

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

Antoni KOZIČ

ĮVAIRIALYČIŲ $A^{III}B^V$ DARINIŲ
TYRIMAS MIKROBANGOSE

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02P) kondensuotos medžiagos: elektrinė
struktūra, elektrinės, magnetinės ir optinės savybės, superlaidininkai,
magnetinis rezonansas, relaksacija, spektroskopija (P 260)

1502-M

Vilnius, 2008

Disertacija rengta 2003–2008 metais Pustlaidininkų fizikos institute.

Darbo mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Steponas AŠMONTAS (Pustlaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Konsultantas

habil. dr. Algirdas SUŽIEDĖLIS (Pustlaidininkų fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1502-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-??-??-?

© Kozič, A. 2008

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2008

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama, kaip padidinti susiaurintų spinduliuotės jutiklių jautrį. Taip pat disertacijoje siekiama ištirti mikrobangų spinduliuotės poveikį susiaurintiems puslaidininkiniams dariniams ir atskleisti stebimų efektų fizinę prigimtį bei nustatyti bandinių struktūros įtaką detektuojamo signalo dydžiui.

Darbe sprendžiami tokie pagrindiniai uždaviniai: tiriamos įvairialyčių susiaurintų puslaidininkinių darinių savybės, priklausančios nuo darinių sluoksnių kokybės ir puslaidininkinių medžiagų parametrų bei analizuojamos savybės, priklausančios nuo stipriai legiruoto puslaidininkinio sluoksnio laidumo, nuo skiriamąjo sluoksnio storio ir nuo sklendės pobūdžio metalizacijos. Siekiant užsibrėžto tikslo, buvo gaminami ir tiriami susiaurinti skirtingi įvairialyčiai dariniai (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs) ir n-GaAs dariniai.

Disertaciją sudaro penki skyriai, kurių paskutinis – rezultatų apibendrinimas.

Pirmajame (įvadiniam) skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas mokslinis darbo naujumas, pristatomi autoriaus pranešimai, disertacijos struktūra.

Antrasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame apžvelgiami elektromagnetinės spinduliuotės detektavimo principai, aptariamos šiluminės ir bigradientinės elektrovaros susidarymo priežastys, AlGaAs/GaAs įvairialyčių sandūra, selektyvusis legiravimas bei puslaidininkinių prietaisų fizikinės galimybės.

Trečiajame skyriuje pateikta eksperimento tyrimo metodika. Išsamiai aprašyti pagrindinės bangos stačiakampiame bangolaidyje sklidimo ypatumai ir perduodama galia. Pateiktos jutiklių voltvatinių charakteristikų matavimų stendų schemos bei voltamperinių charakteristikų matavimo blokinės schemos. Aprašytas bandinių auginimas molekulinį pluoštų epitaksijos būdu ir šiuo būdu užaugintų susiaurintų n-GaAs, AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs darinių sluoksnių sandara bei technologiniai gamybos procesai.

Ketvirtajame skyriuje pateikti šių darinių eksperimentinių tyrimų rezultatai, gauti tiriant bandinius elektromagnetine spinduliuote.

Disertacijos pabaigoje pateiktos bendros išvados.

Disertacijos tema perskaityta 11 pranešimų užsienio šalių bei Lietuvos konferencijose ir paskelbta 10 straipsnių: šeši straipsniai – Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo (Thomson ISI Web of Science) leidiniuose, vienas straipsnis – Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo (Thomson ISI Master List) leidinyje, trys straipsniai – Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose (Thomson ISI Proceedings).

Abstract

The thesis presents the investigation on how to increase the sensitivity of the narrowed sensors of radiation. Also the thesis also deals with the attempts to analyze the influence of the microwave radiation on to the narrowed semiconductor formations and to reveal the physical nature of the observed effects as well as to determine the influence of structure of the samples on the detected signal magnitude.

The work solves the following major tasks: the characteristics of the narrowed semiconductor heterostructures depending on the quality of the modulation layers and on the parameters of the semiconductor materials as well as the characteristics, depending on the selectively doped structure, on the conductivity of the highly doped semiconductor layer, and on the thickness of the separating layer, and the type of metallization of the gate. In order to achieve the goal there were produced and investigated narrowed different heterostructures (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs) and n-GaAs structures.

The thesis consists of four chapters, the final one is the generalization of the results.

The first chapter (introductory) deals with the actuality of the problem, the aim and the tasks are stated, the novelty of the scientific research is described, the reports of the author are presented together with the publications, and the structure of the thesis.

The second chapter is assigned to the review of the literature. It presents the principals of electromagnetic radiation detection, the reasons for formation of the thermal and bi-gradient electromotive forces, analyzes the AlGaAs/GaAs heterojunction selective doping as well as physical possibilities of semiconductor devices.

The third chapter presents the experimental methodology of the investigation. The peculiarities of the propagation of the leading wave in the rectangular waveguide as well as the transmitted power are described extensively. The schemes of the panels of the measurements on the voltage-power characteristics of the sensors as well as the block diagram of the voltage-current characteristics measurement are presented. There is also described the growth of the samples by means of molecular beam epitaxy and the content of the layers of the narrowed n-GaAs, AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs structures grown by this method as well as the technological processes of samples production.

The fourth chapter presents the results of the experimental investigation of the structures, obtained with the samples under the electromagnetic radiation. The thesis is finalized by presenting the general conclusions derived.

There have been presented 11 reports concerning the theme of the thesis in international and Lithuanian conferences. There were published 10 articles, namely six articles were published in the Thomson ISI Web of Science publications, one article was published in the publication of Thomson ISI Master List, and three articles were published in the referred publications of Thomson ISI Proceedings.

Žymėjimai

Simboliai

N_D	donorų tankis;
N_A	akceptorių tankis;
μ	krūvininkų judris;
α	gardelės konstanta;
R_{S0}	bandinio varža;
v_d	dreifo greitis;
S	voltvatinis jautris.

Santrumpos

Si	silicis;
Ge	germanis;
GaAs	galio arsenidas;
AlGaAs	aliuminio galio arsenidas;
InGaAs	indžio galio arsenidas;
InAlAs	indžio aliuminio arsenidas;
AlAs	aliuminio arsenidas;
InAs	indžio arsenidas;
SAD	superaukštas dažnis;
2DE	dvimačiai elektronai;
MOS	<i>angl. – metal-oxide-semiconductor;</i>
SiO ₂	silicio oksidas;
MPE	molekulinių pluoštų epitaksija;
2DEG	<i>angl. – two-dimensional electron gas;</i>
HEMT	<i>angl. – high electron mobility transistor;</i>
PHEMT	<i>angl. – pseudomorphic high electron mobility transistor;</i>
VACH	voltamperinė charakteristika.

Turinys

Reziumė	iii
Abstract	iv
Žymėjimai	v
1. Įvadas	1
1.1. Tiriama problema	1
1.2. Darbo aktualumas	2
1.3. Tyrimų objektas	3
1.4. Darbo tikslas	3
1.5. Darbo uždaviniai	3
1.6. Tyrimų metodai	3
1.7. Mokslinis darbo naujumas	4
1.8. Praktinė vertė	4
1.9. Ginamieji teiginiai	4
1.10. Darbo rezultatų aprobavimas	5
1.11. Disertacijos struktūra	5
2. Literatūros apžvalga	7
2.1. Krūvininkų kaitimas puslaidininkyje	7
2.2. Šiluminės elektrovaros susidarymas ir jos matavimai	9
2.3. Bigradientinės elektrovaros susidarymas	12
2.4. Elektromagnetinės spinduliuotės jutikliai	14
2.5. Įvairialytės sandūros	19
2.5.1. GaAs-AlGaAs įvairialytė sandūra	20
2.5.2. Selektyvusis legiravimas	22
2.6. Puslaidininkinių prietaisų fizikinės galimybės	30
2.7. Uždavinių formulavimas	32

3. Eksperimento tyrimo metodika ir bandiniai.....	33
3.1. Stačiakampio bangolaidžio analizė	33
3.2. Eksperimento metodika.....	36
3.3. Tiriamieji bandiniai	40
3.4. Skyriaus išvados	49
4. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	51
4.1. Tyrimų rezultatai	51
4.2. Diodai su n-GaAs stipriai legiruotu sluoksniu	52
4.3. Diodai su skirtingais skiriamaisiais sluoksniais	56
4.4. Diodai su ir be supergardelės buferinio sluoksnio	60
4.5. Diodai su InGaAs sluoksniu.....	66
4.6. Diodai su sklendės pobūdžio metalizacija.....	68
4.7. Skyriaus išvados	76
5. Rezultatų apibendrinimas.....	79
Bendrosios išvados	79
Literatūros sąrašas	81
Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema	90
Padėka.....	93

1

Įvadas

„Norėčiau žinoti Dievo mintis...visa kita yra tik detalės“

Albert Einstein

1.1. Tiriamoji problema

Puslaidininkų fizikos institute (PFI) nuo pat jo įkūrimo pradžios atliekami krūvininkų kaitimo puslaidininkiuose tyrimai, naudojant SAD elektromagnetinę spinduliuotę. Šių tyrimų pagrindu buvo sukurti elektromagnetinės spinduliuotės jutikliai. Mikrobangų elektromagnetinės spinduliuotės dažnių ruože tyrimai turi tam tikrų ypatumų. Iki šiol sukurti puslaidininkiniai (Si, Ge) elektromagnetinės spinduliuotės jutikliai nepasižymi dideliu jautriu (kiekvienas iš jų turi savų privalumų ir trūkumų). Todėl svarbu turėti jautrius mikrobangų spinduliuotės jutiklius, nes krūvininkų pakaitinimas puslaidininkyje yra tiesiog proporcingas jautriui. Panaudojus įvairialyčius darinius galima pagerinti bandinių jautrį. Įvairialytėje sandūroje susidaręs dvimačių elektronų (2DEG) kanalas leidžia pasiekti itin dideles krūvininkų judrio vertes, todėl galima padidinti tokių jutiklių jautrį. Mažinant jutiklių matmenis, taip pat galima padidinti jutiklių jautrį, tačiau didėja ir jutiklių varža. Didėjant varžai, jutiklių neįmanoma panaudoti matuojant trumpus elektromagnetinės spinduliuotės impulsus. Todėl vienas iš sprendimo būdų – naudoti puslaidininkines medžiagas su dideliu krūvininkų judriu. Tokie

jautrūs karštųjų krūvininkų diodai paprastai naudojami mažos galios elektromagnetinės spinduliuotės signalų detekcijai. Svarbu, kad šie jutikliai detektuotų elektromagnetinę spinduliuotę tiesiogiai, be išorinės įtampos postūmio, t.y. detektuojama įtampa tiesiogiai matuojama tarp diodo, patalpinto į elektromagnetinį lauką, išvadų. Tai ženkliai supaprastina mikrobangų elektromagnetinės spinduliuotės imtuvų konstrukciją, didina jų patikimumą, mažina kainą ir jie tampa universalesni taikymuose.

Siekiant užsibrėžto tikslo, buvo gaminami ir tiriami susiaurinti skirtingi įvairialyčiai dariniai (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs) ir n-GaAs dariniai. Gaminat AlGaAs/GaAs įvairialyčius darinius buvo pagaminti ne tik dariniai su skirtingais sluoksnių storiais, bet ir AlGaAs/GaAs dariniai su įterpta medžiaga (InGaAs sluoksnis) bei AlGaAs/GaAs dariniai su sklendės pobūdžio metalizacija. Molekulinių pluoštų epitaksijos būdu buvo užauginti visų šių medžiagų sluoksniai. Tai leido pirmą kartą pagaminti įvairialyčius asimetriškai ir simetriškai susiaurintus selektyviai legiuotus AlGaAs/GaAs, pseudomorfinius AlGaAs/InGaAs/GaAs bei asimetriškai ir simetriškai susiaurintus stipriai legiuotus n-GaAs darinius, kuriuos ateityje galima bus naudoti įvairių elektronikos prietaisų kūrimui. Tiriant AlGaAs/GaAs darinių elektrines savybes, buvo atliekami darinių fotoluminescencijos tyrimai bei tiriama darinių sluoksnių įtaka darinių savybėms.

1.2. Darbo aktualumas

Šiuolaikinės puslaidininkų elektronikos vystymąsi didele dalimi nulemia fundamentalieji tyrimai puslaidininkų fizikos srityje. Svarbią vietą užima puslaidininkų, esančių stipriuose elektriniuose laukuose, savybių tyrimas elektromagnetinės mikrobangų spinduliuotės ruože. Taikymo požiūriu šis elektromagnetinės spinduliuotės ruožas kelia susidomėjimą ryšių, gynybos, medicinos ir kt. specialistams. Šiuo metu pagrindinė elektronikos vystymosi kryptis – nanoelektronika, kuri netolimoje ateityje pakeis tradicinę mikroelektroniką. Mažinant puslaidininkinių elementų matmenis ir tiriant fizikinius procesus, vykstančius juose veikiant elektromagnetine spinduliuote, atsiranda nauji reiškiniai, kuriuos ištyrus, galima kurti naujus prietaisus arba tobulinti jau žinomus. Sparčiai besivystant elektroninėms sistemoms, pastaruoju metu ypatingai išaugo susidomėjimas elektromagnetinės spinduliuotės detekcijos sistemomis. Mikrobangų elektromagnetinės spinduliuotės impulsai pasižymi plačiu dažnių juostos ruožu, todėl jutikliams, registruojantiems ir matuojantiems šių impulsų galią, keliami specifiniai reikalavimai.

1.3. Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektai yra susiaurinti selektyviai legiruoti skirtingi įvairialyčiai puslaidininkiniai AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs ir n-GaAs dariniai.

1.4. Darbo tikslas

Padidinti susiaurintų spinduliuotės jutiklių jautrį bei nustatyti bandinių struktūros įtaką detektuojamam signalui.

1.5. Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Ištirti mikrobangų spinduliuotės poveikį susiaurintiems puslaidininkiniams dariniams ir atskleisti stebimų efektų fizinę prigimtį.
2. Ištirti susiaurintų įvairialyčių puslaidininkinių darinių savybes priklausomai nuo darinių sluoksnių kokybės ir nuo puslaidininkinių medžiagų parametrų.
3. Ištirti mikrobangų jutiklių savybes, priklausančias nuo selektyviai legiruoto darinio, stipriai legiruoto puslaidininkinio sluoksnio laidumo nuo skiriamojo sluoksnio storio ir nuo sklendės pobūdžio metalizacijos.
4. Įvertinti AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs ir GaAs darinių praktinio panaudojimo galimybę kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

1.6. Tyrimų metodai

Darbe panaudota SAD matavimo metodika. Krūvininkams kaitinti darbe buvo naudojamas superaukšto dažnio elektromagnetinis laukas. Stipriuose elektriniuose laukuose naudojamas magnetroninis generatorius (10 GHz). Silpnuose elektriniuose laukuose SAD spinduliuotės šaltinis, buvo naudojamas klistroninis generatorius, kuris veikia (26-37,5) GHz dažnių ruože. Fotoluminescencijos tyrimai buvo atliekami panaudojant Ar jonų lazerio spinduliuotę, kurios kvanto energija 2,5 eV. Darinių voltamperinės charakteristikos buvo matuojamos naudojant kompiuterizuotas sistemas.

1.7. Mokslinis darbo naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie fiziniam mokslui nauji rezultatai:

1. Pirmą kartą tirta įvairialyčių susiaurintų selektyviai legiruotų AlGaAs/GaAs darinių su skirtingais skiriamųjų sluoksnių storiais, su supergardelės buferiniu sluoksniu, naudojant sklendės pobūdžio metalizaciją, ir pseudomorfinių AlGaAs/InGaAs/GaAs darinių savybės mikrobanguose laukuose.
2. Parodyta, kad veikiant susiaurintus įvairialyčius darinius mikrobangų spinduliuote, atsiranda elektrovara, kurios charakteris ir kiekybiniai parametrai priklauso nuo darinių sluoksnių kokybės, nuo puslaidininkinių medžiagų parametru bei mikrobangų dažnio.
3. Pasiūlyta submikrometrinių matmenų mikrobangų jutiklio konstrukcija su nesimetriškai ir simetriškai susiaurintais dariniais mikrobangų detekcijai aptikti.

1.8. Praktinė vertė

Gauti rezultatai gali būti panaudoti kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius, kurie detektuoja elektromagnetinę spinduliuotę tiesiogiai, be išorinio įtampos postūmio.

1.9. Ginamieji teiginiai

1. Eksperimentiškai nustatyta, kad nesimetriškai ir simetriškai susiaurintų mikrobangų diodų voltvatinis jautris priklauso nuo diodų kaklelio pločio ir didėja panaudojant puslaidininkines medžiagas su dideliu krūvininkų judriu.
2. Papildomo nelegiruoto InGaAs sluoksniu įterpimas susiaurintuose selektyviai legiruotuose AlGaAs/GaAs mikrobangų dioduose tarp skiriamąjo i-AlGaAs sluoksniu ir nelegiruotojo i-GaAs sluoksniu, neperžengus InGaAs kritinio sluoksniu storio, padidina jutiklių voltvatinį jautrį tiek skystojo azoto, tiek kambario temperatūrose.
3. Naudojant nesimetriškai susiaurintuose selektyviai legiruotuose AlGaAs/GaAs mikrobangų dioduose sklendės pobūdžio metalizaciją virš aktyviojo sluoksniu, galima žymiai padidinti diodų voltvatinį jautrį tiek kambario, tiek skystojo azoto temperatūrose.

1.10. Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema paskelbtos 10 mokslinės publikacijos, iš jų 6 straipsniai žurnaluose su Thomson ISI Web of Science citavimo indeksu [1A–6A], 1 straipsnis žurnale su Thomson ISI Master Journal List citavimo indeksu [7A], 3 straipsniai tarptautinių konferencijų recenzuotų pranešimų leidiniuose [8A–10A], referuotame MII duomenų bazėse (Thomson ISI Proceedings). Disertacijos rezultatai aptarti 7 tarptautinėse konferencijose:

- *Directed energy professional society, Huntsville, Alabama (USA), November 9, 2007;*
- *13th International symposium on ultrafast phenomena in semiconductors (UFPS 13), Vilnius, Lithuania, Aug. 26–29, 2007;*
- *International conference advanced optical materials and devices, Vilnius, Lithuania 27–30 August, 2006;*
- *XXXV International school on the physics of semiconducting compounds Jaszowiec, June 17–23, 2006;*
- *An international joint conference of 4th ESA workshop on millimetre wave technology and applications, Finland, Espoo, February 15–17, 2006;*
- *12th International symposium on ultrafast phenomena in semiconductors (UFPS 12), Vilnius, Lithuania, Aug. 22–25, 2004;*
- *13th International conference on nonequilibrium carrier dynamics in semiconductors (HCIS-13), Modena, Italy, July 28–Aug.1, 2003;*

Disertacijos rezultatai aptarti 1 užsienio konferencijoje:

- *X Seminarium powierzchnia i struktury cienkwarstwowe, Poland, Szklarska Poręba Średnia, 17–21 maja, 2005;*

Disertacijos rezultatai aptarti 2 nacionalinėse konferencijose:

- *Puslaidininkų fizikos instituto XVII mokslinės konferencijos, skirtos akad. Juro Poželos 80-mečiui pažymėti, darbai, Vilnius, gruodžio 5–8 d, 2005;*
- *36-oji nacionalinė fizikos konferencija (LNFK 36), Vilnius, birželio 16–18 d., 2005;*

Išspausdintos 3 mokslinės publikacijos konferencijų pranešimų rinkiniuose.

1.11. Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 3 pagrindiniai skyriai, darbo išvados, nuorodos į 86 literatūros šaltinius, pateiktas 10 publikacijų disertacijos tema sąrašas. Iš viso 102 puslapiai teksto, 55 paveikslai.

Literatūros apžvalga

Skyriuje apžvelgiami elektromagnetinės spinduliuotės detektavimo principai, aptariama šiluminės ir bigradientinės elektrovaros susidarymo priežastys, AlGaAs/GaAs įvairialytė sandūra, selektyvusis legiravimas bei puslaidininkinių prietaisų fizikinės galimybės.

2.1. Krūvininkų kaitimas puslaidininkyje

Mikrobangų spinduliuotė – tai didelio dažnio (trumpųjų bangų) radijo bangos, apimančios 0,3–300 GHz dažnių ruožą arba 0,1–100 cm bangų ilgio ruožą. Mikrobangų spinduliuotės ruožas yra vienas iš labiausiai dominančių mokslo krypčių dėl jo plataus taikymo radiolokacijoje, ryšių technikoje, karinėse technologijose, medicinoje, kosminėje aparatūroje ir t.t. Šis ruožas yra vienas intensyviausiai tiriamų. Jį naudojant ypač svarbų vaidmenį vaidina detekcijos sistemos. Jos gali būti labai įvairios, atsižvelgiant į taikymo paskirtį ir mikrobangų galią. Šio ruožo srities detektavimo bei matavimo sistemos per pastaruosius dešimtmečius pasiekė revoliucinius vystymosi etapus. Tobulėjant bevielio ryšio priemonėms, veikiančioms mikrobangų ruože, mikrobangų prietaisai įsitvirtino komercinėje rinkoje [1]. Šiuo metu puslaidininkiniuose mikrobangų prietaisuose taikomos įvairialytės sandūros (AlGaAs/GaAs, InAlAs/InGaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs ir kt.) [2], taip pat tobulinami Si ir GaAs technologijomis pagrįsti prietaisai.

Priklausomai nuo spinduliuotės galios, detekcijai naudojami įvairūs jutikliai. Jei spinduliuotės galia yra maža, paprastai naudojamas kontaktas metalas-puslaidininkis su Šotkio barjeru (Šotkio diodai) arba bolometrai, kurių jautriai gali siekti iki tūkstančio V/W [3].

Jei spinduliuotės galia yra didelė, jie tiesiog neatlaiko elektromagnetinės mikrobangų spinduliuotės (sudega). Taigi šie prietaisai nėra tinkami, todėl elektromagnetinės spinduliuotės detekcijai reikia naudoti kitus jutiklius.

Vienas iš būdų detektuoti elektromagnetinę spinduliuotę mikrobangų ruože – laisvųjų krūvininkų kaitimo reiškinių panaudojimas. Kaip žinia, laisvieji krūvininkai nekompensuojuose puslaidininkiuose sugerdami spindulius įkaista ir jų vidutinė temperatūra stipriuose elektriniuose laukuose gali ženkliai viršyti pusiausvyrinę gardelės temperatūrą. Tokie krūvininkai, kurių energija didesnė už pusiausvyrinę energiją, vadinami karštaisiais krūvininkais. Eksperimentiniuose darbuose [4] parodyta, kad krūvininkų įkaitimo ir atšalimo trukmė, dar vadinama krūvininkų energijos relaksacijos trukme, yra labai trumpa. Kambario temperatūroje ji lygi keletui pikosekundžių ($\sim 10^{-12}$), o mažinant kristalinės gardelės temperatūrą, didėja ir skystojo azoto temperatūroje gali pasiekti 10^{-10} – 10^{-11} sekundžių [4]. Kad išvengtume kristalinės gardelės kaitimo, krūvininkų kaitimui naudojami trumpi mikrobangų spinduliuotės impulsai nuo nanosekundžių iki kelių mikrosekundžių. Stiprūs elektriniai laukai ir karštieji elektronai naudojami praktiškai visuose didelės veikimo spartos tranzistoriuose [5, 6].

Šiame skyrelyje aptarsime nevienalyčio kaitinimo reiškinius. Norint sukurti nevienalytį krūvininkų kaitimą puslaidininkyje, būtina sukurti netolygų elektrinio lauko pasiskirstymą. Tai galima pasiekti, pavyzdžiui, legiruojant medžiagą, apšvietus dalį bandinio, tokiu būdu sukuriant nevienalytį krūvininkų pasiskirstymą erdvėje. Nuo krūvininkų kaitimo būdo priklauso elektronų pasiskirstymo pagal energijos ir greičio reikšmes funkcijos.

Reikia pažymėti, kad elektrogradientinių reiškinių tyrimai susilaukė didelio tarptautinio pripažinimo. Korektiškai išmatuoti karštųjų elektronų šiluminę elektrovarą (ev) pavyko J. Poželai ir K. Repšui 1962 metais [7]. Pirmieji tyrimo rezultatai buvo paskelbti tarptautinėje puslaidininkų fizikos konferencijoje. Buvo nustatyta, kad šiluminės elektrovaros dydis labai priklauso nuo metalo-puslaidininkio sandūros kokybės. Šiluminės elektrovaros tyrimui reikėjo sukurti nehomogeniškumą su gerai žinomais parametrais. Šiuo tikslu 1969 m. pasiūlyta naudoti šviesą. Apšvietus puslaidininkinio bandinio dalį ir sudarius vieną elektrinio lauko gradientą apšviestoje, o kitą – neapšviestoje bandinio dalyje, grandinėje buvo stebima elektrovara, kurią S. Ašmontas ir K. Repšas pavadino fotogradientine elektrovara [8]. Matuojant fotogradientinės elektrovaros priklausomybę nuo elektrinio lauko stiprio bei bandinio orientacijos kristalografinių ašių atžvilgiu, buvo nustatyti elektronų kaitimo ypatumai stipriuose elektriniuose laukuose germanyje ir silicyje .

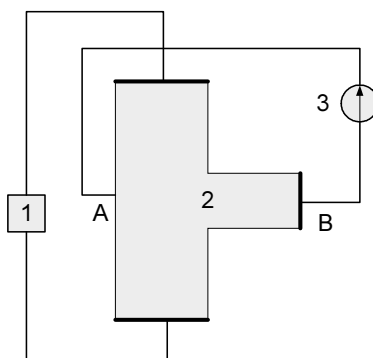
2.2. Šiluminės elektrovaros susidarymas ir jos matavimai

Realiomis sąlygomis puslaidininkiniuose dariniuose beveik visada būna įvairūs nevienalytiškumai, t.y. kontaktai, sandūros, netolygus priemaišų pasiskirstymas, kristalinės gardelės defektai ir t.t. Paveikus nevienalytį puslaidininkį stipriu elektriniu lauku, pakinta krūvininkų pasiskirstymas pagal energijas ir bandinyje susidaro elektrovara. Ji vadinama karštųjų krūvininkų šilumine elektrovara (dėl analogijos su Zeebeko elektrovara [9]).

Nesant išorinio elektrinio lauko poveikio, nevienalytiškumo vietoje difuzinės srovės kompensuojamos dreifinėmis ir susidaro potencialinis barjeras. Pridėjus išorinį kaitinantį elektrinį lauką, pakinta difuzinės ir dreifinės srovių dedamosios. Jeigu turime uždara grandinę, ja ima tekėti elektrinė srovė. Jeigu grandinė atvira, tai tarp puslaidininkio sričių su nevienodais krūvininkų tankiais pakis kontaktinis potencialų skirtumas – susidarys elektrovara, kurią vadiname kontaktine karštųjų krūvininkų šilumine elektrovara.

Jei kaitinsime vienalyčio puslaidininkio elektronų dujas, tai pastarieji difunduos iš karštosios srities į šaltąją sritį. Stacionariu atveju, kai grandinė atvira, visuose puslaidininkio taškuose srovės tankis bus lygus nuliui – difuzinių elektronų srautą kompensuos dreifinis. Tokiu būdu, tarp šaltosios ir karštosios puslaidininkio sričių atsiras potencialų skirtumas, kuris vadinamas tūriniu karštųjų elektronų šilumine elektrovara [9]. Kontaktinės ir tūrinės šiluminės elektrovaros suma paprastai ir yra matuojamoji karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovara.

Pirmasis karštųjų elektronų šiluminę elektrovarą tyrė Štenbekas 1956 metais [10], naudojant T formos bandinius (2.2.1 pav.). Nežiūrint išorinio paprastumo, tokie matavimai yra gana sudėtingi.

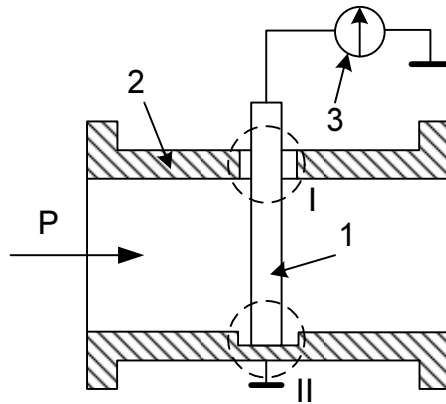


2.2.1 pav. Karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros T formos bandiniuose matavimo schema. 1 – generatorius, 2 – bandinys, 3 – voltmėtras (Штенбек, М. 1956 [10])

Pirma, šiluminės elektrovaros matavimo grandinė yra galvaniskai surišta su kaitinimo grandine, o pati šiluminė elektrovara yra 3–4 eilėms mažesnė už kaitinančiąją įtampą. Antra, zondas A iškraipo elektrinį lauką ir sumažina matavimo tikslumą. Be to, kartu su naudingą signalu susidaro ir pašalinės elektrovaros [9]. Todėl Štenbeko gautus rezultatus galima laikyti tik kokybiniais, nors eksperimento idėja ir buvo teisinga.

1962 metais buvo sukurta tobulesnė metodika karštųjų krūvininkų šiluminei elektrovarai tirti [11]. Krūvininkai buvo kaitinami SAD elektriniu lauku. Tai leido atskirti matavimo grandinę nuo kaitimo grandinės, tirti šiluminę elektrovarą plačiame elektrinių laukų ruože.

Matavimo metodikos esmė tokia: dalis bandinio patalpinama bangolaidyje ir ją veikia SAD elektrinis laukas (2.2.2 pav.). Kitoje bandinio dalyje, esančioje už bangolaidžio, SAD laukas artimas nuliui. Tokiu būdu sukuriamas krūvininkų energijos gradientas bandinio tūryje (I sritis) ir kontaktinėje srityje (II sritis). Taip atsiranda ir tūrinė, ir kontaktinė karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovara.



2.2.2 pav. Karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros matavimo schema SAD metodu. 1 – bangolaidis, 2 – bandinys, 3 – voltmetas

Kaitinant krūvininkus SAD elektriniu lauku, reikia atsižvelgti ir į pašalines elektrovaras:

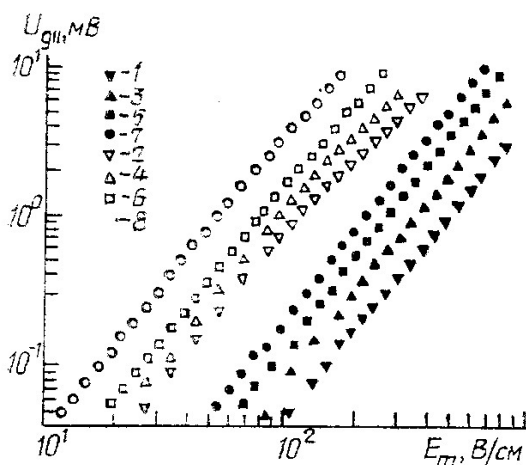
- 1) elektrovarą, susidarančią kontakte dėl SAD srovių lyginimo [12, 13],
- 2) harmoelektrovarą, susidarančią bandinyje su netiesine voltamperine charakteristika, kai traktu sklinda aukštesnės eilės harmonikos [14, 15].

