

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO MATEMATIČKI FAKULTET
GRUPA FIZIKA

TEMA: ELEKTROLUMINESCIJA
KRISTALA I OSNOVNE KA-
RAKTERISTIKE (L.E.D.) SVETLO-
SNO EMITUJUĆIH DIODA

— DIPLOMSKI RAD —

NOVI SAD, MAJ 1976.

IVANKOVIĆ V.
BRANA

ZAHVALJUJEM SE PROFESORU
Dr SLOBODANU CARIĆU MENTORU
OVOG RADA I TEHNIČKOM SAR-
DNIKU, PAJVANČIĆ FRANJI NA
POMOĆI U EKSPERIMENTALNOM
RADU

S A D R Ž A J

	Strana
U V O D	1
LUMINESCENCIJA	2
ELEKTROLUMINESCENCIJA KRISTALA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE SVETLOSNO EMITUJUCIH DIODA	
1. OPŠTA TEORIJA ELEKTROLUMINESCENCIJE KRISTALA	3
SVETLOSNO EMITUJUCÉ DIODE	7
EKSPERIMENTALNI RAD I REZULTATI.KARAKTERISTIKE SVETLJENJA	
a) ZAVISNOST INTENZITETA SVETLJENJA OD NAPONA I STRUJE	12
b) ZAVISNOST INTENZITETA SVETLJENJA OD TEMPERATURE	30
c) PREKVENTNE KARAKTERISTIKE SVETLJENJA (INER- CIJA)	37
4. SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE SVETLOSNO EMITUJUCÉ DIODE	43
Z A K L J U Č A K	50
L I T E R A T U R A	52

U V O D

Danas se za najperspektivnije izvore svetlosti u opštičkoj elektronici smatraju elektroluminescentni izvori svetlosti. Elektroluminescentne izvore svetlosti predstavljaju poluprovođnici sa odgovarajućim primesama. Svetljenje se pobudjuje električnim poljem ili strujom koja protiče kroz poluprovođnički element.

Prednosti elektroluminescentnih izvora svetlosti u odnosu na izvore svetlosti sa usijanim vlaknom ili izvore svetlosti sa pražnjenjem gasa su: minijaturnost, dug rok upotrebe, visoka monohromatičnost zračena, visoka strmina volt-amperne karakteristike i veoma brzo delovanje.

Prve svetlosno emisione diode pojavile su se 1963. godine. Danas se za svetlosno emisione diode koriste za kontrolu, alarame, regulaciju i prenos poruka i grafika u mnoštvu mernih uređaja čije se indikacije prikazuju digitalnim načinom, kada je veliki broj dioda poređan u vidu matrice, a upravljanje se vrši po redovima i kolonama. Zračenja svetlosti kod svetlosno emisionih dioda uslovljeno je intenzivnom rekombinacijom usled injektiranja sporednih nosilaca struje preko p-n kontakta. Rekombinacijom se ostvaruje energija jednaka razlici energije početnog stanja (slobodan elektron s jedne strane i šupljina s druge strane) i krajnjeg stanja (atom električno neutralan).

Transformacija električne struje u svetlosnu energiju objašnjava se preko pojave elektroluminescencije kristala.

LUMINESCENCIJA

→ Lazar Marković - Nuklearna

Za neko telo kaže se da ispoljava pojavu luminescencije kada njegovo zračenje ne sledi zakone čisto topotnog zračenja.

Razlikuju se sledeća osnovni tipovi luminescencije:

Fotoluminescencija, koja obuhvata fosforescenciju i fluorescenciju. Ovu pojavu ispoljavaju tela koja pod dejstvom određene svetlosne rasijacije emituju takođe svetlosne radijacije, ali različite od ekscitacionih radijacija.

Elektroluminescencija, koja se manifestuje za vreme prolaska struje kroz određeni materijal, čija temperatura ostaje ispod temperature usijanja.

Tribuluminescencija, proizvedena drobljenjem izvesnih supstanci.

Hemoluminescencija, izazvana hemijskom reakcijom, kao što je slučaj luminescencije belog fosfora.

Radioluminescencija, proizvedena dejstvom γ -zraka ili katodnih zraka na izvesna tela.

Odavde možemo zaključiti da luminescenciju predstavlja emitovanje svetlosti iz nekematerije pod dejstvom energije, koja može biti od ultravioletne svetlosti, γ -zraka, brzih nanelektrisanih čestica itd.

Poстоји i termoluminescencija koja je u vezi sa svetlošću emitovanom pod uticajem zagrevanja, a kada je kristal već bio izložen nekom od gore spomenutih oblika eksitacije, pri niskoj temperaturi.



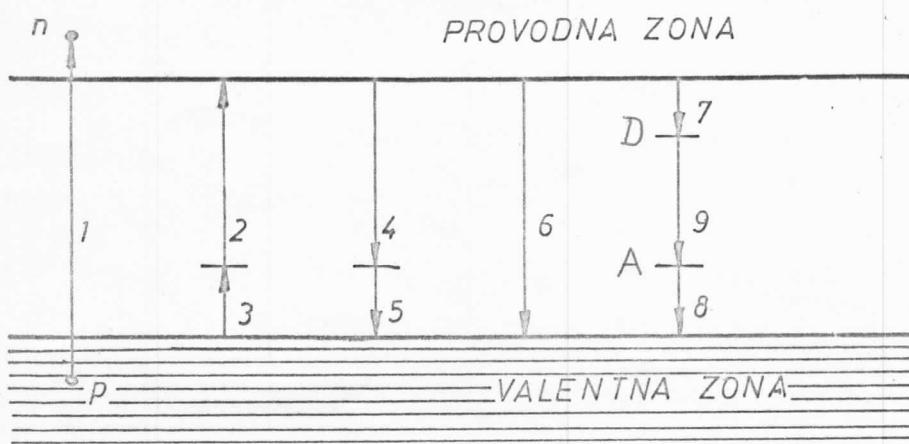
E L E K T R O L U M I N E S C E N C I J A K R I S T A L A
I O S N O V N E K A R A K T E R I S T I K E S V E T +
L O S N O E M I T U J U Ć I H D I O D A (L. E. D.)

1. OPĀTA TEORIJA ELEKTROLUMINESCENCIJE KRISTALA

Elektroluminescencija kristala stvara se pod dejstvom električnog polja. Električno polje menja potencijalnu i kinetičku energiju elektrona u kristalu.

Procesi dovođenja energije poluprovođničkim kristalima i njenog gubitka mogu se analizirati pomoću šeme energetskog stanja elektrona u kristalu.

Na slici 1, gornja zona je najniža iz serije zona koje je pri sobnoj temperaturi nisu ispunjene elektronima i naziva se provodna zona. Donja zona na slici 1. je najniža iz zona energije ispunjene elektronima i zove se valentna zona.



Prelaz obeležen strelicom 1 odgovara spserbovanoj energiji, pri čemu se u provodnoj zoni javlja elektron, a u valentnoj zoni šupljina. Prelaz 2 opisuje ionizirajuće primese, koje ~~zimaju lokalni nivo~~ u zabranjenoj zoni. Prelaz 3. predstavlja prebacivanje elektrona iz valentne zone na nivoe centara luminescencije. Prelazi 4,5,6,7,8 i 9 predstavljaju rekombinaciju elektrona i šupljina i praćeni su prelaskom jednog dela energije u svetlosnu ili toplotnu energiju. Ovi prelazi mogući direktno iz zone u zonu, a mogu prolaziti i kroz nivoe primese. Kao rezultat stimulisanja, predstavljenog kao prelaz 1, za neko vreme u provodnoj zoni stvara se koncentracija elektrona n , a u valentnoj zoni koncentracija šupljina p . Prelaz 6 predstavlja medjuzonsku rekombinaciju elektrona sa šupljinama. Intenzitet medjuzonske rekombinacije elektrona sa šupljinama srazmeran je koncentracijama elektrona (n) i šupljina (p). Rekonbinacije kroz nivoe primesa predstavljene su prelazima četiri i pet. Broj prelaza tipa 4. proporcionalan je koncentraciji elektrona n , kao i koncentraciji slobođenih mesta u nivou primesa. Broj prelaza tipa 5 proporcionalan je koncentraciji šupljina p i koncentraciji elektrona na nivoima primese.

Kristal može da sadrži približno istu količinu donorskih i akceptorских primesa. Elektroni koji potiču od donora (D) kod ovakvih kristala, raspoređuju se na nižim nivoima akceptora (A). Ukoliko su pri tome nivoi donora i akceptora popunjeni stvara se donorsko-akceptorski par i prelazi praćeni zračenjem mogu se dešavati unutar tih parova. Elektroni iz provodne zone sa velikom verovatnoćom

mogu doći u dodir sa donorima, a šupljine iz valentne zone sa akceptorima i pri tome se rekombinovati (prelazi 7,8, i 9).

U većini slučajeva u elektoluminescentnim kristalima učestvuje nekoliko kanala rekombinacije kroz različite lokalne nivoe. Pri tome neki prelazi mogu biti bez zračenja kao što je rekombinacija kroz centre gašenja. Pri niskoj temperaturi preostaju prelazi sa zračenjem, a pri povećanju temperature broj prelaza bez zračenja se povećava.

Razlog ovog temperaturnog gagašenja luminescencije može biti u prebacivanju elektrona iz valentne zone na nivoe centara luminescencije (prelaz tipa 3), što vodi smanjenju broja rekombinacija na tim centrima, i u zavisnosti od toga, povećanju broja rekombinacija kroz centre gašenja. Ovo bi moglo nazvati spoljašnjim gašenjem. Povećanjem temperature moguće je povećanjem verovatnoće nezračećih prelaza u samom centru luminescencije i to bi bilo unutrašnje gašenje. U ovom slučaju elektron direktno prelazi sa stimulisanog nivoa centralne luminescencije na osnovni nivo.

Važna karakteristika koja odražava proces pretvaranja apsorbovane energije u kristalu, u luminescenciju, je kvantni prinos luminescencije (γ_k). To je ustvari broj fotona koji dolaze na svaki apsorbovani kvant svetlosti pri fotoluminescenciji ili broj elektrona koji dolaze na svaki apsorbovani kvant svetlosti pri elektroluminescenciji. Kvantni prinos svetljenja može se predstaviti kao delo kvantnog prinosa ionizacije ili stimulacije (N) i kvantnog prinosa rekombinacije (γ_r). $N\kappa$ je broj neuravnoteženih parova elektron-šupljina, koji se javljaju pri apsorpciji jednog kvanta svetlosti ili

prolazu jednog elektrona kroz kristal. γ_r je broj oslobođenih kvantova svetlosti, koji dolaze na jedan par elektron - šupljina.

$$\gamma_k = N \gamma_r$$

Pri elektroluminescenciji samo jedan deo opšteg broj rekombinacija (θ) događa se u oblasti luminescentnog kristala, jer se neravnotežne šupljine mogu izvoziti poljem iz kristala u metalnu elektrodu ili drugi materijal koji ne zrači. Zato se kvantni prinos rekombinacije može napisati:

$$\gamma_r = \theta P$$

gde je P temperaturno gašenje elektroluminescencije. Veličina θ može da se menja od 1 do vrlo male veličine.

Prinos γ_k opisuje prvobitno javljeno zračenje i ne računa sa mogućnošću apsorpcije tog zračenja unutar samog kristala, (unutrašnji kvantni prinos). Oblasti kristala koje emituju svetlost nalaze se ponekad dosta duboko pod površinom uzorka ili je veliki refleks od te površine (ugao refleksije veći od graničnog ugla) i tada je deo apsorbovane svetlosti značajan. Apsorbovana svetlost može ponovo da stvori par elektron - šupljina.

Spoljašnji kvantni prinos razlikuje se od unutrašnjeg kvagnog prinosa za množilac koji može da bude daleko manji od jedinice i koji obično slabo zavise od intenziteta stimulacije i temperature, ako pri promeni uslova stimulacije ostaju nepromenjeni dubina i oblik oblasti kristala koji zrače, a takođe i koeficijent apsorpcije svetlosti od strane materijala.

Energetski prinos luminescencije (γ) je očnos izračene sa utrošenom energijom svetlosti 1 jednak je ili manji od kvagnog prinosa, jer srednja energija izračenih

kvanta $h\nu$ je obično manja od energije koja odgovara prelazu 3 na sl. 1 (E_3), koju utroši polje na stvaranje svakog para neuravnoteženih nosilaca punjenja. Samo u slučajevima rekombinacije u uslovima injekcione elektroluminescencije pri dosta visokim temperaturama i niskim pritiscima, može se desiti da je $E_3 < h\nu$, jer u stvarenju parova elektron-šupljina učestvuje ne samo energija električnog polja, već i toplotna energija.

$$\gamma = \gamma_k \frac{h\nu}{E_3}$$

SVETLOSNO EMITUJUĆE DIODE

Od 1956. godine poznato je da zaprečni slojevi poluprovodničkog p-n spoja, kroz koje prolazi jednosmerna struja, emituju svetlosne radijacije. Usled tehnoloških teškoća tek 1963. godine su se pojavile prve komercijalne svetlosno-emisione diode. Nazvane su prema angloameričkoj nomenklaturi L.E.D. (LIGHT EMITTING DIODES) i omogućavaju direktnu transformaciju električne struje u svetlosnu energiju.

Problem potrebe za brzim delovanjem elektroluminescenčnih izvora svetlosti u znatnoj meri je rešen stvaranjem svetlosno-emisionih dioda. Materijal za izradu svetlosno-emisione diode je jedinjenje treće i pate grupe periodnog sistema elemenata što se simbolički može predstaviti $A^{III}B^V$. Najčešće su napravljene od galijum fosfida (Ga P) i galijum arsenida (Ga As). Proizvode se još i od karbida silicijuma (Si C), koje su otporne na vlagu i dopuštaju temperaturna opterećenja do 450°C . Ovo omogućava njihovo korišćenje u teškim uslovima eksploatacije, kod povećanja vlažnosti i

temperature, u agresivnim sredinama i uz visoko preopterećenje struji. Svetlosno emisione diode proizvode svetlost sa talasnim dužinama koje prekrivaju ceo vidljivi deo spektra. Ove spektralne karakteristike daju veliku mogućnost izbora dioda u opštičkoj elektronici. Svetlosno emisione diode predstavljaju p-n spoj koji emituje svetlost. Emisija svetlosti je izazvana rekombinacijom elektrona i šupljina, o čemu je pisano u prethodnoj tački.

Rekombinaciona struja (i_p), koja protiče kroz diodu sadrži emisionu komponentu i_{pk} i neemisionu komponentu i_r .

$$i_p = i_{pk} + i_r$$

Unutrašnji kvantni prinos (γ_k) je dat izrazom:

$$\gamma_k = \frac{q N_{hv}}{i_r (1 + \frac{i_{pk}}{i_r})}$$

q je nanelektrišanje elektrona, a N_{hv} je broj nastalih fotona. Iz ovog izraza možemo zaključiti da unutrašnji kvantni prinos raste sa porastom gustine struje kroz diodu. Ako kroz diodu protiče struja velike gustine, potrebno je odvoditi toplotu od kristala, pošto se sa porastom temperature smanjuje kvantni prinos, pokretljivost i vreme života sporednih nosilaca struje u poluprovodniku.

