

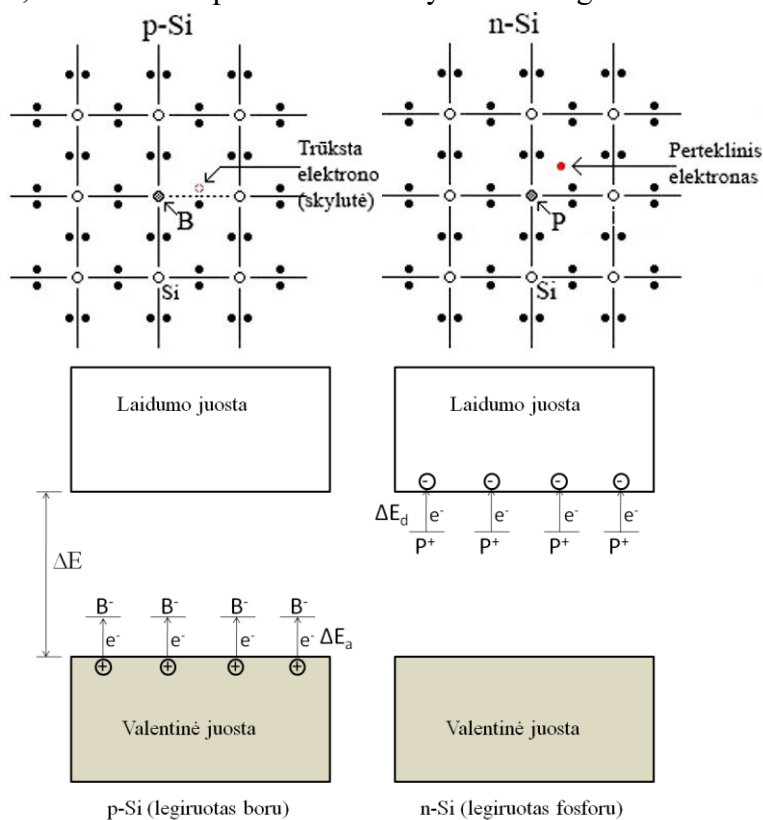
15. SAULĖS ELEMENTAS DAŽAIS JAUTRINTO TITANO DIOKSIDO PAGRINDU

Įvadas

Saulės elementas (*angl. solar cell, photovoltaic cell*) yra įrenginys, kuris verčia saulės energiją į elektros energiją.

Šiuo metu plačiai naudojami saulės elementai yra pagaminti iš didelio paviršiaus p-n jungčių (sandūrų) suformuotų silicio puslaidininkyje. P-tipo puslaidininkis gaunamas, legiruojant silicį elemento atomais su mažesniu valentinių elektronų skaičiumi (B, Al, ir pan.). Jie sukuria akceptorinius energijos lygmenis silicio energetinių juostų struktūroje (draustinių energijų juostoje). Pakanka nedidelės terminės energijos (ΔE_a), kad elektronai iš valentinės juostos būtų sužadinti į akceptorinius lygmenis (1 pav.). B^- jonais, o valentinėje juostoje lieka nesukompensuotas teigiamas krūvis, susidaro taip vadinama skylutė - teigiamo krūvio kvazidalelė (1 pav.). Tokiame

silicyje laisvieji krūvininkai, galintys pernešti krūvį, yra skylutės. N-tipo puslaidininkis gaunamas, kai silicis legiruojamas elemento atomais su didesniu valentinių elektronų skaičiumi (P, As, pan.). Jie draustinių energijų juostoje, arti laidumo juostos, sukuria donorinius lygmenis. Pakanka nedidelės terminės energijos (ΔE_d), kad elektronai iš donorinių lygmenų būtų sužadinti į laidumo juostą. Netekę elektrono, P atomai virsta P^+ jonais. Tokiame silicyje laisvieji krūvininkai yra elektronai laidumo juostoje.

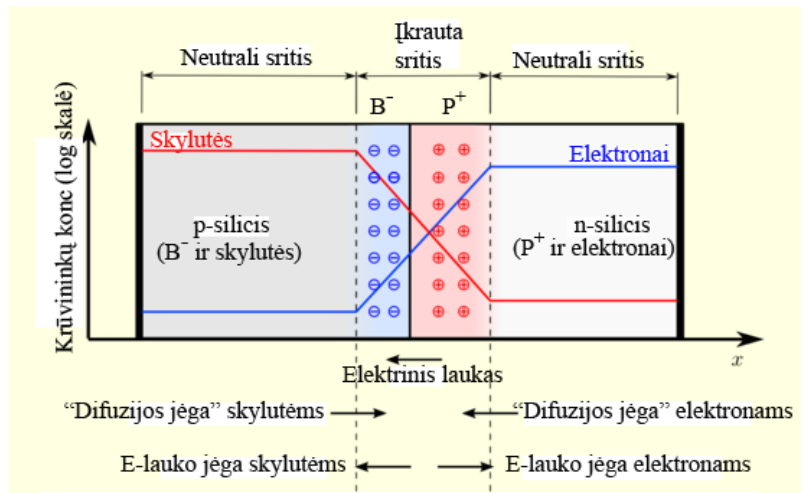


1 pav. p-Si (legiruoto B) ir n-Si (legiruoto P) kristalo struktūra ir energetinių juostų diagrama. ΔE – draustinių energijų juostos plotis; ΔE_a – akceptorinių lygmenų sužadavimo energija; ΔE_d – donorinių lygmenų sužadavimo energija

Gryname silicyje, jo valentiniai elektronai, išsidėstę valentinėje energetinėje juostoje (Si-Si jungtyse), sužadunami tiesiai į laidumo juostą. Tokiu atveju, valentinėje juostoje susidaręs

elektrono trūkumas vadinamas skylute. Tokiam perėjimui reikalinga didesnė terminė energija (ΔE), todėl kambario temperatūroje laisvų krūvininkų koncentracija gryname siliciyje yra nedidelė, nedidelis ir jo elektros laidumas, lyginant su p- ir n-tipo siliciu.

