

Karakteristika Si fotodiode

Uvod

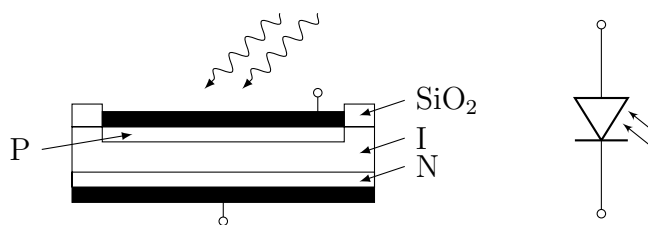
Svetlobo lahko zaznavamo na mnogo različnih načinov. Lahko merimo njene toplotne, kemične in seveda električne učinke, ki so v merilni tehniki najbolj praktični. Vsi našeti učinki so tudi uporabni, kadar želimo izkoriščati svetlobno (sončno) energijo.

Omejimo se le na električne učinke svetlobe in na interakcijo med svetlobnim poljem in elektroni v snovi. Temelje sodobnega razumevanja te interakcije sta postavila leta 1900 Planck in 1905 Einstein z razlago fotoefekta. Fotoefekt lahko delimo na notranji in zunanji, kjer pri prvem vzbujeni elektroni ostanejo v snovi, v kateri so nastali, pri zunanjem fotoefektu pa fotoelektroni zapustijo ta material. Notranji fotoefekt v polprevodnikih je uporaben predvsem za detekcijo infrardeče svetlobe. Boljše detektorje pa lahko dobimo, če vzbujene elektrone prostorsko ločimo od centrov, kjer so nastali, in tako preprečimo rekombinacijo. Tipičen primer je fotoefekt na katodi fotopomnoževalke. Energijsko bilanco zunanjega fotoefekta zapišemo kot

$$h\nu = W_{iz} + \frac{m_e v^2}{2}, \quad (1)$$

kjer je $h\nu$ energija svetlobnega kvanta, W_{iz} je izstopno delo, to je vezavna energija najrahlje vezanih elektronov v snovi, m_e je masa in v hitrost izbitega elektrona v vakuumu. Ker so minimalne vezavne energije elektronov okoli 1 eV, lahko detektiramo preko zunanjega fotoefekta le svetlobo z valovnimi dolžinami, krajšimi od 1000 nm.

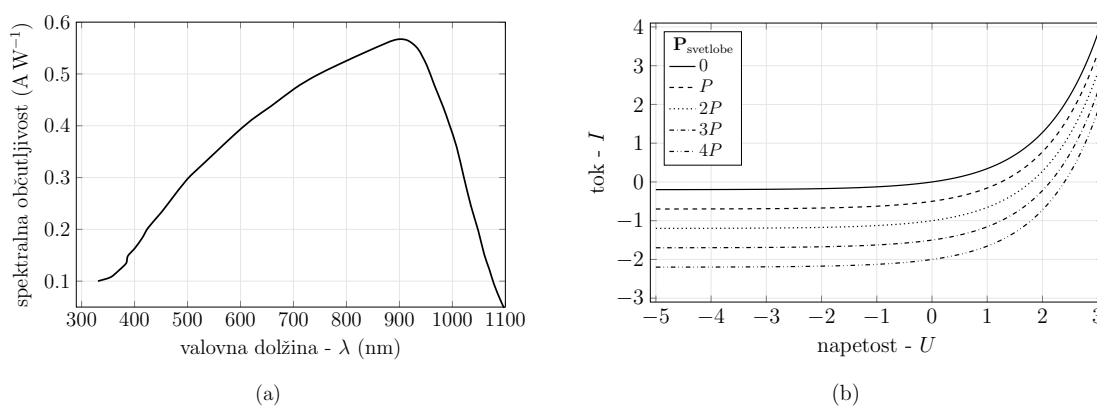
Silicijeva PIN fotodiode tudi izkorišča fotoefekt v nehomogenem sredstvu. Sestavljena je iz treh plasti, p-dopirane, n-dopirane in i -intrinzične, to je čim bolj čiste ali s kompenziranimi nečistočami, glej skico 1. Svetloba naj bi se absorbirala v i-plasti Si, kamor navadno vpada skozi čim tanjšo p-plast, okoli 1 mm debelo. Svetlobno občutljiva plast je običajno debela okoli 10 μ m, saj želimo veliko verjetnost za absorpcijo svetlobe v tej plasti. Absorbiran foton v i-plasti z verjetnostjo blizu 100 % tvori par elektron-vrzel. Notranje difuzijsko polje v tej plasti, ki pa je navadno še dodatno povečano z zunanjo pritisnjeno napetostjo, potegne elektron v n-plast in vrzeli v p-plast fotodiode, kar povzroči električni tok.



Slika 1: Skica PIN fotodiode.

