

Gimnazija Jožeta Plečnika Ljubljana

Daniil Gainullov,
Maks Žnidaršič

Analiza in izdelava betavoltaične baterije

Raziskovalna naloga

Šolski mentor: Grega Celcar, prof. fiz
Zunanji mentor: Sebastian Pleško, mag. kem

Ljubljana, 2024

Kazalo

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Uvod | 5 |
| 1.1 Prednosti uporabe betavoltaične baterije | 5 |
| 1.2 Praktična uporaba betavoltaične baterije | 6 |
| 2 Cilji in hipoteze | 6 |
| 3 Teoretični del | 8 |
| 3.1 Beta razpad | 8 |
| 3.1.1 Beta-radioizotopi | 8 |
| 3.1.2 Radioluminiscenca | 9 |
| 3.2 Polprevodniki | 9 |
| 3.2.1 Valenčni pas, prevodni pas in energijska špranja | 10 |
| 3.2.2 p in n tipa polprevodnikov | 10 |
| 3.2.3 p-n stik | 11 |
| 3.3 Betavoltaična baterija | 13 |
| 3.3.1 Delovanje betavoltaične baterije | 13 |
| 3.3.2 Struktura betavoltaične baterije | 14 |
| 4 Eksperimentalni del | 16 |
| 4.1 Izdelava okolja za testiranje | 16 |
| 4.2 Testiranje polprevodnikov | 19 |
| 4.2.1 BPW34 | 19 |
| 4.2.2 BPW34 v neprozornem ohišju | 20 |
| 4.2.3 BPW34S | 20 |
| 4.2.4 Modra LED dioda | 20 |
| 4.2.5 Bela LED dioda | 20 |
| 4.2.6 UV emisijska dioda | 21 |
| 4.3 Testiranje radioizotopov | 21 |
| 4.4 Izvajanje meritev | 22 |
| 5 Rezultati | 23 |
| 6 Zaključek | 26 |

Slike

| | |
|-----------------------------------------------|----|
| 1 Prikaz polprevodnikov tipa P in N | 11 |
|-----------------------------------------------|----|

| | | |
|---|------------------------------------------------------------------|----|
| 2 | Prikaz PN stika | 12 |
| 3 | Prikaz delovanja betavoltaične baterije | 13 |
| 4 | Prikaz PN in Schottky diode | 14 |
| 5 | Prikaz različnih tipov struktur betavoltaične baterije | 15 |
| 6 | 3D model ohišja | 16 |
| 7 | 3D model ohišja | 18 |
| 8 | I(R) graf polprevodnikov | 24 |

Tabele

| | | |
|---|-------------------------------------|---|
| 1 | Tabela beta-radioizotopov | 9 |
|---|-------------------------------------|---|

Povzetek

Betavoltaična baterija je tip nuklearne baterije, ki proizvaja električni tok iz beta delcev (elektronov), ki nastanejo v procesu beta razpada radioaktivnega vira z uporabo polprevodniških stikov. Od običajnih virov jedrske energije se razlikuje v tem, da električne energije ne pridobiva s topote. Energija nastane ob nastanku parov elektron-vrzel, ki inducirajo premikanje elektronov v električnem krogu.

Želeli smo analizirati in izboljšati lastnosti betavoltaične baterije z uporabo cenejših materialov in dostopnejših radioaktivnih virov. Za ta namen smo naredili ohišje baterije, izbrali najbolj ugodne polprevodnike in nam trenutno dostopne radioaktivne vire.

Rezultati potrjujejo, da je mogoče ustvariti nizko cenovno betavoltaično baterijo. Na žalost smo bili omejeni s močjo radioaktivnih virov.

Abstract

A beta voltaic battery is a type of nuclear battery that generates an electric current from beta particles (electrons) produced during the process of beta decay using semiconductor junctions. It differs from conventional nuclear power sources in that it does not generate electricity from heat conversion. The energy is generated by the creation of electron-hole pairs, which induce the movement of electrons in the system.

We wanted to analyse and improve the properties of the beta-voltaic batteries using cheaper materials and more accessible radioactive sources. For this purpose, we designed the battery shell, selected the most favourable semiconductors and the most accessible radioactive sources currently available to us.

The results confirm that it is possible to create a low-cost beta voltaic battery. Unfortunately, we were limited by the power of the radioactive sources.

Zahvala

Raziskovalno delo je bilo izdelano za Srečanje mladih raziskovalcev Ljubljanske regije. Teoretični in eksperimentalni del naloge sva v večini opravila samostojno, a bi brez pomoči, napotkov in izkušenj mentorjev težko izdelala raziskovalno nalogo z vključitvijo vseh eksperimentalnih tehnik.

Zahvala gre zlasti mentorju Sebastijanu Pleškotu, da nama je razložil teoretično ozadje raziskovalnega dela, predstavili delo v reaktorju ter je bil vedno pripravljeni odgovoriti na vsa vprašanja.

Zahvaljujeva se Odseku za reaktorsko fiziko - F8 na Institutu »Jožef Stefan«, za opravljanje eksperimentalnega dela v laboratoriju od januar 2024 do marca 2024. Zahvala gre tudi vsem na odseku F8 za strokovno pomoč pri izvedbi eksperimentov ter pri delu z laboratorijsko opremo.

Zahvaliti se želiva tudi Gimnaziji Jožeta Plečnika, Šubičeva 1, 1000 Ljubljana, ravnateljici za odobritev in podporo pri obšolskem raziskovalnem dela ter drugim profesorjem iz gimnazije, še posebej najinemu šolskemu mentorju prof. Gregi Celicarju, za pomoč s strokovno literaturo ter pisaju naloge.

1 Uvod

V hitro spreminjačem se svetu, kjer iščemo trajnostne vire energije, se včasih spre-gleda potencial jedrske energije. Kljub naraščajočemu zanimanju za alternativne vire, se vedno več ljudi zaveda prednosti jedrske energije. Nedavno zaključena gra-dnja drugega bloka jedrske elektrarne Krško v Sloveniji kaže na vztrajanje pri njeni uporabi, kljub evropskim trendom. Jedrska energija nudi nizke emisije CO₂, zane-sljivo oskrbo in finančno ugodnost, vendar se sooča z izzivi glede ravnjanja z jedrskimi odpadki in varnostnimi pomisleki.

Betavoltaične baterije predstavljajo inovativno srečanje med jedrsko fiziko in fiziko polprevodnikov. Izkoriščajo energijo delcev beta, ki se sproščajo med radioaktivnim razpadom določenih izotopov, za trajno proizvodnjo električne energije z minimal-nimi okoljskimi vplivi. Zaradi dolge življenske dobe, zanesljivosti in visoke gostote energije so primerne za različne aplikacije, vključno z medicinskimi vsadki in raziskovanjem vesolja.

1.1 Prednosti uporabe betavoltaične baterije

Betavoltaične baterije imajo številne prednosti, zaradi katerih so prepričljiva in inovativna izbira za majhno. a vendar dolgotrajno porabo energije. Našteli bomo nekaj ključnih prednosti uporabe betavoltaičnih baterij:

- 1. Dolga življenska doba in nezahtevno vzdrževanje:** Betavoltaične baterije za proizvodnjo električne energije uporabljajo razpad radioizotopov. Radi-oizotopi, izbrani za betavoltaično tehnologijo, imajo pogosto zelo dolgo razpolovno dobo. To zagotavlja proizvodnjo električne energije v daljšem obdobju. Zaradi te dolgotrajnosti so betavoltaične baterije primerne za aplikacije, kjer je pogosto vzdrževanje ali zamenjava nepraktična.
- 2. Nenehen vir energije:** Betavoltaične baterije zagotavljajo stalen in zane-sljiv vir energije. Dokler radioizotopi razpadajo, baterija proizvaja električno energijo.
- 3. Vpliv na okolje:** V primerjavi s tradicionalnimi baterijami, ki lahko vse-bujejo okolju nevarne snovi, betavoltaične baterije na splošno veljajo za okolju prijazne. Sevanje, ki se oddaja med procesom razpadanja, je običajno mini-malno in ga je mogoče učinkovito zadržati v ohišju baterije. To predstavlja majhno tveganje za okolje.

