

03.05.1978

03 434/1

I N S T I T U T Z A F I Z I K U
P R I R O D N O - M A T E M A T I Č K I F A K U L T E T
U N I V E R Z I T E T U N O V O M S A D U

M I L O Š E V I Ć M A R I N

F O T O P R O V O D N E K A R A K T E R I S T I K E K A D M I J U M S U L F I D A

(D I P L O M S K I R A D)

N O V I S A D
1978.

Zahvaljujem se profesoru Dr Slobodanu Cariću, kao mentoru ovoga rada, na ukazanoj pomoći prilikom izbora teme i literature, na sugestijama prilikom izvodjenja brojnih eksperimenata i teorijske obrade eksperimentalnih rezultata.

U Novom Sadu, maja 1978.g.

M. Milošević

S A D R Ž A J

I	UVOD I OBJAŠNJENJE POJAVE ELEKTRIČNE FOTOPROVODNOSTI	1
II	RAZLOG MERENJA	2
	2.1. RAZLOG MERENJA U CELINI	2
	2.2. KADMIJUM SULFID	3
III	METOD MERENJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE	4
	3.1. METODIKA MERENJA STATIČKIH KARAKTERISTIKA	4
IV	EKSPERIMENTALNA TEHNIKA	10
	4.1. KADMIJUM SULFIDNI UZORAK	10
	4.2. KUĆIŠTE UZORKA	11
	4.3. SPISAK UREDJAJA I ŠEMA ZA MERNU GRUPU STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS UZORKA ORP 60	13
	4.4. SPISAK UREDJAJA I ŠEMA MERNE GRUPE DINA- MIČKE KARAKTERISTIKE CdS UZORKA ORP 60	17
V	A. STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS KAO POLUPROVODNIKA	23
	5.1. TAMNA STRUJA (I_t) U FUNKCIJI NAPONA (U) CdS UZORKA ORP 60	23

5.2. TAMNA STRUJA U FUNKCIJI TEMPERATURE	25
5.3. ŠIRINA ENERGIJE PRELAZA NOSILACA NAELEKTRISANJA	27
5.4. ŠIRINA ENERGIJE PRELAZA ZA ZAMKE I VEROVATNOĆA NALAŽENJA ELEKTRONA U DNU PROVODNE ZONE	32
B. STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS KAO FOTOPROVODNIKA	35
5.5. TEMPERATURNO-FOTOPROVODNA KARAKTERISTIKA PRIMESNOG POLUPROVODNIKA	35
5.6. SPEKTRALNA KARAKTERISTIKA	41
5.7. FOTOSTRUJA U FUNKCIJI JAČINE OSVETLJENOSTI	46
5.8. FOTOSTRUJA U FUNKCIJI NAPONA	49
5.9. FOTOSTRUJA U FUNKCIJI TEMPERATURE	52
C. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE CdS UZORKA	55
5.10. GRANIČNA FREKVENCIJA I VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA	55
5.11. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI TEMPERATURE	58
5.12. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI OSVETLJENOSTI	61
5.13. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI JAČINE MONOHROMATSKE OSVETLJENOSTI	67
5.14. FOTOOPTORNOST U FUNKCIJI JAČINE OSVETLJENOSTI	73
ZAKLJUČAK	79
LITERATURA	81

I UVOD I OBJAŠNJENJE POJAVE ELEKTRIČNE FOTOPROVODNOSTI

Svojstvo električnog provodjenja materijalne sredine okarakterisano je specifičnom provodljivošću σ [$\Omega^{-1} m^{-1}$] koja je data relacijom

$$\sigma = nq\mu \left[\frac{1}{\Omega m} \right] \quad (1.1.)$$

Iz jednačine (1.1.) vidi se da je specifična provodnost materijala srazmerna:

- n - broju slobodnih nosilaca naelektrisanja;
- q - naelektrisanju slobodnih nosilaca;
- μ - pokretljivosti datih slobodnih nosilaca naelektrisana, koja je data u obliku (1.2.)

$$\mu = \frac{q \cdot t_c}{2m} \left[\frac{m^2}{Vs} \right] \quad (1.2.)$$

gde je

- t_c - srednje vreme izmedju dva sudara, a
- m - masa slobodnog nosioca naelektrisanja.

Fotoprovodnost je pojava promene provodnosti $\Delta\delta$ poluprovodnika pod dejstvom elektromagnetsnog (svetlosnog) zračenja.

Pomenuto zračenje izaziva promenu stanja postojećih slobodnih nosilaca naelektrisanja (elektrona i šupljina) u poluprovodniku, kao i generisanje novih slobodnih nosilaca.



naelektrisanja. S obzirom da je provodnost σ srazmerna broju nosilaca naelektrisanja n, njihova promena Δn dovodi do promene fotoprovodnosti - $\Delta\delta_F$. Ako pod dejstvom svetlosti provodnost raste $\Delta\delta_F > 0$ govori se o pozitivnoj fotoprovodnosti, a ako provodnost opada $\Delta\delta_F < 0$ pod dejstvom svetlosti, govori se o negativnoj fotoprovodnosti.

2.1. RAZLOG MERENJA U CELINI

Povod za ovaj rad je primećena pojava da vreme porasta i vreme pada impulsa na fotoprovodniku zavisi od jačine osvetljenosti fotoprovodnog uzorka, kada se na njega dovodi napon četvrtastih impulsa.

Na raspolaganju je bio gotov uzorak kadmijum sulfidnog fotoprovodnika ORP 60, proizvodjača "Philips". CdS fotoprovodnik se ponašao kao poluprovodnik N - tipa, sa pozitivnom fotoprovodnošću. Naravno, za rad na dinamičkim karakteristikama bilo je potrebno i znati i staticke luks - volt - amperno - temperaturske karakteristike. Kao rezultat ispitivanja dobijene su neke energije prelaza kadmijum sulfida. Ovi interesantni rezultati bili su povod da se ispita i spektralna provodljivost kadmijum sulfida, zatim, vreme života nosilaca naelektrisanja.

Na kraju dobijamo zavisnost opadanja fotootporna R_F od intenziteta osvetljenosti E.

Pojavi fotoprovodnosti kadmijum sulfida (CdS) su posvećeni mnogi radovi sa mnogo užim ciljevima (Smith, Rouz, Nikisch, Bube i dr.) (reference: 3,10,11). Većina eksperimentalno dobijenih rezultata iz ovoga rada, slaže se sa rezultatima iz literature.

Ovaj rad ima za cilj da dâ pregled fotoprovodnih karakteristika kadmijum sulfida kao i da, po mogućству, ukaže na fizičke procese koji se dešavaju u tom kristalu i koje uslovjavaju pomenute fotoprovodne karakteristike.

2.2. KADMIJUM SULFID

Kao što se vidi iz hemijske formule CdS, kadmijum sulfid se sastoji iz atoma kadmijuma Cd ($Z = 48$) i atoma sumpora S ($Z = 16$). Ovo jedinjenje pripada $\text{II}_b - \text{VI}_b$ grupi poluprovodnika periodnog sistema elemenata (2.2.1.).

Molekulska težina CdS je $M = 144,464$ [ajm].

Gustina CdS je $\rho = 4,48$ [g/cm³].

Relativna dielektrična konstanta mu je $\epsilon = 11,6$.

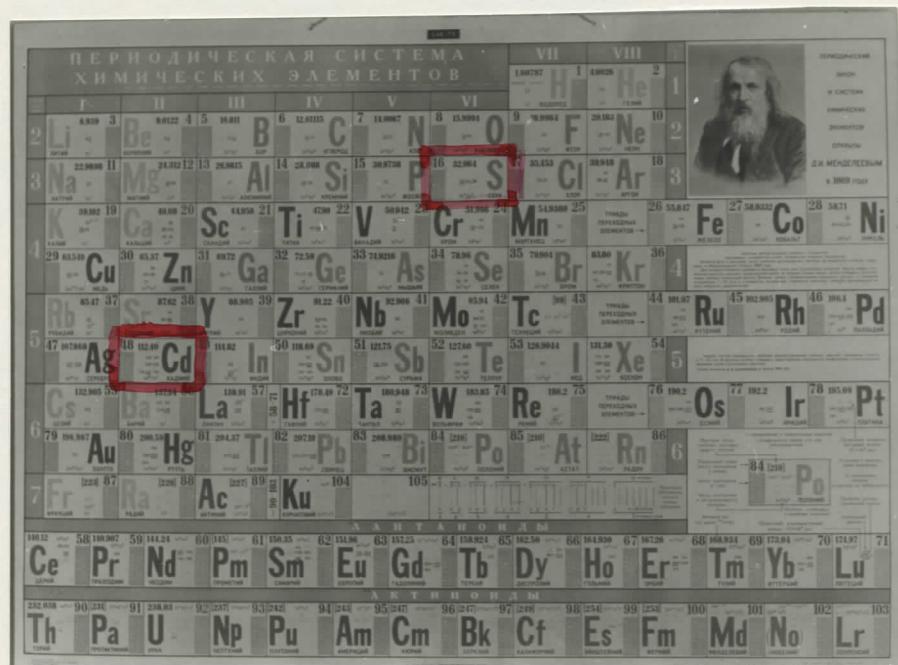
Tačka topljenja mu je $t = 1750$ [$^{\circ}\text{C}$].

Medjuatomsko rastojanje izmedju atoma Cd i S je $d = 2,52$ [\AA].

CdS kristališe u heksagonalnom sistemu i ima vurcitnu strukturu.

Osnovni motiv kristalne strukture je Cd - S.

Ovaj kristal ima žuto - oranž boju.



The image shows the periodic table of chemical elements in Russian. It features a portrait of Dmitri Mendeleev in the upper right corner. The table is organized into groups and periods, with element symbols, atomic numbers, and some physical properties like density and melting point. A red box highlights the element Cadmium (Cd) in Group IIb, which is the focus of the section. The table also includes a legend for transition metals and a note about the discovery of element 114.

Slika 2.2.1.

III METOD MERENJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE

METODIKA MERENJA STATIČKIH KARAKTERISTIKA

Provodnost σ_t i fotoprovodnost σ_F su fizičke veličine koje se nisu mogle dobiti direktno merenjem na uzorku pošto je ovaj bio fabrički zatvoren u kapsulu.

Jedino rešenje je bilo da se meri struja poluprovodnika I_t i fotoprovodnika I_F , koje su povezane sa pomenu-tim provodnostima σ relacijom:

$$I = \frac{V}{\frac{\ell}{s} \cdot \frac{1}{nq\mu}} = \frac{V}{\frac{\ell}{s} \cdot \frac{1}{\sigma}} = \frac{s}{\ell} \cdot V \cdot \sigma \quad (3.1.)$$

gde je:

$\sigma = nq\mu$ - provodnost

V - napon na krajevima uzorka

ℓ - dužina uzorka izmedju elektroda.

Odavde se vidi da je provodnost σ

$$\sigma = \frac{\ell}{s \cdot V} I \quad (3.2.)$$

srazmerna struji I .

$$\sigma \propto I \quad (3.3.)$$

U ovom radu će se meriti struja I i na taj način će se zaključivati o karakteru provodnosti σ_t i fotoprovodnosti

σ_F , jer efektivna dužina ℓ kadmijum sulfidnog uzorka ORP 60 nije data u katalogu.

Pri ispitivanju statičkih fotoprovodnih karakteristika kadmijum sulfida CdS bilo je potrebno meriti sledeće fizičke veličine:

Φ - intenzitet pobudne svetlosti ili jačinu osvetljenosti uzorka E (lux-metrom).

$$\Phi \text{ [lx]} = E \text{ [lx]} \cdot S \text{ [m}^2\text{]}$$

Kako je površina S uzorka iznosila $S = 0,25 \text{ [mm}^2\text{]} = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ to je

$$\Phi \text{ [W]} = 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot E \text{ [lx]} \cdot S \text{ [m}^2\text{]}$$

Jedinica jačine osvetljenja E je luks [lx].

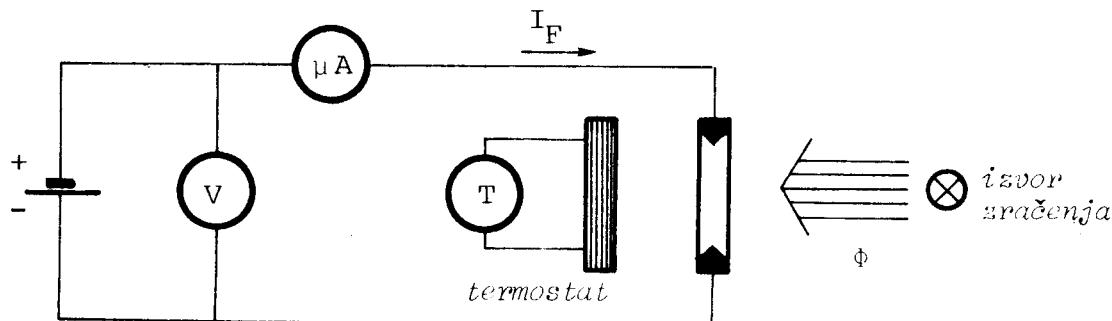
$$E = d\Phi/dS \quad E = \Phi/S \quad 1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2} = 1,4 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$

I_F - fotostruja je merena mikroampermetrom,

U - napon na krajevima uzorka je meren voltmetrom,

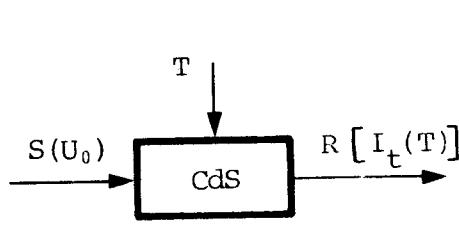
T - temperatura termostata T je merena elektronskim termometrom.

Na crtežu (3.1.) je data opšta električna šema kola za snimanje statičkih karakteristika provodnika i fotoprovodnika.

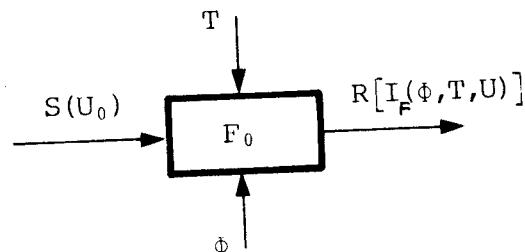


Slika 3.1.

U ovom radu je merena tamna struja I_t i fotostruja I_F , kao odgovor CdS uzorka na promene jačine svetlosti Φ , temperature T i napona U .



Slika 3.2.



Slika 3.3.

Stoga se fotostruja I_F može prikazati u funkciji preostale tri fizičke veličine Φ , T i U .

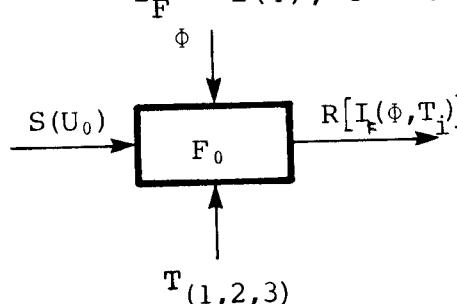
$$I_F = I(\Phi, T, U)$$

Sa obzirom na to da se rezultati ispitivanja najlakše prikazuju u dve dimenzije, uvek je merena fotostruja I_F u funkciji jedne od pomenutih fizičkih veličina, dok su ostale dve veličine bile konstantne.

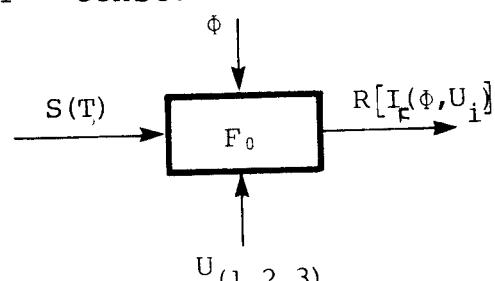
Pregledan prikaz mogućih eksperimenata sa jednim fotoprovodnikom izgleda ovako:

- Fotostruja I_F u funkciji intenziteta svetlosti Φ :

$$I_F = I(\Phi), \quad U = \text{const.}, \quad T = \text{const.}$$



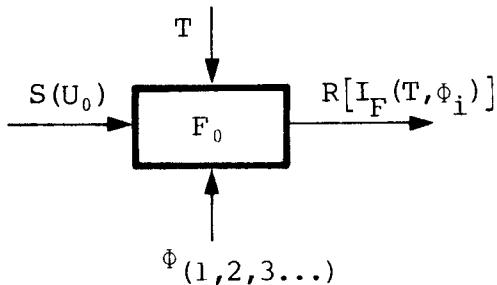
Slika 3.4.



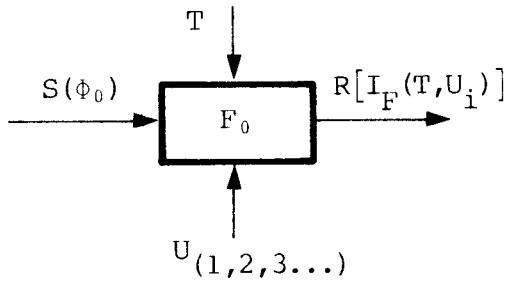
Slika 3.5.

- Fotostruja I_F u funkciji temperature T :

$$I_F = I(T), \quad \phi = \text{const.}, \quad U = \text{const.}$$



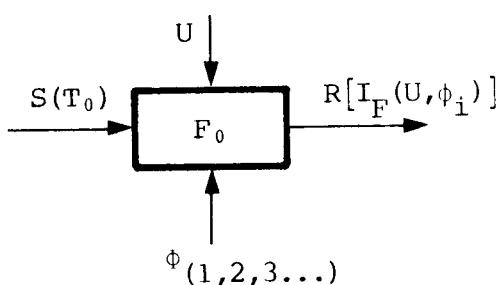
Slika 3.6.



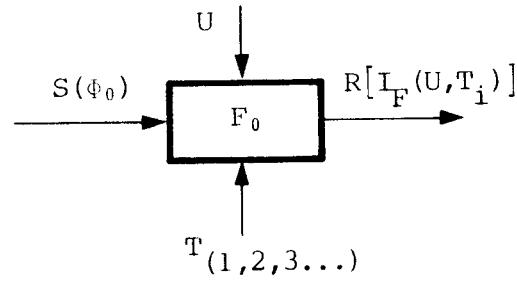
Slika 3.7.

- Fotostruja I_F u funkciji napona U :

$$I_F = I(U), \quad \phi = \text{const.}, \quad T = \text{const.}$$



Slika 3.8.



Slika 3.9.

Svaka od ovih pomenutih veličina (ϕ, T, U) menjana je u onom intervalu, koji je zahtevao pojedini eksperiment. Na taj način je bilo uočljivo koliki je bio pojedini uticaj intenziteta svetlosti ϕ , temperature T i napona U na fotostruju I_F CdS uzorka.

Pri ispitivanju poluprovodnika postoje dva slučaja merenja:

a. merenje provodnih i fotoprovodnih karakteristika u prelaznom režimu i

b. merenje stacionarnih vrednosti.

Merenja u prelaznom režimu su ona kod kojih se ne čeka uspostavljanje stacionarnog stanja kod zavisno promenljive. Na primer za fotostruju I_F je:

$$dI_F/dt \neq 0$$

Ova merenja služe kao preliminarna i nisu poželjna jer ne daju tačne vrednosti zavisno promenljive.

Posle merenja u prelaznom režimu sledila su merenja stacionarnih (ravnotežnih) vrednosti zavisno promenljive. Stacionarne vrednosti zavisno promenljive I se ne menjaju u toku vremena t.

$$\frac{dI_F}{dt} = 0 \quad I_F = \text{const.}$$

Prema dužini vremena t, koliko su nezavisno promenljive veličine ostajale konstantne, tj. koliko dugo je čekana stacionarna vrednost zavisno promenljive, menjanja se uslovno dele na:

- a. kratkovremenska $t = (10^{-3} \div 10^{-2}) \text{ [s]}$
- b. dugovremenska $t = (1 - 90) \text{ [minuta].}$

Kratkovremensko istraživanje je bilo korišćeno za ispitivanje dinamičkih karakteristika CdS uzorka sa pravougaonim impulsima napona. Metodika ispitivanja dinamičkih karakteristika biće izložena u odeljku za eksperimentalnu tehniku (4.4) i glavi V.C.

Dugovremensko istraživanje je bilo korišćeno pri merenju statičkih karakteristika. Na stacionarne vrednosti struje je čekano najmanje $\tau = 3$ minuta za svaku tačku posebno.

Metodika svakog od ovih pomenutih eksperimenata je specifična, pa stoga neće biti pojedinačno opisivana u ovome radu. Zato će se govoriti o eksperimentalnoj tehnici grupe sličnih eksperimenata.

- A - CdS kao poluprovodnik
- B - CdS kao fotoprovodnik
- C - dinamičke karakteristike CdS kao provodnika i fotoprovodnika.

U narednim tabelama izložen je kratak program rada na ispitivanju fotoprovodnih karakteristika CdS - uzorka.

Ispitivanja su vršena sledećim redom:

A. STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS KAO POLUPROVODNIKA

- 5.1. Tamna struja u funkciji napona
- 5.2. Tamna struja u funkciji temperature
- 5.3. Širina energije prelaza nosilaca nanelektrisanja
- 5.4. Širina energije prelaza za zamke i verovatnoća nalaženja elektrona u dnu provodne zone

B. STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS KAO FOTOPROVODNIKA

- 5.5. Temperaturno-fotoprovodna karakteristika primesnog poluprovodnika
- 5.6. Spektralna karakteristika
- 5.7. Fotostruja u funkciji jačine osvetljenosti
- 5.8. Fotostruja u funkciji napona
- 5.9. Fotostruja u funkciji temperature.

C. DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

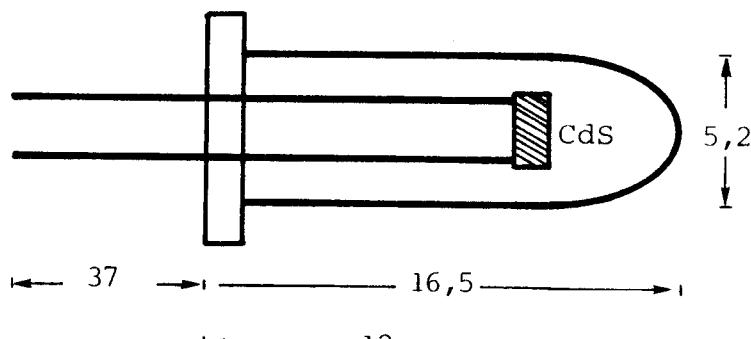
- 5.10. Granična frekvencija i vreme života nosilaca nanelektrisanja
- 5.11. Vreme života nosilaca nanelektrisanja u funkciji temperature
- 5.12. Vreme života u funkciji osvetljenosti
- 5.13. Vreme života nosilaca nanelektrisanja u funkciji jačine monohromatske osvetljenosti
- 5.14. Fotootpornost u funkciji osvetljenosti.

IV EKSPERIMENTALNA TEHNIKA

4.1. KADMIJUM SULFIDNI UZORAK

Sam poluprovodni Cds materijal smešten je u cilindrični stakleni balon ($5,2 \times 16,5$ mm) (slika 4.1.1.). Balon je sa jedne strane zatvoren kupolom koja deluje ujedno i kao sočivo, kroz koje stiže svetlost do kristala Cds. Efektivna površina uzorka je $S = 0,22 \text{ mm}^2$. Sa druge strane izlaze izvodi sa kristala.

Kristal je potopljen u providno sivo-plavkasto silikonsko ulje.



Slika 4.1.1.

Neki od kataloških podataka ovog uzorka su:

- disipacija snage kod temperature ambijenta $T = 25 [{}^\circ\text{C}]$ je $P_{\max} = 70 [\text{mW}]$;
- maksimalno dozvoljen jednosmerni napon je $U = 350 [\text{V}]$;
- maksimalna dozvoljena struja kroz fotoprovodnik je $I_{\max} = 7,5 [\text{mA}]$.

U ovom radu, zbog ovih karakteristika, struja uzorka nije prelazila više od 1 [mA] do 2 [mA].

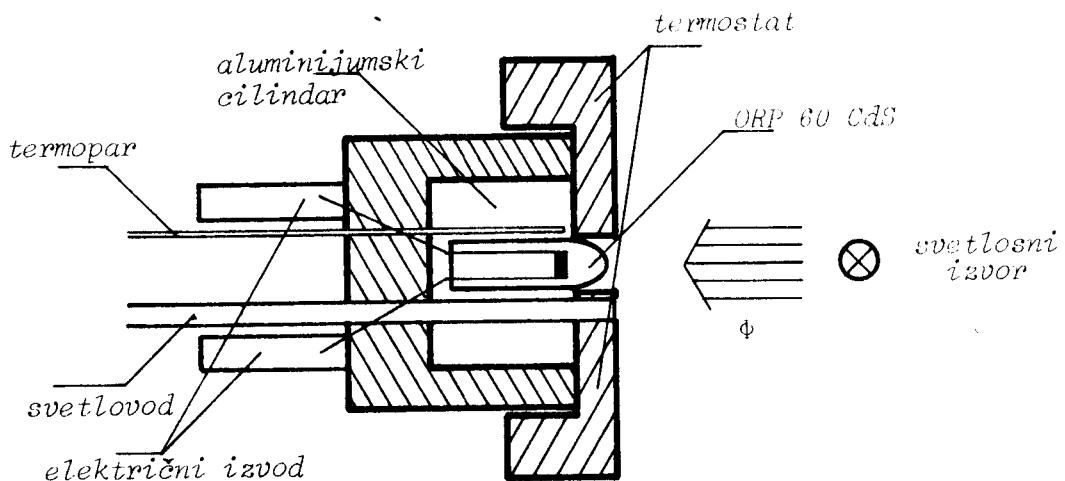
Radni interval temperature ambijenta ovog uzorka je $T_{\min} = -40 [^{\circ}\text{C}]$ do $T_{\max} = 70 [^{\circ}\text{C}]$. Merenja na ovom uzorku su vršena od $T_{\min} = -20 [^{\circ}\text{C}]$ do $T_{\max} = 50 [^{\circ}\text{C}]$, dakle u radnom intervalu temperature. Tamna struja uzorka priključenog na napon od 300 [V] je reda do 1 [nA].

Iz priloženih kataloških spektralnih karakteristika se vidi da je fotoprovodnik ORP 60 fotoosetljiv u vidljivom delu spektra.

To je foto-element čije je vreme relaksacije najmanje 16 časova. O tome je u radu strogo vodjeno računa, tako da je uzorak bio isključen iz električnog kola i bio zamračen bar 24 h. Tek posle tog vremena sva pobudjenja u kristalu postaju zanemarljiva.

4.2. KUĆIŠTE UZORKA

Za fotoprovodnik ORP 60 napravljeno je pogodno kućište od plastične mase sa dva izvoda za priključivanje u električno kolo.

