

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Algirdas Jasinskas

ARTIMOSIOS INFRARAUDONOSIOS SRITIES LAZERINIŲ STRUKTŪRŲ SU III-V  
KVANTINIŲ DUOBIŲ AKTYVIAJA TERPE FORMAVIMAS IR TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Fotonikos ir nanotechnologijų  
studijų programa

Studentas

Algirdas Jasinskas

Leista ginti

2022-05-18

Darbo vadovas

doc. dr. Renata Butkutė

Instituto atstovas

prof. dr. Ramūnas Aleksiejūnas

Vilnius 2022

# Turinys

|   |           |
|---|-----------|
| ĮVADAS .....  | 3         |
| SANTRUMPOS .....  | 6         |
| <b>1. TEORINIS ĮVADAS .....</b>   | <b>7</b>  |
| 1.1. Medžiagų inžinerija ir III-V puslaidininkiai .....   | 7         |
| 1.2. Kvantinės duobės .....   | 9         |
| 1.3. Brego veidrodžiai.....   | 11        |
| <b>2. LITERATŪROS APŽVALGA .....</b>  | <b>13</b> |
| 2.1. Infraraudonosios srities lazeriniai šaltiniai .....  | 13        |
| 2.2. Pasiekimai bismidinių junginių tyrimuose .....   | 14        |
| <b>3. DARBO METODIKA .....</b>  | <b>17</b> |
| 3.1. Molekulinių pluoštelių epitaksija .....  | 17        |
| 3.2. Charakterizavimo metodai.....  | 18        |
| 3.2.1. Rentgeno spindulių difrakcija .....  | 18        |
| 3.2.2. Atominių jėgų mikroskopija .....   | 19        |
| 3.2.3. Fotoluminescencijos matavimai.....   | 20        |
| 3.2.4. Atspindžio matavimai .....   | 21        |
| <b>4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS.....</b>   | <b>23</b> |
| 4.1. GaAsBi kvantinių duobių auginimas.....   | 23        |
| 4.2. InGaAs kvantinių duobių auginimas .....  | 24        |
| 4.3. MBE auginimo parametrų įtaka GaAsBi ir InGaAs kvantinių duobių optinėms ir<br>struktūrinėms savybėms ..... | 25        |
| 4.4. VECSEL struktūrų modeliavimas .....  | 32        |
| 4.5. Lazerinių struktūrų charakterizavimas .....  | 40        |
| 4.6. Nuo lazerinės struktūros link lazerio.....   | 43        |
| <b>5. IŠVADOS.....</b>  | <b>46</b> |
| REZULTATŲ VIEŠINIMAS .....  | 47        |
| LITERATŪROS SĄRAŠAS .....   | 49        |
| SANTRAUKA .....   | 54        |
| SUMMARY .....   | 55        |

# Įvadas

Moksliniai tyrimai infraraudonųjų (IR) bangų spektrinėje srityje pastaruoju metu sulaukia ypatingo dėmesio. Dėl šioje srityje esančių daugelio organinių molekulių vibracinės sugerties arba emisijos spektrų linijų IR tampa svarbia ir perspektyvia taikymams biomedicinoje, aplinkosaugoje, krašto apsaugos ir kitose srityse [1], [2]. Tačiau daugumai tokių taikymų vis dar trūksta efektyvių IR spinduliuotės šaltinių ir detektorių. Šiuolaikinių puslaidininkinių lazerinių diodų taikymą riboja du pagrindiniai faktoriai - lazerinės spinduliuotės bangos ilgio kitimas svyruojant aplinkos temperatūrai bei su sukinio – orbitine sąveika susiję nespindulinės Ožė rekombinacijos nuostoliai [3]. Temperatūrinė medžiagų draustinių energijų tarpo priklausomybė lemia tai, kad šiuos lazerius būtina šaldyti siekiant užtikrinti stabilų jų veikimą, o tai didina sistemos matmenis ir kainą. Šiandien plačiai naudojami GaInAsP šviesos diodai ir lazeriai nesiekia MIR bangų srities, o GaInSbAs junginiuose kovojama su nuostoliais dėl nespindulinės Ožė rekombinacijos ir dėl elektronų šuolių tarp skirtingų valentinės juostos šakų [4]. Dėl šių priežasčių naujų lazerinių šaltinių, funkcionuojančių šiame bangų ruože, paieška bei tyrimai yra vis dar labai svarbūs.

Sprendžiant šias problemas medžiagų inžinerijos principu buvo sukurta nauja III-V-Bi šeimos junginių grupė pavadinta bismidais [5]. Dėl savo unikalios savybės – draustinių energijų tarpo valdymo As pakeičiant Bi – bismidai yra vieni iš perspektyviausių junginių, skirtų taikymams tiek artimųjų, tiek ir vidutinių infraraudonųjų bangų srityje. Vos 1% Bi įterpimas į tokių junginių gardelę sumažina draustinės juostos plotį net iki 88 meV [6]. Yra teoriškai pademonstruota, kad pasitelkiant GaAs platformą trinarių GaAsBi junginių draustinių energijų tarpą galima keisti nuo 1,42 eV iki 0,75 eV, kas atitinka spektrinę sritį nuo 875 nm iki 1500 nm, o MIR sritį (iki 6 μm) galima būtų pasiekti naudojant InP platformą [7]. Į GaInAs junginį įterpus 4 % ir daugiau Bi atomų, keturnaris junginys turėtų didesnę valentinės juostos suskilimą dėl sukinio-orbitinės sąveikos, kuris viršytų draustinių energijų tarpą, o sumažėję nuostoliai dėl Ožė rekombinacijos žymiai pagerintų šviesos šaltinių charakteristikas [8]. Dar ilgesnių bangų (net iki 12 μm) sritį galima pasiekti GaSbBi arba InAsBi junginius auginant ant GaSb padėklų [9]. Taip pat pažymėtina, kad bismidiniai junginiai pasižymi labai nedidele draustinės juostos temperatūrine priklausomybe (žymiai mažesne nei InGaAs ar InSb junginiai), todėl jų pagrindu pagaminti lazeriai galimai veiktų kambario temperatūroje be papildomo aušinimo [10].

Nepaisant visų bismidų privalumų, šie junginiai vis dar nėra plačiai taikomi optoelektronikos prietaisuose dėl technologinių sunkumų auginant bismidinius sluoksnius [11]. Bismuto atomai yra žymiai didesni nei kiti III-V junginių penktos grupės elementai, todėl esant įprastoms auginimo

sąlygoms (600°C ir As perteklius) bismutas segreguoja paviršiuje ir į gardelę neišikomponuoja. Siekiant įterpti Bi į GaAs gardelę reikalingos žemos auginimo temperatūros (dažniausiai 200 °C - 400 °C), kuriose ženkliai išauga taškinių defektų koncentracija, stipriai gesinanti fotoluminescenciją. Pažymėtina, kad kokybiški GaAsBi sluoksniai auga tik esant stechiometriniais atskirų elementų srautų santykiams (As/Ga ir Bi/Ga), o tai dar labiau apsunkina šių junginių technologijos vystymąsi [12]. Dėl šių priežasčių, be GaAsBi šiame darbe taip pat naudojamas InGaAs kaip aktyvioji terpė lazeriniams šaltiniams. Pastarasis junginys yra žymiai labiau ištyrinėtas, ir plačiai naudojamas infraraudonosios srities detektoriuose bei šaltiniuose [13].

Šiame darbe buvo susifokusuota į optiškai kaupinamus puslaidininkinius lazerius (angl. *Vertical External Cavity Surface-Emitting Laser* – VECSEL). Šie lazeriai iš esmės suderina pagrindinius puslaidininkinių ir kietakūnių lazerių privalumus. Kaip ir puslaidininkiniai lazeriai jie pasižymi galimybe nesunkiai valdyti spinduliuotės bangos ilgį, kompaktiškumu, o iš kietakūnių lazerių pasiima geresnius pluošto parametrus bei aukštesnes spinduliuotės galias, dėl to yra labai patrauklūs įvairiems taikymams [14]. Kadangi tyrimo metu buvo koncentruotasi į artimosios infraraudonosios srities lazerius, kaip aktyvioji sritis šiems prietaisams buvo pasirinktos GaAsBi ir InGaAs kvantinės duobės. GaAsBi su ~5% Bi ir InGaAs su 23-26% In spinduliuoja maždaug 1-1,2 μm bangos ilgių ruože. Tokie lazeriai galėtų būti panaudojami aplinkos užterštumo tyrimams (pvz. metano, anglies dvideginio koncentracijoms nustatyti) bei medicinoje (odos vėžio, astmos ar kitų ligų profilaktikai) [15].

Šiame darbe puslaidininkinių plonų sluoksnių auginimui buvo naudota molekulinė pluoštelių epitaksijos (angl. *Molecular Beam Epitaxy* - MBE) technologija. Ji leidžia atominių sluoksnių tikslumu užauginti kristalines struktūras, pasižyminčias mažu defektų skaičiumi ir dideliu grynumu, kurios puikiai tinka lazerinėms struktūroms.

Magistrinių studijų baigiamojo darbo **tikslas** buvo molekulinė pluoštelių epitaksijos būdu užauginti ir kompleksškai ištirti artimosios infraraudonosios srities GaAsBi ir InGaAs paremtas lazerines struktūras, skirtas naudoti 1-1,2 μm bangos ilgių ruože veikiantiems lazeriniams šaltiniams.

Tikslui pasiekti buvo išskelti šie uždaviniai:

- Optimizuoti GaAsBi ir InGaAs kvantinių duobių auginimo ir formos parametrus - cheminę sudėtį, technologines sąlygas (temperatūrą, srautus, greičius), kvantinio darinio geometriją,

siekiant gauti intensyvią fotoluminescenciją pasirinktame bangos ilgių ruože bei aukštą kristalinę kokybę lazerinio šaltinio auginimui;

- Sumodeliuoti skirtingas lazerines VECSEL struktūras su GaAsBi/GaAs ir InGaAs/GaAs kvantiniais dariniais aktyviojoje srityje bei MBE būdu jas užauginti;
- Visapusiškai ištirti optines bei struktūrinės užaugintų lazerinių struktūrų savybes.

# Santrumpos

AFM – atominių jėgų mikroskopas/mikroskopija

$E_g$  – draustinės juostos plotis

InGaAs – indžio galio arsenidas

IR – infraraudonoji spinduliuotė

GaAsBi – galio arsenido bismidas

MBE – molekulių pluoštelių epitaksija

MQW – daugybinės kvantinės duobės

MOCVD – metalo-organinis cheminis garų nusodinimas

PL – fotoluminescencija

QW – kvantinė duobė

RHEED – atspindėjusių didelės energijos elektronų difrakcija

SEM – skenuojantis elektronų mikroskopas

TEM – elektronų pralaidumo mikroskopija

VCSEL - vertikalaus rezonatoriaus paviršiuje spinduliuojantis lazeris

VECSEL – vertikalaus išorinio rezonatoriaus paviršiuje spinduliuojantis lazeris

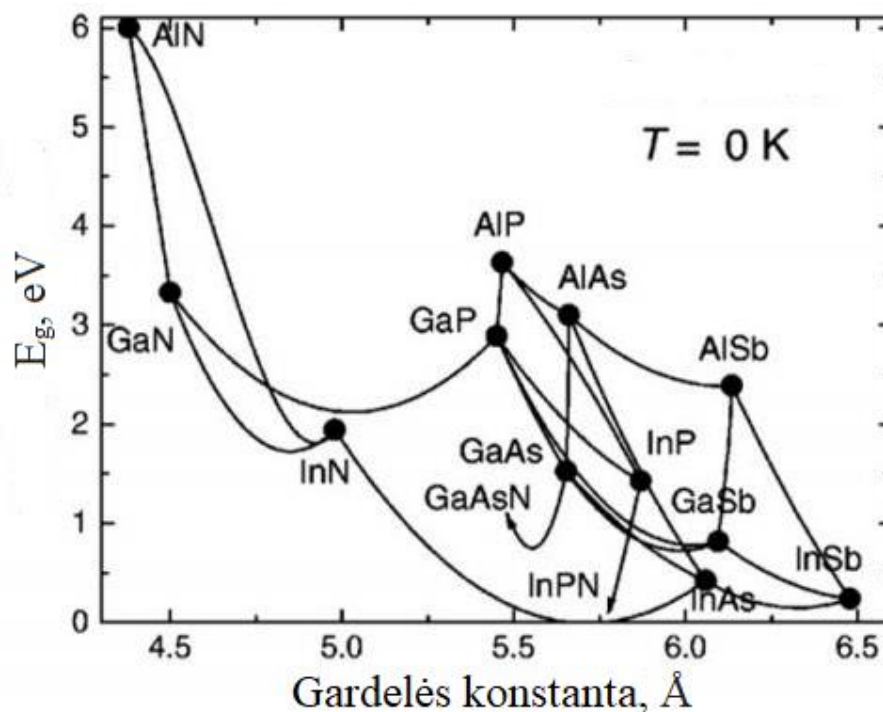
XRD – Rentgeno spindulių difrakcija

# 1. Teorinis įvadas

## 1.1. Medžiagų inžinerija ir III-V puslaidininkiai

Molekulinių pluoštelių epitaksijos metodo sukūrimas įgalino visiškai naujus medžiagų kūrimo principus. Užuoat ieškoję egzistuojančių medžiagų su tam tikromis savybėmis, mokslininkai išmoko pasigaminti naujas, natūraliai neegzistuojančias medžiagas ir kontroliuoti jų mechanines, optines, elektrines, šilumines, magnetines ir kitas savybes [16].

Optoelektronikos ir elektronikos taikymams ypač svarbūs yra vadinamieji III-V puslaidininkiai – periodinės elementų lentelės III ir V grupių junginiai. Pagrindiniai šiuos junginius sudarantys elementai – Ga, Al, In (III grupė) ir N, P, As, Sb bei rečiau sutinkamas Bi (V grupė). Dėl didelio elektronų judrio šie junginiai ypač plačiai naudojami tranzistoriuose, stiprintuvuose ir kituose elektronikos prietaisuose [17]. Kalbant apie optoelektronikos taikymus, iš draustinės juostos tarpų ir gardelės konstantų diagramos (1 pav.) matyti, kad III-V puslaidininkiai perdengia labai platų  $E_g$  intervalą, todėl gali būti panaudojami įvairiems taikymams nuo ultravioletinės iki tolimosios infraraudonosios srities [18].



1 pav. III-V puslaidininkių draustinės juostos tarpų ir gardelės konstantų sąryšio diagrama. Adaptuota pagal [19].

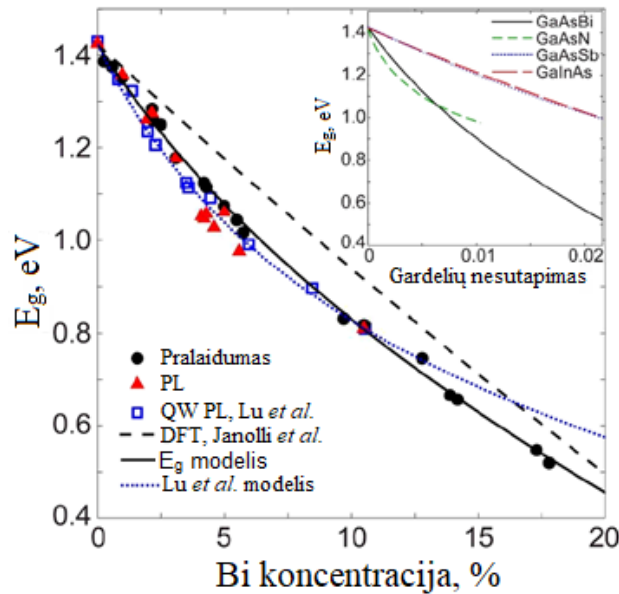
Medžiagų inžinerija leidžia ne tik naudoti šiuos dvinarius junginius, tačiau maišyti skirtingus atomus junginiuose, taip pasigaminant naujus, daugianarius junginius. Pavyzdžiui, labai plačiai naudojamame puslaidininkyje galio arsenide dalį galio atomų pakeičiant indžiu gaunamas naujas junginys – indžio galio arsenidas ( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ). Keičiant In ir Ga atomų santykį naujojo junginio savybes galima nuosekliai keisti, nuo gryno GaAs iki gryno InAs. Akivaizdu, kad naudojantis šiuo principu naujų medžiagų kūrimo iš III-V puslaidininkių galimybės yra beveik beribės. Realybėje, kadangi III-V puslaidininkiai yra kristalinės medžiagos, yra labai svarbus gardelės konstantų suderinamumas. Norint užauginti naują medžiagą ant turimo kristalinio padėklo arba formuojant daugiasluoksnes struktūras, skirtingų sluoksnių gardelės konstantos negali stipriai skirtis. Esant dideliame gardelės konstantų nesutapimui atsiranda įtempimai, kurie, viršijus vadinamąjį kritinį storį sukelia dislokacijas, lemiančias įvairių savybių suprastėjimą. Todėl praktikoje būtinai yra atsižvelgiama į naujų medžiagų gardelės konstantų suderinamumą su įprastai naudojamais padėklais (GaAs, InP, GaSb, InAs). Įspūdingiausias medžiagų inžinerijos pavyzdys - keturnariai ar penkianariai junginiai leidžia vienu metu valdyti ir stipriai keisti naujos medžiagos  $E_g$  ir gardelės konstantą, tačiau dėl technologinių auginimo iššūkių yra rečiau sutinkami [20].

Dar vienas naujų medžiagų inžinerijos ypatumų – galimybė legiruoti auginamus junginius. Pasitelkiant priemaišinius atomus (dažniausiai Si, C, Be, Te) sluoksniai yra praturtinami donoriniais arba akceptoriniais atomais, keičiančiais sluoksnio laidumo tipą ir priemaišų koncentraciją. Tokiu būdu gali būti formuojamos puslaidininkinės sandūros arba labai sudėtingo legiravimo profilio sluoksniai [21].

Siekiant pagerinti dabartinių optoelektronikos prietaisų veikimą, ieškant efektyvesnių šviesos šaltinių ir detektorių medžiagų inžinerijos principu buvo sukurta nauja III-V junginių grupė – bismidai [5]. Šie junginiai gaunami pakeičiant dalį V grupės atomų bismutu. Pagrindinis ir kol kas daugiausiai ištyrinėtas bismidas – trinaris junginys GaAsBi (galio arsenidas bismidas) [22], gaunamas auginimo metu bismutu pakeičiant dalį arseno atomų.

Pagrindinė bismidų savybė – stiprus draustinės juostos tarpo mažinimas didėjant Bi koncentracijai [23] lemia šių junginių patrauklumą artimojoje ir viduriniojoje IR srityje (2 pav.).





2 pav. GaAsBi junginio draustinės juostos pločio priklausomybė nuo Bi koncentracijos. Adaptuota pagal [23].

Pagrindinis bismidų privalumas prieš kitus panašius junginius yra labai staigus draustinės juostos mažinimas (sukuriant 1% gardelių nesutapimą tarp padėklo ir sluoksnio draustinė juosta siaurėja žymiai labiau nei pvz. InGaAs atveju). Tai reiškia, kad naudojant GaAsBi junginius galima būtų pasiekti iki 1,5  $\mu\text{m}$  bangos ilgį ant GaAs padėklų, kas leistų gerokai atpiginti dabar naudojamą InP technologiją.

Kitas svarbus bismidų privalumas – nedidelė draustinės juostos tarpo temperatūrinė priklausomybė [24]. Dėl šios savybės naujos kartos bismidiniai lazeriai galėtų dirbti kambario temperatūroje be išorinio šaldymo. Tai leistų sumažinti sistemų kainą ir matmenis, o bismidiniais lazeriais pasiekus 1,3  $\mu\text{m}$  ir 1,55  $\mu\text{m}$  bangos ilgius (telekomunikacijų langai) būtų galima pakeisti šiuo metu naudojamus InGaAsP lazerius, kurių pagrindinė problema yra temperatūros palaikymo būtinybė.

