



2004-2006 m. Bendrojo programavimo dokumento 2 prioriteto „Žmogiškųjų išteklių plėtra“ 4 priemonė „Mokymosi visą gyvenimą sąlygų plėtra“

Projekto sutarties numeris: ESF/2004/2.4.0-K01-160/SUT-261

Projekto pavadinimas: **Inovatyvūs mokymosi metodai ir naujausios technologijos gamtos mokslų bakalauro rengimui**

FIZ 414 APLINKOS FIZIKA

Laboratorinis darbas

SAULĖS ELEMENTO TYRIMAS

1. Darbo tikslas:

1.1. Ištirti saulės elemento energijos konversijos parametrus.

2. Darbo užduotys:

2.1. Išmatuoti voltamperinę saulės elemento charakteristiką.

2.2. Nustatyti saulės elemento efektyvumą.

3. Bendroji teorija

Fotoelementų veikimo principai

Tiesioginė fotonų energija gali būti verčiama į elektrinę energiją naudojant saulės elementus, kuriuos sudaro puslaidininkinės medžiagos. Puslaidininkis yra (poli)-kristalinė medžiaga, kuriuose tik labai nedidelis skaičius krūvininkų gali judėti laisvai. kristalo struktūra yra tokia, kad egzistuoja nedidelis draustinių energijų tarpas E_g tarp valentinės ir laidumo juostos.

Saulės fotoelementuose naudojamos medžiagos turi nuo 1,0 iki 1,75 eV draudžiamą juostą. Skirtingo energetinio lygmens fotonai priklauso skirtingam šviesos bangos ilgiui. Diapazone nuo infraraudonųjų iki ultravioletinių šviesos spindulių šviesos fotonų energija yra apie 0,5 – 2,9 eV. 1 lentelėje nurodyti kai kurių puslaidininkių draudžiamųjų juostų dydžiai.

1 lentelė. Puslaidininkių draudžiamosios juostos

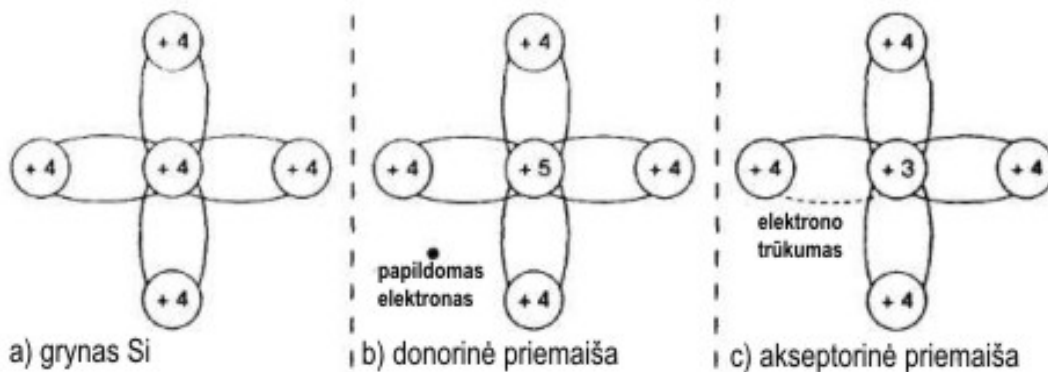
Medžiaga	Draudžiamoji juosta , eV
Monokristalinis silicis	1,12
Amorfinis silicis	1,75
Kadmio telūridas	1,44
Galio Arsenidas	1,43

Dalelių sąveikos kristale vidutinė energija atitinka $kT \sim 0,025$ eV kambario temperatūroje. Tokia energija yra per maža, kad elektronai galėtų peršokti iš valentinės į laidumo juostą. Kadangi dalelių pasiskirstymas atitinka Boltzmano funkciją, pagal kurią galima nustatyti, kokia dalis dalelių (elektronų) turi energiją intervale $[E, E+dE]$:

$$n(E)dE = c e^{-E/kT} dE, \quad (1)$$

kur c yra normavimo daugiklis. Tokiu būdu net ir kambario temperatūroje yra elektronų, kurie turi pakankamai energijos, kad galėtų pereiti į laidumo juostą. Silicyje tokių elektronų kambario temperatūroje yra apie $1,5 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Tai sudaro vos 10^{-12} dalį valentinių elektronų tankio.

