

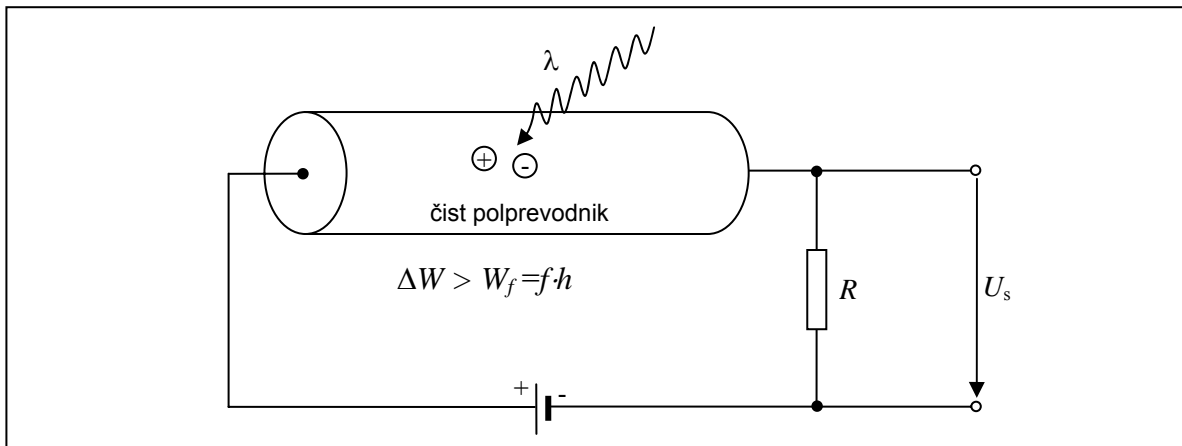
15. Sprejemniki svetlobe

15.1. Toplotni sprejemniki

Toplotni sprejemniki so izdelani kot črna telesa, ki pretvarjajo svetlobo v toploto. Odlikujeta jih velika točnost ($< 1\ \mu\text{m}$) in neodvisnost od valovne dolžine, vendar so zelo počasni in njihov odzivni čas znaša približno 1 ms. Njihova občutljivost je odvisna od hitrosti, saj izvajajo integracijo po času. Zaradi vseh teh lastnosti se uporabljajo v merilni tehniki kot merilniki energije v džulih (angl. joule - J) oziroma vatsekundah (Ws).

15.2. Fotoupori

Fotoupori so izdelani iz čistega polprevodnika. Fotoni, ki padejo na polprevodnik in je njihova energija W_f večja od energije prepovedanega pasu ΔW , podajajo elektrone iz valenčnega pasu v prevodni pas, kar povečuje prevodnost. Učinkovitost zaznavanja svetlobe je pri fotouporu odvisna od valovne dolžine. Slabost je potrebna visoka čistoča polprevodnika, ki narekuje točnost. Odziv je srednje hiter in znaša približno 1 μs , kar pogojuje življenjska doba parov elektron-vrzel. Če je fotoupor majhen, ima dober odzivni čas. Tudi občutljivost je odvisna od velikosti, pri čemer imajo veliki fotoupori slabo občutljivost, majhni pa srednjo občutljivost.



Slika 1: Fotoupor izdelan iz čistega polprevodnika.

15.3. Fotodiode

Fotodiode so naprave, ki spreminjajo svetlobni tok (tok fotonov) v električni tok (tok elektronov). Recimo, da je v določenem časovnem obdobju na fotodiodo prišlo N_f fotonov, ki so ustvarili N_e elektronov. Njuno medsebojno razmerje je definirano kot **kvantni izkoristek fotodiode**, ki se podaja v procentih, saj se vsi vpadni fotoni ne pretvorijo v elektrone.

$$\eta = \frac{N_e}{N_f} < 1. \quad (1)$$

Fotodiode, ki so v osnovi vakuumске ali polprevodniške, lahko delujejo v dveh režimih:

- Fotovoltaični način je zanimiv s stališča energetike pri fotocelicah.
- Fotouporovni način delovanja je zanimiv za telekomunikacije in ostale fizikalne meritve moči.

V sprejemniku telekomunikacijskega signala največkrat uporabimo fotodiodo v fotouporovnem režimu delovanja. V fotovoltaičnem režimu delovanja uporabljamo fotodiode samo, ko v sprejemniku nimamo na voljo električne energije za napajanje. Tipični primer take uporabe je »fiber-radio« sistem, pri katerem signal iz fotodiode neposredno prehaja na anteno. Vse bolj pa prihajajo v uporabo možnosti napajanja električnih vezij s pomočjo fotovoltaične pretvorbe oddanega optičnega signala ustreznih nekaj vatne izhodne moči.

15.3.1. Vakuumska fotodioda

Vakuumska fotodioda je steklena bučka brez prisotnosti plina v kateri se nahajata anoda, ki sprejema elektrone in katoda, ki oddaja elektrone. Ker elektroni na katodi po večini nastajajo z izbijanjem le-teh s pomočjo fotonov, jo imenujemo fotokatoda. Fotoni, ki vpadajo na fotokatodo, izbijajo elektrone, ki potujejo proti anodi in ustvarjajo električni tok, kot prikazuje slika 2.

Pojav izbijanja elektronov površine kovine na katero upada svetloba (elektromagnetno valovanje) imenujemo fotoefekt. Za fotoefekt je potrebna dovolj velika energija (frekvenca) svetlobe. Pojav je prvi opazil Heinrich Hertz leta 1887 pri poskusu s fotocelico, razložil pa ga je Albert Einstein leta 1905 in za to leta 1921 prejel Nobelovo nagrado.

