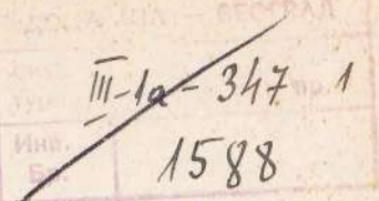


IVANOV i TJAPKIN

**INFRACRVENA
TEHNIKA
U VOJSCI**





VOJNA BIBLIOTEKA

INOSTRANI PISCI

KNJIĆA PEDESETA

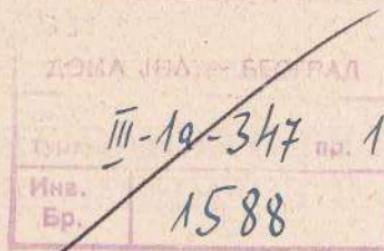
21

UREĐIVAČKI ODBOR

general-pukovnik Srećko MANOLA, general-pukovnik u penziji Božo LAZAREVIĆ,
general-potpukovnik Boško ĐURIČKOVIĆ, viceadmiral Bogdan PECOTIĆ, general-
potpukovnik Mirko BULOVIĆ, general-potpukovnik u penziji Vjekoslav KOLB, general-
major avijacije Nikola LEKIĆ, tehnički pukovnik Miroslav BORAS, tehnički pukovnik
inž. Mihailo KOKOLJEVIĆ, pešadijski pukovnik Milan GLUMAC, pešadijski pukovnik
Zdravko ĐUKOVIĆ (odgovorni urednik)

VOJNOIZDAVAČKI ZAVOD
B E O G R A D
1966.

IVANOV i ТЈАРКИН



**INFRACRVENA
ТЕХНИКА
U VOJSICI**



Сор.

ЖНВ. бр.

III-10-347/1
21180

NASLOV DELA U ORIGINALU

Ю. А. ИВАНОВ, Б. В. ТЯПКИН

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕХНИКА
В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

Preveli sa ruskog

Mirčeta Vešović, dipl. inž.

Dušan Veljković, dipl. inž.

S A D R Ž A J

PREDGOVOR	9
U V O D	11

I d e o

FIZIČKI OSNOVI I ELEMENTI UREDAJA INFRACRVENE TEHNIKE

Glava I. OSNOVNI POJMOVI O ZRAČENJU	15
1. Priroda zračenja	15
2. Energetske karakteristike zračenja	19
3. Spektar optičkog zračenja i njegovo predstavljanje	25
Glava II. IZVORI ZRAČENJA	30
1. Klasifikacija izvora zračenja	30
2. Zračenje apsolutno crnog tela	31
3. Zračenje realnih tела	35
4. Električni izvori zračenja	38
5. Zračenje industrijskih i vojnih objekata	43
Glava III. PROSTIRANJE ENERGIJE ZRAČENJA U ATMOSFERI	57
1. Sastav atmosfere	57
2. Slabljenje zračnog fluksa zračenja u atmosferi	64
3. Rasipanje energije zračenja u atmosferi	66
4. Selektivna apsorpcija energije zračenja	72
Glava IV. OPTIČKI MATERIJALI I OPTIČKI SISTEMI	77
— I. Materijali	77
1. Infracrveni filtri	77
2. Materijali za zaštitnu stakla i aerodinamičke kape projektila (poklopcii)	84
3. Reflektujući pokrivači	90
— II. Optički sistemi	93
4. Namena i klasifikacija	93
5. Optički sistemi sa soćivima	95
6. Optički sistemi sa ogledalima	101
7. Kombinovani optički sistemi	104
8. Gubici energije zračenja u optičkim sistemima	107
Glava V. PRIJEMNICI ENERGIJE ZRAČENJA	111
1. Podela prijemnika energije zračenja	111
2. Neselektivni prijemnici energije zračenja	113
3. Prijemnici sa spolašnjim fotoefektom	117
4. Prijemnici sa unutrašnjim fotoefektom (fotootpornici)	122
5. Prijemnici sa fotogalvanskim efektom (ventilski prijemnici)	138

6. Prijemnici sa bočnim fotoefektom	144
7. Prijemnici sa fotomagnetskim efektom	152
8. Hlađenje fotoosetljivih slojeva	155
Glava VI. PRETVARANJE SLIKE	165
1. Pretvarači sa spoljašnjim fotoefektom	165
2. Glavne karakteristike elektronsko-optičkih pretvarača	173
3. Pojačanje bleska slike	176
4. Elektronsko-optički pretvarači sa fotootpornikom kao katodom	180
5. Napajanje elektronsko-optičkih pretvarača	183
II deo	
PRIMENA INFRACRVENIH UREDAJA U VOJNE SVRHE	
Glava VII. OBEZBEĐENJE BORBENIH DEJSTAVA	189
1. Korišćenje infracrvenih uređaja za noćnu vožnju i noćno gadaњe	189
2. Infracrveni daljinomeri	197
3. Zaštitna signalizacija	206
4. Veza u kosmičkom prostoru	210
5. Sprečavanje sudara aviona u vazduhu	213
6. Navigacija	218
Glava VIII. IZVIĐANJE POMOĆU INFRACRVENIH ZRAKOVA	221
1. Fotografisanje pomoću infrahromatskog filma	222
2. Fotografisanje pomoću elektronsko-optičkih pretvarača	229
3. Evaporografija	232
4. Uredaji za izviđanje u bližem talasnom području infracrvenog spektra	237
5. Televizijski sistem povećane osetljivosti	244
6. Uredaji za snimanje topolitne karte zemljišta	250
7. Posmatranje iz kosmičkog prostora	254
Glava IX. SISTEMI ZA TOPLITNU LOKACIJU	264
1. Princip rada i konstrukcija topolitnih lokatora	264
2. Perspektive razvijanja sistema za topolitnu lokaciju	272
3. Konstrukcija sistema za topolitnu lokaciju	278
4. O mogućnostima otkrivanja balističkih i vodenih raket	287
Glava X. TOPLITNE (IC) GLAVE ZA SAMONAVOĐENJE	294
1. Princip pasivnog samonavodenja projektila	294
2. Topolite (infracrvene) glave za samonavodenje (TGS)	297
3. Blizinski elektrooptički upaljači (BOU)	305
Glava XI. EPIKASNOST I DOMET INFRACRVENIH UREĐAJA	310
1. Osobenosti konstruisanja pasivnih infracrvenih uređaja	310
2. Kriterijumi za ocenu efektivnosti pasivnih infracrvenih sistema	318
3. Domet pasivnih infracrvenih sistema	320
4. Domet aktivnih infracrvenih sistema	325
Glava XII. ODBRANA OD PROTIVNIKOVIH IC-SREDSTAVA	331
1. Metode odbrane	331
2. Smanjenje toplotnog zračenja	334
3. Odbrana manevrom	338
4. Veštački izvori infracrvenog zračenja	341
Literatura	346

U ovoj knjizi su izložene osnovne fizičke pojave na kojima se zasniva primena uredaja iz oblasti infracrvene tehnike u vojsci; razmatraju pojedini elementi tih uredaja i izlažu, takođe, pitanja primene infracrvenih zrakova u vojsci za rešavanje pojedinih taktičkih zadataka.

Konstrukcija i taktičko-tehnički podaci za pojedine uredaje iz infracrvene tehnike uzeti su iz stranih časopisa, prema stanju iz 1960. godine.

Knjiga je namenjena uglavnom čitaocima iz redova armije, ali može biti korisna i za širi krug čitalaca koji se interesuju za razvoj sredstava iz tehnike infracrvenog zračenja.

PREDGOVOR

Tehnika infracrvenog zračenja predstavlja deo savremene fizike i elektronike koji obuhvata pitanja emisije, prostiranja i registracije infracrvenih zrakova, kao i njihovog praktičnog korišćenja u istraživačkim laboratorijama, industriji i vojnoj tehnici.

U knjizi se razmatraju fizičke pojave povezane sa emisijom, prostiranjem i registracijom infracrvenog zračenja, iznosi se materijal od opšteg značaja iz radova vojne primene infracrvenog zračenja i pokušava analizirati perspektiva razvitka ove srazmerno mlade oblasti vojne tehnike.

Knjiga se sastoji iz dva dela. U prvom delu, koji obuhvata 6 glava, razmatraju se pitanja fizike i tehnike emisije, prostiranja i registracije infracrvenih zrakova, kao i pojedini elementi vojnih uređaja koji se zasnivaju na korišćenju infracrvenog zračenja. Na taj način, prvi deo predstavlja uvodno izlaganje za drugi, koji obuhvata sledećih 6 glava, u kojima se analizira razvoj i sadašnje stanje uređaja infracrvene tehnike koji se koriste u stranim armijama.

U drugom delu najveća pažnja je poklonjena pitanjima izvidanja, osmatranja i ništanjenja pomoću uređaja infracrvene tehnike, koja nisu dovoljno iscrpno obradena u domaćoj literaturi.

Obim knjige nije dozvolio autorima da obrade neka srodnna pitanja koja se tiču principa rada uređaja iz infracrvene tehnike: luminiscenciju, elektronsku i geometrijsku optiku, greške ovih sistema pri obrazovanju lika, kao i niz drugih pitanja. O ovim pitanjima autori upućuju čitaoce na odgovarajuće udžbenike optike i fizike.

Svi konkretni primeri u ovoj knjizi, koji se odnose na konstruktivna rešenja, tehničke i taktičke ocene i karakteristike, pa i per-

spektive razvjeta, zasnivaju se na materijalima iz strane tehničke literature. Pregled korišćene literature dat je na kraju knjige.

Autori izražavaju zahvalnost inženjeru potpukovniku I. F. Usoljevu za niz korisnih zapažanja prilikom redakcije knjige, doktoru tehničkih nauka L. Z. Kriksunovu i kandidatu tehničkih nauka M. A. Bramsonu, koji su izvršili recenziju knjige, kao i inženjeru S. V. Žudkeviču, koji je pažljivo pregledao pojedine glave rukopisa. Njihovi saveti uzeti su u obzir pri konačnoj redakciji rukopisa.

Pri radu na knjizi, glave IX (§ 1—3) i X (§ 1—2) napisao je B. V. Tjapkin a ostale — J. A. Ivanov.

U V O D

U drugom svetskom ratu u naoružanje armija zaraćenih država počeli su da se uvode razni uređaji koji bi olakšavali vođenje noćnih borbenih dejstava. U njih, pre svega, treba ubrojati radarske uređaje, uređaje za toplotno otkrivanje i praćenje ciljeva i uređaje za noćno osmatranje. Već prve primene uređaja infracrvene tehnike pokazale su njihovu perspektivnost u rešavanju, pri povoljnim meteorološkim uslovima, velikog broja taktičkih zadataka na kopnu, u vazduhu i na moru. Zbog toga je u poratnom periodu naglo porastao obim radova u oblasti vojne primene uređaja infracrvene tehnike. Istovremeno se pristupilo razradi taktike njihove primene u armijama i intenzivnom opremanju infracrvenim uređajima kopnene vojske, ratnog vazduhoplovstva, protivvazdušne odbrane i ratne mornarice.

Obimni radovi u oblasti vojne primene infracrvenog zračenja vrše se u SAD, Engleskoj, Francuskoj, Saveznoj Republici Nemačkoj, Švedskoj, Japanu, Švajcarskoj, kao i u nekim drugim zemljama.

Veliki interes za uređaje iz infracrvene tehnike posledica je preimuprošta koje infracrveno zračenje ima u odnosu na elektromagnetne oscilacije u radarskom i svetlosnom području talasnih dužina:

1. Infracrvene zrake emituju, praktično, sva tela čija je temperatura različita od apsolutne nule. Prema tome, infracrveni uređaji mogu po principu rada da budu pasivni i nije potrebno da pri otkrivanju cilja budu ozračivani elektromagnetsnom energijom.

2. Infracrveni zraci se ne opažaju okom pa ni pasivne ni aktivne uređaje infracrvene tehnike ne može da otkrije protivnik koji ne raspolaže odgovarajućom opremom.

3. Veća propustljivost atmosfere za infracrvene zrake u odnosu na vidljive, omogućava povećanje radijusa dejstva infracrvenih uređaja u poređenju sa optičkim i, što je najvažnije, omogućava osmatranje ciljeva noću — u odsustvu vizuelne vidljivosti.

4. Pri pravilnom izboru područja spektralne osetljivosti, gubici izračene energije u atmosferi su kod pasivnih infracrvenih uređaja srazmerni kvadratu daljine, dok su gubici energije elektromagnetskih oscilacija radarskih uređaja srazmerni četvrtom stepenu daljine. To omogućava da se konstruišu infracrveni uređaji koji su jednostavniji, manje težine i manjih dimenzija od radarskih iste namene i istog radijusa dejstva.

5. Prirodno da jednostavnost konstrukcije uslovljava i veću sigurnost uređaja infracrvene tehnike u poređenju sa radarskom opremom.

6. Pasivan način rada i mogućnost da se jednostavnim sredstvima izbegne štetan uticaj šuma (selekcija cilja) čine infracrvene uređaje manje osetljivim na ometanje od protivnika, nego što je to slučaj sa radarskim stanicama.

7. Pošto za svoj rad koriste elektromagnetne oscilacije u talasnom području koje leži između vidljive svetlosti i milimetarskih talasa, infracrveni uređaji, zaostajući po moći razdvajanja*) za optičkim uređajima, znatno prevazilaze u tom pogledu radarske stanice. Tako, na primer, dok radarska stanica u talasnom području od 8 mm, sa antenom prečnika 30 cm, omogućava da se na daljini od 8 km razdvoje dva cilja na međusobnom rastojanju 400 — 500 m, pomoću odgovarajućeg infracrvenog uređaja sa prečnikom ogledala od 7,5 cm i fotootpornikom od PbS, mogu se na istoj daljini odvojeno posmatrati motori aviona udaljeni jedan od drugog 8 m.

Još veću moć razdvajanja imaju elektronsko-optički sistemi, koji omogućavaju posmatranje pomoću infracrvenih zrakova sa gotovo fotografском tačnošću.

*) Misli se na razdvajanje ciljeva. — *Prim. red.*

Međutim, takvi principijelni nedostaci infracrvenih sredstava u naoružanju, kao što su praktična nemogućnost njihovog rada u nepovoljnim meteorološkim uslovima (magla, oblačnost) i teškoće oko određivanja daljine ciljeva, nameću da se oni primenjuju u kombinaciji sa radarskom tehnikom.

Ipak, bez obzira na ove nedostatke, u naoružanje armija kapitalističkih zemalja uvode se u zadnje vreme stalno, sve više uređaji infracrvene tehnike, koji, u kombinaciji sa drugim sredstvima, služe za rešavanje sledećih zadataka:

1. taktičkog i strategijskog izviđanja;
2. navođenja raketa i projektila na ciljeve koji predstavljaju toplotne izvore;
3. aktiviranja eksplozivnih punjenja u blizini cilja;
4. otkrivanja toplotnih ciljeva noću i nišanjenja na njih,
5. navigacije;
6. veze i signalizacije između manjih jedinica;
7. čuvanje vojnih objekata i blokiranje uzanih delova zemljišta.

Uporedo sa rešavanjem pobrojanih zadataka vrše se, takođe, intenzivna istraživanja za korišćenje infracrvenih uređaja u protivraketnoj odbrani, izviđanju iz kosmosa i vezama u kosmičkom prostoru.

IDEO

FIZIČKI OSNOVI I ELEMENTI UREĐAJA INFRACRVENE TEHNIKE

G l a v a I

OSNOVNI POJMOVI O ZRAČENJU

1. PRIRODA ZRAČENJA

Pod zračenjem se podrazumeva prenošenje energije u prostoru sa jednog tela na drugo, bilo pomoću materijalnih čestica (β - i α -zračenje kod radioaktivnog raspada), bilo pomoću naizmeničnog elektromagnetskog polja (γ -zračenje, rendgensko zračenje, svetlost, infracrveni zraci i radio-talasi).

Od svih raznolikih oblika zračenja, u daljem izlaganju ćemo razmatrati samo takozvano optičko zračenje, a u njemu još užu oblast infracrvenog zračenja.

Kao i sve druge elektromagnetne oscilacije, infracrveno zračenje se može okarakterisati učestanostu v , talasnom dužinom λ i brzinom prostiranja v .

Ponekad se elektromagnetne oscilacije karakterišu talasnim brojem A , pod kojim se podrazumeva broj talasnih dužina koji se može smestiti na duži dugačkoj jedan santimetar.

Veza između osnovnih veličina zračenja određena je, kao što je poznato, odnosima:

$$\lambda = \frac{c}{v}, \quad (I. 1)$$

$$v = \frac{\lambda}{T}, \quad (I. 2)$$

gde je $c = 2,998 \cdot 10^{10}$ cm/s — brzina svetlosti u vakuumu, a T — perioda oscilacija.

U sredini čiji koeficijenat prelamanja nije jednak jedinici ($n \neq 1$), brzina prostiranja elektromagnetskih oscilacija razlikuje se od brzine svetlosti u vakuumu:

$$v' = \frac{c}{n}. \quad (\text{I. 3})$$

Upoređujući jednačine (I.2) i (I.3) može se zapaziti da će se za jedno isto zračenje talasna dužina menjati u zavisnosti od sredine kroz koju se prostiru elektromagnetske oscilacije, dok njihova učestanost ostaje nepromenjena.

Talasni opseg elektromagnetskih oscilacija je vrlo veliki od 10^{-11} do $3 \cdot 10^{10}$ cm. Zbog ovoga se za merenje talasne dužine elektromagnetskih oscilacija, pored opštepoznatih jedinica dužine, koriste i manje jedinice: mikron (μ), milimikron ($m\mu$), angstrom (\AA) i iks-jedinica (X) (vidi tablicu I. 1).

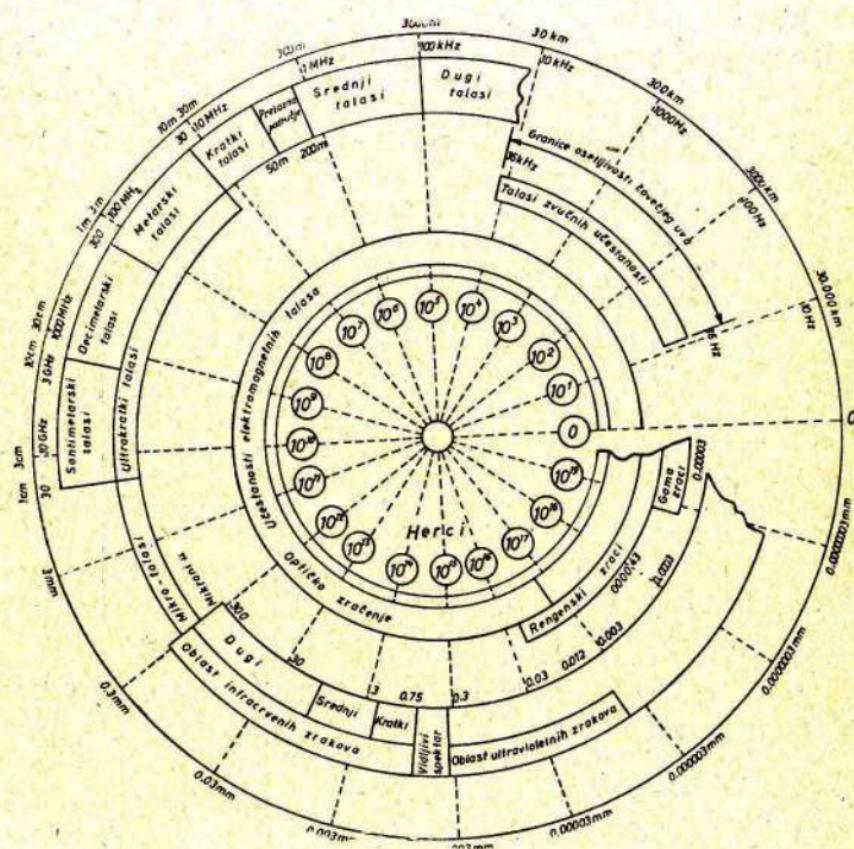
T a b l i c a I.1

Veze između jedinica za merenje talasne dužine elektromagnetskih oscilacija

Jedinice	m	cm	mm	μ	$m\mu$	A	X
1 metar	1	10^2	10^3	10^6	10^9	10^{10}	10^{13}
1 santimetar	10^{-2}	1	10	10^4	10^7	10^8	10^{11}
1 milimetar	10^{-3}	10^{-1}	1	10^3	10^6	10^7	10^{10}
1 mikron	10^{-6}	10^{-4}	10^{-3}	1	10^3	10^4	10^7
1 milimikron	10^{-9}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-3}	1	10	10^4
1 angstrom	10^{-10}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-1}	1	10^3
1 iks-jedinica	10^{-13}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-7}	10^{-4}	10^{-3}	1

Široko talasno područje elektromagnetskog zračenja zgodno je predstaviti u obliku skale, podeljene na pojedine oblasti, koje obuhvataju oscilacije srođne po svojim osobinama, metodama dobijanja i načinima registracije (sl. I.1).

Kako se vidi sa skale elektromagnetskih oscilacija, oblast optičkog zračenja obuhvata oscilacije sa talasnim dužinama približno od $10 \text{ m } \mu$ do 340μ , a područje infracrvenog zračenja leži u granicama $0,75 - 340 \mu^*$.



Sl. I.1. — Spektar elektromagnetskih oscilacija

Elektromagnetne oscilacije imaju dvojaki karakter. One raspolažu i talasnim i korpuskularnim osobinama.

*) Prema novijim podacima, ovo područje moguće je proširiti do $720 - 750 \mu$, tj. neposredno do područja submilimetarskih radiotalasa. — Prim. prev.

Talasna elektromagnetna teorija zračenja dobro objašnjava niz optičkih pojava: interferenciju, difrakciju, polarizaciju, odbijanje i prelamanje svetlosnih zrakova. Ona, međutim, dolazi u protivurečnost sa eksperimentalnim rezultatima povezanim sa međusobnim dejstvom zračenja i materije — u raspodeli energije u spektru zračenja zagrejanih tela, fotoelektričnom efektu, rasipanju svetlosti itd.

T a b l i c a I.2

*Energija fotona elektromagnetskih oscilacija raznih talasnih dužina
($1 \text{ eV} = 1,59 \cdot 10^{-12} \text{ erga}$)*

Talasna dužina (μ)	Energija fotona	
	erg	eV
0,3	$6,22 \cdot 10^{-12}$	3,9
0,55	$3,4 \cdot 10^{-12}$	2,14
0,76	$2,46 \cdot 10^{-12}$	1,53
1	$1,87 \cdot 10^{-12}$	1,17
1,3	$1,44 \cdot 10^{-12}$	0,91
3	$0,62 \cdot 10^{-12}$	0,39
5	$0,37 \cdot 10^{-12}$	0,23
12	$0,16 \cdot 10^{-12}$	0,10

Izlaz iz takve situacije nađen je kada je 1900. godine Plank objavio kvantnu teoriju zračenja. Ova teorija prenosi ideju diskretnosti (prekidnosti) strukture materije na procese elektromagnetskog zračenja. Prema ovoj teoriji, energija elementarnih izvora zračenja (atoma i molekula) može da se menja samo u skokovima, čija veličina predstavlja ceo umnožak od jedne vrednosti, koja je konstantna za datu učestanost. Tu minimalnu količinu energije (za datu učestanost zračenja), Plank je nazvao kvantom energije:

$$\epsilon = h\nu, \quad (\text{I. 4})$$

gde je $h = 6,6238 \cdot 10^{-27}$ erga — univerzalna Plankova konstanta.

Kasnije, 1905. god., Ajnštajn je dalje razvio Plankovu teoriju i preneo ideju diskretnosti zračenja na prostiranje i apsorpciju

elektromagnetskih talasa. Zračenje je počelo da se posmatra kao mlas materijalnih čestica — fotona, sa energijom h i masom

$$m_f = \frac{h}{c^2}. \quad (\text{I. } 5)$$

U skladu sa tim, prema kvantnoj teoriji zračenje se posmatra ne samo kao proces pretvaranja jednog oblika energije u drugi već i kao prelaz materije iz njenog normalnog stanja u oblik elektromagnetskog polja i obratno.

U tablici 1.2 daju se vrednosti energije fotona sa različitom talasnom dužinom.

2. ENERGIJSKE KARAKTERISTIKE ZRAČENJA

Primena uređaja infracrvene tehnike zasniva se na registraciji i kvantitativnom merenju energije, koja se elektromagnetskim talasom prenosi od izvora zračenja do prijemnika.

U zavisnosti od prijemnih uređaja i spektralnog sastava zračenja koje se meri, uvedena su dva sistema jedinica — energijski i fotometrijski (tablica I.3).

Energijski sistem jedinica je univerzalan i može da se primeni u celom spektralnom području optičkog zračenja. Fotometrijski se može koristiti samo u području vidljivog zračenja i gubi smisao u oblasti ultravioletnih i infracrvenih zrakova. Zbog toga ćemo u daljem izlaganju razmatrati samo veličine izražene u energijskom sistemu jedinica. Nazivi veličina dati su prema novoj terminologiji, koju je preporučio Komitet tehničke terminologije Akademije nauka SSSR.*

Fluks zračenja Φ karakteriše snagu optičkog zračenja i omogućava da se proceni količina energije zračenja koja pada na optičke uređaje:

$$\Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (\text{I. } 6)$$

gde je W — energija zračenja.

*) U prevodu su korišćeni termini uobičajeni u našoj vojnotehničkoj literaturi i nastavi na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. — Prim. prev.

U slučaju monohromatskog zračenja, fluks zračenja određuje se neposredno iz spektralne snage zračenja. Za izvore

T a b l i c a I.3

Fotometrijski i energijski sistem jedinica za merenje energije zračenja

Naziv veličine	Sistem jedinica			
	fotometrijski		energijski	
	naziv	jedinica	naziv	jedinica
Izražena energija	Ukupna energija	Svetlosna energija	em · s	Energija zračenja
	Energija u jedinici vremena	Svetlosni fluks (em)	lumen	Fluks zračenja
	Energija u jedinici vremena po jedinici prostornog ugla	Svetlosna jačina (cd)		Jačina zračenja
	Energija sa jedinice površine u jedinici vremena	Zračnost	lm/m ²	Gustina zračenja
	Energija sa jedinice površine u jedinici vremena po jedinici prostornog ugla	Blesak	stilb (sb)	Emisivnost
	Energija u jedinici vremena po jedinici utrošene snage	Svetlosno dejstvo	lm/W	Efikasnost izvora
	Energija po jedinici površine	Količina osvetljavanja	lx · s	Količina ozračivanja
	Energija po jedinici površine u jedinici vremena	Osvetljaj*)	luks (lx)	Ozračenost
Upadna energija				

optičkog zračenja koji imaju neprekidan spektar, ukupan fluks zračenja određen je površinom između krive spektralne raspodele zračenja i apscisne ose:

*) Osvetljenost. — Prim. red.

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{\lambda} d\lambda. \quad (\text{I. 7})$$

Fluks zračenja meri se jedinicama snage. U specijalnim slučajevima njegova snaga se upoređuje sa snagom mlaza materijalnih čestica, koja se obično izražava u eV/s. U tom slučaju, prelaz ka običnim jedinicama snage može se ostvariti pomoću sledećeg odnosa: $1 \text{ W} = 6,29 \cdot 10^{20} \text{ eV/s}$.

T a b l i c a 1.4

Veza između osnovnih jedinica za merenje snage fluksa zračenja

Naziv jedinice	erg/s	W	cal/s	cal/min
1 erg/s	1	10^{-7}	$2,389 \cdot 10^{-8}$	$1,434 \cdot 10^{-6}$
1 vat (W)	10^7	1	0,239	14,34
1 cal/s	$4,185 \cdot 10^7$	4,185	1	60
1 cal/min	$6,976 \cdot 10^5$	0,06976	0,01667	1

Karakter prostorne raspodele fluksa zračenja određen je jačinom zračenja J , pod kojom se podrazumeva odnos ukupnog fluksa zračenja i veličine prostornog ugla po kome je to zračenje ravnomerno raspoređeno. Zato se ponekad „jačina zračenja“ definiše kao ugaona gustina fluksa zračenja u datom pravcu:

$$J = \frac{\Delta \Phi}{\Delta \omega}. \quad (\text{I. 8})$$

Ova definicija ispravna je samo za slučaj tačkastog izvora zračenja. Međutim, u praksi se takva definicija može koristiti sa dovoljnom tačnošću i u slučaju takvih izvora čije su dimenzije znatno manje od rastojanja na kojem se vrši prijem njihovog zračenja.

Veličina prostornog ugla ω može se definisati kao odnos površine, koji na jednoj lopti odseca konus sa temenom u njenom centru, i kvadrata poluprečnika lopte:

$$\omega = \frac{\sigma}{r^2}. \quad (\text{I. 9})$$

Za jedinicu prostornog ugla usvojen je steradijan — prostorni ugao, kome na lopti jediničnog poluprečnika odgovara površina jednakog jedinici. Prostorni ugao koji obuhvata ceo prostor oko

tačkastog izvora zračenja jednak je 4π . Zbog toga se pri ravnomernoj raspodeli fluksa zračenja u svim pravcima jačina zračenja u datom pravcu može izračunati po obrascu:

$$J = \frac{\Phi}{4\pi}. \quad (\text{I. 10})$$

U slučaju neravnomerne raspodele fluksa zračenja u prostoru, uvodi se pojam srednje prostorne (srednje poluprostorne) jačine zračenja, pod kojom se podrazumeva jačina zračenja izvora radijacije sa ravnomernom prostornom raspodelom, čiji je fluks jednak fluksu zračenja izvora sa neravnomernom raspodelom.

Iz datih izraza može se izvesti jedan važan zaključak za shvatanje suštine rada izvora fluksa zračenja: veličina ukupnog fluksa zračenja ne može se povećati ni sa kakvim optičkim sistemima. Korišćenje optičkih sistema omogućava samo pre-raspodelu fluksa zračenja sa jednog pravca na drugi.

Pri određivanju zračenja realnih tela različitih geometrijskih konfiguracija, proračun fluksa i jačine zračenja može da bude povezan sa izvesnim teškoćama. Zato su u tablici I.5 date karakteristike zračenja izvora najjednostavnijeg oblika, koje kombinovanjem u nizu slučajeva mogu da uproste proračun zračenja i izvora složenijeg oblika.

T a b l i c a I.5

Karakteristike zračenja tela jednostavnog oblika

Oblik izvora zračenja	Jačina zračenja	Fluks zračenja	Srednja prostorna jačina zračenja
Svetleći disk	$J = J_0 \cos \alpha$	$\Phi = \pi J_0$	$\frac{1}{4} J_0$
Svetleća lopta	$J = J_0 = \text{const.}$	$\Phi = 4\pi J_0$	J_0
Svetleća polulopta	$J = \frac{J_0}{2}(1 + \cos \alpha)$	$\Phi = 2\pi J_0$	$\frac{1}{2} J_0$
Svetleći cilindar	$J = J_{90} \sin \alpha$	$\Phi = \pi^2 J_{90}$	$\frac{\pi}{4} J_{90}$
Svetleći cilindar sa sfernim završetkom	$J = \frac{J_0}{2}(1 + \cos \alpha) + J_{90} \sin \alpha$	$\Phi = 2\pi J_0 + \pi^2 J_{90}$	$\frac{1}{2} J_0 + \frac{\pi}{4} J_{90}$

Primedbe: J_0 — jačina zračenja normalno na površinu izvora;
 J_{90} — jačina zračenja pod uglom od 90° prema osi cilindra;

J — jačina zračenja pod uglom α prema normali.

Gustina zračenja R karakteriše površinsku gustinu fluksa zračenja koje emituje površina izvora. Kvantitativno, ona je jednaka odnosu ukupnog fluksa zračenja unutar ugla od 2π i površine izvora:

$$R = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}. \quad (\text{I. 11})$$

Emisivnost B karakteriše površinsku gustinu snage zračenja u određenom pravcu ili, drugčije rečeno, to je odnos jačine zračenja i projekcije površine izvora na ravan normalnu na određeni pravac.

$$B = \frac{\Delta J}{\Delta S \cos \alpha}. \quad (\text{I. 12})$$

Za površine čije zračenje podleže Lambertovom zakonu, i zbog toga ne zavisi od usvojenog pravca, veličina emisivnosti takođe ne zavisi od tog pravca. Za takva tela zavisnost između gustine zračenja i emisivnosti ima oblik:

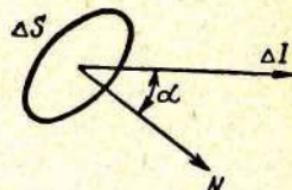
$$R = \pi B. \quad (\text{I. 13})$$

Ozračenost ε karakteriše površinsku gustinu fluksa zračenja koje pada na datu površinu. Ona je brojno jednak odnosu fluksa zračenja i veličine ozračene površine, po kojoj je ravnomerno raspoređen:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}. \quad (\text{I. 14})$$

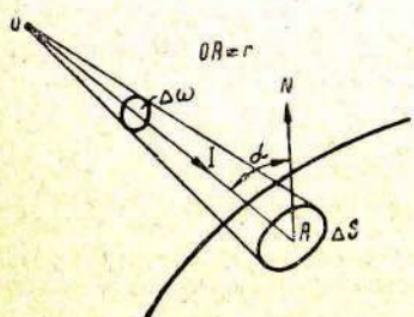
Izražavajući fluks zračenja preko jačine zračenja, dobijamo

$$\varepsilon = \frac{J \cos \alpha}{r^2}. \quad (\text{I. 15})$$



Sl. I.2. — Uz definiciju emisivnosti

Poslednja jednačina pokazuje da je ozračenost površine od strane tačkastog izvora obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja između ozračene površine i tog izvora, i da zavisi još i od ugla između pravca fluksa zračenja i normale na posmatranu površinu (sl. I.3)



Sl. I.3. – Uz određivanje ozračenosti površine

Za površine čije zračenje podleže Lambertovom zakonu, ozračenost je sa gustinom zračenja i emisivnošću povezana sledećim jednačinama:

$$\epsilon = R; \quad (I.16)$$

$$B = \frac{\epsilon}{\pi}. \quad (I. 17)$$

Količina ozračivanja \mathcal{H} određuje količinu energije zračenja koja padne na ozračeno telo za neko određeno vreme.

$$\mathcal{H} = S \epsilon dt \quad (I.18)$$

Ovaj pojam nalazi široku primenu u raznim foto-hemijskim procesima i, posebno, u fotografiji, gde je količina aktiviranog reagensa u emulziji srazmerna snazi upadnog zračenja (ozračenosti) i vremenu ozračivanja.

Efikasnost izvora η_e^*) određuje efektivnost sa kojom se u nekom izvoru zračenja vrši pretvaranje bilo kog oblika energije u energiju zračenja. Kvantitativno, ova efikasnost je data odnosom fluksa zračenja kojeg emituje izvor i snage koja se utroši u njemu:

$$\eta_e = \frac{\Phi}{P} \cdot 100\%. \quad (I. 19)$$

Ako se efikasnost izvora zračenja određuje u odnosu na neki određeni prijemnik fluksa zračenja, čime se ocenjuje efektivnost korišćenja spektralne energije zračenja toga izvora, tada se efikasnost izvora definiše, polazeći od jednačina (I.7) i (I.11), kao :

*) Stepen korisnog dejstva svetlosnog izvora.— Prim. red.

$$\eta_e = \frac{S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda r_\lambda d\lambda}{P} \quad (I. 20)$$

gde su λ_1 i λ_2 — granice osetljivosti prijemnika zračenja;
 r_λ — spektralni intenzitet gustine zračenja izvora u području osetljivosti prijemnika;
 S_λ — spektralna osetljivost prijemnika.

3. SPEKTAR OPTIČKOG ZRAČENJA I NJEGOVO PREDSTAVLJANJE

Pod spektrom optičkog zračenja podrazumeva se raspodela pojedinih monohromatskih zračenja sredena po talasnim dužinama. Takva raspodela može da ima oblik neprekidne krive, ili razdvojenih linija ili traka, između kojih nema zračenja (sl. I.4).

U prvom slučaju radi se o kompaktnom (neprekidnom) spektru optičkog zračenja, koji se sastoji iz beskonačnog broja linija u neprekidnom nizu. Ovaj oblik spektra karakterističan je za zračenja zagrejanih čvrstih i tečnih tela. U nekim slučajevima, na primer pri velikim pritiscima, neprekidan spektar daje i zračenje atoma i molekul a gasova.

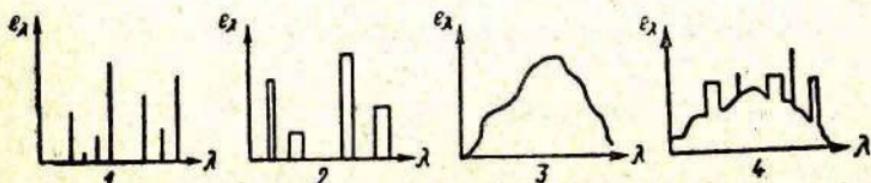
U drugom slučaju, spektar zračenja nazivamo linijskim ili trakastim spektrom.

Linijski spektri sastoje se od odvojenih tankih linija, koje su jasno razdvojene jedna od druge. Takve spekture daju pobudeni atomi ili joni, koji se nalaze na takvim međusobnim rastojanjima da se njihova zračenja mogu posmatrati kao međusobno nezavisna. Zato usijani gasovi ili pare daju pri normalnom pritisku uvek linijski spektar.

Trakasti spektri sastoje se iz velikog broja vrlo bliskih linija, koje obrazuju odvojene, jasno razgraničene trake. Ovi spektri nastaju kod zračenja gasnih molekula, koji se sastoje od dva ili više atoma i nalaze se na takvim međusobnim rastojanjima da se zračenja pojedinih molekula mogu smatrati nezavisnim. Trakaste spekture emituju stoga višatomni molekuli zagrejanih gasova, čija je temperatura još uvek nedovoljna za disocijaciju njihovih molekula na atome i jone.

Ako zračenje nastaje kao rezultat nekoliko različitih procesa, mogu se obrazovati mešoviti spektri. Primer za takav oblik spektra su zračenja električnog luka, cevi sa gasnim pražnjjenjem sa visokim i ultravisokim pritiskom itd.

Pored takve podele, spektar optičkog zračenja je ponekad zgodno klasifikovati po prirodi njegovog nastanka i metodama registracije. Takva klasifikacija data je na sl. I.5, gde su, pored



Sl. I.4. — Tipovi spektara zračenja:
1 — linijski, 2 — trakasti, 3 — neprekidan, 4 — mešoviti.

prirode zračenja i prijemnika za njegovu registraciju, dati i izvori zračenja, talasne dužine, učestanosti i talasni brojevi, koji odgovaraju pojedinim vrstama zračenja.

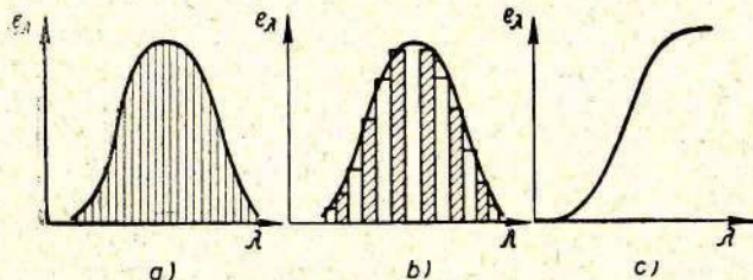
U praktičnoj primeni infracrvenih uređaja uvek se, u stvari, meri ozračenost prijemnog uređaja koju stvara mereno zračenje. Zato je pravilnije govoriti ne o spektru zračenja, već o raspodeli ozračenosti koju spektar datog zračenja stvara u ravni prijemnog uređaja. U tom slučaju automatski se uzimaju u obzir i gubici u sredini kroz koju se prostire mereno zračenje. Ako je potrebno da se dobiju podaci o stvarnom spektru zračenja, treba za dato rastojanje odrediti gubitke u sredini prostiranja i uneti popravku u dobijene rezultate merenja ozračenosti.

Praktično se mogu preporučiti tri načina za dobijanje spektralnih krivih ozračenosti.

Neprekidan spektar (sl. I. 6) može se predstaviti kao zbir konačnog broja spektralnih linija, raspoređenih na vrlo malim, međusobno jednakim spektralnim rastojanjima „a“. Za svaku takvu liniju može se odrediti ozračenost u W/cm^2 i naneti zatim na grafik kao ordinata. Širina spektralnih intervala bira se u zavisnosti od strukture spektra — što je struktura spektra finija,

V, s^{-1}	A, cm^2	Karakteristike zračenja			Svetlosna dužina λ, μ
		Priroda	Labaratorijski izvor	Prijemnik	
10^7		Oscilacije unutrašnjih elektrona u atomima	Visokonaponska varnica	Fotografija	$10^{-7} - 10^{-3}$
10^{17}		Oscilacije spoljnih elektrona u atomima i molekulima	Električni luk, iskra, gasno pražnjenje	Oko	$10^{-6} - 10^{-2}$
10^{15}		Oscilacije molekula	Toplotni izvori	Fotoelement	$10^{-5} - 10^{-1}$
10^{14}		Rotacija molekula		Radiometar Termoelement Bolometar	$10^{-4} - 10^{-0}$
10^{13}					$10^{-3} - 10^{-1}$
10^{12}					$10^{-2} - 10^{-2}$
10^{11}					$10^{-1} - 10^{-3}$
10^{10}					

Sl. I.5. — Spektar optičkih zračenja



Sl. I.6. — Načini dobijanja spektralnih krivih ozračenosti

treba usvajati uže spektralne intervale. Zbir svih ordinata daje u ovom slučaju ukupnu ozračenost prijemnika, koja uključuje ceo spektar zračenja.

Drugi način predstavljanja spektra ozračenosti sastoji se u prikazivanju ozračenosti pojedinih spektralnih intervala u obliku pravougaonih površina „b“. Talasna dužina nanosi se, u ovom slučaju, u linearnoj razmeri. Meru ozračenosti koju zračenje stvara u datom intervalu talasnih dužina, predstavlja, u ovom slučaju, površina pravougaonika, jednaka proizvodu $e\lambda$. Kako veličina $\Delta\lambda$ ima dimenziju dužine, da bi proizvod $e\lambda \Delta\lambda$ imao dimenzije ozračenosti (W/cm^2), spektralni intenzitet ozračenosti $e\lambda$ treba da ima dimenzije W/cm^3 . Brojna vrednost $e\lambda$ zavisi od izbora jedinice za merenje dužine spektralnog intervala. Tako, ako se $\Delta\lambda$ izrazi u milimikronima, da bi se ozračenost u W/cm^2 za interval talasnih dužina izražen u cm, preračunala u vrednost ozračenosti u W/cm^2 za interval talasnih dužina izražen u μ , treba sve ordinate smanjiti 10^7 puta. Na primer, ako je $e\lambda = 10 W/cm^3$, to odgovara ozračenosti od $1 \mu W/cm^2$ po intervalu od $1 m \mu$.

Spektar predstavljen na ovaj način čini neprekidan niz pravougaonika. Njihova suma je mera ozračenosti prouzrokovane celim spektrom zračenja. Smanjujući širinu spektralnih intervala može se u limesu dobiti obvojna kriva, koja prati sve detalje strukture spektra. U ovom slučaju meru ozračenosti predstavlja površina između dobijene krive i apscisne ose.

Ako se duž apscisne ose koristi nelinearna razmera, mora se istovremeno menjati u obrnutom odnosu razmera duž ordinatne ose, u cilju očuvanja elementarnih pravougaonika kao mere ozračenosti u odgovarajućim intervalima talasnih dužina.

Treći, integralan način prikazivanja spektra ozračenosti (sl. I.6c) jeste u tome što se za svaku talasnu dužinu daje integralna vrednost merene ozračenosti. Sumiranje se izvodi od kratkotalasne granice do posmatrane talasne dužine. Ovakvo predstavljen, neprekidan spektar ozračenosti dobija se u obliku monotono rastuće krive. Ta kriva omogućava određivanje vrednosti ozračenosti za proizvoljan talasni interval, ali prikazivanje strukture spektra pomoću nije moguće. S druge strane, kod ovog načina prikazivanja otpadaju ograničenja u izboru razmere.

Na gore izložene načine mogu se prikazati i linijski i trakasti i mešoviti spektri. Linijski spektar prikazan po integralnoj metodi dobija se pri tome u obliku izlomljene linije.

Mešovite spekture je zgodno prikazivati pomoću metode pravougaonika, pošto ona omogućava da se energije neprekidnog i linijskog spektra ocene preko upoređivanja njihovih površina.

G l a v a II

IZVORI ZRAČENJA

1. KLASIFIKACIJA IZVORA ZRAČENJA

S fizičkog gledišta izvor energije zračenja može biti svaki materijalni sistem u kojem se vrši pretvaranje dovedene energije u energiju zračenja. U saglasnosti s tim svi izvori energije zračenja mogu se podeliti na tri osnovne grupe — toplotnu, luminiscentnu i mešovitu.*)

U prvu grupu spadaju takvi izvori kod kojih energija zračenja nastaje kao posledica pretvaranja toplotne energije. Pri tome nije bitno na koji će način nastati toplotna energija: kao rezultat prolaska struje kroz sredinu, kao posledica hemijske reakcije ili kao rezultat pretvaranja mehaničke energije.

Druga grupa obuhvata izvore kod kojih energija zračenja nastaje kao rezultat pobudivanja atoma i molekula materije nekim spoljnjim izazivačem. Pri tome se pod luminiscentnim zračenjem podrazumeva vidljivo zračenje tela, pored njegovog toplotnog zračenja na toj temperaturi, koje traje duže od 10^{-10} sec.

U treću grupu ulaze izvori kod kojih istovremeno postoji i toplotno i luminiscentno zračenje.

Najrasprostranjenija grupa izvora zračenja u prirodi su toplotni izvori. Snaga njihovog zračenja zavisi od njihove temperature, dimenzija i svojstva površine tela koje zrači.

*) Ovde se imaju u vidu izvori nekoherentnog zračenja u optičkom talasnom području — *Prim. prev.*

Pri dатој температуре и величини површине, својства тела са глеђишта зрачења могу се једнозначно одредити апсорpcionом моћи $\alpha_{\lambda T}$ [кофицијентом апсорпције]. У зависности од карактера промене величине кофицијента апсорпције при промени температуре тела и таласне дужине зрачења које на њега пада, тоplotни извори се могу сврстати у три групе:

1. Апсолутно црно тело, код кога апсорpciona моć ne зависи од таласне дужине зрачења које пада на њега и температуре његове површине, и увек је једнака јединици. Такво тело, у poređenju sa другим, има највећу snagu зрачења pri datoј temperaturi za sve talasne dužine.

2. Сиво тело, код кога је апсорpciona moć manja od јединице i зависи od температуре тела, ali ne od таласне дужине зрачења које пада на njega.

3. Селективно апсорpciono тело, код кога је апсорpciona moć manja od јединице i зависи i od таласне дужине зрачења које пада на njega i od температуре тела.

2. ZRAČENJE APSOLUTNO CRNOG TELA

Апсолутно црно тело (ACT), мада не постоји u природи, značajno je iz dva razloga: ono pri datoј температуре зрачи максималну количину energije i njegovo зрачење se може teorijski izračunati.

Pored toga, зрачење апсолутно crнog tela има таква својства, којих nema u mnogim зрачењима realnih tela, i to:

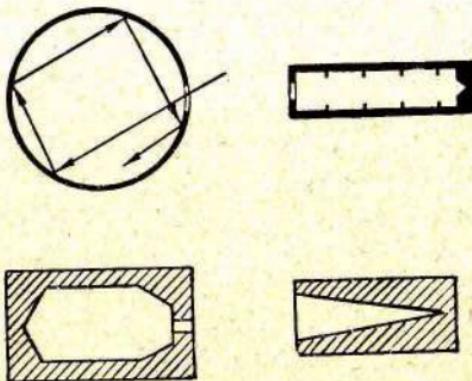
a) зрачење апсолутно crнog tela je nepolarizовано;

b) ono se pokorava Lambertovom zakonu, pa je prema tome величина зрачне моћи апсолутно crнog tela u svim правцима једнакa;

v) зрачна моћ апсолутно crнog tela proporcionalna je kvadratu кофицијента преламања sredine u kojoj se rasprostire fluks зрачења;

g) зрачење апсолутно crнog tela зависи само od таласне дужине i температуре, па zbog toga облик основних функција зрачења $r\lambda = f(T)$ i $r\lambda = f_1(\lambda T)$ ima univerzalni karakter.

Model apsolutno crnog tela može se vrlo približno napraviti u obliku zatvorene šupljine sa malim otvorom, čiji se zidovi ravnomerno zagrevaju do neophodne temperature (sl. II.1).



Sl. II.1. — Šeme modela apsolutno crnog tela

Fluks zračenja koji pada u otvor šupljine, posle višestrukog odbijanja od unutrašnje površine šupljine, praktično se potpuno apsorbuje i samo slučajno, sa zanemarujuće malom energijom, može da izade iz otvora.

Ako, pak, zagrevamo zidove šupljine, onda će se njen otvor ponašati kao apsolutno crno telo sa površinom koja je jednaka površini otvora. Pri tome, bez obzira što će unutrašnja površina zidova šupljine zračiti saglasno svojstvima materijala, puno zračenje šupljine kroz otvor neće zavisiti od materijala i svojstva zidova, ako je temperatura njenih pojedinačnih delova podjednaka.

Zračenje apsolutno crnog tela može se izračunati prema sledećim zakonima.

Kirhofov zakon

Kirhofov zakon ukazuje na to da je odnos zračne i apsorpcione moći jedne tačke tela, za jednu određenu talasnu dužinu

zračenja, i za jedan određen pravac pri datoј temperaturi, za sva tela konstantna veličina.

$$\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = \frac{e'_{\lambda T}}{a'_{\lambda T}} \dots = \text{const.} \quad (\text{II. 1})$$

U slučaju apsolutno crnog tela ($a_{\lambda T} = 1$) ova jednačina dobija oblik

$$\frac{e_{\lambda T}}{a_{\lambda T}} = E_{\lambda T}. \quad (\text{II. 2})$$

Jednačina (II.2) matematički vezuje zračenje apsolutno crnog tela sa zračenjem realnih tela. Kao što se vidi, zračna moć ma kog tela jednaka je proizvodu zračne moći apsolutno crnog tela i apsorpcione moći datog tela.

Kirhofov zakon primenljiv je za sva tela računajući tu i gasove, ako oni samo toplotno zrače. Međutim, on se ne može primeniti ako se uz toplotno zračenje pridružuje i luminiscentno.

Stefan-Bolcmanov zakon

Integralna gustina zračenja apsolutno crnog tela proporcionalna je četvrtom stepenu njegove temperature:

$$R = \sigma T^4 \quad (\text{II. 3})$$

gde je: $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot (\text{°K})^4}$ konstanta zračenja
(Bolcmanova konstanta)

$$T = t^{\circ}\text{C} + 273 = \text{apsolutna temperatura tela.}$$

Za tela površine S (u cm^2) gustina zračenja određuje se odnosom

$$R = \sigma S T^4. \quad (\text{II.4})$$

Iz formule (II.3) se vidi da temperatura tela ima odlučujući uticaj na veličinu gustine zračenja apsolutno crnog tela. Tako, na primer, povećanjem apsolutne temperature tela dva puta, povećava se njegovo zračenje 16 puta.

Izraz (II.3) određuje gustinu zračenja apsolutno crnog tela površine $S = 1 \text{ cm}^2$ u granicama polusfere. Za određivanje emisivnosti apsolutno crnog tela B u granicama telesnog ugla ω , čija osa čini ugao α sa normalom na površinu S koja zrači, mora se koristiti izraz

$$B = \frac{\sigma}{\pi} S_\omega T^4 \cos \alpha. \quad (\text{II. 5})$$

Plankov zakon

Raspodela energije u spektru zračenja apsolutno crnog tela određuje se Plankovim zakonom, čiji matematički izraz ima oblik:

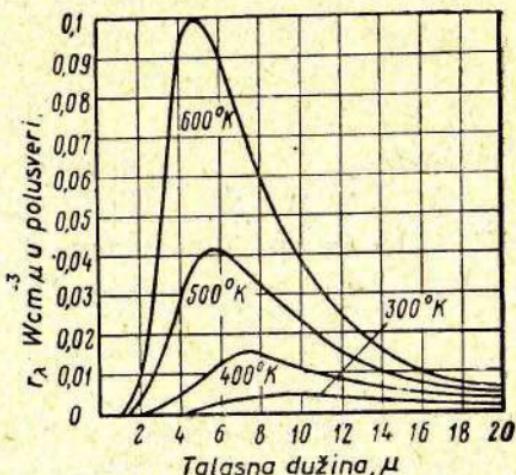
$$r_{\lambda T} = C \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_1}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (\text{II. 6})$$

gde je: λ = talasna dužina

T = apsolutna temperatura

$C_1 = 3,740 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$

$C_2 = 1,438 \text{ cm} \cdot {}^\circ\text{K}$.



Sl. II.2 — Spektralni intenzitet gustine zračenja ACT pri raznim temperaturama

Oblik krivih spektralne gustine zračenja apsolutno crnog tela (ACT), izračunatih po Plankovoj formuli za pojedine temperature, prikazan je na slici II.2.

Vinov zakon

Položaj maksimuma krive zračenja pri različitim temperaturama određuje se Vinovim zakonom (zakonom pomeraja):

$$\lambda_{\max} T = 2.896 \text{ } \eta \cdot {}^0\text{K}, \quad (\text{II. 7})$$

gde se λ_{\max} izražava u mikronima.

Kada se iz (II.7) nađe vrednost λ_{\max} u cm i zameni u (II.6) može se dobiti vrednost spektralne gustine zračenja, u tački koja odgovara λ_{\max}

$$r_{\max} = 1,301 \cdot 10^{-15} T^5 \text{ W/cm}^3. \quad (\text{II. 8})$$

3. ZRAČENJE REALNIH TELA

Zračenje realnih tela razlikuje se od zračenja apsolutno crnog tela. Zato je usvojeno da se ona nazivaju „ne crnim“, podrazumevajući pod tim terminom kako tela sa selektivnim zračenjem, tako i siva tela.

Kako je već primećeno, zračenje ovih tela, pre svega, određuje se ponašanjem apsorpcione moći sa promenom temperature tela i talasne dužine zračenja koje na njega pada. Pored toga, pri izračunavanju zračenja realnih tela mora se uzeti u obzir da ona nisu izolovana jedna od drugog, i u tom smislu fluksevi njihovih energija zračenja sastoje se iz sopstvenog termičkog zračenja i odbijenih fluksova energije izračenih od susednih tela.

Koliko je zračenje realnog tela sa određenom talasnom dužinom i pri datoј temperaturi približno sa zračenjem apsolutno crnog tela, može se ceniti ako se uvede pojam o koeficijentu zračne moći $\epsilon_{\lambda T}$:

$$\epsilon_{\lambda T} = \frac{r_{\lambda T}^s + r_{\lambda T}^o}{(r_{\lambda T})_{\text{ACT}}}, \quad (\text{II. 9})$$

gde je:

- $r_{\lambda T}^s$ = spektralna gustina sopstvenog zračenja tela;
 $r_{\lambda T}^o$ = spektralna gustina odbijenog zračenja od tela;
 $(r_{\lambda T})_{ACT}$ = spektralna gustina zračenja apsolutno crnog tela.

Iz navedenog izraza se vidi da je u slučaju samo sopstvenog zračenja tela ($r_{\lambda T} = 0$), koeficijent zračne moći jednak apsorpcionoj moći datog tela:

$$\epsilon_{\lambda T} = a_{\lambda T}. \quad (\text{II. } 10)$$

Pri postojanju sopstvenog i odbijenog zračenja može da se uvede pojam o koeficijentu crnoće γ_T , pod kojim se podrazumeva odnos ukupnog zračenja datog tela i njegovog termičkog zračenja

$$V_T = \frac{r_T}{r_T^s} = 1 + \frac{r_T^o}{r_T^s}. \quad (\text{II. } 11)$$

Upoređujući navedene izraze dobijamo

$$\epsilon_T = \gamma^1 a_T. \quad (\text{II. } 12)$$

Iz izraza (II.12) sledi da je za otkrivena tela sa visokom temperaturom površine ($\gamma_T \approx 1$) koeficijent zračne moći jednak apsorpcionoj moći tela. Međutim, za slučaj otkrivenih tela sa niskom temperaturom, ili za slučaj zračenja unutrašnjih površina, koeficijent zračne moći i apsorpciona moć tela mogu znatno da se razlikuju među sobom.

Za siva tela čija apsorpciona moć zavisi samo od temperature i ne od talasne dužine zračenja, zakon integralnog zračenja može se napisati sa uračunavanjem koeficijenta zračne moći ϵ_λ , čija se vrednost za različite materijale pri određenim temperaturama daje u termotehničkim priručnicima.

Dok je proračun zračenja sivih tela relativno jednostavan, jer je za taj slučaj neophodno odrediti samo zavisnost $\epsilon_\lambda = f(T)$, to se pri oceni zračenja selektivnih tela mora dopunski uzeti u obzir zavisnosti $\epsilon_{\lambda T} = f(\lambda)$.

Jedan od rasprostranjenih materijala sa selektivnim zračenjem u infracrvenoj tehnici je volfram, čija su svojstva dosta dobro proučena i izložena u specijalnoj literaturi [1,2]. *) Primetimo samo da vrlo često treba da se zna integralna vrednost zračne moći pri datoј temperaturi. Ove vrednosti možemo izračunati po empirijskim formulama:

a) za niske temperature (niže od 1000^0K)

$$\varepsilon_T = 0,571 \sqrt{\rho_T T}, \quad (\text{II. 13})$$

b) za visoke temperature (više od 1000^0K)

gde je:

$$\varepsilon_T = 0,5737 \sqrt{\rho_T T} - 0,1763 \rho_T T, \quad (\text{II. 14})$$

ρ_T — specifični otpor volframa u $\Omega \cdot \text{cm}$ pri temperaturi $T^0\text{K}$.

Pošto se zračenje realnih tela razlikuje od zračenja apsolutno crnog tela, to, da bismo mogli upoređivati njihova zračenja, koristimo se pojmom prividnih temperatura (pseudotemperature). Pod prividnom temperaturom se podrazumeva temperatura apsolutno crnog tela, čije zračenje u zadatom spektralnom intervalu daje isti efekat kao i zračenje datog tela pri njegovoj pravoj temperaturi.

Uvedene su tri takve temperature: energijska temperatura T_e ; temperatura bleska T_s ; temperatura boje T_b .

Pod energijskom temperaturom se podrazumeva takva temperatura apsolutno crnog tela pri kojoj ono ima zračenje jednako sa datim telom koje ima pravu temperaturu T :

$$T = \frac{T_e}{\sqrt[4]{\varepsilon_T}}. \quad (\text{II. 15})$$

Temperatura bleska odgovara takvoј temperaturi apsolutno crnog tela pri kojoj je njegov blesak za zračenje na talasnoj

*) Brojevi u uglastim zagradama predstavljaju redne brojeve u spisku literature, kojom se autor koristio, odnosno na koju se pozivao. — *Prim. red.*

dužini $0,665 \mu$ jednak blesku tela koje zrači na temperaturi T i na istoj talasnoj dužini:

$$T = \frac{c_2}{\lambda} \frac{1}{\ln(\varepsilon_{\lambda T} e^{\frac{c_2}{\lambda T s}})} . \quad (\text{II. 16})$$

Iz formule (II.16) se vidi da temperatura bleska može da se odredi za zračenje sa bilo kojom talasnom dužinom, ako je poznata vrednost za njen spektralni koeficijent crnoće. Međutim, u fotometrijskoj prakci usvojeno je da se njegova vrednost uzima za talasnu dužinu $0,665 \mu$.

Pod temperaturom boje podrazumeva se takva temperatura apsolutno crnog tela, pri kojoj je boja njegovog zračenja jednaka sa bojom zračenja realnog tela temperature T :

$$T_6 = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2) T_{1s} T_{2s}}{\lambda_1 T_{1s} - \lambda_2 T_{2s}} . \quad (\text{II. 17})$$

Razlika između temperature boje i prave temperature nastaje kao posledica selektivnosti zračenja različitih tela. Za siva tala kod kojih je oblik krive spektralne gustine zračenja sličan obliku krive zračenja apsolutno crnog tela, takve razlike neće biti.

Poznavanje temperature boje realnih tela ima veliki značaj pri oceni integralne osetljivosti prijemnika zračenja sa selektivnom reakcijom, pošto ona karakteriše kvalitetnu stranu fluksa zračenja.

4. ELEKTRIČNI IZVORI ZRAČENJA

Primena ovih ili onih izvora energije zračenja u svojstvu uređaja za ozračivanje u infracrvenim aparaturama aktivnog dejstva (sa osvetljavanjem) je celishodno, ako oni zadovoljavaju određene zahteve, od kojih su najvažniji:

- visoki koeficijent korisnog dejstva u infracrvenoj oblasti spektra;
- dug vek rada i stabilnosti zračenja.

- mogućnost korišćenja u sklopu sa optičkim sistemima;
- podesnost podešavanja režima zračenja (radnog režima);
- minimalna težina i gabariti pri dovoljnoj snazi zračenja.

T a b l i c a II.1

Karakteristike zračenja nekih izvora u infracrvenoj oblasti spektra

I z v o r z r a č e n j a	Opšta gustina W/cm ²	Gustina u oblasti 0,8–12 μ W/cm ²	Raspodela energije u procentu u spektralnim oblastima		
			0,8–1,4 μ	1,4–2,4 μ	2,4–12 μ
Gasna volframova sijalica	0,0125	0,007	3,2	20,5	51,6
Električni luk	0,034	0,024	12,8	54	26
Živina svetiljka	0,026	0,01	39	21	—
Helijumska svetiljka	0,021	—	100	—	—
Hernstova sveća	0,0007	0,0005	6	20	—

Ove zahteve najbolje zadovoljavaju električne sijalice sa usijanom niti (tabela II.1).

Električne sijalice sa usijanom niti

Kod električnih sijalica sa usijanom niti, energija koja se dovodi na nit troši se na svetlosno i nevidljivo zračenje kao i na gubitke u balonu, gasu i držaćima. Brojne vrednosti ovih veličina za savremene sijalice različitih snaga date su u tabeli (II.2), i pokazuju da su električne sijalice sa usijanom niti ekonomični i prilično snažni izvori zračenja.

Spektralne karakteristike zračenja nekih sijalica prikazane su na slikama II.3 i II.4.

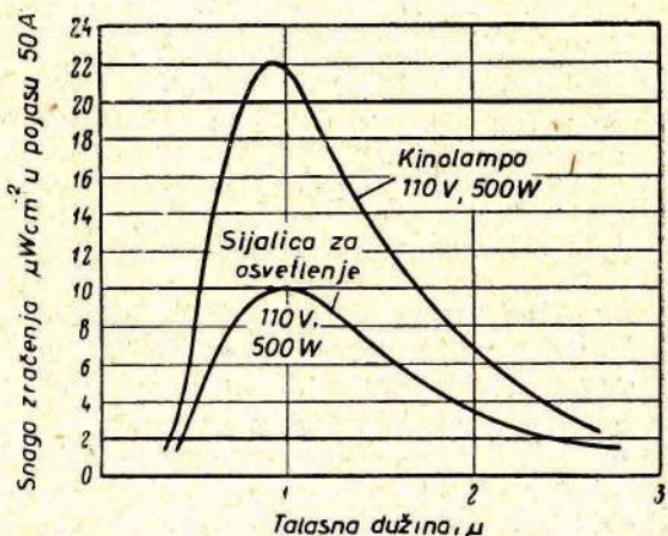
U današnje vreme proizvodi se industrijski veliki assortiman električnih sijalica sa usijanom niti, o kojima se mogu naći podaci u odgovarajućim katalozima i tehničkim priručnicima o osvetljenju.

T a b l i c a II. 2

Energijski bilans električnih sijalica sa usijanom niti

P (W)	T, °K	η lm/W	Energija koja se odvodi preko dr- žača %	Gubici u gasu %	Gubici u balonu %	Zračenje van balona %	Vidljivo zračenje %
25	2535	10,2	1,8	—	7,0	91,2	7
40	2710	11,1	1,6	24,5	7,1	66,8	6,8
60	2767	12,8	1,6	22,2	7,1	69,1	7,6
100	2837	15,4	1,7	18,5	7,0	72,8	9,3
200	2878	17,0	1,7	13,7	7,2	77,4	10,2
500	2340	19,6	1,8	9,2	6,7	82,3	11,4
1000	2395	20,5	4,8	6	7,1	82,1	12,0

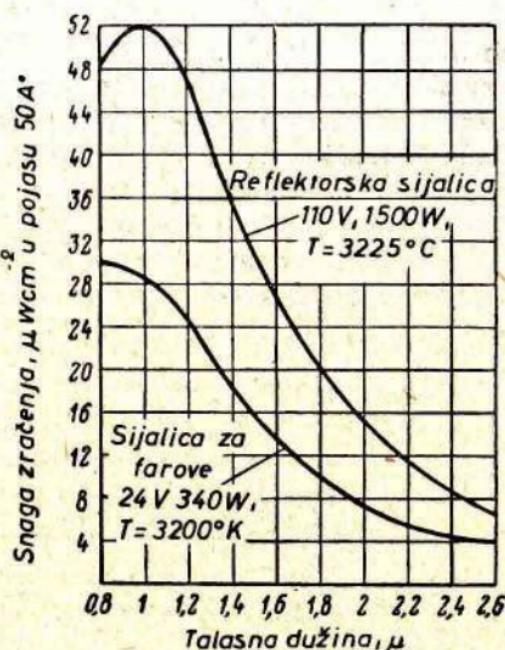
Pri njihovom izboru za izvore energije zračenja u uređajima infracrvene tehnike, neophodno je voditi računa o karakteru



Sl. II.3 — Spektralni intenzitet zračenja sijalica za osvetljenje i kinoprojekcione sijalice 110 V, 500 W.

rada uređaja, neophodnoj jačini zračenja, vremenu rada, mogućnosti napajanja raspoloživim izvorima električne energije i tome

slično. Naročitu pažnju treba obratiti izboru električnih sijalica sa usijanom niti, ako su one predviđene ne za rad u sklopu optičkog sistema, pošto u tom slučaju veliki, a ponekad i odlučujući značaj dobijaju gabariti sijalice i njen topotni režim. Ovo je pre svega



Sl. II.4 — Spektralni intenzitet zračenja sijalica za farove i sijalica za reflektore

vezano sa postavljanjem usijane niti u žihu optičkog sistema, kao i sa hlađenjem balona sijalice unutar relativno male zapremine vazduha u armaturi zatvorenoj po pravilu infracrvenim filtrom. Pored toga, takve sijalice treba da imaju i gabaritni blesak, tj. visoki odnos svetlosne jačine prema površini usijanja.

Električni lukovi

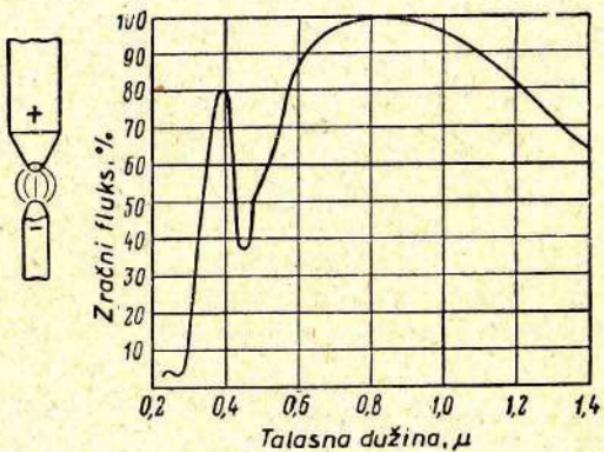
U uređajima za ozračivanje, gde se zahteva veliki intenzitet zračenja, nalaze primenu prosti i visokointenzivni električni lukovi (sl. II.5).



Prost luk se obrazuje između dve grafitne elektrode: katode, koja predstavlja izvor elektrona, i anode, na kojoj se kao rezultat bombardovanja elektronima obrazuje usijani krater temperature reda 4.000°K . Zračenje takvog luka uglavnom je određeno temperaturom kratera koji zrači oko 85% energije, dok katoda zrači oko 10%, a plamen 5% energije.

Sjaj prostih lukova dostiže $18.000 - 20.000 \text{ Sb}$ pri napajanju jednosmernom strujom i 12.000 Sb pri napajanju naizmeničnom strujom. Svetlosni koeficijent korisnog dejstva je $12 - 14 \text{ lm/W}$.

Za poboljšanje tehničkih karakteristika luka neophodno je da se uveća gustina struje među njegovim elektrodama. Kod takvih lukova, koji su dobili naziv visokointenzivni, elektrode imaju meki fitilj, tj. jezgro koje se sastoji iz 30–60% smeše fluorovih soli metala iz grupe retkih zemalja, čađi ili graftita i do 4% borne kiseline (sl. II.6).

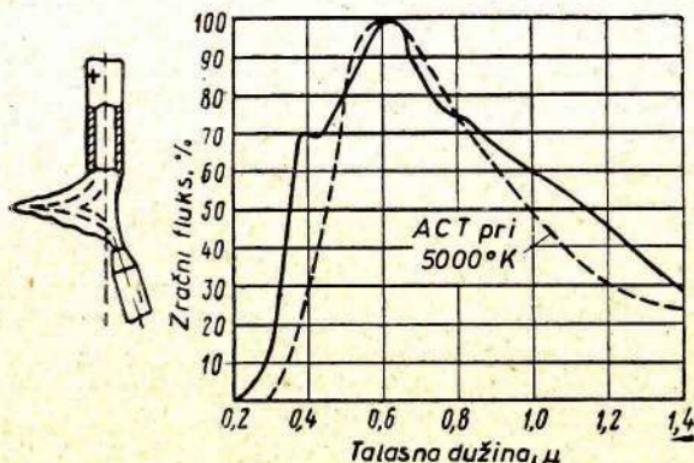


Sl. II. 5 — Spektralni intenzitet fluksa zračenja prostog luka

Sjaj visokointenzivnog luka dostiže 80.000 Sb sa dodatkom luminiscentnog zračenja usijanih para metala retkih zemalja na čisto temperaturno zračenje kratera temperature oko 5.000°K .

U vezi sa višom temperaturom kratera takvog luka njegov spektar je pomeren, u upoređenju sa spektrom zračenja prostog luka, u stranu kraćih talasnih dužina ($\lambda_{\max} \approx 0.6 \mu$). Ovim se i

objašnjava približno jednaka efektivnost oba tipa lukova u infracrvenoj oblasti spektra.



Sl. II.6 — Spektralni intenzitet fluksa zračenja visokointenzivnog luka

5. ZRAČENJE INDUSTRIJSKIH I VOJNIH OBJEKATA

Delatnost ogromne većine industrijskih i vojnih objekata vezana je za primenu energijskih postrojenja, i kao rezultat rada ovih, izdvaja se velika količina toplotne energije, pa prema tome i energije zračenja. Ovi objekti imaju određeni toplotni kontrast prema okolnoj sredini, na osnovu koga oni mogu biti otkriveni infracrvenim uređajima.

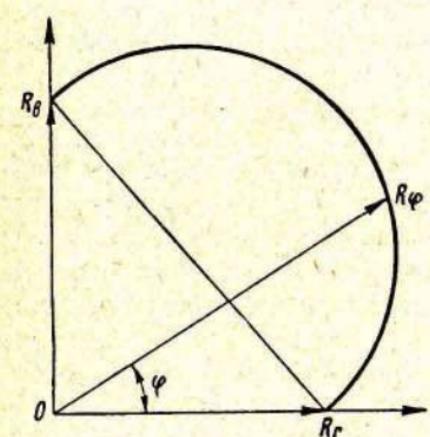
Po svojstvima i karakteristikama, industrijski i vojni objekti mogu biti i prostorni, i tačkasti izvori zračenja. Ali, i u prvom, i u drugom slučaju zračenje ovih objekata zavisi od temperature, konfiguracije i veličine površina koje zrače, kao i od njihovog uzajamnog položaja i stepena crnoće. Ovo uslovljava veliku raznolikost zračenja aktivnih objekata kako po snazi, tako i po njegovom spektralnom sastavu kao i po prostornoj raspodeli energije zračenja.

Naravno da se pri takvoj raznolikosti toplotnih objekata ne može formulisati opšti kriterijum za ocenu njihovog zračenja. Ocenjivati zračenje takvih objekata koji zauzimaju veliku površinu zemljišta i imaju vrlo veliki broj, po svojim karakteristikama

različitih izvora topotnog zračenja, celishodno je u svakom konkretnom slučaju. Uz to, pak, uzajamni raspored izvora zračenja na ravnoj površini može iz osnova da promeni orientacione proračune. Topotno zračenje treba proračunati analogno proračunu zračenja „ne crnih“ tela, smatrujući ove objekte za praksu dovoljno tačnim, sivim telima sa difuznim zračenjem. Takvo uprošćenje dozvoljava da se relativno prosto oceni ne samo integralno zračenje objekta već i spektralna raspodela energije zračenja.

Ponekad je celishodno da se iz grupe objekata koji zrače na posmatranoj površini izdvoje jedan ili dva najsnažnija izvora zračenja i da se njihovo zračenje uzme umesto zračenja grupe objekata. Greška u ocenjivanju zračenja u tom slučaju će biti utoliko manja, ukoliko je veća razlika između temperatura površina izabranih objekata i ostalog područja objekta, a takođe i ukoliko je manja površina i koeficijent zračne moći poslednjih — manji. Takav metod ocenjivanja daje relativno dobre rezultate pri određivanju zračenja industrijskih objekata metalurgijske i metaloprerađivačke industrije: kok-sara i sličnih fabrika, termo-centrala i železničkih čvorova.

Na takvim objektima, po pravilu se mogu izdvojiti posebni objekti: visoke peći, kauperi, koksne baterije, peći za pečenje rude, kupolne peći za livenje, Simens-Martinove peći, gomile usijane šljake, cevi, bazeni za otpadne vode, otkriveni kotlovske agregati, parne lokomotive i slični objekti čije zračenje ponekad višestruko prevazilazi zračenje okolnih objekata.



Sl. II.7 — Uz proračun zračenja objekata u vertikalnoj ravni

Ako nije moguće izdvajanje posebnih objekata topotnog zračenja na radnoj površini, onda se pristupa primeni „metode zona“.

Suština ovog zametnijeg metoda proračuna jeste u tome što se cela radna površina podeli na posebne parcele (zone) sa objektima koji imaju približno jednake temperature i jednake koeficijente crnoće svojih površina.

Za te objekte odredi se fluks zračenja u horizontalnim i vertikalnim ravnima (ponekad to treba uraditi i za razne pravce). Nanesu se u određenoj razmeri fluksevi zračenja date zone u dve uzajamno normalne ravni, spoje njihovi krajevi pravom, nad kojom se, kao nad prečnikom, konstruiše polukrug (sl. II.7). Tada bilo koja prava povućena pod uglom φ iz tačke O do preseka sa polukrugom određuje u toj razmeri fluks zračenja u vertikalnoj ravni pod uglom. Ukupan fluks zračenja celog industrijskog objekta u bilo kom pravcu može da se odredi geometrijskim sabiranjem vektora fluksova zračenja posebnih objekata u datom pravcu:

$$R_\varphi = \sqrt{R_{1\varphi}^2 + R_{2\varphi}^2 + \dots R_{n\varphi}^2} \quad (\text{II. } 18)$$

Analognim načinom može se proceniti i zračenje vojnih objekata. Proračun se u tom slučaju znatno uprošćava time što su zračeće površine vojnih objekata koncentrisane u maloj oblasti i predstavljaju, u svakom slučaju, lokalne izvore zračenja.

I zaista, na brodovima osnovni izvor zračenja su cevi i gasoviti stub, koji zrače fluks zračenja u smeru gornje polusfere; na tenkovima zadnja oplata (obloga) oklopa ispod koje se nalazi motor i izduvne cevi; kod oruđa, zagrejane cevi za vreme gađanja; kod aviona motori i izduvni gasovi, a kod objekata koji lete nadzvučnom brzinom (aviona i raketa) obloga zagrejana usled aerodinamičkog trenja do visoke temperature, što će biti pokazano u kasnijem izlaganju.

Kao primer razmotriće se osobenosti zračenja letelica (aviona i raketa) koje u tom pogledu predstavljaju najkarakterističnije vojne objekte, pošto je kod njih koncentrisana velika energija u relativno malom prostoru i zrače kako motor i izduvni gasovi, tako i obloga letelica.

Kod aviona sa klipnim motorima osnovni izvor infracrvenog zračenja su izduvne cevi, gasovi koji izlaze iz izduvnih cevi (izduvni gasovi) i poklopci motora. Snaga njihovog zračenja se

određuje kao i u ranije razmatrаниm primerima, temperaturom, dimenzijama površine, njihovim koeficijentom crnoće, a takođe i stepenom sagorevanja goriva. Prostorna raspodela energije zračenja određuje se takođe i stepenom zaklonjenosti zračećih površina drugim delovima aviona.

Poklopci motora imaju relativno nisku temperaturu ($80-100^{\circ}\text{C}$) i mali koeficijent crnoće ($0,2-0,45$), što uslovljava malu snagu njihovog zračenja. Međutim, u zavisnosti od tipa aviona, ili tačnije, od konstruktivnog rasporeda sklopova elisno-motorne grupe, zračenje oplate motora može da se rasprostire u prednju ili zadnju polusferu, na gore ili na dole.

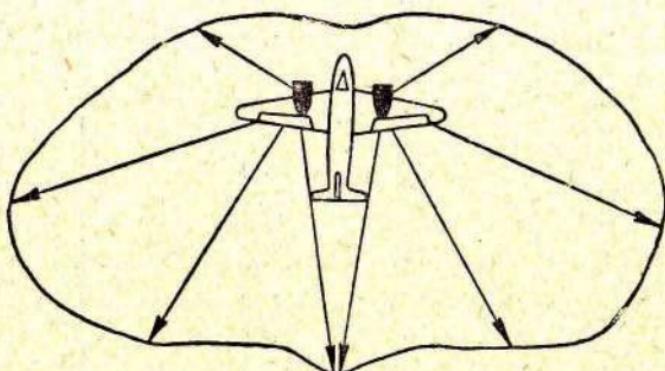
Izduvni gasovi klipnih motora sadrže veliki broj sitnih čvrstih čestica ugljenika, usijanih do temperature $1.000-1.100^{\circ}\text{C}$. Oni nastaju u gasnoj struji usled nepotpunog sagorevanja ugljenovodoničnih goriva u motorima sa unutrašnjim sagorevanjem, koji rade, po pravilu, sa smešom koja nije dovoljno zasićena vazduhom. Prisutnost takvih čestica u gasnoj struji znatno povećava njenu zračnu moć i obezbeđuje praktično neprekidan spektar zračenja izduvnih gasova klipnog motora. Indikatrisa (prostorni dijagram) zračenja izduvnih gasova po pravilu se izdužuje prema zadnjoj polusferi i uzduž poprečne ose aviona.

U opštem bilansu zračenja aviona sa klipnim motorima, deo zračenja izduvnih gasova i oplate motora kreće se u granicama od 35 do 45%. Ostali deo ($65-55\%$) otpada na zračenje izduvnih lula.

Izduvne lule motora postavljaju se ili ispod *centroplana* aviona ili iznad njega, duž uzdužne ose aviona. Zato se i energija zračenja od zagrejanih izduvnih lula može da rasprostire bilo u smeru gornje, bilo donje polusfere sa maksimumom zračenja duž poprečne ose aviona. Rasprostiranje zračenja u smeru prednje ili zadnje polusfere zavisiće od stepena promene vidljive površine izduvnih lula i razmera površine kolena i preseka lule.

Temperatura izduvnih lula dostiže vrednost reda $800-700^{\circ}\text{C}$ u blizini kolektora, snižavajući se postepeno prema izlaznom preseku $250-350^{\circ}\text{C}$. Izduvne lule se prave od termostabilnog čelika, koji je oksidisao u toku korišćenja aviona. Zato je koeficijent crnoće površine lula dosta veliki i dostiže vrednosti od 0,8 do 0,9.

Navedeni podaci dozvoljavaju da se na primeru aviona Si-47 proceni zračenje aviona sa relativno slabim energijskim postrojenjem. Na avionu Si-47 dve izduvne cevi prečnika 15 cm i dužine oko 100 cm postavljene su pod *centroplan* sa spoljne strane svakog od dva motora. Zračenje jedne lule duž poprečne ose aviona biće jednako $1,94 \cdot 10^3$ W i rasprostire se u horizontalnoj ili vertikalnoj ravni samo na jednu stranu. Pri tome intenzitet zračenja u pravcu normalnom na površinu lule predstavlja veličinu reda 620 W/ster.



Sl. II.8 — Indikatrisa zračenja aviona Si-47 u horizontalnoj ravni

Pri oceni ukupne snage zračenja aviona neophodno je da se obračuna zračenje obeju lula u svim pravcima. Tada će ukupni fluks zračenja, računajući samo zračenje cilindričnog dela dveju lula, da iznosi:

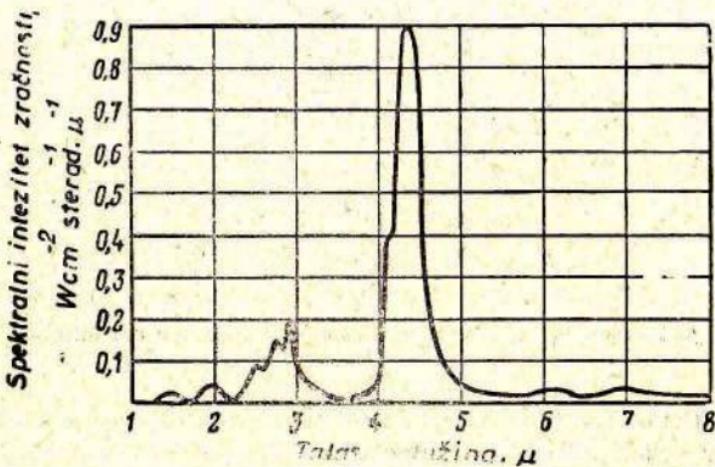
$$\Phi' = 2\pi Dl\varepsilon\sigma T^4 = 13 \cdot 10^3 \text{ w.}$$

Prema tome, zračenje celog aviona Si-47 biće ekvivalentno zračenju tačkastog izvora, sa snagom:

$$\Phi = \frac{\Phi'}{0,6} = 22 \cdot 10^3 \text{ w.}$$

Približan raspored intenziteta zračenja aviona Si-47 u horizontalnoj ravni, uzimajući u obzir zračenje lula, izduvnih gasova i oplate motora — prikazan je na slici II.8.

Kod reaktivnog aviona pri podzvučnim brzinama leta osnovni izvor zračenja jeste reaktivni motor, zajedno sa pro- dužnom cevi i reaktivnim konusom (ako postoji), a takođe i mlaz gasova koji izlazi iz mlaznika. Za razliku od klipnog motora, procenat zračenja gasova ovde je znatno manji zbog potpunijeg sagorevanja goriva pri izobilju kiseonika i nepostojanju, zbog toga što nema čvrstih usijanih čestica ugljenika u gasnoj struji. Zračenje gasnih produkata oblika dvo- ili tro-atomnih molekula ima pojasni spektar i poklapa se sa spektrom apsorpcije analognih molekula u vazduhu. Zato zračenje zagrejane vodene pare i ugljen-dioksida, koji nastaju u velikim količinama pri potpunom sagorevanju ugljenovodonika, nema neku značajnu ulogu u



Sl. II.9 — Spektralna raspodela intenziteta zračenja gasnog mlaza pri sagorevanju kerozina

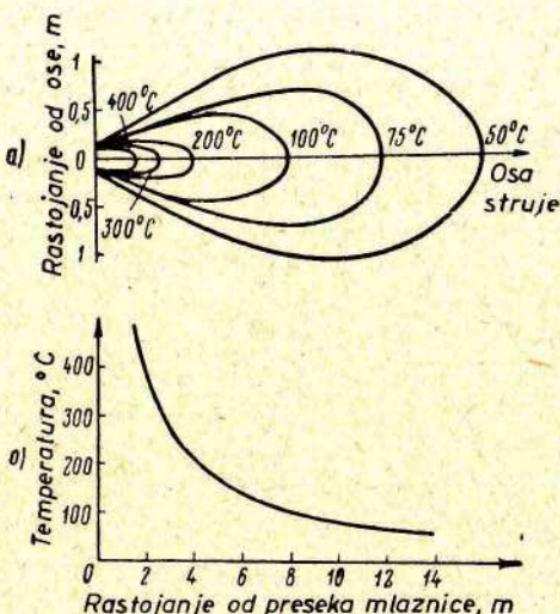
opštem bilansu zračenja gasne struje na malim visinama. Međutim, njihovo zračenje može da pokaže znatan uticaj na većim visinama, gde vazduh sadrži vrlo malo CO_2 i H_2O (sl. II.9).

U literaturi (3,4) se ukazuje da zračenje gasova gasne struje reaktivnog motora temperature 1.200°K ima maksimum oko 2μ . Pri zračnoj moći $\varepsilon = 0,1$ puna snaga zračenja gasne struje iznosi $6,8 \cdot 10^{-15} \text{ W m}^{-2} (\text{°K})^{-4}$.

Oblik mlaza gasne struje i raspored temperature u njoj prikazani su na slici II.10 (5).

U vezi s tim zračenje reaktivnog aviona u osnovi se svodi na zračenje unutrašnje šupljine produžne cevi, čiji zidovi imaju temperaturu reda nekoliko stotina stepeni, i otkrivenih delova motora (lopatice turbine, reaktivni konus).

Lopatice turbine izložene su strujanju vrelih gasova temperature $700 - 750^{\circ}\text{C}$, brzinom isticanja $300 - 400 \text{ m/sek}$. Zato, ako se uračuna aerodinamičko zagrevanje, temperatura lopatica gasne turbine može da pređe 800°C , pošto pri takvoj brzini



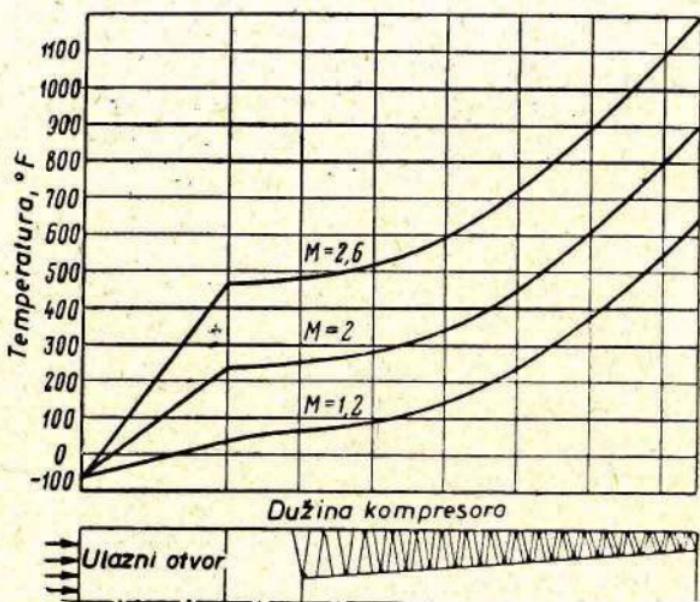
Sl. II.10 — Oblik mlaza (a) i raspored temperature u gasnoj struci reaktivnog motora sa potiskom 300 kg (b)

prirostaj temperature na mestima potpunog zastoja gasne struje predstavlja veličinu reda $45 - 80^{\circ}\text{C}$ [6].

Na slici II.11 — navedeni su eksperimentalni podaci [7] porasta temperature vazduha u kompresoru na visinama od 11.000 do 25.000 m, koji pokazuju da lopatice turbine, koje se nalaze na njenom kraju, a vide se kroz otvor produžne cevi reaktivne mlaznice, mogu da imaju znatnu temperaturu.

U vezi s tim indikatrisa zračenja reaktivnog motora, a takođe i reaktivnog aviona, potpuno se razlikuje od indikatrise zračenja aviona s klipnim motorima i zračenje je više usmereno. Pri tome, osnovno zračenje pada u zadnju polusferu. Karakter indikatrise zračenja svakog posebnog tipa reaktivnog aviona, određen je topotnim režimom motora, njihovim brojem, a takođe i geometrijskim odnosom između dužine i prečnika produžne cevi, rastojanjem između motora i dužinom trupa aviona.

Prelaskom na nadzvučne brzine letenja, oplata letelice postaje izvor topotnog zračenja, pri čemu udeo zračenja oplate



Sl. II.11 — Porast temperature vazduha duž ose kompresora na visinama 11.000—25.000 m.

Prelaz od skale Farenhajta na Celzijusovu skalu vrši se po formuli:

$$t^{\circ} \text{C} = \frac{5}{9} (t^{\circ} \text{F} - 32^{\circ})$$

u opštem bilansu energije zračenja aviona, kontinualno raste sa porastom brzine leta. Pri tome povećanje brzine leta zahteva

primenu sve boljih visokokaloričnih goriva — pa će se prema tome povećavati i zračenje motora.

Već sada se vrše opsežni radovi na izradi novih aktivnijih hemijskih goriva. Naime, razrađuju se goriva sa dodatkom metalnoga praha koji bi pri sagorevanju izdvojio veliku količinu toplote (npr. aluminijum, berilijum, litijum i dr.) U tom slučaju zračenje gasne struje naglo bi se povećalo zbog zračenja užarenih čestica metalnih oksida i zbog povećanja koeficijenta zračenja struje. Drugi način izrade visokoaktivnih avionskih goriva sastoji se u razradi sintetičkih jedinjenja vodonika sa nekim elementima (borom, litijumom i dr.). Ovako dobijeno gorivo pentaboron (jedinjenje bora i vodonika) pri sagorevanju oslobađa 1,5 puta više topline nego obična goriva. To nesumnjivo dovodi do povećanja snage zračenja motora, kao i zračenja gasne struje.

Pri nadzvučnom letu, oplata letelice zaustavlja vazdušna strujanja; njihova kinetička energija prelazi u toplotu koja zagrevi granični sloj i oblogu do temperature T_o , čija veličina može da se izračuna po formuli:

$$\Delta T = T_o - T_v = A \frac{v^2}{2gc_p} = \frac{v^2}{2000} = \frac{M^2 T_v}{5} \quad (\text{II. } 19)$$

gde je:

T_o — temperatura zaustavljenog sloja vazduha, u ($^{\circ}\text{K}$);

T_v — temperatura vazduha koja okružuje letelicu u ($^{\circ}\text{K}$);

v — brzina u m/sek;

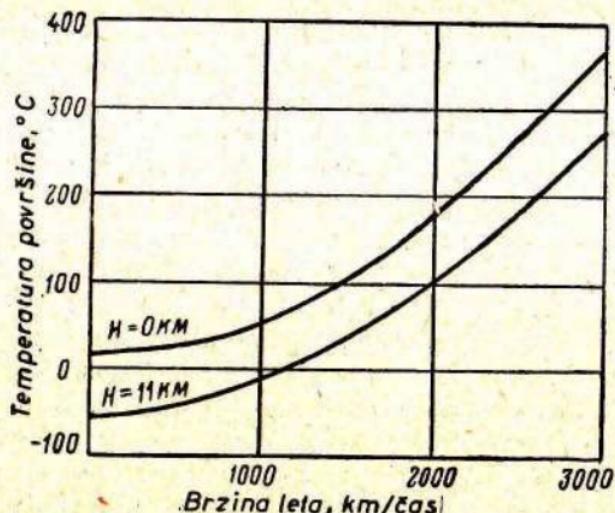
M — Mahov broj.

Odnos apsolutne temperature neporemećene vazdušne struje i temperature zaustavljene (na nultu brzinu) vazdušne struje pri raznim Mahovim brojevima, prikazan je u tablici II.3.

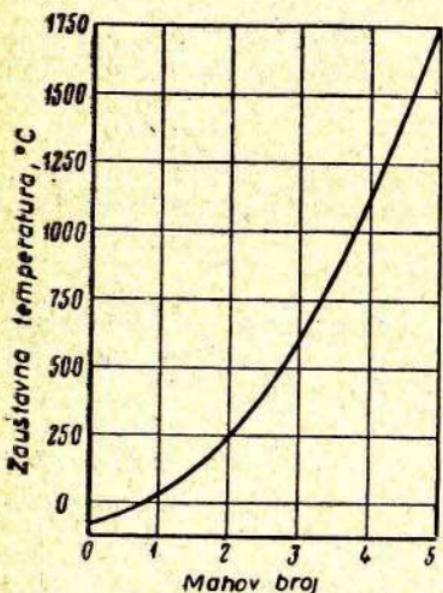
Tablica II.3

Odnos temperature neporemećene vazdušne struje prema temperaturi zaustavljene struje na nultu brzinu za razne brojeve M

M	0	1	2	2,5	3	4	5	10
T/T_0	1	0,883	0,556	0,444	0,357	0,238	0,167	0,048



Sl. II.12 — Temperatura površina aviona u tački zaustavljanja vazdušne struje u zavisnosti od brzine njegovog leta

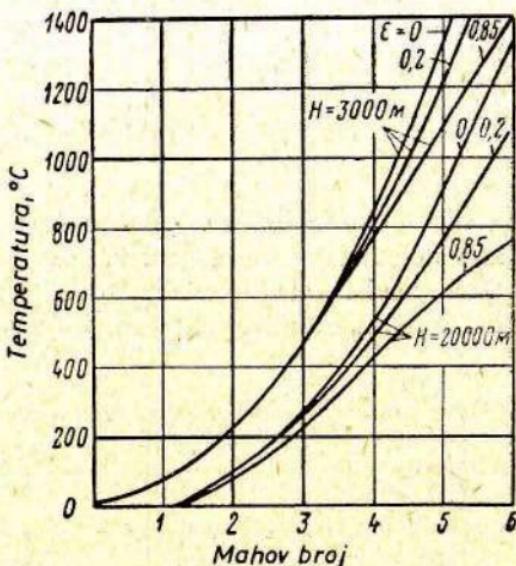


Sl. II. 13 — Temperatura zaustavljanja u zavisnosti od Mahovog broja na visinama leta od 11.000 do 25.000 m

Na slici II. 12 prikazane su proračunske krive zagrevanja površine aviona usled zaustavljanja vazdušnih strujnica sa nadzvučnom brzinom opsrujavaju na visinama do 11 km, bez uračunavanja gubitaka na zračenje. Za mnogo veće brzine leta na visinama od 11 do 25 km kriva zagrevanja oplate aviona, na mestima potpunog zaustavljanja prikazana je na slici II.13 (7).

Navedene krive, dobijene računskim putem po formuli (II.19), daju zadovoljavajuće slaganje na eksperimentalnim podacima, mada pri tome nisu uračunati gubici energije usled zračenja. Ovi gubici će

biti utoliko veći, ukoliko je veća temperatura površine i ukoliko je veći koeficijenat njene zračne moći E . Ova zavisnost (8) pokazana je na slici II. 14.



Sl. II.14 — Ravnotežna temperatura tela pri aerodinamičkom zagrevanju sa uračunatim zračenjem

Pored zagrevanja oplate aviona usled aerodinamičkog zaustavljanja vazdušnih struja, dolazi takođe do zagrevanja i usled trenja s pograničnim slojem vazduha. Veličina aerodinamičkog povišenja temperature u tom slučaju može da se izračuna iz odnosa (II.19) uzimajući u obzir Prendtlov kriterijum ($P\gamma$)

$$\Delta T = A \frac{v^2}{2gc_p} \sqrt{P\gamma} = 0,85 \frac{v^2}{2000}. \quad (\text{II. 20})$$

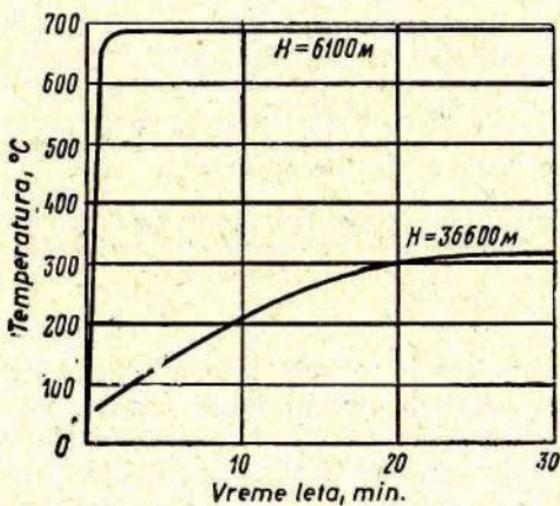
Temperature zagrevanja oplate nekih savremenih aviona u letu (SAD) date su u tablici II.4.

T a b l i c a II. 4

Eksperimentalni podaci za određivanje zagrevanja oplate nekih aviona (9)

Tip aviona	M	Temperatura obloge	
		°C	°K
Konvejer F-106	1,5	60	333
Mak-Donel F-101.....	1,6	62	335
Lokid F-104A	2	122	395
Martin HB-68	2,5	214	487
Bel X-2	3	333	606

Stacionarna ili, kako se inače naziva, ravnotežna temperatura oplate aviona ne nastaje odjednom. Za to je potrebno određeno vreme koje zavisi od toplotne provodnosti materijala, njene zračne moći i visine leta aviona. Kao primer, na slici II.15



Sl. II.15 — Porast temperature površine aviona tokom vremena, pri brzini leta M-4

prikazane su krive zagrevanja oplate aviona pri njegovom nadzvučnom letu, sa brzinom koja odgovara Mahovom broju M — 4, na visinama 6.100 i 36.000 m. [10].

Kao što se vidi sa slike II.15, na visini 6.100 m ravnotežna temperatura oplate aviona jednaka je 680°C i uspostavlja se za manje od 1,5 min. leta sa brzinom $M = 4$, dok se na visini od 36.600 m uspostavlja tek za 20 min.

