

Vežba 1 – Fotodiode

Kao poslednji element u jednom optičkom lancu javlja se prijemnik koji služi za prevođenje optičkog u električni signal. Prvi element prijemnika jeste **fotodetektor**. Fotodetektor konvertuje varijacije optičke snage koja pada na njega u odgovarajuće varijacije električne struje. Pošto je optički signal oslabljen i izobličen kada napusti optičko vlakno, od fotodetektora se moraju zahtevati odlične osobine. Najvažnije su:

- visoka osetljivost na talasnoj dužini koju emituje optički izvor,
- nizak nivo šuma,
- brz odziv (veliki frekvencijski opseg),
- niska osetljivost na promene temperature i druge ambijentalne uslove,
- kompatibilnost sa fizičkim dimenzijama optičkog fibera,
- razumna cena u odnosu na druge komponente senzorskog sistema,
- dug radni vek.

Fotodetektor se mogu klasifikovati u nekoliko grupa: fotomultiplikatori, piroelektrični detektori, poluprovodnički fotoprovodnici, fototranzistori i fotodiode. Međutim, većina ovih detektora ne zadovoljava jedan ili više zahteva navedenih ranije. Fotomultiplikatori imaju veliko pojačanje i mali šum. Nažalost, njihove velike dimenzije i veliki naponi napajanja čine ih nepodesnim u fiberoptičkim sistemima. Piroelektrični fotodetektor konvertuju fotone u toplotu – apsorpcija fotona rezultuje promenom temperature dielektričnog materijala. Ovo prouzrokuje povećanje promene dielektrične konstante, što se obično meri kao promena kapaciteta. Odziv ovih detektora je prilično ravan u širokom spektralnom opsegu, ali je njihova brzina ograničena brzinom hlađenja posle eksitacije. Njihova glavna primena je za detektovanje laserskih impulsa, i oni nisu naročito pogodni za fiberoptičke sisteme. Fotoprovodnici su spori i imaju veliku struju mraka, a isto važi i za fototranzistore.

Od poluprovodničkih fotodetektora u fiberoptičkim sistemima se skoro isključivo koriste fotodiode zbog malih dimenzija, pogodnog materijala, visoke osetljivosti i brzog odziva. Najčešće su u upotrebi dva tipa fotodetektora: PIN i lavinski fotodetektor (engl. *avalanche photodiode*, APD).

3.1 Teorijski osnov

Najjednostavniju poluprovodničku fotodiodu čini ***p-n*** spoj poluprovodnika čiji je energetski procep manji od energije fotona svetlosti koju treba detektovati. Optičko zračenje prolazi kroz tanku, najčešće *p* oblast i apsorbuje se u osiromašenoj oblasti. Ako je energija fotona veća od energetskog procepa materijala, u osiromašenoj oblasti se generiše par elektron-šupljina. Pod dejstvom ugrađenog električnog polja osiromašene oblasti, stvoreni par slobodnih nosilaca naelektrisanja biva razdvojen, te se elektroni kreću ka *n* oblasti, a šupljine ka *p* oblasti. Fotodiode se ponaša kao strujni generator i kroz priključeno spoljašnje kolo elektroni teku u smeru od katode (*n*-tip, oznaka $-$) ka anodi (*p*-tip, oznaka $+$). Struja u kolu je, dakle, inverzna kroz fotodiodu i proporcionalna brzini generacije nosilaca naelektrisanja, tj. snazi optičkog zračenja koje pada

na fotodiodu. Spoj reaguje i na one parove nosilaca koji nastaju van oblasti osiromašenja i difunduju do nje pre nego što se rekombinuju. Utvrđeno je da samo oni nosioci koji nastanu na udaljenosti manjoj od difuzione dužine manjinskih nosilaca uspevaju da dođu do osiromašene oblasti i na taj način doprinose ukupnoj fotostruji.