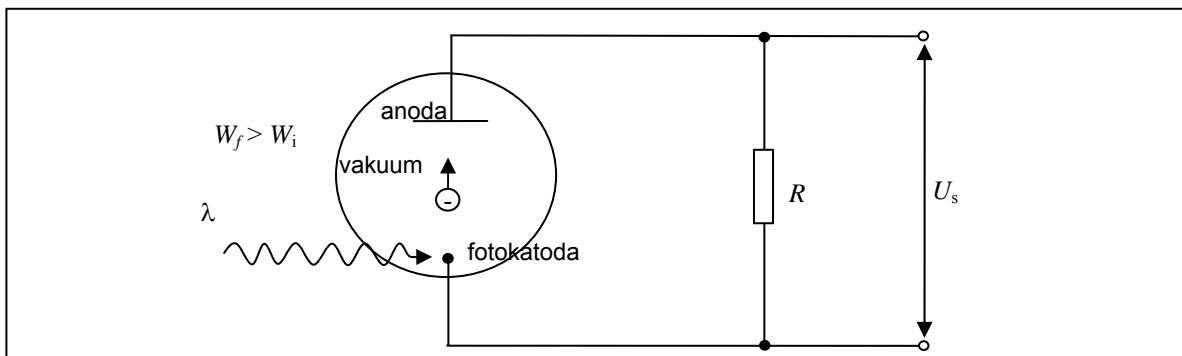
Primer:

Izračunaj koliko največ je lahko valovna dolžina fotona, da bo iz kovine izbil elektron.

($h=6,624 \cdot 10^{-34}$ Js, $c=3 \cdot 10^8$ m/s, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19}$ As).

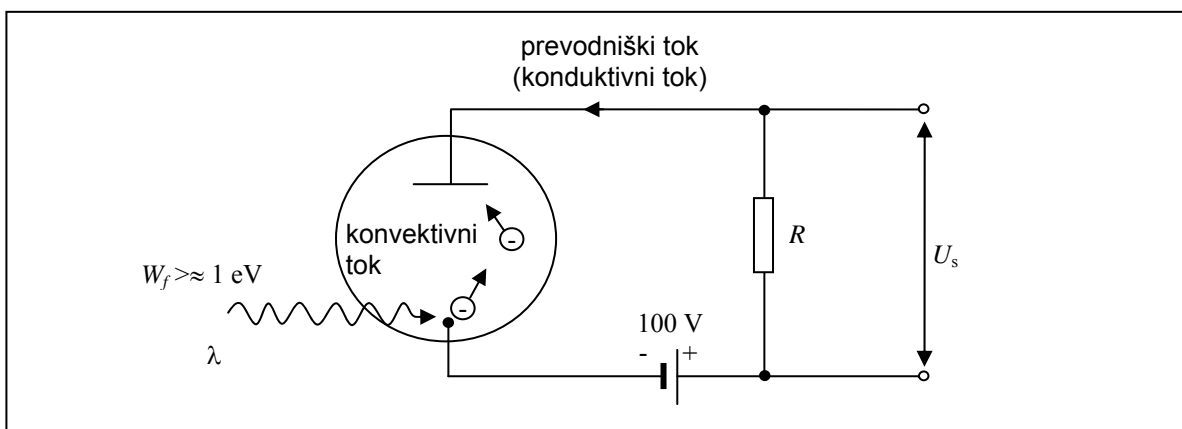
$$W_f = W_e \quad W_e = |Q_e|U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$$

$$f = \frac{W_e}{h} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} = 240 \text{ THz} \quad \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{240 \text{ THz}} = 1250 \text{ nm}$$



Slika 2: Vakuumska fotodioda v fotovoltaičnem načinu delovanja.

Napajalna napetost pri vakuumski fotodiodi v fotouporovnem režimu delovanja, ki ga prikazuje slika 3, znaša približno 100 V. Pri preveliki napajalni napetosti pride do preskokov elektronov brez prisotnosti svetlobe, kar imenujemo hladna emisija elektronov.

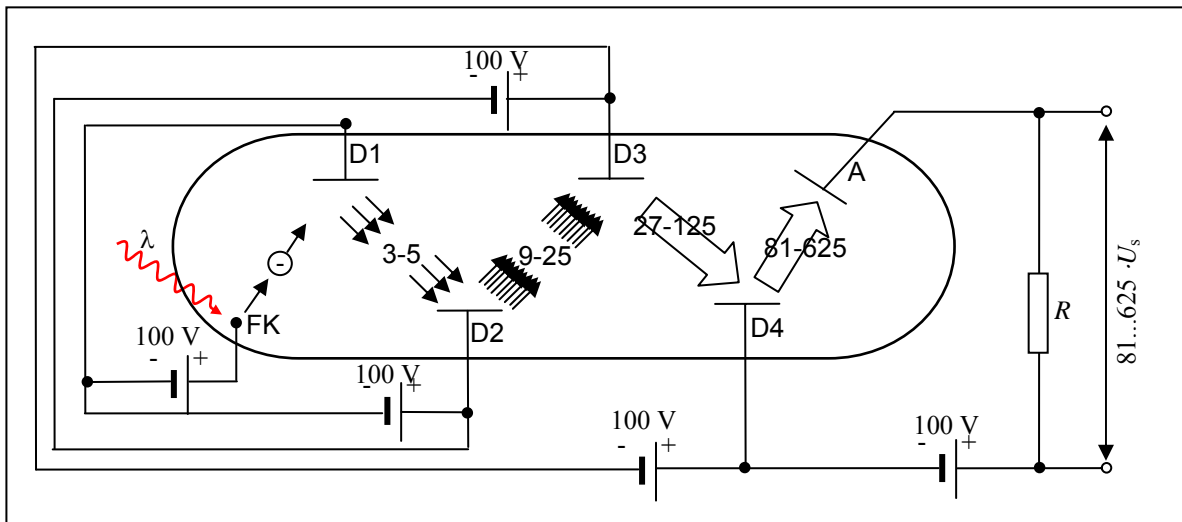


Slika 3: Vakuumska fotodioda v fotouporovnem režimu delovanja.

Vakuumska dioda ima pri modri svetlobi izkoristek 0,2. V bližnjem infrardečem področju (800 nm) je izkoristek manjši in znaša samo 1%. Pri višjih valovnih dolžinah je še nižji in za področje 1550 nm znaša samo 10^{-6} .

V fotodiodnem sprejemniku imamo konvektivni in konduktivni (prevodniški) tok. Delovanje obeh se lahko razloži s pomočjo cevi za vodo. Konduktivni oziroma prevodniški tok si lahko predstavljamo kot cev polno vode, ki ima hiter odziv. Pritisk se širi s hitrostjo zvoka v vodi, kar znaša 1,5 km/s. Konvektivni tok si lahko predstavljamo kot prazno cev, ki se mora šele napolniti, da začne voda brizgati na izhodu.