Galiausiai, bismidiniai junginiai pasižymi didesniu sukinio orbitinės sąveikos suskilimu. Į GaAs junginį įvedus ~10% bismuto, o į InGaAs apie 4% Bi, sukinio-orbitinės sąveikos suskilimas viršytų draustinių energijų tarpą, dėl ko sumažėtų Auger rekombinacijos nuostoliai ir būtų galimybė pagerinti dabartinių šviesos šaltinių charakteristikas [8].

## 1.2. Kvantinės duobės

Su tokiomis naujomis medžiagų inžinerijos technologijomis kaip MBE taip pat atsirado galimybė kontroliuoti augimo procesus atominių monosluoksnių tikslumu. Mažinant sluoksnio

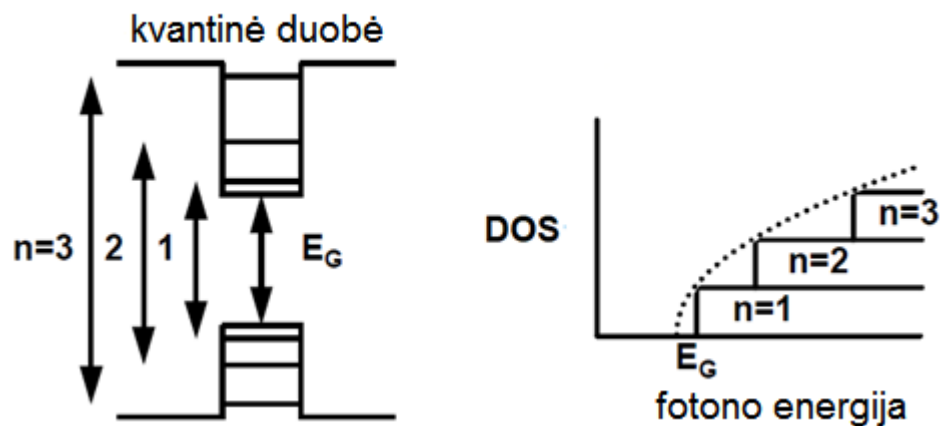
matmenis, tam tikru metu jis pradeda elgtis nebe kaip tūrinis objektas, bet kvantinė duobė. Taip atsitinka, kai QW storis tampa palyginamas su de Broilio bangos ilgiu:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m^* \cdot v} = \sqrt{\frac{h^2}{2m^* \cdot \xi}} \quad (1)$$

kur  $h$  yra Planko konstanta,  $p$  – judesio kiekio momentas,  $m^*$  - efektinė masė,  $v$  – elektronų greitis ir  $\xi$  – kinetinė energija

Tokiu atveju kvantinėse duobėse susiformuoja diskretiniai energetiniai lygmenys – atsiranda kvantinė sąspauda. Elektronas, užuot laisvai judėjęs tūrinėje medžiagoje dabar gali užimti tik tam tikrus diskrečius lygmenis. Šių lygmenų išsidėstymas priklauso nuo kvantinės duobės matmenų – atsiranda visiškai naujas papildomas emisijos bangos ilgio keitimo būdas. Naudojant kvantinius darinius, draustinės juostos plotį galima kontroliuoti ne tik keičiant medžiagos parametrus (elementinę sudėtį) bet ir struktūros geometrinius parametrus (QW storį). Ploninant kvantines duobes emisijos bangos ilgis slenkasis į trumpesnes bangas, nes didėja tarpas tarp kvantuotų lygmenų.

Kvantinės duobės yra formuojamos patalpinant ploną sluoksnį su mažesniu  $E_g$  tarp sluoksnių su didesniu  $E_g$  (barjerai). Kadangi realybėje barjerai nėra begaliniai, banginės funkcijos dalinai įsiskverbia į barjerus ir vietoj diskrečių energetinių lygmenų susiformuoja minijuostos. Dėl to būsenų tankio pasiskirstymo funkcija yra laiptuota (3 pav.).



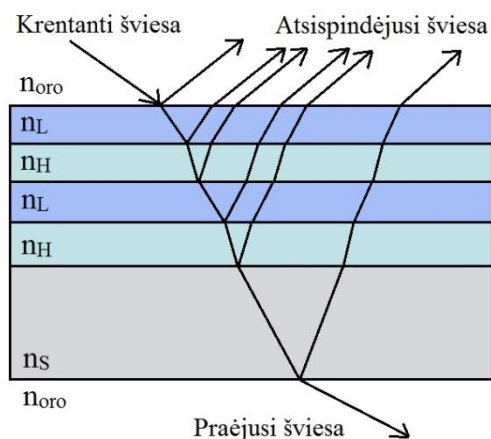
3 pav. Kairėje – kvantinės duobės schema su energetiniais lygmenimis, dešinėje – būsenų tankio funkcijos palyginimas turinei medžiagai ir kvantinei duobei. Adaptuota pagal [25].

Dėl kvantinės sąspaudos QW sluoksniuose sudaromos sąlygos efektyvesnei spindulinei rekombinacijai, dėl to šie dariniai yra plačiai taikomi puslaidininkinių lazerių aktyviosiose terpėse ir pasižymi gerokai mažesnėmis ribinėmis srovėmis nei tūriniais sluoksniais paremti lazeriai [26].

Mažinant kvantinių darinių matmenis ir kitomis kryptimis yra galimybė formuoti kvantines vielas (1D) arba kvantinius taškus (0D). Šios kvantinės struktūros taip pat yra patrauklios įvairiems prietaisų taikymams, tačiau reikalauja dar sudėtingesnių technologinių auginimo sąlygų, todėl daugiausiai naudojami kvantiniai dariniai yra kvantinės duobės [27].

### 1.3. Brego veidrodžiai

Brego veidrodis - struktūra, sudaryta iš periodiškai išdėstytų skirtingo lūžio rodiklių medžiagų (4 pav.). Jo veikimas yra paremtas plonų sluoksnių interferencijos reiškiniu – parinkus tinkamus sluoksnių storius yra sudaromos sąlygos konstruktyviai interferencijai vykti – didžioji dalis spinduliuotės yra atspindima nuo paviršių. Dažniausiai yra naudojamas bangos ketvirčio dizainas, kuriame kiekvieno sluoksnio optinis storis yra lygus ketvirčiui bangos ilgio, kuriam skirtas veidrodis [28].



4 pav. Brego veidrodžio struktūra. Čia  $n_S$  – padėklo lūžio rodiklis,  $n_H$  ir  $n_L$  skirtingų medžiagų lūžio rodikliai.

Galima išskirti du pagrindinius Brego veidrodžių tipus. Pirmasis - dielektriniai veidrodžiai, paremti optinių dangų formavimu. Jie dažnai yra gaminami garinimo elektronų pluoštu ar jonapluoščio dulkinimo technologijomis ir panaudojami kaip veidrodžiai kietakūniams lazeriams ar lazerinėse sistemose. Kitas tipas – puslaidininkiniai Brego veidrodžiai, dažniausiai formuojami MOCVD arba MBE technologijomis. Šie veidrodžiai panaudojami VCSEL/VECSEL tipo lazeriuose ar puslaidininkiniuose įsisotinančiuose sugėrikliuose (angl. Semiconductor Saturable Absorber Mirror - SESAM).

Brego veidrodžio atspindį ( $R$ ) galima aprašyti formule:

$$R \approx 1 - 4 \left( \frac{n_L}{n_H} \right)^{2p} \frac{n_S}{n_H^2}, n_H > n_L. \quad (2)$$

Čia  $n_L$  ir  $n_H$  - medžiagų lūžio rodikliai, tenkinantys sąlygą  $n_H > n_L$ ,  $n_S$  – padėklo lūžio rodiklis.  $p$  – veidrodžio periodų skaičius.

Didelio atspindžio srities spektrinis plotis ( $\Delta\lambda$ ) yra nusakomas taip:

$$\Delta\lambda \approx \frac{4}{\pi} \lambda_0 \cdot \arcsin \left( \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right), \quad (3)$$

kur  $\lambda_0$  charakteringas veidrodžio bangos ilgis.

Norint pasiekti reikiamą Brego veidrodžio atspindžio vertę yra svarbu yra pasirinkti medžiagas, turinčias kuo didesnę lūžio rodiklių skirtumą (tai lemia atspindžio zonos plotį) bei pakankamą periodų skaičių. Puslaidininkinių veidrodžių atveju dar svarbu, kad medžiagos turėtų kuo artimesnius gardelės parametrus, siekiant užtikrinti tvarkingą kristalinės struktūros augimą ir išvengti defektų.

## 2. Literatūros apžvalga

### 2.1. Infraraudonosios srities puslaidininkiniai lazeriai

Pagal tai iš ko yra pagamintas lazeris, galima išskirti kelias pagrindines grupes – kietakūnius, puslaidininkinius, dujų, dažų ir šviesolaidinius lazerius. Puslaidininkiniai lazeriai yra nepakeičiami komunikacijų, saugumo, biomedicinos ar kietakūnių lazerių kaupinimo taikymuose [29]. Pirmasis puslaidininkinis lazeris – lazerinis diodas išrastas 1962 m. [30]. Šį lazerį sudarė GaAs p-n sandūra, kurioje rekombinuojant krūvininkams buvo gaunama lazerinė spinduliuotė. Šiuolaikiniai puslaidininkiniai lazeriai išnaudoja medžiagų inžinerijos galimybes. Modernių lazerinių šaltinių aktyvioji sritis susideda iš naujais puslaidininkiniais junginiais paremtų kvantinių darinių. Šiuo metu dažniausia sutinkami kvantinių duobių lazeriai, tačiau aktyviai tyrinėjami ir kvantinių vielų ar kvantinių taškų lazeriai [31]. Siekiant padidinti puslaidininkinių lazerių spinduliuotės galią yra kuriamos lazerinių diodų matricos, susidedančios iš didelio kiekio tokių pačių šaltinių [32].

Kalbant apie NIR lazeriuose naudojamas medžiagas – dažniausiai naudojamos aktyviosios sritys su AlGaAs (800 nm – 920 nm), InGaAs (920 - 1200 nm), GaInNAs (1150 - 1550 nm) kvantinėmis duobėmis, užaugintomis ant GaAs padėklų [33].

Lazeriniai diodai pasižymi galimybe nesunkiai reguliuoti spinduliuojamos bangos ilgiu, galia, nesudėtinga konstrukcija ir nedidele pagaminimo kaina. Šie prietaisai spinduliuoja sandūros plokštumoje iš aktyviosios srities kraštų. Yra nemažai taikymų, kuriuose labiau tiktų lazeriai, spinduliuojantys iš aktyviosios terpės paviršiaus, statmenai sandūros plokštumai [34]. Pirmasis vertikalaus rezonatoriaus paviršiuje spinduliuojantis lazeris (angl. *Vertical cavity surface-emitting laser* – VCSEL) buvo pagamintas 1979 m. [35]. VCSEL rezonatorių sudaro ant padėklo užauginti du Brego reflektoriai su tarp jų esančia aktyviaja terpe (kvantinės duobės ar taškai). Tokių lazerių aktyvioji sritis yra labai nedidelė (įprastai iki 100 nm), todėl yra labai svarbu minimizuoti nuostolius rezonatoriuje naudojant kuo didesnio atspindžio Brego reflektorius.

VCSEL nesunkiai galima pagaminti dideliais kiekiais – ant vieno padėklo užauginus šias struktūras jas galima padalinti ir taip gauti šimtus ar tūkstančius puslaidininkinių lazerių. Taip pat VCSEL, skirtingai negu lazeriniai diodai, gali būti testuojami įvairiais gaminimo etapais, taip padidindamas gamybos našumas ir sumažinama kaina. Vertikali šių lazerių geometrija lemia, kad juos patogiau integruoti į detektorius ar elektrines grandines [36].

Labai panašią struktūrą turi vertikalaus išorinio rezonatoriaus paviršiuje spinduliuojantys lazeriai (angl. *Vertical External Cavity Surface-Emitting Laser* – VECSEL). Šviesos stiprinimo elementą sudaro didelio atspindžio Brego reflektorius, aktyvioji sritis su kvantinėm duobėm ar kvantiniais taškais ir lazerio spinduliuotės ištrūkų sluoksnis. Lazerio rezonatorius suformuojamas naudojant kitą dalinai atspindintą išorinį veidrodį. Tokia struktūra lemia labai gerą šviesos spindulio kokybę – gaunamas difrakcijos ribojamas Gausinis pluoštas [37]. Optinis VECSEL kaupinimas yra naudingas didelės galios lazeriams, nes taip pašalinami nuostoliai pasireiškiantys dėl laisvųjų krūvininkų sugerties [37].

Pirmąjį vienmodį VECSEL pavyko pagaminti Hoogland su grupe 2000m. [38]. Netrukus kita mokslininkų grupė sukūrė pirmąjį VECSEL spinduliuojantį femtosekundinius impulsus (477 fs) [39]. Per pastaruosius kelis dešimtmečius buvo padaryta didelė pažanga paviršiuje spinduliuojančių puslaidininkinių lazerių srityje. Iki šiol VECSEL pavyko pasiekti 50 GHz impulsų pasikartojimų dažnį [40], 108 fs impulsų trukmę [41] ir 5,1 W vidutinę galią femtosekundiniame lazeryje [42].

## 2.2. Pasiekimai bismidinių junginių tyrimuose

Vos tik pasirodžius pirmiesiems tyrimams bismidų srityje, dėl savo unikalių savybių šie junginiai, atrodė, sukels perversmą puslaidininkinių pasaulyje ir pakeis tradicinius, iki šiol daug metų naudotus junginius. Draustinių energijų tarpo valdymas V grupės atomus pakeičiant Bi [6], mažesnė  $E_g$  temperatūrinė priklausomybė [24] bei spin-orbitinio suskilimo valdymas [8] daro šiuos junginius itin patrauklius optoelektronikos prietaisų taikymams.

Nepaisant šių privalumų, bismidų panaudojimas vis dar stringa dėl jų technologinių auginimo ypatumų. Kadangi Bi yra žymiai didesnis nei kiti V grupės atomai, auginimo metu jis yra linkęs segreguoti paviršiuje ir į gardelę neįeiti. Siekiant įvesti Bi reikalingos ekstremalios auginimo sąlygos – labai žemos auginimo temperatūros (dažniausiai 200 °C – 400 °C) ir stochiometriniai III-V elementų santykiai [12]. Natūralu, kad esant tokioms sąlygoms formuojasi sluoksniai su dideliu nespindulinės rekombinacijos centrų ir defektų tankiu, o net mažiausias nukrypimas nuo stochiometrijos lemia labai staigią optinių ir struktūrinių savybių degradaciją. Kadangi junginiai su bismutu yra vis dar pakankamai nauji ir ne taip gerai ištyrinėti kaip tradiciniai III-V puslaidininkiai – natūralu, kad dauguma tyrimų yra susiję su fundamentiniais šių medžiagų savybių bei augimo mechanizmų tyrimais. Yra pasirodę daug mokslinių straipsnių, kuriuose tyrinėjami auginimo greičio, auginimo

temperatūros, bismuto srauto, As/Ga srautų santykio ir kiti technologiniai auginimo parametrai [43]–[45]. Tiriami bismidinių sluoksnių augimo mechanizmai ir defektų bei lašų formavimasis [46]. Intensyviai tiriamos optinės bandinių savybės fotoluminescencijos spektroskopija [47] bei detaliai tyrinėjamos sluoksnių struktūrinės savybės peršviečiamosios elektronų mikroskopijos metodais [48].

Dažniausiai bismidams auginti naudojama MBE technologija, tačiau netrūksta ir mokslinių darbų, kuriuose šie junginiai užauginti ir MOCVD būdu [49]. Tiesa, dėl bismidams reikalingų žemų auginimo temperatūrų MOCVD nepavyksta užauginti junginių su didele Bi koncentracija, nes organiniams prekursoriams suskaldyti dažnai reikalingos aukštesnės temperatūros. Viena mokslininkų grupė siekdama pagerinti MBE auginimų atsikartojamumą, vietoj įprastai III-V epitaksijai naudojamo dimerinio arseno  $As_2$ , naudoja  $As_4$  molekules [50]. Dauguma mokslinių darbų kol kas yra rašoma apie trinarinius GaAsBi ir keturnarius InGaAsBi junginius, tačiau pastaruoju metu vis labiau tyrinėjami ir kiti bismidai, tokie kaip GaSbBi, GaSbBiN, GaPBi ir kt. [51]–[53]. Papildomai, dėl bismuto savybės segreguoti paviršiuje esant įprastinėms auginimo sąlygoms, jis gali būti panaudojamas kaip surfaktantas, pagerinantis kitų III-V puslaidininkių augimą [54].

Kalbant apie prietaisus paremtus bismidiniais dariniais – nors praėjo jau daugiau nei dešimtmetis nuo pirmojo GaAsBi šviestuko [55] (2009 m.) ir pirmojo GaAsBi lazerio [56] (2010 m.), kol kas tik kelioms mokslininkų grupėms nuo tada pavyko pademonstruoti veikiančius GaAsBi kvantinių duobių lazerius [57], [58]. Visai neseniai S. Wang su grupe pasiekė rekordinį 1,41  $\mu m$  bangos ilgį GaAsBi šnabždančių modų lazeryje [59]. Deja, bet dėl sudėtingų bismidinių sluoksnių auginimo sąlygų, šių prietaisų techniniai parametrai vis dar stipriai atsilieka nuo komerciškai prieinamų įprastinių lazerių.

Kita sritis, kurioje bandoma pritaikyti GaAsBi junginius yra fotovoltiniai saulės elementai.  $GaAs_{0,94}Bi_{0,06}$  turi tiesioginį 1 eV draustinių energijų tarpą, todėl galėtų būti panaudojamas daugiasandūrinuose saulės elementuose [60]. Teoriškai yra parodyta, kad GaAsBi turėtų pasižymėti didesniu energijos konversijos efektyvumu nei šiuo metu naudojamas Ge [61]. Tiesa, eksperimentiniuose GaAsBi saulės elementų tyrimuose šių prietaisų parametrai nesiekė teoriškai modeliuojamų verčių bei veikė prasčiau, nei saulės celės su InGaAs kvantinėmis duobėmis [62], [63]. Prastesnis šių elementų veikimas siejamas su sudėtingų auginimo sąlygų sąlygota maža krūvininkų difuzija, susiformavusiais GaBi metaliniais klasteriais, bei defektiniais lygmenimis, todėl iki realių GaAsBi saulės elementų, pakeisiančių dabartines technologijas, dar labai toli.

