

VILNIAUS UNIVERSITETAS
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Dainius Šalucha

**DIDELĖS GALIOS PUSLAIDININKINIŲ SILICIO PRIETAISŲ *p-n*
SANDŪROS KRAŠTO PASYVACIJA**

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

Vilnius, 2009

Disertacija rengta 2004 – 2009 metais Vilniaus universitete, Puslaidininkių fizikos institute.

Mokslinis vadovas:

Doc. habil. dr. Irena Šimkienė

(Puslaidininkių fizikos institutas, technologijų mokslai, medžiagų inžinerija – 08T)

Turinys

ĮVADAS	4
1. <i>p-n</i> SANDŪROS PASYVACIJOS PROBLEMOS ANALIZĖ	12
1.1 Nagrinėjamų objektų analizė	12
1.2 Technologinio proceso analizė	18
1.3 Tiristorių veikimas	27
1.4 Apibendrinimas	31
2. TYRIMŲ IR MATAVIMŲ METODIKOS APŽVALGA	32
2.1 Izoliacinio griovelio formavimas ir ėsdinimas	32
2.2 Puslaidininkinių struktūrų pasyvacija stiklu	37
2.3 Deimanto tipo (<i>a</i> :C-H) anglies dangos pasyvacija	44
2.4 Porėtojo silicio dangų pritaikymas galinguose puslaidinikiniuose prietaisuose	52
2.5 Paviršinės rekombinacijos slopinimas	56
2.6 Homogeniškumo tyrimas milimetrinėmis bangomis	58
2.8 Apibendrinimas	59
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS	61
3.1 Izoliacinio meza griovelio ėsdinimo optimizavimas	61
3.1.1 Izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio sudėties	62
3.1.2 Izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdinimo įrenginio struktūros ir veikimo principo	65
3.1.3 Izoliacinių meza griovelių ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio temperatūros kitimo	70
3.1.4 Gilių izoliacinių meza griovelių cheminis ėsdinimas	74
3.1.5 Patobulintos konstrukcijos ėsdinimo įrenginio Nr. IIA sukūrimas ir įdiegimas gamyboje	80
3.1.6 Naujo ėsdinimo įrenginio kūrimas	83
3.2 SiO ₂ -PbO-Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ stiklo pasyvacijos optimizavimas	83
3.2.1 Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistema	83
3.2.2 V _{DRM} ir V _{RRM} parametrų priklausomybė nuo SiO ₂ -PbO-Al ₂ O ₃ -B ₂ O ₃ stiklo lydymo proceso	88
3.3 Deimanto tipo (<i>a</i> : C-H) anglies dangos pasyvacija	91
3.3.1 Deimanto tipo (<i>a</i> :C-H) pasyvacijos dangų nuotėkio srovių ir atbulinės įtampos tyrimai	91
3.3.2 Deimanto tipo (<i>a</i> :C-H) pasyvacijos dangų tyrimai XPS ir Ramano sklaidos spektroskopijos metodais	96
3.3.3 Tyrimo rezultatų apibendrinimas	100
3.4 Pasyvuotųjų tiristorinių ir diodinių struktūrų paviršinės rekombinacijos izoliavimo grioveliuose tyrimas	102
3.5 Didelės galios Si diodinių struktūrų pasyvavimas porėtojo silicio dangomis	106
3.6 Silicio plokštelių homogeniškumo tyrimas milimetrinėmis bangomis technologiniame procese	113
4. IŠVADOS	119
5. LITERATŪROS SĄRAŠAS	121

ĮVADAS

Temos aktualumas

1957 metų pabaigoje firma General Electric pagamino pirmuosius tiristorius. Pirmieji tiristoriai palaikė kelių šimtų voltų eilės atgalinę įtampą, o laidžioje būsenoje jais galėjo tekėti kelių amperų stiprumo srovė. Šiuolaikiniai tiristoriai palaiko atgalinę įtampą, didesnę kaip 10 kV, o srovės, tekančios tiristoriuje, stipris gali siekti 7 kA. Šie puslaidininkiniai prietaisai plačiai taikomi įvairiose elektronikos ir elektrotechnikos srityse, ir susidomėjimas jais vis dar didėja. Tiristorių populiarumą paaiškina tokie šių prietaisų privalumai: maži gabaritai ir svoris (galios vienetui), aukštos darbo įtampos ir srovės, didelis naudingumo koeficientas, aukštas mechaninis atsparumas, ilgaamžiškumas, gana platus darbo temperatūrų diapazonas (nuo $-50 \div 60$ iki $+100 \div 150^{\circ}\text{C}$), geri dinaminiai parametrai, charakterizuojantys veikimo spartą ir t. t.

Puslaidininkinių prietaisų pramušimo įtampos valdymas formuojant griovelį periferiniame perimetre yra viena iš labiausiai paplitusių technologinių operacijų, gaminant galios diodus bei tiristorius. Aukštavolčių didelės galios puslaidininkinių prietaisų, kurie dirba kelių tūkstančių amperų diapazone, o uždarymo įtampa siekia kelis tūkstančius voltų, didelė problema yra elektrinio lauko pasiskirstymo ties kristalo briauna, kur $p-n$ sandūra išeina į paviršių ir kur vyksta griūtinis krūvininkų skaičiaus didėjimas, valdymas. Prietaiso darbo stabilumui užtikrinti būtina pasyvuoti paviršių ant profiliuoto krašto kristalo periferijoje. Terminiu būdu užaugintų SiO_2 sluoksnių nepavyko pritaikyti diskretiniuose aukštavolčiuose prietaisuose dėl didelių krūvių tankių ir dreifinių reiškinių. Prietaisų briaunos izoliavimui puslaidininkinių industrijoje įprastai pasitelkiamas griovelio paviršiaus pasyvavimas stiklu ar kaučiukais. Visgi, tokios pasyvacijos kokybė labai priklauso nuo pasyvavimo užpildo adhezijos $p-n$ sandūros srityje ir daugeliu atveju yra nepatenkinama. Todėl išlieka būtinybė ieškoti naujų pasyvavimo technologijų, dangų ir metodikų, aiškintis fizikinius mechanizmus, vykstančius dangos ir puslaidininkio

sandūroje, kurie įgalintų pasiekti didesnes įtampas (maksimalią pasikartojančią impulsinę atgalinę ir maksimalią pasikartojančią impulsinę tiesioginę.

Kita vertus, labai svarbi yra elemento paviršiaus konfiguracija, kuri apsprendžia griūtinio pramušimo pradžia, nustatoma pagal elektrinio lauko stiprumą. (Si atveju pramušimas prasideda, kai sandūros paviršiuje elektrinio lauko stiprumas didesnis už kritinį, t.y. didesnis už $\sim 2 \cdot 10^5$ V/cm). Vienas iš pagrindinių metodų, naudojamų formuojant diskretinių elementų konfiguraciją, yra cheminis ėsdinimas. Kadangi suformuotos struktūros cheminis ėsdinimas ženkliai skiriasi nuo homogeninio puslaidininkio ėsdinimo, optimalios elemento konfiguracijos suformavimui reikalingi papildomi tyrimai bei technologijos optimizavimas. Vystantis medžiagotyros metodams (atominių jėgų ir skenuojantys elektroniniai mikroskopai, tikslūs paviršiaus nelygumų matuokliai) atsirado galimybės tirti paviršiaus morfologiją po tarpinių prietaisų gamybos operacijų. Šie tyrimai parodė tiristorių gamyboje technologines operacijas, sąlygojančias gamybinį broką. Viena iš jų yra išėsdintų izoliacinių griovelių paviršiaus morfologija, sąlygojanti prietaisų pramušimo įtampas. Todėl tyrimų tikslas buvo atlikti gilių izoliacinių griovelių selektyvaus ėsdinimo tyrimus silicio tiristorinėse struktūrose, optimizuoti griovelių paviršiaus morfologiją ir įdiegti AB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“ tiristorių gamyboje.

Reikia pabrėžti, kad iš visų galimų didelės galios puslaidininkinių prietaisų bus išskiriamos dvi grupės, tiristoriai ir galingi diodai, kurie gaminami UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“. Darbe bus nagrinėjami aukštavolčių prietaisų gamyboje esminiai technologiniai procesai – diskretinio elemento konfiguracijos formavimo proceso optimizavimas bei *p-n* sandūros paviršiuje pasyvacijos būdai, siekiant padidinti gaminamų prietaisų kokybę ir išeią. Darbas atliktas UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiuose“ ir Puslaidininkių fizikos institute, glaudžiai susijęs su gamybos aktualijomis, tikslai ir uždaviniai kyla iš šiuo metu gamyboje esančių problemų.

Pagrindiniai darbo tikslai ir uždaviniai:

1. Nustatyti izoliacinių griovelių cheminio ęsdinimo dęsningumus. Ištirti izoliacinių griovelių charakteristikų priklausomybes nuo ęsdiklio sudęties, jo temperatūros kitimo, nuo ęsdinimo įrenginio konstrukcijos ir veikimo principo. Optimizuoti ęsdinimo technologinį procesą, suformuojant optimalią izoliacinio griovelio konfiguraciją.
2. Ištirti $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo lydymosi proceso temperatūrinius profilius. Nustatyti ir optimizuoti tiristorių elektrinių parametų priklausomybes nuo griovelio užpildymo stiklu temperatūrinio režimo.
3. Ištirti deimanto tipo ($a\text{:C-H}$) anglies dangos (DTAD) panaudojimo galimybes galingų puslaidininkinių prietaisų pasyvacijos technologijoje. Atlikti DTAD sluoksnių sąstato ir struktūros tyrimus bei įvertinti $p\text{-}n$ sandūros pasyvacijos kokybę.
4. Ištirti paviršinės rekombinacijos dęsningumus įvairiai pasyvuotų tiristorinių ir diodinių struktūrų grioveliuose.
5. Ištirti porętojo silicio panaudojimą galingų puslaidininkinių prietaisų pasyvacijos technologijoje.
6. Atlikti silicio plokštelių homogeniškumo tyrimą milimetrinėmis bangomis. Nustatyti metodo panaudojimo galimybes, tiriant plokštelių homogeniškumą, technologinio proceso metu, nustatant pakitimus po svarbiausių gamybos operacijų.

Darbo rezultatų naujumas ir praktinė vertę

1. Ištirti tiristorių ir diodų diskretinių elementų izoliacinių griovelių cheminio ęsdinimo dęsningumai. Atliktų tyrimų rezultatai sudarę pagrindą išvystyti optimalią izoliacinių griovelių formavimo technologiją ir sukurti puslaidininkinių struktūrų selektyvaus cheminio ęsdinimo naujos konstrukcijos įrenginį, įdiegtą UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“.

2. Bendradarbiaujant su UAB „Melrada“, sukurta ir UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“ gamyboje įdiegta stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies temperatūrinių ir dujinių parametrų monitoringo sistema, kurią panaudojant pirmą kartą nustatytas ir išnagrinėtas dinaminis $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo lydymosi proceso temperatūrinis profilis.
3. Nustatyta, kad deimanto tipo ($\alpha\text{:C-H}$) anglies dangos efektyviai pasyvuoja galingų puslaidininkinių prietaisų p-n sandūras. Gautų rezultatų pagrindu suprojektuotas didelės galios aukštavoltis (iki 4 kV), valdomas išjungimo tiristorius (VIT).
4. Paviršinės rekombinacijos spartos tyrimai tiristorinėse ir diodinėse struktūrose, gaminamuose UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“, įgalino įvertinti p-n sandūros pasyvacijos kokybę ir optimizuoti pasyvacijos procesą, panaudojant porėtąjį silicį.
5. Tiriant UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“ gamyboje naudojamų Si plokštelių homogeniškumą, pirmą kartą panaudota milimetrinių bangų tyrimo metodika. Nustatyta, kad šiuo metodu tikslinga tirti plokštelių homogeniškumą pirminiuose technologiniuose etapuose, pradinėse plokštelėse ir po difuzijos.

Disertaciją sudaro įvadas, 3 skyriai, išvados ir cituojamos literatūros sąrašas.

Pirmajame skyriuje pateikiama nagrinėjamų objektų, detali gamybos technologinio proceso, tiristorių veikimo ir voltamperinių charakteristikų analizė. Šiame skyriuje išskiriamos technologinės operacijos, kurios įtakoja tiesiogines ir atgalines pramušimo įtampas galinguose puslaidininkiniuose prietaisuose.

Antrajame skyriuje yra tyrimo ir matavimo metodikos apžvalga. Čia pateikti teoriniai duomenys apie izoliacinio griovelio formavimą ir ęsdinimą, porėtojo silicio panaudojimo galimybę pasyvavimui, bei aptariamos esminės stiklo pasyvacijos teorinės žinios. Nagrinėjami literatūros šaltiniai, kuriuose pateikiamas deimanto tipo anglies dangų pritaikymas galios prietaisuose,

paviršinės rekombinacijos slopinimas ir milimetrinių bangų panaudojimas homogeniškumo tyrimui.

Trečiajame skyriuje pateikiami tyrimo rezultatai. Nagrinėjamos izoliacinių griovelių ėsdinimo charakteristikų priklausomybės nuo ėsdiklio sudėties, temperatūros kitimo, nuo ėsdinimo įrenginio struktūros ir veikimo principo. Pateikiamas $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo pasyvacijos optimizavimas panaudojant stiklo lydymo difuzinių krosnių parametrų stebėjimo sistemą. Taip pat deimanto tipo ($a\text{:C-H}$) pasyvacijos dangų nuotėkio srovių ir atbulinės įtampos tyrimai ir deimanto tipo ($a\text{:C-H}$) pasyvacijos dangų tyrimai rentgeno fotoelektronų spektroskopijos (XPS - X-ray photoelectron spectroscopy) ir Ramano sklaidos spektroskopijos metodais. Analizuojama paviršinė rekombinacija pasyvuotų tiristorinių ir diodinių struktūrų izoliavimo grioveliuose. Aptariamas didelės galios Si diodinių struktūrų pasyvavimas porėtojo silicio dangomis tyrimas. Pasiūloma, technologiniame procese pasitelkiant milimetrines bangas, analizuoti Si plokštelių homogeniškumus.

Disertacijos pabaigoje suformuluotos išvados (**ketvirtasis skyrius**) ir pateikiamas naudotos literatūros sąrašas (**penktasis skyrius**).

Disertaciją sudaro 132 puslapiai, 101 paveikslas, 16 lentelių ir 107 pavadinimų cituojamos literatūros sąrašas.

Disertacijos ginamieji teiginiai:

1. Izoliacinis griovelis su lygiu $p\text{-}n$ sandūros paviršiumi tiristorinėse struktūrose optimaliai suformuojamas, naudojant ėsdiklį $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH}$ (1,7 : 3,35 : 2,0 tūriniu santykiu), kurio selektyvumas lygus 106. Sukurta technologija yra panaudota naujoje ėsdinimo įrenginio konstrukcijoje, kurioje ėsdinamų plokštelių sukimosi greitis yra reguliuojamas bei kontroliuojamas ėsdiklio pašalinimas nuo plokštelių paviršiaus.
2. Tiristorinių struktūrų pramušimo įtampas apsprendžia izoliacinio griovelio gylis ir stiklo adhezija jame. Tirtose struktūrose optimalus griovelių gylis

yra 104 μm , o geriausia $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo adhezija pasiekama, išlydant stiklą pastovios 760°C temperatūros zonoje N_2+O_2 atmosferoje.

3. Iš *p-n* sandūrų paviršiaus pasyvacijos tyrimų krūvininkų paviršinės rekombinacijos metodu seka, kad pramušimo įtampas tiristorinėse struktūrose sąlygoja sanglaudos defektai stipriai legiruotose p-n sandūros srityse ir didelės (iki 10^{17} cm^{-3}) liekamosios metalų jonų koncentracijos, susidarę po standartinių technologinių operacijų. Naujoje technologijoje sanglaudos defektų ir metalų jonų koncentracijos sumažinamos, geteruojuojant juos elektrochemiškai suformuotame Si porėtajame sluoksnyje, kuris pašalinamas prieš pasyvaciją stiklu. Pasiūlyta technologija užtikrina pramoninių didelės galios Si prietaisų gamybos efektyvumo padidėjimą 8%.

Darbo aprobacija

Darbo metu gauti ir disertacijoje aprašomi rezultatai išspausdinti 6 moksliniuose straipsniuose ir aptarti 10 tarptautinėse bei nacionalinėse konferencijose.

Disertacijos tema paskelbti straipsniai:

1. A. Marcinkevičius, D. Šalucha, V. Jasonis. Sulydomų diodų elektrinių charakteristikų eksperimentinis tyrimas. Elektronika ir elektrotechnika Nr. 6 (62), p. 41 – 46 (2005).
2. E. Gaubas, T. Čeponis, D. Šalucha, I. Šimkienė, A. Uleckas. Characteristics of Surface Recombination in Silicon Diode Isolation Grooves. Lithuanian Journal of Physics, Vol. 47, No. 4, p. 461-464 (2007).
3. D. Šalucha, A. Marcinkevičius. Investigation of Porous Silicon Layers as Passivation Coatings for High Voltage Silicon Devices. Electronics and Electrical Engineering Nr. 7 (79), p. 41 – 44 (2007).

4. D. Šalucha, I. Šimkienė, J. Sabaitytė. Formation of Nanostructured Layers for Passivation of High Power Silicon Devices, Acta Physica Polonica A Vol. 113 – No. 3, p. 1079 – 1083 (2008).
5. D. Šalucha, I. Šimkienė, Isolation Groove Wet Chemical Etching Characteristics of Silicon High-Power Devices, „Mokslas – Lietuvos ateitis“, Fizika ir fizinė kompiuterija Nr. 1 (3), (2009).
6. D. Šalucha, I. Šimkienė, Problems of Wet Chemical Etching of Isolation Grooves in High-Power Silicon Devices. Lithuanian Journal of Physics, (2009) priimtas.

Disertacijos tema dalyvauta projekte:

BPD 2004-ERPF-3.1.7-06-06/0021, „Aukštavolčio didelės galios valdomo išjungimo tiristoriaus (VIT) konstrukcijos ir technologinių procesų taikomieji moksliniai tyrimai“.

Disertacinio darbo rezultatai pristatyti nacionalinėse bei tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

1. D. Šalucha, Galingų puslaidininkinių įtaisų elektrinių charakteristikų tyrimas, The 9th International Conference “Electronics’05”, VGTU, KTU, 2005;
2. D. Šalucha, p-n sandūros pasyvinimas porėtojo silicio dangomis, The 10th International Conference “Electronics’06”, VGTU, KTU, 2006;
3. D. Šalucha, Stiklo PbO-B₂O₃-SiO₂-Al₂O₃ pasyvacijos proceso tyrimas ir porėtojo silicio sluoksnio formavimas, The 10th International Conference “Electronics’07”, VGTU, KTU, 2007 05 5 - 17;
4. D. Šalucha, I. Šimkienė, Didelės galios puslaidininkinių struktūrų mezopasyvacijos tyrimas ir tobulinimas, 37-toji Lietuvos Nacionalinė fizikos konferencija, VU, 2007 06 11 – 13;

5. E.Gaubas, D.Šalucha, I.Šimkienė, A.Uleckas, Paviršinės rekombinacijos pasyvuotuose Si diodų izoliavimo grioveliuose tyrimas, 37-toji Lietuvos Nacionalinė fizikos konferencija, VU, 2007 06 11 – 13;
6. D. Šalucha, I. Šimkienė, Research of Glass ($\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$) Passivation Process and Formation of Porous Silicon (PSi) Layer, International Summer Conference - School "Advanced Materials and Technologies", 2007 08 27 -31, Palanga;
7. D. Šalucha, I. Šimkienė, J. Sabaitytė, Formation of Nanostructured Layers for Passivation of High Power Silicon Devices, The 13th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors, 2007 08 26 – 29, Vilnius;
8. D. Šalucha, Aukštavolčių tiristorinių ir diodinių struktūrų pasyvavimo technologijos tyrimas ir tobulinimas, The 12th International Conference "Electronics'2008", VGTU, KTU, 2008 05 20 – 22, Vilnius;
9. D. Šalucha, I. Šimkienė, Research and Development of Semiconductor Structures Passivation Technological Process, The 10-th International Summer Conference-School "Advanced Materials and Technologies" ir "Third Summer School of the European Doctorate in Physics and Chemistry of Advanced Materials", 2008 08 27 -31, Palanga;
10. D. Šalucha, Didelės galios silicio prietaisų izoliavimo griovelio cheminis išsėdinimas, XII-oji jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“, VGTU, 2009 04 02, Vilnius.

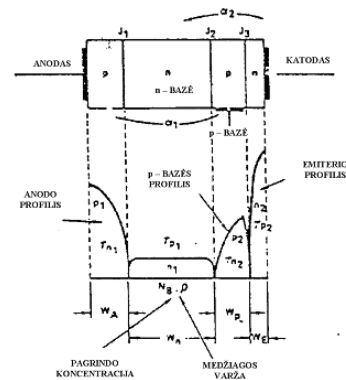
1. *p-n* SANDŪROS PASYVACIJOS PROBLEMOS ANALIZĖ

Šiame skyriuje smulkiau aptarsime nagrinėjamus objektus, trumpai apžvelgsime tiristorių struktūrą, veikimą, parametrus, tipus ir panaudojimo galimybes. Pateiksime smulkią technologinio proceso analizę, išnagrinėdami esmines technologines operacijas.

1. 1 Nagrinėjamų objektų analizė

Tiristoriaus struktūra ir parametrai

Keturių sluoksnių *p-n-p-n* tiristoriaus struktūra parodyta 1. 1. 1 paveiksle [1]. Vertikalią struktūrą sudaro 2 gilūs difuziniai *p* – tipo sluoksniai (P1 – anodinis emiteris, P2 – *p* bazė), tarp kurių yra plati mažo laidumo *n* – bazė N1. Difuzinis n^+ sluoksnis sudaro N2 emiterį. P1 ir P2 turi ominių kontaktus, sudarančius anodo ir katodo išvadus, o trečias kontaktas, sujungtas su *p* – baze, yra valdymo elektrodas. Vertikalią tiristoriaus struktūrą charakterizuoja tokie parametrai:



1.1.1 pav. Tiristoriaus struktūra (vertikalus vaizdas) [1].

- medžiagos specifinė varža ρ ;
- priemaišų pasiskirstymas įvairiuose prietaiso struktūros srityse;
- puslaidininkinių sluoksnių pločiai, o būtent bazių pločiai (w_n ir w_p);
- krūvininkų gyvavimo trukmės (τ_n ir τ_p).

Pagrindinės tiristoriaus statinės charakteristikos yra šios [1]:

I_H (holding) – išjungimo (palaikymo) srovė – tai minimali srovė, kuriai esant tiristorius dar nepereina iš laidumo būsenos į nelaidžią;

V_{RRM} (repetitive peak reverse) – maksimali pasikartojanti impulsinė atgalinė įtampa – tai įtampa, kuriai veikiant tiristorius dar nepramušamas;

I_{RRM} (repetitive peak reverse) - maksimali atgalinė srovė – atgalinė srovė, kai veikia nurodyta atgalinė įtampa V_{RRM} ;

V_{DRM} (repetitive peak direct) – maksimali pasikartojanti tiesioginė impulsinė įtampa uždaroje būsenoje, kai tiristorius dar neįsijungia;

I_{DRM} (repetitive peak direct) – uždaro tiristoriaus srovė, kai veikia nurodyta tiesioginė atsidarymo įtampa V_{DRM} .

V_{TM} (peak on-state) – tiesioginė atsidarymo įtampa – tai įtampos kritimas atvirame tiristoriuje, kai juo teka nurodyta tiesioginė srovė I_{TM} ;

V_{gt} (gate trigger direct) – minimali valdymo įtampa;

I_{gt} (gate trigger direct) - minimali valdymo srovė.

Tiristoriaus veikimo sparta apibūdinama dinaminiais parametrais:

1. Įjungimo laikas τ_t – laikas nuo atidarymo impulso pradžios iki momento, kai tiesioginė tiristoriaus įtampa sumažėja iki reikšmės, lygios $0,1 I_{\text{TM}}$. τ_t mažėja didinant valdymo impulso amplitudę ir didėja didinant anodo įtampą.

2. Išjungimo laikas τ_q - laikas, per kurį nusistovi nelaidumo būseną. Tai minimalus intervalas tarp laiko momentų, kai, tiristoriaus įtampai pakartotinai keičiant veikimo kryptį, tiristorius daugiau neatsidaro.

3. Maksimalus leistinas tiesioginės anodo srovės didėjimo greitis dV/dt - įtampos augimo greitis, kuriam esant sandūrų parazitinių talpų įkrovimo srovė dar neatidaro tiristoriaus.

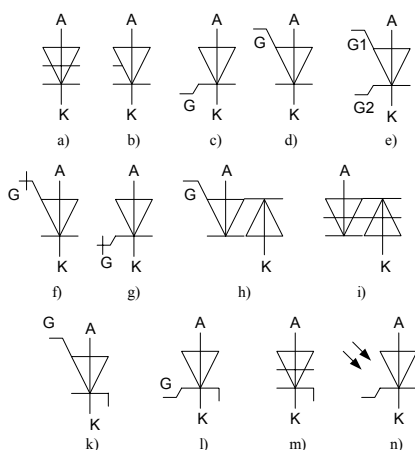
4. Maksimalus leistinas tiesioginės anodo srovės didėjimo greitis di/dt - srovės didėjimo greitis, dar nesukeliantis lokalaus sandūros šiluminio pramušimo.

Tiristorių tipai ir jų panaudojimas

Tobulinant ketursluoksnią pnpn struktūrą, sukurta nemažai puslaidininkinių prietaisų (1. 1. 2 pav.), bendrai vadinamų tiristoriais. Visiems jiems būdinga ketursluoksni struktūra, dvi stabilios būsenos ir griūtinis būsenų perjungimas. Dinistorius, arba diodinis tiristorius, - tai paprasčiausia ketursluoksni pnpn struktūra be valdymo elektrodo. Dinistorius iš nelaidumo būsenos į laidumo pereina tik tuomet, kai tiesioginė įtampa viršija perjungimo įtampą. Triodinis tiristorius, arba trinistorius (dažniausiai vadinami tiesiog tiristoriais), - tai ketursluoksni struktūra su valdymo elektrodu. Tačiau

valdymo elektrodas gali būti prijungtas ne tik prie p_2 bazės, bet ir prie n_1 bazės. Pirmieji tiristoriai vadinami *katodinio valdymo tiristoriais*. Jų valdymo įtampa katodo atžvilgiu turi būti teigiama. Antrieji – *anodinio valdymo tiristoriai*, jų valdymo įtampa anodo atžvilgiu turi būti neigiama (atitinkamų emiterinių sandūrų atžvilgiu valdymo įtampos turi būti tiesioginės). Kartais prie tiristoriaus jungiami abu valdymo elektrodai. Toks tiristorius vadinamas *tetrodiniu*. Triodiniai tiristoriai gaminami trijų tipų: vidutinio dažnio ir mažos arba vidutinės galios, didelės galios ir aukšto dažnio.

Didelės galios tiristoriuose atgalinės įtampos siekia iki 10 kV ir praleidžia iki 7 kA tiesioginę srovę. Tai pasiekama didinant sandūrų plotus ir bazių storius, jungiant tiristorines struktūras lygiagrečiai bei gerinant jų aušinimą. Tačiau tokių tiristorių veikimo sparta yra maža dėl didelių parazitinių talpų. Jie naudojami didelės galios keitikliuose.



1. 1. 2 pav. Tiristoriai: a – dinistorius; b, c, d – triodiniai tiristoriai (b – bendras grafinis žymuo, c – katodinio valdymo, d – anodinio valdymo); e – tetrodinis tiristorius; f, g – dvigubo valdymo (f – anodinio valdymo, g – katodinio valdymo); h, i – simistoriai (h – triodinis, i – dinistorius); k, l, m – griūtiniai tiristoriai (k – anodinio valdymo, l – katodinio valdymo, m – dinistorius); n – fototiristorius

Aukšto dažnio tiristoriai pasižymi mažais perjungimo laikais ir didesniais leistiniais anodo srovės bei įtampos augimo greičiais di/dt ir dV/dt , bet yra palyginti nedidelės galios, naudojami televizijoje, radiolokacijoje ir kituose impulsiniuose įtaisuose. Dvigubo valdymo, arba *uždaromojo*, tiristoriaus valdymo srove galima ne tik atidaryti, bet ir uždaryti tiristorių. Tam į valdymo grandinę reikia paduoti priešingos negu atidarant krypties srovę. Taip uždaryti kartais galima ir paprastą triodinį tiristorių, bet tam reikia didelės uždarymo

srovės, o tokią ne visuomet išlaiko valdymo elektrodo grandinė. Norint padidinti leistiną valdymo srovę, didinamas valdymo elektrodo plotas - jo išvadas lituojamas prie struktūros galinės sienelės. Simetrinių tiristorių (simistorių) voltamperinė charakteristika yra simetrinė, todėl jie gali būti atidaryti abiem kryptimis, esant teigiamai ir neigiamai anodo įtampai. Pagal veikimą jie analogiškai dviejų paprastų tiristorių porai, sujungtai lygiagrečiai, priešingomis kryptimis. Griūtiniai tiristoriai į laidžią būseną perjungiami tik tuomet, kai veikia valdymo impulsas. Veikiant aukštai tiesioginei įtampai, pramušamas lygiagrečiai tiristoriui prijungtas griūtinis tranzistorius, o tiristorius į laidžią būseną nepereina. Tokie tiristoriai naudojami grandinėse, kuriose dėl induktyvumų arba atmosferos iškrovų (perkūnijos) gali susidaryti įtampos šuoliai. Šie ne laiku gali atidaryti paprastus tiristorius, sudarydami avarines situacijas. Fototiristoriai - atidaromi ne valdymo srove, o šviesos signalu, nukreiptu į vieną iš bazių. Dažniausiai taikomi tuomet, kai reikia išvengti parazitinio grįžtamojo ryšio tarp komutuojamos ir valdymo grandinių bei labai aukštų įtampų (daugiau kaip 300 kV) keitikliuose.

Tarp puslaidininkinių galios perjungėjų plačiai naudojami IGBT (Isulated-Gate Bipolar Transistor) ir MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) [2]. Jie yra greiti ir naudojami aukštose dažnių juostose, tačiau vieno elemento galios talpa yra pakankamai maža. Didesniems galios reikalavimams, būtina juos jungti lygiagrečiai ar nuosekliai į vientisą sistemą, o tai apsunkina technologinį procesą ir didina gamybos išlaidas. Todėl siūloma naudoti RSD (Reversed Switched Dynistor) – tiristoriaus tipo prietaisą su pnpn struktūra. Jo turimi du elektrodai palengvina surinkimą į sistemas. RSD yra tiristoriaus tipo įtaisas, galios grandinėje leidžiantis nutraukti srovę tam tikram laikui galios grandinėje [3]. RSD pasižymi mažais energijos nuostoliais. Šie elementai gaminami nuo 16 iki 80 mm diametro. RSD buvo sukurti galios impulsų inžinerijai ir pirmieji įtaisai pasižymėjo 500 kA srove ir 25 kV įtampa. RSD perjungikliai pagaminti ant 63 mm ir 76 mm plokštelių gali perjungti srovę per submilisekundę su maksimalia verte 120 kA ir 180 kA atitinkamai [4]. Trys perjungikliai sujungti lygiagrečiai, leidžia matuoti 25 kV

įtampą su 470 kA srove. Greitinant perjungimo greičius, sukurta SPT struktūra (Soft Punch Trough) su „minkštu“ krūvių pagavimu n srityje [5], tuo pačiu paspartinant perjungimą, sumažinant pereinamojo proceso nuostolius ir įjungto įtaiso nuostolius [6].

Plačios draustinės juostos puslaidininkinė medžiaga SiC naudojama kaip alternatyvi medžiaga galios elektronikos įtaisams gaminti [7]. SiC unikali savo fizikinėmis elektroninėmis savybėmis, suteikia galimybę dirbti aukštose temperatūrose ir aukštuose dažniuose, atspari radiacijai. Didelis griūtinio pramušimo laukas E_b ir didelis judris v_s leidžia gaminti mažesnius ir greitesnius įtaisus. SiC E_b yra 2 MV/cm, viena eile didesnis nei silicio, ir v_s yra $2 \cdot 10^7$ cm/s dvigubai didesnis lyginant su siliciu. Dėl šių priežasčių, aukštesnėse darbinėse temperatūrose ir su didesniu šiluminiu laidumu, SiC pagrindu pagaminti įtaisai pasižymi daug didesniu darbinio srovės tankiu tose pačiose darbinėse įtampose [8].

Aukštos įtampos (HVDC-High voltage Direct Current) perdavimui ir statinei kompensacijai (SVC-Static Var Compensation) pagerinti [9], keletas tiristorių jungiami nuosekliai [10]. Atitinkamai yra daroma ir su didžiausiais GTO (Gate Turn-Off) tiristoriais, kurių įtampos yra 6 kV eilės, o srovė 2500 A, kurie naudojami įtampų kontrolei galios sistemose [11]. Aukštos DC (Direct Current) įtampos pasiekimui, aštuoni GTO tiristoriai sujungiami nuosekliai. Nagrinėjant GTO, nustatyta, kad gilėjant n- bazei, auga atgalinė įtampa ir anksčiau pasiekiamas srovės tankio maksimumas [12]. Srovės tankio maksimumas yra pasiekiamas prie $J=160$ A/cm² ir įtampa $V=1540$ V (kai n bazės gylis siekia 129 μm), kai tuo tarpu, prie 196÷210 μm gylio srovės tankio maksimumas yra prie $J=83$ A/cm² ir įtampa siekia $V=2100$ V.

Įtampos kritimas tiristoriuje apsprendžia aukštą įjungimo lygmenį [13]. Pavyzdžiui, 6 galios tiristoriai (pagaminti SPCO, USA) gaminami ant 125 mm diametro puslaidininkinių padėklų, pasižymi 5 kV blokavimo įtampa. Milisekundės pločio impulsu jie operuoja kelių kiloamperų srovėmis ir kontroliuoja kelių megavatų galią. Natūralus būdas, pagerinti tiristoriaus perjungimą yra valdymo elektrodo išplėtimas („iššakojimas“). Pavyzdžiui

specialios paskirties impulsiniame tiristoriuje (pagaminta ABB) valdymo elektrodas užima pusę puslaidininkinio padėklo ploto. Tai leidžia, 76 mm diametro įtaise per mikrosekundę perjungti kelių kiloamperų sroves. Impulsiniai tiristoriai yra daug brangesni už galios tiristorius, nes jų gamyboje reikalingos papildomos sudėtingos fotolitografijos operacijos ir šių įtaisų maksimali blokavimo įtampa yra apie 23 kV.

Silicio galios diodas yra pagrindinis komponentas, reikalingas galios elektronikos sistemoms, kaip antai DC į AC galios pervedimo sistemoms [14]. Kaip ten bebūtų, šiuolaikiniai silicio galios diodai turi keletą trūkumų, kurie pasireiškia persijungiant iš tiesioginio laidumo į blokavimo režimą. Pavyzdžiui, aukštos įtampos perjungimo prietaisuose (IGBT, GTO) galios sklaida įjungimo režime yra paaiškinama diodo atgaline atsistatymo srove. Todėl realiausia galios diodo sugedimo priežastis gali kilti aukštose dI/dt [15] ir dV/dt [16]. Maksimali prietaisų darbo temperatūra yra 150-200°C, ją riboja sandūros pasyvacijos procesas [17]. Nagrinėti trijų skirtingų gamintojų (Hitachi, Mitsubishi, Toshiba) 8 kV-3,5kVA tiristoriai [18], kurie buvo surinkti į DC elementus Kii HVDC (High voltage Direct Current) kanalo sistemoje. Šie visi trys elementai pasižymėjo stabiliomis dI/dt ir dV/dt vertėmis. Tačiau visi jie turėjo tiek privalumų, tiek ir trūkumų viso testavimo metu (nuo 1994 metų). Viso tyrimo metu, buvo stengtasi palaikyti tas pačias sąlygas, kurias nurodo gamintojai. Tiriamojo darbo [18] pabaigoje nurodoma, kad eilinis vartotojas negali susikurti tokių testavimo sąlygų, kad galėtų patikrinti elementus, ir įsigyti jam tinkamiausius.

Gaminant būtina tinkamai paruošti paviršių pasyvacijai ir pašalinti visas galimas priemaišas iš pasyvuojančios medžiagos. Nagrinėjant galios prietaisus elektrinių ir šiluminių testų metu, pastebėtas atgalinės įtampos verčių kitimas prie maksimalios sandūros darbo temperatūros [19]. Atlikus analizę, nustatyta, kad prie silicio ir pasyvuojančios medžiagos (šiuo atveju gumos) sandūros rastos oro burbulų sancaupos, kas gali sukelti nuotėkių srovės didėjimą ir įtaiso degradaciją. Tam tikslui pasiūlyta pasyvuojančios medžiagos laikymas 30 min vakuuminėje sistemoje, kad ištrauktume iš jos oro likučius [19]. Kaip matome

ir technologijoje, kuri egzistuoja jau daugel metų galima atlikti tam tikrus patobulinimus, kurie ženkliai įtakoja prietaisų stabilumą ir ilgaamžiškumą.

1. 2 Technologinio proceso analizė

Šiame skyriuje bus pateikta aukštavolčių stačiakampių tiristorių gamybos proceso analizė. Priklausomai nuo kristalų topologijos gali keistis tam tikrų procesų režimai. Kaip pavyzdį paimsime stačiakampį $9,017 \times 9,017$ mm topologijos tiristorių.

Stačiakampių ir apvalių tiristorių gamyboje naudojamos zoninio lydymosi metodu pagamintos, galiu (Ga) ir aliuminiu (Al) legiruotos, (111) kristalografinės orientacijos puslaidininkinės Si plokštelės. Gamyboje naudojamas silicis, kurio specifinė varža $\rho=66\pm 13\% \Omega\cdot\text{cm}$.

Galingų tiristorių gamyboje, ypač svarbi yra priemaišų įtaka kristalinei struktūrai. Mūsų atveju plokštelės legiruojamos Ga ir Al naudojant difuziją. Aliuminio ir galio atomų matmenys artimi silicio atomų matmenims, ir todėl šių atomų sudaryti mechaniniai įtempimai, kuriuos nulemia kristalinės gardelės iškraipymai, yra nežymūs. Šiuo požiūriu didžiausią įtaką turi boras ir fosforas, kadangi jų atomai kur kas mažesni negu silicio [1].

Kadangi silicio, galio ir aliuminio atomų matmenys praktiškai sutampa – galis ir aliuminis geriausiai tinka pagrindinėms tiristoriaus sandūroms formuoti. Borą galima naudoti akceptorių difuzijai, formuojant emiterį, kadangi difuzijos procesai paprastesni, o defektų lygis yra patenkinamas. Fosforo difuzijos metu gardelėje taip pat atsiranda defektai. Tai leidžiama n – tipo sričiai, kur šalutinių krūvininkų gyvavimo trukmė nėra svarbus parametras.

Tiristoriaus elektrodai formuojami užgarinant metalo sluoksnį. Galingų tiristorių elektriniai kontaktai skirti dviem tikslams: elektros srovę nukreipti į puslaidininkinį įtaisą ir šilumai nuvesti. Todėl tiristoriaus kontaktai turi turėti gerą laidumą elektros srovei ir šilumai, turėti žemą kontakto paviršinę varžą R_s ir būti atsparūs aukštomis temperatūroms.

Taigi toliau smulkiau apžvelgsime gamybos maršrutą. Plokštelėms p sritims sudaryti naudojama GaAl difuzija. Ši difuzija atliekama ampulėje, naudojant atskirus Ga ir Al šaltinius. Technologinio gamybos maršruto apžvalgą pradėsime nuo to, kai jau yra sudaryta p-n-p struktūra.

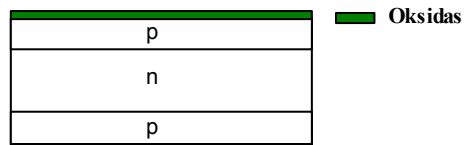
Staćiakampių tiristorių gamybos maršrutas

1. Partijos formavimas. Kiekvienai plokštei priskiriamas partijos numeris. Vieną partiją sudaro 50 plokštelių.

2. Valymas prieš difuziją. Plokštelių paviršius valomas nuo organinių ir neorganinių teršalų. Pradžioje plokštelės nuplaunamos su amoniako peroksido tirpalu: $H_2O:H_2O_2:NH_4OH$. Po to plokštelės plaunamos "Karo" tirpalu: $H_2SO_4:H_2O_2$. pabaigoje plokštelės nuplaunamos dejonizuotu vandeniu.

3. Terminis oksidavimas. Terminio oksidavimo metu suformuojamas SiO_2 , naudojamas kaukei suformuoti boro arba fosforo difuzijos metu. Oksidas susidaro aukštoje temperatūroje sąveikaujant paviršiniam puslaidininkio sluoksniui su deguonimi. Mūsų atveju oksidavimas atliekamas vandens garų ir deguonies atmosferoje, esant $1150\text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai. Oksidavimo metu užauginamas $1,6 - 1,8\text{ }\mu\text{m}$ storio oksido sluoksnis (1.2.1 pav.).

Nors oksidavimas yra būtinas tam tikrose tiristorių gamybos stadijose, jis neigiamai veikia galingų tiristorių nuotėkio srovės uždaroje būsenoje. Žinoma, kad po

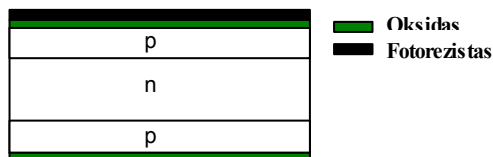


1.2.1 pav. Terminis oksidavimas.

oksidavimo proceso silicyje gali atsirasti defektų, kurie yra spąstai sunkiuju metalų priemaišoms. Mažinant tokių defektų atsiradimą, naudojamas įdeginimas N_2 atmosferoje.

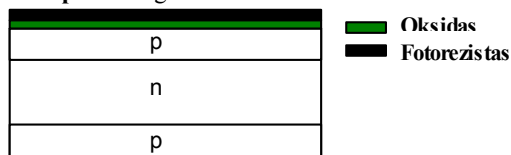
4. Katodo pusės dengimas fotorezistu. Centrifūgoje ant plokštelės paviršiaus iš katodo pusės užnešamas pozityvinis fotorezistas (1.2.2 pav.). Fotorezistas yra chemiškai atspari, šviesai jautri medžiaga, skirta oksido apsaugai iš katodo pusės.

5. Oksido ėsdinimas. Šios operacijos metu atliekamas oksido ėsdinimas iš anodo pusės (1.2.3 pav.). Iš katodo pusės oksidas lieka nepalietas, kadangi jį apsaugo fotorezisto sluoksnis. Ėsdinimas atliekamas naudojant $\text{NH}_4\text{F}:\text{HCl}$ tirpalą.



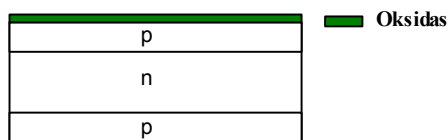
1.2.2 pav. Dengimas fotorezistu.

6. Fotorezisto pašalinimas. Naudojant “Karo” tirpalą $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2$ nuo plokštelės paviršiaus pašalinamas fotorezistas (1.2.4 pav.).



1.2.3 pav. Oksido ėsdinimas.

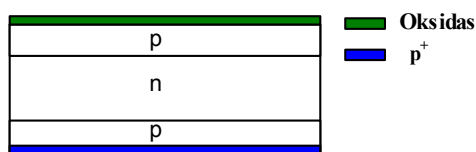
7. R_s –matavimas. Paviršinės varžos matavimas. Varžos reikšmė neturi viršyti $20 - 24 \Omega/\square$.



1.2.4 pav. Fotorezisto pašalinimas.

8. Valymas prieš difuziją. Operacija, analogiška operacijai Nr. 2

9. Boro difuzija (BBr_3) (1-oji stadija). Borui nusodinti naudojama atviro vamzdžio sistema. Proceso metu naudojamas skystas difuzantas BBr_3 . Dėl jo sąveikos su deguonimi O_2 ant plokštelės paviršiaus susidaro borosilikatinio stiklo sluoksnis. Boro difuzijos pirmosios stadijos metu per „langus“ suformuojami $5 - 7 \mu\text{m}$ gylio p tipo sluoksnis (1.2.5 pav.); paviršinė krūvininkų koncentracija yra 10^{19}cm^{-3} eilės.



1.2.5 pav. Boro difuzija (1-oji stadija).