Eksperimentiškai negalima atskirti išlyginto kontakte signalo nuo karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros, nes jų ženklai sutampa. Šių elektrovarų įtaką matuojamojo signalo didumui galima įvertinti tik teoriškai. Harmoelektrovai

panaikinti naudojami bangolaidiniai filtrai bei pasirenkamas atitinkamas trakto ilgis.

Galimos dar tokios elektrovaros, kurios yra surištos su srovės suspaudimu (reiškiny s analogiškas Bernulio efektui skysčiams, tekantiems kintamo skerspjuvio vamzdžiais) [16, 17], bei su elektroninių dujų suspaudimu savosios srovės magnetiniame lauke [4]. Jų dydžiai yra maži, lyginant su matuojamu signalu. Daugiaslėniuose puslaidininkiuose, veikiant krūvininkus elektriniu lauku, gali susidaryti ir tūrinė elektrovara, nulemta anizotropinio tarpšlėninio elektronų pasiskirstymo [18]. Jos galima išvengti reikiamai orientuojant bandinį (elektrinio lauko stiprio vektorių, tankio gradiento ar kristalografinių krypčių atžvilgiu).

Pirmieji eksperimentiniai krūvininkų nevienalyčiuose puslaidininkiuose kaitimo SAD elektriniame lauke tyrimai buvo atliekami su ominiais metalas-puslaidininkis kontaktais [11]. Juose parodyta, kad įmanoma matuoti karštųjų krūvininkų išilginę šiluminę elektrovarą U_{dII} (kai elektrinio lauko stiprio vektorių E_m lygiagretus tankio gradientui) kintančiame elektriniame lauke. Vėliau tokiems eksperimentams skirta žymiai daugiau darbų [9]. Pavyzdžiui, darbo [19] autoriai parodė, kad šiltųjų elektronų srityje U_{dII} susieta su elektrinio lauko stiprio kvadratine priklausomybe ($U_{dII} \sim E_m^2$), tai gerai atitiko teorinius samprotavimus (2.2.3 pav.). Reiktų pastebėti žymią matuojamojo signalo priklausomybę nuo bandinio legiravimo laipsnio.



2.2.3 pav. U_{dII} priklausomybė nuo SAD elektrinio lauko amplitudės, esant skirtingiems elektronų tankiams n -srityje. n , cm^{-3} : 1 – $5,1 \cdot 10^{14}$; 2 – $4,2 \cdot 10^{14}$; 3 – $1,7 \cdot 10^{14}$; 4 – $1,6 \cdot 10^{14}$; 5, 6 – $4,4 \cdot 10^{13}$; 7, 8 – $1,6 \cdot 10^{13}$. T , K: 1, 3, 5, 7 – 300; 2, 4, 6, 8 – 80 (Ašmontas, S. 1984 [20])

Panaudojus teoriškai išvestas formules ir VACH matavimo rezultatus, buvo apskaičiuota elektronų energijos relaksacijos trukmė, kurios vertės gerai sutapo su kitais būdais gautomis vertėmis. Darbe [21] autoriai parodė, kad karštųjų elektronų šiluminė elektrovara priklauso nuo $n-n^+$ sandūros statumo – kuo ji statesnė, tuo detektuojamas signalas mažesnis.

Nustačius, kad egzistuoja karštųjų krūvininkų difuzijos koeficiento anizotropija kaitinančio elektrinio lauko krypties atžvilgiu [22], manyta, kad turėtų būti anizotropinė ir karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovara. Darbuose [23, 24] buvo parodyta, kad priklausomai nuo bandinių savybių, skersinė karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovara būna daugiau ar mažiau silpnesnė už išilginę.

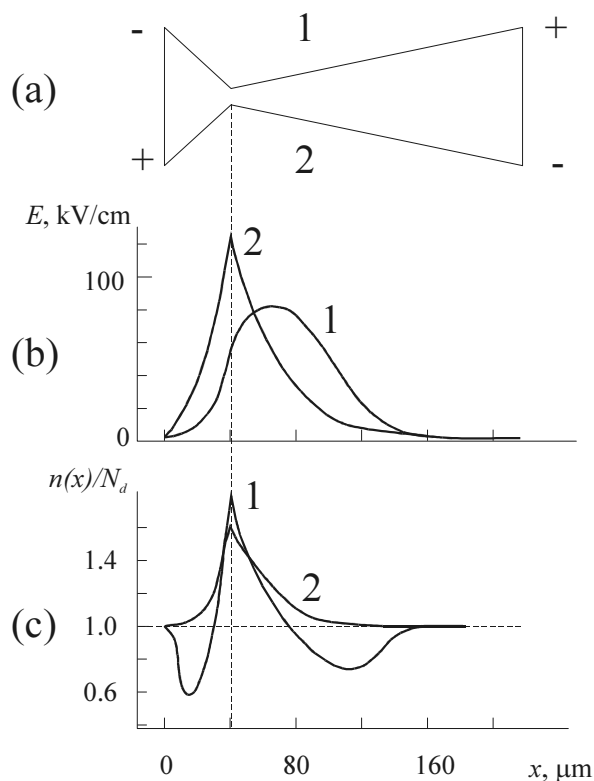
Dabartiniu metu karštųjų krūvininkų šiluminė elektrovara gerai iširta skyliniame bei elektroniniame germanyje ir silicyje.

2.3. Bigradientinės elektrovaros susidarymas

Aptarsime atvejį, kai nevienalytis krūvininkų kaitimas sukuriama suteikiant bandiniui asimetrinę formą. Esant nevienalyčiam krūvininkų kaitimui, vienalyčiame puslaidininkyje susidaro elektrovara. Šis reiškinys buvo pavadintas bigradientiniu efektu puslaidininkuose [25]. Šio reiškinio fizikinė esmė yra tokia: jei turime vienalytį puslaidininkį ir iš jo padarome asimetriškai susiaurintą bandinį, tai jis veikia kaip savotiškas puslaidininkinis diodas. Jo fizikinė detekcijos priežastis yra nevienalytis krūvininkų kaitimas, atsirandantis dėl asimetriškos darinio formos. Siaurinant tokio bandinio kaklelį, elektrinis laukas bandinyje stiprėja, o jo didžiausia vertė yra siauriausioje diodo dalyje. Tai aiškiai matyti iš 2.3.1 paveikslo (b).

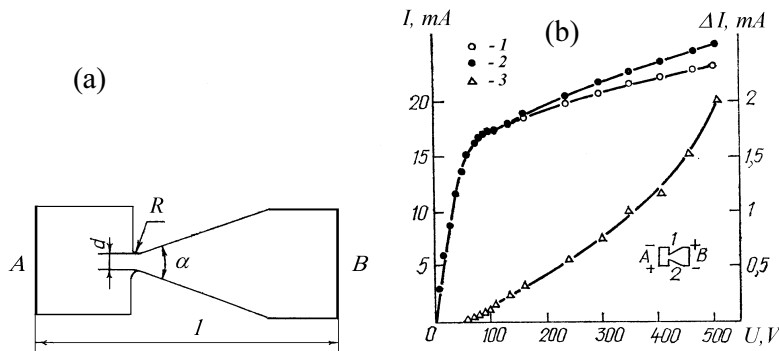
Susidarant nevienalyčiam laukui bandinyje, krūvininkų kaitimas yra nevienalytis, todėl karštųjų krūvininkų srautai nuo siauriausios bandinio vietos bus skirtingi. Tai nulems bandinio voltamperinės charakteristikos asimetriją ir ant bandinio, patalpinto į mikrobangų lauką, galų atsiradimą elektrovaros signalas, kuris proporcingas elektrinio lauko vertei bandinyje. 2.3.2 paveiksle (b) pateiktos voltamperinės charakteristikos išmatuotos susiaurintame n-Ge bandinyje. Matome, kad esant mažoms įtampoms (galiojant Omo dėsniai) per bandinį tekančios srovės dydis nepriklauso nuo pridėtos įtampos poliškumo, o esant didelėms įtampoms (viršijančioms 100 V, Omo dėsnis jau nebegalioja) voltamperinė charakteristika tampa asimetrinė.

Elektrovara bei elektrinio laidumo asimetrija vienalyčiame izotropiniame puslaidininkyje atsiranda todėl, kad elektrinis laukas nehomogeniškai įkaitina elektronus.



2.3.1 pav. Elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas (b) ir elektronų tankis nesimetriškai susiaurintame n-Si bandinyje (c), atvaizduota darinio forma (a); numeriai rodo įtampos poliškumą (Ašmontas, S. 1984 [20])

Karštieji elektronai, paklusdami difuzijos dėsniams, plinta iš karštosios srities į šaltąją. Kadangi elektronų temperatūros gradientai yra skirtingi, tai elektronai į abi puses nuo mažiausios skerspjūvio srities pasiskirsto nevienodai. Puslaidininkis tampa lyg ir nesimetriškai „legiruotas“, o tai sukuria naujo tipo elektrovarą – bigradientinę elektrovarą. Šis reiškinys ne tik leido nustatyti elektronų kaitimo ypatumus stipriuose nevienalyčiuose elektriniuose laukuose, bet ir ištirti nelokalinių ryši tarp puslaidininkio kinetinių koeficientų bei elektrinio lauko stiprio.



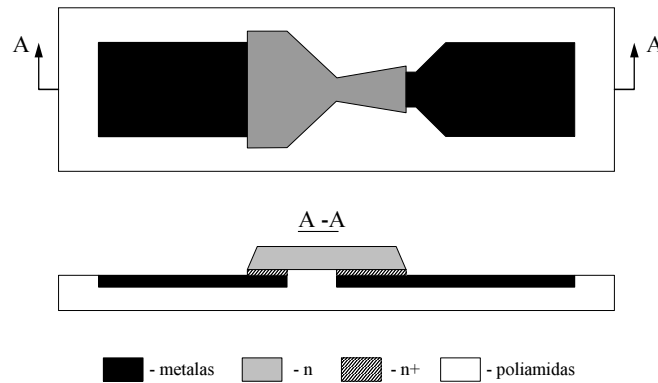
2.3.2 pav. Bandinio forma –(a): A ir B – ominiai kontaktai. (b) – n-Ge voltamperinė charakteristika, esant $T = 300\text{ K}$: 1 – atvirkščias poslinkis; 2 – tiesioginis poslinkis; 3 – srovių skirtumas pakeitus įtampos poliškumą (Ašmontas, S. 1984 [20])

Šio reiškinio pagrindu buvo sukurti naujo tipo diodai, skirti superaukšto dažnio elektromagnetinių svyravimų galios matavimams plačiam dažni ruože. Šis reiškinys 1977 m. birželio 2 d. pripažintas moksliniu atradimu, kurio autoriai yra S. Ašmontas, K. Repšas ir J. Požela.

2.4. Elektromagnetinės spinduliuotės jutikliai

Taikomuoju požiūriu Ge, Si bigradientiniai diodai nebuvo labai tinkami, nes jų jautris buvo per mažas. Kaip parodė teorinė analizė [26], diodo voltvatinis jautris (detektuotos įtampos ir spinduliuotės galios santykis) priklauso nuo puslaidininkinės darinių susiaurintos dalies matmenų. Mažinant diodo kaklelio plotį, galima padidinti jutiklio jautrį, bet dėl to didėja varža (blogėja suderinamumas su bangine bangolaidžio varža, mažėja jutiklio sugeriamoji galia). Taip pat, esant didelei bandinio varžai, didėja jutiklio inertškumas, o tai daro neįmanomu jo panaudojimą matuojant trumpus elektromagnetinės spinduliuotės impulsus. Todėl vienas iš šios problemos sprendimo būdų – panaudoti puslaidininkines medžiagas, kuriose didelis krūvininkų judris. Jutiklio varžos sumažinimui buvo pasiūlyta susiaurintą puslaidininkio dalį – papildomai legiruoti. Tokiu principu buvo sukurtas ir ištirtas nesimetriškai susiaurintas puslaidininkinis darinys su $n-n^+$ -GaAs sandūra [27]. Diodas turi $n-n^+$ sandūrą, todėl šalia bigradientinės elektrovaros atsiranda dar ir įprastinė šiluminė elektrovara. Taigi toks diodas tampa jautresnis. Nesimetriškai susiaurintas

elektromagnetinės spinduliuotės galios jutiklis su $n-n^+$ -GaAs sandūra parodytas 2.4.1 paveiksle.



2.4.1 pav. Asimetrisis $n-n^+$ -GaAs darinio diodas (Sužiedėlis, A., et al. 2000 [27])

Kaip padėklas GaAs bandiniui naudojama 10 μm storio poliimido plėvelė, turinti mažą dielektrinę konstantą, atspari temperatūros pokyčiams bei mechaniniams poveikiams, todėl ant jos suformuotas diodas tampa atsparesnis temperatūriniais ir mechaniniams poveikiams. Elektronų pasiskirstymas išilgai bandinio parodytas 2.4.2 paveiksle.

Procesus, vykstančius šiame prietaise, galime aprašyti fenomenologinės teorijos lygtimis [28]: srovės tankio, šilumos balanso, šilumos srauto tankio bei Puasono lygtimis:

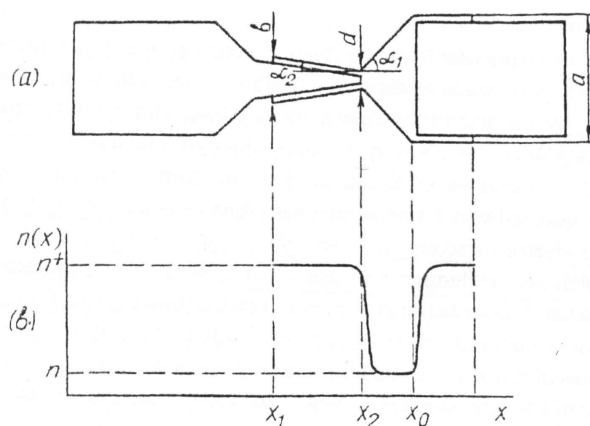
$$j(x) = en(x)\mu(\mathcal{E})\left[E(x) + \alpha \frac{d\mathcal{E}}{dx}\right] + eD(\mathcal{E}) \frac{dn}{dx}; \quad (2.4.1)$$

$$j(x)E(x) = n \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_0}{\tau_g} + \frac{1}{S(x)} \frac{d}{dx} [Q(x)S(x)]; \quad (2.4.2)$$

$$Q(x) = \prod j(x) - k \frac{d\mathcal{E}}{dx}; \quad (2.4.3)$$

$$\frac{1}{S(x)} \frac{d}{dx} [E(x)S(x)] = -\frac{e}{\varepsilon\varepsilon_0} [n(x) - N_d(x)]. \quad (2.4.4)$$

Čia e – elektrono krūvis; $n(x)$ – elektronų tankis; \mathcal{E} – elektrono vidutinė energija; $\mu(\mathcal{E})$ – elektronų judris; α – tūrinis šiluminės elektrovaros jėgos koeficientas; $D(\mathcal{E})$ – difuzijos koeficientas; $Q(x)$ – šiluminio srauto tankis; k – šiluminio laidumo koeficientas; ε – puslaidininkio dielektrinė skvarba; ε_0 – dielektrinė konstanta; N_d – donorų tankis; $\tau_{\mathcal{E}}$ – fenomenologinė elektronų energijos relaksacijos trukmė; $E(x)$ – elektrinio lauko stipris taške x ; $\prod j(x)$ – elektros srovės pernešamos energijos srautas; $S(x)$ – puslaidininkinio darinio skerspjūvio plotas.



2.4.2 pav. Asimetrinio $n-n^+$ -GaAs darinio diodo forma (a); elektronų pasiskirstymas išilgai bandinio – (b); $n-n^+$ -GaAs diodo parametrai: plotis $a = 100 \mu\text{m}$, n ir n^+ platėjimo srities kampas $\alpha_1 = 45^\circ$, $\alpha_2 = 8^\circ$ (Ašmontas, S., et al. 1994 [28])

Išsprendus šią lygčių sistemą, naudojant kraštines sąlygas:

$$n(x_0) = n = N_d, \quad n(x_1) = n^+ = N_d^+, \quad \mathcal{E}(x_0) = \mathcal{E}(x_1) = \mathcal{E}_0, \quad (2.4.5)$$

šiltųjų elektronų atveju, kai $\mathcal{E} \sim \mathcal{E}_0 \ll \mathcal{E}_0$, gaunamas diodo voltvatinis jautris:

$$S = \frac{U_d}{P} = \frac{2\rho^n \mu_0 \tan \alpha_1}{3hd^2 \ln(1+a/d)} N, \quad [V/W] \quad (2.4.6)$$

čia, ρ^n – medžiagos savitoji varža; μ_0 – krūvininkų judris; α_1 – n platėjimo srities kampas; h – diodo storis; d – diodo kaklelio plotis; a – diodo plotis; N – koeficientas, nusakantis voltatinio jautrio priklausomybę nuo dažnio.

Lygtys (2.4.1)–(2.4.4) bigradientinio diodo atveju analitiškai neišsprendžiamos todėl, kad elektronų judris ir difuzijos koeficientas yra nuo elektrinio lauko stiprio priklausančios funkcijos. Šios lygtys sprendžiamos dviem kraštiniais atvejais:

1) kai $\mu(E) = \mu_0 = \text{const}$, t.y. tenkinamas Omo dėsnis, krūvininkų tankis išilgai bandinio nekinta ir lygus $n(x) = N_d$, o elektrinio lauko stipris yra:

$$E(x) = \frac{E_0 S(0)}{S(x)}, \quad (2.4.7)$$

2) kai $\mu(x)E(x) = v_d$ ir $D(x) = 0$, tai elektronų tankio pasiskirstymas išilgai bandinio yra:

$$n(x) = \frac{n(x_k) S(x_k)}{S(x)}, \quad (2.4.8)$$

čia $n(x)$ – elektronų tankis taške x_k , kur dreifinis greitis yra išisotinės. Įstatę (2.4.7) į (2.4.4) ir suintegravę nuo x_k iki x , gauname elektrinio lauko stiprio pasiskirstymą išilgai bandinio:

$$E(x) = \frac{E(x_k) S(x_k)}{S(x)} + \frac{e N_d}{\epsilon \epsilon_0 S(x)} \left[\frac{I}{e N_d v_d} (x - x_k) - \int_{x_k}^x S(x) dx \right], \quad (2.4.9)$$

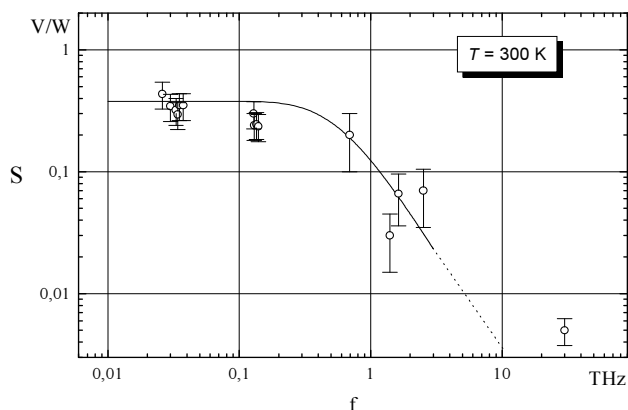
čia $I = e N_d \mu_0 E_0 S(0)$ – per bandinį tekanti srovė.

Iš (2.4.9) lygties matyti, kad elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas bandinyje ir jo didžiausia vertė priklauso nuo bandiniu tekančios elektros srovės krypties. Todėl vienalyčio nesimetriškai susiaurinto puslaidininkinio darinio voltamperinė charakteristika yra nesimetrinė (priklauso nuo pridėtos įtampos poliškumo) dėl erdvinio krūvio srities susidarymo stipriuose elektriniuose laukuose.

Iš atliktų skaičiavimų [29] paaiškėjo, kad n-n⁺-GaAs asimetriškai susiaurinto darinio voltatinis jautris nepriklauso nuo dažnio iki kelių šimtų GHz. Voltatinio jautrio sumažėjimas yra stebimas aukštesniuose dažniuose dėl baigtinės elektronų impulso relaksacijos trukmės. Dažninė voltatinio jautrio priklausomybė, esant kambario temperatūrai, parodyta 2.4.3 paveiksle.

Kaip matyti iš grafiko, jutiklio voltatinio jautrio vertės gerai aprašomos fenomenologinėmis lygtimis. Esant daugiau kaip 30 THz (infraraudonojoje elektromagnetinės spinduliuotės spektro srityje), jau negalioja fenomenologinė

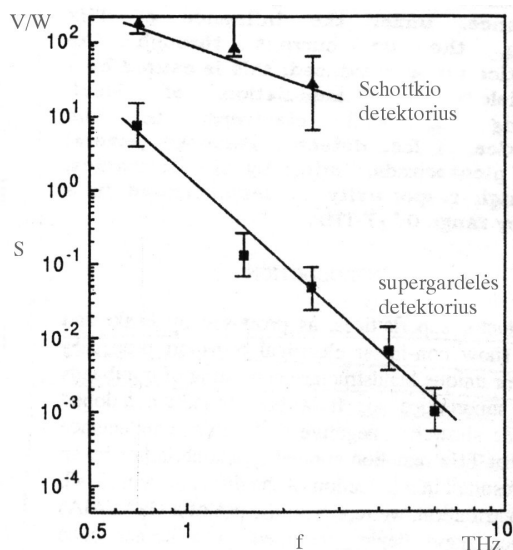
krūvininkų pernašos reiškinių teorija. Tai nesunku pastebėti iš grafiko – eksperimentinis taškas yra toli nuo teoriškai suskaičiuotos kreivės. Tokie jutkliai pasižymi plačia dažnių juosta ir tiesine voltvatine charakteristika, kuri yra pagrindinė jutiklio savybė (detektuotos įtampos priklausomybė nuo krintančios galios).



2.4.3 pav. Dažninė voltvatinio jautrio priklausomybė $n-n^+$ -GaAs asimetriškai susiaurintam elektromagnetinės spinduliuotės galios jutkliui kambario temperatūroje. Ištisa kreivė – skaičiavimai pagal fenomenologinę teoriją, taškai – eksperimentiniai duomenys. (Sužiedėlis, A., et al. 2003 [29])

Vienas iš būdų, taikomas plataus dažnių ruožo mikrobangų detekcijai aptikti yra puslaidininkinių supergardių panaudojimas. Grupė mokslininkų iš Regensburgo universiteto (Vokietija), GaAs/AlGaAs supergardių pagrindu pagamino jutklį [30]. Tokio jutiklio veikimo principas pagrįstas elektromagnetinės spinduliuotės sukeltomis Blocho osciliacijomis supergardiėje. Elektromagnetinė spinduliuotė jutiklyje yra koncentruojama į supergardię specialia antena, kuri indukuoja Blocho osciliacijas supergardiėje, todėl sumažėja srovė, tekanti per darinį, o srovės sumažėjimas yra fiksuojamas oscilografu.

Dažninė jutiklio charakteristika parodyta 2.4.4 paveiksle, palyginimui pavaizduotas analogiškas Šotkio diodas. Iš grafikų matyti, kad Šotkio diodas yra jautresnis už supergardių jutklį, bet supergardių jutklis veikia plačiame dažnių ruože (turi plačią dažnių juostą). Toks jutklis atsparus stipriems spinduliuotės impulsams, juo galima registruoti ultrasparčiuosius spinduliuotės impulsus.



2.4.4 pav. *Jutiklio signalo ir galios santykio priklausomybė nuo dažnio. (Schomburg, E., et al. 2000 [30])*

Kiekvienas iš aptartų jutiklių, skirtų mikrobangoms detektuoti, turi savų privalumų bei trūkumų. Plokščias $n-n^+$ -GaAs diodas pasižymi plačia dažnių juosta, bet santykinai mažu jautriu. Supergardelių pagrindu sukurtas jutiklis gali detektuoti labai stiprius ir labai sparčius impulsus, tačiau jo jautris stipriai priklauso nuo dažnio.

2.5. Įvairialytės sandūros

Norint gerai suprasti įvairių puslaidininkinių darinių savybes, reikia išsiaiškinti šiuos darinius sudarančių medžiagų savybes ir susipažinti su energine juostų sandara.

50-tųjų metų pradžioje pasirodė pirmieji teoriniai ir eksperimentiniai darbai, kuriuose buvo išnagrinėti du skirtingi puslaidininkiniai dariniai, vadinami įvairialytėmis sandūromis [31].

Yra puslaidininkių, kurių kristalinių gardelių konstantos beveik vienodos ir kurių kristalizacijos procesai vyksta panašiai. Tokie puslaidininkiai auginami vienas ant kito ir sudaro vieną kristalą. Tačiau skirtingų puslaidininkinių medžiagų sandūroje kinta draustinės juostos plotis, elektroninis giminingumas,

elektronų išlaisvinimo darbas, dielektrinė skvarba ir kitos savybės. Tarp tokių medžiagų susidaro įvairialytė sandūra. Ją sudarantys puslaidininkiai gali būti legiruoti donorinėmis arba akceptorinėmis priemaišomis.

Išmokus auginti norimos juostinės sandaros įvairialyčius darinius, atsivėrė naujos tobulinimo perspektyvos ir imta naujai kurti puslaidininkinius prietaisus, tokius, kaip elektromagnetinės spinduliuotės jutikliai, šviesos diodai, puslaidininkiniai lazeriai, fotoimtuvai ir kt.

Auginant kvantines duobes iš nelegiruotų puslaidininkių, esant termodinaminei pusiausvyrai, jų erdvinio kvantavimo lygmenys yra tušti (duobėse nėra krūvininkų). Krūvininkai į kvantinę duobę injektuojami išoriniais laukais. Toks metodas taikytinas tiriant optinius krūvininkų šuolius. Jeigu mus domina kinetinės savybės, o ne optinės, pavyzdžiui, konstruojant tranzistorių, tai mums reikia legiruoti įvairialyčius darinius. Legiruotų puslaidininkių sluoksniuose vyksta krūvių persiskirstymas, kuris keičia potencialų darinių reljefą ir krūvininkai lokalizuojasi sluoksnių sandūrose. Krūvininkų tankis potencialinėje duobėje yra valdomas išoriniu elektriniu lauku, kuris pridedamas statmenai sluoksniams. Tokie dariniai yra įdomūs fizikiniu požiūriu ir yra svarbūs ne tik šiuolaikinėje mikroelektronikoje bet ir nanoelektronikoje. Puslaidininkinių įvairialyčių darinių pradininkų Kromer'io ir Alfiorovo pasiekimai (2000 m. darbai buvo pažymėti Nobelio premija) tapo pagrindu naujų fizikinių prietaisų kūrimui [32, 33].

Viena iš svarbiausių puslaidininkinių įvairialyčių sandūrų yra GaAs-AlGaAs įvairialytė sandūra. Ją ir analizuosime.

2.5.1. GaAs-AlGaAs įvairialytė sandūra

Norint gauti puslaidininkinę įvairialytę sandūrą, reikia puslaidininkių su skirtingomis draustinėmis juostomis. Čia susiduriame su puslaidininkinių medžiagų suderinamumo problema. Jei šių puslaidininkinių gardelės yra skirtingos, tuomet atsiranda dideli gardelės įtempimai, kurie turi įtakos energinei juostinei sandarai. GaAs ir AlAs puslaidininkinių gardelės yra artimos (skirtumas apie 0,16 %), todėl šie įtempimai nėra labai dideli. Taigi įvairialyčiams dariniams auginti šios medžiagos yra tinkamos [31]. Tai leidžia išauginti idealius AlGaAs/GaAs darinius be struktūrinių defektų.

Pagal teoriją [29], voltvatinis jautris priklauso nuo puslaidininkinio darinio matmenų. Mažinant matmenis, galima padidinti jutiklio jautrį, bet tada didėja elektrinė jutiklio varža (esant didelei varžai, jutiklio neįmanoma panaudoti matuojant trumpus elektromagnetinės spinduliuotės impulsus). Reikia ieškoti kito sprendimo, norint padidinti jutiklio jautrį, nedidinant elektrinės varžos.

Vienas iš galimų sprendimo būdų yra naudoti puslaidininkinę medžiagą, pasižyminančią dideliu krūvininkų judriu.

Tokiomis medžiagomis galėtų būti selektyviai legiruoti GaAs/AlGaAs dariniai. Aptarsime selektyviai legiruotas GaAs/AlGaAs įvairialytes sandūras. Dėl technologijų sunkumų GaAs ir AlGaAs puslaidininkiniai dariniai ilgą laiką nebuvo plačiai taikomi mikroelektronikoje, nors atskiri prietaisai jau buvo gaminami. Sukūrus ir išstobulinus naujas technologijas, pvz., molekulinį pluoštų epitaksiją ir kt., imta intensyviau šiuos darinius naudoti mikroelektronikoje.

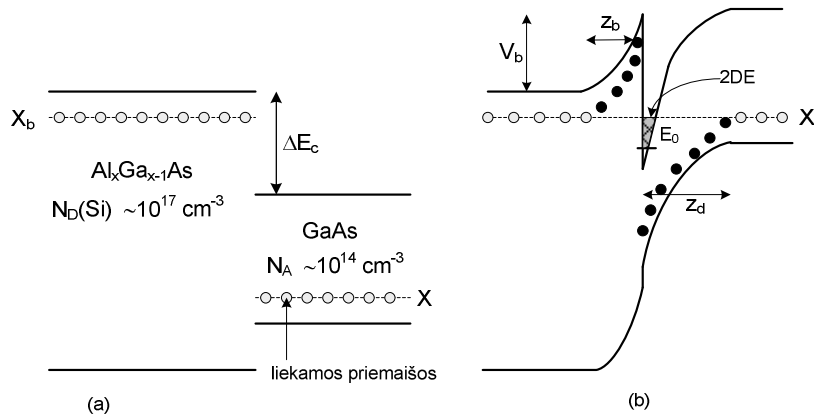
Barjeriniam AlGaAs sluoksniui būdingos tankio vertės yra $N_D \sim 10^{17} \div 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ir sluoksnis legiruotas donorais, paprastai siliciu (Si), kaip parodyta 2.5.1.1 paveiksle (a).