Sudarius kontaktą tarp p ir n-tipo Si, t.y., suformavus p-n sandūrą, joje atsiranda įdomūs ir praktinį pritaikymą randantys reiškiniai (2 pav.). Iš n-tipo Si, turinčio didelę laisvų elektronų koncentraciją, dėl koncentracijos skirtumo, elektronai spontaniškai difunduoja per sandūrą į p-tipo Si, turintį didelę skylių koncentraciją. Skylių difuzija iš p-tipo Si vyksta analogiškai atvirkščiai kryptimi. Sandūroje

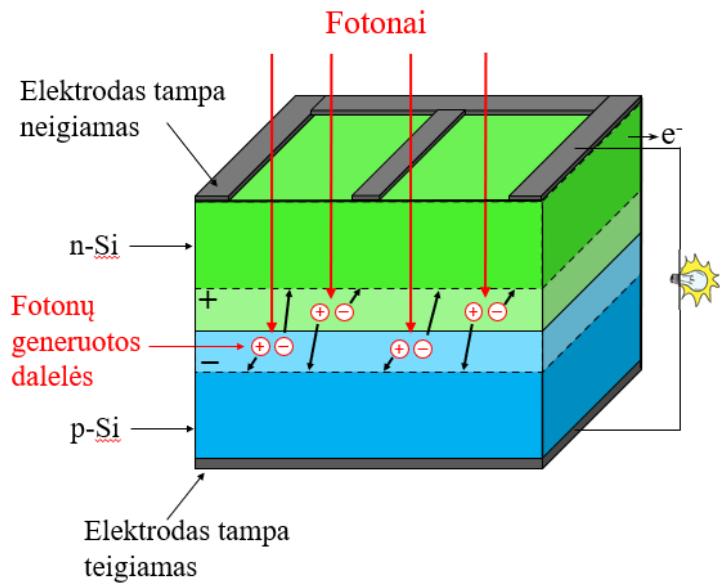


2 pav. Si p-n sandūra terminėje pusiausvyroje. Krūvininkais nuskurdinta sritis abipus sandūros pažymėta šviesiai mėlyna (teigiamai įkrauta sritis) ir raudona (neigiamai įkrauta sritis) spalvomis. Rodyklėmis parodytos kryptys, kuriomis elektronus ir skylutes veikia elektrostatinė ir difuzijos jėgos sandūroje.

susitikę elektronai ir skylutės rekombinuoja tarpusavyje (laisvi krūvininkai išnyksta). Dėl to n-tipo Si srityje šalia p-n sandūros lieka nesukompensuoti teigiami krūviai (P^+ jonai), o p-tipo Si šalia sandūros – nesukompensuoti neigiami krūviai (B^- jonai). Susidarius krūviams priešingose sandūros pusėse, atsiranda elektrinis laukas (įtampa), kurio jėga veikia priešinga kryptimi, t.y., stabdo elektronų ir skylių difuziją per sandūrą ir skatina jų judėjimą atvirkščiai difuzijai kryptimi. Nusistovi dinaminė pusiausvyra. Sandūroje atsiradusio elektrinio lauko įtampa pusiausvyros sąlygomis vadinama p-n sandūros įtampa. Ši įtampa priklauso nuo puslaidininkio draustinės juostos pločio. Pavyzdžiui, Si puslaidininkio p-n sandūros slenkstinė įtampa yra 0,6-0,7 V. Susidariusioje siauroje srityje abipus p-n sandūros nebėra laisvųjų krūvininkų, ji yra nelaidi ir vadinama nuskurdinta sritimi (*angl. depletion zone*).

Saulės elemente, p-Si ir n-Si paviršiai padengiami metaliniais kontaktais, kurie prijungiami prie išorinės apkrovos (elektros lemputės, elektros motoro). 3 paveiksle pateikta supaprastinta schema, kurioje pavaizduoti procesai vykstantys p-n sandūroje apšviečiant elementą saulės šviesa. Fotonai, turintys didesnę energiją, negu puslaidininkio draustinių energijų juostos plotis ($\Delta E \sim 1,1$ eV), arba jai lygią, sužadina elektronus iš valentinės į laidumo juostą abiejose sandūros pusėse (ir p-Si, ir n-Si). Tik nuskurdintoje sandūros srityje susidarę elektronai ir skylutės nerekombinuoja, o išsiskaido elektriniame lauke, didindami laisvų krūvininkų - skylių ir elektronų, koncentraciją. Atsirandant papildomiems laisviesiems krūvininkams (elektronams

laidumo juostoje ir skylutėms valentinėje juostoje) suardoma nusistovėjusi terminė laisvųjų krūvininkų pusiausvyrą p-n sandūroje. Sandūros srityje susidarę laisvi krūvininkai sandūros elektrinio lauko yra išskiriami, t.y., elektronai pernešami per p-n sandūrą į n-tipo Si, o skylutės į p-tipo Si. Pertekliniai elektronai n-tipo silicyje, veikiami susidariusio elektrinio lauko, per metalinį elektrodą juda išorine grandine per apkrovą iki metalo-p-Si



3 pav. Elektros srovės generavimo saulės elemente schema.

kontaktą. Pasiekę p-tipo Si, elektronai susitinka su priešinga kryptimi judančiomis skylutėmis ir rekombinuoja. Taip saulės elementai gamina pastovią elektros srovę. Srovė teka tol, kol elementas apšviečiamas saulės šviesa, generuojančia laisvuosius krūvininkus silicyje.

Saulės elementai į elektros energiją konvertuoja tik nedidelę dalį saulės šviesos energijos. Vienas elementas sukuria labai nedidelę įtampą ($0,5 \div 0,6$ V), todėl elementai paprastai jungiami į baterijas. Saulės spinduliuotė yra sudaryta iš įvairios energijos (bangos ilgio) fotonų. Ji gali būti atspindėta, praeiti per saulės elementą arba būti absorbuota.. Paprastai prasiskverbti gali tik žemesnės energijos fotonai ($< \Delta E_{Si}$). Dalis fotonų atspindima Si paviršiaus. Atspindžiui sumažinti naudojami antireflekciniai sluoksniai. Absorbuojami fotonai, turintys energiją $\geq \Delta E_{Si}$, sužadina Si elektronus iš valentinės į laidumo zoną ir taip generuoja krūvininkus. Jei absorbuoto fotono energija didesnė už ΔE_{Si} , elektrono sužadinimui panaudojama tik dalis fotono energijos, kita energijos dalis virsta šiluma. Kadangi saulės spektre yra tik nedidelė dalis fotonų, kurių energija lygi ar šiek tiek didesnė už ΔE_{Si} , tik ta dalis šviesos energijos gali būti paverčiama elektrine. Silicio saulės elementuose tik apie 6 - 15 % saulės šviesos energijos konvertuojama į elektrinę, priklausomai nuo p-n jungtims panaudoto Si formos (monokristalinis Si, polikristalinis Si, ploni sluoksniai) ir elemento konstrukcijos. Saulės elementų gamyboje vis dar dominuoja silicis, tačiau tiriamos (ir jau naudojamos) ir kitos medžiagos, siekiant padidinti energijos konversijos laipsnį saulės elemente. Pavyzdžiui, vietoje silicio jau naudojamos ir kitų puslaidininkinių medžiagų ($CdTe$, $CuInSe_2$, $CuGaSe_2$, $CuIn_xGa_{(1-x)}Se_2$) p-n sandūros plonų sluoksnių formoje. Šios medžiagos turi kitokias, negu Si, ΔE reikšmes, tad absorbuoja kitokios energijos fotonus. Tokie plonasluoksniai elementai yra pigesni, bet jų konversijos efektyvumas

kol kas dar mažesnis už silicio elementų. Padidintu efektyvumu pasižymi multi-sandūrų saulės elementai. Jie sudaryti iš daug skirtingų puslaidininkių plonų sluoksnių. Pavyzdžiui, trigubos p-n sandūros elementai pagaminti iš trijų skirtingų puslaidininkių – GaAs, Ge, GaInP₂, kurių kiekvienas sudaro po du sluoksnius (p ir n tipo). Kiekvieno sluoksnio puslaidininkis turi jam charakteringą ΔE reikšmę, todėl toks sudėtinis saulės elementas gali absorbuoti fotonus platesniame energijų spektro intervale, t. y., konvertuoti į elektrinę energiją didesnę saulės spinduliuotės energijos dalį. Laboratorijos sąlygomis šiuose elementuose pasiektas konversijos rekordas yra virš 40 %. Jų gamyba brangi, tad jie kol kas naudojami tik kosminių tyrimų įrangoje.

