

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Kietojo kūno elektronikos katedra

Vytautas Vaičiūnas

GaAs ir Si *pn* sandūrų fotoelektrinių savybių tyrimas esant stipriam apšvietimui

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Fizikinių technologijų ir jų vadybos
studijų programa

Studentas:	Vytautas Vaičiūnas
Darbo vadovas:	prof., habil.dr. Steponas Ašmontas FTMC
Recenzentas:	dr. Gytis Sliaužys
Katedros vedėjas:	prof., habil.dr. Kęstutis Arlauskas

Vilnius 2016

Turinys

1. ĮVADAS	3
2. TIKSLAI IR UŽDAVINIAI	4
3. LITERATŪROS APŽVALGA	5
3.1. <i>pn</i> sandūra	5
3.2. Fotoelektrovara	7
3.3. Karštųjų krūvininkų elektrovara	8
3.4. Fotono energijos ir bangos ilgio santykis	10
3.5. Laisvakrūvė ir dvifotonė sugertis	11
3.6. Netiesiniai kristalai	12
3.7. Saulės elementų veikimo principas	13
3.8. Saulės spinduliuotės spektras	16
3.9. Silicio sugerties spektras	17
3.10 Galio arsenide sugerties spektras	19
3.11 Monokristalinio silicio ir galio arsenido saulės elementai	21
4. TYRIMO APARATAI IR METODAI	24
4.1 Tyrimo aparatūra	24
4.2 Lazerio spindulio galios normavimas	27
4.3 Lazerio bangos ilgio derinimas	28
4.4 Bandinių gamyba ir paruošimas	28
4.5 Galios filtrai	29
4.6 Voltamperinių charakteristikų matavimai	29
4.7 Temperatūriniai matavimai	30
5. DARBO REZULTATAI	31
5.1. Voltamperinės charakteristikos	31
5.2. Fotoelektrovaros ir karštųjų krūvininkų fotosrovės matavimai prie 1064 nm lazerio šviesos	32
5.3 Fotoelektrovaros ir karštųjų krūvininkų fotosrovės spektriniai matavimai	35
6. IŠVADOS	39
Literatūra	40
Santrauka	41

1. Įvadas

Jau daugiau nei dešimtmetį pastebimas susidomėjimas atsinaujinančios energijos šaltiniais. Vyriausybės ir organizacijos skatina naudoti kuo mažiau įprastų, teršiančių energijos šaltinių ir pereiti prie atsinaujinančios energetikos. Vieni iš jų, puslaidininkiniai saulės elementai, pradėti naudoti nuo 1970 metų, kai atsiradus naftos trūkumui, susidomėta alternatyviais energijos šaltiniais. Antras, ir daug didesnis, saulės energetikos naudojimo proveržis įvyko pirmajame XXI amžiaus dešimtmetyje. Tai salygojo žemės klimato šiltėjimo grėsmė ir didėjantis CO₂ kiekis atmosferoje. Šiuo metu ir ateityje numatomas vis didėjantis Saulės energetikos sektoriaus augimas, o nuo 2020 metų Saulės energija turėtų tapti pigesnė už šiluminę [1].

Apie 80% saulės elementų gaminami iš silicio, tačiau vis dažniau pritaikomi GaAs, CdTe dariniai. Svarbiausias saulės elementų tyrimų tikslas yra didinti našumą. Shockley-Queisser efektyvumo riba nusako, jog naudingumas įprastomis sąlygomis galėtų siekti 33% [12]. Likusi Saulės spinduliuotės dalis arba prasiskverbia pro *pn* sandūrą (18%), prarandami dėl rekombinacijos (2%), arba virsta į šilumą (47%). Pastaroji šviesos energija kaitina krūvininkus ir dėl to susidaro šiluminė karštųjų krūvininkų elektrovara. Būtent ji yra viena priežasčių kodėl saulės elementų efektyvumas nesiekia teorinių reikšmių. Dėl krūvininkų generacijos stebima ir fotoelektrovara, kurios poliškumas yra priešingo ženklo karštųjų krūvininkų elektrovarai. Abu dydžiai pasireiškia apšvietus *pn* sandūras intensyvia lazerio šviesa.

Taip pat, yra tiriami būdai ne tik sumažinti karštųjų krūvininkų įtaką, bet ir juos panaudoti didesniam saulės elementų efektyvumui. Tai - karštųjų elektronų saulės elementai, kuriuose fotogeneruoti krūvininkai būtų atskirti nepraradę kinetinės energijos [1].

Šiame darbe tiriama fotoelektrovara ir karštųjų krūvininkų elektrovara GaAs ir Si *pn* sandūrose.

2. Tikslai ir uždaviniai

Darbo tikslas:

Eksperimentiškai ištirti karštųjų krūvininkų įtaką fotoelektrovaros susidarymui GaAs ir Si *pn* sandūrose, esant stipriai lazerio spinduliutei.

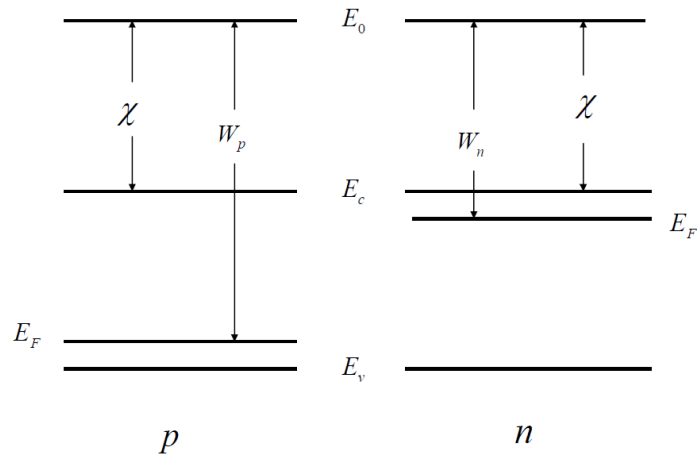
Uždaviniai:

1. Sukurti *pn* sandūrų fotoelektrinių savybių azoto temperatūroje tyrimo metodiką.
2. Ištirti karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros ir fotoelektrovaros priklausomybę nuo spinduliuotės galios Si ir GaAs *pn* sandūrose.
3. Ištirti karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros ir fotoelektrovaros spektrines charakteristikas.
4. Ištirti nuolatinės įtampos įtaką karštųjų krūvininkų šiluminei elektrovarai ir fotoelektrovarai.

3. Literatūros apžvalga

3.1. pn sandūra

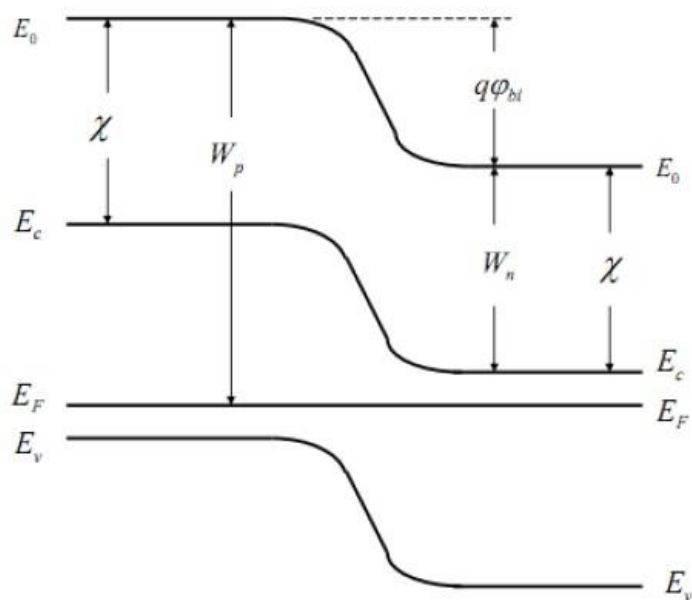
Stacioji pn sandūra tai puslaidininkio monokristalas, kurio konkrečioje vietoje skylinio (p) laidumo tipas pasikeičia į elektroninio (n) laidumo tipą. Laikoma, jog ir p , ir n laidumą lemiančios priemaišos yra visiškai jonizuotos, t.y. $p_{p0} = N_A$ ir $n_{n0} = N_D$, čia p_{p0} ir n_{n0} yra pusiausvyrosios pagrindinių krūvininkų koncentracijos, o N_A, N_D - atitinkamai akceptorų ir donorų koncentracijos. pn sandūrą vadinama simetrine, jeigu $N_D = N_A$ ir nesimetrine, jeigu $N_D \neq N_A$. Be to, stipriau legiruota pn sandūros dalis vadinama emiteriu, o silpniau legiruota – baze. Atskirų p ir n laidumo tipų puslaidininkių energijos juostų diagramos pavaizduotos 1 paveiksle, kuriame p srities išlaisvinimo darbas didesnis už n srities išlaisvinimo darbą [2].



1 pav. p ir n sričių energijos juostų diagramos.

Kai p ir n puslaidininkiai yra glaudžiamame kontakte, abi sritys pradeda keistis tais elektronais, kurių energijos didesnės už atitinkamo puslaidininkio išlaisvinimo darbą. Kadangi n puslaidininkio išlaisvinimo darbas mažesnis už p puslaidininkio, vadinasi, iš n į p puslaidininkį pateks daugiau elektronų negu atvirkščiai. n puslaidininkis p puslaidininkio atžvilgiu įsielektrins teigiamai (teigiamai jonizuotų donorų krūvis), t.y. ims riboti n puslaidininkio elektronų srautą į p puslaidininkį. Savo ruožtu n puslaidininkio elektronai p puslaidininkyje rekombinavę su ten esančiomis skylėmis sumažins p srities pagrindinių krūvininkų koncentraciją, o p srities neigiamą krūvį sudarys jonizuoti akceptoriai.

Vadinasi abiejose sandūros pusėse susidarys nuskurdintos pagrindiniais krūvininkais sritys. Dėl neigiamo krūvio p puslaidininkio energija (tame tarpe ir Fermio lygmens) n puslaidininkio atžvilgiu padidės. Elektronų srautas iš n į p puslaidininkį baigsis, kai abiejų puslaidininkio sričių Fermio lygmenys susilygins. Šiuo atveju susidaręs tarp abiejų puslaidininkio sričių potencialų skirtumas vadinamas kontaktiniu potencialų skirtumu - ϕ_{bi} . pn sandūros energijos juostų diagrama termodinaminėje pusiausvyroje pavaizduota 2 paveiksle [2].



2 pav. pn sandūros energijos juostų diagrama termodinaminėje pusiausvyroje.

Kontaktinio potencialų skirtumo dydžiui nustatyti pažymėkime laisvųjų krūvininkų koncentracijas už nuskurdintų sričių ribų (t.y. neutraliose srityse) $p_{p0} = N_A$ ir n_{p0} (p srityje) bei $n_{n0} = N_D$ ir p_{n0} (n srityje). Pagal Boltzmann'o formulę:

$$n_{p0} = n_{n0} \exp\left(-\frac{q\phi_{bi}}{kT}\right), \quad (1)$$

Kadangi termodinaminėje pusiausvyroje

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_A}, \quad (2)$$

tai

$$n_i^2 = N_A N_D \exp\left(-\frac{q\phi_{bi}}{kT}\right), \quad (3)$$

$$\varphi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \quad (4)$$

Taigi kontaktinis potencialų skirtumas apskaičiuojamas pagal (4) formulę. Matavimo vienetas – voltas. Čia n_i - grynojo (nelegiruoto) puslaidininkio laisvųjų krūvininkų koncentracija. N_D ir N_A - donorų ir akceptorų priemaišų koncentracijos, q - elektros krūvis [2].

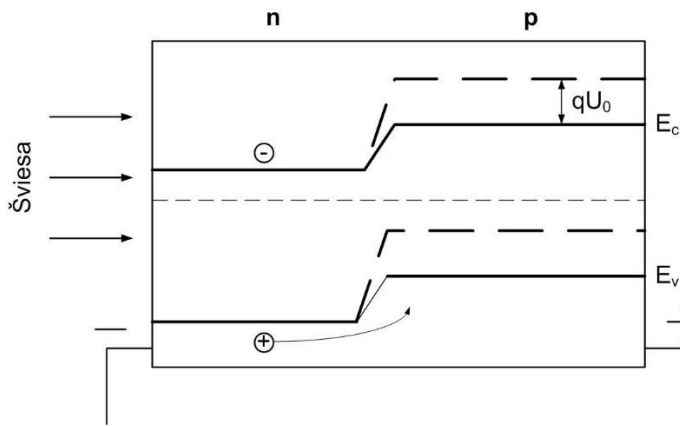
3.2 Fotoelektrovara

Elektrovara (evj) tai išorinių jėgų veikimą apibūdinantis fizikinis dydis. Jis nusako kokį vienetinį teigiamą krūvį perkelia pašalinės jėgos. Klasikinis Saulės elementas – tai paprastas puslaidininkinis diodas, sudarytas iš elektroninio laidumo dalies n ir skylinio laidumo dalies p . Į elementą krintant Saulės šviesai (šviesos fotonams), pn sandūroje susikuria elektrono ir skylės pora. Taip gaunamas elektrinis signalas – elektros įtampa ir srovė.

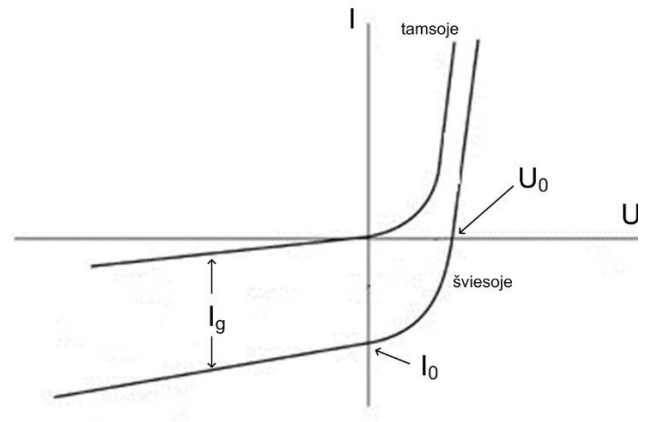
Saulės elemente susidaranti fotoelektrovaros įtampa yra išreiškiama 5 formule.

