



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS  
UNIVERSITETAS

**Jolanta STUPAKOVA**

**AKYTOJO SILICIO NANODARINIŲ FIZINĖS SAVYBĖS,  
VEIKIANT SUPERAUKŠTO DAŽNIO  
ELEKTROMAGNETINE SPINDULIUOTE**

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02P),

kondensuotos medžiagos: elektrinė struktūra, elektrinės,  
magnetinės ir optinės savybės, superlaidininkai,  
magnetinis rezonansas, relaksacija, spektroskopija (P 260)

Vilnius, 2007

Disertacija rengta 2003–2007 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

**Darbo mokslinis vadovas**

habil. dr. Eugenijus Šatkovskis (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika (02P)).

**Konsultantas**

prof. habil. dr. Antanas Česnys (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika (02P)).

## TURINYS

<b>IVADAS</b> .....	4
<i>Tiriamoji problema ir darbo aktualumas</i> .....	6
<i>Darbo tikslas</i> .....	6
<i>Darbo uždaviniai</i> .....	6
<i>Mokslinis naujumas</i> .....	7
<i>Praktinė vertė</i> .....	7
<i>Ginamieji teiginiai</i> .....	7
<i>Rezultatų aprobavimas</i> .....	7
<i>Darbo apimtis</i> .....	8
<b>1. LITERATŪROS ANALIZĖ</b> .....	9
1.1. Akytojo silicio gamybos technologija ir modeliai.....	9
1.2. Pagrindinės akytojo silicio savybės.....	20
1.3. Akytojo silicio taikymas.....	25
1.4. Pirmojo skyriaus išvados.....	32
<b>2. AKYTŪJŲ SLUOKSNIŲ FORMAVIMAS IR TYRIMŲ METODIKA</b> .....	34
2.1. Eksperimentinė elektrocheminio ėsdinimo įranga.....	34
2.2. Sudėtinių akytojo silicio darinių technologija.....	35
2.3. Bandinių gamyba.....	37
2.4. Akytojo silicio darinių tyrimų metodika.....	41
2.5. Antrojo skyriaus išvados.....	45
<b>3. SILICIO SLUOKSNIŲ MORFOLOGIJOS IR SANDAROS TYRIMAI</b> .....	46
3.1. Akytųjų sluoksnių paviršiaus morfologija.....	46
3.2. Akytojo silicio darinių fotoluminescencija.....	48
3.3. Trečiojo skyriaus išvados.....	52
<b>4. ELEKTRINĖS AKYTOJO SILICIO DARINIŲ SAVYBĖS</b> .....	53
Ketvirtojo skyriaus išvados.....	62
<b>5. AKYTOJO SILICIO DARINIŲ TYRIMAI VEIKIANT SUPERAUKŠTO DAŽNIO ELEKTROMAGNETINE SPINDULIUOTE</b> .....	63
5.1. Superaukšto dažnio spinduliuotės poveikis akytojo silicio elektros laidumui.....	63
5.2. Elektrovara akytojo silicio dariniuose paveikiant juos mikrobangų spinduliuotės impulsais.....	68
5.3. Eksperimentinių rezultatų analizė, taikant krūvininkų kaitimo superaukšto dažnio spinduliuotės poveikyje koncepciją.....	81

5.4. Akytojo silicio darinių savybių praktinis panaudojimas mikrobangų jutikliuose.....	87
5.5. Penktojo skyriaus išvados.....	89
<b>BENDROSIOS IŠVADOS.....</b>	<b>90</b>
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS.....</b>	<b>91</b>
<b>AUTORĖS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....</b>	<b>101</b>

## IVADAS

Dėka neišsenkančių atsargų, gerai išvystytos ir gana pigios technologijos, o taip pat palankių savybių silicis tapo pagrindine puslaidininkine medžiaga kietakūnėje elektronikoje ir mikroelektronikoje, o šiuo metu silicis sėkmingai diegiamas į nanoelektronikoje. Vis tik egzistuoja svarbios sritys, kuriose kristalinis silicis dėl savo bazinių fundamentalių savybių negali konkuruoti su kitomis puslaidininkinėmis medžiagomis. Tai greitaveikių prietaisų, optoelektronikos ir optinio ryšio sistemų sritys. Šiuo požiūriu, nepalanki fundamentali savybė yra „netiesi“ silicio draustinės energijos juosta, kuri sąlygoja mažą nepusiausvirų krūvininkų spinduliuotės šuolių efektyvumą. Kita vertus jau prieš porą dešimtmečių atrastas nanostruktūrinis akytasis silicis (ASi), gaunamas elektrochemiškai išdinant monokristalinį silicį, būtų perspektyvus kandidatas tokiems taikymams. ASi pirmą kartą buvo gautas 1956 metais, A. Uhlir'ui tiriant procesus, vykstančius silicio paviršiuje elektrocheminio poliravimo metu fluoro rūgštis ir vandens tirpale [1]. Tai buvo metai, kuomet kūrėsi šiuolaikinės puslaidininkinių elektronikos pagrindai. Šis A. Uhlir'io darbas pralenkė savo epochą beveik 50 metų, kadangi, kaip vėliau paaiškėjo, jis sukūrė pirmąjį silicio nanotechnologijos pavyzdį. Keičiant akytumą, o taip pat veikiant (pavyzdžiui, oksiduojant) vidinį ASi paviršių, buvo suformuoti sluoksniai, pasižymintys intensyvia fotoluminescencija (FL) nuo 5 % esant kambario temperatūroje ir iki 10 % žemosiose temperatūrose plačiame spektro ruože [2]. Taip pamažu ryškėjo potenciali galimybė pagaminti silicio šviesos diodus ir lazerinius bei optoelektroninius darinius šviečiančius įvairiose spektro srityse. Tokius darinius būtų lengva įterpti į silicio optoelektroninius integrinius lustus. Nors intensyvi ASi fotoluminescencija matomojoje srityje pirmą kartą buvo stebėta 1984 m., vis dėlto šis reiškinys nesulaukė ypatingo dėmesio [3]. Dabartinis susidomėjimas ASi spinduliuote prasidėjo nuo L. Canham'o darbo [4], kuriame pirmą kartą atkreipiamas dėmesys į tai, kad spinduliuotės našumo padidėjimas akytajame silicyje gali būti sąlygotas, taip vadinamu, erdviniu kvantinio ribojimo (confinement) efektu, pasireiškiančiu ASi dalelėms sumažėjus iki kelių nanometrų dydžio. Šį efektą galime valdyti, keičiant nanodalelių matmenis. Kadangi optoelektronikai aktuali yra ne foto-, o elektroluminescencija (EL), lygiagrečiai su fotoluminescencijos tyrimais (beveik tuo pačiu metu) buvo pradėti dviejų elektrinių kontaktų ASi darinių elektroluminescencijos tyrimai. Pirmą kartą elektroluminescencija buvo stebėta 1991 m. [5, 6]. 1992 m. ASi elektroluminescencinių darinių išorinis kvantinis efektyvumas tesiekė  $10^{-5}$  % [7]. Daugelio mokslinių grupių pastangų dėka 1993 m. efektyvumas padidintas iki 0,01 % [8], o 1996 m. – jau siekė 0,2 %, o efektyvumas pagal galią viršijo 0,1 % [9–11]. Taip pat nemažai padaryta siekiant padidinti

elektroluminescencijos stabilumą. Pirmųjų ASi darinių elektroluminescencijos intensyvumas vos po kelių minučių, ar net sekundžių sumažėdavo dešimtis kartų, tuo tarpu EL efektyvumas, prietaisui dirbant maždaug apie mėnesį [11], išlieka nepakitęs.

Kilus susidomėjimo ASi dariniais bangai, paaiškėjo, kad šių darinių panaudojimas atveria naujas galimybes daugelyje kitų mokslo ir technikos sričių. Pademonstruota, kad struktūros ASi pagrindu ne tik spinduliuoja šviesą, bet ir praleidžia ją su minimaliais nuostoliais, taip pat ją moduliuoja ir detektuoja. Susidomėjimo mastą ASi tyrimais galima pailiustruoti tuo, kad laikas nuo laiko šiam objektui skirtų darbų skaičius siekdavo keturženklį skaičių. Darbai plito į daugiasluoksnių, silicis-izoliatorius (SOI), technologijų [12], šviesą spinduliuojančius prietaisus [13], jutiklių [14], optikos, kvantinės elektronikos ir fotonikos darinių sritis [15]. Biochemikai ir chemikai kūrė membranas [16]. Bendrą vaizdą apie ASi tyrimų mastą galima susidaryti iš tarptautinių konferencijų „Porous Semiconductors-Science & Technology“ medžiagos [17, 18] bei apžvalginių straipsnių [19–23]. Nors intensyviai buvo tiriamos ASi savybės ir prietaisinės struktūros, tačiau daug savybių vis dar lieka pakankamai neištirtų ir neaiškintų. Ryškus to pavyzdys yra fotoluminescencija, kurios mechanizmas iki šiol nėra iki galo supastas, todėl šia tema vis dar vyksta įvairios diskusijos. ASi gamybos technologija yra sąlygojama daugelio parametrų. Tai lemia didelį skaičių galimų parametrų kombinacijų bei gaunamų rezultatų įvairovę. Nemažai darbų skirta įvairios paskirties dvipolių ASi struktūrų tyrimams. Didžioji tokių darinių dalis gaminama siekiant stebėti elektroluminescencijos efektą arba ketinant pagaminti kokios nors srities jutiklius – fotodetektorius, cheminius jutiklius ir t. t. Kadangi dvipolių gaminių technologija dažniausiai nepakankamai preciziškai kontroliuojama, tai rezultatus palyginti yra sunku. Todėl dvipolių ASi darinių tyrimas ir toliau išlieka labai aktualus.

ASi tyrimų superaukšto dažnio (mikrobangų) spinduliuotės srityje yra nedaug. Galima teigti, kad vienintelė mokslininkų grupė, užsiimanti tokiais tyrimais, yra JAV, Minesotos Universitete. Tačiau ši grupė siekia ASi, kaip medžiagą, suteikiančią mažiausius nuostolius, panaudoti mikrobangų srityje. Todėl yra aktualu ir svarbu pritaikyti šią ASi savybę heterogeniniuose perėjimuose tarp mikrobangų ir elektronikos, mikrobangų ir optoelektronikos elementų bei kitose kombinacijose. Tokie reiškiniai, kaip ASi laidumas, veikiant mikrobangų spinduliuotei, arba galimybė mikrobangų jutiklius konstruoti naudojant ASi darinius, visiškai netyrinėti.

### ***Tiriamoji problema ir darbo aktualumas***

Atradus akytąjį silicį, paaiškėjo, kad daugelyje sričių jo panaudojimas atveria naujas bei netikėtas galimybes. Viena iš galimybių būtų akytojo silicio gaminių panaudojimas mikrobangų technikoje, tiriant mikrobangų sklaidimą ASi sluoksniuose (tyrimai atliekami JAV). Parodyta, kad radijo- ir optoelektroninės jungtys šios medžiagos pagrindu yra optimaliausios nuostolių atžvilgiu ir tinka tobulinant mobilaus ryšio ar kitą superaukštų dažnių techniką [24]. Akivaizdu, kad kitas elementas turėtų būti superaukšto dažnio spinduliuotės jutiklis. Yra žinomi kristalinio silicio mikrobangų spinduliuotės detektoriai, naudojančys karštųjų krūvininkų efektus [25, 26]. Jutiklių jautris paprastai priklauso nuo tam tikrų jo sudedamųjų dalių matmenų. Apskritai, jautris didėja mažėjant minėtiems matmenims [26]. Akytojo silicio technologijos privalumas yra tas, kad ASi kamieno charakteringieji matmenys gali būti sumažinti iki kelių nanometrų. Kitais būdais tokie matmenys kol kas dar praktiškai nepasiekiami arba pasiekiami tik išskirtiniais atvejais. Pritaikius ASi gamybos technologiją jutikliams, tikimasi žymiai padidinti jų jautrį. Kitus privalumus teikia ir ASi erdvinio kvantinio ribojimo (pagavimo) efektas. ASi sluoksnių ir darinių fizinių savybių tyrimai, veikiant juos superaukšto dažnio (SAD) elektromagnetine spinduliuote būtų aktualūs žvalgant ASi darinių panaudojimo SAD technikoje perspektyvą. Nei superaukšto dažnio spinduliuotės poveikis ASi savybėms, nei, tuo labiau, ASi SAD spinduliuotės jutikliai iki šiol nebuvo tiriami. ASi tyrimai betarpiškai siejasi su šiuolaikine ir aktualia nanotechnologijų tematika.

### ***Darbo tikslas***

Ištirti superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės poveikį akytojo silicio nanodarinių elektrofizinėms savybėms ir įvertinti jų praktinio panaudojimo galimybę, kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

### ***Darbo uždaviniai***

1. Parinkti ir pagerinti akytojo silicio darinių formavimo technologiją bei pagaminti bandinius, pritaikytus tyrimams superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės lauke.
2. Atlikti akytojo silicio paviršiaus morfologinius bei jo sluoksnių kontrolinius fotoluminescencinius tyrimus.
3. Atlikti skirtingos sandaros nanokristalinio akytojo silicio darinių palyginamuosius elektrinio laidumo tyrimus ir įvertinti jų tinkamumą numatytam darbo tikslui pasiekti.

4. Ištirti mikrobangų spinduliuotės poveikį akytojo silicio dariniams ir atskleisti stebimų efektų fizinę prigimtį.
5. Įvertinti gautų tyrimo rezultatų praktinio panaudojimo galimybę.

### ***Mokslinis naujumas***

1. Pirmą kartą tirti akytojo ir kristalinio silicio heterogeniniai dariniai, pasižymintys simetrinėmis voltamperinėmis charakteristikomis, kuriuose į akytąjį sluoksnį difuzijos būdu įvesta akceptorinė boro priemaiša.
2. Pirmą kartą atlikti superaukšto dažnio spinduliuotės poveikio elektrocheminio ėsdinimo būdu pagaminto akytojo silicio dvipolių darinių savybėms tyrimai.
3. Parodyta, kad superaukšto dažnio spinduliuotė aktyvuoja akytojo silicio darinių elektrinį laidumą.
4. Parodyta, kad, veikiant akytojo silicio darinius mikrobangų spinduliuote, atsiranda elektrovara, kurios charakteris ir kiekybiniai parametrai priklauso nuo akytojo silicio darinio sandaros bei mikrobangų galios.
5. Pasiūlytas karštųjų krūvininkų modelio taikymas, aiškinant elektros laidumo padidėjimą ir elektrovarą, stebimus superaukšto dažnio elektromagnetiniame lauke.

***Praktinė vertė.*** Gauti rezultatai gali būti panaudoti kuriant mikrobangų jutiklius. Išbandyti laboratoriniai jutiklių pavyzdžiai pasižymėjo nuo  $10^3$  iki  $10^5$  kartų didesniu jautriu negu analogiški kristalinio silicio bandiniai.

### ***Ginamieji teiginiai***

1. Akytojo silicio dariniuose galima mikrobangų spinduliuote aktyvuota elektros krūvio pernaša. Ji sietina su laisvųjų krūvininkų kaitimu superaukšto dažnio elektromagnetiniame lauke, esant stambiamasčiui potencialiniam reljefui.
2. Mikrobangų spinduliuotė akytojo silicio dariniuose sukelia elektrovarą, kurios priežastimi laikytinas krūvininkų kaitimas ir persiskirstymas superaukšto dažnio elektromagnetinio lauko poveikyje.
3. Atskleistos akytojo silicio savybės superaukšto dažnio spinduliuotės lauke gali būti panaudotos kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

### ***Rezultatų aprobavimas***

Disertacijos tema paskelbtos 8 mokslinės publikacijos, iš jų 2 straipsniai žurnaluose su ISI Web of Science citavimo indeksu, 1 straipsnis žurnale su ISI Master Journal List



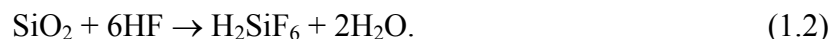
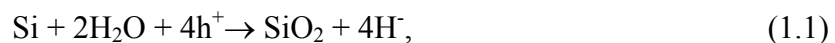
citavimo indeksu, 1 straipsnis tarptautinių konferencijų recenzuotų pranešimų leidinyje, referuotame MII duomenų bazėse (*ISI Proceedings*). Disertacijos rezultatai aptarti 4 tarptautinėse: *Advanced materials and technologies*, 2005 August 27–31, Palanga, Lithuania; *XXXV International school on the physics of semiconducting compounds*, 2006 June 17–23, Ustroń – Jaszowiec, Poland; *International conference Advanced Optical Materials, Technologies, and Devices*, 2006 August 27–30, Vilnius, Lithuania; *13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors*, 2007, 26–29 August, Vilnius, Lithuania; 2 nacionalinėse: *36-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija*, 2005 m. birželio 16–18 d., Vilnius; *37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija*, 2007 m. birželio 11–13 d., Vilnius ir 4 respublikinėse: *7-oji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, sekcija FIZIKA IR FIZINĖ KOMPIUTERIJA 2004 m. balandžio 16 d., Vilnius; *8-oji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, sekcija FIZIKA IR FIZINĖ KOMPIUTERIJA 2005 m. balandžio 8 d., Vilnius; *9-oji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“*, sekcija FIZIKA IR FIZINĖ KOMPIUTERIJA 2006 m. balandžio 7 d., Vilnius; *10-oji Lietuvos jaunujų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, sekcija FIZIKA IR FIZINĖ KOMPIUTERIJA 2007 m. balandžio 6 d., Vilnius konferencijose. Išspausdintos 4 mokslinės publikacijos konferencijų pranešimų rinkiniuose.

***Darbo apimtis.*** Disertaciją sudaro įvadas, 5 pagrindiniai skyriai, darbo išvados, nuorodos į 125 literatūros šaltinius, pateiktas 9 publikacijų disertacijos tema sąrašas. Iš viso 102 puslapiai teksto, 58 paveikslai ir 5 lentelės.

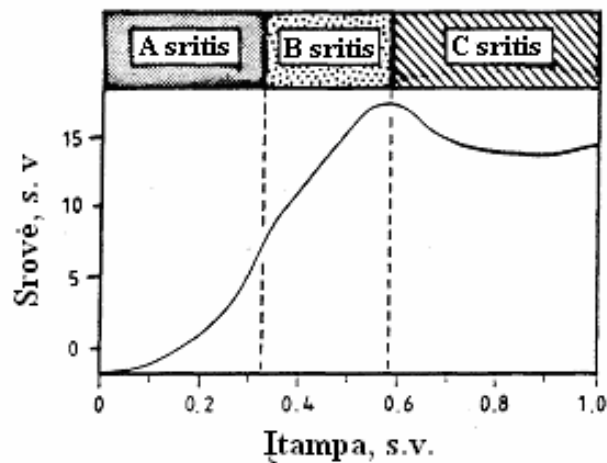
## 1. LITERATŪROS ANALIZĖ

### 1.1. AKYTOJO SILICIO GAMYBOS TECHNOLOGIJA IR MODELIAI

Pirmus akytojo silicio sluoksnius (ASiS), kaip jau buvo minėta, 1956 metais atrado A. Uhlir'as, tyrinėdamas tuo laiku aktualius kristalinio silicio (cSi) paviršiaus elektrocheminio poliravimo procesus vandeniniame fluoro rūgšties (HF) tirpale [1]. Buvo nustatyta, kad elektrochemiškai apdoroto cSi paviršiaus morfologija ir savybės yra tarpiai susietos ne tik su ėsdinimo srovės tankiu, elektrocheminės reakcijos parametrais, elektrolito sudėtimi, bet ir su cSi parametrais, tokiais kaip: savitoji varža, laidumo tipas ir t. t. Ėsdinant silicio paviršių elektrocheminiu būdu, poliruotas silicio paviršius gaunamas tik peržengus tam tikrą ėsdinimo srovės tankio slenkstį. Esant mažesnėms srovėms, priklausomai nuo proceso parametrų, gaunama labai įvairi medžiaga. Silicio paviršiaus cheminio ir elektrocheminio poliravimo tyrimus atliko daugybė tyrinėtojų. 1958 m. D. Turner'io paskelbtame darbe buvo teigiama, kad, esant fiksuotai elektrolito koncentracijai, silicis elektrochemiškai poliruojamas tik kai srovės tankis didesnis už tam tikrą kritinį (1.1 pav.) [27]. Kol ėsdinimo srovės tankis mažesnis už kritinį, silicio paviršiuje susidaro plonas, elektrolite netirpus, panašus į Si junginius sluoksnis. Didinant ėsdinimo trukmę, vyksta selektyvus Si tirpimas. Mažų įtampų srityje (A sritis), kai vyksta ASiS formavimasis, silicio oksido susidarymo greitis yra mažesnis, lyginant su silicio tirpimo greičiu. Didėjant srovės tankiui, Si oksido formavimo greitis auga, ir kai jis viršija Si tirpimo greitį, vyksta perėjimas prie elektropoliravimo režimo (sritis C). Didelių įtampų srityje (C sritis) vyksta paviršiaus poliravimas, paskui ant paviršiaus formuojasi Si oksidas, kuris vėliau panaikinimas [28], vykstant šioms reakcijoms:



Ėsdinant A srities režimu, susidaręs sluoksnis yra chemiškai reaktyvus, jame yra ištirpusio silicio, fluoro, vandenilio bei deguonies [29]. Pastebėta, kad pakaitintas sluoksnis lengvai oksiduojasi ir gali būti naudojamas kaip geras izoliatorius. Pirmųjų tyrimų metu buvo siekiama sukurti sluoksnius integruotiems puslaidininkiniams dariniams (lustams). Daugiau dėmesio buvo skiriama pakankamai mažo akytumo  $A$  (kai  $A < 60\%$ ) ASiS sintezei ir savybių



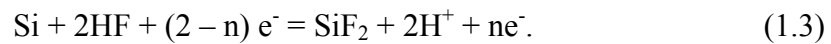
1.1 pav. Elektrolitinio ėsdinimo voltamperinė priklausomybė. Silicio elektrocheminio ėsdinimo režimai: A – porų susidarymas, B – perėjimo sritis, C – poliravimas [26]

tyrimui.

Naujas ASiS technologijos bei intensyvaus savybių tyrimo etapas prasidėjo 1990 metais, kai L. T. Canham paskelbė darbą apie stebėta geltonai–raudoną silicio porėtųjų sluoksnių fotoluminescenciją ir priskyrė jos atsiradimą erdvinio kvantinio ribojimo efektui silicio nanokristaluose [4]. Straipsnis sukėlė milžinišką susidomėjimą ASi dėl dviejų priežasčių. Pirmoji priežastis buvo reali perspektyva sukurti šviesos šaltinį silicio pagrindu, atveriant kelią vientisai silicio optoelektronikai. Antroji – plačiai paplitęs ASi, papildė aktualios nanodarinių fizikos tyrimo objektų arsenalą. Tuo pačiu metu dėmesį patraukė ir kitos unikalios bei ne mažiau įdomios ASi savybės bei kiti silicio ir kitų puslaidininkių nanodariniai [30, 31].

Dabartiniu metu akytuojų siliciu vadinama tūrinė koralo arba kempinės pavidalo silicio struktūra. Struktūrą sudaro plonų silicio sienelių tinklas (ASi kamienas). Tuštumas (*pores* – angl., *поры* – rus.) tarp senelių užpildo oras. Priklausomai nuo gamybos technologijos tuštumų skersmuo gali keistis nuo kelių nanometrų iki kelių mikrometrų arba suformuojamos litografijos metodu. Silicio kamieno sienelių storis taip pat gali būti keičiamas nuo makroskopinių matmenų iki kelių nanometrų. Dėl šio privalumo ASiS technologija priskiriama aktualiausioms nanotechnologijų mokslo kryptims. Akytojo silicio formavimas vyksta kristalinio silicio atomų anodavimo cheminės reakcijos metu. Ėsdinant dažniausiai naudojamas HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH elektrolitas. Elektrocheminio ėsdinimo metu cheminių reakcijų seka iki šiol nėra dar tiksliai nustatyta, todėl laikui bėgant papildoma. Daug faktorių ir pradinių elektrocheminio režimo bei cSi plokštelių (cSiP) parametrų įtakoja

elektrocheminį silicio ėsdinimą. Svarbiausi iš jų yra – jonų pernešimas elektrolite, reakcijos produktų elektrocheminis tirpumas, elektrolito sudėties stabilumas ir reakcijos produktų pašalinimas, elektrolito paviršiaus įtempimo dydis, krūvininkų koncentracija ir pernešimas cSi, o taip pat ir cSi paviršiaus vienalytiškumas ir deformacija. Grįžkime prie silicio elektrocheminio ėsdinimo proceso A srityje (žr. 1.1 paveikslą). Mažų anodinių srovių (ir įtampų) srityje, didėjant įtampai, srovė auga eksponentiškai. Tai rodo, kad srovės tekėjimui pagrindinį poveikį turi potencinis barjeras, esantis elektrolito ir silicio riboje [12, 32]. Manoma, kad elektrocheminio ėsdinimo metu, HF tirpale, vienu metu vykstant kelioms cheminėms reakcijoms, formuojasi ASiS [33, 34]. Pateiksime dažniausiai vykstančių reakcijų schemą [12, 35]:



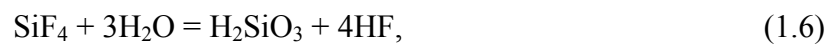
Junginys SiF<sub>2</sub> yra nestabilus ir skyla:



ir



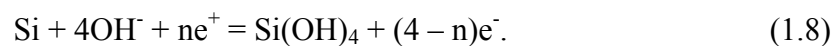
Junginys SiF<sub>4</sub> silpnai disocijuoja ir gali jungtis su vandeniu ir HF:



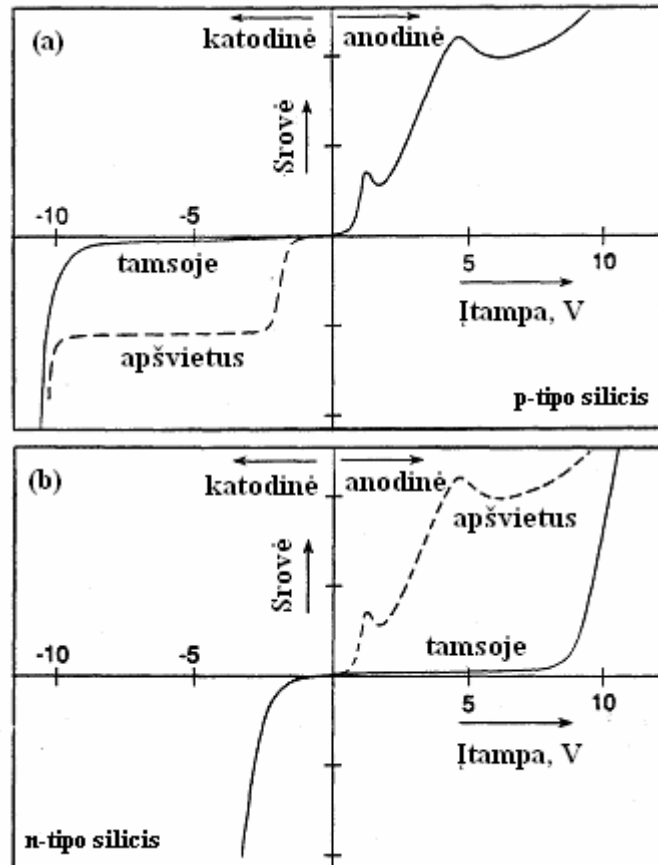
ir



be to, silicio jonai jungiasi su OH<sup>-</sup> jonais:



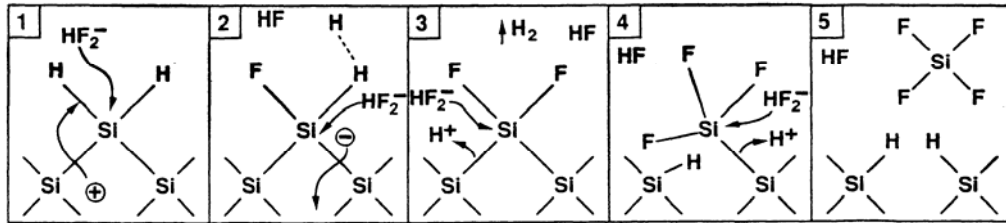
Ėsdinimo celėje – silicio ir elektrolito riboje – susidaro, aukščiau minėtas, potencinis barjeras. Šio barjero aukštį bei elektrinio lauko pasiskirstymą riboje apsprendžia puslaidininkio legiravimo laipsnis ir elektrolito cheminė sudėtis. Yra žinoma, kad puslaidininkio ir elektrolito kontakto voltamperinė charakteristika (VACH) turi Shcottky barjero tipo charakteristiką. Tipinės n– ir p– laidumo tipo silicio elektrolito VACH pateiktos 1.2 paveiksle [12]. Procesai, vykstantys Si ir elektrolito riboje, buvo tyrinėti ne viename



1.2 pav. Tipinė n- (a) ir p-tipo (b) silicio voltamperinė charakteristika anodinio ėsdinimo metu [12]

darbe [12, 36]. Silicio tirpimas fluoro rūgštyje vyksta tada, kai silicio paviršiuje yra tam tikra skylučių koncentracija, t. y. anode (silicio kristalo paviršiuje) vyksta oksidacijos reakcijos, kurių metu atsiskyre elektronai juda silicio paviršiaus link ir į išorinę srovės grandinę.

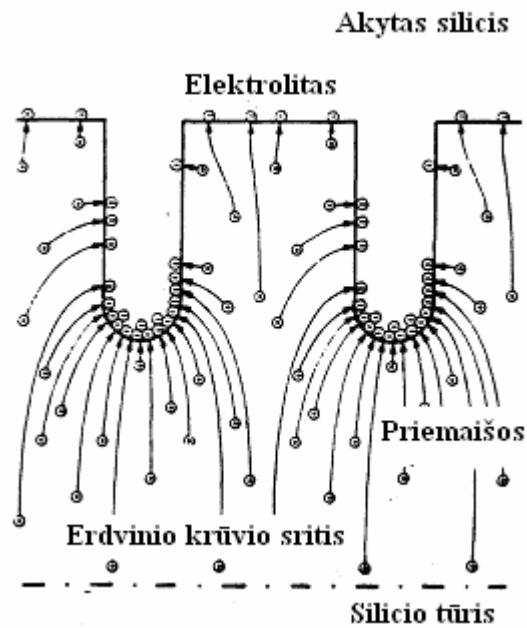
Vaizdi ir supaprastinta elektrocheminio proceso schema, pateikta V. Lehmann'o ir U. Gösele darbe [37]. Anot autorių, pradiniu momentu silicio paviršius yra pasyvuotas vandeniliu (1.3 pav.) ir inertiškas fluoro jonų atakoms iki to momento, kol neatsiranda skylutė ( $h^+$ ) silicio elektrode. Kadangi vandenilio elektroninis giminingumas yra panašus į silicio, o jo indukuota poliarizacija yra maža, tai skylutei ( $h^+$ ) pasiekus paviršius, fluoro jonas suardo Si-H ryšį ir susidaro Si-F ryšys (1 žingsnis, 1.3 pav.). Dėl fluoro ryšio su siliciu poliarizacinės įtakos, kitas F jonas gali atakuoti antrąjį Si-F ryšį. Todėl susidaro dar vienas Si-F ryšys, sukuriama  $H_2$  molekulė, ir vienas elektronas yra įnešamas į elektrodą (2 žingsnis). Dėl Si-F ryšių indukuotos poliarizacijos sumažėja elektronų tankis ir kituose Si ryšiuose. Susilpnėjusius ryšius vėl atakuoja HF arba  $H_2O$  molekulės (3 ir 4 žingsniai). Pašalinus Si atomą, paviršiuje atsiranda ildubimas, o paviršiaus atomai vėl susijungia su



1.3 pav. Silicio elektrodo ėsdinimo HF rūgšties tirpale mechanizmas [37]

vandeniliu (5 žingsnis). Paviršiaus geometrijos pasikeitimas lemia elektrinio lauko persiskirstymą taip, kad padidėtų tikimybė šioje vietoje atsirasti skylutei ( $h^+$ ). Dėl to ėsdinimo metu paviršiaus nelygumai sustiprėja ir pradeda formuotis tuštumos (poros). Elektrochemiškai tirpinant silicį, jo paviršiuje susidaro sudėtingi silicio hidroksidų junginiai. Be to, puslaidininkio ir elektrolito riboje susidaro tirpalas, prisotintas silicio deguoninių junginių (su  $Si^{(0)}$ ,  $Si^{4+}$ ,  $Si^{2+}$  jonais) galintis sudaryti dispersines struktūras. Tai skatina ir esantis elektrolite spiritas, kuris veikia kaip smulkiadispersinių struktūrų susidarymo stabilizatorius. Spirito molekulės, nusėdusios ant Si paviršiaus, trukdo dispersinėms dalelėms susijungti į didelius klasterius ir sudaro galimybę formuotis tinklo pavidalo dispersiniam sluoksniui. Elektrolite esantys  $OH^-$  jonai, jungdamiesi su Si, sudaro netirpius ortosilicio rūgštis bei silicio oksido hidratas, kurie, būdami dispersinės struktūros sudėtyje, apsaugo šį sluoksnį nuo ištirpimo HF rūgštyje toliau ėsdinant.

Susidariusio akytojo sluoksnio sandara yra būdinga žinomoms dispersinėms kristalizacinėms–kondensacinėms struktūroms [35], todėl poros netrukdo tolimesniam Si tirpimui. Kadangi silicis yra organofilinė medžiaga [38], tai elektrolite esantis spiritas užpildo poras, ir formuojasi monokristalinis akytojo silicio sluoksnis. Pagrindinė porų formavimo sąlyga yra pasyvi porų sienelių ir aktyvi porų dugno, kuriame vyksta tirpimas, būseną (1.4 pav.) [36]. Porų dugno gylį apsprendžia srovės tankis, HF koncentracija elektrolite bei ėsdinimo trukmė, o porų dydį – silicio laidumo tipas ir legiravimo laipsnis. Kai silicio elektrodas kontaktuoja su elektrolitu, paviršinė poros dugno sritis yra nuskurdinta judriais krūvininkais. Prijungus anodinę įtampą, sukuriama per stora (keli mikrometrai) legiruotam n-tipui erdvinio krūvio sritis, o p-tipo silicyje jos iš viso nėra (1.2 pav.). Stipriai legiruotame puslaidininkyje krūvio pernešime dominuoja krūvininkų tuneliavimas. Šiuo atveju porų dydžių skalė bei nuskurdinimo srities storis yra apie 10 nm. Vidutiniškai legiruotame n-tipo silicyje krūvininkai gali būti generuojami pramušant, o tam reikalingos poros su smulkiu dugnu, kurių diametras siektų apie 10–100 nm (mezoporos). Jei skylutes generuojame apšviesdami n-tipo silicį, tai porų diametras bus gerokai didesnis – 0,1–20

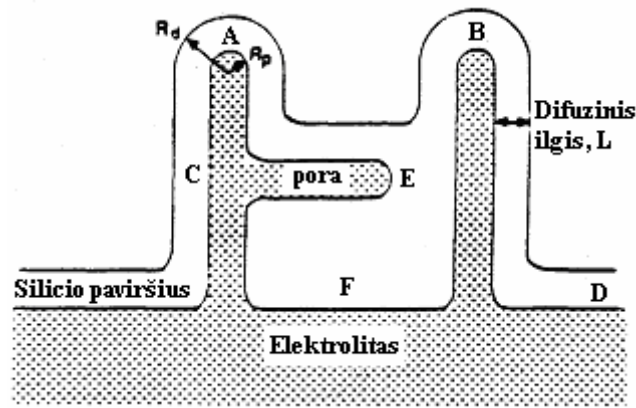


1.4 pav. Porų formavimosi modelis, parodantis krūvininkų srautus ėsdinimo metu [36]

mikronų, ir priklausys nuo legiravimo laipsnio ir formavimo sąlygų (kuo stipriau legiruotas silicis, tuo didesnės poros). Ėsdinimo procesas yra jautrus HF koncentracijai elektrolite. Maža HF koncentracija lemia atitinkamai mažą Si oksido panaikinimo greitį, o tai įtakoja perėjimo prie poliravimo režimo ribą [28].

Akytojo silicio elektrocheminio proceso anodavimo srovės vaidmeniui aprašyti pateikiami keli modeliai. Viename paprastesnių ankstyvųjų modelių elektrolito ir silicio kontaktas nagrinėjamas kaip Schottky barjeras [39]. Pagal tokį modelį laikoma, kad kristalinio silicio padėklo paviršiaus erdviniai nehomogeniškumai turi įtakos Schottky barjero impedansui atskirose vietose. Todėl ėsdinimo srovė nevienalytiškai pasiskirsto paviršiuje, ir cSi paviršius ėsdinamas lokaliai formuojant įdubas. Didėjant įduboms, formuojasi atskirtas kiaurymėmis nevisai netvarkingas tinklas, sudarantis ASiS kamieną. Prie tuštumų sienelių puslaidininkyje susidaro krūvininkais nuskurdinta sritis. Kai nuskurdinta sritis užims pakankamai didelę sienelių dalį, ribos su elektrolitu varža šioje vietoje padidės, o srovė – sumažės. Tokiu būdu per elektrolito ir silicio ribą srovė daugiausia tekės tuštumų dugne (1.4 pav.) [37]. Modelis tik iš dalies paaiškina ASiS susidarymą, ėsdinant stipriai legiruotą p–tipo laidumo silicį, ir visai nepaaiškina vienalyčių porų sistemos susidarymo.

Patobulintame, vadinamajame difuziniame modelyje, daroma prielaida, kad anodinė srovė riboja skylių difuzija iš tūrio link silicio ir elektrolito ribos [40]. Šiuo atveju naujos tuštumos (žr. 1.5 pav. (E sritis)) atsiranda ir dėl jau esamų porų (poros A ir B 1.5 pav.). Naujų porų formavimas skatina srovės stiprio didėjimą, nes prisijungia naujos difuzinės srovės (iš tarp A ir B srities tuštumų). Nauja išauginta tuštuma plinta tol, kol atstumas iki



1.5 pav. Difuzinis porų susidarymo modelis [40]

gretimos tuštumos prilįgsta dviem difuzinės bangos ilgiams. Formuojasi išsišakojanti struktūra. Pagal difuzinį modelį, prie paviršiaus ASiS akytumo laipsnis gali būti kiek didesnis už akytumą tūryje [41]. Tačiau atlikti eksperimentai rodo žymiai sudėtingesnę ASiS formavimosi vaizdą. Yra darbų, kuriuose teigiama ir eksperimentiškai įrodoma, kad ASiS darinį gali sudaryti net keli skirtingų sandarų ASi sluoksniai [42, 43]. Vieno jų, paviršinio sluoksnio storis siekiantis  $1\ \mu\text{m}$  yra per didelis, kad jam būtų galima taikyti difuzinį modelį. Iš to seka, kad ir difuzinis modelis yra tik tam tikras priartėjimas, iki galo neaprepiantis ėsdinimo metu vykstančių procesų ir medžiagų parametrų visumos. Teigiama, kad, norint išsamiai aprašyti ASiS formavimo procesą, reikia atsižvelgti į elektrolito koncentraciją ir su ja susijusius parametrus: silicio laidumo tipą, krūvininkų koncentraciją ir atitinkamą elektrinio lauko pasiskirstymą visoje silicio ir elektrolito ribos erdvėje. Kokybiškai sudėtingesnę ASiS formavimosi koncepciją pasitelkia daugumoje tiriamųjų darbų [44, 45]. Šalia anksčiau įvardintų cheminių reakcijų elektrocheminio ėsdinimo metu dar gali vykti ir silicio rekristalizacija iš elektrolite esančių  $\text{Si}^{2+}$  jonų (redox–reakcija), kuri skatina silicio nanokristalitų rekristalizaciją [45]. Ši teiginį iš dalies patvirtina darbai, kuriuose smulkiadispersiniai silicio nanokristalai gaunami, naudojant žymiai lėtesnį (esant mažam anodinės srovės tankiui) ėsdinimą [46, 47].