Turbūt geriausiai bismidinius sluoksnius iki šiol pavyko pritaikyti terahercų srityje. Terahercų generacijai ar detekcijai aukštos kokybės puslaidininkiai netinka dėl ilgų krūvininkų gyvavimo trukmių, todėl buvo sugalvota įprastinius puslaidininkius (pvz. GaAs) auginti žemose temperatūrose

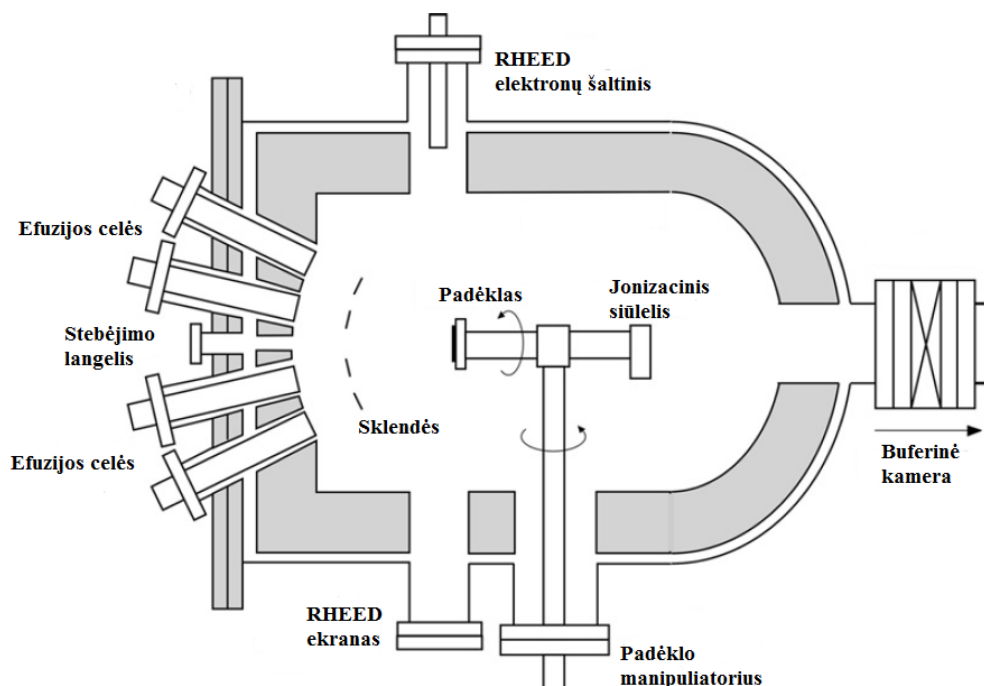
ir taip sutrumpinti krūvininkų gyvavimo trukmes [64]. Bismidiniai sluoksniai dėl savo auginimo ypatumų ir taip yra auginami žemose temperatūrose, todėl pasižymi trumpomis gyvavimo trukmėmis ir yra tinkami Thz emiteriams ir detektoriams gaminti [65]. Papildomai, skirtingai nei žematemperatūrio GaAs atveju, keičiant Bi koncentraciją šiuose junginiuose būtų galimybė reguliuoti bangos ilgus, kuriais Thz prietaisai yra aktyvuojami. Svarbu paminėti, kad bismidiniais sluoksniais paremti teraherciniai komponentai yra ne tik tyrinėjami mokslininkų, bet ir prieinami komerciškai – Lietuvoje veikiančios įmonės Ekspla ir Teravil prekiauja Thz emiteriais ir detektoriais su GaAsBi sluoksniais [66], [67].



## 3. Darbo metodika

### 3.1. Molekulinių pluoštelių epitaksija

Šiame darbe visi bandiniai buvo auginami molekulinių pluoštelių epitaksijos (MBE) metodu. MBE - puslaidininkių pramonėje plačiai naudojama epitaksinių plonų sluoksnių auginimo ant kristalinių padėklų technologija. Siekiant užauginti grynus, be priemaišų epitaksinius sluoksnius procesai vyksta labai aukšto vakuumo sąlygomis ( $10^{-8} - 10^{-10}$  Torr). Tokiam vakuumui pasiekti naudojami joniniai ar kriogeniniai siurbiai bei vakuuminės kameros šaldymas skystu azotu.



3 pav. Molekulinių pluoštelių epitaksijos principinė schema [16].

Principinė molekulinių pluoštelių epitaksijos schema pavaizduota 3 pav. Padėklas yra įdedamas į buferinę kamerą, kur vyksta pirminis jo atkaitinimas, siekiant pašalinti atmosferinę drėgmę. Manipulatoriumi padėklas pervedamas į pagrindinę kamerą, kurioje vyksta auginimo procesas. Medžiagos, iš kurių formuojami epitaksiniai sluoksniai yra specialiuose konteineriuose - tigliuose. Šie konteineriai, kartu su juose esančiais cheminiais elementais, kaitintuvu bei aušinimo sistema sudaro efuzijos celę. Efuzijos celės yra kaitinamos iki kol sudaromas reikiamas sočiųjų garų slėgis, kuris yra matuojamas jonizaciniu matuokliu. Virš efuzijos celių yra garų srautą ribojančios sklendės,

kurios yra atidaromos tik pradėdant auginti sluoksnius. Auginimo metu padėklas yra pastoviai sukamas aplink savo ašį tam, kad medžiaga nusėstų tolygiai ant viso padėklo. Augimo metu epitaksiniai sluoksniai yra stebimi *in situ* naudojant didelės energijos atspindžio elektronų difrakciją (angl. *Reflection High Energy Electron Diffraction* – RHEED). RHEED principas - elektronai, išėję iš šaltinio nedideliu ( $2^\circ - 3^\circ$ ) kampu krinta į padėklą, nuo kurio atsispindėję patenka į ekraną, kuriame stebimas jų difrakcijos vaizdas. Pagal šio vaizdo refleksų išsidėstymą ir jų intensyvumą galima spręsti apie augančio sluoksnio paviršiaus kokybę, jo kitimą.

MBE pasižymi ypač dideliu auginamų sluoksnių grynumu, nedideliu defektų skaičiumi, todėl dažnai yra artimas idealiam epitaksinio augimo modeliui. Pagrindiniai trūkumai – labai mažas augimo greitis (dažniausiai iki  $1 \mu\text{m/val}$  –  $1.5 \mu\text{m/val}$ ) bei didelė procesų kaina. Taip pat siekiant užtikrinti optimalų epitaksinį augimą reikia ilgai optimizuoti technologinius parametrus.

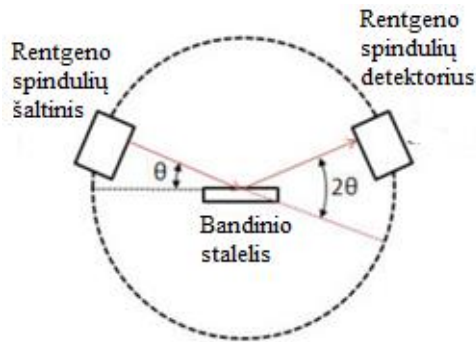
## 3.2. Charakterizavimo metodai

### 3.2.1. Rentgeno spindulių difrakcija

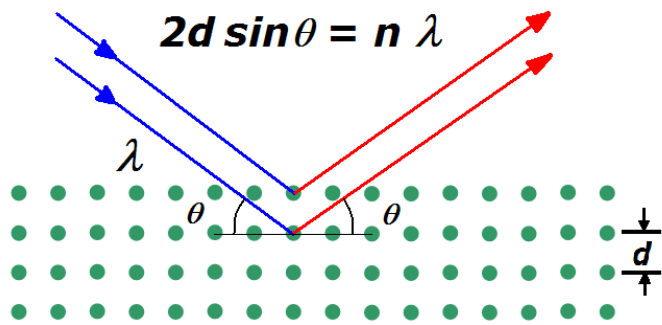
GaAsBi ir InGaAs kvantinių duobių kristalinė sandara – Bi ir In koncentracijos junginiuose, QW ir barjerų storai struktūrose tirtos Rentgeno spindulių difrakcijos (XRD) metodu. Pagrindiniai XRD difraktometrą sudarantys elementai - rentgeno spindulių vamzdis, bandinio stalėlis su ant jo tvirtinamu bandiniu ir rentgeno spindulių detektorius (6 pav.). Iš Rentgeno vamzdžio išėję spinduliai krinta į bandinį. Monochromatiniai Rentgeno spinduliai yra išsklaidomi nuo gardelės plokštumų ir patenka į detektorius. Konstruktyvi interferencija yra stebima jeigu tenkinamas Brego dėsnis (7 pav.):

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta , \quad (4)$$

čia  $n$  – difrakcijos eilė,  $\lambda$  - Rentgeno spindulių bangos ilgis,  $d$  – atstumas tarp gardelės plokštumų ir  $\theta$  – spindulių kritimo kampas į bandinį.



6 pav. XRD principinė schema. Pagrindiniai difraktometrą sudarantys elementai – Rentgeno spindulių šaltinis, bandinio stalis su bandiniu ir Rentgeno spindulių detektorius.



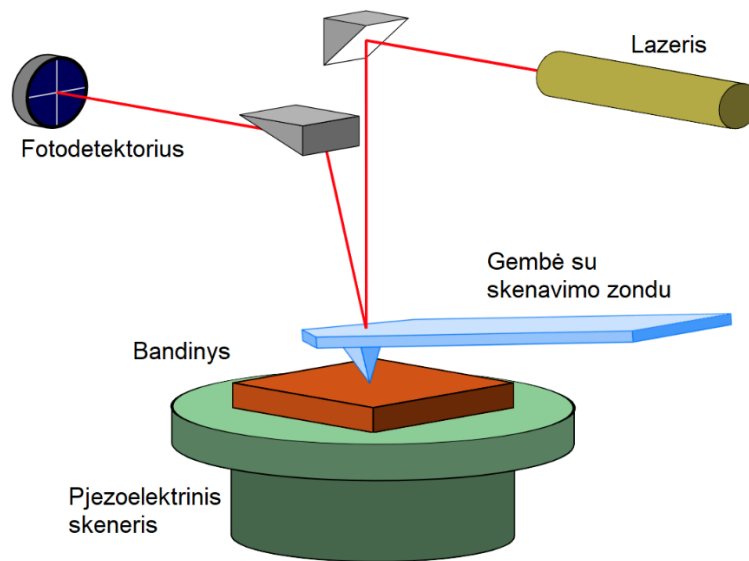
7 pav. Brego dėsnio schema [68].

Atlikus matavimus skirtingiems spindulių kritimo kampams gaunamas difrakcijos intensyvumo pasiskirstymas nuo rentgeno spindulių kritimo kampo į bandinį – difraktograma. Pagal bendrą XRD difraktogramos vaizdą galima atlikti tiriamo bandinio kokybinę analizę, nustatyti kristališkumą. Atskirų difrakcijos smailių padėtis parodo kristalinės gardelės parametrus, o smailių plotis – kristalitų dydžius bei įtempius. Papildomai atlikus matematinę difraktogramų analizę galima paskaičiuoti atskirų struktūros sluoksnių storius ir sudėtį. XRD matavimai yra naudingas medžiagų analizės metodas suteikiantis daug informacijos apie kristalinę struktūrą.

GaAsBi kvantinės duobės tirtos naudojant „Rigaku Smartlab“ Rentgeno spindulių difraktometrą su Ge(400)x2 monochromatoriumi. Modeliuojant matavimų rezultatus buvo įvertinama bismuto ir indžio koncentracija kvantinėse duobės ir sluoksnių storiai – sudaromas grįžtamasis ryšys tolimesniam technologinių auginimo parametru keitimui ir tikslinimui.

### 3.2.2. Atominių jėgų mikroskopija

MBE būdu užaugintų bandinių paviršiaus morfologija buvo tyrinėjama atominių jėgų mikroskopu (AFM), kurio principinė schema pavaizduota 9 pav. Mikroskopo adata, dar vadinama zondų, skirta bandinio paviršiaus skenavimui yra pritaisyta prie gembės, kuri dėl veikiančių jėgų tarp zondo ir paviršiaus išsilenkia [69]. Šis atsilenkimas yra fiksuojamas jutikliu, kurį dažniausiai sudaro lazeris ir fotodetektorius. Grįžtamojo ryšio grandinė užtikrina, kad gembės atsilenkimas yra pastovus, jeigu matuojama pastovios jėgos režimu. Detektoriaus užfiksuoti duomenys kiekviename taške keliauja į kompiuterį, kur nuskenavus bandinio plotą sudaromas paviršiaus topografinis vaizdas, skirtas šiurkštumo analizei.



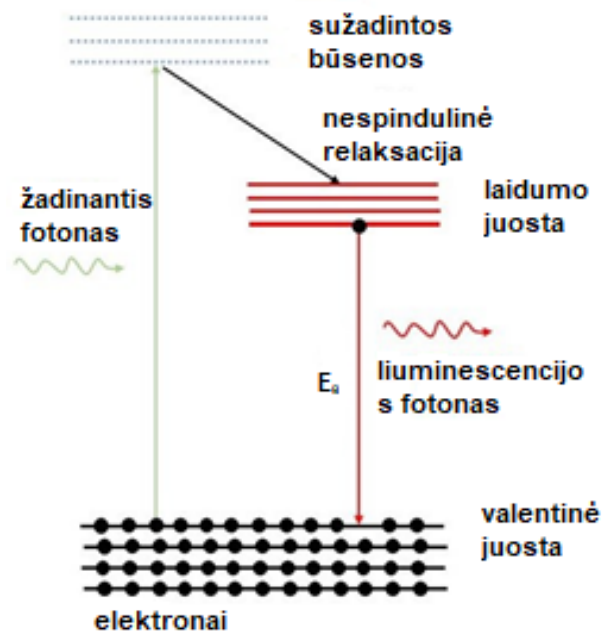
9 pav. Atominių jėgų mikroskopo principinė schema.

Matavimai atlikti virpančio zondo (angl. „*tapping*“) režimu. Paviršiaus šiurkštumas buvo įvertintas išanalizavus tris paviršiaus plotus skirtingose bandinio vietose. Skenavimas vyko (512 × 340) taškų raiška, 0,5 Hz dažniu. Paviršiaus šiurkštumo vertė buvo nustatyta naudojant kompiuterinę programą „Nanoscope Analysis“ ir išvedus trijų matavimų vidurkį.

### 3.2.3. Fotoluminescencijos matavimai

Optinės bandinių savybės darbe buvo tyrinėjamos fotoluminescencijos (PL) matavimais. Tai labai patogus nedestruktyvus puslaidininkinių darinių tyrimo būdas, leidžiantis įvertinti bandinių draustinio tarpo plotį, elektroninę struktūrą ar kitas optines savybes.

Bandinį žadinant didesnės energijos už draustinį tarpą spinduliuote (paprastai lazeriu) elektronai yra perkeltami iš pagrindinių būsenų į sužadintąsias ir spindulinės rekombinacijos būdu emituoja fotonus, atitinkančius medžiagos draustinio tarpo plotį (5 pav.). Iš fotoluminescencijos maksimumo padėties galima įvertinti puslaidininkio draustinės juostos plotį (o kvantinių darinių atvejų – ir storį), o iš PL spektrų kitimo nuo temperatūros ar žadinimo galios – nespindulinės rekombinacijos centrų kiekį, defektų, lokalizuotų būsenų egzistavimą ir kt.

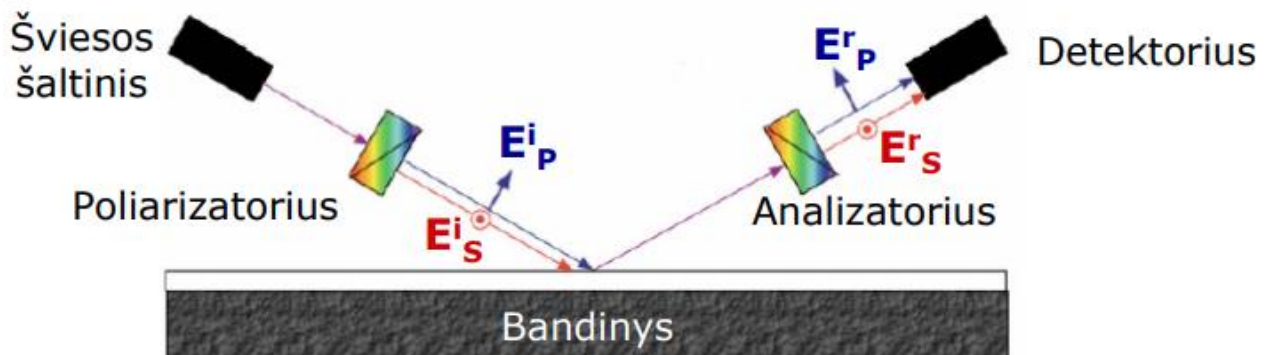


5 pav. PL emisijos principinė schema. Adaptuota pagal [70].

Visi užauginti bandiniai buvo matuoti kambario temperatūros PL stende, žadinant 532 nm 190 mW galios lazeriu. Signalas buvo detekuojamas naudojant InGaAs detektorių. Kai kuriems pasirinktiems bandiniams taip pat buvo pamatuota temperatūrinė PL priklausomybė bandiniui esant uždaro ciklo helio kriostate (3 K – 300 K) bei keičiant žadinančios spinduliuotės galią.

### 3.2.4. Atspindžio matavimai

Brego veidrodžių, bei VECSEL struktūrų charakterizavimui atlikti atspindžio matavimai naudojant elipsometrijos metodiką. Elipsometrija paremta poliarizuotos šviesos bangos poliarizacijos pokyčiu, atsirandančiu šviesai atsispindint nuo medžiagos paviršiaus (10 pav).



10 pav. Principinė elipsometrijos schema.

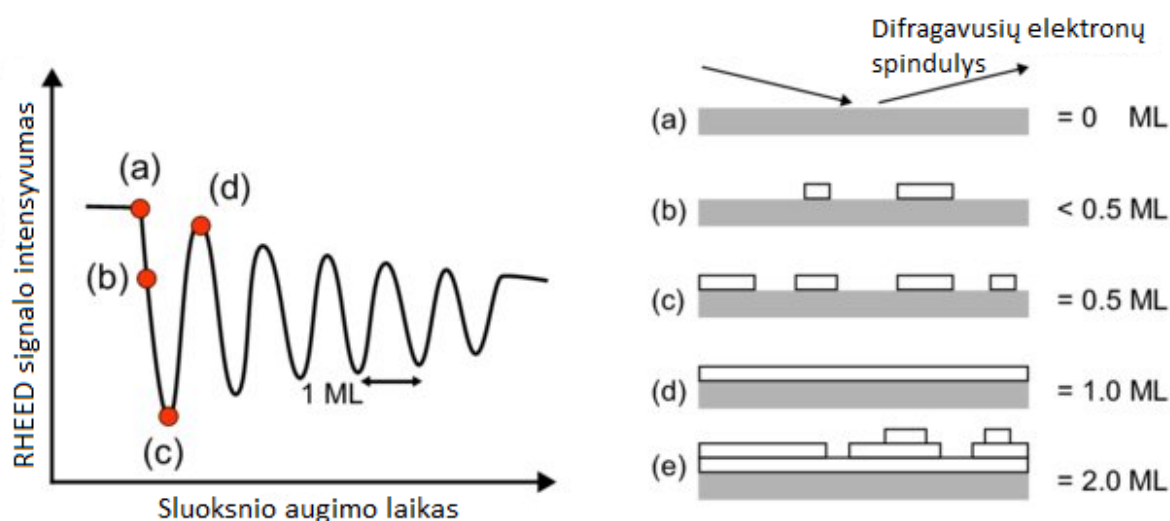
Paprastai šis metodas yra naudojamas medžiagos optinių konstantų nustatymui, ar sluoksnių storių, anizotropijos įvertinimui, tačiau taip pat gali būti pritaikytas ir atspindžio matavimui. Spektrometrinėje elipsometrijoje detektuotos šviesos parametrai matuojami kaip bangos ilgio funkcija. Matavimams naudotas RC2 (J.A. Woolam Co.) elipsometras su dvigubu besisukančiu kompensatoriumi. Šviesos šaltinis šiame elipsometre buvo deuterio arkinio išlydžio lempa, emituojanti 193 – 1690 nm sirtyje. Signalui detektuoti naudoti Si ir InGaAs detektoriai, o prietaiso justiravimui prieš matavimus naudota Si plokštelė. Reikia atkreipti dėmesį, kad matavimai atlikti 19° kampu (minimalus galimas kampas), todėl spektrai buvo pasislinkę apie 7-8 nm trumpesnių bangų sritį nuo mus dominančio 0° kampo atspindžio.

## 4. Rezultatai ir jų aptarimas

### 4.1. GaAsBi kvantinių duobių auginimas

GaAsBi kvantinių duobių auginimui buvo naudota SVTa MBE įranga. Įrenginys yra skirtas III-V puslaidininkių epitaksiniam auginimui ir turi Ga, Al, In, Bi, elementų šaltinius, As šaltinį su vožtuvu valdomu skaldikliu, bei legiravimui skirtus Be ir Si. Aparatūroje ultra aukštas vakuumas ( $10^{10}$  Torr eilės) yra pasiekiamas naudojant rotacinį, turbomolekulinį, joninį ir kriogeninį siurblius.