Šiuo metu saulės elementų tyrimai jau pereina į nanotechnologijų sritį. Intensyviai pradėti tirti elementai nanotaškų (*angl. nanodots*) pagrindu. Tai kvantinės nanostruktūros, pavyzdžiui, anglies nanovamzdeliai, indžio fosfido nanovielos ar kitų medžiagų nanodalelės, įterptos į polimerinę ar porėtą metalo oksido matricą. Keičiant nanotaškų dydį, galima keisti ΔE ir absorbuojamų fotonų energiją. Nors šie tyrimai yra dar tik pradinėje stadijoje, laboratorijose buvo pasiektas 42 % konversijos efektyvumas.

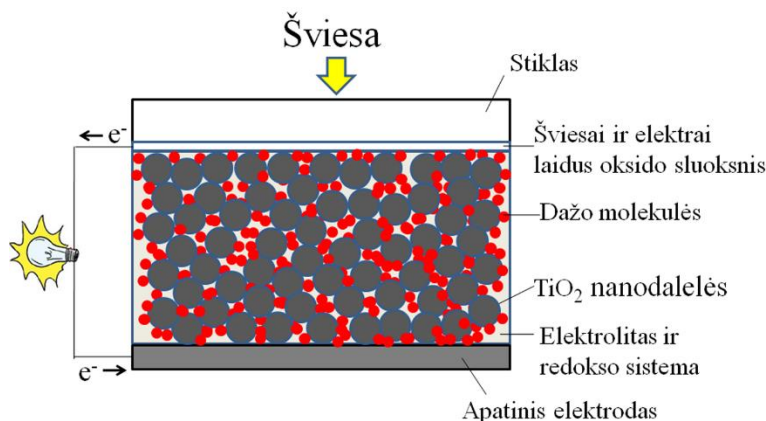
Šiuo metu, yra vystoma daug naujų technologinių saulės elementų tyrimų sričių, siekiant padidinti jų energijos konversijos efektyvumą ir sumažinti kainą. Viena iš kryptių, susijusi su šiuo laboratoriniu darbu, yra dažais jautrinti (*angl. day-sensibilized*) saulės elementai, kuriuose šviesos absorbanto vaidmenį atlieka organiniai dažai. Tai fotoelektrocheminė sistema, priskiriama plonų sluoksnių saulės elementų grupei, kurios veikimas nėra pagrįstas p-n sandūra, kaip silicyje. Silicio saulės elementuose krūvių atskyrimas ir judėjimas vyksta dėka elemente susidariusio elektrostatinio lauko įtampos. Dažais jautrintuose elementuose dominuojantis krūvininkų (elektronų) judėjimo būdas yra jų difuzija dėl skirtingos koncentracijos. Siliciui būdingos dvi funkcijos dažais jautrintuose elementuose yra atskirtos. Juose esantis puslaidininkis panaudojamas tik krūvių transportui, o fotoelektronai sukuriama fotojautriame dažė jį apšvietus. Krūviai atsiskiria sąlyčio paviršiuose tarp dažo, puslaidininkio ir elektrolito.

Dažais jautrinto saulės elemento sandara pavaizduota 4 paveiksle. Norint pasiekti didelę šviesos absorbciją ir elemento efektyvumą, dažo molekulės turi būti paskirstytos kuo didesniame paviršiaus plote (gana storame absorbuojančiame sluoksnyje), t. y., didelio paviršiaus ploto 3D matricoje. Tam panaudojamos puslaidininkio TiO₂ nanodalelės (~10 nm dydžio). Elemento viršutiniu elektrodu naudojama stiklo plokštelė su jos apačioje padengtu šviesai ir elektrai laidžiu oksido sluoksniu (pvz., SnO₂). Laidaus oksido sluoksnis padengiamas TiO₂ miltelių (nanodalelių dydžio) sluoksniu, kuris turi labai porėtą, didelį paviršiaus plotą. Taip paruošta stiklo plokštelė pamerkiamą į fotojautraus dažo tirpalą. Tam dažniausiai naudojami rutenio-polipiridininiai dažai. Šiame darbe naudojamos sultys turi antocianino, betalaino ar kitokio natūralaus dažo. TiO₂

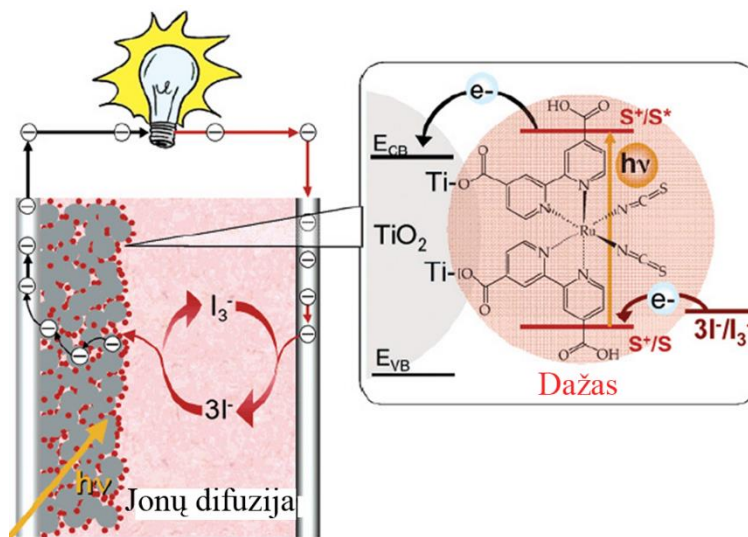
nanodalelės absorbuoja dažo molekules iš sulčių, nes paviršiuje esantys Ti atomai sudaro kompleksus su natūraliais dažais. Mirkant TiO_2 sluoksnį, ant nanodalelių paviršiaus lieka plonas dažo molekulių sluoksnis, kovalentiniais ryšiais susijungusių su TiO_2 paviršiumi. Tada prie TiO_2 sluoksnio prispaudžiamas kitas elektrodas (platinos plokštelė arba laidžiu sluoksniu padengta kita stiklo plokštelė). Tarpas tarp elektrodų prisotinamas elektrolito tirpalu, kuris turi jodido ir trijodido jonų ($3\text{I}^-/\text{I}_3^-$ redokso pora).