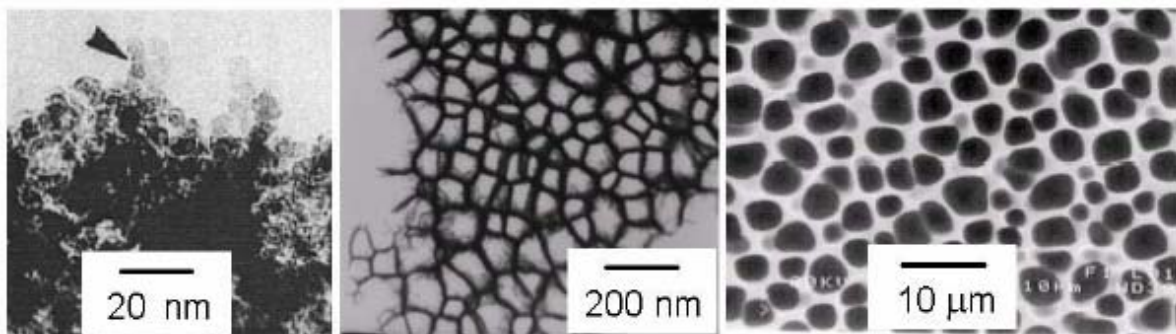
Keičiant anodinio ėsdinimo sąlygas, galima gauti akytąjį silicį su skirtinga porų morfologija ir skirtingu kamienu. Skersiniams porų matmenims  $R$  įtakoja anodinio ėsdinimo srovės tankis, laikas, papildomas apšvietimas, elektrolito sudėtis ir HF koncentracija bei silicio legiravimo laipsnis, laidumo tipas ir t. t. Porų matmenys gali keistis nuo  $10\ \mu\text{m}$  iki  $1\ \text{nm}$ . Pagal tam tikrą jau egzistuojančią klasifikaciją akytasis silicis skirstomas į mikroakytąjį ( $R < 2\ \text{nm}$ ), mezoakytąjį ( $2\ \text{nm} < R < 50\ \text{nm}$ ) ir makroakytąjį ( $R > 50\ \text{nm}$ ) (žr. 1.1 lentelę) [48]. Ši klasifikacija atspindi tuštumų dydį, o ne silicio nanodarinių tinklo matmenis. Kadangi dominančios ASiS nanodarinių savybės (neatsižvelgiant į paviršinius



1.1 lentelė. Akytųjų medžiagų klasifikacija [48]

Vyraujantis porų plotis (nm)	Būdinga medžiaga
$\leq 2$	mikroakytas
2-50	mezoakytas
$> 50$	makroakytas

efektus) daugiausia susietos su liekamojo silicio tinklo (arba kamieno klasterių) matmenimis, ši kvalifikacija nėra labai patogi tiriamuoju atveju. Juo labiau, kad smulkiadispersinė ASi modifikacija su charakteringais nanometriniiais klasteriais (ir tuštumomis) vadinama ne nano- o mikroakytuoju siliciu ir iš esmės neatspindi erdvinio mastelio. Skirtingų pagal esamą klasifikaciją ASiS bandinių morfologijos pavyzdžiai pavaizduoti 1.6 paveiksle. ASiS morfologijos sąsajos su technologijos parametrais pateiktos 1.2 lentelėje. ASiS gamybai naudotos p-tipo silicio plokštelės [39]. Aiškiai matomas dėsningumas, kad akytumas auga, mažinant HF rūgšties koncentraciją ir didinant anodinę srovę.



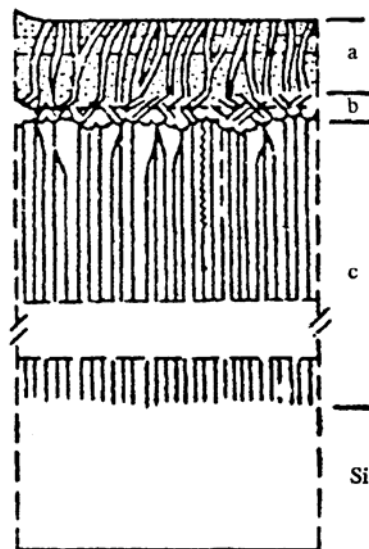
1.6 pav. ASi struktūrų pavyzdžiai: mikroakytas (kairėje), mezoakytas (centre), makroakytas (dešinėje) [48]

Akytojo Si struktūros tyrimas peršviečiamosios elektroninės mikroskopijos būdu nėra lengvas, kadangi, ruošiant bandinius, kyla sunkumų, dėl akytojo Si trapumo. Vis dėlto tokie tyrimai buvo atlikti. Jie parodė, kad akytasis Si, gautas ęsdinant silpnai legiruotą p-tipo kristalinio Si padėklą, turi stipriai besišakojantį ploną kamieną (tinklą). ęsdinant stipriai legiruotą padėklą gaunama stulpelių struktūra [27, 34]. Didelio akytumo silicis yra dažnai vaizduojamas, kaip tarpusavyje susijungusių sferinių silicio klasterių tinklas [28, 45]. Nors yra darbų, kuriuose eksperimentiškai įrodoma, kad ASiS galima išskirti tris skirtingas dalis [35, 49, 50]. Skenuojančios elektroninės mikroskopijos (SEM) tyrimais nustatyta, kad viršutinis kelių μm storio sluoksnis, kuris kaip tik ir pasižymi fotoluminescencija, yra visas suskilinėjęs, vietomis atsiskyręs nuo likusios Si dalies ir nesunkiai pašalinamas mechaniškai. Jį išsamiau ištyrus peršviečiamosios elektroninės mikroskopijos (PEM) metodu, atsirado

1.2 lentelė. Akytojo silicio p-tipo laidumo ASiS ir cSi tankių santykiai (akytumas), gauti esant skirtingiems technologiniams režimams [39]

Savitoji varža, $\Omega \cdot \text{cm}$	Srovės tankis, $\text{mA}/\text{cm}^2$	Fluoro rūgšties koncentracija, %			
		20	30	40	48
		ASiS ir cSi tankių santykiai (akytumas)			
0,01	10	60	70	72	77
	30	49	65	69	77
	100	21	55	60	71
0,1	10	45	54	62	63
	30	39	55	58	67
	100	23	42	52	59
1	10	40	50	52	57
	30	39	54	48	59
	100	–	36	46	48
5	10	42	44	53	61
	30	41	46	49	58
	100	–	37	45	50
25	10	42	46	54	64
	30	36	45	48	53
	100	–	36	52	48

galimybė pamatyti, kad šis mechaniškai atskiriamas sluoksnis susideda iš dviejų dalių (1.7 pav.). Viršutinėje dalyje aiškiai matomi kanalai, einantys nuo paviršiaus gilyn į sluoksnį. Apatinėje dalyje kanalai išsidėstę netvarkingai, o ir jų tankis yra didesnis negu viršutinėje dalyje. Abu sluoksniai susideda iš reakcijos produktų bei smulkiakristalinio silicio intarpų. Sluoksnis baigiasi paviršiumi, padengtu negiliomis poromis. Röntgeno difrakcija rodo, kad



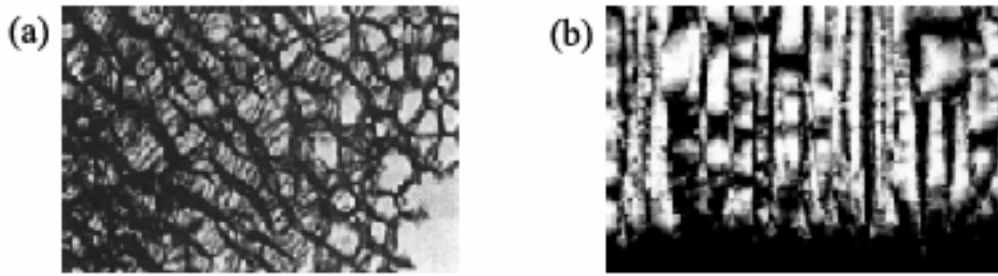
1.7 pav. Anodiškai ęsdinto p-tipo Si scheminis skerspjūvio vaizdas [35]

viršutiniuose sluoksniuose yra nanometrinių matmenų Si dalelių [34, 50]. Po viršutiniu sluoksniu skverbiantis gilyn aptinkamas monokristalinis silicis. Tačiau jame išsiskiria storas (iki 100  $\mu\text{m}$  storio) sluoksnis, kurio savybės skiriasi nuo likusios monokristalinio Si dalies. Iš SEM metodu gautų vaizdų matyti, kad jame yra tam tikrų nevienalytiškumų tinklas. Nevienalytiškumai yra išsidėstę statmenai plokštelės paviršiui, o jų prigimtis neaiški. Kadangi rezultatai gauti naudojantis tik viena medžiaga, esant vienam anodavimo režimui, tai iš šių darbų negalima daryti didesnių apibendrinimų. Minėti darbai siejasi ir su darbu [36], kuriame taip pat atkreipiamas dėmesys į vieną ASi susidarymo aplinkybę, išskiriančią Si iš kitų puslaidininkinių medžiagų – tai anodavimo proceso metu vykstančią Si oksidacijos-redukcijos reakciją. Darbe nurodoma, kad Si ir Ge gali sudaryti junginius su kitais elementais, būdami dvejopo valentingumo – 4 arba 2. Dvivalenčiai junginiai paprastai yra nestabilūs ir reaguoja su aplinka. Tačiau tirpale, kuriame yra  $\text{Si}^{2+}$  jonai, papildomai vyksta redukcijos-oksidacijos (*redox*) reakcija



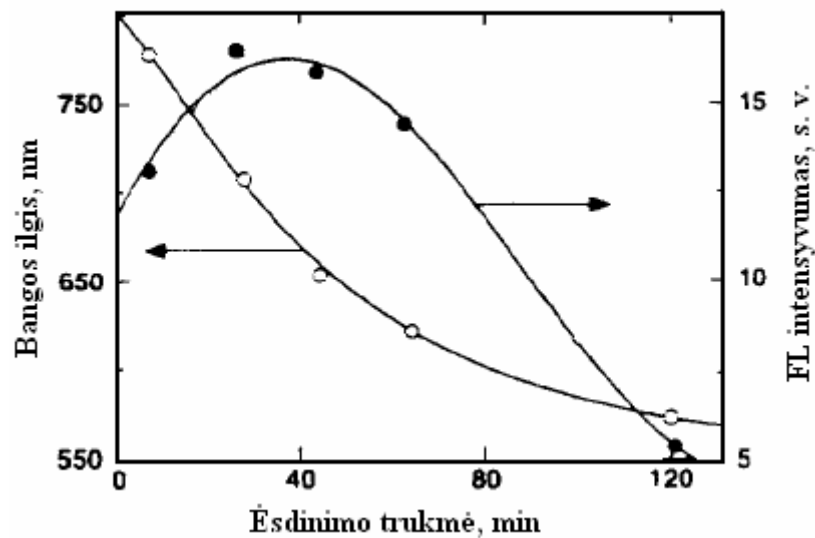
kurios metu iš dviejų  $\text{Si}^{2+}$  jonų gaunamas silicio jonas  $\text{Si}^{4+}$  ir neutralus silicio atomas  $\text{Si}^0$ . Matyt, neutralūs  $\text{Si}^0$  atomai gali konglomeruotis į Si nanoklasterius. Šis klausimas taip pat dar nėra pakankamai ištirtas.

Porų atsiradimas n– ir p–tipo silicyje turi savo ypatumų. Apsistokime ties silicio aktyvųjų sluoksnių, suformuotų ant p–tipo padėklų, sandara. Akytieji Si sluoksniai paprastai formuojami p–tipo, (0,05 – 10)  $\Omega\cdot\text{cm}$  specifinės varžos silicio plokštelėse, dažniausiai (100) orientacijos, esant skylių koncentracijai  $10^{14}\div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Plokštelės elektrochemiškai ėsdinamos HF:H<sub>2</sub>O:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (3:3:4) ir HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (1:1) ar kitų proporcijų elektrolituose, tekant (10 – 55) mA/cm<sup>2</sup> srovei [17–20]. Šiuo atveju daugiausiai formuojasi nanometrinių matmenų poros. Gaunama kempinės formos struktūra, parodyta 1.8 (a) paveiksle. Skenuojančios elektroninės mikroskopijos pagalba nustatyta, kad mažai legiruotame kristaliniame p-tipo silicyje susidaro poros 1–5 nm dydžio [51]. Didinant legiravimo laipsnį, mezoaktyto ASi porų matmenys ir atstumai tarp kaimyninių porų didėja nuo 5 iki 50 nm. Didesnės negu 50 nm matmenų poros gaunamos tik n–tipo silicyje. ASi gamyba n–tipo Si irgi turi savus ypatumus. Kad vyktų elektrocheminio ėsdinimo procesas, reikalingos laisvosios skylės, kurių n–tipo silicyje tamsoje yra mažai. Todėl ėsdinant n–tipo plokšteles, jos dažniausiai apšviečiamos šviesa, kurios bangos ilgis patenka į Si sugerties sritį. Keičiant apšviečiamos šviesos spektrą, galima papildomai įtakoti ASi sluoksnių struktūrą. Kai ASi



1.8 pav. a – PEM būdu gautas p-Si ASi struktūros vaizdas (porų matmenys apie 50 nm, siūlai (tamsios sritys) turi skersmenį apie 10 nm); b – SEM makrokristalinio n-Si ASi struktūros nuotrauka (porų matmenys 0,7-1,0 μm, tamsi sritis apačioje – monokristalinis Si) [21, 51]

kamieno klasterių matmenys smarkiai sumažėja, kad pasireiškia kvantinio ribojimo efektas, prasideda ASi kamieno draustinės juostos didėjimas. Tai iššaukia šviesos absorbcijos ir, atitinkamai, nepusiausvyrųjų skylių generacijos mažėjimą. Todėl ėsdinimo reakcija tokiose vietose sumažėja, ir ASi struktūros matmenys stabilizuojami. Taigi, ASi kristalitų matmenys, jų skleidžiamos šviesos spektrinė padėtis, ir darinio akytumas priklauso nuo sužadinančios šviesos bangos ilgio ėsdinimo metu [46].



1.9 pav. n-tipo ASi FL priklausomybė nuo anodinio ėsdinimo trukmės [47]

FL spektrinį poslinkį ir intensyvumo pakitimą įtakoja ir kiti technologiniai parametrai, pavyzdžiui, ėsdinimo proceso trukmė. 1.9 paveiksle pateikta FL spektrų padėties ir intensyvumo priklausomybė nuo anodinio ėsdinimo laiko [47]. Elektroninio laidumo silicis buvo ėsdinamas 10 mA/cm<sup>2</sup> tankio srove skirtingą laiko tarpą, apšviečiant halogenine lempa. Nors ėsdinimo srovės tankis nebuvo keičiamas, ėsdinant ilgesnį laiką buvo stebimas FL spektro postūmis į trumpesniųjų bangų pusę, kas liudija apie ASi kamieno matmenų

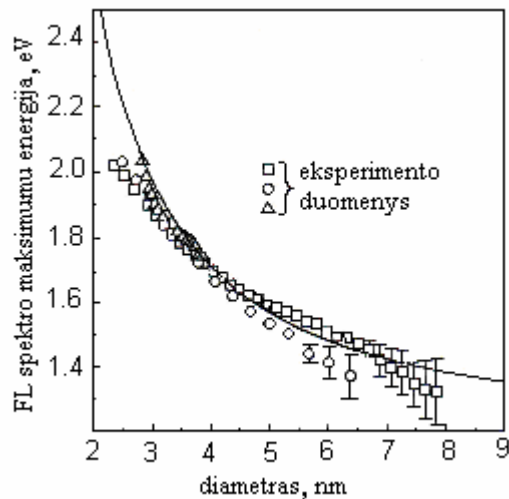
mažėjimą. Apšviestumas įtakoja ir p-tipo silicio plokštelių elektrolitinį ėsdinimą [48]. Taigi ASi elektrocheminis ėsdinimas yra sudėtingas procesas, įtakojamas daugybės faktorių ir parametrų. Viena vertus, tai sukelia sunkumų, siekiant gauti kokybiškai atsikartojančius rezultatus, bet, kita vertus, tai atveria nepaprastai plačias galimybes valdyti procesą ir galimybę sukurti pačius įvairiausius ASi darinius.

## 1.2. PAGRINDINĖS AKYTOJO SILICIO SAVYBĖS

Šiame skyriuje iš labai plataus ASi savybių rinkinio, apžvelgsime tik fundamentalias ir turinčias glaudų ryšį su disertacijoje atliktais tyrimais. Pirmiausia aptarsime erdvinio kvantinio pagavimo efektą, kuris, kaip jau buvo minėta, prieš du dešimtmečius sukėlė labai didelį susidomėjimą ASi. Taip pat su kvantinio pagavimo efektu betarpiškai yra susijusios ir šviesos absorbcija bei fotoluminescencija. Vėliau apžvelgsime savybes, susijusias su aktyvumu, tokias kaip ASi paviršiaus plotas, efektinė dielektrinė skvarba, elektrinis laidumas.

Pirmą kartą erdvinio kvantinio ribojimo efektas aktytajame silicyje buvo paminėtas Canham darbe [4]. Šiame darbe aktytas silicis buvo tiriamas kaip kvantinių vielų rinkinys. Iš kvantinių darinių (šulinių, taškų) teorijos seka, kad puslaidininkio kvantinio darinio draustinės juostos energija didėja, mažėjant geometriniam parametrai  $d$ , kur  $d$  – nanokristalo skersmuo. Žinoma, kad energijos  $\Delta E_u$  padidėjimas yra proporcingas  $d^{-2}$  [4]. Atitinkamai, išspinduliuoto fotono energijos dydis  $h\nu = E_g + \Delta E_u - \Delta E_r$ , kur  $E_g$  – monokristalinio silicio draustinės juostos plotis (1,1 eV),  $\Delta E_r$  - energijos sumažėjimas dėl eksitonų susidarymo arba vykstančių fotoninių efektų. Vienas pirmųjų erdvinio kvantinio ribojimo efekto vertinimų kvadratinio skerspjuvio Si kvantinėms vieloms buvo aprašytas darbe [52]. Laidumo juostos dugno energijos pokytis išreiškiamas kaip  $\Delta E_c = (1 + m_T/m_L) \cdot (h^2 \pi^2 / 2 m_T d^2)$ , kur  $m_T$  ir  $m_L$  – skersinė ( $m_T = 0,19m_e$ ) ir išilginė ( $m_L = 0,92m_e$ ) elektrono efektinės masės, o  $m_e$  – laisvojo elektrono masė. Atitinkamai gauta panaši išraiška ir valentinės juostos krašto pokyčiui  $\Delta E_v$ . Kvantinėms vieloms, kurių orientacijai (001) ir  $d = 3$  nm buvo paskaičiuotos reikšmės  $\Delta E_c = 252$  meV ir  $\Delta E_v = 371$  meV. Tokiu pat būdu įvertintos išspinduliuojamos kvanto energijos dydis  $h\nu = 1,67$  eV.

ASi zoninės struktūros tyrimai apžvelgti teoriniuose darbuose [52–62]. Silicio kvantinių vielų ir sferinės formos kristalitų draustinės juostos pločio priklausomybės, paskaičiuotos naudojant atominių orbitalių tiesinės kombinacijos metodą, pateiktos darbe [61]. Nustatyta, kad erdvinio kvantavimo efektas pastebimai pasireiškia kristalituose, kai jų matmenys mažesni nei 5 nm (1.10 pav.). Kristalitų geometriniams matmenims mažėjant, efekto įtaka draustinės juostos pločiui didėja pagal dėsnį  $\Delta E_i \sim d^{-n}$ , kur  $n$  reikšmė daugiau už dvejetą.

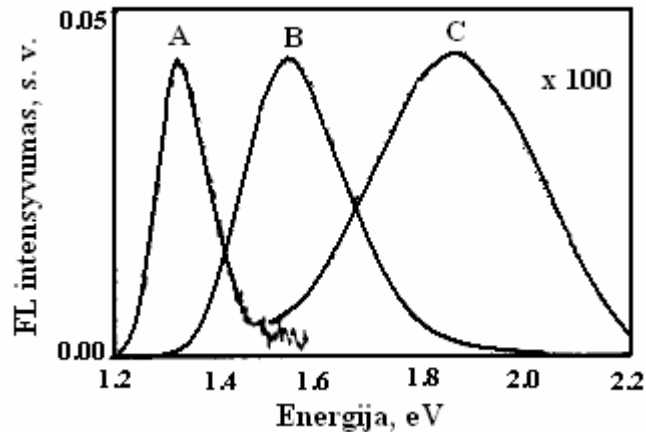


1.10 pav. Koreliacija tarp vidutinio nanokristalų skersmens ir FL spektro maksimumo padėties [60]

Erdvinio kvantinio ribojimo efektą akytajame silicije patvirtina daugybė eksperimentinių fotoluminescencijos tyrimų rezultatų (1.10 pav.). Taip pat įrodyta, kad didelio akytumo laipsnio ASi kristalų matmenys gali būti labai maži, net iki 2 nm ir mažesni. Visas ASi emisijos spektras yra sudėtingas ir jo nepavyksta aprašyti pasitelkiant vieną juostą. Spektre sąlyginai išskiriamos trys juostos (1.3 lentelė). Dominuojanti yra

1.3 lentelė. Pagrindinės ASi fotoluminescencijos juostų savybės

Energijos juostos, eV	Pagrindinės savybės
1,2–2,2 (matomoji juosta)	Jautri akytumo laipsniui. Jautri paviršiaus pasyvavimui, bet nebūtinai vandeniliui. Stipri fotoluminescencijos relaksacijos laiko priklausomybė nuo temperatūros. Susideda mažiausiai iš dviejų komponentų. Dominuojanti juosta šviežiai išdintoje medžiagoje.
0,8–1,3 (infraraudojoji juosta)	Lyginant su matomąja juosta dažniausiai silpna. Jautri akytumo laipsniui. Jautri paviršiaus oksidavimo sąlygoms.
2,5–2,8 (ultravioletinė juosta)	Silpnai priklauso nuo akytumo laipsnio. Labai išryškėja oksidavus akytajam siliciui aukštoje temperatūroje. Sparti fotoluminescencijos relaksacija.



1.11 pav. Matomosios juostos FL spektras, esant skirtingam akytumo laipsniui [63]

matomoji juosta, kuri buvo pastebėta anksčiausiai. Ji dar vadinama lėtąja dėl to, kad jos relaksacijos laikas siekia šimtas mikrosekundžių dalis. Matomosios juostos maksimumo padėtis nėra fiksuota. Priklausomai nuo elektrocheminio ėsdinimo sąlygų ji kinta nuo artimosios infraraudonosios srities iki geltonai žalios (1.11 pav.). Infraraudonoji juosta yra silpniausia. Mėlynoji išryškėja tik po stipraus terminio apdorojimo [63, 64].

Vienas iš dažnai nurodomų ASi parametrų yra akytumas (porėtumas)  $A$ :

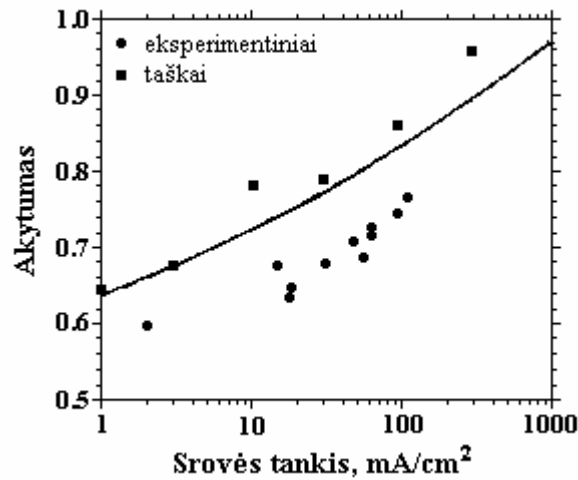
$$A = (V_0 - V_{\text{ASi}})/V_{\text{ASi}}, \quad (1.9)$$

čia  $V_0$  yra bendras ASi užimtas tūris, o  $V_{\text{ASi}}$  – grynas Si ir jo junginių medžiagos tūris. Tai yra efektyvus dydis, nurodantis, kokia medžiagos tūrio dalis užimta oro tuštumų, o kurioje dalyje yra medžiaga. Akytumą (porėtumą) galima taip pat išreikšti per ASi ir Si tankius:

$$A = 1 - \rho_{\text{ASi}}/\rho_{\text{Si}}, \quad (1.10)$$

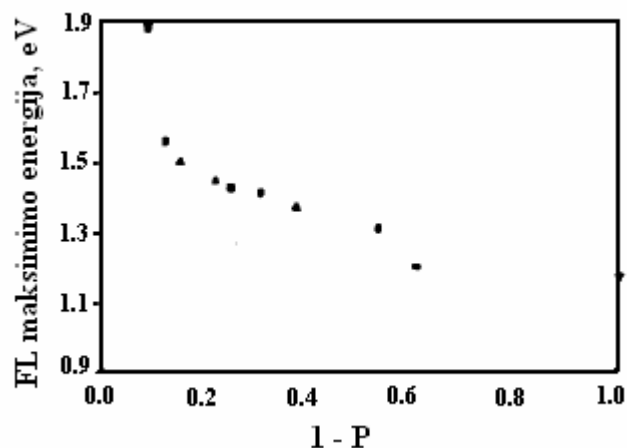
čia  $\rho_{\text{ASi}}$  akytojo sluoksnio tankis, o  $\rho_{\text{Si}}$  – monokristalinio silicio tankis. Jau ne kartą minėta, ASi parametrai, tarp jų ir akytumas, priklauso ir nuo elektrolito sudėties, ir nuo kitų parametrų. Kita vertus, akytumas didėja didinant anodavimo srovę. Tokios priklausomybės pavyzdys pateiktas 1.12 paveiksle [39]. Jame eksperimentiniai taškai lyginami su tam tikru elektrochemijoje naudojamu pusiauempiriniu artiniu.

Ertmių formos gali būti labai įvairios. Jos apsprendžia medžiagos optines, elektrines, mechanines savybes. Porų sienelės yra padengtos elektrocheminės reakcijos produktais ir absorbuotais atomais, kurių cheminė sudėtis lemia akytojo silicio savybes. Kol porų tūris



1.12 pav. Akytumo priklausomybė nuo anodinės srovės tankio [39]

nedidelis (5 %) medžiagos savybės artimos kristalinio silicio savybėms. Bandinių akytumas gali būti labai įvairus ir siekti nuo 5 iki 95 %. Akytajam siliciui charakteringas jo vidinio paviršiaus didelis sumarinis plotas. Priklausomai nuo akytumo laipsnio ir porų geometrijos, makroakytojo silicio plotas yra nuo 10 iki 100 m<sup>2</sup>, mezoakytojo – nuo 100 iki 300 m<sup>2</sup> ir mikroakytojo nuo 300 iki 10<sup>3</sup> m<sup>2</sup>, kai bendrasis tūris 1 cm<sup>3</sup>.

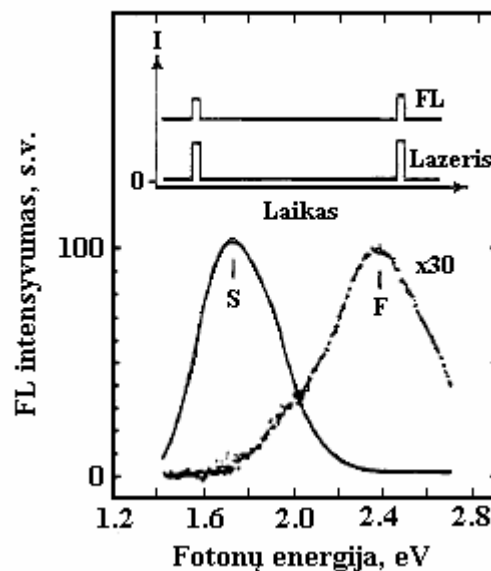


1.13 pav. FL matomosios juostos maksimumo padėties priklausomybė nuo akytumo [64]

Matomoji juosta yra stebima spektruose visuomet, nepriklausomai nuo to, koks laidumo tipas (n– ar p–) buvo naudotas akytajam siliciui pagaminti. Keičiant akytumo laipsnį, matomosios juostos maksimumo padėtis kinta. Tai atspindi 1.13 paveikslas [64]. Cituojamame darbe p–tipo silicio plokštelė buvo ėsdinta dalimis toje pačioje celėje, keičiant ėsdinimo srovę, tokiu būdu suformuojant skirtingo laipsnio akytumo sluoksnius. Bandiniai buvo matuojami iškart po ėsdinimo, naudojant tas pačias sužadavimo sąlygas [63, 64].



Liuminescencijos juostos padėtis kitimas stebimas esant akytumo laipsniui ne mažesiam nei 45 %. Akytumui kintant nuo ~ 45 % iki ~ 90 % matomosios juostos padėtis kinta nuo 1,3 eV iki ~ 2 eV. Šis postūmis su nedidelėmis paklaidomis buvo pakartojamas ir darbe [63]. Matomoji fotoluminescencijos juosta turi gana sudėtingą spektrinę bei laikinę struktūrą. Emisijos spektras susideda mažiausiai iš dviejų emisijos komponentių [65, 66]. Panaudojant spartų, sinchronizuotą laike detektorių buvo pademonstruota, kad fotoluminescencijos spektras susideda iš dviejų – greitos ir lėtos – komponentių (1.14 pav. [67]). Iš paveikslė matome, kad greitos komponentės maksimumas yra didesnių energijų srityje. Relaksacijos laikas kinta priklausomai nuo temperatūros ir nuo to, kuri spektro dalis ar visas platusis spektras yra registruojami. Žemose temperatūrose (< 50 K) fotoluminescencijos relaksacijos laikas gali būti labai ilgas – milisekundžių eilės. Temperatūrai didėjant relaksacijos laikas mažėja, o esant kambario temperatūrai, jis siekia vos kelias mikrosekundes. Laiko trukmė skiriasi kartojant bandymus, todėl sunku ją aprašyti teoriniais modeliais.



1.14 pav. Matomoji juosta yra sudaryta mažiausiai iš dviejų spektrinių juostų su skirtinga fotoluminescencijos slopinimo trukme [67]

Aukščiau minimi duomenys buvo gauti 80 % akytumo p-tipo medžiagai, kuri buvo visiškai stabilizuota oksidu (t. y. paviršius buvo papildomai oksiduotas). Akytajame silicyje, kuriam nebuvo taikyti jokie papildomi paviršiaus apdorojimai, išskyrus laikymą ore, lėtoji komponentė yra dominuojanti. Liuminescencija matomojoje juostoje nėra stabili. Palikus bandinį ore, liuminescencijos efektyvumas ir spektrinė padėtis keičiasi – spektro maksimumas slenka į didesnių energijų pusę. Buvo nustatyta, kad per trejus stovėjimo ore metus fotoluminescencijos maksimumo energija padidėjo 0,5 eV. Praktiškai poslinkis įvyko

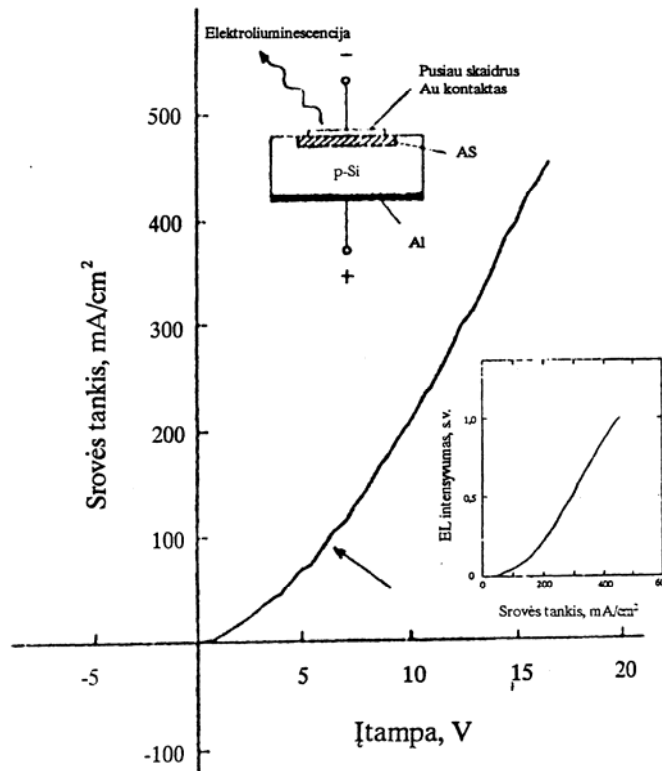
per vienerius metus [68, 69]. Kitas anksti pastebėtas efektas buvo optinis nuovargis, kuris pasireikšdavo naudojant didelės galios lazerinį sužadimą [70, 71]: sužadinant didelio intensyvumo lazerį, fotoluminescencijos efektyvumas, laikui bėgant, mažėdavo.

Tokiu būdu iš labai ribotos fotoluminescencijos darbų apžvalgos darome išvadą, kad iš pirmo žvilgsnio gan paprastas aktytas silicis turi sudėtingą struktūrą, kurios jautri išoriniams poveikiams lemia didelis ir labai tobulas paviršius.

Dielektrinės silicio oksido ( $\text{SiO}_2$ ) plėvelės, gaunamos termiškai oksiduojant kristalinių silicį. Jų storis neviršija kelių mikrometrų. Siekiant didesnio jų storio, buvo pasiūlyta dielektrinių plėvelių gamybai panaudoti aktytojo silicio sluoksnius. Termiškai oksiduojant ASi, deguonies molekulės į aktytąją struktūrą prasiskverbia per visą storį ir taip visiškai oksiduoja ASi sluoksnį. Šiam tikslui įgyvendinti geriausiai tinka 50 % porėtumo aktytojo silicio sluoksniai. Oksiduoti ASi sluoksniai naudojami nuotėkių srovių tarp kaimyninių elementų lustuose sumažinimui, kai tie elementai išsidėstę labai arti vienas kito. Srovės nuotėkių pašalinimui tarp aktyviųjų elementų buvo pasiūlyta nauja struktūra – „silicis – izoliatoriaus“. Tokios struktūros esmę sudaro tai, kad ant dielektrinės medžiagos auginamas monokristalinis silicio sluoksnis. Elementai formuojami sluoksnio tūryje. Po to vykdoma lokalinio oksidavimo operacija, ir kiekvienas elementas izoliuojamas nuo savo kaimynų. Jau pirminių eksperimentų metu, tokiose struktūrose gerai pasireiškė oksiduotas aktytasis silicis. ASi labai gerai tinka ne tik monokristalinio silicio plėvelių auginimui, bet efektyvus, naudojant juos kaip buferinius sluoksnius auginant kitų puslaidininkinių monokristalines plėveles ant silicio paviršiaus epitaksijos būdu (ypač tinka mažo aktytumo Si sluoksniams ( $A < 30\%$ )). Panašiu būdu neseniai (prieš metus) buvo sukurtas, taip vadinamas „hibridinis silicio“ lazeris, tai yra  $\text{A}_3\text{B}_5$  junginių lazeris, užaugintas silicio pagrindu [72].

### **1.3. AKYTOJO SILICIO TAIKYMAS**

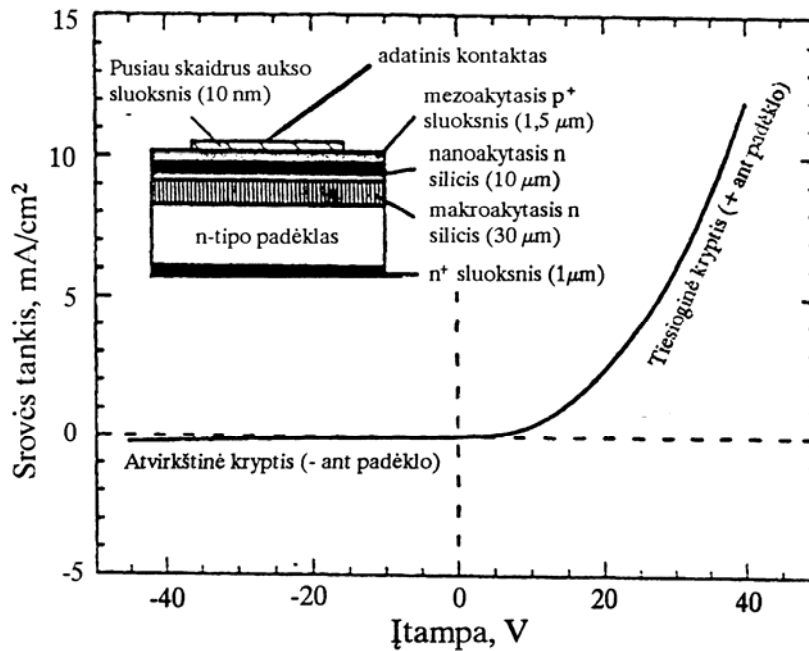
Unikalios ASi fizinės savybės skatina plonuosius sluoksnius panaudoti, kuriant įvairius elektronikos prietaisus. Visų pirma patraukli yra šviesos diodų idėja. Kadangi ASi liuminescencijos maksimumą galima lengvai valdyti keičiant nanostruktūrinio kamieno mastelį, todėl tokius diodus būtų lengva valdyti šviesa. Mokslinėje literatūroje labai plačiai aprašomos aktytojo silicio liuminescencinės savybės. Čia jų neapžvelgsime, o panagrinsime liuminescenciją diodinių struktūrų, artimų disertaciniame darbe tirtiesiems dvipoliams aktytojo silicio dariniams. ASi dvipolių darinių elektroluminescencija pirmą kartą buvo stebėta 1991 m. elektrolitinio ėsdinimo metu [4] ir prietaisinėse kietojo kūno struktūrose [64]. Nežiūrint į tai, kad ASi sluoksnius pasižyminčius dideliu (daugiau negu 1 %)



1.15 pav. Akytojo silicio šviesos diodo elektrinės charakteristikos.

[Įterpimas viršuje vaizduoja schemą, o apačioje – liuksamperinę charakteristiką [73]]

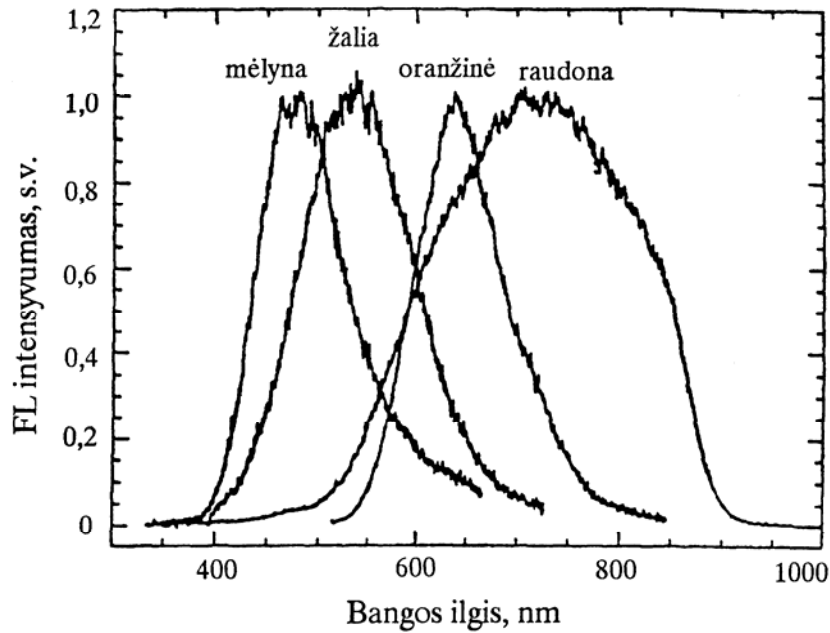
fotoluminescencijos išoriniu kvantiniu našumu nesunku pagaminti, pasiekti artimas elektroluminescencijos našumo reikšmės nepavyksta [64, 65, 69]. Iki šiol pavyko ASi dioduose išorinio kvantinio našumo reikšmės padidinti iki ( $10^{-5}$ – $10^{-3}$ ) %. Šios reikšmės neviršija elektroluminescencijos efektyvumo c-Si pagrindu struktūrose. Be to, luminescencija buvo nestabili, jos intensyvumas labai greitai mažėdavo. Elektroluminescencijai stebėti būtinos pakankamai didelės įtampos: jos dažniausiai siekia dešimtis voltų. Buvo tiriamos įvairios struktūros, naudojant skirtingus kontaktus: indžio alavo oksidu, auksu, aliuminiu ir kitus metalus bei elektrolitus. Dvi charakteringos ir besiskiriančios struktūros pavaizduotos 1.15 ir 1.16 paveiksluose. 1.15 paveiksle parodyta heterostruktūra, kuri turi elektrai laidų ir matomai šviesai pusiau skaidrų aukso kontaktą [73]. Voltamperinė charakteristika yra lyginanti. Šviesa spinduliuojama tik prijungus vienos krypties įtampą. Elektroluminescencijos maksimumas yra ties 680 nm. Spektro plotis siekia 200 nm ir yra panašaus dydžio, kaip ir tipinis kambario temperatūros fotoluminescencijos spektras. Kito prototipo, pagaminto ASi p–n sandūros technologijos pagrindu charakteristika, pavaizduota 1.16 paveiksle [74]. Ją sudaro n–tipo silicio plokštelė su paviršiuje implantuotu  $p^+$  sluoksniu. Anodinis ėsdinimas buvo vykdomas apšvietus, todėl



1.16 pav. p-n sandūros ASi šviesos diodo elektrinės charakteristikos.