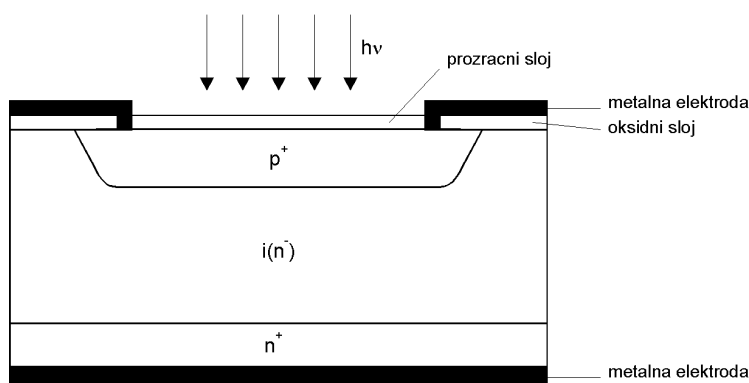
Najvažniji parametri fotodiode su:

- vreme odziva;
- totalna ekvivalentna snaga šuma (engl. *noise equivalent power*, NEP);
- kvantna efikasnost;
- osetljivost.

Kada je odziv fotodiode linearan, njena osetljivost je linearno srazmerna kvantnoj efikasnosti, pa su dva poslednja parametra istovetna. Kod nelinearnog odziva osetljivost je funkcija, ne samo kvantne efikasnosti, već i drugih karakteristika fotodiode.

Nabrojana četiri parametra zavise od tipa fotodiode i poluprovodničkog materijala od kog je fotodioda napravljena. Prva dva parametra treba da budu što manja, a druga dva što veća. U cilju povećavanja kvantne efikasnosti, fotodioda na bazi klasičnog *pn* spoja zamenjena je ***p-i-n* fotodiodom**. Zbog postojanja intrinzične (nedopirane ili slabo-dopirane) *i*-oblasti, kvantna efikasnost biva višestruko povećana. Kod lavinske diode je takođe povećana osetljivost ali je, zbog multiplikacionog procesa na kome se zasniva njen rad, povećana vrednost vremenske konstante kao i šuma. Inače, da bi se smanjila vrednost šuma, bira se materijal sa što većom pokretljivošću manjinskih nosilaca.

PIN fotodioda prikazana je šematski na sl. 1. Sastoji se od p^+ i n^+ oblasti koje su odvojene vrlo nisko n dopiranom unutrašnjom *i*-oblašću. Debljina *i*-oblasti je višestruko veća od debljine *p* i *n* oblasti. Ovim se postiže da se apsorpcija optičkog zračenja vrši dominantno u *i*-oblasti. Potrebno je tražiti kompromis između veličine kvantne efikasnosti i brzine odziva, jer su one međusobno kontradiktorne. U normalnom radnom režimu primenjen je dovoljno veliki inverzni napon napajanja, tako da je *i*-oblast potpuno osiromašena. Drugim rečima, n i p koncentracije nosilaca u *i*-oblasti su zanemarljivo male u odnosu na koncentraciju jonizovanih dopanata u ovoj oblasti.



sl. 1: Poprečni presek PIN fotodiode.

Koeficijent apsorpcije izrazito zavisi od talasne dužine. Zbog toga određeni poluprovodnički materijal može biti korišćen samo u određenom opsegu talasnih dužina. Gornja granična talasna dužina λ_c određena je energetskim procepom E_g materijala preko sledeće relacije:

$$\lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})}. \quad (1)$$

Granične talasne dužine su oko 1.06 μm za Si i 1.6 μm za Ge. Za veće talasne dužine energija fotona je nedovoljna da eksituje elektron iz valentne u provodnu zonu.

Na manjim talasnim dužinama fotoodziv naglo opada zbog vrlo velike vrednosti koeficijenta apsorpcije α . Fotoni visokih energija apsorbuju se vrlo blizu površine fotodetektora, gde je vreme rekombinacije parova elektron-šupljina vrlo malo. Stoga se generisani nosioci rekombinuju pre nego što dođu do fotodetektorskog kola.

