

2 PREGLED OPŠTIH KARAKTERISTIKA OPTIČKIH PRIJEMNIKA I NJIHOVA PODJELA

Optički prijemnik predstavlja važan elektronski sklop sa širokom oblašću primjene u telekomunikacijama, instrumentaciji i mjerenjima, multimedijalnim sistemima, automatskom upravljanju, itd. Sastoji se od fotodiode koja pretvara upadnu svjetlost u struju, i transimpedansnog pojačavača koji pretvara struju fotodiode u izlazni napon. Mjerenjem izlaznog napona dobija se informacija o intenzitetu upadne svjetlosti na ulazu optičkog prijemnika. Kod starijih generacija optičkih prijemnika, fotodioda nije bila u sastavu integrisanog kola sa transimpedansnim pojačavačem. Zbog velike kapacitivnosti same fotodiode realizovane u obliku diskretne komponente, kao i kapacitivnosti metalizacija na štampanoj ploči kojima se vršilo povezivanje fotodiode i transimpedansnog pojačavača, frekventni opseg ovakvog optičkog prijemnika bio je veoma ograničen. Sa porastom zahtjeva za povećanjem brzine prenosa podataka, optički prijemnici su počeli da se realizuju u obliku optoelektronskih integrisanih kola, kod kojih se fotodioda i transimpedanski pojačavač nalaze na istom čipu. Optički prijemnici moraju zadovoljiti zahtjeve u pogledu linearnosti strujno-naponskih karakteristika, maksimalne disipacije snage, naponskog ofseta, šuma, što veće transimpedanse i foto-osjetljivosti, što većeg dinamičkog opsega transimpedanse i foto-osjetljivosti,... Posebno je izražen zahtjev za velikom brzinom rada (velikim frekventnim opsegom) i visokom foto-osjetljivošću (odnos izlaznog napona i optičke snage upadne laserske svjetlosti) optičkih prijemnika. Ovo je uzrokovano stalnim porastom brzine prenosa podataka i istovremenim smanjenjem snage laserske svjetlosti koja se koristi kao medijum za prenos podataka i koja predstavlja ulaznu veličinu optičkog prijemnika.

Podjela optičkih prijemnika može se izvršiti na sljedeći način:

- Optički prijemnici sa fiksnom transimpedansom,
- Optički prijemnici sa varijabilnom transimpedansom.

2.1 Optički prijemnici sa fiksnom transimpedansom

Osnovna struktura tipičnog optičkog prijemnika sa fiksnom transimpedansom prikazana je na slici 2.1. Fotodiode je povezana na ulaz transimpedansnog pojačavača realizovanog pomoću operacionog pojačavača sa otpornikom R_F u grani negativne povratne sprege. Anoda fotodiode je uzemljena, dok je njena katoda na referentnom naponu V_{REF} , zahvaljujući djelovanju negativne povratne sprege. Dakle, napon inverzne polarizacije fotodiode je konstantan, jednak referentnom naponu V_{REF} , i ne zavisi od struje fotodiode. Ukupna struja fotodiode I_{pd} protiče kroz otpornik R_F i kao rezultat na izlazu optičkog prijemnika se dobija napon V_{out} :

$$V_{out} = V_{REF} + R_F I_{pd}. \quad (2.1)$$

Pošto ukupna struja fotodiode I_{pd} ima jednosmjernu (DC) komponentu I_{PD} i naizmjeničnu (AC) komponentu i_{pd} , $I_{pd} = I_{PD} + i_{pd}$, i ukupni izlazni napon optičkog prijemnika V_{out} imaće jednosmjernu komponentu V_{OUT} i naizmjeničnu komponentu v_{out} , $V_{out} = V_{OUT} + v_{out}$. Na osnovu prethodne relacije slijedi da je jednosmjerna transimpedansa optičkog prijemnika T jednaka otpornosti R_F :

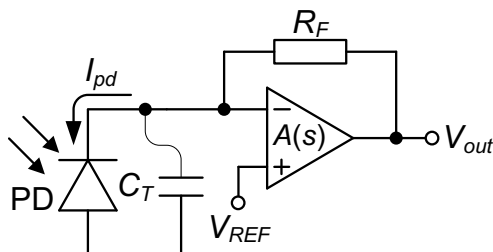
$$T = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{I_{PD}} = R_F. \quad (2.2)$$

Uzimajući u obzir da kod optičkih prijemnika razlika napona na izlazu V_{out} i referentnog napona V_{REF} treba da bude približno konstantna, $V_{out} - V_{REF} \approx const.$, jasno je da će manjim strujama fotodiode I_{PD} odgovarati veća transimpedansa T optičkog prijemnika, i obratno. Foto-osjetljivost optičkog prijemnika S (*sensitivity*) definiše se na sljedeći način:

$$S = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{P_{OPT}} = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{I_{PD}} \frac{I_{PD}}{P_{OPT}} = TR, \quad (2.3)$$

pri čemu je P_{OPT} jednosmjerna optička snaga upadne svjetlosti, dok je R (*responsivity*) osjetljivost fotodiode data izrazom:

$$R = \frac{I_{PD}}{P_{OPT}}. \quad (2.4)$$



Slika 2.1 Tipični optički prijemnik sa fiksnom transimpedansom.

