

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS  
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS INSTITUTAS

VIKTORIJA NARGELIENĖ

ĮVAIRIATARPIŲ GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As DARINIŲ TYRIMAI IR TAIKYMAI  
MIKROBANGŲ DETEKCIJAI

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai, fizika (02 P), puslaidininkių fizika (P 265)

Vilnius, 2013

Disertacija rengta 2008 – 2013 metais Fizinių ir technologijos mokslų centro  
Puslaidininkų fizikos institute

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Algirdas Sužiedėlis (FTMC Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai  
mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkų fizika – P 265)

Konsultantai:

Prof. habil. dr. Algis Jurgis Kundrotas (FTMC Puslaidininkų fizikos  
institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkų fizika – P 265)

Dr. Edmundas Širmulis (FTMC Puslaidininkų fizikos institutas, fiziniai  
mokslai, fizika – 02 P, puslaidininkų fizika – P 265)

## **Padėka**

Dėkoju FTMC Puslaidininkių fizikos institutui leidusiam pasinaudoti jų turima mokslinė aparatūra ir suteikusiam galimybę man paruošti šį darbą. Ypatingai dėkoju darbo vadovui prof. dr. Algirdui Sužiedėliui už pasitikėjimą, suteiktas galimybes tobulėti ir pagalbą interpretuojant eksperimentų rezultatus.

Esu dėkinga prof. habil. dr. Jurgiui Kundrotui ir dr. Aurimui Čerškui už bandinių optinius tyrimus ir produktyvias mokslines diskusijas. Norėčiau padėkoti dr. Edmundui Širmuliui už pagalbą atliekant eksperimentus terahercų srityje. Esu dėkinga dr. Andžej Lučun, bei Angelei ir Gyčiui Steikūnams už pagalbą gaminant bandinius, bei praktinius patarimus.

Dėkoju visiems Puslaidininkių fizikos instituto kolegoms, su kuriais teko bendrauti, už pagalbą, bei draugišką bendravimą.

Dėkoju savo šeimai ir vyrui Sauliui už supratingumą ir palaikymą.

Šį darbą iš dalies finansavo Valstybinis studijų fondas, Lietuvos mokslo taryba, bei Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūra.

## Turinys

ĮVADAS .....	7
Darbo naujumas .....	9
Ginamieji teiginiai .....	10
Disertacijos planas .....	10
Publikacijų sąrašas .....	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	17
1.1. Detektoriniai diodai .....	17
1.2. Įvairiatarpės sandūros .....	24
1.2.1. Izotipinės įvairiatarpės sandūros energijos juostų diagrama.....	24
1.2.2. Izotipinės įvairiatarpės sandūros voltamperinė charakteristika .....	27
1.2.3. Įvairiatarpio GaAs/AlGaAs darinio selektyvus legiravimas.....	30
1.3. Milimetrinių bangų detekcijos mechanizmai .....	33
1.3.1. Silpno signalo detekcijos principai .....	33
1.3.2. Karštųjų krūvininkų šiluminė ir bigradientinė elektrovaros .....	37
1.3.3. Tarpslėninė elektrovara.....	39
2. BANDINIŲ GAMYBA .....	41
2.1. Puslaidininkinių sluoksnių auginimas .....	42
2.2. Mikrobangų diodų gamyba.....	48
Skyriaus pagrindiniai rezultatai .....	53
3. BANDINIŲ CHARAKTERIZAVIMAS.....	54
3.1. Nuostovosios fotoluminescencijos tyrimas .....	54

3.2. Fotoluminescencijos su laikine skyra tyrimai .....	64
3.2.1. Voltamperinių charakteristikų tyrimas.....	72
Skyriaus pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	77
4. MIKROBANGŲ DIODŲ DETEKCINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI.....	79
4.1. Mikrobangų detekcinių savybių tyrimų schemas.....	79
4.2. Įvairiatarpių GaAs/Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> As taškinių mikrobangų diodų detekcinės savybės.....	83
4.3. Įvairiatarpių GaAs/Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As planarinių mikrobangų diodų detekcinės savybės.....	84
4.4. Selektiviai legiruotų GaAs/Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As planarinių mikrobangų diodų detekcinės savybės.....	88
Skyriaus pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	90
IŠVADOS .....	91
Naudotos literatūros sąrašas .....	93

## **Santrumpos**

FL - fotoluminescencija

KMOP – komplementinė metalas-oksidas-puslaidininkis technologija

MPE – molekulinio pluoštelio epitaksija

PDB – planarinis diodas su legiruotu barjeru

RTD – rezonansinis tunelinis diodas

SE – skystinė epitaksija

TCSPC – laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimas

VACH – voltamperinė charakteristika

## ĮVADAS

Mikrobangų dažnių ruožas pagal apibrėžimą yra labai platus ir apima dažnius nuo 300 MHz iki 300 GHz. Pagal taikymus, naudojamus prietaisus ir technologijas šis ruožas skirstomas į siauresnes sritis. Dažnių ruožas nuo 30 GHz iki 300 GHz dar yra vadinamas milimetrinėmis bangomis, nes šio ruožo bangos ilgiai yra milimetrų eilės. Milimetrinių bangų sritis yra labai perspektyvi daugelyje taikymų dėl kelių priežasčių. Visų pirma, tai aukštų dažnių sritis ir joje telpa platus dažnių spektras. Antra, kai kurie milimetrinių bangų ilgiai turi išskirtines sklaidimo aplinkoje savybes. Pavyzdžiui, 60 GHz dažnis, kuris yra naudojamas trumpojo nuotolio komunikacijos tinkluose, yra stipriai slopinamas atmosferoje dėl absorbcijos deguonies molekulėse. Dėl šios priežasties yra išvengiama bangų interferencijos ir įtakos vienu prietaisų kitiems. Kiti milimetrinių bangų ilgiai yra labai silpnai slopinami atmosferoje ir yra plačiai taikomi didelio nuotolio komunikacijos tinkluose. Milimetrinės bangos naudojamos telekomunikacijų tinkluose: plačiajuosčio bevielio tinklo prieigose, bevieliuose asmeniniuose tinkluose; kariuomenėje: trumpojo nuotolio radaruose, nuotolinio ginklų valdymo sistemose, automobiliniuose radaruose. Pastaruoju metu itin didelis susidomėjimas skiriamas milimetrinių bangų panaudojimui diagnostinėje medicinoje [1, 2].

Bet kokio mikrobangų imtuvo viduje yra netiesinis elementas, kurio paskirtis yra keisti priimamo signalo dažnį į žemo, ar nulinio dažnio signalą. Dažniausiai tai yra dviejų išvadų prietaisas – keitiklinis diodas, arba detektorinis diodas. Informaciją nešantis amplitudiškai moduluotas signalas gali būti iš karto detektuojamas detektoriniu diodu, tačiau dažniausiai pradžioje yra naudojamas keitiklinis diodas, kuris priimamo signalo dažnį keičia į skirtuminį jo ir vietinio generatoriaus dažnį. Tuomet tarpinis signalas siaurajuosčiu stiprintuvu yra sustiprinamas ir detektorinio diodo pagalba yra „ištraukiamas“ naudingas signalas, t.y. diodo išvaduose nuolatinė įtampa kinta amplitudinės moduliacijos dažniu.

Nuo XX a. pradžios mikrobangų keitikliams ir detektoriams buvo naudojama lyginanti metalo – puslaidininkio sandūra, iš pradžių, taškinio kontakto [3], o vėliau epitaksinio Šotkio (*Schottky*) diodo [4] pavidalu. Tokiems diodams veikti detektoriniu režimu reikėjo nuolatinės išorinės įtampos, kuri sumažintų diodo varžą ir paslinktų darbo tašką į didžiausio voltamperinės charakteristikos kreivumo vietą. Poreikis turėti diodus, kurie veiktų be išorinės įtampos inicijavo tyrimus dvejomis kryptimis. Pirma, pradėta ieškoti technologinių sprendimų siekiant pagaminti metalo – puslaidininkio sandūras, kurių atidarymo įtampa yra artima nuliui. Antra, pradėta gaminti naujo tipo lyginantys puslaidininkiniai prietaisai: planariniai diodai su legiruotu barjeru, įvairiatarpiai diodai, atvirkštiniai ir rezonansiniai tuneliniai diodai [5-8]. Visi kuriami diodai pirmiausiai lyginami pagal jų atsako jautrį ir veikimo dažnių diapazoną, kurį stengiamasi plėsti į aukštesniųjų dažnių pusę. Visų diodų, kurių veikimo principas pagrįstas lyginančia voltamperine charakteristika, jautris yra atvirkščiai proporcingas diodo talpai. Norint ją sumažinti stengiamasi gaminti diodus, kurie turi itin mažą aktyviosios srities plotą. Tačiau tai reikalauja sudėtingų technologinių procesų ir pakelia gamybos kaštus.

Be detektorinių diodų, milimetrinių bangų impulsams detektuoti gali būti naudojami ir karštųjų krūvininkų diodai, kurių veikimas pagrįstas krūvininkų kaitimu elektromagnetiniame lauke. Nors šių diodų įtampos jautris yra gerokai mažesnis, nei detektorinių diodų, tačiau jų veikimo dažnių ruožas yra gerokai platesnis, nei mikrobangų diapazonas [9].

Šiame darbe pristatomi mūsų sukurtų, pagamintų ir išbandytų įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų, kurie yra skirti detektuoti milimetrines bangas, tyrimų rezultatai.



Šio **darbo tikslas** buvo – sukurti mikrobangų diodus įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As puslaidininkinių darinių pagrindu ir ištirti jų detekcines savybes elektromagnetinės spinduliuotės milimetrinių bangų ilgių ruože.

Norint pasiekti šio tikslo buvo suformuoti tokie **uždaviniai**:

- Molekulinio pluoštelio epitaksijos ir skystinės epitaksijos metodais užauginti GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnius, skirtus milimetrinių bangų diodų gamybai.
- Ištirti puslaidininkinių sluoksnių kokybę nuostoviosios fotoluminescencijos, bei laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo metodais.
- Pagaminti planarinius nesimetriškai susiaurintus GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As diodus naudojant puslaidininkinius sluoksnius, kuriuose yra skirtingas barjerinio Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnio legiravimo donorais profilis.
- Pagaminti lyginančius įvairiatarpius GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodus naudojant puslaidininkinius sluoksnius, kuriuose yra skirtinga AlAs molinė dalis  $x$  trinariame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As junginyje.
- Eksperimentiškai ištirti GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų voltamperines charakteristikas ir nustatyti jų detekcines savybes.
- Išmatuoti GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų voltvatines charakteristikas, iš jų nustatyti diodų jautrį ir išmatuoti jautrio dažninę charakteristiką dažnių ruože nuo 8 GHz iki 170 GHz.

### **Darbo naujumas**

- Planarinių nesimetriškai susiaurintų selektyviai legiruotų GaAs/AlGaAs mikrobangų diodų detekcinės savybės ištirtos plačiame dažnių ruože iki terahercų srities. Nustatyta detekcinių savybių priklausomybė nuo barjerinio AlGaAs sluoksnio legiravimo profilio.

- Planarinių lyginančių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As mikrobangų diodų detekcinės savybės iširtos milimetrinių bangų ilgių ruože, bei nustatyta detekcinių savybių priklausomybė nuo AlAs molinės dalies  $x$ .
- Taškiniuose lyginančiuose GaAs/AlGaAs mikrobangų dioduose aptikta tarpslėninės elektrovaros įtaka detektuotame signale.

### **Ginamieji teiginiai**

- Taškiniuose įvairiatarpiuose mikrobangų dioduose, kurių GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinys užaugintas skystinės epitaksijos metodu, mikrobangų detekcija didžiaja dalimi vyksta dėl mikrobangų srovių lyginimo ir tarpslėninės elektrovaros atsiradimo.
- Planarinių nesimetriškai susiaurintų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As mikrobangų diodų su dvimačiu elektronų sluoksniu jautris didėja mažėjant diodo aktyviosios srities skerspjūvio plotui ir siaurėjant barjerinio Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnio legiravimo profiliui.
- Planariniuose įvairiatarpiuose mikrobangų dioduose, kurių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinys užaugintas molekulinio pluoštelio epitaksijos metodu ir Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnio AlAs molinė dalis  $x = 0,25 \div 0,1$ , detekcija vyksta dėl mikrobangų srovių lyginimo ir detekcijos jautris priklauso nuo barjerinio sluoksnio AlAs molinės dalies. Eksperimentiškai nustatyta, kad didžiausias jautris yra dioduose, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,2$ .

### **Disertacijos planas**

Disertacija yra sudaryta iš keturių skyrių, suskirstytų į smulkesnius poskyrius.

**Pirmasis** skyrius yra skirtas apžvelgti mikrobangų detekcijos metodus ir kitų mokslinių grupių atliktus detektorinių diodų tyrimus. Šiame skyriuje taip pat yra

aprašomas įvairiatarpių darinių energijos juostų modelis, krūvininkų pernaša statmenai bei lygiagrečiai įvairiatarpiam barjerui ir disertacijoje nagrinėjamų diodų mikrobangų detekcijos mechanizmai.

**Antrasis** skyrius yra skirtas įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių sandaros, bei auginimo metodų aprašymui. Šiame skyriuje taip pat yra aprašomi mikrobangų diodų gamybos technologiniai procesai.

**Trečiasis** skyrius yra skirtas aprašyti GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių tyrimus optiniais bei elektriniais metodais. Puslaidininkinių sluoksnių kokybė buvo įvertinta naudojant nuostoviosios fotoluminescencijos ir laike koreliuotų fotonų skaičiavimo metodus. Pagamintų diodų elektrinėms savybėms įvertinti buvo išmatuotos voltamperinės charakteristikos.

**Ketvirtasis** skyrius skirtas mikrobangų diodų detekcinių savybių plačiame mikrobangų dažnių ruože nuo 8 GHz iki 170 GHz tyrimų rezultatų apžvalgai. Aprašomi įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As taškinių ir planarinių mikrobangų diodų, bei nesimetriškai susiaurintų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As planarinių mikrobangų diodų detektuotos įtampos ir jautrio matavimų rezultatai.

### **Autorės indėlis**

Disertacijos autorė dalyvavo gaminant mikrobangų diodus Chalmers Micro- ir Nano- Technologijų centre, Švedijoje, atliko diodų montavimo darbus, voltamperinių charakteristikų ir detekcinių savybių milimetrinių bangų ruože eksperimentus. Autorė taip pat prisidėjo rengiant publikacijas ir konferencijos pranešimus disertacijos tema.

**Publikacijų sąrašas**  
**Publikacijos disertacijos tema**

- [P1] S. Ašmontas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, E. Širmulis, V. Derkach, „Detectors of microwave and terahertz radiation on the basis of semiconductor nanostructures“, *European Microwave Conference, proceedings*, 1650-1653 (2009).
- [P2] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), J. Gradauskas, „Sensitivity increase of point contact hot carrier microwave detector“, *Electronics letters*, **45**, 25, 1328-1329 (2009).
- [P3] A. J. Kundrotas, A. Čerškus, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, V. Umansky, „Enhanced exciton photoluminescence in the selectively Si-doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures“, *Journal of applied physics*, **108**, 6, 063522-1-7 (2010).
- [P4] J. Gradauskas, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, E. Širmulis, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Lučun, M. Vingelis, „Sensitive planar heterojunction detector from microwave to infrared applications“, *IEEE Sensors journal*, **10**, 3, 662-667 (2010).
- [P5] A. Čerškus, A. J. Kundrotas, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Photoluminescence characterisation of GaAs/AlGaAs structures designed for microwave and terahertz detectors“, *Lithuanian Journal of Physics*, **51**, 4, 330-334 (2011).
- [P6] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, A. J. Kundrotas, J. Gradauskas, A. Čerškus, V. Nargelienė, T. Anbinderis, „Planar heterojunction diode for millimeter waves detection“, *PIERS proceedings*, 927-930 (2012).
- [P7] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Kundrotas, V. Nargelienė, J. Gradauskas, "Voltage sensitivity of a point-contact GaAs/AlGaAs heterojunction microwave detector," *Physica Scripta*, **85**, 3, 035702 (2012).

- [P8] A. Čerškus, A. J. Kundrotas, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Dynamic photoluminescence studies of vertical  $n^+/n$ -GaAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As structures designed for microwave electronics“, *Physica scripta*, **87**, 6, 065701-1-5 (2013).
- [P9] A. Čerškus, A. J. Kundrotas, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, E. Johannessen, A. Johannessen, „Photoluminescence lifetimes in GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As structures designed for microwave and terahertz detectors“ *Lithuanian journal of physics*, **53**, 2, 118-125 (2013).

### Publikacijos neįtrauktos į disertaciją

- [P1] E. Širmulis, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), J. Gradauskas, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, „Fast detection of infrared laser pulses on planar small area GaAs/AlGaAs heterojunction“ *Acta physica Polonica A*, 113, 3, 851-854 (2008).
- [P2] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Požela, A. J. Kundrotas, E. Širmulis, J. Gradauskas, A. Kozič, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), T. Anbinderis, “Mesoscopic structures for microwave-THz detection” *Acta physica Polonica A*, 113, 3, 803-809 (2008).
- [P3] V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Sužiedėlis, A. Čerškus, J. Gradauskas, S. Ašmontas, A. J. Kundrotas, „Enhancement of excitonic photoluminescence in silicon-doped  $n^+/i$ -GaAs structures“, *Lithuanian journal of physics*, 49, 3 285 – 290 (2009).
- [P4] A. J. Kundrotas, A. Čerškus, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Enhanced light emission in nanostructures“ *Lithuanian journal of physics*, 51, 4, 292-302 (2011).
- [P5] A. Čerškus, V. Nargelienė, A. J. Kundrotas, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Enhancement of the

- excitonic photoluminescence in  $n^+/i$ -GaAs by controlling the thickness and impurity concentration of the  $n^+$  layer“, *Acta physica Polonica A*, 119, 2, 154-157 (2011).
- [P6] V. Nargelienė, S. Ašmontas, A. Čerškus, J. Gradauskas, A. J. Kundrotas, A. Sužiedėlis, „Peculiarities of excitonic photoluminescence in Si  $\delta$ -doped GaAs structures“ *Acta physica Polonica A*, 119, 2, 177-179 (2011).
- [P7] A. Sužiedėlis, V. Petkun, A. Kozič, V. Kazlauskaitė, A. Čerškus, G. Steikūnas, J. Gradauskas, A. J. Kundrotas, S. Ašmontas, I. Papsujeva, A. Narkūnas, T. Anbinderis, V. Umansky, H. Shtrikmann, „GaAs/AlGaAs structures with  $\delta$ -doped layer for microwave detection“, *Proceedings of SPIE*, 6596, 65960N-1-6 (2007).
- [P8] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Požela, J. Gradauskas, V. Petkun, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), T. Anbinderis, I. Papsujeva, A. Narkūnas, „Millimeter wave detection on gated selectively doped semiconductor structure“, *MSMW'07: Proceedings of 6th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies*, 2, 596 – 598 (2007).
- [P9] M. Vingelis, S. Ašmontas, A. Sužiedėlis, E. Širmulis, J. Gradauskas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. J. Kundrotas, A. Čerškus, „Electron heating phenomena under infrared radiation in thin GaAs layers“ *Radiation interaction with material and its use in technologies : international conference : program and materials*, 265-266 (2008).
- [P10] S. Ašmontas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, V. Derkach, „Wide frequency band detection on laterally constricted GaAs structures having nanometric heavily doped layers“ *Journal of physics. Conference series*, 193, 012020-1-4 (2009).
- [P11] S. Ašmontas, A. Sužiedėlis, E. Širmulis, J. Gradauskas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Lučun, T. Anbinderis, „New planar heterojunction diode

for microwave and infrared applications“, *AIP conference proceedings*, 1199, 213-214 (2010).

### **Konferencijų pranešimai disertacijos tema**

- [K1] J. Gradauskas, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, E. Širmulis, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Lučun, M. Vingelis, „Sensitive planar heterojunction detector from microwave to infrared applications“, *International Symposium on Spectral Sensing Research (ISSSR 2008)*, June 23–27, 2008, Hoboken, NY, USA.
- [K2] V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Sužiedėlis, A. Čerškus, J. Gradauskas, S. Ašmontas, J. Kundrotas, „Eksitoninės fotoluminescencijos stiprinimas siliciu legiruotuose  $n^+/i$ -GaAs dariniuose“, *Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija (LNFK'38)*, Birželio 8–10 d., 2009, Vilnius, Lietuva.
- [K3] S. Ašmontas, V. Kazlauskaitė (Nargelienė), A. Sužiedėlis, J. Gradauskas, E. Širmulis, V. Derkach, „Detectors of microwave and terahertz radiation on the basis of semiconductor nanostructures“, *39th European Microwave Conference*, September 28–October 1, 2009, Rome, Italy.
- [K4] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Požela, J. Gradauskas, V. Nargelienė, Č. Paškevič, V. Derkach, R. Golovashchenko, E. Goroshko, V. Korzh, T. Anbinderis, „Magnetic field influence on properties of planar microwave diodes on the base of modulation doped semiconductor structures“, *20th International Crimean Conference on Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo)*, September 13–17, 2010, Sevastopol, Ukraine.
- [K5] A. Čerškus, J. Kundrotas, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Photoluminescence characterisation of GaAs/AlGaAs structures designed for microwave and terahertz detectors“, *International Conference on Advanced Optical Materials and Devices (AOMD-7)*, August 28–31, 2011, Vilnius, Lithuania.

- [K6] J. Kundrotas, A. Čerškus, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, A. Johannessen, E. Johannessen, „Enhanced exciton photoluminescence in the Si-doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As homo- and heterojunctions“, *International Conference on Advanced Optical Materials and Devices (AOMD-7)*, August 28–31, 2011, Vilnius, Lithuania.
- [K7] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Kundrotas, J. Gradauskas, E. Širmulis, A. Čerškus, V. Nargelienė, „Planar heterojunction diodes for microwave and infrared applications“, *International Conference on Advanced Optical Materials and Devices (AOMD-7)*, August 28–31, 2011, Vilnius, Lithuania.
- [K8] A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, A. J. Kundrotas, J. Gradauskas, A. Čerškus, V. Nargelienė, T. Anbinderis, „Planar heterojunction diode for millimeter waves detection“, *Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2012)*, August 19–23, 2012, Moscow, Russia.
- [K9] A. Čerškus, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, B. Kundrotas, R. Rinkevičienė, „Time-resolved photoluminescence characterisation of GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As structures designed for microwave and terahertz detectors“, *15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors (15 UFPS)*, August 25–28, 2013, Vilnius, Lithuania.
- [K10] J. Kundrotas, A. Čerškus, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gradauskas, E. Johannessen, A. Johannessen, „The increase of radiative lifetime of free excitons in selectively Si-doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures“, *15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors (15 UFPS)*, August 25–28, 2013, Vilnius, Lithuania.



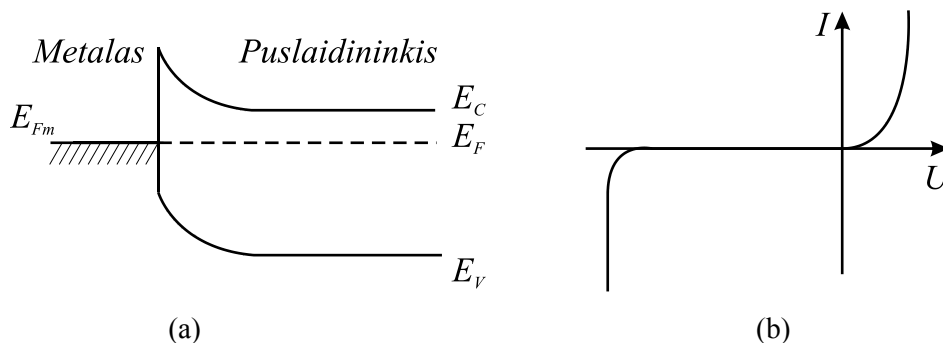
# 1. LITERATŪROS APŽVALGA

Šis skyrius skirtas apžvelgti kitų mokslinių grupių atliktus detektorinių diodų tyrimus, įvairiatarpių darinių energijos juostų modelį ir krūvininkų pernašą statmenai bei lygiagrečiai įvairiatarpiam barjerui. Šiame skyriuje taip pat aprašomi disertacijoje nagrinėjamų diodų mikrobangų detekcijos mechanizmai.

## 1.1. Detektoriniai diodai

Termistoriai, termoporos ir diodiniai detektoriai yra trys pagrindiniai prietaisai, naudojami mikrobangų ir milimetrinių bangų detekcijai, bei jų vidutinės galios matavimui. Dėl fundamentaliai tiesinės išėjimo signalo priklausomybės nuo mikrobangų galios ir gero ilgalaikio stabilumo termistoriai yra dažniausiai naudojami kaip etaloniniai galios matuokliai. Tačiau dėl mažo jautrio, siauro dinaminio diapazono ir lėto atsako mikrobangų galios matavimo taikymams naudojami retai. Daug dažniau yra naudojamos termoporos, kurios pasižymi didesniu jautriu, nei termistoriai. Tiek termistoriai, tiek termoporos naudojami vidutinės galios matavimams. Trumpų mikrobangų impulsų galiai matuoti dažniausiai naudojami diodiniai detektoriai, tačiau impulsinės galios matavimams gali būti naudojami ir kiti prietaisai – termoelektriniai diodai, bei piroelektriniai detektoriai [10].

Diodinių detektorių pagrindinis elementas yra diodas, turintis lyginančiąją voltamperinę charakteristiką (VACH).



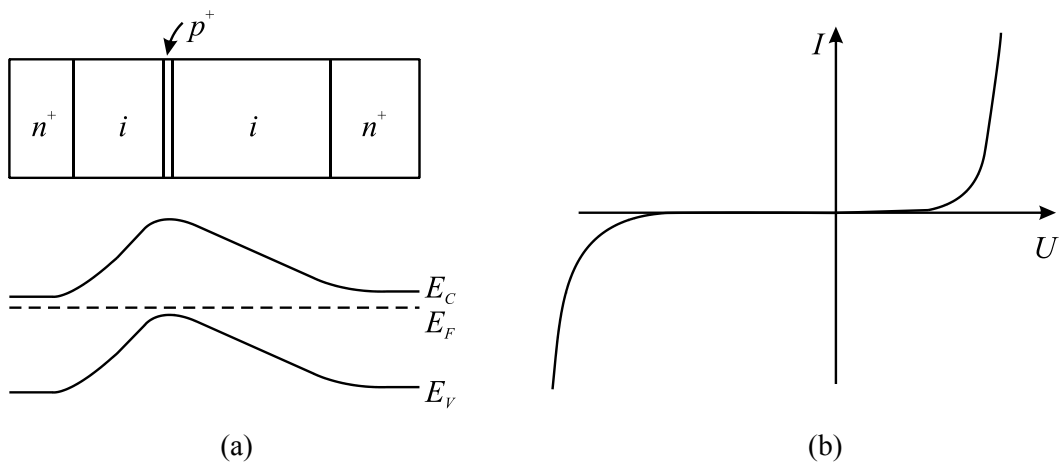
1.1.1 pav. Šotkio diodo energijos juostų diagrama (a) ir voltamperinė charakteristika (b).

Detektoriams mikrobangų ir aukštesniųjų dažnių ruožuose naudojami tik pagrindinių krūvininkų laidumo prietaisai, iš kurių geriausiai žinomas yra Šotkio diodas, kurio energijos juostų diagrama ir VACH pavaizduotos 1.1.1 pav. Šotkio diodo veikimui aukštuose dažniuose turi būti kuo mažesnės nuoseklosioji varža ir sandūros talpa. Nuoseklosioji varža yra mažinama naudojant didelio laidumo puslaidininkį, tačiau dėl to sandūra tampa labai plona ir išauga jos talpa. Norint sumažinti talpą reikia mažinti kontakto plotą. Buvo pasiūlyta keletas metodų, kaip pagaminti mažo ploto Šotkio diodus, tačiau ilgą laiką geriausius rezultatus demonstravo Šotkio diodų konstrukcija su kontaktiniu siūleliu [11, 12]. Deja, tokie diodai pasižymėjo blogu mechaniniu atsparumu ir todėl pradėti gaminti planariniai Šotkio diodai naudojant sijinio kontakto [13] arba prošvaisinės jungės [14] technologijas. Kita Šotkio diodų problema buvo išorinės įtampos poslinkio būtinybė. Norint naudoti diodus be išorinės įtampos, reikia pagaminti metalo-puslaidininkio kontaktą, kurio potencinio barjero aukštis yra mažesnis nei 0,5 eV. Pažeminto barjero Šotkio kontaktai ant *n*-Si buvo pagaminti naudojant retųjų žemių elementus [15, 16]. Dėl didelio krūvininkų judrio ir prietaisų greitaieigiškumo Šotkio diodams gaminti pradėtas naudoti GaAs. Tačiau dėl didelio paviršinių būsenų tankio GaAs paviršiuje bet koks nusodintas metalas sudaro panašaus aukščio Šotki barjerą, kuris svyruoja apie 0,75 eV vertę [17, 18]. Norint gauti nuo metalo priklausantį GaAs barjero aukštį buvo pasiūlytos paviršiaus pasyvavimo *in situ* ir *ex situ* technologijos [19, 20] ir šiuo metu jau yra komerciškai gaminamų GaAs Šotki diodų, kurie veikia be išorinės įtampos poslinkio. Ieškoma ir kitų alternatyvų, pavyzdžiui InP Šotki kontakto potencinio barjero aukštis priklausomai nuo naudojamo metalo dažniausiai yra 0,3 – 0,7 eV eilės, todėl tokie diodai taip pat gali būti taikomi kaip detektoriniai diodai be išorinio įtampos poslinkio [21, 22]. Šiuo metu taip pat vyksta moksliniai tyrimai siekiant pagaminti integruotus Šotkio diodus, kurių gamyba būtų suderinama su komplementine metalas – oksidas – puslaidininkis technologija (KMOP) [23, 24].

Nors Šotkio diodai ir pasižymi dideliu jautriu iki THz srities, tačiau masinė gamyba yra brangi dėl sunkiai atkartojamų diodo parametrų. Taip pat tokie papildomi trūkumai, kaip stipri įtampos jautrio priklausomybė nuo temperatūros ir neatsparumas elektrinėms perkrovoms verčia ieškoti alternatyvų.

Viena iš alternatyvų yra planariniai diodai su legiruotu barjeru (PDB – *anlg.* planar doped barrier), kurių tipinė energijos juostų diagrama ir VACH pavaizduotos 1.1.2 pav. PDB diodai sudaryti iš  $n^+ - i - p^+ - i - n^+$  sluoksnių, o  $p^+$  sluoksnis yra itin plonas ir turi būti pilnai nuskurdintas. PDB diodai yra pagrindinių krūvininkų prietaisai ir turi keletą privalumų lyginant su Šotkio diodais. PDB diodų barjero aukštis ir VACH simetrija tarp tiesioginės ir atbulinės krypties gali būti lengvai keičiami keičiant legiravimo profilį ir savitojo laidumo sluoksnių pločius. Kadangi PDB yra tūriniai diodai, jie yra daug atsparesni elektrinėms perkrovoms, nei Šotkio diodai. Pagrindinis PDB diodų trūkumas yra didelė diferencinė varža.

1989 m. M. J. Kearny su bendraautoriais pasiūlė GaAs PDB diodą kaip alternatyvą Šotkio diodui mikrobangų ir milimetrinių bangų detekcijai [25]. VACH tyrimai parodė, kad jų kreivumo koeficientas yra didžiausias 0 V aplinkoje ir tokius diodus būtų galima naudoti tiesioginei mikrobangų detekcijai be išorinio įtampos poslinkio. Tuo metu tai buvo puiki alternatyva Šotkio diodams, turint

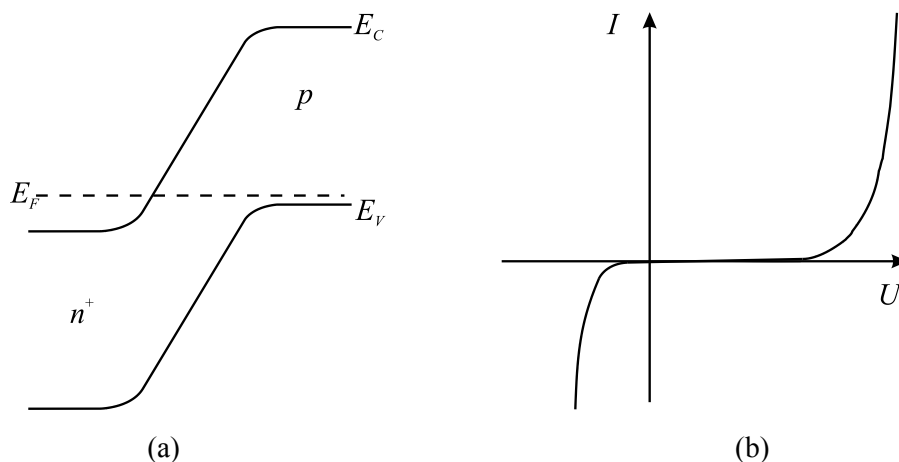


1.1.2 pav. PDB diodo energijos juostų diagrama (a) ir voltamperinė charakteristika (b).

omenyje, kad pažeminto barjero diodai, kurie veiktų be išorinės įtampos poslinkio, buvo gaminami nusodinant retųjų žemių elementus ant silicio [16], o mikrobangų detekcijai buvo naudojami tik diodai su išoriniu poslinkiu. Vėliau M. J. Kearny su bendraautoriais atlikti matavimai milimetrinių bangų ruože parodė, kad PDB diodo jautris buvo 2700 mV/mW ir 800 mV/mW esant atitinkamai 35 GHz ir 94 GHz dažniams [5]. Deja, vėlesni darbai tobulinant GaAs PDB diodus nedavė naujų rezultatų ir didesnio įtampos jautrio nei 2700 mV/mW 35 GHz dažnyje pasiekti nepavyko [26, 27].

