

Природно-математички факултет
Радна заједница заједничких послова
НОВИ САД

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИНСТИТУТ ЗА ФИЗИКУ

Пријемљено:	17. VIII. 1964.		
Орг. јед.	Број	Рок/датум	Време
ОЗ	10/29		

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

FOTOELEKTRIČNI PRETVARACI
(SA OSVRTOM NA MERENJE MALIH POMERANJA)

S E D L A Č E K E N D R E

P R E D G O V O R

Ovaj diplomski rad raden je na industrijskom smeru fizike u Novom Sadu iz predmeta Mernoinstrumentalna tehnika pod vodstvom dr. Ribar Bele.

Zahvaljujem se svima onima koji su mi pomogli da rad ima onakav oblik kakvog ga sad vi držite u ruci.

Sedlaček Endre
jul 1984

S A D R Ź A J

	str
3.5. Realni foto elementi	21
4. Tranzistori	27
4.1. princip rada i jednačine tranzistora .	27
4.2. Fototranzistori	29
4.2.1. Kolektorski PN spoj kao fotodioda .	29
4.2.2. Kolektorski PN spoj kao foto element	31
4.3. Karakteristične veličine fototranzis-	
tora	31
5. Problem: merenje malih pomeranja . . .	34
5.1. Optička prepreka	34
5.2. Izvor svetlosti	35
5.3. Fotoelektrični pretvarač	43
5.4. Merenje malih pomeranja	45
6. Tehnički detalji	49
6.1. Karakteristike foto elementa	49
6.2. Karakteristike fototranzistora	50
6.3. Karakteristike tranzistora 2N3442,	
2N3866 i realizacija stabilizatora .	51
6.4. Optička prepreka	53
6.5. Aparatura	57
Literatura	56

U V O D

Čovek prima oko 90% informacija o okolnom svetu svojim okom, a to znači da čovečje oko ima najvažniju ulogu u upoznavanju objektivnog sveta. Međutim oko čoveka poseduje i izvesne nedostatke odnosno subjektivnosti. Prvenstveno se misli ovde na nemogućnost absolutnog određivanja jačine svetlosti, kao i na nemogućnost praćenja brzih svetlosnih promena (poznato je da čovečje oko može razlikovati tek deset slika u jednoj sekundi). Pored toga mrežnjača oka osetljiva je na elektromagnetne talase u malom intervalu njihovih talasnih dužina (400-780nm).

Razvojem nauke postavili su se zahtevi za merenja koji su isključili nedostatke i subjektivnosti oka, odnosno bilo je potrebno izgraditi takve instrumente koji su svetlost ili svetlosnu promenu pretvorili u neku drugu veličinu. Takve pretvorene veličine pristupačnije su čoveku sa manjom mogućnošću greške.

Gradnja svetloosetljivih instrumenata odnosno fotoelektričnih pretvarača baziraju se na fizičkim pojavama koje su otkriveni u drugoj polovini prošlog veka.

Francuzki fizičar E. Bekerel (Aleksandre Edmond Becquerel 1820-1891, otac H. Bekerela poznatog po otkriću radioaktivnog zračenja) primetio je 1839 godine fotoelektričnu pojavu: zapazio je da na nekim galvanskim elementima javlja napon kada se izloži sunčevom svetlošću. On je razradio galvanski element osetljiv na svetlost - fotovoltažnu ćeliju sa zlatnim i platinastim elektrodama prevučenim srebro hloridom u razblaženoj azotnoj kiselini i predložio je za upotrebu u fotometrijske svrhe. No zbog nepovoljnih osobina fotovoltažne ćelije nisu našli praktičnu primenu.

Tek 1873 godine Smit (Villoghbi Smith) je zapazio foto električne osobine selena. Naime on je zapazio da otpornici od selena u staklenoj čevčici menjaju svoju otpor za 15-100% kada su izloženi sunčevoj svetlosti. Otkriće je našao široku primenu.

Nemački fizičar Herc (Heinrich Hertz, 1857-1894) u svojim eksperimentima sa elektromagnetskim talasima 1887 godine je primetio da varnica na varničaru preskače kod manjeg napona ako se varničar izloži ultraljubičastom zračenju.

Dalja istraživanja je vršio Halvaks (Wilhelm Hallwachs, 1859-1922) i otkrio je da statičko negativno nanelektrisanje cink brzo izgubi ako se osvetli ultraljubičastim zračenjem, dok pozitivan naboj zadržava i uprkos osvetljenju.



Ova se pojava često naziva Halvaksovim efektom. Zamenivši cink kadmijumom a zatim i drugim alkalnim metalima 1889 godine otkrili su Elster i Gaitel da i vidljiva svetlost može prouzrokovati fotoefekat ove vrste. Oni su napravili i prvu fotoćeliju.

Poluprovodnici osetljivi na svetlost našli su svoju praktičnu primenu posle drugog svetskog rata (fotodioda, foto element, fototranzistor, itd).

U ovom radu je obraden tek mali deo fotoelektričnih pretvarača čiji rad bazira na unutrašnjem fotoefektu.

1. P O L U P R O V O D N I C I

Poluprovodnici su specijalna vrsta provodnika ili izolatora. Ovi materijali u nekim uslovima ponašaju se kao provodnici a u drugim uslovima kao izolatori. Koji su to uslovi i šta se dešava u unutrašnjosti tih poluprovodničkih materijala videćemo proučavanjem energetskih stanja čvrstih tela.

1.1. Energetska stanja

Ovde će biti reči o energetskim stanjima elektrona u čvrstim kristalnim strukturama provodnika, izolatora i poluprovodnika.

Vezani elektroni slobodnih atoma imaju tačno odredjene diskretnе vrednosti energija E_n koje proizlaze iz rešenja Šredin-

gerove jednačine

$$\hat{H}_S \Psi(r) = E_n \Psi(r),$$

gde je \hat{H}_S operator hamiltonijana slobodnog atoma

$$\hat{H}_S = \hat{T}_e + \hat{V}_{ee} + \hat{V}_{ej}.$$

$\hat{T}_e = -\sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2$ - operator kinetičke energije elektrona,

$\hat{V}_{ee} = \sum_{ij} \frac{e^2}{|r_i - r_j|}$ - operator interakcije elektrona (sumiranje se vrši po svim elektronima),

$\hat{V}_{ej} = \sum_i \frac{Ze^2}{|r_i|}$ - operator interakcije elektrona i jazgra.

Problem elektronskih stanja atoma u kristalu je složeniji, jer svaki atom deluje na susedne atome. Problem se rešava tako što se pretpostavlja da se kristal sastoji iz velikog broja interagujućih čestica, jazgra i elektrona. U ovom slučaju ukupni hamiltonijan kristala

$$\hat{H}_k = \hat{T}_e + \hat{T}_j + \hat{V}_{ee} + \hat{V}_{ej} + \hat{V}_{jj} \quad \text{gde su}$$

$\hat{T}_e = -\sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2$ - operator kinetičke energije elektrona, sumiranje po svim elektronima kristala,

$\hat{T}_j = -\sum_k \frac{\hbar^2}{2M_k} \cdot \nabla_k^2$ - operator kinetičke energije jazgra, sumiranje po svim jazgrima kristala, i ako su interakcije samo kulonovog tipa

$\hat{V}_{ee} = \sum_{i,j} \frac{e^2}{|r_i - r_j|}$ - operator interakcije medju elektronima ($i \neq j$),

$$\hat{V}_{ej} = \sum_{k,i} \frac{Z_k e^2}{|R_k - r_i|}$$

- operator interakcije izmedju jezgra i elektrona,

$$\hat{V}_{jj} = \sum_{k,l} \frac{Z_k Z_l e^2}{|R_k - R_l|}$$

- operator interakcije medju jezgrima ($k \neq l$).

Šredingerova jednačina koja opisuje ovakav sistem

$$\hat{H}_k \Psi(R, r) = E \cdot \Psi(R, r),$$

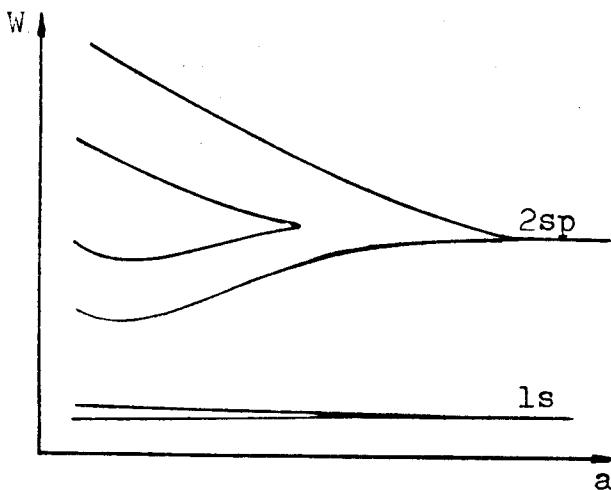
gde su R i r skup vektorskih kordinata jezgra i elektrona. Reševenje ovog problema je nemoguć ako se ne uvedu uprošćenja i približni metodi, koji traže složen matematički račun. Prvo se razdvaja hamiltonijan na dva dela

$$\hat{H}_e = \hat{T}_e + \hat{V}_{ee} + \hat{V}_{ej}$$

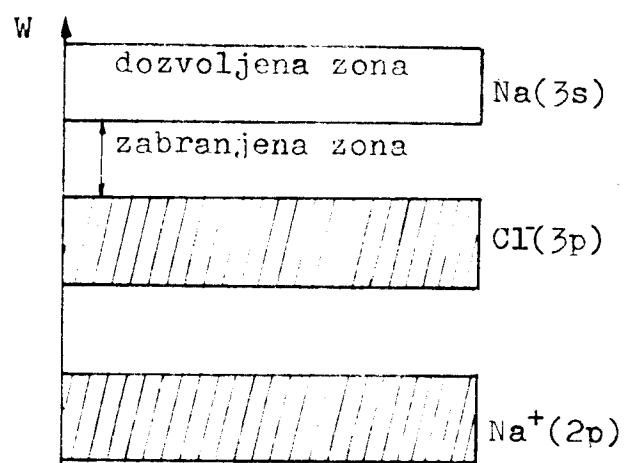
"elektronski", koji nije nezavisan od

$$\hat{H}_j = \hat{T}_j + \hat{V}_{jj}$$

hamiltonijan jezgra. Ovaj poslednji opisuje kretanje jezgra u kristalnoj rešetci, dok prvi kretanje elektrona. Nastavljujući rešavanje ovako početog problema dobija se da u kristalu energetska stanja elektrona nisu diskrette nego se raširuju u zone, čineći takozvane dozvoljene zone. Između dozvoljenih zona postoje zone u kojima nema energetskih stanja, to su zabranjene zone. Pojava širenja diskretnih energetskih nivoa je posledica dejstva svake čestice na svaku (slika 1).



Slika 1a. Širenje energetskih nivoa kod dijamanta u zavisnosti od medjuatomskih rastojanja a .



Slika 1b. Energetske zone kristala NaCl (srađirano-popunjeno).

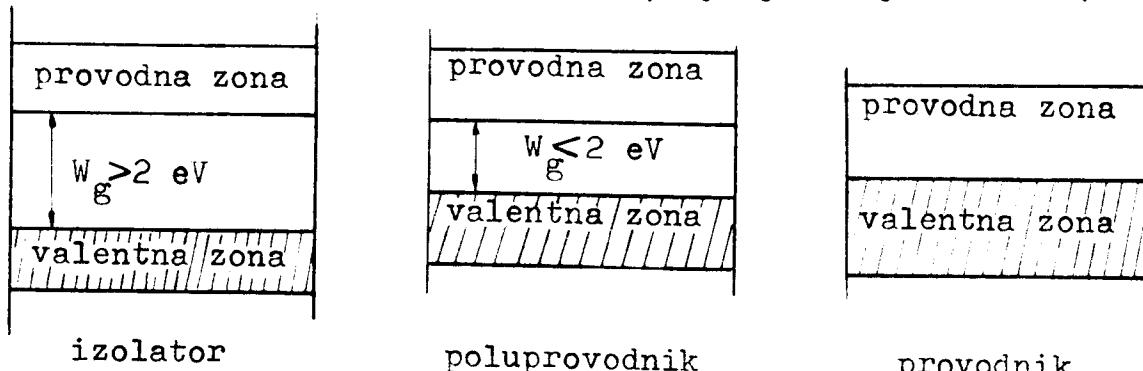
1.2. Provodjenje struje

Na apsolutnoj nuli nisu sve dozvoljene zone popunjene nego samo one koje imaju najniže energije. Ako jedan elektron iz bilo kog razloga može da predje u nepotpunjenu zonu on može da se kreće slobodno u kristalu. Ako na kristal priključimo električno polje taj elektron može usmereno kretati, odnosno provoditi struju, a zona u kojoj elektroni provode struju zove se provodna zona. Popunjena zona koja ima najveću energiju na apsolutnoj nuli zove se valentna zona.

Ako prelazak elektrona iz valenetne u provodnu zonu nije moguć materijal će biti izolator. Kod izolatora nemogućnost prelaza u provodnu zonu proizlazi iz veoma široke zabranjene zone, koja je veća od 2eV (dijamant 5,5,eV). Kod provodnika zabranjena zona ne postoji tj. nema nikakvih energetskih ograničenja da elektron kreće slobodno u kristalu.

se valentni

Poluprovodnici po zonskoj strukturi bliže su izolatorima ali sa malom širinom zabranjene zone, koja je manja od 2eV (slika2).



Slika 2

Kod poluprovodnika neki elektroni iz valentne zone mogu preći u provodnu zonu ako dobiju energiju veću od širine zabranjene zone. Tu energiju oni mogu dobiti iz termičkog kretanja kristalne rešetke, ili od kvanta elektromagnetskog zračenja, fotona. Ako je poluprovodnik zaštićen od elektromagnetskog zračenja biće izolator ako je na dovoljno niskoj temperaturi i provodnik ako je na dovoljno visokoj temperaturi. Provodljivost se menja po zakonu $\exp(-W_g/2KT)$ gde je W_g širina zabranjene zone. Porastom temperature provodljivost poluprovodnika raste, dok kod provodnika zavisnost je obrnuta. Ovo je jedan od bitnih razlika između poluprovodnika i provodnika.

1.3. Struktura poluprovodnika

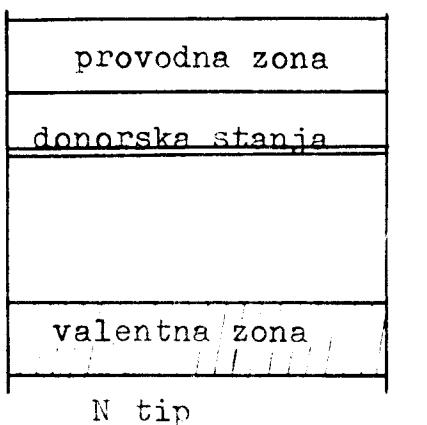
Poluprovodničke osobine ispoljavaju elementi četvrte grupe periodnog sistema, pa intermetalna jedinjenja treće i peta odnosno druge i šeste grupe (Si, Ge, Sn, SiC, AlP, AlAs, AlSb, GaP, GaAs, InP, InAs, InSb, CdS, ZnS).

Čisti poluprovodnici. Ako je poluprovodnički kristal načinjen od istih atoma ili molekula bez primesa i nečistoća poluprovodnik je čist. Atomi poluprovodnika su vezani kovalentnim vezama. Ovde u provodjenju struje učestvuju istovremeno dva nosilaca nanelektrisanja: elektroni i šupljine. Slobodni nosioci nanelektrisanja nastaju otkidanjem elektrona iz kovalantne veze. Minimalna energija za otkidanje jednog elektrona je jednak širini zabranjene zone. Šupljine su nedostatak elektrona u valantnoj zoni ostajući na mestima elektrona kada su ovi prešli u provodnu zonu. Pozitivno nanelektrisane šupljine su pokretne.

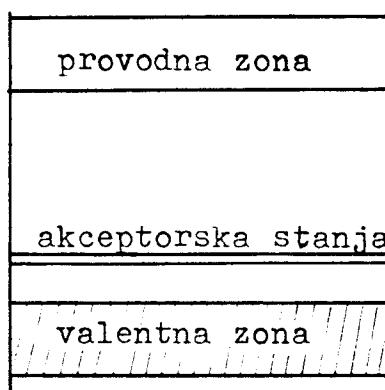
Primesni poluprovodnici. Atom čistog poluprovodnika ima četiri valentna elektrona pomoću kojih gradi kovalentnu vezu sa četiri susedna atoma. Ako u kristalnu rešetku umesto atoma poluprovodnika ugradimo nekoliko atoma koji imaju pet valentnih elektrona, kovalantne veze će se formirati na takav način da od pet elektrona četiri činiće kovalentnu vezu a peti će biti višak. Ovaj poslednji je slabo vezan za svoj atom, dovoljna je mala energija da se odvoji i da bude slobodan. Prema energetskim zonama to znači da postoje elektronska stanja ispod provodne zone koji potiču od petih elektrona a zovu se donorska stanja. Donorski elektroni prešavši u provodnu zonu ostavljaju za sobom pozitivna nanelektrisanja, međutim ova su lokalizovana i nepokretna. Ako nema elektrona iz valentne zone nosioci nanelektrisanja su isključivo elektroni a ovakav poluprovodnik je N tipa.

Ugradnjom u kristalnu strukturu čistog poluprovodnika atome sa tri valentna elektrona kovalentne veze će se formirati, ali sa nedostatkom jednog elektrona. Valentni elektroni susednih atoma ako dobiju malu energiju mogu raskinuti svoju vezu i preći

na mesto nedostatka, stvoreći kod svog atoma nedostatak, odnosno šupljinu. Šupljine se ponašaju slično elektronima ali sa pozitivnim nanelektrisanjem. Prema zonama: postoji nepotpunjena stanja elektrona koji potiču od nedostajućih elektrona i zovu se akceptorska stanja. Akceptorska stanja su lokalizovana i nalaze se iznad popunjene zone (slika 3).



N tip



P tip

Slika 3

Elektroni prešavši u akceptorska stanja ostavljaju za sobom šupljine, tako da su jedini nosioci nanelektrisanja šupljine a poluprovodnik je P tipa.

Ugradnjem akceptorskih i donorskih atoma utiče se na vrstu nosilaca nanelektrisanja kao i na energiju stvaranja slobodnih nosilaca nanelektrisanja.

2. FOTOPOVODLJIVOST

Udarom fotona u neki materijal mogu se javiti dva efekta:

1. Foton predaje svoju energiju elektronu i ovaj elektron izlazi iz materijala.
2. Foton predaje svoju energiju elektronu ali ovaj nema dovoljnu energiju da izadje iz materijala nego samo zauzima viši energetski nivo.

Prvi efekat se zove spoljašnji a drugi unutrašnji fotoefekat. Ovde će biti reči samo o unutrašnjem fotoefektu jer ovaj ima značajnu ulogu kod fotoosetljivih poluprovodnika.

2.1. Fotoprovodljivost poluprovodnika

Provodljivost poluprovodnika može da poraste povećanjem temperature ili pod dejstvom elektromagnetskih talasa. Ako poluprovodnik osvetlimo svetlošću dovoljno visoke frekvencije tada foton izaziva prelazak elektrona iz valantne u provodnu zonu. Ovako nastali slobodni elektroni povećavaju provodljivost materijala zbog čega se efekat zove fotoprovodljivost. Uslov fotoprovodljivosti je u veličini energije fotona koji mora biti veća od širine zabranjene zone, $h\nu > W_g$. Minimalna frekvencija ili maksimalna talasna dužina elektromagnetskog zračenja koji još izaziva efekat može se izračunati iz

$$h\nu_{\min} = W_g \quad i$$

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{W_g} .$$

Tabela 1 daje za razne vrste poluprovodnika širinu zabranjene zone W_g i maksimalnu talasnu dužinu λ_m .

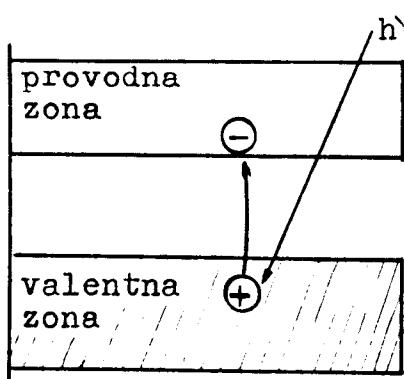
Neosvetljeni poluprovodnik ima takozvanu tamnu provodljivost, koja potiče od termičkih efekata.

vrsta	W_g (eV)	λ_m (μm)
Ge	0,67	1,85
Se	2	0,62
Si	1,12	1,1
Te	0,33	3,75
AlSb	1,6	0,775
CdS	2,4	0,520
ZnS	3,6	0,345
CdSe	1,8	0,69
CdTe	1,5	0,83
GaAs	1,35	0,9
GaSb	0,8	1,55
InAs	0,35	3,54
InP	1,25	0,995
InSb	0,18	6,9
PbS	0,37	3,35
PbSe	0,27	4,58
PbTe	0,3	4,13

Tabela 1.

2.1.1. Fotoprovodljivost čistih poluprovodnika

Kod čistih poluprovodnika u procesu provodjenja učestvuju elektroni i šupljine. Ovi nastaju pod dejstvom fotona: elektron iz valantne zone prelazi u provodnu i postaje slobodan dok na njegovom mestu u valentnoj zoni ostaje pokretna šupljina (slika 4).



Slika 4.

Neka je u čistom neosvetljenom poluprovodniku koncentracija elektrona i šupljina $n=n_0$ i $p=p_0$, dok pokretnost μ_n i μ_p . Tada tamna provodljivost dat izrazom

$$\delta = e (\mu_n n_0 + \mu_p p_0).$$

Zbog termičkog kretanja rešetke u jedinici zapremine i u jedinici vremena proizvede se go elektrona a isto toliko i šupljina. Od ovih u jedinici zapremine i vremena rekombinuje se r_0 elektrona i isto toliko šupljina. Rekombinacija je proporcionalna koncentraciji slobodnih elektrona i šupljina

$$r_0 = g n_0 p_0 \quad (g \text{ koeficijent proporcionalnosti}).$$

Zbog istovremenosti procesa generisanja i rekombinacije rezultujuća promena koncentracije u jedinici vremena je

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = g_0 - g n_0 p_0,$$

a u ravnoteži ukupna promena koncentracije slobodnih nosilaca nanelektrisanja je nula.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{ili} \quad g_0 = g n_0 p_0.$$

Broj stvorenih nosilaca nanelektrisanja jednak je rekombinovanom broju pri stalnoj koncentraciji n_0 i p_0 .

Kada se materijal osvetli porastće koncentracija slobodnih nosilaca nanelektrisanja na $n=n_0+\Delta n$ i $p=p_0+\Delta p$ a provodljivost na

$$\begin{aligned} \delta &= e (\mu_n n + \mu_p p) = e [(n_0 + \Delta n) \mu_n + (p_0 + \Delta p) \mu_p] = \\ &= e (\mu_n n_0 + \mu_p p_0) + e (\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p) = \delta_0 + \Delta \delta \end{aligned}$$

gde je promena provodljivosti $\Delta \delta = e (\mu_n \Delta n + \mu_p \Delta p)$.

Broj generisanih elektrona ili šupljina u jedinici zapremine i vremena biće sad zbir broja generisanih termičkim putem i svetlosnim putem g_0+q . Broj rekombinovanih parova elektron-šupljina biće proporcionalan novoj koncentraciji n i p. Rezultujuća promena koncentracije je kod osvetljenog poluprovodnika

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = g_0 + q - g n p$$

koji je u ravnoteži jednak nuli

$$g_0 + q - g n p = 0. \quad (1)$$

Pošto $n=n_0+\Delta n$ i $p=p_0+\Delta p$

$$g_0 + q - g(n_0 + \Delta n) \cdot (p_0 + \Delta p) = g_0 + q - g n_0 p_0 - g(n_0 \Delta p + p_0 \Delta n + \Delta n \Delta p) = 0$$

ili zbog ravnotežnog stanja neosvetljenog poluprovodnika

$$g_0 - g_{n_0 p_0} = 0 \quad \text{ostaje}$$

$$q - g_{n_0} \Delta p - g_{p_0} \Delta n - g_{\Delta n} \Delta p = 0$$

Ova jednačina važi za čiste poluprovodnike pri čemu $n_0 = p_0$ i $\Delta n = \Delta p$

$$q - 2g_{n_0} \Delta n - g(\Delta n)^2 = 0. \quad (2)$$

Razlikovaćemo dva slučaja:

1. Slučaj slabog osvetljenja
2. Slučaj jakog osvetljenja.

2.1.2. Slabo osvetljenje

U ovom slučaju je Δn malo u poređenju sa n_0 i $(\Delta n)^2$ u jednacini 2 biće zanemaren. Ostaje

$$q - 2g_{n_0} \Delta n = 0 \quad \text{ili}$$

$$\Delta n = \frac{q}{2g_{n_0}} \quad \text{a za šupljine isto} \quad \Delta p = \frac{q}{2g_{n_0}}.$$

Porast broje slobodnih elektrona ili šupljina linearne je funkcija broja svetlošću generisanih slobodnih elektrona u jedinici vremena i zapremina.