Operacioni pojačavač u sklopu optičkog prijemnika modelovan je prenosnom karakteristikom koja ima dominantni pol ω_b i jednosmjerno pojačanje A_0 [24]-[29]:

$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_b}} \quad (2.5)$$

Prenosna karakteristika $T(s)$ optičkog prijemnika prikazanog na slici 2.1 data je izrazom [7]:

$$T(s) = \frac{v_{out}}{i_{pd}} = \frac{A_0 \omega_b}{C_T} \cdot \frac{1}{s^2 + s \frac{1 + \omega_b R_F C_T}{R_F C_T} + \frac{(A_0 + 1) \omega_b}{R_F C_T}}, \quad (2.6)$$

pri čemu je C_T ukupna kapacitivnost na ulazu operacionog pojačavača jednaka sumi kapacitivnosti fotodiode C_{PD} i ulazne kapacitivnosti operacionog pojačavača C_{OAI} , $C_T = C_{PD} + C_{OAI}$. Kapacitivnost fotodiode C_{PD} je obično mnogo veća od ulazne kapacitivnosti operacionog pojačavača C_{OAI} , $C_{PD} \gg C_{OAI}$. Iz prethodnog izraza slijedi da je prirodna učestanost ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(A_0 + 1) \omega_b}{R_F C_T}}, \quad (2.7)$$

dok je faktor Q :

$$Q = \frac{\sqrt{(A_0 + 1) \omega_b R_F C_T}}{1 + \omega_b R_F C_T}. \quad (2.8)$$

Može se uočiti da je frekventni opseg optičkog prijemnika ograničen kapacitivnošću fotodiode C_{PD} , kao i da je frekventni opseg utoliko manji ukoliko je vrijednost transimpedanse $T = R_F$ veća. Takođe, faktor Q je utoliko veći ukoliko je vrijednost vremenske konstante $R_F C_T$ manja. Dakle, sa smanjenjem transimpedanse $T = R_F$ stabilnost optičkog prijemnika prikazanog na slici 2.1 postaje manja (mogućnost pojave oscilacija u vremenskom odzivu postaje veća) usljed povećanja faktora Q .

Kod ovakvih sistema drugog reda moguća je pojava maksimuma u amplitudno-frekventnoj karakteristici (*gain-peaking*), što odgovara pojavi prekoračenja (*overshoot*) i oscilacija u vremenskom odzivu na pobudu odskočnog tipa. Da bi se eliminisao *gain-peaking* u amplitudno-frekventnoj karakteristici optičkog prijemnika, potrebno je da faktor Q bude manji od $1/\sqrt{2}$ [30], što vodi do sljedećeg uslova o odnosu dominantnog pola operacionog pojačavača ω_b i vremenske konstante $R_F C_T$:

$$\omega_b > \frac{2A_0}{R_F C_T}, \quad (2.9)$$

uz pretpostavku da je jednosmjerno pojačanje operacionog pojačavača A_0 dovoljno veliko, $A_0 \gg 1$ [7]. Dakle, da bi sistem bio stabilan, potrebno je obezbijediti dovoljno veliku vrijednost vremenske konstante $R_F C_T$, čime se smanjuje frekventni opseg optičkog prijemnika.

Frekvencijska kompenzacija optičkog prijemnika prikazanog na slici 2.1, može se izvršiti umetanjem kompenzacionog kondenzatora C_F u granu negativne povratne sprege [7], paralelno otporniku R_F , slika 2.2.

Polazeći od prenosne karakteristike (2.6) prethodno opisanog optičkog prijemnika, slijedi da je prenosna karakteristika $T(s)$ optičkog prijemnika sa kompenzacionom kapacitivnošću C_F data izrazom:

$$T(s) = \frac{v_{out}}{i_{pd}} = \frac{A_0 \omega_b}{C_T} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{C_F}{C_T}\right) \left\{ s^2 + s \frac{C_T}{C_T + C_F} \left[\omega_b + \frac{1}{R_F C_T} + \frac{(1 + A_0) \omega_b C_F}{C_T} \right] + \frac{(1 + A_0) \omega_b}{R_F (C_F + C_T)} \right\}} \quad (2.10)$$

Na osnovu prethodne relacije dobija se da je prirodna učestanost ω_0 :