Pastaruoju metu daug dėmesio skiriama atvirkštiniam diodams, kurių veikimo principas yra pagrįstas tarpjuostiniu krūvininkų tuneliavimu. Atvirkštinio diodo sandara yra panaši į tunelinio Esakio (*Esaki*) diodo, tačiau vienas iš sandūrų sudarančių sluoksnių nėra išsigimęs, t.y. legiravimo laipsnis yra mažesnis. Tuomet esant mažai pridėtai įtampai srovė atbuline kryptimi tampa didesnė, nei tiesiogine. Atvirkštinio diodo energijos juostų diagrama ir VACH pavaizduotos 1.1.3 pav.

2005 metais N. Jin su bendraautoriais tiesioginei mikrobangų detekcijai pasiūlė atvirkštinį diodą, pagamintą Si pagrindu [28]. Naudojama technologija buvo suderinama su KMOP ir įvairiatarpio dvipolio tranzistoriaus technologijomis. Tačiau tokio diodo atkirtos dažnis siekė vos 1,8 GHz, o įtampos jautris, išmatuotas 20 GHz dažnyje tebuvo 182 mV/mW [29].



1.1.3 pav. Atvirkštinio diodo energijos juostų diagrama (a) ir voltamperinė charakteristika (b).

Kita mokslinė grupė pasiūlė atvirkštinį diodą, pagamintą įvairiatarpio  $n$ -InAs/AlSb/ $p$ -GaAsSb darinio pagrindu [30]. Šiame diode nei vienas sandūra sudarantis puslaidininkis nėra išsigimęs, o tunelinė struktūra susidaro dėl II-ojo tipo įvairiatarpės sandūros tarp InAs ir GaAlSb [31]. Atvirkštinių diodų, esančių ant padėklo matavimų rezultatai 95 GHz dažnyje parodė, kad diodai, kurių aktyviosios srities plotas buvo  $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ , turėjo 2768 mV/mW jautrį, o diodai, kurių aktyviosios srities plotas buvo  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  turėjo 106 mV/mW jautrį [32]. Panaudoję suderinimo juostelinę liniją autoriai pasiekė rekordinį jautrį – 8000 mV/mW 85 GHz dažnyje [33].

T. Takahashi su bendraautoriais ištyrė  $p^+$ -GaAsSb/ $i$ -InAlAs/ $n$ -InGaAs atvirkštinių diodų, veikiančių be išorinio įtampos poslinkio, jautrio priklausomybę nuo diodo ploto [34]. Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad  $2\ \mu\text{m}$  skersmens diodo įtampos jautris 94 GHz dažnyje buvo 2100 mV/mW, o diodo, kurio skersmuo  $1,6\ \mu\text{m}$ , jautris apskaičiuotas pagal išmatuotus elektrinius parametrus buvo 20000 mV/mW.

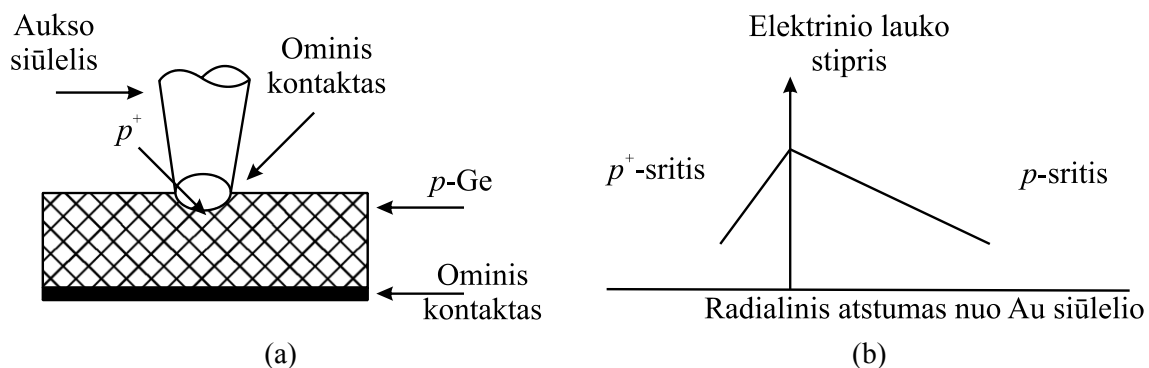
1983 m. T. C. L. G. Sollner su bendraautoriais pagamino rezonansinį tunelinį diodą (RTD – *angl.* Resonant tunneling diode) ir pademonstravo jo detekcines galimybes iki 2,5 THz [35]. Šis RTD veikė žemoje 25 K temperatūroje, o patys autoriai atsaką apibūdino, kaip per mažą praktiniam pritaikymui. Vis dėlto, aukštos kokybės ir atkartojamų parametrų RTD paskatino tolimesnius tyrimus šioje srityje. 1990 m. I. Mehdi su bendraautoriais pademonstravo InGaAs/InAlAs RTD detekcines galimybes iki 40 GHz kambario temperatūroje [36]. Nors diodai turėjo atsaką į milimetrines bangas ir nesant išorinio poslinkio, geriausi rezultatai buvo gauti pridėjus  $\sim 0,3\ \text{V}$  išorinę įtampą.

Kaip jau buvo minėta skyriaus pradžioje impulsinei mikrobangų galiai matuoti gali būti naudojamas termoelektrinis diodas. Tai prietaisas kurio veikimo

principas yra panašus į termoelektrinio detektoriaus, o konstrukcija ir charakteristikos į detektorinio diodo.

Puslaidininkyje, patalpintame į didelio mikrobangų galios gradiento lauką, dėl netolygaus laisvųjų krūvininkų kaitimo indukuojama elektrovara [38-40]. Šis reiškinys primena įprastinį termoelektrinį efektą, tačiau čia yra kaitinami išskirtinai laisvieji krūvininkai, o kristalinė gardelė išlieka šalta. Norint ištirti laisvųjų krūvininkų termoelektrinį reiškinį buvo naudojamos krūvininkų kaitinimo impulsine ir nuolatine srove, bei mikrobangų elektriniu lauku metodikos. Krūvininkų kaitimas puslaidininkyje, patalpintame į mikrobangų lauką ir paskatino naujo tipo mikrobangų detektoriaus atsiradimą – termoelektrinį diodą [9]. Diodu šis prietaisas buvo pavadintas dėl savo konstrukcijos panašumo į taškinį diodą (1.1.4 pav. (a)). Diodą sudaro silpnai legiruotas puslaidininkis (dažniausiai Ge) turintis du ominus kontaktus – didelio ploto apatinį ir mažo ploto viršutinį, gautą prispaudžiant kontaktinį siūlelį. Dėl tokios geometrijos mikrobangų elektrinis laukas yra koncentruotas puslaidininkio tūryje ties kontaktiniu siūleliu (1.1.4 pav. (b)).

Laisvieji krūvininkai abiejose sandūros pusėse yra kaitinami elektrinio lauko, o jų temperatūrų skirtumas lemia termoelektrinės įtampos atsiradimą. Šis reiškinys yra panašus į įprastinį Zėbeko (*Seebeck*) reiškinį, tačiau šiuo atveju



1.1.4 pav. Termoelektrinio diodo konstrukcija (a) ir elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas (b) (adaptuota iš [10]).

kaitinami tik laisvieji krūvininkai. Pirmieji termoelektrinio diodo idėją pasiūlė R. I. Harrison ir J. Zucker, kurie pagamino taškinio kontakto tipo termoelektrinius diodus naudojant Ge, Si ir InP puslaidininkius su volframo siūleliu mažo ploto ominiame kontaktui. Diodų veikimas buvo ištirtas plačiame 3 – 210 GHz dažnių ruože [9]. Tipinio *p*-Ge diodo jautris, išmatuotas kambario temperatūroje 70 GHz dažnyje siekė 10 mV/μW, tačiau išėjimo signalas neatkartojė momentinio galios tankio pokyčio, kai mikrobangų impulso trukmė buvo 0,2 μs. Autoriai taip pat pabrėžė, kad termoelektriniai diodai buvo atsparesni elektros perkrovoms, bei mažiau jautrūs aplinkos faktoriams, nei Šotkio diodai turintys panašius jautrius. Kiek vėliau kita mokslinė grupė pagamino taškinis termoelektrinius diodus ant *p*-Ge su aukso kontaktu. Tyrimai parodė, kad jų įtampos jautris 8 – 12 GHz dažnių ruože buvo ne didesnis nei 1 mV/mW [41], o 3 GHz dažnyje geriausio bandinio įtampos jautris buvo kiek didesnis nei 10 mV/mW [42]. Nustatytas diodų atsako laikas buvo 20 ns.

1971 m. buvo pastebėta, kad vienalyčiame nesimetriškai susiaurintame puslaidininkiniame bandinyje, patalpintame į stiprų elektrinį lauką indukuojama elektrovara, kurią autoriai pavadino bigradientine elektrovaros jėga [43]. Vienalytį nesimetriškai susiaurintą bandinį vėliau autoriai panaudojo mikrobangų detekcijai. Toks darinys turėjo labai didelę varžą, kuriai sumažinti viena susiaurėjimo pusė buvo stipriai legiruota. Tokiu būdu buvo gautas mikrobangų detektorius, kurio veikimo principas buvo pagrįstas šiluminės elektrovaros ir bigradientinės elektrovaros principu [44].

Įvairiatarpių *n*-GaAs/*n*<sup>+</sup>-AlGaAs diodų panaudojimą mikrobangų detekcijai pirmasis ištyrė A. Lechner su bendraautoriais [6, 48]. Gauti rezultatai parodė, kad diodo, kurio skersmuo yra 10 μm, įtampos jautris iki 14,5 GHz buvo tos pačios eilės, kaip ir tuo metu komerciškai Hewlett-Packard gaminamiems Šotkio diodams. Autoriai nurodė, kad sluoksnių auginimui naudojant skystinės

epitaksijos metodą pagamintų diodų voltamperinės charakteristikos kito nuo lyginančių iki beveik ominių.

Be aukščiau aptartų jutiklių, nuolat kuriami nauji detektoriniai diodai ir dviejų išvadų prietaisai, kurių savybės yra panašios į detektorinių diodų. Jie turi greitą atsaką, o jų mažos galios mikrobangų atsakas yra tiesinis. Buvo pademonstruota, kad milimetrinių bangų detekcijai gali būti naudojami metalas-izoliatorius-metalas rezonansiniai diodai [45, 46] ir dvimačių elektronų prietaisai [47, 48].

## **1.2. Įvairiatarpės sandūros**

Disertacijoje nagrinėjami mikrobangų diodai, pagaminti naudojant įvairiatarpius GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinius, kuriuose krūvininkų pernaša vyksta statmenai sandūrai. Detekcinės savybės šiuose dioduose priklauso nuo įvairiatarpės sandūros pločio ir potencialio barjero aukščio, todėl šiame poskyryje yra apžvelgiamos darinių energijos juostų diagrama ir voltamperinė charakteristika, bei kitų mokslinių grupių bandymai užauginti lyginančius GaAs/AlGaAs darinius.

Disertacijoje taip pat nagrinėjami nesimetriškai susiaurinti mikrobangų diodai, pagaminti naudojant GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinius, kuriuose krūvininkų pernaša vyksta lygiagrečiai sandūrai. Detekcinės savybės tokiuose dioduose priklauso nuo krūvininkų judrio. Todėl šiame poskyryje taip pat trumpai apžvelgiami selektyvaus GaAs/AlGaAs darinių legiravimo metodai.

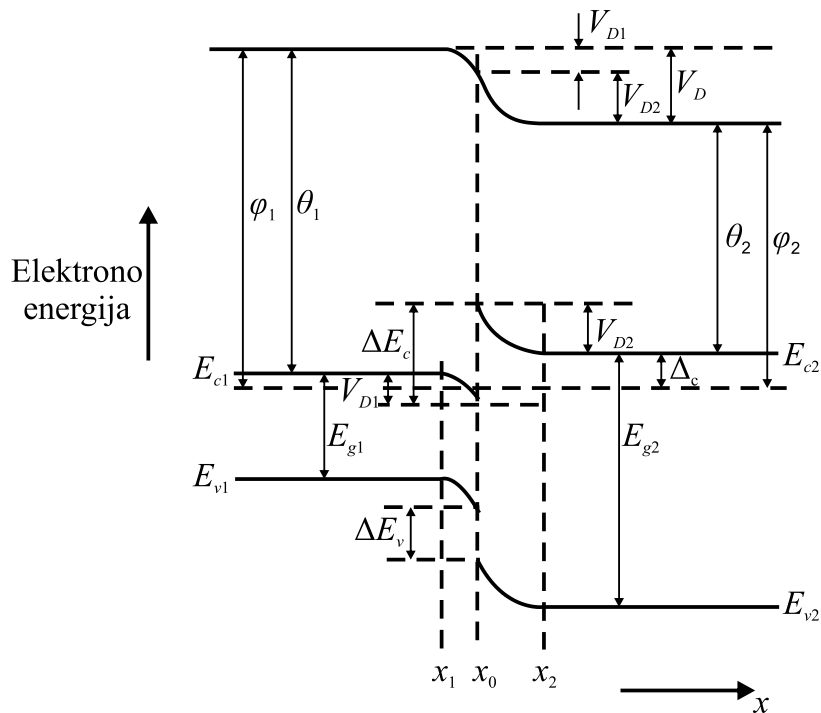
### **1.2.1. Izotipinės įvairiatarpės sandūros energijos juostų diagrama**

R. L. Anderson 1962 metais pasiūlė modelį įvairiatarpės sandūros energijos juostų diagramai skaičiuoti [49]. Savo darbe R. L. Anderson nagrinėjo Ge-GaAs sandūras. Kadangi Ge ir GaAs turi panašias kristalines struktūras, o jų gardelės



konstantos  $a$  yra beveik lygios (Ge  $a = 5,6579 \text{ \AA}$ , GaAs  $a = 5,65389 \text{ \AA}$ , kambario temperatūroje [50]), buvo laikoma, kad sandūroje nesusidaro mechaniniai įtempimai. Teorinis modelis buvo palygintas su eksperimentiniais rezultatais tiriant Ge – GaAs  $n-n$  ir  $n-p$  įvairiatarpės sandūras. Šis modelis remiasi skirtingu puslaidininkių elektroniniu giminiškumu. Izotipinės, t.y. sudarytos iš vienodo legiravimo tipo puslaidininkių,  $n-n$  įvairiatarpės sandūros energijos juostų diagrama pavaizduota 1.2.1.1 pav.

Įvairiatarpė sandūra yra sudaryta iš dviejų puslaidininkių, turinčių skirtingus draudžiamosios energijos tarpus –  $E_{g1}$  ir  $E_{g2}$ , elektronų giminiškumus  $\theta_1$  ir  $\theta_2$ , išlaisvinimo darbus  $\varphi_1$  ir  $\varphi_2$  ir skirtingas dielektrines skvarbas  $\varepsilon_1$  ir  $\varepsilon_2$ . Čia apatiniu indeksu 1 žymimas puslaidininkis su siauresniu draudžiamosios energijos tarpu, o indeksu 2 – su platesniu. Literatūroje siauratarpiu puslaidininkiu yra įprasta vadinti puslaidininkius, kurių draudžiamosios energijos tarpas yra mažesnis nei 1 eV (t.y. mažesnis lyginant siliciu), o plačiatarpiais – puslaidininkius su



1.2.1.1 pav. Izotipinės įvairiatarpės sandūros energijos juostų diagrama (adaptuota iš [49]).

draudžiamosios energijos tarpu didesniu, nei 1 eV. Tačiau, šiame darbe siauratarpiu vadinsime tą puslaidininkį, kuris turi siauresnį draudžiamosios energijos tarpą įvairiatarpiame darinyje, neatsižvelgiant į jo absoliučią vertę. Tas pats galios ir naudojant plačiatarpio puslaidininkio sąvoką šiame tekste. Termodinaminėje pusiausvyroje Fermi energija turi būti vienoda abiejose sandūros pusėse, o vakuuminis lygmuo turi būti lygiagretus laidumo ir valentinės juostų kraštams, todėl dviejų puslaidininkių sandūroje susidaro laidumo ir valentinės juostų trūkia  $\Delta E_c$  ir  $\Delta E_v$ . Neišsigimusiems puslaidininkiams juostų trūkia nepriklauso nuo legiravimo tankio. Sandūros potencialų skirtumas  $V_D = V_{D1} + V_{D2}$  idealiu atveju yra lygus puslaidininkių išlaisvinimo darbų skirtumui  $\varphi_1 - \varphi_2$  [49]. Jei puslaidininkio su siauresniu draudžiamosios energijos tarpu išlaisvinimo darbas yra didesnis nei puslaidininkio su platesniu tarpu (tai yra dažniausiai pasitaikantis atvejis, Ge-GaAs, GaAs-AlGaAs ir kitose sandūrose), tai elektronai iš plačiatarpio puslaidininkio pereis į siauratarpį ir pastarojo pusėje susidarys praturtinta sritis, o kitoje sandūros pusėje nuskurdintas sluoksnis. Pridėjus išorinę įtampą, didesnis jos kritimas bus plačiatarpio pusėje. Potencialiniai barjerai kiekviename iš sandūrą sudarančių puslaidininkių randami iš elektrinės indukcijos nenutrūkstamumo sandūroje sąlygos:

$$\varepsilon_1 F_1 = \varepsilon_2 F_2, \quad (1.2.1.1)$$

čia  $F_1$  ir  $F_2$  – maksimalus elektrinio lauko stipris atitinkamai siauratarpiame ir plačiatarpame puslaidininkiuose [51]:

$$F_1 = \sqrt{\frac{2qN_1}{\varepsilon_1} \left\{ \frac{kT}{q} \left[ \exp \frac{q(V_{D1} - V_1)}{kT} - 1 \right] - (V_{D1} - V_1) \right\}}, \quad (1.2.1.2)$$

$$F_2 = \sqrt{\frac{2qN_2(V_{D2} - V_2)}{\varepsilon_2}}, \quad (1.2.1.3)$$

kur  $V_1$  ir  $V_2$  yra išorinės įtampos  $V$  kritimas atitinkamai siauratarpiame ir plačiatarpiame puslaidininkiuose. Išsprendę (1.2.1.1) - (1.2.1.3) lygtis randame sąryšį tarp potencialių barjerų:

$$V_{D2} - V_2 = \frac{\varepsilon_1 N_1}{\varepsilon_2 N_2} \left\{ \frac{kT}{q} \left[ \exp \frac{q(V_{D1} - V_1)}{kT} - 1 \right] - (V_{D1} - V_1) \right\}. \quad (1.2.1.4)$$

Jei santykis  $\frac{\varepsilon_1 N_1}{\varepsilon_2 N_2}$  yra vieneto eilės, o potencialų skirtumas  $V_D \gg \frac{kT}{q}$ , tai

lygtis (1.2.1.4) supaprastėja:

$$\frac{q}{kT} (V_D - V) = \exp \frac{q(V_{D1} - V_1)}{kT}. \quad (1.2.1.5)$$

Iš (1.2.1.5) lygybės matyti, kad išorinės įtampos kritimas ir potencialinio barjero pokytis bus didesni plačiatarpiame puslaidininkyje, išskyrus atvejus, kai plačiatarpio puslaidininkio legiravimo tankis yra žymiai didesnis, nei siauratarpio  $N_{D2} \gg N_{D1}$  arba, kai yra pridėtas didelis išorinis įtampos poslinkis.

## 1.2.2. Izotipinės įvairiatarpės sandūros voltamperinė charakteristika

Dviejų skirtingų puslaidininkių sandūra yra trūki, o potencialiai barjerai elektronams ir skylėms sandūroje yra skirtingi. Todėl daugeliu atvejų srovė įvairtarpėje sandūroje bus kuriama vieno tipo krūvininkų. 1.2.1.1 pav. pavaizduotos įvairiatarpės sandūros laidumo mechanizmas yra termoelektroninė emisija per barjerą [52], o voltamperinę charakteristiką aprašo lygtis:

$$I = I_s \left( 1 - \frac{V}{V_D} \right) \left( \exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right), \quad (1.2.2.1)$$

kur  $V$  – pridėta išorinė įtampa,  $k$  – Bolcmano konstanta,  $T$  – temperatūra,  $V_D$  – sandūros potencialinio barjero aukštis,  $q$  – elektrono krūvis,  $n$  – idealumo koeficientas, kurio nuokrypį nuo vieneto lemia nuotėkio srovės, atspindžio jėgų

efektai, bet didžiaja dalimi lemia termoelektroninė lauko emisija ir tuneliavimas per barjerą.  $I_S$  – yra soties srovė, kuri aprašoma lygtimi:

$$I_S = \frac{q^2 N_{D2} V_D}{\sqrt{2\pi m_2^* kT}} \exp\left(\frac{-qV_D}{kT}\right), \quad (1.2.2.2)$$

čia  $N_{D2}$  – donorių tankis ir  $m_2^*$  - elektronų efektinė masė plačiatarpame puslaidininkyje. (1.2.2.1) lygtis yra panaši į Šotkio kontakto termoelektroninės emisijos per barjerą charakteristiką [53], tačiau narys  $\left(1 - \frac{V}{V_D}\right)$  lemia ne tokį staigų srovės didėjimą nuo įtampos tiesiogine kryptimi kaip Šotkio diode, kita vertus jis lemia ir tai, kad atbulinė srovė neįsisotina. Įvairiatarpio diodo ir Šotkio diodo soties srovės, bei jų temperatūrinės priklausomybė taip pat yra skirtingos.

Izotipinės įvairiatarpės sandūros voltamperinė charakteristika bus lyginanti tik tuo atveju, jei kompozicinis medžiagų pasikeitimas bus staigus. Jei sandūra yra išplitusi, elektroninis giminiškumas sandūroje pasikeis per tam tikrą ilgį, o VACH bus ominė. Norint, kad įvairiatarpės sandūros VACH būtų lyginanti, elektroninio giminiškumo pasikeitimo nuotolis  $l$  (sandūros plotis), turi būti mažesnis už tam tikrą charakteringąją vertę [54]:

$$l \ll \left(\frac{2\Delta\theta\epsilon_2}{3\sqrt{3}q^2 N_{D2}}\right), \quad (1.2.2.3)$$

čia  $\Delta\theta$  – elektroninio giminiškumo pokytis siauratarpiame ir plačiatarpame puslaidininkuose.

Ankstyvieji bandymai užauginti izotipinius  $n-n$  GaAs –  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  darinius skystinės epitaksijos (SE) metodu parodė, kad daugeliu atveju gaunamos sandūros turi omines VACH [55]. D. T Cheung su bendraautorais [56] pasiūlė supaprastintą modelį skaičiuoti energijos juostų diagramos profiliui įvairiatarpėje sandūroje. Jei aliuminio molinė dalis kinta tiesiškai nuo sandūros link puslaidininkinio sluoksnio tūrio, o elektrinio lauko stipris yra pastovus įvairiatarpėje GaAs -  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

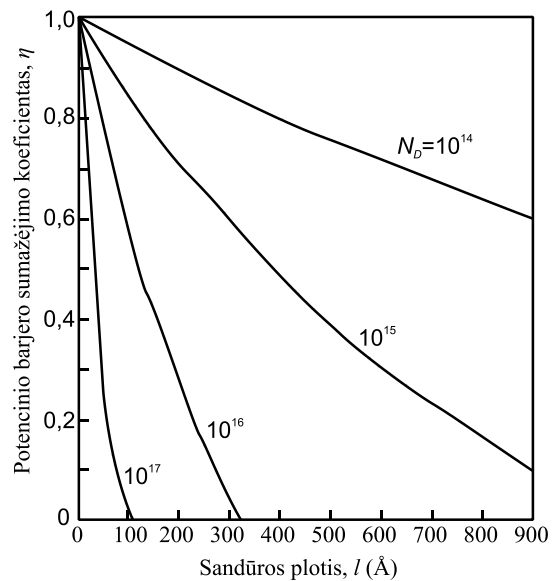
sandūroje, potencinis barjeras randamas įvedant koeficientą  $\eta$ , kuris parodo, kiek kartų barjeras sumažėja lyginant su staigia įvairiatarpe sandūra:

$$\eta = 1 - \frac{l \sqrt{2qN_{D2}(V_D - V) / \epsilon_2}}{\Delta E_c}, \quad (1.2.2.4)$$

(1.2.2.4) lygtis tik apytikriai įvertina potencinio barjero sumažėjimą, tačiau puikiai iliustruoja funkcinę priklausomybę nuo plačiatarpio puslaidininkio legiravimo tankio, sandūros pločio, išorinės įtampos ir dielektrinės skvarbos (1.2.2.1 pav.).

1977 m. C. M. Garner su bendraautoriais Ožė (*Auger*) elektronų spektroskopijos metodu tyrė SE metodu, tačiau skirtingomis sąlygomis užaugintų GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių aliuminio dalies kitimą nuo 10 % iki 90 % Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnyje [57]. Buvo nustatyta, kad sandūros plotis yra 90 – 130 Å eilės auginant

~ 800°C temperatūroje. Remdamiesi šiais duomenimis A. Chandra ir L. F. Eastman parinko auginimo sąlygas ir paskelbė apie srovę lyginančius *n-n* GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinius, užaugintus SE metodu [58]. Autoriai pagamino dvi sandūras su skirtingais GaAs legiravimo tankiais:  $<10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ir  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Eksperimentinių tyrimų rezultatai parodė, kad tik sandūros su GaAs legiravimo tankiu  $<10^{15} \text{ cm}^{-3}$  VACH nėra ominė. S. C. Lee ir G. L. Pearson [59] savo darbe apibendrina ankstesnius eksperimentinius rezultatus



1.2.2.1 pav. Potencinio barjero sumažėjimo koeficiento  $\eta$  priklausomybė nuo sandūros pločio  $l$  ir Al<sub>0,4</sub>Ga<sub>0,6</sub>As sluoksnio legiravimo tankio  $N_D$   $p^+(\text{GaAs}) - n(\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As})$  įvairiatarpėje sandūroje (adaptuota iš [56]).

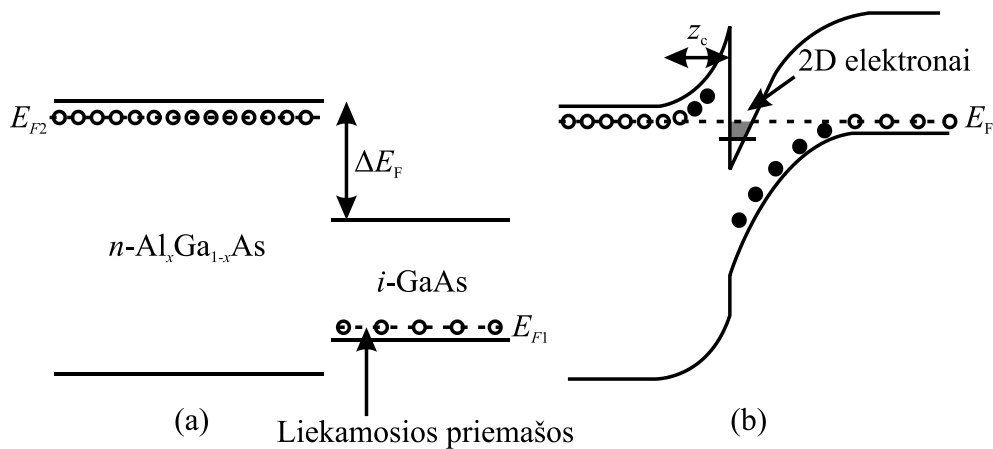
ištyrę eilę bandinių, kuriuose keitė ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnio legiravimo tankį  $N_{D2}$  ir GaAs legiravimo tankį  $N_{D1}$ . Gauti rezultatai parodė, kad esant fiksuotam  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  legiravimo tankiui  $N_{D2}$  ir sandūros pločiui, mažinant GaAs sluoksnio legiravimo tankį  $N_{D1}$ , voltamperinės charakteristikos netiesiškumas didėja. Tačiau šis didėjimas ryškus tik iki kol  $N_{D1}$  tampa lygus  $N_{D2}$ . Atlikti skaičiavimai parodė, kad VACH yra netiesinė iki  $\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  legiravimo tankio. Didesniems  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  legiravimo tankiams, nepriklausomai nuo GaAs legiravimo tankio, įvairiatarpės sandūros VACH buvo ominės.

C. L. Allyn su bendradarbiais [60] užaugino lyginančias įvairiatarpės GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sandūras su staigiu perėjimu ir tolyn nuo sandūros palaipsniui kintančiu barjero sąstatu. Autoriai parodė, kad keisdami sąstatą pagal skirtingas funkcijas, gali gauti norimo aukščio ir formos barjerą. Eksperimentiniai tyrimai parodė, kad staigios įvairiatarpės GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sandūros VACH priklauso ne tik nuo sandūros potencinio barjero aukščio, kaip numato (1.2.2.2) lygtis, bet ir barjero formos.

### **1.2.3. Įvairiatarpio GaAs/AlGaAs darinio selektyvus legiravimas**

Kai įvairiatarpiai GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dariniai naudojami prietaisams, kuriuose krūvio pernaša vyksta lygiagrečiai barjerui, dažniausiai yra legiruojamas tik barjerinis  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnis. Toks legiravimo metodas vadinamas selektyviu legiravimu.

Panagrinėsime krūvių persiskirstymą selektyviai legiruotoje GaAs/  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sandūroje. Pirmiausia panagrinėkime GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnius, kol nėra elektrinio kontakto tarp jų (1.2.3.1 pav. (a)). Barjerinis  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnis yra legiruotas donorais ir cheminis potencialas yra arčiau donorinių priemaišų energijos lygmens, nei GaAs sluoksnyje. GaAs nors ir nėra legiruotas, tačiau jame yra liekamųjų priemaišų, kurios dažniausiai yra akceptorinės prigimties. Liekamosios priemaišos lemia cheminio potencialo padėtį GaAs sluoksnyje.

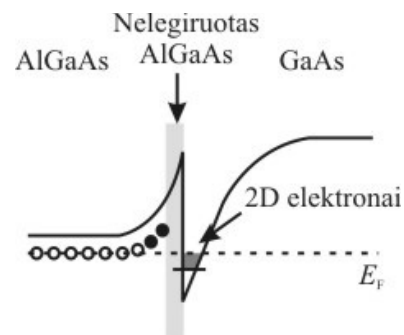


1.2.3.1 pav. Selektviai legiriuoto įvartiarpio GaAs/AlGaAs darinio energijos juostų diagrama: (a) – nesuliesti sluoksniai, (b) - nusistovėjus termodinaminei pusiausvyrai (adaptuota iš [61]).

Sulietus GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnius sandūroje vyksta krūvininkų persiskirstymas. Elektronai iš  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  donorinio lygmens peršoka į GaAs sluoksnį. Likę teigiamai jonizuoti donoriai  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnyje sudaro teigiamo erdvinio krūvio sritį. Tuo pat metu GaAs sluoksnyje elektronai „renkasi“ į potencinę duobę šalia sandūros. GaAs pusėje jonizuoti akceptorai ir potencinėje duobėje lokalizuoti dvimačiai elektronai sudaro neigiamą erdvinio krūvio sritį. Nusistovėjus termodinaminei pusiausvyrai cheminis potencialas sistemoje išsilygina (1.2.3.1 pav. (b)).

Lokaluoti potencinėje duobėje dvimačiai elektronai tampa atskirti erdvėje nuo juos sklaidančių donorinių priemaišų, dėl to jų judrių vertės padidėja ir žemoje temperatūroje (~ 80 K) įgyja vertes artimas  $10^5 \text{ cm}^2/\text{V}\times\text{s}$  [61].