Kad laisvųjų krūvininkų laidumo juostoje būtų daugiau, puslaidininkis legiruojamas – į jį įterpiami elementai, kurie išoriniame sluoksnyje turi penkis elektronus (Sb, P, As) arba tris valentinius elektronus (B, Al, Ga). Pirmuoju atveju atsiranda papildomas elektronas (n tipo puslaidininkis), kuris yra silpnai surištas su branduoliu, o antruoju – elektrono „trūkumas“ vadinamas „skylė“ (p tipo puslaidininkis).



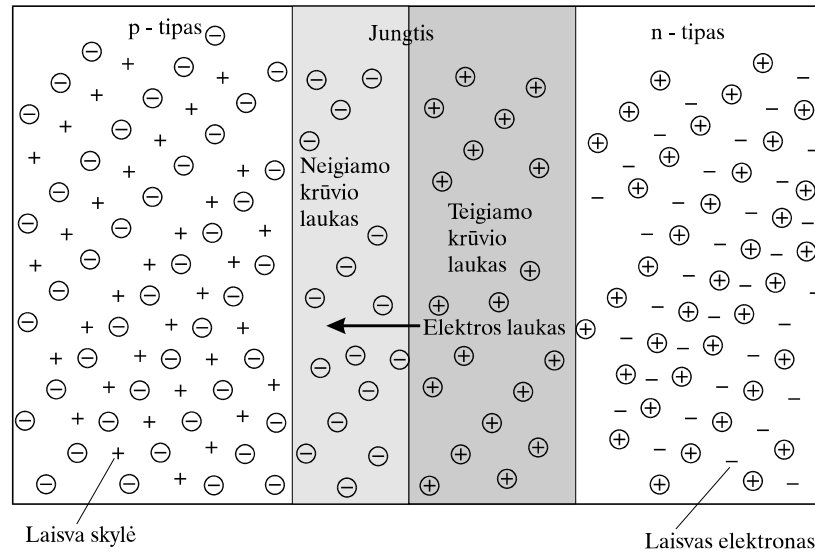
1 pav. Dvimatis Si kristalo atvaizdavimas (a) be priemaišų, (b) donorine priemaiša arba (c) akseptorine priemaiša

Papildomo elektrono ryšio energija yra 0,05 eV eilės¹, t.y. toks elektronas yra daug laisvesnis nei valentinėje juostoje esantys elektronai, be to, jis lengvai gali peršokti į laidumo juostą (donorinių elektronų energijos lygmenis nuo laidumo juostos skiria kaip tik tie 0,05 eV). Legiravimo metu įterpiami labai nedideli kiekiai priemaišinių atomų, tačiau šie kiekiai yra daug didesni negu savųjų krūvininkų tankiai ($\sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$): $\sim 10^{25} \text{ m}^{-3}$ n tipo ir $\sim 10^{22} \text{ m}^{-3}$ p tipo puslaidininkiams.

Norint, kad puslaidininkis veiktų kaip saulės fotoelementas, turi būti suformuota p-n jungtis. Tokios jungties schema pateikta 2 paveiksle. Draudžiamosios juostos dydis apsprendžia saulės elemento atviros grandinės įtampą. Platesnė draudžiamoji juosta reiškia, kad tos medžiagos atomo valentiniams elektronams perkelti į laidumo juostą reikalinga didesnė energija (mažesnio bangos ilgio šviesa). Draudžiamosios juostos dydis yra svarbus saulės elementų veikimui, kadangi fotonai ateinantys iš Saulės, yra skirtingos energijos. Fotonas, kurio energija mažesnė už draudžiamąją naudojamos medžiagos juostą, negalės sužadinti elektrono iš valentinės į laidumo juostą. Jei fotono energija lygi puslaidininkio draudžiamajai juostai, toks fotonas gali išmušti elektroną iš valentinės juostos ir perkelti jį į laidumo juostą. Tuomet valentinėje juostoje vietoje elektrono lieka skylė.