Įterpime pavaizduota jo struktūra [74]

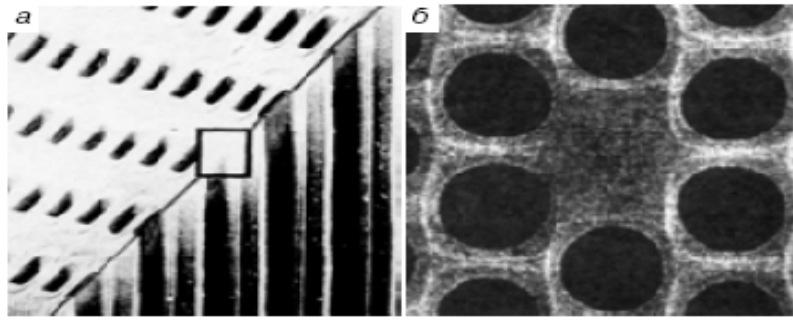
aktyvoju tapo ne tik p<sup>+</sup> sluoksnis, bet ir dalis n–tipo padėklo. Aktyvumas betarpiškai priklausė nuo pradinės medžiagos legiravimo. Aktyvioji sritis ties metalurgine p–n sandūra buvo nanoaktyta. Prietaiso kvantinis efektyvumas siekė 10<sup>-4</sup>. Reiktų pažymėti, kad šios struktūros elektroluminescencijos maksimumo padėtį buvo galima keisti, keičiant apšviečiančiosios šviesos bangos ilgį ėsdinimo metu. Trumpesnis sužadinančiosios šviesos bangos ilgis sąlygojo ir trumpesnę elektroluminescencijos bangos ilgį. Autorių nuomone, norint sukurti laisvas skylutes n–tipo medžiagoje ir taip pagerinti ėsdinimo sąlygas, sužadinantys fotonai turi būti sugeriami mažose silicio dalelėse, kurių dėl erdvinio kvantinio pagavimo efekto draudžiamos juostos plotis yra platesnis nei kristalinio silicio. Kuo mažesnės dalelės yra nanoaktytame sluoksnyje, tuo trumpesnis turi būti apšviečiančiosios šviesos bangos ilgis. Autoriai pademonstravo, kad keičiant sužadimo šviesos bangos ilgį nuo infraraudonosios iki ultravioletinės srities, galima gauti elektroluminescenciją plačiame bangų ruože – nuo raudonojo spinduliavimo iki mėlynojo. Gauti rezultatai pavaizduoti 1.17 paveiksle. Šioje srityje geresnių rezultatų pasiekė švedų mokslininkų grupė [10]. Jų pagamintų ASi diodų kvantinis efektyvumas impulsiniame režime siekė ~ 0,2 %. Tačiau ilgaamžiškumas buvo mažas (tik keletas valandų), todėl kalbėti apie šių bandinių, panaudojimą kuriant prietaisą, dar anksti. Taikomosios ASi elektroluminescencinės struktūros turėtų tenkinti šiuos reikalavimus: efektyvumas pagal galią – 1 % ir daugiau; stabilumas pakankamai ilgam



1.17 pav. Šviesos diodo, pavaizduoto 1.16 pav., elektroluminescencijos spektrai, ėsdinimo metu naudojant skirtingo bangos ilgio šviesą [74]

laiko tarpui (nuo kelių mėnesių iki kelerių metų); elektroluminescencijos moduliacijos aukštu dažniu galimybės; galimybė keisti spinduliavimo juostos padėtį dideliuose intervaluose matomojoje srityje ir (arba) infraraudoname diapazone. Šviesos diodų ASi pagrindu gamybos technologija turi būti suderinta su standartiniais elektronikos technologiniais procesais. Nors buvo tirtos ir kitos struktūros, vis dėl to akytojo silicio šviesos diodų kvantinio efektyvumo nepavyko padidinti. Pagrindinė jo priežastis yra bloga įvestis (injekcija) į akytojo silicio nanokristalus, neleidžianti pilnai sužadinti viso sluoksnio tūrio.

Dar vienas praktiniu požiūriu įdomus akytojo silicio dvipolio darinio panaudojimas yra ASi kondensatoriaus sukūrimas. ASi privalumas yra didelis makroporinio ASi paviršiaus ir tūrio santykis. Tam tikslui buvo panaudotas nanoakytas silicis (paviršiaus plotas tūrio vienetu  $\sim 1 \text{ m}^2/\text{cm}^3$  [75]). Naudojant standartinę fotolitografiją, kristalinio silicio paviršiuje buvo suformuoti ėsdinimo židiniai, ėsdintas  $2 \text{ }\mu\text{m}$  diametro kiaurymių tinklas su erdvinio periodu  $3,5 \text{ }\mu\text{m}$  (1.18 pav.). Kiaurymių ilgis siekė  $165 \text{ }\mu\text{m}$ , o jų paviršiuje buvo formuojamas plonas oksido sluoksnis, kuris atliko dielektriko tarp kondensatoriaus plokščių vaidmenį. Ant oksido buvo išaugintas laidas, fosforu legiruotas polikristalinio silicio sluoksnis, atliekantis antrosios kondensatoriaus plokštės funkcija. Tokios nebūdingos konstrukcijos kondensatoriaus specifinė talpa siekė  $4 \text{ }\mu\text{F}\cdot\text{V}/\text{mm}^3$ . Tai žymus talpos padidėjimas, lyginant su keraminių arba polimerinių kondensatorių specifinė talpa, siekiančia  $0,03\text{--}0,1 \text{ }\mu\text{F}\cdot\text{V}/\text{mm}^3$ .



1.18 pav. a – šimtą kartų padidintas makroakytojo silicio kondensatoriaus vaizdas;  
b – fotoninio kristalo makroakytojos matricos elementas [75]

Pagaminti ASi kondensatoriai veikė iki 100 V įtampos, o jų talpa siekė 10  $\mu\text{F}$ . Šie elementai gali dirbti aukštose iki +200  $^{\circ}\text{C}$  temperatūrose [75]. Tos pačios talpos „aktyvieji“ kondensatoriai savo matmenimis yra žymiai mažesni, o tai yra labai svarbu elektronikai. Taliercio grupė [76] pagamino 150-270  $\mu\text{m}$  storio akytojo silicio membranas ir jas įkomponavo į elektrocheminiame deguonies jutiklyje. Jutiklis veikia Hersch baterijos principu, kurio esmė yra ta, jog pro membraną praėjęs deguonis dalyvauja cheminėje reakcijoje. Todėl kinta baterijos laidumas, kuris ir registruojamas. ASi membranos pasirodė funkcionalios, tačiau dėl didelio storio jos yra gana inertiškos: priklausomai nuo membranų storio difuzija per membraną užtrunka nuo 7 iki 10 minučių.

Bandymai, pritaikyti ASi praktikoje, neaplenkė ir saulės elementų srities. Daugelyje darbų, demonstruojama galimybė sumažinti šviesos atspindžio koeficientą. Tačiau saulės elementų efektyvumas padidėja nedaug [77–80]. Kaip pavyzdį galima paminėti ir G. Smestad ir kt. eksperimentą [81]. Panaudojus ASi, jiems pavyko užregistruoti 0,36 V atviros gandinės įtampą ir 2  $\mu\text{A}$  fotosrovę. Mažą srovę, greičiausiai, sąlygojo nekokybiškas viršutinis kontaktas (platinos adata), o mažą įtampą dideli paviršinės rekombinacijos greičiai. Geresnių rezultatų pasiekė Wei Guang–Pu ir kt. [82]. Jie pagamino p–p–n ASi struktūrą. Sandūra buvo sukurta anodiniu ėsdinimu, ir po jo vykdyta įprasta fosforo difuzijos technologija. Šio tipo saulės elementuose aktyvūs silicis veikė kaip optinis langas ir atspindį sumažinantis sluoksnis. Esant standartiniam šviesos srautui, tokio elemento efektyvumas siekė 7 %.

Akytajį silicį ketinama taikyti ir optoelektronikoje. ASi pagrindu sukurtos struktūros gali ne tik spinduliuoti šviesą, bet ir kreipti, moduluoti bei ją detektuoti. Laukiama, kad ASi pagrindu sukurti optoelektronikos prietaisai bus pigesni negu  $\text{A}_3\text{B}_5$  junginių pagrindu ASi taikymas atvertų galimybes panaudoti vien siliciu grįstos optoelektronikos pranašumus. Tokios perspektyvos patvirtinimas neseniai buvo pademonstruotas darbe [83]. Šio darbo autoriams pavyko pagaminti ASi fotodetektorius, kurių optoelektroninė konversija siekė net

200 %. Integrinėje optikoje naudojamos plėvelių struktūros, planariniai šviesolaidžiai. Juose šviesa sklinda sluoksnyje su dideliu lūžio rodikliu, kuris ribojimas iš abiejų pusių sluoksniu su mažesniu lūžio rodikliu. Žinome, kad ASi lūžio rodiklis priklauso nuo akytumo: kuo didesnis akytumas, tuo mažesnis lūžio rodiklis. Todėl, formuojant ASi skirtingo akytumo daugiasluoksnes struktūras, galima pagaminti šviesolaidžių elementus. Papildomai sugerties nuostolius galima sumažinti oksiduoiant ASi. ASi galimybes optinių šviesolaidžių technologijoje pademonstravo A. Loni ir kt. [84]. Keisdami srovę anodinio ėsdinimo metu, autoriai keitė sluoksnių akytumo laipsnį, tuo pačiu, ir ASi lūžio rodiklį. Tokiu būdu suformuoti šviesolaidžiai galėjo dirbti 1,28  $\mu\text{m}$  ir 0,6328  $\mu\text{m}$  bangos ilgių intervale. Tiesa, lyginant su dabartiniais šviesolaidžiais, jie pasižymėjo dideliais nuostoliais: 10–20 dB/cm (gerų šviesolaidžių nuostoliai  $\sim 0,5$  dB/km).

Dar vienas ASi struktūrų taikymo pavyzdys yra interferencinių infraraudonojo, matomojo ir ultravioletinio spektro sričių filtrų gamyba. Dažnai naudojamas Fabri–Pero interferencinis filtras, pagamintas akytojo silicio pagrindu, yra sudarytas iš septynių sluoksnių, kurių storių ir lūžio rodiklių santykiai yra tapatūs įprastiniams interferenciniams filtrams. Tokių filtrų bangos ilgių selektyvumas  $\Delta\lambda$  yra apie 10 nm [85].

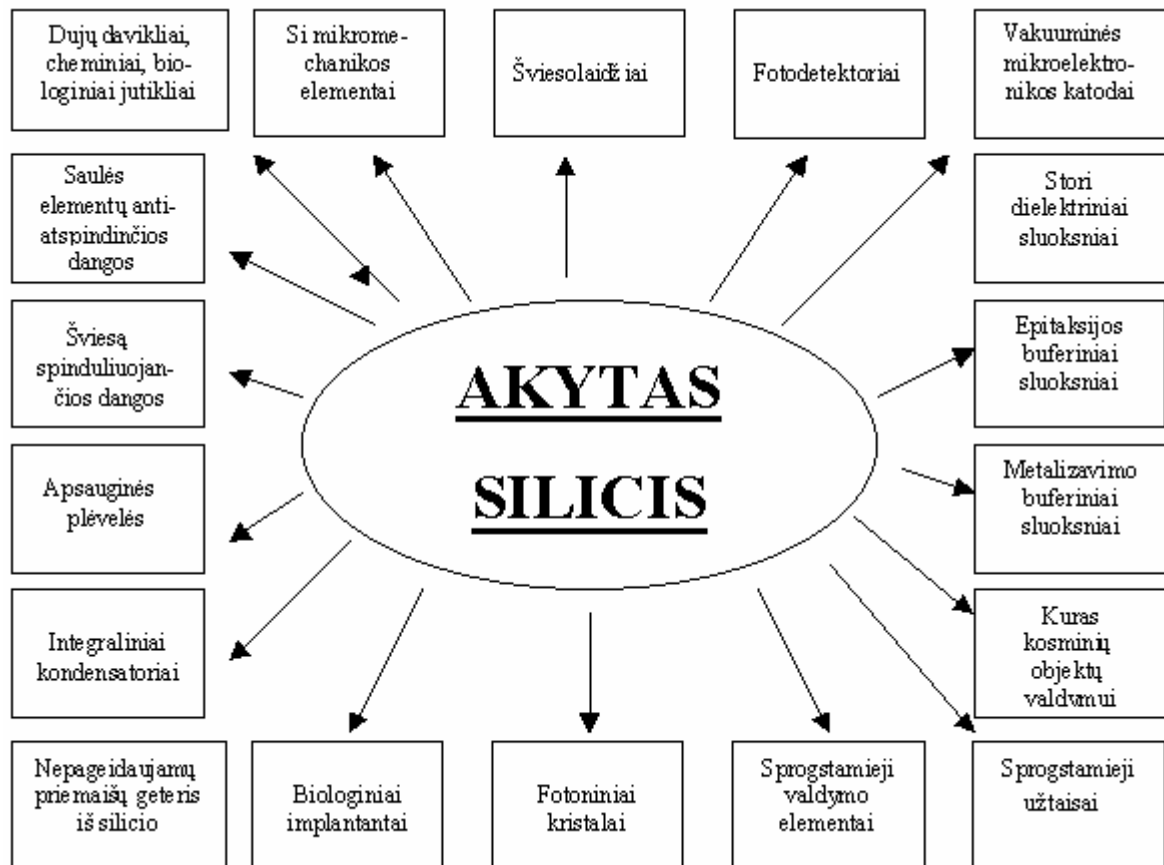
Akytasis silicis yra perspektyvus kuriant drėgmės, dujų, cheminius ir biologinius jutiklius. Jutiklių veikimo principas pagrįstas poveikiu išorinių molekulių paviršiaus elektroninei būsenai. Akytojo silicio talpumas, laidumas, liuminescencinės savybės pakinta dėl aplinkoje esančių molekulių ir cheminių junginių poveikio. Jutikliai pasižymi dideliu jautriu. Akytąjį silicį galima taikyti biocheminiuose ir biologiniuose jutikliuose kaip dirbtinį elementą, kadangi akytasis silicis yra biologijoje dera gerai. Biomedžiagos skirstomos pagal savo savybes į bioinertines, bioaktyvias ir biorezorbuojamas. Bioinertinės medžiagos (pvz., titanas) sukelia minimalius pokyčius aplinkiniuose audiniuose, o bioaktyvios medžiagos (bioglass) sukelia tik tam tikrus pokyčius gyvuose organizmuose. Biorezorbuojamos medžiagos turi gebėjimą prasiskverbti į audinius reguliuojamu greičiu. Pasirodo, kad priklausomai nuo akytumo laipsnio ASi gali būti priskirtas vienai, antrai, arba trečiai paminėtai klasei, ir tai leidžia tikėtis ateityje naujų biomedicininų prietaisų jo pagrindu.

Naujas etapas akytojo silicio tyrimuose ir jo panaudojime yra periodinių akytųjų matricių kūrimas – silicio kristalų, su pagal nusakytą tvarką suformuotomis giliomis (iki 500  $\mu\text{m}$ ) tam tikrų skersinių matmenų poromis (iki 20  $\mu\text{m}$  (žiūr. 1.18 pav.)). Gaminant tokias struktūras ant n-tipo silicio plokštelės paviršiaus sudaroma SiO<sub>2</sub> plėvelė, kurioje fotolitografijos būdu formuojamas taisyklingų langų tinklas. Languose sudaromos apverstų piramidžių formos ėsdinimo duobutės. Toliau atliekamas elektrocheminis ėsdinimas

papildomai apšviečiant apatinę plokštelės pusę (jeigu silicis n-tipo). Tokios struktūros gali būti naudojamos, kuriant integrinius kondensatorius ir fotoninius kristalus. Fotoniniai kristalai – tai dvimatės struktūros su periodiškai kintama erdvėje dielektrine skvarba. Šios struktūros turi dažninį plyšį, leidžiantį aukštu tikslumu kontroliuoti praeinančios elektromagnetinės bangos dažnį (priklausomai nuo banginio vektoriaus krypties). Fotoniniai kristalai gali būti gaminami naudojant erdviškai moduluotas makroaktytojo silicio struktūras [15]. Šioje apžvalgoje pateikiama tik nežymi galimų ir tyrimais jau patvirtintų ASi taikymo dalis. Platesnės aktytojo silicio taikymo galimybes vaizdą demonstruoja 1.19 paveikslas.

Elektromagnetinės spinduliuotės poveikis aktytojo silicio savybėms daugiausia ištirtas optiniame diapazone. Tuo tarpu superaukšto dažnio (radijo dažnio arba mikrobangų) intervale tokių tyrimų atlikta labai mažai, neskaitant darbų, kuriuose superaukšto dažnio elektromagnetinė spinduliuotė buvo papildomai panaudota ASi technologijos metu [86]. Yra žinomos tik dvi mokslines grupes, atliekančios ASi tyrimus mikrobangų lauke. Viena jų (Minesotos Universitete, JAV) tyrinėja aktytąjį silicį kaip medžiagą, perspektyvią pasyvių elementų, jungiančių radijo diapazono mazgus su mikroelektronikos elementais ir lustais gamybai. Tokių jungčių su pakankamai mažais nuostoliais tyrimas yra aktualus, nes jis gali būti naudojamas pvz., mobiliojo ir palydovinio ryšio technikoje. Ištyrus ASi elektrinę skvarbą bei nuostolius mikrobangų ((10 ÷ 40) GHz) intervale, nustatyta, kad ASi dariniuose tokių dažnių nuostoliai prilygsta nuostoliams gerame izoliatoriuje. Parodyta, kad naudojant ASi koplanarinėse perdavimo linijose esant 20 GHz dažniui, nuostoliai sumažėja nuo 20 dB/mm iki 5 dB/mm, t.y. apie 80 % [24, 87]. Svarbi aplinkybė yra ta, kad mažais nuostoliais pasižymintis ASi sluoksnis, sluoksnis gali būti pagaminamas mažos savitosios varžos silicyje. Tai didelis pranašumas integruojant pasyvius radijo dažnio elementus su silicio mikroelektronika. Jis suteikia galimybę sudaryti didelės varžos ir mažų nuostolių sritį mažos savitosios varžos silicio aplinkoje [88]. Neseniai atspausdino darbą kita mokslininkų grupė (Pietų Korėja), kuri taip pat pagamino mažų nuostolių perdavimo liniją su maža savitąja varža (5  $\Omega \cdot \text{cm}$ ) silicio pagrindu [89]. Tuo tarpu monolitinis (monokristalinis, polikristalinis, x-Si ir t. t.) mikrobangų lauke yra plačiai ištyrinėtas ir iš jo gaminama daugybė SAD technikos prietaisų. Jų tarpe yra žinomi kristalinio silicio mikrobangų spinduliuotės detektoriai, panaudojantys karštųjų krūvininkų efektus [25, 26]. Jutiklių jautris paprastai priklauso nuo tam tikrų jo dalių matmenų. Apskritai paėmus, jautris didėja mažinant konstrukcijos matmenis [26]. Aktytojo silicio technologija turi tą privalumą, kad ją pritaikant, ASi kamieno charakteringieji matmenys gali būti sumažinti iki nanometrų dydžio. Kitais būdais tokie matmenys kol kas praktiškai nepasiekiami arba pasiekiami tik išskirtiniais atvejais. Pritaikius ASi gamybos technologiją jutikliuose, kuriuose siekiama





1.19 pav. Akytojo silicio taikymo galimybės

kaip galima mažesnių tam tikrų matmenų, tikėtina, kad žymiai padidės jutiklių jautris. Papildomų privalumų galima laukti iš pasireiškiančiojo ASi erdvinio kvantinio ribojimo efekto.

#### 1.4. PIRMOJO SKYRIAUS IŠVADOS

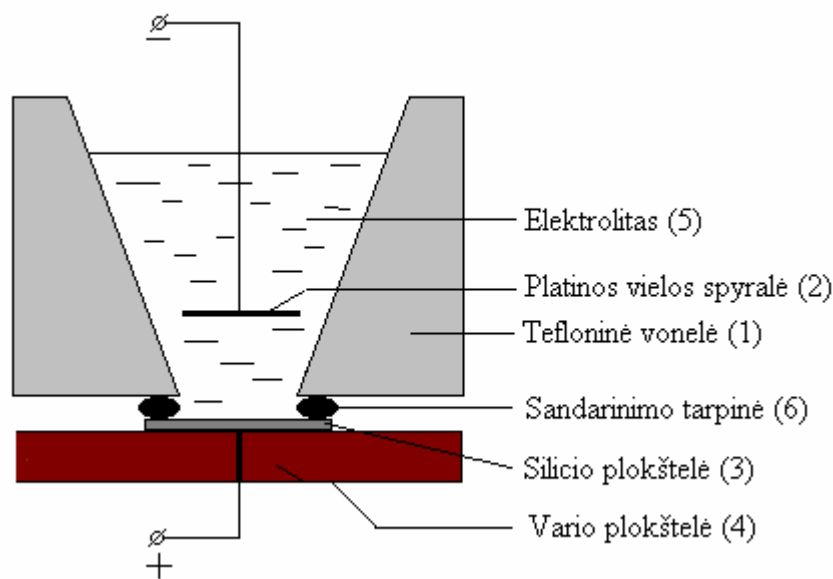
1. Apžvelgtos akytojo silicio elektrocheminio ėsdinimo gamybos technologijos ir modeliai. Parodyta, kad keičiant anodinio ėsdinimo sąlygas (ėsdinimo srovės tankį, ėsdinimo laiką, plokštelių savitąją varžą ir t. t.) galima gauti akytajį silicį su skirtinga porų ir silicio kamieno morfologija.
2. Aprašytos akytojo silicio fotoluminescencinės savybės. Apžvelgiant esamus darbus parodoma, kad sumažinus akytojo silicio kristalitų matmenis iki 2÷5 nm, reiškiasi erdvinis kvantinio ribojimo efektas, kurio vienas iš pasireiškimų yra draustinės juostos pločio didėjimas.
3. Apžvelgiant akytojo silicio praktinio taikymo galimybes, parodyta kad akytojo silicio darinių panaudojimas superaukšto dažnio technikoje tirtas tik nedaugelio aspektų. Superaukšto dažnio poveikis akytajam siliciui ir jo dariniams visai netirtas. Galima

tikėtis nemažų laimėjimų šioje srityje, panaudojus akytojo silicio technologiją ir unikalias savybės. Taigi yra aktualu ištirti akytojo silicio sluoksnių ir jų darinių fizines savybes, veikiant juos superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės lauku.

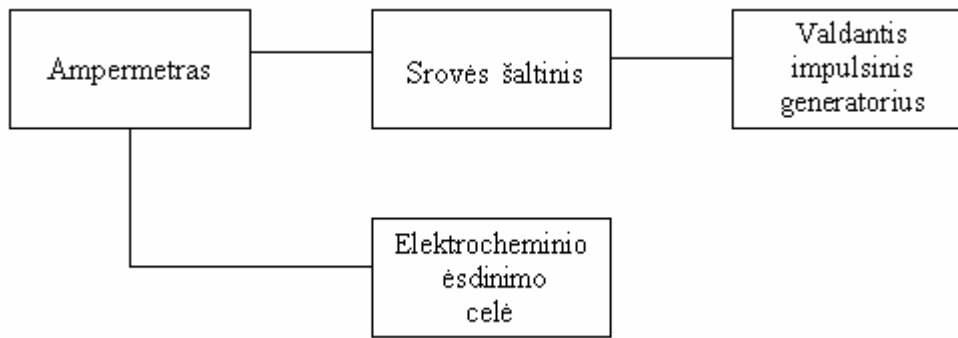
## 2. AKYTŲJŲ SLUOKSNIŲ FORMAVIMAS IR TYRIMŲ METODIKA

### 2.1. EKSPERIMENTINĖ ELEKTROCHEMINIO ĖSDINIMO ĮRANGA

Akytojo silicio sluoksnių gamybai buvo naudojamos p-tipo elektrinio laidumo, (100) kristalografinės orientacijos poliruotos silicio plokštelės. Pirminės medžiagos savitoji varža buvo  $0,4 \Omega \cdot \text{cm}$ . Akytojo silicio sluoksniai buvo formuojami elektrochemiškai, selektyviai ėsdinant plokštelės paviršių fluoro rūgšties elektrolitu. Elektrocheminio ėsdinimo celės schema pateikta 2.1 paveiksle. Ėsdinimas buvo atliekamas tefloninėje elektrolito vonelėje (1). Plokštelės anoduojamo paviršiaus plotas buvo  $\sim 90 \text{ mm}^2$ . Katodu buvo naudojama platinos vielos spiralė (2). Prie monokristalinio silicio plokštelės (3) buvo prijungama anodinė įtampa. Tuo tikslu buvo sudaromas plokštelės elektrinis kontaktas su šlifuotu vario pagrindu (4). Elektrocheminio ėsdinimo celė buvo įmontuojama į specialų laikiklį, po to patalpinama į vonelę kuri pripildoma elektrolitu, taip sudarant elektrinį kontaktą (5). Ėsdinimui buvo naudojamas fluoro rūgšties – etanolio HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH (1:2) elektrolitas, kuriam gaminti naudojama 48 % koncentracijos fluoro rūgštis (HF). Siekiant, kad elektrocheminio ėsdinimo reakcijos metu išsiskiriantis vandenilis būtų efektyviai pašalinamas iš porų ir netrukdytų ėsdinimo reakcijai, ėsdinimas buvo atliekamas kvazistacionarios anodavimo srovės režimu. Srovė buvo leidžiama 5 sekundžių (s) laiko tarpais, su 5 s pertraukomis. Srovės šaltinis buvo valdomas 5 sekundžių meandro impulsais iš valdymo generatoriaus. Kvazistacionarios ėsdinimo įrangos elektrinė schema pateikta 2.2 paveiksle.



2.1 pav. Monokristalinio silicio elektrocheminio ėsdinimo celė

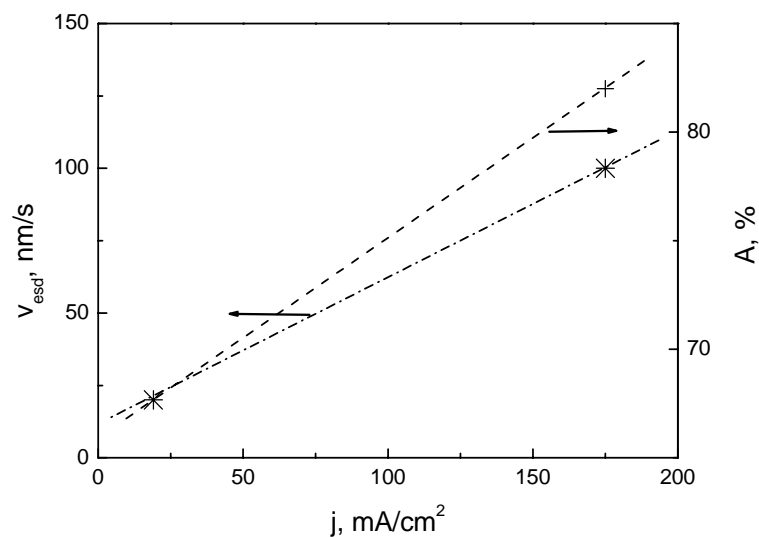


2.2 pav. Elektrocheminio ėsdinimo įrangos schema

## 2.2. SUDĖTINIŲ AKYTOJO SILICIO DARINIŲ TECHNOLOGIJA

Prieš ėsdinimą silicio plokštelės buvo valomos, nuriebalinamos, virinant jas po 10 minučių acetone, po to plaunant etilo spirite. Paskutiniame etape plokštelės buvo plaunamos po tekančiu distiliuotu vandeniu, džiovinamos oro srautu ir montuojamos elektrocheminėje celėje. Prieš anodinio ėsdinimo operaciją nuo plokštelės paviršiaus buvo pašalinamas silicio oksido sluoksnis, patalpinus ją į koncentruotą HF rūgštį 15 minučių. Siekiant, kad ruošiami akytojo silicio bandiniai ir pirminės medžiagos parametrai kuo mažiau būtų įtakojami papildomų operacijų, tokių kaip metalinių kontaktų garinimas, naudojome naujas, literatūroje iki šiol neaprašytas, mūsų pasiūlytas technologijas. Daugumoje darbų viršutinis metalinis elektrodas paprastai užgarinamas tiesiogiai ant tiriamojo ASi sluoksnio. Šiuo atveju kontakto metalas – ASi savybės priklauso nuo daugelio pradinių parametru: silicio ruošinių laidumo, tipo ir savitosios varžos, ASi akytumo ( $A$ ) ir t. t. Siekiant sumažinti pradinių parametru įtaką ir gauti nuo pradinių sąlygų kiek galima mažiau priklausomus ASi darinius, disertaciniame darbe kontaktinės aikštelės ASi pusėje buvo užgarinamos ne tiesiogiai ant pagrindinio sluoksnio, o ant pagalbinio akytojo silicio sluoksnio ASiS1, kurio akytumas buvo mažesnis nei po juo esančio pagrindinio sluoksnio ASiS2. Tuo tikslu buvo panaudotas akytojo silicio elektrocheminės technologijos privalumas, leidžiantis valdyti ASi akytumą keičiant ėsdinimo srovės tankį. Mažo akytumo pagalbinis sluoksnis ASiS1 buvo gaminamas prieš ėsdinant pagrindinį tiriamąjį sluoksnį ASiS2. Tuo tikslu anodavimas buvo atliekamas dviem etapais. Pirmajame etape, tekant mažesnio srovės tankio srovei, buvo pagaminamas paviršiuje esantis pagalbinis sluoksnis ASiS1. Antrame etape, esant didesniam srovės tankiui, buvo suformuotas pagrindinis (ir storesnis) sluoksnis ASiS2. Ėsdinimo srovės tankis ir ėsdinimo

laikas buvo iš anksto paskaičiuotas, naudojantis ėsdinimo greičio ir akytumo priklausomybe nuo ėsdinimo srovės tankio artimų parametrų (2.3 pav.) [84]. Viršutinis sluoksnis ASiS1 buvo ėsdinamas, kai  $j_1 = 10 \text{ mA/cm}^2$ , o ėsdinimo laikas 300 sekundžių. Naudojant tokį anodinės srovės tankį, ASi sluoksnio akytumas  $A \approx 55 \%$ . Tokiam akytumui esant, ASi tinklo matmenys yra didesni nei 10 nm, todėl erdvinio kvantinio ribojimo efektas juose dar nepasireiškia, ir pagal esamą klasifikaciją (1.1 lentelė) yra priskiriamas mezoakytajam siliciui. Jo medžiagos parametrai (išskyrus efektinius: tankį  $\rho$ , dielektrinę skvarbą  $\epsilon$  ir lūžio rodiklį  $\tilde{n}$ ) išlieka tokie pat, kaip ir kristaliniame silicyje. Kadangi buvo numatyta papildomai legiruoti priekontaktines sritis, išlaikant pagalbinio sluoksnio storį maždaug tokį kaip ir



2.3 pav. ASi ėsdinimo greičio ir akytumo priklausomybė nuo ėsdinimo srovės tankio [84]

$p^+$  srities, parinkome 300 sekundžių ėsdinimo trukmę. Laikant ėsdinimo greitį yra pastoviu, įvertintas pagalbinio sluoksnio storis  $l_1 \approx 5 \mu\text{m}$ . Antrajame etape po pagalbinio sluoksnio buvo ėsdinamas pagrindinis tiriamasis sluoksnis ASiS2. Šio proceso metu ėsdinimo srovės tankis  $j_2 = 80 \text{ mA/cm}^2$ , laikas – 600 sekundžių. Atsižvelgiant į aukščiau minėtus duomenis (2.3 pav.), tikėtasi, kad ASiS2 akytumas  $A$  bus apie 75 %, o akytojo sluoksnio storis  $l_2 = 20 \div 25 \mu\text{m}$ . Silicio plokštelėje suformuoti sudėtiniai akytojo silicio dariniai toliau buvo naudojami gaminant bandinius eksperimentiniams tyrimams. Mažas pagalbinio sluoksnio ASiS1 akytumas apsaugo nuo gilesnio kontaktinės medžiagos prasiskverbimo į tuštumas. Ši problema neišvengiamai kildavo mokslinėje literatūroje aprašytuose eksperimentuose.

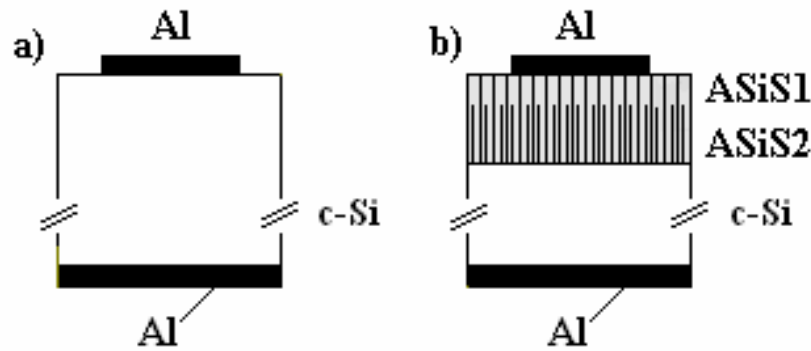
### **2.3. BANDINIŲ GAMYBA**

Superaukšto dažnio tyrimams elektromagnetiniame lauke gali būti naudojami įvairios konfigūracijos bandiniai, priklausomai nuo pasirinkamo tyrimų tikslo [90, 91]. Šiame darbe pasirinkta bandinių geometrija artima taškiniam kontaktui, ir viena vertus, nelabai skyrėsi nuo struktūrų, tirtų kituose darbuose, o, kita vertus, buvo artima SAD lauke tirtiems panašioms kristalinio silicio bandiniams [92, 93]. Be to, bandinių geometrijos pasirinkimą lėmė technologinės galimybės, leidžiančios ASi sluoksnį suformuoti koplanariškai.

Tyrimams atlikti buvo pagaminti kelių skirtingų tipų bandiniai. Šalia tiriamųjų bandinių kiekvienoje serijoje buvo gaminami ir kontroliniai kristalinio silicio bandiniai, kuriems, lygiagrečiai su tiriamaisiais bandiniais, buvo atliekamos visos tos pačios operacijos, išskyrus, ASi elektrocheminį išdėtinimą. Visais atvejais ant bandinių pagrindo (apatinio) paviršiaus buvo pagaminamas dengiantis visą paviršių aliumininio (Al) kontaktinis sluoksnis. Kontaktas buvo garinamas vakuume, kai  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , po to įdeginamas 20 minučių argono atmosferoje esant  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūrai. Kontaktinio sluoksnio storis siekė  $0,5\div 0,6\text{ }\mu\text{m}$ . Daliai bandinių Al kontaktas buvo užnešamas tiesiog ant esamo papildomai nelegiruoto paviršiaus. Likusiems bandiniams paviršinis pagrindo sluoksnis buvo papildomai legiruojamas  $p^{+}$ -tipu, taikant difuziją iš borosilikatinio stiklo siekiant pagaminti mažos varžos omini kontaktą su metalu. Legiravimo operacija buvo atliekama difuzinėje krosnyje, argono atmosferoje. Temperatūra proceso metu buvo  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , o difuzija truko apie 1 valandą.

Tiriamųjų bandinių serijos (apie 250 bandinių) skyrėsi kontaktinių aikštelių prie ASiS gamybos technologija, naudojamų technologijos operacijų kiekiu ir, atitinkamai, būdingomis charakteristikomis. Kontaktinės aikštelės prie ASiS visų tipų bandiniams buvo gaminamos per specialią matricą (trafaretą) vakuume nusodinant Al. Matricoje skritulio formos aikštelės buvo  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,  $50\text{ }\mu\text{m}$  ir  $30\text{ }\mu\text{m}$  skersmens. Skirtingi bandinių tipai pavaizduoti žemiau pateiktose bandinių schemose (2.4, 2.5, 2.6 ir 2.7 pav.). Visuose paveikslėliuose (a) variantai vaizduoja kontrolinius bandinius. Patys paprasčiausi A-tipo bandiniai (2.4 pav., (b)) buvo gaminami be papildomų technologinių operacijų, garinant Al kontaktines aikšteles tiesiog ant ASi sluoksnių. Šiems bandiniams buvo taikyta tokia technologinių operacijų seka:

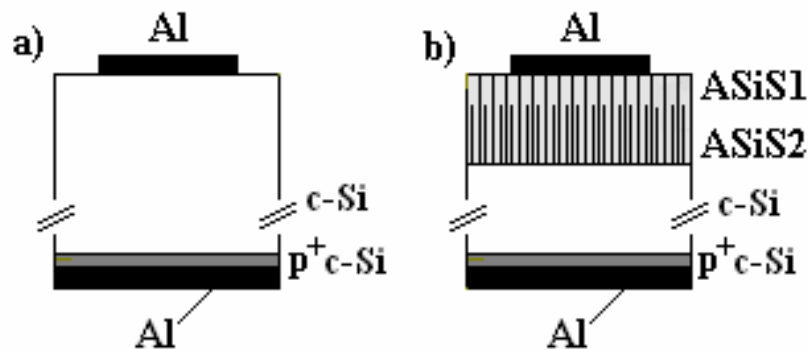
1. paruošiamoji operacija: plokštelės cheminis valymas ir nuriebalinimas;
2. ASiS1 ir ASiS2 anodinis elektrocheminis išdėtinimas (pirmas ir antras išdėtinimo etapai);



2.4 pav. Pirmojo tipo (A–tipas) bandiniai (be boro difuzijos)

3. tarpinis paviršiaus valymas;
4. pagrindo kontakto ištisinio Al sluoksnio užgarinimas;
5. kontaktinių aikštelių užgarinimas ir atkaitinimas 200 °C temperatūroje vakuume;
6. kontaktų įdegimas argono atmosferoje 450 °C temperatūroje 20 minučių.

Tuo pačiu metu kontroliniams bandiniams buvo atliekama visa operacijų seka, išskyrus antrą operaciją (t. y. anodinį elektrocheminį ėsdinimą).



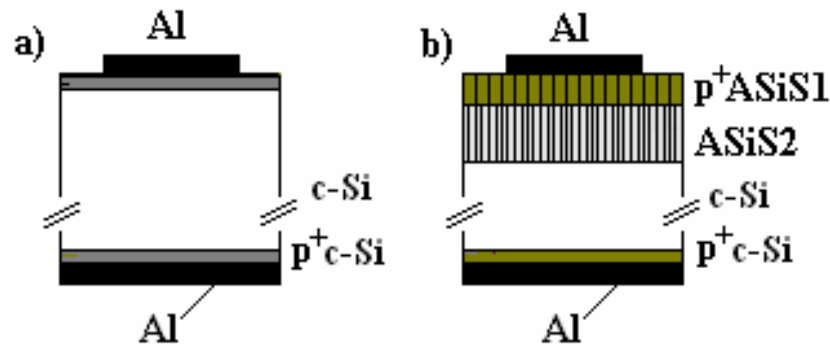
2.5 pav. B–tipo bandinių schema (į pagrindą vykdyta boro difuzija)

B–tipo bandiniai (2.5 pav.) buvo gaminami analogiškai, pridėjus papildomai p<sup>+</sup>–tipo sluoksnio gamybą, skirtą pagrindo kontakto varžos sumažinimui. Žemiau pateikiama atitinkama technologinių operacijų seka:

1. paruošiamoji operacija: plokštelės cheminis valymas ir nuriebalinimas;
2. pagrindo paviršiaus padengimas borosilikatiniu stiklu;
3. boro difuzija į plokštelės pagrindo plokštumą;
4. borosilikatinio stiklo likučių nuėmimas;
5. ASiS1 ir ASiS2 anodinis elektrocheminis ėsdinimas;
6. tarpinis paviršiaus valymas;

7. pagrindo kontakto ištisinio Al sluoksnio užgarinimas;
8. kontaktinių aikštelių užgarinimas ir atkaitinimas 200 °C temperatūroje vakuumė;
9. kontaktų įdeginimas argono atmosferoje 450 °C temperatūroje 20 minučių.