Įterpus tarp  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ir GaAs ploną nelegiriuoto  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  skiriamąjį



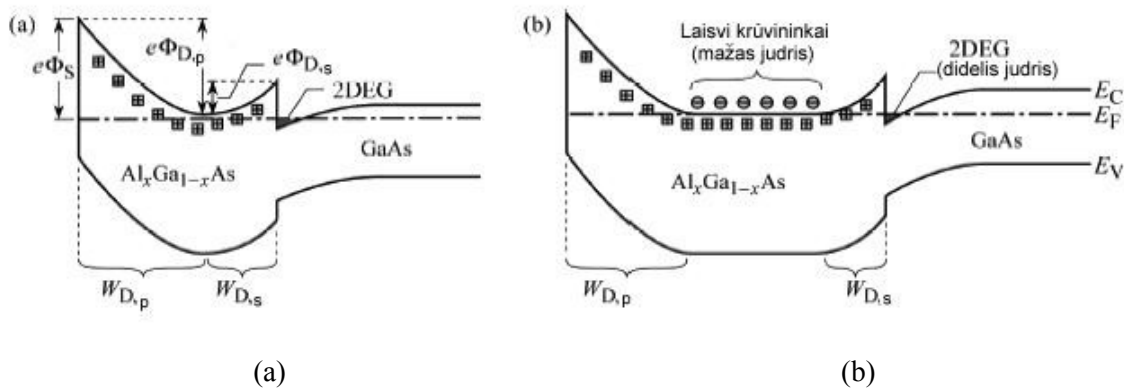
1.2.3.2 pav. Selektviai legiriuotos GaAs/AlGaAs heterosandūros su plonu, nelegiriuoto AlGaAs, sluoksniu potencialinis reljefas (adaptuota [61]).

sluoksnį (*angl.* spacer), dvimačiai elektronai yra erdvėje atitveriami nuo jonizuotų priemaišų (1.2.3.2 pav.), todėl judrio vertės dar padidėja, tačiau sumažėja dvimačių elektronų tankis kanale.

Selektyviai legiruotos GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As įvairiatarpės sandūros krūvininkų judrį gali mažinti atsiradęs lygiagretusis laidumas legiruotame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnyje [5]. Toks laidumas gali atsirasti, jei Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnis nėra pilnai nuskurdintas. 1.2.3.3 pav. (a) pavaizduotas atvejis, kai Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnis yra pilnai nuskurdintas. Matyti, jog jame nėra laisvųjų elektronų, todėl šis sluoksnis neturi įtakos krūvininkų pernašai. 1.2.3.3 pav. (b) pavaizduota sandūra, kurios Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnis nėra pilnai nuskurdintas, todėl jame yra laisvųjų elektronų, dalyvaujančių laidume.

Norint išvengti lygiagretaus laidumo reikia atitinkami parinkti legiruoto Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnio storį. Jis turėtų būti lygus nuskurdintos heterosandūros srities ( $W_{D,p}$ ) ir nuskurdintos išorinės sandūros srities ( $W_{D,s}$ ) pločių sumai:  $d = W_{D,p} + W_{D,s}$ . Jeigu šis sluoksnis bus per storas, atsiras lygiagretus laidumas. Kita vertus ploninant legiruoto Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnį mažėja dvimačiame elektronų kanale esančių elektronų tankis.

Selektyviam barjerinių sluoksnių legiravimui yra naudojami keli metodai:



1.2.3.3 pav. Selektviai legiruota GaAs/AlGaAs heterosandūra: a) be lygiagretaus laidumo; b) su lygiagrečiu laidumu. 2DEG – dvimačių elektronų dujos (adaptuota iš [5]).



homogeniškas barjero legiravimas arba jo legiravimas, vienu ar keliais plonais sluoksniais -  $\delta$  sluoksniais.

Nors elektronai, lokalizuoti potencinėje duobėje, ir yra atskiriami erdvėje nuo jonizuotų priemaišų, tačiau jie išlieka silpname jonizuotų priemaišų kuriamame kuloniniame lauke. Dvimačių elektronų judrio priklausomybės nuo legiruotos srities pločio uždavinys buvo spęstas analitiškai ir skaitmeniškai darbe [62]. Atlikta analizė parodė, kad mažiausias sklaidos potencialas gaunamas, kai legiruotos srities profilis yra labai siauras –  $\delta$  sluoksnis.

### 1.3. Milimetrinių bangų detekcijos mechanizmai

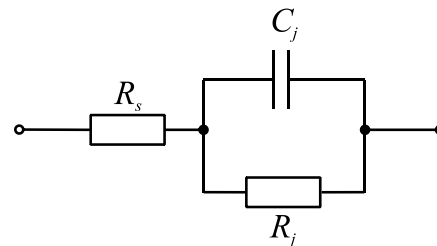
#### 1.3.1. Silpno signalo detekcijos principai

Mikrobangų diodų, kurių veikimo principas pagrįstas pagrindinių krūvininkų termoelektronine emisija per barjerą, voltamperinė charakteristika aprašoma tokia išraiška:

$$I(V) = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (1.3.1.1)$$

čia  $I_s$  – soties srovė,  $q$  – elektrono krūvis,  $n$  – idealumo koeficientas,  $k$  – Bolcmano konstanta,  $T$  – temperatūra. Diodų elektriniai parametrai randami remiantis ekvivalentiniu modeliu, kuris pateiktas 1.3.1.1 pav.  $R_j$  ir  $C_j$  yra atitinkamai sandūros varža ir talpa,  $R_s$  – parazitinė nuosekioji varža susidedanti iš varžos puslaidininkio tūryje ir kontaktinės varžos.

Tarkim, kad diodo įtampa susideda iš dviejų dedamųjų:  $V_0$  – nuolatinės poslinkio įtampos ir  $v$  – nedidelės kintamosios įtampos:



1.3.1.1 pav. Mikrobangų diodo ekvivalentinė grandinė aukštame dažnyje:  $R_s$  – nuosekli varža,  $R_j$  – barjerinė varža,  $C_j$  – barjerinė talpa.

$$V = V_0 + v. \quad (1.3.1.2)$$

Tuomet voltamperinės charakteristikos išraišką galime skleisti Teiloro eilute  $V_0$  aplinkoje:

$$I(V) = I_0 + v \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_0} + \frac{1}{2} v^2 \left. \frac{d^2 I}{dV^2} \right|_{V_0} + \dots, \quad (1.3.1.3)$$

čia  $I_0$  – nuolatinė poslinkio srovė. Rasime pirmojo ir antrojo laipsnio išvestines:

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V_0} = \frac{q}{nkT} I_s \exp\left(\frac{qV_0}{nkT}\right) = \frac{q}{nkT} (I_0 + I_s) = G_d = \frac{1}{R_j}, \quad (1.3.1.4)$$

$$\left. \frac{d^2 I}{dV^2} \right|_{V_0} = \left(\frac{q}{nkT}\right)^2 I_s \exp\left(\frac{qV_0}{nkT}\right) = \left(\frac{q}{nkT}\right)^2 (I_0 + I_s) = \left(\frac{q}{nkT}\right) G_d, \quad (1.3.1.5)$$

čia  $R_j$  yra diodo sandūros varža, o  $G_d$  – diodo dinaminis laidumas. Įsistatę šias išraiškas į lygtį (1.3.1.3), gauname diodo voltamperinės charakteristikos išraišką:

$$I(V) = I_0 + i = I_0 + vG_d + \frac{v^2}{2} \frac{q}{nkT} G_d + \dots, \quad (1.3.1.6)$$

kuri yra vadinama silpno signalo aproksimacija. Įsistatę į šią išraišką amplitudiškai moduluotą sinusinį signalą:

$$v = A[1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega t), \quad (1.3.1.7)$$

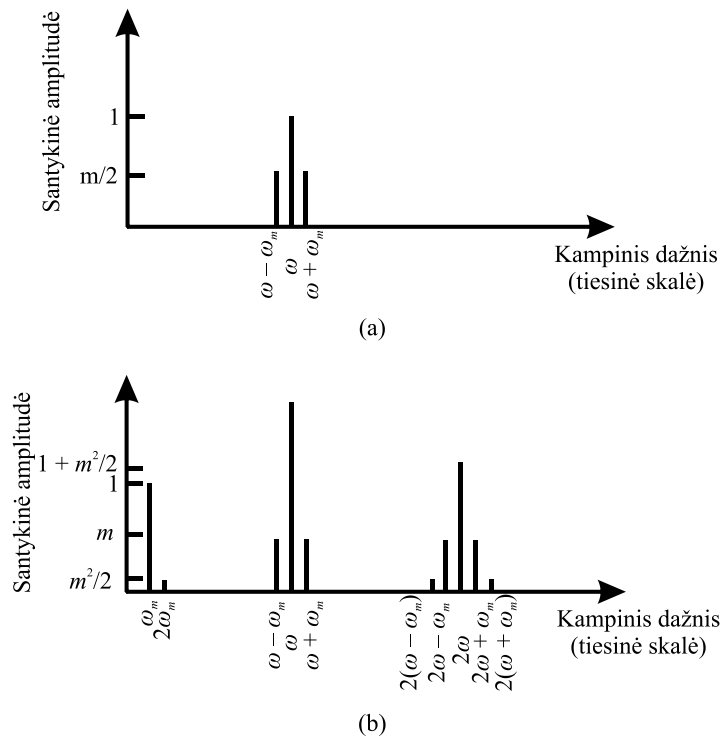
čia  $A$  yra signalo amplitudė,  $\omega_m$  – moduliacijos dažnis,  $\omega$  – signalo dažnis,  $m$  – moduliacijos gylis, galime rasti modeliuojamo mikrobangų diodo spektrinę charakteristiką (1.3.1.2 pav.).

Pirmojo laipsnio narys lygtyje (1.3.1.6) duoda mikrobangų dažnio  $\omega$  ir gretimas  $\omega \pm \omega_m$  spektrines komponentes. Moduliacijos dažnio komponentės ateina iš antrojo ir aukštesniųjų laipsnių narių. Mikrobangų detekcijos metu aukšti dažniai yra nufiltruojami blokuojančiu kondensatoriumi, todėl ant diodo išvadų indukuojama įtampa kintanti moduliacijos dažniu.

Kai įėjimo signalas yra silpnas, antrojo laipsnio narys yra dominuojantis, todėl sakoma, kad diodas veikia kvadratinio detektavimo srityje. Kai įėjimo signalas sustiprėja pakankamai, kad ketvirtojo laipsnio narių indėlis jau tampa svarbus, diodas veikia kvazikvadratinio detektavimo režimu. Tai yra pereinamasis ruožas iki, signalui sustiprėjus pakankamai, kai diodas pradeda veikti tiesinio detektavimo režimu.

Norint palyginti mikrobangų diodus tarpusavyje dažniausiai lyginami tokie parametrai: jautris, kvadratinio detektavimo dinaminis diapazonas, atkirtos dažnis, temperatūrinės parametrų priklausomybės ir triukšminės savybės.

Mikrobangų diodų jautriui apibūdinti naudojami įvairūs dydžiai – tai įtampos jautris, srovės jautris, minimalus detektuojamas signalas, ekvivalentinė



1.3.1.2 pav. Amplitudiškai moduluoto įėjimo signalo spektras (a) detektoriaus išėjimo signalo spektras (b), kai moduliacijos gylis  $m = 0,5$  ir  $\frac{qV}{nkT} = 2$ .

triukšmo galia ir tangentinis jautris. Dažniausiai diodo detekcinėms savybėms įvertinti naudojamas įtampos arba srovės jautris.

Įtampos jautris  $S_u$  yra apibrėžiamas kaip įtampos atviroje grandinėje  $U^{oc}$  ir į diodą krintančios mikrobangų galios  $P_{inc}$  santykis:

$$S_u = \frac{U^{oc}}{P_{inc}}. \quad (1.3.1.8)$$

Jautris matuojamas diodo kvadratinio detektavimo dėsnio srityje, ir matuojamas mV/mW.

Kai diodo banginė varža yra suderinta su mikrobangų perdavimo trakto bangine varža ir amplitudinės moduliacijos dažnis yra gerokai mažesnis už mikrobangų dažnį, diodo silpno signalo įtampos jautris randamas pagal formulę [63]:

$$S_u = \frac{U^{oc}}{P_{in}} = \frac{1}{2} \frac{q}{nkT} \frac{R_j}{1 + \frac{R_s}{R_j} + (\omega C_j)^2 R_s R_j}, \quad (1.3.1.9)$$

čia  $P_{in}$  – diode sugerta mikrobangų galia,  $R_s$  ir  $R_j$  – atitinkamai diodo nuosekloji ir barjerinė varžos,  $C_j$  – diodo barjerinė talpa.

Dažniausiai mikrobangų diodų barjerinė varža yra gerokai didesnė už nuosekliają varžą  $R_j \gg R_s$ . Tuomet žemuose mikrobangų dažniuose jautrio išraiška supaprastėja:

$$S_u = \frac{1}{2} \frac{q}{nkT} R_j. \quad (1.3.1.10)$$

Aukštuose dažniuose  $(\omega C_j)^2 R_s R_j \gg 1$ , ir įtampos jautrio išraišką galima supaprastinti:

$$S_u = \frac{1}{2} \frac{q}{nkT} \frac{1}{(\omega C_j)^2 R_s}. \quad (1.3.1.11)$$

Žemuose dažniuose įtampos jautris priklauso nuo diodo sandūros varžos ir nepriklauso nuo dažnio. Aukštuose dažniuose diodo jautris priklauso nuo barjerinės talpos ir nuosekliosios varžos.

Iš (1.3.1.10) ir (1.3.1.11) lygčių randam mikrobangų diodo atkirtos dažnį  $f_c$ :

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_j R_s}. \quad (1.3.1.12)$$

### 1.3.2. Karštųjų krūvininkų šiluminė ir bigradientinė elektrovaros

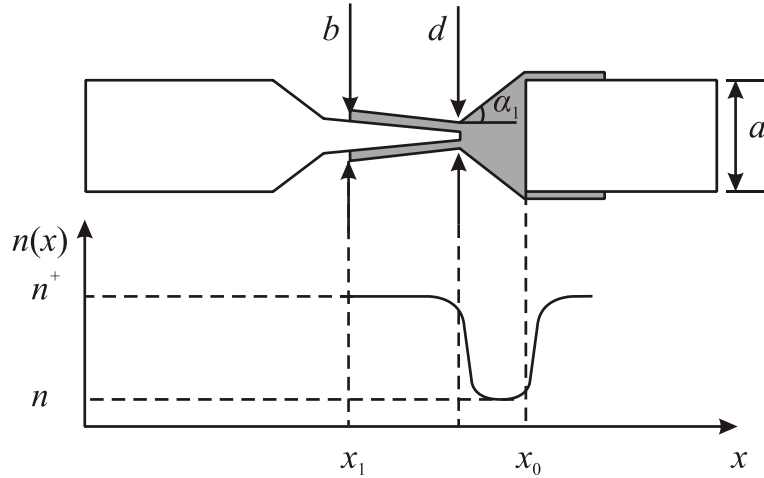
Planarinio nesimetriškai susiaurinto diodo, pavaizduoto 1.3.2.1 pav. veikimo principas yra pagrįstas termoelektrinės ir bigradientinės elektrovaros atsiradimu. Norint aprašyti diodo veikimą mikrobangų elektriniame lauke reikia spręsti fenomenologines srovės tankio, šilumos balanso, šilumos srauto tankio ir Puasono lygtis [44]:

$$j(x) = qn(x)\mu(E) \left[ F(x) + \alpha \frac{dE}{dx} \right] + qD(E) \frac{dn}{dx}, \quad (1.3.2.1)$$

$$j(x)F(x) = n \frac{E - E_0}{\tau_E} + \frac{1}{S(x)} \frac{d}{dx} [Q(x)S(x)], \quad (1.3.2.2)$$

$$Q(x) = \Pi j(x) - \kappa \frac{dE}{dx}, \quad (1.3.2.3)$$

$$\frac{1}{S(x)} \frac{d}{dx} [F(x)S(x)] = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0} [n(x) - N_d(x)], \quad (1.3.2.4)$$



1.3.2.1 pav. Planarinio nesimetriškai susiaurinto diodo konstrukcija (a) ir elektronų tankio pasiskirstymas (b).

čia  $q$  – elektrono krūvis,  $n(x)$  – elektronų tankis,  $E$  – krūvininkų vidutinė energija,  $\mu(E)$  – elektronų judris,  $\alpha$  – tūrinis termoelektorvaros koeficientas,  $D(E)$  – difuzijos koeficientas,  $Q(x)$  – šilumos srauto tankis ir  $\kappa$  – elektronų šiluminio laidumo koeficientas,  $\varepsilon$  ir  $\varepsilon_0$  – atitinkamai puslaidininkio ir vakuumo santykinė dielektrinė skvarba,  $F(x)$  – elektrinio lauko stipris,  $\Pi j(x)$  – elektros srovės perneštas energijos srautas,  $S(x)$  – puslaidininkio skerspjūvio plotas. Koordinačių sistema parinkta taip, kad elektrinis laukas yra lygiagretus koordinatei  $x$ . Skaičiavimai atliekami naudojant kraštines sąlygas:

$$n(x_0) = n = N_d, n(x_1) = n^+ = N_d^+, E(x_0) = E(x_1) = E_0. \quad (1.3.2.5)$$

Elektrovaros jėgos dydis  $n-n^+$  sandūroje priklauso nuo bandinį veikiančio elektrinio lauko stiprio. Nesimetriškai susiaurinto diodo su  $n-n^+$  sandūra jautris mikrobangų galiai randamas:

$$S_u = \frac{U_d}{P} = \frac{2\rho^n \mu \tan \alpha_1}{3hd^2 \ln(1 + \frac{a}{d})} N, \quad (1.3.2.6)$$

čia  $P$  yra bandinyje absorbuota mikrobangų galia,  $U_d$  – detektuota įtampa,  $N$  – narys nusakantis jautrio priklausomybę nuo mikrobangų dažnio [44],  $\rho^n$  – sluoksnio savitoji varža,  $\mu$  – elektronų judris,  $a$  – diodo plotis,  $d$  – diodo

susiaurintos dalies plotis,  $h$  – sluoksnio storis. (1.3.2.6) lygtis rodo, kad norint padidinti jautrį, reikia atitinkamai parinkti diodo konstrukciją, t.y. mažinti diodo kaklelio (suaurintos dalies) plotį, bei puslaidininkinio sluoksnio storį.

Diodo jautris yra susijęs su voltamperinės charakteristikos asimetrija [44]:

$$S_u = \frac{\Delta R}{2U} \frac{N}{(1+s)\tau_E + \tau_M^n}, \quad (1.3.2.7)$$

čia  $\Delta R$  – diferencialinės varžos tiesiogine ir atbuline kryptimi skirtumas,  $U$  – išorinė įtampa,  $\tau_E$  – elektronų energijos relaksacijos trukmė,  $\tau_M^n$  – Maksvelo relaksacijos trukmė. Žemuose dažniuose  $\omega\tau_E \ll 1$ , ir kai laidumo srovė yra didesnė už slinkties srovę, bandinio jautrio sąryšis su VACH asimetrija nepriklauso nuo dažnio:

$$S_u = \frac{\Delta R}{2U}. \quad (1.3.2.8)$$

### 1.3.3. Tarpslėninė elektrovara

Daugiaslėnį puslaidininkį, kuriame laisvųjų krūvininkų pasiskirstymas nėra homogeniškas visame jo tūryje (pavyzdžiui  $n-n^+$  sandūroje), patalpinus į išorinį elektrinį lauką įvyksta krūvininkų persiskirstymas tarp slėnių, kuris lemia tarpslėninės elektrovaros atsiradimą. Kai išorinis elektrinis laukas yra lygiagretus laisvųjų krūvininkų gradientui, tarpslėninė elektrovara aprašoma formule:

$$U_{\text{int||}} = V_k \frac{\overline{D_{\text{int||}}}\mu_0}{D_0\mu_x} \quad (1.3.3.1)$$

Čia  $V_k$  – kontaktinis potencialų skirtumas,  $\mu_0$  – elektronų judris silpname elektriniame lauke,  $D_0$  – elektronų difuzijos koeficientas silpname elektriniame lauke,  $\overline{D_{\text{int||}}}$  tarpslėninis elektronų difuzijos koeficientas,  $\mu_x$  – elektronų judris išilgai pridėto išorinio elektrinio lauko, kuris dviejų slėnių atveju išreiškiamas formule:

$$\mu_x = \frac{(n_0^{(1)} \mu_x^{(1)} + n_0^{(2)} \mu_x^{(2)})}{n} \quad (1.3.3.2)$$

čia  $n_0$  – elektronų tankis skirtinguose slėniuose, o viršutiniai indeksai žymi slėnio numerį;  $n$  – elektronų tankis abiejuose slėniuose.

Taškinio kontakto daugiaslėnio puslaidininkio jautris mikrobangų elektriniam laukui išreiškiamas, kaip tarpslėninės elektrovaros ir krintančios mikrobangų galios santykis:

$$S_u = \frac{U_{\text{int}}}{P_{\text{inc}}} = \frac{U_{\text{int}}}{E^2} \frac{K}{\pi q n \mu_x h r_0^2} \quad (1.3.3.3)$$

čia  $h$  – daugiaslėnio puslaidininkio storis,  $r_0$  – taškinio kontakto spindulys,  $K$  – bandinyje absorbuotos mikrobangų galios santykis su į bandinį krintančia mikrobangų galia.

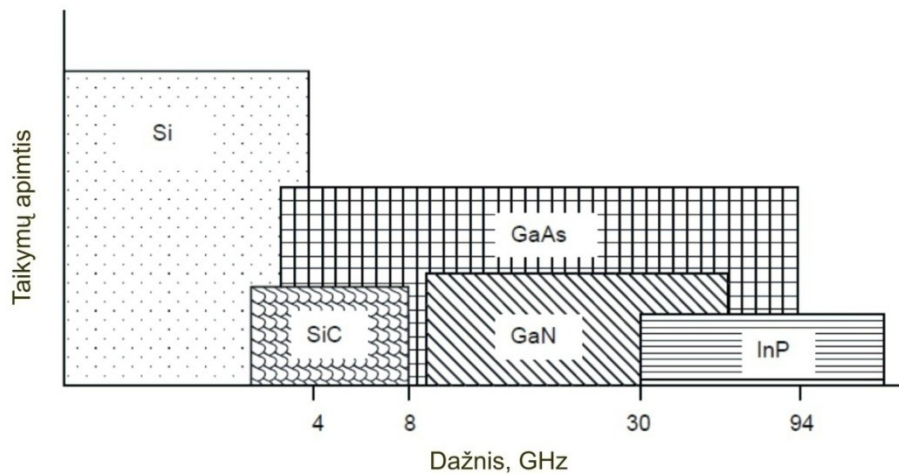


## 2. BANDINIŲ GAMYBA

Mikrobangų ir radijo dažnių elektronikoje dažniausiai naudojami puslaidininkiai yra germanis (Ge), silicis (Si), silicio karbidas (SiC), galio arsenidas (GaAs) ir indžio fosfidas (InP). Elektronų pernaša didele dalimi lemia, kuriame dažnių ruože bus naudojamas konkretus puslaidininkis. 2.1 pav. nurodyta, kokiuose dažnių ruožuose yra naudojami konkretūs puslaidininkiai gaminant mikrobangų integrolius grandynus. Diskretiniai elementai specifiniams taikymams yra gaminami ir aukštesniems dažniams. Dėl gerai išvystytos technologijos ir mažų gamybos kaštų silicis dominuoja visur, kur tik patenkina keliamus reikalavimus. Taikymų dažnių ruožas visiems puslaidininkiams bėgant metams slenka į didesnių dažnių pusę, kadangi atsiranda naujų technologijų, kurios įgalina gauti geresnes elektronines puslaidininkių savybes.

Nors silicis yra plačiausiai naudojamas puslaidininkis elektronikos prietaisuose, egzistuoja puslaidininkiniai junginiai, iš kurių pagamintų mikrobangų elektronikos prietaisų vykdomos funkcijos gerokai lenkia silicio prietaisų fizikines galimybes. Plačiausiai mikrobangų technikoje naudojami puslaidininkiniai junginiai iš III ir V grupės elementų.

GaAs privalumas prieš Si yra apie 6 kartus didesnis elektronų judris [50].



2.1 pav. Puslaidininkinių taikymo mikrobangų elektronikai dažnių ruožai 2001 metų duomenimis (adaptuota iš [65]).

Todėl GaAs yra plačiausiai naudojamas didelio dažnio ir didelės spartos mikrobangų elektronikoje.

Šiame skyriuje aprašomos mūsų tirtų įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As puslaidininkinių sluoksnių auginimo ir mikrobangų diodų gamybos technologijos ir procedūros.

## 2.1. Puslaidininkinių sluoksnių auginimas

Disertacijoje nagrinėjami mikrobangų diodai, kurie buvo pagaminti naudojant GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As įvairiatarpius puslaidininkinius darinius. Šiems dariniams auginti buvo naudojami skystinės epitaksijos ir molekulinio pluoštelio epitaksijos (MPE) metodai. Pagrindiniai bandinių parametrai ir auginimo sąlygos pateiktos lentelėje.

1 lentelė. Disertacijoje nagrinėjamų diodų puslaidininkinių darinių pagrindiniai parametrai.  $N_{D1}$  – donorų tankis GaAs sluoksnyje,  $N_{D2}$  (Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) – donorų tankis barjeriniame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnyje,  $d_D$  – donorais legiruoto Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnio storis,  $d_{sp}$  – nelegiruoto Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As barjero storis.

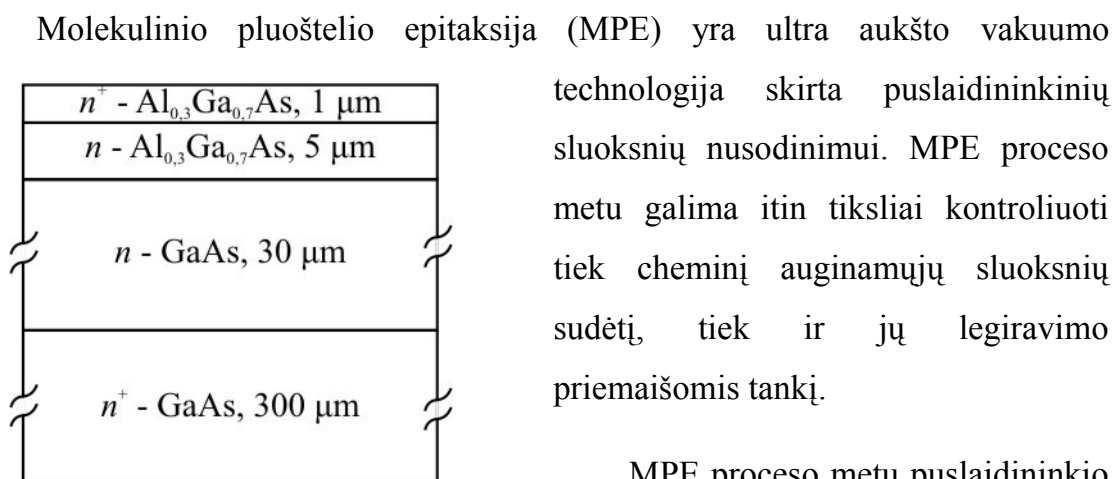
Bandinys	AlAs molinė dalis x barjeriniame Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As sluoksnyje	Donorų tipas	$N_{D1}$ (GaAs), cm <sup>-3</sup>	$N_{D2}$ (Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As), cm <sup>-3</sup>	$d_D$ (nm)	$d_{sp}$ (nm)	Auginimo metodas	Auginimo temp. (°C)
H1	0,25	Si	-	$4 \times 10^{17}$	70	7,5	MPE	600
H2	0,25	Si	-	$3 \times 10^{18}$	8,5	7,5	MPE	600
T1	0,3	Te	$1 \times 10^{15}$	$2 \times 10^{16}$	5000	-	SE	800
V1	0,2	Si	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{16}$	300	-	MPE	600
V2	0,3; 0,25; 0,2; 0,1	Si	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{16}$	300	-	MPE	700

Skystinė epitaksija yra sluoksnių auginimas iš aukštos temperatūros lydalų, todėl dauguma tūrinių puslaidininkinių auginimo technologinių sprendimų gali būti pritaikyta SE. Skystinės epitaksijos metu monokristalinis sluoksnis išsikristalيزuoja iš lydalo, kurio sudėtyje yra auginamoji medžiaga. Sluoksnis

kristalizuojasi padėklo, panardinto į lydalą, paviršiuje, sistemą aušinant pastoviu greičiu.

Pagrindiniai skystinės epitkacijos metodo privalumai yra didelis auginimo greitis (0,1 - 1  $\mu\text{m/s}$  [66]), didelis legirantų pasirinkimas, mažas taškinių defektų tankis ir aukštas auginamų sluoksnių grynumas. Tačiau šiuo metodu negalima užauginti itin plonų epitkasiųjų sluoksnių todėl jis yra nenaudojamas supergardiųjų, kvantinių duobių ir įtemptų sluoksnių auginimui.

Bandinio T1  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  epitaksiniai sluoksniai buvo užauginti SE metodu. Darinio skerspjūvio vaizdas yra pateiktas 2.1.1 pav. Šis darinys buvo panaudotas taškinių mikrobangų diodų gamybai. Epitaksiniai sluoksniai buvo auginami ant paruošto darinio, kurį sudarė laidus  $n^+$ -GaAs padėklas ir epitaksijos iš garų fazės metodu buvo užaugintas 30  $\mu\text{m}$  storio  $n$ -GaAs sluoksnis. Abu GaAs sluoksniai buvo legiruoti telūru, kurio tankis  $n$ -GaAs sluoksnyje buvo  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ , o  $n^+$ -GaAs sluoksnyje  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ . Ant viršaus skystinės epitaksijos metodu  $800^\circ\text{C}$  temperatūroje buvo užaugintas 5  $\mu\text{m}$  storio AlGaAs sluoksnis, kurio donorų (Te) tankis buvo  $10^{16} \text{cm}^{-3}$ . SE metodu buvo užaugintas ir viršutinis 1  $\mu\text{m}$  storio stipriai legiruotas  $n^+$ - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sluoksnis, kurio donorų tankis (Te) buvo  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ .



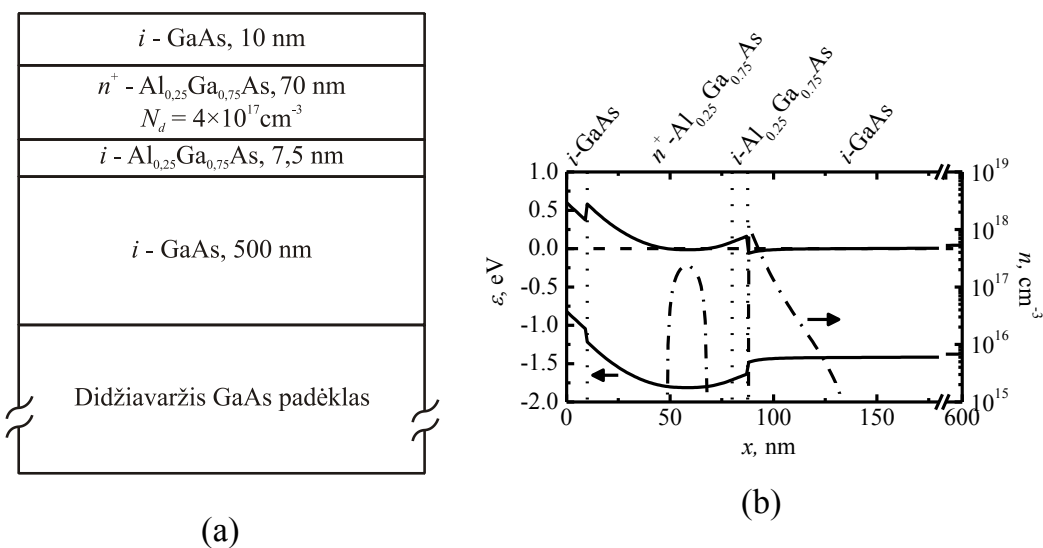
2.1.1 pav. Mikrobangų diodo T1 epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas.

MPE proceso metu puslaidininkio medžiagos ir legirantų atomų srautas

yra nukreipiamas į įkaitintą padėklą, kurio paviršiuje yra formuojamas epitaksinis sluoksnis. Atomų srautas dažniausiai sukuriamas garinant arba sublimuojant kristalinės medžiagos šaltinį. Perjungimui tarp šaltinių auginimo metu naudojamos mechaninės sklendės. Siekiant užtikrinti sluoksnių kokybę auginimas vyksta ultra aukštame vakuume ( $10^{-8}$  Pa [67]). Lėtas auginimo greitis – vienas atominis sluoksnis per sekundę, žema auginimo temperatūra ir mechaninių sklendžių naudojimas leidžia auginti itin staigias sandūras.

Bandiniai H1, H2 ir V1 (2.1.2 pav., 2.1.3pav., 2.1.4pav.) buvo užauginti Braun Submicron Research Center, Izraelyje. Padėklui buvo naudojamas didžiavaržis GaAs, o auginimas vyko  $600^{\circ}\text{C}$  temperatūroje. GaAs ir AlGaAs sluoksniams legiruoti donorais buvo naudojamas silicis.