4. **Uporaba v težkih razmerah:** Betavoltaične baterije so znane po svoji stabilnosti v različnih okoljskih pogojih. Lahko vzdržijo ekstremne temperature, visoko sevanje in druge zahtevne pogoje, ne da bi pri tem ogrozile svojo zmožljivost. Zaradi te odpornosti so primerne za uporabo pri raziskovanju vesolja, vojaških operacijah ali v težkih industrijskih razmerah.
5. **Nizka stopnja samo-praznjenja:** Betavoltaične baterije imajo nizko stopnjo samopraznjenja, kar pomeni, da ostanejo polne tudi po dolgem obdobju neaktivnosti. Ta lastnost je ugodna za aplikacije, pri katerih mora biti baterija zanesljiva tudi po daljšem obdobju neaktivnosti.

1.2 Praktična uporaba betavoltaične baterije

Zaradi svojih edinstvenih in inovativnih lastnosti lahko betavoltaične baterije uporabimo v najrazličnejših strokah in področjih. Področja kjer bi betavoltaične baterije bilo ugodno uporabljati so:

1. **Raziskovanje vesolja:** Betavoltaične baterije so zaradi svoje dolge življenjske dobe in zanesljivosti pridobile pozornost na področju raziskovanja vesolja. Pri misijah v globokem vesolju ali na oddaljenih planetih, kjer je sončna svetloba omejena, betavoltaične baterije zagotavljajo neprekinjen in stabilen vir električne energije. Njihova zmožnost daljšega delovanja brez vzdrževanja ustrezava zahtevam dolgotrajnih vesoljskih misij.
2. **Naprave za daljinsko zaznavanje:** Na oddaljenih ali težko dostopnih lokacijah, kjer je redno vzdrževanje ali zamenjava baterij nepraktična, so betavoltaične baterije odlične. Z njimi je mogoče napajati senzorje, opremo za spremljanje ali naprave za zbiranje podatkov v okoljih, kot so puščave, oceani ali gozdovi. Prav tako so uporabni v vojaških operacijah.
3. **Medicinski vsadki:** Betavoltaične baterije se lahko uporabljajo v medicinskih vsadkih, kot so srčni spodbujevalniki ali drugi elektronski medicinski pripomočki. Njihova daljša življenjska doba zmanjšuje potrebo po pogostih kirurskih posegih za zamenjavo baterij, kar povečuje udobje bolnikov in zmanjšuje tveganja, povezana z operacijami.

2 Cilji in hipoteze

Pred začetkom raziskovalnega dela o betavoltaičnih baterijah smo si zastavili naslednje cilje:

1. **Razumevanje osnov betavoltaične tehnologije:** Poglobiti znanje o tem, kako betavoltaične baterije pretvarjajo radioaktivno sevanje v električno energijo, vključno z osnovnimi principi jedrske fizike, sevanja itd.
2. **Analiza različnih radiokativnih virov:** Preučiti lastnosti različnih radiokativnih materialov, kot so tritij, kobalt in cezij, ter oceniti njihovo primernost za uporabo v betavoltaičnih baterijah z vidika varnosti, učinkovitosti in dolgotrajnosti.
3. **Polprevodniški materiali:** Raziskati lastnosti in učinkovitost različnih polprevodniških materialov v betavoltaičnih celicah, s poudarkom na iskanju idealnih materialov za izboljšanje izhodne moči in zmanjšanje stroškov.
4. **Primerjava z drugimi tehnologijami proizvodnje energije:** Primerjati betavoltaične baterije z drugimi oblikami proizvodnje energije, glede na učinkovitost, trajnost in aplikacijsko uporabnost.
5. **Razvoj lastnega eksperimentalnega modela:** Oblikovati in izvesti eksperiment za merjenje izhodne moči betavoltaične celice, uporabljoč tritij kot radiokativni vir, s ciljem pridobitve praktičnih izkušenj in razumevanja tehničnih izzivov.
6. **Novi vpogledi in inovacije:** Skozi raziskavo razviti nove vpoglede in možne inovacije, ki bi lahko izboljšale učinkovitost, varnost in uporabnost betavoltaičnih baterij v prihodnosti.

Na podlagi zastavljenih ciljev predpostavljamo naslednje hipoteze:

1. Tok izmerjen v bateriji, bo v območju nano amperov.
2. Baterija z modro diodo bo imela največjo moč.
3. Baterija s cezijem bo močnejša kot baterija s tritijem.

3 Teoretični del

3.1 Beta razpad

Beta razpad je ena izmed več vrst radioaktivnega razpada. Delimo ga na več vrst, vendar nas bo v naši raziskovalni nalogi zanimal le beta minus razpad.

V procesu beta minus razpada, se nevron pretvori v proton. Ker se število nukleonov ohrani, se število nevronov zmanjša za ena, ampak se število protonov poveča za ena (1).



Pri tem razpadu se ohranja naboj. Ker dobimo en proton pri tem nastane tudi elektron. Zaradi bilance energije pa odleti tudi elektron antinevtrino. Elektron je naš iskani beta delec, ki pri razpadu nevtrona v proton, odleti skozi oblak elektronov in ne ostane vezan v končnem jedru.

Pri beta razpadu je pomembno omeniti, da je to eksotermen proces, saj pri razpadu nevtrona v proton, izgubimo nekaj mase.

3.1.1 Beta-radioizotopi

Radioizotopi so izotopi elementov s presežkom protonov p^+ ali nevronov n^0 , kar jih naredi nestabilne. Zaradi nestabilnega jedra, lahko v njih poteče vrsta radioaktivnega razpada, v obliki alfa (α), beta (β) ali gama (γ).

V beta-radioizotopih, kot že ime pove, poteče beta razpad in kot take jih lahko uporabimo v betavoltaični bateriji. Da bi baterija delovala čim dlje časa, je bolje če ima radioizotop čim daljšo razpolovno dobo[1], saj tako radioizotop beta delce oddaja dlje. Razpolovne dobe beta-radioizotopov obsegajo vse od nekaj delčkov sekunde (${}^9\text{Li} \sim 178.2 \text{ ms}$ [2]), pa do več sto ali celo več tisoč let (${}^{14}\text{C} \sim 5700 \text{ let}$ [2])). Poleg tega je pomembna tudi energija beta delcev. Ta mora biti dovolj visoka, da lahko baterija ustvari precejšnjo količino energije. Beta delci z višjo energijo spodbudijo ionizacijo večih elektronov, ki vodijo v več energije. Vendar energija ne sme biti previsoka, saj bi beta delci z zelo visoko energijo lahko poškodovali ogrodje baterije.

Specifična energija beta-radioizotopa predstavlja energijsko gostoto, ki jo radioizotop proizvede glede na njegovo maso. Ta količina je v veliko primerih obratno sorazmerna z razpolovno dobo beta-radioizotopa. Torej hočemo uporabiti tak beta-radioizotop,

da bo oddal dovolj energije za našo uporabo, hkrati pa bo imel dovolj dolgo življenjsko dobo, da bo baterijo smiselno uporabiti namesto drugih bolj konvencionalnih vrst baterij (kot so litij-ionske baterije).

V tabeli 1 je prikazanih nekaj beta-radioizotopov in energij beta delcev, ki jih oddajo.

| izotop | vrsta razpada | $t_{1/2}$ [leta] | E_{max} [MeV] | \bar{E} [MeV] |
|------------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|
| ^3H | β^- | 12,32 | 0,01860 | 0,00568 |
| ^{33}P | β^- | 0,069 | 0,249 | 0,0766 |
| ^{63}Ni | β^- | 101,2 | 0,06587 | 0,01713 |
| ^{90}Sr | β^- | 28,9 | 0,546 | 0,1958 |
| ^{90}Y | β^- | 0,007 | 2,2839 | 0,93471 |

Tabela 1: Pogosto uporabljeni beta-radioizotopi kot prikazano v [1]. $t_{1/2}$ je razpolovna doba, E_{max} je največja energij beta delcov in \bar{E} je povprečna energija beta delca.

3.1.2 Radioluminiscenca

To je pojav, pri katerem snov oddaja svetlobo ob interaciji z ionizirajočim sevanjem. Ko nek delec, kot je α ali β delec, ionizira elektron v vzbujeno stanje, se med prehodom tega elektrona nazaj v osnovno stanje sprosti energija v obliki fotona. To lahko vidimo kot svetlobo. Snovi, ki imajo to lastnost imenujemo scintilatorji.