Ako površinu uzorka osvetljeno ravnomerno monohromatskom svetlošću fluksa ϕ (lumen ili watt), koji se sastoji iz mnoštva fotona energije $h\nu$, tada broj fotona koji udaraju u poluprovodnički materijal u jedinici vremena je $\phi/h\nu$. Broj stvorenih parova elektron-šupljina u jedinici vremena i u jedinici zapreme poluprovodnika biće

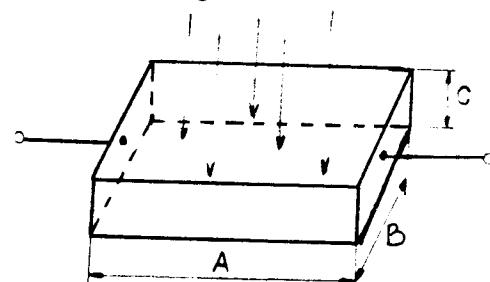
$$q = \frac{\phi}{h\nu} \cdot \eta (1-R) \cdot \frac{1}{ABC}$$

gde su η kvantni koeficijent stvaranja parova elektron-šupljina, R refleksija odnosno $1 - R$ apsorpcija a ABC zapremina kristala (slika 5). Promena broja elektrona i šupljina

$$\begin{aligned} \Delta n &= \Delta p = \frac{q}{2g_{n_0}} = \\ &= \frac{\phi}{h\nu} \cdot \frac{\eta (1-R)}{2g_{n_0} \cdot ABC} \end{aligned}$$

a promena provodljivosti

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p) = \\ &= e \cdot \frac{\phi}{h\nu} \frac{\eta (1-R)}{2g_{n_0} \cdot ABC} (\mu_n + \mu_p) \end{aligned}$$



Slika 5.

Promena provodljivosti samog materijala dimenzije ABC

$$\Delta g = \Delta \delta \frac{BC}{A} = \frac{e\phi}{h\nu} \frac{\eta (1-R)}{2g_{n_0}} \frac{(\mu_n + \mu_p)}{A^2}$$

Promena struje usled osvetljenja ako na krajeve poluprovodnika priključimo napon U

$$\Delta I = U \Delta g = \frac{eU}{h\nu} \phi \frac{\eta (1-R)}{2g_{n_0}} \frac{(\mu_n + \mu_p)}{A^2}$$

Tamna struja iz jednačine $I_t = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$

$$g_T = \frac{\zeta BC}{A} = e \frac{BC}{A} n_0 (\mu_n + \mu_p) = e n_0 ABC \frac{(\mu_n + \mu_p)}{A^2}$$

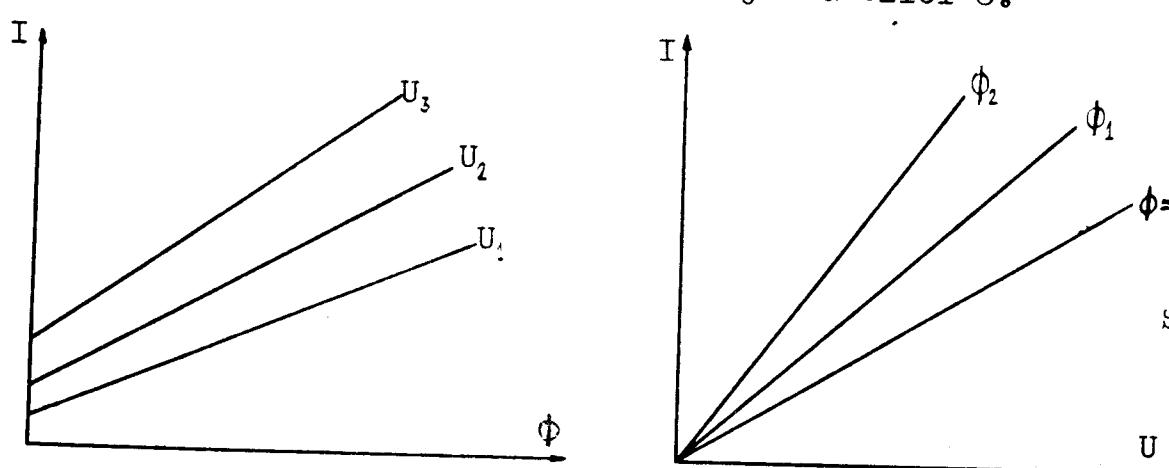
$$I_T = U g_T = e U n_0 ABC \cdot \frac{(\mu_n + \mu_p)}{A^2}$$

a ukupna struja $I = I_T + \Delta I$

$$I = \frac{eU}{A^2} (\mu_n + \mu_p) \left[n_0 \cdot ABC + \frac{\phi}{h\nu} \frac{n(1-R)}{2g n_0} \right] = I_T + UK\phi. \quad (3)$$

K-konstanta.

Grafički prikaz ovih zavisnosti dat je na slici 6.



Slika 6.

Kod osetljivih poluprovodnika μ_n i μ_p treba da su veliki a n_0 malo. Broj n_0 će biti malo ako je širina zabranjene zone veća. Merenja u infracrvenoj oblasti traže malu širinu zabranjene zone i tako da bi održali mali broj n_0 takvi materijali moraju da se hlađe.

2.1.3. Slučaj jakog osvetljenja

Ovde slobodni nosioci nanelektrisanja većim delom potiču od generisanja svetlošću a ne od termičkih efekata, zato u jednacini 1 može se zanemariti g_0 . Ostaće

$$q - g np = 0.$$

Za čist poluprovodnik $n=p$

$$q - gn^2 = 0 \text{ ili } n = \pm \sqrt{\frac{q}{g}}.$$

Promena broja

$$\Delta n = \Delta p = \sqrt{\frac{q}{g}} - n_0$$

Porast broja slobodnih elektrona tako i šupljina je korena funkcija broja svetlošću generisanih slobodnih elektrona u jedinici zapremine i vremena. Znak plus pred korenom uzet je iz razloga što Δn raste sa q .

Porast provodljivosti odnosno struje

$$\Delta \tilde{g} = e \Delta n (\mu_n + \mu_p)$$

$$\Delta g = \frac{BC}{A} e \Delta n \cdot (\mu_n + \mu_p) = e \Delta n \cdot ABC \frac{(\mu_n + \mu_p)}{A^2}$$

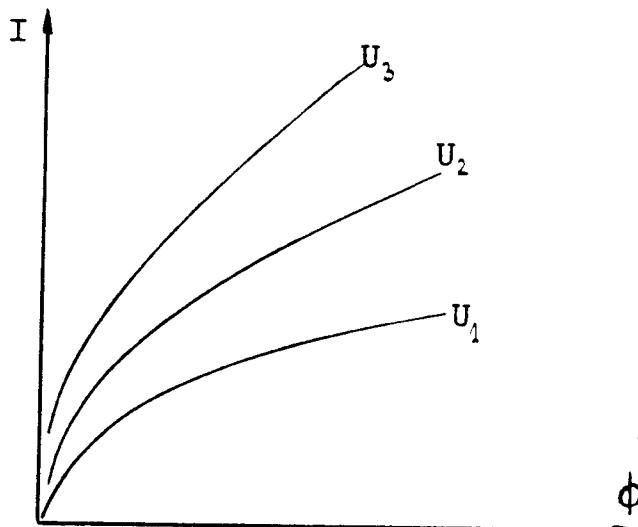
$$\Delta I = U \Delta g = \frac{eU}{A^2} (\mu_n + \mu_p) \left[\sqrt{\frac{q}{g}} \cdot ABC - n_0 ABC \right]$$

$$I = I_0 + \Delta I \quad \text{gde} \quad I_0 = \frac{eU}{A^2} (\mu_n + \mu_p) \cdot n_0 \cdot ABC$$

$$I = \frac{eU}{A^2} (\mu_n + \mu_p) \cdot \sqrt{\frac{q}{S}} ABC$$

$$I = \frac{eU}{A^2} (\mu_n + \mu_p) \sqrt{\Phi} \cdot \sqrt{\frac{n(1-R)}{S h\nu}} ABC \quad . \quad (4)$$

Za velika osvetljenja zavisnost $I=I(\Phi)$ je zakrivljena po zakonu $\sqrt{\Phi}$ i ne zavisi od n_0 (slika 7.).



Slika 7.

2.1.4. Fotoprovodljivost primesnih poluprovodnika

Kod poluprovodnika N tipa postoje donorski nivoi ispod provodne zone na dubini E_0 . Na maloj temperaturi svi elektroni su vezani za donorski nivo a provodljivost kristala mala. Osvetljenjem poluprovodnika fotonima energije $h\nu$ gde je $h\nu > E_0$, provodljivost poraste a slobodni nosioci nanelektrisanja će biti elektroni. Kod poluprovodnika P tipa postoje prazni akceptorski nivoi na visini E_δ iznad valentne zone na koju prelaze elektroni pod dejstvom fotona energije $h\nu$. Za ovakav proces mora biti $h\nu > E_\delta$. Na mestima elektrona u valentnoj zoni ostaju šupljine koji su jedini slobodni nosioci nanelektrisanja.

Ovde će biti razmatrano samo fotoprovodljivost N tipa poluprovodnika, dok poluprovodnici P tipa slično se razmatraju. Ako je N_d broj donorskih atoma u jediničnoj zapremini kristala generisanje slobodnih elektroda sa ovih atoma usled termičkih efekata biće proporcionalno broju popunjениh donorskih atoma odnosno $g_0 = a(N_d - n)$ dok rekombinacija biće proporcionalno broju slobodnih elektrona n i broju nepopunjениh donorskih atoma kojih isto ima n . Kinetička jednačina fotoprovodljivosti je

$$\frac{dn}{dt} = a(N_d - n) - bn^2 + q$$

za koji je u neosvetljenom slučaju i u ravnoteži

$$a \cdot (N_d - n_0) - bn_0^2 = 0,$$

dok u osvetljenom slučaju i u ravnoteži

$$a \cdot (N_d - n) - bn^2 + q = 0$$

gde $n = n_0 + \Delta n$, q je broj svetlošću generisanih slobodnih elektrona u jedinici zapremine i vremena. Ova jednačina je slična jednačini 1 i za dalji račun važe slična rezonovanja kao kod čistih poluprovodnika. Važno je primetiti da ovde nije uzet u obzir

termalno generisanje elektrona iz popunjene zone, što je ekvivalentno pretpostavci da je širina zabranjene zone velika ili da je poluprovodnički materijal na niskoj temperaturi. Krajnji rezultat se dobije za slabo osvetljeni poluprovodnik

$$I = \frac{eU}{A^2} \mu_n \left[n_0 \cdot ABC + \frac{\Phi}{h\nu} \frac{n(1-R)}{2bn_0+a} \right] \quad (5)$$

gde n_0 zavisi od N_d iz jednačine

$$a(N_d - n_0) - bn_0^2 = 0, \quad n_0 = -\frac{a}{2b} + \sqrt{\frac{a^2}{4b^2} + \frac{aN_d}{b}}.$$

Za jako osvetljeni poluprovodnik

$$I = \frac{eU}{A^2} \mu_n \sqrt{\Phi} \sqrt{\frac{n(1-R)}{b \cdot h\nu}} \cdot ABC \quad (6)$$

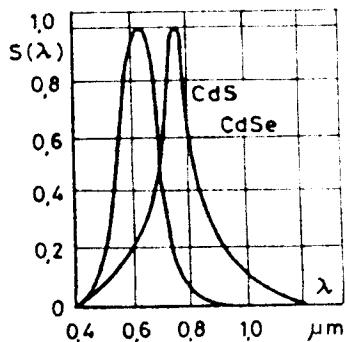
2.2. Realni fotoprovodnici

1. Konstrukcija.

Fotootpornici su najčešće napravljeni tako da na staklenu osnovu nanet tanak poluprovodnički sloj. Na dva suprotna mesta poluprovodnika vezani su omski izvodi, koji obezbeđuju električni kontakt. Staklena osnova i poluprovodnički sloj smešteni su u plastičnu zaštitu dok fotoosetljiva površina zaštićena lakom ili providnim materijalima. Fotoosetljivi poluprovodnički sloj se najčešće pravi od sumpornih i selenskih jedinjenja taliuma, kadmiuma, olova ili bizmuta (Tl_2S , CdS , PbS , BiS , $CdSe$), kao i od telurnih jedinjenja ($PbTe$). Pored toga mogu se praviti od stroncijum sulfida koji je aktiviran sa europijumom i samariumom ili od intermetalnih jedinjenja ($InSb$) itd. (vidi i tabelu na strani 7.)

2. Iz praktičnih gledišta važne su sledeće osobine fotootponika.

- a. Osetljivost, koji se meri u $\mu A/W$ ili $\mu A/lm$ a dat je sa $S=I_\phi/\Phi$ gde je I_ϕ fotostruja $I_\phi=I-I_r$. Ova veličina treba da je što veća, a najbolja je kod CdS i $CdSe$.
- b. I_r -tamna struja, struja u neosvetljenom stanju pri radnom naponu, odnosno R_d tamni otpor. Ove veličine zavise kod čistih poluprovodnika od širine zabranjene zone a kod primesnih od visine donorskikh odnosno akceptorskih nivoa.
- c. Radni napon i dozvoljena snaga dissipacije. Ove veličine zavise od osobine poluprovodničkih materijala, od konstrukcije i dimenzije fotootponika.
- d. Spektralne karakteristike. Izražavaju osetljivost S u zavisnosti od talasne dužine upadne svetlosti. Kao primer na slici 8 je dat $S(\lambda)$ za CdS i $CdSe$.



Slika 8, relativne spektralne karakteristike za CdS i $CdSe$.

e. Volt-amperske karakteristike $I=I(U)$, koje su linearne u širokom opsegu napona i osvetljenja (slika 6).

f. Luks-amperske karakteristike $I=I_T + UK\sqrt{E}$, gde je K konstanta, $E = \phi/S$ jačina osvetljenosti površine, S osvetljena površina foto-otpornika.

Na kraju u tabeli 2 date su fotootpornici proizvodnje Siemensa (SH) i Philipsa (Ph).

Tabela 2.

U_a radni napon, R_d tamni otpor, R_{1000} , R_{50} , R_{20} otpori pri osvetljenju od 1000, 50, 20 luksa.

FOTO-OTPORNICI

Oznaka	Vrsta	Proizvođač	Kućište, dimenz. mm	P mW	U_{max} V	U_a V	R_d MΩ	R_{1000} kΩ	R_{50} kΩ	R_{20} kΩ	Primedba
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FW9801	FR	SH	FR1	—	—	100	0,8	—	—	0,6	
FW1802	FR	SH	FR1	—	—	200	0,8	—	—	1,8	
ORP60	FR	Ph	FR2	70	350	—	200	—	60	—	ORP61, ORP66 ~ORP68
ORP62	FR	Ph	FR2	100	350	—	150	—	45	—	
ORP69	FR	Ph	FR2	100	350	—	100	—	30	—	
RPY58A	FR	Ph	5,3 x 5,3	100	50	—	0,2	—	0,6	—	
RPY60	FR	SH	FR3	—	—	100	100	0,3—0,8	—	—	
RPY61	FR	SH	FR3	—	—	50	—	1,3—0,8	—	—	~RPY63
RPY62	FR	SH	FR3	—	—	100	100	3,5	—	—	~RPY64
RPY71	FR	Ph	5,3 x 5,3	50	50	—	0,6	—	2,4—6	—	
RPY82	FR	Ph	FR4	300	100	—	6	—	0,95	—	
RPY84	FR	Ph	FR4	750	400	—	9	—	1,15	—	
RPY85	FR	Ph	FR4	500	200	—	9	—	1,15	—	

Danas se detektori vidljive i infracrvene svetlosti primeđuju u nekoliko važnih područja.

Nedestruktivna analiza i identifikacija materijala u industriji medicini i u raznim naučnim istraživanjima.

Bezkontaktno merenje temperature raznih zagrejanih tela.

U optoelektronici (optičke veze u kompjutorima) u optičkoj komunikaciji.

Vojna primena. Ovo je posebno razvijeno jer uređaji i ljudi se ne mogu kamuflirati pred infracrvenim detektorima. Zbog svoje kompaktnosti i male težine infracrveni detektori se koriste za navođenje raketa snimanje terena umraku.

Pored ovih fotodetektori se koriste u raznim prekidačkim kolima, alarmnim uređajima a posebno važna primena u automatizaciji proizvodnje, itd.

3. PN SPOJ

Kod PN spoja poluprovodnici P i N tipa se medjusobno dodiruju površinom čineći takozvani slojni PN spoj. Ovakva konstrukcija ima jedan omski izvod iz P dela i jedan iz'N dela.

3.1. Raspodela elektrona i šupljina po energijama, Fermijev nivo

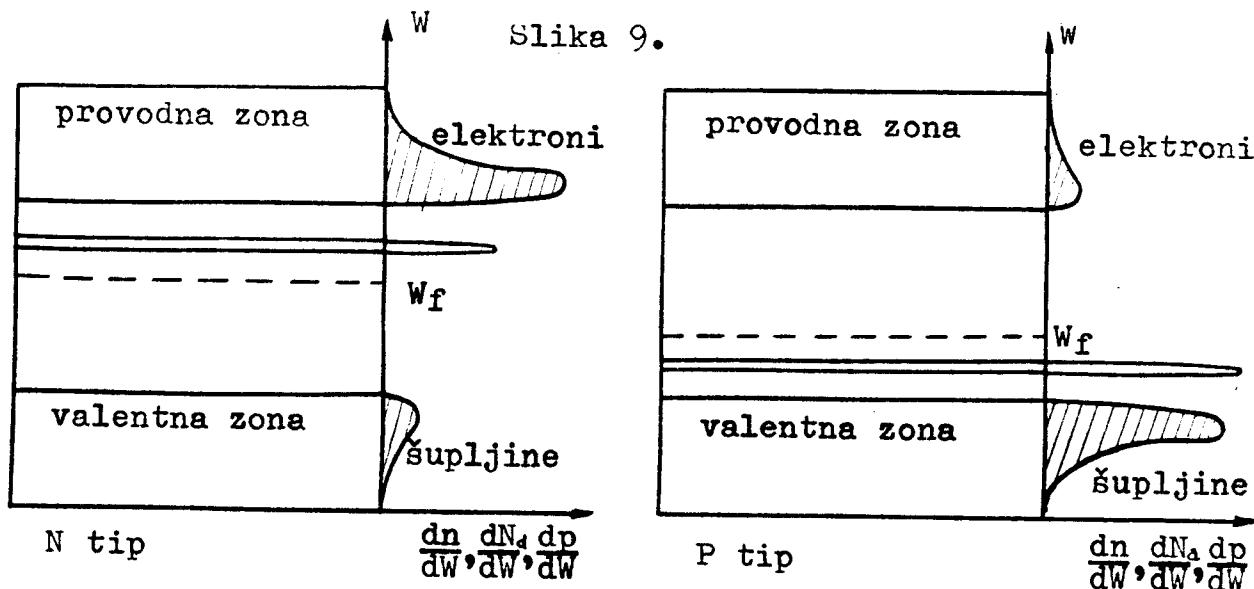
Ovde će biti razmotrena raspodela elektrona i šupljina po energijama za odvojeni, a posle i za spojeni N i P tip poluprovodnika.

Energetske zone sačinjene su od veoma bliskih energetskih nivoa. Raspodelu energetskih nivoa elektrona po energijama u provodnoj zoni dobicemo ako nadjemo za svaku energiju W broj nivoa dN po jedinici zapremine kristala izmedju energije W i $W+dW$. Tada velicina $dN/dW = Z_e(W)$ predstavlja raspodelu energetskih nivoa po energijama za elektrone, odnosno broj nivoa u jedinici zapremine kristala po jediničnom intervalu energije. Ako ovaj broj pomnožimo sa verovatnoćom popunjenoosti nivoa energije W , dobicemo raspodelu elektrona po energijama $dn/dW = Z_e(W) \cdot F(W, T)$. Verovatnoća popunjenoosti nivo energije W dat je za fermijone

$$F(W, T) = \frac{1}{1 + \exp[(W - W_f)/KT]}$$

koja zavisi od apsolutne temperature T . Energija W_f je energija na kojoj je verovatnoća nalaženja elektrona $1/2$ i zove se Fermijev nivo. Raspodela šupljina po energijama u valantnoj zoni dat je sličnim izrazom $dp/dW = Z_v(W) \cdot [1 - F(W, T)]$ gde je $Z_v(W)$ raspodela energetskih nivoa u valantnoj zoni a $1 - F$ verovatnoća da na nivou energije W nema elektrona odnosno da je šupljinu. Raspodela elektrona za akceptorski i donorski nivo dati su izrazima $dN_a/dW = Z_a(W) \cdot F(W, T)$ i $dN_d/dW = Z_d(W) \cdot F(W, T)$. Grafički prikaz ovih raspodela za N i P tip poluprovodnika dat je na slici 9.

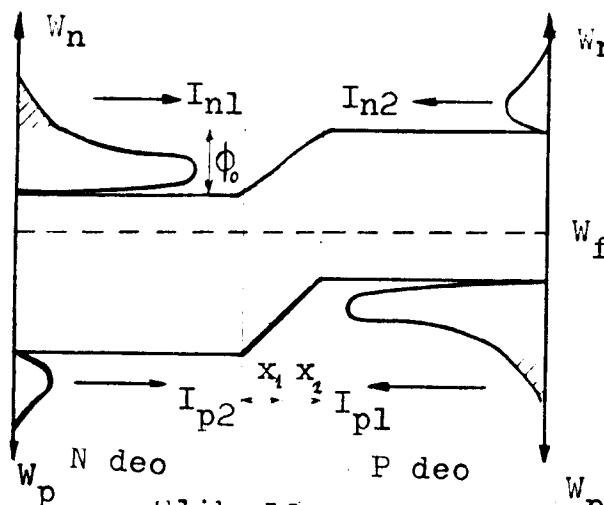
Slika 9.



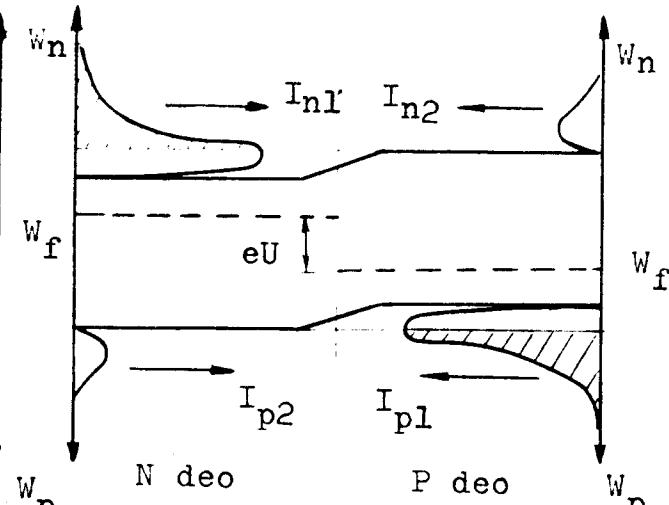
Šrafirane površine su proporcionalne broju elektrona i šupljina. U N tipu poluprovodnika u procesu provođenja struje uglavnom učestvuju elektroni dok ima i mali broj šupljine. Elektroni su glavni a šupljine sporedni nosioci naelektrisanja.

U P tipu poluprovodnika situacija je obrnuta tu su šupljine glavni a elektroni sporedni nosioci naelektrisanja.

Spajanjem N i P tipa poluprovodnika Fermijevi nivoi se izjednacavaju, a energetski dijagram prikazan je na slici lo a. Akceptorski i donorski nivoi nisu ucrtani.



Slika 10 a.



Slika 10 b.

