

Природно-математички факултет
Радна заједница заједничких послова
НОВИ САД

: 09. 1980.			
Ор . . .	Број	Прилог	Вредност
03	10/36		

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
INSTITUT ZA FIZIKU

STEVAN KUCURSKI

FOTOMULTIPLIKATOR SA PREDPOJAČAVAČEM

NOVI SAD
1980.

44

Ovim putem želim da se zahvalim dr Miroslavu Pavlovu, redovnom profesoru Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, koji je kao mentor ovog rada neprekidno pratio njegovu izradu, pokazao široko razumevanje za teškoće na koje sam nailazio i svesrdno pomagao u okončanju ovog rada.

S. Kucurski

S A D R Ž A J

1.	TEORIJSKI DEO	1
	UVOD	1
	SPEKTROSKOPI	2
	MERENJE SPEKTRALNIH INTENZITETA	3
	FOTOELEKTRIČNO MERENJE INTENZITETA	4
	FOTOEMISIONE ĆELIJE I FOTOMULTIPLIKATORI	5
	POJAČAVANJE I REGISTROVANJE FOTOSTRUJE	8
	REZONANTNO MERENJE FOTOSTRUJE	10
	PRELAZNA STANJA KOD TRANZISTORA	11
2.	EKSPERIMENTALNI DEO	13
	IZRADA JEDNOSMERNOG POJAČAVAČA	13
	IZRADA RAZDELNIKA NAPONA	23
	MERENJE LINEARNOSTI FOTOMULTIPLIKATORA	23
	MERENJE TAMNE STRUJE	24
	ANALIZA "ELEKTRONSKOG UDARA"	26
3.	LITERATURA	



U V O D

Zbog mnogobrojnih značajnih rezultata, postignutih na polju nauke primenom spektroskopa, ovaj aparat se nesumnjivo ubraja među najmoćnije do danas poznate instrumente za ispitivanje prirode.

Dobro je poznato da se Njutn prvi bavio ispitivanjem spektara. On je 1666. godine postavio prizmu na put sunčevih zraka, koji je kroz mali otvor ulazio u mračnu komoru, i ostavio na zidu traku boja. Tek 1802. godine Volaston i 1814. godine Fraunhofer, nezavisno jedan od drugog, prvi put su posmatrali spektralne linije, tj. slike uzanog razreza, od kojih je svaka bila obojena nekom bojom. Prvi praktičan spektrometar konstruisali su Kirhof i Bunzen 1859. godine.

Njutnu dugujemo za praktičnu primenu prizme, a Fraunhoferu za primenu difrakcione rešetke. Prizma i rešetka su osnovni sastavni delovi savremenih spektroskopa i služe za razdvajanje talasnih dužina svetlosti (disperzija svetlosti).

SPEKTROSKOPI

Svaki instrument koji se upotrebljava za dobijanje spektara, vidljivog ili nevidljivog, naziva se spektroskop. Pod spektrom podrazumevamo niz (skup) talasnih dužina zračenja uređen prema njihovim veličinama. Elektromagnetno zračenje obuhvata talasne dužine svih vrednosti u intervalu od hiljade kilometara do bilionitih delova jednog milimetra. Potpuni elektromagnetni spektar trebao bi da obuhvata sva ova zračenja, poredjanih u nizu od najdužih do najkraćih talasa.

Spektroskopi su tako izgradjeni da posmatrač može da odredi talasne dužine čitajući skalu. Većina spektroskopa sastoji se iz tri glavna dela:

1. razreza
2. disperzionog sistema (prizma ili difrakciona rešetka, i
3. odgovarajućeg optičkog sistema za dobijanje spektralnih linija (kao monohromatskih slika zareza).

Na slici 1. prikazan je šematski optički sistem prostog spektroskopa. Spektralne linije su poredjane duž žižne ravni i tu se mogu fotografisati, posmatrati kroz okular (ako su vidljive), ili odeliti od susednih linija pomoću drugog zareza.

Prva metoda se upotrebljava kod spektrografa, druga kod vizuelnog spektroskopa, a treća kod monohromatora.

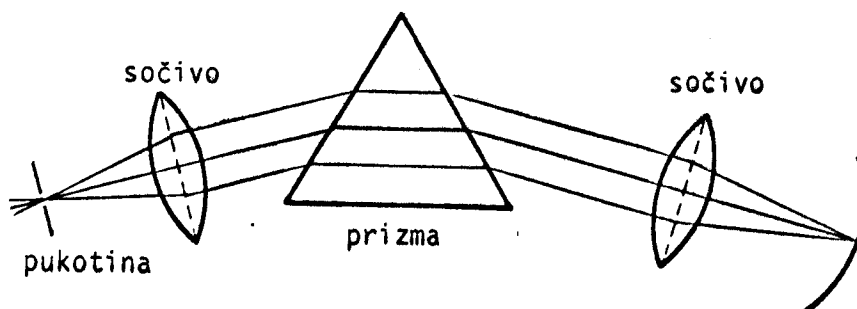
Spektralne linije mogu da se detektuju i registruju na razne načine. Neke od metoda su:

- a) fotografska metoda,
- b) fotoelektrična metoda, i druge.

Fotoelektrična metoda može da se upotrebi izmedju 33000 \AA i kratke vakuumske ultraljubičaste oblasti ($\approx 10 \text{ \AA}$).

Spektroskopska tehnika upotrebljava se, prvo za ispitivanje talasnih dužina i intenziteta zračenja koje emituju atomi i molekuli pod različitim fizičkim uslovima, i drugo, za proučavanje apsorpcije zračenja koje prolazi kroz materiju u različitim oblicima.

Na osnovu ovoga pravi se razlika između emisije i apsorpcione spektroskopije.



Slika 1.

MERENJE SPEKTRALNIH INTENZITETA

Za određivanje intenziteta u spektrima mogu se koristiti ove četiri glavne metode:

1. Apsorpcijom zračenja na zacrnjenoj površini nekog radiometarskog uređaja, kod kojeg se toplotni efekat koristi za dobijanje električnog ili nekog drugog lako merljivog impulsa.

2. Zračenjem se može dejstvovati na neke vrste fotoelektričnog pribora.

3. Može se pustiti da zračenje neko određeno vreme pada na fotografsku emulziju. Gustina srebrnog taloga koji se

izdvoji pri izazivanju emulzije, može služiti kao mera ukupnog zračenja.

4. Intenzitet zračenja može da se određuje (procenjuje) vizuelno.

FOTOELEKTRIČNO MERENJE INTENZITETA

Mnoge električne osobine materije su povezane sa dejstvom svetlosti, tako da postoje različite vrste "fotoelektričnih efekata". Za merenje spektralnih intenziteta koriste se tri vrste fotoelektričnih pojava: fotoemisioni efekat, koji predstavlja izbacivanje naelektrisanja iz materije pod dejstvom zračenja, zatim fotokonduktivni efekat, koji se sastoji u promeni električne provodljivosti pod uticajem zračenja, i napokon fotovoltaični efekat, kojim se naziva stvaranje potencijalne razlike između dve elektrode, kao rezultat ozračivanja jedne od njih.

Karakteristike ova tri tipa fotoćelija su poboljšane toliko da se sada za detekciju i merenje spektara fotoelektrične metode koriste isto tako mnogo kao i fotografske. Naročito značajni napredak je učinjen u:

- a) smanjenju minimalne jačine zračenja koje je potrebno da proizvede merljivo reagovanje u fotoelementu,
- b) razvoju tehnike pravljenja stabilnih i reproduktivnih fotoosetljivih površina,
- c) proširivanju spektralne osetljivosti na infracrvenu i ultraljubičastu oblast spektra, i
- d) razvoju novih načina za pojačavanje fotostruje.

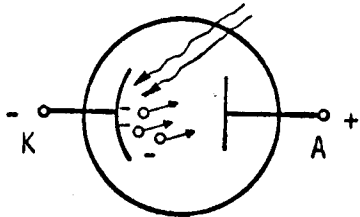
Najvažnija svojstva kod fotoelementa, koja treba imati u vidu kod procenjivanja njihove primenljivosti kao mernog pribora za spektralno zračenje, jesu: osetljivost, linearnost, oblast talasnih dužina, neutralnost i prag osetljivosti. Sva ova svojstva su unapred određena sem "praga osetljivosti", ko-

ji se može definisati kao intenzitet zračenja koji u fotoćeliji može da proizvede električni signal, koji je po veličini u najgorem slučaju bar jednak šumu same fotoćelije. Na žalost, apsolutnu vrednost šuma je teško odrediti, zato što merenje ove vrednosti ne zavisi samo od samog elementa, već i od karakteristika pojačavačkog i indikatorskog sistema.