H1 bandinio sluoksniai buvo užauginti naudojant selektyvaus legiravimo metodą. Pirmiausiai ant padėklo buvo užaugintas 500 nm storio savojo laidumo *i*-GaAs sluoksnis. Santykinai didelis sluoksnio storis parinktas ne atsitiktinai – ant padėklo auginamas storas savojo laidumo GaAs sluoksnis veikia kaip buferis, kuris stabdo priemaišų difuziją iš padėklo į auginamus epitaksinius sluoksnius,



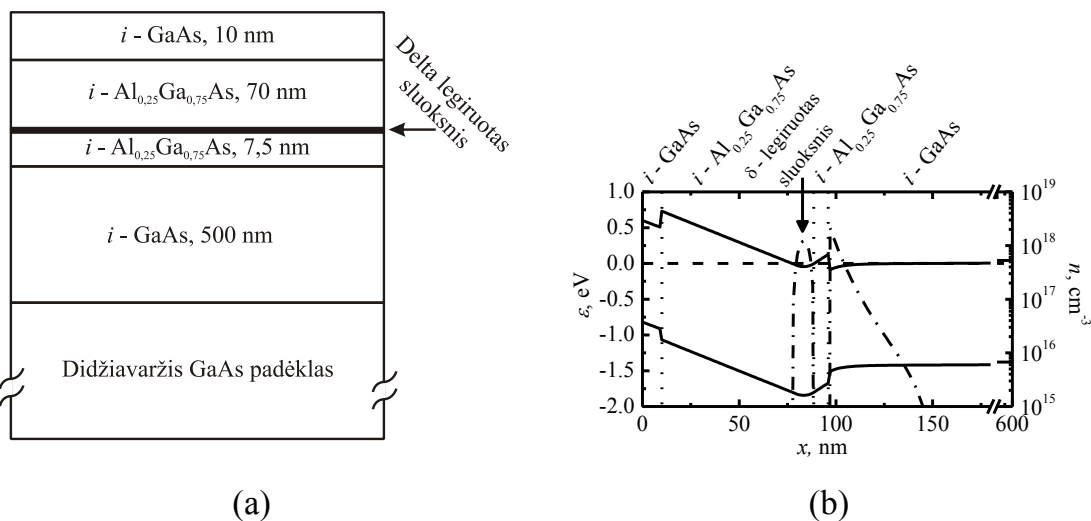
2.1.2 pav. Mikrobangų diodo H1 epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas (a) ir energijos juostų diagrama (b).

sumažina kristalografinių defektų tankį ir leidžia auginti sluoksnius su lygiu paviršiumi.

Ant viršaus auginamas 7,5 nm storio nelegiruotas  $i\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  sluoksnis, tuomet 70 nm storio siliciu legiruotas  $n^+\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  sluoksnis, kurio priemaišų tankis buvo  $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Viršutinis savojo laidumo 10 nm storio  $i\text{-GaAs}$  sluoksnis apsaugo  $n^+\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  sluoksnį nuo savaiminio oksidavimosi ore. H1 bandinio epitaksinių sluoksnių schematinis skerspjūvio vaizdas ir energijos juostų diagrama pavaizduoti 2.1.2 pav.

Šiame darbe aprašomiems bandiniams energijos juostų diagramos gautos skaitmeniškai sprendžiant Puasono (*Poisson*) lygtį [68] darbe aprašytu metodu. Skaičiavimai buvo atlikti laikant, kad bandiniai yra kambario temperatūroje, visos priemaišos jonizuotos ir paviršinis potencialas lygus 0,6 V.

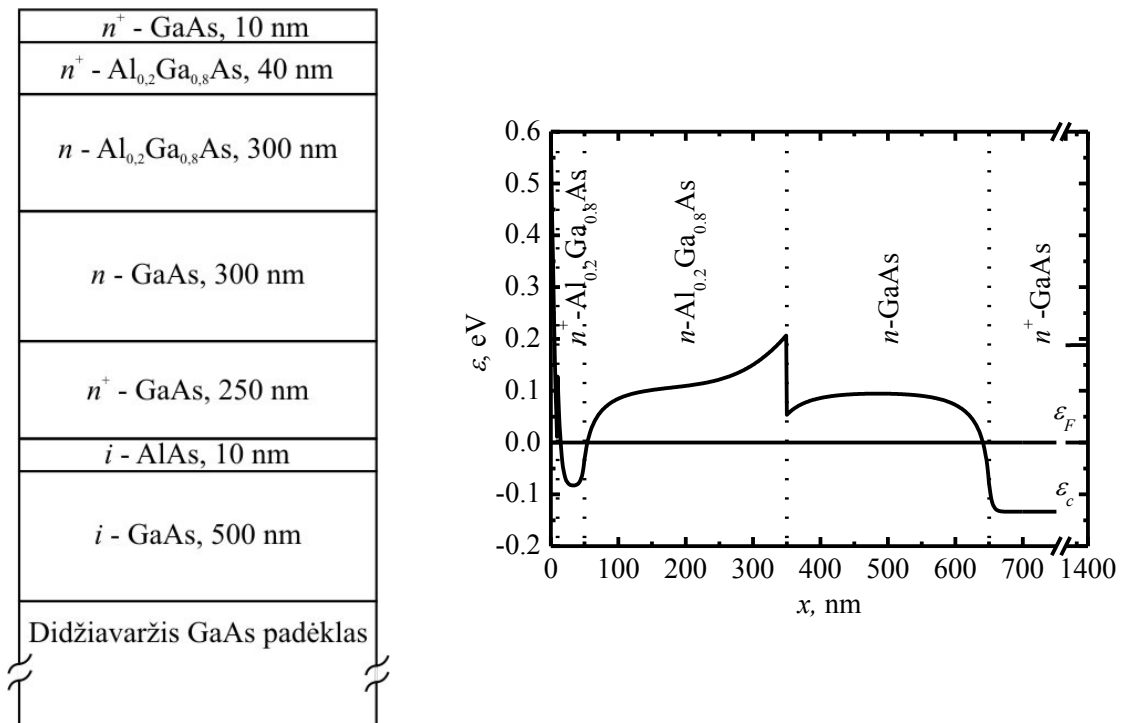
Puslaidininkinių sluoksnių auginimo seka bandiniui H2 buvo panaši kaip ir bandiniui H1 išskyrus tai, kad  $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  barjerinis sluoksnis šiame darinyje buvo legiruotas ne homogeniškai, o lokaliai įterpiant donorų  $\delta$ -sluoksnį. Barjerinio sluoksnio auginimas prasidėjo nuo savojo laidumo, 7,5 nm storio  $i\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$



2.1.3 pav. Mikrobangų detektoriaus H2 epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas (a) ir energijos juostų diagrama (b).

sluoksnio užauginimo, ant kurio buvo užaugintas plonas stipriai legiruotas  $n^+$ - $\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  sluoksnis, kurio donorų tankis buvo  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , o ant viršaus savojo laidumo, 70 nm storio,  $i\text{-Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$  sluoksnis. H2 mikrobangų detektoriaus epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas ir energijos juostų diagrama pavaizduotos 2.1.3 pav.

Įvairiatarpiai GaAs/ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  dariniai V1, užauginti MPE metodu buvo panaudoti planarinių įvairiatarpių mikrobangų diodų, kuriuose krūvininkų pernaša vyksta statmenai sandūrai, gamybai. V1 dariniams ant didžiavaržio GaAs padėklo pirmiausiai buvo užaugintas 500 nm storio savojo laidumo  $i\text{-GaAs}$  sluoksnis. Vėliau užaugintas plonas, 10 nm storio,  $i\text{-AlAs}$  sluoksnis, kuris naudojamas kaip stabdantis ėsdinimą sluoksnis. Stipriai legiruotas  $n^+$ -GaAs sluoksnis, kurio storis 250 nm ir legiravimo tankis  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , reikalingas suformuoti ominiame kontaktui iš GaAs pusės. Prietaiso aktyviają sritį sudaro siliciu legiruoti 300 nm storio  $n\text{-GaAs}$  ir  $n\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sluoksniai, kurių legiravimo tankis  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

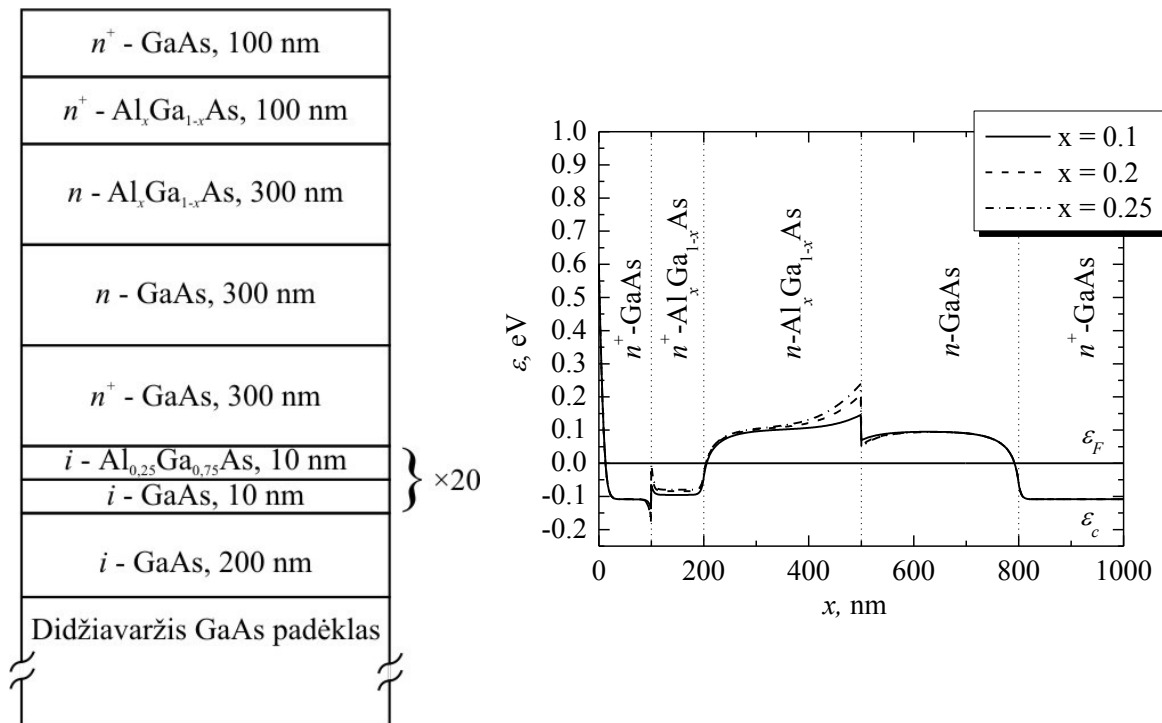


2.1.4 pav. Mikrobangų detektoriaus V1 epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas (a) ir energijos juostų diagrama (b).

Stipriai legiruotas  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnis, kurio storis 40 nm, o legiravimo tankis  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , reikalingas ominiame kontaktui iš Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As pusės sukurti. Viršutinis stipriai legiruotas  $n^+$ -GaAs sluoksnis, kurio legiravimo tankis buvo  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , reikalingas apsaugoti Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As sluoksnį nuo savaiminio oksidavimosi ore.

Puslaidininkiniai dariniai diodams V2 buvo užauginti Micro- and Nanotechnology Center, Švedijoje. Buvo užauginta serija įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių, kurie skyrėsi tik AlAs moline dalimi  $x$  Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnyje, todėl dėl paprastumo visą bandinių seriją vadinsime vienu vardu V2. Šie dariniai buvo panaudoti planarinių įvairiatarpių mikrobangų diodų, kuriuose krūvininkų pernaša vyksta statmenai sandūrai, gamybai.

Pirmiausiai ant didžiavaržio GaAs padėklo buvo užaugintas savojo laidumo, 200 nm storio  $i$ -GaAs sluoksnis. Tuomet užauginta GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As supergardelė. Šie du sluoksniai sudaro buferį tolesniam epitaksinių sluoksnių



2.1.5 pav. Mikrobangų diodų V2 epitaksinių sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas (a) ir energijos juostų diagrama (b).

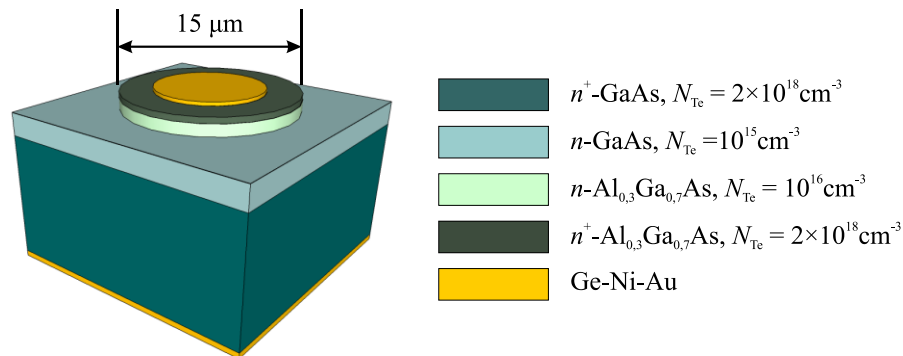
auginimui. Toliau užaugintas 300 nm storio Si legiruotas  $n^+$ -GaAs sluoksnis, kurio priemaišų tankis buvo  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Jis reikalingas apatiniam ominiui kontaktui suformuoti. Tuomet užaugintas Si legiruotas 300 nm storio  $n$ -GaAs sluoksnis, su priemaišų tankiu  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Ant jo užaugintas Si ( $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ) legiruotas 300 nm storio  $n\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnis. Pastarieji du sluoksniai sudaro mikrobangų diodo aktyviają sritį. Stipriai Si legiruotas ( $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )  $n^+\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnis skirtas viršutiniam ominiui kontaktui.

Viršutinis Si legiruotas  $n^+$ -GaAs sluoksnis, kurio legiravimo tankis  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , skirtas apsaugoti  $n^+\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnį nuo savaiminio oksidavimosi ore. V2 darinių epitaksiniai sluoksniai buvo auginami  $700^\circ\text{C}$  temperatūroje. Sluoksnių skerspjūvio schematinis vaizdas ir energijos juostų diagrama pavaizduotos 2.1.5 pav.

## 2.2. Mikrobangų diodų gamyba

Mikrobangų diodų gamybai buvo naudojamos cheminio ėsdinimo, terminio metalų garinimo, greito įdeginimo, polimerų centrifuginio dengimo ir mechaninio poliravimo technologijos.

Mikrobangų diodų T1 gamybos procesas prasidėjo ominių kontaktų formavimu. I-iosios fotolitografijos metu buvo atidengtos sritys viršutiniam ominiui kontaktui. Tuomet buvo termiškai užgarinti Ge-Ni-Au metalai ant abiejų



2.2.1 pav. Taškinio įvairiatarpio diodo T1 schematinis vaizdas.



plokštelės pusių. Termiškai įdeginus 420°C temperatūroje, vandenilio atmosferoje buvo gauti ominiai kontaktai. II-osios fotolitografijos metu buvo uždengtos metalizuotos sritys mezos ėsdinimui. Chemiškai buvo nuėsdinti viršutiniai  $n^+$ - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  ir  $n\text{-Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sluoksniai. Pagamintų bandinių T1 schematinis vaizdas pateiktas 2.2.1 pav.

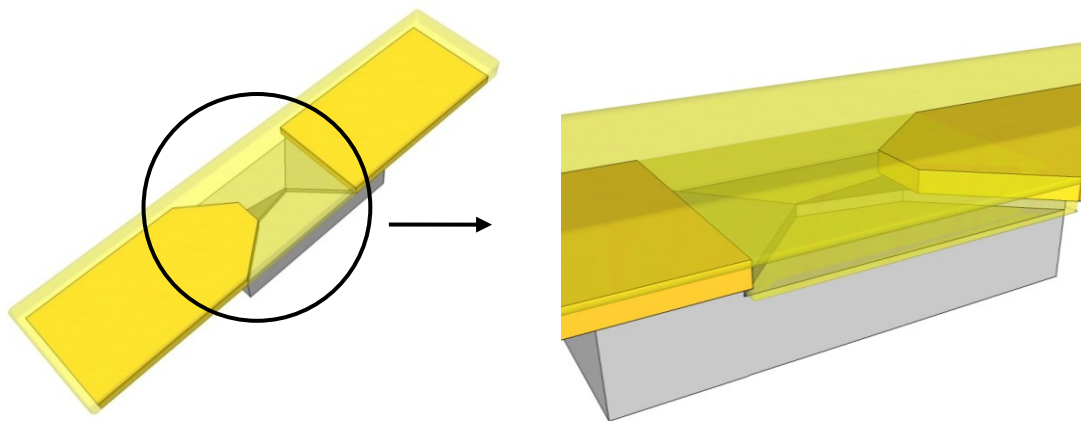
Mikrobangų diodų H1 ir H2 gamyba prasidėjo mezos formavimu. I-osios fotolitografijos metu buvo atidengtos sritys tarp nesimetriškai susiaurintų mežų. Tuomet atliekamas savojo oksido sluoksnio šalinimas. Visų III-V grupės puslaidininkių paviršiuje formuojasi oksidas, kurio storis ir sudėtis priklauso nuo buvimo laiko atmosferoje, ir jos sudėties. Puslaidininkio savas oksido sluoksnis gali reaguoti su ėsdinančia rūgštimi visiškai skirtingai negu oksidavimo metu susidaręs oksido sluoksnis, todėl pradinis ėsdinimo greitis gali būti nenuspėjamas, nes jis priklausys nuo bandinio istorijos ir gali būti skirtingas įvairiose tos pačios plokštelės vietose, todėl prieš kiekvieną cheminio ėsdinimo procesą vykdomas savojo oksido šalinimas  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:20$  tirpale.

Po oksido šalinimo vykdomas cheminis puslaidininkinių sluoksnių ėsdinimas iki nelegiruoto AlGaAs sluoksnio. Šis ėsdinimo metodas yra pats pigiausias ir lengviausiai įgyvendinamas lyginant su kitais (plazminis, jonų pluoštelio ir kt.) ėsdinimo metodais, tačiau kaip ir kiti turi savo privalumų ir trūkumų. Pasirenkant ėsdinimo metodą svarbu atsižvelgti į ėsdinimo greitį, tolygumą, selektyvumą, profilį ir formuojamo darinio matmenis bei paviršiaus apgadimą, kuris gali pabloginti elektronines prietaiso savybes. Pagrindinis cheminio ėsdinimo privalumas yra labai mažas pakenkimas paviršiui, todėl gaunamos labai geros paviršiaus elektroninės savybės. Tačiau cheminio ėsdinimo metu yra neišvengiamas pasiėsdinimas po maskuojančiu sluoksniu. Šis trūkumas tampa kritiniu, kai formuojamas darinys yra labai mažas ir reikalinga itin tiksli matmenų kontrolė. Kiti trūkumai, susiję su proceso kontrole yra ėsdinimo greičio priklausomybė nuo temperatūros, cheminių reagentų susimaišymo ėsdiklyje

laipsnio, bei maskuojančios kaukės orientacijos puslaidininkio kristalografinių plokštumų atžvilgiu. Nominalūs diodų H1 ir H2 išėsdintos mezos sąsmaukos pločiai buvo 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$  ir 3  $\mu\text{m}$ .

II-osios fotolitografijos metu atidaromi langai ominių kontaktų formavimui. Dažniausiai ominiai kontaktai formuojami įterpiant stipriai legiruotą sluoksnį į puslaidininkio ir metalo kontaktą. Tokį stipriai legiruotą sluoksnį galima sudaryti naudojant difuziją, jonų implantavimą, ar užauginant epitaksinį sluoksnį prieš nusodinant metalus. Kitas ir populiariausias metodas yra stipriai legiruoto puslaidininkinio sluoksnio sudarymas kontaktų paruošimo metu. Šiuo atveju puslaidininkio paviršiuje nusodinami metalų, iš kurių vienas yra tinkamas puslaidininkio legirantas, sluoksniai, ir vėliau, greito metalų įdeginimo metu, vyksta puslaidininkio legiravimas. Kontaktų savybės priklauso nuo pasirinktų metalų, jų sluoksnių storių, metalų nusodinimo sąlygų, puslaidininkio paviršiaus paruošimo ir įdeginimo procedūros. Nuo pat šeštojo dešimtmečio, kai buvo atrastas Gano (*Gunn*) efektas, iki dabar ominiams kontaktams ant  $n$  tipo GaAs sudaryti plačiausiai naudojami yra aukso (Au), germanio (Ge) ir nikelio (Ni) sluoksniai [69]. Terminiškai užgarinus Ni/Au/Ge/Ni/Au metalų sluoksnius ir atlikus greitą metalinių kontaktų įdeginimą 430° temperatūroje  $\text{H}_2\text{-N}_2$  dujų atmosferoje buvo suformuoti diodų ominiai kontaktai, bei stipriai legiruota viena sąsmaukos pusė.

III-iosios fotolitografijos metu buvo uždengtas visas diodas ir vykdomas gilus ėsdinimas, kuriam naudojamas tas pats ėsdiklis kaip ir mežų ėsdinimui. Po šio proceso ant puslaidininkio paviršiaus centrifūga užnešamas poliimidai, kuris imidizuojamas pakaitinus iki 300 °C temperatūros ore. Tuomet puslaidininkio padėklas ploninamas iš pradžių mechaniškai, paskui chemiškai. IV-osios fotolitografijos metu buvo atidengti langai metaliniams detektorių kontaktams iš padėklo pusės.



2.2.2 pav. H1 ir H2 mikrobangų diodų schematinis vaizdas.

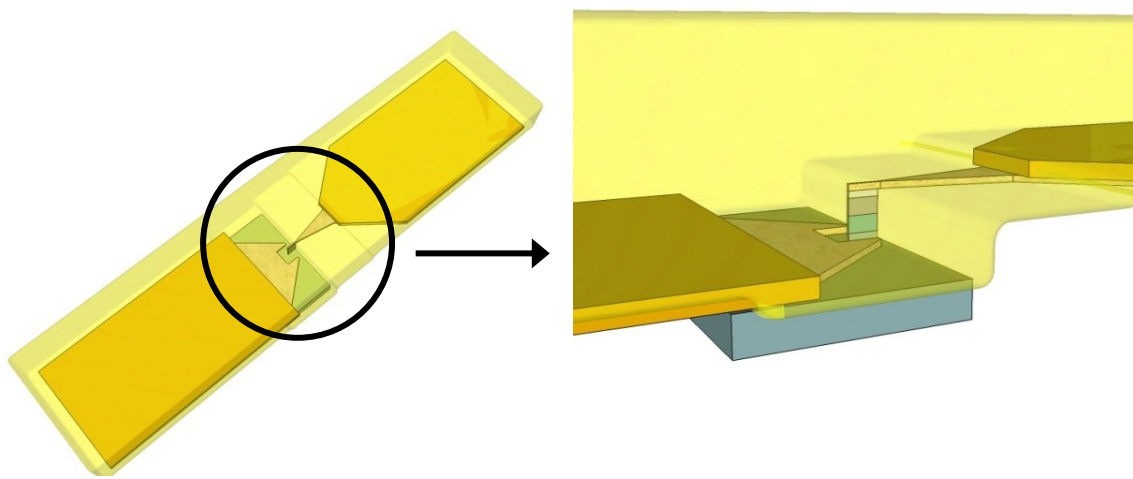
Po šių technologinių procesų buvo gauta mikrobangų diodų matrica ant lanksčios poliimido plėvelės. Vieno diodo matmenys buvo  $500 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ .

Tyrimams detektoriai mechaniškai atskiriami po vieną. H1 ir H2 mikrobangų detektorių schematinis vaizdas pateiktas 2.2.2 pav. Šių detektorių ominiai kontaktai yra tame pačiame epitaksiniam sluoksnyje, todėl krūvininkų pernaša vyksta išilgai puslaidininkinių sluoksnių.

Mikrobangų diodų V1 ir V2 gamyba prasidėjo nuo ominių kontaktų formavimo. I-osios fotolitografijos metu atidaromi langai fotoreziste tose vietose, kur bus formuojamas apatinis ominis diodo kontaktas. Pašalinamas oksidas ir viršutiniai puslaidininkiniai sluoksniai nuėsdinami chemiškai iki apatinio kontaktinio sluoksnio ( $n^+$ -GaAs) naudojant neselektyvųjį ėsdiklį  $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:50$ . Termiškai užginami Ni, Ge ir Au metalų sluoksniai. Fotorezistas su užgarintu metalu nukeliamas organiniame tirpiklyje. II-oji fotolitografija atidaro langus fotoreziste viršutiniam ominiam kontaktui. Termiškai  $3 \times 10^{-6}$  torr vakuume užginami Ni/Au/Ge/Ni/Au metalų sluoksniai ir atliekamas metalizuoto fotorezisto nukėlimas. Užgarintų metalų Ni/Au/Ge/Ni/Au sluoksnių storiai V1 bandiniams buvo atitinkamai 10 nm/ 200 nm/ 100 nm/ 70 nm/ 200 nm. V2 bandiniams Ni/Ge/Au metalų sluoksniai užginami naudojant elektroninio

spindulio garinimą. Užgarintų metalų sluoksnių storiai buvo atitinkamai 20 nm/52 nm/100 nm. Ominiams kontaktams suformuoti buvo atliktas greitas kontaktų įdeginimas 430°C temperatūroje inertinių dujų atmosferoje ( $N_2:H_2$ ). III-oji fotolitografija atidaro langus fotoreziste ir termiškai užgarinus 300 nm Au sluoksnį bei nukėlus metalizuotą fotorezistą suformuojami metaliniai diodo kontaktai. IV-oji fotolitografija skirta diodų mezadarinių formavimui, nuėsdinant viršutinius puslaidininkinius sluoksnius iki apatinio kontaktinio sluoksnio. V-osios fotolitografijos metu fotoreziste atidaromi langai žymėms ėsdinti, pagal kurias nustatomas puslaidininkinio sluoksnio storis plokštelės ploninimo metu. Šios žymės taip pat naudojamos sutapatinant fotošablona su diodo piešiniu paskutinės fotolitografijos metu. Žymių ėsdinimui naudojamas neselektyvus ėsdiklis. Ėsdinimo gylis siekia (3÷5)  $\mu m$ . Po to viršutinė plokštelės pusė dengiama poliimidu ir ji klijuojama ant stiklinio padėklo. Puslaidininkinis padėklas ploninamas iš pradžių mechaniškai, o po to chemiškai iki sutapatinimo žymių pasirodymo. Selektiviame ėsdiklyje šalinamas padėklas.

VI-oji fotolitografija uždengia diodų aktyviasias sritis ir po cheminio ėsdinimo gauname užbaigtą suformuotą diodo darinį ant poliimido plėvelės. Po šių technologinių procesų gaunama mikrobangų diodų matrica ant lanksčios



2.2.3 pav. Mikrobangų diodų V1 ir V2 schematinis vaizdas.

poliimido plėvelės. Tyrimams detektoriai atskiriami po vieną. Mikrobangų detektorių V1 ir V2 schematinis vaizdas pateiktas 2.2.3 pav. Lyginančio įvairiatarpio GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As detektoriaus ominiai kontaktai yra suformuoti skirtinguose epitaksiniuose sluoksniuose, todėl krūvininkų pernaša vyksta statmenai epitaksiniam sluoksniams. Aktyviosios srities plotą lemia ne tik kaklelio plotis, bet ir viršutinio kontakto ilgis. Pagamintų diodų nominalūs kaklelių pločiai buvo nuo 1 μm iki 4 μm.

Po šių technologinių procesų buvo gauta mikrobangų detektorių matrica ant lanksčios poliimido plėvelės. Vieno diodo matmenys buvo 500 μm × 100 μm.

### **Skyriaus pagrindiniai rezultatai**

- Skystinės epitaksijos metodu užaugintas įvairiatarpis GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinys, kuris buvo panaudotas taškinių mikrobangų diodų T1 gamybai.
- MPE metodu buvo užaugintas įvairiatarpis selektyviai legiruotas GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinys, kurio barjeras buvo legiruotas homogeniškai. Naudojant šį darinį buvo pagaminti planariniai, nesimetriškai susiaurinti mikrobangų diodai H1.
- MPE metodu buvo užaugintas įvairiatarpis selektyviai legiruotas GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinys, kurio barjeras buvo legiruotas įterpiant donorų δ-sluoksnį. Naudojant šį darinį buvo pagaminti planariniai, nesimetriškai susiaurinti mikrobangų diodai H2.
- Molekulinio pluoštelio epitaksijos metodu buvo užaugintas GaAs/Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As darinys, kuris buvo panaudotas planarinių įvairiatarpių mikrobangų diodų V1 gamybai.
- Molekulinio pluoštelio epitaksijos metodu buvo užauginti GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As dariniai, turintys skirtingą AlAs molinę dalį  $x$  trinariame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As junginyje:  $x = 0,3$ ,  $x = 0,25$ ,  $x = 0,2$  ir  $x = 0,1$ . Panaudojus šiuos darinius buvo pagaminta serija planarinių įvairiatarpių mikrobangų diodų V2.

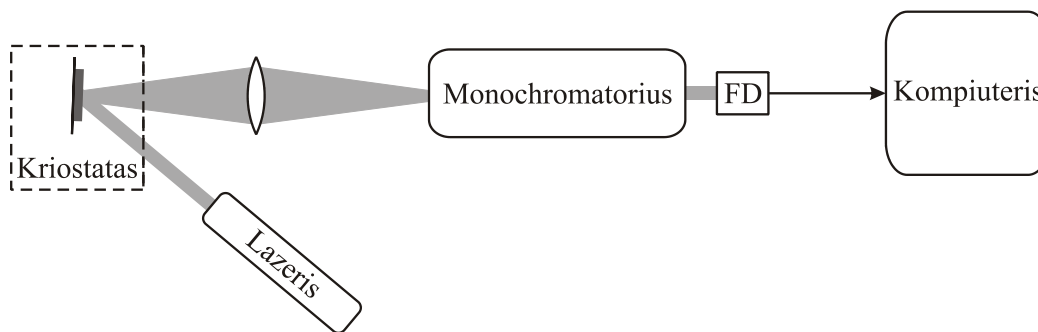
### **3. BANDINIŲ CHARAKTERIZAVIMAS**

Šiame skyriuje pateikiami GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių charakterizavimo optiniais ir elektriniais metodais rezultatai. Sluoksnių kokybė ir sudėtis buvo tiriamos optiniais metodais: nuostoviosios fotoluminescencijos ir laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo. Pagamintų detektorinių diodų elektriniai parametrai buvo įvertinti išmatavus jų voltamperines charakteristikas.

#### **3.1. Nuostoviosios fotoluminescencijos tyrimas**

Fotoluminescencija (FL) yra optinis, neardantis puslaidininkinių sluoksnių kokybės tyrimo metodas. Eksperimento metu yra registruojama puslaidininkinių šviesos emisija rekombinuojant optiškai sužadintiems krūvininkams. Puslaidininkio FL spektras susideda iš daug atskirų spektrinių linijų, kurių energija priklauso nuo pradinės ir galinės krūvininko būsenos energijos. Šis metodas leidžia identifikuoti seklias priemaišas dideliu tikslumu. Nors priemaišinės FL intensyvumas yra proporcingas priemaišų tankiui, tačiau kiekybiškai iš to nustatyti priemaišų tankį yra sunku, nes skirtingų bandinių FL signalas gali stipriai skirtis dėl nespindulinės rekombinacijos per gilius centrus puslaidininkio paviršiuje ir tūryje. Informacija apie tiriamo puslaidininkio kokybę gaunama matuojant FL spektrus skirtingomis sąlygomis, t.y. keičiant temperatūrą, žadinimo energiją, žadinančios spinduliuotės intensyvumą ir kt.

Nuostoviosios FL matavimo schema pateikta 3.1.1 pav. Krūvininkų žadinimui naudojamas nuolatinės veikos Ar jonų lazeris. Lazerio spindulys nukreipiamas nedideliu kampu į bandinio paviršių. Pagrindinės lazerio spinduliuotės linijos yra 458 – 515 nm bangų ilgio intervale, iš kurių intensyviausios yra 488 ir 514,5 nm linijos. Tai atitinka fotonų energiją nuo 2,4 iki 2,7 eV.