10. Žematemperatūrinis oksidinimas. Pagrindinė žematemperatūrio oksidavimo paskirtis – suminkštinti susidariusį borosilikatinio stiklo sluoksnį, kadangi šis sluoksnis yra nenaudingas tolesniam technologiniam procesui. Oksidinimas atliekamas vandens garuose, esant $850 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūrai.

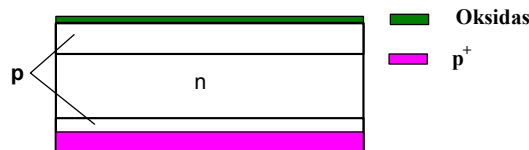
11. Oksido pašalinimas. Susidaręs oksidas ir suminkštintas borosilikatinio stiklo sluoksnis pašalinami fluoro rūgštimi HF.

12. R_s – matavimas. Paviršinės varžos matavimas. Varžos reikšmė neturi viršyti $2 \Omega/\square$.

13. Valymas prieš difuziją. Operacija, analogiška operacijai Nr. 2.

14. Boro difuzija (2-oji stadija).

Šios operacijos metu vyksta boro difuzijos operacijos metu įvestų priemaišų persiskirstymas (1.2.6 pav.). Po difuzijos gaunamas p^+ sluoksnis, kurio gylis yra 10 – 15 μm . Krūvininkų koncentracija sumažėja iki $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.



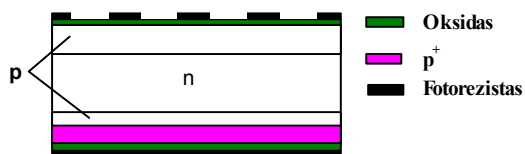
1.2.6 pav. Boro difuzijos 2-oji stadija.

15. Piešinio formavimas. Operaciją sudaro keli etapai:

Fotorezisto užnešimas. Iš abiejų plokštelės pusių užnešamas pozityvinis fotorezistas. Užnešimas atliekamas centrifugoje.

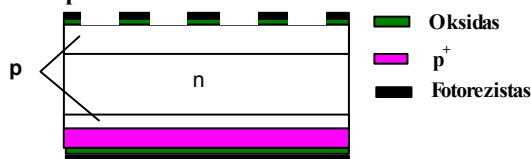
1) *Fotorezisto džiovinimas.* Džiovinimas atliekamas 95°C temperatūroje.

2) *Tapatinimas ir eksponavimas.* Įdėta į specialų voką plokštelė apšviečiama ultravioletine šviesa, kurios bangos ilgis - 360 – 420 nm. Tapatinimas ir eksponavimas atliekamas iš abiejų plokštelės pusių.



1.2.7 pav. Piešinio formavimas.

3) *Ryškinimas.* Šviesiose vietose skyla šviesai jautri medžiaga ir fotorezistas



1.2.8 pav. Oksido išdinimas.

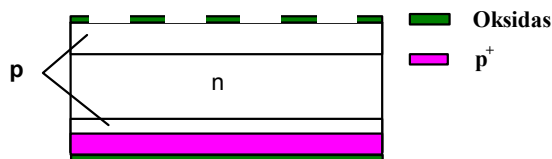
pasidaro tirpus. Jis pašalinamas ryškinimo kalio šarmu (KOH) metu (1.2.7 pav.).

4) *Dubliavimas.* Plokštelės su likusiu fotorezistu kaitinamos 115°C temperatūroje, todėl fotorezistas sukietėja. Tokiu būdu suformuojamas piešinys, reikalingas tolimesnei fosforo difuzijai.

16. Oksido išdinimas. Okside išdinami langai, per kuriuos bus daroma fosforo difuzija. Kaip ir operacijos Nr. 5 metu naudojamas $\text{NH}_4\text{F}:\text{HCl}$ tirpalas (1.2.8 pav.).

17. Fotorezisto pašalinimas. Pašalinamas po operacijų Nr. 15 – 16 likęs fotorezistas (1.2.9 pav.).

Tai atliekama tuo pačiu metodu kaip ir operacijos Nr. 6 metu.

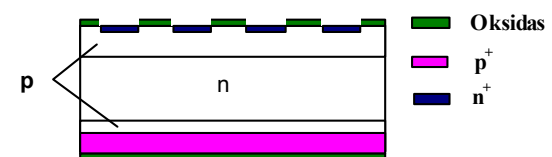


1.2.9 pav. Fotorezisto pašalinimas.

18. Poliruojantis silicio (Si) ėsdinimas. Naudojant kalio šarmą (KOH) – silicyje pro langus okside išėsdinami tapatinimo ženklai tolimesnėms difuzijoms. Ėsdinimo gylis $1,5 \div 2 \mu\text{m}$.

19. Valymas prieš difuziją. Operacija, analogiška operacijai Nr. 2.

20. Fosforo difuzija (PCl_3) (1-oji stadija). Kaip ir boro difuzijos atveju, naudojama atviro vamzdžio sistema. Taip pat naudojamas skystas difuzantas PCl_3 . Ant plokštelės paviršiaus susidaro fosforosilikatinis stiklas, iš kurio ir vyksta fosforo difuzija į puslaidininkio



1.2.10 pav. Fosforo difuzijos pirmoji stadija.

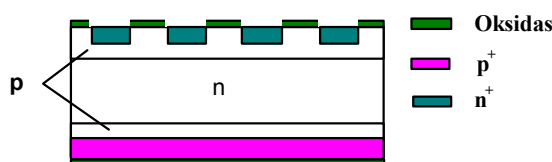
tūrį. Taip suformuojamas negilus n^+ sluoksnis, kuris naudojamas kaip priemaišų šaltinis fosforo difuzijos antrajai stadijai (1.2.10 pav.).

21. Oksido pašalinimas. Pašalinamas fosforosilikatinio stiklo sluoksnis, kuris susiformavo vykstant fosforo difuzijai. Atliekamas taip pat kaip ir operacijos Nr. 11 metu.

22. R_s matavimas. Paviršinės varžos matavimas. Varžos reikšmė neturi viršyti $3 \Omega/\square$.

23. Valymas prieš difuziją. Plokštelės paviršius chemiškai nuvalomas prieš fosforo difuzijos 2-ąją stadiją. Atliekamas taip pat kaip ir per operaciją Nr. 2.

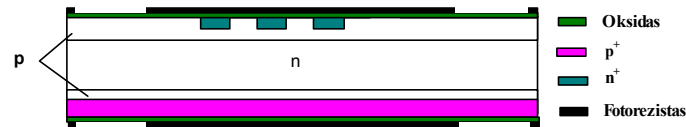
24. Fosforo difuzija (2-oji stadija). Difuzijos metu vyksta priemaišų įvestų per fosforo difuzijos 1-ąją stadiją perskirstymas (1.2.11 pav.). Šios operacijos metu galutinai suformuojamos



1.2.11 pav. Fosforo difuzijos antroji stadija.

25 μm gylio n^+ katodo emiterių sritys. Krūvininkų koncentracija siekia $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Laikas, per kurį atliekamas procesas esant 1250°C temperatūrai, priklauso nuo tiristoriaus topologijos.

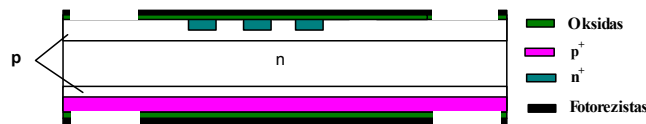
25. Piešinio formavimas. Atliekamas taip pat kaip ir per operaciją Nr. 15. Taip suformuojamas piešinys, reikalingas tolimesnei aukso difuzijai ir stiklo pasyvacijai (1.2.12 pav.).



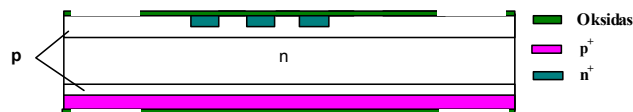
1.2.12 pav. Piešinio formavimas.

26. Oksido išėdinimas. Okside išėdinami langai, per kuriuos bus daroma aukso difuzija (2.13 pav.). Operacija, analogiška operacijai Nr. 5.

27. Fotorezisto pašalinimas. Operacija, analogiška operacijai Nr. 6 (1.2.14 pav.).



1.2.13 pav. Oksido pašalinimas.



1.2.14 pav. Fotorezisto pašalinimas.

28. Cheminis valymas. Plokštelės paviršius nuvalomas “Karo” tirpalu $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$.

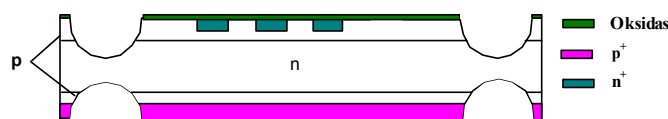
29. Šviežinimas. Prieš aukso difuziją nuo plokštelės paviršiaus pašalinamas oksido sluoksnis, kuris susidaro plokštelėms esant ore. Plokštelė šviežinama praskiestu HF tirpalu.

30. Aukso nusodinimas. Ant plokštelės nusodinamas aukso (Au) sluoksnis. Šiuo atveju plonas aukso sluoksnis yra difuzijos šaltinis.

31. Aukso difuzija. Šios operacijos metu į silicį tose vietose, kur vėliau bus kristalų šlaitai, įvedamas auksas. Tai daroma tam, kad sumažėtų nuotėkio srovės kristalų kraštuose.

32. Aukso pašalinimas. Chemiškai pašalinami aukso likučiai. Tam naudojama „karališka degtinė“ – HCl:HNO₃.

33. Griovio ėsdinimas. Plokštelėje tarp kristalų chemiškai išėsdinami grioveliai (1.2.15 pav.). Ėsdinant griovelius ėsdiklis parenkamas taip, kad ėsdinimo selektyvumas būtų apie 100, t. y. Si ėsdintųsi 100 kartų greičiau nei SiO₂. Griovio gylis turi būti apie 100 μm.



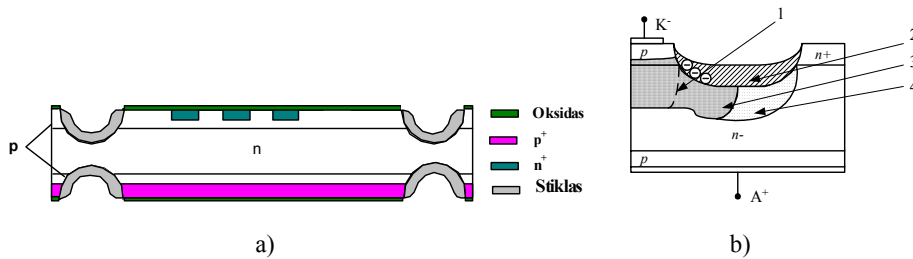
1.2.15 pav. Izoliacinio griovio ėsdinimas.

34. Valymas šepetiu ir plovimas. Plokštelės paviršius nuvalomas šepetiais ir plaunamas dejonizuotu vandeniu.

35. Švarus silicio ėsdinimas. Galutinai suformuojamas griovelis. Plokštelė ėsdinama silpnesniame ėsdiklyje ir išdžiovinama deguonies O₂ ir azoto N₂ atmosferoje ($T = 520^{\circ}\text{C}$).

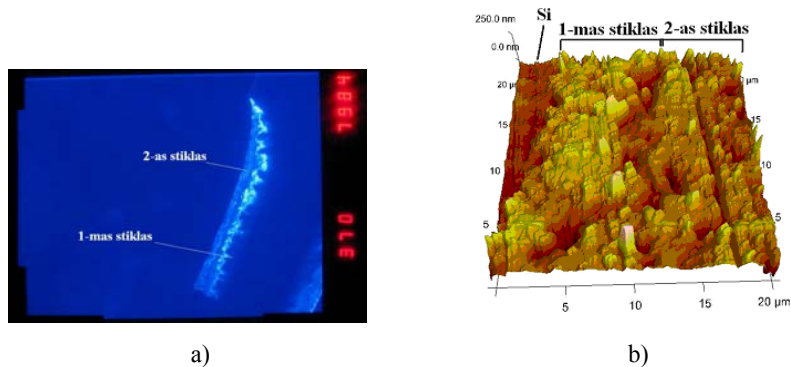
36. Stiklo užnešimas iš abiejų plokštelės pusių (1-oji stadija). Pasyvacijai naudojamas švino – aliuminio silikatinis SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklas. Iš abiejų plokštelės pusių į griovelius tarp kristalų specialiais peiliais užnešamas pirmas stiklo sluoksnis (1.2.16 pav.). Jis įlydomas 740 ÷ 760°C temperatūroje. Tada likučiai nutrinami nuo plokštelės silikoniniu trintuku. Čia labai svarbus plokštelės atšalimo greitis – esant didesniai greičiui nei 4°C per minutę, stiklas suyra.

Šis sluoksnis padeda išvengti sandūros pramušimo toje vietoje, kur ji išeina į paviršių. 1.2.16 (b) paveiksle pateikiamas nuskurdintojo sluoksnio išplitimas nepasyvuojant griovelio, pasyvuojant stiklu ir pasyvuojant stiklu, panaudojant Moat efektą (nuskurdintos srities didesniai išplitimui sudaroma papildoma n+ sritis).

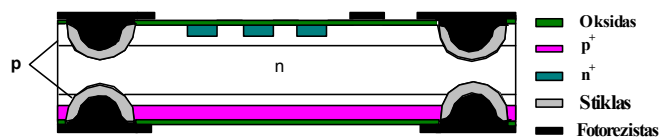


1.2.16 pav. Stiklo užnešimas į izoliuojančius griovelius (a) ir nuskurdintos srities išplitimas stiklu pasyvuotuose prietaisuose (b): 1 – nuskurdintoji sritis, išsėdinus griovelių, 2 – griovelių pasyvavimas stiklu, 3 – nuskurdintos srities išplitimas, esant stiklui, 4 – nuskurdintos srities išplitimas esant stiklui ir Moat efektui [20, 21].

37. Stiklo užnešimas iš abiejų plokštelių pusių (2-oji stadija). Kaip ir operacijos Nr. 36 metu iš abiejų plokštelių pusių į griovius užnešamas antras stiklo sluoksnis. Šis sluoksnis padidina kristalo kraštų mechaninį atsparumą. 1.2.17 paveiksle pateikiamos abiejų stiklų skersinių pjūvių skenuojamojo elektronų mikroskopijos (SEM) ir atominių jėgų mikroskopijos (AJM) nuotraukos.



1.2.17 pav. Pirmojo ir antrojo stiklų skersinių pjūvių nuotraukos: SEM mikroskopu (a), AJM mikroskopu (b).



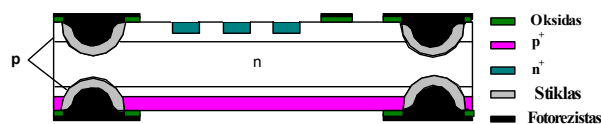
1.2.18 pav. Piešinio formavimas.

38. Piešinio formavimas. Atliekamas taip pat kaip ir per operaciją Nr. 15 (1.2.18 pav.). Vienintelis skirtumas yra tai, kad naudojamas negatyvinis

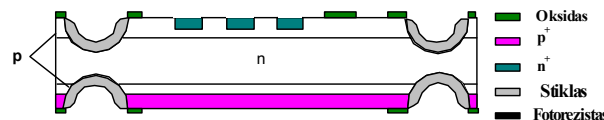
fotorezistas. Tokiu būdu suformuojamas kontaktinių langų, skirtų tolimesnei metalizacijai, piešinys.

39. Oksido ėsdinimas. Okside, dengiančiame plokštelę, išėsdinami kontaktiniai langai (1.2.19 pav.). Atliekamas taip pat kaip ir operacijos Nr. 5 metu.

40. Fotorezisto pašalinimas. Pašalinamas po operacijų Nr. 38 - 39 likęs fotorezistas (1.2.20 pav.). Atliekamas taip pat kaip ir operacijos Nr. 6 metu.

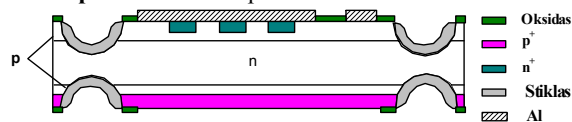


1.2.19 pav. Oksido ėsdinimas.



1.2.20 pav. Fotorezisto pašalinimas.

41. Šviežinimas. Plokštelės paviršius nuvalomas, naudojant



1.2.21 pav. Katodo metalizacija.

tirpalą $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}$ ir dejonizuotą vandenį. Tai daroma norint gauti ominią kontaktą tarp puslaidininkio ir metalo.

42. Katodo metalizacija. Užgarinamas $20\ \mu\text{m}$ storio aliuminio sluoksnis (1.2.21 pav.). Garinimo proceso režimas pateiktas 1.2.1 lentelėje.

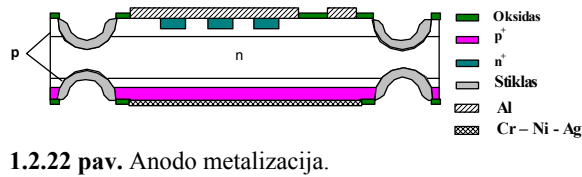
1.2.1 lentelė. Metalizacijos proceso parametrai

Metalas	Storis, μm	Garinimo laikas, min	Indukcijos srovė, mA	Garinimo $T^\circ\text{C}$	Slėgis, $\cdot 10^{-4}\text{Pa}$
Al	$20\ \mu\text{m}$	1 - 1,1 A	55 - 65	150	Pradžioje 3 - 4 pabaigoje - 5
Cr	0,1	4 - 5	45 - 60		3 - 4
Ni	0,4	5 - 7	600 - 700		5 - 7
Ag	0,6	2 - 3	100 - 140		4 - 5

43. Aliuminio įdeginimas. Įdeginimas atliekamas norint gauti ominią kontaktą tarp puslaidininkio ir metalo. Procesas vykdomas esant $500\ ^\circ\text{C}$ temperatūrai.

44. Pavalymas. Plokštelės plaunamos dejonizuotu vandeniu.

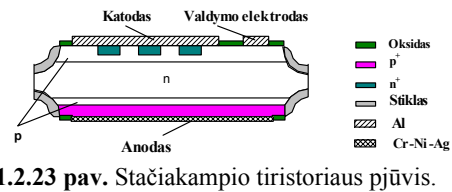
45. Anodo metalizacija. Iš anodo pusės užgarinamas trijų metalų sluoksnis: chromas (Cr), nikelis (Ni), sidabras (Ag) (1.2.22 pav.). Proceso režimas pateiktas 1.2.1 lentelėje.



46. Elektrinių parametrų statistinis matavimas. Matuojama valdymo įtampa U_{gt} , valdymo srovė I_{gt} , palaikymo srovė I_h ir įjungimo srovė I_l .

47. Pjaustymas. Plokštelės supjaustomos į atskirus kristalus. Tokiu būdu galutinai suformuojama stačiakampio tiristoriaus struktūra (1.2.23 pav.).

48. Plokštelių plovimas. Dejonizuotu vandeniu nuo plokštelės paviršiaus nuplaunami teršalai, kurie atsiranda pjaustant.



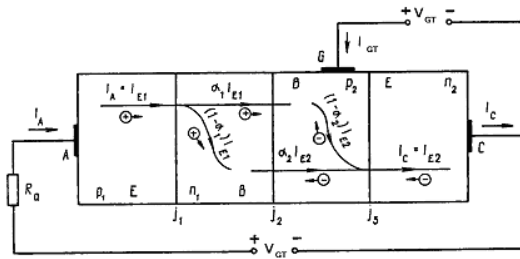
49. Kristalų dėliojimas. Kristalai išdėliojami į tarą.

50. Parametrų matavimas. Matuojama tiesioginė pasikartojanti impulsinė įtampa uždaroje būsenoje V_{DRM} ir pasikartojanti impulsinė atgalinė įtampa V_{RRM} .

1.3 Tiristorių veikimas

Tiristoriaus veikimą patogu nagrinėti, išivaizduojant jį kaip schemą, sudarytą iš dviejų tranzistorių: $p_1n_1p_2$ tranzistoriaus VT1 ir $n_1p_2n_2$ tranzistoriaus VT2 (1.1.1 pav.), kurių emiterio srovės perdavimo koeficientai α_1 ir α_2 [1].

Tarkime, kad prie tiristoriaus jungiama (pliusu prie anodo) tiesioginė įtampa. Valdymo grandinė atjungta ($I_{GT} = 0$).



Įtampa V_F emiterio sandūroms J_1 ir J_2 yra tiesioginė, o kolektoriaus sandūrai J_2 – atgalinė.

Tranzistoriaus T1 emiterio srovė I_{E1} , kurios didžiausią dalį sudaro iš p_1 emiterio injektuojamos skylės, bazėje n_1 išsišakoja į $I_{C1}=\alpha_1 I_{E1}$, tekančią į sritį p_2 ir $I_{B1}=(1 - \alpha_1)I_{E2}$, tekančią į sritį n_1 . Analogiškai tranzistoriaus VT2 emiterio srovė I_{E2} , kurios didžiausią dalį sudaro elektronų injekcijos iš n_2 emiterio p_2 , bazėje išsišakoja į $I_{C2}=\alpha_2 I_{E2}$, tekančią į n_1 , ir $I_{B2}=(1 - \alpha_2)I_{E2}$, tekančią į p_2 bazę (1.3.1 pav.). be to, kolektoriaus sandūra J2, kurią atgaline kryptimi veikia įtampa, tekės bendra abiejų tranzistorių atgalinė kolektoriaus srovė I_{C0} .

Kai valdymo srovės nėra ($I_{GT}=0$), visų sandūrų srovės yra lygios išorinės grandinės tiesioginei srovei I_F :

$$I_F = I_A = I_C = I_{J1} = I_{J2} = I_{J3}. \quad (1.3.1)$$

Savo ruožtu

$$I_{J1} = I_{E1}, I_{J3} = I_{E2}, I_{J2} = \alpha_1 I_{E1} + I_{C0} + \alpha_2 I_{E2}, \quad (1.3.2)$$

todėl

$$I_F = I_{C0}/(1-(\alpha_1 + \alpha_2)). \quad (1.3.3)$$

Gautoji išraiška (1.3.3) turi prasmę tik tuomet, kai abu tranzistoriai dirba stiprinimo režimu ir $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$, t. y. kai tiesioginė įtampa žema ir α_1 bei α_2 nedideli. Tada srityje p_2 skylės, patekusios iš srities p_1 (srovė $\alpha_1 I_{E1}$), visiškai rekombinuoja su elektronais, patekusiais iš srities n_2 (srovė $(1-\alpha_2)I_{E2}$), o srityje n_1 elektronai, patekę iš srities n_2 (srovė $\alpha_2 I_{E2}$), visiškai rekombinuoja su skylėmis, patekusiomis iš srities p_1 (srovė $(1-\alpha_1)I_{E1}$). Krūviai bazėje nesikaupia. Kai I_{C0} nedidelė, tai tiesioginė tiristoriaus srovė taip pat nedidelė, ir tiristorius yra uždaras.

Kai tiristorius atviras, tai visas jo sandūras veikia tiesioginės įtampos. Tačiau sandūrų J1 ir J2 įtampos yra priešingos krypties negu sandūros J3 įtampa. Todėl įtampos kritimas atviraime tiristoriuje V_{TM} yra artimas tiesioginei vienos pn sandūros įtampai ($V_{TM}=0,7-1,5V$). Tiesioginė tiristoriaus įtampa, kuriai veikiant prasideda griūtinis tiristoriaus persijungimas, nes $(\alpha_1 + \alpha_2) \geq 1$, vadinama tiristoriaus perjungimo įtampa V_B . Įtampa, kuriai esant tiristorius pereina į laidumo būseną, kai valdymo srovės nėra, žymima V_{B0} .

Jei prie tiristoriaus, kai jis veikiamas tiesioginės įtampos $V_F < V_{B0}$, valdymo elektrodo emiterinės sandūros atžvilgiu prijungsime tiesioginę įtampą, tai šia sandūra pradės tekėti papildoma srovė I_{GT} . Dėl to padidės emiterio srovė, o kolektoriaus sandūra taip pat pradės tekėti papildoma srovė $I_{GT}\alpha_2$. Tuomet iš išraiškų 1.3.1 – 1.3.3 gausime, kad katodo srovė [1]:

$$I_C = I_A + I_G, \quad (1.3.4)$$

o anodo srovė

$$I_A = (I_{C0} + \alpha_2 I_G) / (1 - (\alpha_1 + \alpha_2)). \quad (1.3.5)$$

Kai $I_{GT} > 0$, didinant tiesioginę tiristoriaus įtampą V_F , jo srovė stiprės greičiau, ir tiristorius į laidumo būseną pereis, kai $V_F = V_B < V_{B0}$. Be to, kuo didesnė valdymo srovė, tuo žemesnė tiristoriaus perjungimo įtampa V_B . Jei valdymo srovė pakankamai stipri, tiristorius atsidaro, kai tik $V_F > V_{TM}$ (V_{TM} – atviro tiristoriaus įtampa).

Tiristoriui perėjus į laidumo būseną, valdymo srovę galima nutraukti arba net prijungti nedidelę priešingo poliškumo valdymo įtampą. Tiristorius ir toliau bus atviras, nes emiterių srovės pakankamai stiprios, kad būtų galima sukurti perteklinius krūvius bazėse ir palaikyti tiesioginę kolektoriaus sandūros įtampą.

Norint, kad tiristorius pereitų iš laidumo būsenos į nelaidumo, reikia iš bazių pašalinti perteklinį krūvį. Tai galima padaryti trimis būdais:

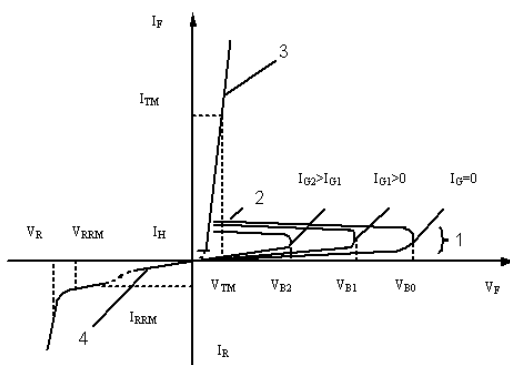
1. Silpninant anodo srovę iki tokio dydžio, kad $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$; tuomet krūvininkai nesikaupytų ir jų perteklius rekombinuotų.
2. Mažinant anodo įtampą, kad ji taptų mažesnė negu įtampa, reikalinga emiterių sandūroms palaikyti atviroms.
3. Keičiant anodo įtampos ženklą, t. y. prijungiant tiristoriui atgalinę įtampą.

Atskirais atvejais, esant silpnai anodo srovei, tiristorių į nelaidumo būseną galima pervesti labai stipria (artima anodo srovei) priešingos krypties valdymo srove. Tačiau stiprios valdymo srovės gali sugadinti tiristorių, todėl toks uždarymo būdas paprastiems tiristoriams nerekomenduotinas.

Įtampa V_R (jungiamo pliusu prie katodo) emiterio sandūroms yra atgalinė, o kolektoriaus tiesioginė. Veikiant atgalinei įtampai, tiristorius srovės praktiškai nepraleidžia, nes yra nelaidumo būsenoje. Ir tik atgalinei įtampai pasiekus sandūrų pramušimo įtampą V_{BR} , srovė ima stiprėti. Tai avarinis tiristoriaus darbo režimas. Paprastai $|V_{BR}| > |V_{B0}|$.

Tiristoriaus voltamperinė charakteristika

Tiristoriaus voltamperinėje charakteristikoje galima išskirti keturias atkarpas, atitinkančias skirtingas tiristoriaus būsenas bei darbo režimus (1.3.2 pav., atkarpos 1, 2, 3, 4).



1.3.2 pav. Tiristoriaus voltamperinė charakteristika (VACH).

Pirmoji atkarpa atitinka nelaidumo būseną, kai veikia tiesioginė įtampa, mažesnė už perjungimo įtampą $V_F < V_{B0}$. Tai beveik horizontali, labai pamažu kylanti linija. Kuo stipresnė valdymo srovė I_{GT} , tuo žemesnė yra perjungimo įtampa V_B . Kai tiesioginė tiristoriaus įtampa V_F artėja prie perjungimo įtampos V_B , srovė ima stiprėti, charakteristika užsiriečia.

Griūtinį tiristoriaus atsidarymą atitinka antroji jo charakteristikos atkarpa. Tiristoriaus srovė stiprėja, o įtampa mažėja (įtampa krinta išorinės grandinės varžoje R_a). Šioje atkarpoje tiristoriaus diferencialinė varža yra neigiama. Prasidėjęs atsidarymo procesas toliau plėtojasi savaimė, kol tiristorius visiškai atsidaro (tampa laidus).

Laidumo būseną atitinka trečioji charakteristikos atkarpa. Čia tiristoriaus varža maža, todėl charakteristikos atkarpa yra staty, artima tiesioginei diodo voltamperinei charakteristikai. Laidaus tiristoriaus savybės nepriklauso nuo

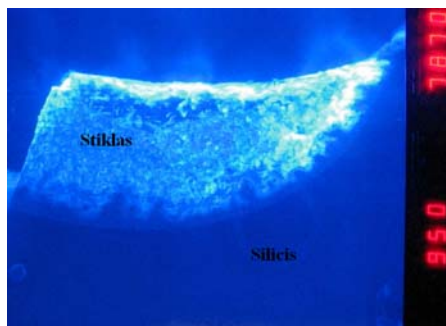
valdymo srovės, todėl tėra viena charakteristikos šaka. Mažinant laidaus tiristoriaus įtampą, srovė silpnėja, ir, jai pasiekus reikšmę I_H , tiristorius vėl užsidaro.

Tiristoriaus darbą, veikiant atgalinei įtampai, atitinka ketvirtoji jo charakteristikos atkarpa. Prijungus atgalinę įtampą V_R , tiristoriumi teka silpna atgalinė srovė. Jei atgalinės įtampos yra gana didelės, tai tiristorius pramušamas, ir atgalinė srovė pradeda stiprėti. Atgalinėje charakteristikoje yra išskiriamos trys sritys [22]: sritis prieš pirmąjį pramušimą, kurioje nuotėkių srovė yra maža, po pirmojo pramušimo ties 2870 V srovė išauga su teigiamu šlaitu (arba teigiama varža), po antro pramušimo ties 4810 V srovės kreivė tampa neigiama.

1.4 Apibendrinimas

Vienos iš svarbiausių $p-n$ sandūros krašto pasyvacijos operacijų yra izoliacinio griovelio cheminis ėsdinimas ir stiklo pasyvacijos operacijos (33 – 37 operacijos technologiniame maršrute). Šiose operacijose būtina ieškoti naujų dangų ir pasyvavimo metodų, kad galėtume pagerinti silicio adheziją su pasyvuojamu stiklu (1.4.1 pav.).

Šio darbo tikslas yra nustatyti izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo dėsningumus. Ištirti izoliacinių meza griovelių ėsdinimo charakteristikų priklausomybes nuo ėsdiklio sudėties, jo temperatūros kitimo, nuo ėsdinimo įrenginio



1.4.1 pav. Si-stiklo sandūros skersinio pjūvio SEM nuotrauka.

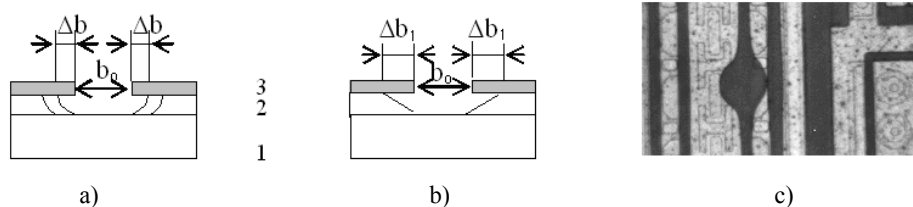
struktūros ir veikimo principo. $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo pasyvacijos optimizavimui, ištirti lydymo temperatūrinius profilius, nustatant V_{DRM} ir V_{RRM} parametrų priklausomybes nuo $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo lydymo temperatūrinio proceso kitimo. Ištirti deimanto tipo ($\alpha\text{-C-H}$) anglies dangos ir porėtojo silicio panaudojimo galimybes galingų puslaidininkinių prietaisų pasyvacijos technologijoje.

2. TYRIMŲ IR MATAVIMŲ METODIKOS APŽVALGA

Kaip jau buvo minėta, svarbiausios *p-n* sandūros krašto pasyvacijos operacijų yra izoliacinio griovelio formavimas ir stiklo pasyvacija. Tai yra 33 – 37 operacija technologiniame gamybos maršrute. Šiame skyriuje pateiksime siūlomas modifikacijas efektyvumo kontrolei bei naujų sluoksnių charakterizavimui naudojamus fizikinius metodus, bus aprašoma naudojama aparatūra ir matavimo metodika.

2.1 Izoliacinio griovelio formavimas ir ėsdinimas

Kai fotorezisto piešinys suformuotas, jį reikia perkelti ant puslaidininkinio darinio. Tam naudojami du būdai: cheminis (kartais vadinamas šlapias) ėsdinimas ir sausas ėsdinimas plazmoje. Ėsdinimo operacijos tikslas – suformuoti elementus su minimaliomis matmenų paklaidomis Δb (2. 1.1 pav.). Be to, ėsdinimo metu atsiradusių defektų tankis neturi viršyti tam tikrų leistinų normų, pavyzdžiui, dideliuose, $0,6 \text{ cm}^2$ ploto integriniuose grandynuose leistinų defektų tankis turi būti mažesnis už $0,1 \text{ cm}^{-2}$. Šiuo metu plačiausiai naudojamas cheminio ėsdinimo būdas, nes ši technologija nereikalauja brangios įrangos.



2.1.1 pav. Plėvelių profiliai, gaunami cheminiu ėsdinimu: fotorezisto sukibimas su ėsdinama plėvele pakankamas (a); sukibimas nepakankamas (b); fotolitografijos brokas (c), dėl kurio įvyko pilnas aliuminio jungiamojo laidininko nutrūkimas; 1 – puslaidininkio plokštelė, 2 – dielektriko ar metalo plėvelė, 3 – fotorezistas.

Elektronikoje naudojamos įvairių medžiagų plėvelės, kurios ėsdinamos pro fotorezisto kaukę. Atlikus cheminį ėsdinimą gaunami įvairūs plėvelių profiliai, o taip pat paaiškėja ir brokas, tai yra parodyta 2.1.1 pav. Dauguma plėvelių (dielektrinių ir metalinių) chemiškai ėsdinamos vienodais greičiais

visomis kryptimis, toks procesas vadinamas izotropiniu. Kaip matosi iš 2.1.1 pav., realus angos plotis dielektrike/metale b_{real} bus didesnis už angą b_0 fotoreziste:

$$b_{real} = b_0 + 2\Delta b = v_{ch.ésd.} \times t_{ch.ésd.}, \quad (2.1.1)$$

čia Δb -šoninis plėvelės ėsdinimas, kai fotorezistas gerai sukibęs su plėvele; $v_{ch.ésd.}$ – medžiagos cheminio ėsdinimo greitis; $t_{ch.ésd.}$ – ėsdinimo laikas. Šoninis ėsdinimas Δb yra lygus ėsdinamos plėvelės storiui, kuomet fotorezisto sukibimas yra pakankamas, o ėsdinimo laikas lygus:

$$t_{ch.ésd.} = d_{plėv.} / v_{ch.ésd.}, \quad (2.1.2)$$

čia $d_{plėv.}$ -ėsdinamos plėvelės storis.

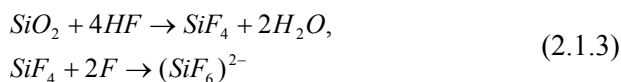
Šiuo atveju gaunamas minimalus šoninis ėsdinimas. Dėl plėvelės storio netolygumo (kinta nuo 5% iki 15%), ėsdiklio temperatūros ir jo koncentracijos nestabilumo, realus ėsdinimo laikas imamas 15-30% ilgesnis už $t_{ch.ésd.}$. Todėl šoninis ėsdinimas nebūna minimalus, o anga plėvelėje gaunama didesnė. Kuomet fotorezisto sukibimas su plėvele yra nepakankamas (2.1.1 b pav.), ėsdiklis “palenda” po juo ir šoninis ėsdinimas gaunamas daug didesnis $\Delta b_1 > \Delta b$. Angos profilis turi iššęsto šlaito formą. Dydis Δb_1 yra nekontroliuojamas, o esant nepriimtina jį reikšmei, plokštelės brokuojamos. Šoninį ėsdinimą galima sumažinti naudojant silpnos koncentracijos ėsdiklius. Svarbu, kad ėsdiklis būtų selektyvus, t.y. ėsdintų tik metalo ar dielektriko plėvele, o fotorezisto neėsdintų.

Plėvelių ėsdinimo greitis priklauso nuo ėsdiklio cheminės sudėties ir koncentracijos, cheminės reakcijos tipo, proceso temperatūros bei plėvelės paviršiaus morfologijos. Mikroelektronikoje naudojamos įvairiausios medžiagos [1]. Aptarsime kai kurių medžiagų ėsdiklius.

Silicio oksido (SiO₂) sluoksnių ėsdinimas

SiO₂ formuojamas terminio oksidavimo, pirolizės, zolis-gelis ir kitais būdais [1]. SiO₂ yra ėsdinamas ėsdikliais, kurių sudėtyje būtinai turi būti

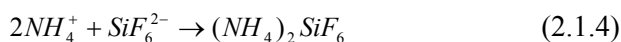
fluoro rūgštis (*HF*), nes jokios kitos rūgštys silicio oksido neėsdina. Chemines reakcijas SiO_2 su fluoro rūgštimi galima užrašyti:



$(\text{SiF}_6)^{2-}$ gerai tirpsta vandenyje, todėl nenusėda ant ėsdinamo paviršiaus. Su koncentruota *HF* reakcija vyksta labai greitai ir ją sunku kontroliuoti. Dujinis SiF_4 nespėja sureaguoti su fluoro jonais (fluoro rūgštis silpnai disocijuoja) ir išsiskirdamas plėšia fotorezisto plėvelės kraštus, didindamas nuokrypius nuo reikalaujamų matmenų.

Reakcijos greitį galima sumažinti skiedžiant *HF* dejonizuotu vandeniu. Ėsdinimo kokybė pagerėja, kaip priedą įdėjus amonio fluoridą (NH_4F). Ėsdinimo greitis priklauso nuo ėsdiklio temperatūros, koncentracijų (*HF* ir NH_4F), ėsdiklio maišymo magnetine maišykle ar purtant ultragarsu. Mažesnio greičio, kitaip dar vadinamais „buferiniais“, ėsdikliams paprastai būna tokios sudėties $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}$ (1-2):(2,5-9):(0-10).

Šiuose ėsdikliuose po (2.1.3) reakcijos vyksta dar viena reakcija:



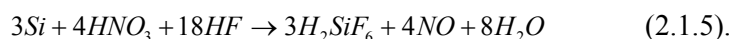
Silicio oksido sluoksnių ėsdinimas „buferiniais“ ėsdikliais priklauso nuo temperatūros ir sluoksnio savybių. Pavyzdžiui, terminio SiO_2 , suformuoto 1050°C temperatūroje, $0,3 \mu\text{m}$ storio buferiniame ėsdiklyje HF (48%): $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}$ (1:2,5:3,8) ėsdinimo greitis yra $0,076 \mu\text{m}/\text{min}$ - 20°C , $0,121 \mu\text{m}/\text{min}$ - 25°C , $0,165 \mu\text{m}/\text{min}$ - 30°C ir $0,252 \mu\text{m}/\text{min}$ - 35°C temperatūroje. Į terminio SiO_2 sluoksnį implantuojant fosforo jonus, ėsdinimo greitis padidėja iki $0,110 \mu\text{m}/\text{min}$ - 20°C ir $0,330 \mu\text{m}/\text{min}$ - 30°C temperatūroje.

Ėsdinimo kokybė tikrinama mikroskopais. Ar oksidas nuėsdintas galima nustatyti pagal spalvą (silicis pilkos spalvos) arba pagal vilgumą: grynas silicis nevilgus vandeniui, o silicio oksidas hidrofilinis. Jei išėsdintos angos pasidengia vandens plėvele, tai oksidas dar neišėsdintas.

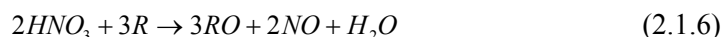
Silicio ėsdinimas

Silicio ėsdinimui naudojamas izotropinis ir anizotropinis ėsdinimas [23, 24]. Anizotropiniai ėsdikliai ėsdina silicio plokštelę <100> ir <110> kryptimis, didesniu greičiu nei <111> kryptimi. Daugeliu atveju, tai daugiakomponenčiai tirpalai, sudaryti iš oksidatoriaus, kuris oksiduoja silicį iki hidratuoto silicio dioksido, kompleksus sudarančio junginio, skirto tam, kad reakcijoje su hidratuotu silicio dioksidu sudarytų tirpius kompleksinius jonus ir vandenį. Izotropiniai ėsdikliai ėsdina silicį beveik vienodu greičiu visomis kristalografinėmis kryptimis. Jie naudojami cheminiam silicio poliravimui. Keičiant sudedamųjų santykį, keičiamas ėsdinimo greitis [24]. Pavyzdžiui, ėsdiklis HF:HNO₃:CH₃COOH=1:40:15, ėsdina silicio (111) plokštumą 0,15 µm/min greičiu, (100) – 0,2 µm/min, (T=298 K), t.y. labai lėtai. Tos pačios sudėties ėsdiklis kitu santykiu (1:3:10) (kitai vadinamas Daša [25]) yra dalinai anizotropinis: n ir p Si <100> kryptimi ėsdina 130 nm/min, <111> kryptimi – 4,5 nm/min. Ėsdinimo greitis didėja, didėjant legiravimo lygiui. Ėsdiklis Daša paprastai naudojamas silicio (111) plokštumoje kristalografinių defektų nustatymui.

Didelės galios prietaisų gamyboje ėsdinimas rūgščių ar šarmų tirpaluose yra standartinė operacija. Silicis gerai tirpsta fluoro rūgšties ir šarmų tirpaluose. Kitų rūgščių ėsdikliuose silicio paviršiuje susidaro netirpstančio oksido plėvelė. Silicio tirpimas vyksta stadijomis ir kiekviena stadija lydima tiek silicio, tiek tirpalo komponentų cheminiais pokyčiais [26]. Ėsdinant HF-HNO₃ rūgščių mišiniuose silicio tirpimo greitis ir ėsdinamo paviršiaus morfologija priklauso nuo rūgščių ir susidarančio reakcijos produkto H₂SiF₆ koncentracijos. Reakcijos produktas H₂SiF₆ ėsdiklyje tirpstant siliciui susidaro dviem etapais: pradžioje HNO₃ oksiduoja silicį į SiO₂, ir antrame etape oksidas reaguoja su HF sudarydamas SiF₄, kuris reaguodamas su HF virsta SiF₆⁻. Silicio tirpimo bendrą reakciją galima užrašyti [27]:

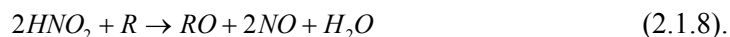


Pastarųjų metų tyrimai [28] parodė, kad silicio ėsdinimo mechanizmas žymiai sudėtingesnis, nei aprašo (2.1.5) reakcija. Žinoma, kad silicio oksidaciją apsprendžia pusiausvyros reakcija tarp azoto oksido ir rūgšties (2.1.6) [29]:



čia *R*- redukcijos reagentas.

Reakcijos metu susidaręs azoto oksidas generuoja nitrito rūgštį (2.1.7), kuri yra dominuojantis oksiduojantis reagentas (2.1.8):



Vadinasi, jei ėsdinimo metu nesusidaro HNO_2 , kaip oksiduojantis reagentas, silicio ėsdinimo greitis labai mažas, nes jį sąlygos tik pirminė azoto rūgšties ir Si reakcija [29].

Žinoma, kad vandenilis ir anglis yra geri redukciniai elementai. Acto rūgštis (CH_3COOH) ėsdiklyje yra redukcinis reagentas, kuris sąlygoja NO ir HNO_2 susidarymą ir tuo pačiu atskiedžia koncentruotas rūgštis. CH_3COOH yra geresnis skiediklis nei vanduo, nes turi mažesnę (6,15) dielektrinę konstantą už vandenį (81), todėl apsprendžia mažesnę HNO_3 disociaciją ir aukštesnę oksidacijos laipsnį ėsdinimo metu. Be to, acto rūgštis yra mažesnio poliarškumo nei vanduo, todėl geriau drėkina dalinai hidrofobinį silicio paviršių [30].