Kapacitivnost čuti samo prevodniški tok (cev polna vode ima veliko vztrajnost), zato želimo ojačati konvektivni tok preden se pretvori v prevodniški tok. To lahko naredimo s **fotopomnoževalko**, kot prikazuje slika 4. Sestavlja jo fotodioda (FK), od 9 do 14 dinod (D) in anoda (A). Proces ojačanja je naključen, zato dobimo dodaten zrnati šum. Slabost tega procesa je dolga pot konvektivnega toka, zato imamo slab odzivni čas $\tau \approx 1 \mu\text{s}$.



Slika 4: Vakuumska fotodioda v fotouporovnem režimu delovanja.

Primer:

Določite skupni faktor množenja elektronov M fotopomnoževalke, ki je opremljena s fotokatodo s kvantnim izkoristkom $\eta=0,2$! Na fotokatodo v eni sekundi vpade $N_f=10^6$ (milijon) fotonov rdeče svetlobe HeNe laserja ($\lambda=632,8 \text{ nm}$). Anoda fotopomnoževalke vleče električni tok $I_A=1 \text{ mA}$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$).

$$\eta = \frac{N_e}{N_f} \quad I_K = N_e |Q_e| = \eta N_f |Q_e|$$

$$M = \frac{I_A}{I_K} = \frac{I_A}{\eta N_f |Q_e|} = \underline{\underline{3,125 \cdot 10^{10}}}$$

Primer:

Fotopomnoževalka ima $N=10$ množilnih elektrod (dinod), ki v povprečju proizvedejo $M=4$ sekundarne elektrone za vsak vpadni elektron. Izračunajte vpadno svetlobno moč P na fotokatodo, ki ima pri valovni dolžini $\lambda=632,8 \text{ nm}$ kvantni izkoristek $\eta=0,2$, če znaša končni anodni tok $I_A=1 \text{ mA}$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$I_A = I_K M^N \quad I = \frac{dQ}{dt} \quad I_K = |Q_e| \frac{dN_e}{dt}$$

$$P = \frac{W}{t} \quad P = hf \frac{dN_f}{dt} = h \cdot \frac{c_0}{\lambda} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{dN_e}{dt} = \frac{hc_0}{\lambda \eta} \cdot \frac{I_a}{|Q_e| M^N} = \underline{\underline{9,36 \text{ nW}}}$$

15.3.2. Polprevodniške fotodiode

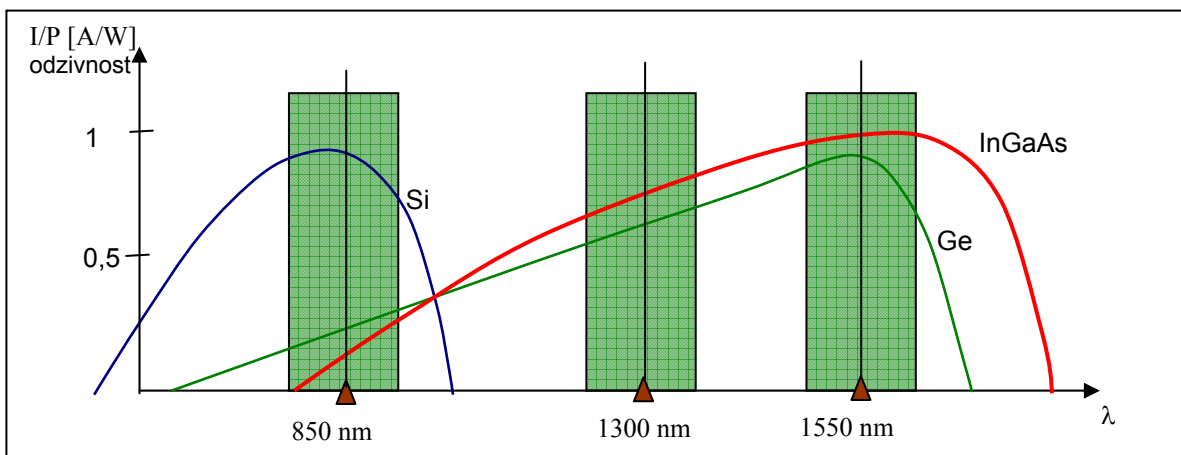
Edini praktično uporabni detektorji za pretvorbo svetlobnih telekomunikacijskih signalov v električne so fotodiode različnih vrst. Pri vseh ostalih pretvornikih imamo počasen odziv ali majhno občutljivost ali slabo razmerje signal/šum. Polprevodniška dioda ni sposobna pretvarjati fotone v elektrone, kadar je energija prepovedanega pasu ΔW večja od energije fotona. S tem je določena največja valovna dolžina, ki jo detektor še lahko zazna in ji pravimo mejna valovna dolžina. Ponavadi jo označimo z

Tipične materiale iz katerih se izdelujejo polprevodniške diode in njihovo odzivnost v odvisnosti od valovne dolžine prikazuje slika 5.

Silicij (Si), ki ima razmeroma velik prepovedan pas ΔW , kar pomeni, da je tovrstna fotodiode primerna za valovne dolžine pod 1,1 μm . Predvsem za valovno dolžino 850 nm se iz silicija izdelujejo odlične fotodiode.

Germanij (Ge), ki ima majhen prepovedan pas ΔW , kar pomeni, da imajo velik temni tok. Iz germanija se izdelujejo zelo dobre fotodiode za sprejemnike na 1300 nm, ki jih v skrajnih primerih lahko uporabljamo tudi za 1550 nm. Mejna valovna dolžina za germanij znaša okoli 1850 nm.

Polprevodniki skupin III in V, katerih tipični predstavnik je InGaAs. Pri le-teh lahko širino prepovedanega pasu ΔW nastavljam, kar pomeni, da lahko fotodiodo optimiziramo za katerokoli valovno dolžino med 1300 nm in 1550 nm.