Boro difuzijos operacija buvo vykdoma 1150 °C temperatūroje, 10 minučių argono atmosferoje, boro difuzijos gylis siekė 4÷5 μm. Kaip ir pirmuoju atveju, lygiagrečiai buvo gaminami kontroliniai bandiniai. Papildomai legiruotas p<sup>+</sup> sluoksnis pagerino bandinių elektrines charakteristikas, tačiau kokybiškai jos iš esmės nepakito lyginant su A–tipo bandinių charakteristikoms (3.4 skyrius). Be pagrindinių B–tipo bandinių serijų buvo pagaminta serija bandinių B’–tipo (2.6 pav.). Nuo B–tipo šių bandinių technologija skyrėsi tuo, kad juose boro difuzija (operacijos 2–4) buvo atlikta vienu metu abiem plokštelės pusėms. Tokiu būdu ASiS1 sluoksnis buvo legiruotas, o ASiS2 sluoksnis liko nelegiruotas, kaip ir B–tipo serijų bandiniuose.



2.6 pav. B’–tipo bandinių schema (boro difuzija, vykdyta iš abiejų plokštelės pusių prieš ėsdinimą)

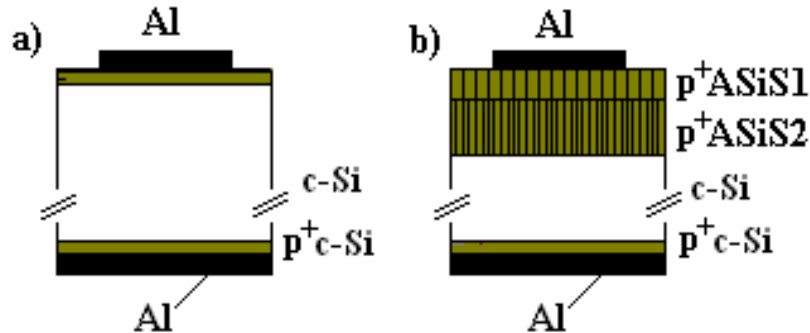
Technologija skyrėsi iš esmės gaminant C–tipo bandinius. C–tipo bandiniams taikyta technologinių operacijų seka neturi analogų pasaulinėje literatūroje. Panašios, bet netapačios technologijos panaudotos gaminant p–n sandūras [12, 15]. Esminis skirtumas, lyginant su ankstesniais bandiniais, buvo tas, kad C–tipo bandiniuose boro difuzijos operacija buvo atliekama, suformavus sudėtingą ASi darinį. Žemiau pateikta C–tipo bandinių gaminto schema ir atliktų operacijų seka:

C–tipo bandinių technologinių operacijų seka:

1. paruošiamoji operacija: plokštelės cheminis valymas ir nuriebalinimas;
2. ASiS1 ir ASiS2 anodinis elektrocheminis ėsdinimas;
3. tarpinis paviršiaus valymas;
4. abiejų paviršių padengimas borosilikatiniu stiklu;
5. boro difuzija į abi plokštelės plokštumas;
6. borosilikatinio stiklo likučių nuėmimas (iš abiejų pusių);

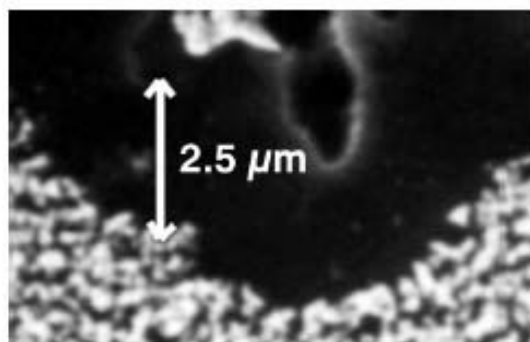


7. tarpinis paviršiaus valymas;
8. pagrindo kontakto ištisinio Al sluoksnio užgarinimas;
9. kontaktinių aikštelių užgarinimas ir atkaitinimas 200 °C temperatūroje vakuume;
10. kontaktų įdeginimas argono atmosferoje 450 °C temperatūroje 20 minučių.



2.7 pav. C–tipo bandinių schema (boro difuzija vykdyta į pagrindą ir į ASi sluoksnius)

C–tipo bandinių schema pavaizduota 2.7 paveiksle (b). Iš schemos matome, kad šio tipo bandiniams papildomas  $p^+$ –tipo pasluoksnis susidaro ne tik prie pagrindo, bet ir prie ASi sluoksnių, nors difuzijos proceso parametrai ir trukmė buvo tokie pat, kaip ir gaminant antro tipo bandinius. Paaiškinti galėtumėme taip: kadangi ASiS1 sluoksnio akytumas yra santykinai mažas (55 %) ir kvantiniai efektai jame nepasireiškia, buvo tikimasi, kad difunduojančio boro difuzijos koeficientas išliks artimas difuzijos koeficientui kristalinėje tūrinėje medžiagoje. Todėl laukta, kad boras difunduos tik apie 5  $\mu\text{m}$ , kaip ir ties pagrindu, o legiruos tik ASiS1 sluoksnis. Papildomą argumentą, kad legiravimas mažai paliečia ASiS2 sluoksnį radome literatūroje [94]. Šiame darbe atliekant tyrimus buvo pagaminta  $p^+$ –n sandūra akytojo silicio sluoksnyje. Suformuotų  $p^+$ –n sandūrų gylis buvo nustatytas ir tiriamas elektroniniu mikroskopu. Darinio, kuris vykdant difuziją kai temperatūra siekia 1100 °C, briaunos mikromorfologija parodyta 2.7 paveiksle. Iš jos matyti, kad sandūra susiformavo apie 2,5  $\mu\text{m}$  žemiau poros dugno.



2.7 pav. ASi emiterio SEM vaizdas, parodantis boro prasiskverbimą į  $p^+$ –n sandūrą [94]

## 2.4. AKYTOJO SILICIO DARINIŲ TYRIMŲ METODIKA

**SEM paviršiaus morfologijos tyrimai.** Sluoksnių paviršiaus mikromorfologija buvo tiriama, naudojant skenuojančios elektroninės mikroskopijos metodą [95]. Šis metodas pagrįstas sufokusuoto elektronų pluoštelio sąveika su tiriamu paviršiumi. Siaurąjį, sufokusuotą elektronų pluoštelį, paprastai charakterizuoja trys parametrai – pluoštelio srautas ( $10^{-12}$ – $10^{-6}$  A), pluoštelio diametras (5 nm – 1  $\mu$ m) ir pluoštelio skleisties kampas ( $10^{-4}$ – $10^{-2}$ ). Šių parametru reikšmės lemia elektronų mikroskopo skiriamąją gebą. Tyrimo metu bandinys patalpinamas į vakuuminę kamerą, kur jo paviršius skenuojamas elektronų pluoštelio. Pluoštelio sąveikos su paviršiumi metu vyksta tamprus bei netamprus elektronų išbarstymas ir mikroskopo skaitikliai fiksuoja šių išbarstymų, o taip pat antrinių elektronų bei kitus signalus, priklausomai nuo prietaiso galimybių. Ekrane matomas elemento dydis (D) apsprendžiamas pasirinktu didinimu ir yra lygus 100  $\mu$ m/kartų, (pavyzdžiui, esant  $10^4$  kartų didinimui, matomo elemento dydis yra 0,01  $\mu$ m).

Bandinių SEM tyrimai buvo atlikti Varšuvos fizikos institute skenuojančiu elektroniniu mikroskopu JEOL 6400 SEM.

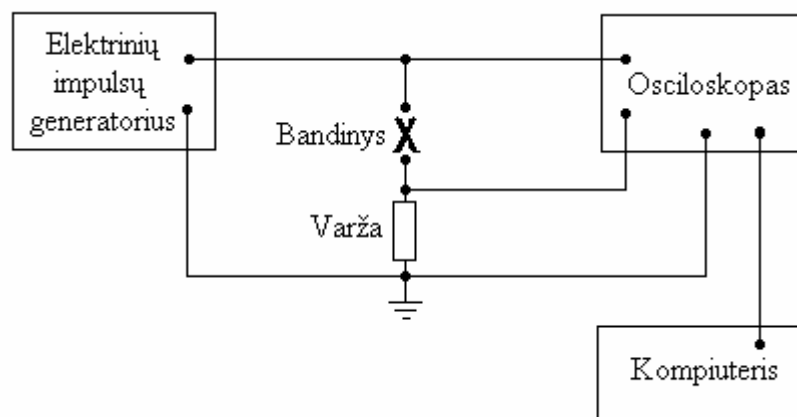
**AFM smulkiųjų darinių paviršiaus tyrimai.** Be SEM morfologijos tyrimų sluoksnių paviršius buvo analizuojamas kambario temperatūroje atominių jėgų skenuojančiojo zondo mikroskopu (AFM). Paviršiaus topografija buvo matuojama, naudojant virpančiojo zondo darbo režimą (Tapping mode), kuris leidžia negadinant paviršiaus gauti detalius reljefo atvaizdus, o fazinis vaizdas leidžia spręsti apie medžiagos trinties kietumo savybes. Akytojo silicio sluoksnių reljefų topografijos tyrimai buvo atlikti Pუსlaidininkų fizikos institute skenuojančiojo zondo atominių jėgų mikroskopu D3100/Nanoscope Iva (Veeco Metrology grup).

**Fotoluminescencijos matavimo metodika.** Silicio, kaip ir kitų medžiagų, nanodariniuose pasireiškia erdvinio kvantinio ribojimo efektas, dėl kurio praplečiama draudžiamųjų energijų juosta ir padidėja spindulinės rekombinacijos tikimybė [4]. Todėl silicio nanodariniai, skirtingai nuo makroskopinio kristalinio silicio, pasižymi intensyvia liuminescencija matomoje optinio spektro srityje. Liuminescencijos juostos maksimumo padėtis yra betarpiškai susieta su nanodarinių (nanokristalų, nanosiūlų, nanoplokštelių, nanoklasterių) matmenimis (1.12 pav.), ir gana išsamiai aprašoma empirine formule [4]:

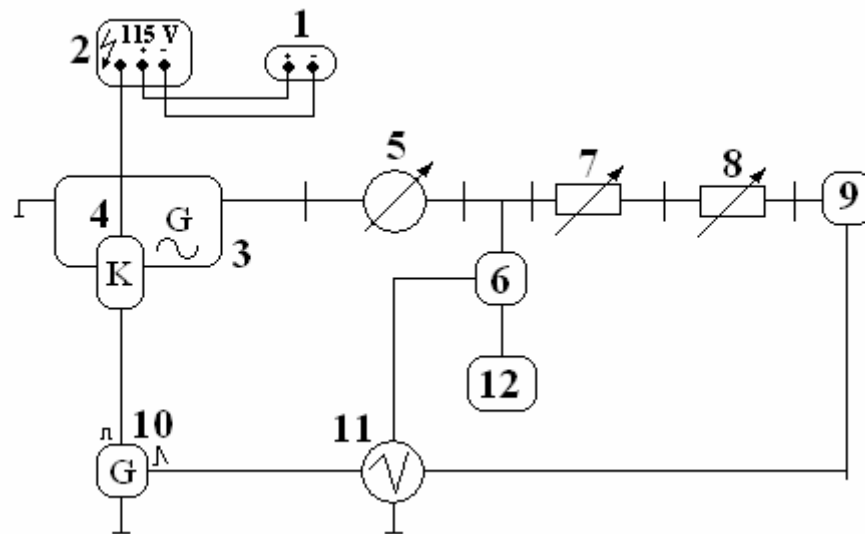
$$E = E_0 + \frac{3.73}{d^{1.39}}, \quad (2.1)$$

čia  $E_0$  – kristalinio silicio draudžiamųjų energijų juostų tarpas, o  $d$  – nanoertmių skersmuo. Liuminescencijos (dažniausiai fotoluminescencijos) tyrimai naudojami silicio nanodarinių matmenims nustatyti. Mūsų paskaičiuotas (pagal planuojamą ASi darinių technologiją) pagrindinio ASiS2 sluoksnio aktyumas turėjo siekti  $\sim 75\%$ . Tokio aktyumo dariniuose išliekančio kamieno matmenys paprastai yra mažesni negu (5÷10) nm dydžio. Todėl buvo tikėtasi, kad ASiS2 tinkle jau pasireikš kvantinis pagavimo efektas, ir bus stebima atitinkama fotoluminescencijos juosta. Disertaciniame darbe iš fotoluminescencijos matavimų buvo įvertinti silicio nanodarinių matmenys ASiS2 sluoksniuose. Fotoluminescencijos tyrimai atlikti “X” spektrografu, sužadavimo šaltiniu, naudojant ksenono lempą [2A, 7A].

**Bandinių elektrinių charakteristikų tyrimo metodika.** Elektriniai ASiS darinių parametrai buvo nustatomi, matuojant voltamperines bandinių charakteristikas. Šiems matavimams atlikti buvo surinkti matavimų standai (charakteriografas TR–4805 ir Agilent 4156C) (žr. 2.8 pav.). Matavimai buvo atliekami leidžiant pastovią srovę, arba trumpus impulsus pritaikytus tirti lustų (integrinių mikroschemų) atskirus elementus. Matuojant abiem būdais buvo gaunamos vienodos voltamperinės charakteristikos. Tokiu būdu parodyta, kad esant įtampoms  $< 5$  V džaulinė šiluma, matuojant pastovios srovės režime, neįtakoja bandinių charakteristikų. Voltamperinės charakteristikos matavime (0÷1) V arba (0÷5) V įtampų intervaluose.



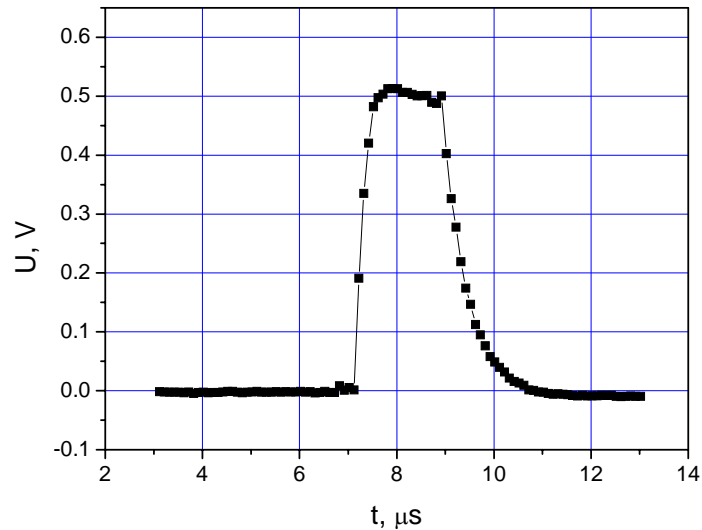
2.8 pav. Voltamperinių charakteristikų matavimo schema



2.9 pav. Mikrobangų spinduliuotės įrangos ir matavimų blokinė schema:

- 1 – 27 V srovės šaltinis; 2 – 115 V 400 Hz srovės šaltinis; 3 – didelės galios elektromagnetinės spinduliuotės generatorius; 4 – komutacinis blokas; 5 – ventilis; 6 – kontrolinis detektorius; 7 ir 8 – slopintuvai; 9 – bangolaidžio galvutė su bandiniu; 10 – impulsinis generatorius; 11 – oscilografas; 12 – suderintoji apkrova

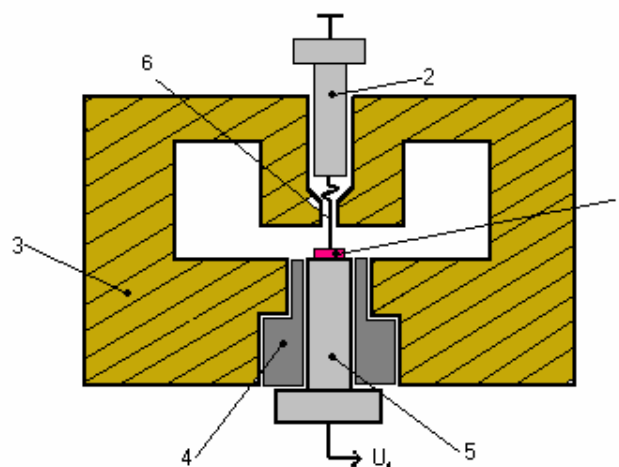
**Superaukšto dažnio spinduliuotės poveikio ASi dariniams tyrimo metodika.** ASiS darinių tyrimams supraukšto dažnio (SAD) spinduliuotės lauke buvo panaudota Puslaidininkų fizikos institute sukurta ir išvystyta metodika, kuria sėkmingai buvo tiriami karštųjų krūvininkų efektai  $n-n^+$ ,  $p-p^+$  ir nevienalyčių puslaidininkų struktūrose [96]. Pagrindinis šios metodikos privalumas, tiriant karštųjų krūvininkų efektus puslaidininkuose, yra galimybė galvaniškai atskirti poveikio ir matavimo grandines. Matavimuose naudotos įrangos schema pavaizduota 2.9 paveiksle. Superaukšto dažnio spinduliuotė, gaunama naudojant impulsinį magnetroninį generatorių (3) (maitinimas 115 V, 400 Hz įtampa). Magnetroninis generatorius skleidė 10 GHz dažnio spinduliuotės 2  $\mu$ s trukmės impulsus, kurių galia siekė (8÷10) kW. SAD spinduliuotės šaltinis buvo valdomas generatoriaus 2  $\mu$ s trukmės impulsais ir 40 Hz pasikartojimo dažniu. Naudojant trumpus spinduliuotės impulsus ir mažą jų pasikartojimo dažnį išvengiama bandinių kristalinės gardelės kaitimo. Mikrobangų spinduliuotės galia buvo tolygiai keičiama slopintuvais (7 ir 8). Kontrolinį detektorių (6) naudojome generatoriaus išėjimo galios kontrolei. Bandinio (9) signalai buvo registruojami oscilografu „Agilent 54642A”. Tiriant atsaką į SAD spinduliuotės poveikį, matavome ASiS darinių elektrovarą, atsirandančią atviruose bandinio kontaktuose,



2.10 pav. Superaukšto dažnio spinduliuotės impulso forma

bei bandinių elektrinio laidumo pokyčius. Pirmuoju atveju, signalas iš bandinio buvo paduodamas tiesiogiai į oscilografo įėjimą. Antruoju atveju, prisitaikant prie bandinio tvirtinimo bangolaidžio sekcijos sąlygų, signalas buvo registruojamas, diferencialiniu būdu, naudojant nuosekliai bandiniui pajungtą apkrovos varžą, nustatančios srovę per bandinį (2.10 pav.). Abiem atvejais šaltinių varža buvo mažesnė už oscilografo įėjimo varžą.

Tiriamieji bandiniai buvo tvirtinami specialiojoje stačiakampio bangolaidinio trakto sekcijoje su susiaurinimu ties plačios sienelės viduriu (2.11 pav.). Tokio susiaurėjimo paskirtis yra padidinti elektrinio lauko stiprį. Elektrinio lauko stiprį  $E$  susiaurėjime ir mikrobangų spinduliuotės impulso galią  $P$  sieja sąryšis  $E \approx 90\sqrt{P}$ , tuo tarpu nesusiaurintame bangolaidyje  $E \approx 30\sqrt{P}$  [26].



2.11 pav. Bangolaidinės galvutės su bandinių struktūrinė schema. 1 – ASi darinių bandinys; 2 – zondo laikiklis; 3 - korpusas; 4 - izoliacinis absorberis; 5 - kristalo laikiklis; 6 – zondas.

## **2.5. ANTROJO SKYRIAUS IŠVADOS**

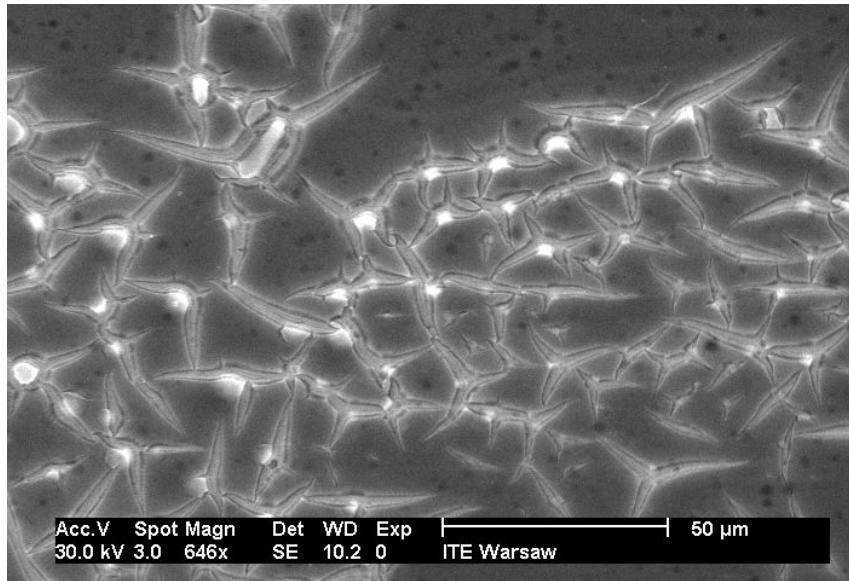
1. Sukonstruota, pritaikyta numatytiems tikslams ir optimizuota akytojo silicio darinių elektrocheminio ėsdinimo įranga.
2. Pagaminti keturių skirtingų tipų akytojo silicio dvipoliai dariniai, skirti tyrimams superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės lauke.
3. Aprašyta naudojama akytojo silicio darinių eksperimentinių tyrimų metodika: skenuojanti elektroninė mikroskopija, atominių jėgų skenuojančio zondo mikroskopija, fotoluminescencija, elektrinių charakteristikų matavimo ir superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės lauke tyrimo standai.

### **3. SILICIO SLUOKSNIŲ MORFOLOGIJOS IR SANDAROS TYRIMAI**

#### **3.1. AKYTŪJŲ SLUOKSNIŲ PAVIRŠIAUS MORFOLOGIJA**

Monokristalinio akytojo silicio sluoksnių paviršiaus morfologija buvo tirta skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos (SEM) metodu. Elektrochemiškai ęsdinto paviršiaus SEM nuotraukos pateiktos 3.1 ir 3.2 paveiksluose. ęsdinant p-Si elektrolitu, sluoksnio paviršiuje susiformuoja ištisa šviesi matinė plėvelė. Tačiau po ęsdinimo plaunant ASi etanolyje, o paskui distiliuotame vandenyje ir džiovinant ore, šis ištisas ASi sluoksnis suskyla, kaip teigiama mokslinėje literatūroje, dėl didelio vandens paviršiaus įtempimo jėgų [97]. Taigi, visai suformuotas ASi darinys yra suskilęs į didesnius ar mažesnius segmentus, atskirtus įvairaus gylio plyšiais. Segmentų dydis, plyšių plotis bei gylis labai priklauso nuo ASi sluoksnio storio, jo akytumo bei drėkinančiojo skysčio paviršiaus įtempimo koeficiento vertės. Tačiau džiovinimo stadijoje papildomai naudojant mažu paviršiaus įtempimo koeficientu pasižymintį skystį, visuomet lieka pavojus nekontroliuojamai paveikti patį ASi sluoksnį. Todėl, kad būtų išvengta nepageidaujamo ir neištirto naujų chemikalų poveikio, ASi buvo plaunamas distiliuotu vandeniu, kaip įprasta. Iš SEM nuotraukos (3.1 pav.) matyti, kad, ASiS suskyla į segmentus, kurių dydis yra 10 μm eilės. Segmentai perskirti įplyšimais, kurių plotis viršutinėje dalyje yra (1÷2) μm tai geriau matoma su didesne SEM skiriamąja geba (3.2 pav.). Pagamintame ASi darinyje išsiskiria skirtingo akytumo sluoksnių sritys. Arčiau paviršiaus yra įplyšęs mažesnio akytumo sluoksnis ASiS1. Plyšys yra apverstos trapecijos (žiūrint iš viršaus, 3.2 pav.) formos, kurios pagrindas daugiau nei dviem kartais mažesnis už viršų, t. y. plyšys siaurėja einant į bandinio gylį. Tiriant įvairiais kampais paviršiaus atžvilgiu padarytas nuotraukas, buvo įvertintas ASiS1 storis  $d_1$ , kuris siekė  $d_1 \sim (2\div 4) \mu\text{m}$ . Šis rezultatas  $d_1 = 15 \text{ nm/s} \times 300 \text{ s} = 4,5 \mu\text{m}$ , gerai atitinka mūsų paskaičiuotą pagal ęsdinimo laiką ir ęsdinimo greitį ir žinomą iš literatūros [15].

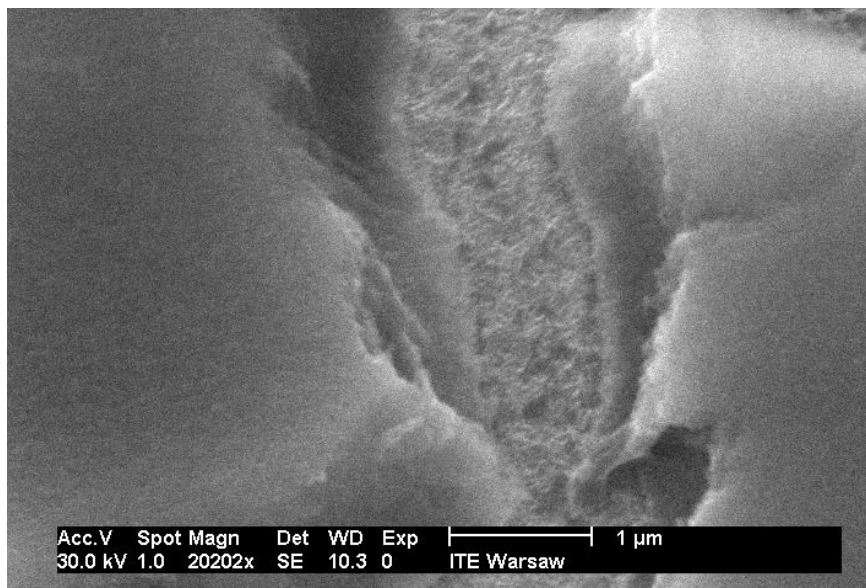
3.2 paveiksle yra matoma, kad giliau už mažo akytumo ASiS1 sluoksnio matomas žymiai didesnio akytumo ASiS2 sluoksnis. Nors ASiS1 mezoakytasis sluoksnis suplyšo į segmentus ASiS2 įplyšimas labai menkas arba iš viso nepastebimas. Tai paaiškinama didesniu ASiS2 akytumu ir mažesniais kamieno skersinių matmenimis. Dėl didesnio akytumo ir tinklo (kempinės) tipo struktūros ASiS2 kamienas yra palankesnis mechaninei deformacijai už ASiS1 sluoksnį. Deformuojant ASiS2 sluoksnį, ASiS1 sluoksnis tik pasislenka, nesuplėšydamas ASiS2 sluoksnio. ASiS2 akytumas įvertintas iš ASi kamieno ir ertmių ploto yra didesnis negu  $\sim 2/3 \times 100 \% = 67 \%$ . Jo akytumas atitinka technologinių



3.1 pav. ASi paviršiaus SEM nuotrauka (didinimas 646 kartai)

etapų numatytus parametrus.

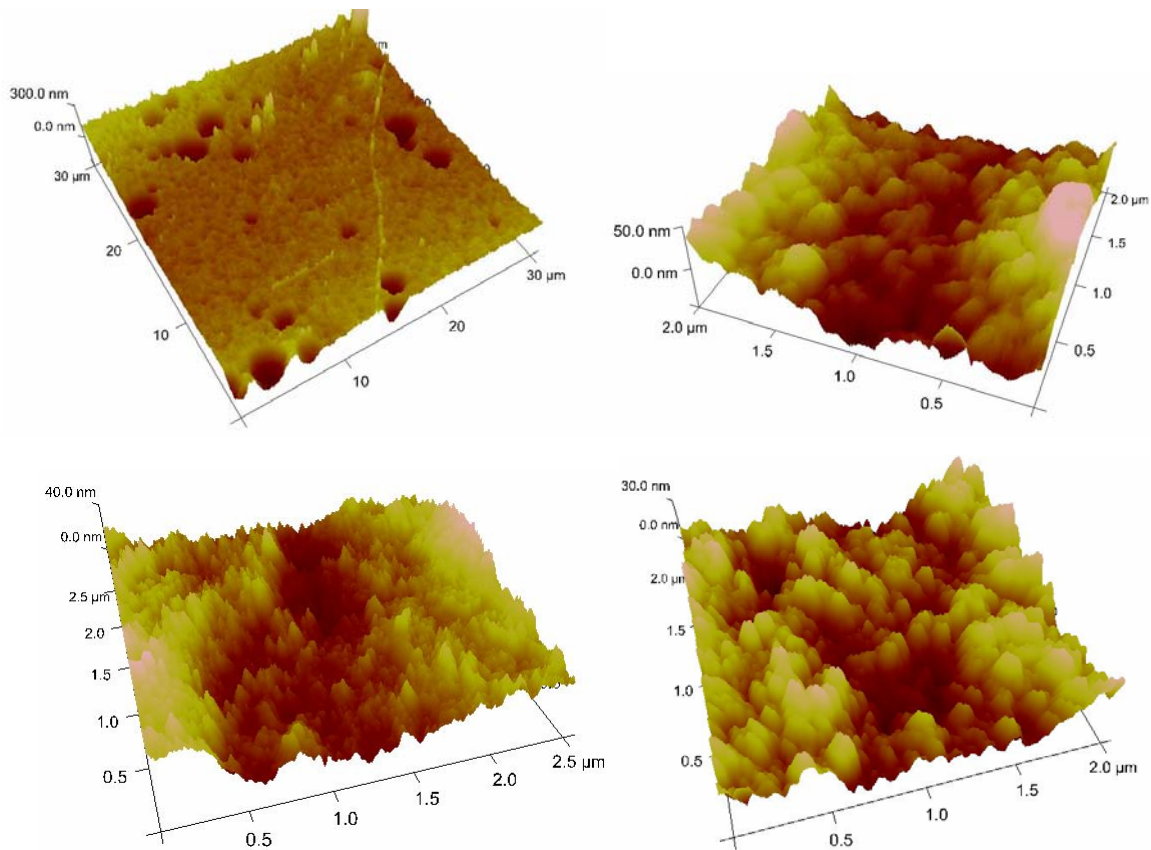
Viršutinio ASi sluoksnio akytumas matomas iš atominių jėgų mikroskopijos (AJM) nuotraukų (3.3 pav.). AJM vaizdai rodo, kad ASiS1 segmentai turi smulkesnę ertmių ir kamieno tinklo struktūrą, kurioms būdingas matmenų vidurkis yra ~ 100 nm. Tokiu būdu mūsų suformuotas ASiS1 atitinka mokslinėje literatūroje egzistuojanti mezoaktytojo silicio



3.2 pav. ASi SEM nuotrauka skersai aktytojo sluoksnio  
(didinimas 20202 kartų)



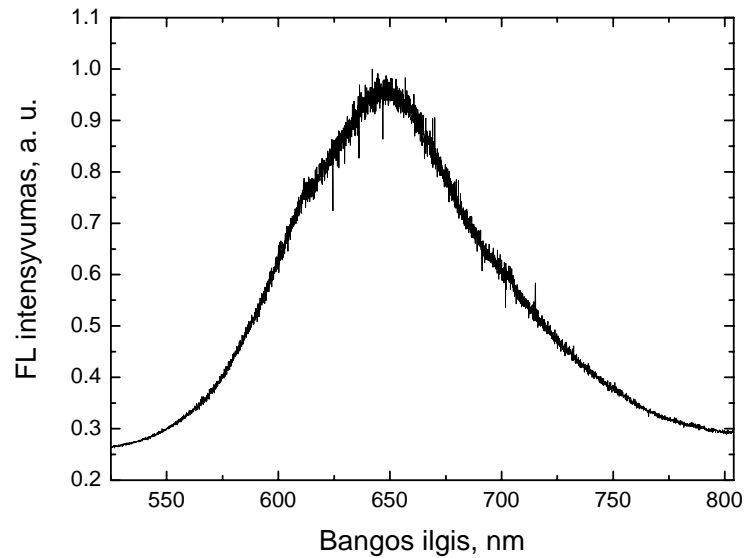
struktūros apibrėžimą [48]. ASiS2 sluoksnio AJM ištirti nepavyko, kadangi jis yra kelių mikrometrų gylyje ir sunkiai pasiekiamas AJM zondų. Apie šio sluoksnio struktūrą sprendėme, tik analizuodami fotoluminescencijos tyrimų rezultatus, iš kurių buvo įvertinti ASiS2 kamienų, kuriančių silicio nanokristalitų charakteringieji matmenys.



3.3 pav. ASi sluoksnių paviršiaus vaizdai, gauti tiriant atominių jėgų mikroskopu

## 3.2. AKYTOJO SILICIO DARINIŲ FOTOLIUMINESCENCIJA

Nustatyta, jog liuminescenciją matomoje srityje aktyjame silicyje lemia erdvinio kvantinio ribojimo efektas Si nanometrinių dydžių kristaluose arba klasteriuose. Fotoluminescencijos (FL) spektro padėtis atspindi tų nanokristalitų matmenis. Todėl FL tyrimai yra patogus metodas (instrumentas) kristalitų matmenų įvertinimui, naudojantis (2.1) išraiška arba panašiu empiriniu sąryšiu tarp spinduliuotės spektrinės padėties ir kristalitų matmenų. Disertaciniame darbe fotoluminescencijos tyrimai buvo panaudoti ASi klasterių charakteringiems matmenims nustatyti ASiS2 sluoksnyje. Spektrams tirti naudota 2 skyriuje aprašyta metodika.



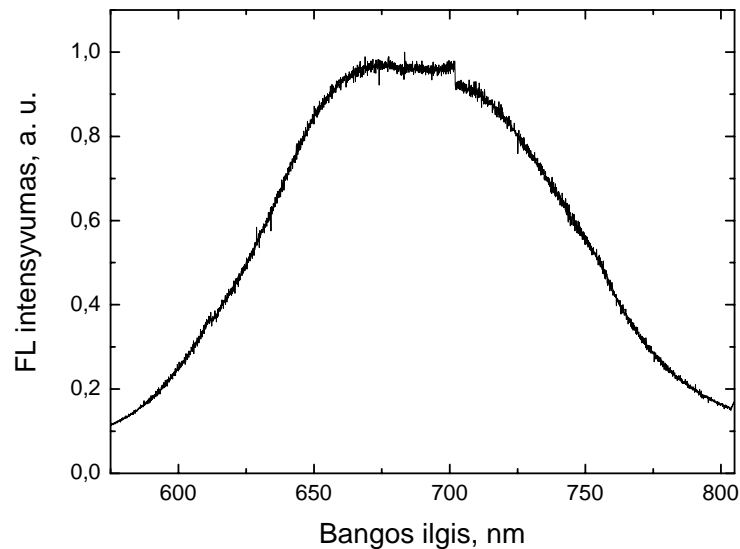
3.4 pav. ASi sluoksnių fotoluminescencijos spektras

Yra žinoma, kad intensyviai švyti tik nanometriniai ASi sluoksniai, kuriuose pasireiškia kvantinio ribojimo efektas [32]. Spinduliuotės spektro padėtį griežtai apsprendžia silicio nanodalelių matmenys [37]. Atsižvelgiant į ęsdinimo srovės tankį, ASi viršutinis sluoksnis (ASiS1) turėtų būti apie 55 %, o pagrindinis (ASiS2) apie 75 % akytumo. Atitinkamai ASiS2 kamieno tinklo matmenys yra (4÷7) nm intervale [85]. Tokie ASi sluoksniai privalėtų švytėti raudonajame spektro ruože.

Mūsų atlikti tyrimai parodė, kad ASi darinio sritis, kurioje ASiS1 sluoksnio įplyšimų mažai arba jų beveik nėra, švyti labai silpnai, o liuminescencijos juostos padėtis itin sunkiai nustatoma. Šis rezultatas patvirtina anksčiau padarytas išvadas apie tai, kad ASiS1 sluoksnio struktūra priskiriama neliuminescuojančiam mezostruktūriniam siliciui. Ir priešingai, nustatėme, kad gera FL pasižymi ASi sritis, kurioje stebima (ASiS2 sluoksnyje). Remiantis tuo, galima teigti, kad kuo daugiau plyšių ASiS1 sluoksnyje, tuo daugiau atvirų ir prieinamų sužadanimui ASiS2 sluoksnio salelių, kurios ir liuminescuoja. 3.4 ir 3.5 paveiksluose pateikti dviejų skirtingų ASi darinių FL spektrai. 3.4 paveikslo FL juostos maksimumas yra ties  $\lambda \approx 650$  nm (kvanto energija  $E \approx 1,91$  eV). Liuminescencijos juosta beveik simetriška, kiek „pakilusi“ virš triukšmo lygio ties  $\Delta\lambda \approx (590\div 640)$  nm, o juostos pusplotis  $\Delta\lambda \approx 80$  nm.

Silicio nanokristalitų matmuo  $d$  įvertintas pasinaudojus empiriniu sąryšiu (2.1 formulė) [98]. Skaičiuojant iš spektro maksimumo ties  $E = 1,91$  eV ir silicio draustinės juostos pločio  $E_g$ , kai  $E_0 = 1,12$  eV [99], gaunama, kad spektro maksimumą atitinkančius spinduliuotės kvantus skleidžia silicio nanokristalitai, kurių matmenys  $d_1 \approx 3,1$  nm.

Atitinkamai, kvantus, kurių energija  $\hbar\omega < 1,91$  eV, skleidžia didesni kristalitai, o kvantus  $\hbar\omega > 1,91$  eV skleidžia kristalitai mažesni už 3,1 nm. Kadangi spektras trumpabangėje savo dalyje kiek „pakilęs“, galima teigti, kad tokio darinio ASiS2 sluoksnyje mažesnių kristalitų santykinai daugiau negu didesnių kristalitų.



3.5 pav. ASi sluoksnių fotoluminescencijos spektras

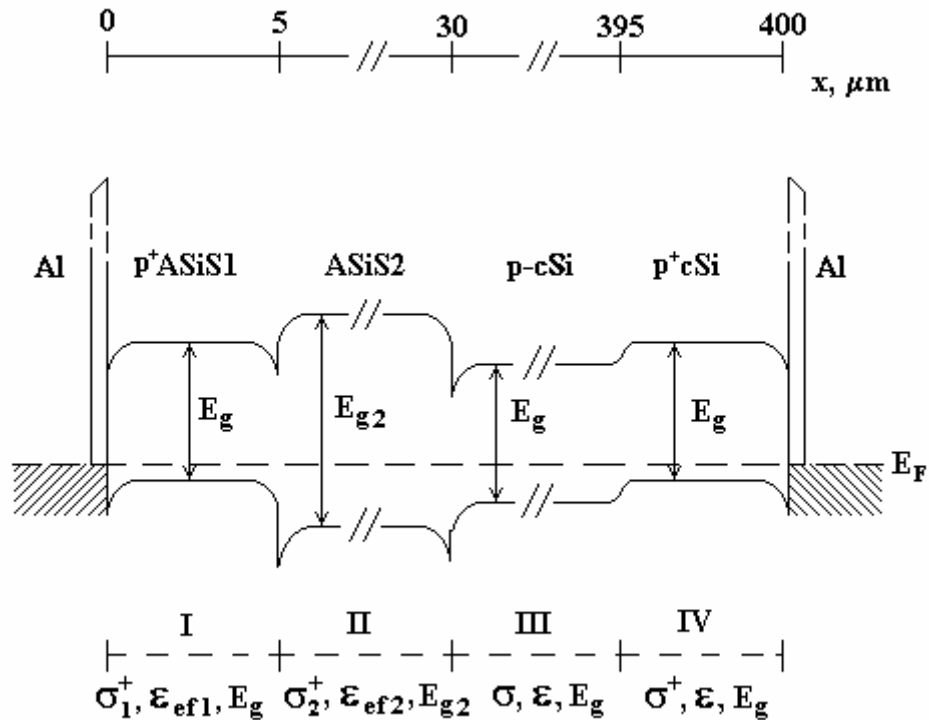
Antrojo bandinio FL spektras pateiktas 3.5 paveiksle. Jo maksimumo sritis, yra lėkštesnė ir nepasizymi aiškia maksimumo padėtimi. Spektro juostos vidurys yra panašioje padėtyje, kaip ir pirmuoju atveju, ties bangos ilgiu  $\lambda \approx 650$  nm. Vadinasi, šio bandinio dominuojančių silicio nanoklasterių (nanokristalitų) dydis ASiS2 sluoksnyje yra artimas ( $3 \div 5$ ) nm. Kadangi abu bandiniai buvo pagaminti vienodomis technologinėmis sąlygomis, buvo įvertinti tikimiausi silicio nanokristalitų matmenys ASiS2 sluoksnyje iš bendro abiejų spektrų puspločių užimamos srities  $\Delta E = (1,6 \div 2)$  eV. Tikėtina, kad nanokristalitų ASiS2 sluoksniuose matmenys yra intervale ( $2,8 \div 4,4$ ) nm.