Esant žemoms temperatūroms, cheminis potencialas yra arčiau prie donorinių priemaišų energijos lygmens. Galio arsenido sluoksnis nėra legiruotas, bet jame yra liekamųjų priemaišų. Tokios priemaišos paprastai yra akceptorinės priemaišos, jų tankio vertės yra $N_A \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ eilės ir valdo cheminio potencialo padėtį įvairialytės sandūros GaAs pusėje. Kai sluoksniai suliesti, elektronai iš AlGaAs donorinių centrų injektuojami į GaAs, o likę jonizuoti donoriai sudaro teigiamą erdvinio krūvio sritį. Tuo pat metu GaAs pusėje formuojasi neigiamo erdvinio krūvio sritis. Termodinaminė pusiausvyra nusistovi, kai laidumo ir valentinės juostos užlinksta taip, kad cheminiai potencialai susilygina, susidaro potencialo barjeras (2.5.1.1 pav. (b)). Čia esantys elektronai yra lokalizuojami siauroje, keleto nanometrų pločio GaAs dalyje, esančioje prie AlGaAs paviršiaus. Tokie elektronai vadinami dvimačiais elektronais (2DE), nes jie gali judėti tik lygiagrečioje AlGaAs/GaAs ribai plokštumoje, tuo tarpu gilyn į GaAs tūrį (x kryptimi) jų judėjimas yra uždraustas, t.y. jie elgiasi kaip dvimatės (2D) dalelės (sudaro dvimačių elektronų dujas, angl. two-dimensional electron gas, 2DEG), dvimačiai elektronai (2DE) ar skylės. Krūvininkai, lokalizuoti potencinėje duobėje dažnai dar vadinami kvazidvimačiais (angl. quasi-two-dimensional). Norima pabrėžti, kad tokie elektronai nėra dvimačiai ir nėra griežtai lokalizuoti vienoje plokštumoje. Fizikiniu požiūriu jų banginės funkcijos charakteringas matmuo ir dimensinės lokalizacijos ilgis yra baigtiniai dydžiai [34]. GaAs/AlGaAs sandūroje elektronams gali susidaryti potencialinis barjeras ir gali pasireikšti staigios AlGaAs/GaAs sandūros voltamperinės charakteristikos netiesiškumas. Tačiau praktikoje GaAs/AlGaAs dariniuose sudaromas ominis kontaktas, nes sandūra dažniausiai nėra staigi.

Įvairialyčių sandūrų eksperimentines voltamperines charakteristikas galima aproksimuoti Shokley lygties išraiška [35]:

$$I = I_s [\exp(qU / akT) - 1] \quad (2.5.1.1)$$

čia I_s – soties srovė, q – elektrono krūvis, U – įtampa, k – Boltzmano konstanta, T – absoliutinė temperatūra, a – koeficientas, priklausantis nuo sandūros tipo ir temperatūros.



2.5.1.1 pav. *GaAs/AlGaAs įvairialytės sandūros juostinė diagrama (a), nusistovėjus termodinaminei pusiausvyrai (b). (Weisbuch, V. 1991 [36], adaptuota Karpus, V. 2004 [37])*

Tiesioginę įvairialytės sandūros srovę nulemia krūvininkai, kuriems potencialinio barjero aukštis mažesnis, nes potencialinių barjerų aukščiai elektronams ir skylėms nevienodi.

Įvairialytė AlGaAs/GaAs sandūra yra struktūriškai tobulesnė už silicio MOS įvairialytę sandūrą (metalo, oksido ir puslaidininkio sluoksnių sistema) ir tai yra svarbus AlGaAs/GaAs sandūros pranašumas ne tik mikroelektronikoje, bet ir nanoelektronikoje, lyginant su siliciu (Si).

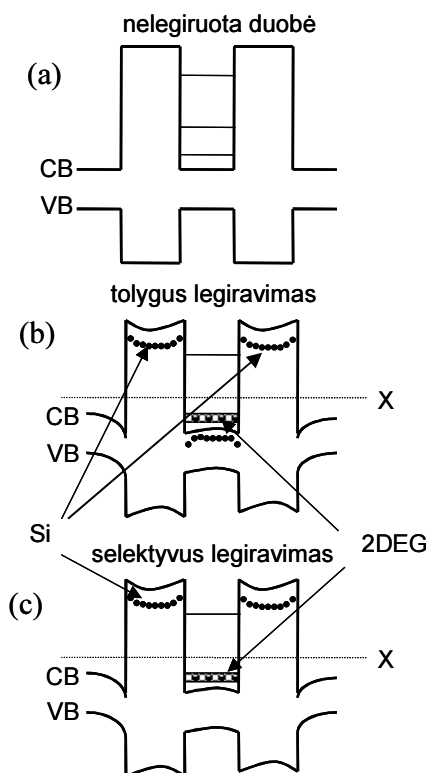
2.5.2. Selektyvusis legiravimas

Pirmuosiuose bandymuose, tolydžiai legiruojant GaAs/AlGaAs įvairialyčius darinius (2.5.2.1 pav. (b)), gaunamos mažos elektronų judrio vertės dėl elektronų sklaidos jonizuotais donorais, tai yra pagrindinis faktorius ribojantis elektronų judrį žemose temperatūrose.

1978 m. Bell laboratorijos mokslininkai (Dingle'as, Stormer'is, Gossard'as ir Wiegmann'as) pasiūlė ir realizavo selektyvaus legiravimo idėją [38] (2.5.2.1 pav.).

Fizikinė esmė yra tokia: reikia legiruoti tik barjerinius AlGaAs sluoksnius, nors tokiu būdu gaunamas mažesnis elektronų tankis, negu tolygaus legiravimo atveju, bet selektyvusis legiravimas atskiria krūvininkus nuo juos sklaidančių donorinių priemaišų erdvėje ir leidžia padidinti elektronų judrį iki rekordiškai

aukštų verčių. Pirmuosiuose bandymuose [38] žematemperatūrinio 2DE judrio vertė AlGaAs/GaAs įvairialytėje sandūroje buvo $\mu = 1,5 \cdot 10^4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$.



2.5.2.1 pav. *Selektyvusis legiravimas (c), tolygus legiravimas (b) ir nelegiruota duobė (a) (Dingle, R., et al. 1978 [38], adaptuota iš Karpus, V. 2004 [37])*

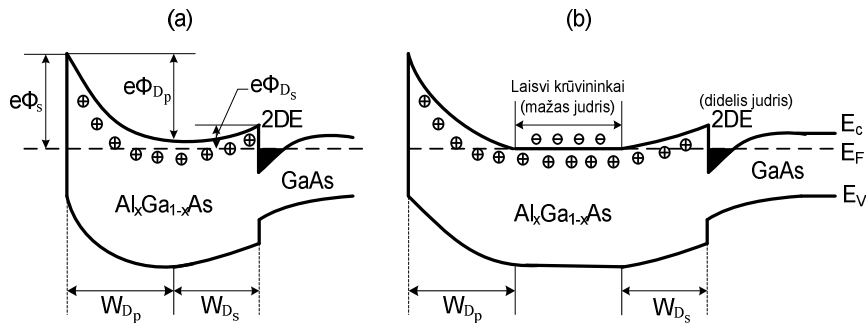
Norint padidinti 2DE judrį, buvo pasiūlyta tarp GaAs ir legiruoto AlGaAs sluoksnio įterpti skiriantį nelegiruotą AlGaAs sluoksnį (~100 Å, angl. spacer), kuris atitveria elektronus nuo jonizuotų donorų, todėl sklaida žemoje temperatūroje dar sumažėja, o judris išauga (1989 metais buvo pasiekta $\mu \cong 1,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ rekordinė vertė skystojo He (Helis) temperatūroje [39]). Elektronų judriui įvairialytėje sandūroje įtakos turi ne tik priemaišos n-AlGaAs sluoksnyje, bet ir liekamosios priemaišos GaAs sluoksnyje [40]. Krūvininkų judrius selektyviai legiruotose GaAs/AlGaAs įvairialytėse sandūrose gali mažinti atsiradęs lygiagretusis laidumas legiruotame AlGaAs sluoksnyje [41]. Toks laidumas gali atsirasti, jei AlGaAs sluoksnis nėra pilnai nuskurdintas.

2.5.2.2 paveiksle (a) pavaizduotas atvejis, kai AlGaAs sluoksnis yra pilnai nuskurdintas. Matyti, jog jame nėra laisvų elektronų, todėl šis sluoksnis neturi įtakos krūvininkų pernašai. 2.5.2.2 paveiksle (b) pavaizduota sandūra, kurios AlGaAs sluoksnis nėra pilnai nuskurdintas, todėl jame yra laisvųjų elektronų, dalyvaujančių laidume.

Norint išvengti lygiagretaus laidumo, reikia atitinkamai parinkti legiruoto AlGaAs sluoksnio storį. Jis turėtų būti lygus nuskurdintos įvairialytės sandūros srities ir nuskurdintos išorinės sandūros srities pločių sumai:

$$d = W_{D,p} + W_{D,s} \quad (2.5.2.1)$$

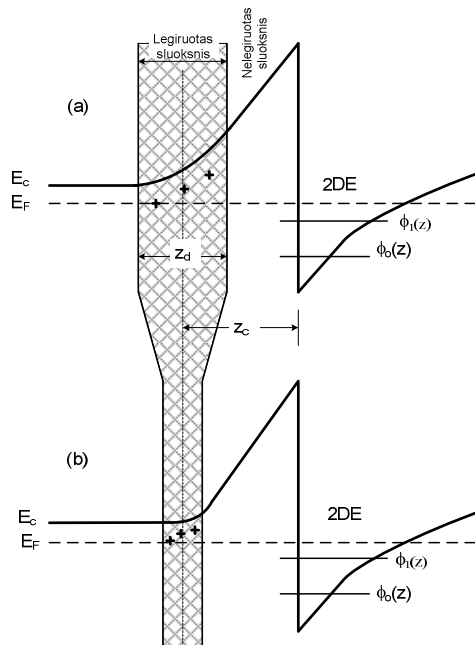
Jeigu šis sluoksnis bus per storas, atsiras lygiagretus laidumas. Kita vertus, ploninant sluoksnį, mažėja dvimačiame elektronų kanale esančių elektronų tankis.



2.5.2.2 pav. *Selektyviai legiruota AlGaAs/GaAs įvairialytė sandūra: be lygiagretaus laidumo (a); su lygiagrečiu laidumu (b) (Schubert, E. F. 2006 [41])*

Nors elektronai, lokalizuoti potencinėje duobėje, ir yra atskiriami erdvėje nuo jonizuotų priemaišų, bet jie išlieka silpname jonizuotų priemaišų kuriamame kuloniniame lauke. Selektiviam barjerinių sluoksnių legiravimui yra naudojami keli būdai: vienalytis, vieno ar kelių delta sluoksnių legiravimas. Kambario temperatūroje vyraujantis sklaidos mechanizmas yra fononinė sklaida, o sklaida dėl jonizuotų priemaišų kuloninio potencialo tampa svarbi tik labai žemose temperatūrose.

2DE judris priklauso nuo priemaišų pasiskirstymo legiruotame AlGaAs sluoksnyje, esant skirtingiems legiruoto sluoksnio storiams [42]. Legiruoto sluoksnio storis – z_d , o jo centro atstumas nuo įvairialytės sandūros – z_c (žr. 2.5.2.3 pav.).



2.5.2.3 pav. *Selektyviai legiruotos įvairialytės sandūros juostinė diagrama skirtingiems legiruoto sluoksnio storiams (Schubert, E. F., et al. 1989 [39])*

Tuomet legiruojančios priemaišos tankį galima išreikšti:

$$N_D(z) = \frac{N_D^{2D}}{z_d} \left\{ \sigma \left[z - \left(z_c - \frac{1}{2} z_d \right) \right] - \sigma \left[z - \left(z_c + \frac{1}{2} z_d \right) \right] \right\}, \quad (2.5.2.2)$$

čia $\sigma(z)$ – laiptuotoji funkcija.

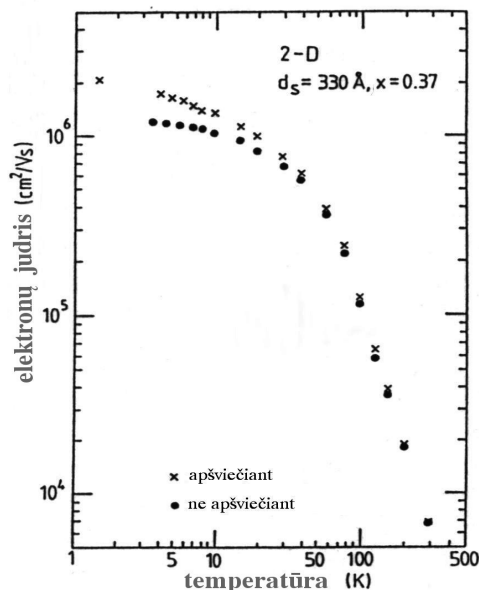
(2.5.2.2) lygtimi aprašant skirtingus legiruoto sluoksnio storio krūvininkų pasiskirstymus, laisvųjų krūvininkų tankis lieka nepakitęs: $N_D^{2D} = n_{2D} = const$. Didėjant legiruoto sluoksnio storiui, nelegiruoto AlGaAs sluoksnis mažėja, taipogi mažėja legiruoto sluoksnio tankis $\frac{N_D^{2D}}{z_d}$, tačiau 2D elektronų judrio priklausomybė nuo z_d nėra akivaizdi. Laisvųjų krūvininkų tankis, keičiantis sluoksnių storiams, išlieka pastovus [42].

2D elektronų judrio priklausomybės nuo legiruotos srities pločio uždavinys spręstas analitiškai ir skaitmeniškai [42]. Atlikta analizė parodė, kad mažiausias sklaidos potencialas gaunamas, kai legiruoto sluoksnio storis artėja iki nulio, o legiruotos srities profilis išreiškiamas delta funkcija:

$$N_D(z) = N_D^{2D} \delta(z + z_c). \quad (2.5.2.3)$$

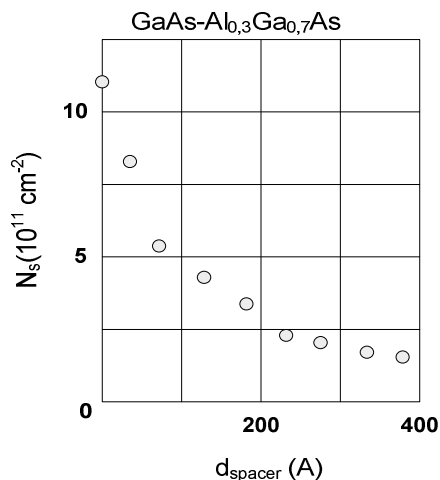
Ši išraiška gauta neįskaičius sklaidos potencialo ekranavimo dvimačiais elektronais. Tačiau sklaidos potencialo įtaka mažiausia, kai legiruoto sluoksnio storis mažiausias [42].

Mažėjant gardelės temperatūrai, elektronų judris didėja. Tai matyti iš 2.5.2.4. paveikslo, kuriame atvaizduota elektronų judrio μ priklausomybė nuo temperatūros, esant selektyviai legiruotai GaAs/AlGaAs įvairialytei sandūrai, kurio skiriamasis sluoksnio storis lygus $d = 33$ nm.



2.5.2.4 pav. Dvimačių elektronų judrio priklausomybė nuo temperatūros, esant 33 nm storio skiriamajame sluoksniui. (Weimann, G., et al. 1985 [43])

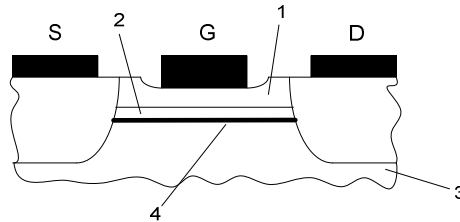
Didindami skiriamąjį sluoksnio plotį d_s , mes mažiname 2D elektronų tankį. Tai parodyta 2.5.2.5 paveiksle. Tokiu būdu galima pasiekti aukštas 2DE judrio vertes dėka mažų 2DE tankių. Tai leido padidinti 2DE pagrindu dirbančių darinių greitaeigiškumą ir 1980 m. pagaminti pirmuosius HEMT (angl. high electron mobility transistor – didelio elektronų judrio tranzistorius) tranzistorius [45, 46].



2.5.2.5 pav. Eksperimentinė 2DE tankio priklausomybė nuo skiriamąjo pločio (Hwang, J. C. M., et al. 1984 [44], adaptuota iš Karpus, V. 2004 [37])

Sukurtus tranzistorius firmos pavadino įvairiai: moduluoto legiravimo lauko tranzistoriais (angl. modulation doped FET – MODFET), lauko tranzistoriais su dvimatėmis dujomis (angl. two – dimension electron gas FET – TEGFET), selektyviai legiruotais įvairialyčiais sandūriniais lauko tranzistoriais (angl. selectively doped heterpjunction transistor – SDHT). Dažniausiai literatūroje sutinkamas HEMT pavadinimas. Tokių tranzistorių sudaro ištaka (S), santaka (D) ir užtūra (G). HEMT sandara atvaizduota 2.5.2.6 paveiksle. Tokio tranzistoriaus kanalas pasižymi dideliu laidumu, užtūros elektrodas yra arti kanalo. Dvimačiai elektronai, esantys potencinėje duobėje, sudaro laidų kanalą. Keičiant sklendės įtampą, galima keisti dvimačių elektronų tankį laidumo kanale. HEMT tranzistoriai pasižymi dideliu perdavimo charakteristikos statumu, kuris lemia didelę veikimo spartą, nes AlGaAs sluoksnis pasižymi didesne nei SiO₂ dielektrine skvarba. Įvairialytės sandūros privalumus įmanoma išnaudoti tik tuomet, jeigu ji pakankamai kokybiška, kitaip sakant, joje nedaug defektų. Jeigu įvairialytę sandūrą sudarančių medžiagų kristalinių gardelių konstantos yra artimos, tai defektų yra nedaug.

Nors HEMT tranzistoriai, kuriuose naudojami GaAs/AlGaAs sluoksniai turi privalumų prieš silicio (Si) ir galio arsenido (GaAs) lauko tranzistorius, jiems būdingi kai kurie trūkumai: įvairialytėje sandūroje laidumo juostos dugno šuolis yra nedidelis, aliuminis jungiasi su deguonimi, GaAs šiluminis laidumas mažas ir t.t.

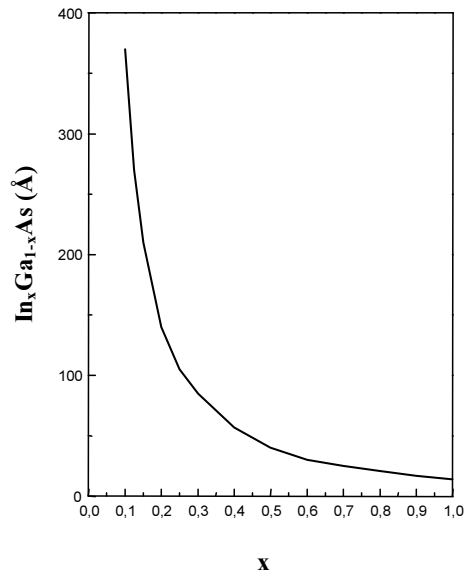


2.5.2.6 pav. Didelio elektronų judrio tranzistoriaus darinys: 1 – *n*-AlGaAs sluoksnis; 2 – nelegiruoto AlGaAs sluoksnis; 3 – *i*-GaAs sluoksnis; 4 – dvimačių elektronų kanalas (adaptuota iš Štaras, S. 2000 [47])

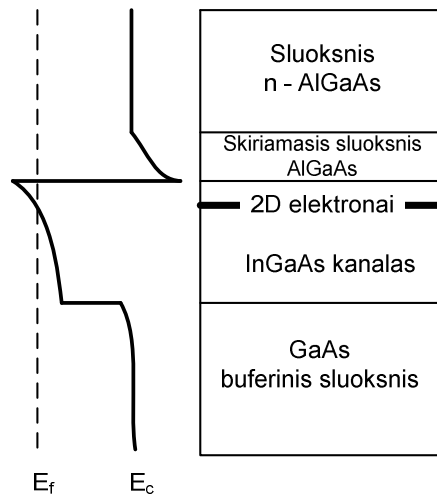
Todėl buvo ieškoma kitų medžiagų. Taip atsirado lauko tranzistorius PHEMT (angl. Pseudomorphic high electron mobility transistor – pseudomorfinis didelio elektronų judrio tranzistorius), kuriame tarp legiruoto sluoksnio (n^+ -AlGaAs) ir sluoksnio, kuriame atsiranda 2DE (GaAs), įterpiamas plonas sluoksnis medžiagos, turinčios siauresnę draustinės energijos juostos tarpą ir didesnę elektronų judrį [48]. Tokia medžiaga AlGaAs/GaAs yra InAs. Bet dėl didelio gardelių skirtumo tarp InAs ($\alpha = 6,0583 \text{ \AA}$) ir dviejų likusių medžiagų (GaAs $\alpha = 5,65 \text{ \AA}$ ir AlGaAs $\alpha \approx 5,65 \text{ \AA}$) yra naudojama InGaAs medžiaga, esant mažai In (Indis) daliai. Įterpiamas InGaAs sluoksnis turi būti plonas, kad neperžengtume jos kritinės storio reikšmės (2.5.2.7 pav.), nes, viršijus kritinį storį, atsirandantys defektai visiškai pakeičia tokio darinio elektrines ir optines savybes. Jeigu gardelių konstantos skiriasi daugiau negu dešimtąją ar net šimtąją procento dalimi, įvairialytėje sandūroje atsiranda dislokacijų ir kitų defektų. Šiuolaikinės technologijos leidžia užauginti sluoksnius, kurių storis neviršija dešimčių gardelių periodų. Tokiuose plonuose sluoksniuose, kai gardelių konstantos skiriasi, atsiranda mechaniniai įtempimai, bet nesusidaro defektų. Šie sluoksnai vadinami sluoksniais su įtempta kristaline gardele arba pseudomorfiniais sluoksniais.

PHEMT struktūros, sudarytos pseudomorfinių įvairialytės struktūros AlGaAs/InGaAs/GaAs pagrindu, veikimas yra panašus į HEMT struktūrų veikimą, bet fizikiniu atžvilgiu tai – dvi skirtingos struktūros. PHEMT struktūros pagrindas yra ne selektyviai legiruota įvairialytė sandūra, o selektyviai legiruota kvantinė duobė. Mechaniniai įtempimai turi įtakos puslaidininkių energijos juostoms, todėl atsiranda papildomų galimybių gauti pageidaujamų savybių sandūras [49–51].

Kaip matyti iš 2.5.2.8 paveikslėlio, naudojant siaurą juostinę InGaAs struktūrą, gaunama gili, beveik trikampė kvantinė duobė, kurioje yra 2DE sritis (*n*-AlGaAs/InGaAs).



2.5.2.7 pav. Įterpiamo InGaAs sluoksnio storio priklausomybė nuo x-molinės In sudėties (Klamka, J. W. 2002 [52])



2.5.2.8 pav. PHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs struktūros darinys (a) ir energinė juostinė diagrama (b) (Misiewicz, J., et al. 1999 [59])

Kanalo vaidmenį atlieka InGaAs sluoksnis, kuriame elektronų judris labai didelis – apie $10\,000\text{ cm}^2/(\text{Vs})$ kambario temperatūroje. Tokių struktūrų optinės savybės buvo ištirtos darbuose [53–58].

2.6. Puslaidininkinių prietaisų fizikinės galimybės

Norint padidinti puslaidininkinių prietaisų veikimo spartą, reikia mažinti jų matmenis ir didinti krūvininkų judrį. Puslaidininkyje krūvininkai gali pernešti krūvį difunduodami tankio mažėjimo kryptimi arba dreifuodami veikiant elektriniam laukui. Krūvininkai gali įgyti didesnę greitį, kai juos veikia elektrinis laukas ir greičiau įveikti tam tikrą nuotolį.

Elektrinis laukas vakuume elektroną veikia jėga $F = qE$, jo greitis didėja, o pagreitis pastovus. Veikiant puslaidininkį elektriniu lauku, krūvininkai juda susidurdami su kristalinės gardelės defektais, todėl jų greitis proporcingas elektrinio lauko stipriui. Taigi dreifo greitis išreiškiamas formule:

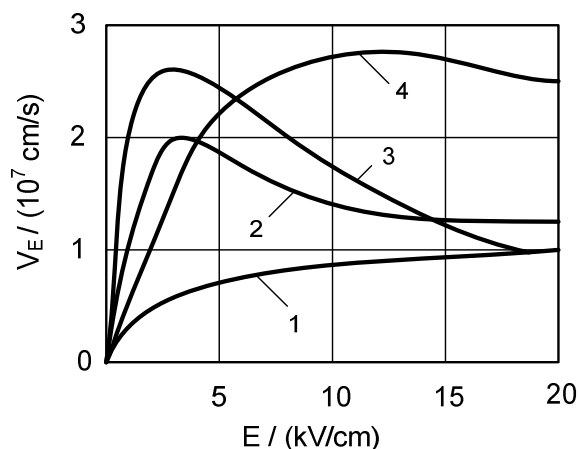
$$v_d = \mu E, \quad (2.6.1)$$

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}, \quad (2.6.2)$$

čia μ – krūvininkų judris, E – elektrinio lauko stipris, τ – impulso relaksacijos trukmė; m^* – efektinė masė.

Kai elektrinis laukas silpnas, dreifo greitis yra daug mažesnis už šiluminio judėjimo greitį V_T . Didėjant elektrinio lauko stipriui, krūvininkų dreifo greitis didėja. Stipriame elektriniame lauke, kai krūvininkų energija žymiai viršija pusiausvyrinę, mažėja judris ir dreifo greičio didėjimas sulėtėja. Germanyje ir silicyje (skaičiavimais ir eksperimentais nustatyta, kad maksimalus elektronų dreifo greitis $v_S = 10^7\text{ cm/s}$) krūvininkų dreifo greitį stipriame elektriniame lauke apriboja susidūrimai su optiniais fononais. Daugiaslėniuose puslaidininkiuose maksimalų krūvininkų dreifo greitį riboja jų perėjimai į kitą laidumo juostos slėnį, kuriame judris mažesnis. Elektronų dreifo greičio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio parodyta 2.6.1 paveiksle. Aptartas krūvininkų dreifo greitis yra stacionarus, kuriuo krūvininkai juda pastovaus stiprumo nuolatiniame elektriniame lauke.

Kai elektrinis laukas staiga įjungiamas, elektroną pradeda veikti jėga $F = qE$. Tada elektronas įgyja pagreitį $a = F/m$ ir laiko intervale $t < \tau$ juda didėjančiu greičiu $v = at = (qE/m)t$, kol susiduria su gardele ir praranda įgytą kryptingo judėjimo greitį. Taip procesas kartojasi. Staiga įjungtas elektrinis laukas greitina visus krūvininkus. Išaugus krūvininkų energijai, padidėja jų sąveikos su fononais tikimybė.



2.6.1 pav. Elektronų dreifo greičio priklausomybė nuo elektrinio lauko stiprio:
 1 – Si ($\mu \cong 1600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$); 2 – GaAs ($\mu \cong 8500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$); 3 – InGaAs
 ($\mu \cong 10\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$); 4 – InP ($\mu \cong 15\,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)

Prasidėjus krūvininkų sklaidai, jų vidutinis greitis pradeda mažėti ir tai tęsiasi kelias pikosekundės dalis, kol nusistovi stacionarus dreifo greitis. Staiga pradėjus veikti elektriniam laukui, gaunamas krūvininkų dreifo greičio „blyksnis“. „Blyksnyje“, krūvininkų greitis gerokai didesnis už stacionarų dreifo greitį. Tokį efektą įmanoma gauti tik labai mažų nanometrinių matmenų dariniuose. Vietoje dreifo greičio blyksnio laike galima panauduoti dreifo greičio blyksnį erdvėje. Taip samprotaujant nereikia elektrinio lauko impulso su labai trumpu frontu. Lauko šuolis gaunamas dėl puslaidininkio darinio netolygumo. Elektronai, judėdami puslaidininkiu, gali patekti į sluoksnį, kuriame veikia stiprus elektrinis laukas ir tokiu būdu gaunamas dreifo greičio blyksnis. Po to pagreitininti elektronai lekia iš inercijos.

Aptartą elektronų judėjimą galima realizuoti panaudojant puslaidininkinius darinius, kuriuose kinta draustinės juostos plotis. Sudarius ploną įvairialytį barjero sluoksnį su 0,3 eV potenciniu barjeru, elektronas gali įgyti 10^8 cm/s greitį, kuris apie 5 kartus didesnis už maksimalų stacionarų dreifo greitį GaAs [60].

2.7. Uždavinių formulavimas

Atsižvelgiant į išnagrinėtą tematiką, yra tikslinga suformuluoti šiuos uždavinius:

1. Ištirti mikrobangų spinduliuotės poveikį susiaurintiems puslaidininkiniams dariniams (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs ir n-GaAs) ir atskleisti stebimų efektų fizinę prigimtį.
2. Ištirti įvairialyčių puslaidininkinių susiaurintų darinių savybes priklausomas nuo darinių sluoksnių kokybės ir nuo puslaidininkinių medžiagų parametrų.
3. Ištirti mikrobangų jutiklių savybes, priklausančias nuo selektyviai legiruoto darinio, stipriai legiruoto puslaidininkinio sluoksnio laidumo nuo skiriamojo sluoksnio storio ir nuo sklendės pobūdžio metalizacijos.
4. Įvertinti AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs ir GaAs darinių praktinio panaudojimo galimybę kuriant mikrobangų spinduliuotės jutiklius.

3

Eksperimento tyrimo metodika ir bandiniai

Skyriuje pateikta eksperimento tyrimo metodika. Išsamiai aprašyti pagrindinės bangos stačiakampiame bangolaidyje sklidimo ypatumai ir perduodama galia. Pateiktos jutiklių voltvatinių charakteristikų matavimų stendų schemas bei voltamperinių charakteristikų matavimo blokinė schema. Aprašytas bandinių auginimas molekulių pluoštų epitaksijos būdu ir šiuo būdu užaugintų susiaurintų n-GaAs, AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs darinių sluoksnių sandara bei technologiniai gamybos procesai.