Električni tok je torej direktna posledica svetlobnega (fotonskega) toka in zato je občutljivost fotodiode izražena s pretočenim električnim nabojem kot posledico absorpcije enega fotona (število el. nabojev)/(število abs. fotonov) v kar širokem področju (tipično 300 nm do 900 nm) konstantna in enaka približno 0.9 osnovnega naboja (temu običajno rečemo 90 % kvantni izkoristek). Izkoristek fotodiode za opravljanje dela pa je največ

nekaj 10 %. Trenutne (leta 2020) najefektivnejše fotocelice dosegajo 47 % [1], ki pa so po sestavi mnogoplastne. Spektralna občutljivost fotodiode izražena kot kvocient med električnim tokom in močjo vpadne svetlobe pri določeni valovni dolžini pa kaže v tem istem področju linearno naraščanje z valovno dolžino, kakor kaže slika 2a. Odstopanja v ultravijoličnem delu karakteristike so posledica povečane absorpcije in s tem večje verjetnosti nekoristne tvorbe para v p-plasti. Na zgornji meji spektra začne občutljivost padati zaradi zmanjševanja absorpcije in končno premajhne energije fotonov v primerjavi z energijsko režo Si. Za meritve svetlobe uporabljamo fotodiodo večinoma v fotoprevodnem načinu, to je nanjo pritismo napetost v zaporni smeri in merimo tok. V tem načinu je fotodioda izvrsten *linearen detektor svetlobe*, kot se tudi vidi na sliki 2b. Če ne uporabimo zunanje napetosti je linearnost slaba in to tem bolj, čim več električne moči črpamo iz fotodiode. Kadar pa hočemo fotodiodo uporabiti kot vir električne moči, je njena karakteristika zelo nelinearna.



Slika 2: (a) Spektralna občutljivost tipične fotodiode. (b) Karakteristika $I(U)$ fotodiode. Večja osvetljenost povzroči večji tok v zaporni smeri. V kvadrantu odvisnosti $I(U)$ z negativnim tokom in pozitivno napetostjo oddaja fotodioda električno moč. Skrajnima odvisnostima, eni z $U = 0$ V in drugi z $I = 0$ A, rečemo fotogalvanski način oziroma fotovoltaični način delovanja.

Potrebščine

- fotodioda v ohišju, svetleča dioda za osvetljevanje
- digitalna multimetra Agilent DMM 34410a (voltmeter) in Siglent SDM3065X (ampermeter), tokovni in napetostni izvor
- zunanje breme - potenciometer

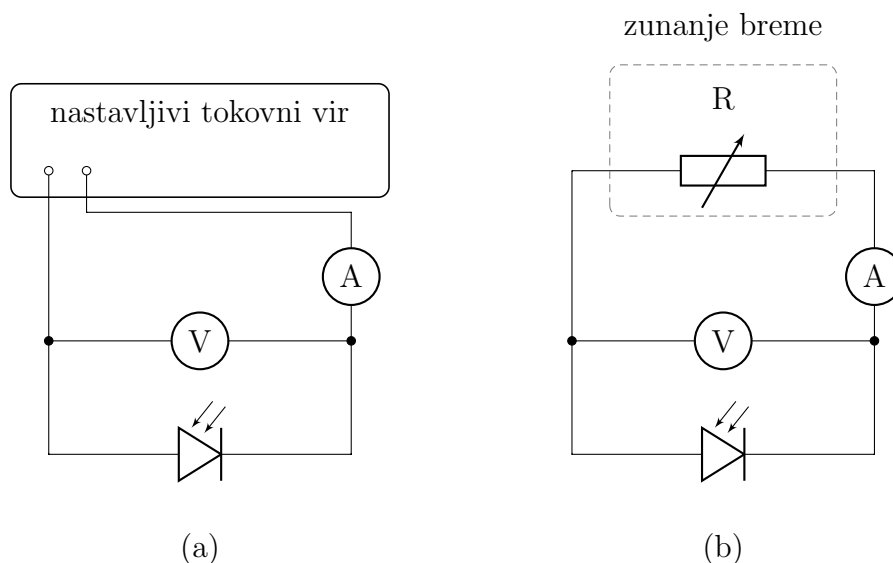
Naloga

1. Izmeri električno karakteristiko $I(U)$ fotodiode v temi in pri različnih osvetlitvah. Meri v obeh načinih, z zunanjim napajanjem, kjer lahko izmeriš celotno karakteristiko, in v fotogalvanskem načinu, kjer je možna meritev le v enem kvadrantu odvisnost $I(U)$.

