

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
*Nastavno-naučna grupa za fiziku*

*Kandidat: Aleksandar Rudić*

FOTOPROVODNE OSOBINE KRISTAL-VIOLETA  
- diplomski rad -

NOVI SAD

JANUAR  
1976.

Zahvaljujem najsrdačnije Dr. Slobodanu Cariću, vanrednom profesoru PMF, rukovodiocu laboratoriјe za fiziku čvrstog stanja i mentoru ovog rada na ukazanoj pomoći pri izboru teme i literature, kao i na korisnim savetima i primedbama u toku teorijske obrade i eksperimentalnog izvođenja ovog rada.

## SADRŽAJ

UVOD .....	1
1. FOTOPROVODLJIVOST .....	2
1.1 Fenomenološki opis fotoprovodljivosti .....	2
1.2 Teorija zona .....	3
1.3 Eksitonii .....	7
1.4 Elektronski prelazi .....	8
2. FAKTORI KOJI UTIČU NA POJAVU FOTOPROVODLJIVOSTI .....	11
2.1 Rekombinaciona kinetika u odsustvu zamki .....	11
2.2 Razlika izmedju nivoa zamki i rekombinacionih nivoa .....	12
2.3 Efekti zamki i korelacija sa zavisnošću fotostruje od intenziteta zračenja .....	13
2.4 Uticaj prostornog naelektrisanja .....	16
2.5 Uticaj sniženog pritiska i gasova na fotoprovodnike .....	16
3. SPECIFIČNOSTI U PROVODLJIVOSTI ORGANSKE BOJE	
KRISTAL-VIOLET .....	17
3.1 Vrsta uzorka i opšte osobine .....	17
3.2 Elektroprovodljivost niskomolekularnih organskih boja .....	19
3.3 Znak nocilaca tamne struje .....	20
3.4 Fotoprovodljivost niskomolekularnih organskih poluprovodnika .....	21
3.5 Znak nosilaca fotostruje .....	22
3.6 Negativna fotoprovodljivost .....	23
4. EKSPERIMENT .....	25
4.1 Uvod .....	25
4.2 Dobijanje uzorka .....	25
4.3 Spisak uredjaja i šeme merne grupe .....	29
4.4 Električna merenja za izračunavanje širine zabranjene zone .....	31
4.5 Električno optička fotometrijska merenja .....	33
4.6 Električno optička merenja. Spektralna karakteristika fotoodgovora .....	34
4.7 Apsorpciona merenja .....	35
4.8 Podloga .....	36
5. TUMAČENJE EKSPERIMENTALNIH PODATAKA .....	36
5.1 V-A karakteristika i fotoprovodljivost stakla kao podloge .....	36
5.2 Pozitivan fotoefekt amorfognog stanja .....	37
5.3 Poluprovodničke karakteristike kristal-violeta .....	37
5.4 Primarne karakteristike fotoprovodnika kristal-violeta .....	39
5.5 Sekundarne karakteristike fotoprovodnika kristal-violeta .....	40
5.6 Kumulativni grafik sekundarnih karakteristika .....	44
5.7 Pobudjivanje uzorka kristal-violeta četvrtastim impulsom velikog intenziteta .....	44
ZAKLJUČAK .....	45
LITERATURA .....	46
PRILOZI	

## U V O D

Pojava fotoprovodljivosti sastoji se u promeni provodljivosti  $\sigma$  pod dejstvom elektromagnetskih (svetlosnih) radijacija. Može da se očekuje da apsorbovana energija zračenja vrši promenu stanja nosilaca nadelektrisanja (elektrona, šupljina), pa se takva supstanca ponaša kao fotoprovodnik. U zavisnosti od toga da li provodljivost  $\sigma$  pod dejstvom svetlosti raste ili opada u odnosu na pomenuta svojstva uzorka u mraku, definiše se respektivno pozitivna  $+Δ\sigma$  ili negativna  $-Δ\sigma$  fotoprovodljivost. Ispitivanju znaka fotoprovodljivosti posvećeni su mnogi radovi.

Ideja vodilja za ovaj rad potiče iz diplomskog rada A. Nahlovski, čiji je cilj bio ispitivanje negativne fotoprovodljivosti na kristalima organskih boja. Organske boje spadaju u supstance koje intenzivno apsorbuju deo zračenja iz oblasti vidljivog spektra, a propuštaju ili reflektuju komplementarni deo istog spektra, zbog čega su intenzivno obojene, odakle im i ime potiče. Pokazano je da organske boje sa osobinama polufotoprovodnika mogu da budu negativno fotoprovodne ( $-Δ\sigma$ ). S obzirom na znak nosilaca nadelektrisanja organske boje mogu da budu poluprovodnici P-tipa, ovo su po pravilu kisele boje, te poluprovodnici N-tipa, po pravilu baze boje. Ispitivani uzorak, kristal violet je bazna organska boja, tj. poluprovodnik N-tipa.

Kako je pokazano da su organske boje naglašeno inertni fotoprovodnici, tj. da su pojave vezane za fotoprovodljivost takve da se stacionarna stanja mogu meriti posle dugog vremena, odlučeno je da se u analizu uzme kristal-violet, kao organska boja. U radu A. Nahlovski pokazano je da ova boja može da ima svojstva negativne fotoprovodljivosti ukoliko se na podlogu naneše bojenjem alkoholnim rastvorom ili rastvorom u destilovanoj vodi. U većem broju radova navedeno je da je kristal-violet fotoprovodnik, ali pozitivan ( $+Δ\sigma$ ). Neki radovi [13, 19] pokazuju, da se znak nosilaca fotostruje menja u zavisnosti od stanja površine uzorka kristal-violeta. U daljem tekstu ovog rada izložen je način dobijanja uzoraka korišćenih u eksperimentima.

Ukratko: uzorak dobijen naparavanjem ima "ogledalsku površinu" i amorfni karakter, a nosioci fotostruje su u ovom



slučaju elektroni [13,19]. Dejstvom pare rastvarača na takav uzorak dobija se površina polikristalnog karaktera, a nosioci fotostruje (kristal-violeta) u ovom slučaju su šupljine. Amorfni uzorak pokazao je pozitivnu ( $+\Delta\sigma$ ) fotoprovodljivost, a polikristalna površina istog uzorka negativnu ( $-\Delta\sigma$ ) fotoprovodljivost.

Cilj ovog rada je da dokaže tvrdjenje iz rada A. Nahlovski, zatim Пуцейко [13] i Terenin [19]. Dalja su ispitivanja vršena s ciljem da se utvrde primarne i sekundarne karakteristike [2] fotoprovodnika kristal-violeta nanesenog u tankom sloju u formi polikristalne površine. Ispitivanja su vršena prema sledećoj šemi:

A. Karakteristike poluprovodnika

- (a) Širina zabranjene zone
- (b) Volt-amperska karakteristika uzorka

B. Karakteristike fotoprovodnika

I - Primarne karakteristike - Zavisnost fotoodgovora od intenziteta upadnog zračenja.

- (a) Normalna fotoprovodljivost  $i_f = f(I)$
- (b) Anomalna fotoprovodljivost  $i_f \neq f(I)$

II - Sekundarne karakteristike - Zavisnost fotoodgovora od talasne dužine upadnog zračenja.

## I. FOTOPROVODLJIVOST

### 1.1 Fenomenološki opis fotoprovodljivosti [4,10]

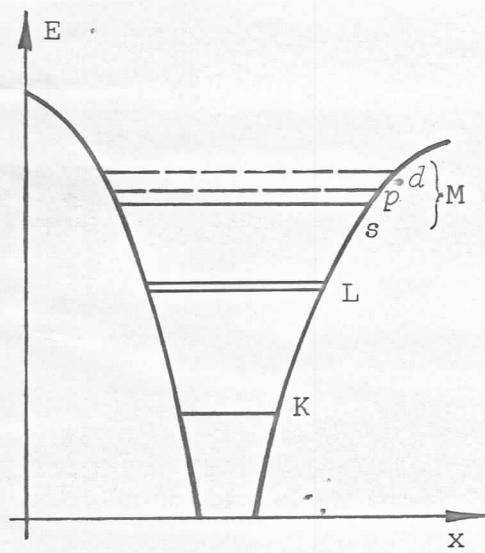
Pod pojmom fotoprovodljivosti podrazumeva se promena provodljivosti  $\sigma$  nekog materijala pod dejstvom svetlosti. Uzrok ove promene je apsorpcija fotona pri interakciji foton - elektron, a pri čemu elektron ne napušta uzorak. Ovakva se pojava naziva unutrašnji fotoefekat. Pri osvetljavanju uzorka nastaju pobudjeni slobodni i pokretni nosioci nanelektrisanja, elektroni i šupljine koji sačinjavaju fotostruju. Energija svetlosti koja ovaj efekat izaziva obično se izražava preko odgovarajuće talasne dužine. Najveća talasna dužina pri kojoj dejstvo svetlosti započinje naziva se apsorpciona ivica. Može se, prema tome, razlikovati struja, odnosno provodljivost uzorka u mraku i iste veličine u slučaju osvetljenog uzorka. Za uzorak u mraku definiše se tamna struja, a za osvetljen uzorak fotostruja.

Prema znaku slobodnih nosilaca nanelektrisanja poluprovodnici mogu da budu N-tipa (slobodni nosioci su elektroni) i P-tipa (slobodni nosioci su šupljine). Čiste poluprovodnike (i-tip; *intrinsic* - bez primesa) karakteriše sopstvena provodljivost, a poluprovodnike sa primesama (n ili p-tipa) karakteriše provodljivost usled primesa (primesna provodljivost).

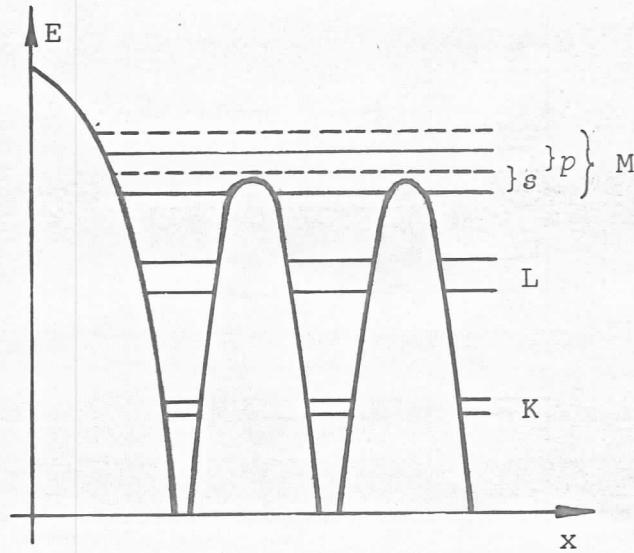
### 1.2 Teorija zona [4,9]

Skoro svi električni i optički efekti kod čvrstih tela mogu kvalitativno da se objasne pomoću teorije zona, tj. zonskom strukturom koja predstavlja osnovu fizike čvrstog stanja. Prema tome, teorija zona može da se primeni i na fenomen fotoprovodljivosti u poluprovodnicima.

U čvrstom telu - kristalu dolazi do zbližavanja susednih atoma. Kvantnomehaničke sile razmene (Van-Der Waalsove sile, elektrostatičke sile privlačenja) počinju da deluju i tada cepaju oštret energijske nivoe elektrona kod izolovanog atoma (sl.1.1) u energijske zone u čvrstom telu (sl.1.2).



Sl. 1.1.



Sl. 1.2.

Dijagrami pokazuju cepanje atomskih sopstvenih vrednosti (eigen-value). Na ovaj način nastaju područja širih intervala energije. Elektroni, koji se nalaze bliže jezgru, svoje energijsko stanje bitno ne menjaju, oni, prema tome nisu podložni uticaju susednih atoma, odnosno kristalnog polja. Cepanje

nivoa u zone uočljivije je kod spoljašnjih elektrona.

Kvantnomehanička interpretacija elektrona [10] je fermionska. Elektroni se, prema tome, pokoravaju Paulijevom principu isključivosti i saglasno ovome zauzimaju strogo definisana kvantna stanja. Stanja u kojima se elektroni mogu naći nazivaju se dozvoljene zone, a stanja u kojima ih nema, zabranjene zone. Najviša popunjena zona je valentna zona. Iznad valentne zone (energijski razmagnuta) nalazi se provodna zona, a između njih se nalazi zabranjena zona (sl.1.3) širine  $\Delta E$ .



Sl. 1.3.

Teorija slobodnih elektrona u metalima uvodi i pojam Fermi-nivoa (prema ovoj teoriji gas elektrona u metalu pokrava se Fermi-Dirac-ovoj statistici). Na  $T = 0^{\circ}\text{K}$  elektroni zauzimaju najniža moguća kvantna stanja, pa im je energija unutar intervala od neke minimalne vrednosti do maksimalne vrednosti  $E_F$  tj. Fermi-energije. Fermijev nivo predstavlja onaj nivo energije na kojem je verovatnoća nalaženja elektrona jednaka  $1/2$ .

Osobine čistih poluprovodnika kao i poluprovodnika sa primesama mogu da budu sada detaljnije objasnjene.

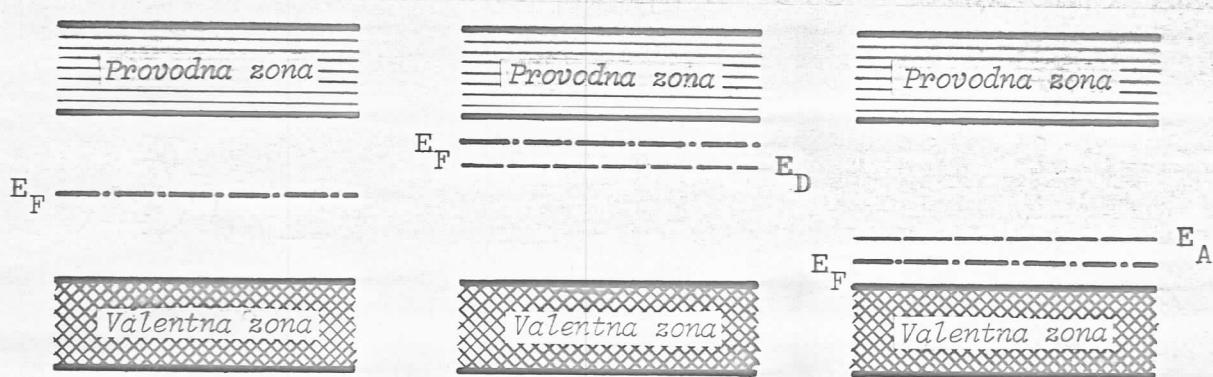
Čisti poluprovodnici (i-tip): Sačinjeni su isključivo od atoma-molekula, ukratko motiva datog materijala. Kristalna rešetka ne sadrži nečistoće, a kristal ima minimum defekata - ovo je idealan slučaj (sl.1.4)

Poluprovodnici N-tipa: Pripadaju poluprovodnicima sa primesama. Ova podvrsta poseduje tzv. donorski nivo koji se nalazi u blizini provodne zone. Dovoljna je mala energija eksitaci-

je pa da elektron napusti ovaj nivo i predje u provodnu zonu (sl.1.5).

Poluprovodnici P-tipa: Pripadaju takodje poluprovodnicima sa prime-sama, a poseduju tzv. akceptorski nivo koji se nalazi u blizini valentne zone. Ovaj nivo ima više nepotpunjenih kvantnih stanja koja mogu da prime elektron (sl.1.6).

(za obe vrste poluprovodnika sa primesama dugotalasna granica, tj. prag fotoprovodljivosti odredjen je energijom aktivacije date primese).



Sl. 1.4.

Sl. 1.5.

Sl. 1.6.

Provodljivosti uzoraka u mraku date su relacijama:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad \text{za čisti poluprovodnik} \quad 1.1$$

$$\sigma = e(n \cdot \mu_n) \quad \text{za N-tip} \quad 1.2$$

$$\sigma = e(p \cdot \mu_p) \quad \text{za P-tip} \quad 1.3$$

gde su veličine  $\mu_n$  i  $\mu_p$  pokretljivosti datih nosilaca nanelektrisanja i predstavljaju konstante za izabrani materijal, a veličine  $n$  i  $p$  predstavljaju koncentracije odgovarajućih nosilaca. U opštem slučaju promene pokretljivosti u datim uslovima su zanemarljive.

U slučajevima fotootpora sa homogenom raspodelom nosilaca u kristalu (ravnomerna raspodela  $n$  i  $p$ ) uz primenu polja u mraku nastaje tamna struja. Ona upravo zavisi od koncentracije nosilaca, elektrona u provodnoj zoni i šupljina u valentnoj zoni. Njihova je koncentracija u ovim slučajevima određena uslovima termičkog pobudjivanja. Tada je provodljivost izola-

tora ili poluprovodnika definisana relacijama 1.1; 1.2 i 1.3 u zavisnosti od vrste izolatora, odnosno poluprovodnika.

Ukoliko se na fotootpor deluje zračenjem odredjene talasne dužine (koju dati poluprovodnik apsorbuje), koncentracija nosilaca (elektrona, šupljina) raste (ili opada), usled čega se menja i provodljivost, prema sledećim relacijama

$$\Delta\sigma = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) \quad 1.4$$

$$\Delta\sigma_n = e(\Delta n \mu_n) \quad 1.5$$

$$\Delta\sigma_p = e(\Delta p \mu_p) \quad 1.6$$

Poluprovodnik je izведен iz ravnotežnog stanja i postiže novo stanje okarakterisano promenom provodljivosti, prema relacijama 1.4; 1.5 i 1.6 (uz obavezno prisustvo novih fotostruja nastalih u stacionarnom režimu). Veličine  $\Delta n$  i  $\Delta p$  predstavljaju promene koncentracija slobodnih nosilaca. Ove promene mogu da nose oba znaka, pa se, prema tome, dodaju ili oduzimaju od polaznih koncentracija. Ove promene koncentracija nastaju fotogenerisanjem slobodnih nosilaca. Uvodjenjem sledećih (pričasnih) pretpostavki račun se u mnogome uprošćava:

- Za dati tip provodljivosti postoji dominantna vrsta nosilaca nanelektrisanja. Doprinos druge vrste je zanemarljiv.
- Kristal u celini ostaje neutralan  $\Delta n = \Delta p$  i ne stvara oblast prostornog nanelektrisanja.

S obzirom na pomenute teorije, moguća je sada potpunija definicija izolatora, poluprovodnika i provodnika. Izolatori su materijali sa potpuno praznim ili popunjениm zonama. Karakteristična je za poluprovodnike zabranjena zona širine  $\Delta E$  reda 1 eV između potpuno popunjene valentne zone i prazne provodne zone, tako da termičko dejstvo može da podigne elektron iz valentne (popunjene) u provodnu (praznu) zonu. Provodljivost metala objašnjava se delimično popunjениm zonama. Klasifikacija materijala može da se izvrši prema provodljivosti

$$\begin{aligned} \sigma_{iz} &< 10^{-10} [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}] && (\text{izolatori}) \\ 10^{-10} < \sigma_{pol} &< 10^4 [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}] && (\text{poluprovodnici}) \\ \sigma_{met} &> 10^4 [\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}] && (\text{metali}) \end{aligned}$$

### 1.3 Eksitoni [14, 15]

Kada je energija apsorbovanog fotona u kristalu nešto veća od širine zabranjene zone  $\Delta E$ , stvara se par elektron-šupljina. Ovaj par može, kao sistem nezavisnih čestica, da se kreće kroz kristal. Takodje je moguće da, usled kulonovske privlačne sile između elektrona i šupljine, dodje do stvaranja stabilnog vezanog stanja ovih čestica, tj. do kreacije eksitona. Energija potrebna za stvaranje para može da bude i manja od širine zabranjene zone. Eksiton se kreće kroz kristal ne noseći nanelektrisanje, on prenosi samo energiju. Ovo predstavlja neutralno pobudjeno stanje kristala.

Ovaj se pojam opisuje pomoću dva modela: Frenkel-ov i Mott-Wennier-ov model.

Frenkel-ovi eksitoni su jako vezani, ekscitacija je lokalizovana u jednom atomu ili u njegovoj okolini. Šupljina se tada nalazi u istom atomu gde je i elektron. Ekscitacija prelazi sa jednog na drugi atom u zavisnosti od veza između susednih atoma. Ovaj slučaj se javlja kod molekulskih kristala.

Mott-Wennier-ovi eksitoni su slabo vezani i mogu se analizirati kao atom vodonikovog tipa, tj. sistem eksitona se ponaša kao slobodna čestica. Medjučestično rastojanje eksitona je veliko u odnosu na konstantu rešetke kristala. Uslov postojanja eksitona je da ukupna energija sistema bude manja od energije ivice provodne zone.

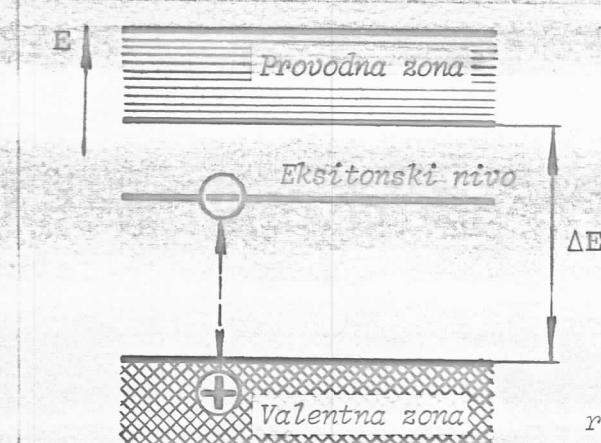
Stvaranje eksitona predstavlja, dakle, apsorpcioni proces, slično kao dovodenje glavnih nosilaca, elektrona, u provodnu zonu i stvaranje šupljina. Razlika je u tome što eksiton prenosi samo energiju ekscitacije, ali ne doprinosi stvaranju fotostruje. Ovo je moguće s obzirom da su nanelektrisanja vezana, a provodenje je moguće samo u slučaju raspada eksitona. (sl.1.7).