FOTOEMISIONE ĆELIJE I FOTOMULTIPLIKATORI

Za merenje spektralnih intenziteta fotoemisiona ćelija je, što se tiče gornjih karakteristika (osetljivost, linearost i dr.), osim spektralne oblasti, verovatno najbolja od svih fotoćelija. Ona pokazuje linearost u širokom području intenziteta osvetljavanja. Na sobnoj temperaturi ima nizak prag osetljivosti, koji se, ako je neophodno, može hladjenjem još više sniziti. Njena osetljivost je velika, a radna stabilnost zadovoljavajuća.

Tipična fotoćelija je prikazana na slici 2.

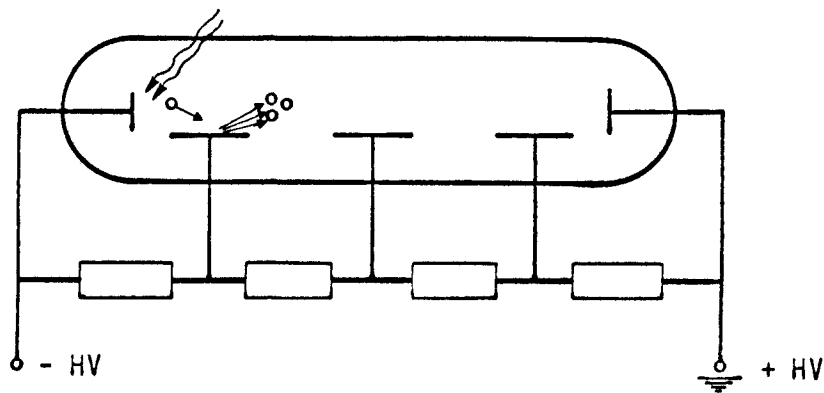


Slika 2.

Fotomultiplikator je specijalna elektronska cev koja se sastoji od fotokatode, sistema dinoda i anode. To je kombinacija fotoemisiona ćelije i elektronskog pojačavača jednosmerne struje u tom omotaču. Princip rada fotomultiplikatora prikazan je na slici 3.

Kod njega se kombinuju dva procesa: konverzija svetlosti u elektrone (fotoefekat) i multiplikacija proizvedenih elektrona. U komercijalnim fotomultiplikatorima potrebno je 10 - 20 fotona da se dobije jedan elektron. Multiplikacija fotoelektrona vrši se preko serije sukcesivnih elektroda, dinoda, uz sekundarnu elektronsku emisiju. Između katode i sistema dinoda, kao i između pojedinih dinoda, uspostavlja se potencijalna razlika za ubrzanje elektrona. Katoda je vezana za negativni, a anoda za pozitivni pol izvora visokog napo-

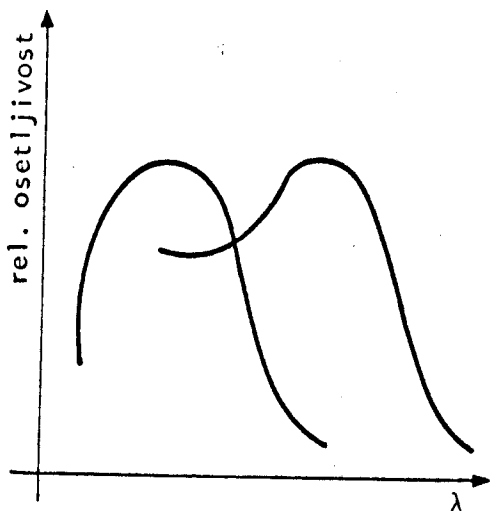
na. Raspodela potencijala u pravcu katoda - anoda realizovana je pomoću unapred podešenog razdelnika napona. Ovim se razdelnikom omogućuje izabrani korak porasta napona duž sistema dinoda sve do anode, koja je na najvišem potencijalu. Raspodela potencijala omogućuje ubrzavanje i umnožavanje elektrona.



Slika 3.

Fotokatoda je izradjena od materijala, koji kada je osvetljen, emituje elektrone. Ovu osobinu imaju zemnoalkalni metali. Fotokatoda, kao i sve dinode, presvučena je slojem istog materijala. Fotoni koji padnu na fotokatodu fotomultiplikatora izbacuju iz nje elektrone. Elektron izbačen iz katode ubrzava se, tj. raste mu kinetička energija do te vrednosti da iz sledeće dinode izbacuje dva ili više elektrona. Daljim se ubrzavanjem broj elektrona od dinode do dinode umnožava. Ovaj broj, ovako nastalih sekundarnih elektrona, zavisi od energije primarnih elektrona (emitovanih iz katode) i od emisijne sposobnosti materijala kojim su presvučene dinode. Sekundarni elektroni se kreću pod dejstvom električnog polja sve dok ne stignu do anode. U normalnom režimu rada dobija se izbacivanjem po jednog elektrona iz fotokatode, po dinodi, četiri do pet elektrona. Faktor multiplikacije po dinodi je oko 4, a za ceo fotomultiplikator on iznosi 4^n , gde n predstavlja broj dinoda. Standardni fotomultiplikatori imaju 10 - 14 dinoda. Multiplikacija u njima ide od 10^5 do 10^8 . Znači, elektronski mlaz se pojačava za nekoliko redova veličine puta.

Izlazni impuls se dovodi na ulaz elektronskog pojačavača, gde se on pojačava, a nakon toga ili odbrojava, ili analizira. Za preciznu fotometriju upotrebljeni potencijali na pojedinim stepenima moraju se pažljivo kontrolisati (približno do 0,1%) zbog toga što fluktuacije napona od x procenata u n -stepenom fotomultiplikatoru menjaju koeficijent pojačavanja za oko nx procenata. U ovim slučajevima mogu da se upotrebe pogodni stabilizovani izvori (vidi eksperimentalni deo) ili baterije suvih elemenata.



Slika 4.

Krive spektralne osetljivosti za dva tipa fotokatoda prikazane su na slici 4. Zbog toga što fotoćelija nije u stanju da povuče razliku između dve razne talasne dužine, neophodno je izolovati svaku talasnu dužinu čiji intenzitet treba da se meri. Spektrograf koji radi na principu fotoelektrične detekcije mora da radi kao monohromator.

Monohromator je snabdeven izlaznim razrezom, i prvi zahtev na koji se nailazi kod fotoelektrične detekcije je postavljanje

fotoćelije tako da ona iskoristi maksimalnu količinu monohromatskog zračenja koje je prošlo kroz izlazni zarez. Ovako postavljanje je relativno lako.

Druga mogućnost koju treba uzeti u obzir jeste metoda praćenja spektra. Ona se sastoji u sukcesivnom postavljanju različitih talasnih dužina na izlazni zarez.

Kod većine monohromatora spektar se razvija obrtanjem disperzionih elemenata (prizmatičnih ili difrakcionih).

POJAČAVANJE I REGISTROVANJE FOTOSTRUJE

Pojačavanje fotostruje kod fotomultiplikatora je dosta lako zahvaljujući velikoj impedanciji. Problem pojačavanja ima, međjutim, dva vida: u prvom slučaju je vezan sa osetljivošću fotoćelije, a u drugom sa pragom detekcije.

Prema definiciji, osetljivost je određena nagibom krive koja povezuje fotostruju sa intenzitetom zračenja koje je izazvalo tu struju. Pojačanje fotostruje za dati faktor povećava nagib krive za isti faktor, pa prema tome i osetljivost. Pošto je struja koja se dobija u fotoćeliji u poredjenju sa svetlosnim intenzitetom koji daju spektrometri, obično tako jako slaba da su za merenje potrebni osetljivi galvanometri, neophodno je pojačati fotostruju, ukoliko je potrebno da se ona registruje na običnom registrujućem miliampermetru. jedan od zadataka pojačavanja sastoji se, prema tome, u pojačavanju fotostruje do nivoa pogodnog za merenje.