Tačiau gilių izoliacinių griovelių ėsdinimas plokštelėje, kurioje yra suformuota p-n sandūra skiriasi nuo padėklo ėsdinimo. Ėsdinimo metu vandenilis įsiterpia į silicį ir pasyvuoja priemaišas, ypač p-tipo priemaišas, tokias kaip boras, suformuodamas didesnės varžos sluoksnį p-srityje [31]. Tai gali pakeisti ėsdinimo greitį bei griovelio paviršiaus morfologiją, o tuo pačiu įtakoti prietaisų pramušimo įtampas. Todėl tikslingas ėsdiklio sudėties, ėsdinimo sąlygų bei metodikos nustatymas įgalintų užtikrinti geresnes gaminamų prietaisų elektrines savybes.

Ėsdinimo proceso vidiniai etapai:

- 1) reaguojančių molekulių difuzija per ribinį sluoksnį į Si paviršių;

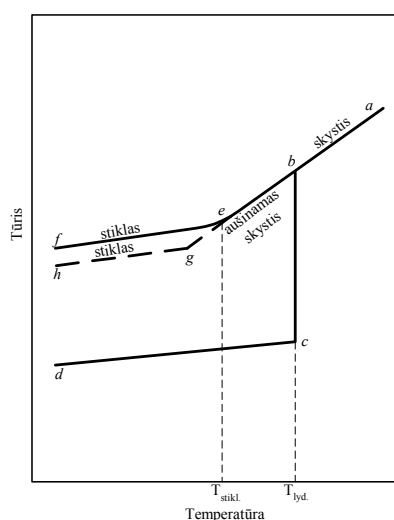
- 2) reaguojančių molekulių adsorbcija Si plokštelės paviršiuje;
- 3) paviršinė reakcija;
- 4) reakcijos produktų desorbcija;
- 5) reakcijos produktų difuzija į tirpalą.

Išoriniais faktoriais (tirpalo temperatūra, tirpalo maišymu) keičiant šių etapų vyksmo greitį bei parenkant išdiklio koncentraciją galima reguliuoti Si išdinimo greitį ir paviršiaus morfologiją.

2. 2 Puslaidininkinių struktūrų pasyvacija stiklu

Stiklo formavimosi proceso termodinamika ir kinetika

Lydinio aušimo metu vyksta du skirtingi procesai [32]. Lydinys kristalizuojasi lydymosi, ar šiek tiek mažesnėje temperatūroje, arba jis ženkliai peršaldomas ir be kristalizacijos pereina į stiklo būseną. 2.2.1 paveiksle pateiktos tūrio priklausomybė nuo temperatūros sistems, kuriose vyksta kristalizacija arba stiklo formavimasis. Tūrio pokyčiai aušimo metu, nesusidarant stiklui, aprašomi kreive *abcd*. Temperatūroje T_{lyd} prasideda kristalizacija (atkarpa *bc*), nors kartais prieš kristalizaciją vyksta lydinio staigus aušimas. Didesnis atkarpos *ab* pasvyrimas, lyginant su atkarpa *cd*, rodo, kad terminio plėtimosi koeficientas skystoje būsenoje didesnis negu kietoje fazėje.



2.2.1 pav. Kristalinių, skystų ir stiklo būsenų tūrio priklausomybė nuo temperatūros.

Stiklo formavimosi sistemos tūrio kitimai pateikiami *abef* ir *abgh* atkarpomis. Srityje *be* yra staigiai aušinamas skystis. Šioje srityje, prie bet kurios temperatūros, skystis greitai pasiekia vidinės pusiausvyros būseną, kuri nusistovi supančios aplinkos temperatūroje. Žeminant temperatūrą, skysčio tamprumas palaipsniui auga iki tokio lygio, kol nepasiekia reikšmės, prie kurios vidinė pusiausvyra jau nebebusistovi. Atomų išsidėstymas tarsi

„užšaldomas“ ir prie pakartotino staigaus aušimo sistema tampa tokia tvirta kaip ir kristalinis kietasis kūnas. Sudarytasis kietasis kūnas nepasižymi atomų išsidėstymo periodiškumu, nors tai būdinga kristaliniam kūnui. Toks savybių pasikeitimas, pereinant iš skystos į kietą stiklo būseną, įvyksta tam tikroje temperatūroje (arba tam tikrame temperatūrų intervale), vadinamos stiklo formavimosi temperatūra $T_{stikl.}$. Duotai sudėčiai galima susintetinti stiklus su skirtingais stabilumo lygiais, t. y. charakterizuojama skirtingomis $T_{stikl.}$ vertėmis. Jeigu lydinys nesusikristalizuoja, tai prie lėto vėsinimo skystis gali būti vidinės pusiausvyros būsenoje iki žemesnių temperatūrų, negu greito aušimo atveju. Tokiu atveju temperatūra $T_{stikl.}$ gali būti šiek tiek sumažinta (2.2.1 pav. *e* ir *g* taškai). Struktūros persiformavimas užtrunka keletą minučių.

Aptarkime stiklo formavimosi kinetiką. Formuojantis stiklui iš lydinio, kristalizacijos greitis turi būti kuo mažesnis. Aušinamo skysčio kristalizaciją sudaro dvi stadijos: 1) kristalų užuomazgų susidarymas; 2) kristalų augimas. Stiklo formavimuisi būdingas lėtas užuomazgų susidarymas ir kristalų augimas. 2.2.2 paveiksle pateikta kristalizacijos greičio priklausomybė nuo temperatūros. Lydymosi taške kristalizacijos greitis lygus nuliui, po to prie tam tikro aušimo laipsnio jis išauga iki maksimalios reikšmės ir vėl sumažėja iki nulio prie žemų temperatūrų.

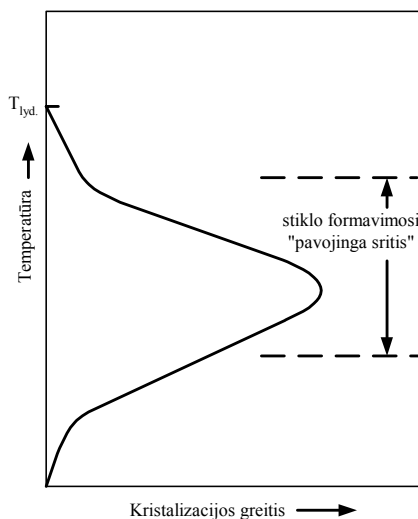
Kreivę, pavaizduotą 2.2.2 paveiksle, galima gauti ir eksperimentiškai matuojant kristalizacijos greitį sistemose, kur šis procesas yra lėtas. Dauguma skysčių užšąla temperatūroje $\leq T_{lyd.}$, ir jų kristalizacijos greitis toks didelis, kad neįmanoma išmatuoti. Kreivės formą (2.2.2 pav.) galima paaiškinti taip:

temperatūrose artimose $T_{lyd.}$ kristalų ir skysčių laisvosios energijos beveik vienodos. Todėl kristalizacijos proceso judanti jėga labai silpna ir greitis beveik lygus nuliui.

Prie temperatūrų $< T_{lyd.}$ laisvoji kristalų energija yra mažesnė už skysčio laisvąją energiją. Kristalizacijos greičio augimas žemiau lydymosi temperatūros įtakoja laisvųjų jėgų skirtumą tarp kristalo ir skysčio, o tai paaiškina kristalizacijos proceso judančios jėgos augimą. Srityje, dar žemesnėje už lydymosi temperatūrą, svarbų vaidmenį vaidina aušinamų

lydinių tamprumas. Augant tamprumui jonų ir atomų difuzija skysčio tūryje ir augančio kristalo paviršiuje tampa vis lėtesnė, ir kristalizacijos greitis pradeda mažėti.

Tokiu būdu, žemėjant temperatūrai, pradeda vykti du konkuruojantys procesai. Jei kristalo ir skysčio laisvųjų energijų skirtumas gerina kristalizacijos procesą, tai aušinamo skysčio tamprumo augimas mažina kristalizacijos vyksmą. Kristalizacijos greičio kreivės maksimumas (2.2.2 pav.) atitinka situaciją, kai abu konkuruojantys procesai yra pusiausvyri. Žemiau maksimumo temperatūros dominuojantis faktorius yra tamprumas, o aukščiau kristalizacijos proceso kinetika apibūdinama kristalų ir skysčio laisvųjų energijų skirtumu.



2.2.2 pav. Kristalizacijos greičio priklausomybė nuo temperatūros.

Kristalizacijos greičio priklausomybės nuo temperatūros grafike (2.2.2 pav.) egzistuoja stiklo formavimosi „pavojinga sritis“, kurioje kristalizacijos greitis maksimalus. Jei pavyksta greitai atvėsinti skystį iki srities žemiau šios temperatūros, susiformuoja stabilus stiklas.

Pasyvuojančių dangų švino-boro stiklų savybės

Nagrinėjamų stiklų linijinis plėtomosi koeficientas ($A=5,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) yra artimas silicio linijiniam plėtimosi koeficientui ($\alpha_{Si}=4,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), tai sumažina vidinius mechaninius įtempimus. Nustatyta [33], kad šiluminio plėtomosi koeficientas CTE (CTE-Coefficient of Thermal Expansion) stikle, įdegintame 820°C temperatūroje yra lygus $3,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ir priklauso tai pačiai eilei kaip ir silicio plokštelės CTE. Šis koeficientų artumas yra svarbus C-V charakteristikų nustatymui MIP (Metalas-Izoliatorius-Puslaidininkis) struktūroje. Efektinė krūvio vertė Q_I , tenkanti vienam ploto vienetui riboje stiklas-puslaidininkis ir matuojant realios struktūros U_{FB} (idealios struktūros atveju $U_{FB}=0$), aprašoma:

$$Q_1 = -C_i(U_{FB} - \Phi_M), \quad (2.2.1)$$

kur C_i – stiklo talpumas, normuotas į ploto vienetą, Φ_M – elektrono išlaisvinimo iš puslaidininkio ir metalo darbų skirtumas; „-“ ženklas paaiškinamas tuo, kad krūvio ženklas stikle yra priešingas pridėtai valdymo elektrodo įtampei. Keičiant temperatūrą, įtampos matavimai nuo T_1 iki T_2 kinta nuo $U_{FB}(T_1)$ iki $U_{FB}(T_2)$, tai paaiškinama krūvio stikle kitimu. Matuojant įtampos vertes prie skirtingų temperatūrų, galima nustatyti dydį ΔQ_i :

$$\Delta Q_i = C_i(U_{FB}(T_1) - U_{FB}(T_2)). \quad (2.2.2)$$

Jeigu kintant temperatūroms kinta U_{FB} vertės, tai paaiškinama paviršinių būsenų krūvio kitimu, sukeltu Fermi lygio vietos kitimu silicijoje, tai ΔQ_i vertė turi sutapti su paviršinių būsenų krūvio verte ΔQ_{SS} , lokalizuotų energijos intervale nuo E_1 iki E_2 , nustatomu aukšto dažnio voltfaradinėmis charakteristikomis (C-U). E_1 ir E_2 vertės atitinka energetinio Fermi lygmens padėtį draudžiamojame juostoje prie temperatūrų T_1 ir T_2 ir nustatomi pagal formulę:

$$E_i = kT_i \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right), \quad (2.2.3)$$

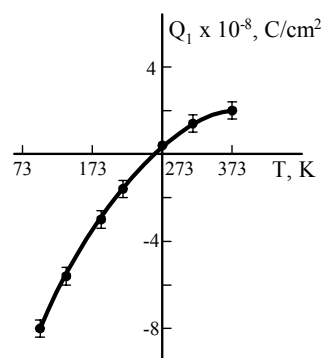
kur k – Bolcmano koeficientas, n_0 – legiruotų priemaišų koncentracija, n_i – savoji krūvininkų koncentracija silicijoje tam tikroje temperatūroje. Matuojant ΔQ_{SS} vertes C-U metodu E_1 ir E_2 vertės parenkamos artėjimo būdu. ΔQ_i ir ΔQ_{SS} verčių nesutapimas byloja apie tūryje egzistuojantį krūvį Q_0 , kurio vertė kinta keičiantis temperatūrai.

Talpų reikšmės C_{FB} , reikalingos U_{FB} verčių matavimui, apibrėžiamos formule [34]:

$$C_{FB} = C_i C_d(T) / (C_i + C_d(T)), \quad (2.2.4)$$

kur $C_d(T)$ – Si krūvininkų talpa, išreiškiama

$$C_d(T) = q \sqrt{(\epsilon \epsilon_0 n_0) / (kT)}, \quad (2.2.5)$$

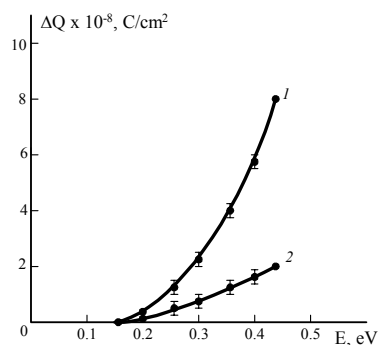


2.2.3 pav. Efektyvaus krūvio priklausomybė nuo temperatūros.

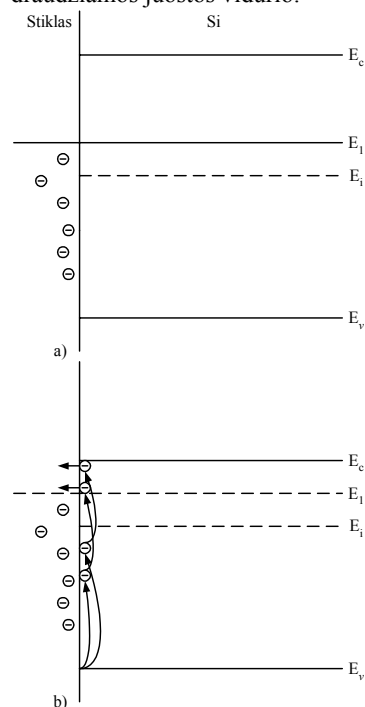
čia – q – elektrono krūvis, ε - silicio dielektrinė skvarba, ε_0 – dielektrinė konstanta. Mažų priemaišų koncentracijų vertė yra lygi $n_0 = (9 \pm 0,5) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

2.2.3 pav. pateikta eksperimentinė $Q_1(T)$ priklausomybė [34]. Nagrinėjama sistema yra silicis-stiklas-metalas. Temperatūrų kitimo ribos - nuo 83 iki 373 K, krūvio dydis dielektrike kinta nuo $(-8,5 \pm 0,3) \times 10^{-8}$ iki $(2,5 \pm 0,3) \times 10^{-8} \text{ C/cm}^2$. Į akis krinta, krūvio ženklo pasikeitimas, kintant temperatūrai. Tai gali būti paaiškinama dviejų tipų krūvių stikle: pastovaus, nepriklausomo nuo temperatūros ir (priešingo pagal ženklą) kintančio kartu su temperatūra.

2.2.4 pav. pateikta ΔQ_I priklausomybė nuo Fermi lygmens padėties (2.2.2), draustinės juostos vidurio silicyje, išnagrinėtame temperatūrų diapazone (2.2.3 pav.) ir taip pat ΔQ_{SS} vertės, nustatytos aukštadažniu C-U charakteristikų metodu, atitinkamame energetiniame intervale [34]. Matyti, kad ΔQ_I reikšmių kitimas staigesnis už ΔQ_{SS} verčių kitimą. Tai paaiškinama tuo, kad stebima ΔQ_I priklausomybė nuo temperatūros, apibrėžiama tiek paviršinių būsenų krūvio kitimu, tiek ir krūvio dydžio kitimu, lokalizuoto nagrinėjamo stiklo tūryje. Tokiu būdu galima užrašyti:



2.2.4 pav. Efektyvaus krūvio kitimo priklausomybė (ΔQ_I) (1) ir paviršiaus būsenų krūvio (ΔQ_{SS}) priklausomybė (2) nuo Si Fermi lygmens padėties draudžiamos juostos vidurio.



2.2.5 pav. Stiklas – puslaidininkis ribos energetinių juostų diagrama prie temperatūrų T_1 a) ir T_2 b) ($T_1 > T_2$).

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{SS} + \Delta Q_0, \quad (2.2.6)$$

$$\Delta Q_0 = C_i(U_{FB}(T_1) - U_{FB}(T_2)) - \Delta Q_{SS}, \quad (2.2.7)$$

kur ΔQ_0 – efektyvaus paviršinio krūvio kitimas dielektrike, nustatomo atitinkamai (2.2.6):

$$\Delta Q_0 = d^{-1} \int_0^d ((\rho_1(x) - \rho_2(x))x) dx, \quad (2.2.8)$$

kur $\rho_1(x)$ ir $\rho_2(x)$ – tūrinio krūvio tankio pasiskirstymo funkcijos stikle prie temperatūrų T_1 ir T_2 atitinkamai, d – dielektriko storis, $x = 0$ stiklas – metalas riboje.

2.2.5 paveiksle pateikiame stiklo ir puslaidininkio ribos energijos lygmenų diagramą, termodinaminės pusiausvyros būsenoje prie temperatūrų T_1 ir T_2 ($T_1 > T_2$). Šioje riboje paviršinė būseną pasižymi donorinėmis savybėmis. Žemiau Fermi lygmens užpildytos elektronais ir elektriškai neutralios, aukščiau laisvos ir turinčios teigiamą krūvį būsenas. Kadangi struktūra yra termodinaminės pusiausvyros būsenoje, gaudyklės ties Si riba užpildomos tik tuo atveju, jei jų jonizacijos energija mažesnė už Fermi lygmens energiją silicyje. Žeminant temperatūrą iki T_2 , Fermi lygmuo silicyje juda link laidumo juostos dugno ir būsenos užsipildo elektronais (2.2.5 pav. b). Tokiu būdu galimas krūvininkų persiskirstymas tarp gaudyklių centrų riboje su stiklu. Tuo atveju dielektrike susidaro krūvio koncentracijos gradientas. Žinoma, kad kristalizacijos procesai, riboje su stiklu, vyksta kur kas greičiau negu jo tūryje. Gaudyklinių centrų koncentracija, riboje su stiklu, daug didesnė negu likusiame stiklo tūryje ir šioje srityje galimas krūvininkų nešėjų pernešimas nuo ribos į stiklo gilumą, aprašomas krūvininkų nešėjų koncentracijos gradientu.

Augant temperatūrai Fermi lygmuo silicyje juda link draudžiamosios juostos vidurio. Tuo atveju vyksta atvirkštinis gaudyklių krūvio perkrovimo procesas dielektrike per paviršinių būsenų atsilaisvintus energijos lygmenis. Tas faktas, kad prie žemų temperatūrų Q_I dydis yra neigiamas, o augant temperatūrai keičia ženklą ir tampa teigiamas, liudija apie teigiamo krūvio

gaudyklių centrų gausėjimą. Galima daryti išvadą, kad gaudyklių centrai riboje su dielektriku, kaip ir paviršinės būsenos, yra donorinio tipo centrai ir įgyja teigiamą krūvį atiduodami elektroną.

Grįžtant prie pastovaus ir kintamo krūvio ženklo stikle, galima teigti, kad krūvis dielektrike yra pastovaus neigiamo krūvio (Q) ir kintamo teigiamo krūvio (Q^+) suma. Kintamo krūvio efektyvus tankis aprašomas gaudyklių centrų koncentracija dielektriko paviršinėje srityje:

$$Q_0 = d^{-1}q \int_0^d (xN_T(x))dx, \quad (2.2.9)$$

kur $N_T(x)$ – gaudyklių centrų pasiskirstymo funkcija, tūrinė koncentracija. Praktiniams tikslams dažniau naudojama efektyvi gaudyklių koncentracija ploto vienetui puslaidininkis-stiklas riboje (N_{TS}) ir nustatoma pagal formulę

$$N_{TS} = \Delta Q^+ / q, \quad (2.2.10)$$

o taip pat jos energetinis spektras dN_{TS}/dE . Dydis ΔQ_0 aprašomas gaudyklių centrų krūvio kitimu ($\Delta Q_0 = \Delta Q^+$), todėl gaudyklių centrų koncentraciją galima aprašyti kaip

$$N_{TS} = \Delta Q_0 / q. \quad (2.2.10 \text{ a})$$

Švino-borosilikatinių stiklų tūryje nustatyta krūvio reikšmė (Q_0), kurios vertė priklauso nuo temperatūros [34]. Ši priklausomybė paaiškinama gaudyklių centrų, lokalizuotų puslaidininkis-stiklas riboje, krūvio kitimu.

Paviršinių krūvių tankis yra lygus [35]:

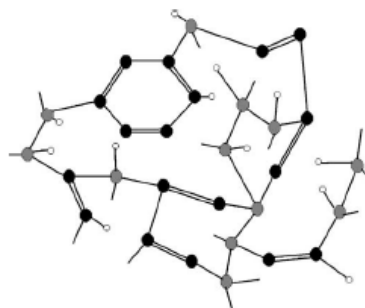
$$Q_S = \frac{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0k_0T}{qL_D} \left[\ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \right]^{1/2}, \quad (2.2.11)$$

Keičiantis temperatūrai vyksta paviršinių būsenų krūvio pokytis Si-stiklas riboje. Susidaręs krūvininkų nešėjų koncentracijos gradientas dielektrike, perneša juos nuo ribos į paviršinę stiklo sritį. Dydžio Q_0 priklausomybė nuo temperatūros leidžia daryti išvadą, kad gaudyklės yra donorinės prigimties.

2.3 Deimanto tipo (a:C-H) anglies dangos pasyvacija

Aukštavolčių didelės galios puslaidininkinių prietaisų, kurie dirba prie kelių tūkstančių amperų, o uždarymo įtampa iki kelių tūkstančių voltų, didelė problema yra elektrinio lauko pasiskirstymas kristalo pakraštyje, kur p-n sandūra išsina į paviršių ir vyksta griūtinių krūvininkų skaičiaus didėjimas. Darbo stabilumui užtikrinti būtina pasyvuoti paviršių kristalo periferijoje ant profiliuoto krašto kampo. Terminiu būdu užauginti SiO₂ sluoksniai nebuvo taikomi diskretiniuose aukštavolčiuose prietaisuose dėl didelių krūvių tankių ir dreifinių reiškinių [36, 37]. Tokiems prietaisams tinkamesni yra silikatiniai stiklai ir organiniai polimerai. Plačiai naudojami švino - aliumoborosilikatiniai stiklai su temperatūriniu plėtimosi koeficientu $4,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Aukštavolčiams prietaisams naudojamas ir aliumosilikatinis stiklas, kurį galima užnešti elektroforezės būdu. Taip pat naudojamas pusiauizoliacinis polikristalinis silicis (*Sipos*). Jis gaunamas iš mišinio SiH₄ - N₂O - N₂. *Sipos* silicio laidumą galima gauti tokį mažą, kad nuotėkio srovės tampa nežymiomis. Dažnai sipos plėvelė padengiama silicio nitrido plėvele gaunama iš sistemos SiH₄ - NH₃ - N₂. Tokia plėvelė apsaugo nuo judrių natrio jonų ir drėgmės.

Pastaruoju metu populiarios yra deimanto tipo anglies dangos (DTAD) [38]. Tai metastabili amorfinė anglies atmaina, kurioje dalis anglies atomų sujungti tarpusavy sp^3 ryšiais (kaip deimante), dalis – sp^2 ryšiais (kaip grafite) (2.3.1 pav.) [38]. Deimanto tipo anglies dangos gali būti hidrogenizuotos ir



2.3.1 pav. Amorfinės deimanto tipo anglies struktūrinė schema. Juodi taškai - sp^2 jungties anglies atomai, pilki taškai - sp^3 jungties atomai, balti taškai - vandenilio atomai.

nehidrogenizuotos. Jos turi aukštą mechaninį atsparumą, cheminį inertiškumą, aukštą optinį pralaidumą ir yra plačios draudžiamos juostos puslaidininkis [38].

Anglis susijungdama su supančiais atomais gali turėti 3 skirtingas hibridizacijos formas. α :C-H egzistuoja sp^3 ir sp^2 ryšiai [39], sp lygmenų dalis nežymi. α :C-H struktūra pagrindinai yra mišinys iš sp^3 (deimanto) pavidalo ir sp^2 (grafitinio) [40]. Įterpus vandenilį galima dar pakeisti sluoksnio savybes. Amorfinių anglių pagrindinių savybių palyginimas tarp deimanto ir grafito pateiktas 2.3.1 lentelėje. Specialus prieštampis plazminiame įrenginyje keičia nusodinimo metu sluoksnio savybes [41]. Prieštampis yra energijos matas, kuriuo jonai bombarduoja padėklą; didėjant prieštampiui, vandenilio kiekis mažėja [39]. Dangos formuojamos ant (111) silicio padėklo, esančio 0,01 m atstumu nuo šaltinio [42]. Argonas ir acetilenas (C_2H_2) yra nešančiosios dujos. Plazmos šaltinio energija ~820W. Šiame darbe buvo keičiamas Ar/ C_2H_2 dujų santykis: 12, 60 ir 100. Atitinkamai gauti sluoksnio augimo greičiai: 2,94 μ m, 0,534 μ m ir 0,5 μ m. Plazmos temperatūros virš padėklų: 480°C, 930°C ir 980°C. Kaip matome iš rezultatų, augimo greitis didėja, didėjant acetileno kiekiui argono plazmoje.

2.3.1 lentelė. Amorfinių anglių pagrindinių savybių palyginimas tarp deimanto ir grafito [43].

Danga	sp^3 , %	H, %	Tankis, g·cm ⁻³	Draustinės juostos plotis, eV	Kietumas, GPa
Deimantas	100	0	3,515	5,5	100
Grafitas	0	0	2,267	0	
C ₆₀		0		1,6	
Stikliškas C	0	0	1,3-1,55	0,01	3
Išgarintas C	0	0	1,9	0,4-0,7	3
Sutankintas C	5	0	2,2	0,5	
ta-C	80-88	0	3,1	2,5	80
α :C-H kietas	40	30-40	1,6-2,2	1,1-1,7	10-20
α :C-H minkštas	60	40-50	1,2-1,6	1,7-4	<10
ta-C:H	70	30	2,4	2,0-2,5	50

Tai yra susiję su angliavandenilio kiekio didėjimu plazmoje [44, 45]. Plevelė paruošta santykiu Ar/ C_2H_2 =12 pasižymi stulpelių struktūra [41]. Stulpelių diametrai kinta nuo 50 iki 100 μ m, kituose santykiuose pasižymi lygesnė struktūra. Mažėjant acetileno kiekiui plazmoje, temperatūra kyla nuo 480°C iki 980°C. Furjė transformacija (FTIR - Fourier transform infrared) ir

Ramano spektro (RS) matavimai parodė, kad acetileno mažėjimas duoda didesnes frakcijas sp^2 ir sp^3 plėvelėse. Nustatyta, kad plėvelė suformuota santykiu $Ar/C_2H_2=60$ yra amorfinė DLC/GLC (diamond-like carbon/graphite-like carbon) su stiklo grafito intarpais, kai tuo tarpu, plėvelė formuota santykiu $Ar/C_2H_2=100$, sudaryta iš sumaišytų sp^2 ir sp^3 hibridizacijų sričių [41, 46]. Šios suformuotos DTAD dangos gali būti ėsdinamos deguonies jonų pluošteliais, suformuojant norimą piešinį su minimaliais nuokrypiais [47 - 49]. Ėsdinimo greitis siekia nuo 29 nm/min iki 44 nm/min.

Optinės draudžiamos juostos plotį apsprendžia sp^2 anglies lygmenys. Vandenilio kiekio sumažėjimas didinant jonų energiją sukelia optinės draudžiamos juostos sumažėjimą, o taip pat sluoksnio tankio padidėjimą ir sluoksnio kietumą. Temperatūrose aukštesnėse už 300°C [39] stebimas vandenilio atidavimas angliavandenilių pavidalu. Slenkstinė vandenilio išsiskyrimo temperatūra priklauso nuo nusodinimo parametrų. Kai yra didesnis priešįtampis, gaunamas sluoksnis su mažesniu vandenilio kiekiu ir tada slenkstinė temperatūra gali siekti 600°C.

Prie mažų priešįtampio reikšmių desorbuojasi vandenilis, metanas ir sunkesni angliavandeniliai; padidėjus priešįtampiui desorbuojamų angliavandenilių dalis kinta; prie didelių priešįtampių išsiskiria tik vandenilis.

Tarpsluoksnyje silicis/(a :C-H) randamas amorfinis tarpsluoksnis SiC [39]. Auger elektroninės spektroskopijos analizės rezultatai parodė, kad tarpsluoksnis yra 5 nm storio; jame yra Si_xC_y fazė, kuri įtakoja į a :C-H dangos sukibimą su Si ir sistemos fizines savybes.

Paprastai naudojami mikrosekundės impulsai, [50] pristatomas nanosekundės impulso plazmos CVD deimantinių dangų užnešimui. Tam tikslui panaudojamas statinės indukcijos (SI) tiristorius su indukcinės energijos baterija (IES-inductive energy storage). Lyginant su mikrosekundiniu metodu, šis metodas pasižymi aukšta elektrono temperatūra ir impulso dažnio eksponentine priklausomybe nuo augimo greičio. Tokiu metodu užneštose dangose, Ramano spektre matomi pikai ties 1360 cm^{-1} ir grafitine juosta 1580 cm^{-1} , su 16 Gpa kietumu.

Kitas DTAD auginimo metodas - galingi jonų srautai. Jei jonų energija neviršija kelių dešimčių eV, tada auga taip vadinamos polimero tipo anglies dangos (hidrogenizuotų dangų atveju) – didelės varžos, skaidrios, mažos dielektrinės skvarbos, tačiau minkštos ir dažnai porėtos.

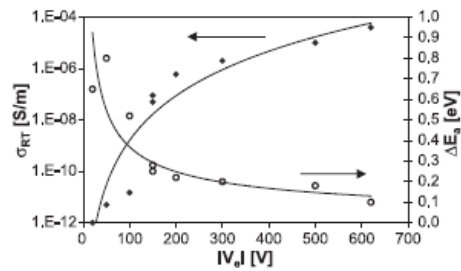
Toliau didinant jonų energiją, ima augti pačios DTAD – jų varža kiek mažesnė, tačiau jų skaidris didelis, lūžio rodiklis kiek didesnis, dielektrinė skvarba 2,5 - 4, šios dangos labai kietos ir pasižymi mažu trinties koeficientu. Optimali energija ~100 eV/anglies atomui angliavandenilyje (tiksliau 92 eV). Toliau didinant jonų energiją (>100 eV) dangų varža palaipsniui ima mažėti, taip pat mažėja jų kietis ir skaidris. Labai padidinus energiją (apie 200 eV [51]) dangose ima vyrauti sp^2 ryšiai, jos pasidaro grafito tipo.

DTAD varžą ir kitas savybes galima keisti ir įvedant į jas įvairių priemaišų. Pvz. SiO_x įvedimas padidina atsparumą pramušimui. $a:C-H$ dangos yra silpnai išreikšto p-tipo laidumo. Papildomai į šias dangas įvedant boro, galima sumažinti DTAD varžą išlaikant laidumą p-tipo. Įvedus azoto, fosforo ar jodo galima suformuoti n-tipo laidumo DTAD.

Legiruojant DTAD siliciu, mažinami mechaniniai įtempimai šiose dangose. Taip galima gerokai padidinti galimą maksimalų šių dangų storį, todėl šis metodas plačiai naudojamas mechaniniame DTAD pritaikyme.

Grįžkime prie plačiai naudojamo plazmocheminio užnešimo su valdomu prieštampiu. Pvz. [51] DTAD suformuojamas lygiagrečių plokščių plazmocheminiame (radio frequency plasma chemical vapor deposition, RF PCVD) reaktoriuje, maitinamame aukšto dažnio generatoriumi; prieštampis keičiamas nuo 20 iki 900V, slėgis 50 Pa, naudojamos metano dujos; garinti sluoksniai 0,02 - 0,80 μm . Plonų DTAD sluoksnių struktūros tyrimai parodė, kad lokalizuotų būsenų koncentracija auga didėjant neigiamam prieštampiui, nes tiek sp^2 fazės didėjimas, tiek vandenilio kiekio mažėjimas sukelia lokalizuotas būsenas draudžiamoje zonoje. Tyrimai parodė [51], kad elektrinis laidumas sumažėja net aštuoniomis eilėmis, prieštampį padidinus iki 620 V (2.3.2 pav.).

Elektronų dreifinis judrumas DTAD yra $\sim 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ir auga, didėjant neigiamam priešįtampiui [51]. Perteklinių krūvininkų gyvavimo laikas palyginus ilgas: $10^{-4} \div 10^{-7} \text{ s}$. Manoma [51], kad labai mažas dreifinis judrumas ir gana ilgas perteklinių krūvininkų



2.3.2 pav. Laidumo ir aktyvacijos energijos priklausomybė nuo priešįtampio RF PCVD reaktoriuje [51].

gyvavimo laikas vargiai leistų panaudoti DTAD klasikiniams elektronikos prietaisams, tačiau visoje eilėje darbų [52-62] aprašomas gana platus šių dangu pritaikymas ir įvairūs jų formavimo būdai, kai kurie taikymo būdai patentuoti.

Pvz. [52] parodyta, kad a :C-H sluoksnius kartu su CF_4 dujomis naudoja reaktyviam joniniam silicio ėsdinimui. a :C-H sluoksniai garinami kambario temperatūroje ir atvirkštinės litografijos būdu sėkmingai gaunamas piešinys ant silicio. Taip pat išgaunamas geras selektyvumas ir siauros $1 \mu\text{m}$ juostos. a :C-H 300 nm storio sluoksniai suformuojami per 20 min, panaudojant CH_4 aukšto dažnio rusenančiame išlydyje, esant $8 \times 10^{-2} \text{ mbar}$ dujų slėgiui ir -170V priešįtampiui.

Panaudojus Ramano ir Fourier infraraudonąją spektroskopiją (*Fourier transform infrared*, FTIR), nustatyta koreliacija tarp hidrogenizuotos amorfinės anglies (a :C-H) sluoksnių, suformuotų 300K CH_4/Ar aukšto dažnio (13,56 MHz) plazmoje, savybių ir nusodinimo sąlygų [53]. Pastebėta, kad didinant argono kiekį, nusodinimo greitis didėja ir gaunami minkštesni sluoksniai.

DTAD sluoksnių panaudojimas puslaidininkinių elementų pasyvacijai turi privalumų lyginant su kaučiukine guma - tradicine pasyvacijos medžiaga struktūrose su nuožulniais kampais. Guma yra nestabili prie įtampų virš 4 kV. Todėl siūloma [54] pasyvavimo procese naudoti DTAD sluoksnius, nusodintus PCVD metodu ant didelės galios $p+nn+$ diodų nuožulnių kraštų. Šis pasiūlymas buvo pagrįstas fizikinių parametų ir $p+nn+$ diodų VACH priklausomybės nuo technologinių parametų (vandenilio kiekio, metano

slėgio, padėklo temperatūros, sluoksnio storio, sp^3/sp^2 santykio) tyrimų rezultatais.

Atsparumas išoriniams poveikiams (cheminiams ir mechaniniams) ir gera adhezija ant Si skatina DTAD dangų taikymą puslaidininkinių prietaisų apsauginėms dangoms, bet keliama selektyvaus ėsdinimo problema [54]. „Siemens“ firmos patentuojamas elektriškai aktyvus ($a:C-H$) sluoksnis (defektų tankis $10^{17} \text{ cm}^{-3} \text{ e}\cdot\text{V}^{-1}$ specifinė varža $>10^{10} \Omega\cdot\text{cm}$, storis 50 nm – 3 μm) naudojamas kaip pasyvuojanti ($a:Si-H$) sluoksnio apsauga nuo mechaninio bei aplinkos poveikio ir kaip antidifuzinis barjeras [57].

Kitas DTAD privalumas – galimybė jas panaudoti elektroaktyviai pasyvacijai [55]. DTAD sluoksniai ($a:C-H$) buvo užnešti aukšto dažnio plazmoje su įvairiais priešįtampiais ant planarinių p+-n sandūrų silicyje. DTAD įtaka planarinėms p+-n sandūroms tirta matuojant lokaliai indukuotą fotolaidumą. Naudojant įvairių bangos ilgių apšvietimą, keistas įsiskverbimo gylis ir tirtos įvairios erdvinio krūvio sritys. Nustatyta, kad erdvinio krūvio srities pokyčiai užnešus DTAD dangą pagerino atbulines voltamperines charakteristikas.

$p-n$ sandūra pasyvuota boru (boro kiekis buvo nuo 0,001 iki 4% svorio) ir legiruota ($a:C-H$) [56]. Defektų tankis $10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ e}\cdot\text{V}^{-1}$, specifinė varža $10^8 \Omega\cdot\text{cm}$ ir optinė draustinė juosta 0.7-1.1 eV, storis 20 nm – 3 μm , priešįtampis 800-900V, dangoje yra <15% deguonies. Kaip boro priemaišą galima naudoti boro rūgšties esterus, karboranus, boranus arba galima naudoti dujinius boro junginius, kurie pridedami į dujinius, organinius junginius turinčius anglies ir vandenilio. Įvedant deguonį į pasyvacijos sluoksnį [56] siūloma naudoti boro rūgšties esterį. Naudojant 0,45 svorio procentų boro ir iki 10 procentų deguonimi legiruotą dangą, atkaitinama 200° ir 350°C temperatūroje. Puslaidininkis užnešimo metu laikomas 300° C temperatūroje. Toks pasyvacijos sluoksnis sunkiai suderinamas su p-legiruotomis puslaidininkio sritimis. Toks suderinimas nėra optimalus dėl inversinio sluoksnio susidarymo ir apsaugos sumažėjimo.

Kitas „Siemens“ firmos patentuotas metodas - elektriškai aktyvus (*a*:C-H) pasyvuojantis sluoksnis (defektų tankis $10^{19} \text{ cm}^{-3} \text{ e}\cdot\text{V}^{-1}$, specifinė varža $>10^8 \Omega\cdot\text{cm}$, optinė draustinė juosta 1,1 eV, storis 50 nm - 3 μm) [58]. Priešįtampis dangos auginimo metu - 800V prie 250°C temperatūros (kadangi taikoma prietaisams, kurių darbinė temperatūra gali siekti 290°C).

Užpatentuotas aukštavoltis diodas, kurio technologiniame procese panaudotos 3 fotolitografijos [59]. 3 šablonai reikalingi skilimų sutapatinimui sustabdymo struktūrose su krašto pasyvacija (*a*:C-H) ar *a*-Si. *a*:C-H dangos gali būti pritaikytos kaip: 1) numatytas kanalo stabdytojas nuotėkio srovių krašte sumažinimui ir 2) skylių stabdytojas, pjaustymo defektų apribojimui.

Taip pat patentuojama korozijai atspari DTAD danga, tenkinanti darbo sąlygas (500 val. 130°C, 85% drėgmė) ir automobilinius standartus (1000 val. 85°C 85% drėgmė) [60]. „Kieti“ ir „minkšti“ DLC sluoksniai užnešami kaitaliojant (skiriasi proceso režimais). Užnešama standartiniame diodiniame reaktoriuje $T < 150^\circ\text{C}$, naudojamas deguonis ir metiletiketonas (MEK). Užnešti 4 sluoksniai „kieto“ DTAD storio 45 nm kaitaliojami su 4 sluoksniais „minkšto“ 300 nm storio; viršutinis „kietas“ sluoksnis 100 nm; bendras storis 1,45 μm . Kiekvienas „kietas“ DTAD sluoksnis užnešamas 23 nm/min greičiu su 15 cm^3/min srautu, 50W galingumu (-470V) ir 30 mtor slėgiu; o „minkštas“ sluoksnis užnešamas 30 nm/min greičiu su 15 cm^3/min srautu, 50W galingumu (-110V) ir 500 mtor slėgiu. Elektrinio kontakto sudarymui ant DLC sluoksnių formuojamas piešinys ir išėsdinama DTAD plėvelė. Ėsdinimui naudojama deguonies plazma ar argonų jonų lazeris. Jei reikia, kiaurymės gali būti išėsdintos iki kristalo ar padėklo metalizacijos.

Puslaidininkinių prietaisų pasyvacijai siūlomos (*a*:C-H) boru legiruotos dangos [61, 62]. Naudojamas aukšto dažnio PECVD įrenginys, yra galimybė dirbti su 6 colių plokštelėmis; maksimali temperatūra pasiekama panaudojus aktyvų plokštelės aušinimą skystu heliu iš plokštelės apačios. Darbo slėgis 50 mtor su 150 cm^3/min metano srautu, legiravimo dujos trietilboratas (TEB) buvo įmaišytos į dujų srautą; kadangi TEB kambario temperatūroje yra

skystas, TEB buvo įvestas į helį, kaip srauto nešėjas; masės srauto greitis 20 mg/min TEB ir 100 cm³/min helio. Aukšto dažnio plazmos galingumas 990W (pastovi įtampa -850V). Skaičiuojamas reakcijos rodiklis r , kai jis yra $4 \cdot 10^9$ (kV)⁻¹ gaunama atbulinė pramušimo įtampa 4200V.

2.3.2 lentelė. Literatūrinių šaltinių suvestinė apie (*a*:C-H) dangų nusodinimą ir topologinio piešinio formavimo būdus.

Firma	<i>(a</i> :C-H)dangos formavimas		Piešinio formavimas	Literatūra
	Formavimo metodas	Savybes		
1. Eupec, Siemens, Germany	<i>(a</i> :C-H) legiruota B 4 svorio %; a.d. plazma žemo slėgio, dujų ir garų mišinys, deguonies 15 svorio % $T_{pl}=300^{\circ}C$, rekomenduoja atkaitinti 200-350°C	Elektroaktyvi; storis 0,02÷3μm, Varža 10 ⁸ Ω-cm	Nenurodyta, dengia ant nuskelto krašto	[56] 1997
2. Siemens, Germany	Elektriškai aktyvus (<i>a</i> :C-H) a.d žemo slėgio plazma 100Pa, dujos hidrokarbonai: metanas CH ₄ , $T_{pl} \leq 250^{\circ}C$	varža >10 ¹⁰ Ω-cm, storis 50nm-3μm Pasiekia sp^3 frakcijos 60%		[57] 1992
3. Siemens, Germany	Elektriškai aktyvus (<i>a</i> :C-H) a.d žemo slėgio plazma 100Pa, dujos: alkane, metanas, CH ₄ , $T_{pl} \geq 250^{\circ}C$	varža >10 ⁸ Ω-cm, storis 0.05μm÷3μm		[58] 1991
4. Infineon, Eupec, Germany	<i>(a</i> :C-H) ar a-Si	Diodai >500V	Fotolitografija, krašto pasyvacija	[59] 2004
5. General Electric Comp, US	DLC korozijai atsparios dangos, plazminis reaktorius $T < 150^{\circ}C$. Dujos O ₂ ir metilėtilenketonas (MEK) storis 0,5-2μm.	storis 0,5÷2 μm aukštas atsparumas pagal karinius ir automobilinius standartus	Ėsdina deguonies plazmoje arba Ar jonų lazeriu; (neaišku kuo maskuoja)	[60] 2003
6. Infineon Technologies, Germany	Elektriškai aktyvi pasyvacija (<i>a</i> :C-H) PECVD a.d. plazma, 6“ plokštelės, $T_{max}=100^{\circ}C$ su plokštelės aušinimu skystu heliu; slėgis 50 mtor metano srautas 150 cm ³ /min, legiruojama boru iš trietilborato.	Storis 0,1÷1 μm. Laidumas $\approx 10^{-6}(\Omega \cdot cm)^{-1}$ Pramušimo įtampos iki 4200V.	Nenurodyta	[61],[62] 2005 2007

Apibendrinta informacija pateikiama 2.3.2 lentelėje, čia nurodomi firmose naudojami dangų formavimo metodai, savybės ir kokiu principu formuojamas piešinys.

2. 4 Porėtojo silicio dangų pritaikymas galinguose puslaidinikiniuose prietaisuose

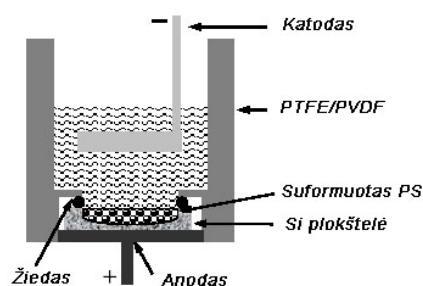
Formuojant puslaidinikinę struktūrą gamybos procese, atliekamos technologinės operacijos kurių metu iš ęsdiklių ir ploviklių darinio paviršiuje lieka 10^{13} - 10^{17} cm⁻² metalų jonų, ir anodinės oksidacijos reakcija generuoja tūrinis darinio struktūrinius defektus, tuo pačiu pagerindama darinio paviršiaus savybes. Šie tūriniai defektai yra sulaikomi porėtojo silicio sluoksnyje, kuri nuėmus gaunama medžiaga su geresnėmis tūrinėmis savybėmis.

