

6.18. SAULĖS ELEMENTO (SE) TYRIMAS

Darbo tikslas

Ištirti įvairias saulės elemento voltamperines charakteristikas ir nustatyti jo parametrus.

Darbo užduotys

- Ištirti saulės elemento voltamperines charakteristikas (srovės ir galios priklausomybę nuo įtampos) esant dirbtiniam ir natūraliam apšvietimui.
- Ištirti, kaip voltamperinės charakteristikos priklauso nuo šviesos intensyvumo ir bangos ilgio.
- Nustatyti vieno ir keleto (sujungtų nuosekliai bei lygiagrečiai) saulės elementų naudingumo koeficientą.

Teorinės temos

- Puslaidininkinės p-n sandūros veikimo principas.
- Fotoefektas.
- Saulės elemento veikimo principas.
- Saulės elemento efektyvumas ir jo priklausomybė nuo bangos ilgio.
- Maksimali saulės elemento galia.
- Trumpojo jungimo srovė.

Darbo priemonės ir prietaisai

Saulės elementai, ampermetras, voltmetras, jungiamieji laidai, lempa su spalvotomis plokštelėmis (arba skirtingų spalvų lemputėms), reostatas/varžynas, šviesos galios matuoklis.

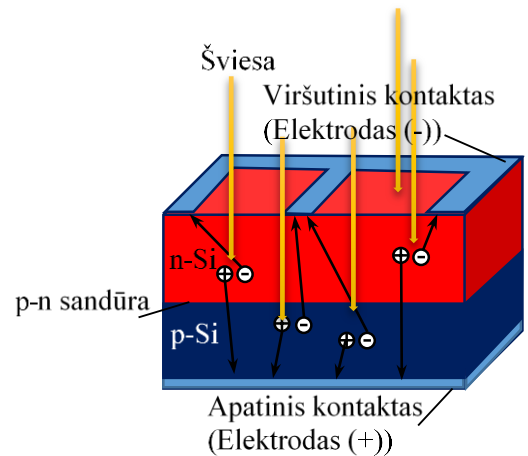
Darbo metodika

Saulės elementas arba jų junginys, dar vadinamas *saulės baterija*, yra prietaisas, fotoelektrinio efekto dėka verčiantis Saulės šviesos energiją į nuolatinės srovės elektros energiją.

Šiuo metu Saulės šviesa į elektrą dažniausiai verčiama puslaidininkiniuose saulės elementuose. Pastarieji yra gaminami iš silicio (Si). Tai dažniausiai yra p-n jungčių puslaidininkis. Silicis yra vienas gausiausių Žemės elementų, plačiai paplitęs smėlio (silicio dioksido) pavidalu.

Grynojo puslaidininkio elektrinį laidumą lemia dviejų tipų laisvieji krūvininkai – laidumo elektronai ir skylės, kurių tankiai yra vienodi. Grynajame puslaidininkyje laisvieji krūvininkai atsiranda kaip puslaidininkio atomų jonizacijos rezultatas. Šias medžiagos savybes galima keisti įdėjus šiek tiek priemaišų - gardelės mazguose dalį atomų pakeičiant kitokio valentingumo medžiagos, vadinamos *priemaiša*, atomais. Priemaišų atomų tankis būna mažas, dešimčiai milijonų silicio atomų vidutiniškai tenka vienas priemaišų atomas. Tada kiekvieną priemaišos atomą supa tik puslaidininkio medžiagos atomai, nes atskiri priemaišų atomai kristale yra santykinai toli vienas nuo kito. Priemaišų atomai yra atskirti (izoliuoti) vienas nuo kito ir negali sąveikauti. Norint gauti pageidaujamą puslaidininkio laidumo tipą naudojamos donorinės (kurios padidina laisvųjų elektronų kiekį medžiagoje (n tipo)) ir akceptorinės (kurios padidina skylių kiekį medžiagoje (p tipo)) priemaišos.