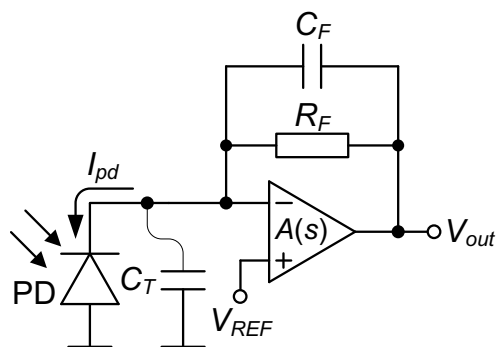
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{(1 + A_0) \omega_b}{R_F (C_F + C_T)}} \approx \sqrt{\frac{A_0 \omega_b}{R_F (C_F + C_T)}} \approx \sqrt{\frac{A_0 \omega_b}{R_F C_T}} \quad (2.11)$$

dok je faktor Q :

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{A_0 \omega_b}{R_F (C_F + C_T)}}}{\left(1 + \frac{C_F}{C_T}\right) \left[\omega_b + \frac{1}{R_F C_T} + \frac{(1 + A_0) \omega_b C_F}{C_T} \right]} \approx \frac{\sqrt{\frac{R_F C_T}{A_0 \omega_b}}}{\frac{1}{A_0 \omega_b} + R_F \left(C_F + \frac{C_T}{A_0} \right)} \quad (2.12)$$

Prilikom izvođenja relacija (2.11) i (2.12), uzeto je u obzir da je kapacitivnost kompenzacionog kondenzatora C_F mnogo manja od kapacitivnosti fotodiode C_{PD} , $C_{PD} \gg C_F$, kao i da je jednosmjerno pojačanje operacionog pojačavača A_0 dovoljno veliko, $A_0 \gg 1$. Može se uočiti da je frekventni opseg ograničen kapacitivnošću fotodiode C_{PD} , kao i da je frekventni opseg utoliko manji ukoliko je vrijednost transimpedanse $T=R_F$ veća. Optimalna vrijednost kompenzacione kapacitivnosti C_F može se dobiti iz uslova $Q < 1/\sqrt{2}$ [30]. Naime, za stabilan sistem potrebno je izabrati:

$$C_F > \sqrt{\frac{2C_T}{A_0 \omega_b R_F}} - \frac{C_T}{A_0} - \frac{1}{A_0 \omega_b R_F} \quad (2.13)$$

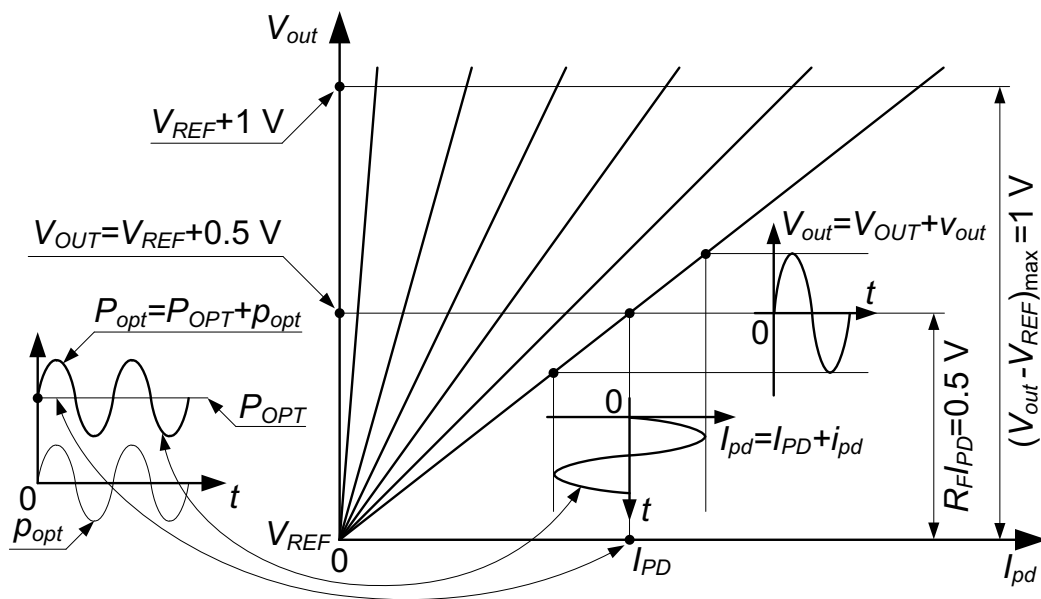


Slika 2.2 Optički prijemnik sa fiksnom transimpedansom sa kompenzacionim kondenzatorom.

Dakle, stabilnost optičkog prijemnika se može ostvariti povoljnim odabirom kompenzacione kapacitivnosti C_F , čime se neće ugroziti frekventni opseg optičkog prijemnika (2.11) ukoliko je kompenzaciona kapacitivnost C_F (2.13) mnogo manja od kapacitivnosti fotodiode C_{PD} .