3.2. Struje kroz PN spoj

Spajanjem N i P tipa poluprovodnika dolazi do brzog razmeštanja slobodnih nosilaca naelektrisanja. Šupljine iz P dela prelaze u N deo a elektroni iz N dela u P deo. Proses nastaje zbog razlike koncentracije elektrona i šupljina u jednom i u drugom delu. Usled razmeštanja nosilaca naelektrisanja P deo će biti naelektrisano negativno a N deo pozitivno, zbog čega se javlja električno polje. Ovo posle dovoljnog razmeštanja nosilaca naelektrisanja postane toliko jako da sprečava dalja razmeštanja glavnih nosilaca naelektrisanja. Za njih će se polje manifestovati kao potencijalna barijera Φ , prikazano na slici lo a. Postoji izvestan broj glavnih nosilaca naelektrisanja (šrafirani deo na slici lo.a), koji usled termičkih efekata dobiju toliku energiju da mogu preći preko barijere. Za sporedne nosioce naelektrisanja potencijalna barijera ne postoji i mogu slobodno prelaziti iz jednog u drugi deo.

Možemo reći da postoje četiri struje:

I_{nl} - struja usled kretanja glavnih nosilaca naelektrisanja (elektrona) iz N dela u P deo,

I_{n2} - struja usled kretanja sporednih nosilaca naelektrisanja (elektrona) iz P dela u N deo,

I_{pl} - struja usled kretanja glavnih nosilaca naelektrisanja (šupljina) iz P dela u N deo,

I_{p2} - struja usled kretanja sporednih nosilaca naelektrisanja (šupljina) iz N dela u P deo.

U ravnoteži je rezultujući protok elektrona $I_{nl} - I_{n2} = 0$ i protok šupljine $I_{pl} - I_{p2} = 0$. Smer struje je pozitivan u smeru od P ka N.

Ako se na PN spoj priključi napon U (pozitivan ako je plus na P delu i negativan ako je plus na N delu) potencijalna barijera će se promeniti na $\phi = \phi_0 - eU$, Fermijevi nivoi će se razmaknuti za vrednost eU , dok I_{nl} i I_{pl} promeniće se po zakonu $\exp(eU/KT)$. Struja sporednih nosilaca nanelektrisanja I_{n2} i I_{p2} ostaće nepromenjena. Slika lo b. prikazuje energetsko stanje polarizovanog PN spoja. Rezultujuća struja elektrona neće sada biti jednak nuli nego nekoj vrednosti I_n .

$$I_n = I_{nl} \cdot \exp(eU/KT) - I_{n2}$$

i za šupljine $I_p = I_{pl} \cdot \exp(eU/KT) - I_{p2}$.

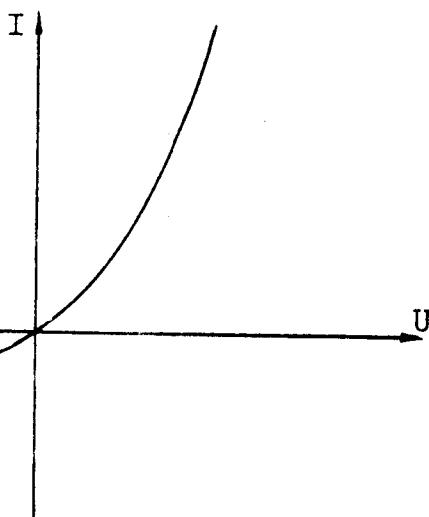
A pošto je $I_{nl} = I_{n2} = I_{no}$ i $I_{pl} = I_{p2} = I_{po}$

$$I_n = I_{no} [\exp(eU/KT) - 1] \quad I_p = I_{po} [\exp(eU/KT) - 1].$$

Ukupna struja $I = I_n + I_p = (I_{no} + I_{po}) [\exp(eU/KT) - 1]$ ili

$$I = I_o [\exp(eU/KT) - 1]. \quad (7)$$

Ova poslednja jednačina je jednačina struje kroz PN spoj, I_o je inverzna struja (slika 11).



Slika 11.

3.3. Fotoosetljivost PN spoja

Na fotoosetljivost PN spoja baziraju rad fotodiode, Schottky-fotodiode, foto elementi, fototranzistori, fototranzistori sa efektom polja (foto-FET), fototiristori i lavina fotodiode.

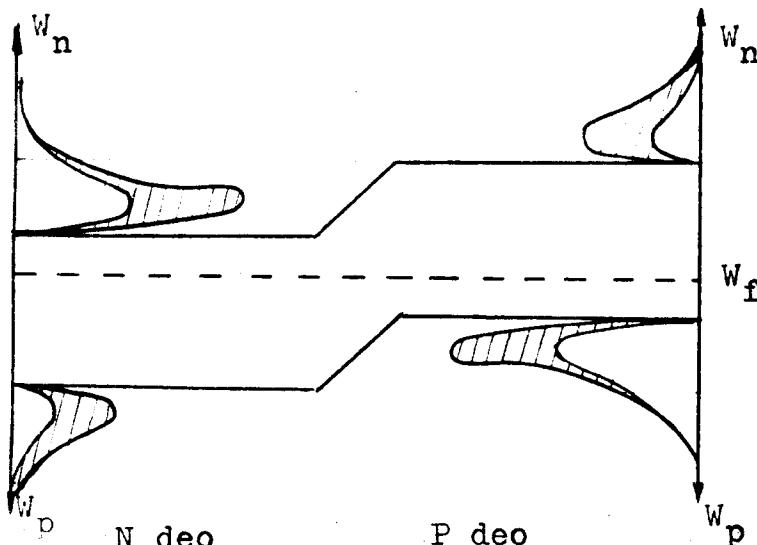
Razmeštanje nanelektrisanja prilikom spajanja P i N dela ograničava se na mali prostor oko površine spoja. Ovi slojevi nisu neutralni nego u P delu negativni a u N delu pozitivni. Ti nanelektrisani slojevi se zovu slojevima prostornog nanelektrisanja. Debljina tih slojeva su na slici 10 a. označeni sa x_1 i x_2 .

Ako se PN spoj izloži kvantima elektromagnetskih talasa tada će fotoni generisati parove elektron-šupljina. Ako foton ima veću energiju od širine zabranjene zone $h\nu > W_g$ može da prebaci elektron iz valentne zone u provodnu pri čemu na mestu elektrona ostaje pokretna šupljina. Ako PN spoj osvetlimo monohromatskom svetlošću, na osnovu Ajnštajnovе relacije za unutrašnji fotoefekat

$$h\nu = W_g + \frac{mv^2}{2}$$

vidi se da za veliku energiju $h\nu$ prebačeni elektroni mogu imati

veliku kinetičku energiju $mv^2/2$. Medjutim ovi elektroni usled difuzionog kretanja sudarajući sa atomima kristalne rešetke igubu deo kinetičke energije i raspodeljuju se po energijama blizu donje ivice provodne zone. Fotoefektom nasatle šupljine isto mogu imati veliku kinetičku energiju koju gube u sudarima sa atomima rešetke i raspodeljuju se po energijama blizu gornje ivice valentne zone. Slika 12 predstavlja raspodelu elektrona i šupljina osvetljenog PN spoja. Šrafirane površine su proporcionalne brojevima elektrona i šupljina generisanih svetlosnim putem.



Slika 12.

Skoro svi elektroni u N delu (glavni nosioci nanelektrisanja) po energijama su ispod nivoa donje ivice provodne zone P dela, pa ne mogu prelaziti u P delu zbog potencijalne barijere. Medjutim elektroni u P delu su sporedni nosioci nanelektrisanja i ako difuzijom stignu do slojeva prostornog nanelektrisanja lako predju u N delo. Skoro sve šupljine u P delu (glavni nosioci nanelektrisanja) po energijama su iznad nivoa gornje ivice valentne zone N dela, pa ne mogu prelaziti u N delo. Šupljine u N delu su sporedni nosioci nanelektrisanja i mogu prelaziti sloj prostornog nanelektrisanja.

Možemo reći da zbog osvetljenja PN spoja porasla struja sporednih nosilaca nanelektrisanja i to sa:

I_{sn} - struja usled kretanja elektrona iz P dela u N delo,

I_{sp} - struja usled kretanja šupljina iz N dela u P delo.

Struje I_{sn} i I_{sp} imaju smer od N ka P delu, tako da je ukupan porast struje $I_s = I_{sn} + I_{sp}$, koja je po našoj konvenciji negativna.

Struja glavnih nosilaca nanelektrisanja nije se znatno promenila, pa ako je karakteristika PN spoja u neosvetljenom stanju pri spoljašnjem potencijalu U

$$I = I_0 [\exp(eU/KT) - 1]$$

tada struja je osvetljenog PN spoja

$$I = I_0 [\exp(eU/KT) - 1] - I_s. \quad (8)$$

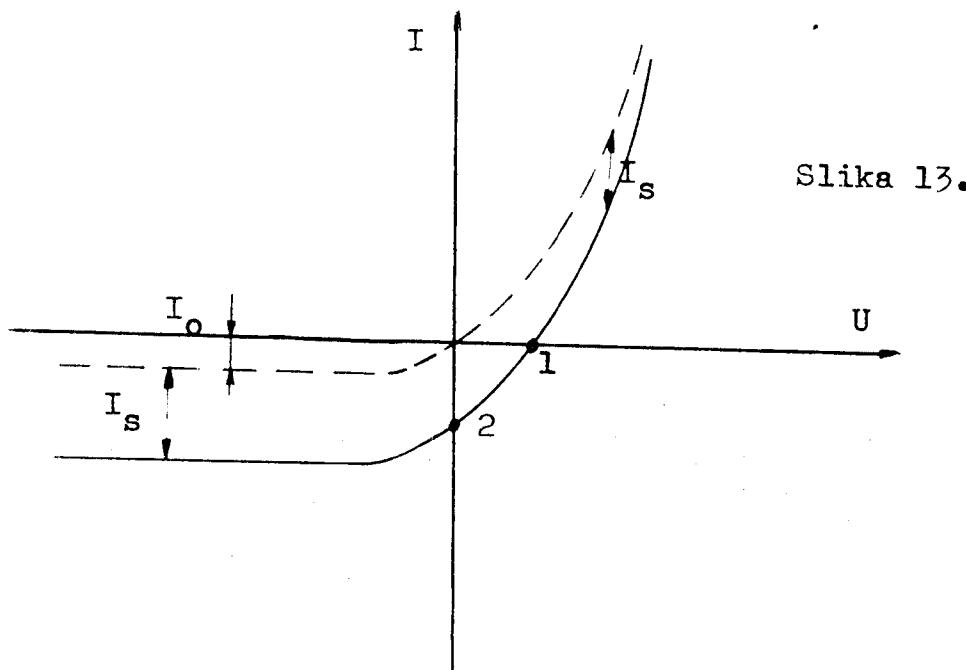
I_s je fotostruja i spušta celokupnu karakteristiku za ovu vrednost. Slika 13 prikazuje karakteristiku osvetljenog PN spoja.

Ako je Φ fluks elektromagnetskog zračenja koji pada na PN spoj i ako se sastoji iz fotona energije $h\nu$, tada broj fotona koji

pada u jedinici vremena na PN spoj biće $\phi/h\nu$. Ako je R refleksija površine, l-R apsorpcija, η kvantni koeficijent stvaranja parova elektron-šupljina, tada fotostruja biće dat izrazom

$$I_s = \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R).$$

Ova jednačina važi u slučaju kada su P i N delovi dovoljno tanki, odnosno kada svetlosnim putem generisani sporedni nosioci nanelektrisanja pre rekombinacije stignu u drugi deo PN spoja. Fotostruja I_s je linearna funkcija osvetljenja.



Slika 13.

3.4. Dva načina rada

Osvetljeni PN spoj ima dva načina rada.
1. U inverznoj polarizaciji kada na elektrode priključimo napon U (plus na N, minus na P) PN spoj je u režimu fotodiode. U ovom slučaju već za mali inverzni napon struja

$$I = -I_o - I_s, \text{ jer } I_o [\exp(-eU/KT) - 1] = -I_o.$$

Kod dobrih fotodioda tamna struja I_o je veoma mala tako da $I = -I_s$. Karakteristike fotodiode date su na slici 14.

2. Režim foto elementa. Na osvetljeni PN spoj ne priključujemo nikakav napon i elektrode ostavljamo otvorenim. Tada se izmedju elektroda pojavljuje napon U (slika 13, tačka 1), dok struja $I=0$. Ako to uvrstimo u jednačinu 8

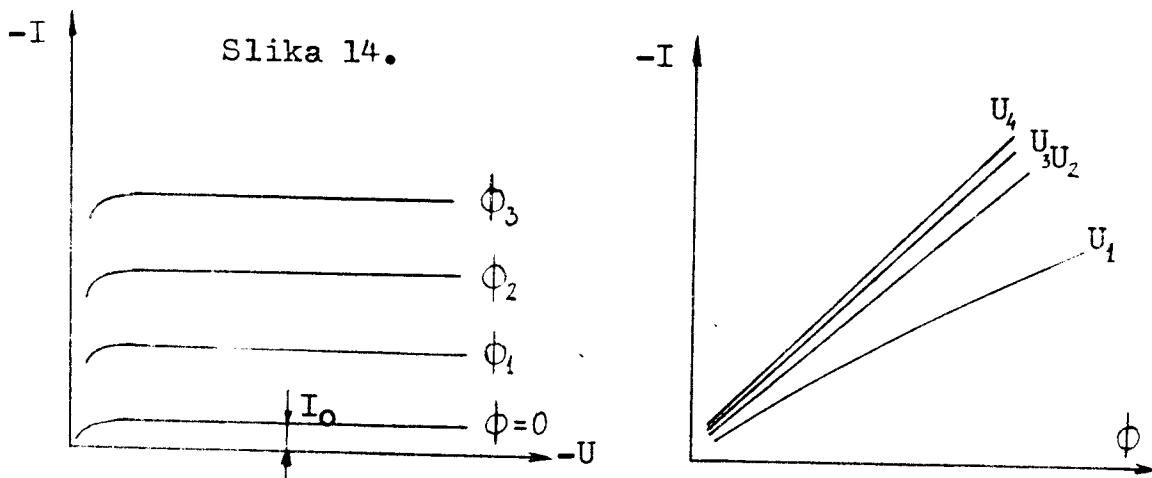
$$I_o \exp(eU/KT) - 1 - I_s = 0,$$

$$\frac{eU}{KT} = \ln(1 + \frac{I_s}{I_o})$$

ili odavde

$$U = \frac{KT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_s}{I_o}\right).$$

To je napon otvorenog foto elementa.



U slučaju slabog osvetlenja $I_s \ll I_o$ i tada

$$U = \frac{KT}{e} \frac{I_s}{I_o} = I_s R_u \quad \text{gde je } R_u = \frac{KT}{e I_o}$$

unutrašnji otpor kod slabog osvetljenja. Pošto je

$$I_s = \frac{e\phi}{h\nu} \eta(1-R), \quad U = \phi \frac{eR_u}{h\nu} \eta(1-R).$$

Zavisnost $U=U(\phi)$ je linearна.

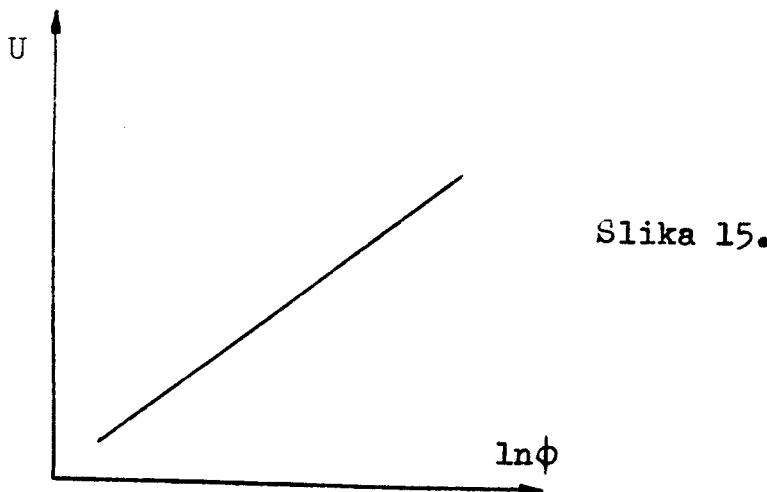
Za veće osvetljenja

$$U = \frac{KT}{e} \ln \frac{I_s}{I_o},$$

jer $I_s \gg I_o$; zavisnost je logaritamska (slika 15):

$$U = \frac{KT}{e} \ln \left[\phi \frac{e \eta (1-R)}{h\nu} \right] \quad (9)$$

Ovo je u stvari napon praznog hoda foto elementa U_{ph} .



Ako elektrode osvetljenog foto elementa kratko spojimo iz jednačine 8 za $U=0$ (slika 13, tačka 2)

$$I_{ks} = -I_s = -\frac{e\phi}{h\nu}\eta(1-R).$$

Sa druge strane znamo da će zbog unutrašnjeg otpora R_u teći struja

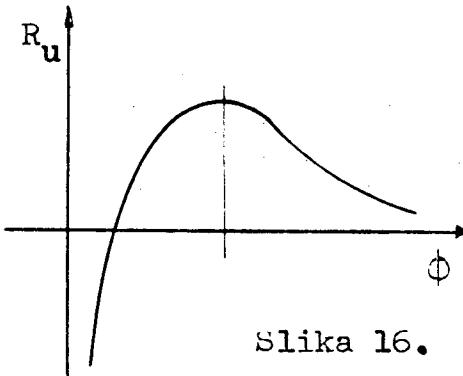
$$I_{ks} = \frac{U_{ph}}{R_u} = \frac{KT}{eR_u} \ln\left[\phi \frac{e\eta(1-R)}{I_o h\nu}\right],$$

gde je U_{ph} napon praznog hoda foto elementa (jednačina 9). Izjednačavanjem ove dve poslednje jednačine, sa tim da u prvoj uzimamo znak plus zbog istog smera struje

$$\frac{KT}{eR_u} \ln\left[\phi \frac{e\eta(1-R)}{I_o h\nu}\right] = \frac{e\phi}{h\nu}\eta(1-R)$$

$$\text{dobijamo } R_u = \frac{KT}{e\phi} \cdot \frac{h\nu}{\eta(1-R)} \ln\left[\phi \frac{e\eta(1-R)}{I_o h\nu}\right].$$

Funkcija $R_u(\phi)$ ima oblik prikazan na slici 16.



Slika 16.

Maksimum se dobije iz $dR_u/d\phi = 0$, odnosno za

$$\phi = \frac{2,7 I_o h\nu}{e\eta(1-R)}.$$

Iz ove poslednje jednačine

$$\frac{\phi e\eta(1-R)}{h\nu} = 2,7 I_o \text{ ili } I_s = 2,7 I_o.$$

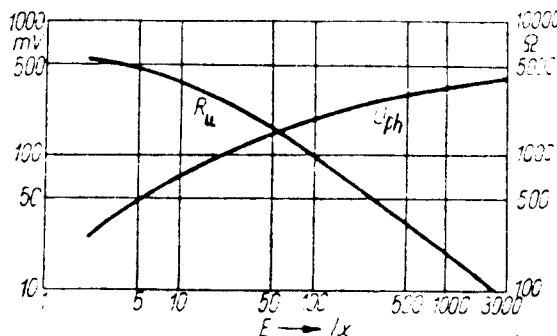
Pošto je naša pretpostavka da je $I_s > I_o$, u toj oblasti $R_u(\phi)$ opada sa porastom osvetljenja.

Ako uzmemo da je površina našeg foto elementa S tada jačina osvetljenosti $E = \phi/S$ ili $\phi = ES$ i

$$U_{ph} = \frac{KT}{e} \ln\left[E \frac{Se\eta(1-R)}{I_o h\nu}\right] \quad (10)$$

$$R_u = \frac{KT}{e^2 E^2 S^2 \eta(1-R)} \cdot \ln\left[E \frac{Se\eta(1-R)}{I_o h\nu}\right].$$

Ove poslednje zavisnosti date su na slici 17.

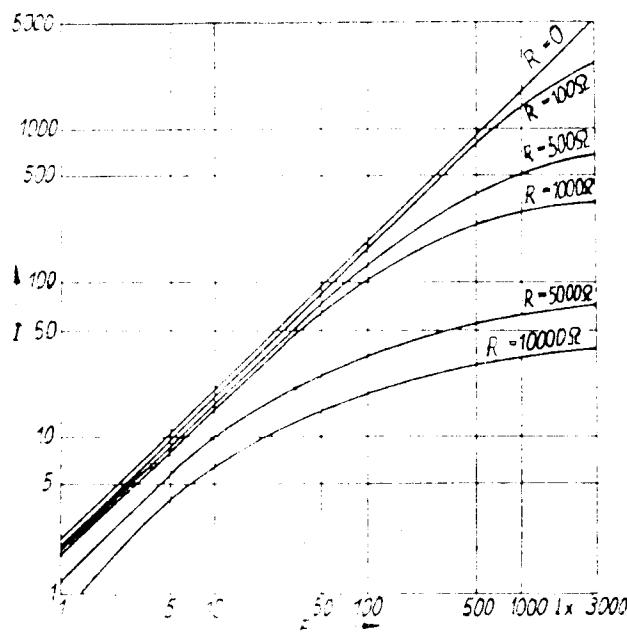


Slika 17.

Ako na elektrode osvetljenog foto elementa vežemo potrošač R , kroz njega će poteći struja I . Napon praznog hoda će se razdeliti na unutrašnjem otporu R_u i na spoljašnjem otporu R ,

$$U_{ph} = R_u I + RI \quad I = \frac{U_{ph}}{R_u + R} .$$

Za $R \neq 0$ I neće biti više linearne funkcija od E i zakrivljuje se sve više sa porastom R (slika 18).



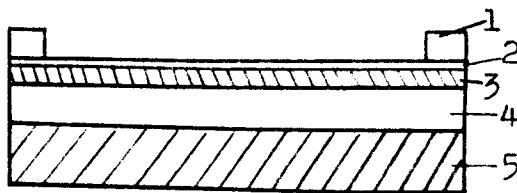
Slika 18.

3.5. Realni foto elementi

1. Konstrukcija.

Svetlost ne prodire duboko u poluprovodnički materijal. Apsorpcija sa dubinom opisan je zakonom $E = E_0 \exp(-\alpha x)$, gde je E intenzitet svetlosti na dubini x , E_0 upadni intenzitet svetlosti, α koeficijent svetlosne apsorpcije ($1/\alpha$ dubina na kojoj $E = E_0/e$). Za PN spojeve $\alpha \approx 10^7 \text{ m}^{-1}$, odnosno $1/\alpha = 10^7 \text{ m} = 100 \text{ nm}$. To znači da PN prelaz mora biti blizu površine i da bude veoma tanak. Zato foto elementi se konstruišu tako da PN prelaz ne bude veći od 100 nm , da bude na površini i paralelan sa njom. Jednu elektrodu činiće metalna podloga na koju se nanese N tip poluprovodnika. Difuzijom odgovarajućih primesnih atoma tanak sloj na površini se pretvorci u P tip, a na nju se nanese providna metalna elektroda. Metalni prsten na providnoj elektrodi služi za odvod struje (slika 19).

Dosad su najbolje rezultate dali foto elementi od silicijuma i selenia, koji se koriste kao sunčevi elementi (pretvaranje sunčeve energije u električnu).



Slika 19.

- 1-metalni prsten
- 2-providna elektroda
- 3-P tip
- 4-N tip
- 5-podloga

2. Iz praktičnih gledišta važne su sledeće veličine foto elementa.

a. Osetljivost pri kratkom spoju, računa se iz $S=I_{KS}/E$ ($\mu A/klx$)

$$S = \frac{ES' \eta(1-R)}{E \cdot h\nu} = \frac{S' \eta(1-R)}{h\nu}$$

koji zavisi od površine S' .

b. Napon praznog hoda U_{ph} kod nekog osvetljenja. Po jednačini

$$U = \frac{KT}{e} \ln \left[E \frac{S' e \eta(1-R)}{I_0 \cdot h\nu} \right]$$

napon praznog hoda zavisi logaritamski od E ali kod realnih foto elementa U_{ph} asimptotski približava nekoj vrednosti U koji je oko 500mV.

c. Spektralne karakteristike izražavaju osetljivost u funkciji od talasne dužine upadne svetlosti. Za selenski foto element maksimum se nalazi oko 550 nm, dok za silicijumski oko 800 nm.

d. Luks-amperske karakteristike $I=I(E)$, koja treba da je linearna. Pomoću ove karakteristike se računa osetljivost S .

Oznaka za foto element dat je na slici 20.