Saulės elemente p-Si ir n-Si paviršiai yra padengti metaliniais kontaktais, kurie paprastai jungiami prie išorinės apkrovos (lemputės, nuolatinės srovės generatoriaus ar pan., 6.18.1 pav.). Kai p-n sandūra apšviečiama, fotonai, turintys lygią arba didesnę energiją negu silicio puslaidininkio draustinių energijų juostos plotis ($\Delta E_{Si} \approx 1.1$ eV), priverčia pereiti silicio elektronus iš valentinės į laidumo juostą abiejose sandūros pusėse (ir p, ir n-Si). Atsiradus papildomiems laisviesiems krūvininkams (elektronams laidumo juostoje ir skylėms valentinėje juostoje, buvusi terminė laisvųjų krūvininkų pusiausvyra p-n sandūroje sutrikdoma. Sandūros srityje susidarę laisvi krūvininkai (elektronai ir skylės) sandūros elektrinio lauko yra išskiriami: elektronai pernešami per sandūrą į n-tipo Si sluoksnį, o skylės į p-tipo Si sluoksnį. Pertekliniai elektronai n-tipo silicyje, veikiami susidariusio elektrinio lauko, per metalinį elektrodą juda išorine grandine per apkrovą iki kito metalo ir puslaidininkio kontakto. Pasiekę p-tipo Si, elektronai susitinka su priešinga kryptimi judančiomis skylėmis ir rekombinuoja. Taip saulės elemente atsiranda nuolatinė elektros srovė. Srovė teka tol, kol elementas yra apšviečiamas šviesa, generuojančia laisvuosius krūvininkus silicyje.



6.18.1 pav. Saulės elemento schema

Tik nedidelę kritusios šviesos energijos dalį elementas konvertuoja į naudingą elektros energiją. Vieno elemento generuojama galia (įtampos ir srovės sandauga) yra labai maža, tad elementai paprastai sujungiami į masyvus - baterijas. Saulės šviesa yra įvairios energijos (bangos ilgio) fotonų srautas. Atsklidusi iki silicio paviršiaus, ji gali atsispindėti, būti sugerta arba išsklaidyta (t.y. nebūti nei sugerta, nei atspindėta, bet sklisti toliau, o dėl kelyje sutinkamų skirtingo lūžio rodiklio medžiagų pakeisti kryptį). Dalis fotonų atspindima nuo silicio paviršiaus. Atspindžiui sumažinti naudojami antirefleksiniai sluoksniai. Sugeriami tik tie fotonai, turintys energiją $E_{\text{fot}} > \Delta E_{Si}$, kurie geba sužadinti silicio elektronus iš valentinės į laidumo juostą ir taip generuoti krūvininkus. Jei sugerto fotono energija didesnė už ΔE_{Si} , elektrono sužadimui panaudojama tik dalis fotono energijos, o kita dalis virsta šiluma. Kadangi Saulės spektre yra tik nedidelė dalis fotonų, kurių energija lygi ar šiek tiek didesnė už ΔE_{Si} , todėl tik ta dalis šviesos energijos gali būti paverčiama elektrine. Silicio saulės elementuose tik apie 15-25 % Saulės šviesos energijos konvertuojama į elektrinę, priklausomai nuo p-n jungtims panaudoto silicio atmainos (monokristalinio Si, polikristalinio Si, plonų sluoksnių) bei elemento konstrukcijos. Saulės elementų gamyboje vis dar dominuoja silicis, tačiau tiriamos (ir jau naudojamos) ir kitos medžiagos, siekiant padidinti energijos keitimo efektyvumą. Pavyzdžiui, vietoje silicio jau naudojamos kitos puslaidininkinės medžiagos (CdTe, CuInSe₂, CuGaSe₂, CuIn_xGa_(1-x)Se₂). Šios medžiagos turi kitokias nei Si draustines energijos juostas (ΔE), tad sugeria kitokios energijos fotonus. Šie plonasluoksniai elementai yra pigesni, bet jų keitimo efektyvumas (10-20 %) kol kas dar mažesnis už silicio elementų. Padidintu efektyvumu pasižymi daugiasluoksniai saulės elementai. Jie sudaryti iš daug plonų skirtingų puslaidininkinių sluoksnių, nusodintų epitaksijos iš cheminių garų būdu.

Saulės elementuose naudojamas trijų pagrindinių kristalinių tipų silicis: monokristalinis, polikristalinis ir amorfinis. Skirtumas lemia, kaip išsidėstę atomai silicio kristale. Nuo elemento tipo priklauso ir jo efektyvumas. Monokristalinio ir polikristalinio tipo elementų efektyvumas yra beveik toks pat arba didesnis už amorfinio tipo elementų. Dabar plačiai tiriami organiniai ir polimeriniai saulės elementai, tačiau kol kas jų keitimo efektyvumas mažas, palyginus su neorganinių medžiagų elementais.

