

Karakteristika Silicijeve fotodiode

Bor Kokovnik

December 2023

1 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 naštetih učinki so tudi uporabni, kadar želimo izkoriščati svetlobno (sončno) energijo.

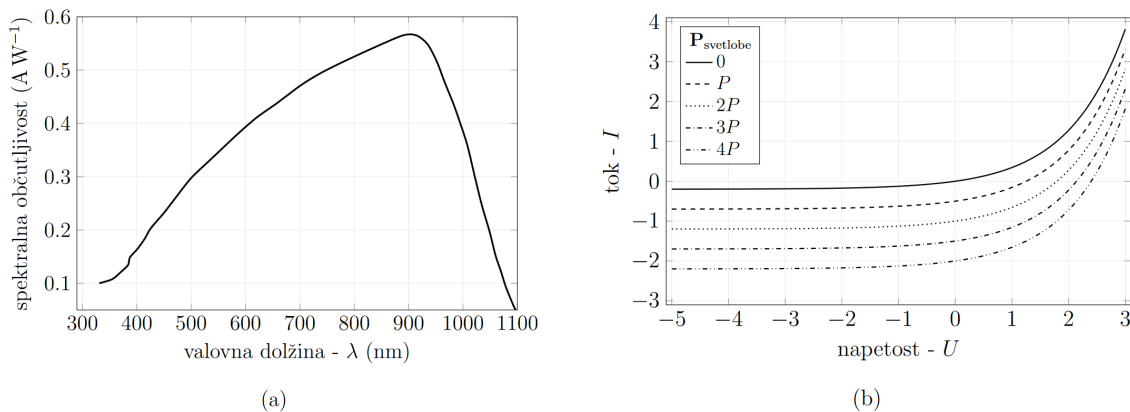
Fotoefekt lahko delimo na notranji in zunanji, kjer pri prvem vzbujeni elektroni ostanejo v snovi, v kateri so nastali, pri zunanjem fotoefektu pa fotoelektroni zapustijo ta material. Notranji fotoefekt v polprevodnikih je uporaben predvsem za detekcijo infrardeče svetlobe. Boljše detektorje pa lahko 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 po enačbi (1);

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

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. Silicijeva PIN fotodioda 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. Svetloba naj bi se absorbirala v i-plasti Si. 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.

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 %. 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 1a. Odstopanja v ultravioletnem 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 pritisnemo napetost v zaporni smeri in merimo tok. V tem načinu je fotodioda izvrsten linearen detektor svetlobe, kot se tudi vidi na sliki 1b. Če ne uporabimo zunanjega vira

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 1: (a) Spektralna občutljivost tipične fotodiode. (b) Karakteristika $I(U)$ fotodiode. Ve-čja 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 $U = 0 \text{ V}$ in drugi z $I = 0 \text{ A}$, rečemo fotogalvanski način oziroma fotovoltaični način delovanja.

2 Potrebščine

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

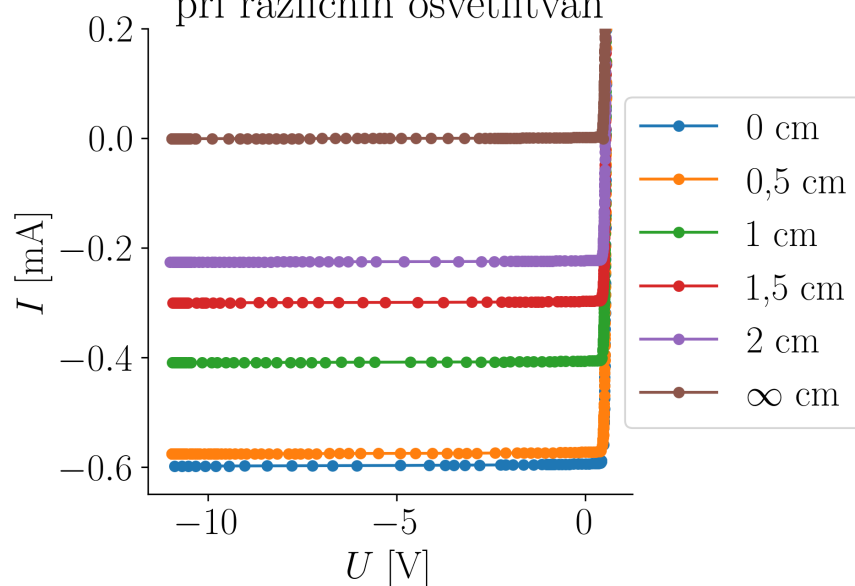
3 Naloga

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. Oceni izkoristek svetleče diode (LED), ki jo uporabljaš kot svetlobni izvor.

4 Meritve

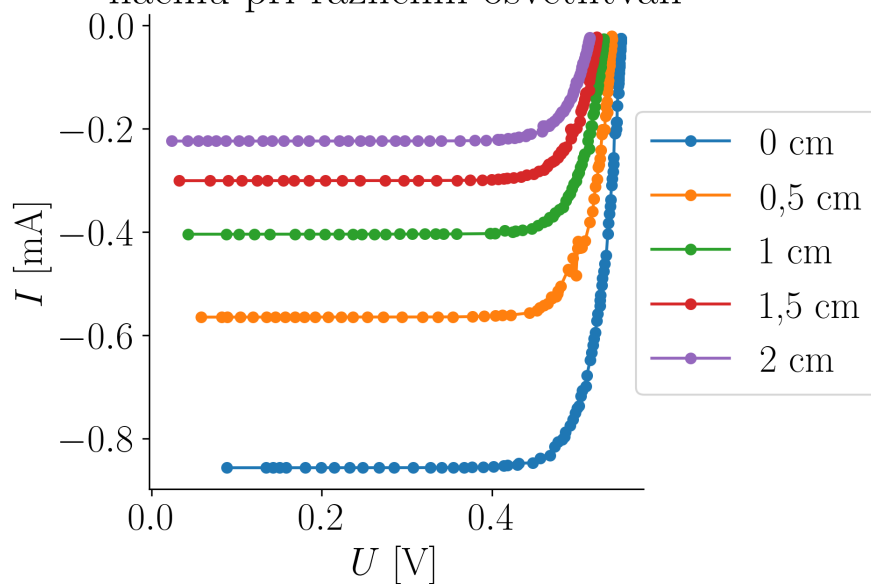
Datum Izvedbe eksperimenta: 11. 12. 2023