2.2 Optički prijemnici sa promjenljivom transimpedansom

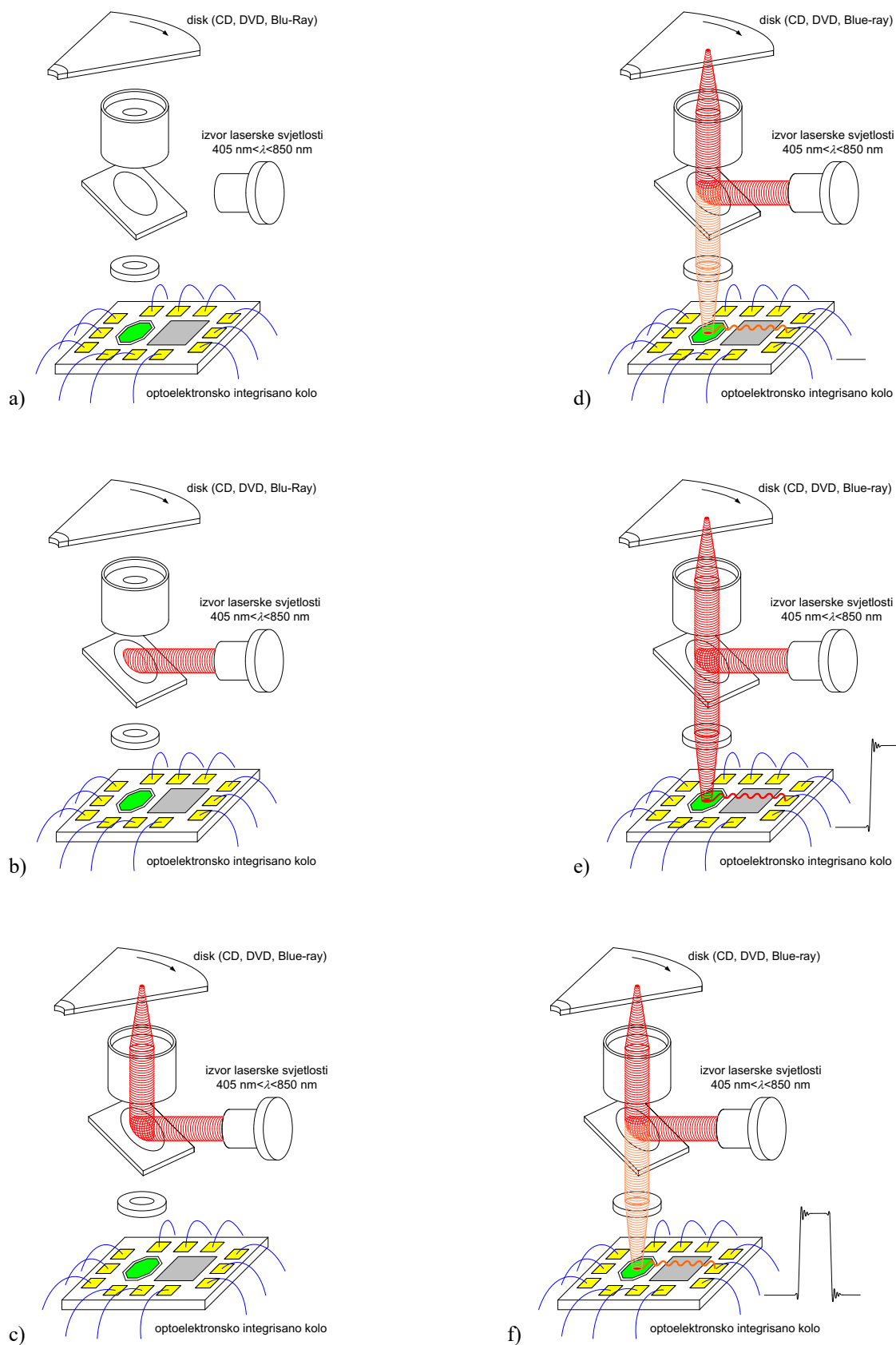
Potreba za optoelektronskim kolima sa promjenljivom transimpedansom (pojačanjem) postala je naročito izražena sa pojavom prvih optičkih prijemnika u sklopu optičkih memorija kao što su CD, DVD i Blu-Ray. Zavisnost izlaznog napona V_{out} optičkog prijemnika sa promjenljivom transimpedansom od struje fotodiode I_{pd} sa odgovarajućom optičkom snagom upadne laserske svjetlosti prikazana je na slici 2.3. Ukupna optička snaga P_{opt} laserske svjetlosti reflektovane sa površine optičkog diska za skladištenje podataka data je kao $P_{opt}=P_{OPT}+p_{opt}$, gdje je P_{OPT} jednosmjerna komponenta optičke snage, dok je p_{opt} naizmjenična komponenta optičke snage. Pozitivna jednosmjerna komponenta optičke snage uvijek postoji, bez obzira na to da li ukupna optička snaga odgovara logičkoj “0” ili logičkoj “1” na površini optičkog diska. Vremenski dijagram ukupne optičke snage laserske svjetlosti reflektovane sa površine optičkog diska za skladištenje podataka, prikazan na slici 2.3, odgovara digitalnoj sekvenci “1010”. Logičkoj “1” odgovara laserska svjetlost čija je ukupna optička snaga P_{opt} u granicama $P_{opt}>P_{OPT}>0$, dok logičkoj “0” odgovara laserska svjetlost čija je ukupna optička snaga P_{opt} u granicama $0<P_{opt}<P_{OPT}$. Talasni oblik dijagrama optičke snage zavisi od dimenzija polja i udubljenja na površini optičkog diska. Ukupna struja fotodiode I_{pd} data je kao $I_{pd}=I_{PD}+i_{pd}$, gdje je I_{PD} jednosmjerna komponenta struje fotodiode koja odgovara jednosmjernoj komponenti P_{OPT} optičke snage, dok je i_{pd} naizmjenična komponenta struje fotodiode koja odgovara naizmjeničnoj komponenti p_{opt} optičke snage. S obzirom da jednosmjerna komponenta optičke snage P_{OPT} uvijek postoji, jednosmjerna komponenta struje fotodiode I_{PD} , takođe, uvijek postoji. Ukupni izlazni napon V_{out} optičkog prijemnika dat je izrazom $V_{out}=V_{OUT}+v_{out}$, gdje je V_{OUT} jednosmjerna komponenta i v_{out} naizmjenična komponenta izlaznog napona. Nagib karakteristika zavisnosti izlaznog napona V_{out} optičkog prijemnika sa promjenljivom transimpedansom od struje fotodiode I_{pd} odgovara transimpedansi T optičkog prijemnika $T=dV_{out}/dI_{pd}=v_{out}/i_{pd}$. Jasno je da većim