Porėtojo silicio formavimas

Porėtojo silicio struktūra formuojama elektrocheminiu ęsdinimu apdorojant Si plokštelę elektrolite, kurio pagrindinės sudaromosios dalys yra HF rūgštis ir etilo alkoholis. Silicio plokštelės paviršius yra hidrofobinis, alkoholis pridedamas tam, kad padidintų paviršiaus drėkinimą ir prasiskverbimą į poras, taip gaunamas homogeniškas srovės tankis, kuris padeda gauti tolygų porėtojo silicio sluoksnį [63]. Silicio paviršiaus elektrocheminio ęsdinimo metu, H₂ dujos ant paviršiaus sudaro mažų burbulų sluoksnį. Kai elektrolite yra etilo alkoholio, dėl sumažėjusių įtempimų tarp paviršiaus ir skysčio šie burbulai lengvai palieka paviršių. Be to burbuliavimas padeda cirkuliuoti skysčiui elektrolizavimo celėje ir perneša, pašalina reakcijos produktus.

Paprastai elektrolizavimo celė gaminama iš polivinilfluorido (PVDF) arba politetrafluoretileno (PTFE). Anodizavimo katodas gaminamas iš platinos arba kitos HF rūgščiai atsparios medžiagos, o Si paviršius atlieka anodo funkciją [63 – 64].

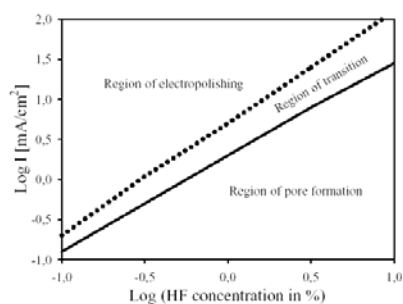
Literatūroje nurodomos dviejų tipų elektrolizavimo celės [63], kurios skiriasi savo geometrija. Sudėtingesnė yra dviejų talpų elektrolizavimo celė su tirpalo cirkuliacija, tačiau šiame darbe aprašomas standartinė vienos talpos elektrolizavimo celė naudojama (2.4.1 pav.). Apatinė silicio plokštelės dalis



2.4.1 pav. Standartinė vienos talpos elektrocheminio ėsdinimo celė.

kontaktuoja su metalu arba grafito plokšte, tuo tarpu viršutinėje dalyje, atribotoje O-žiedu atspariu rūgštims, vyksta elektrocheminis ėsdinimas. Ši standartinė vienos talpos elektrocheminio ėsdinimo celė pasirinkta dėl gero homogeniškumo, lengvos porų ir storio kontrolės ir apšvietimo realizavimo galimybės anodizavimo proceso metu (tai yra būtina n-tipo plokštelės atveju).

2.4.2 paveiksle pateikiame skirtingų sričių susidarymo priklausomybę nuo HF koncentracijos elektrolite ir anodizavimo proceso srovės tankio [68, 69]. Formuojant porėtąjį silicį (žemiau išsistinės linijos 2.4.2 paveiksle), negalima viršyti nurodyto srovės tankio pateiktose HF koncentracijose, kitu atveju, porėtoji struktūra tampa nehomogeniška ir kai kurios jos dalys nusilupa nuo paviršiaus (tarp išsistinės ir taškinės linijos). Dideliuose anodiniuose potencialuose, Si plokštelė poliruojama (sritis virš taškinės linijos).

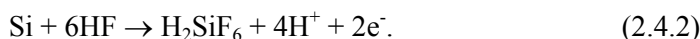


2.4.2 pav. Porų formavimosi, pereinamosios ir poliravimo sritys prie skirtingų HF koncentracijų [68].

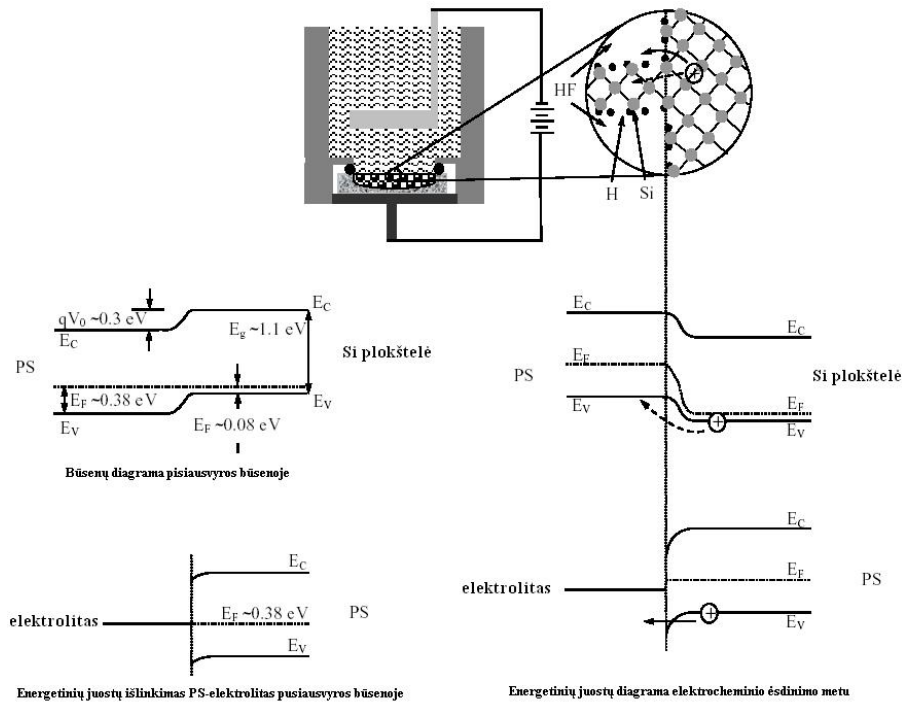
Porų formavimosi cheminės reakcijos lygtis gali būti užrašyta [63]:



Paviršiaus poliravimo atveju, lygtis užrašoma [70]:



2.4.3 paveiksle pateikiamos Si-Por-Si ir Por-Si-elektrolitas būsenų diagramos, pusiausvyros ir anodizavimo metu [71-73].



2.4.3 pav. PorSi-Si ir PorSi-HF elektrolito energetinių juostų diagrama pusiausvyros būsenoje [72] ir elektrocheminio ėsdinimo metu [73].

Anodizavimo metu egzistuoja du skirtingi būdai skylėi pasiekti paviršių. Pirmasis yra tiesiai į porėtojo sluoksnio dugną, o kitas - per Si gardelę į porų paviršių (2.4.3 pav.). Pirmuoju atveju, skylės juda be didesnio pasipriešinimo ir gali lengvai sąveikauti su reakcijos produktais ties kietąja būsena – elektrolito paviršiumi. Antruoju atveju, skylėms reikia pereiti per ominę sandūrą tarp Si tūrio ir porėtojo sluoksnio. Be to, dėl didelės savitosios paviršiaus srities karkase, skylės judėdamos per Si gardelę sudaro labai mažą srovės tankį porų paviršiuje.

Pateikiami pagrindiniai porėtojo silicio parametrai: porėtumas, storis, porų diametras ir mikrostruktūra, priklausanti nuo elektrolito sudėties, anodizavimo srovės tankio, ėsdinimo trukmės, plokštelės tipo ir savitosios varžos, apšvietimo (n-tipo atveju), temperatūros, aplinkos drėgmės džiovavimo sąlygų (2.4.1 lentelė) [69].

2.4. 1 lentelė. Anodizavimo sąlygos formuojant porėtąjį silicią [69].

Vertės didinimas	Porėtumas	Ėsdinimo greitis	I_{kr}
HF koncentracija	Mažėja	Mažėja	Didėja
Srovės tankis	Didėja	Didėja	-
Anodizavimo trukmė	Nedaug didėja	Nedaug didėja	-
Temperatūra	-	-	Didėja
p- tipo plokštelė	Mažėja	Didėja	Didėja
n-tipo plokštelė	Didėja	Didėja	-

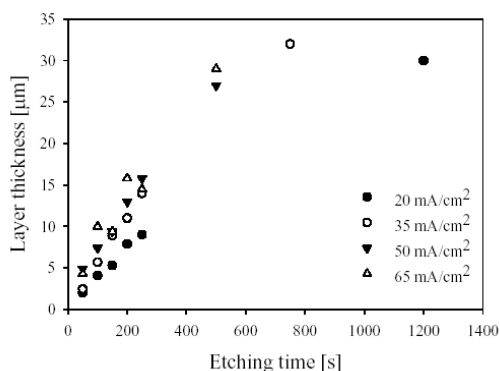
Porėtojo silicio storis auga, ilgėjant anodinio ėsdinimo trukmei ir srovės tankiui (2.4.4 pav.), o porėtumas nepriklauso nuo anodizavimo laiko.

Porėtojo silicio morfologija ir sąstatas

Porų formavimosi procesų tyrimai atskleidžia

skirtingų porų struktūrą, elektrochemiškai ėsdinant n- ir p- tipo Si [74]. Skirtingai nei p-Si, nanokristalinis sluoksnis n-Si neištisinis, netolygiai padengia mikroporų paviršių. Šis sluoksnis gali būti nuėsdintas 30% KOH vandeniniame tirpale.

Kaip ir p-Si atveju, n-Si porėtojo sluoksnio storis ir struktūra priklauso nuo fluoro rūgšties ir spirito kiekio elektrolite bei ėsdinimo metu tekančios srovės tankio ir ėsdinimo laiko [35]. Ėsdinant 16% HF elektrolite, porėtojo sluoksnio storis padidėja nuo 8 iki 80 μm , o porų diametras nuo kelių šimtų nanometrų iki 1 μm , kai srovės tankis didėja nuo 1 iki 50 mA/cm^2 . Mikroporėtojo sluoksnio morfologija labai priklauso nuo apšvietimo ėsdinimo metu. Apšviečiant ėsdinamą paviršių kaitinimo lempa ($\lambda_{\text{max}}=1,12 \mu\text{m}$, 600 lx), susidaro poros, statmenos paviršiui. Didinant apšvietimo intensyvumą (iki 1200 lx), poros šakojasi, persipina ir sudaro retą, netvarkingą struktūrą. Apšviečiant padėklą iš apatinės pusės to paties intensyvumo šviesa, poros



2.4.4 pav. Porėtojo silicio storio priklausomybė nuo anodizavimo trukmės (kai 11,7 M HF ir 10,3 M $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) [63].

išsidėsto tvarkingai, jos vienodo $\sim 2,5-3 \mu\text{m}$ dydžio. Toki struktūros skirtumą sąlygoja šviesos generuojamų skylių vieta. Ėsdinimo metu apšviečiant paviršių, skylės generuojamos tarpuose tarp susiformavusių porų, todėl porose atsiranda atšišakojimai. Tuo tarpu apšviečiant apatinę padėklo pusę, skylės generuojamos tolygiai apatiniame padėklo sluoksnyje ir elektrinio lauko veikiamos juda paviršiaus link. Pasiekusios dugną, oksiduoja Si atomus ir poros dugne esantis silicis tirpsta. Tokiu atveju pora tolygiai gilėja, o jos diametras praktiškai nekinta. Atlikti tyrimai [74, 76] rodo, kad porėtųjų sluoksnių formavimosi bendrieji dėsniumai yra panašūs tiek p-, tiek ir n-Si atveju, tačiau kiekybinės porėtųjų sluoksnių charakteristikos ženkliai skiriasi. Svarbu ir tai, kad n-Si atveju padėkle formuojasi mikro- ir makro- poros, kai tuo tarpu p-Si būdingos nano-poros.

2.5 Paviršinės rekombinacijos slopinimas

Paviršinė rekombinacija yra vienas iš nepageidautinų reiškinių, sukeliančių žymias nuotėkio srovės puslaidininkiniuose prietaisuose bei ribojančių jų efektyvumą. Paviršinės rekombinacijos mažinimui egzistuoja įvairūs paviršiaus apdorojimo (pasyvacijos) būdai – tai aukštatemperatūriniai metodai (terminis oksidavimas, pirolizė, pasyvinimas stiklu ir kt.) arba cheminės dangos. Situaciją apsunkina tai, kad pasyvuojančios dangos formuojamos jau pagamintų prietaisų paviršiuje, kai terminių metodų taikymas yra labai ribotas. Cheminės dangos dažnai reaguoja tiek su puslaidininkio, tiek ir su kontakto metalo paviršiumi.

Vienas iš šios problemos sprendimo būdų – žematemperatūrinė silicio porėtųjų sluoksnių technologija [77]. Didinant ėsdinimo srovės tankį, bet nepasiekiant kritinės vertės, prie kurios prasideda padėklo poliravimas, gaunami mažo porėtumo, ištisiniai, savo savybėmis artimesni SiO_2 sluoksniai, tinkantys paviršiaus pasyvavimui.

Porėto silicio dangos ant puslaidininkinių struktūrų darinių paviršių buvo formuojamos anodinio ėsdinimo būdu. Atlikus tokių darinių paviršinės rekombinacijos tyrimus (3.4 skyriuje), nustatyta, kad paviršinę rekombinaciją

porėtasis sluoksnis sumažina iki 3 kartų [78-80]. Paviršinės rekombinacijos spartos mažėjimas gali vykti dėl kelių priežasčių. Pirmiausia, formuojant puslaidininkinę struktūrą, atliekamos kelios technologinės operacijos, kurių metu iš šerdžių ir ploviklių darinio paviršiuje lieka 10^{13} - 10^{17} cm⁻² metalų jonų. Anodizavimo metu šie jonai desorbuojami nuo Si darinio paviršiaus ir pereina į porėtąjį sluoksnį, kuriame baigia savo migravimą, prisijungdami prie silicio oksidų. Kita vertus, anodinės oksidacijos reakcija generuoja tūrinius darinio struktūrinius defektus, tuo pačiu pagerindama darinio paviršiaus savybes.

Efektyvi gyvavimo trukmė nustatoma iš:

$$\tau_{eff} = 1 / \left[\tau_b + 1 / (\tau_s + \tau_D) \right], \quad (2.5.1)$$

kaip tūrinių (τ_b) ir paviršinių komponentių rezultatas. Paviršiaus komponentė susijusi su $\tau_D = d_{eff}^2 / \pi^2 D$ pernešimo difuzija ir $\tau_s = d_{eff} / s$ paviršiaus rekombinacijos judrumu s . Čia d_{eff} yra efektyvus bandinio storis ir D pernešimo koeficientas. Efektyvios gyvavimo trukmės absoliutūs dydžiai yra tinkamos charakteristikos medžiagos paviršiaus pasyvacijos efektyvumo vertinimui. Rekombinacijos parametrų detalesniam vertinimui išskiriamos vėlinimo amplitudės ir nykstamo dydžio gyvavimo trukmės [81], įvertinant sužadinimo gylį. Sužadinimo gylis keičiamas per absorbcijos koeficientą α , prie skirtingų bangų ilgių. Perteklinių krūvininkų tankio profilis $n(x)$ gali būti išreikšta per pradinį sužadinimo domeną $n_0(\alpha)$, integruojamą mikrobangų pagalba per efektinį storį d_{eff} . Integralu išvestas nepusiausvyrų krūvininkų pernešimo tankio vidurkis $\langle n(t) \rangle_d$ įskaičiuojamas į galutinius koeficientus $\langle A_m \rangle_d$, nepriklausomus nuo laiko t ir koordinatės x . Relaksacijos koncentracija yra eksponentinė su labai tankiais stabilizavimo profiliais, nutolusiais vienas nuo kito trumpomis atkarpomis per trumpos trukmes. Tai leidžia nustatyti pagrindinės vėlinimo modos amplitudės vertę, ekstrapoluoiant asimptotinę vėlavimo impulsą iki pradinio momento $t=0$ su normalizuotais perėjimais $\langle n(t) \rangle_{d,0}$.

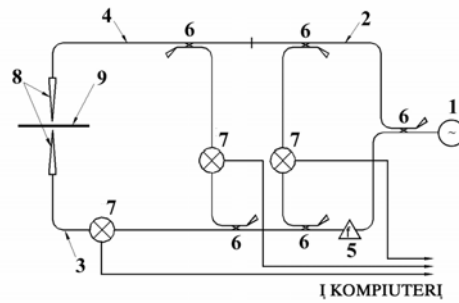
Ši amplitudė išreiškiama:

$$\langle A_1 \rangle_d = \frac{8}{(\lambda_1 d)^2 (1 + (\frac{D}{sd})^2 (\lambda_1 d)^2 + 2 \frac{D}{sd})}, \quad (2.5.2)$$

kuri leidžia tiesiogiai įvertinti s arba $\lambda_1 d$ vertes iš asimptotinės dedamosios gęsimo spartos. Efektyvi gyvavimo trukmė $\tau_{eff} = 1/[\tau_b^{-1} + D\lambda_1^2]$ matuojama tiesiogiai ir jos vertė yra artima aprašytai išraiškoje 2.5.1. Tūrio ir paviršiaus rekombinacijos parametrai gali būti atskirti naudojant išraiškas (2.5.1) ir (2.5.2).

2. 6 Homogeniškumo tyrimas milimetrinėmis bangomis

Silicio plokštelių homogeniškumo tyrimas atliekamas tam, kad nustatyti plokštelės vienalytiškumo kitimą technologinio proceso metu. Silicio plokštelių homogeniškumo tyrimams mes naudojome Puskaidininkų fizikos institute sukurta aparatūra, kurios veikimo principas paremtas plokštelės skenavimu milimetrinių bangų spinduliu. Pagrindinė matavimo metodo idėja yra lokalus milimetrinių bangų žadinimas tiriamos medžiagos plokštelėje ir praėjusių bangų amplitudės bei fazės matavimas skirtingose plokštelės vietose. Iš esmės tai yra milimetrinių bangų tiltelis (2.6.1 pav.), susidedantis iš atraminio ir matuojamojo signalo kanalų. Tiriamoji plokštelė talpinama matuojamojo signalo kanale tarp dviejų bangolaidžių, kurie tarnauja kaip sužadinančioji ir priimančioji antenos. Plokštelė stumdama sužadinančiosios ir priimančiosios antenų atžvilgiu naudojant skenavimo mechanizmą. Elektrinių, dielektrinių arba mechaninių parametru pasiskirstymo netolygumas plokštelės plote keičia praėjusios (atsispindėjusios) bangos amplitudę ir fazę. Todėl, žvalgant plokštelę milimetrinių bangų spinduliu ir matuojant amplitudės bei fazės pokyčius, galima gauti informaciją apie jos vienalytiškumą. Visas matavimo procesas yra valdomas kompiuteriu, o vienalytiškumo žemėlapis atvaizduojamas jo ekrane.



2.6.1. pav. Prietaiso, matuojančio praėjusios ir atsispindėjusios elektromagnetinės bangos amplitudę ir fazę principinė schema: 1 – generatorius, 2 – atraminis kanalas, 3 – praėjimo matavimo kanalas, 4 – atspindžio matavimo kanalas, 5 – dažnio keitiklis, 6 – kryptiniai atšakotuvai, 7 – maišikliai, 8 – antenos, 9 – tiriamoji plokštelė [82].

Plokštelės skenavimui buvo naudojamas skenavimo mechanizmas susidedantis iš dviejų žingsninių variklių. Vienas iš jų buvo naudojamas plokštelės sukimui apie jos ašį, o kitas suteikdavo jai linijinį judesį. Tokiu būdu skenavimas vyko spirale nuo plokštelės centro į jos kraštus. Skenavimo žingsnis buvo lygus 0,375 mm. Vienoje spiralės vijoje yra matuojama 1200 taškų. Maksimalus skenuojamo ploto diametras yra 90 mm. Matavimai atliekami 118 – 149 GHz dažnių ruože.

Silicio plokštelių homogeniškumo matavimo rezultatai pateikiami 3.6 skyriuje.

2.8 Apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo stengtasi pateikti nagrinėjamų objektų fizikinius ypatumus ir jų pritaikymą praktikoje. Aptarti izoliacinio griovelio formavimo ir ėsdinimo ypatumai, pramušimo įtampos didinimas, naudojant joninę implantaciją. Pateikti izoliacinio griovelio pasyvavimo $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklu fizikiniai principai: stiklo formavimosi proceso termodinamika ir kinetika, išnagrinėtos pasyvuojančių dangų (švino-boro pagrindo stiklų) savybės. Išnagrinėtas deimanto tipo ($a\text{:C-H}$) anglies dangos elektriškai aktyvios pasyvacijos pritaikymas galios elektronikoje ir pateikta patentinių bei literatūros analizė. Išnagrinėtos porėtojo silicio formavimo ypatumai, morfologija ir pateiktas porėtojo silicio dangų pritaikymas galinguose

puslaidinikiniuose prietaisuose. Pateikta paviršinės rekombinacijos slopinimo analizė ir silicio plokštelių homogeniškumo tyrimo galimybė milimetrinėmis bangomis. Aptarus fizikinius modelius ir metodus, pereisime prie konkrečių jų pritaikymo praktikoje. Pabrėžiame, kad šie metodai taikyti ant realių puslaidininkinių struktūrų, kurios yra gaminamos UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiai“.

3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

3.1 Izoliacinio meza griovelio ęsdinimo optimizavimas

Selektyvus Si struktūrų ęsdinimas naudojamas galingų prietaisų gamyboje tradiciškai yra rūgštiniuose tirpaluose. Rūgštiniuose tirpaluose oksidantu naudojama azoto rūgštis, o susiformavęs oksidas tirpinamas fluoro rūgštyje. Tačiau Si tiristorinių struktūrų HNO_3+HF ęsdikliuose yra gana sudėtingas ir sudarytas iš daugelio elementarių reakcijų, kurios priklauso nuo ęsdinimo sąlygų (temperatūros, vandenilio išsiskyrimo greičio, ęsdiklio maišymo būdo, reagentų ir reakcijos produktų masės pernešimo į ęsdinamą paviršių ir nuo jo) ęsdiklio sudėties bei silicio struktūros savybių (legiravimo laipsnio, priemaišų tipo, kristalografijos, paviršiaus paruošimo). Nuo šių reakcijų priklauso išęsdinto paviršiaus morfologija, kuri tiesiogiai siejasi su gaminamų prietaisų patikimumu bei gamybos efektyvumu.

Šiame skyriuje pateiksime izoliacinio meza griovelio ęsdinimo proceso tyrimus. Pradžioje bus aptarti negilių ($d=25\pm 2,5 \mu\text{m}$) izoliacinių griovelių charakteristikų, priklausančių nuo ęsdiklio sudėties, ęsdinimo įrenginio konstrukcijos, ęsdinimo trukmės ir temperatūros, tyrimai. Išnagrinėti negilių griovelių charakteristikų kitimo principai, pritaikomi gilių ($d=100\pm 5 \mu\text{m}$) griovelių formavimui. Griovelių gylyai siejami su pramušimo įtampų vertėmis, nekintant difuziniams parametrams. Pateikiamos $p-n$ sandūros pramušimo įtampų verčių priklausomybės nuo griovelių gylių skirtingos savitosios varžos silicio struktūrose. Įvertinant visas aplinkybes, pateikiama naujo ęsdinimo įrenginio konstrukcija, kuri leidžia optimizuoti izoliacinio griovelio ęsdinimo procesą ir suformuoti optimalios konfigūracijos diskretinius elementus su mažiausia savybių dispersija visame plokštelės plote.

Dalis tyrimų buvo atlikti vykdant BPD 2004-ERPF-3.1.7-06-06/0021 projektą „Aukštavolčio didelės galios valdomo išjungimo tiristoriaus (VIT) konstrukcijos ir technologinių procesų taikomieji moksliniai tyrimai“ ir

pateikta „Didelio tankio meza struktūrų formavimo, ėsdinant didelio ploto (iki \varnothing 100 mm) silicio plokštelę, tyrimai“ dalyje.

3.1.1 Izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio sudėties

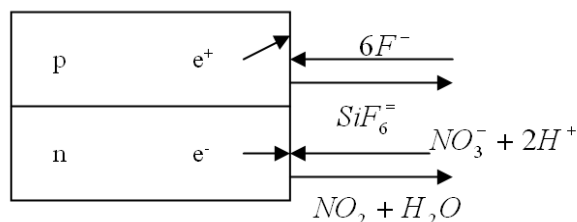
Šių eksperimentų metu buvo naudojamos Si struktūros su p - n sandūra (\varnothing 100 mm, (111), $p \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Izoliacinių griovelių ėsdinimui buvo naudojami rūgštiniai HF:HNO₃:CH₃COOH ėsdikliai skirtingomis tūrinėmis proporcijomis. Nors pagrindinės Si ėsdinimo rūgštiniuose cheminės reakcijos yra žinomos, bet tam, kad susiformuotų tolygi ėsdinamo paviršiaus morfologija, reikia sukurti kontroliuojamas reakcijos produktų masės pernešimo sąlygas nuo ėsdinamo paviršiaus, kurias sąlygoja ėsdiklio sudėtis, temperatūra bei įrenginio konstrukcija. Ėsdinimo proceso eksperimentiniai rezultatai pateikti 3.1.1 lentelėje. Lentelėje pateikti ėsdikliai buvo paruošti prieš ėsdinimą. Reikia pažymėti, kad visi bandiniai buvo ėsdinami pastovioje kambario temperatūroje $T=20^\circ\text{C}$. Ėsdiklis buvo maišomas ėsdinimo įrenginiuose, rankiniu būdu arba leidžiant per tirpalą azoto dujas.

3.1.1 lentelė. Ėsdiklio sudėties parinkimas

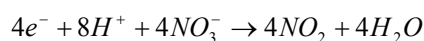
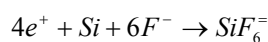
Nr.	Ėsdiklis	Ėsdinimo metodas	$t_{\text{esd.}}$	Griovelio gylis, μm		Si ėsdinimo greitis v_{Si} , $\mu\text{m}/\text{min}$	Rezultatas
				\bar{x}	R		
1.	HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 1,7:3,35:2,0	I struktūros ėsdinimo įrenginys	1' 30"	27,9	8,0	18,6	Griovio dugnas kreivas $\sim 3,0 \mu\text{m}$
		II struktūros ėsdinimo įrenginys	1' 50"	28,4	0,8	15,5	Griovio dugnas tolygus
2.	HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 0,458:4,0:1,5	Maišymas azotu (N ₂)	5'	32,5	4,0	6,5	Gerai
			4' 15"	27,7	7,0	6,5	Gerai
3.	HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 0,458:4,0:1,5 HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 0,43:2,07:0,76	Maišymas rankiniu būdu	4' 15" +40"	30,1	4,7	6,5	Gerai
4.	HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 0,458:4,0:1,5	Maišymas rankiniu būdu	7' +1'15"	26,8 25,0	2,2 4,0	3,25 3,03	Lėtas ėsdinimas
5.	HF:HNO ₃ :CH ₃ COOH 0,43:2,07:0,76		2'15" +1'15"	29,7	5,4	8,5	Vidutiniškai
			1'40"+2'	42	6,0	11,5	Vidutiniškai
6.	HF:HNO ₃ :H ₂ O 3:2:5			1'20"	-	-	-

Kaip matyti iš tyrimų rezultatų nuo ėsdiklio sudėties priklauso ir ėsdinimo greitis, ir morfologija. Kaip matosi iš lentelės, mažėjant fluoro rūgšties kiekiui ėsdiklyje mažėja ėsdinimo greitis, tačiau turi būti išlaikytas oksidanto (HNO_3) ir oksido tirpiklio (HF) santykis $\sim 1,97$. Padidinus šį santykį iki ~ 10 , ėsdinimo greitis ir paviršiaus morfologija priklauso nuo ėsdinimo trukmės ir maišymo būdo. Esant ilgesnei ėsdinimo trukmei reakcijos produktai sudaro sluoksnį prie ėsdinamo paviršiaus ir sumažėja reagentų difuzija į paviršių ir tuo pačiu sumažėja ėsdinimo greitis ir jo tolygumas (3 ir 4 eilutė lentelėje). Sumažinus šį santykį iki $\sim 0,6$ paviršiuje susiformuoja netirpi plėvelė. Akivaizdu, kad ėsdinimo procesas priklauso nuo reagentų difuzijos į ėsdinamą paviršių, kuris savo ruožtu priklauso nuo maišymo ir įrenginio konstrukcijos, lokalsios ir aplinkos temperatūrų. Šie efektai komplikuoja kontroliuojamos morfologijos formavimą izotropinio ėsdinimo metu. Ėsdiklio anizotropija (nelygus griovelio dugnas) pasireiškė esant standartinei ėsdiklio sudėčiai, bei ėsdinant standartiniam ėsdinimo įrenginiui. Iš 3.1.1 lentelės matyti, kad mažiausias griovelių gylių reikšmių intervalas gaunamas ėsdinant $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ (1,7:3,35:2,0 tūriniu santykiu) ėsdikliu II konstrukcijos ėsdinimo įrenginyje. I ir II konstrukcijos ėsdinimo įrenginių palyginimas bus pateiktas 3.1.2 skyriuje. Ėsdiklio maišymas rankiniu būdu arba maišymas N_2 dujomis nepasiteisino, nes tokiu atveju gaunamas $3 \div 11 \mu\text{m}/\text{min}$ ėsdinimo greitis ir didelis griovelių gylių verčių intervalas per plokštelės plotą.

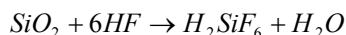
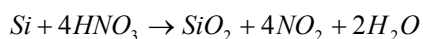
Aptarsime Si struktūros su p - n sandūra tirpimo mechanizmą. Kaip matosi iš diagramos (3.1.1 pav.) p ir n -sričių tirpimą joninėje formoje galima užrašyti:



3.1.1 pav. p - n sandūros tirpimo mechanizmas.



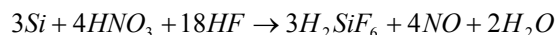
Silicio tirpimas yra autokatalitinė oksidacijos-redukcijos reakcija, kurios metu formuojasi silicio oksidas. Šias reakcijas galima užrašyti [83]:



Kadangi ėsdinimo procese formuojasi NO_2 akivaizdu, kad ėsdiklyje gali susidaryti NO_2 dimerai, N_2O_4 bei NO , kuris susidaro iš nitrito rūgšties redukcijos reakcijos:

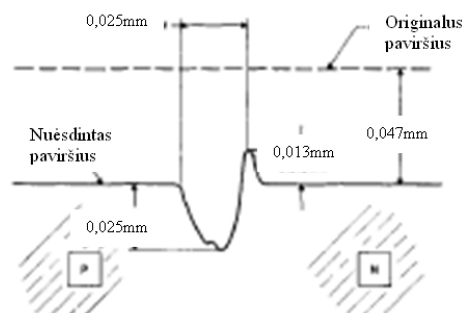


Žinoma, kad geriausiai reakcijos:



stechiometriją atitinka $[\text{HNO}_3]/[\text{HF}]$ santykis lygus 4,5 [83]. Esant šiam santykiui stebimas maksimalus silicio ėsdinimo greitis ir išlaikomas maksimalus azoto rūgšties redukcijos produkto NO kiekis. Ėsdinant prie mažų HF koncentracijų, silicio paviršiuje susidaro netolygi SiO_x plėvelė, trukdanti reagentų difuzijai į ėsdinamą paviršių ir ėsdinimo greitis sumažėja, kaip parodyta [84].

Be to, žinoma, kad, ėsdinant $p-n$ sandūrą, p ir n sritys ėsdinasi nevienodu greičiu. Kaip matosi iš 3.1.2 pav. [83], p -sritis ties sandūra ėsdinasi ~60% greičiau, nei n -sritis, nes p -sirtyje Si tirpsta



3.1.2 pav. Ėsdintos HF-HNO₃ tirpale $p-n$ sandūros profilis [83].

sudarydamas H_2SiF_6 junginius (kaip seka iš diagramos), o n -sirtyje vyrauja HNO_3 redukcija. Taigi tam, kad išlyginti $p-n$ sandūros profilį palankiausias eksperimentiškai nustatytas $[\text{HNO}_3]/[\text{HF}]$ santykis lygus 1,97. Be to, ėsdiklio sudėtyje esanti acto rūgštis, vaidina skiediklio vaidmenį ir sumažina ėsdinimo greitį p -sirtyje.

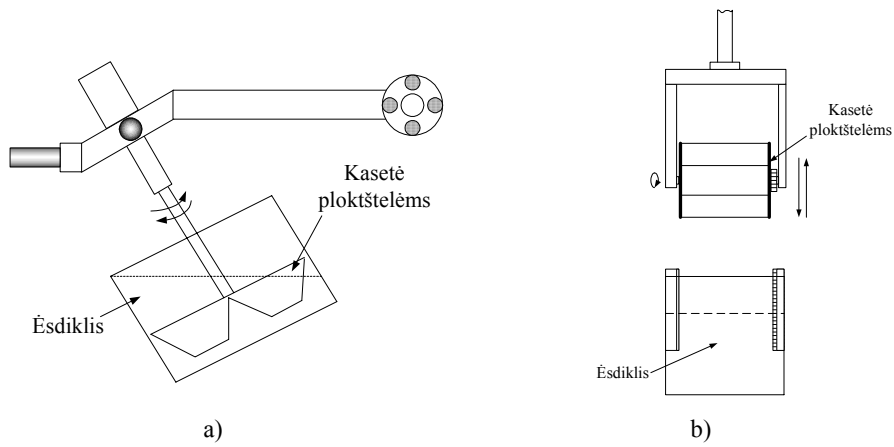
3.1.2 Izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdinimo įrenginio struktūros ir veikimo principo

Sisteminiai efektai, kurie gali įtakoti griovelio formą yra laisva tirpalo konvekcija dėl bandinių vertikalios pozicijos ar nehomogeniško temperatūros pasiskirstymo griovelyje. Pavyzdžiui, konvekcija gali suardyti simetriją dėl vyraujančios ėsdiklio srauto krypties, kas ir stebima griovelio dugno nelygumuose. Be to, griovelio ėsdinimo greitis gali būti ribojamas dėl susiformavusių dujų burbuliukų (SiF_4 , NO ir kitų reakcijos produktų), kurie riboja ėsdiklio pernešimą į ėsdinamą paviršių. Šių problemų sprendimui palyginami dviejų konstrukcijų izoliacinio griovelio ėsdinimo įrenginiai.

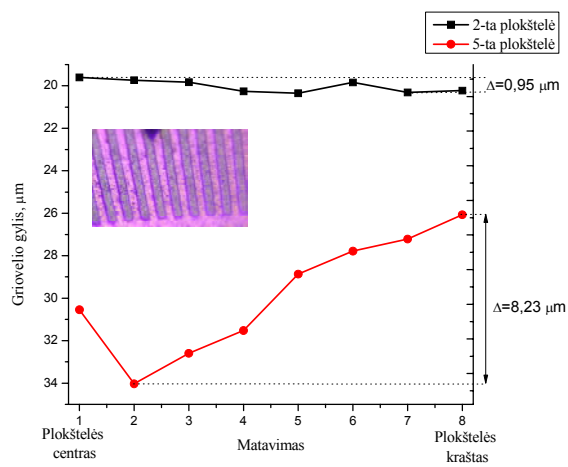
Ši eksperimentų planą suskirstome į du etapus:

1. Ėsdinimo įrenginio struktūros parinkimas;
2. Ėsdinimo su pasirinktu įrenginiu trukmės parinkimas.

Panagrinėkime kiekvieną etapą smulkiau. Pirmajame etape, ėsdinimas atliekamas su dviem ėsdinimo įrenginiais (3.1.3 pav.), vienodais ėsdinimo režimais. Šio etapo pabaigoje, tolimesniam darbui, pasirenkamas ėsdinimo įrenginys, kuriame gaunamas mažesnis griovelių gylių verčių išsibarstymas. Antrajame etape, ėsdinimo eksperimentai atliekami su pirmajame etape pasirinktu įrenginiu. Šiuo atveju ėsdinimo trukmės keičiamos tol, kol pasiekiamas norimas griovelių gylis ($25 \div 30 \mu\text{m}$). Ėsdiklio temperatūra laikoma pastovi. Jos parinkimui yra skirtas 3.1.3 skyrius „Izoliacinių meza griovelių cheminio ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio temperatūros kitimo“, kuriame taip pat bus patikrintas ir tirpalo selektyvumas Si/SiO₂.



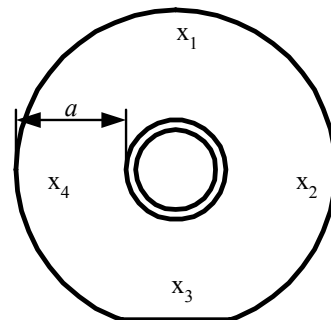
3.1.3 pav. I (a) ir II (b) struktūros ėsdinimo įrenginiai.



3.1.4 pav. 2-osios ir 5-osios plokštelių, \times_4 gylių verčių išsibarstymas matuojant nuo plokštelės centro į kraštą. Intarpe nurodoma, kad matavimai atlikti statmenai izoliaciniam grioveliams. Plokštelėje yra aštuoni žiedai su didelio tankio meza struktūromis.

Šiems eksperimentams parinkome dvi ęsdinimo trukmes t_1 ir t_2 ($t_2 > t_1$), kur $t_1 = 70$ s, $t_2 = 90$ s. Eksperimentinės plokštelės ęsdintos skirtingos struktūros įrenginiuose. Plokštelės Nr. 1 ir Nr. 4 ęsdintos 70 s trukme, o plokštelės Nr. 2, 3, 5, 6 – 90 s trukme. ęsdiklio temperatūra palaikoma $+20^\circ\text{C} \pm 0,8^\circ\text{C}$ ribose. Išmatavus griovelių gylius x ir y kryptimis (3.1.5 pav.: pirmoji matavimo vieta x_1 – plokštelės viršus, antroji x_2 – dešinėje pusėje, trečioji x_3 – ties bazine nuopjova ir ketvirtoji x_4 – plokštelės kairėje pusėje) paaiškėjo, kad su I struktūros ęsdinimo įrenginiu, griovelių gylių kitimo intervalas viršija $5 \mu\text{m}$, kai tuo tarpu II struktūros ęsdinimo įrenginys leidžia pasiekti $1,5 \mu\text{m}$ griovelių gylių verčių kitimo intervalą. 3.1.4 paveiksle pateikiami plokštelių Nr. 2 ir Nr. 5 kairės pusės (x_4) griovelių gyliai, matuojant nuo plokštelės centro ir baigiant krašte. Primename kad šios plokštelės ęsdintos vienoda trukme, tik skirtingos struktūros ęsdinimo įrenginiuose.

Dėl mažo griovelių gylių reikšmių intervalo [85], kuris yra $\sim 1,5 \mu\text{m}$ per plokštelę iš keturių matavimo vietų, o kartu ir matuojant vienos vietos kitimą nuo plokštelės krašto į centrą (aštuoniuose struktūriniuose žieduose) $R = 0,95 \mu\text{m}$ (3.1.4 pav.), buvo pasirinktas II struktūros ęsdinimo įrenginys. I struktūros ęsdinimo įrenginio privalumas yra tas, kad jame gaunamas lygesnis griovelio dugnas. Tačiau ęsdinant II struktūros ęsdinimo įrenginiu, gaunami griovelio dugno nelygumai ypatingai neįtakoja tolimesnes operacijas, nes jie net nesiekia $0,5 \mu\text{m}$.



3.1.5 pav. Matavimo vietų (x_1, x_2, x_3 ir x_4) išsidėstymas plokštelėje. a – plokštelės ketvirtojo taško griovelių gylių matavimo intervalas, matuojant nuo plokštelės centro į kraštą.

Optimaliai ęsdinimo trukmei nustatyti naudojamas II struktūros ęsdinimo įrenginys. Eksperimentų metu palaikoma pastovi ęsdiklio temperatūra (kad kitimas neviršytų $0,8^\circ\text{C}$). Pirmajame etape, išsirinkus ęsdinimo įrenginio konstrukciją, parenkamos ęsdinimo trukmės, nes netenkina pasiektas $19 - 20 \mu\text{m}$ gyliš. 3.1.2

lentelėje pateikiamos ėsdinimo trukmės, ėsdiklių temperatūros ir griovelių gylių matavimai x ir y kryptimis (1 – plokštelės viršuje, 2 – dešinėje pusėje, 3 – ties bazine nuopjova, 4 – plokštelės kairėje pusėje).

3.1.2 lentelė. Ėsdinimo parametrai ir griovelių gyliai

Pl. Nr.	Ėsdinimo trukmė, s	Ėsdiklio temperatūra, °C	Griovelių gyliai matavimo vietose, μm				\bar{x} , μm	R, μm
			x ₁	x ₂	x ₃	x ₄		
7	90	20,4	22,43	23,61	22,9	21,97	22,735	1,64
8	110	20,9	28,77	28,75	28,0	27,98	28,378	0,79
9	130	20,9	33,9	32,45	32,1	33,03	32,873	1,79

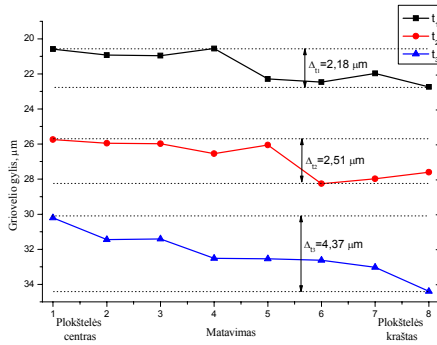
Lentelėje nurodyti dydžiai: \bar{x} - vidurkis, R – reikšmių intervalas. Kaip matyti iš 3.1.2 lentelės, griovelių gylių reikšmių kitimo intervalas yra $0,8 \div 1,8 \mu\text{m}$ ribose. 3.1.3 lentelėje pateikiami plokštelių Nr. 7-9 kairės pusės (x₄) griovelių gylių verčių intervalai, pradedant matuoti nuo plokštelės krašto (Nr. 8) ir baigiant centrinėje dalyje (Nr. 1).

3.1.3 lentelė. Plokštelių Nr. 7 – 9 x₄ krypties (aštuonių konstrukcinių žiedų) griovelių gyliai, jų vidurkiai ir kitimo intervalai, μm

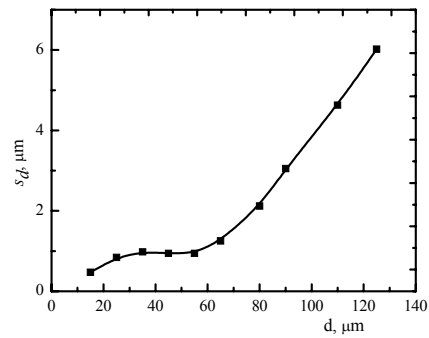
Pl. Nr.	Trukmė	8	7	6	5	4	3	2	1	\bar{x} , μm	R
7	t ₁	22,74	21,97	22,5	22,29	20,56	20,96	20,93	20,6	21,564	2,18
8	t ₂	27,61	27,98	28,3	26,06	26,55	25,98	25,96	25,8	26,769	2,51
9	t ₃	34,4	30,03	32,6	32,54	32,52	31,41	31,45	30,2	31,899	4,37

Palyginkime plokštelių Nr. 2 ir Nr. 7 griovelių gylių rezultatus. Šie parametrai lyginami tam, kad parodytume proceso pasikartojimą. Šių plokštelių gylių vidurkių skirtumas $\Delta X (\bar{x}_7 - \bar{x}_2) = 1,521 \mu\text{m}$, $\Delta R (R_7 - R_2) = 1,23 \mu\text{m}$. 3.1.6 (a) paveikslu iliustravome 3.1.3 lentelės rezultatus, tik čia nurodomos plokštelės pagal trukmes, kur t₁ - pl. Nr. 7, t₂ - pl. Nr. 8, t₃ - pl. Nr. 9.

Paveiksle 3.1.6 (a) griovelių gylio ašis apversta tam, kad matytume griovelių gylių kitimo morfologiją per plokštelę: centre – sekiau, krašte – giliau.



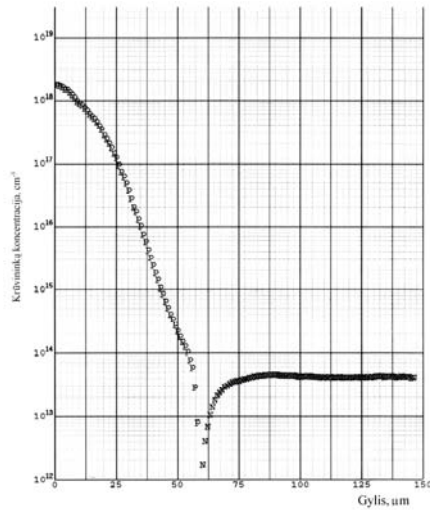
a)



b)

3.1.6 pav. Plokštelių Nr. 7 – 9 x_4 gylių intervalai matuojant nuo plokštelės centro į kraštą (a) ir izoliacinio griovelio gylių verčių standartinio nuokrypio priklausomybė nuo griovelio gylio kitimo (b).