Sparčiai tobulėjant technologijoms saulės elementų tyrimai pereina į nanotechnologijų sritį. Intensyviai tiriami ir tobulinami saulės elementai nanotaškų pagrindu. Tai yra kvantinės nanostruktūros, pvz., anglies nanovamzdeliai, indžio fosfido nanovielos ar kitų medžiagų nanodalelės, įterptos į polimerinę ar porėtą metalo oksido matricą. Keičiant nanotaškų dydį, galima keisti ΔE , kartu ir

sugeriamų fotonų energiją. Nors šie tyrimai yra dar tik pradinėje stadijoje, laboratorijose jau pasiekiamas 42 % keitimo efektyvumas.

Svarbiausi saulės elemento parametrai - generuojama srovė, įtampa bei galia. Įprastinė saulės elemento voltamperinė charakteristika pavaizduota 6.18.2 paveiksle.

Neapšviesto saulės elemento srovės (I_n) priklausomybė nuo įtampos atitinka įprastinę srovės, tekančios puslaidininkinio diodo p-n sandūra, išraišką:

$$I_n = I_0 \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right), \quad (6.18.1)$$

čia I_0 – atvirkštinė soties srovė, e - elektrono krūvis, U - įtampa, n - koeficientas, apibūdinantis realių parametrų nukrypimą nuo idealios diodo charakteristikos, k - Bolcmano konstanta, T – absoliučioji temperatūra.

Apšviestą saulės elementą idealiu atveju galima įsivaizduoti kaip lygiagrečiai sujungtus du elementarius elektroninius komponentus: srovės šaltinį ir tą patį p-n diodą. Srovės šaltinis generuoja fotosrovę, kuri yra proporcinga apšviestumui. Diodo esanti p-n sandūra dėka energijos juostų struktūros užtikrina sugeneruotų krūvių atskyrimą ir vienkryptį srovės tekėjimą. Šiuo atveju apšviesto saulės elemento srovė $I_{\text{apšviesto}}$ aprašoma taip:

$$I_{\text{apšviesto}} = I_a - I_0 \left(e^{\frac{eU}{nkT}} - 1 \right), \quad (6.18.2)$$

čia I_a yra srovės šaltinio sugeneruota srovė. Tipinė voltamperinė saulės elemento charakteristika pavaizduota 6.18.3 paveiksle. Jei prie saulės elemento prijungiama apkrovos varža R , tada įtampa U_R ir srovė I_R apkrovoje nustatomos iš saulės elemento srovės ir įtampos priklausomybės bei tiesės, atitinkančios lygtį $U = -IR$, sankirtos. Tokiu atveju apkrovoje išsiskirianti galia yra:

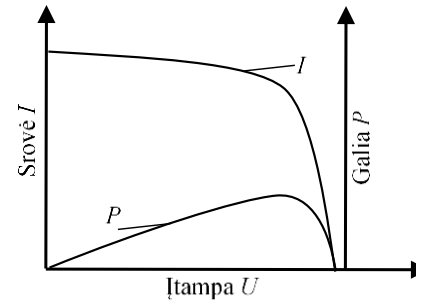
$$P_R = RI_R^2. \quad (6.18.3)$$

Jei saulės elemento kontaktai yra atjungti arba užtrumpinti, saulės elemento išėjimo galia lygi nuliui. Derinant apkrovimo varžą, galima surasti optimalų darbo tašką, kuriame išėjimo galia yra maksimali. Realių saulės elementų parametrus blogina ominė elemento varža ties paviršiumi. Šios varžos įtaka didelė ir gali sumažinti naudingą galią daugiau nei 70 procentų.

Saulės elemento efektyvumo koeficientas η yra išreiškiamas taip:

$$\eta = \frac{P_{\text{iš}}}{P_{\text{i}}} \cdot 100 \% = \frac{I_{\text{tj}} U_{\text{ag}} \cdot f}{P_{\text{i}}} \cdot 100 \% , \quad (6.18.4)$$