2. Nariši en sam graf odvisnosti $I(U)$, kjer je parameter osvetljenost fotodiode, za vse meritve z zunanjim napajanjem in posebej še za meritve v fotogalvanskem načinu. Iz diagrama v fotogalvanskem načinu določi, kolikšne upore bi morali priključiti na fotodiodo ob uporabljenih osvetlitvah, da bi se na uporih trošila kar največja električna moč.
3. Oцени izkoristek svetleče diode (LED), ki jo uporabljaš kot svetlobni izvor.

Navodila

A. Priključi komponente po shemi na sliki 3a in 4. Za osvetljevanje pri tej vaji niso primerne luči na izmenični tok, ker njihova svetilnost utripa s 100 Hz. Zato uporabimo tukaj svetlečo diodo, ki jo preko ustreznega upora priključimo na enosmerno napetost.



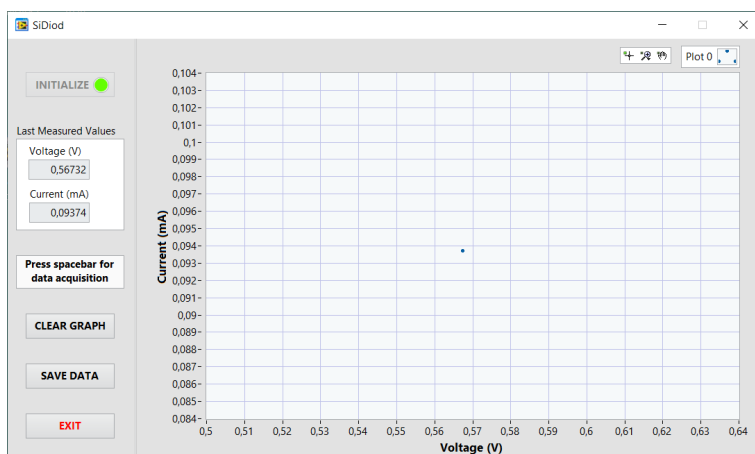
Slika 3: (a) Meritev karakteristike $I(U)$ fotodiode z zunanjim tokovnim generatorjem. (b) Meritev s fotodiodo, kot edinim generatorjem toka.



Slika 4: Vezava voltmetra (levo, Agilent DMM 34410a) in ampermetra (desno, Siglent SDM3065X).

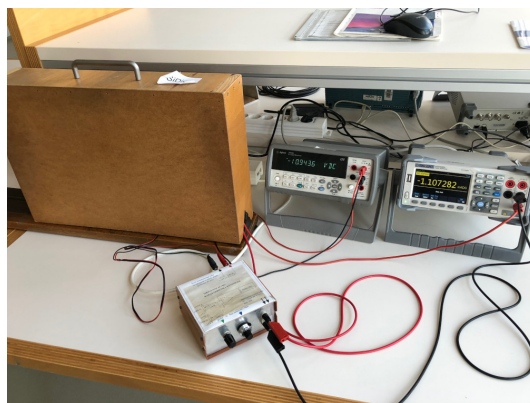
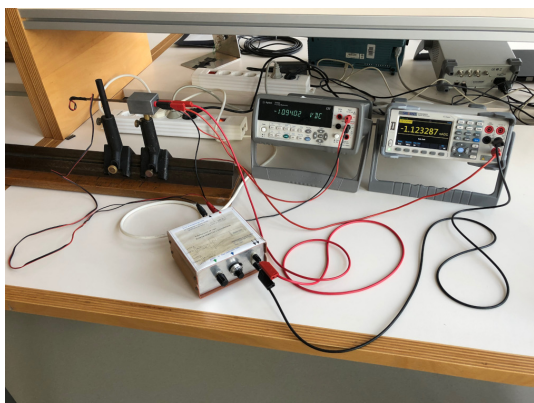
Poskrbi, da te ne bo motila okoliška svetloba, zato prekrij izvor in detektor s pokrovom. Tok skozi fotodiodo spreminjaš v primernih korakih najprej s pomočjo potenciometra na tokovnem izvoru. Za zajemanje meritev toka in napetosti uporabi program **SiDiod**, ki ga najdeš na namizju uporabnika **student** z geslom **praktikum2** na prenosniku ob vaji. Slika 5 prikazuje okno programa za zajem meritev.





Slika 5: Program **SiDiod** za zajem meritev toka in napetosti na silicijevi fotodiodi.