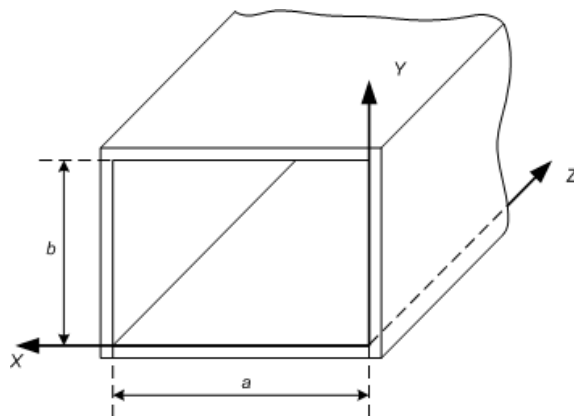
3.1. Stačiakampio bangolaidžio analizė

Krūvininkams kaitinti darbe buvo naudojamas superaukšto dažnio elektromagnetinis laukas. Ši metodika turi daug pranašumų, lyginant su pastovaus lauko metodikomis [4]. Tokiu būdu vyksta bekontaktis krūvininkų kaitinimas, kaitinimo grandinė atskiriama nuo matavimo grandinės. Tai leidžia matuoti mažus signalus esant stipriems elektriniams laukams. Eksperimentiškai dažninės charakteristikos buvo matuotos (10÷37) GHz dažnių ruože. Buvo naudojami įvairūs elektromagnetinės mikrobangės spinduliuotės šaltiniai.

Šiuo metu vis dažniau naudojami stačiakampiai bangolaidžiai dėl platesnio jų darbo dažnių ruožo, lyginant su apskritaisiais. Taipogi, elektromagnetinio

lauko struktūra stačiakampiuose bangolaidžiuose ne tokia jautri bangolaidžių sienelių deformacijoms. Stačiakampio bangolaidžio skerspjūvis parodytas 3.1.1 paveiksle.

Kiekvienam bangos tipui apibrėžiamas bangos ilgio ruožas, kuriame tenkinama bangos sklidimo bangolaidyje sąlyga. Stačiakampiam bangolaidyje sklinda H_{10} banga, kuri vadinama pagrindine stačiakampio bangolaidžio banga. Jeigu bangolaidžiu perduodamų virpesių bangos ilgis $\lambda < a$ (a – bangolaidžio plačiosios sienelės plotis, 3.1.1 pav.), tai šalia H_{10} bangos gali sklisti kitos bangų modos. Šios bangų modos vienas nuo kitos skiriasi elektromagnetinio lauko struktūra, intensyvumu ir faziniu sklidimo greičiu.

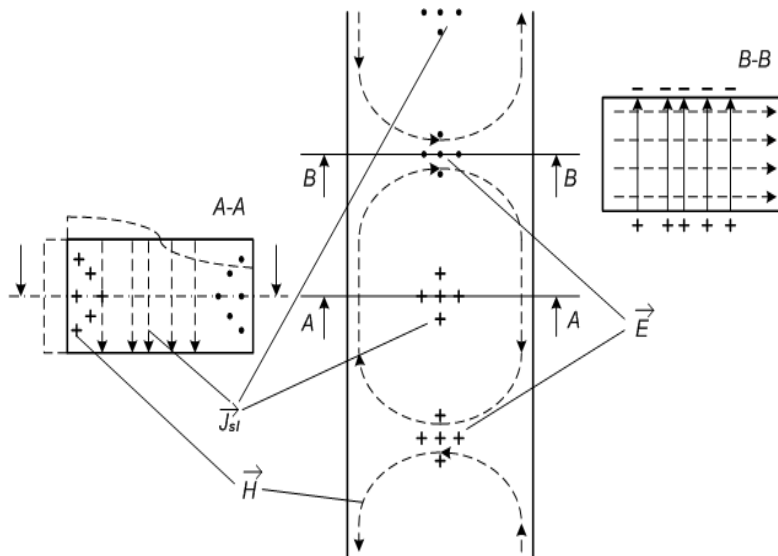


3.1.1 pav. Stačiakampio bangolaidžio skerspjūvis

Bangoms interferuojant, bangolaidyje susidaro sudėtinga lauko struktūra. Šis interferencinis elektromagnetinis laukas tampa jautrus perduodamų virpesių dažnio pokyčiams ir padidėja nuostoliai bangolaidyje. Atsižvelgiant į tai, kas pasakyta, bangolaidžio matmenys ir generatoriaus bangos ilgis parenkami taip, kad bangolaidyje sklistų tikrai pagrindinė H_{10} banga. Pagrindinės bangos stačiakampiam bangolaidyje H_{10} modos elektromagnetinio lauko struktūra bei elektrinio lauko pasiskirstymas bangolaidžio A-A ir B-B pjūviuose pavaizduotas 3.1.2 paveiksle.

Banga bangolaidyje sklinda dviem kryptimis: nuo generatoriaus link apkrovos – vadinama tiesioginė banga ir nuo apkrovos link generatoriaus – atgalinė banga. Atgalinė banga susidaro dėl atspindžių nuo apkrovos arba nuo netolygumų bangolaidyje ir vadinama atspindėtąja banga. Sklindant pagrindinei bangai, bangolaidyje galimi trys darbo režimai: bėgančiųjų bangų, stovinčiųjų bangų ir mišrusis. Bėgančiųjų bangų režimas susidaro, kai apkrova sugeria visą krintančios bangos pernešamą energiją arba idealiuoju atveju, kai bangolaidžio apkrovos aktyvioji varža yra lygi bangolaidžio banginei varžai. Stovinčiųjų bangų režimas nusistovi užtrumpintame arba reaktyviajame

apkrova apkrautame bangolaidyje. Tokiu atveju apkrova nesugeria krintančios bangos pernešamos energijos. Mišrusis režimas nusistovi bangolaidyje, apkrautame kompleksine arba aktyviaja apkrova, ir bangolaidyje, kurio apkrovos varža nelygi bangolaidžio banginei varžai.



3.1.2 pav. Pagrindinės bangos H_{10} stačiakampiame bangolaidyje elektromagnetinio lauko struktūra

Elektromagnetinio lauko struktūra bangolaidžio skerspjūvyje nepriklauso nuo darbo režimo bangolaidyje. Analizuojant elektromagnetinio lauko amplitudžių kitimą išilgai bangolaidžio ašies, pakanka analizuoti jų reikšmes fiksuotame skerspjūvio taške.

Sklindant pagrindinei bangai H_{10} , bangolaidyje yra pernešama galia. Pagrindinės bangos, sklindančios stačiakampiu bangolaidžiu, pernešama galia:

$$P = \frac{E_{y0}^2}{4R_H} ab, \quad (3.1.1)$$

čia E_{y0}^2 / R_H – maksimalusis galios srauto tankis, ab – bangolaidžio skerspjūvio plotas; R_H – bangolaidžio banginė varža H tipo bangoms.

Pagal (3.1.1) išraišką mes galime apskaičiuoti ne tik bangolaidžiu perduodamą galią, bet ir bėgančiosios bangos elektrinio lauko stiprio amplitudę – žinant bangolaidžiu perduodamos galios dydį. Bangolaidžiu perduodama galia priklauso

nuo dažnių ruožo. Bangolaidžio perduodamos galios priklausomybė nuo normuotos bangos ilgio:

$$P = \frac{E_{y0}^2}{4R_T} ab \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (3.1.2)$$

Čia R_T – idealioji terpės banginė varža.

Bangolaidyje sklis pagrindinė H_{10} banga, jeigu bus įvykdyta sąlyga $2b < \lambda < 2a$, ribinė galia didžiausia, o slopinimo koeficientas mažiausias, kai $\xi = \lambda / 2a$ (ξ – darbo taškas) ir $\eta = b / a$ (η – bangolaidžio sienelių matmenų santykis).

Išilgai bangolaidžio perduodamą galią galima taip pat išreikšti per magnetinio lauko stiprio skersinę dedamąją:

$$P = \frac{H_{x0}^2}{4} R_H ab. \quad (3.1.3)$$

Čia $R_H = \frac{E_{sm}}{H_{sm}}$, – bangolaidžio banginė varža H tipo bangoms.

3.2. Eksperimento metodika

Siekiant išvengti įprastinės Zeebeko elektrovaros, nulemtos kristalinės gardelės kaitinimo, SAD elektrinis laukas į bangolaidį paduodamas trumpais, retai pasikartojančiais impulsais [4]. Tokiu būdu gardelės temperatūra impulso veikimo metu pakinta žymiai mažiau δT_L , nei krūvininkų:

$$\delta T_L \ll \Delta E / k \cdot T. \quad (3.2.1)$$

Impulsų pasikartojimo dažnis parenkamas toks, kad vidutinis gardelės temperatūros padidėjimas būtų nežymus:

$$\Delta T_L \ll T, \quad (3.2.2)$$

čia T – aplinkos temperatūra.

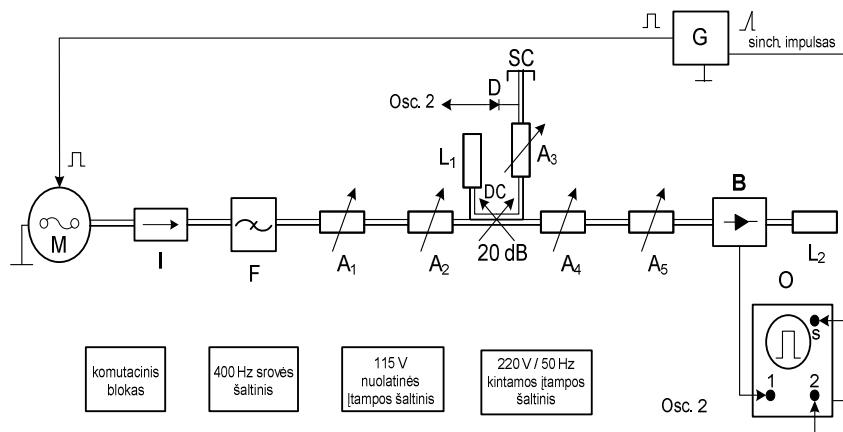
Pagrindinės SAD metodikos neigiama pusė yra tai, jog matuojamos vidutinės vertės per laiko tarpą. Tai apsunkina teorinę gautų rezultatų interpretaciją, ypač kai pasireiškia krūvininkų kaitinimo inertiškumas.

Visuose eksperimentuose elektrinis laukas buvo orientuotas išilgai bandinio. Eksperimentai buvo atliekami kambario $T = 300$ K bei skystojo azoto $T = 77$ K temperatūrose.

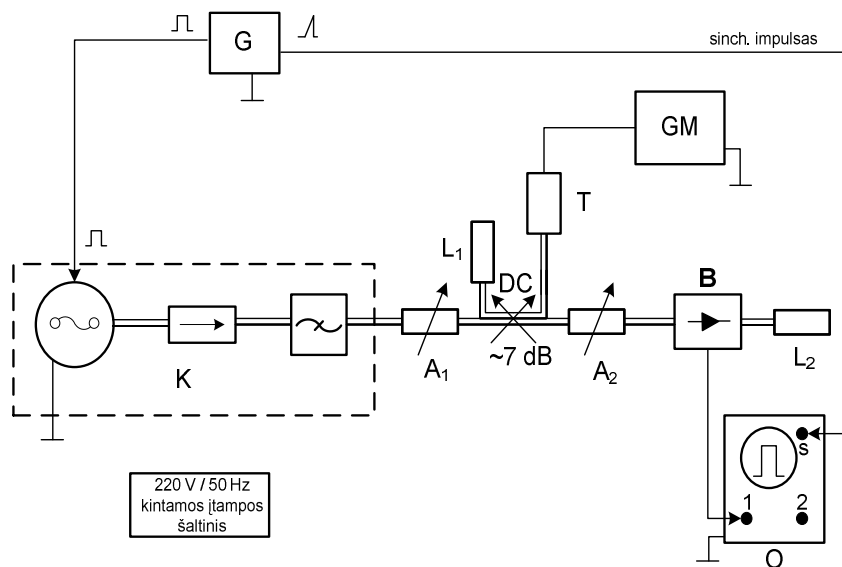
10 GHz ruože buvo naudojamas didelės galios magnetroninis generatorius, kuris generuoja stačiakampius (1÷2) μ s trukmės mikrobangų spinduliuotės

impulsus su 40 Hz pasikartojimo dažniu. Stipriuose elektriniuose laukuose darinių voltvatinės ir jautrio dažninės priklausomybės buvo išmatuotos naudojantis 3.2.1 paveiksle pateikta eksperimento schema. Dirbant su 3-jų cm ilgio bangomis, naudoti stačiakampiai $23 \times 3,4 \text{ mm}^2$ skerspjuvio ploto bangolaidžiai. Tokio stendo generatoriaus maksimali impulsų galia siekė 8kW, tačiau ji buvo slopinama slopintuvais. Impulsinis generatorius moduliavo elektromagnetinės spinduliuotės šaltinio generatoriaus signalą retai besikartojančiais mikrosekundinės trukmės impulsais. Aukštesniųjų harmonikų filtrų naudojimas leido išvengti harmoelektrovaros susidarymo. Beje, tarp magnetroninio generatoriaus ir aukštesniųjų harmonikų filtro buvo įmontuotas feritinis ventilis, kuris sugerdavo nuo bandinio bei trakto sudūrimų atsispindėjusias elektromagnetines bangas. Slopintuvu buvo tolygiai keičiama ir matuojama mikrobangų spinduliuotės galia, kurios lygis bangolaidžio atšakoje buvo kontroliuojamas jutiklio galvute. Bandinio detektuojamas signalas buvo registruojamas oscilografu.

Tyrinėjant mikrobangų detektavimo ypatumus silpnuose elektriniuose laukuose nuo 26 GHz iki 37 GHz, buvo matuojama stende, kurio schema pavaizduota 3.2.2 paveiksle.



3.2.1 pav. Jutiklių voltvatinių charakteristikų matavimo stendo schema
M – magnetroninis generatorius; *I* – ventilis; *F* – harmonikų filtras;
*A*₁, *A*₂, *A*₃ – slopintuvai skirti didelės galias slopinimui ; *A*₄, *A*₅ –
 preciziniai slopintuvai (labai tikslūs); *L*₁, *L*₂ – suderinta apkrova;
DC – atšakotuvai; *SC* – trumpas jungiklis; *D* – jutiklis; *B* –
 bangolaidinė galvutė su bandiniu; *G* – impulsinis generatorius; *O* –
 oscilografas



3.2.2 pav. Jutiklių parametų silpnuose elektriniuose laukuose matavimo stendo schema. *K* – klistroninis generatorius; *A*₁, *A*₂ – slopintuvai (labai tikslūs); *DC* – atšakotuvas; *L*₁, *L*₂ – suderinta apkrova; *T* – termistorinė galvutė; *GM* – termistorinis galios matuoklis (M3-22A); *G* – impulsinis generatorius; *B* – bangolaidinė galvutė su bandiniu; *O* – oscilografas

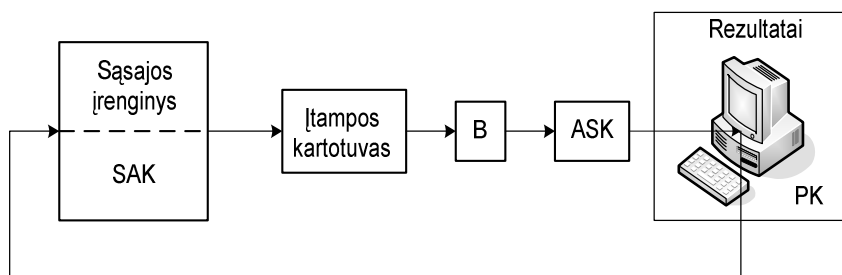
Šiuo atveju bangolaidžio skerspjūvio plotas – 7,2x3,4 mm². Pirmiausia, uždarius slopintuvą *A*₂, generatorius buvo nustatomas nuolatinės generacijos režimui ir termistoriniu galios matuokliu M3-22A buvo išmatuojama galia. Voltvatinų charakteristikų matavimai buvo atliekami generatoriui veikiant impulsiniu režimu. Norint išvengti tiriamų darinių kristalinės gardelės kaitinimo, signalas impulsiniu generatoriumi B5-63 buvo moduluojamas 10 μs trukmės retai pasikartojančiais 50 Hz dažnio impulsais. Slopintuvu *A*₁ tolygiai keičiant galią, oscilografu buvo registruojamas bandinio detektuojamas signalas.

Tokiu būdu buvo išmatuotos darinių voltavatinės charakteristikos ir įvertintas voltvatinis jautris:

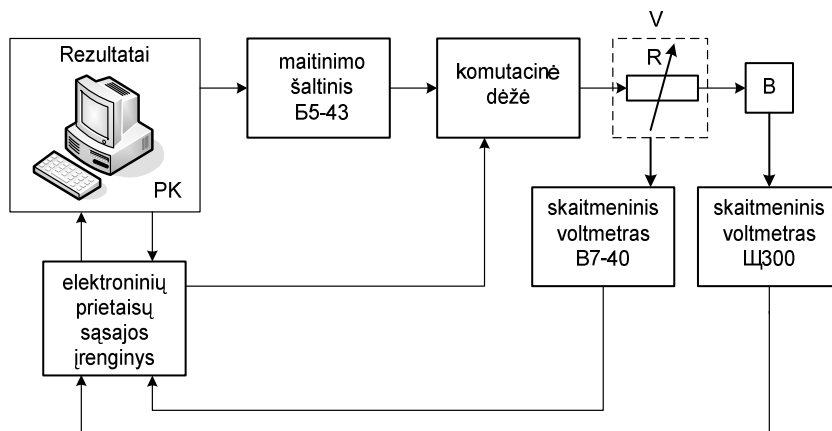
$$S = \frac{U_d}{P}, \quad (3.2.3)$$

čia U_d – bandinio detektuota įtampa; P – mikrobangų spinduliuotės galia bangolaidyje. Santykis U_d / P surandamas iš voltvatinės charakteristikos tiesinės dalies.

Darinių voltamperinės charakteristikos kambario ir skystojo azoto temperatūrose buvo matuojamos naudojant kompiuterizuotas sistemas. Pirmoji sistema buvo sudaryta iš sąsajos įrenginio, įtampos kartotuvo ir programos parašytos LabView 6i terpėje. Sąsajos įrenginys čia naudojamas ir kaip maitinimo šaltinis, ir kaip matavimo prietaisas, be to, jis turi sąsajos plokštes, reikalingas įrenginių ryšiui su kompiuteriu užtikrinti. Sistema automatiškai mato tekančios srovės dydžius ir įtampos pokyčius. Po to apdorojo rezultatus, kurie iš karto buvo pateikiami kompiuterio ekrane ir užrašomi į duomenų laikmeną. Matavimo blokinė schema parodyta 3.2.3 paveiksle [61]. Antroji sistema buvo sudaryta iš asmeninio kompiuterio, kurio pagrindinė funkcija – keisti pastovios srovės maitinimo šaltinio B5-43 išėjimo įtampą ir nuskaityti informaciją iš elektroninių prietaisų sąsajos įrenginio, prie kurio prijungti du skaitmeniniai voltmetrai. Kompiuteris turi du lygiagrečius prievadus, kuriais komunikuoja su šaltiniu ir elektroninių prietaisų sąsajos įrenginiu. Elektroninių prietaisų sąsajos įrenginys skirtas voltmetrų rodmenims skaityti ir perduoti juos kompiuteriui. Komutacinė dėžutė prie kompiuterio jungiama per elektroninių prietaisų sąsajos įrenginį ir naudojama srovės kryptį keisti.



3.2.3 pav. I-oji voltamperinės charakteristikos matavimo stendo blokinė schema [61]. *SAK* – skaitmeninis analoginis keitiklis; *B* – matuojamas bandinys; *ASK* – analoginis skaitmeninis keitiklis; *PK* – asmeninis kompiuteris



3.2.4 pav. II-ji voltamperinės charakteristikos matavimo stendo blokinė schema [62]. PK – asmeninis kompiuteris; V – varžynas; B – matuojamas bandinys

Nuosekliai su bandiniu sujungtas varžynas, reikalingas srovei, tekančiai per bandinį, nustatyti. Voltamperinės charakteristikos matavimas kontroliuojamas asmeniniu kompiuteriu. Užduota įtampa siunčiama maitinimo šaltiniu. Skaitmeniniais voltmetrais matuojama įtampa bandinyje ir varžoje. Kadangi varža ir bandinys yra sujungti nuosekliai, tai per varžą ir bandinį tekanti srovė yra tokia pati. Išmatavę įtampą varžoje, iš Omo dėsnio randame srovės, tekančios bandiniu, stiprį. Žinant srovės stiprį bei įtampą, brėžiamas voltamperinės charakteristikos grafikas. Duomenys matavimo metu matomi kompiuterio ekrane, o baigus matavimą, įrašomi į tekstinę laikmeną. Voltamperinės charakteristikos matavimo stendo schema pateikta 3.2.4 paveiksle [62].

3.3. Tiriamieji bandiniai

Dėl technologinių sunkumų GaAs ir AlGaAs puslaidininkiniai dariniai ilgą laiką nebuvo plačiai taikomi mikroelektronikoje, nors atskiri prietaisai ir buvo gaminami. Tik prieš 30 metų buvo tiriami plonasluoksniai įvairialyčiai dariniai, o prieš 10 metų pradėti tirti nanodariniai. Sukūrus ir išstobulinus naujas technologijas, pvz., molekulinę pluoštų epitaksiją ir t.t., imta intensyviau šiuos darinius naudoti ne tik mikroelektronikoje, bet ir nanoelektronikoje [63].

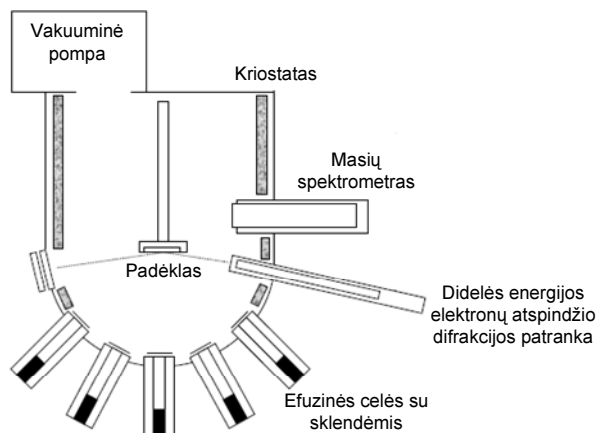
Norint išauginti labai plonus ($3\div 100$) nm sluoksnius, susiduriama su technologiniais sunkumais. Išspręsti šį uždavinį galima molekulinio pluoštelio epitaksija (MPE – vakuuminio medžiagų garinimo metodas), kuri pradėta vystyti praėjo šimtmečio šeštojo dešimtmečio pabaigoje labai švarių puslaidininkinių epitaksinių sluoksnių auginimui. Šios technologijos vystymąsi diktavo elementų charakteringų dydžių mikroelektronikoje mažėjimas ir sparčiai besivystanti nanodarinių fizika.

Taikant šį metodą, norimi sluoksniai auginami superaukšto vakuumo aplinkoje ant labai švaraus monokristalinių padėklų paviršiaus, naudojant molekulių ar atomų valdomus pluoštus. MPE metodas leidžia išauginti labai aukštos kokybės sluoksnius. Be to, šis metodas ypatingas tuo, kad epitaksinius sluoksnius galima auginti kinetiniame režime (kinetinis augimas leidžia sukurti vienalyčius kietuosius tirpalus, kurie pusiausvyros sąlygomis nesusimaišo), kai tradiciniuose metoduose epitaksija vyksta sąlygose, artimose termodinaminei pusiausvyrai.

Įrenginį sudaro auginimo kamera, kurioje sukuriama 10^{-8} Pa ir geresnis vakuumas, naudojant titano sublimacinį ir joninį vakuuminį siurblius. Įjungus medžiagų šaltinius, vakuumas sumažėja iki ($10^{-5}\div 10^{-6}$) Pa. Kameroje yra keletas kaitinamų elektros srove efuzinių celių. Keičiant krosnelės galingumą, galima valdyti molekulių pluoštų intensyvumą ir reguliuoti efuzinės celės temperatūrą. Auginimo kameroje yra įrengti diagnostiniai prietaisai: kvadrupolinis masių spektrometras, jonizacinis jonų matuoklis, elektronų difraktometras, kuriais galima stebėti auginimo procesą. Be auginimo kameros, įrenginys gali turėti analizės, metalizavimo ir kitas kameras. Kameros yra atskirtos vakuuminėmis sklendėmis. Pirmiausia padėklai yra dedami į pakrovimo kamerą. Joje pasiekiamas 10^{-6} Pa vakuumas. Padėklai įrengtu manipulatoriumi perduodami į bet kurią kamerą per atidarytas vakuumines sklendes [64, 65].

Prieš sudedant plokšteles į įrenginį, jos yra labai kruopščiai paruošiamos, nes molekulinio pluoštų epitaksija labai jautri plokštelių paviršių, ant kurių auginamas sluoksnis, kokybei. Medžiagų pluoštelių sluoksnio auginimo metu galima pertraukti sklendėmis ir taip keisti medžiagos ar legiravimo sudėtį. Taikant tokį būdą yra užauginami įvairūs įvairialyčiai dariniai ar legiruotos sandūros, kvantinės duobės ir supergirdelės. Molekulinio pluoštų epitaksijos įrenginio tipinė supaprastinta schema parodyta 3.3.1 paveiksle.

Taikant MPE galima auginti sudėtingo profilio darinius, valdyti iki vieno atominio storio sluoksnių augimą ir keisti legiruojančių priemaišų tankį. Tokio metodo trūkumas – lėtas auginimo greitis ir ilgai trunkantis, sudėtingas plokštelių pakeitimas.



3.3.1 pav. Molekulinių pluoštų epitaksijos supaprastinta įrenginio schema (Rinaldi, F. 2002[66])

Be to, ši technologija reikalauja superaukšto vakuumo ir labai švurių medžiagų. Nepaisant jos trūkumų, didesnė dalis puslaidininkinių darinių, kurie yra tiriama laboratorijose, išauginami būtent šios technologijos būdu.

Eksperimentui buvo naudojamos puslaidininkinės plokštelės (400 μm storio pusiau izoliuojantis GaAs padėklas), ant kurių buvo auginami **selektyviai legiruoti AlGaAs/GaAs** dariniai:

1. Dariniai su skirtingo storio skiriamaisiais sluoksniais.
2. Dariniai su ir be supergirdelės buferinio sluoksnio.

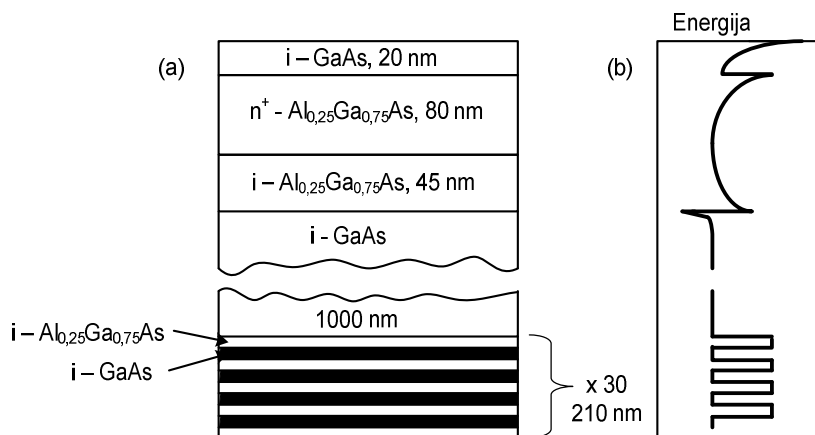
1. Buvo užauginti selektyviai legiruoti $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}/\text{GaAs}$ dariniai su 7,5 nm (vadinami siaurasluoksniais dariniais) ir 45 nm (vadinami plačiasluoksniais dariniais, 3.3.2 pav.) skiriamaisiais sluoksniais tarp 80 nm storio legiruoto AlGaAs sluoksnio ir nelegiruoto i-GaAs sluoksnio. Abiem atvejais nelegiruotą i-GaAs sluoksnį nuo padėklo skyrė 30-ties periodų supergirdelė. Kambario temperatūroje elektronų tankis dvimačiame kanale siaurasluoksnuose dariniuose buvo $6,2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, o plačiasluoksnuose – $1,4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Skystojo azoto temperatūroje elektronų tankis sumažėjo, atitinkamai, iki $3,9 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ir $1,6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Darinių elektronų judris siaurasluoksnuose dariniuose – $\mu(300 \text{ K}) = 4800 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ir $\mu(77 \text{ K}) = 52000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ – bei plačiasluoksnuose dariniuose – $\mu(300 \text{ K}) = 2400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ir $\mu(77 \text{ K}) = 66\,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

<i>i</i> -GaAs, 10nm	<i>i</i> -GaAs, 20nm
n^+ -Al _{0.3} Ga _{0.7} As, N _d ⁺ =4·10 ¹⁷ cm ⁻³ , 70nm	n^+ -Al _{0.25} Ga _{0.75} As, N _d ⁺ =10 ¹⁸ cm ⁻³ , 80nm
<i>i</i> -Al _{0.3} Ga _{0.7} As, 7.5nm	<i>i</i> -Al _{0.25} Ga _{0.75} As, 45nm
<i>i</i> -GaAs, 500nm	<i>i</i> -GaAs, 1μm
SI-GaAs, 400μm	SI-GaAs, 400μm

(a) (b)

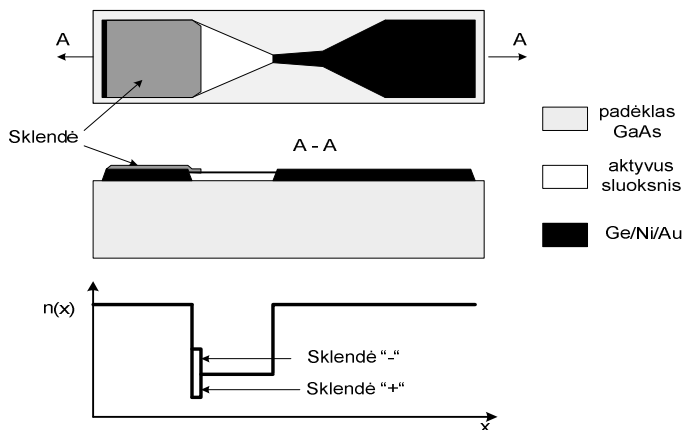
3.3.2 pav. Dariniai su skirtingais skiriamaisiais sluoksniais (a) $d_i = 7,5 \text{ nm}$ ir (b) $d_i = 45 \text{ nm}$

2. Buvo užauginti dviejų rūšių selektyviai legiruoti Al_{0.25}Ga_{0.75}As/GaAs dariniai – su supergirdelės buferiniu sluoksniu ir be jo (3.3.3 pav., pateikta darinio epitaksinių sluoksnių seka (a) ir laidumo juostos dugno kokybinis energetinio profilio vaizdas (b)). Buferinį sluoksnį sudarė 30 kartų pasikartojantys nelegiruoti AlGaAs/GaAs sluoksniai. Abiejų rūšių dariniuose 80 nm storio legiruotas n⁺-AlGaAs sluoksnis buvo atskirtas nuo i-GaAs srities 45 nm storio i-AlGaAs skiriamuoju barjeriniu sluoksniu. Abiejų rūšių dariniuose iš Holo matavimų nustatyta, kad kambario temperatūroje elektronų tankis dvimačiame kanale yra 1,35·10¹² cm⁻², o skystojo azoto temperatūroje elektronų tankis išaugo iki 2,75·10¹² cm⁻² be supergirdelės buferinio sluoksniu ir sumažėjo iki 1,6·10¹¹ cm⁻² su supergirdelės buferiniu sluoksniu. Elektronų judris dariniams be supergirdelės beveik nepakito, šaldant juos nuo kambario $\mu(300 \text{ K}) = 2200 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ iki skystojo azoto $\mu(77 \text{ K}) = 2600 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ temperatūros. Dariniams su supergirdeliniu buferiniu sluoksniu buvo stebimas žymus elektronų judrio padidėjimas skystojo azoto temperatūroje nuo $\mu(300 \text{ K}) = 2400 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ iki $\mu(77 \text{ K}) = 66\,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Nesimetriškai susiaurinti 2DEG dariniai buvo formuoti cheminio ėsdinimo būdu. Ėsdinama buvo šiek tiek žemiau apatinės legiruotojo n⁺-Al_{0.25}Ga_{0.75}As sluoksniu ribos.