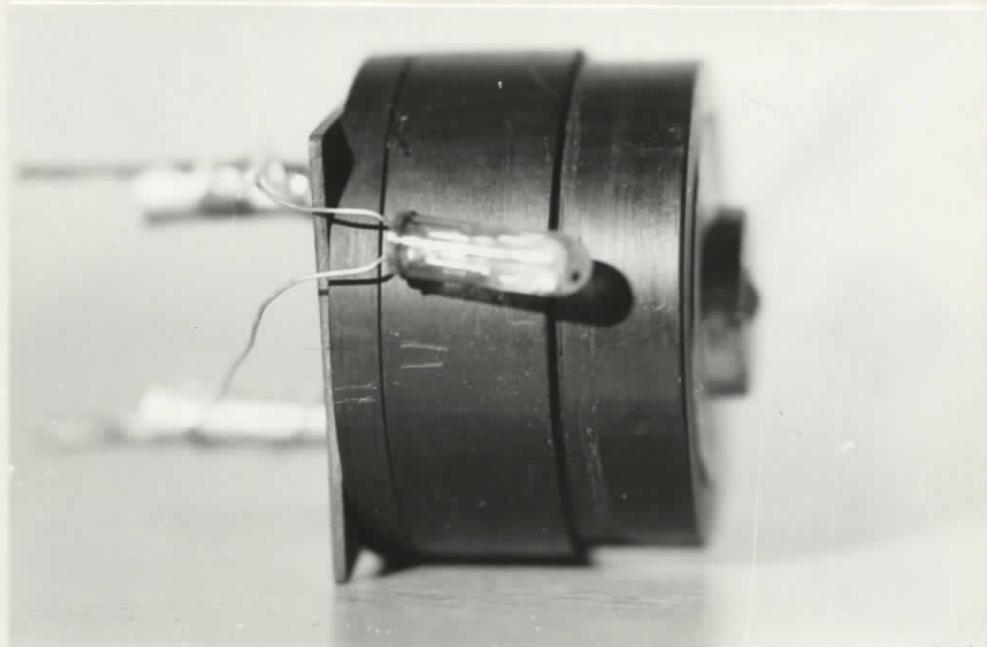


Slika 4.2.1.

Telo fotoprovodnika obavlja aluminijumski cilindar koji omogućuje dobar toplotni kontakt sa termostatom (mikros-

kopskim stolom).

Za merenje temperature služi termopar, koji se nalazi u aluminijumskom cilindru na rastojanju od jednog milimetra od balona fotoprovodnika.



Slika 4.2.2.

Spoljašnji izgled merne glave uzorka (fotootpornik je izvučen napolje)

Pretpostavlja se da je temperatura kristala CdS jednaka temperaturi koju meri termopar.

Jačina osvetljenosti E fotoprovodnog uzorka je merna svetlomerom (luks-metrom). To je bio jedini baždareni instrument na raspolaganju za merenje intenziteta pobudne svetlosti, tj. osvetljenosti uzorka.

Svetlost je iz izvora stizala do fotoprovodnika tako što se uz sam fotoprovodnik, na rastojanju 5 mm od samog tela kristala CdS, nalazio svetlovod (fiberglas). Kroz svetlovod je totalnom refleksijom stizala svetlost do svetlomera (luks-metra) koji je merio osvetljenost uzorka (slika 4.2.3.).

Sa obzirom na blizinu svetlovoda i uzorka predpostavlja se da je intenzitet svetlosti koja pada na uzorak, jed-

naka intenzitetu svetlosti koja pada na poprečni presek svetlovoda.

Na taj način je meren intenzitet pobudne svetlosti koja pada na uzorak, tj. osvetljenost E uzorka, što pokazuje slika 4.2.3.



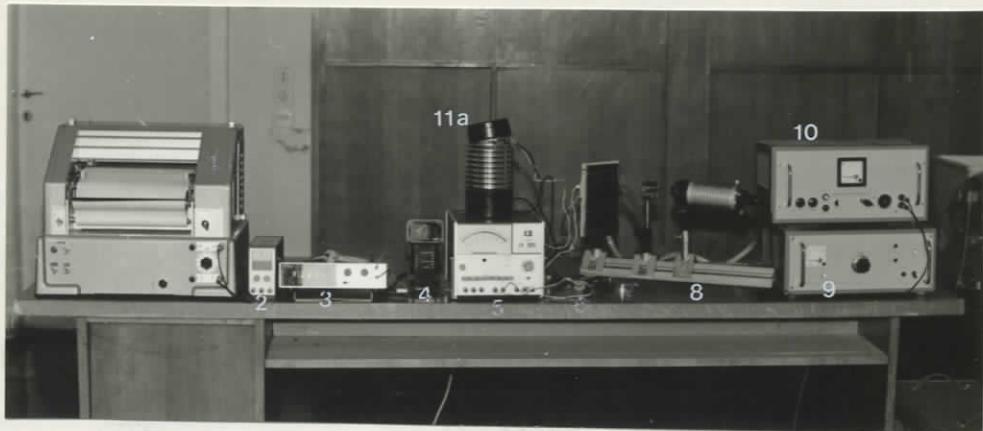
Slika 4.2.3.

*Kućište uzorka, svetlovod i svetlomer (1 - uzorak,
2 - svetlovod i 3 - luksmetar)*

Dosad opisano kućište uzorka se odnosilo na foto-provodne eksperimente gde je uzorak bio osvetljen. Medjutim, pri istraživanju karakteristika zamračenog poluprovodničkog uzorka CdS, glava - kućište uzorka ostaje ista, samo što se menja aluminijumski cilindar, koji potpuno zaklanja uzorak od pristupa svetlosti. Takodje se odstranjuje svetlovod, a ostaje samo termopar za merenje temperature uzorka.

4.3. SPISAK UREDJAJA I ŠEMA ZA MERNU GRUPU STATIČKE KARAKTERISTIKE CdS UZORKA ORP60

U ovoj grupi eksperimenata su korišćeni sledeći merni instrumenti i uredjaji, kao što to prikazuje slika 4.3.1.



Slika 4.3.1.

1 - pisač, 2 - ispravljač, 3 - voltematar, 4 - digimer,
 5 - mikrovoltmetar, 6 - mikroskopski sto, 7 - polaroidi
 8 - svetlosni izvor, 9 - izvor napajanja mikroskopskega stola,
 10 - izvor napajanja sijalice, 11a - termos boca

1. Pisač (Graphispot)
2. Izvor stabilisanog napajanja (Philips) - PM - 1509
3. Voltmetar (digitalni multimetar) (Ei)
4. Mikroampermetar - digimer (Iskra)
5. Mikrovoltmetar (Philips) PM - 2436
6. Mikroskopski sto (Zeiss)
7. Par polaroida
8. Svetlosni izvor (sijalica osram i spekol (6 V, 30 W)
 (6 V, 18 W))
9. Izvor napajanja mikroskopskega stola
10. Izvor stabilisanog napona za napajanje sijalice (6 V,
 30 W)

Nisu prikazani na slici, a korišćeni su:

11. Termopar
12. Fotoprovodni uzorak CdS ORP60 (Philips)
13. Stabilisani izvor napajanja (Bertran Associates Inc.)

14. Monohromator (Zeiss - spekol)
15. Svetlomer (Luna - six) (Köln) - fotometar
16. Svetlovod $\phi = 4$ mm.

Osnovni podaci o uređajima:

1. Pisač (Graphispot) firme "Sefram" je galvanometarski pisač. Korišćen je za merenje tamnih struja i fotostruja i njihovog prelaska u stacionarno stanje. Preciznost beleženja ovog instrumenta je $\pm 0,8 \%$.

2. Izvor stabilisanog napajanja (Philips)-PM-1509 je služio za napajanje uzorka naponom. Može se regulisati od 0 do 30 V. Stabilnost mu je $\pm 0,5 \%$.

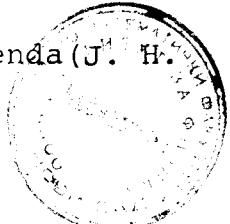
3. Digitalni voltmetar (multimetar) (Ei) služio je za kontrolu jednosmernog napona na uzorku.

4. Mikroampermetar (digimer) (Iskra) služio je za merenje tamnih struja i fotostruja, jednosmernih napona, kao i otpora. Tačnost $\pm 0,5 \%$.

5. Mikrovoltmetar (Philips) (PM-2434) je služio za merenje temperature sa termoparom sa tačnošću 1 %. Referentni nivoi su bili tačka ključanja i tačka mržnjenja vode. Opseg merenja mu je $0,1 [\mu V] \div 1000 [V]$ sa tačnošću od 1,5 %. Za iste svrhe korišćen je i univerzalni instrument za merenje jednosmernog napona, struje, a takođe i otpora. Kada je ovaj instrument korišćen kao ampermetar, imao je najmanje opseg od 1 [pA], pa do 1000 [mA]. Korišćen je naročito za merenje tamnih struja tačnošću 1,5 %. Napone je merio na opsegu 10 [μV] s tačnošću od $\pm 3 \%$.

6. Mikroskopski sto firme "Carl Zeiss - Jena", je grejno-hladeća jedinica čiji se rad zasniva na Peltijer-ovom efektu (inverziji Seebeck-ovog termo-električnog efekta). Ovaj sto je korišćen kao termostat, sa mogućnošću regulacije temperature uzorka od $-20[^{\circ}C]$ do $+80[^{\circ}C]$.

7.a. Polaroidi - par - firme "Leibold" služili su za finu regulaciju intenziteta pobudnog svetla.

7.b. U istu svrhu korišćena je i "Iris"-blendā (J. H. 

Dollmayer LTD - London). Termostatom (tj. kompletom uredjaja 6 i 9) se odabira i reguliše željena temperatura uzorka. Fotometrom (15) se meri osvetljenost uzorka (12) preko svetlovoda (16). Termoparom (11) i mikrovoltmetrom (5) PM-2434 se meri temperatura uzorka.

10. Izvor stabilisanog napona (6 V, 30 V) služio je za napajanje svetlosnih izvora sijalica.

11. Termopar (thermocoax) (firme "Philips") je element koji uz mikrometar PM-2434 ili PM-2436 služi za veoma precizna merenja temperature u željenim tačkama. Izradjen je od hromel-alumel kombinacije. Fabrički je kalibriran, a drugi mu je kraj smešten u posudu sa ledom (11a).

12. Fotoprovodni uzorak Cds (Philips) (ORP 60) je već spomenut.

13. Stabilizovani izvor napajanja (Bertman Associates - Inc.) ima mogućnost biranja napona od 0 [V] do 3000 [V]. Stabilnost mu je 0,25 %. Poslužio je za napajanje uzorka pri istraživanju tamnih temperaturno-volt-amperskih karakteristika.

Sa blok šeme za mernu grupu statičke karakteristike se može videti već pomenuta funkcija pojeninih instrumenata i uredjaja, slika 4.3.2.

Kao svetlosni izvor, korišćene su sijalice (8) ili monohromator (14).

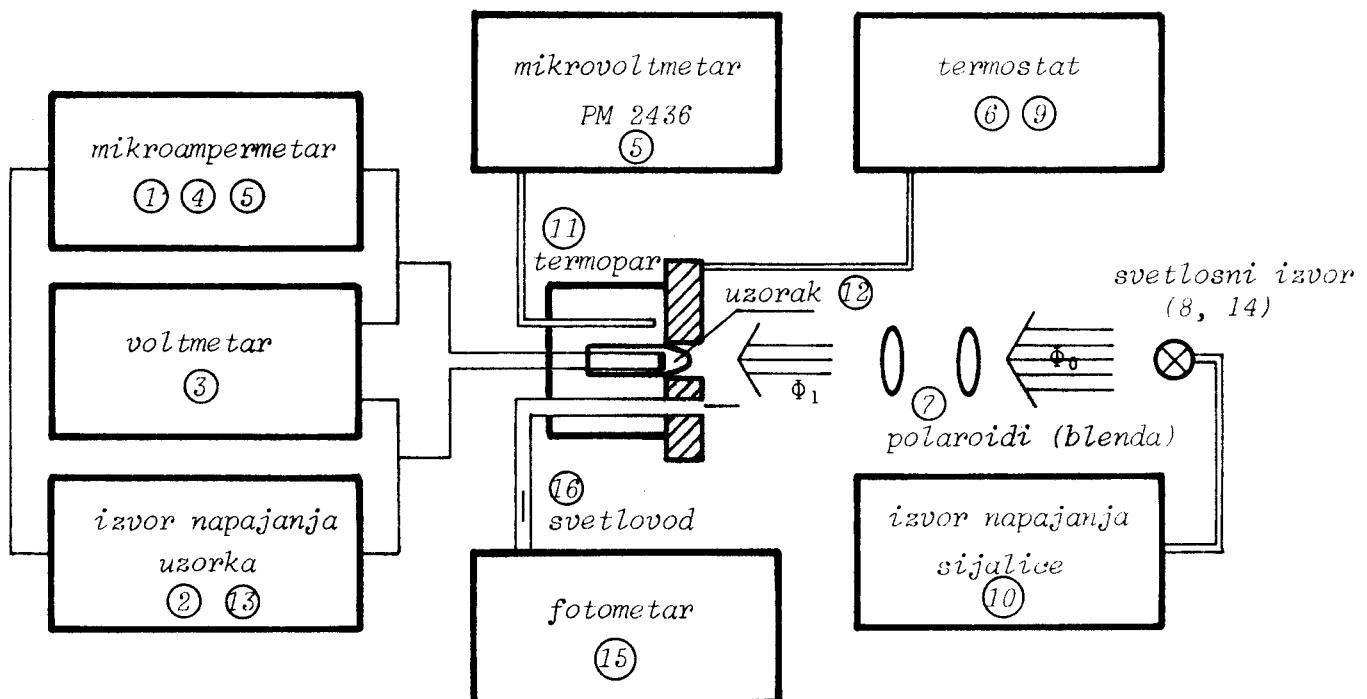
Intenzitet upadne svetlosti Φ_0 regulisan je parom polaroida (7a) ili iris-blendom (7b), tako da se dobije željeni intenzitet pobudne svetlosti Φ_1 .

Termostatom (tj. kompletom uredjaja (6) i (9)) se odabira i reguliše željena temperatura uzorka.

Fotometrom (15) se meri osvetljenost uzorka (12) preko svetlovoda (16).

Termoparom (11), mikrovoltmetrom (5) PM-2434 se meri temperatura uzorka.

Izvor električnog napajanja uzorka (2) i (13), koji omogućuje fino odabiranje potrebnog napona za napajanje.



Slika 4.3.2.

Blok šema za mernu grupu - statičke karakteristike

4.4. SPISAK UREDJAJA I ŠEMA MERNE GRUPE DINAMIČKE KARAKTERISTIKE Cds UZORKA

Sa ovom mernom grupom u ovom odeljku će se posmatrati kadmijum sulfidni uzorak kao poluprovodnik, fotoprovodnik i kao dielektrik.

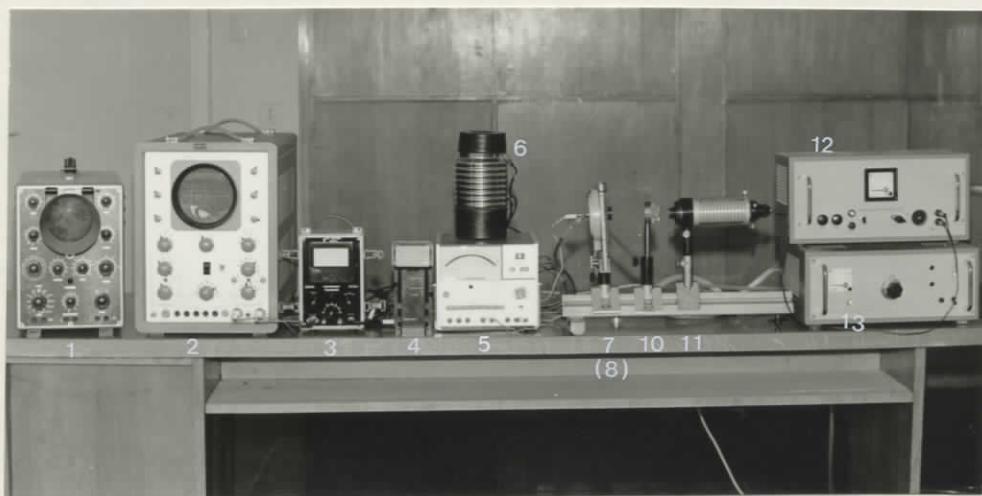
Najvažnija merenja sa ovom mernom grupom odnose se na ispitivanja vremena života života nosilaca nanelektrisanja.

Spisak uredjaja i instrumenata koji su korišćeni u ovoj grupi eksperimenata:

- a. Generator testerastih impulsa (Philips) (osciloskop GM-5654x)

- 1b. Generator četvrtastih impulsa (Philips) PM-5712
(slika 4.4.2.)
2. Dvomlazni osciloskop GM-5603
3. Cevni voltmeter (Iskra)
4. Mikroampermetar (Digimer) (Iskra)
5. DC - mikrometar PM-2334 (Philips)
6. Termopar (thermocoax) (Philips)
7. Mikroskopski sto
8. Uzorak CdS - ORP 60 (Philips)
9. Par polaroida (Leybold)
10. Blenda "Iris" (J.H. Dallmeyer LTD)
11. Svetlosni izvor - sijalica "Spekol" ($U = 6 \text{ V}$)
12. Izvor napajanja za sijalice ($U = 6 \text{ V}$, $P = 30 \text{ W}$)
13. Izvor napajanja mikroskopskog stola strujom
14. Svetlovod $\phi 4$ [mm]
15. Fotometar (Luna-six)
16. Monohromator (Carl Zeiss - Spekol)
17. Spektralni filtri (Carl Zeiss) I i II.

Na priloženim slikama 4.4.1 i 4.4.2. prikazani su instrumenti obeleženi brojevima (s leva na desno).



Slika 4.4.1.

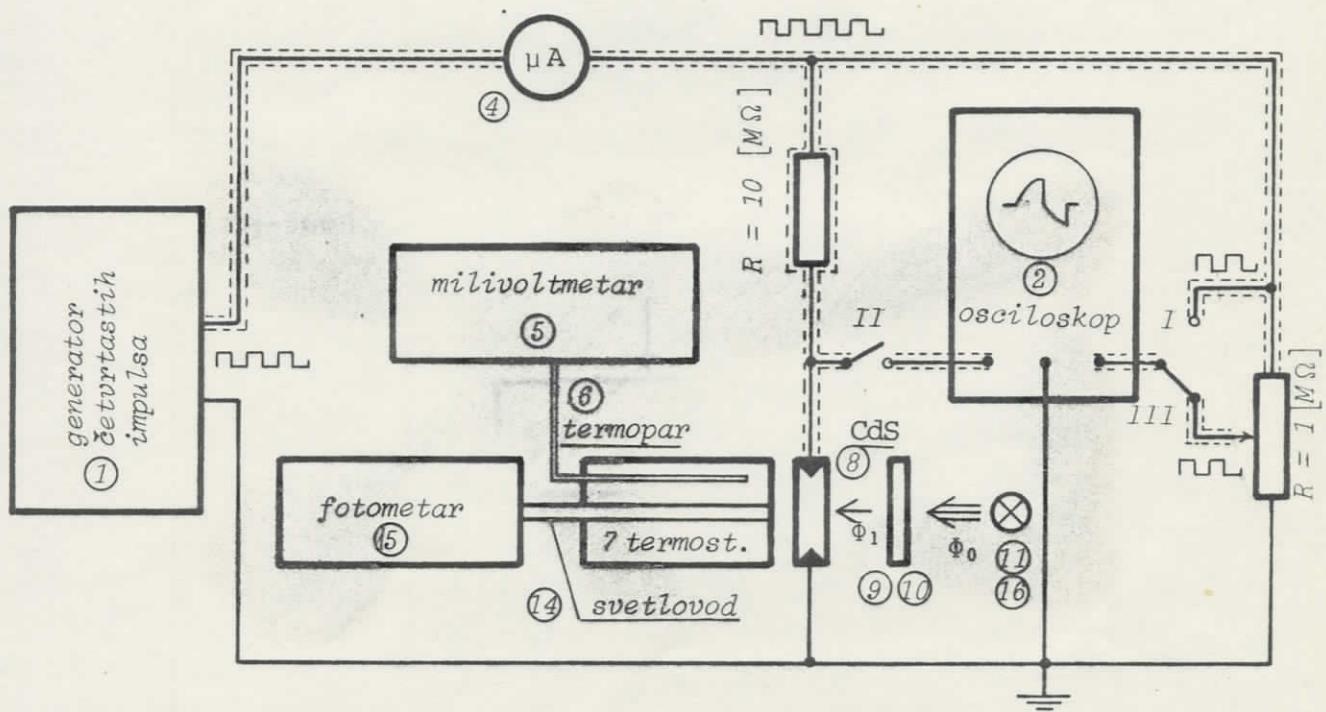
* Redni brojevi u zagradi označavaju da se pomenuti element šeme ne vidi na slici ili po potrebi dolazi na to mesto u šemi.



Slika 4.4.2.

Generator četvrtastih impulsa

Električna šema ovog bloka za snimanje dinamičkih karakteristika data je na slici 4.4.3.

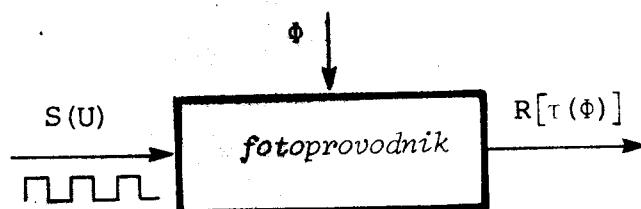


Slika 4.4.3.

FUNKCIJA POJEDINIХ ELEMENATA U ŠEMI

- Kompletom svetlovod (14) i fotometar (15) se meri jačina osvetljenosti E_{CdS} uzorka u luksima.
- Termostatom (7), tj. mikroskopskim stolom se bira radna temperatura uzorka (8).
- Kompletom milivoltmetar (5) - termopar se meri temperatura uzorka tačnošću $\pm 1\%$.
- Uzorak je bio osvetljavan "spekolovom" sijalicom (11), kada je bila potrebna bela svetlost, a monohromatorom "Spekol-Zeiss", kada je bila potrebna monohromatska svetlost iz vidljivog dela spektra.
- Intenzitet svetlosti ϕ je regulisan parom polaroida (9) i "Iris" blendom (10).
- Na mestu u blok šemi su pored polaroida po potrebi korišćeni filtri firme "Zeiss" I i II, za izdvajanje svetlosti jedne talasne dužine iz bele svetlosti.

Suština bloka za dinamičke karakteristike je da je uzorak bio izlagan testerastim i četvrtastim impulsima. Tada je posmatran njegov odgovor kao poluprovodnika kad je zamračen i foto-odgovor kao fotoprovodnika kad je osvetljen (slika 4.4.4). Odgovor uzorka je posmatran na dvomlaznom osciloskopu (2) GM-5603.



Slika 4.4.4.

Na ovaj način je bilo moguće izmeriti vreme života nosilaca nanelektrisanja τ u uzorku i zavisnost vremena života od temperature i intenziteta svetlosti ϕ .

Kao generator (1b) četvrtastih impulsa, korišten je generator PM-5712 firme "Philips". Na ovom generatoru je moguće menjati frekvenciju izlaznog signala u intervalu od $f = 1$ [Hz] do $f = 50$ [MHz] a izlazni napon četvrtastih impulsa u intervalu od $U = (0 \div 17)$ [V].

Stabilnost izlaznog napona je 0,3 %. Vreme uspostavljanja signala je $t = 4$ n[s].

U eksperimentima iz ovog rada nije se prelazila frekvencija viša od $f = 3$ [KHz].

Upadni četvrtasti signal i odgovor CdS uzorka posmatran je "Philips"-ovim dvomlaznim osciloskopom GM-5603. Merni opseg ovog osciloskopa je $f = (0 \div 14)$ [MHz]. Osetljivost za merenje napona je minimalna 5 [V/cm], a maksimalna 0,5 [V/cm]. Ulazna impedansa osciloskopa je $Z = 1$ [$M\Omega$]. Kapacitet na ulazu osciloskopa je $C = 25$ [pF]. Vreme uspostavljanja (prijema) amplitude signala je $t = 25$ [ns]. Greška pri merenju ovim osciloskopom se kreće u intervalu od $\pm(3 \div 6 \%)$.

Osciloskopom GM-5603 su mereni naponi, period signala, vreme uspostavljanja τ_1 i padanja signala τ_3 i vreme života nosilaca nanelektrisanja τ .

Mikroampermetrom (4) (Digimerom) je procenjivana struja koja prolazi kroz uzorak. Poznato je da kroz uzorak nije poželjno da prodje veća struja od $I = 3$ [mA], da bi se sačuvale trajne kataloške karakteristike CdS uzorka. Interval frekvencija naizmeničnih struja u kojem meri digimer je od $f = 40$ [Hz] pa do $f = 20$ [KHz]. Najveća frekvencija četvrtastih impulsa kojoj je izlagan uzorak je iznosila $v = 3$ [KHz].

Na taj način je mikroampermetrom merena struja u njegovom frekventnom intervalu.

U električnoj šemi za dinamičke karakteristike koristi se komparativna metoda izmedju ulaznog signala i odgovora uzorka II.

U tačku I na električnoj šemi se dovodi četvrtasti signal iz generatora četvrtastih impulsa. Uključivanjem signala na ulaz osciloskopa dobija se oblik izlaznog četvrtastog

signala na ekranu osciloskopa.

Da bi se mogao dobiti odgovor uzorka, koristi se razdelnik napona, koji se sastoji od otpora $R = 11,5 \text{ [M}\Omega\text{]}$ i otpora samog uzorka R_{Cds} (slika 5.14.2.) i (4.4.3).

Sa tačke (II) na šemi (slika 4.4.3.) se odvodi odgovor uzorka na jedan kanal osciloskopa. Tada se izmeri naponski odgovor uzorka, a na potenciometru $R = 1 \text{ [M}\Omega\text{]}$ se podeši isti napon signala I kao i na uzorku II.

Dvomlazni osciloskop GM-5603 ima dva nezavisna ulaza, ali jedan ekran.

Komparativni ulazni signal (III) i odgovor uzorka (II) se posmatraju naizmenično korišćenjem jednog preklopnika.

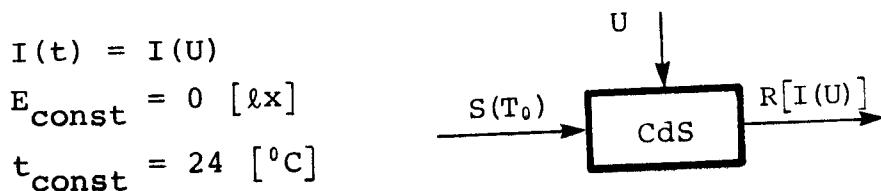
Na taj način je bilo moguće zapaziti promene odgovora uzorka u odnosu na ulazni komparativni signal bez dodatnog posebnog podešavanja osciloskopa za posmatranje ulaznog komparativnog signala (I), koji ima mnogo viši napon nego odgovor uzorka (II).

V A STATICKE KARAKTERISTIKE
 CdS KAO POLUPROVODNIKA

5.1. TAMNA STRUJA (I_t) U FUNKCIJI NAPONA (U)
 CdS UZORKA ORP 60

Fotoprovodnik ORP 60 se ovde posmatra kao poluprovodnik. CdS uzorak se relaksirao više od 16 časova kao što to zahteva uputstvo u katalogu.

Cilj eksperimenta je bio da se utvrdi da li postoji tamna struja I_t u CdS poluprovodniku, kog je reda veličine i kako se menja u funkciji napona (U). Ovaj eksperiment je tipa kao na prikazanom crtežu (slika 5.1.1.).



Slika 5.1.1.