Kao primer ovde će navesti karakteristike jednog foto elementa iz svetlomera za fotoamatere.

Dimenzije foto elementa su $19 \times 33 \times 1$ mm. Njegova površina koja može da se izloži svetlošći $S' = 627 \text{ mm}^2$.

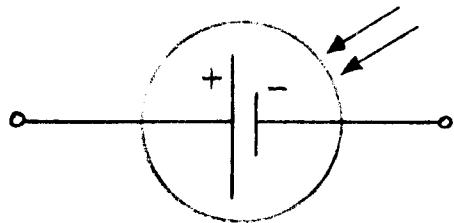
Kako je unutrašnji otpor mikroampermetra velika I_{KS} nije linearna funkcija od osvetljenja. Osetljivost sam izračunao za $E=300$ lx i za $E=1000$ lx:

$$S_{300} = 0,13 \frac{\mu A}{lx} = 130 \frac{\mu A}{klx}$$

$$S_{1000} = 0,042 \frac{\mu A}{lx} = 42 \frac{\mu A}{klx}$$

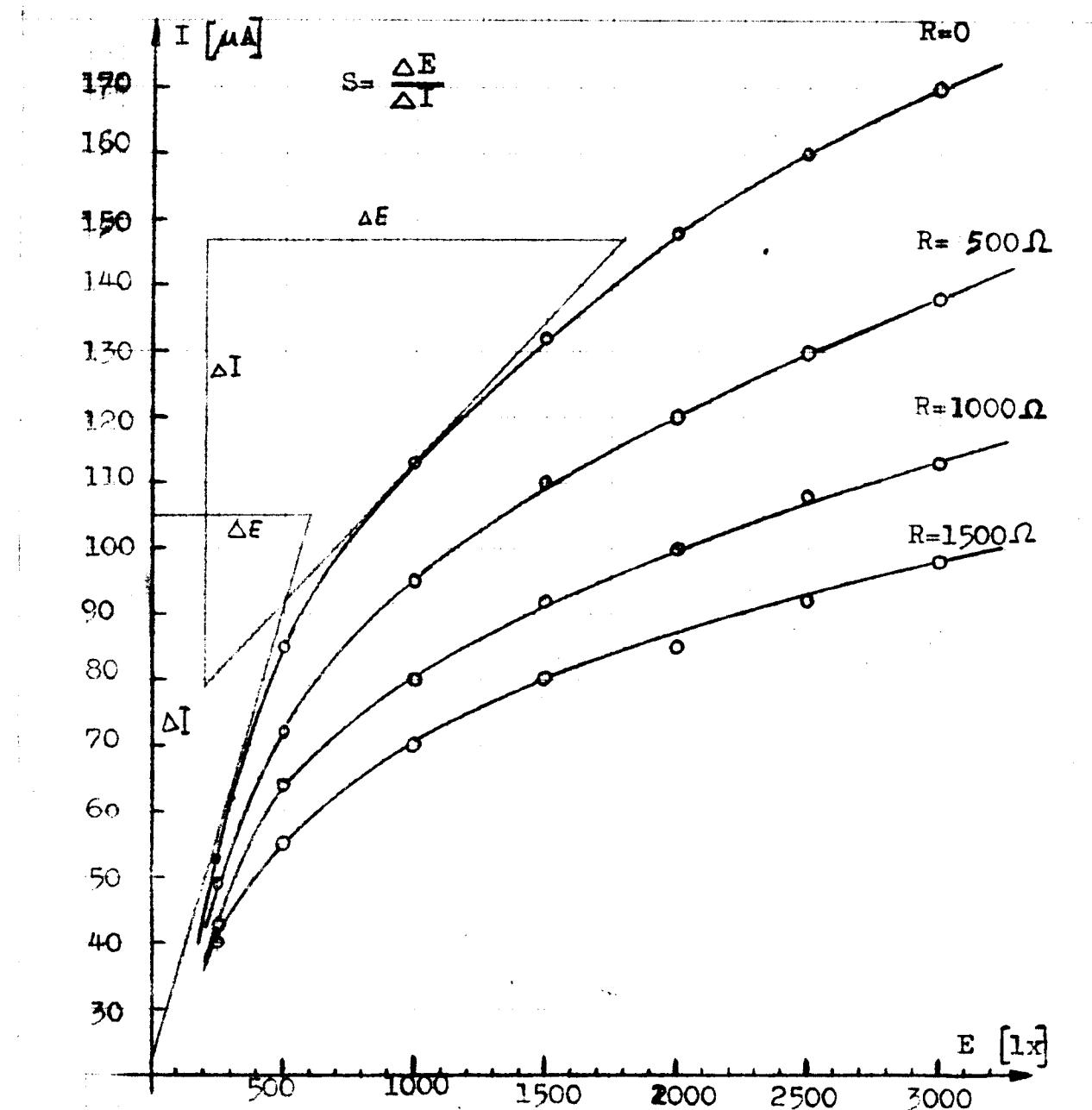
Luks-amperske karakteristike date su na slici 21 i 22. Na slici 22 $I=I(E)$ nacrtan je u ln-ln skali.

Karakteristike $U=U(E)$ i $U=U(\ln E)$ dati su na slici 23 i 24. Na slici 23 se vidi da U_{ph} približava nekoj vrednosti oko 300mV. Zavisnost $U=U(\ln E)$ je linearna (slika 24).



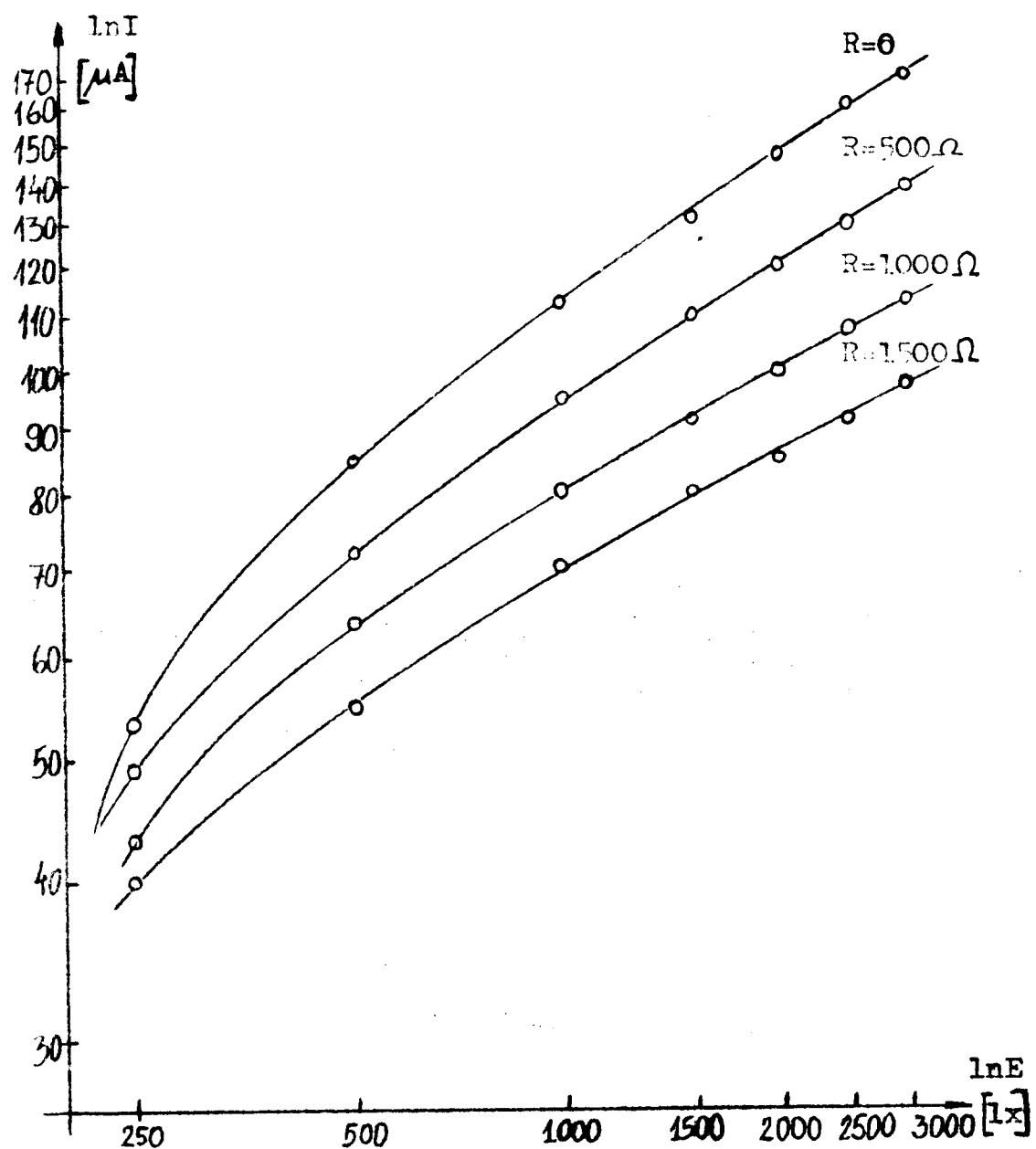
Slika 20.

Slika 21.

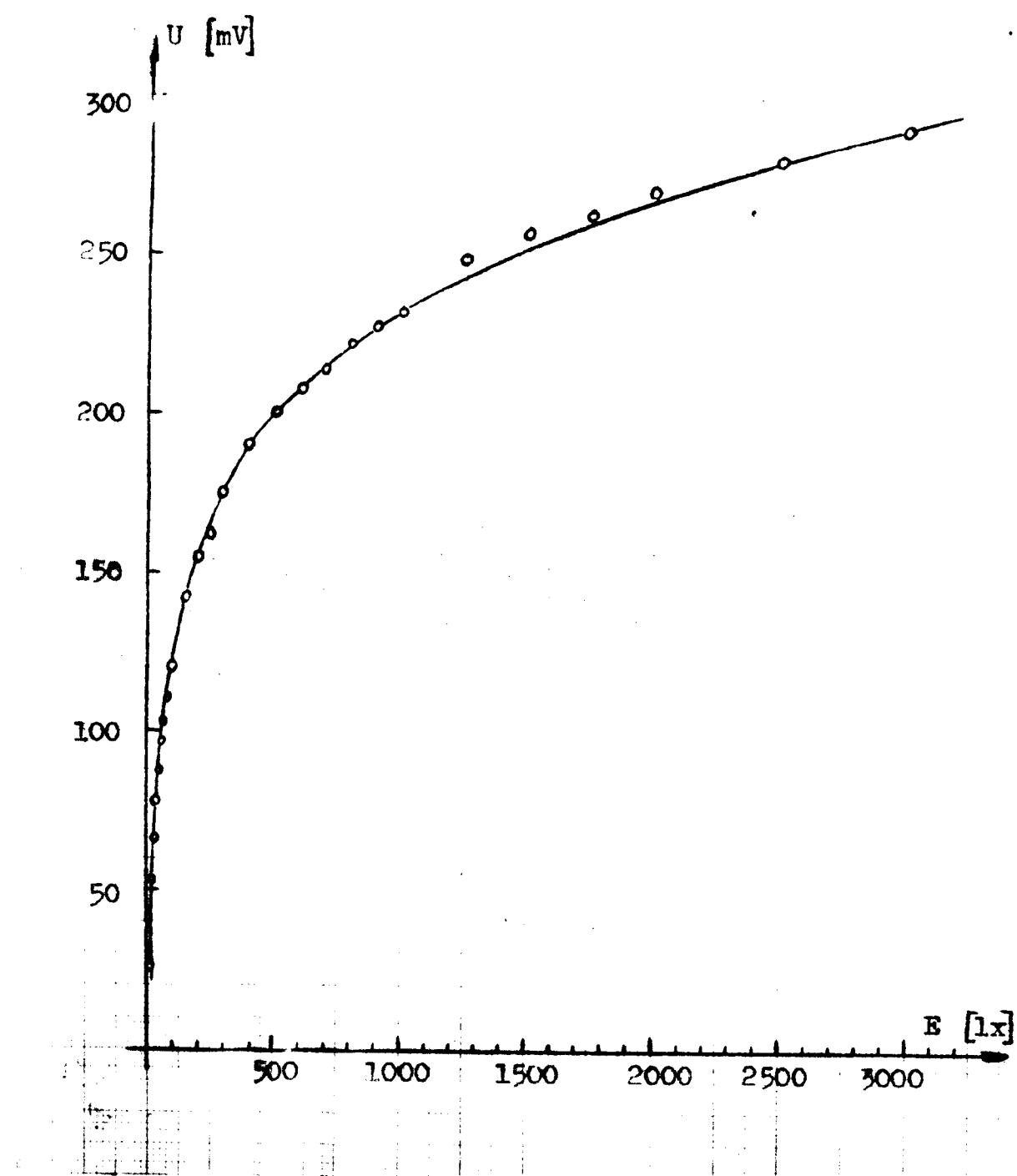


$$S_{300} = \frac{105-22}{600} = 0,13 \frac{\mu\text{A}}{\text{lx}}, \quad S_{1000} = \frac{147-79,5}{1800-200} = 0,042 \frac{\mu\text{A}}{\text{lx}}.$$

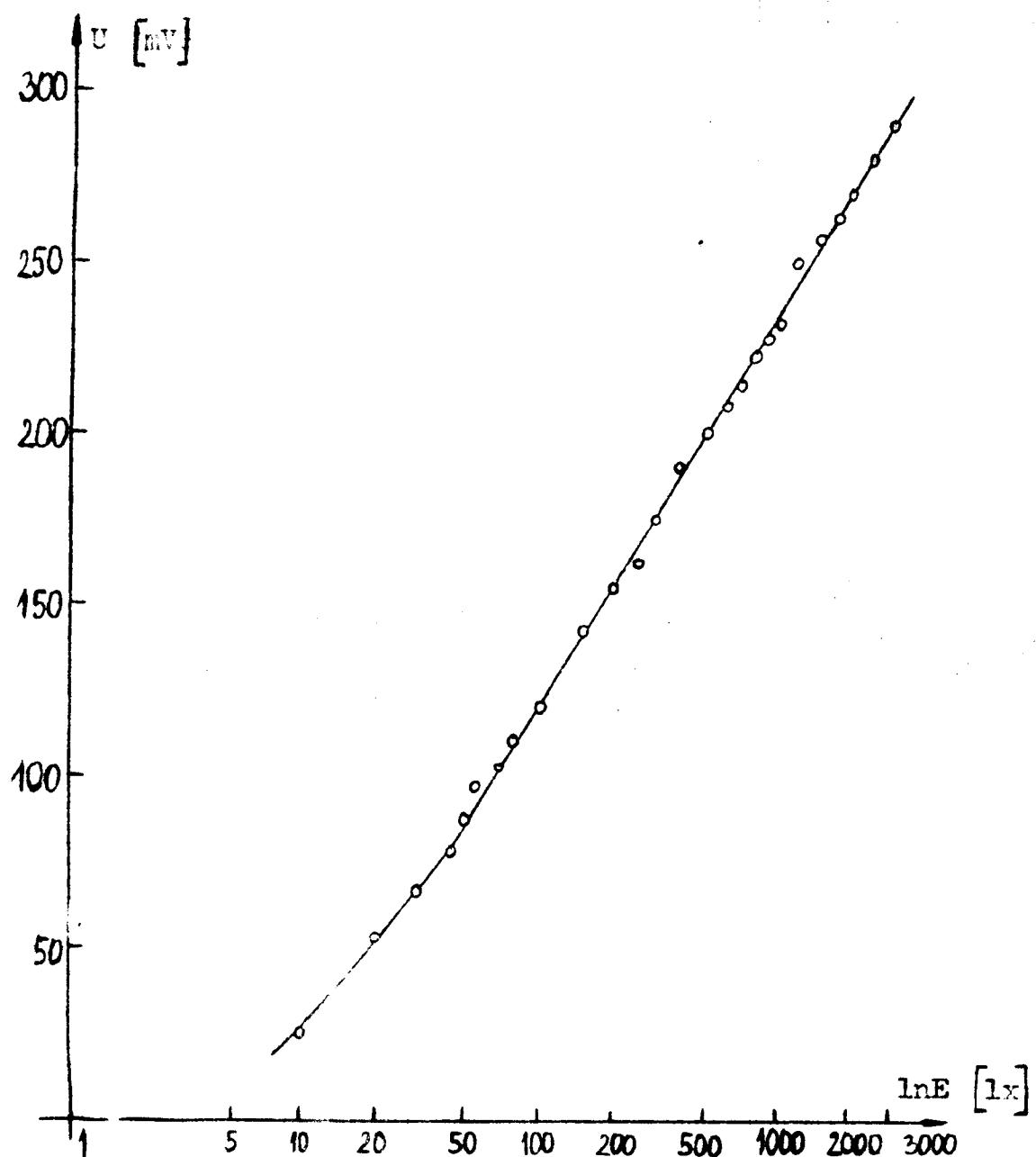
Slika 22.



Slika 23.



Slika 24.



4. TRANZISTORI

Tranzistori su poluprovodnički elementi koji sadrže tri sloja poluprovodnika; ili dva P tipa izmedju kojih je kao u sendviču tanak sloj N tipa (PNP tranzistor); ili dva N tipa izmedju kojih je tanak sloj P tipa (NPN tranzistor). Ovi tranzistori su načinjeni od jednog monokristala i zovu se slojni (bipolarni) tranzistori. Osnovna im je osobina da u određenoj vezi u kolu struje mogu pojačati signale.

4.1. Princip rada i jednačine tranzistora

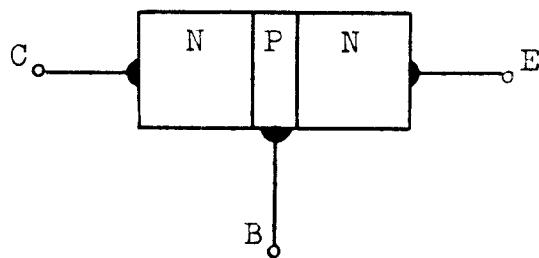
Ovde će biti reči o NPN tranzistoru dok za PNP tranzistore važe slične jednačine.

Sloj u sredini se zove baza (B), dok ostala dva dela su kolektor (C) i emiter (E). Iz svakog sloja načinjen je omski izvod (slika 25). Razlika izmedju spoja kod emitera i spoja kod kolektora sastoji se u tome što spoj kolektor-baza načinjen je na većoj površini nego spoj emiter-baza.

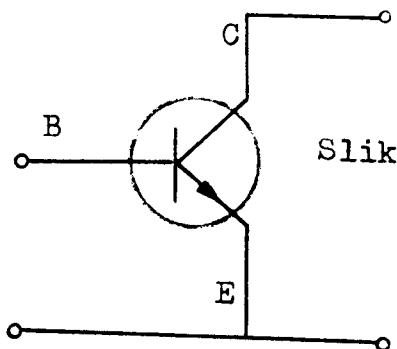
U normalnom režimu rada spoj kod kolektora se polarije inverzno dok spoj kod emitera direktno. Ako je kod NPN tranzistora u bazi (P deo) koncentracija akceptorskih atoma mala i ako je konstrukcija tranzistora takva da je debljina baze manja od difuzione konstante elektrona, tada svi ubačeni elektroni naponom U_{BE} iz emitera u bazu pre rekombinacije difuzijom stižu do kolektorskog spoja. Tu se pojavljuju kao sporedni

nosioci nanelektrisanja i lako prelaze kolektorski PN spoj. Izvestan deo elektrona se ipak rekombinuje u bazi (1-10%) a njih nadoknadjuje struja baze. Ako povećamo napon U_{BE} to znači da povećamo i broj ubačenih elektrona iz emitera u bazu. Kako je procenat rekombinovanih elektrona u bazi približno isti to znači da smo povećali i struju baze. Možemo reći da naponom U_{BE} odnosno strujom i_B upravljamo strujom kroz kolektor a kako je struja baze puno manja od struje kolektora odnos i_C/i_B može biti i nekoliko stotina. Ovaj odnos predstavlja strujno pojačanje tranzistora.

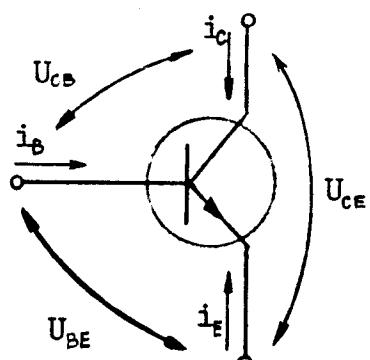
Spoj tranzistora kod kojeg se strujom baze upravlja struja kolektora zove se tranzistor sa zajedničkim emiterom. Slika 26 predstavlja šematski prikaz NPN tranzistora sa zajedničkim emiterom. Najbolje pojačavačke osobine ima tranzistor u ovom spoju i ovde ću razmatrati samo vezu NPN tranzistora sa zajedničkim emiterom.



Slika 25.



Slika 26.



Slika 27.

Neka su struje koje teku kroz om-ske izvode kolektora, baze i emitera i_c , i_b i i_e i orijentisemo ih tako da svi imaju smer ulaza u tranzistor. Pored toga neka su U_{BE} napon izmedju baze i emitera, U_{CE} napon izmedju kolektora i emitera (njih merimo u odnosu na emiter), U_{CB} napon izmedju kolektora i baze a meri se u odnosu na bazu.

Slika 27 daje šematski prikaz tranzistora sa naponima i strujama. Veze izmedju ovih veličina i_c , i_b , i_e , U_{BE} , U_{CE} , U_{CB} u obliku jednačina su jednačine tranzistora, i za potpuno opisivanje tranzistora dovoljne su dve jednačine sa po dve nezavisno promenljive.

Polazeći od pretpostavke da tranzistor može da se tretira kao dva PN spoja odnosno dve diode vezane suprotno (slika 28), kao i to da je širina baze veoma mala, odnosno da jedan deo nosilaca nanelektrisanja koji predstavlja jedan PN spoj pojavljuju se kao dodatni nosioci nanelektrisanja kroz drugi spoj, dobiju se jednačine u obliku:

$$i_c = -\frac{I_{CEO}}{1-\alpha_N} \left[\exp(-eU_{CE}/KT) - 1 \right] + \beta i_b, \quad (11)$$

$$i_b = \frac{I_{EBO}}{1+(1-\alpha_I)\beta} \left[\exp(eU_{BE}/KT) - 1 \right] + \frac{(1-\alpha_I) \cdot I_{CEO}}{1+(1-\alpha_I)\alpha_N} \left[\exp(-eU_{CE}/KT) - 1 \right]. \quad (12)$$

Jednačina 11 predstavlja izlazne karakteristike NPN tranzistora sa zajedničkim emiterom pri čemu nezavisna veličina je U_{CE} a zavisna je i_c , dok i_b igra ulogu parametra. Veličina β naziva se koeficijent strujnog pojačanja tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom i njena vrednost se kreće u intervalu 10-500.

$$\beta = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N}$$

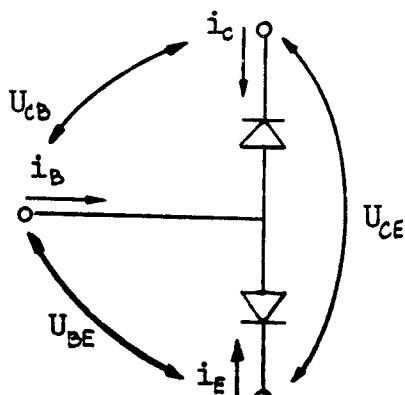
Već za male pozitivne napone U_{CE} (plus na kolektoru)

$$\exp(-eU_{CE}/KT) - 1 = -1$$

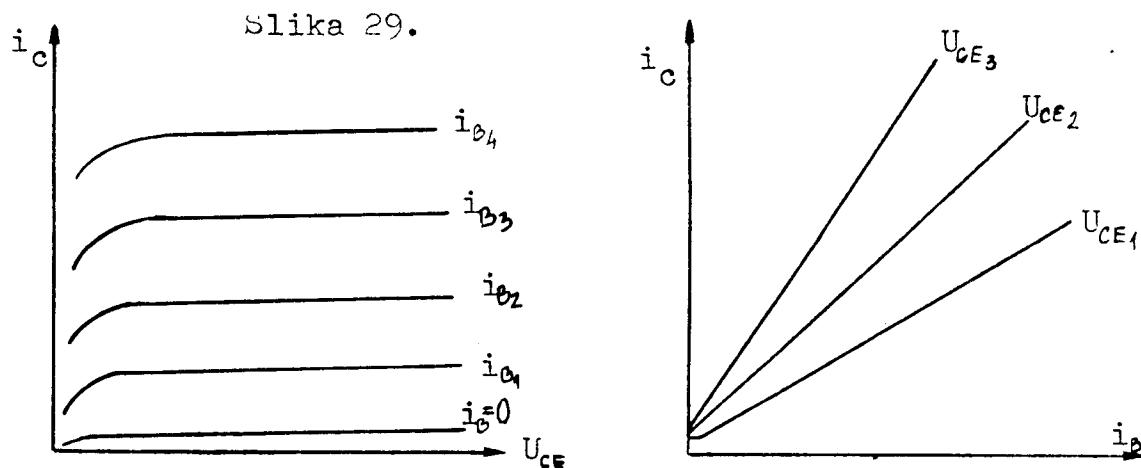
$$i_c = \frac{I_{CEO}}{1-\alpha_N} + \beta i_b$$

Grafički prikaz ovih zavisnosti dati su na slici 29.