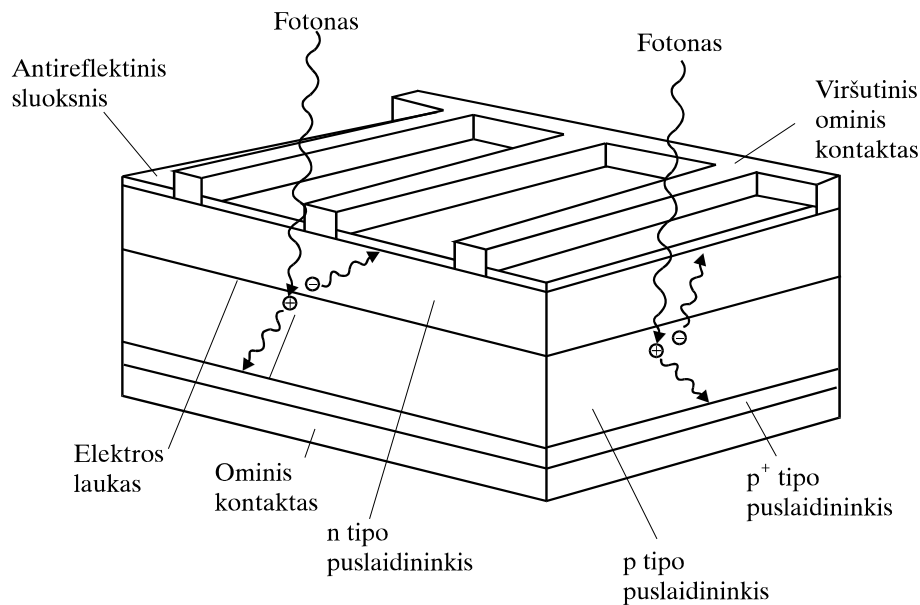
¹ Šis elektronas atitinka elektrono vandenilio atome modelį, nes visų branduolių krūviai yra ekranuoti kitais elektronais. Kulono jėgų lauke $V = -e^2 / (4\pi\epsilon_0\epsilon_r r^2)$. Siliciui $\epsilon_r = 11,4$, efektyvi elektrono masė $\sim 0,2 m_e$. Gauname, kad elektrono ryšio energija silicyje yra apie $2 \cdot 10^3$ kartų mažesnė vandenilio atome, t.y. apie 0,02 eV. Siliciui šiek tiek daugiau, o Ge yra apie 0,01 eV.

Tokiu atveju sakoma, kad fotonas sukūrė porą elektronas-skylė. Fotonas su energijos pertekliumi gali išlaisvinti tik vieną elektroną, o energijos perteklius virsta šiluma.



2 pav. p - n jungties schema

Saulės fotoelemento struktūra pateikta 3 paveiksle. Plokštelės viršuje suformuotas metalinis tinklelis (pro jį šviesa turi patekti į puslaidininkį), o apačioje metalinis kontaktas. Kai saulė apšviečia saulės elementą, silicyje generuojama daugybė porų elektronas-skylė. Elektronai ir skylės yra neigiami ir teigiami (atitinkamai) krūvininkai, todėl p-n sandūros elektros laukas verčia elektronus tekėti į n - tipo silicį, o skylės - į p - tipo silicį. Šviesos generuota elektros srovė teka iš p-tipo silicio į apkrovimą. Tiek vienoje, tiek ir kitoje puslaidininkio plokštelės pusėje suformuoti metaliniai elektrodai, prie kurių jungiamas apkrovimas. Viršutinis kontaktas paprastai yra šukų arba tinklelio pavidalo, o apatinis - iššisinis metalo sluoksnis.



4 pav. Saulės fotoelemento struktūra

Šviečiant ryškiai saulei, kai į elemento 1 cm^2 krinta 100 mW šviesos galingumas (1000 W/m^2), iš jo gaunamas $10 - 18 \text{ mW}$ elektros galingumas. Paprastai saulės elementai formuojami

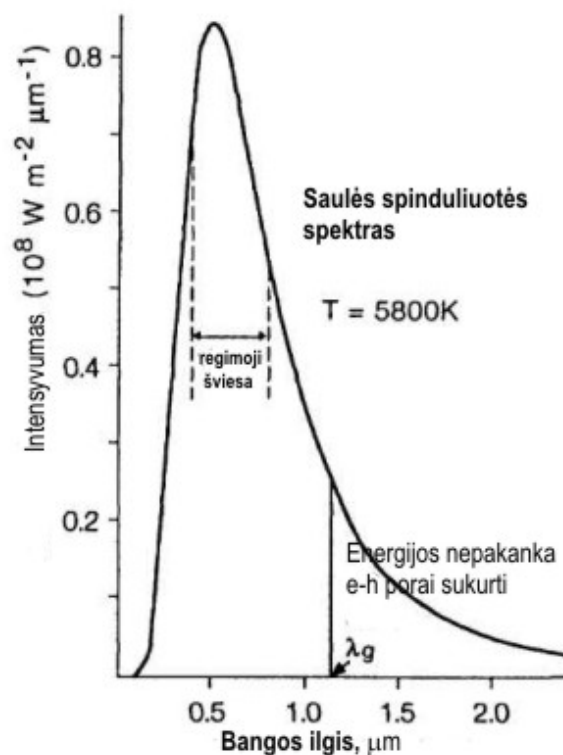
100 - 150 mm skersmens silicio plokštelėse. Toks elementas turi 0,5 - 0,6 V įtampą ir atiduoda 2 – 3 A stiprumo srovę, t.y. 1,0 - 1,5 W galingumą.