3.3.3 pav. *Selektyviai legiruo to darinio sluoksnių seka (a) ir laidumo juostos dugno profilis (b)*

Dariniai su sklende buvo pagaminti iš selektyviai legiruo tų mikrobangų diodų su supergardelės buferiniu sluoksniu, virš aktyviosios diodo srities užgarinus papildomą Au kontaktą, pastumtą 5 μm virš aktyviosios diodo srities (3.3.4 pav.).

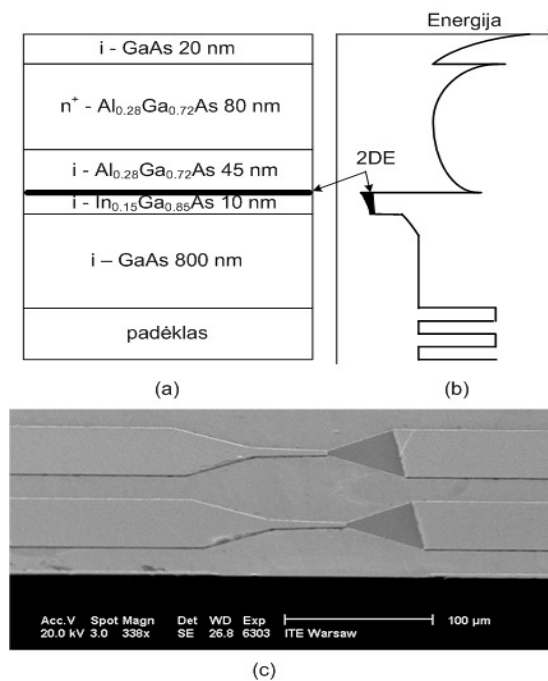


3.3.4 pav. *Asimetriškai susiaurintas darinys su daline sklende virš dvimačių elektronų kanalo. „-“ žymi neigiamą sklendės potencialą, „+“ – teigiamą*

Paruoštų selektyviai legiruočių AlGaAs/GaAs bandinių dydžiai buvo $700\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$. Buvo pagaminti mikrobangų diodai su skirtingais puslaidininkinio darinio „kaklelio“ pločiais $d = (1 \div 3)\ \mu\text{m}$.

Pseudomorfiniai AlGaAs/InGaAs/GaAs su 2DEG sluoksniu dariniai.

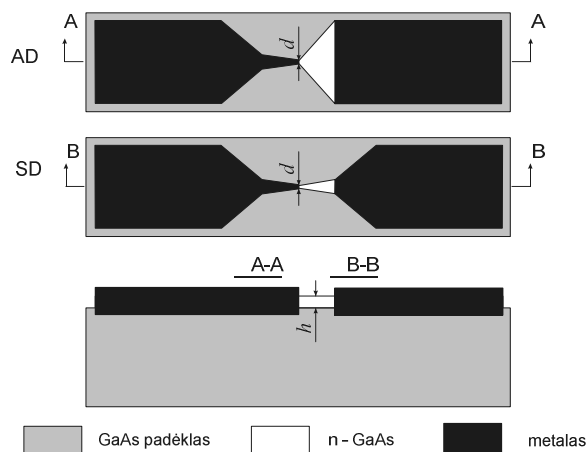
Buvo užauginti selektyviai legiruoti $\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{GaAs}$ dariniai su papildomu 10 nm InGaAs sluoksniu tarp 45 nm skiriamojo sluoksniu i-AlGaAs ir nelegiruoto 800 nm sluoksniu i-GaAs (3.3.5. pav.). Nelegiruotąjį i-GaAs sluoksnį nuo GaAs padėklo skyrė 10-ties periodų GaAs/AlGaAs supergirdelė. Ant legiruoto n^+ -AlGaAs sluoksniu buvo užaugintas nelegiruotas 20 nm i-GaAs sluoksnis, apsaugantis AlGaAs nuo oksidacijos. Elektronų tankis legiruotame 80 nm n^+ -AlGaAs sluoksnyje siekė $N_d \sim 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$. Elektronų judris aktyviajame i-InGaAs sluoksnyje kambario temperatūroje buvo $\mu(300\ \text{K}) = 6,1 \cdot 10^3\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, o skystojo azoto temperatūroje $\mu(77\ \text{K}) = 2,74 \cdot 10^5\ \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Selektivityviai legiruočių pseudomorfinių AlGaAs/GaAs bandinių „kaklelio“ pločiai buvo $d = (5 \div 7)\ \mu\text{m}$.



3.3.5 pav. Pseudomorfinė selektyviai legiruota AlGaAs/InGaAs/GaAs struktūra (a), energinė juostinė diagrama (b) ir asimetriškai susiaurinto bandinio nuotrauka (c)

Planariniai n-GaAs dariniai.

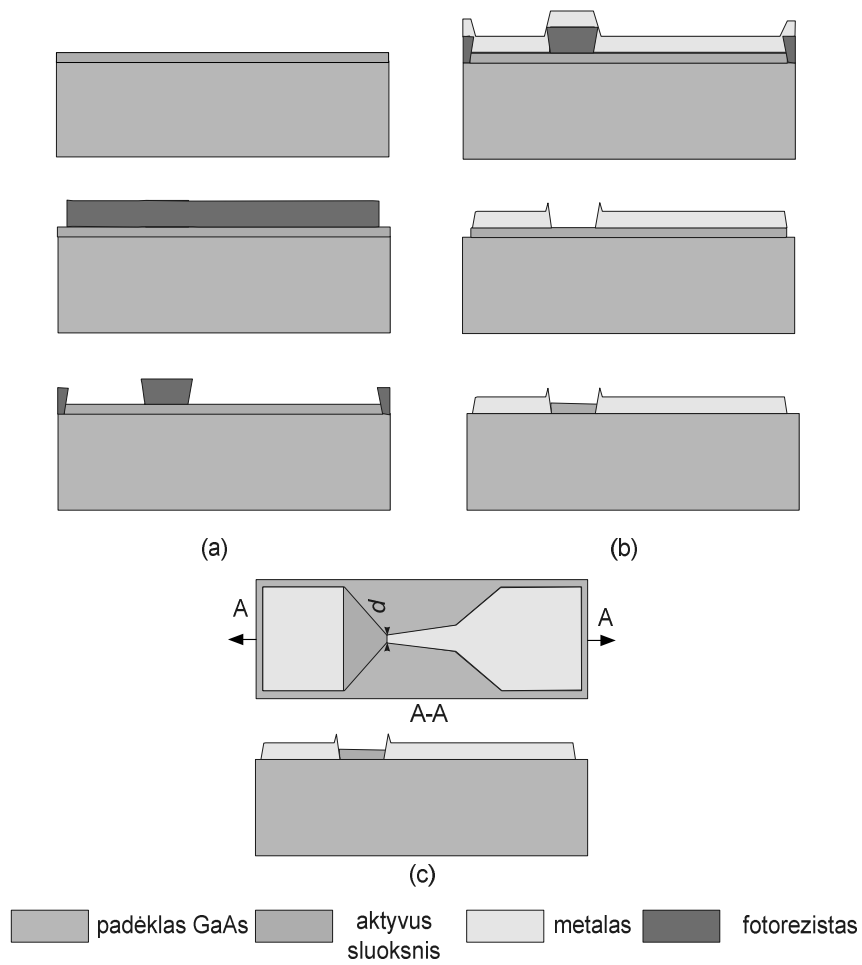
Buvo pagaminti dviejų tipų bandiniai (3.3.6 pav.) pagal simetriškai ir asimetriškai susiaurinto diodo geometriją. Abiejų rūšių dariniuose n⁺-GaAs sluoksnio storis buvo 100 nm, o susiaurinto „kaklelio“ pločiai $d = (1\div 3) \mu\text{m}$. Elektronų tankis n⁺-GaAs sluoksnyje buvo $N_d = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Abiejų rūšių dariniuose Halo matavimu nustatyta, kad epitaksiniam sluoksnyje kambario temperatūroje elektronų judris siekė $\mu = 3000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.



3.3.6 pav. Planariniai n-GaAs dariniai su simetriškai (SD) susiaurintu kakleliu ir asimetriškai (AD) susiaurintu kakleliu.

Visi dariniai išauginti molekulių pluoštų epitaksijos būdu Brauno submikrometrinių tyrimų centre Izraelyje pagal projektus Nr. HPRI-CT-2001-00114 ir RITA-2003-506095 (išskyrus bandinius pseudomorfinių darinių pagrindu, kurie buvo užauginti Cephona Centre of Excellence, Lenkijoje). Visi dariniai buvo legiruojami siliciu (Si).

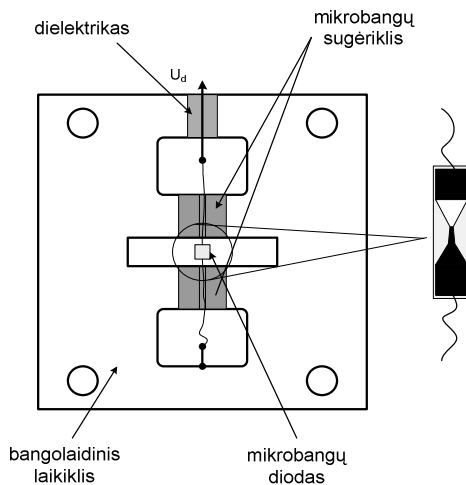
Iš šių puslaidininkinių plokštelių vėliau buvo gaminami tyrimams skirti bandiniai pagal asimetriškai ir simetriškai susiaurinto diodo geometriją. Bandinių gamyba pradedama susiaurinto meza-darinio formavimu, panaudojant fotolitografiją ir cheminį ėsdinimą (3.3.7 pav. (a)). Antroji fotolitografija skirta metalinių kontaktų formavimui. Ni/Au/Ge/Ni/Au-10 nm/200 nm/100 nm/70 nm/200 nm (pseudomorfiniams dariniams – Ni/AuGe/Ni/Au-10 nm/300 nm/70 nm/200 nm) sluoksniai buvo termiškai užgarinti $3 \cdot 10^{-6}$ Torr vakuume.



3.3.7 pav. Nesimetriškai susiaurintų darinių supaprastinta gamybos technologinė seka

Vėliau metalizuotas fotorezistas buvo nukeltas ir atliktas greitas metalinių kontaktų įdeginimas 430°C temperatūroje $\text{H}_2\text{-N}_2$ dujų atmosferoje. Įdeginimo trukmė 40 s (3.3.7 pav. (b)). Bandiniams su daline sklende virš dvimačio elektronų kanalo po antrosios fotolitografijos buvo atlikta papildoma fotolitografija. Sklendė suformuota užgarinant Cr (Chromas) ir Au (Auksas) sluoksnį vakuume $1 \cdot 10^{-9}$ Torr. Metalizuotas fotorezistas buvo pašalintas organiniame tirpiklyje.

Tokiu būdu puslaidininkinėje plokštelėje buvo suformuota diodų matrica, kuri vėliau buvo supjaustyta į atskirus pavienius bandinius (3.3.7 pav. (c)). Termokompresijos būdu uždejus ant kontaktų auksinius $50 \mu\text{m}$ laidelius, bandiniai buvo įdėti į stačiakampį bangolaidinį laikiklį statmenai jo plačiosioms sienelėms (3.3.8 pav.).



3.3.8 pav. Bangolaidinė galvutė su bandiniu

Darinių fotoluminescencijos tyrimai buvo atliekami panaudojant Ar jonų lazerio spinduliuotę, kurios kvanto energija $2,5 \text{ eV}$. Krūvininkų sužadinimo intensyvumas buvo keičiamas nuo $0,2 \text{ W/cm}^2$ iki 30 W/cm^2 . Fotoluminescencija buvo fiksuojama kriogeniniu fotodaugintuvu, dirbančiu pavienių fotonų registravimo režimu.

3.4. Skyriaus išvados

Visi tiriamieji dariniai išauginti MPE būdu Brauno submikrometrinių tyrimų centre Izraelyje, išskyrus bandinius pseudomorfinių darinių pagrindu, kurie buvo užauginti Cephona Centre of Excellence, Lenkijoje. Darinių fotoluminescencijos tyrimai buvo atliekami panaudojant Ar jonų lazerio spinduliuotę (kvanto energija 2,5 eV). Iš šių puslaidininkinių plokštelių vėliau buvo gaminami tyrimams skirti bandiniai, pagal asimetriškai ir simetriškai susiaurinto diodo geometriją. Taip puslaidininkinėje plokštelėje buvo suformuota diodų matrica, kuri vėliau supjaustyta į atskirus pavienius bandinius.

Krūvininkams kaitinti darbe buvo naudojamas SAD elektromagnetinis laukas. Eksperimentiškai dažninės charakteristikos buvo matuotos nuo 10 GHz iki 37 GHz dažnių ruože. Darinių VACH buvo matuojamos naudojant kompiuterizuotas sistemas. Visuose eksperimentuose elektrinis laukas buvo orientuotas išilgai bandinio. Eksperimentai buvo atliekami kambario $T = 300$ K bei skystojo azoto $T = 77$ K temperatūrose.

Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Skyriuje pateikti puslaidininkinių n-GaAs, AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs darinių eksperimentinių tyrimų rezultatai, gauti tiriant bandinius elektromagnetine spinduliuote.

Skyriaus medžiaga publikuota straipsnyje [1A-10A].

4.1. Tyrimų rezultatai

Sparti pažanga mikroelektronikoje pastaruosius porą dešimtmečių, suteikė galimybę praktiškai įgyvendinti anksčiau tik teoriškai įmanomus, žemesnių nei mums įprasta trijų dimensijų darinius. Tai paskatino naujos kokybės teorinius ir eksperimentinius tyrimus, svarbius tiek fundamentiniu, tiek taikomuoju požiūriu. Pavyzdžiui, lauko tranzistoriai selektyviai legiruotų puslaidininkinių darinių pagrindu su dvimačių elektroninių dujų (2DE) sluoksniu buvo panaudoti elektromagnetinei spinduliuotei aptikti plačiame dažnių ruože [67]. Pasiūlyta mikrobangų jutiklio konstrukcija su nesimetriškai susiaurintu submikrometrinių matmenų puslaidininkiniu dariniu [5A] pritaikyta mikrobangų detektoriams su 2DE sluoksniu [68, 6A, 10A].

Ištirtos mikrobangų jutiklių, pagamintų su nesimetriškai ir simetriškai susiaurintais n-GaAs, selektyviai legiruotais AlGaAs/GaAs, ir nesimetriškai susiaurintais pseudomorfiniais GaAs/AlGaAs įvairialyčiais dariniais savybės,

priklausomai nuo stipriai legiruotos puslaidininkinės medžiagos laidumo [5A] ir nuo dvimačio elektroninių dujų kanalo kokybės (tiriant AlGaAs/GaAs), kurią lemia:

- skiriamojo sluoksnio tarp legiruotojo AlGaAs sluoksnio ir nelegiruotojo GaAs sluoksnio storis [7A],
- supergardelės buferinis sluoksnis tarp padėklo ir aktyviojo sluoksnio [4A],
- darinio metalinių kontaktų pobūdis [9A],
- papildomo nelegiruoto InGaAs sluoksnio tarp skiriamojo i-AlGaAs sluoksnio ir nelegiruoto i-GaAs sluoksnio įterpimas [3A].

4.2. Diodai su n-GaAs stipriai legiruotu sluoksniu

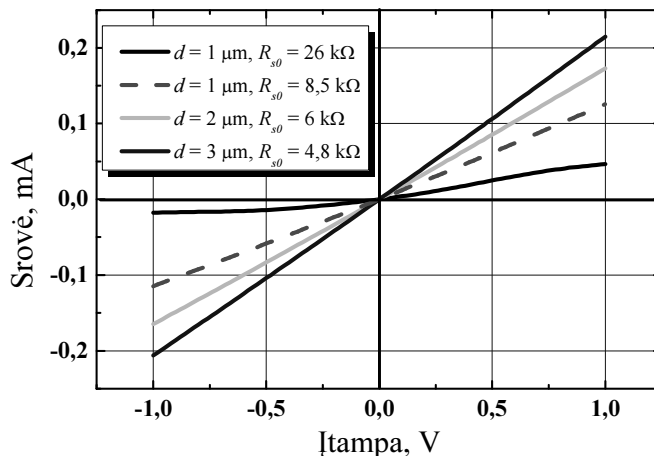
Stipriai legiruotų n-GaAs darinių voltamperinių charakteristikų eksperimentiniai matavimai kambario temperatūroje nuolatinės srovės režime parodė, kad VACH buvo tiesinės ir elektrinės varžos vertės kiekybiškai atitiko teoriškai suskaičiuotas iš darinio geometrijos R_{S0} :

$$R_{S0} = \frac{\rho}{2h \tan \alpha} \ln \left(1 + \frac{a}{d} \right), \quad (4.2.1)$$

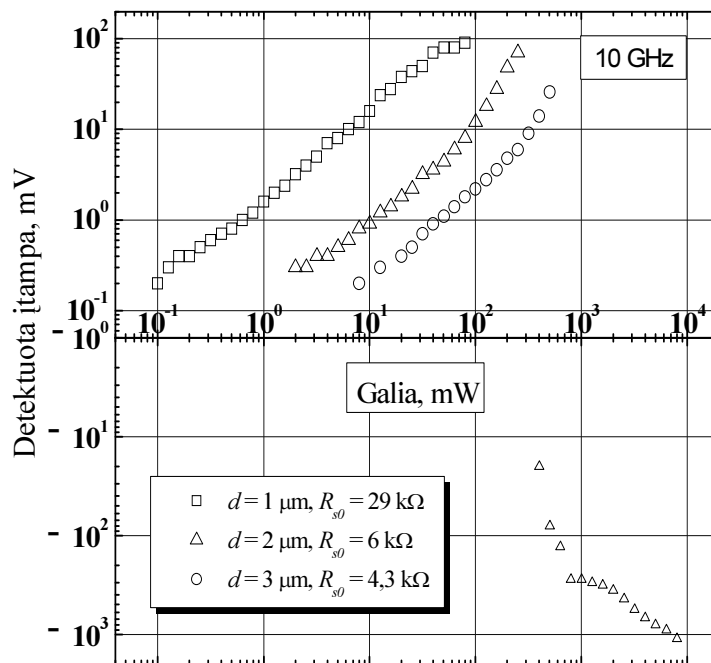
čia ρ – n srities savitoji varža; h – darinio storis; d – siauriausios vietos plotis; a – darinio plotis jo plačiausioje vietoje; α – n sluoksnio išplatėjimo kampas.

Voltamperinių charakteristikų kreivės n-GaAs dariniams su skirtingais kaklelio pločiais ($d = (1\div 3) \mu\text{m}$) kambario temperatūroje pateiktos 4.2.1 paveiksle.

Mikrobangų diodų detektuotos įtampos poliškumas atitiko šiluminę karštųjų krūvininkų elektrovarą n-n⁺ sandūroje [27, 29]. Simetriškai susiaurinto diodo signalo priklausomybė nuo krintančios mikrobangų galios pateikta 4.2.2 paveiksle. Voltvatinė charakteristika yra tiesinė šiltųjų krūvininkų dalyje, tai yra, kai mikrobangė spinduliuotė diodo kaklelio srityje mažai keičia krūvininkų judrį. Didesniu jautrumu pasižymi diodai su siauresniu kakleliu. Tai patvirtina ir jautrumo priklausomybės nuo darinių kaklelio pločio teoriniai skaičiavimai [69]. Prie didesnės mikrobangės spinduliuotės galios buvo stebima super-tiesinė voltvatinė priklausomybė. Daroma prielaida, kad super-tiesinė voltvatinė charakteristika siejama su padidėjusia krūvininkų tarpšlėnė sklaida GaAs [70], taipogi su padidėjusia elektronų energijos relaksacijos trukme GaAs kambario temperatūroje [71].



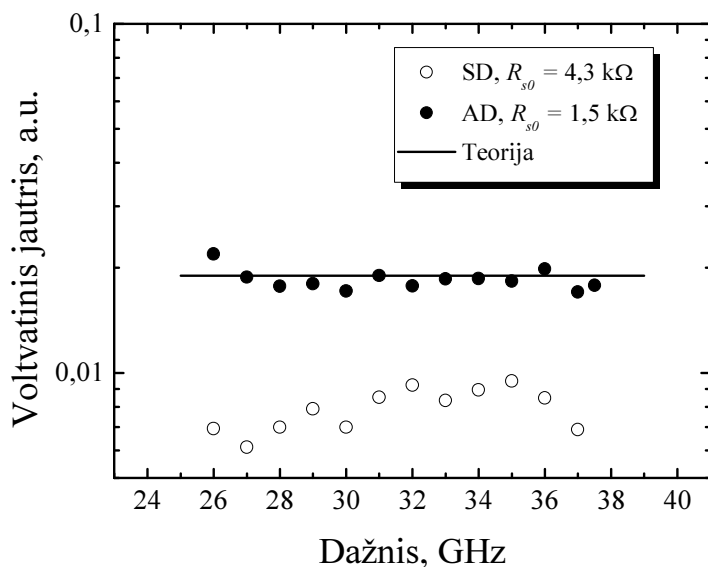
4.2.1 pav. Stipriai legiruotų *n*-GaAs darinių voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje



4.2.2 pav. Simetriškai susiaurinto *n*-GaAs diodo signalo priklausomybė nuo mikrobangų galios su skirtingais diodo kaklelio pločiais kambario temperatūroje

Dar vienas ypatumas buvo stebimas, tiriant susiaurintus n-GaAs mikrobangų diodus. Tai nemonotoninė voltvatinė charakteristika: padidinus mikrobangės spinduliuotės galią, stebimas detektuotos įtampos sumažėjimas ir po to sekantis detektuotos įtampos ženklo pasikeitimas. Toks efektas aiškinamas dėl Gunn'o efekto [70] atsirandančia neigiama diferencine varža n-GaAs sluoksnyje.

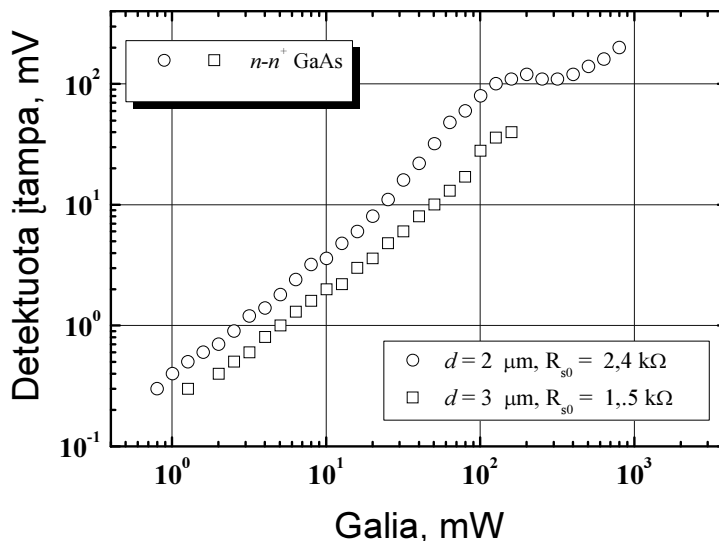
Matavimai Ka (26 GHz÷37,5 GHz) dažnių diapazone parodė voltvatinio jautrio padidėjimą asimetriškai susiaurintiems n-GaAs mikrobangų diodams. Eksperimentinės simetrijų ir asimetrinių mikrobangų diodų su kaklelio pločia $d = 3 \mu\text{m}$ jautrio dažninės priklausomybės pateiktos 4.2.3 paveiksle.



4.2.3 pav. *Asimetriškai ir simetriškai susiaurintų mikrobangų diodų jautrio dažninė priklausomybė išmatuota kambario temperatūroje (tamsūs taškai – asimetriškai susiaurintas n-GaAs mikrobangų diodas; šviesūs taškai – simetriškai susiaurintas n-GaAs mikrobangų diodas)*

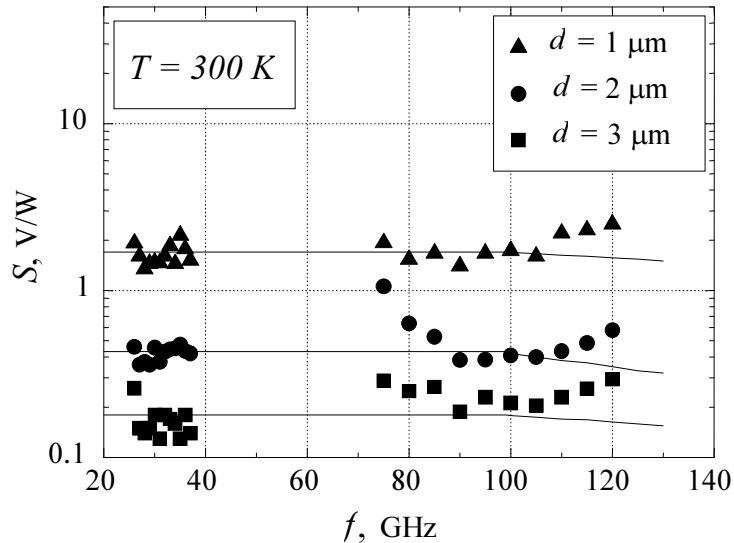
Buvo stebima silpna voltvatinio jautrio priklausomybė nuo dažnio abiejuose susiaurintuose dioduose Ka dažnių ruože. Linija (4.2.3. pav.) rodo teorinę dažnio priklausomybę nuo voltvatinio jautrio mikrobangų diodams su asimetriškai susiaurintu epitaksiniu sluoksniu [28].

Jautrio padidėjimo priežastis (4.2.4 pav.) siejama su bigradientine elektrovara asimetriškai susiaurintoje puslaidininkio struktūroje [69] dėl to, kad stipriai legiruotame puslaidininkyje šiluminės elektrovaros ir bigradientinės elektrovaros ženklas yra toks pat.



4.2.4 pav. *Asimetriškai susiaurinto n-GaAs diodo signalo priklausomybė nuo mikrobangų galios, esant skirtingiems diodo kaklelio pločiams, kambario temperatūroje*

Mikrobangų diodo, pagaminto selektyviai legiruoto darinio pagrindu (su skirtingais diodo kaklelio pločiais, $d = 1 \div 3 \mu\text{m}$), su vienalytiškai legiruotu barjeru, turinčio savyje asimetriškai susiaurintą $n-n^+$ sandūrą, voltvatinio jautrio priklausomybė nuo dažnio pateikta 4.2.5 paveiksle. Tiesi linija rodo teorinę dažninę priklausomybę nuo mikrobangų diodo voltvatinio jautrio ir suskaičiuota pagal (2.4.6) formulę. Eksperimentiniai mikrobangų diodo voltvatinio jautrio matavimai atitiko teorinius skaičiavimus. Teoriniai skaičiavimai su eksperimentiniais rezultatais sutampa, kai laikoma, jog 0,5 % mikrobangės spinduliuotės galios sugeria mikrobangų diodas. Mikrobangų diodo jautris priklauso nuo diodo kaklelio storio (4.2.5 pav.).



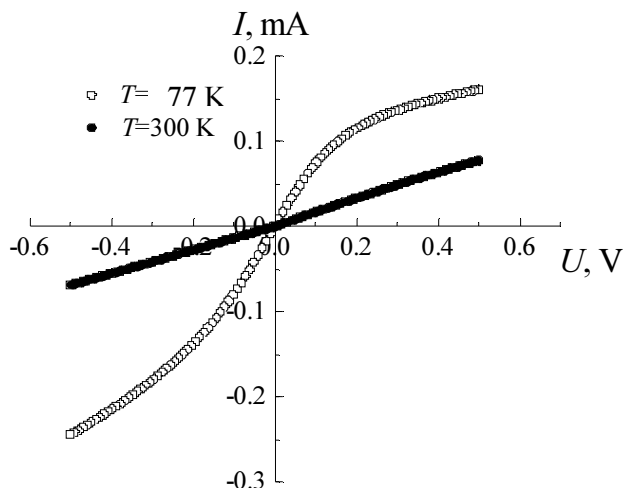
4.2.5 pav. Mikrobangų diodo su vienalytiškai legiruotu barjeru, turinčio savyje asimetriškai susiaurintą $n-n^+$ sandūrą, voltvatinio jautrio priklausomybė nuo dažnio (tiesi linija – teoriniai skaičiavimai, taškai – eksperimentiniai duomenys) [2A, 8A]

4.3. Diodai su skirtingais skiriamaisiais sluoksniais

Remiantis moderniosios medžiagų inžinerijos pasiekimais, buvo sukurti puslaidininkiniai dariniai, pasižymintys labai dideliu krūvininkų judriu žemose temperatūrose [38, 39]. Mikrobangų diodų, kurių veikimas pagrįstas karštųjų krūvininkų šilumine elektrovara, voltvatinis jautris tuo didesnis, kuo didesnis krūvininkų judris. Toks teiginys buvo patikrintas [7A] darbe, kuriame pasiūlyta mikrobangų diodo planarinė konstrukcija su asimetriškai konfigūruotu dvimačių elektronų dujų sluoksniu. Kambario temperatūroje šių diodų jautris buvo toks pat, kaip ir diodų su nesimetriškai susiaurinta trimate $n-n^+$ GaAs [72] sandūra, tačiau skystojo azoto temperatūroje diodų su 2DE sluoksniu jautris buvo eile didesnis nei tūrinių diodų. Darinių elektrinis laidumas buvo matuojamas nuolatinės srovės režime.