Sa druge strane, prag detekcije fotoćelije je osobina koja se ne može izmeniti samim pojačavanjem, sem ukoliko se ne misli na pogoršanje praga osetljivosti.

Važno je imati u vidu da se pri pojačavanju svih komponentata fotostruje šum pojačava zajedno sa signalom, tako da svako pojačavanje ne menja odnos između signala i šuma, sem u slučaju kada sam pojačavač unosi znatan šum, što još više pogoršava stanje.

Određjena jačina zračenja, koja pada na fotokatodu, proizvodi fotostruju između katode i prve dinode. Osetljivost prvog stepena fotomultiplikatora jednaka je odnosu te fotostruje i jačine zračenja. Fotoelektroni, zatim, padaju na prvu dinodu, oslobađajući pri tom veliki broj elektrona, koji dalje pa-

daju na drugu dinodu. Ovo povećanje broja elektrona pojačava fotostruju, što dovodi do odgovarajućeg povećanja osetljivosti. Ovo povećanje osetljivosti, postignuto pomoću samo jedne vakuumске cevi, predstavlja veliko preimućstvo fotomultiplikatora.

Sa druge strane, prag detekcije fotomultiplikatora nije manji od praga detekcije prvog stepena, jer fotokatoda usled termojonskog efekta neprekidno emituje elektrone. Termojonska struja čini glavni deo "tamne struje", koja je taj naziv dobila po tome što se ona najbolje meri u mraku, pošto se pod dejstvom svetlosti fotostruja naročito povećava. Veličina tamne struja zavisi od temperature katode, razlike potencijala između prve dinode i fotokateode i niza drugih faktora. Međutim, ako su ovi faktori, prosečno uzevši, konstantni, tada je i tamna struja konstantna. Ako bi tamna struja bila apsolutno konstantna, tada bi se ona mogla oduzeti od ukupne struje, pa ne bi ograničavala najmanji signal dostupan detekciji. Međutim, tamna struja neznatno fluktuirala oko neke srednje vrednosti. Ove fluktuacije određuju izvestan prag za najmanji merljivi signal, koji je približno jednak srednjoj vrednosti samih fluktuacija. Na taj način, odnos između minimalnog signala koji se može meriti, i veličine šuma približno je jednak jedinici. Svaki manji signal biće prigušen šumom.

Svaki stepen pojačavanja fotomultiplikatora pojačava zajedno sa fotostrujom i tamnu struju i sve njene fluktuacije.

Zbog toga se odnos između fotostruje i šuma pri pojačavanju ne menja, i ne smanjuje se veličina signala koji se može meriti.

Pojedini stepeni multiplikacije mogu da unesu i svoje sopstvene šumove, povišavajući na taj način minimalni signal koji se može detektovati. Ovaj efekat je relativno mali u odnosu na prethodni, o kojem je već bilo reči.

REZONANTNO MERENJE FOTOSTRUJE

Ako se zračenje prekida periodično posebnim prekidačem, onda će se struja koja se stvara u fotoćeliji menjati sa istim periodom (frekvencijom). Za prekidanje svetlosti može se upotrebiti rotacioni sektor.

Ukoliko pojačavač pojačava samo uzan opseg frekvencija, i to one koje su jednake frekvenciji signala, tada je to tzv. rezonantni pojačavač.

Sa druge strane, fluktuacije tamne struje fotokatode nisu ograničene na neki uzan opseg frekvencija, već se prostiru na dovoljno širok "spektar šuma". Zbog toga će rezonantni pojačavač naizmenične struje pojačati neki deo šuma, i to upravo onaj koji leži u rezonantnom frekventnom opsegu pojačavača. Ukoliko je taj opseg uži, utoliko će manji deo šuma biti pojačan. Prema tome, prag detekcije može da bude snižen ako se svetlost, koja se meri na neki način, prekida tako da se rezultujuća struja menja sa frekvencijom na koju je podešen pojačavač.

Praktično preimućstvo rezonantnih pojačavača naizmenične fotostruje zasnovano je na činjenici da fotoćelije uopšte imaju malu inerciju. Zahvaljujući tome, prekidanje može da bude relativno brzo. Ovo znači da naizmenična struja iz fotoćelije ima visoku frekvenciju.

Moglo bi se pretpostaviti da se smanjenjem opsega rezonantnog pojačavača prag detekcije može smanjiti do zanemarljivo male vrednosti. Ovakvo smanjivanje bi smanjilo pojačani deo šuma, ali pojačavači sa užim frekventnim opsegom unose sve veći sopstveni šum, tako da ovde imamo kompromisno rešenje.

Pošto je termojonska struja funkcija temperature fotokatode, druga mogućnost za smanjenje tamne struje i njenih fluktuacija leži u hladjenju fotokatode. Na ovaj način može se postići vrlo veliko smanjenje, jer termojonska struja eksponencijalno zavisi od temperature po formuli $I_t = AT^2 e^{-B/T}$. Snižavanje temperature od sobne (300 °K) do temperature tečnog vazduha (90 °K) izaziva smanjenje termojonske struje za 10000 puta, što odgovara smanjenju termojonskih fluktuacija za 100 puta.

PRELAZNA STANJA KOD TRANZISTORA (Tranzistor u impulsnim kolima)

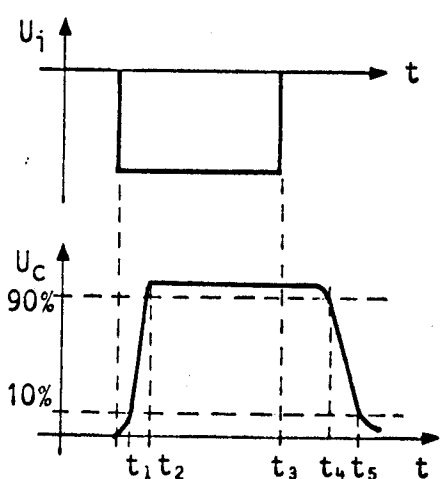
Usled nagomilavanja sporednih nosilaca, u pojedinim delovima tranzistora javljaju se izvesne prelazne pojave. Nagomilavanje elektrona u emitoru, a pogotovo u kolektoru, kod tranzistora PNP tipa možemo zanemariti. Ostaje da proučimo samo nagomilavanje šupljina u bazi, i posledicu toga nagomilavanja.

Ako na bazu tranzistora dovedemo negativan impuls (slika 6.), tako da bazno-emiterski spoj bude polarisan u propusnom smeru, tranzistor postaje provodan. Protok kolektorske struje (koja povećava i struju emitera), stvara pad napona na otporu R_e u kolu emitera, što čini kolektor manje negativnim u odnosu na emiter. Kao posledica polarizacije oba spoja u propusnom smeru dolazi do nagomilavanja sporednih nosilaca naelektrisanja u bazi, i to ne samo sa strane emitera, već i sa strane kolektora. Na taj način jedna od osnovnih karakteristika rada tranzistora u zasićenju je velika gustina slobodnih nosilaca naelektrisanja u baznom opsegu.

U trenutku prestanka trajanja ulaznog impulsa logično bi bilo pretpostaviti da će nestati protoka kolektorske struje, tj. da će tranzistor postati zakočen. Medjutim, usled velike gustine sporednih nosilaca naelektrisanja u baznom opse-

gu, tranzistor ostaje i dalje provodan za izvesno vreme po prestanku ulaznog impulsa. Tek kada gustina slobodnih nosilaca blizu kolektorskog spoja spadne na nulu, (do čega dolazi rekombinacijom u bazi), doći će do smanjenja i prestanka protoka kolektorske struje. Istovremeno raste i kolektorska impedanca i dostiže svoju punu normalnu vrednost.

Ovaj efekat produženja trajanja izlaznog impulsa u odnosu na ulazni impuls poznat je pod imenom "efekat nagomilavanja". On se javlja samo kod rada tranzistora u zasićenju. Vreme trajanja efekta nagomilavanja zavisi kako od veličine amplitude ulaznog impulsa, tako i od trajanja ulaznog impulsa. Na slici 5. dato je upoređenje ulaznog i izlaznog impulsa.



Slika 5.