Fotoelementų efektyvumas

Santykis tarp gaunamo iš saulės elemento elektros galingumo ir krintančio į elementą saulės šviesos galingumo, vadinamas **saulės fotoelemento efektyvumu**:

$$\eta = \frac{\text{elektrinė galia, Wm}^{-2}}{\text{krintanti energija, Wm}^{-2}} \quad (3)$$

Saulės spinduliuotės spektras pavaizduotas 5 paveiksle. Silicio draustinės energijos plotį $E_g = 1,12$ eV atitinka fotonas, kurio bangos ilgis $\lambda_g = 1100$ nm ($E = h \cdot \nu$ ir $c = \nu \lambda$). Visi fotonai, kurių bangos ilgis $\lambda > \lambda_g$, turi per mažai energijos, kad galėtų sukurti porą elektronas-skylė. Tokiu būdu prarandama apie 23 % efektyvumo η . Naudojant medžiagas, kurių E_g didesnis, efektyvumas dar daugiau sumažėja.



5 pav. Saulės spinduliuotės spektras; λ_g atitinka bangos ilgį, kurio fotono energija atitinka Si draustinės juostos plotį E_g

Be to, fotonų energijos $E > E_g$ gali būti įvairios, o e-h poros susidarymui sunaudojama lygiai E_g energija; likusi dalis $E - E_g$ virsta šiluma. Dėl minėtų dviejų efektų maksimali teorinė silicio fotoelemento efektyvumo riba lygi 44 %. Šiuo metu gaminamų ir esančių rinkoje saulės fotoelementų vidutinis efektyvumo koeficientas yra apie 15 %. Tokiu būdu 85% į saulės fotoelementą krintančios energijos nėra fotoelemento konvertuojami į elektros energiją ir jie sudaro energijos nuostolius fotoelemente.

Saulės fotoelemento nuostoliai susideda iš:

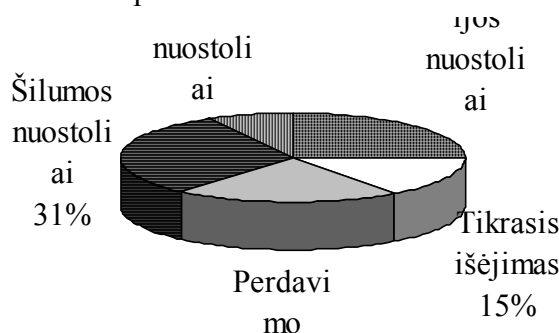
1) atspindžio nuostolių; 2) konversijos nuostolių; 3) šilumos nuostolių; 4) perdavimo nuostolių.

Atspindžio nuostoliai atsiranda dėl to, kad dalis į fotoelementą krentančių šviesos fotonų yra atspindimi nuo jo paviršiaus. Nors visi fotoelementai yra padengiami neatspindinčia danga, tačiau vis gi dalis fotonų atsispindi nuo šio paviršiaus ir tai sudaro apie 8% visos į fotoelementą krentančios energijos.

Šviesos kvantai, kurių energija mažesnė už fotoelemento draudžiamą juostą, nepajėgia permesti elektrono iš valentinės juostos į laidumo juostą. Toks fotonas pereis kiaurai pro fotoelementą. Tokiu būdu fotoelemente susidaro *perdavimo nuostoliai*, kurie sudaro 21% fotoelemento energijos balanse.

Šviesos fotonas, kurio energija didesnė už fotoelemento draudžiamą juostą, gali išlaisvinti tik vieną elektroną, o energijos perteklius virsta šiluma. Be to kiti didesnę energiją turintys fotonai praeina pro fotoelementą kiaurai ir šiek tiek ją sušildo. Tokiu būdu fotoelemente susidaro *Šilumos nuostoliai*, kurie sudaro 31% fotoelemento energijos balanse.

Perdavimo ir šilumos nuostoliai priklauso šviesos bangos ilgiams, kurie fotoelemento negali būti panaudoti, dėl didesnės ar mažesnės fotonų energijos prie tam tikrų šviesos bangos ilgių. Kai kurie iš fotoelemente sugeneruotų elektronų nepatenka į išorinę grandinę ir dėl to susidaro konversijos nuostoliai, kurie sudaro 25% visos į fotoelementą krentančios energijos. Šių įvairių nuostolių proporcijos pavaizduotos 6 paveiksle.