U slučaju da je apsorbovana energija manja od energije prelaza nosilac eksiton se obrázuje prema relaciji

$$\hbar\nu = \Delta E - E_{eks} \quad 1.7$$

gdje je  $E_{eks}$  energija vezivanja eksitonskog para. Pri direk-

nom prelazu javlja se linijski apsorpcioni spektar sličan odgovarajućem spektru vodonika. U slučajevima indirektnog prelaza



Sl. 1.7.

spektar je kontinualan. Ako je uzrok apsorpcije formiranje eksitona sa apsorpcijom ili emisijom foton, minimalna energija za ovakav proces data je tada relacijom

$$hv = \Delta E \pm E_{fon} - E_{eks} \quad 1.8$$

#### 1.4 Elektronski prelazi [3]

Kod fotoprovodnika ovakvi se prelazi dele u tri tipa:

1. Apsorpcija i ekscitacija
2. Hvatanje u zamke i zahvat
3. Rekombinacija

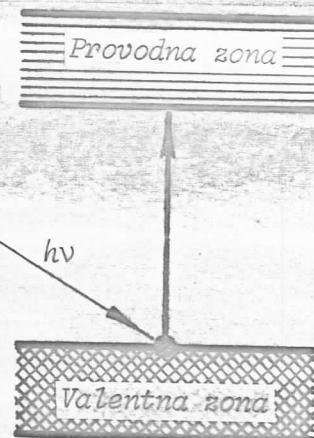
1. Apsorpcija i ekscitacija: Kod fotoprovodnika moguća su tri tipa apsorpcionih prelaza:

(a) Ukoliko atomi kristala sami apsorbuju foton, tada, po svakom apsorbovanom fotonu, nastaju slobodni elektron i šupljina -(sl.1.8).

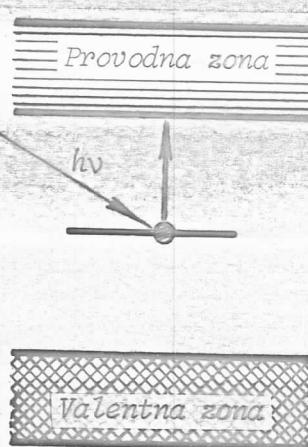
(b) Apsorpcija na nekom nivou nesavršenosti, stvaranje par slobodnog elektrona i šupljine koja je vezana u okolini nesavršenosti (sl.1.9)

(c) Neki apsorbovani foton može da digne elektron iz valentne zone na nezaposednuti nivo ugradjene nesavršenosti, stvarajući tako slobodnu šupljinu i elektron vezan u blizini nesavršenosti (sl.1.10)

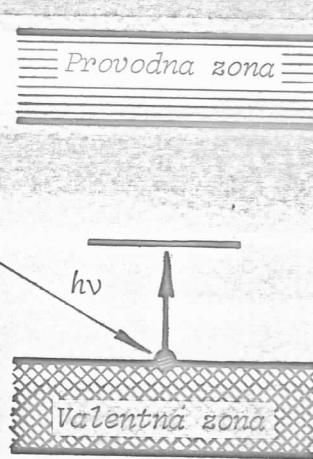
Sledeći su prelazi, pri apsorpciji, takođe mogući. Oni, međutim, ne doprinose stvaranju slobodnih nosilaca nanelek-



Sl. 1.8



Sl. 1.9



Sl. 1.10

trisanja, a to su: formiranje eksitona, prelazi izmedju pobudjenih stanja nesavršenosti u kristalnoj rešeci, zatim prelazi izmedju dozvoljenih zona.

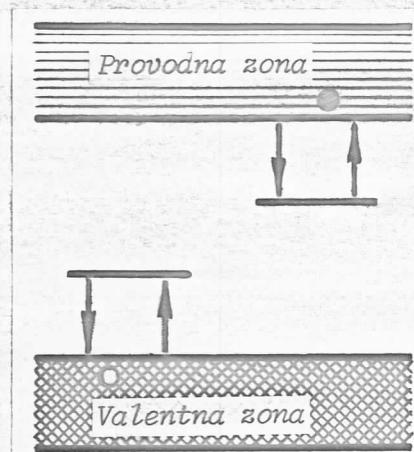
Minimalna energija potrebna za apsorpcioni prelaz sa valentne u provodnu zonu mora da bude jednaka energijskoj širini zabranjene zone  $\Delta E$ , a talasna dužina svetlosti naziva se apsorpciona ivica. Ukoliko je energija fotona veća od  $\Delta E$ , prelaz može da se dogodi sa dna valentne zone do gornje ili donje ivice provodne zone u zavisnosti od veličine energije zračenja. Apsorpcija ovih kvanata energije je kontinualna, sve do neke maksimalne energije koja odgovara prelazu sa dna valentne do gornje ivice provodne zone. (Uredjena kristalna provodna zona se poklapa sa nekim višim dozvoljenim zonama, tako da maksimalna apsorbovana energija nije nadjena). Svi ovi prelazi praćeni su apsorpcijom fotona uz moguću emisiju fonona (kvant oscilacija kristalne rešetke).

2. Hvatanje u zamke i zahvat: Ovo je slučaj prelaza slobodnog elektrona u neki centar nesavršenosti (ukoliko se mogućnost direktnе rekombinacije ili odlaska nosioca nanelektrisanja putem elektroda iz kristala žanemari). Centri nesavršenosti dele se na dve grupe:

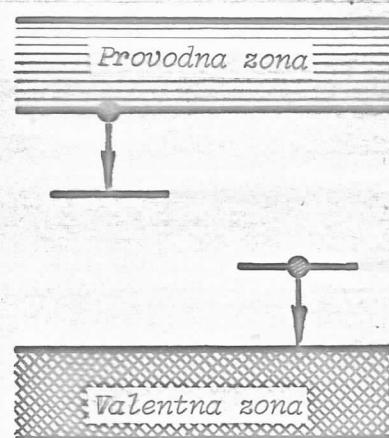
(a) Centri zanki: Veća je verovatnoća da se zahvaćeni nosilac termičkim pobudjivanjem prebaci u provodnu zonu, nego da se

rekombinuje sa nosiocem suprotnog znaka na nesavršenosti (sl.1.11).

(b) Rekombinacioni centri: Veća je verovatnoća da se zahvaćeni nosilac rekombinuje na nesavršenosti sa nosiocem suprotnog znaka nego da se, daljim pobudjivanjem, prebaci u provodnu zonu. (sl.1.12).



Sl. 1.11.



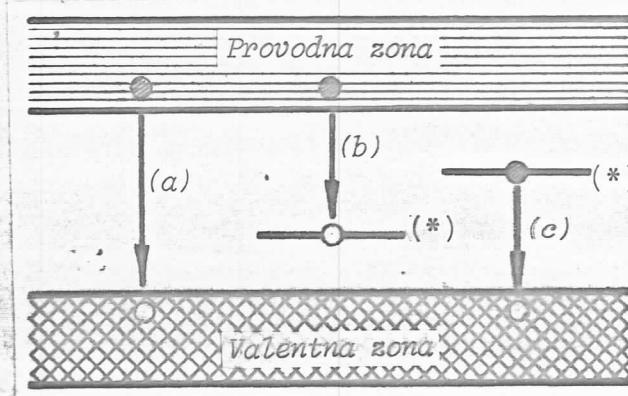
Sl. 1.12.

3. Rekombinacija: U ovom slučaju mogu da se javе tri tipa rekombinacionih prelaza:

(a) Rekombinacija slobodnog elektrona i šupljine (za ovaj proces verovatnoća je mala): Pri ovom procesu emituje se foton energije  $\Delta E$  (širine zabranjene zone). Ova se emisija naziva emisija sa ivice. (sl.1.13.a)

(b) Elektron je zahvaćen u pobudjeni rekombinacioni centar koji sadrži u sebi šupljinu. (sl.1.13.b)

(c) Šupljina je zahvaćena u pobudjeni rekombinacioni centar koji sadrži u sebi elektron (sl.1.13.c)



Sl. 1.13.

Prelazi sa sl.1.13.b i 1.13.c mogu takodje da budu praćeni emisijom fotona.

(\*) Centar čiji je energijski nivo bliže ivici neke zone, delovaće pre kao zamka nego kao rekombinacioni centar.

## 2. FAKTORI KOJI UTIČU NA POJAVU FOTOPROVODLJIVOSTI

### 2.1 Rekombinaciona kinetika u odsustvu zamki [3]

U ovom je odeljku ukratko razmotrena rekombinaciona kinetika fotoprovodnika bez centara zamki, tj. centara koji zarobljavaju i otpuštaju nosioce nanelektrisanja, dok u samom rekombinacionom procesu nemaju poseban značaj.

Ukupna brzina generisanja slobodnih nosilaca nanelektrisanja u ravnotežnom stanju jednaka je ukupnoj brzini rekombinacije istih. Za neosvetljeni uzorak važi

$$\sum_i g_i = n_0 v \sum_i S_i N_i \quad 2.1$$

gde je  $n_0$  gustina slobodnih elektrona u mraku;  $g_i$  je termalna generacija iz  $i$ -tih centara;  $S_i$  i  $N_i$  respektivno predstavljaju efikasni presek rekombinacije, odnosno gustinu  $i$ -tih rekombinacionih centara. Ako je dopunska gustina nosilaca  $\Delta n$ , odnosno slobodnih elektrona usled optičkog generisanja  $f$ , tada važi relacija:

$$f + \sum_i g_i = (n_0 + \Delta n) v \sum_i S_i N_i \quad 2.2$$

gde je  $v$  termalna brzina nosilaca  $\sqrt{2kT/m}$ .

Ukoliko važi prepostavka da je reč o rekombinacionim centrima jednog tipa, te da su oni uzroci termalnog i optičkog generisanja, tada važi

$$f + g = (n_0 + \Delta n) v S N \quad 2.3$$

Ukoliko je

$$N = n_0 + \Delta n$$

sledi

$$f + g = (n_0 + \Delta n)^2 v S \quad 2.4$$

$$n_0 + \Delta n = \left( \frac{f + g}{v S} \right)^{1/2} \quad 2.5$$

pa se uvodi

$$\tau = [vS(n_0 + \Delta n)]^{-1} \quad 2.6$$

S obzirom da je  $g \ll f$ , kao i  $n_0 \gg \Delta n$ , ove jednačine za poluprovodnike imaju oblik

$$\Delta n = \frac{f}{2n_0 v S} \quad 2.7$$

$$\tau \approx (n_0 v S)^{-1} \quad 2.8$$

Očigledno je da fotostruja direktno zavisi od prvog stepena intenziteta svetlosti, a u prvoj aproksimaciji život nosilaca na elektrisanja ne zavisi od intenziteta upadnog zračenja, odnosno jednak je vremenu života slobodnih nosilaca u neosvetljenom poluprovodniku.

## 2.2 Razlika izmedju nivoa zamki i rekombinacionih nivoa [3]

Pre nego što se predje na realne poluprovodnike, potrebno je da se uspostavi kriterijum koji definiše razliku izmedju centara zamki i centara rekombinacije. Podela je data sledećim uslovima:

1. Verovatnoća termalnog oslobođanja nosilaca
2. Verovatnoća rekombinacije sa nosiocem suprotnog znaka, pre nego što dodje do termalnog oslobođanja.

Matematički prikazano; za centre koji sa nekom energijom  $E_I$  leže ispod provodne zone, ovi su centri centri zamki za elektrone ukoliko je zadovoljena relacija

$$n_I p v S_p \ll n_I S_n v N_c \exp\left(-\frac{E_I}{kT}\right) \quad 2.9$$

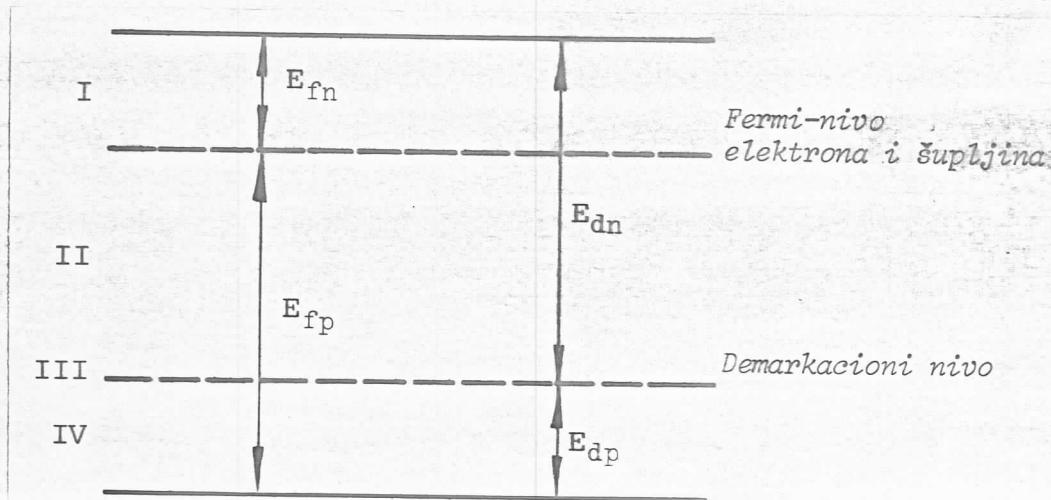
ili, ako su u pitanju rekombinacioni centri za elektrone

$$n_I p v S_p \gg n_I S_n v N_c \exp\left(-\frac{E_I}{kT}\right) \quad 2.10$$

gde je  $n_I$  gustina centara koje zauzimaju elektroni;  $p$  gustina slobodnih šupljina;  $S_n$  efikasni presek zamki za zarobljavanje slobodnog elektrona pomoću centra u kojem se nalazi šupljina;  $S_p$  je efikasni presek za zarobljavanje slobodne šupljine pomoću centra u kojem se nalazi elektron i  $N_c$  je efektivna gustina stanja u provodnoj zoni.

Podesno je da se ovde definiše položaj demarkacionog nivoa, koji razdvaja nivoe zamki i nivoe rekombinacije na sledeći način:

Kada se elektron (šupljina) nalazi u blizini demarkacionog nivoa za elektrone (šupljine), ista je verovatnoća da se rekombinuje sa šupljinom (elektronom), odnosno da se termalno pobudjen prenese u provodnu zonu. Položaj nivoa za poluprovodnike prikazan je na sl.2.1.



Sl. 2.1.

Po definiciji, svi su nivoi u termalnoj ravnoteži sa zonama. Postoji samo jedan Fermi-nivo za elektrone i šupljine. Nivoi u oblasti (I) predstavljaju zamke za elektrone, u oblasti (IV) su zamke za šupljine, oblast (II) obuhvata rekombinacione nivoe elektrona, a oblast (III) rekombinacione nivoe šupljina.

### 2.3 Efekti zamki i korelacija sa zavisnošću fotostruje od intenziteta zračenja [3]

Ukoliko u datom materijalu u zabranjenoj zoni ne bi postojali pomenuti nivoi, svaki bi pobudjeni nosilac nanelektrisanja postajao slobodni nosilac. U slučaju da poluprovodnik poseduje samo rekombinacione centre, takve da glavni nosioci imaju vreme života duže nego vreme života sporednih nosilaca, tada je svaki pobudjeni glavni nosilac i slobodni nosilac nanelektrisanja. U realnim kristalima, međutim, postoji takođe i centri zamki, pa je broj slobodnih nosilaca nanelektrisanja manji od ukupnog broja pobudjenih.

Jedan od glavnih pokazatelja kojim se eksperimentalno može utvrditi postojanje efekta zamki je vreme opadanja fotostruje. U slučaju ako je, po prestanku ekscitacije, vreme opadanja fotostruje veće nego vreme života nosilaca, može tada sa sigurnošću da se tvrdi da centri zamki u materijalu postoje. U odsustvu zamki, međutim, fotostruja opada kao i gustina slobodnih nosilaca, a vreme opadanja fotostruje jednako je vremenu života slobodnih nosilaca.

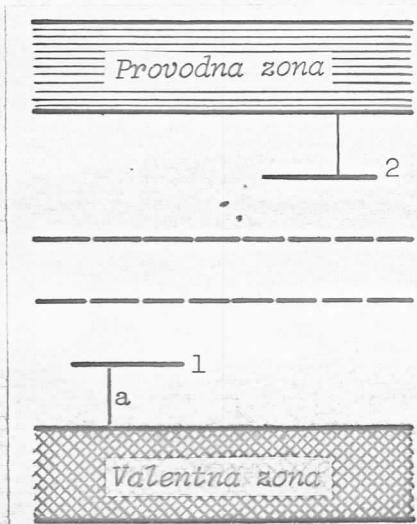
Neka je uzet materijal poluprovodnik N-tipa i neka su glavni nosioci slobodni, a sporedni nosioci odmah zarobljeni. Neka je, zatim, provodljivost usled tamne struje zanemarljiva, tada je uslov ravnoteže dat sa

$$f = vS_n n N_r \quad 2.11$$

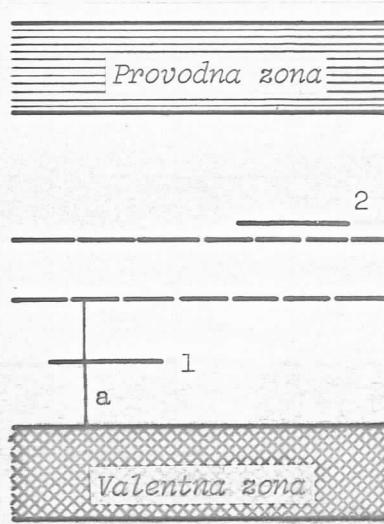
gde je  $N_r$  gustina rekombinacionih centara koji sadrže šupljine, a  $S_n$  je efikasni presek za zarobljavanje slobodnog elektrona u datom centru (odgovarajuća relacija bez zamki glasi:  $f = vS_n n^2$ ). Kako je, međutim  $N_r = n + n_t$ , efekat desenzitivizacije nastaje kada je  $n_t > n$ , gde je  $n_t$  gustina nosilaca zahvaćenih u zamke

$$f = vS_n n(n + n_t) \quad 2.12$$

Slike 2.2 - 2.5 prikazuju četiri moguća jednostavna rekombinacionih nivoa i nivoa zamki u odnosu na položaj kvazielektronskog Fermi-nivoa u mraku i pri osvetljenju



S1. 2.2.

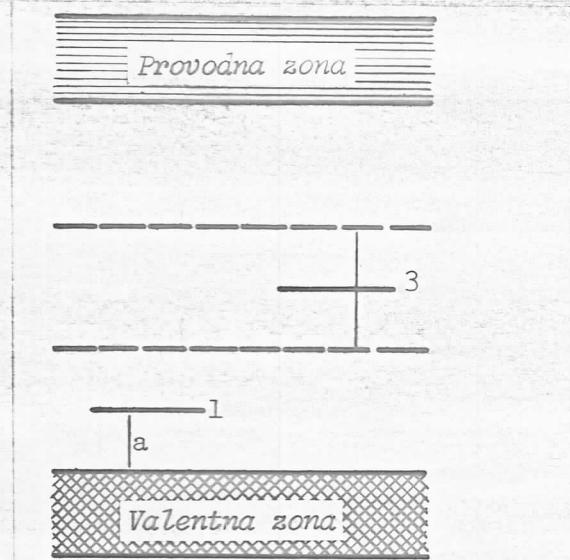


S1. 2.3.

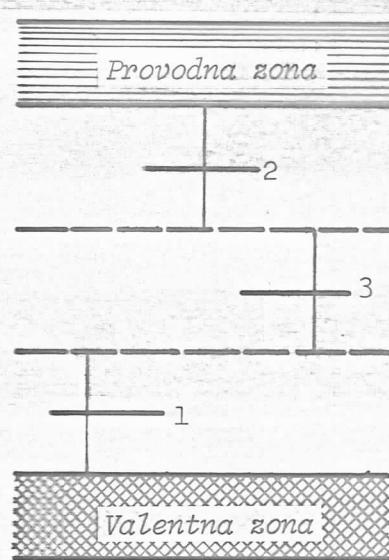
Uz sliku 2.2 : (1) Rekombinacioni centar, (2) Centar zamki.

Pod dejstvom svetlosti Fermi-nivo se pomera naviše. Broj zaro-bljenih elektrona se povećava i nastaje blaga desenzitivizacija. U slučaju da se nivo (2) nalazi bliže provodnoj zoni, desenziti-vizacija postaje zanemarljiva.

Uz sliku 2.3 : U ovom slučaju centar zamki (2) leži blizu Fermi-nivoa pri osvetljavanju, pa desenzitivizacija znatno poraste.



S1. 2.4.



S1. 2.5.

Uz sliku 2.4 : Centar (3) je centar zamki i nalazi se izmedju Fermi-nivoa prilikom osvetljavanja i Fermi-nivoa u mraku. Nivoi zamki tipa (3) mogu prouzrokovati veliku desenzitivizaciju foto-provodnika.

Uz sliku 2.5 : Desenzitivizacija se u ovom slučaju (istovremeni uslovi sa 2.3 i 2.4) uvećava, pod uslovom da je gustina zarobljenih elektrona u centrima (2) uporedljiva sa dodatnim rekombinacionim centrima (3) koji nastaju usled osvetljavanja.

Promena broja slobodnih nosilaca nanelektrisanja  $n$  u zavisnosti od bržine optičkog generisanja  $f^{1/2}$  menja se u linearnu formu  $n$  od  $f$  za matemarijale (poluprovodnike) sa uniformnom distribucijom zamki. Zavisnost  $n$  od  $f^{1/2}$  može da se nadje i u prisusutvu zamki, ukoliko je gustina fotopobudjenih elektrona u zamkama iznad elektronskog Fermi-nivoa veća nego gustina odgovarajućih elektrona ispod Fermi-nivoa. Eksponent veličine  $f$  pri eksperimentalnom utvrđivanju zavisnosti  $n$  od  $f$  može da se nadje u intervalu  $1/2 - 1$ , što može da se objasni



eksponencijalnom distribucijom zamki. Gustina zamki u zavisnosti od energije  $E$  eksponencijalno opada sa rastojanjem (po  $E$  osi) od dna provodne zone.