čia $P_{\text{iš}}$ - saulės elemento generuojama elektrinė galia, P_{i} – į jį krentančios spinduliuotės galia, I_{tj} – trumpojo jungimo srovė (maksimali srovė, kuri gali tekėti saulės elementu, kai jo elektrodai užtrumpinti; esant trumpajam jungimui įtampa grandinėje lygi nuliui), U_{ag} – atviros grandinės (prie kurios neprijungta jokia išorinė apkrova; atviroje grandinėje srovė lygi nuliui) įtampa, f – užpildos koeficientas (angl. *fill factor*); jis apibūdina, kiek realaus fotodiodo voltamperinė charakteristika sutampa su idealaus saulės elemento voltamperine charakteristika. Šis dydis apibrėžiamas kaip maksimalios galios ir trumpojo jungimo galios santykis:



6.18.2 pav. Įprastinė saulės elemento voltamperinė charakteristika

$$f = \frac{U_{\max} I_{\max}}{U_{\text{ag}} I_{\text{tj}}} \quad (6.18.5)$$

Geometriškai jis nusako dviejų stačiakampių plotų santykį (6.18.3 pav.). Idealiame monokristalinio silicio saulės elementui f teoriškai yra apie 0,8, bet realiaime, ypač kai jo plotas yra 100 cm² ir daugiau, f mažėja. Dėl rekombinacinių srovių silicio saulės elementų efektyvumas 300 K (27°C) temperatūroje gali sumažėti iki 25 %. Naudingumas η yra didžiausias, kai generuojama galia didžiausia. Tinkamai parinkus apkrovą naudingoji elemento galia gali siekti iki $0,8 \cdot U_{\text{ag}} I_{\text{tj}}$.

Didžiausia grandinėje generuojama galia P_{\max} , atviros grandinės įtampa U_{ag} ir srovė I_{tj} yra susietos tokia priklausomybe:

$$P_{\max} = U_{\text{ag}} I_{\text{tj}} f \quad (6.18.6)$$

Darbo eiga

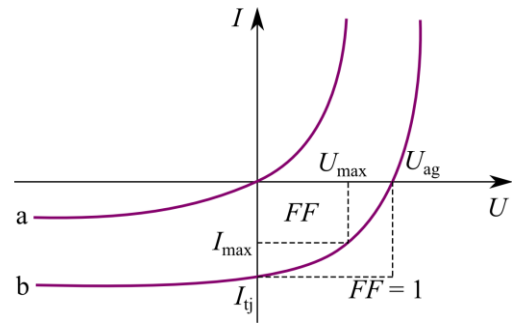
1. SE voltamperinė charakteristika esant dirbtiniam apšvietimui

1. Sujungiama 6.18.4 paveiksle pavaizduota grandinė. Tiesioginis apšvietimas turi kristi statmenai saulės elemento paviršiui.
2. Saulės elementas ir dirbtinės šviesos šaltinis (lemputė) pastatomi atstumu L vienas nuo kito.
3. Nustačius įvairias apkrovos varžas (pasirenkama bent 7-10 verčių), pamatuojama grandine tekanti fotoelektrinė srovė ir įtampa. Rekomenduojama, pirmam matavimui pasirinkti kiek įmanoma mažesnę varžą, o paskutiniajam - didžiausią.
4. Matavimai kartojami pakeitus atstumą tarp lemputės ir saulės baterijos.
5. Pagal formulę $P = U \cdot I$ apskaičiuojama elektros srovės galia.
6. Duomenys surašomi į 1 lentelę:

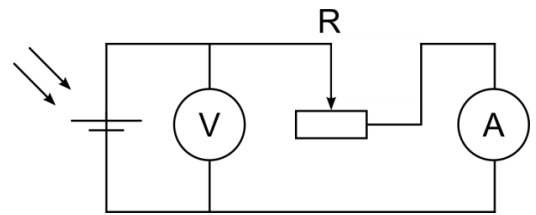
1 lentelė

$L, \text{ m}$	$I_{\text{fot.}}, \text{ A}$	$U, \text{ V}$	$P, \text{ W}$

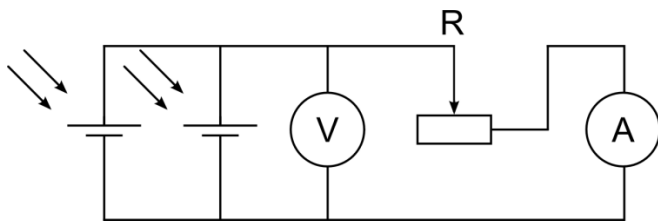
7. Iš gautų duomenų nubrėžiami fotoelektrinės srovės priklausomybės nuo įtampos bei fotoelemento galios priklausomybės nuo fotoįtampos grafikai.
8. Sujungiama 6.18.5 paveiksle pavaizduota grandinė - keli saulės elementai į saulės bateriją sujungiami lygiagrečiai. Pakartojami 2 – 7 darbo eigos punktai.
9. Sujungiama 6.18.6 paveiksle pavaizduota grandinė - keli saulės elementai į saulės bateriją sujungiami nuosekliai. Pakartojami 2 – 7 darbo eigos punktai.
10. Pakeitus spinduliuotės bangos ilgį (spalvotų filtrų pagalba arba naudojant kitos spalvos lempą) pakartojami 1-9 darbo eigos punktai.



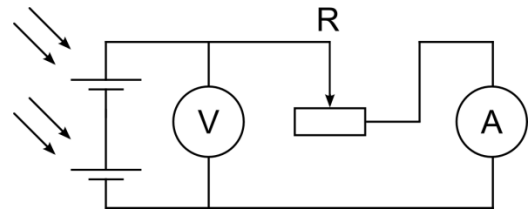
6.18.3 pav. Saulės elemento voltamperinė charakteristika: a - elementas apšviestas, b - elementas neapšviestas



6.18.4 pav. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo grandinės schema



6.18.5 pav. Lygiagrečiai sujungtų saulės elementų baterijos voltamperinės charakteristikos matavimo schema



6.18.6 pav. Nuosekliai sujungtų saulės elementų baterijos voltamperinės charakteristikos matavimo schema

2. SE voltamperinė charakteristika esant natūraliam apšvietimui

1. Sujungiama 6.18.4 paveiksle pavaizduota grandinė. Tiesioginė saulės šviesa turi kristi į saulės elemento paviršių statmenai.
2. Fotosrovės ir įtampos matavimai pradedami esant atvirai grandinei (t.y. $R = \infty$; realiame matavime pakanka nustatyti maksimalią įmanomą varžą). Pažymėtina, jog esant atvirai grandinei, kai srovė $I = 0$, visa šviesos sukurta srovė teka per saulės elementą. Esant trumpajam jungimui, kai $U = 0$, visa srovė teka per išorinę apkrovą. Šviesos galios matuokliu išmatuojama krintančios spinduliuotės galia P_i .
3. Matavimai mažinant varžą atliekami parinkus bent 10 skirtingų verčių.
4. Pagal formulę $P = U \cdot I$ apskaičiuojama saulės elementu tekančios elektros srovės galia.
5. Duomenys surašomi į 2 lentelę:

2 lentelė

L, m	$I_{\text{fot.}}, A$	U, V	P, W

6. Pagal eksperimentinius duomenis nubrėžiami fotoelektrinės srovės priklausomybės nuo įtampos bei fotoelemento galios priklausomybės nuo fotoįtampos grafikai.
7. Sujungiama 6.18.5 paveiksle pavaizduota grandinė - keli saulės elementai į saulės bateriją sujungiami lygiagrečiai. Pakartojami šios darbo dalies 2 – 6 punktai.
8. Sujungiama 6.18.6 paveiksle pavaizduota grandinė - keli saulės elementai į saulės bateriją sujungiami nuosekliai. Pakartojami šios darbo dalies 2 – 6 punktai.
9. Saulės elemento paviršių pakreipus 45° kampu pakartojami šios darbo dalies 2-6 punktai.
10. Pagal formulę $\eta = P_{\text{iš}}/P_i$ apskaičiuojamas saulės elemento naudingumo koeficientas, čia $P_{\text{iš}}$ - saulės elemento generuojama elektrinė galia (maksimumas randamas iš 6-ame punkte nubraižyto grafiko).

Literatūra

1. J. Butrimaitė, A. Dementjev, G. Dikčius, R. Gadonas, J. Jasevičiūtė, V. Karenauskaitė, V. Sirutkaitis, V. Smilgevičius, *Fizika biomedicinos ir fizinių mokslų studentams*. I dalis. Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla, 2003.
2. B. Kukšas, S. Vičas, *Fizika 2*. Trečiasis leidimas. Vilnius, Mokslas, 1988.
3. Paul A. Tipler, *Physics*. Antrasis leidimas. Ročesteris, Worth Publishers, 1982.
4. J. M. Hollas, *Modern Spectroscopy*. Ketvirtas leidimas. Čičesteris, John Wiley & Sons, 2004.