Ta pojav je pomemben, saj lahko z njim direktno pretvorimo vir sevanja v vir svetlobe [3].

3.2 Polprevodniki

Polprevodniki so materiali, katerih električna prevodnost σ je nekje med prevodnostjo prevodnikov in izolatorjev. Uporabljajo se v mnogo vrstah elektronskih naprav, kot so diode, tranzistorji in integrirana vezja.

Delimo jih na dve skupini: čiste in nečiste. Čisti polprevodniki so zgrajeni iz kovalentni kristali elementov, kot sta silicij *Si* ali germanij *Ge*. Čistim polprevodnikom lahko dopiramo (dodamo majhno količino elementov druge vrste), kar jih naredi nečiste. Dodani elementi čistim polprevodnikom dodajo nepravilnosti, kar pomaga njihovi sposobnosti prevajanja električnega toka. Druga vrsta nečistih polprevodnikov, pa

so spojine, ki imajo enake lastnosti kot ostali polprevodniki, primer spojine je galijev nitrid GaN .

3.2.1 Valenčni pas, prevodni pas in energijska špranja

Valenčni in prevodni pas predstavljata različne energijske nivoje elektronov v nekem materialu. V valenčnem (energijsko nižjem) pasu se elektroni ne morejo premikati prosto, v prevodnem pasu, pa so elektroni v višjem energijskem stanju, kar jim omogoči, da se prosto premikajo po telesu materiala.

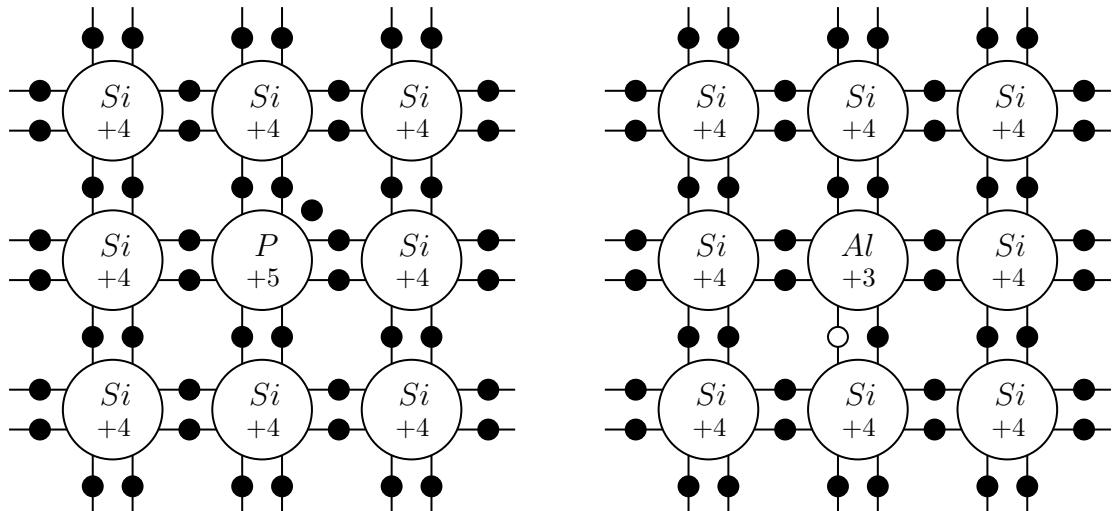
Energijska špranja E_g predstavlja razliko energije med valenčnim in prevodnim pasom, torej energijo, ki jo elektron potrebuje za prehod iz valenčnega v prevodni pas. V prevodnikih je energijska špranja neobstoječa, torej se valenčni in prevodni pas prekrivata, kar dovoli prost pretok elektronov po telesu prevodnika. V izolatorju je energijska špranja zelo velika (nad 5 eV) in ne dovoli prehoda elektronov med valenčnim in prevodnim pasom. Energijska špranja polprevodnika pa je manjša (med 1 eV in 3 eV). To dovoli elektronom, da s pomočjo iz okolja pridobljene energije preidejo preko energijske špranje v prevodni pas, kar omogoči pretok električnega toka. Elektroni, ki so prešli v prevodni pas, pustijo za sabo vrzeli, v katere se preostali elektroni v polprevodniku lahko premikajo.

3.2.2 p in n tipa polprevodnikov

Poznamo dva tipa polprevodnikov: negativno nabite polprevodnike tipa n in pozitivno nabite polprevodnike tipa p [4]. Takim polprevodnikom so bile dodane nepravilnosti, z namenom, da bi povečali njihovo prevodnost.

Polprevodnik tipa n je vrsta polprevodniškega materiala, ki je bil dopiran s pet valentnim elementom. Pogosto sta to fosfor P ali arzen As . Ker so elementi polprevodnikov štiri valentni, vsi elektroni dodane spojine ne tvorijo kovalentnih vezi, kot je prikazano na sliki 1 levo. Peti elektron pa se giblje v kristalu v električnem polju jedra in sredice daleč proč od jedra in sredice. Peti zunanji elektron zasede osnovno energijsko stanje pri energiji, ki je tik pod prevodnim pasom. Pri sobni temperaturi preidejo ti elektroni v prevodni pas. Prav tako preidejo tudi elektroni iz valenčnega pasu v prevodni pas in pri tem zapustijo vrzeli. V tem primeru dobimo več elektronov v prevodnem pasu kot je vrzeli v valenčnem. S tem so elektroni v polprevodniku tipa n večinski nosilci naboja, vrzeli pa manjšinski nosilci naboja.

Polprevodnik tipa p je bil dopiran s tri valentnim elementom. Ker so elementi polprevodnikov štiri valentni, ostane en elektron atoma osnovnega polprevodnika, ki ne more tvoriti kovalentne vezi, kot prikazano na sliki 1 (desno). To ustvari vrzeli v strukturi materiala. Osnovno energijsko stanje primesi za vrzel se nahaja tik nad valenčnim pasom. V tem energijske stanju, ki ga zasede vrzel, manjka elektron. Pri sobni temperaturi elektroni iz valenčnega pasu prehajajo v energijsko stanje primesi. Pri tem v valenčnem pasu nastanejo vrzeli. Elektron, ki preide v energijsko stanje primesi, zasede vrzel v enem izmed atomov primesi. Nekaj elektronov prav tako preide iz valenčnega pasu v prevodni pas. Ti elektroni prav tako pustijo za seboj vrzeli. V tem primeru je število elektronov v prevodnem pasu manjše od števila vrzeli. Zato so tukaj vrzeli v valenčnem pasu večinski nosilci naboja, elektroni v prevodnem pa manjšinski nosilci naboja.



Slika 1: Levo: prikaz silicijevega kristala z dodanim fosforjem P . Eden izmed fosforjevih elektronov ne tvori kovalentne vezi, kar mu omogoči prosto premikanje. Desno: prikaz silicijevega kristala z dodanim aluminijem Al . Na eni izmed vezi okoli aluminiija je vrzel (označena s \circ), kjer bi se moral nahajati elektron.