Prema tome, u intervalu promene intenziteta osvetljavanja za koje vrednosti je gustina slobodnih nosilaca manja od gustine zarobljenih, ovaj model daje teoriju [16] po kojoj se eksponent veličine  $f$  u zavisnosti  $n$  od  $f$  menja u intervalu  $1/2-1$ .

#### 2.4 Uticaj prostornog naelektrisanja [14, 7]

Ukoliko je omski kontakt izmedju elektroda i uzorka ostvaren i ako se na ovaj sistem primeni spoljašnje polje, moguće je prenosenje naelektrisanja. Ukoliko je polje dovoljno veliko nastaje struja elektrona koja je ograničena prostornim naelektrisanjem u poluprovodniku. Ova je struja za čvrsto telo definisana relacijom

$$j = \frac{V^2 \mu \epsilon}{L^3} \quad \left[ \frac{A}{m^2} \right] \quad 2.13$$

gde je  $V[V]$  potencijalna razlika na elektrodama;  $L[m]$  linearna dimenzija uzorka (dužina širina);  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$  dielektrična konstanta ( $\epsilon_r$  - relativna dielektrična konstanta, materijala; v. tablice  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ );  $\mu [m^2/Vs]$  pokretljivost nosilaca naelektrisanja.

#### 2.5 Uticaj sniženog pritiska i gasova na fotoprovodnike [3, 6, 5]

Primenom ultravisokih pritisaka na materijale uzrok je povećanja kinetičke energije elektrona. Kvantna teorija pokazuje da ova energija može do te mere povećati, da se elektroni oslobadaju veza sa sopstvenim jezgrom, pri čemu materijal prima svojstva metala. Pokazano je računski da pritisak od  $10^{10}$  atmosfera može da izazove raspad materijala u smislu obrazovanja homogene strukture elektrona i jezgara. Organski materijali u čvrstom stanju, usled slabijeg dejstva medjumolekularnih sila, pokazuju veći stepen kompresibilnosti. Primena i najmanjeg pritiska dovodi do preklapanja orbita susednih molekula. Ovo je praočeno primetnim porastom njihove električne provodljivosti. Utvrđeno je takođe (Inokuchi, Akamotu) da se kod nekih materijala

jala (organskih boja) ova pojava manifestuje tek posle izvesne vrednosti (praga) pritiska ( $80 \text{ kg/cm}^2$ ). Moguća je, na osnovu izloženog, pretpostavka da sniženi pritisak primjenjen na organske boje (kristal violet) ima obrnuto dejstvo, tj. vrednosti tamne struje i fotostruje su znatno manje.

Uticaj različitih gasova na elektronske osobine organskih poluprovodnika još nije potpuno ispitana. Utvrđeno je da postoji, međutim, zavisnost tamne i fotostruje poluprovodnika u prisustvu kiseonika. U slučaju monokristala naftalina utvrđeno je da u prisustvu kiseonika aktivaciona energija opada sa povećanjem pritiska kiseonika. Ove su promene reverzibilne. Vartanyan je našao da fotoodgovor na tankom filmu antracenskog kristala raste u prisustvu kiseonika. Ova je pojava objašnjena fotooksidacijom površine. Kiseonik u okolini organskog poluprovodnika utiče na promenu nekih svojstava kao: apsorpcija, adsorpcija, zatim učestvuje u procesu oksidacije. Ovo je takođe zapaženo i pri izvršenim eksperimentima (merenjima). Kada se elektronegativna supstanca, kiseonik, adsorbuje na poluprovodnik  $\text{N}$ -tipa u obliku negativnog jona, svaki adsorbovan jon uklanja jedan slobodan elektron iz provodne zone, usled čega može da se opazi opadanje površinske provodljivosti. Ovo je detaljnije obadjeno u odeljcima 4.3; 5.4; 5.5; 5.6 .

### 3. SPECIFIČNOSTI U PROVODLJIVOSTI ORGANSKE BOJE KRISTAL-VIOLET

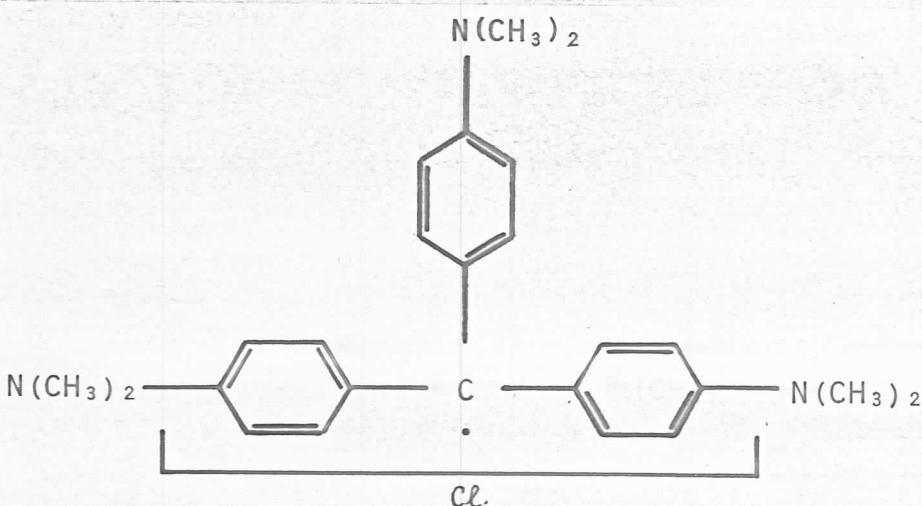
#### 3.1 Vrsta uzorka i opšte osobine [6,14]

Pri izvršenim merenjima korišćen je kao uzorak kristal-violet (National Anoline Division). Po hemijskom sastavu to je heksametiltriaminofenilkarbonijumhlorid čija je struktorna formula data na sl.3.1. Molekulska težina uzorka iznosi 389,53 tačka topljenja je  $195^\circ\text{C}$ . U alkoholnom rastvoru boja je ljučasta, a u kristalnom stanju je tamno-zelena. To je organska boja i to bazna, a pripada grupi niskomolekularnih organskih supstanci, tj. grupi monomera.

Ovo su jedinjenja koja imaju određen broj delokalizovanih  $\pi$ -elektrona, slobodne radikale i komplekse koji prenose elektrostatičko privlačenje uslovljeno

usku provodnu zonu i malu pokretljivost slobodnih nosilaca nanelektrisanja.

Na datoј temperaturi, organski poluprovodnici (kristali) pokazuju električnu provodljivost koja je vremenski nezavisna. Ovo je sopstvena provodljivost poluprovodnika. Na datoј temperaturi termalno pobudjeni elektroni prelaze u provodnu zonu i stvaraju se parovi elektron-šupljina. Proces termalne eksicitacije i rekombinacije nastavlja se do uspostavljanja dinamičke ravnoteže. Proces provodenja odgovara termalnom pobudjivanju elektrona iz valentne u provodnu zonu i to onih čija je energija dovoljna da savladaju zabranjenu zonu.



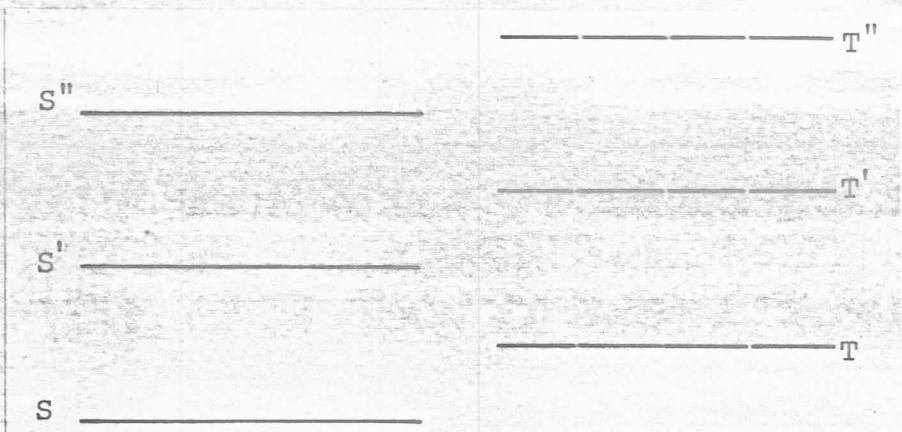
Sl. 3.1.

Broj  $\pi$ -elektrona u spregnutom sistemu molekula organskih jedinjenja uvek je paran. Prema tome je njihov ukupni spinski moment ( $S$ ) celobrojna vrednost. Kada su svi elektroni spareni  $S = 0$ . Promena spina jednog elektrona dovodi do slaganja spina (sada istih) kod sparenih elektrona, pa je ukupni spinski moment  $S = 1$ . Multipletnost stanja odredjena je pomoću vrednosti spinskog momenta. Broj mogućih orijentacija orbitalnih i spinskih momenata molekula određen je multipletnošću  $2S + 1$ . Ovde se razlikuju dva moguća stanja molekula organske boje:

(a) Singletno: Za sparene elektrone  $S = 0$ , pri čemu je multipletnost - jedan (1).

(b) Tripletno: Za nesparene elektrone  $S = 1$ , pri čemu je multipletnost - tri (3).

Za niskomolekulske organske boje foto i poluprovodnike nepobudjeno stanje je OSNOVNO SINGLETNO STANJE (sl. 3.2)



Sl. 3.2.

Raspored tih energijskih nivoa koji odgovaraju datim stanjima dat je na sl. 3.2; gde su S i T osnovna stanja; S' i T', odnosno S'' i T'' su respektivno prvo i drugo pobudjeno singletno i tripletno stanje. Sve optičke i električne pojave kod organskih boja povezane su sa prelazima izmedju tri najniža stanja S, T i S'.

### 3.2 Elektroprovodljivost niskomolekularnih organskih boja

Najvažniji podaci koji se odnose na procese foto i poluprovodljivosti datih materijala dobijaju se merenjem temperaturne zavisnosti provodljivosti. Za čiste organske poluprovodnike (sopstvena provodljivost) gde je  $p = n$  (koncentracije nosilaca nanelektrisanja, elektrona i šupljina su jednake) u datom intervalu temperatura elektroprovodljivost je opisana relacijom

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{\Delta E_T}{2kT}\right) \quad 3.1$$

gde je  $\sigma$  provodljivost na dатој temperaturi;  $\sigma_0$  je broj koji formalno karakteriše provodljivost pri  $T = \infty$ ;  $k$  je Boltzmann-ova konstanta, a  $\Delta E_T$  temperaturna energija aktivacije - širina zabranjene zone.

Važno je da se napomene da jednačina 3.1 iz koje se indirektno određuje širina zabranjene zone  $\Delta E_T$  važi samo kada je sledeći uslov zadovoljen: Ispitivanje se vrši na dovoljno visokim temperaturama (ovo zavisi od ispitivanog materijala), tj. kada je

n = p. Izraz pomoću kojeg se eksplisitno određuje termička energija aktivacije zavisi od karaktera provodnosti. Prema tome, zavisi od procesa koji se u materijalu odigravaju, kao i od stanja u kojem se materijal nalazi. Ukratko: mehanizmi pri kojima se prelazi vrše optičkom - fotonskom aktivacijom, elektron preko zabranjene zone prelazi u skokovima [1], a energija aktivacije određena je izrazom koji sadrži  $\exp(-\Delta E_F/kT)$ , a u slučajevima zonskih mehanizama provodnosti, odgovarajući izraz sadrži član  $\exp(-\Delta E_T/2kT)$ . Za niskomolekulske organske supstance uzima se izraz sa  $2kT$ , iako je u nekim radovima [21] uzet izraz sa  $kT$ , čime polovi širinu zabranjene zone. U skladu sa [1] i [25] u ovom se radu širina zabranjene zone određuje preko relacije:

$$i_s = c \cdot \exp(-\Delta E_T/2kT) \quad 3.2$$

odnosno

$$\log i_s = \log c - \frac{1}{2kT} \Delta E_T \log e \quad 3.3$$

ako se  $\log i_s$  grafički prikaže u zavisnosti od  $1/T$  dobija se prava, čiji je koeficijent pravca  $-(1/2k)\Delta E_T \log e$ , odakle se diferenciranjem jednačine 3.3 dobija širina zabranjene zone

$$\Delta E_T = 2 \frac{\Delta \log i_s}{\Delta(1/T)} \frac{k}{\log e} \quad 3.4$$

gde je  $k = 8.62 \times 10^{-5}$  eV/ $^{\circ}\text{K}$ ;  $\log e = 0.43429$ , pa se  $\Delta E_T$  dobija u eV. U opštem slučaju može se širina zabranjene zone izračunati u zavisnosti od stanja uzorka i uslova merenja preko relacije

$$\Delta E_T = \alpha \frac{k}{\log e} \frac{\Delta \log i_s}{\Delta(1/T)}, \quad 1 < \alpha < 2 \quad 3.5$$

Niskomolekulska organska jedinjenja, po pravilu, pokazuju visok stepen omske provodljivosti. Širina zabranjene zone koja se dobija merenjem veoma zavisi od načina pripremanja uzorka, od strukture i od toga da li je uzorak ispitivan u vakuumu ili u atmosferi nekog datog gasa.

### 3.3 Znak nosilaca tamne struje [1]

Znak nosilaca nanelektrisanja od kojih je obrazovana tamna struja za niz niskomolekularnih poluprovodnika određen je u nekoliko radova metodom termoelektromotorne sile. U

kristal violetu odredjen je elektronski (n-tip) karakter nosilaca tamne struje, pri čemu je koeficijent elektromotorne sile  $K = 0.15$  [17]. Termoelektromotorna sila merena je integralnom metodom. Hladne elektrode su se nalazile na konstantnoj temperaturi, a veličina termoelektromotorne sile odredjena je u zavisnosti od temperature zagrejanih elektroda. Znak koeficijenta termoelektromotorne sile ukazuje na znak nosilaca nanelektrisanja. Dominantni nosioci nanelektrisanja kod organskih jedinjenja mogu da budu kako elektroni tako i šupljine (P ili N-tip poluprovodnika). Bazne boje spadaju u red N-poluprovodnika, pa je i kristal-violet N-tip. Znak nosilaca elektroprovodljivosti ne mora da bude vezan sa znakom nanelektrisanja jona kod organskih boja tipa soli kiselina ili baza.

### 3.4 Fotoprovodljivost niskomolekularnih organskih poluprovodnika [1]

Kod niskomolekularnih organskih jedinjenja javlja se fotoelektrična osetljivost. Pri osvetljavanju nekim delom vidljivog spektra njihova provodljivost raste ili opada. Veličina fotoprovodljivosti - fotoodgovora zavisi od talasne dužine upadnog zračenja, intenziteta osvetljenja, temperature, a u dovoljno jakim poljima i od potencijalne razlike koja stvara polje.

Voltamperska karakteristika organskog poluprovodnika zavisi od vrednosti primjenjenog polja. Za male napone fotostruja se pokorava Ohm-ovom zakonu. Pri jačim poljima primećeno je odstupanje od Ohm-ovog zakona, odnosno neproporcionalni porast fotostruje. Fotostruja zavisi i od intenziteta osvetljavanja. U slučajevima normalne fotoprovodljivosti fotoodgovor raste sa intenzitetom svetlosti, a kod anomalne fotoprovodljivosti intenzitet svetlosti nema uticaja na fotoodgovor. Kod organskih boja opažena je normalna fotoprovodljivost. Pojava fotostruje kod organskih poluprovodnika rezultuje iz dva istovremena dejstva, optičkog pobudjivanja, prikupljanja nosilaca na nekom medjunivou i termičko pobudjivanje u zonu provodljivosti.

(a) Kinetika fotostruju: Inerntnost fotostruje, po Vartanyan-u, može da se menja u širokim granicama. Vreme uspostavljanja stacionarnog fototoka u slojevima kristal-violeta može da iznosi do

nekoliko časova. Svojstvo inertnosti nije vezano za prisustvo primesnih nosilaca koji grade zamke. Ovo je dokazano uzastopnim hromatografskim prečišćavanjem date boje. Inertnost je karakteristika same boje, tj. posledica postojanja centara prilepljivanja dugoživećih zamki, ispod provodne zone za elektrone, a u blizini valentne zone za šupljine.

Opadanje fotoprovodljivosti po prestanku dejstva svetlosti (dostizanje vrednosti tamne struje) za boju kristal violet pokorava se hiperboličnom zakonu:

$$\frac{1}{\sigma_t} - \frac{1}{\sigma_0} = kt \quad 3.6$$

gde je  $\sigma_0$  početna vrednost provodljivosti;  $\sigma_t$  maksimalna provodljivost postignuta pre isključenja svetlosti;  $t$  vreme uspostavljanja tamne struje;  $k$  konstanta koja karakteriše brzinu promene provodljivosti u mraku.

Hiperbolički karakter uspostavljanja tamne struje ukazuje na bimolekularni karakter rekombinacije nosilaca u mraku. Posebne zakonitosti vezane za ovu pojavu i dalje se objavljaju. Za temperature ispod  $60^{\circ}\text{C}$  (Nelson) brzina uspostavljanja u toku nekoliko prvih sekundi veća je nego u ostalim intervalima vremena uspostavljanja. Efekat postaje izraženiji pri snižavanju temperature.

### 3.5 Znak nosilaca fotostruje

Direktan metod za određivanje znaka nosilaca fotostruje je kondenzatorski metod [18]. U elektronske fotopoluprovodnike spadaju kristal-violet, malahit i Rodamin V. U prisustvu kiseonika, koji pokazuje akceptorska svojstva i čije se dejstvo svodi na zahvat elektrona, može se očekivati da će provodljivost usled elektrona opasti, a odgovarajuća provodljivost u sledećem prisustvu šupljina porasti.

Posebno je važno za kristal-violet, da li se ispitivanje obavlja u vakuumu ili vazduhu. U slučaju praha opažena je provodljivost usled šupljina, a u ogledalskim slojevima fotoprovodljivost sa elektronima kao nosiocima. Ogledalska, elektronska provodljivost obradom uzorka parama rastvarača prelazi u

provodljivost usled šupljina. Specijalnim elektro-mikroskopskim ispitivanjima ustanovljeno je da se ogledalski slojevi javljaju u amorfnom stanju, a da se takvi slojevi obradjeni parama rastvarača javljaju kao polikristali uz prisustvo šupljine kao nosilaca fotostruje. Ovo je slučaj kristal-violeta. Kontakt ogledalskih slojeva sa parama rastvarača izaziva prekristalizaciju u drugu stabilniju formu. Promena znaka nosilaca objašnjava se na sledeći način: U ogledalskim slojevima postoji elektronska provodnost koja je osobina same boje, jer je uticaj površine sveden na minimum, a negativni znak nosilaca očuvan je i u vazduhu. Obrazovanjem mikrokristala sa bolje razvijenom površinom raste i mogućnost prodiranja molekula kiseonika u kristalnu rešetku, a posledica ovoga je zahvat elektrona, pa se u mikrokristalima javlja i provodljivost usled šupljina, čak i u uslovima dobrog vakuuma.

### 3.6 Negativna fotoprovodljivost [3]

Fenomen opadanja tamne struje fotoprovodnika pod dejstvom svetlosti naziva se negativna fotoprovodljivost. Negativna fotoprovodljivost se razlikuje od optičkog gašenja kod istih poluprovodnika. Negativna fotoprovodljivost je opadanje tamne struje usled apsorpcije pogodnog zračenja, dok je optičko gašenje opadanje fotostruje pobudjene nekom primarnom radijacijom usled pogodne sekundarne apsorbovane radijacije.

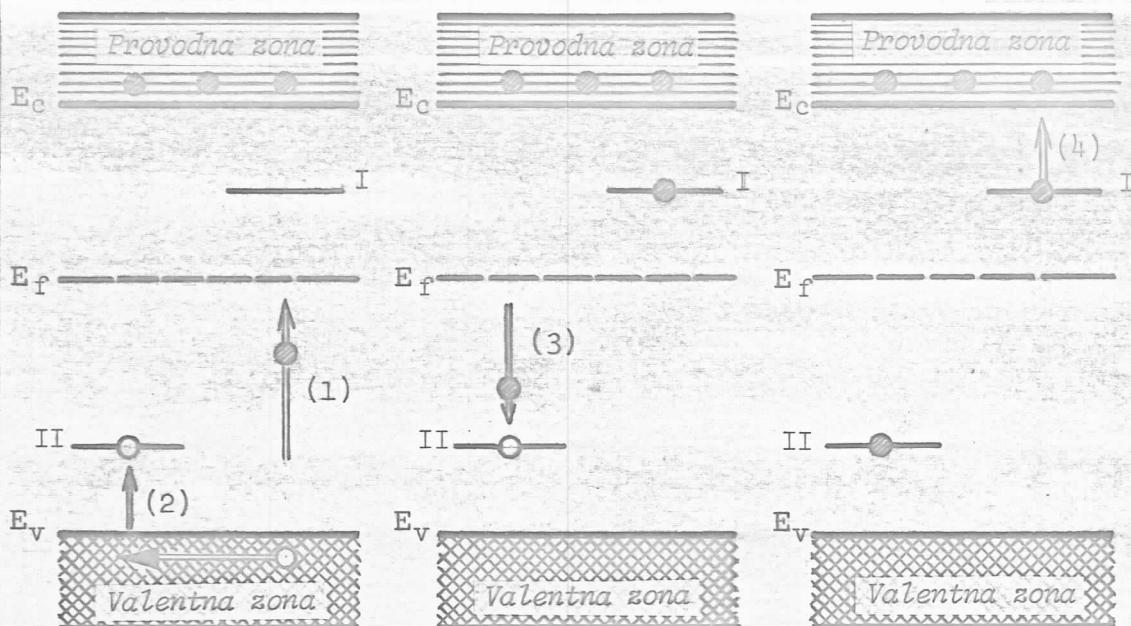
Ova se pojava izučava od 1877. god. Eksperimenti su vršeni na materijalima i to:  $Se$ ,  $Sb_2S_3$ ,  $MoS_2$ ,  $AgCl$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ , itd. Učinjeni su mnogi pokušaji da se pojava objasni pomoću raznih teorija zasnovanih na eksperimentima. Preciznije objašnjenje, na koje i ovaj rad ukazuje, dao je Stöckmann.