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_0}{I_s} + 1\right) \quad (5)$$

Pokyčiai energijos juostose, kai pn sandūra yra apšviečiama, pasireiškia potencialinio barjero aukščio sumažėjimu (3 pav). Šis sumažėjimas atitinka šviesoje sugeneruojamų krūvininkų potencialų skirtumą, kuris ir yra fotogeneracijos įtampa U_0 . 4 pav. parodo teorinę pn sandūros voltamperinę charakteristiką. Matome, jog tamsoje fotogeneracija nevyksta, taigi $U_0 = 0$. Tačiau sandūrą apšvietus įtampos vertės pasislenka neigiamos srovės pusėn, per I_0 – generacijos srovės dydį. O iš šviesoje veikiančios pn sandūros voltamperinės charakteristikos fotogeneracijos įtampa U_0 nustatoma pagal tai, kuriame taške srovė yra lygi nuliui.

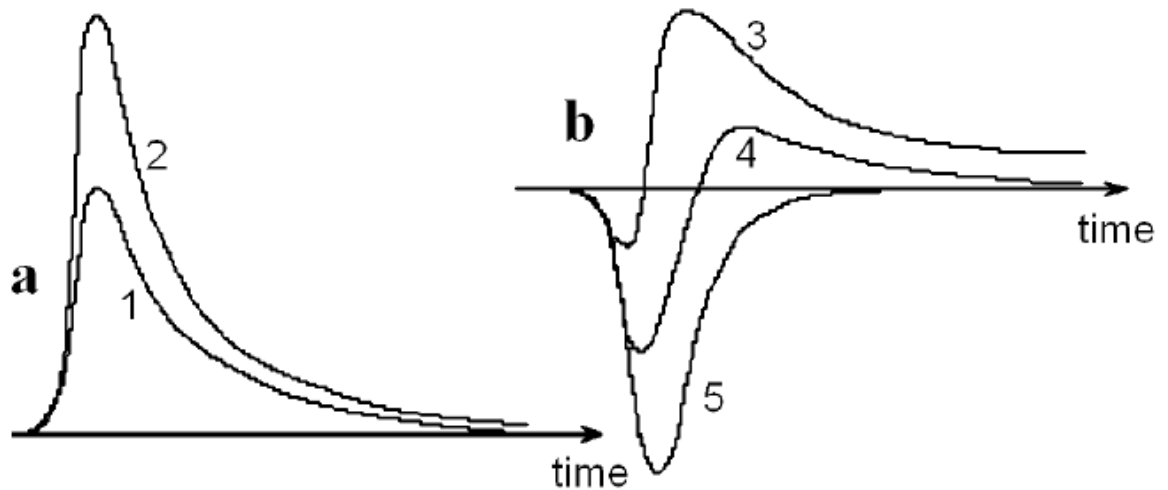


3 pav. Valentinė ir laidumo juostos pn sandūroje, tamsoje (punktyrinė linija) ir apšvietus (tiesi linija).



4 pav. pn sandūros voltamperinė charakteristika, tamsoje ir apšvietus.

Fotoelektrovaros sukelta fotosrovė, kuri dar vadinama klasikine, priklauso nuo prijungtos išorinės įtampos. Lazerio šviesa apšviestoje InSb pn sandūroje fotoelektrovara pavaizduota 5 pav., kaip teigiamo poliaringumo fotoįtampa - 1,2,3,4 [3, 17].



5 pav. Fotosignalai InSb pn sandūroje, kai puslaidininkis apšviečiamas CO₂ lazerio spinduliuote. Atgaline (a) ir tiesiogine (b) kryptimis įtampa. $U = 0$ V (1), $-0,20$ V (2), $0,167$ V (3), $0,20$ V (4), $0,227$ V (5) [3].

3.3 Karštųjų krūvininkų elektrovara

Karštųjų krūvininkų atsiradimas tai reiškinyms nekompensuotuose puslaidininkiuose, kai laisvieji krūvininkai absorbuodami spinduliavimą įkaista ir jų energija stipriuose elektriniuose laukuose ar intensyvioje spinduliuotėje gali viršyti pusiausvyrinę gardelės temperatūrą [5].

Saulės spinduliuotėje yra labai įvairios energijos fotonų. Jiems patekus į puslaidininkį, kurio draustinis energijų tarpas E_g yra didesnis už fotono energiją, laikoma, jog fotonas nėra sugeriamas. Jeigu fotono energija sutampa arba viršija draustinį tarpą, tuomet susikuria elektrono ir skylės pora. Perteklinė energija, kurios nereikia krūvininkų porų generavimui ir kuri yra lygi draustinio tarpo ir fotono energijos skirtumui, paverčia krūvininkus karštaisiais. Esant potencialiniam barjerui ir krūvininkams kaistant sandūroje, susidaro karštųjų krūvininkų elektrovara. Tokiu būdu pakaitintų krūvininkų temperatūra gali siekti net 3000 K (2727°C), kai kristalo temperatūra 300 K (27°C).

Karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovaros jėga $n-n^+$ sandūroje randama pagal formulę:

$$U_T = \frac{kT}{q} \left(\frac{T_n}{T} - 1 \right) \ln \frac{n^+}{n} = V_K \left(\frac{T_n}{T} - 1 \right), \quad (6)$$

Čia V_K – potencialinio barjero aukštis, T_n – krūvininkų temperatūra, o T – gardelės temperatūra [4].

Potencialinio barjero aukštis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$qV_K = kT \ln \left(\frac{n^+}{n} \right) \quad (7)$$

Kai puslaidininkis yra apšviečiamas šviesa su kvanto energija didesne už draustinės juostos tarpą, sukuriama elektrono ir skylės pora ir perteklinė energija perduodama krūvininkams:

$$E_{\text{perteklinė}} = \hbar\omega - E_g \quad (8)$$

Taigi sugeneruotos elektrono ir skylės poros turi didesnę energiją negu pusiausvyriniai krūvininkai. Kai šviesos intensyvumas yra pakankamai didelis ir sugeneruotų porų yra žymiai daugiau už pusiausvyrinių elektronų ir skylių koncentraciją, tai krūvininkai tampa karštaisiais ir jų energija aprašoma formule:

$$\frac{3}{2} \frac{K(T_n - T_0)}{\tau_\varepsilon} = \frac{\alpha P_k (1 - R)}{n \hbar \omega} \cdot E_p^n \quad (9)$$

kur E_p^n – perteklinė energija, tenkanti elektronams, α – šviesos sugerties koeficientas, n – elektronų koncentracija, R – atspindžio koeficientas, τ_e – krūvininkų energijos relaksacijos laikas, P_k – lazerio impulso galia.

Prie pn sandūros prijungus išorinę įtampą U stebime eksponentinį karštųjų krūvininkų fotosrovės kitimą:

$$I_{\text{fot}} \propto \exp(U) \quad (10)$$

Karštųjų krūvininkų fotoįtampą parodo priešingo nei generacijos įtakotos fotoįtampos dalis (5 pav). Taigi, tiesioginė išorinė įtampa sudaro sąlygas karštiesiems krūvininkams lengviau įveikti potencialinį barjerą [3].

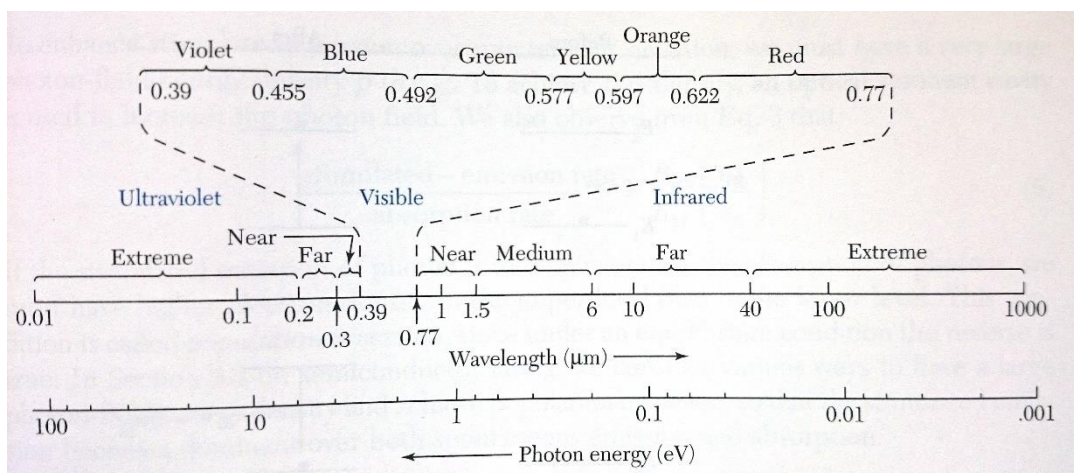
Kitas būdas atskirti fotoelektrovarą nuo karštųjų krūvininkų fotoįtampos yra stebimų signalų trukmės. Karštųjų krūvininkų fotoįtampa yra žymiai greitesnė už klasikinę, nes jos greitį lemia krūvininkų energijos relaksacijos trukmė, kuri paprastai puslaidininkiuose yra apie 1-100 ps. Tuo tarpu klasikinė fotoelektrovara yra lėtesnė, nes ji priklauso nuo pusiausvyrinės krūvininkų gyvavimo trukmės (μs eilės) [3, 15].

3.4. Fotono energijos ir bangos ilgio santykis

Į saulės elementą krintanti šviesa gali būti labai įvairaus bangos ilgio. Tai kas įvyks su šios šviesos fotonais, jiems patekus į saulės elemento viduje esančią pn sandūrą, priklauso nuo fotonų energijos. Žinant bangos ilgį fotono energiją galima apskaičiuoti pagal 11 formulę. 6 pav. pavaizduota įvairius bangos ilgius atitinkančios fotonų energijos UV, regimosios ir IR spektro srityse.

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{E(\text{eV})} = \frac{1.24}{E(\text{eV})}, \quad (11)$$

čia c – šviesos greitis vakuume, ν – šviesos dažnis, h – planko konstanta, E – fotono energija, išreikšta elektronvoltais (eV), λ – bangos ilgis mikrometrais (μm) [13].

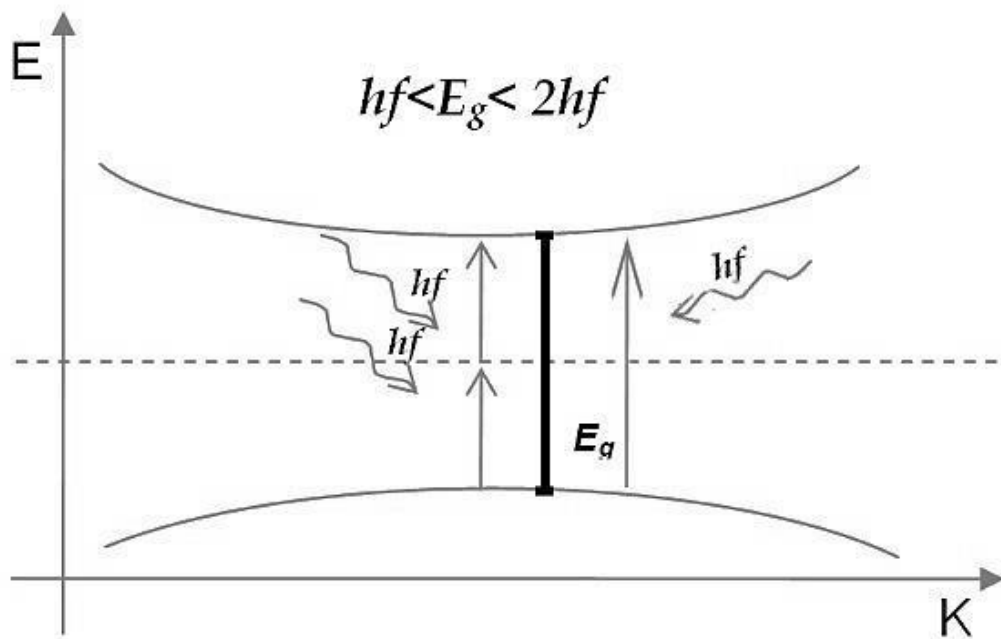


6 pav. Elektromagnetinių bangų spektras nuo ultravioletinių iki infraraudonųjų spindulių [13].

3.5. Laisvagrūvė ir dvifotonė sugertis

Laisvagrūvė šviesos sugertis vyrauja, kai puslaidininkyje šviesos kvanto energija yra mažesnė už draustinę energijų juostų tarpą. Vykstant laisvagrūvei šviesos sugerčiai, nevienalyčiuose puslaidininkiuose atsiranda elektrovaros jėga (fotoevj) padidėjus krūvininkų vidutinei energijai [5].

Dvifotonė sugertis – tai vienalaikė dviejų fotonų sugertis iš pagrindinės sistemos būsenos į sužadintąją. Tai neparimetrinis procesas, nes jame dalyvauja ir realūs terpės lygmenys, o sistemos kvantmechaninė būsena pakinta. Galimi du dvifotonės sugerties atvejai: sugeriami du to paties dažnio (to paties šviesos šaltinio ar pluošto) arba du skirtingo dažnio (iš skirtingų šaltinių) fotonai. Abiem atvejais sužadinimas vyksta per virtualius lygmenis, kurių gyvavimo trukmė yra labai trumpa. Dėl to abu fotonai turi sąveikauti su terpe vienu metu, taigi tikimybė, kad tokia sugertis įvyks, smarkiai priklauso nuo spinduliuotės intensyvumo [6]. Schematinė vienfotonė ir dvifotonė sugertis vaizduojama 7 pav. Paprastai dvifotonė sugertis vyrauja prie didelių apšvietimo intensyvumui. Tuomet, esant stipriam apšvietimui į sandūrą patenka daug fotonų kurie leidžia perkelti krūvininkus į laidumo juostą. Vykstant dvifotonei sugerčiai krūvininkai dažnai įgauna didesnę energiją nei E_g , todėl kaista ir tampa karštaisiais krūvininkais.



7 pav. Dvifotonės ir vienfotonės sugerties schema.

3.6. Netiesiniai kristalai

Visi impulsiniai kietojo kūno lazeriai spinduliuoja artimojoje infraraudonojoje spektro srityje, o jų spinduliuotės dažnio derinimo galimybės ribotos. Tai susiję su lazerinių lygmenų išplitimu, kuris daugeliu atvejų yra labai nedidelis. Netiesinės optikos metodai siūlo paprastą ir efektyvų būdą keisti lazerių spinduliuotės dažnį [6].