Kvantna efikasnost i brzina odziva zavise od energetskog procepa materijala, talasne dužine svetlosti, i dopiraniosti i debljine p , i i n oblasti. **Kvantna efikasnost** η definiše se kao odnos broja generisanih parova elektron-šupljina i broja upadnih fotona energije $h\nu$:

$$\eta = \frac{I_p/q}{P_0/h\nu}. \quad (2)$$

Ovde je I_p srednja fotostruja generisana srednjom upadnom optičkom snagom P_0 . U praksi 100 fotona će generisati između 30 i 95 parova elektron-šupljina, pa je kvantna efikasnost između 30 i 95 procenata. Da bi se postigla visoka kvantna efikasnost i -oblast mora biti dovoljno široka da bi što veći deo upadne svetlosti bio apsorbovan. Međutim, što je šira oblast, to više vremena treba fotogenerisanim nosiocima da driftom prođu kroz inverzno polarisan spoj. Pošto driftovsko vreme, između ostalog, određuje brzinu odziva fotodiode, mora se napraviti kompromis između brzine odziva i kvantne efikasnosti.

Jedna od osobina kojom se fotodiode često karakteriše je **osetljivost** (responsivnost, engl. *responsivity*) \mathcal{R} . Ona je povezana sa kvantnom efikasnošću sledećom relacijom:

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \eta \frac{q}{h\nu}. \quad (3)$$

Ovaj parametar je vrlo pogodan pošto definiše fotostruju koja se generiše po jedinici upadne optičke snage.

Sledeća vrlo važna karakteristika je **vreme odziva**. Vreme odziva zavisi od sledeća tri faktora:

1. vremena preleta fotogenerisanih nosilaca kroz osiromašenu oblast;
2. vremena difuzije fotonosilaca generisanih van oblasti osiromašenja;
3. RC vremenske konstante fotodiode i pridruženog kola.

Parametri fotodiode odgovorni za ova tri faktora su koeficijent apsorpcije, širina i -oblasti W , kapacitivnost fotodiode (difuziona i oblasti prostornog tovara), kapacitivnost pojačavača, vrednost radne otpornosti R_L , i ulazna otpornost pojačavača.

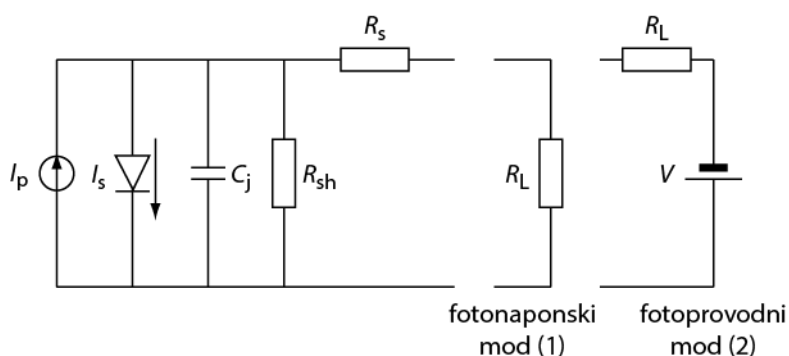
Glavne vrste **šuma** u fotodetektoru koji nemaju unutrašnje pojačanje su kvantni šum (engl. *quantum/shot noise*) i šum struje mraka. Njima treba dodati termički šum pojačavača koji se javlja u svakoj elektronskoj i optoelektronskoj komponenti. **Kvantni šum** potiče od statističke prirode generacije i kolekcije fotoelektrona. Drugim rečima, i električna struja i svetlost imaju „granularnu“ strukturu budući da su sačinjene od diskretnih gradivnih jedinica – elektrona i fotona. One ne teku kontinualno, ali kontinualni model omogućava značajno jednostavniju analizu nego praćenje pojedinačnih nosilaca naelektrisanja ili energije. Svako odstupanje od kontinualne reprezentacije može se tretirati kao šum. Statistika kojom se modeluje generacija