Slika 2.3 Zavisnost izlaznog napona V_{out} optičkog prijemnika sa promjenljivom transimpedansom od struje fotodiode I_{pd} sa odgovarajućom optičkom snagom upadne laserske svjetlosti P_{opt} .

transimpedansama $T=dV_{out}/dI_{pd}=v_{out}/i_{pd}$ optičkog prijemnika odgovara manja jednosmjerna struja fotodiode I_{PD} , i obratno, što je u skladu sa relacijom (2.2). Slično kao i kod optičkih prijemnika sa fiksnom transimpedansom, i kod optičkih prijemnika sa promjenljivom transimpedansom postoji referentni napon V_{REF} . Maksimalna razlika između ukupnog izlaznog napona V_{out} i referentnog napona V_{REF} mora biti jednaka za sve transimpedanse [3]. Kako bi se ostvario maksimalan opseg izlaznog napona $(V_{out}-V_{REF})_{max}$ (obično reda 1 V), transimpedansa transimpedansnog pojačavača mora biti promjenljiva u širokom opsegu. Jednosmjerni izlazni napon mora se nalaziti u sredini ukupnog radnog opsega izlaznog napona $V_{REF}<V_{out}<V_{REF}+1\text{ V}$ kako bi se na izlazu dobio signal maksimalne amplitude bez izobličenja. Dakle, jednosmjerna vrijednost napona na izlazu je $V_{OUT}=V_{REF}+0.5\text{ V}$ za svaku transimpedansu. Drugim riječima, razlika između jednosmjernog izlaznog napona V_{OUT} i referentnog napona V_{REF} je $V_{OUT}-V_{REF}=0.5\text{ V}$ za svaku transimpedansu.

Na slici 2.4 je prikazan osnovni princip čitanja podataka sa optičkog diska. Laserski snop od izvora, preko ogledala/propusnika koje usmjerava svjetlost ka disku i sistema za fokusiranje, pada na optički disk. Odbijeni laserski snop se preko ogledala/propusnika i sistema za fokusiranje usmjerava na fotodiodu optičkog prijemnika. Intenzitet svjetlosti odbijene od optičkog diska se razlikuje, u zavisnosti od toga da li je u pitanju logička “1” ili logička “0”. Samim tim, i struja fotodiode ima različitu vrijednost, pa optički prijemnik na svom izlazu daje odgovarajući naponski nivo za slučaj logičke “1” i logičke “0”.



Slika 2.4 Postupak čitanja podataka sa optičkog diska.

Posljednjih godina prisutan je trend realizacije univerzalnih optičkih memorija. Pod univerzalnom optičkom memorijom podrazumijeva se optoelektronsko integrisano kolo koje ima sposobnost obavljanja širokog spektra različitih radnih operacija kao što su:

- Rad pri različitim talasnim dužinama laserske svjetlosti: $\lambda=780$ nm (infracrvena svjetlost) za CD, $\lambda=660$ nm (crvena svjetlost) za DVD, $\lambda=405$ nm (plava svjetlost) za Blu-Ray,
- Rad u modovima čitanja i pisanja podataka,
- Rad sa višeslojnim diskovima.