Jednačina 12 predstavlja ulazne karakteristike tranzistora sa zajedničkim emiterom pri čemu U_{BE} nezavisno promenljiva, U_{CE} parametar a i_b zavisno promenljiva.



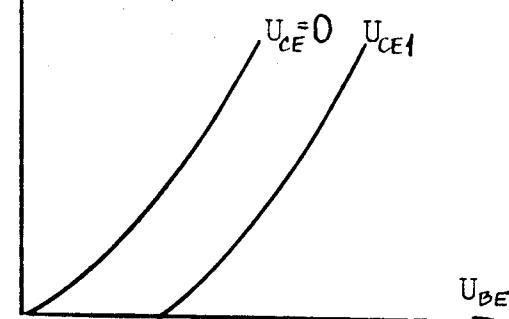
Slika 28.



Veličine I_{CBO} i I_{EBO} predstavljaju inverzne struje kolektorskog i emiterskog PN spoja, slične kao kod diode I_o . α_i i α_e su bezdimenzijsne veličine i govore o tome koji deo nosilaca nanelektrisanja koji predje jedan spoj učestvuje u struci drugog spoja. Njihove veličine su oko 0,9 i 0,99.

Grafički prikaz ulaznih karakteristika dat je na slici 30.

Slika 30.



4.2. Fototranzistori

Tranzistori sa tri izvoda koji su konstruisani tako da mogu pogodno osvetliti zovu se fototranzistori. Kod ovih tranzistora se osvetljava jedan od PN spoja: spoj kolektor-baza ili spoj emiter-baza. Iz praktičnih razloga fotoosetljivost spoja emiter-baza nema velikog značaja (mala površina, mali inverzni napon), nego se za fotoosetljivost koristi spoj kolektor-baza. Ovaj u zavisnosti od polarizacije može da radi kao fotodioda ili foto element.

4.2.1. Kolektorski PN spoj kao fotodioda

NPN fototranzistor sa spojem kolektor-baza kao fotodioda polariše se na sledeći način. Spoj kolektor-baza se polariše inverzno odnosno na kolektor se dovodi pozitivan napon a na bazu negativan. Spoj emiter-baza se polariše direktno.

Na osnovu jednačine za fotodiodu već za mali inverzni napon stup je data izrazom (vidi i stranu 18)

$$I = -I_o - I_s = -I_o - \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R).$$

Ova struja odgovara inverznoj struji kolektorskog PN spoja I_{CEO} , tako da na osnovu jednačine tranzistora i s obzirom na to da je orijentisan suprotno od i_c

$$i_c = \frac{I_{CEO}}{1-\alpha_N} + \beta i_B = \frac{1}{1-\alpha_N} \left[I_0 + \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) \right] + \beta i_B.$$

Kako se radi o tranzistoru zbog male širine baze inverzna struja I_0 se razlikuje od inverzne struje diode pa će ovde biti stavljeno I'_0 i

$$i_c = \frac{1}{1-\alpha_N} \left[I'_0 + \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) \right] + \beta i_B,$$

$$i_c = \frac{I'_0}{1-\alpha_N} + \frac{1}{1-\alpha_N} \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) + \beta i_B.$$

$$\text{Ako stavimo } I_{CEO} = \frac{I'_0}{1-\alpha_N}$$

konačna jednačina struje kolektora

$$i_c = I_{CEO} + \frac{1}{1-\alpha_N} \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) + \beta i_B.$$

Treba napomenuti da ova jednačina važi za dovoljno velike napone U_{CE} ($U_{CE} > KT/e$) i kako se vidi struja kolektora ne zavisi od ovog napona. I_{CEO} je tamna struja i za fototranzistore se kreće u oblasti nA i pA. Zbog ove osobine sa fototranzistorima se mogu meriti veoma mala osvetljenja.

Kako je

$$\beta = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N} \quad \text{tada} \quad \beta+1 = \frac{\alpha_N}{1-\alpha_N} + 1 = \frac{1}{1-\alpha_N}$$

$$i_c = I_{CEO} + (\beta+1) \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) + \beta i_B.$$

Zbog pojačavačkog efekta tranzistora fotostruja diode

$$I_s = \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R)$$

pojačana, odnosno osetljivost fototranzistora povećano $\beta+1$ puta. Fototranzistor spada u grupu pojačavačkih fotoelektričnih pretvarača. U tu grupu spada i fototranzistor sa efektom polja kao i fototiristor i lavina fotodioda. U grupu nepojačavačkih fotoelektričnih pretvarača spada fotodioda i foto element.

Nezavisno od osvetlenja fototranzistorom se može upravljati i strujom baze. Upravljanjem pomoću baze mogu se odstraniti neželjeni efekti smanjiti tamnu struju i podešiti radnu tačku.

U slučaju da je struja baze $i_B=0$ i ako I_{CEO} veoma mala, tada za veće napone U_{CE}

$$i_c = (\beta+1) \frac{e\phi}{h\nu} \eta (1-R) = (\beta+1) \cdot E \frac{S_e}{h\nu} \eta (1-R).$$

S' -osvetljena površina kod kolektorskog PN spoja. Ova jednačina daje vezu izmedju struje kolektora i osvetljenosti za tranzistor za koji je $i_B=0$, odnosno za tranzistor bez izvoda baze.

4.2.2. Kolektorski PN spoj kao foto element

Fototranzistor da bi radio sa kolektorskim PN spojem kao foto element polariše se na sledeći način. Spoj kolektor-baza se polariše direktno, odnosno kod NPN tranzistora na kolektor se dovodi negativan a na bazu pozitivan napon. U ovom slučaju oba PN spoja su polarisani direktno.

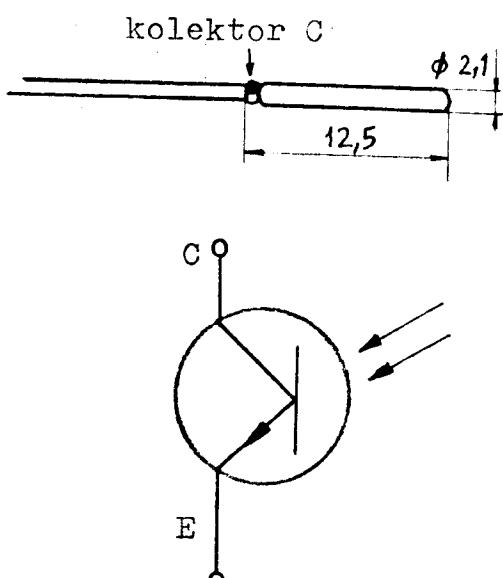
I ovde se može dokazati da je osetljivost fototranzistora jednak proizvodu osetljivosti foto elementa bez pojačanja i faktora $\beta+1$.

Fototranzistori sa izvodom baze bilo u režimu fotodiode ili fotoelementa kolektorskog PN spoja mogu se koristiti za registrovanje modulisanih signala.

4.3. Karakteristične veličine fototranzistora

Kako će kasnije koristiti fototranzistor bez izvoda baze opisacu njegove karakteristične veličine. To će vršiti na primeru BPY 61 proizvodnje Siemensa. Isti tip fototranzistora proizvodi i Texas Instruments sa oznakom LS 403.

Fototranzistor BPY 61 je epitaksijalan NPN silicijumski tranzistor u minijaturnom staklenom kućištu dimenzije 12,5x2,1 mm. Njegova oznaka i izgled dat je na slici 31.



Slika 31.

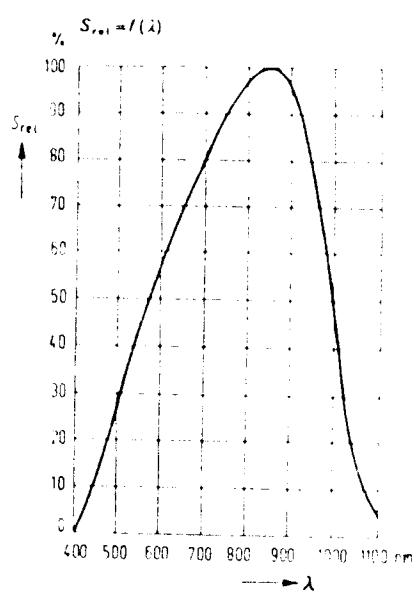
Baza nema izvoda pa se strujom kolektora upravlja svetlošću. Izvod kolektora na kućištu je označen crvenom tačkom. Veličina ϕ za ovaj tranzistor je velika pa se tranzistor može koristiti kao naročito osetljiv fotoelektrični pretvarač.

Karakteristični parametri:

maksimalni napon kolektora 50 V, (U_{CE})
maksimalni napon emitera 7 V, (U_{EC})
maksimalna struja i 60 mA,
najveća snaga dissipacije (25°C) 70mW,
najveća dozvoljena temperatura 125°C,
tamna struja I_{C0} 5 nA,
površina osetljiva na zračenje iznosi
 $0,43 \times 0,43\text{mm} = 0,17\text{mm}^2$.
Relativna spektralna raspodela osetljivosti dat je na slici 32.
BPY 61 ima četiri vrste grupisane prema fotoosetljivosti i označene rimskim brojevima (tabela 3). Osetljivost se odnosi na zračenje wolframske niti temperature $T=2856$ K.

Tabela 3.

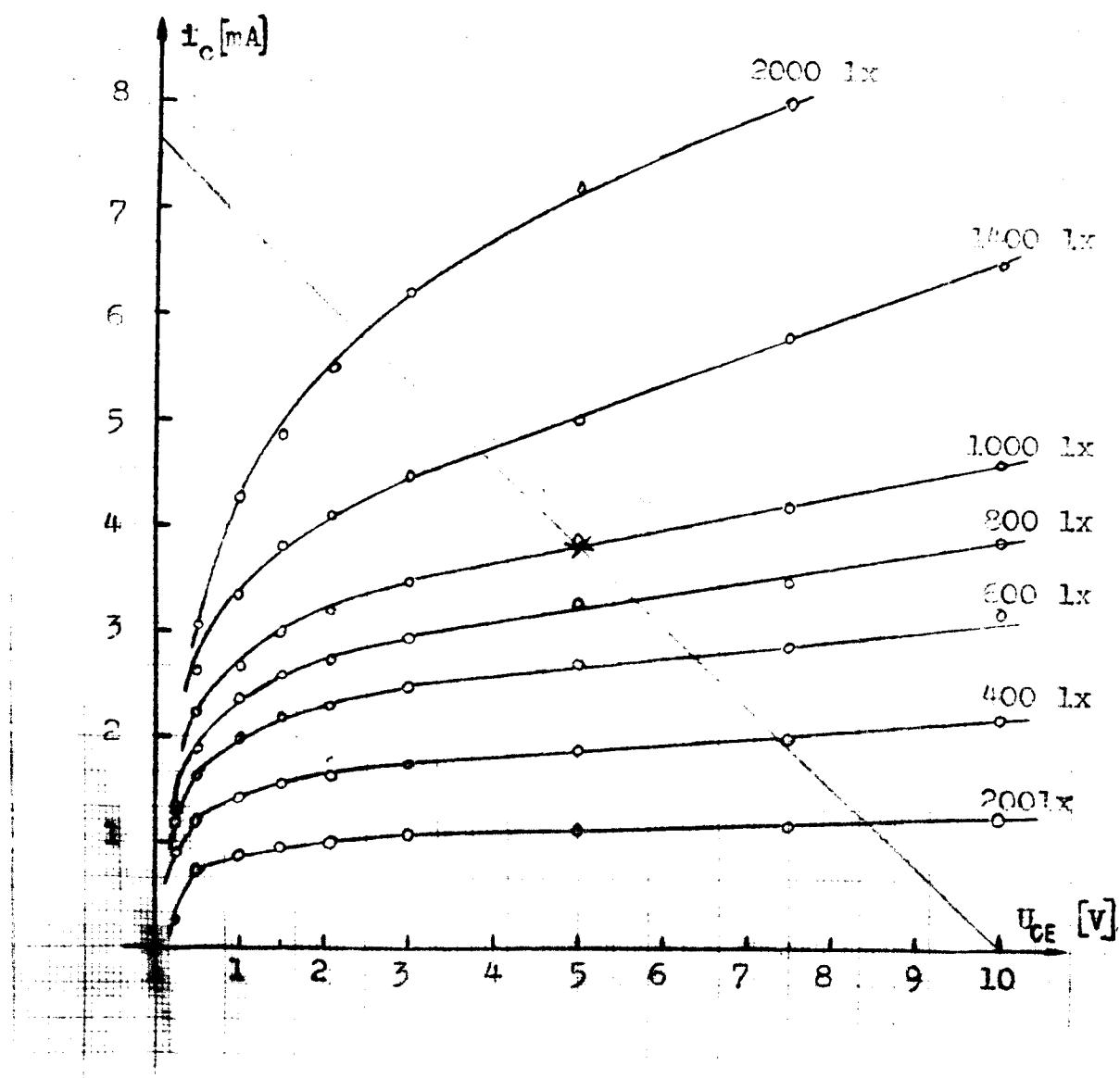
BPY 61	I	II	III	IV
osetljivost ($\frac{\mu\text{A}}{\text{lx}}$) pri $E=1000$ lx ($U_{CE}=5\text{V}$)	0,8 - 1,6	1,25 - 2,5	2 - 4	3,2 - 6,3



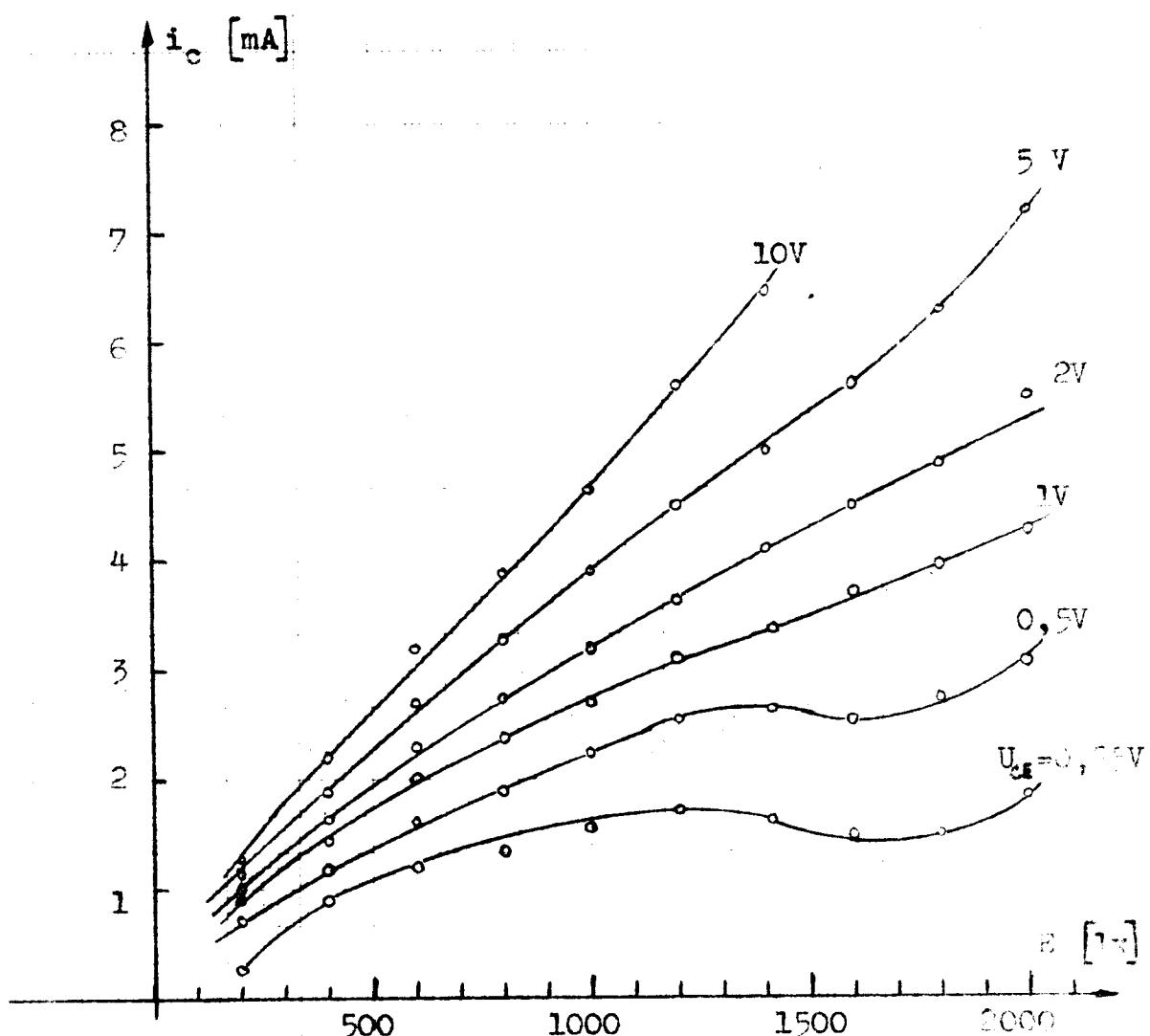
Kao primer na slici 33 i 34 dati su karakteristike BPY 61 III.

Slika 32.

Slika 33.



Slika 34.

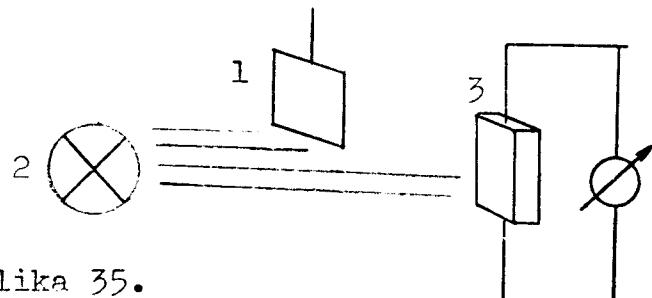


5. PROBLEM: MERENJE MALIH POMERANJA

Postavljen problem se satoji u sledećem: Potrebno je konstrui-sati aparaturu za merenje malih pomeranja pomoću fotoelektričnih pretvarača.

Aparatura će se sastojati iz izvora svetlosti i fotoelektričnog pretvarača koji će biti optički povezani i smešteni u jednu svetlosnu nepropustljivu kutiju. Na put svetlosnih zraka biće postavljena optička prepreka koja će zakloniti deo svetlosnog fluksa. Svetlosna prepreka će biti povezana sa mernim telom čije se pomeranje meri. Pomeranjem svetlosne prepreke menjaćemo svetlosni fluks koji pada na fotoelektrični pretvarač i uspostavićemo vezu izmedju pomeranja mernog tela i otklona kazaljke ampermetra odnosno voltmetra. Na takav način neelektričnu veličinu (malo pomeranje) pretvorimo u promenu svetlosnog fluksa, a promenu svetlosnog fluksa u promenu struje ili napona.

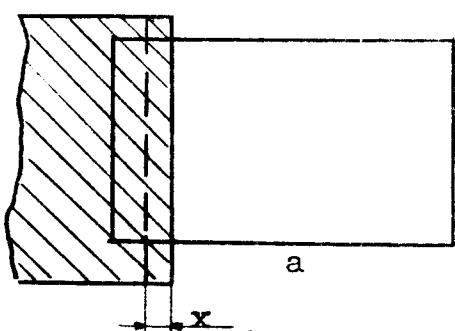
- Važni delovi aparature su (slika 35):
1. Optička prepreka.
 2. Izvor svetlosti.
 3. Fotoelektrični pretvarač.



Slika 35.

5.1. Optička prepreka

Neka paralelan snec svetlosti prolazi kroz jedan pravougli prozor dužine a i širine b (slika 36) i pada na foto element. Struja kratkog spoja foto elementa je linearna funkcija jačine osvetljenosti površine E , odnosno $I=c \cdot E \cdot S$, gde je S površina foto elementa na koji pada svetlost, odnosno $S=ab$ površina prozora (zbog paralelnosti snopa). c je konstanta koja se odnosi na foto element i aparatu.



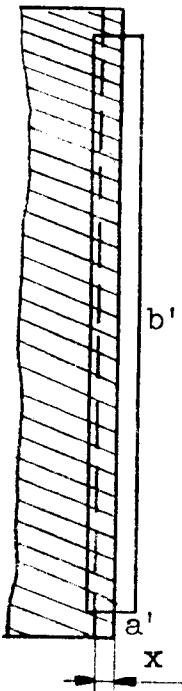
Slika 36.

Ako se optička prepreka (šrafirani deo na slici 36) kreće kroz prozor

paralelno sa stranicom a smanjiće osvetljenu površinu foto elementa. Ako se prepreka pomeri za dužinu x promeniće se i osvetljena površina foto elementa za $\Delta S = xb$, koji prouzrokuje promenu struje

$$\Delta I = cE\Delta S = cExb.$$

Promena ΔI će biti utoliko veća ukoliko je veća vrednost jačine osvetljenosti i ukoliko je veća vrednost promene ΔS . Za određeno pomeranje prepreke promena površine će biti veća ukoliko je dužina prozora b veća. Konstruišemo zato prozor oblika prikazan na slici 37, gde su nove dimenzijske



Slika 37.

$$a' = \frac{a}{k} \quad \text{i} \quad b' = b \cdot k,$$

(k broj veći od 1). Površina prozora u prvom slučaju je $P = a \cdot b$ a u drugom slučaju

$$P' = a' \cdot b' = \frac{a}{k} \cdot b \cdot k = ab = P,$$

medjutim dok za dato pomeranje prepreke x u prvom slučaju $\Delta S = x \cdot b$ sada

$$\Delta S' = x \cdot b' = x \cdot b \cdot k = k \Delta S.$$

Vidi se da izborom dovoljno dugačkog prozora osetljivost sistema se može povećati k puta.

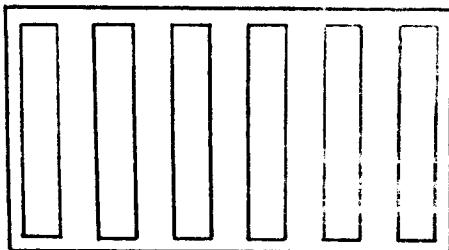
Pojavljuje se medjutim sad sledeći problem: teško je napraviti paralelan snop svetlosti na tako velikoj dužini kao b' i teško je tehnički izvesti paralelno pomeranje optičke prepreke sa stranicom a' . Da bi izbegli ove teškoće prozori prepreka se konstruišu kao niz kraćih paralelnih otvora (rešetka) prikazanom na slici 38. Pomeranje jedne rešetke ispred druge izazvaće dovoljnu veliku promenu osvetljene površine. Ovakvom metodom moguće je meriti pomeranje manje od $1 \mu m$. Osetljivost aparature se može povećati ako se poveća broj linija u rešetci. Dužina na kojoj se mogu meriti mala pomeranja jednak je širini jedne providne linije.

Važno je napomenuti još da se ovde ne radi o optičkoj rešetci i o principu interferencije, nego o fotometrijskom merenju malih pomeranja. Rešetka služi za povećanje osetljivosti sistema a pojava interferencije je nepoželjan efekat.

5.2. Izvor svetlosti

Kao izvor svetlosti se koristi sijalica 12V 1,75A (21W), kod koje svetlost potiče od usijane wolframove niti. Spektralna raspodela zračenja je kontinualna i opisana je Plankovim zakonom zračenja. Radna temperatura wolframove niti je oko 2200-3000 K.

Emitovani svetlosni fluks sijalice jako zavisi od napona na sijalici. Zbog toga u slučaju varijacije napona na sijalici doći će do varijacije svetlosnog fluksa. Ove promene mogu biti tolike da onemogućuju merenje malih pomeranja sa dovoljnom tačnošću. Promena svetlosnog fluksa usled fluktuacije napona manifestovaće se na mernom instrumentu preko $I = c\Phi$ kao malo pomeranje mernog tela, do koje u stvari nije došlo.