Uzorak je bio potpuno zamračen $E = 0 \text{ [lx]}$ na konstantnoj temperaturi od $t = 24 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$. Napon U je menjan od $U = 0 \text{ [V]}$ do $U = 300 \text{ [V]}$. Tamna struja I_t se kretala od $I_{t_{\min}} = 0,01 \text{ [nA]}$ do $I_{t_{\max}} = 0,67 \text{ [nA]}$ i merena je DC - mikrometrom PM-2436.

Iz grafika (slika 5.1.3.) se vidi da je tamna struja I_F linearna funkcija napona U i da raste po Omovom zakonu [ref. 3,8] i u skladu već pomenute relacije

$$I = \frac{\delta \cdot s}{l} U \quad (5.1.2.)$$

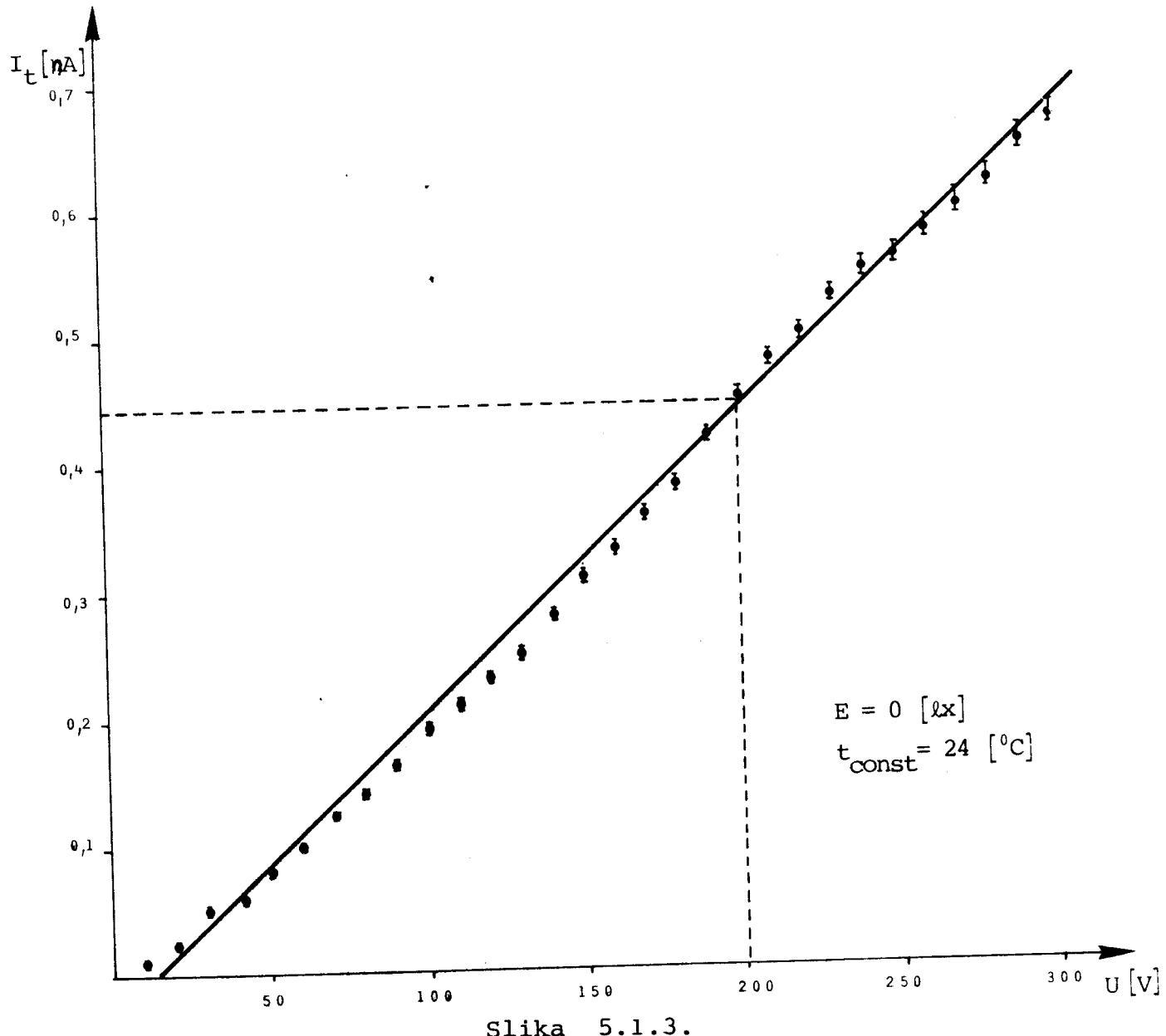
gde je:

δ - provodnost

s - poprečni presek uzorka

l - dužina uzorka

U - radni napon



Slika 5.1.3.

Tamna struja je linearna funkcija napona

Iz ovog merenja se može proceniti red veličine tamnog otpora CdS poluprovodnika na temperaturi $t = 24 [{}^{\circ}\text{C}]$. Račun pokazuje da je on reda veličine

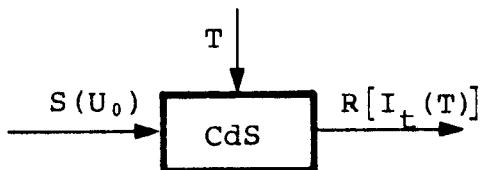
$$R = \frac{U}{I} = \frac{300 [\text{V}]}{0,67 [\text{nA}]} = \frac{300 \Omega}{0,67 \cdot 10^{-9}} = \frac{300}{0,67} 10^9 \Omega = 4,48 \cdot 10^{11} [\Omega]$$

Tamna struja staklenog balona u koji je smešten uzorak je reda veličine $I_t = 1 [\text{pA}]$ i nalazi se u okviru najveće eksperimentalne greške od $\pm 1,5 \%$ na opsegu od $1 [\text{nA}]$ koja iznosi $\Delta I = \pm 15 [\text{pA}]$.

5.2. TAMNA STRUJA I_t U FUNKCIJI TEMPERATURE T

CdS UZORKA ORP 60

Ovaj eksperiment je tipa (slika 5.2.1.) i ima za cilj da utvrdi zavisnost tamne struje od temperature T.



Slika 5.2.1.

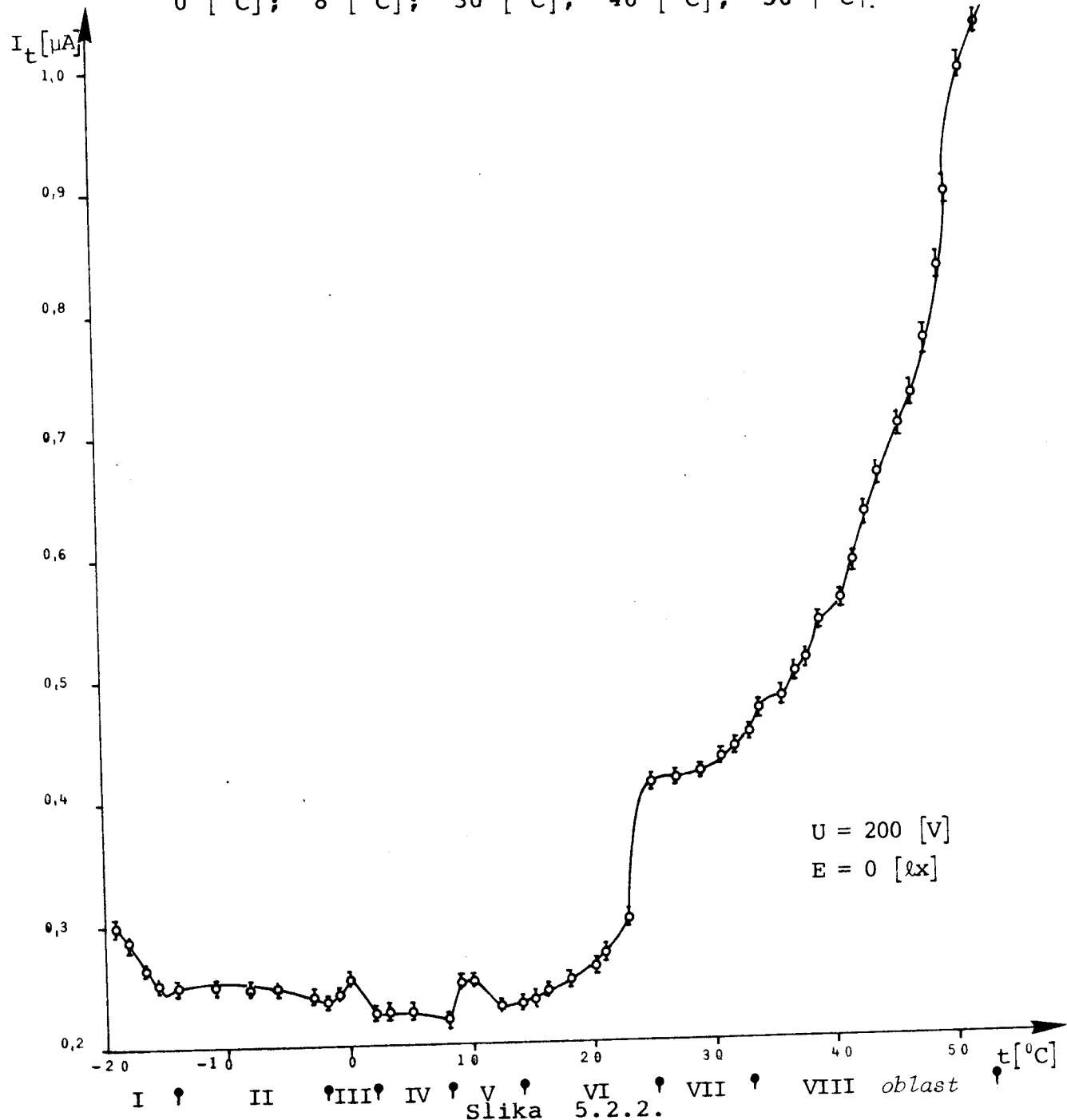
Ostala dva parametra, osvetljenost E i napon U su u eksperimentu bili konstantni. Zbog zatamnjenoosti uzorka njegova osvetljenost E je bila jednaka nuli ($E = 0 [\text{lx}]$).

Napon U je odabran $2/3$ od napona $U = 300 [\text{V}]$ u prethodnom eksperimentu, tj. iznosi $U = 200 [\text{V}]$. Na ovom naponu tamna struja I_t je već dostizala merljive vrednosti, daleko veće od tamne struje curenja staklenog balona, na sobnoj temperaturi.

Tamna struja I_t merena je sa DC-mikrometrom PM-2436 na opsegu $1 [\text{nA}]$ sa tačnošću $\pm 1,5 \%$. Temperatura je menjana

od $t = -20 [{}^{\circ}\text{C}]$ do $t = 53 [{}^{\circ}\text{C}]$. Na krivoj sa grafika (slika 5.2.2.) je moguće primetiti više oblasti temperature gde struja teži da bude konstantna, a dalje naglo počinje da raste. Te temperature su:

$$0 [{}^{\circ}\text{C}]; \quad 8 [{}^{\circ}\text{C}]; \quad 30 [{}^{\circ}\text{C}]; \quad 40 [{}^{\circ}\text{C}]; \quad 50 [{}^{\circ}\text{C}].$$



Tamma struja u funkciji temperature

Svaka od ovih promena tamne struje je posledica nekih fizičkih procesa u CdS uzorku.

KOMENTAR EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Na osnovu mnogih poredjenja rezultata iz literaturе pretpostavljam da se do $t = 8 [{}^{\circ}\text{C}]$ pune tzv. donorske zamke, a posle toga do $50 [{}^{\circ}\text{C}]$, iz njih se oslobadjaju elektroni pod uticajem toplostne energije $E = kT$ za kristale.

Sa obzirom da je toplostna energija reda stotog dela elektron-volta i da je mnogo manja od energije zabranjene zone CdS, jasno je da se zamke nalaze na rastojanju nekoliko kT ispod provodne zone u zabranjenoj zoni.

Na taj način se ostvaruje provodnost CdS uzorka u mraku.

U ovom eksperimentu su zapažene zamke na sledećim temperaturama i njima odgovarajućim energijama.

TABELA 5.2.3.

$t [{}^{\circ}\text{C}]$	0	8	23	30	40	50
$T [{}^{\circ}\text{K}]$	273	281	296	303	313	323
$E=kT [eV]$	$2,353 \cdot 10^{-2}$	$2,421 \cdot 10^{-2}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$	$2,611 \cdot 10^{-2}$	$2,697 \cdot 10^{-2}$	$2,784 \cdot 10^{-2}$

Ove energije zamki su za red veličine manje od onih koje je dobio Nikisch, ali su bliske njegovim vrednostima [ref. 10 i 11].

5.3. ŠIRINA ENERGIJE PRELAZA NOSILACA NAELEKTRISANJA

Korišćenjem eksperimentalnih rezultata iz prethodnog eksperimenta (5.2.), moguće je odrediti širinu zabranjene zone ΔE ili energiju prelaza kod poluprovodnika.

Tamna struja I_t poluprovodnika u funkciji temperature T data je kao:

$$I_t = C e^{-\frac{E_T}{2kT}} \quad (5.3.1)$$

Ako se rezultati iz prethodnog eksperimenta 5.2 prikažu grafički kao $\log I_t$ u funkciji od $1/T$ dobija se grafik (slika 5.3.2.). Iz ovog grafika se može odrediti širina energije prelaza kod poluprovodnika, korišćenjem jednačine (5.3.1.). Izražavanjem energije E_t uz ubacivanje koeficijenta α , dobija se opštiji oblik te jednačine

$$\Delta E_t = \alpha \frac{k}{\log e} \cdot \frac{\Delta(\log I_t)}{\Delta(1/T)} \quad (5.3.3.)$$

gde je: $1 \leq \alpha \leq 2$, $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ [eV/ $^{\circ}\text{K}$], $\log e = 0,43429$.

Iz grafikona (slika 5.3.2.) se vidi da je kriva tamne struje I_t u funkciji napona U složena i da se sastoji od više delova koji se mogu aproksimirati sa pravom. Ove sastavne krive obeležene su na sledeći način:

A, I, II, III, IV, VI, VIII.

Ovo odmah ukazuje da na različitim temperaturama različite energije aktivacije ΔE_i pokreću nosioce nanelektrisanja na provodnost i prelaze ~~medju~~^{iz} energetskih nivoa u kristolnom uzorku.

Korišćenjem grafikona (slika 5.3.2.) i poslednje jednačine (5.3.3.) dobijaju se energije prelaza za dva slučaja $\alpha = 1$ i $\alpha = 2$. Svi ovi rezultati su tabelarno dati u tabeli 5.3.4.

U stupcu koji je označen kao "sličnost rezultata" su obeleženi prelazi bliski ili slični rezultatima koje je dobio Nikisch i drugi eksperimentatori [referenca 10 i 11].

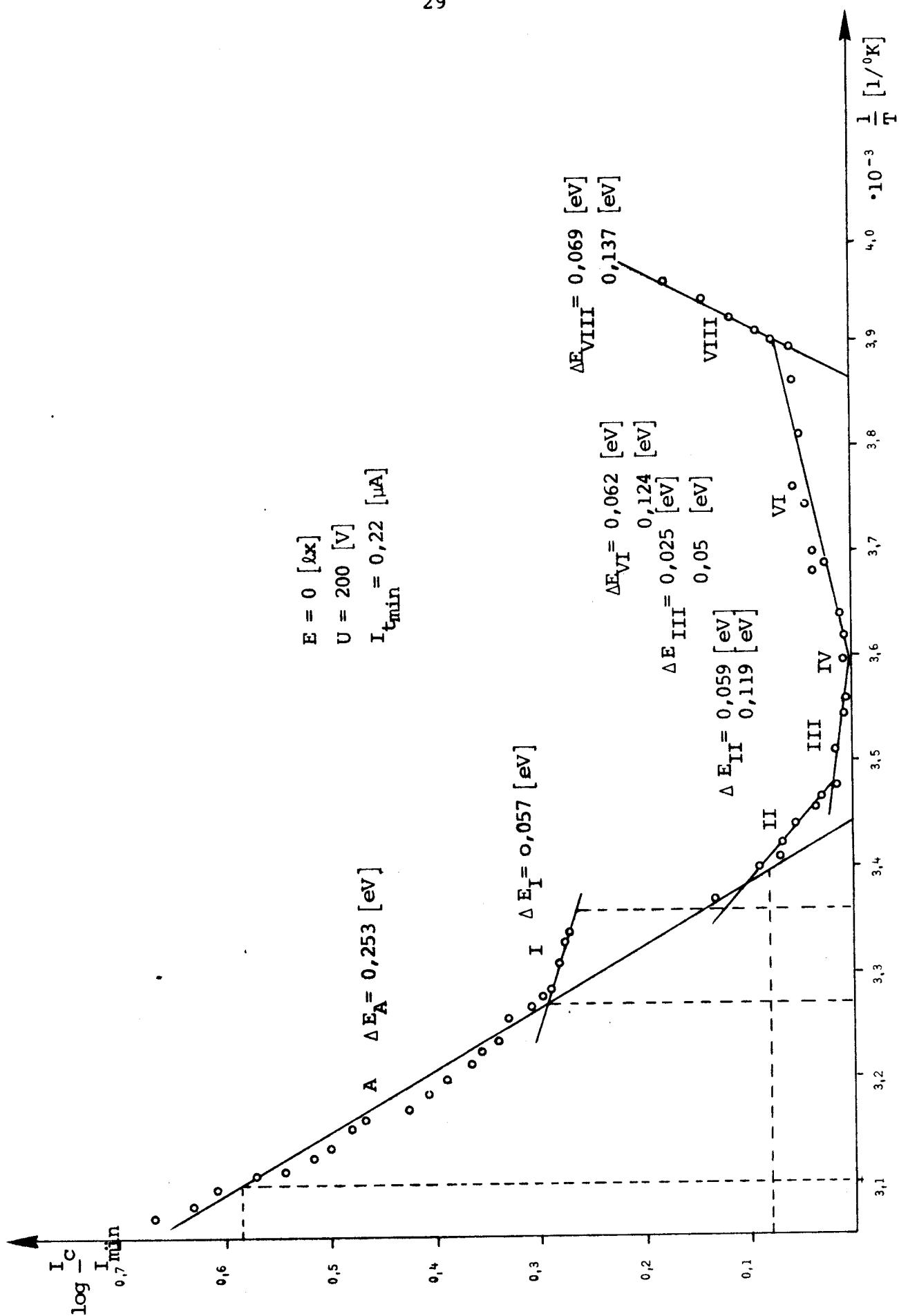


TABELA 5.3.4.

broj prelaza	$E = \frac{k}{\log e} \cdot \frac{\Delta \log(I_t/I_{t_m})}{\Delta \cdot \frac{1}{T}}$		$E = 2 \frac{k}{\log e} \cdot \frac{\Delta \log(I_t/I_{t_m})}{\Delta \cdot \frac{1}{T}}$	
	[eV]	sličnost rezultata	[eV]	sličnost rezultata
A	0,253	E_2	0,506	E_5
I	0,057	B - C	0,114	E_1
II	0,059	BC	0,119	E_1
III	0,025		0,051	BC
IV	0,021 0,018	AB	0,042 0,032	
prelazi za šupljine				
VI	0,062	BC	0,124	
VIII	0,069	BC	0,137	

Radi uporedjivanja rezultata ovog rada sa rezultatima raznih autora iz literature, ovde se navode rezultati za energije prelaza "zamki" koje je dobio Nikisch za CdS-kristal [reference 10 i 11].

$$\begin{aligned}\Delta E_1 &= 0,12 \text{ [eV]} && - \text{usled viška sumpora} \\ \Delta E_2 &= 0,22 \text{ [eV]} \\ \Delta E_3 &= 0,33 \text{ [eV]} \\ \Delta E_4 &= 0,4 - 0,5 \text{ [eV]} \\ \Delta E_5 &= 0,55 - 0,6 \text{ [eV]} \\ \Delta E_6 &= 0,7 - 0,8 \text{ [eV]}\end{aligned}$$

Energija osnovnog prelaza je:

$$\Delta E = 2,4 \text{ [eV]}$$

Interesantno je, takodje, navesti rezultate koje daju Donald Long i Tredgold [ref. 11 i 12]. Oni u svojim knjigama spominju postojanje tri valentne energetske zone kod CdS kristala (slika 5.6.4.).

Energetske razlike izmedju ovih energetskih nivoa-zona su:

$$\Delta E_{AB} = 0,016 \text{ [eV]} \quad \Delta E_{BC} = 0,057 \text{ [eV]}$$

Iz vrednosti direktnog energetskog prelaza $\Delta E = 2,4$ [eV] vidi se da su energije, koje su nadjene u ovom radu 10 do 100 puta manje od širine zabranjene zone kod CdS. Prema tome, termo-provodnost se ne zasniva na direktnim prelazima.

Poredjenjem energije prelaza dobijenim u ovom radu sa Nokisch-ovim energijama zamki, vidi se dasu one slične sa energijama zamki koje navodi Nikisch i energijama prelaza izmedju valentnih zona A-B i B-C koje navodi Donald Long.

ANALIZA GRAFIKONA (5.3.2.)

Sa grafikona (5.1.3.) se vidi da povećanjem temperature od $t = -20$ [$^{\circ}\text{C}$] do $t = 8$ [$^{\circ}\text{C}$] fotoprovodnost opada jer se pune donorske zamke sa elektronima. Za ovaj interval temperature se dobija kriva VIII i VI.

Odgovarajuća energija prelaza je:

$$E_{\text{VIII}} = 0,069 \text{ [eV]}$$

dok je za interval temperature $t = -14$ [$^{\circ}\text{C}$] do $t = 8$ [$^{\circ}\text{C}$] energija prelaza

$$E_{\text{VI}} = 0,062 \text{ [eV]}$$

Ove energije E_{VI} i E_{VIII} su približno jednake i najблиže su energiji $E_{BC} = 0,057$ [eV] izmedju dve valentne zone, koju navodi Donald Long.

Energija $E = 0,018$ [eV] koja je dobijena iz posebnog eksperimenta predstavlja takodje energiju prelaza izmedju

dve energije valentne zone $E_{AB} = 0,016$ [eV]. Na temperaturi $t = 8$ [$^{\circ}$ C] u poluprovodniku je provodnost minimalna.

Na temperaturi $t = 8$ [$^{\circ}$ C] do $t = 52$ [$^{\circ}$ C] provodnost CdS uzorka naglo raste. U tom intervalu temperature, nosioci nanelektrisanja se oslobadjavaju iz zamki.

Energije tih prelaza su:

$$\begin{aligned}\Delta E_{III} &= 0,025 \text{ [eV]} \\ \Delta E_{II} &= 0,059 \text{ [eV]} \\ \Delta E_I &= 0,057 \text{ [eV]} \\ \Delta E_A &= 0,253 \text{ [eV]}\end{aligned}$$

Iz navedenih rezultata se vidi da su energije prelaza za jedan red veličine manje ili jednake energijama zamki koje je dobio Nikisch.

ZAKLJUČAK

Energije prelaza koje su nadjene u ovoj analizi ne predstavljaju energije osnovnog (direktnog) prelaza koji iznosi oko 2,4 [eV] do 2,6 [eV]. Pomenute nadjene energije predstavljaju energije termičke aktivacije nosilaca nanelektrisanja iz zamki i energije popunjavanja elektrona u zamke.

5.4. ŠIRINA ENERGIJE PRELAZA ZA ZAMKE I VEROVATNOĆA NALAŽENJA ELEKTRONA U DNU PROVODNE ZONE SA CdS UZORAK ORP 60

Cilj ovog razmatranja je da se izračuna verovatnoća nalaženja elektrona $F(E, T)$ u dnu provodne zone. Odgovarajuća formula je

$$F(E, T) = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Delta E}{kT}}} \quad (5.4.1.)$$

gde je ΔE širina energije prelaza.

Uzmimo jednu od energija zamki, npr. $\Delta E_z = 0,02$ [ev], i energiju osnovnog (direktnog) energetskog prelaza $\Delta E = 2,4$ [ev]. Poslednja energija osnovnog prelaza je nadje-na iz spektralnih foto-provodnih karakteristika ($\Delta E = 2,451$ [ev]) (odeljak 5.6.).

Uvrstimo te vrednosti energije prelaza ΔE na odre-djenoj temperaturi T u formulu (5.4.1.), dobićemo vrednost za Fermijevu verovatnoću nalaženja elektrona.