fotoelektrona ima Poasonovu raspodelu, te se kvantni šum opisuje upravo pomoću nje. **Struja mraka**, ili inverzna struja zasićenja, jeste struja koja protiče kroz polarisanu fotodiodu kada nema upadne svetlosti. Ona je kombinacija balk i površinske struje. Balk struja mraka i_{DB} potiče od elektrona i/ili šupljina termički generisanih u pn spoju. Površinska struja mraka se često naziva i površinskom strujom curenja ili samo strujom curenja. Ona zavisi od površinskih defekata, čistoće, napona polarizacije i sl. Efektivan način za smanjivanje površinske struje mraka je korišćenje *guard ring* strukture. Generalno, kod PIN fotodioda **termički šum** koji potiče od opterećenja R_L i aktivnih elemenata pojačavačkog kola jeste dominantan.

Silicijumske diode koriste se za detekciju vidljive i infracrvene svetlosti talasne dužine manje od $1 \mu\text{m}$. One pokazuju dobru linearnost pri pretvaranju intenziteta svetlosti u struju u opsegu od 7 do 8 redova veličine (linearnost do 1%). Odstupanja nastaju pri velikim intenzitetima svetlosti, kada broj fotona postane uporediv sa brojem lokacija elektron-šupljina u ispražnjenom području. Pri detekciji laserskog zračenja brzo može doći do zasićenja. Kao primer može se uzeti uobičajeni He-Ne laser snage 1 mW , koji ima dvostruko veći intenzitet nego što je potrebno za zasićenje tipične silicijumske fotodiode.

Ako je koeficijent apsorpcije veći – veća je i kvantna efikasnost. To je slučaj kod poluprovodnika sa direktnim energetskim procepom (npr. GaAs i druga III-V jedinjenja) jer kod njih nije potrebno učešće fonona pri očuvanju impulsa, za razliku od Si i Ge. Otuda ovi poluprovodnici omogućavaju potpunu apsorpciju pri debljinama apsorpcionog sloja od par mikrometara, dok ona kod Si iznosi čitavih $50 \mu\text{m}$ (za talasnu dužinu od 830 nm). Time se potpuna apsorpcija i maksimalna kvantna efikasnost mogu postići sa debljinama i -oblasti od nekoliko mikrometara, čime se značajno smanjuje vreme preleta fotogenerisanih nosilaca, odnosno povećava brzina odziva.

Idealna fotodioda može se predstaviti kao paralelna veza strujnog izvora i obične poluprovodničke diode. Izvor daje struju srazmernu optičkoj snazi upadne svetlosti, a dioda opisuje ponašanje pn spoja u odsustvu optičkog zračenja.



sl. 2: Ekvivalentno kolo fotodiode i dva osnovna načina vezivanja fotodiode u kolo.

Realna fotodioda predstavlja se ekvivalentnim kolom prikazanim na sl. 2, gde se pored strujnog izvora i diode pojavljuju i kapacitivnost pn spoja i dve otpornosti (otpornost spoja fotodiode R_{sh} i otpornost kontakata diode R_s). Pomoću kondenzatora C_j modeluje se kapacitivnost koju pokazuje neprovodna osiromašena zona u „sendviču“ između dve provodne površi. Ona je u stvari paralelna veza difuzione kapacitivnosti i kapacitivnosti oblasti prostornog tovara. Difuziona kapacitivnost je posledica difuzionog kretanja fotogenerisanih nosilaca i zanemaruje se u odnosu na kapacitivnost oblasti prostornog tovara, koja je direktno proporcionalna aktivnoj površini spoja a obrnuto proporcionalna debljini zone osiromašenja. Ova debljina inače raste sa