Primerjava karakteristik napajane fotodiode
pri različnih osvetlitvah

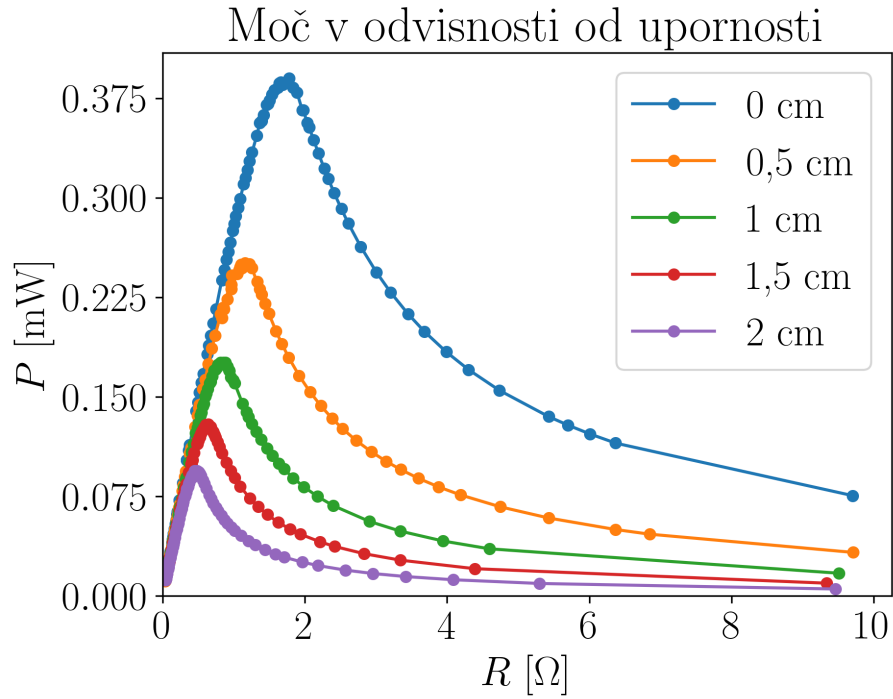


Slika 2: Graf odvisnosti $I(U)$ z zunanjim napajanjem fotodiode pri različnih osvetlitvah, podanih v oddaljenosti svetleče diode do fotodiode.

Primerjava karakteristik v fotogalvanskem
načinu pri različnih osvetlitvah



Slika 3: Graf odvisnosti $I(U)$ v fotogalvanskem načinu pri različnih osvetlitvah, podanih v oddaljenosti svetleče diode do fotodiode.



Slika 4: Graf odvisnosti $P(R)$ v fotogalvanskem načinu pri različnih osvetlitvah, podanih v oddaljenosti svetleče diode do fotodiode.

Iz grafa 4 lahko odčitamo, pri katerih upornostih se pri posameznem nivoju osvetljenosti troši največja moč. Tako pridemo do vrednosti, prikazanih v tabeli (negotovosti v tabeli so ocenjene);

d [cm] $\pm 0,1$ cm	R [Ω] $\pm 0,05$ Ω	W_{max} [mW] $\pm 0,005$ mW
0,0	1,18	0,39
0,5	1,16	0,25
1,0	0,85	0,18
1,5	0,64	0,13
2,0	0,49	0,09

Za oceno izkoristka diode η potrebujemo poleg meritve toka I_{LED} in napetosti U_{LED} na njej, meritev toka I_{max} na merilni fotodiodi in občutljivost diode k pri valovni dolžini 650 nm, kar dobimo iz grafa 1(a). Tok na fotodiodi odčitamo v zapornem režimu pri oddaljenosti 0 cm. Upošteval sem povprečje prvih 15 vrednosti, ko je karakteristika močno linearna. Na podlagi tega sem določil povprečno vrednost in negotovost po standardnem odklonu.

Tako pridemo do sledečih vrednosti:

$$\begin{aligned}
 k &= (0,43 \pm 0,1) \text{ A/W} \\
 U_{LED} &= (1,8823 \pm 0,0001) \text{ V} \\
 I_{LED} &= (23,29 \pm 0,01) \text{ mA} \\
 I_{max} &= (0,5980 \pm 0,0003) \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Iz teh pa lahko po enačbi za izkoristek $\eta = \frac{I_{max}}{kP_{LED}}$ izračunamo iskano vrednost:

$$\eta = (3,2 \pm 0,7)\%$$

5 Analiza rezultatov

Večina negotovosti v poročilu je ocenjenih iz grafov.

Dobljene odvisnosti $I(U)$ se skladajo s pričakovanimi in med merjenjem nisem opazil ničesar neobičajnega. Edini rezultat, ki me je presenetil je nizka izmerjena učinkovitost LED luči, kar bi lahko pojasnil z tem, da se tudi pri razdalji 0 cm ni v fotodiodi absorbiral celoten tok svetlobe iz luči, kot sem predpostavil. Na izračun bi lahko v manjši meri vplivala tudi predpostavka, da LED luč sveti pri valovni dolžini 650 nm.