Zagrevanje oplate aviona pri nadzvučnom letu dovodi do toga da avion postaje izvor intenzivnog zračenja infracrvenih zraka, čiji se fluks praktično rasprostire na sve strane u prostornom uglu 4π . To zračenje, čija veličina u datom pravcu zavisi od dimenzija projekcije površina aviona, kao i od njene zračne moći i temperature, dodavaće se na usmereno zračenje raketnih motora, koje postaje sve veće i učiniće avion uočljivim za otkrivanje i uništenje (za samonavođenje i aktiviranje punjenja raket) infracrvenim uređajima.

Sniženje toplotnog zračenja spoljnih površina nadzvučnog aviona, moguće je samo primenom materijala za oplate sa vrlo niskim koeficijentom zračne moći. Međutim, taj zahtev je protivrećan onome za velikom zračnom moći materijala oplate zbog njenog intenzivnog hlađenja, da bi se povećala čvrstoća aviona pri nadzvučnom letu (problem toplotne barijere).

Još jače toplotne izvore predstavljaju rakete čija brzina leta znatno prevazilazi brzinu zvuka. Kod raket, osnovni uzrok toplotnog zračenja jeste zagrevanje tela rakete za vreme rada motora, aerodinamičko zagrevanje pri letu kroz gušće slojeve atmosfere i zagrevanje tela rakete usled zračenja Sunca pri njenom letu u kosmosu. Pored toga, u početnom stadijumu leta, snažan, mada kratkotrajan, izvor zračenja predstavlja mlaz (buktinja) usijanih gasova koje izbacuje motor.

Usled rada motora telo rakete, a naročito njen repni (zadnji) deo, može da se zgreje do znatnih temperatura, pošto temperatura u komori za sagorevanje dostiže $2.000 - 3.000^{\circ}\text{C}$, mada najintenzivnije zagrevanje tela nastaje usled leta rakete kroz gусте slojeve atmosfere.

Tako je, na primer, poznato da se nemačka raka V-2 (A-4) usled trenja o vazduh pri brzini od oko $5.600 \text{ km}/\text{s}$ zagrevala do crvenog usijanja. Proračun temperature tela raket V-2 po formuli (II.20) pokazuje da je njegova temperatura iznosila oko 950°C .

Ako se uzmu u obzir dimenzije raketa (dužina 14 m, maksimalni prečnik 1.65 m) i njen oblik, onda se njeno zračenje može da proceni kao veličina reda 4.000—5.000 k.

Kosmičke rakete se dopunski zagrevaju sunčevim zracima pri letu kroz kosmički prostor (11).

Toplotni bilans kosmičkih raketa (sagorevanje goriva, aerodinamičko zagrevanje i zagrevanje sunčevim zracima) u konačnom zbiru određuje rezultujuću temperaturu.

Zagrevanje tela rakete usled ozračenja sunčevim zracima, uzima se u obzir prilikom proračunavanja samo pri njenom letu kroz kosmički prostor, gde zagrevanje usled trenja u stvari ne postoji, a motor rakete je već završio svoj rad.

Ocena tog zračenja može se izvesti na primeru zamišljenog kosmičkog tela sfernog oblika koje ima oblogu od materijala sa zračnom moći $\varepsilon = 1$ (idealni provodnik toplote). Sunčeva konstanta je oko 1.200 W/m^2 ^{*}). Pod dejstvom tog zračenja površina sfere koja je okrenuta Suncu, ravnomerno će se zagrevati proporcionalno proizvodu sunčeve konstante i površine projekcije sfere (ravan velikog kruga) i istovremeno (bezinerzialno) predavati toplotu onom delu sfere koji je okrenut od Sunca. Takvo stanje zagrevanja sfere tražeće dotle dok se zračenje cele površine ne uravnoteži sa zračenjem Sunca koje pada na nju. Površina i ravan projekcije sfere u odnosu su kao 4 : 1.

Prema tome, zagrejana sfera zračiće 290 W/m^2 , samo usled ozračenja od Sunca, što odgovara zračenju oplate temperature od 290 do 300°K .

^{*}) Sunčeva konstanta varira u toku godine zbog različitih položaja i daljina Zemlje od Sunca. — *Prim. prev.*

G l a v a III

PROSTIRANJE ENERGIJE ZRAČENJA U ATMOSFERI

Vazdušni omotač Zemlje — atmosfera predstavlja sredinu u kojoj se prenosi energija zračenja od izvora ka prijemniku. Sastav i svojstva atmosfere u mnogome uslovljavaju efikasnost primene uređaja infracrvene tehnike.

1. SASTAV ATMOSFERE

Zemljina atmosfera jeste mehanička smeša gasova i sićušnih čvrstih čestica koje lebde u njoj. Takva smeša se naziva aerosolom.

T a b l i c a III. I

Osnovne čvrste, tečne i gasovite komponente u atmosferi

Primese	Dimenziye cm	Broj u dm ³	Brzina taloženja cm/sek.
Molekuli gasova	10^{-8}	$2,8 \cdot 10^{19}$	—
Joni: laki	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$5 - 10^2$	—
srednji	10^{-7}	10^3	—
teški	10^{-6}	10^3	—
Prašina: kosmička	$10^{-5} - 10^{-4}$	—	—
zemaljska	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^2 - 10^4$	10^{-3}
Jezgra kondenzacije	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^2 - 10^5$	10^{-7}
Kapljice: sumaglice	$10^{-5} - 10^{-4}$	$10^2 - 10^3$	$10^{-3} - 10^{-2}$
magle	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10 - 10^3$	$10^{-3} - 10^{-2}$
slane			
(sitne kiše)	10^{-2}	$1 - 10$	10^2
kiše }	10^{-1}	$1 - 4$	$5 \cdot 10^2$

Sadržaj stalnih gasovitih sastojaka u suvoj atmosferi, zahvaljujući turbulentnom mešanju, ostaje konstantan do visine od 25 do 30 km. Međutim, u realnoj atmosferi koja sadrži vodenu paru procentualni sadržaj gasova se menja u zavisnosti od količine vodene pare.

U atmosferi se u promenljivim količinama nalaze: voden para, čvrsti i tečni sastojci (tablica III.1). Njihova količina u atmosferi menja se u zavisnosti od geografske sredine, ljudske delatnosti i prirode. U ovu grupu sastojaka treba uključiti ugljen-dioksid i ozon koji, uporedo s vodenom parom kao i čvrstim i tečnim sastojcima, utiču na optička svojstva atmosfere.

Vodena para

U zavisnosti od temperature i vlažnosti vazduha, atmosfera može da sadrži od 0 do 4% vodene pare (po zapremini). Veličine njenih molekula kreću se od $11 \cdot 10^{-5}$ do $14 \cdot 10^{-5} \mu$. Sniženjem temperature, količina vodene pare se smanjuje (tablica III.2). Razlikuje se takođe srednji sadržaj vodene pare u zavisnosti od geografske širine (tablica III.3).

T a b l i c a III.2

Promena parcijalnog pritiska zasićene vodene pare E i absolutne vlažnosti vazduha A pri zemlji, u zavisnosti od temperature

t°C	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+20	+30	+40	+50
E mm živ. stuba	0,95	1,43	2,14	3,16	4,58	6,54	9,21	17,54	31,82	55,3	92,5
e mb	1,27	1,91	2,85	4,22	6,1	8,64	12,26	23,28	42,42	73,7	123
A g/m ³	1,08	1,6	2,35	3,41	4,86	6,32	9,41	17,32	30,38	51,1	82,8

Povećanjem visine količina vodene pare naglo opada, pošto na njeno rasprostiranje utiču niske temperature i procesi kondenzacije, a takođe i udaljenje od površine sa koje se isparava.

Za srednje uslove opadanje apsolutne vlažnosti sa visinom (napona vodene pare)*) može biti približno izraženo barometarskom formulom:

*) Napon ili parcijalni pritisak. — *Prim. red.*

$$aH = a_0 \cdot 10^{-\frac{H}{\beta}} \quad (\text{III. 1})$$

gde je:

β — 5000 za niže slojeve atmosfere, ako se visina izražava u metrima.

T a b l i c a III. 3

Srednja godišnja vrednost absolutne a i relativne vlažnosti pri zemlji za razne širine φ severne polulopte

φ stepeni	5	15	25	35	45	55	65
a, g/cm ³	18,5	16,8	13,6	9,8	7,2	5,2	3,4
f, %	79	75	71	70	74	78	82

Polazeći od izraza (III.1) očekuje se da će napon vodene pare, ili absolutna vlažnost vazduha, na visini od 2.000 m biti dva puta, na visini 5.000 m -- deset puta, a na visini 10.000 m — sto puta manja nego na površini zemlje. Ispitivanja potvrđuju ovu pretpostavku i pokazuju da je osnovna količina vodene pare koncentrisana u prizemnom sloju atmosfere do 5 km. Prisustvo vlage na većim visinama uslovljeno je, po pravilu, vertikalnim premeštanjem vazdušnih masa. Međutim, bez obzira na to, parcijalni pritisak vodene pare na granici troposfere (11.000 m) snižava se do $1 = 0,0137$ mb.

Veći broj autora, razmatrajući vlažnost atmosfere, operišu pojmom „specifična vlažnost“, pod kojim podrazumevaju količinu vode koja sadrži sloj jediničnog preseka i dužine L

$$W = a_H L, \quad (\text{III. 2})$$

gde je:

a_H — absolutna vlažnost vazduha na visini H.

Pri tom specifična vlažnost sloja može da se izrazi u jedinicama mase (g) ili u jedinicama dužine (mm).

Ugljen-dioksid

Ugljen-dioksid se nalazi u atmosferi kao rezultat životnih funkcija organske prirode i izdvaja se iz zemljine kore, pa je i

njegov sadržaj u prizemnom sloju neravnomern. Tako, na primer, srednja količina CO_2 u nezagađenom seoskom vazduhu uzima se 0,03% po zapremini, dok se nad gradovima njegova količina povećava do 0,05%.

Usled vertikalnih pomeranja u atmosferi, ova koncentracija ugljen-dioksida se održava konstantno na visini od 20 do 25 km.

Ozon

Ozona (O_3) ima u atmosferi 0,00004%, i to veoma neravnomerno. U nižim atmosferskim slojevima ozona ima od 0,000001 do 0,00001%, a na visinama od 65 do 70 km nailazi se samo na njegove tragove.

Čvrste i tečne primese

Pored vodene pare, ozona i ugljen-dioksida u atmosferi uvek ima prašine, dima, čestica soli, cvetnog praha od rastinja, bakterija i mikroba, vodenih kapi i kristala leda. Većina ih primesa ne samo da zamaluje atmosferu već u velikoj meri utiče i na stvaranje oblaka i magle, imajući ulogu jezgara za kondenzaciju vodene pare.

Raspodela čvrstih i tečnih čestica po visini, u tesnoj je vezi sa brzinom njihovog taloženja, koja može da bude izračunata po Stoksovom formuli:

$$v = 1,26 \cdot 10^6 \cdot r^2 \text{ cm/s}, \quad (\text{III. } 3)$$

gde je:

r — prečnik čestice u cm.

Ova se formula dobro slaže sa eksperimentalnim podacima za čestice koje imaju veći prečnik od 10^{-3} cm, i pokazuje da čestice manje od 1μ padaju sa tako neznatnom brzinom ($v < 10^{-2}$ cm/sek) da lebde pa ih vertikalne vazdušne struje lako nose uvis.

Ako je poznata brzina padanja čestica, moguće je proračunati i njihov raspored po visini (sl. III.1):

$$n_H = n_0 e^{-\frac{v}{k} H} \quad (\text{III. 4})$$

gde je:

k — koeficijent turbulentnosti

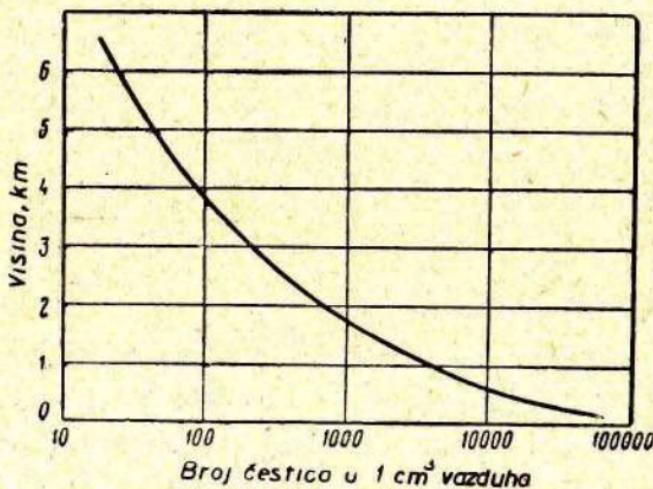
n_0 — broj čestica u 1 cm^3 vazduha pri zemlji.

Odnos $\frac{V}{K}$ može biti u granicama od 405 (prema Vigandu) do

750 (prema Zajcevu i Cajvoronskome). Atmosferska prašina može da bude kosmičkog, vulkanskog i zemaljskog porekla.

U prizemnom sloju atmosfere glavni uzroci njenog zamućenja jesu zemaljska prašina, dim, bakterije, soli i hidrometeori.*)

Težinska merenja pokazuju da relativno čist seoski vazduh sadrži do $0,00025 \text{ g}$ praštine u 1 cm^3 , povećavajući se skoro tri puta u periodu suše i suvih topnih vetrova. U sušno vedro vreme 1 cm^3



Sl. III.1 — Raspodela čestica praštine po visini

sadrži do 130.000 čestica praštine, čiji broj se posle kiše smanjuje na 32.000 do 30.000. Nad vodenom površinom količina praštine se znatno smanjuje (tab.III.4).

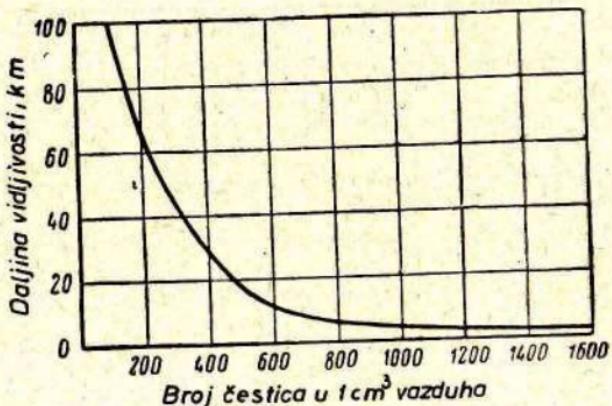
*) Vodene kapljice i kristali leda. — Prim. prev.

T a b l i c a III. 4

Raspodela količine prašine pri udaljavanju od obalske linije nad vodenu površinu

Rastojanje od obale u km	0	16	19	21	26
Broj čestica u 1 cm^3	35.000	2.750	1.250	800	780

Raspodela prašine u atmosferi određena je ne samo vremenskim prilikama i geografskom sredinom već i ljudskom delatnošću, naročito u industrijskim oblastima. Gradska prašina i dim iz industrijskih preduzeća, obično se rasprostiru na visinama ne većim od 700 do 500 m, ali u slučaju intenzivnih vertikalnih vazdušnih strujanja mogu dostići i veće visine.



Sl. III.2 — Zavisnost meteorološke vidljivosti od zaprašenosti atmosfere

Prisustvo znatnih količina prašine u prizemnom sloju atmosfere umnogome smanjuje njenu prozračnost (sl.III.2), a sem toga i prisustvo hidrometeora i vodene pare još više pogoršavaju prozračnost prizemnog sloja.

Hidrometeori se obrazuju u vazduhu prilikom koncentracije zasićenja vodene pare (pri datoј temperaturi), kada je parcijalni

pritisak vodene pare dostigao maksimalnu vrednost. Obrazovanje hidrometeora potpomaže prisustvo higroskopskih primesa u vazduhu — jezgara kondenzacije.

Pojava hidrometeora izaziva naglo zamućenje atmosfere.

U zavisnosti od stepena zamućenja atmosfere, razlikuju se:

sumaglica — s vidljivošću 1—10 km;

magla — s vidljivošću manjom od 1 km.

Posmatranja su pokazala da u vodenim maglama ima kapljica veličine od 0,1 do 50—60 μ . U poslednjem slučaju ove kapljice su vidljive okom i padaju na zemlju u vidu sitne kiše. Ogromna većina kapljica ima razmere 7—15 μ pri pozitivnim temperaturama (iznad nule) i 2—5 μ pri negativnim. Broj kapljica u 1 cm³ vazduha iznosi 50—100 pri slaboj magli i 50—600 pri jakoj magli.

U sumaglići, koja je u stvari početni stadijum razvijanja magle, veličina kapljica je manja od 1 μ — a njihov broj u 1 cm³ vazduha ne prelazi 10—40 kapljica.

Radi pogodnijeg upoređivanja magli usvojeno je da se one karakterišu specifičnom vlažnošću, tj. količinom koncentrisane vlage u jedinici zapremine. Veličina specifične vlažnosti magle zavisi od količine i veličine kapljica i od temperature vazduha (tablica III.5).

T a b l i c a III.5

Specifična vlažnost magle pri različitim temperaturama

t °C	-30	-20	-10	0	+10	+20
W, g/m ³	0,05—0,18	0,16—0,25	0,18—0,65	0,18—0,7	0,3—1,2	0,5—1,5

Optička svojstva magle umnogome su slična svojstvima oblaka: oni dobro odbijaju sunčevu svetlost ($\rho \approx 0,8$) i selektivno apsorbuju fluks zračenja. Rasipanje fluksa zračenja proporcionalno je broju kapljica u jedinici zapremine i njihovoj veličini, tj. specifičnoj vlažnosti magle.

Zato postoji mogućnost da se relativno jednostavno izračuna daljina vidljivosti u magli, po formuli

$$L = c \frac{r_{sr}}{W}, \quad (\text{III. } 5)$$

gde je:

r_{sr} — srednja veličina kapljice magle

W — specifična vlažnost magle

C — 2,5 ako je r_{sr} u mikronima, a W -u g/m^3 (obično se u praksi uzima $r_{sr} = 15\mu$).

2. SLABLJENJE FLUKSA ZRAČENJA U ATMOSFERI

S gledišta vidljivosti, osnovne optičke pojave koje nastaju u atmosferi svode se na slabljenje fluksa zračenja, koji se rasprostire od posmatranog objekta ka posmatraču, i smanjenje jasnoće kontrasta objekta u odnosu na okolinu.

Slabljenje fluksa zračenja u atmosferi može da nastane, u opštem slučaju, zbog rasipanja i apsorpcije energije zračenja.

Prvo je najizrazitije u vidljivoj oblasti spektra, a drugo u ultraljubičastoj a naročito u infracrvenoj oblasti. Slabljenje fluksa zračenja u atmosferi može se proceniti prema slici III.3 — na kojoj je grafički prikazana spektralna ozračenost gornjih slojeva atmosfere (1) i površine zemlje (2) sunčevim zracima u podne.

U opštem slučaju, slabljenje fluksa zračenja pri prostiranju kroz sredinu koja ima koeficijent slabljenja β (km^{-1}) i dužinu L (km) može se proračunati Buger-Lambertovim zakonom:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\beta L} = \Phi_0 \tau^L, \quad (\text{III. } 6)$$

gde je:

Φ_0 — fluks zračenja koji ulazi u sredinu;

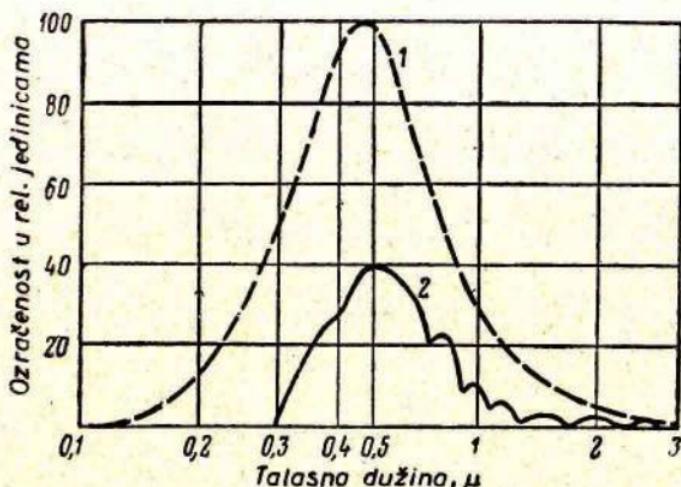
Φ — fluks zračenja koji izlazi iz sredine;

τ — $e^{-\beta}$ = koeficijent prozračnosti sredine, čija je dužina 1 km:

$$\beta = \ln \frac{1}{\tau}. \quad (\text{III. } 7)$$

Navedene formule primenljive su za monohromatski fluks zračenja, koji se prostire horizontalno u atmosferi sa konstantnim koeficijentom slabljenja, duž cele linije prostiranja.

Pri prostiranju fluksa zračenja vertikalno ili pod uglom γ prema horizontu, koeficijent slabljenja β može da pretrpi nagle promene, koje su uslovljene nehomogenošću atmosfere na raznim visinama.



Sl. III.3 — Spektralni intenzitet ozračenosti gornjih slojeva atmosfere (1) i površine zemlje (2)

U tom slučaju treba izdeliti po visinama debljinu atmosfere na n jednakih slojeva u čijim granicama je vrednost koeficijenta slabljenja konstantna i odrediti za svaki sloj koeficijent prozračnosti. Tada će ukupna prozračnost sloja atmosfere visine H biti jednaka proizvodu koeficijenta prozračnosti svih slojeva:

$$\tau_{H\lambda} = \tau_{(0-H_1)\lambda} \tau_{(H_1-H_2)\lambda} \cdots \cdots \tau_{(H_{n-1}-H_n)\lambda}. \quad (\text{III. } 8)$$

Ako se, pak, zračni fluks prostire koso, pod uglom γ prema horizontu, onda će prozračnost biti:

$$\tau_{\lambda\mu} = \frac{1}{\sin \gamma} \cdot \tau_{H\lambda}. \quad (\text{III. } 9)$$

Pri prostiranju kroz atmosferu složenog nemonohromatskog fluksa zračenja neophodno je da se odredi koeficijent propustljivosti za svaki pojedinačni monohromatski deo fluksa, a tek onda ukupni koeficijent propustljivosti iz odnosa:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} r_{\lambda} S d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}, \quad (\text{III. 10})$$

gde je:

r_{λ} — spektralna gustina intenziteta zračenja,

S_{λ} — spektralna osetljivost prijemnika zračenja.

U prostim slučajevima za približan proračun koristi se srednja vrednost koeficijenta slabljenja β_{sr} za monohromatski fluks zračenja u granicama celog sloja atmosfere, u kome se vrši prenos energije zračenja,

$$\Phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{0\lambda} e^{-\beta_{sr} L} d\lambda. \quad (\text{III. 11})$$

Prozračnost atmosfere je funkcija rasipanja i selektivne apsorpcije energije zračenja u atmosferi. Zato se ukupna prozračnost atmosfere može da predstavi kao proizvod koeficijenta prozračnosti uslovljenog rasipanjem zračne energije (τ_r) i koeficijenta prozračnosti uslovljenog selektivnom apsorpcijom u njoj (τ_{sa}):

$$\tau = \tau_r \tau_{sa}. \quad (\text{III. 12})$$

3. RASIPANJE ENERGIJE ZRAČENJA U ATMOSFERI

Pod rasipanjem energije zračenja u nekoj sredini, pa i u atmosferi, podrazumeva se proces skretanja fluksa zračenja od svog prvobitnog pravca. Uzrok rasipanja atmosfere je njena optička nehomogenost zbog koje nastaje prelamanje, odbijanje i difrakcija fluksa zračenja.

U zavisnosti od odnosa između dimenzija čestica disperzne faze i talasne dužine fluksa zračenja, rasipanje može da bude molekularno (na česticama veoma malih dimenzija), difrakciono (na česticama reda veličine talasne dužine) i geometrijsko (na česticama velikih dimenzija). U realnoj atmosferi gde su prisutne čestice praktično svih dimenzija, postoje istovremeno sva tri vida rasipanja.

Za vidljivu svetlost koeficijent slabljenja fluksa zračenja usled rasipanja može se odrediti ako je poznata meteorološka daljina vidljivosti:

$$L = \frac{3,92}{\beta}, \quad (\text{III. } 3)$$

gde je:

β — koeficijent slabljenja za $\lambda = 0,55 \mu$ (milja⁻¹).

Polazeći od ovog izraza, Žilbert (1) je dobio koeficijent slabljenja vidljivog zračenja usled rasipanja u zavisnosti od vremenskih prilika, pa ga je uporedio sa koeficijentom rasipanja u čistoj suvoj atmosferi β_0 , izračunatom prema Relejovoj formuli (vidi tablicu III.6).

T a b l i c a III. 6

Slabljenje vidljivog zračenja ($\lambda = 0,55 \mu$) pri raznim stepenima zamućenosti atmosfere

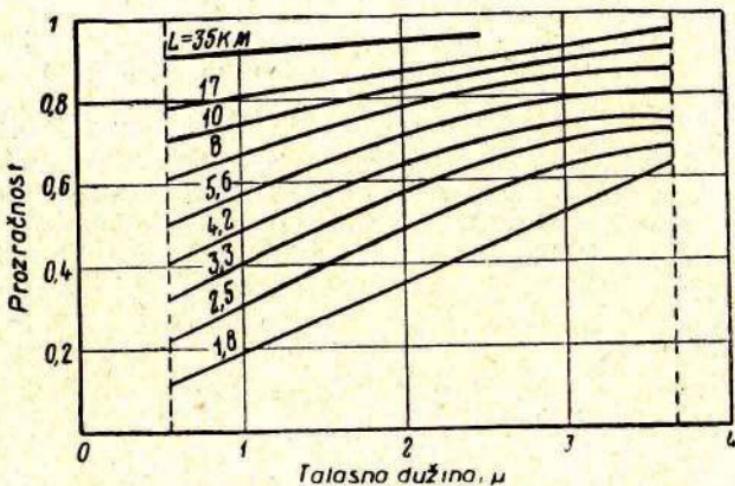
L, km	Stanje u atmosferi	$\beta, (\text{milja})^{-1}$	β/β_0
< 0,02	Vrlo jaka magla	> 85,6	> 6060
0,05	Jaka magla	85,6	6060
0,2	Umerena magla	21,4	1515
0,5	Slaba magla	8,54	606
1	Jaka sumaglica	2,14	151
4	Slaba sumaglica	1,07	75,6
10	V e d r o	0,427	30,2
20	Vrlo vedro	0,214	15,1
50	Izvanredno vedro	0,0713	5,06

Za zračenja talasnih dužina različitih od $0,55 \mu$, koeficijent slabljenja (ne uzimajući u obzir selektivnu apsorpciju) može se odrediti iz odnosa

$$\frac{\beta a}{\beta} = \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^4 . \quad (\text{III. 14})$$

Ova se formula dobro slaže sa praktičnim rezultatima pri ocenjivanju slabljenja infracrvenih zraka u atmosferi sa meteorološkom daljinom vidljivosti većom od 10 km.

Džebi i drugi autori [2] odredili su propuštanje fluksa zračenja u posebnim prozorima prozračnosti atmosfere na trasi dužine 4200 m, u zavisnosti od meteorološke daljine vidljivosti.



Sl. III.4 — Prozračnost atmosfere usled rasipanja pri različitim daljinama meteorološke vidljivosti na trasi 1,85 km

Interpolacijom dobijenih podataka konstruisane su pogodne krive za proračun prozračnosti atmosfere u infracrvenoj oblasti spektra pri različitim atmosferskim prilikama usled rasipanja fluksa zračenja u njoj (sl. III.4). Pri tom je u svim slučajevima ekvivalentni vodeni stub uziman konstantnim (17 mm), a meteorološka daljina vidljivosti izračunavana je iz odnosa (III.13).

Rasipanje fluksa zračenja u suvoj i čistoj atmosferi, sa kojom se obično srećemo na većim visinama, sa dovoljnom tačnošću se slaže sa zakonima molekularnog rasipanja koje je podrobno proučio Relej.

Razmatrajući rasipanje fluksa zračenja gasnim jonima i odvojenim skupinama molekula nastalim usled neprekidnog haotičnog kretanja, Relej je izveo zakon: „Kada se svetlost rasipa vrlo malim česticama u odnosu na ma koju talasnu dužinu, odnos amplitude oscilacije u rasutoj i upadnoj svetlosti obrnuto je srazmeran kvadratu talasne dužine, a odnos intenziteta njenom četvrtom stepenu“.

Matematički se ovaj zakon može izraziti sledećom zavisnošću:

$$\varepsilon_{\lambda}^{\varphi} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{2r^2 \lambda^4 N} (1 + \cos^2 \varphi), \quad (\text{III. } 15)$$

gde je:

$\varepsilon_{\lambda}^{\varphi}$ — koeficijent rasipanja u datom pravcu koji zaklapa ugao φ sa pravcem upada monohromatskog fluksa zračenja;

n — indeks prelamanja vazduha;

N — broj molekula u 1 cm³ zapremine;

r — rastojanje od sredine u kojoj se vrši rasipanje.

Relejev zakon primenljiv je dotle dok je odnos prečnika čestica i talasne dužine znatno manji od jedinice. Kao što su pokazali radovi M. B. Šulejkina, Relejev zakon je primenljiv za kapljice manje od 0,42 μ . Povećanjem prečnika čestica eksponent stepena talasne dužine se smanjuje (tablica III.7), a takođe se menja i koeficijent A:

$$\varepsilon_{\lambda} = \Delta_{\lambda}^{-k}. \quad (\text{III. } 16)$$

T a b l i c a III. 7

Promena koeficijenta k u izrazu (III.16) pri promeni prečnika čestica od kojih se vrši rasipanje

d, (μ)	0,42	0,52	0,59	0,64	0,68	0,71
k	4	3,5	3	2,5	2	1,5

U vezi s tim u slučaju idealnog molekularnog rasipanja formula (III.16) dobije oblik:

$$\varepsilon_\lambda = 0,0082 \lambda^{-4},$$

a u slučaju visinskih uslova za suvu atmosferu biće:

$$\varepsilon_\lambda = 0,012 \lambda^{-3,68},$$

i u slučaju da atmosfera sadrži vlagu u količini 10 mm ekvivalentnog vodenog stuba, biće:

$$\varepsilon_\lambda = 0,0008 \cdot \lambda^{-1,75}.$$

Rasipanje usled difrakcije

U realnoj atmosferi uvek lebde čvrste i tečne čestice čija je veličina jednaka ili veća od talasne dužine zračenja. Rasipanje energije zračenja na njima je vrlo složeno i može da se opiše sledećom matematičkom zavisnošću:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\lambda^2}{2\pi} f(\alpha \beta), \\ \alpha &= \frac{2\pi s}{\lambda}, \quad \beta = \frac{n}{n_0} \alpha, \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. } 17)$$

gde je:

- R — intenzitet rasute energije zračenja;
- S — prečnik čestice koja vrši rasipanje;
- n; n₀ — indeksi prelamanja čestica i vazduha.

Za razliku od molekularnog rasipanja, gde je polarni dijagram simetričan u odnosu na osnovni zrak i normalni pravac na njega, pri difrakcionom rasipanju vidi se simetričnost samo u odnosu na osnovni zrak, a indikatrisa može da se izrazi jednačinom

$$R_\varphi = 1 + p \cos \varphi + q \cos^2 \varphi. \quad (\text{III. } 18)$$

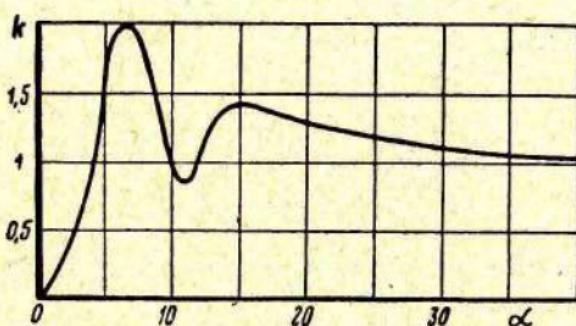
Koeficijenti p i q zavise od materijalnog sastava čestica i njihovih dimenzija. Za maglu sa srednjom specifičnom vlažnošću p = 2,7 a q = 3.

Povećanjem α , tj. odnosa između ρ i λ , dijagram rasipanja se izdužuje unapred. Energija, koja se dobija unazad i sa strane, smanjuje se težeći granici od 16,8% celokupne upadne energije (geometrijsko rasipanje).

Hauton i Stroton su našli da u slučaju difrakcionog rasipanja, koeficijent rasipanja βg predstavlja funkciju:

$$\left. \begin{aligned} \beta g &= 2\pi\rho^2 k, \\ k &= f(\alpha). \end{aligned} \right\} \quad (\text{III. } 19)$$

Pošto k zavisi od dimenzija čestica i talasne dužine, onda pri $\lambda = \text{const.}$ kriva na sl. III.5 — predstavlja zavisnost koeficijenta rasipanja od dimenzija čestica, a pri $\rho = \text{const.}$ zavisnost koeficijenta rasipanja od talasne dužine fluksa zračenja koji se prostire.



Sl. III.5 — Zavisnost $k=f(\alpha)$ u Stroton-Hautonovoj formuli

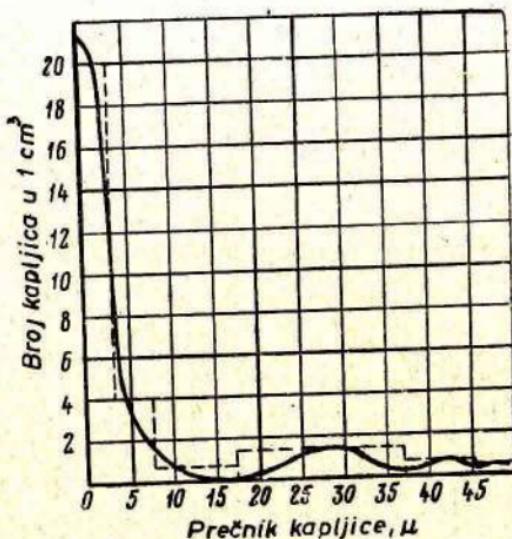
Poseban slučaj difrakcionog rasipanja predstavlja rasipanje fluksa zračenja na sasvim velikim česticama — geometrijsko rasipanje. Za njega su karakteristična dva osnovna pravila:

a) veličina rasute energije ne zavisi od talasne dužine fluksa zračenja koji pada na česticu;

b) energija zračenja odbijena u pravcu osnovnog (upadnog) zraka veća je 24 puta od energije odbijene u suprotnu stranu.

Bez obzira na to, u praksi se opaža dobro prolaženje dugotalasnog infracrvenog zračenja u zamućenoj atmosferi, gde je

osnovno rasipanje geometrijsko. To može da se objasni, prvo, zavisnošću koeficijenta prelamanja čestica od talasne dužine i, drugo, prisustvom u atmosferi, pored krupnih čestica i velike količine sitnih čestica (sl. III.6), što u celosti čini atmosferu prozračnijom za dugotalasna zračenja.



Sl. III.6 — Raspodela kapljica u magli prema dimenzijama

Bolje prolaženje dugotalasnog zračenja kroz zamućenu atmosferu, a time i kroz maglu, potvrđeno je nizom radova bez obzira na prisustvo selektivne apsorpcije u tom spektralnom području.

4. SELEKTIVNA APSORPCIJA ENERGIJE ZRAČENJA

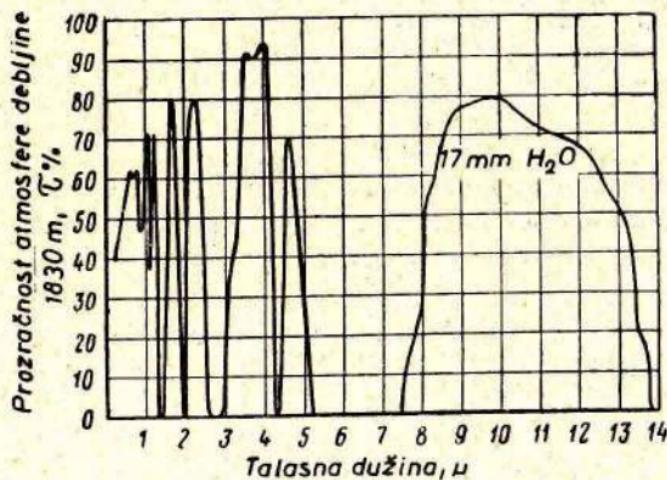
Pri apsorpciji fluksa zračenja u atmosferi, nastaje njegovo slabljenje usled prelaska dela energije zračenja u druge vidove energije: toplotnu, mehaničku i hemijsku. Karakteristično za tako slabljenje je to što je apsorpcija fluksa zračenja u atmosferi selektivna i postoji samo za one talasne dužine čija učestanost

predstavlja rezonantnu učestanost molekula gasova koji obrazuju atmosferu. Po pravilu, u toj selektivnoj apsorpciji fluksa zračenja učestvuju mnogoatomni molekuli gasova i to u prvom redu vodena para (H_2O), ugljen-dioksid (CO_2) i ozon (O_3).

Ozon ima najvažnije pojaseve apsorpcije u udaljenom ultraljubičastom delu spektra i to između $0,2$ i $0,32 \mu$ sa $\lambda_{\max} = 0,255 \mu$. U vidljivoj oblasti spektra od $\lambda_{\max} = 0,6 \mu$ — gde je koeficijent apsorpcije $\beta = 0,068 \text{ cm}^{-1}$ i u infracrvenoj oblasti spektra $4,63 - 4,95 \mu$, $8,3 - 10,6 \mu$ ($\beta = 0,255 \text{ cm}^{-1}$) i $12,1 - 16,4 \mu$.

Ugljen-dioksid ima više pojaseva apsorpcije u infracrvenom delu spektra, od kojih je najjače izražen uski pojas od $4 - 4,8 \mu$ i široki od $12,9 - 17,1 \mu$ sa $\lambda_{\max} = 14,3 \mu$.

Vodena para, koja se nalazi u atmosferi u relativno velikoj količini, ima mnogo širokih pojaseva apsorpcije u vidljivom i infracrvenom delu spektra. U vidljivom delu spektra postoji pet relativno slabih pojaseva apsorpcije vodene pare, i to: od $730,4 - 682 \text{ m}\mu$; od $606 - 586 \text{ m}\mu$; od $578 - 567 \text{ m}\mu$; od $547,8 - 542 \text{ m}\mu$; od $511,1 - 498 \text{ m}\mu$. Takođe i u bližem infracrvenom



Sl. III.7 — Prozračnost atmosfere po Džebiju

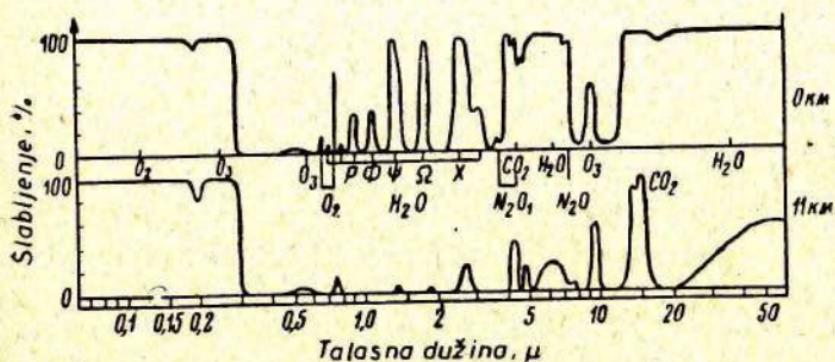
delu spektra postoje jako izraženi i široki pojasevi apsorpcije: Od $0,926 - 0,978 \mu$; $1,095 - 1,165 \mu$; $1,319 - 1,498 \mu$; $1,762 - 1,977 \mu$ i od $2,52 - 2,845 \mu$.



Na slici III.7 — prikazana je prozračnost atmosfere debljine 1.830 m (1 milja), po podacima Džebija, za talasne dužine do 14μ .

Najpotpunija i detaljnija ispitivanja spektralne prozračnosti atmosfere u infracrvenom delu spektra izvršili su Tejlor i Vajt 1956. god. (3). U ovim ispitivanjima proučavana je prozračnost horizontalnog sloja atmosfere pod vodenom površinom. Dužine talasa iznosile su 305 m, 5,47 km i 16,2 km.

Kao rezultat ovih ispitivanja dobijena je precizna struktura spektra prozračnosti atmosfere u talasnem području, od $0,6 - 15 \mu$.



Sl. III.8 — Spektralni koeficijent apsorpcije atmosfere na raznim visinama

Radovi Džebija, Tejlora i Vajta omogućuju da se sa dovoljnom tačnošću odrede oni delovi spektra u čijim je granicama atmosfera više ili manje prozračna za infracrvene zrake.

Tako, na primer, atmosferski vazduh na morskom nivou, koji sadrži vode 13,7—17 mm ekvivalentnog vodenog stuba, ima „prozore“ tj. spektralne zone prozračne za infracrveno zračenje sledećih talasnih dužina:

$0,95 - 1,05 \mu$	$3,3 - 4,2 \mu$
$1,15 - 1,35 \mu$	$4,5 - 5,1 \mu$
$1,5 - 1,8 \mu$	$8 - 13 \mu$
$2,1 - 2,4 \mu$	

Povećanjem nadmorske visine, širina propusnih zona „prozora“ atmosfere se povećava (sl. III.8) usled smanjenja gustine vazduha i količine vodene pare u njemu.

Veoma jednostavan metod proračuna prozračnosti atmosfere u širokom spektralnom području predložili su Elder i Strong [5]. Njihov metod proračuna zasnovan je na eksperimentalno utvrđenoj činjenici, da ukoliko je veći ekvivalentni sloj apsorbera W , utoliko manje dopunsko povećanje apsorpcije izaziva priraštaj ekvivalentnog sloja apsorbera dW . Matematički, ovaj zakon može da se približno izrazi empirijskom jednačinom

$$\tau_{sa} = t_0 - k \lg W. \quad (\text{III. 20})$$

Jednačina (III.20) zasnovana je na pretpostavci da zračenje koje se prostire kroz atmosferu zauzima dovoljno širok spektralni interval, tako da može obuhvatiti podvojene pojaseve apsorpcije. Zato su Elder i Strong podelili spektar infracrvenog zračenja od $0,72 - 14 \mu$ na 8 zona, za koje su određene vrednosti koeficijenta t_0 i k (tabl. III.8).

T a b l i c a III.8

Zone infracrvenog spektra i vrednosti konstanti u jednačini (III.20)

Br. zone	Granice zone [μ]	k	t_0
I	0,72 — 0,92	15,1	106,3
II	0,92 — 1,1	16,5	106,3
III	1,1 — 1,4	17,1	96,3
IV	1,4 — 1,9	13,1	81,0
V	1,9 — 2,7	13,1	72,5
VI	2,7 — 4,3	12,5	72,3
VII	4,3 — 5,9	21,5	51,2
VIII	5,9 — 14	—	—

Za atmosferu u kojoj nema čvrstih i tečnih primesa (prema Elderu i Strongu iznad 2–3 km), ali ima vodene pare, rešenje jednačine (III.20) u zavisnosti od koncentracije vodene pare prikazano je na slici III.9, pri čemu su za određivanje količine vode u atmosferi, na visinama većim od 3000 m, Elder i Strong primenili izraz:

$$W = a_0 \cdot 10^{-\left(3 + \frac{H}{5}\right)} L, \quad (\text{III. 21})$$

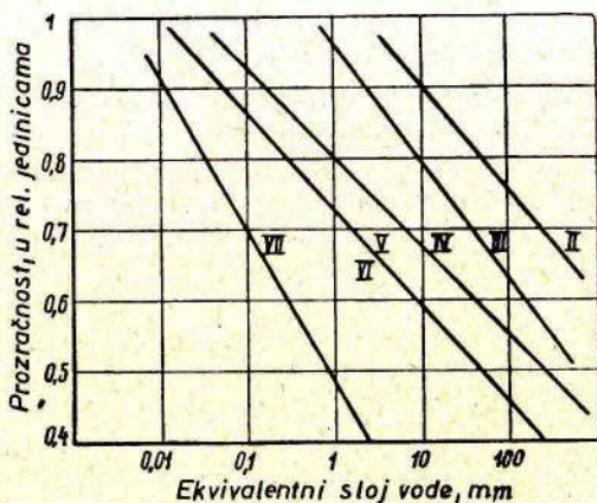
gde je:

a_0 — apsolutna vlažnost pri zemlji, g/cm^3 ;

H — visina, km;

L — rastojanje, m.

Prikazani dijagrami na slici III.9 — omogućavaju da se po određivanju količine vode odredi prozračnost atmosfere usled selektivne apsorpcije vodene pare u bilo kom delu spektra na visinama iznad 3.000 m. Međutim, u jednačinama Eldera i Stronga nije uzeto u obzir slabljenje fluksa zračenja usled magle.



Sl. III.9 — Grafički prikaz jednačine
 $\tau_{sa} = t_0 - k \lg W$

Koristeći podatke mnogih posmatranja za visine iznad 2—3 km (čista atmosfera), Elder i Strong (aproksimirajući zavisnost $\tau_r = f(\lambda)$ za ekvivalentni stub 1 mm) daju formulu za prozračnost atmosfere usled rasipanja u vodenoj pari:

$$\tau_r = (0,998)^W, \quad (\text{III. 22})$$

gde je:

W — sadržaj vode u atmosferi na svakom kilometru putanje zraka.

Prema tome, u skladu sa izrazom (III.12) ukupni koeficijent propusnosti čiste atmosfere može da bude izražen kao:

$$\tau = \tau_{sa} \cdot \tau_r = (t_0 - k \lg W) \cdot 0,998^W. \quad (\text{III. 23})$$

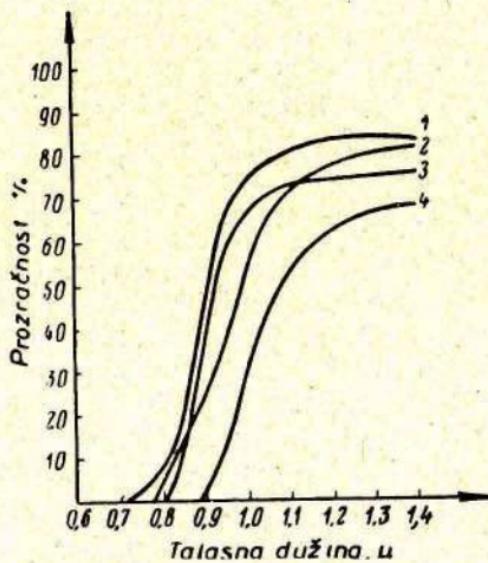
Glava IV

OPTIČKI MATERIJALI I OPTIČKI SISTEMI

I. MATERIJALI

1. INFRACRVENI FILTERI

Filtrom se naziva takva optička naprava pomoću koje je moguće promeniti spektralni sastav i veličinu fluksa zračenja koji pada na osetljivi elemenat.

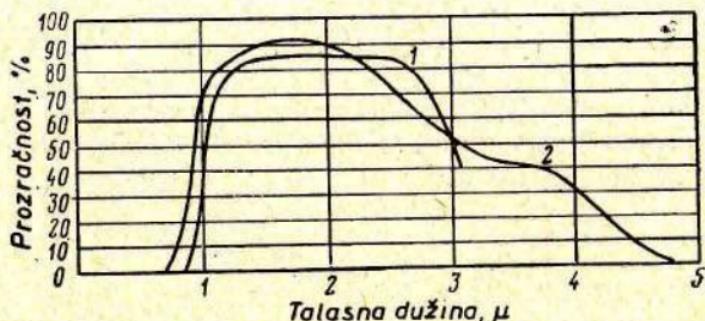


Sl. IV. 1 — Propustljivost infracrvenih filtera:

1 — KS-13 $d = 2 \text{ mm}$; 2 — KS-12 $d = 2 \text{ mm}$; 3 — slojni, $d = 3 \text{ mm}$;
4 — slojni, $d = 4 \text{ mm}$

Filtri mogu biti zasnovani na različitim optičkim pojavama: apsorpciji, interferenciji, selektivnom odbijanju, polarizaciji i sl. Filtri mogu da se izrade kao čvrsti, tečni i gasoviti. U tehnici se najviše primenjuju čvrsti filtri, zasnovani na apsorpciji zračnog fluksa u staklu, plastičnim masama, specijalnim pločicama i prirodnim i veštačkim kristalima.

Za apsorpciju vidljivog zračenja i propuštanja bliskog infracrvenog zračenja ($0,8 - 3 \mu$) najviše se primenjuju filtri od stakla, u koje se kao primese dodaju oksidi mangana ili sulfosele-nidi antimona, a takođe i slojni i polivinilski filtri, na bazi acetil-celuloze ili želatina (sl. IV-1 i IV-2).

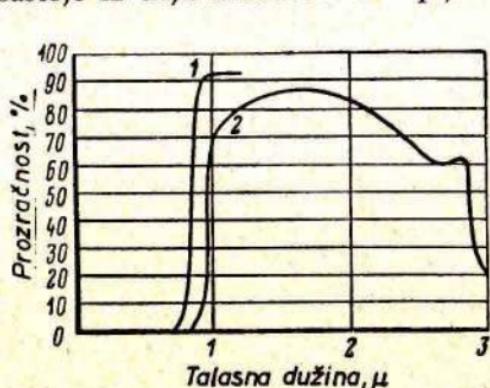


Sl. IV.2 — Propustljivost stakala IKS-1 $d = 2 \text{ mm}$ (1)
i manganskog $d = 2 \text{ mm}$ (2)

Filtri treba da imaju maksimalnu integralnu propustljivost u infracrvenoj oblasti spektra i minimalnu — u vidljivoj. Pored toga, poželjno je da prednja ivica spektralne krive propustljivosti bude po mogućnosti što strmija. U tom pogledu su slojni filtri unekoliko bolji od staklenih. Međutim, stakleni duže traju, čvršći su, termički postojaniji i otporniji na vlagu, a takođe i tehnički povoljniji za proizvodnju.

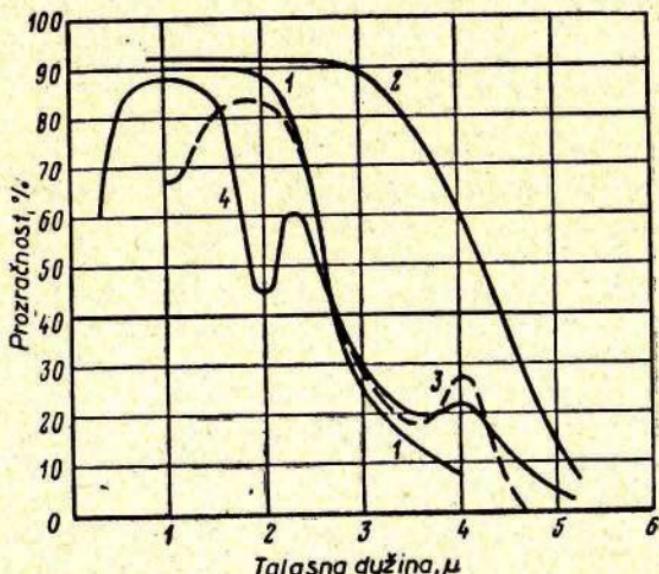
Za filtraciju vidljivog zračenja uspešno se mogu primeniti želatinsko-stakleni filtri (Sl. IV.3), koji predstavljaju sloj obojenog želatina, smeštenog između dve staklene pločice. Ovakvi filtri imaju strmu prednju ivicu spektralne karakteristike i visoku prozračnost u IC — oblasti spektra. Međutim, oni su osetljivi na

temperaturne promene i imaju lošu postojanost na vlagu, jer se sastoje iz triju međusobno slepljenih elemenata.



Sl. IV.3 — Propusljivost želatinsko-staklenih filtera firme „Fopmen-Kodak“ (1) i GOI № 2128/6680 $d = 4$ mm (2)

Za odstranjivanje vidljivog i bliskog infracrvenog zračenja primenjuju se i praškasti filtri, koji predstavljaju osnovu prozračnu

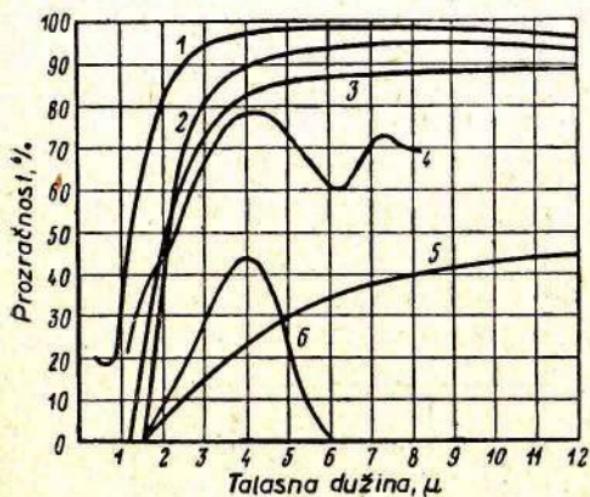


Sl. IV.4 — Propusljivost stakala:

ogledalskog (1), kvarcnog (2), prozorskog (3) i monokristala kvarca (4)

u potreboj spektralnoj oblasti (pločicu *silvina* ili kamene soli), na koju se isparavanjem u vakuumu nanese sloj praška od metala ili poluprovodnika.

Princip rada takvih filtera zasnovan je na rasipanju vidljivog i bliskog infracrvenog zračenja na česticama čije su veličine srazmerne talasnim dužinama. Takvi će filtri biti neprozračni za zračenja talasnih dužina, manjih od dimenzija čestica praškastog sloja, a prozračni za talasne dužine veće od dimenzija čestica.



Sl. IV.5 — Propustljivost praškastih filtera:
1 — zlatno crnilo na silvinu;
2 — selen na silvinu; 3 — telurno crnilo na silvinu; 4 — magnezijum-oksid na liskunu;
5 — bizmutno crnilo na silvinu;
6 — magnezijum-oksid na staklu ($d = 0,1 \text{ mm}$)

Utvrđeno je da za propuštanje energije zračenja u talasnom području od $2-7,5 \mu$, čestice praškastog filtra moraju imati dimenzije od $0,22$ do $2,5 \mu$ (2). Po pravilu, prašak koji vrši rasipanje treba da bude prozračan za infracrvene zrake. Međutim, kao što se vidi sa sl. IV.5 i metalno crnilo može da bude prozračno za infracrvene zrake.

U praškaste filtre treba ubrojiti i filtre od srebro-hlorida sa crnim slojem srebro-bromida. Oni su potpuno neprozračni za vidljive zrake, ali odlično propuštaju zračenja u spektralnom području od $1-3 \mu$ (3).

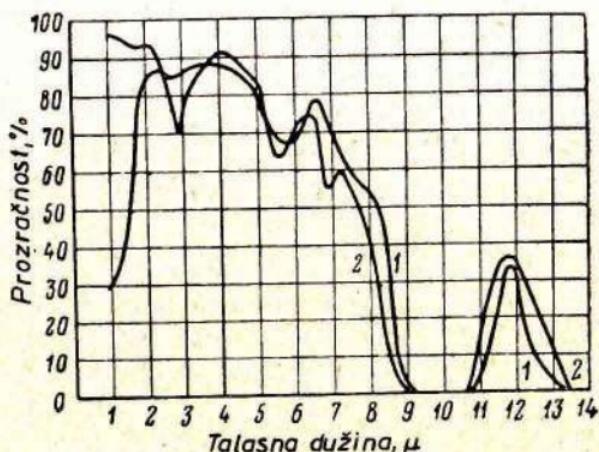
Kao podloga za mnoge praškaste filtre upotrebljava se liskun, ako se želi da se izdvoji zračenje talasne dužine od $2-8 \mu$. Spektralna propustljivost dve vrste liskuna prikazana je na slici IV.6.

T a b l i c a IV.1

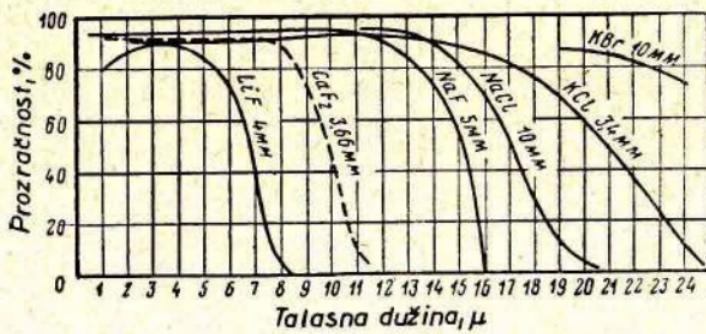
Osnovna svojstva nekih kristala

Materijal	λ_0 (μ)	Koefic. pre- lamanja nD	Rastvorjiv- ost u vodi $\gamma, \text{g}/100 \text{ cm}^3$	S v o j s t v a
KBr	27	1,55	53,48	Bezbojni kockasti kristali. Higroskopni, meki, lako se grebu. Rastvaraju se u špiritusu i glicerinu. Izrađuju se do prečnika od 190 mm. Cena srednja.
NaCl	20	1,54	35,7	Bezbojni kockasti kristali. Higroskopni. Rasipaju se, lako se grebu. Rastvaraju se u glicerinu. Izrađuju se do prečnika 190 mm. Cena niska.
LiF	85	1,39	0,27	Bezbojni kubni kristali. Rasipaju se, lako se grebu. Pri poliranju se ljušte po površini. Rastvaraju se u kiselinama. Izrađuju se do prečnika 185 mm i više. Sirovina za veštačko dobijanje je deficitarna. Cena srednja.
CaF ₂ [fluorit]	11	1,43	0,002	Bezbojni kockasti kristali. Tope se, lako se grebu. Počinju da propuštaju na 0,324 μ . Rastvaraju se u rastvorima soli NH ₄ . Izrađuju se dimenzija 150 mm. Cena srednja.
KCl [silvin]	24	1,49	34,7 (20°C)	Bezbojni kockasti kristali. Higroskopni, lako se grebu. Rastvaraju se u alkalijama, etrima i glicerinu. Imaju pojaseve apsorpcije oko 3 i 7 μ . Dobri kristali se retko sreću. Cena srednja.
KJ	31	1,67	127,5	Bezbojni kockasti kristali. Vrlo higroskopni. Teško se poliraju. Vrlo su meki i lako se grebu. Rastvaraju se u špiritusu i amonijaku. Određuju se do prečnika 190 mm. Cena srednja.
C ₈ Br	40	1,7	124,3 (25°C)	Bezbojni kockasti kristali. Higroskopni. Meki, lako se grebu. Rastvaraju se u špiritusu. Izrađuju se do prečnika 45 mm. Cena srednja.
C ₈ J	50	—	—	Bezbojni kockasti kristali. Vrlo higroskopni.

Ovi filtri omogućavaju da se izdvoje relativno uska područja infracrvenog dela spektra. Ako je neophodno da se radi sa dugo-talasnim infracrvenim zračenjem, onda je celishodno da se prime-



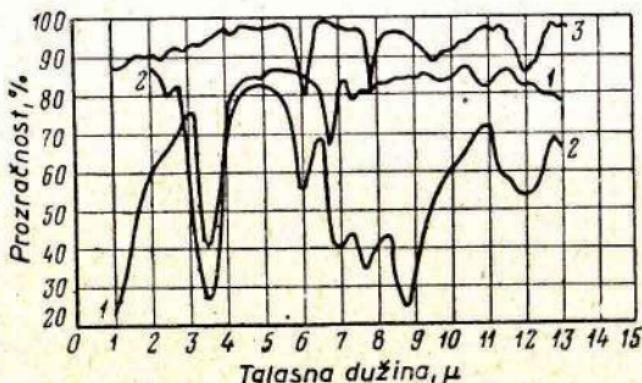
Sl. IV.6 — Propustljivost biotita $d = 0,4$ mm (1)
i muskovita $d = 0,2$ mm (2)



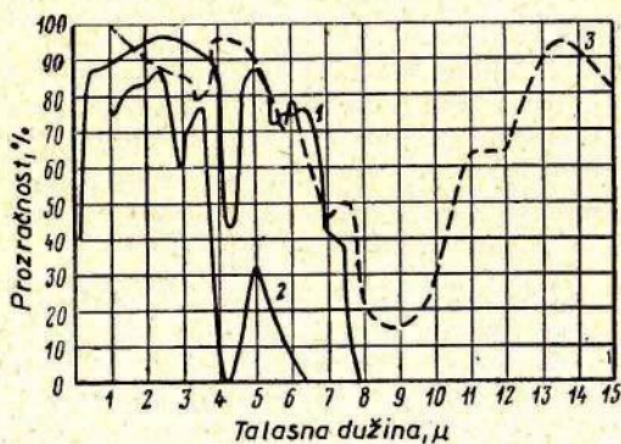
Sl. IV.7 — Propustljivost nekih kristala

njuju materijali kod kojih se sopstvene normalne učestanosti oscilovanja molekula nalaze u udaljenoj infracrvenoj oblasti spektra.

Takvi materijali su uglavnom kristali: kalijum-bromid, kalijum-jodid, kamena so, litijum-fluorid, kalcijum-fluorid, kalijum-hlorid, cezijum-bromid i dr.



Sl. IV.8 — Propustljivost zaštitnih slojeva:
 1 — polietilena $d = 0,025 \text{ mm}$; 2 — hidrohlorida kaučuka
 $d = 0,045 \text{ mm}$; 3 — nitroceluloze $d = 0,5 \text{ mm}$



Sl. IV.9 — Propustljivost teflona:
 1 — debljine $0,2 \text{ mm}$; 2 — debljine 4 mm i 3 — vinilnog laka
 $d = 20 \mu$

Njihova osnovna svojstva i spektralne krive propustljivosti prikazane su u tablici IV.1 — i na sl. IV.7.

Karakteristika nabrojanih kristala je visoka higroskopnost, zbog koje se moraju pokrivati zaštitnim slojevima, koji znatno oslabljuju infracrveno zračenje i kvare optička svojstva elemenata uređaja. Kao zaštitni slojevi najčešće se primenjuju slojevi iz hidrohlorida, kaučuka, poluetilena, teflona, vinilnog laka i drugih materijala (5), čija je spektralna prozračnost prikazana na sl. IV.8 i IV.9.

2. MATERIJALI ZA ZAŠTITNA STAKLA I AERODINAMIČKE KAPE PROJEKTILA (POKLOPCI)

Materijali od kojih se izrađuju zaštitna stakla i poklopci za uređaje u infracrvenoj tehnici, pored visokog koeficijenta prozračnosti u neophodnom talasnom području, moraju biti veoma čvrsti, termički stabilni i postojani na vlagu, moraju zadržavati svojstva za duže vreme i moraju biti podesni za izradu detalja različitog oblika.

Zato materijali razmotreni u § 1, izuzimajući staklo, iako se mogu upotrebljavati za ulazne prozore prijemnika fluksa zračenja, ipak su neophodni za zaštitna stakla i poklopce za uređaje u infracrvenoj tehnici.

U poslednje vreme izvršena su obimna ispitivanja koja su omogućila da se dobiju novi veštački materijali koji poseduju dobru prozračnost u širokom dijapazonu talasnih dužina infracrvene oblasti spektra sa dobrim eksploatacionim osobinama.

Karakteristike takvih materijala prikazane su u tablici IV.2 [4] i slici IV.10.

Staklo „servofraks“, razrađeno u SAD, primenjuje se za izradu sočiva i objektiva sa minimalnom sferičnom aberacijom u dijapazonu od talasnih dužina od $2-5 \mu$. Da bi smanjili gubitke usled odbijanja na površinu sočiva, nanet je antirefleksni pokretač [9].

Srebro-hlorid u obliku listova [16] i u drugim oblicima, koristi se tamo gde se zahteva nehigroskopnost i nerastvorljivost u vodi. Koeficijent prozračnosti srebro-hlorida do 18μ iznosi 80%. Povećanje prozračnosti može se postići antirefleksionim pokrivačem. Istina, pri tom se stvaraju naknadni pojasevi apsorpcije, koji nastaju usled apsorpcije sloja polistirena [17].

T a b l i c a IV.2

Osnovna svojstva nekih materijala koji se primenjuju za izradu poklopaca za uređaje u infracrvenoj tehnici

Materijal	λ_0, μ	nd	Rasvorljivost u vodi $\gamma, g/100 \text{ cm}^3$	S v o j s t v a
Staklo	3	1,5—1,9	0	Homogeno. Bezbojno. Lako se seče, šlifuje i polira. Neotrovno. Izrađuju se u neograničenim dimenzijama. Cena niska.
Staklo „servofraks“ Al ₂ S ₃ [9]	12 *)	2,59	0	Homogeno, crveno staklo. Neotrovno. Omekšava na + 195°C. Rastvara se u alkalijama. Dimenzije se ograničavaju iz konstrukcijskih razloga. Može da se primeni za sve tipove optičkih sistema.
AgCl	23	2,07	0	Bezbojni kockasti kristali. Izotropni, ne rasipaju se. Meki su. Omekšavaju pri niškim temperaturama. Postaju tamni na sunčevom svetlu. Izazivaju koroziju metala. Rastvaraju se u NH ₄ OH, Na ₂ S ₂ O ₃ , KCN. Izrađuju se u dimenzijama do 100 mm. Cena im je visoka.
Topljeni kvarc SiO ₂	4	1,43	0	Izotropan. Ima odlična tehnička i toplotna svojstva. Rastvara se u HF. Dimenzije su ograničene optičkom homogenošću. Cena srednja.
Safir Al ₂ O ₃ [10]	5,5	1,77	0	Veštački heksagonalni kristali. Ne rastvaraju se, teško se grebu. Odlične mehaničke čvrstoće. Toplotna svojstva odlična. Maksimalne dimenzije do 125 mm. Cena visoka.
Periklaz MgO [8]	10	—	0	Veštački izotropni minerali. Mehanički veoma postojani. Vremenom po površini tamni, zbog obrazovanja Mg(OH) ₂ . Cena mu je srednja.

*) Ovde treba da stoji As₂S₃ — Prim. prev.

Materijal	λ_0, μ	nd	Rastvorljivost u vodi $\gamma, g/100 \text{ cm}^3$	Svojstva	
Silicijum (12, 13, 14)	20	3,5	0	Kubni kristali, čeličnosive boje. Tačka topljenja je visoka. Rastvara se u HF i HNO ₃ . Izrađuje se u dimenzijama do 40 mm. Cena mu je visoka.	
Germanijum (14, 15)	40	—	0	Kristali čeličnosive boje sa tamnoplavim prelivom. Dobro se obraduju. Mehanički su postojani. U oblasti 1,5—15 μ prozračnost nije manja od 40%. Cena visoka.	
KRS-5 Ta Br + Ta J	38	2,63	0,02	Crveni kubni kristali. Ne rastapaju se. Lako se grebu — teško se poliraju. Koeficijent širenja je veliki. Toksični; rastvorljivi u HNO ₃ i u carskoj vodi. Izrađuju se u dimenzijama do 125 mm. Cena visoka.	
KRS-6 Ti Br + Ti Cl	—	—	—	Optička svojstva bolja nego kod KRS-5. Toksičan. Cena mu je vrlo visoka.	

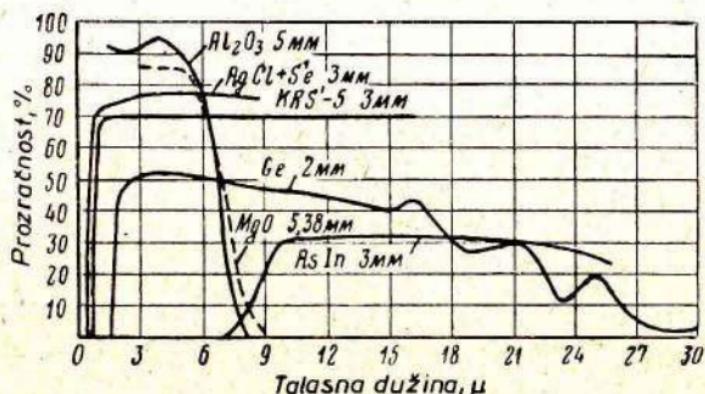
Nedostatak srebro-hlorida je što se ne može primenjivati na dnevnom svetlu. Da bi se otklonilo potamnjenje srebro-hlorida, njegova se površina pokriva antimonom ili selenom, što dovodi do izvesnog porasta odbijanja fluksa zračenja usled veće vrednosti koeficijenta prelamanja antimona i selen, nego srebro-hlorida.

Veštački safir primenjuje se za čone kalote reaktivnih projektila sa infracrvenom glavom za samonavodenje [10]. Danas se osvajaju serije čeonih kalota prečnika 140—175 mm. Sintetički safir propušta oko 90% zračenja talasne dužine do 4 μ i 50% na talasnoj dužini 6 μ .

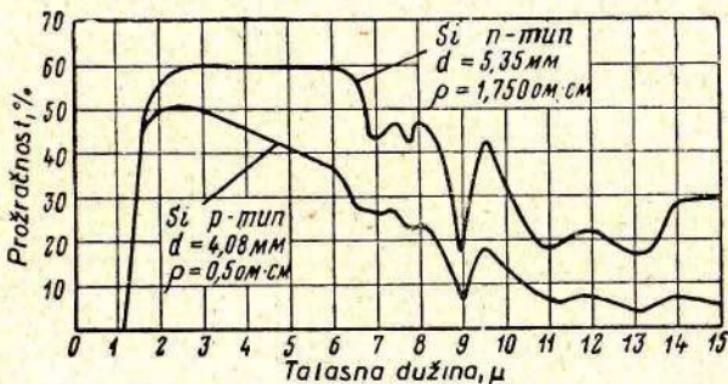
Po tvrdoći, veštački safir je kao almaz i zadržava je do temperaturu od 1.800°C (slika IV.10).

Ozbiljni konkurenti kvarcu, safiru i srebro-hloridu kao materijalima za uređaje u infracrvenoj tehnici, postaju germanijum i silicijum, bez obzira na relativno visoku cenu njihovog dobijanja. Ovi, u optičkom pogledu vrlo pogodni elementi, poseduju

dobru prozračnost u širokom spektralnom dijapazonu, a omogućuju nanošenje antirefleksnih slojeva na svojim površinama i imaju dobra termička i mehanička svojstva [12, 13, 14 i 15].



Sl. IV.10 — Propustljivost nekih materijala koji se upotrebljavaju za poklopce IC-sistema

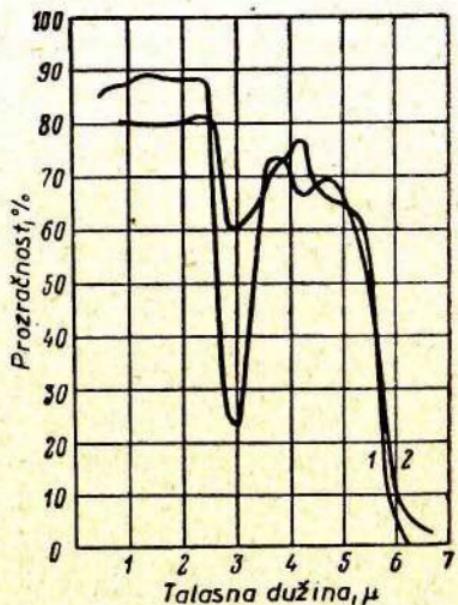


Sl. IV.11 — Propustljivost silicijuma

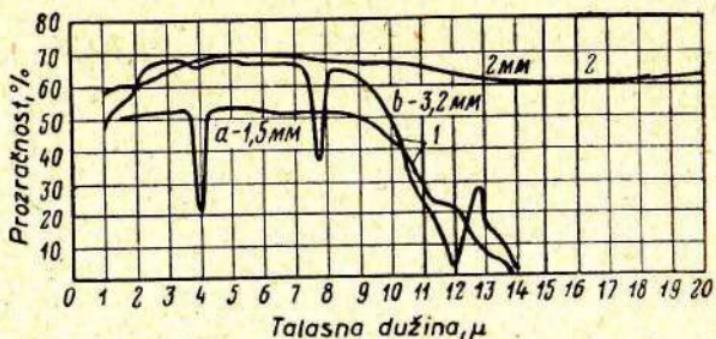
Uporedno sa kristalnim materijalima, široku primenu su našli i staklasti materijali.

Telurna crna stakla [16] koja sadrže od 20 do 81,5% TeO_2 , a kao primeće — CaO , MnO_2 i V_2O_5 , propuštaju u talasnom području od 0,8 — 5μ do 70% energije zračenja. Analogna svojstva imaju telurna stakla $\text{TeO}_2 - \text{PbO} - \text{ZnF}_2$ [17], olovno-germanijumska stakla tipa G-135, kalcijum-aluminijumsko-

silikatna stakla tipa C-1458 i njima ekvivalentna stakla C-1434 [18] — slika IV.12.



Sl. IV.12 — Propustljivost stakala:
1 — G-135 debljine 2 mm; 2 — C-1434 debljine 2 mm



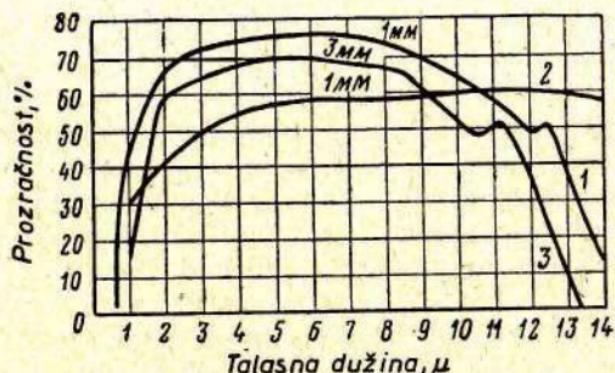
Sl. IV.13 — Propustljivost stakala:
1 — Arsen-sulfidnog; 2 — arsen-selenidnog

Analogne krive propustljivosti imaju staklasti materijali na bazi aluminata kalcijuma [19], koja u talasnom području

$2-5 \mu$ imaju koeficijent prozračnosti do 90% i koeficijent prelamanja za talasnu dužinu $4,26 \mu$, $1,592 - 1,753$.

Materijali staklaste strukture sa širim dijapazonom spektralnog koeficijenta propustljivosti, napravljeni su na bazi selen-a, arsena i sumpora [17, 20].

Arsen-sulfidna stakla (sl. IV.13) prozračna su do 14μ , i u slučaju kada sadrže do 20% sumpora propuštaju do 50% fluksa zračenja (kriva 1a), a pri 60% sumpora koeficijent prozračnosti zračnog fluksa se povećava do 65% (kriva 1b).



Sl. IV.14 — Propustljivost:

1 — Arsen-pentosulfida; 2 — arsen-pentoselenida; 3 — arsen-trisulfida

Staklasti selen (kriva 2) ima skoro ravnomernu prozračnost u talasnom području od $1-21 \mu$, jednaku $60-65\%$.

Najbolje su se pokazala stakla od arsen-pentosulfida i arsenpentoselenida, čije su spektralne krive propustljivosti prikazane na slici IV.14.

Arsen-trisulfid, koga je dobio Frerih, predstavlja staklastu materiju tamnocrvene boje. Pri normalnoj temperaturi koeficijent širenja iznosi $26 \cdot 10^{-6}$, tačka omekšanja je $+ 195^\circ\text{C}$, rastvorljivost u vodi pri normalnoj temperaturi $5 \cdot 10^{-5} \text{ gr}/100 \text{ cm}^3$, gustina $3,2 \text{ gr}/\text{cm}^3$. Koeficijent propustljivosti u spektralnoj oblasti od $1-12 \mu$ — jednak je 70%. Staklo je tvrdo, ali se lako šlifuje.

Arsen-pentoselenidna i arsen-pentosulfidna stakla na izgled su crna, sa blještavom površinom, nerastvorljiva u vodi pri nor-

malnoj temperaturi (na 100°C njihova rastvorljivost iznosi $0,0017 \text{ gr}/\text{cm}^3$), imaju gustinu reda $4,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ i tačku omekšanja oko 200°C . U talasnom području od $0,6-13 \mu$ prozračnost stakala iznosi $60-65\%$.

3. REFLEKTUJUĆI POKRIVAČI

U infracrvenim uređajima često se primenjuju optički sistemi sa ogledalima. Osnovno njihovo preim秉stvo u poređenju sa soćivima jeste odsustvo hromatske aberacije, što omogućava da se koristi jedan jedini objektiv u vrlo širokom spektralnom području. Pored toga, cena objektiva sa ogledalom je niža od cene objektiva sa soćivom.

Potrebno je da ogledala imaju dve osnovne činjenice: visoki koeficijent odbijanja u potrebnom spektralnom području i dobar kvalitet lika. Prvo se postiže pogodnim izborom reflektujućeg pokrivača, a drugo kvalitetom izrade podloge (staklene ili metalne) određenog oblika: paraboloid, hiperboloid, elipsoid, deo sfere, ili, konačno, ravan. Kao najrasprostranjeniji materijal za podlogu služi staklo, koje se dobro obrađuje i omogućuje dobijanje refleksionih površina visokog kvaliteta.

Spoljna površina ogledala pokriva se, metodom isparavanja u vakuumu, gustim slojem metala, koji dobro odbija infracrvene zrake, jer je moć odbijanja slojeva nanesenih u vakuumu uvek veća nego kod poliranih metalnih površina. U infracrvenoj spektralnoj oblasti visoku moć odbijanja imaju srebro, zlato, bakar, rodijum i aluminijum (sl. IV. 15). Za talasne dužine veće od 4μ , koeficijent odbijanja ovih pokrivača može se odrediti po formuli:

$$\rho = 1 - 0,365 \sqrt{\frac{r}{\lambda}}, \quad (\text{IV. } 1)$$

gde je:

r — specifični otpor metala $(\Omega/\text{mm}^2)/\text{m}$;

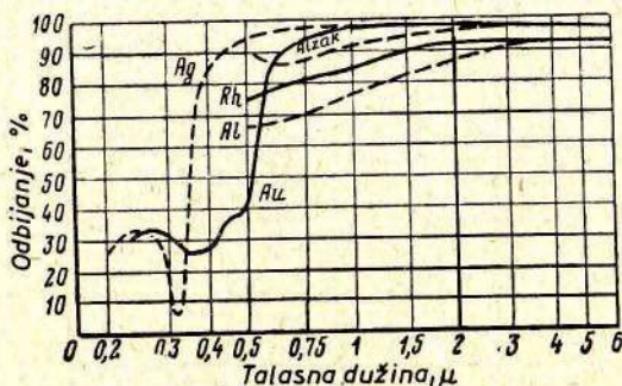
λ — talasna dužina μ .

Srebro u infracrvenoj oblasti spektra ima koeficijent odbijanja 99% , ali samo u sveže napravljenom sloju. Tokom vremena

sloj tamni i moć odbijanja se jako smanjuje. Pored toga, zbog relativno lošeg spajanja sa stakлом, fizička čvrstoća sloja je neznatna.

Legura aluminijuma i magnezijuma ($69\% \text{ Al} + 31\% \text{ Mg}$) je stabilnija nego srebro, a koeficijent odbijanja u infracrvenom delu spektra dostiže 92%.

Zlato i platina imaju takođe u infracrvenom delu spektra koeficijent odbijanja kao i srebro, a po svojim hemijskim i fizičkim stabilnostima nemaju sebi ravnog, osim rodijumskih pokrivača. Sloj zlata je vrlo podesan, ako je potrebno da se smanji odbijanje vidljivog zračenja.



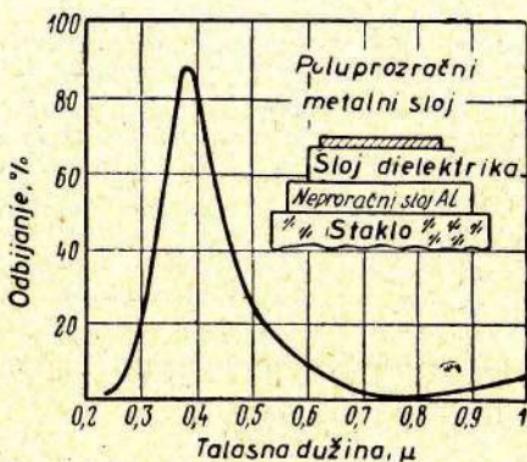
Sl. IV.15 — Spektralni koeficijent odbijanja nekih pokrivača

Aluminijum ima visoki koeficijent odbijanja u celom optičkom delu elektromagnetskog spektra — od vakuumskog ultra-violetnog do daleke infracrvene oblasti. Pošto se dobro spaja sa stakлом i ima zaštitni oksidni sloj, refleksni aluminijumski sloj ima dobru mehaničku čvrstoću (pokrivač može da se pere vodom i sapunom) i ne tamni na vazduhu. Debljina zaštitnog oksidnog sloja dostiže 100 Å. Za povećanje njegove čvrstoće primenjuje se veštačko naprašenje tankim slojem SiO_2 , koji kad se zagревa do 450°C , u roku od 40 časova, i dejstva 10%-tnog

rastvora NaOH, u toku 1 časa obezbeđuje očuvanje i refleksione moći sloja.

Često je poželjno iskoristiti refleksioni element kao filter za odsecanje nepotrebnog dela talasnog područja, ili za izdvajanje potrebnih pojaseva zračenja. Radi toga su u poslednjim godinama razrađene različite kombinacije selektivno refleksionih slojeva [21].

U najprostijem obliku takvi refleksioni filtri sastoje se od dobro reflektujućeg neprozračnog metala (npr. aluminijuma), dielektričnog međusloja i poluprozračnog sloja metala. Maksimum odbijanja nalazi se na onim talasnim dužinama za koje je debljina međusloja jednaka parnom broju četvrtine talasne dužine. Mi-



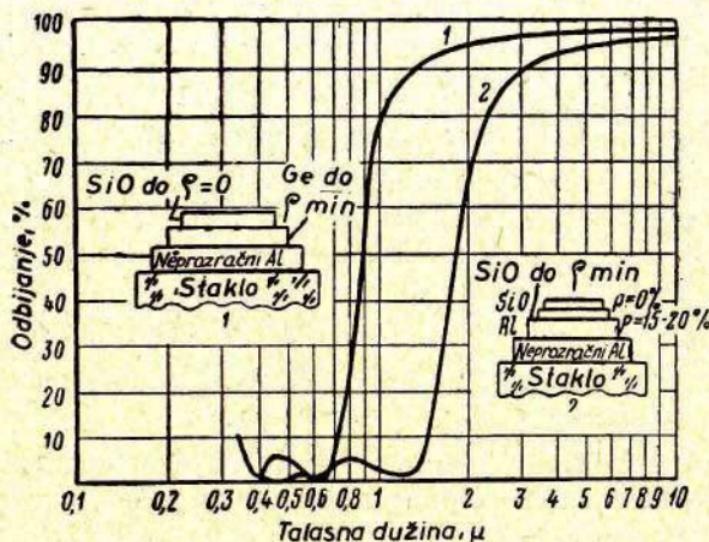
Sl. IV.16 — Konstrukcija i spektralni koeficijent odbijanja selektivnog refleksionog filtra

nimum odbijanja se dobije za one talasne dužine za koje je debljina međusloja ravna neparnom broju četvrtina talasne dužine. Koeficijent refleksije (odbijanja) na maksimumu, jednak je koeficijentu odbijanja neprozračnog metala, a odbijanje na minimumu može se svesti na nulu putem podesnog izbora debljine poluprozračnog metalnog sloja (sl. IV. 16).

Filtri ovakvog tipa izrađuju se za celu optičku oblast elektromagnetnih talasa. Utvrđeno je da se primenom nekoliko pari slojeva, može izraditi vrlo uskopojasni refleksni filter.

Često je neophodno odseći vidljivi i ultraljubičasti deo spektra radi smanjenja uticaja difuznog svetla na uređaj. U tom cilju bile su izrađene dve kombinacije slojeva takvih „tamnih“ ogledala (sl. IV. 17).

Kod prvog tipa aluminijum se pokriva germanijumskim slojem i SiO, pri čemu svaki od slojeva ima debljinu približnu četvrtini talasne dužine. Germanijum se upotrebljava zbog njegove dobre apsorpcije u vidljivom delu spektra i dobre prostiljivosti u infracrvenoj oblasti.



Sl. IV.17 — Konstrukcija i spektralni koeficijent odbijanja „tamnih“ ogledala

U drugom tipu primenjuju se dva pokrivača SiO (razdvjeljena poluprozračnim aluminijumskim slojem), nanesena na neprозрачни sloj aluminijuma.

II. OPTIČKI SISTEMI

4. NAMENA I KLASIFIKACIJA

Optički sistemi su predviđeni za prijem (predaju) i pre rasodelu fluksa zračenja radi njegovog efektivnijeg iskorišćenja.

Oni mogu biti sastavni deo izvora energije zračenja. U tom slučaju optički sistemi služe i za koncentraciju fluksa zračenja u malom talasnom uglu za dobijanje veće svetlosne snage u određenom pravcu i za dobijanje određenih oblika snopa fluksa zračenja.

Ako se optički sistemi primenjuju zajedno s prijemnikom (indikatorom) energije zračenja, onda su oni predviđeni za fokusiranje fluksa zračenja koji pada na optički sistem i njegovo usmeravanje na osetljivi element prijemnika. Blagodareći tome, ozračenost osetljivog elementa može da bude znatno veća od ozračenosti optičkog sistema.

Razlikuju se tri grupe optičkog sistema:

- a) sočivasti ili dioptrijski kod kojih se fluks zračenja pre-raspodeljuje prolaskom kroz sredinu koja prelama;
- b) reflektujući ili katoptrijski, kod kojih se fluks zračenja preraspodeljuje u prostoru odbijanjem od jednog ili nekoliko ogledala različitog oblika;
- c) mešoviti, koji sadrže i sočivaste i reflektujuće sisteme.

Sve tri grupe optičkih sistema široko se primenjuju u infracrvenim uređajima.

Kvalitet optičkih sistema u infracrvenim uređajima umnogome se određuje njihovom moći razdvajanja, koja u mnogim slučajevima mora da bude veoma visoka.

Tako, u vidljivom i bliskom infracrvenom području spektra, gde su osetljivi element oči, fotografска ploča ili elektronsko-optički pretvarači, koji imaju moć razdvajanja nekad i manji od 10μ , od optičkih sistema se zahteva moć razdvajanja od najmanje $40 - 50$ linija na 1 mm. Počev od 2μ (talasne dužine i više, moć razdvajanja savremenih osetljivih elemenata je reda veličine 100μ i više, što unekoliko smanjuje zahtev za moći razdvajanja optike. Ta okolnost daje mogućnost da se u nekim tipovima infracrvenih uređaja primene prostiji optički sistemi.

Moć razdvajanja idealnog optičkog sistema ograničena je difrakcionom slikom oko lika posmatrane tačke. Prečnik lika tačkastog izvora u tom slučaju može se odrediti iz odnosa

$$\frac{d}{\lambda} = 1,22 \frac{f}{D}, \quad (\text{IV. } 2)$$

gde je:

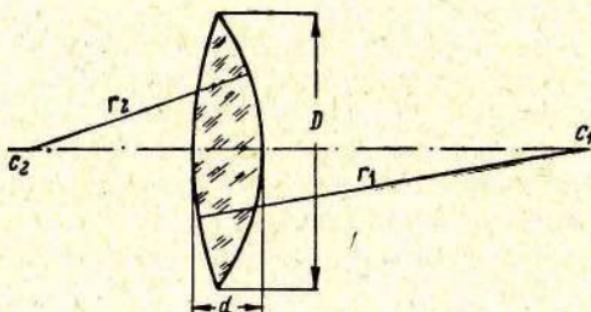
- d — prečnik centralnog maksimuma lika tačke u onim jedinicama u kojim je i λ ;
- f — efektivna žižna daljina objektiva za dato λ ;
- d — prečnik ulaznog otvora.

Navedeni izraz pokazuje da povećanjem λ i f opada moć razdvajanja optičkih sistema.

Kod stvarnih optičkih sistema moć razdvajanja još više se kvari zbog njima svojstvenih izobličenja (aberacije).

5. OPTIČKI SISTEMI SA SOČIVIMA

Svaki optički sistem sa sočivima predstavlja određeni sklop sočiva, zato se i osnovni zakoni funkcionisanja takvog sistema mogu objasniti na primeru rada jednog sočiva.



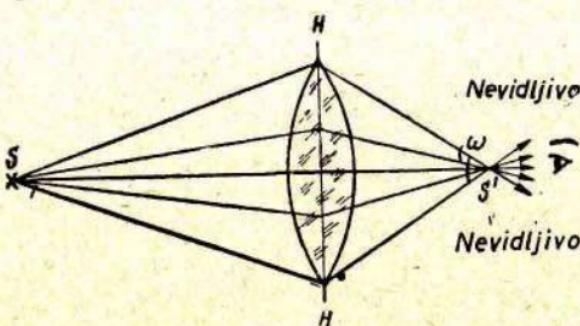
Sl. IV.18a — Parametri sočiva

Sočivom se naziva detalj od bilo kakvog prozračnog materijala, ograničen jednom ili dvema sfernim površinama čiji se centri nalaze na jednoj liniji koja se naziva optičkom osom sočiva (sl. IV. 18a).

Za opis geometrijskih slika i svojstava sočiva dovoljno je znati poluprečnike krivine površine r_1 i r_2 , osnu debljinu d , prečnik D i indeks (koeficijenat) prelamanja materijala n , od kojeg je napravljeno sočivo.

Kod sabirnih sistema (objektiva) osnovni zadatak optike je dobijanje lika svetlećih tačaka ili prostranih predmeta.

Lik svetlećih tačaka, dobijen pomoću sočiva, razlikuje se od stvarnih izvora po tome što se iz stvarnog izvora fluks zračenja



Sl. IV.18b — Posmatranje lika svetleće tačke kroz sočivo

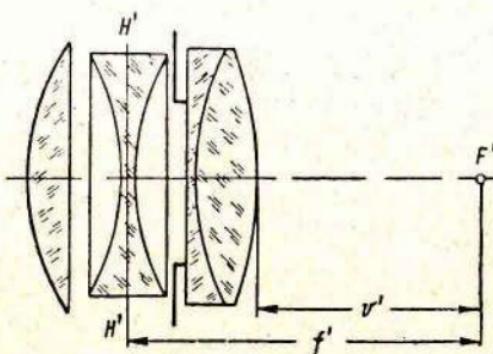
rasprostire na sve strane i može da se otkrije sa svih strana, a iz njegovog lika, dobijenog pomoću sočiva, fluks zračenja se rasprostire u ograničenom prostornom uglu. Veličina tog prostornog ugla određuje se relativnim otvorom sočiva. Tako, na primer, ako se smanji prečnik sočiva dijafragmom, onda će telesni ugao biti sužen i lik će moći da se posmatra samo u jednom određenom pravcu (Sl. IV.18b).

U razmotrenom primeru, izvor zračenja S nalazi se na glavnoj optičkoj osi sočiva, a njegov lik S' dobija se takođe na glavnoj optičkoj osi u tzv. tački sprege. Ako se izvor zračenja udalji od sočiva toliko da se njegovi zraci koji padaju na sočivo mogu smatrati paralelnim, onda će lik da se nađe u tački koja se naziva glavnom žižom F.

Rasipanje od glavne ravni sočiva HH do glavne žiže naziva se glavnim žižinim rastojanjem f'. Glavno žižino rastojanje f' zavisi od veličine i smera radijusa krivine, indeksa prelamanja materijala i debljine sočiva.

$$f' = \frac{n r_1 r_2}{(n-1)[n(r_2-r_1)+(n-1)d]} \quad (\text{IV. } 3)$$

Na šemama objektiva obično se pokazuju veličine f' i V' (temena-žižna duljina). Ovo omogućava da se nađe glavna žiža F^1 i nanoseći na levu stranu od nje, glavno žižino rastojanje f^1 , dobija se položaj glavne ravni $H'H'$ (sl. IV.19).



Sl. IV.19 — Određivanje glavne ravni objektiva

Uvođenje pojma glavne ravni $H'H'$ omogućava da se zameni stvarno prelamanje zraka na svim površinama sočiva objektiva jednim fiktivnim, i da se time ostvari prostija konstrukcija lika.

Osvetljenost lika stvorenog objektivom proporcionalna je svetlosnoj jačini, tj. osvetljenost lika se uvećava povećanjem prečnika i smanjenjem žižne duljine objektiva:

$$F = C(D/f)^2. \quad (\text{IV. } 4)$$

U vezi s tim treba razmotriti pitanje o blesku lika posmatranog objekta, dobijenog pomoću objektiva. Ovde se javljaju dva karakteristična slučaja: posmatranje prostranog objekta i posmatranje tačkastog izvora zračenja (sl. IV.20).

U prvom slučaju, na rastojanju 1 od objektiva sa površinom ulaznog otvora S , nalazi se telo površine σ . Lik ovog tela površine σ , obrazuje se objektivom na rastojanju l_1 :

$$\frac{\sigma}{f^2} = \frac{\sigma_1}{f_1^2}. \quad (\text{IV. } 5)$$

Fluks zračenja, usmeren od tela ka objektivu, može da bude određen formulom:

$$\Phi = B\sigma\omega,$$

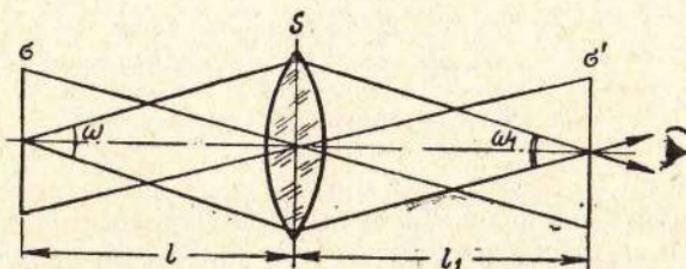
gde je:

B — blesak površine;

ω — S/l^2 — prostorni ugao u kome se rasprostire fluks

Φ pa sleduje:

$$\Phi = \frac{B\sigma S}{l^2}. \quad (\text{IV. } 6)$$



Sl. IV.20 — Uz proračun bleska lika

Izlazeći iz objektiva, fluks zračenja smanjuje svoju veličinu usled gubitaka u objektivu

$$\Phi_1 = \tau\Phi.$$

Ovaj fluks formira posmatrani lik površine σ , i bleska B_1 :

$$\Phi = \frac{B_1\sigma S}{l_1^2} = \frac{\tau B\sigma S}{l^2},$$

Odakle proizilazi

$$B_1 = \tau B. \quad (\text{IV. } 7)$$

Prema tome blesak lika obrazovanog objektivom uvek je manji od bleska posmatranog objekta ($\tau < 1$).

Osvetljaj lika, obrazovanog u ovom slučaju objektivom, može da se izračuna po formuli:

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\sigma_1} = \frac{B_1 S}{l^2} = \frac{\tau B S}{l^2}. \quad (\text{IV. 8})$$

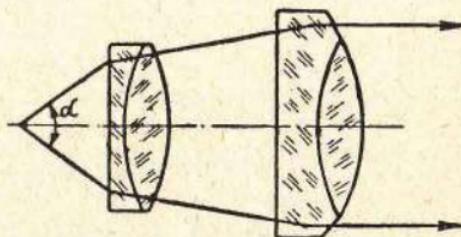
Ako se tačkasti izvori zračenja posmatraju pomoću optičkih uređaja, onda je moguće da se dobije i pojačanje bleska lika. Ali u tom slučaju odlučujuću ulogu ima osobenost funkcionišanja očiju pri posmatranju prostranih i tačkastih objekata.

Pri posmatranju tačkastog izvora ceo njegov lik pada na jedan osetljiv elemenat mrežice oka, nezavisno od toga da li se posmatra golim okom ili kroz optički pribor.

Pri posmatranju izvora golim okom, svetlosni fluks koji pada na element mrežice proporcionalan je površini zenice oka. Ako se, pak, izvor posmatra kroz optički pribor, onda će u oko da padne svetlosni fluks koji je proporcionalan površini objektiva. Zahvaljujući tome, blesak lika će porasti proporcionalno odnosu kvadrata prečnika objektiva i zenice oka. A pošto blesak pozadine kao i prostranog objekta ostaju nepromjenjeni, istovremeno će da se poveća kontrast lika.

Vrlo često se optički sistemi karakterišu, naporedo s pojmom „relativni otvor“ i „svetlosna jačina“, i pojmom „apertura optičkog sistema“ (Sl. IV.21).

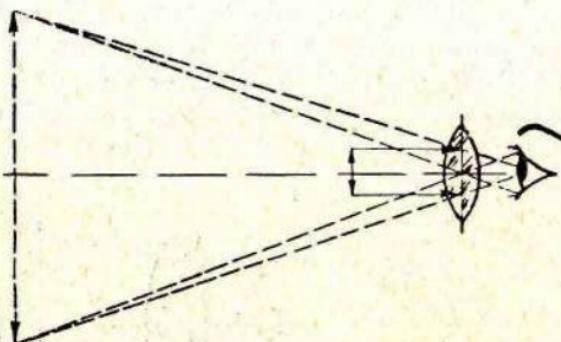
Razlikuje se uglovna i brojna apertura. Pod uglovnom aperturom podrazumeva se maksimalni ugao α među krajnjim efektivnim zracima konusnog svetlosnog snopa koji ulazi u optički sistem. Brojna apertura jednaka je $n \sin \alpha/2$; gde je n — indeks prelamanja sredine u kojoj se nalazi posmatrani predmet. Pomoću aperture može da se odredi količina aktivnog fluksa zračenja i moć razdvajanja optičkog sistema. Tako je blesak lika proporcionalan kvadratu brojne aperture, a moć razdvajanja proporcionalna je uglovnoj aperturi.



Sl. IV.21 — Apertura optičkog sistema

Kod uređaja predviđenih za vizuelno posmatranje infracrvenim zracima, uporedno sa objektivima primenjuju se i sistemi sa okularom. U najprostijem obliku okular predstavlja uvećajuće staklo (lupu), koja omogućava oku da posmatra predmete pod povećanim uglom (sl. IV.22).

Lupa se postavlja pred oko, a posmatrani predmet na rastojanju jednakom ili mnogo manjem od žižne daljine lupe. U



Sl. IV.22 — Obrazovanje lika lupom

tom slučaju se dobija prividan pravi i uvećan lik posmatranog predmeta.