Račun je pokazao da promena temperature od $t_1 = -20$ [$^{\circ}\text{C}$] do $t_2 = 450$ [$^{\circ}\text{C}$] izaziva promenu odgovarajućih ve-rovatnoća od:

a. za energiju od $\Delta E_z = 0,02$ [ev]

$$F(\Delta E_z, T_1) = F(0,02 \text{ eV}, 253^\circ\text{K}) = 0,286$$

$$F(\Delta E_z, T_2) = F(0,02 \text{ eV}, 323^\circ\text{K}) = 0,328$$

$$F(\Delta E_z, T_3) = F(0,02 \text{ eV}, 723^\circ\text{K}) = 0,42$$

b. Verovatnoća nalaženja elektrona u dnu provodne zone za energiju direktnog prelaza $\Delta E = 2,4$ [ev] pri promeni temperature od $t_1 = -20$ [$^{\circ}\text{C}$] do $t = 450$ [$^{\circ}\text{C}$] se menja:

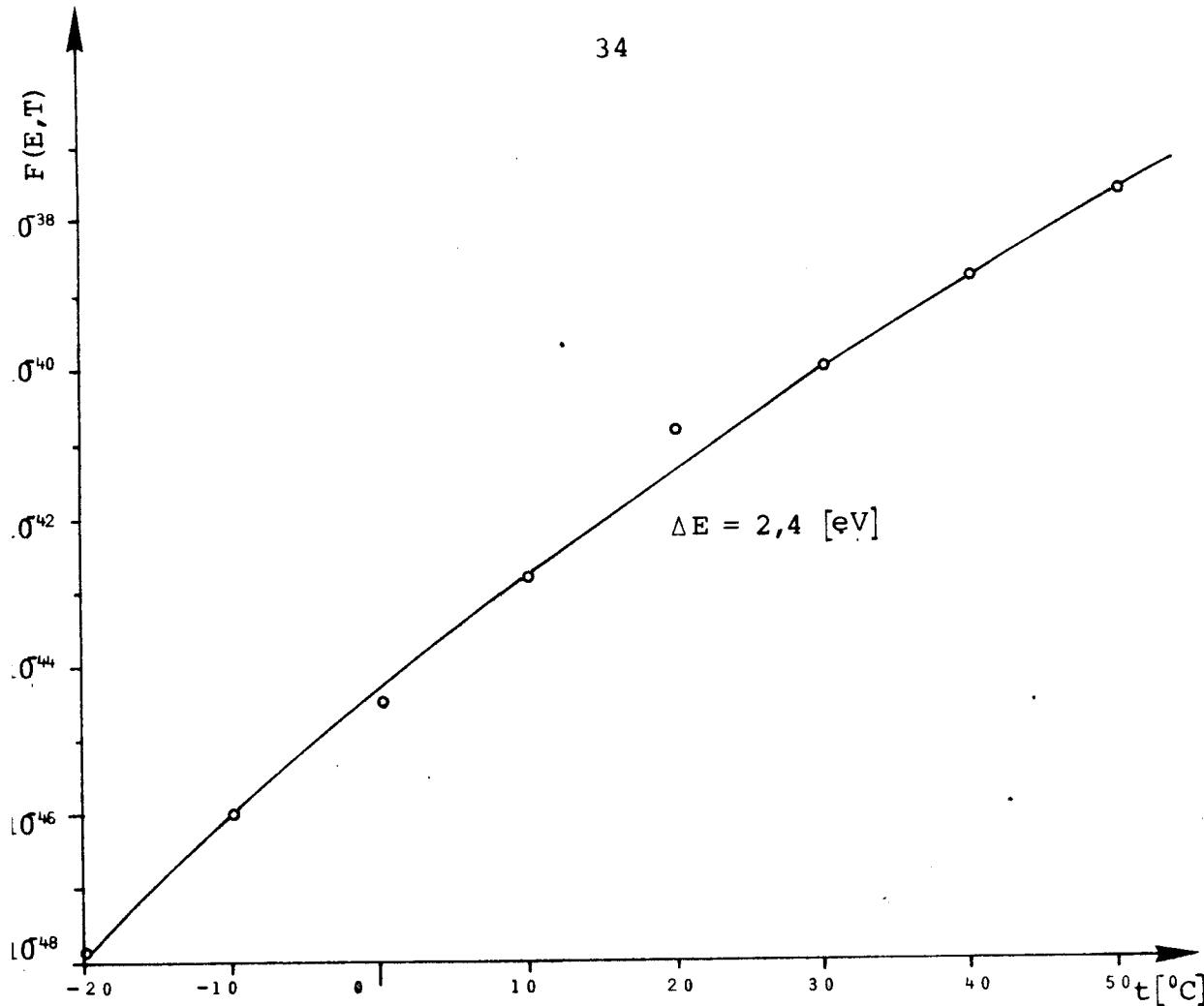
$$F(\Delta E, T_1) = F(2,4 \text{ eV}, 253^\circ\text{K}) = 1,68 \cdot 10^{-48}$$

$$F(\Delta E, T_2) = F(2,4 \text{ eV}, 323^\circ\text{K}) = 3,766 \cdot 10^{-38}$$

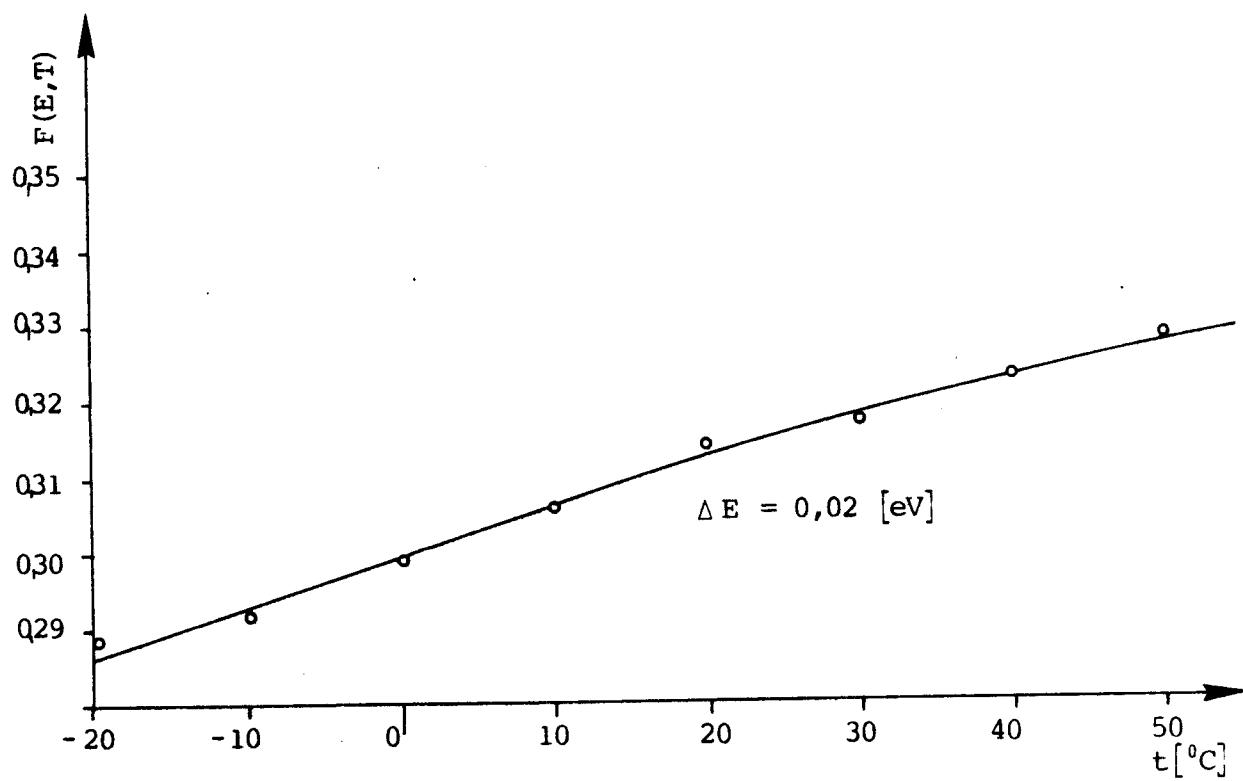
$$F(\Delta E, T_3) = F(2,4 \text{ eV}, 723^\circ\text{K}) = 1,896 \cdot 10^{-17}$$

Odmah se može uočiti da je za veliku širinu zabra-njene zone $\Delta E = 2,4$ [ev] osnovnog prelaza, verovatnoća nala-ženja elektrona veoma mala i kreće se za pomenuti interval temperature od 10^{-48} do 10^{-17} .

Medjutim, ako se poluprovodniku obezbede energets-ki nivoi zamki "dopingovanjem" sa primesama ili vakancijama koje potiču od tehnologije izrade uzorka, verovatnoća se zna-tno povećava. Verovatnoća nalaženja elektrona na energetskom nivou zamke, koja se nalazi za $\Delta E_z = 0,02$ [ev] ispod provod-ne zone, se za navedeni interval temperature menja od 0,286 do 0,42.



Slika 5.4.2.



Slika 5.4.3.

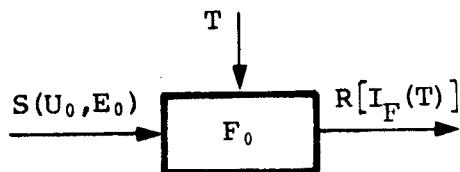
Odmah se vidi da je verovatnoća nalaženja elektrona u dnu provodne zone veoma velika, jer se i energetski nivo zamke nalazi blizu dna provodne zone.

Na priloženim grafikonima (slike 5.4.2. i 5.4.3.) vidi se porast verovatnoće nalaženja elektrona u dnu provodne zone za $\Delta E = 2,4$ [eV] i $\Delta E = 0,02$ [eV] u funkciji temperature. Merenja su vršena u intervalu od $t = (-20 \div 50)$ [$^{\circ}\text{C}$], dok su proračuni vršeni do $t = 450$ [$^{\circ}\text{C}$].

STATIČKE KARAKTERISTIKE V_B CdS KAO FOTOPROVODNIKA

5.5. TEMPERATURNO FOTOPROVODNA KARAKTERISTIKA CdS FOTOPROVODNIKA

U ovom eksperimentu tipa, kao što to prikazuje slika 5.5.1., uzorak se ispituje kao fotoprovodnik.



Slika 5.5.1.

Cilj ovog eksperimenta je da se nadje zavisnost fotostruje od temperature T . Takođe je ovim eksperimentom trebalo da se utvrdi da li postoji možda neka temperatura pri kojoj će fotostruja opasti na nulu usled negativnog uticaja temperature na fotostruju.

Radni uslovi fotoprovodnika su bili:

- jačina osvetljenosti $E_0 = 4 \text{ [lx]} = \text{const.}$
- radni napon $U_0 = \text{const} = 10 \text{ [V]}$.

Napon U je bio odabran tako da struja bude merljiva na mikroampermetru. Rezultati merenja dati su na grafikonu (slika 5.5.2) - kriva (II).

Početna struja je bila $I_0 = 106 \text{ [\mu A]}$ na sobnoj temperaturi $t_0 = 25 \text{ [^{\circ}C]}$. Povećanje temperature do $t_1 = 180 \text{ [^{\circ}C]}$ pratio je smanjenje fotostruje sve do $I_1 = 0,2 \text{ [\mu A]}$.

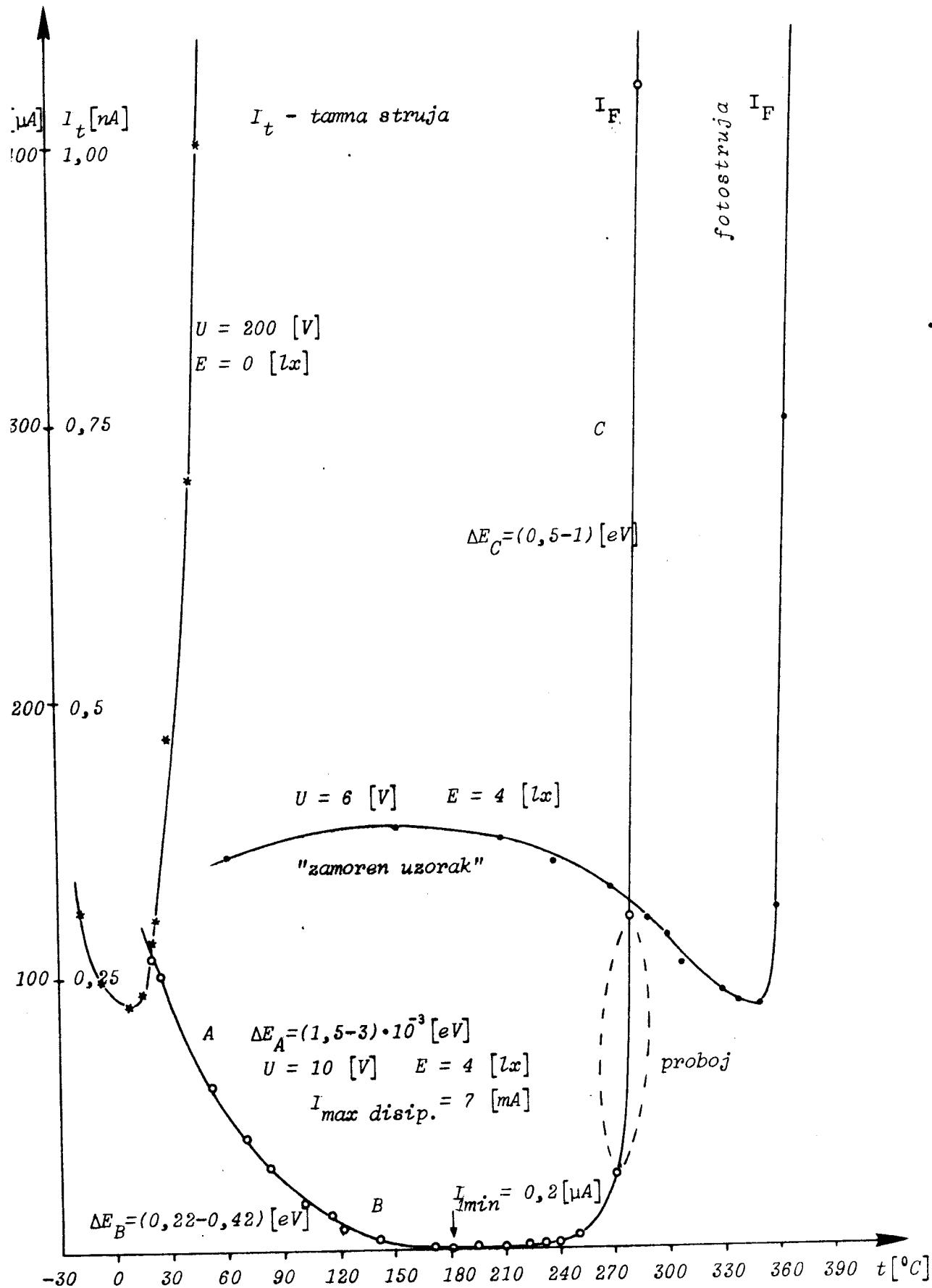
Dalje povećanje temperature do $t_2 = 270 \text{ [^{\circ}K]}$ blago je ~~je~~ povećavalo fotostruju na $I_2 = 27 \text{ [\mu A]}$. Porast temperaturе do $t_3 = 350 \text{ [^{\circ}C]}$ pratio je nagli porast fotostruje do $I_3 = 5200 \text{ [\mu A]}$.

U okolini temperature $t_p = 280 \text{ [^{\circ}C]}$ je proboj fotoprovodnika ORP 60, jer na toj temperaturi termo-stimulativna fotoprovodnost $I_p = 120 \text{ [\mu A]}$ premašuje početnu vrednost $I_0 = 106 \text{ [\mu A]}$ na $t_0 = 25 \text{ [^{\circ}C]}$.

Ovakva strujno-temperaturska karakteristika je karakteristična i za ostale poluprovodnike. U ovom slučaju je uzeta mala jačina osvetljenosti ($E_0 = 4 \text{ [lx]}$) uzorka, da bi se izjednačio efekat fotogenerisanja nosilaca nanelektrisanja, koji doprinosi većoj fotoprovodnosti, sa negativnim temperaturskim uticajem na fotoprovodnost.

Ovaj eksperiment je ponovljen još jedanput sa istim uzorkom, pri sličnim uslovima, s obzirom da je i tamna struja bila velika pri naponu od $U_0 = 10 \text{ [V]}$, radni napon je snižen na $U_0 = 6 \text{ [V]}$. Jačina osvetljenosti je bila $E_0 = 4 \text{ [lx]}$. Na samom početku je primećeno da je Cds čelija ORP 60 izgubila 50% od svoje osetljivosti u prethodnom eksperimentu.

Iz grafika, (slika 5.5.2.) - kriva (III), se vidi da kriva fotoprovodnosti zadržava formalno svoj oblik.



Slika 5.5.2.

Minimum fotostruje ($I = 90 \text{ } [\mu\text{A}]$) se sada javio pomeren na temperaturi od $t = 350 \text{ } [{}^\circ\text{C}]$. To znači da na višim temperaturama CdS kristalni uzorak pretrpi ireverzibilne promene u svojoj kristalnoj strukturi. Sa obzirom da je tačka topljenja kristala $t = 1750 \text{ } [{}^\circ\text{C}]$, o topljenju ne može biti ni govora, jer se u ovim eksperimentima radilo do temperaturе $t = 360 \text{ } [{}^\circ\text{C}]$.

ZAKLJUČAK

Za odredjene radne uslove (radnog napna U i jačine osvetljenosti E), postoji neka kritična temperatura T_k , do koje opada fotoprovodnost. Fotoprovodnost opada pri stalnoj jačini osvetljenosti E , stalnom naponu U i usled porasta temperature T . To znači, da se na kritičnoj temperaturi izjednacava pozitivni fotoprovodni efekat, koji dovodi do povećanja fotoprovodnosti pri ~~povećanju~~ jačine osvetljenosti E i negativnog temperaturnog efekta, koji dovodi do smanjenja fotoprovodnosti pri povećanju temperature T .

Posle kritične temperature T_k sledi termostimulativni fotoprovodni efekat.

ENERGIJE PRELAZA CdS UZORKA PRI TERMOFOTOPROVODNOSTI

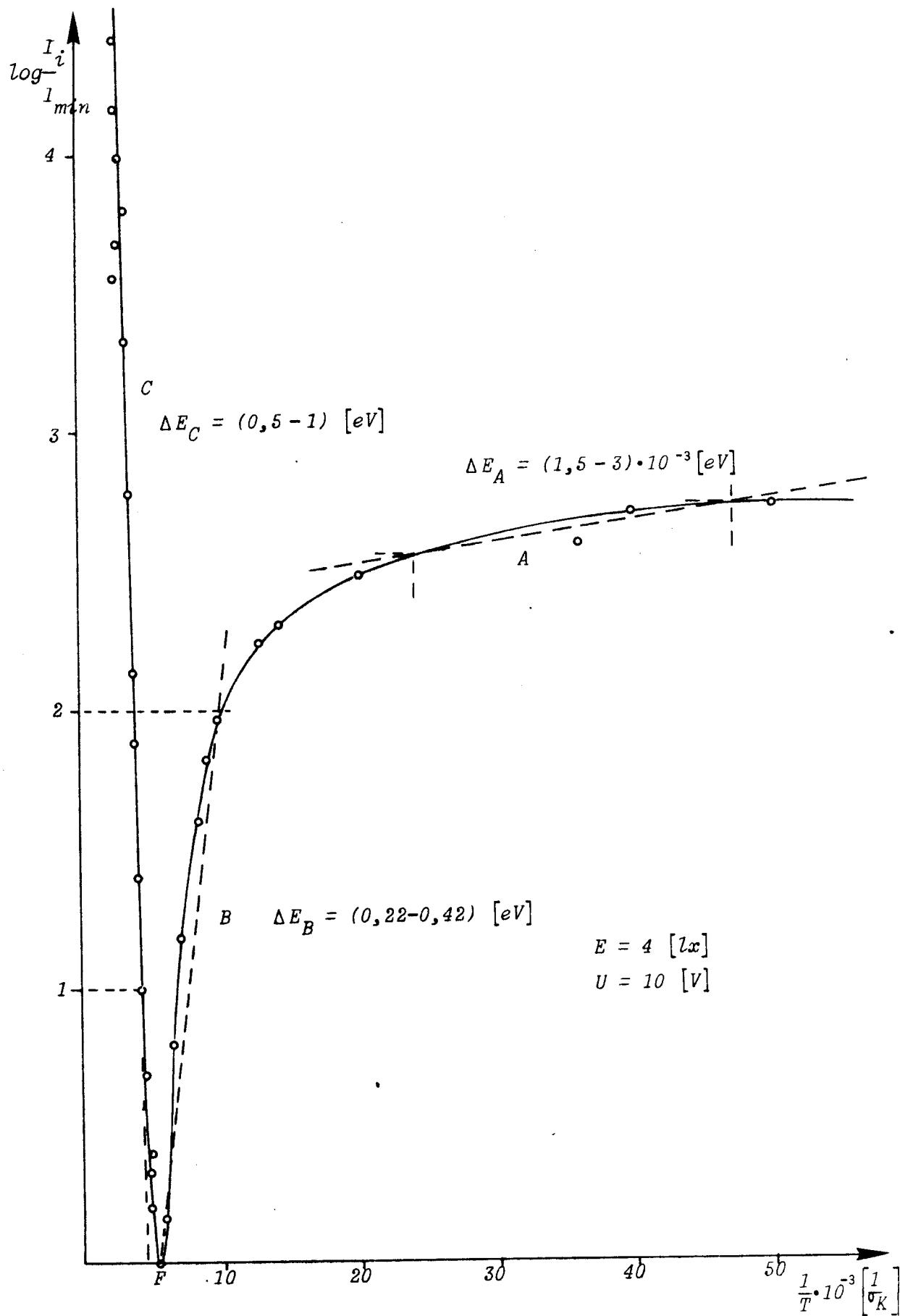
Korišćenjem već poznatog metoda ¹²⁵³ nalaženje energije prelaza u eksperimentu 5.5. su nadjene njene sledeće vrednosti:

$$\Delta E_A = (1,48 \div 2,97) \overset{3}{\underset{10}{\text{---}}} \text{[eV]}$$

$$\Delta E_B = (0,212 \div 0,422) \text{ [eV]}$$

$$\Delta E_C = (0,521 \div 1,042) \text{ [eV]}$$

Na slici 5.5.3. grafički je prikazan $\log(I_i/I_{min})$ u funkciji od $1/T$.



Slika 5.5.3.

POKUŠAJ OBJAŠNJENJA EKSPERIMENTALNE
KRIVE PRIKAZANE GRAFIČKI NA SLICI 5.5.3.

Iako je kriva sa grafika (5.5.3.) karakteristična i za ostale poluprovodnike, kao što je to npr. germanijum, za njenu interpretaciju ne postoji dovoljno ubedljivosti i sigurnosti pojedinih autora [ref. 18].

I Na delu grafikona koji je označen sa A,B vidi se kako opada fotostruja u funkciji od temperature. Taj deo krive predstavlja drugi (viši) temperaturni opseg poluprovodnika na kojem su svi donorski atomi jonizovani pod uticajem temperature. Ovi donorski atomi ponašali su se kao energetski nivoi zamki za fotoprovodne elektrone, što dovodi do smanjenja fotostruje.

Ovde se ostvaruju energetski prelazi $\Delta E_A = (1,5 \div 3) \cdot 10^{-3}$ [ev] i $\Delta E_B = (0,22 \div 0,42)$ [ev]. Povišenjem temperature, fotostruja se smanjuje i zbog povećanja vibracija kristalne rešetke, što dovodi do češćih rasejanja fotoprovodnih elektrona, smanjenja pokretljivosti i fotoprovodnosti.

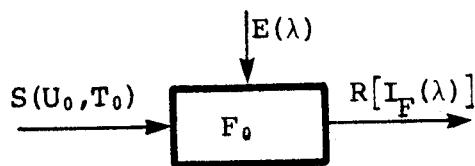
II Na temperaturi $t = 180$ [$^{\circ}\text{C}$], Fermi-nivo se poklapa sa donorskim nivoom, tj. najveći broj fotogenerisanih elektrona biva uhvaćen na energetskom nivou zamke, a da pri tom ne izvrši prelaz iz valentne u provodnu zonu, nego samo izvrši prelaz valentna zona - energetski nivo zamke. Fotostruja ima minimum $I_1 = 0,2$ [μA] dok je na $t = 20$ [$^{\circ}\text{C}$] iznosila $I_0 = 106$ [μA].

III U trećoj oblasti krive od $t = 180$ [$^{\circ}\text{C}$] do $t = 350$ [$^{\circ}\text{C}$] fotoprovodnost naglo raste porastom temperature. Ovde se javlja tzv. termostimulativna fotoprovodnost. Fotoprovodnik se ponaša kao čist bezprimesni poluprovodnik. Ovaj deo krive se objašnjava time što je energija termičkog kretanja rešetke dovoljna za otkidanje valentnih elektrona samog CdS fotoprovodnika. Zbog toga svako dalje povećanje temperature

dovodi do naglog oslobođanja valentnih elektrona iz fotoprovodnika i elektrona naseljenih na nivoima zamki. Ovo povećanje koncentracije slobodnih nosilaca nanelektrisanja dovodi do brzog porasta fotostruje u funkciji od temperature. Na $t = 350 [^{\circ}\text{C}]$ fotostruja dostiže vrednost $I_f = 5200 [\mu\text{A}]$.

5.6 SPEKTRALNA KARAKTERISTIKA PRIMESNOG CdS FOTOPROVODNIKA

Ovaj eksperiment je tipa, kao što to pokazuje crtež na slici 5.6.1.



Slika 5.6.1.

Cilj ovog eksperimenta je da se utvrди zavisnost fotostruje I_F u funkciji spektralne osvetljenosti. Maksimumi fotoprovodnosti omogućavaju da se nadje energija prelaza.

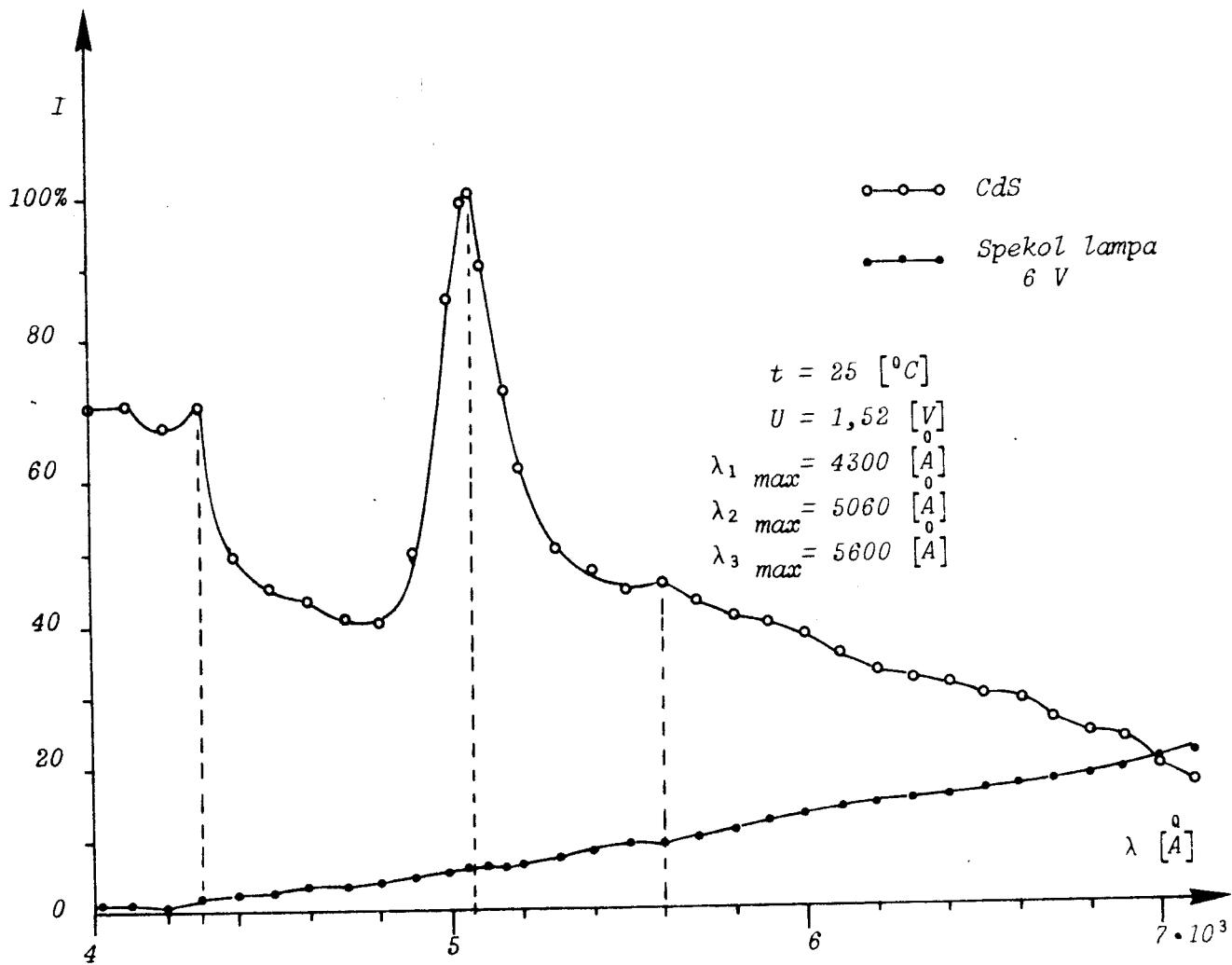
Konstantni parametri su: $\bar{U}_0 = 1,52 [\text{V}]$ i $t_0 = 25 [^{\circ}\text{C}]$. Uzorak je osvetljavan monohromatskom svetlošću talasne dužine $\lambda = (4000 \div 7500) [\overset{\circ}{\text{A}}]$ sa korakom od $\Delta\lambda = 100 [\overset{\circ}{\text{A}}]$.

Rezultati merenja predstavljeni su grafički na slici 5.6.2. Iz grafikona se vidi da se maksimumi spektralne fotoprovodnosti nalaze na sledećim talasnim dužinama

$$\lambda_1 = 4300 [\overset{\circ}{\text{A}}] \quad \lambda_2 = 5060 [\overset{\circ}{\text{A}}] \quad \lambda_3 = 5600 [\overset{\circ}{\text{A}}]$$

Račun daje odgovarajuće energije prelaza $E = 4(c/\lambda)$

$$E_1 = 2,885 [\text{eV}] \quad E_2 = 2,451 [\text{eV}] \quad E_3 = 2,215 [\text{eV}]$$



Slika 5.6.2.