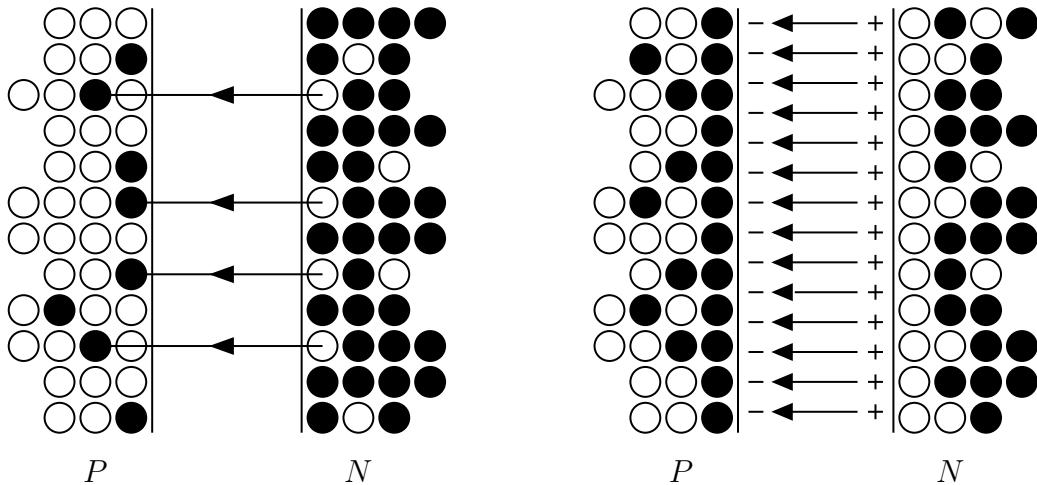
3.2.3 p-n stik

Ko postavimo p in n tipa polprevodnikov eden poleg drugega, pride do pojava, ki mu pravimo p-n stik[4][5]. Na spoju med polprevodniškima materialoma, pride do prehajanja prostih elektronov iz n območja v p območje, kjer se nato ponovno združijo z vrzelmi v strukturi p tipa polprevodnika. Po združitvi imajo sedaj atomi p tipa

polprevodnika na stiku en dodaten elektron, kar jih naredi negativno nabite. Podobno elektroni, ki so prešli v p območje pustijo za sabo pozitivno nabite ione v n območju. Ta proces se nadaljuje, dokler v tanki plasti okoli spoja ne nastane električno polje. To električno polje preprečuje pretok elektronov skozi stik. Območje v katerem nastane električno polje je popolnoma izčrpano prostih elektron, zato ga imenujemo deplecijsko območje.

Če na p-n stik priključimo elektrodo, pride do dveh različnih pojavov. Če priključimo katodo na p območje in anodo na n območje, to dovoli elektronom, na stiku med p območjem in katodo, da prehajajo skozi elektrodo do n območja, nato pa naprej do deplecijskega območja. Podobno vrzeli, ki so nastale na stiku med p območjem in elektrodo, potujejo proti deplecijskemu območju (skozi p območje), nakar se ponovno združijo z elektroni, ki preidejo iz n območja. To dovoli pretok električnega toka skozi p-n stik. Tako vezanem p-n stiku pravimo prevodno vezan.

Če vežemo elektrodo obratno, to dovoli še nekaj dodatnim elektron iz območja n preiti v območje p, kar rahlo poveča deplecijsko območje in posledično prepreči pretok električnega toka. Kljub povečanemu električnemu polju, pa to vseeno ne vstavi toka popolnoma, saj tok še vedno lahko prenašajo manjšinski nosilci. Tako vezanem p-n stiku pravimo zaporno vezan.



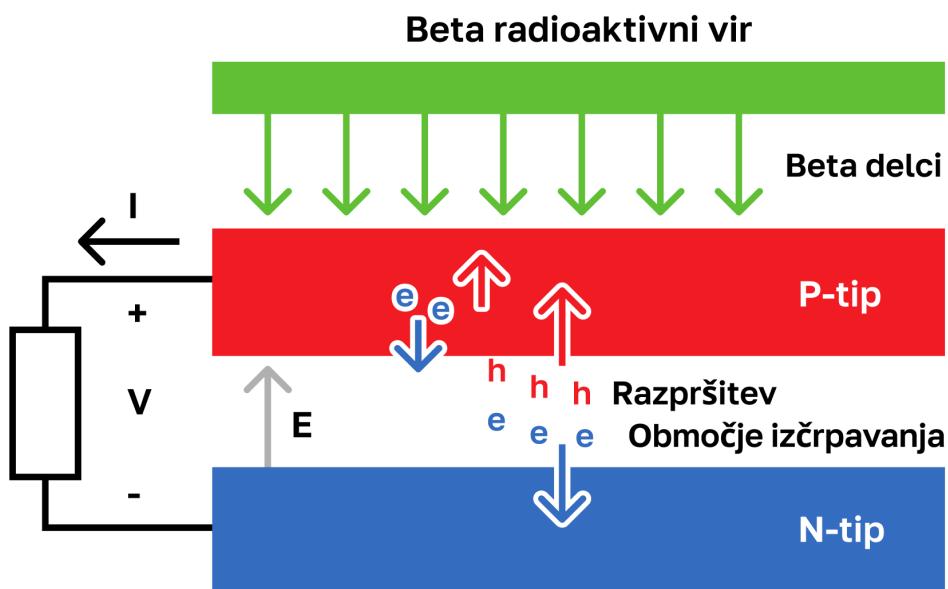
Slika 2: Levo: prikaz prehajanja elektronov iz N območja v P območje, kjer se združijo z vrzelmi v strukturi. Desno: nastanek električnega polja med pozitivno nabitimi ioni v N območju in negativno nabitimi ioni v P območju.

3.3 Betavoltaična baterija

3.3.1 Delovanje betavoltaične baterije

Pretvorba beta sevanja v električno energijo je zelo podobna pretvorbi sončne energije v električno s pomočjo fotodiod [6].

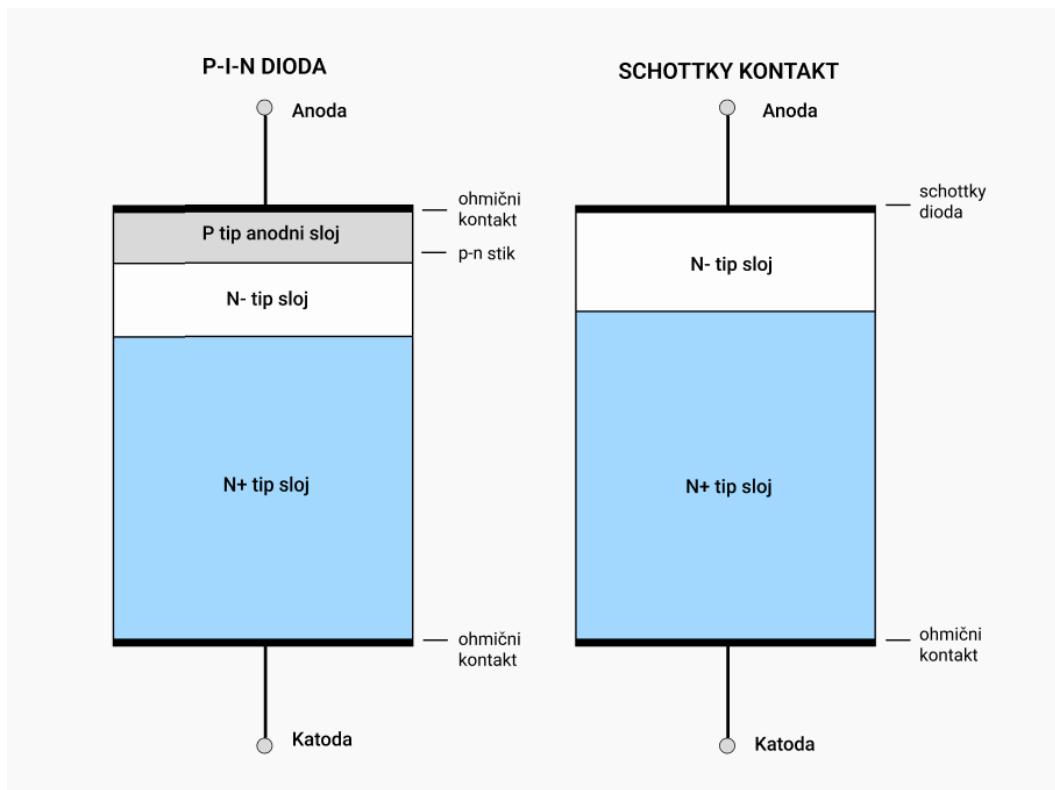
Postopek se začne v jedru radioizotopa, kjer med beta razpadom nastane beta delec. Ta se nato pri visoki hitrosti zaleti v polprevodniško diodo z zaprto vezanim pn stikom. Če ima beta delec dovolj energije lahko ionizirani enega ali več elektronov v prevodni pas, za sabo pa pustijo vrzeli v valenčnem pasu. Pomembno je omeniti, da en beta delec lahko ustvari več vrzeli preko serije interakcij s polprevodnikom, kar je glavna razlika med tem načinom pridobivanja energije in sončnimi celicami. Zaradi električnega polja na p-n stiku, se pari elektron-vrzel ločijo in elektroni potegnjeni proti katodi v n območje, vrzeli pa proti anodi v p območje, kar je razvidno iz slike 3. Premikanje elektronov nato privede do električnega toka[1].