Visi tyrimui paruošti bandiniai buvo auginti ant 2 colių skersmens pusiau izoliuojančių GaAs padėklų. Prieš auginimą padėklai buvo buferinėje kameroje atkaitinami dvi valandas  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei deoksiduojami  $630\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje auginimo kameroje. Iš pradžių ant padėklo buvo užauginamas  $\sim 100\text{ nm}$  GaAs buferinis sluoksnis  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  temperatūroje, skirtas išlyginti paviršių ir paruošti padėklą struktūros auginimui. GaAs ir GaAsBi augimo greičiai (11 pav.) buvo apskaičiuojami iš RHEED intensyvumo osciliacijų (11 pav.), o šaltinių srautai įvertinami jonizaciniu srauto matuokliu. Šaltinių srautai buvo reguliuojami keičiant jų temperatūras, kurios procesų metu buvo atitinkamos: Ga – ( $980 - 1050$ )  $^{\circ}\text{C}$ , Bi – ( $520-570$ )  $^{\circ}\text{C}$ , As – ( $380 - 450$ )  $^{\circ}\text{C}$ . Sluoksnių augimo greičiai kito nuo  $300$  iki  $700\text{ nm/h}$ .



11 pav. RHEED intensyvumo osciliacijų susidarymo schema. Adaptuota pagal [71]. Intensyvumo osciliacijos paremtos RHEED signalo pokyčiu keičiantis paviršiaus lygumui. Auginimo pradžioje (a) paviršius yra visiškai lygus – stebimas RHEED signalo maksimumas. Augant atominiam monosluoksniui (b, c) paviršius laikinai pasidaro šiurkštesnis – elektronai yra sklaidomi, todėl signalo intensyvumas sumažėja. Pilnai užaugus atomų sluoksniui (d) paviršius išsilygina, todėl stebimas difragavusių elektronų maksimumas. Augimo eigoje signalo amplitudė mažėja dėl ne visiškai idealaus augimo (e). Kiekviena osciliacija parodo vieną užaugusį atominį monosluoksnį (ML).

Prieš auginant GaAsBi kvantines duobes padėklo temperatūra būdavo sumažinama iki 340 – 400 °C temperatūros ir 20 s leidžiamas gryno bismuto srautas, siekiant praturtinti paviršių Bi (sudaryti drėkinamąjį sluoksnį) ir pagerinti jo įsikomponavimą. Tada sekė stechiometrinio As/Ga srautų santykio nusistatymas bei QW ir barjerinių sluoksnių auginimas.

Buvo bandyti keli GaAsBi QW auginimo metodai. Auginimas dviejose padėklo temperatūrose [72], kai QW auginamos žemesnėje temperatūroje, tada daroma pertrauka ir keliama temperatūra į aukštesnę reikalingą GaAs barjero sluoksniui augti ir procesas kartojamas. Taip pat naudotas kitas, nepertraukiamo auginimo pastovioje temperatūroje metodas ir išbandytas pagerintos migracijos epitaksijos būdas, kai leidžiami atskiri šaltiniai ir atomai padengia po vieną atominį sluoksnį [73].

Po MQW struktūros auginimo, paskutinis barjeras visada būdavo auginamas įprastinėje aukštoje temperatūroje (600 °C) siekiant pašalinti paviršiuje susikaupusį Bi perteklių ir kartu atkaitinti GaAsBi kvantinių duobių sluoksnius.

## 4.2. InGaAs kvantinių duobių auginimas

InGaAs kvantinių duobių auginimas technologiškai yra kur kas paprastesnis, nei GaAsBi. Šiuos duobės buvo augintos modernesne, Veeco GENxplor MBE įranga, turinčia 2 Ga, Al, Bi, In elementų šaltinius, As ir Sb šaltinius su skaldikliais bei legiravimui skirtus Be, Si, Te. Dėl šioje aparatūroje pasiekiamo aukštesnio vakuumo lygio ji yra labiau tinkama gerai žinomų III-V puslaidininkinių medžiagų kvantinėms struktūroms auginti.

Padėklų nudujinimas nesiskyrė nuo proceso, auginant GaAsBi, tačiau, kadangi buvo auginami labai stipriai įtempti (kompresiniai įtempiai) InGaAs sluoksniai (su 23-26% In), augimo greičiai negalėjo būti matuojami iš RHEED osciliacijų. Vietoj to, augimo greičiai apytikriai buvo įvertinami iš elementų srautų santykio bei susikalibruojami atlikus XRD matavimus po auginimo.

Auginant šias kvantines duobes Ga auginimo temperatūra siekė (886 – 905) °C, In – (721-732) °C, As – (340 – 350) °C. InGaAs sluoksniai buvo auginami maždaug 800 nm/h greičiu. Kiti skirtumai – InGaAs duobės augintos aukštesnėje temperatūroje (560 °C – 580 °C), bei kadangi In nesunkiai įsikomponuoja į GaAs gardelę, buvo iš karto auginamas InGaAs be pradinio gryno In sluoksnio. Galiausiai, auginant InGaAs As/Ga santykis buvo standartinis ir siekė 10-15.

Baigiamajame magistriniame darbe naudojami du bandinių žymėjimai: serija B ir serija VGA. Toks žymėjimas yra siejamas su skirtingiomis MBE įrangomis: B serija buvo auginta SVTa MBE įranga, o VGA serija - naudojant Veeco MBE. Bandiniai nebuvo pervadinti standartiškai į A ir B



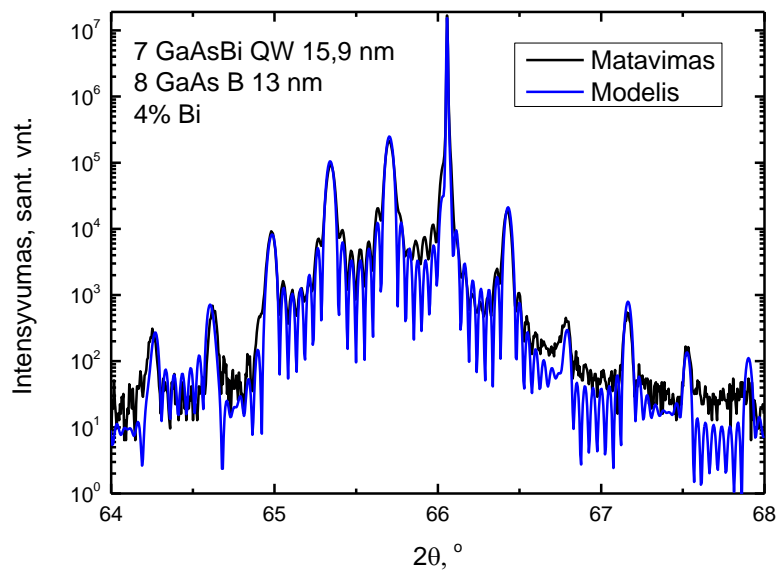
grupės dėl Optoelektronikos skyriuje naudojamos tvarkos rašant publikacijas ir pristatant konferencijose.

### **4.3. MBE auginimo parametrų įtaka GaAsBi ir InGaAs kvantinių duobių optinėms ir struktūrinėms savybėms**

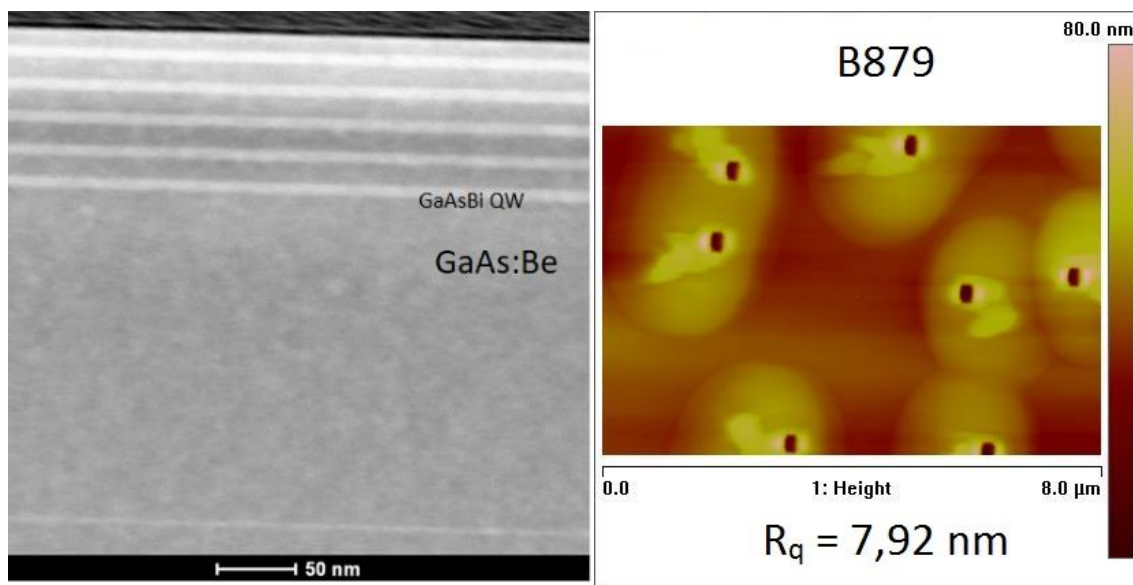
Ankstesnio mokslo tiriamojo darbo metu buvo atliktas išsamus GaAsBi kvantinių duobių auginimo parametrų tyrimas. Tyrimus apibendrinant buvo:

- nustatyta tinkamiausia GaAsBi QW **auginimo temperatūra – 370°C**, kuriai esant į GaAs gardelę įeina 4-5% Bi (gaunama apie 1 - 1,2 μm spinduliuotė);
- nustatytas optimalus **As/Ga srautų santykis 1,07**, kuriam esant Bi GaAs gardelėje keičia arseną, o pasiekiami PL intensyvumai yra maksimalūs;
- suformuluota išvada, kad lazerinėms struktūroms tinkamesnės būtų apie **15 nm storio GaAsBi duobės**;
- ištirtos temperatūrinės GaAsBi QW fotoluminescencijos priklausomybės, nustatytas **lokalizuotų būsenų egzistavimas**, stebėti **paviršiaus morfologijos pokyčiai** keičiant elementų srautus auginimo metu ir kt.

Galutiniame rezultate buvo gautos itin aukštos kokybės GaAsBi kvantinės duobės, pasižyminčios tvarkinga kristaline sandara (12 pav.), aštriomis ribomis tarp sluoksnių (13 pav. kairė). Dauguma GaAsBi kvantinių duobių bandinių pasižymėjo paviršiaus morfologijos ypatumais (13 pav. dešinė), patvirtinačiais sudėtingų auginimų iššūkius. Ypač nelygus bandinių paviršius sklaidytų kaupinimo spinduliuotę lazerinėse struktūrose ir kenktų lazerio veikimui, todėl yra vengtinas.

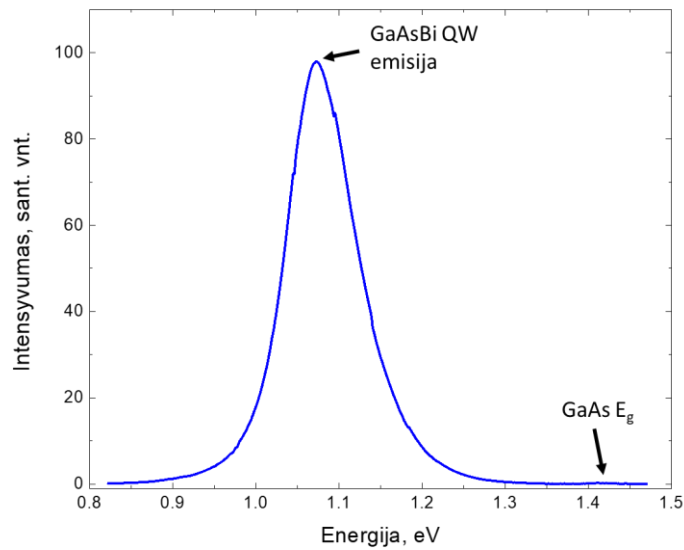


12 pav. Bandinio su septyniomis 15,9 nm GaAsBi kvantinėmis duobėmis HR-XRD matavimo rezultatai (juoda kreivė) bei modelis, iš kurio buvo nustatyta bismuto koncentracija duobėse ir sluoksnių storiai (mėlyna kreivė).



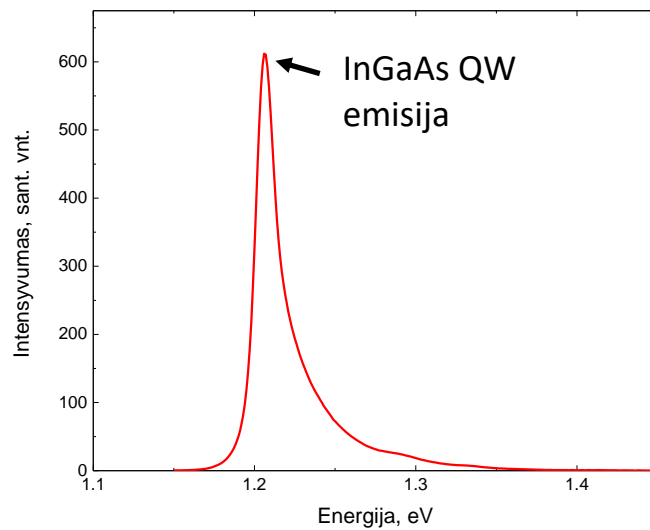
13 pav. GaAsBi MQW bandinio su penkiomis 7 nm storio kvantinėmis duobėmis HRTEM skerspjūvio nuotrauka (kairė), bei atominių jėgų mikroskopo paviršiaus nuotrauka (dešinė).

Analizuojant tirtas optines GaAsBi QW savybes ir gautus rezultatus, buvo apibrėžtas optimalių technologinių sąlygų langas: auginant tinkamose technologinėse sąlygose ( $T_p = 370$  °C,  $As/Ga = 1,06 - 1,08$ ,  $Bi/Ga = 0,3 - 0,5$ ) pavyko daugiau nei 1000 kartų padidinti PL intensyvumą. Bandinių kambario temperatūros PL spektrai pasižymėjo viena siaura, intensyvia PL smaile (14 pav.).



14 pav. Bandinio B897 (penkios 15 nm storio kvantinės duobės su ~5 % bismuto) kambario temperatūros PL spektras.

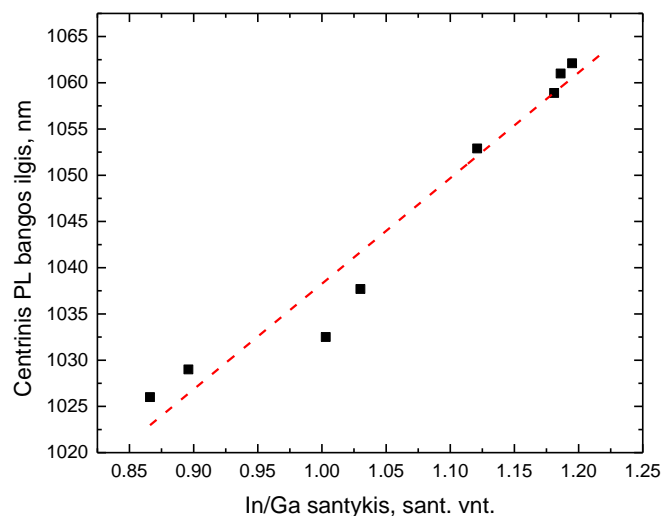
Šiame darbe panašus tyrimas buvo atliktas ir InGaAs kvantinėms duobėms. Kadangi auginant įtemptus InGaAs sluoksnius ant GaAs yra sunku pasiekti tokius bangos ilgius kaip su GaAsBi kvantinėmis duobėmis, šiuo atveju buvo pasirinkti 1030 nm ir 1064 nm bangos ilgiai, kurie aktualūs daugeliui lazerinių sistemų moksliniuose tyrimuose. Buvo tirtos dvi principinės galimybės keisti InGaAs QW centrinę PL bangos ilgį – keičiant In koncentraciją duobėje bei keičiant kvantinių duobių storį. Taigi, tą patį emisijos bangos ilgį galima pasiekti su (1) plonesnėmis daugiau indžio turinčiomis duobėmis bei (2) naudojant storesnes duobes su mažesniu indžio kiekiu. In įterpimas į GaAs (galį keičiant indžiu) sukuria įtemptus kristalinėje gardelėje, todėl labai didelių indžio koncentracijų naudojimas auginant ant GaAs padėklų yra vengtinas. Iš kitos pusės, naudoti labai storas InGaAs duobes su nedideliu kiekiu indžio taip pat būtų nenaudinga, nes tokiu atveju artėjame prie ribos, kur sluoksnis elgiasi nebe kaip kvantinis darinys ir spinduliavimo našumas mažėja. Atsižvelgus į šiuos aspektus, bei pasirėmus kitų autorių darbais [74], buvo nuspręsta auginti vidutinio storumo – 7 nm InGaAs kvantinės duobes.



15 pav. Bandinio su dvylika 7 nm storio InGaAs kvantinių duobių (23% In) kambario temperatūros PL spektras.

PL spektro matavimai, pateikti 15 paveiksle, parodė, kad 7 nm pločio InGaAs QW pasižymėjo labai dideliu kambario PL intensyvumu. Lyginant su GaAsBi QW spektrais nesunkiai galima pastebėti, kad InGaAs QW PL pusplotis (23 meV) buvo gerokai siauresnis nei GaAsBi duobių (įprastai apie 100 meV). Galima daryti išvadą, kad indis kvantinėse duobėse pasiskirstęs tolygiai, duobės yra vienodos, bandinių kokybė aukšta.

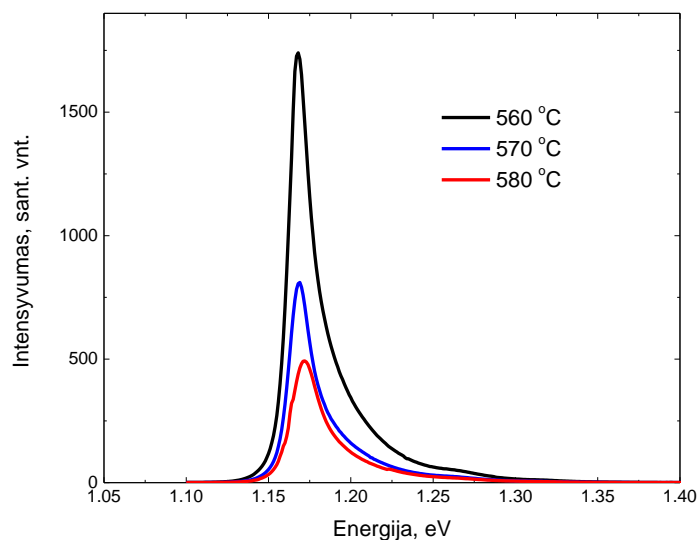
Užfiksavus pasirinktą QW storį, toliau fotoluminescencijos bangos ilgis buvo reguliuojamas tik keičiant In kiekį InGaAs duobėse (keičiant In srautą auginimo metu).



16 pav. Centrinio PL bangos ilgio priklausomybė nuo In/Ga srautų santykio. Rezultatai gauti auginant 7 nm pločio kvantines duobes. Auginimo metu visos kitos technologinės sąlygos išliko tos pačios.