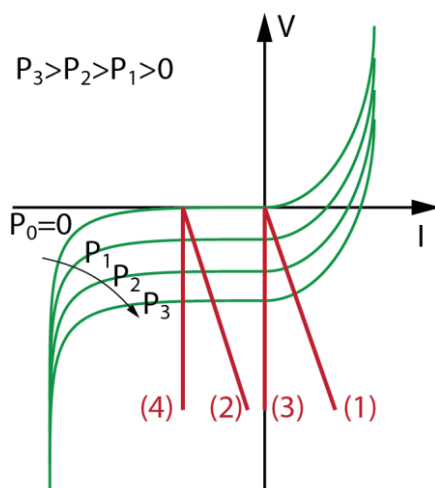
povećanjem napona inverzne polarizacije fotodiode. C_j se kreće u rasponu od 3 do 2500 pF i od presudnog je značaja za brzinu odziva diode. Spoj fotodiode ima konačnu paralelnu otpornost R_{sh} , najčešće u rasponu od 5×10^7 do $10^{10} \Omega$.

Fotodetektor se retko koristi nezavisno u optičkom sistemu. Obično je optički signal koji dolazi do fotodiode slab, pa i rezultujuća fotostruja mora biti pojačana pre daljeg procesiranja. Kod PIN fotodiode nema unutrašnjeg pojačanja, pa je neophodno pridružiti joj pojačavačko kolo. Neminovnost sprežanja fotodiode u električno kolo uslovljava pojavu parazitnih efekata. Oni se ogledaju u pojavi parazitne kapacitivnosti spoljnog električnog kola i otpornosti kontakata. Parazitna kapacitivnost se ne može izbeći, dok se otpornost kontakata može minimizovati primenom kvalitetne tehnologije naparavanja metalnih kontakata. Otpornost kontakata diode, R_s , u proračunima se gotovo uvek zanemaruje, jer je reda 0.1 do 100 Ω . Pored ove dve, fotodiode poseduje i svoju unutrašnju (ugrađenu) otpornost, ali je njena vrednost mala i dolazi do izražaja u dinamičkim procesima pri direktnoj polarizaciji fotodiode. Zato se ova otpornost uglavnom zanemaruje.

Struja koja protiče kroz ekvivalentno kolo sastoji se od dve komponente: generisana fotostruja I_p i struja mraka I_d koja teče kroz diodu. Struja mraka je posledica termičkog kretanja nosilaca. Sem ovih struja, unutar PIN fotodiode javlja se i struja pomeraja. Struja fotodiode može se opisati standardnom jednačinom polarisanog pn spoja:

$$I = I_d \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] - I_p, \quad (4)$$

gde je I ukupna struja fotodiode, I_p intenzitet generisane fotostruje, I_d struja mraka, V napon spoja, k_B Bolcmanova konstanta, a T apsolutna temperatura spoja. Strujno-naponska karakteristika prikazana je na sl. 3.



sl. 3: Strujno-naponska karakteristika fotodiode sa radnim pravama za pojedina kola.