Kod izlaznog impulsa karakteristični su vremenski intervali uspostavljanja, porasta, nagomilavanja i opadanja impulsa. Vreme uspostavljanja ($t_0 \div t_1$) određeno je vremenom potrebnim da nosioci iz emitorskog opsega stignu preko baze do kolektora i na taj način uspostave strujni tok. To vreme je vrlo malo i obično se može zanemariti.

Vreme porasta ($t_1 \div t_2$) odgovara prelaznom režimu rada. To je vreme potrebno da tranzistor dođe u zasićenje od trenutka ka-

da je počeo da provodi. Vreme porasta za određeni tip tranzistora zavisi od veličine ulazne bazne struje.

Vreme ($t_2 \div t_3$) odgovara vremenu trajanja ulaznog impulsa, a vreme ($t_3 \div t_4$) pojavljuje se kao vreme produženja trajanja impulsa usled efekta nagomilavanja.

Od trenutka t_4 gustina nosilaca blizu kolektorskog spoja je vrlo mala. Kolektorska impedanca počinje da raste, da bi u t_5 dostigla najzad svoju normalnu vrednost. Ovaj interval predstavlja vreme opadanja impulsa.

EKSPERIMENTALNI DEO

IZRADA JEDNOSMERNOG POJAČAVAČA

Jednosmerni pojačavači sa tranzistorima imaju veliku primenu u mernim uređajima, računskoj tehnici itd.

Kod pojačavača jednosmerne struje postoji neposredna veza između stepena bez primene kondenzatora za spregu

U ovom slučaju jednosmerni pojačavač je sa jednim tranzistorom PNP tipa, oznake BFY 64.

Šema veze je data na slici 6.

Usvojene su sledeće vrednosti:

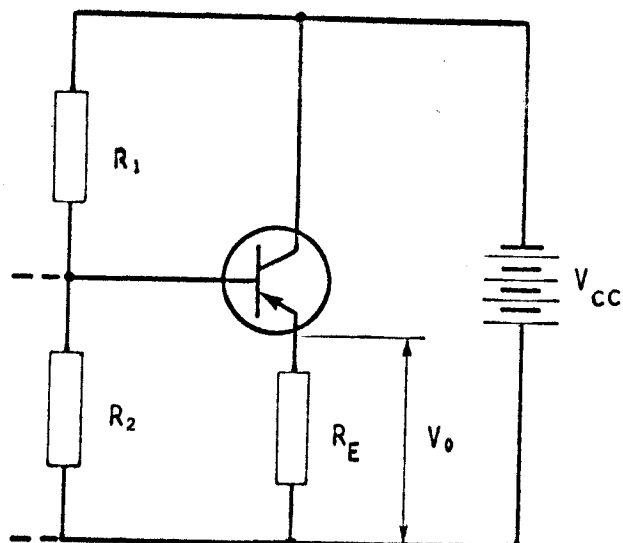
$$V_{CC} = 6 \text{ V}, \quad R_e = 50 \, \Omega \text{ i } R_2 = 2,4 \text{ k}\Omega$$

Pri izboru otpora R_L javljaju se dva kontradiktorna uslova:

1. R_2 treba da je što veće da bi potrošnja fotomultiplikatora pri tzv. "praznom hodu" bila što manja, i
2. Otpor R_2 treba da je što manji da bi vreme "gašenja" fotomultiplikatora bilo što kraće.

Vreme gašenja predstavlja proteklo vreme od prestanka osvetljavanja fotomultiplikatora, do trenutka kada na izlazu linearnog (jednosmernog) pojačavača vrednost struje ili napona ne padne ispod 10% od njene početne vrednosti.

Odgovarajuće karakteristike tranzistora su prikazane tabelarno (tabele 1. i 2.), i grafički (izlazne karakteristike



Slika 6.

na graficima 1. i 2., a ulazne na grafiku 3.).

Usvojene su sledeće vrednosti za radnu tačku:

$$I_b = 20 \mu\text{A}, \quad I_c = -1,5 \text{ mA}, \quad V_{be} = -0,62 \text{ V}.$$

Sledi:

$$I_e = 1,52 \text{ mA},$$

i dalje računski da je za $V_{cc} = 6 \text{ V}$, $R_1 = 19,6 \text{ k}\Omega$. (U kolo se ugrađuje otpornik od $20 \text{ k}\Omega$).

Sledeći korak bio je povezivanje usvojenih i proračunatih elemenata prema slici 6.

Merenjem su nadjene sledeće vrednosti za radnu tačku:

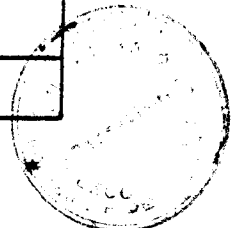
$$V_a = 38,5 \text{ mV}, \quad V_{be} = -0,58 \text{ V}, \quad V_{ce} = -5,9 \text{ V}.$$

Prenosne karakteristike jednosmernog pojačavača su određivane prema šemi na slici 7, a rezultati merenja su prikazani u tabeli 3. i na grafiku 4.

TABELA 1.

IZLAZNE KARAKTERISTIKE TRANZISTORA BFY 64

$-V_{ce}$ [V]	0	1	2	3	4	5	6	8	10
$-I_b$ [μ A]	$-I_c$ [mA]								
0	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0	0,065	0,065	0,070	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
2	0	0,14	0,14	0,145	0,15	0,15	0,15	0,155	0,16
3	0	0,21	0,215	0,22	0,22	0,22	0,23	0,235	0,24
4	0	0,28	0,285	0,29	0,295	0,295	0,305	0,31	0,32
5	0	0,36	0,365	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,40
6	0	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,48	0,49
7	0	0,51	0,52	0,525	0,535	0,535	0,55	0,56	0,57
8	0	0,59	0,6	0,605	0,615	0,615	0,625	0,64	0,65
9	0	0,66	0,67	0,68	0,69	0,69	0,71	0,72	0,74
10	0	0,72	0,74	0,76	0,77	0,78	0,79	0,81	0,83
20	0	1,48	1,52	1,55	1,57	1,6	1,62	1,66	1,7
30	0	2,28	2,32	2,36	2,4	2,44	2,46	2,52	2,57
40	0	3	3,05	3,1	3,15	3,2	3,25	3,35	3,45
50	0	3,75	3,84	3,9	3,98	4	4,08	4,2	4,3
60	0	4,55	4,65	4,7	4,8	4,85	4,9	5,08	5,2
70	0	5,4	5,48	5,55	5,65	5,72	5,82	6	6,15
80	0	6,15	6,25	6,38	6,48	6,58	6,78	6,92	7,1
90	0	7	7,15	7,25	7,4	7,5	7,6	7,85	8,1
100	0	7,7	7,8	8	8,1	8,2	8,4	8,7	9
150	0	11,6	12	12,2	12,5	12,7	13	13,5	14
200	0	15,7	16	16,5	16,8	17,3	17,6	18,8	19,5
250	0	20,3	20,6	21	21,5	22	22,6	23,8	25
300	0	24,6	25,2	25,6	26,2	26,8	27,6	28,2	31
350	0	29,3	29,7	30,5	31,2	32	33	35	
400	0	32	33	34	35	36	37	39	
450	0	37	38	39	40	42	43		
I_c^{max} [mA]		120	120	100	75	60	50	37,5	30



NASTAVAK TABELE 1.

$-V_{ce}$ [V]	0	1	2	3	4	5	6	8	10
$-I_b$ [μ A]	$-I_c$ [mA]								
500	0	42	43	44	46	47	49	-	-
550	0	46,5	48	49	52	53,5	-	-	-
600	0	51	52	54	57	59	-	-	-
650	0	53	55	58	60	-	-	-	-
700	0	56	58	60	63	-	-	-	-
750	0	63	66	68	69	-	-	-	-
800	0	67	70	72	-	-	-	-	-
850	0	71	74	76	-	-	-	-	-
900	0	76	79	81	-	-	-	-	-
950	0	80	84	86	-	-	-	-	-
1000	0	83	88	91	-	-	-	-	-
1050	0	89	92	97	-	-	-	-	-
1100	0	94	98	102	-	-	-	-	-
1150	0	97	101,5	-	-	-	-	-	-
1200	0	100	104	-	-	-	-	-	-
I_c^{max} [mA]		120	120	100	75	60	50	37,5	30

TABELA 2.