Maksimalna kvantna efikasnost L.E.D-a je našla primenu kod granične elektroluminescencije, kada je energija izraženih kvantova bliska energiji zabranjene zone poluprovodnika i kada je vreme trajanja sporednih injektiranih nosilaca struje (T) jednako vremenu emisione rekombinacije (T_k). Tada je unutrašnji kvantni prinos dat izrazom:

$$\gamma_k = \frac{T}{T_k}$$

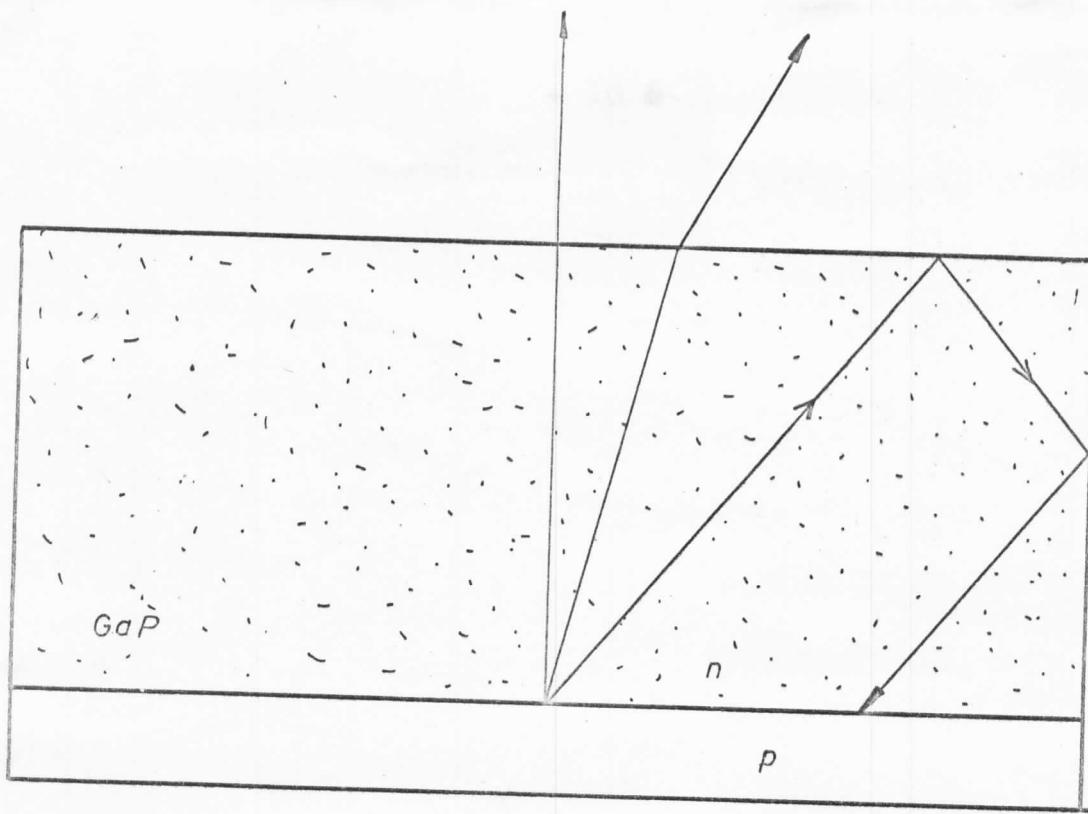
Na ovaj odnos utiče kvalitet poluprovođničkog materijala, kvalitet i količina u njega uvedenih primesa, strukturalna nesavršenost i dr. Pored granične elektroluminescencije postoje i elektroluminescencija sa primesama, izazvana rekombinacijom injektiranih nosilaca na nivoima različitih primesa. Primesna elektroluminescencija karakteriše se manjom efektivnošću u poređenju sa graničnom i ispoljava tendenciju prema zasićenju intenziteta svetljenja kod velikih jačina struje.

Za opštičku elektroniku najznačajniji je spoljni kvantni prinos očnosno efektivnost. Spoljni kvantni prinos je manji od unutrašnjeg kvantnog prinosa, što je uslovljeno apsorpcijom zračenja u debljini poluprovođnika, kontaktima i gubicima na refleksiju na granicama poluprovođnika iz sredine u koju svetlost ulazi iz diode.

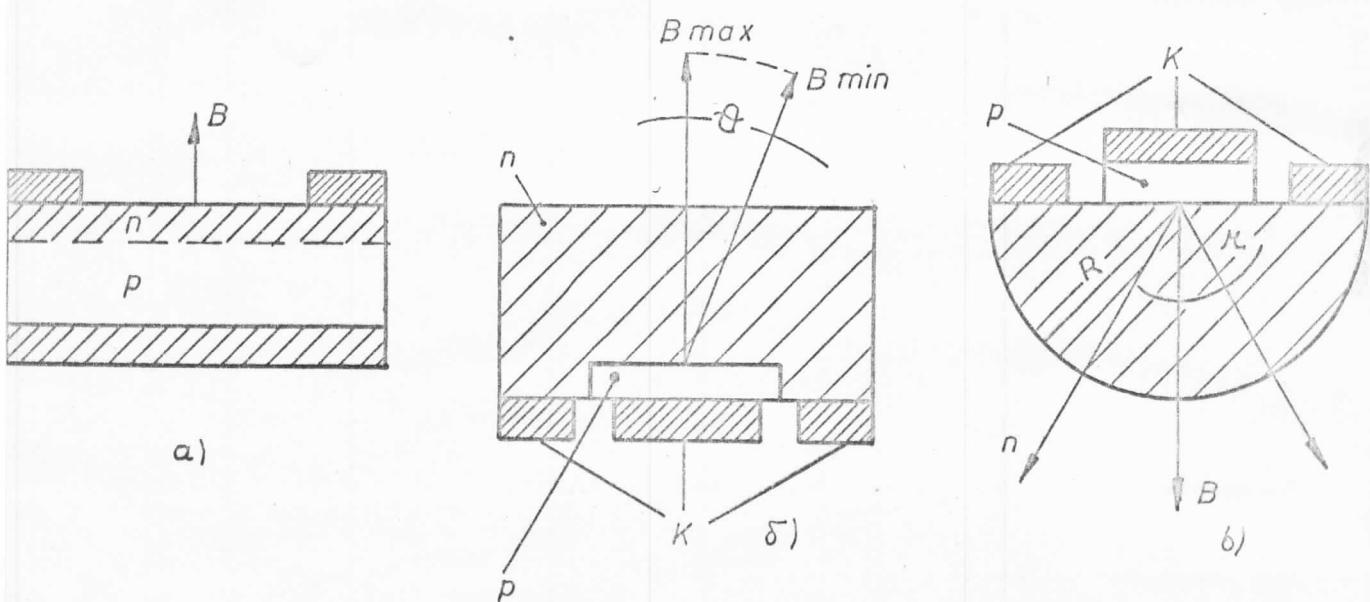
Znači, svi elektroni injekтовани u zaprečni sloj ne ostvaruju rađanje fotona. Isto tako svi fotonii proizvedeni rekombinacijama nisu izraženi prema spoljašnosti. Veliki deo tih fotona biva apsorbovan pri prolazu kroz unutrašnjost kristala. Drugi deo fotona koji dosegne površine između kristala poluprovođnika i vazduha pod uglom većem od graničnog ugla totalne refleksije, ostaju u kristalu te bivaju apsorbovani na povratnom putu. Ovo ilustruje slika 2.

Gubici zbog refleksije na granicama poluprovođnika i sredine u koju svetlost ulazi mogu biti i do 99% što znači da iz kristala samo mali deo fotona nastalih rekombinacijama biva izražen prema spoljašnosti. Ovi gubici u velikoj meri zavise od konstrukcije diode.

Na sl. 3 navedene su tri principijelne konstrukcije L.E.D-a, koje se danas koriste.



SL. BR. 2



Sl. br. 3. KONSTRUKCIJE INJEKCIIONIH SVETLOSNIH DIODA:

a) PLJOSNATA b) PLJOSNATA PLANARNA b) POLUSFERNA
SA MEZASTRUKTUROM $R \gg \kappa$, K-KONTAKTI.

Konstrukcija diode treba da obezbedi izvod zračenja svetlosti u pravcu optičke ose kristala sa minimalnim gubicima. Pljosnata konstrukcija je najpovoljnija. Ona omogućava da se dobiju diode sa relativno velikom radnom površinom od nekoliko mm^2 . Efektivnost pljosnatih dioda je veoma mala. Najvećom efektivnošću oslikuje se polusferna konstrukcija diode. Tehnologija njene proizvodnje je komplikovanija od tehnologije pljosnate diode, no, veliki dobitak u efektivnosti daje joj veću primenu u optičkoj elektronici. Prema zakonu LamBERTA intenzivnost svetljenja u različitim pravcima proporcionalna je kosinusu ugla prinosa zračenja (θ) prema optičkoj osi diode. Ako je kod svetlosno emisionih dioda ugao prinosa luminescencije

$$\theta_{\text{prin.}} = 20^\circ \text{ onda to određuje: } B_{\min} = 0,96 B_{\max}.$$

B_{\min} je minimalni intenzitet svetljenja, a B_{\max} je maksimalni intenzitet svetljenja u granicama ugla prinosa. Veličina prinosnog ugla zavisi od koeficijenata prelamanja poluprovođnika i sredine u koju ide svetlost. Kritična veličina ovog ugla data je izrazom:

$$\theta_{\text{krit.}} \geq \arcsin \frac{n_1}{n_2}$$

n_1 je koeficijent prelamanja sredine, a n_2 koeficijent prelamanja poluprovođnika. Za $\theta > \theta_{\text{krit.}}$ luminescencija nastala u p-n prelazu neće izaći napolje. Ovo uslovjava nisku efektivnost pljosnate i pljosnate planarne konstrukcije svetlosno-emisione diode.

U polusfernoj konstrukciji, ukoliko odnos poluprečnika veće i manje polusfere zadovoljava uslov $\frac{R}{r} \geq \frac{n_2}{n_1}$

onda će za ovu površinu diode $\theta < \theta_{krit}$ $\theta_B \approx 180^\circ$. θ_B je ugao pod kojim se emituje svetlost. U polusfernoj konstrukciji donekle raste apsorpcija luminescencije u samom poluprovođniku.

U odnosu na pljosnate diode, polusferne imaju veću efektivnost za red veličine. Za povećanje spoljsne efektivnosti svetlosno-emisionih dioda primenjuju se različiti prozračni premazi. Prozračni premaz povećava spoljni kvantni prinos približno za 1,4 do 1,6 puta van zavisnosti od konstrukcije diode. Primena višeslojnog prozračnog premaza omogućava povećanje efektivnosti svetlosno-emisionih dioda.

Injekcioni svetlosni izvori (L.E.D.) proizvode se na bazi monokristala. Za svetlosno emisione diode Ga P i Si C osnova je pljosnata konstrukcija.

Vek trajanja svetlosno-emisione diode je izuzetno dug i iznosi oko 100 godina.

E K S P E R I M E N T A L N I R A D I

R E Z U L T A T I

KARAKTERISTIKE SVETLJENJA

a) ZAVISNOST INTENZITETA SVETLJENJA OD NAPONA I STRUJE

Intenzitet svetlosti je meren preko intenziteta foto struje kroz fotomultiplikator.

Za ispitivanje karakteristika svetljenja svetlosno emisione diode na bazi Ga P korišćeni su sledeći instrumenti:

1. Univerzalni digitalni merač DIGIMER, opsega od 0-1000 V, m A, k Ω , firme ISKRA.

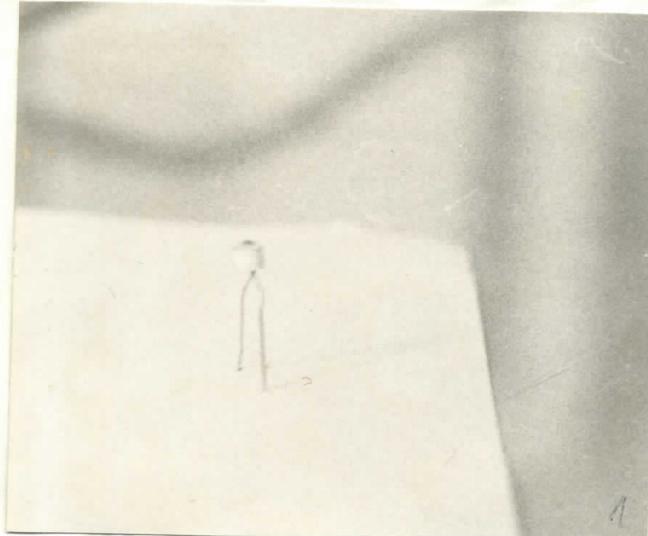
2. Univerzalni merač MULTIMETER DM-3, opsega od 0,1-1000mA, V firme EI NIŠ
3. Izvor napajanja PE 1509, opsega od 0-30V; 400 mA, PHILIPS
4. Svetlovod firme LAJBOLD
5. Potenciometar od 1 k Ω ; 0,10 A, LJUBLJANA
6. Za visoki napon DC KILOVOLTS BERTAN ASSOCIATES, INC PLAINVIEW, N.Y. MODEL 205-0,3 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY do 3000 V. i 10 mA.
7. Instrument za merenje struje D.C. MICROMETER PM 2436, firme PHILIPS
8. FOTOMULTIPLIKATOR AVP-150 PHILIPS
9. fotomultiplikator 50 AVP OTV PHILIPS
10. Instrument za zagrevanje i hlađenje STROMVERSORGUNG HEIZ - UND KÜHLTISCH - 20 ... + 80°C
^{ix} I_{max} [zagrevanje do 16 A
hlađenje do 40 A]
11. Pisač GRAPHISPOT SEFRAM PARIS 0,25 μ A-1000 μ A cela skala u dvanaest područja 2,5mV-10000 mV cela skala u ^{xii} 12 poštuća.
12. Monohromator SPIEGELMONOCHROMATOR SPM2 - GEBRAUCHSANLEITUNG CARLZEISS JENA sa rešetkom od 651 linijom/mm
13. Generator četvrtaskog impulsa PM 5712 PULSE GENERATOR 1 Hz - 50 MHz RISETIME 4 ns PHILIPS (SWEDEN)
14. Tektronix 475 OSCILOSKOPE, dvokanalni osciloskop.

Fotografija instrumenata:

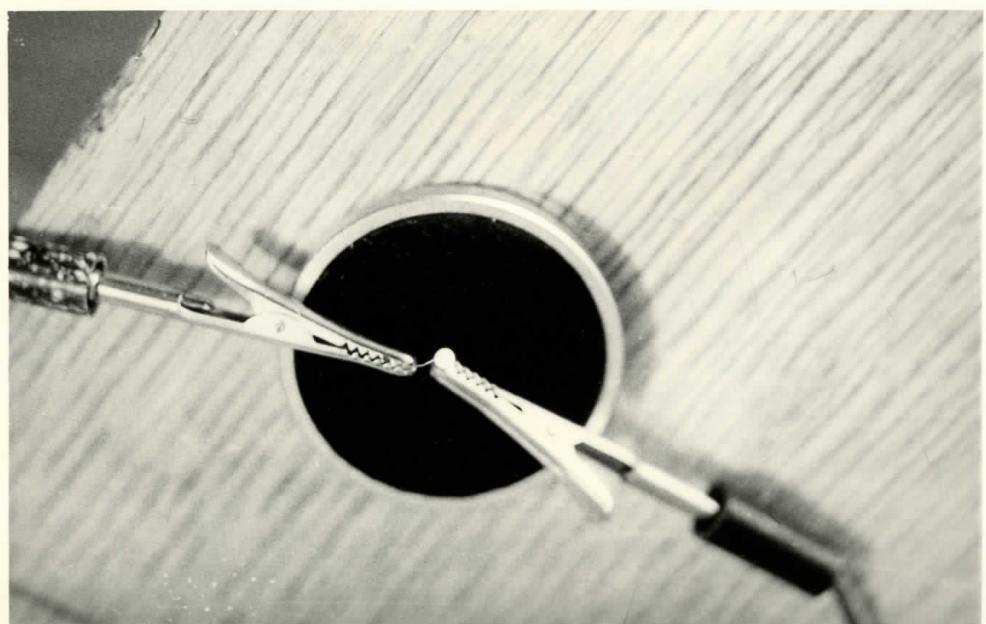
Osnovne karakteristike ispitivane galijum
fosfiđne svetlosno emitujuće diode su:

- totalna dissipacija, 12 mW
- maksimalna dozvoljena struja kroz diodu, 30mA
- na 20 mA struje dioda emituje 2,0 mcd
svetlosti
- kapacitet je 1000 pF
- emitovana svetlost je zelene boje