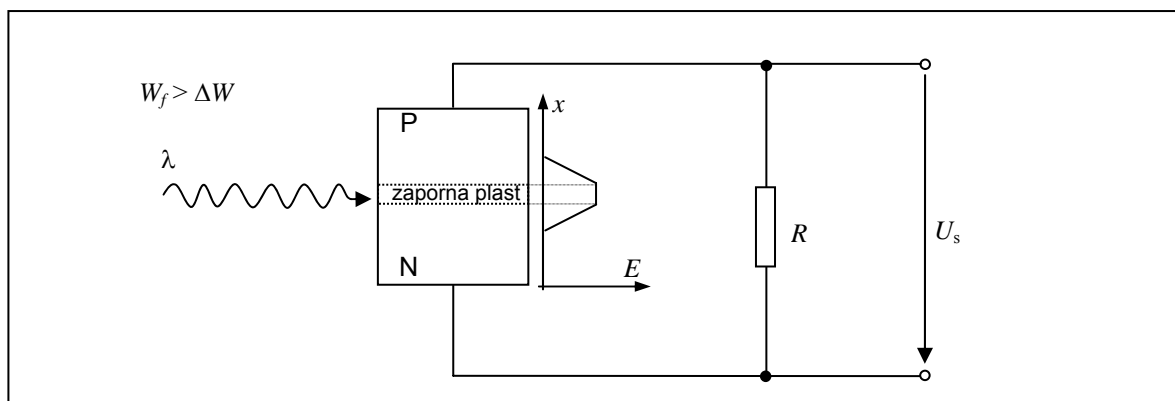


Slika 5: Odzivnost polprevodniške diode iz različnih materialov v odvisnosti od valovne dolžine.

Fotodiode je sestavljena iz dveh plasti polprevodnika z različnimi primesi, ki določajo tip polprevodnika. V tanki plasti med obema tipoma polprevodnika se prosti nosilci rekombinirajo, posledica pa je električno polje v tej plasti, ki ji pravimo tudi intrinzična plast. Kadar foton, katerega energija je večja od energije prepovedanega pasu, zadene intrinzično plast PN spoja v fotodiodi, povzroči prehod elektrona iz valenčnega pasu v prepovedan pas in s tem nastanek para elektron vrzel. Nastale nosilce električno polje v zaporni plasti potegne v ustrezni tip polprevodnika, kjer so na razpolago za prevajanje.

Če fotodiodo kratko sklenemo, v posameznem tipu polprevodnika zbrani prosti nosilci povzročijo tok skozi kratkostični spoj. Elektron se bo pod vplivom električnega polja gibal v smeri proti N-plasti, vrzeli pa v smeri P-plasti. Kratkostični tok je sorazmeren številu prostih nosilcev, ta pa svetlobnemu toku, ki pada na diodo. Z merjenem toku skozi kratko sklenjeno fotodiodo torej merimo svetlobni tok. Tak način delovanja imenujemo fotovoltajčni (angl. photovoltaic mode) in je prikazan na sliki 6.

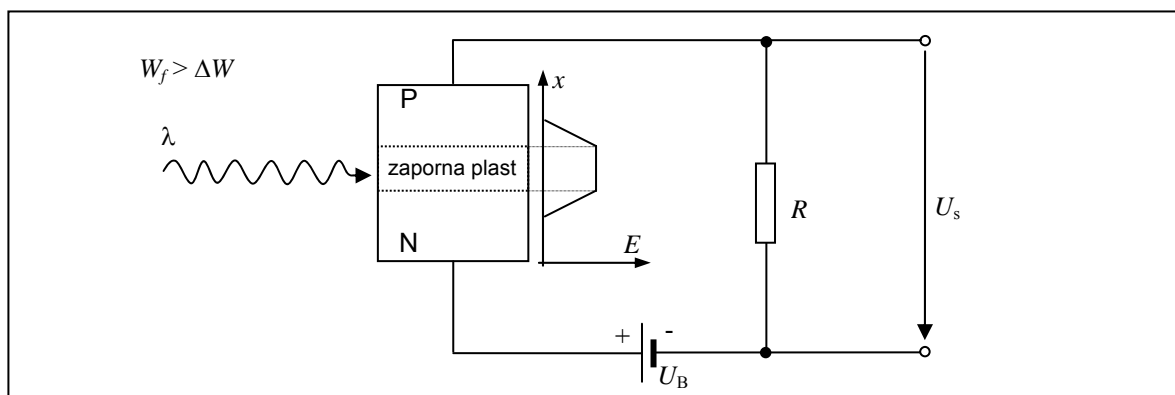
Na sliki 6 je uporabljen merilnik napetosti z vzporedno vezanim uporom R . Upor moramo izbrati tako, da padec napetosti na njem ni znaten v primerjavi s padcem napetosti na diodi (0,7 V). Pri upornosti 1 k Ω bomo zato lahko merili kratkostične tokove do 100 μA ; ti povzročijo padec napetosti do 100 mV na upor R , kar je dovolj malo.



Slika 6: Polprevodniška fotodiode v fotovoltaičnem načinu delovanja.

Na fotodiode lahko pritisnemo napetost v zaporni smeri, kot prikazuje slika 7. Zaradi pritisnjene napetosti tok ne teče, poveča pa se širina intrinzične plasti med obema tipoma polprevodnika. Foton, ki zadene to plast, sprosti naboje, ti pa povzročijo prevajanje fotodiode. Tok skozi fotodiode, na katero je pritisnjena zaporna napetost, je zato sorazmeren svetlobnemu toku skozi diode. Tak način delovanja je v imenujemo fotouporovni režim (angl. photoconductive mode). Ker v tem načinu delovanja proste nosilce naboja v intrinzični plasti pospešuje večje električno polje, je delovanja diode hitrejše.

Na sliki 7 je prikazano merjenje toka preko padca napetosti na upor R . Pri tem načinu merjenja lahko izberemo R , ki je mnogo večji od vrednosti, ki smo jo morali omejiti pri merjenju po prvem načinu. Paziti je treba le, da ostane padec napetosti na upor R manjši od napajalne napetosti U_B . Za dane vrednosti bi torej lahko merili tokove do največ $100 \mu\text{A}$, pri tem bi bil padec napetosti na R do 10 V . Merilno vezavo lahko uporabimo tudi takrat, ko želimo meriti z osciloskopom ali računalniškim vmesnikom, saj oba merilnika merita padec napetosti.



Slika 7: Polprevodniška fotodiode v fotouporovnem načinu delovanja.