6 pav. Fotoelemento energijos balansas

4. Tyrimo metodika

Voltamperinė saulės elemento charakteristika gali suteikti informacijos apie jo galios savybes. Kartu su galios kreive voltamperinė charakteristika parodo maksimalios galios tašką (*maximum power point* (MPP)). Saulės elemento efektyvumas parodo, kokia dalis kritusios šviesos energijos paverčiama elektrine energija:

$$\text{efektyvumas } \eta = \frac{\text{elektrinė galia}}{\text{spinduliavimo galia}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (4)$$

Norint nustatyti efektyvumą, reikia žinoti krintančio spinduliavimo galią P_{in} ir saulės elemento generuojamą elektrinę galią P_{out} . Saulės elementas generuoja maksimalią elektrinę galią MPP taške. Bet kurio saulės elemento galia yra apibrėžta prietaiso charakteristika.

Spinduliuotės galią nustatome specialiu prietaisu fotometru, tačiau galima pasinaudoti multimetru. Šis matavimas paremtas idėja, kad trumpo jungimo srovė (maksimali fotoelektrinė

srovė) yra proporcinga fotonų, krintančių į saulės elementą, skaičiui. Dėl to trumpo jungimo srovė proporcinga šviesos intensyvumui. Atvirosios grandinės įtampa priklauso nuo puslaidininkinės medžiagos, iš kurios saulės elementas pagamintas. Jis nėra proporcingas krintančiam šviesos intensyvumui, todėl negali būti naudojamas šiams matavimui.

Norint multimetru išmatuoti krintantį šviesos intensyvumą, trumpo jungimo srovės dydis turi būti padaugintas iš tam tikro daugiklio F , nusakančio šviesos intensyvumą. Maksimalus saulės šviesos intensyvumas vasaros dieną yra maždaug lygus 1000 W/m^2 . Maksimali trumpo jungimo srovė pasiekama ties šiuo intensyvumu yra lygi 350 mA . Nominalių saulės elemento parametrų sąlygos: elemento temperatūra $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ir apšviestumas 1000 W/m^2). Tada daugiklio F vertė nusakoma tokiu santykiu:

$$F = \frac{1000 \text{ W/m}^2}{350 \text{ mA}} = 2,86 \frac{\text{W}}{\text{mA} \times \text{m}^2} \quad (2)$$

Pavyzdys.

Pirmiausia išmatuojame saulės elemento paviršiaus plotą S . Tarkime, keturi $30 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ elementai $S = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Tegul trumpo jungimo srovė $I_s = 180 \text{ mA}$. Tada

$$P_{\text{in}} = F \cdot I_s \cdot S = 2.86 \text{ W}/(\text{mA} \cdot \text{m}) \cdot 180 \text{ mA} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 3,089 \text{ W} \quad (3)$$

Tegul maksimali saulės elemento galia MPP taške $P_{\text{out}} = 0,311 \text{ W}$. Tada efektyvumą gauname tokį:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{0,311}{3,089} = 0,101 \quad (4)$$

t.y., $10,1 \%$.

Elektrinės grandinės jungimo schema voltamperinės charakteristikos matavimui pateikta 7 paveiksle. Tiesioginė šviesa krinta į saulės elementą (90° kampas). Matavimus reikia pradėti palaukus bent minutę, kol nusistovi temperatūros svyravimai. Matavimus pradėti nuo atviros grandinės (t.y., $R = \infty$). Tada reikia perjungti varžyną mažinant varžą.