Dažais jautrinto saulės elemento veikimo principas pateiktas 5 paveiksle.

Saulės šviesa įeina į elementą per viršutinę stiklo plokštelę ir šviesai laidų elektrodą. Pats titano dioksidas absorbuoja nedaug šviesos ir tik UV srityje. Dažo molekulės absorbuoja matomos šviesos spektro fotonus, o sužadintas dažo elektronas "injektuojamas" į TiO_2 laidumo juostą ir juda (difuzija dėl elektronų koncentracijos skirtumo) per TiO_2 sluoksnį iki šviesai laidaus viršutinio elektrodo. Dažo molekulė taip netenka elektrono (t.y., oksiduoja), tad jei jo praradimas nebus kompensuotas, molekulė suirtų. Dažo molekulė atgal redukuojama jodido jonais, taip atgaudama prarastą elektroną, kuris vėl galės būti sužadintas šviesa. Jodido jonai, redukuodami dažą, patys oksiduoja iki trijodido jonų. Šis redokso procesas vyksta taip greitai, kad sužadintas dažo elektronas nespėja rekombinuoti. Dažo atiduoti fotoelektronai, per TiO_2 sluoksnį atėję prie viršutinio elektrodo, toliau juda išorine grandine per apkrovą iki apatinio elektrodo. Per jį į sistemą įvesti elektronai atiduodami prie elektrodo difundavusiems I_3^- jonams, kurie tokiu būdu



4 pav. Dažais jautrinto saulės elemento sandara.



5 pav. Dažais jautrinti saulės elemento veikimo principas. Dažas: cis-RuL₂(NCS)₂ (raudonas), kur L = 2,2'-bipiridil-4,4'-dikarboksilinė rūgštis.

atgaudama prarastą elektroną, kuris vėl galės būti sužadintas šviesa. Jodido jonai, redukuodami dažą, patys oksiduoja iki trijodido jonų. Šis redokso procesas vyksta taip greitai, kad sužadintas dažo elektronas nespėja rekombinuoti. Dažo atiduoti fotoelektronai, per TiO_2 sluoksnį atėję prie viršutinio elektrodo, toliau juda išorine grandine per apkrovą iki apatinio elektrodo. Per jį į sistemą įvesti elektronai atiduodami prie elektrodo difundavusiems I_3^- jonams, kurie tokiu būdu

vėl redukuojasi iki I⁻ jonų. Taip susidaro uždaras fotoelektrocheminis ciklas, kuriame šviesos poveikyje gaminama elektros srovė.

Dažais jautrintas TiO₂ sluoksnis absorbuoja tik dalį matomos šviesos fotonų, kurių energija priklauso nuo dažo šviesos absorbcijos maksimumo padėties spektre. Lyginant su Si, naudojami dažai absorbuoja mažiau raudonos šviesos, vadinasi, tokiam elemente mažesnė matomos šviesos fotonų dalis panaudojama srovei gaminti. Tradiciniai Si saulės elementai duoda ~ 0,6 V įtampą ir ~35 mA/cm² srovę, o dažais jautrinti saulės elementai duoda 0,6-0,7 V įtampą ir ~ 20 mA/cm² srovę (konversijos laipsnis apie 11 %).

Dažais jautrinti saulės elementai laikomi labai perspektyviais, todėl labai plačiai tiriama. Pagrindinis jų privalumas – jiems gaminti gali būti panaudotos pigios medžiagos ir pigi gamybos technologija. Nepaisant vis dar santykinai mažesnio elektros energijos gaminimo efektyvumo, numatoma, kad dėl kainos/efektyvumo santykio, dažais jautrinti saulės elementai artimiausioje ateityje sudarys rimtą konkurenciją tradiciniams silicio elementams.

Šio darbo tikslas – pagaminti dažais jautrinto TiO₂ saulės elementą ir nustatyti jo charakteristikas.

Darbo aprašymas

1. Saulės elemento gaminimas ir tyrimas.

Saulės elementas gaminamas naudojant du padėklus – dvi stiklo plokšteles (~2,5 cm × 2,5 cm) padengtas elektrai laidaus ir šviesai pralaidaus oksido (TCO-Transparent conducting oxide) sluoksniu. Pavyzdžiui, Sn⁴⁺ legiruoto indžio oksido (Sn: In₂O₃) arba F⁻ legiruoto alavo oksido (F: SnO₂) sluoksniais.

Paimami du stiklo padėklai su padengtu laidžiu sluoksniu ir nuriebalinami indu plovikliu. Po to, jie gerai nuplaunami paprastu, distiliuotu vandeniu ir etanoliu. Nuplauti ir švarūs stikliukai, padedami ant švaraus rankšluostinio popieriaus ir leidžiama jiems nudžiūti. Multimetru išmatuojama stiklo plokštelės elektrai laidžios pusės elektrinė varža. Varža matuojama švelniai priliečiant multimetromatavimo kontaktus priešinguose plokštelės kampuose. Išmatuota varža neturi viršyti 100 Ω.

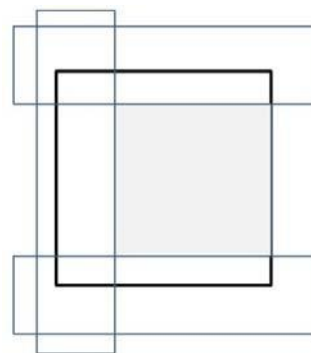
1.1. Dažais jautrinto TiO₂ sluoksnio gaminimas

Aktyvus saulės spinduliuotei TiO₂ sluoksnis formuojamas ant vieno iš nuplautų padėklų. Tokio sluoksnio gaminimas susideda iš dviejų etapų.

1.1.1. TiO₂ sluoksnio suformavimas

TiO₂ sluoksnis suformuojamas ant stiklo padėklo užtepimo būdu.

Plokštelė (laidžia puse į viršų) padedama ant apverstos stiklinės Petri lėkštelės dugno. Ant plokštelės trijų kraštų, užklijuojamos to paties storio lipnios plėvelės juostelės (6 pav.). Užklijuotų kraštų plotis turi būti apytikriai po 3 mm dviejuose priešinguose kraštuose, o trečias kraštas – apie 5-6 mm (skirtas kontaktams saulės elemento charakteristikų matavimui). Juostelės prikljuoja plokštelę ir prie Petri lėkštelės.



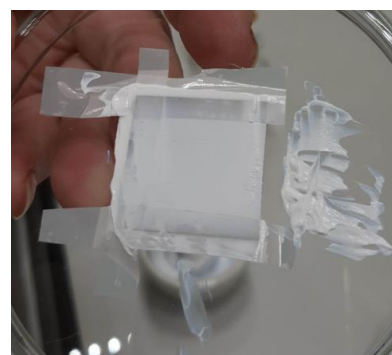
6 pav. Juostelių užklijavimo schema.