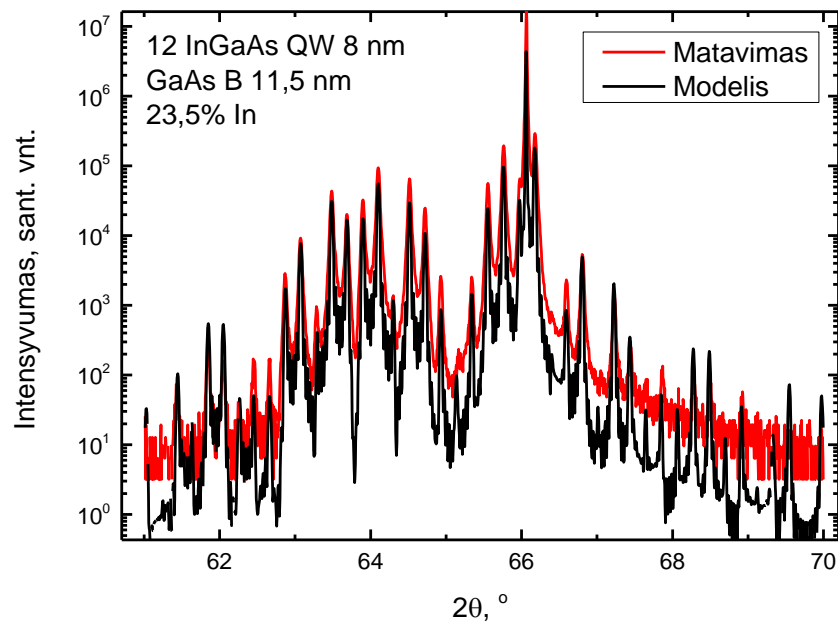
Atlikus seriją auginimų nustatyta, kad siekiant InGaAs QW liuminescencijos ties 1030 nm ir 1064 nm bangos ilgiais, auginimo metu reikėtų naudoti In/Ga srautų santykius 0,93 ir 1,225, atitinkamai (16 pav.).

Toliau buvo optimizuota InGaAs kvantinių duobių auginimo temperatūra. Sumažinus QW auginimo temperatūrą nuo 580 °C iki 560 °C, bandinių kambario fotoluminescencijos intensyvumą pavyko padidinti net 3 kartus (17 pav.). Tikėtina, kad dar labiau pamažinus augimo temperatūrą pavyktų padidinti PL intensyvumą dar labiau, tačiau mažesnė temperatūra nebetiktų kitų sluoksnių (GaAs barjerų) auginimui. Siekiant auginti aukštos kokybės GaAs sluoksnius ir atsižvelgiant, kad lazerinėje struktūroje taip pat bus auginamas AlGaAs sluoksnis, nuspręsta InGaAs MQW struktūras auginti 560 °C temperatūroje.

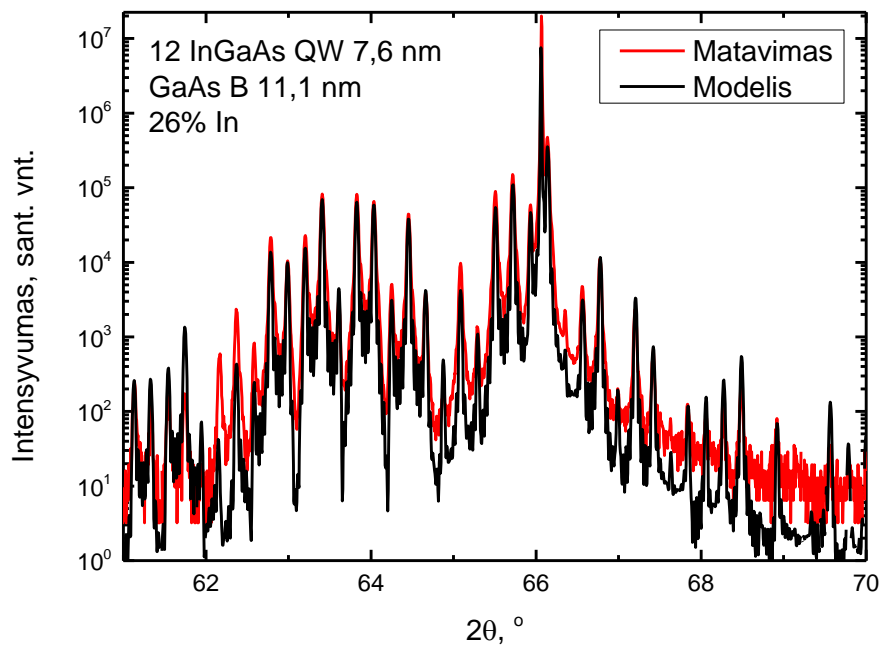


17 pav. Skirtingose temperatūrose užaugintų InGaAs MQW bandinių kambario temperatūros PL spektrai.

Siekiant išsiaiškinti indžio koncentracijas kvantinėse duobėse, duobių ir barjerų storius, buvo atlikti XRD matavimai. Sumodeliavus Rentgeno spindulių difraktogramas (18 ir 19 pav.) nustatyta, kad norint gauti fotoluminescenciją ties 1030 nm į kvantines duobes buvo įvesta 23,5% In, o 1064 nm spinduliuotei pasiekti reikalinga 26% In koncentracija. Remiantis šiais duomenimis buvo skaičiuojami junginių lūžio rodikliai. Taip pat buvo sumodeliuoti tikslūs QW ir barjerinių sluoksnių storiai.

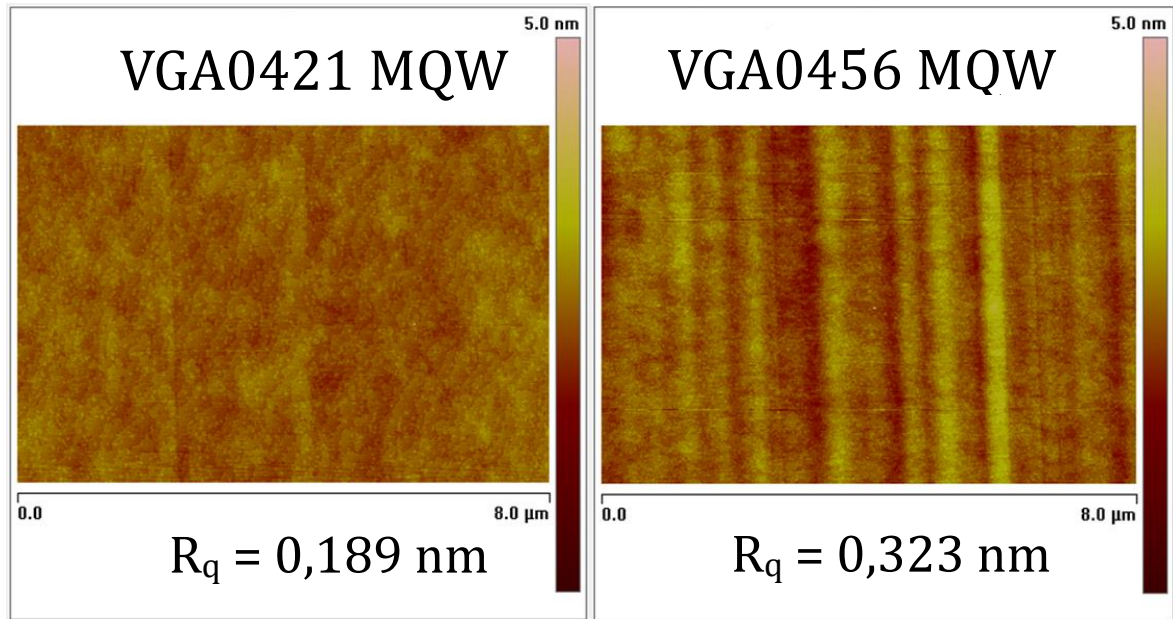


18 pav. Bandinio VGA0409 su dvylika InGaAs kvantinių duobių Rentgeno spindulių difrakcijos matavimas (raudona kreivė) bei modelis (juoda kreivė), kurį tapatinant su matavimu buvo įvertinti sluoksnių storiai bei In koncentracija InGaAs junginyje.



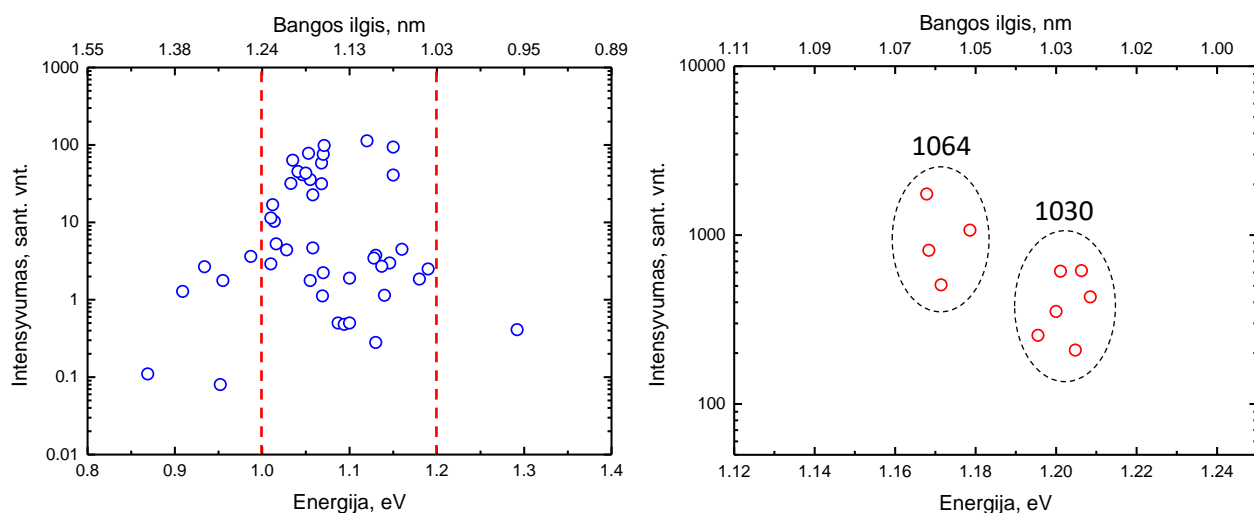
19 pav. Bandinio VGA0425 su dvylika InGaAs kvantinių duobių Rentgeno spindulių difrakcijos matavimas (raudona kreivė) bei modelis (juoda kreivė), kurį tapatinant su matavimu buvo įvertinti sluoksnių storiai bei In koncentracija InGaAs junginyje.

Iš paviršiaus matavimų atominių jėgų mikroskopu (20 pav.) nustatyta, kad InGaAs MQW bandinių paviršiai – gerokai lygesni, nei GaAsBi kvantinių duobių. Tiesa, kai kuriuose bandiniuose matyti išilgai paviršiaus einančios juostos – dislokacijų užuomazgos. Tai tik patvirtina, kad auginamos labai įtemptos InGaAs kvantinės duobės netoli kritinio storio ribos, tačiau paviršiaus šiurkštumas nesiekė net pusės nanometro. Spėdžiant iš optinių savybių – kritinis storis nebuvo viršytas todėl šios duobės yra tinkamos lazerinėms struktūroms formuoti.



20 pav. InGaAs MQW bandinių VGA0421 (kairėje) ir VGA0456 (dešinėje) paviršiaus morfologijos bei paviršiaus šiurkštumo vertės ( $R_q$ ).

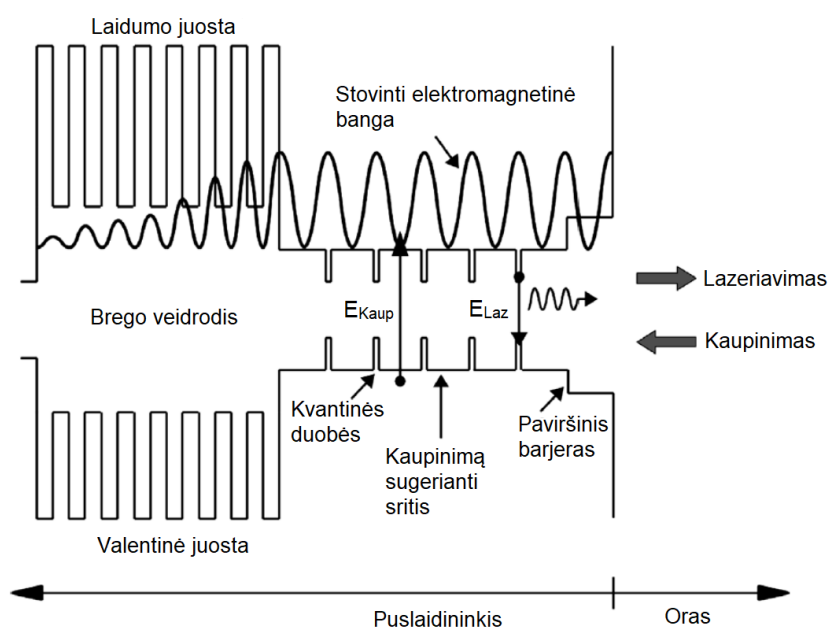
Pabaigai, pagrindinius rezultatus galima apibendrinti žiūrint į visų bandinių kambario temperatūros PL žemėlapius (21 pav). Iš šių grafikų galima matyti, kad vidutiniškai InGaAs QW pasižymėjo bent 100 kartų intensyvesne fotoluminescencija, o net ir pats prasčiausias InGaAs bandynys kambario temperatūroje liuminescavo geriau, nei geriausias GaAsBi kvantinės duobės. Šis rezultatas sąlygotas sudėtingų GaAsBi auginimo sąlygų ir žemų auginimo temperatūrų, dėl kurių struktūroje galimai yra daugiau taškinių defektų ir nespindulinės rekombinacijos centrų. Taip pat galima atkreipti dėmesį ir į duomenų išsibarstymą bangos ilgių skalėje. GaAsBi atveju yra sunku tiksliai kontroliuoti Bi koncentraciją junginyje – Bi inkorporacijai reikalingas stechiometrinis As/Ga srautų santykis lemia, kad procesai yra sunkiai atkartojami. InGaAs kvantinėse duobėse situacija visai kitokia – QW emisijos bangos ilgį sąlyginai nesunkiai buvo galima valdyti ir atkartoti.



21 pav. Visų GaAsBi MQW bandinių (kairėje), ir InGaAs MQW bandinių (dešinėje), užaugintų skirtingomis technologinėmis sąlygomis kambario temperatūros PL žemėlapis. Raudonos brūkšninės linijos žymi bangos ilgių intervalą, į kurį buvo fokusuotasi su GaAsBi kvantinėmis duobėmis, o juodi punktyrai – InGaAs kvantinių duobių tikslinius bangos ilgius.

#### 4.4. VECSEL struktūrų modeliavimas

Tipinė VECSEL spinduliuotę stiprinančio elemento energijos juostų diagrama yra pateikta 22 paveiksle.



22 pav. VECSEL šviesą stiprinančio elemento energetinė diagrama. Adaptuota pagal [75].



Šį elementą sudaro Brego veidrodis, pasižymintis artimu 100% atspindžiu, aktyvioji sritis su periodiškai išdėstytomis kvantinėmis duobėmis ir spinduliuotės ištrūkos sluoksnis (angl. *window layer*), kurio paskirtis – neleisti vykti paviršinei krūvininkų rekombinacijai. Kadangi pastarasis sluoksnis dažniausiai turi aliuminio – norint apsaugoti puslaidininkinį nuo oksidacijos struktūra baigiama plonu dengiamuoju sluoksniu (angl. *capping layer*). QW išdėstymas paremtas rezonansinio periodinio stiprinimo struktūra [76], kurioje kvantinės duobės yra pozicionuojamos taip, kad sutaptų su stovinčios elektromagnetinės bangos maksimumų padėtimi. Tam yra naudojami papildomi tarpiniai sluoksniai (angl. *spacer layer*) kurių antrinė funkcija – sugerti kaupinimo spinduliuotę. Tokioje struktūroje kvantinių duobių emisija yra maksimaliai sustiprinama.

Pirmasis žingsnis buvo Brego veidrodžio modeliavimas pasirinktiems bangos ilgiams. Kadangi vertikalios konfigūracijos puslaidininkiniuose lazeriuose šviesa per aktyviają terpę nueina žymiai trumpesnę kelią, negu įprastiniuose, pvz. lazeriniuose dioduose, dėl to pagrindinis reikalavimas Brego veidrodžiui buvo atspindžio vertė kuo artimesnė 100%.

InGaAs VECSEL struktūroms buvo paskaičiuoti Brego veidrodžiai su centriniu atspindžio maksimumu ties 1030 nm ir 1064 nm bangos ilgiais, o GaAsBi lazeriams – ties 1160 nm.

Kaip didelio lūžio rodiklio medžiaga šiuose veidrodžiuose buvo naudotas GaAs, o mažo lūžio rodiklio medžiaga – AlAs. Kadangi buvo pasirinktas ketvirčio bangos ilgio dizainas, atskirų sluoksnių storius nesunkiai galima buvo paskaičiuoti pagal formules:

$$d_{GaAs} = \frac{\lambda_c}{4 \cdot n_{GaAs}} \quad (5)$$

$$d_{AlAs} = \frac{\lambda_c}{4 \cdot n_{AlAs}} \quad (6)$$

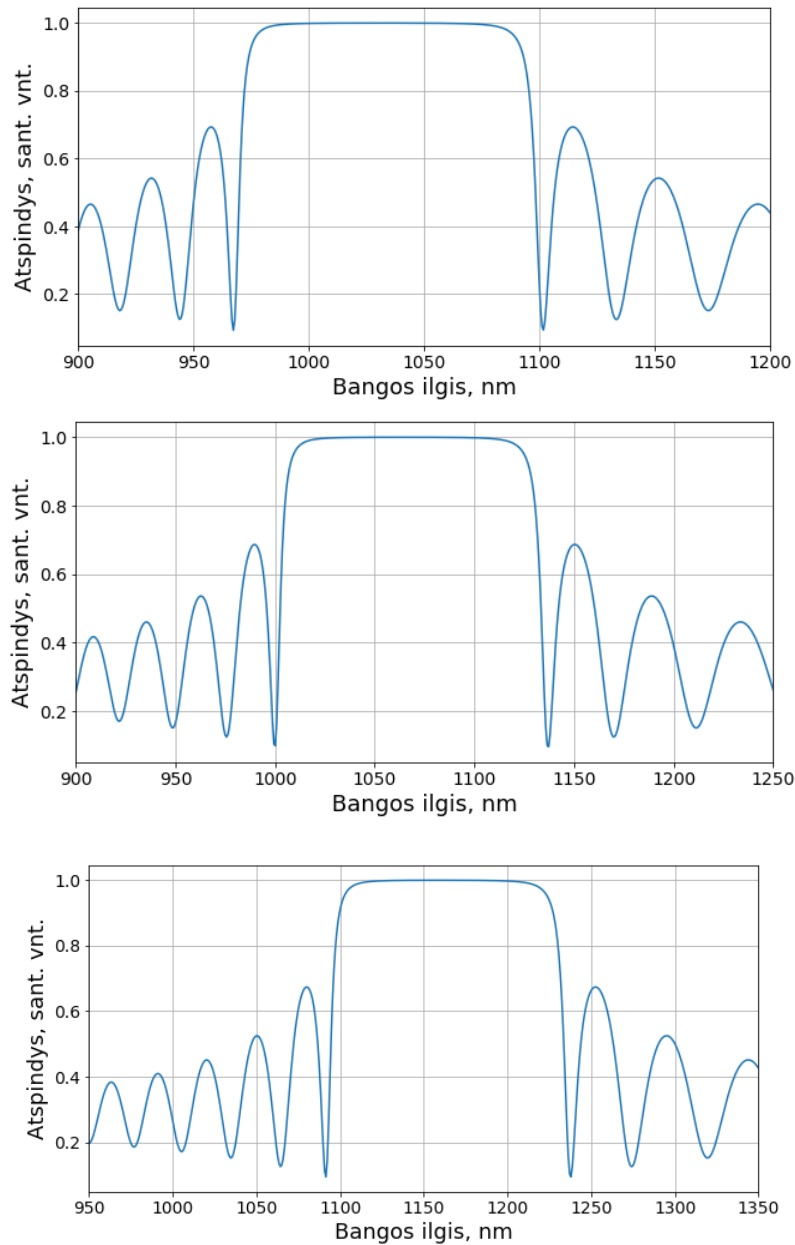
Kur  $d_{GaAs}$  - GaAs sluoksnio storis,  $d_{AlAs}$  – AlAs sluoksnio storis,  $\lambda_c$  – Brego veidrodžio centrinis bangos ilgis,  $n_{GaAs}$  – GaAs lūžio rodiklis ir  $n_{AlAs}$  – AlAs lūžio rodiklis.