Kontaktų varža plačia sluoksniuose bandiniuose buvo $\rho_c = (0.5 - 1.0) \Omega\text{mm}$, o siaurasluoksniuose bandiniuose $\rho_c = (0.1 - 0.5) \Omega\text{mm}$. Abiejų rūšių jutikliuose

(dariniai su 7,5 nm ir 45 nm skiriamuoju sluoksniu) voltamperinės charakteristikos buvo tiesinės silpnų elektrinių laukų srityje tiek kambario, tiek skystojo azoto temperatūrose (4.3.1 pav.). Matavimai atlikti siaurasluoksniuose bandiniuose su 1 μm kaklelio pločiu.

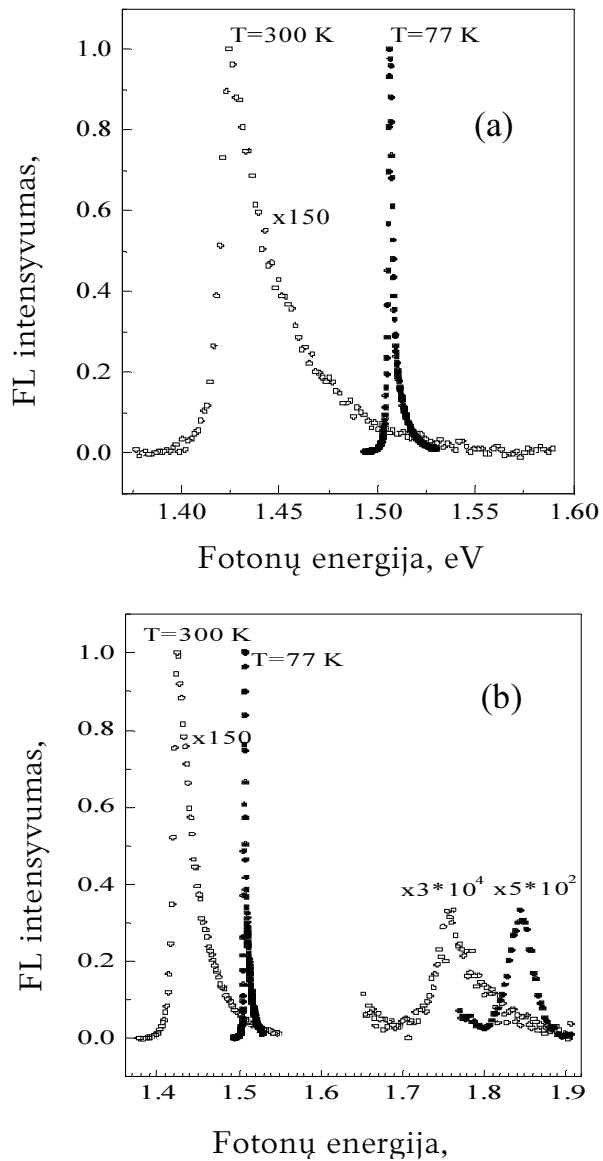


4.3.1 pav. Mikrobangų diodų su siauru skiriamuoju sluoksniu voltamperinės charakteristikos, išmatuotos kambario ir skystojo azoto temperatūrose

Fotoluminescencijos tyrimai abiejų rūšių jutikliams (siaurasluoksniuose 7,5 nm ir plačiasluoksniuose 45 nm dariniuose) su Ar jonų lazerio žadinančiąja spinduliuote kambario ($T = 300\text{ K}$) ir skystojo azoto ($T = 77\text{ K}$) temperatūrose (4.3.2 pav.), parodė, kad plačiasluoksnių darinių spektruose galime išskirti dvi smailių grupes: viena jų stebima nuo 1,7 eV iki 1,9 eV srityje, kuri sietina su elektronų ir skylių porų rekombinacija AlGaAs sluoksnyje. Mažas šių smailių intensyvumas rodo, jog didžioji šviesa sužadintų krūvininkų dalis palieka šį sluoksnį ir jų rekombinacija vyksta GaAs sluoksnyje, dėl to stebime antrąją intensyvių fotoluminescencijos smailių grupę ties (1,4÷1,52) eV, kurios energetinė padėtis labai artima eksitoninei spinduliuotei GaAs sluoksnyje, kur susidaro 2DE sluoksnis. Siaurasluoksniuose darinių spektruose stebimos smailės, kurios byloja tik apie eksitoninę spinduliuotę GaAs. Šiuo atveju tai, kad nėra luminescencijos ties (1,7÷1,9) eV, reiškia, jog n^+ -AlGaAs sluoksnis yra visiškai nuskurdintas elektronais, ir jie efektyviai surenkami 2DE kanale.

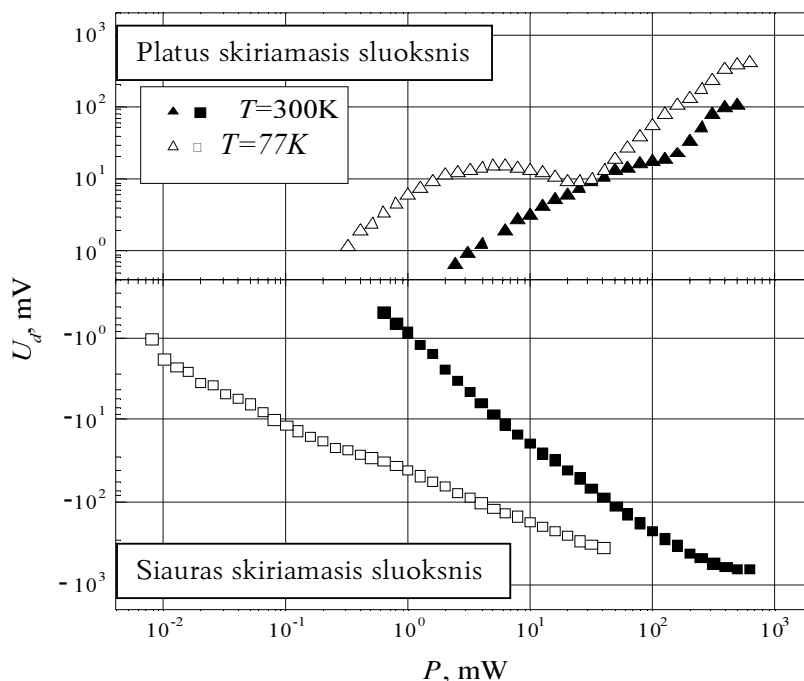
Plačiasluoksniuose dariniuose detektuotas įtampos poliškumas atitiko karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros ženklą tokios pat konfigūracijos nesimetriškai susiaurintoje n - n^+ sandūroje, kai 2DE kanalas laikomas n sritimi, o

susiaurintoji metalizuota dalis – n^+ sritimi. Detektuotos įtampos priklausomybės nuo mikrobangės spinduliuotės galios pateiktos 4.3.3 paveiksle.



4.3.2 pav. *Selektyviai legiruotos GaAs/AlGaAs struktūros fotoluminescencijos spektras su (a) siauresniu ir (b) platesniu sluoksniu*

Plačiasluoksniuose dioduose voltvatinės charakteristikos buvo tiesinės silpnos mikrobangės spinduliuotės srityje, o prie didesnių galių pasireiškėdavo šios priklausomybės nemonotoninis pobūdis, aiškinamas tarpslėninės sklaidos reiškiniais, vykstančiais daugiaslėniuose puslaidininkiuose [73–75]. Šiuo atveju voltvatinis jautris kambario temperatūroje buvo 0,3 V/W, o skystojo azoto temperatūroje išaugo iki 5,5 V/W.



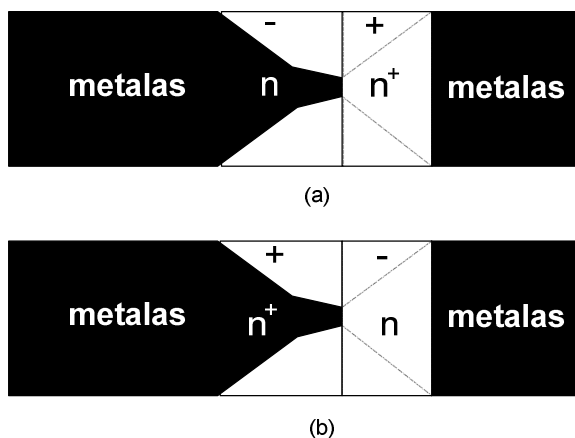
4.3.3 pav. Mikrobangų diodų su plačiu (trikampiai) ir siauru (kvadratai) skiriamuoju sluoksniu voltvatinės charakteristikos, išmatuotos kambario (tamsūs taškai) ir skystojo azoto (šviesūs taškai) temperatūrose

Siaurasluoksniuose dariniuose mikrobangų diodo detektuotos įtampos poliškumas buvo priešingo ženklo nei diodo su plačiuoju skiriamuoju i-AlGaAs sluoksniu.

Toks detektuotos įtampos poliškumas gali būti paaiškintas n-n⁺ sandūros sričių pasikeitimu, kai 2DE sluoksnis gali būti laikomas n⁺ sritimi dėl efektyvaus elektronų surinkimo į dvimatį kanalą, o metalizuota susiaurintoji diodo sritis – n sritimi (4.3.4 pav.).

Taip pat reikia pažymėti, jog abiejų rūšių mikrobangų diodų detektuotos įtampos poliškumas atitiko jų voltamperinių charakteristikų asimetrijos stipriuose elektriniuose laukuose ženklą.

Siaurasluoksnių diodų, kaip ir diodų su plačiuoju skiriamuoju sluoksniu, voltvatinės charakteristikos buvo tiesinės iki 100 mW kambario temperatūroje, tačiau plačiasluoksniuose dariniuose voltvatinis jautris buvo eile mažesnis.



4.3.4 pav. *Detektuotos įtampos poliškumo atsiradimas dėl sandūros sričių pasikeitimo, (a) atsiranda detektuotas teigiamas signalas, (b) atsiranda detektuotas neigiamas signalas*

Skystojo azoto temperatūroje siaurasluoksnių diodų dinaminis ruožas buvo ribojamas 100 μ W, tačiau jų jautris buvo beveik dviem eilėmis didesnis nei plačiasluoksniuose dioduose ir siekė 175 V/W.

4.4. Diodai su ir be supergardelės buferinio sluoksnio

Bandinių, pagamintų iš selektyviai legiruočių darinių su supergardele, voltamperinių charakteristikų matavimai pastoviosios srovės režime parodė, kad eksperimentinės elektrinės varžos vertės kiekybiškai atitinka teoriškai suskaičiuotas iš darinio geometrijos (pagal 4.2.1 lygtį). VACH buvo tiesinė silpnų elektrinių laukų srityje ir pereinavo į subtiesinę stipriuose laukuose dėl elektronų dreifinio greičio sotinimosi (4.4.1 pav.)

Darinių be supergardelės buferinio sluoksnio VACH taip pat buvo tiesinės, tačiau jų eksperimentinės varžų vertės buvo didesnės, nei teorinės. Bandinių su

supergardele VACH asimetrijos ženklas atitiko n^+ -n sandūros voltampinės charakteristikos asimetrijos ženklą [28], kai nemetalizuota 2DE dalis traktuojama nelegiruotąja n sritimi, o metalizuota diodo dalis – stipriau legiruotąja n^+ sritimi (4.3.4 pav. (a)). Priešingo ženklo VACH asimetrija buvo stebima bandinių be supergadelės atveju: esant tai pačiai įtampos vertei bandinyje, per jį tekėjo stipresnė srovė, kai teigiamas įtampos potencialas buvo sudarytas labiau susiaurintoje metalizuotoje darinio pusėje. Šie eksperimentiniai faktai leidžia teigti, kad bandinio be supergadelės n^+ ir n sritys yra susikeitusios vietomis: bandinio dalis su 2DEG kanalu turi būti laikoma sritimi n^+ , o metalizuota susiaurinta sritis – mažiau legiruotąja n sritimi (4.3.4 pav. (b)).

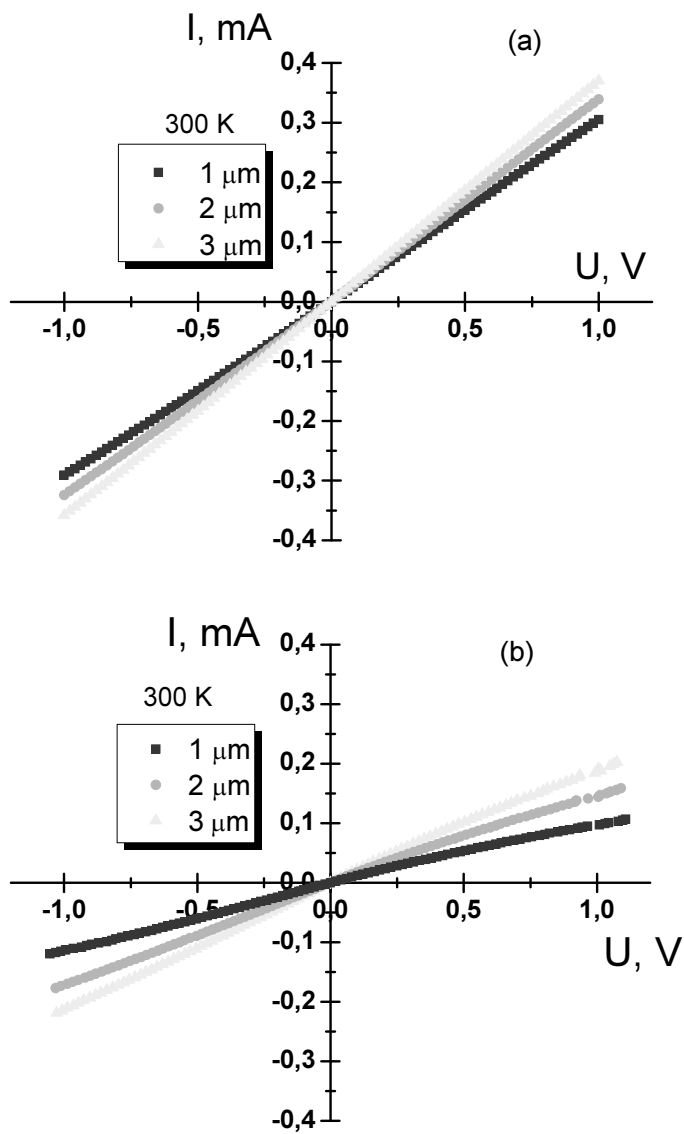
Bandinių liuminescencijos spektrai suteikia vertingos informacijos apie energetinius lygmenis puslaidininkinėje medžiagoje. 4.4.2 paveiksle pateikti selektyviai legiruotų GaAs/Al_{0,25}Ga_{0,75}As darinių liuminescencijos spektrai, išmatuoti skystojo azoto (tamsūs taškai) ir kambario (šviesūs taškai) temperatūrose, bandiniams su supergardele ir be jos. Galime išskirti dvi spektro smailių grupes. Viena jų išsidėsčiusi energetinėje (1,7 ÷ 1,9) eV srityje. Bandiniui su supergardele šias smailes siejame su elektronų-skylių porų rekombinacija Al_{0,25}Ga_{0,75}Al sluoksnyje.

Mažas liuminescencijos intensyvumas rodo, jog didžioji šviesa generuotų krūvininkų dalis palieka šį sluoksnį ir po to rekombinuoja GaAs sluoksnyje, emituodami mažesnės energijos kvantą. Antroji smailių grupė, išsidėsčiusi (1,4 ÷ 1,52) eV srityje, pasižymi žymiai didesniu liuminescencijos intensyvumu, ir jų energetinė padėtis labai artima eksitoninei spinduliuotei GaAs, kur kaip tik ir susidaro 2DEG kanalas.

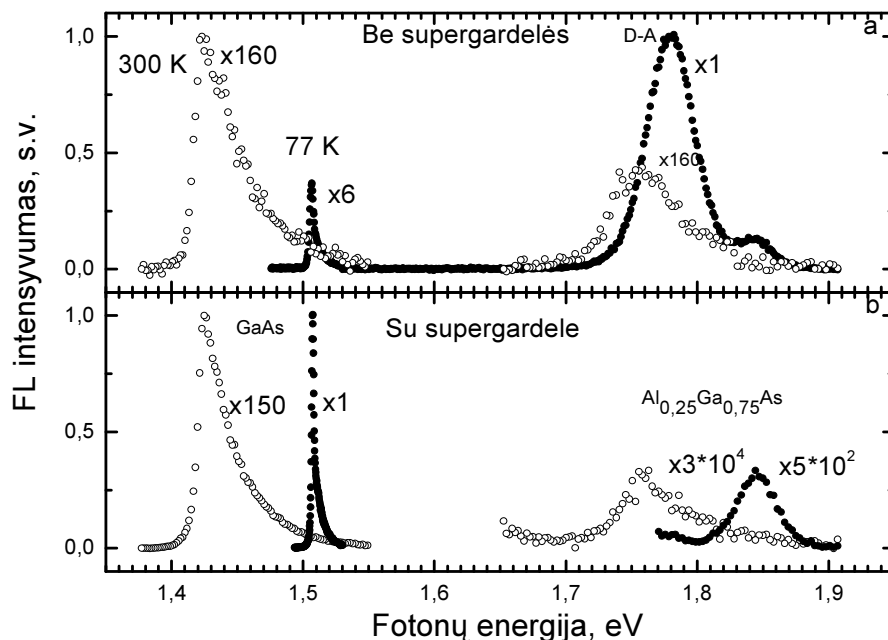
Kitokią situaciją turime bandiniams be supergadelės buferinio sluoksnio. Didžiausio intensyvumo liuminescenciją stebime ties 1,79 eV skystojo azoto temperatūroje. Šią smaile galime susieti su elektronų šuoliais iš donorinių lygmenų į akceptorinius lygmenis, nes, kaip žinoma [76], silicis AlGaAs yra amfoterinė priemaiša, kuri gali veikti ne tik kaip donorinė, bet ir kaip akceptorinė priemaiša, tai didžiąja dalimi priklauso nuo kristalų auginimo sąlygų. Žymiai didesnis liuminescencijos intensyvumas iš Al_{0,25}Ga_{0,75}As sluoksnio, lyginant su GaAs, stebėtas žemoje temperatūroje bandiniams be buferinio sluoksnio, aiškinamas dominuojančia nespinduline elektronų ir skylių rekombinacija 2DE kanale, kuri vyksta per defektus ir liekamąsias priemaišas

Eksperimentiniai fotoluminescencijos tyrimo rezultatai koreliuoja su elektronų judrio matavimo rezultatais – dariniai su supergadelės buferiniu sluoksniu pasižymi didesniu elektronų judriu nei be jo.

Bandinių su supergardele voltatinės charakteristikos pateiktos 4.4.3 paveiksle. Detektuotos įtampos poliškumas atitiko elektronų šiluminės elektrovaros jėgos ženklą n^+ -n sandūroje. Teigiamas potencialas buvo stebimas ant metalizuotos susiaurinto darinio dalies n^+ bei koreliavo su VACH asimetrijos ženklu.

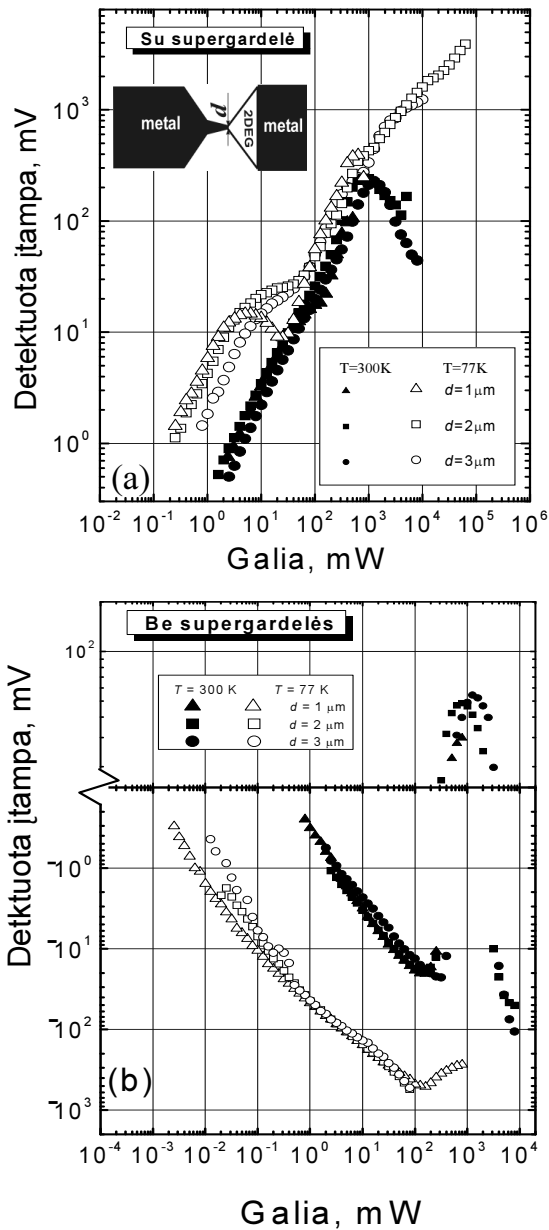


4.4.1 pav. Asimetriškai susiaurintų bandinių su supergardoje (a) ir be supergardelės (b) VACH kambario temperatūroje

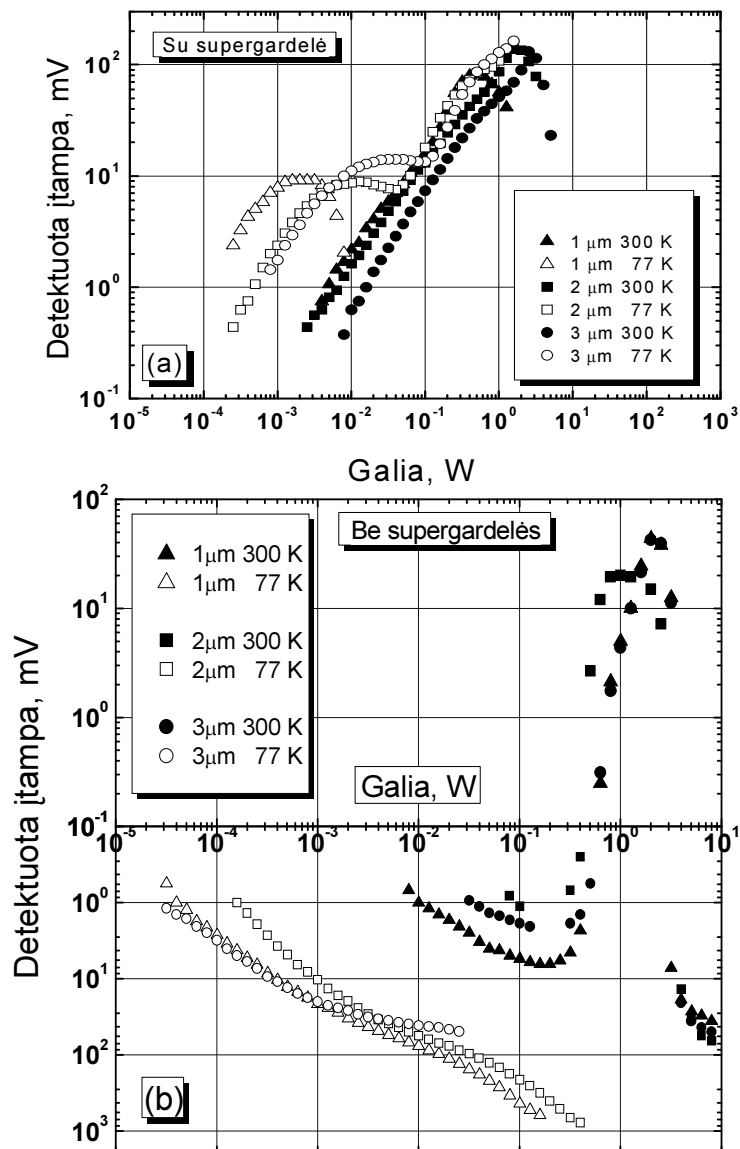


4.4.2 pav. *Selektyviai legiruočių GaAs/Al_{0,25}Ga_{0,75}As darinių liuminescencijos spektrai išmatuoti skystojo azoto ir kambario temperatūrose bandiniams su supergardele (a) ir be jos (b)*

Kambario temperatūroje tiesinė detektuotos įtampos priklausomybė nuo galios buvo stebima iki 1 W bangolaidžiu sklindančios mikrobangės spinduliuotės galios vertės, o skystojo azoto temperatūroje ši priklausomybė nukrypavo nuo tiesinės prie beveik dviem eilėms mažesnės galios vertės. Šią nemonotoninę detektuotos įtampos priklausomybę nuo galios aiškiname elektronų permetimu į aukštesnius energetinius slėnius ir Gunn'o domenų susidarymu stipriame mikrobangų elektriniame lauke. Labiau tikėtina, kad domenai susidarys žemoje temperatūroje, kadangi tuomet elektronai tampa judresni ir jų judris stipriau priklauso nuo elektrinio lauko stiprio [77]. Mikrobangų diodai su siauresniu kakleliu pasižymėjo didesniu voltvatinio jautriu, tačiau jų voltvatinės charakteristikos buvo labiau nemonotoninės dėl stipresnio elektrinio lauko darinio susiaurėjimo. Voltatinis jautris skystojo azoto temperatūroje buvo eile didesnis nei kambario temperatūroje dėl padidėjusių elektronų judrio ir energijos relaksacijos trukmės verčių žemoje temperatūroje.



4.4.3 pav. Asimetriškai susiaurintų mikrobangų diodų su supergardenės buferiniu sluoksniu (a) ir be jo (b) voltatinės charakteristikos, išmatuotos skystojo azoto ir kambario temperatūrose



4.4.4 pav. Simetriškai susiaurintų mikrobangų diodų su supergardenės buferiniu sluoksniu (a) ir be jo (b) voltatinės charakteristikos, išmatuotos skystojo azoto ir kambario temperatūrose

Mikrobangų diodo, pagaminto iš selektyviai legiruoto darinio be buferinio sluoksnio, detektuotos įtampos poliškumas buvo priešingo ženklo ir atitiko bandinio VACH asimetrijos ženklą (4.4.3 pav. (b)). Detektuota įtampa tiesiškai priklausė nuo mikrobangės spinduliuotės galios iki $100 \mu\text{W}$ skystojo azoto ir iki 100 mW kambario temperatūrose. Tačiau reikia pažymėti aukštą voltvatinio jautrio vertę žemoje temperatūroje – bandiniui su $1 \mu\text{m}$ kaklelio pločiu ji siekė 200 V/W . Taip pat buvo išmatuotos voltvatinės charakteristikos simetriškai susiaurintiems bandiniams (4.4.4 pav.).

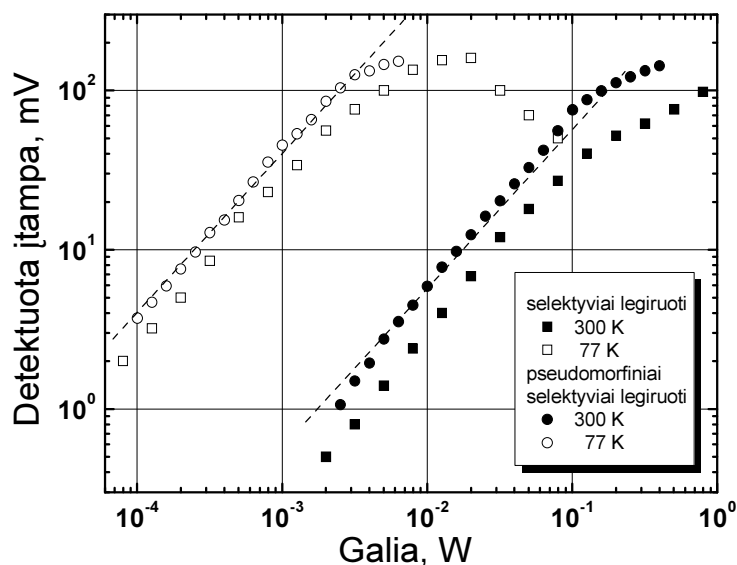
4.5. Diodai su InGaAs sluoksniu

Vienas svarbiausių elektromagnetinės spinduliuotės jutiklių parametrų yra jų voltvatinis jautris. Jutiklių, kurių veika yra pagrįsta laisvųjų krūvininkų kaitimu, pranašumas yra tas, kad jais galima detektuoti plataus spektro elektromagnetinę spinduliuotę [28]. Tačiau, lyginant su kitais jutikliais, jie pasižymi nedideliu jautriu.

Fenomenologinė teorija [24] sako, kad elektromagnetinių bangų jutiklio jautris yra proporcingas laisvųjų krūvininkų judriui. Karštųjų krūvininkų indukuotas signalas yra proporcingas krūvininkų temperatūrai. Todėl kitas būdas jutiklio jautriui padidinti – pagaminti jutiklį iš puslaidininkinės medžiagos, pasižyminties dideliu krūvininkų judriu. Elektronų judris selektyviai legiruotose įvairialytėse AlGaAs/GaAs sandūrose buvo analizuojamas teoriškai ir tiriamas eksperimentiškai darbuose [78, 79].

Gera žinoma dėsningumas, kad krūvininkų judris yra susijęs su puslaidininkio draustinių energijų juostos pločiu [80]. Todėl racionalu naudoti puslaidininkinę medžiagą, pasižymintį siauresniu draustinių energijų juostos tarpu. Tokia medžiaga nagrinėjamiems selektyviai legiruotiems AlGaAs/GaAs dariniams [6A, 10A] galėtų būti InAs puslaidininkinė medžiaga. Tačiau dėl gardelių konstantos skirtumo, InAs medžiagos AlGaAs/GaAs įvairialytėje sandūroje naudoti negalima dėl įvairialytėje sandūroje galinčių atsirasti dislokacijų ir gardelės defektų. Todėl būtina naudoti medžiagą, panašią į InAs puslaidininkinę medžiagą, kurios gardelės konstanta būtų artima AlGaAs/GaAs. Tokia medžiaga galėtų būti InGaAs, kurios gardelės konstanta yra artima AlGaAs-GaAs medžiagoms. Taipogi ji pasižymi didesniu krūvininkų judriu ir siauresniu draustinės juostos tarpu, lyginant su AlGaAs-GaAs puslaidininkinėmis medžiagomis. Siauratarpi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ sluoksnį įterpus į selektyviai legiruotojo darinio GaAs potencinį kanalą, elektronų lokalizacija dvimačiame kanale tampa efektyvesnė ir krūvininkų judris jame padidėja. Reikia tik neperžengti $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kritinio sluoksnio storio ribos, kad neatsirastų defektų dėl gardelės konstantų skirtumo [81, 82].