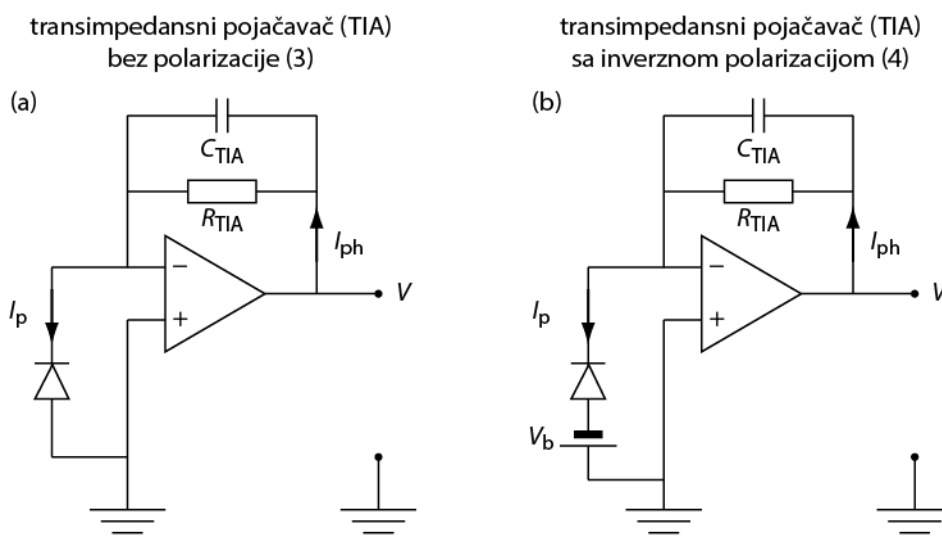
Na ponašanje fotodiode utiču karakteristike priključenog spoljašnjeg kola. Različitim kolima se mogu poboljšati ili istaći pojedine karakteristike optoelektronske konverzije, obično na račun nekih drugih, koje nisu važne u datoj primeni. Razlikuju se četiri osnovna načina vezivanja fotodiode. Njihove radne prave¹ prikazane su na sl. 3. Dva osnovna načina detekcije nastalih

¹ Radne prave predstavljaju geometrijsko mesto sukcesivnih radnih tačaka na strujno-naponskim karakteristikama fotodiode za različite intenzitete svetlosti.

nosilaca naelektrisanja su **fotovoltaični** i **fotoprovodni**, u zavisnosti da li se dioda nalazi u polarisanom ili nepolarisanom električnom kolu, sl. 2.

Kolo (1) na sl. 2 predstavlja najjednostavnije kolo, u kome se koristi rezistivno opterećenje bez polarizacije. Na radnom otporniku se generiše napon $V = I_p R_L$. Otpornost R_L treba da bude što veća da bi se dobio veći koristan signal, kao i da bi se eliminisao uticaj paralelne otpornosti fotodiode koja se menja sa temperaturom. Međutim, brzina odziva kola određena je vremenskom konstantom $R_L C_j$, te je za veće brzine potrebna mala otpornost R_L . Da bi se postigla linearnost takođe je potrebna manja vrednost radnog otpornika. Iz izloženog se može zaključiti da se ovakvo fotonaponsko kolo koristi u jednostavnim sistemima gde nema strogih zahteva za linearnošću i brzinom odziva.

Kolo (2) na sl. 2 radi u fotoprovodnom režimu rada. Primenom inverznog napona polarizacije povećava se debljina osiromašenog sloja pn spoja fotodiode i time se smanjuje kapacitivnost C_j . Inverznim naponom se takođe povećava linearnost odziva, tj. dinamički opseg, do oko 30% od vrednosti primenjenog napona. Kolo (2) se primenjuje kada je potrebna dobra linearnost i veća brzina odziva.



sl. 4: Transimpedanski pojačavač (a) bez polarizacije i (b) sa inverznom polarizacijom.

Transimpedanski pojačavač bez polarizacije, kolo (3) na sl. 4, omogućava rad u efektivnom kratkom spoju (anoda je na pravoj, a katoda na virtuelnoj masi), kada se postiže najveća linearnost fotodiode. Sva fotogenerisana struja prolazi kroz otpornik u kolu povratne sprege R_{TIA} (sl. 4(a)) i napon na izlazu operacionog pojačavača je:

$$V = I_p R_{TIA} . \quad (5)$$

Osnovna funkcija sklopa je pretvaranje strujnog signala u odgovarajući naponski signal, koji je pogodan za dalju obradu. Kolo se zato i zove transimpedanski pojačavač i njegova prenosna funkcija ima prirodu otpornosti (R_{TIA} u paralelnoj vezi sa parazitnom ili spoljašnjom kapacitivnošću C_{TIA}). Kod ovog kola je smanjen šum koji je uglavnom određen i obrnuto proporcionalan efektivnoj paralelnoj otpornosti kojom je dioda zatvorena (termalni šum). Kada se koristi operacioni pojačavač sa FET ulazom, termalni šum je minimalan i određen je sa R_{Sh} fotodiode. Takođe, zbog efektivnog kratkog spoja diode, brzina detekcije je značajno povećana.