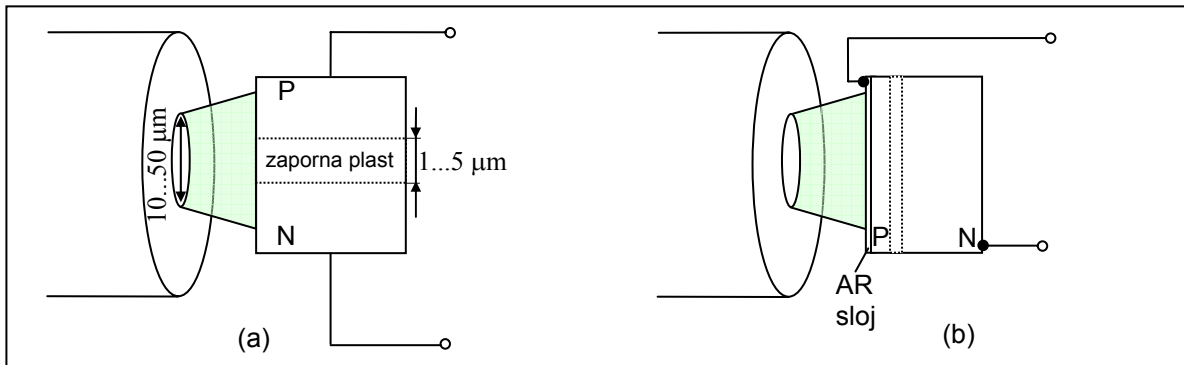
Baterijska napajalna napetost U_B pri polprevodniški fotodiode v fotouporovnem režimu delovanja znaša približno 10 V , kvantni izkoristek take fotodiode pa znaša med 50% in 90% . Sodobne fotodiode imajo visok kvantni izkoristek, običajno preko 80% .

Vse fotodiode za optične komunikacije se uporabljajo v zapornem režimu delovanja, kar pomeni, da imajo razmeroma debelo zaporno plast. Debela zaporna plast je povezana z izkoristkom, saj so fotoni, ki vpadajo izven zaporne plasti nekoristni, ker ne povzročijo povečanja toka skozi diode. Širino zapornega področja je tako ključen dejavnik, saj določa območje diode, ki se odziva na svetlobo.

Veliko zaporno področje ima tudi slabo lastnost. Z naraščanjem dimenzij zapornega področja se povečuje tudi čas, ki ga potrebujejo nosilci naboja, da preidejo zaporno plast (s tem se poslabša frekvenčna karakteristika fotodiode). Za PN-spoj je tako potrebno poiskati kompromis med velikostjo zapornega področja (velikost aktivnega področja) in hitrost odziva.

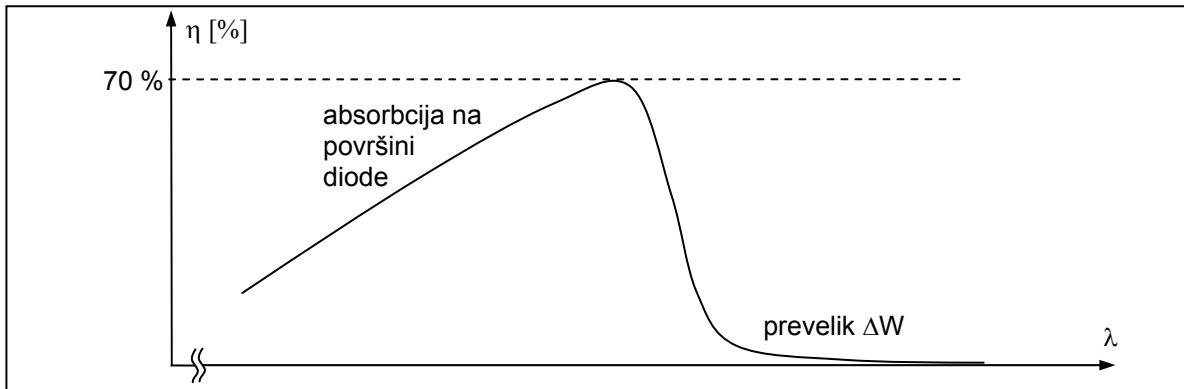
Izkoristek sklopa iz vlakna na fotodiode je odvisen od izvedbe fotodiode, kot prikazuje slika 8. V primeru, ki ga prikazuje slika 8a, imamo slab spoj, saj večina svetlobnega toka ne vpade na zaporno

plast. Veliko izgubljene svetlobe pomeni slab sklopni izkoristek. V primeru na sliki 8b je P plast zelo tanka, kar pomeni, da je prepovedan pas zelo blizu površine. Vpadni svetlobni tok v celoti pade na prepovedano področje, kjer ustvari nosilce naboja.



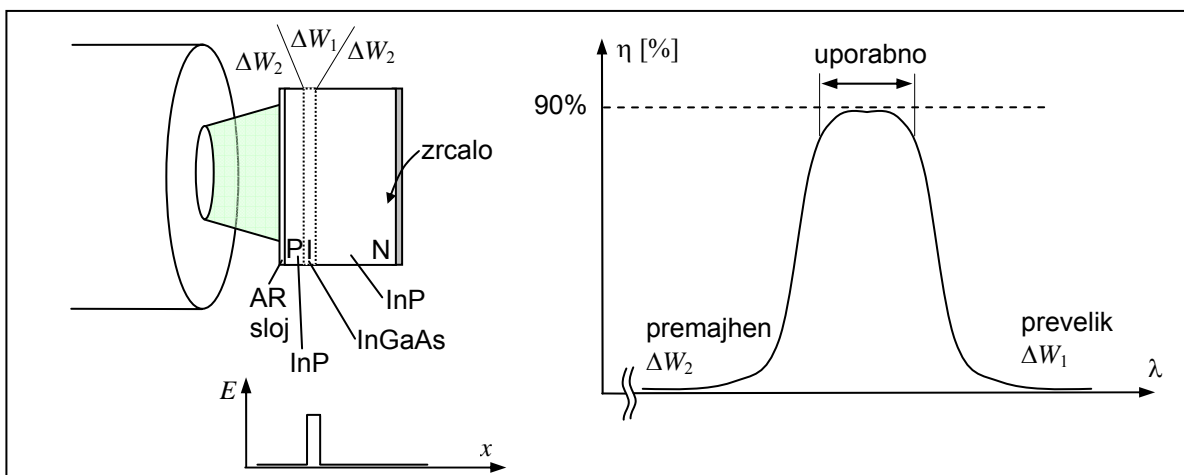
Slika 8: Izkoristek sklopa iz vlakna na fotodiode.