METODIKA DOBIJANJA SPEKTRALNE KARAKTERISTIKE FOTOPROVODNIKA

Merenje spektralne fotostruje $I_F(\lambda)$ izvršeno je osvetljavanjem uzorka sa svetlošću spekolove sijalice ($6 [V]$, $30 [W]$). Relativni spektralni intenzitet $I_{Ri}(\lambda)$, bio je poznat, kao što to prikazuje grafik na slici (5.6.2.).

Deljenjem spektralne fotostruje $I_{Fi}(\lambda)$ sa relativnim intenzitetom sjajnosti svetlosnog izvora I_R , dobija se fotostruja $I(\lambda)$, kao kada bi svetlosni izvor sjajio istim sjajem na svim talasnim dužinama (formula 5.6.3.).

$$\frac{I_{Fi}(\lambda)}{I_{Ri}(\lambda)} = I_F(\lambda) \quad (5.6.3.)$$

Ovim računskim postupkom je dobijena absolutna vrednost fotostruje na određenim talasnim dužinama.

Iz ove absolutne spektralne karakteristike dobijena je relativna fotoprovodna karakteristika, normiranjem svih absolutnih vrednosti spektralnih fotostruja $I_F(\lambda)$ na 100 %. Formula za dobijanje relativne fotoprovodne karakteristike glasi:

$$I_R = \frac{I_{Fi}(\lambda)}{I_F(\lambda)_{\max}} \cdot 100 \% \quad (5.6.4.)$$

Na ovaj način je dobijen grafik na slici (5.6.2.).

DISKUSIJA REZULTATA

U ovom eksperimentu su određena tri spektralna maksimuma fotoprovodnosti, i to na talasnim dužinama:

$$\lambda_1 = 4300 \text{ } [\text{\AA}] \quad \lambda_2 = 5060 \text{ } [\text{\AA}] \quad \lambda_3 = 5600 \text{ } [\text{\AA}]$$

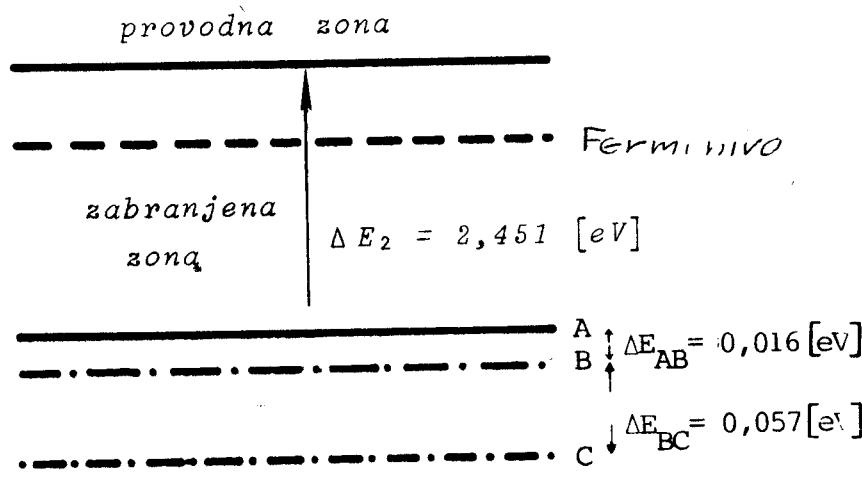
Odgovarajuće energije ovim talasnim dužinama su:

$$\Delta E_1 = 2,885 \text{ [eV]} \quad \Delta E_2 = 2,451 \text{ [eV]} \quad \Delta E_3 = 2,215 \text{ [eV]}$$

Glavnom spektralnom maksimumu $\lambda_2 = 5060 \text{ } [\text{\AA}]$ odgovara energija direktnog (osnovnog) prelaza od $\Delta E_2 = 2,451 \text{ [eV]}$ iz valentne u provodnu zonu. To je ujedno i širina zabranjene zone (slika 5.6.4.).

Ostala dva spektralna maksimuma fotoprovodnosti λ_1 i λ_3 su neznatna po intenzitetu relativne spektralne fotoprovodnosti. Njihove energije ΔE_1 i ΔE_3 predstavljaju indirektne prelaze koji se u suštini svode ponovo na direktni prelaz ΔE_2 iz valentne zone u provodnu zonu.

Ovi indirektni prelazi su praćeni:



Slika 5.6.4.

a. emisijom fonona u rešetku CdS, čija energija predstavlja razliku:

$$\Delta E_1 - \Delta E_2 = 2,885 \text{ [eV]} - 2,451 \text{ [eV]} = 0,434 \text{ [eV]}$$

b. apsorpcija fonona energije od kristalne rešetke:

$$\Delta E_2 - \Delta E_3 = 2,451 \text{ [eV]} - 2,215 \text{ [eV]} = 0,236 \text{ [eV]}$$

Energija osnovnog prelaza ΔE_2 zavisi od više faktora:

- temperature
- vrste i količine primesa
- tehnologije izrade (kvantni efekti)

Temperatura.

Rezultat $\Delta E_2 = 2,451 \text{ [eV]}$ dobijen je na temperaturi $T \approx 300 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$. Jedan od autora koji se bavio ovom problematikom je i Donald Long [ref 12]. On navodi podatak da je izmerena širina zabranjene zone $\Delta E = 2,582 \text{ [eV]}$ na $T = 4 \text{ [}^{\circ}\text{K]}$, što znači da se povećanjem temperature T zabranjena zona sružava, a fotoprovodni spektralni maksimumi se pomjeraju ka većim talasnim dužinama $\lambda = 4804 \text{ [\AA]}$.

Inače, mnogi autori navode da je direktni energetski prelaz (širina zabranjene zone) $\Delta E = 2,4 \text{ [eV]}$.

Tako autor Ступельман navodi da širina zabranjene zone u CdS iznosi $\Delta E = 2,46$ [eV], Tredgold [11] $\Delta E = 2,4$ [eV], Wang [9] $\Delta E = 2,4$ [eV] i $\Delta E = 2,45$ [eV].

Primese.

Primese imaju velikog uticaja na fotoprovodnost i pojavu spektralnih fotoprovodnih maksimuma (Ступельман, str. 143, sl. 10.4) [ref. 1].

Ovde ćemo navesti nekoliko spektralnih fotoprovodnih maksimuma, koji su ostvareni na različite načine.

Čist CdS ima spektralni maksimum fotoprovodnosti na $\lambda = 5000$ [\AA], a CdS dopingovan sa primesama srebra (Ag) ima maksimum fotoprovodnosti na $\lambda = 5500$ [\AA].

Visoka koncentracija bakra pomera maksimum spektralne fotoprovodnosti za čitavih $\lambda = 1000$ [\AA] u odnosu na čist CdS, tj. na $\lambda = 6000$ [\AA].

Na osnovu ovoga se zaključuje da povećanje procenta primesa u CdS fotoprovodniku širi zabranjenu zonu, ali povećava koncentraciju donorskih atoma, tj. povećava se broj zamki (slobodnih kvantnih stanja u zabranjenoj zoni).

Takodje se, na osnovu priliženih podataka zaključuje da je radni uzorak CDS ORP 60 dosta čist jer ima maksimum relativne spektralne fotoprovodnosti na talasnoj dužini od $\lambda = 5060$ [\AA].

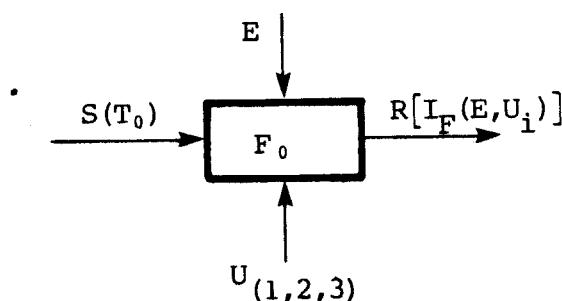
Iz prethodnih merenja se da zaključiti da zbog velikog broja zamki, moguće je da u uzorku postoji stehiometrijski višak sumpora i veoma malo primesa bakra. Velika fotoosećljivost kristala CdS se može pripisati stehiometrijskom višku kadmijuma.

Tehnologija izrade.

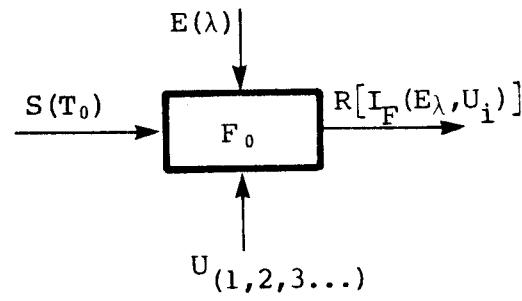
Tehnologija izrade i dimenzije uzorka takodje dove do tzv. kvantnih efekata. Naime, tehnologija izrade i dimenzije uzorka utiču na širinu zabranjene zone. Te razlike energije su reda 0,01 [eV], tj. stotog dela elektron-volta.

5.7. FOTOSTRUJA U FUNKCIJI JAČINE OSVETLJENOSTI

Ovaj eksperiment je tipa kao što to prikazuju crteži na slikama 5.7.1. i 5.7.2.



Slika 5.7.1.



Slika 5.7.2.

Cilj merenja je bio da se ispita fotostruja u funkciji jačine osvetljenosti E . Eksperiment je vršen sa belom svetlošću $E = (0 \div 350) [\text{lx}]$ i crvenom svetlošću $\lambda = (6000 \div 6500) [\text{\AA}]$ u intervalu $E = (0 \div 130) [\text{lx}]$. Ostali parametri su: $t = (22 \div 23) [{}^{\circ}\text{C}]$ i $U = (0 \div 30) [\text{V}]$ sa korakom $\Delta U = 2 [\text{V}]$. Rezultati merenja prikazani su grafički na slikama 5.7.3. i 5.7.4. Iz oba grafikona vidi se da fotostruja I_F ima nelinearnu karakteristiku u funkciji osvetljenosti E .

Ova nelinearnost fotostruje se može prikazati sa eksponencijalnom funkcijom:

$$I_F = U [\text{V}] \cdot E^\alpha [\text{lx}] \quad (5.7.5.)$$

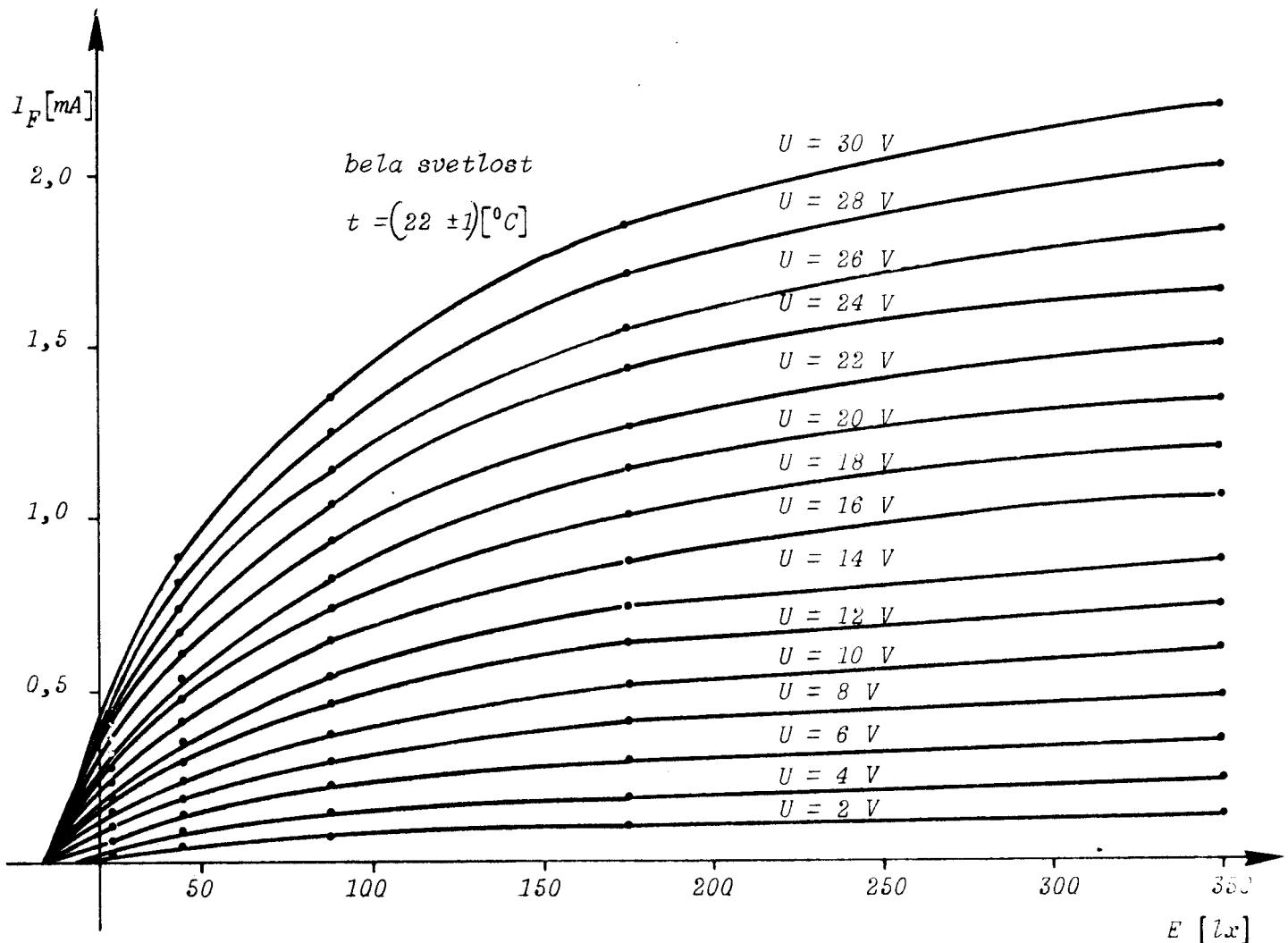
gde je $U [\text{V}]$ - radni napon uzorka

$E [\text{lx}]$ - jačina osvetljenosti u luksima ($1 [\text{lx}] = 1,4 \cdot 10^{-3} [\text{W/m}^2]$)

α - eksponencijalni bezdimenzionalni koeficijent porasta fotostruje u funkciji osvetljenosti E .

Izražavanjem koeficijenta iz jednačine (5.7.5.)

dobija se



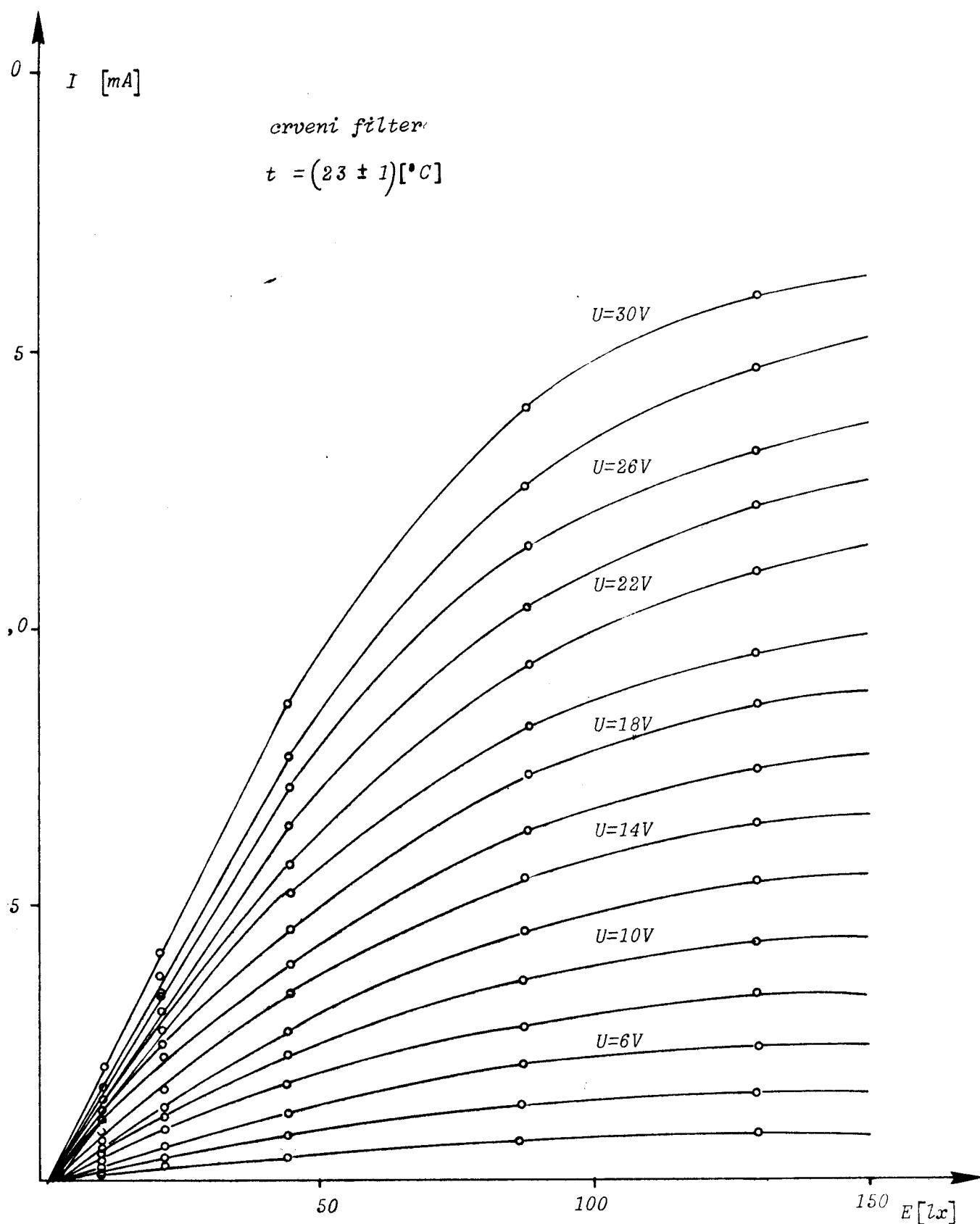
Slika 5.7.3.

$$\alpha = \frac{\log(I_F [\text{A}] / U [\text{V}])}{\log \{E [\text{lx}] \cdot 1,4 \cdot 10^{-3} [\text{W/m}^2]\}} \quad (5.7.6.)$$

Izračunavanjem koeficijenta α za napone dobija se

za belu svetlost: $U = (2 \div 30) \text{ V}$, $E = (0 \div 350) \text{ lx}$, $\alpha = (2,7 \div 13,6)$

za crvenu svetlost: $U = (2 \div 30) \text{ V}$, $E = (0 \div 130) \text{ lx}$, $\alpha = (2,7 \div 5,9)$



Slika 5.7.4.

TABLICA 5.7.7.

radni napon U [V]	jačina osvetljenosti E [lx]						$\frac{\text{BeLa}}{\text{svetlost}}$
	$E = 5,5$	$E = 22$	$E = 44$	$E = 88$	$E = 175$	$E = 350$	
2	$\alpha = 2,7$	$\alpha = 3,2$	$\alpha = 3,8$	$\alpha = 3,7$	$\alpha = 7$	$\alpha = 13,6$	
30	$\alpha = 2,9$	$\alpha = 3,2$	$\alpha = 3,7$	$\alpha = 3,6$	$\alpha = 6,9$	$\alpha = 13,3$	

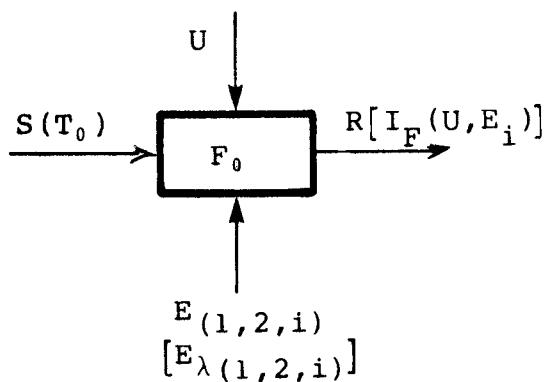
Iz ovih izračunatih podataka, a i iz tablica 5.7.7. i 5.7.8. zaključeno je da je koeficijent α približno jednak za konstantnu jačinu osvetljenosti E i promene napona u intervalu od $U = (2 \div 30)$ [V]. Ova činjenica ukazuje da je fotostruja I_F linearna funkcija napona U .

TABLICA 5.7.8.

radni napon U [V]	jačina osvetljenosti E u [lx] $\lambda = (6000 \div 6500) \text{ nm}$							$\frac{\text{Crvena}}{\text{svetlost}}$
	$E = 2,75$	$E = 5,5$	$E = 11$	$E = 22$	$E = 44$	$E = 88$	$E = 130$	
2	$\alpha = 2,75$	$\alpha = 2,61$	$\alpha = 2,9$	$\alpha = 3,29$	$\alpha = 3,83$	$\alpha = 3,69$	$\alpha = 5,89$	
30	$\alpha = 2,77$	$\alpha = 2,62$	$\alpha = 2,84$	$\alpha = 3,22$	$\alpha = 3,76$	$\alpha = 3,6$	$\alpha = 5,77$	

5.8. FOTOSTRUJA U FUNKCIJI NAPONA

Ovaj eksperiment je tipa kao što je to prikazano crtežom na slici 5.8.1.



Slika 5.8.1.

Cilj eksperimenta je da se izmeri fotostruja u funkciji napona, tj. $I_F = I_F(U)$ pri $T_0 = \text{const}$ i $E = \text{const}$.

Rezultati ovog eksperimenta su prikazani grafički na slikama 5.8.2. i 5.8.3. Ovi rezultati su samo preuredjeni rezultati eksperimenta 5.7.

Iz grafikona se vidi da fotostruja raste praktično linearno u funkciji napona koji porast se može prikazati relacijom:

$$I_{F_i} = \beta \cdot U_i \quad (5.8.4.)$$

Za malu jačinu osvetljavanja belom svetlošću $E = (0 \div 22) [\ell x]$ linearni koeficijenti su:

$$\beta_1 = 0,647 \text{ } [\mu\text{A/V}] \quad \text{za} \quad E_1 = 5,5 \text{ } [\ell x]$$

$$\beta_2 = 12,517 \text{ } [\mu\text{A/V}] \quad \text{za} \quad E_2 = 22 \text{ } [\ell x]$$

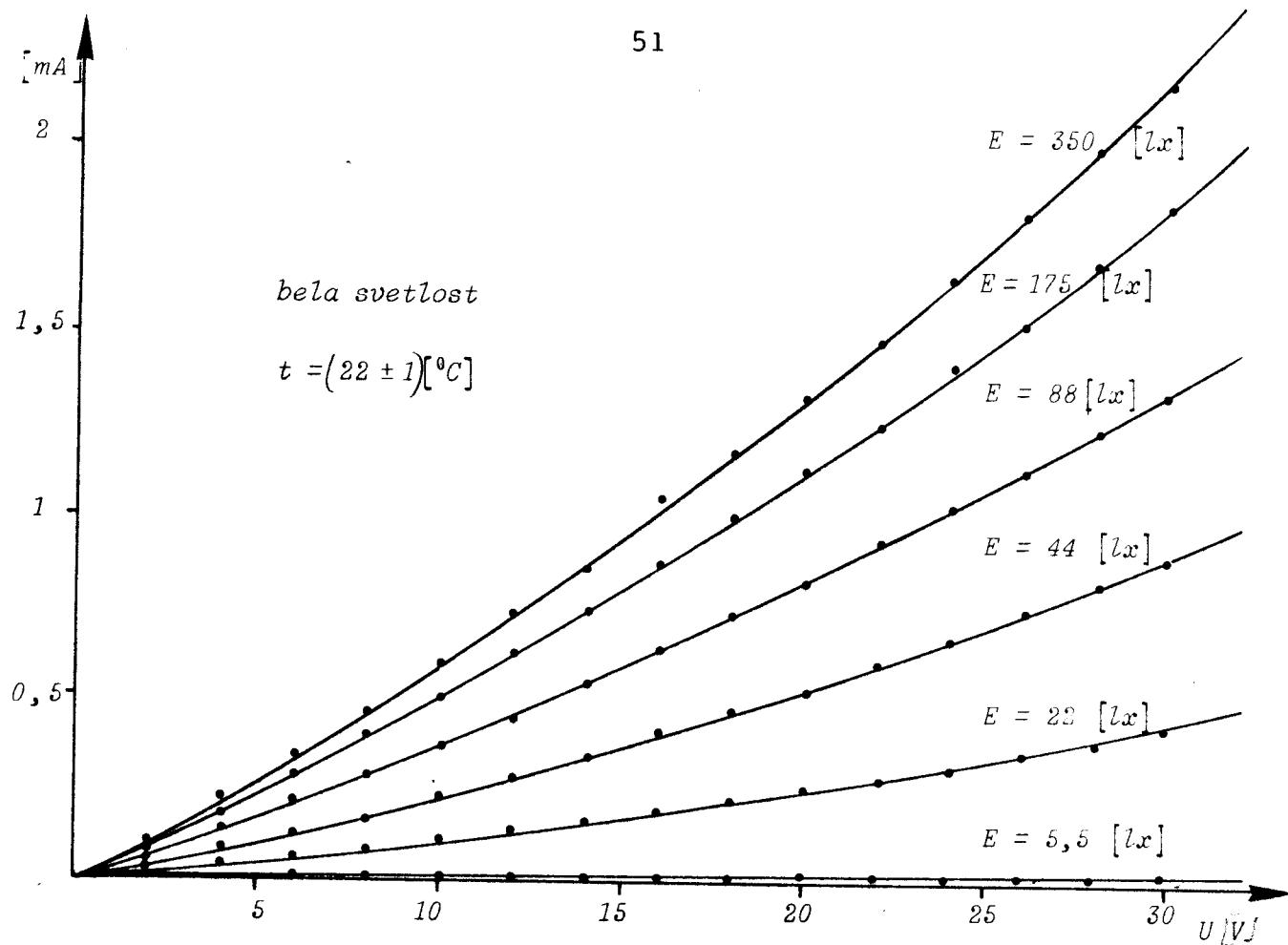
u Funkciji
Fotostruja raste linearno od napona za sledeće jačine crvenog osvetljavanja:

$$E = 2,8 \text{ } [\ell x] \quad E = 5,5 \text{ } [\ell x] \quad E = 11 \text{ } [\ell x]$$

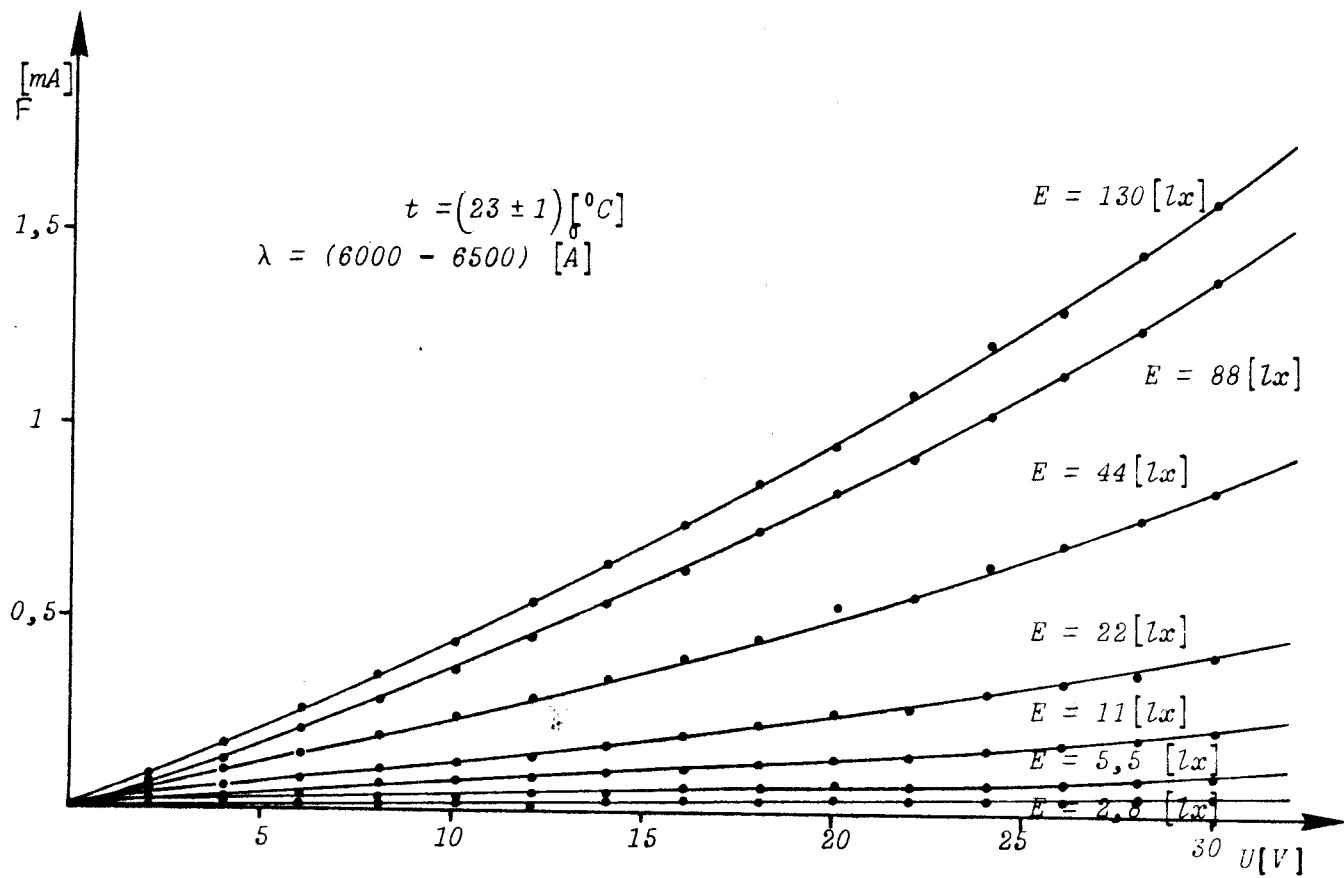
Odgovarajući linearni koeficijenti porasta fotostruje su:

$$\beta = 1,379 \text{ } [\mu\text{A/V}] \quad \beta = 2,622 \text{ } [\mu\text{A/V}] \quad \beta = 6,424 \text{ } [\mu\text{A/V}]$$

Greške koje se javljaju pri izračunavanju fotostruje usled pretpostavke linearnosti su maksimalno $(\Delta I_F)_{\max} =$



Slika 5.8.2.