Ilgėjant ęsdinimo trukmei, gilėja griovelių gylis, o kartu didėja ir jų verčių kitimo intervalas (nuo 2,18 μm iki 4,37 μm), kuris priklauso nuo griovio gylio. 3.1.6 (b) paveiksle pateikiame izoliacinio griovelio gylių verčių standartinio nuokrypio [86] priklausomybę nuo gylio kitimo. Apimamas platus griovelio gylio nuo 20 μm iki 120 μm . Kaip matome iki 60 μm standartinis nuokrypis kinta nežymiai, viršijus šią ribą prasideda staigus augimas. Kaip



3.1.7 pav. Krūvininkų koncentracijos pasiskirstymas po ampulinės GaAl difuzijos.

žinoma, iš technologinio proceso, p - n perėjimas yra būtent ties šia vieta (3.1.7 pav.) ir jis technologinio proceso metu gali pasislinkti į 100 μm gylį. Pereinamoji koncentracijų sritis tarp n ir p tipo užima apie 25 ÷ 30 μm , kas nugilėjus sandūrai, siektų apie 130 μm . Todėl ir stebimas toks staigus standartinio nuokrypio augimas paveiksle 3.1.6 (b). Galime daryti prielaidą,

kad jeigu būtume ėsdinę iki 140 μm gylio, tai būtume pastebėję standartinio nuokrypio charakteristikos užlinkimą, tačiau tai būtų buvę rizikinga dėl plokštelės mechaninių savybių, nes liktų mažas skerspjūvyje Si likutis (apie 70 μm) tarp griovelių.

Rezultatų apibendrinimui, panagrinėsime griovelių ėsdinimo greičius. II-osios struktūros ėsdinimo įrenginyje, lyginant su I-osios struktūros įrenginiu, vidutinis griovelių ėsdinimo greitis skiriasi 4 $\mu\text{m}/\text{min}$. Plokštelės Nr. 7 – 9, atkartoja plokštelių Nr. 1 – 3 ėsdinimo greičius 1 μm tikslumu, ėsdintos tame pačiame ėsdinimo įrenginyje, tik skirtingu laiku. Vidutinis ėsdinimo greitis II įrenginyje yra $v_{\text{esd.}} = 15,72 \mu\text{m}/\text{min}$. Tokiu atveju, norint pasiekti 25 ÷ 30 μm griovelių gylį, ėsdinimo trukmė turi būti 95 ÷ 114 s. Kadangi vienas iš esminių faktorių yra tirpalo temperatūra, todėl pagal šio eksperimento rezultatus pasirenkama plokštelė Nr. 8. Plokštelės ėsdinimo režimas yra optimalus: ėsdinimo trukmė $t_2 = 110$ s, ėsdiklio temperatūra $\sim 20^\circ\text{C}$ (jos įtaka bus iširta kitoje eksperimentų sekoje). Ėsdinant tokiu režimu gaunami griovelių gyliai yra $27,5 \mu\text{m} \pm 2,5 \mu\text{m}$.

3.1.3 Izoliacinių meza griovelių ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio temperatūros kitimo

Pagal sudarytą eksperimentų seką, penkios plokštelės (Nr. 10 – 14) ėsdinamos pagal 3.1.4 lentelėje nurodytus parametrus. Ėsdinimo trukmė $t = \text{const} = 110$ s. Pradinis SiO_2 sluoksnio storis $d_0 = 1,421 \mu\text{m}$. SiO_2 storis matuotas skaidrių plėvelių storio kontrolei skirtu prietaisu MPV-SP (UAB “Vilniaus Ventos puslaidininkiai”). Ėsdinta II struktūros ėsdinimo įrenginyje.

3.1.4 lentelė. Ėsdinimo parametrai

Pl. Nr.	Ėsdiklio temperatūra, $^\circ\text{C}$	Temperatūrų žymėjimai
10	9,1	T_1
11	14,3	T_2
12	19,5	T_3
13	25,8	T_4
14	30,9	T_5

3.1.5 lentelė. Griovių gylių ir SiO_2 storiių lentelė

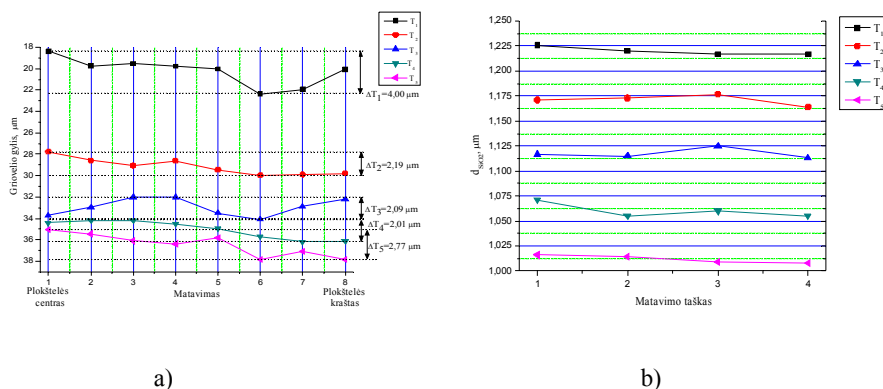
Pl. Nr.	Griovių gylis, μm		SiO_2 storis, μm	
	\bar{x}	R	\bar{x}	R
10	21,603	1,61	1,220	0,009
11	30,010	1,57	1,171	0,013
12	33,688	1,45	1,118	0,012
13	36,595	1,82	1,060	0,016
14	37,360	2,42	1,012	0,008

Tam, kad pasiektume norimas temperatūras intervaluose tarp ęsdinimų, ęsdinta standartinės topologijos, serijinės gamybos partija. Tai reikia įvertinti apibendrinant rezultatus ir įvertinant ęsdiklio savybių pokyčius.

3.1.5 lentelėje pirmame stulpelyje pateikti gautieji griovių gyliai, matuoti x ir y kryptimis per plokštelę, antrame stulpelyje – SiO₂ storis tuose pačiose plokštelės vietose. Iš šios lentelės matyti, kad kylant ęsdiklio temperatūrai, didėja griovių gylių verčių intervalas, tačiau tai nėra tendencija silicio oksido storio atžvilgiu.

3.1.8 a paveiksle pateikiamos plokštelės x₄ vietos griovelių gyliai ir jų kitimo intervalas. Šiame paveiksle pateikiami griovelių gylio verčių kitimo intervalai ΔT konkrečioje temperatūroje. Kaip matyti iš 3.1.8 paveikslo, esant vėsiam ęsdikliui, gaunamas didesnis griovelių gylių išsibarstymas.

Pasiekus ęsdiklio temperatūrą 15°C ir kylant iki 30°C, griovelių gylių verčių kitimo intervalas stabilizuojasi ir nusistovi apie 2 μm, tuo pačiu griovelių gyliai, pasiekę 34 μm vertes, dėl išaugusio ęsdinimo greičio, suvienodėja nepriklausomai nuo ęsdiklio temperatūros.

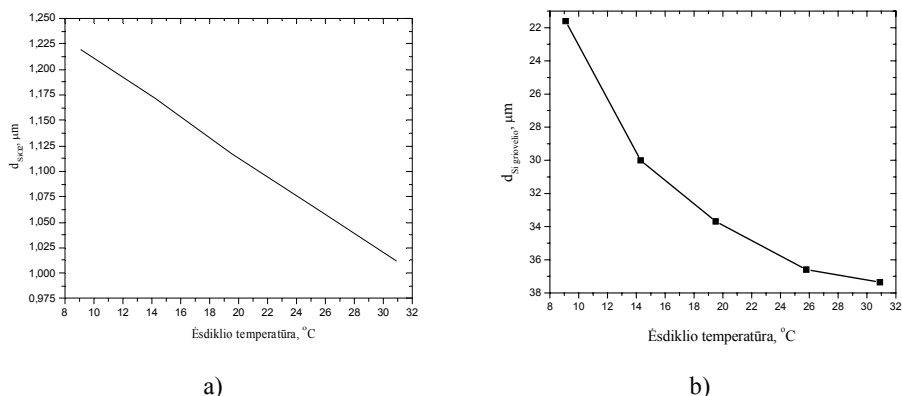


3.1.8 pav. x₄ (plokštelės kairėje) griovelių gylių vertės ir jų kitimo intervalai, judant nuo plokštelės krašto (matavimas 8) į centrą (matavimas 1) (a), SiO₂ storio pasiskirstymas per plokštelę x ir y kryptimis (b).

Pereikime prie SiO₂ storio kitimo nagrinėjimo. Pradinis silicio oksido storis $d_0 = 1,421 \mu\text{m}$. 3.1.8 (b) paveiksle pateikiami likusiojo silicio oksido

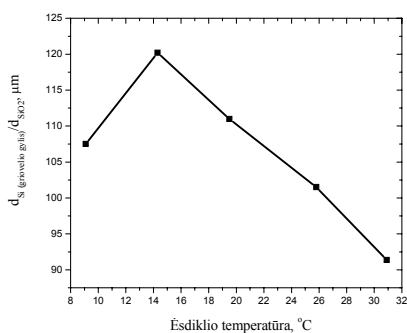
storai, po ęsdinimo operacijos. Šios likusiojo oksido storių vertęs matuotos tose pačiose vietose kaip griovelių gyliai x ir y kryptimis (3.1.5 lentelė). Likusio silicio oksido storio išsibarstymai per plokštelę - minimalūs ir priklauso nuo ęsdiklio temperatūros: $R_1 = 0,009 \mu\text{m}$, $R_2 = 0,013 \mu\text{m}$, $R_3 = 0,012 \mu\text{m}$, $R_4 = 0,016 \mu\text{m}$, $R_5 = 0,008 \mu\text{m}$. 3.1.9 (a) paveiksle pateikiama SiO_2 sluoksnio storio priklausomybė nuo ęsdiklio temperatūros kitimo. Iš šio paveikslo matyti, kad kylant ęsdiklio temperatūrai, prie tos pačios ęsdinimo proceso trukmės, proporcingai plonėja oksido sluoksnis.

3.1.9 (b) paveiksle pateikiama griovelių gylių priklausomybė nuo ęsdiklio temperatūros kitimo. Šis paveikslas yra 3.1.9 (a) paveikslo atitikmuo, tik dėl skirtingų mastelių jie braižyti atskirai. Kylant ęsdiklio temperatūrai, didėja ęsdinimo greitis ir prie tos pačios ęsdinimo proceso trukmės gaunami gilesni grioveliai, atitinkamai ir plonesnis apsauginis SiO_2 sluoksnis.

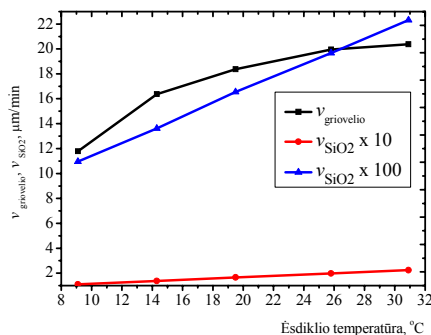


3.1.9 pav. SiO_2 storio (a) ir griovelio gylio (b) priklausomybės nuo ęsdiklio temperatūros kitimo.

Iš šių dviejų priklausomybių gaunamas svarbus fizikinis dydis – tirpalo selektyvumas Si/SiO_2 . Šis dydis svarbus griovelio ęsdinimo procesui, skaičiuojant griovelių ęsdinimo trukmes ir greičius. Taip pat šis santykis parodo, koks yra būtinas SiO_2 sluoksnio storis, norimo gylio griovelių išęsdinimui. Tirpalo selektyvumo pasiskirstymas pateikiamas 3.1.10 (a) paveiksle.



a)



b)

3.1.10 pav. Tirpalo selektyvumas Si/SiO₂ (a) bei Si ir SiO₂ ėsdinimo greičių priklausomybės (b) nuo ėsdiklio temperatūros.

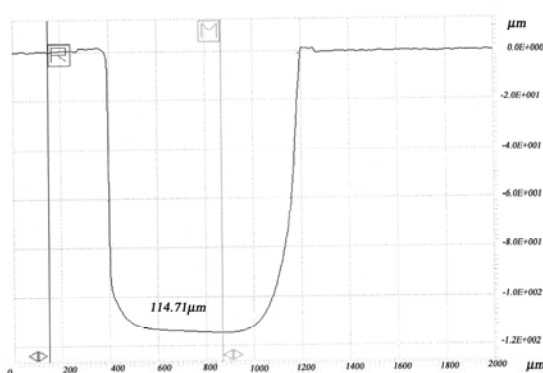
Didėjant temperatūrai, ėsdinimosi santykis mažėja, nors prie 14°C pasiekia maksimumą, kurį galima būtų vertinti kaip atsitiktinį arba kaip esminį faktorių. Prie šių temperatūrų tirpalo selektyvumas yra ~120, t. y. tiek kartu greičiau ėsdinasi silicis negu silicio oksidas. Išvedus reikšmių vidurkį, gauname, kad tirpalo HF:HNO₃:CH₃COOH Si/SiO₂ selektyvumas yra 106. 3.1.10 (b) pav. pateikiamos Si ir SiO₂ ėsdinimo greičių priklausomybės nuo ėsdiklio temperatūros kitimo. Silicio oksido ėsdinimo greičių vertės padaugintos iš daugiklių 10 ir 100, tam, kad matytųsi ta pati ėsdinimo greičių kitimo tendencija. Kaip jau buvo galima numanyti iš ankščiau pateiktų matavimų, ėsdinimo greitis proporcingai auga, didėjant ėsdiklio temperatūrai. Griovelių ėsdinimo greitis, esant 14,3°C tirpalo temperatūrai, yra 16,4 μm/min, o esant 19,5°C tirpalo temperatūrai, yra 18,4 μm/min.

Šiais eksperimentais patikrinti 3.1.2 punkto gautieji rezultatai. Pakartotas tas pats griovelių gylių verčių kitimo intervalas (iki 2 μm). Nustatytas ėsdiklio temperatūrų diapazonas 15°C ÷ 25°C. Turint gautąsias priklausomybes, nesunku bus apskaičiuoti ėsdinimo trukmes. Nustatytas HF:HNO₃:CH₃COOH tirpalo Si/SiO₂ selektyvumas, kurio vidutinė reikšmė 106.

3.1.4 Gilių izoliacinių meza griovelių cheminis ėsdinimas

Tiristoriaus pramušimo įtampą nulemia struktūros forma tiristoriaus krašte arba tose srityse, kur $p-n$ sandūra J1 ir J2 (1.1.1 pav.) išeina į paviršių. Paviršiaus konfigūracija yra svarbi todėl, kad griūtinio pramušimo pradžia nustatoma pagal elektrinio lauko stiprumą, kuris tampa didesnis negu tam tikra kritinė reikšmė (silicio atveju apytiksliai $2 \times 10^5 \text{C/cm}$). Taip pat reikia įvertinti tai, kad maksimalus elektrinio lauko stiprumas arti vietos, kur sandūra išeina į paviršių arba pačiame paviršiuje, paprastai didesnis negu tūryje. Todėl reikia imtis priemonių užtikrinančių kuo mažesnę lauko stiprumą paviršiuje, kad būtų gauta maksimali pramušimo įtampa.

Vienas iš pagrindinių metodų, naudojamų lauko stipriui mažinti, yra ėsdinimas. Nuskurdintojo sluoksnio ėsdinimo metodu pašalinama didelė puslaidininkinio padėklo periferijos dalis. Taip suformuotas griovys



3.1.11 pav. Išėsdintas griovys. $p-n$ perėjimas 90 μm gylyje. (3.1.11 pav.) užtikrina elektrinio lauko stiprumą paviršiuje, siekiantį 60 – 80% nuo tūrinės pramušimo įtampos.

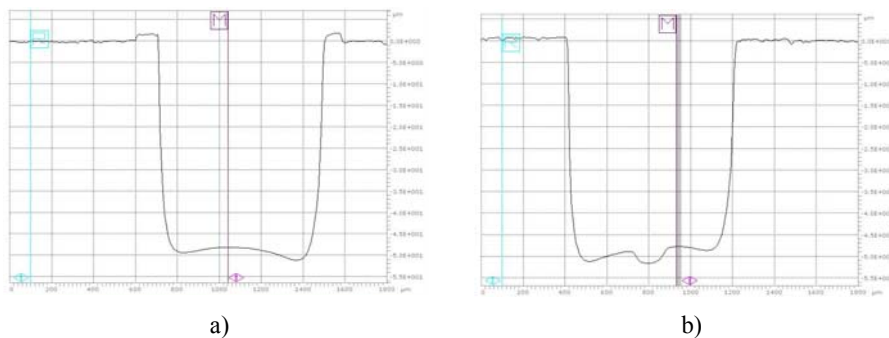
3.1.1 - 3.1.3 skyriuose aptarti seklių griovelių ėsdinimo principai pravers aptariant gilesnių griovelių ėsdinimo specifiką. Pagal technologinį procesą, $p-n$ sandūra yra ~60 μm gylyje (priklausomai nuo gaminio topologijos). Ėsdinamas pasyvacijai skirtas griovys yra 90 ÷ 100 μm (taip pat priklauso nuo $p-n$ sandūros gylio).

Griovio ėsdinimo trukmę sudaro du laikai, iš kurių pirmasis priklauso nuo silicio tipo, o antrasis yra paskaičiuojamas, išmatavus gylius po pirmojo ėsdinimo:

$$t_2 = \frac{t_1 - \Delta X(X_{j2} - X_{j1})}{X_{j1}}, \quad (3.1.1)$$

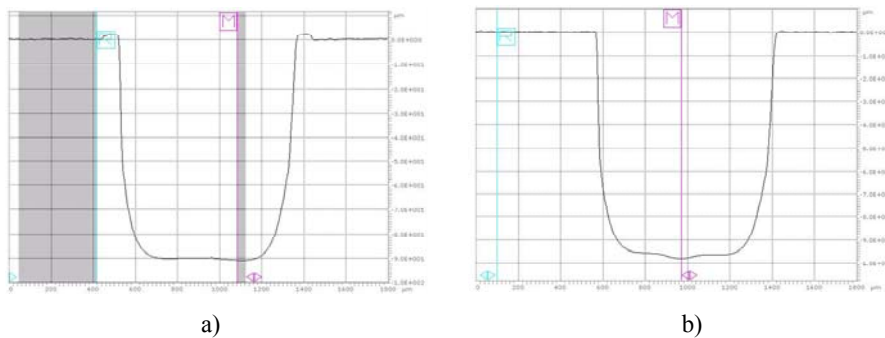
kur – t_1 – pirmojo ęsdinimo trukmę, t_2 – antrojo ęsdinimo trukmę, X_{j1} – gylis po pirmojo ęsdinimo, X_{j2} – reikalingas gylis po antrojo ęsdinimo, ΔX – pirmojo ir antrojo ęsdinimo gylių skirtumas.

Griovio ęsdinimo profiliai pateikti 3.1.12 paveiksle. Pirmojo ęsdinimo parametrai: $T_{tirpalo}^o = 11^o C$, $t_1 = 3'30''$, $v_{ęsd.1} = 14,3 \mu m/min$, $X_{j1} \approx 48 \mu m$. Po pirmosios ęsdinimo trukmės yra pasiekiami $p-n$ sandūra ir todėl grioviai gaunami netolygūs tiek anodo tiek ir katodo pusėse.



3.1.12 pav. Griovio profilis po pirmos ęsdinimo trukmės (a–katodo pusėje, b–anodo pusėje).

3.1.13 paveiksle pateiktas griovio profilis po antrosios ęsdinimo trukmės. Antrojo ęsdinimo parametrai: $T_{tirpalo}^o = 20^o C$, $t_2 = 2'30''$, $v_{ęsd.2} = 18,4 \mu m/min$, $X_{j2} \approx 99 \mu m$. Griovys pasiekęs 100 μm gylį, įgauna tolygią formą. 3.1.11 paveiksle pateikiami grioviai su tolygesniais griovių dugnais, kurių gylio verčių svyravimas yra 1 μm .



3.1.13 pav. Griovio profilis po antros ęsdinimo trukmės (a–katodo pusėje, b–anodo pusėje).

Kaip jau buvo minėta ankstesniuose skyriuose, UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiuose“ yra dviejų tipų griovio ėsdinimo įrenginiai: sukurinio (3.1.3 (a) pav.) ir linijinio sukimosi (3.1.3 (b) pav.). Šiuose griovių ėsdinimo įrenginiuose ėsdinant 125 mm skersmens plokšteles, gaunamas ~20 μm griovių gylių išsibarstymas per plokštelę. Sukuriniame ėsdinimo įrenginyje griovelių gylių išsibarstymas priklauso nuo plokštelių apsikimo aplink savo ašį skaičiaus. 3.1.6 lentelėje pateikiame palyginimo duomenis kai plokštelės sukotos du ir keturis kartus. Plokštelė Nr. 6 buvo sukta keturis, o plokštelė Nr. 7 tik du kartus. Taip pat pateikiame ir pramušimo įtampų vertes atitinkamuose plokštelės vietose, kuriuose matuoti griovių gyliai.

3.1.6 lentelė. Griovių gyliai ir pramušimo įtampų vertės

Matavimo vieta	Griovių gyliai, μm				Pramušimo įtampų vertės, V			
	6-toji plokštelė		7-toji plokštelė		6-toji plokštelė		7-toji plokštelė	
	K	A	K	A	V _{DRM}	V _{RRM}	V _{DRM}	V _{RRM}
1	116,3	124,4	130,3	125,7	1840	1860	1900	1900
2	120,6	117,4	113,9	116,1	1860	1900	1840	1800
3	117,2	119	125,9	116,6	1900	1920	1920	1860
4	114,5	119,9	121	120,8	1860	1860	1800	1900
5	111,5	111,7	116,4	113,2	1820	1840	1760	1700
X	116,02	118,48	121,5	118,48	1856	1876	1844	1832
R	9,1	11,7	16,4	12,5	80	80	160	200

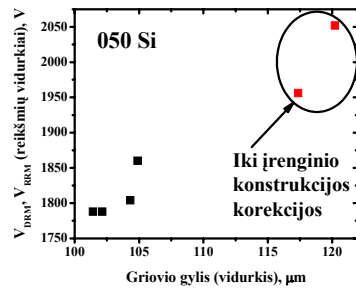
Kaip matyti iš 3.1.6 lentelės, griovių gylių verčių kitimo intervalai 6-toje plokštelėje katodo (K) pusėje buvo sumažintas iki 9,1 μm, o anodo (A) pusėje iki 11,7 μm. 7-tojoje plokštelėje, kuri ėsdinta sukant du kartus, K pusėje griovių gylių verčių kitimo intervalas yra 16,4 μm, o A pusėje - 12,5 μm. Nagrinėjant V_{DRM}/V_{RRM} verčių išsibarstymą, matyti, kad su didesniu griovių gylių verčių kitimo intervalu gaunamas didesnis pramušimo įtampų verčių kitimo intervalas 160 ÷ 200 V. Plokštelėje, kuri buvo sukama keturis kartus apie savo ašį, pramušimo įtampų verčių išsibarstymas 80 V. Mažindami griovio gylio verčių kitimo intervalą, mažiname ir pramušimo įtampų verčių kitimo intervalą plokštelėje. Tačiau toks ėsdinimo metodas gamyboje yra nepraktiškas, nes kiekvieną kart apsikant plokšteles reikia ištraukti kasetę iš tirpalo ir apsikus vėl į ją įleisti. Šie manevrai užima daug laiko ir pailgėja

ėsdinimo trukmė. Sūkuriniame įrenginyje praktiškai neįmanoma pasiekti, kad plokštelės sukūptų aplink savo ašį, ėsdinimo metu. Tai yra įmanoma linijinio sukimosi principo ėsdinimo įrenginyje.

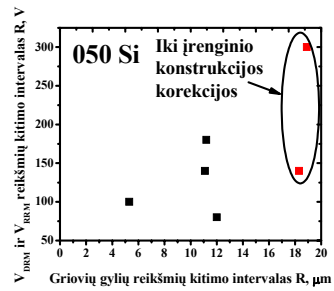
Linijinio sukimosi įrenginyje (3.1.3 (b) pav.) kasetė su plokštelėmis išeina iš tirpalo tame pačiame taške, nes tai lemia krumpliaračių sistema, esanti tirpalo vonelėje. Šiame taške grioveliai visada yra giliausi, lyginant su likusia plokštelės dalimi. Pastebėta, kad šis taškas yra ties plokštelės bazine nuopjova, kur tvirtinamas kasetės laikiklis, prispaudžiantis plokšteles. Galimi du sprendimo būdai: plokštelė turi judėti kasetėje (kas neįmanoma) arba reikia tobulinti krumpliaračių sistemą. Atlikus krumpliaračių konstrukcijoje pakeitimus ir patobulinimus, išnaudojant inercinį kasetės judėjimą tirpale, pastebėta, kad plokštelės kiekvieną kartą iš tirpalo išeina kitame taške ir per 1 min plokštelė atlieka šešis apsisukimus aplink savo ašį.

3.1.14 paveiksle pateiktos V_{DRM}/V_{RRM} verčių priklausomybės nuo griovio gylio ir verčių kitimo intervalo. Matavimai atlikti prietaisų, kurių Si parametrai: $\rho=60\div 90 \text{ } \Omega\text{-cm}$, $d=370\pm 10 \text{ } \mu\text{m}$, $X_j=45 \text{ } \mu\text{m}$ (050Si) ir $\rho=57,4\div 74,6 \text{ } \Omega\text{-cm}$, $d=405\pm 10 \text{ } \mu\text{m}$, $X_j=65 \text{ } \mu\text{m}$ (135Si).

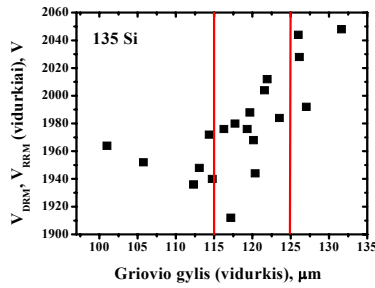
Kaip matyti iš 3.1.14 pav., prie gilesnių griovių gaunamos aukštesnės ir pramušimo įtampų vertės. Griovio gylio vertės kito $18 \div 20 \text{ } \mu\text{m}$ intervale (iki įrenginio korekcijos). Po griovio ėsdinimo įrenginio konstrukcijos korekcijos, griovių gylių vertės pasiskirstė $5 \div 12 \text{ } \mu\text{m}$ intervale (3.1.14 (b) pav.). Griovių gylių verčių kitimo intervalas sumažintas beveik 50%. Pramušimo įtampų verčių intervalas prieš konstrukcijos korekciją buvo $150 \div 300 \text{ V}$, po korekcijos ir griovių gylių verčių kitimo intervalo sumažinimo, intervalas pasiskirstė $75 \div 175 \text{ V}$ ribose (3.1.14 (b) pav.). Šie matavimai pakartoti su 135Si plokštelėmis ir 3.1.14 (c-d) paveiksle pateikiamos jų V_{DRM} ir V_{RRM} priklausomybės nuo griovio gylio, nurodant visų plokštelių matavimo taškų verčių vidurkius. Pagal technologiją griovio gylis turi būti $115 \div 125 \text{ } \mu\text{m}$ ribose, tačiau iš 3.1.14 (c-d) paveikslo matyti, kad $1940 \div 1960 \text{ } \mu\text{m}$ įtampų vertės pasiekiamos ir prie $100 \div 115 \text{ } \mu\text{m}$ griovių gylių.



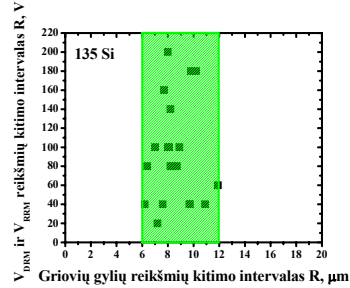
a)



b)



c)

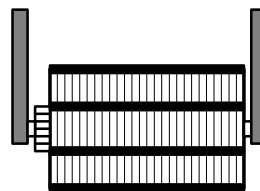


d)

3.1.14 pav. Skirtingų silicių padėklų V_{DRM}/V_{RRM} verčių priklausomybės nuo griovio gylio ir V_{DRM}/V_{RRM} verčių kitimo intervalo priklausomybės nuo griovio gylio verčių kitimo intervalo: 050Si padėklo (a) - V_{DRM}/V_{RRM} priklausomybė nuo griovio gylio, (b) - V_{DRM}/V_{RRM} kitimo intervalo priklausomybė nuo griovio gylio verčių kitimo intervalo; 135Si (c) - V_{DRM}/V_{RRM} priklausomybė nuo griovio gylio, (d) - V_{DRM}/V_{RRM} kitimo intervalo verčių priklausomybė nuo griovio gylio verčių kitimo intervalo.

Šiuose matavimuose difuziniai gyliai laikyti nekintamais ir remiantis technologiniais reikalavimais sandūra yra 90 μm gylyje. Viršijus 125 μm griovio gylį pramušimų įtampų vertės viršija 2000 V. 3.1.14 (d) paveiksle pateikiami V_{DRM} ir V_{RRM} verčių kitimo intervalo priklausomybė nuo griovių gylių verčių kitimo intervalo (135Si). Kaip ir 050Si atveju, griovių gylių vertės telpa 6 ÷ 12 μm intervale (3.1.14 (d) pav.). Pramušimo įtampų vertės kinta 20 ÷ 200 V intervale. Apibendrinant, galima pasakyti, kad ėsdinimo įrenginio sukimosi principo konstrukcijos korekcija davė teigiamą rezultatą, nes pasiektas griovio gylių verčių kitimo intervalas iki 12 μm . Mažėjant griovių gylių verčių kitimo intervalui, mažėja ir pramušimo įtampų verčių kitimo intervalas, savo ruožtu, gerinamos ir mechaninės plokštelių savybės po technologinio griovio ėsdinimo proceso.

Nagrinėjant linijinio sukimosi ėsdinimo įrenginio ypatumus, nustatyta, kad šiame įrenginyje ėsdintos plokštelės turi skirtingus griovių gylius, kurie priklauso nuo plokštelės padėties ėsdinimo kasetėje. Viename ėsdinimo procese telpa 25 plokštelės ($\varnothing 125$ mm), kadangi partijoje yra 50 plokštelių tai sudaro du



I ėsd. 2 12 25
II ėsd. 26 35 49

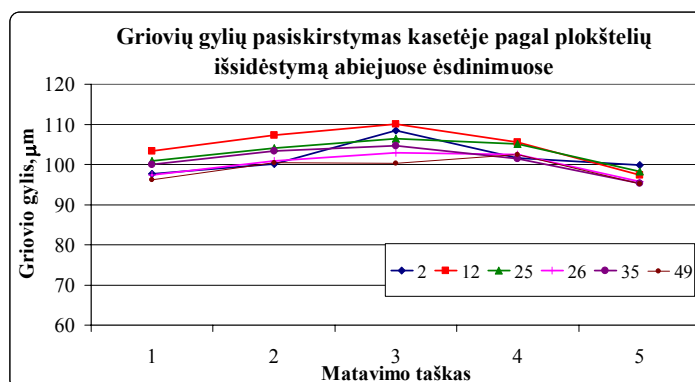
3.1.15 pav. Plokštelių išsidėstymas kasetėje 1-ojo ir 2-ojo ėsdinimo metu.

ėsdinimo procesus. Jos sudedamos į kasetę ir prispaudžiamos laikikliu ties bazine nuopjova. 3.1.15 paveiksle pateikiamas plokštelių išsidėstymas kasetėje ėsdinimų metu. Iš kiekvieno ėsdinimo paimta po tris plokšteles ir išmatuoti jų griovių gyliai (profilometru Dektak 6M). Griovių gylių matavimų duomenys pateikti 3.1.7 lentelėje.

3.1.7 lentelė. Griovių gylių verčių kitimo intervalai nuo plokštelės padėties ėsdinimo kasetėje, abiejuose ėsdinimuose

Matavimas	I ėsdinimas			II ėsdinimas			\bar{x} , μm	R , μm
	Nr. 2	Nr. 12	Nr. 25	Nr. 26	Nr. 35	Nr. 49		
1.	97,7	103,3	100,9	97,4	100,0	96,2	99,3	5,9
2.	100,2	107,3	104,1	100,9	103,4	100,4	102,7	7,1
3.	108,4	110,1	106,4	102,9	104,7	100,3	105,5	7,2
4.	101,6	105,5	105,1	102,5	101,5	102,5	103,1	4,0
5.	99,9	97,3	98,2	95,8	95,4	95,2	97,0	4,5
\bar{x} , μm	101,56	104,7	102,94	99,9	101,0	98,92		
R , μm	10,7	12,8	8,2	7,1	9,3	7,3		

Kaip matome, didžiausias griovių gylių verčių kitimo intervalas siekia 12,8 μm . Giliausi grioviai išėsdinami plokštelėje, kuri yra centrinėje kasetės dalyje (Nr. 12 ir Nr. 35). Sekliausi grioviai yra kraštinėse plokštelėse. 3.1.16 paveikslas iliustruoja 3.1.7 lentelę.



3.1.16 pav. Griovių gylių pasiskirstymas kasetėje pagal plokštelių išsidėstymą abiejuose ėsdinimuose

Griovių gylių matavimo taškų skirtumas siekia iki 7,2 μm . Kraštinėse plokštelėse griovių gyliai yra seklesni, nes kasetės kraštai yra uždari ir nepatenka reikiamas tirpalo kiekis, taip pat vonelės šoninės sienelės yra aušinamos ir tirpalo temperatūra kraštuose yra žemesnė.

3.1.5 Patobulintos konstrukcijos ėsdinimo įrenginio Nr. IIA sukūrimas ir įdiegimas gamyboje

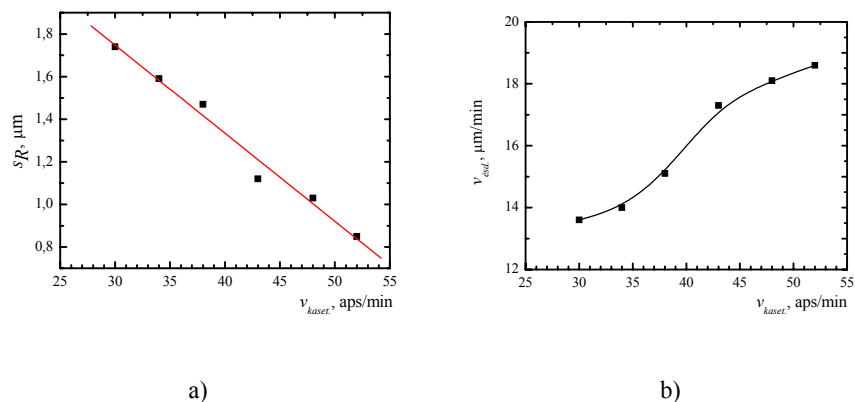
Apibendrinant ir įvertinant visus 3.1.1 - 3.1.4 skyrių pastebėjimus, pagaminta ir įdiegta gamyboje, patobulinta ėsdinimo įrenginio Nr. II konstrukcija (3.1.17 pav.). Ėsdinimo įrenginyje Nr. II negalima buvo keisti kasetės sukimosi greičio ir jis buvo pastovus – 38 aps/min. Prieš tai atlikti eksperimentai, ėsdinti šiuo greičiu. Ėsdinimo įrenginys Nr. IIA leidžia keisti kasetės sukimosi greitį intervale 30 – 60 aps/min.

Atliktas tyrimas kaip izoliacinio griovelio gylio verčių intervalas ir ėsdinimo



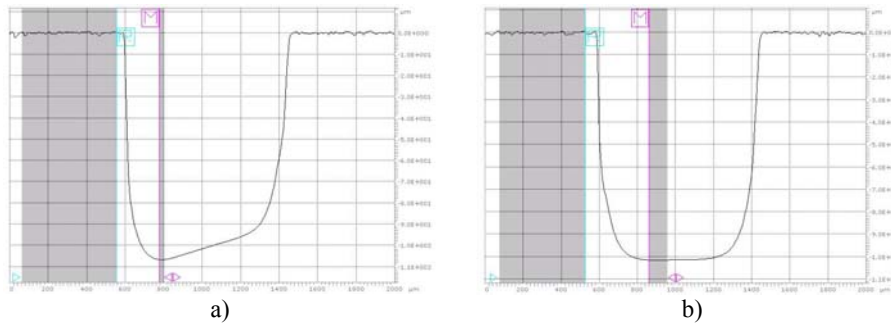
3.1.17 pav. Sukurtas ir įdiegtas gamyboje patobulintos konstrukcijos ėsdinimo įrenginys.

greitis priklauso nuo kasetės sukimosi greičio. Pasirinktas ėsdinimo kasetės sukimosi intervalas 30 – 52 aps/min. Tikslesniam rezultatų įvertinimui, izoliacinio griovelių gylių verčių intervalų reikšmių vidurkiai perskaičiuoti į standartinius nuokrypius s_R . Eksperimentiniai duomenys pateikiami 3.1.18 paveiksle. Šiame paveiksle pateikiama izoliacinio griovelio gylių reikšmių intervalo standartinio nuokrypio (3.1.18 (a) pav.) ir ėsdinimo greičio (3.1.18 (b) pav.) priklausomybės nuo ėsdinimo kasetės sukimosi greičio. Eksperimentiniai duomenys rodo, kad didinant kasetės sukimosi greitį, sumažėja izoliacinių griovelių reikšmių intervalas ir didėja ėsdinimo greitis. Kasetės sukimosi greičio didinimas leido sumažinti griovelių gylių reikšmių standartinį nuokrypį nuo 1,74 iki 0,85. Didinant $v_{kaset.}$, auga izoliacinio griovelio ėsdinimo greitis (3.1.18 (b) pav.), jis išaugo nuo 13,6 $\mu\text{m}/\text{min}$ iki 18,6 $\mu\text{m}/\text{min}$, atitinkamai padidinus kasetės sukimosi greitį nuo 30 aps/min iki 52 aps/min.



3.1.18 pav. Izoliacinio griovelio gylių reikšmių intervalo standartinio nuokrypio (a) ir ėsdinimo greičio (b) priklausomybės nuo ėsdinimo kasetės sukimosi greičio.

Didinant kasetės sukimosi greitį, auga plokštelės apsisukimų skaičius tirpale, kartu sparčiau pašalinami reakcijos produktai iš izoliacinio griovelio dugno ir jo paviršius gaunamas lygesnis. Griovelių profiliai, ėsdinant skirtingais kasetės apsisukimo greičiais, pateikiami 3.1.19 paveiksle.



3.1.19 pav. Izoliacinių griovelių profilai, ėsdinti 30 aps/min (a) ir 52 aps/min (b) ėsdinimo kasetės greičiais.

Kitas šio ėsdinimo įrenginio privalumas – tirpalo cirkuliavimas vonelėje, ėsdinimo proceso metu. Ši savybė leidžia geriau tirpalui prieiti prie ėsdinamo paviršiaus. Jeigu prisimentant, kad patobulinus ėsdinimo įrenginio Nr. II krumpliaračių sistemą (3.1.14 pav.), pasiektas griovelių gylių verčių kitimo intervalas siekė 12 μm , tai šiame įrenginyje šis intervalas siekia tik 6 μm (ant \varnothing 125 mm plokštelės). Kartu gaunamas tolygesnis SiO_2 paviršius, ėsdinimo metu. Oksido storio kitimą, ėsdinimo metu, pateikiame 3.1.8 lentelėje.

3.1.8 lentelė. SiO_2 storio kitimas po 1-ojo ir 2-ojo ėsdinimo.

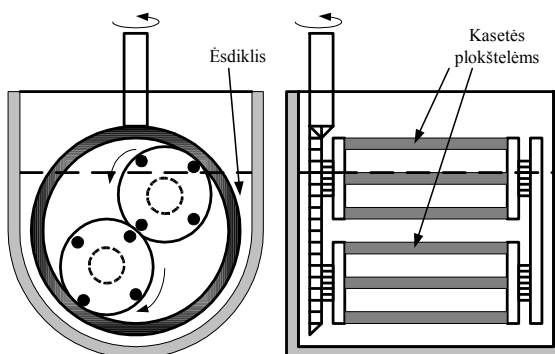
Matavimo vieta	SiO_2 storis skirtingose plokštelės vietose, μm				
	1.	2.	3.	4.	5.
Po 1-ojo ėsdinimo	1,389	1,396	1,395	1,396	1,382
Po 2-ojo ėsdinimo	1,118	1,117	1,114	1,108	1,097

Šis griovio ėsdinimo įrenginys neseniai buvo įdiegtas gamyboje ir po truputį išryškėja jo trūkumai ir privalumai. Šiame įrenginyje įdiegta automatinė ėsdiklio šaldymo sistema, pasiekus nustatytą temperatūrą, tirpalas pradeda aušinti tol, kol atauš iki nustatytos vertės. Ėsdinimo įrenginys palengvino ir operatoriaus darbą: tirpalo padavimas – automatinis, tirpalo išsiurbimas - automatinis. Ėsdinimo procesas vyksta uždaroje erdvėje, nepatenkant reakcijos garams į aplinką. Operatoriui reikia tik sudėti plokšteles į ėsdinimo kasetę ir paleisti programą, jai pasibaigus, pamatuoti griovelių gylių vertes ir paskaičiuvus antrą ėsdinimo trukmę, paleisti programą iš naujo.

3.1.6 Naujo ęsdinimo įrenginio kęrimas

Apibendrinant ir įvertinant visus 3.1.1 - 3.1.5 skyrių pastebėjimus, pasiūlyta nauja ęsdinimo įrenginio konstrukcija (3.1.20 pav.). Šioje konstrukcijoje panaudojami

tiek sękurinio, tiek ir linijinio sukimosi ęsdinimo įrenginių ypatumai (3.1.3 pav.). Trečios kartos ęsdinimo įrenginį sudaro dvi besisukančios viena apie



kitą kasetęs, į kiekvieną iš 3.1.20 pav. Kuriamo ęsdinimo įrenginio eskizas.

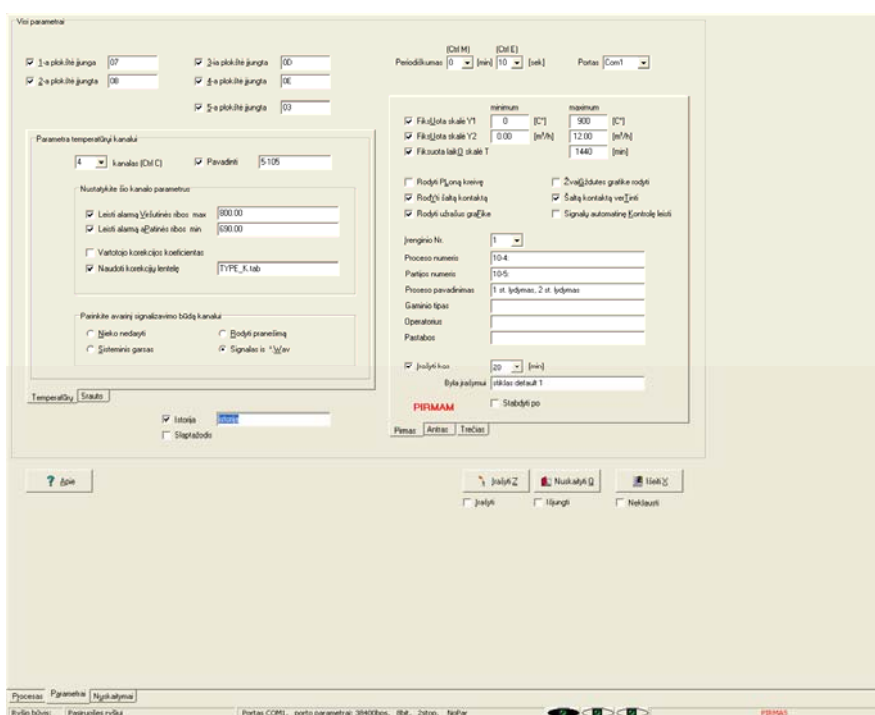
jų telpa po 25 plokštelęs. Šios kasetęs turi dvi trajektorijas: bendrą abiejų kasečių ir atskirą kiekvienos kasetęs. Tiek viena, tiek ir kita suteikia kasetęms atsitiktinį išėjimo iš tirpalo tašką, t. y. kiekvienąkart išeina iš tirpalo kitame taške. Tai reiškia, kad kiekvieną kartą iš tirpalo išlenda kasetę vis kitame taške. Sukimosi greitis, o kartu ir ęsdinimosi greitis yra reguliuojami keičiant sukimosi spartą. Šio ęsdinimo įrenginio pirminis variantas turi vieną ęsdinimo kasetę. Šiuo ęsdinimo įrenginiu išęsdintose plokštelęse gautas 26 μm griovelio gylių verčių kitimo intervalas (Ø125 mm plokštelęse). Atlikus ęsdinimus, paaiškėjo, ką reikia gerinti konstrukcijoje. Pirma, šiame ęsdinimo įrenginyje - pastovus sukimosi greitis, kuris yra per didelis. Antra, tirpalo vonelę sukurta iš nepermatomos medžiagos, o tai apsunkina ęsdinimo proceso stebėjimą ir tirpalo kiekio nustatymą. Šiuo metu šios konstrukcinės pataisos yra įvertinamos ir bus pateiktas naujas įrenginio variantas su dviem viena aplink kitą besisukančiomis kasetęmis.