Fotografije diode Ga P

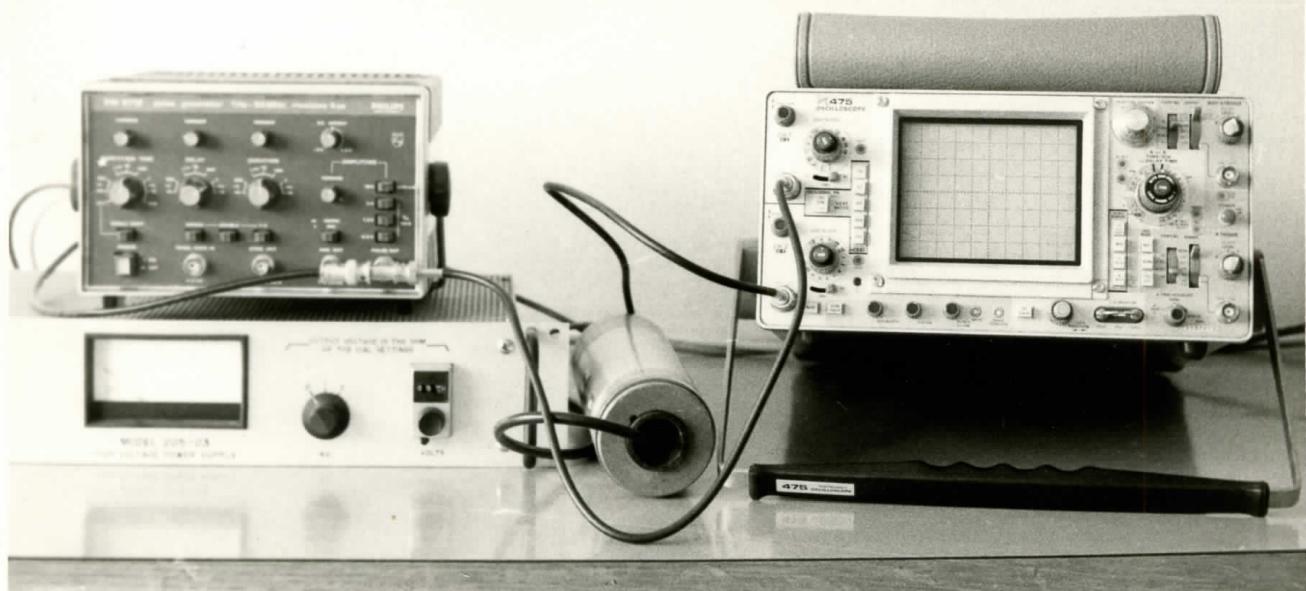


1 i 2 - izgled diode

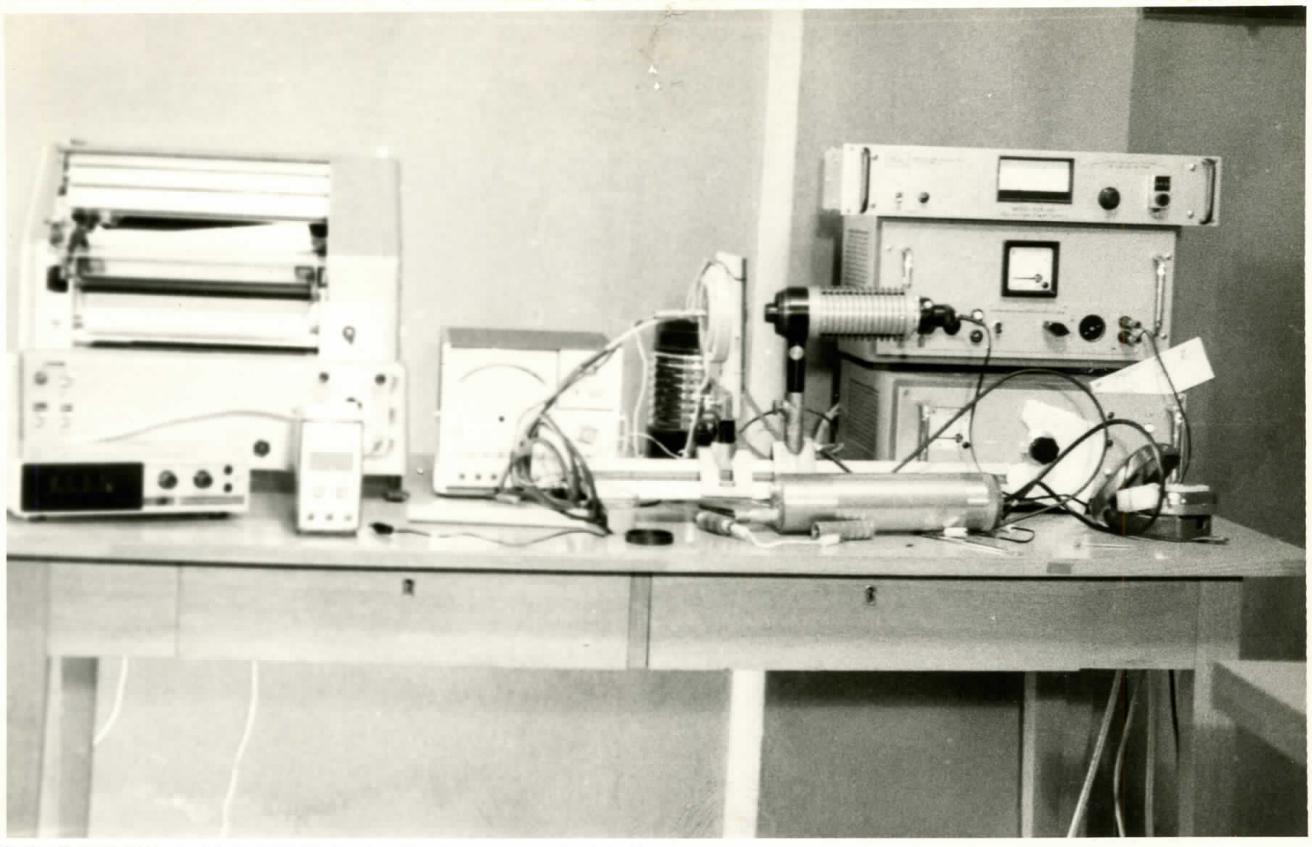




INSTRUMENTI ZA MERENJE ZAVISNOSTI FOTO STRUTE
OD NAPONA NA POLOVIMA DIODE



INSTRUMENTI ZA ODREDIVANJE FREKVENTNIH
KARAKTERISTIKA DIODE



INSTRUMENTI ZA ODRDIVANTE ZAVISNOSTI FOTO
STRUJE OD TEMPERATURE DIODE

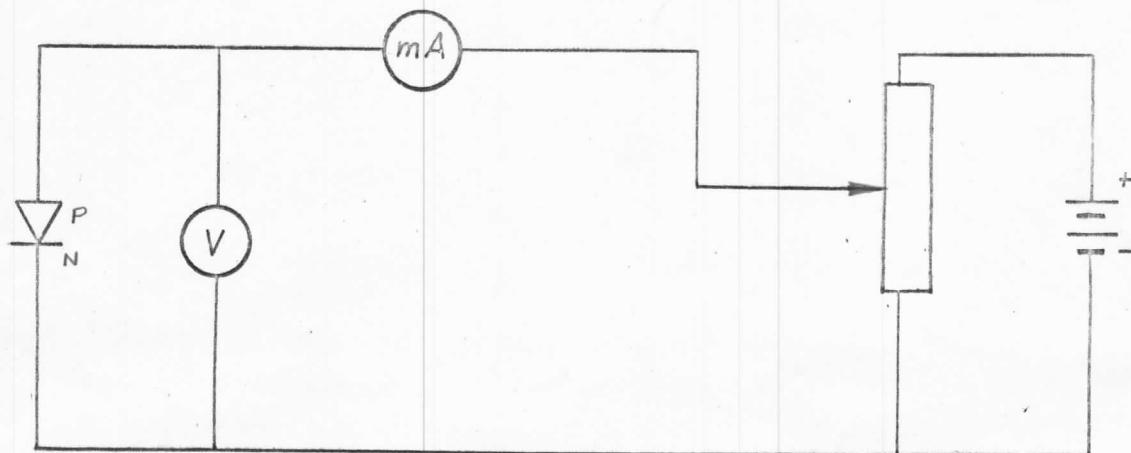


DVOKANALNI OSKLOSKOP



PISAC Č MONOHROMATOR

Zavisnost struje od napona svetlosno emisione
diode Ga P na sobnoj temperaturi :



Šema veze u direktnoj polarizaciji.

Struja diode merena je DIGIMER®-om, očsega od 0-1000 V, mA, k Ω , firme ISKRA.

Napon diode meren je MULTIMETROM DM-3, opsega od 0,1 - 1000 mA, V. Za izvor napajanja diode upotrebljen je PE 1509, opsega od 0-30V, 400 mA. Za reguliranje napona upotrebljen je potenciometar od 1 k Ω , 0,10 A.

Napen je menjjan od 0,01 V do 2,01 V i za razne vrednosti napone očitane su vrednosti struje. Struja kroz diodu je iznosila od $0,01\text{mA}$ do 36 mA.

Zapaženo je da pri napomu od 1,71 V i struji od 0,24 mA dioda počinje da svetli. (Napon preko nje je $\approx 8\Omega$)

Na grafiku br. 1 nalazi se predstavljena zavisnost struje od napona svetlosno emisione diode Ga P na sobnoj temperaturi ($I_d = f(U_d)$). Dobijena zavisnost je veoma strma, što znači da je Ga P dioda niskovoltni i niskoomski element električnog kola. Sledi da Ga P dioda ima mali unutrašnji otpor. Pošto je intenzitet svetljenja meren preko foto struje, izvršeno je merenje i tamne struje kroz fotomultiplikator.

Na grafikonu broj 2 nanesena je zavisnost tamne struje fotomultiplikatora (struje koja teče kroz fotomultiplikator, kada se u njega ne uvodi nikakva svetlost), od napona na fotomultiplikatoru. Grafik je nacrtan aproksimativno. Napon na fotomultiplikatoru je menjan od 10 V do 600 V i pri tome su izmerene vrednosti struje I_t od 0,005 mA do 1,55 mA. Visoki napon fotomultiplikatora dobijen je od instrumenta DC KILOVOLTS BERTAN ASSOCIATES, INC PLAINVIEW N.Y. MODEL 205 - 0,3 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY (opsega DO 3000 V i 10 mA. Za merenje tamne struje upotrebljen je D.C. MICROMETAR PM 2436, FIRME PHILIPS.

Upotrebljen je fotomultiplikator AVP - 150

БР. 2

ТАБЕЛА ЗАВИСНОСТИ ТАМНЕ СТРУЈЕ
ОД НАПОНА НА ФОТОМОУЛТИПЛИКАТОРУ

$U_{F.M.}$ [V]	I_t [nA]	I_t [nA] ПРЕМА ГРАФИКУ	$U_{F.M.}$ [V]	I_t [nA]	I_t [nA] ПРЕМА ГРАФИКУ
10	0,005		340	0,400	
20	0,003		350	0,480	0,41
40	0,003		360	0,600	
50	0,002		370	0,600	
60	0,005		380	0,620	
70	0,005		390	0,700	
80	0,005		400	0,700	0,59
90	0,005		410	0,700	
100	0,005		420	0,750	
110	0,010		430	0,80	
120	0,015		440	0,82	
130	0,020		450	0,85	0,79
150	0,040	0,05	460	0,80	
160	0,050		470	0,88	
170	0,060		480	0,90	
180	0,065		490	0,95	
190	0,075		500	1,00	1,02
200	0,075	0,10	510	1,05	
210	0,090		520	1,10	
220	0,100		530	1,15	
230	0,135		540	1,20	
250	0,145		550	1,25	1,29
260	0,165		560	1,35	
270	0,260		570	1,40	
280	0,300		580	1,45	
290	0,300		590	1,50	
300	0,300	0,27	600	1,55	1,58
310	0,280				
320	0,320				

БР. 1

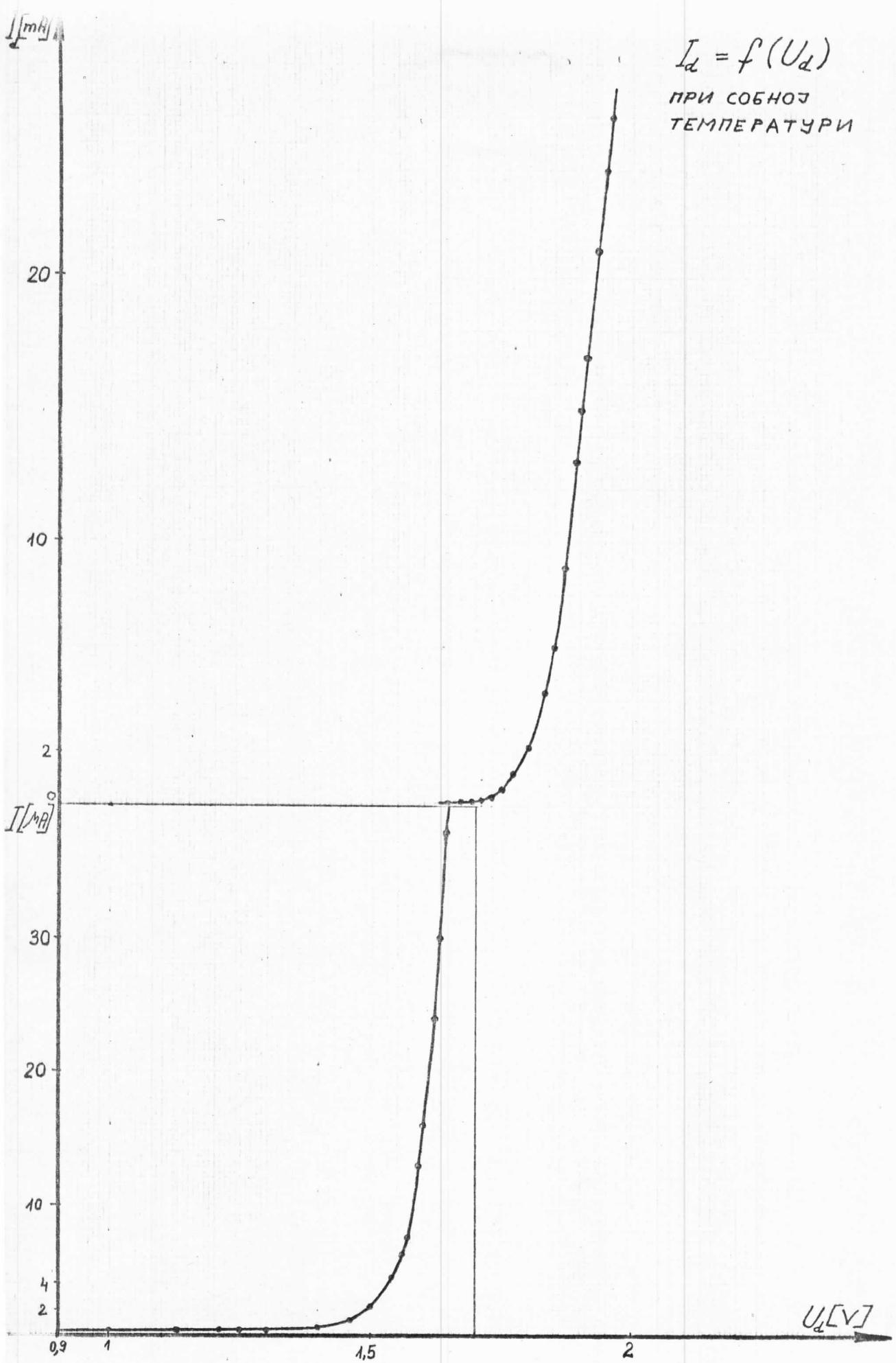
ТАБЕЛА ЗАВИСНОСТИ СТРУЈЕ
ОД НАПОНА GaP ДИОДЕ
НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ

U_d [V]	I_d [mA]	U_d [V]	I_d [mA]
1,00	0,12	1,70	0,17
1,13	0,13	1,71	0,24
1,21	0,14	1,72	0,28
1,25	0,16	1,73	0,37
1,30	0,19	1,74	0,47
1,36	0,29	1,75	0,62
1,40	0,46	1,76	0,80
1,43	0,69	1,77	1,20
1,46	1,20	1,78	1,40
1,48	1,40	1,79	1,90
1,50	2,20	1,80	2,20
1,54	4,50	1,81	2,80
1,56	6,10	1,83	4,30
1,57	7,50	1,84	5,90
1,59	13,00	1,85	6,00
1,60	16,00	1,86	7,40
1,62	24,00	1,87	9,00
1,63	30,00	1,88	10,20
1,64	38,00	1,89	13,00
1,65	52,00	1,90	15,00
1,67	78,00	1,91	17,00
1,68	110,00	1,94	21,00
1,69	140,00	1,95	24,00
		1,96	26,00