Slika 5.8.3.

3 [%].

Iz svega navedenog se može zaključiti da se za male jačine osvetljenosti uzorka ($E = (0 \div 22) [\text{lx}]$) i niže napone od $U = 30 [\text{V}]$, CdS uzorak ORP 60 može koristiti u linearnom režimu rada.

Za veće jačine osvetljenosti uzorka ($E = (44 \div 350) [\text{lx}]$, kao i za napone oko $U = 30 [\text{V}]$, javlja se mala ne-linearnost fotostruje u funkciji od napona. Ova nelinearnost se može prikazati relacijom:

$$I_F = A \cdot U^\gamma \quad (5.8.5.)$$

gde je: A - konstanta koja u sebe uključuje osvetljenost uzorka ($A = E$).

U - napon

γ - nelinearnibezdimenzioni koeficijent

Logaritmovanje i sredjivanje izraza daje konačni izraz za nelinearni koeficijent

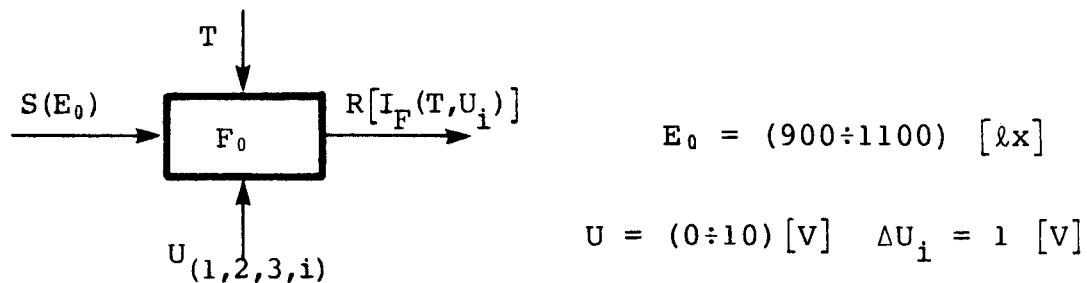
$$\gamma = \frac{\log (I_F/E)}{\log U} \quad (5.8.6.)$$

Kao primer izračunato je $\gamma = -1,648$ za $E = 350 [\text{lx}]$, $U = 28 [\text{V}]$ i $I_F = 2020 [\mu\text{A}]$.

5.9. FOTOSTRUJA I_F U FUNKCIJI TEMPERATURE T

Ovaj eksperiment je tipa, kao što to prikazuje crtež na slici 5.9.1.

Cilj ovoga merenja je bio da se utvrdi zavisnost fotostruje I_F u funkciji od temperature T, pri raznim radnim naponima U_i . Rezultati merenja prikazani su grafički na slici 5.9.2., odakle se vidi da fotostruja opada sa porastom

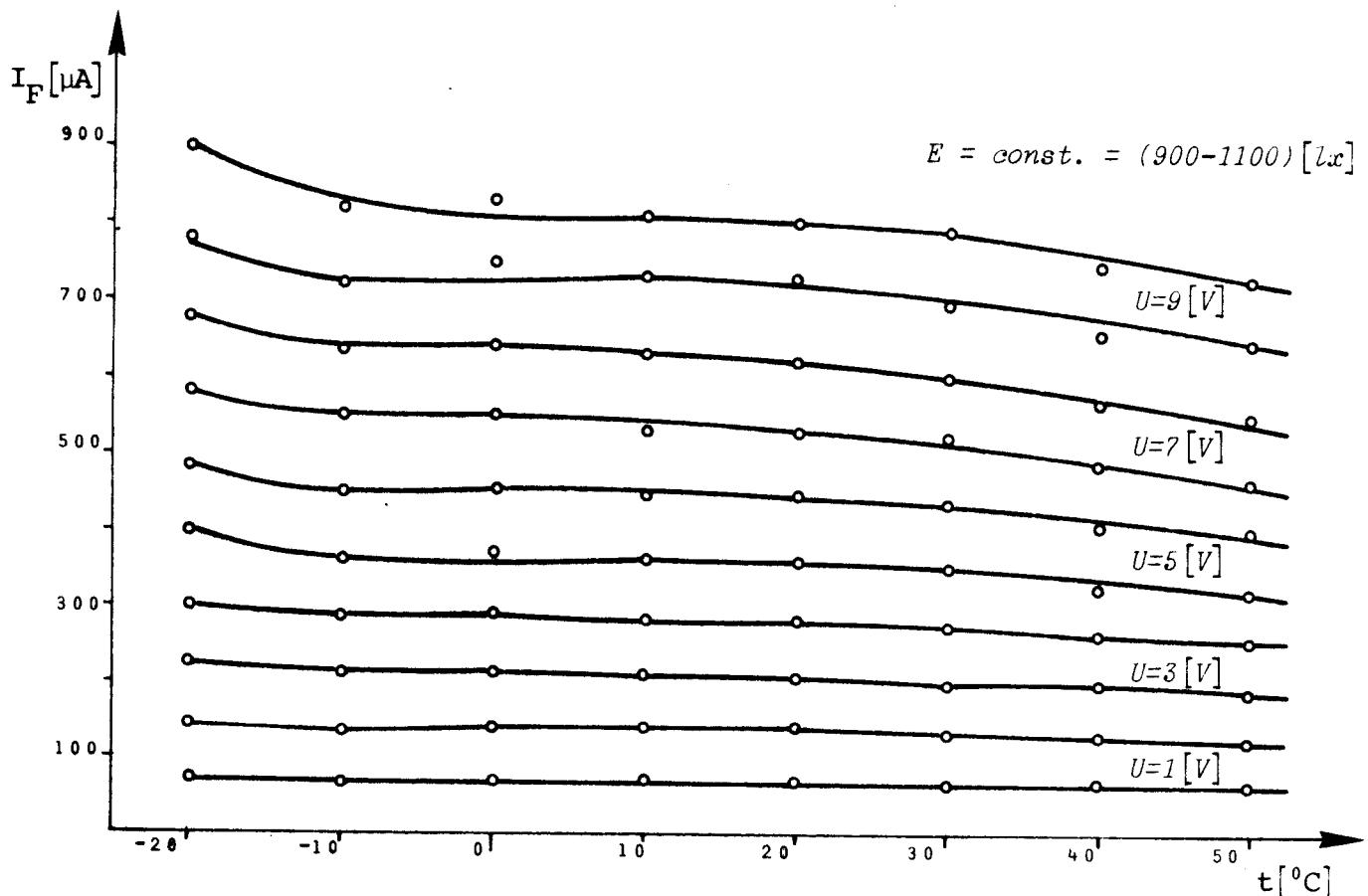


Slika 5.9.1.

temperature. Za napone $U_i = (1 \div 4) \text{ [V]}$ ovaj pad fotostruje je linearan, dok je za više napone $U_i = (4 \div 10) \text{ [V]}$ ovaj pad nelinearan.

Opšta formula za linearno opadajuću funkciju je:

$$I = I_0 (1 - \alpha t) \quad (5.9.3.)$$



Slika 5.9.2.

Kada se ova formula primeni na pad fotostruje I_F u funkciji napona, dobija se

$$I_{Fn} = I_o [1 - \alpha(t_n - t_o)] \quad (5.9.4.)$$

Iz ove se formule dobija linearni topotni koeficijent opadanja fotostruje

$$\alpha = \frac{1}{t_n - t_o} \cdot \frac{I_o - I_{Fn}}{I_o} \quad (5.9.5.)$$

Računom se dobijaju prva četiri koeficijenta za prva četiri napona i za njihovu jačinu osvetljenosti $E = (900 \div 1100) [\text{lx}]$ (tablica 5.9.6.)

TABLICA 5.9.6.

$$E = (900 \div 1100) [\text{lx}]$$

<i>radni napon</i>	$U_1 = 1 [\text{V}]$	$U_2 = 2 [\text{V}]$	$U_3 = 3 [\text{V}]$	$U_4 = 4 [\text{V}]$
α linearni topotni koeficijent	$\alpha_1 = 2,183 \cdot 10^3 \left[\frac{1}{\text{lx}} \right]$	$\alpha_2 = 2,666 \cdot 10^3 \left[\frac{1}{\text{lx}} \right]$	$\alpha_3 = 2,54 \cdot 10^3 \left[\frac{1}{\text{lx}} \right]$	$\alpha_4 = 2,238 \cdot 10^3 \left[\frac{1}{\text{lx}} \right]$
$\alpha [\%] [1/^\circ\text{K}]$	0,218	0,267	0,254	0,224

Ovi linearni topotni koeficijenti opadanja fotostruje se jako dobro slažu sa podacima koje je dao proizvodjač "Philips" u svom katalogu.

$$\alpha_{tipično} = 0,2\% \qquad \alpha_{max} = 0,5\%$$

Vc

DINAMIČKE KARAKTERISTIKE

5.10. GRANIČNA FREKVENCIJA I VREME ŽIVOTA
NOSILACA NAELEKTRISANJA

U ovom eksperimentu zamračenom CdS uzorku se traži granična frekvencija i ispituje vreme života nosilaca naelektrisanja.

Dakle, zamračenom CdS uzorku su dovedeni četvrtasti naponski impulsi, a frekvencija je menjana od $v = 10$ [Hz] do nekoliko kiloherca, sa korakom dva u svakom redu veličine frekvencije.

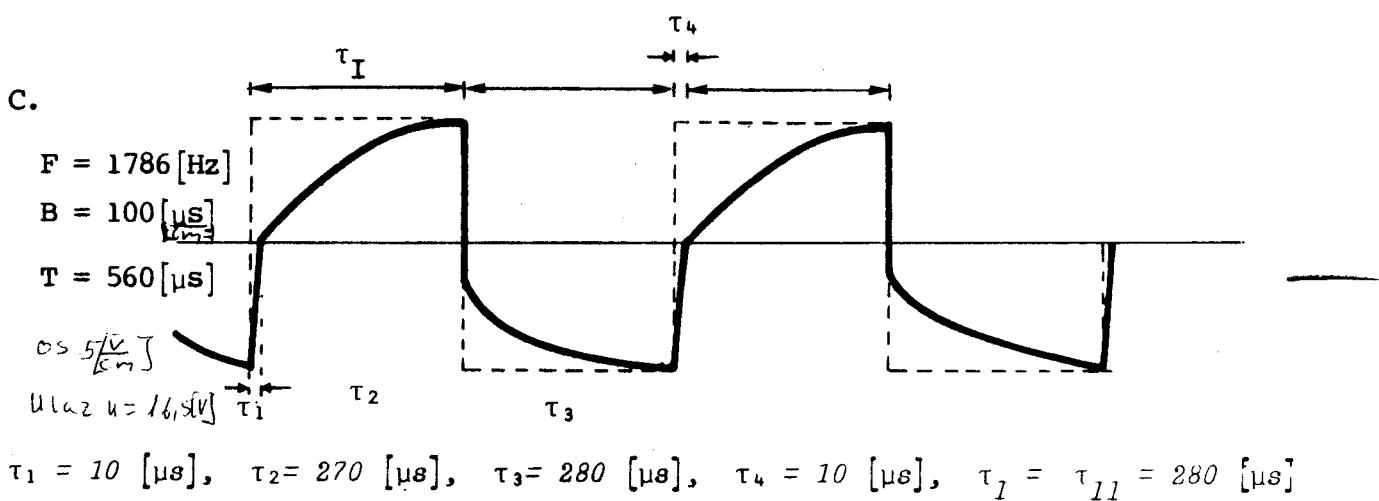
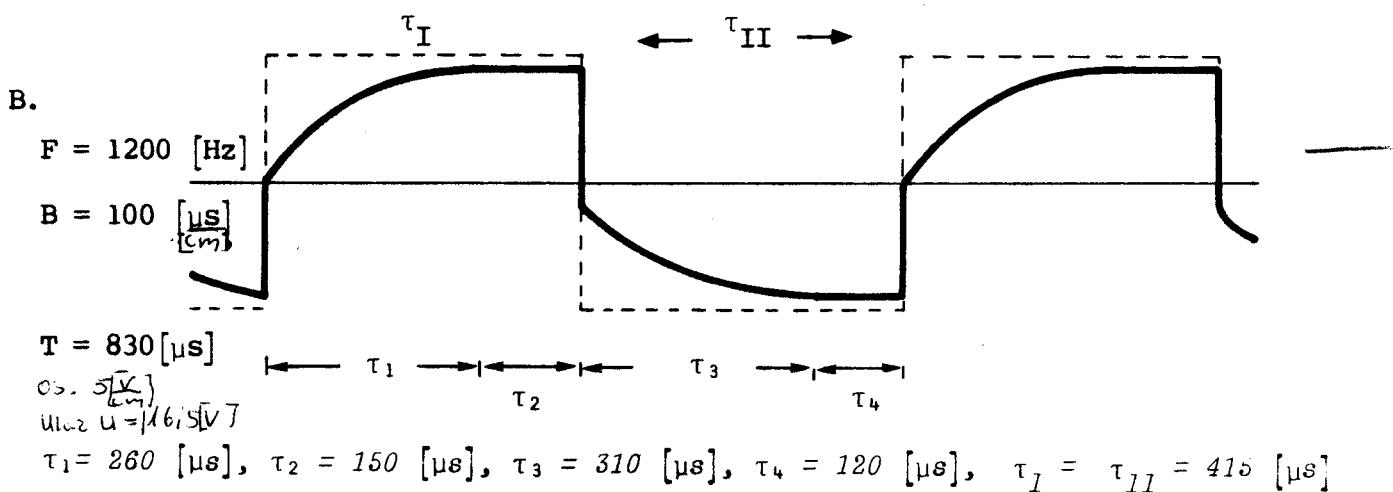
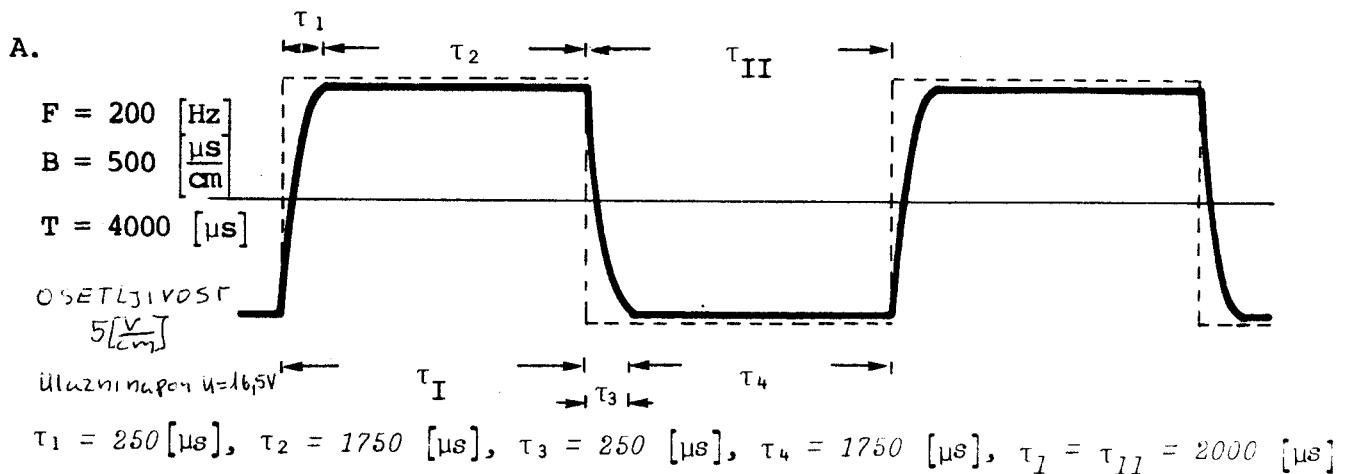
Na osciloskopu je posmatran električni odgovor CdS poluprovodnika, komparativnom metodom koja je već opisana u metodici rada dinamičkih karakteristika.

Rezultati ispitivanja odgovora CdS uzorka dati su grafički na slici (5.10.1.).

Na frekvencijama do $f \approx 200$ [Hz] CdS poluprovodnik ORP 60 uspeva dosta dobro da prati promenljivo električno polje $E = \pm U/e$, bez većih izobličenja električnog odgovora. Frekventna baza je bila $B_t = 500$ [$\mu s/cm$]. Vreme uspostavljanja (rise time) je $\tau_1 \approx 250$ [μs], a vreme opadanja (fall time) je $\tau_3 \approx 250$ [μs]. Vremena trajanja pozitivne τ_2 i negativne stacionarne provodnosti τ_4 (duration time) su jednaka $\tau_2 = \tau_4 = 1750$ [μs].

Vreme trajanja pozitivnog i negativnog ulaznog signala je $\tau_I = \tau_{II} = 2000$ [μs]. Period ulaznog signala je $T = 4000$ [μs].

NALAŽENJE GRANIČNE FREKVENCIJE
ZATAMNJENOG UZORKA



Slika 5.10.1.

Od ferkvencije $f = 200$ [Hz] frekvencija je menjana sa korakom $\Delta f = 200$ [Hz] sve do vrednosti od $f = 1200$ [Hz]. Rezultati merenja na toj frekvenciji dati su grafički na slici 5.10.1.b.

Iz priloženih podataka vidi se da je frekvencija ulaznog signala iznosila $f = 1200$ [Hz], period $T = 830[\mu\text{s}]$ i napon $U = 16,5$ [V].

Vreme trajanja pozitivnog i negativnog impulsa je $\tau_I = \tau_{II} = 415$ [μs].

Vreme uspostavljanja stacionarne provodnosti na CdS uzorku je $\tau_1 = 260$ [μs]. Vreme trajanja stacionarne provodnosti je $\tau_2 = 150$ [μs], a negativne $\tau_4 = 120$ [μs]. Vreme opadanja provodnosti do stacionarne vrednosti je $\tau_3 = 310$ [μs].

Iz prethodna dva merenja (5.10.1a. i 5.10.1b.) se vidi da vreme uspostavljanja τ_1 i vreme opadanja τ_3 približno zadržavaju svoju vrednost, sa porastom frekvencije. Istovremeno sa porastom frekvencije opada vreme trajanja pozitivne τ_2 i vreme trajanja negativne stacionarne provodnosti τ_4 .

Povećanjem frekvencije do $f = 1786$ [Hz] vreme trajanja τ_2 pozitivne stacionarne provodnosti i vreme trajanja τ_4 negativne stacionarne provodnosti opada na nulu ($\tau_2 = \tau_4 = 0$ [s]).

Vreme uspostavljanja signala $\tau_1 = 280$ [μs] je približno jednako pozitivnom poluperiodu ulaznog signala $\tau_I \approx \tau_1 = 270$ [μs].

Vreme opadanja signala $\tau_3 = 280$ [μs] je približno jednak vremenu τ_I negativnog poluperioda ulaznog signala. $\tau_3 = \tau_{II} = 280$ [μs].

Frekvencija $f = 1786$ [Hz] predstavlja graničnu frekvenciju zamračenog CdS uzorka, jer uzorak ne uspeva da prati četvrtaste impulse ulaznog signala niti se u njemu uspevaju uspostaviti ravnotežne provodnosti.

Sa slike (5.10.1c.) vidi se da je vreme uspostavljanja $\tau_2 = 270$ [μs] približno jednak vremenu opadanja impulsa $\tau_3 = 280$ [μs].

Na osnovu poredjenja iz literature zaključuje se

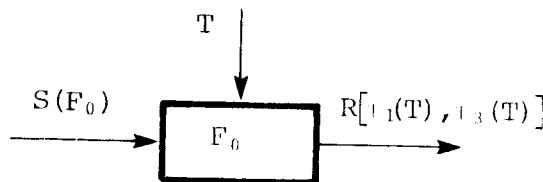
da se ovde radi o linearnoj rekombinaciji nosilaca nanelektrisanja u zamračenom CdS uzorku ORP 60 [ref. 1].

Kod linearne rekombinacije, vreme padanja τ_3 se poklapa sa vremenom života nosilaca nanelektrisanja i u ovom slučaju iznosi $\tau_3 \approx 280 \text{ } [\mu\text{s}]$.

5.11. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI TEMPERATURE

(TEMPERATURNAA ZAVISNOST VREMENA USPOSTAVLJANJA I PADANJA DO STACIONARNIH PROVODNOSTI)

Ovaj eksperiment je tipa, kao što je to prikazano na slici (5.11.1.)



Slika 5.11.1.

Da bi se utvrdila zavisnost vremena τ_1 uspostavljanja stacionarnog stanja i vremena τ_3 pada do uspostavljanja stacionarnog stanja od temperature, izvršena su dva merenja iz dinamičkih karakteristika sa CdS uzorkom.

Rezultati merenja su prikazani grafički na slici (5.11.2.).

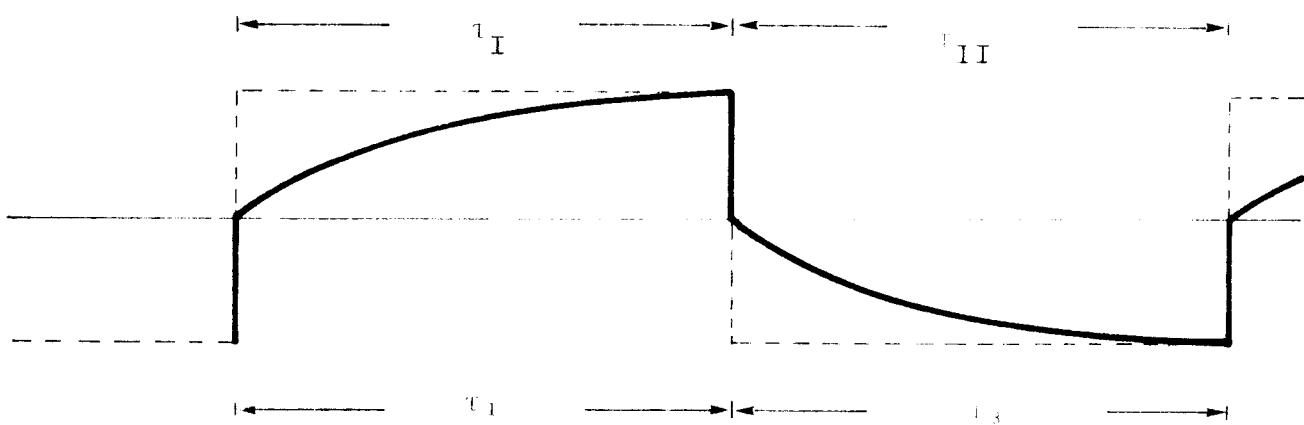
Prvo merenje (5.11.2a.) je izvršeno sa zamračenim uzorkom CdS na graničnoj frekvenciji $f_0 = 1925 \text{ [Hz]}$. Vreme trajanja pozitivnog i negativnog poluperioda je bilo isto i iznosilo je $\tau_I = \tau_{II} = 260 \text{ } [\mu\text{s}]$.