Jedna od karakteristika povećanja okularnog sistema jeste odnos tangensa ugla pod kojim se vidi predmet kroz lupon i tangensa ugla, pod kojim se vidi predmet bez lupe sa rastojanja koje je najpogodnije za gledanje oka — 250 mm:

$$G_{ok} = \frac{\operatorname{tg} \omega_1}{\operatorname{tg} \omega}. \quad (\text{IV. } 9)$$

Ako se predmet nalazi u žižinoj ravni okulara, onda od svake tačke predmeta iz okulara izlazi paralelni snop zrakova, koji se okom svodi u tačku i na mrežnjači se dobija oštri lik posmatranog predmeta. Ovaj slučaj se najčešće susreće u praksi, pošto se pri tom oko posmatrača nalazi u stanju mirovanja, i prema tome, ne izaziva zamor posmatrača. U tom slučaju povećanje okulara može da se odredi iz odnosa:

$$G_{ok} = \frac{250}{f'}. \quad (\text{IV. } 10)$$

Iz formule (IV.10) vidi se da povećanje okularskog sistema može da bude vrlo veliko, ako se smanji njegovo fokusno rastojanje. Ipak, praktično, granica povećanja okulara određuje se minimalno dozvoljenom žižom s tačke gledišta udobnosti za posmatranje. Zato se u optičkim uređajima, uključujući i infracrvene, ne primenjuju okulari sa povećanjem većim od 15 do 20 puta. Ukupno povećanje takvih uređaja određeno je odnosom žižne daljine objektiva i žižne daljine okulara, a ako se između njih nalazi neki drugi elemenat (npr. elektronsko-optički pretvarač) i njegovo uveličanje utiče na ukupno povećanje:

$$G = \frac{f_{ob}}{f_{ok}} = G_{e\cdot op} \quad (\text{IV. 11})$$

gde je:

$G_{e\cdot op}$ — elektronsko optičko povećanje pretyarača.

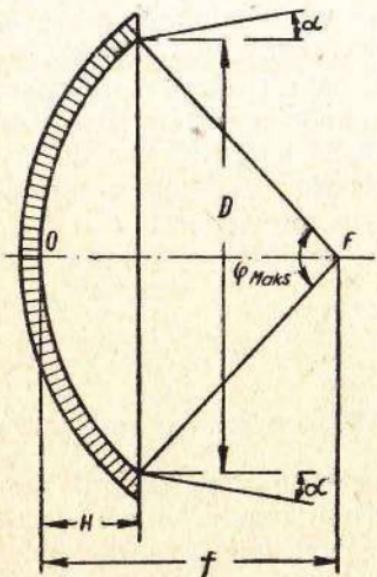
Korisni dijapazon žižnih daljina okularskih sistema, koji se primenjuju s određenim objektivom, ograničen je s jedne strane slabljenjem svetlosti koja se raspodeljuje na suviše povećani lik (donja granica), a s druge veličinom izlaznog otvora-pupile (gornja granica).

Prečnik zenice čovečjeg oka može da se menja od 2 do 8 mm. Pošto je okular namenjen da skuplja svu svetlost sa posmatranog predmeta, i da je usmeri u paralelnom snopu u oko, neophodno je da sva svetlost uđe u otvor oka (zenicu). Ovo je naročito važno za uređaje koji rade u uslovima slabe osvetljenosti. Zato se kod okulara, po pravilu, teži da se dobijeni lik obrazuje blizu oka u krugu sa prečnikom manjim od 8 mm.

6. OPTIČKI SISTEMI SA OGLEDALIMA

Reflektujući optički sistemi (sferična ili parabolična, izdubljena ili ispuščena ogledala) primenjuju se u optici sistema za ozračivanje u uređajima za noćno posmatranje, kod sistema za pelengaciju na bazi IC-zračenja i u glavama za samonavođenje radi fokusiranja fluksa zračenja od cilja na osjetljivi elemenat, kao i

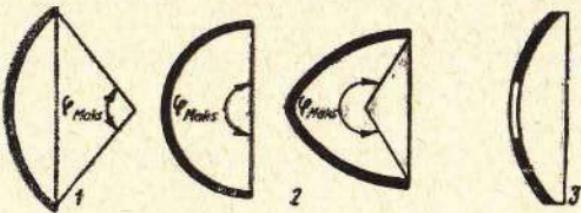
u drugim uređajima gde nije potrebno da se istovremeno dobije cela slika vidnog polja (sl. IV.23).



Sl. IV.23 — Osnovni parametri reflektora

gova vrednost može da se izrazi preko ugla u ravni φ_{\max} u obliku:

$$\omega = 2\pi(1 - \cos \varphi_{\max}). \quad (\text{IV. 12})$$



Sl. IV.24 — Vrste reflektora:
1 — plitki; 2 — duboki; 3 — sa slepom mrljom

U zavisnosti od konstrukcije (sl. IV.24) reflektori se dele na plitke ($\varphi_{\max} < 180^\circ$), duboke ($\varphi_{\max} \geq 180^\circ$) i reflektore

Realni reflektor ima dve površine — lice i poleđinu. Lice je okrenuto ka izvoru zračenja ili prema osjetljivom elementu. Ona određuje aperturu reflektora (krug ograničen krajevima ogledala) ili njegov svetlosni otvor.

Rastojanje od površine preseka reflektora do njegovog temena naziva se dubina reflektora (H). Tačka u kojoj se sekutraci koji padaju na reflektor paralelno optičkoj osi naziva se žiža reflektora F , a rastojanje od temena O do žiže — žižna daljina f .

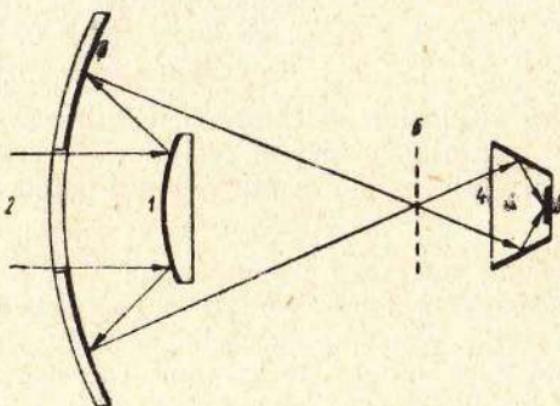
Uglom zahvata reflektora ω naziva se prostorni ugao s temena u fokusu i kracima oslojenjem na svetlosni otvor. Njegova vrednost može da se izrazi preko ugla u ravni φ_{\max} u obliku:

sa slepom mrljom. Poslednji imaju otvor u centralnom delu, naspram koga je postavljen neki detalj koji zaklanja taj deo.

Pošto izvor zračenja ili osetljivi element imaju konačne dimenzije, reflektori imaju neki ugao rasturanja (2α) čija se veličina određuje odnosom dimenzija izvora (osetljivog elementa) i žižne duljine reflektora. U nekim slučajevima usvojeno je da se ugao 2α naziva trenutnim vidnim poljem optičkog sistema.

Zbog postojanja ugla rasturanja reflektora kod uređaja za ozračivanje, svetlosna jačina duž ose ostaje nepromenjena samo do izvesnog rastojanja L_0 , koje se naziva rastojanjem obrazovanja snopa. Počev od tog rastojanja, koje je veće desetinu i stotinu puta od žižne duljine, može da se primeni zakon obrnutih kvadrata, koji određuju ozračenost na rastojanju L :

$$\epsilon = \frac{J}{L^2} \tau^L. \quad (\text{IV. } 13)$$



Sl. IV.25a — Šema optike IC-glave za samonavodenje „Krebs“

Danas se u infracrvenim uređajima primenjuju i stakleni i metalni reflektori.

Kao primer primene staklenih reflektora u toplo-pelengacionim sistemima, na sl. IV.25a — prikazana je šema optike glave za samonavodenje „krebs“ (Nemačka) predviđene za navođenje čamaca-torpeda na neprijateljske brodove.

Optički sistem se sastoji od ispuštenog ogledala prečnika 35 mm, na koje pada fluks zračenja od cilja 2 kroz slepi otvor izdubljenog ogledala 3, prečnika 250 mm sa žižnom daljinom 55 mm. Od ogledala odbijeni fluks zračenja pada u ogledalasti

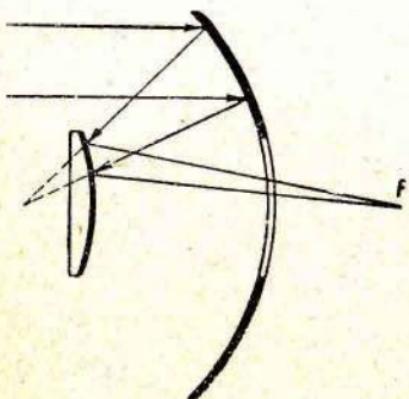
kondenzator („svetlosnu klopku“) 4, a odatle na prijemnik 5. U žižnoj ravni ogledala 3 nalazi se disk koji skanira 6 i koji omogućava da se odredi pravac na cilj — „levo-desno“. Vidno polje optičkog sistema je 45° , ali prema njegovim krajevima osetljivost se naglo smanjuje, što praktično dovodi do toga da se koristi samo centralni deo vidnog polja, tj. 20° .

Na sl. IV.25b prikazana je šema objektiva sa dva ogledala, kod koga slepi otvor služi za propuštanje fluksa na prijemnik.

Sl. IV.25b — Šema objektiva sa ogledalima

Uporedno sa staklenim reflektorima, u infracrvenim uređajima široko se primenjuju i metalni reflektori. Poslednji su prostiji za izradu, jeftiniji i imaju manju težinu u poređenju sa staklenim.

Grubi metalni reflektori koji se dobijaju galvanostegijom ili elektrohemiskim načinom, koriste se u postrojenjima za ozračivanje u svim vrstama signalnih uređaja. Fini metalni reflektori za objektive sa ogledalima i toplo-pelengacione uređaje dobijaju se elektrolitičkim putem.

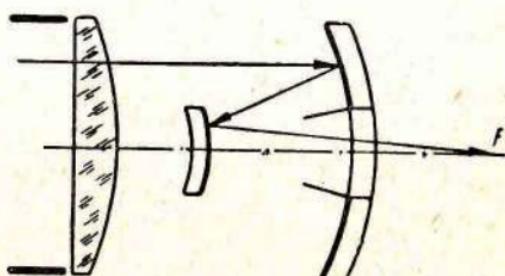


7. KOMBINOVANI OPTIČKI SISTEMI

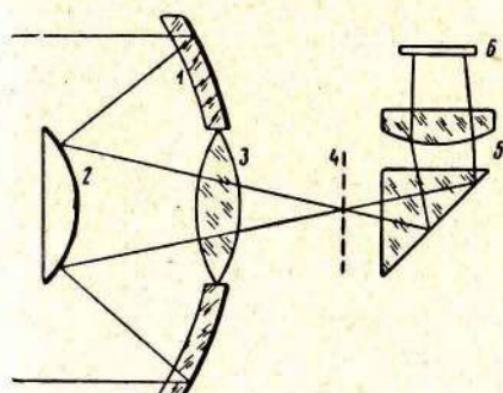
Ogledalski i ogledalsko-sočivni objektivi koji su relativno brzo počeli široko da se primenjuju, omogućuju da se znatno smanje gabariti optike (dužina) pri velikoj žižnoj daljini i da se izbegnu hromatska izobličenja, koja nastaju kao rezultat prolaska fluksa zračenja kroz veoma debelo staklo.

Bez obzira na to što je konstrukcija ogledalskih objektiva bila poznata još u Njutnovo vreme, kao prepreka u njihovoj izradi dugo je bila teškoća izrade ogledala koja ne tamne. Tek posle osvajanja tehnologije izrade aluminijumskih ogledala postalo je moguće izradivati ogledalsko-sočivaste sisteme sa visokim koeficijentom odbijanja (sl. IV. 26).

Razmatrajući optičku šemu ogledalsko-sočivastog objektiva, uočava se bitna osobina takvih sistema, koja se sastoje u tome što prstenasti oblik ulaznog vidnog otvora-pupile smanjuje njegovu površinu. Zbog toga je površina ulazne pupile (zenice) ogledalskog ili ogledalsko-sočivastog objektiva manja od površine sočivastog objektiva istog prečnika.



Sl. IV.26 — Šema objektiva sa ogledalom i sočivom

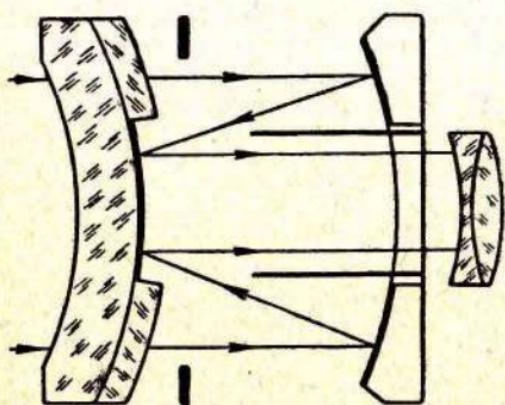


Sl. IV.27 — Šema ogledalsko-sočivastog objektiva infracrvene glave „vaserfal“

sočiva blizu žiže 3 za otklanjanje aberacije kome, modulatora 4, kondenzora 5 i fotoelementa 6. Vidno polje optičkog sistema iznosi $2\beta = 6^\circ$.

Na sl. IV.27 prikazana je šema objektiva nemačke glave za samonavodenje „vaserfal“, koja se sastoji iz izdubljenog pozitivnog prijemnog ogledala 1, prečnika 250 mm i žižne daljine 450 mm, ispuštenog odbojnog ogledala 2, korekcionog

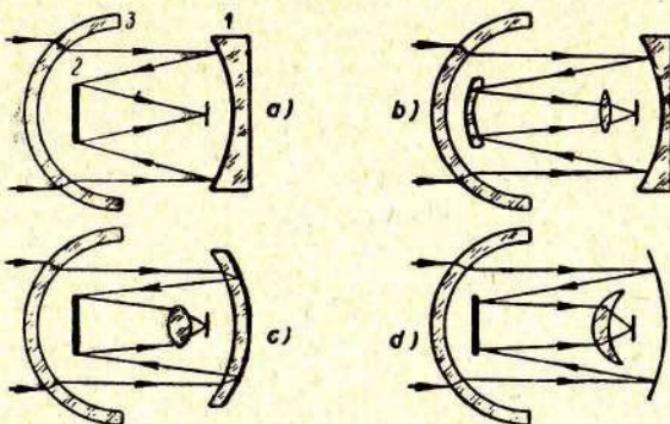
Kod nekih konstrukcija ogledalsko-sočivastih objektiva, sočivo koje služi za zaštitu izdubljenog ogledala od prašine, zamagljivanja i mehaničkih povreda može da se upotrebljava i za popravku sferične aberacije, kome i astigmatizma. Pored



Sl. IV.28 — Meniskusni objektiv D. D. Maksutova ($f=260$ mm, $A = 1, 5, 6$)

toga, na ovo sočivo nalepljuje se druga negativna, refleksna površina. Takvi objektivi se nazivaju meniskusi. Mogu se takođe i postaviti dva sočiva — na ulazu u objektiv i posle izlaska zraka iz slepog otvora (blizu žiže). Na sl. IV.28 prikazana je šema meniskusnog objektiva sa dva sistema sočiva za korekciju i dva reflektorska ogledala. Blenda se posta-

vlja ispred izdubljenog ogledala da bi zaštitila lik od zrakova koji mogu da prodrnu obilazeći povratno (negativno) ogledalo.



Sl. IV.29 — Šema savremenih ogledalsko-sočivastih objektiva za IC (toplote) glave za samonavodenje

Danas je pošlo za rukom da se naprave prilično proste šeme ogledalsko-sočivastih sistema za IC (toplote) glave za samonavođenje (sl. IV. 29), koje rade u sklopu sa čeonim kalotama (poklopčima) i imaju prilično vidno polje i dobru moć razlaganja.

Ove šeme sadrže primarno izdubljeno ogledalo 1, sekundarno ogledalo sa spoljnim ili unutrašnjim refleksionim slojem 2, čeonu kalotu 3 i korekciono sočivo 4. Čeona kalota kod ovih sistema ima aktivnu ulogu, smanjujući sferičnu aberaciju optičkog sistema.

Bolja od ovih šema d) nema sferičnu i hromatsku aberaciju i obezbeđuje dimenzije kružića rasipanja na ~ 2 mrad, pri uglovima upada fluksa zračenja 6° i oko $2,5$ m rad. pri uglovima upada 12° . Takav kvalitet dobijenog lika čini ovu šemu perspektivnom za IC (toplote) glave za samonavođenje i toplo-pelengacione uređaje sa većim vidnim poljem.

Za sisteme sa malim vidnim poljem pogodna je šema b), koja za slučaj kalote od topljenog kvarca, sekundarnog ogledala-sočiva i korekcionog sočiva od arsentrisulfida, omogućuje da se dobije kružić rasipanja oko 1 mrad za snop zrakova pod uglom 2° i manje od 4 mrad za snop zrakova pod uglom 4° .

Međutim, u ovoj šemi hromatska aberacija povećava lik kružića rasipanja po celom vidnom polju za $0,5$ mrad.

8. GUBICI ENERGIJE ZRAČENJA U OPTIČKIM SISTEMIMA

Pri prolasku fluksa zračenja kroz optičke sisteme nastaje njegovo slabljenje usled:

- apsorpcije materijala od kojeg je načinjen sistem;
- odbijanja od površine sočiva i drugih optičkih detalja;
- rasipanja fluksa zračenja u masi materijala.

Apsorpcija fluksa zračenja čak i kod najprozračnijih optičkih stakala nastaje usled prisustva primesa oksida gvožđa i hroma u njima, koje ulaze u staklo pri topljenju (termičkoj obradi). Apsorpcija se karakteriše koeficijentom apsorpcije na putu ravnom 1 cm.

Za vidljivi deo spektra, u zavisnosti od vrste stakla, koeficijent apsorpcije α kreće se u granicama $0,01 - 0,03$ smanjujući se u bliskoj infracrvenoj oblasti spektra. Prema tome, pri

debljini stakla m [cm], koeficijent propustljivosti optičkog sistema samo usled apsorpcije energije zračenja može da bude određen iz odnosa:

$$\tau = (1 - \alpha)^m. \quad (\text{IV. 14})$$

Gubici usled odbijanja fluksa zračenja nastaju i kod sočivastih i kod ogledalskih elemenata optičkih sistema. Ovi gubici zavise od koeficijenta prelamanja sredine u kojoj se rasprostire fluks zračenja i ugla pod kojim on pada na granicu između dve sredine.

U slučaju odbijanja fluksa zračenja od granične površine „vazduh-staklo“ ili „staklo-vazduh“ pri upadnim uglovima od 45° do 50° od normale, koeficijent odbijanja može da se izračuna po formuli:

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \quad (\text{IV. 15})$$

gde je:

n — indeks prelamanja stakla od koga je napravljeno sočivo.

U tabeli IV.3 date su vrednosti indeksa prelamanja nekih optičkih sredina za razne talasne dužine.

T a b l i c a IV.3

Indeksi prelamanja nekih optičkih sredina

M a t e r i j a l	Indeks prelamanja n		
	$\lambda = 0,68 \mu$	$\lambda = 2,2 \mu$	$\lambda = 4,3 \mu$
V a z d u h	1,000.292		
Organsko staklo	1,49	—	—
Kanadski balzam	1,54	—	—
Optička stakla	1,5 — 1,92	1,5 — 1,7	—
Topljeni kvarc	1,43	1,43	1,37
Arsentrisulfid	—	2,38	2,35
S a f i r	1,77	1,73	1,68
Litijum-fluorid	1,39	1,38	1,34
URS-6	2,63	2,2	2,19
Germanijum	4,13	4,08	4,02
Kalijum-bromid	1,55	1,54	1,53
Srebro-hlorid	2,07	2,01	2,00

Kod najrasprostranjenijeg materijala (stakla) za objektive infracrvenih uređaja u bliskoj oblasti spektra, indeks prelamanja se kreće od 1,5 do 1,92, pa prema tome, saglasno formuli (IV.15), koeficijent odbijanja od jedne granične površine između stakla i vazduha može da se uzme da je jednak 0,04—0,06.

Kod postojanja n refleksnih površina, koeficijent propustljivosti (ili bilo kog optičkog dela), uzimajući u obzir samo gubitke usled odbijanja, može se izračunati po formuli:

$$\tau_\rho = (1 - \rho)^n. \quad (\text{IV. } 16)$$

Uzimajući u obzir gubitke usled apsorpcije i odbijanja, propustljivost optičkog sistema može da se izračuna po formuli:

$$\tau_{0.s} = \tau_\rho \cdot \tau_\alpha = (1 - \rho)^n (1 - \alpha)^m. \quad (\text{IV. } 17)$$

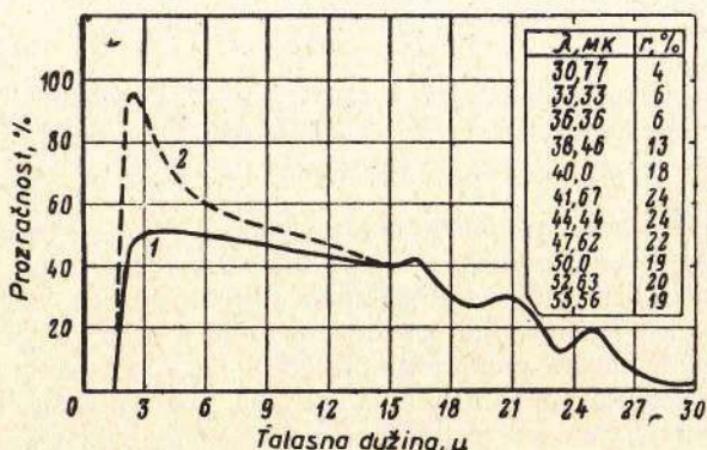
Gubici fluksa zračenja u masi sredine od koje je napravljen optički sistem, nastaju i njegovim rasipanjem usled prisustva u materijalu svih vrsta nehomogenosti: mehurića, vlakana, sitnih kamičaka i sl. Ovi gubici se povećavaju u toku korišćenja uređaja pri aljkavom rukovanju posledica čega su ogrebotine, mrlje i naslage na površini optičkih detalja, zamagljivanje, obasipanje sitnim česticama prljavštine i metalnim opiljcima, razlepjivanje slepljenih površina itd.

Gubici energije zračenja mogu se u osnovi sniziti na dva načina: smanjenjem broja refleksnih površina i nanošenjem antirefleksnog sloja na optičkim detaljima.

U prvom slučaju smanjenje gubitaka postiže se slepljivanjem pojedinačnih detalja optičkog sistema kanadskim balzamom ili balzaminom, koji ima koeficijent prelamanja blizak koeficijentu prelamanja stakla.

U slučajevima gde se ne dozvoljava slepljivanje optičkih detalja, primenjuje se antirefleksijski sloj. Pod antirefleksijskim slojem na optičkim detaljima podrazumeva se smanjenje koeficijenta refleksije energije zračenja, obrazovanjem na njima slojeva sa indeksom prelamanja, bliskim indeksu prelamanja materijala od kojeg je optički detalj napravljen. Ovaj sloj, smanjujući gubitke energije zračenja povećava stvarnu svetlosnu jačinu optičkog sistema, smanjuje veličinu ekspozicije i ima antioreolno dejstvo (sprečava stvaranje „oreola“).

Na sl. IV.30 pokazan je uticaj antirefleksnog sloja na propustljivost germanijumskog filtra. Nanošenje antirefleksionih slojeva na optičke detalje može se ostvariti hemijskim ili fizičkim putem. U prvom slučaju sloj se obrazuje usled promene strukture najtanjeg površinskog sloja optičkog detalja, pri dejstvu na njega hemijskih jedinjenja (za staklo npr. silicijumska kiselina).



Sl. IV.30 — Propustljivost germanijumskog filtra pre (1) i posle (2) nanošenja antirefleksionog sloja

U drugom slučaju na površinu optičkog detalja isparavanjem se nanosi sloj od druge prozračne materije (za stakla — magnezijum-fluorid ili kalcijum-fluorid).

Glava V

PRIJEMNICI ENERGIJE ZRAČENJA

1. PODELA PRIJEMNIKA ENERGIJE ZRAČENJA

U optičkoj oblasti spektra elektromagnetičnih talasa širu primenu imaju 4 osnovna načina registracije zračenja: vizuelni, fotografski, fotoelektrični i radiometrijski. Poslednja tri pobrojana načina široko se primenjuju u laboratorijskoj praksi, dok se u infracrvenim uredajima vojne namene koristi, uglavnom, fotoelektrični način registracije zračenja.

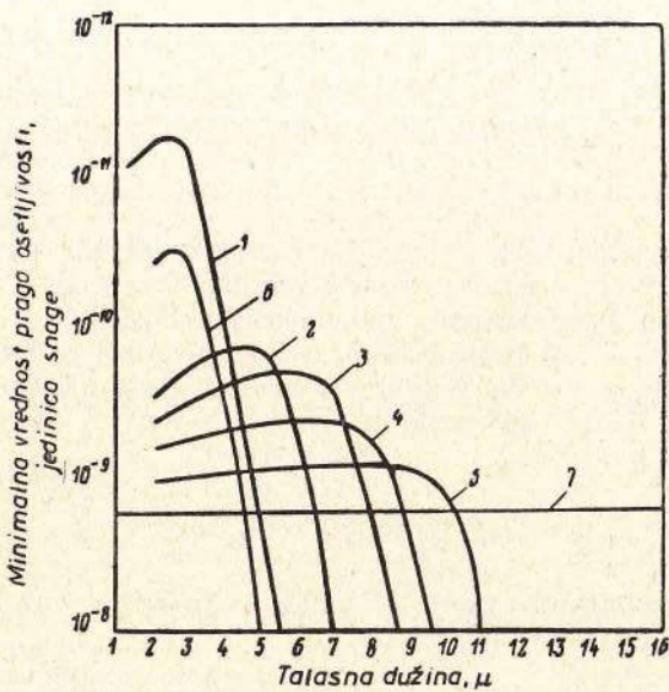
Tabela V.I

Podela prijemnika energije zračenja

Neselektivni prijemnici	Selektivni prijemnici
Termoelementi	Fotoelementi sa spoljašnjim fotoefektom
Bolometri	Fotoelementi sa unutrašnjim fotoefektom (fotootpornici)
Evaporograf	Fotoelementi sa bočnim fotoefektom
Radiometar	Fotoelementi sa fotomagnetskim efektom
Optičko-akustični prijemnici	

Fotoelektrični način registracije zračenja, kod koga se energija kvanata zračenja predaje neposredno elektronima fotooset-

Ijivog materijala, karakteriše se vrlo visokom osetljivošću i malom vremenskom inercijom. Međutim, za razliku od radiometrijske metode, za ovaj način registracije je tipična promenljiva spektralna osetljivost i unutar srazmerno uzanih intervala talasnih dužina (sl. V.1).



Sl. V.1 — Relativna osetljivost detektora infracrvenog zračenja:

1 — rashladeni PbS ($193^{\circ}K$); 2 — rashladeni $PbTe$ ($90^{\circ}K$); 3 — rashladeni $PbSe$ ($90^{\circ}K$); 4 — rashladeni $InSb$ ($90^{\circ}K$); 5 — rashladeni Ge ($90^{\circ}K$) sa primesama Au ; 6 — nehladieni PbS ($293^{\circ}K$); 7 — topotoni detektor

U tablici V.1 data je detaljnija podela prijemnika zračenja, dok će se u narednim paragrafima podrobnije razmatrati samo fotoelektrični prijemnici, kao najrasprostranjeniji, i u izvesnoj meri superprovodni bolometri. Sa načinom rada i karakteri-

stikama savremenih termoelemenata i bolometarskih kola moguće je upoznati se kroz odgovarajuće kurseve fizike i spektroskopije.

2. NESELEKTIVNI PRIJEMNICI ENERGIJE ZRAČENJA

Polazeći od principa rada neselektivnih prijemnika zračenja, kod kojih se uvek vrši pretvaranje energije zračenja u toplotnu energiju, može im se postaviti niz specifičnih zahteva:

1. Prijemna površina mora da ima visoku apsorpcionu sposobnost. To se obično postiže „zacrnjivanjem“ prijemne površine.

2. Vremenska inercija prijemnika zavisi od brzine porasta njegove temperature. Prema tome, on mora da ima male dimenzije i male toplotne gubitke usled toplotne provodnosti i zračenja. Ovo je zahtevalo razradu konstrukcija toplotnih prijemnika sa primenom dubokog rashlađivanja i vakuma i usvajanje poluprovodnika i izolatora u izradi prijemnih površina.

T a b l i c a V. 2

Glavne karakteristike savremenih toplotnih prijemnika

T i p	Prijemna površina cm ²	Temperatura °K	Vremenska konstanta, sek.	Prag osjetljivosti W/cm ²
Fosfor termoelement	$1,5 \cdot 10^{-2}$	300	$8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
Metalni termoelement	$5 \cdot 10^{-3}$	300	$3,6 \cdot 10^{-2}$	10^{-8}
Termoelement Kozireva	$2,4 \cdot 10^{-2}$	300	—	$2,3 \cdot 10^{-9}$
Brokmanov metalni termoelement	$5,3 \cdot 10^{-2}$	300	$50 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Munov poluprovodni bolometar	$0,5 \cdot 10^{-2}$	300	$50 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Klejssov dielektrični bolometar	$0,5 \cdot 10^{-2}$	300	0,1	$100 \cdot 10^{-10}$

U infracrvenim vojnim uređajima toplotni prijemnici zbog svoje nedovoljne osetljivosti i velike vremenske inercije danas ne nalaze širu primenu. U tablici V.2 dati su podaci za nekoliko savremenih toplotnih prijemnika, koji se primenjuju u istraživačkim laboratorijama.

Gore opisani prijemnici zračenja ne mogu se, razume se, koristiti za registraciju brzih procesa.

Sa gledišta vojne primene postoji izvestan interes za superprovodne bolometre, koji imaju veliku osetljivost u širokom području infracrvenog spektra i relativno malu vremensku inerciju.

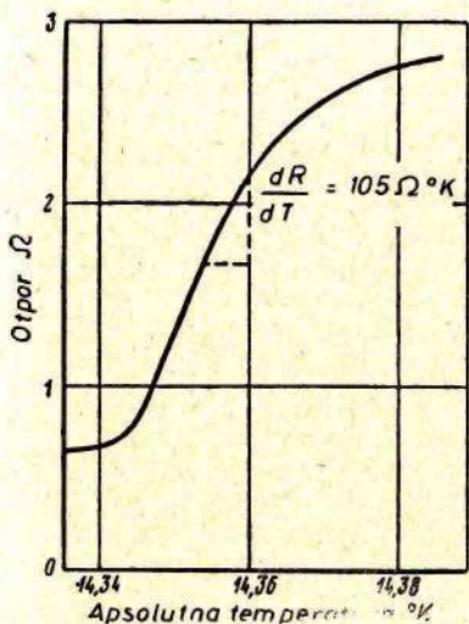
Pojava superprovodnosti nekih materijala otkrivena je dosta davno i sastoji se u tome što u okolini absolutne nule ($t = -273,15^{\circ}\text{C}$) otpor nekih materijala pada praktično na nulu pri promeni temperature za samo nekoliko hiljaditih stepeni u odnosu na jednu početnu kritičnu temperaturu.

Usled ovoga, takvi materijali u uslovima superprovodnosti imaju vrlo veliki temperaturni koeficijent promene otpora, što je u stvari jedan od uslova za dobijanje visokoosetljivih bolometara. Toplotni kapacitet materijala u uslovima superprovodnosti postaje vrlo mali, što predstavlja drugi povoljan uslov za dobijanje visokoosetljivih bolometara. Osim toga, pri vrlo niskim temperaturama naglo se smanjuju, težeći ka nuli, fluktuacije napona na krajevima osetljivog elementa. To omogućava da se ostvari veće pojačanje korisnog signala, koje je inače obično ograničeno sopstvenim šumovima mernog kola, i da se na taj način poboljša prag osetljivosti prijemnika.

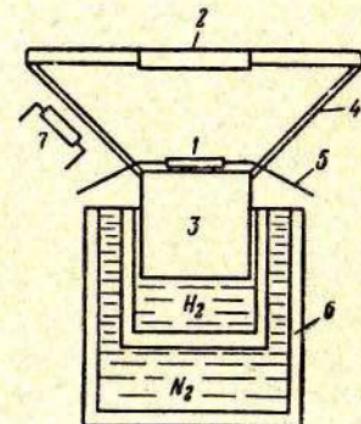
Bez obzira na očiglednu perspektivnost superprovodnih bolometara, dugo vreme nije mogao da se realizuje uređaj kolikotoliko podesan za eksploraciju. To se objašnjava time što za ogromnu većinu materijala pojava superprovodnosti nastupa na vrlo niskim temperaturama (olovo 4°K , tantal $3,22-3,23^{\circ}\text{K}$), koje je moguće postići samo ako se kao rashladni fluid koristi tečni helijum.

Otkriće pojave superprovodnosti nitrida niobijuma i kolumbijuma na nešto višim temperaturama, koje se postižu primenom tečnog vodonika, omogućilo je da se na toj osnovi izgrade superprovodni bolometri pogodni za praktičnu upotrebu i prouče njihove osnovne osobine (sl. V.2).

Kod kolumbijum-nitrida prelaz od normalnog stanja ka superprovodnosti nastupa između 14,34 i 14,38 °K. U tom temperaturnom intervalu na linearnom delu krive brzina promene otpora sa temperaturom iznosi 105 oma po stepenu Kelvina. Postizanje takvih temperatura je znatno prostije, pošto je za to dovoljna primena tečnog vodonika. Laboratorija univerziteta Džon Hopkins iz Baltimora, u kojoj je bio izrađen superprovodni bolometar od kolumbijum-nitrida, razradila je i prenosni uređaj, težine 24 kg, za dobijanje tečnog vodonika iz gasovitog, sa kapacitetom koji je obezbeđivao punjenje termostata u toku od 2 sata (sl. V.3).



Sl. V.2 — Promena otpora superprovodnog bolometra kolumbijum-nitrida

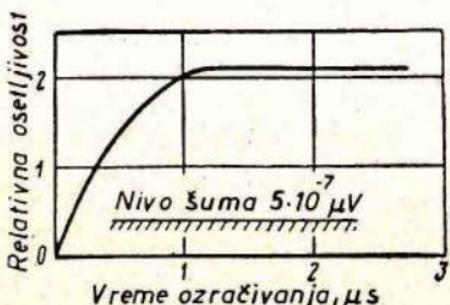


Sl. V.3 — Konstrukcija superprovodnog bolometra

Bolometar predstavlja tanku traku (1) kolumbijum-nitrida debljine 6μ , širine 0,25 mm, dužine 5 mm. Ova traka je zaledljena pomoću bakelitnog laka na osnovu masivnog bakarnog cilindra (3) prečnika 1 cm i okružena radi mehaničke zaštite i zaštite od okolnog zračenja sa bakarnom poluloptom (4). Cilindar se potapa u termostat (6), koji se sastoji od nekoliko Djua-

rovih sudova, napunjenih tečnim azotom i vodonikom. Osetljivi elemenat nalazi se u vakuumu na temperaturi 14^0K . Da bi se temperatura podigla do optimalne vrednosti ($14,36^0\text{K}$), u neposrednoj blizini bakarne mase koja okružava bolometar

postavljen je otpor 7 do 500 Ω , kroz koji se propušta struja od 10mA.



Sl. V.4 — Porast signala superprovodnog bolometra u zavisnosti je od vremena njegovog ozračivanja

Fluktuacioni šumovi na krajevima bolometarskog otpora jednaki su $0,5 \cdot 10^{-6} \mu\text{V}$, tj. odgovaraju signalu srednje snage 10^{-5} erga. Međutim, korišćenjem selektivnog pojačivača prag osetljivosti može se poboljšati do $2 \cdot 10^{-6}$ erga ili $2 \cdot 10^{-13} \text{ W} \cdot \text{s}$.

Pošto konstrukcija bolometra obezbeđuje brz odvod topote dobijene spsorpcijom energije zračenja posredstvom topotne provodnosti i isto tako brzo vraćanje u ravnotežno stanje posle prestanka dejstva fluksa zračenja na osetljiv elemenat, to je vremenska inercija ovakvog bolometra neznatna. Na sl. V.4 data je kriva porasta signala u zavisnosti od vremena ozračivanja bolometra fluksom zračenja, modulisanim sa učestanoscu od 13 Hz. Kako se vidi sa krive, signal dostiže maksimalnu vrednost za vreme jednako 1 ms, a polovinu te vrednosti za 0,3 ms. Prema tome, može se reći da je vremenska konstanta superprovodnog bolometra između 0,0003 i 0,001 s.

Danas je poznat veći broj bolometarskih kola koja se zasnavaju na superprovodnosti. Ona se za sada koriste u spektroskopske svrhe. Uvođenje bolometarskih kola u primjenju infracrvenu tehniku, uključujući vojnu, za sada sprečavaju teškoće oko postizanja potrebnog hlađenja.

Međutim, ovaj način registracije se smatra kao perspektivan, jer ima vrlo malo prijemnika koji omogućavaju da se posmatra fluks energije zračenja reda 10^{-10} W uz dovoljno malu vremensku inerciju i široko spektralno područje osetljivosti.

T a b l i c a V. 3

Glavne karakteristike superprovodnih bolometara

Autor	Dimenzijs, mm ²	Opor, O C	Vremenska konstanta, s	Prag osetljivosti, W	Vrsta ispunioca
Endrjus	1,25	5	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-10}$	vakuum
Milton	0,8	—	$3 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-10}$	„
Nelson	0,8	—	$18 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-10}$	„

3. PRIJEMNICI SA SPOLJAŠNJIM FOTOEFEKTOM

Oblast fotoelektričnih pojava obuhvata pojavu elektromotorne sile pod dejstvom fluksa zračenja (fotogalvanski efekat), promenu otpora materijala pri njegovom ozračivanju (superprovodnost) i emisiju elektrona sa površine tela prouzrokovana upadnim fluksom zračenja (spoljašnji fotoefekat).

U normalnim uslovima, u svakom metalu ima oko 10^{23} slobodnih elektrona po 1 cm^3 . Svi oni nose sa sobom neku određenu količinu energije i slobodno se kreću u svim pravcima unutar metala. Međutim, njihova je energija nedovoljna da bi napustili metal. Za to je, kako je poznato iz kvantne teorije, elektronima potrebno saopštiti dopunska energija.

Dopunska energija može, između ostalog, da bude i energija infracrvenog zračenja, koja se, apsorbujući u materijalu, delimično troši na njegovo zagrevanje, a delom i na to da elektronima saopšti dopunska kinetičku energiju i izbaciti ih iz materijala. Na taj način, u slučaju spoljašnjeg fotoefekta vrši se pretvaranje energije zračenja u kinetičku energiju elektrona, tj. u elektromagnetnu energiju (ako početna brzina $v \neq 0$).

Elektron može da napusti materijal (metal) samo ukoliko se energija zračenja apsorbuje u materijalu i ukoliko je ona dovoljna za savlađivanje sila veze između elektrona i površine tela i saopštavanje elektronu neke brzine v ,

$$h\nu = \epsilon\varphi + \frac{mv^2}{2}. \quad (\text{V. I})$$

Prvi član jednačine (V.1) određuje veličinu minimalne vrednosti energije koju treba saopštiti elektronu u metalu, da bi on bio izbačen izvan tela sa nultom brzinom. Ova vrednost energije dobila je naziv „izlazni rad“. Ova se konstanta za čiste metale kreće u proseku između 1 i 5 eV (vidi tablicu V.4).

Tablica V.4

Izlazni rad nekih elemenata

Element	$\epsilon\varphi$, eV	Element	$\epsilon\varphi$, eV
Litijum	2,49	Kadmijum	4,1
Silicijum	4,2	Sumpor	4,14
Kalijum	2,26	Telur	4,76
Nikl	5,24	Cezijum	1,9
Germanijum	4,5	Volfram	4,5
Selen	4,4	Platina	5,36
Srebro	4,79	Bizmut	4,25

U ovom slučaju celokupna energija fotona troši se na savladivanje potencijalne barijere i izraz (V.1) može se pisati u obliku:

$$h\nu_0 = \epsilon\varphi_0, \quad (\text{V. 2})$$

gde je γ_0 — granična učestanost elektromagnetskog zračenja, pri kojoj elektroni izleću nultom brzinom sa površine metala.

Graničnoj učestanosti γ_0 odgovara talasna dužina λ_0 , koja nosi naziv dugotalasne ili „crvene“ granice fotoefekta:

$$\lambda_0 = \frac{1,236}{\varphi_0}, \quad (\text{V. 3})$$

gde je λ_0 — u mikronima, a φ_0 — u elektronvoltima.

Smanjenje „izlaznog rada“ i, u vezi sa tim, povećanje dugotlasne granice osetljivosti spoljašnjeg foto-efekta moguće je postići „unošenjem nečistoća“ u metal, tj. apsorpcijom na površini metala atoma i jona materijala sa manjim „izlaznim radom“.

U tom slučaju na površini metala se obrazuje dipolni sloj sa pozitivnim nanelektrisanjem prema spoljnjoj strani, čime se smanjuje veličina potencijalne barijere. Zbog ovoga se svi osetljivi slojevi sa spoljašnjim foto-efektom, koji su osetljivi na vidljivo i infracrveno zračenje, sastoje od nekoliko komponenata.

Spoljašnji foto-efekat nastupa praktično odmah posle početka ozračivanja površine foto-elementa (vremenska inercija ne prelazi $3 \cdot 10^{-9}$ s).

Sa gledišta praktične primene, u uređajima infracrvene tehnike nas će dalje interesovati sledeće karakteristike spoljašnjeg foto-efekta:

1. Integralna osetljivost — odnos foto-struje u kolu prijemnika prema snazi fluksa zračenja koji pada na prijemnik. Integralna osetljivost se izražava u mikroamperima po vatu, ili, kada je reč o vidljivoj svetlosti, u mikroamperima po lumenu. Za njeno izračunavanje vrlo često se koristi jedna od sledećih relacija:

$$S = \frac{I_f l^2}{q J_i} = \frac{I_f}{\epsilon_q} = \frac{I_f}{\Phi}, \quad (V. 4)$$

gde je: I_f — maksimalna vrednost foto-struje;

Φ — upadni fluks zračenja;

ϵ — ozračenost prijemnika, W/cm^2 ;

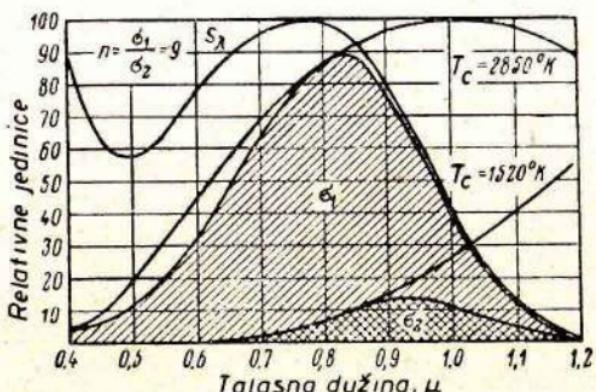
q — radna površina prijemnika, cm^2 ;

l — rastojanje od izvora zračenja poznate temperature do prijemnika, cm;

J_i — ugaona gustina zračenja, $W/st. rad.$.

Često se integralna osetljivost prijemnika određuje preko kvantnog izlaza njegovog fotoosetljivog sloja, pod kojim se razumeva broj elektrona, koji izleću sa katode pod dejstvom jednog kvanta fluksa upadnog zračenja. Kvantni izlaz materijala koji podležu spoljašnjem foto-efektu određen je ukupnošću njihovih fizičkih osobina. U idealnom slučaju, svaki foton koji padne na površinu foto-osetljivog sloja može da osloboди jedan elektron, tj. teorijsku granicu fotoelektronske emisije predstavlja kvantni izlaz jednak jedinici. Međutim, takav izlaz nikada se ne dostiže.

Deo energije upadnog fluksa zračenja ne može da pređe u kinetičku energiju elektrona, pošto se ona ili odbija od površine osetljivog sloja, ili prolazi kroz njega bez susreta sa elektronima.



Sl. V.5 — Efikasnost cezijumoksidnog fotoosetljivog sloja za zračenja na različitim temperaturama u zavisnosti od talasne dužine

Ali čak i pri punoj apsorpciji fotona od strane materijala, verovatnoća izbijanja elektrona je mala. Neki fotoni ne oslobadaju elektrone u potpunosti, već prevode vezane elektrone u pobudeno stanje, dok drugi, doduše, stvaraju slobodne elektrone, ali ovi ne izlaze iz materijala usled gubljenja dobijene energije, što je rezultat sudara sa drugim elektronima ili predavanja energije kristalnoj rešetki. Stoga kvantni izlaz fotoemisionih slojeva ne prelazi, u najboljem slučaju, 10–20%.

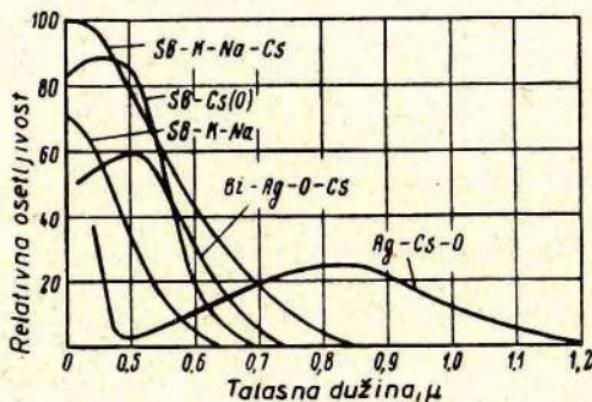
2. Spektralna osetljivost — zavisnost osetljivosti prijemnika od talasne dužine upadnog monohromatskog fluksa zračenja. Ona u krajnjoj liniji određuje efikasnost primene infracrvenih uređaja u njihovom zajedničkom radu u sklopu sa izvorima energije zračenja.

Na sl. V.5 je radi primera određena efikasnost prijemnika sa cezijumoksidnim osetljivim slojem za zračenje električne sijalice sa grejnim vlaknom, pri različitim temperaturama obojenosti grejnog vlakna.

3. Prag osetljivosti (prag fluksa) — minimalna vrednost fluksa zračenja u vatima ili, za vidljivu svetlost, u luksima, koja još može da se oseti sa prijemnim uređajem.

Prag osetljivosti prijemnika određen je nivoom šumova u kolu prijemnika. On je određen, uglavnom, parazitnim strujama kroz izolaciju i tamnom strujom, koja nastaje u neozračenom prijemniku kao rezultat auto — i termoelektronske emisije.

U uredajima infracrvene tehnike spoljašnji fotoefekat se koristi kod elektronsko-optičkih pretvarača i fotoelektronskih multiplikatora, kao i u predajnim televizijskim cevima povećane osetljivosti za noćnu upotrebu. U ovim uredajima se kao katode koriste cezijumoksidni, antimon-cezijumovi i bizmut-srebro-cezijumovi fotoosetljivi slojevi, kao i, u novije vreme razvijene, višealkalne foto-katode. Spektralne karakteristike osetljivosti ovih foto-katoda date su na sl. V.6.



Sl. V.6 — Spektralna osetljivost nekih foto-katoda

Osobine prva tri fotoosetljiva sloja su prilično iscrpno obradene u literaturi [1,2,3]. Višealkalne foto-katode su razvijene srazmerno nedavno [4,5]. One su, međutim, po celom nizu svojih osobina veoma interesantne kao osetljivi elementi u uredajima za noćno osmatranje. Te su osobine, prvenstveno, visoka integralna osetljivost foto-katode i vrlo male tamne struje koje omogućavaju postizanje velikog pojačanja bleska slike bez hlađenja foto-katode.

T a b l i c a V. 5

Osnovne karakteristike fotokatoda sa spoljašnjim fotoefektom

Fotokatoda	Tal. dužina maks. osetljivosti, μ	Dugotalasna granica — $\lambda 0,01$, μ	Kv. izlaz za vidljivi deo spektra	Integralna osetljivost, $\mu\text{A}/\text{Im}$
Ag—O—Cs	0,85	1,4	0,005	50
Sb—Cs	0,45	0,65	0,1	25
Sb—Cs (O)	0,48	0,70	0,2	90
Bi—Ag—O—Cs	0,48	0,75	0,1	90
Sb—K—Na	0,4	0,62	0,1	60
Sb—K—Na—Cs	0,4	0,82	0,2	200

4. PRIJEMNICI SA UNUTRAŠNJIM FOTOEFEKTOM (FOTOOTPORNICI)

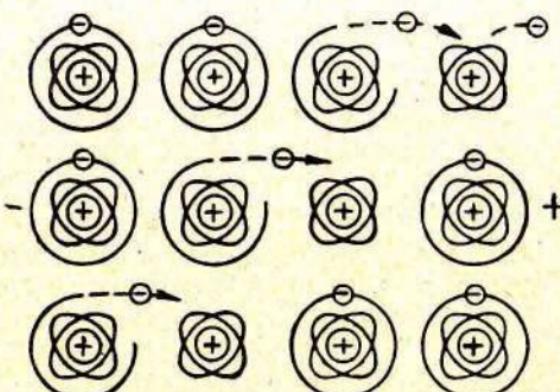
Foto-otpornik (FO) je poluprovodnički elemenat koji pod dejstvom energije zračenja menja svoj unutrašnji otpor.

Za razliku od metala, gde su atomi kristalne rešetke bez svojih spoljašnjih valentnih elektrona, u poluprovodniku je pri nižim temperaturama većina elektrona vezana sa atomima rešetke. Međutim, ta veza nije čvrsta. Učestvujući u toplotnom kretanju, atomi osciluju i gube svoje valentne elektrone. Zato se u poluprovodniku pri zagrevanju povećava broj elektrona koji mogu da prenose struju, što je ekvivalentno smanjenju njegovog električnog otpora. To je prva razlika između poluprovodnika i metala, za koje je karakteristično povećanje otpora sa porastom temperature.

Druga specifičnost poluprovodnika jeste što su u njemu nosioci struje ne samo slobodni elektroni, već i atomi koji su ostali bez svojih spoljašnjih valentnih elektrona i usled toga postali pozitivno nanelektrisani (joni).

Da bi shvatili ovu pojavu, pomoći ćemo se sl. V.7. Pod dejstvom razlike potencijala koja se dovodi na poluprovodnik, foto-elektron izbijen iz spoljašnje ljske krajnjeg atoma počinje da se kreće ka pozitivnoj elektrodi. U atomu koji je izgubio

elektron ostaje slobodno mesto — „šupljina“. Ona, međutim, ostaje prazna samo vrlo kratko vreme ($10^{-3} - 10^{-7}$ sek). Usled delovanja električnog polja, na nju odmah prelazi elektron sa susednog atoma. Ovaj elektron, težeći da se kreće ka pozitivnoj elektrodi, vrši ovaj prelaz bez potpunog oslobođanja od valentnih



Sl. V.7 — Obrazovanje i kretanje „šupljina“ u poluprovodniku

veza. Novooslobodeno mesto zauzima elektron sa atoma udaljenijeg od pozitivne elektrode, itd. Na taj način, rezultat je isti kao da se elektroni pomeraju ka pozitivnoj a „šupljine“ — ka negativnoj elektrodi. To je nešto uprošćena fizička slika nastanka električne struje u poluprovodniku pri njegovom zagrevanju.

Kretanje vezanih elektrona od atoma do atoma u pravcu pozitivne elektrode predstavlja značajno povećanje struje kroz poluprovodnik. Ovaj doprinos se može posmatrati i tako da „šupljine“ krećući se ka negativnoj elektrodi, prenose sa sobom pozitivno nanelektrisanje, jednako po apsolutnoj vrednosti nanelektrisanju elektrona.

Jednak broj elektrona i „šupljina“ može da bude samo u slučaju apsolutno čistog poluprovodnika. Prisustvo makar i minimalne količine primesa stvara u poluprovodniku višak elek-

trona (provodnost n-tipa) ili višak „šupljina“ (provodnost p-tipa). Pošto savršeno čistih poluprovodnika u prirodi praktično nema, to se u praksi obično srećemo sa fotootpornicima koji imaju ili elektronsku provodnost (n), ili provodnost preko šupljina (p). Radovi iz poslednjih godina pokazuju da prisustvo primesa u poluprovodniku ogromno povećava (nekada desetine miliona puta) njegovu specifičnu elektroprovodnost. U tome i jeste jedna od razlika između poluprovodnika i metala, kod kojih elektroprovodnost opada dodavanjem primesa.

Uvođenje primesa u poluprovodnik omogućava da se smanji širina zabranjene zone E. Podsećamo da se pod širinom zabranjene zone, izražene u elektronvoltima, podrazumeva minimalna količina energije koju treba saopštiti elektronu da bi on prešao iz vezanog stanja u slobodno (u provodnu zonu). Širina zabranjene zone, slično izlaznom radu kod spoljašnjeg fotoefekta, određuje dugotalasnu granicu osetljivosti poluprovodničkog fotootpornika.

T a b l i c a V. 6

Poluprovodnici sa fotoprovodnošću u infracrvenoj oblasti spektra pri $t = 20^{\circ}C$ (po Frederiku i Blantu)

Jedinjenje	ΔE , eV	λ_o , μ	Jedinjenje	ΔE , eV	λ_o , μ
PbS	0,4	3,1	Mg ₂ Sn	0,22	5,6
PbTe	0,34	3,7	Bi ₂ S	1,25	0,98
PbSe	0,25	5,0	Ag ₂ S	0,90	1,38
InSb	0,16	7,8	MoS ₂	0,60	2,1
InAs	0,3	4,1	HgTe	0,40	3,1
GaSb	0,65	1,9	ZnSb	0,55	2,25
MgSb	0,80	1,55	Cd ₃ As ₂	0,60	2,10

U tablici V.6 date su širine zabranjene zone i dugotalasne granice osetljivosti nekih poluprovodničkih jedinjenja koja pokazuju fotoprovodnost u infracrvenoj oblasti spektra.

U daljem tekstu će biti razmatrani samo neki od fotootpornika navedenih u tablici, pošto su ostali zasada samo teorijski

interesantni za objašnjavanje pojava koje se dešavaju u poluprovodnicima.

Treba unapred napomenuti da u objavljenim materijalima razni autori navode međusobno različite vrednosti širine zabranjene zone i dugotalasne granice osetljivosti. To se može objasniti kako količinom i nečistoćom u ispitivanim uzorcima, tako i tačnošću i načinom izvođenja eksperimenata. Osim toga, u najvećem broju radova usvojeno je, kao i u dатој tablici, da se kao dugotalasna granica osetljivosti definiše ona talasna dužina gde osetljivost pada na 50% od svoje maksimalne vrednosti. Neki autori se međutim drže granice sa osetljivošću 10% od maksimalne. Radi olakšavanja upoređivanja različitih rezultata u daljem ćemo se pridržavati definicije dugotalasne granice usvojene u tablici V.6.

Istorijski su u infracrvenim uređajima kao prijemnici prvo počeli da se primenjuju fotootpornici od jedinjenja olova: olovosulfidni, olovoteluridni i olovoselenidni.

Ova jedinjenja predstavljaju poluprovodnike kako n- tako i p-tipa, sa pokretljivošću nosilaca od $1-50 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$ za polikristalne slojeve dobijene isparavanjem. U monokristalima je pokretljivost nosilaca znatno veća i pri sobnoj temperaturi (290°K) ima vrednosti ovog reda

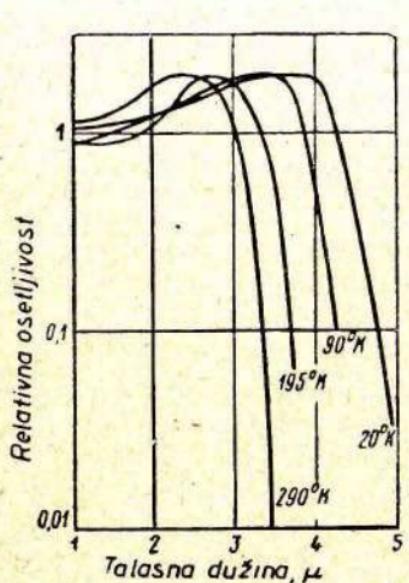
	PbS	PbTe	PbSe
Pokretljivost elektrona	640	2100	$1.400 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$
Pokretljivost šupljina	800	840	$1.400 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$

Pri niskim temperaturama pokretljivost nosilaca brzo raste i dostiže kod PbS, pri temperaturi 77°K , $- 10^4 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$, a pri 20°K $- 10^5 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot \text{V}$. Ovo i uslovljava povećanje osetljivosti fotootpornika pri njihovom hlađenju. Za razliku od toplotnih detektora, fotootpornici imaju jasno izražen maksimum osetljivosti i malu vremensku inerciju.

Bez obzira na to što se u prirodi sreću čisti kristali PbS — galenit, PbTe — altait i PbSe — klostalit, u infracrvenim uređajima se koriste veštački fotoosetljivi slojevi ovih jedinjenja.

U zadnje vreme razrađene su dve metode za dobijanje fotoosetljivih slojeva — hemijska i fizička.

U prvom slučaju, tanak fotoosetljivi sloj se taloži iz rastvora u prisustvu oksidatora. Ovi slojevi, posle pokrivanja sa zaštitnim lakom, mogu se ostaviti otkriveni na vazduhu.



Sl. V. 8a. — Promena spektralne osetljivosti PbS pri hlađenju

U drugom slučaju, osetljivi sloj se dobija naparavanjem u vakuumu i naknadnom termičkom obradom u atmosferi sa malim pritiskom kiseonika, ili direktno naparavanjem u atmosferi sa malim pritiskom kiseonika.

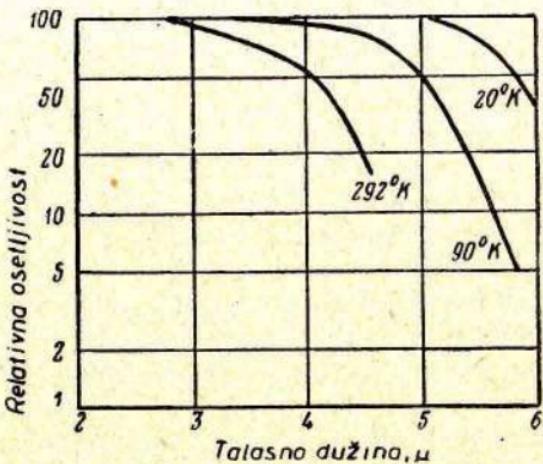
Fotoosetljivi slojevi fotootpornika (debljine oko 1μ) koji se dobijaju naparavanjem imaju poroznu strukturu koja se sastoji od skupina kristalića dimenzija 0,1 do 1μ . Otpor dobijenih slojeva PbS i PbSe je na sobnoj temperaturi reda $0,5 - 2 \text{ M}\Omega$. Pri hlađenju slojeva njihov otpor naglo raste, dostižući za PbTe i PbSe vrednosti od više desetina megoma (na primer, do $30 - 50 \text{ M}\Omega$ za PbTe).

Hlađenjem fotoosetljivih slojeva jedinjenja olova povezano je još jedno njihovo svojstvo: povećavanjem dubine hlađenja maksimum spektralne osetljivosti i dugotalasna granica pomeraju se ka većim talasnim dužinama, uz jednovremeno povećanje vremenske inercije detektor-a (sl. V.8a-c).

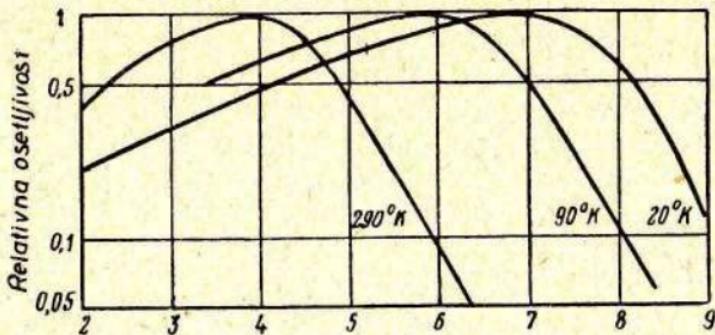
Na datim krivama, nacrtanim u polulogaritamskoj razmeri, može se primetiti da pri većim talasnim dužinama osetljivost fotootpornika brzo opada.

Mos [6] je, predlažući da se za dugotalasnu granicu osetljivosti usvoji talasna dužina ($\lambda_{0,5}$) na kojoj osetljivost iznosi 50% od svoje maksimalne vrednosti, dao za ovu granicu, pri različitim temperaturama, sledeće vrednosti:

Fotootpornici	Temperatura, °K			
	295	195	90	20
PbS	2,9 μ	3,3 μ	3,8 μ	4,1 μ
PbTe	3,9 μ	—	5,1 μ	5,9 μ
PbSe	5,0 μ	—	7,1 μ	8,2 μ



Sl. V.8b — Promena spektralne osetljivosti PbTe pri hlađenju



Sl. V.8c — Promena spektralne osetljivosti PbSe pri hlađenju

Smit [24], koji je objavio veliki pregledni rad o fotootpornicima na bazi jedinjenja olova, navodi analogne podatke i jedno-

vremeno daje vrednosti dugotalasne granice pri kojim osetljivosti iznose 1% od maksimalne vrednosti:

Fotootpornici	Temperatura, °K		
	295	90	20
PbS	3,5 μ	4,5 μ	—
PbTe	—	5,75 μ	—
PbSe	7 μ	9,3 μ	10,2 μ

Integralna osetljivost fotootpornika od jedinjenja olova takođe se mnogo menja sa temperaturom. Tako je, na primer, kod PbTe ona na sobnoj temperaturi izuzetno mala. Po pravilu, integralna osetljivost jedinjenja olova raste sa snižavanjem temperature do temperature tečnog vazduha, posle čega ostaje praktično konstantna [7]. Oovo-sulfidni fotootpornici (za razliku od oovo-teluridnih i oovo-selenidnih) mogu da rade i na sobnim temperaturama, tj. bez hlađenja. Međutim, njihova se osetljivost u tom slučaju znatno smanjuje. Ustanovljeno je da se na sobnoj temperaturi osetljivost fotootpornika menja za približno 5% pri promeni temperature od 1°C.

Granična osetljivost PbS je više od 100 puta iznad osetljivosti savremenih termoelemenata. Minimalna vrednost energije, koju fotootpornik od PbS još može da oseti u okolini maksimuma svoje osetljivosti pri propusnom opsegu od 1 Hz, reda je veličine 10^{-12} W. Smit [24] daje proračun osetljivosti nehlađenog PbS za zračenje temperature 200°C, pri propusnom opsegu od 1 Hz i dobija za ovaj slučaj, kao rezultat, $\Phi_p = 10^{-10}$ W. Hlađenje čvrstim ugljen-dioksidom povećava osetljivost i omogućava registrovanje zračenja sa $\lambda = 2,2 \mu$, pri snazi od $4 \cdot 10^{-12}$ W/Hz. Merenja su vršena sa učestanošću modulacije fluksa zračenja od 800 Hz.

Fotootpornici od PbTe imaju takođe pri dubokom hlađenju graničnu osetljivost 100 i više puta, bolju od savremenih termoelemenata [8]. Prema tome, može se očekivati da minimalna količina monohromatskog zračenja u maksimumu osetljivosti PbTe bude za propusni opseg od 1 Hz, reda $10^{-12} - 10^{-11}$ W.

Fotootpornici od PbSe imaju na temperaturi tečnog vazduha u odnosu na najbolje primerke PbTe nešto manju integralnu osetljivost, ali prevazilaze 6—10 puta osetljivost najboljih sadašnjih topotnih detektora, tj. imaju integralnu osetljivost oko $3 \cdot 10^{-11}$ W. Za razliku od PbTe, PbSe raspolaže primetnom osetljivošću na sobnoj temperaturi.

Mos [6] daje proračunske podatke za prag osetljivosti fotootpornika od PbS i PbTe, sredene ovde u tablici V.7.

T a b l i c a V.7

Proračunski podaci praga osetljivosti fotootpornika od PbS i PbTe

Vrsta fotootpornika	T, °K	q, mm ²	λ zrač, μ	Φ _p , W
PbS	273	1	—	$5 \cdot 10^{-14}$
PbS	90	1	—	$0,8 \cdot 10^{-14}$
PbS	293	10	2,2	$2 \cdot 10^{-11}$
PbS	90	10	2,2	$4 \cdot 10^{-12}$
PbTe	90	1	4	$5 \cdot 10^{-13}$

Citirana tablica pokazuje da pri registraciji zračenja sa talasnom dužinom oko 4 μ, za koje su olovo-sulfidni fotootpornici nedovoljno osetljivi, naglo rastu prednosti fotootpornika od olovo-telurida.

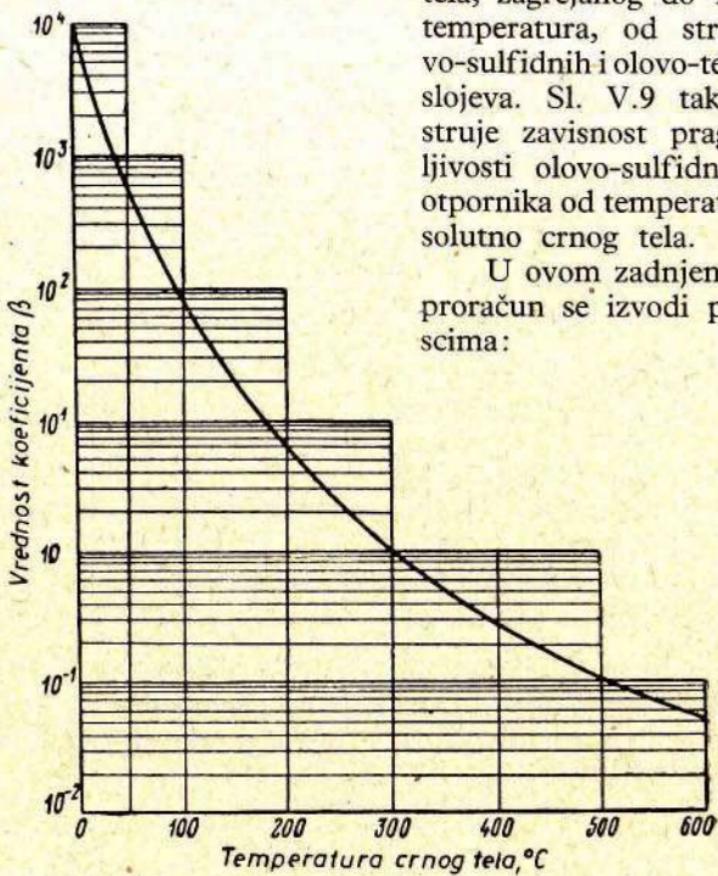
T a b l i c a V. 8

Efikasnost korišćenja zračenja apsolutno crnog tela (ACT) za razne tipove fotootpornika

t _{ACT} , °C	Efikasnost, %		
	PbS 293°K	PbTe 90°K	PbSe 90°K
300	0,5	25	48
150	0,26	8	26
50	0,01	2	11
20	0,004	1	7
0	0,001	0,6	5

Navedene prednosti se uočljivo pokazuju u tablici V.8, gde su date efikasnosti korišćenja zračenja absolutno crnog tела, zagrejanog do različitih temperatura, od strane olovo-sulfidnih i olovo-teluridnih slojeva. Sl. V.9 takođe ilustruje zavisnost praga osetljivosti olovo-sulfidnog fotootpornika od temperature absolutno crnog tela.

U ovom zadnjem slučaju proračun se izvodi po obrascima:



Sl. V.9 — Promena integralne osetljivosti PbS pri promeni temperaturi crnog tela

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{pt} &= \beta (\Phi_p) 300^\circ\text{C} \\ \beta &= \left\{ \frac{\int_0^\infty r_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty r_\lambda S_\lambda d\lambda} \right\}_{t^\circ\text{C}}^{300^\circ\text{C}} ; \end{aligned} \right\} \quad (\text{V. } 5)$$

gde je:

r_λ — spektralne gustine zračenja absolutno crnih tela sa temperaturom 300°C i $t^\circ\text{C}$

S_λ — spektralna osetljivost fotootpornika.

Pri registraciji modulisanog fluksa zračenja veliki značaj ima vremenska inercija fotootpornika koja se obično karakteriše ili frekventnom karakteristikom (tj. zavisnošću izlaznog signala sa fotootpornika od učestanosti modulacije upadnog fluksa zračenja), ili vremenskom konstantom fotootpornika, određenom vremenom za koje signal dostiže 50, ili 63, ili 90% od svoje maksimalne vrednosti.

Kako je već ukazano, vremenska konstanta fotootpornika je znatno niža nego kod topotnih prijemnika energije zračenja. Tako se vremenska konstanta PbS na temperaturi od 293°K kreće u granicama od 10^{-4} do 10^{-5} s, dok je za PbTe i PbSe manja od 10^{-5} s.

U zavisnosti od načina dobijanja fotoosetljivih slojeva vremenska konstanta $\tau_{0,5}$ može za PbS fotootpornike da uzima vrednosti od 1—2 do nekoliko stotina μs , pri korišćenju fizičke metode za dobijanje sloja, i vrednosti od nekoliko stotina μs , do 1 ms pri korišćenju hemijske metode.

Kod ovih fotootpornika postoji jako izražena zavisnost veličine vremenske konstante od temperature. Pri hlađenju sa čvrstim ugljen-dioksidom ili tečnim vazduhom vremenska konstanta može da dostigne vrednost 10^{-2} s. Iznad 200°K vremenska konstanta se brzo smanjuje sa povećanjem temperature (u prvoj aproksimaciji sa eksponencijalnom zavisnošću).

Vremenska inercija PbTe i PbSe fotootpornika je znatno manja. Kako je vremenska konstanta PbTe jednaka $5 \mu\text{s}$, a kod PbSe $0,5$ do $1,5 \mu\text{s}$, i ne menja se bitno sve do dubokog rashladivanja. To omogućava da se pomoću ovih fotootpornika ostvari, bez primetnog smanjenja izlaznog signala, registracija flukseva zračenja modulisanih učestanošću do 20 kHz.

Fotootpornici od jedinjenja olova široko se primenjuju u uređajima infracrvene tehnike u svojstvu osetljivih elemenata sistema za upravljanje vatrom, sistema za samonavođenje raketa i za njihovo aktiviranje u blizini cilja, kao i u uređajima za izviđanje.

Njihova se osetljivost od drugog svetskog rata povećala za više od dva reda veličine. Po materijalima objavljenim u literaturi [9], fotootpornici koji se serijski proizvode u SAD imaju karakteristike navedene u tablici V.9.

T a b l i c a V. 9

Karakteristike slojnih fotootpornika za uređaje infracrvene tehnike

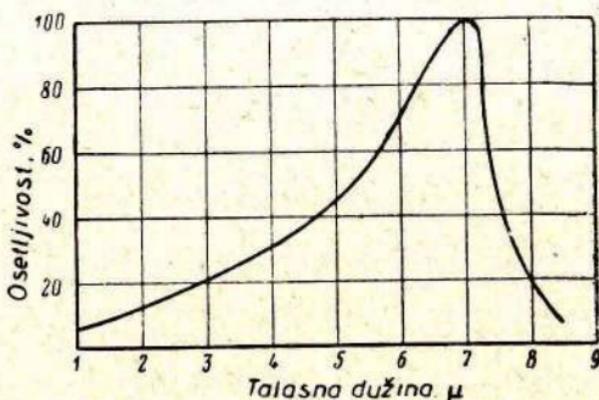
Vrsta foto-otpornika	λ maks, μ	T, $^{\circ}$ K	q, cm^{-2}	Ep, W/cm^2	τ_{us}
PbS	2,2	290	0,25	$2 \cdot 10^{-10}$	40
PbTe	4	90	0,04	$2 \cdot 10^{-10}$	10
PbSe	4	77	—	10^{-9}	10

Bez obzira na uspehe koji su postignuti u izradi visokoosetljivih i brzih fotootpornika na bazi jedinjenja olova, počevši od oko 1952. god. posebna pažnja počela je da se poklanja proučavanju poluprovodničkih jedinjenja sastavljenih od elemenata II, III i V grupe periodnog sistema, a takođe i germanijuma. Interesovanje za njih izazvano je time što je u poređenju sa jedinjenjima olova, tehnologija dobijanja takvih fotootpornika jednostavnija, a oni, pored toga, uspešno konkurišu jedinjenjima olova u dugotalasnoj granici osetljivosti, vremenskoj inerciji i veličini sopstvenih šumova.

Kao detektor infracrvenog zračenja, od ovih jedinjenja najšire se primenjuje indijum-antimonid InSb. On ima izraženu fotoprovodnost i u slojnim i u monokristalnim uzorcima, kao i fotogalvanski, fotomagnetni i bočni fotoefekat. Posebna karakteristika indijum-antimonida pri njegovom korišćenju kao detektora infracrvenog zračenja jesu zanemarljivo mali sopstveni šumovi (do 10^{-8} V), koji pri odgovarajućem izboru pojačavačkih šema omogućavaju registraciju vrlo malih flukseva zračenja.

Vremenska konstanta je kod InSb i na sobnoj temperaturi i pri dubokom hlađenju vrlo mala (do 10^{-7} s). Eksperimentalno je utvrđeno da pri hlađenju InSb tečnim vazduhom, vreme za koje izlazni signal dostiže 63% svoje maksimalne vrednosti iznosi približno 0,8 μ s. Na sobnoj temperaturi vremenska konstanta fotoprovodnosti nije mogla biti izmerena.

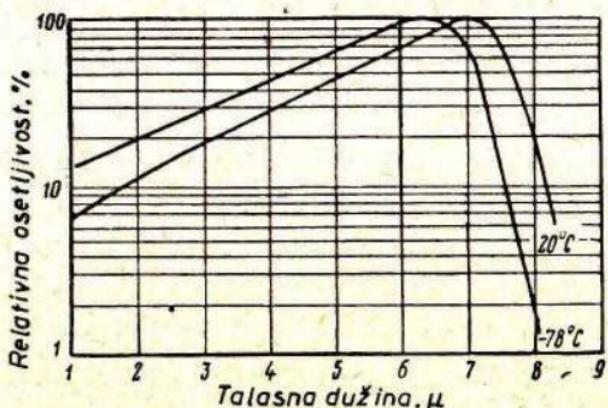
Spektralna raspodela osetljivosti InSb fotootpornika na sobnoj temperaturi (sl. V.10) pokazuje da ona od svih poznatih neohlađenih fotootpornika ima najveću dugotalasnu granicu osetljivosti $\lambda_{0,5} = 7,5 - 7,75 \mu$, što odgovara širini zabranjene zone od 0,16 eV. Međutim, prema ispitivanjima, u ovim je uslovima integralna osetljivost indijum-antimonida isuviše mala za njegovu šиру primenu u infracrvenim uredajima.



Sl. V.10 — Spektralna osetljivost InSb pri $t = 20^\circ C$

Rashladivanje indijum-antimonida pomera maksimum osetljivosti i dugotalasnu granicu $\lambda_{0,5}$ prema kraćim talasnim dužinama sa priraštajem od $1,7 \cdot 10^{-4}$ eV/stepenu, što se može videti i sa krivih sa sl. V.11.

Razni autori daju različite vrednosti za dugotalasnu granicu osetljivosti indijum-antimonida. Međutim, većina njih procenjuje prag osetljivosti za zračenje sa talasnom dužinom od 4μ kao veličinu koja je, pri hlađenju fotoosetljivog sloja do $90 - 77^\circ K$, reda $10^{-11} - 5 \cdot 10^{-12} W/cm^2$. Prepostavlja se da su razlike u oceni dugotalasne granice monokristala indijum-antimonida povezane sa čistoćom materijala i metodama njenog određivanja. Pošto su ispitivanja osobina fotoprovodnosti vršena sa srazmerno čistim monokristalima indijum-antimonida, dobijenim u laboratorijskim uslovima, to u industrijskim razmerama, gde je dobijanje vrlo čistih uzoraka otežano, fotootpornci od indijum-antimonida mogu da imaju karakteristike koje se razlikuju od onih navedenih u tablici V. 10. Ovo u izve-



Sl. V.11 — Spektralna osetljivost InSb na različitim temperaturama

T a b l i c a V. 10

Glavne karakteristike fotootpornika od InSb prema podacima [10]

T, $^{\circ}$ K	R _{un} , kΩ	Φ_p , W	λ_{maks} , μ	$\lambda_{0,5}$, μ	Osetljivost V/W
90	2,08	$2,6 \cdot 10^{-11}$	5,6	5,85	1.300
195	1,8	$7 \cdot 10^{-11}$	5,6	6	400
249	0,49	$4 \cdot 10^{-10}$	6,2	6,85	30
292	0,12	$7 \cdot 10^{-10}$	6,2	7,2	1

snoj meri objašnjava karakteristike komercijalnih fotootpornika od indijum-antimonida (tablica V. 11) objašnjene u štampi SAD [9].

Od velikog je interesa, pored indijum-antimonida, i germanijum, sa kojim je, takođe, moguće realizovati više metoda registracije infracrvenog zračenja.

T a b l i c a V. 11

Karakteristike komercijalnih fotootpornika od InSb, proizvedenih u SAD u 1958 god.

Vrsta foto-otpornika	λ_{maks} , μ	T, $^{\circ}$ K	q, cm^2	τ , us	Osetljivost za zračenje sa $\lambda = 4\mu$, W/cm^2
InSb	4	90	0,014	1	$3,6 \cdot 10^{-6}$
InSb	5	77	0,001	1	$1 \cdot 10^{-8}$

Čisti germanijum je siva materija, slična metalu, sa metalnim sjajem. Od glatke površine odbija se oko 50% vidljive svetlosti. U infracrvenoj oblasti spektra koeficijenat refleksije se smanjuje. Specifična otpornost čistog germanijuma je $47 \Omega \cdot \text{cm}$, a širina zabranjene zone na 0°K — 0,75 eV. U hemijskom pogledu germanijum je vrlo postojan.

U svojstvu detektora infracrvenih zrakova, germanijum se može koristiti kao fotootpornik, kao fotodioda i kao elemenat koji menja svoju dielektričnu konstantu pri ozračivanju sa infracrvenim zračenjem.

Kao fotootpornik, čisti germanijum može da se koristi samo na temperaturi tečnog azota, pošto na većim temperaturama dolazi do velikih tamnih struja. U cilju povećanja fotoprovodnosti germanijuma i proširenja granica njegove spektralne osetljivosti, germanijumu se veštački dodaju strane primešane uvođenjem atoma zlata, antimona i cinka. Kao fotootpornik, germanijum se najviše upotrebljava sa primešama zlata. Rastvorljivost zlata u germanijumu iznosi oko 10^{15} atoma po 1 cm^3 . Dodatavanjem primeša zlata germanijumu n- i p-tipa uspelo je da se dobiju visokoosetljivi fotootpornici osetljivi pri hlađenju sa tečnim azotom u spektralnoj oblasti do 10μ .

U tablici V.12 izneti su podaci za komercijalne primerke germanijumskega fotootpornika sa primešama zlata. Date su, takođe, i proračunate vrednosti osetljivosti.

T a b l i c a V.12

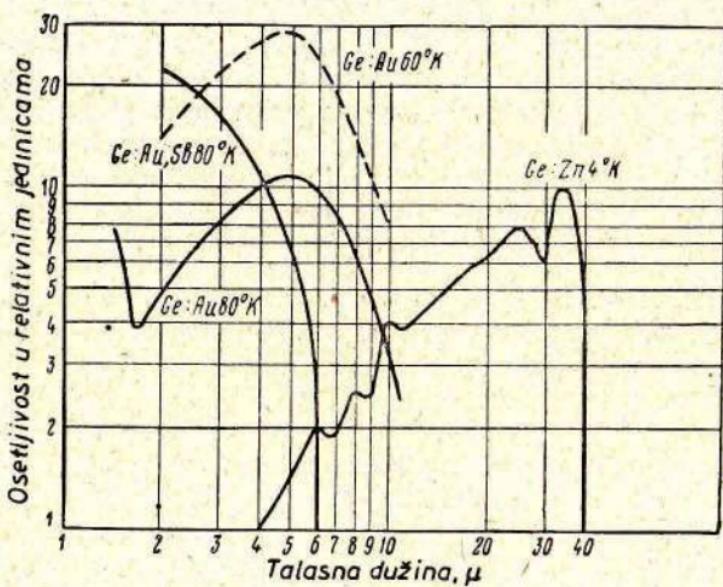
Glavne karakteristike komercijalnih tipova germanijumskega fotootpornika sa primešama zlata (9)

Vrsta provodnosti	λ maks, μ	T, $^{\circ}\text{K}$	σ , cm^2/eV	r, μs	Prag osetljivosti za zračenje sa $\lambda = 4 \mu, \text{W/cm}^2$
p	4	77	0,04	1	$1 \cdot 10^{-9}$
p	4	77	0,12	0,1	$4,4 \cdot 10^{-10} \star$
n	4	90	0,16	20	$1,6 \cdot 10^{-10}$
n	4	90	0,16	20	$3,8 \cdot 10^{-10} \star$

Primedba: proračunate vrednosti osetljivosti označene su znakom \star .

U literaturi isto tako postoje saopštenja o razvoju velikog broja germanijumskih fotootpornika za otkrivanje ciljeva sa relativno niskom temperaturom. Prema literaturi (11), firma Vestinghaus je razvila germanijumske fotootpornike p-tipa sa primesama zlata, koji je, pri hlađenju sa tečnim azotom, predviđen za rad u području od $1-10 \mu$. Fotootpornik ima prag osetljivosti (ekvivalentan snazi šuma) $5 \cdot 10^{-11} \text{ W}$ na 78°K i $1,6 \cdot 10^{-11} \text{ W}$ na 60°K . Vremenska konstanta je manja od $0,2 \mu\text{s}$. Napominje se da PbSe u ovim uslovima ima osetljivost istog reda u talasnom području $2-5 \mu$, pri vremenskoj konstanti od $30 \mu\text{s}$.

Spektralna osetljivost germanijumskih fotootpornika prikazana je na sl. V.12.



Sl. V.12 — Spektralna osetljivost germanijumskih fotootpornika sa različitim primesama

Za germanijumski fotootpornik sa primesama cinka tipa 536—1ZIP, koji radi na temperaturi tečnog helijuma, tvrdi se da se njegova osetljivost prostire do 40μ , uz vremensku konstantu od $0,01 \mu\text{s}$ [12]. Fotoosetljivi sloj ima dimenzije $2 \times 2 \text{ mm}$.

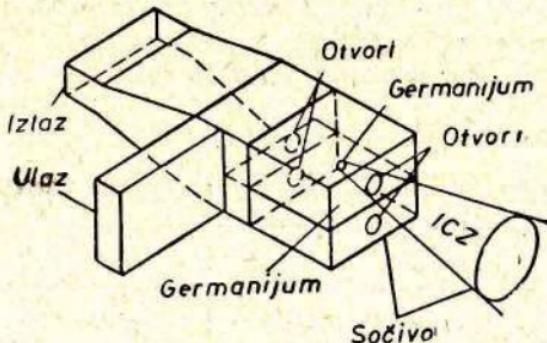
Prag osetljivosti za zračenje crnog tela sa $T = 500^{\circ}\text{K}$ odgovara ekvivalentnoj snazi šuma od $4 \cdot 10^{-9} \text{ W}$, pri propusnom opsegu od 1 Hz i učestanosti modulacije fluksa zračenja od 800 Hz.

Napominje se [13] takođe da je uspelo da se na bazi germanijumskog fotootpornika sa primesama antimiona, koji radi na temperaturi tečnog helijuma, konstruiše laboratorijski uređaj za registraciju zračenja u talasnom području od 55–100 μ , uz vremensku konstantu od 10^{-5} s .

Na kraju treba ukazati na još jednu osobinu germanijumskih fotootpornika, koja omogućava izradu visokoosetljivog radio-uredaja za registraciju energije infracrvenog zračenja [14, 15]. Ovaj uređaj predstavlja, u stvari, kristal germanijuma sa primesama zlata, koji se u normalnim temperaturnim uslovima pobuduje poljem vrlo visoke učestanosti (sl. V.13).

Kristal germanijuma smešten je unutar šupljeg rezonatora velike selektivnosti. Pri delovanju infracrvenog zračenja na kristal, dolazi do promene kompleksne dielektrične konstante germanijuma i razdešavanja rezonatora.

Detektor se sastoji od talasovodnog trojnika, čija je jedna grana opterećena sa dva jednakona rezonatora sa po jednim germa-



Sl. V.13 — Skica germanijumskog detektora infracrvenog zračenja u talasovodu

nijumskim kristalom u svakom od njih. Druga grana služi za dovođenje mikrotalasne energije iz izvora napajanja. Signali reflektovani od rezonatora sabiraju se u trećoj, izlaznoj grani sa faznom razlikom od 180° . Ako reflektovani signali imaju

jednake amplitude, na izlazu nema nikakvog signala. Ako je jedan od kristala ozračen infracrvenim zracima, tada se jednakost amplituda i postojeći odnos faza narušavaju i na izlazu se dobija primetan signal.

5. PRIJEMNICI SA FOTOGALVANSKIM EFEKTOM (VENTILSKI PRIJEMNICI)

Pretvaranje energije zračenja u električnu pomoću fotoosetljivih slojeva, može da se ostvari korišćenjem ventilskog ili, kako ga još nazivaju, fotogalvanskog efekta. Njegova suština je u tome što se na mestu dodira poluprovodnika i metala obrazuje tanak prelazni sloj sa jednosmernom provodnošću (zaprečni sloj). Pri ozračivanju takvog prijemnika fluksom zračenja nosioci struje mogu da se kreću samo u jednom pravcu, na primer od poluprovodnika ka metalu, stvarajući između njih razliku potencijala i struju u spoljnjem kolu.

Ventilski prijemnici imaju, u odnosu na fotoemisione slojeve, veliku integralnu osetljivost, što se može videti iz tablice V.13.

Međutim, ventilski prijemnici nisu našli širu primenu u uređajima infracrvene tehnike zbog velike inercije, nelinearnosti svetlosne karakteristike pri povećanom opterećenju i srazmerno malog radnog talasnog područja od $0,5 - 1,4 \mu$.

T a b l i c a V.13

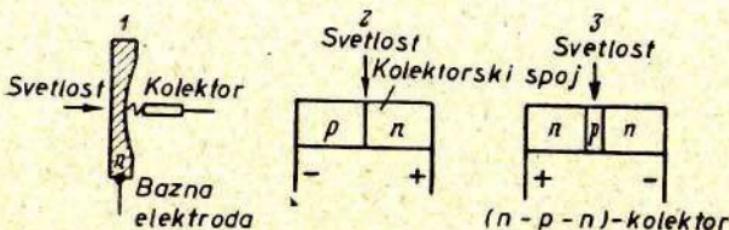
Integralna osetljivost prijemnika za izvor sa temperaturom. $T_c = 2850^{\circ}K$

P r i j e m n i k	S, $\mu A/lm$
Sa spoljašnjim fotoefektom	150 – 200
Ventilski srebro-sulfidni	8.000 – 8.700
Ventilski talijum-sulfidni	do 11.000

U posleratnom periodu počeli su prilično široko da se primenjuju novi fotoelektrični prijemnici zračenja — fotodiode (FD) i fototranzistori (FT), čiji je princip rada analogan ventilskom fotoefektu.

Fotodiode predstavljaju znatno poboljšanje u odnosu na ranije razvijene ventilske prijemnike, kako zbog svoje spektralne i integralne osetljivosti, tako i zbog male vremenske inercije, visokog koeficijenta korisnog dejstva i stabilnosti karakteristika u vremenu.

Danas su u praksi najrasprostranjenije germanijumske fotodiode ova tri tipa: sa tačkastim spojem, sa n-p spojem i sa n-p-n spojem sa strujnim pojačanjem (fototranzistori). Njihove skice date su na sl. V.14.

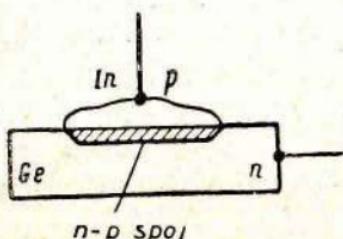


Sl. V.14. — Skice strukture germanijumskih fotodioda 1, 2 i fototranzistora 3

Ove diode mogu da se vežu u šemi za registraciju fluksa zračenja na dva načina: redno sa izvorom jednosmerne struje napona od nekoliko volti do 80—100 V (fotodiodni režim) i bez izvora napajanja (aktivni režim). U prvom slučaju se postiže znatno veća osetljivost prijemnika.

Tačkasta fotodioda je tanka pločica monokristala germanijuma n-tipa (sa elektronskom provodnošću), udubljena na unutrašnjoj strani. Na tom mestu se za germanijum vezuje kolektor — metalna elektroda od volframove žice u obliku opruge. Pri osvetljavanju spoljne površine germanijumske pločice, oko vrha kolektora se obrazuje oblast prečnika oko 1 mm sa provodnošću p-tipa. U n-p spoju, koji se stvara u ovoj oblasti, ostvaruje se potreban prelaz nosilaca kroz zaprečni sloj. Znak pomenjanja odgovara u ovom slučaju smeru inverzne polarizacije zapačnog spoja, tj. od poluprovodnika ka metalu.

Konstrukcijski se tačkaste fotodiode izvode u obliku cilindričnih štapića, prečnika 5–6 mm i dužine 10–12 mm. Germanijumska pločica sa tačkastim spojem pričvršćuje se pomoću smese otporne na vlagu i toplotu za jednu od čeonih strana štapića, koja predstavlja prijemnu površinu fotodiode. Na drugoj strani štapića izvodi se priključak kolektora.



Sl. V.15 — Tačkasta fotodioda sa kapljicom indijuma

jumom n-tipa spojena zavarivanjem kapljica monokristala nekog drugog materijala sa provodnošću p-tipa, na primer indijuma. Konstrukcija takve fotodiode prikazana je na sl. V.15. U ovom slučaju se na račun povećane pokretljivosti i koncentracije šupljina u indijumu, stvara efikasniji međusloj sa n—p prelazom, što omogućava značajno povećanje osetljivosti tačkastih fotodioda.

Površinske germanijumske fotodiode sa n—p i n—p—n spojevima izrađuju se od pravougaonih pločica germanijumovih monokristala sa različitim tipovima provodnosti. Dimenzije pločica su reda $1 \times 1 \times 3,5$ mm. Kod fotodioda sa n—p—n spojevima (fototranzistora) oba spoja nalaze se na rastojanju od oko 0,05 mm.

Za n—p prelaze znak pomeranja odgovara inverznom smeru polarizacije (element sa provodnošću n-tipa jeste pozitivan kraj).

Kod n—p—n spojeva, na jedan od spojeva se dovodi napon u inverznom smeru a na drugi — mali napon u direktnom smeru

Osetljivost sva tri tipa fotodioda zavisi od mesta na koje fluks zračenja pada na površinu germanijuma.

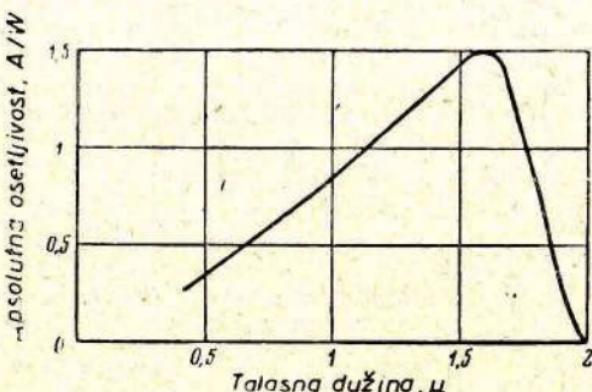
Najbolja efikasnost se postiže kada fluks zračenja pada u granicama od nekoliko desetih delova milimetra od mesta spoja. Germanijumske fotodiode po svojoj konstrukciji imaju male

U poslednje vreme počele su široko da se primenjuju tačkaste fotodiode, kod kojih je umesto volframskog kolektora sa germanijumom n-tipa spojena zavarivanjem kapljica monokristala sa provodnošću p-tipa, na primer indijuma. Konstrukcija takve fotodiode prikazana je na sl. V.15. U ovom slučaju se na račun povećane pokretljivosti i koncentracije šupljina u indijumu, stvara efikasniji međusloj sa n—p prelazom, što omogućava značajno povećanje osetljivosti tačkastih fotodioda.

dimenziije. Tako za posmatranu francusku fotodiodu sa dužinom površinskog spoja od 2,6 mm, „efektivna površina“ iznosi $1,05 \text{ mm}^2$.

Tamna struja germanijumskih fotodioda u fotodiodnom režimu, ima na sobnoj temperaturi vrednost u granicama $3-10 \mu\text{A}$, povećavajući se pri priraštaju temperature od 1°C za $2-3\%$ kod tačkastih i za 10% kod površinskih fotodioda.

Spektralna osetljivost germanijumskih fotodioda proteže se sve do $1,8-2$ sa maksimumom u okolini $1,5$ (sl. V.16).



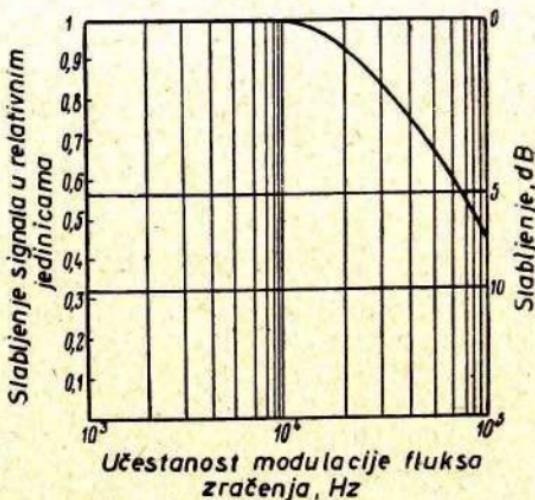
Sl. V.16 — Spektralna osetljivost germanijumske fotodiode

Ovakva raspodela osetljivosti dobro se slaže sa radovima Šejva i Mosa [17, 18], koji su merili kvantni izlaz germanijumske fotodiode sa n-p spojem.

Za razliku od starih ventilskih prijemnika, germanijumske fotodiode imaju vrlo malu vremensku inerciju. Na sl. V.17 data je frekventna karakteristika francuske fotodiode, iz koje se vidi da je sve do 10^4 Hz fotodioda praktično bez vremenske inercije i da se vrednost osetljivosti tek pri učestanosti od 75 kHz smanjuje dva puta u odnosu na režim konstantnog ozračivanja.

Voltamperne karakteristike germanijumskih fotodioda zavise od njihovog tipa. Tako, voltamperne karakteristike tačkastih

fotodioda, pri većim intenzitetima ozračivanja odstupaju od linearne zavisnosti. Za razliku od tačkastih, površinske fotodiode imaju voltamerne karakteristike sa dobrom linearnošću pri maloj vrednosti napona zasićenja. Njihova paralelnost određena je proporcionalnošću vrednosti struje i fluksa zračenja.



Sl. V.17 — Frekventna karakteristika germanijumske fotodiode

Šejv [17] daje sledeće vrednosti glavnih karakteristika germanijumskih fotodioda (tablica V.14).

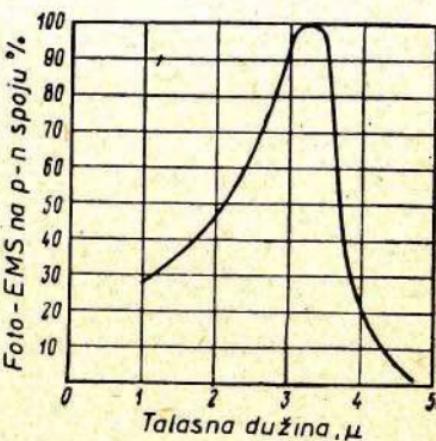
T a b l i c a V.14

Vrednosti glavnih karakteristika germanijumskih fotodioda

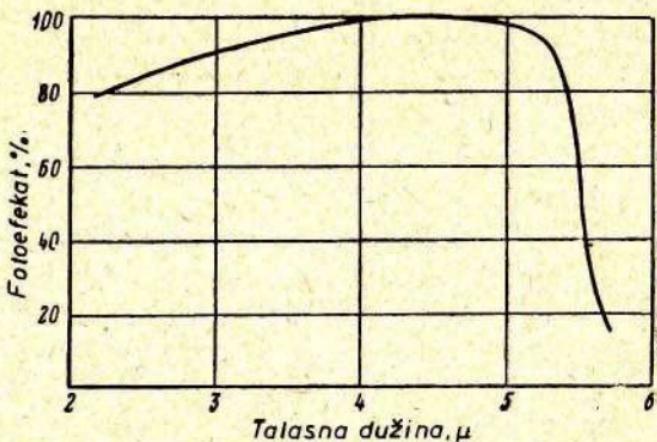
Vrsta fotodiode	Struja	Temperaturni koeficijent tamne struje, %	Otpor, Ω	Osetljivost A/lm
Tačkasta	$1-2 \mu A$	2-3	20.000	0,1
n-p	$1-10 \mu A$	10	10^7	0,03
n-p-n	$20-40 \mu A$	10	10^5	3-10

Granice osetljivosti savremenih fotodioda proširene su korišćenjem novih poluprovodničkih jedinjenja. U novije vreme razvijene su fotodiode na bazi InSb i InAs. Na sl. V.18 date su spektralne karakteristike ovih fotodioda. One raspolažu visokom osetljivošću u znatno širem intervalu talasnih dužina uz malu vremensku inerciju, ali zato je potrebno za njihov rad hlađenje do temperature 75–77 °K.

U štampi su bile objavljene neke vrednosti karakteristika (računske i eksperimentalne) za fotodiode od indijum-antimonida, na osnovu kojih je sastavljena tablica V.15. Vrednosti praga osetljivosti date su u tablici za zračenje sa talasnom dužinom od 4μ .