Kljub izredno tanki P plasti na površini diode prihaja v njej do nekoristne absorpcije svetlobe, saj so fotoni, ki vpadajo izven zaporne plasti nekoristni. Kot prikazuje slika 9, je izkoristek fotodiode pri nizkih valovnih dolžinah nizek zaradi absorpcije na površini diode. Pri nižjih valovnih dolžinah (večjih energijah) je absorpcija na površini še bolj izrazita.



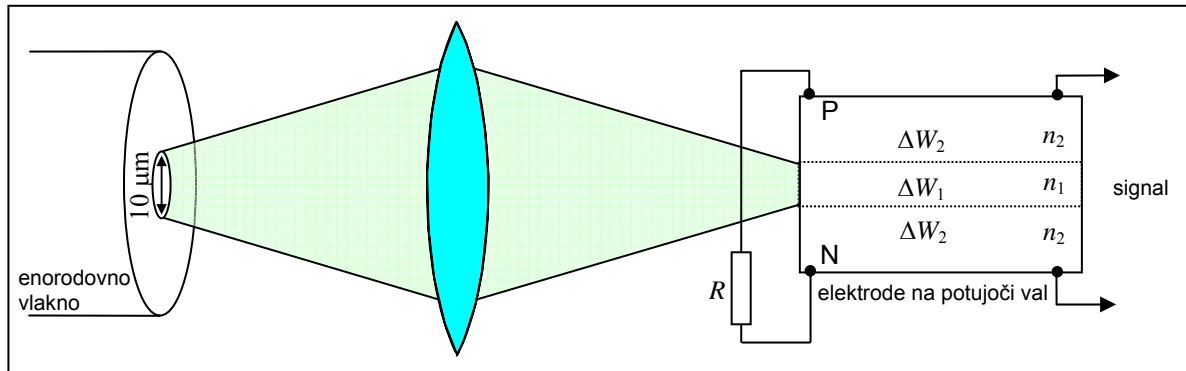
Slika 9: Absorbcija v fotodiodi.

Nekoristno absorpcijo na površini fotodiode preprečimo z izdelavo fotodiode v obliki heterostrukture, kot prikazuje slika 10. Pri tem pazimo, da izdelamo vrhno P-plast fotodiode iz polprevodnika, ki ima večji energijski pas kot je energijski pas v prepovedanem območju. $\Delta W_1 < \Delta W_f < \Delta W_2$. S tem je fotonom onemogočeno, da bi se absorbirali na vходу v fotodiode, preden pridejo do prepovedanega pasu. Izkoristek je s tem v vsem uporabnem pasu enako visok.



Slika 10: Zgradba fotodiode s heterostrukturo in karakteristika njenega izkoristka.

Pri visokih bitnih hitrostih želimo imeti fotodiodo z majhno kapacitivnostjo. Osnovana je kot elektrode na potujoči val, kar prikazuje slika 11.



Slika 11: Sklop na hitro fotodiodo s pomočjo leče.

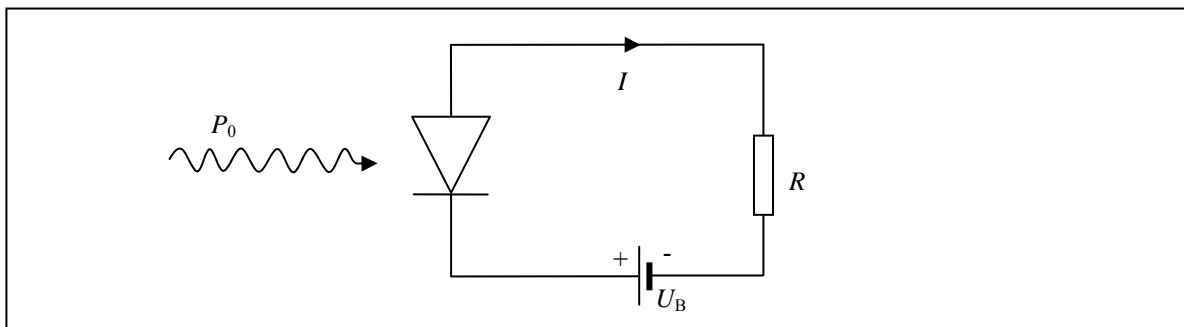
Odzivnost fotodiode se podaja kot razmerje električnega toka proti optični moči I/P z enoto $[A/W]$, kar prikazuje slika 12. Optična moč, ki je odvisna od števila fotonov, je

$$P_0 = W_f \frac{dN_f}{dt}, \quad (2)$$

pri čemer je energija fotona

$$W_f = h \cdot f, \quad (3)$$

kjer je Plankova konstanta $h=6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $h_s=6,625 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$.



Slika 12: Odzivnost polprevodniške fotodiode.

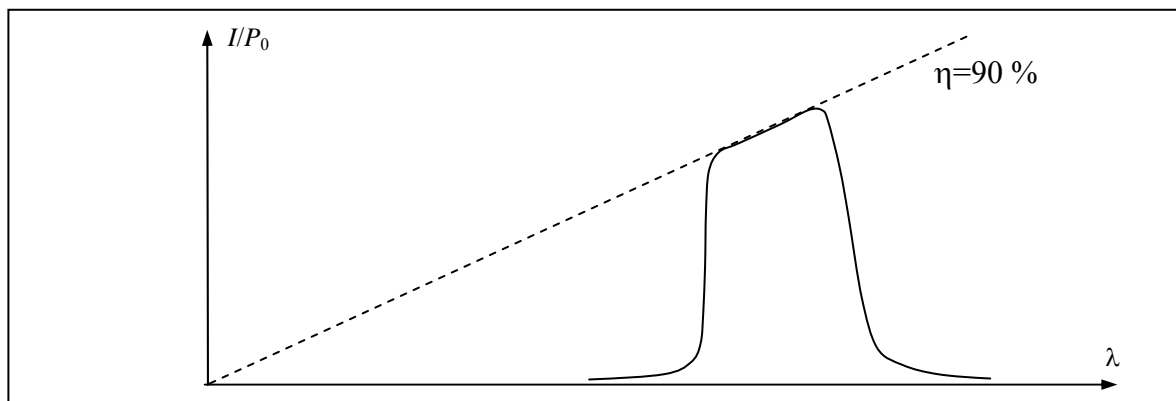
Električni tok je gibanje elektronov z nabojem Q_e , ki znaša $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$.