Vienas iš metodų yra antrosios harmonikos generacija, netiesiniuose kristaluose. Šis metodas remiasi tuo, kad netiesinėje terpėje yra sugeriami du fotonai ir akimirksniu išspinduliuojamas vienas, dvigubo dažnio fotonas. Pirmosios bangos (kaupinimo) vektorius žymimas k_1 , o antrosios harmonikos – k_2 . Tuomet fazių išsiderinimą Δk , tarp abiejų bangų, galima užrašyti kaip:

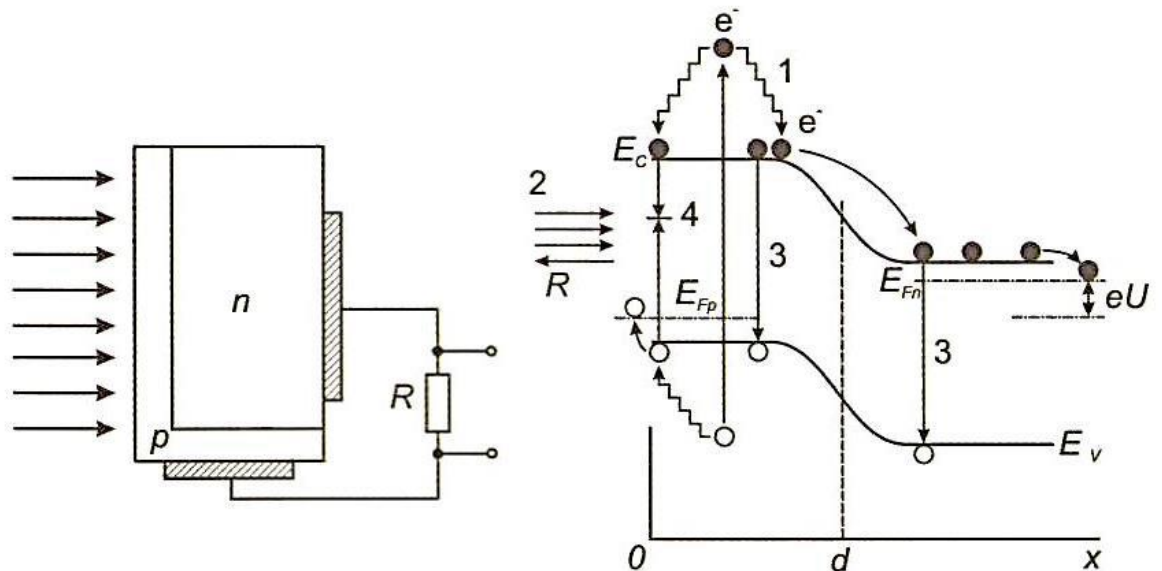
$$\Delta k = 2k_1 - k_2 \quad (12)$$

Didžiausias antrosios harmonikos intensyvumas pasiekiamas, kai $\Delta k = 0$, tai yra suderinamas fazinis synchronizmas tarp bangų. Fazinį synchronizmą galima pasiekti ir keičiant kristalo temperatūrą, nes lūžio rodiklis turi didesnę ar mažesnę temperatūrinę priklausomybę. Temperatūriniam faziniam

sinchronizmui realizuoti naudojami tik tie netiesiniai kristalai, kuriuose temperatūrinė lūžio rodiklio priklausomybė yra labai stipri, pavyzdžiui ličio niobatas (LiNbO_3).

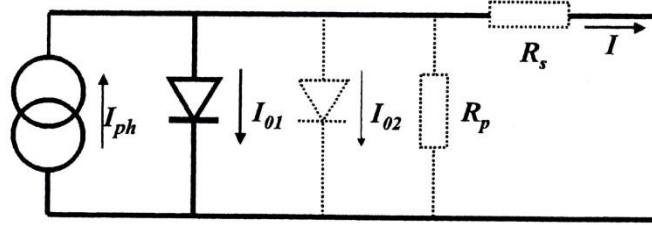
3.7. Saulės elementų veikimo principas

8 paveiksle pavaizduotas klasikinis kristalinis saulės elementas, sudarytas iš arti paviršiaus suformuotos pn sandūros ir juostinis apšviestos sandūros vaizdas. Puslaidininkyje yra sugerama yra ne visa į pn sandūrą krintanti šviesa, o tik ta, kurios kvantų energija yra didesnė už draudžiamosios energijos juostos plotį E_g . Dalis fotogeneruotų krūvininkų per labai trumpą laiką termalizuoja išsklaidydami perteklinę kinetinę energiją ir elektros kūrimui gali būti panaudojama tik E_g energija (žr. 8 pav., 1). Svarbu ir tai, jog realiai dalis krintančios šviesos atsispindi (žr. 8 pav., 2), o ir ne visi sugerti kvantai generuoja krūvininkų poras. Dalis fotogeneruotų krūvininkų rekombinuoja tūryje (žr. 8 pav., 3), kita dalis – paviršiuje (žr. 8 pav., 4), nesukurdami elektros srovės. Visa tai mažina realų elemento efektyvumą, todėl net idealaus Saulės elemento su viena pn sandūra efektyvumas neviršija 30% [1].



8 pav. Apšviesto Saulės elemento sandara ir atviros grandinės juostinis modelis.

Idealiu atveju saulės elementas schemeje yra jungiamas lygiagrečiai su lyginančiu diodu I_{01} (9 pav). Realu atveju neišvengiama pašalinių varžų, kaip elektrodų varža R_s nulemta emiterio sluoksnio ir kontaktų tinklo ir šunto varža R_p įtakota gamybos defektų [7].



9 pav. Ekvivalentinė idealaus saulės elemento grandinė (pilnos linijos). Realaus saulės elemento komponentai pažymėti taškinėmis linijomis.

Toliau aprašant idealųjį saulės elementą laikome, jog visi fotogeneruoti krūvininkai yra pilnai išskiriami sandūros elektrinio lauko ir nėra rekombinacijos. Tuomet trumpo jungimo srovė yra $I_0 = qG$, kur G – krūvininkų fotogeneracijos greitis. Jei elementas neužtrumpintas, tai dėl susidariusios įtampos tekės priešingos krypties tamsinė pn sandūros srovė:

$$I_{tamsinė} = I_s \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right), \quad (13)$$

kur k yra Bolcmano konstanta, T – temperatūra. I_s - atbulinė diodo srovė be paviršinės rekombinacijos [1,8].

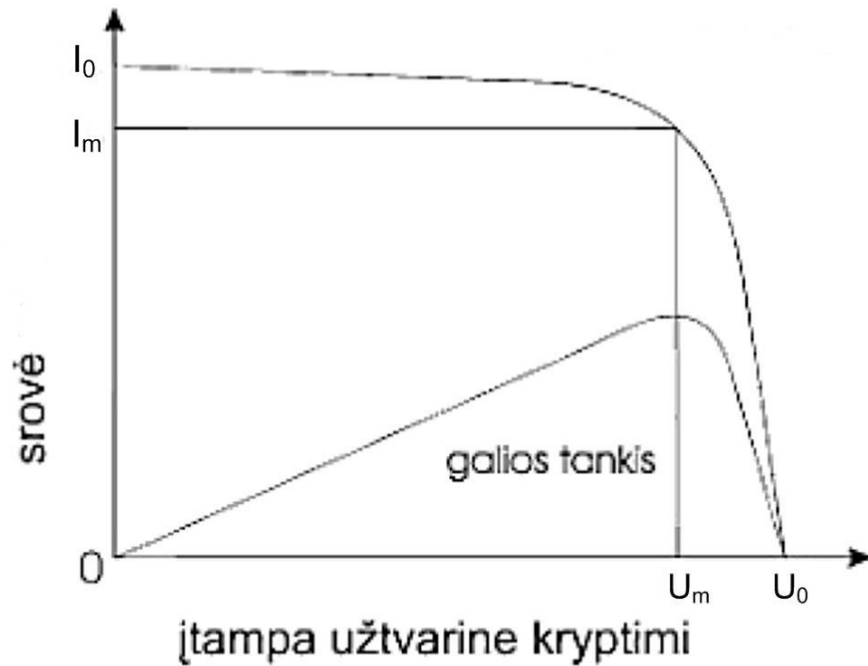
$$I_s = \frac{qD_p p_n}{L_p} + \frac{qD_n n_p}{L_n} \quad (14)$$

Bendras saulės elemento srovė yra lygi fotosrovės ir tamsinės srovės skirtumui:

$$I = qG - I_s \left(\exp \frac{qU}{kT} - 1 \right), \quad (15)$$

Pagal (15) elemento fotoelektrovara:

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_0}{I_s} + 1 \right), \quad (16)$$



10 pav. Apšviesto saulės elemento voltamperinė ir galios charakteristikos.

Saulės elemento įtampa kinta tarp 0 ir U_0 , o išskiriama galia lygi:

$$P = IU, \quad (17)$$

Maksimali galia pasiekama prie tam tikros įtampos U_m . Užpildos faktorius FF apskaičiuojamas pagal galias prie įtampų U_m ir U_0 (10 pav.),

$$FF = \frac{I_m U_m}{I_0 U_0} \quad (18)$$

Užpildos faktorius gali siekti iki 85%.

Saulės elemento efektyvumas η yra galios tankis sukuriamas Saulės apšvitos galios tankio P_s ,

$$\eta = \frac{I_m U_m}{P_0}, \quad (19)$$

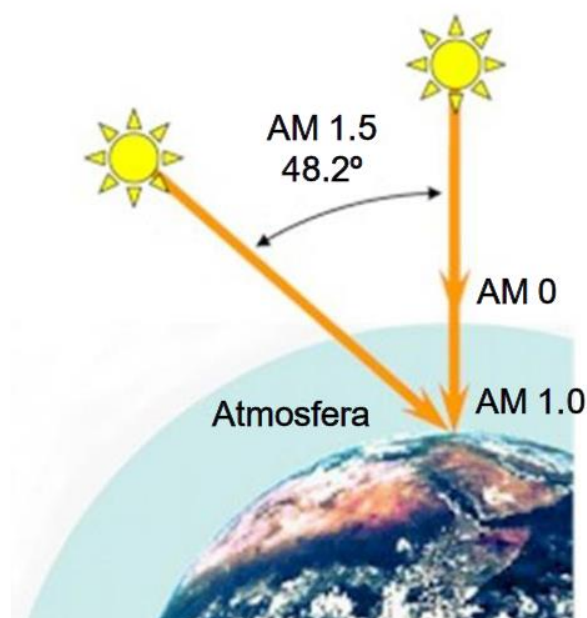
tuomet,

$$\eta = \frac{I_0 V_0 FF}{P_0}, \quad (20)$$

Šie keturi dydžiai: I_0 , V_0 , FF , η yra pagrindiniai aprašant saulės elementų veikimo charakteristikas. Tiriant realiu atveju ir užpildos faktorius, ir elemento efektyvumas mažėja dėl baigtinės elektrodų varžos R_s ar šunto varžos R_p [1,8].

3.8. Saulės spinduliuotės spektras

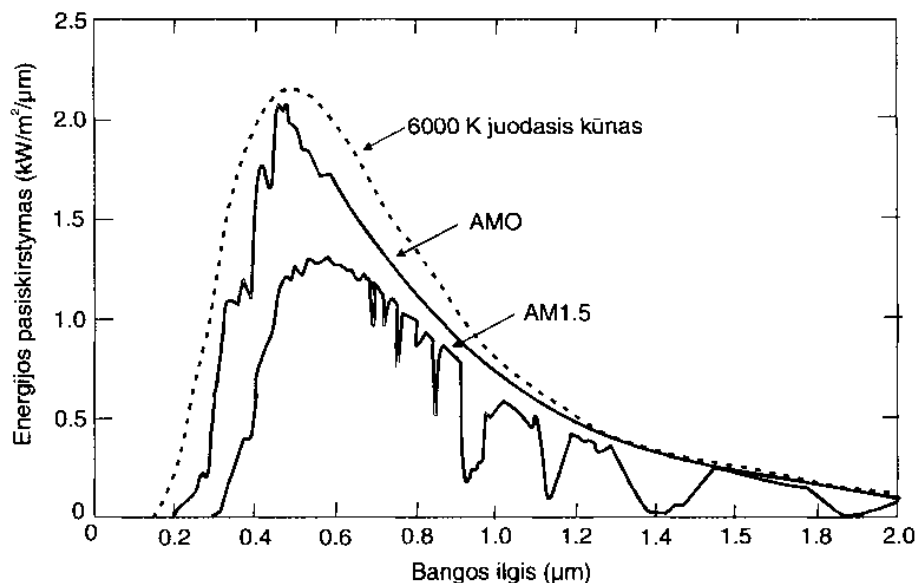
Saulės spinduliuotė Žemei yra bene svarbiausias gyvybinis resursas. Be jos neišliktų jokia Žemės gyvybinė forma, tai yra, nei gyvūnai, nei augalai ar tuo labiau žmonės. Pastaruoju metu, didėjant gyventojų skaičiui ir tuo pačiu stipriai išaugus taršai, vis labiau pereinama prie atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimo. Tai geoterminė, vėjo, saulės energija ir kitos. Iš jų Saulės energija yra viena palankiausių išgauti ir jos efektyvumas nepriklauso nuo to kiek intensyviai ji yra naudojama. Tačiau prieš Saulės spindulius pasiekiant Žemės paviršių svarbu atsižvelgti į kelis faktorius. Saulės spinduliuotės galia tenkanti



11 pav. Saulės spinduliuotės kelias į žemę.

vienam kvadratiniam metrui statmenai apšviesto ploto už atmosferos ribų yra lygi $1,353 \text{ kW/m}^2$. Šis pasiskirstymas atitinka vadinamąjį AM0 (Air-Mass-Zero) spektrą (11 pav.). Kertant atmosferą, priklausomai nuo kritimo kampo, dalis spinduliuotės energijos sugeriama. AM1 atitinka energijos srautą, saulei esant zenite. Tačiau dažniausiai Saulė šviečia kitu kampu, priklausančiu nuo geografinės padėties, todėl kalbant apie saulės elementus, susitarta standartizuoti Saulės spektrą AM1,5 (oro masė 1,5 karto didesnė negu Saulei esant zenite). Tai atitinka $48,2^\circ$ spinduliuotės kritimo kampą į žemės paviršių ir apie 1 kW/m^2 suintegruotą energijos srauto tankį. Lietuvoje giedrą vidurdienį krintančios Saulės srauto tankis

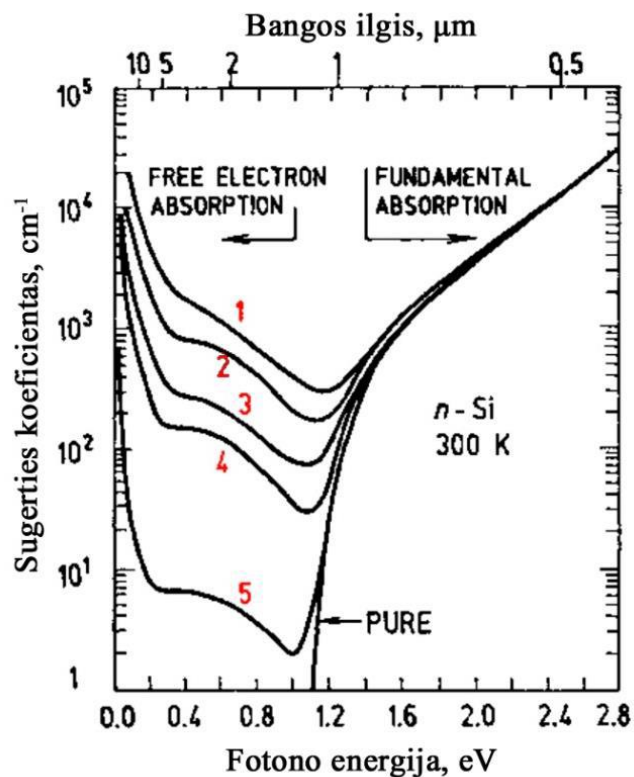
neviršija 1 kW/m^2 , o vidutiniškai siekia 120 W/m^2 , todėl didelis Saulės energijos panaudojimo efektyvumas nepasiekiamas. Į Žemę krintančių ir ją pasiekiančių Saulės spinduliuojamų elektromagnetinių bangų spektras pavaizduotas 12 pav. [1].