Tokiu būdu iš fotoluminescencijos tyrimų nustatyta, kad mūsų ASi dariniai tikrai yra sudaryti iš dviejų skirtingų sluoksnių. Vienas jų (viršutinis ASiS1) yra santykinai makroskopinis (elemento matmenys siekė 100 nm). Toks akytasis silicis vadinamas mezoaktyuoju. Kitas sluoksnis ASiS2, pagal nusistovėjusią klasifikaciją, vadinamas mikroaktyuoju siliciu. Sluoksnis ASiS2 pasižymi aiškia fotoluminescencija, o jį sudaro nanometrinių dydžio silicio nanoklasterių (nanokristalitų) tinklas. Silicio nanoklasterių matmenys yra ( $2,8 \div 4,4$ ) nm. Dėmesį patraukia didelis spektro juostos plotis – nuo 650 nm iki 750 nm (pagal 1/2 intensyvumo maksimumo), atitinkamai (1,6–1,9) eV. Tai platesnė

sritis nei mokslinėje literatūroje žinomų vienalyčių ASi sluoksnių FL spektras [97, 98]. Platus fotoluminescencijos spektras rodo, kad mūsų ASi nanodariniuose dalelių pasiskirstymas pagal dydžius yra įvairesnis nei vienalyčiuose ASi sluoksniuose, o tai dar kartą patvirtina, kad mūsų nevienalyčio ASi darinio struktūra, sudaryta iš dviejų skirtingo aktyvumo sluoksnių.

Atlikti ASi morfologijos bei FL tyrimai leidžia sudaryti bandinio energijos juostų diagramą. Diagrama atitinka B'–tipo bandinį, su galuose suformuotais metaliniais (šiuo atveju, aliuminio) kontaktais (3.6 pav.).

Paveiksle pavaizduotos draustinės energijos juostos  $E_i$  įvairioms bandinio dalims, o taip pat elektrinis laidumas  $\sigma_i$ , dielektrinė skvarba  $\epsilon_i$  bei apytiksliai nurodyti atskirų dalių storiai. Kryptis iš kairės į dešinę atitinka kryptį gilyn nuo aktytojo silicio paviršiaus į kristalinį silicį. Akytojo silicio sluoksnio ASiS1 paviršiuje esantis Al kontaktas gali būti atskirtas krūvininkų tuneliavimui skaidriu oksido sluoksniu. Po kontaktu yra pagalbinis ASiS1 sluoksnis. Jo storis yra apie 5  $\mu\text{m}$ . Kadangi jis yra papildomai legiruotas (B'–tipo ir C–tipo bandiniai) boru, tai jo laidumas  $\sigma^+$  yra didesnis už pradinės Si plokštelės laidumą  $\sigma$ . Erdviniai kvantiniai efektai ASiS1 sluoksnyje nepasireiškia, todėl draustinės energijos juostos plotis jame yra lygus draustinės energijos juostos pločiui cSi  $E_g$ . Dielektrinės skvarbos efektyvi vertė yra  $\epsilon_{\text{ef1}}$ , kadangi sluoksnis sudarytas iš tuščiųjų ertmių ir kristalinio kamieno tinklo. Giliau yra aktytasis sluoksnis ASiS2. Jo laidumas  $\sigma_2$ , dielektrine skvarba  $\epsilon_{\text{ef2}}$  ir draustinės juostos plotis  $E_{g2}$ . Kaip rodo FL tyrimai,  $E_{g2}$  yra didesnė už kristalinio silicio draustinės juostos plotį  $E_g$  ir patenka į intervalą  $E_{g2} \in (1,6 \div 1,9)$  eV. Todėl ASiS1 ir ASiS2 riboje turėtų egzistuoti potencinis barjeras. Paprastai didelio aktyvumo sluoksniai turi mažesnę elektrinį laidumą, todėl Fermi lygmuo gali būti ties  $E_g$  viduriu, kaip ir netvarkių puslaidininkių atveju. ASiS2 storis yra apie (20÷25)  $\mu\text{m}$ . Dar giliau yra neįsūdintas cSi su savais parametrais  $\sigma$ ,  $\epsilon$  ir  $E_g$ , o prie kontakto pagrindo vėl papildomai legiruotas  $p^+$  cSi sluoksnis, besiskiriantis nuo pradinės plokštelės tik didesniu laidumu  $\sigma^+$ . ASiS2 ir cSi riboje taip pat egzistuoja potencinis barjeras dėl draustinės energijos juostų pločių skirtumo ASiS2 sluoksnyje ir cSi. Atkreipiame dėmesį į tai, kad šis barjeras yra priešingos krypties, lyginant su ankstesniu ASiS1 ir ASiS2 ribos barjeru. Tokiu būdu mūsų bandinių energetinė diagrama (schema) atitinka dviejų priešpriešiais sujungtų izotopinių barjerinių sandūrų schemą. Tokia schema dažnai naudojama aiškinant ASi dvipolių darinių savybes. Tačiau skirtingai nuo mūsų atvejo, kituose moksliniuose darbuose pirmojo diodo vaidmuo paprastai tenka metalo ir ASi kontaktui. Tuo tarpu disertacijoje tirtuose bandiniuose dėl kvantinio erdvinio ribojimo efekto abu energiškai simetriniai barjerai, yra ASiS2 sluoksnio galuose. Būtina pažymėti,



3.6 pav. Akytojo silicio sluoksnių nanodarinio juostinė diagrama.

kad 3.6 paveiksle pavaizduota diagrama yra kiek supaprastinta, kadangi joje neatsižvelgta į galimas lokalias būsenas sluoksnių ribose, kurios turėtų sumažinti barjero aukštį [100, 101, 102].

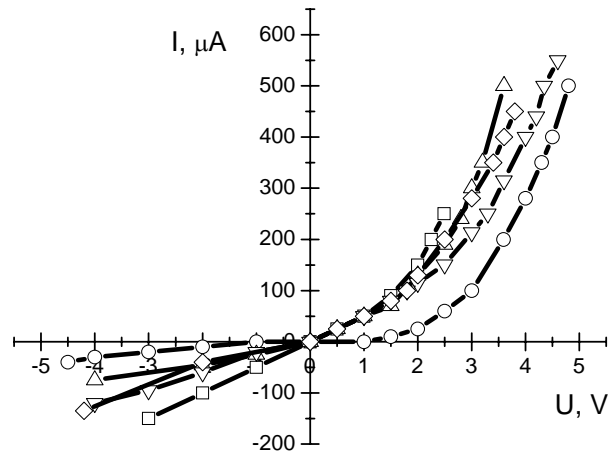
### 3.3. TREČIOJO SKYRIAUS IŠVADOS

1. Atlikti akytojo silicio paviršiaus morfologiniai bei jo sluoksnių kontroliniai fotoluminescencijos tyrimai.
2. Nustatyta, kad akytas silicis tirtuose dariniuose susideda iš dviejų sluoksnių – mažesnio akytumo paviršinio ir didesnio akytumo gilesnio sluoksnio.
3. Panaudojant fotoluminescencijos tyrimų rezultatus parodyta, kad akytojo silicio kamieną sudarančių elementų matmenys yra (3÷5) nm ruože.
4. Gautų rezultatų pagrindu sukurta akytojo silicio sluoksnių nanodarinio juostinė diagrama. Juostinėje diagramoje parodyta, kad tarp akytojo silicio sluoksnių egzistuoja izotipinėms heterogeninėms sandūroms būdingi potencialiai barjerai.

## **4. ELEKTRINĖS AKYTOJO SILICIO DARINIŲ SAVYBĖS**

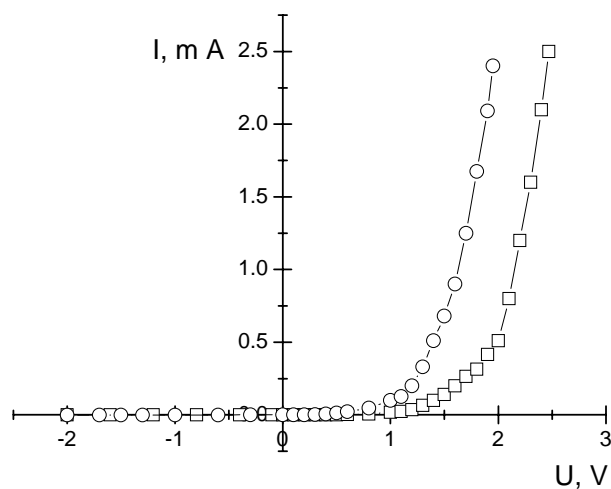
Elektrinio krūvio pernaša ir su ją susieti reiškiniai ASi sluoksniuose tirti daugelyje mokslinių darbų. Tyrimo objektai dažniausiai buvo skirti arba elektroluminescencijos tyrimams, arba taikomiesiems tyrimams: fotodetektorių, cheminių ir biocheminių jutiklių, saulės elementų ir panašiai gamybai. Objektų įvairovė pagal paskirtį, technologijos parametrus, pradines medžiagas ir skirtingą bandinių geometriją apsunkina ASi elektrinių savybių apibendrinimą. Todėl dauguma dabar egzistuojančių išvadų apie ASi elektrinę krūvininkų pernašą turi būti vertinama su tam tikromis išlygomis, labai atidžiai lyginant pradines medžiagas, visas technologijos sąlygas ir galutinio objekto parametrus (jų galima surinkti ne mažiau nei 10) bei jų kombinacijas. Akytąją silicį galima traktuoti kaip puslaidininkinį objektą. ASi darinių elektrodams gaminti buvo išbandytos įvairios medžiagos: Al, Ni, Au, laidūs indžio–alavo oksido sluoksniai ir kiti. Priklausomai nuo elektrodų medžiagos ir technologijos gaunamos įvairios voltamperinės charakteristikos (VACH) [101]. Šiame skyriuje pateikiami disertacijoje aprašytų bandinių voltamperinių charakteristikų ir varžos tyrimai. Šie duomenys vertinami kaip pagalbini, vėliau padedantis suvokti superaukšto dažnio spinduliuotės poveikį ASi dariniams.

Elektrinių savybių tyrimų nagrinėjimą pradėsime nuo technologiškai paprastesnių A–tipo ir kontrolinių bandinių voltamperinių charakteristikų. 4.1 paveiksle pateiktos kelių A–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos. Gaminant A–tipo bandinius, kaip minėta, nei į akytojo silicio sluoksnį, nei į Si pagrindą nebuvo atliekama boro difuzija. Iš 4.1 paveikslo matome, kad visų šio tipo bandinių voltamperinės charakteristikos yra netiesinės, nesimetrinės su ryškiu lyginimo efektu. Tokia VACH eiga būdinga metalaspuslaidininkis struktūros Schottky barjerui, arba izotipinei labai nesimetrinei  $p-p^+$  arba  $n-n^+$  sandūrai, kurioje erdvinis krūvis susitelkęs didesnės varžos puslaidininkyje. Tačiau VACH forma tolima nuo daugiau ar mažiau idealaus diodo charakteristikos. Neabejotinai tai nulemta sudėtingos ASi sandaros bandinio tūryje ir paviršiuje. Bandinio tūryje egzistuoja potencialiai barjerai ASiS2 srities galuose, o bandinių paviršiuose galimi Schottky tipo barjerai Al/ASiS2 ir Al/cSi ribose. Atsižvelgiant į ASi paviršiaus morfologiją galima manyti, kad viršutinis, kontaktinės aikštelės, Al sluoksnis glaudžiasi ne tik su ASiS1, bet ir su ASiS2 sluoksniu. Tuomet erdvinio krūvio sritys ASiS1 dalyje gali būti užšuntuota Al sluoksniu. Neatmetama galimybė, kad pasireiškia ir lokaliniai stipraus lauko efektai, lemiantys netiesiškumą. Atsižvelgiant į šiuos ypatumus labai sunku analizuoti ir vertinti A–tipo bandinių voltamperinių charakteristikų eigą. Siekdami tai išaiškinti, panagrinėsime ir palyginsime



4.1 pav. A–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos

modifikuotų bandinių matavimų rezultatus. Kaip rašyta 2.3 skyriuje, B–tipo bandiniai buvo patobulinti, lyginant su A–tipo bandiniais. Apatinėje plokštelės dalyje buvo suformuotas  $p^+$  sluoksnis, kurio paskirtis yra pagerinti kontaktą su pagrindu. Eksperimentas parodė, kad B–tipo bandiniai iš tikrųjų yra tobulesni už A–tipo bandinius. Tai atspindėjo jų voltamperinės charakteristikos pateiktos 4.2 paveiksle. Kaip ir A–tipo bandinių atveju, voltamperinės charakteristikos yra asimetrinės. Tačiau, lyginant su ankstesnėmis charakteristikomis, jose lyginimo efektas labiau išreikštas. Charakteristikų forma pralaidžiąja kryptimi (teigiamas polius prie pagrindo, neigiamas prie ASi sluoksnio) yra artimesnė voltamperinei charakteristikai diodo su plonu akytojo silicio sluoksniu [101]. Ja aprašome naudodami išraišką [103]:



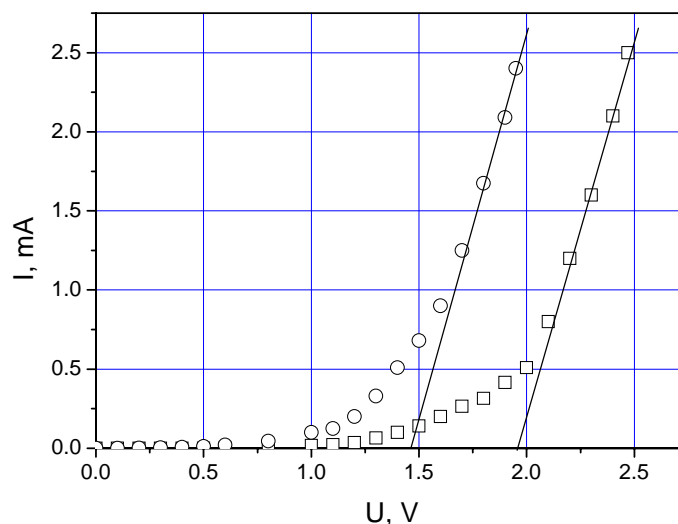
4.2 pav. B–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos

$$I = I_0 \exp\left[\frac{e}{mkT}(V - IR_s)\right], \quad (4.1)$$

kurioje atsižvelgiama į potencialinio barjero aukštį (įeina į  $I_0$  išraišką [104]), diodo idealumo koeficientą  $m$ , pridėtos įtampos dydį  $V$ . Taip pat atsižvelgiama ir į nuosekliają darinio varžą  $R_s$ . Tai akivaizdžiai matoma, kai iš lygties (4.1) užrašoma dinaminės varžos  $r$  išraiška:

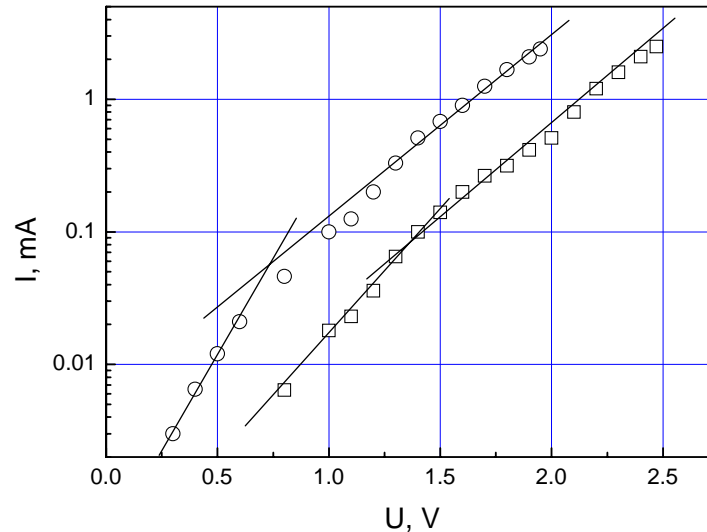
$$r = \frac{dV}{dI} = \frac{mkT}{eI_0} \exp\left[-\frac{e}{mkT}(V - IR_s)\right] + R_s = \frac{mkT}{eI} + R_s. \quad (4.2)$$

Iš 4.2 lygties matyti, kad, esant didelėms srovėms  $I$  kai įtampa  $\sim 2$  V, dešinėje lygties pusėje pirmasis narys yra žymiai mažesnis lyginant su antruoju, o voltamperinė charakteristika gali būti aproksimuojama tiesiąja linija, iš kurios polinkio (išvestinės) nustatomas nuosekliosios varžos dydis. Tokios ekstrapoliacijos pavyzdys demonstruojamas 4.3 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad didesnių įtampų srityje ekstrapoliuojančių tiesių išvestinės yra artimos, vadinasi, visų bandinių nuosekloji varža  $R_s$  yra praktiškai vienoda (apytiksliai  $R_s \sim 1 \cdot 10^3 \Omega$ ). Geras pasikartojamumas, liudija, kad naudojamos technologinės operacijos, tiek akytojo silicio elektrocheminis šėdinimas, tiek ir kontaktų gamyba vakuuminio garinimo būdu, buvo pakankamai tobulos.



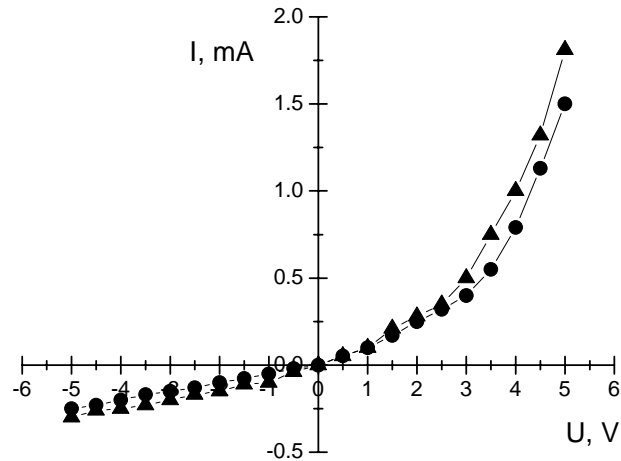
4.3 pav. B-tipo bandinių voltamperinės charakteristikos, demonstruojančios liekamąją nuosekliają varžą





4.4 pav. B-tipo bandinių voltamperinės charakteristikos, vaizduojančios idealumo koeficientą  $m$

Diodinių struktūrų idealumo koeficientas  $m$ , kurį galima nustatyti iš voltamperinių charakteristikų (žr. 4.4 paveikslą), dažnai yra naudojamas srovės pernašos mechanizmo identifikavimui [105]. Jo vertė atspindi srovės pernašos per sandūrą mechanizmo. Atsižvelgiant į sritį, kurioje vyksta krūvininkų perneša per diodinę struktūrą pratekančią srovę galima suskirstyti į kelias komponentes [105]. Kai idealumo koeficiento vertė  $m = 1$ , srovę sandūroje riboja krūvininkų emisija ir difuzija puslaidininkyje, esant  $m$  vertės artimai dvejetui, srovę lemia krūvininkų rekombinacija nuskurdintoje srityje. Dar didesnės  $m$  vertės rodo, kad diodinės struktūros voltamperinė charakteristika sąlygoja rekombinacija bei tuneliavimas tarpiniame sluoksnyje bei paviršinės būsenos atskirose darinio sąlyčio srityse [106, 107]. Akytojo silicio diodinių darinių voltamperinių charakteristikų analizei skirta nemažai mokslinių darbų. Daugelyje darbų pažymima, kad sričių riboje yra didelis paviršinių (tiksliau, lokalinių) būsenų tankis, kuris ir nulemia dideles  $m$  koeficiento vertes. Įvertintos idealumo koeficiento  $m$  vertės tiriamiesiems dariniams, patenka į intervalą nuo 2 iki 5. Tokie idealumo koeficientai būdingi storiems akytojo silicio sluoksniams [102, 107]. Iš tikrųjų mūsų įvertintos  $m$  reikšmės kiek didesnės, nei yra iš tikrųjų, kadangi, mes atsižvelgėme į barjero voltamperinę charakteristiką  $\ln I = \ln I_0 + \frac{q}{mkT}V$ . O tai reiškia, kad eksperimentinę VACH (4.4 pav.) reikia pakoreguoti, įskaitant įtampos šuolį nuosekloje varžoje  $R_s$ .



4.5 pav. B'–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos

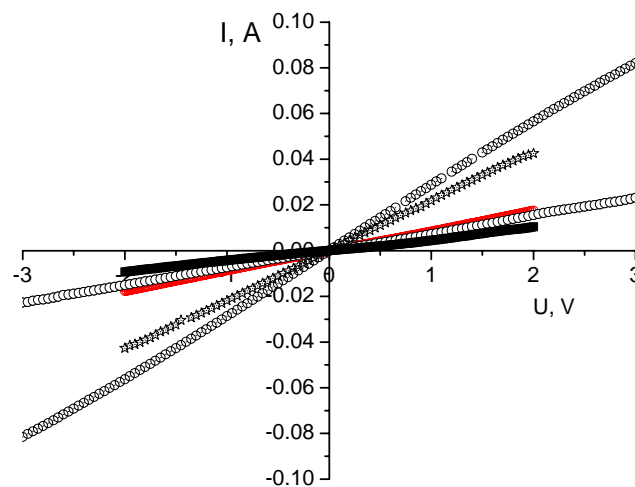
Panašios asimetrinės charakteristikos buvo gautos ir tiriant B'–tipo serijos bandinius. B'–tipo bandiniuose potencialiai barjerai priekontaktinės aikštelės ir ASiS1/ASiS2 riboje yra išnykę dėl išankstinio papildomo prie paviršinės Si plokštelės srities ( $\sim 5 \mu\text{m}$ ) legiravimo. Lyginant 4.3 ir 4.5 paveikslų grafikus matome, kad legiravimas daro įtaką voltamperinėms charakteristikoms. Srovės reikšmės pralaidžiąja kryptimi pasistūmėjo į didesnių įtampų pusę, o srovė užtvėriamąja kryptimi – padidėjo. Nors lyginimo efektas yra kiek švelnesnis lyginant su B–tipo bandiniais, tačiau jis vis tiek išliko. Taigi, srovės lyginimo efektą, mūsų bandiniuose, lemia potencialus barjeras darinio tūryje ASiS2 ir cSi riboje. Jau minėjome, kad izotipinio heteroenergetinio barjero egzistavimas ASi ir cSi riboje yra charakteringas mikroaktytojo silicio dariniams [100, 101, 102, 103]. ASiS2 kamieno elementų matmenys yra nanometrų dydžio ir juose pasireiškia erdvinio kvantinio ribojimo efektas. Dėl to padidėja ASi draustinės juostos plotis, ir tarp ASi ir cSi susiformuoja potencialus barjeras. Būtent toks izotipinis heteroenergetinis barjeras yra mūsų bandiniuose ties ASiS2 ir cSi riba (3.6 pav.). Idealumo koeficiento vertės šiems bandiniams yra gana didelės  $m \approx (3\div 9)$ . Tai rodo, kad darinio elektrinės savybės yra stipriai įtakojamos lokalinių (tarpfazinių arba paviršinių) būsenų aktytajame silicyje. To reikėjo tikėtis, kadangi didelis aktytojo silicio paviršiaus plotas ( $S/V \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ ) neišvengiamai įtakoja daugelį ASi darinių savybių. Paviršiaus būsenų tankiui įvertinti buvo panaudota metodika, išdėstyta darbe [104]. Jame teigiama, kad atsižvelgus į liekamąją varžą, dalis įtampos diodiniame darinyje pasidalija į potencialą, krentantį ant erdvinio krūvio srities  $V_p$  ir potencialą  $V_i$ , krentantį ant atominio mastelio tarpfazinės srities pločio  $\delta$ . Įtampos  $V_i$  dydis sąlygojamas paviršinėmis lokaliomis būsenomis, kurių tankis yra  $D_s$ . Manoma, kad tai silicio ir deguonies  $\text{SiO}_x$  ir tipo  $\text{SiH}_y$  ir  $\text{SiF}_z$

kompozitai [108]. Tokiu atveju [106]:

$$m = 1 + \frac{\varepsilon_s \delta}{\varepsilon_i w} + \frac{e D_s \delta}{\varepsilon_i}, \quad (4.3)$$

čia  $\varepsilon_s$  ir  $\varepsilon_i$  – dielektrinės skvarbos, atitinka puslaidininkio ir tarpfazinę sritį,  $\delta$  – oksido storį,  $w$  – erdvinio krūvio sritį. Laikant, kad  $\varepsilon_s = 11,9$  ir  $\varepsilon_i = 3,9$ , o  $\delta = 2,5$  nm, buvo gauta, kad paviršinių būsenų tankis  $D_s = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , kai  $m = 3,8$  ir  $D_s = 9,6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ , kai  $m = 10$ . Skaičiavimai parodė, kad duotuoju atveju paviršinių būsenų tankis (ypač B'-tipo bandiniuose) yra dar didesnis  $D_s \geq (10^{14} \div 10^{15}) \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ . Voltamperinių charakteristikų matavimai patvirtina akytojo silicio diodinių struktūrų modelį, kuriame barjerai yra išsidėstę darinio tūryje – nanostruktūrinių sluoksnių sandūroje su monolitiniu siliciu arba akytuoju, bet be kvantinio pagavimo efekto, sluoksniu [109]. A– ir B–tipo bandiniuose įtaką turi abu barjerai ASiS2 srities galuose ir barjeras prie kontaktinės aikštelės. Tačiau B'–tipo bandiniuose voltamperinių charakteristikų forma pagrindai lemia barjeras ASiS2 ir cSi sričių riboje. Taip pat voltamperinių charakteristikų matavimai patvirtina šiame darbe tiriamųjų akytojo silicio darinių energijos juostų modelį, pavaizduotą 3.6 paveiksle.

Visiškai kitokios voltamperinės charakteristikos buvo išmatuotos C–tipo serijos bandiniams. Priminsime, kad šio tipo bandiniai buvo gaminami iš pradžių elektrochemiškai formuojant akytojo silicio sluoksnių ASiS1 ir ASiS2 darinį, o tik po to atliekama boro difuzijos operacija. C–tipo bandinių varža buvo keliomis eilėmis mažesnė už A–tipo ir



4.6 pav. C–tipo voltamperinės charakteristikos

B–tipo bandinių varžą. C–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos, skirtingai nuo ankstesnių bandinių voltamperinių charakteristikų, buvo simetriškos ir tiesinės (žr. 4.6 pav). Voltamperinių charakteristikų ištiesinimo tendencija jau buvo galima išvelgti ir B'–tipo bandiniuose, kuriuose ASiS1 sluoksnis yra legiruotas prieš ėsdinimą. Taigi, boro difuzija ir akytojo silicio sluoksnyje susidariusi p<sup>+</sup>–sritis labai keičia darinio elektrines savybes. Galima teigti, kad akytajame silicyje difuzija vyko daug greičiau ir giliau, negu ji vyksta monolitiniame silicyje. Yra žinoma, kad priemaišų difuzijos procesą aprašo Fiko lygtys [109], kurios sprendinys priemaišų pasiskirstymui  $N(x, t)$ , esant fiksuotam šaltiniui yra:

$$N(x, t) = N_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2} \sqrt{Dt} \right) \right), \quad (4.4)$$

čia  $\operatorname{erf} \left( \frac{x}{2} \sqrt{Dt} \right)$  – Gauso paklaidų funkcija,  $N_0$  – priemaišų tirpumas. Jeigu skaičiavimuose būtų naudotasi monolitinio silicio parametrais, tai, esant vienos valandos operacijos trukmei, difuzija turėjo įvykti į 3÷5 μm gylį [94]. Tačiau tokiu atveju boras būtų difundavęs tik per ASiS1 sluoksnį, kurio storis yra ≈ 5 μm, o voltamperinėse charakteristikose būtų stebimas netiesiškumas, susietas, jei ne su barjeriais p<sup>+</sup>ASiS1/ASiS2 ir ASiS2/cSi sandūrose, tai bent su barjeru ASiS2/cSi sandūroje. Aiškinant C-tipo bandinių tiesines voltamperines charakteristikas, remsimės tuo pačiu sudėtinio pavienio ASi modeliu, pasiūlytu darbe [36]. Kaip jau minėjome, išsamesni ASi morfologijos tyrimai rodo, kad elektrochemiškai pagamintas ASi susideda iš trijų sluoksnių: viršutinio, turinčio amorfinę struktūrą, vidurinio – monokristalinio, nanometrinių matmenų kamieno, ir trečiojo sluoksnio, kurį sudaro statmenai, į paviršių nusidriekę nanometrinių dydžio kapiliarų kanalai. Tų kanalų gylis priklauso nuo daugelių faktorių ir gali būti nuo keleto nm iki šimtų nm [36, 110]. Iš mokslinės literatūros duomenų galima teigti, kad priemaišų difuzija akytajame silicyje pasižymi didele anizotropija. Difuzija į ASi kamieną, statmenai sienelėms, vyksta apytiksliai tuo pačiu greičiu kaip ir į cSi [94]. Panaši, bet netapati, boro difuzija į n–tipo akytajį silicio sluoksnį gaminant p–n sandūrą, aprašyta darbe [111]. Autoriai nustatė, kad boro difuzija vyksta visame akytojo silicio kamieno paviršiuje. Difuzijos metu, kuria jie vykdė vieną valandą 1100 °C temperatūroje, boras difundavo į akytojo silicio kamieno sienelės ~ 2,5 μm, tuo tarpu priemaišų difuzija kamieno paviršiumi gilyn į ASi difuzija vyko daug sparčiau. Yra duomenų, kad tokios „paviršinės“ difuzijos koeficientas net šimtus kartus viršija difuzijos koeficientą cSi, o difuzijos aktyvacijos energija yra apie penkis kartus mažesnė už

difuzijos aktyvacijos energiją cSi [110]. Taigi, paspartėjusi difuzija\* vyksta kanalais gilyn į cSi, tuo tarpu difuzija į kamieno sienelės vyksta įprastiniu cSi greičiu. Dėl anizotropinės boro difuzijos legiruojamos ne tik ASiS1 ir ASiS2 darinio dalys, bet ir apie 100 μm storio dalis likusio cSi pagrindo. Legiruotas ASi kamieno ir kanalų paviršius šuntuoja barjerus abipus ASiS2 srities. Todėl matuojamos voltamperinės charakteristikos yra tiesinės, o bandinių varža lyginant su kontrolinių gali būti net mažesnė. Priešingai nei buvo tikėtasi, nustatyta, kad terminis poveikis neturi įtakos liuminescencijai, nors ir padidina sluoksnio elektrinį laidumą. Dėl to nuosekli legiruotų darinių varža sumažėja, lyginant su nelegiruotais bandiniais. Skirtingai nei kitų tyrėjų darbuose, mūsų ASi dariniai buvo papildomai legiruoti tuo pačiu elementu, kaip ir pradinė silicio plokštelė. Tačiau nedidelė boro atomų koncentracija ( $N_i \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) silicio kamiene neturėjo stipriai stabdyti difuzijos proceso, kaip parodė eksperimentai, pademonstruoti darbe [94].

Atsižvelgiant į akytojo silicio sluoksnių sandarą, galima paaiškinti ir mažas ( $10^2 \div 10^3$ ) Ω C–tipo bandinių varžas. Kadangi šio darbo bandiniai gaminti naudojant (100) orientacijos plokšteles, porų gylis juose turėjo siekti 100 nm ar net daugiau [36]. Tai legiravimo operacijos metu boras intensyviai difundavo per akytąjį (100÷150) nm sluoksnį kamieno sienelių paviršiumi. Tuo pačiu metu, difunduodamas statmenai kamieno sienelėmis, jis legiruoja ASi kamieną. Atsižvelgiant į tiesines C–tipo bandinių voltamperines charakteristikas bei mažą varžą, energetinė C–tipo darinių schema turėtų kiek skirtis nuo pateiktos 3.6 paveiksle. Pagrindinis skirtumas būtų tas, kad dėl paviršinių lokalinių būsenų Fermi lygmuo būtų „pririštas“ tarpfazinėse srityse, o stipriai legiruota p<sup>+</sup> sritis prasitęstų apie (100÷150) μm į kristalinio silicio pagrindą [36]. Tačiau  $E_g$  padidėja dėl kvantinio ribojimo efekto ASiS2 sluoksnyje ir šiuose bandiniuose.

Tolimesniems tyrimams atrinkome bandinius (apie 250 vnt.) pagal jų elektrinę varžą. Darant prielaidą, kad bandiniai yra nupjauto kūgio formos, kurio pagrindas yra lygus kontaktinės aikštelės plotui, esant  $\rho = 0,4 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  ir  $l = 450 \text{ } \mu\text{m}$  (plokštelės storis) bei kontakto aikštelės skersmeniui 100 μm, jų varžai  $R = \rho(l/S)$ , turėtų būti apie 200 Ω. Išmatuota kontrolinių bandinių varža, turinčių papildomai legiruotas p<sup>+</sup> sritis iš abiejų pusių, buvo apie 300 Ω. Tarkime, kad jei prie metalinių kontaktų, su p<sup>+</sup> sritimis yra natūralaus oksido sluoksnis, tai jis yra labai plonas ir krūvininkų tuneliavimui skaidrus. A–tipo bandinių varža siekė megaomų eilės. Šiuo atveju varžos padidėjimas gali būti sąlygojamas kelių priežasčių. Pirma priežastis būtų geometrinis faktorius akytojo silicio sluoksnyje. Tačiau, esant aktytumui apie 80 % ir akytojo silicio sluoksnio storiui apie 25 μm, geometrinis faktorius

---

\* panaši pagreitinata difuzija kartais stebima ir monolitiniuose puslaidininkuose, kuri vadinama neapibrėžtu terminu „difuzija pagreitintais kanalais“ [110].

duoda labai mažą varžos padidėjimą. Skaičiavimai rodo, kad varžos padidėjimas yra nedaugiau 30 %, t. y. bandinio varža būtų  $\sim 400 \Omega$ . Antra priežastis – tai oksido ir kitų junginių sluoksnis, susidarantis ant akytojo silicio kamieno. Tačiau, kaip ir kristalinio silicio atveju, jis neturėtų būti labai storas, todėl i šiuo atveju oksido sluoksnis būtų krūvininkų tuneliavimui skaidrus. Trečia priežastis – akytojo silicio specifinės varžos padidėjimas. Atsižvelgiant į tai, kad ASiS darinio bendras storis yra apie  $25 \mu\text{m}$ , iš bandinio varžos dydžio įvertinta ASi specifinė varža turėtų būti  $(10^4 \div 10^5) \cdot \Omega \cdot \text{cm}$ . Toks ASi specifinės varžos padidėjimas yra normalus ir sutampa su kituose darbuose pateikiamais duomenimis [112]. Taigi, matavimai ir analizė rodo, kad A-tipo tipo bandinių varžą iš esmės apsprendžia ASi sluoksnių elektrines savybes. Tačiau B– ir B'–tipo bandiniuose stebima kitokia situacija. Kaip ir A-tipo bandiniuose, pralaidžioji kryptis atitinka neigiamą ASi sluoksnio poliškumą cSi pagrindo atžvilgiu. Mažų įtampų intervale (iki 1 V) bandinių varža yra  $10^4 \Omega$  eilės. Jei tai būtų vien ASi sluoksnių varža, tuomet ji išliktų panaši tiesinėje voltamperinės charakteristikos dalyje, kaip nuosekloji liekamąja varža. Tačiau, B– ir B'–tipo bandiniuose iš tiesinės voltamperinių charakteristikų dalies nustatyta nuosekloji varža siekė  $(2 \div 3) \cdot 10^2 \Omega$ . Galima teigti, kad darinio varžos mažėjimui gali įtakoti erdvinio krūvio sritis prie ASi sluoksnių ir cSi ribų [113]. Kitas galimas mažos nuosekliosios varžos paaiškinimas galėtų būti toks: laikant, kad pagrindinis pridėto potencialų skirtumo kritimas vyksta ASi sluoksniuose, pridėjus įtampą virš 1 V, elektrinio lauko stipris ASi srityje būtų  $10^5 \text{ V/m}$  eilės. Tokie laukai Si medžiagoje yra pakankamai dideli, tad galima laukti karštųjų krūvininkų (stipraus elektrinio lauko) efektų. Disertacinio darbo 5–me skyriuje bus parodyta, kad skirtingai nuo cSi stipraus lauko (krūvininkų) efektas didina ASi sluoksnių elektrinį laidumą. Taigi, maža B– i B'–tipo bandinių nuosekloji varža gali būti lemiamą ir netiesiniais stipraus lauko efektais. Skirtingų tipų varžų suvestinė pateikta 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Bandinių charakteringų varžų suvestinė lentelė

Bandiniai	A–tipo	B–tipo	B'–tipo	C–tipo
Varžos	$(1 \div 10) \cdot 10^5 \Omega$	$(1,2 \div 1,8) \cdot 10^4 \Omega$	$(1 \div 5) \cdot 10^3 \Omega$	$(1 \div 10) \cdot 10^2 \Omega$

C–tipo bandiniai ryškiai skyrėsi nuo kitų bandinių ne tik savo varža, bet ir kitomis charakteristikomis. Įvairių šio tipo bandinių varža buvo nuo  $10^2 \Omega$  iki  $10^3 \Omega$ . Kai kurių varža buvo net mažesnė už kontrolinių cSi bandinių varžą. Tai rodo, kad boro difuzijos operacija, atlikta per akytojo silicio sluoksnį, priešingai nei tikėtasi, stipriai keičia visas ASiS darinio elektrines savybes. Ypač reiktų atkreipti dėmesį į tuos bandinius, kurių varža siekė apie

šimtą omų. Lygindami ASiS darinius su cSi bandiniais, matome, kad ASiS darinių varža du kartus mažesnė už cSi bandinių varžą. Tai leidžia manyti, kad šiuose bandiniuose boras yra prasiskverbęs po ASiS2 sluoksniu. Po nanokristaliniu akytoju sluoksniu egzistuoja sritis, kurioje susiformuoja tuštumų (ertmių) užuomazgos besitęsiančios gilyn kanalų pavidalu. Difuzija tokių kanalų sienelių paviršiumi gali vykti sparčiau dėl didesnio, nei cSi, paviršiaus ploto. Todėl difuzijos operacija vykdoma per akytojo silicio sluoksnius iš esmės keičia viso darinio savybes. Tai patvirtina palyginamieji su B'– ir C–tipo bandinių, besiskiriančių operacijų seka, tyrimų rezultatai. Visos serijos B'–tipo bandinių (apie 100 vnt.) varža buvo nuo 1 iki 5 MΩ eilės, difuzijos gylis – apie (3÷5) μm, tai yra jis beveik sutapo su ASiS1 sluoksnio storis. Šiuo atveju ASiS2 specifinė varža siekė  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$  eilės. Todėl matuojamoji varža yra ASiS2 (sluoksnio storis 20 μm) varža, o jos dydis sutampa su anksčiau gautais B–tipo bandinių rezultatais.