Atitinkamai, šių veidrodžių pagrindiniai parametrai buvo šie:

1 lentelė. Pagrindiniai modeliuotų Brego veidrodžių parametrai.

| $\lambda_c$ , nm | $n_{GaAs}$ | $n_{AlAs}$ | $d_{GaAs}$ , nm | $d_{AlAs}$ , nm |
|------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| 1030             | 3,4926     | 2,9577     | 73,7            | 87,1            |
| 1064             | 3,4761     | 2,952      | 76,5            | 90,1            |
| 1160             | 3,4413     | 2,9389     | 84,3            | 98,7            |

Veidrodžių atspindžio spektrai buvo sumodeliuoti perdavimo matricių metodu. Iš skaičiavimų nustatyta, kad norint pasiekti atspindį artimą 100% plačiame spektriniame ruože aplink centrinį bangos ilgį, reikėtų naudoti 28 periodų dizainą (23 pav.).

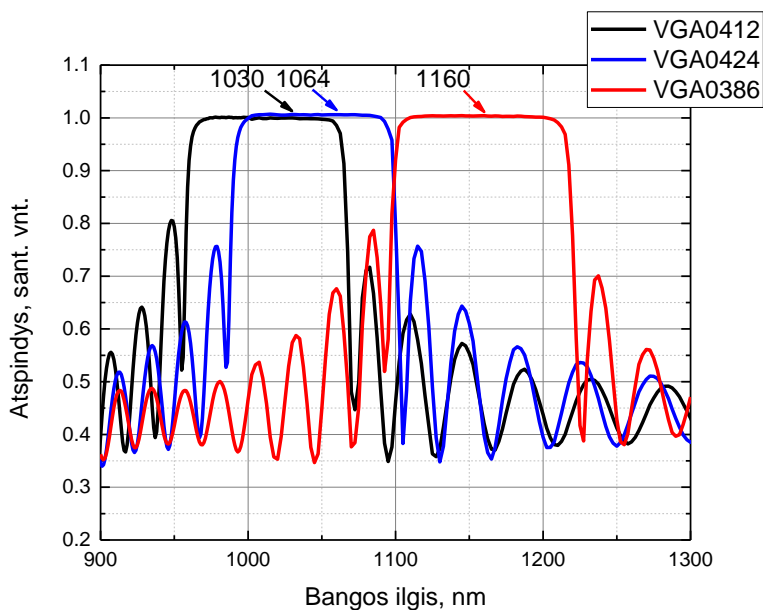


23 pav. Perdavimo matricių metodu sumodeliuotų 28 periodų Brego veidrodžių atspindžio spektrai, skirti trims centriniams bangos ilgiams – 1030 nm, 1064 nm, 1160 nm.

Šios sumodeliuotos veidrodžių struktūros buvo MBE būdu auginamos ant GaAs padėklų. Brego veidrodžio struktūros schema pavaizduota 24 pav.



24 pav. Brego veidrodžio su 28 AlAs/GaAs periodais struktūrinė schema.



25 pav. Užaugintų Brego veidrodžių atspindžio spektrai. Bandinys VGA0412 (juoda kreivė) buvo skirtas 1030 nm centriniam bangos ilgiui, bandinys VGA0424 (mėlyna kreivė) – 1064 nm bangos ilgiui, o VGA0386 (raudona kreivė) – 1160 nm bangos ilgio lazerinei struktūrai.

Visi užauginti Brego veidrodžiai buvo charakterizuoti atspindžio matavimais (25 pav.). Iš paveikslo matyti, kad veidrodžių atspindžio spektrai labai gerai atitiko modeliavimo rezultatus, pasižymėjo plačiu bangos ilgių ruožu, kuriame atspindys yra artimas 100%. Dėl auginimo paklaidų kai kurių veidrodžių dizaino bangos ilgis buvo ne pačiame didelio atspindžio zonos centre. Tačiau labai platus atspindimų bangos ilgių ruožas patvirtino, kad šie veidrodžiai yra tinkami tolimesnei lazerinių struktūrų gamybai.

Toliau buvo modeliuojama pilna VECSEL struktūra Modeliuojant buvo atsižvelgta į keletą svarbių kriterijų. Siekiant padidinti optinį stiprinimą šiose struktūrose pravartu naudoti kuo didesnę kvantinių duobių skaičių. Iš kitos pusės – kadangi yra auginami įtempti sluoksniai, esant per dideliu duobių kiekiui šie sluoksniai ir kartu visa struktūra pradėtų relaksuoti. Todėl bendras GaAsBi (InGaAs) storis negali būti per didelis. Pagal anksčiau atliktus kvantinių duobių tyrinėjimus optimaliu kvantinių duobių skaičiumi pasirinkta 12. Kitas aspektas – auginant tiek daug duobių bendras

struktūros storis gautųsi labai didelis (kas lemtų prastesnį šiluminį laidumą), bei giliai esančios duobės būtų silpniau žadinamos, todėl išbandyti ir sudėtingesni struktūrų dizainai, kuriuose QW buvo išdėstytos ne po vieną, bet „paketais“ po 2 arba 3 kiekvienam stovinčios bangos pūpsniui.

Kadangi stovinčios bangos maksimumai yra išsidėstę  $\lambda/2$  periodu, tai ir kvantinės duobės (arba jų paketai) privalo būti išdėstytos tokiu periodu. Siekiant struktūroje tinkamai išdėstyti kvantines duobes buvo auginami papildomi tarpiniai sluoksniai. Jeigu kvantinę duobę pozicinuotume per patį pūpsnio centrą, tai pusė jos būtų vienoje maksimumo pusėje – pusė kitoje. Pirmojo tarpinio sluoksnio (einančio iš karto po Brego veidrodžio) fizinį storį galime paskaičiuoti optinį šio sluoksnio storį padalinę iš medžiagos lūžio rodiklio:

$$d_{FirstSpacer} = \frac{d_{FirstSpacer}^{Opt}}{n_{FirstSpacer}} \quad (7)$$

$$d_{FirstSpacer}^{Opt} = \frac{\lambda}{2} - \frac{d_{QW}^{Opt}}{2} = \frac{\lambda}{2} - \frac{d_{QW} \cdot n_{QW}}{2} \quad (8)$$

kur  $d_{QW}^{Opt}$  – kvantinės duobės optinis storis,  $d_{QW}$  – fizinis kvantinės duobės storis,  $n_{QW}$  – kvantinės duobės lūžio rodiklis.

Įstatę (8) į (7) gauname:

$$d_{FirstSpacer}^{(1)} = \frac{\lambda - d_{QW} \cdot n_{QW}}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (9)$$

$n_{Spacer}$  – tarpinio sluoksnio medžiagos lūžio rodiklis.

Kai VECSEL dizaine kvantinės duobės išdėstytos paketais, situacija šiek tiek sudėtingesnė, nes reikia atsižvelgti ir į barjerų (sluoksnių, tarp kvantinių duobių) storį ir lūžio rodiklį, tačiau atitinkamai, pirmojo tarpinio sluoksnio dviejų QW paketo atveju galime apskaičiuoti pagal:

$$d_{FirstSpacer}^{(2)} = \frac{\lambda - 2 \cdot d_{QW} \cdot n_{QW} - d_B \cdot n_B}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (10)$$

Čia  $d_B$  – barjerinių sluoksnių fizinis storis,  $n_B$  – barjerinių sluoksnių lūžio rodiklis.

Struktūros dizainui, su 3 QW paketais, atitinkamai gauname:

$$d_{SpacerFirst}^{(3)} = \frac{\lambda - 3 \cdot d_{QW} \cdot n_{QW} - 2 \cdot d_B \cdot n_B}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (11)$$

Remiantis tais pačiais principu, visų struktūros vidinių tarpinių sluoksnių storius skaičiuotume pagal formules:

$$d_{Spacer}^{(1)} = \frac{\lambda - 2 \cdot d_{QW} \cdot n_{QW}}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (12)$$

$$d_{Spacer}^{(2)} = \frac{\lambda - 4 \cdot d_{QW} \cdot n_{QW} - 2 \cdot d_B \cdot n_B}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (13)$$

$$d_{Spacer}^{(3)} = \frac{\lambda - 6 \cdot d_{QW} \cdot n_{QW} - 4 \cdot d_B \cdot n_B}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (14)$$

Iš VECSEL schemos matyti, kad situacija tarpiniam sluoksniui, einančiam po paskutinės kvantinės duobės, yra ta pati kaip ir pirmajam, todėl atitinkamai ir jo storis bus toks pat. Lieka paskaičiuoti tik paskutiniojo tarpinio sluoksnio storį, tam, kad rezonansinė struktūra užsibaigtų ties maksimumu. Į paskutinę pusbangę įeina spinduliuotės ištrūkos sluoksnis, stabdantis paviršinę rekombinaciją ir, kadangi lango sluoksnis dažniausiai susideda iš AlGaAs, siekiant išvengti bandinio paviršiaus oksidacijos, struktūra galiausiai yra užbaigiama plonu, apsaugančiu dengiamuoju sluoksniu. Taigi, laisvai pasirinkus ištrūkos ir dengiamuosius sluoksnius, paskutiniojo struktūros tarpinio sluoksnio storis tada bus lygus:

$$d_{LastSpacer} = \frac{\lambda - 2 \cdot d_{Window} \cdot n_{Window} - 2 \cdot d_{Cap} \cdot n_{Cap}}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (15)$$

Čia  $d_{Window}$  – spinduliuotės ištrūkos sluoksnio fizinis storis,  $n_{Window}$  – spinduliuotės ištrūkos sluoksnio medžiagos lūžio rodiklis,  $d_{Cap}$  – dengiamojo sluoksnio fizinis storis,  $n_{Cap}$  – dengiamojo sluoksnio medžiagos lūžio rodiklis.

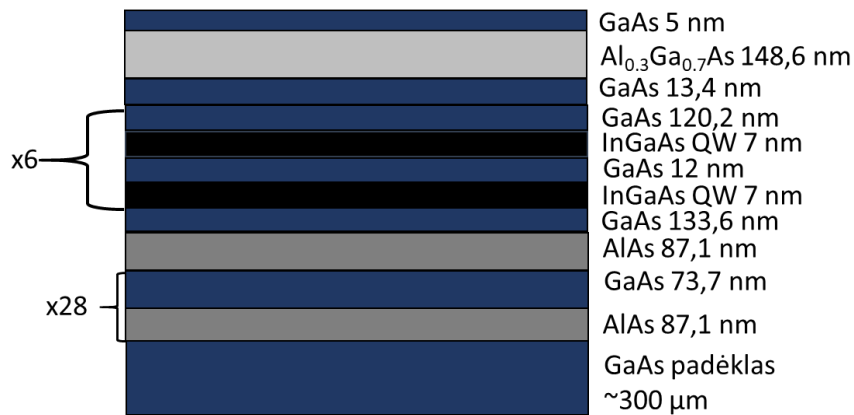
Galimas ir alternatyvus dizainas, kuriame į paskutinį  $\lambda/2$  periodą sutalpinami tik dengiamasis ir spinduliuotės ištrūkos sluoksniai. Tokiu atveju, pasirinkus norimą dengiamojo sluoksnio storį, ištrūkos sluoksnio storis būtų:

$$d_{Window} = \frac{\lambda - 2 \cdot d_{Cap} \cdot n_{Cap}}{2 \cdot n_{Spacer}} \quad (16)$$

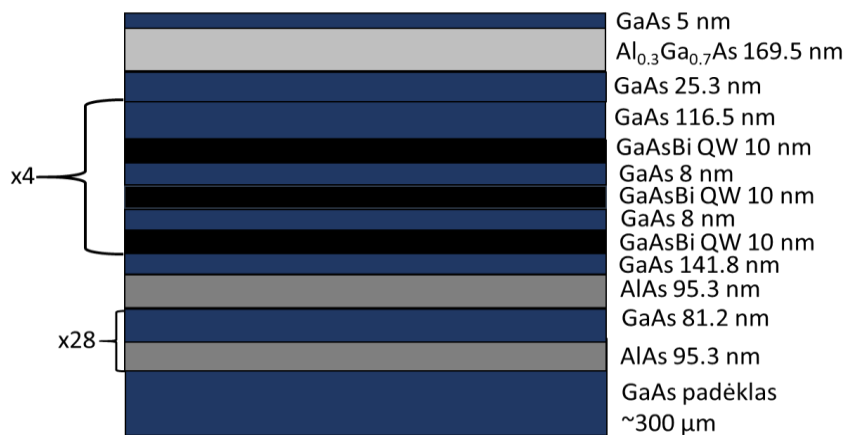
Naudojantis šiomis formulėmis ir laisvai pasirinkus kvantinių duobių, barjerinius, dengiamuosius ir/arba spinduliuotės ištrūkos sluoksnių junginius bei jų storius, buvo paskaičiuoti visi tarpinių sluoksnių storiai, taip kad kvantinės duobės būtų išdėstytos ant stovinčios elektromagnetinės bangos maksimumų. Kvantinės duobės skaičiavimuose buvo sudarytos iš GaAsBi arba InGaAs junginių, barjeriniai, tarpiniai bei dengiamieji sluoksniai iš GaAs, o ištrūkos sluoksniui naudotas  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ . InGaAs ir AlGaAs lūžio rodikliai skaičiavimams gauti remiantis arsenidų lūžio rodiklių

skaičiuokle [77]. Skirtingų koncentracijų GaAsBi junginio optinės konstantos yra vis dar nežinomos, todėl skaičiavimams lūžio rodikliai buvo apytikriai įvertinti remiantis kolegų darbais [78].

Remiantis aukščiau pateiktomis formulėmis, buvo apskaičiuotos VECSEL struktūros su InGaAs ir GaAsBi kvantinių duobių aktyviosiomis terpėmis. Sumodeliuotų struktūrų schemas pavaizduotos 26 ir 27 paveiksluose.

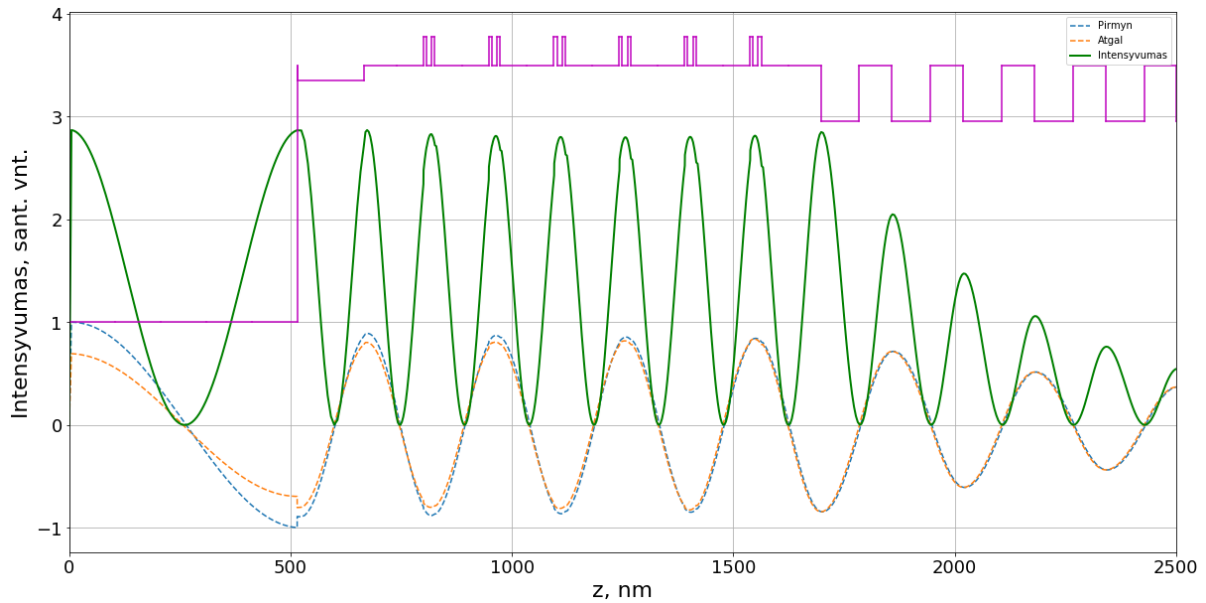


26 pav. InGaAs lazerinės struktūros, skirtos 1030 nm bangos ilgiui schema.

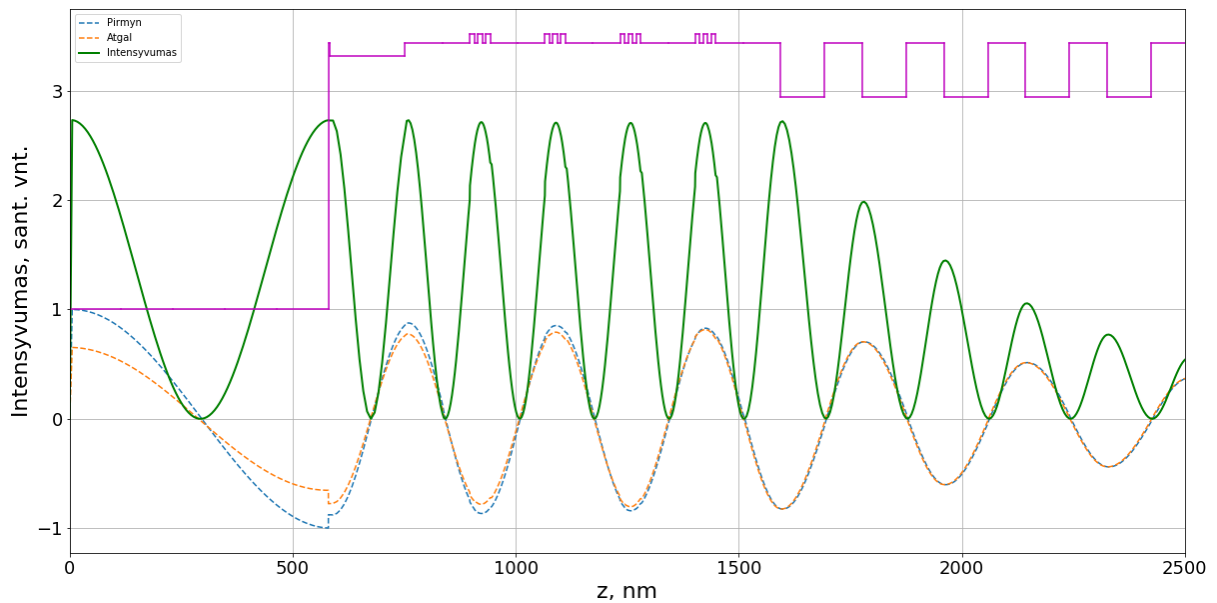


27 pav. GaAsBi lazerinės struktūros, skirtos 1160 nm bangos ilgiui schema.

Taip pat naudojantis perdavimo matricių metodu buvo sumodeliuotas elektrinio lauko intensyvumo pasiskirstymas šiose struktūrose (28 ir 29 pav.). Skaičiavimai buvo patvirtinti matant, kad struktūrose kvantinės duobės iš tiesų išsidėsčiusios ties elektrinio lauko intensyvumo maksimumumais.