12 pav. Saulės spektro virš atmosferos – AM0 ir krentančio į žemės paviršių - AM1,5 palyginimas su juodo kūno 6000K spinduliuotės spektru.

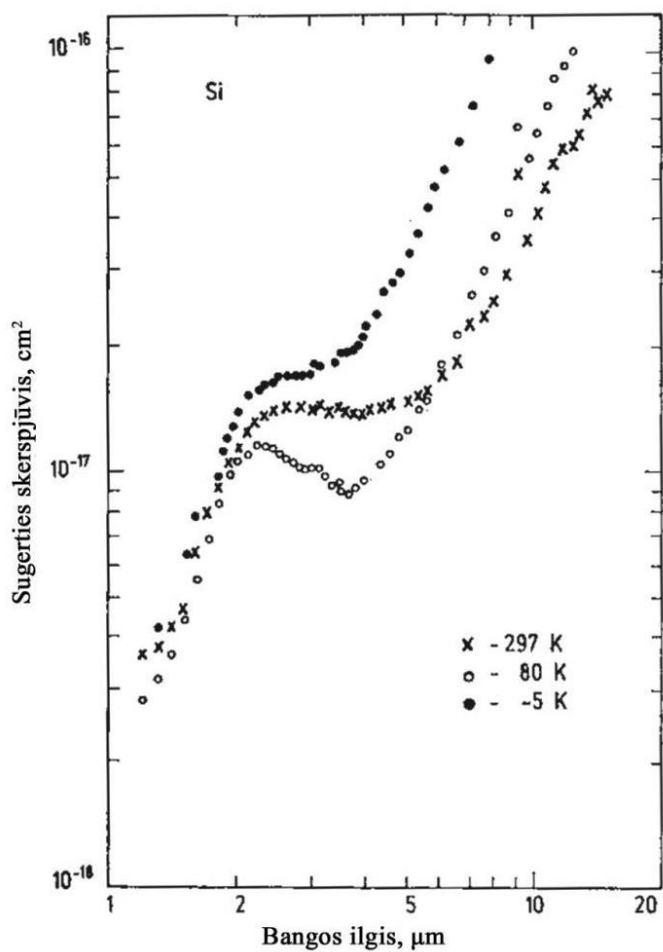
3.9. Silicio sugerties spektras

Silicis yra populiariausia medžiaga saulės elementų gamyboje, nepaisant to, kad tai netiesiatarpis puslaidininkis. Draustinis tarpas $E_g = 1.12 \text{ eV}$. 13 pav. Pavaizduota kambario temperatūros n tipo silicio sugerties efektyvumas esant įvairiom fotonų energijoms. Didesnė elektronų koncentracija nulemia didesnį sugerties koeficientą. Be to, fotonų energijoms esant $0,01 \text{ eV} - 1,1 \text{ eV}$ vyrauja laisvųjų elektronų sugertis, o nuo $1,1 \text{ eV}$ – klasikinis silicio sugerties spektras, vykstant tarpjuostinei sugerčiai. Taigi, sugertiems fotonams, kurių energija siekia draustinį tarpą stebimas įprastinis silicio spektras, kuris beveik nepriklauso nuo elektronų koncentracijos.



13 pav. *n-Si* kambario temperatūroje parodo įvairių koncentracijų laisvųjų elektronų įtaką optiniam sugerties spektrui. 1 – $n = 4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 2 – $2,4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 3 – $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$; 4 – $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 5 – $3,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; [10]

Kitu atveju, kai fotono energija yra nepakankama įveikti draustinį tarpą, vyrauja sugertis laisvaisiais elektronais. Tai pavaizduota 14 pav. esant įvairioms gardelės temperatūroms, o elektronų koncentracijai nekintant. Galima pastebėti, jog sugerties skerspjūvis, o taip pat ir sugerties koeficientas, prie didesnių bangos ilgių išauga.

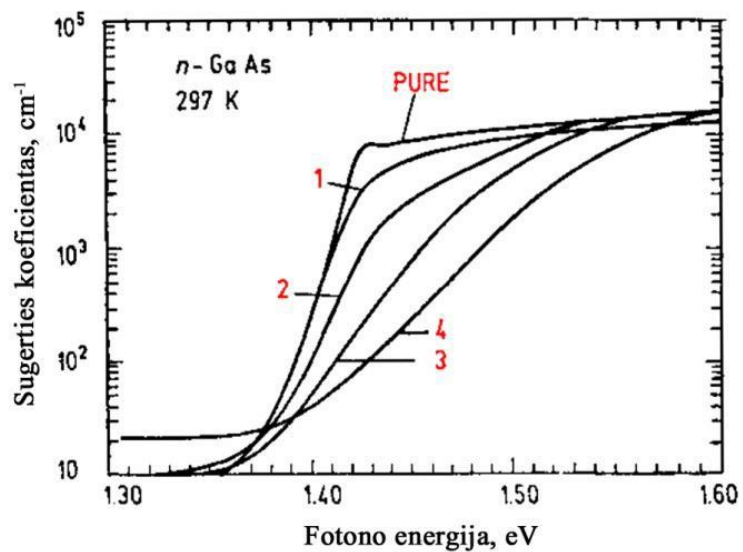


14 pav. Laisvųjų elektronų sugerties skerspjuvio priklausomybė nuo bangos ilgio esant skirtingoms *n*-Si gardelės temperatūroms. Elektronų koncentracija – $1,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [10].

3.10. Galio arsenido sugerties spektras

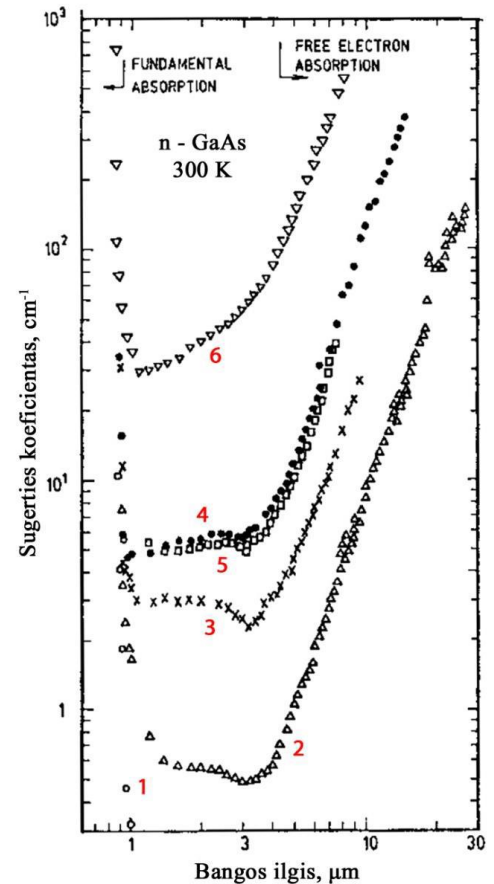
Galio arsenidas, būdamas tiesiatarpis puslaidininkis, yra tiriamas ir pritaikomas saulės elementams nuo pat jų atsiradimo. Draustinis tarpas $E_g = 1,42 \text{ eV}$. 15 pav. pavaizduota kambario temperatūros, *n* tipo GaAs sugerties koeficiento priklausomybė nuo krintančio fotono energijos esant

įvairiai elektronų koncentracijai. Kitaip nei silicyje elektronų tankis įtakoja sugertį tų fotonų, kurių energija viršija draustinį tarpą E_g . Sugertis išauga net 10^3 kartų gryname galio arsenide. Taip pat, didesnė elektronų koncentracija GaAs lemia lėtesnį sugerties didėjimą.



15 pav. Sugerties koeficiento priklausomybė nuo fotono energijos n tipo GaAs arti draustinio energijos tarpo, kambario temperatūroje. Elektronų koncentracija: 1 – $n = 5,9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 2 – $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 3 – $3,3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 4 – $6,7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; [10].

Kita, jau platesnėje spektro srityje atvaizduota sugerties koeficiento priklausomybė galio arsenide nuo krintančios bangos ilgio, yra parodyta 16 pav. Esant mažesniams nei 1 μm bangos ilgiui vis dar vyksta tarpjuostinė sugertis, kuri sumažėja srityje 1 – 4 μm , nes joje vyksta gana neintensyvi dvifotonė ir trifotonė sugertis. O esant didesniems bangos ilgiams vyrauja fotonų sugertis laisvaisiais krūvininkais ir sugerties koeficientas pradeda sparčiai didėti augant bangos ilgiui kvadratu.

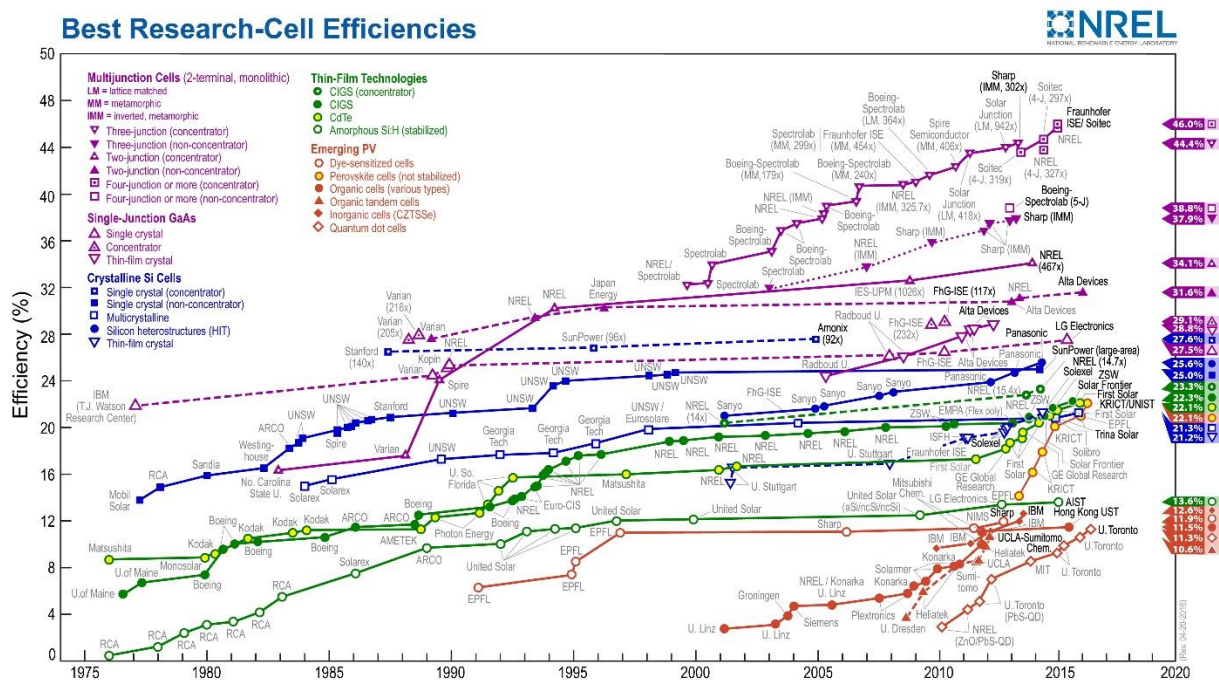


16 pav. Sugerties koeficiento priklausomybė nuo fotono bangos ilgio n tipo GaAs, kambario temperatūroje. Laisvųjų elektronų koncentracija: [10].
 1 – $n < 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$; 2 – $1,3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; 3 – $4,9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;
 4 – $1,09 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 5 – $1,12 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 6 – $5,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;

3.11. Monokristalinio silicio ir galio arsenido saulės elementai

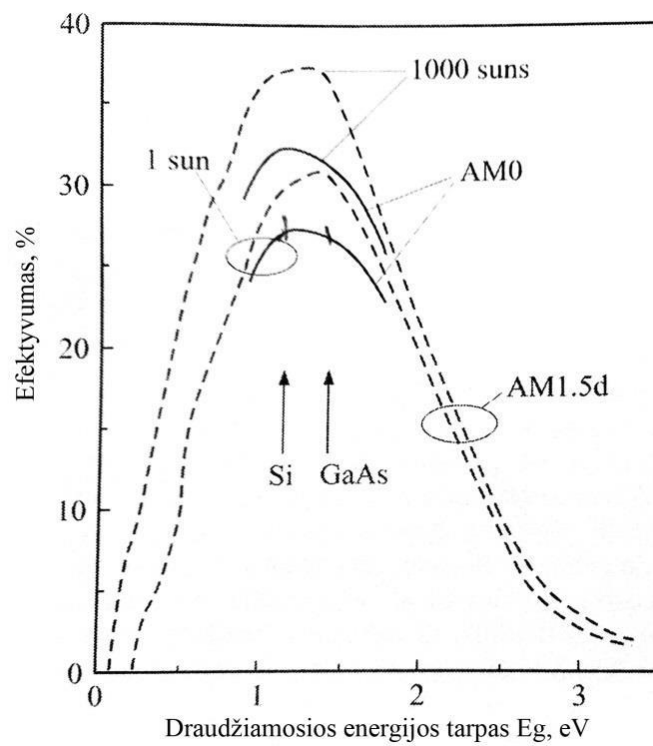
Saulės elementai yra gaminami iš įvairiausių medžiagų: amorfinio ir kristalinio silicio, kadmio telūrido, galio arsenido, organinių medžiagų. Tarp saulės elementų, turinčių vieną $p-n$ sandūrą, vieni efektyviausių ir geriausiai pritaikomų saulės elementų gamyboje yra monokristalinis silicis ir GaAs. Nuo pat pradžios silicis yra dažniausiai naudojama medžiaga saulės elementų gamyboje ir jos naudojimas siekia 80%. Populiarumo priežastis yra Si paplitimas žemėje, netoksiškumas ir žema kaina. Iš įvairių silicio rūšių labiausiai paplitę yra polikristalinis ir monokristalinis. Pastarasis leidžia pasiekti keliais

procentais aukštesnį saulės elemento efektyvumą ir ilgesnį jų gyvavimo laiką. Monokristalinis saulės elementas yra gaminamas Czochralski metodu iš aukštoje temperatūroje ištirpdyto silicio kristalų. Toks silicio kristalas efektyviai sugeria šviesos kvantus ir išsklaido mažesnę šviesos dalį nei polikristalinis silicis. 17 paveiksle matome efektyvumo priklausomybę nuo draudžiamosios energijos tarpo pločio. Prie AM1,5 silicio efektyvumas yra apie 31% . Šiuo metu pagal NREL – Nacionalinės atsinaujinačios energetikos laboratorijos statistiką (17 pav.) monokristalinis silicis pasiekia 25% ribą [5].