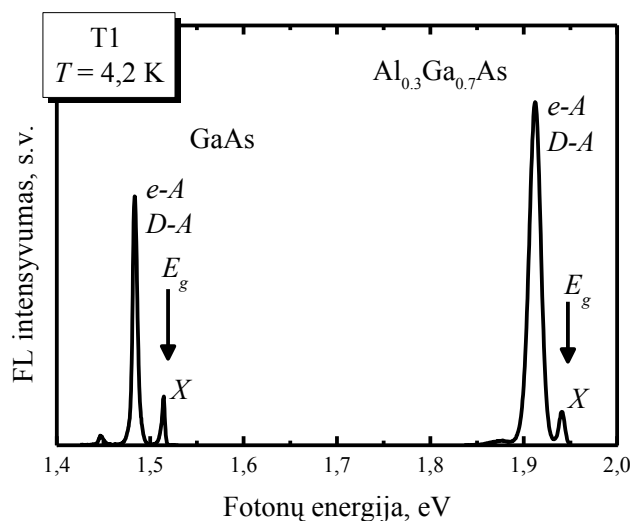


3.1.1 pav. Nuostoviosios fotoluminescencijos matavimo schema.

Bandiniai talpinami į Janis firmos uždarojo ciklo helio optinį kriostatą SHI-4, kuriame bandiniai atšaldomi iki skystojo helio temperatūros  $\sim 3,6$  K. Pasinaudojus kaitinimo krosnelės valdymo įrenginiu temperatūrą galima keisti nuo 3,6 K iki 300 K.

Iš bandinio surinkta šviesa per lęšį nukreipiama į monochromatoriaus įėjimo plyšį. Fotoluminescencijos signalas išskiriamas naudojant pilnai automatizuotą HORIBA Jobin Yvon monochromatorių FHR-1000. FL detekuojama termoelektriškai šaldomu Hamamatsu firmos GaAs fotodaugintuvu, veikiančiu fotonų skaičiavimo režimu. Fotonų skaičiavimas atliekamas Becker & Hickl firmos dviejų kanalų modulių PMS-400A. Sužadinimo intensyvumas buvo keičiamas naudojant neutralius stiklinius filtrus.

Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinio, skirto taškinio diodo T1 gamybai, FL spektras, išmatuotas 4,2 K temperatūroje pavaizduotas 3.1.2 pav. FL spektras susideda iš dviejų sričių. Žemesnių energijų skalėje yra spinduliuotė susijusi su GaAs sluoksniais, o aukštesnių energijų skalėje – su Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksniais. Pačios intensyviausios smailės abiejose dalyse yra siejamos su laisvųjų elektronų bei elektronų, surištų su donorais rekombinacija per akceptorines priemaišas, kurios 3.1.2 pav. pažymėtos atitinkamai ( $e-A$ ) ir ( $D-A$ ). Ryškios eksitonų smailės, pažymėtos  $X$ , abiejose dalyse liudija apie gerą GaAs ir Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnių kokybę. GaAs ir Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As draudžiamosios energijos tarpo vertės skysto helio



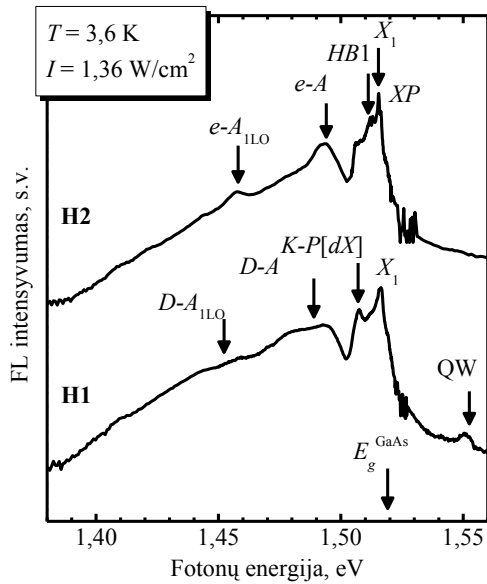
3.1.2 pav. Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinio T1 fotoluminescencijos spektras, išmatuotas 4,2 K temperatūroje.

temperatūroje buvo rekonstruotos iš eksitoninės smailės padėties, įskaičius eksitono ryšio energiją.

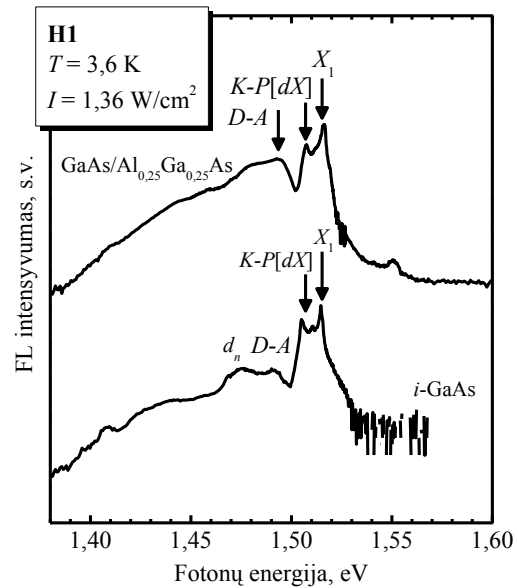
Gauti rezultatai gerai sutapo su kitų autorių eksperimentiškai nustatytais vertėmis [70]:  $E_g(\text{GaAs}) = 1,519 \text{ eV}$  ir  $E_g(\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}) = 1,947 \text{ eV}$ .

Selektyviai legiruotų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinių, skirtų H1 ir H2 bandinių gamybai, FL spektrai, išmatuoti 3,6 K temperatūroje, naudojant lazerinio sužadavimo intensyvumą  $I = 1,36 \text{ W/cm}^2$ , pavaizduoti 3.1.3 pav. Spektrinių linijų pozicijų vietos buvo apskaičiuotos teoriškai ir palygintos su eksperimentiniais rezultatais. Intensyviausia FL linija  $X_1$  priskiriama laisvojo eksitono rekombinacijai [71].  $e-A$  yra laisvųjų elektronų rekombinacija su skylėmis, surištomis su liekamąja anglies priemaiša [72].  $e-A_{\text{ILO}}$  yra  $e-A$  linijos pirmoji fononinė replika.  $D-A$  elektronų šuoliai iš donorinių lygmenų į akceptorinius lygmenis [73].  $K-P[\text{dX}]$  – su defektais surišų eksitonų rekombinacija, vadinama Künzel ir Ploog ruožu [74]. Smailė  $HB1$ , kuri buvo stebėta ir H1, ir H2 darinyje, yra būdinga selektyviai legiruotoms įvairiatarpėms sandūroms ir priskiriama 2D





3.1.3 pav. H1 ir H2 darinių fotoluminescencijos spektrai. Spektrai yra sunormuoti ir perstumti vertikaliajoje skalėje.

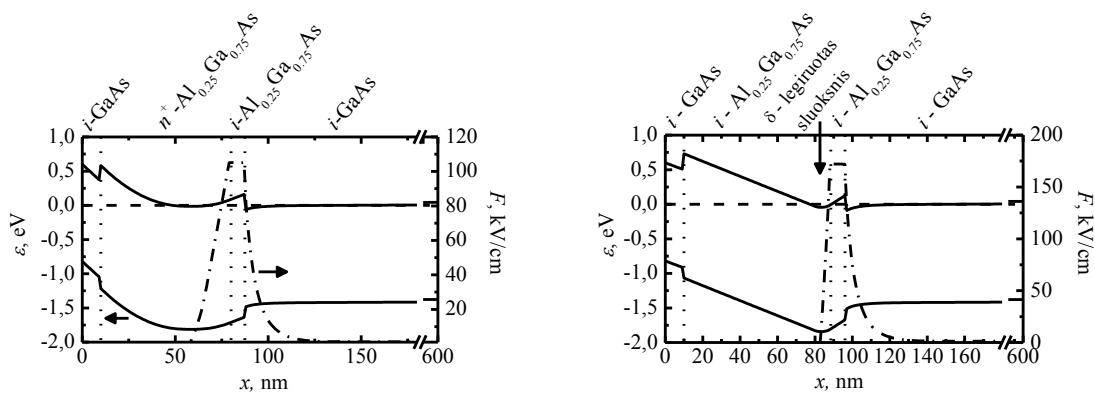


3.1.4 pav. H1 darinio ir *i*-GaAs sluoksnio, gauto chemiškai nuėsdinus viršutinius epitaksinius sluoksnius fotoluminescencijos spektrai. Spektrai yra sunormuoti ir perstumti vertikaliajoje skalėje.

eksitonams [75, 76]. GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinių FL spektrai buvo išmatuoti chemiškai nuėsdinus viršutinius sluoksnius iki savojo laidumo *i*-GaAs sluoksnio. Sugretinus įvairiatarpių darinių ir *i*-GaAs spektrus buvo atskleisti nauji šių darinių ypatumai. GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinio H1 ir *i*-GaAs sluoksnio, gauto nuėsdinus viršutinius *i*-GaAs (10 nm), *n*<sup>+</sup>-Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As (70 nm) ir *i*-Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As (7,5 nm) darinio epitaksinius sluoksnius, FL spektrai išmatuoti 3,6 K temperatūroje ir naudojant 1,36 W/cm<sup>2</sup> žadinimo intensyvumą pavaizduoti 3.1.4 pav. Gauti rezultatai parodė, kad GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinyje išauga eksitoninės spinduliuotės intensyvumas ir susiaureja FL linija lyginant su *i*-GaAs sluoksniu.

Eksitoninės linijos intensyvumo sustiprėjimą įvertinome įvedę sustiprėjimo koeficientą:

$$k_x = \frac{I_H(X)}{I_i(X)} \quad (3.1.1)$$



3.1.5 pav. H1 darinio (a) ir H2 darinio (b) energijos juostų diagramos ir elektrinio lauko stipriai.

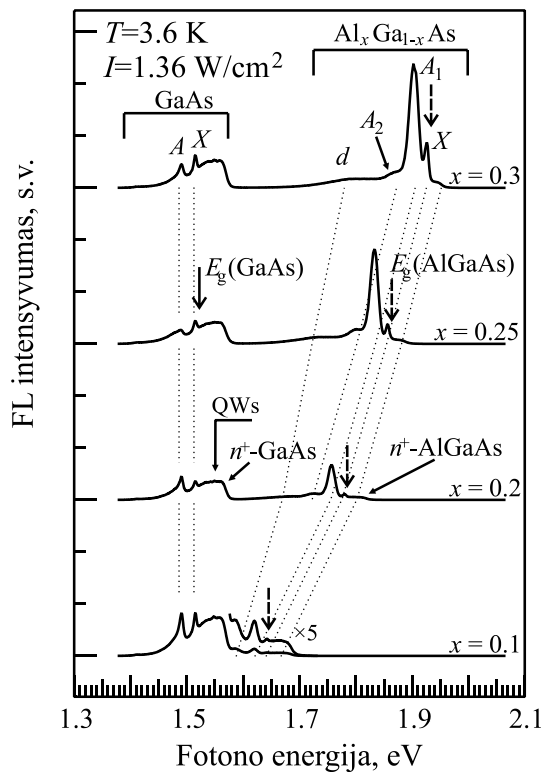
Čia  $I_H(X)$  – eksitoninės linijos įvairiatarpėje GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sandūroje intensyvumas,  $I_i(X)$  – eksitoninės linijos *i*-GaAs sluoksnyje intensyvumas.

Nustatytas H1 darinio eksitoninės linijos sustiprėjimas  $k_X = 40 - 80$ , o H2 darinio  $k_X = 300 - 500$ . Eksitoninės linijos sustiprėjimas įvairiatarpėje GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sandūroje gali būti paaiškintas vidinio elektrinio lauko susidarymu tokioje sandūroje. Lazerio šviesos sužadinti krūvininkai *i*-GaAs sluoksnyje gali suformuoti eksitonus, o pastarieji rekombinuoti išspinduliuodami šviesos kvantą. Tačiau vidinis elektrinis laukas įvairiatarpės sandūros aplinkoje išskiria krūvininkus erdvėje. Skylės judės sandūros link, o elektronai tols nuo sandūros. Šio proceso metu elektronai ir skylės gali suformuoti eksitoną su krūvininku iš kitos fotosužadintos poros, t.y. suformuoti bimolekulinį eksitoną. Taigi *i*-GaAs sluoksnyje vyks laisvųjų krūvininkų kaupimasis, o tuo pačiu didės ir eksitonų skaičius šiame sluoksnyje.

Eksitoninės linijos susiaurėjimas buvo nustatytas palyginus linijos plotį  $\Gamma$  ties puse maksimumo. H1 bandinio eksitoninės linijos plotis ties puse maksimumo buvo  $\Gamma = 0,9$  meV, o *i*-GaAs, gauto iš H1 darinio,  $\Gamma = 1,2$  meV. H2 darinio eksitoninės linijos susiaurėjimas buvo didesnis: įvairiatarpės sandūros  $\Gamma = 0,4$  meV, o *i*-GaAs  $\Gamma = 1$  meV.

Eksitoninės linijos susiaurėjimo priežastys kol kas nėra aiškios. Viena vertus, yra žinoma, kad sužadinti krūvininkai epitaksiniuose sluoksniuose dažniausiai pasiskirsto greta liekamųjų priemaišų ar atsitiktinai sluoksnyje išsidėsčiusių nehomogeniškumų. Ši sąveika sąlygoja eksitoninės linijos išplitimą. Siaura eksitoninė linija, stebima GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinyje, yra panaši į itin švaraus GaAs kristalo eksitoninę liniją. Todėl galima manyti, kad įvairiatarpiame darinyje pakinta eksitonų sąveika su kristalo defektais. Kita vertus, eksitoninės linijos susiaurėjimas ir eksitoninio-polaritono spinduliuotė rodo, kad vyksta eksitonų sąveika su išspinduliuota elektromagnetine banga. Dėl šios priežasties aktyviausiai vyksta tam tikro bangos ilgio spinduliuotė. Ši spinduliuotė vadinama eksitonine lazerine arba eksitonine-polaritonine lazerine spinduliuote. Eksitoninės linijos susiaurėjimas taip pat gali vykti dėl kolektyvinės eksitonų sąveikos įvairiatarpėje GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sandūroje [77-79]. Naujausi atlikti tyrimai parodė, kad eksitoninių linijų susiaurėjimas yra susijęs su eksitonų gyvavimo trukmės pailgėjimu. Tai dar kartą patvirtino, kad vyksta stipri sąveika tarp eksitoninės sistemos, bei spinduliuojamojo elektromagnetinio lauko [80].

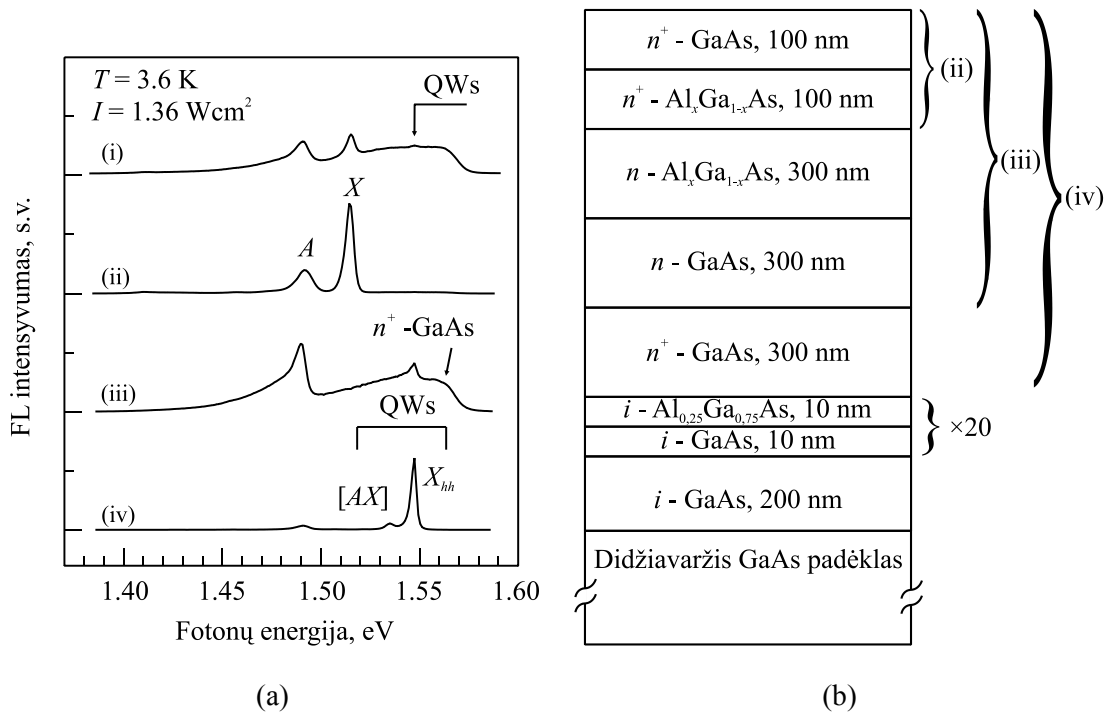
Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių, skirtų V2 diodų gamybai, FL spektras, išmatuotas 3,6 K temperatūroje, naudojant lazerinio žadinimo intensyvumą  $I = 1,36 \text{ W/cm}^2$ , pavaizduotas 3.1.6 pav.



3.1.6 pav. Įvairiatarpių GaAs/AlGaAs darinių FL spektrai. Spektrai yra sunormuoti ir perstumti vertikaliajoje skalėje.

Spektrą galima suskirstyti į dvi sritis: spinduliuotę iš GaAs sluoksnių, kurios energija mažesnė nei 1,57 eV, ir spinduliuotę iš  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnių, kurios energija didesnė nei iš GaAs sluoksnių ir priklauso nuo AlAs molinės dalies  $x$ . Mažėjant AlAs molinei daliai  $x$ , silpnėja  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnio FL intensyvumas. Tai yra susiję su bandinių auginimo ypatumais, parenkant auginimo temperatūrą. Bandinių, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,3$ ,  $x = 0,25$  ir  $x = 0,2$  spektre galime išskirti penkias išplitusias smailes, o bandinyje, kurio  $x = 0,1$  – keturias. GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  darinys susideda iš stipriai ir silpnai legiruotų sluoksnių, todėl matuojant darinio FL jo spektras tiek GaAs, tiek  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  pusėje yra šių sluoksnių FL spektrų superpozicija. Norint suprasti spektrinių linijų prigimtį reikia nagrinėti FL spektrus nuėsdinus viršutinius stipriai legiruotos sluoksnius.

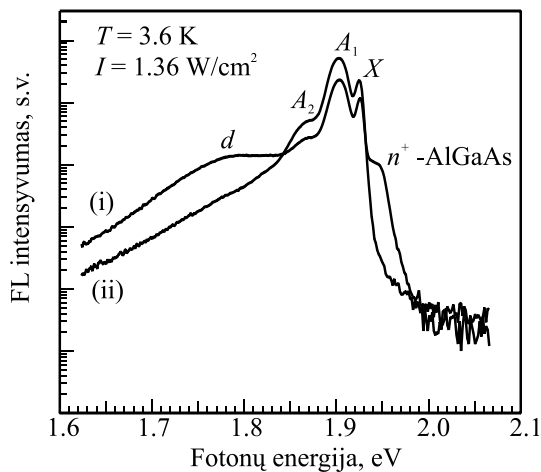
Atskirai panagrinėsime GaAs sluoksnių ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  spinduliuotės spektrus.



3.1.7 pav. Įvairiatarpio GaAs/ $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  darinio FL spektrai (a) ir darinio struktūra (b): (i) be papildomo paruošimo, (ii) nuėsdinus viršutinius  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sluoksnius, (iii) nuėsdinus  $n^+$ -GaAs,  $n^+$ - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ ,  $n$ -GaAs ir  $n$ - $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sluoksnius ir (iv) nuėsdinus visus pslaidininkinius sluoksnius iki supergardelės.

GaAs sluoksnių spektrai, gauti išmatavus bandinius tokius, kaip užauginta (i) ir paeiliui nuėsdinus puslaidininkinius sluoksnius (ii) – (iv) pavaizduoti 3.1.7 pav. (a). Puslaidininkinių sluoksnių ėsdinimo etapai, pavaizduoti 3.1.7 pav. (b). Riestiniu skliausteliu pažymėti sluoksniai, kurie buvo nuėsdinti, t.y. FL spektras pažymėtas (ii) buvo išmatuotas nuėsdinus du viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnius.

Spinduliuotė, kurios energija yra mažesnė už GaAs draudžiamosios energijos tarpą  $E_g(\text{GaAs}) = 1,519 \text{ eV}$  [81], priskiriama silpnai legiruotam  $n$ -GaAs sluoksniui. Smailė  $X$  ties 1,515 eV yra siejama su laisvojo eksitono rekombinacija [71]. Spektrinė linija ties 1,49 eV, pažymėta  $A$ , yra elektronų rekombinacija su skylėmis, surištomis su anglies akceptorine priemaiša [72]. Plati spinduliuotės juosta nuo 1,5 eV iki 1,57 eV yra priskiriama stipriai legiruotam  $n^+$ -GaAs sluoksniui. Ši juosta praktiškai išnyksta chemiškai nuėsdinus du viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnius. Spinduliuotė iš supergardenės (žymina QWs), esančios buferiniame sluoksnyje prie padėklo, ryškiausiai matoma



3.1.8 pav. Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinio FL spektrai (i) be papildomo paruošimo, (ii) chemiškai nuėsdinus viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As.

nusėdinus visus viršutinius puslaidininkinius sluoksnius (3.1.7 pav. (iv)).

FL spektro (3.1.6 pav.) aukštesnių energijų pusėje yra spinduliuotė susijusi su Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksniais. Palyginus FL spektrus bandinių, su ir be viršutinio stipriai legiruoto  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksniu (3.1.8 pav.) matyti, kad dvi kraštinės išplitusios linijos, pažymėtos  $d$  ir  $n^+$ -AlGaAs, yra spinduliuotė iš  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As

sluoksniu.

GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  legiravimui donorais buvo naudojamas Si, kuris šiuose puslaidininkiuose yra amfoterinė priemaiša, t.y. daugumoje užimdamas Ga vietas jis tampa donorine, o užimdamas As vietas ir tampa akceptorine priemaiša. Pagrindinė liekamoji priemaiša GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksniuose, užaugintuose MPE metodu, yra anglis, kuri šiuose sluoksniuose tampa akceptorine priemaiša. Aukščiau išvardintų priemaišų ryšio energijos  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  junginyje, kai AlAs molinė dalis  $x$  kinta ribose  $0 < x < 0,4$ , buvo suskaičiuotos naudojantis formulėmis:

$$E_{\text{Si}}(D) = 6,0 + 8,8x + 7,2x^2 \text{ (meV)} \quad [82], \quad (3.1.2)$$

$$E_{\text{Si}}(A) = 34,8 + 47,3x + 465x^{3,5} \text{ (meV)} \quad [83], \quad (3.1.3)$$

$$E_{\text{C}}(A) = 26,7 + 5,56x + 110x^{3,4} \text{ (meV)} \quad [84]. \quad (3.1.4)$$

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  draudžiamosios energijos tarpo vertė buvo apskaičiuota pagal formulę:

$$E_{\text{g}}^{\Gamma} (T = 2 \text{ K}) = 1,5194 + 1,36x + 0,22x^2 \text{ (eV)} \quad [70]. \quad (3.1.5)$$

Draudžiamosios energijos tarpas  $E_{\text{g}}$  dariniams su skirtinga AlAs moline dalimi  $x$  3.1.6 pav. pavaizduotas vertikaliomis punktyrinėmis rodyklėmis.

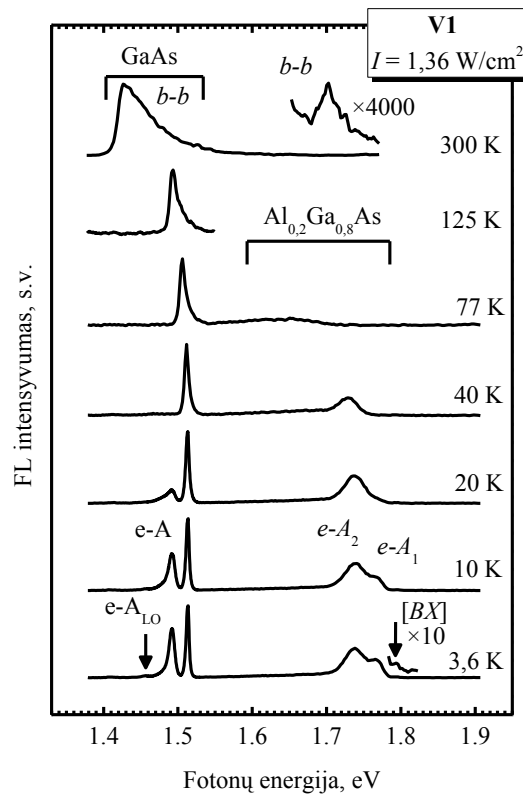
Laisvojo eksitono ryšio energija buvo suskaičiuota naudojantis kvadratine lygtimi  $E_{\text{X}}(\Gamma) = 4,1 + 5,5x + 4,4x^2 \text{ (meV)} \quad [85]$ . Eksitono, surišto su priemaiša, ryšio energija  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnyje buvo suskaičiuota naudojantis Hayne'us nustatytu sąryšiu su priemaišos jonizacijos energija [86] aproksimuojant į surišto eksitono ryšio energiją GaAs [87]. Eksitono, surišto su Si donorine priemaiša, ryšio energija  $E_{\text{DX}} = 1,2 + 1,8x + 1,4x^2 \text{ (meV)}$ , eksitono, surišto su C akceptorine priemaiša, ryšio energija  $E_{\text{CX}} = 2,9 + 0,62x + 12x^{3,4} \text{ (meV)}$ . Spektrinės linijos  $A_1$  ir  $A_2$  yra laisvojo elektrono rekombinacija su atitinkamai anglies ir silicio akceptoriumi. Didelių energijų spinduliuotės kraštas yra susijęs su Fermi energijos

lygmeniu stipriai legiruotame  $n^+$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Išplitusi spektrinė linija  $d$  priskiriama taškiniams defektams ir silicio kompleksams su taškiniais defektais, nes jos padėtis energijos skalėje yra žemiau negu žemiausios energijos perėjimas, susijęs su seklisiosiomis priemaišomis.

Palyginus eksitoninės linijos intensyvumą  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnyje, išmatuotą bandinyje be papildomo paruošimo ir chemiškai nuėsdinus viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As yra pastebimas linijos sustiprėjimas, kaip ir bandiniuose H1 ir H2, kuris yra siejamas su laisvųjų elektronų dreifu tolyn nuo  $n/n^+$  sandūros veikiant vidiniam elektriniam laukui. Nustatytas eksitoninės linijos sustiprėjimas  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnyje, 3,6 K temperatūroje, yra  $k_X = 20$ .

Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As darinio, skirto V1 diodų gamybai, FL spektras išmatuotas naudojant lazerinį žadinimo intensyvumą 1,36 W/cm<sup>2</sup>, plačiame temperatūrų intervale, pavaizduotas 3.1.9 pav. Spektre galima išskirti dvi dalis.

Pirmoji, kurios energijos mažesnės nei 1,57 eV yra priskiriama GaAs sluoksniams. Spektrinės linijos, žemose temperatūrose esančios energijos skalėje žemiau negu GaAs draudžiamosios energijos tarpas  $E_g(\text{GaAs}) = 1,519 \text{ eV}$  ( $T = 3,6 \text{ K}$ ),



3.1.9 pav. V1 bandinio FL spektras, išmatuotas naudojant 1,36 W/cm<sup>2</sup> žadinančios šviesos intensyvumą, skirtingose temperatūrose. Spektrai yra sunormuoti ir perstumti vertikalioje skalėje.

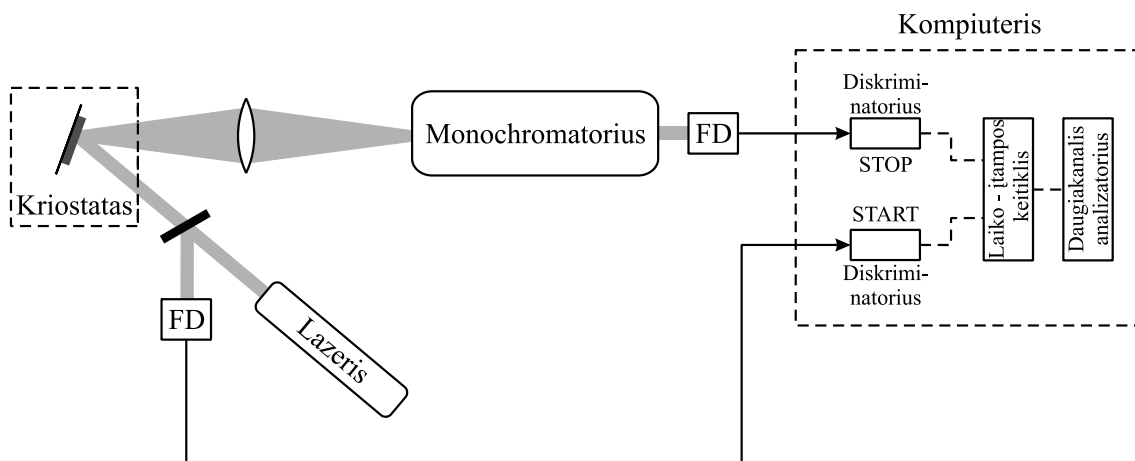
siejamos su  $n$ -GaAs sluoksniu.

Smailė  $X$  ties 1,515 eV yra laisvojo eksitono rekombinacija [71]. Spektrinė linija ties 1,49 eV, pažymėta  $e-A$ , yra elektronų rekombinacija su anglies akceptorine priemaiša [72]. Rodykle  $e-A_{LO}$  pažymėta  $e-A$  perėjimo pirmoji fononinė replika [88]. Viršutiniai stipriai legiruoti  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ -AlGaAs sluoksniai labai ploni, todėl spinduliuotė iš jų yra labai silpna. Antroji FL spektro dalis, esanti didesnių energijų pusėje siejama su silpnai legiruotu  $n$ -AlGaAs sluoksniu. Ši spektro dalis žemose temperatūrose susideda iš trijų išplitusių linijų. Spektrinės linijos  $e-A_1$  ir  $e-A_2$  yra laisvojo elektrono rekombinacija atitinkamai su anglies ir silicio akceptoriumi. Smailė ties 1,795 eV, pažymėta rodykle  $[BX]$ , yra siejama su surišto eksitono su donoru rekombinacija [89]. Pagal surištojo eksitono spektrinių linijų padėtį buvo patikslinta AlAs molinė dalis AlGaAs sluoksnyje, kuri lygi  $x = 0,2$ . AlGaAs epitaksinio sluoksnio FL efektyvumas yra susijęs su sluoksnio auginimo temperatūra: kai ji yra didesnė nei 700 °C, FL efektyvumas yra didelis, o spektre galima išskirti aštrią eksitoninę liniją [90, 91]. Norint gauti didesnę elektronų judrį GaAs sluoksnyje V1 darinys buvo auginamas gana žemoje 600 °C temperatūroje, todėl  $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$  eksitoninės linijos intensyvumas yra silpnas. Aukštesnėse temperatūrose FL spektre dominuoja tarpjuostinė rekombinacija pažymėta ( $b-b$ ).

### 3.2. Fotoluminescencijos su laikine skyra tyrimai

Fotoluminescencijos kinetikos tyrimui buvo taikomas laike koreliuotu pavienių fotonų skaičiavimo (*angl.* TCSPC – time correlated single photon counting) metodas. TCSPC yra pagrįstas periodinės šviesos signalo pavienių fotonų detektavimu, detekcijos laiko matavimu ir bangos formos atstatymu iš individualaus laiko matavimų. Kai detektuojamas fotonas impulso pasirodymo laikas yra išmatuojamas signalo periode. Po daugelio signalo periodų





3.2.1 pav. Laike koreliuoto pavienių fotonų skaičiavimo eksperimento schema.

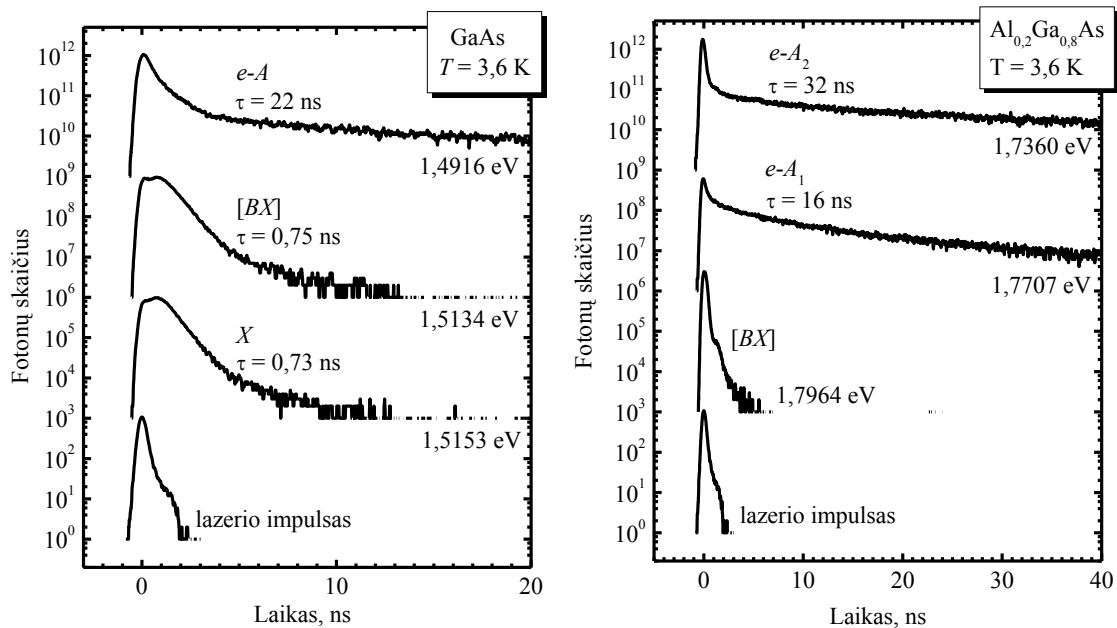
užregistruojamas didelis fotonų kiekis ir suformuojamas fotonų pasiskirstymas signalo periode. Rezultatas parodo optinio impulso pavidalą.