28 pav. Elektrinio lauko stiprio (žalia kreivė) pasiskirstymas InGaAs VECSEL struktūroje. Mėlyna kreivė vaizduoja elektrinį lauką, sklindantį nuo išorės link Brego veidrodžio, oranžinė – nuo Brego reflektoriaus link išorės. Purpurinė kreivė – lūžio rodiklių profilis struktūroje.



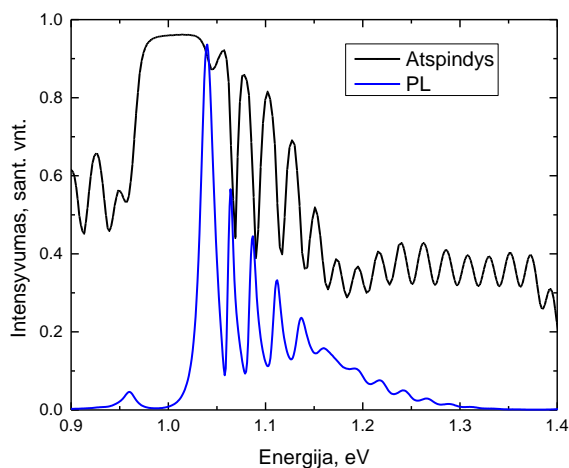
29 pav. Elektrinio lauko stiprio (žalia kreivė) pasiskirstymas GaAsBi VECSEL struktūroje. Mėlyna kreivė vaizduoja elektrinį lauką, sklindantį nuo išorės link Brego veidrodžio, oranžinė – nuo Brego reflektoriaus link išorės. Purpurinė kreivė – lūžio rodiklių profilis struktūroje.

## 4.5. Lazerinių struktūrų charakterizavimas

MBE būdu užauginus sumodeliuotas VECSEL struktūras charakterizavimui naudoti atspindžio bei fotoluminescencijos matavimai. Viename grafike atidėjus abu šiuos matavimus galima stebėti, ar lazerinė struktūra veikia tinkamai. Jeigu centrinis kvantinių duobių fotoluminescencijos dažnis sutampa su rezonansiniu VECSEL struktūros dažniu – stebimas didelis PL intensyvumo išaugimas, o atspindyje dėl susidariusios stovinčios elektromagnetinės bangos atsiranda QW sugerties sąlygotas įdubimas.

Darbo metu buvo užaugintos kelios serijos VECSEL bandinių keičiant struktūrų dizainus, auginimo parametrus bei bandant atkartoti auginimus. Viso buvo užaugintos 6 GaAsBi ir 8 InGaAs VECSEL struktūros. Toliau šiame skyrelyje aptariami tik charakteringi bandiniai, pasižymėję tipinėmis savybėmis.

Charakterizuojant VECSEL struktūras su GaAsBi QW aktyviaja terpe visų pirma pastebėta, kad fotoluminescencijos maksimumo padėtis dažnai nesutapdavo su Brego veidrodžio centru (30 pav.). Dėl sudėtingo GaAsBi sluoksnių MBE auginimo, į GaAs gardelę įvedamas šiek tiek skirtingas bismuto kiekis, keitė ir PL maksimumo padėtį.

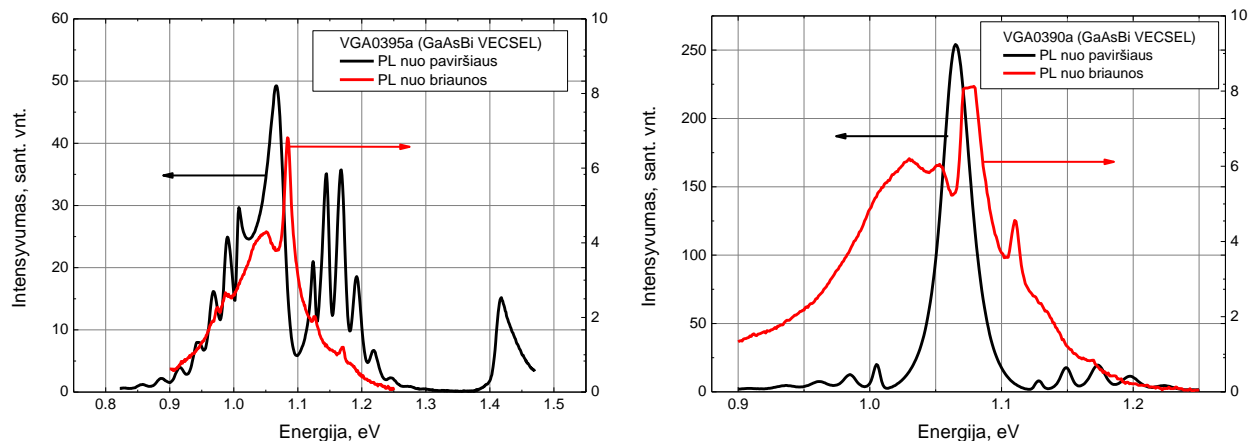


30 pav. Lazerinės struktūros VGA0385 su GaAsBi QW aktyviaja terpe atspindžio bei fotoluminescencijos spektrai.

Kai kvantinių duobių emisijos bangos ilgis nesutampa su VECSEL struktūros rezonansiniu bangos ilgiu, gaunamas tik dalinis stiprinimas bei stebima daug įvairaus intensyvumo pikų PL spektre. Dėl kompleksinės spektro sudėties dažnai yra sunku pasakyti, ties kokia energija yra QW emisijos padėtis. Šiai problemai spręsti buvo papildomai naudoti fotoluminescencijos matavimai nuo bandinio briaunos (31 pav.). PL spektre, gautame nuo bandinio briaunos stebima tikroji QW emisija,



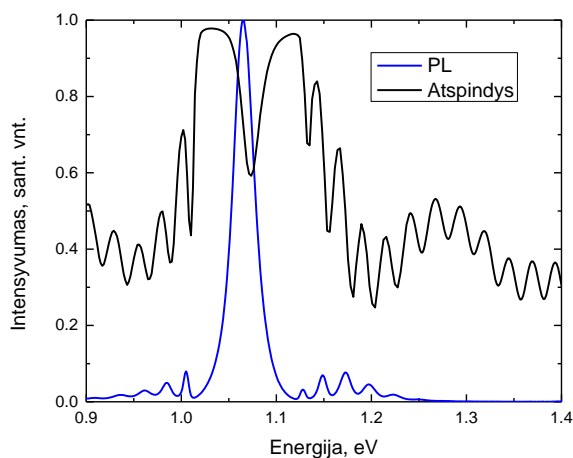
o matuojant įprastiniu būdu, nuo bandinio paviršius gaunamas PL spektras, paveiktas rezonansinės VECSEL struktūros.



31 pav. Lazerinių struktūrų VGA0395 (kairėje) ir VGA0390 (dešinėje) su GaAsBi QW aktyviaja terpe PL matavimai nuo bandinio paviršiaus (juodos kreivės) bei briaunos (raudonos kreivės).

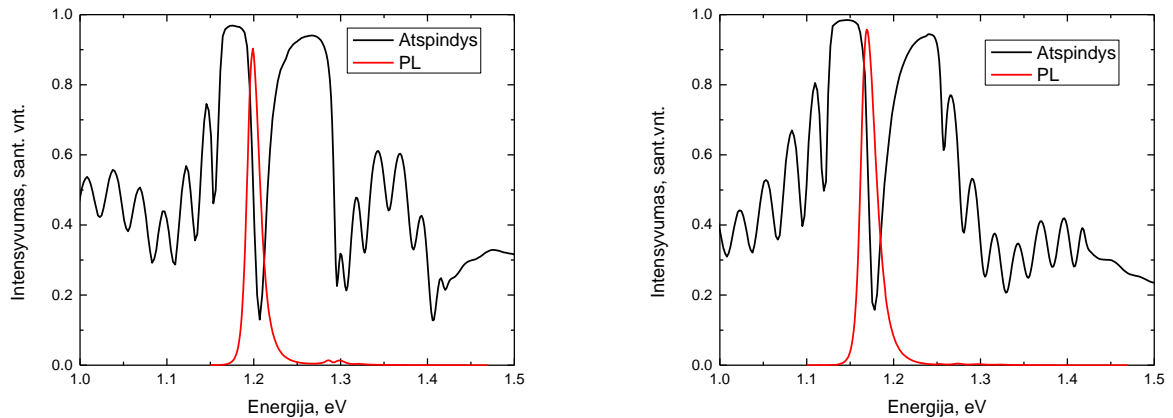
Šie matavimai padėjo suprasti, kaip reikėtų keisti GaAsBi QW auginimo sąlygas, siekiant įvesti tinkamą Bi kiekį ir gauti PL ties Brego veidrodžio centru, bei VECSEL struktūros stiprinamu bangos ilgiu.

Po daugelio auginimų, pavyko gauti GaAsBi lazerinę struktūrą, kurioje PL maksimumo padėtis sutapo su Brego veidrodžio centru bei atspindžio spektro įdubimu (32 pav.). Šis bandinys (VGA0390) atitiko VECSEL struktūroms keliamus reikalavimus ir turėjo potencialo išgauti lazeriavimą.



32 pav. Lazerinės struktūros VGA0390 su GaAsBi QW aktyviaja terpe atspindžio bei fotoluminescencijos spektrai.

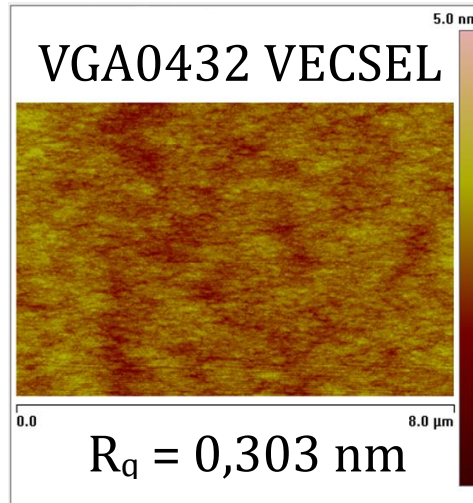
Tokie patys matavimai atlikti ir užaugintose struktūrose su InGaAs kvantinėmis duobėmis (33 pav.). Esminis skirtumas nuo GaAsBi struktūrų yra tai, kad InGaAs auginimas yra žymiai lengviau kontroliuojamas ir atkartojamas. Šiose struktūrose nekilo problemų bandant gauti PL emisiją ties pasirinktu bangos ilgiu. Taip pat dėl InGaAs sluoksnių aukštesnės kokybės, PL intensyvumai šiose VECSEL struktūrose buvo apie 1000 kartų didesni, nei struktūrose su GaAsBi QW.



33 pav. Lazerinių struktūrų VGA0422 (kairėje) ir VGA0432 (dešinėje) su InGaAs QW aktyviąja terpe atspindžio bei fotoluminescencijos spektrai.

Bandiniai VGA0422 (1033 nm emisijos bangos ilgis) ir VGA0432 (1060 nm bangos ilgis) labai gerai atitiko modeliuotas struktūras bei VECSEL aktyviems elementams keliamus reikalavimus.

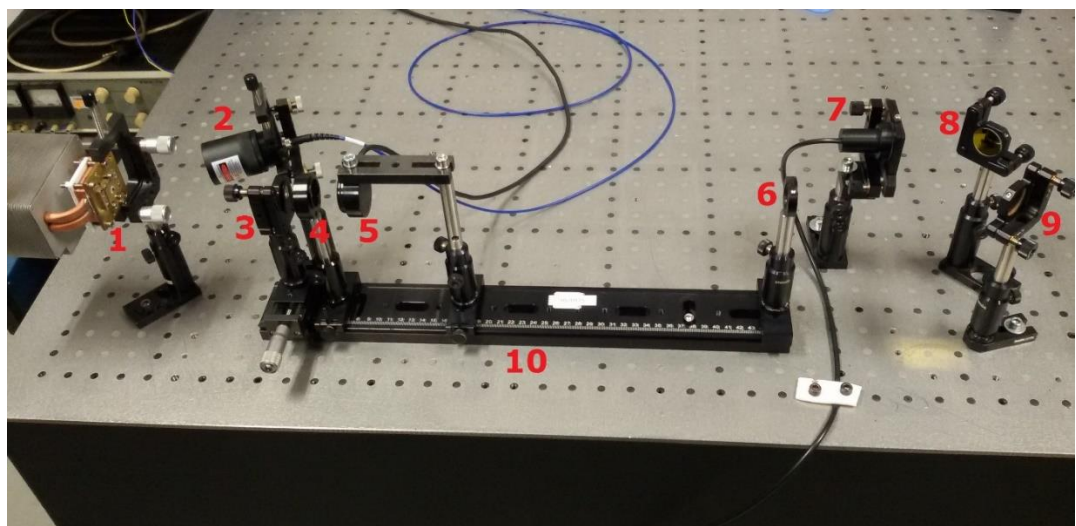
Pabaigai, patikrinta InGaAs lazerinių struktūrų paviršiaus kokybė. Iš AFM vaizdų matyti, kad paviršius yra labai lygus (šiurkštumo parametras  $R_q = 0,303$  nm), o MQW bandiniuose aptiktų dislokacijų nematyti - stori tarpiniai sluoksniai gerai užlygino bet kokius InGaAs auginimo metu atsiradusius nelygumus (34 pav.).



34 pav. InGaAs VECSEL bandinio VGA0432 paviršiaus morfologijos nuotrauka bei paviršiaus šiurkštumo vertė ( $R_q$ ).

#### 4.6. Nuo lazerinės struktūros link lazerio

Norint užaugintose struktūrose generuoti lazerinę spinduliuotę reikalingas rezonatorius ir optinis kaupinimas. Tuo tikslu buvo surinktas optinio kaupinimo stendas (35 pav.). 3x3 mm dydžio lazerinė struktūra yra montuojama ant vandeniui šaldomo varinio laikiklio (1). Kaupinimui naudojamas 808 nm lazeris, kurio galia – iki 4W (2), o lazerio rezonatoriui sudaryti naudojamas išorinis sferinis veidrodis (3), praleidžiantis 2% spinduliuotės ties darbiniais bangos ilgiais. Generuojama spinduliuotė yra fokusuojama lęšiu (4) ir fiksuojama galios matuokliu (5). Papildomai, išorinio lęšio pozicionavimui naudojamas regimosios šviesos lazeris (7) su diafragma (6) bei dviem veidrodžiais (8, 9).



35 pav. VECSEL struktūroms testuoti skirtas optinio kaupinimo stendas. Žymėjimai: vandeniui šaldomas varinis laikiklis (1), kaupinimui naudojamas 808 nm lazeris (2), išorinis sferinis veidrodis (3), lęšis (4), galios matuoklis (5) diafragma (6), regimosios šviesos lazeris (7), veidrodžiai (8, 9), bėgiai (10).

Dauguma elementų yra pozicionuoti ant bėgių (10), kad prireikus galima būtų nesunkiai pakeisti jų poziciją.

Pirminiuose matavimuose ištestavus užaugintas struktūras buvo stebimas pW eilės signalas galios matuoklyje – deja, lazeriavimas nebuvo gautas nei GaAsBi, nei InGaAs lazerinėse struktūrose. Tolimesni tyrimai yra už šio darbo apimties ribų, tačiau yra sudarytas veiksmų planas, siekiant gauti lazeriavimą tyrinėtose struktūrose.

### **Aušinimo optimizavimas**

Viena iš priežasčių, dėl kurių galimai tirtose struktūrose nepavyko gauti lazeriavimo – šiluminiai reiškiniai. Žadinant puslaidininkį intensyvia lazerine spinduliuote jis šyla. Iš kvantinių duobių PL temperatūrinės priklausomybės žinome, kad didėjant temperatūrai – centrinis bangos ilgis slenkasi į mažesnių energijų (ilgesnių bangų pusę). Iš kitos pusės, rezonansinis VECSEL bangos ilgis trumpėja augant temperatūrai, dėl medžiagų lūžio rodiklio temperatūrinės priklausomybės. Per daug pakaitus lazerinei struktūrai, jos charakteristikos nebeatitinka kambario temperatūroje gautų matavimų ir dėl to, tikėtina, lazeriavimas nevyksta. Siekiant pagerinti šilumos nuvedimą, yra planuojama nuploninti arba visiškai nuimti GaAs padėklus nuo VECSEL struktūrų. Taip pat planuojama išbandyti alternatyvius šilumos nuvedimo būdus, pvz. naudojant deimantinį langą [33].

### **Optinio kaupinimo optimizavimas**

Kol kas buvo atlikti tik preliminarūs matavimai, pasirinkus pirminius kaupinimo parametrus. Žadinančio spindulio kritimo kampas, kaupinančio lazerio bangos ilgis, galia, pluošto sufokusavimas – visi šie veiksniai turi svarbią įtaką kaupinant lazerines struktūras. Taip pat yra daug alternatyvių konfigūracijų, kaip galima žadinti VECSEL struktūras [33]. Į šiuos aspektus bus atsižvelgta tobulinant testavimo stendą.

### **Antirefleksinės dangos**

Augintos VECSEL struktūros užsibaigia didelio lūžio rodiklio GaAs dengiamuoju sluoksniu. Tarp oro ir puslaidininkio gaunamas gana didelis lūžio rodiklių kontrastas, todėl atspindžiai nuo paviršiaus gali būti viena iš problemų. Dalis literatūroje aprašytų šio tipo paviršiuje turi antirefleksines dangas [33]. Padengus puslaidininkį praskaidrinančia danga ties kaupinimo bangos ilgiu (808 nm), mažesnė dalis kaupinimo spinduliuotės būtų atspindėta nuo paviršiaus - būtų

pagerinamas kaupinimo efektyvumas. Kitu atveju – suformavus antirefleksinę dangą, skirtą lazeriavimo bangos ilgiui būtų pagerinama lazerio generuojamos šviesos išstrūka iš puslaidininkinės struktūros.

Toliau yra planuojama ant užaugintų struktūrų fizinio garų nusodinimo metodais suformuoti praskaidrinančias dielektrines dangas.

## 5. Išvados

1. Kvantinės GaAsBi/GaAs duobės, užaugintos esant 370 °C temperatūrai ir 1,07 As/Ga srautų santykiui, pasižymėjo intensyvia fotoluminescencija ties 1160 nm bangos ilgiu.
2. Maksimaliai emisijai ties 1030 nm ir 1064 nm bangos ilgiais naudotiems InGaAs/GaAs kvantiniams dariniams optimalios auginimo sąlygos buvo 560 °C temperatūra ir 0,93 bei 1,225 In/Ga srautų santykiai, atitinkamai.
3. Teoriškai sumodeliuotose VECSEL struktūrose buvo įvertinta, kad 1160 nm emisijai tinkamiausios yra 10 nm storio GaAsBi/GaAs kvantinės duobės su 5% Bi, o 1030 nm ir 1064 nm emisijai pasiekti turi būti naudojamos 7 nm InGaAs/GaAs kvantinės duobės su 23,5% bei 26% In, atitinkamai.
4. Visose (ir GaAsBi/GaAs, ir InGaAs/GaAs) užaugintose lazerinėse struktūrose kvantinių duobių fotoluminescencijos smailės padėtis sutapo su rezonansiniais VECSEL struktūrų dažniais, dėl ko gautas didelis kvantinių duobių emisijos stiprinimas.

Rekomendacija ateities tyrimams:

Siekiant įveikinti tirtas lazerines struktūras toliau bus gerinamas šilumos nuvedimas (šaldymo vandeniu iki 4 °C sistema ir padėklų ploninimas), tobulinamas optinio kaupinimo standas (kaupinimo šaltinio parametrai, fokusavimas, geometrija) bei ant lazerinių struktūrų formuojamos antirefleksinės dangos.