17 pav. Saulės elementų efektyvumo palyginimas [5].

Galio arsenidas, nors ir rečiau nei silicis, yra efektyviai naudojamas saulės elementuose. GaAs pasižymi 1,43 eV draudžiamosios energijos tarpo pločiu, beveik idealiu vienos *pn* sandūros saulės elementams. Be to, galio arsenidas pranašesnis už silicį dėl žymiai aukštesnio šviesos sugerties koeficiento, o tai leidžia gaminti plonesnius saulės elementus. Taip pat, GaAs yra ypač atsparūs karščiui, spinduliutei, o tai paverčia jį tinkamu pritaikymui kosmose. 18 paveiksle galio arsenido teorinis efektyvumas yra apie 32%. Realiai pasiektas 26,4% efektyvumas [9,11].



18 pav. Maksimalaus saulės elemento efektyvumo priklausomybė nuo puslaidininkio draudžiamosios energijos pločio [9].

7. Tyrimo aparatai ir metodai

4.1. Tyrimo aparatūra

Eksperimente artimojoje IR spektro srityje kaip stiprus šviesos šaltinis buvo naudojamas titano safyro lazeris Nd: YAG pagamintas UAB EKSPLA. Jo parametrai pateikti žemiau:

Techniniai parametrai:

Lazeris – Nd: YAG [CLASS 4]

Bangos ilgis λ – 1064 nm

Maksimali išėjimo galia P – 5 mJ

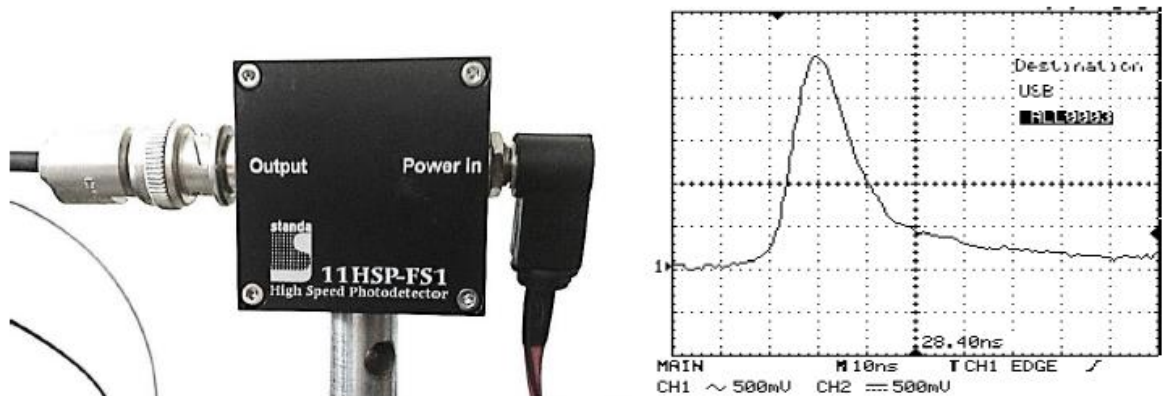
Impulso dažnis – 500-10 Hz



19 pav. Šviesos šaltinis: Lazeris – Nd: YAG

Vidurinėje IR srityje matavimams naudotas „Model PL5“ CO₂ lazeris, pagamintas „Edinburgh Instruments Ltd“. Jo spektro aprėptis: 9170 – 10800 nm.

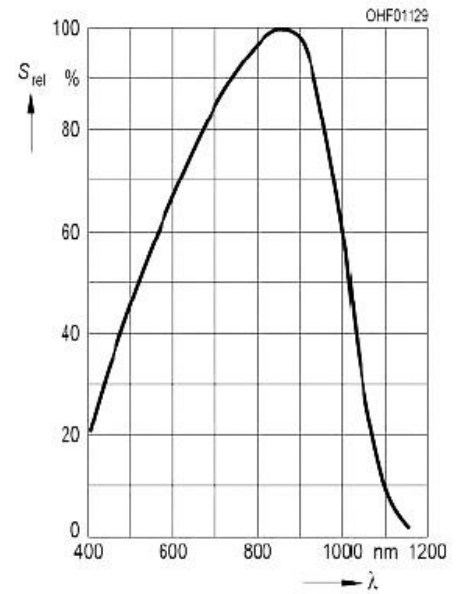
Taip pat matavimuose buvo naudoti keli skirtingi fotodetektoriai, kuris sugeria optinę energiją ir ją paverčia į fotosrovę. Jais buvo matuojami lazerio spindulio parametrai. Artimojoje IR spektro srityje naudotas STANDA 11HSP-FS1 ypač trumpus impulsus <1 ns fiksuojantis fotodetektorius. 20 pav. pavaizduota šiuo fotodetektoriumi išmatuota lazerio signalo forma.



20 pav. Fotodetektorius STANDA 11HSP-FS1 ir juo gauta lazerio signalo forma

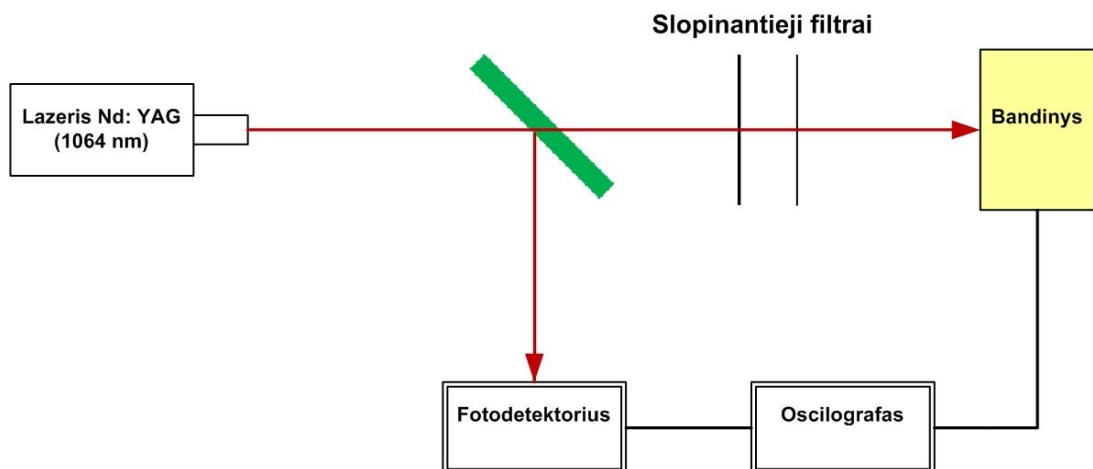
Fotodetektoriaus techninės jo charakteristikos :

Modelis	11HSP-FS1
Bangų diapazonas	400-1100 nm
Kilimo laikas	<1 ns
Jautris ($\lambda=850$ nm)	0,62 A/W
Impulso plotis (FWHM)	1 ns
NEP, (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	2.9×10^{-14}
Talpa $V_R=50V$	2,2 pF
Medžiaga	Silicis
Tamsioji srovė	1 nA
Jautrumo zona	1 mm ²



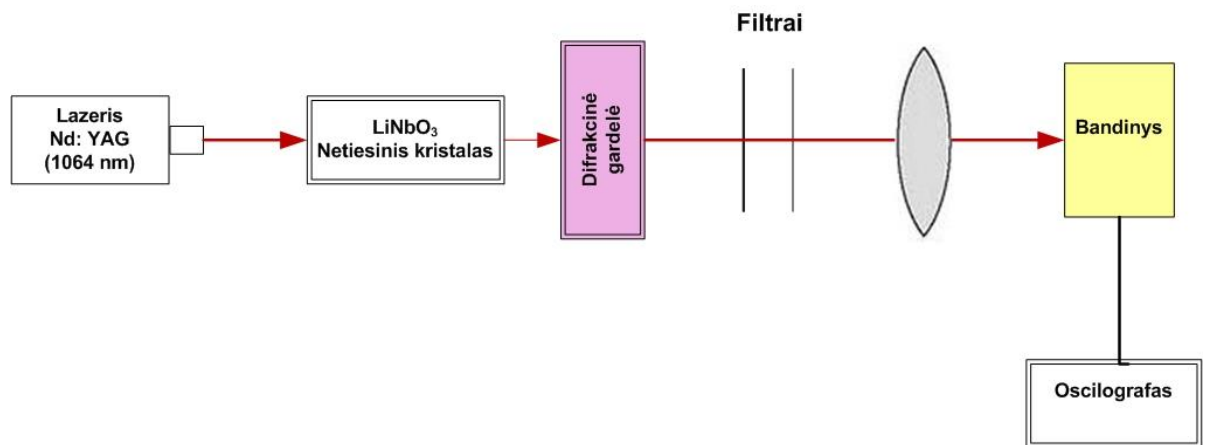
21 pav. Gamintojo pateiktas detektoriaus spektras

Prieš atliekant matavimus, pirma buvo paruošta ir suderinta matavimų optinė schema, skirta matavimams prie vienodo lazerio bangos ilgio (1064 nm). Ši schema pavaizduota 22 paveiksle. Panaši schema buvo naudojama ir vidurinėje IR srityje su CO₂ lazeriu.



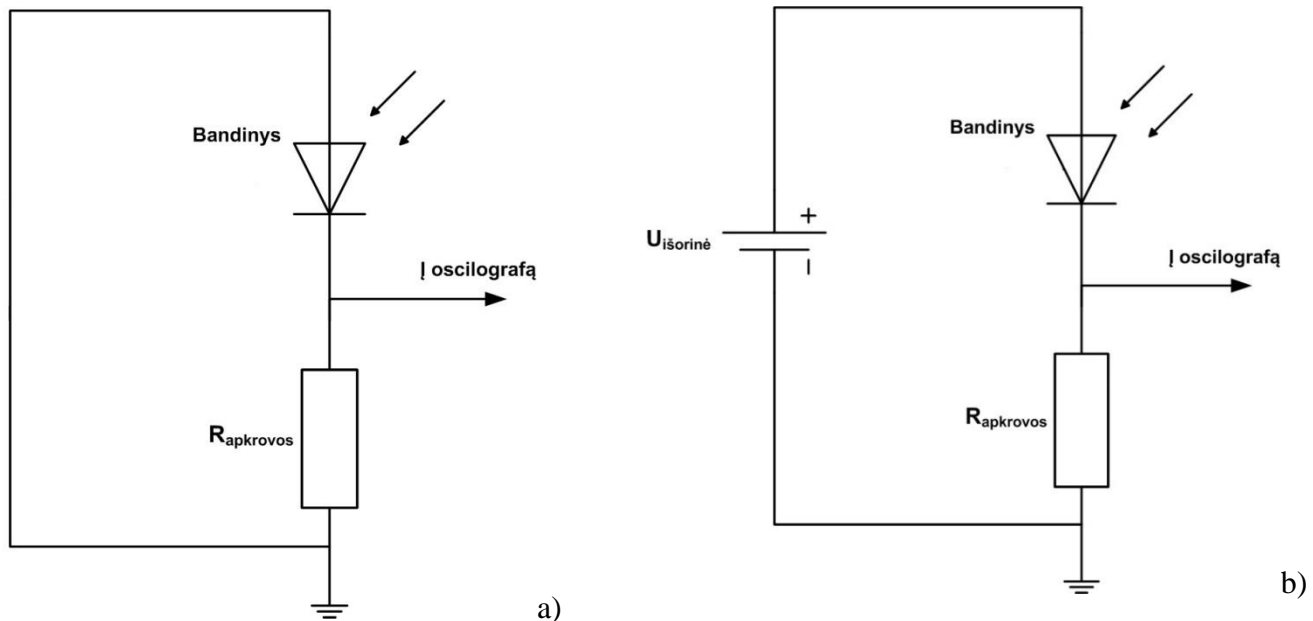
22 pav. Optinė fiksuoto bangos ilgio matavimų schema

Matavimuose ilgesnių bangų (1400 – 4200) srityje, buvo sužadinama tuo pačiu Nd: YAG lazeriu, tačiau kiek kitokia optinė schema, kuri pavaizduota 23 pav. Kaip filtrai naudojami nebe slopinantieji (Neutral Density), o dvigubo stiklo ir germanio filtrai, kurie slopina pašalinius bangos ilgius.



23 pav. Optinė keičiamo bangos ilgio matavimų schema

Prieš matuojant bandinys buvo įtvirtintas į laikiklį ir apšviečiamas lazerio spindulio kaip pavaizduota 22, 23 paveikslų optinėje schemeje. Matavimo rezultatai užsirašomi ir taip pat išsaugomi USB laikmenoje.