Slika 3: Shematski prikaz delovanja betavoltaične baterije

3.3.2 Struktura betavoltaične baterije

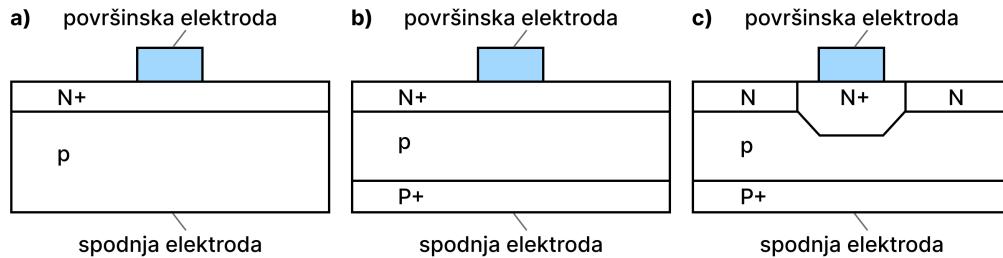
Betavoltaično baterijo sestavljajo več plasti, vključno z virom sevanja beta žarkov, polprevodniškim spojem in kovinsko elektrodo. Obstajata dve vrsti polprevodniških spojev za betavoltaično baterijo, ki temeljijo na generaciji vgrajenega električnega polja: spoj PN (P-i-N) in Schottkyjeve diode. Običajno zraven se dodaja rahlo dopirana intrinzična regija (i-področje), da bi se podaljšala življenjska doba nosilcev, nastalih zaradi sevanja, tako da se lahko več nosilcev kopiči v območju na drugi strani. Trenutno je najpogostejša betavoltaična baterija zgrajena na osnovi spoja P-i-N. Ti spoji vključujejo plasti polprevodniškega materiala z različnimi vrstami dotikanja – P-tipom in N-tipom, kar lahko opazimo na sliki 4. Vrzeli znotraj teh plasti prispevajo k električni prevodnosti polprevodnika, njihovo gibanje pa je bistven dejavnik pri delovanju betavoltaične baterije.



Slika 4: Levo: prikaz strukture PiN diode. Desno: Prikaz strukture Schottky diode.

Poleg tega so raziskali betavoltaične baterije, ki temeljijo na Schottkyjevih spojih, predvsem zaradi preprostejšega postopka izdelave, kjer se uporablja le ena vrsta do-

piranja, kot je vidno na sliki 4. Kovinsko-polprevodniški stik (Schottkyjev spoj) se oblikuje skozi spontano interakcijo polprevodnika in kovine po izdelavi elektrode. Čeprav imajo betavoltaične baterije, ki temeljijo na Schottkyjevih spojih, sorazmerno nižje lastnosti zmoglјivosti zaradi večje količine uhajalnega toka, vendar imajo manjši padec napetosti in večjo hitrost preklopa, kar jih naredi manj primerne za visoko napetostne naprave. V našem primeru slabosti Schottkyjevih polprevodnikov niso tako slabe, saj betavoltaična batetija je dolgotrajni vir z majhno napetostjo. Splošno znano je, da se zaustavitvena moč delcev beta zmanjšuje z večanjem globine prodora v snov. Če se te pari elektron-vrzeli nastanejo v območju "izčrpavanja" (depletion) se lahko v celoti ločijo in zberejo. Separacija poteka zaradi notranjega električnega polja v območju izčrpavanja. Elektronise pomaknejo prodi N-strani in vrzeli proti P-strani in s tem ustvarijo tok. Vendar se lahko pari elektron-vrzeli nastanejo zunaj območja izčrpavanja, imenujemo jih "minority carriers". Te nosilci se morajo "difuzirati" (diffuse) ali se premakniti v območje izčrpavanja, da se ločijo in prispevajo k toku. Ta proces "difuzije" ni tako efektiven kot direktna ločitev znotraj območja izčrpavanja, ravno zato zgradba baterije rabi biti taka, da se maksimizira nastanek parov elektron-vrzeli vznosno v območju izčrpavanja.



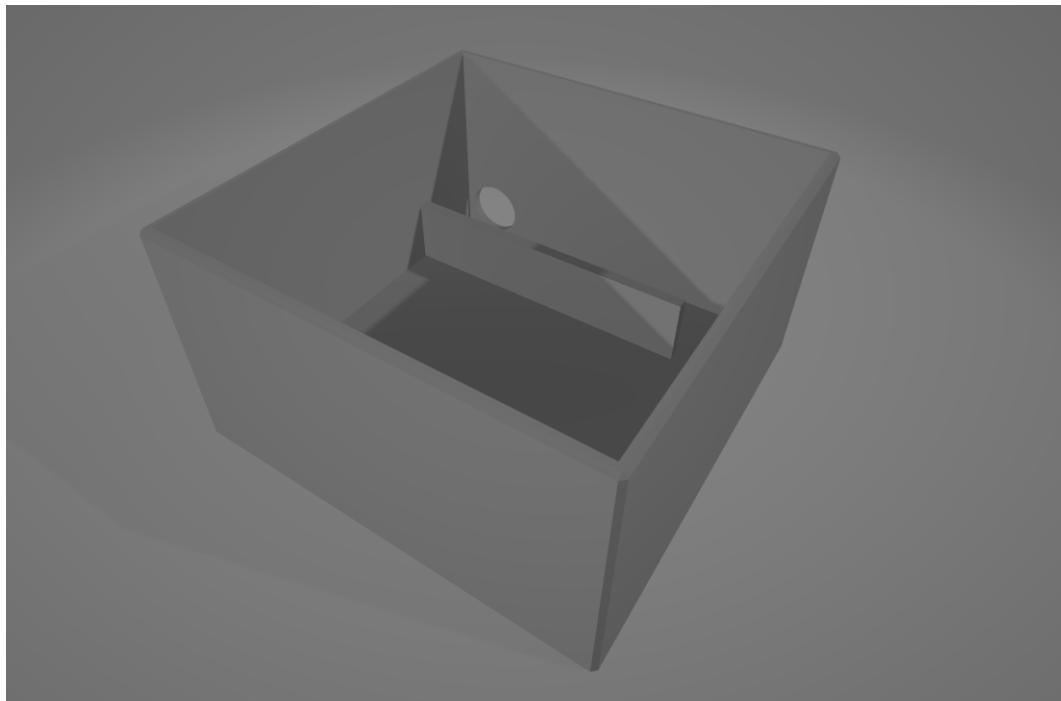
Slika 5: Različni tipi struktur betavoltaične baterije: a) navadna ravna plošča b) BSF c) SER

Del betavoltaične baterije ki pretvarja energijo beta delcev v električno energijo se imenuje polprevodniški pretvornik. Njegova struktura je lahko različna, vendar najbolj običajne so naslednje tri: navadna ravna plošča, BSF (angl. back surface field) in SER (angl. selective emitter radioisotope), prikazi teh struktur lahko vidimo na sliki 5. BSF in SER strukture imajo območja s večjim dopingom, oz. s dodanimi nečistotami z namenom spremeniti lastnosti polprevodnika, kar pomaga zbrati več nosilcev (elektronom in vrzelov) in izboljša delovanje baterije.

4 Eksperimentalni del

4.1 Izdelava okolja za testiranje

Meritve ki jih bomo opravljali z našimi diodami, bodo morale biti izjemno natančne. Še posebej zato, ker bomo merili majhne tokove. Vsak šum je lahko za našo delo kritičnega pomena. Zato smo se odločili, da bomo naredili opredeljeno okolje za izvajanje naših poskusov. Odločili smo se, da bomo naredili ohišje za našo betavoltaično baterijo v obliki škatle. Po nekaj neuspešnih poskusih, smo naredili naslednji model, ki ga predstavlja slika 6.