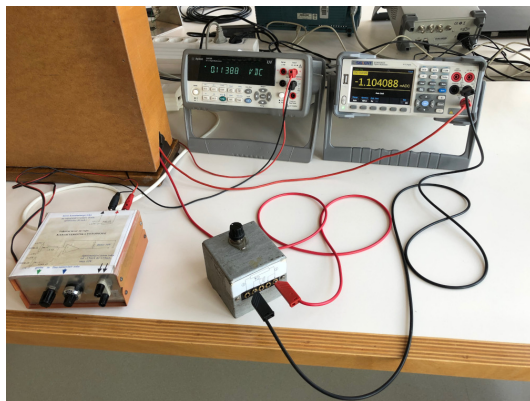
Najprej priključi USB razdelilec na USB vhod prenosnika. Poskrbi, da sta USB kablja iz obeh digitalnih multimetrov priključena na USB razdelilec. Sedaj lahko pričneš z inicializacijo s pritiskom na gumb **Initialize**. Med postopkom se bodo avtomatično izvedle ustrezne nastavitve obeh multimetrov, morebiti se bodo slišali tudi vgrajeni releji (preklopniki). Ko se rdeča oznaka v gumbu obarva zeleno, lahko pričneš z zajemanjem podatkov. Ob vsakem pritisku na preslednico (spacebar) se bo izvedlo branje meritev na obeh multimetrih ter prikaz na grafu programa. Spremeni nekoliko tok napajanja ter ponovno pritisni na preslednico. Tako ponavljaš dokler ne pomeriš celotne $I(U)$ karakteristike. S pritiskom na gumb **Save Data** se bodo podatki prikazani na grafu, tok I (mA) in napetost U (V), shranili v privzeto mapo na namizju prenosnika imenovano **SiDiod**. S pomočjo gumba **Clear Graph** izbrišeš trenutno prikazane meritve na grafu.



Slika 6: Meritev $I(U)$ karakteristike Si fotodiode v vezju z zunanjim napajanjem. Med meritvijo obe diodi zakrijemo, da odpravimo vpliv ozadja.

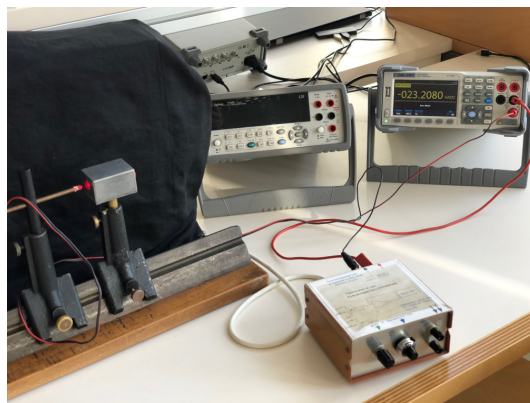
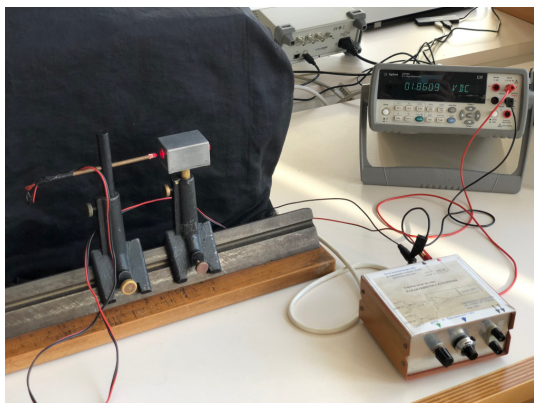
Zasloni fotodiodo, da ostane v temi, in izmeri njeno karakteristiko, slika 6. Spremeni osvetlitev in ponovno izmeri karakteristiko. To ponovi pri petih različnih osvetlitvah, ki jih je potrebno opisati tako, da jih kasneje lahko ponoviš. Kontroliraj jih lahko z oddaljenostjo od svetila. Med izbranimi osvetlitvami naj bo tudi maksimalna možna, takrat ko na fotodiodi zbereš skoraj vso svetlobo svetleče diode.

B. Izmeri še enkrat del karakteristike, ki ga lahko izmeriš brez zunanjega vira napetosti, slika 7. Uporabi shemo prikazano na sliki 3b. Meritve karakteristike fotodiode ponovi pri enakih razdaljah kot pri prvi nalogi, razen v primeru, ko fotodioda ni osvetljena. V tem primeru namreč v vezju ni toka, saj je sedaj edini tokovni vir prav (osvetljena) fotodioda.



Slika 7: Merilno vezje v fotogalvanskem načinu, kjer zunanje napajanje zamenjamo z nastavljenim uporom (potenciometrom).

C. Na koncu ne pozabi izmeriti tudi električno moč, ki se troši na svetleči diodi, tako da posebej izmeriš tok I_{LED} in napetost U_{LED} na svetleči diodi, slika 8. To moč primerjaj z izračunano močjo, ki jo določiš iz toka skozi fotodiodo, ko je bila ta maksimalno osvetljena. Upoštevaj spektralno občutljivost pri valovni dolžini 650 nm, ki jo prebereš iz slike 2a.



Slika 8: Meritev napetosti U_{LED} (levo) ter toka I_{LED} na svetleči diodi.

Literatura

- [1] National Renewable Energy Laboratory. *Best Research-Cell Efficiency Chart*. URL: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.