Uslovi negativne fotoprovodljivosti za kristal n-tipa dati su neposredno kako sledi u daljem tekstu, a objašnjenje je i ilustrovano na sl.3.3

- (a) Termalno izbacivanje elektrona sa nivoa I je sporije nego rekombinacija elektrona i šupljina sa nivoa II.
- (b) Šupljine ne smeju direktno da se rekombinuju na nivou I.
- (c) Nivoi I moraju da leže iznad Fermi-nivoa.
- (d) Efikasni presek centara I mora da bude za glavne no-

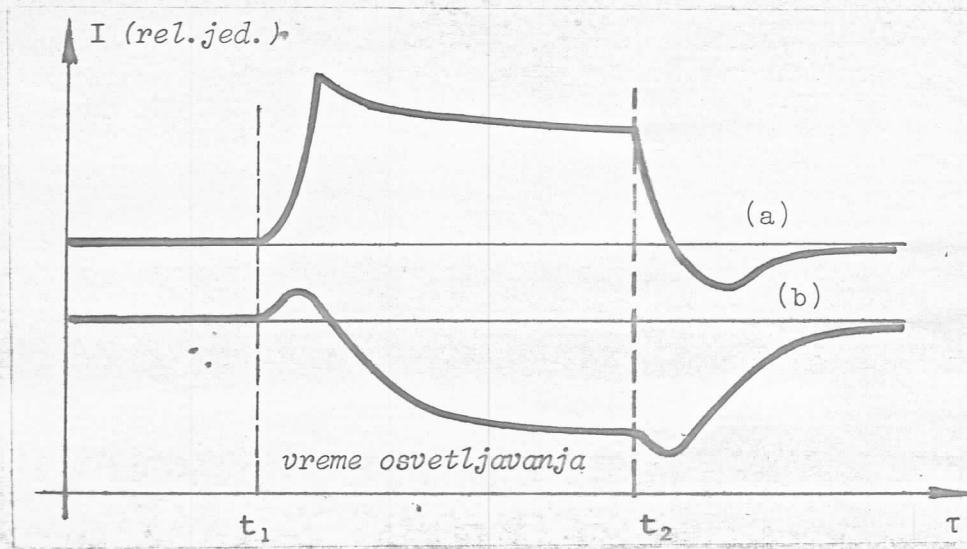
sioce manji nego efikasni presek centara II.

(e) Gustina centara II ne sme biti suviše mala za primarnе nosioce.



Sl. 3.3.

Uzrok pojave negativne fotoprovodljivosti može da bude i postojanje višestruko nanelektrisanih centara iznad Fermi-nivoa, dok je pojava pozitivne fotoprovodljivosti vezana za postojanje takvih centara ispod Fermi-nivoa. Na sl.3.4 ilustrova-



Sl. 3.4.

na je pozitivna fotoprovodljivost sa prisustvom negativne (kriva (a)) i negativna fotoprovodljivost sa prisustvom pozitivne, tj. za slučajeve  $\Delta\sigma_+ > \Delta\sigma_-$  i  $\Delta\sigma_- > \Delta\sigma_+$  respektivno.

## 4. EKSPERIMENT

### 4.1 Uvod

U prethodnim poglavljima razmatrane su teorijske osnove pojave fotoprovodljivosti uopšte, kao i negativne fotoprovodljivosti. Pozitivna normalna fotoprovodljivost dobro je proučena i postoje odgovarajuća teorijska objašnjenja potvrđena eksperimentalno ustanovljenim činjenicama. Pojava negativne fotoprovodljivosti o kojoj je i reč (na organskim bojama) nije koraktno objašnjena, ni eksperimentalno u najvećem broju slučajeva razmotrena. Prisutan je, naime, nedostatak eksperimentalnih podataka. Jedan od clijeva ovog rada je i da doprinese eksperimentalnim podacima iz ove oblasti.

Proučene su primarne i sekundarne osobine organske boje kristal-violeta (uzorak je dat u formi tankog filma). Primarne osobine su, po Korsunskom, fotometrijske zavisnosti, tj. zavisnost fotoodgovora od intenziteta upadnog zračenja. Proučene su i sekundarne osobine, a to su spektralne zavisnosti fotoodgovora. Izmerena je i širina zabranjene zone eksperimentalno, kao što je u odeljku 3.2 i opisano. Izvedeni eksperiment imao je cilj da utvrdi promenu apsorpcije, ukoliko postoji. U slučaju promene apsorpcije dobio bi se jedan dokaz koji ukazuje na proces reverzibilne fotolize.

Osnovni je problem dobijanje standardnog uzorka i izrada merne glave kojom bi se mogla meriti, u sklopu nekog električnog kola, struja reda  $10^{-11}$  A.

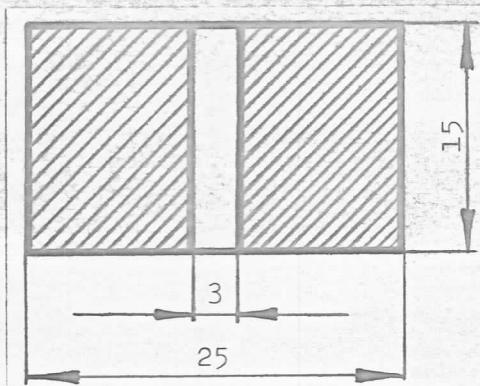
### 4.2 Dobijanje uzorka

U cilju dobijanja uzorka mogu da se upotrebe dva načina izrade i to: 1. Nanošenje iz rastvora taloženjem, ili nanošenjem sloja (mazanjem), 2. Naparavanje pod sniženim pritiskom. Prvi način zahteva izuzetno veliku čistoću uzorka i razvijenu tehniku nanošenja ravnomernog sloja. Naparavanje pod sniženim pritiskom u suštinu predstavlja čišćenje uzorka, s obzirom da se putem sublimacije vrši prekristalizacija. Poznata je činjenica da mnoge organske boje mogu da budu naparene na srednjim temperaturama i u vakuumu, a da se ne dekomponuju [5,6].

U radu A. Nahlovski primenjena je tehnika nanošenja boje iz rastvora na nosač uzorka. U ovom se radu koristi tehnika naparavanja u vakuumu.

Kako je rečeno kristal-violet je organska boja, koja se u blizini tačke topljenja  $t_f = 195^{\circ}\text{C}$ , kao i većina organskih boja raspada (razlaže). Molekulska težina je 389.53 a boja u kristalnom stanju tamnozelena. Naparavanje se vrši na staklenu, prethodno obrušenu, ploču dimenzija  $25 \times 15 \text{ mm}$ . Brušenje je obavljeno u cilju boljeg nanošenja uzorka. Na ploču su pričvršćene, neutralnim lepkom, dve elektrode od folije aluminijuma

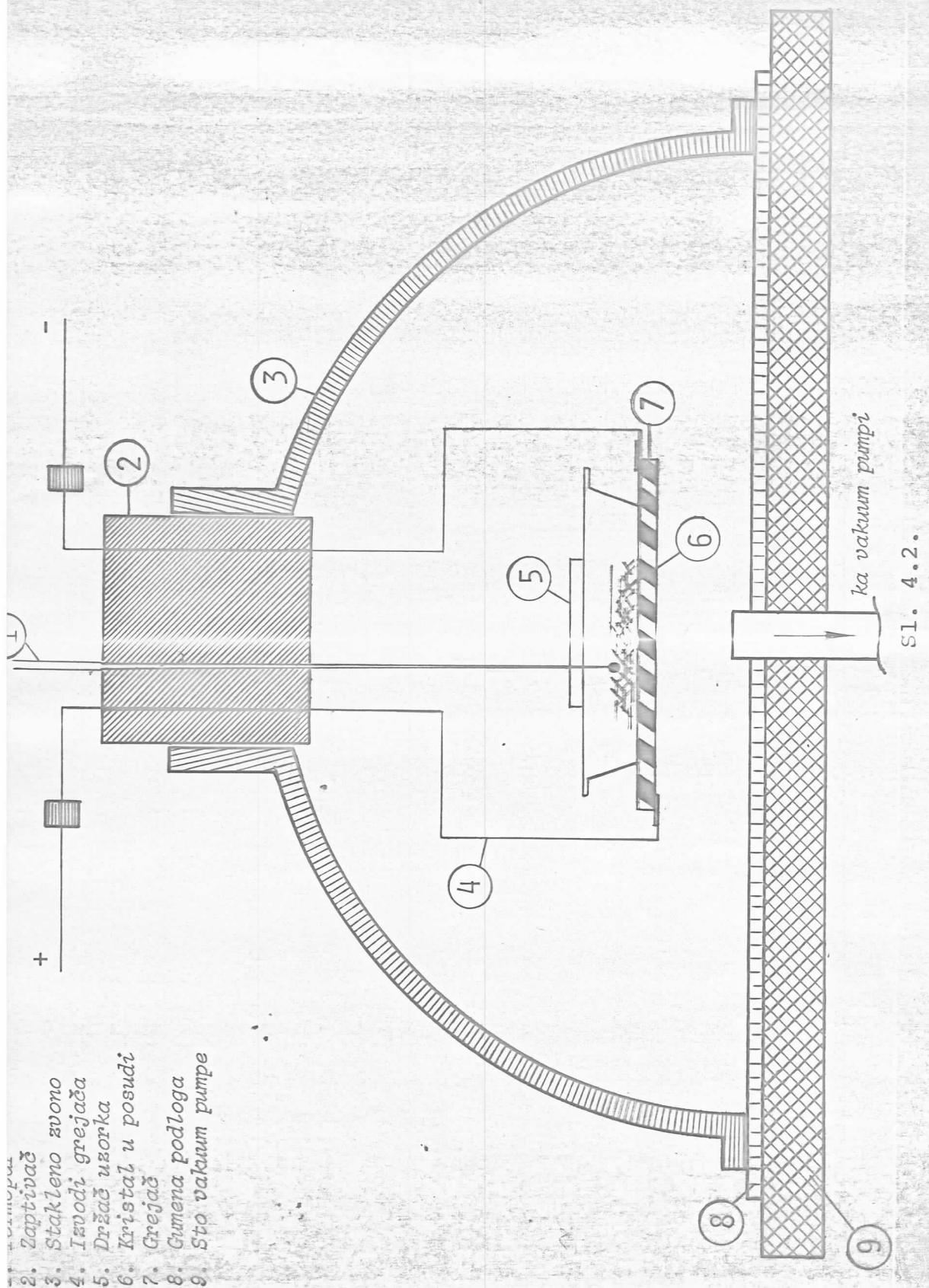
čiji je raspored dat na sl. 4.1. Unutrašnji krajevi prethodno učvršćenih elektroda su slobodni. Ovo je učinjeno da se postigne što efikasniji galvanski kontakt između naparenog uzorka i elektroda. Maska za naparavanje izradjena je takođe od folije aluminijuma i u procesu neposredno pre



Sl. 4.1.

naparavanja oblikovana je tako da samo centralni pojas pločice dimenzija  $6 \times 15 \text{ mm}$  ne pokriva. Prema tome, centralno polje na kojem je naparavanje moguće obuhvata simetrično dve trake elektroda ( $1.5 \times 15 \text{ mm}$ ) i centralni deo ploče obrušenog stakla (v. sl. 4.1). Ovako pripremljen nosač postavlja se iznad porculanske čaše u kojoj se nalaze kristali uzorka - kristal-violet. Ovaj se sklop u celini pokriva folijom aluminijuma, a nosač se nalazi udaljen oko  $7 \text{ mm}$  od dna čaše, koje neposredno naleže na azbestnu grejnu ploču grejača. Malo rastojanje površine nosača od kristala na dnu čaše (koji se naparava) osigurava uz kratak put pare kristala homogeno naparavanje na datu površinu, odnosno dobru standardizaciju uzorka koji se ispituje. Uredjaj za naparavanje prikazan je na sl. 4.2. On se sastoji od: a) Grejača, b) Staklenog zvona sa priključcima grejača, c) Termopara, koji je povezan sa milivoltmetrom, d) Vakuum pumpe.

a) Grejač: To je azbestna ploča prilagodjena dimenzijama porculanske čaše, na koju je namotana kantal-žica (trakasti profil,  $\rho = 11.7 \Omega/\text{m}$ ). Krajevi žice su povezani sa izvorom za napajanje



omoću provodnika koji su izvedeni kroz čep zvona. Izvor napajanja je ispravljač čiji se napon može regulisati u intervalu od 1260 V i dozvoljene potrošnje do 5A.

b) Stakleno zvono: Predstavlja približno staklenu polusferu a otvorom na vrhu, gde se nalazi čep sa odgovarajućim izvodima (termopar, napajanje grejača).

c) Termopar: Izradjen je kao hromel-alumel kombinacija, fabički je kalibriran i drugi mu je kraj smešten u posudu sa lemom. Očitavanje termoelektromske sile izvodi se pomoću mikrooltmetra Philips PM 2434.

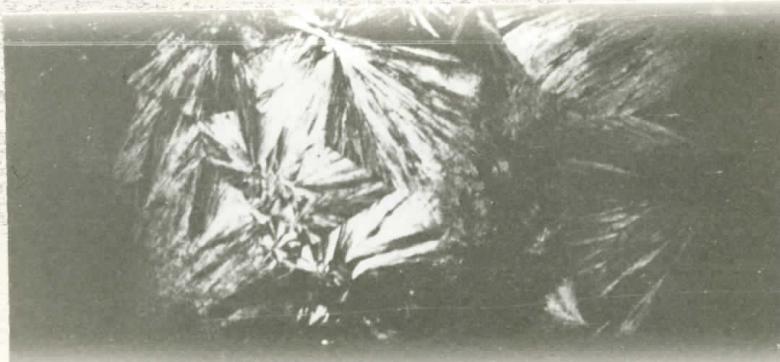
d) Vakuum pumpa: Montirana je na poseban sto, njen je kapacitet  $3.0 \text{ m}^3/\text{h}$ , a za vreme izvodjenja procesa naparavanja održava pritisak reda veličine  $10^{-2} \text{ mmHg}$ .

Postupak naparavanja, primenjen u ovom radu, sastoji se u sledećem: Nakon premazivanja svih mogućih slobodnih površina (otvora) vakuum mašcu uključuje se vakuum pumpa. Po istevremena oko 5 minuta uključuje se i grejač. Kada se postigne temperatura od oko  $100^\circ\text{C}$  ona se održava u intervalu od oko 15 minuta, nakon čega se grejanje isključuje. Temperatura počinje pada, a vakuum pumpa se isključuje tek kada se postigne soba temperatura. Ukoliko slobodni krajevi elektroda ostanu pričvršćeni za staklenu podlogu može se tada sa dovoljnom sigurnošću tvrditi da je kontakt ostvaren.

Ove je uslove, primenom opisanog postupka, najbolje zadovoljio jedan od šest uzoraka u eksperimentu. Posmatranjem uzorka pod mikroskopom utvrđeno je da je sloj homogen, a rijacija debljine iznosi od  $2-6 \mu$ . Merenje ove debljine sloja veden je izoštravanjem objektiva na ploču zatim na određeno sto na uzorku respektivno (s obzirom da je uvećanje mikroskopa poznato, za dato uvećanje hod mikrometra za izoštravanje je librisan). Debljina sloja merena je pomoću mikroskopa Carl Zeiss-Erganal, objektiv  $40\times$ , okular  $10\times$ , uvećanje  $400\times$ . Razred mernih tačaka na površini uzorka: svakih 2mm po dužini i 1 mm po širini.

Posmatranjem uzorka golim okom i mikroskopom utvr-

djeno je da ima površinu ogledalskog tipa, ravnu i zategnutu bez pukotina. Ovakav uzorak kristal-violeta ima amorfni karakter i pokazuje fotostruju N-tipa [18,19,13]. Ukoliko se uzorak tretira parom sopstvenog rastvarača on prekristališe, dobija površinu izbrazdanu polikristalima (medjusobno povezanim), tj. prelazi u stabilniji oblik postojanja, uz promenu znaka glavnih nosilaca (struje provodljivosti) [18,19,13]



Fotografije uzorka posle prekristalizacije

Posmatranjem uzorka pod polarizacionim mikroskopom utvrđeno je da je isti optički aktivan (zakreće ravan polarizacije) i uočljivi su tragovi sferolitske i dendritske kristalizacije. Osnost kristalizacije nije utvrđena.

#### 4.3 Spisak uredjaja i šeme merne grupe

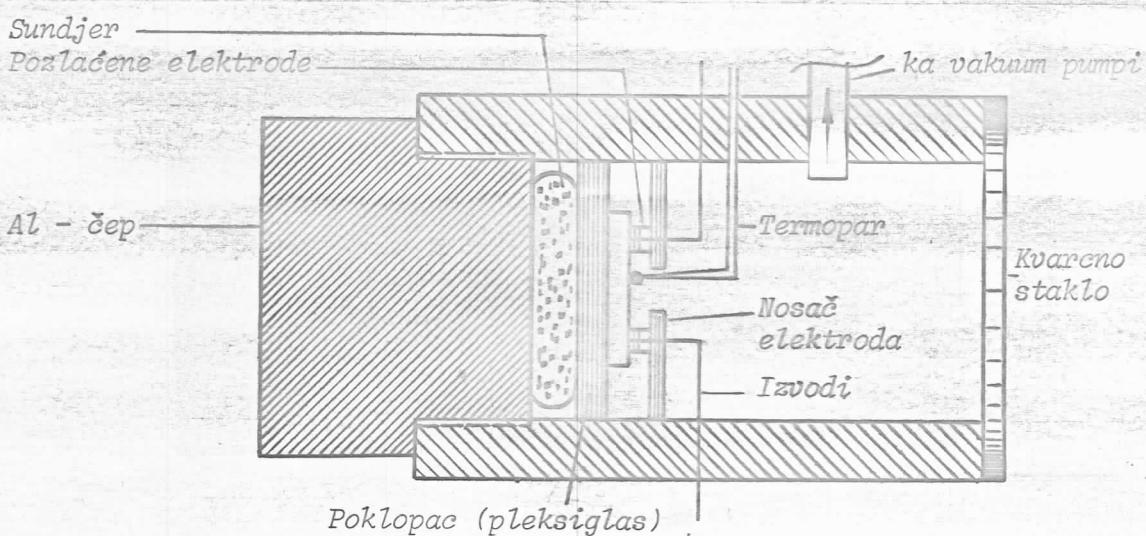
1. Micrometer (Philips) - PM 2436
2. Mikrovoltmetar (Philips) - PM 2434
3. Pisač (Graphispot)
4. Multimeter (digitalni) (EI)
5. Termopar (Thermocoax)
6. Filteri (Zeiss)
7. Termoelement

8. Fotomultiplikator
  9. Izvor stabilisanog napona  
(Bertran Associates Inc. mod. 209-03)
  10. Mikroskopski sto (Zeiss)
  11. Monohromator (Zeiss)
  12. Vakuum pumpa (Leybold)
  13. Izvori osvetljavanja (55W - 200W - Flash lampa)
1. DC Micrometer - Univerzalni instrument (Volt, Amper, Ohm metar) PM 2436/06 Philips. Poseduje izlaz za pisač  $\pm 5$  V i opterećenja 5mA, može da se koristi i kao D.C. pojačavač. Korišćen je za merenje tamne i fotostruje u nA području 0.01 - 1000 nA. Tačnost merenja usled drift-a na nA opsegu je  $\pm 3\%$ . Poseduje kompenzaciono kolo za strujnu kompenzaciju. Skala je povezana sa indikatorom polarizacije, što omogućuje merenje bez obzira na znak DC veličine i način priključenja.
2. DC Mikrovoltmetar - PM 2434 Philips - Opseg merenja  $0.1\mu V - 1000 V$ . Korišćen je za merenje temperature (posredstvom termoelektrnomotorne sile) i intenziteta upadnog zračenja kada je povezan sa termoparam, odnosno termokuplom respektivno. Takodje poseduje kompenzaciono kolo.
3. Pisač - firme Sefram - galvanometarski pisač korišćen za beleženje tamnih i fotostruja (vezan za instrument pod 1.)
9. Izvor DC stabilisanog napona - firme Bertran - tip BA 209-03 M, Fina regulacija 0.2 V i stabilnost (peak to peak)  $0.1\%$  pri maksimalnom opterećenju. Opseg instrumenta 0-1000 V struja opterećenja 0-30 mA. Korišćen je za održavanje uzorka pod konstantnim radnim naponom.
10. Mikroskopski sto - firme Carl Zeiss - Jena. Ovo je grejno - hlađeća jedinica, čiji metod rada počiva na Peltier-ovom efektu, inverzija Seebeck-ovog termoelektričnog efekta. Ovaj sto je korišćen kao termostat sa mogućnošću regulacije temperature od  $-20$  do  $+80^{\circ}C$ .
11. Monohromator - Ogledalski monohromator firme Carl Zeiss - Jena (SPM 2). Upotrebljena je rešetka 650 pod/mm. Ulazna svetlost dobijena je iz halogene svetiljke 55W.

Držač uzorka i merna glava: Držač uzorka (merna glava) konstruisan je tako da udovolji zahtevima eksperimenta. Korišćeni su izola-

cioni materijali, kako bi se merenja obavila što verodostojnije. Posebni eksperimentalni zahtevi za realizaciju vakuuma i merenja temperature unutar glave na samom uzorku su ispunjeni.

Prozor za osvetljavanje izradjen je od kvarcnog stakla. Svi mogući otvori premazani su vakuum mašću, piceinom i dvokomponentnim lepilom. Za promenu temperature uzorka korišćena je toplotna provodljivost aluminijuma od kojeg je izradjen čep u obliku za tvarača sa navojem (sl.4.3).



Sl. 4.3. Merna glava

Opoženo je pri merenju da se po isključenju vakuum pumpe tamna struja znatno promeni, usled kondenzovanja vodene pare na površini uzorka u mernoj glavi.

Merenja su vršena pomoću uredjaja obuhvaćenih spiskom iz 4.3 a prema blok-šemi i električnoj šemi kako je dato na sl.4.4 i sl.4.5.