Sl. V.18a — Spektralne karakteristike fotodioda od InSb



Sl. V.18b — Spektralne karakteristike fotodioda od InAs.

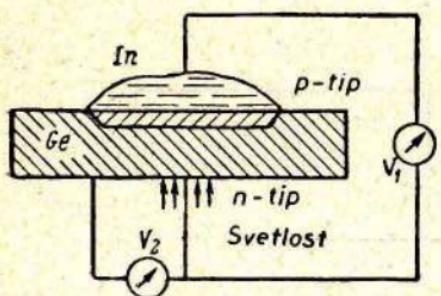
Karakteristike fotodioda od indijum-antimonida

λ maks, μ	Temperatura fotosloja °K	Površina fotosloja, cm^2	Vremenska konstanta, μs	Prag osetljivosti W/cm^2
4	77	0,01	2	$1,1 \cdot 10^{-8}$
4	77	0,01	2	$1,1 \cdot 10^{-9}*$

Primedba: Izračunate vrednosti osetljivosti obeležene su znakom *.

6. PRIJEMNICI SA BOČNIM FOTOEFEKTOM

Kao što je bilo objašnjeno u odeljku 5, pri osvetljavanju poluprovodničkog p—n spoja germanijumske fotodiode, između dve strane ovog spoja nastaje fotoelektromotorna sila. Dalja istraživanja fotoelektričnog efekta u germanijumskim fotodioidama dovela su do otkrića takozvanog bočnog fotoefekta, koji se pojavljuje pri nejednakom osvetljavanju površine prijemnika [20, 21].



Sl. V.19 — Šema nastajanja bočnog (poduznog) fotoefekta kod fotodiode

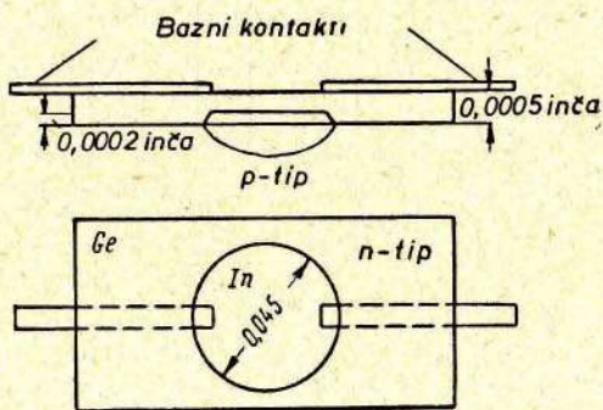
Suština bočnog fotoefekta jeste u nastajanju dopunske fotoelektromotorne sile, paralelnog spoja, koja se superponira sa fotoelektromotornom silom između dve suprotnе strane spoja, za slučaj da fluks zračenja pada na osetljivu površinu nesimetrično u odnosu na osu fotoelementa. Šema takve pojave prikazana je na sl. V.19. Ako se germanijumska fotodioda ozrači svet-

lom mrljom (manjom po dimenzijama od osetljive površine) simetričnom u odnosu na njenu osu, onda će voltmeter V₁ pokazati prisustvo napona na p—n spoju fotodiode. Ako se sada svetlosna mrlja pomera u bilo koju stranu u odnosu na centralnu tačku (osu prijemnika), voltmeter V₂, priključen između dve pro-

izvoljne tačke na površini germanijumskog sloja, pokazaće prisustvo napona između tih tačaka. Potencijal će biti najniži u oblasti svetle mrlje i povećavaće se srazmerno udaljavanju od centra mrlje ka krajevima prijemnika.

Da bi se koristio samo bočni fotoefekat, na prijemnik (germanijumu pločicu sa utopljenom kapljom indijuma) se nanose dva bazna priključka za skidanje bočne fotoelektromotorne sile, kose razmeštaju simetrično u odnosu na centar osetljive površine. Potreba za kontaktom sa indijumovom kapljom otpada, pošto se uzdužna fotoelektromotorana sila u ovom slučaju ne meri i indijum se može ostaviti da, kako se to kaže, električno „pliva“.

Kod ovakve konstrukcije fotodiode, bočna fotoelektromotorna sila se menja od pozitivne do negativne vrednosti u zavisnosti od položaja svetlosne mrlje na površini u odnosu na osu simetrije fotoelementa. Prema tome, tačkasti svetlosni izvor, čiji se lik kroz objektiv projektuje na prijemnik, stvaraće signal

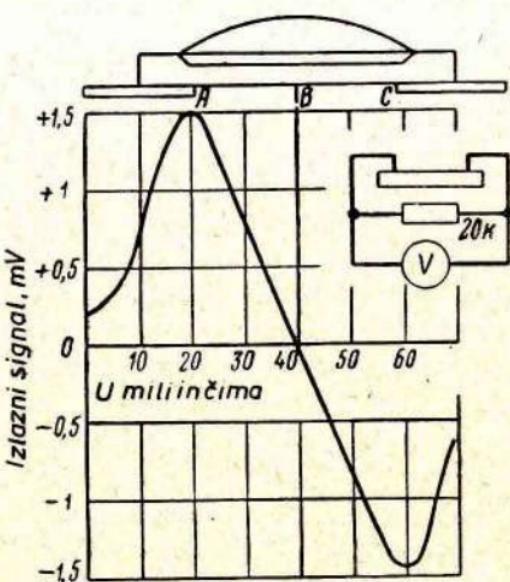


Sl. V.20a — Konstrukcija fotodiode sa bočnim fotoefektom

koji se menja u zavisnosti od ugla između ose simetrije sistema prijemnik — objektiv i pravca svetlosnog izvora, tj. prijemnik može da meri ugaoni položaj svetlosnog izvora nultom metodom visoke tačnosti. Pri promeni pravca svetlosnog izvora menja se i znak signala.

U literaturi je opisana sledeća konstrukcija fotoelementa sa bočnim fotoefektom (sl. V. 20a).

Germanijumska pločica deblijine 0,0127 cm (0,005 inča) i površine $0,635 \text{ cm}^2$ (0,25 kv. inča)* imala je specifičnu otpornost



Sl. V.20b — Zavisnost fotoelektromotorne sile od položaja svetle mrlje na osetljivoj površini

$1-2 \Omega/\text{cm}$. Kaplja indijuma prečnika $0,114 \text{ cm}$ (0,045 inča) utapana je u germanijum na dubinu od $0,005 \text{ cm}$ (0,002 inča) i imala je specifičnu otpornost u području spoja od $0,001 \Omega/\text{cm}$. Dva bazna kontakta bila su simetrično razmeštena.

Ako svetlosni zrak pada u centar osetljive površine iznad kaplje indijuma, na kontaktima se pojavljuju dva međusobno jednaka napona, tako da je napon između baznih priključaka jednak nuli (sl. V.20b).

Ako se svetla tačka pomeri iz centra, rezultantni izlazni napon može se izračunati po formuli:

* Verovatno je jedna od ovih mera pogrešna. — Prim. prev.

$$U_{izl} = \frac{\rho}{q} \frac{Ix_1}{2l} \left(-x_1 \right) + \frac{\rho}{q} \frac{I(2l - x_1)}{2l} \left(2l - x_1 \right) = \\ = 2 \frac{\rho}{q} I \left(1 - x_1 \right), \quad (V. 6)$$

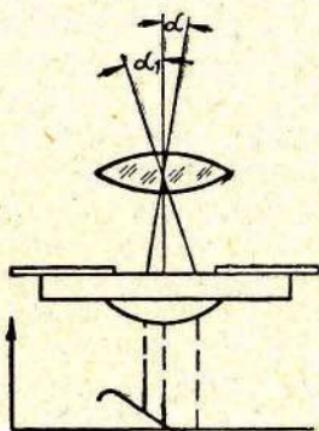
gde je: ρ — otpor;

q — površina osetljivog elementa;

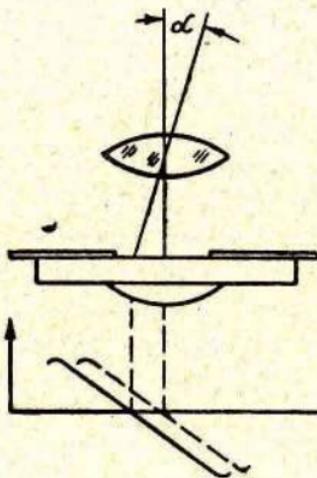
$2l$ — rastojanje između baznih kontakata;

x_1 — tekuća koordinata svetle mrlje.

Kada se svetla tačka nalazi u položaju A, rezultantni napon, koji predstavlja razliku napona levog i desnog kraja prijemnika u odnosu na svetlu tačku, dostiže svoju maksimalnu vrednost (za posmatrani prijemnik $U_{izl} = 1,5$ mV). Pri kretanju svetle



Sl. V.20c — Šema određivanja ugaonog položaja svetlosnog izvora



Sl. V.20d — Simuliranje zaokretanja uređaja pomeranjem ose karakteristike

tačke prema položaju C, izlazni napon počinje da se smanjuje, prolazi kroz nulu i menja znak, dostižući maksimalnu vrednost suprotnog znaka u tački C.

Dobijena kriva promene izlaznog napona biće na radnom delu pravolinijska. Na granicama radnog dela prijemnika, u neposrednoj blizini baznih kontakata, kriva naglo pada zbog

gubitka osetljivosti na granicama zone utapanja indijumove kaplje.

Pomoću sličnog prijemnika mogu se dobiti i dve koordinate, ako se uvede i drugi par baznih priključaka normalno na prvi. U takvom prijemniku odstupanje svetlosnog zraka od centra biće određeno parom međukontaktnih napona, čija amplituda i znak jednoznačno određuju položaj svetlosne mrlje na površini i, prema tome, i pravac izvora fluksa zračenja.

Pomoću navedenih prijemnika moguće je, dakle, određivati ugaoni položaj izvora zračenja, tj. faktički ostvariti otkrivanje i praćenje izvora zračenja. U stvari, ako fluks zračenja fokusiramo optičkim sistemom u centralni deo prijemnika (sl. V.20v), to će na njegovom izlazu napon biti jednak nuli. Ako se svetlosni fluks fokusira desno ili levo od ose simetrije fotoelementa, na njegovom izlazu će se pojaviti napon. Veličina i znak napona omogućavaju da se sudi o udaljenju mrlje levo ili desno od ose simetrije. Zaokrećući uređaj na odgovarajuću stranu do trenutka iščezavanja izlaznog napona, moguće je odrediti ugaoni položaj izvora zračenja.

U literaturi se navodi da tačnost određivanja ugaonog položaja izvora zračenja pomoću ovakve nulte metode dostiže 0,1 ugaonu sekundu, pošto greška u poklapanju svetlosne mrlje sa osom simetrije prijemnika ne prelazi 100 \AA . Ako se koristi prijemnik sa dva para baznih priključaka, ugaoni položaj izvora zračenja moguće je sa istom tačnošću odrediti jednovremeno po dve koordinate — po azimutu i po mesnom uglu.

Nedostatak ovakvog načina određivanja ugaonog položaja cilja jeste njegova velika inercija, pošto se prijemnik mora zaokretati do trenutka iščezavanja izlaznog napona. Zbog ovoga, opisana metoda ne omogućava ostvarivanje određivanja ugaonog položaja izvora zračenja sa kratkim dejstvom, na primer bleska od ispaljivanja artiljerijskih oruđa. Trajanje bleska predstavlja vreme reda nekoliko milisekundi i, razumljivo, zaokretanje prijemnika za tako kratko vreme je nemoguće.

Bočni fotoefekat omogućava, međutim, ostvarivanje simuliranja zaokretanja prijemnika pomeranjem ose karakteristike (sl. V.20d) ili, kako se obično kaže, primenom „elektronskog zaokretanja“.

Pomeranje karakteristike može se postići dovođenjem napona pomeranja odgovarajućeg znaka na bazne elektrode.

Uticaj napona pomeranja, dovedenog između baznih priključaka iz spoljnje baterije, može se odrediti iz odnosa:

$$\left. \begin{aligned} U_c &= 2 \frac{\rho}{q} I (1 - c U_b - x_1), \\ c &= \frac{R_p}{R_p - R_b} \frac{q_p}{2\rho I}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{V. 7})$$

gde je: U_b — napon baterije pomeranja;

R_b — unutrašnji otpor baterije;

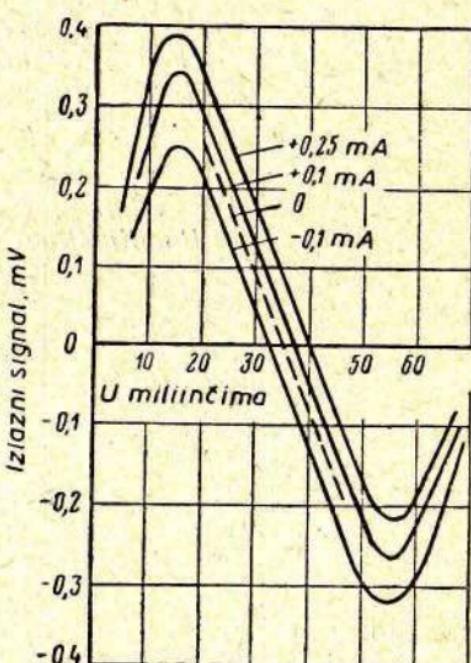
R_p — otpor prijemnika.

Izraz (V.7) da je zavisnost promene karakteristike duž apscisne ose, u zavisnosti od promene napona baterije U_b .

Kriva se pomera u jednu stranu pri struji pomeranja jednog znaka i u drugu — pri struji pomeranja suprotnog znaka, kao što se vidi sa sl. V.20e.

Pored mehaničke modulacije fluksa zračenja, pomoću opisanog prijemnika može se ostvariti i elektronska modulacija izlaznog signala dovođenjem naizmeničnog napona pomeranja na sam spoj prema šemi sa sl. V.21.

Menjući veličinu struje u direktnom smeru između kaplje indijuma i dva bazna kontakta, može se smanjiti osetljivost prijemnika do na približno 10% od njene prvobitne veličine, što je ekvi-

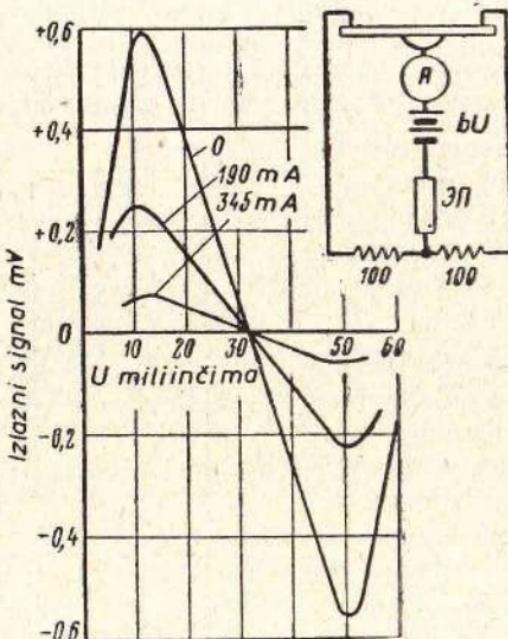


Sl. V.20e — Promena karakteristike pri promeni napona pomeranja

valentno sa modulacijom signala. Ovo smanjenje osetljivosti objašnjava se padom napona u baznoj oblasti od direktnе struje, što sprečava prelaz nosilaca struje iz kaplje indijuma u germanijum, usled dejstva fluksa zračenja. Dručije rečeno, povećanjem struje kroz spoj nagiba karakteristika se smanjuje.

Elektronski prekidač može da se izvede u obliku elektronskog kola (tipa multivibratora) koje naizmenično uključuje i isključuje plus baterije na kaplju indijuma.

Treba primetiti da se pri usvojenoj metodi, modulacije fluksa zračenja jednovremeno prekidaju i parazitne struje i fluktuacioni šumovi poluprovodnika, pa se, prema tome, ne mogu izdvojiti pri daljem pojačanju.



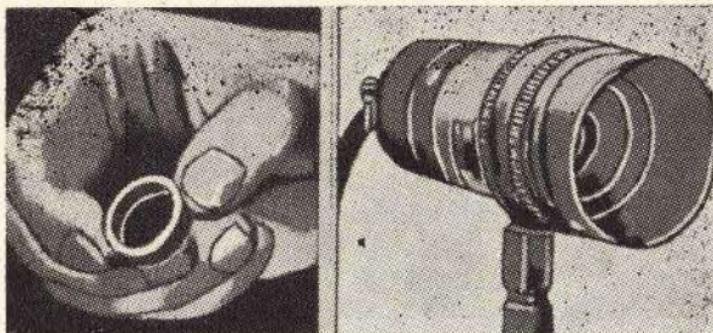
Sl. V.21 — Elektronska modulacija

Linearnost radnog dela karakteristike prijemnika je unutar tačnosti od 1%, a njena strmina zavisi od rastojanja između baznih kontakata. Što je manje rastojanje između baznih kontakata, nagib karakteristike je veći.

Pri optimalnom izvoru prečnika mrlje, može da se dobije strmina od 45% na 0,0254 mm (1 miliinč).

Ispitivanja modela—makete prijemnika, čija je karakteristika imala maksimum od 1,5 mV i strminu od 43% na 0,0254 mm (tj. promenu veličine napona za 43% od maksimalne vrednosti pri pomeranju svetle mrlje na 0,025 mm od centra), pokazala su da je moguća registracija napona od $10 \mu\text{V}$, koja odgovara promeni položaja mrlje na radnoj površini prijemnika od 100\AA . Ako se koristi objektiv sa žižnom daljinom od 25,4 mm (1 inč), ugaona tačnost jednaka je 0,1 ugaone sekunde (tačnost koju omogućava oko iznosi 0,5—1 ugaone minute, a kod dobrih optičkih daljinomera 10—15 ugaonih sekundi [22]).

Uredaj je omogućavao da se posmatra izvor monohromatskog zračenja talasne dužine $\lambda = 6.000 \text{\AA}$ i snage $\Phi = 10 \text{ W}$ sa rastojanja $L = 1.000 \text{ m}$, pri temperaturi okoline $T = 300^{\circ}\text{K}$. Vrednost struje šumova bila je na sobnoj temperaturi pri propusnom opsegu pojačavača $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ veličine reda 10^{-11} A , a odnos signal/šum bio je u ovom eksperimentu jednak 20 dB. U uredaju je bio korišćen objektiv sa otvorom $A_0 = 10 \text{ cm}^2$ i koeficijentom transparencije $\tau_0 = 0,8$.



Sl. V.22 — Spoljni izgled prijemnika sa bočnim fotoefektom i uređaja za određivanje ugaonog položaja izvora zračenja

Prijemnik je imao unutrašnji otpor između baznih priključaka $R = 100\Omega$ i koeficijenat refleksije osetljive površine 0,37.

Osetljivost uređaja u navedenim uslovima može se proceniti kao veličina reda $200 \mu \text{A/lm}$.

U novije vreme su se pojavile publikacije prema kojima su na bazi prijemnika sa bočnim fotoefektom realizovani uređaji za određivanje ugaonog položaja izvora zračenja, procenu položaja projektila u prostoru i njegovu stabilizaciju i tačno optičko određivanje precesije žiroskopa i akcelerometra [23].

Spoljni izgled jednog od takvih uređaja prikazan je na sl. V.22. Uredaj ima sledeće karakteristike:

$$\text{maksimalni izlazni napon pri opterećenju od } 20 \text{ k}\Omega - 42 \frac{\text{V}}{\text{inč.W}};$$

$$\text{linearna osetljivost } 0,32 \frac{\text{V}}{\text{inč.W}};$$

$$\text{ugaona osetljivost } 16 \frac{\text{V}}{\text{inč.W}}, \text{ pri žižnoj daljini objektiva}$$

od 254 mm (10 inča);

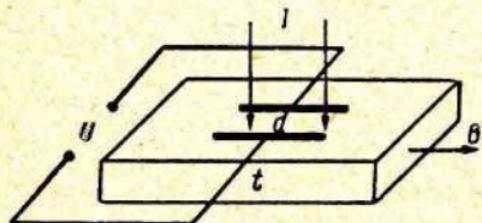
minimalna količina energije koja daje signal od 1 V — 0,015 W (za izvor sa $T_e = 2.600^0\text{K}$);

vremenska konstanta $5 \mu \text{s}$;

unutrašnji otpor 3.000Ω .

7. PRIJEMNICI SA FOTOMAGNETNIM EFEKTOM

1934 god. Noskov i Kikoin su primetili da ako se poluprovodnička pločica postavi u magnetno polje B (sl. V.23) i ozrači fluksom zračenja normalnim na linije sila polja, tada će se u pločici pojavit razlika potencijala normalno na polje i na fluks zračenja.



Sl. V.23 — Šema nastajanja fotomagnetskog efekta

Kasnije je ova pojava nazvana fotomagnetski efekat, detaljno ispitivana [24, 25, 26] na germanijumu, silicijumu, olovo-sulfidu, indijum-antimonidu i magnezijum-stanidu. Posebno ohrabrujući

rezultati dobijeni su u zadnje vreme na vrlo čistim uzorcima indijum-antimonida.

Ako se jedna od površina pravougaonog uzorka pomenutih jedinjenja ozrači, u njegovom površinskom sloju obrazovaće se parovi „elektron — šupljina“, koji će zatim početi da difunduju ka unutrašnjosti uzorka i da pri tome pod dejstvom normalnog magnetnog polja skreću u suprotnim pravcima. Kao rezultat toga, na prijemniku se obrazuje razlika potencijala normalna na magnetno polje i na pravac fluksa zračenja. Napon između dve ravne elektrode, koje se nalaze na uzorku na međusobnom rastojanju d (cm), može se izračunati po obrascu:

$$U = IdBs \cdot 10^8 \text{ (V)}, \quad (\text{V. 8})$$

gde je: s — brzina poršinske rekombinacije nosilaca struje, cm/s ;

$$I = \text{intenzitet fluksa zračenja}, \frac{\text{kvanta}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2};$$

B — intenzitet magnetnog polja, ersteda.

(U slučaju germanijuma sa $s = 10.000 \text{ sm/s}$, pri $d = 0,1 \text{ cm}$,

$B = 10.000$ ersteda i intenzitetu $I = 1 \frac{\text{kvant}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$, dobija se

$$U = 0,1 \text{ V.})$$

Ispitivanja indijum-antimonida kao detektora infracrvenog zračenja pokazala su da fotomagnetna elektromotorna sila premašuje veličinu signala koji se dobija preko fotoprovodnosti. Za slučaj indijum-antimonida, čija se sopstvena providnost poklapa sa teorijom koju je dao Mos, odnos ovih signala može se odrediti iz relacije:

$$\frac{u_{fm}}{u_{fp}} = 0,32 \frac{Bd}{u} \sqrt{\frac{\mu}{\tau}}, \quad (\text{V. 9})$$

gde je: u — napon koji se dovodi na uzorak pri merenju fotoprovodnosti;

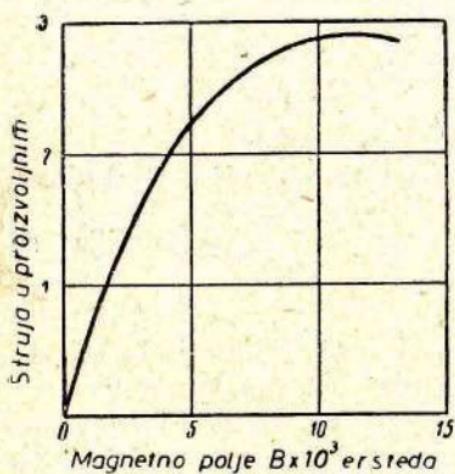
μ — pokretljivost nosilaca struje, $\text{cm}^2/\text{V.s}$;

τ — vreme života nosilaca, s.

Struja kratkog spoja i_{ks} se pri promeni intenziteta magnetnog polja menja po zakonu:

$$i_{ks} = \frac{kB}{1 - cB^2}, \quad (\text{V. 10})$$

što se potpuno slaže sa eksperimentalnim podacima. Međutim, fotomagnetna elektromotorna sila se sa promenom intenziteta magnetnog polja ne menja po ovom zakonu, pošto otpor uzorka raste povećanjem magnetnog polja. Kako su pokazala ispitivanja D. N. Nasledova i J. S. Smetanikove [27], u monokristalu InSb n-tipa sa koncentracijom donora od $2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ zavisnost fotomagnetne elektromotorne sile od intenziteta magnetnog polja je u intervalu 300—20.000 ersteda skoro linearna.



Sl. V.24. Promena struje kratkog spoja u zavisnosti od magnetnog polja kod InSb

U literaturi se ne navode podaci o spektralnoj osjetljivosti detektora, mada se napominje [6] da rezultati spektralnih merenja na čistim primercima InSb, InAs i Mg_2Sn daju osnovu da se ovi detektori smatraju pogodnim za prijem zračenja u srazmerno dalekoj infracrvenoj oblasti spektra. Osim toga, postoji saopštenje [24] o gruboj proceni spektralne osjetljivosti fotomagnetnog efekta u indijum-antimonidu. Merena je reakcija indijum-antimonida na zračenja apsolutno crnog tela zagrejanog do 300°C ,

sa kvarcnom pločicom debljine 3 mm kao filtrom i bez nje. Pri postavljanju kvarcne pločice ispred ispitivanog uzorka, fotomagnetna elektromotorna sila se smanjila 5 puta. Ovo je omogućilo autorima da procene da fotomagnetni efekt u indijum-antimonidu potiče uglavnom od zračenja sa talasnom dužinom iznad 4 μ .

U literaturi [28] se opisuje fotomagnetni prijemnik na bazi kristala InSb, koji radi na sobnoj temperaturi i raspolaže spektralnom osetljivošću u području do $7,5 \mu$. Njegov prag osetljivosti za zračenja sa talasnom dužinom od $6,6 \mu$ jednak je $6,7 \cdot 10^{-10} \text{ W}$ pri propusnom opsegu pojačavača $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ i veličini prijemne površine od $0,71 \text{ mm}^2$. Na istom mestu se napominje da je vremenska konstanta prijemnika, izmerena kao vreme opadanja signala za „e“ puta, manja od $1 \mu\text{s}$.

T a b l i c a V. 16

Računske i eksperimentalne karakteristike InSb prijemnika sa fotomagnetskim efektom [9]

Karakteristične vrijednosti	Materijal	λ_{maks} , μ	Struja detektora	Površina, cm^2	Prag osetljivosti, W/cm^2	$t_r, \mu\text{s}$
Računske Eksperimentalne	InSb	4	300	0,3	$1 \cdot 10^{-9}$	1
	InSb	4	300	0,16	$2,5 \cdot 10^{-8}$	1

Razmotreni način detekcije infracrvenog zračenja ima kao prednost u odnosu na primenu fotootpornika svoje vrlo male šumove, koji inače ograničavaju vrednost praga osetljivosti. Zbog ovoga primena fotomagnetskog efekta u InSb zahteva korišćenje pojačavača sa vrlo malim sopstvenim šumovima. U suprotnom slučaju, dobitak od primene visokoosetljive metode registracije infracrvenog zračenja u širokom spektralnom području, može biti znatno umanjen smanjenjem praga osetljivosti sistema kao celine.

8. HLAĐENJE FOTOOSETLJIVIH SLOJEVA

Kao što je već ukazano, većina prijemnika zračenja zahteva hlađenje. Hlađenje fotoosetljivih slojeva omogućava povećanje njihove integralne osetljivosti, povećanje spektralnog intervala osetljivosti prema većim talasnim dužinama i smanjenje unutrašnjih šumova, koji ograničavaju prag osetljivost uređaja infracrvene tehnike.

Hlađenje fotoosetljivog elementa može se postići njegovim smeštanjem u Djuarov sud, napunjen odgovarajućom supstancom za rashlađivanje, čime se obezbeđuju temperature hlađenja navedene u tabl. V.17.

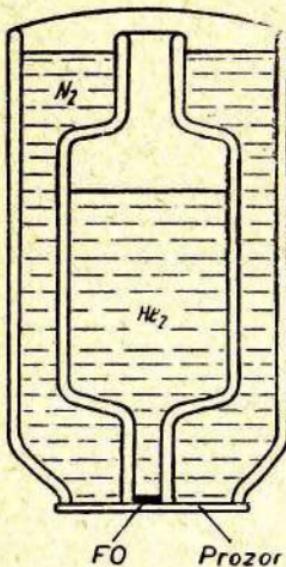
Tablica V.17

Dobijanje niskih temperatura

Supstanc za rashladivanje i njeno stanje	Ostvarljiva temperatura	
	°K	°C
Topljenje leda	273,16	0
Isparavanje čvrstog ugljendioksida	194,7	-78,46
Ključanje tečnog vazduha	88 - 85	-185 - 183
Ključanje tečnog kiseonika	90,2	-183
Ključanje tečnog azota	77,4	-195,8
Ključanje tečnog neon-a	23	-250,16
Ključanje tečnog vodonika	20,5	-252,66
Ključanje tečnog helijuma	4,22	-268,94

Metode navedene u tablici široko se primenjuju u laboratorijama i mogu se koristiti za hlađenje laboratorijskih primeraka prijemnika, pošto tu u izboru načina hlađenja glavnu ulogu imaju uglavnom ekonomski razlozi i potreban utrošak supstance za rashlađivanje. Ovakvo hlađenje postiže se postavljanjem fotoosetljivog elementa u kriostat.

Kao primer, na sl. V.25 data je šema hlađenja visokoosetljivog germanijumskog fotootpornika sa primesama cinka (536—IZIP firme „Perkin-Elmer“). Hlađenje fotootpornika vrši se tečnim helijumom, koji ispunjava unutrašnji sud kriostata. Spoljni sud, u kome je smešten unutrašnji, napunjen je tečnim azotom da bi se smanjila brzina isparavanja tečnog helijuma. Sam fotootpornik postavljen je u



Sl. V.25 — Kriostat za hlađenje fotootpornika

vakuumu na unutrašnjem zidu prvog suda. Spoljni zid oba suda (prozor) izrađen je od KRS-5.

Fotootpornik se hlađi do temperature od 4°K i ima sledeće karakteristike:

dimenzije kriostata — dužina 45 cm, prečnik 15 cm;

dimenzije fotoosetljivog sloja — od 2×2 do 20×20 mm;

spektralna osjetljivost — $2-40 \mu$;

vremenska inercija — 0,01 μ s.

Ovaj detektor firme „Perkin-Elmer“ proizvodi serijski, a namenjen je za detekciju zračenja izvora srazmerno niske temperature [12].

U slučaju razvoja sistema za hlađenje fotoosetljivih slojeva infracrvenih uređaja za vojne primene, pored ekonomskog faktora prвostepeni značaj imaju sigurnost rada, težina, dimenzije, vreme trajanja rashladne supstance i mogućnost primene na svakom mestu i u svako vreme.

Da bismo stekli sliku o teškoćama koje treba savladavati pri razvoju sličnih sistema, razmotrićemo uslove njihovog rada:

a) sistemi za hlađenje mogu se postavljati u infracrvenim glavama za samonavođenje raketa, na satelitima, u avionskim uređajima, u prenosnim uređajima itd. Prema tome, oni moraju biti malih dimenzija i težine, uz neznatnu potrošnju spoljnje energije;

b) vreme rada rashladnog uređaja može da se kreće od nekoliko minuta do nekoliko dana bez ponovnog punjenja;

c) sistemi za hlađenje moraju da rade bez zastoja na svakoj visini, svakoj temperaturi i u svakom položaju koji mogu da zauzmu u prostoru sa uređajem u kome se nalaze;

d) sistem za hlađenje treba da obezbedi maksimalnu sigurnost, posebne uslove za očuvanje gasa u čistom stanju, kao i mehaničku čvrstoću materijala koji rade u uslovima vrlo niskih temperatura.

Imajući u vidu sve izloženo, smatra se (29) da je među mnogim tehničkim problemima, koji stoje pred industrijom koja proizvodi infracrvene uređaje za vojne i civilne primene, jedan od prvih na spisku najtežih — problem hlađenja infracrvenih detektora.

Za hlađenje fotoosetljivih slojeva u uredajima infracrvene tehnike, mogu se primeniti četiri osnovna sistema:

kriostatni,

koji rade na osnovu adiabatskog širenja radne supstance, za direktno hlađenje kondenzovanim gasom (razmenjivači toplote), i

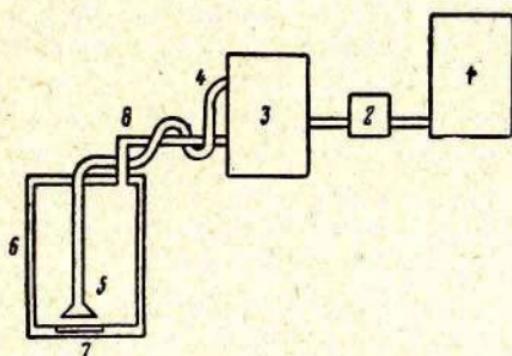
termoelektrični sistemi.

Zajednička osobina prva tri sistema jeste potreba za korišćenjem zatvorenih sistema*) u slučajevima kada treba obezbediti maksimalnu čistoću rashladne supstance i duži red bez dopunjavanja. Osim toga, u uslovima rada koji postoje u kosmičkom prostoru otvoreni sistemi su u principu nepovoljni.

Uprošćena blok-šema rashladnog uredaja koji radi u zatvorenom ciklusu data je na sl. V.26.

Iz rezervnog balona 1, gde se čuva zaliha rashladne tečnosti ili gasa, supstanca za hlađenje se kroz regulacioni ventil 2 uvodi u kompresor 3 i otuda pod pritiskom kroz spiralnu cev 4 u mlaznik 5, postavljen u neposrednoj blizini fotoosetljivog sloja 7 koji se hlađi. Fotoosetljivi sloj smešten je u vakuumu zatvorenog i dobro izolovanog kriostata 6. Rashladna tečnost se isparava i

širi u mlazniku i time hlađi unutrašnji deo kriostata. Zatim rashladni gas kroz cev 8 dolazi u kompresor, gde se ponovo sabija i pod pritiskom uvodi u mlaznik, da šireći se po drugi put, opet izvrši hlađenje unutrašnjeg dela kriostata. Tako se, od ciklusa do ciklusa vrši postepeno rashladivanje fotoosetljivog sloja.



Sl. V.26 — Blok-šema rashladnog uredaja koji radi u zatvorenom ciklusu (kružna cirkulacija)

sloja. U potrebnom trenutku regulacioni ventil može da propusti

*) Misli se na automatske sisteme sa kružnom cirkulacijom rashladnog agensa. — Prim. red.

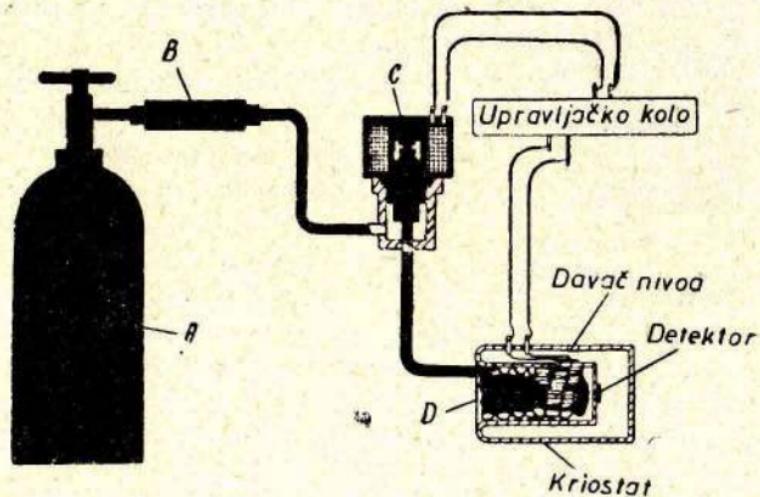
u uredaj dopunsku količinu kondenzovanog gasa. U cilju povećanja koeficijenta korisnog dejstva gas se pod pritiskom vodi kroz spiralnu cev obavijenu oko cevi 8, čime se ostvaruje njegovo prethodno rashladivanje.

Ponekad se spiralna cev obavlja oko cevi koja od rezervnog balona vodi ka regulacionom ventilu i ima temperaturu kondenzovanog gasa.

Po svojoj konstrukciji i načinu rada kriostati se mogu podeliti na tri grupe:

- kod kojih se hlađenje postiže primenom sabijenog gasa;
- kod kojih se fotoosetljivi sloj hladi proticanjem kondenzovanog gasa po njihovoj podlozi, uz postepeno dodavanje rashladne tečnosti u skladu sa njenom potrošnjom;
- sa korišćenjem kompresora u jednom zatvorenom sistemu.

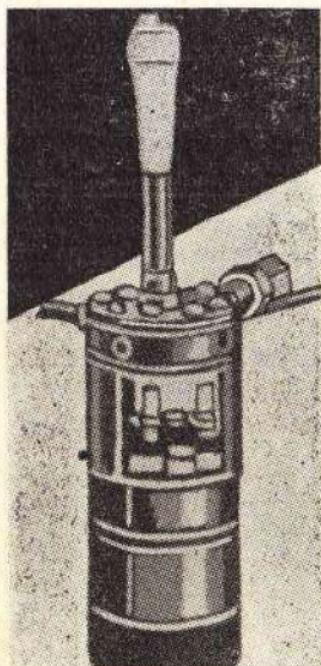
Princip rada prve grupe kriostatnih sistema (sl. V.27) može se razumeti iz šeme rashladnog uređaja koji radi na osnovu adiabatskog širenja prethodno sabijenog gasa (azota ili helijuma).



Sl. V.27 — Šema rashladnog uređaja koji radi na principu adiabatskog širenja gase

Gas sabijen pod pritiskom 180 atm. uvodi se iz rezervoara A kroz kapilaru i filter B i solenoidom regulisan ventil C u komoru za širenje D, gde se širi i kondenuje. Dodavanje gasa reguliše

se pomoću davača koji menja otpor pri snižavanju nivoa rashladne tečnosti i time deluje na solenoid regulacionog ventila (dozator).



Sl. V.28 — Spoljni izgled rashladnog uređaja sa adiabatskim širenjem gasa

pilare na čijem se kraju postavlja detektor infracrvenog zračenja koji se hlađi, i grejača. Zagrevanje tečnosti (azota) pomoću grejne spirale izaziva njeno širenje i dizanje po kapilari, do detektora koji se hlađi.

Smatra se da su ovakvi sistemi najperspektivniji za avionske uređaje. U napunjenom stanju sistem je težak oko 4 kg i obezbeđuje neprekidno hlađenje 8 detektora do temperature od -195°C u toku 6 časova.

Preim秉stvo ovakvog sistema u odnosu na sisteme zasnovane na adiabatskom širenju sabijenog gasa je to što nema

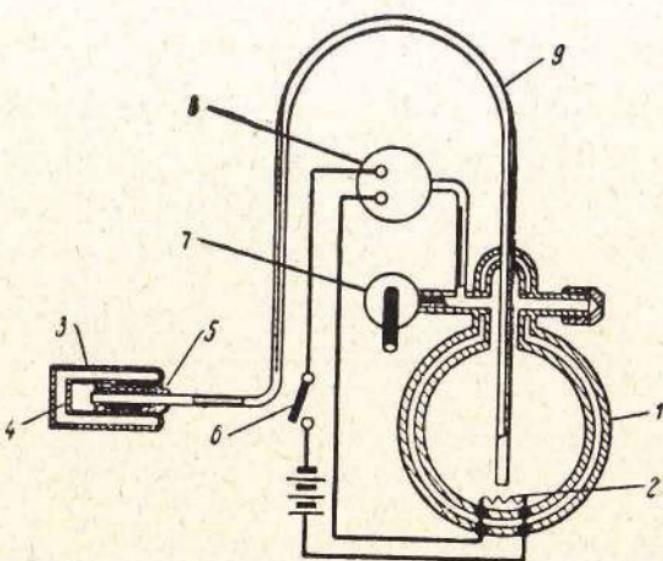
Po analognoj šemi izведен je rashladni uređaj firme Linde, prikazan na sl. V.28.

U ovom sistemu se kao radna supstanca koristi sabijeni helijum, koji se uvodi u komoru za hlađenje (cilindar prečnika 0,8 cm i dužine 5 cm), pod pritiskom od 20 atm. Šireći se u kriostatu u blizini fotoosetljivog sloja, helijum omogućava dobijanje temperatura do $-210--213^{\circ}\text{C}$. Težina uređaja je 220 gr. Kako se napominje u literaturi, njegova primena omogućava smanjenje težine avionske infracrvene opreme do 4 kg.

Specifičnost opisane konstrukcije jeste u tome što se u njoj koristi samo jedan pokretan deo — plastični klip u kriostatu.

Kriostati sa direktnim prenosom rashladne tečnosti (sl. V.29) sastoje se iz specijalnog suda za čuvanje kondenzovanog gasa pod pritiskom, ka-

potrebe za uređajima za regulaciju temperaturnih promena u zapremini koja se hlađi, pošto se tečnost isparava na potpuno određenoj temperaturi. Preim秉stvo je i to što nema nikakvih



Sl. V.29 — Šema rashladnog uređaja sa direktnim prenosom tečnosti:

1 — rezervoar sa azotom, 2 — grejač, 3 — balon, 4 — detektor, 5 — ka atmosferi, 6 — ručni prekidač, 7 — diferencijalni ventil, 8 — pneumatski prekidač, 9 — cevovod

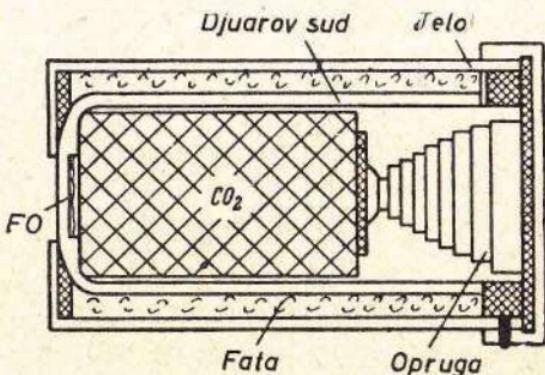
pokretnih delova koji rade na niskoj temperaturi. Osim toga, ovi sistemi obezbeđuju veliku čistoću rashladne supstance, s obzirom na to da su kod njih sve primese nečistoća zamrznute.

Sistemi sa direktnim prenosom tečnosti potpuno su nepogodni za rad u uslovima vrlo razređenog vazduha u kosmosu. Kao nedostatak treba zapaziti (što se odnosi i na sisteme sa adiabatskim širenjem gase) i njihovu malu ekonomičnost i veliki utrošak supstance za rashladivanje.

Jedan od oblika kriostatnih sistema druge grupe predstavljaju Djuarovi sudovi za hlađenje olovo-sulfidnih fotootpornika pomoću čvrstog ugljen-dioksida ili freona (sl. V.30).

U Djuarov sud se postavljaju kocke čvrstog ugljen-dioksida koje svojim isparavanjem hlađe fotootpornik, koji se nalazi u

kontaktu sa kockama kroz staklo dna suda, do temperature od -78°C . Da bi se obezbedio stalni dodir kocki i fotootpornika, kocke se pritiskuju ka dnu suda specijalnom oprugom koja je pričvršćena za poklopac kriostata.



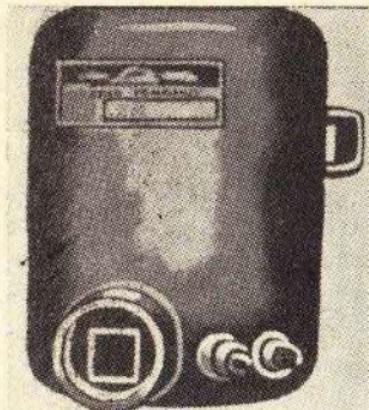
Sl. V.30 — Konstrukcija kriostata za hlađenje PbS čvrstim ugljen-dioksidom (suvim ledom)

U vezi sa ukazanim nedostacima otvorenih sistema za hlađenje, danas glavnu liniju razvitka u konstrukciji rashladnih sistema predstavlja razvoj metoda hlađenja pomoću zatvorenih kriostatnih sistema sa tečnim azotom ili helijumom. Pri tome se fotoosetljivi sloj hlađi ili gasom koji se širi, ili metodom kvašenja — kondenzovanjem gasa na površini koja se hlađi.

U prvom slučaju tečnost se čuva u izolovanom balonu pod manjim pritiskom i kroz kapilaru vodi ka fotootporniku, gde se isparavanjem vrši njegovo hlađenje. Iskorišćeni gas se ponovo sabija pomoću kompresora i po zatvorenoj liniji opet uvodi u kriostat.

U drugom slučaju se u okolini podloge fotoosetljivog sloja stvaraju

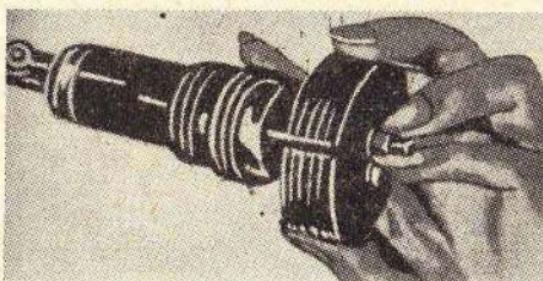
Sl. V.31 — Uredaj firme „Linde“ sa hlađenjem površine u kontaktu sa fotoosetljivim slojem na bazi kondenzovanja gasa



uslovi koji odgovaraju „tački rose“ za dati gas. Gas se kondenzuje na podlozi detektora, hlađi ga i zatim, posle ponovnog isparavanja, sabija kompresorom i opet vodi u zapreminu koja se hlađi. U srazmeri sa trošenjem gasa vrši se njegovo dopunjavanje iz rezervnog balona [30].

Na sl. V.31 prikazan je sistem firme „Linde“, kod koga je fotoosetljivi sloj postavljen neposredno na površini za kondenzovanje. U ovom sistemu tečnost kvasi zadnju stranu fotoosetljivog sloja kako pri njegovom radu, tako i kad je van pogona. Prema tome, fotoosetljivi sloj je uvek hladan i, smešten u vakuum, uvek spremjan za rad. Napominje se da je uređaj težak do 3,4 kg i da može da obezbedi hlađenje do 8 fotoosetljivih slojeva u toku 6 časova, posle 24 sata prethodne pripreme.

Za rad opisanih sistema za hlađenje potrebna je zaliha supstance za rashlađivanje. To nije uvek pogodno i može da dovede do toga da baš u potrebnom trenutku zaliha rashladne tečnosti nije pri ruci. Osim toga, prisustvo radnog balona sa rashladnom tečnošću, makar i ograničene zapreme, kao i kompresorskog uređaja, čini ove sisteme srazmerno glomaznim.



Sl. V.32 — Termoelektrični hladnjak firme „Vestinghaus“

Zbog ovoga su naporci industrije danas već upravljeni ka osvajanju principijelno novih metoda hlađenja fotoosetljivih slojeva.

Kao jedna od takvih mogućnosti pokaza'o se, kada se ne zahteva duboko hlađenje, korišćenje termoelektričnih generatora. Još 1834. god. francuski naučnik Peltje je primetio da ako se kroz termospreg propušta struja u smeru koji je suprotan smeru

termostruje, koja nastaje pri zagrevanju termosprega, da se tada temperatura spoja snižava (Peltjeov efekat). Tako je, propuštajući struju od antimona ka bizmutu, Peltje postigao hlađenje spoja za 45°C u odnosu na temperaturu okoline.

Peltjeov efekat naročito je izražen na mestu spoja dva poluprovodnika. Zato je tek u novije vreme, posle krupnih dostignuća u oblasti fizike poluprovodnika, postalo moguće da se Peltjeov efekat primeni u praksi.

Danas se vrše intenzivna istraživanja materijala sa malom toplotnom provodljivošću, ali sa visokom elektroprovodnošću i termoelektrnom silom. Istovremeno se razrađuju konstrukcije termoelektričnih hladnjaka, za sada za hlađenje olovo-sulfidnih fotootpornika (sl. V.32).

Termoelektrični hladnjaci su sasvim sigurni u radu, nemaju pokretnih delova, male su težine i mogu se konstrukcijski izvesti zajedno sa fotoasetljivim slojem. Snaga koju troše je vrlo mala $2-2,5\text{ W}$. Tako, hladnjak prikazan na sl. V.32 vuče struju od 10 A pri naponu od $0,1\text{ V}$, obezbeđujući pri tome pad temperature od 50°C pri temperaturi okoline od -25°C .

Povećanje pada temperature za oko 50% može se postići korišćenjem dvostepenog hlađenja. Prema obaveštenjima iz štampe, danas su razvijeni dvostepeni termoelektrični hladnjaci, koji omogućavaju pad temperature do 79°C .

Napominje se da termoelektrični hladnjaci imaju tri prednosti u odnosu na druge sisteme, a to su:

- a) rad hladnjaka ne podleže uticaju vakuma ni okolne sredine;
- b) koeficijenat korisnog dejstva hladnjaka poboljšava se porastom temperature okолнog vazduha;
- c) energija potrebna za rad hladnjaka može da se uzme iz bilo kog spoljnјeg izvora.

G l a v a VI

PRETVARAČI SLIKE

Usvojeno je da se pod pretvaračem slike podrazumeva takav elektrovakuumski uredaj koji omogućava pretvaranje optičke slike jednog spektralnog sastava u drugi, posredstvom obrazovanja elektronske međuslike. Cilj takvog pretvaranja može biti bilo prenos slike iz jedne spektralne oblasti u drugu, bilo pojačanje bleska slike, bilo i jedno i drugo istovremeno. Najrasprostranjeniji pretvarači slike su danas elektronsko-optički pretvarači (EOP).

1. PRETVARAČI SA SPOLJAŠNJIM FOTOFEKTOM

Kao prvi elektronsko-optički pretvarači pojavili su se (1934. god.) najjednostavniji dvoelektrodni pretvarači tipa „Holstove čaše“ (sl. VI.1).

Dvoelektrodni pretvarači se izvode u obliku ravnog kondenzatora, smeštenog u staklenom sudu u kome se stvara vakuum reda $10^{-4} - 10^{-5}$ mm Hg, tako da se fotoelektroni mogu kretati bez sudara sa molekulima vazduha. Na prednji zid suda je sa unutrašnje strane nanesen vrlo tanak providan sloj srebra, koji predstavlja jednu od dve elektrode pretvarača. Na njega se, kao na podlogu, nanosi isparavanjem u vakuumu poluprovidan fotoosetljivi sloj (cezijum-oksidni ili cesijum-sulfidni).

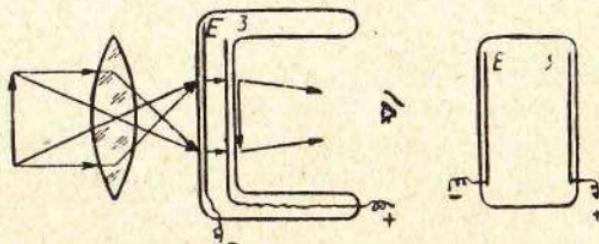
Na suprotni zid suda nanosi se, takođe na providnu srebrnu podlogu, sloj luminiscentne materije (vilemita ili cink-sulfida).

Između katode i ekrana dovodi se visoki napon (do 12.000 V), koji unutar pretvarača stvara planparalelno elektrostatičko polje intenziteta

$$E = \frac{U}{d}, \quad (\text{VI. } 1)$$

gde je d — rastojanje između fotokatode i ekrana u cm.

Infracrveni zraci odbijeni od posmatranog predmeta projektuju se pomoću objektiva na fotokatodu, stvarajući na njoj za oko nevidljivi prevrnuti i umanjeni lik sa raspodelom „svetlih“



Sl. VI.1 — Skica najjednostavnijeg pretvarača

i „tamnih“ mesta po fotokatodi, koja odgovara raspodeli intenziteta zračenja pojedinih delova posmatranog predmeta. Na „svetlijim“ mestima lika, iz katode će biti izbačen veći broj elektrona nego sa „tamnijih“ mesta. Elektroni izbačeni iz fotokatode (fotoelektroni) ulaze u planparalelno elektrostatičko polje i kreću se jednakom ubrzanim putem prema ekranu.

Gustina stvorene fotoelektrične struje sa različitim delova fotokatode biće proporcionalna intenzitetu njihovog ozračivanja. Zbog ovoga će elektronska slika odgovarati optičkoj na fotokatodi. Fotoelektroni elektronske slike, koji u toku svog kretanja ka ekranu dobijaju kinetičku energiju eU (eV), bombarduju ekran i pobuduju ga da svetli. Intenzitet bleska pojedinih tačaka ekrana srazmeran je veličini fotoelektronske struje. Ovo omogućava da se na ekranu dobije jednobojna slika predmeta koji se posmatra u infracrvenim zracima, sa raspodelom svetlih tonova koja odgovara raspodeli intenziteta zračenja (sopstvenog i odbijenog) pojedinih tačaka predmeta.

Kvalitet slike predmeta, koji se posmatra kroz dvoelektrodni pretvarač opisanog tipa, je slab usled nesavršenosti elektronsko-optičkog sistema tipa ravnog kondenzatora. Kod plan-paralelnog prenosa elektroni se zbog različitih vrednosti njihovih početnih brzina v_0 ne kreću u polju paralelno jedan sa drugim, već po parabolama sa temenom u tački izletanja. Tako se elektroni ne fokusiraju na ekranu u jednoj tački, koja bi odgovarala određenoj tački na fotokatodi. Svaka tačka na katodi pojavljuje se zbog toga na ekranu u vidu kružića rasipanja, kojim je određena moć razlaganja EOP.

Mogućnosti povećanja moći razlaganja dvoelektrodnog EOP ograničene su sledećim faktorima:

1. Pri intenzitetu polja na fotokatodi reda 10 kV/cm počinje autoelektronska emisija sa fotokatode, koja jako snižava kontrast slike.

2. Smanjenje rastojanja između fotokatode i ekrana dovodi do povećavanja povratnog osvetljavanja fotokatode zračenjem ekrana, što prouzrokuje smanjenje moći razlaganja pretvarača i superponiranje zajedničkog parazitnog šuma sa slikom.

3. Povećanje radnog napona ili smanjenje rastojanja između elektroda ograničeno je takođe probojem između elektroda, što izaziva oštećenje uređaja.

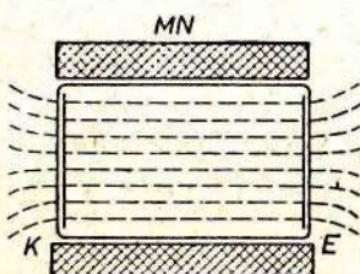
4. Pri malom rastojanju između ekrana i fotokatode nastaju tehnološke teškoće oko toga da se pri senzibilizaciji fotokatode parama cezijuma ostvare jednakе osobine sloja po celoj osetljivoj površini.

Ova ograničenja ne dozvoljavaju dobijanje pretvarača visoke moći razlaganja. Tako je kod najboljih primeraka dvoelektrodnih pretvarača bilo moguće postići dobijanje kružića rasipanja, prečnika $D = 0,1 \text{ mm}$, tj. u ovom slučaju moć razlaganja ne prelazi vrednost reda 10 linija/mm.

Za poboljšanje kvaliteta slike najjednostavnijih pretvarača bilo je predloženo kombinovano elektrostatičko i magnetno fokusiranje fotoelektrona (sl. VI.2).

Fotokatoda i ekran se u takvom pretvaraču razdvajaju na veće rastojanje (ponekad do 10 cm), a napon ubrzanja se snižava do 500 V . Fokusiranje elektrona se postiže dugim magnetnim sočivom.

Praktično je pošlo za rukom da se ovakvim načinom fokusiranja postigne moć razlaganja pretvarača od 20–30 linija/mm (za rastojanje između elektroda $d = 7$ cm i $U = 500$ V).



Sl. VI.2 — Dvoelektrodni pretvarač sa magnetnim fokusiranjem

Bez obzira na svoju jednostavnost, dvoelektrodne pretvarače su još u drugom svetskom ratu potisli savršeniji višeektrodni pretvarači, koji su u sebi sadržali elektrostatičku elektronsku optiku. Tro-ili višeektrodni pretvarači, bez obzira na to što je njihova izrada složenija od izrade dvoelektrodnih, imaju u odnosu na ove poslednje niz preimุćstava, što je doprinelo da se oni široko primenjuju, naročito u uređajima vojne infracrvene tehnike.

Ova preimуćstva su sledeća:

1. Poboljšanje zaštite fotokatode od osvetljavanja zbog zračenja ekranu pomoću dijafragmi. To omogućava da se koriste luminiscentni materijali sa većim bleskom i veći naponi ubrzavaњa, pri kojima naglo raste emisija ekranu.

2. Primena nekoliko elektroda omogućava da se dobije raspodela potencijala elektrostatičkog polja u kojoj potencijal postepeno raste od fotokatode ka ekranu. To pruža mogućnost za korišćenje velikih ubrzavajućih napona bez opasnosti od autoelektronske emisije sa fotoosetljivog sloja.

3. Višeektrodni pretvarači omogućavaju da se dobije slika ne samo u razmeri 1 : 1 već i uvećana i smanjena. Ova druga mogućnost ima vrlo veliki značaj za pojačanje bleska slike, pošto pri umanjenju slike raste gustina struje i blesak ekranu.

4. Primena fokusirajućih sistema povećava moć razlaganja pretvarača u odnosu na paralelan prenos elektrona.

Za slučaj elektrostatičkog fokusiranja prečnika kružića rasipanja može se izračunati po obrascu (VI.2), a za slučaj kombinovanog — po obrascu (VI.3):

$$D = 2d \frac{\Gamma_e}{2\Gamma_e - 1} \frac{v_0}{U}, \quad (\text{VI. } 2)$$

$$D = 2d \frac{\Gamma_e}{2\Gamma_e - 1} \frac{v_0}{U}, \quad (\text{VI. } 3)$$

gde je: v_0 — početna brzina fotoelektrona;

U — razlika potencijala između anode i fotokatode;

d — rastojanje između elektroda;

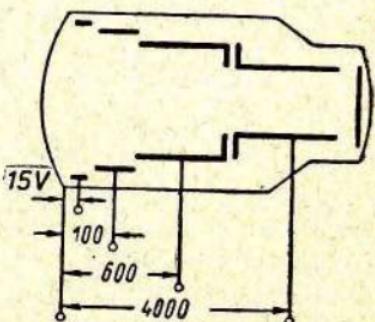
Γ_e — elektronsko-optičko uvećanje pretvarača.

5. Kod višeelektrodnih konstrukcija pretvarača, između fotokatode i glavne fokusirajuće elektrode postavlja se niz međuelektroda, na koje se dovodi napon sa jednog potenciometarskog delitelja. Takva konstrukcija omogućava podešavanje relativne raspodele potencijala između elektroda, a time postizanje elektronskog fokusiranja slike na ekranu pretvarača.

Tipičan primer ovakve vrste pretvarača jeste pretvarač 1-P-25, razvijen u drugom svetskom ratu u SAD (sl. VI.3).

6. Kod višeelektrodnih pretvarača postoji mogućnost promene uvećanja, korišćenjem dijafragme sa otvorom (blende) kao kod elektronskog sočiva (sl. VI.4). Ovo se ostvaruje dovođenjem promenljivog potencijala U_3 na dijafragmu, koji se menja u granicama od U_1 do U_2 . Osnovno uvećanje takvog pretvarača (pri $U_3 = 0$) jednako je $I_2 : 2I_1$. Međutim, ako se na dijafragmu dovede potencijal $U_3 = U_2$, uvećanje će biti manje, a pri $U_3 = U_1$, veće od navedenog odnosa.

7. Prelaz na višeelektrodne pretvarače omogućio je, takođe da se korišćenjem sferne fotokatode poboljša kvalitet slike smanjenjem njene distorzije. Poluprečnik krivine površine katode uzima se tako da centar krivine padne u ravan između glavnih fokusirajućih elektroda. Efekat korišćenja sferne fotokatode prikazan je na sl. VI.5.



Sl. VI.3 — Skica pretvarača
1-P-25

Navedene prednosti više-elektrodnih pretvarača lika dovele su do toga da su na kraju drugog svetskog rata pretvarači sa plan-paralelnim elektrostatickim poljem bili potpuno istisnuti.

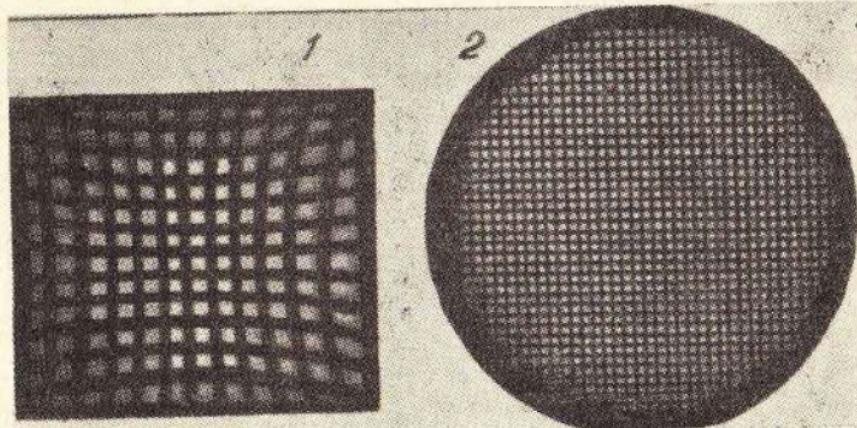
U inostranstvu se najmasovnije primenjuju pretvarači firme AEG (Nemačka), 1-P-25 (SAD) i firme Malard (Engleska).

Firma AEG je još u drugom svetskom ratu proizvodila svoje pretvarače u dve varijante — sa prećnicima ekrana od 50 i 30 mm (sl. VI.6). Elektronsko sočivo pretvarača je obrazованo od cilindrične čaše sa otvorom na dnu, na koju

Sl. VI.4 — Skica pretvarača koji omogućava promenu elektronsko-optičkog uvećanja

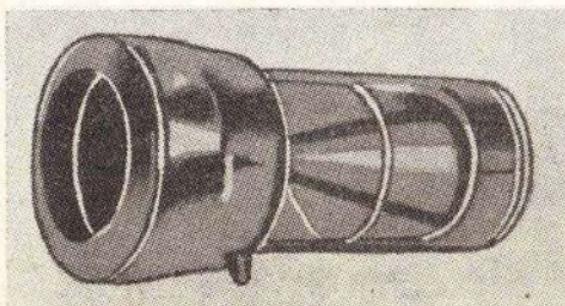
se dovodi potencijal od 5 kV u odnosu na fotokatodu, i zarađenog konusa, električno povezanog sa ekransom, na koji se dovodi potencijal od 18 kV. Pretvarač ima dužinu 160 mm i prećnik 80 mm. Fotokatoda je cezijum-oksidna, sa dugotalasnom granicom osetljivosti $\lambda_0 = 1,3 \mu$.

U pretvaraču je primenjena aluminizacija unutrašnje površine ekrana od sulfid-selenida cinka. Prevlačenje ekrana tankim



Sl. VI.5 — Kvalitet slike pri korišćenju ravne 1 i izdubljene 2 fotokatode

homogenim slojem aluminijuma omogućava povećanje emisije ekrana i smanjenje povratnog osvetljavanja fotokatode, što poboljšava kontrast slike kao i njenu jasnoću.



Sl. VI.6 — Pretvarač firme AEG (Nemačka)

Povećanje ukupne emisije ekrana potiče, u ovom slučaju, od refleksije svetlosnog fluksa ekrana prema posmatraču od strane unutrašnje površine aluminijumskog sloja kao ogledala. To ujedno znatno slabi svetlosni fluks ekrana prema fotokatodi.

Povećanje jasnoće slike postiže se na račun dobre elektro-provodnosti aluminijumskog sloja, koji obezbeduje brzo oticanje prostornog tovara, zbog čijeg prisustva inače dolazi do kvarenja elektronske slike u blizini ekrana.

Pretvarač firme AEG omogućava, pod uslovom da se koristi odgovarajuća projekciona optika, pojačanje bleška slike i ima sledeće glavne karakteristike:

osetljivost fotokatode — $30 - 25 \mu\text{A/lm}$;

elektronsko-optičko uvećanje — 0,65;

moc razdvajanja u centru vidnog polja na ekranu — 40 linija/mm.

Pretvarač 1-P-25, dužine 110 mm i prečnika 40 mm (sl. VI.7), koristi više-elektrodno elektronsko sočivo, na čije se elektrode dovode naponi od 15, 10, 600 i 4000 V.



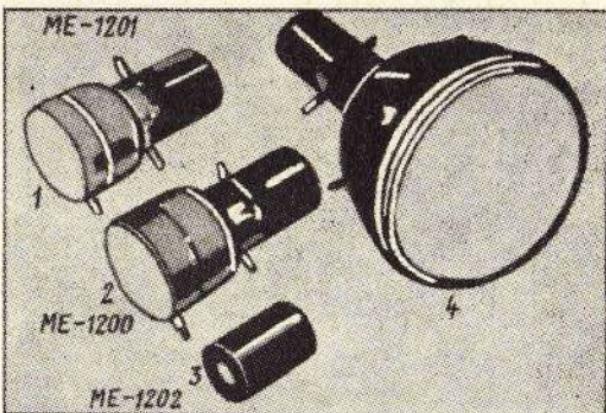
Sl. VI.7 — Pretvarač 1-P-25 (SAD)

Fotokatoda je cezijum-oksidna, sa dugotalasnom granicom osetljivosti $\lambda_0 = 1,3 \mu$, a za ekran se koristi vilemit, čiji se spektralni sastav zračenja dobro slaže sa spektralnom osetljivošću oka. Koeficijenat pretvaranja bleska slike leži u granicama 0,5–0,4, tj. pretvarač, i pored srazmerno visokih glavnih karakteristika, ne može da se koristi kao pojačavač bleska slike.

T a b l i c a VI.I

Glavne karakteristike američkih pretvarača

Naziv karakteristike	Merna jedinica	V r e d n o s t	
		1—P—25	6914
Dužina	mm	115	68
Prečnik	"	42	43
Radni napon	V	4.000	16.000
Fokusirajući naponi na među-elektrodamu	"	15; 100; 600;	nema ih
Uvećanje	čist broj	0,5	1,8
Srednja vrednost moći razlaganja po vidnom polju	lin/mm	8	28
Koeficijenat pretvaranja	čist broj	0,4	30
Osetljivost fotokatode	$\mu\text{A/lm}$	20—30	30—40



Sl. VI.8 — Pretvarači firme „Malard“ (Engleska)

1959 god. u SAD su počeli da se proizvode pretvarači tipa 6914 [13], čije su glavne karakteristike, upoređene sa onima kod

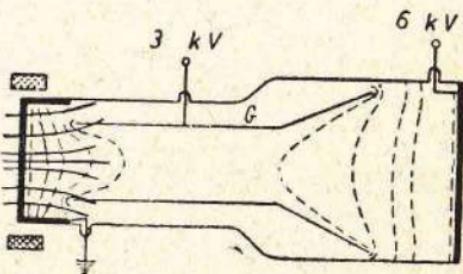
pretvarača 1-P-25, date u tablici VI.1. Kako se vidi iz upoređenja, ovaj pretvarač omogućava bitno povećanje bleska slike na račun visoke vrednosti koeficijenta pretvaranja.

Firma Malard proizvela je seriju elektronsko-optičkih pretvarača marke ME (sl. VI.8).

Specifična osobina ovih troelektrodnih pretvarača jeste mogućnost korišćenja elektrostatičkog ili kombinovanog fokusiranja elektronskih snopova, kao i mogućnost rada sa konstantnim ubrzavajućim naponom i u impulsnom režimu.

Skica pretvarača ME-1201 data je na sl. VI.9. Pretvarač ima cezijumoksidnu fotokatodu i ekran od cinksulfida, prekriven poluprovidnim aluminijumskim slojem. Dimenzije pretvarača su: dužina 235 mm, prečnik fotokatode 30 mm, prečnik ekrana 115 mm.

U pretvaraču je ostvareno promenljivo elektronsko-optičko uvećanje od 1 do 4, uz ravnomernu moć razdvajanja na ekranu od 20 linija/mm (pri $\Gamma_e = 1$), što je postignuto kombinovanim fokusiranjem elektronskog snopa.



Sl. VI.9 — Skica pretvarača ME-1201

2. GLAVNE KARAKTERISTIKE ELEKTRONSKO-OPTIČKIH PRETVARAČA

Elektronsko-optički pretvarači koriste se, uglavnom, u uređajima za vizuelno ili fotografsko osmatranje raznih objekata. Efikasnost njihove primene može se u svakom konkretnom slučaju oceniti pomoću sledećih osnovnih karakteristika:

1. Spektralna osetljivost fotokatode $S(\lambda)$ određuje oblast spektra u kojoj se vrši posmatranje. Danas se u elektronsko-optičkim pretvaračima primenjuju cezijum-antimonidne ili mazaične fotokatode (za posmatranje u vidljivoj oblasti spektra) i cezijum-oksidne fotokatode (za posmatranje u vidljivoj i infracrvenoj oblasti spektra).

2. Integralna osetljivost fotokatode S karakteriše ukupnu osetljivost uređaja za posmatranje. Usvojeno je da se ona izražava preko odnosa fotostruje u pretvaraču i fluksa zračenja koji pada na fotokatodu ($\mu\text{A/lm}$).

3. Blesak slike B_e . Ako se pretpostavi da za emisiju ekrana važi Lambertov zakon, blesak ekrana pretvarača može se odrediti iz relacije:

$$\cdot \quad B_e = \pi \xi S_k \epsilon_k U \Gamma_e^{-2} \cdot 10^{-6}, \quad (\text{VI. 4})$$

gde je: ξ — svetlosno dejstvo ekrana u spoljašnju polusferu, koja predstavlja funkciju energije pobudnih elektrona, cd/W ;

ϵ_k — ozračenost fotokatode, W/cm^2 ;

U — ubrzavajući napon, V ;

Γ_e — elektronsko-optičko uvećanje.

Prema tome, pri jednakim ostalim uslovima blesak slike na ekranu je proporcionalan svetlosnom dejstvu luminiscentnog materijala i ubrzavajućem naponu koji se dovodi na pretvarač.

4. Spektralna raspodela bleska slike $b\lambda$ karakteriše stepen usaglašenosti zračenja ekrana sa spektralnom osetljivošću prijemnika koji prima sliku (oko, fotografска emulzija). Poznavanje ove karakteristike pretvarača je neophodno, pošto ona može da bude od velikog uticaja na efikasnost primene uređaja kao celine. Može da se desi, čak i kada se postigne veliki blesak ekrana, da koeficijenat korisnog dejstva uređaja kao celine bude vrlo mali, ako se raspodela bleska jako razlikuje od spektralne osetljivosti prijemnika.

5. Koeficijenat pretvaranja η je odnos fluksa energije zračenja ekrana pretvarača u spoljnju polusferu i fluksa energije zračenja koji pada na fotokatodu:

$$\eta = \frac{\Phi_e}{\Phi_k} = \pi \xi S_k U \cdot 10^{-6}. \quad (\text{VI. 5})$$

Kako se vidi iz izraza (VI.5), za dovoljno velike napone i dovoljno veliko svetlosno dejstvo ekrana i osetljivost fotokatode, koeficijenat pretvaranja može postati veći od jedinice. U tome se

sastoji jedna od mogućnosti pojačanja bleska slike pomoću elektronsko-optičkih pretvarača.

6. Blesak šuma ekrana — B_f .

I kad fotokatoda pretvarača nije ozračena, njegov ekran ima izvestan blesak, koji je prouzrokovан prisustvom tamne struje fotokatode, nastale usled termoelektronske emisije:

$$B_f = \pi \xi I_T U \cdot 10^{-6} \Gamma_e^{-2}, \quad (\text{VI. } 6)$$

gde je: I_T = gustina tamne struje pretvarača.

Gustina tamne struje za cezijum-oksidne fotokatode dostiže vrednosti $10^{-12} - 10^{-11}$ A/cm², a za cezijum-antimonidne $10^{-15} - 10^{-16}$ A/cm².

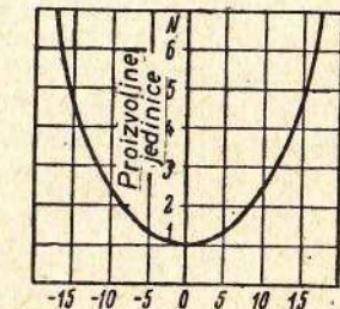
Pošto se na pozadini sa bleskom B_f vrši posmatranje lika objekta sa bleskom B_e , to se kontrast slike snižava i može se približno odrediti iz odnosa ($B_e > B_f$)

$$k = \frac{B_e - B_f}{B_e}. \quad (\text{VI. } 7)$$

Zbog ovoga se, u cilju smanjenja bleska šuma, u nizu slučajeva radi sniženja gustine termoelektronske struje ide na hlađenje fotokatoda (naročito cezijum-oksidnih).

7. Elektronsko-optičko uvećanje Γ_e doprinosi povećanju osetljivosti pretvarača (pri $\Gamma_e < 1$), jer je povećanje bleska slike srazmerno smanjenju njene površine. Bez obzira na to što se tako smanjena slika posmatra kroz okular sa malim žižnim rastojanjem i velikim otvorom, što dovodi do dopunskih gubitaka svetlosti, dobitak je u tome, što može u oku da se sakupi veliki deo svetlosti koju ekran zrači u oblasti zadnje polusfere.

8. Moć razlaganja N pretvarača određuje minimalnu vrednost ugla pod kojim se dve različite tačke mogu odvojeno posmatrati.



Sl. VI.10 — Promena moći razdvajanja na ekranu pretvarača

Sl. VI.10 — Promena moći razdvajanja na ekranu pretvarača

Iz obrazaca (VI.2) i (VI.3) se vidi da je pri pravilnom izboru karakterističnih veličina pretvarača, moć razdvajanja data elementima elektronske optike prilično velika za snopove elektrona u blizini ose simetrije. Međutim, praktično se ova moć razdvajanja ne postiže u celom vidnom polju zbog rasipanja fluksa zračenja na zrnastoj strukturi fotokatode i luminiscentnog sloja, kao i zbog prisustva elektronsko-optičkih aberacija. Ove poslednje dovodi do jakog pogoršanja moći razdvajanja pretvarača po perifernim delovima vidnog polja.

3. POJAČANJE BLESKA SLIKE

U ovoj knjizi napred su bili razmotreni fotoemisioni elektronsko-optički pretvarači, namenjeni, uglavnom, za posmatranje objekata u odbijenim infracrvenim zracima. Međutim, u nizu slučajeva elektronsko-optički pretvarači se koriste za posmatranje objekata na malom nivou osvetljenosti, tj. u prirodno noćnoj osvetljenosti. U ovom slučaju, elektronsko-optički pretvarači se koriste kao pojačavači bleska.

Pomoću čisto optičkih uređaja principijelno je nemoguće postići povećanje bleska slike u odnosu na blesak posmatranog objekta.

U elektronsko-optičkim uređajima ovo je moguće postići preko elektronskog pojačanja, tj. dovodeći spoljnju energiju u pretvarač.

Može se pokazati [2] da je koeficijenat pojačanja bleska slike na ekranu koji se posmatra, u odnosu na blesak objekta, dat sa:

$$\frac{B_1}{\mathcal{B}} = \frac{\eta A^2}{4 I_e^2} = \frac{\pi A^2 S U \xi \cdot 10^{-6}}{4 I_e^2}. \quad (\text{VI. 8})$$

gde je: $A = \sqrt{\tau_{ob}}$ — fizička svetlosna moć objektiva;

\mathcal{B} — blesak objekta;

B_1 — blesak lika objekta na ekranu pretvarača.

Prema tome, pojačanje bleska slike može se postići smanjenjem razmere slike ($I_e < 1$) i povećanjem svetlosne moći

objektiva A, integralne osetljivosti fotokatode φ , ubrzavajućeg napona U i svetlosnog dejstva ekrana prema posmatraču ξ .

Ako je svetlosno dejstvo ekrana izraženo u fotometrijskim jedinicama (lm/W , cd/W), tada se za slučaj da se za registraciju fluksa zračenja sa ekrana koristi ne oko, već neki drugi prijemnik, blesak ekrana može izračunati iz relacije:

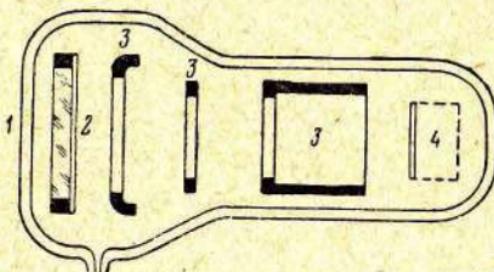
$$B_1 = \beta B_1,$$

$$\beta = \frac{\int S_{pr(\lambda)} B_1(\lambda) d\lambda}{\int V(\lambda) B_1(\lambda) d\lambda}; \quad (VI. 9)$$

gde je:

- $V(\lambda)$ — relativna osetljivost oka;
- $S_{pr(\lambda)}$ — spektralna osetljivost prijemnika;
- $B_1(\lambda)$ — spektralni blesak ekrana.

Mandel [3, 4] daje proračune povećanja bleska slike pomoću elektronsko-optičkih pretvarača sa cezijum-antimonidnom fotokatodom i ekranom od cink-sulfida aktiviranog srebrom. Za



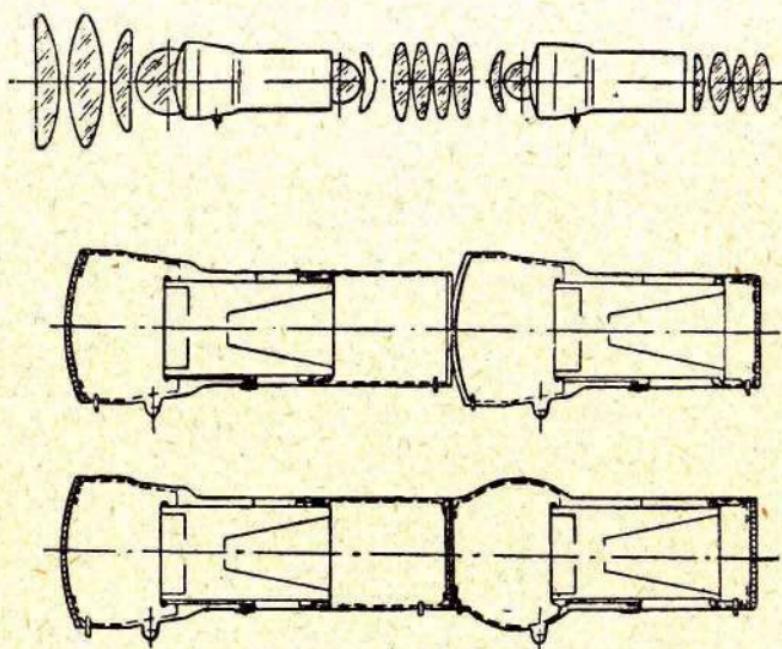
Sl. VI.11 — Skica elektronsko-optičkog uredaja za fotografisanje slabih zvezda

vizuelno posmatranje povećanje bleska slike dostiže vrednost 32, a pri usaglašavanju spektralnog sastava zračenja ekrana sa osetljivošću panhromatskog fotomaterijala — 90.

U tehnici se praktično primenjuju jednostepeni pretvarači kod kojih se pojačanje bleska postiže usaglašavanjem spektralnih karakteristika zračenja i osetljivosti fotokatode, kao i povećanjem bleska ekrana pri povećavanju ubrzavajućeg napona [5].

Za fotografisanje slabo vidljivih zvezda u Francuskoj je bio razvijen elektronsko-optički dodatak za teleskop, koji je omogućavao fotografisanje pomoću neposrednog dejstva elektronske slike na fotoemulziji (sl. VI.11).

Dodatak se sastoji od dvodeljnog staklenog suda 1, iz koga se stalno ispumpava vazduh. Unutar balona smeštena je fotokatoda 2, elektrodni sistem 3 i kaseta sa foto-pločama 4. Lik slabo vidljivih zvezda projektuje se na fotokatodu pomoću objek-



Sl. VI.12 — Šeme konstrukcija dvostepenog pretvarača sa jednim stepenom pojačanja bleska

tiva teleskopa. Pod dejstvom ubrzavajućeg napona od 40.000 V, fotoelektroni se fokusiraju na emulziji foto-ploče, zacrnjujući je na mestima koja odgovaraju položaju slabih zvezda u vidnom polju teleskopa. Koeficijenat pojačanja gustine zacrnjenja je pri primeni takvog dodatka jednak 100.

Iz navedenog primera se vidi da se za dobijanje srazmerno malih vrednosti koeficijenta pojačanja bleska kod jednostepenih

pretvarača moraju koristiti složene konstrukcije i sprovesti niz mera za usaglašavanje zračenja sa prijemnim delom cevi. Zbog toga su takvi pretvarači mogli da se koriste samo u laboratorijama.

Pojačavač bleska mogao je šire da se koristi posle razrade načina za redno vezivanje dva, tri i više elektronsko-optičkih pretvarača (6). Šeme takvog vezivanja dva pretvarača u jedan uredaj, koji se naziva kaskadni pretvarač (dvostepeni pretvarač), date su na sl. VI.12.

Pri rednom vezivanju dva elektronsko-optička pretvarača (jednostepeni EOP) posredstvom odgovarajuće optike, pojačanje bleska može se proceniti preko obrasca:

$$\frac{B^2}{B} = \frac{\frac{A_1^2 n_1}{4} \sin^2 \frac{\theta_1}{2} \eta_2 \tau_1 - 2}{\Gamma_{e1}^2 \Gamma_{\epsilon 2}^2 \Gamma_{1-2}^2} \quad (\text{VI. 10})$$

gde je θ_1 — ugao otvora sa strane prvog ekrana.

U radu [6] se navodi da je za slučaj povezivanja dva elektronsko-optička pretvarača firme AEG pomoću odgovarajuće optike, moguće postići koeficijenat pojačanja bleska jednak 115. Prilikom primene direktnog optičkog kontakta između ekrana prvog i fotokatode drugog pretvarača, koeficijenat pojačanja bleska dostiže već vrednost 1460.

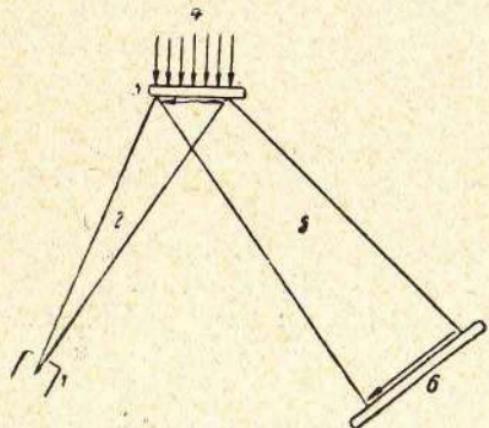
Radi dobijanja velikih koeficijenata pojačanja bleska slike, kod takvih dvostepenih i trostepenih pretvarača (jednokaskadni, dvokaskadni EOP) ulazna fotokatoda i izlazni ekran usvajaju se u skladu sa zahtevima koje određuju izvor zračenja i uredaj za registraciju, dok su unutrašnje fotokatode i ekrani od cezijum-antimonida i luminiscentnog materijala sa modroplavim zračenjem, na koje je cezijum-antimonidna fotokatoda najosetljivija.

Prilikom korišćenja cezijumoksidne ulazne katode nailazi se na znatnu tamnu struju od termoelektronske emisije. Ova tamna struja pojačava se u sledećim stepenima i stvara na izlaznom ekranu jak svetao šum. Zbog ovoga je pri primeni kaskadnih pretvarača sa cezijum-oksidsnom ulaznom fotokatodom potrebno hlađenje fotokatode do temperature reda $-40 = -50^\circ\text{C}$, da bi se smanjila tamna struja.

Višestepeni elektronsko-optički pretvarači posmatraju se u literaturi kao jedan od mogućih načina za stvaranje uređaja za noćno „gledanje“, u prirodno noćnoj osvetljenosti zemljine površine. Već danas oni se primenjuju kao predpojačavački stepeni pojačanja bleska u televizijskim uređajima za noćno osmatranje, koji se opisuju u glavi VIII.

4. ELEKTRONSKO-OPTIČKI PRETVARAČI SA FOTOOTPORNIKOM KAO KATODOM

Elektronsko-optički pretvarači sa fotoemisionom katodom omogućavaju posmatranje objekata preko njihovog sopstvenog zračenja, ako je temperatura površine objekta iznad 250—300°C. Za posmatranje objekata sa temperaturom ispod 250 C moraju se koristiti fotootpornici. Zbog ovoga su, razumljivo, vršena istraživanja da bi se ispitala mogućnost izrade elektronsko-optičkih pretvarača sa fotootpornikom kao katodom. Princip rada takvih pretvarača razlikuje se od principa rada fotoemisionih pretvarača.



Sl. VI.13 — Princip rada elektronsko-optičkog pretvarača sa fotootpornikom

Zagrejana katoda 1 emituje (sl. VI.13) snop elektrona 2, koji pada na površinu fotootpornika 3, na koji se dovodi mali pozitivan potencijal u odnosu na katodu. Elektronski snop stvara struju kroz fotosloj, izazivajući pad potencijala na njegovoj površini i, kao posledicu toga, odbijanje dela elektrona 5 prema luminiscentnom ekranu 6. Ako se sada na fotootpornik projektuje lik objekta koji se posmatra u infracrvenim zracima 4, ot-

por pojedinih tačaka fotoosetljivog sloja u smeru normalnom na površinu menjaće se u saglasnosti sa intenzitetom fluksa zračenja koji pada na te tačke. Promena otpora izazvaće promenu struje

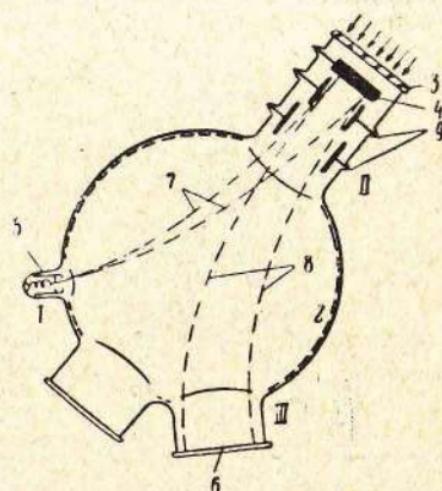
kroz fotootpornik i potencijala u svim tačkama njegove površine, što će dovesti do promene u broju elektrona koji se iz svake pojedine tačke odbijaju prema ekranu. Pošto broj odbijenih elektrona od fotoootportnika zavisi od intenziteta fluksa zračenja koji pada na njega, to će i intenzitet zračenja ekrana biti srazmeran sa upadnim fluksom zračenja. Prema tome, postoji mogućnost da se dobije slika posmatranog objekta ako se odbijeni snop elektrona fokusira na ecran.

Fotoootportnici za ovakve pretvarače, pored velike integralne osetljivosti, moraju da imaju visoki specifični otpor u normalnom smeru (reda $10 \Omega \cdot \text{cm}$), koji je potreban za dobijanje dovoljne potencijalne razlike između ozračenih i neozračenih tačaka, kao i za sprečavanje „rasplinjavanja“ električnog opterećenja po reflektujućoj površini [7].

Razdvajanje upadnog i odbijenog elektronskog snopa može se izvršiti pomoću magnetnog kao i elektrostatičkog polja [8, 9].

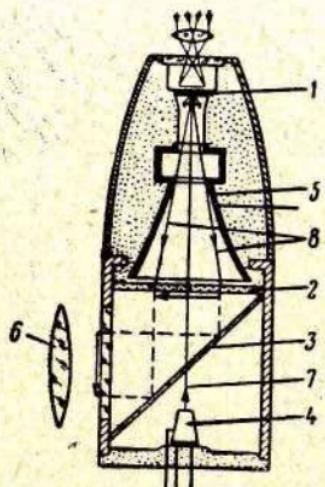
Pretvarač sa magnetnim razdvajanjem upadnog i odbijenog snopa elektrona (sl. VI.14) sastoji se od cilindričnog balona sa četiri ogranka raspoređena u jednoj ravni. U ogranku I postavljen je elektronski top 5. U ogranku II sa ravnim prozorom 3, propustljivim u infracrvenoj oblasti spektra, postavlja se fotoootpornik 4 i dve cilindrične elektrode 9, koje stvaraju kočeće polje za upadne elektrone 7 i ubrzavajuće za odbijene elektrone 8. U ogranku III smešten je luminiscentni ecran 6 na kome se posmatra objekat.

Unutrašnja površina balona pokrivena je akvadagom 2 (vodeni rastvor grafita) i nalazi se na potencijalu od 4kV. Oko

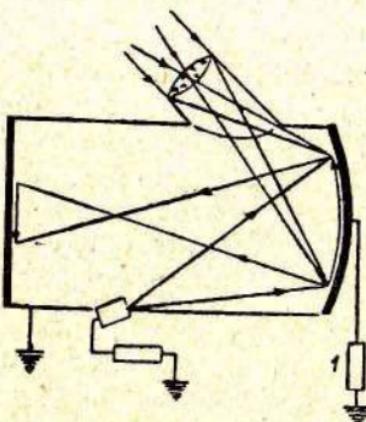


Sl. VI.14 — Pretvarač sa magnetnim razdvajanjem elektronskih snopova

balona se postavlja solenoid, koji stvara homogeno magnetno polje normalno na ravan kretanja elektrona. Elektronski mlaz izlazi iz elektronskog topa u divergentnom snopu, ulazi u magnetno polje u balonu i pod njegovim dejstvom skreće prema fotokatodi. Ovde se elektroni usporavaju u polju cilindričnih anoda i odbijaju od fotootpornika. Za odbijene elektrone, cilindrične anode predstavljaju ubrzavajući sistem, a magnetno polje ih skreće sada u drugom smeru — prema ekrานу (zbog promjenjenog znaka vektora brzine elektrona).



Sl. VI.15a — Pretvarač sa elektrostatičkim razdvajanjem elektronskih snopova (Nemačka)



Sl. VI.15b — Pretvarač firme RCA sa elektrostatičkim razdvajanjem elektronskih snopova (SAD)

Pretvarači sa elektrostatičkim poljem za razdvajanje upadnog i odbijenog snopa elektrona bili su razvijeni u Nemačkoj (sl. VI.15a) i u SAD u laboratorijama firme RCA (sl. VI.15b).

Pretvarač (sl. VI.15a) se sastoji od fotokatode 1, izrađene od bizmutove soli selenske kiseline, luminiscentnog ekrana 2, ogledala 3, elektronskog topa 4, elektrodnog sistema 5 i okulara 6. Tanak mlaz elektrona prolazi kroz otvor na ogledalu i luminiscentnom ekranu. Ulazeći u elektrodnji sistem elektronski snop se širi, a elektroni usporavaju svoju brzinu. Odbijeni

elektroni 8 sa fotokatode ubrzavaju se sa istim sistemom elektroda i fokusiraju na ekranu. Padajući na ekran elektronski snop ga osvetjava, što se posmatra kroz okular preko ogledala 3. Fotokatoda korišćena u pretvaraču bila je osetljiva do 2μ , sa maksimumom spektralne osetljivosti u okolini 1μ . Specifična otpornost fotoosetljivog sloja pokazala se kao vrlo mala ($10^6 \Omega \cdot \text{cm}$), što je ometalo da se dobije slika dobrog kvaliteta. Zbog ovoga pretvarač nije izašao iz faze laboratorijskih ispitivanja.

Pretvarač firme RCA (sl. VI.15b) sastoji se, u principu, iz istih elemenata kao i nemački, mada je konstrukcijski izведен nešto drugčije. Elektrostatičko polje se obrazuje pomoću baterije 1, koja između fotokatode i ekrana stvara potencijalnu razliku reda 5–6 kV.

Bez obzira na nesavršenost opisanih pretvarača sa fotootpornicima, pojedini njihovi primeri dostizali su osetljivost od 0,1 lx, tj. omogućavali su da se na slici uoči razlika u osvetljenosti pojedinih delova objekta od 0,1 lx za zračenje u vidljivom delu spektra sa stvarnom temperaturom od 2700°K . Pretvarači su omogućavali posmatranje predmeta sa površinskom temperaturom ispod 200°C . Moć razdvajanja kod najboljih primeraka nije prelazila 20 linija/mm.

5. NAPAJANJE ELEKTRONSKO-OPTIČKIH PRETVARAČA

Savremeni elektronsko-optički pretvarači napajaju se iz specijalnih visokonaponskih izvora napajanja. U zavisnosti od namene elektronsko-optičkog uređaja, njegovog mesta korišćenja i uslova rada, visokonapski izvori mogu se izradivati bilo kao autonomni, bilo za priključivanje na spoljašnju električnu mrežu.

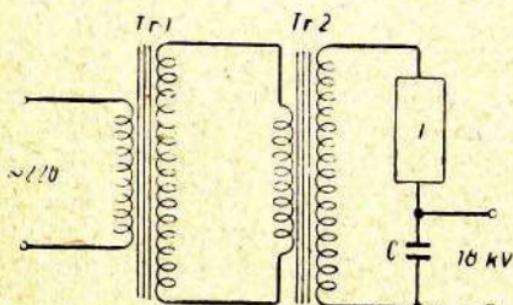
Nezavisno od njihove vrste, izvori napajanja treba da budu ekonomični i male težine i dimenzija. Snaga izvora treba da bude dovoljna za normalan rad elektronsko-optičkog pretvarača u celom opsegu radnih osvetljenosti fotokatode, uz malu zavisnost izlaznog napona od promena napona glavnog izvora energije.

U vezi sa malom potrošnjom struje u elektronsko-optičkim pretvaračima, i snaga koju daje izvor napajanja može biti vrlo mala. Tako, ako se ima u vidu samo radna struja kroz pretvarač, reda nekoliko mikroampera, potrošnja snage pri naponu od 18

kV iznosiće 0,1 — 0,2 W. Međutim, zbog potrošnje snage u deliteljima napona i otpornicima za gašenje, kao i zbog gubitaka od parazitnih struja kroz staklo i kablove priključnice, snaga izvora napajanja mora se povećati 0,5 do 1 W.

Zahvaljujući maloj potrošnji struje u pretvaraču, napon koji daje visokonaponski izvor određen je vrsnim vrednostima napona koji se dobija pri pretvaranju, što znatno uprošćava šemu izvora.

Danas se u praksi koriste šeme sa naizmeničnim i jednosmernim napajanjem, predviđene za autonomni rad i za priključivanje na mrežu.



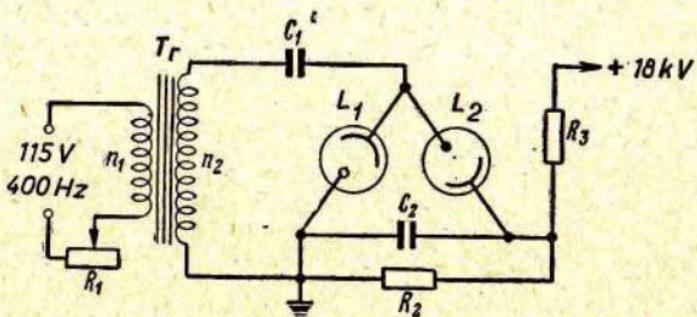
Sl. VI.16a — Izvor sa naizmeničnim napajanjem sa dvostrukom transformacijom napona

Ako se kao polazni izvor energije koristi naizmenična struja, dobija se najjednostavnija šema visokonaponskog izvora napajanja, pošto u tom slučaju nije potreban vibropretvarač. Takve šeme se izvode na principu dvostrukе transformacije struje (sl. VI.16a), ili primenom šeme umnožavanja napona (sl. VI. 16b).

Kod dvojne transformacije (sl. VI.16a) se na ulaz prvog transformatora dovodi naizmenični napon industrijske ili neke više učestanosti. Na izlazni namotaj drugog transformatora priključuje se ispravljački elemenat i kapacitet sa čijih se obloga skida jednosmerni napon od 18 kV. Snaga koju izvor napajanja uzima iz mreže iznosi 15—30 VA. Nedostatak ovakve šeme jesu veliki gubici, kako u samom transformatoru, tako i u ispravljačkom delu. Da bi se oni smanjili, cela šema mora se postaviti u ulje ili u čvrstu zalivnu smesu.

Šema visokonaponskog izvora sa naizmeničnim napajanjem, uz korišćenje udvajanja napona, ima prednosti u odnosu na prethodnu kako po dimenzijama i težini, tako i po potrošnji snage iz mreže polaznog izvora struje.

Tako, na primer, kod jedne od konstrukcija visokonaponskog izvora šema sadrži visokonaponski transformator (sl. VI.16b) sa primarom sa $n_1 = 300$ namotaja, na koji se preko promenljivog otpora R_1 dovodi napon 115V, 50 Hz. Sekundarni namotaj ima $n_2 = 19000$ namotaja, što omogućava da se na njemu dobije napon od 7–10 kV. Paralelno sa sekundarnim namotajem vezano je kolo udvajanja i ispravljanja napona, izvedeno sa diodama sa hladnom emisijom CBK–1 (L_1 i L_2) i visokonaponskim



Sl. VI.16b — Izvor sa naizmeničnim napajanjem sa udvajanjem napona

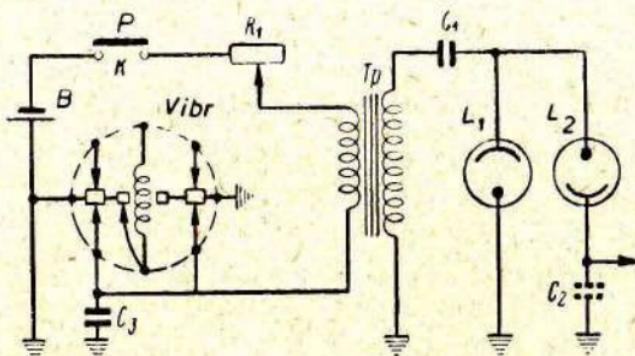
kondenzatorima (C_1 i C_2). Za razliku od dioda sa grejanom katodom, kod dioda sa hladnom emisijom katoda je aktivirana cezijumom, što uslovljava mali izlazni rad, dok anoda ima veliki izlazni rad. Time se obezbeđuje prolaz struje u jednom pravcu (anoda — katoda) pri dovođenju naizmeničnog napona na diodu.