Transimpedanski pojačavači moraju imati kapacitet da proizvedu dovoljno veliki analogni nivo logičke jedinice (obično oko 1 V) za različite talasne dužine laserske svjetlosti (infracrvena, crvena, plava), za operacije čitanja i upisa podataka, kao i za višeslojne diskove. Fotodioda za lasersku svjetlost različite talasne dužine, pri istoj optičkoj snazi upadne svjetlosti, proizvodi struje različitih intenziteta. Ovo je posljedica različitih osjetljivosti jedne iste fotodiode za različite talasne dužine svjetlosti. Za PIN fotodiode ove osjetljivosti se kreću od 0.1 A/W do 0.5 A/W, u zavisnosti od talasne dužine laserske svjetlosti. Da bi se na izlazu optičkog prijemnika dobio isti analogni nivo logičke jedinice za laserske snopove različitih talasnih dužina, transimpedanski pojačavač mora imati različito pojačanje. Intenzitet laserske svjetlosti prilikom upisa podataka u optoelektronsku memoriju je značajno veći od intenziteta laserske svjetlosti prilikom čitanja podataka. Ovo je uzrokovano činjenicom da je prilikom upisa podataka potrebno istopiti (*burn*) oblast submikronskih dimenzija na površini diska djelovanjem laserskog snopa. Istovremeno sa procesom upisivanja podataka obavlja se i proces čitanja podataka na bazi laserskog snopa reflektovanog od površine diska koji pada na fotodiodu. Kako je optička snaga odbijenog laserskog snopa u modu upisa podataka mnogo veća od optičke snage odbijenog laserskog snopa u modu čitanja podataka, pojačavač u modu upisa podataka mora smanjiti svoju transimpedansu kako bi se na izlazu dobio isti analogni nivo logičke jedinice. Intenzitet laserske svjetlosti odbijene od unutrašnjeg sloja je značajno manji od intenziteta laserske svjetlosti odbijene od spoljašnjeg sloja diska. Da bi se dobio isti analogni nivo logičke jedinice na izlazu optičkog prijemnika prilikom čitanja podataka sa unutrašnjeg sloja, pojačavač mora povećati svoju transimpedansu. Dakle, transimpedanski pojačavači treba da posjeduju široko kontrolabilna pojačanja kako bi mogli da zadovolje zahtjeve univerzalnih optičkih memorija. Drugim riječima, optički prijemnici sa promjenljivim pojačanjem moraju zadovoljiti zahtjeve u pogledu što većeg dinamičkog opsega transimpedansi (odnos maksimalne i minimalne transimpedanse), odnosno, što većeg dinamičkog opsega foto-osjetljivosti (odnos maksimalne i minimalne foto-osjetljivosti). Postojeći optički prijemnici sa promjenljivom transimpedansom mogu se podijeliti u tri grupe:

- Sistemi sa otpornim mrežama,
- Sistemi sa strujnim pojačavačima sa promjenljivim pojačanjem,

- Sistemi sa naponom kontrolisanim otpornicima koji koriste kombinaciju strujnog i naponskog procesiranja.

2.2.1 Optički prijemnici sa otpornim mrežama

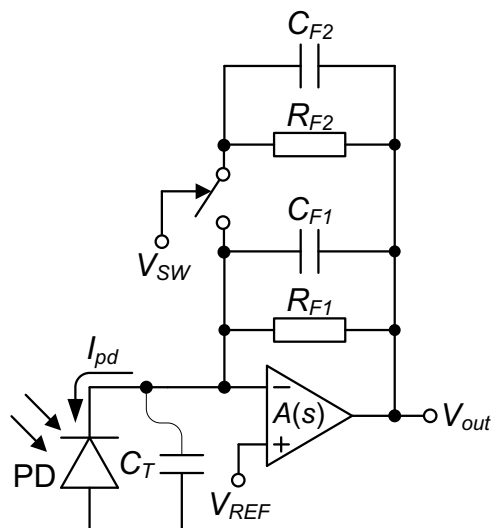
Optički prijemnici sa diskretnim vrijednostima transimpedansi na bazi prekidačkih tehnika [7], predstavljaju najstariji tip optoelektronskih kola sa promjenljivim pojačanjem, slika 2.5. Transimpedanski pojačavač se projektuje kao operacioni pojačavač sa mrežom fiksnih otpornika u grani negativne povratne sprege na čiji ulaz se dovodi struja fotodiode. Ova mreža sastoji se od paralelno vezanih otpornika, pri čemu se svaki pojedinačno može uključiti u kolo ili isključiti iz njega preko sistema bilateralnih CMOS prekidača. Na taj način se mijenja ekvivalentna otpornost u grani negativne povratne sprege koja je jednaka transimpedansi optičkog prijemnika (2.14).