#### 4.4 Električna merenja za izračunavanje širine zabranjene zone [10,25]

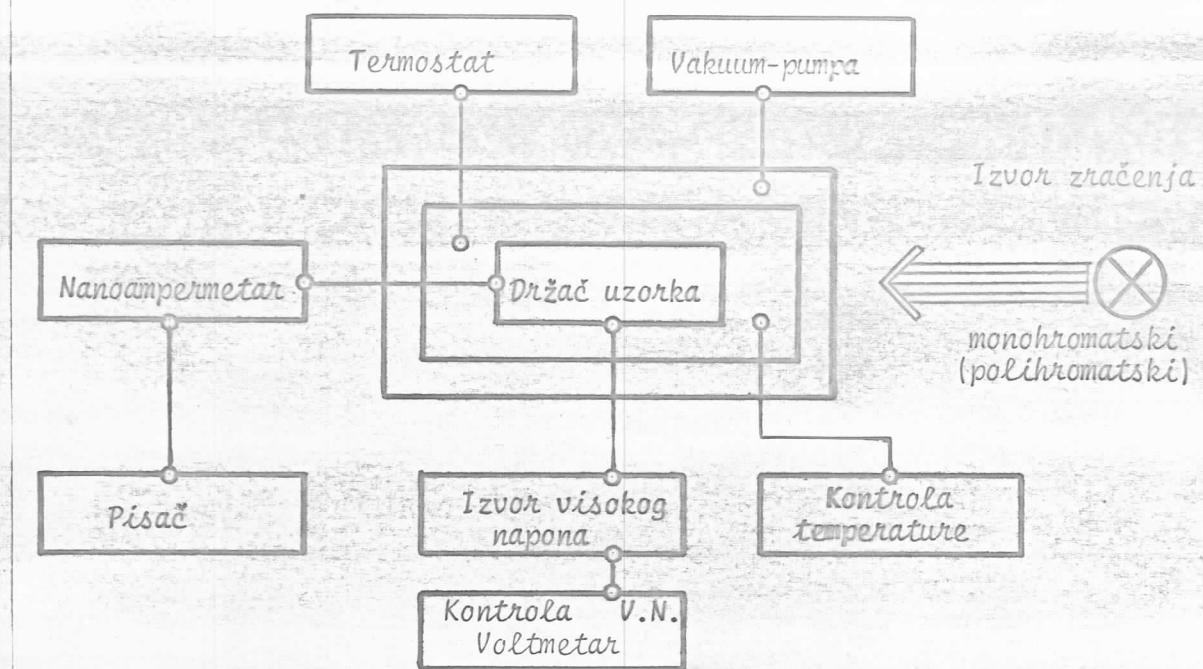
Merenjem temperaturne zavisnosti tamne struje  $i_t = i_t(T)$  pri konstantnom naponu na krajevima (elektrodama) može se izračunati širina zabranjene zone. Korišćenjem relacije

$$\Delta E_T = 2 \cdot \frac{k}{\log e} \cdot \frac{\Delta \log i_t}{\Delta(1/T)} \quad 4.1$$

pomenuta veličina se jednostavno izračunava. Ustanovljeno je u

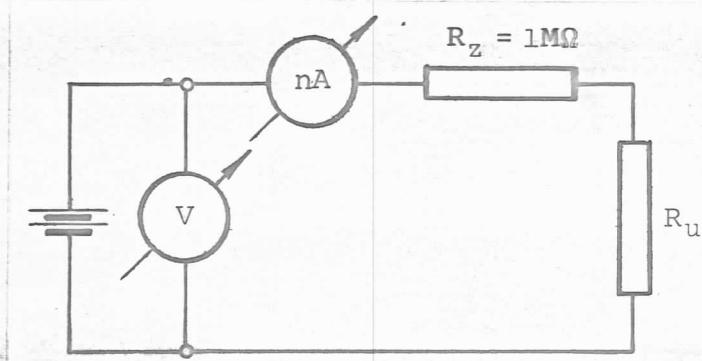
tri konsekutivna merenja da je svaki rezultat reproducibilan.  
Relacija 4.1 u skladu je sa teorijom iz odeljka 3.2

### Blok-šema mernog uredjaja



S1. 4.4.

### Električno kolo za snimanje karakteristika uzorka



S1. 4.5.

Rezultati izračunavanja dati su tabelarno:

TABELA 4.1

R.Br.	U [V]	$\Delta E_{exp}$ [eV]
1.	50	1.82
2.	150	1.52
3.	300	1.90

Računska srednja vrednost iznosi  $\Delta E_{exp} = 1.75$  eV. Tablični rezultat za tanak film kristal-violeta [1] iznosi  $\Delta E = 1.78$  eV.

Merenja su vršena na sledeći način:

- a) Uspostavljen je napon po želji (50, 150 ili 300 V) na uzorku.
- b) Uzorak se nalazi u posebno konstruisanoj mernoj glavi pod sniženim pritiskom od  $10^{-2}$  mmHg i na početnoj temperaturi od  $40^{\circ}\text{C}$ . Uzorak je neosvetljen (u tamni).
- c) Tamna struja uzorka za dati napon i temperaturu stabilizuje se posle vremena od 10 - 20 min.
- d) Micrometer je postavljen na opseg 1 - 0.03 nA i povezan sa pisačem. Tamna struja je tada beležena; a njena konstantnost tokom vremena kontrolisana je pomoću pisača.

Grafički prikaz ovog eksperimenta dat je na grafiku 1.

#### 4.5 Električno optička fotometrijska merenja

Ovo su primarna merenja kod fotoprovodnika. Merenje fotoodgovor uzorka (fotostruja uzorka) u zavisnosti od intenziteta upadnog zračenja pri naponu od 200 V i temperaturi od  $28 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Talasna dužina upadnog zračenja pripada intervalu  $6500 - 7000 \text{ \AA}$  (korišćen je filter RG-5 - oznaka firme Zeiss).

Izvor svetlosti je halogena sijalica 55W.

Merenje je izvršeno na sledeći način:

- a) Za dati napon (200 V) i temperaturu uspostavljena je tamna struja kroz uzorak pod sniženim pritiskom  $p = 10^{-2}$  mmHg. Posle ovog se vrši kompenzacija struje nastale usled različitih spojeva metala u mernoj glavi. Tamna struja se dovodi na nullu vrednost instrumenta.
- b) Prethodno je pomoću jedne konstrukcije sa osjetljivošću od  $0.16 \text{ mV/mW}$  izmeren intenzitet svetlosti kroz filter RG-5 na četiri različita rastojanja.
- c) Uzorak je osvetljen datim intenzitetima {0.065; 0.052; 0.032; 0.026  $\text{mW/mm}^2$ }, merena je fotostruja i zabeležena pomoću pisača: Struja se stabilizovala posle oko pola sata.
- d) Posle svakog obavljenog merenja uzorak je ostavljen oko 2.5 sata da se stabilizuje i da se tamna struja za dati napon

i temperaturu uspostavi. Postupak je ponovljen za sva četiri odabrana intenziteta.

Grafički prikaz eksperimenta dat je na grafikonu br. 2 (v. prilog).

Korišćenjem filtra propusnika talasnog područja 6500 - 7000 Å izmerena je posebno zavisnost negativne fotostrukture od napona. U ovom je slučaju izabran intenzitet od 0.0065 mW/mm<sup>2</sup>. Snimljena je zavisnost tamne struje od napona (Volt-amperska karakteristika).

Rezultati merenja grafički su prikazani na graficima br.3 i br.4 (v. prilog).

#### 4.6 Električno optička merenja. Spektralna karakteristika fotoodgovora

Ova grupa merenja daje tzv. sekundarne karakteristike. Pri konstantnom naponu, temperaturi uzorka i intenzitetu upadnog zračenja meri se zavisnost fotoodgovora samo od promene talasne dužine upadnog zračenja. U ovom slučaju to je talasni interval, a meren je fotoodgovor u zavisnosti od vremena. Grupa upotrebljениh filtera, njihova propusna moć, kao i položaj maksimalnog propuštenog intenziteta tabelarno je prikazana u tabeli 4.2.

TABELA 4.2

Oznaka filtra	Talasno područje [Å]	Položaj maksimuma [Å]
—	2000 - 3650	3650
VG 6	4800 - 5700	5250
OG 5	5600 - 6000	5800
RG 1	6000 - 6500	6250
RG 5	6500 - 7000	6750
RG 17	6600 - 8900	7750
RG 8	7200 - 9300	8350

Postupak pri merenju je sledeći:

a) Uzorak se stavlja pod napon  $U = 200 \text{ V}$ , pri sniženom pritisku, temperatura je podešena na  $28 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Vrši se strujna kompenzacija koja je posledica spojeva različitih materijala u mernoj glavi.

b) Tamna struja se uspostavlja koja se meri nanoampermeterom i registruje pomoću pisača (osvetljavanje se vrši samo kada je it konstantno u toku vremena).

c) Kada je konstantna tamna struja postignuta vrši se strujna kompenzacija tamne struje, tj. njena se vrednost dovodi na nulu instrumenta i pisača. Ovo je učinjeno kako bi se mogao upotrebiti opseg veće osetljivosti instrumenta u slučaju da je intenzitet pojave mali.

d) Uzorak se osvetljava snopom svetlosti konstantnog intenziteta i talasne dužine u propusnom opsegu datog filtra. Korišćen intenzitet ima vrednost  $0.052 \text{ mW/mm}^2$  površine uzorka.

e) Prati se fotoodgovor sve dok fotostruja ne dostigne neku stacionarnu vrednost. Izvor svetlosti tada se isključuje i prati se uspostavljanje tamne struje uzorka.

Rezultati merenja nalaze se na graficima od broja 5 do broja 12. Grafik broj 19 prikazuje kumulativne rezultate, tj. zavisnost fotoodgovora za sve upotrebljene talasne opsege. Grafici br. 14 i br. 15 prikazuju pojavu fotoprovodljivosti izazvanu kratkotrajnim impulsom svetlosti pomoću fleš-lampe. Na istom rastojanju sa filterom (14) i bez filtera (15) (čiji opseg definiše područje od  $6500 - 7000 \text{ Å}$ ). Impuls svetlosti u ovom slučaju je približno četvrtasti - aproksimacija je na četvrtasti, jer mu je trajanje,  $\tau = 1/60 \text{ s}$ , mnogo manje od trajanja same pojave. Fleš nosi oznaku za brojku vodilju 14 za 18 DIN film (po DIN 19011).

#### 4.7 Apsorpciona merenja

Ova su merenja izvršena kako bi se ustanovilo da li je jedan od uzroka postojanja datog efekta fotoliza. Izvršena su merenja čisto kvalitativnog karaktera. Uzorak je postavljen u mernu glavu na otvor monohromatora. Na drugom kraju postavljen je fotomultiplikator čiji je zadatak da registruje moguće pojačanje ili slabljenje snopa svetlosti koja prolazi kroz

uzorak, što odražava promenu apsorpcije ili transparencije.

#### 4.8 Podloga

Da bi se utvrdila verodostojnost dobijenih podataka, prvo merenje izvršeno po ispitivanju znaka provodljivosti je ispitivanje V-A karakteristike podloge, kao ispitivanje mogućnosti da li je staklo korišćeno u eksperimentu fotoprovodnik. Merenja su vršena pri sledećim uslovima:

a) V-A karakteristika stakla merena je u vakuumu i pri temperaturi  $28 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  u mraku.

b) Ispitana je reakcija podloge na polihromatsko zračenje (mnogo većeg intenziteta od kasnije primenjenih) pri temperaturi  $28 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , naponu od  $U = 300\text{ V}$  i u vakuumu.

### 5. TUMAČENJE EKSPERIMENTALNIH PODATAKA

#### 5.1 V-A karakteristika i fotoprovodljivost stakla kao podloge

Na grafikonu označenom sa (I) nalazi se voltamper-ska karakteristika stakla (izolatora), koje je u ovim eksperimentima i korišćeno kao podloga uzorka kristal-violeta. Staklo je izolator. Provodna zona mu je prazna a valentna popunjena. Jedini način na koji staklo može da provodi jeste da nosioci n-elektrisanja klize po njegovoj površini. Sa priloženog grafikona (I) vidi se da u prenošenju n-elektrisanja učestvuju dve vrste nosilaca. Za napone ispod  $625\text{ V}$  to su jedni, a iznad ove vrednosti polarizacija menja znak. Važno je da je V-A karakteristika linearna. Za radnu tačku uzorka uzeta u većini kasnijih merenja vrednost napona  $U = 200\text{V}$ , a struja curenja u ovom slučaju odredjena je ekstrapolacijom iz grafika na vrednost od  $0.95 \times 10^{-2}\text{ nA}$ . (pri temperaturi od  $28 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ). Ako se uzme da je pri istim uslovima tamna struja  $i_t = 3.90 \times 10^{-2}\text{ nA}$  jasno je da se ova vrednost tamne struje stakla mora uzeti u obzir, ali samo kao fon.

Grafikon II prikazuje reakciju podloge na polihromatsko zračenje pri konstantnom pritisku i naponu. Vidi se da staklo pokazuje negativnu fotoprovodljivost, tj. opadanje provodljivosti pod dejstvom odgovarajućeg zračenja. Vremena us-

postavljanja stacionarnog stanja pri osvetljenju srazmerno su mala u odnosu na uzorak kao i uspostavljanja ravnoteže u mraku. Opadanje struje je gotovo zanemarljivo u odnosu na fotoodgovor uzorka  $i_f = 0.24 \times 10^{-2}$  nA (za staklo);  $i_f = 2.81 \times 10^{-2}$  nA (za uzorak).

Izborom radne tačke uticaj podloge sveden je na minimum, pod datim uslovima, pa se može zaključiti da osobine podloge ne utiču na datu pojavu.

### 5.2 Pozitivan fotoefekt amorfognog stanja

Na grafiku III pokazano je ponašanje uzorka kristal-violeta u amorfnom stanju, gde je isti prema dobijenim podacima pozitivni fotoprovodnik, tj. u slučajevima polihromatskog ozračavanja ogledalske površine dolazi do porasta provodljivosti.

Ovaj se slučaj uklapa u teorijski razmotrene situacije u radovima pomenutim u odeljcima 3.3 i 3.5 gde se spominje da je u mraku (nezavisno od toga kakva je površina kristala) kristal-violet poluprovodnik n-tipa. Prema tome, kakva mu je površina, fotoefekat se odvija na pokazani način i to je Pozitivni fotoefekat: Za površinu ogledalskog tipa - amorfni sloj, nosioci fotoefekta su elektroni - N-tip. Znači da u ovom slučaju dolazi do porasta već postojeće tamne struje prema poznatim zakonitostima za foto i poluprovodnike N-tipa. U ovom slučaju su nosioci tamne struje isti kao i foto-nosioci, tj. N-tipa.

$$\Delta\sigma_n = e \Delta n \mu_n$$

5.1

U prilog tvrdnji o amorfnom karakteru i o neuredjenosti uzorka u ovom slučaju ide činjenica da je korišćen visoki napon 1 kV da bi se dobila bilo kakva merljiva struja, kao i neobično mala tamna struja pri datom naponu.

### 5.3 Poluprovodničke karakteristike kristal violeta

Na grafičima br.4 i br.1 prikazane su V-A karakteristike uzorka (pri temperaturi  $28 \pm 0.5^\circ C$ ) i izvedeni grafikon (iz temperaturne zavisnosti tamne struje) za određivanje širine zabranjene zone [10, 25].

Iz grafika br.4 vidi se da se uzorak ponaša približno prema Ohm-ovom zakonu sve do napona od 160 V tada nastaje saturacija struje i u intervalu promene napona od 160V do 210V javlja se plato strujne saturacije, kod približno 220V nastupa probaj. Teško je da se utvrdi da pomenuti plato zaista postoji, ali se, u granicama eksperimentalne greške, može tvrditi da se do napona od 160V uzorak zaista pokorava Ohm-ovom zakonu (odsustvo prostornog nanelektrisanja) i u ovoj oblasti za poluprovodnike važi

$$\left. \begin{array}{ll} \sigma_n = e \mu_n & \text{za } N\text{-tip} \\ \sigma_p = e \mu_p & \text{za } P\text{-tip} \\ \sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) & \text{za } i\text{-tip} \end{array} \right\} \quad 5.2$$

U regionu platoa (koji se može uzeti da postoji, ili da je nastavak prave) može se tvrditi da se uspostavlja struja ograničena prostornim nanelektrisanjem.

Iz grafika br.1 može se za kristal-violet odrediti širina zabranjene zone preko relacije

$$\Delta E_T = 2 \frac{k}{\log e} \frac{\Delta \log i_t}{\Delta(1/T)} \quad 5.3$$

Eksperimentalno određena širina zabranjene zone sa tri prave (pod različitim naponima) iznosi (srednja vrednost)  $\overline{\Delta E} = 1.75$  eV (uradjeno u odeljku 4.4). Uporedjivanje laboratorijski dobijenog rezultata sa ranije dobijenim rezultatom od  $\Delta E = 1.78$  eV za uzorak kristal-violeta, može se videti da postoji saglasnost unutar granica eksperimentalne greške. Utvrđeno je da se radi o uzorku kristal-violeta u obliku filma i sa širinom zabranjene zone koja odgovara širini zabranjene zone datog hemijskog jedinjenja, kristal-violeta sa hloridnim anjonom [20]. Kristal-violet je poluprovodnik N-tipa [19].

Za širinu zabranjene zone od 1.75 eV određena je energija fotona koji je u stanju da izvrši prelaz i to je  $\lambda_{exp} = 7089 \text{ \AA}$ , što u granicama eksperimentalne greške odgovara rezultatu iz [1], tj.  $\lambda = 6940 \text{ \AA}$ .

Izračunavanje širine zabranjene zone u tri primera:

$$k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}; \quad \log e = 0.43429$$

$$1. \quad U_1 = 50 \text{ V}; \quad \Delta \log i_t = 2.0 - 1.08 = 0.92$$

$$\Delta(1/T) = (3.4 - 3.2) \times 10^{-3} = 0.2 \times 10^{-3}$$

$$\Delta E_T = 2 \frac{k}{\log e} \frac{\Delta \log i_t}{\Delta(1/T)} = 2 \frac{8.62 \times 10^{-5}}{0.43429} \cdot \frac{0.92}{0.2 \times 10^{-3}}$$

$$\Delta E_T = 1.82 \text{ eV} .$$

$$2. \quad U_2 = 150 \text{ V}; \quad \Delta \log i_t = 2.24 - 1.40 = 0.84$$

$$\Delta(1/T) = (3.44 - 3.22) \times 10^{-3} = 0.22 \times 10^{-3}$$

$$\Delta E_T = 2 \frac{k}{\log e} \frac{\Delta \log i_t}{\Delta(1/T)} = 2 \frac{8.62 \times 10^{-5}}{0.43429} \cdot \frac{0.84}{0.22 \times 10^{-3}}$$

$$\Delta E_T = 1.52 \text{ eV} .$$

$$3. \quad U_3 = 300 \text{ V}; \quad \Delta \log i_t = 2.2 - 1.0 = 1.2$$

$$\Delta(1/T) = (3.57 - 3.32) \times 10^{-3} = 0.25 \times 10^{-3}$$

$$\Delta E_T = 2 \frac{k}{\log e} \frac{\Delta \log i_t}{\Delta(1/T)} = 2 \frac{8.62 \times 10^{-5}}{0.43429} \cdot \frac{1.2}{0.25 \times 10^{-3}}$$

$$\Delta E_T = 1.90 \text{ eV} .$$

Srednja vrednost ovih rezultata iznosi:

$$\overline{\Delta E_T} = 1.75 \text{ eV} .$$

#### 5.4 Primarne karakteristike fotoprovodnika kristal-violeta

Na grafiku br. 2 pokazana je funkcionalna zavisnost fotoodgovora od intenziteta upadnog zračenja  $i_f = i_f(I)$ . Izvučena linija u logaritamskoj razmeri pokazuje zavisnost

$$i_f = c I^{3/5}$$

5.4

Može se zaključiti da je kristal-violet normalni fotoprovodnik, a da su ispitivanja pomenutoj uzorku u skladu sa teorijom o foto i poluprovodnicima (organskim bojama), prema kojoj je

$$i_f \sim I^n \quad \text{gde je } 0.5 < n < 1 \quad 5.5$$

što ide u prilog teorijskoj postavci o prisustvu zamki u ovom

slučaju, tj. kada je distribucija eksponencijalna (v. odeljak 2.3). Ovim je prilazom obihvaćen niz interesantnih teorijskih objašnjenja relevantnih u tumačenju desenzitivizacije fotoprovodnika, kao i negativne fotoprovodljivosti [3,2,1].

### 5.5 Sekundarne karakteristike fotoprovodnika kristal-violeta

Pod sekundarnim karakteristikama podrazumeva se zavisnost fotoodgovora uzorka od talasne dužine upadnog zračenja, pri konstantnom intenzitetu zračenja.

Na grafikonu br.5 dat je uopšteni prikaz ponašanja fotodgovora nakon osvetljavanja uzorka zračenjem u intervalu talasnih dužina  $\lambda' \rightarrow \lambda''$ . Posmatrajući proces u celini, u vremenskom intervalu od  $t_0$  do  $t_4$  isti se može podeliti u četiri vremenska podintervala kako dalje sledi:

- Od  $t_0$  do  $t_1$  interval  $\tau_n$ , to je vreme uspostavljanja tamne struje  $i_t$ .
- U intervalu  $\tau_t$  uspostavljena je tamna struja pri datom naponu.
- Interval  $\tau_{rf}$  je vremenski interval kada je uzorak osvetljen zračenjem konstantnog intenziteta, a intervala talasnih dužina  $\lambda' - \lambda''$ . Ovaj interval je od posebne važnosti u datom eksperimentu, kada se čeka uspostavljanje ravnotežnog stanja  $\{i_f(-)\}$ , pa se u trenutku  $t_3$  svetlost isključuje.
- U intervalu  $\tau_{rt}$  posmatraju se vreme i način relaksacije fotoprovodnika.