Atsveriamą 0,50 g nanokristalinio TiO₂ miltelių, suberiama į mažą porcelianinę grūstuvę ir stikline Pastero pipete įlašinama ~25-30 lašų labai praskiestos acto rūgšties (1:1000). Mišinys gerai sutrinamas. Turi būti gaunama klampi vienalytė koloidinė suspensija (7 pav.). Tada plastikine Pastero pipete pridedamas 1 lašas skaidraus indų ploviklio ir vėl gerai išmaišoma trinant (prie grūstuvėlio prikibusią pastą vis nugramdant mentele ir grąžinant į grūstuvę). Jei gautos suspensijos konsistencija per tiršta tepimui, ją galima praskiesti papildomai įlašinant 2-3 lašus acto rūgšties ir vėl gerai išmaišyti.



7 pav. TiO₂ pasta.

Dalis paruoštos TiO₂ suspensijos metaline mentele perkeliama ant stiklo plokštelės (tarp užklijuotų lipnių juostelių). Braukiant su mentele suspensija (kartu mentele spaudžiant prie juostelių) tolygiai paskleidžiama po visą neužklijuotą paviršių. Jei nepavyko, braukiame iš naujo.



8 pav. TiO₂ sluoksnis.

Galima suspensiją braukti daug kartų, kol gaunamas tolygus plonas sluoksnis. Jeigu suspensija pradeda džiūti ir nebeišeina jos tolygiai paskirstyti, tada sluoksnis nuplaunamas, o suspensija praskiedžiama 1-2 lašais praskiestos acto rūgšties ir tepimas kartojamas iš naujo. Sluoksnio storis turi apytiksliai atitikti užklijuotų lipnių juostelių (apie ~40-60 μm) storį. Užteptas sluoksnis turi būti tolygus ir be skylių ar tarpelių (8 pav.). Užtepto TiO₂ pastos sluoksnio kokybė lemia saulės elemento kokybę, todėl **būtina parodyti suformuotą sluoksnį dėstytojui ar laborantui, ir tęsti darbą tik gavus jų leidimą.**

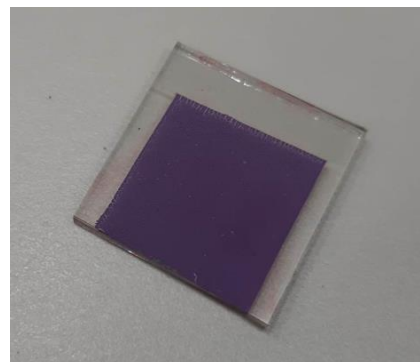
Stengiantis nepažeisti užtepto TiO₂ sluoksnio, atsargiai nuplėšiamos lipnios plėvelės juostelės. Stikliukas su padengtu sluoksniu kaitinamas, padėjus jį (TiO₂ sluoksniu į viršų) ant, virš dujinio degiklio, kaitinamos plokštelės krašto. Padėklas kaitinamas palaipsniui, kad nuo staigaus temperatūros kėlimo, nesuskilinėtų TiO₂ sluoksnis. Tam tikslui, jis palaipsniui (~per 2-3 min) stumiamas į karščiausią zoną padėklo centre ir paliekamas kaisti ~15 min. (temperatūra centre yra ~450-500 °C). Kaitinant pradžioje išdega organiniai priedai ir sluoksnis paruduoja, vėliau išbąla – gaunamas baltas TiO₂ sluoksnis (9 pav.). Išjungiamas dujų degiklis ir padėklas su TiO₂ sluoksniu paliekamas ataušti.



9 pav. Išdžiovintas TiO₂ sluoksnis.

1.1.2. TiO₂ sluoksnio jautrinimas dažų.

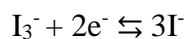
TiO₂ sluoksnio jautrinimui skirtos sultis (**klauskite dėstytojo, kurias sultis naudoti**) perpilamos į mažą Petri lėkštelę. Į jas pamerkiama stiklo plokštelė su iškaitintu ir ataušintu TiO₂ sluoksniu – TiO₂ sluoksniu į viršų – ir laikoma ~30 min. Praėjus laikui TiO₂ sluoksnio spalva pasikeičia (10 pav.). Plokštelė ištraukiama iš sulčių, švelniai apiplaunama nedideliu kiekiu vandens ir etanolio (etanolis išplauna vandenį iš porėto TiO₂ sluoksnio). Sluoksnis atsargiai nusausinamas rankšluostiniu popieriumi, po to, dar trumpai padžiovinamas šiltu oru (su fenu).



10 pav. TiO₂ sluoksnis jautrintas dažais.

1.2. Stiklo plokštelės padengimas grafitu.

Ant kito nuplauto padėklo, dengiamas grafito sluoksnis, kuris veikia kaip katalizatorius ir aktyvuoja I₃⁻ redukcijos į I⁻ reakciją:



Šiame darbe laidus paviršius gali būti padengiamas grafitu dviem metodais (klauskite dėstytojo):

a) Padengimas suodžiais žvakės liepsnoje. Uždegama žvakė ir plokštelė (laidžiu sluoksniu į apačią) greitai braukoma per liepsnos vidurinę dalį (11 pav.), kol plokštelės paviršius tolygiai padengiamas nestoru suodžių sluoksniu (ne juodas, o pilkas, dar permatomas sluoksnis). Tada,

plokštelės kraštai iš trijų pusių nuvalomi vatos krapštuku nuo suodžių, suformuojant apytiksliai tokio pat pločio tris nepadengtus kraštus, kaip ir pirmojoje plokštelėje (6 ir 12 pav.).



11 pav. Stiklo plokštelės laidaus sluoksnio padengimas suodžiais



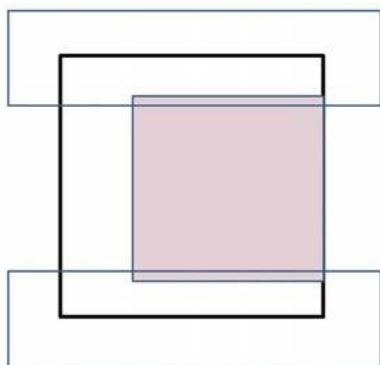
12 pav. Stikliukas padengtas suodžiu sluoksniu.

b) Padengimas grafitu grafitiniu pieštuku. Ant plokštelės trijų kraštų, užklijuojamos to paties storio lipnios plėvelės juostelės (6 pav.). Užklijuotų kraštų plotis turi būti apytikriai po 3 mm dviejuose priešinguose kraštuose, o trečias kraštas – apie 5-6 mm (skirtas kontaktams saulės elemento charakteristikų matavimui). Tuomet, grafitiniu pieštuku švelniai braukiant padengiamas (užpiešiamas) visas neuždengtas stikliuko plotas. Stengiantis nepažeisti padengto grafito sluoksnio, atsargiai nuplėšiamos lipnios plėvelės juostelės.