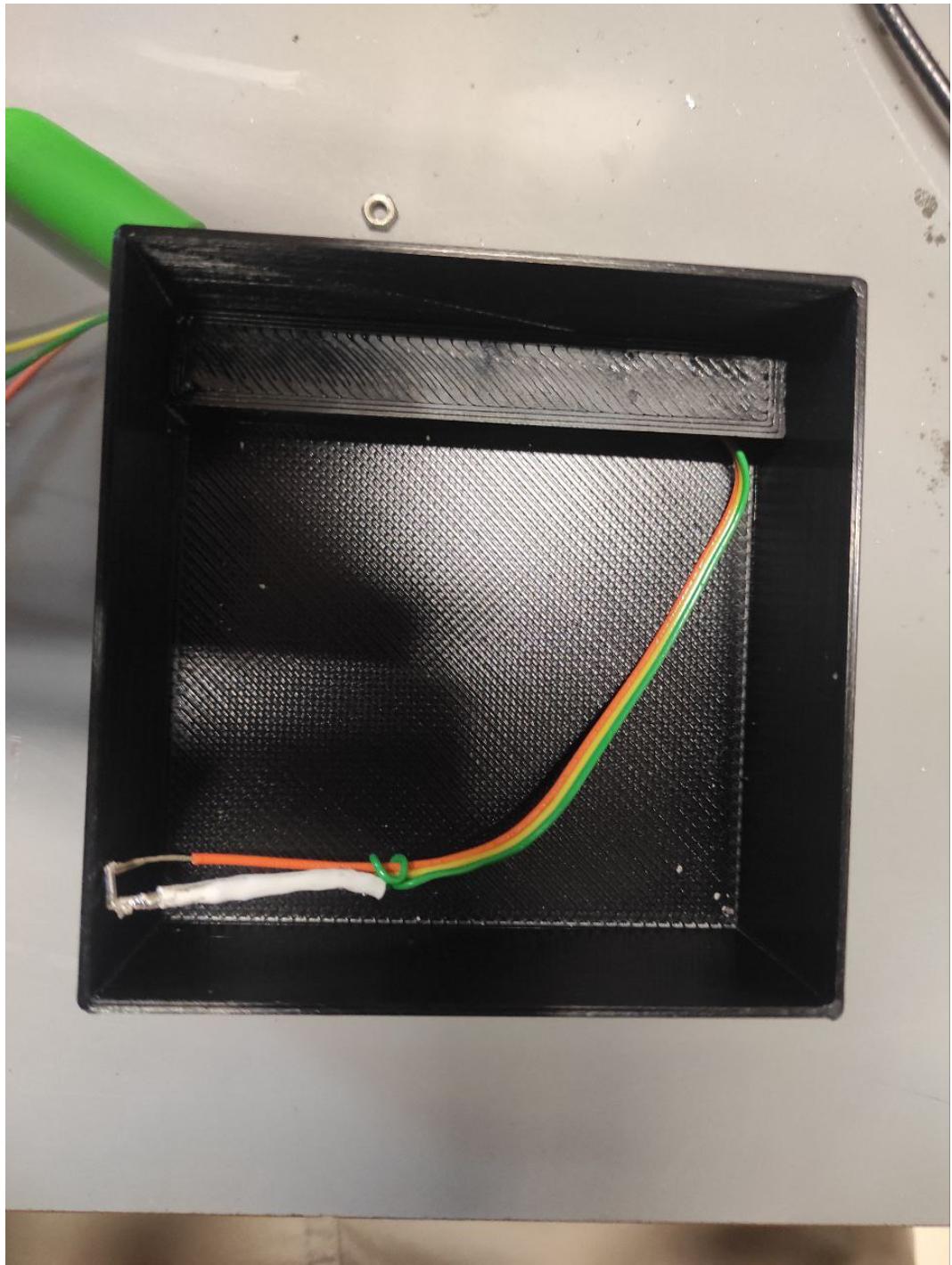
Slika 6: 3D model ohišja betavoltaične baterije brez pokrova

Na sliki 6 je prikazan model brez pokrovov, saj sta se printala ločeno. Gre za dva pokrova: eden za osnovno ohišje baterije, drugi pa za "labirint". Labirint predstavlja majhno steno v skrajnjem delu ohišja baterije. Skupaj ti pokrovi minimalizirajo količino svetlobe, ki bi lahko prišla v osnovni del baterije skupaj s kabli. Labirint podaljša pot svetlobe in jo naredi bolj zahtevno, kar preprečuje motnje, ki bi jih lahko svetloba povzročila med merjenjem.

Na začetku smo razmišljali o 3D tiskanju ohišja iz običajne plastike, vendar smo se na koncu odločili za material PETG ESD (angl. Polyethylene terephthalate glycol - Electrostatic Dissipative). Ta material je izjemno koristen za 3D tiskanje komponent za betavoltaične baterije zaradi njegove sposobnosti zmanjševanja nabiranja statične električne napetosti. To je ključno pri preprečevanju statičnega praznjenja, ki lahko poškoduje občutljive elektronske komponente in sisteme za zaznavanje beta delcev. S tem bi bile meritve manj natančne.

Poleg tega PETG ESD ponuja vzdržljivost in odpornost proti kemikalijam, ki presegajo standardne plastike. To zagotavlja dolgotrajnost in zanesljivost betavoltaičnih naprav v različnih okoljih. Uporaba tega materiala pri 3D tiskanju omogoča natančno izdelavo zapletenih delov, optimizacijo oblikovanja in funkcionalnosti betavoltaičnih baterij.

Na sliki 7 lahko vidimo, kako izgleda ohišje iz tega materiala skupaj s polprevodnikom, ki gre preko labirinta [7].



Slika 7: 3D model ohišja betavoltaične baterije brez pokrova

4.2 Testiranje polprevodnikov

Pri izbiri diode za betavoltaično baterijo je ključnega pomena upoštevati več dejavnikov, ki vplivajo na njeno učinkovitost in zanesljivost. Tukaj so nekateri pomembni vidiki:

1. Energijska špranja: Energijska špranja je razlika v energiji med valenčnim pasom in prevodnim pasom v polprevodniku. Pri izbiri diode za betavoltaično baterijo je pomembno, da ima dioda energijsko špranjo, ki se ujema z energijo beta delcev. To omogoča učinkovito pretvorbo energije iz sevanja v električno energijo.
2. Material diode: Material diode je ključnega pomena za njeno delovanje. Pri betavoltaičnih aplikacijah je priporočljivo izbrati diodo, ki je odporna proti radioaktivnemu sevanju. Material mora biti stabilen in zanesljiv tudi ob dolgotrajni izpostavljenosti sevanju.
3. Valovna dolžina sevanja: Če je vaša aplikacija specifična glede valovne dolžine sevanja (na primer UV sterilizacija), izberite diodo, ki je občutljiva na to valovno dolžino. Pravilna izbira diode bo zagotovila optimalno pretvorbo energije.
4. Zanesljivost: Dioda mora biti zanesljiva in vzdržljiva v zahtevnih okoljih.

4.2.1 BPW34

BPW34 je visokohitrostna fotodioda s dobro fotosenzitivnostjo, izdelana v miniaturiziranem plastičnem ohišju s ploščato zgornjo stranjo. Ta fotodioda je občutljiva na vidno in blizu infrardeče sevanje. Njena hitrost odziva je izjemno kratka (20 ns), kar jo naredi primerno za aplikacije, ki zahtevajo hitro detekcijo svetlobe.

BPW34 je silicijeva PIN fotodioda, znana po svoji visoki hitrosti in visoki občutljivosti na sevanje v miniaturi s ploščato zgornjo stranjo v prozornem plastičnem ohišju, kar jo naredi primerno za vidno in blizu infrardeče sevanje. Idealna je za aplikacije, ki zahtevajo visoko hitrost detekcije svetlobe.

Za izračun energijske špranje fotodiode BPW34 se običajno uporablja enačba, ki povezuje energijsko špranjo E_g polprevodnika z valovno dolžino λ njegove največje občutljivosti. Ta enačba je dana kot

$$E_g = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

kjer je λ valovna dolžina, pri kateri je občutljivost fotodiode največja, h je Planckova konstanta, c hitrost svetlobe, in E_g je energijska špranja. Za BPW34 je njegova največja občutljivost okoli 900 nm. Posledično z uporabo enačbe (2) lahko

izračunamo energijsko špranjo diode. Energijska špranja fotodiode BPW34, izračunana na podlagi njene največje valovne dolžine občutljivosti 900 nm, je približno 1,38 eV.