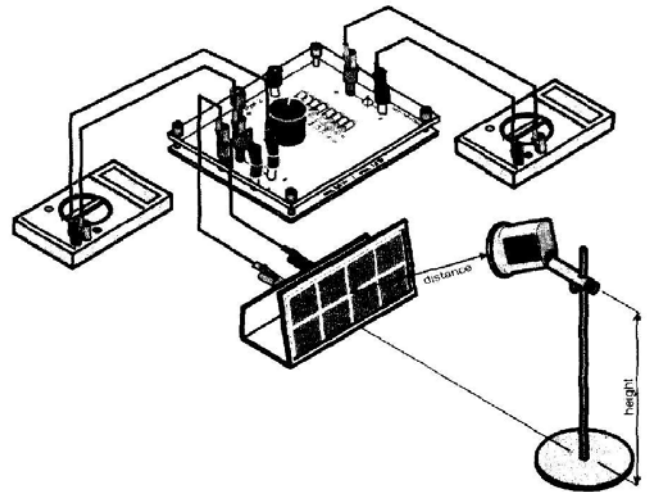
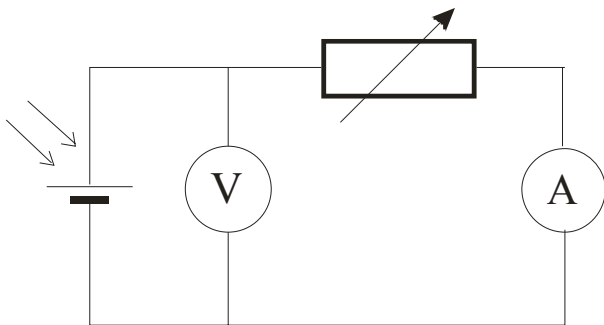
Keletą žodžių aprašysime, kaip reikia naudoti šiame darbe naudojamą varžyną. Jį reikia jungti dviem laidais – vieną prie bendrojo kontakto (kraštinis dešinėje), kitą – prie kairiojo kraštinio kontakto. Pirmas jungiklis keičia varžą žingsniu $10 \text{ k}\Omega$, antras – žingsniu $1 \text{ k}\Omega$, trečias - kas 100Ω , toliau kas $\times 10$, 1 ir $0,1 \Omega$. Varžyną galima įjungti maksimaliai $99999,9 \Omega$ varžai – visus jungiklius pasukus iki vertės „9“. Pavyzdžiui, norint parinkti varžą 1356Ω , antrą jungiklį reikia pasukti iki „1“, trečią jungiklį reikia pasukti iki „3“, ketvirtą - iki „5“, penktą – iki „6“, t.y. $1000 \Omega + 300 \Omega + 50 \Omega + 6 \Omega$.

Išmatuokite įtampą ir srovę kiekvienai varžos reikšmei ir surašykite duomenis į lentelę. Palaukite 20 s , kol nusistovės visi parametrai.

5. Naudojami prietaisai

1. Saulės elementas.

2. Šviesos šaltinis saulės elemento apšvietimui.
3. 2 multimetrai.
4. Varžynas (decade resistance box).
5. Fotometras šviesos spinduliavimo intensyvumo matavimui (arba trumpojo jungimo srovės vertę padauginti iš prietaiso konstantos F, kuri naudojamam saulės elementui lygi $F = 2,86 \text{ W}/(\text{mA}\cdot\text{m}^2)$).
6. Jungiamieji laidai.



7 pav. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo schema

8 pav. Prietaisų jungimo schema Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimui

6. Tyrimo eiga

1. Sujungti prietaisus, kaip parodyta 8 paveiksle.
2. Skirtingoms apkrovos varžoms išmatuoti saulės elemento srovę ir įtampą. Užpildykite žemiau pateiktą lentelę.

R, Ω	U, V	I, A	P, W ($P = UI$)
∞	1,95	0,00	0,00
330	1,94	0,01	0,019
...			

3. Nubrėškite grafiką, kaip fotoelektrinė srovė priklauso nuo fotoįtampos.
4. Nubrėškite grafiką, kaip fotoelemento galia priklauso nuo fotoįtampos. Raskite MPP tašką. Pastaba. MPP vaizdžiai rodo stačiakampiai V-A charakteristikoje: vienoje kraštinėje U, kitoje I. Stačiakampis su didžiausiu plotu rodo didžiausią galią.
5. Apskaičiuokite Saulės elemento efektyvumą.
6. Įvertinkite paklaidą.
6. Parašykite išvadas, pakomentuokite gautus rezultatus, palyginkite su teorinėmis reikšmėmis. Pažymėkite matavimo metodikos trūkumus.

5. Kontroliniai klausimai

1. p-n jungties veikimo principas.
2. Fotoefektas.
3. Saulės elemento veikimo principas.
4. Saulės elemento efektyvumas.
5. Maksimali saulės elemento galia.
6. Saulės elemento efektyvumo priklausomybė nuo bangos ilgio.
7. Trumpojo jungimo srovė.

6. Literatūra

1. A. Kanapickas. Aplinkos fizika. Paskaitų konspektas
2. Experiments: Fuel cell. Wasserstoff-energie Systeme GmbH, 34 p.
3. A. Tamašauskas. Fizika. V.: Mokslas, 1987, 224 p.