3. 2 SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklo pasyvacijos optimizavimas

3.2.1 Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistema

2007 metais SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklo pasyvacijos proceso optimizavimui UAB “Vilniaus Ventos puslaidininkiai” bendradarbiaudama su

UAB “Melrada” sukūrė difuzinės krosnies monitoringo sistemą, padedančią stebėti stiklo pasyvacijos procesą. Ši monitoringo sistema skirta aukštoms temperatūroms ir dujų srautams matuoti. Numatyta galimybė temperatūrą matuoti ir su kitų termoporų tipais. Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos blokai RS485 per nuoseklaus interfeiso keitiklį RS232/485 sujungti kabeliais su kompiuterio pagrindinio bloko RS232 lizdo stendo bloku. Ši monitoringo sistema leidžia stebėti stiklo lydymo procesą realiaame laike. Pasirenkamieji prametrai yra nustatomi stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos matavimo programos lange “Parametrai” (3.2.1 pav.).

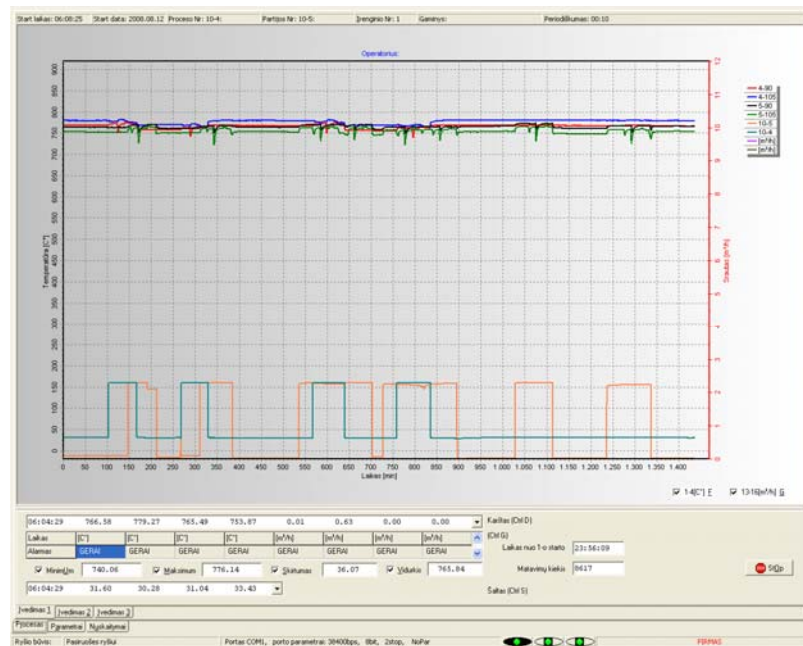


3.2.1 pav. Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos matavimo programos “Parametrai” langas.

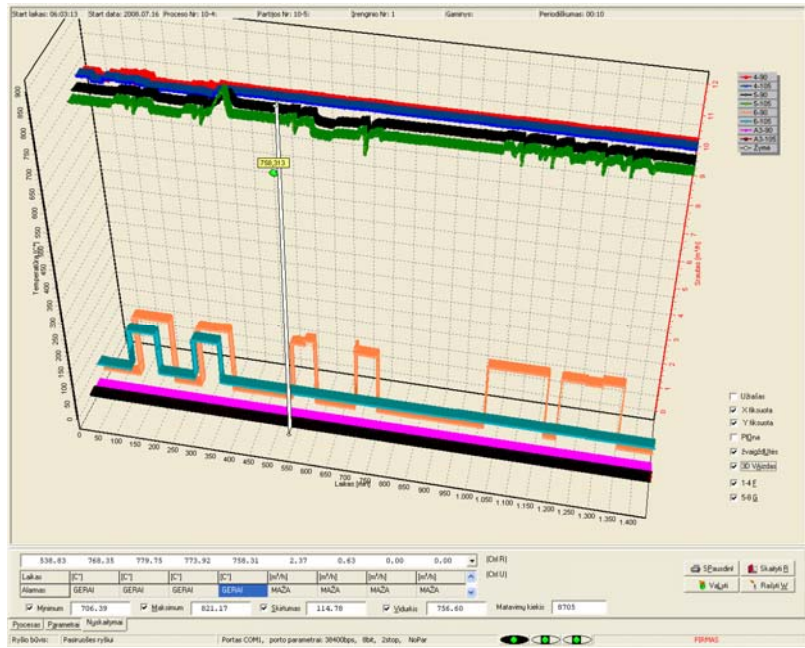
Šiame lange išskirtos funkcinės zonos “Parametrai temperatūrų kanalui” ir “Parametrai srauto kanalui” – rodo arba priskiria dvylikos temperatūrinių kanalų režimus, kuriuos galima matyti arba keisti šio lango zonoje

“Nustatykite šio kanalo parametrus”. Jei norima, kad programa duotų garsinį pranešimą, kai temperatūra išeina iš užduotų ribų – reikia pažymėti langelius “Leisti aliarmą viršutinės ribos max” ir “Leisti aliarmą apatinės ribos min” bei į atitinkamus langus įrašyti temperatūros arba srauto reikšmes. Lange “Vartotojo korekcijos koeficientas” pasirenkamas atitinkamo kanalo koeficientas. Lange “Naudoti korekcijų lentelę” pasirenkama reikiamos termoporos korekcinė lentelė. Visa tai atliekama kiekvienam kanalui atskirai. Režimo “Periodiškumas” langeliuose “min” ir “sek” nustatomas temperatūros matavimo režimo periodiškumas nuo 10 sekundžių iki 9 minučių.

“Gaminio tipas”, “Operatorius”, “Pastabos” įrašomi atitinkami informaciniai duomenys, kurie atsiranda pagrindinio lango “Procesas” “Įvedimas 1” arba “Įvedimas 2”, “Įvedimas 3” viršutinėje dalyje (3.2.2 pav.), bei užrašo į duomenų kaupimo bylą. “Procesas” “Įvedimas 1” arba “Įvedimas 2”, “Įvedimas 3” lango apačioje kairėje rodoma visų keturių kanalų reali temperatūra bei apatiniame langelyje dar nustatoma šalto kontakto temperatūra ir keturi kanalai dujų srautams.



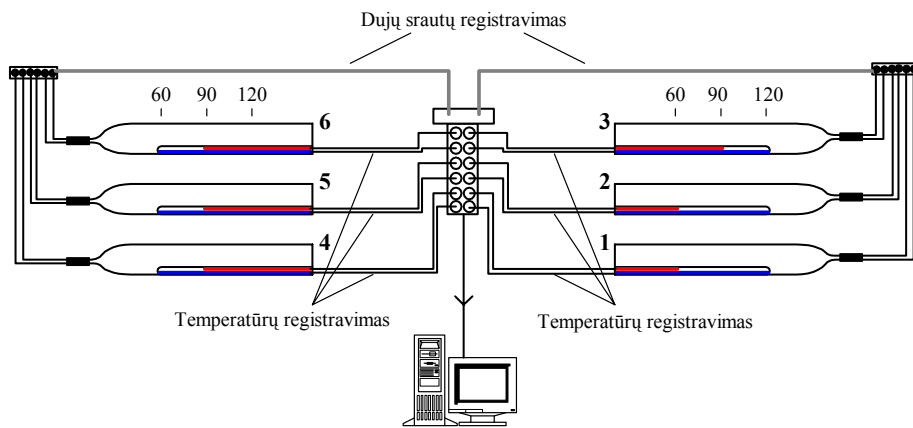
a)



b)

3.2.2 pav. Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos matavimo programos “Procesas” “Įvedimas 1” langas (a) ir stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos matavimo programos “Nuskaitymai” langas 3D režime (b). Čia pateikiami dviejų difuzinių vamzdžių visos paros temperatūros ir dujų srauto stebėjimo rezultatai.

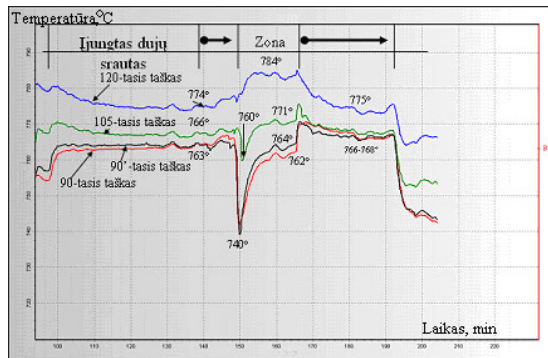
Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistema sukurta šešiams lydymo vamzdžiams (3.2.3 pav.).



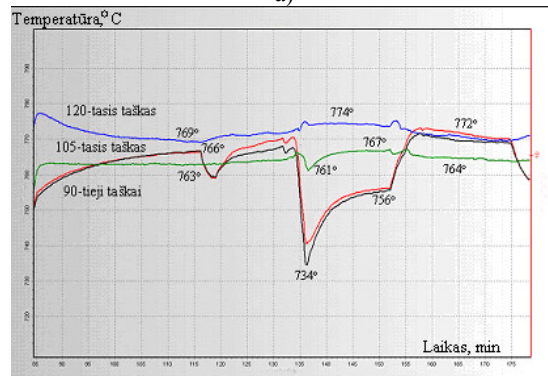
3.2.3 pav. Stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistemos schema.

Termoporos išdėstytos 90-tajame ir 120-tajame difuzinio vamzdžio taške, būtent šioje zonoje stovi silicio karbido kasetė su plokštelėmis išskyrus vamzdžius Nr. 1 ir Nr. 2. Šiuose vamzdžiuose džiovinamas pirmo ir antro stiklo sluoksniai, todėl, termoporos išdėstytos 60-tajame ir 120-tajame taške (platesnė temperatūrinė zona). Atskirais kanalais registruojami O₂ dujų srautai.

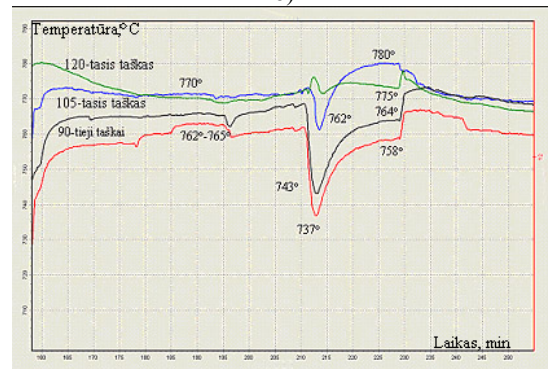
3.2.4 paveiksle iliustruojamas tyrimas, kurio metu buvo tikrinamos temperatūros pirmo stiklo lydymo metu skirtinguose difuziniuose vamzdžiuose. Šio tyrimo metu patikrinti vamzdžiai Nr. 3 – 5. Temperatūros tikrintos 90 – tajame, 105 – tajame ir 120 – tajame taške. Antrasis taškas pasirinktas neatsitiktinai, nes būtent 90 – 105 intervale lydymo metu stovi karbidinė kasetė su plokštelėmis (karbidinės kasetės ilgis 120 mm). Šių temperatūrinių profilių patikros tikslas buvo patikrinti 120-tojo taško informatyvumą. Tam tikslui



a)



b)



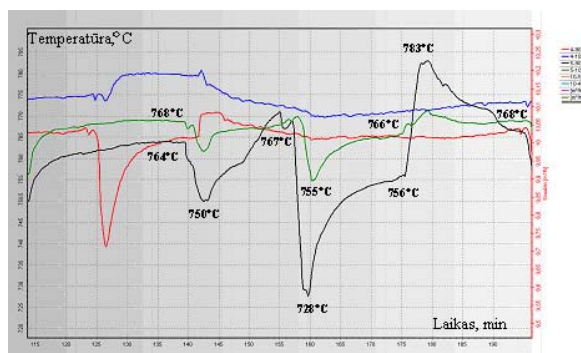
c)

3.2.4 pav. Pirmojo stiklo lydymo temperatūrų kitimas skirtinguose difuziniuose vamzdžiuose (a–temperatūrinis profilis vamzdyje Nr. 4 (pagal 3.2.3 pav. numeraciją), b–temperatūrinis profilis vamzdyje Nr. 5, c–temperatūrinis profilis vamzdyje Nr. 3. Registruojamos temperatūros skirtinguose difuzinio vamzdžio vietose: 90, 105 ir 120 tuosiuose taškuose.

pagaminta papildoma termoporų sistema, kurioje registruojamos temperatūros 90' (sutampa su realiu 90-tuoju tašku) ir 105 taške. Įjungus dujas, difuziniame vamzdyje nusistovi temperatūra, kasetei su plokštelėmis įėjus į temperatūrinę zoną, temperatūra krenta iki ~740°C ir atsistato iki pradinės. Pastebėta, kad 120-tojo taško temperatūra nėra informatyvi, nes parodo kaip veikia difuzinė krosnis įeinant kasetei į temperatūrinę zoną (paduodama įtampa, temperatūros palaikymui). Iš šių tyrimų seka išvada, kad 105-tasis vamzdžio taškas yra informatyvesnis, nes karbidinė kasetė su plokštelėmis stovi tarp 90-tojo ir 105-tojo taško. Tokiu būdu 120-tasis taškas buvo eliminuotas iš monitoringo sistemos ir termopora pastumta į 105-tąjį tašką.

3.2.2 V_{DRM} ir V_{RRM} parametru priklausomybė nuo $SiO_2-PbO-Al_2O_3-B_2O_3$ stiklo lydymo proceso

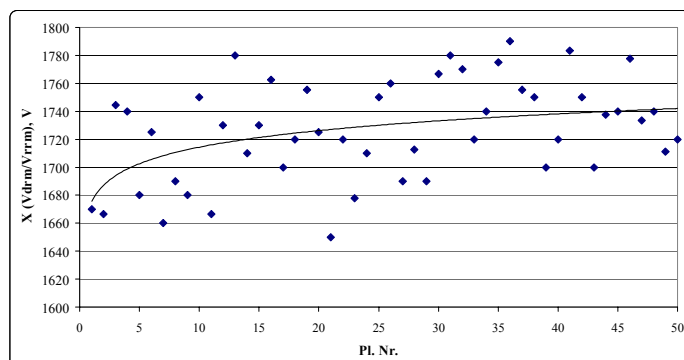
Šio eksperimento tikslas išsiaiškinti kaip V_{DRM} ir V_{RRM} parametrus įtakoja plokštelės pozicija difuziniame vamzdyje, pirmojo stiklo lydymo metu. Visos 50 plokštelių sunumeruotos pagal tai, kaip stovėjo temperatūrinėje zonoje pirmojo stiklo lydymo metu. Pl. Nr. 1 – prie kasetės kablo, plokštelė Nr. 50 – prie dujų. Eksperimentas atliktas vamzdyje Nr. 5. 3.2.5 paveiksle pateiktas pirmojo stiklo lydymo temperatūrinis profilis.



3.2.5 pav. Pirmojo stiklo lydymo temperatūrinis profilis.

Juoda linija – 90-tasis taškas, kuriame stovi plokštelė Nr. 1, žalia linija – 105-tasis taškas, kuriame stovi plokštelė Nr. 50. Įvažiuojant plokštelėms į temperatūrinę zoną, šiuose taškuose temperatūros susilygino iki 767°C. Įėjus į temperatūrinę zoną, 90-tajame taške temperatūra nukrito iki 728°C, o 105-tajame iki 755°C. Plokštelėms išstovėjus temperatūrinėje zonoje 16 min,

temperatūrų skirtumas tarp šių taškų buvo 10°C. Tokiu būdu plokštelė Nr. 50 visą laiką išstovėjo didesnės temperatūros zonoje negu plokštelė Nr. 1. Šių temperatūrų poveikį matysime tolimesnėje analizėje.

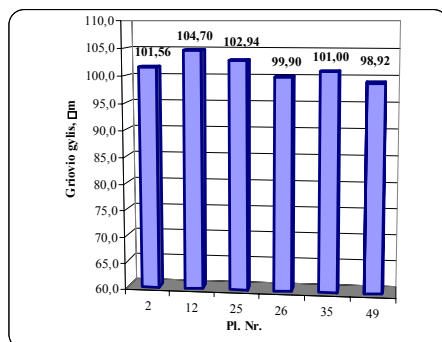


3.2.6 pav. V_{DRM} ir V_{RRM} verčių kitimas pirmo stiklo lydymosi temperatūroje.

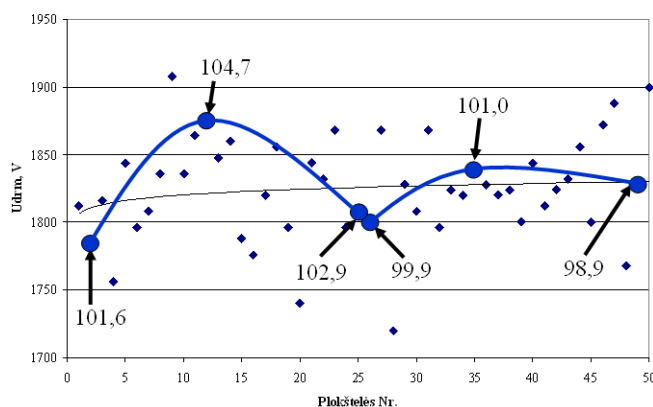
Visose plokštelėse (1 – 50) pamatuotos statistinės V_{DRM} ir V_{RRM} vertės, 5 taškai per plokštelę, iš viso 250 matavimų. Paveiksle 3.2.6 pateikiamas V_{DRM} ir V_{RRM} pramušimo verčių vidurkis. Iš šiame paveiksle aproksimuotos kreivės matyti, kad pramušimo vertės ties dujų padavimo sistema yra didesnės (pl. Nr. 50).

Žinoma, pastebimas didelis pramušimo įtampų verčių kitimo intervalas greta stovėjusiose plokštelėse, nors joms sudarytos vienodos pirmojo stiklo lydymo sąlygos. Tuo pačiu nebuvo vertinami griovių gylių verčių pasiskirstymai. Šis eksperimentas informatyvus dėl V_{DRM} ir V_{RRM} pramušimo verčių pasiskirstymo temperatūrinėje zonoje nustatymo atskirose plokštelėse. Tačiau reikia nepamiršti, kad atlikti statistiniai matavimai (250 matavimų), o ne matuoti visi kristalai plokštelėse, tai sudarytų 6000 matavimų.

Pakartosime tą patį eksperimentą, įvertinant griovių gylius. Šiam eksperimentui panaudota 50 plokštelių su sudaryta tiristorine struktūra. Plokštelės sunumeruotos nuo 1 iki 50, plokštelės nuo 1 iki 25 ėsdintos pirmajame ėsdinime, o likusios antrajame (į vieną ėsdinimą telpa 25 plokštelės). Šio tyrimo griovių gylių vertės pateiktos 3.1.7 lentelėje ir 3.1.14 paveiksle.



3.2.7 pav. Griovių gylių pasiskirstymas kasetėje pagal plokštelių išsidėstymą abiejuose ėsdinimuose. Plokštelės Nr. 1 – 25 – pirmasis ėsdinimas, plokštelės Nr. 26 – 50 – antrasis ėsdinimas.



3.2.8 pav. V_{dmm} priklausomybė nuo griovio gylio ir plokštelių išsidėstymo pirmojo stiklo lydymo temperatūrinėje zonoje.

Paveiksle 3.2.7 parodytas abiejų ėsdinimo procesų griovelių gylių pasiskirstymas plokštelėse. Pirmojo ėsdinimo griovelių gyliai matuoti plokštelėse Nr. 2, Nr. 12. ir Nr. 25. Antrojo ėsdinimo griovelių gyliai matuoti plokštelėse Nr. 26, Nr. 35. ir Nr. 49. Tiek pirmajame tiek ir antrajame ėsdinimuose, griovelių gylių verčių kitimo intervalas skirtingose plokštelėse yra $2 \div 3 \mu\text{m}$. Antrojo ėsdinimo gyliai μm seklesni už pirmojo ėsdinimo. Sandūros gylis šiose struktūrose yra $60 \mu\text{m}$, skirtingi gyliai išėsdinti, tam, kad pastebėtume pramušimo įtampų skirtumą. Šioms plokštelėms atliktas šviežinimas, užnešta pirmojo stiklo masė, kuri išdžiovinta 516°C temperatūroje, N_2 ir O_2 atmosferoje ir išlydytas stiklas 760°C temperatūroje. Pirmojo stiklo lydymo metu, plokštelės išdėstytos vamzdyje kaip ir prieš tai buvusio eksperimento metu. Antrojo ėsdinimo plokštelės, su seklesniu

grioveliu, stovėjo arčiau dujų sistemos ir aukštesnėje temperatūroje. Šiame eksperimente statistiškai matuota tiesioginės krypties V_{DRM} vertė (5 kristalai iš 120). Tiesioginės krypties V_{DRM} vertės priklausomybė nuo griovelio gylio ir plokštelių išsidėstymo, pirmojo stiklo lydymo temperatūrinėje zonoje, pateikiama 3.2.8 paveiksle. Šiame paveiksle matome, kad V_{DRM} reikšmės atkartoja griovio gylio pasiskirstymus (3.2.7 pav.), nepriklausomai nuo plokštelės padėties pirmojo stiklo lydymo temperatūrinėje zonoje. Griovelio gylis apsprendžia pramušimo įtampos vertę, o stiklo lydymo procesas – pramušimo įtampos charakteristikos pavidalą.

3.3 Deimanto tipo (*a*:C-H) anglies dangos pasyvacija

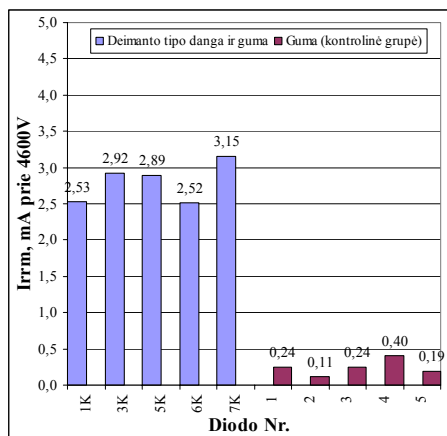
Šio skyriaus tikslas yra panaudoti (*a*:C-H) pasyvacijos dangą ant tiristorinių ir diodinių struktūrų, gaminamų UAB „Vilniaus Ventos Pustlaidininkiai“. Atliekant eksperimentinius tyrimus svarbiausias rodiklis yra nuotėkio srovės kambario ir aukštoje temperatūrose, todėl eksperimentų vertinimui pasirinkta nuotėkio srovė prie aukštų įtampų ir atbulinės įtampos prie užduotų nuotėkio srovių. Kai kuriems eksperimentams buvo atlikti XPS spektroskopijos ir Ramano sklaidos sp^2/sp^3 santykio tyrimai.

Skyrius, kuriame aptariamas (*a*:C-H) dangos panaudojimas pasyvacijai buvo atliktas BPD 2004-ERPF-3.1.7-06-06/0021 projekto „Aukštavolčio didelės galios valdomo išjungimo tiristoriaus (VIT) konstrukcijos ir technologinių procesų taikomieji moksliniai tyrimai“ skyriuje „Deimanto tipo (*a*:C-H) elektriškai aktyvios pasyvacijos tyrimai“.

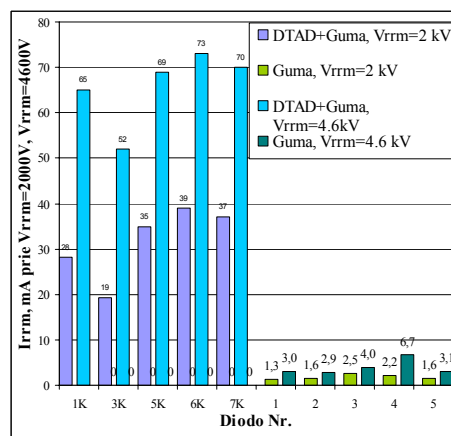
3.3.1 Deimanto tipo (*a*:C-H) pasyvacijos dangų nuotėkio srovių ir atbulinės įtampos tyrimai

Šiame tyrime paruošti standartiniai apvalūs diodai (bandinių numeracija K1, K3, K5, K6 ir K7) ir užneštos (*a*:C-H) pasyvacijos dangos, nusodintos A1 ir A2 režimais, taip pat ant bandinių užnešta guma. Nuotėkio srovės ir atgalinės įtampos matuotos kambario $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$ ir $T_{\text{max}}=150^{\circ}\text{C}$

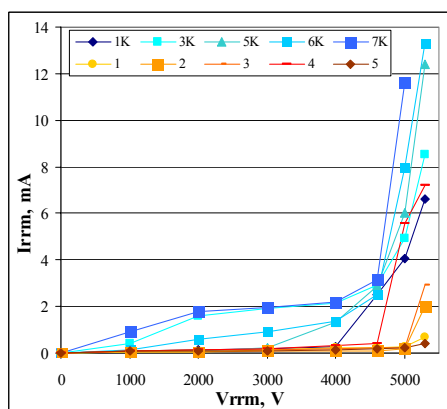
temperatūrose. K3 pavyzdys padengtas A1 režimu 2 kartus. Atlikti nuotėkio srovių matavimai $T_{kamb.}=25^{\circ}\text{C}$ ir $T_{max}=150^{\circ}\text{C}$ temperatūrose, kai paduota 4600V įtampa. Palyginimui pateikiami panašūs matavimai, kai pasyvacijai naudojama tik kaučiukinė guma (standartinis plačiai vartojamas būdas). Rezultatai parodyti 3.3.1 pav., 3.3.2 pav., 3.3.3 pav. ir 3.3.4 pav.



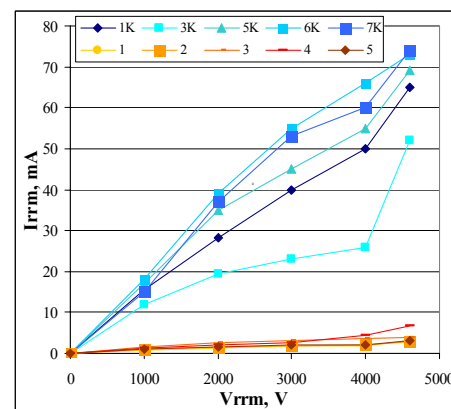
3.3.1 pav. I_{RRM} matavimai prie $T_{kamb.} = 25^{\circ}\text{C}$.



3.3.2 pav. I_{RRM} matavimai prie $T_{max} = 150^{\circ}\text{C}$.



3.3.3 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{kamb.}=25^{\circ}\text{C}$.

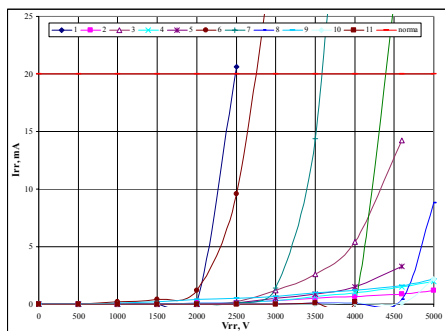


3.3.4 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{max}=150^{\circ}\text{C}$.

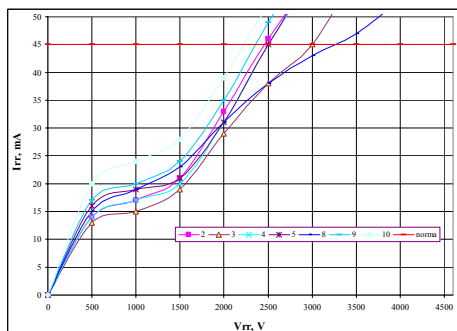
Tiek nuotėkio srovių, tiek ir pramušimo įtampų vertės gautos blogesnės (a:C-H) pasyvacijos nei standartinė gumos pasyvacija. I_{RRM} vertės DTAD didesnės už gumą pasyvuotas net tris kartus (3.3.1 pav.), tuo tarpu prie $T_{max} = 150^{\circ}\text{C}$, tas santykis išauga iki 15 kartų tiek prie $V_{RRM} = 2\text{kV}$, tiek ir prie $V_{RRM} = 4,6\text{kV}$. Ženklesnis skirtumas yra bandinyje 3K, kuris A1 režimu buvo užnešinėjamas du kartus. Šio bandinio matavimai kambario temperatūrose nedaug skiriasi nuo likusių bandinių matavimų (3.3.1 pav. ir 3.3.3 pav.),

tačiau prie maksimalių temperatūrų $T_{\max} = 150^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{RRM}} = 19 \text{ mA}$, ties $V_{\text{RRM}} = 2 \text{ kV}$, o ties $V_{\text{RRM}} = 4,6 \text{ kV}$ jo vertė siekia $I_{\text{RRM}} = 52 \text{ mA}$ (3.3.2 pav. ir 3.3.4 pav.). Darome išvadą, kad auginant kuo storesnį DTAD sluoksnį, gaunamos geresnės charakteristikos.

Antrajame eksperimentų plane tyrimams paruošti pavyzdžiai (11 vnt.) paimti iš įmonės produkcijos, piešinio formavimas atliktas su fotorezistu, po ($a:C-H$) padengimo fotorezistas nuimtas. Šio tyrimo tikslas yra išsiaiškinti ar tie patys bandiniai, kurie turi mažas nuotėkio srovės kambario temperatūroje, pasižymi atitinkamai žemomis nuotėkio srovių vertėmis ir prie maksimalių temperatūrų. Atlikti diodų grupės ($a:C-H$) pasyvacijos dangų nuotėkio srovių nuo atbulinės įtampos tyrimai $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$ ir $T_{\max}=150^{\circ}\text{C}$ temperatūrose. Rezultatai pateikiami 3.3.5 pav. ir 3.3.6 pav., kur „norma“ nurodoma technologinių specifikacijų riba, kuri prie $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$ yra $I_{\text{RRM}} = 20 \text{ mA}$, o prie $T_{\max}=150^{\circ}\text{C}$ yra $I_{\text{RRM}} = 45 \text{ mA}$.



3.3.5 pav. $I_{\text{RRM}}(V_{\text{RRM}})$ matavimai prie $T_{\text{kamb.}} = 25^{\circ}\text{C}$.

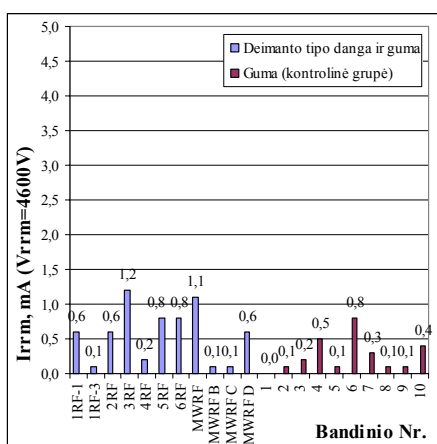


3.3.6 pav. $I_{\text{RRM}}(V_{\text{RRM}})$ matavimai prie $T_{\max} = 150^{\circ}\text{C}$.

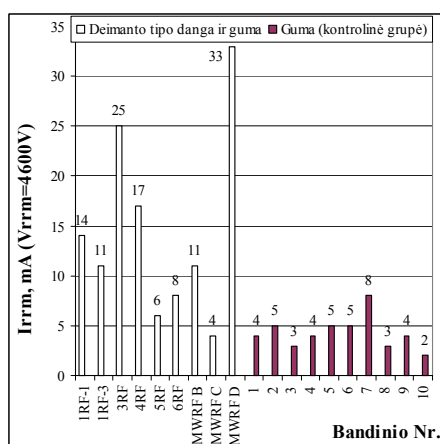
Kaip matome iš 3.3.5 paveikslo didelėmis nuotėkių srovių vertėmis prie $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$ pasižymi bandiniai Nr. 1, 6, 7, 11, kuriuose $I_{\text{RRM}} = 20 \div 57 \text{ mA}$ ($V_{\text{RRM}} = 2 \text{ kV} \div 4 \text{ kV}$). Antroji grupė yra Nr. 3 ir Nr. 8, kuriuose $I_{\text{RRM}} = 8 \div 14 \text{ mA}$ ($V_{\text{RRM}} = 4,5 \text{ kV} \div 5 \text{ kV}$). Trečioje grupėje (bandiniai Nr. 2, 4, 5, 9, 10) I_{RRM} neviršija 5 mA prie $V_{\text{RRM}} = 5 \text{ kV}$ (3.3.5 pav.). Prie $T_{\max}=150^{\circ}\text{C}$ I_{RRM} vertes iki 45 mA turi bandiniai Nr. 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 iš antrosios ir trečiosios grupės (3.3.6 pav.). Tie bandiniai, kurie turėjo mažiausias I_{RRM} vertes prie kambario

temperatūros, pasižymėjo ir mažesnėmis I_{RRM} vertėmis prie maksimalių temperatūrų (3.3.5 pav. ir 3.3.6 pav.).

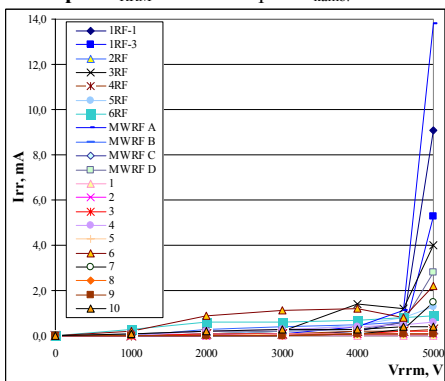
Trečiame eksperimentų plane buvo tyrinėti skirtingi užnešimo režimai ir skirtingi nusodinimo įrenginiai. Įrenginyje Nr. 1 bandiniai 1RF-1 ir 1RF-3 užnešti B1 režimu, o bandiniai 2RF, 3RF, 4RF, 5RF ir 6RF B2 režimu. Įrenginyje Nr. 2 bandiniai MWRF A, MWRF B, MWRF C ir MWRF D užnešti B3 režimu. Atlikti nuotėkio srovių matavimai $T_{kamb.}=25^{\circ}C$ ir $T_{max}=150^{\circ}C$ temperatūrose, kai $V_{RRM}=4600V$. Palyginimui pateikiami panašūs matavimai, kai pasyvaciai naudojama tik kaučiukinė guma (standartinis, plačiai naudojamas būdas). Rezultatai parodyti 3.3.10 pav., 3.3.11 pav., 3.3.12 pav. ir 3.3.13 pav.



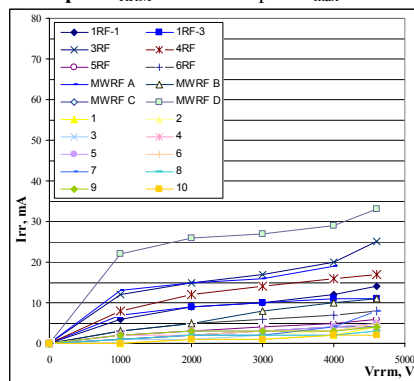
3.3.7 pav. I_{RRM} matavimai prie $T_{kamb.} = 25^{\circ}C$.



3.3.8 pav. I_{RRM} matavimai prie $T_{max} = 150^{\circ}C$



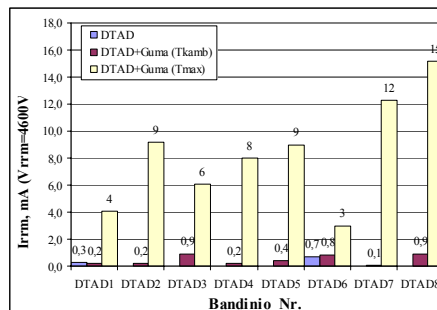
3.3.9 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{kamb.} = 25^{\circ}C$.



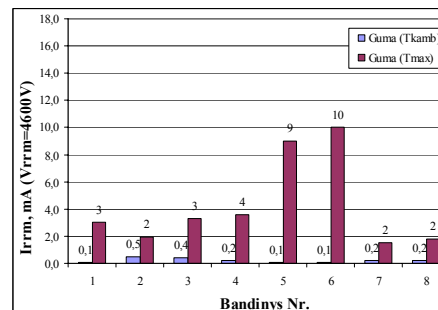
3.3.10 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{max} = 150^{\circ}C$.

Kaip matome iš 3.3.7 paveikslo, I_{RRM} vertės prie $T_{kamb.}$ yra tos pačios eilės, bandinių su DTAD - 0,5 mA, o su guma - 0,3 mA, tačiau šis santykis nėra išlaikomas prie maksimalių temperatūrų (3.3.8 pav.). Bandinių su DTAD I_{RRM} vertės išauga apie 28 kartus, kai tuo metu kontrolinės grupės pakinta tik 14 kartų. Šio eksperimento rezultatai yra priimtinesni už anksčiau nagrinėtus, nes vertės suvienodėja tiek prie kambario, tiek ir prie maksimalių temperatūrų, lyginant su 3.3.1 – 3.3.4 paveikslais. Tokiuose bandiniuose kaip 1RF-1, 1RF-3, 2RF, 4RF, 5RF, 6RF, MWRF B, MWRF C ir MWRF D prie $T_{kamb.}$ turimos nuotėkių srovių vertės susilygina su kontrolinės grupės I_{RRM} vertėmis. Prie $T_{max}=150^{\circ}C$ temperatūros tokie DTAD bandiniai kaip 5RF ir MWRF C pasiekia tik 6 mA ir atitinkamai 4mA, kai tuo tarpu bandiniuose su guma turimas I_{RRM} verčių intervalas yra $2 \div 8$ mA (3.3.8 pav. ir 3.3.10 pav.).

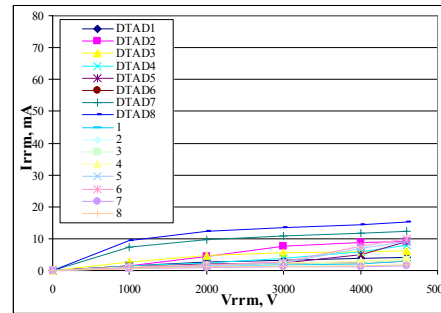
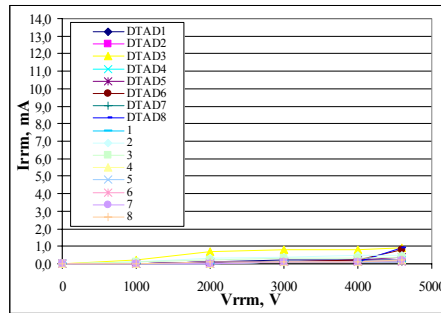
Ketvirtame eksperimentų plane pateikiame 8 bandinius užneštus DTAD ir 8 bandinius užneštus su guma. Šiame eksperimente bandiniai buvo matuojami prieš gumos užnešimą, tačiau prie $V_{rrm} = 4600V$ pavyko pamatuoti tik bandinius DTAD1 ir DTAD6 (3.3.11 pav.). Bandiniai, užnešus gumą išmatuoti $T_{kamb.}=25^{\circ}C$ ir $T_{max}=150^{\circ}C$ temperatūrose (3.3.11 pav.), kaip matome, šiuo atveju I_{RRM} vertės yra tos pačios eilės kaip ir kontrolinės grupės su guma (3.3.12 pav.).



3.3.11 pav. DTAD bandinių matavimai.



3.3.12 pav. Kontrolinės grupės matavimai



3.3.13 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{kamb.} = 25^{\circ}\text{C}$. 3.3.14 pav. $I_{RRM}(V_{RRM})$ matavimai prie $T_{max} = 150^{\circ}\text{C}$.

Pagal $I_{RRM}(V_{RRM})$ priklausomybes (3.3.13 pav. ir 3.3.14 pav.) matome, kad šiame eksperimente pavyko gauti vienodas I_{RRM} vertes tiek bandiniuose, kuriuose užneštos DTAD dangos, tiek tuose, kur užnešta pasyvuojanti guma. Iš 3.3.1 – 3.3.14 paveikslų sekos matome, kad šis metodas yra tinkamas I_{RRM} nuotėkių mažinimui, tik reikalingas DTAD dangų užnešimo režimų atidirbimas ir pritaikymas gamybos technologijai.

3.3.2 Deimanto tipo (a:C-H) pasyvacijos dangų tyrimai XPS ir Ramano sklaidos spektroskopijos metodais

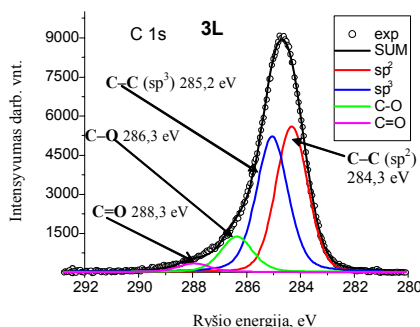
Kaip minėta aukščiau, deimanto tipo anglis yra netvarkingas C atomų mišinys su sp^2 ir sp^3 hibridizacijomis. sp^3 ryšys DLC (Diamond Like Carbon) suteikia daug gerų taikomųjų mechaninio atsparumo ir cheminio bei elektrocheminio inertiškumo savybių. Tuo metu kai sp^2 ryšys kontroliuoja elektronines ir optines savybes sp^3/sp^2 anglies atomų santykis yra vienas svarbiausių rodiklių, apsprendžiančių DLC dangų savybes. Šiuos ryšius galima nustatyti ir įvertinti rentgeno spindulių fotonų spektroskopijos metodu (XPS). Mums svarbu sužinoti, kuris iš šių ryšių vyrauja mūsų tiriamose dangose, koks jų santykis, kad įvertintume dangų tinkamumą galios prietaisų pasyvacijai. Taip pat atlikti Ramano sklaidos spektro tyrimai kitu metodu, kad įvertintume DLC dangų struktūros įvairių procesų metu užneštose dangose.

Siekiant išsiaiškinti tirtų bandinių paviršiaus cheminę sudėtį, rentgeno fotoelektronų spektrai buvo užrašomi plačiame elektronų kinetinės energijos intervale (0÷1000) eV. Identifikavus cheminius elementus, tolimesni tyrimai

vykdomi registruojant atskirų cheminių elementų rentgeno fotoelektronų spektrus siauruose energetiniuose intervaluose (iki 50 eV), išlaikant vienodą kinetinės energijos kitimo žingsnį – 50 meV.

Tirti bandiniai - 00L, kur silicio oksido paviršius neuždengtas plėvele, ir 3L(DTAD6), kur DLC plėvelė auginta ant Si. Bandinio 00L paviršiaus elementinė sudėtis yra: C – 91,6%, O – 8,1%, Si – 0,3%, o 3L: C – 86,2%, O – 13,8%. Bandinių paviršiuje randamas deguonis, kuris nėra adsorbuotas molekulinis deguonis, bet sudaro cheminius ryšius su anglimi. Tokį faktą patvirtina anglies C 1s rentgeno fotoelektronų spektras, kuriame aiškiai išskiriama anglis, turinti ryšius su deguonies atomais (3.3.15 pav.).

Vertinant skirtingą anglies ryšio charakterį, buvo įskaitomi tik ryšiai tarp anglies atomų, t.y. neįskaityti anglies atomai sudarę cheminius ryšius su deguonimi ir su siliciu. Santykinis elektronų orbitalių hibridizacijos vertinimas atliktas pagal dviejų kreivių aprašomus plotus (sp^2 hibridizacija – smailė (284,2-284,3) eV ir sp^3 hibridizacija – smailė (285,2-285,2) eV). Lentelėje 3.3.1 pateikti matuotų bandinių rezultatai.



3.3.15 pav. Anglies C 1s rentgeno fotoelektronų spektras bandinyje 3L. Atskiri taškai – eksperimentinis rezultatas, Ištininės linijos- spektro matematinis išdėstymas į atskiras dedamąsias ir visų dedamųjų suma.