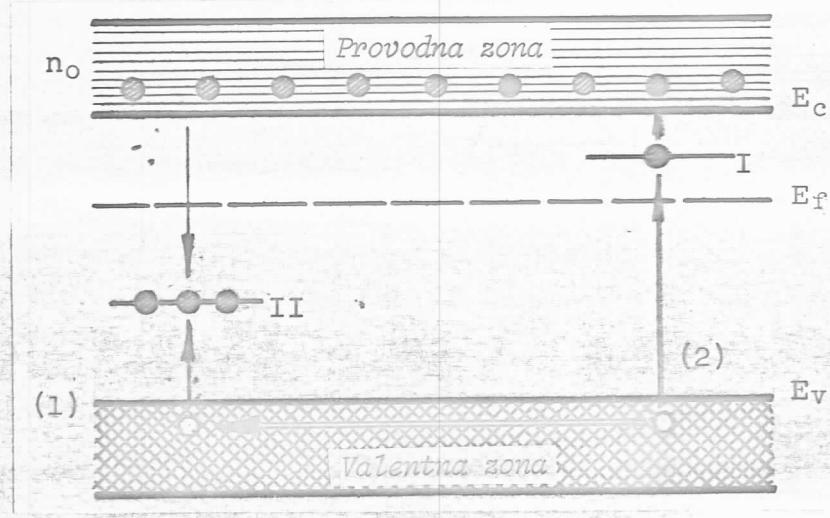
Grafici 5-12 uključujući i grafik II dobijeni su na sledeći način: Kako je tamna struja ispitivanog uzorka uspostavljena, ona je pomoću strujne kompenzacije nanoampermetra, dovedena na nulu. Varijacije merene veličine mogu se pratiti sa da na osetljivijem opsegu instrumenta, pri čemu je polaritet veličine posebno indiciran.

Pri svim merenjima instrument je pokazivao negativni polaritet (položaj Lo), a pri uključenju izvora osvetljenja nastupao je obrnuti efekat (položaj Hi). Ovo ukazuje na pad tamne struje.

Dalje analize i tumačenja vezane su za vrednost talasne dužine kao i intervala  $\tau_{rf}$  i  $\tau_{rt}$ . Sledi kako je dato teorijsko objašnjenje koje najviše odgovara za pojavu negativne fotoprovodljivosti:

Kako je rečeno kod pripremanja uzorka (odeljak 4.2) isti poseduje svojstva poluprovodnika N-tipa i sopstvenu provodljivost (uzorak bez primesa). Prilikom prekristalizacije površine iz ogledalske (amorfne) u polikristalnu menja se znak fotoprovodljivosti. Postupak prekristalizacije otvara nivoe zamki i rekombinacione nivoe (odeljak 2.3 i 3.5). Negativna fotoprovodljivost je posledica uticaja dugoživećih zamki za elektrone (nivo prilepljivanja - prema sovjetskim autorima) i otvaranja nivoa za rekombinaciju elektrona i šupljina u blizini valentne zone. Teorijske osnove dao je Stöckmann (odeljak 3.6), a proces se održava na sledeći način: U intervalu  $\tau_{rf}$  (u trenutku osvetljanja) sledeći mehanizam (tumačenje autora) stupa u dejstvo. Za N-tip nosilaca tamne struje (po Stöckmann-u)

- Kvant svetlosti izbacuje iz valentne zone elektron ostavljajući za sobom šupljinu.
- Sa nivoa I elektron prelazi u provodnu zonu čime se objašnjava pik (maksimum) provodljivosti (sl.5.1)
- Elektroni sa provodne zone prelaze na nivo II gde se rekombinuju sa šupljinom, tada nastupa pojava negativnog fotoefekta. Važno je da se brzine procesa (1) i (2) odnosе kao što sledi - Za procese zahvata elektrona na nivou I i termičko pobudjivanje u zonu provodljivosti



$$V_I = N_c v S_{nI} \exp\left(-\frac{|E_c, E_I|}{kT}\right) \quad 5.6$$

$$V_{II} = n_o v S_{nII} = N_c v S_{nII} \exp\left(-\frac{|E_c, E_f|}{kT}\right) \quad 5.7$$

Negativna fotoprovodljivost javlja se, prema tome, ako je

$$N_c v S_{nII} \exp\left(-\frac{|E_c, E_f|}{kT}\right) > N_c v S_{nI} \exp\left(-\frac{|E_c, E_I|}{kT}\right) \quad 5.8$$

ili

$$\frac{S_{nII}}{S_{nI}} > \exp\left(\frac{|E_I, E_f|}{kT}\right) \quad 5.9$$

Navedene jednačine [2,3] određuju uslove pod kojima se javlja negativna fotoprovodljivost: Potrebno je da brzina procesa rekombinacije elektrona i šupljina na nivou II bude veća od brzine stvaranja slobodnih elektrona u provodnoj zoni.

d. U trenutku isključenja izvora svetlosti, verovatno je da elektron još nije prešao u provodnu zonu sa nivoa I, a rekombinacija još uvek traje, te s obzirom da je brzina rekombinacije veća, po isključenju izvora stvara se negativni pik (grafici: 7 - 12).

Grafik br.6 prikazuje naknadno snimljen fotoodgovor kristal violeta za interval primjenjenog zračenja od 2000 do  $3650 \text{ \AA}$ , znači zračenja veće energije. Uočljiv je pozitivan fotoefekat ( $\Delta\sigma_+ > \Delta\sigma_-$ ). Elektroni izbačeni iz valentne zone prelaze u provodnu zonu sa dovoljnom energijom, tako da preskaču nivoe prilepljivanja. U ovom slučaju javlja se i negativni fotoefekat, što se može videti iz relativno slabog fotoodgovora supstance ( $0.45 \times 10^{-2} \text{ nA}$ ). S obzirom na veliku energiju upadnog zračenja elektroni su prinudjeni da preskaču nivoe prilepljivanja. Ukoliko se elektroni i zadrže na nekom nivou zamki, vreme života zamke je skraćeno. Na ovaj način utvrđena se spektralna zavisnost kako pozitivne, tako i negativne fotoprovodljivosti.

Na osnovu ostalih grafika mogu se, analizom intervala  $\tau_t$ ,  $\tau_{rf}$  i  $\tau_{rt}$ , formulisati sledeći zaključci:

a. U svim slučajevima u intervalu  $\tau_t$ , tj. u vremenu kada je tamna struja uspostavljena, vidi se da tamna struja dostiže is-

tu vrednost za dati napon i temperaturu. Ovo ukazuje na reverzibilnost i reproducibilnost pojave (a posebno na nepromenjene uslove, konstantan pritisak i kolicinu prisutnog kiseonika).

b. Vreme uspostavljanja ravnotežnog stanja fotostruje kreće se u intervalu 30 - 60 min, a ovaj podatak, sem primarnih karakteristika, takodje ukazuje na eksponencijalni raspored zamki u fotoprovodniku. Na graficima je data vrednost fotoodgovora. Vrednost tamne struje koja se oduzima, na svakom je grafiku označena u komentaru posebno { $i_t = 3.5 \times 10^{-2}$  nA, pri  $U = 200$  V i pri  $T = 28 \pm 0.5$  °C}. Odredjivanjem širine zabranjene zone dobija se i podatak o položaju, talasnoj dužini, na kojoj se nalazi, po apsolutnoj vrednosti, najveći fotoodgovor. Vartanyan [21] je utvrdio dvostruku vrednost širine zabranjene zone za većinu organskih boja koja je izračunata za  $\alpha = 1$  (v. odjeljak 3.2), a da ista vrednost odgovara energiji zračenja koje maksimalno pobudjuje fotoprovodnik. Vrednost koju je dobio Vartanyan [21] je polovina od vrednosti širine zabranjene zone koja je data u radu [1] i u ovom radu. Talasna dužina pobudjivanja kojoj odgovara maksimalni fotoodgovor iznosi  $\lambda_{exp} = 7018$  Å. Maksimalni fotoodgovor dobijen u ovom radu nadjen je pri upotrebi filtra čiji je propusni opseg u intervalu 7200 - 9500 Å; drugi po redu fotoodgovor nadjen je u intervalu 6500 - 7000 Å. Odstupanje eksperimentalnih od teorijske vrednosti može da se objasni ukoliko se uzme u obzir vreme potrebno za uspostavljanje stacionarnog stanja. U slučaju na grafiku br.12 (interval 7200 - 9500 Å) vreme uspostavljanja iznosi oko 55 min. Tok opadanja tamne struje je isprekidan, što ukazuje na poremećaje u obrazovanju ravnotežnog stanja, odnosno moguće promene pritiska ili temperature. Sa grafika br.10 može se videti da se ravnotežno stanje uspostavlja u roku od 25 min. Proces uspostavljanja ovog ravnotežnog stanja nije ometen bilo kojim uticajem sa strane, što pokazuje i glatka kriva fotoodgovora. Razlog neslaganja teorijske i eksperimentalnih vrednosti talasnih dužina može da bude i vrednost koeficijenta  $\alpha$  ( $1 < \alpha < 2$ ), koja je usvojena pri izračunavanju, a koja, gledano fizički, zavisi od parametara procesa i stanja fotoprovodnika.

c. Interval  $\tau_{rt}$  počinje u trenutku  $t_1$ , tj. po isključenju

izvora svetla. Ovde se javlja jedan negativni pik, što ukazuje na prelaz elektrona iz provodne zone na nepotpunjeno stanje, tj. nivo zamke II. Posledica ovog je dalji pad tamne struje. Poluprovodnik (ispitivani uzorak) u tami pokazuje relaksaciju, čiji karakter spore promene ukazuje na prisustvo zamki (vreme uspostavljanja ravnotežnog stanja u mraku nije jednako vremenu života nosilaca nanelektrisanja). Važno je da se napomene da se, čak i posle uspostavljanja tamne struje, merenja ne mogu neposredno nastaviti, jer je potrebno da se u trajanju od jednog časa uzorak dovede u stanje potpune relaksacije.

Ukratko rečeno: Primenom raznih intervala talasnih dužina zračenja na uzorak javljaju se različiti fotoodgovori. Ovo je skladu sa teorijom Stöckmann-a i uslovima pod kojima je uzorak kristal violeta izradjen. Pretpostavka o prisustvu višestrukog nanelektrisanog centara (centara prilepljivanja, nivoa zamki) iznad Fermi-nivoa time je potvrđena.

### 5.6 Kumulativni grafik sekundarnih karakteristika

Grafik br.13 pokazuje spektralnu zavisnost fotoodgovora (pri jednakim intenzitetima upadnog zračenja). Vrednosti fotoodgovora dobijene od svih šest upotrebljenih滤器 (karakteristika transparencije - intenzitet propuštenog zračenja u definisanom intervalu talasnih dužina - datih filtera je gausijanska) leže na mestima koja se mogu i predvideti, sem u slučaju tačke 6 (odeljak 5.5).

Vrednost fotoodgovora dobijena na talasnoj dužini od  $5750 \text{ Å}$  ista je kao i vrednost (teorijska i eksperimentalna) pri talasnoj dužini od  $6750 \text{ Å}$ . Ovo se objašnjava činjenicom da se organska boja kristal violet može upotrebiti kao senzitor fotoprovodnika  $\text{AgJ}$  u intervalu  $4800 - 5400 \text{ Å}$  [22]. U ostalim intervalima primenjenih talasnih dužina može se pretpostaviti prisustvo  $\Delta\sigma_{+} < \Delta\sigma_{-}$ .

### 5.7 Pobudjivanje uzorka kristal violeta pomoću četvrtastog impulsa velikog intenziteta

Izvršen eksperiment pokazuje da se negativni fotoefekat javlja i u slučaju dejstva kratkotrajnog veoma intenziv-

nog zračenja. Grafik br.14 prikazuje slučaj primjenjenog zračeњa od  $6500 - 7000 \text{ \AA}$ , a negativni fotoefekat je veoma izražen. U slučaju da je upotrebljeni četvrtasti impuls polihromatskog karaktera uključujući i talasne dužine do  $2000 \text{ \AA}$ , nastupa tipičan slučaj optičkog gašenja fotoprovodljivosti (iako se može opaziti odredjeni negativni efekat koji verovatno potiče od podloge). U ovom je slučaju dakle  $\Delta\sigma_+ \approx \Delta\sigma_-$ .

## ZAKLJUČAK

Namena ovog rada prvenstveno je da doprinese objašnjenju fenomena negativne fotoprovodljivosti na primeru organske boje kristal-violeta. Ova jedinjenja fizička čvrstog stanja ubraja u čvrsta tela. Električne i optičke osobine ovih kristala, prema tome, upotpunjaju podatke o njihovoj strukturi. Kristalno stanje kristal-violeta utvrđeno je rendgenskim merenjima [14] kao i merenjima pomoću polarizacionog mikroskopa. Izvršena snimanja karakteristika pokazala su da je supstanca kristal-violet poluprovodnik sa širinom zabranjene zone  $\Delta E = 1.74 \text{ eV}$  i da ponaša približno po Ohm-ovom zakonu. Električno-optička merenja pokazuju osobine dve vrste uzoraka. Uzorci sa ogledalskom površinom, amorfног karaktera, imaju karakter poluprovodnika N-tipa i odgovarajuću tamnu i fotostruji. Prekristalizovan uzorak pokazuje promenu znaka fotoprovodljivosti, dok je tamna struja (tip nosilaca) ostala ista. Amorfni uzorak poseduje normalnu pozitivnu fotoprovodljivost, a polikristalna površina istog uzorka normalnu negativnu fotoprovodljivost. Ovo je potvrđeno karakterom fotoodgovora koji u oba slučaja zavisi od intenziteta upadnog zračenja kao:  $i_f = c I^{3/5}$ .

Utvrđene osobine i dobijeni podaci mogu da se objasne teorijom Stöckmann-a. Teorija singlet-tripletnih prelaza nije mogla da se uzme u obzir, jer u čvrstom stanju ovog materijala nije konstatovana fosforescencija. Ovo navodi na zaključak da su pomenuti prelazi nemogući. Stvaranje eksitona moguće kod takvih struktura čija je širina zabranjene zone veća od iste utvrđene za ispitivani uzorak kristal-violet. Ni ova se teorija ne može uzeti, prema tome, u obzir. Postojanje nekog fotohemiskog efekta nije primećeno (apsorpciona merenja).

Potrebito je da dalja istraživanja budu usmerena u pravcu ispitivanja dejstva različitih gasova, posebno kiseonika, pod povišenim pritiskom na uzorak kristal-violeta. Potrebno je da se detaljnije provere oksidaciono-redukcione kao i fotolitičke sposobnosti kristal-violeta, zatim fotoizomerizacija (reverzibilna ili ireverzibilna [26]), fototropija (promena oblika pod dejstvom svetlosti), jer su ovi fenomeni uzrok dugotrajnih sporih vremenskih promena karakterističnih veličina.

## LITERATURA

- [1] Академия Наук СССР: Органические полупроводники, Наука, Москва, 1968.
- [2] М. И. Корсунский: Аномальная фотопроводимость, Наука, Москва, 1972.
- [3] Richard H. Bube: *Photoconductivity of Solids*, John Wiley and Sons Inc., New York, London 1967.
- [4] P. Görlich: *Photoconductivity in Solids*, New York Dover Publications Inc., 1967.
- [5] *Physics and Chemistry of the Organic Solid State*, Vol. II, Interscience Publishers, John Wiley and Sons Inc., New York 1965.
- [6] Y. Okamoto and W. Brenner: *Organic Semiconductors*, Chapman and Hall, London 1964.
- [7] R.H. Tredgold: *Space Charge Conduction in Solids*, Elsevier Publ. Co., New York 1966.
- [8] *Proceedings of the Third International Conference on Photoconductivity*, Editor: Erik M. Pell, Pergamon Press, Oxford, New York 1970.
- [9] S. Carić: *Uvod u fiziku čvrstog stanja*, I deo, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad 1970.
- [10] M. Pavlov: *Elektronika*, I deo, Univerzitet u Novom Sadu, Novi Sad 1973.
- [11] R.J. Elliott, A.F. Gibson: *An Introduction to Solid State Physics and its Applications*, William Clowes and Sons LTD, London 1974.
- [12] H.Z. Meir, *Physik Chem.*, 208, 340 (Leipzig, 1958).
- [13] И.А. Акимов, Е.Н. Пуцейко: Фотоэлектрические и оптические явления в полупроводниках (Труды Всес. Совещания) Изд. А.Н. Киев,

- [14] A. Nahlovski: *Diplomski rad, PMF, Novi Sad,*  
Novi Sad 1972.
- [15] Charles Kittel: *Uvod u fiziku čvrstog stanja,*  
Savremena administracija, Beograd 1970.
- [16] A. Rose, *RCA Rev.,* 12, 362 (1951).
- [17] D.D. Eley, H. Inokuchi, *Z. Elektrochem.*, 63, 29 (1959).
- [18] Е.Н. Пуцейко, Докл. АН СССР, 67, 1009 (1949).
- [19] A. Terenin, *Proc. Chem. Soc.*, 311, 1964.
- [20] Vartanyan, A.T., L.D. Rozenstein, *Soviet Phys.,*  
"Doklady" (Engl. Transl.), 5, 291 (1960).
- [21] Vartanyan, A.T., *Izv. Akad. Nauk, SSSR, Ser. Fiz.*,  
20, 1541 (1956).
- [22] A.G. Goldman, I.A. Akimov, *Zh. Fiz. Khim.*, 27, 355 (1953).
- [23] A. Rose: *Concepts in Photoconductivity and Allied Problems,*  
Interscience Publishers, New York, London 1963.
- [24] *Handbook of Chemistry and Physics,*  
Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, OHIO (1958).
- [25] J. Stringer: "An Introduction to the Electron Theory of Solids",  
Pergamon Press, Oxford, New York (1967).
- [26] *Physics and Chemistry of the Organic Solid State, Vol. I.,*  
Interscience Publishers, John Wiley and Sons Inc., New York 1965.

$i_t [mA] \times 10^{-2}$

2

0

200

500

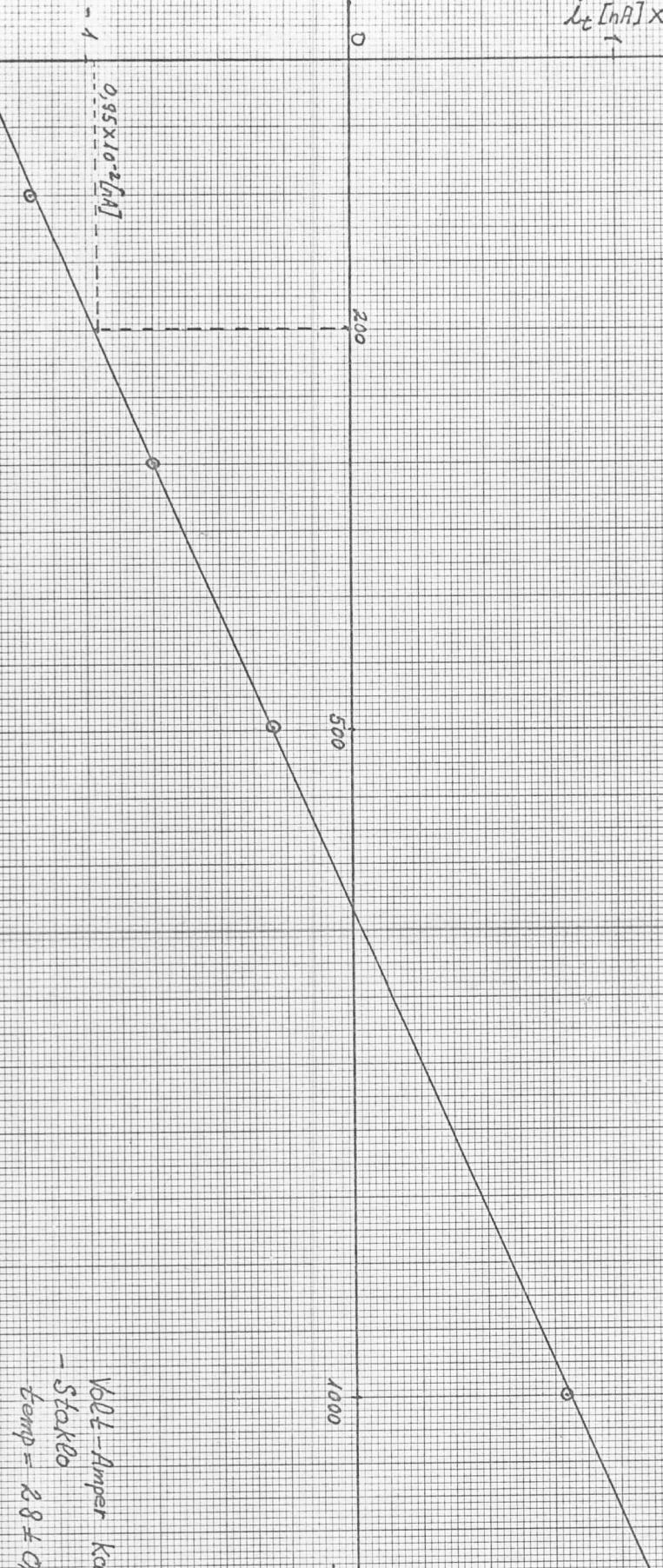
1000

U/I

10

11

12



Volt-Amper karakteristika podloge  
- Stakko  
 $\text{temp} = 28 \pm 0,5^\circ\text{C}$

$$i_g (-) [mA] \times 10^{-2}$$

40

0

$$i_g = 0,24 \times 10^{-2} [mA]$$

0

HI

LI

II

2,0

3,0

$t_0$

$t_{ref}$  5

10

15

20

$t [min]$

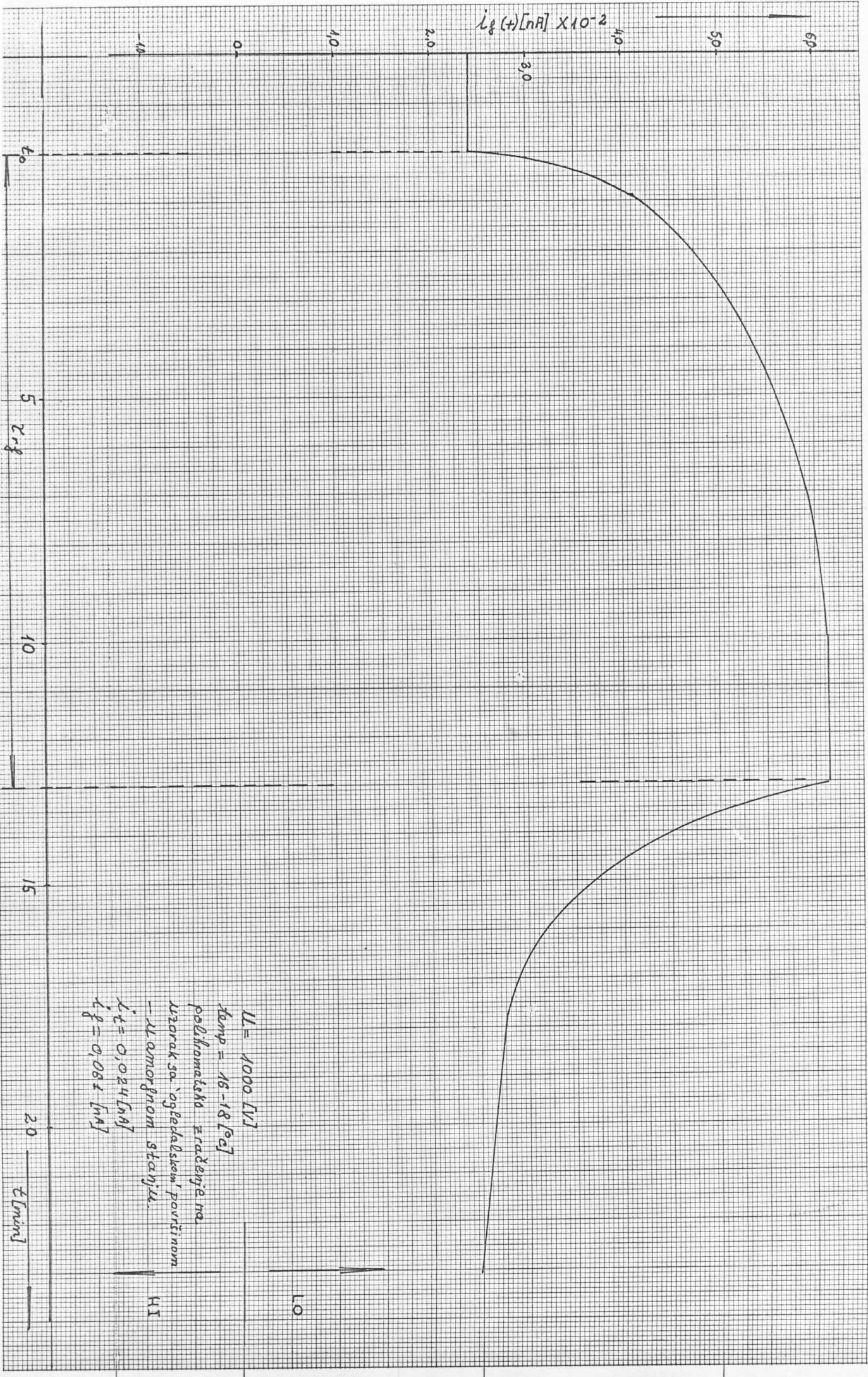
Reakcija podloge (staklo)  
na date uslove:

$\lambda$  - polikromatsko

temp =  $28 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$

$U = 300 \text{ V}$

$i_g = 0,7 \times 10^{-2} [mA]$



$\log \frac{i_t}{i_{\text{min}}}$

3

0

3,1

3,2

3,3

3,4

3,5

$$\frac{1}{t} \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

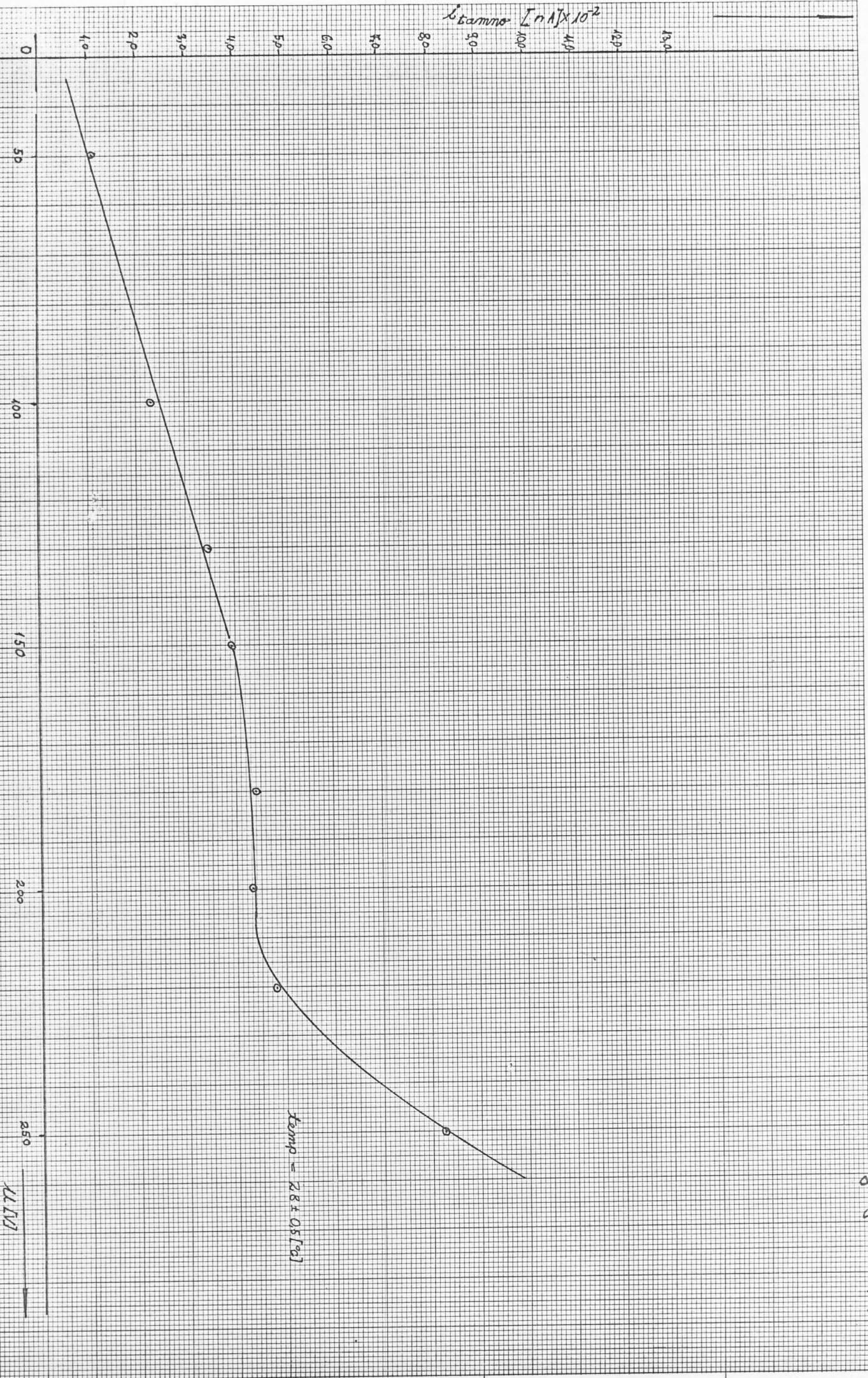
$$U_3 = 300 \text{ mV}$$

$$U_2 = 150 \text{ mV}$$

$$U_1 = 50 \text{ mV}$$

grafikon # 1

graphique #4



0,15

0,1

0

0,20

 $I^{3/5}$  $I_{\text{in}} I^{3/5}$ 

$$\lambda = 6500 - 7000 \text{ [Å]}$$

$$\mu = 200 \text{ [V]}$$

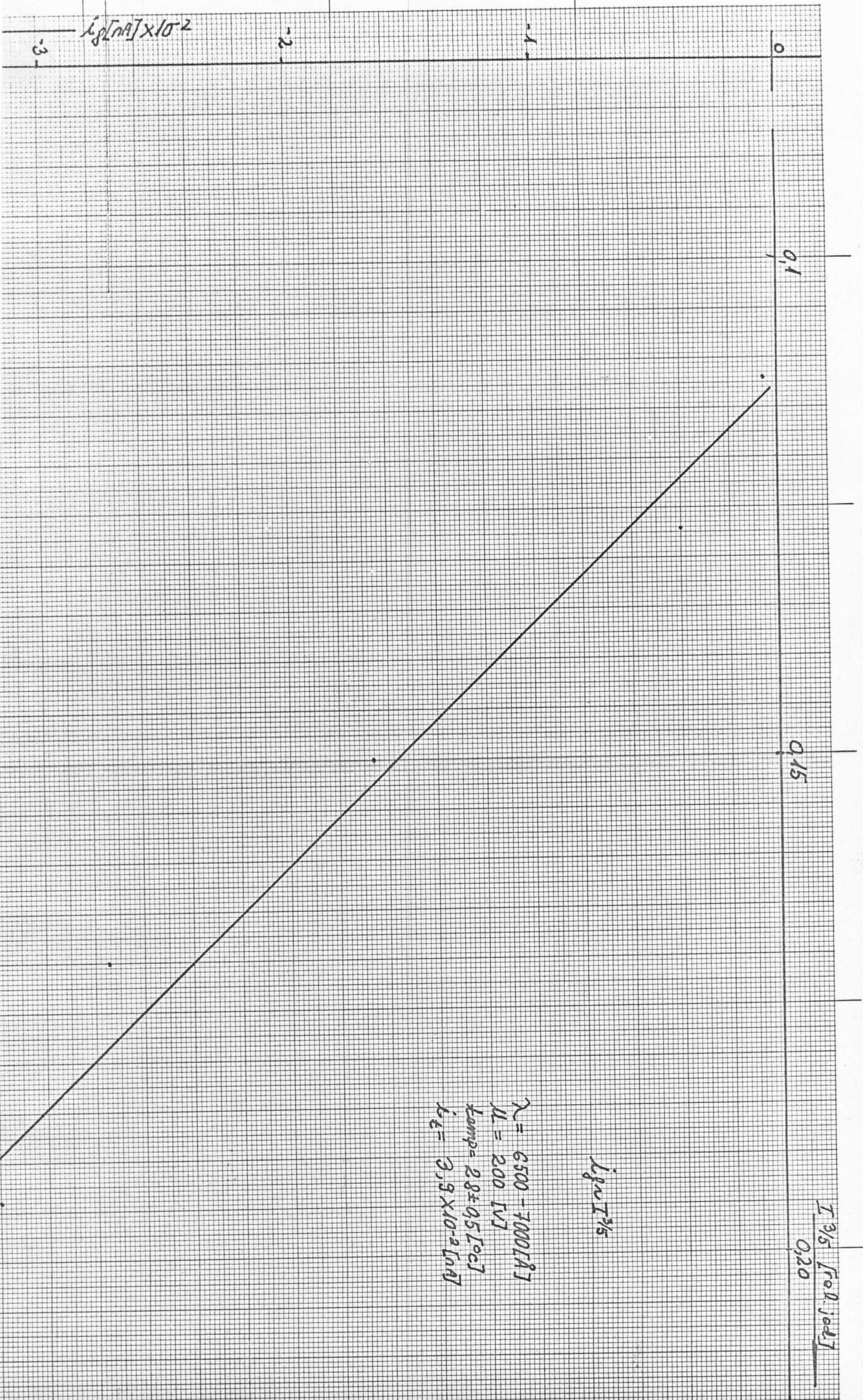
$$\text{temp} = 2,8 \pm 0,5 \text{ [°C]}$$

$$i_t = 3,3 \times 10^{-2} \text{ [mA]}$$

 $i_g [\text{nA}] \times 10^{-2}$ 

-2

-3



Pomácsay Alenka kód: Violet (polka- & fotoprovodník)

Prí:

Ukonč.

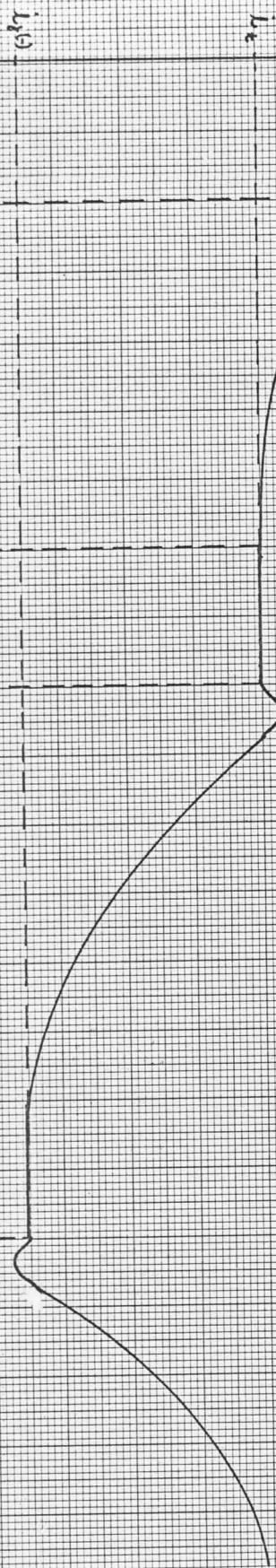
Kompaktnost:

Prí: svedčíme o kvalitnejšej výmeni  $\lambda$

sa  $I = \text{const}$

$$\lambda = \lambda' \Rightarrow \pi$$

$i$  [rel. jed.]

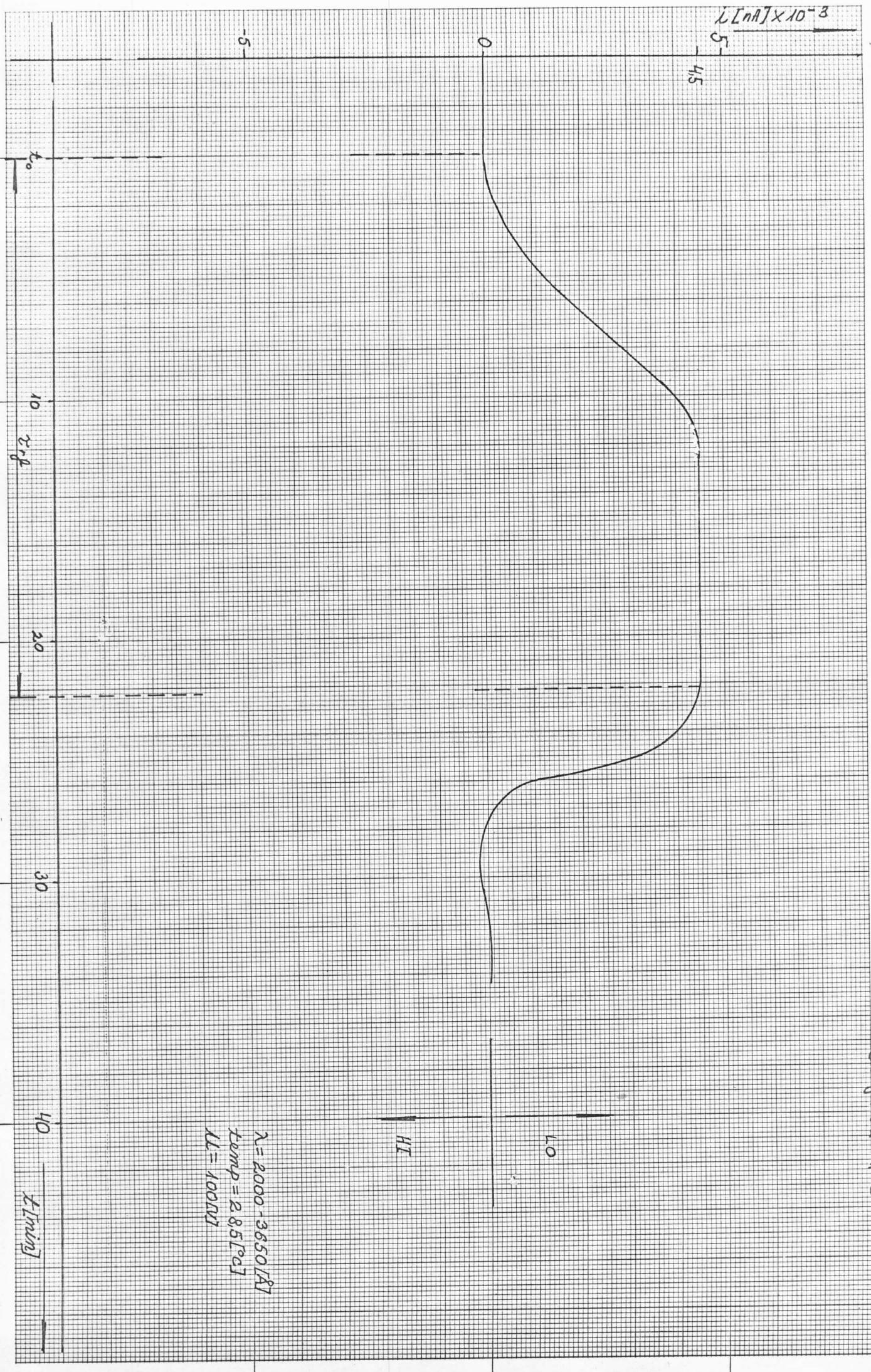


$i_r$

$t_0$

$i_u$

$t$  [min]



graphique #7

$\lambda [nm] \times 10^{-2}$

10

H

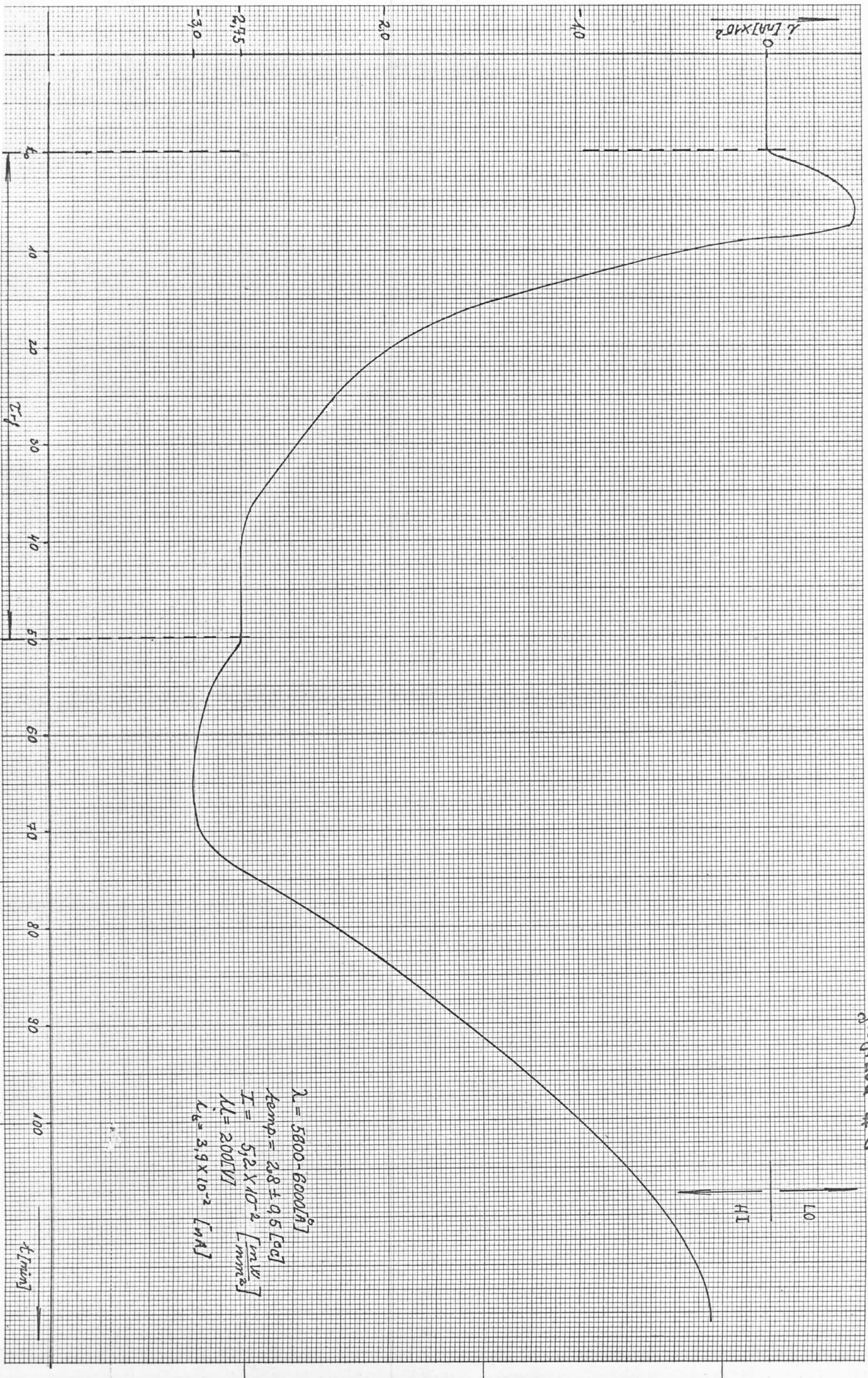
-10

-2,0  
-2,20

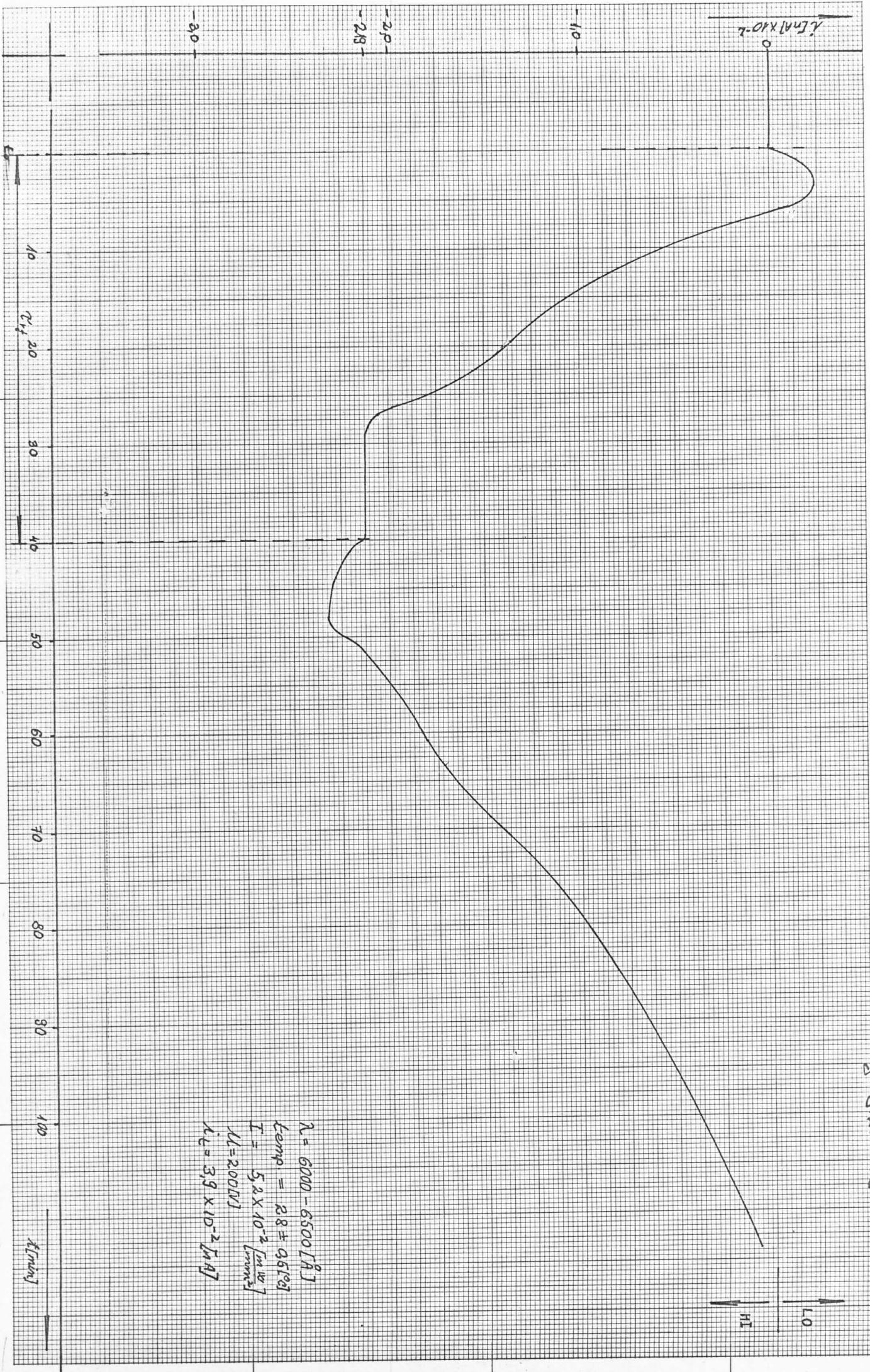
10  
10  
20  
30  
40  
50  
60  
70  
80  
90  
100  
 $t [min]$