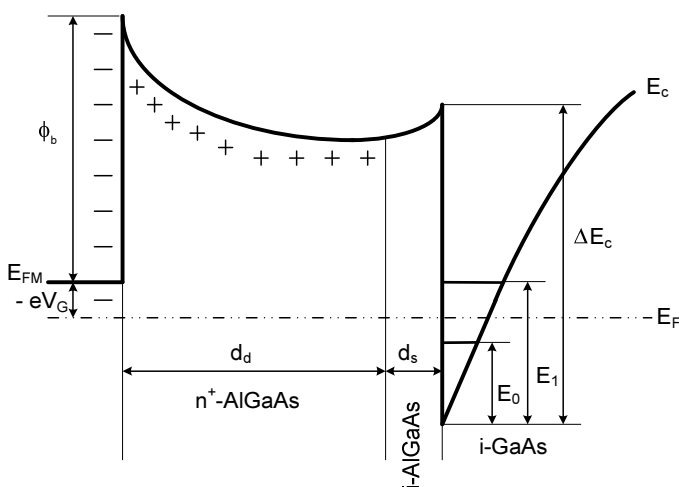
Siekiant padidinti mikrobangų diodų voltatinį jautrį [69, 6A, 10A], buvo sukonstruoti ir tirti AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorfiniai dariniai su dvimatėmis elektronų dujomis, dariniai, pasižymintys dideliu krūvininkų judrumu aktyvioje diodo srityje [48]. Palyginti eksperimentiškai gauti rezultatai, tiriant detektuotą signalą AlGaAs/InGaAs/GaAs pseudomorfiniuose ir AlGaAs/GaAs dariniuose [6A, 10A] (4.5.1 pav.). Matyti, jog skystojo azoto temperatūroje pseudomorfinio darinio jautris yra apie 38 V/W, tuo tarpu AlGaAs/GaAs – 20 V/W. Kambario temperatūroje pseudomorfinio AlGaAs/InGaAs/GaAs darinio jautris yra taip pat daugiau nei dvigubai didesnis už selektyviai legiruotojo AlGaAs/GaAs diodo jautrį [83].



4.5.1 pav. Nesimetriškai susiaurintų diodų, pagamintų iš AlGaAs/InGaAs/GaAs ir AlGaAs/GaAs, voltatinės charakteristikos, juos paveikus 10 GHz dažnio spinduliuote. 2DE judriai $T = 300\text{ K}$ ir $T = 77\text{ K}$ temperatūroms yra, atitinkamai: AlGaAs/GaAs – $4700\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ir $190\ 600\text{ cm}^2/\text{Vs}$; AlGaAs/InGaAs/GaAs – $6100\text{ cm}^2/\text{Vs}$ ir $274\ 000\text{ cm}^2/\text{Vs}$

4.6. Diodai su sklendės pobūdžio metalizacija

Norint padidinti asimetriškai susiaurinto mikrobangų diodo jautrumą, reikia naudoti sklendę, kuria būtų galima keisti elektronų tankį 2DE kanale [9A]. HEMT tranzistoriaus energetinė juostinė diagrama pateikta 4.6.1 paveiksle.



4.6.1 pav. HEMT tranzistoriaus energetinė juostinė diagrama.

Elektronų tankis 2DE kanale gali būti išreikšta [84]:

$$n_s(x) = \frac{\varepsilon}{q(d_d + d_s)} [V_G - V(x) - V_T] \quad (4.6.1)$$

čia ε – dielektrinė konstanta AlGaAs; q – elektrono krūvis; d_d ir d_s – legiruoto AlGaAs ir skiriamąjo AlGaAs sluoksnių pločiai; V_G – sklendės įtampa; $V(x)$ – potencialas taške x .

Slenkstinę įtampą galima išreikšti taip:

$$V_T = \phi_b - \Delta E_c / q + \Delta E_F / q - V_p, \quad (4.6.2)$$

poliarizacijos įtampa V_p :

$$V_p = qN_D^2 d_d^2 / 2. \quad (4.6.3)$$

Čia $\phi_b, \Delta E_c$ ir ΔE_F yra energetiniai įvairialytės sandūros parametrai; N_D – plokštuminis donorų tankis 2DE kanale. Tokiu būdu pridėdamas įtampą prie sklendės, galime valdyti elektronų tankį 2DE kanale.

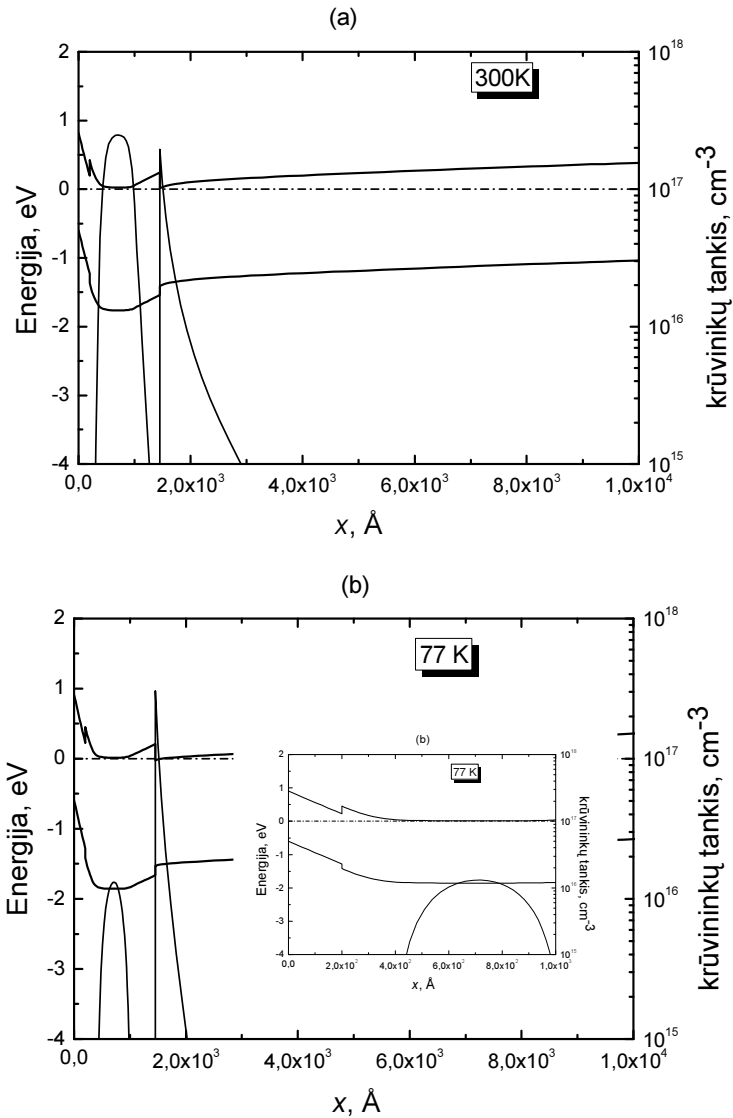
Priklausomai nuo pridėtos įtampos poliškumo, elektronai gali skirtingai pasiskirstyti 2DE kanale. Esant teigiamai įtampai ant sklendės, sumažėja elektronų tankis po sklende. Jeigu neigiama įtampa atsiranda ant sklendės ties kaire diodo puse, tai padidėja elektronų tankis ties ta vieta. Tokiu būdu sklendės įtampa leidžia pakeisti elektronų pasiskirstymą tiriamo asimetriškai susiaurinto mikrobangų diodo 2DE kanale (4.6.2 pav., 4.6.3 pav.).

Nagrinėjant 4.6.1 paveiksle juostinę diagramą, matome, jog įvairialytį darinį sudaro: metalinė sklendė, apsauginis GaAs sluoksnis, legiruotas n-AlGaAs sluoksnis, nelegiruotas skiriamasis sluoksnis i-AlGaAs ir GaAs padėklas. Apsauginis GaAs sluoksnis yra įvairialyčio darinio dalis, skirta apsaugoti sistemą nuo degradacijos, nes AIAs paviršius aktyviai reaguoja su atmosferos deguonimi. Pridėjus prie GaAs metalinę sklendę, barjero aukštis išlieka apytikriai lygus ϕ_b energijai. Svarbus paviršinių būsenų nulemtas efektas yra tas, kad tik dalis legiruoto n-AlGaAs sluoksnio elektronų pildo 2DE kanalą. Kiti legiruoti n-AlGaAs sluoksnio elektronai pildo paviršines būsenas.

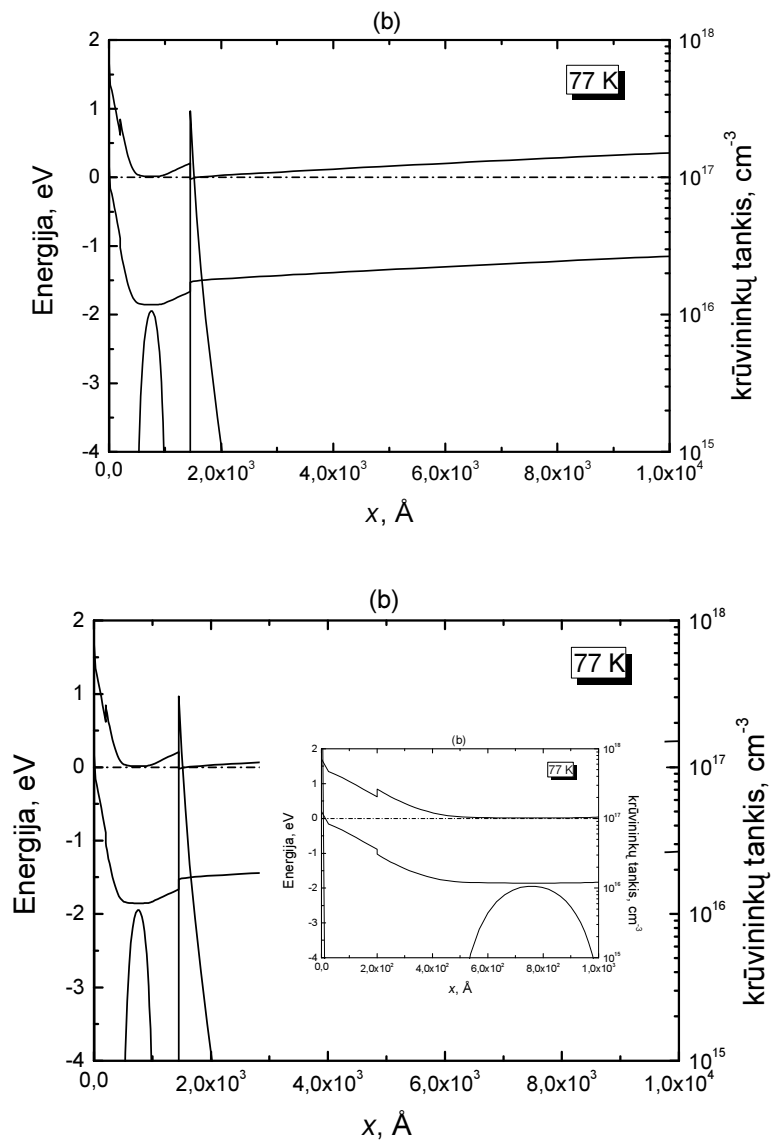
Sklendės ir puslaidininkio kontakte formuojasi barjeras. Esant normaliam diodo darbo režimui (4.6.2 pav.), kai prie sklendės nėra pridėtos įtampos, paviršinės būsenos neturi įtakos 2DE kanalui. Pridėjus įtampą prie diodo sklendės, ji kris ant GaAs-AlGaAs sandūros, keisdama joje 2DE tankį, ir ant nuskurdinto barjero sluoksnio (4.6.3 pav.).

Jei sklendė yra labai arti aktyvaus GaAs-AlGaAs sluoksnio, krūvių persiskirstymas barjere gali paveikti visą AlGaAs sluoksnį ir pakelti dimensinio kvantavimo lygmenis aktyviame 2DE sluoksnyje virš cheminio potencialo. Priklausomai nuo atstumo tarp aktyvaus 2DE sluoksnio ir sklendės, galime valdyti 2D elektronus kanale: kanalas gali būti arba atidarytas, arba uždarytas. Pridėjus tam tikra neigiamą įtampos potencialo vertę prie diodo sklendės, galime uždaryti 2D elektronų kanalą. Reikia atkreipti dėmesį, kad slenkstinė įtampa, kuri uždaro 2DE kanalą, nepriklauso nuo skiriamąjo nelegiruoto i-AlGaAs sluoksnio pločio. Ji priklauso nuo legiruojančių priemaišų tankio, apsauginio GaAs sluoksnio bei n^+ -AlGaAs sluoksnio pločio.

Diodų su sklende voltamperinės charakteristikos iš esmės nesiskyrė nuo diodų be sklendės VACH (4.6.4 pav.). Tačiau mikrobangiame elektriniame lauke šie diodai elgėsi visiškai skirtingai. (4.6.5 pav.) – pateiktos diodų su sklende ir be sklendės detektuotos įtampos priklausomybės nuo mikrobangės spinduliuotės galios bangolaidyje, išmatuotos kambario ir skystojo azoto temperatūrose esant $f = 10$ GHz dažniui.



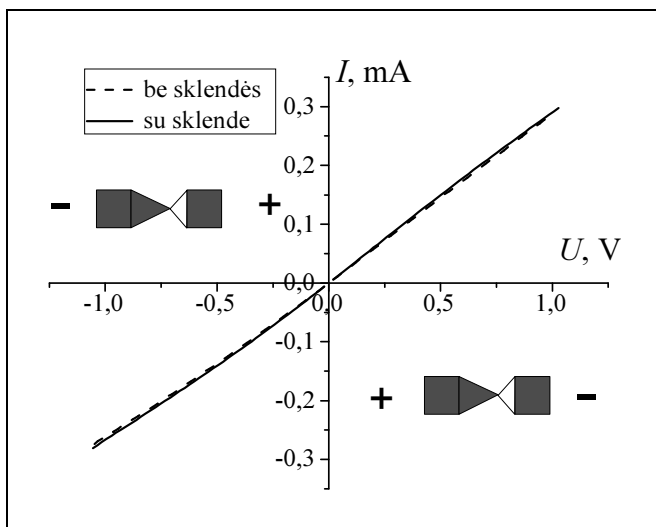
4.6.2 pav. Mikrobangų diodų su sklende krūvininkų tankio pasiskirstymas energetinėje juostoje, (a) esant 0V sklendės įtampai, apskaičiuotos kambario temperatūroje, (b) esant 0V sklendės įtampai, apskaičiuotos skystojo azoto temperatūroje



4.6.3 pav. Krūvininkų tankio pasiskirstymas, (a) esant neigiamai $-0,8$ V sklendės įtampai, 300 K, (b) esant neigiamai $-0,8$ V sklendės įtampai, 77 K

Abiem atvejais detektuotos įtampos poliškumas buvo tas pats: patalpinus diodą į mikrobangų lauką, neigiamas potencialas atsirasdavo ant labiau susiaurintos diodo pusės, tai atitiko jų VACH asimetrijos ženklą. Kaip matyti iš 4.6.5 paveikslo, esminis skirtumas tarp šių diodų – voltvatinio jautrio skirtumas

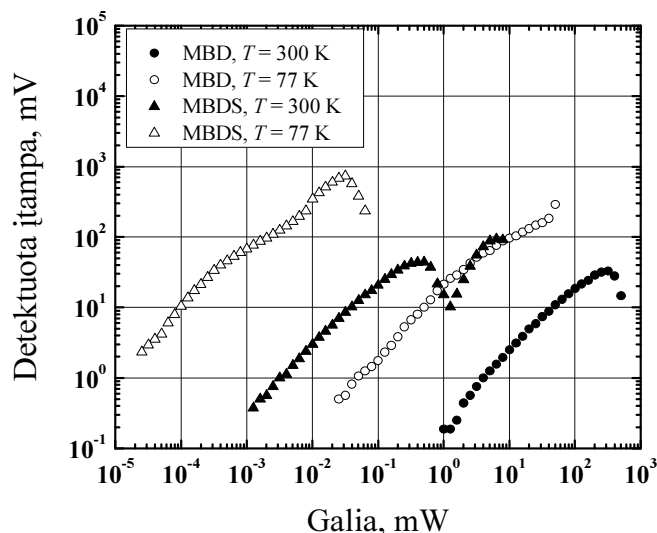
Mikrobangų diodų be sklendės voltvatinis jautris kambario temperatūroje buvo $S(300) = 0,2 \text{ V/W}$, o skystojo azoto temperatūroje jis padidėjo dviem eilėmis ir siekė $S(77) = 20 \text{ V/W}$.



4.6.4 pav. Mikrobangų diodų su sklende (ištisa linija) ir be jos (punktyrinė linija) VACH, išmatuotos kambario temperatūroje

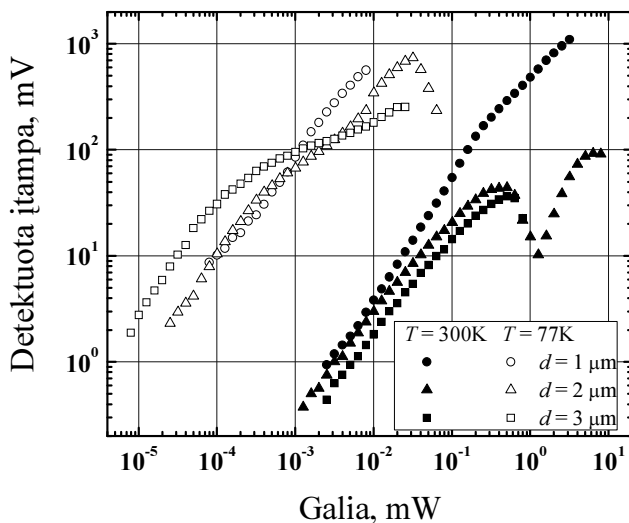
Mikrobangų diodų su sklende atveju buvo pasiekti rekordiniai jautriai. Kambario temperatūroje $S(300) = 200 \text{ V/W}$ ir skystojo azoto temperatūroje $S(300) = 100 \text{ kV/W}$. Atkreiptinas dėmesys į tai, jog diodai su sklende jau kambario temperatūroje pasižymi geresniu jautriu, nei diodai be sklendės skystojo azoto temperatūroje, tai neabejotinai palengvina ir supaprastina jų taikymą. Na, o aukštas mikrobangų diodų voltvatinis jautris skystojo azoto temperatūroje atveria galimybes tiesioginiam nanovatinės eilės mikrobangės spinduliuotės galios detektavimui ir matavimui.

Diodų be sklendės detektuota įtampa nuo mikrobangės spinduliuotės galios priklausė tiesiškai iki $P = 100 \text{ mW}$ kambario temperatūroje ir iki $P = 1 \text{ mW}$ skystojo azoto temperatūroje. Diodų su sklende atveju dinaminis ruožas kambario temperatūroje buvo apribotas $P = 50 \mu\text{W}$ galia, skystojo azoto temperatūroje dinaminis ruožas tesiekė $P = 500 \text{ nW}$ galia.



4.6.5 pav. Mikrobangų diodų su sklende (MBDS) ir be jos (MBD) voltvatinės charakteristikos, išmatuotos $T = 300$ K ir $T = 77$ K temperatūrose

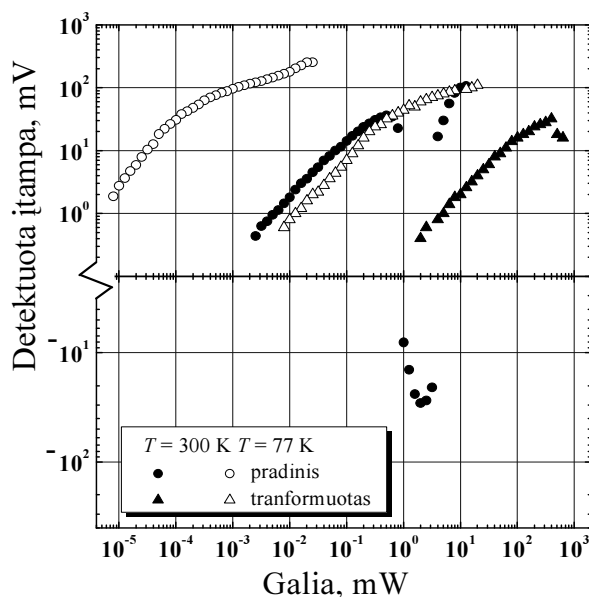
Įdomi mikrobangų diodų su sklende voltvatinio jautrio priklausomybė nuo susiaurintos bandinio dalies pločio d . 4.6.6 paveiksle pateiktos diodo su įvairiais kaklelio pločiais voltvatinės charakteristikos kambario ir skystojo azoto temperatūrose. Kambario temperatūroje stebima tiesioginė koreliacija tarp voltvatinio jautrio ir susiaurinto bandinio kaklelio pločio: $S(1 \mu\text{m}) = 490$ V/W, $S(2 \mu\text{m}) = 320$ V/W, $S(3 \mu\text{m}) = 190$ V/W. Skystojo azoto temperatūroje tokio voltvatinio jautrio verčių atitikimo 2DE kanalų matmenims nestebime. Didžiausias voltvatinis jautris būdingas diodams, kurių kaklelio plotis buvo $d = 3 \mu\text{m}$ ir siekė $S = 330$ kV/W. Diodų su siauresniais kakleliais voltvatinis jautris buvo apie $S = (90 \div 100)$ kV/W. Galima teigti, jog taikomuoju požiūriu mikrobangų diodai su sklende yra įdomūs savo pakankamu jautriu kambario temperatūroje ir nepaprastai aukštu jautriu skystojo azoto temperatūroje, jiems nereikalingas mažesnis negu $1 \mu\text{m}$ kaklelio plotis, tai žymiai supaprastina mikrobangų diodų gamybą.



4.6.6 pav. Įvairių kaklelių pločio mikrobangų diodų su sklende voltvatinės charakteristikos, išmatuotos $T = 300\text{ K}$ ir $T = 77\text{ K}$ temperatūrose

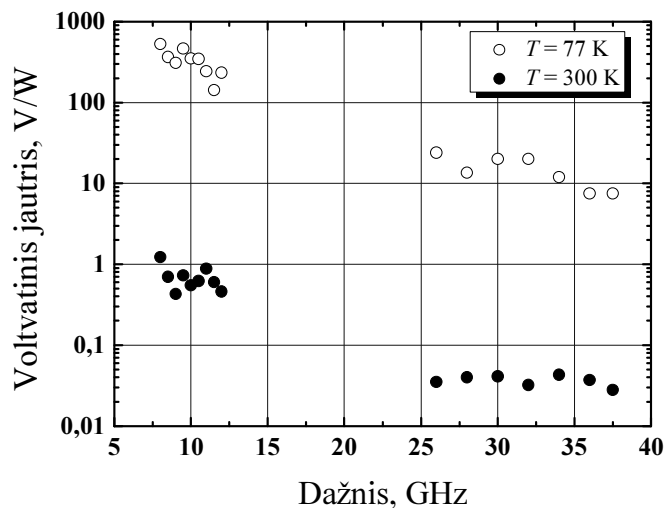
Analizuojant diodus, pasižyminčius dideliais mikrobangų diodų voltvatiniais jautriais, natūralu tikėti, jog šių diodų elektriniai parametrai turėtų būti jautrūs mikrobangės spinduliuotės poveikiui. 4.6.7 paveiksle parodytas diodo su sklende (kaklelio storis $d = 3\ \mu\text{m}$) voltvatinės charakteristikos. Trikampiais taškais pažymėtos charakteristikos diodo, nepatyrusio spinduliuotės poveikio, o taškais – diodo, kurio parametrai pakito po matavimų mikrobangiame lauke. Visų pirma atkreiptinas dėmesys į diodo varžos padidėjimą nuo $R = 3.5\ \text{k}\Omega$ iki $R = 7\ \text{k}\Omega$, tai byloja apie 2DE kanalo pakitimus. Tačiau nepatyrusio mikrobangės spinduliuotės poveikio diodo, voltvatinis jautris kambario ir skystojo azoto temperatūrose buvo, atitinkamai, $S(300) = 170\ \text{V/W}$ ir $S(77) = 280\ \text{kV/W}$. Po mikrobangų matavimų diodo jautris sumažėjo iki $S(300) = 0,2\ \text{V/W}$ ir $S(77) = 70\ \text{V/W}$. Dėl paviršinio potencialo barjero, paviršiuje elektronų ir skylių tankiai skiriasi nuo jų verčių tūryje. Veikiant stipriam mikrobangiam laukui ties paviršiumi, galime keisti paviršinį potencialo barjerą ir paviršiuje esančių perteklinių krūvininkų tankį, kai kinta tiek paviršinis laidumas, tiek krūvininkų judris. Paviršinis laidumas kinta todėl, jog paviršiniai centrai pagauna krūvininkus. Taip pat krūvininkai yra pagaunami centruose šalia 2DE kanalo, nes nelegiruotame skiriamajame sluoksnyje ir pačiame GaAs yra nedidelis baigtinis liekamųjų priemaišų tankis [85]. Tai rodo padidėjusi bandinių varža ir jų varžos

sumažėjimas, apšviečiant bandinius šviesa. Todėl yra stebimas jautrumo sumažėjimas (4.6.7 pav.) [86].



4.6.7 pav. Mikrobangų diodų su sklende voltvatinės charakteristikos prieš ir po mikrobangės spinduliuotės poveikio, išmatuotos $T = 300\text{ K}$ ir $T = 77\text{ K}$ temperatūrose

Mikrobangės spinduliuotės paveikto diodo su sklende voltvatinio jautrio priklausomybės nuo dažnio, išmatuotos kambario ir skystojo azoto temperatūrose, pateiktos 4.6.8 paveiksle. Kambario temperatūroje diodo voltvatinis jautris sumažėjo beveik 40 kartų, o mikrobangės spinduliuotės dažnis padidėjo nuo $f = 8\text{ GHz}$ iki $f = 37,5\text{ GHz}$. Skystojo azoto temperatūroje voltvatinio jautrio dažninė priklausomybė buvo ryškesnė: jautris sumažėjo nuo $S = 530\text{ V/W}$ ties $f = 8\text{ GHz}$ dažniu iki $S = 7,5\text{ V/W}$ ties $f = 37,5\text{ GHz}$. Matome, kad diodo jautris priklauso nuo dažnio, esant aukštesniems dažniams, jų jautrumas mažesnis, lyginant su 10 GHz dažniu. Mikrobangų diodo su asimetriškai susiaurinta GaAs $n\text{-}n^+$ sandūra detektuota įtampa priklausė nuo dažnio, kai mikrobangės spinduliuotės dažnis viršijo $f = 100\text{ GHz}$ [28].



4.6.8 pav. Mikrobangų diodų su sklende, paveikto mikrobange spinduliuote, voltvatinio jautrio dažninės priklausomybės, išmatuotos kambario ir skystojo azoto temperatūrose

4.7. Skyriaus išvados

Atlikti eksperimentiniai tyrimai su planariniais stipriai legiruotais n-GaAs mikrobangų diodais, užaugintais molekulinį pluoštų epitaksijos būdu, leidžia daryti tokias išvadas:

1. Stipriai legiruoto puslaidininkio $n-n^+$ sandūroje dėl karštųjų elektronų kaitinimo nevienalyčiame puslaidininkyje susidaro šiluminė elektrovara.
2. Mikrobangų diodų voltvatinis jautris su stipriai legiruota GaAs $n-n^+$ sandūra didėja, siaurinant diodų kaklelio plotį.
3. Detektuotos įtampos atsiradimas dėl šiluminės ir bigradientinės elektrovaros lemia silpną diodų voltvatinio jautrio priklausomybę nuo dažnio.

Pateikiami mikrobangų detekcijos eksperimentinių tyrimų duomenys panaudojant nesimetriškai susiaurintus selektyviai legiruotus AlGaAs/GaAs darinius su skirtingo pločio skiriamuoju sluoksniu, leidžia daryti tokias išvadas:

1. Detektuotos įtampos poliškumas dariniuose su platesniu skiriamuoju sluoksniu (45 nm) atitiko karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros

jėgos poliškumą tokios konfigūracijos $n-n^+$ sandūrai [28] ir buvo priešingas darinio su siauru skiriamuoju sluoksniu (7,5 nm) detektuotos įtampos poliškumui.

2. Darinių su siauru skiriamuoju sluoksniu voltatinis jautris buvo eile didesnis kambario temperatūroje ir beveik dviem eilėmis didesnis skysto azoto temperatūroje, ir siekė 175 V/W.
3. Fotoluminescencijos tyrimai kambario ir skystojo azoto temperatūroje parodė, jog dariniuose su platesniu skiriamuoju sluoksniu dalis krūvininkų lieka priemaišomis papildytame sluoksnyje, o su siauresniu – visi krūvininkai yra efektyviai surenkami potenciniame elektronų dujų dvimačiame kanale. Efektyvus elektronų surinkimas į dvimatį elektroninių dujų kanalą sukuria situaciją, kai nesimetriškai susiaurinto priemaišomis selektyviai legiruoto darinio n^+ ir n sritys pasikeičia vietomis, dėl to pasikeičia ir detektuotos įtampos poliškumas.

Mikrobangų diodų, pagamintų iš nesimetriškai ir simetriškai susiaurinto GaAs/AlGaAs darinio su supergardelės buferiniu sluoksniu, leidžia daryti tokias išvadas:

Detektuotos įtampos poliškumas atitiko karštųjų elektronų šiluminės elektrovaros poliškumą ir bandinio VACH asimetrijos ženklą (4.4.3 (a) ir 4.4.4 (a) pav.). 2DE kanalas yra laikomas n -sritimi, o metalizuota dalis – n^+ sritimi. Kai nesimetriškai ir simetriškai mikrobangų diodo metalizuota sritis pasižymi mažesniu elektriniu laidumu nei 2DE sritis, jo detektuotos įtampos poliškumas ir VACH asimetrijos ženklas yra priešingi diodo su supergardele ženklui (4.4.3 (b) ir 4.4.4 (b) pav.). Bandinio be supergardelės n^+ ir n sritys keičiasi vietomis, 2DE kanalas laikomas n^+ sritimi, o metalizuota dalis – n sritimi.

Mikrobangų diodų, pagamintų iš nesimetriškai susiaurinto AlGaAs/InGaAs/GaAs darinio su InGaAs sluoksniu, leidžia daryti tokias išvadas:

1. Jutiklio veikimas yra pagrįstas nevienalyčių laisvųjų elektronų kaitimu susiaurintoje bandinio dalyje [24]. Iš rezultatų galima pastebėti, kad bandinio temperatūros kitimas veikia jutiklio jautrį. Diodo su AlGaAs/InGaAs/GaAs struktūra jautris išaugo nuo 0,6 V/W kambario temperatūroje iki 38 V/W skystojo azoto temperatūroje, t.y. apie du kartus didesnis negu jautris AlGaAs/GaAs diodų.
2. Palyginus jutiklio jautrio pokytį su dvimačių krūvininkų judrio pokyčiu, atsirandančiu dėl gardelės temperatūros kitimo, galima teigti, kad pastarasis reiškiny yra minėtojo jutiklio jautrio padidėjimo priežastis.