Betavoltaične naprave zahtevajo polprevodnike, ki lahko učinkovito pretvorijo sevanje v električno energijo. Visoka občutljivost na širok spekter svetlobe in hitri odzivni časi BPW34 bi jo lahko naredili primerno za takšne aplikacije, ob predpostavki, da lahko učinkovito interagira z energijskimi nivoji beta delcev.

4.2.2 BPW34 v neprozornem ohišju

Ta dioda je predvsem podobna svoji različici, ki ima prozorno ohišje in ima večino enakih lastnosti. Je silicijeva p-i-n fotodioda in njena občutljivost je pri valovni dolžini 900 nm. Zanimalo nas je tudi, če bo prišlo do sprememb pri rezultatih, če bo testirana dioda imela debelejše in neprozorno ohišje.

4.2.3 BPW34S

Še ena različica silicijeve PIN fotodiode, katera ima največjo občutljivost pri valovni dolžini 920 nm. Zanimalo nas je ali bodo take majhne spremembe v energijski špranji močno vplivale na pridobljene rezultate. Energijska špranja fotodiode BPW34S, izračunana na podlagi njene največje valovne dolžine občutljivosti 920 nm in enačbe (2), je približno 1,35 eV.

4.2.4 Modra LED dioda

Uporabili smo tudi običajno modro LED diodo. Valovna dolžina kjer ima dioda največjo občutljivost se nahaja med 450-500 nm [7]. Posledično je tudi energijska špranja večja in znaša okoli 2,48-2,76 eV. Ta energijska špranja predstavlja pomembno prednost pri uporabi betavoltaičnih baterij. To je značilno za galijev nitrid (GaN) ali indijev galijev nitrid (InGaN).

Visoka energijska špranja modrih LED diod, lahko učinkovito pretvorijo visokoenergijske beta delce v električno energijo. Beta delci imajo višje energijske ravni, ki se dobro ujemajo z materiali z visoko energijsko špranjom. To omogoča učinkovitejšo pretvorbo energije. [1]

4.2.5 Bela LED dioda

Bela LED dioda deluje na osnovi polprevodniškega materiala, ki seva svetlubo, ko skozenj teče električni tok. Barva svetlobe, ki jo dioda oddaja, je odvisna od energije,

potrebne za prehod elektronov čez energijsko špranjo polprevodnika. Bela svetloba se pri LED diodah običajno doseže plastjo svetlečega fosforja na polprevodniški napravi.

Za uporabo v betavoltaičnih napravah, ki pretvarjajo beta delce iz radioaktivnega razpada v električno energijo, je ključnega pomena energijska špranja uporabljenega polprevodnika. Bela LED dioda, ki uporablja materiale z direktno energijsko špranjom, kot je galijev nitrid (GaN), omogoča učinkovito pretvorbo visokoenergijskih beta delcev v električno energijo. To je zato, ker direktna energijska špranja omogoča, da valenčni elektroni neposredno preidejo v prevodni pas ob absorpciji fotona. To poveča verjetnost emisije svetlobe ali, v primeru betavoltaičnih naprav, pretvorbo energije.

Energijska špranja pri beli LED diodi se ne razlikuje kaj bistveno od modre LED diode. Zanimalo nas je tudi, kako bo na rezultate vplivala plast svetlečega fosforja s katero je pokrita dioda.

4.2.6 UV emisijska dioda

UV emisijske diode delujejo po principu elektroluminiscence, kjer ponovna kombinacija elektronov in elektronskih vrzeli v polprevodniku proizvede svetljivo. V tem primeru UV svetljivo. Valovna dolžina svetlobe, ki jo oddaja UV LED dioda, je odvisna od energijske špranje polprevodniškega materiala, ki se uporablja. Materiali z večjo energijsko špranjijo oddajajo svetljivo pri krajevih valovnih dolžin, kar omogoča UV LED diodam, da sevajo v ultravijoličnem spektru.

Za UV emisijske diode se pogosto uporablja materiali kot sta aluminijev galijev nitrid (AlGaN) ali galijev nitrid (GaN). Ti sevajo z valovnimi dolžinami okoli 365 nm za GaN [8]. Energijska špranja je precej visoka - 3,40 eV. Te diode so še posebej primerne za betavoltaične aplikacije, saj visoka energijska špranja omogoča učinkovito pretvorbo visokoenergijskih beta delcev v električno energijo. Ta lastnost naredi UV LED diode privlačne za uporabo v napravah, ki zahtevajo visokoenergijsko UV sevanje za razkuževanje, sterilizacijo ali druge aplikacije.

4.3 Testiranje radioizotopov

Za testiranje smo uporabili tri različne vrste radioizotopov. To so bili cezij ^{137}Ce , kadmij Cd in tritij ^3H . Razlog za izbiro vsakega izmed njih je zelo preprost. V vsakem izmed njih poteka proces beta ali gama razpada. Hkrati smo imeli dostop do teh radioaktivnih izotopov.

Kobalt ^{60}Cb : Oddaja močne gama žarke, ki lahko zagotovijo visoko energijsko izhodno moč, vendar zahteva dodatno zaščito saj so zelo prodorni.

Cezij ^{137}Cs : Cezij oddaja beta delce kot tudi gama delce. Ima dolgo razpolovno dobo, kar omogoča dolgotrajno energijsko dobavo. Vendar, podobno kot kobalt, zahteva previdnost pri ravnjanju.

Tritij ^3H : Oddaja nizko energijske beta delce in ima relativno kratko razpolovno dobo. Zaradi nizko energijskih beta delcev je manj nevaren in lažje obvladljiv kot kobalt in cezij, kar zmanjšuje potrebo po robustni zaščiti. Radioizotop tritija je v našem primeru bil premazan s scintilatorjem. To pomeni, da se del beta sevanja pretvori v svetlobo. Ta prav tako reagira z diodo, kar lahko doprinese k višji energiji betavoltaične baterije[9].

4.4 Izvajanje meritve

Vse meritve so bile izvedena na elektrometru Kethley 6517. Izbran je bil zaradi njegove sposobnosti zaznavanje izjemno nizkih ravni električnega toka, napetosti in upornosti. To je bilo ključno za natančno ocenjevanje učinkovitosti in delovanja betavoltaičnih baterij. Njegove napredne funkcije in večja natančnost omogočajo podrobno analizo vedenja baterije pri različnih pogojih, kar olajšuje optimizacijo oblikovanja in funkcije baterije.

Postopek je potekal v naslednjih korakih:

1. Diodo smo skupaj z elektrometrom in upornikom povezali v električni krog.
2. V okolje za testiranje smo vstavili polprevodniško diodo. Nato smo se prepričali, da je tok v električnem krogu enak $0 \pm 10 \text{ pA}$.
3. Sedaj smo v okolje za testiranje vstavili še radioizotop, ter tok ponovno izmerili.

To smo nato ponovili za vse diode in radioizotope.

5 Rezultati

Med diodami, ki smo jih testirali, sta nam oprijemljive rezultate podali le diodi BPW34 in BPW34S. Ostale diode ali niso reagirale z radioizotopi ali pa jih nismo mogli izmeriti. Te so imele veliko šuma.

Obe diode, ki sta nam dali rezultate, sta reagirali s tritijem. To pomeni, da od oben močnejših sevalcev, nismo dobili nikakršne reakcije, kar je v nasprotju z do sedaj znano teorijo.

Razlog zato, se najverjetneje skriva v scintilatorju, s katerim je bil premazan tritij. S scintilatorjem, sta reagirali fotodiodi, saj je tako radioaktivni vir oddajal tudi fotone. Torej bi morali za boljše rezultate uporabiti močnejše vire sevanja.

Diodama BPW34 in BPW34S smo nato izmerili električni tok I pri različnih upornostih R , z namenom, da bi našli najvišjo energijo, ki jo naša baterija lahko proizvede.