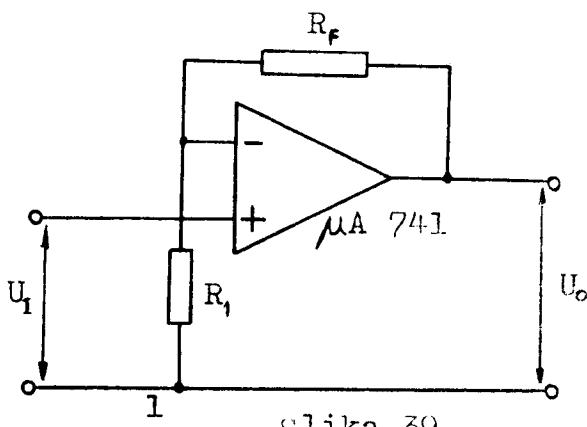
Slika 38.

Da bi eliminisali izvor ovakvih grešaka treba stabilizovati svetlosni fluks sijalice. Za stabilizaciju će koristiti povratnu spregu pomoću jednog fototranzistora. Fototranzistor će biti direktno osvetljen i stalno će meriti svetlosni fluks sijalice. U slučaju promene fluksa preko pojačavača daće uputstvo za korekciju napona na sijalici. Na ovaj način fluktuacije svetlosnog fluksa nastalog iz bilo kog razloga biće eliminisana, odnosno svetlosni fluks biće stabilizovan.

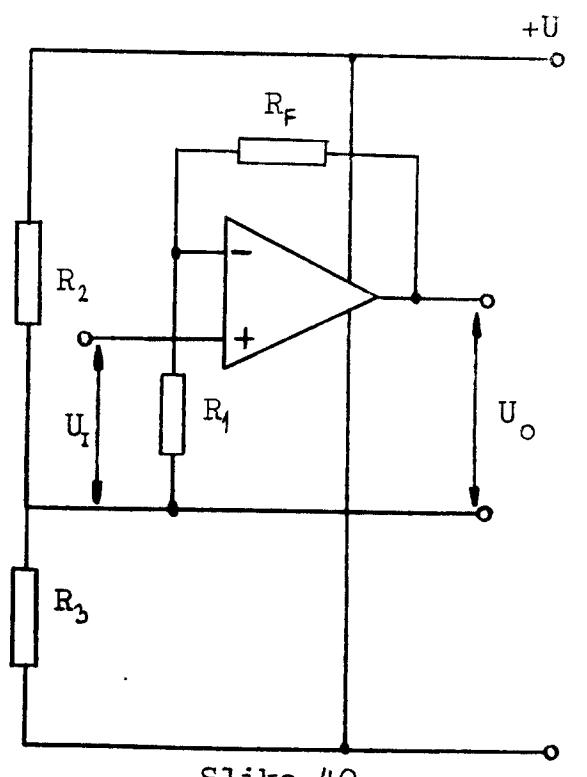
Konkretna realizacija stabilizatora.

Stabilizator će se sastojati iz tri dela: fototranzistora, pojačavača, i izlaznog stepena snage.

Za pojačavač će koristiti $\mu A 741$ kao neinvertujući pojačavač (slika 39). Pošto nemam simetričan izvor napajanja tačka 1 mora



Slika 39.



Slika 40.

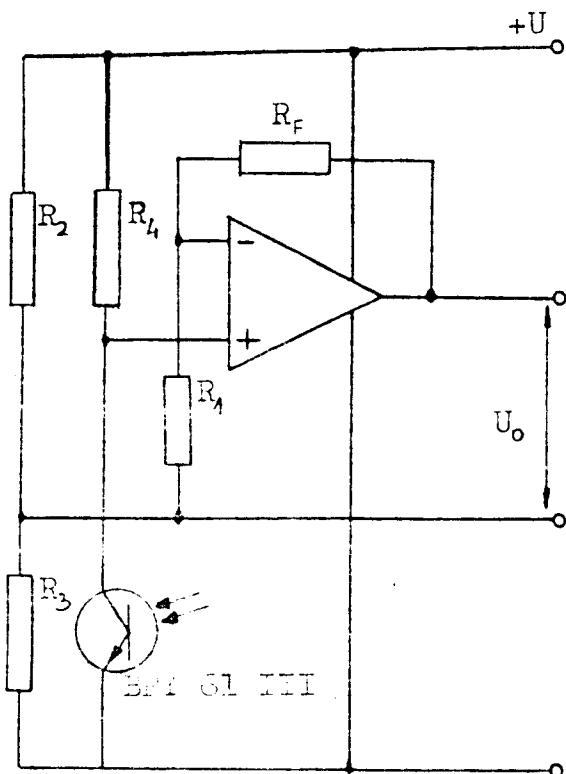
biti na simetričnom razdelniku napona, i operacioni pojačavač sa izvorom napajanja imaće vezu prikazanom na slici 40. Napon U_I će dobiti iz sličnog razdelnika napona pri čemu će jedan otpor biti zamenjen fototranzistorom BPY 61 III (slika 41). Operacioni pojačavač će napajati sa $U=10V$, pa će tada za BPY 61 III pri $5V$ i $E=1000lx$ odgovarajući otpor u razdelniku napona biti $R_4 = U/i_c = 1,3k\Omega$ (na osnovu povučene radne prave na slici 33). Otpore R_1 i R_3 će izabrati kao dve grane trimerpotenciometra od $10k\Omega$, čime postoji mogućnost podešavanja ulaznog napona U_I .

U ovakovom spoju idealni operacioni pojačavač ima pojačanje

$$A = \frac{R_F + R_1}{R_1}$$

a ako ga izaberem za 100 pri $R_F = 1k\Omega$ $R_F = 99k\Omega \approx 100k\Omega$. Kod $\mu A 741$ kompenzacija ofset napona na ulazu vrši se potenciometrom R_k od $10k\Omega$. Kompletna šema pojačavača dat je na slici 42.

Kao izlazni stepen koristiću tranzistor velike snage 2N3442 (T_1) koji upravlja strujom sijalice. Njegove karakteristike date su na skicama 43 i 44. Kroz sijalicu sa $P=21W$ pri $12V$ teče struja $I=1,75A$ a otpor $jedn$ iznosi $R=U/I=6,85\Omega$. Ako povučem radnu pravu tranzistora vidi se da pri izboru radne tačke kod $U_{CE} = 2V$ potrebna je struja baze $35mA$. Da ne bi opteretio operacioni pojačavač vezao sam tranzistor 2N3866 (T_2) u Darlington spoj (slika 45). Kako je napon $U'_O = 5V$ za $U_I = 0$ on bi proterao struju



Slika 41.

kroz bazu T_2

$$i_B = \frac{U'_o}{h_{ie1} + h_{ie2}} = \frac{5}{1,54 + 55,7} = 87 \text{ mA}$$

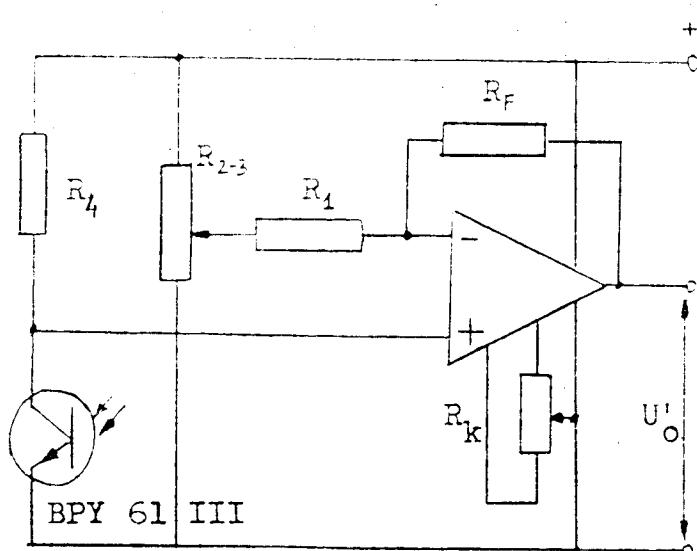
zato vezaču otpor R_6 na bazu T_2 da bi ograničio struju koji treba da ima vrednost $700\mu\text{A}$ (h_{ie} i i_B sam očitao sa karakteristike T_2 slika 46 i 47),

$$R_6 + h_{ie1} + h_{ie2} = \frac{U'_o}{i_B}$$

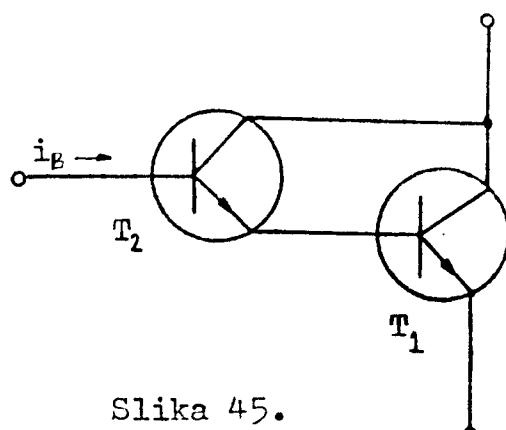
$$R_6 = \frac{U'_o}{i_B} - h_{ie1} - h_{ie2} = 7 \text{ k}\Omega$$

Da bi stabilisao od fluktuacije napona i sam pojačavač korističu zener diodu BZX 10. Napajanje sijalice i pojačavača se vrši iz izvora naizmenične struje kroz Graetz B 40 C 3200/2200 koji može da propušta maksimalnu struju $3,2\text{A}$ (pri hlađenju). Napon napajanja je 13V jer pad napona na Graetz-u je oko 1V .

Da ne bi na zener diodi opao napon ispod 10V u trenutku kada talasasti napon padne ispod 10V korističu kombinaciju diode 1N4007 i elektrolit kondenzatora $47\mu\text{F}$. Dioda je vezana tako da sprečava pražnjenje kondenzatora kroz sijalicu kada napon opadne ispod 10V , dok pražnjenje kondenzatora kroz zener diodu i pojačavač ograničen sa otporom $R_6=240\Omega$. Na taj način napon na kondenzatoru uvek je veći od 10V . Tada na zener diodi (a takođe i na pojačavaču) održava se napon od 10V bez obzira na talasasti oblik napona napajanja. Kompletna šema stabilizatora dat je na slici 48.

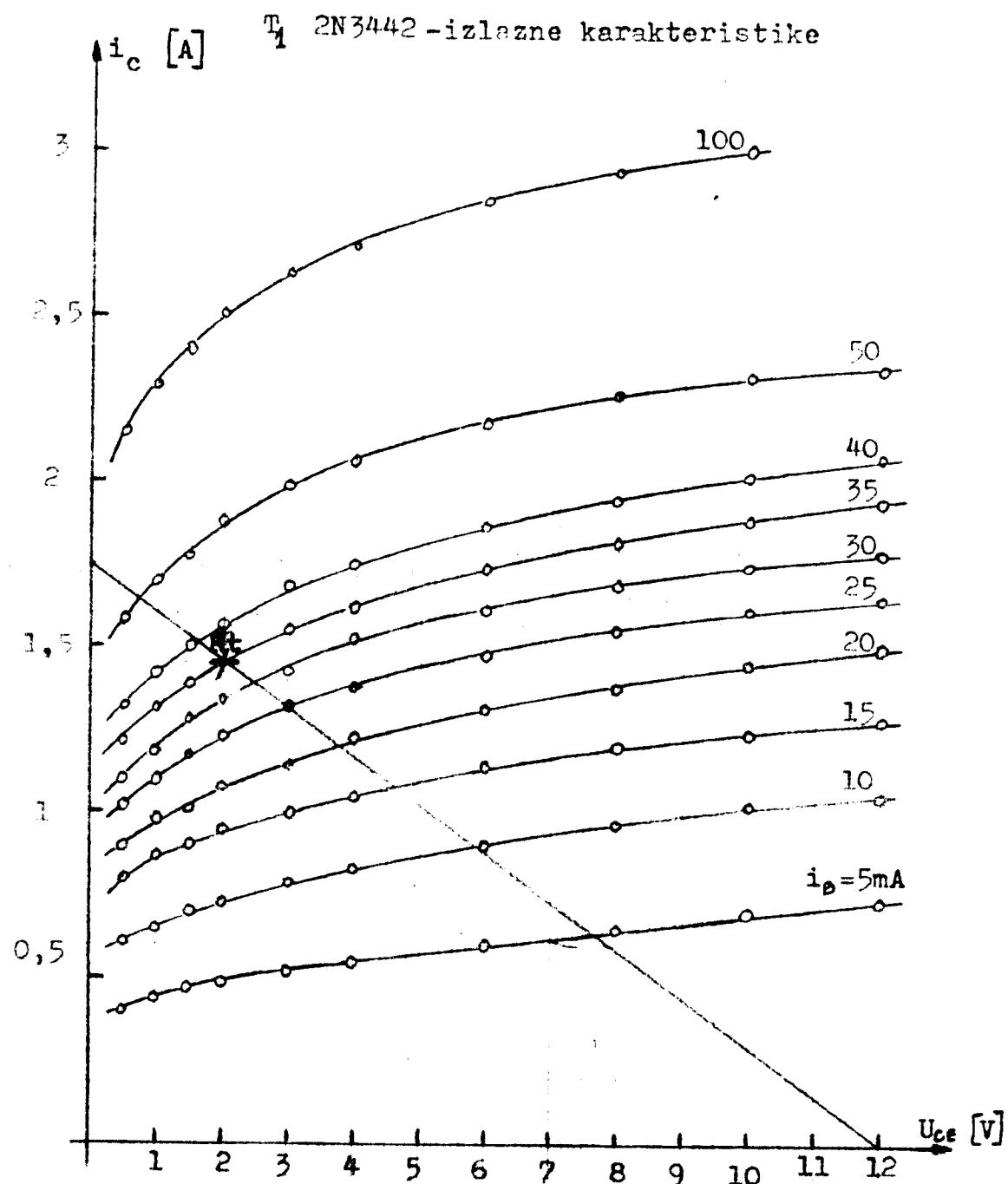


Slika 42.



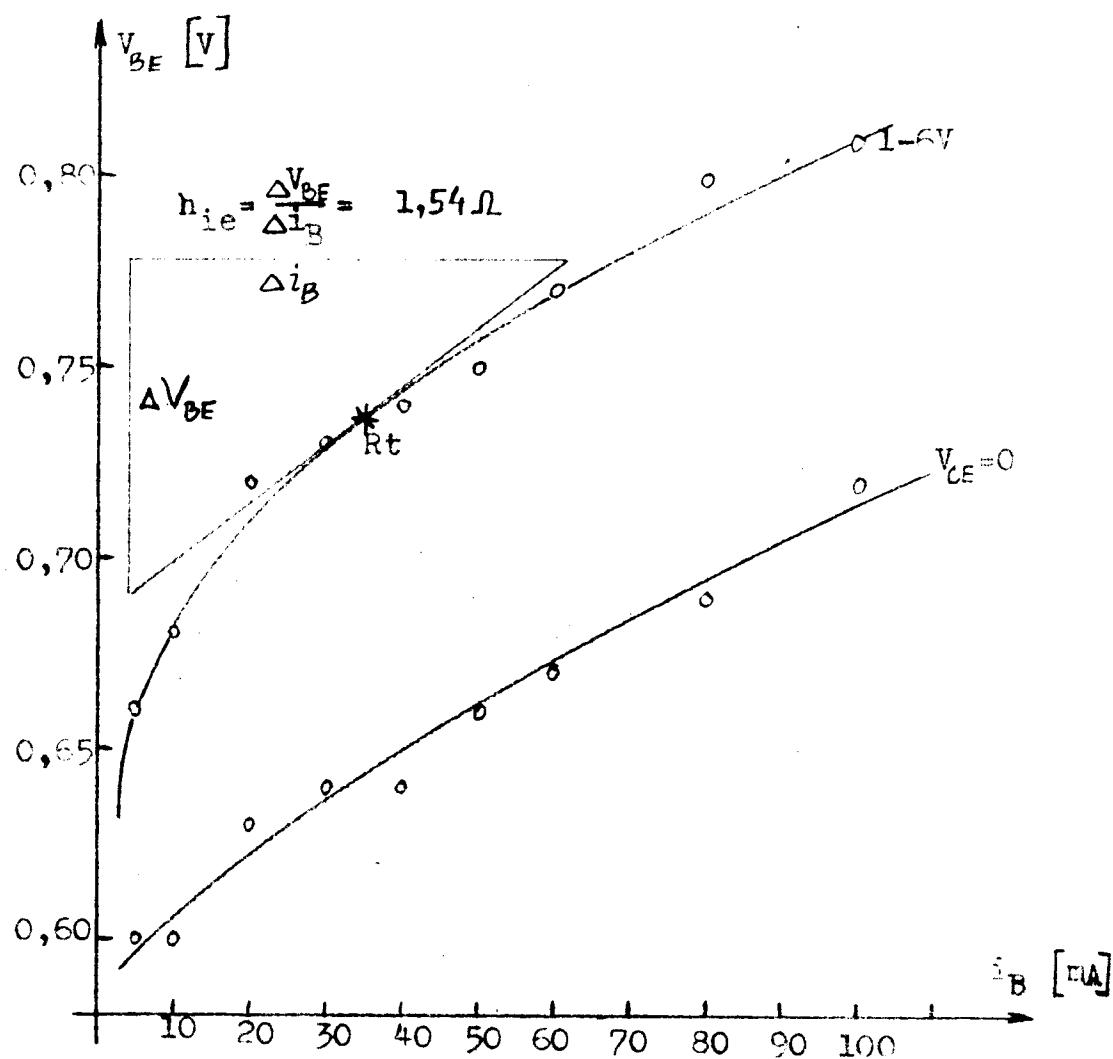
Slika 45.

Slika 43.