Mikrobangų diodai, pagaminti iš nesimetriškai susiaurinto GaAs/AlGaAs darinio su metalizuota sklende virš aktyviojo sluoksniu, leidžia daryti tokias išvadas:

Mikrobangų diodų su sklende elektriniai parametrai yra jautrūs mikrobangės spinduliuotės poveikiui. Jų voltvatinio jautrio priklausomybė nuo dažnio nepaprastai aukštos voltvatinio jautrio vertės, centimetriniame – milimetriniame bangos ilgių ruože byloja apie sklendės įtaką asimetriškiems selektyviai legiruotiems AlGaAs/GaAs diodams.

Rezultatų apibendrinimas

Bendrosios išvados

Iš atliktų eksperimentinių nesimetriškai susiaurintų AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs bei simetriškai ir asimetriškai susiaurintų n-GaAs mikrobangų diodų tyrimų galime daryti šias išvadas:

1. Asimetriškai ir simetriškai susiaurintų mikrobangų diodų jautris priklauso nuo diodų struktūros kaklelio pločio ir didėja panaudojant puslaidininkines medžiagas su dideliu krūvininkų judriu.
2. Mikrobangų diodų, pagamintų iš nesimetriškai susiaurinto AlGaAs/GaAs darinio su supergardenės buferiniu sluoksniu ir su platesniu skiriamuoju sluoksniu, detektuotos įtampos poliškumas atitiko karštųjų elektronų šiluminės elektrovaros poliškumą ir bandinio VACH asimetrijos ženklą. Efektyvus krūvininkų kaitimas vyko 2DE kanale. Supergardenės buferinio sluoksnio buvimas lemia 2DE kanalo kokybę.
3. Kai nesimetriškai susiaurinto mikrobangų diodo metalizuota sritis pasižymi mažesniu elektriniu laidumu nei 2DE sritis, tai jos detektuotos įtampos poliškumas ir VACH asimetrijos ženklas yra priešingi diodo su supergardenės ženklui.
4. Parodyta akivaizdi 2DE kanalo kokybės įtaka detektuojamo signalo poliškumui ir jo dydžiui nuo skiriamąjo sluoksnio storio.

5. Įterpimas papildomo InGaAs sluoksnio į susiaurintą nesimetriškai selektyviai legiruoatą AlGaAs/GaAs darinį, neperžengus InGaAs kritinio sluoksnio storio, padidina jutiklio jautrumą apie 50 %.
6. Mikrobangų diodai, pagaminti iš nesimetriškai susiaurinto AlGaAs/GaAs darinio su metalizuota sklende virš aktyviojo sluoksnio dalies, pasižymi dideliais voltvatinais jautriais kambario (apie 200 V/W) ir skystojo azoto temperatūrose – elektriniai parametrai yra jautrūs mikrobangės spinduliuotės poveikiui.

Literatūros sąrašas

- [1] BARLAS, D.; HENDERSON, G.; ZHANG, X. SiGe transistor technology for RF applications. *Microwave Journal*, 1999, vol. 42, no. 6, p. 22–39.
- [2] KOBAYASHI, K. W.; OKI, A. K.; STREIT, D. C. Indium phosphide heterojunction bipolar transistor technology for future telecommunications applications. *Microwave Journal*, 1999, vol. 42, no. 7, p. 74–96.
- [3] OZBAY, E.; KIMUKIN, T.; AND BIYIKLI. Ultrafast & highly efficient resonant cavity enhanced photodiodes. *Materials Science forum*, 2002, vol. 384–385, p. 241–248.
- [4] ДЕНИС, В.; ПОЖЕЛА, Ю. Горячие электроны. Вильнюс: Минтис, 1971. 289 С.
- [5] MENOZZI, R.; et al. On the effects of hot electrons on the DC and RF characteristics of lattice-matched InAlAs/InGaAs/InP HEMTs. *Microwave and Guided Wave Letters*, 1997, vol. 7, no. 1, p. 3–5.

- [6] TKACHENKO, Y. A.; et al. Hot-Electron-Induced Degradation of Pseudomorphic High-Electron Mobility Transistors. *Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, 1995, vol. 95, no. 1, p. 115–118.
- [7] РЕПШАС, К. К.; ПОЖЕЛА, Ю. К. Термоэлектродвижущая сила на горячих электронах и электропроводность германия в области квадратичной зависимости от электрического поля. *Лит. физ. сб.*, 1964, Т. 4, вып. 4, С. 485–490.
- [8] АШМОНТАС, С.; РЕПШАС, К. Фотоградиентная эдс горячих носителей заряда. *Лит. физ. сб.*, 1970, Т. 10, вып. 3, С. 413–418.
- [9] ПОЖЕЛА, Ю. К.; Термоэдс, обусловленная разогреванием носителей тока.- В кн.: *Актуальные вопросы физики полупроводников и полупроводниковых приборов*. Вильнюс, 1969, С. 87–97.
- [10] ШТЕНБЕК, М.; Попытка определение повышения температуры носителей тока, вызываемого электрическим полем в германии. *Изв. АН СССР. Сер. Физическая*. 1956, Т. 20, вып. 12, С. 1560–1562.
- [11] БАНИС, Т. Л.; ВЕБРА, А. И.; ПОЖЕЛА, Ю. К.; РЕПШАС, К. К. Разогревание носителей тока в полупроводниках в сильных электрических полях. *Радиотехника и электроника*. 1962, Т. 17, вып. 9, С. 1519–1522.
- [12] AŠMONTAS, S. Taškinio n-n⁺ kontakto voltamperinės charakteristikos tyrimas. *Lietuvos fizikos rinkinys*. 1975, 15 t., Nr. 1, p. 65–72.
- [13] AŠMONTAS, S. Elektronų kaitinimas germanyje nevienalyčiuose elektriniuose laukuose. *Lietuvos fizikos rinkinys*. 1976, 16 t., Nr. 3, p. 407–417.
- [14] CARLIN, J. K.; POZHELA, Y. K. Some results on microwave excitation of dc by Pot electrons in germanium. *Proc. IEEE*, 1965, vol. 53, no 11, p. 1788–1790.
- [15] BANYS, T.; POŽELA, J.; REPŠAS, K. Nuolatinės elektrovaros jėgos, atsirandančios puslaidininkyje stipriame kintamame elektriniame lauke. *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1976, 6 t., Nr. 3, p. 415–425.

- [16] CHESTER, M. Evidence for a configurational emf in a conducting medium. *Phys. Rev. Lett.*, 1960. vol. 5, no 3, p. 91–937.
- [17] CHESTER, M. Theory of a configurational emf. *Phys. Rev.*, 1964, vol. 133, no. 4A, p. A907–A915.
- [18] ГРИБНИКОВ, З. С. Поперечная объемная эдс и растягивание диффузионных длин в многодолинных полупроводниках. *письма в ЖЭТФ*, 1969, Т. 9, С. 545–548.
- [19] АШМОНТАС, С. П.; ВИНГЯЛИС, Л. Л.; СУБАЧЮС, Л. Е. Термоэдс горячих электронов в кремний. *ФТП*, 1982, Т. 16, вып. 12, С. 2110–2115.
- [20] АШМОНТАС, С. Электроградиентные явления в полупроводниках / Ред. Ю. Пожела, Вильнюс: Мокслас, 1984, Т. 5, С. 140–152.
- [21] AŠMONTAS, S.; VINGELIS, L.; OLEKAS, A. n-n⁺ sandūros staigumo įtaka karštųjų elektronų šiluminės elektrovaros jėgos vertei silicyje. *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1984, 24 t., Nr. 3, p. 75.
- [22] БАРЕЙКИС, В. А.; ПОЖЕЛА, Ю.; МАТУЛЕНЕНЕ, И. Б. Шумы и диффузия носителей тока в дырочном германий. *Труды IX Международной конференции по физике полупроводников*. Москва: Наука, 1969, Т. 2, С. 805.
- [23] AŠMONTAS, S.; POŽELA, J.; SUBAČIUS, L. Tarpslėninės elektronų sklaidos įtaka pernešimo reiškiniams silicyje stipriuose elektriniuose laukuose. *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1978, 18 t., Nr. 1, p. 17–27.
- [24] AŠMONTAS, S.; SUBAČIUS, L. Karštųjų elektronų difuzijos koeficientas germanyje. *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1977, 17 t., Nr. 1, p. 72–78.
- [25] AŠMONTAS, S.; POŽELA, J.; REPŠAS, K. Karštų srovės nešėjų sąlygota bigradientinė evj. *Lietuvos fizikos rinkinys*, 1971, 11 t., Nr. 2, p. 243–245.
- [26] AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; SUŽIEDĖLIS, A.; VALUŠIS, G. Submicron semiconductor structure for microwave detection. In: *Proc. 25th. Conf. Micro-and-Nano-Engineering, September 21-23. – 1999, Rome, Italy*, M. Gentili, E. Di Fabricio, G. Meneghini, Eds. (Elsevier,

- Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Tokyo), 2000, vol. 53/1-4, p. 553–556.
- [27] SUŽIEDĖLIS, A.; GRADAUSKAS, J.; AŠMONTAS, S.; VALUŠIS, G.; ROSKOS, G. H. Electrical detection of THz frequencies by asymmetrically shaped n-n⁺ GaAs diodes. *8th International Conference on Terahertz Electronics, Germany, Darmstadt, 28-29 September, 2000*, p. 242.
- [28] AŠMONTAS, S.; SUŽIEDĖLIS, A. New microwave detector. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1994, vol. 15, no. 3, p. 523–538.
- [29] SUŽIEDĖLIS, A.; GRADAUSKAS, J.; AŠMONTAS, S.; VALUŠIS, G.; ROSKOS, G. H. Very-broad band THz detector based on asymmetrically-necked n-n⁺-GaAs structures. *J. Appl. Phys.*, 2003, p. 1015–1018.
- [30] SCHOMBURG, E.; KLAPPENBERGER, F.; KRATSCHEMER, M.; IGNATOV, A. A.; RENK, F. K.; WEGSCHEIDER, W. Ultrafast, ultra-broadband superlattice detector for THz radiation. In *Proc. 8th Intern. Conf. On Terahertz Electronics, Darmstadt, Germany, September. 2000*, p. 92.
- [31] ГУБАНОВ, А. И. К. Теории контакта двух полупроводников со смешанной проводимостью. *ЖЕТФ*, 1951, С. 79.
- [32] KROEMER, H. Nobel lecture: Quasielectric fields and band offsets: Teaching electrons new tricks. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, p 783–793.
- [33] ALFEROV, Z. I. Nobel lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, vol. 73, p. 767–782.
- [34] STORMER, H. L.; DINGLE, R.; GOSSARD, A. C.; WIEGMANN, W.; STURGE, M. D. Two-dimensional electron gas at a semiconductor interface. *Solid State Commun.*, 1979, vol. 29, p 705–709.
- [35] SHOCKLEY, N.; SPARKS, M.; TEAL, G. K. p-n junction transistors. *Phys. Rev.*, 1951, vol. 81, no. 1, p. 151–162.
- [36] WEISBUCH, C.; VINTER, B. *Quantum Semiconductor Structures*. Boston: Academic Press, 1991.
- [37] KARPUS, V. *Dvimačiai elektronai*. Vilnius: Ciklonas, 2004, p. 189.

- [38] DINGLE, R.; STORMER, H. L.; GOSSARD, A. C.; WIEGMANN, W. Electron mobilities in modulation-doped semiconductor heterojunction superlattices. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, vol. 33, no. 7, p. 665–667.
- [39] PFEIFFER, L.; WEST, K. W.; STORMER, H. L.; BALDWIN, K. W. Electron mobilities exceeding 10^7 cm²/V s in modulation-doped GaAs. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, vol. 55, no. 18, p. 1888–1890.
- [40] STERN, F. Doping considerations for heterojunctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, vol. 43, no. 10, p. 974–976.
- [41] SCHUBERT, E.F. Physical foundations of solid – state device. New York, 2006, p. 273.
- [42] SCHUBERT, E. F.; et at. Dopant distribution for maximum carrier mobility in selectively doped Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs heterostructures. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, vol. 54, no. 14, p. 3.
- [43] WEIMANN, G.; SCHLAPP, W. Molecular beam epitaxial growth and transport properties of modulation doped AlGaAs-GaAs heterostructures. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1985, p. 412.
- [44] HWANG, J. C. M.; KASTALSKY, A.; STORMER, H. L.; AND KERAMIDAS, V. G. Transport port properties of selectively doped GaAs-(AlGa)As heterostructures grown by molecular beam epitaxy. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, vol. 44, no. 8, p. 802–804.
- [45] DELAGEBEAUDEUF, D.; DELESCLUSE, P.; ETIENNE, P.; LAVIRON, M.; CHAPLART, J.; AND LINH, N. T. Two-dimensional electron gas MESFET structure. *Electron. Lett.*, 1980, vol. 16, p. 667–668.
- [46] MIMURA, T.; HIYAMIZU, S.; FUJII, T.; AND NAMBU. A new field-effect transistor with selecktively doped GaAsIn-Al_xGa_{1-x}As heterojunctions. *Jpn. J. Appl. Phys. (Part 2)*, 1980, vol. 19, p. L225–L227.
- [47] ŠTARAS, S. Fizikinė ir funkcinė elektronika – mikrobangų puslaidininkiniai prietaisai. Vilnius: Technika, 2000, p. 48.
- [48] CHAN, K. T.; LIGHTER, M.J.; PATTERSON, G.A.; YU, K. M. Growth studies of pseudomorphic GaAs/InGaAs/AlGaAs modulation-doped field-effect transistor structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, vol. 56, p. 2022.

- [49] KOBAYASHI, K. W.; OKI, A. K.; STREIT, D. C. Indium phosphide heterojunction bipolar transistor technology for future telecommunications applications. *Microwave Journal*, 1999, vol. 42, no 7, p. 74–96.
- [50] WANG, H.; AND OTH. A single-chip 94-GHz frequency source using InP based HEMT-HBT integration technology. *1998 Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium*, 1998, p. 275–278.
- [51] LAU, K. F.; LIU, L.; DOW, S. Recent MMW technology development and its military and commercial applications. *1998 Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium*, 1998, p. 87–90.
- [52] KLAMKA, J. W. Heterozłączowe przyrządy polprzewodnikowe na zakres mikrofal i fal milimetrycznych. Warszawa: Agencja Lotnicza ALTAIR sp.z.o.o, CNPEP RADWAR SA, 2002.
- [53] KUAN, H.; SU, Y.K.; WU, T.S.; HUANG, Y.S.; CHI, W.S. Electromodulation spectroscopy study of symmetry forbidden transitions in an $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ single quantum well grown using a tertiarybutylarsine source. *Solid-State Electronics*, 1996, vol. 39, no. 6, p. 885–890.
- [54] HAN, A.C.; WOJTOWICZ, M.; PASCUA, D.; BLOCK, T.R.; STREIT, D.C. Photoreflectance study of pseudomorphic high electron mobility transistors. *Appl. Phys.*, 1997, vol. 82, p. 2607.
- [55] KUO, C.W.; SU, Y.K. Photo reflectance and C-V measurement investigations of dry etched gate recesses for GaInP/ InGaAs/GaAs pseudomorphic high electron mobility transistors (HEMTs) using BCl_3/Ar plasma. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 36, no. 12B, p. L1651–1653.
- [56] YIN, Y.; QIANG, H.; POLLAK, F.H.; STREIT, D.C.; WOJTOWICZ, M. Two-dimensional electron gas effects in the electromodulation spectra of a pseudomorphic $\text{Ga}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{As}/\text{GaAs}$ modulation-doped quantum well structure. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 61, p. 1579.
- [57] YIN, Y.; QIANG, H.; YAN, D.; POLLAK, F.H.; NOBLE, T.F. Room-temperature photoreflectance characterization of pseudomorphic GaAlAs/InGaAs/GaAs high electron mobility transistor structures including the two-dimensional electron gas density. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, vol. 8, p. 1599.

- [58] LIU, W.; JIANG, D.; ZHANG, Y.; JIN, S.; WANG, R. Spectroscopy studies of the effects of two-dimensional electron gas on interband transitions. *J. Appl. Phys.*, 1995, vol. 77, p. 4564–4567.
- [59] MISIEWICZ, J.; SEK, G.; SITAREK, P. Photoreflectance Spectroscopy of Semiconductor Structures. *Publishing House of the Wroclaw University of Technology*. Wroclaw, 1999, p. 201.
- [60] ПОЖЕЛА, Ю. Физика быстродействующих транзисторов. Вильнюс: Мокслас, 1989, 264 С.
- [61] LISAUSKAS, A.; SELIUTA, D.; KOZIČ, A.; VALUŠIS, G.. VACH matavimo programa LabView 6i terpėje.
- [62] PETKUN, V.; KAZLAUSKAITĖ, V.; SUŽIEDĖLIS, A. Automatizuota bandinių voltamperinių charakteristikų matavimo sistema, naudojant prietaisus, neturinčius universaliosios sąsajos. *Puslaidininkų fizikos instituto XVII mokslinė konferencija, sausio 3-9 d.* Vilnius, 2007, p. 133–136.
- [63] KUNDROTAS, J. GaAs/AlGaAs savybės. Vilnius: PFI, 2001, 168 p.
- [64] PLOOG, K. H. Molecular beam epitaxy-fundamental growth aspects and selected contributions and applications of low-dimensional semiconductors structures, in: Fabrication. *Properties and Applications of Low-Dimensional Semiconductors* (NATO ASI Series 3: High technology, V. 30, Eds. M. Balkanski, I. Yanchev, Dordrecht, “Kluwer Academic Publishers”. 1995, p. 1–58.
- [65] CHO, A. Y.; CHENG, K. Y. Growth of extremely uniform layers by rotating substrate holder with molecular beam epitaxy for applications to electro-optic and micro wave devices. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, vol. 38, no. 5, p. 360–362.
- [66] RINALDI, F. Basics of Molecular Beam Epitaxy (MBE). *Optoelectronics Department, University of Ulm*, Annual Report 2002.
- [67] KNAP, W.; DENG, Y.; RUMYANTSEV, S.; SHUR, M. S. Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, vol. 81, p. 4637–4639.

- [68] KOZIČ, A.. Selektiviai moduluoti GaAs/AlGaAs dariniai kaip mikrobangų detektoriai. *Elektronikos studijų programos, elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties magistro darbas/ vad. G. Valušis, K. Maceika*. Vilnius: VGTU, 2003, 65 p.
- [69] AŠMONTAS, S.; SUŽIEDĖLIS, A. Hot electron thermoelectricity. *Journal of Thermoelectricity*, 1997, no. 1, p. 5–26.
- [70] AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; KUNDROTAS, J.; SUŽIEDĖLIS, A.; ŠILĖNAS, A.; VALUŠIS, G. New aspects of microwave detection in GaAs/AlGaAs heterojunctions. *Proceedings of the 24th International conference on the Physics of Semiconductors. 24ICPS'98. Jerusalem (Israel)*. 1999.
- [71] ASHIDA, K.; INOUE, M.; SHIRAFUJI, J.; INUISHI, Y. Microwave frequency dependence of velocity-field characteristics in n-GaAs. *J. Phys. Soc. Jpn. Technol. Rep. Osaka Univ. (Japan)*. 23 (1121–1154), 475–484. 1974, vol. 37, p. 408.
- [72] SUŽIEDĖLIS, A.; GRADAUSKA, J.; AŠMONTAS, S.; VALUŠIS, G.; ROSKOS, H. G. Giga- and terahertz frequencies band detector based on an asymmetrically-necked n-n⁺ GaAs planar structure. *J. Appl. Phys.*, 2003, vol. 93, p. 3034.
- [73] FACETT, W.; BOARDMAN, A. D.; AND SWAIN, S. Monte Carlo determination of electron transport properties in gallium arsenide. *J. Phys. Chem. Solid.*, 1970, vol. 31, no. 9, p. 1963–1990.
- [74] SAXENA, A. K.; AND GRUMURTHY, K. S. Scattering parameters from an analysis of the Hall electron mobility in Ga_{1-x}Al_xAs alloys. *J. Phys. Chem. Solid.*, 1982, vol. 43, no. 9, p. 801–808.
- [75] BHATTACHARYA, P. K.; DAS, U and LUDOWISE, M. J. Transport properties of n-type metalorganic chemical- vapor-deposited Al_xGa_{1-x}As (0 ≤ X ≤ 0.6). *Phys. Rev. B.*, 1984, vol. 29, no. 12, p. 6623–6631.
- [76] OELGART, G.; LIPPOLD, G.; PROCTOR, M.; MARTIN, D.; REINHART, F. K. Ionization energy of the Si acceptor on Al_xGa_{1-x}As. *Semiconductor Science and Technology*, 1991, vol. 6, no. 12, p. 1120–1125.

- [77] HILL, G.; ROBSON, P. N. Electron drift velocity in GaAs using a variable frequency microwave time-of-flight technique. *Solid-State Electronics*, 1982, vol. 25, no. 7, p. 589–597.
- [78] WALUKIEWICZ, W.; RUDA, H. E.; LAGOWSKY, J.; AND GATOS, H. C. Electron mobility limits in a two-dimensional electron gas GaAs-GaAlAs heterostructures. *Phys. Rev. B.*, 1984, vol. 29, p. 4818.
- [79] HIRAKAWA, K.; AND SAKALI, H. Mobility of the two-dimensional electron gas of selectively doped n-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ heterojunctions with controlled electron concentrations. *Phys. Rev. B.*, 1986, vol. 33, p. 8291.
- [80] GELLER, C. B.; WOLF, W.; PICOZZI, S.; AND CONTINENZA, A. Computational band-structure engineering of III-V semiconductor alloys. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, no. 3, p. 368–370.
- [81] ABSIU, R.; MADEBO, M.; WARMINSKI, T.; USHER, B. Interfacial coherence and later indium segregation in thick InGaAs single heterostructures grown on GaAs substrates. *Semiconducting and Insulating Materials conference, 2000 SIMC-XI International, 3-7 July. 2000*, p. 240–243.
- [82] PRICE, G. L. Critical-Thickness and growth-mode transitions in highly strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ films. *Physical Review Letters*, 1991, vol. 66, no. 4, p. 469–472.
- [83] INOUE, K.; MATSUNO, T. Electron mobilities in modulation-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ and pseudomorphic $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum-well structures. *Phys. Rev.*, 1993, vol. 47, no. 7, p. 3771–3778.
- [84] POŽELA, J. *Physics of High-speed transistors*. New York and London: Plenum Press. 1993, 337 p.
- [85] BERGMANN, G. Weak location in thin films: A time-of-flight experiment with conduction electrons. *Phys. Rev.*, 1984, vol. 107, no. 1, p. 1–58.
- [86] STERN, F. Doping considerations for heterojunctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, Vol. 43, no. 10, p. 974–976.

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo
(Thomson ISI Web of Science) leidiniuose

- 1A. SUŽIEDĖLIS, A.; AŠMONTAS, S.; POŽELA, J.; KUNDROTAS, J.; ŠIRMULIS, E.; GRADAUSKAS, J.; KOZIČ, A.; KAZLAUSKAITĖ, V.; ANBINDERIS, T. Mesoscopic structures for microwave THz detection. *Acta Physica Polonica A*, 2008, vol. 113, no. 3, p.803–809. ISSN 0587-4246.
- 2A. AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; SUŽIEDĖLIS, A.; KOZIČ, A.; PAŠKEVIČ, Č.; KAZLAUSKAITĖ, V.; ŠIRMULIS, E. Microwave to terahertz radiation detection by semiconductor nanostructures. *Journal Directed Energy*, 2008. ISSN 1546-0185 (spaudoje).
- 3A. KOZIČ, A.; PAŠKEVIČ, Č.; SUŽIEDĖLIS, A.; GRADAUSKAS, J.; AŠMONTAS, S.; SZERLING, A.; WRZESIŃSKA, H. Asymmetrically shaped pseudomorphic modulation doped structure for microwave detection. *Acta Physica Polonica A*, 2006, vol. 110, no. 6, p. 845–849. ISSN 0587-4246.
- 4A. KOZIČ, A.; SUŽIEDĖLIS, A.; PETKUN, V.; ČERŠKUS, A.; SHTRIKMANN, H.; GRADAUSKAS, J.; KUNDROTAS, J.; AŠMONTAS, S. Properties of constricted 2DEG/Metal structures in microwave electric fields. *Optica Applicata*, 2005, vol. 35, no. 3, p. 464–470 ISSN 0078-5466.
- 5A. AŠMONTAS, S.; GRADAUSKAS, J.; KOZIČ, A.; SHTRIKMANN, H.; SUŽIEDĖLIS, A. Submicrometric heavily doped n–GaAs structures for microwave detection. *Acta Physica Polonica A*, 2005, vol. 107, no. 1, p. 147–150 ISSN 0587-4246.

- 6A. JUOZAPAVIČIUS, A.; ARDARAVIČIUS, L.; SUŽIEDĖLIS, A.; KOZIČ, A.; GRADAUSKAS, J.; KUNDROTAS, J.; SELIUTA, D.; ŠIRMULIS, E.; AŠMONTAS, S.; VALUŠIS, G.; ROSKOS, H. G.; KÖHLER, K. Microwave sensor based on modulation-doped GaAs/AlGaAs structure. *Semiconductors Science Technology*, 2004, vol. 19, p. S436–S439 ISSN 0268-1242.

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo
(*Thomson ISI Master List*) leidiniuose

- 7A. KOZIČ, A.; PETKUN, V.; ČERŠKUS, A.; SHTRIKMANN, H.; UMANSKY, V.; GRADAUSKAS, J.; SELIUTA, D.; SUŽIEDĖLIS, A.; KUNDROTAS, J.; AŠMONTAS, S. Influence of spacer on microwave detection in modulation-doped GaAs structures. *Lithuanian Journal of Physics*, 2006, vol. 46, no. 3, p. 325–329 ISSN 1648-8504.

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto duomenų bazėse
referuojamuose leidiniuose (*Thomson ISI Proceedings*)

- 8A. SUŽIEDĖLIS, A.; PETKUN, V.; KOZIČ, A.; KAZLAUSKAITĖ, V.; ČERŠKUS, A.; STEIKŪNAS, G.; GRADAUSKAS, J.; KUNDROTAS, J.; AŠMONTAS, S.; PAPSUJEVA, I.; NARKŪNAS, A.; ANBINDERIS, T.; UMANSKY, V.; SHTRIKMAN, H. GaAs/AlGaAs structures with δ -doped layer for microwave detection. *Advanced Optical Materials, Technologies, and Devices*, In *Proc. of SPIE*, 2007, vol. 6596, p. 65960N1–65960N6.
- 9A. SUŽIEDĖLIS, A.; KOZIČ, A.; PAŠKEVIČ, Č.; PETKUN, V.; GRADAUSKAS, J.; POŽELA, J.; AŠMONTAS, S.; SHTRIKMANN, H.; KISELIOV, V.; ANBINDERIS, T. Gate-Influenced Increase of Voltage Sensitivity in Asymmetrically Shaped 2DEG Microwave Diodes. In *an International Joint Conference of 4th ESA Workshop on MillimetreWave Technology and Applications*. Finland, Espoo, February 15–17: 2006, p. 239–244.
- 10A. AŠMONTAS, S.; ARDARAVIČIUS, L.; BALAKAUSKAS, S.; GRADAUSKAS, J.; KOZIČ, A.; KUNDROTAS, J.; KÖHLER, K.; ROSKOS, H. G.; SACH, R.; SUŽIEDĖLIS, A.; SELIUTA, D.; ŠIRMULIS, E.; VALUŠIS, G. Asymmetrically-shaped diodes for microwave-submillimeter sensing. In *Proc. 26th Intern. Conf. on Physics*

of Semiconductors ICPS-26, at Edinburgh, Scotland, 29 July–2 August 2002 (edited by A. R. Long and J. H. Davies, *Institute of Physics Publishing, Bristol*, 2003), *Institute of Physics Conference Series Number 171*, Section 8: Novel devices, paper d-240, 2003. ISBN 0750309245.

Padėka

Visų pirma norėčiau padėkoti savo šeimai, materialiai ir dvasiškai rėmusiai doktorantūros studijų Puslaidininkių fizikos institute metu, be kurios pagalbos šis daktaro darbas nebūtų išvydęs dienos šviesos.

Dėkoju Puslaidininkių fizikos instituto Nevienalyčių struktūrų laboratorijai, suteikusiai puikias sąlygas, geranorišką atmosferą bei galimybę ruošti šį darbą. Ypatingai dėkingas darbo vadovui prof. habil. dr. Steponui Ašmontui už suteiktą galimybę paruošti šią daktaro disertaciją, už visokeriopą pagalbą, mokslines diskusijas ir vertingus patarimus. Norėčiau padėkoti habil. dr. Algirdui Sužiedėliui už pagalbą tiek rengiant eksperimentus, tiek aptariant gautus rezultatus, už vertingas idėjas ir pasiūlytus iškilusių mokslinių klausimų sprendimo kelius. Šiltai dėkoju doc. dr. Jonui Gradauskui už visokeriopą pagalbą bei naudingas diskusijas, habil. dr. Jurgiui Kundrotui už pagalbą, atliekant fotoluminescencijos eksperimentus ir interpretuojant gautus rezultatus, Valerijui Petkun, supažindinusiame su voltamperinių charakteristikų matavimo stendu, Andžėjui Lučun už techninę pagalbą.

Dėkoju savo kolegoms, tikėjusiems manimi, už gerai praleistą laiką institute.

Dėkingas mylimiems už meilę, kantrybę ir rūpestį.

I would like to thank prof. dr hab. Maciej Bugajski at the Institute of Electron Technology – Department of Physics and Technology of Low Dimensional Structures (Warsaw, Poland). I am thankful to M.Sc. Hanna Wrzesinska and M.Sc. Anna Szerling for performed fabrication technology operation of AlGaAs/InGaAs/GaAs structure.

Antoni Kozič

INVESTIGATION OF A^{III}B^V HETEROSTRUCTURES UNDER THE ACTION OF
MICROWAVE RADIATION

Doctoral Dissertation

Physical Sciences, Physics (02P)

Antoni Kozič

ĮVAIRIALYČIŲ A^{III}B^V DARINIŲ TYRIMAS MIKROBANGOSE

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02P)

2008 05 14. 6,25 sp. 1. Tiražas 20 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11,

LT-10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Baltijos kopija“, Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, <http://www.kopija.lt>