ULAZNE KARAKTERISTIKE TRANZISTORA BFY 64 (PNP)
SA ZAJEDNIČKIM EMITEROM

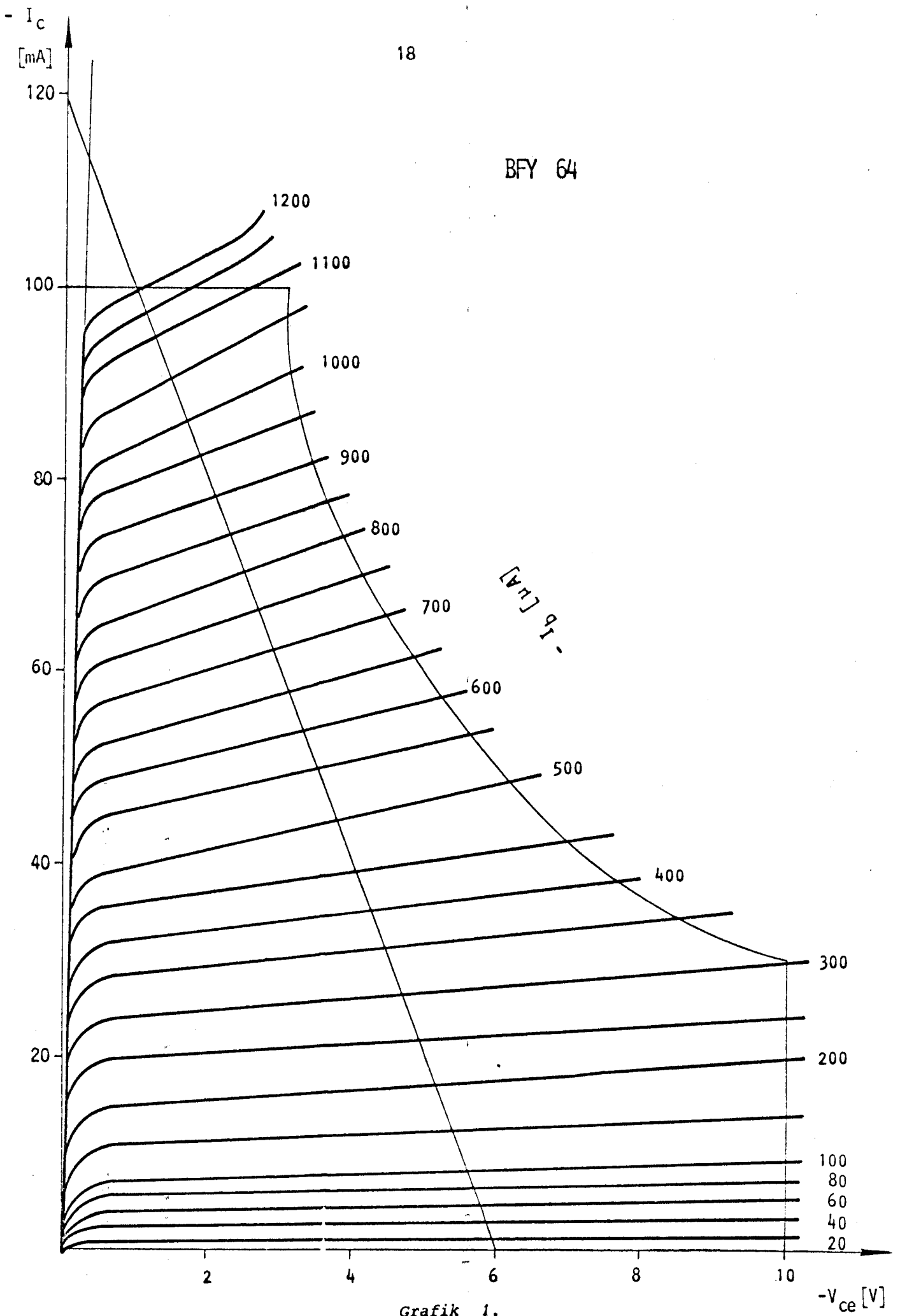
$-V_{ce}$ [V]	0	1	2	4	8
$-I_b$ [mA]	V_{be} [mV]				
0		0	0	0	0
10		600	600	600	600
20		620	620	620	620
30		630	630	630	630

NASTAVAK TABELE 2.

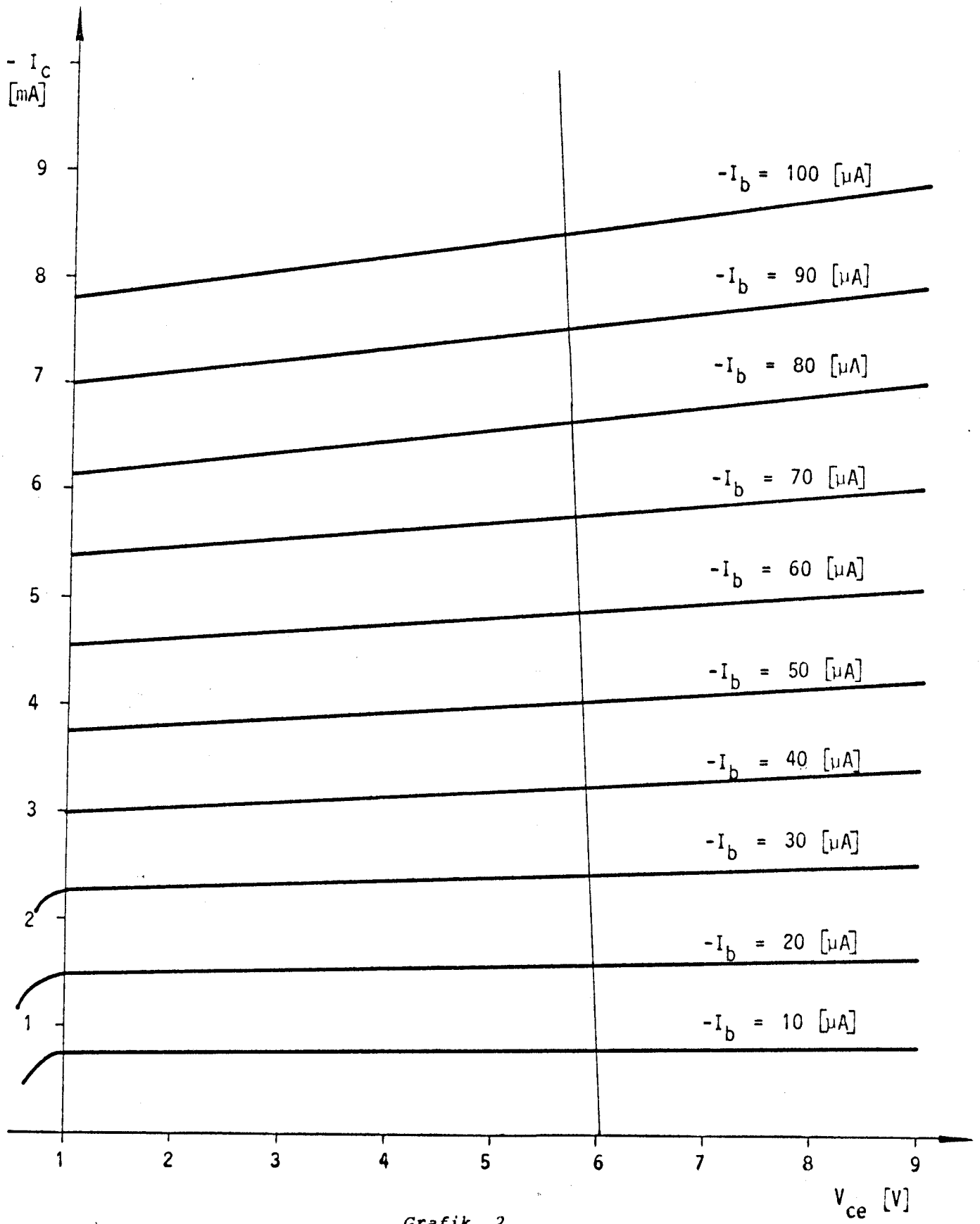
$-V_{ce}$ [V]	0	1	2	4	8
$-I_b$ [mA]	V_{be} [mV]				
40		640	640	640	640
50	583	648	648	648	648
60		650	650	650	650
70		650	650	650	650
80		655	655	655	655
90		655	655	655	655
100	602	660	660	660	660
150	614	660	660	660	660
200	623	668	668	668	668
250	628	673	673	673	673
300	634	678	678	678	678
350	638	681	681	681	681
400	643	683	683	683	683
450	647	687	687	687	687
500	650	689	689	689	689
550	652	690	690	690	690
600	655	691	691	691	691
650	658	692	692	692	692
700	660	693	693	693	693
750	661	661	661	661	661
800	663	696	696	696	696
max I_c [mA]	120	120	120	75	37,5

Predotpor baze je $R_b = 50 \text{ k}\Omega$.