U prvoj poluperiodi, kada je anoda diode L_1 na pozitivnom potencijalu u odnosu na katodu, napon transformatora puni kondenzator C_1 kroz L_1 . U drugoj poluperiodi dioda L_1 je začočena i napon na namotaju transformatora se sabira sa naponom na C_1 , poprimajući skoro udvojenu vrednost amplitudne naizmeničnog napona. U ovoj poluperiodi otvorena je dioda L_2 , koja puni kondenzator C_2 do dvostruke amplitude napona na namotaju transformatora. Sa kondenzatora C_2 napon se kroz otpor R_3 dovodi na elektronsko-optički pretvarač. Otpornik R_3 ograničava struju koja se uzima iz izvora na 15–20 μ A.

Otpornik R_2 , vezan paralelno sa C_2 , služi za brže pražnjenje kondenzatora C_2 posle isključivanja izvora napajanja.

Visokonaponski izvor napajanja izведен po ovakvoj šemi daje, opterećujući mrežu sa manje od 10 VA, napon u granicama od 15 do 20 kV pri struji opterećenja od 1 μ A.

Autonomni izvori sa jednosmernim napajanjem koriste, za razliku od izvora sa naizmeničnim napajanjem, uglavnom primarne izvore male snage (suve baterije, akumulatorske baterije malog kapaciteta) i potrebno je za njihov rad da se primene posebni



Sl. VI.17 — Autonomni izvor napajanja sa vibropretvaračem

postupci za pretvaranje jednosmernog napona u naizmenični radi dalje transformacije i ispravljanja. Zato u ovom slučaju odlučujuću ulogu imaju pitanja ekonomičnog korišćenja energije primarnog izvora.

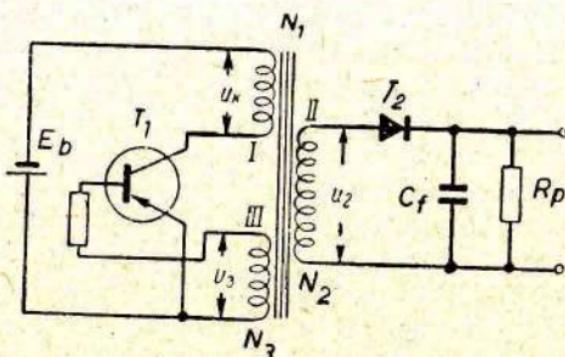
Kao najekonomičnije rešenje ovde se pokazao izvor sa primenom vibropretvarača i kola za udvajanje napona (sl. VI.17).

Koeficijent korisnog dejstva vibropretvarača ne prelazi 50—70%. Ako se uzmu u obzir dopunski gubici u transformatoru i ispravljaču, ukupan koeficijent korisnog dejstva čak i srazmerno ekonomičnih blokova ne prelazi 50%.

U vezi s tim danas su od posebnog interesa pretvarači napona bez vibratora, koji koriste tranzistore. Prednosti takvih pretvarača jesu visok koeficijent korisnog dejstva i male dimenzije.

Princip rada tranzistorских pretvarača napona može se razumeti iz šeme sa sl. VI.18.

Tranzistor T_1 vezan je u kolu primara transformatora po šemi sa uzemljenim emiterom. On ima ulogu prekidača, koji naizmenično uključuje i isključuje napon baterije u kolo primarnog namotaja transformatora, a koji se zatvara preko veze kolektor-emiter tranzistora. Pošto je otpor veze kolektor-emiter vrlo mali, praktično ceo napon E_b dovodi se na transformatorski namotaj I.



Sl. VI.18 — Tranzistorski izvor napajanja

Struja u namotaju I počinje da raste, indukujući u namotajima II i III naizmenični napon proporcionalan brzini promene struje u namotaju I. Porastom struje, brzina ove promene se smanjuje, što dovodi do smanjenja napona u namotajima II i III. Smanjenje napona U_3 izaziva smanjenje struje baze tranzistora, a to opet smanjuje struju kolektora itd. Kao rezultat toga tranzistor T_1 prestaje da provodi. Dok je tranzistor zakočen, naponi U_k i U_3 se smanjuju do nule i menjaju znak, prouzrokujući time ponovno pojavljivanje struje baze i struje kolektora, dolazi do otvaranja tranzistora i ceo radni ciklus pretvarača se ponavlja.

Koefficijent korisnog dejstva tranzistorskih pretvarača dostiže 80 do 90%.

Opisane šeme visokonaponskih izvora napajanja uključuju u sebe, kao obavezan elemenat, primarni izvor napajanja, što ih često čini glomaznim ili zahteva spoljni izvor struje.

U poslednje vreme počela su sve češće da se javljaju saopštenja o razvijanju visokonaponskih atomskih baterija za napa-

janje pojedinih kola elektronskih uređaja, među kojima i elektronsko-optičkih pretvarača [10, 11, 12].

Za dobijanje takvih izvora električne energije može se koristiti zračenje kako nanelektrisanih čestica, tako i neutralnih (γ -zračenje, neutroni).

Glavni izvori nanelektrisanih čestica koji su počeli industrijski da se primenjuju jesu stroncijum-90, itrijum-90 i njihova mešavina, kao i tritijum i prometejjum-147. Za dobijanje neutralnih čestica može se koristiti, uglavnom, kobalt-60, sa kvantima energije γ -zračenja od 1,33 MeV i vremenom poluraspadanja od 5,3 godine.

Pretvaranje zračenja u električnu energiju može se ostvariti metodom aktivnog kondenzatora.

Aktivni kondenzator se sastoji od centralne elektrode sa radioaktivnim izotopom koji emituje β -zrake (emiter), i spoljašnje elektrode koja sakuplja izbačene elektrone (kolektor).

Pri dovoljno velikom vremenu nagomilavanja električnog punjenja, ovakve baterije omogućavaju dobijanje vrlo visokih napona. Tako, po raspoloživim podacima [10], emisiona baterija sa dovoljno velikim kapacitetom opterećenja omogućava dobijanje napona od 360 000 V pri snazi od 0,2 mW.

Baterije tipa „aktivnog kondenzatora“ sa β -radioaktivnim izotopima odlikuju se čvrstom konstrukcijom, odsustvom korozije sastavnih delova, malom težinom, velikom sigurnošću u radu, otpornošću na kratke spojeve, linearnošću karakteristike punjenja i dugim vekom trajanja (25 godina). Osim toga, one mogu da izdrže sasvim velika opterećenja na temperaturu i ubrzanje.

II D E O

PRIMENA INFRACRVENIH UREĐAJA U VOJNE SVRHE

G l a v a VII

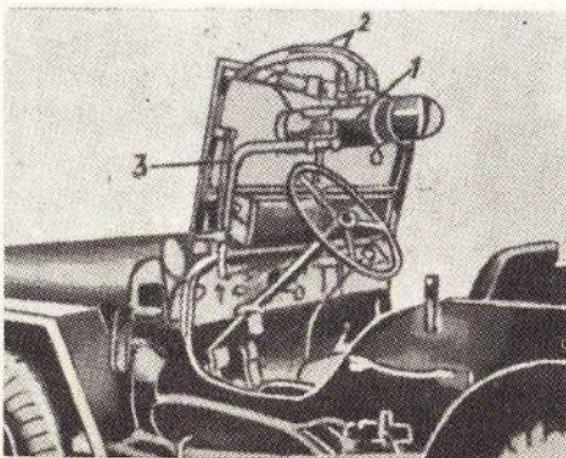
OBEZBEĐENJE BORBENIH DEJSTAVA

1. KORIŠĆENJE INFRACRVENIH UREĐAJA ZA NOĆNU VOŽNJU I NOĆNO GAĐANJE

U uslovima savremenog vođenja borbenih dejstava, veliku ulogu i značaj imaju noćne operacije. Prirodno je da se za obezbeđenje tajnosti noćnih dejstava traže i odgovarajuća tehnička sredstva. U takva sredstva spadaju i infracrveni uređaji koji, po mišljenju mnogih stranih vojnih stručnjaka, omogućuju da se obezbedi tajnost i iznenadno dejstvo svojih snaga. Tako, F. O. Mikše, u knjizi „Atomsko oružje i armija“, ukazuje na sve veći značaj infracrvenih sredstava u vođenju noćnih operacija. Već se danas pomoću infracrvenih uređaja rešavaju sledeći zadaci: vožnja transportnih sredstava i ratne tehnike noću, noćna gađanja iz streljačkog oružja, otkrivanje vojnih objekata na bojnom polju na osnovu njihovog topotnog zračenja (tenkova, oruđa, brodova i sl.), signalizacija i veza između odvojenih jedinica i objekata, obeležavanje kolona u pokretu, regulisanje kretanja (saobraćaja) i osmatranje protivničkih dejstava (1).

Infracrveni uređaji za vođenje motornih vozila noću (sl. VII.1) sastoje se iz elektronsko-optičkog uređaja za osmatranje,

reflektora pokrivenog infracrvenim filtrom i bloka za napajanje uređaja za osmatranje.



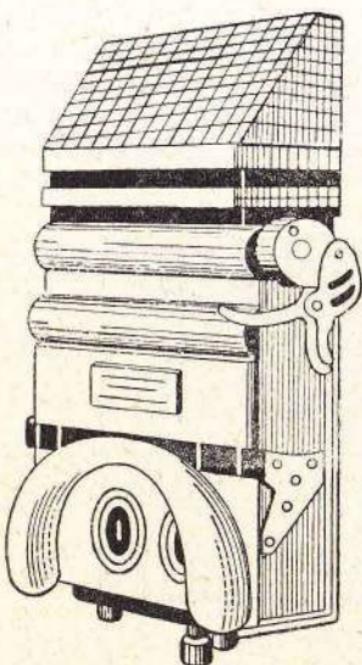
Sl. VII.1a — Švedski uređaj za noćnu vožnju na automobilu tipa „viliš“

1 — elektronsko-optički uređaj za osmatranje; 2 — dovod napajanja; 3 — konzola za učvršćenje uređaja



Sl. VII.1b — Američki uređaj na šlemu za noćnu vožnju

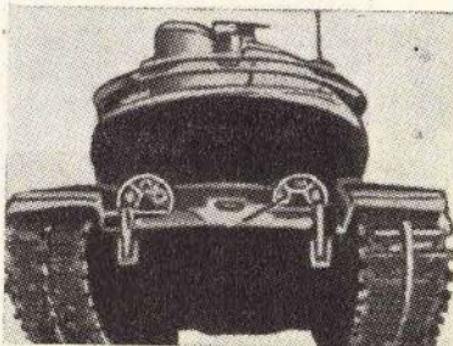
Po konstrukciji, uređaji za osmatranje se dele na direktnе (monokularne ili binokularne) i indirektnе ili periskopske (sl. VII.2)



Sl. VII.2 — Tenkovski periskopski uređaj M-41

Uređaji za osmatranje učvršćuju se na motornim vozilima ili na šlemu vozača.

Infracrveni farovi, koji ozračuju područje ispred vozila, mogu da budu posebno postavljeni, paralelno sa običnim farovima za osvetljenje, kao na američkom srednjem



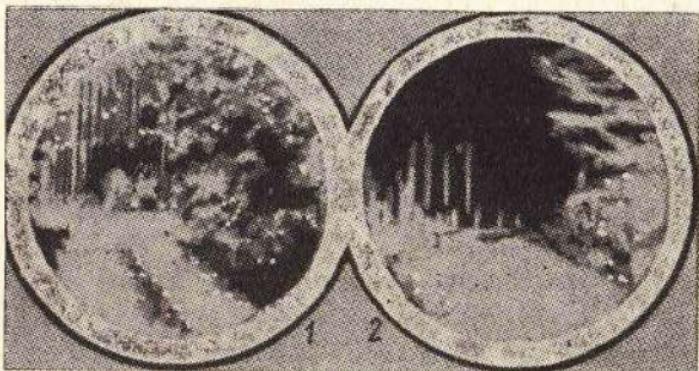
Sl. VII.3 — Položaj infracrvenih farova na tenku M-48

tenku — M-48 (sl. VII.3), ili, kada je neophodno, ispred farova za osvetljenje postavljaju se infracrveni filtri. Obično, radi ograničenja rasprostiranja fluksa zračenja u gornju polusferu, i u ovom i u drugim slučajevima primenjuju se specijalni štitovi i dijafragma.

Za poboljšanje uslova maskiranja pri kretanju kolone vozila u stranoj stampi preporučuje se montaža ovih uređaja na čeono vozilo, začelno vozilo, kao i na jedno ili dva vozila u koloni. U tom slučaju za obezbeđenje sigurnosti kretanja preporučuje se postavljanje na vozilu specijalnih svetlećih znakova, vidljivih za vozača sledećeg vozila, a takođe i postavljanje na neophodnim mestima, na putevima, specijalnih infracrvenih signalnih svetiljki i pokazivača.



Pošto su domet i vidni ugao osmatranja terena u uređajima za osmatranje ograničeni, sasvim je prirodno da se ograniči i brzina kretanja vozila. Prema pisanju u američkim publikacijama, brzina kretanja oklopnih transportera noću mora biti najmanje 10 km/č (2). Ipak, jedan od poslednjih uređaja za vođenje vozila T-6A, koji je ispitivan 1958. god. i uveden u naoružanje američke armije, obezbeđuje, navodno, takvu brzinu kretanja vozila noću koja je jednak brzini kretanja danju po nenabijenim putevima.



Sl. VII.4 — Deo puta, posmatran uređajem za noćnu vožnju vozila danju — 1 i noću — 2

Karakter slike okoline, posmatrane danju 1 i noću 2, na elektronsko-optičkom uređaju, prikazan je na slici VII.4.

Uporedo sa uređajima za noćnu vožnju, u jedinicama kopnene vojske više zemalja, primenjuju se infracrveni elektronsko-optički nišani za karabine, puške, automate i oruđa.

Kao nišan takvog tipa, može se uzeti i nišan za karabin M-2 (SAD). Nišan se sastoji od infracrvenog reflektora sa sijalicom snage 25 W, elektronsko-optičkog uređaja za osmatranje sa pretvaračem 1-P-25 i bloka za napajanje, koga vojnik nosi u torbici na leđima. Daljina gađanja iznosi 100 m.

Godine 1954. u naoružanju SAD uveden je infracrveni nišan „supersnajperskop“ za puške „garand M-1“ (3) — (sl. VII. 5), koji se sastoji iz istih delova (reflektora i elektronsko-optičkog uređaja) kao i M-2, ali ovaj može da nišani 250 do

270 m. Povećanje nišanske daljine postignuto je blagodareći primeni osetljivih pretvarača sa ubrzavajućim naponom 20.000 V i reflektora snage 30 W. Težina kompleta nišana bez akumulatorske baterije iznosi 12 kg.

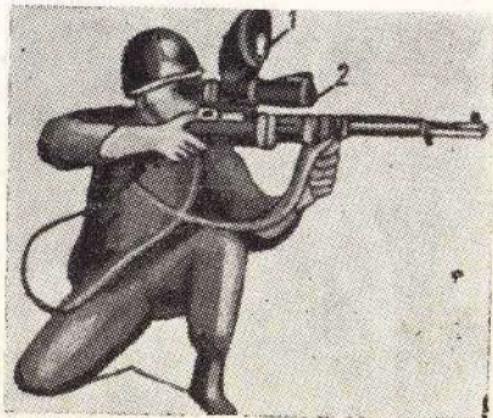
Za razliku od M-2, reflektor (1) nišana „supersnajperskopa“ postavlja se iznad puške, a ne ispod i ima zajednički nosač sa uređajem za osmatranje (2). Ova okolnost dozvoljava da se puška brzo opremi sa dnevnog za noćno dejstvo, i obratno.

U stranoj literaturi preporučuje se sledeća taktička primena pušaka sa infracrvenim nišanima: vojnici koji imaju takve puške dejstvuju u parovima — jedan osvetljava položaj, a drugi, koji se nalazi na izvesnom rastojanju od prvog, za to vreme otvara vatru na cilj.

Infracrveni nišani za mitraljeze (sl. VII.6) i oruđa slični su po svojoj konstrukciji puščanim, ali može s njima da se nišani na veće daljine usled jačih reflektora i izvora za napajanje. Tako, nišan za ručni mitraljez „šatelro“ (Francuska), težine 8 kg (bez izvora za napajanje), može da nišani do 400 m. Kod njega se reflektor i visokonaponski blok napajanja montiraju na ležište zrna, blizu uređaja za posmatranje. Akumulatorska baterija za napajanje reflektora i uređaja za posmatranje ima relativno veću težinu i prenosi je jedan od poslužioca mitraljeza.

Celishodno je primenjivati mitraljez sa infracrvenim nišanima kao i puške u parovima, postavljajući ih na krilne položaje voda. Ponekad se u komplet nišana dodaje i signalni prenosni reflektor. Pri tome se radi maskiranja preporučuje postavljanje reflektora dalje od mitraljeza koji gađa.

O efikasnosti primene infracrvenog nišana za streljačko oružje, može da se sudi prema operaciji za zauzimanje ostrva



Sl. VII. 5 — „Supersnajperskop“
na pušci „garand M-1“

Okinava. U ovoj operaciji japanska armija je izgubila 30% ljudstva, koje je izginulo samo zbog toga što je pomorska pešadija SAD primenila karabine s noćnim nišanom M-2.



Sl. VII.6a — Francuski laki mitraljez „šatello“ sa infracrvenim nišanom

Na američkom tenku M-60 koriste se sledeći uređaji: reflektor koji daje infracrveno i vidljivo svetlo, dvokanalni optički i elektronsko-optički periskopski nišani, monokularni daljinomer i spregnuti televizijski sistem. Ovi uređaji omogućuju tenku da vodi borbu u svako doba dana i noći.

Za „osvetljenje“ bojnog polja na tenku je postavljen kombinovani reflektor koji je razvila firma „Dženeral-elektrik“, kao zamenu za ranije primenjivani 18-colovni reflektor. Reflektor ima ksenonsku sijalicu sa usijanom niti i postavlja se na oklopnu iznad topa. Za uključenje infracrvenog ozračivanja, između sijalice i reflektora postavlja se mali infracrveni filter.



Sl. VII. 6b — Mitraljez sa infracrvenim nišanom

Komandant tenka i nišandžija imaju dvokanalne periskopske nišane koji im omogućuju osmatranje sa infracrvenim i vidljivim zracima. Optički kanal sa osmostrukim povećanjem služi za

posmatranje levim okom, a elektronsko-optički kanal sa istim povećanjem — desnim okom.

Monokularni daljinomer radi na principu daljinomera kod fotografskih aparata (poklapanje dva lika cilja) i omogućuje da se bez naročitih teškoća odredi daljina u dijapazonu od 500 do 4400 m.

Upotreba spregnute televizijske aparature u tenku povećava mogućnosti oklopnih jedinica pri vođenju noćnih borbenih dejstava. Aparatura se sastoji iz predajne televizijske kamere, dva prijemnika i pomoćnih blokova. Karakteristična osobina aparature je ta što može da radi u dva režima: u režimu obične televizijske aparature i korišćenjem principa pamćenja signala. Prvi režim je predviđen za rad danju, a drugi — u prirodnoj noćnoj osvetljenosti, kada okolina ne može da se posmatra čak ni optičkim uredajima.

Istiće se da ovakav sistem bitno dopunjuje infracrveni nišan i potpuno je pasivan.

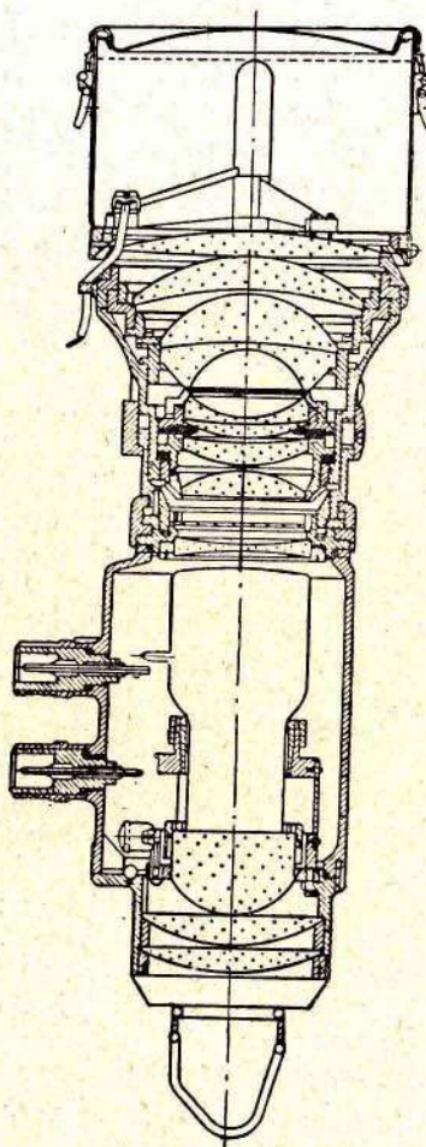
Osnovni nedostatak ovakvih razmatranih nišana je potreba za specijalnim infracrvenim reflektorom za ozračivanje cilja. Njegovo zračenje u stvari je demaskirajući faktor i protivnik opremljen infracrvenim priborom može ne samo da otkrije već i da uništi reflektor puškomitralskom ili topovskom vatrom.

Zato su još u toku II svetskog rata vršeni opiti radi izrade pasivnih infracrvenih nišana koji za svoj rad koriste toplotno zračenje ciljeva.

Jedan od prvih takvih nišana bio je protivavionski elektronsko-optički nišan „ORAO“ (Nemačka), kojim se mogao otkriti avion B—29 na osnovu toplotnog zračenja njegovih motora sa rastojanja od oko 30 km.

Vršeni su opiti da se postave elektronsko-optički nišani na avione za otkrivanje i nišanje vazdušnih ciljeva. Tako su se 1942. god. u naoružanju engleskih vazduhoplovnih snaga pojavili lovci s elektronsko-optičkim vizirima, učvršćenim u kabini aviona. U početku su bili predviđeni za otkrivanje svojih aviona obeleženih infracrvenim farovima. Ali kasnije je pred objektiv pribora postavljen kolimator za obezbeđenje nišanja.

U isto vreme u Nemačkoj je bio razrađen i postavljen na nekim lovačkim avionima elektronsko-optički nišan „španer II A“ s nepokretnim nišanskim markerom. Ovaj nišan (sl. VII.7)



Sl. VII.7 — Nemački elektronsko-optički pretvarač „Paner - II A“

imao je jaku optiku s velikim ulaznim otvorom ($A = 1 : 0,8$; $f = 90$ mm), te je imao i velike gabarite. Kao osetljivi elemenat u nišanu je postavljen pretvarač firme AEG. Pri vidnom ugлу od 30° nišanom se mogao otkriti avion B-29 na rastojanju od 8 do 10 km.

2. INFRACRVENI DALJINOMERI

Pasivni infracrveni sistemi za otkrivanje i nišanjenje ne omogućavaju da se njima neposredno izmeri daljina do cilja, pa se za određivanje rastojanja do cilja upotrebljavaju radarska ili optička sredstva.

Zato su nastojanja mnogih specijalista iz infracrvene tehnike bila usmerena na izradu daljinomera koji bi radili u infracrvenoj oblasti spektra. Izrada takvih daljinomera omogućila bi da rad sistema za otkrivanje i nišanjenje bude elastičan i bez smetnji, a takođe bi znatno povećala tajnost njihovog rada.

Po principu dejstva infracrveni daljinomeri su identični s optičkim, koji rade u vidljivoj oblasti spektra i mogu da se podele na elektrooptičke, bazne i osne.

Optički daljinomeri koji rade u vidljivoj oblasti spektra široko se primenjuju u artiljeriji, geodeziji i inžinjeriji; infracrveni daljinomeri usled niza specifičnih zahteva koji se pred njih postavljaju, do danas nisu mogli masovno da se primene. I pored toga, princip konstrukcije takvih daljinomera može da se objasni na osnovu analize postojećih sistema.

Daljinomeri koji pripadaju tipu aktivnog principa dejstva zasnovani su na merenju vremena rasprostiranja fluksa zračenja duž trase, čija je dužina jednaka dvostrukoj veličini merenog rastojanja.

Ako je poznata brzina prostiranja energije zračenja u dатој sredini (vazduha) $v = c/n$, onda se mereno rastojanje može izračunati iz prostog odnosa:

$$D = v t/2 + k, \quad (\text{VII.1})$$

gde je:

k — konstanta popravke daljinomera.

Za takvu vrstu daljinomera karakteristična je neophodnost ozračivanja cilja elektromagnetskom energijom, koja se na bilo

koji način razlikuje od zračenja okoline. To zahteva specijalnu modulaciju fluksa zračenja, tj. promenu karakteristike fluksa zračenja u vremenu. Po pravilu, takva promena karakteristika zasnovana je na amplitudnoj modulaciji koja može da se ostvari na različite načine: mehaničkim modulatorom, impulsnim zračenjem, primenom Kerovog elektrooptičkog efekta ili piezoelektričnog efekta.

U slučaju primene impulsnih svetiljki za stvaranje fluksa zračenja, elektrooptički daljinomeri analogno radiolokatorima nazvani su „svetlosni lokatori“ (svetlosni radari).

Daljinomeri baznog tipa spadaju u pasivne sisteme, jer se njihov rad zasniva na registraciji fluksa zračenja, izračenog samim ciljem.

Usvojeno je da se bazni daljinomeri dele na daljinomere sa unutrašnjom bazom i sa spoljnom bazom. U prvom slučaju, baza sa prijemnim glavama koje su postavljene na njenim krajevima nalazi se na objektu sa kojeg se meri rastojanje; u drugom slučaju, rastojanje se meri prema bazi na čijim krajevima postoje izvor energije zračenja, koji su postavljeni na objektu do kojeg se meri rastojanje. Kao što se vidi, u drugom slučaju je mogućnost daljinomera ograničena, jer je potrebno od ranije znati veličinu baze.

Ipak i u jednom i u drugom slučaju meri se paralaktički ugao Δ (sl. VII.8) ograničen dvema linijama viziranja graničnih tačaka baze.

Rastojanje do objekta može u tom slučaju da se odredi iz proste relacije:

$$D = B/\Delta \text{ [m]}, \quad (\text{VII.2})$$

gde je:

B — baza, m;

Δ — paralaktički ugao u radijanima.

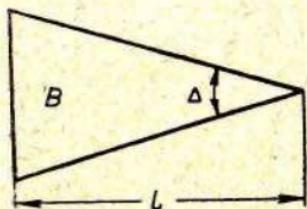
Princip osnih daljinomera je zasnovan na tome što svakoj tački prostora, na rastojanju L od objektiva daljinomera, odgovara potpuno određena tačka u ravni lika na rastojanju L' , na kom je njen lik najoštriji. Kad se izmeri rastojanje L' , može da se odredi i rastojanje do posmatranog objekta iz relacije:

$$\frac{L'}{f} = \frac{1}{\frac{2}{f} - 1}, \quad (\text{VII. } 3)$$

gde je:

f — žižna daljina objektiva.

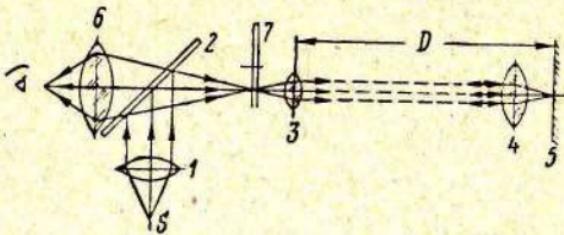
Osnova metoda merenja daljina nije se primenila u vojnoj tehnici, pošto je rastojanje u ravni lika pri merenju velikih rastojanja neznatno, a time će i tačnost merenja rastojanja biti mala. Prihvatljiva tačnost pri ovoj metodi može da se postigne pri merenju rastojanja manjih od (100—200) f .



Sl. VII.8 — Paralaktički ugao pri baznom metodu određivanja daljine

I pored toga, za vreme II svetskog rata u Nemačkoj je bio razvijen osni daljinomer za elektronsko-optički nišan „ORAO“ (Igel). U ovom nišanu fokusiranje lika cilja (svetlećih tačaka od izduvnih cevi aviona) vršilo se jednim od sočiva objektiva. Ovo je omogućilo da se odredi (približno) kosa daljina do cilja, a prema mesnom uglu i visini njegovog leta, neophodna za nišanjenje i otvaranje protivavionske vatre.

Razmotrimo podrobnije rad najperspektivnijih tipova daljinomera — elektrooptičkog i baznog.



Sl. VII.9 — Šema Fizovog eksperimenta

Princip rada, koji predstavlja osnovu elektrooptičkih daljinomera, prvi je primenio Fizo 1849. god. za merenje brzine prostiranja svetlosti. Aparatura koju je on napravio bila je u stvari prvi optički daljinomer, mada se primenjivala u druge svrhe.

Svetlost od izvora S (sl.VII.9) projektuje se pomoću objektiva 1 i poluprozračnog ogledala 2 u ravan okretanja zupčastog modulacionog diska 7, koji ima n zubaca i koji se obrće brzinom N obrta/sek. Pomoću izlaznog sočiva 3 fluks zračenja se od izvora usmerava paralelnim snopom na površinu ogledala 5, pred kojim se postavlja objektiv za fokusiranje 4. Objektiv za fokusiranje postavlja se na žižnom rastojanju od ogledala, pa se fluks zračenja odbijen od ogledala ponovo skuplja objektivom i usmerava u suprotnom pravcu u vidu paralelnog snopa i posmatra kroz okular 6.

Pri određenom broju obrtaja nazubljenog diska, svetli lik izvora svetlosti od odbijenih zrakova iščezava. U tom momentu daljina do ogledala može da se odredi iz odnosa:

$$D = c/4 N n, \quad (\text{VII.4})$$

gde je:

c — brzina prostiranja svetlosti
 $(c \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sek})$.

Iz principa rada Fizovog postrojenja sledi da elektro-optički daljinomer (sl. VII.9) mora da sadrži sledeće osnovne blokove: izvor energije zračenja; modulator; optički sistem koji usmerava modulisani fluks zračenja u potrebnom pravcu; prijemnik odbijenog fluksa zračenja; uređaj za merenje vremena prostiranja signala i površinu koja odbija nazad optički signal.

Pri razvoju elektrooptičkog daljinomera ovog ili onog tipa, pred njim se postavljaju dva osnovna zahteva: obezbeđenje neophodnog dometa i obezbeđenje potrebne tačnosti merenja daljine.

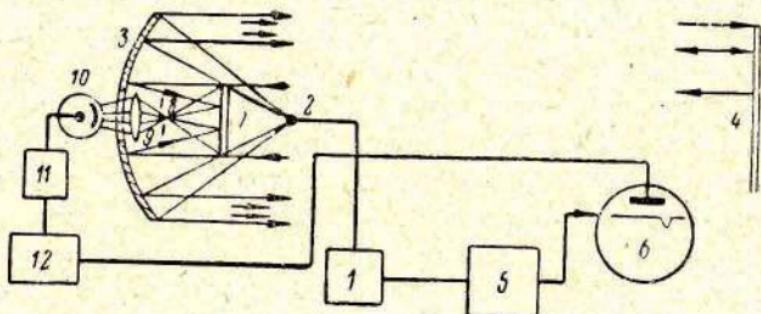
Prvi zahtev se obezbeđuje primenom dovoljno snažnih izvora zračenja, jakom optikom s malim gubicima i osetljivim prijemnikom. Ograničenje dometa elektrooptičkih daljinomera u prvom redu uslovljeno je rasipanjem i apsorpcijom energije zračenja u atmosferi i na površinama cilja sa kojeg se odbija, čija veličina može da se kreće u širokim granicama i ne može se uzeti u obzir pri konstruisanju daljinomera. Zato snagu izvora energije zračenja treba uzimati sa izvesnom rezervom. U tom smislu pogodnije je koristiti infracrvene zrake, pošto oni bolje prolaze kroz atmosferu i imaju veći koeficijent odbijanja od većine metalnih površina. Pored toga, njihova primena manje demaskira rad daljinomera.

Obezbeđenje potrebne tačnosti pri merenju daljine do cilja može da se ostvari izborom odgovarajuće karakteristike fluksa zračenja i primenom specijalnih uređaja za merenje vrlo malih vremenskih intervala (reda mikrosekunde).

S gledišta formiranja optičkog signala, energija zračenja može da se karakteriše učestanostu, fazom i svojom veličinom (amplitudom). Praktičnu primenu u daljinomerima za formiranje signala našla je amplitudna modulacija fluksa zračenja.

Radi promene intenziteta fluksa zračenja u daljinomerima se primenjuju mehanički modulatori, impulsne svetiljke, Kerov elektrooptički efekat, pieza-električni efekat i pojave difrakcije i interferencije fluksa zračenja. Sve ove metode prilično široko se primenjuju, naročito kod geodetskih elektrooptičkih daljinomera.

Kao što sledi iz izmenjenog izraza (VII.4) $c = 4 \text{ DN}_n$, tačnost merenja daljine srazmerna je učestanosti modulacije fluksa zračenja (N_n). Pored toga, praktično je utvrđeno da se tačnost rada daljinomera povećava ukoliko je oblik modulisanog signala bliži harmoničnom.



Sl. VII.10 — Blok šema impulsnog elektrooptičkog daljinomera

Tamo gde je neophodno da se dobije velika tačnost u merenju rastojanja (u geodeziji), primenjuje se obično harmonijska modulacija sa vrlo visokom učestanostu (do $30 \cdot 10^6 \text{ Hz}$).

U daljinomerima za vojne svrhe, gde ne treba vrlo velika tačnost u merenju daljine, primenjuje se impulsna modulacija. Primena impulsnih svetiljki ima vrlo važno preim秉stvo u poređenju sa izvorima neprekidnog zračenja jer i pri maloj srednjoj snazi, koju troši svetiljka od izvora za napajanje, energija u impulsu može da bude vrlo velika.

Rad takvog impulsnog elektrooptičkog daljinomera razmotrimo na primeru američkog daljinomera, razvijenog 1948. godine. Daljinomer (sl. VII.10) je bio predviđen za merenje daljine od 4550 m. Kao izvor fluksa zračenja služila je impulsna svetiljka koja je emitovala svetlosne impulse dužine $1 \mu\text{s}$, pri učestanosti ponavljanja 20 impulsa u sekundi.

Impulsna svetiljka 2 smeštena je u žiji paraboličnog ogledala 3 i potpaljuje se izvorom za napajanje 1. Pri blesku svetiljke istovremeno se isključuje i generator vremenske baze 5, formirajući na katodnoj cevi 6 horizontalnu liniju vremenske baze.

Odbijeni zrak od cilja 4, pomoću paraboličnog reflektora i ravnog ogledala 7, usmerava se kroz dijafragmu 8 i objektiv 9 na fotokatodu fotomultiplikatora 10. Posle predpojačanja 11 nastali strujni impuls se vodi na pojačavač sistema za vertikalno skretanje mlaza na katodnoj cevi. Kao rezultat toga na horizontalnoj liniji vremenske baze pojaviće se vertikalna slika odbijenog impulsa fluksa zračenja.

Pošto se početak vremenske baze poklapa s trenutkom slanja (emitovanja) svetlosnog impulsa, onda će rastojanje od početka vremenske baze do vertikalnog impulsa biti proporcionalno vremenu putovanja signala ili dvostrukom rastojanju do cilja.

Ovo vreme može da se izmeri veoma tačno običnim radio-tehničkim radarskim metodama pri čvrstoj vezi između trenutka zračenja svetlosnog impulsa i početka vremenske baze.

Opisana šema impulsnog daljinomera omogućavala je da se izmeri rastojanje sa tačnošću 1,82 m kako noću tako i danju, mada je danju tačnost bila manja.

Elektrooptički daljinomeri, bez obzira na mogućnost da se pomoću njih izmeri daljina sa velikom tačnošću zbog njihovog aktivnog principa dejstva, kao i radiolokacioni (radarski) daljinomeri demaskiraju svoj rad. Rad elektrooptičkih daljinomera znatno zavisi od doba dana i atmosferskih prilika, a nizak koefficijent odbijanja površina većine vojnih objekata zahteva primenu vrlo moćnih izvora zračenja za obezbeđenje većih dometa.

U tom pogledu pokazali su se pogodnijim pasivni bazni daljinomeri, ako se ne zahteva vrlo velika tačnost pri merenju rastojanja.

U stanicama za upravljanje vatrom od najvećeg interesa su daljinomeri sa unutrašnjom bazom, pošto kod njih baza ulazi u konstruktivne dimenzije i uvek je tačno poznata. Takvi daljinomeri moraju obavezno imati: prijemne glave osetljive u talasnom području zračenja cilja, računar i pokazivač daljine. Prijemne glave su postavljene na krajevima baze i predstavljaju najodgovornije elemente šeme, pošto njihova tačnost određivanja uglovnih koordinata daje u krajnjem računu tačnost određivanja rastojanja do cilja:

$$\frac{dD}{D} = \frac{d\Delta}{\Delta} \quad (\text{VII. } 5)$$

Ovo je naročito važno kad se uzme u obzir da su veoma male veličine paralaktičkog ugla koji se meri (tablica VII.1).

T a b l i c a VII.1

Vrednosti paralaktičkog ugla u sekundama za različite baze i daljine

Baza B (m)	D a l j i n a D (km)						
	1	2	3	5	10	15	20
1	206	103	68	42	21	14	10
2	412	206	137	82	41	27	20
4	824	412	275	164	82	55	41
10	2060	1030	687	412	206	135	103

Male vrednosti merenog paralaktičkog ugla koje ne prelaze veličinu od nekoliko minuta, zahtevaju da bazni daljinomeri moraju biti vanredno precizni instrumenti za merenje uglova, zaštićeni od spoljnih dejstava: potresa, udaraca i promene temperature. Oni moraju takođe da imaju veoma čvrstu bazu. Zato pored nabrojanih osnovnih elemenata, bazni daljinomeri moraju da sadrže i niz dopunskih uređaja koji kompenzuju spoljne uticaje.

Dok se problem kompenzacije grešaka usled spoljnih uticaja kod stacionarnih baznih daljinomera (zemaljskih i brodskih) rešava povećanjem težine i gabarita usled korišćenja složenijih šema, dotle za daljinomere avionskih stanica za upravljanje vatrom, gde gabariti i težina imaju katkad odlučujuću ulogu, rešenje ovog problema je veoma složeno. U literaturi nema podataka

o razvoju infracrvenih daljinomera za avionske stанице за pre-sretanje. Pošto tačnost rada optičkih daljinomera u prvom redu zavisi od tačnosti merenja veoma malih paralaktičkih uglova, vrlo korisno mogu da posluže za te svrhe prijemnici sa bočnim fotoefektom, opisanim u glavi V. Velika preciznost merenja uglovnih koordinata cilja, koja dostiže red stotih delova uglovne sekunde, omogućuje da se ovom metodom izmere mali paralaktički uglovi pri korišćenju kratkih baza. Ovo znatno povećava čvrstoću (krutost) sistema, pa prema tome smanjuje zahteve za kompenzaciju, čime se uprošćava daljinomer.

Daljinomeri sa bazom na cilju (sa spoljnom bazom) ograničeno se primenjuju pošto nepoznatu veličinu koja treba približno da se proceni predstavlja sama baza, pa se zato ovi daljinomeri mogu ubrojati u instrumente male tačnosti.

Kao primer primene takvih daljinomerskih naprava predstavlja najprostiji kolimatorski streljački nišan sa daljinomernom mrežom izraženom u hiljaditim delovima rastojanja.

Strelac po silueti cilja određuje njegove dimenzije i prema broju podeljaka na skali, koji se uklapaju u gabarit cilja, određuje daljinu do njega po formuli:

$$D = B/n \cdot 1000 \text{ (m)} \quad (\text{VII. } 6)$$

Takav način je vrlo prost za upotrebu i očigledan, ali ima velike greške usled odsustva tačnih podataka o stvarnim dimenzijama merenja baze i netačnog merenja ugla, naročito na velikim daljinama. Zato tačnost merenja duljine do cilja predstavlja veličinu reda 15% i više.

Varijanta daljinomera sa spoljnom bazom može da bude uređaj za određivanje rastojanja između dva sopstvena objekta, markirana izvorima infracrvenog zračenja koji se nalaze na izvesnom rastojanju.

Princip rada takvog daljinomera zasnovan je na, u optici poznatoj, kompenzaciji pomeraja lika pomoću optičkog klini (klinasta kompenzacija — sl. VII.11).

Ako na objektiv pada paralelni snop svetlosti, u njegovoj žižnoj ravni dobiće se lik izvora (tačka A). Ako, pak, sad pred objektiv postavimo optički klin, on će izazvati skretanje snopa.

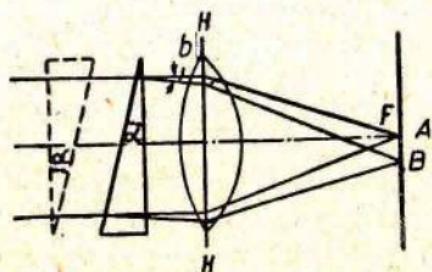
za ugao $\delta = (n - 1)\alpha$, usled čega će lik izvora da se pomeri i odgovaraće položaju tačke B u žižnoj ravni. Pri tome je rastojanje

$$AB = a = f\delta = f(n - 1)\alpha, \quad (\text{VII. } 7)$$

gde je:

f — žižna daljina objektiva.

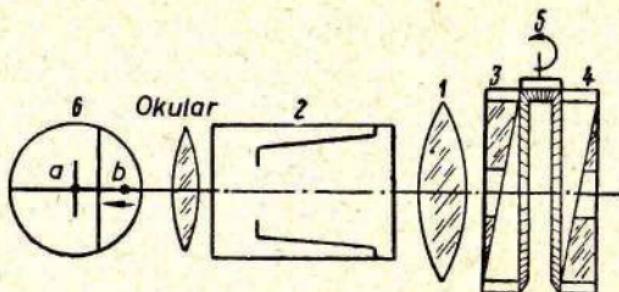
Ako se klin napravi u vidu tankog usečenog cilindra, onda će pri njegovom kretanju oko optičke ose pomeraj koji ima horizontalnu i vertikalnu komponentu da se menja. Pomeranje lika u vertikalnoj ravni može da se odstrani kombinacijom dva podjednaka klina, postavljena jedan nasuprot drugome i koji se okreću u suprotnim pravcima. U tom slučaju lik izvora (tačka A) pri okretanju klinova pomerće se u horizontalnoj ravni, pri čemu će veličina tog



Sl. VII.11 — Princip rada klinastog kompenzatora

pomeranja biti proporcionalna uglu zaokretanja klinova (φ).

Opisano svojstvo optičkog klina koji se obrće može da se iskoristi za kompenzaciju ugla paralaksa u daljinomerima sa spoljnom bazom.



Sl. VII.12 — Principijelna šema klinastog daljinomera

Princip konstrukcije takvog daljinomera može da se vidi na sl. VII.12.

Sa spoljne strane objektiva 1, elektronsko-optičkog uređaja 2, postavljaju se dva jednaka klini 3—4, međusobno spojena koničnom transmisijom 5. Pomoću ove transmisije ostvaruje se njihovo obrtanje na suprotne strane. Klinovi imaju u centru otvore kroz koje fluks zračenja jednog od infracrvenih izvora, koji ograničavaju spoljnu bazu, dolazi na objektiv 1, a zatim na fotokatodu elektronsko-optičkog pretvarača 2.

Lik izvora a na ekranu pretvarača 6 poklapa se sa centrom krsta, koji predstavlja oznaku optičke ose uređaja. Lik drugog izvora b projektuje se na fotokatodu preko ona dva klini. Ako su klinovi postavljeni tačno jedan naspram drugog, onda oni obrazuju plan-paralelnu ploču i rastojanje između dva lika odgovara veličini ugla paralakse, pod kojim se vidi spoljna baza.

Pri pomeranju klinova ručicom dolazi do poklapanja lika drugog izvora b u horizontalnoj ravni dotle dok se njegov lik ne bude projektovao na fotokatodu pretvarača kroz otvor na klinovima. Ovaj položaj na ekranu može biti markiran vertikalnom končanicom prema kojoj se i pomera lik drugog izvora.

Ugao zaokreta klinova φ , pa prema tome i ugao zaokreta ručice na kojoj se može naneti podela, koristi se za baždarenje uređaja prema daljinu:

$$D = \frac{B}{2\delta(\cos \varphi_0 - \cos e)}, \quad (\text{VII. } 8)$$

gde je:

φ_0 — početni utvrđeni položaj klinova.

Kao što se vidi, ova metoda merenja vrlo je prosta, ne zahteva specijalnu obuku, mada i ovde može doći do greške zbog moguće promene veličine baze. Zato se ova metoda koristi tamo gde nije potrebna velika tačnost u merenju rastojanja.

3. ZAŠTITNA SIGNALIZACIJA*)

Radi povećanja pouzdanosti zaštite pojedinih, u vojnom pogledu posebno važnih objekata, blokiranje prolaza i pojedinih delova terena, kada je vizuelno osmatranje iz bilo kojih razloga

*) „Infracrveni stražari“. — Prim. red.

otežano, primenjuje se aparatura za automatsku fotoelektronsku zaštitnu signalizaciju (AFZS).

Po svom principu rada aparatura AFZS može da bude pasivna i aktivna.

U prvom slučaju objekt koji preseca zaštitnu liniju biva otkriven specijalnom aparaturom u momentu kad se pojavi u vidnom polju prijemnog uređaja, bilo usled toplotnog zračenja objekta ili njegovog kontrasta između objekta i pozadine. Takav vid zaštite primenjivao se još u toku I svetskog rata. Kao primer može da posluži blokiranje ulaska u luku Ostende pomoću prostog toplotno-pelengacionog uređaja, koji je registrovao ulazak brodova u luku prema zračenju njihovih dimnjaka.

U slučaju aktivnog principa dejstva štićeni objekt se opasuje po periferiji neprekidnim prstenom infracrvenih zrakova, čije presecanje u bilo kojoj tački izaziva signal uzbune. Prema tome, takav sistem mora da sadrži izvore infracrvenog zračenja, prijemne uređaje sa pojačavačima signala i sistem releja, koja uključuju potrebne uređaje za indikaciju.

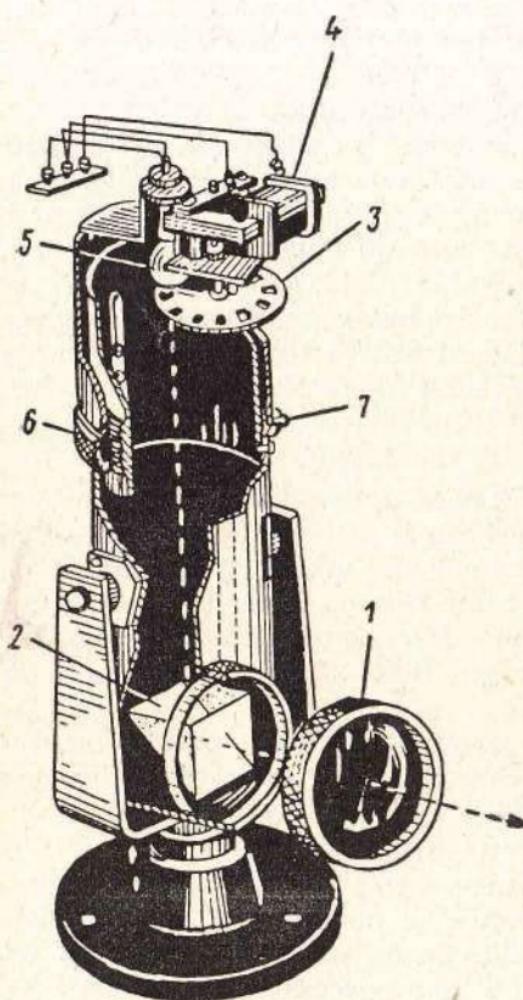
Kao izvor zračenja obično se upotrebljava električna sijalica sa usijanom niti, postavljena u žizi optičkog sistema koji usmerava fluks zračenja u snop sa vrlo malim uglom razilaženja. Sijalica se pokriva infracrvenim filtrom, a da bi se isključile smetnje usled zračenja pozadine, kao i da bi se uprostilo pojačanje fotostruje u prijemnom uređaju, fluks zračenja se moduliše na izlazu predajnika.

Predajnik (VII.13) se sastoji iz postolja, cevi (tubusa) i modulatora. Za tačno podešavanje zraka u pravcu prijemnog uređaja, postolje ima dva para zavrtnjeva (grubih i mikrometarskih) za grubo i precizno podešavanje (13).

U cevi se postavlja prizma-sočivo i infracrveni filter. Fokusiranje fluksa zračenja ostvaruje se pomeranjem sijalice u odnosu na prizmu-sočivo. Sijalica sa usijanom niti (12 V, 15 W) napaja se nižim naponom 11 V radi povećanja pouzdanosti rada. Modulacija fluksa zračenja ostvaruje se diskom sa 12 otvora, koji se okreće brzinom od 3.000 ob/min.

Prijemni uređaj (VII.14) predstavlja visokoosetljivi foto-relej, koji se sastoji od fotoelementa i trostopenog cevnog pojačavača podešenog na učestanost 600 Hz, sa pojačanjem rada

10⁶. Fluks zračenja koji dolazi kroz ulazni otvor fokusira se sočivom na fotoelement, pobuđujući u njemu fotostruju. U cilju smanjenja zamora fotoelementa dnevnim svetлом ulazni prozor istovremeno predstavlja i infracrveni filter.



Sl. VII.13 — Predajnik AFZS IKO-6

1 — svetlosni filter; 2 — prizma-sočivo; 3 — modulacioni disk; 4 — električni motor modulatora napona 12V, 3.000 ob/min; 5 — sijalica 12V, 15W; 6 — obrtni prsten za fokusiranje; 7 — uvrđujući zavrtanj obrtnog prstena

Pojačana struja dolazi u namotaj izlaznog releja, koje zatvara kontakte namotaja za napajanje međureleja na prijemnoj tabli.

Pri presecanju zraka neprozračnim predmetom fotostruje nestaje, izlazno relo otpušta kotvu i time isključuje i medurelej. Ovo izaziva signale za uzbunu i osvetljenje odgovarajućeg dela na signalnoj tabli.

Karakteristično za datu šemu je što je namotaj međureleja sve vreme pod strujom. Zato osvetljenje odgovarajuće zone na signalnoj tabli nastaje i pri prolasku kroz zonu i pri neispravnosti u bilo kom delu sistema.

Ako je neophodno da se odredi i pravac prelaska zabranjene zone, onda se postavljaju dve paralelne linije infracrvenih zrakova. U tom slučaju poredak osvetljavanja odgovarajućih linija na signalnoj tabli pokazuje u kom se pravcu prelazi štićena zona.

Pri blokirajući prolaza ili zaštiti vojnih objekata

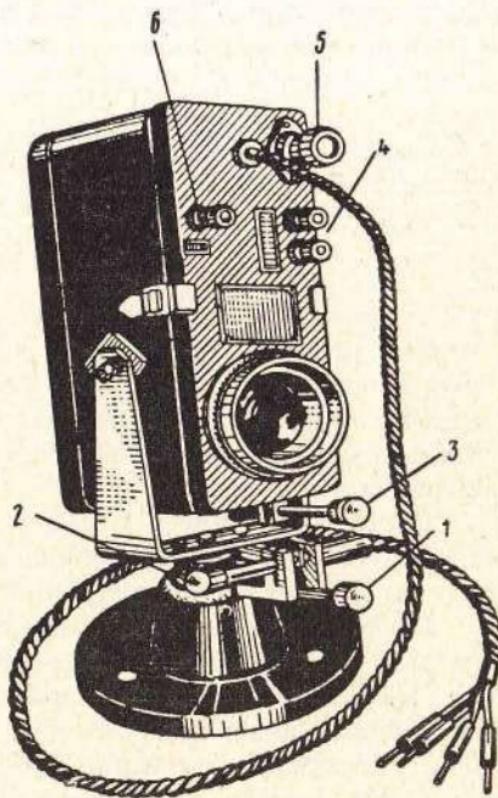
veliki značaj ima dobro smišljeno i izvršeno maskiranje aparature. Radi toga pravi se aparatura malih dimenzija i velike sigurnosti u radu, da je ne bi trebalo za duže vreme proveriti i remontirati.

Kao primer takve aparature predviđene za blokiranje prolaska preko granice, strategijskih prolaza, puteva, mostova, minskih polja, aerodroma i vazdušnih baza, skladišta municije i voznih parkova, može se uzeti aparatura za infracrvenu ogradu L - 80, koju je razvila firma VVT (Francuska) — (4).

Aparatura L - 80 sastoji se od predajnika infracrvenih zrakova, modulisanih učestanosti 50 Hz, prijemne glave sa pojačavačem i signalnog uređaja.

Izvor zračenja (sijalica 2,5 V; 0,3 A) pokriven je infracrvenim filtrom i postavljen u žihu sočiva, prečnika 80 mm. Modulacija fluksa zračenja ostvaruje se napajanjem sijalice jednom poluperiodom naizmeničnog napona učestanosti 50 Hz. Takav način modulacije fluksa zračenja obezbeđuje potpunu bešumnost u radu, što je neophodno za obezbeđenje tajnosti optičkog blokiranja.

Ulagni prozor prijemnika predstavlja sočivo prečnika 80 mm, u čiju se žihu postavlja fotoelement. Fotostruja se dovodi na ulaz pojačavača, izvedenog sa dve cevi i podešenog na 50 Hz.



Sl. VII.14 — Prijemnik AFZS:

1 — zavrtanj za grubo podešavanje po horizontali;
2 — mikrometarski zavrtanj za fino podešavanje po horizontali; 3 — zavrtanj za vertikalno podešavanje;
4 — klemi za priključenje kontrolnog miliampermetra;
5 — osigurač; 6 — klemi za uzemljenje

Domet sistema „predajnik-prijemnik“ sa rezervom za obezbeđenje pouzdanog rada pri lošim meteorološkim uslovima iznosi 500 m.

U slučaju povrede branjenog prostora, prijemni uredaj daje komandu signalnom uređaju na kome se pali crvena sijalica za uzbunu i zvono počne da zvoni. Za isključenje signala za uzbunu i ponovno puštanje sistema u rad postoji specijalni prekidač.

Sistem se napaja preko transformatora za sniženje napona sa mreže od 110, 125, 220 i 250 V. Ukupna potrošnja energije iznosi 20 W.

4. VEZA U KOSMIČKOM PROSTORU

U zemaljskoj atmosferi veza sa infracrvenim zracima ograničeno se primenjuje i znatno zaostaje po dometu za radio-vezom. Povećanjem visine efektivnost primene optičkih sredstava veze neprekidno raste. Van zemaljske atmosfere infracrvena sredstva veze ne samo da ne zaostaju za radio-vezom već imaju, praktično, neograničen domet.

Uspesi postignuti u osvajanju kosmičkog prostora ponovo su postavili problem veza pomoću infracrvenih zrakova kao predmet teorijskih i eksperimentalnih ispitivanja.

Interes za takvu vrstu veze nije slučajan, pošto ova veza ima niz preimุćstava u poređenju sa sredstvima radio-veze:

1. Spektar infracrvenog zračenja dovoljan je za smeštanje više miliona kanala veze.

2. Veza sa infracrvenim zracima u kosmičkom prostoru omogućava korišćenje sunčevog zračenja ili toplote, koja se izdvaja u samom kosmičkom brodu, kao izvoru energije noseće učestanosti.

3. Otpada potreba specijalnih predajnika; potrebni su samo modulatori energije zračenja.

4. Veliko smanjenje talasne dužine izražene energije omogućuje primenu optičkih sistema malih gabarita s visokom usmerenošću zračenja. (Prepostavlja se kao moguće dobijanje snopa zrakova s uglom reda 10^{-5} rad.)

5. Povećanjem stepena usmerenosti zračenja pri zadatom prečniku optičkih sistema snaga predajnika se smanjuje obrnuto proporcionalno kvadratu talasne dužine.

Teorijski proračuni pokazuju da je za vezu Zemlje s Marsom, primenom koherentnog zračenja kvantomehaničkog generatora optičkog dijapazona i osetljivog elementa s ekvivalentnom snagom šumova 10^{-17} W/Hz (W sec.) pri aperturi optike 1 m. i brzini predaje 10^6 dvojnih elemenata (impuls-pauza) u sekundi, potrebna srednja snaga 10 W.

Ali pri razvoju sistema veze sa infracrvenim zracima nalazi se danas na niz problematičnih pitanja. Glavna od njih su:

a) izrada koherentnih optičkih generatora i pojačavača i to u prvom redu kvantomehaničkih;

b) razvoj sistema za precizno praćenje radi obezbeđenja stroge uzajamne usmerenosti predajnog i prijemnog uređaja;

c) razvoj tehnologije za proizvodnju jeftinijih optičkih sistema sa vrlo oštrim zahtevima u pogledu tolerancije pri njihovoj izradi.

Neposredno ispitivanje maketa aparature u kosmičkom prostoru takođe predstavlja složen zadatak. Baš zato pitanje primene infracrvenih zrakova za vezu u kosmosu za sada je još u fazi teorijskih ispitivanja, mada se smatra vrlo perspektivnim. Izuzetak je pitanje izrade pojedinih elemenata i celih blok-šema aparature za vezu sa infracrvenim zracima.

Poznato je npr. da firma „Farand Optike Ko. Inc.“ radi na stvaranju nekoherentnih izvora zračenja. Tako je ova firma razvila izvor svetlosti sa iskrištem prečnika 11 mm koji daje blesak $40 \cdot 10^9$ sb/cm² (veći od bleska Sunca) i može da se primeni u sistemima veze sa impulsnom modulacijom. Ista firma predlaže primenu neprekidnog zračenja iz izvora infracrvenih zrakova, kao noseće učestanosti modulisane sinusoidalnim oscilacijama niže učestanosti.

U tablici VII.2 — prikazana su neka optimalna svojstva izvora zračenja, koja mogu biti iskorišćena za optičku vezu, a u tablici VII.3 — optimalna svojstva osetljivih elemenata predviđenih za te svrhe.

Blok-šema jednog od sistema za vezu sa infracrvenim zrcima, koji je razvila firma »Elektro-optikel sistems« [5,6,7] prikazana je na sl. VII. 15.

U sistemu SOCOM za predaju informacija iskorišćen je optički dijapazon sunčevog zračenja kao noseća učestanost.

T a b l i c a VII.2

Optimalna svojstva izvora zračenja namenjenih za optičke veze [5, 6, 7]

Izvor zračenja	Jačina zrač. W/sterad		Snaga W		Širina pojasa Hz	
	U im- pulu	Sred- nja	Ulaz- na	Izlaz- na	Ukup- na	Modu- lacija
Kosi luk	10^7	10^7	$3 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$	10^{15}	10^8
Druge vrste pražnjenja	$3 \cdot 10^8$	10^4	—	1	10^{15}	10^8
Odbijena sunčeva svetlost	10^7	10^7	—	10^3	$5 \cdot 10^{14}$	10^8
Živin luk visokog pritiska	10^9	10^7	10^3	$5 \cdot 10^2$	10^{15}	10^8
Kvantomehanički genera- tor optičkog dijapazona	$5 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{11}$	10^3	10^2	10^{12}	10^9

T a b l i c a VII.3

Optimalna svojstva prijemnika [5, 6, 7]

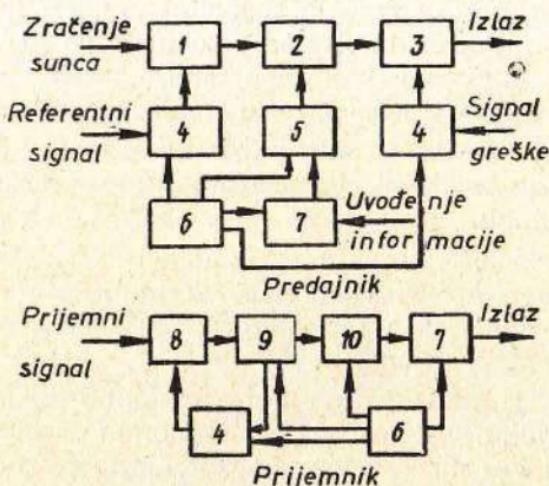
Osetljivi elemenat	Ekvivalentna snaga šuma W/Hz	Širina pojasa noseće učestanosti Hz	Širina pojasa modulacije Hz
Toplotni	10^{11}	10^{15}	—
Fotootpornik	10^{-13}	10^{15}	—
Čovečje oko	10^{-16}	$3 \cdot 10^{14}$	10
Fotoelement sa kvantomehaničkim pojačanjem	10^{-17}	10^{15}	10^9
Fotomultiplikator	10^{-17}	10^{15}	10^8
Detektor vrlo visokih učestanosti	$2 \cdot 10^{-23}$	10^9	10^9
Kvantomehanički pojačavač optičkog dijapazona	10^{-18}	10^8	10^8

Predajna i prijemna antena predstavljaju sistem ogledala sa promenljivom orientacijom, koja omogućuju da se sakuplja sunčeva energija pod bilo kojim uglovima.

Sunčev zračenje skuplja se u predajniku tako što se dobije uzan snop koji se zatim propušta kroz modulator. Modulišući signal se obrazuje posle prolaska informacije kroz blok za obradu informacije i predmodulator. Posle modulacije kodirani signal dolazi na predajno ogledalo za predaju u okolni prostor.

Praćenje sunca ostvaruje se specijalnim pratećim uređajem osetljivim u talasnom području od $0,5 - 1,1 \mu$.

Predato zračenje se hvata prijemnom antenom u čijoj se žiči postavlja osetljivi element. Posle prolaska kroz odgovarajući obradu, signal dolazi na izlazni uređaj za reprodukciju.



Sl. VII.15 — Blok-sHEMA prijemnika i predajnika sistema SOCOM:

1 — sabirna antena; 2 — optički modulator; 3 — predajna antena; 4 — servomehanizam; 5 — predmodulator; 6 — izvor za napajanje; 7 — blok za obradu informacije; 8 — prijemna antena; 9 — detektor noseće učestanosti; 10 — detektor učestanosti za predmodulaciju

Prema izjavama firme, predajnik je težine 13—18 kg, troši snagu 10—15 W. Očekuje se da pri predaji signala na rastojanju $10^6 - 10^7$ km sa ogledalima 1 m^2 i propusnom opsegu 10 Hz odnos signal/šum bude 10 db. Ovaj odnos može da se poveća još 10 puta, hlađenjem fotoosetljivog elementa.

5. SPREČAVANJE SUDARA AVIONA U VAZDUHU

Pri letovima na velikim visinama po vedrom vremenu ili pri ravnomernoj oblačnosti nastaje pojava poznata pod nazivom kratkovidost praznine (8). U tom slučaju pilot sa normalnim vidom odjednom postaje kratkovid i njegove oči se fokusiraju na rastojanju ne manjem od dva metra.

Ako se uzme u obzir da su uslovi posmatranja vazdušnih ciljeva na velikim visinama otežani tamnom pozadinom neba i vrlo malim rasipanjem sunčevog svetla, onda je razumljivo zašto je važno blagovremeno otkriti avion koji ide u susret, jer se time sprečava sudar.

Pored toga, na savremenim avionima, a naročito na reaktivnim, pilot je prinuđen da više od polovine vremena izgubi posmatrajući instrumente na kontrolnoj tabli u kabini i zato ne može da odvoji mnogo vremena za osmatranje prostora van kabine.

Ove karakteristike radu pilota na visinama i brzim avionima zahtevaju izradu specijalne aparature za sprečavanje sudara aviona u vazduhu.

Prema raspoloživim podacima iz literature (9, 10, 11) podesna aparatura mora da se sastoji kako iz indikatora približavanja nepoznatog aviona, tako i iz složenog automatskog sistema za sprečavanje sudara aviona.

Indikator je predviđen da upozori pilota o prisustvu drugog aviona u vazduhu. Njegovi pokazivači moraju da budu lako uočljivi, pošto pilotu služe samo za upozorenje na moguće opasnosti, posle čega pilot koncentriše svoju pažnju na onu stranu na koju pokazuje uređaj. Pošto se uveri da se nalazi u ugroženom položaju, preduzima odgovarajući manevr. Prema tome, indikator približavanja je najkorisniji pri lepom vremenu.

Sistem za sprečavanje sudara aviona u vazduhu mora da otkrije avion koji se približava, da sredi dobijene podatke i odredi da li se oba aviona nalaze u opasnom kursu, da odbaci podatke o bezopasnim avionima i da pokaže pilotu pravilan manevr. Sistem mora neprekidno da analizira opasnost, koju predstavlja svaki avion koji se približava i da pilotu ne obraća pažnju na njega sve dok nije neophodno izvršiti manevr.

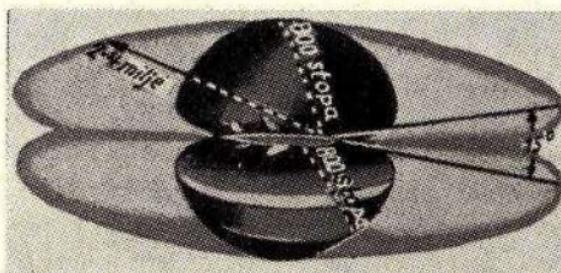
Daljina otkrivanja aviona koji se približavaju i lete na visini 3.000 m, s 90% verovatnoće otkrivanja utvrđena je za spore avione (brzina leta do 550 km/čas.) — 3,2 km, za brze (brzine leta veće od 550 km/č) — do 13 km.

Ova daljina mora da bude obezbeđena u zoni \pm 240 m po visini leta štićenog aviona, pošto je usvojena minimalna razlika leta pojedinačnih aviona 300 m.

Godine 1957. bile su razrađene i objavljene u inostranstvu dve osnovne šeme indikatora približavanja. Ovi sistemi koriste princip registracije infracrvenog zračenja aviona koji se približava ili registracije modulacije infracrvenog zračenja pozadine, bilo elisama aviona, bilo turbulentnošću gasne struje iza preseka reaktivne mlaznice.

Prva šema, koja pilotu daje samo pravac približavanja aviona, sastoji se od prijemnika zračenja u horizontalnoj ravni, dva prijemnika zračenja u donjoj i gornjoj polusferi, indikatorskog uređaja na komandnoj tabli i bloka za napajanje sa pretvaračem podataka.

Prijemnici zračenja postavljaju se na trupu aviona tako što se obezbedi dobijanje dijagrama osmatranja, pokazanog na sl. VII.16.



Sl. VII.16 — Zone osmatranja aparature

Prijemnik zračenja u horizontalnoj ravni sastoji se iz pokretnog ogledala postavljenog pod uglom od 45° , i optičkog sistema, u čijoj se žiži nalazi nehladeni olovo-sulfidni fotootpornik. Izlazni deo prijemnika u horizontalnoj ravni postavljen je u polusferičnoj kaloti prečnika 9,2 cm. Pretraživanje prostora radi otkrivanja aviona ostvareno je vidnim poljem od 15° u predelu 360° , sa brzinom 30 ob/min.

Minimalni domet ovog prijemnika zavisi od tipa aviona koji se približava, njegovog rakursa i atmosferskih prilika i dostiže $3,2 - 6,4$ km.

Prijemnici u gornjoj i donjoj polusferi sastoje se od nehladienih olovo-sulfidnih fotootpornika mozaičnog tipa, pokrivenih sočivom.

Sva tri prijemnika preko pretvarača podataka spojena su za indikatorske instrumente sa kazaljkama prečnika 75 mm.

Na staklo indikatorskog uređaja nanesena je silueta sopstvenog aviona. Kazaljka je učvršćena na pokretnom disku, čija je prednja strana podeljena na četiri kvadranta za signalizaciju, da se avion koji se približava nalazi u odnosu na sopstveni avion u jednom od sledećih položaja: zdesna, sleva, odozgo ili odozdo. Pozadi diska postavlja se pet sijalica, jedna od njih (u centru) vezana je sa prijemnikom u horizontalnoj ravni, a ostale četiri — sa odgovarajućim prijemnicima u polusferama.

Pri ozračivanju prijemnika u horizontalnoj ravni infracrvenim zracima sa aviona koji se približava, kazaljka indikatora okrenuće se sinhrono sa zaokretom ogledala i pokazaće ugao kursa iz koga dolazi avion, a centralna lampica počeće da migi s učestanošću 1 do 2 Hz.

Ako se avion koji se približava nalazi u opasnoj 240-metarskoj zoni po visini, onda će se upaliti lampica koja osvetljava odgovarajući kvadrant instrumenta, što omogućava pilotu da jasno odredi gde se nalazi avion koji se približava: desno, levo, iznad ili ispod njegovog aviona. Postoje još dve vrste slične šeme.

Jedna od njih predviđa da se na avion postave specijalni infracrveni izvori kružnog dejstva, što omogućuje da se poveća domet i neosetljivost indikatora približavanja na smetnje, ali ovo komplikuje dopunsку opremu.

U drugoj modifikaciji, na repu aviona postavlja se televizijska kamera sa kojom se može upravljati. Nakon što pilot dobije upozorenje o prisustvu nepoznatog aviona u zadnjoj polusferi, on može da uključi televizijsku kameru i da je upravi prema avionu koji se približava i da posmatra na ekrantu nastalu vazdušnu situaciju.

Eksperimentalna provera date šeme pokazala je da se četvoromotorni avion otkriva na rastojanjima, na kojima se ne bi mogao videti optičkim spravama sa četvorostrukim uvećanjem.

U jednoj od šema indikatora približavanja, nehladeni olovo-sulfidni fotootpornik postavlja se u nosnom i repnom delu trupa aviona i na konzolama krila iznad i ispod, što omogućava da može da se osmatra gornja i donja polusfera oko aviona (sl. VII.17).

Svaki prijemnik predstavlja komplet od tri prstena na zajedničkoj kupolastoj osnovi, na kojima su okolo postavljena

36 fotootpornika. Prijemnik je pokriven poklopcom od plastične mase, prečnika 20 cm, koji dobro propušta infracrvene zrake u talasnom području od $0,9-8 \mu$.* Taj materijal (hemijski postojan, lak i čvrst) dobro izdržava zagrevanja do 300°C .

Broj elemenata u šemi određuje tačnost šeme u horizontalnoj ravni, pošto svaki element ima ograničeno vidno polje — ne veće od 10° . Broj prstenova u svakom prijemniku određuje moć razdvajanja po mesnom uglu.

Domet indikatora približavanja u horizontalnoj ravni iznosi 16 km, a u vertikalnoj — omogućuje da se odredi ulazak približavajućeg aviona koji se približava u 240-metarsku zonu iznad ili ispod svog aviona.

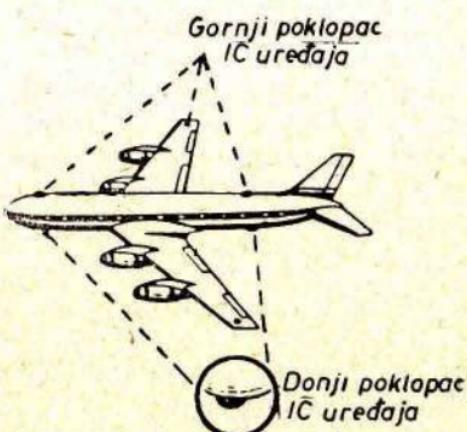
Komplet opreme, u koji spadaju: prijemnik infracrvenog zračenja, pojačavač, komutator, generator vremenske baze, računar i indikator, teži 13,5 kg.

Naizmenično osmatranje prostora u horizontalnoj ravni ostvaruje se pomoću naizmeničnog priključivanja fotootpornika na računar i indikator.

Daljina do otkrivenog aviona određuje se metodom triangulacije prema poznatoj bazi između dva prijemnika i po uglovima viziranja aviona od strane svakog prijemnika.

Osetljivost aparature određena je nivoom šumova u momentu priključivanja fotootpornika na komutatoru, koji iznosi $10 \mu\text{V}$, i gubicima u optici. Greške pri merenju daljine uslovljene su deformacijom krila u letu, promenom ugla propinjanja i podrhtavanjem aviona i dostižu 4% kod malih i 10% kod velikih aviona.

*) Ovde je svakako greška i treba da stoji: „od $0,9-2,8 \mu$ “. — Prim. prev.



Sl. VII.17 — Položaji prijemnika zračenja na avionu

6. NAVIGACIJA

Pomoću infracrvenih uređaja može se prostim sredstvima ostvariti pouzdano vodenje objekata na moru i vazduhu prema zadatoj marš-ruti.

Najprostije se rešava problem vođenja brodova po usmerenim infracrvenim svetionicima (držanje mesta u stroju, provođenje brodova kroz prolaze minskih polja i kroz ulaze u luke). Za to je neophodno imati na brodovima elektronskooptički uređaj za osmatranje i signalne infracrvene izvore postavljene na određenim mestima. Za određivanje pravca na otvorenom moru dovoljno je imati optičke ili fotoelektrične sekstante sa ručnim ili automatskim praćenjem zvezda.

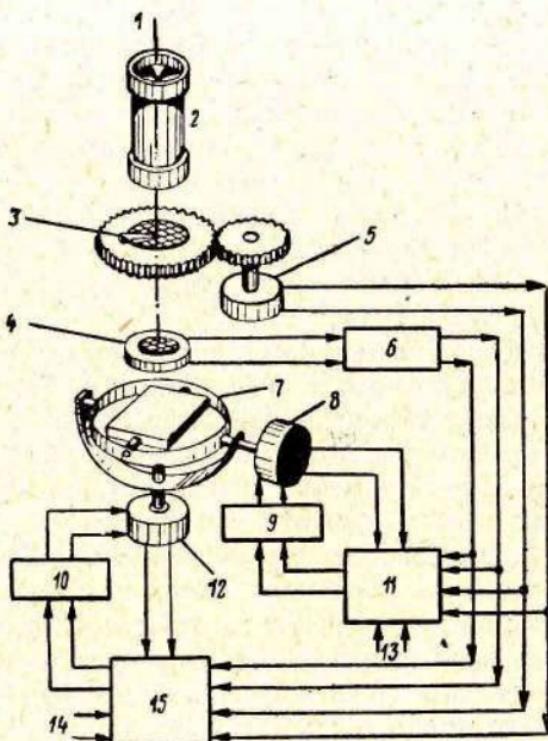
Danas kada postoje avioni sa velikim brzinama i za velike visine, problem određivanja putanje postaje vrlo aktuelan. Ranije primenjivane metode aeronavigacije u brzim i visinskim letovima imale su mnogo velike greške. Metode radio-navigacije takođe ne obezbeđuju veliku tačnost u navođenju aviona. Zato se velika pažnja poklanja metodi astronavigacije, koja omogućuje relativno tačno izvođenje letova kod letelica sa i bez pilota. Ovaj zadatak postaje najaktuelniji zbog porasta visine letenja, što su na velikim visinama zvezde praktički jedini realni orientirni. U datom slučaju ručno praćenje zvezda je nedovoljno. Neophodna je primena automatskih uređaja koji prate zvezde i neprekidno daju koordinate zvezda sa minimalnim kašnjenjem.

Jedan od takvih automatskih uređaja jeste astrokompas MD-1 (12).

Iz principijelne šeme datog uređaja se vidi (s. VII.18) da osnovne elemente fotoelektričnog automatskog astrokompassa predstavljaju: osetljivi element 4 koji prima zračenje zvezda; žiroskopski stabilizirana platforma 7, za stabilizaciju osetljivog elementa u ravni pravog horizonta; uređaj za izdvajanje signala od zvezda; generator signala greške 9, 10; servomotori za dejstvo na žirostabilisanu platformu 8, 12.

Kao osetljivi elementi mogu biti korišćeni: fotoelement, fotomultiplikator, ikonoskop, a oni se postavljaju u žihu objektiva 2. Između osetljivog elementa i objektiva postavlja se modulator 3.

Optičkim elementima se postavljaju strogi zahtevi, pošto je važno dobijanje dobrog lika u celom talasnom području (od plavog do infracrvenog) zračenja zvezda. Takođe je neophodan dvoobjektivni sistem radi obezbeđenja širokog vidnog polja (širokougaoni objektiv) i velika tačnost u praćenju zvezda (objektiv sa velikim žižnim rastojanjem i sa što je moguće užim vidnim poljem).



Sl. VII.18 — Kinematička šema astrokompasa MD-I

Za stabilizaciju položaja fotoelektričnog prijemnika i modulatora, u odnosu na pravi horizont (pravu vertikalnu), ovi se postavljaju na žirostabilisaniu platformu.

Osetljivi element daje signal onda kada se zvezda nalazi u vidnom polju prijemne glave. Ovaj signal omogućuje da se dobiju neophodni podaci za određivanje pravca prema zvezdi i veličinu greške u odnosu na podatke koje daje računar.

Kao modulatori, koji istovremeno vrše i ulogu koordinatora, mogu da budu mehanički, optički ili elektronski uređaji.

Mehanički modulator (disk sa izrezima) primenjuje se u sistemima sa fotomultiplikatorom ili samo jednim fotootpornikom. Brzina okretanja diska sinhronizovana je sa signalima koji dolaze od generatora referentnih signala 5, a koji se obrće tim istim motorom. Upoređenje signala fotoelektričnog prijemnika 6 — sa referentnim signalima, omogućuje da se dobiju podaci o trenutnom položaju zvezde. Naponi greške, 9 i 10 koji se dobiju kao rezultat poređenja signala, deluju neposredno na uređaj za žirostabilizaciju sve dotle dok zračenje zvezde ne padne u centar vidnog polja osetljivog sistema. U tom trenutku signal povratne sprege dovodi u nulti položaj generatore signala greške 11, 15 po azimutu i mesnom uglu. Veličina napona signala povratne sprege, srazmerna je relativnom pelengu zvezde i može lako da se pretvori u signal, srazmeran uglu greške između izmerenog i pravog položaja zvezde.

Pri optičkoj metodi modulacije primenjuje se nekoliko fotootpornika, postavljenih oko centra vidnog polja.

Ako se podaci pratećeg uređaja slažu sa podacima iz računara 13, 14, fluks zračenja od zvezde pada u centar vidnog polja i signala greške nema. Pri pojavi razlike signala, fluks zračenja pada na jedan od fotootpornika, usled čega se pojavi signal greške koji se zatim upoređuje sa podacima računara i deluje na žirostabilizator.

Veliko preim秉stvo optičkog modulatora jeste odsustvo pokretnih delova: ugao greške određuje se prema tome na koji od fotootpornika pada fluks zračenja. Za razliku od optičkog, postoji elektronski modulator koji se primenjuje sa ikonoskopom, čiji se mozaik deli na četiri sektora, a za određivanje pravca prema zvezdi koriste se magnetni sistemi za pokretanje.

G l a v a VIII

IZVIĐANJE POMOĆU INFRACRVENIH ZRAKOVA

Radi povećanja vremenskog intervala potrebnog za izviđanje, poboljšanja njegovog kvaliteta, operativnosti i neprekidnosti poklanja se velika pažnja usavršavanju uređaja i metoda izviđanja pomoću infracrvenih zrakova.

Razvijaju se uređaji za noćno osmatranje, televizijski sistemi povećane osjetljivosti, avionski foto-aparati (za fotografisanje specijalnim infrahromatskim filmom, ili posredstvom pretvaranja nevidljive slike u vidljivu i njenim fotografisanjem običnim fotografskim filmom), uređaji za snimanje toplotne karte zemljišta i pasivnu toplotnu lokaciju.

Bez obzira na to što efikasnost pobrojanih uređaja u velikoj meri zavisi od meteoroloških uslova, interesovanje za njih neprekidno raste, s obzirom da njihova upotreba omogućava:

dobijanje slike posmatranih objekata u noćnim uslovima, preko njihovog temperaturnog kontrasta u odnosu na pozadinu koja ih okružuje;

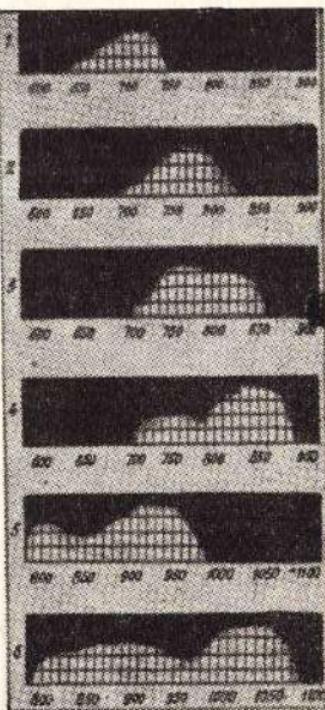
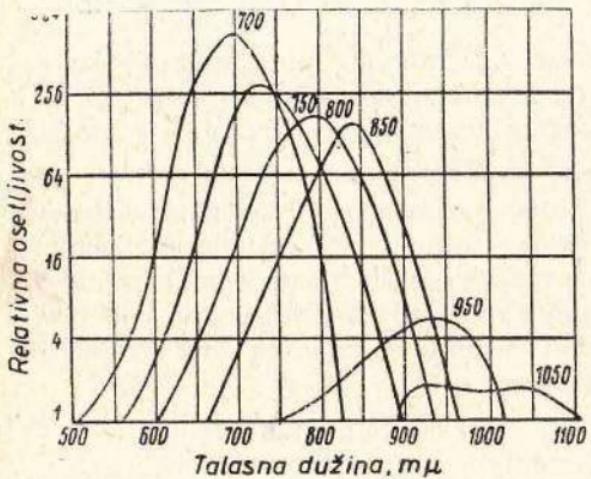
dobijanje slike udaljenih objekata kroz vazdušnu izmaglicu, kada korišćenje vidljive svetlosti u ove svrhe postaje neefikasno ili čak i nemoguće;

demaskiranje objekata zamaskiranih od posmatranja u vidljivoj i radarskoj oblasti elektromagnetskog spektra.

1. FOTOGRAFISANJE POMOĆU INFRAHROMATSKOG FILMA

Srebro-halogenidne fotoemulzije su osetljive na plavo-violetno zračenje. Da bi se učinile osetljivim i za druga zračenja, sa većom talasnom dužinom, u emulziju se moraju uvesti izvesni pigmenti, tj. izvršiti optička senzibilizacija fotomaterijala.

U infracrvenoj oblasti spektra u ove svrhe se koriste pigmenti izrađeni na bazi cijana: kriptocijanin, neocijanin i drugi. Emulzije obojene ovim pigmentima nazivaju se infrahromatske

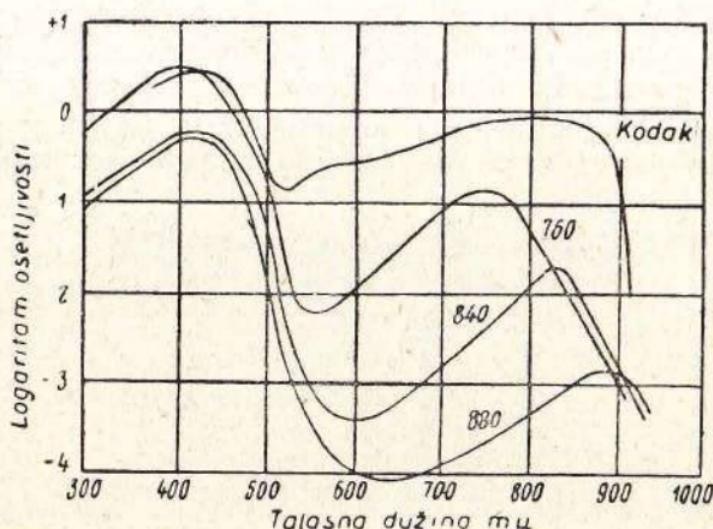


Sl. VIII.1 — Spektralna osetljivost infrahromatskih filmova „Agfa“

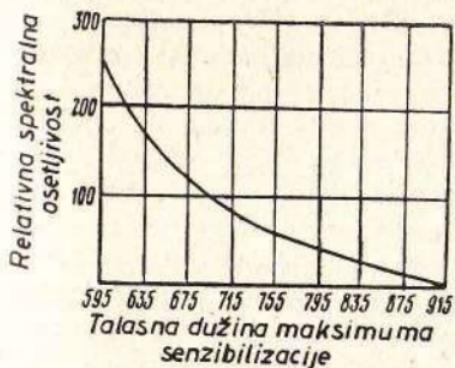
i razlikuju se međusobno po talasnim dužinama infracrvenog zračenja na koje su osetljive. Danas se koriste infrahromatski materijali sa dugotalasnom granicom osetljivosti do $1,36 \mu$.

Posmatrajući krive spektralne osetljivosti infrahromatskih emulzija (sl. VIII.1 i VIII.2), može se izvući jedan vrlo važan praktičan zaključak — da povećanjem maksimalne talasne dužine senzibilizacije dolazi do neprekidnog i brzog opadanja inte-

gralne osetljivosti fotomaterijala u infracrvenoj oblasti spektra. Ovaj pad osetljivosti može se pregledno predstaviti krivom sa sl. VII.3.



Sl. VIII.2 — Spektralna osetljivost sovjetskih infrahromatskih filmova „Infra“ i avionskog filma firme „Istman-Kodak“ (SAD)



Sl. VIII.3 — Opadanje osetljivosti infrahromatskih materijala sa promenom talasne dužine maksimuma senzibilizacije

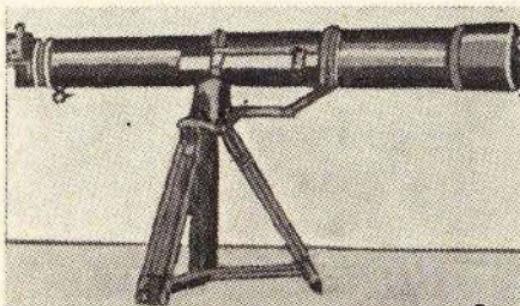
Porastom talasne dužine senzibilizacije opada i garantni rok za čuvanje filma. Ovo je zbog toga što pri čuvanju infrahromatskog materijala brzo opada njegova osetljivost, a istovremeno se povećava zamagljivanje. Pri tome je brzina smanjenja osetljivosti utolikovo veća, ukoliko je veća talasna dužina senzibilizacije.

Izvesno povećanje stabilnosti infrahromatskih ma-

terijala može se postići ukoliko se hermetički pakovani čuvaju u frižiderima.

Razmotrene osobine infrahromatskih materijala (opadanje integralne osetljivosti i smanjenje stabilnosti materijala senzibiliziranih u spektralnom području većih talasnih dužina) uslovjava da se u praksi primenjuju emulzije, koje su osetljive na zračenje u talasnom području $0,75 - 0,85 \mu$.

Infrahromatski materijali sa većom dugotalasnom granicom osetljivosti koriste se, po pravilu, samo za naučna snimanja, gde



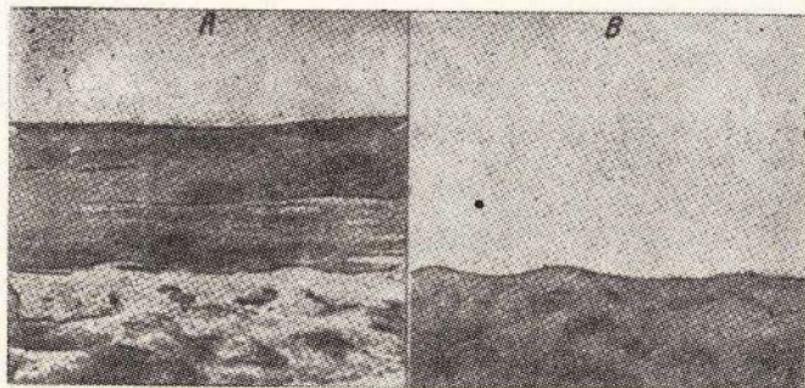
Sl. VIII.4 — Američka fotokamera za fotografisanje sa infracrvenim zracima

su dopuštene velike ekspozicije, a emulzija se priprema neposredno pre no što će se upotrebiti. Postoji i drugi razlog koji ne dopušta širu primenu fotoemulzija senzibiliziranih na infracrvene zrake većih talasnih dužina: — zračenje tela zagrejanog do sobne temperature deluje, naime, već primetno na emulziju senzibiliziranu do $\lambda_{\text{max}} = 2 \mu$, izazivajući njen zamagljivanje. Prirodno je da je rad sa takvim materijalima jako otežan, ako ne i sasvim nemoguć.

Za fotografisanje sa infracrvenim zracima bile su 1955 — 1957. god. konstruisane specijalne foto-kamere (1, 2), sa objektivima velike žižne daljine. Tako je u SAD za fotografisanje u zemaljskim uslovima bila razvijena kamera sa objektivom žižne daljine od 254 cm i relativnim otvorom 1:12,5 (sl. VIII.4). Dimenzije slike su $12,7 \times 17,8$ cm. Zastor ima 10 brzina okidanja sa minimalnim vremenom $1/200$ s. Kamera je namenjena za sni-

manje objekata koji su udaljeni do 50 km i omogućuje da se na snimku raspozna usamljeni automobil, snimljen sa daljine od 10 km.

Objektiv sa još većom žižnom daljinom (17 m) primenjivali su Nemci na foto-kameri u drugom svetskom ratu, pomoći koje su fotografisali englesku obalu preko kanala La Manša, sa rastojanja od 33 km, po jakoj izmaglici.



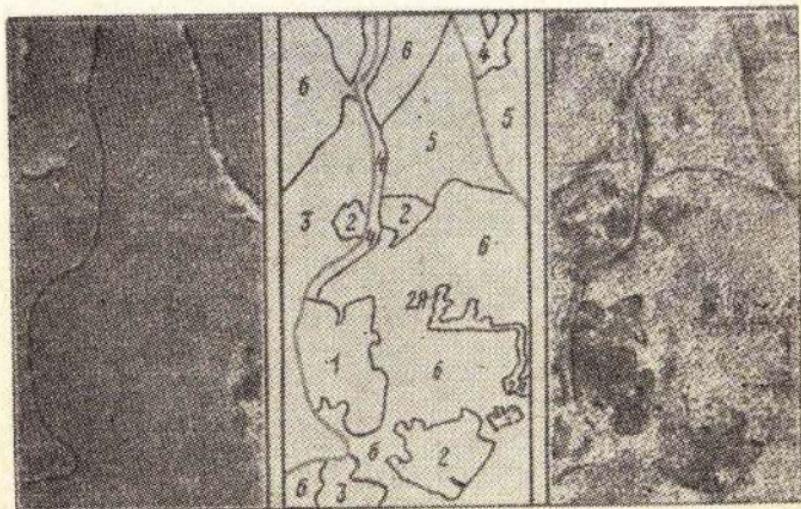
Sl. VIII.5 — Planinski pejzaž, snimljen infracrvenim (A) i svetlosnim (B) zracima sa udaljenosti od 60 km

Pomoći sličnih foto-kamera mogućno je snimati udaljene objekte, koji su od posmatranja vidljivim zracima zaklonjeni atmosferskom izmaglicom (sl. VIII.5), i dobijanje aerofotosnimaka što se razlikuju od onih sa vidljivim zracima (sl. VIII.6). Osim toga, ukazuje se na mogućnost otkrivanja prisustva ciljeva i njihovog karaktera, praćenja promena u maskiranju i sistemu organizacije odbrane i vatre protivnika, olakšavanja orijentacije i pokazivanja ciljeva svojoj artiljeriji, kao i poboljšanja maskiranja sopstvenih snaga.

Neki autori [3, 4] ukazuju da je pomoći infrahromatskih materijala moguće dobiti snimke sa boljim kontrastom izdvajanja objekata na zemljištu nego pri fotografisanju sa panhromatskim materijalima, a na račun različite toplotne emisije tamnih i svetlih mesta. Osim toga, kao na prednost avionske infracrvene fotografije ukazuje se na mogućnost fotografisanja zemljišta kroz

otvore u oblacima, pošto se u tom slučaju efekat zaklanjanja objekata na zemljištu senkama oblaka jako smanjuje u odnosu na fotografisanje sa panhromatskim filmom.

Na proces stvaranja slike posmatranih objekata glavni uticaj imaju spektralni sastav zračenja koje se reflektuje od objekta,



Sl. VIII.6 — Aerofoto-snimak šumskog kompleksa žuto-crvenim (levo) i infracrvenim (desno) zracima:

1 — borovi (stara stabla), 2 — borovi (mlada stabla), 3 — borovi i lisnato drveće; 4 — tajga; 5 — tajga i lisnato drveće; 6 — lisnato drveće

spektralna osetljivost prijemnog uređaja i spektralni koeficijenat slabljenja fluksa zračenja u atmosferi. Pri ostalim jednakim uslovima posmatranja (isti objekt, jednaka propustljivost atmosfere, isto rastojanje do posmatranog objekta i isti izvor njegovog osvetljavanja) prenos slike zavisiće od efektivnog intenziteta fluksa zračenja A_λ koji se odbija od objekta:

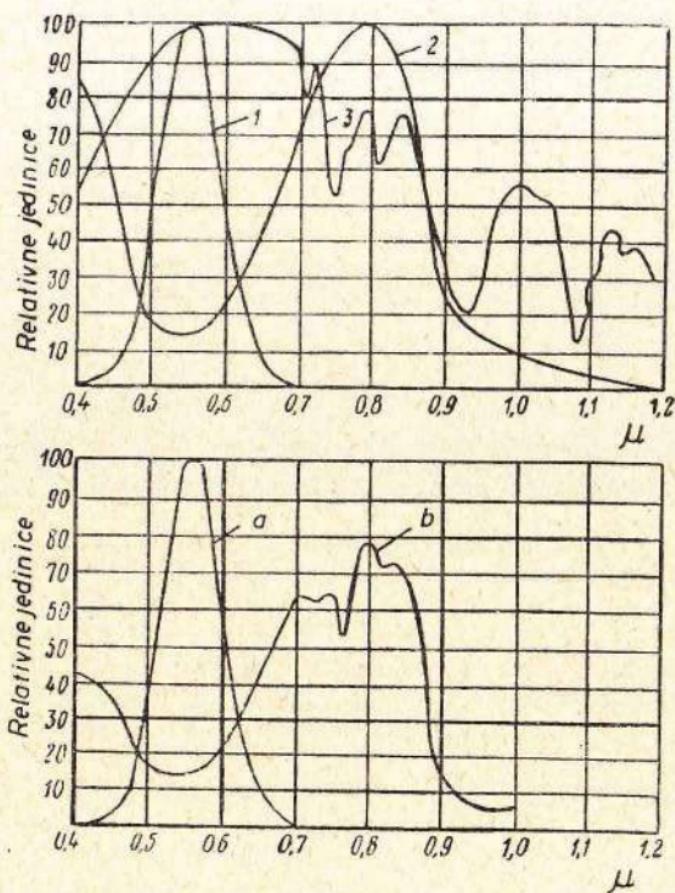
$$A_\lambda = S_\lambda r_\lambda \tau_\lambda, \quad (\text{VIII. } 1)$$

gde je: S_λ — spektralna osetljivost prijemnog uređaja;

r_λ — spektralna gustina reflektovanog zračenja;

τ_λ — spektralni koeficijenat propustljivosti atmosfere.

Na sl. VIII.7 date su krive spektralne osetljivosti oka 1 i cezijum-oksidne fotokatode 2, kao i spektralna raspodela ener-

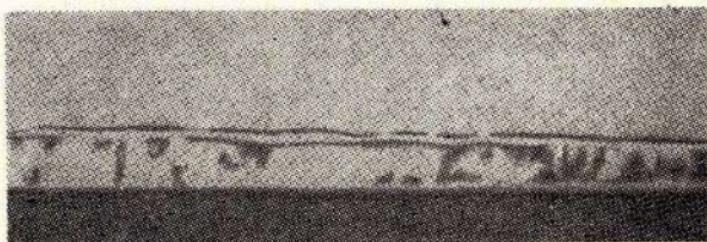


Sl. VIII.7 — Izobličenja u prenosu slike posmatrana u različitim delovima spektra

gije sunčevog zračenja 3, uzimajući u obzir propustljivost atmosfere. Kao rezultat množenja odgovarajućih ordinata ucrtanih krivih, dobijene su krive efektivnog spektralnog intenziteta fluksa zračenja za oko i cezijum-oksidnu fotokatodu, kao funkcije talasne dužine optičkog zračenja (bez uračunavanja selektivnosti refleksije objekta).

Iz upoređenja krivih a i b na sl. VIII.7 sledi da će se za oko pokazati kao najsajnije reflektovano zračenje sa talasnom dužinom u području $0,54 - 0,58 \mu$, dok će za cezijum-oksidnu fotokatodu maksimum bleska odgovarati odbijenom zračenju sa talasnom dužinom $0,78 - 0,86 \mu$. Može se pokazati da će se raspodela bleska slike sličnog karaktera dobiti i u slučaju korišćenja infrahromatskog foto-materijala.

Efekat izobličenja osvetljenosti slike pri fotografisanju sa infrahromatskim materijalom, zajedno sa izostajanjem efekta



Sl. VIII.8 Slika artiljerijske baterije u dejstvu, dobijena metodom kombinovanog snimanja na infrahromatski film

atmosferske izmaglice (zamaglijenosti na foto-materijalu), može se uspešno iskoristiti za povećanje efikasnosti vazdušnog izviđanja u dnevnim uslovima i olakšavanje dešifrovanja dobijenih snimaka.

Mala osetljivost infrahromatskih materijala, koja je inače njihov nedostatak, može se uspešno koristiti za tačno određivanje položaja neprijateljskih reflektora i artiljerijskih baterija u dejstvu. Zbog toga se noću, sa otvorenim zastorom fotokamere, snimaju, na primer, odsjaji od ispaljivanja oruđa. Pri tome slaba noćna svetlost ne deluje na infrahromatski film i na njemu se dobija samo prikriven lik odsjaja. Danju se, pri nepromjenjenom položaju foto-kamera, fotografije zemljište. Kao rezultat, dobija se snimak (sl. VIII.8) na kome se na zemljištu kao pozadini jasno razlikuju pravci artiljerijskih položaja [5].