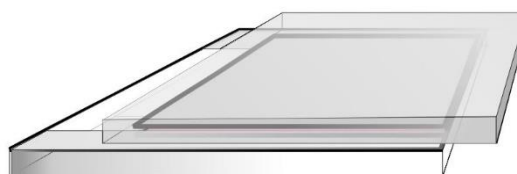
1.3. Saulės elemento surinkimas.

Plokštelės, turinčios dažu jautrintą TiO_2 sluoksnį, du nepadengti priešingi kraštai užklijuojami lipnia juostele taip, kad ji apie 1-2 mm uždengtų ir TiO_2 sluoksnio dalį (13a pav.). Žirkklėmis nukerpamos išsikišusios plėvelės dalys.

Paruošta plokštelė suglaudžiama su stiklo plokštele padengta grafitu taip, kad TiO_2 ir suodžiais padengtos dalys susiglausdamos kuo labiau sutaptų (13b pav.), o nepadengti platesni kraštai liktų išsikišę (kontaktams prijungti). Suglaustos plokštelės suspaudžiamos spaustukais (14 pav.).

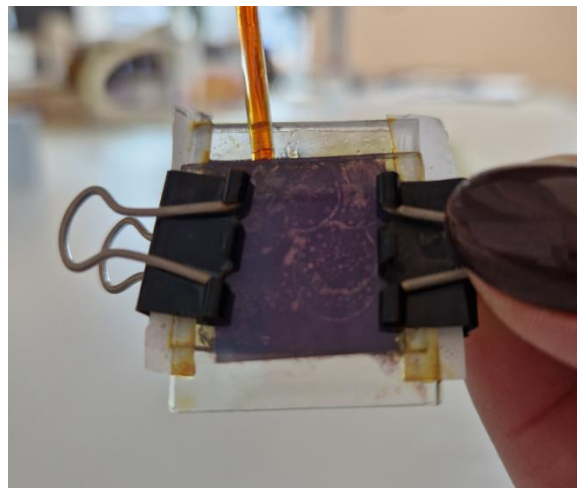


13a pav. Juostelių užkljavimo schema ant stiklo plokštės su dažu jautrintu TiO_2



13b pav. Saulės element surinkimas.

Vienas spaustukas šiek tiek atleidžiamas ir į tarpą tarp plokštelių (14 pav.) įlašinami keli lašai KI_3/KI elektrolito. Tai tirpalas, turintis 0,5 M KI ir 0,05 M I_2 bevandeniame etilenglikolyje, kurio buteliukas pažymėtas “ KI_3 ”. Veikiamas kapiliarinių jėgų, elektrolito tirpalas pasiskleidžia ir užpildo tarpą tarp stiklo plokštelių. Įsitikinama, kad visas suglaustas plokštelių plotas yra sudrėkintas elektrolitu, kitu atveju, įlašinami dar keli lašai KI_3 .

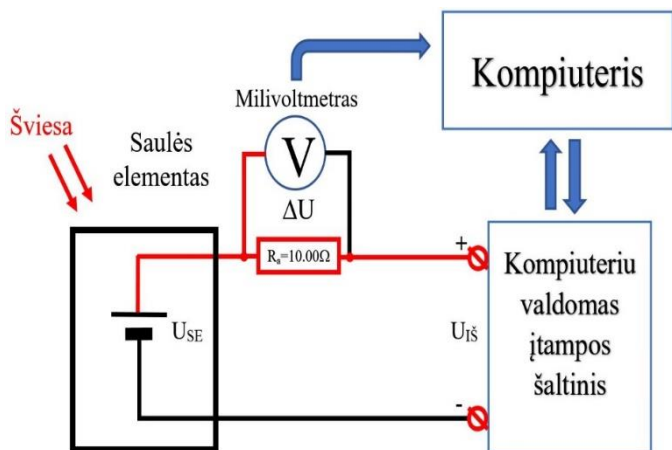


14 pav. Saulės elemento surinkimas ir užpildymas elektrolitu.

2. Saulės elemento tyrimas

2.1. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimas

Svarbiausi saulės elemento (SE) parametrai, apibūdinantys jo efektyvumą, yra jo generuojama srovė (I), įtampa (U) ir galia (P). Uždavus tam tikrą įtampą galima išmatuoti generuojamą saulės elemento srovę ir apskaičiuoti jo galią. Generuojamos srovės priklausomybė nuo įtampos vadinama SE voltamperinė charakteristika, kuri būtina norint įvertinti pagaminto saulės elemento kokybę. Šiame darbe voltamperinė charakteristika nustatoma saulės elemento įtampos kompensavimo metodu. Supaprastinta matavimo schema pateikta 15 paveiksle, o bendras įrangos vaizdas – 16 paveiksle.

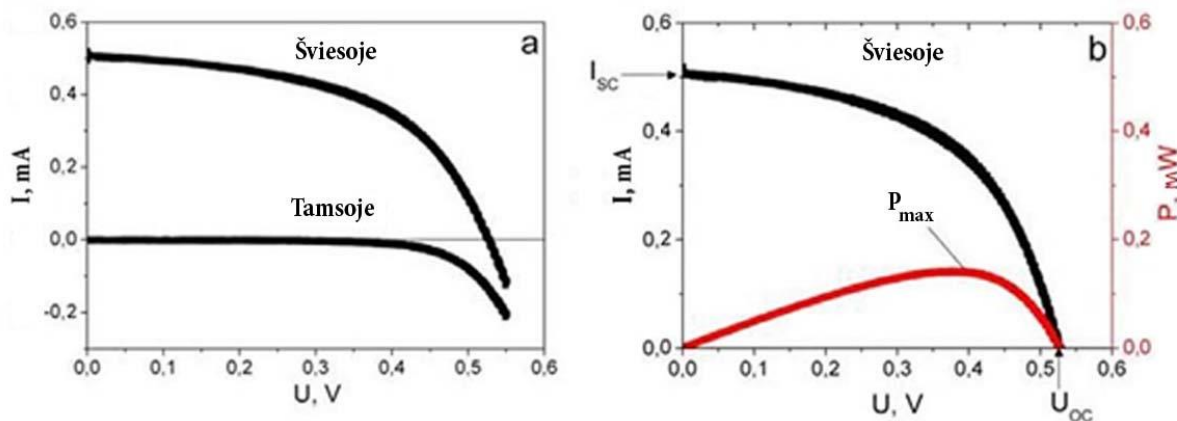


15 pav. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo supaprastinta schema.



16 pav. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo įranga.