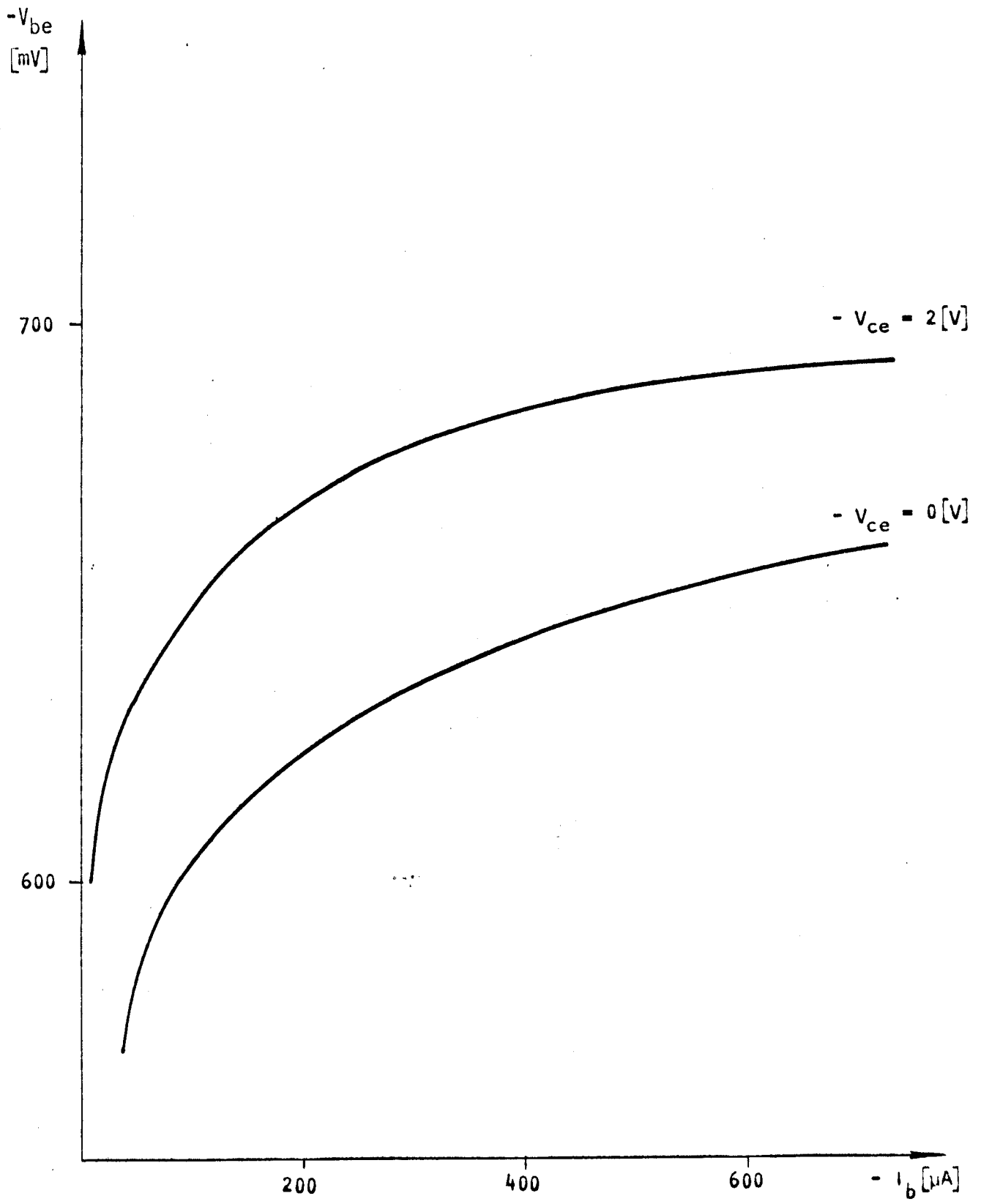
BFY 64



Grafik 1.



Grafik 2.



Grafik 3.

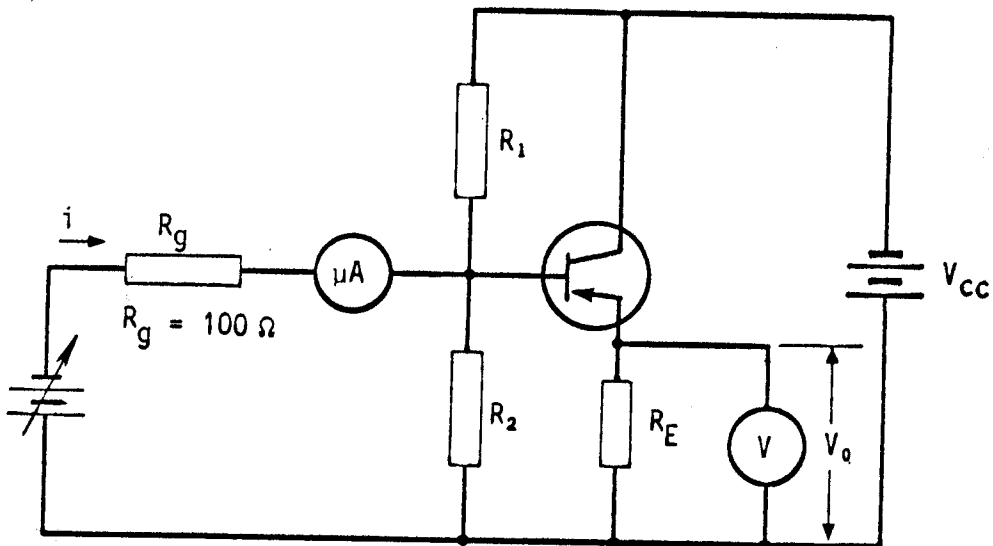
TABELA 3.

i_A mA	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
V V	0,09	0,15	0,28	0,42	0,56	0,59	0,84	0,98