Izvršivši slična snimanja iz dva-tri položaja i poznajući azimutalne uglove postavljanja foto-kamera, može se odrediti i tačan položaj baterije.

2. FOTOGRAFISANJE POMOĆU ELEKTRONSKO-OPTIČKIH PRETVARAČA

Kako je već ukazivano u odeljku 1, primena infrahromatskih emulzija nailazi na teškoće: njihovu vrlo nisku integralnu osetljivost i malu stabilnost u vremenu. Da bi se one izbegle,

mora se prethodno nevidljiva infracrvena slika pretvoriti u vidljivu i ova poslednja fotografisati na običnu, srazmerno stabilnu i visokoosetljivu fotoemulziju. Pretvaranje nevidljive infracrvene slike u vidljivu može se ostvariti pomoću elektronsko-optičkog pretvarača, evapografa i fosforecentnih materijala osetljivih na infracrvene zrake.

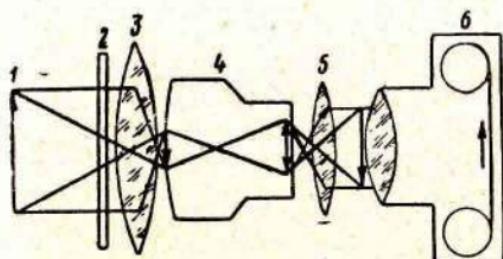
Sl. VIII.9 — Principijelna šema fotokamere sa elektronsko-optičkim pretvaračem

Principijelna šema fotografisanja sa infracrvenim zracima, korišćenjem elektronsko-optičkog pretvarača, data je na sl. VIII. 9.

Fluks zračenja 1, odbijen od objekta koji se fotografiše, prolazi kroz infracrveni filter 2 i fokusira se pomoću objektiva 3 na fotokatodu elektronsko-optičkog pretvarača 4. Vidljiva slika dobijena na njegovom ekranu prenosi se pomoću optičkog sistema na fotografski film 6.

Ceo sistem uključujući projekcioni objektiv, elektronsko-optički pretvarač i sistem za prenos vidljive slike na foto-emulziju, dobio je naziv „elektronsko-optički objektiv“.

Uključivanje elektronsko-optičkog pretvarača kao prelaznog elementa pogoršava niz karakteristika optičkog sistema fotokamere i stoga se moraju preduzimati specijalne mере за oticanjanje ovih uticaja ili za njihovu delimičnu kompenzaciju. Ovo se, u prvom redu, odnosi na moć razdvajanja i zahtev u pogledu geometrijske sličnosti objekta koji se fotografiše i njegovog lika.



Geometrijska sličnost objekta i lika kod elektronsko-optičkog objektiva nije ispunjeno. Ovo je posledica toga što kod pretvarača, naročito onih sa ravnom fotokatodom, postoji, po pravilu, distorzija, tj. uvećanje linijskih odsečaka se menja njihovim udaljenjem od centra prema krajevima slike. Za otklanjanje distorzije moraju se posebno korigovati projekcioni i fotografiski objektiv, da bi se kod njih ostvarila distorzija suprotnog znaka.

Moć razdvajanja elektronsko-optičkih objektiva je, po pravilu, manja nego kod običnih objektiva zbog male moći razdvajanja elektronsko-optičkog pretvarača. Zbog toga se mora veštački povećati moć razdvajanja pretvarača i projektovati objektivi sa ravnomernijom raspodelom moći razlaganja po vidnom polju.

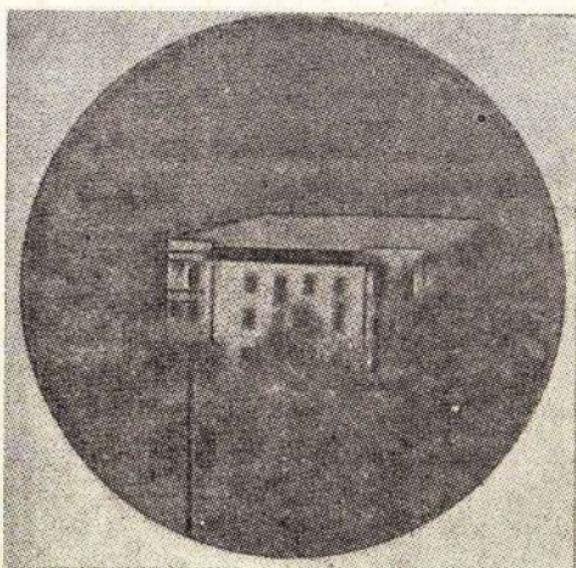
Kao najefikasniji su se pokazali sledeći načini povećanja moći razdvajanja pretvarača:

a) primena kombinovanog fokusiranja elektrona elektrostatickim i magnetnim poljem. Na ovaj način je firmi Malard (Engleska) pošlo za rukom da razvije elektronsko-optički pretvarač za fotografisanje infracrvenim zracima ME-1201, čija je moć razdvajanja u celom vidnom polju 20 linija/mm [6];

b) znatno povećanje fokusirajućeg napona na elektrodama pretvarača. Kada se napon na elektrode dovodi na duže vreme, ovo otežava nastupanje probaja između katode i drugih elektroda. Osim toga, pri velikom naponu napajanja može doći do pojave zamora luminiscentnog sloja i trajnog oštećenja pretvarača.

Sve ove pojave se mogu izbeći ako se na elektrode umesto stalnog napona dovode impulsi visokog napona. Kako su pokazala ispitivanja [7], dovodenjem na elektrode pravougaonih naponskih impulsa, trajanja 1–10 μ s, polazi za rukom da se napon probaja poveća 5–7 puta, pošto je u tom slučaju trajanje impulsa veličina koja se može porediti sa vremenom potrebnim za razvitak probaja. Prelaz na impulsno napajanje pretvarača omogućava povećanje gradijenta polja kod fotokatode sa 4,5 na 30 kV/cm i, prema tome, značajno povećanje moći razdvajanja pretvarača. Osim toga, pri takvom napajanju može se povećati i blesak slike na ekranu, bez opasnosti od njegovog sagorevanja ili nepovratnog zamora.

Kod elektronsko-optičkog objektiva moguće je korišćenjem pretvarača koji dopušta pojačanje bleska slike, znatno povećati svetlosnu moć u poređenju sa običnim objektivom sa sočivima.



Sl.VIII.10 — Slika pejzaža dobijena pomoću elektronsko-optičkog foto-aparata

To omogućava da se u žižnoj ravni (na filmu) dobije dovoljna osvetljenost za fotografisanje sa malim vremenom ekspozicije.

Svetlosna moć elektronsko-optičkog objektiva može se povećati na posredan način podesnim izborom spektralnog zračenja luminiscentnog ekrana pretvarača i spektralne osetljivosti fotografске emulzije.

Bitno preim秉stvo opisane metode fotografisanja jeste što može da se primeni i prilikom male osvetljenosti, kada i obični i infrahromatski materijali postaju neefikasni. Osim toga, ova metoda omogućava korišćenje običnih, visokoosetljivih i stabilnih foto-materijala.

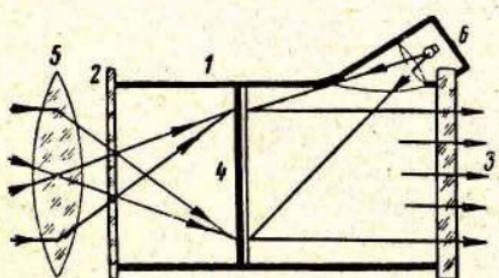
Na sl. VIII.10 data je kao ilustracija fotografija snimljena pred zalazak sunca pomoću elektronsko-optičkog pretvarača.

3. EVAPOROGRAFIJA

Dosada razmatrane metode fotografisanja sa infracrvenim zracima omogućavaju izvođenje fotografisanja ili na račun odbijenog zračenja, ili, ako je temperatura površine objekta viša za $250-300^{\circ}\text{C}$, na račun sopstvenog zračenja. Ovo je moguće što opisane metode koriste srazmerno kratkotalasno infracrveno zračenje sa talasnom dužinom manjom od $1,2 \mu$.

Kod evaporografske metode, prema nemačkom fizičaru Černiju, koristi se dugotalasno zračenje tela sa niskom površinskom temperaturom.

Princip evaporografske metode sastoji se u sledećem (sl. VIII.11):



Sl. VIII.11 — Principijelna šema evaporografa

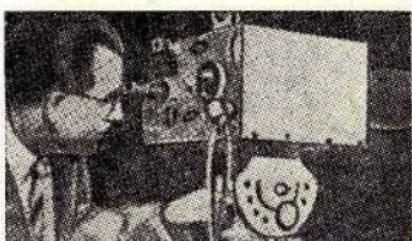
U sudu 1, sa ulaznim prozorom propustljivim za infracrvene zrake 2 i izlaznim prozorom 3, postavlja se tanka liskunska membrana 4. Strana membrane, okrenuta prema objektivu 5, pokriva se matiranim platinom ili čađu, radi bolje apsorpcije infracrvenog zračenja. Na suprotnu stranu membra-

ne nanosi se isparavanjem, tanak sloj neke viskozne tečnosti (na primer, kamforno ulje). Debljina sloja ulja usvaja se tako što se korišćenjem interferencije svetlosti postiže minimalno odbijanje fluksa zračenja od pomoćnog svetlosnog izvora 6.

Ako se na zacrnjenu površinu membrane projektuje lik objekta koji se snima, tada će se na mestima gde je intenzitet infracrvenog zračenja veći pločica zagrejati, što će dovesti do delimičnog isparavanja ulja i njegovog oticanja na hladnija mesta. Interferencija odbijenih zrakova iz izvora 6 neće tu izazvati potpuno gašenje vidljive svetlosti i na membrani će se pojaviti interferpciona slika, koja odgovara raspodeli temperature na površini objekta. Ona se može posmatrati bilo vizuelno, bilo fotografisanjem kroz izlazni prozor evaporografa.

Radi otklanjanja uticaja spoljne temperature na isparljivost kondenzovanog sloja ulja, liskunska membrana se postavlja u vakuum, a kućište prijemnog dela uređaja izrađuje se od dobrog termoizolacionog materijala.

Pošto je pretvaranje energije zračenja u toplotu, koje se koristi u opisanoj metodi, najnepovoljniji način posmatranja energije zračenja, to od ove metode i ne treba očekivati veliku



Sl. VIII.12a — Spoljašnji izgled uređaja „eva“

osetljivost, kao ni dobru moć razdvajanja. Osim toga, za zagrevanje membrane i isparavanje sloja tečnosti potrebno je izvesno vreme, usled čega ovakvi uređaji imaju znatnu vremensku inerciju. Za fotografisanje drugog objekta mora se sačekati određeno vreme koje je potrebno za kondenzaciju novog sloja kamifornog ulja na membranu.

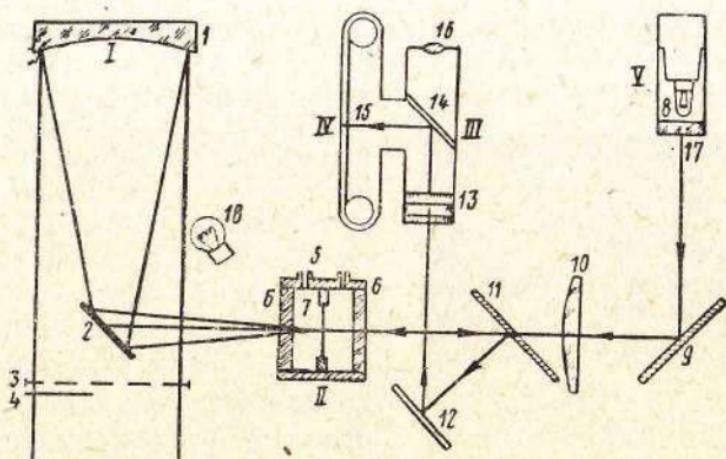
Bez obzira na ukazane nedostatke koji se odnose na ovu metodu, slični uređaji primenjuju se u vojnoj tehnici, pošto u principu omogućavaju osmatranje u mraku na račun sopstvenog zračenja ciljeva.

Kao primer razmotrićemo aparaturu za noćno osmatranje „eva“, koju je razvila firma „Berd“ (SAD) 1956. god. i uvela u naoružanje vazduhoplovstva 1957. godine [8, 9, 10].

Uredaj „eva“ (sl. VIII.12a) omogućava da se u potpunoj tamni raspoznaju obrisi predmeta sa površinskom temperaturom različitom od temperature njegove okoline, i da se predmet prepozna na osnovu nejednake raspodele temperature u pojedinim njegovim tačkama. Osetljivost uređaja je $0,1^{\circ}\text{C}$, pri čemu može da registruje promene temperature u području od nekoliko stepeni do nekoliko hiljada stepeni.

Uredaj (sl. VIII.12b) se sastoji iz 5 osnovnih delova: objektiva sa ogledalom velike žižne daljine I, vakuumske komore II, optičkog sistema za posmatranje III, foto-kamere IV i izvora za osvetljavanje V.

Objektiv ($2\beta = 5^{\circ}$; $A = 1 : 2,5$; $f = 20$ cm) sadrži dva ogledala — sferno 1 i skretno 2, neutralni filter u obliku rešetke za slabljenje fluksa snažnih izvora zračenja 3 i zastor na ulazu



Sl. VIII.12b — Optička šema uređaja „eva“

objektiva 4, za onemogućavanje pristupa fluksu zračenja u toku pripreme uređaja za ponovno osmatranje.

Osetljivi elemenat 7, postavljen u žiju ogledala 1, u stvari je tanka membrana od nitroceluloze, pokrivena s jedne strane matiranim platinom a s druge — tankim slojem kamifornog ulja. Membrana je smeštena u hermetizovanom sudu 5, iz koga se periodično ispumpava vazduh. Ulazni prostor 6 izrađen je od kristala kuhinjske soli, pokrivenog sloja vinilnog laka. Zadnji zid komore napravljen je od stakla koje propušta samo vidljivu svetlost, a zadržava infracrvene zrake.

Optički vizir III namenjen je za vizuelno posmatranje interferencione slike i sastoji se od objektiva velike žižne daljine 13, koji je istovremeno i objektiv minijaturne foto-kamere 15, poluprovidnog ogledala 14 i okulara 16. Poluprovidno ogledalo reflektuje 50% vidljivog zračenja na fotografsku traku, a 50% propušta prema posmatraču.

Izvor za osvetljavanje V sastoji se iz sijalice sa grejnim vlačnom od volframa, filtra 17 koji odseca sve infracrveno zračenje sijalice, ogledala 9 i kondenzorskog sočiva 10. Na putu para-



Sl. VIII.13 — Slika automobila, aviona i coveka, dobijene pomoću uređaja „eva“ u mraku

lelnog svetlosnog snopa, posle kondenzorskog sočiva, nalazi se poluprovidna ploča 11 sa koeficijentom refleksije od 50%. Posle prolaska kroz ovu ploču i izlazni otvor komore, svetlost pada na osetljivu površinu. Pošto se reflektuje od nje, svetlost se posredstvom poluprovidne ploče i ogledala 12 usmerava na objektiv sistema za posmatranje i foto-aparata.

Posle prestanka posmatranja zatvara se zastor objektiva i uključuje sijalica 18, čije zračenje preko ogledala 2 pada na zacrnjenu površinu osetljive membrane, ravnomerno je zagreva i time odstranjuje uljani film.

Kontrola čišćenja membrane i nanošenja ulja koje sledi za njim, ostvaruje se vizuelno kroz sistem za posmatranje po promeni boje uljanog filma u odbijenim zracima od žute (ulja nema) do zeleno-žute (debljina uljanog filma odgovara radnoj vrednosti).

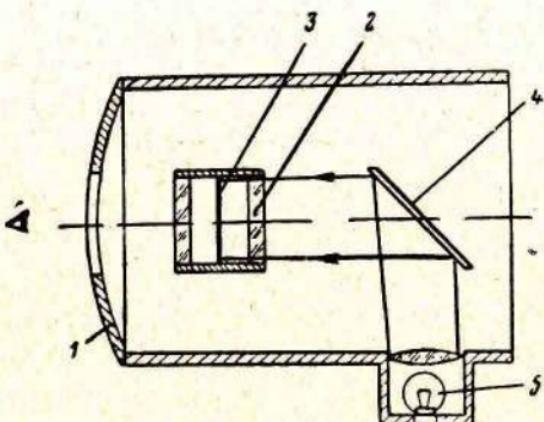
U literaturi se navodi da se pomoću uređaja „eva“ može u potpunoj tamni fotografisati čovek na udaljenju od 180 m, a zgrada na udaljenju od 1800 m (sl. VIII.13).

Princip pretvaranja toplotne energije u vidljivo zračenje, koje se može posmatrati vizuelno ili fotografisanjem, u stvari je osnova i za drugi, poluprovodnički pretvarač sličnog tipa, koji je nedavno razrađen u Engleskoj (11).

Princip rada uređaja (sl. VIII.14) zasnovan je na zavisnosti apsorpcije svetlosti koja pada na poluprovodnik od njegove temperature. Ako se poluprovodnički film posmatra u propuštenoj

monohromatskoj svetlosti sa talasnom dužinom bliskoj granici propustljivosti, to će najmanje promene temperature pojedinih delova filma izazvati odgovarajuće promene njihove providnosti.

Infracrveni zraci, posle dobijanja od paraboličnog ogledala 1 i ulaska u vakuumsku komoru kroz ulazni prozor od kuhinjske soli 2, padaju na poluprovodnički osetljivi film 3. Film se sastoji od hromne osnove i sloja amorfognog selenia debljine 1, koji je okre-



Sl. VIII.14 — Poluprovodnički pretvarač slike:

1 — parabolično ogledalo; 2 — prostor od kuhinjske soli;
3 — film od selenia i hroma; 4 — ogledalo; 5 — natrijumska
svetiljka

nut prema ogledalu objektiva. Specifičnost takvog filma jeste u tome što on dobro apsorbuje infracrvene zrake koji nailaze od strane na kojoj je selen, a slabo one koji nailaze od strane na kojoj je hrom.

Lik predmeta, ili tačnije — raspodela intenziteta infracrvenog zračenja različitih delova predmeta, posmatra se u propuštenoj svetlosti natrijumske svetiljke.

Osetljivost uređaja ograničena je osetljivošću oka ili fotografске trake na razlikovanje najmanjih kontrasta. U prvom modelu ona je bila srazmerno niska, s obzirom da je dozvoljavala fotografisanje objekata čija se temperatura razlikovala od temperature okoline za 15°C , i to pri vremenu ekspozicije od 2 s. Vremenska inercija uređaja je 0,5 s. Moć razdvajanja uređaja ograni-

čena je kvalitetom ogledala, prozora komore i filma i iznosi 4 linije po milimetru.

Vakuum u komori sa osetljivim filmom održava se pomoću geterske supstance 10^{-4} mm Hg.

4. UREĐAJI ZA IZVIĐANJE U BLIŽEM TALASNOM PODRUČJU INFRACRVENOG SPEKTRA

Za posmatranje specijalnih izvora infracrvenog zračenja mogu se koristiti bilo pretvarači koji pokazuju osetljivost u bližem talasnom području infracrvenog spektra (do 2μ) — metaskopi sa fosforecentnim materijalom kao osetljivim elementom, monokulari ili binokulari sa elektronsko-optičkim pretvaračima, kao i specijalni uredaji sa fotootpornicima ili fotodiodama. Kako se od ovakvih uredaja ne traži visoka moć razdvajanja i velika osetljivost, oni mogu biti jednostavne konstrukcije i male težine i dimenzija.

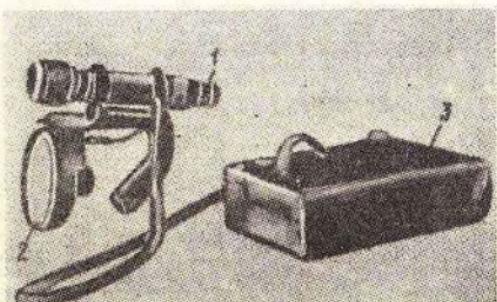
U metaskopima se koristi pojava „gašenja“ ili „aktiviranja“ pomoću infracrvenih zrakova fosforescencije osetljive supstance, koja je prethodno pobudena α -zračenjem ili ultravioletnim zracima.

Primer za ovakve uredaje jeste metaskop UF/F (SAD), razvijen za vreme drugog svetskog rata, i metaskop CNET (Francuska), razvijen u posleratnom periodu. Daljina posmatranja sa metaskopima, za izvore infracrvenog zračenja srednje snage, iznosi nekoliko kilometara.

Bez obzira na male dimenzije metaskopa i odsustvo specijalnih izvora napajanja, njihovu primenu ograničava njihova mala moć razdvajanja, zbog čega su ih potisli savršeniji uredaji sa elektronsko-optičkim pretvaračima.

Navedeni uredaji bili su predviđeni za osmatranje izvora infracrvenog zračenja, čiji bi rezultati omogućili dobijanje predstave o rasporedu protivnika, karakteru i pravcima transporta, spojevima između protivničkih jedinica i, delimično, o prirodi infracrvenih sredstava koje koristi protivnik. Međutim, izviđanje može da zнатно korisnije podatke ako se ostvari posmatranje situacije na zemljištu, a ne pojedinih izvora infracrvenog zračenja.

U ove svrhe mogu se koristiti samo uređaji sa optikom velike svetlosne moći i visokokvalitetnim elektronsko-optičkim pretvaračima, predviđeni za rad sa osvetljavanjem zemljišta reflektora koji su pokriveni infracrvenim filtrima ili posmatranje u uslovima prirodne osvetljenosti.



Sl. VIII.15 — „Snajperskop“ (SAD)

crvenim reflektorom malih dimenzija 2. Napajanje uređaja i reflektora vrši se iz posebne akumulatorske baterije, koju borac nosi u rancu 3 ili u torbi preko ramena.

Reflektor, prečnika 100 mm, sa sijalicom sa grejnim vlaknom snage 30 W, obezbeđuje svetlosnu jačinu od $7 \leftarrow 10$ hiljada sveća duž svoje ose.

Kao elektronsko-optički pretvarač u uređaju za posmatranje bio je u to vreme usvojen široko korišćen pretvarač 1-P-25, sa naponom napajanja od 4.000 V.

Fluks zračenja reflektora odbija se od objekata na zemljištu i dospevajući u objektiv uređaja za posmatranje stvara, posle pretvaranja, na ekrantu uređaja sliku terena ispred posmatrača. Radijus dejstva uređaja je 150 m.

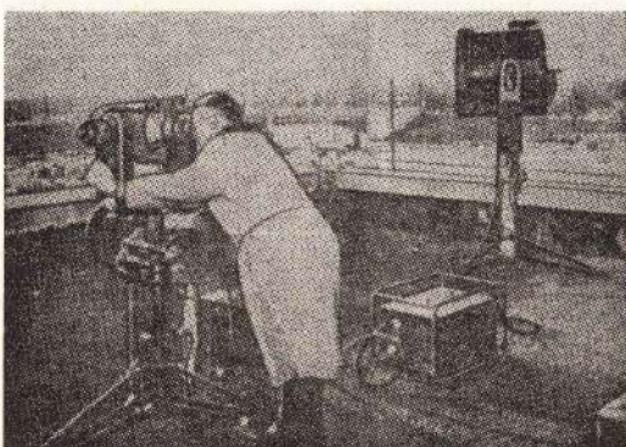
U 1955. god. se pojavila vest o razvoju uređaja koji omogućava posmatranje noću na rastojanju do 3.600 m [13].

Kao elemenat za osvetljavanje u njemu, usvojen je reflektor prečnika 60 cm, sa sijalicom sa grejnim vlaknom 1500 W, 9 V pokrivenom infracrvenim filtrom, koja razvija osnu svetlosnu jačinu od 5 miliona sveća.

Pred kraj drugog svetskog rata, u kopnenoj vojsci SAD počeo je da se upotrebljava uređaj za posmatranje sa infracrvenim zracima manjeg dometa — „snajperskop“ (sl. VIII.15).

„Snajperskop“ predstavlja elektronsko-optički uređaj za posmatranje 1, montiran zajedno sa infracrvenim reflektorom malih dimenzija 2. Napajanje uređaja i

Elektronsko-optički uređaj za posmatranje šestostruko uvećava i napaja se iz posebnog visokonaponskog izvora, koji daje napon od 20.000 V. Uredaj za posmatranje je sinhrono povezan



Sl. VIII.16 — Američki uređaj za posmatranje u mraku

sa jednim ili nekoliko reflektora, što obezbeđuje zaokretanje reflektora u stranu na koju se vrši posmatranje (sl. VIII.16).

Upoređujući karakteristike ova dva uređaja za posmatranje sa infracrvenim zracima, može se zapaziti da je povećanje daljine vidljivosti za 24 puta dovelo do povećanja potrošnje snage reflektora za 50 puta, a svetlosne jačine osvetljavanja — 500 puta. Zato ne treba očekivati značajnije povećanje radijusa dejstva elektronsko-optičkih uređaja koji rade u sklopu sa reflektorima. Ovi uređaji će ostati uređaji manjeg dometa, za posmatranje terena u neposrednoj blizini posmatrača. Osim toga, takvi uređaji ne mogu u principu da obezbede tajnost svoje primene, pošto protivnik opremljen odgovarajućom aparaturom uvek može da otkrije ne samo rad reflektora već i da odredi njegov položaj. Za takve svrhe bio je, na primer, konstruisan uređaj IRI-03 [14] za upozoravanje vojnika o njihovom ozračivanju infracrvenim zracima (sl. VIII.17).

Uredaj IRI-03 sastoji se iz fotogeneratora zvučne učestanosti izbijanja i elektrodinamičke telefonske slušalice, koja daje zvučne signale u slučaju ozračivanja.

Fotogenerator učestanosti izbijanja izrađen je od poluprovodničkih elemenata i sastoji se od oscilatora sa konstantnom učestanošću f_1 , oscilatora sa promenljivom učestanošću f_2 sa foto-otpornikom kao upravljačkim elementom i stepena za mešanje, koji izdvaja učestanost izbijanja f_s , na koju odmah reaguje telefonska slušalica.



Sl. VIII.17 — Uredaj IRI—03

Kada fotootpornik nije ozračen, učestanost oscilacija oba oscilatora su jednake ($f_1 = f_2$). Pri ozračivanju fotootpornika infracrvenim zracima, učestanost f_2 se menja u сразмерi sa intenzitetom ozračivanja, i kao rezultat toga na izlazu mešača se pojavljuje učestanost izbijanja, koja se čuje u telefonskoj slušalici.

Oba oscilatora, mešač i napajanje, montirani su u plastičnoj kutiji dimenzija $11 \times 6,5 \times 2$ cm i težine 200

gr, koja se može obesiti o dugme uniforme. Elektrodinamička slušalica sa permanentnim magnetom povezana je sa uređajem kablom i može se pričvrstiti za uvo vojnika.

Uredaj se napaja minijaturnim baterijama od 1,5 i 22,5 V, predviđenom za neprekidan rad od 50 časova.

Fotootpornik je osetljiv u talasnem području od $0,6-2,3 \mu$, a njegova konstrukcija obezbeđuje vidni ugao uređaja od oko 140° . Po uvećanju učestanosti zvuka izbijanja može se odrediti pravac izvora infracrvenog zračenja sa tačnošću od $\pm 5^\circ$.

Po visini zvuka koji daje uređaj može se, takođe, orijentaciono ceniti da li se vojnik nalazi u opasnoj zoni ili zoni prethodnog upozoravanja. Tako, ako se vojnik nalazi u zoni prethodnog upozoravanja (u granicama od 1–3 radiusa dejstva uređaja za posmatranje) indikator će davati ton niske učestanosti od 200–2.000 Hz. Pri ulasku u opasnu zonu (u okviru dometa

uredaja za posmatranje) učestanost zvuka se povećava do 2.000—10.000 Hz, rastući sa približavanjem ka uređaju za posmatranje.

Uredaj IRI-03 ima neosporne prednosti nad metaskopima, pošto pri njegovoj upotrebi oči i ruke vojnika ostaju uvek slobodni, a osim toga, pomoću njega se može kvalitativno oceniti pravac izvora ozračivanja i njegovo rastojanje (efekat blizine izvora ozračivanja).

Metaskopi i uređaji tipa „snajperskop“ ne omogućavaju posmatranje bez prethodnog osvetljavanja ciljeva. Iz toga prirodno, proizilazi pitanje o konstruisanju uređaja koji bi omogućavali posmatranje cilja na račun njegove ozračenosti u uslovima noćnog neba.

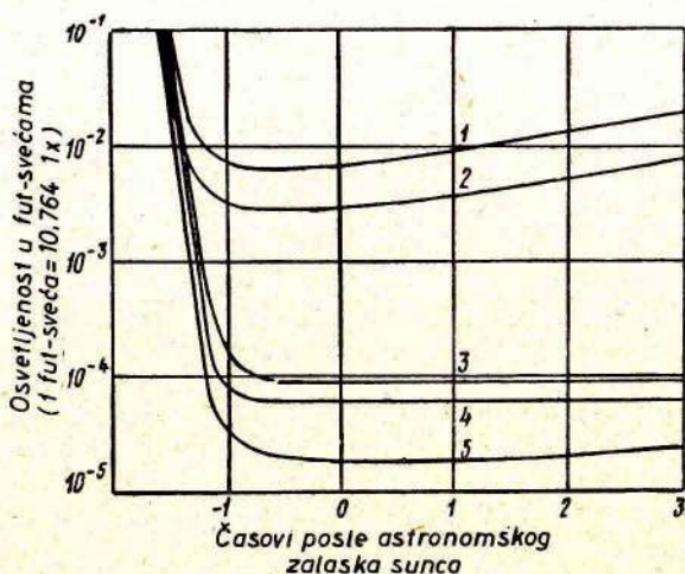
Noću, glavni izvori koji na zemljinoj površini stvaraju određen nivo osvetljenosti, jesu Mesec, zvezde i kosmičko prostoranstvo, ispunjeno milijardama za oko nevidljivih zvezda, koje ipak šalju na Zemlju znatno veću količinu energije zračenja nego sve okom vidljive zvezde. U zračenju noćnog neba vidnu ulogu ima zračenje iz infracrvenog dela spektra, naročito ono sa talasnom dužinom oko $1,03 \mu$. Kada je oblačno ozračenost objekata na zemljištu je veoma smanjena zbog rasipanja i apsorpcije energije zračenja u sloju oblaka.

Zavisnost osvetljenosti zemljine površine posle astronomskog zalaska Sunca (Sunce se nalazi iza horizonta više od 180°) od stanja oblačnosti, data je za srednje geografske širine na sl. VIII.18 [15].

Navedene krive pokazuju da pri vedrom vremenu i na punoj mesečini, kada je manje ili više moguća orijentacija na zemljištu, osvetljenost zemljine površine predstavlja veličinu reda desetih delova luksa. Kada nema mesečine osvetljenost naglo pada, dostižući vrednosti reda $10^{-3} - 10^{-4}$ lx. U takvim uslovima ne mogu se vizuelno posmatrati nikakvi objekti, i to ne samo iz vazduha već i sa relativno malih rastojanja na zemlji.

A. A. Geršun [16] daje srednje numeričke vrednosti prirodne noćne osvetljenosti: polumesec na vedrom nebu 0,2 lx; vedra noć bez mesečine 0,001—0,002 lx; noć bez mesečine i oblačnost srednje gustine 0,0005—0,001 lx; noć bez mesečine i oblačnost velike gustine 0,0002 lx.

Ovakva osvetljenost objekata stvara pri koeficijentu difuzne refleksije $\varphi = 0,4$ vidljivi blesak u granicama $0,025 \cdot 10^{-4}$ — $0,000025 \cdot 10^{-4}$ sb ($0,025$ — $0,000025$ nt).



Sl. VIII.18 — Noćna osvetljenost zemljine površine:
1 — vedro, pun mesec; 2 — srednja oblačnost, pun mesec; 3 — vedro, bez mesečine; 4 — srednja oblačnost, bez mesečine; 5 — jaka oblačnost, bez mesečine

Ustanovljeno je [17] da je za vreme tamne noći prag osetljivosti oka dat sledećim vrednostima:

za mrlju $B_p = (0,9 - 1) \cdot 10^{-4}$ nt,

za tačku $E_p = 1 \cdot 10^{-7}$ lx.

Navedene vrednosti praga osetljivosti dobijene su izvođenjem specijalnih eksperimenata i mogu stoga da se znatno razlikaze sa onim što se dobija pri posmatranju u realnim uslovima, kada deluju razni fizički i psihofiziološki faktori koji nisu uzeti u obzir pri eksperimentu. U zavisnosti od toga, realne vrednosti praga osetljivosti bleska mogu se razlikovati od navedenih za 20 do 50 puta u smislu njihovog povećanja, tj. $B_p \approx (2-5) \cdot 10^{-3}$ nt.

Iz izloženog se vidi da je u realnim uslovima pri vizuelnom posmatranju objekata na zemljištu u toku noći za njihovo otkrivanje nedovoljan njihov sopstveni blesak. Ako se uzme u obzir da vrednosti bleska potrebne za raspoznavanje objekata nisu u okolini praga osjetljivosti, već znatno veće, izuzetak će biti samo posmatranje u toku vedre noći pri punom mesecu.

U vezi sa ovim, treba ukazati i na zavisnost moći razdvajanja oka od bleska posmatranih predmeta (tablica VIII.1).

Tablica VIII.1

Zavisnost ugla razlaganja oka od bleska predmeta

Blesak, nt	Ugao razlaganja, min.	Blesak, nt	Ugao razlaganja, min.
$3,142 \cdot 10^{-4}$	50	1,57	2
$1,57 \cdot 10^{-3}$	30	3,142	1,5
$3,142 \cdot 10^{-3}$	17	15,7	1,2
$1,57 \cdot 10^{-2}$	11	31,42	0,9
$3,142 \cdot 10^{-2}$	9	314,2	0,8
0,157	4	1.570	0,7
0,3142	3	3.142	0,7

Moć razdvajanja oka, kao i njegova sposobnost da primi vrednosti bleska ili osvetljenosti na zenici u okolini praga osjetljivosti bitno zavise od uslova posmatranja i mogu se stoga razlikovati od eksperimentalnih vrednosti 5 do 10 puta.

Na taj način, za noćno izviđanje potrebno je povećati blesak slike posmatranih objekata, uz jednovremeno smanjenje ugla razdvajanja.

Ovo nije moguće izvesti sa optičkim uređajima, pošto je blesak slike, koji oko prima od objekta koji se posmatra kroz optički uređaj, uvek manji od stvarnog bleska samog objekta za iznos gubitaka u optici i može se izračunati po obrazcu:

$$B = B_0 \left(\frac{d}{d_o} \right)^2 \tau_{ou}, \quad (\text{VIII. 2})$$

gde je: B_0 — blesak objekta;

d — prečnik izlaznog snopa uređaja;

d_0 — prečnik zenica oka adaptiranog na tamu ($d_0 \geq d$);
 τ_{ou} — propustljivost optike uređaja ($\tau_{ou} < 1$).

Korišćenje elektronsko-optičkih uređaja za izviđanje omogućava povećanje bleska slike posmatranih objekata u noćnim uslovima u takvoj meri da ih posmatrač može bez teškoća raspozнати. Kako je već napomenuto u glavi VI, primena višestrukih pretvarača u velikoj meri povećava blesak slike (od 100—1.000 puta) i omogućava posmatranje zemljišta u toku noći, kada se objekti na zemljištu ne mogu videti golid okom. Prema podacima iz literature (18), višestepeni elektronsko-optički pretvarači omogućavaju u optimalnim uslovima koeficijenat pojačanja bleska $\eta = 10^5$. Takvo pojačanje bleska omogućava konstruisanje elektronsko-optičkih uređaja za izviđanje u uslovima prirodne noćne osvetljenosti od 10^{-3} — 10^{-4} lx.

5. TELEVIZIJSKI SISTEMI POVEĆANE OSETLJIVOSTI

Uređaji opisani u odeljku 4 su uređaji za neposredno posmatranje zemljišta i potrebno je prisustvo za to posebno određenog posmatrača, koji tek kroz neko vreme može da preda komandi subjektivne rezultate svojih posmatranja. Međutim, poželjno je da se informacije dobijaju u toku celog toka posmatranja, neposredno na komandnom mestu.

Za ove svrhe sve više se uvode metode televizijskog izviđanja u dnevnim, prelaznim i noćnim uslovima.

Uvođenje noćnog televizijskog izviđanja uslovljeno je osvajanjem specijalnih visokoosetljivih prednjih cevi, koje mogu da razvijaju dovoljno velike signale pri maloj ili vrlo maloj osvetljenosti na fotokatodi.

Objavljeni podaci govore o tome da danas postojeće, obične, televizijske cevi mogu normalno da rade pri osvetljenostima na fotokatodi reda jedinica i desetih delova luksa. U tablici VIII.2 su, prema podacima [20], date vrednosti potrebnih osvetljenosti objekata E_{ob} i optimalne vrednosti relativnog otvora objektiva za savremene predajne cevi. Date su, takođe, proračunske vrednosti osvetljenosti objekta i fotokatode E_f u slučaju korišćenja objektiva sa relativnim otvorom $A = 1 : 2$.

Tabela VIII.2

Osvetljenosti na zemljištu potrebne za normalan rad televizijskih cevi

Tip cevi	E_{ob} , lx	A	E_{ob} , lx $A = 1:2$	E_f , lx $A = 1:2$
Superikonoskop	3.000	1 : 3,5	1000	25
Ortikon	1.400	1 : 6,3	140	3,5
Superortikon Li-17	100	1 : 4,5	20,8	0,5
Superortikon Li-201	330	1 : 4,5	62,5	1,5
Vidikon	330	1 : 2	330	10

Osvetljenost E_f je izračunata po obrascu:

$$E_f = \frac{1}{4} \rho_{ob} \tau_o \tau_{atm} A^2 E_{ob}, \quad (\text{VIII. 3})$$

gde je: E_f — osvetljenost na fotokatodi;

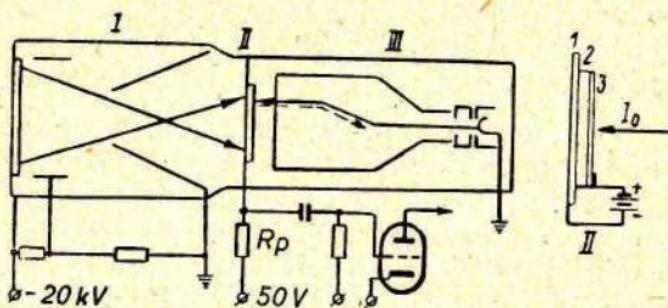
E_{ob} — osvetljenost na objektu;

ρ_{ob} — koeficijenat refleksije površine objekta;

τ_o — propustljivost objektiva;

τ_{atm} — propustljivost atmosfere.

Kako se vidi iz tablice, čak i tako osetljive cevi kao što su superortikoni ne omogućavaju posmatranje ne samo noću već i u polumraku. Zbog toga je za realizaciju noćnih izviđačkih televizijskih sistema potrebno povećanje osetljivosti predajnih cevi.



Sl. VIII.19. — Šema konstrukcije ibikona

Osetljivost bilo koje predajne televizijske cevi ograničena je šumovima koji nastaju u procesu pretvaranja svetlosti u fotostruju,

šumovima skanirajućeg elektronskog mlaza i šumovima prepojačavača. Pri tome preovlađuju poslednja dva izvora šuma. Zbog ovoga je pojačanje fotostruje najzgodnije vršiti pre nego što elektronski mlaz izvrši komutaciju nanelektrisanja nagomilanog na zastoru.

Takvo pojačanje fotostruje može se izvesti na tri načina: pojačanjem fotostruje korišćenjem sekundarne elektronske emisije;

indukovanom provodnošću, i

svetlosnim pojačanjem slike na principu elektronsko-optičkog pretvarača.

Praktičnu primenu našla su dva poslednja načina koji su, sudeći po podacima objavljenim u literaturi, omogućili dobijanje ohrabrujućih rezultata.

Na sl. VIII.19 prikazana je šema cevi ibikon, koja koristi pojavu indukovane provodnosti.

Po mehanizmu obrazovanja signala cev ibikon se malo razlikuje od vidikona. Međutim, dodavanje dela za prenos elektronske slike omogućava višestruko povećanje struje koju stvara potencijalni reljef na zastoru, a time i osetljivost cevi.

Ibikon se, konstrukcijski, sastoji iz tri dela — dela za prenos elektronske slike sa fotokatodom i ubrzavajućim elektrodama I, zastora II u kome se pobuđuje indukovana provodnost i dela za komutaciju sa elektronskim topom i sistemom elektromagneta III. Pojačani signal uzima se neposredno sa zastora i dovodi na ulaznu cev videopojačavača.

Dok se u vidikonu svetlosni fluks koristi neposredno za promenu otpora u pojedinim tačkama zastora, dotle u ibikonu on deluje na fotokatodu koja usled toga emituje elektrone. Fotoelektroni ulaze u ubrzavajuće polje prenosnog dela, dobijaju veliku energiju i sa njom udaraju u poluprovodnički zastor. Zastor ibikona obavlja dve funkcije — nagomilavanje nanelektrisanja i pojačanja fotostruje pre komutacije.

Zastor ibikona II može se šematski predstaviti u obliku tanke pločice poluprovodnika 2 (dielektrika), obložene sa dva provodna sloja 1 i 3, na koje se dovodi napon. Prednji (okrenut

fotokatodi) aluminijumski sloj 3 debljine $0,2 \mu$ slobodno propušta fotoelektrone, ubrzane sa naponom od 20 i više kilovolti, u sloj poluprovodnika (dielektrika), što dovodi do pojavljivanja struje If (u odsustvu fotoelektrona, struje u poluprovodniku praktično nema).

Pojava struje fotoelektrona u poluprovodniku izaziva pojavu indukovane struje I. Odnos I/I_f može se posmatrati kao koeficijent strujnog pojačanja cevi, koji dovodi do odgovarajućeg svetlosnog pojačanja slike.

Cev ibikon (prema podacima [23]) ima 200 puta veću osjetljivost od savremenih superortikona. Ona omogućava dobijanje slike sa jasnoćom većom od 250 linija (radna površina zastora je oko 7 cm^2) pri osvetljenosti na fotokatodi od $3 \cdot 10^{-4} \text{ lx}$. Cezijum-oksidna fotokatoda cevi ima osjetljivost $40 \mu \text{ A/lm}$, a ubrzavajući napon u delu za prenos elektronske slike jednak je 30 kV, što je na datom nivou osvetljenosti obezbeđivalo fotostruju reda 10^{-11} A .

U slučaju korišćenja cezijumantimonidne fotokatode 24, minimalan nivo osvetljenosti se snižava do $10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6} \text{ lx}$, što omogućava posmatranje u mraku, u vedroj noći bez mesečine.

Ohrabrujući rezultati dobijeni su, takođe, kao rezultat rada sa cevima tipa superortikon. Usavršavanje sastavnih delova superortikona omogućilo je povećanje njegove osjetljivosti za 50 do 500 puta. Tako se kod cevi WL-7198 [25], namenjene za avionske televizijske aparature, uspelo da se samo na račun povećanja čvrstine unutrašnjih konstrukcija poveća osjetljivost i moć razlaganja u uslovima velikih ubrzanja i vibracija. Ova cev je obezbeđivala dobijanje slike sa jasnoćom od 250 linija, pri preopterećenju od 10 g, učestanosti vibracija 50–500 Hz i osvetljenosti fotokatode od $3 \cdot 10^{-3} \text{ lx}$.

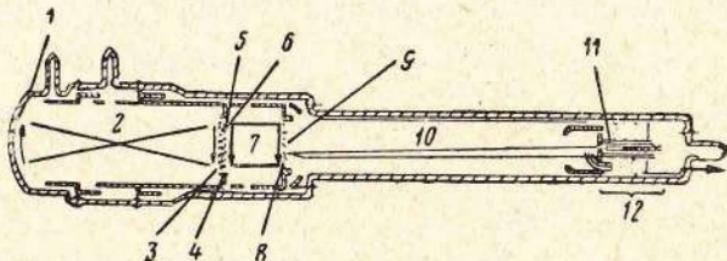
Udaljavanje rešetke od zastora za 3–4 mm takođe je do prinelo povećanju osjetljivosti superortikona zbog manjeg uticaja napona na rešetci na potencijalni reljef na zastoru.

U zadnje vreme počele su da se koriste nove višealkalne fotokatode sa osjetljivošću od 200 i više $\mu \text{ A/lm}$, umesto 70–90 $\mu \text{ A/lm}$ kod srebro-bizmutnih fotokatoda. Takve fotokatode omogućavaju povećanje osjetljivosti superortikona, poboljšanje stabilnosti njihovih karakteristika i duži vek trajanja [15].

Postoji, međutim, drugi vrlo efikasan put za veliko povećanje osetljivosti savremenih superortikona, koji omogućava rešavanje problema noćnog izviđanja pomoću televizijske aparature. Taj se sastoji u prethodnom pojačanju bleska slike pomoću višestepenih elektronsko-optičkih pojačavača bleska [15]. Šema takve cevi sa jednim stepenom pojačanja bleska data je na sl. VIII.20, a njen spoljašnji izgled — na sl. VIII.21.

Slika posmatranog predmeta projektuje se pomoću objektiva na fotokatodu elektronsko-optičkog pretvarača, na čijem se ekranu dobija lik predmeta pojačanog bleska. U slučaju jednog stepena pojačanja, zračenje ekrana izaziva emisiju elektrona sa druge fotokatode, koja je postavljena na suprotnoj strani sloja ekrana i predstavlja početak ulaznog dela običnog superortikona. Pri korišćenju dvostepenog pojačavača vrši se dvostruko pojačanje bleska pomoću prvog i drugog luminiscentnog ekrana.

Osetljivost ovakvih cevi zavisi od pojačanja bleska u elektronsko-optičkim pretvaračima. Kod uskladenih spektralnih karakteristika zračenja ekrana i osetljivosti prelaznih fotokatoda,



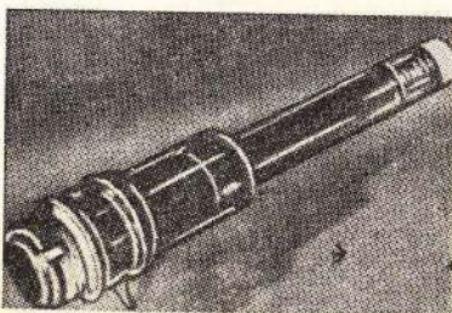
Sl. VIII.20 — Šema superortikona sa jednim stepenom pojačanja bleska:
1 — prva fotokatoda; 2 — obrazovanje elektronske slike; 3 — aluminijumski sloj; 4 — ekran sa luminiscentnom sumpstancom; 5 — tanka liskunska membrana; 6 — druga fotokatoda; 7 — ponovno obrazovanje elektronske slike; 8 — ekran-klopka; 9 — tanak stakleni zastor; 10 — elektronski mlas; 11 — elektronski top; 12 — elektronski pojačavač; 13 — izlaz videosignal-a

jedan stepen pojačanja obezbeđuje strujno pojačanje 10 do 20 puta, pri ubrzavajućem naponu od kV. Sa dva stepena pojačanja može se dobiti pojačanje od 300 puta.

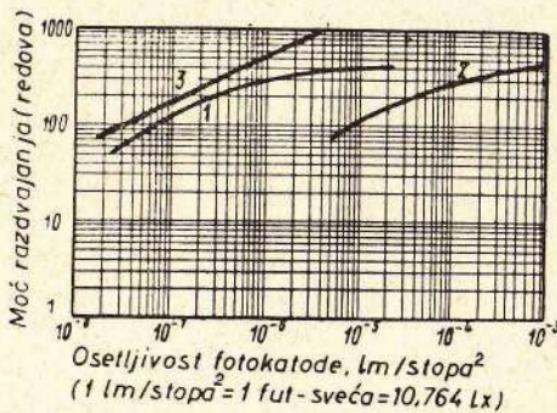
Broj stepenova pojačanja bleska ograničen je opadanjem moći razdvajanja uređaja (naročito na krajevima vidnog polja), prouzrokovanim aberacijama elektronsko-optičkog sistema i

rasipanjem svetlosti na slojevima između ekrana i prelaznih fotokatoda, kao i na zrnastoj strukturi ekrana. Pri optimalnom izboru debljine sloja i zrnaste strukture ekrana postiže se sa jednim stepenom pojačanja razdvajanje u centru vidnog polja do 600—650 linija, a sa dva stepena — 450 linija. Eksperimentalni primerak cevi sa dva stepena pojačanja bleska omogućio je dobijanje slike sa jasnoćom većom od 100 linija, pri osvetljenosti na fotokatodi od 10^{-6} lx .

Na sl. VIII.22 prikazana je zavisnost moći razdvajanja od osvetljenosti na fotokatodi za studijski superortikon 1 i superortikona sa jednim stepenom pojačanja bleska 2. Na istom dijagramu date su na krivoj 3 vrednosti moći razdvajanja koje



Sl. VIII.21 — Superortikon sa jednim stepenom pojačanja bleska



Sl. VIII. 22 — Zavisnost moći razdvajanja predajnih cevi od osvetljenosti na fotokatodi

je Morton teoretski proračunao za slučaj idealnog uređaja, u kome bi postojale samo fluktuacije fotostruje i čija osetljivost

ne bi bila ograničena šumovima elektronskog mlaza, već šumovima fotostruje.

Opisani radovi iz razvoja visokoosetljivih predajnih televizijskih cevi omogućili su konstruisanje uređaja za izviđanje u noćnim uslovima bez mesečine (takozvanog „mačjeg oka“) [26, 27, 28], u kome je kao osjetljivi elemenat usvojen superortikon sa jednim stepenom pojačanja bleska. Napominje se da je osjetljivost uređaja „mačje oko“ 1.000 puta veća od osjetljivosti običnih televizijskih kamera sa superortikonom.

6. UREĐAJI ZA SNIMANJE TOPLOTNE KARTE ZEMLJIŠTA

Metode posmatranja opisane u prethodnim poglavljima koriste, po pravilu, srazmerno kratkotalasno infracrveno zračenje. Izuzetak predstavlja evaporografska metoda, kod koje u obrazovanju slike učestvuje, praktično, celokupno zračenje zagrejanog tela.

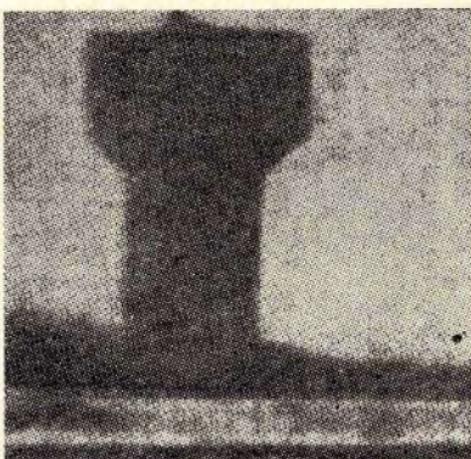
U termografiji, na kojoj se zasnivaju aparature za snimanje toplotne karte zemljišta, vrši se registracija celog spektra zračenja, čije je područje ograničeno samo propustljivošću atmosfere i elemenata optike uređaja za registraciju. Međutim, korišćenje dugotalasnog zračenja u termografiji jednovremeno je i nedostatak te metode, pošto je to zračenje uvek praćeno ometanjem od rasutog zračenja okolnih tela, samog prijemnika itd. Zbog ovoga se u termografiji, kao i kod evaporografije, uvek registruje razlika temperatura (topljni kontrast) između posmatranog predmeta i tela koja ga okružuju (pozadine), kao i između pojedinih delova površine posmatranog predmeta.

Uređaji za posmatranje, po termografskoj metodi, u opštem slučaju sadrže: prijemnik (termoelemenat, bolometar ili neki drugi detektor) smešten u žihu objektiva ili sfernog ogledala sa malim vidnim uglom, deo za skandiranje za posmatranje prostora elemenat po elemenat, uređaj za registrovanje koji beleži intenzitet zračenja svakog elementa posmatranog prostora, kao i etalonski izvor zračenja za upoređivanje intenziteta zračenja pojedinih detalja pejzaža i uređaj za kompenzaciju parazitnog zračenja pozadine.

Kao primeri ovakvih sistema mogu se navesti Bejljev fotografski teleskop [29] i uređaj za toplotno izviđanje zemljišta [30].

Bejlijev fotografski teleskop jeste sistem sa objektivom prečnika 30 cm, u čijoj je žiči postavljen termostub sa malom vremenskom konstantom. Termostub je priključen u poziciju sa kompenzacionim termoelementom, koji ima sa njim jednaku osetljivost, ali veću vremensku inerciju. Dobijeni diferencijalni signal dovodi se na ulaz visokoosetljivog galvanometra. Na taj način, galvanometar reaguje na razliku termostruja registracionog termostuba i termoelementa, ozračenih ukupnim zračenjem pejzaža. Skaniranje posmatranog prostora je u redovima i ostvaruje se laganim zaokretanjem teleskopa u horizontalnoj ravni i brzim, skokovitim zaokretanjima u vertikalnoj ravni oko horizontalne ose. Skretanje ogledala galvanometra je u svakom trenutku proporcionalno višku temperature posmatranog predmeta iznad srednje temperature pozadine. Svetlosni zrak iz posebnog izvora odbija se od ogledala galvanometra kroz specijalnu trougaonu dijafragmu na fotoploču na takav način da su njegov intenzitet, a odatle i gustina zacrnjenja fotografске emulzije srazmerni sa uglom skretanja galvanometra. Kretanje tog registracionog zraka po fotografskoj ploči sinhronizovano je sa sistemom za skaniranje.

Vreme ekspozicije sa Bejlijevim uređajem je prilično dugo, pošto se sva posmatrana slika prelazi redom sa jednim osetljivim elementom. Tako je, ako je vremenska konstanta registracionog termostuba 0,1 s, moguće fotografisati samo 10 tačaka u sekundi, dok je za dobijanje potpune slike potrebno, u zavisnosti od njenih dimenzija, vreme od 10 do 35 minuta. Međutim to se vreme može, u principu, skratiti povećanjem broja prijemnih elemenata ili izradom mozaika od termoelementa.

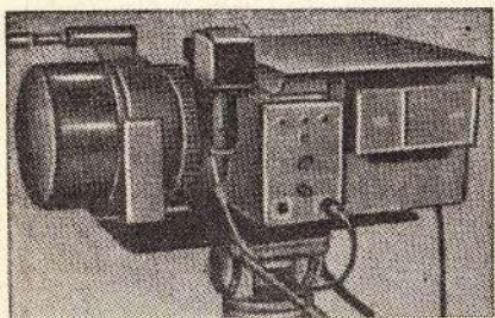


Sl. VIII.23 — Toplotna fotografija tornja za vodu

Na sl. VIII.23 prikazana je fotografija tornja za vodu, snimljena na račun njegovog sopstvenog zračenja sa rastojanja od 1 km. Vreme ekspozicije bilo je 10 minuta.

Uredaj za fotografisanje objekata u dugotalasnem području infracrvenog spektra (sl. VIII.24a) jeste, kao i u prvom slučaju, uređaj koji omogućava dobijanje slike na osnovu međusobne razlike u temperaturi pojedinih elemenata objekata i u odnosu na pozadinu. Za razliku od Bejljevog teleskopa, ovaj uređaj omogućava dobijanje slike površinske raspodele temperature preko upoređivanja upadnog zračenja sa zračenjem etalonskog crnog tela.

Uredaj (sl. VIII.24b) je ukupno težak oko 45 kg i sastoји se

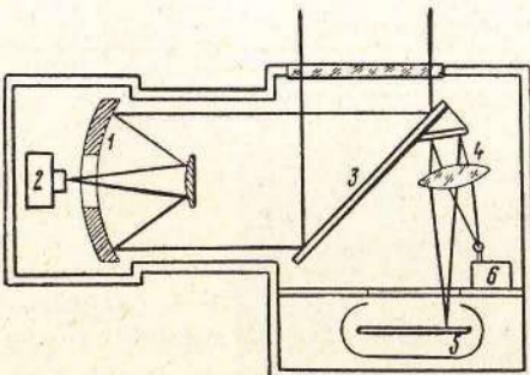


Sl. VIII.24a — Spoljašnji izgled uređaja za fotografisanje u dugotalasnem području infracrvenog spektra „optiterm“

od objektiva 1 sastavljenog od ogledala i sočiva, bolometra postavljenog u žižnoj ravni objektiva i montiranog u sklopu sa pojačavačem 2, skanirajućeg ogledala 3, sinhronizovanog sa sistemom za zapisivanje 4 na fotografsku traku 5, i uređaja koji reguliše intenzitet svetlosnog zraka za zapisivanje 6, u zavisnosti od energije zračenja koja pada na bolometar.

Osetljivi elemenat poluprovodničkog bolometra, koji je postavljen u žižnoj ravni kombinovanog objektiva, pokriven je filtrom od KRS-5. Lik posmatranog predmeta projektuje se na objektiv elemenat po elemenat pomoću skanirajućeg ogledala, postavljenog pod uglom od 45° prema osi objektiva. Slika se formira po televizijskom principu — po redovima grupisanim u pravougaoni kadar. Vreme skaniranja potrebno za svaki kadar određeno je osetljivošću i vremenskom inercijom bolometra, kao i zahtevima u pogledu razlikovanja detalja, i može se menjati u granicama od 2 do 15 minuta pri vremenskoj konstanti bolometra od 0,001 s. Trenutno vidno polje sistema „objektiv — osetljivi

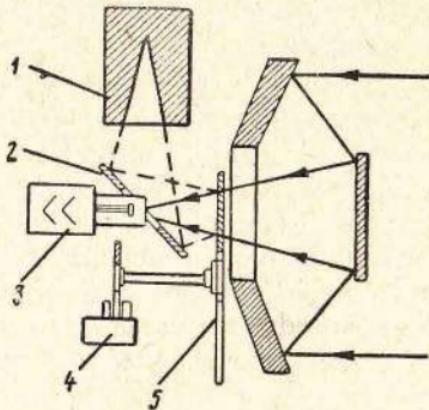
elemenat“, koje određuje moć razdvajanja uređaja, manje je od 30 ugaonih minuta. Vidno polje celog sistema je 10^0 u vertikalnom i 20^0 u horizontalnom smeru. Osetljivost uređaja omogućava



Sl. VIII.24b — Šema uređaja za fotografisanje u dugotalasnom području infracrvenog spektra „optiterm“

registrovanje razlike u zračenju susednih delova objekta koji se fotografiše, ako im se temperature razlikuju za $0,02^0\text{C}$. Sa tom osetljivošću može se pomoći uređaja meriti temperatura objekta koji se fotografiše u granicama od -170 do -300^0C .

Promena struje bolometra se posle pojačanja koristi za amplitudnu modulaciju zračenja neonske cevi sa katodnim pražnjenjem. Svetlosni fluks cevi sa katodnim pražnjenjem se vodi po običnoj fotoploči pomoći drugog ogledala, sinhrono povezanog sa skanirajućim ogledalom. Na putu prostiranja svetlosnog fluksa postavljeno je kolimatorsko sočivo, koje na fotoploči formira tačkasti lik neonske cevi.



Sl. VIII.24c — Šema glave „optiterm“:

1 — etalonsko crno telo; 2 — skretno ogledalo; 3 — bolometar sa pojačavačem; 4 — sinhronizator; 5 — modulator

Bolometarski prijemnik je zajedno sa objektivom, modulatom i crnim telom smešten u masivnom izolacionom kućištu, za sprečavanje uticaja promena okolne temperature na kvalitet slike.

Pomoću specijalnog diska podeljenog na sektore (modulatora), koji se okreće motorom, osetljivi elemenat bolometra se naizmenično podvrgava ozračivanju od strane objekta koji se fotografiše i

crnog tela (sl. VIII.24c). Neprovidni sektor modulatora, koji ne propuštaju direktno zračenje objekta na bolometar, imaju u tom cilju sa zadnje strane (okrenute ka bolometru) površinu sa osobinama ogledala. U trenutku kada se ulaz bolometra prekrije neoprovidnim sektorom modulatora zračenje crnog tela, posredstvom ogledala postavljenog pod uglom od 45° prema optičkim osama



Sl. VIII.25 — Slika dobijena u potpunom mraku pomoću glave „optiterm“

uredaja i crnog tela, dospeva preko zadnje površine sektora na bolometar.

Drugi disk, postavljen na istu osovinu sa prvim, moduliše zračenje jedne sijalice, koja osvetljava fototranzistor namenjen generisanju sinhronizacionih signala. Upoređivanje (korišćenjem faznog razdvajanja pomoću sinhronizacionog signala) amplituda signala sa bolometra za vreme njegovog ozračivanja crnim telom i za vreme ozračivanja zračenjem predmeta koji se fotografiše, pruža mogućnost za određivanje odnosa temperatura fotografisanog predmeta i etalonskog crnog tela. Na sl. VIII.25 prikazana je fotografija čoveka koja je dobijena pomoću uređaja „optiterm“.

7. POSMATRANJE IZ KOSMIČKOG PROSTORA

Uspešno ostvarenje lansiranja veštačkih zemljinih satelita sposobnih da provedu duže vreme u kosmičkom prostoru oko

T a b l i c a VIII.3

Glavne karakteristike radiometrijske glave „optiterm“

Naziv karakteristika	Varijanta bolometra		
	I	II	III
Dimenziije prijemnika, mm	$0,3 \times 0,3$	$1,0 \times 1,0$	$2,5 \times 2,5$
Trenutno vidno polje, stepeni	1×1	$0,2 \times 0,2$	$0,5 \times 0,5$
Vremenska konstanta, s	0,016	0,016	0,016
Osetljivost, W/cm^2	$2 \cdot 10^{-11}$	$6,7 \cdot 10^{-11}$	$1'7 \cdot 10^{-10}$
Ekvivalentan temperaturni šum, °C	0,1	0,03	0,01

Zemlje, kao i uspesi u oblasti radio-elektronike stvorili su mogućnosti za posmatranje (izviđanje) objekata na Zemlji iz kosmičkog prostora.

Napominje se da se takvo izviđanje, u slučaju lansiranja satelita u polarnu orbitu, može vršiti radi prikupljanja informacija o vojnim objektima i podataka o oblačnosti zemljine atmosfere, potrebnih za tačnu prognozu vremena u bilo kom delu zemljine lopte.

U izveštaju Laboratorije za interplanetarno izviđanje, koji je pod nazivom „Osnovna razmatranja u odnosu na vršenje izviđanja sa satelita“ objavljen u SAD [31, 32, 33], razmatraju se fizičke mogućnosti i ograničenja takve aparature. Među velikim brojem fizičkih i konstrukcijskih pitanja autori izveštaja izdvajaju tri osnovna problema, čije je poznavanje neophodno za konstruisanje stvarno efikasnih sredstava za izviđanje. Tu spadaju: specifičnosti zračenja zemljine površine, prostiranje fluksa zračenja na velika rastojanja kroz atmosferu i moć razdvajanja aparature.

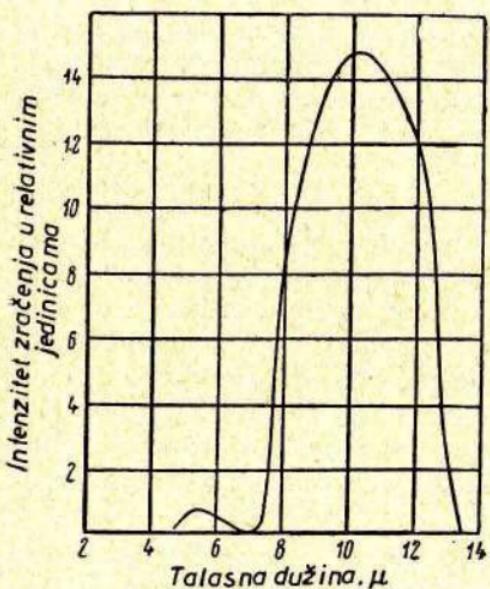
Kao izvor fluksa zračenja, Zemlja se u kosmičkom prostoru može posmatrati kao telo u čijem se zračenju nailazi na tri komponente: odbijeno sunčev zračenje, sopstveno niskotemperaturno zračenje i zračenje veštačkih izvora, stvorenih delatnošću čoveka.

Sunčev zračenje odbijeno od zemljine površine ima maksimum spektralne gustine zračenja u vidljivom delu spektra. Ono je određeno kako ozračenošću zemljine površine, tako i

njenom sposobnošću refleksije (albedo). Ozračenost zemljine površine zavisi od visine sunca, geografske širine, doba dana i godine, kao i stanja u atmosferi.

Izvan atmosfere ozračenost od zračenja sunca iznosi $1,94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}$, što u fotometrijskim jedinicama odgovara osvetljenosti od 13.600 fut-sveća ($1 \text{ fut-sveća} = 1 \frac{\text{lumen}}{\text{stopa}^2} = 10,764 \text{ lx} \approx 10,764 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$).

Zbog gubitaka u atmosferi, osvetljenost zemljine površine može u podne, kad je vedar dan, da dostigne maksimalnu vrednost od 10.000 fut-sveća, pri čemu 80% osvetljenosti potiče od direktnih sunčevih zrakova a 20% — od svetlosti dobijene rasipanjem zračenja u atmosferi. Vrednost srednjeg albeda zemljine površine i atmosfere kreće se u granicama $0,32 - 0,52$, zavisno od stanja oblačnosti, raznolikosti prirodnih oblika, upadnog ugla fluksa zračenja i njegovog spektralnog sastava. Za srednju vrednost albeda Zemlje usvojena je vrednost 0,45.



Sl. VIII.26 — Zračenje Zemlje koje izlazi van granica atmosfere (po Faulu)

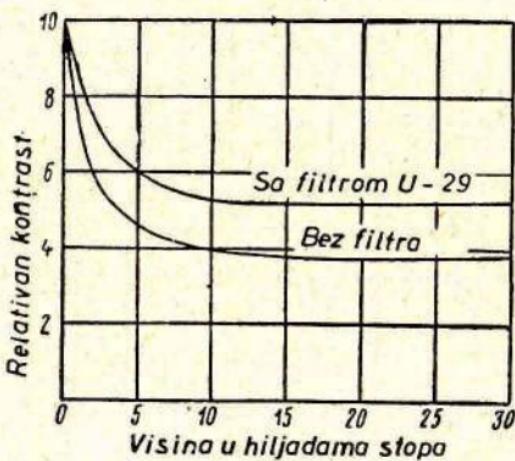
Vrlo dobro reflektuju fluks zračenja oblaci, voda i sneg. Dok odbijanje od oblaka zavisi od njihove debljine i sadržaja vode, ostajući nepromenjeno sve do 3μ , dotele zelenilo, koje ima malu refleksiju u vidljivom delu spektra, naglo povećava svoj albedo

u infracrvenom delu spektra. Reflektujuća moć glatke vodenе površine zavisi od visine Sunca ($Z\odot$) i pri upadnim uglovima

fluksa zračenja manjim od 40° odbijanja praktično nema (pri $Z\odot = 43^{\circ} - \rho = 0,02$, a pri $Z\odot = 85^{\circ} - \rho = 0,4$).

Niskotemperaturno zračenje Zemlje u kosmički prostor posledica je apsorpcije sunčeve energije. Ono ima neprekidan spektar u talasnom području od $4-40 \mu$, sa maksimumom u okolini 12μ . Međutim, zbog selektivne apsorpcije atmosfere izvan njenih granica izlazi zračenje u užem talasnom opsegu (sl. VIII.26). To se zračenje malo menja u toku dana i stvara ravnometnu pozadinu zračenja oko cele Zemlje. Bez obzira na to što je srednja temperatura Zemlje 287°K , temperatura njenog efektivnog zračenja iznosi 252°K zbog apsorpcije energije zračenja od vodene pare, ugljen-dioksida i ozona.

Treća komponenta — zračenje veštačkih izvora na Zemlji — razlikuje se od prve dve po svojoj temperaturi i po svojim razmerama. Ovi izvori imaju površinsku temperaturu koja ponekad znatno prevazilazi temperaturu zemljine površine i drukčiji



SL.VIII.27 — Smanjenje relativnog kontrasta sa visinom

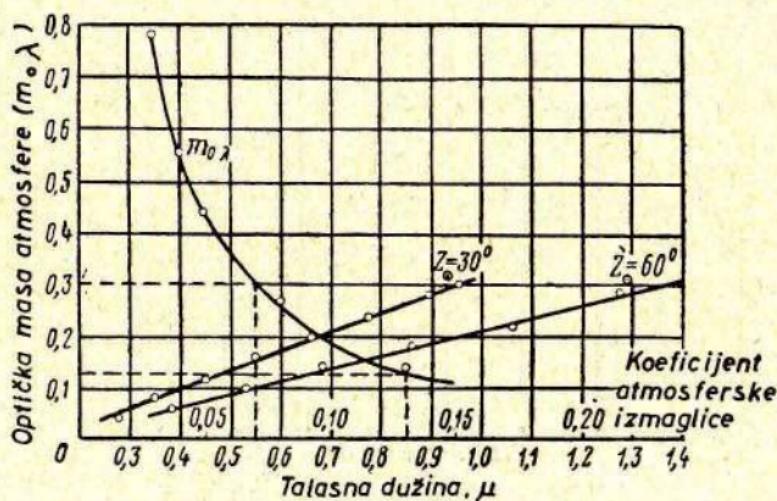
spektralni sastav zračenja, dok su po karakteru svoga rasporeda na zemljinoj površini lokalne prirode, što omogućava njihovo izdvajanje iz pozadine niskotemperaturnog zemljinog zračenja.

Pri posmatranju pojedinih delova zemljine površine sa vrlo velikih visina ozbiljan problem predstavlja smanjenje kontrasta

sa kojim se ovi delovi vide, zbog prisustva svetlosnog oreola oko Zemlje i rasipanja fluksa zračenja u atmosferi.

Statistika pokazuje [32] da je absolutni kontrast ogromne većine objekata na Zemlji vrlo mali. Tako je u vidljivoj svetlosti u 95% svih slučajeva kontrast manji od 0,2, a u 90% slučajeva — manji od 0,1. Pri posmatranju sa velikih visina kontrast koji se opaža još više se smanjuje. Na sl. VIII.27 prikazana je zavisnost relativnog (prividnog) kontrasta od visine posmatranja. Iz ove zavisnosti se vidi da se već pri posmatranju sa visine od oko 3.000 m relativan kontrast objekata smanjuje od 2 do 2,5 puta.

Dalje smanjenje kontrasta posmatranih objekata može da dovede do toga da se veličina signala koji proizvodi sistem za obrazovanje slike smanji toliko da može da se uporedi sa fluktuationim šumovima aparature za izviđanje. Danas se smatra da je moguće posmatranje objekata dovoljno velikih razmara, ako je njihov kontrast sa pozadinom koja ih okružuje veći od 0,02.



Sl. VIII.28 — Zavisnosti optičke mase atmosfere od talasne dužine i koeficijenta bleska atmosferske izmaglice od optičke mase (za razne visine Sunca $Z \odot$)

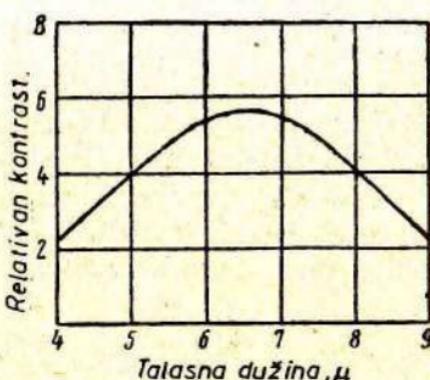
Smanjenje kontrasta između objekata ne samo da snižava energetske mogućnosti aparature za izviđanje već pogoršava i njenu moć razdvajanja.

Pošto je slabljenje kontrasta objekata na Zemljiji pri posmatranju sa velikih visina povezano sa stanjem atmosfere, pa prema tome i sa optičkom masom atmosfere, to treba očekivati poboljšanje uslova za posmatranje pri prelazu u talasno područje većih talasnih dužina, pošto se pri tome smanjuje ekvivalentna optička masa atmosfere, a kao posledica toga i koeficijenat bleska vazdušne izmaglice.

Na sl. VIII.28 date su zavisnosti optičke mase atmosfere od talasne dužine i koeficijenta bleska atmosferske izmaglice od vrednosti optičke mase atmosfere pri raznim visinama Sunca $Z \odot$. Kako se vidi sa tih krivih, optička masa atmosfere smanjuje se tri puta pri prelazu sa posmatranja u vidljivoj svetlosti na posmatranje u bližem talasnom području infracrvenog spektra.

Prilikom izviđanja u oblasti većih talasnih dužina infracrvenog spektra, veštački objekti sa toplotnim zračenjem biće posmatrani na pozadini niskotemperaturnog zračenja Zemlje. U ovom je slučaju izbor talasnog područja za registracioni uredaj određen propustljivošću atmosfere i kontrastom objekata u odnosu na niskotemperaturno zračenje Zemlje. Za većinu objekata kontrast sa pozadinom koja ih okružuje raste u području od $3 - 6,5 \mu$ (sl. VIII.29) na račun maksimuma njihove spektralne karakteristike i odsustva zračenja Zemlje u tom području spektra. U oblasti sa još većim talasnim dužinama ($6,5 - 12 \mu$) kontrast ponovo počinje da se smanjuje zbog naglog porasta sopstvenog zračenja Zemlje.

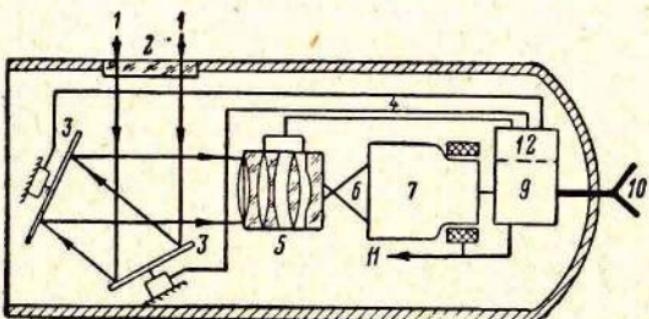
Registriranje ciljeva srazmerno malih dimenzija sa velikih rastojanja postavlja vrlo stroge zahteve pred sisteme za izviđanje, koji se postavljaju na veštačke zemljine satelite i druge kosmičke letelice. Zato se za izviđanje objekata malih dimenzija smatra



Sl. VIII.29 — Relativan kontrast objekata na zemljištu pri njihovom posmatranju u različitim delovima spektra

svršishodnim usvajanje osnovnog principa analognog fotografskom, sa predajom podataka preko radio-veze [34]. Osim toga, napominje se da u savremenoj tehnici najverovatniji uslovi za izviđanje sa vrlo velikih visina jesu osvetljenosti reda 86.000 lx, tj. „jako sunce“, pošto pri osvetljenostima reda 43.000 lx već nije sigurno da će se kontrasti u blesku objekata na zemljишtu raspoznavati i na njihovoј slici. U vezi s tim najverovatnije je da će se koristiti televizijski metodi sa prethodnim elektronskooptičkim pojačanjem svetlosti. To potvrđuje eksperimenat u kome su u toku dana fotografisani kroz zemljишnu atmosferu planeta Jupiter i njeni sateliti pomoću uređaja „mačje oko“ [35].

Pošto su prethodna ispitivanja, vršena pri lansiranjima raket „Viking“, omogućila da se pomoći kamere male žižne daljine dobiju snimci zemljine površine sa visine od 258 km,



Sl. VIII.30 — Blok-sema aparature obaveštajnog satelita Zemlje prema projektu WS-117

na kojima su se mogli razlikovati železnički čvorovi, piste za uzletanje i drugi detalji na zemljишtu, odlučeno je da se fotografски princip usvoji kao osnova za dobijanje slike i u sistemu WS-117.

Trebalo je da satelit „Samos“ bude lansiran u polarnu orbitu sa maksimalnim rastojanjem od Zemlje od 800 km. Pri tome je površina koja je posmatrana preko aparature na satelitu iznosila oko 500 km².

Uređaje za izviđanje sa veštačkih satelita počeli su u SAD da razvijaju još 1956. god. [34], i to u početku pod širinom „Veliki brat“, a kasnije pod novom šifrom WS-117.

1961. god. bio je lansiran u orbitu treći obaveštajni satelit „Samos“, opremljen specijalnom kombinovanom aparaturom za izviđanje, sa predajom podataka na Zemlju preko televizijskog kanala.

Na sl. VIII.30 prikazana je okvirna načelna šema sistema za izviđanje WS-117. Energija zračenja 1, odbijena od zemljine površine, prolazi kroz ulazni prozor 2 satelita i projektuje se na objektiv 5 pomoću dva ogledala 3, stabilisana u prostoru. Objektiv ima promenljivo žižno rastojanje za dobijanje slike posmatrane površine u manjoj i većoj razmeri. Kao osetljivi elemenat koristi se predajna televizijska cev povećane osetljivosti sa jednostepenim pojačavačem bleska 6. Dobijeni videosignal se pomoću širokopojasnog pojačavača 9 i antene 10 predaje na zemaljske prijemne stanice, gde se vrši vizuelni ili fotografski prijem dobijenih slika.

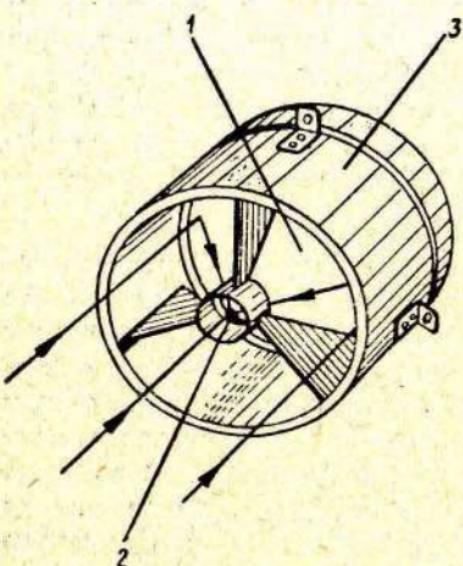
Problem neprekidne orientacije satelita, sa ciljem da optički sistem bude stalno okrenut prema onom delu zemljine površine koji se snima, odnosno da upadni ugao fluksa zračenja u objektiv bude konstantan, rešen je primenom stabilizacionog mehanizma razvijenog još 1953. god. Ovaj mehanizam, koji se sastoji iz dva ravna ogledala i objektiva pričvršćenih za kardanske prstenove žiroskopa za stabilizaciju, dopušta međusobno pomeranje tri elementa po komandama sa zemaljskih stanica. Za ovo postoji prijemnik 12, koji daje signale za upravljanje stabilizacionim mehanizmom i objektivom pri promeni razmere snimanja (kolo 4). Preko istog kola dovode se komande sa glavne žiroskopske platforme, koja stabišće let satelita. Uredaji se napajaju preko dovoda 11 iz izvora elektroenergije koji je zajednički za ceo satelit.

Drugi pravac u razvoju sistema za izviđanje koji je danas našao praktičnu primenu, usmeren je na konstruisanje infracrvenih uređaja sa dugotalsnim prijemnicima za dobijanje informacija o formiranju oblačnosti na površini zemljine lopte.

1958. god. u SAD je bio lansiran drugi veštački satelit po projektu „Avangard“, na kome je bio montiran infracrveni uređaj za izviđanje nazvan „atmosfersko oko“. Namena ovog uređaja jeste prikupljanje i predaja, na prijemne stanice, podataka o

formiraju i gustini oblačnosti u raznim delovima zemljine površine, što je potrebno za sastavljanje tačnih vremenskih prognoza (38, 39).

Uredaj se sastoji od dva teleskopska sistema sa reflektujućom optikom, postavljanja na spoljnoj površini sfernog veštačkog satelita pod uglom od 45° jedan prema drugom, sistema za zapisivanje dobijenih signala na magnetnu traku i telemetarskog uređaja za predaju podataka sa magnetne trake na zemlju.



Sl. VIII.31 — Prijemni uređaj za registrovanje oblačnosti sa veštačkih satelita:

1 — parabolično ogledalo; 2 — prijemnik;
3 — kućište

istom telu sa fotoootpornikom. Težina prijemnog uređaja je 100 gr.

Pri kretanju satelita po kružnoj orbiti, na visini od 560 km, optički sistem svakog prijemnika posmatra površinu 11×11 km, direktno ispod sebe i 90×90 km, na krajevima zemljinog diska. Brzina okretanja satelita oko svoje vertikalne ose iznosi 1 obrt/s. Diferencijalni signal sa dva fotoootpornika, modulisan sa učestanostu od 290 Hz, zapisuje se posle pojačanja na magnetnu traku,

Parabolično ogledalo i nehladeni olovo-sulfidni fotoootpornik učvršćeni su u cilindru prečnika 7,5 cm (sl. VIII.31), od čelika koji ne rđa, debljine 0,25 mm, čija je spoljna površina pozlaćena radi smanjenja dejstva okolnih zračenja.

Svetlosna moć optičkog sistema koji obezbeđuje skaniranje po površini oblaka je vrlo velika — 1 : 0,7. Olovo-sulfidni fotoootpornik, postavljen u žizi ogledala, ima radnu površinu od 1 mm^2 . Radna površina fotoootpornika pokrivena je infracrvenim filtrom, koji odseca vidljivo zračenje.

Fotoootpornik se napaja iz silicijumskih sunčanih baterija, koje su montirane u

Težina prijemnog uređaja je

odakle se kroz određeno vreme očitava i preko telemetarske veze predaje na prijemnu stanicu.

Opisani uređaj u ovakvom obliku teško bi se mogao iskoristiti za izviđanje objekata sa topotnim zračenjem malih dimenzija, pošto je njegova moć razdvajanja vrlo mala. Međutim, nesumnjivo je da će se daljim razvitkom, naročito u pogledu moći razdvajanja, slični uređaji sa fotootpornicima moći da koriste za posmatranje pojedinih krupnijih objekata, čija se površinska temperatura razlikuje od temperature njihove pozadine.

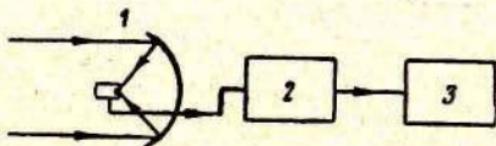


G l a v a IX

SISTEMI ZA TOPLOTNU LOKACIJU*)

1. PRINCIP RADA I KONSTRUKCIJA TOPLOTNIH LOKATORA

Pod topotnim lokatorom podrazumeva se optičko-elektronomehanički uređaj namenjen za određivanje ugaonih koordinata zemaljskih (morskih) i vazdušnih ciljeva, po njihovom sopstvenom topotnom zračenju.



Sl. IX.1 — Principijelna šema najjednostavnijeg topotnog lokatora

Principijelna šema takvog uređaja (sl. IX.1) sadrži, u najprostijem slučaju, prijemni deo 1 sa osetljivim elementom i pojačavačem, sinhronizator 2 i indikatorski deo 3.

Topotno zračenje cilja prima se pomoću optičkog sistema i usmerava na osetljivi elemenat, a sinhronizacioni deo omogućava da se na osnovu signala dobijenih iz pojačavača fotostruje odredi ugaoni položaj cilja u odnosu na optičku osu prijemnog uređaja.

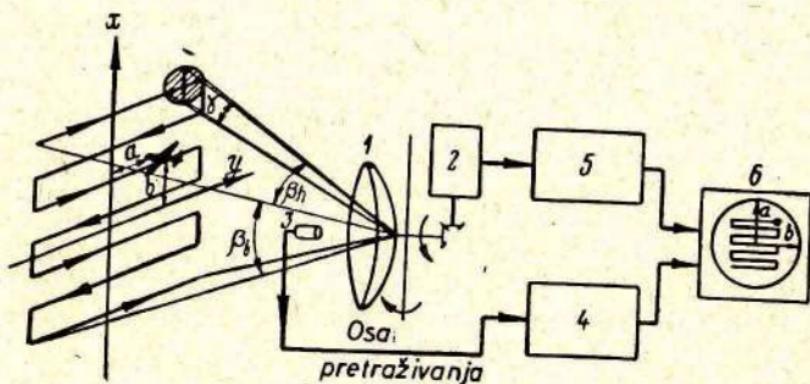
*) U originalu: „Теплопеленгационные системы“ — sistemi za topotnu pelengaciju, koja predstavlja vrstu lokacije kod koje se određuju samo ugaone koordinate. Ovakav termin, međutim, nije kod nas uobičajen.
— Prim. red.

Položaj cilja može se vizuelno posmatrati u obliku svetle tačke na pokazivaču ili fiksirati u obliku električnih signala, proporcionalnih njegovim koordinatama.

Uredaji za topotnu lokaciju mogu se podeliti na dve velike grupe: osmatračke sisteme i osmatračke prateće, ili samo prateće sisteme. Ovi poslednji široko se primenjuju u sistemima za samovođenje i biće posebno razmotreni u glavi X.

Osmatrački topotni lokatori rešavaju uži krug zadataka i predviđeni su za traženje, otkrivanje i određivanje ugaonog položaja cilja. Osmatrački topotni lokatori široko se koriste za otkrivanje ciljeva sa topotnim zračenjem, u stanicama za upravljanje vatrom i u aparaturama za topotno izviđanje zemljišta.

Strukturalna šema osmatračkog topotnog lokatora (sl. IX.2) sadrži, u opštem slučaju, sledeće glavne elemente: prijemni optički sistem 1, koji hvata topotno zračenje cilja i usmerava ga



Sl.IX.2 — Strukturalna šema osmatračkog topotnog lokatora

na osetljivi elemenat; sistem za pretraživanje 2, koji obezbeđuje pretraživačko kretanje prijemnog sistema po zadatom zakonu; osetljivi elemenat 3, koji topotno zračenje cilja pretvara u električni signal; pojačavač fotostruja (ili napona) 4; sistem za skicanje i sinhronizaciju 5, u kome se stvara vremenska baza za ekran pokazivača, koja reproducuje način kretanja optičke ose prijemnog sistema pri pretraživanju prostora; indikatorski uređaj 6, koji omogućava vizuelnu ocenu položaja cilja u odnosu na bilo koju osu.

Sistem za pretraživanje jeste neophodan deo svakog toplotnog lokatora, pa stoga izbor kinematike kretanja prijemnog sistema, polazeći od zahteva da se obezbede najbolji uslovi pretraživanja prostora i najveća verovatnoća i brzina otkrivanja cilja, predstavlja vrlo važan zadatak.

Način pretraživanja prostora koji se danas najviše koristi je pretraživanje sa uzanim, ili kako se ponekad kaže, iglastim snopom [1]. U ovom slučaju uzani snop, određen vidnim poljem sistema „optika — osetljivi elemenat“ (ugao γ na sl. IX.2), pretražuje po zadatom zakonu kretanja prostor u određenom prostornom uglu — uglu pretraživanja (β_v , β_H). Vreme za koje se izvrši pretraživanje tog ugla naziva se periodom pretraživanja toplotnog lokatora.

Pretraživanje prostora iglastim snopom omogućava:

jednovremeno i jednoznačno određivanje obe ugaone koordinate cilja (a i b na sl. IX.2);

povećanje stabilnosti sistema u odnosu na smetnje zbog smanjenja uticaja šuma pri malom vidnom uglu;

povećanje radiusa dejstva toplotnog lokatora;

racionalnu modulaciju toplotnog zračenja koje dolazi od cilja.

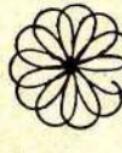
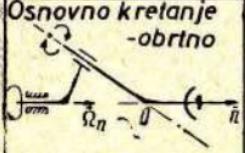
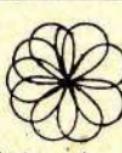
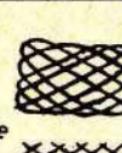
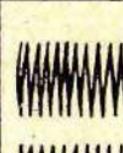
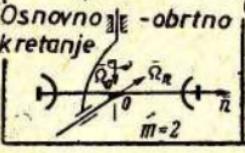
Sa gledišta taktičke primene, svaki toplotni lokator treba da obezbedi najveću verovatnoću otkrivanja cilja, odnosno treba da ima malu periodu pretraživanja. Pokazivanje cilja na ekranu treba da obezbedi određivanje položaja cilja i njegovu promenu u prostoru.

Ispunjavanje ovih zahteva uslovljeno je, u izvesnoj meri, zakonom kretanja iglastog snopa u prostoru. U tom smislu mogu se izdvojiti dve grupe sistema pretraživanja — sa osnom i ravnom simetrijom. U prvom slučaju oblast pretraživanja je ograničena konusnom površinom (normalan presek — krug), a u drugom — dvogramim rogljem i sa dve konusne površine (normalan presek blizak pravougaoniku ili zaobljenom pravougaoniku).

Ako se ugaono kretanje snopa za pretraživanje u prostoru razdvoji na osnovno i povratno, tada se, u zavisnosti od veličine odnosa perioda osnovnog i povratnog kretanja, u obe grupe mogu razlikovati pretraživanja sa direktnim i inverznim ponavljanjem

i pretraživanja bez ponavljanja. Osim toga, svaki od ovih oblika pretraživanja može se dalje podeliti na dve varijante — normalnu i sa proredom. Ova druga se koristi radi smanjivanja periode pretraživanja, mada se pri tome povećava broj neobuhvaćenih elemenata prostora.

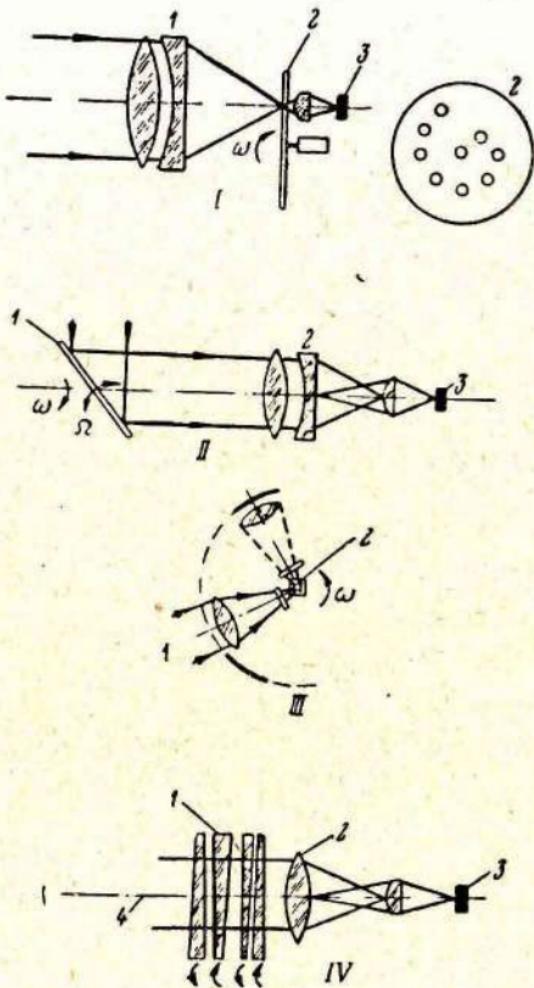
Na sl. IX.3 dati su oblici trajektorija snopa za razne kinematičke šeme pretraživanja.

Kinematska Šema	Pretraživanja sa direktnim ponavljanjem	Pretraživanja bez ponavljanja	Pretraživanja sa inverznim ponavljanjem
Pretraživanja sa osnom simetrijom			
Osnovno kretanje - oscilatorno 	 Spiralni	 Radijalno-kružni	
Osnovno kretanje - obrtno 	 Spiralni	 Obrtno-konusni	 Obrtno-konusni
Pretraživanja sa ravnom simetrijom			
Osnovno - oscilatorno 	 Cik-cak kretanje	 Zavojni	 Zavojni
Osnovno - obrtno 			

Sl. IX.3 — Oblici trajektorije snopa za različite načine pretraživanja

Pretraživanja sa ponavljanjem imaju prednosti nad onima bez ponavljanja. Ona, naime, imaju manju periodu pretraživanja i bolju dinamičku karakteristiku, tj. omogućavaju jednostavniju kompenzaciju inercijalnih naprezanja (naročito pretraživanja sa inverznim ponavljanjem).

Sistemi za pretraživanje mogu se konstrukcijski izvesti na razne načine. Na sl. IX.4 prikazani su neki oblici sistema za pretraživanje [2].



Sl. IX.4 — Optički sistemi za pretraživanje:

I — sistem sa Nipkovljevim diskom: 1 — prijemna optika, 2 — Nipkovljev disk, 3 — prijemnik; II — sistem sa ravnim prijemnim ogledalom: 1 — ogledalo za pretraživanje, 2 — objektiv, 3 — prijemnik; III — sistem sa obrtnim objektivima: 1 — prijemna optika, 2 — prijemnik; IV — sistem sa obrtnim optičkim klinovima: 1 — obrtni optički klinovi, 2 — objektiv, 3 — prijemnik, 4 — osa pretraživanja

U sistemu za pretraživanje sa Nipkovljevim diskom I, ovaj disk se postavlja u neposrednoj blizini fotoosetljivog sloja. Pri njegovom okretanju fluks zračenja pada na fotoosetljivi sloj kroz otvore raspoređene u spirali. Ugao pretraživanja je kod ovakvog sistema određen karakteristikama objektiva i dimenzijama fotoosetljivog sloja, koje u ovom slučaju treba da budu dovoljno velike, a ugaona veličina iglastog snopa (trenutni vidni ugao) — objektivom i prečnikom otvora u disku.

Kod kombinovanih sistema sa ogledalima i sočivima II pretraživačko kretanje ostvaruje se u dve ravni sa ravnim ogledalom. Kao rezultat takvog kretanja dobija se pretraživanje prostora uzanim snopom, čija je ugaona veličina određena karakteristikama optike i dimenzijama fotoosetljivog sloja. Ugao pretraživanja određen je, u ovom slučaju, veličinom ugaonog pomeranja ravnog ogledala.

Skaniranje u redovima III može se ostvariti okretanjem nekoliko objektiva, postavljenih u spiralu na cilindričnoj površini u čijem se centru nalazi fotoosetljivi sloj. Trenutni vidni ugao određen je u ovom sistemu karakteristikama objektiva i dimenzijama fotoosetljivog sloja, a ugao pretraživanja — uglovima nagiba objektiva prema cilindričnoj površini na kojoj su postavljeni.

Osobina optičkih klinova da fluks zračenja koji prolazi kroz njih prelamaju prema svojoj osnovi može se, takođe, iskoristiti za ostvarivanje pretraživačkog kretanja. Takav sistem IV ima dva para optičkih klinova, koji su postavljeni ispred objektiva i podešeni tako da se klinovi u oba para okreću u suprotnim smjerovima. Pri ovom okretanju menja se efektivni ugao prelamanja, određen nagibom bočnih strana klina i time ostvaruje kretanje iglastog snopa po uglu pretraživanja. Veličina ugla pretraživanja određena je osobinama materijala od koga su izrađeni klinovi i uglom pri njihovom vrhu, a ugaone dimenzije snopa za pretraživanje — objektivom i dimenzijama fotoosetljivog sloja.

Izbor načina pretraživanja i njegovo konstrukcijsko izvođenje određeni su namenom sistema za toplotnu lokaciju, i taktičko-tehničkim zahtevima. Kao primer rada prijemnog optičkog sistema, sa pretraživanjem pomoću iglastog snopa, razmotrićemo rad prijemnog uređaja sistema za snimanje toplotne karte zemljišta [2]. Ovaj sistem se postavlja na avionu i treba da omogući

dobijanje toplotne karte zemljišta iznad koga leti avion na ekranu pokazivača.

Avion leti na visini H , putnom brzinom v . Pretraživački deo aparature ima iglasti snop, sa vidnim uglom γ od nekoliko ugaonih minuta. Pretraživanje se u sistemu ostvaruje okretanjem prijemnog optičkog elementa za ugao 2β , oko ose paralelne uzdužnoj osi aviona. Na taj način, zaokretanjem prijemnog elementa za ugao 2β pretražuje se prostor po pravim linijama. U zavisnosti od brzina leta aviona i okretanja prijemnog elementa, linije pretraživanja povučene na zemljištu mogu se dobiti sa proredom ili sa međusobnim prekrivanjem. Kao prijemni elemenat u delu za pretraživanje, kod ovog uređaja ušvojena je prizma sa n refleksionih površina, koja se okreće brzinom r . Na taj način, jednom obrtaju prizme odgovara povlačenje n linija na zemljištu.

Da bi aparatura dobro radila potrebni su sledeći uslovi:

a) Da bi se obezbedila dobra moć razdvajanja ugao γ treba da bude vrlo mali, a brzina pretraživanja maksimalna. Ovaj drugi uslov ograničen je, međutim, vremenskom konstantom osetljivog elementa τ .

b) Vreme smenjivanja elemenata slike zemljišta na osetljivom elementu ne sme biti manje od $k\tau$, gde je k pozitivan broj koji označava rezervu u vremenskoj inerciji osetljivog elementa. Broj elemenata koji se mogu razdvojiti u jedinici vremena određen je izrazom $2\pi r/\gamma$, pa je, prema tome, vreme pomeranja slike za ugaonu veličinu koja odgovara vidnom uglu jednakso sa $\gamma/2\pi r$. Potrebno je, dakle, da bude zadovoljena nejednačina

$$k\tau \leqslant \frac{\gamma}{2\pi r}. \quad (\text{IX. } 1)$$

Osmatrački uređaj treba da radi takvom brzinom da na slici zemljišta ne bude proreda. Širina zahvata ovog dela u pravcu leta iznosi za jednu liniju γH , a širina pojasa zahvaćenog zemljišta u jedinici vremena je γHnr . Da ne bi bilo proreda, treba da je $\gamma Hnr \geq v$. Iz tog odnosa i iz izraza (IX.1), sledi da je

$$r \geq \frac{\alpha}{2\pi k\tau} \quad \text{i} \quad r \geq \frac{v}{Hn\gamma}. \quad (\text{IX. } 2)$$

Eliminišući r i γ iz izraza (IX.2) dobija se respektivno:

$$\gamma \geq \sqrt{\frac{2\pi k}{n} \frac{v}{H} \tau}, \quad (\text{IX. } 3)$$

$$r \geq \sqrt{\frac{1}{2\pi kn} \frac{v}{H} \frac{1}{\tau}}. \quad (\text{IX. } 4)$$

Na taj način, potreban trenutni vidni ugao aparature za snimanje toplotne karte zemljišta određen je odnosom v/H i vremenskom konstantom fotoosetljivog sloja $k\tau$.