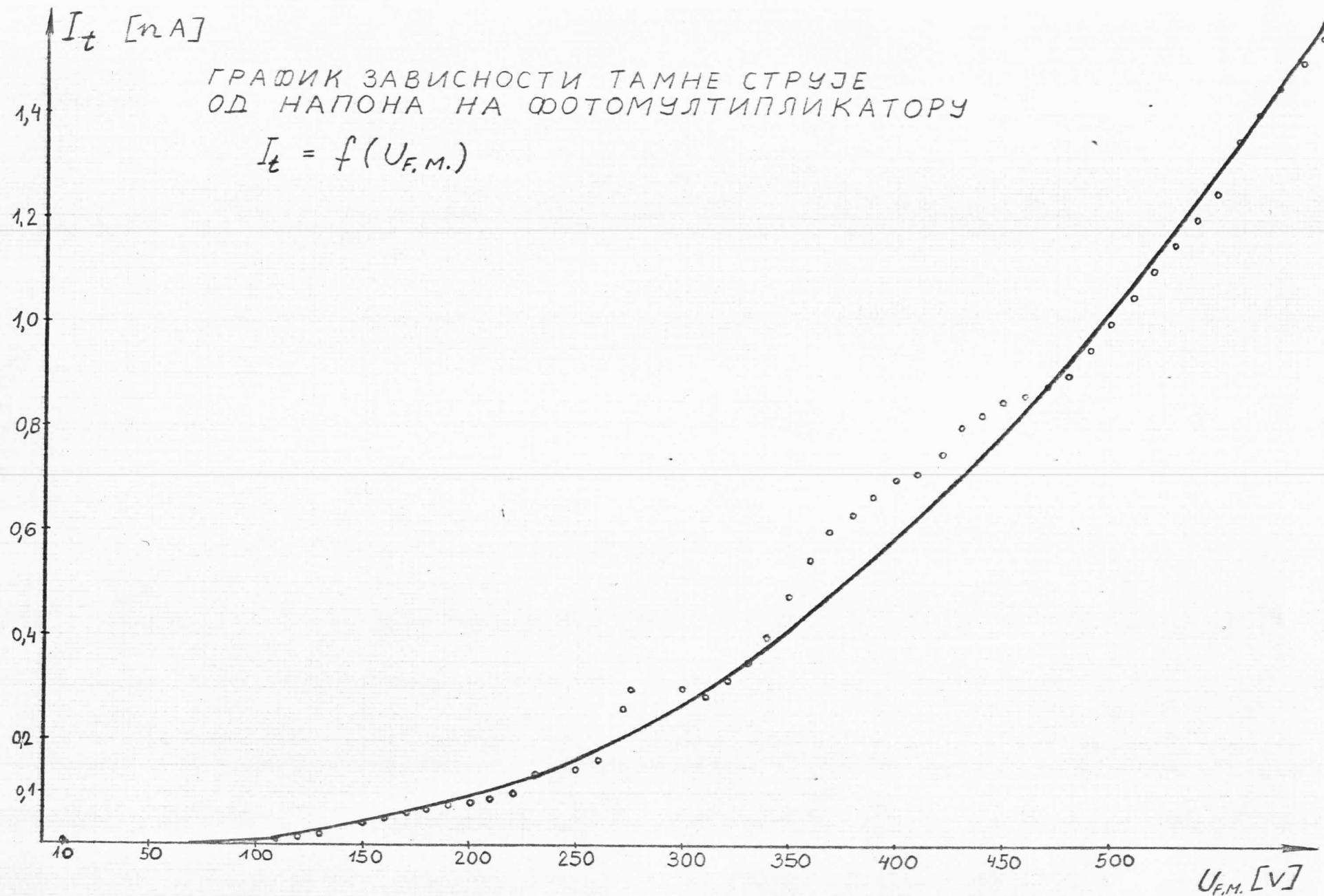
$$I_d = f(U_d)$$

БР.1

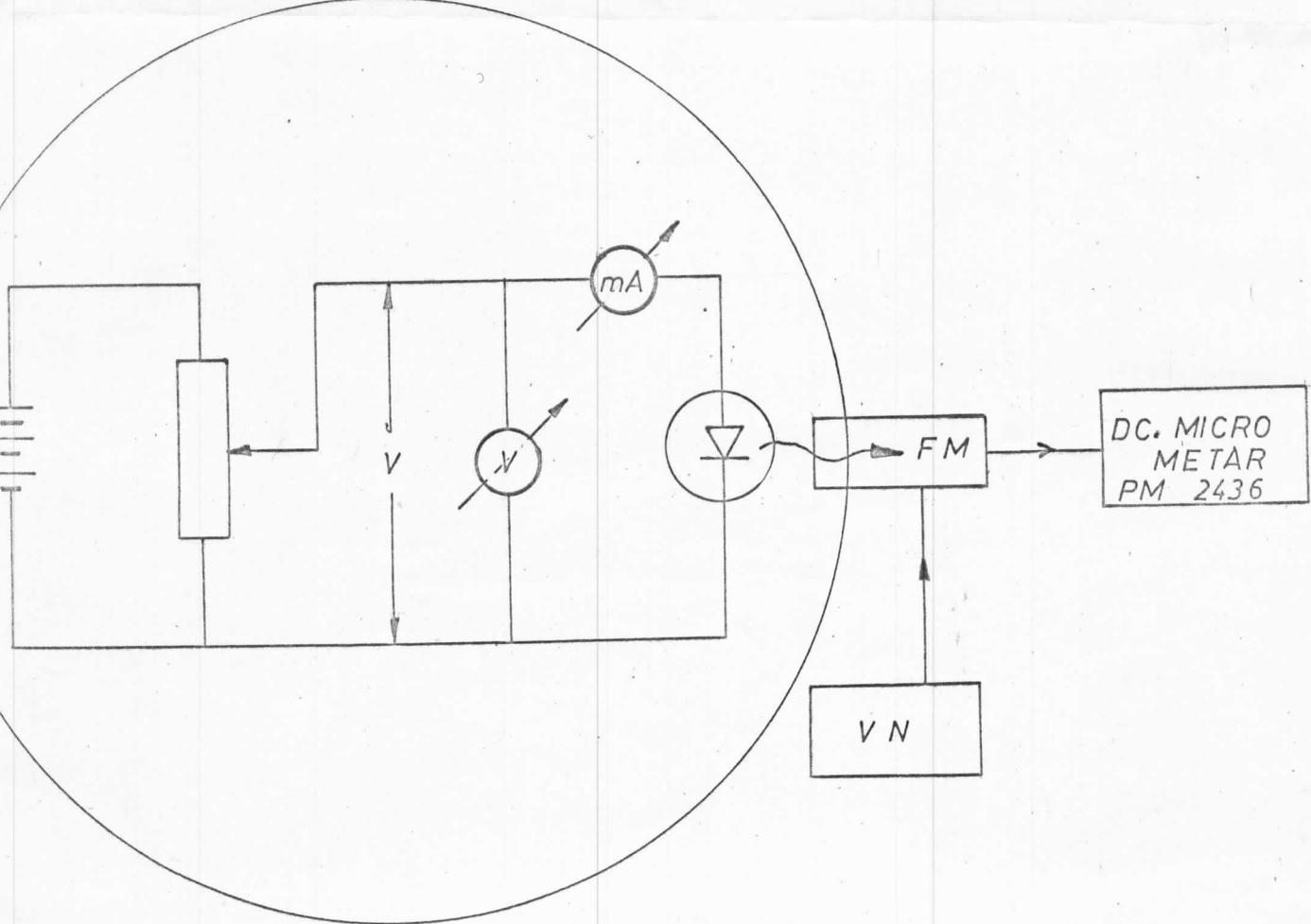
ПРИ СОБНОЙ
ТЕМПЕРАТУРЕ



БР. 2



Za ispitivanje zavisnosti intenziteta svetljenja (foto struje I_f) od napona na diodi (U_d) i struje kroz diodu (I_d) instrumenti su bili povezani prema priloženoj šemsi veze.



Struja diode (I_d) merena je instrumentom DIGIMETER, opsega od 0@1000 V, mA, k Ω , firme ISKRA. Napon diode (U_d) meren je MULTIMETROM DM-3, opsega od 0,1 do 1000 mA, V.

Za izvor napajanja korišćen je instrument PE 1509, opsega od 0-30 V, 400 mA.

Za prevodjenje svetlosti u emisiju elektrána (struju I_f) upotrebljen je fotošmultiplikator AVP-150.

Za dobijanje visokog napona na fotomultiplikatoru, upotrebljen je BERTAN ASSOCIATES, INC. PLAINVIEW, N.Y. MODEL 205-03.

Fotostruja je merena instrumentom D.C. MICROMETER PN 2436 filme PHILIPS. Za menjanje potencijala korišćen je potenciometar od $1 \text{ k}\Omega$; 0,10 A.

U tabeli broj 3 unete su vrednosti struje kroz diodu (I_d) i fotostruje (I_f) dobijene pri menjanju napona na diodi (U_d) pomoću potenciometra. Pri promeni napona na diodi od 1,954V do 1,754V, struja kroz diodu se menjala od 18 mA do 0,5 mA, a foto struja od 8,7 nA do 0,61 nA. Dalje merenje (za manje vrednosti napona U_d) nije imalo smisla jer je foto struja bila približno jednaka težnoj struci fotomultiplikatora.

U zadnjoj koloni tabele br.3 unete su vrednosti foto struje normirane na 100

(Visoki napon fotomultiplikatora iznosio je 344,6 V.)

Visoki napon fotomultiplikatora je bio konstantan i iznosio je 344,6 V.

Iz tabele br. 1 može se izračunati unutrašnji otpor Ga P svetlosno emisione diode.

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1,96 - 1,76}{26 - 0,80} = \frac{0,2 \text{ V}}{25,2 \text{ mA}} = 0,007936 \frac{\text{V}}{10^{-3} \text{ A}}$$

$$R_i = 7,94 \Omega$$

Ovaj rezultat pokazuje da je unutrašnji otpor Ga P svetlosno emitujuće diode vrlo mali.

Na grafiku broj 3 predstavljena je zavisnost intenziteta svetljenja (foto struje I_f) od struje kroz diodu, na sobnoj temperaturi. Napon na fotomultiplikatoru bio je konstantan i iznosio je: $U_{F.M.} = 344,6 \text{ V}$.

Ova zavisnost se može nazvati i stručno-strujnom zavisnošću i predstavlja osnovnu karakteristiku svetlano emisione diode kao svetlosnog izvora.

$$I_f = f(I_d)$$

Pri promeni struje kroz diodu od 1 - 18 mA foto struja se menjala od 8,7 nA do 0,61 nA. Na grafiku su nanete normirane vrednosti foto struje. Karakteristika ima malo odstupanje od linearnosti u početnoj zoni do struje $I_d=7\text{mA}$. Od 7mA struje kroz diodu pa nadalje karakteristika je prava linija. Za veće jačine struje kroz diodu od ispitivanih, karakteristika bi se zakrivljivala, ali ta oblast nije rađena zbog ograničenja struje I_d zbog mogućnosti oštećenja diode.

Na slici broj 1 data je šema energetskih prelaza. Od struje kroz diodu (I_d) zavisi stepen punjenja nivoa odgovornih za zračne i nezračne rekombinacije, što znači i intenzitet svetljenja, odnosno foto struje. Pri malim strujama dok je koncentracija elektrona na nivoima centara gašenja manja, predvlažjuće rekombinacije bez zračenja.

БР. 3

ТАБЕЛКА ЗА ВЛИСНОСТИ ИНТЕНЗИТЕТА СВЕТЉЕЊА (ДОТО СТРУЈЕ)

ОД СТРУЈЕ И НАПОНА КРОЗ GaP ДИОДУ НА СОБНОЈ
ТЕМПЕРАТУРИ $U_{F.M.} = 344,6 \text{ V}$

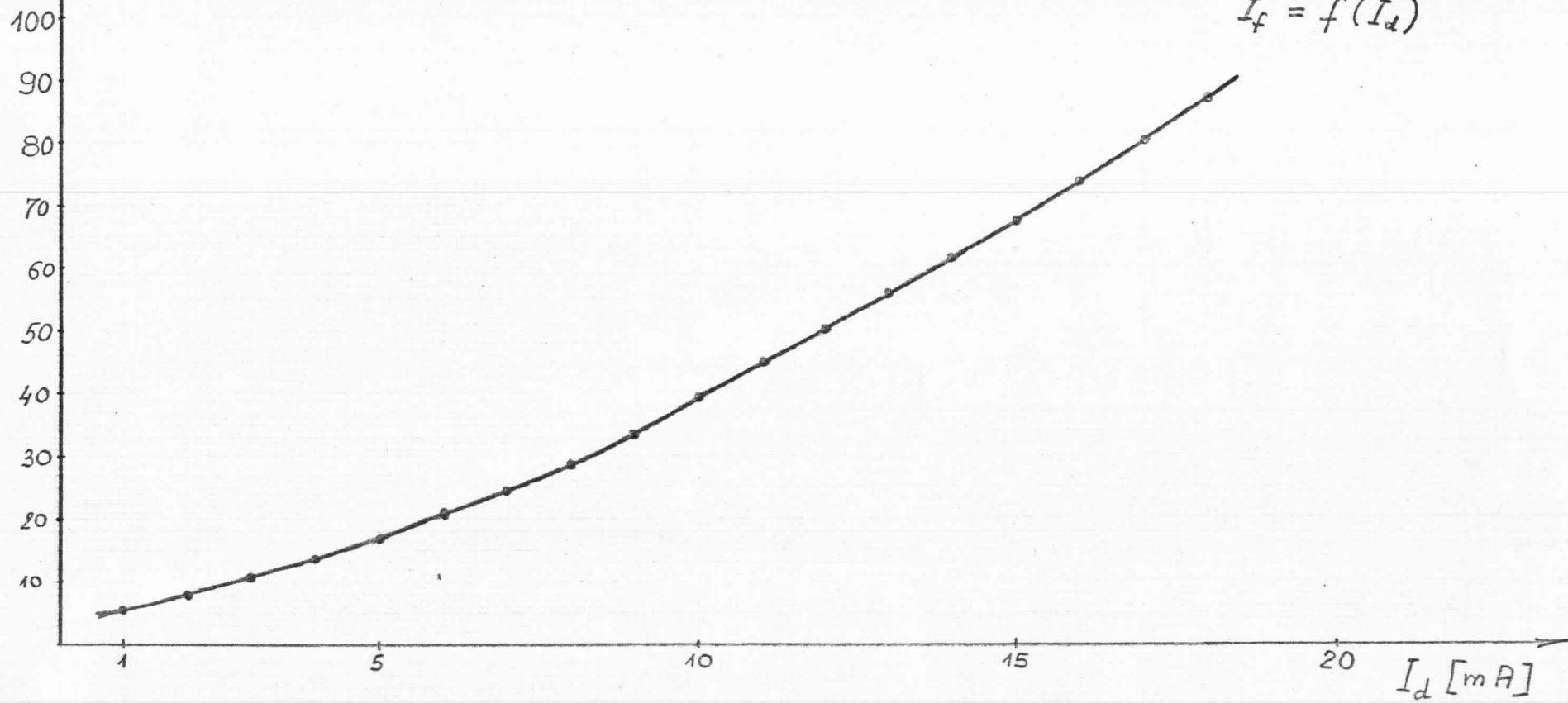
$I_d [\text{mA}]$	$U_d [\text{V}]$	$I_f [n\text{A}]$	I_f НОРМИРАНО НА 100
18	1,954	8,7	100
17	1,946	8,0	92
16	1,939	7,3	83,95
15	1,932	6,64	76,36
14	1,926	6,2	71,3
13	1,918	5,6	64,4
12	1,913	4,95	56,92
11	1,905	4,45	51,17
10	1,898	3,94	45,31
9	1,890	3,4	39,1
8	1,881	2,9	33,35
7	1,873	2,5	28,75
6	1,864	2,1	24,15
5	1,853	1,7	19,55
4	1,841	1,4	16,1
3	1,828	1,1	12,65
2	1,809	0,8	9,2
1	1,780	0,6	6,9
0,9	1,781	0,63	7,24
0,8	1,779	0,62	7,13
0,7	1,769	0,65	7,47
0,6	1,766	0,60	6,9
0,5	1,754	0,61	7,01