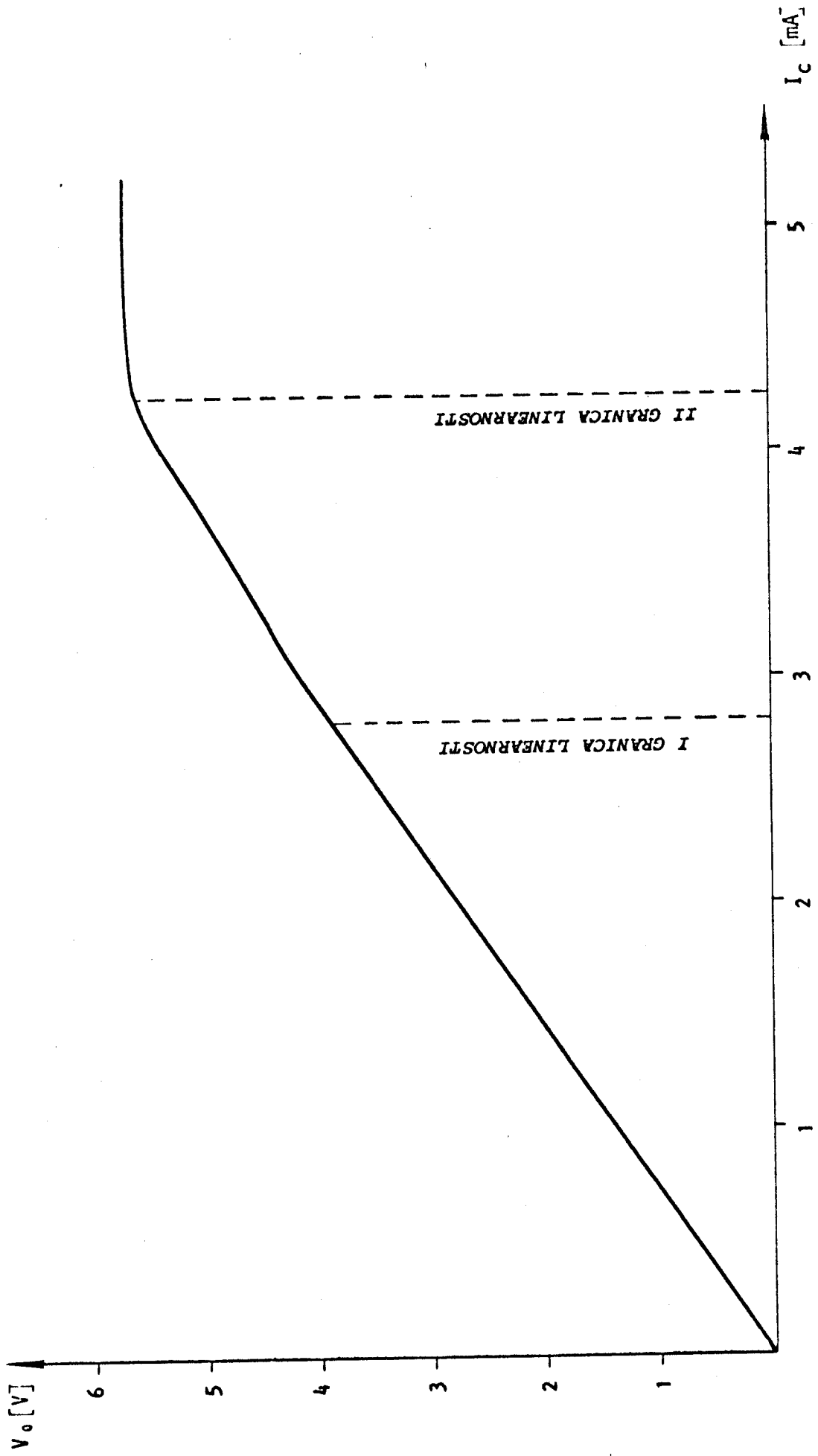
i_A mA	0,80	0,90	1,00	1,20	1,50	1,80	2,00	2,20
V V	1,1	1,28	1,4	1,7	2,12	1,53	2,8	3,1

i_A mA	2,50	2,80	3,00	3,20	3,50	3,80	4,00	4,2
V V	3,5	3,9	4,1	4,4	4,8	5,1	5,4	5,6

i_A mA	4,4	4,6	4,8
V V	5,68	5,7	5,7



Slika 7.

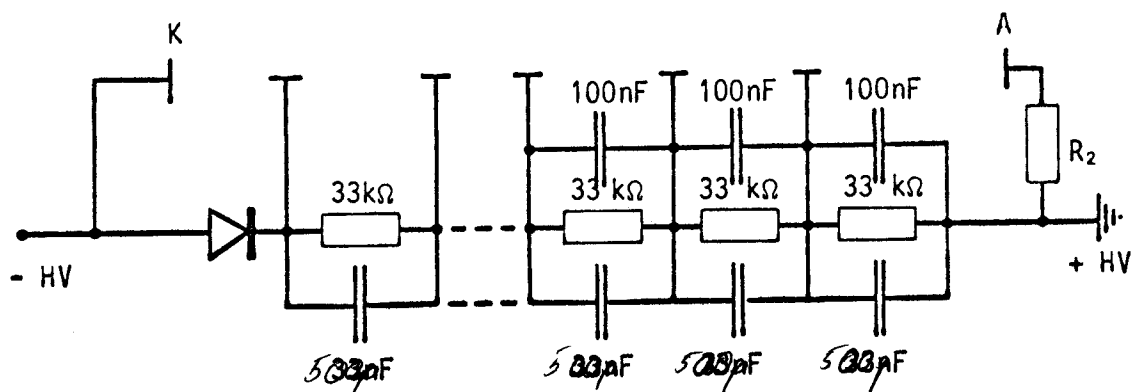


Grafik 4.

IZRADA RAZDELNIKA NAPONA

Upotrebljena fotomultiplikatorska cev ima devet dinoda. Njena oznaka je RCA 4840.

Za stabilizaciju napona između katode i prve dinode iskorišćena je zener dioda probojnog napona 93 V. Ustvari, upotrebljena su tri zener dioda vezana redno, od kojih dve probojnog napona 33 V, a jedna probojnog napona 27 V. Razdelnik napona sačinjavaju otpornici otpora 33 k Ω i kondenzatori kapaciteta 33 nF i 100 nF, prema šemi datoj na slici 8.



Slika 8.

MERENJE LINEARNOSTI FOTOMULTIPLIKATORA

Ovde se vrši merenje veličine izlaznog napona V_0 (napon na otporniku R_e) u zavisnosti od veličine izlaznog raz-

reza (slita) d_2 . Veličinu ulaznog razreza d_1 (u monohromator) je konstantna i iznosi 2 mm.

Monohromator je postavljen na talasnu dužinu od $\lambda = 4976 \text{ \AA}$.

Rezultati merenja su dati u tabeli 4. i na grafiku 5.

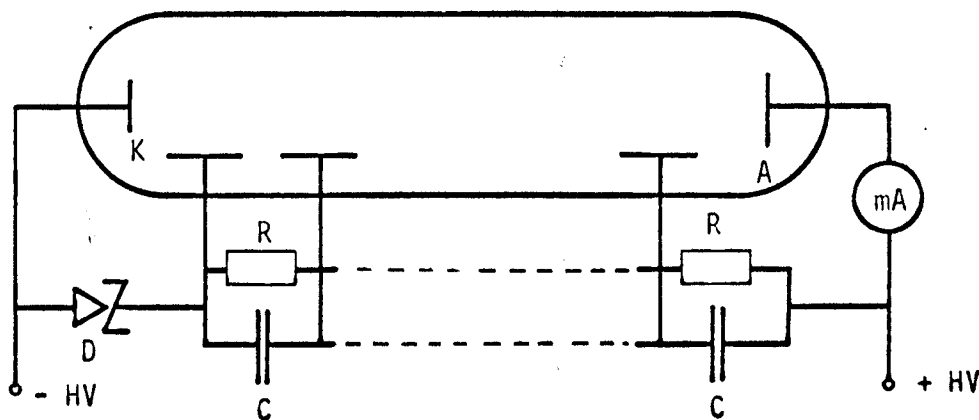
TABELA 4.

d_2 [mm]	2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0
V_a [V]	5,4	5,5	5,1	4,5	3,9	3,2	2,4	1,9	1,3	0,6	0,15	0,05