$$\begin{aligned}\lambda &= 4800 - 5700 [\text{Å}] \\ \text{temp} &= 3.8 \pm 0.5 [\text{K}] \\ I &= 5.2 \times 10^{-2} \left[ \frac{\text{eV}}{\text{nm}^2} \right] \\ \mu &= 200 \text{ mJ} \\ i_2 &= 3.9 \times 10^{-2} [\text{mA}]\end{aligned}$$

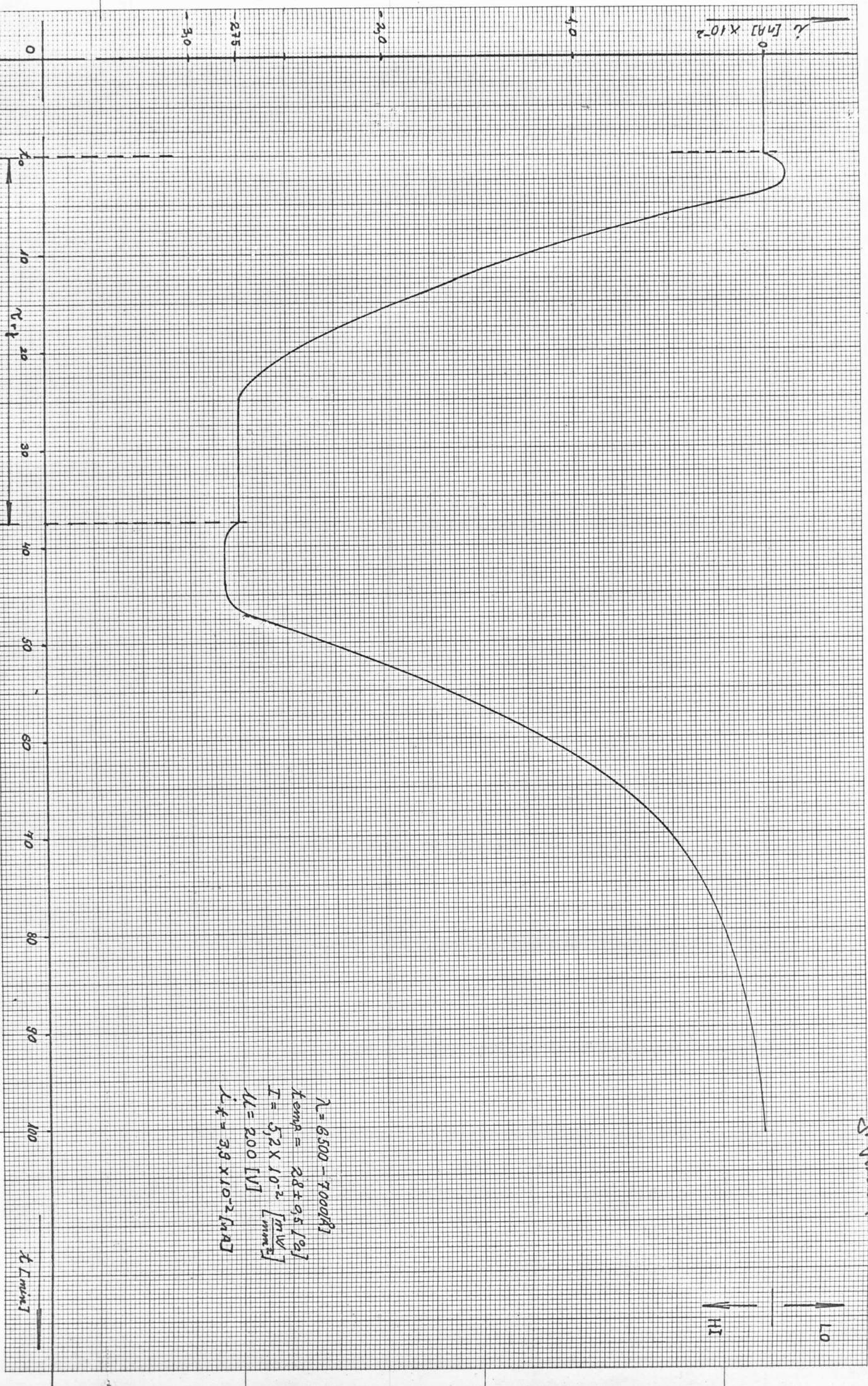
gradišten # 8

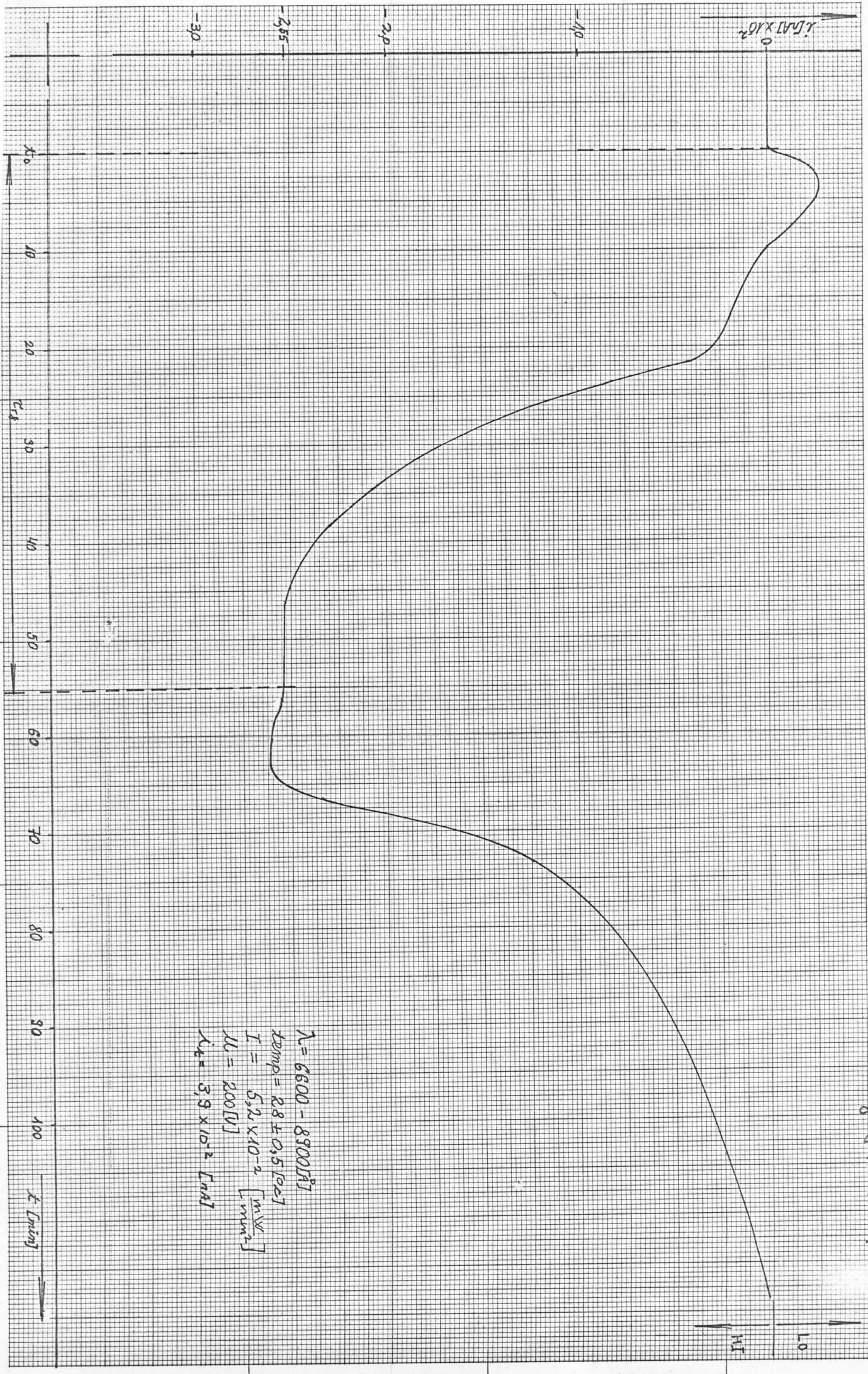


graphique #9

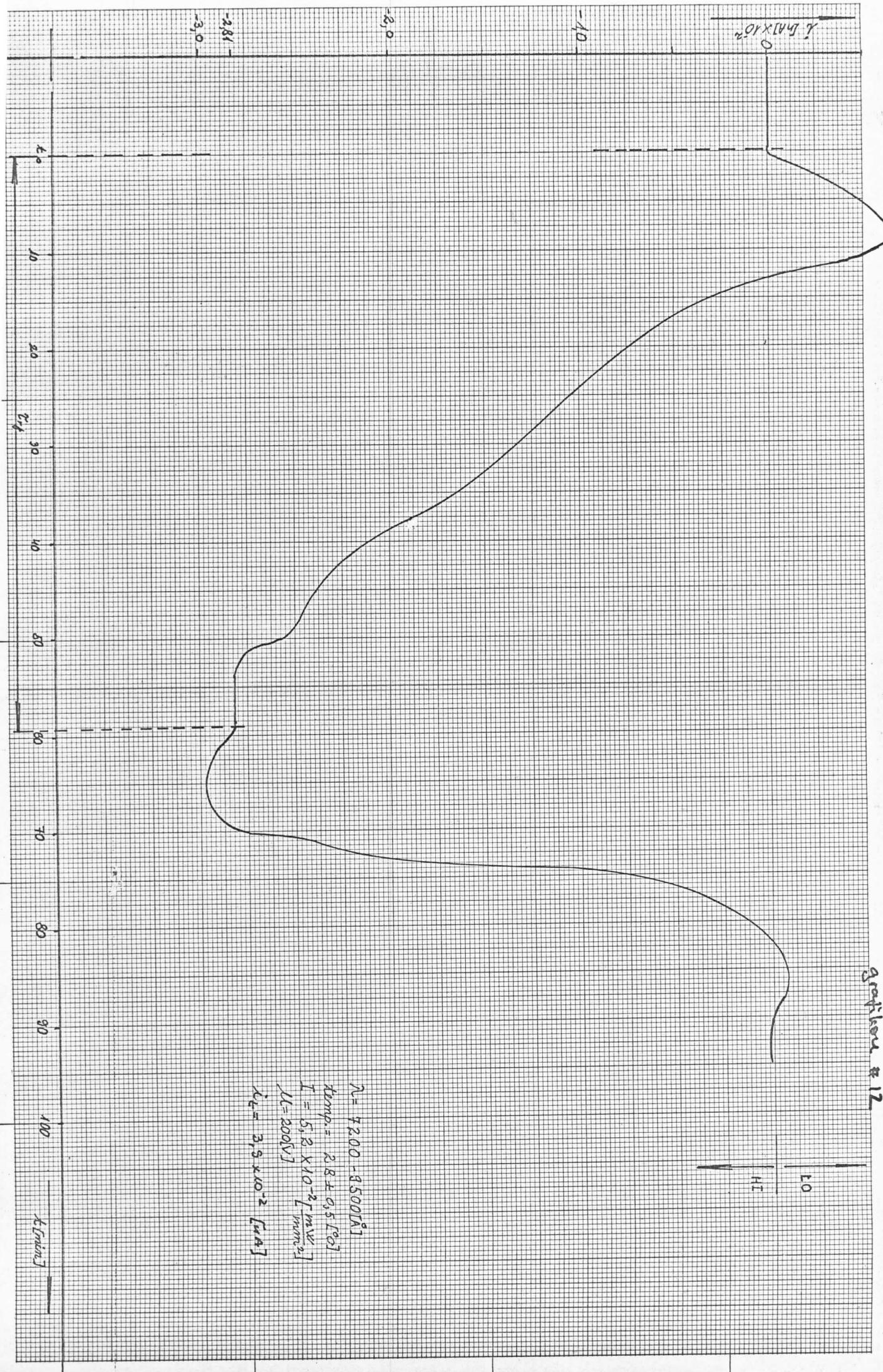


grafikau #10

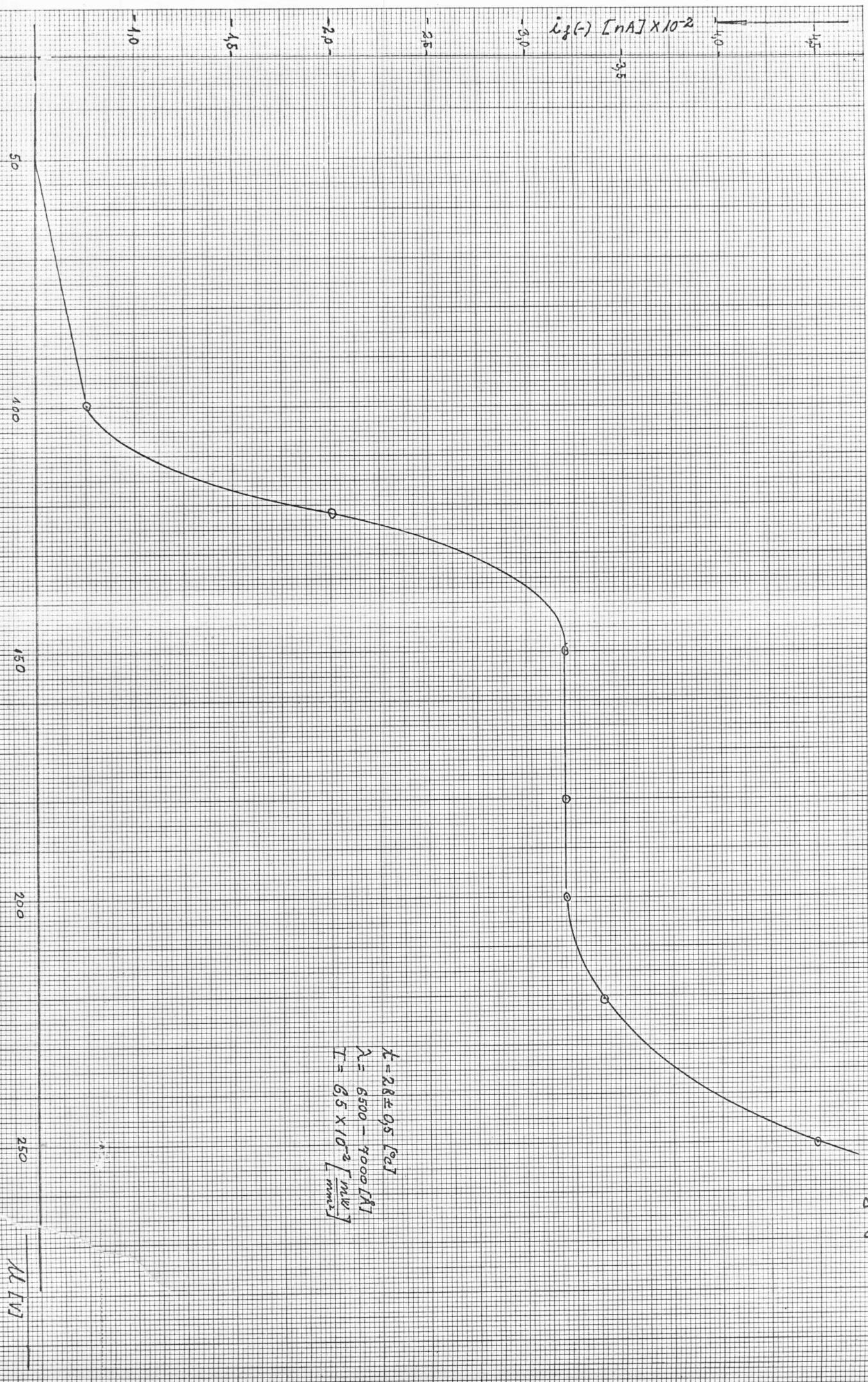




Grafiken #12.



grafikon #13 (a)



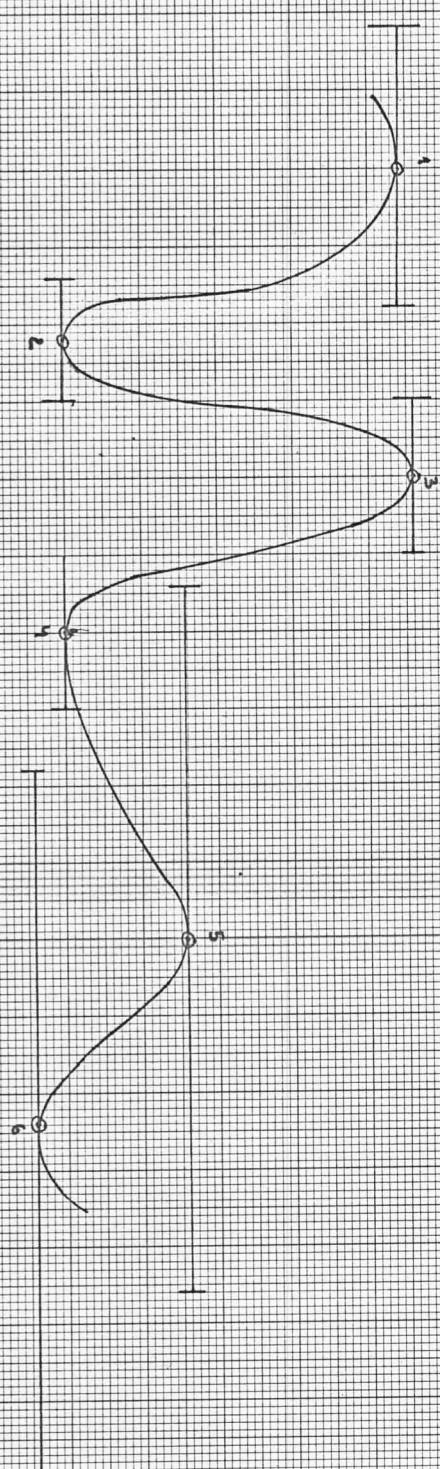
5600 - 6000 [A] (# 1)      6000 - 6500 [A] (# 5)      6500 - 7000 [A] (# 6)  
 6600 - 8000 [A] (# 8)

(# 3)

$i_8(-) [\mu A] \times 10^{-2}$

-2.0

-1.5



$$M = 200 [W]$$

$$\text{temp.} = 28 \pm 0.5 [^{\circ}\text{C}]$$

$$I = 5.2 \times 10^{-2} \left[ \frac{\text{mW}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$i_8 = 3.9 \times 10^{-2} \left[ \mu\text{A} \right]$$

(\*) Je broj upotrebljenog  
dijistra.

$i(t) [mA] \times 10^{-2}$ 

-1,0

-2,0

-3,0

-3,5

t<sub>0</sub>

5

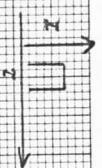
t<sub>0</sub>

10

15

20

t [msec]



Pobudzovací vlna s periodickým četněním impulsa  
ve čtrnácti intervalech

$$T = 6500 - 9000 [\mu\text{s}]$$

$$\text{TEMP} = 2,8 \pm 0,5 [\text{°C}]$$

$$BL = 200 [\text{V}]$$

$$I_2 = 3,9 \times 10^{-2} [\text{mA}]$$

grafika 4-15