Kako se na krajevima fotodiode održava konstantan napon (0 V), povećana je i linearnost detekcije.

Primena inverznog napona (sl. 4(b)), kao i kod kola (2), povećava brzinu odziva zbog povećanja debljine osiromašene oblasti, i dinamički opseg (linearnost). Nedostatak primene inverznog napona u kolu (4) je povećanje struje mraka, te ovo kolo nije pogodno u slučajevima kada je potrebna velika osetljivost.

Karakteristike fotodiode u kolu transimpedansnog pojačavača su limitirane praktičnim ograničenjima samog operacionog pojačavača. Kritični faktori pojačavača uključuju ulaznu struju polarizacije, proizvod pojačanja i propusnog opsega (engl. *gain-bandwidth product* GBW), ulazni naponski i ulazni strujni šum.

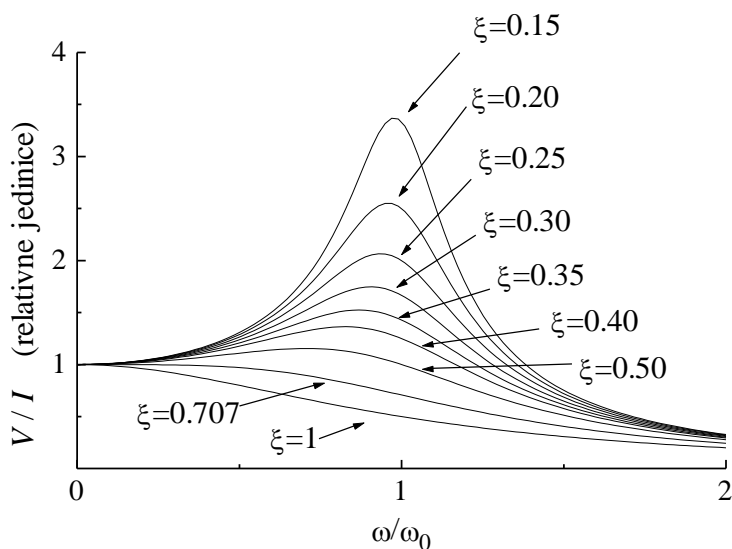
Struja polarizacije operacionog pojačavača sabira se sa strujom fotodiode (struja mraka i struja signala). Bipolarni pojačavači imaju tipične struje polarizacije od 30 do 100 nA, što nije zanemarljivo ako se detektuju signali reda nW. Za relativno male optičke signale pogodni su JFET pojačavači, koji imaju znatno manje vrednosti struje polarizacije (do 50 pA). U oba slučaja, ako se želi precizna detekcija jednosmernih nivoa mora se obezbediti mogućnost podešavanja strujnog ofseta, tj. kompenzovanja uticaja neželjenih struja, bez obzira da li potiču od struje polarizacije, struje mraka ili od optičkog zračenja pozadine.

Kod idealnog operacionog pojačavača, sa beskonačnim pojačanjem i propusnim opsegom, brzina detekcije je ograničena samo fizikom rada fotodiode. Međutim, kod realnih operacionih pojačavača pojačanje opada sa frekvencijom i to tako da GBW ostaje konstantan. Jednostavnom analizom dobija se prenosna funkcija transimpedansnog pojačavača:

$$\frac{V(s)}{I(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} R_{TIA}, \quad (6)$$

gde su $\omega_0^2 = \text{GBW}/(R_{TIA}C_j)$ i $2\xi\omega_0 = \text{GBW} \cdot C_{TIA}/C_j + 1/(R_{sh}C_j)$.