Vreme uspostavljanja stacionarne provodnosti i vreme padanja do stacionarne provodnosti je takođe bilo

A. PERIOD T SA VREMENOM $\tau_1 = \tau_{II}$
I MOGUĆNOSTI DA SE τ_3 MENJA SA TEMPERATUROM

$$\begin{array}{ll} F = 1925 \text{ [Hz]} & T = 520 \text{ [\mu s]} \\ B = 40 \text{ [\mu s/cm]} & U = 17,5 \text{ [V]} \end{array} \quad \text{osetljivost osciloskopa } 5 \text{ [V/cm]}$$

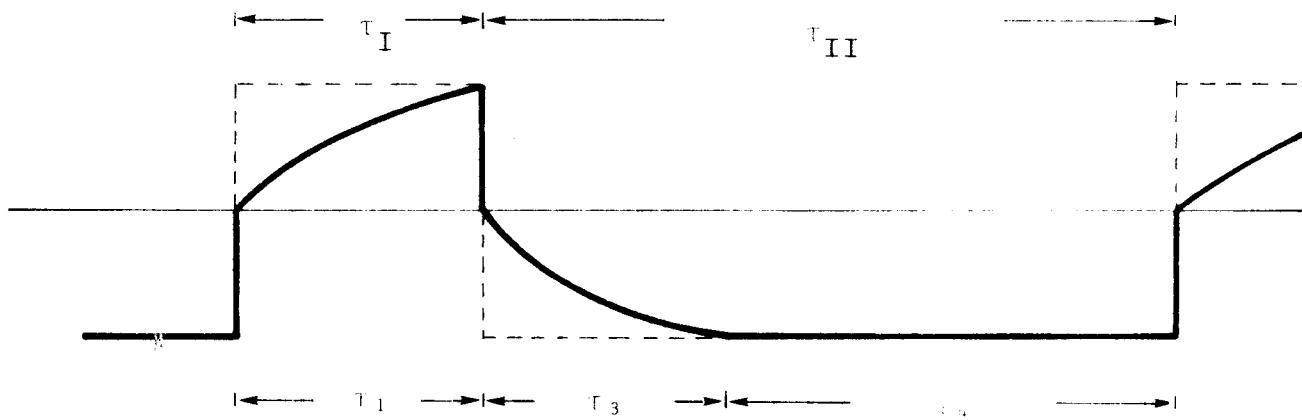
$$\tau_1 = \tau_3 = 260 \text{ [\mu s]} \quad \tau_I = \tau_{II} = 260 \text{ [\mu s]}$$



B. PERIOD T SA VREMENOM $\tau_{II} > \tau_I$
I MOGUĆNOSTI DA SE τ_3 MENJA SA TEMPERATUROM

$$\begin{array}{ll} F = 826 \text{ [Hz]} & T = 1220 \text{ [\mu s]} \\ B = 100 \text{ [\mu s/cm]} & U = 17,5 \text{ [V]} \end{array} \quad \text{osetljivost osciloskopa } 5 \text{ [V/cm]}$$

$$\tau_1 = \tau_I = 320 \text{ [\mu s]}, \tau_3 = 320 \text{ [\mu s]}, \tau_4 = 560 \text{ [\mu s]}, \tau_{II} = 600 \text{ [\mu s]}$$



Slika 5.11.2.

$\tau_1 = \tau_3 = 260 [\mu\text{s}]$, i nije se promenilo u intervalu temperature od $t = (-10 \div 60) [{}^\circ\text{C}]$.

U ovom eksperimentu se očekivalo da će se τ_1 i τ_3 menjati sa temperaturom.

U drugom eksperimentu je merenje takodje izvršeno sa zamračenim uzorkom na frekvenciji $f = 826 [\text{Hz}]$.

Rezultati merenja su prikazani grafički na slici (5.11.2b.).

Period T četvrtastog napona je odabran tako da vreme uspostavljanja τ_1 bude jednako vremenu τ_I trajanja pozitivnog poluperioda $\tau_1 = \tau_I = 320 [\mu\text{s}]$, kao i na graničnoj frekvenciji.

Negativni poluperiod traje $\tau_{II} = 900 [\mu\text{s}]$.

Vreme padanja do stacionarne provodnosti $\tau_3 = 320 [\mu\text{s}]$ je manje od vremena trajanja stacionarnog stanja $\tau_4 = 580 [\mu\text{s}]$.

Ovde je obezbedjena mogućnost da se τ_3 menja u intervalu $\tau_{II} = 900 [\mu\text{s}]$ sa promenom temperature. Temperatura t je menjana u intervalu $t = (-10 \div 60) [{}^\circ\text{C}]$, ali nijedno od pomenutih vremena (τ_1 , τ_2 , τ_3 i τ_4) se nije promenilo.

ZAKLJUČAK

Vreme uspostavljanja stacionarne provodnosti $\tau_1 = 320 [\mu\text{s}]$ i vreme padanja do stacionarne vrednosti (vreme života nosilaca nanelektrisanja) se ne menja u intervalu temperature $t = (-10 \div 60) [{}^\circ\text{C}]$, kod zamračenog CdS uzorka.

Ovaj zaključak se slaže sa rezultatima eksperimentatora iz reference [3] i teorijskim izlaganjima autora iz reference [18]. Oni navode da se u intervalu temperature od $t = (0 \div 40) [{}^\circ\text{C}]$, vreme života nosilaca nanelektrisanja praktično ne menja i da je reda veličine $\tau \sim 10^{-3} [\text{s}]$.

Vreme života nosilaca nanelektrisanja, koja daju tri pomenuta merenja u ovom radu (5.10.1c.), (5.11.2.a.) i (5.11.2.b.) se kreću u intervalu $\tau = (260 - 320) [\mu\text{s}]$.

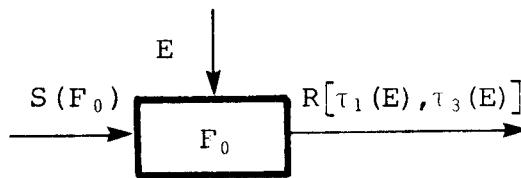
Ovde bi trebalo istaći kao posebno tačan rezultat vreme života $\tau = 260 \text{ } [\mu\text{s}]$ iz eksperimenta (5.11.2b.) i graničnu frekvenciju od $f = 1925 \text{ [Hz]}$.

Zbog nezavisnosti vremena uspostavljanja τ_1 i vremena padanja τ_3 od temperature, CdS uzorak ORP 60 nije potrebno termostatirati, pa u narednim eksperimentima se neće ni spominjati temperatura na kojoj su eksperimenti izvedjeni.

5.12. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA τ U FUNKCIJI JAČINE OSVETLJENOSTI E

(VREME USPOSTAVLJANJA τ_1 I VREME OPADANJA τ_3
NA GRANIČNOJ FREKVENCIJI $f = 1800 \text{ [Hz]}$ U
FUNKCIJI OSVETLJENOSTI E)

Ovaj eksperiment je tipa, kao što je to prikazano na slici 5.12.1.



Slika 5.12.1.

Ovo je jedno od preliminarnih merenja sa ciljom da se vidi kako se menja vreme uspostavljanja τ_1 i vreme opadanja τ_3 u funkciji osvetljenosti E na graničnoj frekvenciji $f = 1800 \text{ [Hz]}$.

U ovom eksperimentu CdS uzorak ORP 60 se ispituje kao fotoprovodnik jer se u toku eksperimenta osvetljava svetlošću različitog intenziteta.

Zamračenom CdS uzorku je, već izloženom tehnikom doveden napon granične frekvencije od $f = 1800$ [Hz] (slika 5.12.2a.).

Vreme uspostavljanja τ_1 i vreme padanja τ_2 su jednaki, $\tau_1 = \tau_2 = 288$ [μs].

Poluperiodi ulaznog signala su takođe bili $\tau_I = \tau_2 = 288$ [μs]. Period ulaznog signala je bio $T = 576$ [μs].

Osvetljavanjem uzorka sa svetlošću izaziva se nagle smanjenje vremena uspostavljanja τ_1 i vremena padanja τ_2 .

Ova merenja su izvršena sa jačinom osvetljenosti $E = (0; 0,17; 0,35; 0,7; 2,8; 4; 5,5; 15; 1400)$ [ℓx].

Na slici (5.12.2b.) je prikazano vreme uspostavljanja $\tau_1 = 184$ [μs] i vreme opadanja takođe $\tau_3 = 184$ [μs], za osvetljenost $E \approx 0,7$ [ℓx].

Odmah se primećuje da se vremena uspostavljanja i padanja smanjuju povećanjem jačine osvetljenosti sa $E = 0$ [ℓx] na $E = 0,7$ [ℓx], sa $\tau_1 = \tau_3 = 288$ [μs] na $\tau_1 = \tau_3 = 184$ [μs].

Povećanjem jačine osvetljenosti uzorka na $E \approx 15$ [ℓx] vreme uspostavljanja τ_1 i vreme padanja τ_2 se smanjuju na $\tau_1 = \tau_2 = 48$ [μs] (slika 5.12.2c.).

Dalje povećanje jačine osvetljenosti E izaziva neznatno i sporo smanjenje vremena uspostavljanja τ_1 i vremena padanja τ_3 . Rezultati ovih merenja su prikazani u tabeli 5.12.3. i na grafikonu (slika 5.12.4.).

ZAKLJUČAK

Iz svega do sada navedenog se zaključuje da se vreme nosilaca nanelektrisanja smanjuje u funkciji osvetljenosti E .

Ovi rezultati se slažu sa eksperimentalnim rezultatima koje navodi E.T. Kovač i D.V. Čepur [ref. 3]. Oni tvrde da je koncentracija ravnotežnih nosilaca nanelektrisanja nastalih fotogenerisanim daleko veća nego koncentracija

ravnotežnih nosilaca.

Oni takodje smatraju, da je objašnjenje zavisnosti vremena života τ nosilaca nanelektrisanja od jačine osvetljenosti E moguće na osnovu modela energetskih nivoa koji je predložio već spomenuti autoritet za fotoprovodnost Rouz [ref. 3].

Razmatra se slučaj kada je koncentracija neravnotežnih pobudjenih nosilaca nanelektrisanja mnogo manja nego koncentracija centara rekombinacije i za elektrone i za šupljine.

TABELA 5.12.3.

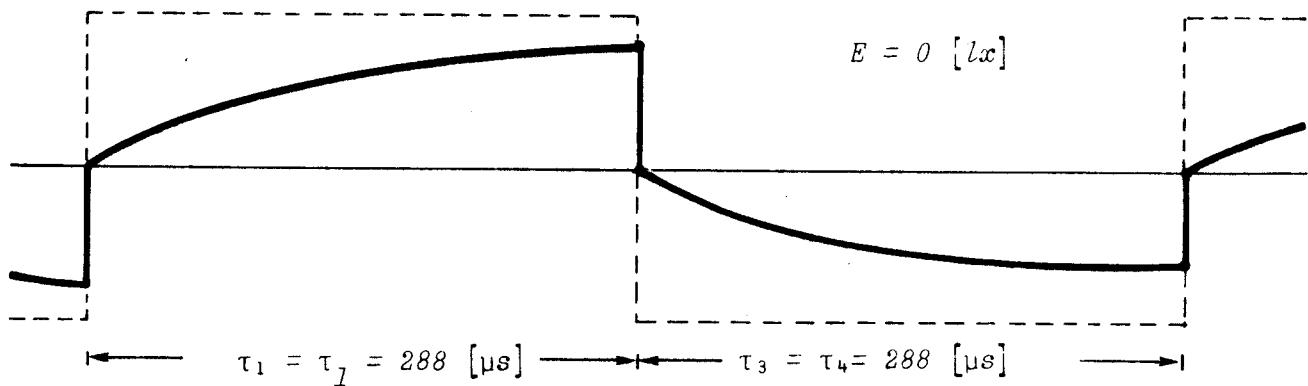
red. broj	E [lx]	$\tau_1 = \tau_3$ [μs]	$\tau_2 = \tau_4$ [μs]
1	0	288	≈ 0
2	0,17	248	40
3	0,35	216	72
4	0,7	184	104
5	2,8	152	136
6	4	128	160
7	5,5	88	200
8	15	48	240
9	1400	≈ 0	≈ 288

Efikasni preseci centara rekombinacije za elektrone je S_n , a za šupljine S_p . Brzina gubodnih nosilaca nanelektrisanja je V . Energetska šema nivoa sa rekombinacionim centrima jednoga tipa, po Rouzu, je prikazana na slici 5.12.5.

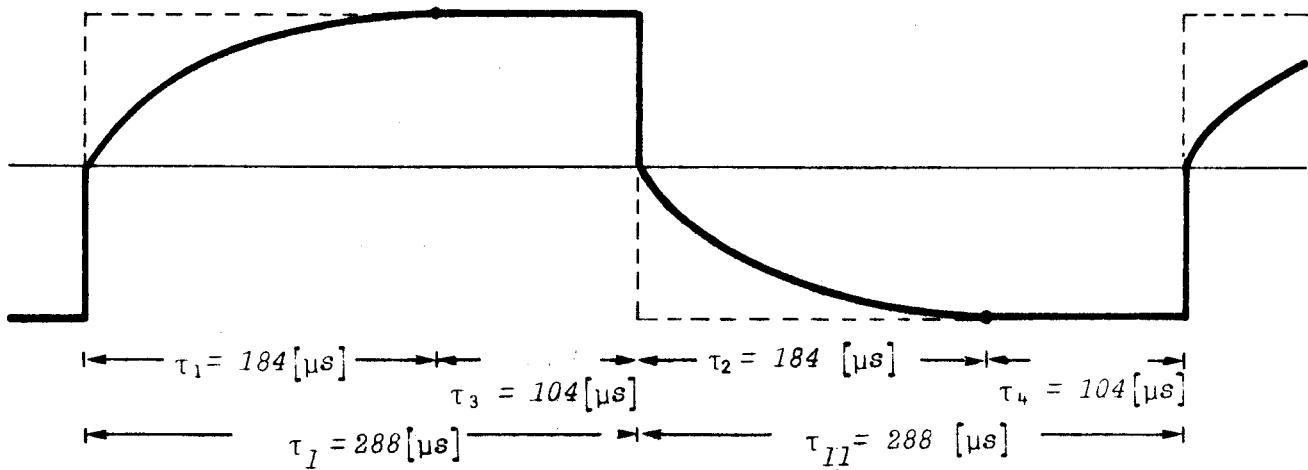
Vreme života elektrona τ_n je već jednom spomenuto i iznosi:

granična frekvencija $F_g = 1800 \text{ [Hz]}$ ulazni napon $U = 20 \text{ [V]}$
 vremenska baza $B = 40 \text{ [\mu s/cm]}$ osetljivost osciloskopa $s \text{ [V/cm]}$
 period $T = 576 \text{ [\mu s]}$

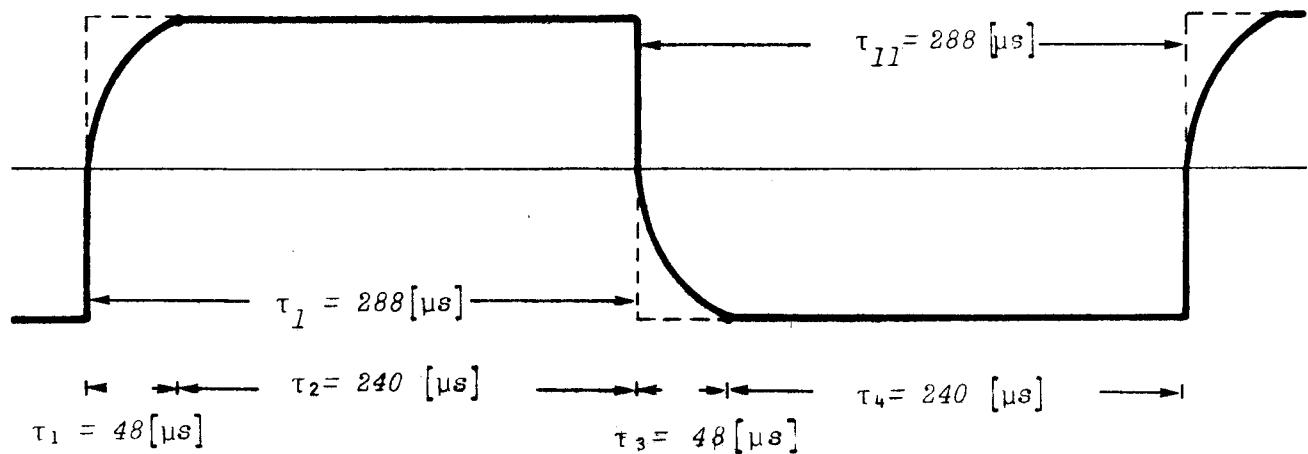
A.



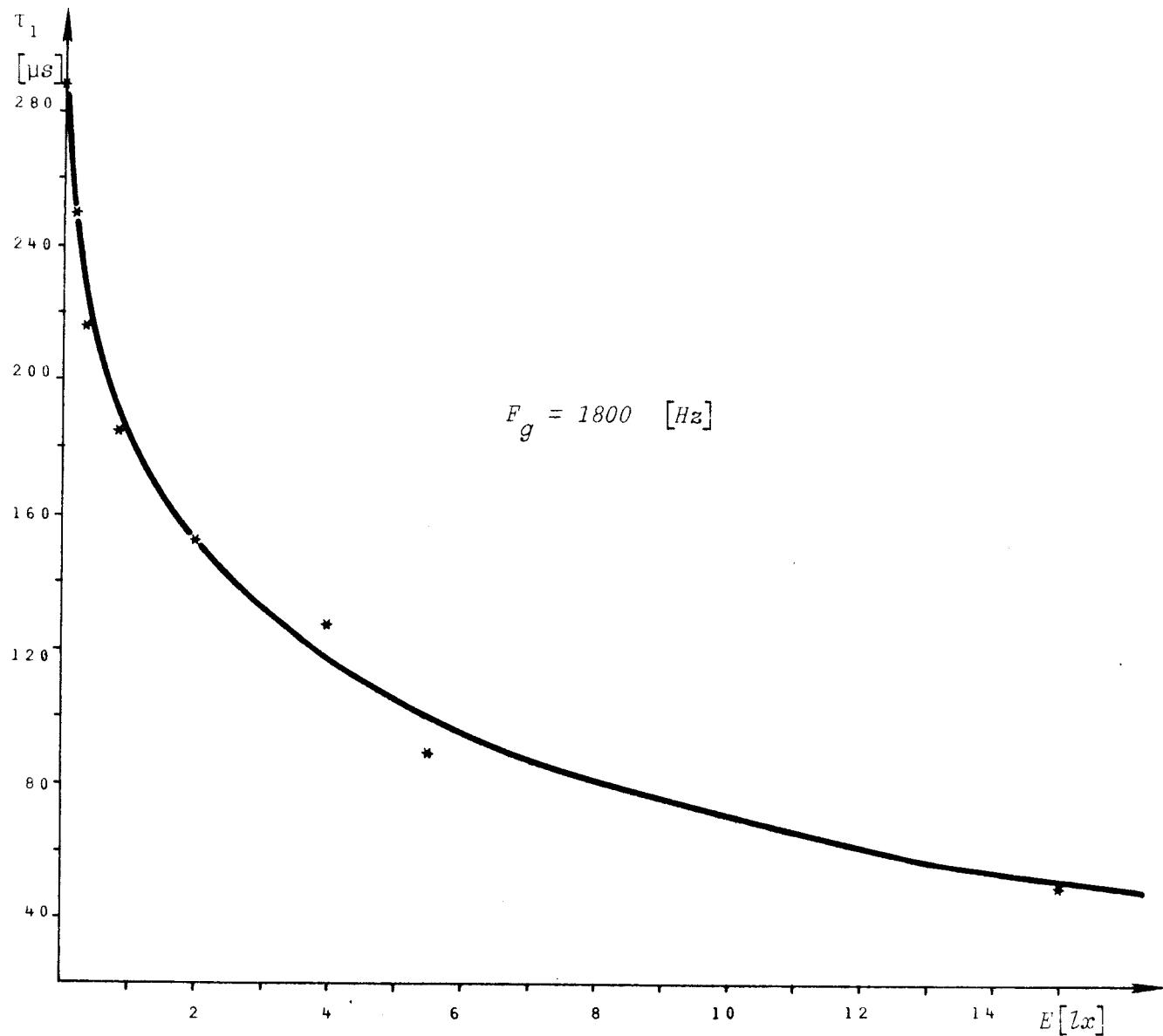
B. $E = 0,7 \text{ [lx]}$ $F_g = 1800 \text{ [Hz]}$ $T = 576 \text{ [\mu s]}$ $U = 20 \text{ [V]}$



C. $E = 15 \text{ [lx]}$ $F_g = 1800 \text{ [Hz]}$ $T = 576 \text{ [\mu s]}$ $U = 20 \text{ [V]}$



Slika 5.12.2.



Slika 5.12.4.

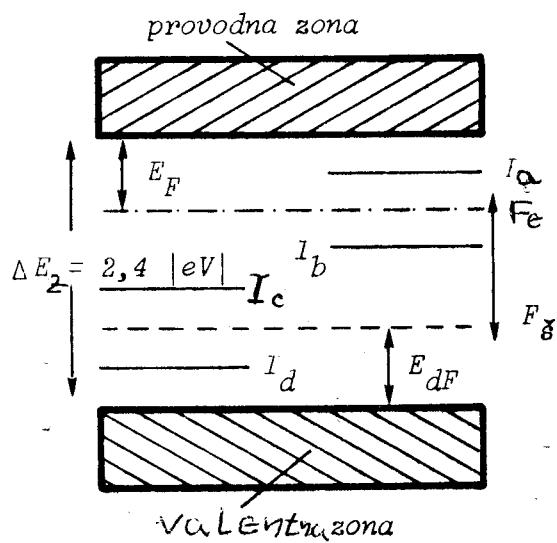
$$\tau_n = \frac{1}{vs_n [(N_{Ib} - n_{Ib}) + (N_{Ic} - n_{Ic})]} \quad (5.12.6.)$$

Vreme života šupljina je:

$$\tau_p = \frac{1}{v s_p n_r} \quad (5.12.7.)$$

$(N_{Ib} - n_{Ib})$ - opšti broj nezauzetih centara na nivou I_b

$(N_{Ic} - n_{Ic})$ - opšti broj nezauzetih centara na nivou I_c



E_F - energetski položaj Fermijevog nivoa za elektrone

I_a - nivo zamki, elektrona, akceptora

I_b - rekombinacioni nivo

I_c - rekombinacioni nivo

F_e - Fermijev nivo za elektrone

F_g - Fermijev (demarkacioni) nivo za šupljine

I_d - nivo donora (zamke za šupljine)

E_{df} - energetsko rastojanje do kvazinivoa Fermija za šupljine

$\Delta E_z = 2,4 \text{ [eV]} \text{ Širina zabranjene zone}$

Slika 5.12.5.

$$n_r = n_{Ib} + n_{Ic} \quad (5.12.8)$$

n_r - Opšti broj zauzetih (rekombinovanih) centara rekombinacije, koji se nalaze na nivoima izmedju nivoa Fermija za elektrone i demarkacionog (Fermi-nivoa) za šupljine.

OBJAŠNJENJE OPADANJA VREMENA ŽIVOTA τ NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI OSVETLJENOSTI E

Pri povećanju jačine osvetljenosti E Fermijev nivo za elektrone se približava provodnoj zoni, a demarkacioni nivo (Fermijev nivo za šupljine) se približava valentnoj zoni.

Akceptorski nivo I_a postaje nivo rekombinacije za elketrone, a donorski nivo I_d postaje nivo rekombinacije za šupljine.

Vreme života nosilaca naelektrisanja se smanjuje zbog povećane rekombinacije, i ako je fotogenerisanje nosilaca naelektrisanja veliko. Fotogenerisanje nosilaca naelektrisanja se povećava sa povećanjem jačine osvetljenosti E .

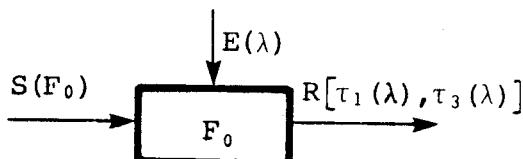
Ako se dalje povećava nivo koncentracije nosilaca naelektrisanja, nivo rekombinacije ostaje konstantan, a vreme života nosilaca naelektrisanja se dalje neznatno menja i teži konstanti, što će se videti iz narednog eksperimenta.
(Ступельман [ref. 3]).

U narednom eksperimentu će se ispitivati vreme života nosilaca naelektrisanja u funkciji monohromatske svetlosti E_λ .

5.13. VREME ŽIVOTA NOSILACA NAELEKTRISANJA U FUNKCIJI JAČINE MONOHROMATSKE SVETLOSTI

Cilj ovog eksperimenta je da utvrди ponašanje vremena uspostavljanja τ_1 i vremena opadanja τ_3 stacionarne provodnosti u funkciji jačine monohromatske osvetljenosti E_λ kod CdS uzorka.

Ovaj eksperiment je tipa, kao što je to šematski predstavljeno na slici (5.13.1.).



Slika 5.13.1.

Zamračenom uzorku je dovedena granična frekvencija od $f_g = 1800$ [Hz]. Period granične frekvencije je bio $T = 576$ [μs]. Vreme uspostavljanja τ_1 i vreme opadanja τ_3 do stacionarne provodnosti bilo je isto i iznosilo je $\tau_1 = \tau_3 = 288$ [μs].

Tako pripremljen uzorak je osvetljavan monohromatskom svetlošću različite jačine E , a na osciloskopu je mjerena promena vremena uspostavljanja τ_1 i opadanja τ_3 u funkciji jačine monohromatske svjetlosti E_x .

Monohromatska svjetlost je dobijena filtriranjem pomoću filtara firme "Zeiss".

Pored vremena života nosilaca nanelektrisanja u ovom eksperimentu su komparativnom metodom mereni i odgovarajući naponski foto-frekventni odgovori. Ovi naponi su poslužili za procenu fotoprovodnosti CdS uzorka i promenu fotootpornosti u funkciji osvetljenosti E .

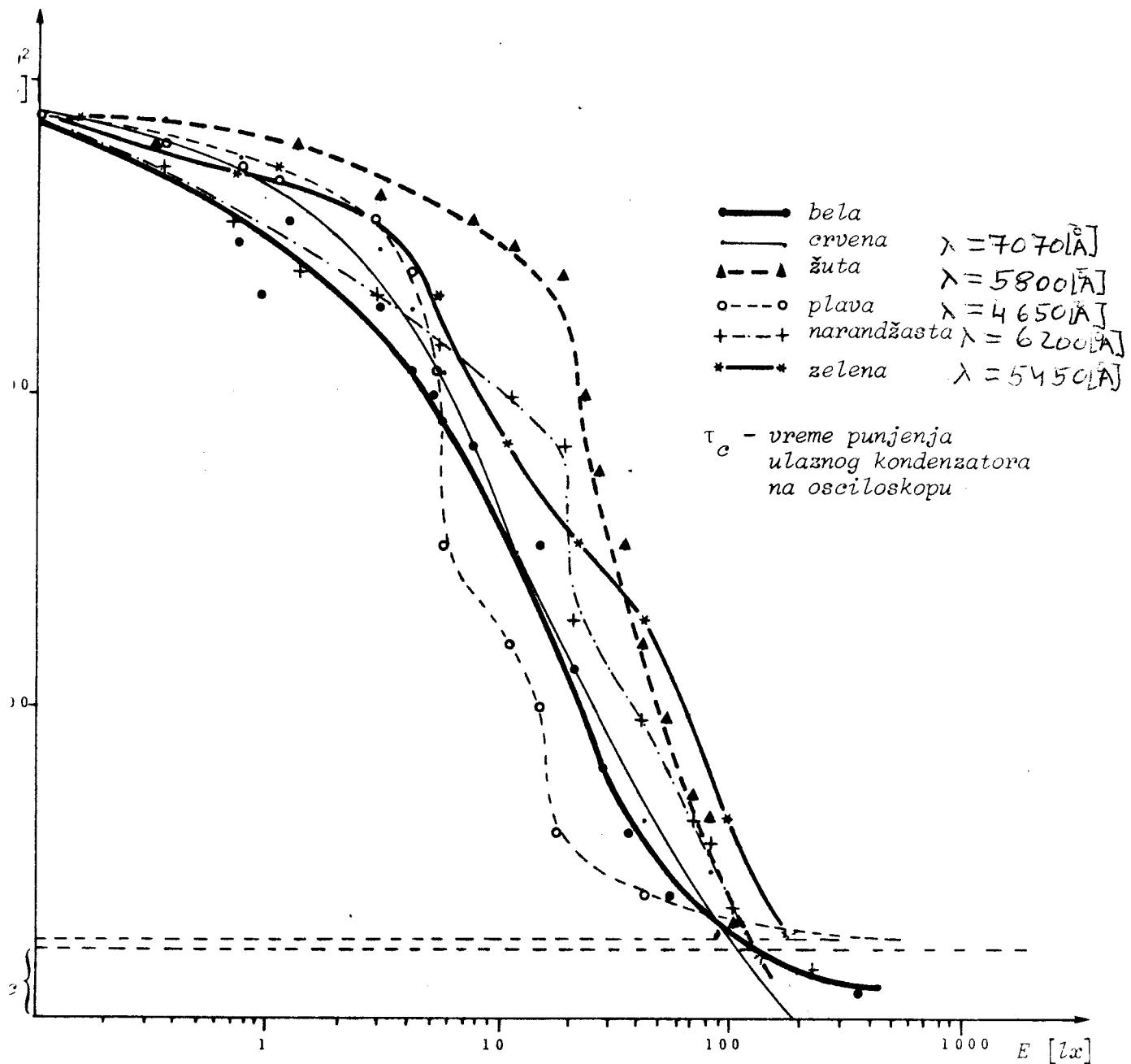
A. Prvo je ispitivanje izvršeno sa belom svetlošću. Povećanjem jačine osvetljenosti uzorka sa belom svetlošću u intervalu od $E = (0 \div 1400)$ [lx] vreme uspostavljanja τ_1 i padanja τ_2 se smanjilo sa $\tau_1 = \tau_2 = 288$ [μs] na $\tau_1 \approx \tau_2 \approx 0$ [s]. Treba naglasiti samo to da se τ_1 i τ_2 ne smanjuju na nulu, već da imaju konačno malu vrednost, koja zalazi u granice greške merenja. Ulazni napon je bio $U = 1$ [V].