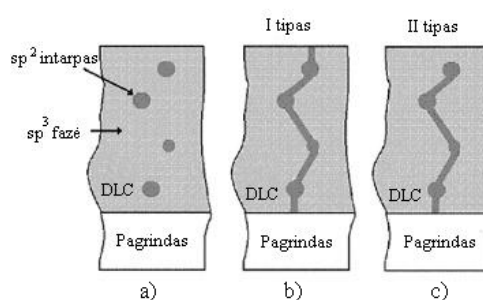
3. 3.1 lentelė. Bandinių sp^3/sp^2 hibridizacijos tyrimo rezultatai

Bandinys	Kreivės plotas smailė 284,2 eV	Kreivės plotas smailė 285,2 eV	sp^2 hibridizacija, %	sp^3 hibridizacija, %	Santykis sp^3/sp^2
00L	13113,5	6917,4	65,5 %	34,5 %	0,53
3L	8900,0	8700,0	50,6 %	49,4 %	0,98
grafitas	13590,9	5270,6	72,1 %	23,9 %	0,33

Formuojantis deimanto tipo struktūroms, visi cheminiai ryšiai susidaro persiklojant 2p anglies ir 2s orbitalių elektronų banginėms funkcijoms.

Susiformuoja p-σ valentinė juosta, kurioje elektronų energetinė būseną 7,4 eV. Kai formuojasi grafitui būdinga struktūra – tai persikloja tik dviejų 2p ir 2s anglies orbitalių elektronų banginės funkcijos, o dar vienas ryšys susidaro persiklojant p_z elektronų banginėms funkcijoms, ir susiformuoja p-π valentinė juosta arti 2,8 eV [87]. Tokiu būdu valentinių elektronų spektras tiesiogiai atspindi anglies cheminio ryšio charakterį – grafito tipo medžiagos juostoje p-σ turėtų būti mažesnis būsenų tankis, nei deimanto tipo medžiagoje. Grafito valentinių elektronų spektre neįmanoma išskirti atskirų valentinių juostų p-π ir p-σ, matomas tik išplitęs kraštas. Tuo metu, visų DLC plėvelių valentinių elektronų spektruose p-σ juosta jau išskiriama.

Bandinys 3L pasižymi ne tik didžiausiu anglies kiekiu, kurios cheminio ryšio charakteris atitinka sp^3 hibridizaciją, bet ir mažiausiu paviršinio krūvio nutekėjimu, t.y. matavimo metu paviršiuje susikaupia didžiausias elektrinis krūvis. Tai paprastai matoma visose izoliacinėmis savybėmis pasižyminčiose



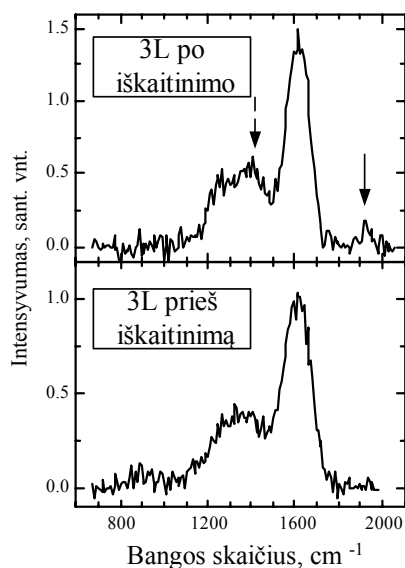
3.3.16 pav. DLC plėvelės modelis (a) ir susiformuojantys nanokanalai: tipas I (b) susidaro transformuojantis fazei sp^3 į fazę sp^2 , o tipas II (c) susidaro dėl struktūrinių defektų atsirandančių tarp gretimų grafitinių klasterių intarpų. [88].

plėvelėse. Kai izoliacinė plėvelė suformuojama ant metalo ar puslaidininkio, tai jos paviršiuje susikaupiantį krūvį kompensuoja krūvio nešėjai, atėję iš padėklo, jei plėvelės storis yra nedidelis. Net geros kokybės DLC plėvelėse transformuojantis fazei sp^3 į fazę sp^2 gali susidaryti nanokanalai [88]. Paveiksle 3.3.16 parodyti tokių darinių formavimosi modeliai: I – susidaro transformuojantis fazei sp^3 į fazę sp^2 , II – susidaro dėl struktūrinių defektų, atsirandančių tarp gretimų grafitinių klasterių intarpų.

DLC plėvelių paviršiuje randamas deguonis ir anglis susijungusi su deguonimi. Siekiant išsiaiškinti ar tai būdinga tik paviršiui, buvo bombarduojama argono jonais norint išvalyti plėveles. Argono jonų kinetinė energija nustatyta 2 keV, o poveikio trukmė – 30 minučių. Toks tyrimas buvo

atliktas 3L bandiniui ir grafitui. Po valymo grafito bandinyje deguonies sumažėjo nežymiai. Švelnus valymas nedidelės kinetinės energijos argono jonais neardė pačios struktūros, nes jei būtų priešingai, tai grafito bandinio santykis sp^3/sp^2 turėtų nesumažėti, o padidėti. Bandinio 3L DLC paveikus argono jonais, santykis sp^3/sp^2 sumažėjo. Paprastai DLC plėvelėse tiek aukštatemperatūrinis kaitinimas vakuume, tiek bombardavimas argono jonais sumažina sp^3/sp^2 santykį, t.y. ardomas tetraedrinis anglies atomų išsidėstymas [89], tokį rezultatą mes ir gauname bandinyje 3L.

Ramano sklaidos tyrimai atlikti su žadinančiu lazeriu, kurio bangos ilgis – 325 nm. Tirtu 3L bandinio Ramano spektras pateiktas 3.3.17 paveiksle. Jame be Ramano sklaidos juostų yra užfiksuotas ir foninis spektras, kuris atsiranda dėl bandinio liuminescencijos. Daugumoje Ramano sklaidos spektrų, išmatuotų ruože nuo 700 iki 2100 cm^{-1} , vyrauja dvi juostos, kurių smailės yra ties $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ (G juosta) ir 1350 cm^{-1} (D juosta). Pirmoji juosta paprastai yra siejama su grafito struktūra. Ji atitinka tįsimo svyravimus sp^2 taškuose, esančiuose tiek sp^2 grandinėse, tiek ir aromatiniuose žieduose. Antroji juosta (1350 cm^{-1}) siejama su svyravimais netvarkingoje sistemoje ir atitinka „kvėpavimo“ modas sp^2 žieduose [90, 91]. Šių dviejų juostų intensyvumo santykį galima panaudoti bandinių struktūros apibūdinimui ir palyginimui [92-94].



3.3.17 pav. Bandinio 3L Ramano sklaidos spektrai. Apatinė dalis eksperimentinis rezultatas prieš kaitinimą; viršutiniai spektrai – po iškaitinimo.

Bandinys 3L po XPS ir Ramano sklaidos tyrimų atkaitintas 420°C temperatūroje, H₂ atmosferoje ir vėl atlikti XPS spektrometriniai bei Ramano sklaidos tyrimai. Silicio matosi daugiau todėl, kad dar labiau suplonėjo plėvelė ištrupėjusiose srityse ir spektruose tiesiog matomi Si 2p elektronai iš padėklo. Plėvelės eroziją iškaitinant vandenilio atmosferoje stebėjo ir H. Nakazawa [95], tiesa, publikuotame darbe aprašomos plėvelės buvo kaitinamos 400°C temperatūroje, tačiau po 15 minučių iškaitinimo Ramano sklaidos tyrimai neberodė jokio anglies sąlygoto signalo. Bandinyje 3L po iškaitinimo C intensyvumas 1s fotoelektronų spektre didėja ties energija 284 eV. Galima teigti, kad tikrai neįvyksta paprastas anglies ryšio charakterio pokytis, greičiau vykstančius procesus apsprendžia plėvelės erozija. Šis bandinys po kaitinimo vandenilio atmosferoje taip pat buvo tikrinamas Ramano sklaidos tyrimo metodu. Šio bandinio Ramano sklaidos spektrai yra pateikti paveiksle 3.3.17. Po kaitinimo vandenilio atmosferoje bandinyje 3L pastebima silpna juosta ties 1940 cm⁻¹ ir nežymiai padidėja intensyvumas ties 1420 cm⁻¹, pastarieji efektai pažymėti paveiksle 3.3.17 ištisine ir punktyrine rodyklėmis. Tai jau gali būti rodyklis, jog po bandinio 3L iškaitinimo sumažėjo plėvelės storis.

3.3.2 lentelė. Cheminių ryšių tarp anglies atomų charakterio įvertinimas 3L bandinyje, kaitintame H₂ atmosferoje.

Bandinys	Kreivės plotas smailė 284,2 eV	Kreivės plotas smailė 285,2 eV	<i>sp</i> ² hibridizacija, %	<i>sp</i> ³ hibridizacija, %	Santykis <i>sp</i> ³ / <i>sp</i> ²
3L	8900,0	8700,0	50,6 %	49,4 %	0,98
3L kaitintas	3668,9	2318	61,3 %	38,7 %	0,63

Anglies cheminių ryšių charakterio kitimas kaitinant vandenilio atmosferoje, pateiktas 3.3.2 lentelėje. Rezultatai rodo, kad bandinyje 3L *sp*³ charakterio ryšių kiekis sumažėjo po kaitinimo, nuo 49,4 % iki 38,7 %.

3.3.3 Tyrimo rezultatų apibendrinimas

Atlikti (*α*:C-H) užneštų dangų ant galios diodų tyrimai parodė, kad yra galimybė pagaminti kokybiškas (*α*:C-H) dangas aukštavolčiams prietaisams su

priimtinais nuotėkiais tiek $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$, tiek ir $T_{\text{max}}=150^{\circ}\text{C}$ temperatūrose. Bandiniuose su (α :C-H) užnešta danga gautos I_{RRM} vertės suvienodėjo tiek $T_{\text{kamb.}}=25^{\circ}\text{C}$, tiek ir $T_{\text{max}}=150^{\circ}\text{C}$ temperatūrose, lyginant su standartinės pasyvacijos gautomis I_{RRM} vertėmis. Tačiau būtina atlikti šių skirtingų pasyvacijos būdų analizę, įvertinant senėjimą laike ir aukštadažniuose bandymuose.

Visi rentgeno fotoelektronų spektroskopijos tyrimai trumpai gali būti pateikti išreiškiant santykį sp^3/sp^2 . Anglies cheminio ryšio charakterio tyrimo rezultatai bandiniui 3L: 0,98 po (α :C-H) dangos užnešimo, 0,83 po Ar jonų bombardavimo ir 0,63 po kaitinimo vandenilio atmosferoje. Ramano sklaidos tyrimai apibendrinti pateikiant D ir G juostų intensyvumų santykius 3L bandiniui: 0,65 po (α :C-H) dangos užnešimo ir 0,81 po kaitinimo vandenilio atmosferoje.

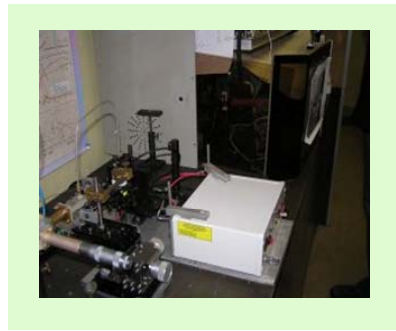
Ramano sklaidos tyrimo metodas leidžia nesunkiai įvertinti anglies cheminių ryši būdingą grafitui (sp^2 charakteris), kuri nurodo intensyvi G juosta ties 1600 cm^{-1} . Anglies atomų tetraedriniam išsidėstymui su vyraujančiu sp^3 ryšio charakteriu būdinga linija turėtų būti ties 1320 cm^{-1} , tačiau Ramano sklaidos skerspjūvis šiuo atveju yra 50-200 kartų mažesnis nei sp^2 ryšio struktūrų, kurių aromatiniuose žieduose esantys defektai sąlygoja Ramano sklaidos juostą D ties 1350 cm^{-1} [96, 97]. Dėl šios priežasties tiesioginis XPS ir Ramano sklaidos tyrimų rezultatų palyginimas yra neįmanomas, nes D ir G juostų intensyvumų santykiai labiau atspindi aromatinių žiedų su defektais kiekį, nei santykį sp^3/sp^2 . G juostos padėtis priklauso nuo tiriamos struktūros, keičiantis anglies ryšio charakteriui, stebima G juostos dispersija. Pavyzdžiui, žadinant 325 nm spinduliuote, Ramano sklaidos spektruose G juosta slenka nuo 1580 cm^{-1} grafito iki 1590 cm^{-1} deimanto tipo (α :C-H) sluoksniuose, 1610 cm^{-1} (α :C-H) polimeruose. Pažymėtina, kad tuo pačiu metu D ir G juostų intensyvumų santykis mažėja, kas parodo, jog mažėjant bendram aromatinių žiedų kiekiui mažėja ir defektinių aromatinių žiedų kiekis [96, 98]. Iškaitinimas vandenilio atmosferoje anglies susijungusios su deguonimi kiekio

nesumažina. Iškaitinimo metu vyksta plėvelės erozija, pasireiškianti plėvelės storio mažėjimu - šį faktą patvirtino abu tyrimo metodai.

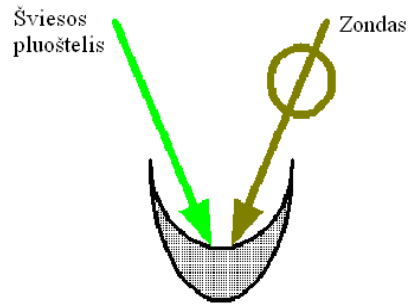
3.4 Pasyvuotųjų tiristorinių ir diodinių struktūrų paviršinės rekombinacijos izoliavimo grioveliuose tyrimas

Vienas iš svarbiausių parametru, apibūdinančių paviršiaus paruošimą, yra krūvininkų paviršinės rekombinacijos sparta. Siekiant griovių sandūros paribyje suderinti elektrinio lauko glotninimo technologiją ir diodo briaunos pasyvavimo efektyvumą, kuriamos modernesnės griovelio/briaunos pasyvavimo technologijos, pasitelkiant cheminį ėsdinimą, oksidavimą bei mezopasyvinimo technologijas [99, 100]. Šiame skyriuje ir nagrinėjami griovelio pasyvavimo ir izoliavimo technologiniai režimai, kontroliuojant paviršinę rekombinaciją.

Taip pat ištirti pramoniniai Si diodų izoliavimo dariniai: tik išėsdintuose, nepasyvuotuose grioveliuose; stiklu izoliuotuose grioveliuose be papildomo griovelio paviršiaus pasyvavimo; stiklu izoliuotuose grioveliuose, kurie prieš įlydant stiklą, buvo pasyvuojami elektrocheminio ėsdinimo būdu. Standartiškai formuojami 100 μm gylio ir 800 μm pločio grioveliai. Įprastai griovelis užpildomas SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklu, įlydomu 750÷760°C temperatūroje. Taikant elektrocheminio ėsdinimo paruošiamąją izoliavimo procedūrą, griovelio paviršiai ėsdinami 20÷180 s fluoro rūgšties (HF) - etilo spirito (H₂O₅OH) elektrolite, esant 20÷30 mA/cm² elektros srovės tankiui (plačiau apie elektrocheminį ėsdinimą 3.5 skyriuje).



a)



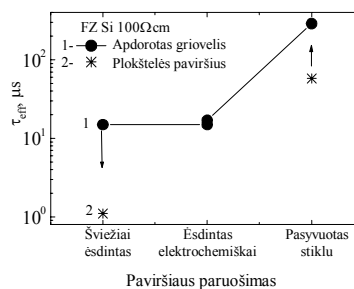
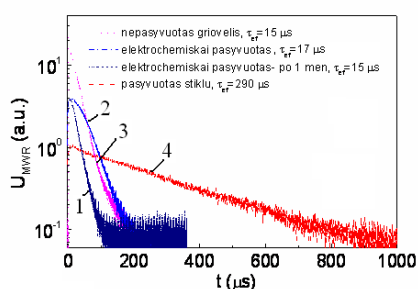
b)

3.4.1 pav. MW-PCT matavimo įranga (a), krūvininkų sužadinimas infraraudonosios (1062 nm) arba žaliosios (531 nm) šviesos lazerio pluošteliu aštriai fokusuotu į griovelio paviršių (b), ir krūvininkų tankio kitimų, dėl paviršinės ir tūrinės rekombinacijos, registravimas adatiniu-koaksialiniu 22 GHz ruožo mikrobangų zondų.

Paviršinės rekombinacijos spartos kitimai buvo tiriami nenuostoviosios mikrobangų (MW-PCT – Microwave Probed Photo Conductivity Transients – nenuostovaus fotolaidumo kinetikų matavimas zonduojant mikrobangomis) sugerties metodu [101]. Nepusiausvyrieji krūvininkai buvo sužadinami infraraudonosios (1062 nm) arba žaliosios (531 nm) šviesos lazerio pluošteliu aštriai fokusuotu į griovelio paviršių (3.4.1 pav.), 500 ps trukmės impulsais. Nepusiausvyriųjų krūvininkų tankio kitimai dėl paviršinės ir tūrinės rekombinacijos buvo registruojami adatiniu-koaksialiniu 22 GHz ruožo mikrobangų zondų. Matavimams buvo naudojamas Tektronix TDS-5104 oscilografas. Ištirti sužadintų krūvininkų gėsimio efektinės trukmės kitimai, esant įvairioms griovelio pasyvavimo būsenoms. Taip pat buvo ištirtos krūvininkų nykimo kinetikos, derinant tūrinį (1062 nm) ir paviršinį (531 nm) sužadinimą, kai iš kinetikos amplitudinio-laikinio kitimo [101] tiesiogiai išskiriamas paviršinės rekombinacijos sandas ir įvertinama paviršinės rekombinacijos sparta.

Mikrobangų sukelti fotolaidumo kitimai, matuoti struktūrose su skirtingu paviršiaus paruošimu, iliustruoti 3.4.2 paveiksle. Pagal skirtingą paviršiaus paruošimą galime išskirti perteklinių krūvininkų pernešimo charakteristikas. Trumpiausia efektyvi gyvavimo trukmė nustatyta nepasyvuotame bandinyje, o ilgiausia – stiklu pasyvuotame paviršiuje. Elektrocheminio ėsdinimo procedūra

šiek tiek padidina efektyvią gyvavimo trukmę, šis efektas laikui bėgant silpnėja.



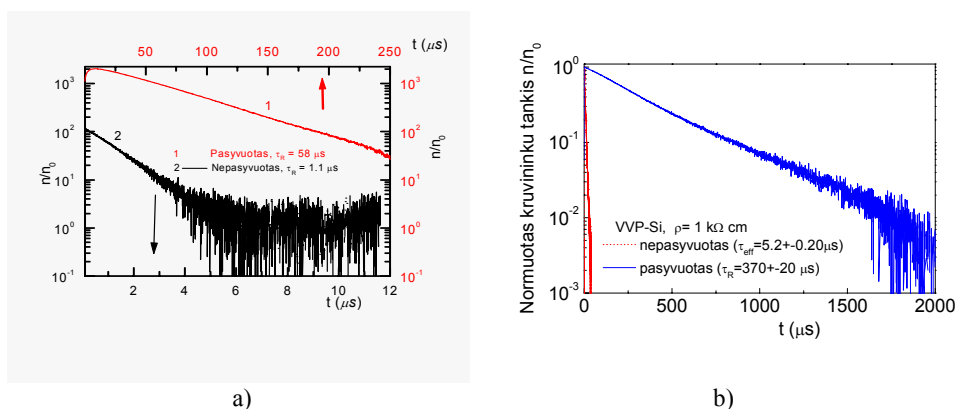
3.4.2 pav. Perteklinių krūvininkų tankio relaksacijos kitimai matuoti MW-PCT įranga, išskiriant sandūros paruošimo metodus: ėsdintas paviršius (1), ėsdintas elektrochemiškai (2) ir ėsdintas elektrochemiškai, matuojant po 1 mėnesio (3), pasyvuotas paviršius $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklu (4).

3.4.3 pav. Efektyvi gyvavimo trukmė skirtingai apdorotuose paviršiuose. Matuota bandiniuose ant nepasyvuoto pradinio Si paviršiaus ir ant pasyvuoto paviršiaus.

Efektyvios gyvavimo trukmės kitimas, pagal nagrinėtus procesus, pateiktas 3.4.3 paveiksle. Šiame paveiksle palyginamos gyvavimo trukmės charakteristikų vertės bandiniuose: jau apdorotas paviršius lyginamas su neapdorotų plokštelių paviršiumi, turinčių panašią paviršinę varžą (1) ir silicio bandiniais, padengtais jodo tirpalu (2). Pabrėžtina tai, kad efektyvi gyvavimo trukmė gana gerai charakterizuoja kokybinę paviršiaus pasyvacijos būklę.

Šiuose bandiniuose efektyvus storis skaičiuotas $d_{eff} = 60 \mu\text{m}$, nes izoliaciniuose grioveliuose šį parametą nustatyti sunku. Todėl paviršiaus rekombinacijos kitimas gali būti vertinamas lyginant efektyvias gyvavimo trukmes plokštelėse ir grioveliuose. Įvertinant krūvininkų pernašos difuziją ir efektyvų storį, paviršiaus rekombinacijos parametro s judrumas kinta nuo 100 cm/s pasyvuoto iki $5,5 \cdot 10^3$ cm/s nepasyvuoto paviršiaus. Todėl s vertės gali būti nustatytos $s \approx 600$ cm/s nepasyvuoto ir $s \ll 100$ cm/s stiklu pasyvuoto griovelio. Stiklu pasyvuotuose grioveliuose ilga efektyvi gyvavimo trukmė 300 μs reiškia tai, kad krūvininkų gesimo spartą riboja tūrio rekombinacijos

defektai. Nustatyta, kad ilga tūrio gyvavimo trukmė yra būdinga didelės savitosios varžos Si plokštelėse (3.4.4 pav.) ir pasyvacija jodo tirpalu ženkliai pailgina efektyvią gyvavimo trukmę iki $\tau_b > 350 \mu\text{s}$.



3.4.4 pav. Normalizuotas krūvininkų pernešimo trukmės pradinėje FZ Si medžiagoje su nepasyvuotu ir pasyvuotu plokštelės paviršiumi: vidutinio laidumo Si $\rho=60 \Omega\text{-cm}$ (a) ir didžiavaržio Si $\rho=1 \text{ k}\Omega\text{-cm}$ atveju (b).

Įvertinant pradinės FZ Si medžiagos tūrio gyvavimo trukmę ir panaudojant paviršiaus rekombinacijos vertę iš 2.5.2 išraiškos, nustatytas stiklu pasyvuotų griovelių $s \approx 10 \text{ cm/s}$. s verčių nustatymui pasyvuotuose grioveliuose, MW-PCT perėjimuose sudaryta dviguba sužadavimo banga. Keičiant sužadavimo bangos ilgį nuo 1062 iki 531 nm ir vertinant s vertes iš išraiškos 2.5.2 atitinkamo mažėjimo neaptikta, lyginant su 3.4.2 pav. kreive 4. Tai įrodo, kad gerai pasyvuotuose grioveliuose s vertės yra mažos. Paviršinė rekombinacija sutelkta ties sandūra, kai griovio krašto paviršius izoliuotas įlidytu stiklu.

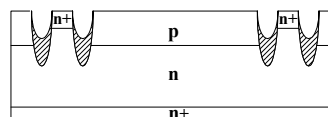
Tyrimo rezultatų apibendrinimas

Rekombinacijų charakteristikų kitimo pagalba, matuojant bekontakto MW-PCT technika, įvertinta griovelių pasyvacijos kokybė. Aptikta, kad pasyvuojant ir izoliuojant griovelio paviršius, krūvininkų efektinė gyvavimo trukmė kinta nuo 10 μs iki 300 μs . Tai atitinka paviršinės rekombinacijos

spartos sumažėjimą nuo $3 \cdot 10^3$ cm/s iki 10 cm/s, priklausomai nuo griovelio krašto paviršiaus paruošimo metodo. Efektyvi krūvininkų gyvavimo trukmė gerai pasyvuotuose izoliaciniuose grioveliuose priartėja prie aktyvaus sluoksnio rekombinacijos trukmės pradinėje silicio medžiagoje.

3.5 Didelės galios Si diodinių struktūrų pasyvavimas porėtojo silicio dangomis

Kaip jau buvo minėta anksčiau, formuojant puslaidininkinę struktūrą, atliekamos tokios technologinės operacijos, kurių metu iš šėdiklių ir ploviklių darinio paviršiuje lieka 10^{13} - 10^{17} cm⁻² metalų jonų ir kartu anodinės oksidacijos reakcija generuoja tūrinis darinio struktūrinius defektus, taip pat pagerindama darinio paviršiaus savybes. Šie tūriniai defektai yra sulaikomi porėtojo silicio sluoksnyje, kurį nuėmus gaunama medžiaga su geresnėmis tūrinėmis savybėmis [101-103]. Anodizavimo procesas yra galvanostatinis, jo metu kontroliuojama srovė. Šis procesas gali būti moduluojamas, keičiant srovės tankį ir trukmę [63, 104]. Šiame skyriuje nagrinėjama tūrinių defektų geteravimo į bandinio paviršį galimybė. Tai yra tarsi negilus generavimas, padengiant plona Si₃N₄ plėvele, poli-silicio arba porėtojo silicio dangas [105]. Mūsų atveju, panaudojamos porėtojo silicio dangos. Naudojant elektrocheminį šėdinimą [106], paviršius pasidengia plona plėvele, kuri tarnauja kaip pasyvuojantis sluoksnis, nulemiantis puslaidininkinės struktūros pramušimo įtampų vertes. Nagrinėjami standartiniai MOAT diodai su sudarytomis sritimis: n-tipo legiruota fosforu ir p-tipo legiruota boru. Silicio kristalografinių plokštumų orientacija yra (111) ir pradinė savitoji varža 120 Ω·cm. Elektrocheminis šėdinimas atliekamas po izoliacinių griovelių šėdinimo operacijos, prieš SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklo

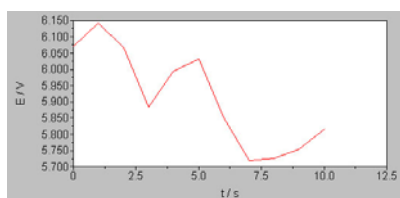


3.5.1 pav. Nagrinėjamos struktūros skersinis pjūvis. Griovelis šėdinamas HF:HNO₃:H₃COOH rūgščių mišinyje. $X_{jp}=33\div40$ μm, $X_{jGriovelio}=95\pm5$ μm. Griovelis užpildomas SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklu. Stiklas lydomas 750÷760°C temperatūroje.

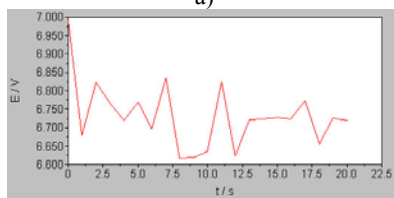
pasivaciją. Sudarytoji *p-n* sandūra yra 33-40 μm gylyje, o izoliacinis griovelis išėsdinamas 95 ± 5 μm gylio. Šiuose eksperimentuose nagrinėjama diodinė struktūra pateikiama 3.5.1 paveiksle.

Šio eksperimento technologinis maršrutas: izoliaciniai grioveliai pasyvuoti stiklu, išmatuotos 100% V_{RRM} vertės plokštelėje nustatytos sritys, kuriose rasti lėkšti pramušimo įtampų charakteristikų pavidalai. Chemiškai nuimtas stiklas iš izoliacinių griovelių, plokštei atliktas elektrocheminis ėsdinimas, iškaitinta H_2 atmosferoje 550°C temperatūroje. Porėtojo silicio sluoksnis nuėsdintas KOH tirpale ir pakartota stiklo pasivacija. Šiam eksperimentui naudotos trys plokštelės (\varnothing 100 mm). Anodo kontaktui užgarintas 5 μm Al sluoksnis, kuris buvo nereikalingas pagaminus vienos talpos anodizavimo celę (2.4.1 pav.) su grafitiniu kontaktu. Elektrolitui panaudoti HF ir $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ reagentai santykiu 1:1. Reakcijos metu elektrocheminio ėsdinimo celė apšviesta 100W plataus spektro šviesa. Anodizavimo srovės tankiai ir ėsdinimo trukmės kontroliuotos kompiuterine elektrocheminio ėsdinimo sistema AUTOLAB (*AUTOLAB, GPES-General Purpose Electrochemical System v 4.9*) [107].

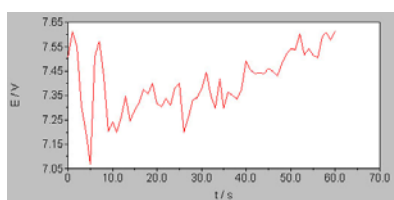
Eksperte naudotų plokštelių plotas yra $78,5 \text{ cm}^2$, izoliacinių griovelių plotas, kuriuo tekėjo nustatytoji srovė, yra $2,82 \text{ cm}^2$. Parinktas pastovus srovės tankis $J = 25,5 \text{ mA/cm}^2$, keičiamos ėsdinimo trukmės: $t_1 = 10 \text{ s}$, $t_2 = 20 \text{ s}$, $t_3 = 60 \text{ s}$, kur indeksas reiškia plokštelės identifikavimo numerį. Įtampos kitimas buvo stebimas elektrocheminio ėsdinimo metu tam, kad užfiksuotume reikšmingus įtampos pokyčius, priklausančius nuo nuotėkių. Paveiksle 3.5.2 (a – c) pateikiami įtampos kitimai kiekvienoje plokštelėje skirtingomis ėsdinimo trukmėmis. Pradžioje pastebima pereinamoji sritis, kuri gali būti paaiškinama krūvio susidarymu prieš ėsdinimo pradžią, priklausančią nuo aktyvacijos energijos. Nereguliarus pjūklinis pavidalas simbolizuoja oksido susidarymą ir ėsdinimą, kaip srovės trūkimo modelyje arba vandenilio burbulų konkuravimą su elektrolito tekėjimu.



a)

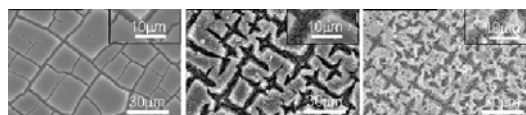


b)



c)

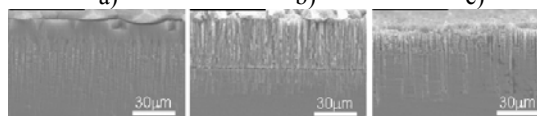
3.5.2 pav. Įtampos kitimas bandinyje, ėsdinimo metu, esant pastoviai srovei. Pradžioje yra pereinamasis periodas, kuris po kelių sekundžių pereina į nereguliarų pjūklinį pavidalą. Šie virpesiai rodo elektrocheminio oksido augimą ir jungimąsi į poras (a – įtampos kitimas plokštelėje Nr.1, ėsdinimo trukmė – 10s, (b) – įtampos kitimas plokštelėje Nr.2, ėsdinimo trukmė – 20s, (c) – įtampos kitimas plokštelėje Nr.3, ėsdinimo trukmė – 60s).



a)

b)

c)

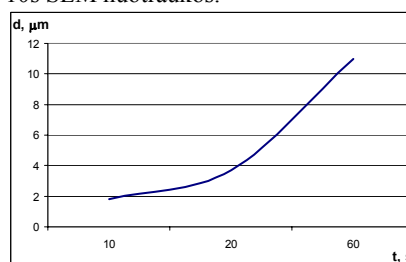


c)

d)

e)

3.5.3 pav. Porėtojo silicio, esant skirtingoms ėsdinimo trukmėms vaizdo iš viršaus (a – c) ir skersinio pjūvio (d – f); a, d – $t_3=60s$, b, e – $t_2=20s$, c, f – $t_1=10s$ SEM nuotraukos.



3.5.4 pav. Elektrocheminio oksido storio priklausomybė nuo ėsdinimo trukmės.

Priklausomai nuo ėsdinimo trukmės, susiformuoja skirtingos morfologijos ir storio sluoksniai (3.5.3 pav. ir 3.5.4 pav.), įtakoiantys griovelio plotį ir gylį (3.5.1 lentelė.).

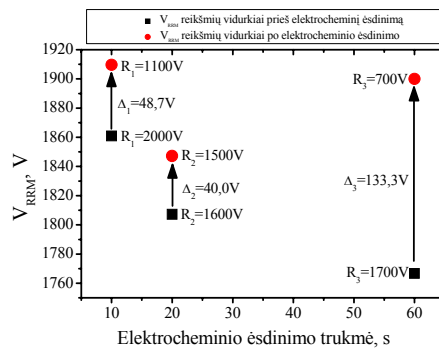
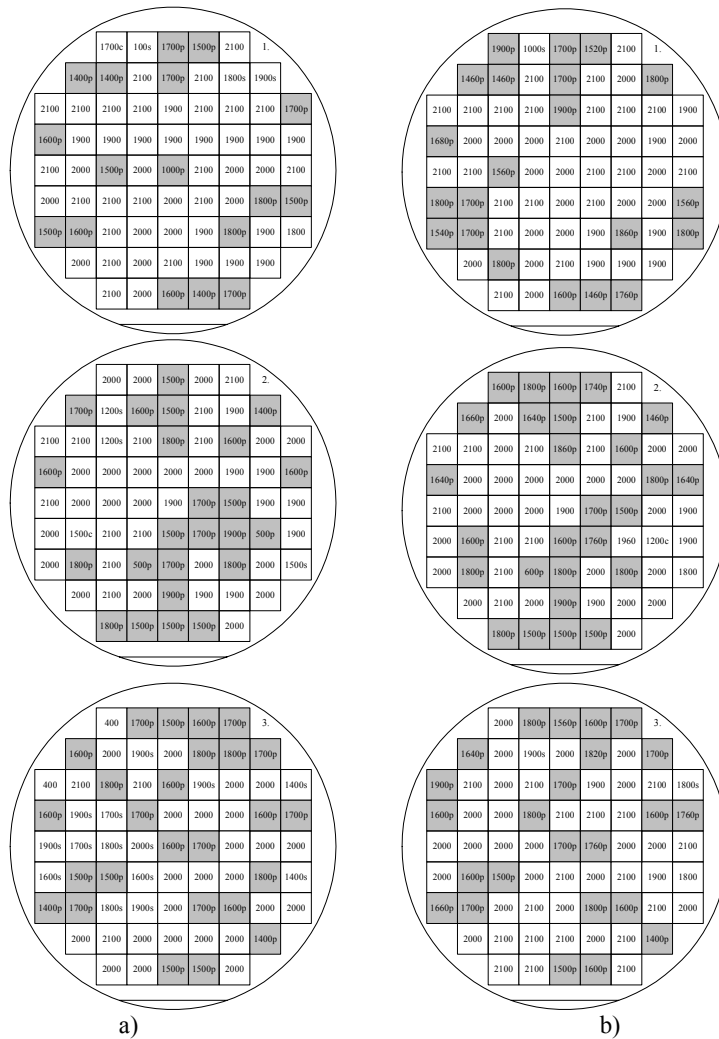
3.5.1 lentelė. Izoliavimo griovelių charakteristikos po elektrocheminio ėsdinimo

Plokštelės numeris	1.	2.	3.
Griovelio gylis, μm	106	109	115
Griovelio plotis, μm	282	290	307

Sekantis technologinis procesas, po elektrocheminio ęsdinimo ir porętojo silicio sluoksnio sudarymo, yra bandinių iškaitinimas H_2 atmosferoje, $t=1h$, $550^\circ C$ temperatūroje. Po šios operacijos, KOH tirpale nuimamas porętojo silicio sluoksnis. Kartu su elektrocheminiu oksidu nuimamos tūrinės priemaišos, kurios buvo ištrauktos iš bandinių tūrio. Po cheminio valymo, ant šių trijų plokštelių atliekama SiO_2 - PbO - Al_2O_3 - B_2O_3 stiklo pasyvacija.

Paveiksle 3.5.5 ir 3.5.2 lentelėje pateikiamos V_{RRM} vertės prieš elektrocheminį ęsdinimą ir po bandinių iškaitinimo. Šios vertės matuotos azoto atmosferoje, prie $I_{RRM}=100 \mu A$ srovės. Raidės s, p ir c žemėlapiuose reiškia voltamperinės charakteristikos pavidalus. Raidė s – minkštos charakteristikos pavidalas, p – lękštos charakteristikos pavidalas ir c – susikryžiusios charakteristikos pavidalas. Tie kristalai plokštelėse, prie kurių V_{RRM} verčių nėra jokių raidžių, turi tikrą pramušimo įtampos charakteristiką. Šio eksperimento tikslas ir buvo sumažinti lękštų pramušimo charakteristikų kiekį ir padidinti šių pramušimo įtampų vertes. 3.5.2 lentelėje pateikiami atskirų plokštelių V_{RRM} verčių vidurkiai ir jų kitimo intervalai.

Kaip matyti iš 3.5.2 lentelės, elektrocheminis ęsdinimas buvo veiksmingas tiek vidutinėmis reikšmėmis, tiek ir jų verčių kitimo intervalais, visose trijose plokštelėse. Pirmoje plokštelėje pokyčio vidurkis yra 48,7V, o V_{RRM} verčių kitimo intervalas sumažėjo 900V. Antroje plokštelėje pokyčio vidurkis yra 40V, tačiau V_{RRM} verčių kitimo intervalas sumažėjo 100V. Plokštelėje Nr. 3, verčių vidurkis išaugo iki 133,3V, o V_{RRM} verčių kitimo intervalas sumažėjo iki 1000V. Suskirsčius V_{RRM} vertes pagal intervalus (3.5.5 pav.) ir jas vertinant prieš ir po ęsdinimo, gauti statistiniai verčių pasiskirstymo rezultatai. Jie pateikti 3.5.6 paveiksle, kuris savo ruožtu iliustruoja tiek 3.5.5 paveikslą, tiek ir 3.5.2 lentelę.



c)

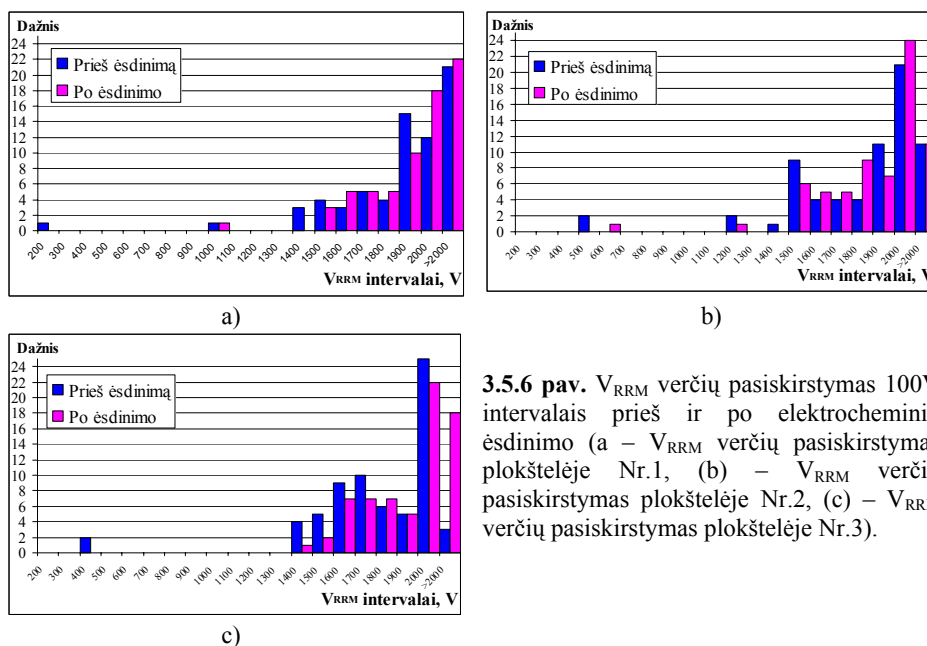
3.5.5 pav. V_{RRM} verčių matavimo žemėlapiai: (a) – prieš elektrocheminį ęsdinimą, (b) – po elektrocheminio ęsdinimo. V_{RRM} reikšmių vidurkiai (c). Raidės s, p ir c žemėlapiuose reiškia voltamperinės charakteristikos pavidalus. Raidė s – minkštos charakteristikos pavidalas, p – lėkštos charakteristikos pavidalas ir c – susikryžiuvusios charakteristikos pavidalas.

3.5.2 lentelė. V_{RRM} verčių vidurkiai ir išsibarstymai prieš ir po elektrocheminio ėsdinimo

Prieš elektrocheminį ėsdinimą			
Plokštelės numeris	1.	2.	3.
$\bar{X}_{V_{RRM}}, V$	1860,9	1807,2	1766,7
$R_{V_{RRM}}, V$	2000	1600	1700
Po elektrocheminio ėsdinimo			
$\bar{X}_{V_{RRM}}, V$	1909,6	1847,2	1900,0
$R_{V_{RRM}}, V$	1100	1500	700

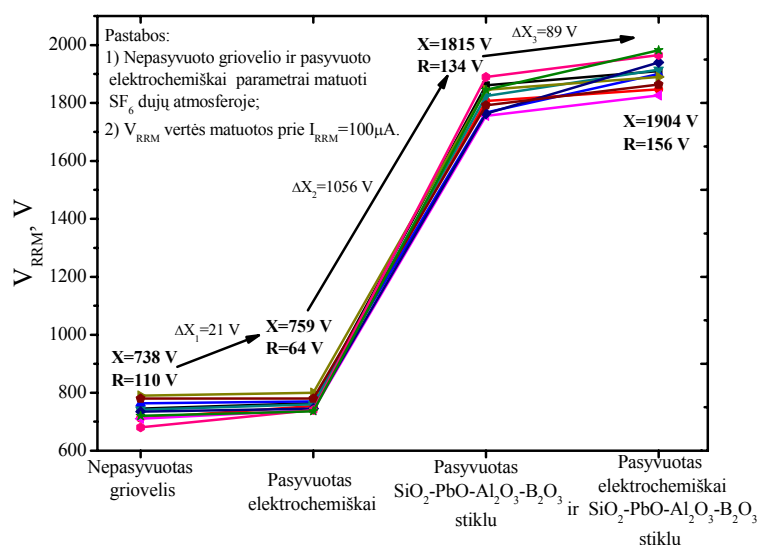
Įvertinant gautus rezultatus, aukščiausia pasyvacijos kokybė ir parametru pagerėjimas pasiekiamas ilginant elektrocheminio ėsdinimo trukmę. Vidutiniai V_{RRM} pramušimo įtampų pokyčiai (parametru pagerėjimas) plokštelėje Nr. 1 - 2,6%, plokštelėje Nr. 2 - 2,2% ir plokštelėje Nr. 3 - 7,6%, efektyvumas didėja, ilginant elektrocheminio ėsdinimo trukmę.

Vykdamas kitus eksperimentus, t. y. ilginant ėsdinimo trukmę, gauti didesnio efektyvumo koeficiento nepavyko, nes ilgėjant trukmei, prasideda griovelio krašto poliravimas ir nebeišlaikoma optimali griovelio forma.



3.5.6 pav. V_{RRM} verčių pasiskirstymas 100V intervalais prieš ir po elektrocheminio ėsdinimo (a – V_{RRM} verčių pasiskirstymas plokštelėje Nr.1, (b) – V_{RRM} verčių pasiskirstymas plokštelėje Nr.2, (c) – V_{RRM} verčių pasiskirstymas plokštelėje Nr.3).

Įvertinant gautus rezultatus šio darbo skyriuose 3.4 ir 3.5, gaunamas grafikas, iliustruojantis parametrų verčių kitimus visų eksperimentų eigoje (3.5.7 pav.).



3.5.7 pav. Maksimalios pasikartojančios impulsinės atgalinės įtampos (V_{RRM}) kitimas, esant skirtingiems bandinių apdorojimo metodams. Pirmoji pakopa – nepasyvuotas izoliacinis griovelis. Antroji pakopa – izoliacinis griovelis pasyvuotas elektrocheminiu esdinimu (tiek pirmu, tiek antru atveju V_{RRM} vertės matuotos SF₆ atmosferoje). Trečioji pakopa – izoliacinis griovelis pasyvuotas SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklu ir ketvirtoji pakopa – izoliacinis griovelis pasyvuotas elektrocheminiu oksidu ir SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklu.