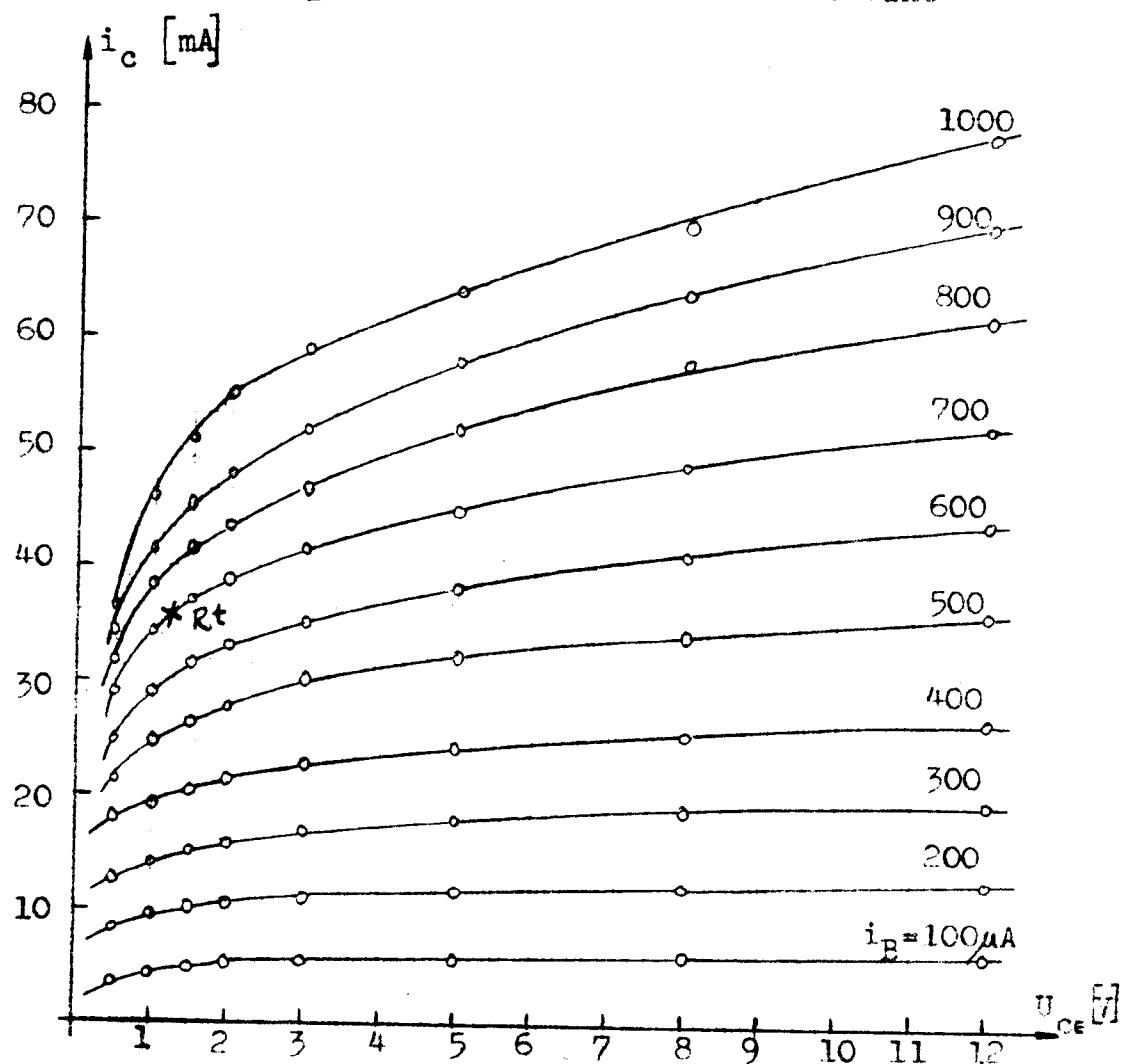
Slika 44,

T₁ 2N3224-ulazne karakteristike

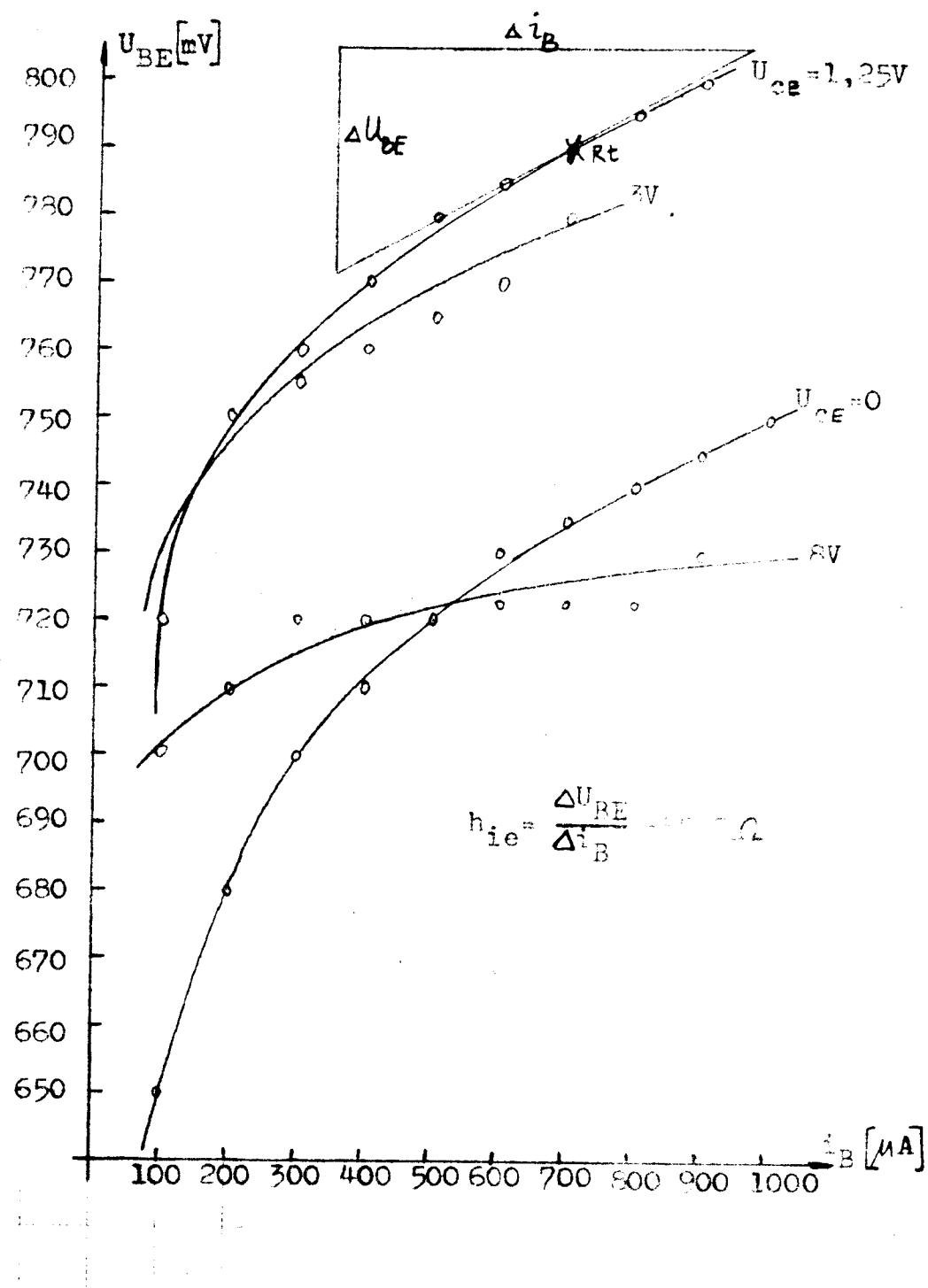


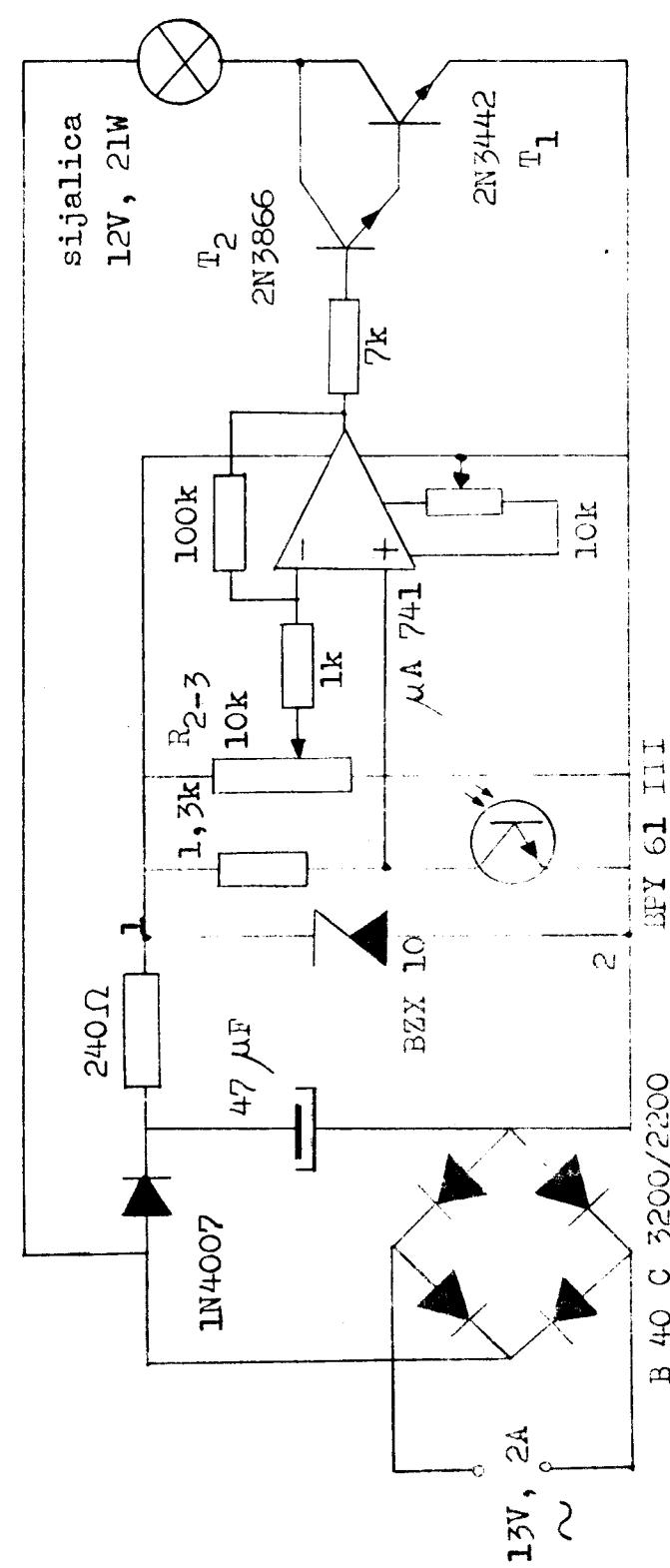
Slika 46.

T₂ 2N3866-izlazne karakteristike



Slika 47.
T₂ 2N3866-ulazne karakteristike





Slika 48. Šema stabilizatora

Ako iz bilo kog razloga opadne svetlosni fluks sijalice ~~opređe struju~~ fototranzistora BPY 61 III, pa će se na ne-invertujucem ulazu operacionog pojačavača povećati napon, koji se pojačava 100 puta. Porašće struja baze tranzistora 2N3866 a ovaj izaziva porast struje baze tranzistora 2N3442. Njegova radna tačka će se pomeriti ka nižim naponima, odnosno porašće napon na sijalici baš za onu vrednost koja je potrebna da eliminiše pad svetlosnog fluksa. Karakteristike tranzistora T_4 i T_2 dati su na slikama 43, 44, 46, 47 sa naznačenom radnom tačkom i radnom pravom za T_4 .

Posle realizacije i provere rada stabilizatora došlo je do sledećih rezultata:

Proveren oblik napona osciloskopom između tačaka 1 i 2 (slika 48). Napon je skoro potpuno "ravan" sa naizmeničnom komponentom oko 0,2V.

Slika 49 prikazuje zavisnost jačine osvetljenosti neke površine na udaljenosti od 10cm od sijalice u funkciji od naizmeničnog napona napajanja: a - sa stabilizatorom, b - bez stabilizatora.

Jasno se uočava plato u slučaju korišćenja stabilizatora. Za 13V napajanja relativna promena osvetljenosti po voltu iznosi

$$\frac{\Delta E}{E} \frac{1}{\Delta U} = \begin{cases} 1,68\% / V & \text{sa stabilizatorom} \\ 21,16\% / V & \text{bez stabilizatora.} \end{cases}$$

Inače potenciometrom R_{2-3} se može podešiti visina platoa.

Interesantno je napomenuti da stabilizator kompenzuje ne samo naponske promene nego i spoljašnje svetlosne promene. Ovi mogu poticati od drugih sijalica, dnevne svetlosti, kao i od providnih ili neprovidnih tela koji se nađu između fototranzistora i sijalice. Tako na primer ako fototranzistor izložimo svetlošći jedne druge sijalice, stabilizator u težnji da kompenzuje spoljašnji uticaj delimično ili potpuno gasi sijalicu vezanog u krug stabilizatora.

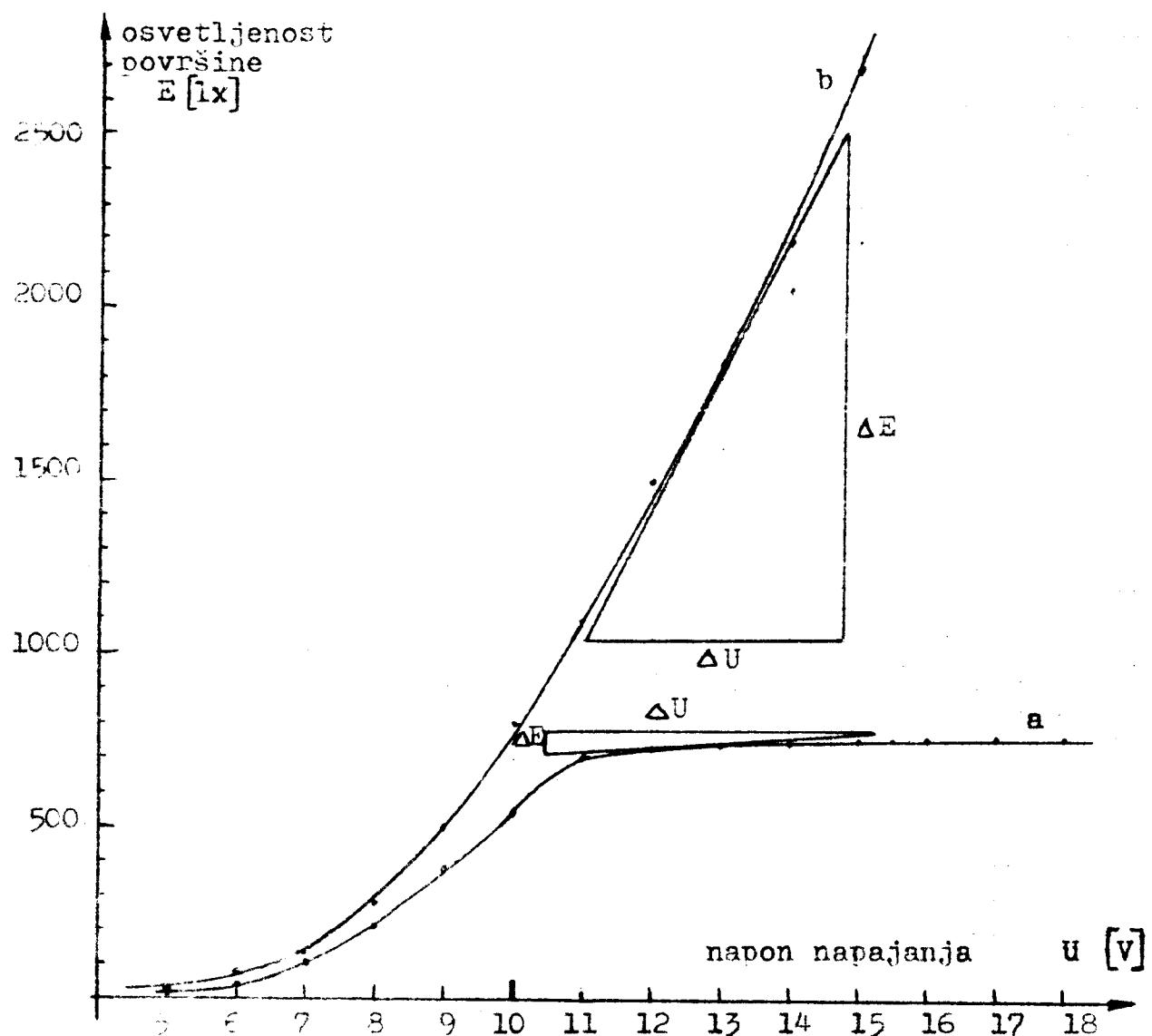
5.3. Fotoelektrični pretvarač

Kao fotoelektrični pretvarač koristiću foto element i fototranzistore.

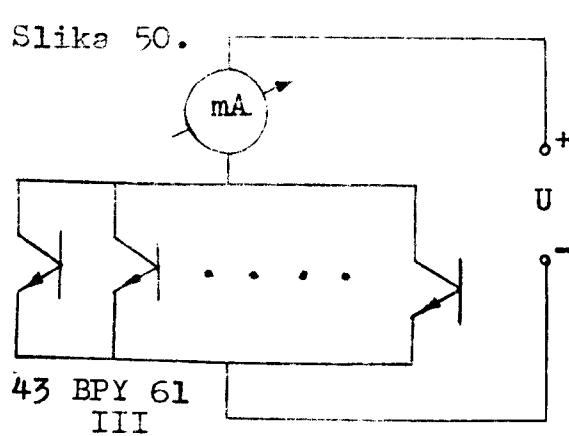
Kod fotoelementa ču meriti struju kratkog spoja (grafikon 21). Kako ova nije linearna zbog velikog unutrašnjeg otpora mikroampermetra, očekuje se da ni pomeranje optičke prepreke neće izazvati linearno pomeranje kazaljke ampermetra.

Kod fototranzistora ču meriti struju kolektora. Fototranzistor ima malu površinu za osvetljenje pa ču vezati 43 fototranzistora BPY 61 III paralelno, čime im se struja sabira (slika 50). Broj 43 proizlazi iz ograničenog broja fototranzistora koji mi stoje na raspolaganje, kao i iz geometrijskih uslova. Napon napajanja ču izabrati tako da fototranzistori budu u naponskom zasićenju. To je deo napona od 2 do 50 V (grafik 33). Za napajanje se koristi napon između tačaka 1 i 2 sa slike 48 (slika 51). Tada $U=10V$.

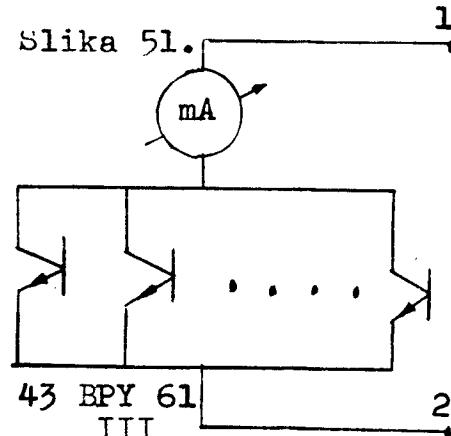
Slika 49.



Slika 50.



Slika 51.



5.4. Merenje malih pomeranja

Za kalibraciju aparature za merenje malih pomeranja koristiću mikrometar. Pomeranjem pokretnog dela mikrometra pomeraču optičku prepreku a zavisnost $I=I$ (pomeranje) predstaviću grafički. Posle realizacije aparature i izvršenih merenja za fotoelektrični pretvarač kao foto element i fototranzistor dobio sam rezultate koji su prikazani na grafikonu 52 i 53.

Grafikon 52 odnosi se na foto element. Maksimumi struja se odnose na potpuno otvorenu optičku prepreku, dok minimum za zatvoren slučaj. Ovde treba napomenuti da pri zatvorenosti optičke prepreke ipak pada mala količina svetlosti na foto element. To je zbog nesavršenosti optičke prepreke i zato minimum struje nije nula. Kako se optička prepreka i prozor sastoji od providnih i neprovidnih linija $0,5\text{mm}=500\mu\text{m}$, pomeranje od jednog maksimuma do minimuma iznosi $500\mu\text{m}$.

Merilo osetljivosti aparature je strmina grafika između maksima i minima, odnosno α ili $\text{tg}\alpha$. Kako se vidi zavisnost za foto element nije linearna sem u malom delu. Za taj deo

$$\text{tg}\alpha_1 = \frac{\Delta I}{\Delta l} = \frac{27-12,2}{110} = 0,13 \frac{\mu\text{A}}{\mu\text{m}}$$

$$\text{tg}\alpha_2 = \frac{28,5-14,5}{110} = 0,12 \frac{\mu\text{A}}{\mu\text{m}}$$

Da bi ove veličine mogao uporediti sa veličinama dobijenih iz merenja sa fototranzistorima moraću uračunati i vrednost jednog podeoka mikroampermetra. Kako on iznosi $1\mu\text{A}/\text{podeok}$

$$\text{tg}\alpha'_1 = 0,13 \frac{\text{podeok}}{\mu\text{m}}$$

$$\text{tg}\alpha'_2 = 0,12 \frac{\text{podeok}}{\mu\text{m}}$$

Grafikon 53 se odnosi na merenje kada je fotoelektrični pretvarač bio niz fototranzistora. Ovde minimumi predstavljaju zatvoren slučaj optičke prepreke, dok maksimum otvorenost. Uočava se razlika između merenja sa fotoelementom i fototranzistorom - fototranzistorima je opseg linearnosti jepuno veća.

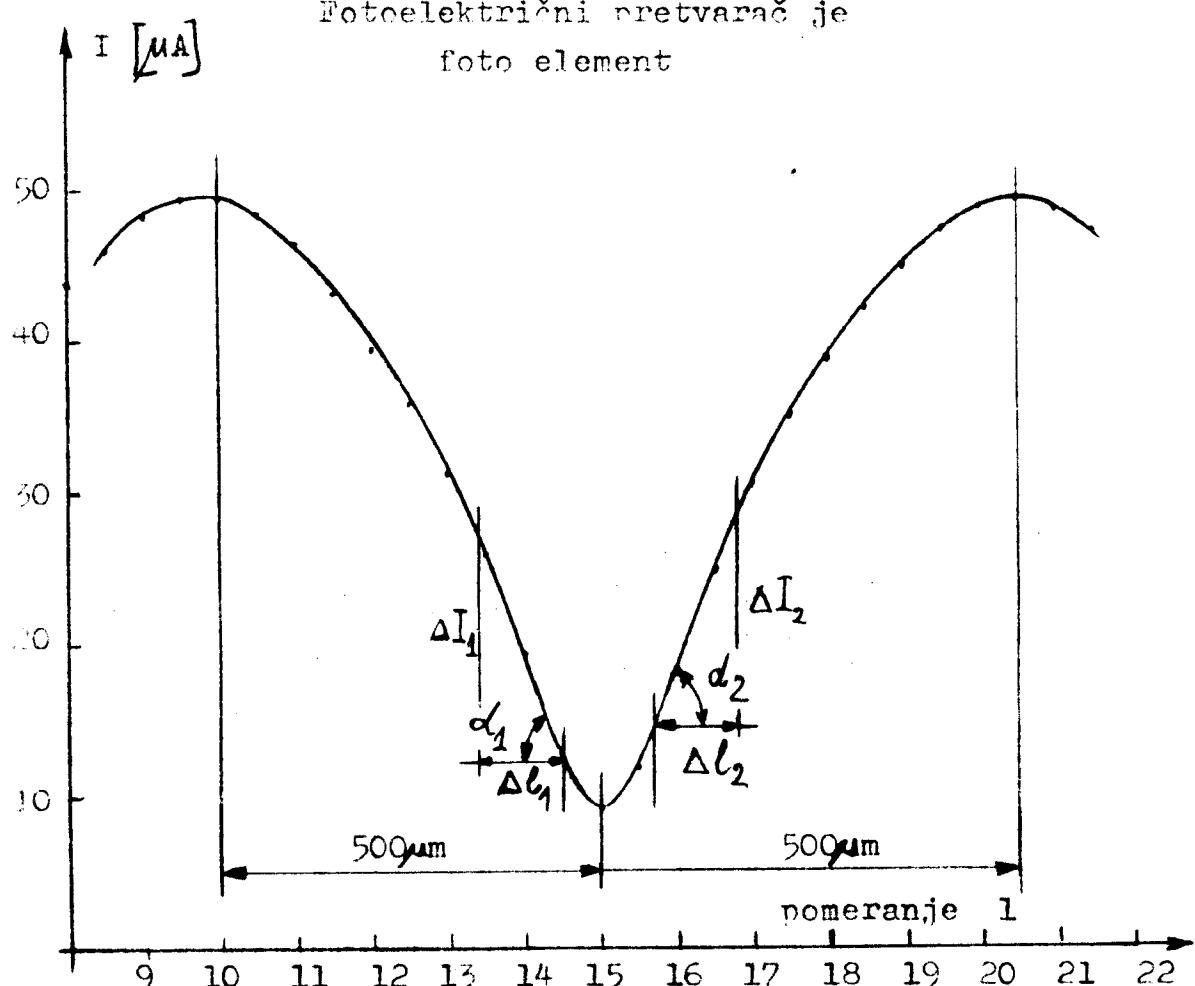
Osetljivosti su sada ako je jedan podeok miliampermetra $0,1\text{ mA}$

$$\text{tg}\alpha_3 = \frac{4,75-0,95}{330} = 0,011 \frac{\text{mA}}{\mu\text{m}}$$

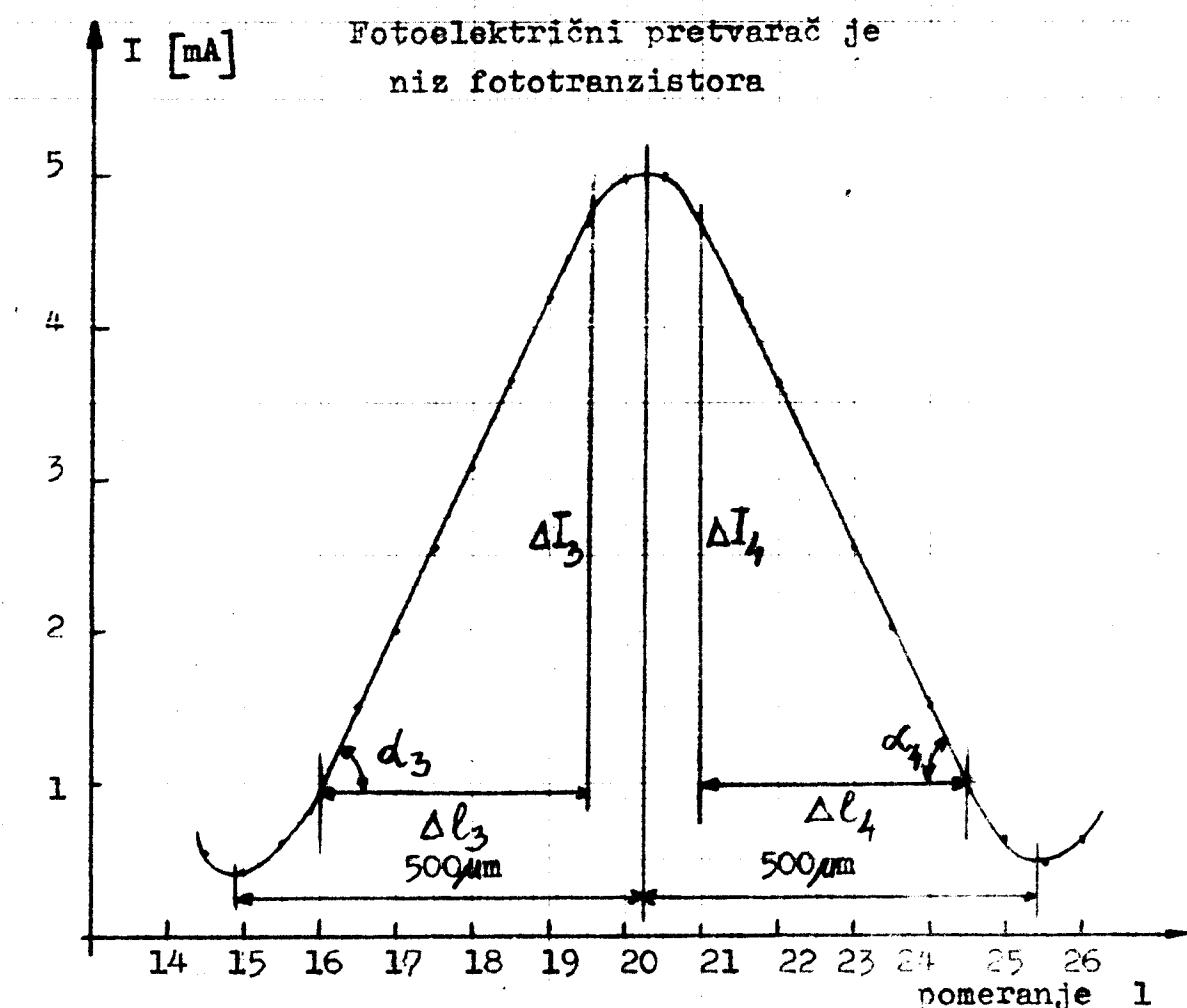
$$\text{tg}\alpha_4 = \frac{4,65-1,0}{336} = 0,010 \frac{\text{mA}}{\mu\text{m}},$$

Slika 52.

Fotoelektrični pretvarač je
foto element



Slika 53.



odnosno

$$\operatorname{tg} \alpha'_3 = 0,11 \frac{\text{podeok}}{\mu\text{m}}$$

$$\operatorname{tg} \alpha'_4 = 0,10 \frac{\text{podeok}}{\mu\text{m}}.$$

Aparatura sa foto elementom je osetljivija za oko 1,1 do 1,3 puta, međutim opseg linearnosti je manja nego kod aparature sa fototranzistorima.