#### **KETVIRTOJO SKYRIAUS IŠVADOS**

1. Akytojo silicio sluoksniai kartu su monokristalinio silicio pagrindu sudaro dvipolį darinį kurio voltamperinės charakteristikos yra netiesinės, o varža apsprendžiama akytojo silicio ir erdvinio krūvio sričių varžomis.
2. Bandiniai, kuriuose į akytąjį sluoksnį difuzijos būdu įvesta akceptorinė boro priemaiša, pasižymi simetrinėmis voltamperinėmis charakteristikos.
3. Legiravimo poveikis pasireiškia žymiu akytojo silicio sluoksnio elektros laidumo padidėjimu.

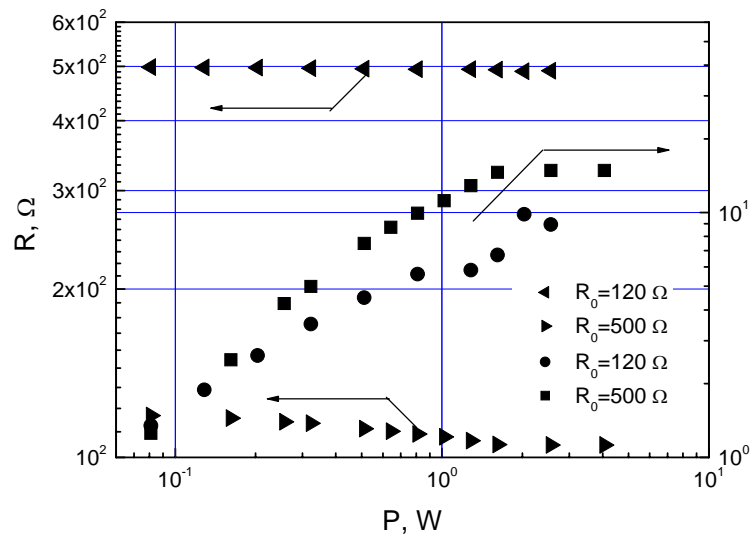
## **5. AKYTOJO SILICIO DARINIŲ TYRIMAI VEIKIANT SUPERAUKŠTO DAŽNIO ELEKTROMAGNETINE SPINDULIUOTE**

Šiame skyriuje pateikiami superaukšto dažnio (SAD) spinduliuotės poveikio akytojo silicio dariniams tyrimų rezultatai [2A]. Kaip jau minėta, akytojo silicio savybės SAD spinduliuotės lauke buvo tyrinėti tik vienu aspektu – siekiant ateityje ASi panaudoti radijo– ir optoelektroninių jungčių technologijoje bei technikoje. Šiems tyrimams yra svarbūs du pagrindiniai medžiagos parametrai – tai dielektrinė skvarba ir elektrinis laidumas. Abu parametrai akytojo silicio gamybos metu yra lengvai kontroliuojami. Parodyta, kad naudojant akytąjį silicį žymiai (~ 80 %) sumažėja mikrobangų spinduliuotės nuostoliai pereinamuose elementuose [24]. Paskelbti mokslinėje literatūroje darbai, daugiausiai tiria SAD spinduliuotę (jos slopinimą, sklaidą ir pan.) poveikį ASi sluoksniui. Mūsų atlikti tyrimai, kurių rezultatai pateikiami šiame skyriuje, iš esmės skyrėsi nuo iki šiol atliktų tuo, kad jie skirti tirti SAD spinduliuotės poveikį ASi sluoksnių dariniams (tų darinių savybėms). Mūsų žiniomis, mokslinėje literatūroje tai yra pirmieji tokio pobūdžio tyrimai.

### **5.1. SUPERAUKŠTO DAŽNIO SPINDULIUOTĖS POVEIKIS AKYTOJO SILICIO ELEKTROS LAIDUMUI**

Superaukšto dažnio spinduliuotės poveikio akytojo silicio varžai eksperimentai buvo atlikti su C-tipo bandiniais. Šių bandinių pasirinkimą lėmė palankios jų elektrinės savybės, sudarančios prielaidas rezultatų analizei. Iš tikrųjų, tiesines voltamperines charakteristikas aprašo Ohmo dėsnis, o tai leidžia tikėtis paprastesnių atsako į spinduliuotės poveikį dėsningumą. Nors tokiu atveju interpretacija nėra paprasta. Elektros laidumo mechanizmas nanostruktūrinuose akytojo silicio sluoksniuose dar labai mažai išaiškintas. Išsamų ir galutinį modelio sukūrimą apsunkina esminiai skirtumai pasitaikantys tiriamuosiuose akytojo silicio sluoksniuose, o tai trukdo padaryti konkrečius apibendrinimus. Pavyzdžiui, tunelinis Fauler–Nordheinio, Poole–Frenkelio ir erdvinio krūvio ribotų srovių modeliai buvo sėkmingai taikomi panašios sandaros akytojo silicio dariniuose [100, 101, 102]. Kita vertus, ryškūs nukrypimai nuo vieno ar kito modelių stebimi nežymiai pakeitus akytųjų sluoksnių gamybos operacijas arba siekiant ASi sluoksnius apsaugoti mechaniškai. Taigi, tik mūsų atveju parankiausia buvo tirti bandinius, pasižyminčius tiesinėms voltamperinėms charakteristikoms, o stebimus bandinių varžos pakitimus, juos paveikiant SAD spinduliuote, susieti su akytojo silicio darinio elektros laidumu. Kituose (A– ir B–tipo) bandiniuose





5.1 pav. ASi darinių varžos  $R$  ir jos pokyčio modulio  $\Delta R$  priklausomybės nuo sužadinančios SAD spinduliuotės impulso galios  $P$ ,  $R_0$  – pradinė bandinių varža

neišvengiamai iškiltų papildomų problemų dėl priekontaktinėje erdvėje ir tūryje esančių potencinių barjerų.

Dviejų C–tipo bandinių su skirtinga pradine varža  $R_0$  varžos pokyčių  $\Delta R$ , paveikus SAD spinduliuote, eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti 5.1 paveiksle. Eksperimentas parodė, kad, paveikus mikrobangų spinduliuote, bandinių varža sumažėja, tai yra jos pokytis  $\Delta R$  yra neigiamas. Grafike, patogumo dėlei, atidėta modulio  $|\Delta R|$  priklausomybė nuo spinduliuotės impulso galios  $P$ . Eksperimentinė įranga leido užregistruoti maždaug 1 % varžos pokyčius, pradedant 0,1 W spinduliuotės impulso galia. Abiem atvejais  $\Delta R(P)$  priklausomybė yra netiesinė. Netiesiškumas labiau išryškėja i mažesnės varžos bandiniu.

Mikrobangų spinduliuotės poveikis puslaidininkiuose paprastai pasireiškia krūvininkų kaitimo efektu SAD elektriniame lauke [90]. Krūvininkų kaitimas (energijos didėjimas) keičia sklaidos procesus, ir tai turi tiesioginį poveikį krūvininkų judrumui, o per judrumą ir elektros laidumui. Dėl elektrinio lauko  $E$  kaistant krūvininkams, jų judrumas  $\mu(E)$  tenkina išraišką [114, 115]:

$$\mu(E) = \mu_0(1 + \beta E^2), \quad (5.1)$$

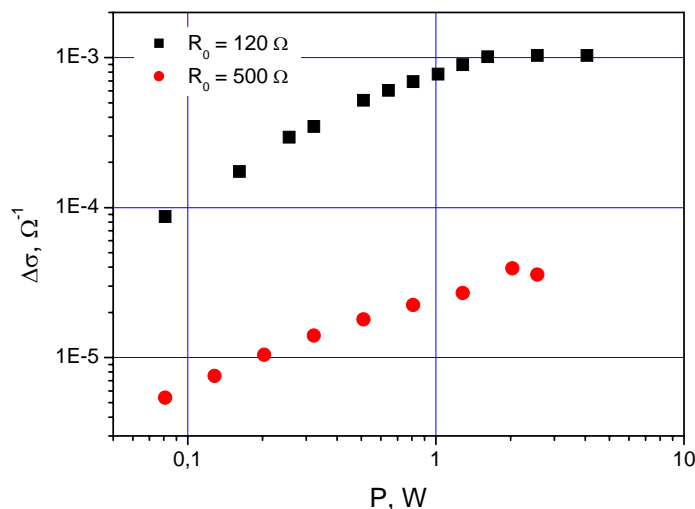
čia  $\mu_0$  – pradinė judrumo reikšmė,  $\beta$  – netiesiškumo koeficientas. Netiesiškumo koeficientas labai priklauso nuo krūvininkų sklaidos mechanizmo ir gali būti neigiamas arba teigiamas.

Tai matyti iš bendros judrumo  $\mu$  priklausomybės nuo krūvininkų energijos išraiškos [116]:

$$\mu = \frac{e}{m^*} \tau_0(T) (kT)^{\frac{1}{2}-r} E^{r-\frac{1}{2}}, \quad (5.2)$$

čia  $r$  – sklaidos faktorius;  $r = 0$  sklaidai akustiniais fononais,  $r = 2$  – sklaidai priemaišų jonais. Paprastai krūvininkų sklaida puslaidininkiuose yra sudėtinė (kompleksinė), ji susideda iš kelių sklaidos procesų vykstančių tuo pačiu metu. Todėl negalima tiksliai iš anksto numatyti ir įvertinti netiesiškumo koeficiento. Silpno kaitimo atveju paprastai  $\beta < 0$  [101]. Pagal esamus mokslinėje literatūroje duomenis, mūsų tiriamuoju atveju jis turėtų būti artimas nuliui arba neigiamas [117]. Remiantis modeliu, pagrįstu krūvininkų kaitimo poveikiu judrumui, turėtume laukti atvirkštinio efekto, nei yra stebimas eksperimente. Be to, laidumo santykio  $\Delta\sigma$  priklausomybė nuo impulso galios (elektrinio lauko stiprio kvadrato  $E^2$ ) yra netiesinė (5.2 pav.; mūsų atveju  $\Delta\sigma \approx \Delta R/R_0^2$ ), kai tuo tarpu pagal išraišką (5.1) tikėtina priklausomybė turėtų būti tiesinė. Gauti eksperimentiniai rezultatai rodo, kad SAD spinduliuotė sukelia (aktyvuoja) akytojo silicio sluoksnių laidumą, todėl galime daryti prielaidą, jog veikia aktyvacinis mechanizmas. Kaip buvo minėta, būtent šis elektrinio laidumo modelis yra labiausiai išstobulintas, taikant jį akytajam siliciui.

Temperatūra aktyvuojamo perkoliacinio (*angl.* – percolation) elektros laidumo modelis akytojo silicio sluoksniams buvo pasiūlytas ir pritaikytas F. Koch'o ir bendraautorių darbuose [101, 117]. Juose ASi traktuojamas kaip netvarkioji medžiaga, kurioje elektros



5.2 pav. ASi darinių laidumo padidėjimo  $\Delta\sigma$  priklausomybė nuo SAD spinduliuotės impulso galios

srovė teka perkoliacijos sritimis su lokaliu laidumu. Tos sritys užima tik mažą bendro tūrio dalį. Laidžioji medžiaga sudaro elektrai laidžių kristalinių tinklą (ASi kamieną). Kristalinių matmenys siekia kelis nanometrus, todėl kristalituose pasireiškia erdvinio kvantavimo efektas, o draustinės energijos tarpas priklauso nuo dalelės matmenų. Kristalitai skiriasi savo matmenimis ir forma, ir tai lemia draustinės energijos tarpo pokyčių skirtumus skirtingoms dalelėms. Šie pokyčiai savo ruožtu sukelia lokalias elektronines būsenas. Būsenų lokalizacija sudaro potencinę galimybę perkoliaciniam laidumui, kuris, kaip žinoma, yra aktyvacinio pobūdžio [110]. Pagal šį modelį, elektrinis laidumas akytojo silicio sluoksniuose yra apibrėžiamas kaip labai komplikotas perkoliacinio laidumo procesas fraktalinės formos kristalinių, su erdvinio kvantavimo efektu, tinkle ties Fermi lygmeniu. Laidumo išraiškos nuolatinei ir kintamajai srovei yra skirtingos. Nuolatinės srovės elektros laidumui buvo gauta tokia išraiška [118]:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_0 / kT), \quad (5.3)$$

čia

$$\sigma = N(E_F) e^2 a^2 \frac{\varepsilon E_0 v_0}{2kT}. \quad (5.4)$$

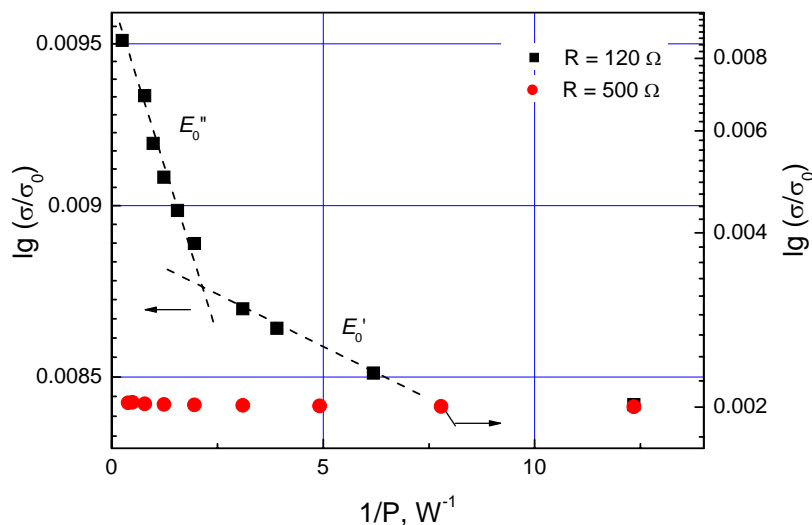
Šiose formulėse  $E_0$  – aktyvacijos energija,  $\varepsilon$  – dielektrinė skvarba,  $N(E_F)$  – būsenų tankis ties Fermi lygmeniu,  $a$  ir  $v_0$  – konstantos. Darbe [111] nagrinėjami akytojo silicio atmainai  $E_0 = 0,45 \pm 0,05$  eV,  $N(E_F) = 10^{19}$  eV<sup>-1</sup>cm<sup>-3</sup>,  $v_0 = 10^{10}$  s<sup>-1</sup>,  $a = 50$  Å. Artima aktyvacijos energijos reikšmė ( $E_0 = 0,45$  eV) buvo gauta ir darbe [96]. Tačiau tame darbe aktyvacijos energija daugiau siejama su paviršinėmis būsenomis tarpfazinėse srityse. Reikia pažymėti, kad aktyvacinio pobūdžio elektrinio laidumo modelis aktytajame silicyje siejamas su šuolinio aktyvacinio laidumo modeliu amorfinio silicio sluoksniuose, pagamintuose iš silano (SiH<sub>4</sub>) rusenančio išlydžio būdu. Šiuose amorfinio silicio sluoksniuose randami tuštumų (ertmių) pobūdžio struktūros defektai. Amorfinio silicio ir ertmių riboje lieka daugybė laisvųjų ryšių, kurie paprastai surišami silicio ir vandenilio Si–H jungtimis [119]. Nustatyta, kad tokiuose sluoksniuose pasireiškia ir šuolinis laidumas per lokalines būsenas, o šuolio aktyvacijos energija yra apie 0,08 eV [119]. Akytojo silicio kamieno tinklas, neskaitant paties kamieno ir tuštumų tūrio santykio, iš dalies primena amorfinį silicį [119]. Laisvųjų ryšių yra ir ASi siūlų ir klasterių paviršiuje. Paprastai jie surišami vandenilio, išsiskiriančio elektrocheminio ėsdinimo reakcijos metu. Įdomu tai, kad 5.3 paveiksle pavaizduota priklausomybė

$\lg \sigma = f(1/P)$  labai primena darbe [119] pateiktą šuolinio dreifinio judrumo  $\mu_D$  priklausomybę  $\lg \mu_D = f(1/T)$  amorfinio silicio sluoksniams, o tai leidžia ieškoti elektrinio laidumo mechanizmų bendrumo.

Taikydami [117] modelį, mes darome prielaidą, kad mūsų bandiniuose kaip ir monolitiniame silicyje, mikrobangų spinduliuotė yra sugerama laisvųjų krūvininkų. Taip didėja krūvininkų vidutinė energija ir temperatūra. Krūvininkų vidutinės energijos (temperatūros) augimas iššaukia perkoliacinio elektros laidumo didėjimą. Kaip bus parodyta 5.3 skyriuje, pagrindinis šio mechanizmo realizavimo veiksnys yra karštųjų skylių temperatūra. Tačiau duotuoju momentu mums visai nesvarbu, kokia tai temperatūra, kadangi (5.3) formulė galioja bet kuriuo atveju, nesvarbu, ar tai būtų termodinaminės pusiausvyros sąlygos, kai krūvininkų ir gardelės temperatūros yra vienodos, ar tai būtų vien karštųjų krūvininkų temperatūra jų kaitimo sąlygomis. Teigiant, kad temperatūra yra proporcinga absorbuotai mikrobangų energijai  $T \sim P\Delta t_{imp}$ , (5.3) formulė šiuo atveju gali būti užrašyta taip:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_0 / k'P), \quad (5.5)$$

čia  $k'$  yra Boltzmano konstantos atitikmuo, betarpiškai susijęs su skylių temperatūra  $T_h$  ir spinduliuotės impulso galia  $P$ . Pritaikome standartinę aktyvacijos energijos puslaidininkuose nustatymo procedūrą, t. y. ieškome grafinės priklausomybės  $\lg \sigma = f(1/P)$  (5.3 pav.). Matome, kad 5.3 paveiksle pateikta priklausomybė  $120 \Omega$  bandiniui gali būti



5.3 pav. ASi darinių laidumo priklausomybė nuo atvirkštinės impulso galios

aproksimuota dviem tiesėmis  $lg \sigma \sim P^{-1}$  su skirtingomis išvestinėmis (skirtingais polinkio kampais ašies atžvilgiu). Tai reiškia, kad išryškinamos dvi skirtingos aktyvacijos energijos  $E'_0$  ir  $E''_0$ . Laidumo aktyvacija prasideda nuo mažiausios aktyvacinės energijos. Didinant mikrobangų impulso galią  $P$ , didėja krūvininkų temperatūra  $T$  ir į laidumo mechanizmą įsijungia (atsispindi) didesnės aktyvacijos energijos reikalaujantys centrai (būsenų tankio fluktuacijos). Vadinasi aktyvacijos energijos tenkina sąlygą  $E''_0 > E'_0$ . Antrame bandinyje, kurio pradinė varža  $R_0 = 500 \Omega$ , išryškėja tik vienas aktyvacijos energijos lygmuo. Jis pasireiškia tik esant maksimalioms impulsų galioms  $P$ . Bandinio varža yra didesnė negu buvo pirmuoju atveju, galima manyti, kad dėl elektrinio lauko pasiskirstymo, todėl srityje, analogiškoje pirmajam bandiniui, laidumo aktyvacija prasideda tik prie didesnių sužadinančios spinduliuotės impulso galių.

Taigi, elektrinio laidumo matavimai akytojo silicio dariniuose, veikiant juos SAD spinduliuote, atskleidė slenkstinį sukeliama laidumo pobūdį. Išskirti du aktyvacijos energijos slenksčiai  $E'_0$  ir  $E''_0$  ( $E''_0 > E'_0$ ).

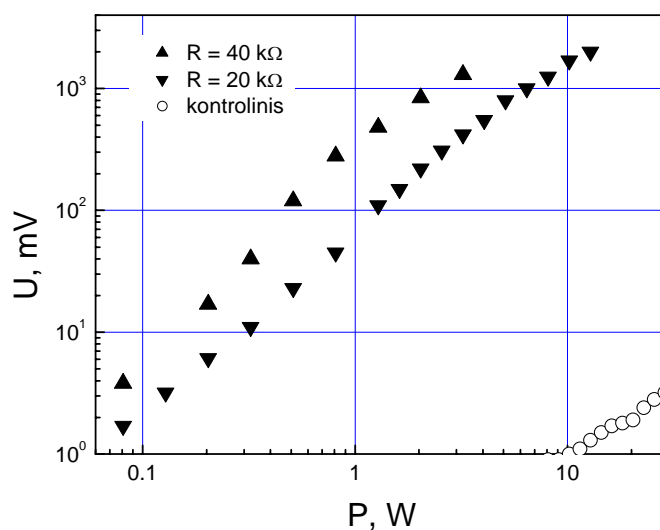
## **5.2. ELEKTROVARA AKYTOJO SILICIO DARINIUOSE, PAVEIKIANT JUOS MIKROBANGŲ SPINDULIUOTĖS IMPULSAIS**

Elektros lauku įkaitintų ir pusiausvyrų krūvininkų sandūroje atsirandančios, taip vadinamos, karštųjų krūvininkų termogradientinės arba elektrogradientinės elektrovaros matavimai yra vienas iš plačiai naudojamų metodų, tiriant karštųjų krūvininkų efektus puslaidininkiuose [90, 91]. Karštųjų krūvininkų termoelektrovaros puslaidininkiuose efektas išoriškai yra panašus į įprastinį termoelektrovaros efektą, tačiau jo atsiradimo priežastis puslaidininkiuose yra kitokia ir gali būti įvairi. Svarbu, kad dėl vienokių ar kitokių priežasčių ir sąlygų bandinyje atsirastų krūvininkų temperatūros gradientas. Puslaidininkiuose egzistuoja nemaža karštųjų krūvininkų elektrovaros efekto realizavimo galimybių. Dauguma jų yra aprašyti monografijoje [91]. Lyginant su šiame darbe atliktais tyrimais, artimiausi jų yra elektrogradientinės elektrovaros, atsirandančios nevienalyčiuose puslaidininkių dariniuose ir taškiniuose  $n-n^+$  ( $p-p^+$ ) kontaktuose, atvejai. Prie taškinių kontaktų arba nevienalyčių darinių galima priskirti ir šiame darbe tiriamus darinius su akytojo silicio sluoksniais.

Ankstesniame skyriuje, buvo parodyta, kad ASi darinių elektros laidumo didėjimas paaiškinamas skylių ansamblio temperatūros  $T_h$  augimu SAD spinduliuotės lauke. Norint paaiškinti elektrovaros atsiradimą, neužtenka vien temperatūros didėjimo. Kad atsirastų

termoelektrovara, reikia, kad bandinyje susiformuotų ir krūvininkų temperatūros gradientas  $\nabla T_h$ . Tačiau tai nesunku pagrįsti mūsų tirtų ASi darinių atveju. Tikrai, akytojo silicio dariniai kartu su padėklu ir kontaktais, kaip jau buvo parodyta aukščiau, sudaro sudėtingą elektrinių savybių sistemą (3.6 pav.). Dėl šios priežasties patalpinus bandinį į SAD elektrinį lauką, mikrobangų energija skirtingose jo srityse (pagrindinės jų yra tris; 3.6 pav.) sugerama nevienodai. Todėl ir krūvininkų energija tose srityse (ir atitinkamai jų temperatūra) didėja taip pat nevienodai. Kad skylių temperatūros  $T_h$  augimas paaiškinamas elektrinio laidumo kitimu, mes jau minėjome. Dėl skirtingos SAD spinduliuotės energijos sugerties išvardintose srityse, bandinyje gali atsirasti skylių temperatūros gradientai  $\nabla T_h$ . Kita vertus, ASiS2 kamieno ribos su cSi ir ASiS1 kamieniu yra ne kas kita, o labai smulkūs nanometrinių matmenų taškiniai kontaktai. Taškiniam kontakte SAD spinduliuotės elektrinis laukas yra labai nehomogeniškas. Todėl, kaistant krūvininkams, taškinio kontakto srityje susidaro krūvininkų temperatūros gradientas ir eksperimente stebimas elektrogradientinis elektrovaros atsakas.

Pirmieji matavimai buvo atlikti technologiškai paprastesniems A–tipo bei šios serijos kontroliniams bandiniams, ir tik vėliau eksperimentuota su sudėtingesniųjų B– ir C–tipo bandiniais. Bandymai parodė, kad A–tipo akytojo silicio dariniuose, sužadinant juos superaukšto dažnio spinduliuotės impulsais, atsiranda elektrovara. Atsakas pasirodo, peržengus impulso galios slenkstį  $P \sim 10^{-1}$  W (5.4 pav.). Atsako impulsas (ant kontaktinės aikštelės) yra teigiamas bandinio pagrindo atžvilgiu.



5.4 pav. A-tipo bandinių elektrovaros amplitudės priklausomybė nuo superaukšto dažnio spinduliuotės impulso galios

Priklausomai nuo SAD spinduliuotės galios, elektrovaroje išskiriamos dvi sritys. Pirmoje impulso galios dekadose ( $10^{-1} \div 10^0$ ) W elektrovaros amplitudės  $U$  augimas apytiksliai kinta pagal laipsninę priklausomybę  $U \sim P^2$ , kuri vėliau, dekadose ( $10^0 \div 10^1$ ) W, pereina į tiesinę priklausomybę  $U \sim P$ . Panaši funkcinė priklausomybė stebima ir kontroliniuose (be ASi sluoksnių) bandiniuose. Yra nustatyta, kad kontroliniuose bandiniuose, tapačiuose cSi dariniams, elektrovara atsiranda dėl laisvųjų krūvininkų kaitimo efekto SAD spinduliuotei veikiant [90, 91]. Logiška būtų tikėtis krūvininkų kaitimo ir ASi dariniuose, kadangi SAD spinduliuotės energiją juose, vienaip ar kitaip, vis vien sugeria laisvieji krūvininkai. Atsižvelgiant į tai, kad bandinių varža yra žymiai didesnė už banginę bangolaidžio varžą ( $R_z = 460 \Omega$ ), galima laikyti, kad superaukšto dažnio spinduliuotės elektrinio lauko stiprio vektorius tolygiai pasiskirstęs per visą susiaurintą bangolaidžio plyšį ir kerta visą bandinio skerspjūvį. Tuo atveju, kai elektrovarą lemia potencialiai barjerai, mes negalime neįskaityti nei vieno iš barjerų indėlio. Priminsime, kad tokių barjerų yra tris (3.6 pav.). Du egzistuoja bandinio tūryje – tai barjerai sandūroje ASiS1/ASiS2 ir ASiS2/cSi. Kaip jau buvo parodyta, šie barjerai atsirado dėl draustinių energijų juostos pločio skirtumo tarp ASiS2 sluoksnio ir kaimyninių ASiS1 ir cSi, kuriuose draustinės energijos tarpas liko nepakitęs (3.2 skyrius). Trečias barjeras egzistuoja prie kontakto Al/ASiS1. Kaistant skylėms dėl mikrobangų spinduliuotės, kiekviename barjere susidaro elektrovara  $U_x$ , kurios dydį apsprendžia potencialinio barjero aukštis  $\varphi_{x,(x=1,2,3)}$  ir skylių temperatūra  $T_h$  [90]:

$$U_x = \varphi_x \left( \frac{T_h}{T_0} - 1 \right), \quad (5.6)$$

čia

$$T_h = T_0 (1 + \gamma P), \quad (5.7)$$

čia  $T_0$  – kristalinės gardelės temperatūra,  $\gamma$  – atvirkštinis galiai koeficientas. Išraiška (5.6) perrašoma taip:

$$U_x = \varphi_x \gamma P. \quad (5.8)$$

Suminė elektrovara susideda iš elektrovaros komponentų išvardintuose trijuose barjeruose:

$$U = (\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \gamma P. \quad (5.9)$$

Elektrovaros dydis skirtinguose bandiniuose šiek tiek skiriasi todėl, kad ASi morfologija (ypač paviršiaus) yra nevienoda. Dėl tų skirtumų elektrinis laukas nevienodai įkaitina krūvininkus skirtinguose bandiniuose. Reiktų pažymėti, kad toks elektrovaros atsiradimo mechanizmas akytojo silicio darinyje nėra vienareikšmis. Reikalas tas, kad kartu su karštųjų krūvininkų elektrovara potenciniame barjere gali atsirasti signalas dėl aukštadažnių srovių lyginimo efekto. Kuris iš efektų – karštųjų krūvininkų termoelektrovara ar aukštadažnių srovių lyginimas – dominuos, priklauso nuo daugybės fizinių parametrų puslaidininkyje, pvz., krūvininkų energijos  $\tau_\varepsilon$  ir Maksvell'io relaksacijos laiko  $\tau_M$  santykio. Sakykime, cSi potencinio barjero n–n<sup>+</sup> sričių sandūros atveju, kai  $\tau_M \ll \tau_\varepsilon$  dominuoja lyginimo (diodinė) komponentė, o, esant  $\tau_M \gg \tau_\varepsilon$ , karštųjų elektronų termogradientinė komponentė. Matuojamas signalas stipriai priklauso nuo elektromagnetinės spinduliuotės dažnio. Jeigu turime n–n<sup>+</sup> sandūrą ir  $n^+ \gg n$ , tai esant  $\omega\tau_M^{n^+} \ll 1$  elektrovara  $U_{II}$ , išreiškiama taip:

$$U_{II} = \mu_0'' E_m^2 (N_1 + N_2), \quad (5.10)$$

čia nariai  $N_1$  ir  $N_2$ , apsprendžiantys atitinkamai termoelektrovarą ir diodinį efektą, yra sudėtingos  $\omega$ ,  $\tau_M$  ir  $\tau_\varepsilon$  funkcijos [93]:

$$N_1 = \frac{1 + (\omega\tau_M^n)^2}{6(\omega\tau_M^n)^2} \tau_\varepsilon \left[ 1 + \frac{1}{1 + (\omega\tau_\varepsilon)^2} \right] \ln \left[ 1 + (\omega\tau_M^n)^2 \right], \quad (5.11)$$

$$N_2 = \frac{1 + (\omega\tau_M^n)^2}{4(\omega\tau_M^n)^2} \tau_M \left[ \frac{1}{\omega\tau_M^n} \operatorname{arctg} \omega\tau_M^n - \frac{1}{1 + (\omega\tau_M^n)^2} \right]. \quad (5.12)$$

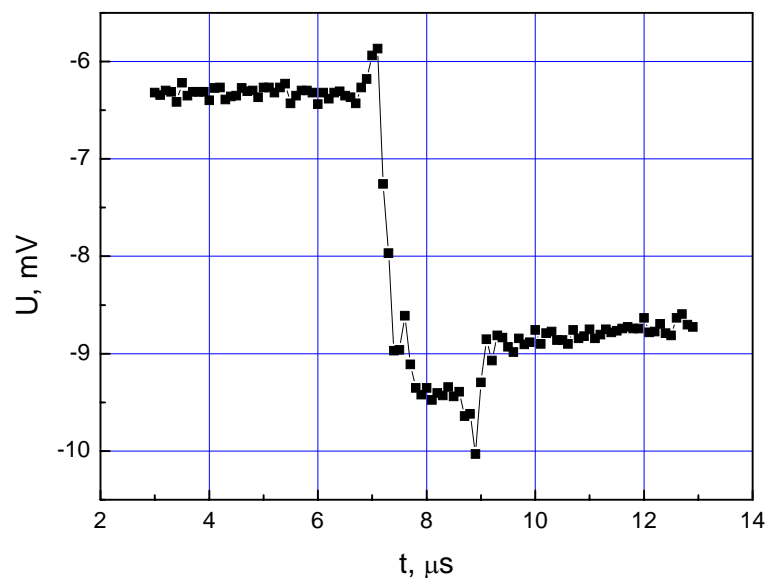
Čia išraiškose (5.10)–(5.12)  $\tau_M = \varepsilon\varepsilon_0 / en\mu_n$  – Maksvell'io relaksacijos laikas,  $\varepsilon$  – silicio dielektrinė skvarba,  $n$  ir  $\mu_n$  – atitinkamai elektronų koncentracija ir judrumas. Narys  $\mu_0'' N_1 E_m^2$  (5.10) formulėje, aprašo karštųjų krūvininkų elektrovarą, o  $\mu_0'' N_2 E_m^2$  – superaukšto dažnio srovių lyginimo efektą. Net kristaliniame silicyje santykis tarp šių narių labai sudėtingas. Kai dažniai  $\omega \sim \tau_M^{-2}$ ,  $N_2$  mažėja, o  $N_1$  auga. Dažniams  $\omega^2 \gg \tau_M^{-2}$  (į šį intervalą patenka mūsų naudotas dažnis  $\omega = 10$  GHz),  $N_2$  augant,  $\omega$  mažėja tiesiškai, o  $N_1$  auga pagal logaritminį dėsnį. Žemaomiuose bandiniuose (mūsų bazinė medžiaga yra



žemaomė) dėl  $N_1$  ir  $N_2$  santykio diodinis lyginimas atsilieka ir galutinį signalą nulemia karštųjų krūvininkų termoelektrovara. Akytojo silicio dariniai pasižymi žymiai sudėtingesne sandara nei  $n-n^+$  arba  $p-p^+$  cSi dariniai, kadangi vietoj vieno parametro, juose vienu metu neišvengiamai kinta keli parametrai: dielektrinė skvarba, draustinių energijų tarpas, elektros laidumas ir t. t. (turima omenyje, kad bent viename iš ASi sluoksnių pasireiškia erdvinis kvantinio ribojimo efektas, 3.6 pav.). Jeigu paskaičiuotume Maksvell'io relaksacijos laiką  $\tau_M$  bazinėje silicio plokštelėje, kurios parametrai yra:  $\rho = 0,4 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\mu_p = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,  $p = 4 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ , tai gautume  $\tau_M \approx 4 \cdot 10^{-13} \text{ s}$ . Šis rezultatas tenkina sąlygą  $\omega\tau_M \ll 1$ . Tačiau, jeigu mes pabandytume įvertinti tą sąlygą akytojo silicio sluoksniui, kuriame  $\rho = (10^4 \div 10^5) \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $\mu_p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , efektyvi skylių koncentracija  $p \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , tai tokios sistemos Maksvell'io relaksacijos laikas  $\tau_M$  būtų apie  $10^{-9} \text{ s}$ . Tuomet tenkinama priešinga sąlyga  $\omega\tau_M \gg 1$ . Tokiu būdu skirtingose darinio vietose gali būti tenkinamos skirtingos (net priešingos) sąlygos, lemiančios vienos ar kitos elektrovaros atsiradimą. Eksperimentiniai duomenys rodo, kad, pirmoje dekaadoje, didinant mikrobangų spinduliuotės impulso galią, A–tipo dariniuose elektrovaros amplitudė auga sparčiau, negu tikėtasi (turint omenyje visų krūvininkų kaitimą), ir sparčiau negu kontroliniuose bandiniuose. Tai patvirtina sudėtingos (aukščiau išdėstytos) atskirų sluoksnių ir barjerų schemos egzistavimą ir galimą kelių skirtingų elektrovaros komponentų superpoziciją.

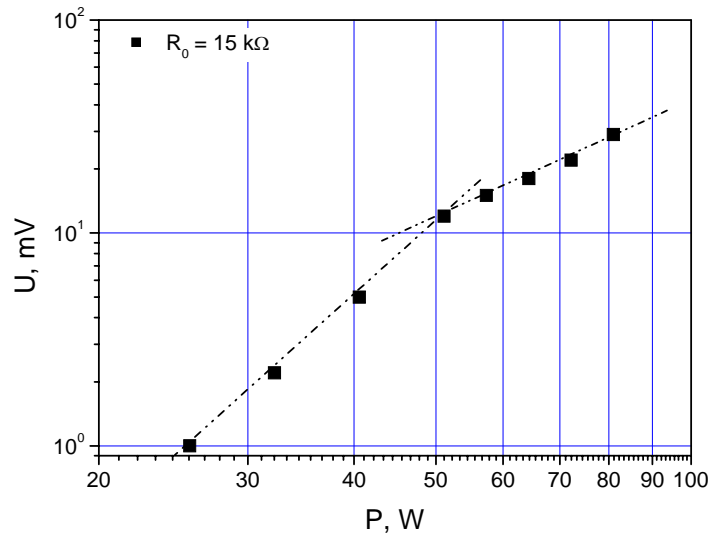
Pasitelkiant taškinio kontakto modelių, galima ir alternatyvi interpretacija. Iš tikrųjų, kaip išdėstyta aukščiau, riba abipus ASiS2 srities galima laikyti nanometriniams taškiniams kontaktams srityse prie cSi ir ASiS1. Šiuose kontaktuose taip pat galimas elektrogradientinės termoelektrovaros atsiradimas. Apie elektrovaros orientaciją bandinio atžvilgiu kalbėti problematiška, nes ASiS2 sluoksnio elektrinis laidumas, pagal literatūros duomenis, turėtų būti mažesnis už cSi ir ASiS1 kamieno elektrinį laidumą. Tačiau yra svarbus argumentas, teigiantis, kad taškiniai kontaktai dalyvauja elektrovaros atsako kūrime. Tas argumentas – teigiamas elektrovara bandinio pagrindo atžvilgiu. Atsako ženklas sutampa su elektrovaros atsako ženklu kontroliniuose bandiniuose. Kontaktinės aikštelės kontroliniams bandiniams, iš esmės, yra taškiniai kontaktai, ir juose atsaką kuria elektrogradientinė termoelektrinė elektrovara. Nesunku įsitikinti, kad taškinio kontakto kontroliniuose bandiniuose geometrija sutampa su taškinių nanokontaktų geometrija ASiS2 ir cSi riboje. A–tipo bandinių elektrovaros amplitudės eiga intervale ( $10^0 \div 10^1$ ) W taip pat sutampa (5.4 pav.). Tai leidžia teigti, kad teigiamo ženklo elektrovaros atsakas A–tipo bandiniuose (didžiąją dalimi) yra nulemtas taškinio nanok kontakto ASiS2 ir cSi riboje.

Apsistosome trumpai ties atsako dinamika. Signalo relaksacijoje po sužadavimo galima išskirti dvi komponentės – greitąją ir lėtąją (5.5 pav.). Greitosios komponentės trukmė  $\tau_g$  yra mažesnė nei  $\sim 0,1 \mu\text{s}$ , tačiau jos amplitudė yra maža, ir ją galima pastebėti tik ties atsako viršūne. Lėtoji komponentės trukmė  $\tau_l \sim 150 \mu\text{s}$ , ji stebima pasibaigus greitajai relaksacijos daliai. Galima manyti, kad sudėtingą atsako relaksaciją sąlygoja dviejų (o gal net ir daugiau) bandinyje susidarančių elektrovaros komponentių superpozicija. Kadangi lėtoji relaksacija stebima nuo pradžios ir nesikeičia visame intervale didinant SAD impulso galią, tai rodo, kad ji nėra apsprendžiama nepusiausvyriųjų krūvininkų generacijos. Manoma kad tai, greičiausiai, RC grandinės relaksacijos laikas, nes bandinių varža yra didelė ( $\sim 10^6 \Omega$ ), todėl užtenka mažos ( $\sim 100 \text{ pF}$ ) talpos, kad RC relaksacija būtų  $\sim 10^2 \mu\text{s}$ .