24 pav. Elektrinė matavimų schema, a) be išorinės įtampos, b) su įtampa - $U_{išorinė}$

Matavimai buvo atliekami sujungta elektrine grandine, kuri pavaizduota aukščiau (24 pav.). Eksperimentai daryti be išorinės įtampos šaltinio, su tiesiogine kryptimi prijungta išorine įtampa $U_{išorinė}$ ir su atgaline kryptimi prijungta išorine įtampa $U_{išorinė}$. Kaip išorinės įtampos šaltinis buvo naudojama izoliuota dėžutė su vienu (1,25V) ar dviem (2,55V) AAA tipo elementais. Taip pat buvo naudotas generatorius, tais atvejais, kai išorinė įtampa budavo keičiama nedideliais žingsniais. Prieš matavimus įtampos šaltinis buvo patikrinamas multimetru.

Apkrovos varža $R_{apkrovos} = 100\Omega$ silicio bandiniams, galio arsenido - 50Ω . Apšvietus bandinį lazerio spinduliuote, bandinio vidinė varža staigiai sumažėja ir įtampa ant apkrovos varžos $R_{apkrovos}$ padidėja. Pilnutinės įtampos formulė:

$$U_{šaltinio} = U_{bandinio} + U_{R_{apkrovos}} \quad (21)$$

4.2. Lazerio spindulio galios normavimas

Kiekvieną kartą apšviečiant bandinį lazerio šviesa buvo išmatuojama spindulio galia. Kadangi buvo tiriamos plataus spektro spinduliuotė, todėl naudoti keli galios matuokliai ir fotodetektoriai.

Vidurinėje IR srityje buvo naudojamas „Photon Drag“ germanio fotodetektorius. Jo jautris, kai bangos ilgis yra $10,6 \mu\text{m}$, siekia $0,7 \text{ mV/kW}$.

Tuo tarpu, artimojoje IR srityje naudotas laboratorinis spindulio energijos matuoklis, pagal išskiriamą šilumą. Juo buvo matuojama vidutinė lazerio generuojamo spindulio galia (mV).

Svarbu paminėti, jog visi fotoįtampų matavimai buvo skaičiuojami juos dalijant iš lazerio spindulio impulso galios. Tai leido suvienodinti prie įvairių lazerio galingumų ir skirtingų matavimų sąlygų atliktus tyrimus ir rasti fotoįtampų vertes vienam spindulio galios vienetui (mV/kW). Matavimo rezultatuose pateiktuose grafikuose 34 – 39, fotoįtampos yra perskaičiuotos į galios vienetui tenkančią įtampą (mV/kW). Žemiau pateikta formulė pagal kurią spindulio galia buvo paverčiama į lazerio spinduliuotės impulso galią:

$$P_{impulso}(kW) = \frac{P_{vid}(mV)}{f_{lazerio}(Hz) \cdot t_{impulso}(s)}, \quad (22)$$

čia $f_{lazerio}$ – lazerio dažnis, šiame darbe 400-500 Hz, $t_{impulso}$ – fotodetektoriumi matuojamo spinduliuotės impulso trukmė šiame tyrime 20 ns (20 pav.).

4.3. Lazerio bangos ilgio derinimas

Šiame tyrime lazerio bangos ilgis buvo keičiamas difrakcine gardele ir netiesiniu kristalu – ličio niobatu (LiNbO_3). Netiesinis kristalas leidžia į jį sklindantį lazerio spindulį generuoti įvairių bangos ilgių spinduliuotę. O tuomet difrakcinė gardelė išskiria tam tikro bangos ilgio spindulius.

Ličio neobatas buvo pasirinktas dėl didelės temperatūrinės lūžio rodiklio priklausomybės, todėl matuojant buvo patogu derinti į bandinį krentantį šviesos spindulio bangos ilgį prie įvairių temperatūrų (20-180 °C). Taip pat ličio niobatas pasižymi skaidrumu artimojoje ir vidurinėje IR srityje. 1 lentelėje nurodytos pagrindinės LiNbO_3 charakteristikos.

1 lentelė. Pagrindiniai netiesinio kristalo LiNbO_3 parametrai. D_{ij} yra didžiausią vertę turintis matricinis elementas, I_p yra paviršiaus optinio pažeidimo slenkstinis intensyvumas [6].

Kristalas	Trumpinys	Tipas	D_{ij} , pm/V	Skaidrumo sritis, μm	I_p , GW/cm^2
LiNbO_3	LN	Neig. vienašis	25,2	0,4 – 5,5	0,05

4.4. Bandinių gamyba ir paruošimas



25 pav. GaAs pn sandūros struktūra ir sudėtis

Galio arsenido bandiniai buvo auginami skystinės epitaksijos būdu vandenilio atmosferoje, horizontaliame kvarciniame reaktoriuje, naudojant grafitinę kasetę. Darinys buvo auginamas iš arsenu prisotinto galio tirpalo ant n tipo, alavu legiruoto, galio arsenido padėklo. p tipo sluoksnis buvo auginamas nuo 800 °C iki 792 °C, mažinant temperatūrą 0,5 °C per minutę. P+ sluoksnyje buvo išsėdintas

1 mm² ploto langas apšvietimui. Tada terminio garinimo metu buvo užgarinti AuGeNi ominiai kontaktai. Darinio struktūra pavaizduota 25 paveiksle.

4.5. Galios filtrai

2 lentelė. ND filtrų pralaidumas ir galia

Tyrimui naudotas lazeris turi fiksuotą impulso galią (32 kW). Matavimuose buvo reikalinga įvairi apšvietimo spindulio galia, todėl buvo naudoti slopinantieji (Neutral Density filtrai). Filtrų pavadinimai, procentinės pralaidumo dalys ir impulso galios nurodytos 2 lentelėje. Ypač mažai spinduliuotės galiai išgauti buvo naudojamos dviejų ar trijų filtrų kombinacijos.

Filtrai	Pralaidumas, %	P, kW
nėra	100	32
HC1	82,5	26,4
HC2	55,5	17,76
TC6	48,8	15,62
TC10	35,6	11,39
HC7*	32,7	10,46
HC6	28,6	9,15
HC7	27,4	8,77
HC3	22,2	7,10
HC13	11,7	3,74
HC9	6	1,92
HC9 s	1,37	0,438

4.6. Voltamperinių charakteristikų matavimai

Kiekvienas tirtas bandinys prieš atliekant matavimus buvo tikrinamas charakteriografu. Tikslesnėms srovių nuo įtampų priklausomybių matavimams buvo naudotas didelio tikslumo SUSS Microtec EP6 charakteriografas pavaizduotas 26 paveiksle.



26 pav. SUSS Microtec EP6 charakteriografas

Šiame darbe buvo tiriama tik galio arsenido *pn* sandūrų srovių priklausomybės nuo įtampos. Matavimai buvo atliekami tamsoje – saulės elementą uždengus ir apšvietus jį ryškia LED šviesa, kurios intensyvumas yra apie 5 mW/cm².

4.7. Temperatūriniai matavimai

Visi tiriami bandiniai buvo matuojami ne tik kambario temperatūroje, bet ir ypač žemoje temperatūroje. Tam buvo pasirinkta skystojo azoto temperatūros atmosfera, kuri siekia apie 77K (195,8 C°). Temperatūriniai matavimai atliekami specialiame izoliuotame kriostate, kuris pavaizduotas 27 pav. Matavimuose azoto temperatūroje įprastinis bandinio laikiklis nebetinkamas, todėl naudotas specialus sandarus laikiklis (28 pav.), su bario fluorido stiklu lazerio spinduliui pasiekti bandinį. Bario fluorido trūkumas yra tas, kad stipri lazerio spindulio galia gali pažeisti BaF stiklą, todėl matavimai buvo atliekami neviršijant 5,5 kW lazerio impulso galios.



27 pav. Kriostatas

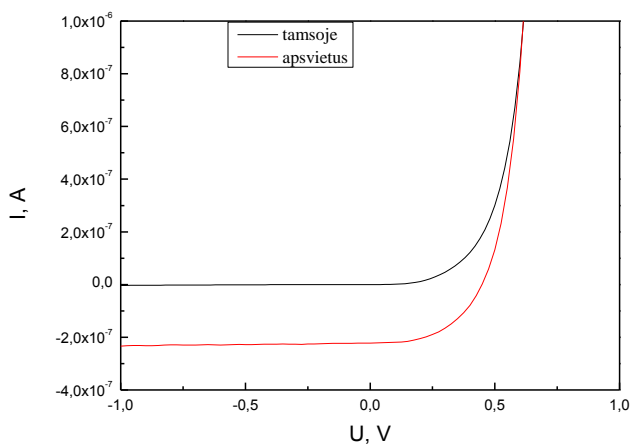


28 pav. Sandarus bandinių laikiklis

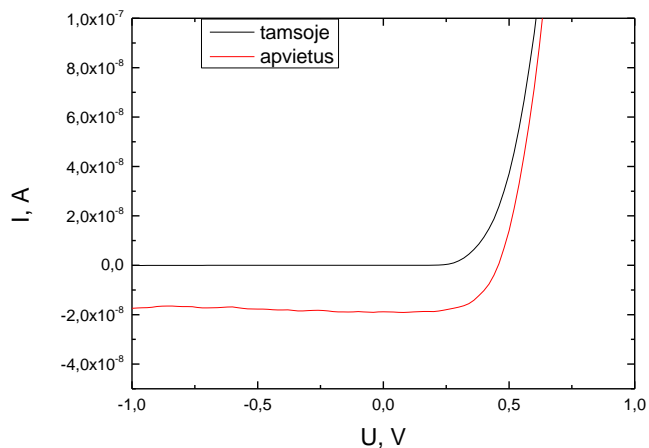
5. Darbo rezultatai

5.1. Voltamperinės charakteristikos

Pagal išmatuotas voltamperines charakteristikas (29, 30 pav.) apšvietus GaAs bandinį stebima vienoda fotoelektrovara (0,45V) ir kambario temperatūroje, ir atšaldžius. Tačiau fotosrovė atšaldžius sumažėja apie 10 kartų: nuo $2,2 \cdot 10^{-7}$ A iki $1,8 \cdot 10^{-8}$ A. Tai paaiškinama tuo, kad labai žemose temperatūrose barjero aukštis, kurį turi įveikti krūvininkai, padidėja. Ir sumažėja krūvininkų koncentracija nuskurdintoje srityje.



29 pav. Voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje.

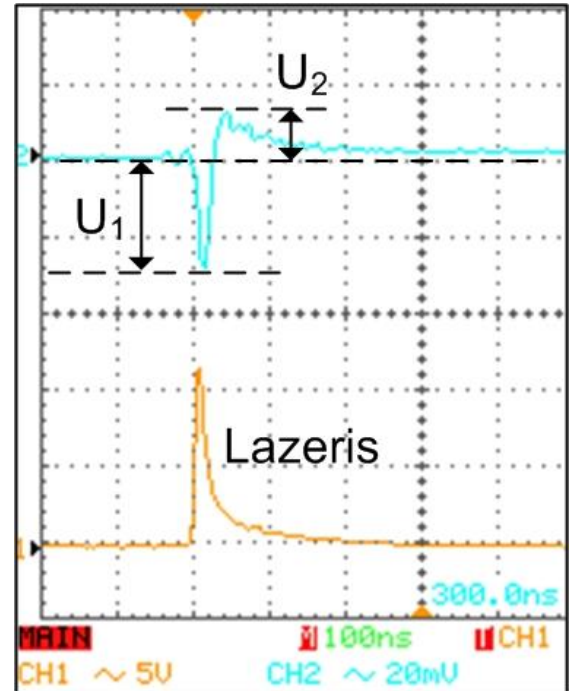


30 pav. Voltamperinės charakteristikos azoto temperatūroje.

5.2. Fotoelektrovaros ir karštųjų krūvininkų fotosrovės matavimai prie 1064 nm lazerio šviesos

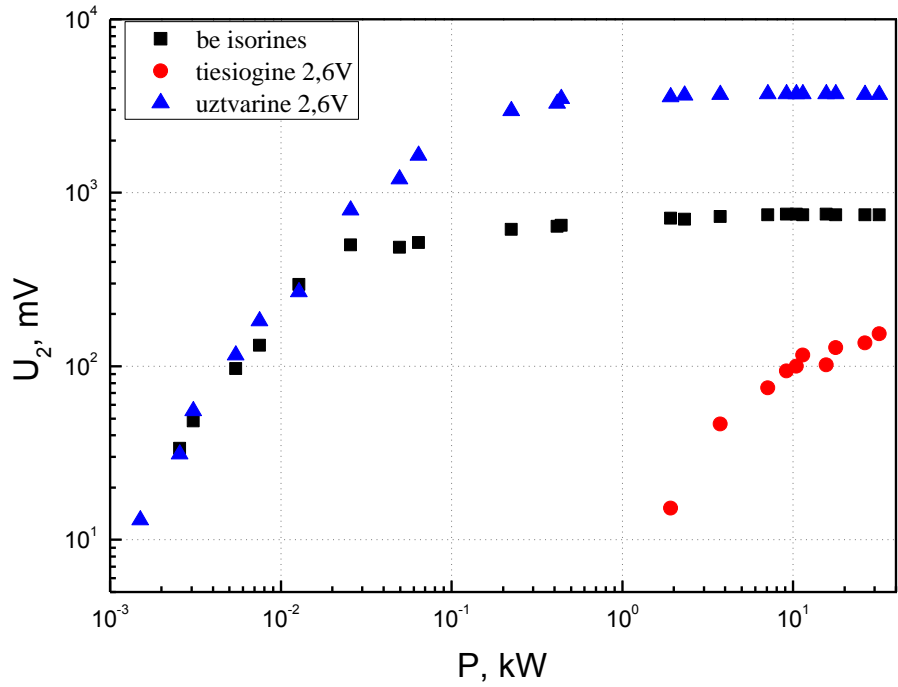
Apšvietus *pn* sandūrą lazerio spinduliuote, stebimas fotoatsakas, kurio vaizdas oscilografe matomas 31 pav. Fotodetektoriumi išmatuotas 1064 nm bangos ilgio lazerio impulsas, kurio trukmė yra apie 12 - 20 ns. 31 pav. aukščiau pavaizduotas fotoatsakas, kuris susideda iš neigiamo poliškumo dalies U_1 ir teigiamo poliškumo dalies U_2 . Pagal poliškumus ir spartą nustatyta, jog U_1 yra karštųjų krūvininkų elektrovara, o U_2 – fotoelektrovara.

Tiriant monokristalinio silicio bandinį karštųjų krūvininkų elektrovara nebuvo stebima. Tai galima paaiškinti tuo, jog Si $E_g = 1.12$ eV, o kvanto energija $h\omega = 1,17$ eV todėl fotosužadinti krūvininkai neturi ženklios perteklinės energijos.