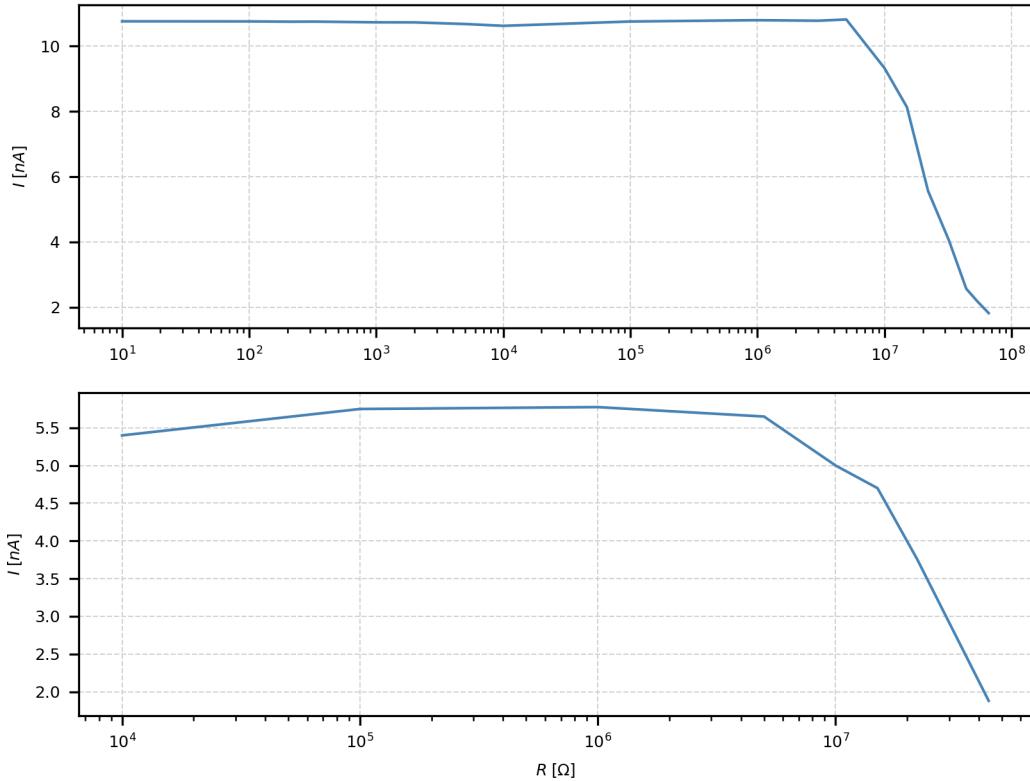
Na sliki 8 spodaj, lahko opazimo točko, na kateri je električni tok v sistemu največji. Na sliki 8 zgoraj pa tega ni mogoče opaziti. To lahko pojasnimo z visoko notranjo upornostjo diode BPW34.

Moč baterije sva izračunala z enačbo

$$P = IR^2,$$

kjer P predstavlja moč v vatih. Med sabo sva primerjala moči pri vseh upornostih, ter tako izračunala največjo moč vsake izmed baterij.

$$\begin{aligned} P_{BPW34} &= 1,2 \cdot 10^{-3} W \\ P_{BPW34S} &= 5,8 \cdot 10^{-4} W \end{aligned}$$



Slika 8: Graf toka I v odvisnosti od upornosti R . Zgoraj: BPW34, Spodaj: BPW34S

Po natančni analizi grafov smo prišli do naslednjih ugotovitev:

Stabilen tok pri nizki upornosti: Betavoltaična baterija ohranja razmeroma stabilen izhodni tok pri nižjih upornostih, kar dokazuje njeno sposobnost zagotavljanja stalne moči pri različnih pogojih obremenitve. Ta stabilnost je ključna za aplikacije, ki zahtevajo zanesljiv vir energije.

Zmanjšanje toka pri visoki upornosti: Pri povečevanju upornosti, zlasti pri zelo visokih vrednostih, je opazno zmanjšanje toka. To obnašanje poudarja notranje omejitve sposobnosti baterije.

Upoštevanje učinkovitosti: Prisotnost notranjega upora, zlasti v sestavnih delih, kot so diode v vezju, lahko bistveno vpliva na učinkovitost sistema. Vnaša energijske izgube v obliki toplote in zmanjšuje neto izhodno moč, ki je na voljo za zunanje obremenitve. Optimizacija komponent za zmanjšanje teh izgub je ključnega pomena za povečanje splošne učinkovitosti sistema.

6 Zaključek

Naše dosedanje raziskave betavoltaičnih baterij so omogočile dragocen vpogled v temeljne vidike in učinkovitost delovanja teh virov energije. S proučevanjem histogramov in uporabo različnih diod smo poiskali za nas najugodnejše diode. Naša analiza je poudarila pomen izbire ustrezne radioaktivne snovi, pri čemer se je tritij izkazal kot prednostna izbira zaradi relativno varnih emisij beta delcev in primernoosti za dosledno proizvodnjo energije.

Raziskava delovanja betavoltaične baterije pri različnih upornostih je razkrila vpliv značilnosti obremenitve na učinkovitost baterije in stabilnost njene proizvodnje. To poudarja potrebo po optimizaciji električne zasnove. Da bi zmanjšali izgube in izboljšali učinkovitost, je potrebno pri optimizaciji vključiti tudi izbiro diod. Notranja upornost diod, ki je kritični dejavnik v vezju, je bila opredeljena kot pomemben vpliv na učinkovitost, zato je treba skrbno izbrati komponente za zagotovitev optimalnih obratovalnih lastnosti.

V prihodnjih mesecih nameravamo bistveno pospešiti raziskave betavoltaičnih baterij z vključitvijo močnejših radioaktivnih virov in poskusi s širšim naborom diod in polprevodnikov, vključno s sončnimi celicami. Cilj te pobude je povečati proizvodnjo energije in učinkovitost betavoltaičnih sistemov. Ključne strategije vključujejo optimizacijo zbiranja energije iz delcev beta ter uporabo naprednih simulacij in modeliranja za napovedovanje in izboljševanje učinkovitosti sistema. Ta prizadevanja so usmerjena v ustvarjanje učinkovitejših, vsestranskih in trajnostnih energetskih rešitev za različne aplikacije, kar pomeni ključni korak v našem stalnem raziskovanju betavoltaične tehnologije.

Literatura

- [1] C. Zhou, J. Zhang, X. Wang in sod., “Review—Betavoltaic Cell: The Past, Present, and Future,” *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, let. 10, št. 2, str. 027 005, feb. 2021, ISSN: 2162-8777. DOI: 10.1149/2162-8777/abe423. spletni naslov: <http://dx.doi.org/10.1149/2162-8777/abe423>.
- [2] F. Kondev, M. Wang, W. Huang, S. Naimi in G. Audi, “The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties *,” *Chinese Physics C*, let. 45, št. 3, str. 030 001, mar. 2021, ISSN: 2058-6132. DOI: 10.1088/1674-1137/abddae. spletni naslov: <http://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/abddae>.
- [3] J. Demas in S. Demas, “Luminescence,” v *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier, 2014. DOI: 10.1016/b978-0-12-409547-2.11000-5. spletni naslov: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.11000-5>.
- [4] D. Halliday, R. Resnick in J. Walker, *Fundamentals of Physics* (Fundamentals of Physics). Wiley, 2013, ISBN: 9781118230718. spletni naslov: <https://books.google.si/books?id=HybkAwAAQBAJ>.
- [5] https://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_2.html, [Accessed 01-03-2024].
- [6] *How does a Photodiode Work? — utmel.com*, <https://www.utmel.com/blog/categories/diodes/how-does-a-photodiode-work>, [Accessed 01-03-2024].
- [7] Y. Wang, M. Zhang, Y. Sun in sod., “Role of Short-wavelength Blue Light in the Formation of Cataract and Expression of Caspase-1, -11 and Gasdermin D in rat Lens Epithelium Cells: Insight into the Novel Pathogenesis of Cataract.,” dec. 2019. DOI: 10.21203/rs.2.18560/v1. spletni naslov: <http://dx.doi.org/10.21203/rs.2.18560/v1>.
- [8] *The wavelength range of LEDs — Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation — Asia-English — toshiba.semicon-storage.com*, <https://toshiba.semicon-storage.com/ap-en/semiconductor/knowledge/e-learning/discrete/chap5/chap5-3.html>, [Accessed 02-03-2024].
- [9] S. Xue, C. Tan, P. Kandlakunta, I. Oksuz, V. Hlinka in L. R. Cao, “Methods for improving the power conversion efficiency of nuclear-voltaic batteries,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, let. 927, str. 133–139, maj 2019, ISSN: 0168-9002. DOI: 10.1016/j.nima.2019.01.097. spletni naslov: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.097>.