Izraz (6) odgovara niskofrekventnom filteru drugog reda. Frekvencijski odziv kola u zavisnosti od koeficijenta prigušenja ξ prikazan je na sl. 5.



sl. 5: Frekvencijski odziv transimpedansnog pojačavača.

Na karakteristici se vidi potencijalno veliko premašenje odziva na kritičnoj frekvenciji ω_0 . Premašenje je jako zavisno od GBW i odnosa kapacitivnosti u povratnoj sprezi C_{TIA} i kapacitivnosti spoja C_j . Upotreba C_{TIA} je neizbežna u praktičnim realizacijama da bi se obezbedio stabilan rad. Za primene kada je važan odziv na visokim frekvencijama moraju se, na osnovu prethodnih izraza, izabrati kritični parametri: operacioni pojačavač sa odgovarajućim GBW, kondenzator u povratnoj sprezi C_{TIA} i napon polarizacije fotodiode, kojim se podešava kapacitivnost spoja C_j .

U sledećoj tabeli su ukratko sumirane prednosti i nedostaci opisanih konfiguracija.

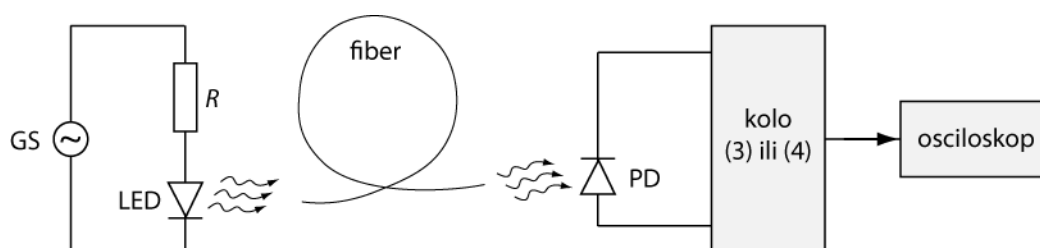
Tabela 1: Prednosti i nedostaci osnovnih konfiguracija u kojima fotodiode može da radi

Kolo	Prednosti	Nedostaci
(1)	<ul style="list-style-type: none"> jednostavan rad 	<ul style="list-style-type: none"> ograničena brzina ograničena linearnost ograničena osetljivost
(2)	<ul style="list-style-type: none"> poboljšanje linearnosti poboljšanje brzine 	<ul style="list-style-type: none"> uticaj struje mraka porast šuma sačme
(3)	<ul style="list-style-type: none"> poboljšanje brzine poboljšanje linearnosti smanjen šum 	<ul style="list-style-type: none"> dodatni šum pojačavača potencijalni visokofrekventni šum
(4)	<ul style="list-style-type: none"> maksimalna brzina maksimalna linearnost 	<ul style="list-style-type: none"> povećan uticaj struje mraka povećan sačma šum moć visokofrekventni šum slabijeg intenziteta

3.2 Zadatak vežbe

Potrebno je snimiti frekvencijske karakteristike kola (3) i (4) za različite vrednosti otpornosti R_{TIA} i kapacitivnosti C_{TIA} , a zatim ih nacrtati u logaritamskoj razmeri i odrediti 3dB propusni opseg ispitivanih sklopova. Izvesti zaključak na osnovu snimljenih krivih koje kolo daje najbolje rezultate i ukratko opisati prednosti i mane svakog od merenih sklopova.

3.3 Postavka vežbe i postupak merenja



sl. 6: Postavka eksperimenta: GS-generator signala (konstantna amplituda, frekvencija može da se menja), PD-fotodiode.

Postavka eksperimenta prikazana je na sl. 6. Crvena LED diode vezana je u odgovarajuće kolo zajedno sa generatorom sinusoidalnog signala čija se frekvencija može menjati. Svetlost se od LED diode vodi do fotodiode optičkim vlaknom. Fotodiode je vezana u kolo (3) ili (4), a izlazni naponski signal posmatra se na digitalnom osciloskopu.