TCSPC matavimo schema pavaizduota 3.2.1 pav. Fotoluminescencijos žadinimui naudojamas diodu kaupinamas Nd:LSB kietojo kūno lazeris, kurio impulso trukmė pusės maksimumo aukštyje yra apie 400 ps. Impulso pasikartojimo dažnis siekė 10 kHz ir vidutinė galia – 40 mW. Pikosekundinio lazerio spindulio bangos ilgis buvo 531 nm (antroji harmonika) arba atitinkama energija 2,3 eV. Lazerio siunčiami ultratrumpieji impulsai spindulio dalikliu dalinami į dvi dalis. Pagrindinė dalis nukreipiama į bandinį, o kita nukreipiama į fotodiodą, kuris generuoja elektroninį impulsą. Šis impulsas toliau patenka į diskriminatorių, kuris iš fotodiodo tam tikros amplitudės impulso sugeneruoja skaitmeninį elektroninį impulsą, vadinamą „start“ impulsu. „Start“ impulsas patenka į laiko įtampos keitiklį ir jį paleidžia. Laiko-įtampos keitiklis – tai prietaisas, išduodantis įtampą, proporcingą laiko tarpui tarp dviejų elektroninių signalų („start“ ir „stop“). Iš esmės tai yra kondensatorius, įkraunamas pastovia elektros srove. Matuojamas signalas yra sinchronizuotas su lazerio impulsu nuo išdalinto žadinančio spindulio tam, kad išvengtume lazerio impulso „tirtėjimo“ triukšmo.

FL fotoną, kuri išspinduliuoja bandinys, užregistruoja termoelektriškai šaldomas didelio efektyvumo į raudonąją šviesos spektro sritį praplėstas daugiašarminio katodo fotodaugintuvas su vidiniu gigaherciniu stiprintuvu. Fotodaugintuvo signalas pereina diskriminatorių ir patenka į laiko-įtampos keitiklį. Šis impulsas vadinamas „stop“ impulsu. Tokiu būdu laiko įtampos keitiklyje atsiranda įtampa, proporcinga laiko tarpui tarp „start“ ir „stop“ signalų pasirodymo, arba, paprasčiau tariant, trukmei tarp bandinio sužadavimo ir fotono išspinduliavimo. Ši įtampa užrašoma daugiakanaliniame analizatoriuje.

Pavienių fotonų skaičiavimas atliekamas naudojantis Becker & Hickl firmos SPC-130 sistema.

$n$ -GaAs ir  $n$ -Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As sluoksnių, esančių V1 įvairiatarpiuose dariniuose, FL gesimo trukmės, išmatuotos 3,6 K temperatūroje pateiktos 3.2.2 pav. Charakteringos FL signalo gesimo trukmės buvo suskaičiuotos aproksimuojant FL signalo kinetikas dvi eksponentiniu gesimu. Itin trumpos gyvavimo trukmės buvo apskaičiuotos panaudojant dekonvoliucijos algoritmą. Šiuo metodu apskaičiuota laisvojo eksitono  $n$ -GaAs sluoksnyje gesimo trukmė buvo  $\tau(X) = 0,73$  ns. Dalis eksitonų silpnai Si legiruotame  $n$ -GaAs sluoksnyje žemose temperatūrose yra surišti su donoriais. Todėl laisvųjų eksitonų linija yra susiliejusi su surištųjų eksitonų linija ir šias dvi smailes sunku išskirti FL spektre. Išmatuota FL signalo gesimo trukmė ties numanoma surištojo eksitono energija yra  $\tau([BX]) = 0,75$  ns, kuri paklaidų ribose sutampa su laisvojo eksitono gyvavimo trukme. Labai žemose temperatūrose itin švariame GaAs kristale laisvojo eksitono spindulinės rekombinacijos trukmė yra 3,3 ns [92]. Kadangi išmatuota charakteringa laisvojo eksitono gyvavimo trukmė yra gerokai mažesnė, galima daryti prielaidą, kad egzistuoja kiti spindulinės ir nespindulinės rekombinacijos kanalai.



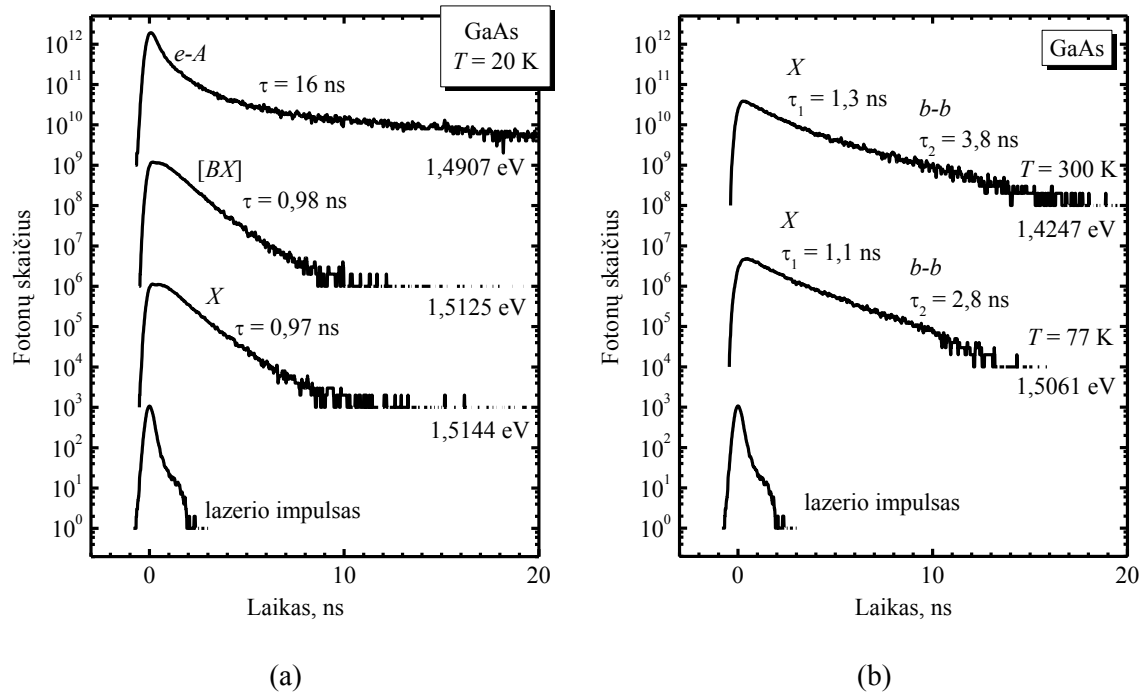
3.2.2 pav. Skirtingų emisijos linijų  $n$ -GaAs (a) ir  $n$ -AlGaAs (b) gesimo trukmės, išmatuotos 3,6 K temperatūroje. Žemiausia kreivė yra žadinantis lazerio impulsas. Spektrai yra perstumti vertikaliajoje skalėje.

Laisvojo elektrono rekombinacijos su akceptoriumi FL signalo kinetika susideda iš dviejų dalių (3.2.2 pav. (a)). Sparčioji kinetikos dalis siejama su laisvųjų krūvininkų pagavimu į eksitonus ir defektus. Lėtoji dalis siejama su laisvųjų elektronų rekombinacija per akceptorines priemaišas, o charakteringa šio proceso trukmė yra  $\tau(e-A) = 22$  ns, kuri yra artima pateikiamai darbe [93].

Silpnai legiruoto  $n$ -Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As sluoksnio emisijos juostų FL signalo gesimo kinetikos, išmatuotos 3,6 K temperatūroje, pavaizduotos 3.2.2 pav. (b). Matyti, kad surištojo eksitono gyvavimo trukmė yra labai trumpa ir palyginama su matavimuose naudojamo lazerio impulso galinio fronto trukme  $\tau = 200$  ps. Tokią trumpą gyvavimo trukmę gali sąlygoti keli mechanizmai. Eksitonai yra sklaidomi priemaišomis, tai lemia emisijos juostos plėtėjimą ir gyvavimo trukmės mažėjimą. Laisvi elektronai taip pat yra pagaunami defektiniuose lygmenyse, o dalis jų gali nudreifuoti į energetiškai žemesnes tiriamojo darinio sritis (pvz.: GaAs). Kitos dvi emisijos linijos, pažymėtos  $e-A_1$  ir  $e-A_2$ , yra siejamos su elektronų rekombinacija į

skirtingų tipų sekliąsias priemaišas: anglies ir silicio akseptorius. Šios linijos įsisotina esant didesniems žadinančios šviesos intensyvumams bei pranyksta temperatūrą padidinus atitinkamai virš 40 K ir 60 K. Išmatuotos šių emisijos linijų gesimo trukmės  $n\text{-Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  sluoksnyje yra  $\tau(e-A_1) = 16\text{ ns}$  ir  $\tau(e-A_2) = 32\text{ ns}$ .

Charakteringoji laisvojo elektrono su neutraliu akseptoriumi spindulinės rekombinacijos sparta yra proporcinga neutraliųjų akseptorių tankiui  $\frac{1}{\tau_{e-A}} = N_A B_{e-A}$ , kur  $N_A$  yra neutraliųjų akseptorių tankis, o  $B_{e-A}$  – spindulinės rekombinacijos koeficientas [94]. Spindulinės rekombinacijos koeficientas gali būti išreikštas, kaip elektronų šiluminio greičio  $v_{th}$  ir pagavimo skerspjūvio  $\sigma_{e-A}$  sandauga  $B_{e-A} = v_{th}\sigma_{e-A}$ . Pilnam vyksmo supratimui, reikėtų įskaityti ir skylių pagavimą jonizuotais akseptoriais. Tačiau šis pagavimas yra labai spartus ir



3.2.3 pav. Skirtingų emisijos linijų  $n\text{-GaAs}$  gesimo trukmės, išmatuotos 20 K (a), 77 K ir 300 K (b) temperatūrose. Žemiausia kreivė yra žadinantis lazerio impulsas. Spektrai yra perstumti vertikaliajoje skalėje.

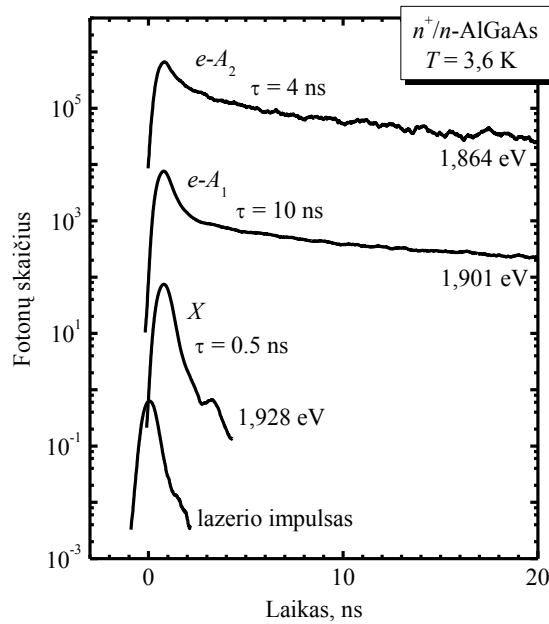
trunka tik šimtus femtosekundžių [95]. Todėl mūsų nagrinėjamu atveju į šį vyksmą galima neatsižvelgti. Laikant, kad elektronų pagavimo į akceptorius  $A_1$  ir  $A_2$  skerspjūviai yra vienodi, galima daryti išvadą, kad skirtingas rekombinacijos su minėtais akceptoriais trukmes lemia skirtingas šių akceptorių tankis.

Eksitonų  $X$  ir tarpjuostinės  $b$ - $b$  FL gesimo kreivės  $n$ -GaAs sluoksnyje, išmatuotos 20 K, 77 K ir 300 K temperatūrose, pavaizduotos 3.2.3 pav.

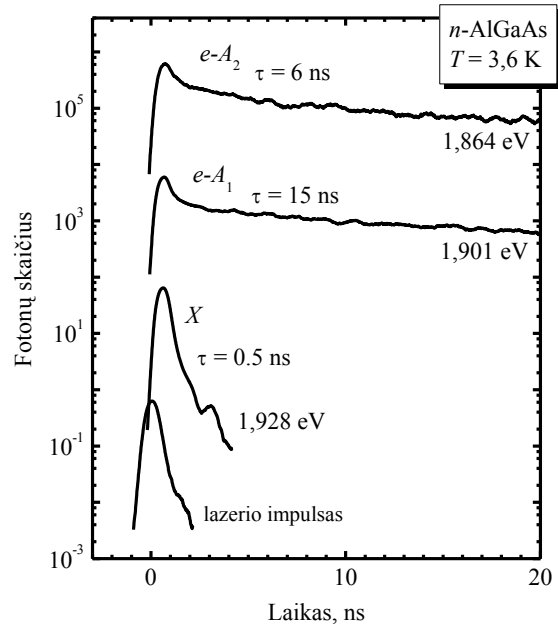
Aukštose temperatūrose eksitonų FL linija susilieja su tarpjuostinės rekombinacijos juosta. Energijų, artimų draudžiamosios energijos tarpui FL gesimo kreivės susideda iš dviejų eksponentinių procesų. Todėl eksitoninė spinduliuotė turi būti įskaitoma iki pat kambario temperatūros. Šie rezultatai gerai sutampa su ankstesniais nuostoviosios FL matavimais, kur buvo nustatyta, kad eksitoninės emisijos dalis sudaro 88%, 42% ir 14% emisijos intensyvumo ties draudžiamosios energijos tarpu, esant atitinkamai 22 K, 111 K ir 280 K temperatūroms [81].

Iš rezultatų pateiktų 3.2.2 pav. ir 3.2.3 pav. nustatėme laisvojo eksitono rekombinacijos trukmes  $n$ -GaAs sluoksnyje skirtingose temperatūrose:  $\tau(X) = 0,73$  ns (3,6 K),  $\tau(X) = 1,1$  ns (77 K) ir  $\tau(X) = 1,3$  ns (300 K). Tarpjuostinės rekombinacijos  $n$ -GaAs trukmė yra 2,8 ns ir 3,8 ns atitinkamai 77 K ir 300 K temperatūrose.

Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinio V2 silpnai legiruoto  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksniu skirtingų FL spektro komponenčių gesimas, išmatuotas 3,6 K temperatūroje, pavaizduotas 3.2.4 pav. (a). To paties paveikslo (b) dalyje pavaizduota FL spektro komponenčių gesimas, pamatuotas nuėsdinus viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ - Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnius. Laisvųjų eksitonų gyvavimo trukmė abiem atvejais ( $n/n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As ir  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As) yra lygi 0,5 ns.

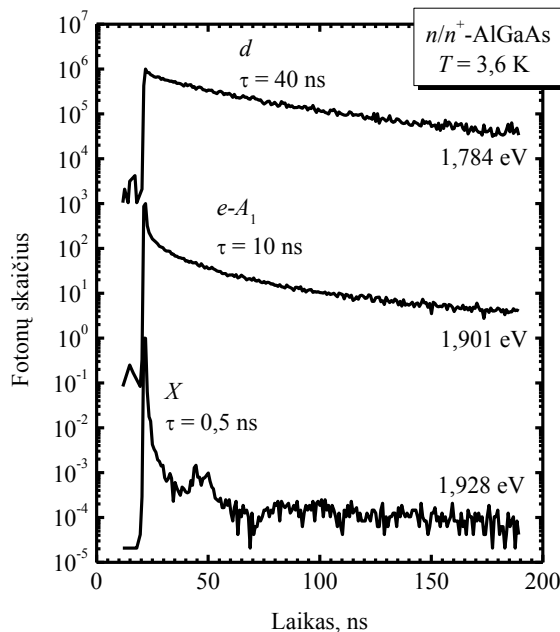


(a)



(b)

3.2.4 pav. Skirtingų emisijos linijų gesimo trukmės, išmatuotos 3,6 K temperatūroje  $n^+/n$ -AlGaAs (a) ir  $n$ -AlGaAs (b). Žemiausia kreivė yra žadinantis lazerio impulsas. Spektrai yra perstumti vertikaliajoje skalėje.



3.2.5 pav. Skirtingų emisijos linijų gesimo trukmės, išmatuotos 3,6 K temperatūroje  $n^+/n$ -AlGaAs. Spektrai yra perstumti vertikaliajoje skalėje.

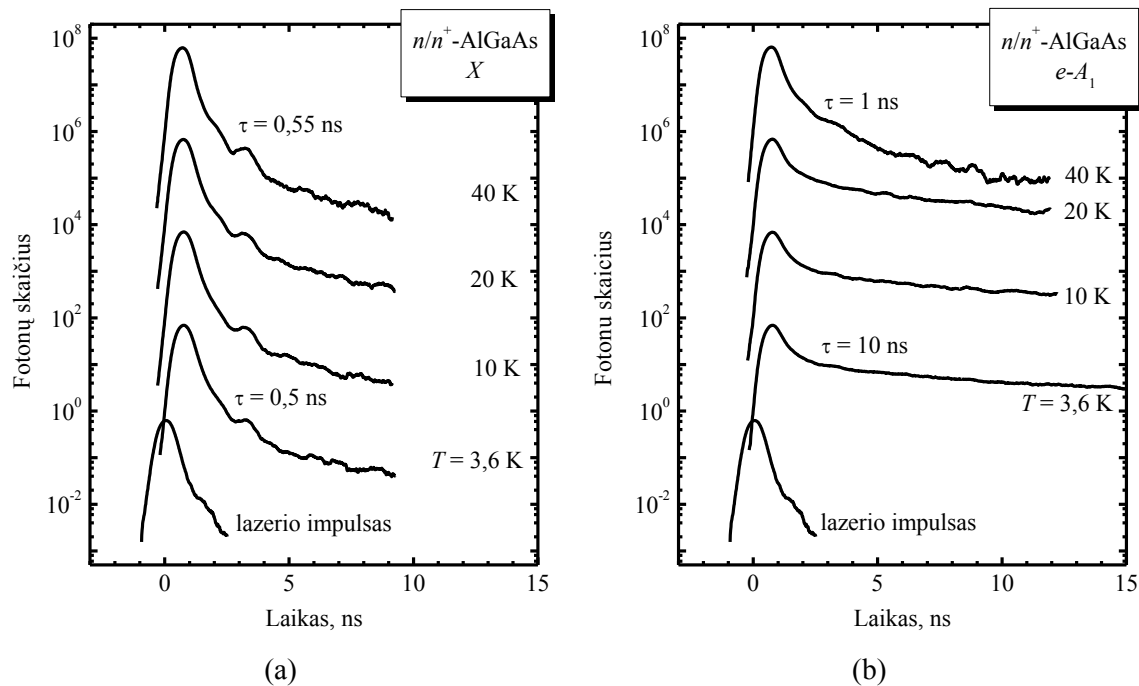
Laisvojo elektrono rekombinacijos į akceptorinius lygmenis trukmė keičiasi nuo 4 ns iki 15 ns ir priklauso nuo akceptorius tipo, bei bandinio struktūros. Laisvųjų krūvininkų tankio dinamika  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  gali būti įtakojama dalies jų dreifo į energetiškai žemesnes bandinio sritis.

Eksitoninės linijos  $X$  ir linijos  $e-A_1$ , siejamos su elektronų rekombinacija į akceptorinius lygmenis, FL signalų gesimai

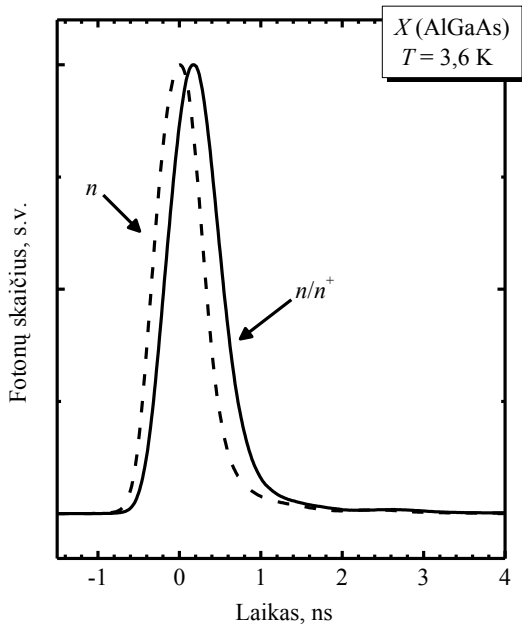
platesnėje laiko skalėje pavaizduoti 3.2.5 pav.

Nuolatinės FL matavimų metu buvo aptikta išplitusi linija ties 1,78 eV, kuri buvo priskirta taškiniams defektams ir silicio kompleksams su taškiniais defektais (3.1.8 pav.). FL su laikine skyra eksperimento rezultatai, pateikti 3.2.5 pav. parodė, kad prielaida buvo teisinga. Nustatyta charakteringa su defektais siejamos emisijos gyvavimo trukmė yra apie  $\tau(d) = 40$  ns.

Eksitoninės linijos  $X$  ir linijos  $e-A_1$ , siejamos su elektronų rekombinacija į akceptorinius lygmenis, FL signalo gesimai, išmatuoti įvairiose temperatūrose, pateikti 3.2.6 pav. Eksitonų gyvavimo trukmė beveik nepriklauso nuo temperatūros. Laisvųjų elektronų rekombinacijos į akceptorinius lygmenis trukmė, temperatūrose žemesnėse nei 20 K taip pat nepriklauso nuo temperatūros. Aukštesnėse temperatūrose ( $T \geq 40$  K) laisvųjų elektronų rekombinacija per akceptorinius lygmenis paspartėja, nes pradeda dominuoti akceptorių šiluminė



3.2.6 pav. Eksitoninės linijos  $X$  (a) ir linijos  $e-A_1$ , siejamos su elektronų rekombinacija į akceptorinius lygmenis, (b) FL signalo gesimai, išmatuoti įvairiose temperatūrose. Žemiausia kreivė yra žadinantis lazerio impulsas. Spektrai yra perstumti vertikaliajoje skalėje.



3.2.7 pav. Eksitoninės linijos  $n^+/n$ -AlGaAs (ištininė linija) ir  $n$ -AlGaAs FL išsižiebimo ir gesimo laikinės charakteristikos, išmatuotos 3,6 K temperatūroje.

stipriai legiruotą  $n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnį. Išmatavus eksitoninės linijos  $X$  FL išsižiebimo ir gesimo trukmes vienu ir kitu atveju matyti, kad FL maksimumai yra pasislinkę laike per maždaug 200 ps. Šis laiko tarpas yra siejamas su trukme, reikalinga laisviems krūvininkams, veikiamiems vidinio elektrinio lauko, nudreifuoti tolyn nuo sandūros ir suformuoti eksitonus. Tai patvirtina prielaidą, kad eksitonai yra formuojami plokščių energijos juostų srityje.

### 3.2.1. Voltamperinių charakteristikų tyrimas

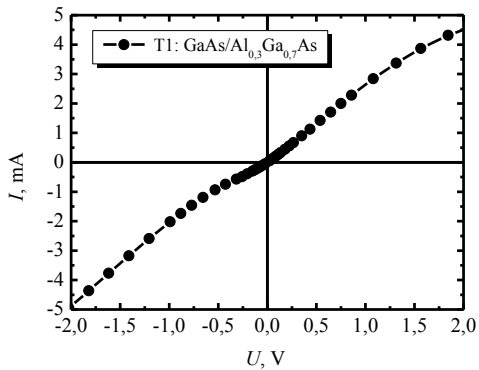
Taškinio įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As mikrobangų diodo T1 VACH, išmatuota kambario temperatūroje, pavaizduota 3.2.1.1 pav. Gauti rezultatai parodė, kad diodo T1 charakteristika yra beveik ominė. Panašūs VACH rezultatai buvo gauti ir kitų autorių, kurie įvairiatarpiams GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As dariniams auginti naudojo skystinės epitaksijos metodą [55, 59]. Omines GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių VACH lemia potencinio barjero sumažėjimas įvairiatarpėje sandūroje dėl

jonizacija.

Eksitoninės linijos  $X$  FL išsižiebimo ir gesimo trukmės, išmatuotos 3,6 K temperatūroje, V2 bandinyje be papildomo paruošimo ir nuėsdinus viršutinius stipriai legiruotus  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ - Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnius, pavaizduotos 3.2.7 pav.

Nuostoviosios FL eksperimento rezultatai parodė eksitoninės linijos iš  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnio sustiprėjimą darinyje  $n^+/n$ - Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, lyginant su FL iš  $n$ - Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As, gauto nuėsdinus



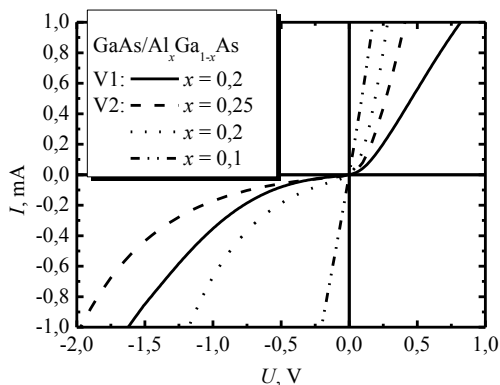


3.2.1.1 pav. Taškinių įvairiatarpių diodo T1 voltamperinė charakteristika, išmatuota kambario temperatūroje.

130 Å, o kai AlGaAs legiravimo tankis  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  pakanka pereinamojo sluoksnio 20 Å, kad įvairiatarpių GaAs/AlGaAs darinio VACH būtų ominė [59].

Įvairiatarpių mikrobangų diodų V1 ir V2, pagamintų iš GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As puslaidininkinių sluoksnių, voltamperinės charakteristikos išmatuotos kambario temperatūroje pavaizduotos 3.2.1.2 pav.

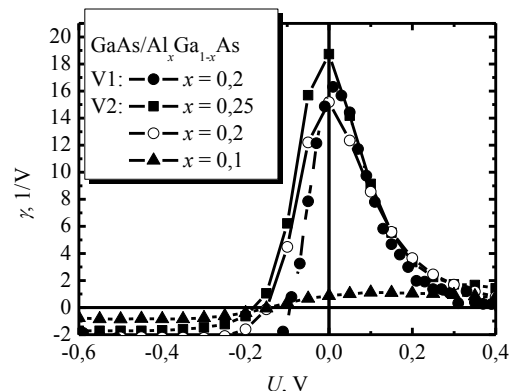
Mažėjant AlAs molinei daliai  $x$  trinariame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As junginyje mažėja potencinis barjeras įvairiatarpėje GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sandūroje (1.2.1.1 pav.), todėl



3.2.1.2 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų voltamperinės charakteristikos, išmatuotos kambario temperatūroje.

susidarančio pereinamojo sluoksnio tarp  $n$ -GaAs ir  $n$ -Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As ir šis sumažėjimas yra didesnis bandiniams su didesniu Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As legiravimo tankiu.

Kitų autorių atlikti tyrimai parodė, kad įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių, užaugintų skystinės epitaksijos metodu  $\sim 800^\circ\text{C}$  temperatūroje, pereinamojo sluoksnio storis gali siekti



3.2.1.3 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As mikrobangų diodų V1 ir V2 kreivumo koeficiento  $\gamma$  priklausomybė nuo nuolatinės įtampos.

didėja srovė per sandūrą atbuline kryptimi ir mažėja voltamperinės charakteristikos netiesiškumas.

Voltamperinės charakteristikos netiesiškumui įvertinti naudojamas kreivumo koeficientas, kuris randamas:

$$\gamma = \frac{\left(\frac{d^2 I}{dU^2}\right)}{\left(\frac{dI}{dU}\right)}. \quad (3.2.1.1)$$

V1 ir V2 bandinių kreivumo koeficientų priklausomybės nuo nuolatinės įtampos pavaizduotos 3.2.1.3 pav. Diodai turintys didžiausią AlAs molinę dalį  $x$ , turi didžiausią voltamperinės charakteristikos kreivumo koeficientą, kuriam didėjant didėja ir diodo įtampos jautris (1.3.1.10). Kita vertus, didėjant voltamperinės charakteristikos kreivumo koeficientui, didėja sandūros barjerinė varža, todėl aukštuose dažniuose mažėja diode sugerama mikrobangų galia.

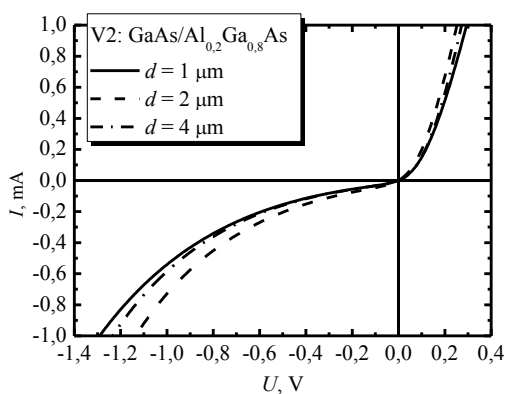
Gauti rezultatai rodo, kad įvairiųjų GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As mikrobangų diodų voltamperinės charakteristikos kreivumo koeficientas yra didžiausias 0 V aplinkoje, todėl tokiems diodams veikti detekciniu režimu nereikia išorinės įtampos poslinkio. Įvairiųjų GaAs/Al<sub>0,1</sub>Ga<sub>0,9</sub>As diodų VACH yra beveik ominė, tačiau kreivumo koeficientas nėra lygus nuliui, todėl galima tikėtis atsako į mikrobangas.

3.2.1.2 pav. pateikti rezultatai rodo, kad bandinių V1 ir V2, kurių AlAs molinė dalis buvo  $x = 0,2$ , voltamperinės charakteristikos buvo skirtingos. Vienoda AlAs molinė dalis barjeriniame sluoksnyje abiejuose bandiniuose leido tikėtis panašių rezultatų, tačiau V1 diodo srovė tiek tiesiogine, tiek atbuline kryptimis buvo mažesnė, nei diodo V2. Bandiniai V1 ir V2 buvo pagaminti naudojant įvairiatarpes sandūras, kurios turėjo vienodus sandūrą sudarančių sluoksnių storius – 300 nm, vienodą jų legiravimo tankį –  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ir vienodą

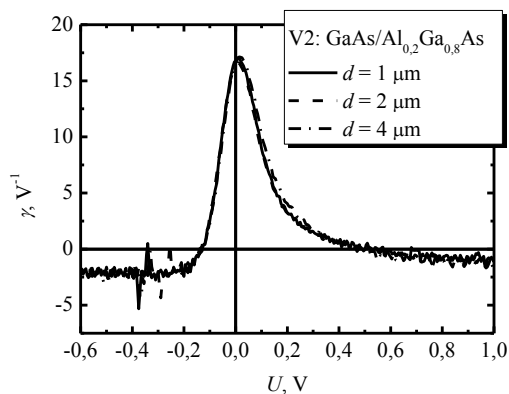
AlAs molinę dalį  $x = 0,2$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  junginyje. Todėl skirtingas bandinių elektrines savybes lėmė, ne sluoksnių sandaros skirtumai, o diodų konstrukcija. Gaminant ominius kontaktus ir naudojant Au/Ge/Ni sluoksnius ant GaAs greito įdeginimo metu Ge difunduoja į GaAs ir užima į paviršių difundavusio Ga vietas, tapdamas donorine priemaiša GaAs puslaidininkyje. Priklausomai nuo užgarintų metalų sluoksnių storių, nuo įdeginimo temperatūros ir laiko, Ge difuzija į GaAs sluoksnį gali siekti nuo  $\sim 70$  nm iki  $\sim 250$  nm [96]. V1 bandinių du stipriai legiruoti  $n^+$ -GaAs ir  $n^+$ - $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  sluoksniai yra 50 nm storio, o užgarintų Au/Ge/Ni metalų bendras storis 580 nm, todėl galima daryti prielaidą, kad po užgarintų Au/Ge/Ni sluoksnių įdeginimo susidaro mažo potencinio barjero Šotkio sandūra su  $n$ - $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  sluoksniu [97]. Tokiu atveju gauname, kad mikrobangų detektoriuje turime dvi nuosekliai sujungtas sandūras – įvairtarpe GaAs/ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  sandūrą ir Šotkio sandūrą. Kadangi šios dvi sandūros dalijasi vienu puslaidininkiniu sluoksniu, kuris įvairiatarpei sandūrai yra plačiatarpis, tai jos yra sujungtos viena kitai užtvarinėmis kryptimis. Vieno iš kontaktų neomiškumas lemia padidėjusią diodo nuosekliają varžą, nuo kurios priklauso diodo atkirtos dažnis ir jautris aukštuose dažniuose.