Vrednosti veličina v i H , koje ulaze u izraze (IX.3) i (IX.4), određene su taktičkom namenom aparature, a $n = 360/2\beta$.

Na primer, za slučaj $H = 300$ m, $v = 300$ m/s, $k = 2$, $n = 2$, $\tau = 10^{-5}$ s, dobija se $r = 360$ stepeni/s i $\gamma \approx 0,5^\circ \approx 10$ mrad.

Ovakav vidni ugao ne može, prirodno, da obezbedi dobru moć razdvajanja. Da bi se ona poboljšala, uz jednovremeno obezbeđenje pretraživanja zemljišta bez proreda, potrebno je ili da se poveća brzina pretraživanja na račun znatno manje vremenske konstante fotoosetljivog sloja, ili da se u aparaturi iskoriste mozaični fotoosetljivi slojevi. U ovom drugom slučaju obrasci (IX.3) i (IX.4) prelaze u oblik:

$$r \geq \sqrt{\frac{1}{2\pi knN} \frac{v}{H} \frac{1}{\tau}}, \quad (\text{IX. } 5)$$

$$\gamma \geq \sqrt{\frac{2\pi k}{nN} \frac{v}{H} \tau}, \quad (\text{IX. } 6)$$

gde je N — broj elemenata u mozaiku.

Tako, ako se u slučaju prethodnog primera usvoji $\tau = 10^{-6}$ s i $N = 9$, dobija se $\gamma = 3'$, što omogućava da se konstruiše uređaj za snimanje toplotne karte zemljišta sa dovoljno velikom moći razlaganja.

Nešto drukčija slika dobija se pri korišćenju slične aparature sa velikih visina. Dok pri letu na visini od 300 m ugaono razlaganje od 1 mrad daje linijsko razlaganje od 30 cm, to je pri letu na visini od $H = 30.000$ m za dobijanje istog linijskog raz-

laganja potrebno ugaono razlaganje od 10^{-2} mrad. Uzimajući u obzir izraz za graničnu difrakcionu moć razlaganja optičkih sistema $\gamma = 1,22 \frac{\lambda}{D}$, može se videti da čak i u tom najpovoljnijem slučaju pri $\gamma = 10^{-2}$ mrad i $\lambda = 10\mu$, prečnik ulazne optike D treba da bude jednak oko 120 cm. Na taj način, mogućnosti korišćenja aparature za snimanje toplotne karte zemljišta mogu da budu tehnički ograničene, i to, u prvom redu, mogućnošću smeštaja aparature na letelici.

Pri oceni moći razdvajanja uređaja za toplotnu lokaciju namenjenih izviđanju zemljišta, treba imati u vidu da moć razdvajanja takvih sistema u vidnom polju nije konstantna. Ona se smanjuje skretanjem optičke ose pretraživačkog uređaja od vertikale.

2. PERSPEKTIVE RAZVITKA SISTEMA ZA TOPLOTNU LOKACIJU

Razvitkom vojne tehnike razvijaju se sve više i sistemi za toplotnu lokaciju u naoružanju svih rodova vojske. Naročito se intenzivno radi na konstruisanju poluautomatskih i automatskih infracrvenih stanica za otkrivanje ciljeva i upravljanje vatrom.

Kod stanica za upravljanje vatrom, zahtevi koji se postavljaju pred uređaje koji imaju funkcije otkrivanja (osmatranja) i nisanjenja (praćenja) su protivurečni. Uređaji za osmatranje treba da obezbede veliku verovatnoću otkrivanja cilja na velikom rastojanju i u velikom uglu pretraživanja, pri minimalnom vremenu pretraživanja. Pri tome oni moraju da imaju visoku moć razdvajanja, da bi otkrili i odredili ugaone koordinate svih ciljeva u vidnom polju.

Prateći uređaji treba da imaju veliku ugaonu tačnost i, po pravilu, da određuju koordinate samo jednog izabranog cilja.

Dok se kod radarskih stanica, iz konstrukcijskih razloga i zahteva u pogledu gabarita, obe funkcije najčešće ostvaruju u jednom uređaju, kod infracrvenih sistema često je pogodnije odvojeno izvesti osmatrački i prateći deo.

U tablici IX.1 navedeni su kao primer osnovni zahtevi koje treba da ispune stanice za upravljanje vatrom na principu toplotne lokacije, a koje se razrađuju u SAD za ratno vazduhoplovstvo [3].

T a b l i c a IX.1

Naziv parametra	Merna jedinica	Sistem za pretraživanje	Sistem za praćenje
Glavna namena	—	Otkrivanje svih ciljeva u vidnom polju	Održavanje jednog cilja u vidnom polju, u prisustvu nekoliko ciljeva
Daljina otkrivanja	km	20 – 100	10 – 20
Vidno polje	steponi	20 – 180	1 – 20
Ugaona moć razdvajanja	steponi	1	0,05
Učestanost modulacije (kadrova)	kadr./s	0,1 – 4	4 – 100
Izlazni podaci	—	Položaj cilja (dve koordinate) Intenzitet zračenja Dimenzije cilja Temperatura cilja	Položaj cilja (dve koordinate) Brzina promene položaja cilja (dve koordinate)

Iz navedenih podataka se vidi da se pred sisteme za otkrivanje postavljaju strogi zahtevi u pogledu radiusa dejstva i uglova pretraživanja.

U sistemima sa iglastim snopom ovi zahtevi su protivurečni. Tako, na primer, povećanje ugla pretraživanja zahteva povećanje površine osetljivog elementa, a to vodi ka smanjenju njegove osetljivosti, što je ekvivalentno smanjenju radiusa dejstva, kao i povećanju vremena pretraživanja i smanjenju moći razdvajanja.

Prema tome, u sistemima sa jednim osetljivim elementom, za čiju se površinu zbog obezbedenja potrebnog radiusa dejstva mora usvojiti prilično mala vrednost, teško je, pri pretraživanju sa iglastim snopom, ostvariti potrebno vidno polje osmatranja. Osim toga, pretraživanje sa iglastim snopom zahteva složenu kinematičku šemu sistema za pretraživanje.

Izlaz iz ove situacije nađen je zamenom jednog osetljivog elementa, mozaikom od velikog broja malih osetljivih elemenata. Sistem sa mozaikom koji se sastoji iz N osetljivih elemenata,

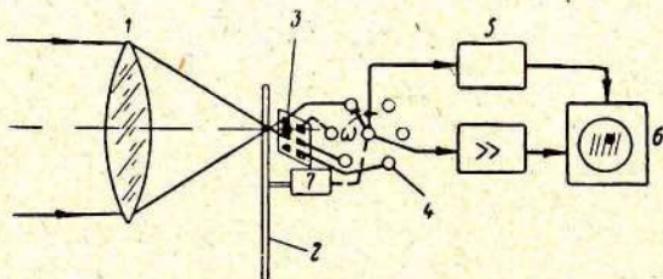
trebalo bi teoretski da bude \sqrt{N} puta osetljiviji od sistema iste namene sa jednim osetljivim elementom, a sa istim vidnim poljem i istom brzinom pretraživanja.

Prelaz na mozaične osetljive elemente povezan je, prirodno, sa rešavanjem niza dopunskih problema: teškoćama oko izrade fotoosetljivih slojeva sa jednakim karakteristikama, povećanjem broja pojačavača ili uvođenjem komutacionog uređaja za naizmenično priključivanje elemenata mozaika na zajednički pojačavač, problemom smanjenja šumova itd.

Danas su poznata tri tipa sistema sa mozaičnim osetljivim elementima, kod kojih:

- svaki elemenat mozaika ima sopstveni pojačavač;
- svi elementi mozaika priključuju se naizmenično na zajednički pojačavač;
- mozaik je zamenjen infracrvenim vidikonom.

Najveći interes postoji za drugu grupu sistema [5], čiji se način rada može videti sa sl. IX.5.

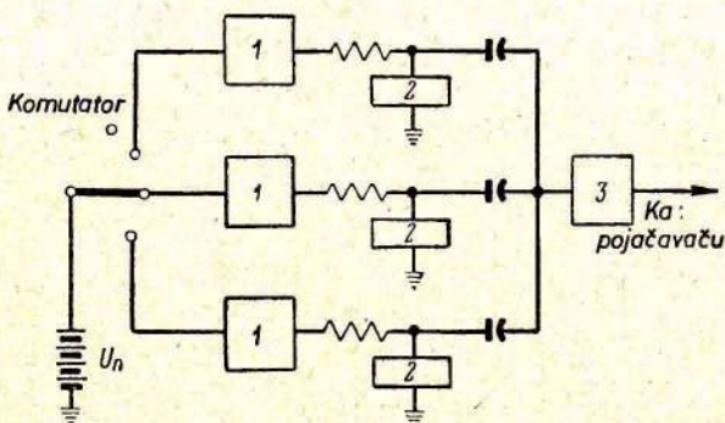


Sl. IX.5 — Principijelna šema sistema sa mozaičnim osetljivim elementom i zajedničkim pojačavačem:

1 — prijemna optika; 2 — modulacioni disk; 3 — mozaični prijemnik sa ulaznim kolimom; 4 — komutator; 5 — blok vremenske baze i sinhronizacije; 6 — pokazivač; 7 — motor

Ugao pretraživanja topotognog lokatora određen je sistemom „objektiv-mozaik“, pri čemu se pretraživanje zemljišta u granicama ovog ugla ostvaruje preko nepokretnog snopa koji obrazuje svaki pojedini elemenat mozaika. Topotno zračenje cilja, pretходно модулисано помоћу модулатора са обртним диском, фокусира се оптичким системом на један од елемената мозаика. Зависно од тога на који је од елемената мозаика пала енергија

zračenja cilja, sa tog elementa se odvodi signal, koji se do trenutka komutacije nagomilava u podešenom oscilatornom kolu. Signal se sa oscilatornog kola vodi na ulaz pojačavača pomoću mehaničkog komutatora, čiji rotor naizmenično prelazi preko svih elemenata mozaika. Posle pojačavanja signal se dovodi na pokazivač, čija je vremenska baza sinhronizovana sa okretanjem komutatora. Zbog toga položaj svetle tačke na ekranu pokazivača odgovara položaju cilja, u odnosu na optičku osu prijemnog sistema.



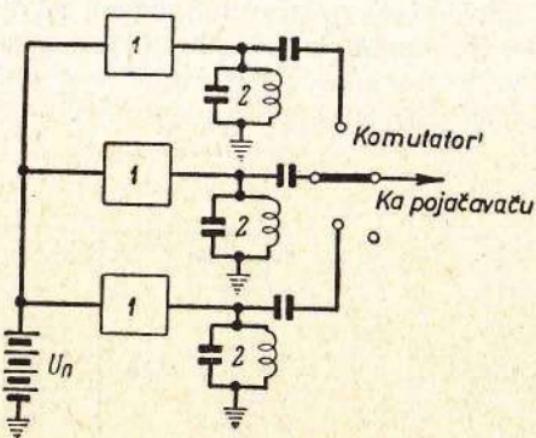
Sl. IX.6a — Šema komutacije napona napajanja pojedinih elemenata mozaika:

1 — uskopoljasni filter; 2 — elemenat mozaika; 3 — širokopolasni filter

Kao šeme pogodne za komutaciju mogu se iskoristiti dve šeme sa sl. IX.6 — šema za komutaciju napona napajanja koji se dovodi na pojedine elemente mozaika (sl. IX.6a) i šema za komutaciju signala koji se skidaju sa elemenata mozaika (sl. IX.6b).

Pri komutaciji napona napajanja javlja se jedna teškoća, koja je povezana s tim što vreme trajanja prelaznog procesa pri dovodenju napona na elemenat mozaika može da bude znatno duže od vremena trajanja signala sa cilja. Da bi se smanjilo trajanje prelaznog procesa, potrebno je isfiltrirati napon napajanja pomoću srazmerno složenih električnih filtera. Prema tome, kod ovakve metode komutacije treba za svaki elemenat mozaika predvideti kompaktan električni filter sa više elemenata. Filter se izvodi

u obliku keramičke pločice, na čiju se površinu nanosi štampano kolo RC-filtra. Na površini pločice od barijum-titanata, dimenzija 25×25 mm, smešta se do 10 celija RC-filtra sa kapacitivnošću svakog elementa do $0,01 \mu\text{F}$ [5].



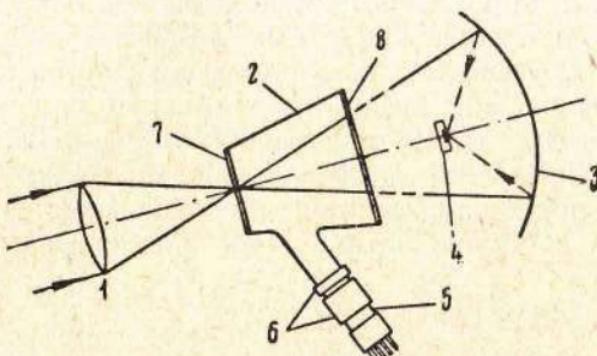
Sl. IX.6b — Šema komutacije korisnog signala, koji se skida sa elemenata mozaika:

1 — elemenat mozaika; 2 — rezonantno kolo

U drugoj šemi za komutaciju, iskorišćenoj u američkom toplotnom lokatoru „odes“, koji je razradila firma „Avion“, izlazni signal sa svakog osetljivog elementa mozaika naizmenično se dovodi na ulaz pojačavača pomoću mehaničkog komutatora. Za obezbeđenje uspešnog rada takvog sistema potrebna je vrlo pažljiva izrada komutacionog kola, da sopstveni šumovi komutatorskog mehanizma ne bi premašili koristan signal koji se skida sa elemenata mozaika.

Sledeći korak u razvoju mozaičnih prijemnika trebalo bi, po svemu sudeći, da budu elektronske cevi tipa termikon i vidikon. Njihova primena omogućava znatno uprošćavanje elektronskih kola uređaja za pretraživanje i zaobilazeњe teškoća, povezanih sa komutacijom malih struja. Osim toga, korišćenje elektronskog skaniranja omogućava znatno smanjenje vremena pretraživanja i uticaja šuma i povećanje moći razdvajanja sistema za toplotnu lokaciju. Primer ovakvog sistema sa elektronskim skaniranjem jeste avionski pretraživački uređaj „filtersken“, firme „Filko“ [6].

Glavni elemenat ovog sistema za toplotnu lokaciju (sl. IX.7) jeste elektronska cev sa velikom brzinom skaniranja, bez integracije signala. Konusni deo cevi pokriven je s jedne strane tankom silicijumskom pločicom, a s druge — materijalom koji je propustljiv u usvojenom talasnom području. Elektronski top postavljen je u grliću cevi pod takvim uglom da njegov elektronski mlaz pada na silicijumsku pločicu.



Sl. IX.7 — Skica uređaja „filtersken“

1 — prvi objektiv; 2 — cev za skaniranje; 3 — drugi, reflektujući objektiv; 4 — detektor IC-zračenja; 5 — elektronski top; 6 — fokusirajući otklonski namotaj; 7 — ulazni prozor; 8 — izlazni prozor

Lik cilja u infracrvenim zracima fokusira se prijemnom optikom na ulazni (silicijumski) prozor elektronske cevi. Zračenje koje obrazuje tu sliku se posle izlaska iz cevi ponovo fokusira pomoću ogledala na fotoosetljivi elemenat. Kao osetljivi elemenat može se koristiti bilo koji fotootpornik, ali je u posmatranoj maketi bio usvojen indijum-antimonid, sa pragom osetljivosti od $1,3 \cdot 10^{-7}$ W, za zračenje sa temperaturom 300°K i $1,5 \cdot 10^{-10}$ W, za zračenje sa temperaturom 500°K.

Posle uključivanja elektronskog mlaza i njegovog fokusiranja na unutrašnjoj površini ulaznog prozora elektronske cevi, elektroni, ubrzani pod dejstvom napona od 25 kV, izazivaju lokalno obrazovanje slobodnih nosilaca u poluprovodniku, što je ekvivalentno promeni provodnosti i, kao posledica toga, promeni koeficijenta apsorpcije na mestu pada mlaza na pločici. Elektronski mlaz i mrlja sa visokom optičkom apsorpcijom koju on stvara, pomeraju se pod dejstvom otklonskog sistema po sili-

cijumskoj pločici, čime se stvara skaniranje slike (pretraživanje po vidnom polju).

Pošto je količina energije zračenja propuštena kroz cev u bilo kom trenutku, određena „bleskom“ dela infracrvene slike koju zaklanja mrlja, to i izlazni signal sa fotootpornika predstavlja takođe funkciju vremena, čija vrednost zavisi od „bleska“ infracrvene slike na ulaznom prozoru celi. Na taj način, osetljivi elemenat šalje ka pokazivaču izlazni signal koji je proporcionalan sa promenom energije zračenja redom posmatranih elemenata vidnog polja. Vremenska baza pokazivača sinhronizovana je sa sistemom za skretanje elektronskog mlaza, što omogućava da se na ekranu uređaja dobije topotna slika vidnog polja.

Sistem je jednostavne konstrukcije, ima malu težinu i dimenzije i omogućava posmatranje predmeta sa temperaturom od 125°C , ako se usvoje sledeće vrednosti elemenata korišćenih u maketi:

Površina apsorbujuće mrlje	$3,1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$
Površina skaniranja	$2,24 \text{ cm}^2$
Površina osetljivog elementa	$0,1 \text{ cm}^2$
Učestanost horizontalne baze	1 kHz
Učestanost vertikalne baze	30 Hz
Relativan otvor objektiva	1 : 3
Relativan otvor ogledala	1 : 0,75
Propusni opseg	30 kHz

3. KONSTRUKCIJA SISTEMA ZA TOPOTNU LOKACIJU

Danas je u inostranstvu veliki broj tipova aparatura za topotnu lokaciju, predviđenih za postavljanje kako na zemaljskim (morskim), tako i na vazdušnim objektima. Inače, identični u načinu rada, oni se međusobno razlikuju po svojoj konstrukciji i taktičko-tehničkim podacima.

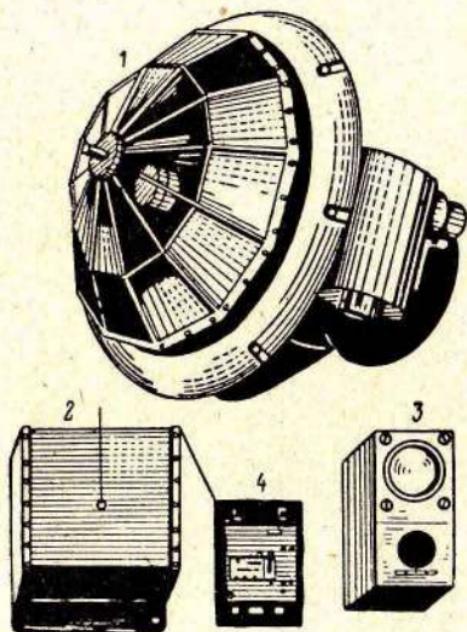
Najveći broj sistema za topotnu lokaciju razvija se za vazduhoplovstvo i namenjen je za otkrivanje vazdušnih i zemaljskih (morskih) ciljeva, za izviđanje i navigaciju. U zadnje vreme počelo je da se radi na razvoju automatskih sistema za topotnu lokaciju,

predviđenih za postavljanje na reaktivne letelice bez pilota i veštačke satelite za vazdušna izviđanja i registracije lansiranja raketa.

1944. god. u Nemačkoj je bio razvijen i izrađen noćni toplotni lokator „Kil-4“ (sl. IX.8), koji se sastojao iz prijemnog uređaja 1, pojačavača fotostruje 2, pokazivača 3 i komandne table 4.

Prijemni uređaj toplotnog lokatora postavlja se u čeonom delu trupa lovačkog aviona. On je u sebi sadržao obrtno prijemno ogledalo prečnika 250 mm,

u čijoj se žižnoj ravni postavlja fotootpornik od olovo-sulfida, prepojačavač fotootpornika, mehanički dovod za okretanje ogledala, mehanizam za traženje cilja u horizontalnoj ravni i potenciometre-davače, povezane sa dovodom za okretanje ogledala radi sinhronizacije vremenske baze pokazivača. Prijemni uređaj je pokriven staklenom čeonom kalotom, koja mu je dala savršeniji, aerodinamički, oblik. Olovo-sulfidni fotootpornik hlađen je do temperature od -78°C sa čvrstim ugljen-dioksidom.



Sl. IX.8 — Spoljašnji izgled kompleta toplotnog lokatora „Kil-4“

stog snopa, širokog oko 10° . Prijemni uređaj, kao celina, mogao je da vrši pretraživačko kretanje u horizontalnoj ravni u ugлу od 60° .

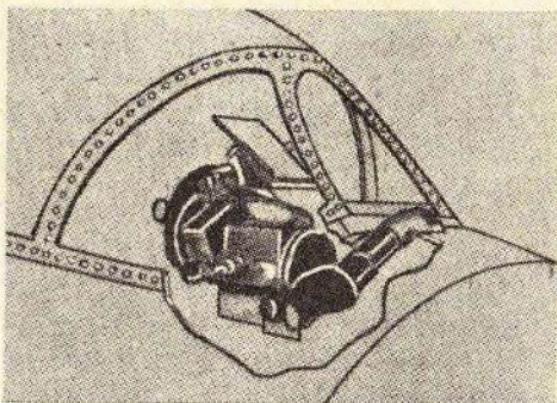
Kada bi zračenje cilja palo na fotootpornik, sa njega je odvođen impuls fotostruje, koji se posle pojačanja vodio na

Pretraživanje prostora u vidnom uglu od 20° izvedeno je pomoću igla-

pokazivač. Jednovremeno je uziman napon sa sinusnih potenciometara, povezanih sa pogonskom osovinom za okretanje ogledala i voden na otklonske elektrode katodne cevi pokazivača. Taj napon je na ekranu pokazivača stvarao vremensku bazu, koja je reproducovala karakter kretanja optičke ose ogledala u prostoru.

Prilikom pretraživačkog kretanja toplotnog lokatora, kao celine, u horizontalnoj ravni, dobijan je jednovremeno, pomoću predajnih selsina, napon proporcionalan sa ugaonim odstupanjem ose toplotnog lokatora od uzdužne ose aviona i voden na instrument sa skazaljkom. To je omogućavalo pilotu da oceni gde se nalazi cilj — desno ili levo od ose aviona.

Posmatrajući položaj svetle tačke cilja na pokazivaču i poznajući njegov položaj u odnosu na uzdužnu osu aviona, pilot je mogao da manevrišući svojim avionom poklopi svetu tačku cilja sa centrom končanice na ekranu pokazivača i tako da se približi protivničkom avionu do granica njegove vizuelne vidljivosti. Posle toga, napad na cilj je ostvarivan vizuelnim putem.



Sl. IX.9 — Infracrveni nišan AN/ASG-14
na avionu F-104

Daljina otkrivanja klipnih aviona, pomoću toplotnog lokatora „Kil-4“, iznosila je na srednjim visinama 8—10 km, a ugaoni položaj cilja određivan je sa tačnošću od $\pm 10^\circ$.

Dalja razrada ideja koje su predstavljale osnovu toplotnog lokatora „Kil-4“, kao i dalje usavršavanje skaniranja i auto-

matike za obezbeđenje praćenja otkrivenog cilja, doveli su u posleratnom periodu do stvaranja poluautomatskih i automatskih avionskih stanica za upravljanje vatrom, na principu topločne lokacije.

Tako su, prema podacima koji postoje u literaturi [8], svi lovački avioni tipa F-100, u SAD, opremljeni stanicama za upravljanje vatrom na osnovu infracrvenog zračenja (sl. IX.9).

Infracrveni nišan AN/ASG-14 za avion F-104 „starfajter“ je konstruisan u jednom delu, koji sadrži infracrveni sistem za otkrivanje cilja, elektronski pojačavač i projekcioni sistem za vizuelnu detekciju cilja. Projekcioni sistem nišana projektuje infracrvenu sliku cilja, posle odgovarajućeg pretvaranja i pojačanja, na ogledalo optičkog nišana. Osetljivi elemenat (PbS) smešten je izvan kabine, ispred zaštitnog stakla i pokriven malim ulaznim prozorom, propustljivim u oblasti osetljivosti fotootpornika.

Pilot posmatra na ogledalu optičkog nišana istovremeno svetlu tačku cilja i nišanski marker, čiji se položaj u vidnom polju određuje pomoću računara optičkog nišana. Ovo mu omogućava da po noći izvrši napad na cilj isti onako kao kada bi cilj video neposredno okom.

U opisanom nišanu, zahvaljujući njegovom velikom vidnom polju, nije potreban poseban pretraživački uređaj, pošto se na ogledalu nišana mogu posmatrati svi ciljevi koji dospeju u vidno polje prijemne glave. Pilot u ovom slučaju izvršava selekciju, odnosno bira cilj koji treba napasti.

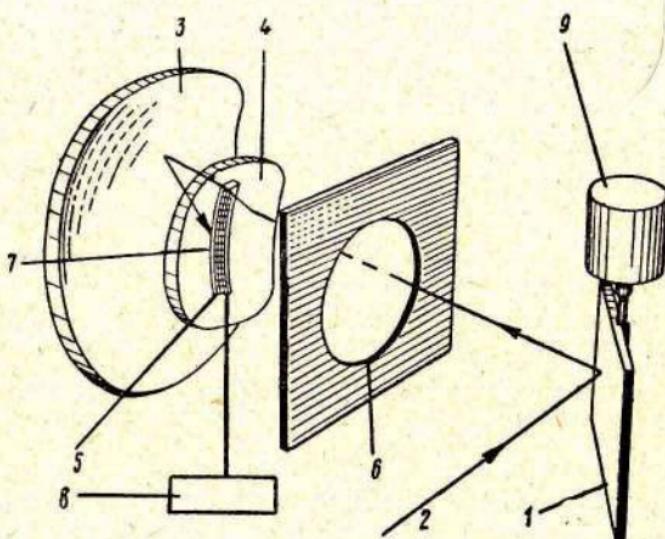
U kasnijoj verziji infracrvene nišanske stanice AN/AAR-21, koju je razvila firma Hjuz Erkraft Ko., sistemi osmatranja i praćenja su razdvojeni. Kao osetljivi elemenat, u nišanskoj staniči je usvojen olovo-sulfidni fotootpornik koji je ohlađen do temperature tečnog azota. Za razliku od stанице AN/ASG-14, ova stаницa omogućava merenje rastojanja do cilja pomoću dve prateće glave, a na osnovu infracrvenog zračenja [10].

Razvijaju se i kombinovani optičko-radarски sistemi, kod kojih funkcije otkrivanja cilja i njegovog prethodnog praćenja vrši infracrvena aparatura, a posle otkrivanja cilja i dovođenja lovca u njegovu blizinu automatski se za kraće vreme uključuje radiodaljinomer, pomoću koga se u računar uvodi koordinata daljine.

Projekcija radarske i infracrvene slike vrši se na istom ekrantu, kao i kod kombinovane stanice firme Vestinghaus [11, 12, 13].

Korišćenje sličnih kombinovanih sistema sa kratkotrajnim uključivanjem radio-daljinomera u poslednjoj fazi napada, znatno smanjuje mogućnost prevremenog otkrivanja napadačkog lovca od strane protivnika.

U periodu 1957—1958. god. u SAD je bio razvijen pretraživačko-prateći sistem za topotnu lokaciju — KODES (sl. IX.10a) [4, 14], čiji je rad bio zasnovan na korišćenju mozaika od fotootpornika sa naizmeničnom komutacijom signala pojedinih elemenata i njihovim pojačanjem u jednom pojačavaču.

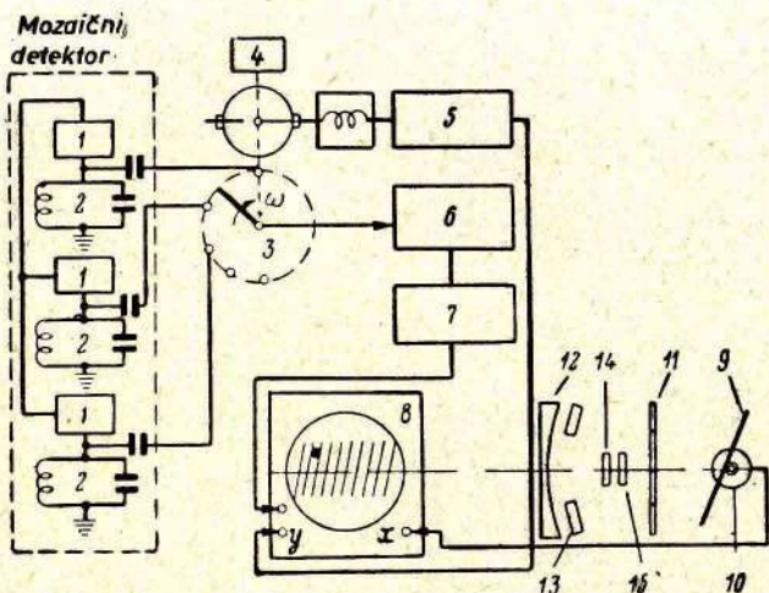


Sl. IX.10a — Šema optičkog sistema aparature KODES:

1 — ravno prijemno ogledalo; 2 — fluks zračenja; 3 — fokusirajuće sferno ogledalo; 4 — korekciono sočivo; 5 — mozaik; 6 — blenda; 7 — modulaciona rešetka; 8 — komutator; 9 — hidraulični pokretač pretraživačkog ogledala

Ravno prijemno ogledalo 1, povezano sa davačem koordinata, okreće se levo-desno u azimutalnoj ravni i time ostvaruje pretraživanje cilja. Fluks zračenja 2 usmerava se preko ogledala 1 na ulaz sfernog optičkog sistema 3. Ovaj sistem fokusira primljenu energiju kroz korekciona sočiva 4, na osetljivu površinu mozaika 5.

Optički sistem sadrži, takođe, blendu 6, u čijem je otvoru postavljen interferencijski filter sa propusnim opsegom od 1,8 do $2,7 \mu$, i modulacionu rešetku sa rastojanjima između linija od oko 0,05 mm, postavljenu na krivu površinu, dimenzija 32×4 mm. Pomoću modulacione rešetke, zračenje cilja se moduliše sa učestanostu od 40 Hz. Blenda, postavljena u ravni centra krivine sfernog ogledala, omogućava smanjenje aberacije optičkog sistema na račun ograničavanja širine propuštenog snopa zračenja.

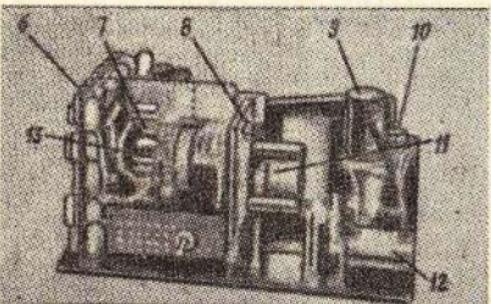
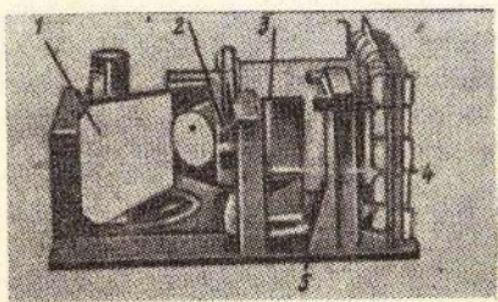


Sl. IX.10b — Blok-sema sistema KODES:

1 — elemenat mozaika; 2 — oscilatorno kolo; 3 — komutator; 4 — motor za pokretanje komutatora; 5 — generator testerastih impulsa; 6 — pojačavač; 7 — detektor i ograničavač; 8 — pokazivač; 9 — skanirajuće ogledalo; 10 — davač koordinata; 11 — blenda; 12 — sferno ogledalo; 13 — korekciono sočivo; 14 — rešetka; 15 — mozaik

Mozaik od fotootpornika ima izdužen oblik (32×2 mm), zbog čega se, da bi se obezbedilo kvalitetno fokusiranje lika cilja na svakom elementu mozaika, postavlja u meridionalnoj ravni optičkog sistema. Iz istog razloga mozaik se nanosi na krivu podlogu, čiji je poluprečnik krivine jednak poluprečniku krivine žižne površine optike.

Ugaona veličina lika tačkastog cilja na elementu mozaika je 1,2 mrad, iz dobru moć razdvajanja po celom vidnom polju. Trenutni vidni ugao optičkog sistema je $2,7^\circ$ po azimutu i 40° po mesnom uglu. Sa ovim trenutnim uglom prijemni uređaj pretražuje u prostoru, a na račun kretanja ravnog ogledala, ugao od 90° po azimutu i 40° po mesnom uglu. Ugao od 40° ostvaruje se naizmeničnim priključivanjem elemenata mozaika na ulaz pojačavača pomoću komutatora (sl. IX.10b).



Sl. IX.11 — Izgled aparature „kodes“ sa skinutim poklopcom:

- 1 — ravno ogledalo;
- 2 — filter;
- 3 — modulaciona rešetka i elementi mozaika;
- 4 — fokusirajuće sočivo;
- 5 — korekciono sočivo;
- 6 — 30 podešenih kola;
- 7 — pojačavač signala;
- 8 — generator testerastog napona;
- 9 — motor za pokretanje ogledala;
- 10 — azimutalni potencijometar;
- 11 — davač mesnog ugla;
- 12 — motor za pokretanje komutatora;
- 13 — komutator.

signal sa elementa mozaika dolazi izveden sa 5 tranzistora.

Izlazni signali sa elemenata mozaika nagomilavaju svoju energiju u pojedinim oscilatornim kolima, podešenim na učestanost od 934 Hz. Ova rezonantna kola obavljaju dvostruku funkciju — nagomilavaju energiju u toku vremenskog perioda određenog učestanošću komutacije i izdvajaju signal iz šumova. Kondenzator za spregu C ne propušta jednosmernu komponentu na kontakte komutatora.

Mehanički komutator izrađen je po ugledu na tipove koji se koriste u telemetarskoj praksi i ima 60 lamele. Svi trideset elemenata mozaika vezani su za lamele komutatora tako da se dobijaju dva ciklusa komutacije za jedan obrt rotora komutatora.

Preko kontakta komutatora na ulaz pojačavača, koji je

Radi postizanja optimalne osetljivosti, propusni opseg pojačavača ($\Delta f = 40 \text{ Hz}$) usaglašen je sa vremenom trajanja signala sa jednog elementa (0,023 s).

Pošle pojačanja signal se detektuje u dvostranom detektoru, ograničava i vodi na pokazivač.

Horizontalna vremenska baza pokazivača sinhronizovana je sa kretanjem prijemnog ogledala pomoću preciznog potencijometra, koji u ovom slučaju predstavlja davač koordinate.

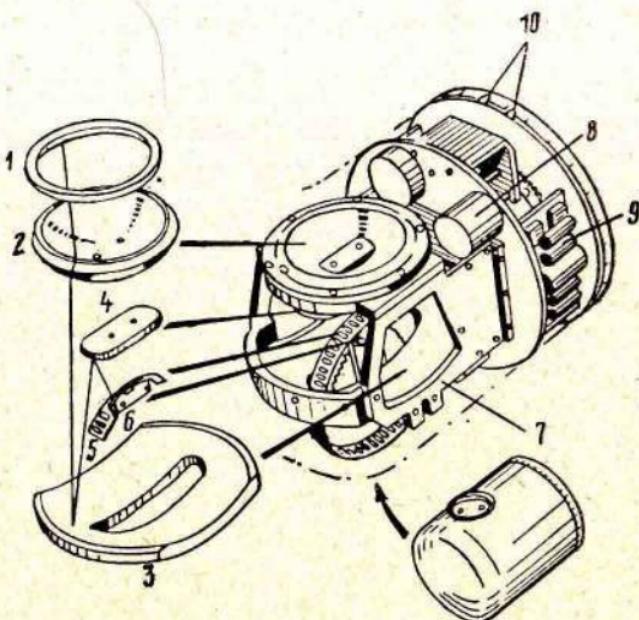
Vertikalna baza pokazivača sinhronizovana je sa položajem rotora komutatora preko generatora testerastog napona, koji daje dva testerasta impulsa za svaki obrt komutatora. Dovodenjem ovih napona na otklonske elektrode katodne cevi pokazivača, vremenske baze reprodukuju redosled pretraživanja prostora od strane prijemnog sistema, pri čemu položaj svetle tačke cilja na ekranu, u odnosu na centar cevi, odgovara položaju cilja u prostoru, u odnosu na optičku osu uređaja. Vreme pretraživanja vidnog polja je 1,5 s.

Izgled toplotnog lokatora prikazan je na sl. IX.11, a u tablici IX.2 date su njegove glavne karakteristike.

T a b l i c a IX.2
Glavni parametri sistema „kodes“

Naziv parametra	Merna jedinica	Vrednost
Ugao pretraživanja: po azimutu po mesnom uglu	stepen	± 45 40
Trenutni vidni ugao: po azimutu po mesnom uglu	"	2,7 40
Vreme pretraživanja	s	1,5
Prečnik ulaznog otvora	mm	43
Koefficijent korisnog dejstva optike	%	30
Relativni otvor	—	F/ (1:1)
Ugaona veličina liča sa 90% maksimalnog intenziteta	mrad	1
Osetljivi element	—	PbS
Dimenzije elementa mozaika	mm	1×2
Vremenska konstanta	μs	200
Područje osetljivosti	μ	$1,8 - 2,7$
Integralna osetljivost	W/cm^2	$4 \cdot 10^{-10}$

Na bazi sistema KODES u SAD je razvijen pretraživački sistem za otkrivanje veštačkih zemljinih satelita, po njihovom toplotnom zračenju [2]. Izgled prijemnog uređaja ovog sistema prikazan je na sl. IX.12.



Sl. IX.12 — Uredaj za otkrivanje veštačkih zemljinih satelita:

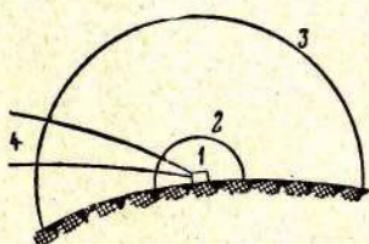
- 1 — ulazni otvor;
- 2 — korekciono sočivo;
- 3 — sferno ogledalo;
- 4 — drugo ogledalo;
- 5 — doboš za modulaciju;
- 6 — mozaik;
- 7 — ram za učvršćivanje optike;
- 8 — motor za pretraživanje;
- 9 — elektronski delovi uređaja;
- 10 — skala uglova pretraživanja

Prijemna glava se postavlja na pokretnoj platformi sa tri stepena slobode, što omogućava da se njen vidno polje usmeri na bilo koji deo neba. Za razliku od ranije opisanog sistema KODES, u ovoj aparaturi se pretraživačko kretanje ostvaruje okretanjem cele prijemne glave u azimutalnoj ravni, u ugaonim granicama $+30^{\circ} - +210^{\circ}$. Trenutno vidno polje, određeno vidnim uglom optike i mozaikom od 30 osetljivih elemenata, jednako je $0,92 \times 27,5^{\circ}$. Zračenje satelita moduliše se sa učestanostu od 1000 Hz, pomoću doboša sa prorezima. Kao osetljivi elementi mozaika usvojeni su nehlădeni olovo-sulfidni foto-

otpornici. Signal sa elemenata mozaika vodi se na oscilograf pomoću komutatora, na čijem se ekranu može posmatrati svetla tačka cilja i pratiti njeno kretanje.

4. O MOGUĆNOSTIMA OTKRIVANJA BALISTIČKIH I VOĐENIH RAKETA

Progres u oblasti razvijanja taktičkog i strategijskog naoružanja i uvodenja u naoružanje vođenih i balističkih raketa srednjeg i velikog dometa u nizu zemalja, zahtevali su razvoj pouzdanih sistema za daljinsko otkrivanje lansiranja raketa i njihovog ulaska u atmosferu, sa ciljem da se one zatim unište u vazduhu na dovoljnoj daljini od branjenog objekta. Ovaj problem, na kome se vrlo mnogo radi u nizu zemalja, a naročito u SAD, otežan je time što opremanje raketa nuklearnim bojevim glavama zahteva absolutnu sigurnost njihovog uništenja, na rastojanjima koja su bezbedna za branjeni objekat.



Sl. IX.13 — Skica odbrane od IBR:

1 — branjeni objekat; 2 — odbrambena polulopta; 3 — zona otkrivanja; 4 — zona mogućeg pojavljivanja IBR

Prema oceni stranih stručnjaka, poluprečnik odbrambene polulopte 2 oko branjenog objekta 1 (sl. IX.13) treba da iznosi oko 80 km [25]. Pri tome se uzima u obzir radijus dejstva atomskog punjenja srednjeg troljtnog ekvivalenta i rastojanje koje garantuje bezbednost ljudi koji opslužuju objekat.

Da bi se obezbedio susret antirakete sa balističkom raketom na granici odbrambene polulopte, raketa mora da bude blagovremeno

otkrivena pomoću nekog sredstva koje je u stanju da odredi koordinate njene trajektorije i izračuna tačku susreta. Minimalna daljina otkrivanja rakete određena je njenim tipom, kao i tipom rakete koja se koristi za presretanje i sistemom za navođenje.

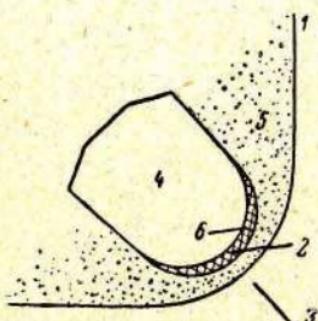
Savremeni radarski sistemi omogućuju otkrivanje interkontinentalne balističke rakete (IBR) na rastojanju do 800—1.600 km [25], kao i njeno dalje praćenje. Oni su, međutim, osetljivi na smetnje, koje mogu da se pojave u obliku aktivnog ometanja

neposredno sa rakete, signala sa lažnih ciljeva i povremenih smetnji od severne svetlosti, refleksija sa Meseca itd.

U vezi s tim interesantna su istraživanja koja se vrše u inostranstvu, a u prvom redu u SAD, o mogućnostima otkrivanja IBR pomoću infracrvene aparature. Ova istraživanja vrše se u tri osnovna pravca:

ispitivanje zračenja raketa i veštačkih zemljinih satelita;
ispitivanje mogućnosti otkrivanja IBR;

konstruisanje sistema za navođenje antiraketa na IBR koje ulaze u gусте слојеве atmosfere.



Sl. IX.14 — Zagrevanje čeonog konusa rakete pri njegovom ulasku u atmosferu:

1 — front udarnog talasa; 2 — kritična tačka; 3 — pravac leta; 4 — čeonog konus; 5 — sloj ionizovanog vazduha visoke temperature; 6 — plastični termoizolacioni jastuk

1.000 puta većim od bleska planete Jupiter, koja se nalazila u pozadini putanje rakete (tablica IX.3).

Ovako visoke temperature karakteristične su za tačku kočenja, ali i temperatura celog tela konusa može da prelazi vrednosti reda $2.000 - 2.500^{\circ}\text{C}$. To omogućava ne samo otkrivanje raketa po njihovom toplotnom zračenju već i njihovo sigurno praćenje do trenutka potpunog sagorevanja ili pada na zemlju. Tako je pri pomenuitim ispitivanjima rakete „Jupiter“, radio-metrijskim putem otkrivena i praćena sva tri dela rakete: čeonog

Ispitivanja toplotnog zračenja balističkih raketa, na završnom delu njihove trajektorije [15], pokazala su da čeonii konus rakete koja ulazi u atmosferu stvara front udarnog talasa, iza koga se obrazuje sloj vazduha visoke temperature, koji intenzivno zagreva telo konusa gotovo do njegovog otapanja (sl. IX.14). Ovom prilikom vazduh u tom sloju se ionizuje i zrači kako u vidljivoj, tako i u infracrvenoj oblasti spektra.

O stepenu zagrevanja čeonog konusa može se suditi prema saopštenjima strane štampe, koja kažu da se čeonii konus rakete „Jupiter“, pri njenom ulasku u atmosferu, zagrevao do belog usijanja, tako da je bio vizuelno vidljiv u toku 24 sekunde, sa bleskom

T a b l i c a IX.

Brzina i temperatura nekih tipičnih letelica pri njihovom povratku u zemljinu atmosferu [16]

Letelica	Brzina, m/s	Tempera- tura, °C
Raketa sa dometom 1.600 km	3.500	3.400
Raketa sa dometom 8.000 km	6.700	7.100
Satelit sa orbitom visine 480 km	7.600	8.600

konusa, tela rakete i dela sa instrumentima — sve do njihovog pada u Atlantski okean [17].

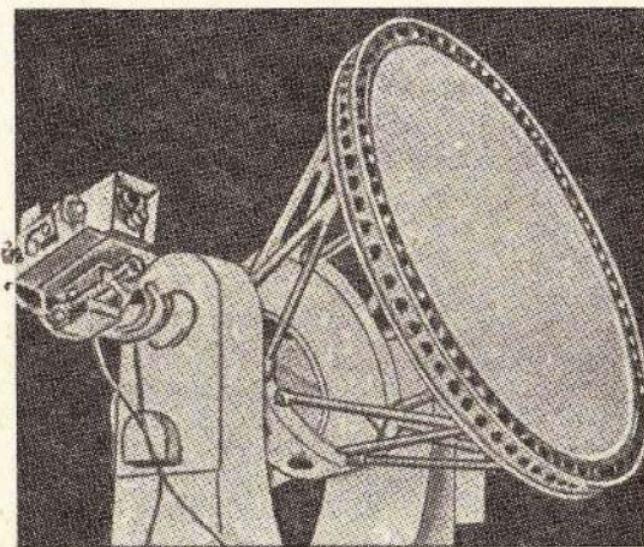
Pored ispitivanja toplotnog zračenja raketa, danas se vrše intenzivna teoretska i eksperimentalna ispitivanja infracrvenog zračenja kosmičkih brodova i veštačkih zemljinih satelita u toku njihovog leta po orbitama udaljenim više stotina kilometara od površine zemlje [18]. Tako je serija posmatranja letova veštačkih zemljinih satelita (VZS) pokazala realne mogućnosti za njihovo otkrivanje po danu i noću pomoću uređaja infracrvene tehnike. Ustanovljeno je da zračenje VZS znatno prelazi teoretski očekivano zračenje tela sa temperaturom 300°K i iznosi, na primer, za treći sovjetski VZS, prema merenjima Blok Majorana, veličinu reda 1.000 W. Mada priroda zračenja VZS danas još nije potpuno objašnjena, pretpostavlja se da je ono prouzrokovano prisustvom zone visokoenergetskih čestica na tim visinama, kao i procesima rekombinacije elektrona i jona, koji se nalaze na tim visinama, na površini satelita. Međutim, ova hipoteza navodi na mogućnost da može da se otkrije IBR znatno pre njenog ulaska u gušće slojeve atmosfere, a pri letu u kosmosu na visinama reda 500 do 1.200 km.

Opisana ispitivanja vršena su sa specijalno za to razvijenim eksperimentalnim uređajima — radio-metrima i spektrometarskim uređajima. Oni se konstrukcijski izvode kao prenosni, ili se postavljaju na antene radarskih stanica, ili platforme artillerijskih oruđa, da bi se iskoristili njihovi prateći sistemi.

Radio-metar S8, firme „Aerodžet general“, težine 9 kg i sa ulaznim otvorom prečnika 15 cm, postavljan je ili na specijalnom tronošcu, ili na lafetu brodskog topa, kao što je to bio slučaj

prilikom lansiranja raketa „jupiter“, u maju-junu 1958. god. Radi smanjenja dimenzija uređaja, u njemu je usvojena kombinovana refleksiono-refrakciona optika velike žižne daljine, sa višestrukim odbijanjem. Uređaj S8, postavljen na brodovima u rejonu Malih Antila, omogućio je praćenje putanje leta rakete od trenutka lansiranja do pada u okean [19]. Isti uređaj koristio je proizvođač i za posmatranje leta trećeg sovjetskog veštačkog satelita.

Posmatranje leta rakete „jupiter“ pri njenom ulasku u guste slojeve atmosfere vršeno je takođe i pomoću ručnog radiometra R-4K, firme „Boing Indžiniring Ko.“ [20]. Uređaj sa vidnim poljem od 4° sastoji se od radiometarske glave sa zamenljivim



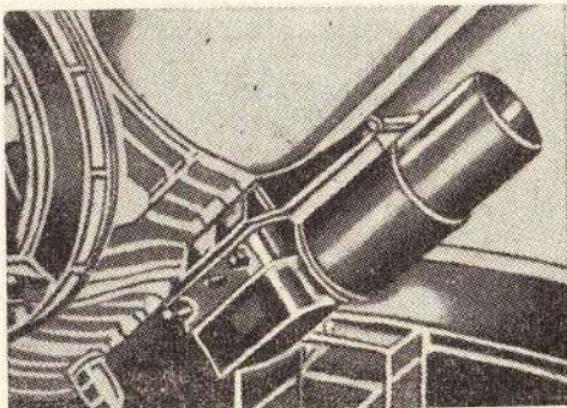
Sl. IX.15 — Uređaj velikog radijusa dejstva, spregnut sa radarskom antenom

osetljivim elementima (PbS i germanijumski bolometar) i modulacionim diskovima, radi obezbeđenja rada i po danu i po noći i adaptivnosti uređaja. Težina uređaja je 6 kg. Radio-metarska glava postavljena je na ručnom hvataču da bi se udobnije radilo u položaju „iz ruke“, ali može da se postavi i na bilo koji prateći uređaj radi zajedničkog rada u režimu praćenja (sl. IX.15).

Za početno navođenje radiometra na raketu pri njenom ulasku u atmosferu, na kućištu glave montiran je teleskopski nišan.

Velika pažnja poklanjana je takođe proveri mogućnosti otkrivanja raketa u trenutku njihovog lansiranja i na aktivnom delu putanje. Pošto infracrveni uređaji imaju veliku tačnost u merenju ugaonih koordinata, to dobijeni podaci o lansiranju raketa omogućavaju određivanje koordinata mesta starta i proračunavanje putanje leta rakete do trenutka njenog susreta sa antiraketom.

Ispitivanja u ovom pravcu vršena su kako sa već opisanom aparaturom, tako i sa specijalnom spektrometarskom infracrvenom aparaturom.



Sl. IX.16a — Spektrometarski uređaj „rapid-sken“

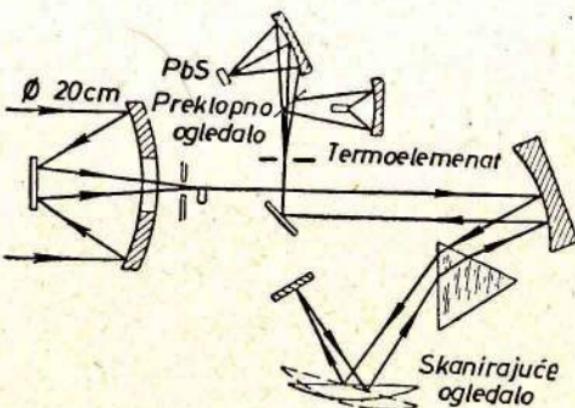
Firma „Perkin-Elmer“ već duže vreme vrši spektrometarska ispitivanja zračenja raketa za vreme lansiranja i na aktivnom delu putanje pomoću spektrometra „rapid-sken“, postavljenog na optičkom pratećem sistemu ROTI-MII 21 (sl. IX.16a).

Glavni deo uređaja „rapid-sken“ je infracrveni monohromator sa brzim skaniranjem, čija je šema prikazana na sl. IX.16b. Monohromator neprekidno beleži intenzitet infracrvenog zračenja u području $0,3 - 3,6 \mu$. Učestanost skaniranja ogledala može se regulisati u granicama $2,5 - 180$ Hz.

Lansiranja raketa posmatrana su sa rastojanja od 50 km od raketnog poligona. Istovremeno sa zapisivanjem infracrvenog

spektra vršena su daljinska fotografisanja leta projektila pomoću optičkog sistema ROTI. Dobijeni podaci upoređivani su sa spektrometarskim merenjima radi ispitivanja mogućnosti za prepoznavanje raketa po njihovom topotnom zračenju.

Pretpostavlja se da se infracrveni uređaji za otkrivanje balističkih raketa instaliraju na zemaljskim osmatračkim stanicama, i na patrolnim avionima službe strategijskog izviđanja.



Sl. IX.16b — Optička shema monohromatora „rapid-sken“

Kada neprijatelj vrši aktivne radio-smetnje infracrveni sistemi mogu da budu važan izvor za dobijanje informacija na daljim prilazima branjenog objekta. Međutim, bitan nedostatak karakterističan za te sisteme — zavisnost radne sposobnosti od atmosferskih uslova, smanjuje njihove taktičke mogućnosti.

Problem presretanja vođenih i balističkih raketa nije ograničen samo njihovim blagovremenim otkrivanjem i određivanjem putanje njihovog leta. Potrebno je i da se obezbedi navođenje antiraketa na ove projektile da bi se uništili na velikom rastojanju od branjenog objekta.

I u ovom slučaju sredstva infracrvene tehnike mogu da se pokažu kao vrlo efikasna, naročito u poslednjoj fazi navođenja antirakete.

Pretpostavlja se da će se u prvoj fazi antiraketa približavati balističkoj raketi po komandama sa zemlje, preko radio-veze.

Pri tome uređaji za vođenje treba neprekidno da unose popravke u putanju antirakete, uzimajući u obzir informacije iz stanice za praćenje IBR. Međutim, i u tom slučaju, kako se ukazuje u stampi, postoji znatna verovatnoća greške i kao posledica toga — promašaj antirakete. Promašaj može da bude prouzrokovani greškama sistema za vođenje ili slučajnim odstupanjem antirakete od zadane putanje iz spoljnih razloga.

Prirodno da je u takvima uslovima vrlo mala verovatnoća presretanja IBR. Zbog toga se preporučuje da se antirakete opreme glavama za samonavodenje, među kojima i glavama na bazi infracrvenog (toplotočnog) zračenja. Infracrvena glava za samonavodenje u poslednjoj fazi približavanja antirakete ulazi u neposrednu zonu presretanja i dalje približavanje sve do susreta treba da se vrši po komandama sistema za samonavodenje.

Visoka temperatura konusa IBR i velika razredenost atmosfere na visinama presretanja treba da obezbede veliku efikasnost infracrvenih glava za samonavodenje.

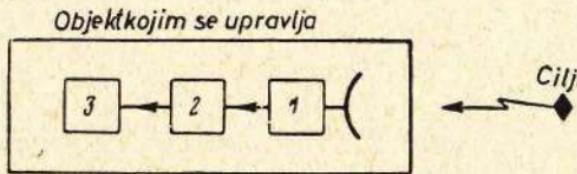


Glava X

TOPLOTNE (IC) GLAVE ZA SAMONAVOĐENJE

1. PRINCIP PASIVNOG SAMONAVOĐENJA PROJEKtila

Postoji nekoliko načina za upravljanje bez pilota borbenim sredstvima od trenutka njihovog lansiranja do susreta sa ciljem. Jedan od vidova takvog upravljanja je metod samonavođenja na cilj.



Sl. X.1 — Principijelna šema sistema za samonavodenje

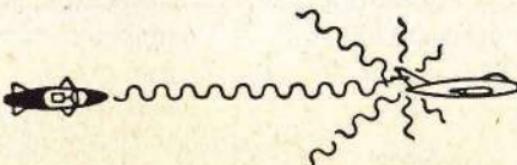
Kod samonavođenja na upravljanom projektilu postavlja se poseban uređaj, koji se naziva koordinator cilja, koji određuje položaj cilja prema objektu koji se samonavodi i obrazuje signale za upravljanje pri pojavi ugla greške između pravca na cilj i zadatog pravca (ose projektila ili koordinatora i vektora brzine kretanja projektila).

Principijelna šema sistema za samonavodenje (sl. X.1) obično sadrži tri osnovna elementa: koordinator cilja — 1, računar — 2 i mehanizme za upravljanje letom projektila — 3.

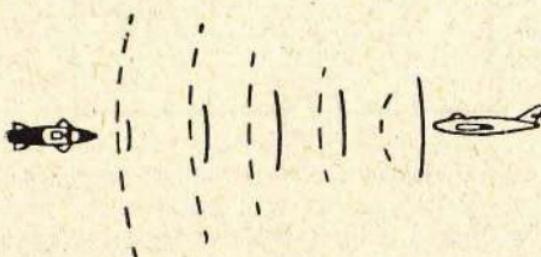
Samonavodenje se može ostvariti pasivnim metodom (sl. X.2a), a takođe i aktivnim (sl. X.2b) ili poluaktivnim (sl. X.2c).

Pri pasivnom samonavođenju, za dobijanje signala za upravljanje letom projektila koristi se energija zračenja samog cilja.

Pri aktivnom samonavodenju, za dobijanje signala upravljanja koristi se energija odbijena od cilja ozračenog sa samonavodenog projektila. Prema tome, karakteristično za ovakav sistem,

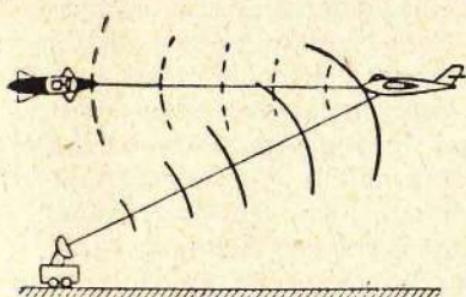


Sl. X.2a — Šema pasivnog samonavodenja



Sl. X. 2b — Šema aktivnog samonavodenja

je postojanje specijalnog predajnika energije na projektilu, koji je zrači u okolini prostora, i prijemnika* podešenog za taj oblik energije.



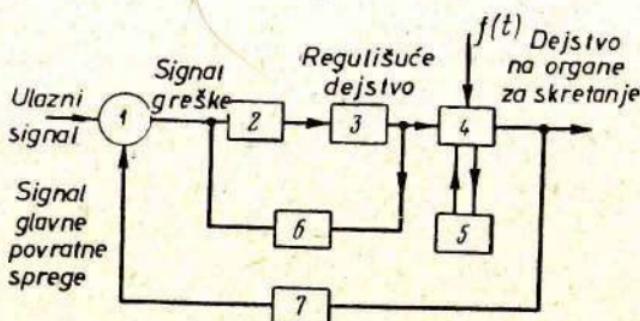
Sl. X.2c — Šema poluaktivnog samonavodenja

Pri poluaktivnom samonavodenju cilj se ozračuje energijom od izvora, postavljenog van projektila i posle odbijanja ove energije od cilja, ona se prima preko prijemnika koji stvara signal upravljanja.

Pasivni sistemi za samonavođenje zahtevaju minimalnu količinu opreme na upravljanom projektilu,

ali je za njihov rad potreban kontrast energije koji zrači cilj (zvučne, svetlosne, toplotne i radio-talasa) prema energiji koju zrači okolna sredina.

Poslednjih godina više se primenjuju, u svojstvu sistema za pasivno samonavodenje, topotne (infracrvene) glave za samonavodenje (TGS). Topotna glava za samonavodenje predstavlja zatvoreni prateći sistem*) (sl. X.3) i sadrži sledeće osnovne elemente (1):



Sl. X.3 — Blok-sema topotne glave za samonavodenje

Koordinator cilja 1, koji određuje signal greške na osnovu upoređenja ulaznog signala i signala glavne povratne sprege; pojačavač 2, izvršni element 3, koji ima regulišuće dejstvo, koje se prenosi na objekt regulisanja 4, uredaj za stabilizaciju 5, element lokalne povratne sprege i glavnu povratnu spregu 7.

Koordinator cilja jeste optičko-mehanički uređaj koji prima topotno zračenje cilja i određuje njegov položaj prema svojoj optičkoj osi. U slučaju odstupanja cilja od optičke ose koordinatora, ovaj uređaj stvara signal greške. Signal greške, posle pojačanja i pretvaranja u drugim delovima šeme, dejstvuje preko izvršnih organa na pogonski uređaj za pokretanje glave, koji pomera prijemni uređaj tako da se odstrani signal greške, tj. da se poklopi optička osa koordinatora sa pravcem na cilj. U procesu praćenja cilja koordinatorom, električni impulsi, koji su proporcionalni ugлу greške ili uglovnoj brzini pomeranja prijemnog uređaja, posle neophodnih transformacija dovode se na mehanizam za upravljanje letelicom.

*) Automatski prateći sistem sa zatvorenom petljom. — Prim. red.

Na slici X.4 prikazan je primer taktičke primene pasivnog samonavodenja kod projektila „vazduh-vazduh“, opremljenih toplotnom glavom za samonavodenje (2).

Posle otkrivanja vazdušnog cilja od strane lovca pomoću bilo kakvog avionskog uređaja, i uzimanja istog na nišan, kad toplotna glava za samonavodenje zahvati cilj, lansira se projektil.

Pošto pasivni sistem ne zahteva zračenje bilo kakve energije od strane lovca presretača, lovac je odmah po lansiranju projektila slobodan i može da izade iz napada. Dalje navođenje projektila na cilj vrši toplotna glava za samonavodenje.

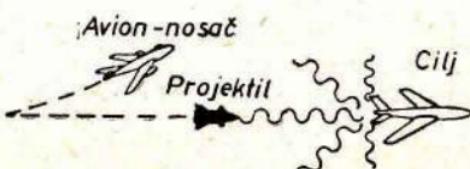
U tome i jeste jedno od preimcuštava infracrvenih sistema za samonavodenje po principu pasivnog dejstva — lovac-presretač se minimalno vreme nalazi u zoni protivničke odbrambene vatre.

Od drugih preimcuštava infracrvenih sistema za samonavodenje, treba napomenuti: trajnost primene jer nije potrebno ozračavati cilj, jednostavnost aparature, pouzdanost njenog rada i relativno mala cena koštanja. Tako na primer, projektil „folkon“, sa radarskom glavom za samonavodenje, skoro 10 puta je skuplji od projektila „sajdvinder“ s toplotnom glavom za samonavodenje. U projektilu „sajdvinder“ primenjeno je svega 7 elektronskih cevi, dok ih je u projektilu „folkon“ nekoliko desetina (3).

Jednostavnost konstrukcije direktno je povezana sa njenom pouzdanošću. Nemanje predajnika i dosta glomaznih antenskih sistema čini toplotne glave za samonavodenje kompaktnim, što je posebno značajno za projektile „vazduh-vazduh“, čiji su gabariti veoma ograničeni.

2. TOPOLTNE (INFRACRVENE) GLAVE ZA SAMONAVOĐENJE (TGS)

Razrada prvih borbenih primeraka toplotnih sistema za samonavodenje počela je u toku II svetskog rata, kada je u Nemačkoj proizveden niz eksperimentalnih uzoraka toplotnih sistema



Sl. X.4 — Napad na cilj pomoću projektila sa toplotnom glavom za samonavodenje

za samonavodenje, za različite tipove projektila, koji zbog nezadrživog napada Sovjetske armije nisu mogli praktično da se primene. U posleratnom periodu u Švajcarskoj, Francuskoj, Italiji, Švedskoj, a naročito u SAD i Velikoj Britaniji ovi radovi su nastavljeni i niz projektila sa topotnim glavama za samonavodenje uveden je, poslednjih godina, u naoružanje.

Topotne glave za samonavodenje mogu da se podele na dve grupe: prateće i indikatorske (sa širokim vidnim poljem).

Kod pratećih glava za samonavodenje, čija je blok šema pokazana na sl. X.3, signal upravljanja preko izvršnih organa i glavne povratne snage koristi se za otklanjanje ugla greške, a električni signal, koji je proporcionalan ugлу zaokreta ili ugaonoj brzini kretanja koordinatora, koristi se za upravljanje projektilom.

Kod indikatorskih glava, koje imaju široki vidni ugao, upravljujući signal se koristi za direktno dejstvo na upravljujući uredaj projektila, a odstranjenje odstupanja projektila postiže se direktno korekcijom pravca leta projektila.

Kod pratećih sistema moguće je primeniti optiku sa uskim vidnim poljem, što povećava osetljivost, pa prema tome i domet topotne glave za samonavodenje. Pored toga, takvi su sistemi manje podložni smetnjama, jer se pri manjim vidnim uglovima smanjuje štetno dejstvo šumova i smetnji. Primenom pratećih glava postoji mogućnost da se prati cilj u granicama znatnih uglova, što proširuje taktičku mogućnost navođenja projektila na cilj.

Primena uskog vidnog polja kod pratećih glava ima takođe i svojih nedostataka: neophodno je da nosač projektila ima specijalne uređaje koji omogućavaju otkrivanje i prethodno navođenje koordinatora na cilj, ili da se glava tako konstruktivno izvede da obezbedi pretraživanje pred start ili u letu, što komplikuje uređaje.

Indikatorske glave sa širokim vidnim uglom odlikuju se prostom konstrukcijom i mogu dejstrovati i bez uređaja za prethodno navođenje na pravac cilja, ali, s druge strane, one su podložnije smetnjama i imaju manji domet.

I prateće i indikatorske toplotne glave za samonavođenje mogu da se podele na glave relejne regulacije ili upravljanja*) (po principu „da-ne“) i na glave proporcionalne regulacije.

Kod glava koje rade po principu „da-ne“ određuje se samo znak ugla greške, a ne i njihova veličina.

Kod glava sa proporcionalnom regulacijom veličina signala upravljanja je proporcionalna uglu greške.

U zavisnosti od načina izdvajanja signala greške, toplotne glave za samonavođenje mogu da se podele na glave sa impulsnim, frekventnim, faznim i amplitudno-faznim metodom izdvajanja signala greške.

Ovi metodi se odlikuju sledećim osobinama:

- impulsni, kod koga se pri pojavi ugla greške s koordinatoma dobijaju određeni električni impulsi koji omogućavaju, posle izvesnih transformacija, da se odredi znak i veličina ugla greške sa daljim korišćenjem ovog signala za otkrivanje ugla greške (glava „madrid“);

- frekventni, kod koga za različite položaje cilja u odnosu na osu koordinatora, odgovarajući signali različitih učestanosti (JUNO-1, „linze“);

- fazni, kada se, u zavisnosti od položaja cilja, sa koordinatoma dobijaju signali različitih faza („emden-1“);

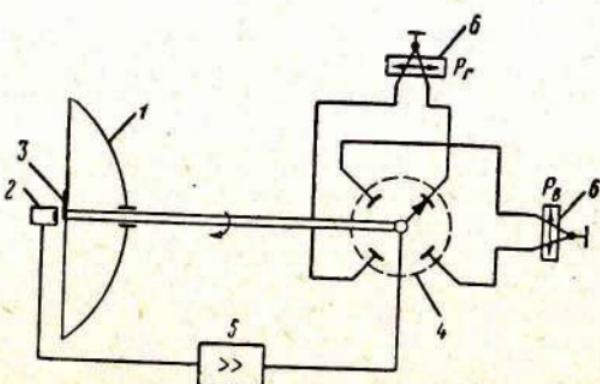
- amplitudno-fazni, pri kome se u zavisnosti od znaka ugla greške i njegove veličine, s koordinatora dobijaju signali različitih po fazi i amplitudi.

Prateća toplotna glava za samonavođenje, „madrid“, razrađena u Nemačkoj krajem II svetskog rata, bila je predviđena za navođenje protivavionskih projektila tipa „zemlja-vazduh“, na vazdušne ciljeve (4).

Koordinator toplotne glave za samonavođenje „madrid“ (sl. X.5), sastoji se iz „paraboličnog“ ogledala 1, u čijoj se žizi postavlja hlađeni olovo-sulfidni fotootpornik 2. U neposrednoj blizini fotootpornika postavlja se modulacioni disk 3, sa jednim izrezanim kvadratom (vidi sl. X. 6).

*) Automatsko upravljanje sa zatvorenom petljom — naziva se automatskom regulacijom. Kod ovakvog automatskog upravljanja, u procesu upravljanja stalno se kontroliše stanje upravljanog objekta i na osnovu toga vrši korekcija upravljujućeg signala. — *Prim. red.*

Sihrono sa modulacionim diskom okreće se rotor preklopnika 4, koji izvrši četiri priključenja u toku jednog obrta.



Sl. X.5 — Šema topotne glave za samonavodenje — „madrid“

Kad fluks zračenja od cilja padne u vidno polje uređaja, ogledalo obrazuje u žižnoj ravni, gde je postavljen fotootpornik, lik cilja u vidu mrlje rasipanja. Pri tom će se sa fotootpornika skidati strujni (naponski) impulsi, sa učestanošću koja je određena uglavnom brzinom modulacionog diska. Posle pojačavača 5, podešenog na tu učestanost, ovi signali preko razdelnika-komutatora dolaze na namotaje 6, releja R_h , R_v , koji dejstvuju na organe za upravljanje položajem koordinatora. *)

Ako se lik cilja nalazi u centru vidnog polja (ugao greške ravan je nuli), onda oba namotaja ostaju bez struje, jer nema modulacije fluksa i prateći sistem ostaje u pređašnjem položaju. Pri ovome su upravljući signali, koji dejstvuju na organe upravljanja projektila, ravni nuli, te organi upravljanja zauzimaju neutralan položaj.

Kada se lik pomera van centra vidnog polja nastaju modulisani signali koji dolaze preko komutatora na namotaje releja. Pri tom, u zavisnosti od toga u kom se kvadrantu nalazio lik cilja, signal će doći u odgovarajući namotaj releja i to tako da izvršni mehanizam vraća koordinator u stranu smanjenja ugla greške.

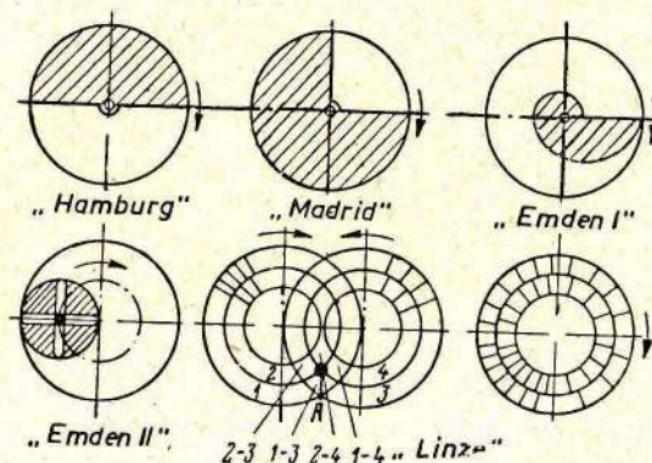
*) U horizontalnoj i vertikalnoj ravni. — Prim. red.

Koordinator pri povratku određuje signal upravljanja, koji dejstvuje na organe upravljanja tako što oni zaokreću projektil do poklapanja njegove uzdužne ose sa pravcem na cilj.

U projektalu „encian“, za upravljanje radom glave primjenjen je elektropneumatski uredaj, koji je omogućavao brzinu kretanja glave za ciljem 20%, pri uglu praćenja $\pm 30^\circ$. Vidni ugao optike iznosio je $\pm 30^\circ$. Vazduh koji je potreban za rad nalazio se u malom čeličnom balonu. Težina glave „madrida“ iznosila je 5 kg., a u njoj je bilo 3—4 elektronske cevi. Domet joj je iznosio oko 2—3 km, uzimajući kao ciljeve avione.

Dok je topotna glava „madrid“ određivala električne signale greške u pogledu pojedinačnih impulsa odredene učestanosti ponavljanja, kod glave za samonavođenje — „linze“ signali greške razlikovali su se po učestanosti u zavisnosti od položaja cilja prema optičkoj osi koordinatora.

Topotna glava za samonavodenje „linze“ sa vidnim uglom 16—20 $^\circ$, spada, po ranijoj klasifikaciji, u vrstu indikatorskih glava.

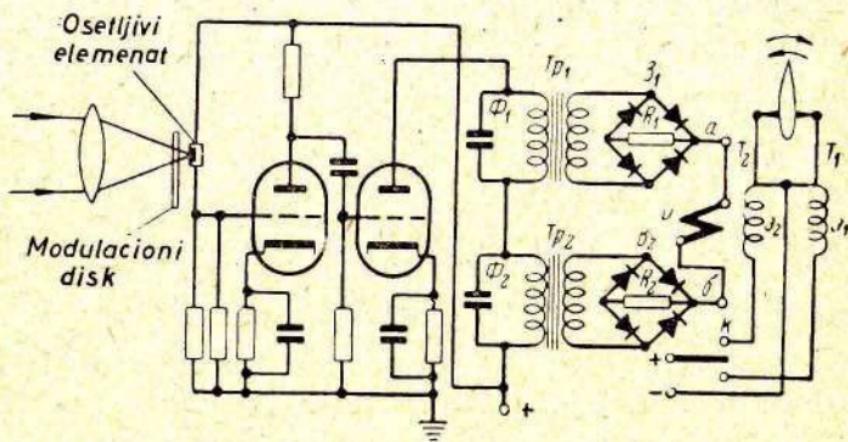


Sl. X.6 — Modulacioni diskovi nekih topotnih glava za samonavođenje

Za razliku od prethodne glave, ovaj uredaj je imao dva modulaciona diska (sl. X.6), postavljena u žižnoj ravni optičkog sistema iz kojih se postavlja fotootpornik [4,5]. Svaki disk ima dva reda proreza, čiji je broj u svakom redu različit. Pri

okretanju diskova obrazuju se četiri polja sa različitom učestanošću modulacije koje se međusobno prekrivaju, zavisno od toga na koje polje pada lik cilja, na ulaz pojačavača signala sa fotootpornika, obrazuje se signal različite učestanosti. U onom slučaju kada se lik cilja projektuje u tački A, na fotootporniku neće biti nikakvog signala. Sa ulaza pojačavača mešavina signala različitih učestanosti dolazi na električne filtre, od kojih je svaki podešen na jednu od učestanosti koje se obrazuju modulacionim diskovima.

Rad filtara može se videti na primeru šeme izdvajanja signala upravljanja za jedan od kanala upravljanja (na primer, vertikalni). Upravljanje po ovom kanalu postiže se pomoću dva suprotna polja (1–3, 2–4) koja obezbeđuju modulacioni diskovi.



Sl. X.7 — Principijelna šema izdvajanja signala upravljanja po vertikalnom kanalu, kod glave tipa „linze“

Šema (sl. X.7) sadrži dva filtra koji su podešeni na učestanost modulacije poljima f_1 i f_2 . Filtri su uključeni u anodno kolo zadnje cevi pojačavača i preko transformatora spregnuti sa ispravljačima b_1 i b_2 vezanim u mostnom spoju.

Ako se učestanost signala f_1 poklapa sa učestanošću filtra F_1 , na krajevima sekundarnog namotaja transformatora Tr_1 pojaviće se promenljivi napon, pod čijim će dejstvom kroz otpornik R_1 poteći struja i_1 . Na klemama a, b releja R_1 pojaviće se napon + u. Relej će se aktivirati, kontakti K će se spojiti i uključiće

napon na solenoid EM1. Jezgro solenoida, pomoću poluge T₁ spojeno je sa kormilom projektila, koje otklanjajući se obrazuje moment upravljanja, koji ispravlja trajektoriju leta projektila dotle dok se optička osa koordinatora ne poklopi sa pravcem na cilj. U momentu njihovog poklapanja signal na ulazu koordinatora postaje jednak nuli; relej otpušta kontakte i isključuje struju iz solenoida, a kormila ostaju u neutralnom položaju.

Ako se učestanost modulacije f₁ slaže sa podešenošću filtra F₂, na klemama a, b releja R1 pojaviće se naponi i relej će uključiti solenoid EM2, obezbeđujući time premeštanje kormila projektila u drugu stranu.

Na faznom principu izdvajanja signala bila je razvijena toplotna glava za samonavođenje „emden-I“ indikatorskog tipa, sa vidnim uglom od 20°.

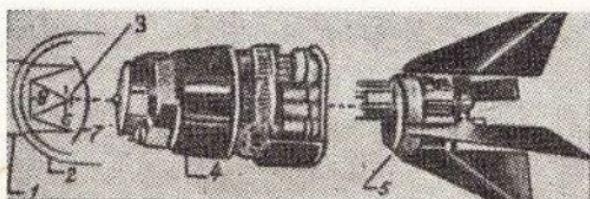
U ovom sistemu, modulacioni disk napravljen je u obliku Arhimedove spirale (vidi sl. X.6), čime je omogućeno da se dobiju u polarnom koordinatnom sistemu signali greške, koji se razlikuju jedan od drugog po fazi, zavisno od položaja cilja u odnosu na optičku osu koordinatora.

Sinhrono sa modulacionim diskom okreće se i generator naizmenične struje, koji predstavlja generator referentnog sinusnog napona. Faza strujnih impulsa sa fotootpornika, koje daje koordinator, upoređuje se sa fazom referentnog napona. Izdvojena u procesu upoređivanja faza, fazna razlika koristi se za obrazovanje signala upravljanja, koji vrši otklanjanje ugla greške između pravca na cilj i optičke ose koordinatora.

Kao primeri praktične primene toplotnih glava za samonavođenje na borbenim raketama su projektili tipa „vazduh-vazduh“ — „sajdvinder“ i „folkon“ GAR-2A (SAD), „fajerstrik“ (Engleska), C-7 (Italija), „matra“ R-510 (Francuska) [12]. Najrasprostranjeniji iz ove serije je projektil „sajdvinder“, predviđen za dejstvo protiv vazdušnih ciljeva, dužine 2,75 m, a prečnika oko 0,125 m.

Toplotna glava za samonavođenje (Sl. X.8) postavljena je u nos projektila i zatvorena aerodinamičkom kapom 2. Koordinator glave zauzima odsek dužine oko 10 cm. Za skupljanje i fokusiranje infracrvenog zračenja cilja 1 primenjen je ogledalski objektiv, koji se sastoji od paraboličnog ogledala 7 i ravног

ogledala 8. Prečnik paraboličnog ogledala iznosi 8,9 cm. Vidni ugao objektiva, u čijoj je žiči postavljen nehladeni olovo-sulfidni fotoootpornik 3, iznosi 4° . Do zahvata cilja optički sistem vrši



Sl. X.8 — Toplotna glava za samonavodenje projektila „sajdvinder“

pretraživanje. Toplotno zračenje cilja moduliše se modulacionim diskom koji se vrti brzinom 30 o/min. Sa fotoootpornika se skida signal greške, koji dolazi u pojačavač 4 i posle određivanja koordinata u izvršne organe — servomotore 5, koji upravljuju kormilima projektila. Težina glave je oko 9 kg.

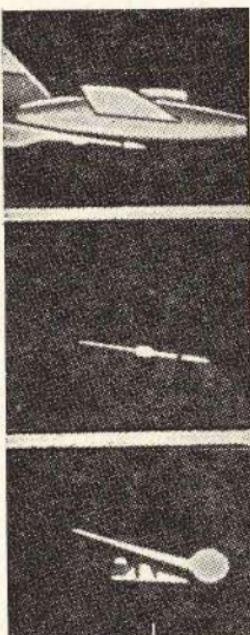
Kod projektila je primjenjen blizinski elektrooptički upaljač, koji aktivira eksploziju punjenja pri prolasku projektila blizu cilja, na rastojanju manjem od 10 m.

Kako se ukazuje u literaturi [8], projektil „sajdvinder“, (sl. X.9) bez obzira na svoju jednostavnost i male gabarite glave za samonavodenje, poseduje veliku tačnost pogadanja i u nizu slučajeva je pogadao trasere, pričvršćene na konzolama leteće mete, ne povredivši metu.

Efektivni domet toplovnih glava za samonavodenje je reda 3.300 m.

Engleski projektil „fajerstrik“ opremljen je složenijom toplotnom glavom s ogledalskom optikom. Aerodinamička kapa glave napravljena je u obliku osmostrane piramide od tankih ploča optičkog stakla (Sl. X.10).

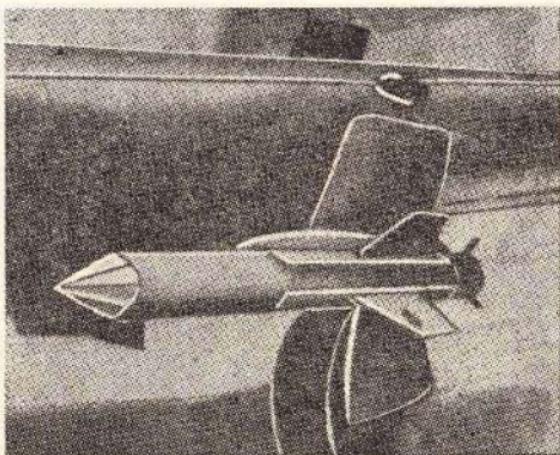
U šemi je saopštavano da toplotna glava za samonavodenje, projektila „fajerstrik“, ima



Sl. X.9 — Projektil „sajdvinder“ pogada traser za vreme ispitivanja

domet prema avionu tipa „meteor“, na malim visinama — danju 8 km, a noću na visini 3.000 m — 18 km. [8].

Veliki domet glave za samonavođenje omogućuje da se ostvari zahvat cilja pre lansiranja projektila sa aviona-nosača. Posle lansiranja projektila, avion-nosač može da izade iz napada, jer se praćenje cilja dalje ostvaruje, samostalno, topotnom glavom za samonavođenje.



Sl. X.10 — Projektil „fajerstrik“ sa topotnom glavom za samonavodjenje

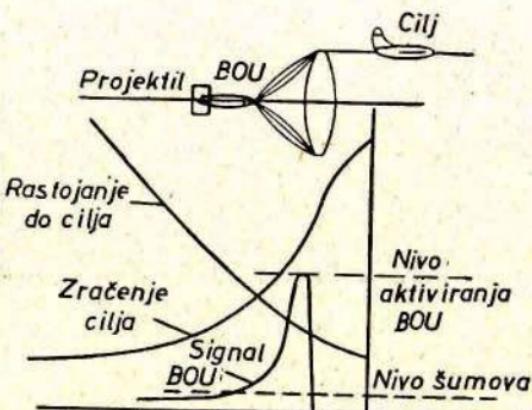
3. BLIZINSKI ELEKTROOPTIČKI UPALJAČI (BOU)

Za povećanje verovatnoće uništenja cilja pri nepreciznom navođenju projektila, primenjuje se blizinsko (nekontaktno) paljenje punjenja u neposrednoj blizini cilja. Na kom će rastojanju upaljač da se aktivira zavisi od tipa projektila, snage eksplozivnog punjenja, prečnika efikasnog dejstva parčadi. To rastojanje obično se kreće od 15 do 50 m za različite tipove projektila.

Primena blizinskih upaljača uslovjava veliku verovatnoću uništenja ciljeva koji raspolažu visokom manevarskom sposobnošću, kao što su vazdušni ciljevi. Po podacima iz literature (11), verovatnoća uništenja vazdušnog cilja projektilom sa blizinskim upaljačem dostiže 80 do 90%, dok je verovatnoća direktnog pogadanja cilja 60%.

Kao izvor informacije o pristizanju projektila u blizinu cilja mogu biti korišćene različite fizičke osobine cilja koje ga izdvajaju od okoline: odbijanje radio-talasa od cilja, sopstvena radio-zračenja cilja, sopstvena emisija zvuka, jačina magnetnog ili elektrostatičkog polja oko cilja, kao i toplotno zračenje cilja i optički kontrast cilja prema okolini. Danas se za vazdušne i nadzemne ciljeve najviše primenjuju radarski i elektrooptički blizinski upaljači.

Na sl. X.11 pokazana je promena tokom vremena fizičkog parametra koji predstavlja izvor informacije za blizinski elektrooptički upaljač i signala koji određuje trenutak aktiviranja eksplozivnog punjenja.

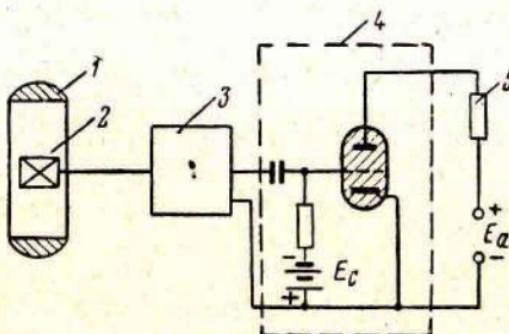


Sl. X.11 — Promena daljine cilja, njegovog zračenja i signala blizinskog upaljača

Po principu dejstva, elektrooptički blizinski upaljači mogu biti razvrstani u tri grupe:

- upaljače koji koriste toplotno zračenje cilja kao izvor informacije o prolasku projektila kraj cilja (pasivni sistemi);
- upaljače koji koriste modulisani fluks zračenja reflektovan od cilja, i emitovan od samog projektila (aktivni ili optičko-radarски sistemi);
- upaljače koji reaguju na vidni kontrast cilja prema okolini (kontrasni princip).

Na sl. X.12 predstavljena je principijelna šema jednog pasivnog elektrooptičkog upaljača, koji se sastoji iz prijemnika toplotnog (IC) zračenja 2, postavljenog u žihu toroidalnog sočiva sa kružnim vidnim poljem 1, pojačavača fotoelektričnog signala 3, tiratronskog releja 4 i piro-patrone 5.



Sl. X.12 — Principijelna šema pasivnog blizinskog elektrooptičkog upaljača

Kao prijemnik se koriste fotootpornici sa osetljivošću u dijapazonu talasnih dužina koji se poklapa sa spektralnom krivom toplotnog zračenja cilja. Za obezbeđenje kružnog vidnog polja, sloj fotootpornika se nanosi na podlogu cilindričnog oblika.

Oblik toroidalnog sočiva i položaj fotootpornika proračunati su tako da obezbede neophodno vidno polje i nagib vidnog polja napred, prema letu projektila. Ugao nagiba ose vidnog polja bira se u zavisnosti od brzine projektila i inertnosti elektronike upaljača i to tako da u intervalu od prijema informacije do eksplozije punjenja projektil ne ode dalje od cilja.

Pojačavač fotoelektričnog signala izведен je kao jednostepeni pojačavač, naizmenične struje, sa širokim propusnim opsegom (impulsni ili video-pojačavač). Pojačani impuls sa izlaza pojačavača vodi se na upravljačku rešetku tiratrona, u čijem anodnom kolu je uključena piropatrona sa baterijom. Posle paljenja tiratrona, kroz anodno kolo proteče jaka struja koja izaziva paljenje piropatrone i eksploziju punjenja.

Kad nema cilja, na fotootpornik pada zračenje od ravnomerne pozadine, na primer od neba. Struja u fotootporniku će se

malo menjati, pa će shodno tome sa izlaza pojačavača signal biti mali da bi upalio tiratron.

Domet ovakvog blizinskog upaljača određuje se njegovom osetljivošću, snagom zračenja cilja u datom pravcu i meteoro-loškim uslovima.

Prirodno je da pri upadu stranih topotnih izvora dovoljne snage u vidno polje elektrooptičkog upaljača, može nastati lažno aktiviranje upaljača i prevremena eksplozija punjenja.

Zato se za povećanje sigurnosti rada upaljača preduzima niz mera koje umanjuju mogućnost prevremene eksplozije projektila usled dejstva raznovrsnih izvora zračenja (na primer, oblaka osvetljenih Suncem, Sunca i Meseca, pojedinih zemaljskih objekata itd.). Takve mere mogu biti:

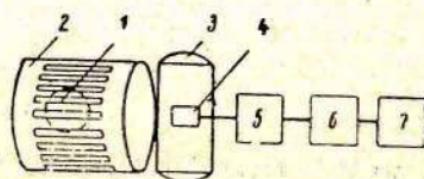
a) Primena uskopojasnih IC-filtara ispred fotootpornika koji propuštaju samo zračenja karakteristična za određeni cilj.

b) Uključenje dva fotootpornika po mostnoj šemi nasuprot jedan drugome. U tom slučaju zračenje neravnomerne pozadine padaće na dva fotootpornika i kompenziraće jedan drugog. Kad se u vidnom polju pojavi cilj (tačasti izvor), na jedan fotootpornik pašće zračenje cilja i pozadine, a na drugi samo zračenje ove poslednje. Kao rezultat toga u dijagonali mosta javiće se struja dovoljna da posle pojačanja uključi tiratronske reljeve.

c) Primena vremenskog blokiranja napajanja blizinskog elektrooptičkog upaljača, s tim da se upaljač doveđe u radni režim tek kroz određeno vreme, neophodno za približavanje projektila cilju. Blokiranje može biti ostvareno vremenskim reljem ili prinudnim nalivanjem elektrolita u akumulator kroz porozne pregrade posle lansiranja. Poslednji metod primenjuje se kod upaljača za američke protivavionske projektile. Kod njega se baterija za napajanje nalazi u suvom stanju, a elektrolit se čuva u sudovima sa poroznim zidovima. Posle lansiranja, usled ubrzanja, elektrolit prodire kroz pore u akumulator i dovodi upaljač u radni režim.

Kao primer aktivnog ili optičkolokacionog blizinskog upaljača (druga grupa) može se uzeti upaljač „pistole“, razrađen u Nemačkoj za vreme II svetskog rata.

Upaljač „pistole“ (Sl. X.13) ima izvor IC-zračenja 1, smešten unutar cilindra koji se okreće i ima prozore 2. Modulisano zračenje rasprostire radijalno (normalno na pravac kretanja) i kada projektil proleti blizu cilja modulisani zraci se odbijaju od cilja i padaju na prijemnu optiku upaljača 3, koja ih fokusira na prijemnik 4. Naizmenična fotoelektrična struja, sa frekvencijom jednakom učestanosti modulacije zračenja izvora, dolazi na ulaz pojačavača 5. Posle pojačavača signal se filtrira kroz električni filter 6, i vodi na izvršni relaj upaljača koji se aktivira i uključuje paljenje piropatrone, a ova izaziva eksploziju punjenja. Primena modulisanog IC-zračenja i uskopojasnog električnog filtra, podešenog na učestanost modulacije, obezbeđuje veću pouzdanost s obzirom na zračenje pozadine, jer se promenljivi signal ovoga zadržava na filtru i ne dolazi do izvršnog releja.



Sl. X.13 — Blok-šema aktivnog elektrooptičkog upaljača „pistole“

Elektrooptički upaljači treće grupe, koji rade na principu kontrasta cilja, predstavljaju obično fotorele i rade skoro redovno u vidljivoj oblasti spektra. Glavni njihov nedostatak je osetljivost na smetnje: pošto objekti imaju površine raznog sjaja i boje, upaljač mora biti proračunat za širi spektar, pa je time i više izložen spoljnijim smetnjama. Stoga ovi upaljači, i pored toga što mogu izazvati nekontaktno paljenje eksploziva u blizini cilja nisu našli praktičnu primenu.

G l a v a XI

EFIKASNOST I DOMET INFRACRVENIH UREĐAJA

1. OSOBENOSTI KONSTRUISANJA PASIVNIH INFRAKRVENIH UREĐAJA

Pri projektovanju i eksploataciji infracrvenih uređaja po principu pasivnog dejstva, uglavnom se susreću tri faktora koja određuju efikasnost primene uređaja u praksi, i to:

- a) zračenje cilja i okoline;
- b) prostiranje energije zračenja u atmosferi;
- c) parametri prijemnog uređaja koji pretvara energiju zračenja u odgovarajući električni signal.

Pri tome se aktivno može uticati samo na parametre prijemnog uređaja, uključujući optiku, uređaje za pretraživanje, osetljivi elementi i elektronsku šemu. No i ovde su manje ili više podložne izboru samo karakteristike osetljivog elementa i donekle optike. Izborom karakteristika osetljivog elementa i optike može da se odredi optimalno područje spektralne osetljivosti prijemnika, njegova integralna osetljivost, inertnost i gabaritne dimenzije ulaznog otvora optike.

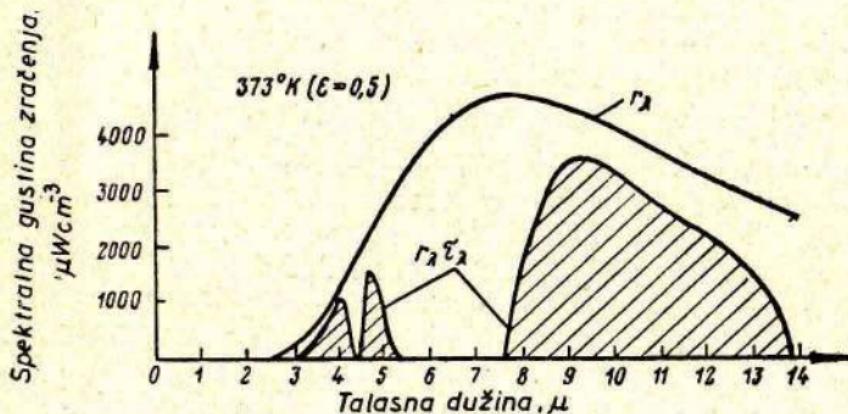
Neophodno je takođe da se zna fluks zračenja, koji dolazi od cilja i određuje domet uređaja u celini, a takođe i da se oceni ometajuće zračenje okoline, da bi se na podesan način ovo smanjilo i da uređaj bude sposoban za rad za vreme smetnji.

Pri oceni zračenja cilja i okoline obično se određuje spektralna gustina zračenja cilja ($r\lambda$) moć zračenja njegove površine ($E\lambda$) i talasna dužina maksimalnog zračenja (λ_{max}). Poslednja je interesan-

tina stoga što je u okolini λ_{\max} spektralna gustina zračenja proporcionalna petom stepenu temperature, dok je ukupno zračenje proporcionalno samo četvrtom stepenu temperature.

Kad se dobiju nužni podaci o zračenju cilja, neophodno je da se oceni njegovo slabljenje u atmosferi na traženoj daljini koja odgovara dometu uređaja. Ovo može da se izvrši nanošenjem krive spektralne prozračnosti atmosfere uz krivu spektralne gustine zračenja i množenjem odgovarajućih ordinata.

Ako je kriva r_λ nanesena u absolutnim energijskim jedinicama, onda površina ograničena krivom $r_\lambda \tau_\lambda$, karakteriše kvalitativno i kvantitativno fluks zračenja (uzimajući u obzir neselektivno slabljenje) koji pada na objektiv prijemnika. Kao primer, na slici: XI.1 prikazane su krive zračenja sivog tela ($E = 0,5$) s temperaturom površine 100°C pre i posle prolaska zračenja kroz atmosferu.



Sl. XI.1 — Zračenje sivog tela temperature $T = 100^\circ\text{C}$ pre i posle prolaska kroz sloj atmosfere, debljine 1,85 km ($\text{H}_2\text{O} = 18 \text{ mm}$)

Kao što se vidi iz navedenih krivih, energija zračenja posle prolaska kroz atmosferu pada na prijemnik, praktično, u dva spektralna područja od: $3,0—5,2\mu$ i $7,5—13,5\mu$. Ukoliko se smanjuje temperatura, sve veći procenat pada na zračenje u talasnem području $7,5—13,5\mu$.

Takva grafička konstrukcija omogućuje da se odredi optimalna oblast osetljivosti konstruisanog uređaja, polazeći od

mogućnosti osetljivog elementa i spektralne propustljivosti optike.

Često se mora rešavati i drugi zadatak: izbor spektralnog područja u kome bi osetljivost aparature prema temperaturnim promenama bila najviša. Takav se problem često sreće pri proračunu radijacionih pirometara i prijemnih glava uređaja za infracrveno osmatranje.

U tom slučaju, diferencirajući Plankovu jednačinu po temperaturi i deleći svaki član dobijenog izraza sa r_λ , dobija se:

$$\frac{1}{r_\lambda} \cdot \frac{dr_\lambda}{dT} = \frac{C_2}{\lambda T} \cdot \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda T}}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1}. \quad (\text{XI. 1})$$

Ako je $C_2/\lambda T$ veliko u poređenju sa drugim članom, onda se formula (XI.1) može da napiše u obliku:

$$\frac{dr_\lambda}{dT} = \frac{r_\lambda C_2}{\lambda T}. \quad (\text{XI. 2})$$

Dobijeni izraz definiše brzinu promene spektralnog intenziteta gustine zračenja sa promenom temperature tela, sa tačnošću 1%, ako je $\lambda T < 0,30 \text{ cm}^{-1} \text{ K}$ i 10%, ako je $\lambda T < 0,60 \text{ cm}^{-1} \text{ K}$.

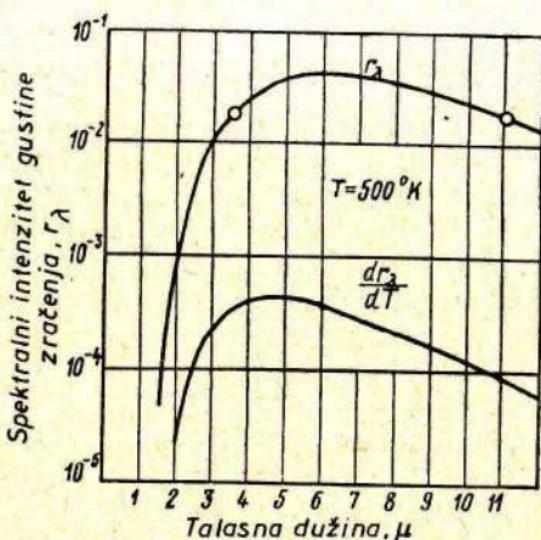
Na slici XI.2 konstruisane su spektralne krive intenziteta gustine zračenja apsolutno crnog tela, temperature 500 K ($\text{W cm}^{-2} \mu^{-1}$) i brzine njene promene ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \mu^{-1} (\text{K})^{-1}$).