Ovakvi sistemi imaju problem veoma izraženog uticaja kapacitivnosti fotodiode na frekventnu karakteristiku optičkog prijemnika. Naime, kao i u slučaju optičkih prijemnika sa fiksnom transimpedansom, u frekventnoj karakteristici se javlja maksimum čiji je intenzitet funkcija kapacitivnosti $C_T = C_{PD} + C_{OAI}$, pri čemu je C_{PD} kapacitivnost fotodiode i C_{OAI} ulazna kapacitivnost operacionog pojačavača. Suviše izražen maksimum frekventne karakteristike, odnosno, suviše veliki faktor Q prenosa karakteristike optičkog prijemnika, uzrokuje pojavu prekoračenja i oscilacija u vremenskom odzivu na pobudu odskočnog tipa. U cilju eliminisanja ove pojave vrši se frekvencijska kompenzacija primjenom kondenzatora paralelno vezanih otpornicima u grani negativne povratne sprege. Kapacitivnosti ovih kompenzacionih kondenzatora su funkcija ne samo kapacitivnosti fotodiode nego i transimpedanse optičkog prijemnika, relacija (2.13). Dakle, za različite transimpedanse (različit broj paralelno vezanih otpornika u grani negativne povratne sprege) potrebno je koristiti kompenzacione kondenzatore različitih kapacitivnosti. Ovi sistemi uglavnom posjeduju samo dvije transimpedanse: jednu (veću) kada je u granu negativne povratne sprege uključen samo jedan otpornik, i drugu (manju) kada su u granu negativne povratne sprege uključena dva paralelno vezana otpornika korišćenjem jednog bilateralnog CMOS prekidača:

$$T = \begin{cases} R_{F1}, & V_{SW} = 0 \\ R_{F1} \parallel R_{F2}, & V_{SW} = V_{DD} \end{cases} \quad (2.14)$$

Značajan problem predstavljaju parazitne kapacitivnosti samog bilateralnog CMOS prekidača koje u velikoj mjeri smanjuju frekventni opseg optičkog prijemnika.

Posebnu grupu čine optički prijemnici na bazi otpornih mreža kod kojih se transimpedansa mijenja aktiviranjem, odnosno, deaktiviranjem pojedinih otpornosti bez upotrebe prekidačkih tehnika. Prethodna funkcija se može ostvariti uvođenjem sistema za automatsku kontrolu pojačanja [4], [5], ili, odgovarajućom kombinacijom kontrolnih napona [6].



Slika 2.5 Tipični optički prijemnik sa diskretnim vrijednostima transimpedansi na bazi prekidačkih tehnika.

2.2.2 Optički prijemnici sa strujnim pojačavačima sa promjenljivim pojačanjem

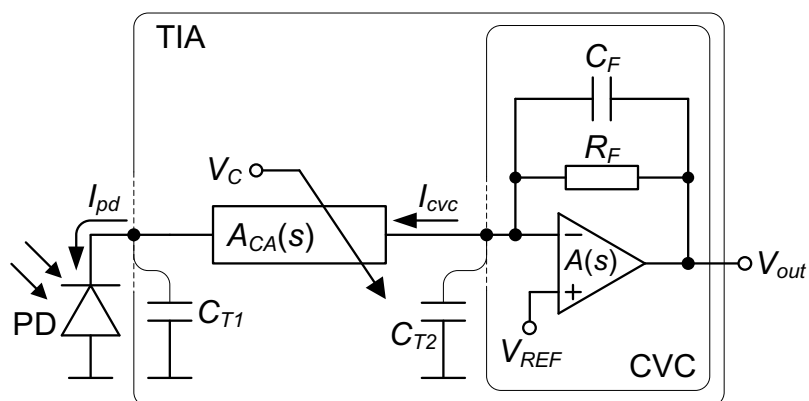
Kod ovog tipa optičkih prijemnika transimpedansni pojačavač se sastoji od strujnog pojačavača i konvertora struje u napon [12]-[16], slika 2.6. Strujni pojačavač CA (*Current Amplifier*) ima promjenljivo pojačanje A_{CA} koje je funkcija kontrolnog napona V_C , $A_{CA}=f(V_C)$. Konvertor struje u napon CVC (*Current-to-Voltage Converter*) sastoji se od operacionog pojačavača sa otpornikom R_F u grani negativne povratne sprege. Transimpedansa optičkog prijemnika je proporcionalna otpornosti u grani negativne povratne sprege operacionog pojačavača, a faktor proporcionalnosti jednak je pojačanju strujnog pojačavača:

$$T = \frac{V_{out} - V_{REF}}{I_{pd}} = \frac{I_{cvc}}{I_{pd}} \frac{V_{out} - V_{REF}}{I_{cvc}} = A_{CA} R_F, \quad (2.15)$$

gdje je:

$$A_{CA} = \frac{I_{cvc}}{I_{pd}} \quad (2.16)$$

pojačanje strujnog pojačavača. Zahvaljujući promjenljivom pojačanju strujnog pojačavača, i transimpedansa ovog tipa optičkog prijemnika je takođe promjenljiva. Kapacitivnost C_{T1} predstavlja sumu kapacitivnosti fotodiode C_{PD} i ulazne kapacitivnosti strujnog pojačavača C_{CAI} , $C_{T1}=C_{PD}+C_{CAI}$. Kapacitivnost C_{T2} predstavlja sumu ulazne kapacitivnosti operacionog pojačavača C_{OAI} i izlazne kapacitivnosti strujnog pojačavača C_{CAO} , $C_{T2}=C_{OAI}+C_{CAO}$. Slično kao kod prethodnog tipa optičkih prijemnika, frekvencijska kompenzacija obavlja se umetanjem kondenzatora C_F u granu negativne povratne sprege operacionog pojačavača, paralelno otporniku R_F . S obzirom da se u grani negativne povratne sprege nalazi samo jedan otpornik fiksne



Slika 2.6 Optički prijemnik sa strujnim pojačavačem sa promjenljivim pojačanjem.