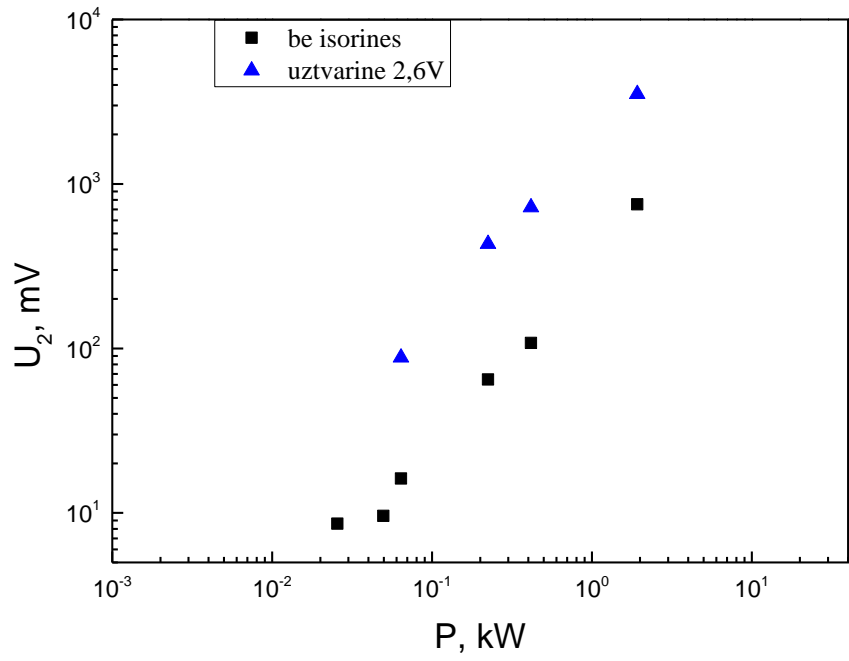


31 pav. Apšviečiamas lazerio impulsas ir fotoatsako signalas GaAs *pn* sandūroje.

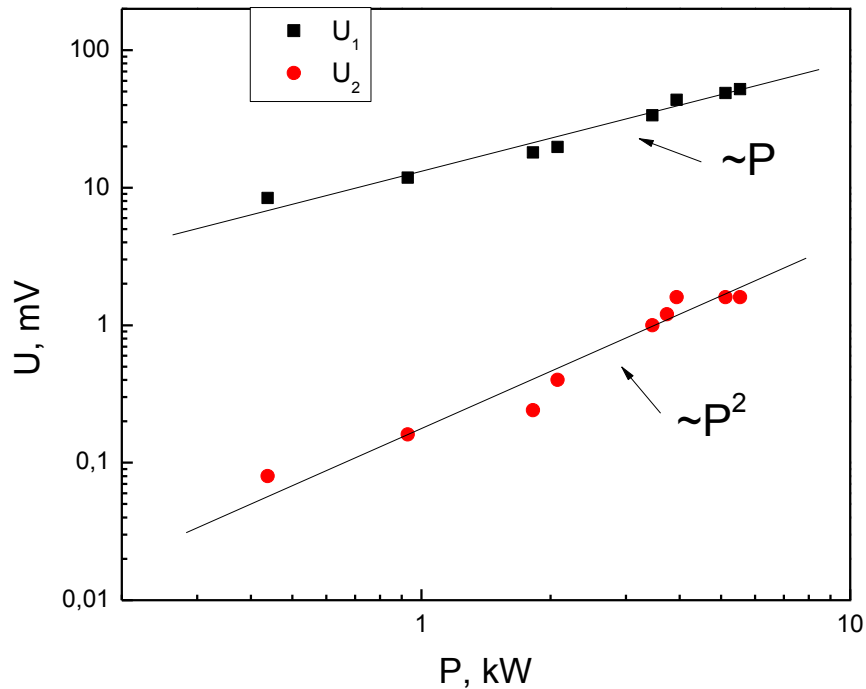
Tiriant fotoelektrovarą U_2 , pastebėta, jog ir atšaldžius, ir kambario temperatūroje fotoelektrovara silicio dariniuose nuo apšviečiamo spindulio impulso galios priklauso tiesiškai (32, 33 pav.). Prie didesnių galių (apie 0,1 kW) fotoelektrovara pasiekia barjero aukštį, todėl U_2 beveik nebekinta. Atšaldžius įsisotinimas neišmatuotas, nes laikiklyje įmontuotas bario fluorida stiklas yra jautrus didelėms spindulio galioms.



32 pav. Si *pn* sandūros fotoatsako U_2 priklausomybė nuo lazerio impulso galios kambario temperatūroje.



33 pav. Si *pn* sandūros fotoatsako U_2 priklausomybė nuo lazerio impulso galios skystojo azoto temperatūroje.



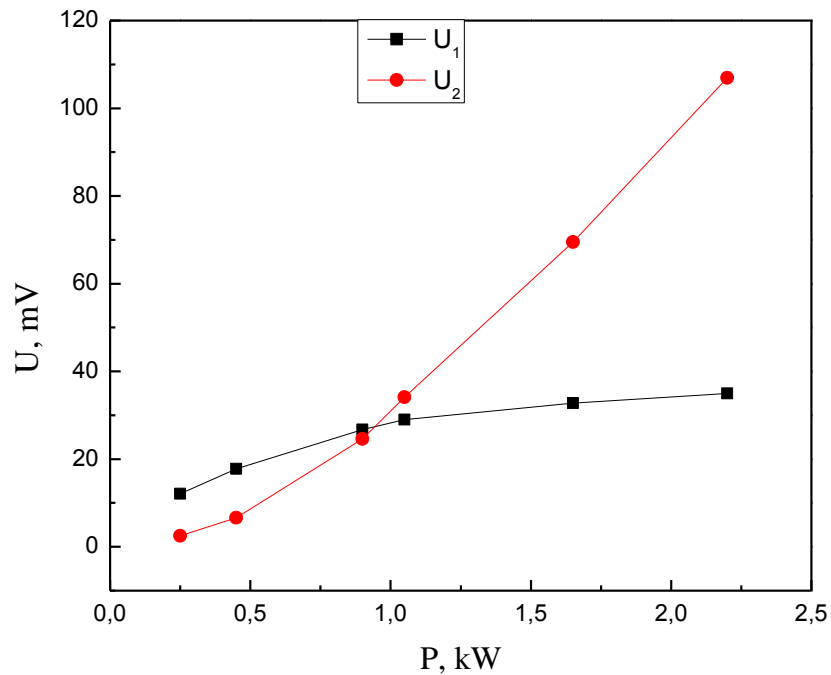
34 pav. GaAs *pn* sandūros fotoatsakų U_1 ir U_2 priklausomybė nuo lazerio impulso galios kambario temperatūroje.

Galio arsenido bandiniuose stebima kvadratinė fotoelektrovaros U_2 priklausomybė nuo lazerio spindulio galios (34 pav.). Taigi, krūvininkų generacija tirtuose bandiniuose vyksta dėl dvifotonės sugerties. Taip yra nes fotono energija yra mažesnė nei draustinis energijų tarpas.

Taip pat, 34 paveiksle pavaizduotas GaAs bandinyje stebimas fotoatsakas U_1 , kurį sukelia krūvininkų kaitimas. Gautas tiesiškai didėjantis U_1 augant lazeriu spinduliuojamai galiai. Taigi, karštuosius krūvininkus sukelia laisvagrūvė sugertis ir perteklinė energija, kuri atsiranda dėl dvifotonės sugerties.

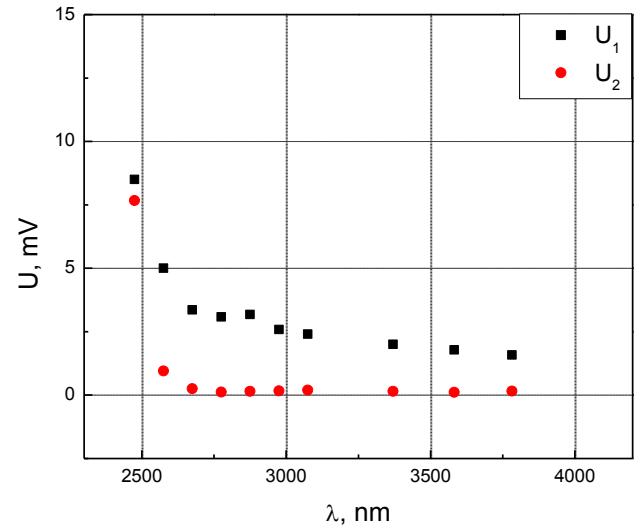
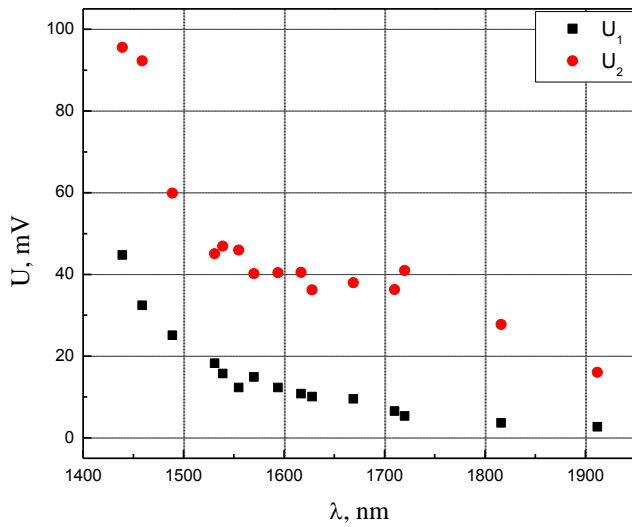
5.3. Fotoelektrovaros ir karštųjų krūvininkų fotosrovės spektriniai matavimai

Kiti matavimai buvo atliekami esant didesniems bangų ilgiams (1400 – 10600 nm.), tam kad patikrinti fotosrovės priklausomybes nuo įvairių energijų fotonų.



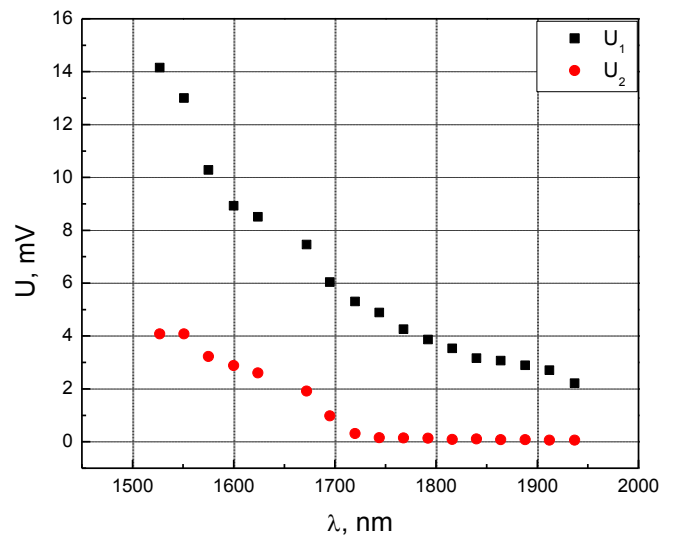
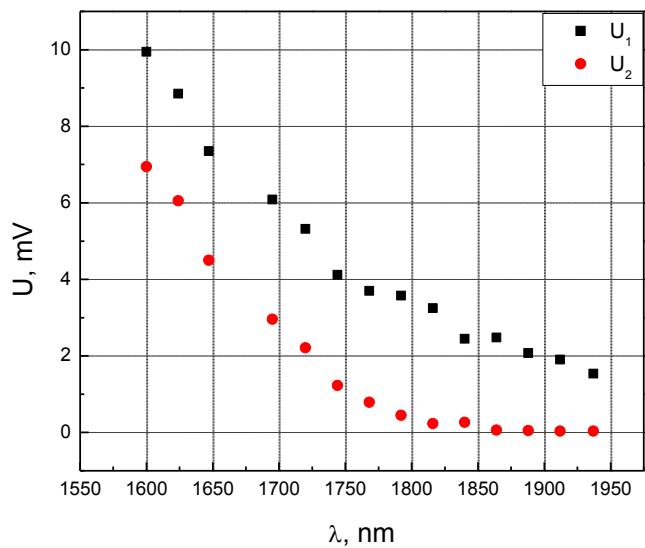
35 pav. Si *pn* sandūros fotoatsako U_1 ir U_2 priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės galios kai bangos ilgis 1539 nm.

35 pav. pavaizduota Si *pn* sandūros fotoatsakas apšvietus 1539 nm. lazerio šviesa. Fotoelektrovara didėja beveik kvadratinio dėsnio, nes vyksta dvifotonė sugertis, o karštųjų krūvininkų sukelta elektrovara nuo lazerio galios didėja tiesiškai.



36 pav. Si *pn* sandūros fotoatsako U_1 ir U_2 priklausomybė nuo lazerio spindulio bangos ilgio

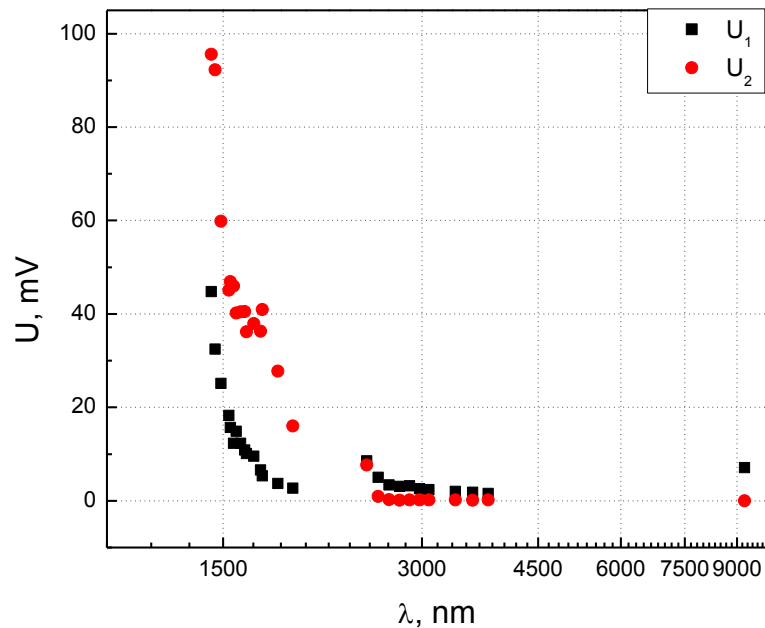
Toliau silicio saulės elementai buvo tiriami artimojoje ir vidurinėje IR srityse. 36 pav. pavaizduota fotoįtampų kitimas dvifotonės fotogeneracijos silicyje srityje. Foelektrovara tampa lygi nuliui apie 2650 nm. srityje, nes tada dėl mažos fotonų energijos visiškai išnyksta dvifotonė sugertis. Tuo tarpu karštųjų krūvininkų elektrovara šioje srityje (2650 nm.) išlieka, nes vyksta sugertis laisvaisiais krūvininkais.