Ako greška merenja Δn iznosi pola podeoka minimalno pomerenje koje još možemo detektovati

$$x = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha'} \Delta n$$

kod aparature sa foto elementom

$$x_1 = \frac{0,5}{0,13} = 3,84 \mu\text{m}$$

$$x_2 = \frac{0,5}{0,12} = 4,16 \mu\text{m}$$

kod aparature sa fototranzistorima

$$x_3 = \frac{0,5}{0,11} = 4,54 \mu\text{m}$$

$$x_4 = \frac{0,5}{0,10} = 5,0 \mu\text{m.}$$

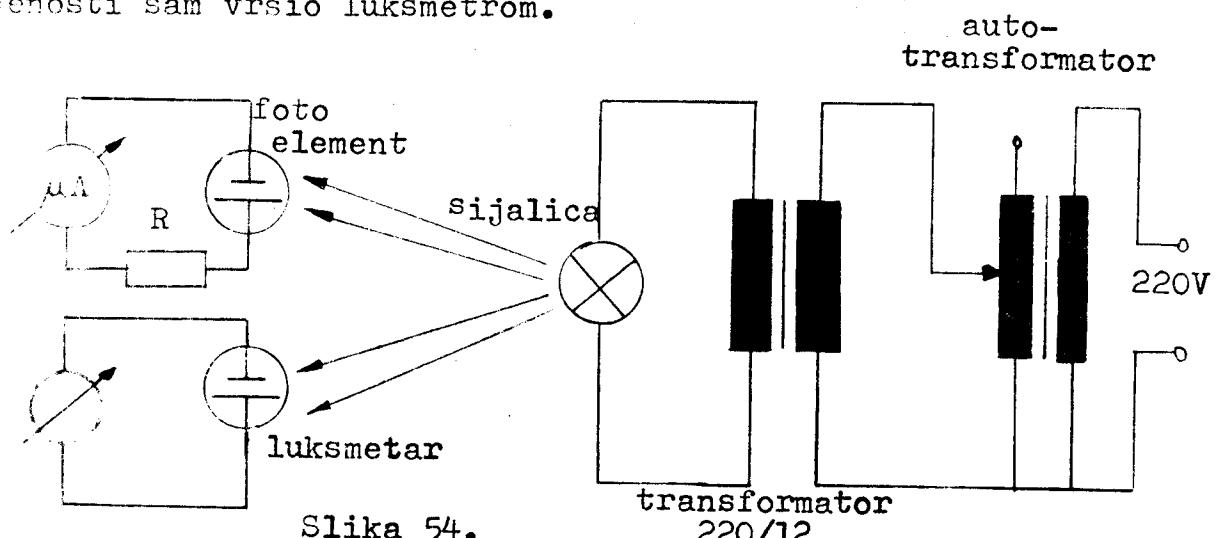
6. TEHNIČKI DETALJI

U ovom delu ću opisati kako sam izmerio karakteristike foto elementa, fototranzistora, tranzistora T_1 i T_2 kao i sve pojedinosti koje se odnose na samu aparaturu za merenje malih pomeranja.

6.1. Karakteristike foto elementa

Foto element je izvađen iz jednog svetlomera za fotoamater. Površina osetljiva na svetlost je 19×33 mm.

Struju kratkog spoja sam merio za različite otpore opterećenja R . Šema merenja dat je na slici 54. Merenje osvetljenosti sam vršio luksmetrom.



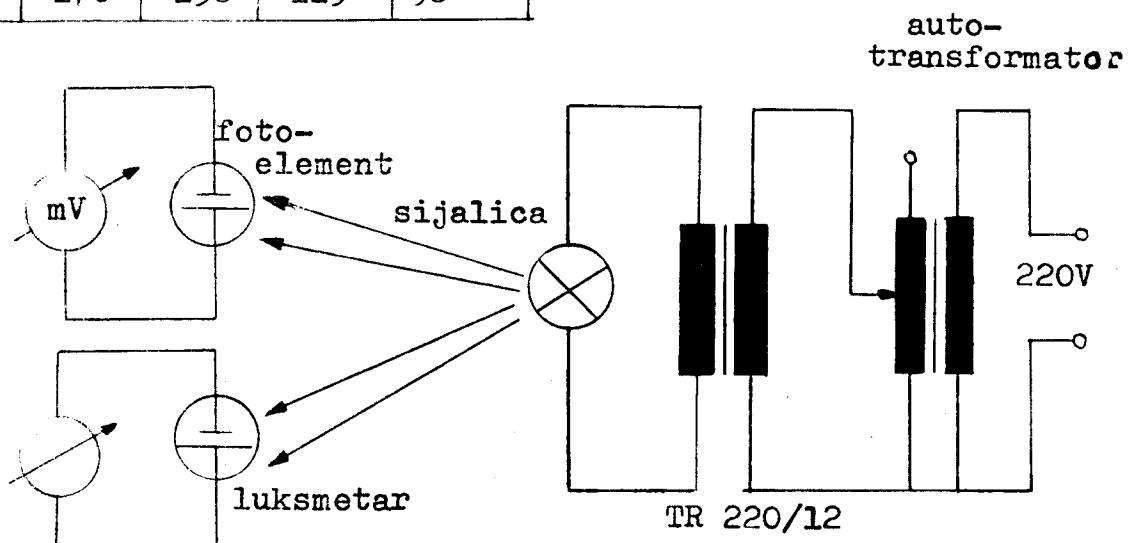
Geometrijska raspodela elemenata u toku merenja ostala je ista, a osvetljenost sam menjao autotransformatorom. Rezultati merenja date su u tabeli 4, a ovi rezultuju grafike prikazani na slici 21 i 22.

Napomena: struja kratkog spoja pri $R=0$ nije linearna funkcija jer unutrašnji otpor mikroampermetra nije jednak nuli i ima značajnu ulogu u zakrivljenju karakteristika.

Napon praznog hoda sam merio između neopterećenih elektroda foto elementa milivoltmetrom. Šema merenja dat je na slici 55. Tabela 5 daje brojčane vrednosti napona na elektrodama u funkciji osvetljenosti. Ove vrednosti rezultuju grafikone prikazane na slici 23 i 24.

E [lx]	R=0	R=500	R=1000	R=1500
	I [μ A]			
250	53	49	43	40
500	85	72	64	55
1000	113	95	80	70
1500	132	110	92	80
2000	148	120	100	85
2500	160	130	108	92
3000	170	138	113	98

Tabela 4.
(vrednosti otpora u omima)



Slika 55.

E [lx]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200	250
U [mV]	25	53	60	78	88	97	103	110	-	120	142	155	162

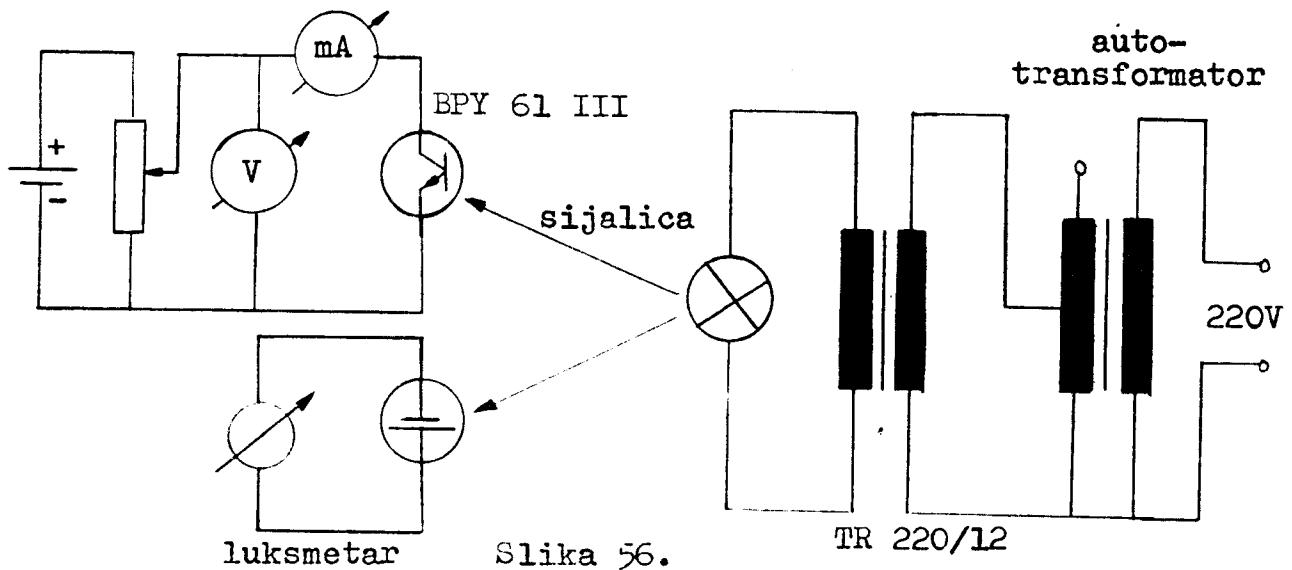
E [lx]	300	400	500	600	700	800	900	1000	1250	1500	1750	2000
U [mV]	175	190	200	208	214	222	228	232	249	257	263	270

E [lx]	2500	3000
U [mV]	280	290

Tabela 5.

6.2.Karakteristike fototranzistora

Struju kolektora fototranzisrora BPY 61 III merio sam za razne vrednosti napona i osvetljenja. Šema merenja dat je na slici 56. Merenja su dala rezultate prikazani u tabeli 6 odnosno na slikama 33 i 34.



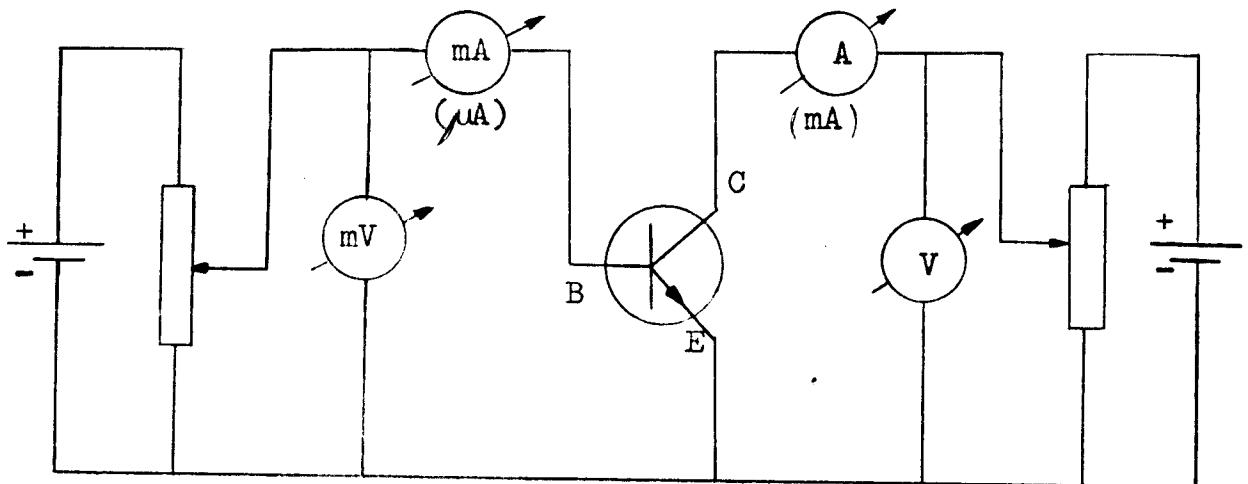
$U[V]$	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	5,00	7,50	10,0
$E[1x]$	$i_c [mA]$								
200	0,25	0,72	0,89	0,95	1,00	1,06	1,13	1,18	1,26
400	0,90	1,19	1,43	1,56	1,63	1,75	1,90	2,00	2,20
600	1,20	1,62	2,00	2,18	2,30	2,48	2,70	2,90	3,20
800	1,32	1,90	2,36	2,56	2,72	2,97	3,28	3,50	3,85
1000	1,55	2,23	2,68	3,00	3,19	3,48	3,90	4,20	4,65
1200	1,72	2,52	3,10	3,42	3,63	3,98	4,50	4,90	5,60
1400	1,68	2,62	3,35	3,80	4,10	4,48	5,00	5,80	6,50
1600	1,48	2,55	3,70	4,18	4,50	4,95	5,60	6,50	-
1800	1,50	2,75	3,95	4,35	4,90	5,70	6,30	7,00	-
2000	1,83	3,05	4,25	4,88	5,50	6,20	7,20	8,00	-

Tabela 6.

6.3.Karakteristike tranzistora 2N3442, 2N3866 i realizacija stabilizatora

Ulagne i izlagne karakteristike tranzistora 2N3442 i 2N3866 merene su u kolu struje prikazanom na slici 57. Grafički rezultati merenja su dati na slikama 43 44 46 47.

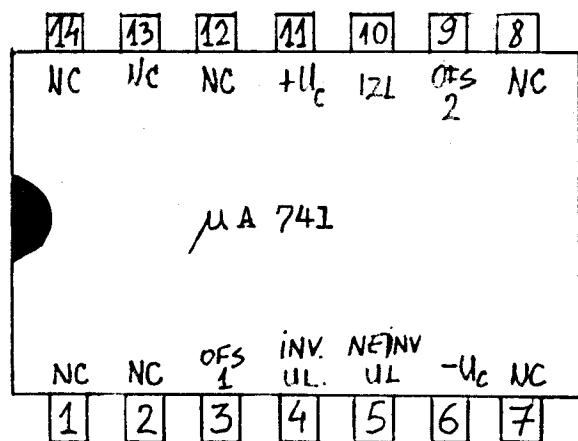
Stabilizator sa slike 48 realizovan je na štampanom kolu dimenzije 55×55 mm a prikazan je na slici 58. Raspored nožica operacionog pojačavača dat je na slici 59. Tranzistor 2N3442 i Graetz smešteni su na hladnjak.



Slika 57.



Slika 58. Strana bakra štampanog kola.



Slika 59. Operacioni pojačavač u DIL - 14 kućištu.(glezano od gore).

Posle izgradnje stabilizatora izmerena je zavisnost osvetljenosti neke površine u blizini sijalice od naizmeničnog napona napajanja. Rezultati merenja dati su u tabeli 7.

$U[V]$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$E_a [lx]$	12	40	110	210	380	550	700	725	740	750	755
$E_b [lx]$	25	75	140	280	500	800	1100	1500	1840	2200	2700
$U[V]$	16	17	18	19	20						
$E_a [lx]$	760	765	770	775	780						

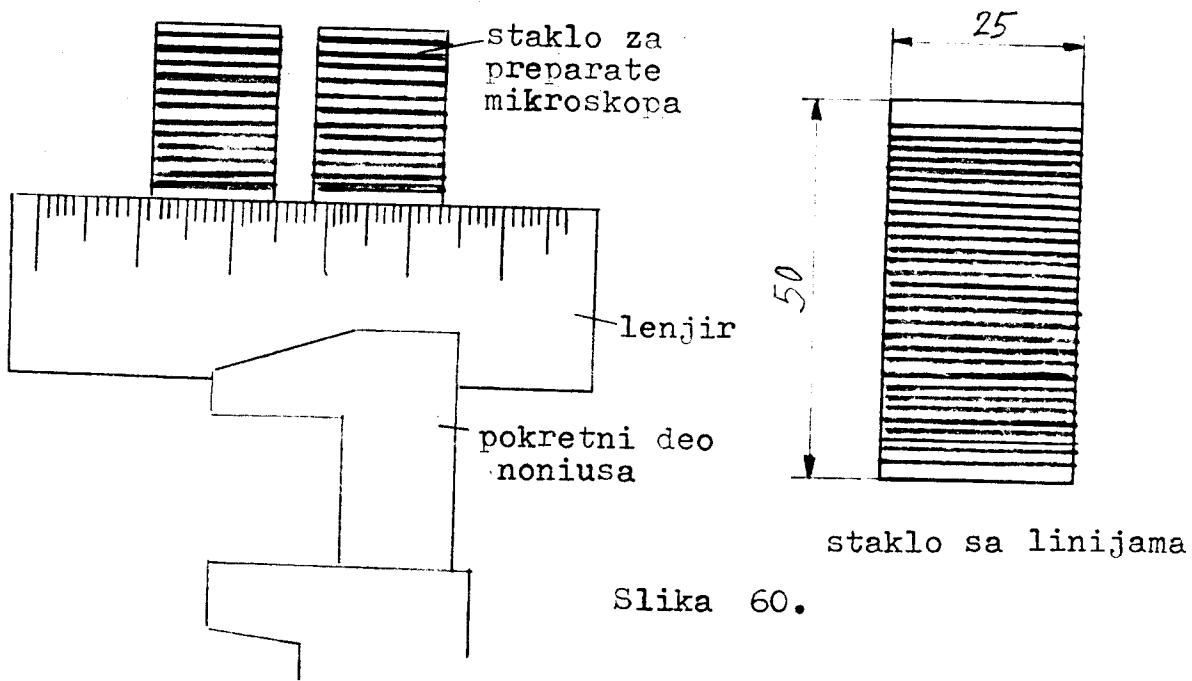
Tabela 7.

6.4. Optička prepreka

Najvažniji deo aparature za merenje malih pomeranja je sigurno optička prepreka. Kako ona mora biti sastavljena od niza providnih i neprovidnih linija $0,5\text{mm}$, ja sam snimio 36 linija od 5mm na film $36 \times 24\text{mm}$ (deset puta umanjeno) (film ORWO NP 15). Međutim ni kontrastno razvijanje ovog inače kontrastnog filma nije dao dobre rezultate, optičku prepreku sam morao realizovati drugčije. Film pored toga nema konstantan oblik, savija se, pa je i to predstavlja problem.

Na staklo za preparate mikroskopa rapidografom $0,5\text{mm}$ povukao sam linije crnog tuša, a preko linija sam zalepio selotejp. Ovaj treba da čuva optičku prepreku od ogrebotina. Ako jedno ovakvo staklo sa linijama pomeramo ispred drugog takvog, doći će na dužini od $0,5\text{mm}$ od providnog do neprovidnog stanja.

Crtanje paralelnih linija vršio sam noniusom za koji je bio vezan lenjir. Pomeranje kliznog dela noniusa svakih 1mm mogao sam tačno očitati a linije sam vukao istovremeno na dva stakla. Na taj način sam eliminisao grešku koja bi nastala u slučaju da linije nisu normalne na ivicu stakla. Naime pogodnom izborom položaja stakla linije mogu biti paralelne bez obzira što nisu normalne na ivicu (slika 60).



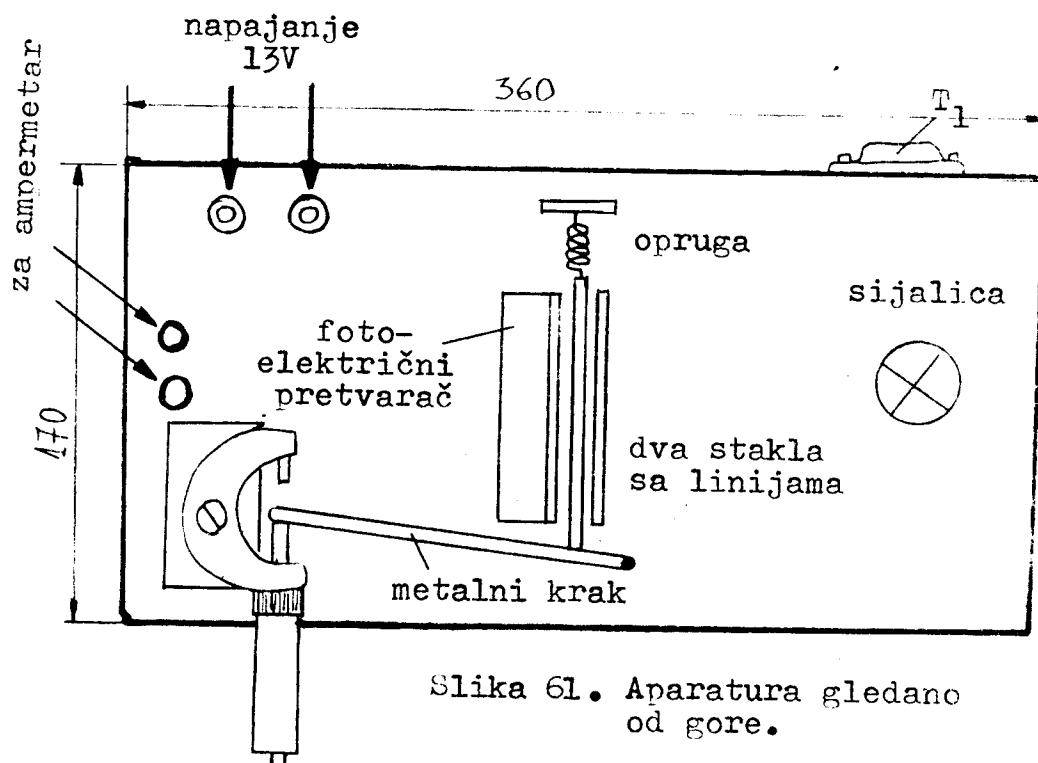
Slika 60.

6.5. Aparatura

Izvor svetlosti, stakla sa linijama i fotoelektrični pretvarač sam smestio na jednu kutiju dimenzije $17 \times 36 \times 4\text{cm}$. Fotoelektrični pretvarač se nalazi veoma blizu optičke prepreke pa nije potrebno sočivo za paralelizaciju snopa svetlosti. Jednu od dva stakla sam fiksirao a drugu sam preko jednog metalnog kraka vezao za pokretni deo jednog mikrometra, koji će koristiti za kalibraciju. Za pomeranje pokretnog dela mikrometra od $100\text{ }\mu\text{m}$ pokretno staklo će se pomeriti za $10\text{ }\mu\text{m}$.

Tako jedan podeok na mikrometru odgovara pomeranju stakla od $1 \mu\text{m}$. Da ne bi krak imao prazan hod pokretno staklo (pokretni deo optičke prepreke) je vezan za oprugu koji ga stalno pritiska (slika 61).

Prikљučci za napajanje i ampermetar se nalaze na gornjem delu kutije. Napajanje: 13 V naizmenične struje. Unutar kutije se nalazi stabilizator a jedna strana kutije je od aluminijskog lima za koji je vezan trantistor 2N3442 i Graetz radi hlađenja.



Slika 61. Aparatura gledano od gore.

Kalibracija aparature sastoji se u sledećem. Za svako pomeranje pokretnog dela mikrometra očitana je pomeranje kazaljke ampermetra i nacrtan je kalibracioni grafikon prikazan na slikama 52 i 53. Brojčane vrednosti su dati u tabelama 8 i 9.

pod-eok	I (μ A)
8,00	43,7
8,50	46,0
9,00	48,2
9,50	49,4
10,00	49,5
10,50	48,5
11,00	46,5
11,50	43,0
12,00	39,5
12,50	35,8
13,00	31,2
13,50	25,9
14,00	19,3
14,50	12,5
15,00	9,2
15,50	11,8
16,00	18,2
16,50	25,0
17,00	30,4
17,50	34,9
18,00	38,7
18,50	42,0
19,00	44,8
19,50	47,2
20,00	48,9
20,50	49,3
21,00	48,6
21,50	47,0

Tabela 8.

pod-eok	I _c [mA]
14,50	00,56
15,00	0,43
15,50	0,61
16,00	0,92
16,50	1,49
17,00	2,01
17,50	2,54
18,00	3,08
18,50	3,64
19,00	4,19
19,50	4,68
20,00	4,98
20,50	4,98
21,00	4,64
21,50	4,17
22,00	3,62
22,50	3,09
23,00	2,55
23,50	2,02
24,00	1,51
24,50	1,02
25,00	0,63
25,50	0,47
26,00	0,62

Tabela 9.

L I T E R A T U R A

1. Aldert van der Ziel: Szilárdtest-elektronika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
2. Miroslav Pavlov: Elektronika (prvi i drugi deo), Novi Sad, 1973.
3. Franko Bassani, Džuzeppe Pastori Parravičini: Elektronnije sostojanija i optičeskie perehodi v tverdih telah, Nauka, Moskva, 1982.
4. A. N. Marcsenko: Vezérelhető félvezető ellenállások, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, Mir, Moszkva, 1982.
5. Texas, Optoelektronikai receptek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
6. Tekas, Analóg és illesztő integrált áramkörök, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
7. Dragan M. Pantić, Bogoljub M. Milivojević: Poluprovodnička elektronika, Tehnička Knjiga, Zagreb, 1978.
8. Velimir Mesaroš: Elektronske cevi, poluprovodnici i integrirana kola, Tehnička Knjiga, Beograd.
9. M.M. Grinstejn: Fényellenállások az automatikában, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.
10. Zelenka László: Nem villamos menyiségek villamos mérőműszerei, Műszaki Könyvkiadó, Budapest,
11. Grave H. F: Nemvillamos menyiségek villamos mérése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
12. Miletta Bradvarović, Mihajlo Bogićević: Fotoćelija i nje na primena, Tehnička Knjiga, Beograd, 1962.
13. Natko Urli, Uroš Desnica: Karakterizacija fotodetektora infracrvene i vidljive svetlosti s posebnim osvrtom na mogućnost primene kadmijeva telurida za njihovu izradu, Poseban otisak iz časopisa "Elektrotehnika" br. 3-1972, Zagreb, 1972.