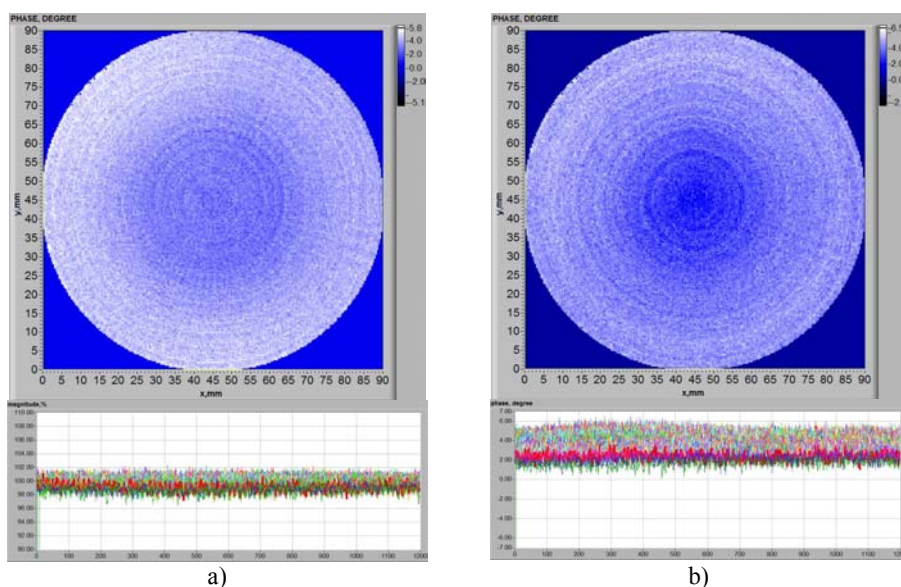
Iš 3.5.7 paveikslu matyti, kad nepasyvuoto griovelio atveju, vidutinės V_{RRM} vertės yra 738V, o verčių kitimo intervalas siekia 110V. Tik elektrocheminio oksido pagalba pasyvuoto izoliacinio griovelio atveju (antroji pakopa) V_{RRM} vertės yra 759V, o jų kitimo intervalas - 64V. Verčių augimas tarp pirmosios ir antrosios pakopų $\Delta X_1=21V$. Tačiau porėtojo silicio spontaniška oksidacija - laikoma šio metodo trūkumu ir jei ji sudaroma kaip tarpinė operacija, ši savybė panaikinama. Nepasyvuoto ir pasyvuoto elektrocheminiu oksidu atveju, dėl galimo išorinio pramušimo, V_{RRM} vertės matuotos SF₆ dujų atmosferoje. Trečiojoje pakopoje pateikiama tik pasyvacija SiO₂-PbO-Al₂O₃-B₂O₃ stiklu, kuri, savo ruožtu, suteikia $\Delta X_2=1056V$, o vidutinės V_{RRM} vertės yra 1815V su verčių kitimo intervalu 134V. SiO₂-PbO-

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklas lydintas 760°C temperatūroje, N_2 ir O_2 atmosferoje, procesą stebint stiklo lydymo difuzinių krosnių monitoringo sistema, kuri buvo aptarta šio darbo 3.3 punkte. Ketvirtojoje pakopoje, nurodytoje 3.5.7 paveiksle, panaudotas elektrocheminis oksidas kartu su $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo pasyvacija. Šio izoliacinio griovelio apdorojimo metodo efektyvumas, lyginant su trečiaja pakopa, yra $\Delta X_3=89\text{V}$, o jei lyginant su pirmąja pakopa, tai siekia 1166V . Šiuo metodu pasyvuoto griovelio atveju vidutinės V_{RRM} vertės yra 1904V , o verčių kitimo intervalas siekia 156V . Visais keturiais atvejais maksimalios pasikartojančios impulsinės atgalinės įtampos vertės matuotos prie maksimalios atgalinės srovės (atgalinė srovė, kai veikia nurodyta atgalinė įtampa V_{RRM}) $I_{\text{RRM}}=100\ \mu\text{A}$. Tai reiškia, kad matavimo sąlygos visais keturiais atvejais buvo vienodos. Elektrocheminio oksido ir stiklo $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ pasyvacijos metodo efektyvumas siekia $2 - 8\%$, priklausomai nuo elektrocheminio išdininimo trukmės.

3.6 Silicio plokštelių homogeniškumo tyrimas milimetrinėmis bangomis technologiniame procese

Šiame skyriuje nagrinėjamos Si plokštelės po pagrindinių technologinių operacijų, aptartų pirmajame skyriuje. Kiekviename žingsnyje matavimai atlikti vienodomis sąlygomis. Matavimams naudojamos (111) orientacijos Si plokštelės su $\rho=120\ \Omega\text{-cm}$ specifine varža. Pirmasis matavimas atliktas pradinėse plokštelėse, gautų iš gamintojų. Šis matavimas atliktas tam, kad išsiaiškintume, kokio homogeniškumo yra gaunamos pradinės plokštelės, nes gamintojas nurodo 5% savitosios varžos verčių išsibarstymą. Kitas matavimas atliktas po ampulinės GaAl difuzijos, kuri įdiegta UAB „Vilniaus Ventos puslaidininkiuose“. Šis matavimas informatyvus tuo, kad sužinome kaip plokštelės homogeniškumą nulemia turimi technologiniai procesai ir įranga. Po to matavimai atliekami po fosforo difuzijos, aukso difuzijos bei po izoliacinių griovelių išdininimo ir $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ pasyvacijos operacijų.

3.6.1 paveiksle pateikiamos praėjusio pro pradinę Si plokštelę, kurios storis $d = 405 \mu\text{m}$, mikrobangos signalo amplitudės (3.6.1 (a) pav.) ir fazės (3.6.1 (b) pav.) pasiskirstymas. Registruojamo signalo dydis proporcingas vaizdo sūdrumui. Šiame paveiksle matome, kad praėjusios bangos amplitudinės vertės svyruoja $98 \div 102 \%$ ribose, o mikrobangos signalo fazės pasiskirstymo ribos yra nuo 2% iki 6% . Taigi, galima konstatuoti, kad pradinės plokštelės, gaunamos iš gamintojų yra homogeniškos ir išlaiko 5% specifinės varžos kitimo ribas. Centrinėje plokštelės dalyje stebimas tamsesnė sritis rodo, kad šioje srityje plokštelės laidumas yra šiek tiek didesnis.



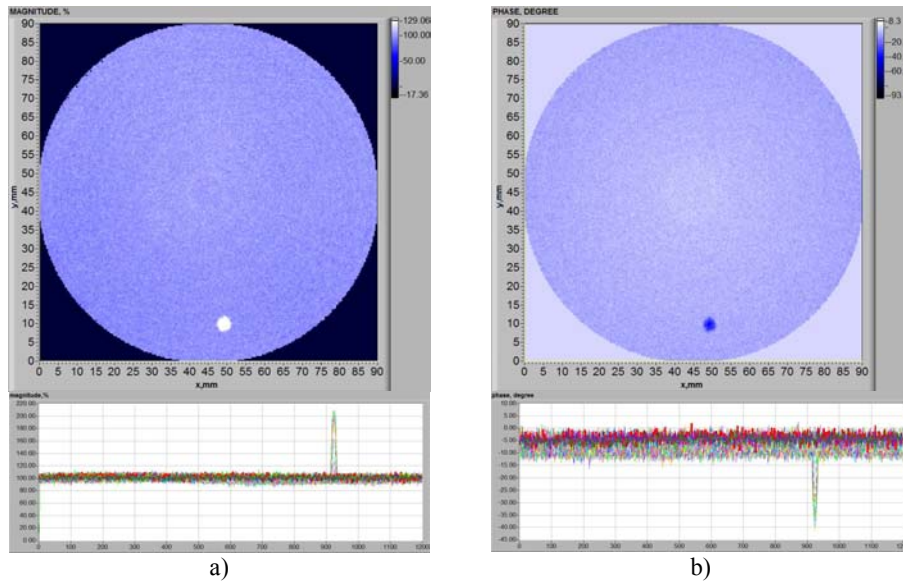
3.6.1 pav. Praėjusio pro pradinę Si plokštelę, mikrobangos signalo amplitudės (a) ir fazės (b) pasiskirstymas. Plokštelės storis $d = 405 \mu\text{m}$, skenuojamas plotas – 90 mm^2 . Bangos dažnis lygus 118 GHz .

Stačiakampių ir apvalių tiristorių gamyboje naudojamos $\langle 111 \rangle$ kristalografinės orientacijos Si plokštelės pagamintos zoninio lydymosi metodu ir legiruojamos galiu (Ga) ir aliuminiu (Al). Galingų tiristorių gamyboje ypač svarbi yra priemaišų įtaka kristalinei struktūrai. Mūsų atveju, plokštelės legiruojamos Ga ir Al naudojant difuziją. Aliuminio ir galio atomų matmenys artimi silicio atomams, todėl jų atomų sudaryti mechaniniai įtempimai, kuriuos

nulemia kristalinės gardelės iškraipymai, yra nežymūs. Šiuo požiūriu neigiamiausią įtaką turi boras ir fosforas, kadangi jų atomai žymiai mažesni negu silicio. Kadangi silicio, galio ir aliuminio atomų matmenys praktiškai sutampa – galis ir aliuminis geriausiai tinka pagrindinėms tiristoriaus sandūroms formuoti. Boras naudojamas akceptorių difuzijai formuojant emiterį, nes difuzijos procesai paprastesni, o defektų lygis - patenkinamas. Fosforo difuzijos metu gardelėje taip pat atsiranda defektai.

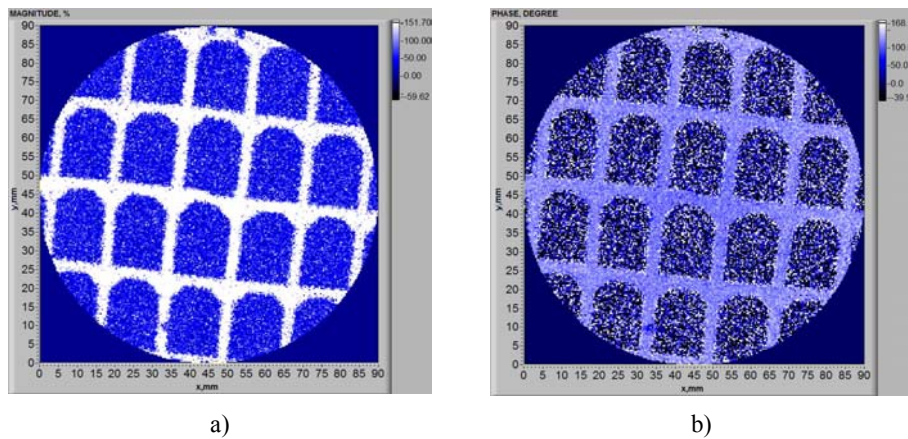
Po ampulinės GaAl difuzijos (difuzijos gylis siekia 50 μm), kurios metu iš abiejų plokštelės pusių suformuojamos p-tipo laidumo sritys, Si plokštelės vėl buvo skenuojamos milimetrinių bangų spinduliu. 3.6.2 paveiksle pateikiamos praėjusių pro Si plokštelę milimetrinių bangų amplitudiniai ir faziniai vaizdai. Iš šio paveikslo matome, kad praėjusios bangos amplitudinės vertės svyruoja 96 ÷ 104 % ribose, o mikrobangos signalo fazės pasiskirstymas yra 8 % ribose. Taigi, po GaAl difuzijos signalo verčių išsibarstymas padidėjo iki 8 %, tai reiškia, kad išaugo 4 %, lyginant su pradine plokštele. Tai paaiškinama tuo, kad sukūrus skirtingo laidumo sritis iš abiejų plokštelės pusių, laidumo pasiskirstymo išbarstymas plokštelės plote yra didesnis. Amplitudiniame ir faziniame vaizduose (3.6.2 pav.) stebimas taškas yra šlifas, difuzijos gyliui nustatyti.

Sekanti operacija - fosforo difuzija. Fosforo difuzijos metu naudojamas skystas difuzantas PCl_3 . Ant plokštelės paviršiaus susidaro fosforosilikatinis stiklas, iš kurio ir vyksta fosforo difuzija į puslaidininkio tūrį. Taip suformuojamas negilus n^+ sluoksnis, kuris naudojamas kaip priemaišų šaltinis fosforo difuzijos antrajai stadijai.



3.6.2 pav. Praėjusio pro Si plokštelę po GaAl difuzijos milimetrinių bangų amplitudinis (a) ir fazinis (b) vaizdai. Bangos dažnis tas pats kaip ir 3.6.1 pav.

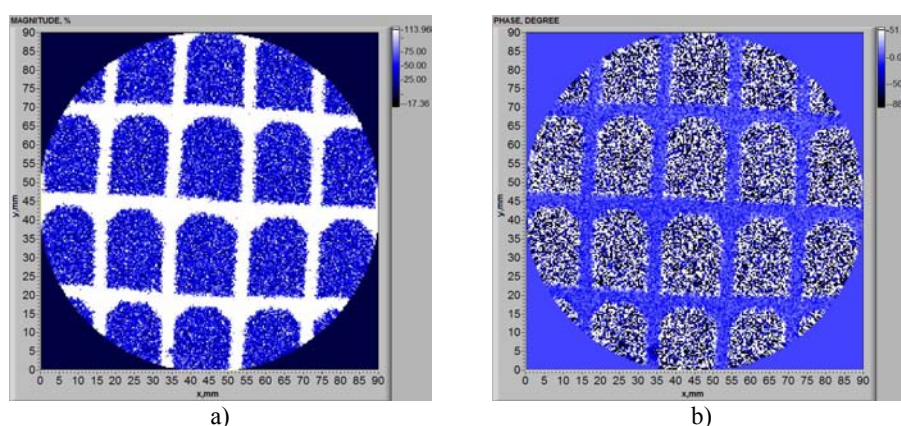
Fosforo difuzijos metu vyksta priemaišų, įvestų per fosforo difuzijos 1-ąją stadiją perskirstymas ir šios operacijos metu galutinai suformuojamos 25 μm gylio n^+ katodo emiterių sritis. Krūvininkų koncentracija siekia $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$. Si plokštelės amplitudinis (a) ir fazinis (b) vaizdai, gauti skenuojant ją milimetrinių bangų spinduliu po fosforo difuzijos, pateikti 3.6.3 paveiksle.



3.6.3 pav. Milimetrinių bangų praėjusių per Si plokštelę po fosforo difuzijos amplitudinis (a) ir fazinis (b) vaizdai.

Paveiksle stebimos tamsios sritys atitinka sritims, į kurias buvo difunduojamas fosforas, o šviesūs takeliai atitinka sritims apsaugotoms nuo fosforo difuzijos. Dėl fosforo difuzijos žymiai padidėja plokštelės paviršinis laidumas, o tai, savo ruožtu, sąlygoja žymų praėjusios bangos amplitudės sumažėjimą atitinkamose plokštelės srityse. Panašų reljefą atkartoja ir fazinis vaizdas.

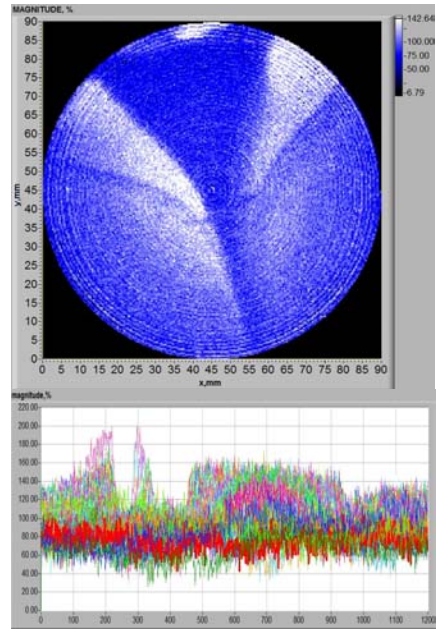
Aukso difuzijos operacijos metu į silicį (tose vietose, kur vėliau bus kristalų šlaitai), įvedamas auksas. Tai daroma tam, kad sumažėtų nuotėkio srovės kristalų kraštuose. Silicio plokštelės amplitudinis (a) ir fazinis (b) vaizdai po aukso difuzijos operacijos pateikti 3.6.4 paveiksle.



3.6.4 pav. Silicio plokštelės amplitudinis (a) ir fazinis (b) vaizdai po aukso difuzijos operacijos.

3.6.5 paveiksle pateikiami po stiklo pasyvacijos tirtų plokštelių V_{DRM}/V_{RRM} verčių žemėlapiai. Plokštelėje 2x kryžiumi pažymėtas kristalas – šlifas difuzijos gyliui nustatyti.

V_{DRM}							
V_{RRM}							
	2000	2000	2000	2000	2000	2000	1x
	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
1900	2000	2000	2000	2000	1900	1900	
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
	2000	2000	2000	2000	1900		
	2000	2000	2000	2000	2000		
	2000	1900	2000	2000	2000		2x
	2000	2000	2000	2000	2000		
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
1900	2000	2000	2000	1900	2000	2000	
2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	
	2000	2000	X	2000	2000		
	2000	2000		2000	2000		



3.6.5 pav. V_{DRM}/V_{RRM} pramušimo įtampų verčių pasiskirstymas tirtose plokštelėse.

3.6.6 pav. Praėjusio pro Si plokštelę po GaAl difuzijos milimetrinių bangų amplitudinis vaizdas.

Iš milimetrinėmis bangomis atliktų homogeniškumo tyrimų galima daryti išvadą, kad šie matavimai tikslingi skenuoti pradines plokšteles ir plokšteles po GaAl difuzijos, nes tik po šio proceso stebimi žemi triukšmų lygiai. Šie triukšmų lygiai išauga po kiekvienos operacijos ir homogeniškumas stebimas tik sudarytose skirtingo laidumo srityse. Šios išvados iliustravimą pateikiame plokštelės homogeniškumo išsibarstymą po GaAl difuzijos 3.6.6 paveiksle, kurios metu įvyko tam tikri nukrypimai nuo technologinio proceso. Aiškiai matomas netolygus signalo pasiskirstymas yra siejamas su tiriamos plokštelės nehomogeniškumu. Įdiegus tokią matavimo metodiką į technologinį procesą, palengvėtų broko paieška ir jo nustatymo vietos technologiniame gamybos maršrute.

4. IŠVADOS

1. Išanalizuota galingų puslaidininkinių struktūrų konstrukcija, pagrindinės charakteristikos, parametrų tarpusavio ryšys, taip pat technologinis procesas ir jo ypatumai. Išanalizuotos technologinio gamybos maršruto silpniausios pozicijos.
2. Nustatyta izoliacinių griovelių ėsdinimo charakteristikų priklausomybė nuo ėsdiklio sudėties, nuo ėsdinimo įrenginio struktūros, nuo ėsdiklio temperatūros kitimo. Tolygiam ėsdinimui turi būti išlaikytas oksidanto (HNO_3) ir oksido tirpiklio (HF) santykis $\sim 1,97$. Sukurta ėsdinimo technologija yra panaudota naujoje ėsdinimo įrenginio konstrukcijoje, kurioje reguliuojamas ėsdinamų plokštelių sukimosi greitis bei kontroliuojamas ėsdiklio pašalinimas nuo plokštelių paviršiaus.
3. Stiklo pasyvacijai stebėti sukurta stiklo pasyvacijos difuzinės krosnies monitoringo sistema. Nustatyta V_{DRM} verčių priklausomybė nuo $\text{SiO}_2\text{-PbO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ stiklo lydymo proceso: V_{DRM} reikšmės atkartoja griovio gylio pasiskirstymus nepriklausomai nuo plokštelės padėties pirmojo stiklo lydymo temperatūrinėje zonoje. Griovelio gylis apsprendžia pramušimo įtampos vertę, o stiklo lydymo procesas – pramušimo įtampos charakteristikos pavidalą.
4. Atlikti deimanto tipo anglies dangų (DTAD) užneštų ant galios diodų tyrimai parodė, kad yra galimybė pagaminti kokybiškas ($a\text{:C-H}$) dangas su priimtinais nuotėkiais tiek $T_{\text{kamb.}} = 25^\circ\text{C}$, tiek ir $T_{\text{max}} = 150^\circ\text{C}$ temperatūrose. Bandiniuose su DTAD gautos I_{RRM} vertės suvienodėjo su standartinės pasyvacijos gautomis I_{RRM} vertėmis.
5. Rekombinacijų charakteristikų kitimo pagalba matuojant bekontakto MW-PCT technika, įvertinta griovelių pasyvacijos kokybė. Aptikta, kad pasyvuojant ir izoliuojant griovelio paviršių krūvininkų efektinė gyvavimo trukmė kinta nuo 10 μs iki 300 μs . Tai atitinka paviršinės rekombinacijos greičio sumažėjimą nuo 3×10^3 cm/s iki 10 cm/s, priklausomai nuo griovelio krašto paviršiaus paruošimo metodo.

6. Po izoliacinio griovelio ėsdinimo operacijos, prieš stiklo pasyvaciją sudarinėjamas porėtojo silicio sluoksnis. Nustatyta, kad ilgėjant ėsdinimo trukmei, didėja PorSi storis. Kadangi stipriai legiruotose plokštelės srityse papildomai atsiranda sanglaudos defektų, lėtai aušinant defektai pereina į PorSi ir po to pašalinami kartu su šiuo sluoksniu. Šio metodo efektyvumas siekia $2 \div 8 \%$, priklausomai nuo elektrocheminio ėsdinimo trukmės.
7. Atlikus homogeniškumo tyrimus milimetrinėmis bangomis, nustatyta, kad pradinėse plokštelėse ir po GaAl difuzijos praėjusios bangos amplitudės ir fazės pasiskirstymo ribos siekia, atitinkamai, 4 ir 8%.

5. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. С. Зи, Физика полупроводниковых приборов (перевод с английского – В. А. Гергель, В. В. Ракатин), Мир, Москва, (1984).
2. Z. Yuming, Y. Yuehui, C. Haigang, L. Lin, A High Power Semiconductor Switch RSD for Pulsed Applications, Plasma Science and Technology, Vol. 9, No. 5, p. 622-625 (2007).
3. I. Grekhov, A. Kozlov, S. Korotkov, A. Stepanyants, A High-Frequency Reverse Switch-On Dynistor Generator for High Power Induction Heating Systems, Instruments and Experimental Techniques, Vol. 43, No. 1, p. 70-73 (2000).
4. G. D. Chumakov, I. V. Galakhov, S. N. Gudov, Switching of High Power Current Pulses up to 250 kA and Submilisecond Duration using New Silicon Devices Reverse Switched Dinistors, 10th IEEE International Pulsed Power Conference, p. 1103-1108 (1995).
5. E. M. Geifman, I. V. Grekhov, S. V. Korotkov, Design and Experimental Investigation of Asymmetric Reverse-Switched Dynistors, Power Converters&Intelligent Motion, (2002).
6. S. A. Belyaev, V. G. Bezuglov, V. V. Chibirkin, G. D. Chumakov, New Generation of High – Power Semiconductor Closing Switches for Pulsed Power Applications, 28th ICPIG, July 15-20, Prague, p. 1524-1528 (2007).
7. I. Grekhov, P. Ivanov, D. Khristyuk, A. Konstantinov, S. Korotkov, Subnanosecond semiconductor opening switches base don 4H-SiC $p^+p^0n^+$ diodes, Solid-State Electronics 47, p. 1769-1774 (2003).
8. P. Ivanov, M. Levinshtein, K. Irvine, O. Kordina, High hole lifetime (3,8 μ s) in 4h-SiC diodes with 5,5 kV blocking voltage, Electron Lett. 35 (16), p. 1382-1383 (1999).
9. D. Ioka, K. Sakakibara, Y. Yokomizu, T. Matsumura, N. Izuhara, Distribution Voltage Rise at Dense Photovoltaic Generation Area and Its Suppression by SVC, Electrical Engineering in Japan, Vol. 166, No. 2, p. 47-52 (2009).

10. H. Schulze, F. Niedernostheide, U. Kellner-Werdehausen, High-voltage Thyristors for HVDC and Other Applications: Light-triggering Combined with Self-protection Functions, (2005).
11. Y. Tokiwa, F. Ichikawa, S. Irokawa, T. Kitahara, Development of self-commutated SVC for Power System, Electrical Engineering in Japan, Vol. 114, p. 74-85 (2007).
12. J. Oetjen, R. Jungblut, U. Kuhlmann, J. Arkenau, R. Sittig, Current filamentation in bipolar Power devices during dynamic avalanche breakdown, Solid State Electronics 44, p. 117-123 (2000).
13. I. Grekhov, A. Kozlov, S. Korotkov, A. Stepanyantz, A High-Voltage Changer Base don Reverse Switch-on Dynistors, Instruments and Experimental Techniques, Vol. 45, No. 5, (2002).
14. A. Huang, V. Temple, Y. Liu, Y. Li, Analysis of turn-off failure mechanism of silicon power diode, Solid-State Electronics 47, p. 727-739 (2003).
15. K. Matsushita, T. Schinohe, M. Tsukua, U. Minami, J. Miwa, S. Yanagisawa, 4,5 kV high-speed and rugged planar diode with novel carrier distribution control, Proceedings of ISPSD, p. 191-294 (1998).
16. Y. Tamomatsu, E. Suekawa, T. Enjyoji, M. Takeda, H. Kondoh, An analysis and improvement of destruction immunity during reverse recovery for high voltage planar diodes under high dI_{rr}/dt conduction, Proceedings of the International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics, p. 353-356 (1996).
17. V. Obreja, The PN Junction Passivation Process and Performance of Semiconductor Devices, 30th International Spring Seminar on Electronics Technology, p. 287-292 (2007).
18. K. Asano, Y. Sugawara, A Unified Proposal for Characteristic Testing Methods and Figure of Merit of 8 kV/3,5 kVA Class Light Triggered Thyristors, Electrical Engineering in Japan, Vol. 140, No. 3, p. 61-70 (2002).

19. S. Salkalachen, N. H. Krishnan, S. Krishnan, H. B. Satyamuthy, K. S. Srinivas, Edge Passivation and Related Electrical Stability in Silicon Power Devices, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 3. No. 1, p. 12-17 (1990).
20. F. Zhang, C. X. Xu, S. Y. Zhang, Influence of negative charged surface protective material on surface depletion region width, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Canada, p. 862-867 (1996).
21. S. Salkalachen, N. H. Krishnan, S. Krishnan, H. B. Satyamuthy, K. S. Srinivas, Edge passivation and related electrical stability in silicon Power devices, IEEE transactions on Semiconductor Manufacture, p. 12-17 (1990).
22. M. Domej, B. Breitholtz, M. Ostling, J. Lutz, Dynamic avalanche in Si Power diodes and impact ionization at the nn^+ junction, Solid State Electronics 44, p. 477-485 (2000).
23. K. E. Bean, Anisotropic Etching of Silicon, IEEE transactions on electron devices, ED-25, p. 1185 (1978).
24. A. Kvedaravičius, R. Navickas, Silicio integrinių schemų gamybos vadovas, Vilnius, Mokslas, (1989).
25. J. G. Banuelos, E. V. Basiuk, J. M. Saniger-Blesa, Morphology of patterned semiconductor III-V surfaces prepared by spontaneous anisotropic chemical etching, Revista mexicana de fisica 49, p. 310 (2003).
26. P. B. Mumola, G. J. Gardopee, T. Feng, A. M. Ledger, P. J. Clapis, P. E. Miller, Proc. of 2nd Int. Symp. Semicond. Wafer Bonding: Science and Applications, The Electrochem Soc., 401 PV 93 (1993).
27. J. Acker, A. Henbge, C. Muller, Titrimetric determination of silicon dissolved in concentrated HF-HNO₃ –etching solutions, Talanta 68, p. 581-585 (2006).
28. J. Acker, A. Henbge, Chemical analysis of acidic silicon etch solutions II. Determination of HNO₃, HF and H₂SiF₆ by ion chromatography, Talanta 72, p. 1540-1545 (2007).

29. A. Oltersdorf, M. Zimmer, M. Seitz, J. Rentsch, 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September, Valencia, Spain, (2008).
30. M. Steinert, J. Acker, A. Henßge, K. Wetzig, Experimental studies on the mechanism of wet chemical etching of silicon in HF/HNO₃ mixtures, J. Electrochem. Soc., 152, C843-C850 (2005).
31. J. Weber, S. Knack, O.V. Feklisova, N.A. Yarkin, E. B. Yakimov, Hydrogen penetration into silicon during wet-chemical etching, Microelectronic Engineering 66, p. 320-326 (2003).
32. А. Вест, Химия твердого тела, часть 2, Москва “Мир”, p. 178-233(1988).
33. Y. Jeon, M. Kim, O. Kwon, J. Lee, B. Ryu, Fabrication of Glass Passivation Films for Power Devices by Screen Printing and Their Characterization, Journal of the Ceramic Society of Japan, Vol. 112, No. 1305, p. 1245-1249 (2004).
34. П. Б. Парчинский, С. И. Власов, У. Т. Тургунов, Свойства пассивирующих покрытий на основе свинцово-боросиликатных стекол, Неорганические материалы, том 38, p. 750-754 (2002).
35. W. Chun-yu, W. Ying, Z. Chang-chun, Effect of equivalent surface charge density on electrical field of positively beveled p-n junction, J. Shanghai Univ. (Engl Ed) 12, p. 43-46 (2008).
36. А. Блихер, Физика силовых биполярных и полевых транзисторов. Энергоатомиздат, p. 72-73 (1986).
37. П. С. Агаларзаде, А. И. Петрин, С. О. Изидинов, Основы конструирования и технологии поверхности p-n перехода, p. 224 (1978).
38. J. Robertson, Diamond-like amorphous carbon, Materials Science and Engineering R37920020129-281 Reports: A review Journal. (1999).
39. R. Barthelmeß. Elektroaktive Passivierung von hochsperrenden pn-Übergängen in Silizium mit amorphen, wasserstoffhaltigen Kohlestoffschichten (a:C-H). Der Naturwissenschaftlichen Fakultäten der

Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangungen des Doktorgrades, (1995).

40. T. Yoshitake, T. Nishiyama, K. Nagayama, The Role of Hydrogen and Oxygen Gas in the Growth of Carbon Thin Films by Pulsed Laser Deposition, *Diamond and Related Materials* 9, p. 689 – 692 (2000).
41. L. Marcinauskas, A. Grigonis, V. Valinčius, P. Valatkevičius, Surface and Structural Analysis of Carbon Coatings Produced by Plasma Jet CVD, *Materials Science* Vol. 13, No. 4, p. 269-272 (2007).
42. L. Marcinauskas, A. Grigonis, V. Valinčius, P. Valatkevičius, Investigation of Single-Chamber Linear Plasma Torch Characteristics While Heating Monatomic and Diatomic Gases, *Power Engineering* 1, p. 36-41 (2006).
43. J. Szmidt, Diamond like layers as passivation for Power Bipolar - Transistors *Diamond and Related Materials* 3 (4-6), p. 849-852 (1994).
44. J. Asmussen, D. Reinhard, *Diamond Thin Films Handbook*, Marcel Dekker Incorporated, New York, p. 656 (2002).
45. T. Zaharia, J. Sullivan, S. Saied, R. Bosch, M. Bijker, Fast Deposition of Diamond-like Hydrogenated Carbon Films, *Diamond Relat. Mater.* 16, p. 623-629 (2007).
46. L. Marcinauskas, A. Grigonis, P. Valatkevičius, V. Šablinskas, Formation of Carbon Coatings Employing Plasma Torch from Argon-Acetylene Gas Mixture, *Proc. of SPIE* 6596, p. 65961D-1-7 (2007).
47. Š. Meškiniš, V. Kopustinskas, K. Šlapikas, R. Gudaitis, A. Guobienė, S. Tamulevičius, Oxygen Ion Beam Etching of Diamond Like Carbon Films, *Materials Science* Vol. 13, No. 4, p. 282-285 (2007).
48. Š. Meškiniš, V. Kopustinskas, S. Tamulevičius, M. Andrulevičius, B. Čižiūtė, G. Niaura, Synthesis of the Silicon and Silicon Oxide Doped *a*-C:H Films from Hexamethyldisiloxane Vapor by DC Ion Beam, *Surface and Coatings Technology* 200, p. 6240-6244 (2006).
49. M. Massi, R. Mansano, H. Maciel, C. Otani, P. Verdonck, L. Nishioka, Effects of Plasma Etching on DLC Films, *Thin Solid Films* 1999, p. 381 (1999).

50. Y. Kondo, T. Saito, T. Terazawa, N. Ohtake, Preparation of Diamondlike Carbon Films Using Nanopulse Generator Employing SI Thyristor, *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 159, No. 4, p. 1-6 (2007).
51. E. Staryga, G. W. Bąk, Relation between physical structure and electrical properties of diamond-like carbon thin films, *Diamond & Related Materials* 14, p. 23-34 (2005).
52. M. Alves, O. Balachova, E. da Silva Braga, L. Cescato, Selective deposition of amorphous hydrogenated carbon films used as masks for reactive ion etching of Si using CF₄, *Vacuum* 52, p. 313-314 (1999).
53. L. Valentini, J. M. Kenny, G. Mariotto, P. Tosi, Deposition of hydrogenated amorphous carbon films from CH₄/Ar plasmas: Ar dilution effects, *Journal of Material Science* v.36, p. 5295-5300 (2001).
54. J. Vobecký, S. Vacková, J. Gurovič, A. Macková, M. Trchová, D. Kolesnikov, Diamond like Carbon Layers for Junction termination of High-power Devices, Department of Microelectronics Faculty of Electrical Engineering Czech Technical University in Prague, Czech Republic. Project Support: Research Programme no. JE MSM 212300017.
55. M. Frischholz, T. Mandel, R. Helbig, G. Schmidt, Hammerschmidt A. OBIC Measurements on Planar High-voltage p+n Junctions with Diamond-like Carbon-Films as Passivation Layer, *Applied Surface Science* 65-6, p. 784-788 (1993).
56. A. Hammerschmidt, G. Schmidt, R. Schulte, Semiconductor component having a passivation layer and method for manufacturing same, Eupec Europaelsche Gesellsch. F. Leistungshalbleiter MBH & Co.KG (Warstein-Belecke, DE); Siemens Aktiengesellschaft (Munich, DE) US Patent 5631496, (1997).
57. S. Birkle, J. Kammermaier, G. Schmidt, R. Schulte, Protective layer for Electroactive Passivation Layers, (Siemens Aktiengesellschaft) US patent 5162875, (1992).
58. S. Birkle, J. Kammermaier, G. Schmidt, A. Winnacker, Amorphous, hydrogenated carbon electroactive passivation layer Siemens

- Aktiengesellschaft (Siemens Aktiengesellschaft Berlin & Munich, DE) US Patent 5039358, (1991).
59. R. Barthelmess, F. Pfirsch, A. Mander, G. Schmit, High voltage diode.(Infineon Technologies Munich, , Eupec Europaelche Gesellschaft fuer Leistungshalb-Leiter mbH, Warstein, DE) US Patent 6770917 2004-08-03.
 60. R. Joseph Sala, K. Mattew, J. Wilson Rose, Amorphous Hydrogenated Carbon Hermetic Structure Fabrication Method.(General Electric Company) US patent 6548329B1 2003-04-15.
 61. G. Schmidt, Semiconductor Component having a p-n Junction and Passivation layer applied on a Surface (Infineon Technologies AG, Munchen, DE) US patent appl, 2005/0156284A1. 2005-07-21.
 62. G. Schmit, Semiconductor Component Having a PN Junction and a Passivation Layer Applied on a Surface (Infineon Technologies AG, Munich) US Patent 7187058B2 2007-03-06.
 63. T. Yoshitake, T. Nishiyama, K. Nagayama, The Role of Hydrogen and Oxygen Gas in the Growth of Carbon Thin Films by Pulsed Laser Deposition, *Diamond and Related Materials* 9, p. 689 – 692 (2000).
 64. Z. Fekih, F. Z. Otmani, N. Ghellai, N. E. Chabanne-Sari, Characterization of the porous silicon layers, *M. J. Condensed Mate*, vol. 7, p. 35 – 37 (2006).
 65. F. Edelberg, *S. J. Appl. Phys.*, vol. 81, p. 2410 (1997).
 66. S. Berger, S. Quoizola, A. Fave, *Journal of Crystal research and technology*, Vol. 8, p. 1005 (2001).
 67. Jia-Chuan Lin, Wei-Lun Chen, Photoluminescence from n-type porous silicon layer enhanced by a forward-biased np-junction, *Optics Express*, vol. 14, No. 21, (2006).
 68. R. L. Smith, S. D. Collins, Porous silicon formation mechanisms, *J. Appl. Phys.* 71 (8), (1992).
 69. O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, Porous silicon: a Quantum sponge structure for silicon based optoelectronics, *Surface Science Rep.* 38, p. 1-126 (2000).

70. S. Franssila, Introduction to microfabrication, John Wiley & Sons Ltd., UK, p. 123 – 125 (2004).
71. V. Lehmann, B. Jobst, T. Muschik, A. Kux, Correlation between optical properties and crystallite size in porous silicon, Jpn. J. Appl. Phys. 32, p. 2095-2099 (1993).
72. J. Mizsei, J. Shrair, Investigation of Fermi – level pinning at silicon/porous-silicon interfaze by vibrating capacitor and surface photovoltage measurements, Appl. Surf. Sci., 235, p. 376-388 (2004).
73. S. Ottow, Basics of semiconductor electrochemistry, (2005).
74. I. Šimkienė, Seiconductor-electrolyte interfaze in the technology of optoelectronic devices, Lithuanian J. Phys. 42, p. 231-247 (2002).
75. I. Šimkienė, Porous dielectric and semiconductor films in nanotechnology (review), Lithuanian J. Phys. 43, p. 319-334 (2003).
76. J. Sabaitytė, K. Grigoras, V. Pačebutas, V. Snikta, I. Šimkienė, Formation of nanocrystalline materials by electrochemical etching, Mater. Sci. 6, p. 254-257 (2000).
77. I. Šimkienė, Nanodariniai mezoporėtose terpėse, Habilitacijos procedūrai teikiamų mokslo darbų apžvalga, Fiziniai mokslai, Vilnius (2007).
78. E. Gaubas, K. Grigoras, I. Šimkienė, Velocity of surface recombination in silicon after various surface passivation technological procedures, Liet. Fiz. Žurn. 37 p. 544-550 (1997).
79. G. Kopitkovas, J. Mikulskas, K. Gigoras, I. Šimkienė, R. Tamošiūnas, Solar celės with porous silicon: modification of surface-recombination velocity, Appl. Phys. A 73, p. 495-501 (2001).
80. K. Grigoras, V. Pačebutas, J. Sabaitytė, I. Šimkienė, H. Tvardauskas, E. Gaubas, J. Harkonen, Formation of shalow n^+ -p junction by spin-on technique, Physica Scripta T79, p. 236-238 (1999).
81. E. Gaubas, Transient absorption techniques for investigation of recombination properties in semiconductor materials.,Lith. Journ. Phys., 43, p. 145-165 (2003).

82. A. Laurinavičius, T. Anbinderis, Si wafer quality characterization by scanning millimetre wave beam. Proc. Intern. Conf. "Radiation interaction with mater and its use in technologies" Kaunas, Lithuania, 24-27 September 2008, p. 190 - 193.
83. D.L. Klein, D.J. D'Stefan, Controlled etching of silicon in the HF-HNO₃ system *Journal of The Electrochemical Society*, 108, 38-42 (1962).
84. V. B. Svetovoy, J. W. Berenschot, and M. C. Elwenspoek, Precise Test of the Diffusion-Controlled Wet Isotropic Etching of Silicon via Circular Mask Openings, *Journal of The Electrochemical Society*, 153 (9) C641-C647 (2006).
85. V. Adomėnas, Statistiniai kokybės valdymo metodai, Technologija, Kaunas (2000).
86. V. Čekanavičius, G. Murauskas, Statistika ir jos taikymas, I dalis, Leidykla „TEV“, Vilnius (2000).
87. P. Reinke, M. G. Garnier, P. Oelhafen, In situ photoelectron spectroscopy analysis of tetrahedral amorphous carbon films, *Journal of Electron spectroscopy analysis of tetrahedral amorphous carbon films*, 136, p.239-245 (2004).
88. A. Evtukh, V. Litovchenko, M. Semenko, at.all, Formation of conducting nanochannels in diamond-like carbon films, *Semicond. Sci. Technol.* 21, p. 1326-1330 (2006).
89. V. Matolin, I. Matolinova, K. Veltruska, K. Masek, Photoelectron spectroscopy and secondary ion mass spectrometry characterization of diamond - like carbon films, *Thin solid films*, 515, p. 5386-5390 (2007).
90. W. Cai, J. H. Sui, *Surf. Coatings Technol.*, 201, p. 5194 (2007).
91. A. Bandavid, P. J. Martin, at all, The mechanical and biocompatibility properties of DLC-Si films prepared by DC plasma activated chemical vapor deposition, *Diamond and Related Materials*, 16, 1616-1633 (2007).
92. T. Iseki, H. Mori, H. Hasegawa, H. Tachikawa, K. Nakanishi, Structural analysis of Si-containing diamond-like carbon, *Diamond and Related Materials*, 15, 1004-11010 (2006).

93. A. Hu, W. W. Duley, Surface enhanced Raman spectroscopic characterization of molecular structures in diamond-like carbon films, *Chemical Physics Letters* 450, 375-378 (2008).
94. M. Veres, M. Koos, S. Toth, et al, Characterization of a-C:H and oxygen-containing Si:C:H films by Raman spectroscopy and XPS, *Diamond and Related Materials* 14, p.1056-1051 (2005).
95. H. Nakazawa, T. Kawabata, M. Kudo, M. Mashita, Structural changes of diamond-like carbon films due to atomic hydrogen exposure during annealing, *Applied Surface Science*, 253, p.4188-4196 (2007).
96. Andrea Carlo Ferrari, Determination of bonding in diamond-like carbon by Raman spectroscopy, *Diamond and Related Materials*, 11, p.1053-1061 (2002).
97. R. Ramamurti, V. Shanov, R. N. Singh, S. Mamedov, P. Boolchand, Raman spectroscopy study of the influence of processing conditions on the structure of polycrystalline diamond films, *J.Vac.Sci. Technol. A* 24(2), p. 179-189 (2006).
98. S. Yamamoto, H. Kodama, T. Hasebe, A. Shirakura, T. Suzuki, Oxygen transmission of transparent diamond-like carbon Films, *Diamond and Related Materials*, 14, p.1112-1115 (2005).
99. B. J. Baliga, *Power semiconductor devices*, PWS Publishing Company, Boston, (2008).
100. R. Bilyalov, Z. Matic, J. Poortmans, F. Schomann, W. Schmidt, *IEEE Transactions on Electron Devices*, p. 291 – 294 (2005).
101. Y. S. Tsuo, J. R. Pitts, K. R. Jantzen, S. E. Asher, M. M. Al-Jassim, T. F. Cizek, *Porous Silicon Gettering*, The 25th PVSC, p. 461-464, (1996).
102. J. Wong-Leung, C. E. Ascheron, M. Petravic, R. G. Elliman, J. S. Williams, *Gettering of Copper to Hydrogen-Induced Cavities in Silicon*, *Appl. Phys. Lett.*, 66, p. 1321-1233 (1995).
103. C. S. Chen, D. K. Schroder, *Kinetics of Gettering in Silicon*, *J. Appl. Phys.*, 71, p. 5858-5864 (1992).

104. Y. Zhao, D. Yang, D. Li, M. Jiang, Annealing and amorphous silicon passivation of porous silicon with blue light Mission, Applied Surface Science 252, p. 1065 – 1069 (2005).
105. С. Н. Никифорова-Денисоваю, С. А. Пименов, Е. Л. Хитро, Снижение дефектности в кремниевых пластинах с помощью лазерного гетерирования, Электронная техника, Серия 3, Микроэлектроника, Москва, вып. 4(133), p. 24 – 27 (1989).
106. M. R. Poponiak, Method for Gettering Contiminants in Monocrystalline Silicon, US Patent No. 3929529, Dec. 30 (1975).
107. AUTOLAB for Electrochemical Purpose, Autolab Manual.

Padėka

Vadovei doc. habil. dr. Irenai Šimkienei ir prof. habil. dr. Jurgiui Babonui – už paramą ir konsultacijas.

Habil. dr. E. Gaubui – už paviršinės rekombinacijos matavimus ir moralinę paramą.

Prof. habil. dr. A. Laurinavičiui – už silicio plokštelių homogeniškumo matavimus.

A. ir G. Steikūnams už patarimus ir pagalbą izoliacinių griovelių matavimuose.

Recenzentams ir oponentams prof. habil. dr. A. Laurinavičiui ir prof. habil. dr. K. Juodkaziui – už pastabas ir kritiką.

„Vilniaus Ventos puslaidininkų“ vadovybei – už suteiktą progą gamyboje atlikti eksperimentinius tyrimus.

„Vilniaus Ventos puslaidininkų“ kolegoms:

E. Navickienei, K. Mikšai, G. Pranauskienei, J. Danieliui, A. Kaškonui, A. Beigai, K. Taliunui, V. Gruzdžiui, V. Čyriui, J. Suckel, D. Vencevičiūtei, M. Šagalovui, V. Bražiūnienei ir A. Šauliui.

Bendražygiui dr. J. Višnakovui – už kartu nueitą kelią.

Tėvams – už skatinimą dirbti mokslo srityje.

Žmonai Editai – už supratimą ir kantrybę.