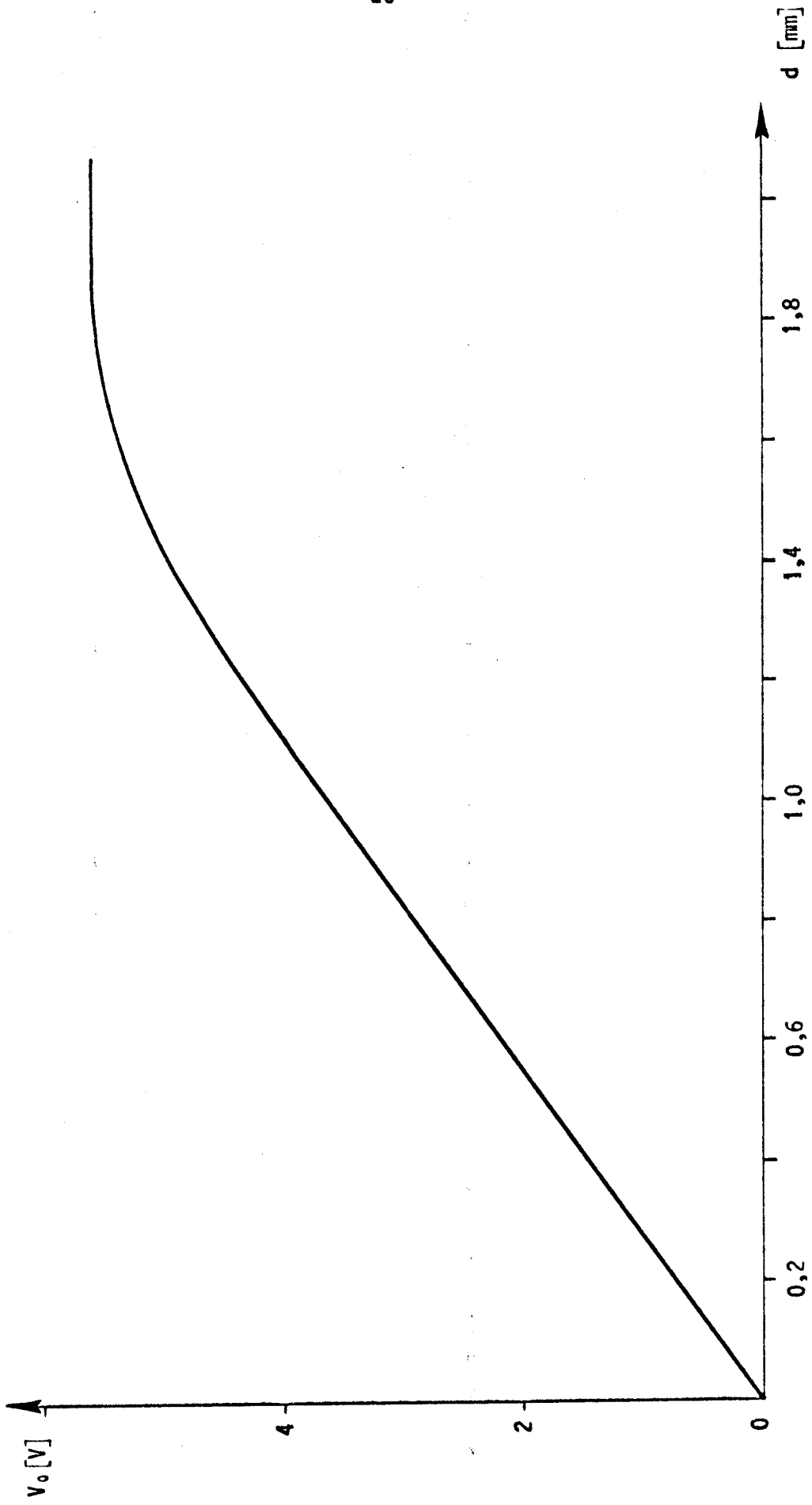
pri HV = 900 [V]

MERENJE TAMNE STRUJE

Merenje tamne struje je izvršeno prema šemi datoj na slici 10. Rezultati merenja dati su u tabeli 5 i predstavljaju srednje vrednosti iz pet merenja.



Slika 9.



Grafik 5.

TABELA 5.

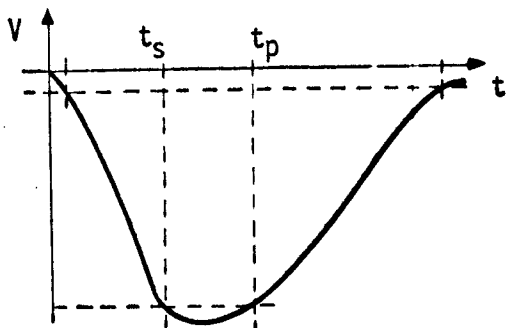
HV [V]	I_{dc} [mA]	HV [V]	I_{dc} [mA]
200	0,43	700	28
250	0,58	725	37
300	0,76	750	48
350	0,95	775	62
400	1,3	800	80
450	1,9	825	98
500	3,3	850	122
525	4,2	875	155
550	5,7	900	180
575	8,0	925	220
600	9,8	950	275
625	12,5	975	330
650	16,0	1000	400
675	21,0		

ANALIZA "ELEKTRONSKOG UDARA"

Kao što je napred već rečeno, tamnu struju najvećim delom sačinjavaju elektroni koji nastaju termoelektronskom emisijom sa fotokatode. Nakon multiplikacije ovih elektrona na dinodama, oni se javljaju kao impulsna struja anode. Dalje, pošto je ulazni impuls pojačan na linearnom pojačavaču, izlazni impuls se može posmatrati na osciloskopu. Analiza ovih impulsa je izvršena pri visokom naponu od 800 V. Vremenska baza na osciloskopu je iznosila 0,1 μ s/pod, a amplituda impulsa 2 mV/pod.

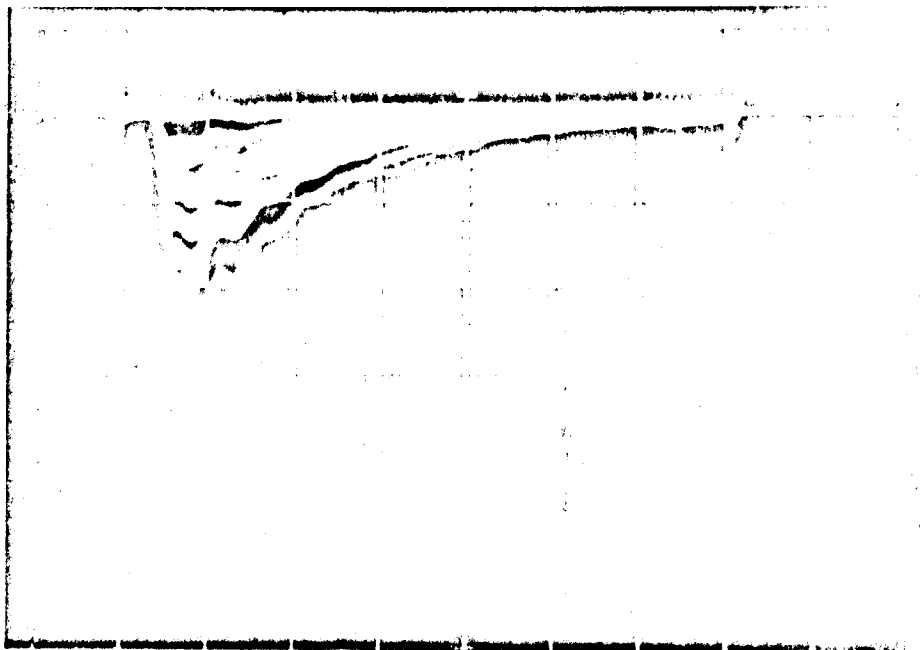
Izgleđ izlaznog impulsa usled elektronskog udara je prikazan na slici 10.

Sa snimka izlaznih impulsa (slika 11.) odredjeno je vreme porasta i pada napona. Ova vremena su odredjena kao proteklo vreme od porasta napona (odnosno struje) od 10% do 90%, (odnosno od 90% do 10%) njihove maksimalne (odnosno minimalne) vrednosti.



Slika 10.

Sa snimka nalazimo da je vreme smanjenja napona (t_s) manje od $0,02 \mu s$, a da je vreme porasta napona (t_p) reda veličine $0,3 \mu s$.



Slika 11.

LITERATURA

1. Praktična spektroskopija, Harrison, Lord i Loofbourow
2. Photomultiplier tubes - EMI
3. Elektronika I - dr M. Pavlov
Nori Sad 1973
4. Poluprovodničke diode i tranzistori - V. Cvekić
5. Fizička elektronika - B. Djurić
Beograd 1964

ZAKLJUČAK

Cilj diplomskog rada je bila izrada predpojačavača i razdelnika napona za fotomultiplikator i određivanje karakteristika fotomultiplikatora.

Izrada predpojačavača je obuhvatila određivanje statičkih karakteristika tranzistora BFY 64 i proračun elemenata za zadanu radnu tačku.

Nakon povezivanja pojačavača i razdelnika napona izvršena su sledeća merenja:

1. Merenje tamne struje fotomultiplikatora
2. Određivanje linearnosti fotomultiplikatora
3. Analiza "elektronskog udara".

Merenjem je utvrđeno da intenzitet tamne struje za HV 800 V nije veći od nekoliko stotina μA , da fotomultiplikator pokazuje linearnost do otvora izlaznog razreza od 1,6 mm i da je vreme porasta impulsa kratko, a vreme opadanja izlaznog impulsa prosečno.