Bendras bandinių V2 viršutinių stipriai legiruotų GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnių storis buvo 200 nm, o užgarintų Au/Ge/Ni metalų bendras sluoksnių storis mažesnis, nei 200 nm, todėl šiuose bandiniuose jų išsilydymo gylis buvo mažesnis, nei stipriai legiruotų sluoksnių storis, ir gautas viršutinis kontaktas buvo ominis.

Įvairiatarpių GaAs/ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  mikrobangų diodų V2, turinčių skirtingus aktyviosios srities plotus, voltamperinės charakteristikos ir jų kreivumo koeficientai pavaizduoti 3.2.1.4 pav. Gauti rezultatai rodo, kad žemuose dažniuose įvairiatarpių diodų jautris turi nepriklausyti nuo aktyviosios srities pločio, nes voltamperinių charakteristikų kreivumo koeficientas yra vienodas visiems diodams.



(a)

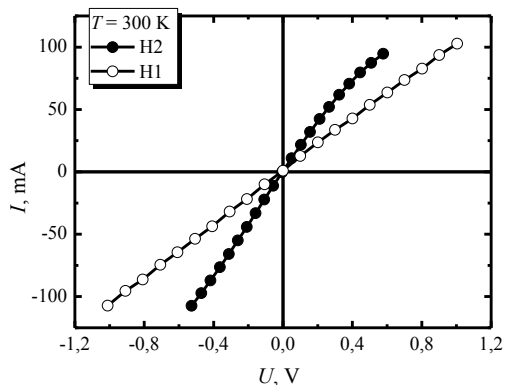


(b)

3.2.1.4 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As diodų V2, turinčių skirtingus aktyviosios srities plotus, voltamperinės charakteristikos, išmatuotos kambario temperatūroje (a) ir jų kreivumo koeficientai (b).

Įvairiatarpių mikrobangų diodų įtampos atkirtos dažnis (1.3.1.12) yra atvirkščiai proporcingas diodo barjerinės talpos kvadratui ir nuosekliai varžai, todėl mažėjant diodo aktyviosios srities plotui, atkirtos dažnis turėtų didėti.

Nesimetriškai susiaurintų mikrobangų diodų H1 ir H2 voltamperinės charakteristikos, išmatuotos kambario temperatūroje, pateiktos 3.2.1.5 pav. Norint



3.2.1.5 pav. H1 ir H2 bandinių voltamperinės charakteristikos, išmatuotos kambario temperatūroje.

išvengti kristalinės gardelės kaitimo matavimai buvo atliekami naudojant trumpus retai pasikartojančius nuolatinės įtampos impulsus. Teigiama įtampos kryptis buvo kai  $n$  srities potencialas buvo teigiamas, o  $n^+$  srities – neigiamas. Mikrobangų diodų H1 ir H2 voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje yra ominės. H2 diodo diferencialinė varža yra mažesnė, nei

diodo H1. Mikrobangų diodas H2 buvo pagamintas, naudojant GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinį, kurio barjerinis sluoksnis buvo legiruotas įterpiančiais donorų  $\delta$ -sluoksnį. Kaip buvo parodyta darbe [62] sklaidos potencialo įtaka elektronams dvimačiame kanale GaAs/AlGaAs įvairiatarpėje sandūroje yra mažiausia, kai legiruoto sluoksnio storis artėja į nulį. Todėl sumažėjusią H2 mikrobangų diodo varžą siejame su elektronų judrio padidėjimu šiame darinyje.

### Skyriaus pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Nuostoviosios FL ir laike koreliuotų fotonų skaičiavimo metodais buvo ištirta puslaidininkinių darinių, skirtų mikrobangų diodams gaminti kokybė.
- Pagal FL smailių padėtis buvo patvirtinta puslaidininkinių darinių, skirtų mikrobangų diodams T1, H1, H2 ir V2 gaminti, sudėtis.
- Pagal surištojo eksitono su donoru fotoluminescencijos spektrinių linijų padėtį buvo patikslinta AlAs molinė dalis  $x = 0,2$  puslaidininkiniame darinyje, skirtame mikrobangų diodų V1 gamybai.
- Įvairiatarpiuose GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As dariniuose pastebėtas eksitoninės linijos GaAs sluoksnyje sustiprėjimas, lyginant su to pačio darinio eksitonine linija pašalinus įvairiatarpe sandūrą, kuri siejama su elektronų dreifu dėl vidinio elektrinio lauko tolyn nuo sandūros, kur vyksta laisvųjų krūvininkų kaupimasis. Selektviai legiruotame darinyje H1 nustatytas eksitoninės linijos sustiprėjimas  $k_X = 40 - 80$ , darinyje H2  $k_X = 300 - 500$ .
- Puslaidininkiniame darinyje, skirtame mikrobangų diodų V2 gamybai, pastebėtas eksitoninės linijos sustiprėjimas  $n/n^+$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinyje, lyginant su eksitonine linija  $n$ -Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sluoksnyje. Šis sustiprėjimas, kaip ir H1 darinio atveju, siejamas laisvųjų krūvininkų dreifu ir kaupimusi plokščių energijos juostų srityje dėl vidinio elektrinio lauko sandūroje.

- GaAs ir  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnių kokybė skiriasi dėl parinktos auginimo temperatūros. Darinių V1 ir V2 FL spektrų palyginimas parodė, kad geresnės kokybės GaAs sluoksnis gaunamas auginant darinius žemoje temperatūroje ( $600^\circ\text{C}$ ). Geresnės kokybės  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnis gaunamas auginant darinius aukštesnėje ( $\sim 700^\circ\text{C}$ ) temperatūroje.
- Mikrobangų diodų T1 voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje yra beveik ominės dėl lėkštos GaAs/ $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  sandūros skystinės epitaksijos metodu užaugintame darinyje.
- V1 ir V2 mikrobangų diodų voltamperinės charakteristikos kreivumo koeficientas auga, didinant AlAs molinę dalį  $x$   $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnyje.
- Mikrobangų diodų V1 nuosekliosios varžos padidėjimas lyginant su diodų V2, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,2$ , siejamas su pažeminto barjero Šotkio kontakto susidarymu formuojant  $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$  sluoksnio omini kontaktą diode V1.
- Mikrobangų diodų H1 ir H2 voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje yra ominės. H2 diodų varža yra mažesnė nei H1 dėl didesnio elektronų judrio dvimačių elektronų kanale, kuri lemia legiravimo profilis barjeriniame sluoksnyje.

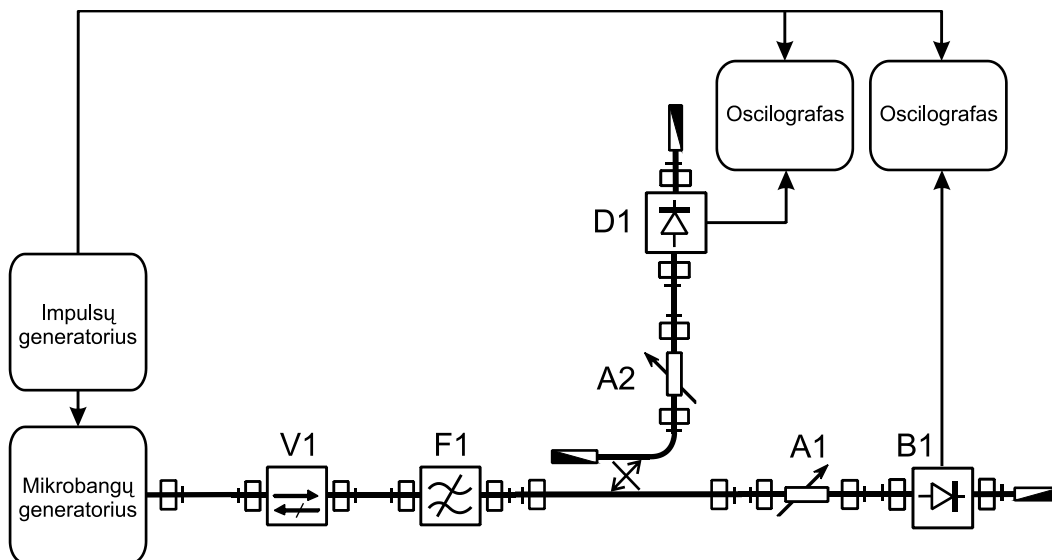
## 4. MIKROBANGŲ DIODŲ DETEKCINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAI

Šiame skyriuje pristatomi mikrobangų diodų, pagamintų naudojant įvairiatarpius GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinius, mikrobangų detekcinių savybių tyrimai. Tyrimai buvo atlikti mikrobangų dažnių ruožuose 8 – 12,5 GHz, 26 – 37,5 GHz, 75 – 110 GHz ir 110 – 170 GHz.

### 4.1. Mikrobangų detekcinių savybių tyrimų schemos

Norint nustatyti mikrobangų diodų detekcijos tiesinės priklausomybės ruožą buvo išmatuotos diodų voltvatinės charakteristikos. Voltvatinė charakteristikų matavimai dažnių ruože 8 – 12,5 GHz buvo atliekami stende, kurio struktūrinė schema pavaizduota 4.1.1 pav.

Mikrobangų generacijai buvo naudojamas klistroninis generatorius. Impulsų generatorius buvo naudojamas mikrobangų galios moduliacijai mikrosekundžių trukmės, retai pasikartojančiais impulsais. Mikrobangų spinduliotei pernešti buvo

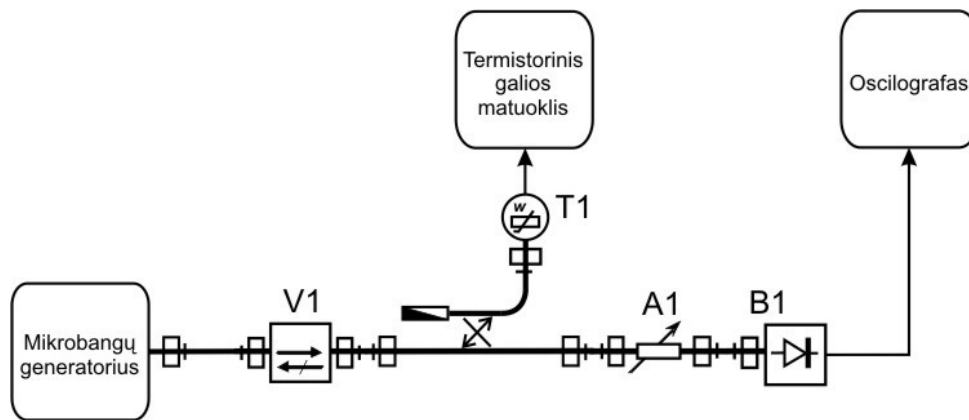


4.1.1 pav. Diodo voltvatinės charakteristikos matavimo schema 8 – 12 GHz. V1 – ventilis, F1 – antros harmonikos filtras, A1, A2 – atenuatoriai, D1 – mikrobangų detektorius, B1 – tiriamasis diodas.

naudojami stačiakampiai bangolaidžiai. Bangolaidžiu sklindanti galia buvo matuojama  $p$ -Ge diodiniu detektoriumi, kuris į bangolaidinį traktą buvo įjungtas per atšakotuvą. A2 atenuatorius buvo naudojamas sumažinti mikrobangų galią, krintančią į  $p$ -Ge diodinį detektorių. Į bandinį krintanti mikrobangų galia keičiama atenuatoriumi A1. Bandinio B1 atsakas į mikrobangas registruojamas oscilografu.

Voltvatinės charakteristikos matavimai dažnių 26 – 37,5 GHz ruože buvo atliekami stende, kurio struktūrinė schema pavaizduota 4.1.2 pav.

Mikrobangų generacijai naudojamas generatorius, kurio pagrindinis komponentas yra bėgančios bangos lempa. Generatorius gali veikti nuolatinės generacijos režimu arba impulsiniu režimu. Mikrobangų signalas moduluojamas meandru, t.y. stačiakampiu impulsu, kurio pasikartojimo periodas yra dvigubas impulso ilgis. Mikrobangų spinduliuotei perduoti iki bandinio naudojami stačiakampiai bangolaidžiai. Bangolaidžiu sklindanti spinduliuotės galia matuojama termistoriniu galios matuokliu, kurio termistorinė galvutė į bangolaidinį traktą įjungta per atšakotuvą. Mikrobangų galia matuojama generatoriui veikiant nuolatinės generacijos režimu, o impulsinė galia apskaičiuojama pagal formulę:



4.1.2 pav. Diodo voltvatinės charakteristikos matavimo schema. V1 – ventilis, T1 – termistorinė galvutė, A1 – atenuatorius, B1 – tiriamasis diodas.

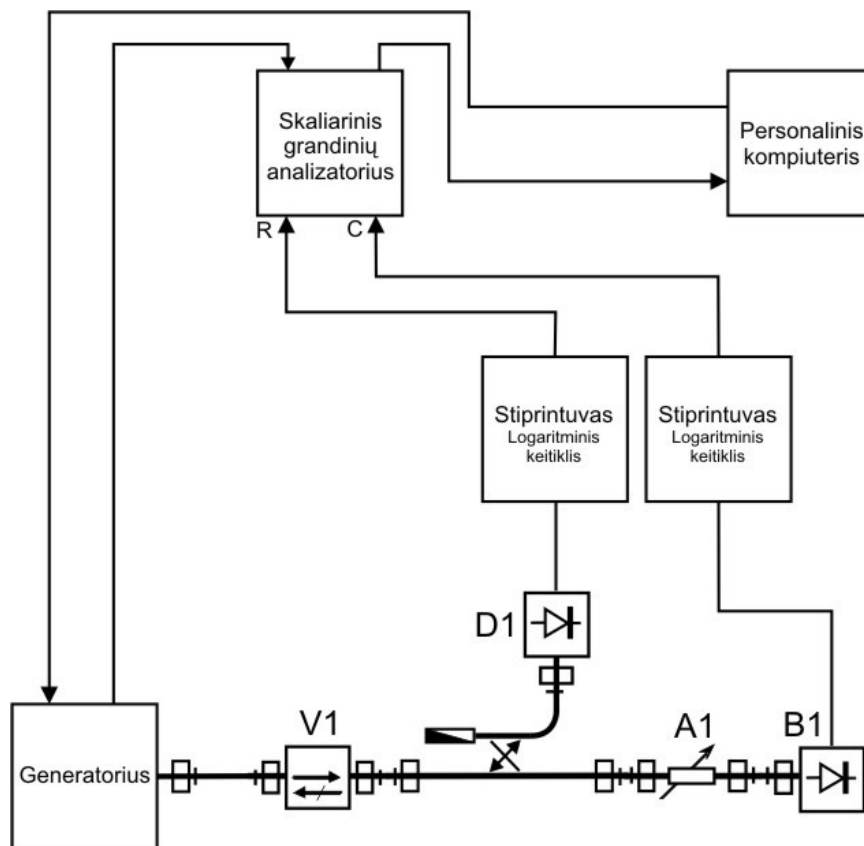


$$P_{imp} = \frac{P_{vid}}{f_m \cdot \tau}, \quad (4.1.1)$$

kur,  $P_{vid}$  – nuolatinės generacijos režimu veikiančio generatoriui vidutinė galia,  $f_m$  – impulsų pasikartojimo dažnis,  $\tau$  – impulso trukmė.

Įvairiatarpių diodų voltvatinių charakteristikų matavimai buvo atliekami naudojant vidinę mikrobangų generatoriaus amplitudinę moduliaciją stačiakampiu impulsu, kurio pasikartojimo dažnis buvo 1 kHz. Į bandinį krintanti mikrobangų galia keičiama atenuatoriumi A1. Bandinio B1 atsakas į mikrobangas registruojamas oscilografu.

Mikrobangų diodų jautrio dažninės charakteristikos matavimai dažnių ruožuose 75 – 110 GHz ir 110 – 170 GHz buvo atliekami stenduose, kurių



4.1.3 pav. Diodo jautrio matavimo schema. V1 – ventilis, D1 – mikrobangų diodas, A1 – atenuatorius, B1 – tiriamasis diodas.

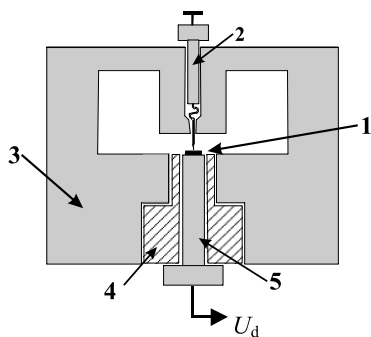
struktūrinė schema pavaizduota 4.1.3 pav. Skirtingiems dažnių ruožams struktūrinė stendo schema ir prietaisų tipai yra vienodi, o skiriasi tik naudojami bangolaidžiai ir bangolaidiniai elementai.

Mikrobangų generacijai naudojamas švytuojamojo dažnio generatorius, kurio pagrindinis komponentas yra atbulinės bangos lempa. Norint realizuoti panoraminį matavimo režimą, mikrobangų generatorius periodiškai keičia dažnį nuo žemiausio dažnio 75 GHz (110 GHz) iki aukščiausio dažnio 110 GHz (170 GHz). Išėjimo signalas yra moduluojamas 100 kHz dažniu pasikartojančiais stačiakampiais impulsais.

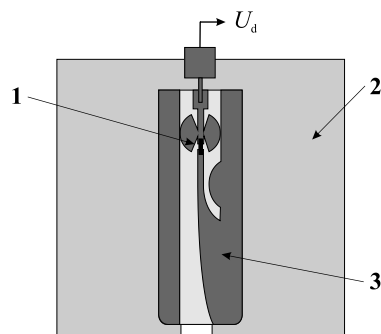
D1 detektorius matuoja krintančios mikrobangų spinduliuotės galią antrinėje linijoje, kuri parinkta taip, kad mikrobangų spinduliuotė būtų pakankamai maža siekiant užtikrinti, jog mikrobangų diodas D1 veiktų detekcijos, pagal kvadratinį dėsnį, režimu. Ranka valdomas atenuatorius reikalingas mikrobangų spinduliuotės galių, krintančių į bandinį, keisti. Mikrobangų diodo D1 ir tiriamojo bandinio B1 išėjimo signalai vienašiu kabeliu perduodami į logaritminius stiprintuvus, kurie sustiprintą signalą ir perduoda į skaliarinių grandinių analizatorių. Čia analoginiai signalai yra konvertuojami į skaitmeninius ir toliau USB kabeliu perduodami į asmeninį kompiuterį.

Jautrio skaičiavimus atlieka kompiuteris ir jautrio dažninė charakteristika visame matuojamų dažnių ruože yra pateikiama realiuoju laiku.

Taškinio diodo T1 detekcinės savybės buvo tiriamos, kai bandinys buvo įmontuotas į susiaurintą bangolaidinę galvutę. Detekcinių savybių tyrimams 8 – 12 GHz dažnių ruože skirta mikrobangų galvutė pavaizduota 4.1.4 pav. Planariniai mikrobangų diodai laidžia sidabro pasta buvo įklijuojami į juostelinę liniją, kuri buvo sumontuota į bangolaidinę galvutę. Mikrobangų galvutė su juosteline linija 26 – 37,5 GHz dažnių ruožui pavaizduota 4.1.5 pav.



1 – taškinis diodas                      4 – sugėriklis  
 2 – taškinio kontakto laikiklis      5 – padėklo kontakto laikiklis  
 3 – bangolaidis



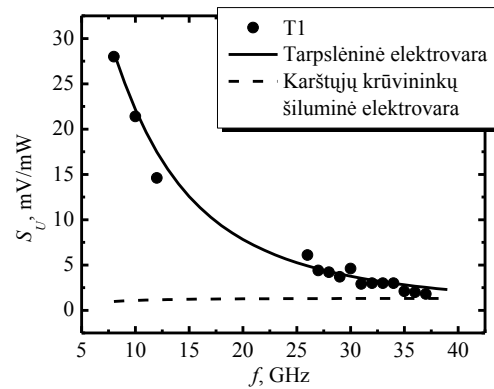
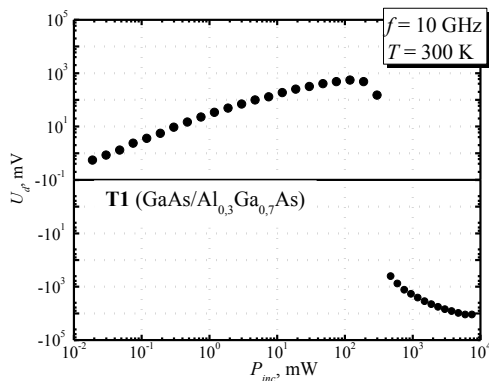
1 - planarinis diodas  
 2 - bangolaidis      3 - juostelinė linija

4.1.4 pav. Taškinio mikrobangų diodo T1 montavimo galvutė tyrimams 8 – 12 GHz dažnių ruože.

4.1.5 pav. Planarinių mikrobangų diodų H1, H2, V1 ir V2 montavimo galvutė tyrimams 26 – 37,5 GHz dažnių ruože.

## 4.2. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As taškinių mikrobangų diodų detekcinės savybės

Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As taškinio diodo T1 nuolatinės įtampos priklausomybė nuo į diodą krintančios mikrobangų galios, išmatuota kambario temperatūroje 10 GHz dažnyje, pateikta 4.2.1 pav. Teigiamas detektuotos įtampos potencialas buvo matuojamas taškiniame diodo kontakte. Šis įtampos poliškumas sutampa su šiluminės elektrovaros poliškumu  $n-n^+$  sandūroje, su tarpšlėninės elektrovaros  $n/n^+-Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  sandūroje ir mikrobangų srovių lyginimo  $n-GaAs/n-Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  sandūroje, ženklais. Taškinio diodo T1 voltvatinė charakteristika buvo išmatuota plačiame mikrobangų galių ruože: nuo 10  $\mu$ W iki 10 W. Gauti rezultatai parodė, kad diodas veikia kvadratinio detektavimo režimu iki 1 mW. Iš čia nustatytas diodo jautris buvo  $S = 30$  mV/mW. Toliau didėjant mikrobangų galiai, išėjimo charakteristika pradeda sotintis ir viršijus 300 mW, keičia savo poliškumą. Nemonotoninė diodo voltvatinė charakteristika didėjant mikrobangų galiai yra siejama su neigiamos diferencialinės varžos susidarymu  $n-GaAs$  sluoksnyje dėl Gano efekto.



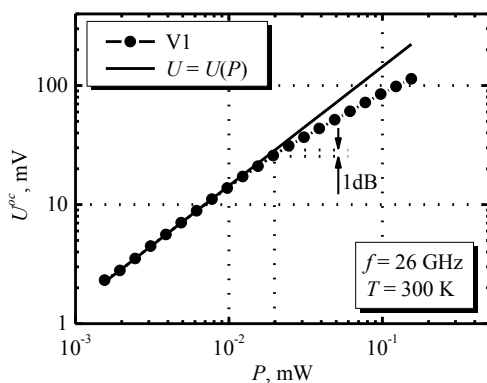
4.2.1 pav. Įvairiatario GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As taškinio diodo įtampos priklausomybė nuo krintančios mikrobangų galios, išmatuota 10 GHz dažnyje, kambario temperatūroje.

4.2.2 pav. T1 diodo jautrio priklausomybė nuo mikrobangų dažnio, išmatuota kambario temperatūroje.

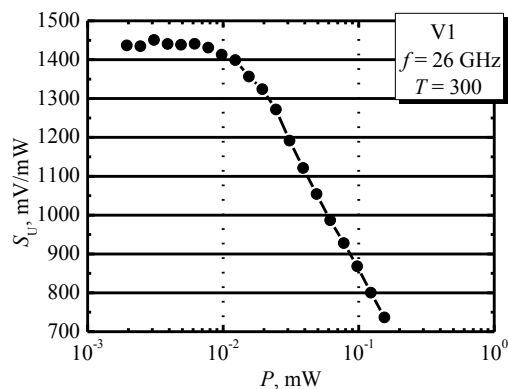
T1 diodo voltvatinės charakteristikos buvo išmatuotos dažnių ruožuose 8 – 12,5 GHz ir 26 – 37,5 GHz. Iš šių charakteristikų tiesinės dalies buvo nustatytas diodų jautris ir atidėta jautrio priklausomybė nuo dažnio, kuri pavaizduota 4.2.2 pav. Didėjant dažniui diodo jautris mažėja pagal  $1/\omega^2$  dėsnį (4.2.2 pav. ištisinė linija). Tokia jautrio priklausomybė nuo dažnio būdinga ir tarpslėninės elektrovaros (1.3.3.3) lygtis ir mikrobangų srovių lyginimo (1.3.1.11) lygtis detekcijos mechanizmams. Karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros teroinė priklausomybė 4.2.2 pav. atidėta punktyrine linija. Matyti, kad žemuose dažniuose šios elektrovaros indėlis į detektuojamą signalą yra labai mažas. Diodo detektuotos įtampos poliškumas yra vienodas ir visiems išvardinties mechanizmams, todėl potencialų skirtumas diodo kontaktuose žemuose dažniuose, veikiant mikrobangų elektriniams laukui, susidaro dėl tarpslėninės elektrovaros ir mikrobangų srovių lyginimo.

### 4.3. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As planarinių mikrobangų diodų detekcinės savybės

Įvairiatarpio diodo V1 detektuotos įtampos (a) ir iš voltvatinės charakteristikos įvertinto jautrio (b) priklausomybės nuo į diodą krintančios



(a)



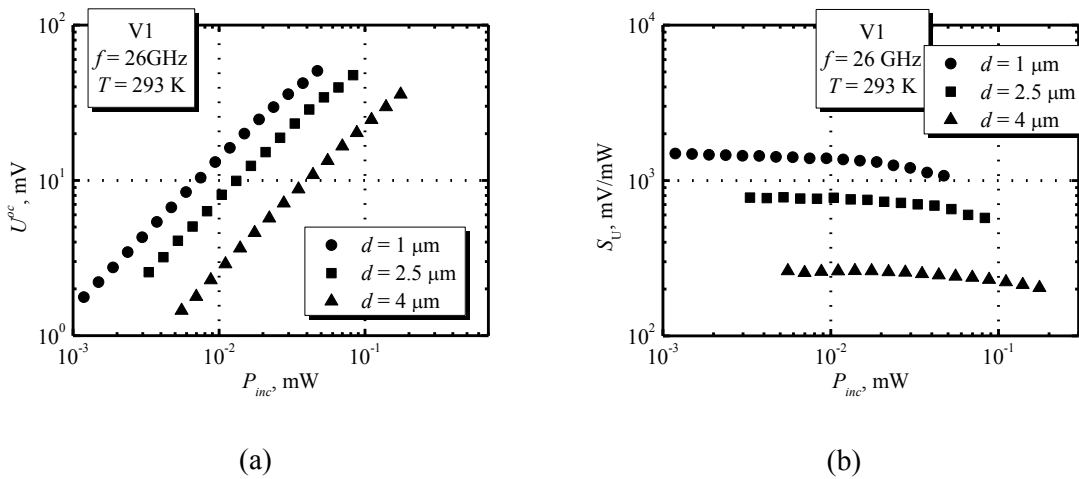
(b)

4.3.1 pav. Įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As diodo V1 nuolatinės įtampos priklausomybė nuo į diodą krintančios mikrobangų galios (a) ir įtampos jautrio priklausomybė nuo mikrobangų galios (b).

mikrobangų galios pavaizduotos 4.3.1 pav. Matavimai buvo atliekami kambario temperatūroje, naudojant 26 GHz mikrobangų spinduliuotę.

Iš matavimo rezultatų nustatytas diodo kvadratinio detektavimo ruožas yra iki 20 μW. Viršutine ruožo riba laikoma mikrobangų galia, kuriai esant eksperimentinė kreivė nukrypsta nuo kvadratinio dėsnio per 1 dB. Kai mikrobangų galia viršija 20 μW diodo įtampos priklausomybės nuo mikrobangų galios kreivės polinkis pradeda mažėti, kol veikimo režimas tampa tiesinio detektavimo. 4.3.1 pav. (a) matomas nukrypimas nuo detektavimo pagal kvadratinį dėsnį yra pereinamoji sritis į detektavimą pagal tiesinį dėsnį. Kvadratinėje diodo detektavimo srityje nustatytas diodo V1 jautris yra 1440 mV/mW (4.3.1 pav. (b)).

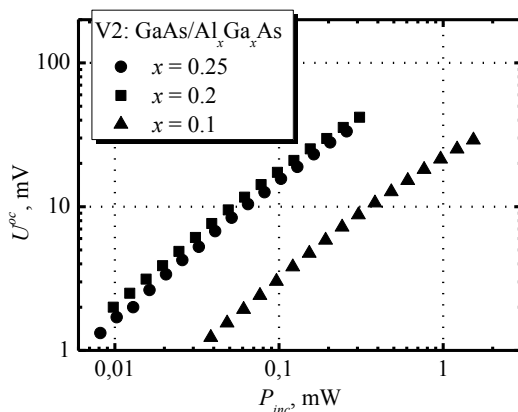
Įvairiatarpiai detektoriniai diodai buvo gaminami su skirtingais aktyviosios srities plotais. Diodų V1, turinčių skirtingus aktyviosios srities plotus, nuolatinės įtampos (a) ir jautrio (b) priklausomybės, išmatuotos kambario temperatūroje, naudojant 26 GHz dažnio mikrobangas, nuo į diodus krintančios mikrobangų galios pavaizduotos 4.3.2 pav.



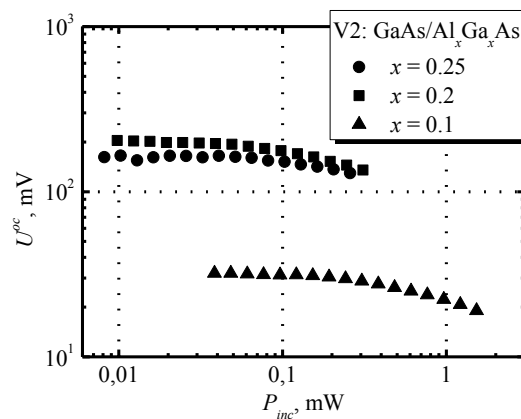
4.3.2 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As diodų V1, turinčių skirtingus aktyviosios srities plotčius, nuolatinės įtampos priklausomybės (a) ir įtampos jautrio priklausomybės (b) nuo į diodą krintančių mikrobangų galios.

Mažėjant diodų aktyviosios srities plotui, didėja jo įtampos jautris: diodo, kurio aktyviosios srities plotis  $d = 1 \mu\text{m}$  jautris  $S = 1440 \text{ mV/mW}$ , diodo, kurio  $d = 2,5 \mu\text{m}$ ,  $S = 770 \text{ mV/mW}$  ir diodo, kurio  $d = 4 \mu\text{m}$ ,  $S = 260 \text{ mV/mW}$ . Pagal (1.3.1.10) įtampos jautris žemuose dažniuose nepriklauso nuo barjerinės talpos ir nuoseklios varžos, todėl jautris neturėtų priklausyti ir nuo diodo aktyviosios srities ploto. Gauti rezultatai rodo, kad 26 GHz dažnyje diodų įtampos jautris priklauso tiesiškai nuo aktyviosios srities ploto, todėl šis dažnis  $f$  yra didesnis nei diodo atkirtos dažnis  $f_c$  ir toliau didinant dažnį įtampos jautris turėtų mažėti dėsnio  $1/\omega^2$ . Bandinių V2-V4 įtampos atviroje grandinėje ir jautrio priklausomybės nuo į diodą krintančios mikrobangų galios pavaizduotos 4.3.3 pav. Šiame paveikslėlyje lyginami įvairiatarpiai diodai, turintys skirtingą AlAs molinę dalį trinariame Al<sub>x</sub>Ga<sub>x</sub>As junginyje.