5.5 pav. A–tipo ASi darinių elektrovaros atsako relaksacija, žadinant 2  $\mu\text{s}$  trukmės SAD spinduliuotės impulsu

Ši analizė rodo, kad į elektrovaros atsako kūrimą A–tipo bandiniuose gali būti įtrauktos ne tik kelios skirtingos ASi darinio sritys, bet ir skirtingi mechanizmai: tris potencialiai barjerai ir dvi (arba net tris, įskaitant pačią kontaktinę aikštelę) taškinių kontaktų ribos. SAD spinduliuotės impulso galios ( $10^0 \div 10^1$ ) W intervale nusveria argumentai elektrogradientinės elektrovaros taškinių nanokontaktų ASiS2 ir cSi riboje naudai. Tačiau to paties ženklo elektrovara atsiranda prie mažesnių galių ( $10^{-1} \div 10^0$ ) W. Jos eiga  $U \sim P^2$  yra staigesnė, ir neatitinka įprastų taškiniam kontaktui gaunamų išvadų [91, 120]. Neapibrėžtumas yra ir lėtojoje atsako relaksacijoje. Patikimos interpretacijos sunkumai, ir palyginimo su kitų autorių darbais galimybės stoka (gauti rezultatai yra pirmi tokio

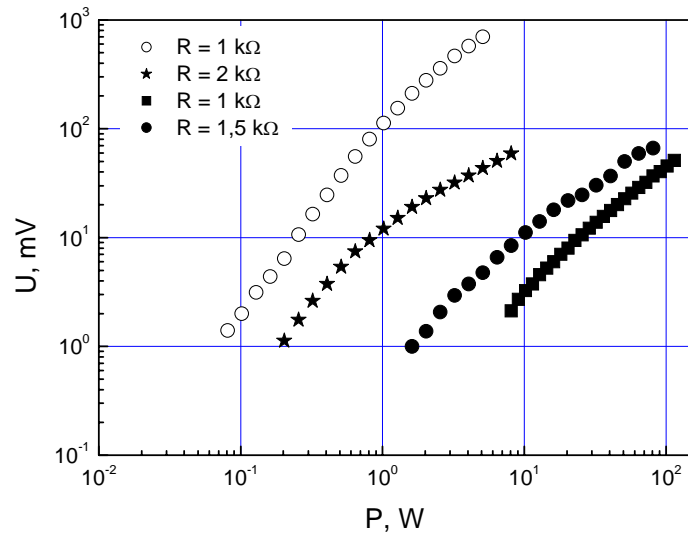


5.6 pav. ASi darinių B–tipo bandinių SAD atsako priklausomybė nuo spinduliuotės impulso galios  $P$

pobūdžio ASi dariniuose), paskatino ieškoti kelio eliminuoti esamus daugiaprasmiškumus. Kaip ir varžos tyrimo atveju, panaudotas jau anksčiau aprašytas kelias, nuo (technologiniu požiūriu) paprastesnių prie sudėtingesnių, bet interpretacijai palankesnių B– ir C–tipo bandinių.

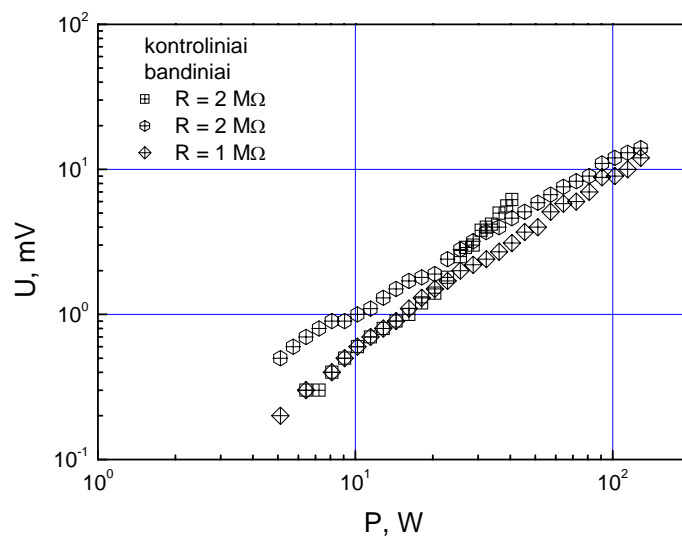
B–tipo bandiniuose buvo patobulintos priekontaktinės sritys taip, kad metalo Al sluoksniai kontaktuotų su papildomai legiruotomis  $p^+$  sritimis, tokiu būdu sudarydami gerą, bebarjerinį ominių kontaktą su puslaidininkiu. Vieno iš B–tipo bandinių elektrovaros atsako amplitudės priklausomybė nuo spinduliuotės impulso galios pateikta 5.6 paveiksle. Elektrovaros signalas atsiranda, esant gana didelėms spinduliuotės impulso galioms ( $P > 10$  W). Kaip ir A–tipo bandiniuose stebimas staigus elektrovaros amplitudės augimas, didinant mikrobangų spinduliuotės impulso galią. Iš 5.6 paveikslo matyti, kad elektrovaros eiga gali būti aproksimuota dviem tiesėmis  $\ln U \sim 3 \ln P$  ir  $\ln U \sim 3/2 \ln P$ . Tai reiškia, kad elektrovara lyg ir susieta su impulso galia  $P$  laipsninėmis priklausomybėmis  $U \sim P^3$  ir  $U \sim P^{3/2}$ . Tokios laipsninės priklausomybės sunkiai derinamas su įprastiniu krūvininkų kaitimo modeliu, kuriame krūvininkų temperatūros poveikis siejamas su kaitimo poveikiu krūvininkų judrumui. Dažniausiai šis modelis duoda tiesinės varžos ar elektrovaros priklausomybes nuo  $P$  (arba kvadratinė nuo  $E$ , formulės (5.6)–(5.7)). Šiuo atveju, kaip bus parodyta 5.3 skyriuje, labiau tinka kitas – difuzinis – elektrovaros atsiradimo modelis.

Atliekant kitą žingsnį bandinių sandaros tobulinimo (supaprastinimo) link, buvo pagamintas ominis kontaktas ir prie ASi sluoksnio. Tuo tikslu boro difuzija atlikta prieš

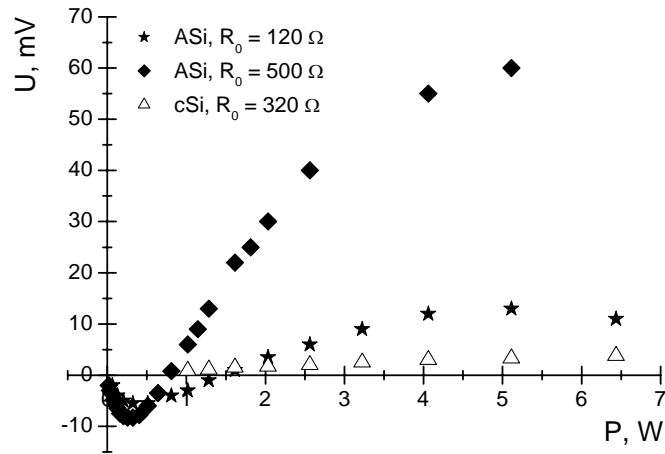


5.7 pav. B'– tipo bandinių superaukšto dažnio elektromagnetinės spinduliuotės atsakas

ėsdinimo operaciją į abi kristalinio silicio plokštelės plokštumas, suformuojant stipriai legiruotas sritis ir prie bandinių pagrindo, ir ASiS1 sluoksnyje (B'–tipo bandiniai). Jau minėjome, kad B–tipo ir B'–tipo bandinių elektrinės savybės buvo panašios. Panašus buvo ir elektrovaros atsakas veikiant bandinius mikrobangų spinduliuote (5.7 pav.). Elektrovara bandinio pagrindo atžvilgiu yra teigiama, kaip kontroliniuose (5.8 pav.) bei A–tipo ir B–tipo bandiniuose. Atsako amplitudės augimas didinant spinduliuotės impulso galią, gali būti apytiksliai aprašomas laipsninėmis funkcijomis su laipsnio rodikliu nuo vieneto iki dviejų.

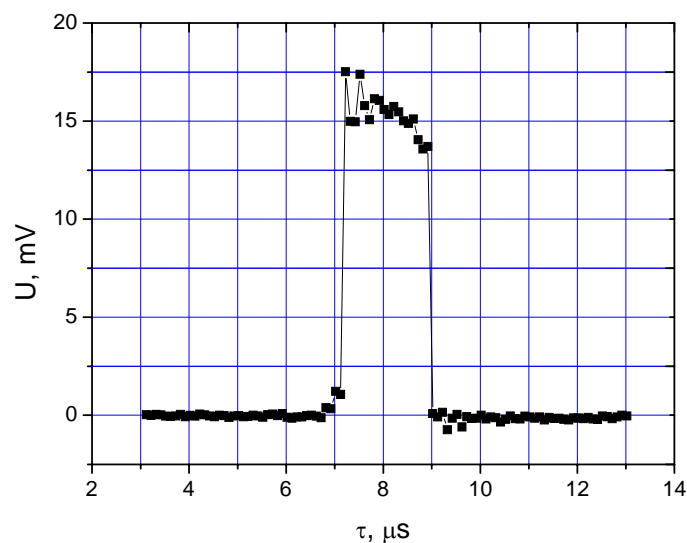


5.8 pav. Kontrolinių A–tipo serijos bandinių elektrovaros atsakas veikiant SAD spinduliuotės impulsais

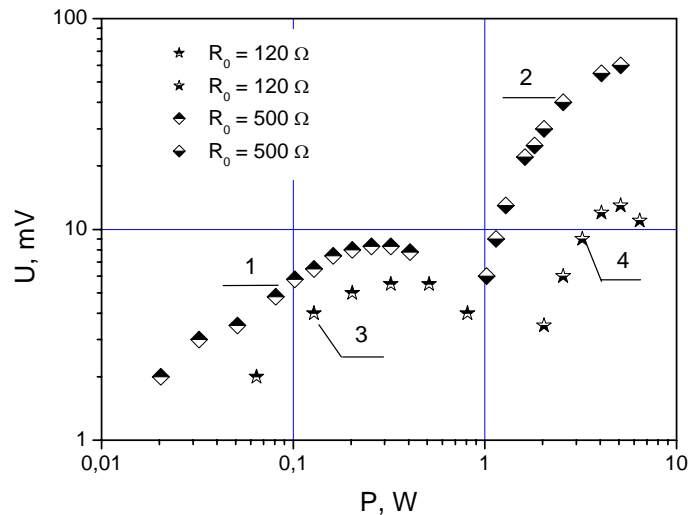


5.9 pav. C–tipo bandinių elektrovaros priklausomybė nuo mikrobangų spinduliuotės impulso galios

Atsako amplitudė yra 10 kartų ir daugiau didesnė, lyginant su amplitudė kontroliniuose bandiniuose. Kaip ir ankstesniuose B–tipo bandiniuose, atsako augimas, didinant impulso galią, nepaaiškinamas modeliu, priimtu naudoti monolitiniuose puslaidininkiuose, tai yra, poveikiu krūvininkų sklaidai. Kitokia elektrovaros eiga yra stebima C–tipo bandiniuose, kurių voltamperinės charakteristikos (žr. 4.2 skyrių) yra tiesinės. Elektrovaros signalas šiuose bandiniuose atsirasdavo, esant žymiai mažesnėms impulso galioms (atskiruose bandiniuose net dviem eilėmis), o mažiausių galių srityje užregistruotas signalas buvo neigiamas, tai yra priešingo ženklo, negu ankstesniuose tyrimuose (5.9 pav.). Atsakas buvo



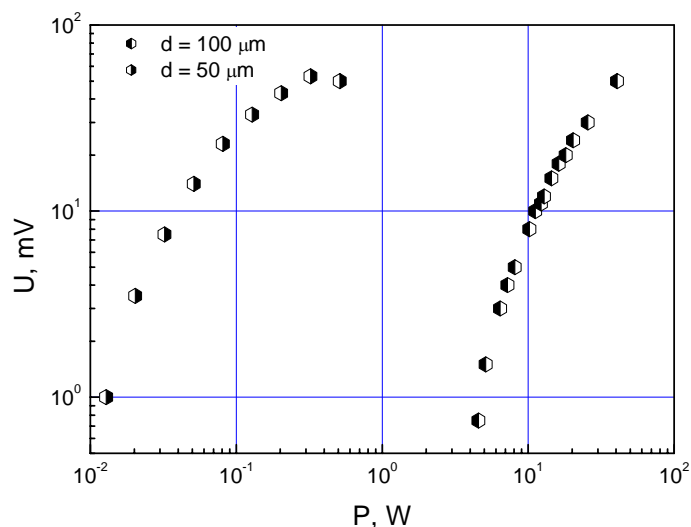
5.10 pav. Elektrovaros atsakas C–tipo bandiniuose



5.11 pav. C-tipo bandinių elektrovaros signalas:

1, 3 – neigiama atsako dalis; 2, 4 – teigiama atsako dalis

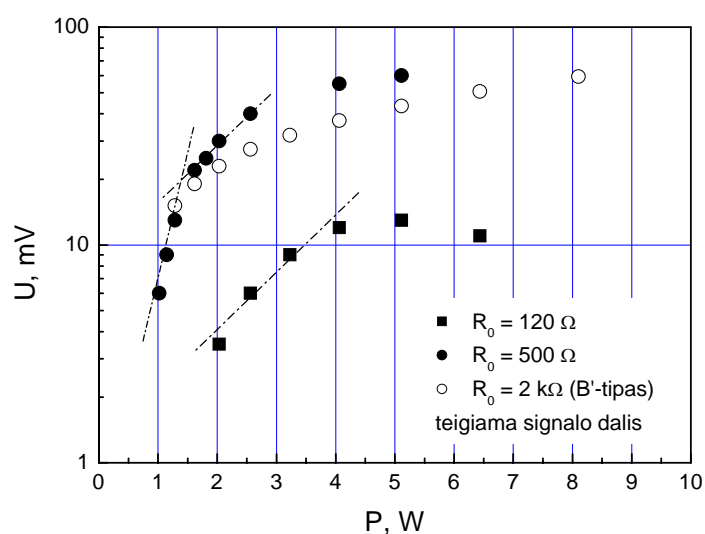
neinertiškas ir gerai atkartodavo sužadinančio impulso mikrobangų spinduliuotės formą (5.10 pav.). Didėjant impulso galiai, elektrovara augdavo, pasiekusi tam tikrą maksimalią vertę, sumažėdavo iki nulio ir keisdavo ženklą (5.9 ir 5.11 pav.). Toliau didinant SAD spinduliuotės impulso galią signalas keitėsi panašiai kaip ir ankstesniųjų bandinių atveju. Elektrovaros amplitudė buvo viena-dviem eilėmis didesnė už jos amplitudę kontroliniuose monolitinio silicio bandiniuose (ten, kur ji galėjo būti palyginta su signalu kontroliniuose bandiniuose). Elektrovara sotinosi artėjant prie impulso galių  $P \cong 10$  W. Eksperimentas,



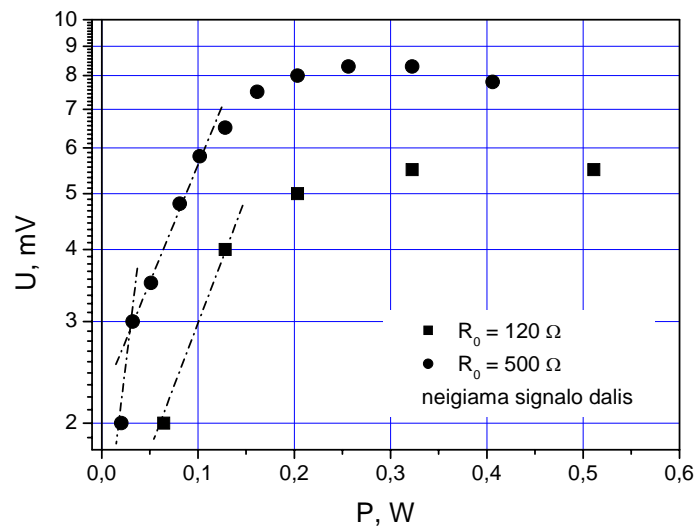
5.12 pav. ASi dvipolių darinių, su skirtingais kontaktinių aikštelių diametrais  $d$ , atsako į mikrobangas teigiama dalis

atliktas su 100  $\mu\text{m}$  ir 50  $\mu\text{m}$  skersmens bandinių kontaktinėmis aikštelėmis, parodė, kad elektrovaros dydis priklauso nuo kontaktinės aikštelės ploto (5.12 pav.). Mažinant aikštelės plotą, signalo amplitudė praktiškai nekito, tačiau elektrovaros atsiradimo pradžia pastebimai pasislinko į mažesnių spinduliuotės impulso galių pusę (5.12 pav.). Voltvatinio jautrio padidėjimas, sumažinus kontaktinės aikštelės plotą, nėra nauja. Tačiau jis yra dešimtis kartų didesnis, nei buvo laukta, pasitelkus taškinio kontakto schemą [120].

Aiškinant neįprastą elektrovaros eigą C–tipo bandiniuose pradžia apstokime ties teigiama atsako dalimi. Lygindami šią dalį su aukščiau stebėtais rezultatais A– ir B–tipo bandiniuose, matome, kad jie yra panašūs. Teigiama elektrovara C–tipo bandiniuose atsiranda ir nusveria neigiamą atsako signalą, esant beveik tokiems pat SAD impulso galioms, kaip ir A– ir B–tipo bandiniams. Tačiau skiriasi kreivių augimo dėsningumai, ir C–tipo bandinių atsake nėra lėtos relaksacijos. Lėtos relaksacijos nebuvimas lengvai paaiškinamas mažesne C–tipo bandinių varža. Darant prielaidą, kad grandinės elektrinė talpa yra ta pati ( $\sim 100$  pF), o bandinių varža  $R_0$  neviršija 1 k $\Omega$ , lengva įsitikinti, kad tokios grandinės laiko pastovioji  $R_0C \sim 10^{-1}$   $\mu\text{s}$ . Tęsiant elektrovaros matavimų analizę, pageidautina bent apytiksliai nustatyti atsako amplitudės kaip funkcijos SAD impulso galios  $P$  kitimo dėsnį. Šiam tikslui atsako amplitudės priklausomybės  $U(P)$  eksperimentiniai duomenys atvaizduojami grafiškai pusiaulogaritminiame mastelyje (5.13 pav.). Grafike matyti, kad atsako amplitudės augimo dalyje eksperimentinių duomenų aproksimacijai gali būti panaudota atvirkštinės eksponentės funkcija  $U \sim \exp(-1/P)$ . Prisimindami ankstesnį skyrių, kuriame tokia pat atvirkštinės eksponentės funkcijos priklausomybė buvo stebėta



5.13 pav. C–tipo ir B’–tipo bandinių teigiamos elektrovaros dalies priklausomybė nuo superaukšto dažnio spinduliuotės impulso galios



5.14 pav. C–tipo neigiamos elektrovaros dalies priklausomybė nuo superaukšto dažnio spinduliuotės impulso galios

ASi darinių elektros laidumui, darome išvadą, kad abu efektus – elektros laidumo didėjimą ir elektrovaros atsaką ASi dariniuose sąlygoja ta pati priežastis. Todėl elektrovarai gali būti pritaikyta (5.5) formulei analogiška išraiška:

$$U \sim \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{k'P}\right). \quad (5.13)$$

Panašiai ekstrapoliuojama ir neigiama atsako dalis (5.14 pav.). Tai rodo, kad abi, tiek teigiamo, tiek neigiamo ženklo elektrovaros vienodai priklauso nuo superaukšto dažnio spinduliuotės impulso galios. Tai reiškia, kad C–tipo ASi darinyje ir teigiamos, ir neigiamos elektrovaros priežastys yra tos pačios\*. Dviejų, skirtingo ženklo elektrovaros atsiradimas lengvai paaiškinamas atsižvelgiant į tiriamųjų C-tipo ASi darinių struktūrinę sandarą. Darinio vidinę struktūrą kuria, jau minėtos, pagrindinės tris sritys. Tai yra vidurinė ASiS2 sritis, kurioje pareiškia erdvinio kvantinio ribojimo efektas, bei abipus jos esančios ir tik akytumo laipsniu besiskiriančios sritys ASiS1 ir cSi (3.6 pav.). Geometriškai, sandūros abipus ASiS2 sluoksnio su ASiS1 ir cSi sritimis erdvėje yra nukeiptos viena prieš kitą. Kadangi (kaip bus parodyta 5.3 skyriuje) fizinių parametų skirtumas ASiS2 srityje ir kitose srityse yra priežastis atsirasti elektrovarai, tai C–tipo bandiniams pritaikoma dviejų

\* Verta pastebėti, kad A–tipo, B–tipo ir B'–tipo bandinių elektrovaros aproksimacijai nepakanka pritaikyti paprastos atvirkščios eksponentės funkcijos  $U(P)$  priklausomybės (5.13 pav.). Tai rodo, kad šiuose bandiniuose sukeltos elektrovaros priežastis yra labiau komplikuoatas



priešpriešinių nuosekliai sujungtų elektrovaros šaltinių ekvivalentinė schema. Analizuojant giliau, ASiS1 ir ASiS2, ASiS2 ir cSi ribos, vis dėl to kai kuriais parametrais skiriasi viena nuo kitos, todėl SAD spinduliuotė juose gali būti sugerama nevienodai. Tie skirtumai lemia nuoseklia vieną paskui kitą elektrovaros atsiradimo tvarką. Tačiau, galimas ir kitoks neigiamos ir teigiamos elektrovaros atsiradimo eiliškumo paaiškinimas, net jei SAD spinduliuotė skirtingose darinio srityse būtų absorbuojama vienodai. Eksperimente stebimi teigiamos elektrovaros atsako dėsningumai visų serijų bandiniuose yra panašūs. Todėl, galime teigti, kad teigiama elektrovara atsiranda darinių srityje, kuri yra vienoda (arba beveik vienoda) visiems bandiniams. Tokia sritis yra ties ASiS2 ir cSi riba. Tuo tarpu neigiamos elektrovaros atsakas atsiranda tik C-tipo bandiniuose. Galima manyti, kad ji sukeliama srityje, kuri yra kitokia, nei A-, B- ir B'-tipo bandiniuose. Tokia sritis yra ties ASiS1 ir ASiS2 riba. Kaip ir kitur, ji yra orientuota priešinga kryptimi, negu ASiS2 ir cSi riba, tačiau, skirtingai nuo pirmųjų trijų serijų bandinių, C-tipo bandiniuose ji yra adekvati ASiS2 ir cSi ribai (abi ribos vienodai legiruotos). Todėl logiška manyti, kad būtent ASiS1 ir ASiS2 riboje atsiranda neigiamos elektrovaros atsakas į SAD spinduliuotę. Abi ASi darinio sričių ribos ASiS1/ASiS2 ir ASiS2/cSi iš esmės yra taškiniai kontaktai tarp ASiS2 kamieno elementų ASiS1 kamieno elementais, vienoje pusėje, ir tarp cSi bei ASiS2, kitoje pusėje. Atsižvelgiant į ASi morfologiją, į šiuos taškinius kontaktus galime žvelgti kaip į nevienodais kampais siaurėjančių elementų ribą. Tuomet neigiamos ir teigiamos elektrovaros atsiradimo eiliškumas gali būti lengvai paaiškintas, panaudojus karštųjų krūvininkų bigradientinio jutiklio voltvatinio jautrio  $S$  išraišką [96]:

$$S = \frac{U_d}{P} = \frac{2\rho\mu_0 \tan \alpha}{3hd^2 \ln(1 + a/d)}. \quad (5.14)$$

Šioje išraiškoje  $\rho$  – pradinės medžiagos savitoji varža,  $\mu_0$  – krūvininkų judrumas,  $\alpha$ ,  $d$  ir  $a$  – geometriniai parametrai, kur  $\alpha$  – siaurėjimo kampas,  $d$  – siauriausios sąlyčio ribos plotis,  $a$  – plačiosios srities plotis. Mūsų atveju  $d$  atitinka ASiS2 srities kamieno elementų skerspjūvį, o  $a$  vienu atveju atitinka ASiS1 srities kamieno elementų skerspjūvį, o antru atveju – cSi ploto tarp ASiS2 srities kamieno elementų skerspjūvį. Antruoju atveju  $a$  yra žymiai didesnis nei pirmuoju atveju. Atitinkamai logaritminis narys formulės (5.14) vardiklyje antruoju atveju yra didesnis. Tai reiškia, kad ASiS2 ir cSi ribos voltvatinis jautris SAD spinduliuotei yra mažesnis už ASiS1 ir ASiS2 ribos voltvatinį jautrį. Didesnis ASiS1 ir ASiS2 ribos voltvatinis jautris ir lemia pirmaujančią neigiamo elektrovaros signalo

atsiradimą. Išraiška (5.14) gauta planariniam jutiklio variantui, tuo tarpu ASi darinyje mes turime tūrinius elementus. Todėl apsiribojame tik kokybinėmis išvadomis. Taigi, aiškinant teigiamo ir neigiamo elektrovaros atsako atsiradimo eiliškumą mums neprireikė daryti papildomų prielaidų dėl nevienodo SAD elektrinio lauko pasiskirstymo per bandinio skerspjūvį.

### 5.3. EKSPERIMENTINIŲ REZULTATŲ ANALIZĖ, TAIKANT KRŪVININKŲ KAITIMO SUPERAUKŠTO DAŽNIO SPINDULIUOTĖS POVEIKYJE KONCEPCIJĄ

Karštųjų krūvininkų efektus lengva atskirti nuo gardelės šiluminių efektų pagal relaksacijos laiką (jeigu jį įmanoma pamatuoti). Tai, kad C–tipo bandiniuose atsakas į mikrobangų spinduliuotę yra beveik beinercinis, patvirtina, kad stebimus reiškinius lemia karštųjų krūvininkų efektai. Kitus argumentus teikia laidumo (5.1 skyrius) ir elektrovaros (5.2 skyrius) tyrimų rezultatai. Kaip buvo parodyta 5.1 skyriuje, mikrobangų spinduliuotė sužadina ASi dariniuose elektrinį laidumą, kuriuo priklausomybė nuo SAD impulso galios turi charakteringą, aktyvuojamą procesą aprašančios eksponentinės funkcijos, bruožų. Iš išraiškos (5.3) seka, kad elektrinis laidumas auga dėl temperatūros didėjimo, nes aktyvacijos energija  $E_0$  yra pastovus parametras. Galutinėje išraiškoje tai privalo būti krūvininkų temperatūra. Kyla klausimas, ar tai yra karštosios skylės ir jų temperatūra  $T_h$ , ar skylės, esančios pusiausvyroje su kristaline gardele, o tuomet gardelės temperatūra būtų  $T_0$ . Siekiant patvirtinti karštųjų krūvininkų efektą ir atsiriboti nuo gardelės šiluminių efektų, buvo

5.1 lentelė. Bandinių temperatūros pokyčiai esant skirtingoms SAD galioms

Impulso galia, W	1	10	$10^2$	$10^3$
Impulso energija, J	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
$\Delta T_0$ , K	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10

įvertintas galimas bandinio pašilimas naudotų mikrobangų spinduliuotės impulso galių intervale. Bandinio temperatūros pokytis  $\Delta T_0$  SAD impulso metu buvo įvertintas, taikant adiabatinių artinį, tai yra, laikant, kad  $\Delta T_0 = \Delta Q / \chi m$ . Čia  $Q = P \cdot t_{\text{imp}}$  yra impulso energija. Atsižvelgiant į tai, kad ne mažiau 2/3–ų bandinio tūrio sudaro cSi, bandinio masė  $m = \rho \cdot V$  buvo skaičiuota naudojant kristalinio silicio tankį  $\rho = \rho_{\text{cSi}} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , bandinio tūris  $V = 0,6 \times 0,5 \times 0,45 \text{ mm}^3 \approx 10^{-10} \text{ m}^3$ , šiluminė talpa  $\chi \approx 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  [99]. Atlikti skaičiavimai

rodo, kad dėl mažos SAD spinduliuotės impulso trukmės ( $t_{\text{imp}} = 2 \mu\text{s}$ ) 1 kW galios impulsas pašildo bandinį ne daugiau nei  $\Delta T_0 = 10 \text{ K}$ . Taigi, esant impulso galiai (1÷2) W bandinio pašilimas sudaro laipsnio dalys (5.1 lentelė). Tai yra pernelyg mažas gardelės temperatūros pokytis, kad juo būtų galima paaiškinti 0,45 eV aktyvacijos energijos elektrinio laidumo padidėjimą [117, 119]. Todėl, kaip ir buvo tikėtasi, bei atsižvelgiant į elektrinio laidumo matavimų rezultatus, galima teigti, kad elektrovarą sąlygoja skylių kaitimas veikiant mikrobangų spinduliuotei. Tada temperatūra (5.3) išraiškoje yra karštųjų skylių temperatūra  $T_h = T_0 + \Delta T_h$ . Panaudojus darbe [117] gautas išraiškas (5.3) ir (5.4) radome, kad bandinio varžos pokytis  $\Delta R = R(P) - R(0)$ , veikiant SAD impulsu  $P$ , yra:

$$\Delta R = A [T_h \exp(E_0 / kT_h) - T_0 \exp(E_0 / kT_0)], \quad (5.15)$$

čia  $A = 2k / [N(E_F) E_0 e^2 a^2 \epsilon v_0]$ ,  $T_h$  ir  $T_0$ , atitinkamai skylių ir kristalinės gardelės temperatūros. Ekspontentes skleidžiant eilute ir paliekant narius iki kvadratinio nario, gaunama tokia varžos pokyčio išraiška:

$$\Delta R = A \left[ \left( 1 - \frac{E_0^2}{2k^2 T_0^2} \frac{T_0}{T_h} \right) \Delta T_h \right]. \quad (5.16)$$

Iš (5.16) formulės seka, kad, didėjant skylių temperatūrai, varžos pokyčio ženklas priklauso nuo antrojo skliaustuose esančio nario ženklo ir yra neigiamas, jeigu tenkinama sąlyga:

$$B = E_0^2 / (2k^2 T_0 T_h) > 1. \quad (5.17)$$

Ši sąlyga būtų tenkinama, jeigu temperatūra  $T_h$  būtų pakankamai maža. Kad įvertinti temperatūros  $T_h$  ribą buvo apskaičiuotas santykis  $B = \frac{E_0^2}{2k^2 T_0^2}$ . Įrašius bandinio temperatūrą  $T_0 = 300 \text{ K}$ , ASi budinga elektros laidumo aktyvacijos energija  $E_0 = 0,45 \text{ eV}$  [119], gaunama, kai  $B = 160$ . Norint įvykdyti sąlygą (5.17) skylės turėtų įkaisti ne daugiau nei iki  $T_{h(\text{lim})} = 5 \cdot 10^4 \text{ K}$ . Tokia karštųjų krūvininkų temperatūra nepasiekama net naudojant pikosekundinius lazerinius impulsus, todėl šiuo atveju riba  $T_{h(\text{lim})}$  tikrai nepasiekama [116]. Šie skaičiavimai rodo, kad ASi darinio varžos pokytis (jeigu tik jis yra) gali būti paaiškintas šuoliniu aktyvaciniu ASi laidumo pobūdžiu ir skylių kaitimu, veikiant SAD laukui.

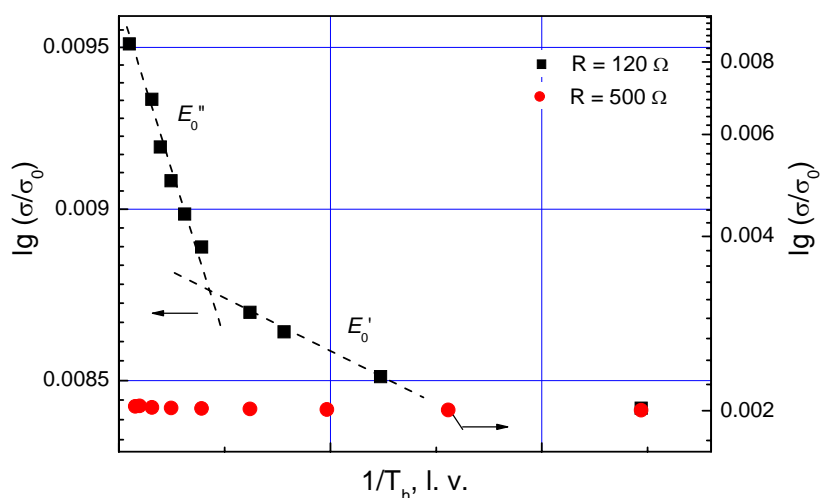
Tiriamuoju atveju jis turi būti neigiamas. Tai atitinka gautus ir 5.1 skyriuje pateiktus eksperimentinius rezultatus. Paprastumo dėlei galima laikyti, kad tarp skylių temperatūros pokyčio  $\Delta T_h$  ir impulso galios  $P$  išlaikoma tiesinė priklausomybė  $\Delta T_h \sim P$ . Tuomet, taikydami (5.16) išraišką 5.2 paveikslo kreivėms, matome, kad (5.16) išraiška gerai dera aprašant eksperimentų rezultatus.

Taigi, eksperimentiniai rezultatai ir taikytos modelio koncepcijos analizė rodo, kad ASi darinių varžos pokytis, veikiant juos SAD spinduliuote, paaiškinamas skylių kaitimu akytame silicyje, atsižvelgiant į aktyvacinį akytojo silicio elektros laidumo pobūdį. Kadangi skylių temperatūra  $T_h \sim P$ , tai 5.3 išraiška gali būti pakeista į kokybiškai adekvačią:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_i / kT_h), \quad (5.18)$$

kur eksponentės vardiklyje, yra skylių temperatūra  $T_h$ . Atitinkamai pakoreguotas 5.3 paveikslo grafikas transformuojamas į grafiką pateiktą 5.15 paveiksle. Paveiksle 5.15 pateikta būdinga aktyvacijos reiškinio kreivė, rodanti, kad akytojo silicio elektrinio laidumo didėjimą lemia laidumo aktyvacija, kaistant skylių ansambliui, absorbuojančiam mikrobangų energiją. Aktyvacijos energijos išsidėsto didėjimo tvarka  $E_0'' > E_0'$ .

Apibendrinami aukščiau pateiktus rezultatus, galime teigti, kad mūsų ASi dariniuose skylės kaista dėl SAD spinduliuotės poveikio. Apie tai liudija: 1 – trumpa elektrinio laidumo ir elektrovaros relaksacija; 2 – šiluminio efekto įvertinimai, rodantys, kad bandinių kristalinės gardelės pašilimas SAD impulso metu yra nežymus; 3 – skylių kaitimo efektas paaiškina ASiS darinio elektrinio laidumo didėjimą, veikiant SAD spinduliuotei. Toliau pademonstruosime, kad elektrovaros atsiradimas ir jos eiga, didinant SAD



5.15 pav. ASi darinių laidumo priklausomybė nuo skylių temperatūros  $1/T_h$  grafikas

spinduliuotės impulso galią, taip pat gali būti paaiškinti skylių kaitimo efekto ASiS darinyje. Pradėdami nagrinėti elektrovaros atsiradimo priežastis, tarkime, kaip įprasta [25, 90], kad karštųjų krūvininkų elektrovarai galioja tos pačios bendros pradinės išraiškos, kaip ir įprastai termoelektrovarai puslaidininkiuose [122], tik vietoje kristalinės gardelės temperatūros  $T_0$ , juose yra karštųjų krūvininkų temperatūra. Mūsų atveju tai skylių temperatūra  $T_h$ . Išraiškos rašomos vienmačiam atvejui.

Taigi, termoelektrovara  $dU$  dėl skylių temperatūros gradiento  $dT_h$  yra:

$$dU = \alpha dT_h, \quad (5.19)$$

čia  $\alpha$  – termoelektrovaros koeficientas, arba:

$$U = \alpha \Delta T_h. \quad (5.20)$$

Bendru atveju termoelektrovara gali susidėti iš dviejų dedamųjų: kontaktinės (arba barjerinės) elektrovaros  $U_\varphi$ , atsirandančios dėl aukščiau minėtų potencinių barjerų  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  bei tūrinės difuzinės dedamosios  $U_d$ , atsirandančios dėl padidėjusios karštųjų skylių difuzijos iš „karštųjų“ darinio sričių į „šaltąsias“ [25, 90, 123]. Atitinkamai termoelektrovaros koeficientas  $\alpha$  yra lygus:

$$\alpha = \alpha_\varphi + \alpha_d = \frac{\partial U_\varphi}{\partial T_h} + \frac{\partial U_d}{\partial T_h}, \quad (5.21)$$

o suminė elektrovara:

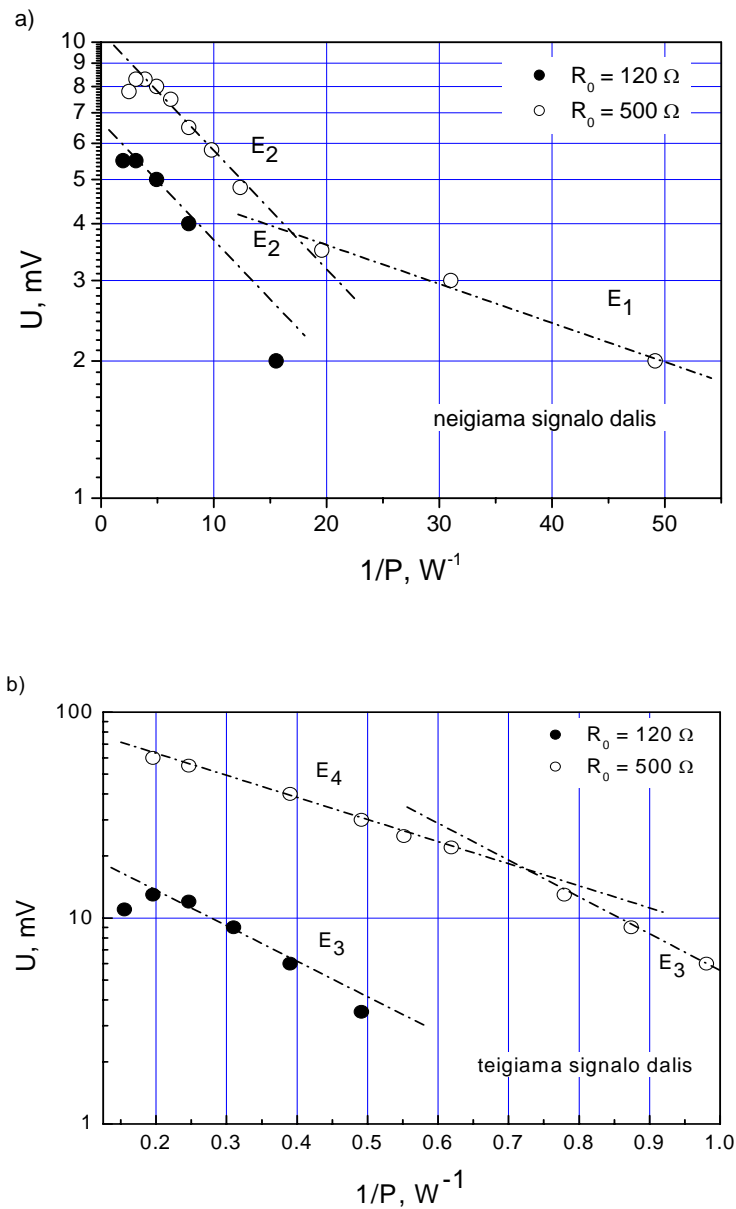
$$U = \left( \frac{\partial U_\varphi}{\partial T_h} + \frac{\partial U_d}{\partial T_h} \right) \Delta T_h. \quad (5.22)$$

Nagrinėjimą pradėkime nuo C–tipo bandinių elektrovaros atsako. Kaip vėliau paaiškės, nors šios serijos bandiniai technologijos požiūriu yra sudėtingesni, bet kaip ir elektrinio laidumo atveju, turi privalumą, interpretuojant elektrovaros eksperimentinius rezultatus. 4–me skyriuje pateiktos C–tipo bandinių voltamperinės charakteristikos yra tiesinės. Taigi, neatsižvelgiant į 3–me skyriuje aprašytus barjerus  $\varphi_1, \varphi_2$  ir  $\varphi_3$ , C–tipo bandinių

voltamperinėse charakteristikose barjerai nepasireiškė. Pasinaudojant šiuo rezultatu galime daryti prielaidą, kad barjerai nepasireiškia ir elektrovaros kūrime, tai yra laikome, kad  $\frac{\partial U_{\varphi}}{\partial T_h} = 0$ . Taigi termoelektrovaros išraiška (5.22) šiuo atveju bus:

$$U = \frac{\partial U_d}{\partial T_h} \Delta T_h. \quad (5.23)$$

Tokia išraiška aprašo karštųjų skylių elektrovarą atsirandančią dėl padidėjusio karštųjų skylių difuzijos srauto į „šaltąsias“ sritis. Labai aiški tampa ir padidėjusios difuzijos priežastis, atsižvelgus į tai, kad ASiS dariniams būdingas „perkoliacinio“ modelio elektrinis laidumas. Skylių kaitimas (tai yra, jų ansamblio vidutinės energijos padidėjimas) „užkelia“ skylės virš „perkoliacijos slenksčio“ [118, 125], tuo pačiu jas delokalizuoja ir suteikdamas joms galimybę difunduoti erdvėje. Toks termoelektrovaros atsiradimo mechanizmas ASiS darinyje labai panašus į žinomą termoelektrovaros reiškinį netvarkiose medžiagose [118, 125]. Bet ASi negalima tiesiogiai sutapatinti su minėtomis netvarkiomis medžiagomis, bent jau dėl to, kad fraktalų tinklo ASi kamienas neatitinka įprastinės monolitinės netvarkios medžiagos sampratos [117]. Be to įprastinės termoelektrovaros atveju krūvininkai didina savo energiją pasisavindami ją iš kristalinės gardelės, tai yra sąveikoje su fononais. Tokiu būdu sąveika su fononais yra ne tik sklaidos priežastis, bet ir energijos papildymo šaltinis. Tuo tarpu mūsų atveju skylės gauna energiją iš SAD elektromagnetinio lauko. Iki šiol termoelektrovaros tyrimai akytojo silicio dariniuose nebuvo atliekami nei eksperimentiškai, nei modeliuojami teoriškai. Todėl eksperimento analizei pasinaudosime, nedetalizuojant, tik pačia bendriausia netvarkioms medžiagoms gauta išvada, kurioje teigiama, kad termoelektrovara juose gali būti išreikšta per tos medžiagos perkoliacinį nuolatinės srovės elektros laidumą [118, 125]. Vystant šią išvadą toliau buvo samprotauta taip: termoelektrovara ASi darinyje atsiranda dėl to, kad SAD spinduliuotės energijos įkaitintos skylės yra pasiekusios „perkoliacijos slenkstį“ (arba „judrumo slenkstį“ [118, 125]). Jos yra išlaisvintos iš lokalizuotos būsenos ir gali dalyvauti difuzinėje pernašoje. Kadangi SAD spinduliuotė nevienodai kaitina skylių ansamblį įvairiose ASi darinio erdvės srityse, tai susiformuoja sritys su skirtinga skylių temperatūra  $T_h$ , ir atsiranda skylių temperatūros gradientai  $\nabla T_h$ . Taigi, padidėja skylių srautai iš „karštųjų“ sričių į „šaltąsias“, o skylių srautų balanso kaita sukelia impulsinį karštųjų skylių elektrovaros atsaką į SAD impulsą. Kaip ir elektrinio laidumo atveju elektrovaros dydis



5.16 pav. C–tipo bandinių elektrovaros priklausomybė nuo dydžio atvirkštinio impulso galiai (kylančiojoje grafikų dalyje): a) – neigiama ir b) – teigiama signalo dalys

priklauso nuo to, kiek skylių „peržengia“ perkoliacijos slenkstį. Tai reiškia, kad analogiškai elektrinio laidumo išraiškai (5.18) galima rašyti:

$$U \sim \exp\left(-\frac{E_i}{kT_h}\right). \quad (5.24)$$

Elektrovaros teigiamo ir neigiamo atsakų amplitudžių priklausomybė nuo SAD spinduliuotės impulso galios pavaizduota pusiaulogaritminiame mastelyje (5.16 pav.). Kadangi skylių temperatūra  $T_h \sim P$ , tai 5.16 paveiksle pavaizduotas priklausomybes gerai aprašo (5.24) formulė. Matome, kad ir teigiama ir neigiama atsakų dalys rodo aktyvacinį elektrovaros pobūdį. Identifikuotos aktyvacijos energijos  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  ir  $E_4$ . Energijos  $E_2$  ir  $E_3$  būdingos ir teigiamam, ir neigiamam signalui. Taigi tikėtina, kad elektrovara, atsirandanti akytojo silicio dariniuose, yra karštųjų krūvininkų termoelektrinė elektrovara. Jos atsiradimo priežastis yra skylių temperatūros didėjimas dėl jų absorbuotos SAD spinduliuotės energijos.