$$I = |Q_e| \frac{dN_e}{dt}, \quad (4)$$

Odzivnost fotodiode je premosorazmerna izkoristku in se potemtakem lahko izračuna kot

$$\frac{I}{P_0} = \frac{|Q_e| \frac{dN_e}{dt}}{hf \frac{dN_f}{dt}} = \frac{|Q_e|}{hf} \cdot \frac{dN_e}{dN_f} = \frac{|Q_e|}{hf} \cdot \eta = \eta \cdot \frac{|Q_e| \lambda}{hc_0} \quad (5)$$

in je praktično vedno manj kot 1. Odzivnost fotodiode je funkcija valovne dolžine I/P (λ), kot prikazuje slika 13. Za fotodiode v območju od $1,3 \mu\text{m}$ do $1,55 \mu\text{m}$ znaša odzivnost med $0,5 \text{ A/W}$ in 1 A/W . Fotodioda na potujoči val ima odzivnost približno $0,2 \text{ A/W}$.



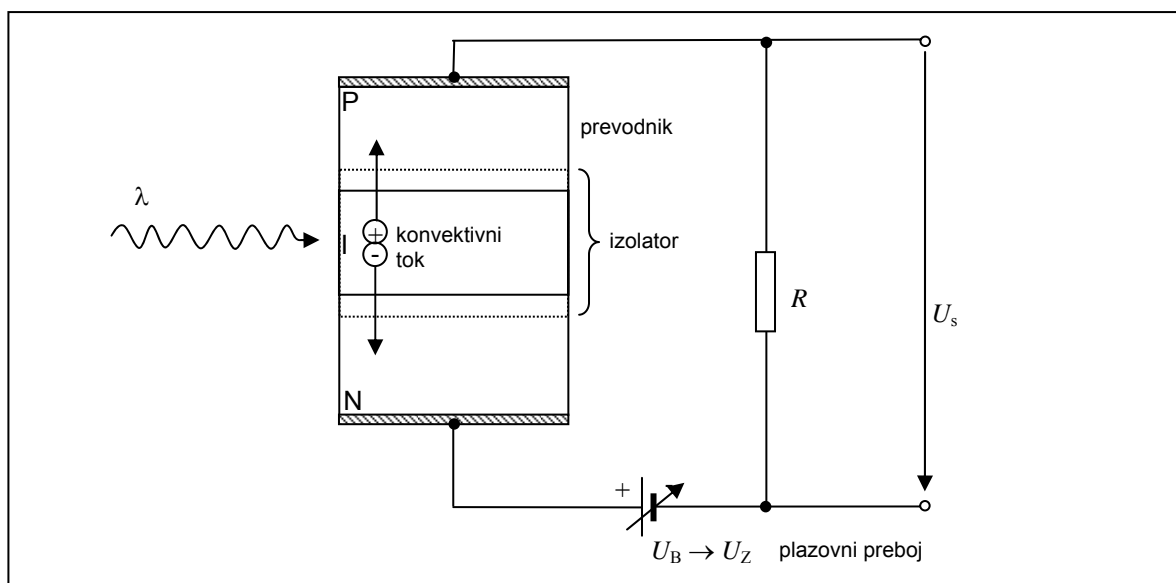
Slika 13: Odzivnost fotodiode kot funkcija valovne dolžine.

Primer:

Fotodiode iz InGaAs za valovno dolžino $\lambda=1300$ nm ima izkoristek $\eta=80$ %. Izračunajte odzivnost fotodiode I/P z enoto [A/W]!

$$\frac{I}{P_0} = \eta \cdot \frac{|Q_c| \lambda}{hc_0} = 0,8 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = \underline{\underline{0,83 \text{ A/W}}}$$

Občutljivost optičnih sprejemnikov najbolj omejuje šum električnega ojačevalnika, ki ojačuje signal s fotodiode. Občutljivost optičnega sprejemnika s fotodiode lahko izboljšamo edino tako, da se vhodni signal ojači preden se pretvori v električni tok zunaj diode (konduktivni tok). Tudi v polprevodnikih je mogoče konvektivni tok elektronov in vrzeli ojačati preden se spremeni v prevodniški (konduktivni) tok. Zaporna plast je izolator in po analogiji vakuumске diode ustreza vakuumu. Za namen ojačanja konvektivnega toka se izvede ojačevanje signala v sami fotodiode z uporabo plazovnega pomnoževanja nosilcev elektrine.



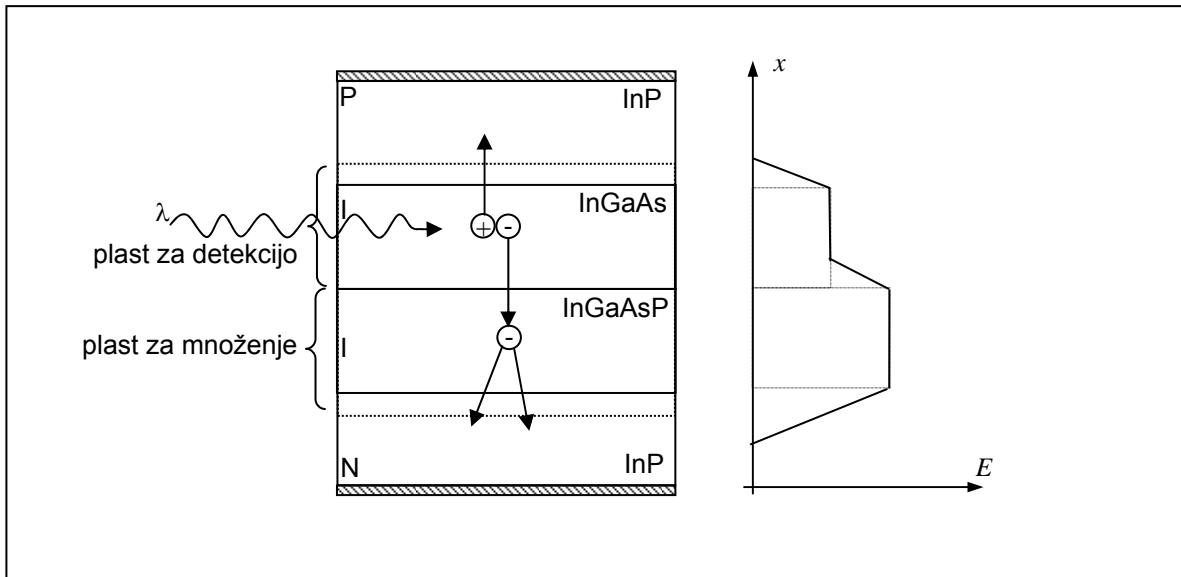
Slika 14: PIN fotodiode.