Mikrobangų diodai, kurių AlAs molinė dalis buvo  $x = 0,1$  turėjo mažiausią įtampos jautrį  $S_u = 32 \text{ mV/mW}$ , diodai, kurių molinė dalis  $x = 0,2$  turėjo įtampos jautrį  $S_u = 204 \text{ mV/mW}$ , o diodai, kurių molinė dalis  $x = 0,25$  turėjo įtampos jautrį  $S_u = 163 \text{ mV/mW}$ . Mikrobangų diodai, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,25$  turėjo didžiausią voltamperinės charakteristikos kreivumo koeficientą (3.2.1.3 pav.),



(a)

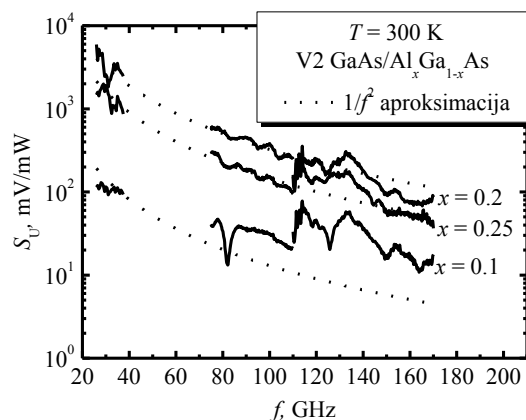


(b)

4.3.3 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų V2, turinčių skirtingas AlAs molines dalis  $x$  trinariame Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As junginyje, nuolatinės įtampos priklausomybės (a) ir įtampos jautrio priklausomybės (b) nuo į diodą krintančių mikrobangų galios.

tačiau įtampos jautris yra mažesnis, nei diodų, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,2$ . Tai galima paaiškinti tuo, kad didėjant diodo barjerinei varžai, mažėja jame sugeriamos mikrobangų galios dalis.

Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų V2 įtampos jautrio dažninės charakteristikos pavaizduotos 4.3.4 pav. Diodų, kurių AlAs molinė dalis  $x = 0,25$  ir  $x = 0,2$ , įtampos jautris yra atvirkščiai proporcingas dažnio kvadratui, tačiau diodų, kurių  $x = 0,1$  įtampos jautrio mažėjimas didėjant dažniui yra lėtesnis. Daug lėtesnis įtampos jautrio mažėjimas didėjant milimetrinių bangų dažniui, rodo, kad diodų, kurių  $x = 0,1$ , atkirtos dažnis yra didesnis, nei diodų su didesne AlAs moline dalimi.



4.3.4 pav. Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų V2, su AlAs moline dalimi  $x = 0,25$ ,  $x = 0,2$ ,  $x = 0,1$ , atitinkamai, įtampos jautrio dažninė priklausomybė.

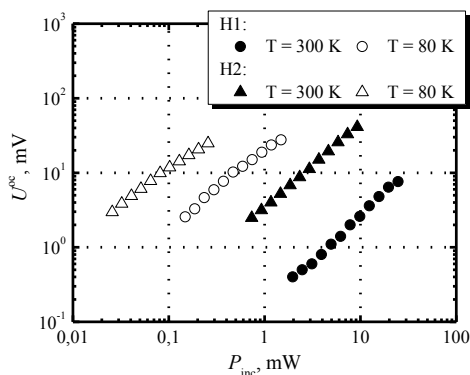
#### 4.4. Selektviai legiruotų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As planarinių mikrobangų diodų detekcinės savybės

Selektviai legiruotų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As mikrobangų detektorių H1 ir H2 voltvatinės charakteristikos, išmatuotos 26 GHz dažnyje kambario ir skystojo azoto temperatūrose, pavaizduotos 4.4.1 pav. Detektuotos įtampos ženklas sutapo su šiluminės krūvininkų elektrovaros ir bigradientinės elektrovaros ženklais.

Voltvatinės charakteristikos buvo tiesinės matuotame mikrobangų galios diapazone tiek kambario, tiek skystojo azoto temperatūrose. Iš gautų rezultatų nustatytas mikrobangų detektorių jautris. Diodo H1, kurio barjeras buvo legiruotas homogeniškai, jautris kambario temperatūroje buvo 0,3 mV/mW, o skystojo azoto temperatūroje 20 mV/mW. Diodo H2, kurio barjeras buvo legiruotas įterpiančiomis stipriai donorais legiruotą  $\delta$ -sluoksnį, jautris kambario temperatūroje buvo 2 mV/mW, o skystojo azoto temperatūroje siekė 120 mV/mW. Abiejų mikrobangų diodų jautrio padidėjimas skystojo azoto temperatūroje siejamas su padidėjusiu elektronų judriu ir pailgėjusia elektronų energijos relaksacijos trukme.

GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinio barjerinį sluoksnį legiruojant ne homogeniškai,

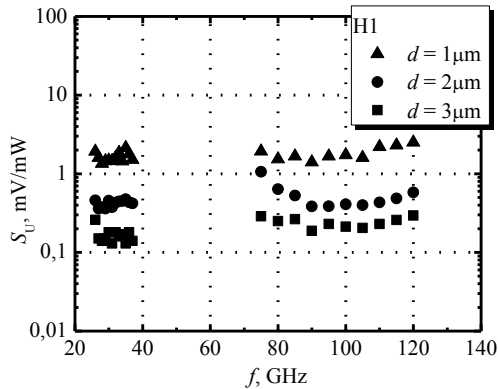
o įterpiančiomis stipriai legiruotą  $\delta$ -sluoksnį sumažėja legiruoto sluoksnio storis, todėl padidėja elektronų judris dvimačių elektronų kanale, kuris sąlygoja padidėjusį H2 bandinių voltvatinį jautrį lyginant su H1 bandiniais [62].



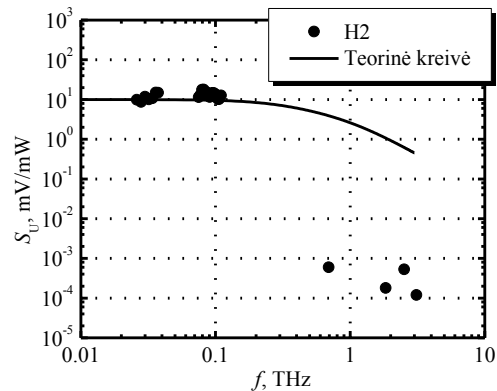
4.4.1 pav. Mikrobangų diodų H1 (apskritimai) ir H2 (trikampiai) voltvatinės charakteristikos, išmatuotos 26 GHz dažnyje kambario ir skystojo azoto temperatūrose.

Mikrobangų diodų jautris buvo išmatuotas 26 – 37,5 GHz ir 70 – 120 GHz dažnių ruožuose. Gauti





4.4.2 pav. Mikrobangų diodų H1, turinčių skirtingus kaklelio pločius, jautrio dažninė priklausomybė, išmatuota kambario temperatūroje.



4.4.3 pav. Mikrobangų diodo H2 jautrio dažninė priklausomybė, išmatuota kambario temperatūroje.

rezultatai pateikti 4.4.2 pav.

Nesimetriškai susiaurintų mikrobangų diodų H1 jautris, išmatuotas 26 GHz dažnyje kambario temperatūroje, priklausomai nuo diodo kaklelio pločio skyrėsi net 10 kartų, t.y. bandinių, kurių kaklelio plotis buvo 3  $\mu\text{m}$  turėjo 0,2 mV/mW jautrį, o bandiniai, kurių kaklelio plotis buvo 1  $\mu\text{m}$  – 2 mV/mW. Diodų jautris buvo pastovus visame matuotame dažnių diapazone. Mikrobangų diodo H2 jautrio priklausomybė nuo dažnio, išmatuota iki THz srities pavaizduota 4.4.3 pav. Tame pačiame paveiksle atidėta ir teorinė jautrio priklausomybė nuo dažnio, apskaičiuota naudojantis (1.3.2.6) išraiška. Skaičiavimai rodo, kad diodo jautris yra pastovus iki 60 GHz, o didesniuose dažniuose pradeda mažėti kvadratinio dėsnio. Eksperimentiniai rezultatai rodo, kad jautris yra pastovus 26 GHz – 120 GHz dažnių ruože, tačiau terahercų srityje mažėja daug sparčiau nei numato teorija. Šis ryškus sumažėjimas gali būti susijęs su sumažėjusia absorbuotos galios dalimi didėjant dažniui.

## Skyriaus pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Taškinių įvairiatarpių diodų T1 voltvatinė charakteristika, išmatuota kambario temperatūroje 10 GHz dažnyje, yra tiesinė iki 1 mW. Nustatytas diodo jautris yra 30 mV/mW. Diodo jautris yra atvirkščiai proporcingas mikrobangų dažnio kvadratui intervale nuo 8 GHz iki 37 GHz.
- Didėjant mikrobangų galiai taškinio diodo T1 atsakas pradeda sotintis ir keičia savo poliškumą. Nemonotoninę diodo atsako priklausomybę nuo mikrobangų galios siejame su Gano domenų susidarymu.
- Detektuotos įtampos poliškumas, jautris ir jo dažninė priklausomybė taškiniuose dioduose parodė, kad detekcija šiuose dioduose vyksta dėl mikrobangų srovių lyginimo GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sandūroje ir tarpslėninės elektrovaros  $n/n^+$ -AlGaAs.
- Planarinio įvairiatarpio GaAs/Al<sub>0,2</sub>Ga<sub>0,8</sub>As diodo V1, kurio aktyviosios srities plotis 4 μm jautris 26 GHz dažnyje yra 260 mV/mW. Sumažinus kaklelio plotį iki 1 μm, diodo jautris padidėja iki 1440 mV/mW.
- Planarinių įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As diodų V2 jautris priklauso nuo AlAs molinės dalies  $x$  ir yra didžiausias, kai  $x = 0,2$ .
- Planarinių selektyviai legiruotų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As diodų H1 jautris kambario temperatūroje yra 0,3 mV/mW, diodų H2 jautris 2 mV/mW.
- Planarinių selektyviai legiruotų GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As diodų jautris priklauso nuo barjerinio Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnio legiravimo profilio. Kai barjerinis sluoksnis yra legiruojamas įterpiant stipriai donorais legiruotą  $\delta$ -sluoksnį, pagamintų diodų jautris yra didesnis, lyginant su diodais, kurių barjerinis sluoksnis yra legiruotas homogeniškai.

## IŠVADOS

- Įvairiatarpių GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As darinių, skirtų mikrobangų diodų gamybai, tyrimas nuostoviosios fotoluminescencijos ir laike koreliuotų fotonų skaičiavimo metodais parodė, kad epitakasinių sluoksnių, užaugintų molekulinio pluoštelio epitaksijos metodu, kokybė priklauso nuo auginimo temperatūros. GaAs sluoksnio aukštesnė kokybė gaunama darinius auginant 600°C temperatūroje, o Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As sluoksnio aukštesnė kokybė gaunama auginant 700°C temperatūroje.
- Taškinių mikrobangų diodų, kurių GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As darinys buvo užaugintas skystinės epitaksijos metodu, voltamperinės charakteristikos kambario temperatūroje omiškumą sąlygoja lėkšta įvairiatarpė sandūra.
- Planarinių nesimetriškai susiaurintų diodų, kurių GaAs/Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As darinys buvo užaugintas molekulinio pluoštelio epitaksijos metodu legiruojant barjerinį Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnį įterpian stipriai donorais legiruotą δ-sluoksnį, varža yra mažesnė, nei tokio pačio tipo diodų, kurių darinio barjerinis Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnis legiruotas homogeniškai, dėl didesnio elektronų judrio dvimačių elektronų kanale.
- Taškinių mikrobangų diodų detektuotos įtampos poliškumas, jautris mikrobangų galiai ir jautrio dažninė priklausomybė parodė, kad detekcija vyksta dėl mikrobangų srovių lyginimo įvairiatarpėje GaAs/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As sandūroje ir tarpšlėninės elektrovaros  $n/n^+$ - Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As.
- Planarinių nesimetriškai susiaurintų mikrobangų diodų detekcija vyksta dėl karštųjų krūvininkų šiluminės elektrovaros susiaurintoje kaklelio dalyje atsiradimo. Diodų, kurių darinio barjerinis Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnis legiruotas įterpian stipriai legiruotą δ-sluoksnį, jautris didesnis, nei diodų, kurių darinio barjerinis Al<sub>0,25</sub>Ga<sub>0,75</sub>As sluoksnis legiruotas homogeniškai, dėl didesnio elektronų judrio dvimačių elektronų kanale.

- Planarinių įvairiatarpių GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  mikrobangų diodų jautris priklauso nuo AlAs molinės dalies  $x$  barjeriniame  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sluoksnyje ir yra didžiausias, kai  $x = 0,2$ .

## Naudotos literatūros sąrašas

- [1] S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, "Human skin permittivity determined by millimeter wave reflection measurements," *Bioelectromagnetics*, vol. 28, pp. 331-339, 2007.
- [2] F. Topfer, S. Dudorov, and J. Oberhammer, "Micromachined 100GHz near-field measurement probe for high-resolution microwave skin-cancer diagnosis," in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International*, 2012, pp. 1-3.
- [3] H. C. Torrey, C. A. Whitmer, and S. A. Goudsmit, *Crystal Rectifiers*: McGraw-Hill Book Company, 1948.
- [4] D. T. Young and J. C. Irvin, "Millimeter frequency conversion using Au-n-type GaAs Schottky barrier epitaxial diodes with a novel contacting technique," *Proceedings of the IEEE*, vol. 53, pp. 2130-2131, 1965.
- [5] M. J. Kearney, A. Condie, and I. Dale, "GaAs planar doped barrier diodes for millimetre-wave detector applications," *Electronics Letters*, vol. 27, pp. 721-722, 1991.
- [6] J. Lechner, M. Kneidinger, H. W. Thim, R. Kuch, and J. Wernisch, "Microwave detection with n-GaAs/N-GaAlAs heterojunctions," *Electronics Letters*, vol. 15, pp. 254-255, 1979.
- [7] R. T. Syme, M. J. Kelly, M. Robinson, R. S. Smith, and I. Dale, "Novel GaAs/AlAs tunnel structures as microwave detectors," 1992, pp. 46-56.
- [8] P. E. Chase and K. K. N. Chang, "Tunnel Diodes as Millimeter Wave Detectors and Mixers," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 560-561, 1963.
- [9] R. I. Harrison and J. E. Zucker, "Hot-carrier microwave detector," *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, pp. 588-595, 1966.
- [10] A. Fantom, *Radio Frequency & Microwave Power Measurement*: P. Peregrinus, 1990.
- [11] M. V. Schneider and G. T. Wrixon, "Development and Testing of a Receiver at 230 GHz," in *Microwave Symposium Digest, 1974 S-MTT International*, 1974, pp. 120-122.
- [12] G. T. Wrixon, "Low-Noise Diodes and Mixers for the 1--2-mm Wavelength Region," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1159-1165, 1974.
- [13] A. A. Immorlica and E. J. Wood, "A novel technology for fabrication of beam-leaded GaAs Schottky-barrier mixer diodes," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 710-713, 1978.
- [14] W. L. Bishop, K. McKinney, R. J. Mattauch, T. W. Crowe, and G. Green, "A Novel Whiskerless Schottky Diode for Millimeter and Submillimeter Wave

- Application," in *Microwave Symposium Digest, 1987 IEEE MTT-S International*, 1987, pp. 607-610.
- [15] Y. A. A. K. Kerr, "Schottky diode MM detectors with improved sensitivity and dynamic range," *Microwave Journal*, pp. 67-71, 1981.
- [16] K. N. Tu, R. D. Thompson, and B. Y. Tsaur, "Low Schottky barrier of rare-earth silicide on n-Si," *Applied Physics Letters*, vol. 38, pp. 626-628, 1981.
- [17] J. R. Waldrop, "Electrical properties of ideal metal contacts to GaAs: Schottky-barrier height," *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, vol. 2, pp. 445-448, 1984.
- [18] J. R. Waldrop, "Rare-earth metal Schottky-barrier contacts to GaAs," *Applied Physics Letters*, vol. 46, pp. 864-866, 1985.
- [19] Y. Wada and K. Wada, "GaAs surface passivation by deposition of an ultrathin InP-related layer," *Applied Physics Letters*, vol. 63, pp. 379-381, 1993.
- [20] T. Hashizume, K. Ikeya, M. Mutoh, and H. Hasegawa, "Surface passivation of GaAs with ultrathin Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si interface control layer formed by MBE and in situ ECR plasma nitridation," *Applied Surface Science*, vol. 123-124, pp. 599-602, 1998.
- [21] Z. J. Horváth, V. Rakovics, B. Szentpáli, S. Püspöki, and K. Žd'ánský, "InP Schottky junctions for zero bias detector diodes," *Vacuum*, vol. 71, pp. 113-116, 2003.
- [22] H. Ito, Y. Muramoto, H. Yamamoto, and T. Ishibashi, "High-sensitivity submillimeter wave detector module implementing InP-based zero-biased Schottky-barrier diode," pp. 84960K-84960K, 2012.
- [23] W. Jeon, T. M. Firestone, J. C. Rodgers, and J. Melngailis, "Design and fabrication of Schottky diode, on-chip RF power detector," *Solid-State Electronics*, vol. 48, pp. 2089-2093, 2004.
- [24] H. Ruonan, Z. Yaming, D. Coquillat, H. Videlier, W. Knap, E. Brown, and K. K. O, "A 280-GHz Schottky Diode Detector in 130-nm Digital CMOS," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 46, pp. 2602-2612, 2011.
- [25] I. Dale, A. Condie, S. Neylon, and M. J. Kearney, "Planar doped barrier mixer and detector diodes as alternatives to Schottky diodes for both microwave and millimetre wave applications," in *Microwave Symposium Digest, 1989., IEEE MTT-S International*, 1989, pp. 467-470 vol.1.
- [26] V. T. Vo, Z. R. Hu, K. L. Koon, C. N. Dharmasiri, S. C. Subramaniam, and A. A. Rezazadeh, "High voltage sensitivity GaAs planar doped barrier diodes for microwave/millimetre-wave zero-bias power detector applications," *Electronics Letters*, vol. 40, pp. 343-344, 2004.
- [27] H. Zhirun, V. T. Vo, and A. A. Rezazadeh, "High tangential signal sensitivity GaAs planar doped barrier diodes for microwave/millimeter-wave power detector applications," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 15, pp. 150-152, 2005.

- [28] J. Niu, R. Yu, S.-Y. Chung, P. R. Berger, P. E. Thompson, and P. Fay, "High sensitivity Si-based backward diodes for zero-biased square-law detection and the effect of post-growth annealing on performance," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 26, pp. 575-578, 2005.
- [29] S.-Y. Park, R. Yu, S.-Y. Chung, P. R. Berger, P. E. Thompson, and P. Fay. (2007, Sensitivity of Si-based zero-bias backward diodes for microwave detection. *Electronics Letters* 43(5), 295-296.
- [30] J. N. Schulman and D. H. Chow, "Sb-heterostructure interband backward diodes," *Electron Device Letters, IEEE*, vol. 21, pp. 353-355, 2000.
- [31] J. H. Davies, *The Physics of Low-dimensional Semiconductors: An Introduction*: Cambridge University Press, 1998.
- [32] J. N. Schulman, E. T. Croke, D. H. Chow, H. L. Dunlap, K. S. Holabird, M. A. Morgan, and S. Weinreb, "Quantum tunneling Sb-heterostructure millimeter-wave diodes," in *Electron Devices Meeting, 2001. IEDM '01. Technical Digest. International*, 2001, pp. 35.1.1-35.1.3.
- [33] J. N. Schulman, V. Kolinko, M. Morgan, C. Martin, J. Lovberg, S. Thomas, III, J. Zinck, and Y. K. Boegeman, "W-band direct detection circuit performance with Sb-heterostructure diodes," *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, vol. 14, pp. 316-318, 2004.
- [34] T. Takahashi, M. Sato, Y. Nakasha, and N. Hara, "Lattice-matched p<sup>+</sup>-GaAsSb/i-InAlAs/n-InGaAs zero-bias backward diodes for millimeter-wave detectors and mixers," in *Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 95-98.
- [35] T. C. L. G. Sollner, W. D. Goodhue, P. E. Tannenwald, C. D. Parker, and D. D. Peck, "Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz," *Applied Physics Letters*, vol. 43, pp. 588-590, 1983.
- [36] I. Mehdi, C. Kidner, J. R. East, and G. I. Haddad, "Millimeter-wave detection using resonant tunnelling diodes," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 3, pp. 1-4, 1990.
- [37] A. Lechner, M. Kneidinger, and R. Kuch, "Planar n-GaAs/N-GaAlAs microwave diodes," *Electronics Letters*, vol. 16, pp. 1-2, 1980.
- [38] S. H. Koenig, "Hot and warm electrons — A review," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 8, pp. 227-234, 1959.
- [39] J. Zucker, "Thermoelectric Power of Hot Carriers," *Journal of Applied Physics*, vol. 35, pp. 618-621, 1964.
- [40] J. K. Pozhela and K. K. Repshas, "Thermoelectric Force of hot Carriers," *physica status solidi (b)*, vol. 27, pp. 757-762, 1968.
- [41] A. Oshimoto and K. Kikuchi, "Microwave Power Meter using Hot Electron," in *Microwave Conference, 1973. 3rd European*, 1973, pp. 1-4.

- [42] K. Kikuchi and A. Oshimoto, "Broad-band high-speed microwave power sensor using hot carriers in semiconductor," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. IM-30, pp. 238-242, 1981.
- [43] J. P. S. Ašmontas, K. Repšas, "Karštų srovės nešėjų sąlygota bigradientinė evj," *Lietuvos fizikos rinkinys*, vol. 9, pp. 245-251, 1971.
- [44] S. Ašmontas and A. Sužiedelis, "New microwave detector," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 15, pp. 525-538, 1994/03/01 1994.
- [45] A. B. Hoofring, V. J. Kapoor, and W. Krawczonek, "Submicron nickel-oxide-gold tunnel diode detectors for rectennas," *Journal of Applied Physics*, vol. 66, pp. 430-437, 1989.
- [46] S. Krishnan, S. Bhansali, E. Stefanakos, and Y. Goswami, "Thin Film Metal-Insulator-Metal Junction for Millimeter Wave Detection," *Procedia Chemistry*, vol. 1, pp. 409-412, 2009.
- [47] S. Barbieri, F. Mango, F. Beltram, M. Lazzarino, and L. Sorba, "Broad-band microwave detection with a novel 2D hot-electron device," *Superlattices and Microstructures*, vol. 23, pp. 1079-1082, 1998.
- [48] E. S. Kannan, I. Bisotto, J. C. Portal, T. J. Beck, and L. Jalabert, "Energy free microwave based signal communication using ratchet effect," *Applied Physics Letters*, vol. 101, pp. 143504-4, 2012.
- [49] R. L. Anderson, "Experiments on Ge-GaAs heterojunctions," *Electron Devices, IRE Transactions on*, vol. 9, pp. 509-509, 1962.
- [50] A. Dargys and J. Kundrotas, *Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP*. Vilnius, Lithuania: Science and Encyclopedia Publishers, 1994.
- [51] K. K. Ng, *Complete Guide to Semiconductor Devices*: McGraw-Hill, 1995.
- [52] L. L. Chang, "The conduction properties of  $\text{Ge}\square\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x\text{n-n}$  heterojunctions," *Solid-State Electronics*, vol. 8, pp. 721-728, 1965.
- [53] S. M. Sze and K. K. Ng, *Physics of semiconductor devices*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007.
- [54] W. G. Oldham and A. G. Milnes, "n-n Semiconductor heterojunctions," *Solid-State Electronics*, vol. 6, pp. 121-132, 1963.
- [55] J. F. Womac and R. H. Rediker, "The graded-gap  $\text{Al}_{[sub x]} \text{Ga}_{[sub 1 - x]} \text{As}_{[Single Bond]} \text{GaAs}$  heterojunction," *Journal of Applied Physics*, vol. 43, pp. 4129-4133, 1972.
- [56] D. T. Cheung, S. Y. Chiang, and G. L. Pearson, "A simplified model for graded-gap heterojunctions," *Solid-State Electronics*, vol. 18, pp. 263-266, 1975.
- [57] C. M. Garner, Y. D. Shen, J. S. Kim, G. L. Pearso, F. W. E. Spicer, J. J. S. Harris, and D. D. Edwall, "Auger profiling of "abrupt" LPE  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$  heterojunctions," *Journal of Applied Physics*, vol. 48, pp. 3147-3149, 1977.



- [58] A. Chandra and L. F. Eastman, "Rectification at n-n GaAs:(Ga,Al)As heterojunctions," *Electronics Letters*, vol. 15, pp. 90-91, 1979.
- [59] S. C. Lee and G. L. Pearson, "Rectification in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs N-n heterojunction devices," *Solid-State Electronics*, vol. 24, pp. 563-568, 1981.
- [60] C. L. Allyn, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, "New rectifying semiconductor structure by molecular beam epitaxy," *Applied Physics Letters*, vol. 36, pp. 373-376, 1980.
- [61] V. Karpus, *Dvimačiai elektronai*, 2004.
- [62] E. F. Schubert, L. Pfeiffer, K. W. West, and A. Izabelle, "Dopant distribution for maximum carrier mobility in selectively doped  $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ /GaAs heterostructures," *Applied Physics Letters*, vol. 54, pp. 1350-1352, 1989.
- [63] I. J. Bahl and P. Bhartia, *Microwave solid state circuit design*: Wiley-Interscience, 2003.
- [64] K. R. S. Ašmontas, "Apie karštųjų krūvio nešėjų sąlygotą bigradientinę elektrovaros jėgą " *Lietuvos fizikos rinkinys*, vol. 13, pp. 550-558, 1973.
- [65] M. Golio, *The RF and Microwave Handbook*. Florida: CRC Press LLC, 2001.
- [66] H. J. Scheel, "Introduction to Liquid Phase Epitaxy," in *Liquid Phase Epitaxy of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 1-19.
- [67] G. S. May and S. M. Sze, *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*: John Wiley & Sons, Incorporated, 2004.
- [68] I.-H. Tan, G. L. Snider, L. D. Chang, and E. L. Hu, "A self-consistent solution of Schrödinger--Poisson equations using a nonuniform mesh," *Journal of Applied Physics*, vol. 68, pp. 4071-4076, 1990.
- [69] N. Braslau, J. B. Gunn, and J. L. Staples, "Metal-semiconductor contacts for GaAs bulk effect devices," *Solid-State Electronics*, vol. 10, pp. 381-383, 1967.
- [70] C. Bosio, J. L. Staehli, M. Guzzi, G. Burri, and R. A. Logan, "Direct-energy-gap dependence on Al concentration in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ," *Physical Review B*, vol. 38, pp. 3263-3268, 1988.
- [71] S. B. Nam, D. C. Reynolds, C. W. Litton, R. J. Almassy, T. C. Collins, and C. M. Wolfe, "Free-exciton energy spectrum in GaAs," *Physical Review B*, vol. 13, pp. 761-767, 1976.
- [72] D. J. Ashen, P. J. Dean, D. T. J. Hurle, J. B. Mullin, A. M. White, and P. D. Greene, "The incorporation and characterisation of acceptors in epitaxial GaAs," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 36, pp. 1041-1053, 1975.
- [73] I. Szafranek, M. A. Plano, M. J. McCollum, S. A. Stockman, S. L. Jackson, K. Y. Cheng, and G. E. Stillman, "Growth-induced shallow acceptor defect and related luminescence effects in molecular beam epitaxial GaAs," *Journal of Applied Physics*, vol. 68, pp. 741-754, 1990.

- [74] H. Kunzel and K. Ploog, "The effect of As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub> molecular beam species on photoluminescence of molecular beam epitaxially grown GaAs," *Applied Physics Letters*, vol. 37, pp. 416-418, 1980.
- [75] G. D. Gilliland, D. J. Wolford, T. F. Kuech, and J. A. Bradley, "Luminescence kinetics of intrinsic excitonic states quantum-mechanically bound near high-quality (n<sup>-</sup>-type GaAs)/(p-type Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As) heterointerfaces," *Physical Review B*, vol. 49, pp. 8113-8125, 1994.
- [76] J. X. Shen, Y. Oka, W. Ossau, G. Landwehr, K. J. Friedland, R. Hey, K. Ploog, and G. Weimann, "Vertical transport of photo-excited carriers for excitonic recombinations in modulation doped GaAsGa<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As heterojunctions," *Solid State Communications*, vol. 106, pp. 495-499, 1998.
- [77] A. Mysyrowicz, E. Benson, and E. Fortin, "Directed Beam of Excitons Produced by Stimulated Scattering," *Physical Review Letters*, vol. 77, pp. 896-899, 1996.
- [78] R. M. Stevenson, V. N. Astratov, M. S. Skolnick, D. M. Whittaker, M. Emam-Ismael, A. I. Tartakovskii, P. G. Savvidis, J. J. Baumberg, and J. S. Roberts, "Continuous Wave Observation of Massive Polariton Redistribution by Stimulated Scattering in Semiconductor Microcavities," *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 3680-3683, 2000.
- [79] J. Keeling, F. M. Marchetti, M. H. Szymańska, and P. B. Littlewood, "Collective coherence in planar semiconductor microcavities," *Semiconductor science and technology*, vol. 22, p. R1, 2007.
- [80] A. Č. J. Kundrotas, V. Nargelienė, A. Sužiedėlis, S. Ašmontas, J. Gardauskas, E. Johannessen, A. Johannessen, "The increase of radiative lifetime of free excitons in selectiveley Si-doped GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures," *Abstracts of 15th International Symposium on Ultrafast Phenomena in Semiconductors*, 2013.
- [81] E. Grilli, M. Guzzi, R. Zamboni, and L. Pavesi, "High-precision determination of the temperature dependence of the fundamental energy gap in gallium arsenide," *Physical Review B*, vol. 45, pp. 1638-1644, 1992.
- [82] L. Pavesi and M. Guzzi, "Photoluminescence of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As alloys," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, pp. 4779-4842, 1994.
- [83] G. Oelgart, G. Lippold, M. Proctor, D. Martin, and F. K. Reinhart, "Ionization energy of the Si acceptor on Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As," *Semiconductor science and technology*, vol. 6, p. 1120, 1991.
- [84] R. Heilman and G. Oelgart, "Ionization energy of the carbon acceptor in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As," *Semiconductor science and technology*, vol. 5, p. 1040, 1990.
- [85] L. Pavesi and M. Guzzi, "Photoluminescence of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As alloys," *Journal of Applied Physics*, vol. 75, p. 4779, 1994.
- [86] J. R. Haynes, "Experimental Proof of the Existence of a New Electronic Complex in Silicon," *Physical Review Letters*, vol. 4, pp. 361-363, 1960.
- [87] W. Bludau and E. Wagner, "Impact ionization of excitons in GaAs," *Physical Review B*, vol. 13, pp. 5410-5414, 1976.

- [88] J. Kundrotas, A. Čerškus, S. Ašmontas, G. Valušis, M. P. Halsall, E. Johannessen, and P. Harrison, "Impurity-induced Huang–Rhys factor in beryllium  $\delta$ -doped GaAs/AlAs multiple quantum wells: fractional-dimensional space approach," *Semiconductor science and technology*, vol. 22, p. 1070, 2007.
- [89] T. F. Kuech, D. J. Wolford, R. Potemski, J. A. Bradley, K. H. Kelleher, D. Yan, J. P. Farrell, P. M. S. Lesser, and F. H. Pollak, "Dependence of the Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As band edge on alloy composition based on the absolute measurement of  $x$ ," *Applied Physics Letters*, vol. 51, pp. 505-507, 1987.
- [90] G. Wicks, W. I. Wang, C. E. C. Wood, L. F. Eastman, and L. Rathbun, "Photoluminescence of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As grown by molecular beam epitaxy," *Journal of Applied Physics*, vol. 52, pp. 5792-5796, 1981.
- [91] T. Hayakawa, K. Takahashi, T. Suyama, M. Kondo, S. Yamamoto, and T. Hijikata, "Effect of group V/III flux ratio on the reliability of GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As laser diodes prepared by molecular beam epitaxy," *Applied Physics Letters*, vol. 52, pp. 252-254, 1988.
- [92] G. W. p't Hooft, W. A. J. A. van der Poel, L. W. Molenkamp, and C. T. Foxon, "Giant oscillator strength of free excitons in GaAs," *Physical Review B*, vol. 35, pp. 8281-8284, 1987.
- [93] L. F. Halle, S. C. Moss, and D. C. Marvin, "Transient photoluminescence measurements on GaAs and AlGaAs double heterostructures," in *Photovoltaic Specialists Conference, 1993., Conference Record of the Twenty Third IEEE*, 1993, pp. 774-778.
- [94] A. Čėsna, J. Kundrotas, and A. Dargys, "Photoluminescence transients due to donor and exciton avalanche breakdown," *Journal of Luminescence*, vol. 78, pp. 157-166, 1998.
- [95] A. Lohner, M. Woerner, T. Elsaesser, and W. Kaiser, "Picosecond capture of photoexcited holes by shallow acceptors in p-type GaAs," *Physical Review Letters*, vol. 68, pp. 3920-3923, 1992.
- [96] Y.-C. Shih, M. Murakami, E. L. Wilkie, and A. C. Callegari, "Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs," *Journal of Applied Physics*, vol. 62, p. 582, 1987.
- [97] G. Y. Robinson, "Variation of Schottky-barrier energy with interdiffusion in Au and Ni/Au/Ge films on GaAs," *Journal of Vacuum Science and Technology*, vol. 13, pp. 884-887, 1976.