Rezultati merenja su sredjeni u tabeli 5.13.3. i predstavljeni grafički kumulativnim grafikonom na slici (5.13.2.).

B. Drugo merenje je izvršeno sa crvenom svetlošću talasne dužine $\lambda = 7040$ [\AA]. Povećanjem jačine osvetljenosti od $E = (0 \div 175)$ [lx] vreme nosilaca nanelektrisanja teži nuli. Ulazni napon je tokom merenja bio $U = 4$ [V].

Rezultati merenja su prikazani grafički na slici (5.13.2.).

C. Merenje je izvršeno, takođe, i sa plavom svetlo-



Slika 5.13.2.

šću talasne dužine $\lambda = 4650 \text{\AA}$. Promenom jačine osvetljenonosti uzorka u intervalu $E = (0 \div 44) \text{lx}$ vreme uspostavljanja i opadanja se smanjilo sa $\tau = 288 \text{\mu s}$ na $\tau = 40 \text{\mu s}$. Ulažni napon je bio $U = 3,2 \text{V}$.

Rezultati merenja predstavljeni su grafički na slici (5.13.2.).

D. Merenje je vršeno i sa zelenom svetlošću talasne dužine $\lambda = 5450 \text{ [Å]}$.

Promenom jačine osvetljenosti uzorka u intervalu $E = (0 \div 234) [\text{lx}]$, vreme života nosilaca nanelektrisanja τ_3 se promenilo od $\tau_3 = 288 \text{ [\mu s]}$ do $\tau_3 = 16 \text{ [\mu s]}$. Ulazni četvrtasti naponski impuls je imao vrednost $U = 3,2 \text{ [V]}$.

Rezultati merenja su sredjeni u tabeli 5.13.4. i predstavljeni grafički kumulativnim grafikonom na slici 5.13.2.

F. Takodje je izvršeno merenje i za žutu svetlost talasne dužine $\lambda = 5800 \text{ [\AA]}$.

Promenom jačine osvetljenosti uzorka u intervalu od $E = (0 \div 107,3) [\text{lx}]$ vreme života nosilaca nanelektrisanja u CdS uzorku se smanjilo sa $\tau_3 = 288 \text{ [\mu s]}$ na $\tau_3 = 32 \text{ [\mu s]}$. Ulazni četvrtasti impulsi su imali napon od $U = 4 \text{ [V]}$.

Rezultati merenja za žutu svetlost dati su grafički na kumulativnom grafikonu (slika 5.13.2.).

G. Na kraju je izvršeno merenje i za narandžastu svetlost talasne dužine $\lambda = 6200 \text{ [\AA]}$.

Promenom jačine osvetljenosti uzorka u intervalu od $E = (0 \div 156) [\text{lx}]$, vreme života nosilaca nanelektrisanja $\tau_1 = \tau_3$ se smanjilo sa $\tau_3 = 288 \text{ [\mu s]}$ na $\tau_3 = 20 \text{ [\mu s]}$. Ulazni napon četvrtastih impulsa je bio $U = 4 \text{ [V]}$.

Rezultati merenja za narandžastu svetlost dati su grafički na kumulativnom grafikonu (slika 5.13.2.).

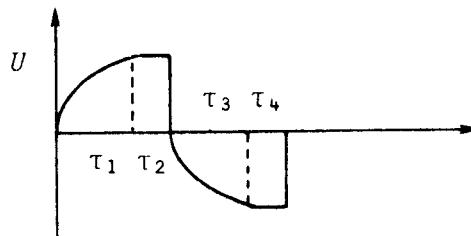
KOMENTAR KUMULATIVNOG GRAFIKONA (5.13.2.)

Za sve talasne dužine fotopobudne svetlosti, kojom se osvetjava CdS uzorak, vreme života opada eksponencijalno u funkciji jačine osvetljenosti E .

TABELA 5.13.3.

bela svetlost

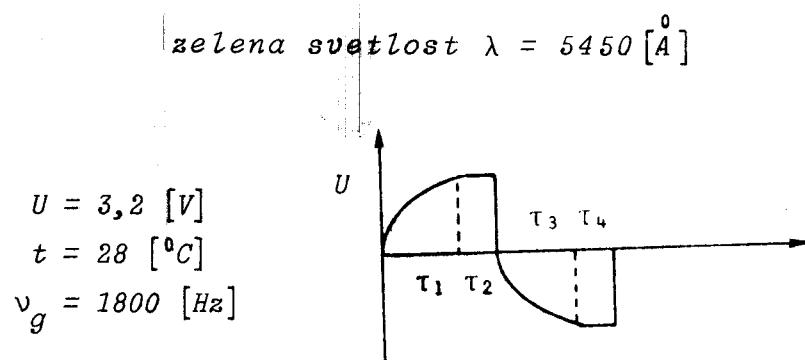
$$\begin{aligned} U &= 1 \text{ [V]} \\ t &= 28 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \\ v_g &= 1800 \text{ [Hz]} \end{aligned}$$



broj merenja	E [lx]	τ_1 [μs] uspostav.	τ_2 [μs] trajanje	τ_3 [μs] padanje	τ_4 [μs] trajanje	U_2 [V] $R = 11,5M$	U_1 [V] foto-otp.
1	0	288	≈ 0	288	≈ 0	0,02	0,98
2	0,7	248	40	248	40	0,07	0,93
3	0,93	232	56	232	56	0,1	0,9
4	2,8	228	60	228	60	0,15	0,85
5	3,7	208	72	208	40	0,2	0,8
6	4,67	200	88	200	88	0,25	0,75
7	5,5	192	96	176	112	0,31	0,69
8	7,5	184	104	160	128	0,52	0,48
9	14,7	152	136	152	136	0,58	0,42
10	22	112	176	120	168	0,66	0,36
11	29,35	80	208	80	208	0,8	0,2
12	36,6	60	224	64	224	0,85	0,15
13	58,6	40	248	40	248	-	-
14	88	28	260	24	264	0,9	0,1
15	234	16	272	16	272	-	-
16	350	8	280	8	280	≈ 1	≈ 0
17	1400	≈ 0	≈ 288	0	288	-	-

Vreme života nosilaca nanelektrisanja najviše opada pri jačini osvetljenosti uzorka u intervalu od $E = (0 \div 4)$ [lx] i kreće se od $\tau = (300 \div 250)$ [μs].

TABELA 5.13.4.



broj merenja	E [lx]	τ_1 [μs] uspostavljen.	τ_2 [μs] trajanje	τ_3 [μs] opadanje	τ_4 [μs] trajanje	U_2 [V]	U_1 [V] foto-otpor
1	0	288	≈0	288	0	≈0	≈3,2
2	0,7	272	16	272	16	0,24	2,96
3	1,4	272	16	264	24	-	-
4	2,8	256	32	256	32	0,64	2,56
5	5,5	232	56	232	56	1	2,2
6	11	184	116	192	96	1,5	1,7
7	22	152	136	160	128	1,9	1,3
8	44	128	180	108	180	2,4	0,8
9	107,3	64	224	64	224	2,5	0,7
10	175	28	260	28	260	2,7	0,5
11	234	16	272	16	272	2,9	0,3

Pri osvetljenosti uzorka od oko $E = 4 \text{ [lx]}$ krive menjaju nagib i imaju "kolena".

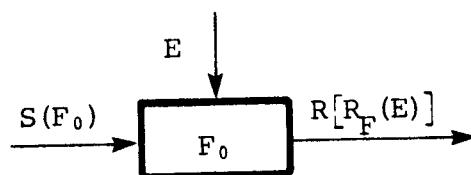
U intervalu jačine osvetljenosti $E = (10 \div 100) \text{ [lx]}$ vreme života se smanjuje od $\tau = 200 \text{ [μs]}$ i preko $\tau = 40 \text{ [μs]}$ teži nuli.

Vreme života nosilaca nanelektrisanja pri žutoj pobudnoj svetlosti (sve do $E = 40 \text{ [μx]}$) je najveće, a pri plavoj pobudnoj svetlosti je najmanje.

U intervalu od $E = (40 \div 200) [\text{lx}]$ najveće vreme života izaziva zelena pobudna svetlost talasne dužine $\lambda_{Im} = 5450 [\text{\AA}]$. Poznato je iz spektralnih karakteristika da je maksimum spektralne fotoprovodnosti na $\lambda = 5060 [\text{\AA}]$ (odeljak 5.6.).

5.14. FOTOOTPOR R_F U FUNKCIJI OSVETLJENOSTI E

Ovaj eksperiment je tipa, kao što je to grafički predstavljeno na slici 5.14.1.



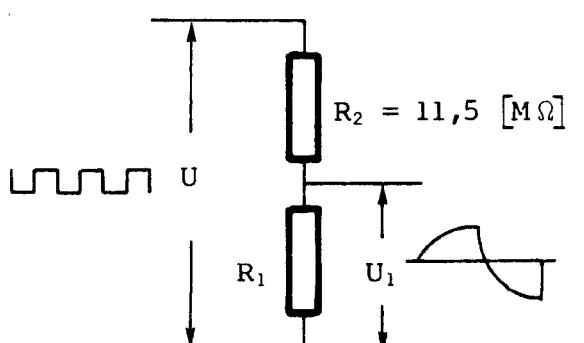
Slika 5.14.1.

Ispitivanje vremena života
ispitivanje vremena života nosilaca nanelektrisanja u funkciji osvetljenosti E , dalo je kao rezultat informaciju o opadanju fotootpornosti CdS u funkciji osvetljenosti.

Metod merenja velikih otpora komparativnom metodom je već izložen u metodici merenja i odeljku (4.4.).

Osciloskopom je meren ulazni napon U sa generatora četvrtastih impulsa i fotonaponski odgovor CdS uzorka.

Potenciometarska jednačina glasi:



$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (5.14.3.)$$

$$I = \frac{U_1}{R_1}$$

$$R_1 = \frac{U_1}{Iz} \cdot R_2 \quad (5.14.4.)$$

Slika 5.14.2.

ili

$$R_1 = \frac{U_1}{U_2} R_2 \quad (5.14.5.)$$

gde je $U_2 = U - U_1$ i $R_1 = 11,5 \text{ [M}\Omega\text{]}$.

Pri ovome je pretpostavljeno da kroz ulazni otpor (slika 5.14.2.) osciloskopa $R = 20 \text{ [M}\Omega\text{]}$ teče zanemarljivo mala struja.

CdS uzorak ORP 60 pokazao je velik taman otpor reda $R_t = 5,6 \cdot 10^8 \text{ [\Omega]}$. Povećanjem jačine osvetljenosti E , povećava se i fotoprovodnost σ_F , što je dovelo do naglog smanjenja fotootpornosti

$$R_1 = \frac{1}{n \cdot q \cdot \mu} \cdot \frac{\lambda}{s} = \frac{1}{\sigma_F} \cdot \frac{\lambda}{s} \quad (5.14.6.)$$

Apsorpcijom fotona u uzorku je koncentracija eksitovanih nosilaca nanelektrisanja postala daleko veća, nego koncentracija ravnotežnih nosilaca nanelektrisanja [ref. 3].

Kao što je poznato, merenje napona U_1 i U_2 je izvršeno za belu svetlost i monohromatske svetlosti (crvenu $\lambda = 6200 \text{ [Å]}$, žutu $\lambda = 5800 \text{ [Å]}$, zelenu $\lambda = 5480 \text{ [Å]}$, plavu $\lambda = 4700 \text{ [Å]}$ i narandžastu $\lambda = 6200 \text{ [Å]}$).

Rezultati merenja za belo i zeleno osvetljavanje dati su u tabelama 5.14.7. i 5.14.8. i predstavljeni kumulativnim grafikonom na slici (5.14.9.). Sa kumulativnog grafikona se vidi da fotootpornost eksponencijalno opada u funkciji osvetljenosti E , svake od pomenutih svetlosti, kao što to i navodi proizvodjač "Philips" u svom katalogu [ref. 13].

Cilj ispitivanja sa intenzitetima različitih talasnih dužina je da se vidi koja od tih spektralnih svetlosti najviše utiče na pad fotootpornosti i povećanje fotoprovodnosti. Sa kumulativnog grafikona se vidi da je to plava svetlost talasne dužine $\lambda = 4700 \text{ [Å]}$, sa koeficijentom opadanja od $\alpha = 0,761$, dok najmanji koeficijent od $\alpha = 0,278$ ima zelenu svetlost talasne dužine $\lambda = 5480 \text{ [Å]}$.

TABELA 5.14.7.

bel a svetlost

E [lx]	U_2 [V]	U_1 [V]	R_1 [$M \Omega$]
0	0,02	0,98	563,5
0,7	0,07	0,93	152,78
0,93	0,1	0,9	103,5
2,8	0,15	0,83	65,17
3,7	0,2	0,8	46
4,67	0,25	0,75	34,5
5,5	0,31	0,69	25,597
7,5	0,52	0,48	10,62
14,7	0,58	0,42	8,37
22	0,66	0,36	6,27
29,35	0,8	0,2	2,875
36,6	0,85	0,15	2,03
88	0,9	0,1	1,27
350	0,98	0,02	0,235

TABELA 5.14.8.

zelena svetlost

$\lambda = (5450 \div 5480) \text{ } [\text{\AA}]$			
E [lx]	U_2 [V]	U_1 [V]	R_1 [$M \Omega$]
0	0,065	3,2	563,5
0,7	0,24	2,96	140,88
2,8	0,64	2,56	46
5,5	1	2,2	25,3
11	1,5	1,7	10,15
22	1,9	1,3	7,87
44	2,4	0,8	3,28
107,3	2,5	0,7	3,22
175	2,7	0,5	2,13
234	2,9	0,3	1,19

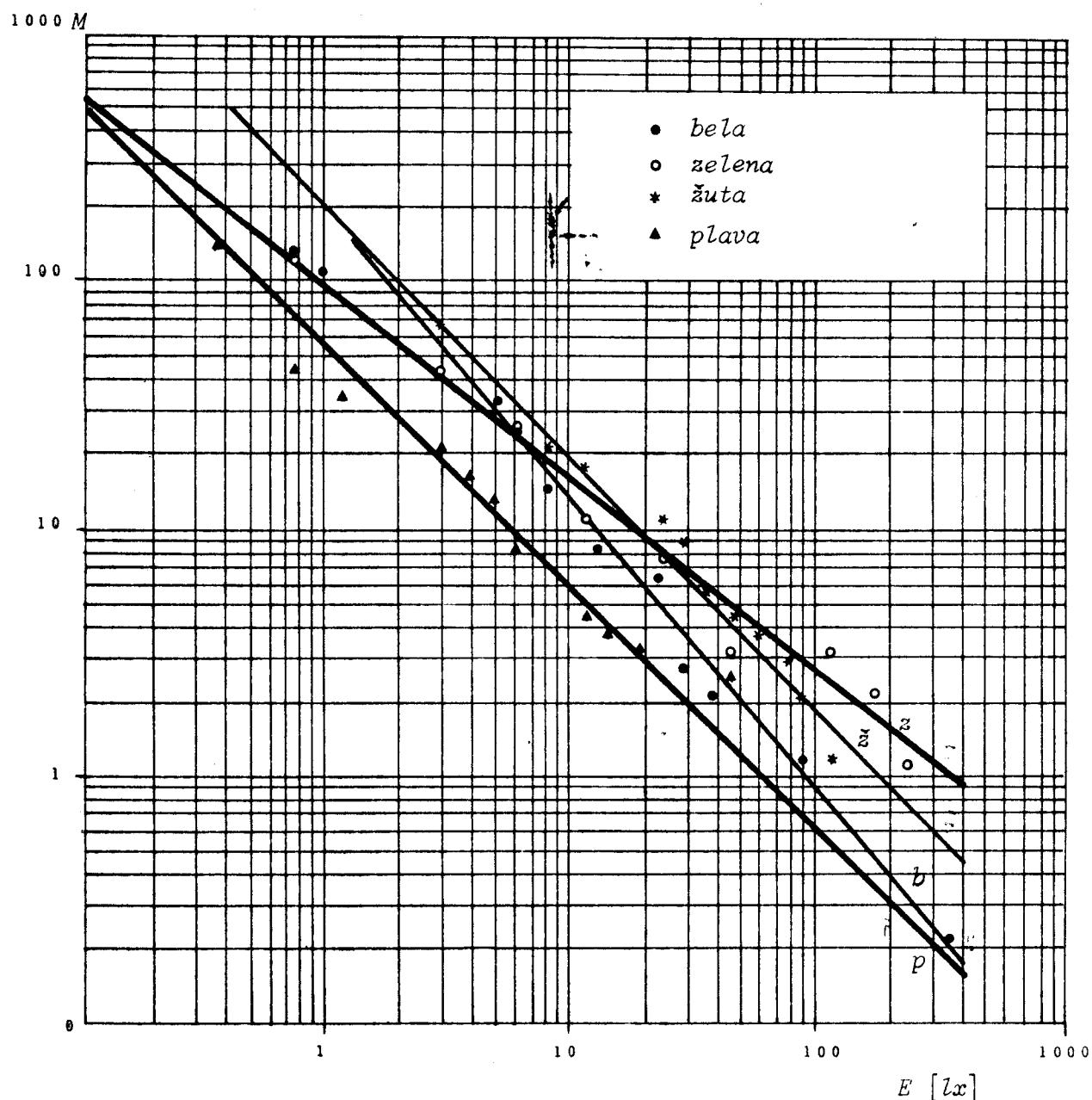
Ovaj koeficijent opadanja fotootporna CdS u funkciji osvetljenosti E odnosi se na relaciju:

$$\log R_E = \log R_O (1 - \alpha \log(E/E_O)) \quad (5.14.10.)$$

gde je:

$$\alpha = \frac{1 - \log(R_E/R_O)}{\log(E/E_O)} \quad (5.14.11.)$$

U tabelama 5.14.13. i 5.14.14. dati su eksponent-cijalni koeficijenti opadanja u funkciji osvetljenosti E_λ za pojedine spektralne izvore i za belu svetlost.



plava - $\lambda = 4700 \text{ } \overset{\circ}{\text{A}}$
 zelena - $\lambda = 5400 \text{ } \overset{\circ}{\text{A}}$
 žuta - $\lambda = 5700 \text{ } \overset{\circ}{\text{A}}$

Slika 5.14.6.

TABELA 5.14.13.

λ [Å]	4700 plava	5480 zelena	5800 žuta	6200 narandž.	bela svetlost
R_0 [MΩ] $E_0 = 1 \text{ lx}$	200	90	200	150	100
R_E [MΩ] $E = 100 \text{ lx}$	0,6	2,5	1,5	1,5	0,8
α	0,761	0,278	0,565	0,5	0,548

TABELA 5.14.14.

λ [Å]	4700 plava	5480 zelena	5800 žuta	6200 narandž.	bela svetlost
R_T [MΩ] $E = 0 \text{ lx}$	563,5	563,5	563,5	563,5	563,5
R_F [MΩ] $E = 100 \text{ lx}$	0,6	2,5	1,5	1,50	0,8
$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_T - R_F}{R_F}$	938,33	224,4	374,7	374,7	703,38

Svaki fotoootpornik karakteriše relativna promena otpora:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_T - R_F}{R_F} \quad (5.14.12.)$$

gde je: R_T - otpor zatamnjenog CdS uzorka ($R_T = 563 \text{ [M}\Omega\text{]}$)
 R_F - fotoootpor osvetljenog uzorka

U tabeli 5.14.14. date su relativne promene foto-

otpora za razne spektralne izvore i belu svetlost.

Iz tabele 5.14.14. se vidi da se za promenu jačine osvetljenosti $E = (0 \div 100) [\text{lx}]$ najviše promeni fotoootpor pod dejstvom plave svetlosti $\lambda = 4700 [\text{\AA}]$ i to za 938,33 puta. Za iste uslove se najmanje promeni fotoootpor Cds uzorka pod dejstvom zelene svetlosti $\lambda = 5480 [\text{\AA}]$ i to 224,4 puta.

VI

Z A K L J U Č A K

Namena ovog rada je da eksperimentalnim rezultatima doprinese rasvetljavanju fenomena fotoprovodnosti CdS uzorka ORP 60.

Na osnovu eksperimenata kojima su se ispitivale statičke fotoprovodne karakteristike uzorka, proizišli su rezultati koji će ovde biti sumirani.

- Za strujno-naponsku karakteristiku uzorka važi Omov zakon.
 - Luks-amperna karakteristika nije linearna.
 - Iz karakteristike tamne struje u funkciji temperature nadjene su energije termičke aktivacije sa energetskog nivoa zamki, koje su reda veličine $\Delta E = (0,01 \div 1) [\text{eV}]$.
 - Spektralne fotoprovodne karakteristike su dale rezultat za širinu zabranjene zone $\Delta E_{\text{CdS}} = 2,451 [\text{eV}]$.
 - Za odgovarajuće energije prelaza ($\Delta E_1 = 0,02 [\text{eV}]$ i $\Delta E_2 = 2,451 [\text{eV}]$) su nadjene i odgovarajuće Fermijevе verovatnoće nalaženja elektrona u dnu provodne zone $F_{(\Delta E_1, T)} = 0,3$ i $F_{(\Delta E_2, T)} = 10^{-41}$ na sobnoj temperaturi.
 - Verovatnoća nalaženja elektrona u dnu provodne zone raste sa porastom temperature.

Iz eksperimenata za dinamičke karakteristike CdS Uzorka, proizašli su sledeći rezultati:

- Granična frekvencija uzorka je $f_g = 1786 [\text{Hz}]$.

- Vreme života nosilaca nanelektrisanja je $\tau = 270$ [μs]; ono ne zavisi od temperature, a eksponencijalno opada u funkciji osvetljenosti E.

- Fotootpor uzorka eksponencijalno opada u funkciji osvetljenosti tako da se taj pad može predstaviti pravom u logaritamskom koordinatnom sistemu.

- Kapacitet uzorka je iznosio $C = 4$ [pF] i veoma brzo opada u funkciji osvetljenosti.

Ove fotoprovodne karakteristike CdS uzorka mogu doprineti boljem rasvetljavanju procesa fotoprovodnosti kod ovog kristala i ostalih fotoprovodnika.

CdS kao fotoprovodnik je našao veliku primenu u automatici i mernoj tehnici.

VII

LITERATURA

1. В.Ш. Ступельман, Г.А. Филаретов: "Полупроводниковые приборы", Изд. "Мир", Москва 1973.
2. Ф.Ј. Блатт: "Физика электронной проводимости в твердых телах", Изд. "Мир", Москва 1971.
3. "Полупроводниковая электроника", Кафедра физики полупроводников, Ужгород 1971.
4. М.С. Киреев: "Физика полупроводников", Изд. "Мир", Москва 1969.
5. "Физика и химия сложных полупроводников", Академия наук Молдавской ССР, Кишинев 1975.
6. "Диэлектрики и полупроводники", Научный сборник 5, Университет Киев 1974.
7. Ж. Панков: "Оптические процессы в полупроводниках", Изд. "Мир", Москва 1973.
8. С.В. Майоров: "Фотоэлектронные и термоэлектронные приборы и их применение", "Машиностроение", Москва 1973.
9. Wang: "Solid-state electronics", Universiti of California 1966.
10. Simon Larach: "Photoelectronic materials and devices", D. Van Nostrand Company, INC., Princeton 1965.
11. R.H. Tredgold: "Space Charge Conduction in Solids", Elsevier Publishing Comp., Amsterdam - London - New York 1966.
12. Donald Long "ENERGY BANDS IN SEMICONDUCTORS", Interscience Publishers, New York - London - Sydney 1968.
13. H.D. Schulz - Methke: "Photoelemente und kristallphotozellen", Jakob Schneider Verlag, Berlin 1955.

14. PHILIPS "Data Handbook", katalog br. 5, april 1968
i maj 1970.

15. Charles Kittel: "Uvod u fiziku čvrstog stanja",
"Savremena administracija", Beograd 1970.

16. Dr Slobodan Carić: "Uvod u fiziku čvrstog stanja"
II deo - praktikum, "Institut za fiziku PMF", Novi Sad 1977.

17. D.A. Tjapkin: "Elektronska fizika čvrstog tela" I
i II deo, "Elektrotehnički fakultet", Beograd 1963.

18. C.L. Hemenway, R.W. Henry, M. Caulton: "Fizička
elektronika", "Naučna knjiga", Beograd 1974.

19. Dr Miroslav Pavlov: "Elektronika" I i II deo,
"Prirodno-matematički fakultet", Novi Sad 1973.

20. "Mineralogija", "Vuk Karadžić", Beograd 1974.

21. V.M. Vučić: "Osnovna merenja u fizici", "Naučna
knjiga", Beograd 1967.

22. D.Janković, J.Janić, M.Pavlov: "Praktikum eksperimentalnih
vežbi iz fizike" I i II deo, "Univerzitet u Novom
Sadu", Novi Sad 1973.

23. B.Ribar, D.Petrović: "Praktikum eksperimentalnih
vežbi iz elektriciteta", "Univerzitet - PMF", Novi Sad 1975.

DIPLOMSKI RADOVI

24. A.Nahlovski: "Negativna fotoprovodljivost na tankim
kristalima organskih boja", "Institut za fiziku PMF-a", Novi
Sad 1972.

25. A.Rudić: "Fotoprovodne osobine kristal-violeta",
"Institut za fiziku PMF-a", Novi Sad 1976.

26. B.V. Ivanković: "Elektroluminescencija kristala i
osnovne karakteristike L.E.D. (svetlosno emitujućih) dioda",
"Institut za fiziku PMF-a", Novi Sad 1976.

LISTOVI I ČASOPISI

27. B.Mateić: "Fotootpornici I,II,III", Elektrotehničar

9 - 10, 11 - 12, (1972) i 1 - 2 (1973), "Tehnička knjiga"
Zagreb 1972/73.

28. B.Mateić: "Fotoreceptori I i II", "Radioamater"
1 i 2 (1975), "Tehnička knjiga", Beograd 1975.