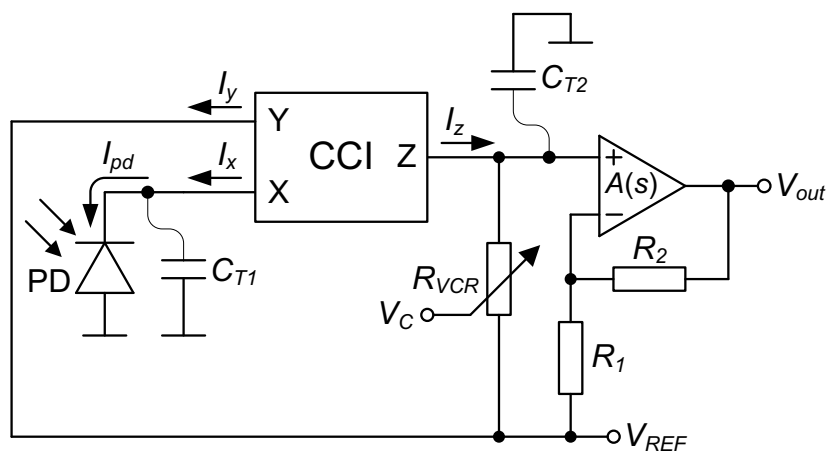
otpornosti, izbjegnuto je problem koji se javlja prilikom frekvencijske kompenzacije kod optičkih prijemnika na bazi prekidačkih tehnika. Međutim, i kod ovog tipa optičkog prijemnika veoma često je izražen problem značajnog uticaja kapacitivnosti fotodiode na frekventnu karakteristiku.

2.2.3 Optički prijemnici sa naponom kontrolisanim otpornicima koji koriste kombinaciju strujnog i naponskog procesiranja

Kod ovog tipa optičkih prijemnika transimpedanski pojačavač sastoji se od strujnog prenosnika [31]-[38], naponskog pojačavača i naponom kontrolisanog otpornika slika 2.7 [17]-[23]. Struja fotodiode I_{pd} se vodi direktno na strujni ulaz strujnog prenosnika, $I_x = I_{pd}$. Struja sa izlaza strujnog prenosnika I_z , koja je jednaka struji fotodiode, $I_z = I_x = I_{pd}$, vodi se u granu sa naponom kontrolisanim otpornikom R_{VCR} . Otpornost naponom kontrolisanog otpornika R_{VCR} je funkcija kontrolnog napona V_C , $R_{VCR} = f(V_C)$. Pad napona na naponom kontrolisanom otporniku se pojačava u naponskom pojačavaču. Transimpedansa ovog optičkog prijemnika proporcionalna je otpornosti naponom kontrolisanog otpornika, a faktor proporcionalnosti jednak je pojačanju naponskog pojačavača:

$$T = \frac{V_{out} - V_{REF}}{I_{pd}} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_{VCR}. \quad (2.17)$$

Kapacitivnost C_{T1} predstavlja sumu kapacitivnosti fotodiode C_{PD} i ulazne kapacitivnosti strujnog prenosnika C_X , $C_{T1} = C_{PD} + C_X$. Kapacitivnost C_{T2} predstavlja sumu ulazne kapacitivnosti operacionog pojačavača C_{OAI} , izlazne kapacitivnosti strujnog prenosnika C_Z i parazitne kapacitivnosti naponom kontrolisanog otpornika C_{VCR} , $C_{T2} = C_{OAI} + C_Z + C_{VCR}$. Optički prijemnici sa naponom kontrolisanim otpornicima koji koriste kombinaciju strujnog i naponskog procesiranja rješavaju problem negativnog uticaja kapacitivnosti fotodiode na frekventnu karakteristiku. Naime, izborom strujnog prenosnika dovoljno male ulazne otpornosti na strujnom priključku, pol koji formiraju kapacitivnost C_{T1} i ulazna otpornost strujnog prenosnika na strujnom priključku



Slika 2.7 Optički prijemnik sa naponom kontrolisanim otpornikom koji koristi kombinaciju strujnog i naponskog procesiranja.

ima veliku vrijednost, i nema nikakvog uticaja na frekventnu karakteristiku optičkog prijemnika ovog tipa.