Kompiuterio valdomu įtampos šaltiniu palaipsniui didinama (skleidžiama) išėjimo įtampa U_{is} , kol ji susilygina (kompensuoja) su apšviesto saulės elemento generuojama elektrovaros jėga (EVJ) ir tampa truputį didesnė. Didėjant šaltinio užduodamai įtampai vis labiau yra kompensuojama saulės elemento EVJ ir grandine tekanti srovė mažėja (17 pav.). Kuo saulės elemento srovė mažiau priklauso nuo užduodamos įtampos (kreivė bus labiau išgaubta), tuo didesnis saulės elemento efektyvumas ir jo generuojama galia P_{max} ($P=U \cdot I$). Būtent pastaroji charakteristika rodo, kokia yra optimali saulės elemento apkrova (17b pav.). Susilyginus įtampoms (šaltinio užduodamai ir SE generuojamai), srovė tampa lygi nuliui, o toliau didinant įtampą srovė tampa neigiama. Tokia priklausomybė yra pavaizduota 17a paveiksle, kuriame pateikta SE voltamperinė charakteristika išmatuota šviesoje. Kai eksperimentas atliekamas tamsoje, yra išmatuojama puslaidininkio p-n sandūros charakteristika. Kol užduodama įtampa yra mažesnė nei p-n sandūros barjero įtampa, srovė išlieka artima nuliui. Neigiama srovė pradeda eksponentiškai didėti, kai užduodama įtampa priartėja ir viršija p-n sandūros barjero įtampą.



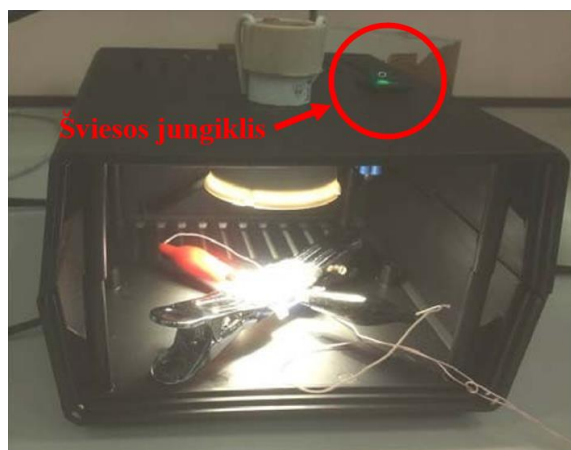
17 pav. Saulės elemento voltamperinė charakteristika.

Srovė matuojama netiesiogiai: milivoltmetru matuojamas įtampos kritimas (ΔU), atsirandantis į grandinę įterpatoje apkrovos varžoje ($R_a=10 \Omega$), o grandine tekanti srovė paskaičiuojama pagal Omo dėsnį $I = \Delta U/R_a$. Kompiuteris registruoja šaltinio skleidžiamą įtampą ir įtampos kritimą apkrovos varžoje, pastarąjį perskaičiuodamas į srovę, o matavimo duomenis pateikia grafiniu pavidalu koordinatėse įtampa-srovė. Pradžioje išmatuojama SE voltamperinė charakteristika šviesoje, po to tamsoje. Šviesos šaltiniu naudojama 350 lm baltos šviesos lempa.

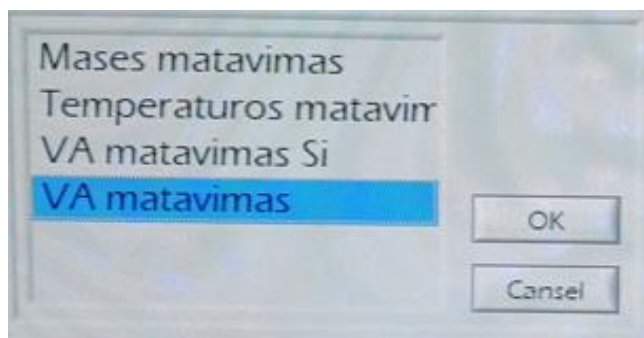
Matavimo eiga:

Saulės elementas matavimo schemeje prijungiamas krokodilo tipo gnybtais: raudona jungtis jungiama prie elemento „plus“ poliaus (grafitu padengta plokštelė), juoda – prie „minus“ poliaus (dažais jautrintu TiO_2 sluoksniu padengta plokštelė). Elementas įdedamas į

matavimo dėžutę (18 paveikslas) po joje esančiu šviesos šaltiniu (dažu jautrintas TiO₂ sluoksnis turi būti nukreiptas į šviesos šaltinį).



18 pav. Saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo dėžutė su šviesos šaltiniu.



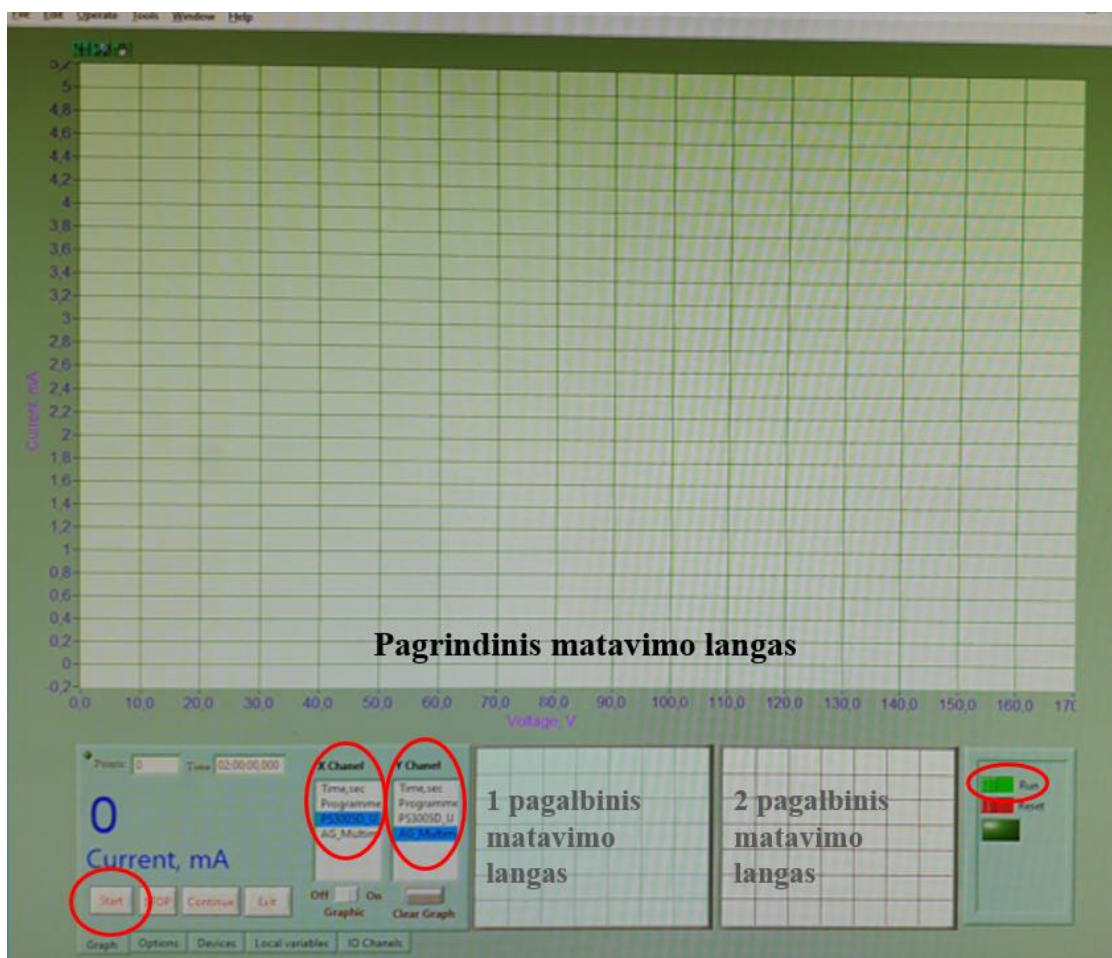
19 pav. Saulės elemento matavimo pasirinkimo.