Iz krive r_λ vidi se da na njoj postoji nekoliko parova tačaka s jednakim spektralnim intenzitetom gustine zračenja, pri raznim talasnim dužinama (na prim. pri $3,5$ i 11μ). Ako sada pogledamo krivu $\frac{dr_\lambda}{dT}$ očigledno je da je najpodesnija oblast u okolini $3,5 \mu$,

pošto je ovde pri promeni temperature za isti broj stepeni brzina promene spektralne gustine zračenja mnogo veća nego na 11μ . Konačan izbor spektralnog intervala u tom slučaju može da se ostvari samo uzimajući u obzir osobenosti rada uređaja, njegovu namenu, uticaj atmosfere i mogućnosti osetljivog elementa.

Gubici energije u atmosferi možda i ne bi predstavljali ozbiljnu prepreku pri razradi infracrvenih uređaja, kad bi imali odgovarajući visokoosetljivi elemenat sa širokom spektralnom

karakteristikom. U praksi, pak, nailazimo na osetljive elemente koji imaju, bilo visoku osetljivost u uskom pojasu spektra (foto-otpornici, fotodiode), bilo relativno nisku osetljivost u širokom dijapazonu talasnih dužina (termoelementi, bolometri).



Sl. XI.2 — Spektralni intenzitet gustine zračenja apsolutno crnog tela, temperaturre $T = 500^{\circ}\text{K}$ i brzina njene promene sa promenom temperature

Posle toga kad je utvrđena efektivna vrednost prijemnog fluksa zračenja, izbor osetljivog elementa treba vršiti uzimajući u obzir njegovu spektralnu osetljivost, preobražajnu osetljivost (V/W), prag osetljivosti (W), inertnost i koeficijent iskorišćenja datog zračenja. Pri tom se u svakom konkretnom slučaju ide na kompromisno rešenje. Nije obavezno da se bira osetljivi element sa širokom spektralnom karakteristikom ili s maksimalnom integralnom osetljivošću (minimalna ekvivalentna snaga šumova), pošto to može da dovede do složenosti konstrukcije (zahtev za dubinskim hlađenjem), ili do povećanja inertnosti sistema (kao u slučaju P₆S₁). Često je potrebno da se uračuna i neophodnost filtracije ometajućeg zračenja okoline.

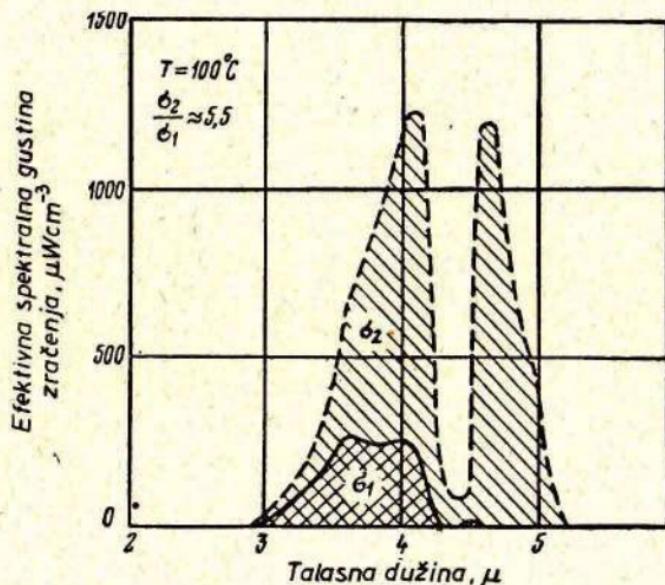
Jedan od osnovnih zahteva pri izboru osetljivog elementa je maksimalno pretvaranje primljenog fluksa zračenja:

$$R_{\text{ef}} = \int_0^{\infty} r_{\lambda} \tau_{\lambda} S_{\lambda} \tau_{o\lambda} d\lambda, \quad (\text{XI. } 3)$$

gde je:

$\tau_{o\lambda}$ = spektralna prozračnost optike, uključujući i filter.

Izračunavanje ovog integrala može da se izvrši grafički. Za to se, na primer, na krive $r_{\lambda} \tau_{\lambda}$ (vidi sl. XI.1), postave krive spektralne osetljivosti fotootpremnika i spektralne propustljivosti optičkog sistema. Množeći ordinate za svaku talasnu dužinu, dobijaju se krive koje ograničavaju ravni, proporcionalne izlazu osetljivog elementa R_{ef} za dato zračenje.



Sl. XI.3 — Reakcija PbS (-78) i $PbTe$ ($-185^{\circ}C$) na zračenje tela, temperature $T = 100^{\circ}C$.

Takav metod ocene omogućuje da se upoređuje efektivnost ovog ili onog osetljivog elementa na zračenje tela date temperature,

ili efektivnosti nekog osetljivog elementa na zračenja tela različitih temperatura.

Na slici XI.3. prikazan je proračun R_{ef} za olovo-sulfidni (-78°C) i olovo-telurni (-185°C) fotootpornik za zračenje sivog tela, temperature 100°C ($E = 0,5$).

Pri oceni efektivnosti zračenja nije uračunat uticaj propusljivosti optičkih detalja prijemnog uređaja, kao ni filtra. Zato prikazane krive karakterišu samo efektivni intenzitet gustine zračenja cilja (W/cm^3), koju je osetljivi element primio posle prolaska fluksa zračenja kroz atmosferu.

Kao što se vidi iz navedenog primera (vidi sl. XI.3) efektivnost olovo-telurnog (površina δ_2) je veća nego olovo-sulfidnog fotootpornika (površina δ_1) usled šire oblasti njegove spektralne osetljivosti. Efektivnost PbTe raste smanjenjem temperature zračenja cilja i povećanjem dubine hlađenja osetljivog elementa. Ovo je ilustrovano podacima Loka L.S. (1) koji navodi sledeći odnos izlaznih signala za PbS i PbTe, prilikom prijema zračenja apsolutno crnog tela, temperature 500°K , na rastojanju 1850 m:

$$\text{PbS (90}^{\circ}\text{K)} : \text{PbS (293}^{\circ}\text{K)} = 4,5$$

$$\text{PbTe (90}^{\circ}\text{K)} : \text{PbS (90}^{\circ}\text{K)} = 5,2$$

$$\text{PbTe (90}^{\circ}\text{K)} : \text{PbS (293}^{\circ}\text{K)} = 24.$$

Prema tome, ako PbTe i PbS imaju istu osetljivost na talasnim dužinama koje odgovaraju maksimumu osetljivosti, onda će PbTe biti 24 puta osetljiviji nego PbS pri sobnoj temperaturi za registraciju integralnog zračenja tela temperature 500°K . U stvarnosti, pak, integralna osetljivost PbTe unekoliko je manja od osetljivosti PbS, pa se takav dobitak ne može ostvariti.

Pri takvoj oceni osetljivog elementa, prirodno postavlja se pitanje o celishodnosti prelaska na sisteme sa većom širinom pojasa kao što su olovo-selenid, indijum-antimonid i germanijum, naročito za registrovanje nisko-temperaturnog zračenja. Takav prelaz može se opravdati samo u slučaju ako se spektralna kriva osetljivosti fotootpornika i njen maksimum nalaze u prozoru prozračnosti atmosfere od $7,5 - 13,5 \mu$. U protivnom, proširenje oblasti spektralne osetljivosti fotootpornika, u poređenju sa PbTe, ne daje nikakva preimuceštva, jer je u oblasti $5,2 - 7,5 \mu$

atmosfera u nižim slojevima potpuno neprozračna.*). Međutim, porast efektivnosti dugotalasnih osetljivih elemenata, pri registraciji niskotemperaturnog zračenja, na većim visinama i u kosmosu postoji u svakom slučaju.

Razmotreni kriterijumi ocene prijemnih infracrvenih uređaja, zasnovani na proračunu efikasnosti korišćenja spektra zračenja, dozvoljavaju da se oceni dejstvo zračenja cilja i okoline za ovaj ili onaj osetljivi elemenat, a takođe i da se odrede naj-optimalniji uslovi filtracije zračenja okoline.

Ako se konstruiše kriva zavisnosti spektralne efikasnosti energije zračenja, za neki osetljivi element (na primer, PbS), od temperature crnog tela, može se odrediti ne samo optimalna temperatura cilja za dati sistem već i stepen uticaja smetnji izvora sa drugim temperaturama (sl. IX.4).

U slučaju sistema sa PbS optimalna temperatura je 1700°K , pošto pri tom sistem prima 22% ukupne energije. Sistem ne reaguje na sopstveno zračenje oblaka (273°K), a reakcija na ciljeve tipa reaktivne mlaznice aviona (700°K) dovoljno je visoka. Ali on je skoro isto toliko osetljiv na reflektovano zračenje Sunca, pa je prema tome jako podložan uticaju zračenja okoline.

Pri konstruisanju infracrvenih uređaja problem slabljenja smetnji usled zračenja okoline je najteži, pošto okolinu mogu da predstavljaju različiti izvori sopstvenog ili odbijenog zračenja: sunčeva svetlost, svetlost odbijena od oblaka, od površine Zemlje i Meseca, zračenje objekta koji okružuju cilj, kao i zračenje atmosfere.

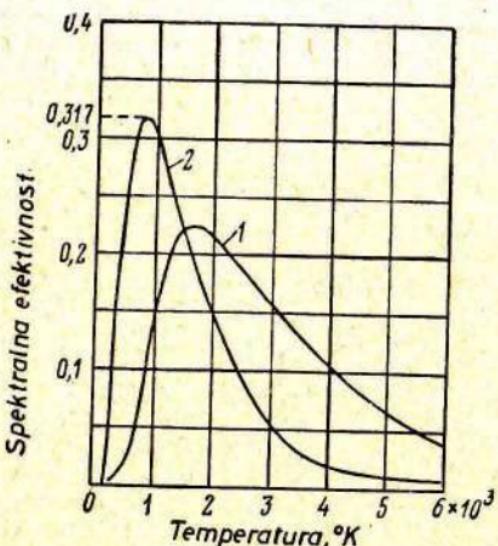
Štetno zračenje okoline otklanja se raznim metodama: izdvajanjem cilja prema njegovim dimenzijama, izdvajanjem intenziteta zračenja ili metodom optičke filtracije [2].

Metod optičke filtracije najrasprostranjeniji je u uređajima i sastoji se u sledećem: ako su poznate spektralne karakteristike zračenja cilja i okoline, onda se mogu izabrati takvi filtri koji će

*.) Primena širokopojasnog osetljivog elementa može da ima preimcušta samo ako je njegova osetljivost u području $3 - 5,2 \mu$ veća nego kod PbTe.

propuštati veći deo zračenja cilja, a skoro u potpunosti odseći zračenje okoline.

U slučaju primene uređaja danju, osnovne smetnje od okoline mogu nastati odbijanjem ili rasipanjem sunčeve svetlosti, čiji je spektralni sastav blizak pravom sunčevom zračenju. Sunce



Sl. XI.4 — Reakcija PbS na ciljeve
s različitom temperaturom

1 — sistem s PbS ; 2 — sistem s optimalnom filtracijom

pri temperaturi $T_c = 6000^{\circ}\text{K}$ zrači spektar talasne dužine $\lambda_{\max} = 0,5 \mu$ u kome 50% energije otpada na infracrveno područje iznad $0,7 \mu$, 25% — na oblast iznad 1μ i 2% — iznad 3μ . Zato je osnovni zadatak filtracije, u tom slučaju, odsecanje vidljivog i bliskog infracrvenog zračenja pri istovremenom propuštanju maksimuma zračenja cilja. Pošto je temperatura cilja uvek znatno niža od temperature Sunca, ovaj metod je dovoljno efektivan, ako je poznata propustljivost atmosfere i optike.

U slučaju primene uređaja noću, ili na ciljeve sa maksimumom zračenja na talasnim dužinama većim od 4μ , smetnje okoline mogu nastati od zračenja same sredine, zemlje i atmosfere. U tom slučaju, neophodno je da se odseče dugotalasno zračenje, što

može da se postigne pogodnom kombinacijom fotootpornika i dugotalasnog filtra.

Koristeći metod optičke filtracije može znatno da se povisi efektivnost prijemnog uređaja pri dejstvu na relativno nisko-temperaturne ciljeve. Kao primer, na slici XI.4 prikazane su krive spektralne efektivnosti infracrvenog sistema pri optimalnoj filtraciji, iz koje se vidi da je u tom slučaju reakcija sistema maksimalna (0,317) za zračenja tela zagrejanih na temperaturu oko 883°K , pri oštrom prigušenju osjetljivosti na štetno zračenje okoline.

Međutim, ova metoda praktično nije primenljiva, ako je temperatura cilja bliska temperaturi okoline ili kada odbijeno zračenje od okoline i zračenje cilja imaju slične spektralne karakteristike.

Za izdvajanje cilja u tom slučaju, može se koristiti razlika u dimenzijama cilja i okoline. Razvijeno je mnogo šema za izdvajanje cilja, koje se baziraju na ovom principu, ponekad i vrlo složenih, ali uvek zasnovanih na pretpostavci o tačkastom liku cilja na osjetljivom elementu i raznovrsnosti okoline koji ima kočne dimenzije.

Ovo omogućuje da se ostvari modulacija lika cilja, ne modulijući lik okoline ili da se razvije analizator koji se zasniva na periodičnom uvođenju u vidno polje sistema neprozračnog elementa, dimenzija jednakih dimenzijama lika cilja. Ako infracrveno zračenje posle uvođenja neprozračnog elementa dolazi na osjetljivi elemenat, onda to potvrđuje da je površina koja zrači infracrvene zrake veća od površine cilja, pa prema tome postoji nehomogenost okoline.

2. KRITERIJUMI ZA OCENU EFEKTIVNOSTI INFRACRVENIH PASIVNIH SISTEMA

Radna sposobnost infracrvenih sistema može se ocenjivati različitim parametrima. Međutim, u uređajima za vojne svrhe i delimično u uređajima za otkrivanje i upravljanje vatrom i uređajima za samonavodenje, od kojih se zahteva veliki domet, kao kriterijum ocene efektivnosti može da posluži sposobnost otkrivanja cilja u prisustvu šumova. Zato se kao kriterijum pri oceni radne sposobnosti uređaja za vojne svrhe uzima minimalna

veličina signala, koja se može izdvojiti iz šumova koji maskiraju korisni signal.

Šumovi u infracrvenim uređajima nastaju uglavnom iz dva razloga:

a) Šumovi elektronskih sistema nastaju pri mehaničkim vibracijama ili pri radu pratećih sistema. Ovi su šumovi promenljivi u toku rada i kod pravilno konstruisanih sistema osnovni izvori šumova biće samo osetljivi element i pojačavački sistem.

b) Šumovi koji potiču od nehomogenosti zračenja atmosfere, pozadine neba ili zemlje. Ovi šumovi se javljaju bilo usled neposrednog zračenja Sunca ili odbijanja i rasipanja sunčeve energije, bilo usled sopstvenog zračenja prirodne okoline. Ovi šumovi se relativno sporo menjaju a i zato se ocenjuju prema njihovoj prostornoj raspodeli.

Haotičke fluktuacije fluksa zračenja, koga prima osetljivi elemenat, po svojim osobinama malo se razlikuje od sopstvenih šumova u prijemnom uređaju. One se mogu odstraniti dotle dok nivo infracrvene energije na prijemu ne nadvisi nivo sopstvenih šumova osetljivog elementa. Zato osetljivost aparature može da se ocenjuje po nivou njenih sopstvenih šumova — prag osetljivosti (u inostranoj literaturi — ekvivalentna snaga šumova). Pod pragom osetljivosti podrazumeva se snaga infracrvenog zračenja u vatima na ulazu osetljivog elementa, koja obrazuje na izlazu signal jednak srednjoj vrednosti nivoa šumova, u odgovarajućem frekventnom području.

Pojam „Prag osetljivosti“ (ekvivalentna snaga šuma) odnosi se na osetljivi element. Pošto infracrveni sistemi sadrže i druge izvore šumova, kao karakteristiku rada uređaja u celini (u režimu otkrivanja ili praćenja) svrsishodno je uvesti pojам o minimalnom pragu osetljivosti aparature za obezbeđenje pouzdanosti rada. Tu veličinu određuje odnos signal/šum, pri kojoj će sistem raditi pouzdano. Obično se pri projektovanju infracrvenih uređaja pasivnog principa dejstva za osmatranje uzima odnos signal/šum jednak 3—5.

Odnos signal/šum omogućuje da se prema poznatoj veličini šuma oceni domet infracrvene aparature.

Ako se potpuno zanemare šumovi usled zračenja okoline i detalja aparature ispred osetljivog elementa, onda se domet

infracrvenog sistema pasivnog principa dejstva može odrediti iz odnosa:

$$\frac{S}{N} \bar{N}(\Delta f) = \frac{S_e S_o}{\pi L^2} \int_0^\infty r_\lambda \tau_\lambda r_{o\lambda} S_\lambda d\lambda, \quad (\text{XI. 4})$$

gde je:

S/N — odnos signal/šum;

$\bar{N}(\Delta f)$ — srednja vrednost šumova, osetljivog elementa u datom frekventnom području Δf ;

S_e — površina cilja cm^2 ;

S_o — površina ulazne pupile;

r_λ — spektralna gustina zračenja, W/cm^3 ;

τ_λ — propustljivost atmosfere;

$r_{o\lambda}$ — propustljivost optičkog sistema;

S_λ — spektralna osetljivost prijemnika;

L — rastojanje do izvora zračenja.

3. DOMET PASIVNIH INFRACRVENIH SISTEMA

Domet pasivnih infracrvenih sistema zavisi od mnogih faktora, koje je ponekad nemoguće uzeti u obzir. Ali orijentaciono, domet infracrvenog sistema može da se proceni ako je moguće proceniti veličinu fluksa zračenja koji je došao od cilja na osetljivi element i uporediti ga sa pragom osetljivosti aparature Φ_{pr} (ekvivalentna snaga šuma) izraženog u vatima.

Takav proračun dometa primenljiv je ako nema zračenja okoline i može da se izvede po formuli:

$$L = \sqrt{\frac{\epsilon \sigma}{\pi} T_e^2 \frac{S_e S_o}{\Phi_{pr}} \tau_o \tau_a \cos \alpha \cos \beta}, \quad (\text{XI. 5})$$

gde su:

α i β — uglovi (sl. XI.5) između linije posmatranja i normale na površinu koja zrači S_e , i normale na ravan objektiva S_o , respektivno.

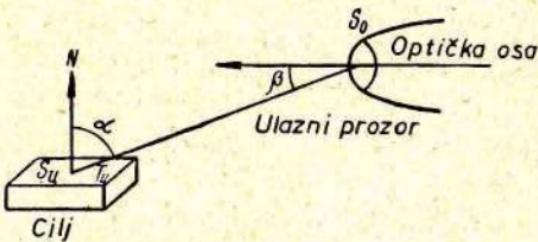
U izraz (XI.5) ulaze veličine integralne moći zračenja ϵ , prozračnosti atmosfere τ_a i optičke τ_o u odnosu na zračenje cilja, temperature T_e i izabranog osetljivog elementa. Zato i veličina praga osetljivosti Φ_{pr} mora da se odredi polazeći od izabrane spektralne raspodele zračenja cilja, propuštanja atmosfere i oset-

ljivosti prijemnika, što predstavlja izvesnu nepogodnost, pošto se Φ_{pr} kao karakteristika osetljivog elementa uvek daje u odnosu na zračenje potpuno određene temperature površine. Pored toga, za dato zračenje i spektralnu karakteristiku osetljivog elementa, mora se odrediti efektivna propustljivost atmosfere i optike.

Složenost takvog proračuna sastoji se u određivanju efektivnog fluksa zračenja, koji dejstvuju na osetljivi elemenat.

Metoda proračuna efektivnog fluksa grafičkim putem razmatrana je u § 1. Kao rezultat grafičkog integriranja, koje je praktično ograničeno u spektralnom predelu osetljivosti prijemnika i prozračnosti optike ($\lambda_2 - \lambda_1$), određuje se efektivna veličina fluksa zračenja (W/cm^2) koja dejstvuje na prijemnik.

Navedena metoda se može prihvati za proračun dometa infracrvenih sistema pasivnog principa dejstva, predviđenih za noćni rad, kada je ekivalentna snaga šuma osetljivog elementa (srednja kvadratna vrednost) određena sopstvenim šumovima osetljivog sloja i bliska podacima koje daje proizvođač. Danju, pak, kada je vrednost N određena uglavnom šumovima koji dolaze od zračenja okoline, i ne može dovoljno tačno da se uračuna, takav proračun može da unese primetne greške.



Sl. XI.5 — Uz proračun dometa IC-sistema pasivnog dejstva

U razmatranim metodama za ocenjivanje dometa pasivnih infracrvenih sistema prozračnost atmosfere se praktično uzima za ograničeni sloj prema odgovarajućim krivama. Greška pri tom neće biti previše velika, jer ukoliko je veći sloj apsorbera, utoliko manju dopunsку apsorpciju izaziva povećanje sloja atmosfere. Eksperimentalno je utvrđeno da nema primetne promene propustljivosti atmosfere (naročito na većim visinama) sa povećanjem

njene debljine iznad 2 km. *) Ovo omogućava da se koriste eksperimentalne krive prozračnosti atmosfere Džebija, bez unošenja primetne greške u proračunu dometa infracrvenih sistema.

Proračun dometa infracrvenih uredaja pasivnog dejstva, prema razmatranim formulama, prilično je zametan posao. Zato su preduzeti pokušaji da se konstruišu nomogrami za proračun dometa pasivnih infracrvenih sistema. Jedan takav nomogram (Sejmorov nomogram) prikazan je na sl. XI.6 [3]. Nomogram je konstruisan prema formuli (XI.6), pri sledećim uslovima:

1) zračenje cilja se moduliše učestanošću koja nije veća od granične učestanosti koju određuje vremenska konstanta prijemnika;

2) osetljivost prijemnog uređaja ograničena je sopstvenim šumovima prijemnika zračenja, a odnos signal/šum jednak je 4;

3) lik cilja potpuno pada na površinu osetljivog elementa (prijemnika zračenja):

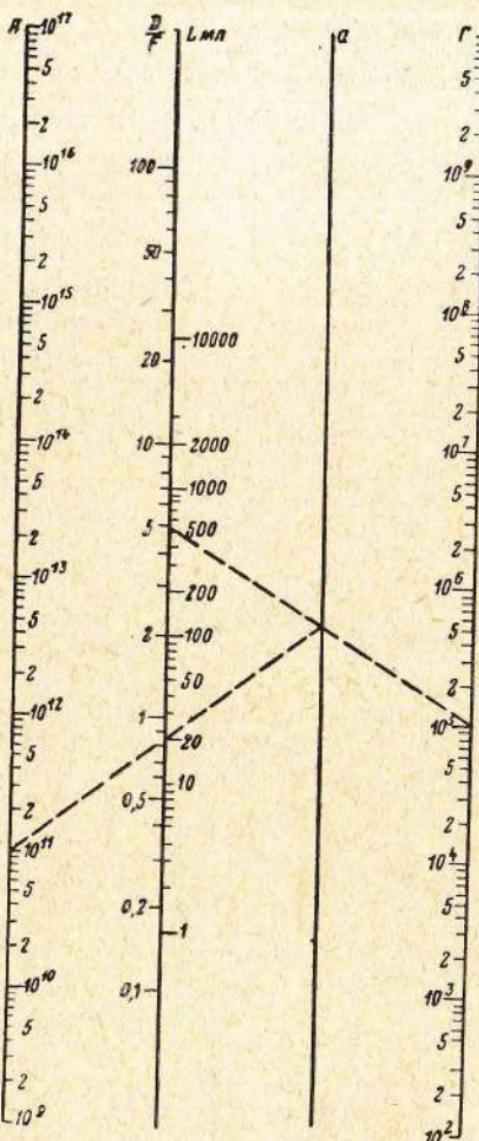
$$L = K \sqrt{\int_0^{\infty} \frac{J_{\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{a\lambda}}{N} d_{\lambda} \frac{D}{F} \left(\frac{nts}{\omega t} \right) \frac{1}{2}}, \quad (\text{XI. } 6)$$

gde je:

$$\int_0^{\infty} \frac{J_{\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{a\lambda}}{N} d_{\lambda} = A - \text{spektralni faktor;}$$

K	— koeficijent proporcionalnosti;
J	— jačina zračenja (W/sterad);
$\tau_{a\lambda}$	— srednja spektralna prozračnost atmosfere, za spektralni interval osetljivosti prijemnika zračenja;
$\tau_{o\lambda}$	— spektralna propustljivost optike;
N	— granična osetljivost prijemnika (ekvivalentna snaga šumova) — (W);
D/F	— relativan otvor optičkog sistema;
$G = \frac{nts}{\omega t}$	— parametar skaniranja;
n	— broj osetljivih elemenata;

*) Ovde se više misli na spektralnu promenu propustljivosti atmosfere
— Prim. prev.



Sl. XI.6 — Nomogram za proračun dometa infracrvenog sistema pasivnog dejstva

t_s

- vreme trajanja kadra (s) (vreme trajanja jednog prebrisavanja vidnog polja);

- ω — vidno polje po kadru (sterad);
 t — vremenska konstanta (s).

Odredivši parametre skaniranja (pretraživanja) infracrvenog sistema, spaja se odgovarajuća tačka skale G sa vrednošću relativnog otpora. Zatim se spaja tačka preseka konstruisane prave sa pomoćnom pravom a i određena vrednost spektralnog faktora A . Domet infracrvenog sistema u miljama čita se na skali L .

Ako istovremeno na prijemnik deluju fluksovi od cilja i okoline, čije zračenje ne može da se odstrani filtriranjem, kaže se da sistem radi prema toplotnom kontrastu. Domet sistema može se odrediti sledećim razmatranjima.

Efektivni fluks zračenja cilja i okoline koji pada na prijemnik *) određuje se kao:

$$\Phi_c = \varepsilon_c \sigma T_c^4 S_c \frac{S_o}{\pi L^2} \tau_{oc} \tau_{ac} \cos \alpha \cos \beta;$$

$$\Phi_p = \varepsilon_p \sigma T_p^4 S_p \frac{S_o}{\pi L^2} \tau_{op} \tau_{ap} \cos \alpha \cos \beta.$$

Korisni signal na izlazu pasivnog infracrvenog sistema biće proporcionalan razlici ukupnog fluksa od cilja i od dela okoline koji nije zaklonjen ciljem i fluksa od okoline;

$$\Delta \Phi = \Phi_c + \Phi_p' - \Phi_p, \quad (\text{XI. } 7)$$

gde je:

$$\Phi'_p = \varepsilon_p \sigma T_p^4 (S_p - S_c) \frac{S_o}{\pi L^2} \tau_{op} \tau_{ap} \cos \alpha \cos \beta,$$

pa je prema tome:

$$\Delta \Phi = \sigma S_c \frac{S_o}{\pi L^2} \cos \alpha \cos \beta (\varepsilon_c \tau_{oc} \tau_{ac} T_c^4 - \varepsilon_p \tau_{op} \tau_{ap} T_p^4).$$

Ako se uzme $\Delta \Phi = \Phi_{pr}$, onda je po analogiji sa izrazom (XI.5) moguće odrediti maksimalni domet takvog sistema.

*) Indeksi „p“ i „c“ u izrazima odnose se na zračenje pozadine (okoline) i cilja.

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi} S_e S_o \cos \alpha \cos \beta \left(\frac{\varepsilon_c \tau_{oe} \tau_{ae} T_c^4}{\Phi_{pr}} - \frac{\varepsilon_p \tau_{op} \tau_{ap} T_p^4}{\Phi_{pr}} \right)}. \quad (\text{XI. } 8)$$

Ako razlika $\Delta\Phi$ bude manja od praga osetljivosti prijemnog uređaja infracrvenog sistema, onda će ovaj da izgubi cilj.

4. DOMET AKTIVNIH INFRACRVENIH SISTEMA

Infracrveni sistemi aktivnog dejstva široko se primenjuju u uredajima za noćno osmatranje, kod pešadijskih noćnih nišana i u daljinomerima. Takvi sistemi sadrže impulsni izvor zračenja ili sa neprekidnim zračenjem.

Princip dejstva aktivnih sistema, nezavisno od vrste primjenjenog izvora zračenja, sastoji se u sledećem: visokointenzivni izvor zračenja, smešten u fokusu reflektora i pokriven infracrvenim filtrom, ozračava cilj. Odbijenu energiju zračenja od cilja prima prijemni sistem i fokusira na osetljivi element koji je pretvara u odgovarajući signal.

Efektivnost aktivnih sistema uglavnom se određuje slabljenjem fluksa zračenja u atmosferi, odnosno meteorološkom vidljivošću D .

Domet može da se odredi polazeći od sledećih uslova. Ako jačinu zračenja reflektora označimo sa I_r , onda ozračenost objekta ε_0 na rastojanju L od reflektora može da se izračuna iz odnosa:

$$\varepsilon_0 = \frac{J_r}{L^2} e^{-\beta L} \quad (\text{XI. } 9)$$

gde je:

β — srednja vrednost koeficijenata slabljenja atmosfere za spektralno područje osetljivosti sistema.

Usled odbijanja fluksa zračenja od objekta, ravan objektiva uređaja za osmatranje biće ozračena sa ε_p :

$$\varepsilon_p = \frac{J_o}{L^2} e^{-\beta L} = \frac{J_r}{L^4} S_o \rho_e^{-2\beta L} \quad (\text{XI. } 10)$$

gde je: $J_o = S_o \varepsilon_o \rho \frac{1}{\pi}$ — jačina zračenja fluksa odbijenog od objekta u smeru uređaja za osmatranje.

Ako se izvrše odgovarajuće transformacije i zameni veličina koeficijenta slabljenja na stvarnoj daljini vidljivosti (daljina vidljivosti u datom talasnom području, za koju može da se odredi vrednost koeficijenta slabljenja β), onda će izraz (XI.10) posle logaritmovanja da dobije oblik:

$$\lg \frac{J_r}{\varepsilon_{pr}} = 4 \lg L - \lg (S_o \rho) + \frac{1,45 L}{D}, \quad (\text{XI. 11})$$

gde je:

ε_o — prag osetljivosti uređaja za osmatranje;

D — stvarna meteorološka vidljivost.

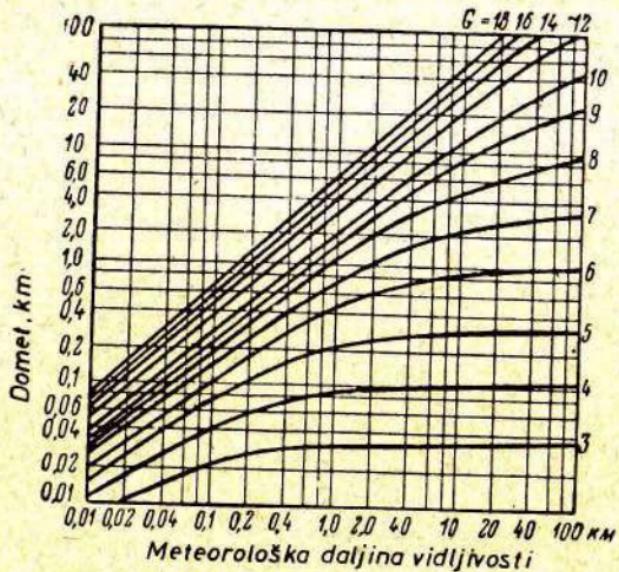
Neki autori logaritam odnosa J_r/ε_p određuju kao kvalitet aktivnog infracrvenog sistema G koji karakteriše koliko puta je red veličine jačine zračenja reflektora veći od praga osetljivosti uređaja za osmatranje.

Rešavajući jednačinu (XI.11) pri raznim vrednostima kvaliteta sistema, mogu da se konstruišu krive zavisnosti dometa aktivnog infracrvenog sistema od meteorološke vidljivosti pri raznim vrednostima G .

Iz slike XI.7 vidi se da pri kvalitetu sistema $G = 8$ povećanje meteorološke vidljivosti od 100 na 500 m povećava domet sistema kao i pri uvećanju kvaliteta sistema od 8 na 18, što odgovara poboljšanju sistema 10^{10} puta. Povećanjem meteorološke vidljivosti ovaj efekat se smanjuje. U slučaju promene meteorološke vidljivosti od 10 na 100 km priraštaj dometa sistema sa $G = 8$ iznosi samo 5 km, što odgovara povećanju kvaliteta G od 8 na 9.

Na domet aktivnih elektronskooptičkih sistema, pored stanja atmosfere, vidan uticaj ima i blesak pozadine ekrana pretvarača koji je uslovljen termičkom emisijom elektrona s fotokatode i osvetljavanjem ekrana usled rasipanja zračenja reflektora u atmosferu.

Blesak okoline na ekranu može znatno da se smanji racionalnim postavljanjem reflektora i uređaja za osmatranje, a takođe i



Sl. XI.7 — Domet aktivnih elektronsko-optičkih sistema u zavisnosti od meteorološke vidljivosti i kvaliteta sistema

hlađenjem fotokatode. U ovom drugom slučaju povećanje daljine otkrivanja može da se izračuna iz izraza (4):

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{\frac{\eta}{G_e^2} \frac{1}{4A^2} R + R_p}{\frac{\eta}{G_e^2} \frac{1}{4A^2} R}} \quad (\text{XI. 12})$$

gde je:

$L_1 L_2$ — daljine otkrivanja cilja sa uređajima s hlađenom i nehlađenom fotokatodom;

η — koeficijent pretvaranja;

G_e — elektronsko-optičko pojačanje;

R — gustina zračenja posmatrane površine;

R_p — gustina zračenja pozadine ekrana.

Ako su aktivni sistemi predviđeni za dobijanje bilo kakve informacije o prisustvu cilja, a ne za dobijanje lika (na primer kod daljinomera) onda se, po pravilu, primenjuje impulsno ozračenje cilja. Učestanost slanja impulsa, pri ovom, određuje se maksimalno dozvoljenom snagom rasipanja u sijalici i u električnom kolu.

$$P_{sr} = \frac{CU^2}{2} f, \quad (\text{XI. 13})$$

gde je:

f — učestanost ponavljanja impulsa;

C — kapacitet kondenzatora za pražnjenje;

U — napon do kog se puni kondenzator.

Ako je jačina zračenja impulsnog reflektora J_r , onda se ozračenost cilja određuje izrazom:

$$B_e = \frac{\rho_c \varphi_c}{\pi} = \frac{\eta_r B_r S_r \varphi_c}{\pi L^2} \tau^L, \quad (\text{XI. 14})$$

gde je:

η_r — koeficijent korisnog dejstva optike reflektora;

S_r — površina svetlosnog otvora reflektora;

B_r — blesak impulsne sijalice;

φ_c — koeficijent difuznog odbijanja površine cilja.

Pošto je jačina zračenja cilja usled odbijanja fluksa $I_c = S_c B_e$, na osetljivi element prijemnika pašće fluks Φ_c , koji izaziva na izlazu sistema određeni korisni signal

$$\Phi_s = J_c \frac{S_{po}}{L^2} \eta \tau^L = \frac{\eta_r \mu S_r S_{po} S_c B_p \varphi_c \tau^{2L}}{\pi L^4} \quad (\text{XI. 15})$$

gde je:

η — koeficijent korisnog dejstva prijemne optike;

S_{po} — površina ulaznog prozora prijemne optike;

S_c — površina projekcije ozračenog dela cilja u pravcu prijemnika.

Izraz (XI.15) predstavlja osnovnu formulu za određivanje dometa impulsnih optičkih sistema. Međutim, istovremeno sa

korisnim fluksom Φ_s , u prijemni uredaj ulazi i f luks zračenja okoline, koji izaziva šumove na izlazu sistema, na čijem nivou mora da se izdvoji koristan signal:

$$\Phi_p = \frac{\mu S_{po} B_p S'_c}{L^2} \quad (\text{XI. 16})$$

gde je:

B_p — blesak pozadine;

S_c — površina mrlje koja se upisuje u geometrijske dimenzije cilja*).

Jačina šumova proporcionalna je, u opštem slučaju, vidnom uglu prijemnog sistema Θ , površini prijemnog prozora optike S_{po} i blesku pozadine B_p :

$$N = K\Theta S_{po} B_p^{1/2}. \quad (\text{XI. 17})$$

Prema tome, efektivnost impulsnog optičkog sistema S/N određena je parametrima cilja, izvorom zračenja, predajnom i prijemnom optikom, atmosferom, pozadinom i daljinom:

$$S/N = K \frac{S_r S_c B_r \varphi_c \tau^{2L}}{\theta L^4 B_p^{1/2}} \quad (\text{XI. 18})$$

Razmotrimo izraz (XI.18) kada kao osjetljiv element služi fotomultiplikator. Struja fotomultiplikatora, usled korisnog signala Φ_s i signala od okoline Φ_p , srazmerna je odgovarajućim fluksevima zračenja:

$$i_s = K\Phi_s$$

$$i_p = K\Phi_p.$$

Struja šumova na izlazu pojačavača prijemnog sistema može da se izrazi sledećom formulom:

$$i_s = \sqrt{2e i_p \Delta f} \quad (\text{XI. 19})$$

gde je:

e — naboj elektrona;

Δf — propusni opseg pojačavača.

*) Ovde je svakako štamparska greška i treba da stoji: „... razmere prijemnika“. — Prim. prev.

Prema tome, odnos korisnog signala i šumova može da se iskaže sledećim izrazom:

$$\frac{i_s}{i_s} = \frac{K\Phi_s}{\sqrt{2e K\Phi_p \Delta f}}.$$

Zamenjujući Φ_s i Φ_p odgovarajućim vrednostima i uzimajući u obzir da je

$$S_p = \frac{S_c L^2}{f_p^2}$$

gde je:

S_c — površina izvora zračenja;

f_p — žižna daljina optike reflektora,

dobijamo sledeći odnos signal/šum u impulsnom optičkom sistemu sa fotomultiplikatorom kao osetljivim elementom:

$$\frac{i_s}{i_s} = \frac{\eta_r S_r \varphi_e Br \tau^{2L}}{\pi L^2 f_r} \sqrt{\frac{S_{po} \eta K S_c}{2e \Delta f Br}}. \quad (\text{XI. 20})$$

Ako se zada odnos signal/šum, neophodan za pouzdan rad sistema, može se iz izraza (XI.20) odrediti i njegov domet.

Iz izraza (XI.18) se vidi da su šumovi proporcionalni vidnom uglu prijemnog sistema Θ . Da bi prijemni sistem potpuno primao korisni fluks zračenja, njegov vidni ugao mora biti jednak ili veći od ugla zračenja reflektora. Međutim, u poslednjem slučaju povećavaju se šumovi i zato je poželjno imati što manje vidno polje, da bi prijemni uređaj primao što manji fluks od okoline.

Ako su uglovne dimenzije cilja (mrlje) veće od vidnog ugla prijemnika, onda će dimenzije mrlje koja deluje na prijemni uređaj (pri malim vidnim uglovima) biti $S_c = \Theta L$. Uvođenjem ove vrednosti u formulu (XI.18), dobijamo da je efektivnost impulsnog optičkog uređaja obrnuto srazmerna trećem stepenu daljine, a ne četvrtom:

$$S/N = K \frac{S_r Br \varphi_e \tau^{2L}}{L^3 B_p^{1/2}}. \quad (\text{XI. 21})$$

G l a v a XII

ODBRANA OD PROTIVNIKOVIH IC-SREDSTAVA

1. METODE ODBRANE (PROTIVDEJSTVA)

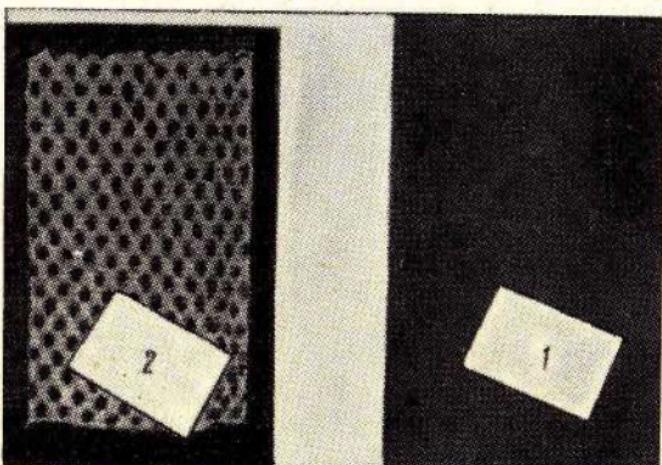
Poznato je da su pasivna IC-sredstva za otkrivanje, osmatranje, nišanjenje i navođenje, u odnosu na ometanje, mnogo sigurnija od aktivnih. Zaista, protivnik ne može da otkrije rad pasivnog sistema, jer ovaj ne zrači u okolinu nikakvu energiju. To je neosporno preim秉stvo pasivnih sistema uopšte, a infracrvenih posebno, u poređenju sa aktivnim, koji za svoj rad moraju ozračavati cilj elektromagnetnom energijom i primati echo-signal odbijen od cilja.

U vezi s tim dugo se smatralo da je ometanje infracrvenih sredstava protivnika teško, mada se ukazivalo da je infracrvena aparatura, u poređenju sa radarskom, osetljivija na neke toplotne ciljeve [1, 2, 3]. Istina, prisustvo više tela oko cilja koja zrače IC-zrake može dovesti do toga da IC-sistem predviđen za otkrivanje i praćenje određenog cilja, pređe na praćenje lažnog cilja. To je naročito opasno ako je IC-sistem predviđen za samonavodenje projektila na cilj, kod koga se posle lansiranja putanja više ne može ispraviti.

Druga mogućnost sniženja efikasnosti primene sredstava IC-tehnike bazira se na njihovom osnovnom nedostatku, koji se ogleda u velikoj zavisnosti dometa od sastava atmosfere. U gustoj magli i oblacima, uređaji IC-tehnike praktično i nemaju preim秉stva nad vizuelnim osmatranjem. Upravo stoga, u više inostranih saopštenja [4, 5], predlaže se kao mera za ometanje

korišćenje veštačkih maskiranih sredstava, kao što su magla i oblačnost.

Već odavno, i uspešno, se radi na razvoju maskiranih sredstava za zaštitu objekta od snimanja IC-fotografskim aparatom. Razvijeni su i primenjuju se specijalno obojeni materijali i maskirne mreže, a takođe i boje za kamuflažu objekata, čiji su spektralni koeficijenti odbijanja u području vidljive i IC-oblasti spektra isti kao i okoline [6, 7, 8] (sl. XII.1).



Sl. XII.1 — Slika normalne maskirne mreže u vidljivim [1] i infracrvenim zracima [2]

Ovaj metod protivdejstva može dati zadovoljavajuće rezultate u slučaju maskiranja stacionarnih ili pokretnih objekata na jednorodnoj okolini (na primer, brodova na moru). Sopstveno zračenje tela ne može se maskirati na ovaj način.

Sopstveno zračenje objekata može se maskirati pokrivačem od termoizolacionog materijala i izgradnjom zaštitnih ograda oko objekta. I pored skupoće i glomaznosti, ovaj način zaštite objekata od IC-sredstava ne može rešiti problem maskiranja ni svih stacionarnih objekata, a kamoli pokretnih. U mnogo slučajeva, ovaj metod može poremetiti toplotni režim objekta, što bi izazvalo njegovo prevremeno izbacivanje iz upotrebe.

Postavljanje lažnih toplih ciljeva oko objekta, mada moguće u stacionarnim uslovima, nije uvek efikasno. Naročito

za ometanje rada optičkog sistema samonavodenja SOLO, mora se prethodno u neposrednoj blizini objekta postaviti više izvora zračenja, koji bi se posle bacanja bombi brzo udaljavali od objekta [9], što je veoma teško ostvariti.

Širok razvoj sredstava IC-tehnike, naročito nišanskih sistema i IC-glava za samonavodenje reaktivnih projektila, zahteva izgradnju efikasnijih sredstava zaštite od pribora IC-tehnike.

Složenost postavljenog zahteva sastoji se u tome što je za efikasno ometanje IC-pribora za osmatranje i nišanjenje neophodno imitirati topotno zračenje branjenog objekta, kako po snazi tako i po spektralnom sastavu zračenja [10]. Ovo, pak, iako ostvarljivo u zemaljskim uslovima, zahteva ogromne izdatke, jer lažni cilj po temperaturnom režimu, dimenzijama i karakteristikama zračenja materijala mora biti ekvivalentan branjenom objektu.

Još složeniji je problem zaštite letećih i pokretnih objekata, jer se pored njih ne mogu postaviti glomazni izvori smetnji.

Prvi način zaštite takvih objekata jeste u smanjenju snage topotnog zračenja, tj. u sniženju temperature izlažnih gasova i smanjenju površine superbrzih aviona i raketa, a takođe i u smanjenju njihove sposobnosti zračenja. Ovaj metod je u protivrečnosti sa taktičkim zahtevima aviona i njihovim vekom, a može da se primeni samo u izuzetnim slučajevima. Povećanjem brzine leta povećava se i temperatura obloge aviona, pa je radi trajnosti neophodno koristiti materijal sa visokim koeficijentom zračenja. Smanjenje snage IC-zračenja moguće je jedino veštačkim hlađenjem površine aviona, pomoću rashladnih uređaja.

Do danas je objavljeno malo radova iz oblasti ometanja IC-uređaja. Ipak, iz kratkih saopštenja o ispitivanjima IC-glava za samonavodenje mogu se naslutiti osnovni načini rešavanja ovog problema, a to su:

- a) usavršavanje metoda hlađenja [11];
- b) manevrisanje cilja [3, 6];
- c) primena malih izvora visokog intenziteta zračenja u vidu pirotehničkih raketa [12, 13, 14, 15, 16];
- d) korišćenje niskotemperaturnih izvora smetnji [10, 13, 14, 17, 18];

- e) korišćenje brzih raketa radi ometanja raketa napadača [13, 14, 15, 19];
- f) primena veštačkog zamagljivanja atmosfere [6, 20];
- g) izgradnja specijalnih letelica snabdevenih izvorima IC-zračenja, koje lete iza bombardera pri ulasku u vazdušni prostor protivnika [3, 15, 21].

2. SMANJENJE TOPLITNOG ZRAČENJA

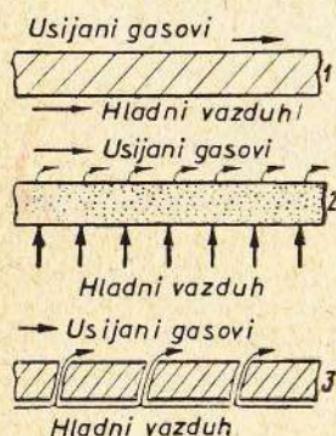
U inostranoj literaturi objavljeno je nekoliko teoretskih i eksperimentalnih radova, koji razmatraju mere za zaštitu od protivničkih sistema IC-tehnike, pomoću sniženja temperature površina letelica koje se zagrevaju radom motora i aerodinamičkim trenjem [22, 23].

Najprihvatljivije rešenje je primena vazduha kao rashladnog sredstva za hlađenje površina aviona, jer se može uvek dobiti

na svim visinama na kojima se mogu primeniti vazdušno-reakтивni i turbo-reaktivni motori, usled čega nije potrebno nositi rezerve rashladnog agensa, pošto je opterećenje motorom i gorivom i bez toga prilično veliko (kod savremenih aviona dostiže i 50—70% od ukupne težine pri poletanju). Usisavanje vazduha i njegovo prethodno hlađenje, prirodno, zahteva veću snagu motora, a to donekle povećava njegovu težinu. Ali, u poređenju sa drugim, ovaj metod je ipak najekonomičniji.

Postoje tri načina hlađenja spoljnih i unutrašnjih površina aviona vazduhom: konvekcioni, porozni i slojeviti.

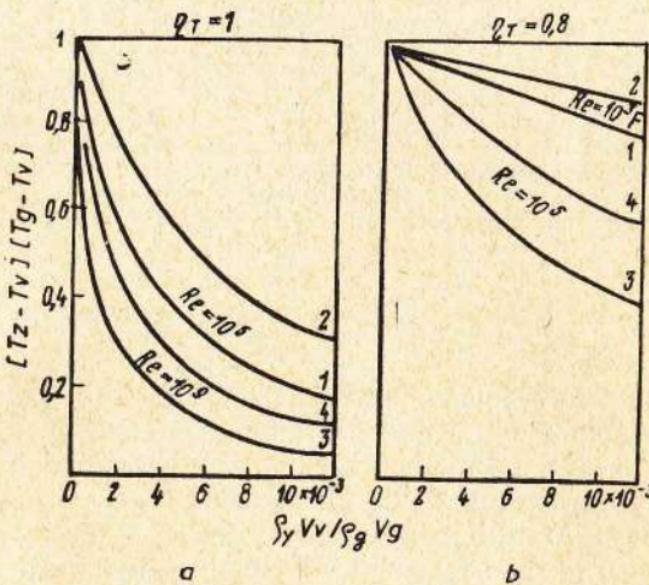
Pri konvekcionom načinu, struja hladnog vazduha usmerava se duž rashladne površine zida (sl. XII.2). Osnovni uslovi hlađenja određuju se, u tom slučaju, temperaturom zida pri kojoj materijal zadržava neophodnu čvrstoću. Hlađenje zidova do nižih temperatura iziskuje veći utrošak vazduha (sl. XII.3), a time i veću



Sl. XII.2 — Šematski prikaz konvekcionog (1), poroznog (2) i slojevitog (3) hlađenja

snagu motora. Efikasnost konvekcionog metoda hlađenja pri različitom utrošku vazduha predstavljena je na sl. XII.3. Na slici XII.3, kao i na svim sledećim dijagramima, označeno je sa:

- T_v — temperatura hlađenog zida;
- T_v — temperatura vazduha;
- T_g — temperatura gasa;
- $\rho_v V_v$ — srednja brzina mase hladnog vazduha;
- $\rho_g V_g$ — srednja brzina mase struje izduvnih gasova;
- η_T — termički koeficijent korisnog dejstva hlađenja.

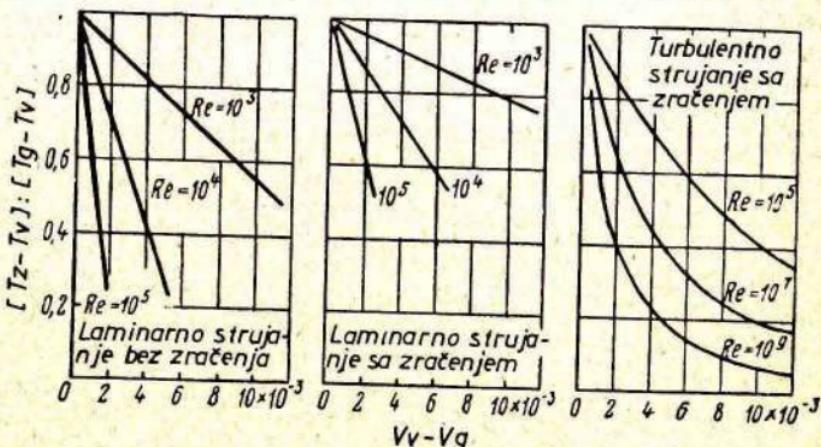


Sl. XII.3 — Efekat konvekcionog hlađenja:

- a) 1 — laminarno sa zračenjem; 2 — bez zračenja; 3 — turbulentno bez zračenja; 4 — sa zračenjem. b) 1 — laminarno bez zračenja; 2 — sa zračenjem; 3 — turbulentno bez zračenja; 4 — sa zračenjem

Iz dijagrama na sl. XII.3 vidi se da efikasnost konvekcionog hlađenja raste povećanjem utroška vazduha, Rejnoldsonovog broja i koeficijenta korisnog dejstva. Pored toga, efikasnost hlađenja pri laminarnom strujanju veća je nego pri turbulentnom. Iz krivih se takođe vidi da se sa porastom utroška vazduha strmina krivih smanjuje, iz čega sledi da se pri povećanju utroška vazduha iznad određene granice neće bitno povećati efikasnost.

Pri poroznom hlađenju, zidovi moraju biti od porognog materijala, a hladan vazduh mora da prolazi kroz pore u usijani gas. U tom slučaju između zida i usijanih gasova obrazuje se zaštitni sloj hladnog vazduha koji odvlače usijani gasovi. Na taj



Sl. XII.4 — Efektivnost „porognog“ hlađenja

način se stvaraju uslovi za protivstrujanje između topote hladnog vazduha i topote koju usijani gasovi predaju zidovima. Efikasnost hlađenja, na ovaj način, povećava se usled toga što je površina dodira između vazduha i zagrejanog zida vrlo velika. Zato će i temperatura zida biti jednaka temperaturi vazdušnog sloja koji usijani gasovi odvlače sa sobom. Rezultati ispitivanja ovog načina hlađenja pokazani su na sl. XII.4. Iz slike XII.4 se vidi da se pri ovom načinu relativan utrošak vazduha smanjuje povećanjem Rejhnoldsonovog broja. Tako na primer, za dobijanje iste efikasnosti hlađenja, pri $Re = 10^5$ potrebna je samo jedna trećina vazduha neophodnog pri $Re = 10^4$. Pri jednakim Rejhnoldsonovim brojevima, ovaj način hlađenja je prilikom laminarnog strujanja efikasniji nego pri turbulentnom.

Kod slojevitog hlađenja, vazduh ističe kroz otvore paralelno sa hlađenom površinom, obrazujući hladan sloj. Tada zid ostaje hladan samo pored otvora za hladan vazduh, dok u pravcu otvora za isticanje gasova njegova temperatura postepeno raste. Smanjenje neravnomernosti temperature zidova može se postići

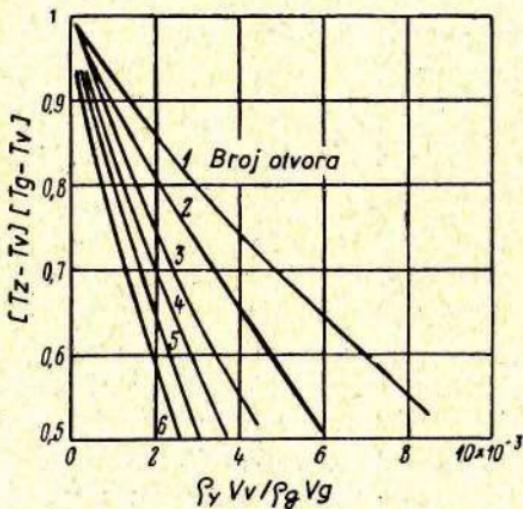
povećanjem broja otvora, što se vidi sa slike XII.5, gde je prikazana zavisnost utroška hladnog vazduha od broja rupa pri fiksiranoj temperaturi zida T_z .

Poređenjem razmotrenih načina hlađenja možemo izvesti sledeće zaključke:

1. Kod termičkog hlađenja koeficijent korisnog dejstva $\eta_T = 1$, a kod relativno dobrog hlađenja odnos (efekat) $(T_z - T_v) : [T_g - T_v] = 0,4$. Pri tom je kod konvekcionog hlađenja potrebno tri puta više vazduha nego kod poroznog.

2. Preim秉stvo slojevitog hlađenja je u tome što se praktično može da primeni kod većine konstrukcija.

3. Pri konvekcionom hlađenju vazduh može da se nalazi pod bilo kojim pritiskom, dok kod druga dva načina mora da postoji razlika u pritisku između vazduha i usijanih gasova. Istina, pri konvekcionom hlađenju potrebno je prethodno hlađenje vazduha koji je zagrejan aerodinamičkim trenjem.



Sl. XII.5 — Efektivnost „slojevitog“ hlađenja

Efikasnost hlađenja, sa gledišta toplotnog zračenja aviona, može se oceniti na primeru konvekcionog hlađenja pri turbulentnom strujanju i Rejnoldsonovom broju $Re=10^9$. Radi jednostavnijeg računanja uzmimo da je $\eta_T = 1$. Tada će za $T_g =$

$= 1.000^{\circ}\text{K}$ i $T_v = 373^{\circ}\text{K}$ pri odnosu $(T_z - T_v) : (T_g - T_v)$ $= 0,4$ temperaturna ohlađene površine biti $T_z = 624^{\circ}\text{K}$. Shodno tome, pri svim ostalim jednakim uslovima, snaga toplotnog zračenja će se smanjiti za 6,5 puta, a daljina otkrivanja aviona sredstvima IC-tehnike za 2,55 puta.

Ako se pri ovim uslovima poveća utrošak vazduha za 2,5 puta, može se dobiti efikasnost ravna 0,2 (sl. XII.3, kriva 4a). Za ovaj slučaj temperaturna zida postaje $T_z = 498^{\circ}\text{K}$, što odgovara smanjenju snage zračenja za 16 puta, a daljine otkrivanja za 4 puta.

3. ODBRANA MANEVROM

Obrana manevrom kao sredstvom zaštite od neprijateljskog napada, poznata je već odavno. Ovaj metod uzet je u razmatranje kao jedna od mogućnosti za odbranu od neprijateljskih IC-sredstava, čije se funkcionisanje bazira na sledećim osobenostima:

- Dijagram IC-zračenja savremenih reaktivnih aviona ima oštro usmereni oblik.
- IC-sredstva, kao i sva druga sredstva za otkrivanje i navođenje na cilj, imaju ograničeno vidno polje i izvesnu inertnost.
- Neprijateljski avion, naoružan IC-sredstvima za otkrivanje, ništanjanje i navođenje, mora da napada na cilj-avion sa njegove zadnje strane. Prema tome, njegova brzina mora da bude veća od brzine cilja, ali mu je zbog toga i sposobnost manevriranja manja od sposobnosti aviona-cilja.
- OštRNA manevra brzih aviona ograničena je opterećenjima koja pri manevru nastaju, naročito pri manjim visinama i efektivnošću nosećih površina i organa upravljanja na većim visinama.

Na taj način, manevriranje ciljem mora da onemogući napadaču gađanje raketama sa IC-glavom za samonavođenje, ili u kojima bi se organi upravljanja raketom dovodili u situaciju da ne mogu ponoviti manevr cilja.

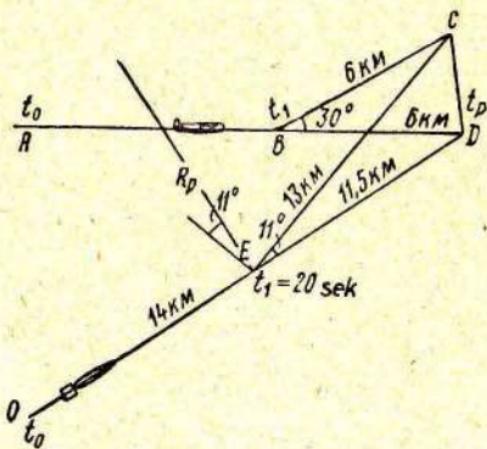
Pored toga, manevriranje avionom treba izvesti tako da se maksimalno smanji zračenje u pravcu napadača, što omogućuje izbacivanje iz dejstva IC-sistema za samonavođenje. U nekim radovima [6] se predlaže da se pred izvođenje manevra isključe motori čime bi napadački IC-uredaji izgubili cilj.

Manevar aviona kao mera za ometanje protivničkih IC-sistema za praćenje i samonavodenje sadrži tri osnovna elementa: promenu brzine, visine i kursa. Ovi elementi nemaju isti uticaj na efikasnost protivdejstva IC-uredajima.

Promena brzine savremenih teških bombardera za 100–150 km/č može se izvesti za 2–2,5 minuta, dok raketa leti svega nekoliko sekundi do cilja od momenta njegovog hvatanja glavom za samonavodenje.

Pri manevriranju po visini po istom kursu letenja, brzina propinjanja ne obezbeđuje naglu uglovnu promenu, pa se time ne postiže ni smanjenje IC-zračenja u pravcu protivničkih IC-uredaja, tako da će oni moći da slede ovaj manevar. Pored toga, iako raketa ne pogodi u sam avion, ona će proći mimo njega na dovoljnem rastojanju da blizinski upaljač izazove eksploziju punjenja i parčadima ošteti avion.

Najefektivniji manevar je oštra promena kursa sa maksimalno dozvoljenim opterećenjima. U tom će slučaju raketa sa IC-glavom za samonavodenje, koja ima mnogo veću brzinu od aviona,



Sl. XII.6 — Uz proračun navođenja rakete
na cilj koji manevriše

morati da izvrši zaokret sa mnogo većim radijusom. Pri tome nastaje realna mogućnost da IC-glava za samonavodenje izgubi cilj usled naglog smanjenja njegovog toplotnog zračenja u pravcu

rakete. U primeru na sl. XII.6 prikazana je mogućnost presretanja cilja sa raketom zemlja-vazduh pri sledećim uslovima:

visina leta aviona $H = 20.000 \text{ m}$;

brzina leta aviona $v_e = 300 \text{ m/sek}$;

brzina rakete $v_p = 700 \text{ m/sek}$;

težina rakete $P = 1.000 \text{ kg}$;

sila potiska motora rakete $F = 2.000 \text{ kg}$;

dopuštena opterećenja rakete (u manevru) $n = 1000 \text{ g}^*$.

Pretpostavimo da 20 sekundi posle starta rakete avion u tački B izvrši zaokret od 30° , produžujući let u pravcu BC. Raketa se tog trenutka nalazila u tački E, na rastojanju od 11,2 km od proračunate tačke susreta D. IC-glava za samonavodenje, delujući na kormila, zaokreće trajektoriju leta za 11° u pravcu EC. Ako se približno proračuna dužina luka po kome raketa nastavlja put koji odgovara tetivi EC, može se izračunati neophodni radijus zaokreta rakete, da bi ona stigla u tačku susreta C:

$$R_p = \frac{13 \cdot 57,32}{22} = 34 \text{ km.}$$

Dozvoljeni radijus zaokreta je:

$$R_g = \frac{v_p^2 \cdot P}{F \sin \alpha \cdot g},$$

gde je:

α — ugao otklona trajektorije rakete od prvobitnog pravca pri kome preopterećenja ne prelaze dozvoljene granice.

U slučaju kada je $\eta = 1000 \text{ g}$ i $\alpha = 15^\circ$ dobija se:

$$R_g = \frac{700^2 \cdot 1000}{516 \cdot 9 \cdot 81} = 95 \text{ km.}$$

Upoređujući dozvoljeni radijus skretanja rakete sa neophodnim, može se reći da pri manevru cilja od 30° u datim uslovima raketa neće pogoditi cilj.

*) Ovde je svakako štamparska greška jer takve rakete ne mogu imati ovoliko dopušteno preopterećenje. — Prim. prev.

Iz ovoga se vidi da u nekim slučajevima manevrisanje aviona može dovesti do ometanja protivničkih IC-sredstava za samonavodenje.

Treba imati na umu da su vreme za izvođenje manevra i njegova oština određeni brzinom i visinom leta, kao i poletnom težinom aviona. Porastom visine i brzine leta, manevar aviona je sve ograničeniji i odlikuje se velikim radijusima zaokreta. Ova činjenica sve više ide na ruku napadaču, dok je napadnutom sve teže da se spase od uništenja.

Na osnovu svega može se zaključiti da manevrisanje ponekad može dovesti do ometanja sistema za IC-samonavođenje, ali ne može uvek biti efikasna mera.

4. VEŠTAČKI IZVORI INFRACRVENOG ZRAČENJA

Prilikom ispitivanja raketa „vazduh-vazduh“ sa IC-glavom za samonavođenje u SAD i Engleskoj, pokazalo se da su rakete vrlo precizne i da sa vrlo velikom tačnošću pogadaju imitatore toplotnog zračenja aviona. Tako, na primer, pri ispitivanju rakete „sajdvinder“ njegova IC-glava za samonavođenje navodila je raketu na cilj sa takvom tačnošću da je ova pogadala traser na konzoli krila leteće mete F-9, ne oštetivši samu metu [12]. Pored toga, veliki broj projektila „falkon“ GAR-2A sa IC-glavom za samonavodenje uspešno je ispitivan na metama u vidu svetlećih raketa [15]. Ova ispitivanja omogućila su da se zaključi da avion napadnut raketama sa IC-samonavođenjem može da se zaštitи ako izbaci neki snažni izvor IC-zračenja [13, 14] koji bi skrenuo prateći sistem projektila i izazvao paljenje njegovog eksplozivnog punjenja.

Karakteristično je što se u literaturi posvećenoj odbrani od IC-sredstava [16] zaključuje da je neophodna izrada visoko-temperaturnih izvora smetnji, malih po dimenzijama, čiji ukupni intenzitet zračenja može da imitira zračenje reaktivnih motora i tečnih raketnih motora makar i za vrlo kratko vreme.

Pri tome se pretpostavlja da je raspodela energije zračenja u prostoru, i IC-izvora za ometanje i aviona jednaka i da se odnos intenziteta zračenja u pravcu napadača uzima kao odnos njihovih snaga zračenja (sl. XII.7).

IC-glava za samonavođenje biće ozračena podjednako od izvora za ometanje i aviona kad rastojanja budu, ne računajući prozračnost atmosfere, u odnosu:

$$\frac{\mathcal{J}_1}{L_1^2} = \frac{\mathcal{J}_2}{L_2^2},$$

kako je:

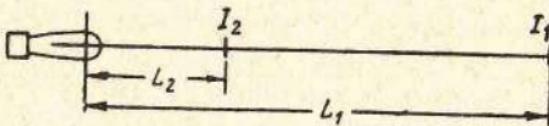
$$\mathcal{J}_1 = 10 \mathcal{J}_2,$$

sledi:

$$L_2 = \frac{L_1}{\sqrt{10}} = \frac{L_1}{3,3}.$$

Ako se uzme $L_1 = 660$ m, biće $L_2 = 200$ m, tj. izvor za ometanje treba postaviti na oko 440 m od štićenog aviona.

Počev od rastojanja 660 m od aviona, efekat dejstva IC-izvora za ometanje neprekidno raste u poređenju sa efektom zračenja aviona, jer se rastojanje od protivničke rakete do izvora za ometanje relativno brže smanjuje nego rastojanje do aviona. Na primer, na rastojanju 560 m od aviona, tj. 100 m od IC-izvora za ometanje, ozračivanje IC-glave za samonavođenje od IC-izvora za ometanje biće oko 29 puta veće nego od aviona.



Sl. XII.7. Uz proračun efikasnosti vučenog izvora zračenja

Aerodinamičko zagrevanje površina supersoničnih raket, a takođe i snažno zračenje njihovih mlaznika na aktivnom delu putanjе dozvoljavaju pretpostavku da se napadnuti avion može odbraniti od projektila sa IC-glavom za samonavođenje, ako u njegovom pravcu ispali kontraraketu čije će toplotno zračenje skrenuti IC-glavu za samonavođenje ili izazvati paljenje njenog eksplozivnog punjenja [13, 14]. Ova pretpostavka našla je svoju

praktičnu potvrdu pri ispitivanju dejstva rakete „falkon“ GAR-2A na brze rakete i projektile „matador“ [15].

Prirodno je da se takvi visokointenzivni izvori u vidu svetlećih ili signalnih raketa sa malim vremenom dejstva, predviđeni za skretanje protivničkih projektila sa IC-glavom za samonavođenje, ne nalaze u radnom režimu dok su na avionu. Za vreme sagorevanja oni se moraju nalaziti van aviona kojeg štite, tj. između aviona i protivničke rakete, i to na takvom rastojanju od aviona da ovaj ne strada od parčadi pri eksploziji rakete.

Godine 1957. uspešno je lansirana engleska raketa sa IC-glavom za samonavođenje „fajerstrik“ na izvor koji je imitirao zračenje aviona sa turboreaktivnim motorom [17]. Kao IC-izvor se koristio električni grejač učvršćen na vučenoj meti. Mada je snaga zračenja ovog električnog grejača bila vrlo neznatna, raketa je direktno pogodila u njega.

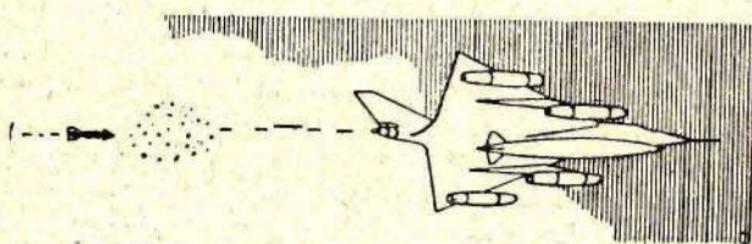
Pri poznatom odnosu rastojanja između aviona, toplotnog izvora i rakete, ozračenost IC-glave za samonavođenje od relativno slabog izvora toplote biće veća nego od snažnog izvora toplote, kao što je avion, ali udaljenog od rakete na relativno veće rastojanje.

U članku „Razvitak raketa tipa vazduh-vazduh u SAD“ [3] pokazano je da je odbrana bombardera od raketa sa IC-glavom za samonavođenje moguća korišćenjem toplotnih izvora koje bombarder vuče sa sobom. Pored toga, u SAD [10] firma „Junajtid Stejts fler asosiejšn“ počela je serijsku proizvodnju lакih izvora IC-zračenja malih dimenzija, predviđenih za postavljanje na avione-mete. Snaga ovih izvora u talasnom području od 0,75 do 7 mikrona zavisi od njihovih dimenzija i iznosi 500 do 2500 vati, u trajanju od 4 minuta.

Ako se uzmu podaci o snazi zračenja veštačkih izvora IC-zrakova (2500 vati) i snazi zračenja aviona (25000 vati), može se oceniti sa kog će rastojanja efekat toplotnog zračenja veštačkog IC-izvora biti veći na IC-glavu za samonavođenje od efekta zračenja aviona-teglica, koga ovaj izvor štiti. Štaviše, osetljivost IC-glava za samonavođenje na toplotnu energiju koju zrače supersonične rakete, omogućava da se ova toplotna energija iskoristi za navođenje antiraketa na međukontinentalne rakete [19].

Ceneći data saopštenja i priznajući mogućnost ometanja IC-sredstava protivnika pomoću supersoničnih kontraraketa izbačenih prema protivniku, ne treba izgubiti iz vida njihovu visoku cenu i ograničenu količinu koju avion, pored ostalih sredstava, može da nosi, što ograničava njihovu primenu samo na izuzetne slučajeve.

Prostiji i mnogo jeftiniji od svih veštačkih IC-izvora za ometanje je metod veštačkog zamagljivanja atmosfere između aviona i napadača, pomoću materija koje pri sjedinjavanju sa kiseonikom iz vazduha oslobođaju veliku količinu topote. U jednoj publikaciji [20] ukazuje se na izradu specijalnog trasera za praćenje trajektorije projektila „Aeromarker“-a koji daje jarki mlaž i oblak gustog dima po kome se i snima njegova trajektorija. Primećuje se da ovaj oblak dobro odbija elektromagnetne talase radarskog područja i služi kao izvor toplotnog zračenja za navođenje IC-sistema. Ako se uzme u obzir da se pri tome istovremeno maskira toplotno zračenje aviona, očevidno je da postoji mogućnost korišćenja ovakvog trasera za ometanje protivničkih IC-sredstava. Avion sakriven ovakvom dimnom zavesom moći će da izvrši manevar i izade iz zone protivničkog napada.



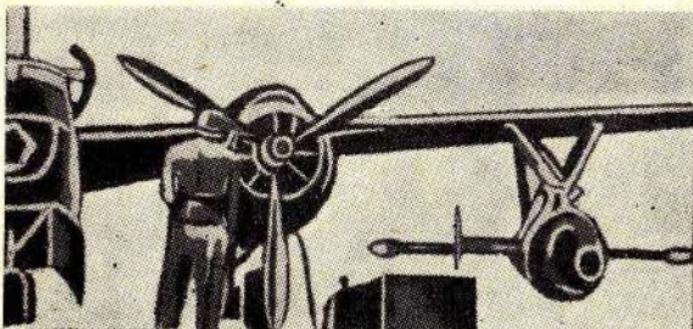
Sl. XII.8 — Zaštita bombardera pomoću oblaka sitnih čeličnih opiljaka

Nedostatak ovog metoda je u tome što postojanost oblaka zavisi od veličine čestica dima i brzine strujanja vazdušnih masa. Bez obzira na to, ovakve veštačke dimne zavese jednovremeno maskiraju toplotno zračenje objekta i ponašaju se kao izvor zračenja, te se zbog jeftinoće i prostog dobijanja mogu široko primenjivati. Poznato je da je u SAD razrađen jeftin metod dobijanja tetrachlor-titana koji se primenjuje kao odlično sredstvo

za stvaranje dimnih zavesa koji slabe IC-zračenje u području do 6 mikrona [27].

Interesantna su takođe ispitivanja o zaštiti od raketa sa IC-glavom za samonavođenje i osmatranja sa veštačkih satelita putem raspršivanja na njihovom putu oblaka peska ili finih čeličnih opiljaka. Pri sudaru projektila ili satelita sa takvim česticama, usled velike brzine, doći će do razaranja čeone kalote IC-glave za samonavodenje projektila ili satelita [29,30], što će dovesti do njegovog uništenja (sl. XII.8).

Na kraju, ne treba zaboraviti da su konstruisani i bespilotni nosači smetnji koji su opremljeni sredstvima za ometanje IC-sistema pasivnog i aktivnog tipa. Takvi nosači smetnji u potrebnom momentu puštaju se sa aviona i odvlače na sebe projektile sa IC-glavom za samonavođenje.



Sl. XII.9 — Lažan topotni cilj „fajerbi“ pod krilom aviona

U SAD je razrađen lažni topotni cilj „fajerbi“ kao letelica kojom se upravlja sa daljine, a izbacuje se sa zemlje, broda ili aviona pomoću barutnih bacača. Topotni izvori su postavljeni na specijalnim konzolama i automatski se uključuju pri izbacivanju (sl. XII.9). Poznato je, takođe, da se u SAD razrađuje i specijalni projektil „HKDT-1“ koji služi kao meta za ispitivanje raketa „vazduh-vazduh“ sa IC-glavom za samonavođenje, ali istovremeno može da služi i kao lažni cilj za zaštitu vazdušnih i zemaljskih objekata [28].

LITERATURA

Глава III

1. Иванов А. П. Электрические источники света. Госэнерго издат, 1955.
2. JOSA, 1946, C, vol. 36, №. 10
3. Aviation Age, 1957, III.
4. Aviation Week, 1957, V, vol. 13
5. Гопшк И. Аэродинамика больших скоростей. Изд-во иностранной литературы, 1954.
6. Левинсон Я. И. Физические основы аэродинамики больших скоростей, 1942.
7. Flying Safety, 1958, XI.
8. J. Royal Aeronautical S., 1958, vol. 62, №. 566
9. American Aviation, 1956, vol. 20, №. 11.
10. Перевод № 7469, БНТ.
11. Missiles and Rockets, 1958, VI, №. 5.

Глава III

1. JOSA, 1941, №. 7
2. Proc. Roy. Soc. Am., 1951, №. 1084, p. 206
3. JOSA, 1957, vol. 47, №. 3
4. JOSA, 1956, III. vol. 46, №. 3; IV, №. 4
5. J. Franklin Inst., 1953, vol. 255, №. 3, p. 189.

Глава IV

1. Каталог цветного стекла, Оборонгиз, 1951.
2. „Успехи физических наук”, 1941, т. XX, вып.
3. JOSA, 1948, vol. 38, p. 775
4. Локк А. Управление снарядами. Гостехиздат, 1967.
5. „Успехи физических наук”, т. 41, вып. 2
6. JOSA, 1947, vol. 37, p. 451
7. Instruments and Automation, 1957, vol. 30, №. 12

8. Electronics, 1957, 10.VIII, vol. 30, №. 8A.
9. А н г о . М. А., Инфракрасные излучения. Госэнергоиздат, 1957.
10. Jet Propulsion, 1957, V, vol. 27, №. 5
11. Western Aviation, 1957, vol. 35, №. 5.
12. JOSA, 1957, III, №. 3.
13. JOSA, 1955, VI, №. 6.
14. JOSA 1947, vol. 37, p. 337.
15. JOSA, 1947, vol. 37, p. 113.
16. J. Soc. Class Techol., 1954, vol. 38, №. 183.
17. Rev. Optique, 1954, vol. 33, №. 10.
18. Amer. Ceram. Soc. Bull., 1955, vol. 34, №. 9.
19. JOSA, 1957, vol. 47, №. 6.
20. JOSA, 1953, XII, №. 12.
21. JOSA, 1955, vol. 43, №. 11.

G l a v a V

1. М а р г о л и н М. А., Р у м а н ц е в Н. П. Основы инфракрасной техники. Воениздат, 1957.
2. Лукианов. Фотозлементы.
3. Г е р л и х П. Фотоэлементы, Гостехиздат, 1948.
4. IRE Trans. on Nuclear Science 1956, CXI, №. 4.
5. „Светотехника”, 1959, № 4.
6. Proc. of the IRE, 1955, vol. 43, №. 12.
7. Adv. Phys., 1953, vol. 2, p. 321.
8. Science, 1953, I, p. 115.
9. Proceedings National Electronics Conf., 1958, №. 13.
10. J. Scient. Instruments, 1957, IX, vol. 34, №. 9.
11. Aviation Week, 1959, 4. V.
12. Aviation Week, 1959, 13. IV.
13. J. Scient. Instruments, 1959, vol. 36, №. 4.
14. Electronics, 1959, vol. 32, №. 1.
15. Electronics, 1959, vol. 32, №. 5.
16. Electronique, 1956, №. 110.
17. JOSA, 1953, vol. 43, p. 239.
18. Physica, 1954, vol. 20, p. 989
19. Nachrichtentechnik, 1959, vol. 5, №. 10
20. Proc. IRE, 1957, vol. 45, №. 4
21. Electronics, 1957, 7. III.
22. Optical—Instruments, Chemical Publishing Co. Inc., Brooklyn, 1945, №. 4
23. Aviation Week, 1959, 21. IX.
24. „Новые полупроводниковые материалы”. Сборник под ред. Б. Г. Коломийца. Изд-во иностранной литературы, 1958.
25. Да н л э п У. Введение в физику полупроводников. Изд-во иностранной литературы, 1959.
26. Proc. Phys. Soc. 1953, vol. 66, sec. B, p. 993
27. „Физика твердого тела”, 1959, Г, № 4.

28. J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, №. 5
29. Missiles and Rockets, 1959, 9. XI.
30. Missiles and Rockets, 1959, V, №. 21

G l a v a VI

1. „Техника телевидения”, 1955, № 10 (16).
2. Z. angew. Math. und Phys., 1958, 25. IX, Bd. IXa, №. 3
3. Sci. News, 1956, №. 40
4. J. Scient. Instruments, 1955, X, vol. 32, №. 10
5. Radio Electronics, 1955, V, №. 5
6. Annalen der Physik, 1954, vol. 14, №. 1—2
7. „Успехи электровакуумной техники”. Сборник статей. Госэнергоиздат, 1956.
8. Z. angew. Phys., 1948, Bd. 1, №. 2
9. Elektron in Wissenschaft und Technik, 1949, IV, H. 4, S. 141
10. Engineering, 1955, 180, №. 4678
11. Electronics and Communications, 1957, vol. 5, №. 2
12. Electronics Industr. and Tele-Tech, 1957, vol. 16, №. 7
13. Proc. IRE, 1959, 47 №. 9

G l a v a VII

1. Army Quarterly, 1953, VII
2. Military Review, 1956, XI
3. J. Franklin Inst., 1954, XI.
4. Проспект Ф. ВВТ. (Франция) на аппаратуру Л-80.
5. Missiles and Rockets, 1960, 6. VI, №. 23
6. Electronic Design, 1960, 8. VI. №. 12
7. Aviation Week, 1960, 2. V, №. 18
8. White side T. The problema of vision in flight at high altitude, London, 1957
9. Trans. IRE 1957, VI, vol. ANE-4, №. 2
10. Electronics, 1957, VII, vol. 30, №. 7
11. Aviation Week, 1957, 13. V.
12. J. Institute of Navigation, 1958, vol. 6, №. 1
13. Инструкция по эксплуатации установки АФОС с аппаратурой выпуска 1956 г. Министерство приборостроения и средств автоматизации СССР, 1956.

G l a v a VIII

1. Functionale Photography, 1955, vol. 6, №. 5
2. Army-Navy-Air Force J., 1957, XI, vol. 45, №. 11
3. Брок Г. К. Физические основы аэрофотографии Геодезиздат, 1958.
4. Clark W. Photography by Infra-red, London, 1946
5. „Новое в военной технике” Сборник статей. Воениздат. 1958.
6. IRE Trans. Telemetry and Remote Control, 1955, vol. TRC-1, №. 2

7. „Успехи физических наук”, 1956, т. IX. вып. 2.
8. Science, 1956, vol. 123, №. 3193
9. Discovery, 1956, V, vol. 17, №.5
10. Instrum. and Automation, 1957, II, vol. 30, №. 2
11. Nature, 1958, III, vol. 181, №. 4610
12. Bur. Ships J., 1956, vol. 4, №. 11
13. Radio and Telev. News, 1955, IV, 54, №. 4
14. Перевод № 12318, БНТ.
15. Proceedings National Electronics Conf., 1958, vol. 13
16. Г е р ш у н А. А. Принцип и применены световой маскировки. Госэнергоиздат, 1948.
17. М е щ к о в В. В. Осветительные установки. Госэнергоиздат, 1947.
18. „Доклды Академии наук СССР”, 1956, т. 111, № 5.
19. Electronics, 1958, 26. IX, vol. 31, №. 39
20. Г у р е в и ч С. Б. Физические процессы в передающих трубках. Физматгиз, 1958.
21. Phys. Rev., 1950, vol. 79
22. Proc. Phys. Soc. 1951, vol. A 36, p. 362
23. National Convent Record IRE, 1957, pt. 3, p. 5
24. Electronics, 1956, XI, vol. 29, №. 11
25. Proc. IRE, 1957, vol. 45, №. 4, p. 12. A § 13 A.
26. J. of the Franklin Inst., 1957, VI, vol. 263, №. 6
27. Army-Navy-Air Force J., 1955, 17.XII.
28. Electronics, 1956, III, №. 3
29. А н г о М. А. Инфракрасные излучения. Госэнергоиздат, 1957.
30. JOSA, 1959, II, vol. 49, №. 2
31. Aviation Week, 1959, 19.I.
32. Aviation Week, 1959, 26.I.
33. Aviation Week, 1959, 2.II.
34. American Aviation, 1956, 2. VII.
35. Electronics, 1958, 15. VIII, vol. 31, №.33
36. Aviation Daily, 1958, 19. VI, vol. 116, №. 15
37. Aviation Week, 1957, 4. X, vol. 67, №. 15
38. Aviation Week, 1958, 18. VII, vol. 69, №. 7
39. Missiles and Rockets, 1958, VI, vol. 3, №. 7

G l a v a IX

1. П о л и к а р п о в Б. И. Обзоры иглообразным лучом. ВВИА им. проф. Жуковского, 1955.
2. Proc. IRE, 1959, IX, vol. 47, №. 9
3. Space Aeronautics, 1959, I, vol. 31, №. 1
4. Electronics, 1959, IV, №.17
5. Electronics, 1959, 32, №. 26, p. 38—41
6. Proc. IRE, 1959, XII, vol. 47, №. 12
7. „Иностранная авиатехника”, 1957, № 12
8. American Aviation, 1957, XII, №. 30

9. Aviation Daily, 1958, 9. IX, vol. 118, №. 6
10. Aviation Week, 1959, 4. V. №. 18
11. Missiles and Rockets, 1958, 22. XII, vol. 4, №. 25
12. Signal, 1959, II, №. 6
13. Aviation Week, 1959, 4. V, №. 18
14. Missiles and Rockets, 1959, №. 16
15. Interavia, 1959, №. 2
16. „Вопросы ракетной техники”, 1960, №. 4.
17. Electronics, 1959, vol. 52, №. 6
18. Missiles and Rockets, 1958, vol. 3, №. 7
19. Missiles and Rockets, 1958, 20. X, vol. 4, №. 16
20. Missiles and Rockets, 1958, 21. VII, vol. 4, №. 3
21. Missiles and Rockets, 1960, 23. V, №. 21
22. Missiles and Rockets, 1960, 14. III, №. 6
23. Missiles and Rockets. 1957, XI,
24. Electronics, 1954, VIII, №. 8
25. Николаев М. Н. Снаряда. Воениздат, 1960.

G l a v a X

1. Солодовников В. В. Основы автоматического регулирования. Машгиз, 1954.
2. Локк А. С. Управление снарядами. Гостехиздат, 1958.
3. Flight, 1958, vol. 74, №. 2602
4. Мюллер Ф. Телеуправление. Изд-во иностранной литературы, 1957.
5. Вараксин Я. Г. Радиоэлектроника в военном деле. Изд-во „Советское радио”, 1956.
6. Electronics, 1950, X, №. 10
7. Марисов В. И., Кучеров И. К. управляемые снаряды, Воениздат, 1959.
8. Aeroplane, 1958, vol. 95, №. 2462
9. Aviation Week, 1958, XII, vol. 69, №. 23
10. Electronics, 1958, XI, №. 11
11. Interavia, 1958, 1. IV, №. 3950
12. Janc's all the World's Aircraft, 1961—1962

G l a v a XI

1. Локк А. С. Управление снарядами. Гостехиздат, 1957.
2. Proc. IRE, 1959, IX, vol. 47, №. 9
3. Aviation Age, 1958, vol. 28, №. 7
4. Z. angew. Math. und Phys., 1958, 25. IX, №. 3

G l a v a XII

1. American Aviation, 1954, 25. X.
2. Aeronautics, 1957, I, №. 1
3. Missiles and Rockets, 1957, vol. 2, №. 7; vol. 2, №. 8

4. Aviation Week, 1957, III
5. Flight, 1956, vol. 70, №. 2498
6. Aviation Week, 1957, 25. III, №. 12
7. Textil-Praxis, 1957, vol. 12, №. 1
8. А н г о М. А. Инфракрасные излучения. Госэнергоиздат, 1957.
9. Aviation Week, 1958, 8. XII, vol. 63, №. 23
10. Aviation Daily, 1958, 28. XI, vol. 119, №. 17
11. Interavia, 1957, VIII, №. 12
12. Flight, 1956, 7. VII.
13. Aviation Week, 1957, 6. V. vol. 66, №. 18
14. Aircraft, 1957, VI, vol. 19, №. 6
15. Aviation Daily, 1957, 26. VII, vol. 111, №. 19
16. Astronautics, 1958, III, №. 6
17. Aeroplane, 1957, 3. V, vol. 92, №. 2382
18. Elektrotechnik, 1955, IX, №. 3
19. Interavia, 1956, X, vol. 11, №. 10
20. Interavia Air Letter, 1957, 30. IV, №. 3716
21. Flight, 1957, 6. XII, vol. 72, №. 2550
22. „Бюллетень ИАСА”, 1954, № 1182.
23. J. Brit. Interplanet. Soc., 1954, vol. 13
24. Flight, 1957, vol. 71, №. 2512
25. Aviation Week, 1956, vol. 65, №. 20
26. J. Commrce, 1957, 15. VII.
27. Missiles and Rockets, 1957, VII.
28. Missiles and Rockets, 1958, vol. 3, №. 7
29. Interavia Air Letters, 1960, 26. II, №. 4431
30. Missiles and Rockets, 1959, 31. VIII, №. 36.

VOJNA BIBLIOTEKA

— INOSTRANI PISCI —

Osnovana 1950. godine

Dosada izdala ove knjige

- 1) knjiga: General AJZENHAUER, **OD INVAZIJE DO POBEDE**, rasprodato.
- 2) knjiga: Maršal MONTGOMERI, **OD EL ALAMEJNA DO BALTIČKOG MORA**, rasprodato.
- 3) knjiga: Kamil RUŽERON, **BUDUĆI RAT**, rasprodato.
- 4) knjiga: Pukovnik dr fil., BEŠLAJN, **RUKOVODENJE NARODNOM ODBRANOM**, rasprodato.
- 5) knjiga: Bazil H. LIDEL-HART, **STRATEGIJA POSREDNOG PRILAŽENJA**, strana 397, cena 230 din.
- 6) knjiga: Kamil RUŽERON, **POUKE IZ RATA U KOREJI**, rasprodato.
- 7) knjiga: Džordž PATON, **RAT KAKVOG SAM JA VIDEO**, rasprodato.
- 8) knjiga: General ER, **ARTILJERIJA — NEKAD, SAD I UBUDUĆE**, strana 405, cena 300 din.
- 9) knjiga: Omar BREDLI, **USPOMENE JEDNOG VOJNIKA**, rasprodato.
- 10) knjiga: Pukovnik LIKA, **EVOLUCIJA TAKTIČKIH IDEJA**, rasprodato.
- 11) knjiga: J. O. HIRSFELDER, **ATOMSKA BOMBA I LIČNA ZAŠTITA**, rasprodato.
- 12) knjiga: Maršal PAPAGOS, **GRČKA U RATU 1940/41**, strana 400, cena 200 din.
- 13) knjiga: Džon KRESVEL, **RAT NA MORU 1939/45**, rasprodato.
- 14) knjiga: ROZBERI, **BILOŠKI RAT**, rasprodato.

- 15) knjiga: General-pukovnik DAPČEVIĆ, **ZNAČAJ I SNAGA MANEVRA**, strana 638, cena 500 din.
- 16) knjiga: General ŠASEN, **ISTORIJA DRUGOG SVETSKOG RATA**, rasprodato.
- 17) knjiga: SVEČIN, **STRATEGIJA**, strana 452, cena 450 dinara.
- 18) knjiga: AJMANSBERGER, **TENKOVSKI RAT**, strana 356 sa 3 priloga, cena 400 dinara.
- 19) knjiga: KAMON, **NAPOLEONOVI RATOVI**, rasprodato.
- 20) knjiga: KARPOV, **OBALSKA ODBRANA**, strana 524, cena 700 dinara.
- 21) knjiga: MIKŠE, **TAKTIKA ATOMSKOG RATA**, rasprodato.
- 22) knjiga: MIDEILDORF, **TAKTIKA U POHODU NA RUSIJU**, rasprodato.
- 23) knjiga: AJRE, **RATNA VEŠTINA I TEHNIKA**, strana 248, cena 300 din.
- 24) knjiga: PRENTIS, **CIVILNA ZAŠTITA U MODERNOM RATU**, rasprodato.
- 25) knjiga: HITL, **VOJNI ŠTABOVI**, strana 336, cena 500 din.
- 26) knjiga: Maršal JERJOMENKO, **STALJINGRAD**. Delo obuhvata staljingradsku operaciju u celini sa uništenjem nemačke 6. armije, kao i izvesne zaključke i iskustva iz ove operacije. Strana 522, cena 1.000 din.
- 27) knjiga: FOJHTER, **ISTORIJA VAZDUŠNOG RATA** (prevod sa nemačkog) strana 503, cena 850 din.
- 28) knjiga: Admiral KASTEKS, **STRATEGIJSKE TEORIJE** (I sveška). Strana 430, cena 600 din.
- 29) knjiga: GUDELIJAN, **VOJNI MEMOARI**, strana 623, cena 1.000 din.
- 30) knjiga: **VOĐENI PROJEKTILI**. Strana 546, cena 4.500 din.
- 31) knjiga: GRUPA POLJSKIH AUTORA, **ODABRANE OPERACIJE POLJSKE NARODNE VOJSKE**. Zbirka članaka o dejstvima jedinica Poljske narodne vojske do pada Berlina 1945. godine. Strana 432, cena 1.000 din.
- 32) knjiga: GRUPA SOVJETSKIH AUTORA, **PROBOJ ORGANIZOVANE ODBRANE**. Zbirka odabranih diplomskih radova sa sovjetskih vojnih akademija iz oblasti probaja organizovane odbrane operativnim jedinicama. Strana 487, cena 1.000 din.
- 33) knjiga: HERBERT FAJS, **ČERČIL — RUZVELT — STALJIN**. Delo predstavlja vojnodiplomatsku istoriju drugog svetskog rata koji pokazuje »rat koji su ovi vodili i mir koji su želeli«. Strana 840, cena 1.500 din.

- 34) knjiga: MIDELDORF, **TAKTIKA RODOVA I SLUŽBI**. Knjiga obrađuje postupno sve osnovne taktičke radnje taktičkih jedinica. Strana 671, cena 800 din.
- 35) knjiga: GRUPA SOVJETSKIH AUTORA, **TAKTIČKI PRIMERI BORBE**. Delo predstavlja zbirku odabranih konkretnih primera borbi pešadijskih pukova i njihovih delova na istočnom frontu. Strana 264, cena 800 din.
- 36) knjiga: Ešer LI, **VAZDUŠNA MOĆ**, Studija o mogućnosti vazduhoplovstva u savremenim uslovima. Strana 288, cena 650 din.
- 37) knjiga: MONTROS, **NEBESKA KONJICA**. Studija o helikopterima na osnovu iskustva u korejskom ratu. Strana 307, cena 700 dinara.
- 38) knjiga: MELENTIN, **OKLOPNE BITKE**, U knjizi nemački general Melentin opisuje sve važnije oklopne bitke iz drugog svetskog rata. Strana 448, cena 850 din.
- 39) knjiga: GRUPA SOVJETSKIH AUTORA, **RAZVOJ TAKTIKE SOVJETSKE ARMije 1941—1945**. Strana 593, cena 1.300 din.
- 40) knjiga: **ZBIRKA ČLANAKA IZ STRATEGIJE** (I sveska) Strana 646, cena 900 din.
- 41) knjiga: **ZBIRKA ČLANAKA IZ OPERATIVNE VEŠTINE** (I sveska). Strana 507, cena 1.600 din.
- 42) knjiga: **ZBIRKA ČLANAKA IZ TAKTIKE** (I sveska). Strana 803, cena 1.250 din.
- 43) knjiga: **ZBIRKA ČLANAKA IZ VOJNE PSIHOLOGIJE** (sveska). Strana 489, cena 1.000 din.
- 44) knjiga: Maršal JERJOMENKO, **NA ZAPADNOM PRAVCU**. Strana 336, cena 600 din.
- 45) knjiga: Maršal ČUKOV, **ODBRANA STALJINGRADA**. Strana 423, cena 600 din.
- 46) knjiga: **TRANZISTORI** (prevod sa engleskog). Strana 464, cena 1.100
- 47) knjiga: GRUPA SOVJETSKIH AUTORA pod redakcijom generala armije KUROČKINA, **METODIKA VOJNONA-UCHNOG ISTRAŽIVANJA**. Strana 384, cena 650 din.
- 48) knjiga: NASTAVNICI VOJNOPOLITIČKE AKADEMIJE »LENJIN«, **MORALNO-POLITIČKI FAKTOR U SAVREMENOM RATU**. Strana 382, cena 1.000 din.
- 49) knjiga: STERNBERG, **VOJNA I INDUSTRIJSKA REVOLUCIJA** (prevod sa nemačkog). Strana 360, cena 1.000 din.
- 50) knjiga: IVANOV i TJAPKIN, **INFRACRVENA TEHNIKA U VOJSCI**, Strana 351, cena 1800 din.

- 51) knjiga: **BUDONI, PREĐENI PUT.** (Memoari iz oktobarske revolucije). Strana 486, cena 750 din.
- 52) knjiga: **POPELJ, U TEŠKO VREME,** Strana 400, cena 700 din.
- 53) knjiga: **LOKTIONOV, DUNAVSKA FLOTILA U VELIKOM OTADŽBINSKOM RATU.** Strana 324, cena 1650.
- 54) knjiga: **POPELJ, TENKOVI SU OKRENULI NA ZAPAD** (druga knjiga piščeve trilogije). Strana 438, cena 1.100 din.
- 55) knjiga: Maršal SOKOLOVSKI, **VOJNA STRATEGIJA** (rad grupe autora). Strana 584, cena 1.100 din.
- 56) knjiga: **SEMJONOV, RAZVOJ SOVJETSKE OPERATIVNE VEŠTINE.** Strana 405, cena 1.250 din.
- 57) knjiga: **AKADEMIJA NAUKA SSSR, VELIKA BITKA KOD MOSKVE.** Strana 361, cena 1.200 din.
- 58) knjiga: **GRUPA SOVJETSKIH AUTORA, O SOVJETSKOJ VOJNOJ NAUCI.** Strana 420, cena 1.250 din.
- 59) knjiga: **KEGL i MENSON, POMORSKI RAT U KOREJI.** Strana 564, cena 1.850 din.
- 60) knjiga: **KOLESNIKOV, ZORGE.** Strana 246, cena 700 din.
- 61) knjiga: **GONČARENKO, KIBERNETIKA U VOJSCI.** Strana 409, cena 1.000 din.
- 62) knjiga: **GRUPA SOVJETSKIH AUTORA, BITKA ZA LENJINGRAD.** Delo je u štampi.
- 63) knjiga: **ROTMISTROV, ISTORIJA RATNE VEŠTINE — I.** Strana 701.
- 64) knjiga: **ROTMISTROV, ISTORIJA RATNE VEŠTINE — II.** Strana 880, cena I i II knjige 2550.
- 65) knjiga: **POPELJ, NAPRED NA BERLIN.** Delo je u pripremi.
- 66) knjiga: **BUĐONI, PREĐENI PUT — II.** (Memoari iz oktobarske revolucije). Delo je u pripremi.
- 67) knjiga: **EKLZ, LOGISTIKA U NACIONALNOJ ODBRANI.** Delo je u pripremi.
- 68) knjiga: **M. N. ALEŠKOV, J. J. ŽUKOV, OSNOVI RAKETNOG ORUŽJA.** Delo je u pripremi.
- 69) knjiga: **PLJASKIN, LISUHIN i RUVINSKI, INŽINJERIJSKO OBEZBEDENJE BORBENIH DEJSTAVA.** Delo je u pripremi
- 70) knjiga: **MANŠTAJN, IZGUBLJENE POBEDE.** Delo je u pripremi.
- 71) knjiga: **IVANOV, ŠEMANSKI i JANOV, KOMANDOVANJE JEDINICAMA U BOJU.** Delo je u pripremi.

J. A. IVANOV, B. V. TJAPKIN
INFRACRVENA TEHNIKA U VOJSCI

Redigovao prema originalu
kapetan I klase
Ratko Pavlić, dipl. inž.

*

Lektor
Veljko Aleksić

*

Tehnički urednik
Andro Strugar

*

Korektori
Biljana Đorđević
Vera Obradović

*

Stampanje završeno decembra 1966.
Tiraž 5.000
Cena 18 N. din.