Žal predstavlja v polprevodniku povzročen plazovni preboj (plazovno ojačanje) dodaten izvor šuma. To je iz systemskega stališča ponovno slabo, saj pokvari razmerje signal šum sprejemnika. Dodaten izvor šuma lahko zmanjšamo, če izdelamo fotodiode iz 4 plasti, kot prikazuje slika 15. Pri tem je ločena plast za detekcijo od plasti za ojačanja. Fotodiode z vgrajenim plazovnim ojačenjem (angl. Avalanche Photo Detector - APD) je zato načrtovana tako, da se doseže čim večje ojačenje signala in proizvede čim manj šuma.

V plazovni fotodiodi je zaporna plast ločena na dva sloja:

- v zgornjem sloju pride do detekcije svetlobe;
- v spodnjem sloju pa do plazovnega ojačenja nosilcev elektrine.

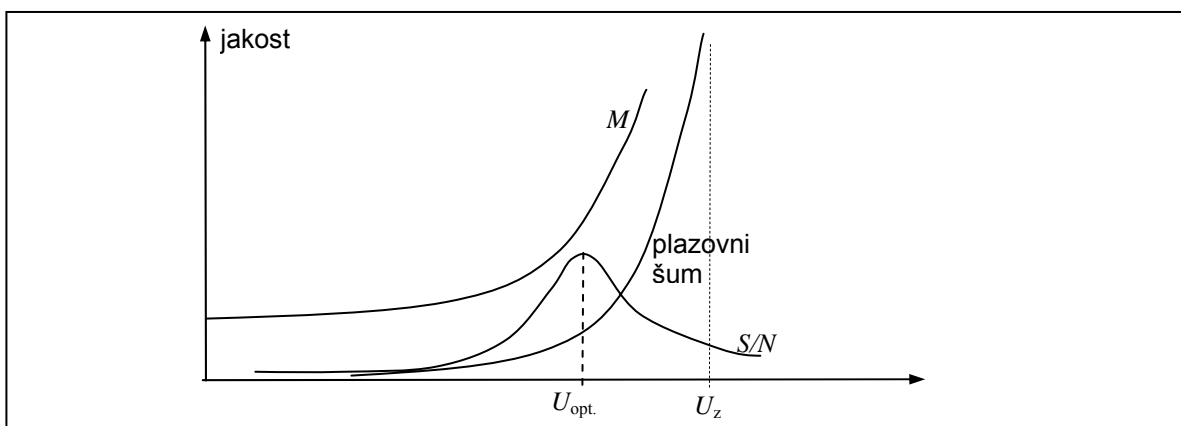
Ločitev detekcije od plazovnega ojačenja se doseže z uporabo različnih polprevodnikov v zaporni plasti. Takšna ločitev detekcije in plazovnega ojačenja omogoča boljše razmerje signal/šum, ker na ta način plazovni mehanizem ne ojačuje nekaterih virov temnega toka fotodiode, ki je posledica notranjih termičnih procesov.



Slika 15: Plazovna fotodioda.

Vrednost plazovnega ojačenja lahko nastavljamo tudi z zunanjo izbiro zaporne napetosti na fotodiodi. Faktor množenja narašča z naraščanjem zaporne napetosti, kot prikazuje graf na sliki 18. Še hitreje pa z večanjem zaporne napetosti narašča šum plazovnega preboja. Plazovni preboj vnese veliko šuma, zato je optimalna napetost pod mejo za plazovni preboj.

Slabost posebej izdelanega sloja za množenje je v tem, da poveča odzivni čas detekcije. Z APD lahko detektiramo samo signale, ki imajo bitni pretok manjši od 10 Gbit/s.



Slika 16: Graf razmerja S/N pri plazovni fotodiodi.

Silicij ima zelo primerno število fotonov, ki so potrebni za detekcijo enega bita, vendar na žalost na za telekomunikacije neuporabni valovni dolžini.

	M	$U_{\text{optimalna}}$	N_f/bit
Si	≈ 100	$\approx 100 \text{ V}$	60
Ge	≈ 10	$\approx 30 \text{ V}$	300
InGaAsP	≈ 20	$\approx 70 \text{ V}$	200

Slika 17: Tabela različnih snovi in njihovih lastnosti za plazovne fotodiode.

Primer:

Izračunajte faktor plazovnega ojačenja M fotodiode, ki daje pri vhodni svetlobni moči $P=1 \text{ mW}$ na valovni dolžini $\lambda=1,3 \text{ }\mu\text{m}$ električni tok $I=10 \text{ mA}$. Plazovna fotodiode ima brez pritisnjene zaporne napetosti kvantni izkoristek $\eta=0,6$. ($h=6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, $c_0=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $Q_e=-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}$)

$$P = \frac{dW_f}{dt} = hf \cdot \frac{dN_f}{dt} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{dN_f}{dt}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = |Q_e| \cdot \frac{dN_e}{dt} = M\eta|Q_e| \cdot \frac{dN_f}{dt} = M\eta|Q_e| \cdot \frac{P\lambda}{hc}$$

$$M = \frac{Ihc}{\eta|Q_e|P\lambda} = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ A} \cdot 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-3} \text{ W} \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = \underline{\underline{15,9}}$$