Ijungiamas kompiuteris ir įsitikinama, kad visi prietaisai, reikalingi matavimui, įjungti (multimetras Agilent U1251A, įtampos šaltinis Velleman PS3005D). Paleidžiama saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimo programa (VA v.2.023.vi, ji yra ekrano darbalaukyje). Atsiradusiame lange pasirenkamas voltamperinės charakteristikos matavimas - „VA matavimas“ (19 pav.).

Pasirinkus matavimo metodą, jei reikalinga, suderinamas pagrindinis programos matavimo langas (20 pav.). Paspaudus klavišą „Start“ programa paleidžiama veikti. Programos lange matome pagrindinį matavimo langą. Pasirenkame “X Chanel” – įtampa (PS3005D_U), “Y Chanel” – srovė (AG_Miltimetras U1251A).

Paleidžiame įtampos skleidimą paspausdami klavišą “Run” ir toliau sekame programos nurodymais.

Pasibaigus įtampos skleidimui (pirmyn ir atgal), matavimo programa kompiuteryje sustabdoma klavišu „Stop“ (kuris yra matavimo programos lango apačioje, kairėje pusėje), o matavimo duomenys išsaugomi (File/Save as..) direktorijoje D/Work/Duomenys/metai/SE/vardas pavarde.xls kaip Excel failas. Patikriname, ar tikrai failas išsaugotas nurodytoje direktorijoje. Kompiuterio monitoriuje gauta voltamperinė kreivė **parodoma laborantui ar dėstytojui**. Išsaugoti matavimo duomenys išsisiunčiami sau į elektroninį paštą. Gretimame kompiuteryje (prie kurio prijungtas spausdintuvas) duomenys atidaromi su Excel arba Origin programa, padaromas saulės elemento voltamperinės



20 pav. Matavimo programos vaizdas. Apibraukti lango elementai:

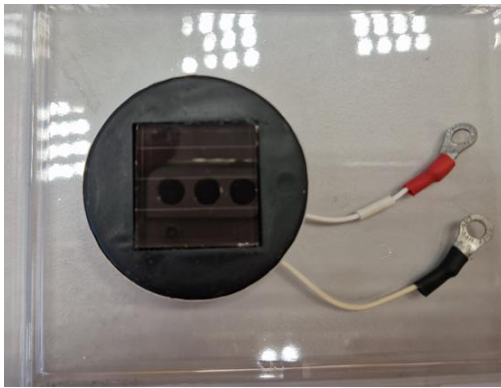
- klavišai „Start“, „Run“
- x ir y atidedamų pagrindiniame grafiko lange pasirinkimas.
(PS3005D_U – įtampa, AG_Miltimetras – srovė)

charakteristikos grafikas, atspausdinamas ir duodamas pasirašyti laborantui. Tai bus „originalus“ grafikas, kurį būtinai reikės pristatyti darbo gynimo metu kartu su aprašymu.

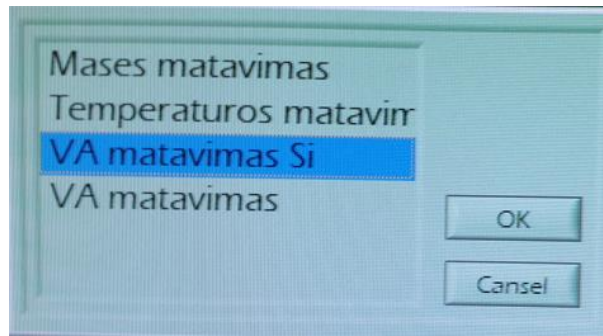
Pabaigus darbą, saulės elementas išmontuojamas, o abi stiklo plokštelės nuplaunamos, nusausinamos ir padedamos atgal į dėžutę.

2.2. Silicio saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimas

Palyginimui, tose pačiose sąlygose, yra išmatuojama komercinės kilmės silicio saulės elemento voltamperinė charakteristika. Šį saulės elementą rasite darbo vietoje, dėžutėje (21 pav.) „Si saulės elementas“. Jis matavimo schemeje prijungiamas krokodilo tipo gnybtais: raudona jungtis jungiama prie raudonos jungties, juoda – prie juodos. Elementas įdedamas į matavimo dėžutę (18 paveikslas). Prieš tai naudota matavimo programa išjungžiama ir vėl įjungžiama. Atsiradusiame lange pasirenkamas Si saulės elemento voltamperinės charakteristikos matavimas - „VA matavimas Si“ (22 pav.) ir matavimas atliekamas pagal 2.1. dalyje pateiktą metodiką.



21 pav. Si saulės elementas.



22 pav. Si saulės elemento matavimo pasirinkimo langas.

2.3. Matavimo duomenų analizė

Papildomai padaromi abiejų saulės elementų matavimų grafikai, kuriuose yra tik apšviestų SE voltamperinės charakteristikos kreivės (U-I) ir SE galios ($P=U \cdot I$) priklausomybės nuo įtampos kreivės (P-U). Įvertinamos apšviestų SE užtrumpinimo srovės (I_{sc} – short circuit current, kai $U = 0$) ir SE atviros grandinės įtampos (U_{oc} – open circuit voltage, kai $I = 0$). Žiūrėkite 17b paveikslą. Iš P-U kreivių nustatomos SE generuojamos maksimalios galios (P_{max}). Paskaičiuojami užpildymo faktoriai, procentais (FF – Fill Factor): $FF = P_{max} / (U_{oc} \cdot I_{sc})$.

Darbo rezultatai išsamiai aprašomi, palyginami tarpusavyje ir padaromos išvados.

3. Klausimų temos darbo gynimui

Saulės elementai, jų tipai, naudojamos medžiagos, veikimo principas, charakteristikos.

Dažais jautrinti saulės elementai.

4. Literatūra

1. Greg P. Smestad and Michael Grätzel, "Demonstrating Electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline Energy Converter," *Journal of Chemical Education*, 75/6 (1998) 752.
2. <https://education.mrsec.wisc.edu/titanium-dioxide-raspberry-solar-cell/>
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/P%E2%80%93junction>
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Dye-sensitized_solar_cell
6. <https://www.thesolarplan.com/articles/how-do-solar-panels-work.html>