I_f

ГРАФИК ЗАВИСНОСТИ ООТО СТРУЈЕ ОД ДИОДНЕ СТРУЈЕ
НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ

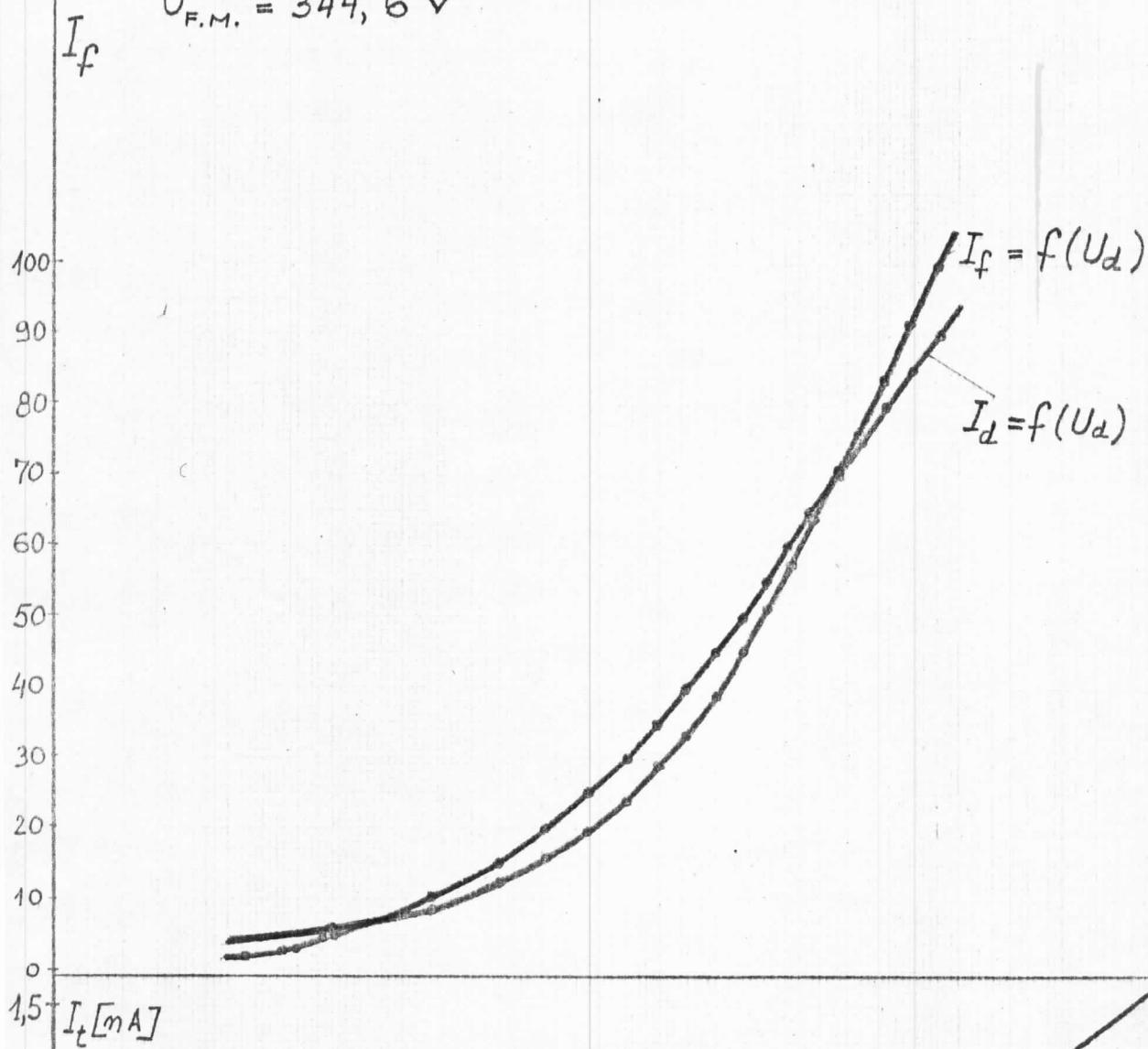
$$U_{F.M.} = 344,6V$$

$$I_f = f(I_d)$$

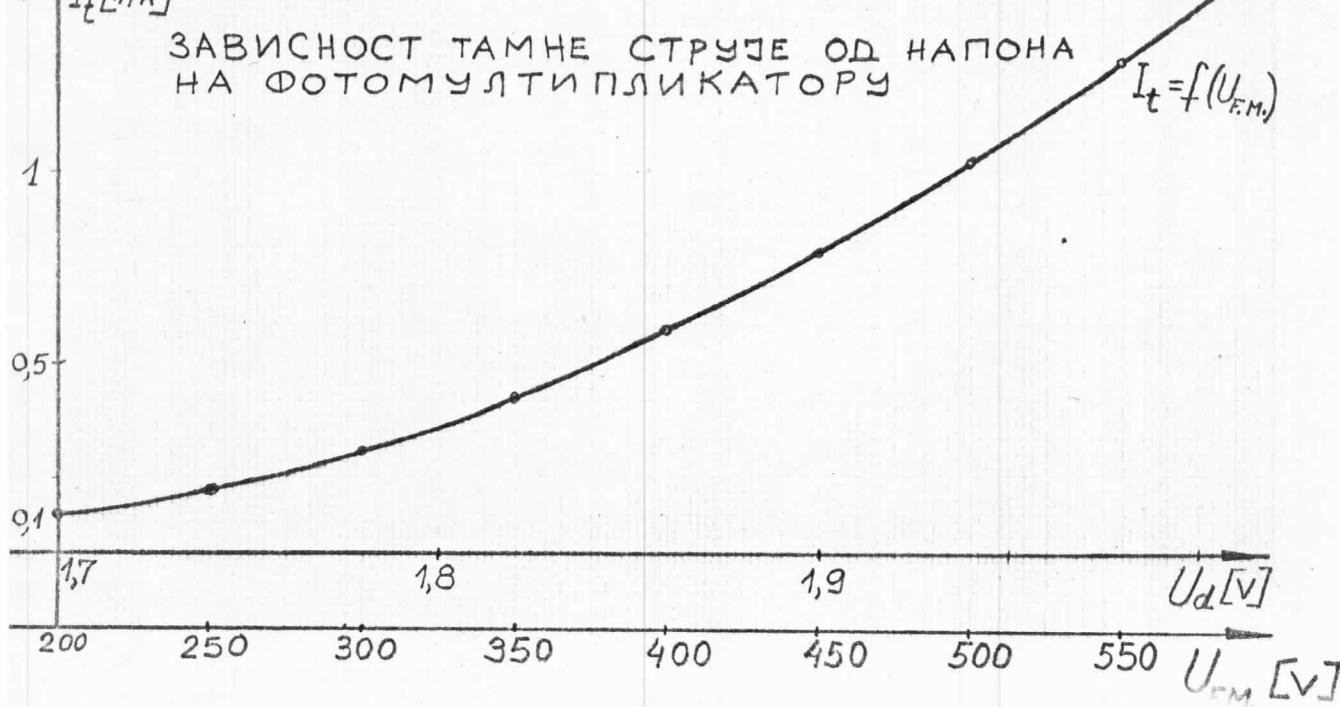


БР. 4

ЗАВИСНОСТ СТРУЈЕ КРОЗ ДИОДУ И ФОТО
СТРУЈЕ ОД НАПОНА НА ДИОДИ
НА СОБНОЈ ТЕМПЕРАТУРИ
 $U_{F.M.} = 344,6 \text{ V}$



ЗАВИСНОСТ ТАМНЕ СТРУЈЕ ОД НАПОНА
НА ФОТОМУЛТИПЛИКАТОРУ



Pri velikim strujama kada su nivoi centara godišnja popunjeni elektronima preoblađivaće rekombinacije sa zračenjem. Brzina rekombinacije kroz centre gašenja srazmerna je koncentraciji injektiranih šupljina, a brzina rekombinacije kroz nivo centara zračenja srazmerna je koncentraciji injektiranih elektrona u provodnoj zoni.

Zavisnost intenziteta svetljenja (foto struje) pri sobnoj temperaturi, od napona na diodi predstavljena je na grafiku, broj 4. Radi upoređivanja vrednosti na grafiku broj 4 nacrtane su i zavisnost struje kroz diodu od napona na diodi na sobnoj temperaturi i zavisnost tamne struje od napona na fotomultiplikatoru. Za prve dve zavisnosti napon na fotomultiplikatoru je iznosio 344,6 V.

Dakle na grafiku broj 4 se nalaze sledeće zavisnosti:

$$I_f = f(U_d); \quad I_d = f(U_d) \text{ i } I_t = f(U_{F.M.})$$

Za vrednosti napona na diodi od $U_d = 1,785$ V do $U_d = 1,967$ V jačina struje kroz diodu se povećavala od $I_d = 1$ mA do $I_d = 20$ mA, a foto struja od $I_f = 0,65$ nA do $I_f = 10$ nA. Na grafiku su prikazane vrednosti foto struje normirane na 100. Za manje vrednosti napona U_d nije bilo moguće pratiti promenu intenziteta svetljenja (foto struje), zbog poklapanja vrednosti foto struje sa tačnom strujom fotomultiplikatora. Zapaženo je pri snimanju statičke karakteristike Ga P svetlosne emitujuće diode da dioda počinje svetleti na naponu od 1,71 V. Kako se u zadnjem eksperimentu pri naponu od 1,785 V foto struja poklapa sa tamnom strujom fotomultiplikatora, to na ovaj način nije bilo moguće ispitati prag svetljenja Ga P svetlosno emitujuće diode.

Dobijena karakteristika zavisnosti intenziteta svetljenja (foto struje) od napona na diodi pri sobnoj temperaturi, je veoma strma, kao i zavisnost struje kroz diodu od napona na diodi. Za male promene napona na diodi ostvaruju se velike promene jačine struje kroz diodu, što znači da dioda ima mali unutrašnji otpor. Intenzitet svetljenja je eksponencijalna funkcija napona priključenog na polove diode te je karakteristika kriva linija. Vrednosti tačaka ucrtanih na grafiku br. 4 za predstavljanje zavisnosti tamne struje fotomultiplikatora od napona na fotomultiplikatoru, uzete su sa grafika broj 2.

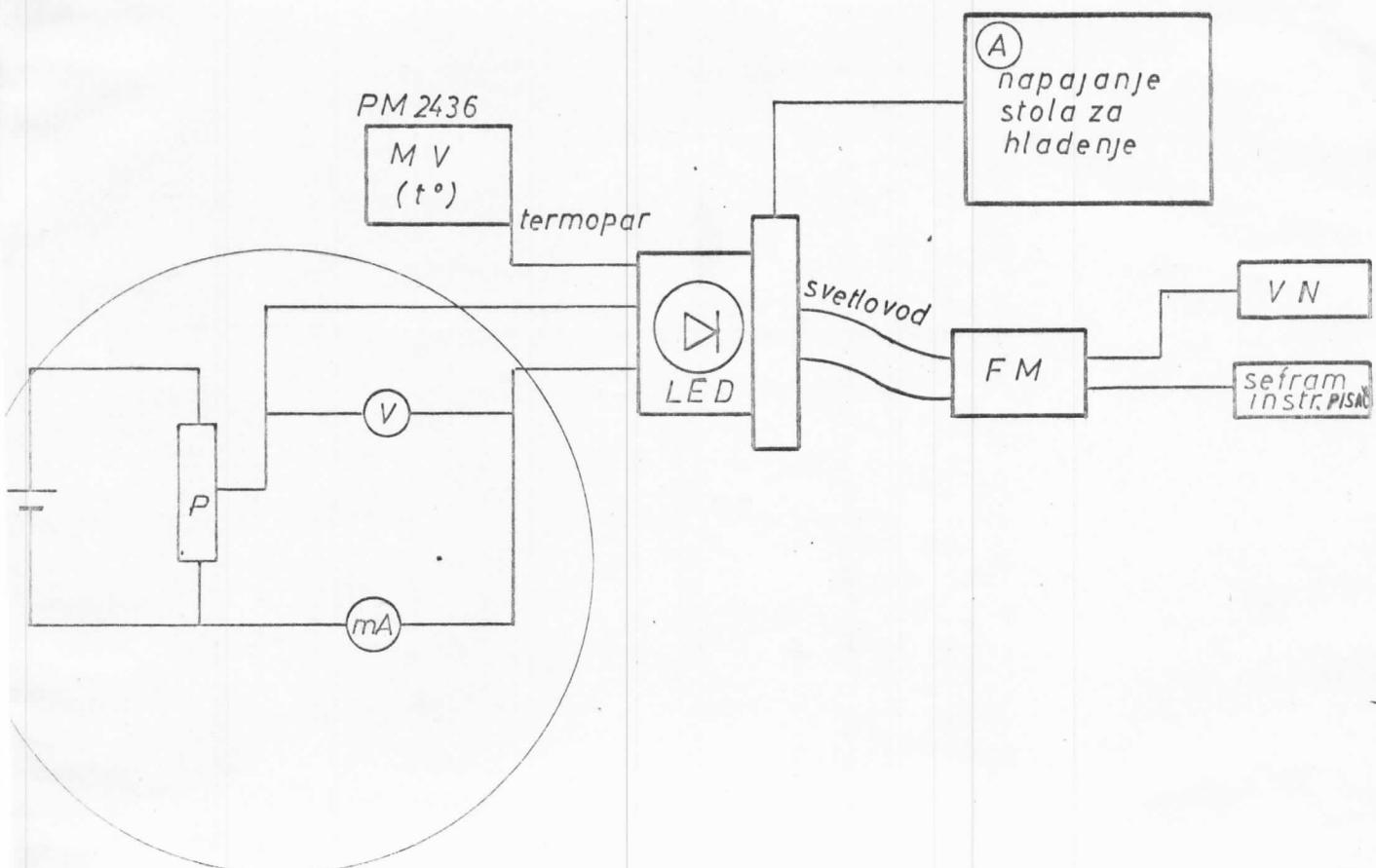
Od nanesenih vrednosti za foto struju trebalo bi oduzeti vrednost tamne struje, za koju je fotostruja uvećana.

b) ZAVISNOST INTENZITETA SVETLJENJA OD TEMPERATURE

Šema veze instrumenata za merenje: (str. 31)

Struja kroz diodu (I_d) merena je instrumentom, DIGIMERZ, opsega od 0-1000 V, mA, $k\Omega$, firme Iskra. Napon na polovima diode meren je instrumentom MULTIMETER DM-3 opsega od 0,1 do 1.000 mA, V, Kao izvor napajanja korišćen je instrument PE 1509, opsega od 0-30V, 400 mA. Za vezu fotomultiplikatora i diode upotrebljen je svetlovod. Prevodenje intenziteta svetlosti u emisiju elektrona (foto struju), izvršeno je fotomultiplikatorom 50 AVP OTV.

Visoki napon za fotomultiplikator je dobijen od instrumenta BERTAN ASSOCIATES, INC. PLAINVIEW, N.Y. MODEL 205-03. Merenje temperature u mV izvršeno je instrumentom D.C. MICROMETER PM 2436 firme PHILIPS. Za hlađenje



i grejanje upotrebljen je STROMVERSORGUNG HEIZ - UND KUHLTISCH - 20.... + 80°C i I_{max} (zagrevanje do 16A, hlađenje do 40 A). Za merenje foto struje uzet je GRAPHISPOT SEFRAM PARIS. Regulisanje napona i jačina struje u diodi izvršeno je potencijometrom od 1 k Ω i 0,10 A. Veza instrumenta za merenje temperature i Ga P svetlosno emitujuće diode ostvarena je preko termopara.

Pomoću potenciometra regulisani su struja diode I_d i napon diode U_d i tokom merenja te veličine su održavane konstantnim.

$$I_d = 14,8 \text{ mA} = \text{const}$$

$$U_d = 1,99 \text{ V} = \text{const}$$

Napon fotomultiplikatora tokom celog merenja iznosio je:

$$U_{FM} = 647 \text{ V.}$$

Izmerena je vrednost foto struje na sobnoj temperaturi. Sobna temperatura je iznosila 1,17 mV što preračunato iznosi $23,25^{\circ}\text{C}$. Foto struja na sobnoj temperaturi je iznosila $0,24 \mu\text{A}$. Ga P dioda je potom hlađenja i pri hlađenju zapisivane su vrednosti temperature u mV i foto struje u μA . Vršeno je hlađenje diode do $-0,12 \text{ mV}$ odnosno do -9°C . Dioda dalje nije hlađena jer se na aparaturni, a samim tim i na diodi nahvatao sloj leda, koji svakako utiče na intenzitet svetlosti, koje iz diode preko svetlovoda odlazi u fotomultiplikator, te umanjuje tačnost merenja. Posle toga vršeno je zagrevanje diode do $1,87 \text{ mV}$ odnosno $40,5^{\circ}\text{C}$, pri čemu je fotostruja iznosila $0,222 \mu\text{A}$. Dalje zagrevanje nije vršeno da nebi došlo do oštećenja plastičnog nosača diode.

U tabeli br. 4 nannete su tabelarne vrednosti zavisnosti intenziteta svetljenja(foto struje) od temperature. Konstantne veličine su: $I_d = 14,8 \text{ mA}$; $U_d = 1,99 \text{ V}$ u $U_{FM} = 647 \text{ V}$. Prvi deo tabele odnosi se na hlađenje diode od sobne temperature ($23,25^{\circ}\text{C}$) do -9°C . Drugi deo tabele odnosi se na zagrevanje diode do $40,5^{\circ}\text{C}$. Vrednosti u prvoj i trećoj koloni su dobijene očitavanjem na instrumentu (t [m V] i $I_f [\mu\text{A}]$). Druga kolona tabele 4 (t [$^{\circ}\text{C}$]) je dobijena preračunavanjem mV u $^{\circ}\text{C}$ pomoću tablice. U četvrtoj koloni su vrednosti foto struje normirane na 100.