#### **5.4. AKYTOJO SILICIO DARINIŲ SAVYBIŲ PRAKTINIS PANAUDOJIMAS MIKROBANGŲ JUTIKLIUOSE**

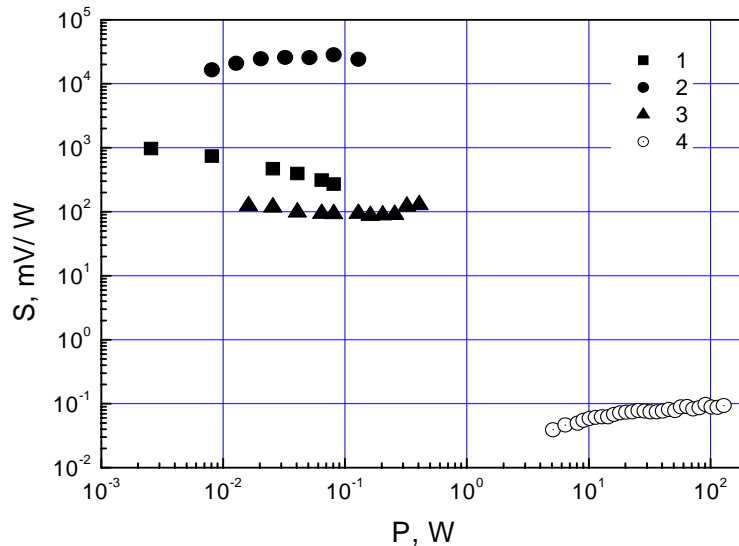
Skyriuje 5.2 pateikti eksperimentiniai duomenys rodo, kad ASi dariniuose elektrovara atsiranda esant žymiai mažesnėms SAD impulso galioms, negu tos pačios medžiagos kontroliniuose cSi bandiniuose. Tai rodo ASi darinių pranašumą prieš paprastą cSi, kuriant SAD spinduliuotės jutiklius. ASi dariniuose elektrovara atsiranda ASiS2 srities ribose su kaimyninėmis cSi ir ASiS1 sritimis. ASiS2 srities kamieno elementų skersiniai matmenys yra kelių nanometrų dydžio. Tokiu būdu riboje su cSi sritimi yra didelis kiekis labai smulkių taškinių kontaktų. Panašiai atrodo ir riba ASiS1/ASiS2. ASiS1 sluoksnis yra santykinai mažo akytumo, o jo elementų matmenys yra viena – dviem eilėmis didesni už kontaktuojančių ASiS2 elementų matmenis. Taigi, darbe tiriamas ASi sluoksnių darinys yra ne kas kita, o daugybės lygiagrečiai sujungtų nanometrinių taškinių kontaktų konstrukcija. Akivaizdu, kad viso bandinio kaip SAD spinduliuotės jutiklio voltvatinis jautris  $S$ , proporcingas kiekvieno taškinio kontakto su puslaidininkiu atsakui į SAD spinduliuotę, yra karštųjų krūvininkų termoelektrovara (kartais vadinama elektrogradientinė elektrovara) [90, 91]. Taškinio kontakto voltvatinis jautris  $S$  tirtas daugelyje darbų, o jo išraiška, naudojant karštųjų krūvininkų termoelektrovaros teoriją, yra [120]:

$$S \sim F(s', p') \frac{\tau_\varepsilon}{3\pi e n_0 r_0^3}, \quad (5.25)$$

čia  $F(s', p')$  – funkcija, priklausanti nuo impulso ir energijos laiko relaksacijos laipsninių rodyklių,  $e$  – elektrono krūvis,  $n_0$  – krūvininkų koncentracija,  $r_0$  – taškinio kontakto



spindulys. Svarbu tai, kad taškinio kontakto jautris didėja mažinant spindulį proporcingai  $r^{-3}$ . ASi kamieno matmenys gali būti padaromi išskirtinai maži (nanometrų eilės), net  $\sim 10^3$  kartų mažesni, negu galima pasiekti įprastinės optinės litografijos būdu. Tai leidžia tikėtis, kad naudojant ASi bus pagaminti labai jautrūs SAD spinduliuotės jutikliai.



5.17 pav. Jutiklių, pagamintų iš ASiS darinių, jautrių suvestinė (1, 2, 3 – jutikliai su ASiS dariniais, 4 – kontroliniai cSi jutikliai)

Žvelgiant teoriškai, vidutiniai optinės litografijos būdu pasiekiami matmenys yra mikrometrų dydžio matmenys, o ASiS2 elemento yra keli ar keliasdešimt nanometrų. Jutiklių jautrio padidėjimas dėl matmenų sumažėjimo galėtų siekti tūkstančius ar net šimtus tūkstančių kartų. Panašius rezultatus pasiektume, taikant bigradientinės karštųjų krūvininkų elektrovaros modelį [96]. Tik šiuo atveju jautris didėtų kiek lėčiau ( $S \sim 1/d^2$ , formulė 5.14). Kelių jutiklių, pagamintų juose naudojant ASiS darinius, jautrių suvestinė pateikta 5.17 paveiksle. Tame pačiame paveiksle pavaizduoti ir kontrolinių bandinių jautriai. Iš 5.17 paveikslo matome, kad jutiklių su akytojo silicio dariniais voltvatinis jautris yra nuo  $10^3$  iki  $10^5$  kartų didesnis už jautrį kontroliniuose bandiniuose. Jų darbinis režimas yra paslinkęs dvi – tris dešimtis W į mažesnių SAD spinduliuotės impulso galių pusę. Dinaminis jutiklių diapazonas nėra didelis ir siekia vieną – dvi dekadus. Tačiau tai neturėtų nuvilti, kadangi šiems bandiniams, kaip ir jutiklių prototipams nebuvo atliktas nei konstrukcijos, nei parametru optimizavimas.

Taigi atlikti tyrimai parodo, kad naudojant ASi savybes gali būti pagaminami SAD spinduliuotės jutikliai silicio sluoksnių pagrindu  $10^3$  iki  $10^5$  kartų jautresni už analogiškus dabartinius jutiklius.

## **5.5 PENKTOJO SKYRIAUS IŠVADOS**

1. Akytojo silicio dariniuose, pasižyminčiuose simetrinėmis voltamperinėmis charakteristikomis, pasireiškia mikrobangų spinduliuotės aktyvuota elektros krūvio pernaša.
2. Superaukšto dažnio elektromagnetinė spinduliuotė sukelia akytojo silicio dariniuose elektrovaros atsaką, kurio parametrai ir amplitudė priklauso nuo darinio sandaros ir mikrobangų impulso galios.
3. Elektrovaros atsako akytojo silicio dariniuose veikiant superaukšto dažnio elektromagnetine spinduliuote priežastis – skylių ansamblio kaitimas sugertos superaukšto dažnio spinduliuotės energijos poveikyje.
4. Akytojo silicio fizinės savybės superaukšto dažnio spinduliuotės elektromagnetiniame lauke gali būti panaudotos kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

## **BENDROSIOS IŠVADOS**

1. Akytasis silicis tirtuose dariniuose, sprendžiant iš morfologinių ir fotoluminescencinių tyrimo rezultatų, susideda iš dviejų sluoksnių – mažesnio akytumo paviršinio ir didesnio akytumo sluoksnių, kontaktuojančio su kristaliniu siliciu. Akytojo silicio kamieną sudarančių elementų matmenys yra (3÷5) nanometrų ruože. Tirtų darinių juostinėse diagramose tarp šių sluoksnių galimi izotipinėms heterogeninėms sandūros būdingi potencialiai barjerai.
2. Papildomas akytojo silicio sluoksnių legiravimas boru stipriai įtakoja darinio elektrines savybes. Legiravimo poveikis pasireiškia žymiu akytojo silicio sluoksnių elektros laidumo padidėjimu, o heterogeninis akytojo ir kristalinio silicio darinys tiesinėmis voltamperinėmis charakteristikomis.
3. Akytojo silicio dariniuose, pasižyminčiuose simetrinėmis voltamperinėmis charakteristikomis, pasireiškia mikrobangų spinduliuotės aktyvuota elektros krūvio pernaša, sietina su skylių ansamblio kaitimu superaukšto dažnio elektromagnetiniame lauke.
4. Superaukšto dažnio elektromagnetinė spinduliuotė sukelia akytojo silicio dariniuose elektrovaros atsaką, kurio parametrai ir amplitudė priklauso nuo darinio sandaros ir mikrobangų impulso galios.
5. Elektrovaros atsako akytojo silicio dariniuose veikiant superaukšto dažnio elektromagnetine spinduliuote priežastis – skylių ansamblio kaitimas.
6. Akytojo silicio fizinės savybės superaukšto dažnio spinduliuotės elektromagnetiniame lauke gali būti panaudotos kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Uhler, A. Electrolytic shaping of Germanium and Silicon, *Bell Syst., Tech. J.*, 1956, V. 35, p. 333–339.
2. Fauchet, P.M. Photoluminescence and electroluminescence from porous silicon, *J. Lum.*, 1996, V. 70, p. 294–309.
3. Pickering, C.; Beale, M.I.J.; Robbins D.J.; Pearson, P.J.; Greef, R. Optical studies of the structure of porous silicon films formed in p-type degenerate and non-degenerate silicon, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1984, V. 17, p. 6535–6540.
4. Cahnam, L.T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, V. 57, N. 10, p. 1046–1052.
5. Halimaoui A.; Oules, C.; Bomchil, G.; Bsiesy, A.; Gaspard, F.; Herino, R.; Ligeon, M.; Muller, F. Electroluminescence in the visible range during anodic oxidation of porous silicon films, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, V. 59, p. 304–310.
6. Richter, A.; Steiner, P.; Kozlowsky, F.; Lang, W. Current-induced light emission from a porous silicon device, *IEEE Electron Device Lett.*, 1992, V. 12, p. 691–694.
7. Koshida, N.; Koyama, H. Visible electroluminescence from porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 60, p. 347–351.
8. Steiner, P.; Kozlowsky, F.; Lang, W. Light-emitting porous silicon diode with an increased electroluminescence quantum efficiency, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, V. 62, p. 2700–2705.
9. Loni, A.; Simons, A.J.; Cox, T.I.; J. Calcott, P.D.; Canham, L.T. Electroluminescent porous silicon device with an external quantum efficiency greater than 0.1% under CW operation, *Electron. Lett.*, 1995, V. 31, p. 1288–1295.
10. Lalic, N.; Linnros, J. A porous silicon light-emitting diode with a high quantum efficiency during pulsed operation, *Thin Solid Films*, 1996, V. 276, p. 155–160.
11. Tsybeskov, L.; Duttagupta, S.P.; Mirschmann, K.D.; Fauchet, P.M. Stable and efficient electroluminescence from a porous silicon-based bipolar device, *Appl. Phys. Lett.*, 1996, V. 68, p. 2058–2062.
12. Smith, R.L.; Collins, S.D. Porous silicon formation mechanisms, *J. Appl. Phys.*, 1992, V. 71, R1, p. 2–103.
13. Mirschmann, K.D.; Tsybeskov, L.; Duttagupta, S.P.; Fauchet, P.M. Silicon-based visible light-emitting devices, interped into microelectronic circuits, *Nature*, 1996, V. 384, p. 388–395.

14. Bischoff, T.; Müller, G.; Welser, W.; Koch, F. Frontside micromachining using porous silicon sacrificial – layer technologies, *Sensor and Actuators*, 1997, V. A 60, p. 228–234.
15. Pavesi, L. Porous silicon dielectric multilayers and microcavities, *Rivista d. Nuove Eimento*, 1997, V. 20, N. 10, p. 1–74.
16. Müller, F.; Birner, A.; Schilling, J.; Gösele, U.; Kettner, Ch.; Hänggi, P.; Membranes for micropumps from macroporous silicon, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2000, V. 182, p. 585–590.
17. A Collection of papers Present of the First International Conference on Porous Semiconductors – Science & Technology, Mallorca, Spain, *Journal of Porous Materials*, 2000, V. 7, N 1, N. 2, N. 3, p. 1–320.
18. *Porous Semiconductors – Science & Technology*, Extended Abstract of the 3d International Conference, Tenerife Spain, 10–15. 03. 2002.
19. Cullis, A.G.; Canham, L.T.; Calcott P.D.J. The structural and luminescence properties of porous silicon, *Appl. Phys. Rev., J. Appl. Phys.*, 1997, V. 32, N. 3, p. 909–965.
20. Kovalev, D.; Heckler, h.; Polisski, G.; Koch, F. Optical properties of Si nanocrystals, *Phys. Stst. Sol.*, 1999, V. 215, p. 871–932.
21. Pavesi, L. Porous silicon dielectric multilayers and microcavities, *Rivista del Nuovo Cimento*, 1997, V. 20, N. 10, p. 1–78.
22. Bettotti, P.; Cazzanelli, M.; Dal Negro, L.; Danese, B.; Gaburro, Z.; Oton, C.J.; Vijaya Prakash, G.; Pavesi, L. Silicon nanostructures for photonics, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2002, V. 14, p. 8253–8281.
23. Föll, H.; Christophersen, M.; Carstensen, J.; Hasse, G. Formation and application of porous silicon, *Materials Science and Engineering R*, 2002, V. 39, p. 93–141.
24. Itotia, K.; Drayton, F. Porosity effects on coplanar waveguide porous silicon interconnects, *IEEE MTT-S 2002 International Microwave Symposium Digest*, V. 2, p. 681–684, June 2002.
25. Ашмонтас, С. Электроградиентные явления в полупроводниках. Вильнюс. Мокслас. 1984. 183 с.
26. Ašmontas, S.; Sužiedėlis, A. New microwave detector, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1994, V. 15, N. 3, p. 525–538.
27. Turner, D.R. Electropolishing Silicon in Hydrofluoric Acid Solutions, *J. Electrochem. Soc.*, 1958, V. 105, N. 7, p. 402–410.

28. Zhang, X.G.; Collins, S.D.; Smith, R. L. Porous silicon formation and electropolishing of Silicon by anodic polarization in HF solution, *J. Electrochem. Soc.*, 1989, V. 136, p. 1561–1564.
29. Unagami, T.; Sehi, M. Structure of porous silicon layer and head-treatment effect, *J. Electrochem. Soc.*, 1978, V. 125, N. 8, p. 1339–1345.
30. Medvid', A.; Berzina, B.; Trinkler, L.; Fedorenko, L.; Lytvyn, P.; Yusupov, N.; Yamaguchi, T.; Sirghi, L.; Aoyama, M. Formation of nanostructure on surface of SiC by laser radiation, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2003, V. 195, N. 1, p. 199–203.
31. Medvid', A.; Mychko, A.; Krivich, A.; Onufrijevs, P. Formation of pores in Ge single crystal by laser radiation, *Appl. Surf. Sci.*, 2005, V. 244/1–4, p. 203–208.
32. Dewald, J.F. The Surface Chemistry of Metals and Semiconductors, Ed. H. C. Gatos, NY: Wiley, 1960, p. 78–91.
33. Turner, D.R. Electrochemistry of Semiconductors, Ed. P. J. Holmes, NY: Academic, 1961, p. 161–167.
34. Unagami, T. Formation mechanism of porous silicon layer by anodization in HF solution, *J. Electrochem. Soc.*, 1980, V. 127, p. 476–480.
35. Ambrazevičius, G.; Zaicevas, G.; Jasutis, V.; Leščinskis, D.; Lideikis, T.; Šimkienė, I.; Gulbinaitė, D. Layered structure of luminescent porous silicon, *J. Appl. Phys.*, 1994, V. 76, N. 9, p. 5442–5446.
36. Hamilton, B. Porous silicon, *Semicond. Sci. Technol.*, 1995, V. 10, p. 1187–1207.
37. Lehmann, V.; Gösele, U. Porous silicon formation: a quantum wire effect, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, V. 58, p. 856–860.
38. Canham, L.T.; Groszek, A.J.; Characterization of microporous Si by flow calorimetry: Comparison with a hydrophobic SiO<sub>2</sub> molecular sieve, *J. Appl. Phys.*, 1992, V. 72, N. 4, p. 1558–1565.
39. Beale, M.J.; Benjamin, J.D.; Uren, M.J.; Chew, N.G.; Cullis, A.G. Luminescent anodised silicon aerocrystal networks prepared by supercritical drying, *J. Crystal Growth*, 1985, V. 73, p. 622–625.
40. Smith, R.L.; Chuang, S.F.; Collins, S.D. A theoretical model of the formation morphologies of porous silicon. *J. Electron. Mater.*, 1988, V. 17, p. 533–540.
41. Bower, R.W.; Collins, S.D. Fractal transitions in diffusion-limited cluster formation, *Phys. Rev. A*, 1991, V. 43, p. 3165–3170.
42. Ookudo, N. Depth-dependent porous silicon photoluminescence, *J. Appl. Phys.*, 1993, V. 74, p. 6375–6379.

43. Yan, H.; Hu, X. Interfacial dynamics and formation of porous silicon, *J. Appl. Phys.*, 1993, V. 73, p. 4324–4330.
44. Bomchil, C.; Herino, R.; Halimaoui, A. Porous silicon: the material and its applications in silicon-on-insulator technologies, *Appl. Surf. Sci.*, 1989, V. 41, p. 604–613.
45. Goryachev, D. N.; Belyakov, L. V.; Sreseli, O. M.; Yaroshetskii, I. D. Porous semiconductors: why only silicon-based? A possible explanation, *Semicon. Sci. Technol.*, 1995, V. 10, p. 373–380.
46. Kanemitsu, Y.; Uto, H.; Masumoto, Y.; Masumoto, T.; Futagi, T.; Mimura, H. Microstructure and optical properties of free-standing porous silicon films: Size dependence of absorption spectra in Si nanometer-sized crystallites, *Phys. Rev. B*, 1993, V. 48, p. 2827–2831.
47. Sni, Z.; Leong, P.P.; Herman, I.P.; Higashi, G.S.; Temkin, H. Raman analysis of light-emitting porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 60, p. 2086–2090.
48. Ossicini, S.; Pavesi, L.; Priolo, F. Light emitting silicon for microphotonics, *Springer Tracts in Modern Physics*, 2003, V. 194, Springer–Verlag, Berlin 2003.
49. Nakagawa, K.; Nishida, A.; Shimada, T.; Yamaguchi, H.; Eguchi, K. Fine structures of porous silicon with visible photoluminescence, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, V. 31, Pt. 2, N. 4B, p. L515–L517.
50. Dapkus, L.; Gulbinaitė, D.; Jasutis, V.; Leščinskis, D.; Šimkienė, I. Microstructure of electrochemically etched (100) Si surface, *Lietuvos fizikos žurnalas*, 1993, V. 33, N. 3, p. 145–149.
51. Bisi, O.; Ossicini, S.; Pavesi, L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, *Surf. Sci. Rep.*, 2000, V. 38, p. 1–29.
52. Voos, M.; Usan, P.; Delalande, C.; Bastard, G.; Halimaoui, A. Visible photoluminescence from porous silicon: A quantum confinement effect mainly due to holes?, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 61, p. 1213–1219.
53. Bassani, F.; Paravissini, G.P. *Electronic States and Optical Transmissions in Solid*. Oxford: Pergamon Press, 1975.
54. Needs, R.J.; Read, A.J.; Nash, R.J.; Bhattarcharjee, S.; Oteish, A.; Canham, L.T.; Calcott, P.D.J. *Physica A*, 1994, V. 207, p. 411–414.
55. Buda, F.; Kohanoff, J.; Pannello, M. Optical properties of porous silicon: A first-principles study, *Phys. Rev. Lett.*, 1992, V. 69, p. 1272–1276.

56. Ohno, T.; Shitaishi, K.; Ogawa, T. Intrinsic origin of visible light emission from silicon quantum wires: Electronic structure and geometrically restricted exciton, *Phys. Rev. Lett.*, 1992, V. 69, p. 2400–2403.
57. Walle, V.; Northrup, J. E. First-principles investigation of visible light emission from silicon-based materials, *Phys. Rev. Lett.*, 1993, V. 70, p. 1116–1119.
58. Xia, J. B.; Chang, Y. C. Theory of the electronic structure of porous Si, *Phys. Rev. B*, 1993, V. 48, p. 5179–5183.
59. Sanders, G. D.; Chang, Y. C. Optical properties of free-standing silicon quantum wires, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 60, p. 2525–2529.
60. Delerue, C.; Lannoo, M.; Allan, G. Theory of the luminescence of porous silicon, *J. Lum.*, 1993, V. 57, p. 249–253.
61. Proot, J. P.; Delerue, C.; Allan, G. Electronic structure and optical properties of silicon crystallites: Application to porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 61, p. 1948–1954.
62. Delerue, C.; Allan, G.; Lannoo, M. Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon, *Phys. Rev. B*, 1993, V. 48, p. 11024–11028.
63. Gardellis, S.; Hamilton, B.; The effect of surface modification on the luminescence of porous silicon, *J. Appl. Phys.*, 1994, V. 76, N. 9, p. 5327–5341.
64. Gardellis, S.; Rimmer, J. S.; Dawson, P.; Hamilton, B.; Kubiak, R. A.; Whall, T. E.; Parker, E. H. C. Evidence for quantum confinement in the photoluminescence of porous Si and SiGe, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, V. 59, N. 7, p. 2118–2132.
65. Collins, R. T.; Tichler, M. A.; Stathis, J. H. Photoinduced hydrogen loss from porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 61, p. 1649–1654.
66. Shih, S.; Jung, K. H.; Kwong, D. L.; Kovar, M.; White, J. M. Effects of H and O passivation on photoluminescence from anodically oxidized porous Si, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, V. 62, p. 1780–1785.
67. Calcott, P. D. J.; Nash, K. J.; Canham, L. T.; Kane, M. J.; Broomhead, D. Identification of radioactive transitions in highly porous silicon, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 1993, V. 5, p. L91–L103.
68. Canham, L. T. Optical properties of low dimensional silicon structures, *NATO ASI Series*, Dordrecht: Kluwer Academic, 1993, V. 244, p. 81–93.
69. Tischler, A.; Collins, R. T.; Stathis, J. H.; Tsang, J. C. Luminescence degradation in porous silicon, *Appl. Phys. Lett.*, 1992, V. 60, p. 639–642.



70. Prokes, S. M. Light emission in thermally oxidized porous silicon: Evidence for oxide-related luminescence, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, V. 62, p. 3244–3248.
71. Hybertsen, M. S. Absorption and emission of light in nanoscale silicon structures, *Phys. Rev. Lett.*, 1994, V. 72, p.1514–1518.
72. Jones, R.; Cohen, O.; Paniccia, M.; Fang, A. W.; Bowers, J. Hybrid silicon laser, *Photonics Spectra*, 2007, p. 55–63.
73. Papaconstantopoulos, D.A.; Economou, E.N. Calculations of the electronic properties of hydrogenated silicon, *Phys. Rev. B*, 1981, V. 24, N. 12, p. 7233–7246.
74. Kozłowski, F.; Steiner, P.; Lang, W. Optical properties of low dimensional silicon structures, *NATO ASI Series*, 1993, V. 244 (Dordrecht: Kluwer Academic), p.123–126.
75. Lehmann, V.; Hönlein, W.; Reisinger, H.; Spitzer, A.; Wendt, H.; Willer, J. A novel capacitor technology based on porous silicon, *Thin Solid Films*, 1996, V. 276, p. 138–142.
76. Taliercio, T.; Dilhan, M.; Massone, E.; Foucaran, A.; Gue, A.M.; Bretagnon, T.; Fraisse, B.; Montes, L. Porous silicon membranes for gas-sensor applications, *Sensors and Actuators*, 1995, V. 46–47, p. 43–46.
77. Tsuo, Y.S.; Heben, M.J.; Wu, X.; Xiao, Y.; Moore, C.A.; Verlinden, P.; Deb, S.K. Photovoltaic device applications of porous silicon, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 1992, V. 283, p. 405–410.
78. Menna, P.; Di Francia, G.; La Ferrara, V. Porous silicon in solar cells: A review and a description of its application as an AR coating, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1995, V. 37, p. 13–24.
79. Bastide, S.; Strehlke, S.; Cuniot, M.; Bountry–Forveille, A.; Le, Q.N.; Sarti, D.; Levy–Clement, C. Porous silicon emitter for solar cells, *13<sup>th</sup> ECPSEC*, Nica (France), 23–27 October, 1995
80. Lagoubi, A.; Neumann-Spallart, M.; Bastide, S.; Levy–Clement, C. Conditioning of n-silicon by photoelectrochemical etching for photovoltaic applications, *11<sup>th</sup> ECPSEC*, Montreux (Swiss), 12–16 October, 1992
81. Smestad, G.; Kunst, M. Photovoltaic response in electrochemically prepared photoluminescent porous silicon, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, V. 26, p. 277–283.

82. Guang–Pu, W.; Yi–Ming, Z.; Zhao–Jian, H.; Yu, L.; Jing–Wei, F.; Yio–Wu, M. Porous silicon and its application test for photovoltaic devices, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1994, V. 35, p. 319–324.
83. Shieh, J.–M.; Lai, Y.–F.; Ni, W.–X.; Kuo, H.–C.; Fang, C.–Y.; Huang, J.; Pan, C.–L. Enhanced photoresponse of a metal–oxide–semiconductor photodetector with silicon nanocrystals embedded in the oxide layer, *Appl. Phys. Lett.*, 2007, V. 50, p. 051105–051112.
84. Loni, A.; Canham, L.T.; Berger, M.G.; Arens–Fischer, R.; Munder, H.; Luth, H.; Arrand, H.F.; Benson, T.M. Porous silicon multilayer optical waveguides, *Thin Solid Films*, 1996, V. 276, p. 143–146.
85. Berger, M.G.; Dieker, C.; Thönissen, M.; Vescan, L.; Lüth, H.; Münder, H.; Theiß, W.; Werke, M.; Grosse, P. Porosity superlattices: a new class of Si heterostructures, *Appl. Phys.*, 1994, V. 27, p. 1333–1336.
86. Ko, J. H.; Nam, C. M.; Jeong, I. H.; Kwon, Y. S. Low–loss and high frequency interconnection technology on membrane supported by porous silicon post. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, V. 42, Part 1, N. 4B, p. 2478–2482.
87. Peterson, R. L.; Drayton, R. F. Dielectric properties of oxidized porous silicon in a low resistivity substrate. *IEEE MTT–S International Microwave Symposium Digest*, 2001, V. 2, p. 767–770.
88. Drayton, R. F. Recent developments in porous silicon substrates for RF/Microwave applications. Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems. *2004 IEEE MIT–S Digest*, 2004, p. 155–158.
89. Kim, B. J.; Ha, M. L.; Kwon, Y. S. New through-water interconnections with thick oxidized porous silicon sidewall via. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, V. 45, N. 8A, p. 6141–6145.
90. Dienys, V.; Požela, J. Hot electrons, *Mintis Publishing House*, Vilnius, 1971, p. 290.
91. Ašmontas, S. Electrogradient phenomena in semiconductors, Editor prof. J. Požela, *Mokslas*, Vilnius, 1984, p. 184.
92. Ašmontas, S.; Vingelis, L.; Olekas, A. Thermo E.M.F. of hot holes in silicon, *Liet. Fiz. Rink.*, 1985, XXV, N. 4, p. 19–25.
93. Ашмонтас, С.; Вингялис, Л.; Субачюс, Л. Термоэдс горячих электронов в кремнии, *Физика и техника полупроводников*, 1982, V. 16, N. 12, p. 2110–2115.

94. Grigoras, K.; Jasutis, V.; Pačebutas, V.; Sabataitytė, J.; Šimkienė, I.; Tvardauskas, H. Fotojautrūs dariniai mikroaktyvame silicyje. *Puslaidininkų fizikos institutot XI mokslinės konferencijos darbai*, Vilnius, 1999 m. gruodžio 8–10 d., 1999, p. 87–91.
95. Golstein, J.I.; Newbary, D.E.; Echlin, P.; Joy, D.; Fiori, Ch.; Lifshin, E. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, *Plenum Press*, 1981, V. 21, p.25–31.
96. Ašmontas, S.; Sužiedelis, A. Hot electron thermoelectricity, *Journal of Thermoelectricity*, 1997, N. 1, p. 5–26.
97. Lehman, V. Electrochemistry of Silicon, Wiley-VCH Weinheim, 2002, p.115.
98. Ledoux, G.; Gong, J.; Huisken, F. Photoluminescence of size-separated silicon nanocrystals: Confirmation of quantum confinement, *Appl. Phys. Lett.*, 2002, V. 80, N. 25, p. 4834–4836.
99. Dargys, A.; Kundrotas, J. Handbook on Physical Properties of Ge, Si, GaAs and InP, *Science and Encyclopaedia Publisher*, Vilnius, 1994, p. 264–271.
100. Balagurov, L. A.; Bayliss, S. C.; Yarkin, D. G.; Andrushin, S. Ya.; Kasatochkin, V. S.; Orlov, A. F.; Petrova, E. A. Low noise photosensitive device structures based on porous silicon, *Solid-State Electronics*, 2003, V. 47, p. 65–69.
101. Ben-Chorin, M.; Möller, F.; Koch, F. Nonlinear electrical transport in porous silicon, *Phys. Rev. B*, 1994, V. 49, N. 4, p. 2981-2984.
102. Maruska, H. P.; Namavar, F.; Kalkhoran, N. M. Energy bands in quantum confined silicon light-emitting diodes, *Appl Phys. Lett*, 1993. V. 63, N. 1, p. 45–47.
103. Пикус, Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. “Наука”, Москва, 1965, с. 448.
104. Maruska, H. P.; Namavar, F.; Kalkhoran, N. M. Current injection mechanism for porous-silicon transparent surface light-emitting diodes, *Appl Phys. Lett*, 1992. V. 61, N. 11, p. 1338–1340.
105. Bube R. H. Photoelectronic properties of semiconductors, *Cambridge University Press*, 1992, p. 314.
106. Kovalev, D. I.; Yaroshetzki, I. D.; Muschik, T.; Petrova-Koch, V.; Koch, F. Fast and slow visible luminescence bands of oxidized porous Si, *Appl Phys. Lett*, 1994. V. 64, N. 2, p. 214–216.
107. Namavar, F.; Maruska, H. P.; Kalkhoran, N. M. Visible electroluminescence from porous silicon np heterojunction diodes, *Appl Phys. Lett*, 1992. V. 60, N. 20, p. 2514–2516.
108. Болтакс, Б. И.. Диффузия в полупроводниках. *Физмат. Москва*. 1969, с. 285.

109. Nishimura, K.; Nagao, Y.; Ikeda, N. Thermo diffusion of antimony in to nanostructured porous silicon, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, V. 35, part 2, N 9B, p. L1145–L1147.
110. Pačebutas, V.; Šimkienė, I.; Gulbinaitė, D.; Bikulčius, E.; Pašiškevičius, V.; Krotkus, A. Electrical and photoelectrical properties of porous silicon diode structures, *Lietuvos Fizikos žurnalas*, 1993, V. 33, N. 1, p. 52–57.
111. Noguchi, N.; Suemene, I.; Yamanishi, M.; Hua, G. C.; Otsuka, N. Study of luminescent region in anodized porous silicons by photoluminescence imaging and their microstructures, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, V. 31, part. 2, N. 4B, p. L490–L494.
112. Peng, C; Hirschman, K. D.; Fauchet, P. M. Carrier transport in porous silicon light-emitting devices, *J. Appl. Phys.*, 1996, V. 80, N. 1, p. 295–300.
113. Balagurov, L. A.; Orlov, A. F.; Andryuchin, S., Ya. Highly sensitive porous silicon based photodiode structure, *J. Appl. Phys.*, 1997, V. 82, N. 9, p. 4647–4650.
114. Conwell, E. High field transport in semiconductors, *Academic Press, New York and London*, 1967, p. 384.
115. Asche, M.; Sarbei, O. G. Electric conductivity of hot carriers in Si and Ge. *Phys. Stat. Sol.*, 1969, V. 33, N. 9, p. 9–57.
116. Фистуль, В. И. Введение в физику полупроводников, *Высшая школа*, Москва, 1975, с. 296.
117. Ben-Chorin, M.; Möller, F.; Koch, F.; Schirmacher, W.; Eberhard, M. Hopping transport on a fractal: ac conductivity of porous silicon, *Phys. Rev. B*, 1995, V. 51, N. 4, p. 2199–2213.
118. Mott, N. F.; Davis, E. A. Electron process in non-crystalline materials, *Clarendon Press*, Oxford, 1979, p. 660.
119. Kovalev, D.; Diener, J.; Heckler, H.; Polisski, G.; Koch, F. Low-temperature photoluminescence upconversion in porous Si, *Phys. Rev. B*, 2000, V. 61, N. 23, p. 15841–15847.
120. Гуога, В. И.; Пожела, Ю. К. О чувствительности СВЧ-детектора на горячих носителях тока, *Радиотехника и электроника*, 1969, V. 14, N. 3, p. 565–566.
121. Šatkovskis, E.; Gradauskas, J.; Česnys, A.; Stupakova, J.; Sužiedelis, A. Charge carrier heating effect in porous silicon structures by microwave radiation, *13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors*, Abstracts, August 26–29, 2007, Vilnius, Lithuania, p. 72.
122. Иоффе, А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы, *АН СССР*, 1960, с. 188.

123. Аскеров, Б. М. Электронные явления переноса в полупроволниках, *Наука*, Москва, 1985, с. 317.
124. Стельбанс, Л. С. Физика полупроводников, *Сов. радио*, Москва, 1967, с. 451.
125. Бонч-Бруевич, В. Л.; Звягин, И. П.; Кайпер, Р.; Миронов, А. Г.; Эндерлайн, Р.; Эссер, Б. Электронная теория неупорядоченных полупроводников, *Наука*, Москва, 1981, с. 384.

## AUTORĖS PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai su ISI Web of Science citavimo indeksu:

- 1A. AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; ZAGADSKY, V.; STUPAKOVA, J.; SUŽIEDĖLIS, A.; ŠATKOVSKIS, E. Microwave detectors based on porous silicon, *Technical Physics Letters*, 2006, Vol. 32, N. 7, p. 603–605. ISSN 1063–7850. АШМОНТАС, С.; ГРАДАУСКАС, И.; ЗАГАДСКИЙ, В.; СТУПАКОВА, И.; СУЖЕДЕЛИС, А.; ШАТКОВСКИС, Э.; Детекторы сверхвысокочастотного электромагнитного излучения из пористого кремния, *Письма в ЖТФ*, 2006, том 32, вып. 14, с. 8–14/ISSN 0320–0116.
- 2A. STUPAKOVA, J.; AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; ZAGADSKIJ, V.; SHATKOVSKIS, E.; SUŽIEDĖLIS, A. Studies of response of metal – porous silicon structures to microwave radiation, *Acta Physica Polonica A*, 2006, Vol. 110, N. 6, p. 817–822/ISSN 0587–4246.

Straipsniai ISI Master List Journal leidiniuose:

- 3A. SHATKOVSKIS, E.; GRADAUSKAS, J.; STUPAKOVA, J.; ČESNYS, A.; SUŽIEDĖLIS, A. Effect of Microwave radiation on conductivity of porous silicon nanostructures, *Lithuanian J. Phys.*, 2007, V. 47, N. 2, p. 169–173. ISSN 1648–8504.

Straipsniai recenzuojamuose tarptautinių konferencijų medžiagos rinkiniuose Proceedings of SPIE (ISI):

- 4A. SHATKOVSKIS, E.; ČESNYS, A.; GRADAUSKAS, J.; STUPAKOVA, J.; KIPRIJANOVIČ, O. Effect of strong electric field on electrical characteristics of two-terminal porous silicon structures, *Advanced Optical Materials, Technologies, and Devices, Proc. of SPIE*, 2007, V. 6596, pp. 659615–(1–4).

Straipsniai Lietuvos konferencijos rinkiniuose:

- 5A. STUPAKOVA, J.; ŠATKOVSKIS, E. Akytojo silicio bandinių elektriniams matavimams technologijos, *7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ pranešimų rinkinys*, 2004, p. 188–191. ISBN 9986–05–723–X.

- 6A. STUPAKOVA, J.; GRADAUSKAS, J.; ŠATKOVSKIS, E. Akytojo silicio ir aliuminio darinių savybių tyrimas superaukšto dažnio elektriniame lauke, *8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ medžiaga*, 2005, p. 103–106. ISBN 9986–05–853–8.
- 7A. STUPAKOVA, J.; KOZIČ, A.; MANEIKIS, A.; ŠATKOVSKIS, E. Akytojo silicio sluoksnių sandaros ir morfologijos tyrimai, *9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, 2006, p. 135–138. ISBN 9986–05–989–5.
- 8A. STUPAKOVA, J.; ŠATKOVSKIS, E.; GRADAUSKAS, J. Karštųjų krūvininkų atsakas į superaukšto dažnio spinduliuotės poveikį akytojo silicio nanodariniuose, *10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*, 2007, p. 139–147. ISBN 978–9955–28–136–8.