37 pav. Dviejų GaAs *pn* sandūrų fotoatsakų U_1 ir U_2 priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės bangos ilgio.

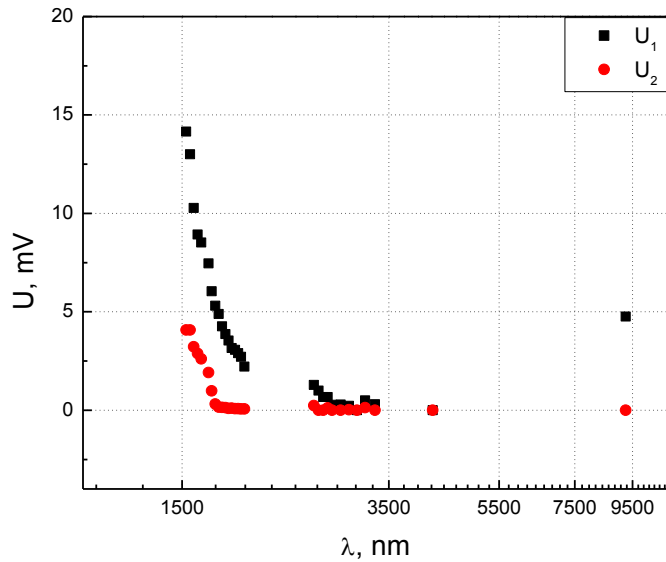
Panašiai buvo tiriami ir du GaAs bandiniai (37 pav.). Juose fotoelektrovara pasiekdavo nulį ties lazerio spindulio bangos ilgiais 1700-1800 nm. Teoriškai dviejų kvantų energijos dvifotonei sugerčiai galio arsenide užtenka iki 1740 nm. Pirmame bandinyje stebėtas lėtas sumažėjimas iki nulio gali būti įtakotas fonono sugerties arba juostų išplitimo.

Galio arsenide bangos ilgiui esant apie 1800 nm. sugerties koeficientas laisvaisiais krūvininkais beveik nekinta, todėl jo įtaka nėra esminė. Bet vis dar atsiranda karštųjų krūvininkų, nes vyksta vienfotoninė šviesos sugertis laisvaisiais krūvininkais, tačiau ji mažėja nes nebėra dvifotonės sugerties.



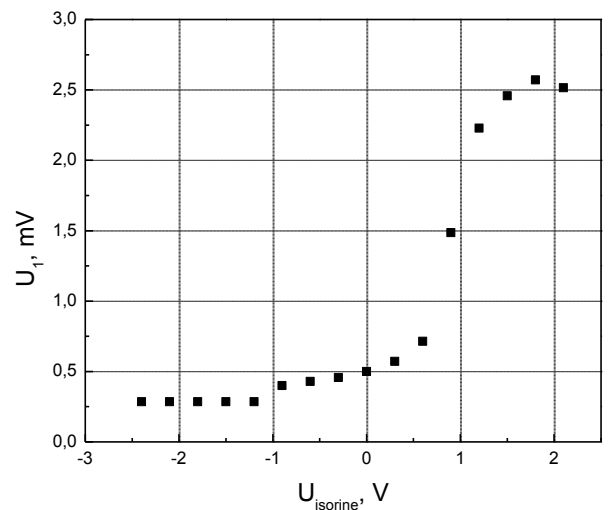
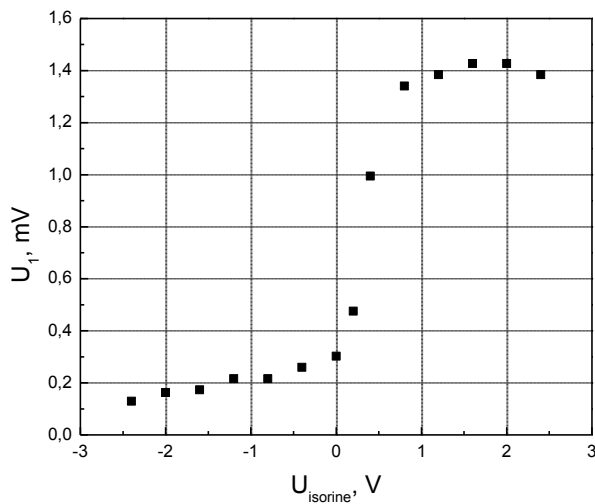
38 pav. Si *pn* sandūros fotoatsakų U_1 ir U_2 priklausomybės nuo bangos ilgio plačiame bangų spektre

38 ir 39 pav. atvaizduoti visi Si ir GaAs rezultatai, matuoti prie įvairių bangos ilgių. Si atveju, gauti rezultatai tik iš dalies atitinka 12 ir 13 pav. sugerties spektrus. O GaAs atveju pavyko gauti tikslesnius rezultatus, labiau sutampančiais su 14 ir 15 pav. sugerties spektrais.



39 pav. GaAs *pn* sandūros fotoatsakų U_1 ir U_2 priklausomybės nuo bangos ilgio plačiame bangų spektre

Išmatavus karštųjų krūvininkų elektrovaros fotoįtampas silicyje ir galio arsenide esant $10,6 \mu\text{m}$ šviesai (40 pav.) pastebėtas tas pats fotoįtampų didėjimas kaip ir žemoose bangų ilgiuose. Esant atbulinei įtampai U_1 beveik pradingsta, nes išplinta nuskurdintas *pn* sandūros sluoksnis ir padidėja potencialinio barjero aukštis. Tuo tarpu prijungus tiesioginę įtampą karštųjų krūvininkų elektrovara didėja iki kol $U_{\text{išorinė}}$ ant *pn* sandūros pasiekia patencinio barjero aukštį.



40 pav. Karštųjų krūvininkų fotoįtampas priklausomybės nuo išorinės įtampos Si (kairėje) ir GaAs (dešinėje) *pn* sandūrose prie $10,6 \mu\text{m}$. bangos ilgio.

6. Išvados

1. Sukurta fotoelektrinių savybių skysto azoto temperatūroje tyrimo metodika.
2. Sukurta fotoelektrinių savybių tyrimo metodika, panaudojant parametrinį bangų stiprinimą.
3. Si ir GaAs *pn* sandūrų fotoelektrovaros ir karštųjų krūvininkų tyrimai parodė:
 - Fotogeneracijos įtampa nuo impulso galios didėja tiesiškai, kai fotonų energijos užtenka vienfotonei sugerčiai. Prie mažesnių fotonų energijų vyksta didėjimas pagal kvadratinį dėsnį, dėl dvifotonės sugerties.
 - Karštųjų krūvininkų įtakota elektrovara nuo apšvietimo galios didėja tiesiškai. Ji atsiranda sandūroje vykstant šviesos sugerčiai laisvaisiais krūvininkais ir esant perteklinei energijai po elektrono ir skylės fotogeneracijos.
 - Ištyrus fotoelektrovaros priklausomybę nuo šviesos bangos ilgio pastebėta, jog ji išnyksta ties dvifotonės sugerties riba, kuri silicyje yra 2,65 μm , o galio arsenide 1,8 μm . Ilgesnėse bangose karštųjų krūvininkų elektrovara išlieka dėl šviesos sugerties laisvaisiais krūvininkais.
4. Išmatavus išorinės įtampos įtaką saulės elementams paaiškėjo:
 - Silicyje ir galio arsenide atgalinė įtampa didina krūvininkų generacijos įtakotą fotoelektrovarą, o tiesioginė – mažina.
 - GaAs tiesioginė įtampa didina karštųjų krūvininkų elektrovarą, o atgalinė sumažina. Tai įvyksta dėl to, jog išorinė įtampa keičia potencialinio barjero aukštį.

Literatūra

1. G. Tamulaitis, G. Juška. Energiją taupančios puslaidininkinės technologijos, 2008
2. S. Vengris. Kietojo kūno elektronika, 2008
3. J. Gradauskas, E. Širmulis, S. Ašmontas, A. Sužiedelis, Z. Dashevsky ir Kasiyan. Peculiarities of High Power Infrared Detection on Narrow-Gap Semiconductor p-n Junctions. Acta Physica Polonica, Vol. 119, No. 2, 2011, pp. 237-240
4. S. Ašmontas. Elektrogradientiniai reiškiniai puslaidininkiuose, 1984
5. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
6. A. Dubietis. Netiesinė optika, 2011
7. L. Castaner. Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation, 2007
8. J. Nelson. The Physics of Solar Cells, 2003
9. Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, V. D. Rumyantsev. Solar photovoltaics: Trends and prospects. Fiz. Tech. Poluprovodn., Vol. 38, No. 8, 2004, pp. 937–948.
10. A. Dargys, J. Kundrotas. Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP. 1994
11. http://www.webelsolar.com/solar_energy/solar_cell_types.html
12. http://solarcellcentral.com/limits_page.html
13. S.M. Sze. Semiconductor devices, physics and technology. 2nd ed.
14. S. Ašmontas. Mikrobangų ir infraraudonosios spinduliuotės sąveika su puslaidininkiais, MG 1999/10
15. K. Kempa, M. J. Naughton, Z. F. Ren, A. Herczynski, T. Kirkpatrick, J. Rybczynski, and Y. Gao. Hot electron effect in nanoscopically thin photovoltaic junctions. APPLIED PHYSICS LETTERS 95, 233121 2009
16. J. Gradauskas, S. Ašmontas, E. Širmulis, A. Sužiedelis, A. Čerškus, B. Kundrotas, R. Rinkevičienė, Z. Dashevsky, V. Kasiyan. Photoresponse of Metal-PbTe Structures to CO₂ Laser Excitation. ISSN 1392–1320 MATERIALS SCIENCE. Vol. 20, No. 2. 2014
17. S. Ašmontas, J. Gradauskas, E. Širmulis and K. Naudžius. Photoresponse of InSb-based p-n structure during illumination by CO₂ laser. Semiconductors, Vol 28, 1994, pp. 1089-1091

GaAs ir Si *pn* sandūrų fotoelektrinių savybių tyrimas esant stipriam apšvietimui

Santrauka

Jau 20 a. paskutiniiais dešimtmečiais prasidėjo didelis susidomėjimo saulės elementais, kuris tęsiasi iki šiol. To priežastis buvo tradicinių energijos šaltinių išteklių mažėjimas ir vyriausybių noras apriboti taršą ir klimato atšilimą. Didžiausio populiarumo ir pritaikymo sulaukė puslaidininkiniai saulės elementai, kaip kristalinis silicis. Vis dėlto, Si saulės elementuose didesnį nei 25% efektyvumą pasiekti neleidžia krūvininkų kaitimas, kai saulės energija nepanaudojama krūvininkų porų sukūrimui. Tai karštieji krūvininkai, kurie matavimuose pasireiškia neigiamo poliaringumo elektrovara. Dėl krūvininkų generacijos stebima ir fotoelektrovara, kurios poliaringumas yra priešingo ženklo karštųjų krūvininkų elektrovarai. Abu dydžiai pasireiškia apšvietus *pn* sandūras intensyvia lazerio šviesa. Yra ieškoma būdų kaip ne tik sumažinti karštųjų krūvininkų įtaką saulės elementų veikimui, bet ir juos panaudoti efektyvumo didinimui.

Šio baigiamojo darbo tikslas yra eksperimentiškai ištirti karštųjų krūvininkų įtaką fotoelektrovaros susidarymui GaAs ir Si *pn* sandūrose, esant stipriai lazerio spinduliuotei.

Šiame darbe atlikta literatūros apžvalga, ištirta karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros (U_1) ir fotoelektrovaros (U_2) priklausomybės nuo spinduliuotės galios ir įvairių bangos ilgių Si, GaAs *pn* sandūrose. Taip pat sukurta saulės elementų tyrimų azoto temperatūroje ir esant įvairiai išorinei įtampai tyrimų metodikos. Darbo gale aptarti rezultatai ir išvados

Ištyrus pastebėta, jog karštųjų krūvininkų elektrovara susidaro tuomet, kai šviesa kaitina krūvininkus. Fotoelektrovara tiriamuose bandiniuose buvo stebima, kai šviesa generuodavo elektrono ir skylės poras. Pastebėta, jog prijungta išorinė užtvarinė įtampa didina krūvininkų generacijos įtakotą fotoelektrovarą, o tiesioginė – mažina. Karštųjų krūvininkų kuriamą elektrovarą išorinė įtampa įtakoja atvirkščiai – tiesioginė įtampa padidina, o užtvarinė lemia karštųjų krūvininkų elektrovaros sumažėjimą.

Investigation of photoelectric properties of GaAs and Si pn junctions under intense illumination

Summary

For a last few decades of the 20 century, a huge interest in solar cells has been started and it continues until today. The reason of that is decrease of traditional energy resources and intention of governments to limit pollution and global warming. Semiconductor solar cells made of crystalline silicon were always the most useful and popular among solar cells. However, heating of carriers, when solar energy is unused to generate pairs of carriers, limits efficiency of Si cells to 25%. They are called hot carriers and are observed as negative voltage in investigations of solar cells. Also, generation of carriers induce a photoelectromotive force with opposite polarity than voltage of hot carriers. Both of these values appear when *pn* junction is under intense laser illumination. Therefore it is topical interest to find the ways not only reducing the negative impact of the hot carriers, but also using hot carriers for efficient solar cell operation.

The aim of this master work is to investigate the influence of hot carriers on the photovoltage formation across GaAs and Si *pn* junction under intense illumination.

This work includes a literature review and an investigation of hot carriers electromotive force and photoemf dependance on various powers and wavelengths of radiation. Methods to investigate solar cells in nitrogen temperatures and under various external voltages are also created. Lastly, the results and conclusions are discussed.

It was found that hot carriers electromotive force is caused by light heating the carriers in *pn* junction. Photovoltage was observed when light generated pairs of electrons and holes. It was noticed that applied external reverse-biased voltage increases photovoltage influenced of carriers generation, while forward-biased external voltage diminishes it. In hot carriers case, it is opposite. Reverse-biased external voltage makes hot carriers emf to diminish, while forward-biased voltage forces it to increase.