БР. 4

ТАБЕЛА ЗАВИСНОСТИ ФОТО СТРУЈЕ ОД ТЕМПЕРАТУРЕ
 GaP ДИОДЕ $I_d = 14,8 \text{ mA}$ $U_d = 1,99 \text{ V}$ $U_{FM} = 647 \text{ V}$

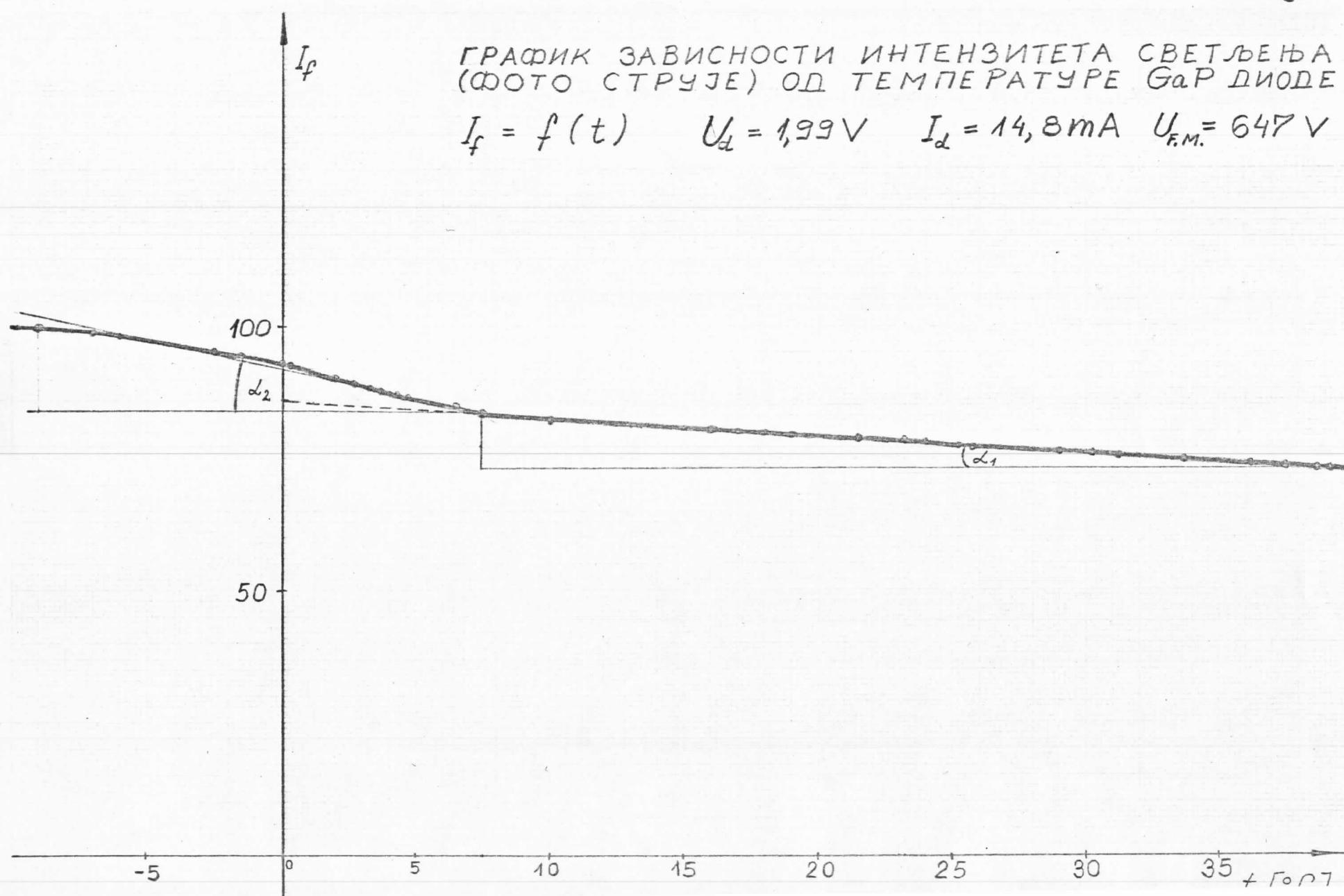
$t [mV]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I_f [\mu\text{A}]$	I_f НОРМИРАНА НА 100
1,17	23,25	0,240	78,69
0,64	10,0	0,252	82,62
0,53	7,25	0,256	83,93
0,49	6,25	0,258	84,59
0,43	4,75	0,264	86,56
0,41	4,25	0,266	87,21
0,40	4,0	0,267	87,54
0,39	3,75	0,268	87,87
0,37	3,26	0,270	88,52
0,31	1,75	0,276	90,49
0,28	1,0	0,279	91,47
0,25	0,25	0,282	92,46
0,245	0,0	0,284	93,11
0,17	-1,75	0,288	94,43
0,14	-2,5	0,291	95,41
0,01	-6,0	0,300	98,36
-0,035	-7,0	0,302	99,02
-0,06	-7,5	0,303	99,34
-0,075	-8,0	0,304	99,67
-0,12	-9,0	0,305	100

$t [mV]$	$t [^{\circ}\text{C}]$	$I_f [\mu\text{A}]$	I_f НОРМИРАНА НА 100
0,88	16,0	0,246	80,66
0,92	17,0	0,245	80,33
0,96	18,0	0,244	80,00
1,0	19,0	0,243	79,67
1,1	21,5	0,241	79,02
1,2	24,0	0,238	78,03
1,25	25,25	0,237	77,70
1,35	25,75	0,235	77,05
1,4	29,0	0,233	76,39
1,45	30,25	0,232	76,07
1,5	31,25	0,231	75,74
1,6	33,75	0,229	75,08
1,7	36,25	0,226	74,10
1,75	37,5	0,225	73,77
1,8	38,75	0,224	73,44
1,82	39,25	0,223	73,11
1,87	40,5	0,222	72,79

БР. 5

ГРАФИК ЗАВИСНОСТИ ИНТЕНЗИТЕТА СВЕТЉЕЊА
(ФОТО СТРУЈЕ) ОД ТЕМПЕРАТУРЕ GaP ДИОДЕ

$$I_f = f(t) \quad U_d = 1,99 \text{ V} \quad I_d = 14,8 \text{ mA} \quad U_{F.M.} = 647 \text{ V}$$



Na grafiku broj 5 naneta je zavisnost intenziteta svetljenja (izraženog preko foto struje), od temperature Ga Psvetlosno emitujuće diode pri konstantnim veličinama : (emitujuće diode pri konstantnim veličinama) $U_d = \text{const} = 1,99V$; $I_d = \text{const} = 14,8 \text{ mA}$ i $U_{FM} = 647 \text{ V}$.

Dakle grafik br. 5 predstavlja: $I_f = f(t)$.

Na opscisu osu naneta je temperatura od -9°C do $40,5^{\circ}\text{C}$. Pri promeni temperature u ovom intervalu, menjalo se jačina fotostruje od $0,305 \mu\text{A}$ do $0,222 \mu\text{A}$, što je naneto na oordinatnu osu. Na temperaturi od $7,5^{\circ}\text{C}$ na grafiku se konslatuje prevojna tačka. Pri promeni temperature od $7,5^{\circ}\text{C}$ do $40,5^{\circ}\text{C}$ karakteristika je linearna sa tendencijom blagog opadanja vrednosti foto struje. Pri smanjenju temperature od $7,5^{\circ}\text{C}$ do -9°C karakteristika se zakrivljuje i pokazuje brži porast foto struje.

Kada je $U_d = \text{const}$, $I_d = \text{const}$ u $U_{FM} = \text{const}$ promena intenziteta svetljenja (foto struje) u zavisnosti od temperature povezana je samo sa promenama kvantnog prinosa. Promene kvantnog prinosa mogu da se dešavaju kao posledica pojave temperaturnog gašenja ili usled prelaska osnovnog potoka rekombinacije u oblasti kristala gde je kvantni prisnos mali.

Opadanje svetlosti u oblasti visokih temperatura izazvano je povećanjem temperaturnog gašenja u određenim oblastima kristala. Pri niskim temperaturama preoblađuje injekcija elektrona u p oblasti gde je verovatnoća izraženih prelaza mala. Pri temperaturama manjim

od $7,5^{\circ}\text{C}$ više preovladuju prelazi sa zračenjem te intenzitet svetlosti brže raste. Na temperaturama većim od $7,5^{\circ}\text{C}$ sporije se povećava broj prelaza bez zračenja te intenzitet svetlosti blago opada. Smanjenje intenziteta foto struje pri povećanju temperature vrši se zbog prebacivanja elektrona iz valentne zone na nivoe centara luminescencije, što vodi smanjenju broja rekombinacija na tim centrima i samim tim povećanju broja rekombinacija kroz centre gašenja. Ovo je predstavljeno na slici broj 1. Deo karakteristike u intervalu temperature od $7,5^{\circ}\text{C}$ do $40,5^{\circ}\text{C}$ zaklapa ugao nagiba \angle_1 koji se može izračunati sa grafikona.

$$\operatorname{tg} \angle = \frac{I_{f2} - I_{f1}}{t_2 - t_1}$$

$$\operatorname{tg} \angle_1 = \frac{83,93 - 73,77}{37,5 - 7,25} = \frac{10,16}{30,25} = 0,3358$$

$$\angle_1 = 18^{\circ} 34'$$

Deo karakteristike u intervalu temperature od -9°C do $7,5^{\circ}\text{C}$ zaklapa ugao nagiba \angle_2 .

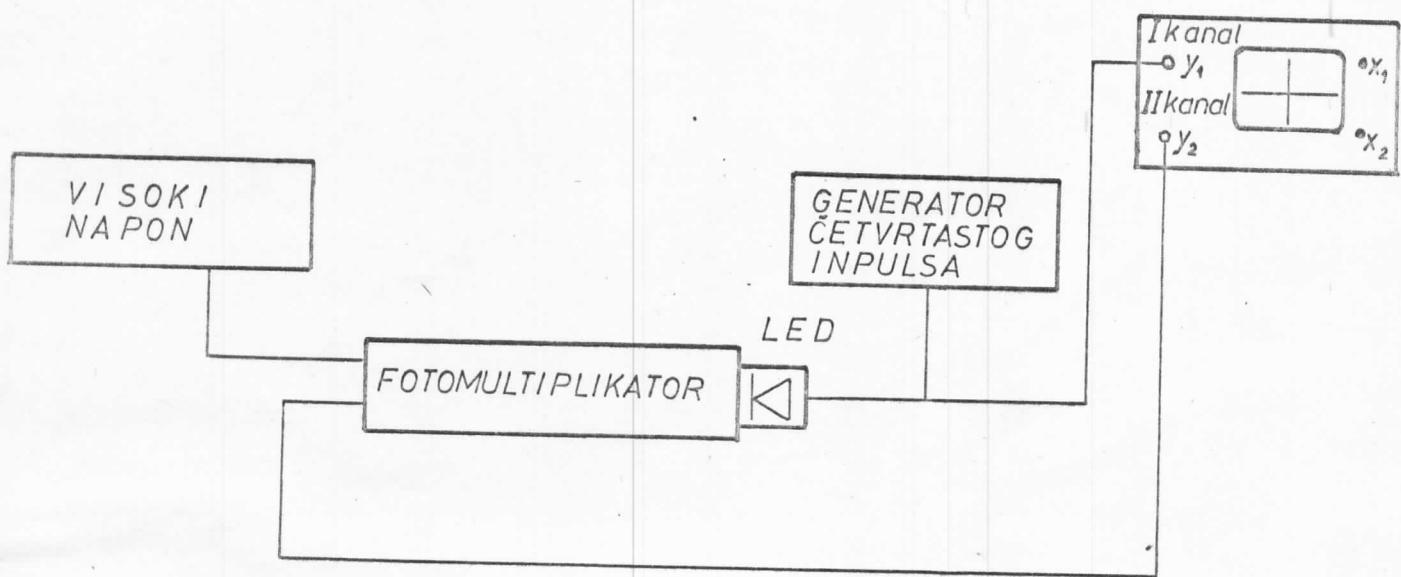
Sa grafikona sledi:

$$\operatorname{tg} \angle_2 = \frac{92 - 83,93}{7,25 - 0} = \frac{8,07}{7,25} = 1,1131$$

$$\angle_2 = 48^{\circ} 2'$$

C) FREKVENTNE KARAKTERISTIKE SVETLJENJA
(INERCIJA)

Šema veze instrumenata za merenje:



Pri ispitivanju frekventnih karakteristika
GaP svetlosno emitujuće diode korišćeni su sledeći
instrumenti:

Za pretvaranje svetlosti u emisiju elektrona
(foto struju) upotrebljen je fotomultiplikator 50 AVP OTV.
Za dobijanje visokog napona na fotomultiplikatoru upotrebljen
je DC KILOVOLTS BERTAN ASSOCIATES, INC PLAINVIEW N.Y. MODEL

205-03 HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY do 3000 V i 10 mA. Kao generator četvrtastog impulsa upotrebljen je PM 5712 PULSE GENERATOR 1Hz - 50 MHz RISETIME 4 ns PHILIPS (SWEDEN). Za praćenje ulaznog i izlaznog signala upotrebljen je dvokanalni osciloskop TEKTRONIK 475 OSCILOSKOPE.

Visoki napon na fotomultiplikatoru održavan je konstantnim i iznosio je 536 V.

Sa generatora četvrtastih impulsa napona vođen je ulazni signal na Ga P svetlosno emitujuću diodu i na dvokanalni oskiloskop. Odgovor diode na uvećeni periodični četvrtasti impuls napona vođen je iz fotomultiplikatora u dvokanalni osciloskop. Na osciloskopu su istovremeno posmatrani ulazni signal i izlazni signal. Na grafikonima 6 i 7 nacrtani su oblici ulaznog i izlaznog signala sa obeleženim vrednostima napona i vremena uspostavljanja, trajanja, opadanja i svetljenja. U svim merenjima ulazni signal je imao napon od 2 V.

U prvom merenju periodični četvrtasti impuls napona ulaznog signala imao je napon od 2 V, vreme trajanja pozitivnog poluperioda signala 150 ms i vreme trajanja negativnog poluperioda 100 ms. Pod nastalim uslovima oscilogram svetljenja (luminescencije) ima izgled kao na grafikonu br. 6 pod I. Izlazni signal je imao vreme uspostavljanja od 15 ms. Vreme trajanja izlaznog signala iznosilo je 130 ms, posle čega sledećo vreme opadanja (gašenja) od 15 ms i vreme svetljenja od 90 ms. Zatim sledi novi period sa istim vrednostima. Napon izlaznog signala je iznosio 60 mV. ■

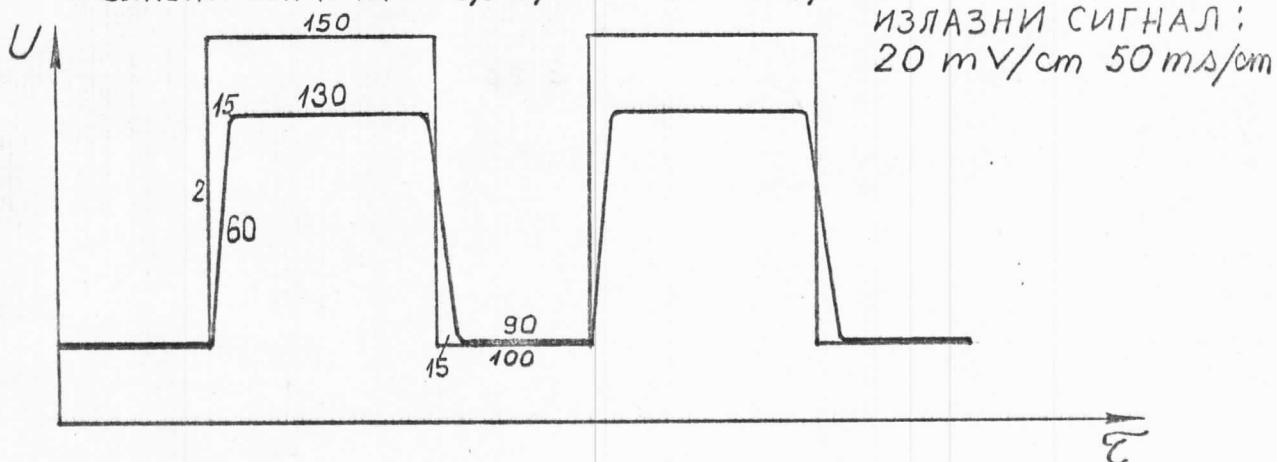
БР. 6

ФРЕКВЕНТНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СВЕТЉЕЊА

GaP диоде $U_{F.M.} = 536V$

I МЕРЕЊЕ

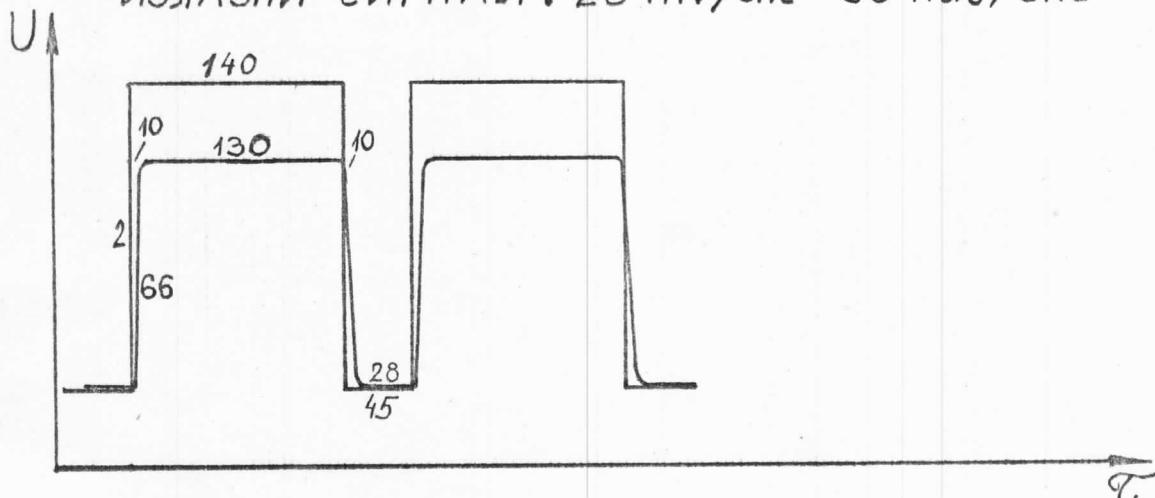
УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 50 ms/cm



II МЕРЕЊЕ

УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 50 ms/cm

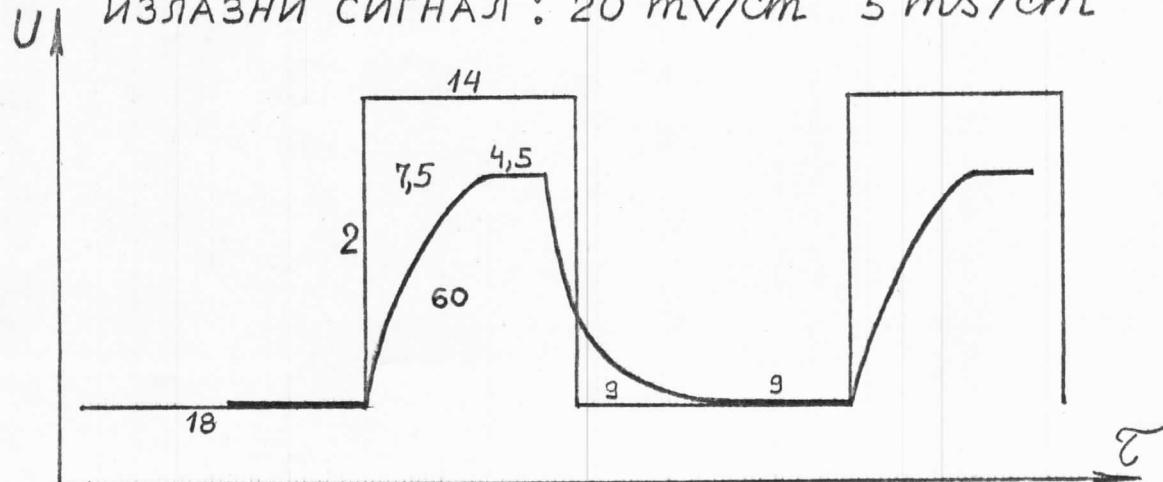
ИЗЛАЗНИ СИГНАЛ: 20 mV/cm 50 ms/cm



III МЕРЕЊЕ

УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 5 ms/cm

ИЗЛАЗНИ СИГНАЛ: 20 mV/cm 5 ms/cm

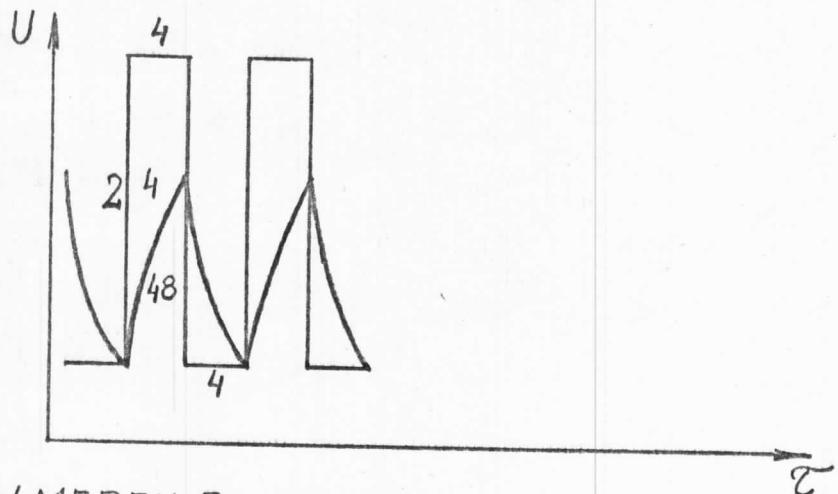


БР. 7

ФРЕКВЕНТНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СВЕТЉЕЊА
GaP ДИОДЕ $V_{F.M.} = 536V$

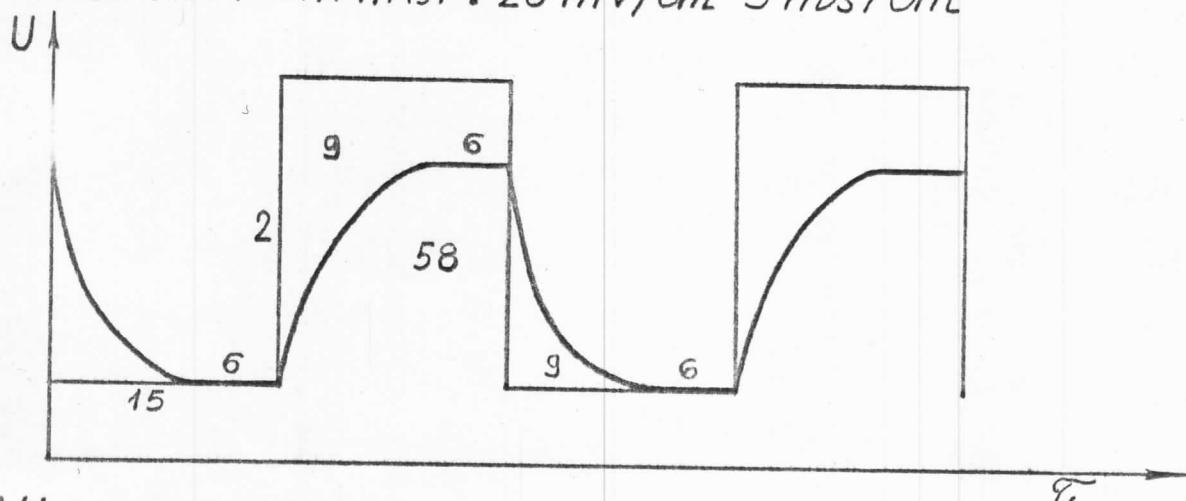
IV МЕРЕЊЕ

УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 5 ms/cm
ИЗЛАЗНИ СИГНАЛ: 20 mV/cm 5 ms/cm



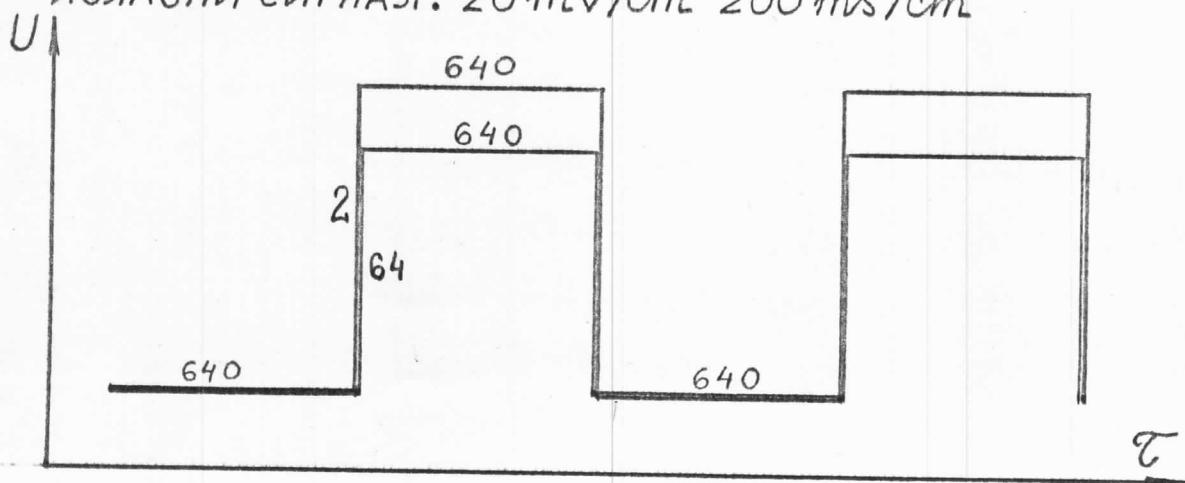
V МЕРЕЊЕ

УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 5 ms/cm
ИЗЛАЗНИ СИГНАЛ: 20 mV/cm 5 ms/cm



VI МЕРЕЊЕ

УЛАЗНИ СИГНАЛ: $0,5 \text{ V/cm}$ 200 ms/cm
ИЗЛАЗНИ СИГНАЛ: 20 mV/cm 200 ms/cm



U drugom merenju skraćuje se dužina impulsa ulaznog signala. Napon ulaznog signala je iznosio 2 V, a dužina trajanja impulsa pozitivnog poluperioda 140 ms, negativnog 45 ms. Izlazni signal je imao napon 66 mV. Vreme uspostavljanja iznosilo je 10 ms, vreme trajanja 150 ms, vreme opadanja 10 ms i vreme svetljenja 28 ms.

U trećem merenju napon ulaznog signala je iznosio 2 V, a izlaznog signala 60 mV. Vreme trajanja pozitivnog poluperioda ulaznog signala iznosilo je 14 ms a negativnog poluperioda 18 ms. Vreme uspostavljanja izlaznog signala iznosilo je 7,5 ms. Vreme trajanja izlaznog signala iznosilo je 4,5 ms, vreme opadanja 9 ms i vreme svetljenja 9 ms.

Tekom četvrtog merenja ulazni signal je imao napon 2 V, a izlazni signal 48 mV. Vreme trajanja pozitivnog poluperioda iznosilo je 4 ms i negativnog poluperioda takođe 4 ms. Izlazni signal je imao vreme uspostavljanja 4 ms i vreme opadanja 4 ms. Vreme trajanja i vreme svetljenja bili su jednaki 0.

Granica funkcije

Pri petom merenju ulazni signal je imao napon 2V, a izlazni 58 mv. Vreme trajanja pozitivnog poluperioda ulaznog signala iznosilo je 15 ms i negativnog poluperioda takođe 15 ms. Vreme uspostavljanja izlaznog signala iznosilo je 9 ms, vreme trajanja 6 ms, vreme opadanja 9 ms. i vreme svetljenja 6 ms.

U šestom merenju ulazni signal je imao napon 2 V, a izlazni 64 mV. Vreme trajanja pozitivnog poluperioda iznosilo je 640 ms kao i negativnog poluperioda. Izlazni signal je imao vreme trajanja i vreme svetljenja jednako

i iznosilo je **640** ms. Vreme uspostavljanja i vreme opadanja bilo je jednak 0.

Pri skraćivanju trajanja ulaznog impulsa skraćuje se i trajanje izlaznog impulsa. Kada ulazni impuls ima vreme trajanja od 4 ms, Ga P svetlosno emitujuće dioda prestaje da svetli. Iz ovoga se može izračunati granična frekvencija ulaznog impulsa pri kojoj Ga P dioda više nije u stanju da prati promene ulaznog napona i tada svetljenje prestaje.

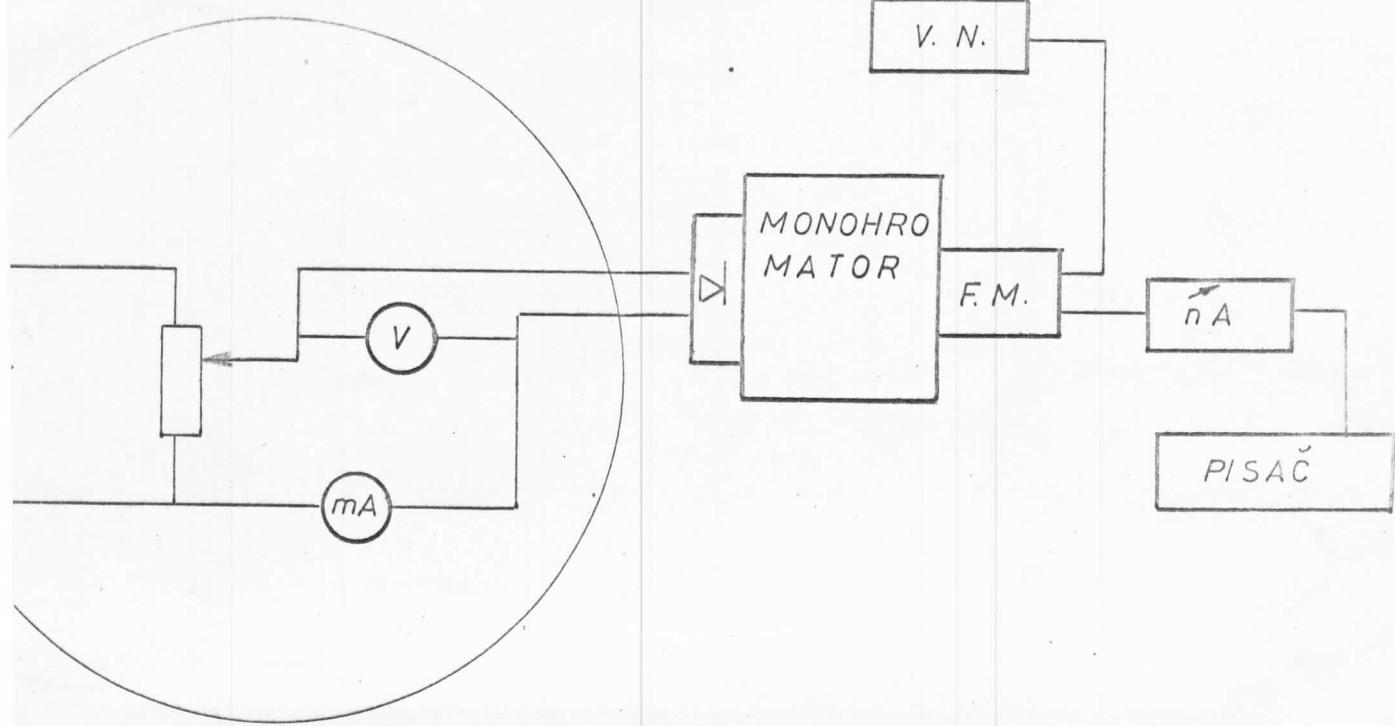
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,004} = 250 \text{ Hz}$$

Granična frekvencija Ga P svetlosno emitujuće diode iznosi 250 Hz. Ako ulazni signal ima ovu frekvenciju ili veću frekvenciju dioda neće emitovati svetlost.

Vreme uspostavljanja režima paljenja žuk Ga P svetlosno emisione diode je relativno kratko i kreće se od 15 ms do 7,5 ms u trećem merenju i približno je 0, odnosno zanemarljivo je u šestom merenju kada je vreme trajanja i ulaznog i izlaznog impulsa 640 ms.

4. SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE SVETLOSNO EMITUJUĆE DIODE

Šema veže instrumenata za merenje:



Za određivanje spektralnih karakteristika GaP svetlosno emitujuće diode upotrebljeni su sledeći instrumenti:

Kao izvor napajanja upotrebljen je PE 1509, opsega od 0-30 V; 40 mA. Struja kroz diodu merena je instrumentom DIGIMERJ, opsega od 0-1000 V, mA, k Ω , firme ISKRA. Za merenje napona na polovima diode upotrebljen je MULTIMETER DM - 3 opsega od 0,1 - 1000 mA, V. Za

regulisanje vrednosti napona na polovina diode i struje kroz diodu upotrebljavan je potenciometar od $1 \text{ k}\Omega$; $0,10 \text{ A}$. Prevođenje intenziteta svetljenja diode u emisiju elektrona (foto struju) izvršeno je fotomultiplikatorom 50 AVP OTV. Za dobijanje visokog napona na fotomultiplikatoru upotrebljen je BERTAN ASSOCIATES, INC PLAINVIEW, N.Y. MODEL 205-03. Regulisanje prolaska svetlosti iz diode u fotomultiplikator izvršeno je monochromatorom SPIEGELMONOCHROMATOR SPM 2 - GEBRAUCHSANLEITUNG firme CARLZEISS JENA. Za merenje foto struje upotrebljen je D.C. MICROMETER PN 2436 firme PHILIPS. Pomoću pišča GRAPHISPOT SEFRAM PARIS registrovana je foto struja u višu spektralne karakteristike.

U cilju provere tablice za provođenje talasnog broja (a^0) u talasnu dužinu ($\lambda [\text{nm}]$), izvršeno je snimanje spektra za živinu lampu, HQ E 40. U atestu lampe HQE 40 nalaze se upisane talasne dužine na kojima se nalaze maksimumi intenziteta spektralne karakteristike. Te vrednosti su: 404,7 nm; 435,8 nm; 579,0 nm; 577,0 nm i 546,1 nm. Sa snimljenog spektra određeno je da se maksimumi intenziteta nalaze na talasnim dužinama 405,0 nm; 435,9 nm; 579,1 nm i 577,2 nm i 546,2 nm. Iz ovoga sleai da je razlika u satimⁱizmerenim vrednostima talasnih dužina zanemarljiva što znači da je rešetka u monochromatoru pravilno postavljena, te se tablice za preračunavanje talasnog broja u talasnoj dužini izraženu u nm mogu primeniti bez korekcije.

Tokom merenja napon na fctomultiplikatoru je bio konstantan i iznosio je 600 V. Papir u pisaču se kretao brzinom $v = 60 \text{ mm/min}$. Upotrebljena je rešetka u monohromatoru sa 651 linija/mm.

Izvršena su tri snimanja spektralnih karakteristika za koja su gornje veličine održavane konstantnim. U prvom snimanju napon na polovima Ga P svetlosno emitujuće diode iznosio je: $U_{d1} = 1,885 \text{ V}$. Struja kroz diodu iznosila je $I_{d1} = 8 \text{ mA}$. Otvor monohromatora je iznosio $d_1 = 1,28 \text{ mm}$. Pri drugom snimanju održavane su konstantnim sledeće veličine: $U_{d2} = 1,900 \text{ V}$; $I_{d2} = 10,2 \text{ mA}$ i otvor monohromatora $d_2 = 1,35 \text{ mm}$.

U trećem snimanju konstantne veličine su iznosile: $U_{d3} = 1,963 \text{ V}$; $I_{d3} = 20,1 \text{ mA}$ i $d_3 = 1,5 \text{ mm}$.

Sa snimljenih spektralnih karakteristika uzete su vrednosti talasnih brojeva i intenziteta koji odgovaraju tim talasnim brojevima i nanete u tablicu br. 5 u prvu, treću, četvrtu i petu kolonu. U drugoj koloni tablice broji 5 nanete su vrednosti talasnih dužina $\lambda [\text{nm}]$. Ove vrednosti su dobijene preračunavanjem talasnog broja u nanometre, pomoću tablice.

Vrednostici iz tablice br. 5 nanete su na grafiku br. 8. Na ovom grafiku se nalaze spektri Ga P svetlosno emitujuće diode u funkciji napona na polovima diode.

U intervalu talasnih dužina od 481,33 nm do 671,20 nm, intenzitet spektralnih karakteristika se kretao od 0,1 do 16,7 i do 0,15 relativnih jedinica za

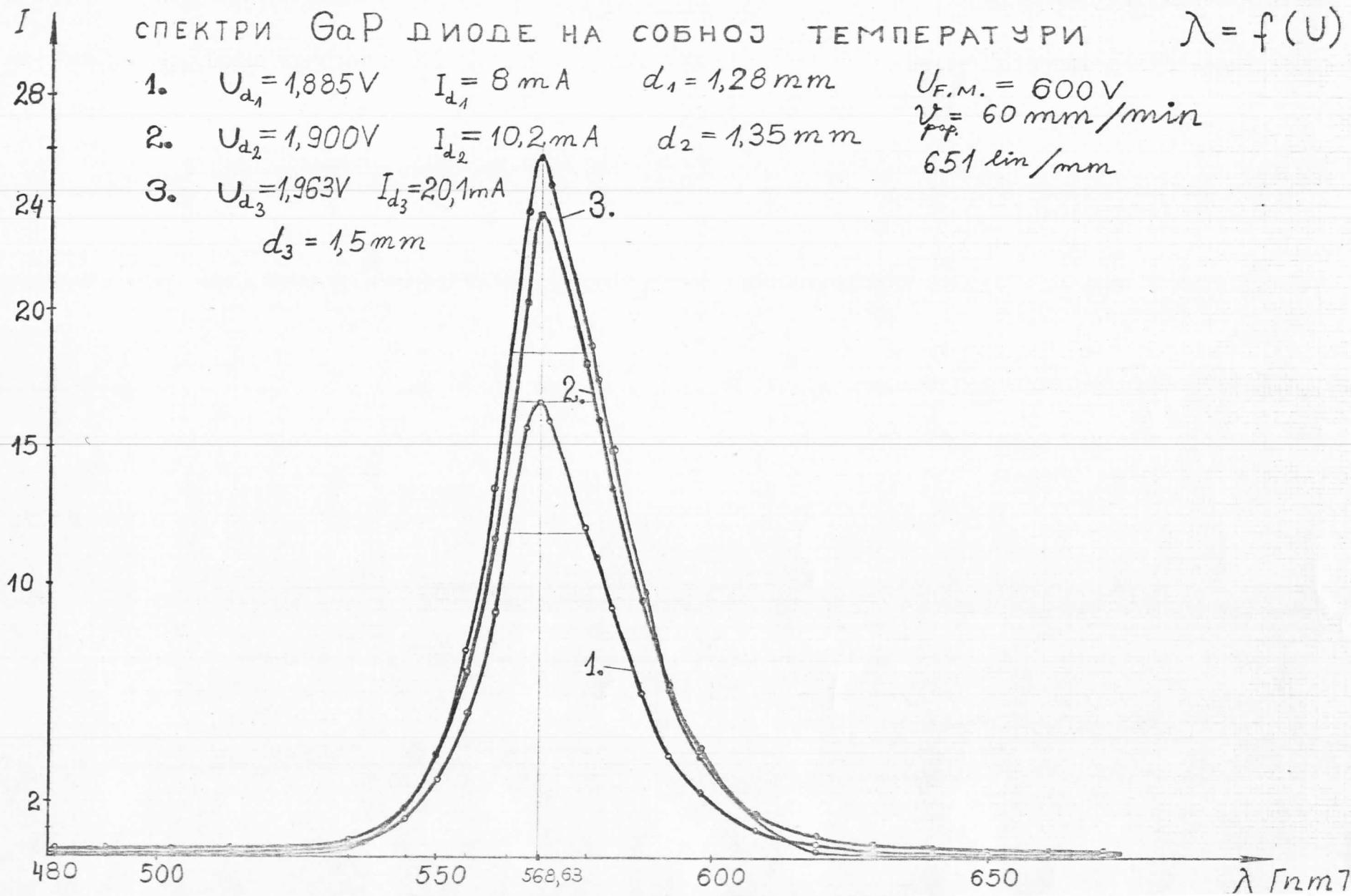
prvu karakteristiku. Za drugu karakteristiku, u istom intervalu talasnih dužina, intenzitet se menja od 0,28 do 23,6 i nazad do 0,3 relativne jedinice. U istom intervalu talasnih dužina, za treću karakteristiku intenzitet je isao od 0,05 do 25,7 i do 0,05 relativnih jedinica. Maksimum intenziteta (osnovni vrh luminescencije Ga P svetlosne emisije diode) za sve tri spektralne karakteristike se nalazi na talasnoj dužini od 568,63 nm odnosno 5686,3 Å što odgovara zelenoj svetlosti luminescencije. Menjanjem napona na polovima Ga P svetlosno emisione diode dakle maksimum intenziteta (pik) se ne pomera već ostaje na istoj talasnoj dužini. Povećanjem napona na polovima Ga P svetlosne emisione diode spektralna karakteristika se širi a intenzitet raste. Povećanjem napona U_d od $U_{d1} = 1,885V$ na $U_{d2} = 1,900V$ i na $U_{d3} = 1,963V$, intenzitet spektralne karakteristike se povećao da $I_1 = 16,7$ relativnih jedinica na $I_2 = 23,6$ relativnih jedinica i na $I_3 = 25,7$ relativnih jedinica. Može se reći da je intenzitet vrhova (maksimuma) spektralnih karakteristika Ga P svetlosno emitujuće diode raste i sa porastom jačine struje kroz diodu. Promeni jačine struje kroz diodu od $I_{d1} = 8 \text{ mA}$ na $I_{d2} = 10,2 \text{ mA}$ i na $I_{d3} = 20,1 \text{ mA}$, odgovaraju promene intenziteta maksimuma karakteristike od $I_1 = 16,7$ relativnih jedinica na $I_2 = 23,6$ relativnih jedinica i na $I_3 = 25,7$ relativnih jedinica.

Talasna dužina emitovane svetlosti Ga P svetlosne emisione diode zavisi od širine zabranjene zone

ТАБЕЛА ЗАВИСНОСТИ ИНТЕНЗИТЕТА СПЕКТРАЛНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ
ОД ТАЛАСНОГ БРОЈА И ТАЛАСНЕ ДУЖИНЕ

α°	$\lambda [nm]$	I_1	I_2	I_3
19,0	481,33	0,1	0,28	0,05
19,2	491,96	0,1	0,28	0,05
19,4	502,54	0,1	0,28	0,05
19,6	513,12	0,15	0,30	0,05
19,8	523,70	0,2	0,35	0,1
20,0	534,29	0,4	0,65	0,4
20,2	544,87	1,4	1,80	1,9
20,3	550,16	2,8	3,7	3,7
20,4	555,45	5,3	6,8	7,5
20,5	560,74	9,0	11,7	13,5
20,6	566,0	15,8	20,4	23,8
20,65	568,63	16,7	23,6	25,7
20,8	576,56	12,0	18,1	18,8
20,85	579,21	11,0	16,0	17,5
20,9	581,84	9,1	13,5	15,0
21,0	587,10	6,0	9,4	9,7
21,1	592,37	3,8	6,3	6,2
21,2	597,63	2,4	4,0	3,8
21,4	608,16	1,0	1,6	1,5
21,6	618,68	0,5	0,8	0,6
21,8	629,21	0,3	0,5	0,3
22,0	639,74	0,2	0,4	0,15
22,2	650,21	0,18	0,3	0,1
22,4	660,73	0,15	0,3	0,05
22,6	671,20	0,15	0,3	0,05

БР. 8



poluprovodničkog kristala Ga P, jer propuštanjem struje kroz zaprečni spoj p-n svetlosno emisione diode u propusnom smeru elektroni koji dolaze iz oblasti N bivaju injektorani u oblast p u kojoj se rekomбинuju sa šupljinama, pri čemu se oslobađa energija koja biva izražena u obliku fotona. Energija jednog fotona je $E = h\nu$, gde je ν frekvencija radijacije izražena u Hz, a h je Planckova konstanta i iznosi: $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Talasna dužina emitovane radijacije je $\lambda = \frac{c}{\nu}$, gde je c brzina svetlosti u vakuumu. ~~članak~~

Što je veća širina zabranjene zone to je veća frekvencija emitovane radijacije, a manja talasna dužina talasa.

Energija izraženih kvantova i njihova talasna dužina vezane su između sebe izrazom:

$$\lambda = \frac{1237}{E}$$

E - je energija izraženog kvanta i izražava se u eV.

λ - je talasna dužina izraženog kvanta i izražava se u nm.

Iz položaja pika karakteristike na grafiku broj 8 sledi:

$$\lambda = 568,63$$

$$E = \frac{1237}{568,63} = 2,18 \text{ eV}$$

Energija prelaza, odnosno širina zabranjene zone Ga P svetlosnoemitujuće diode iznosi 2,18 eV.

Poluširine spektra na grafiku br. 8 određene su na visinama dobijenim kada se maksimum intenziteta podeli sa $\sqrt{2}$. Za prvu karakteristiku poluširina je određena na visini ~~16,7~~ 16,7: 1,41 = 11,84 relativnih jedinica. Za drugu karakteristiku poluširina je određena na visini 23,6:1,41 = 16,73 relativnih jedinica, a za treću karakteristiku na visini 25,7:1,41 = 18,22 relativnih jedinica. Poluširina za karakteristiku 1 na grafikonu br. 8 iznosi 14,3 nm, za karakteristiku 2 poluširine iznosi 14,4 nm, a za karakteristiku 3 iznosi 14,9 nm.

Z A K L J U Č A K

Na osnovu izvedenih eksperimenata sa Ga P svetlosno/emisionom diodom može se zaključiti sledeće:

Svetlosno emisiona dioda na bazi Ga P počinje da svetli pri naponu na polovima diode od 1,71 V i pri struji kroz diodu od 0,24 mA. Diođu karakteriše vrlo mali unutrašnji otpor, koji iznosi: $R_i = 7,94 \Omega$. Iz ovoga sledi da je volt-amperna karakteristika ove diode veoma strma.

Strujno - strujnu zavisnost $I_f = f(I_d)$ karakteriše izrazita linearost od $I_d = 7\mu A$ pa nadalje u oblasti primene diode, što je veoma bitno za diodu kao svetlosni izvor.

Intenzitet svetljenja Ga P svetlosno emitujuće diode opada sa povećanjem temperature. Na sobnoj temperaturi, kada struja kroz diodu iznosi $I_d = 14,8 \text{ mA}$, a napon na polovima diode $U_g = 1,99 \text{ V}$ intenzitet svetljenja izražen preko foto struje iznosi $I_f = 0,24 \mu\text{A}$, a pod istim uslovima I_d i U_g fotostruja na minus 9°C iznosi $0,305 \mu\text{A}$, a na $40,5^\circ\text{C}$ foto struja iznosi $0,222 \mu\text{A}$. Sledeći da se kvantni prinos svetlosti smanjuje kada temperatura raste.

■

Svetlosno emisionu diodu na bazi Ga P karakteriše i veoma brzo delovanje. Vreme paljenja ove diode iznosi oko 10 ms. Granična frekvencija ulaznog signala iznosi 250 Hz. Iznad ove frekvencije i na ovoj frekvenciji dioda nije u stanju da emituje svetlost.

Osnovni vrh luminescencije spektra Ga P svetlosno emisione diode nalazi se na talasnoj dužini $\lambda = 5686,3 \text{ \AA}$, što znači da je emitovana svetlost zelene boje. Menjanjem napona na polovima diode i struje kroz diodu pik se ne pomera već ostaje na talasnoj dužini $\lambda = 5686,3 \text{ \AA}$, što ustaži da je prelaz strogo određen.

Energija prelaza koja je jednak širini zabranjene zone kod svetlosno emisione diode na bazi Ga P iznosi 2,18 eV.

Poluširina spektralne karakteristike Ga P svetlosno emisione diode iznosi oko 14 nm. Drugi pik spektralne karakteristike nije nađen u veljivoj oblasti spektra.

Na osnovu spomenutih karakteristika svetlosno emisiona dioda na bazi Ga P je našla vrlo veliku primenu u optičkoj elektronici.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОПДТА ЕНЦИКЛОПЕДИЈА LAROUISE, ТОМ 2.
ИЗДАВАЧКО ПРЕДУЗЕЋЕ „ВУК КАРАЧИЋ“, БЕОГРАД 1972. ГОД.
2. ALDERT VAN DER ZIEL, SOLID STATE PHYSICAL ELECTRONICS, SECOND EDITION ALDERT VAN DER ZIEL
PRENTICE-HALL, INC., ENGLEWOOD CLIFFS,
NEW JERSEY, 1968
3. И. К. ВЕРЕЩАГИН, ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КРИСТАЛЛОВ,
ИЗДАТЕЛЬСТВО „НАУКА“ МОСКВА 1974
4. С. В. СВЕЧНИКОВ, ЭЛЕМЕНТЫ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО „СОВЕТСКОЕ РАДИО“ МОСКВА - 1971
5. АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОДДЕЛЕНИЕ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАУЧНЫЙ
СОВЕТ ПО ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
Институт физики

ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
„НАУКОВА ДУМКА“ КІЕВ - 1971