# Rezultatų viešinimas

Iš magistrinio darbo metu gautų rezultatų atspausdinti 2 moksliniai straipsniai:

1. S. Pūkienė, M. Karaliūnas, **A. Jasinskas**, E. Dudutienė, B. Čechavičius, J. Devenson, R. Butkutė, A. Udal and G. Valušis, *Enhancement of photoluminescence of GaAsBi quantum wells by parabolic design of AlGaAs barriers*, Nanotechnology, Vol. 30, 455001 (11pp) (2019); <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab36f3>

2. E. Dudutienė, **A. Jasinskas**, B. Čechavičius, R. Nedzinskas, M. Jokubauskaitė, A. Bičiūnas, V. Bukauskas, G. Valušis and R. Butkutė, *Photoluminescence properties of GaAsBi single quantum wells with 10% of Bi*, Lithuanian Journal of Physics, Vol. 31, 142-150 (2021). <https://doi.org/10.3952/physics.v61i2.4442>

Darbo metu gauti rezultatai 2018 – 2022 m. buvo pristatyti aštuoniolikoje tarptautinių ir nacionalinių konferencijų:

- International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors (2018, 2019);
- Open Readings (2019, 2021, 2022);
- APROPOS – Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems (2018, 2020);
- Frontiers in Optics (2019, 2020);
- AMT – Advanced Materials and Technologies (2018, 2019, 2020, 2021);
- LithPol – Lithuania-Poland Workshop on Physics and Technology (2019);
- LNFK – Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija (2021);
- FizTeCh – Fizinių ir Technologijos mokslų centro doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija (2018, 2020, 2021).

Pats studentas konferencijose pristatė 2 žodinius ir 7 stendinius pranešimus:

1. Algirdas Jasinskas, Renata Butkutė, Simona Pūkienė, Sandra Stanionytė, Evelina Pozingytė, Bronislovas Čechavičius and Arūnas Krotkus, *Dilute Bismide Quantum Well Structures for IR Lasers*, 20<sup>th</sup> International Conference – School Advanced Materials and Technologies, August 28<sup>th</sup> – 31<sup>st</sup>, 2018, Palanga, Lithuania.
2. Algirdas Jasinskas, Renata Butkutė, Simona Pūkienė, Sandra Stanionytė, Evelina Pozingytė, Bronislovas Čechavičius and Arūnas Krotkus, *Growth and Characterization of GaAsBi MQW Structures for NIR Lasers*, Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems - APROPOS-16, October 10<sup>th</sup> – 12<sup>th</sup>, 2018, Vilnius, Lithuania.
3. Algirdas Jasinskas, Renata Butkutė, Sandra Stanionytė, Evelina Pozingytė, Bronislovas Čechavičius and Arūnas Krotkus, *Kvantinių GaAsBi darinių auginimo sąlygų optimizavimas*, 8-oji doktorantų ir jaunųjų mokslininkų konferencija – Fiztech, October 17<sup>th</sup> – 18<sup>th</sup>, 2018, Vilnius, Lithuania.
4. Algirdas Jasinskas, Renata Butkutė, Sandra Stanionytė, Bronislovas Čechavičius, Martynas Skapas and Evelina Pozingytė, *GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> MQW Structures as an Active Region for NIR Lasers*, Open Readings 2019: 62<sup>nd</sup> International Conference for Students of Physics and Natural Sciences, March 19-22, 2019, Vilnius, Lithuania.

5. Algirdas Jasinskas, Evelina Dudutienė, Bronislovas Čechavičius, Sandra Stanionytė and Renata Butkutė, *Optimization of GaAsBi MQW Growth Parameters for NIR Laser Applications*, 10th International Workshop on Bismuth-Containing Semiconductors, July 21st – 24th, Toulouse, France.
6. Algirdas Jasinskas, Sandra Stanionytė, Martynas Skapas, Bronislovas Čechavičius, Evelina Dudutienė and Renata Butkutė, *The Effect of MBE Growth Parameters on Properties of GaAsBi Quantum Well Structures*, 21st International Conference – School Advanced Materials and Technologies, August 19th – 23rd, 2019 Palanga, Lithuania.
7. Algirdas Jasinskas, Simona Pūkienė, Sandra Stanionytė, Martynas Skapas, Bronislovas Čechavičius and Renata Butkutė, *AlIII-BV Quantum Structures for NIR Emitters*, Lithuania-Poland Workshop on Physics and Technology, September 26 – 27, 2019, Vilnius, Lithuania.
8. Algirdas Jasinskas, Simona Pūkienė, Lukas Jočionis, Bronislovas Čechavičius and Renata Butkutė, *Optically pumped semiconductor lasers based on InGaAs/GaAs and GaAsBi/GaAs quantum wells*, Advanced Properties and Processes in Optoelectronic Materials and Systems - APROPOS-17, September 29th – October 1st, 2020, Vilnius, Lithuania.
9. Algirdas Jasinskas, Andrea Simaz, Mina Beshara, Gerhard Bohm, Mikhail Belkin and Renata Butkutė, *Comparative Study of Different Quantum Well Active Regions for Mid-IR VCSELS*, Lietuvos Nacionalinė Fizikos Konferencija LNFK 41, October 6th – 8th, 2021, Vilnius, Lithuania.



# Literatūros sąrašas:

- [1] M. Jamrógiewicz, "Application of the near-infrared spectroscopy in the pharmaceutical technology," *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, vol. 66, pp. 1–10, 2012.
- [2] J. U. Porep, D. R. Kammerer and R. Carle, "On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 211–230, 2015.
- [3] A. S. Polkovnikov and G. G. Zegrya, "Auger recombination in semiconductor quantum wells," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 58, no. 7, pp. 4039–4056, 1998.
- [4] T. D. Eales, I. P. Marko, A. R. Adams, J. R. Meyer, I. Vurgaftman, and S. J. Sweeney, "Quantifying Auger recombination coefficients in type-I mid-infrared InGaAsSb quantum well lasers," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 54, no. 5, 2020.
- [5] L. Wang, L. Zhang, L. Yue, D. Liang, X. Chen, Y. Li, P. Lu, J. Shao and S. Want, "Novel dilute bismide, epitaxy, physical properties and device application," *Crystals*, vol. 7, no. 3, 2017.
- [6] S. Francoeur, M. J. Seong, A. Mascarenhas, S. Tixier, M. Adamcyk, and T. Tiedje, "Band gap of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>, 0 < x < 3.6%," *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 22, pp. 3874–3876, 2003.
- [7] C. A. Broderick, M. Usman, S. J. Sweeney and E. P. O'Reilly, "Band engineering in dilute nitride and bismide semiconductor lasers," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 9, 2012.
- [8] B. Fluegel, S. Francoeur, A. Mascarenhas, S. Tixier, E. C. Young and T. Tiedje, "Giant spin-orbit bowing in GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>," *Physical Review Letters*, vol. 97, no. 6, 2006.
- [9] S. Wang, *Bismuth - Containing Alloys and Nanostructures, Springer Series in Materials Science 285, 2019.*
- [10] J. Liu, W. Pan, X. Wu, C. Cao, Y. Li, X. Chen, Y. Zhang, L. Wang, J. Yan, D. Zhang, Y. Song, J. Shao and S. Wang, "Electrically injected GaAsBi/GaAs single quantum well laser diodes," *AIP Advances*, vol. 7, no. 11, 2017.
- [11] S. Tixier, M. Adamcyk and T. Tiedje, "Molecular beam epitaxy growth of GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub>," *Applied Physics Letters*, vol. 82, no. 14, pp. 2245–2247, 2003.
- [12] J. Puustinen, J. Hilska and M. Guina, "Analysis of GaAsBi growth regimes in high resolution with respect to As/Ga ratio using stationary MBE growth," *Journal of Crystal Growth*, vol. 511, no. December 2018, pp. 33–41, 2019.
- [13] N. Dikareva, B. Zvonkov, I. Samartsev, S. Nekorkin, N. Baidus and A. Dubinov, "GaAs-Based Laser Diode with InGaAs Waveguide Quantum Wells," *Semiconductors*, vol. 53, no. 12, pp. 1709–1711, 2019.
- [14] M. Guina, A. Rantamäki and A. Härkönen, "Optically pumped VECSELs: Review of technology and progress," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, no. 38, 2017.
- [15] D. Jung, S. Bank, M. L. Lee, and D. Wasserman, "Next-generation mid-infrared sources," *Journal of Optics*, vol. 19, no. 12, 2017.
- [16] A. Y. Cho, *Molecular beam epitaxy: from research to mass production*, Elsevier, April 1995.

- [17] N. J. Shah and S.-S. Pei, "III-V Device Technologies for Electronic Applications," *AT&T Technical Journal*, vol. 68, no. 1, pp. 19–28, Jan. 1989.
- [18] S. Mokkaṭpati and C. Jagadiṣh, "III-V compound SC for optoelectronic devices," *Materials Today*, vol. 12, no. 4, pp. 22–32, 2009.
- [19] "III-V Compound Semiconductors." <https://jprineas.lab.uiowa.edu/iii-v-compound-semiconductors>.
- [20] G. B. Stringfellow, "Calculation of ternary and quaternary III–V phase diagrams," *Journal of Crystal Growth*, vol. 27, no. March, pp. 21–34, 1974.
- [21] E. F. Schubert, *Doping in III-V Semiconductors*, Cambridge University Press, 1993.
- [22] H. Achour, S. Louhibi, B. Amrani, A. Tebboune and N. Sekkal, "Structural and electronic properties of GaAsBi," *Superlattices and Microstructures*, vol. 44, no. 2, pp. 223–229, no. May, 2008.
- [23] M. Nejad, "Optical and Electronic Properties of GaAsBi Alloys for Device Applications," *PhD Thesis*, August 2015.
- [24] W. M. Linhart and R. Kudrawiec, "Temperature dependence of band gaps in dilute bismides," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 33, no. 7, 2018.
- [25] D. Miller, "Optical physics of quantum wells," *Quantum Dynamics of Simple Systems*, pp. 239–266, 2020.
- [26] B. Zhao, T Chen and A. Tariv, "Comparison of differential gain in single quantum well and bulk double heterostructure lasers," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 25, pp. 2343–2345, 1991.
- [27] P. Harrison, "Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures," p. 564, 2011.
- [28] "Bragg mirrors." [https://www.rp-photonics.com/bragg\\_mirrors.html](https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html).
- [29] D. Patil, *Semiconductor Laser Diode– Technology and Applications*, *IntechOpen*, April 2012.
- [30] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys and R. O. Carlson, "Coherent Light Emission From GaAs Junctions," *Physical Review Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 366–368, Nov. 1962.
- [31] N. N. Ledentsov, D. Bimberg and Z. I. Alferov, "Progress in epitaxial growth and performance of quantum dot and quantum wire lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 11, pp. 1540–1555, 2008.
- [32] J. Endriz, M. Vakili, G. Browder, M. DeVito, J. Haden, G. Harnagel, W. Plano, M. Sakamoti, D. Welch, S. Willing, D. Worland, H. Yao, "High Power Diode Laser Arrays," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 28, no. 4, pp. 952–965, 1992.
- [33] M. Guina, A. Rantamäki and A. Härkönen, "Optically pumped VECSELs: Review of technology and progress," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 50, no. 38, 2017.
- [34] A. Krotkus, *Puslaidininkiy optoelektronikos sistemas ir prietaisai*. 2008.
- [35] K. Iga, "Surface-emitting laser - its birth and generation of new optoelectronics field," *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, no. 6, pp. 1201–1215, 2000.
- [36] K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita, "Surface emitting semiconductor laser array: Its advantage and future," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 7, no. 3, pp. 842–846, May 1989.

- [37] A. C. Tropper, H. D. Foreman, A. Garnache, K. G. Wilcox and S. H. Hoogland, "Vertical-external-cavity semiconductor lasers," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 37, no. 9, pp. 75–85, 2004.
- [38] S. Hoogland, S. Dhanjal, A. C. Tropper, J. S. Roberts, R. Häring and R. Paschotta, "Passively Mode-Locked Diode-Pumped Surface-Emitting Semiconductor Laser," *IEEE Photonics Technology Letters* vol. 12, no. 9, pp. 10–13, 2000.
- [39] A. Garnache, S. Hoogland, A. C. Tropper, I. Sagnes, G. Saint-Girons and J. S. Roberts, "Sub-500-fs soliton-like pulse in a passively mode-locked broadband surface-emitting laser with 100 mW average power," *Applied Physics Letters*, vol. 80, no. 21, pp. 3892–3894, 2002.
- [40] D. Lorente, D. Maas, H. Unold, A. Bellancourt, B. Rudin, E. Gini, D. Ebling, U. Keller, "50-GHz passively mode-locked surface-emitting semiconductor laser with 100-mW average output power," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 42, no. 8, pp. 838–847, 2006.
- [41] P. Klopp, U. Griebner, M. Zorn and M. Weyers, "Pulse repetition rate up to 92 GHz or pulse duration shorter than 110 fs from a mode-locked semiconductor disk laser," *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 7, 2011.
- [42] M. Scheller, A. Laurain, S. W. Koch and J. v. Moloney, "Passively mode-locked femtosecond VECSELS with high average output power," *SPIE LASE Proceedings Volume 8606, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) III*, 860605, 2013.
- [43] V. Bahrami-Yekta, T. Tiedje and M. Masnadi-Shirazi, "MBE growth optimization for GaAs  $1-x$  Bi  $x$  and dependence of photoluminescence on growth temperature," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 9, p. 094007, Sep. 2015.
- [44] A. Ptak, R. France, D. Beaton, K. Alberi, J. Simon, A. Mascarenhas, C. Jiang, "Kinetically limited growth of GaAsBi by molecular-beam epitaxy," *Journal of Crystal Growth*, vol. 338, no. 1, pp. 107–110, 2012.
- [45] R. B. Lewis, M. Masnadi-Shirazi and T. Tiedje, "Growth of high Bi concentration GaAs  $1-x$ Bi  $x$  by molecular beam epitaxy," *Applied Physics Letters*, vol. 101, no. 8, 2012.
- [46] G. Vardar, S. W. Paleg, M. v. Warren, M. Kang, S. Jeon and R. S. Goldman, "Mechanisms of droplet formation and Bi incorporation during molecular beam epitaxy of GaAsBi," *Applied Physics Letters*, vol. 102, no. 4, 2013.
- [47] J. Kopaczek, W. Linhart, M. Baranowski, R. Richards, F. Bastiman, J. David and R. Kudrawiec, "Optical properties of GaAsBi/GaAs quantum wells: Photoreflectance, photoluminescence and time-resolved photoluminescence study," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 9, 2015.
- [48] N. Baladés, D. Sales, M. Herrera, C. Tan, Y. Liu, R. Richards and S. Molina, "Analysis of bi distribution in epitaxial GaAsBi by aberration-corrected HAADF-STEM," *Nanoscale Research Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 0–7, 2018.
- [49] H. Fitouri, I. Moussa, A. Rebey and B. el Jani, "Study of GaAsBi MOVPE growth on (100) GaAs substrate under high Bi flow rate by high resolution X-ray diffraction," *Microelectronic Engineering*, vol. 88, no. 4, pp. 476–479, Apr. 2011.
- [50] R. Richards, F. Bastiman, C. Hunter, D. Mendes, A. Mohman, J. Roberts and J. David, "Molecular beam epitaxy growth of GaAsBi using As<sub>2</sub> and As<sub>4</sub>," *Journal of Crystal Growth*, vol. 390, pp. 120–124, 2014.

- [51] J. Hilska, E. Koivusalo, J. Puustinen, S. Suomalainen and M. Guina, "Epitaxial phases of high Bi content GaSbBi alloys," *Journal of Crystal Growth*, vol. 516, pp. 67–71, 2019.
- [52] A. Assali, F. Kanouni, Q. Zou and R. Khenata, "Optical characteristics of dilute gallium phosphide bismide: Promising material for near-infra photonic device applications," *Physics Letters A*, vol. 384, no. 6, p. 126147, Feb. 2020.
- [53] D. P. Samajdar, U. Das, A. S. Sharma, S. Das and S. Dhar, "Influence of Bi and N related impurity states on the band structure and band offsets of GaSbBiN alloys," *Current Applied Physics*, vol. 16, no. 12, pp. 1687–1694, Dec. 2016.
- [54] S. Tixier, M. Adamczyk, E. C. Young, J. H. Schmid and T. Tiedje, "Surfactant enhanced growth of GaNAs and InGaNAs using bismuth," *Journal of Crystal Growth*, vol. 251, no. 1–4, pp. 449–454, 2003.
- [55] R. B. Lewis, D. A. Beaton, X. Lu and T. Tiedje, "GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> light emitting diodes," *Journal of Crystal Growth*, vol. 311, no. 7, pp. 1872–1875, 2009.
- [56] Y. Tominaga, K. Oe and M. Yoshimoto, "Low temperature dependence of oscillation wavelength in GaAs<sub>1-x</sub>Bi<sub>x</sub> laser by photo-pumping," *Applied Physics Express*, vol. 3, no. 6, pp. 1–4, 2010.
- [57] I. Marko, S. Jin, K. Hild, Z. Batool, Z. Bushell, P. Ludewig, W. Stolz, K. Volz, R. Butkutė, V. Pačebutas, A. Geižutis, A. Krotkus and S. Sweeney, "Properties of hybrid MOVPE/MBE grown GaAsBi/GaAs based near-infrared emitting quantum well lasers," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 9, 2015.
- [58] X. Wu, W. Pan, Z. Zhang, T. Li, C. Cao, J. Liu, L. Zhang, Y. Song, H. Ou and S. Wang, "1.142 μm GaAsBi/GaAs Quantum Well Lasers Grown by Molecular Beam Epitaxy," *ACS Photonics*, vol. 4, no. 6, pp. 1322–1326, 2017.
- [59] X. Liu, L. Wang, X. Fang, T. Zhou, G. Xiang, B. Xiang, X. Chen, S. Hark, H. Liang, S. Wang and Z. Zhang, "Continuous wave operation of GaAsBi microdisk lasers at room temperature with large wavelengths ranging from 1.27 to 1.41 μm," *Photonics Research*, vol. 7, no. 5, p. 508, 2019.
- [60] T. Thomas, A. Mellor, N. Hylton, M. Fuhrer, D. Alonso-Alvarez, A. Braun, N. Ekins-Daukes, J. David and S. Sweeney, "Requirements for a GaAsBi 1 eV sub-cell in a GaAs-based multi-junction solar cell," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 9, 2015.
- [61] A. Zayan, M. Stevens and T. E. Vandervelde, "GaAsBi alloys for photovoltaic and thermophotovoltaic applications," in *2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Jun. 2016, pp. 2839–2843.
- [62] A. Muhammetgulyyev, O. G. Erbas, B. Kinaci, O. Donmez, Y. G. Celebi and A. Erol, "Characterization of a GaAs/GaAsBi pin solar cell," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 34, no. 8, 2019.
- [63] R. Richards, A. Mellor, F. Harun, J. Cheong, N. Hylton, T. Wilson, T. Thomas, J. Roberts, N. Ekins-Daukes and J. David, "Photovoltaic characterisation of GaAsBi/GaAs multiple quantum well devices," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 172, no. December, pp. 238–243, 2017.
- [64] S. S. Prabhu, S. E. Ralph, M. R. Melloch and E. S. Harmon, "Carrier dynamics of low-temperature-grown GaAs observed via THz spectroscopy," *Applied Physics Letters*, vol. 70, no. 18, pp. 2419–2421, 1997.

- [65] K. Bertulis, A. Krotkus, G. Aleksejenko, V. Pačebutas, R. Adomavičius, G. Molis and S. Marcinkevičius, "GaBiAs: A material for optoelectronic terahertz devices," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 20, pp. 3–5, 2006.
- [66] "Ekspla Thz emiteriai." <https://ekspla.cn/wp-content/uploads/2011/05/thz-emitters-and-detectors.pdf>.
- [67] "Teravil Thz detektorius." <https://teravil.lt/detector.php>.
- [68] S. Kumar, "Synthesis of strongly correlated oxides and investigation of their electrical and optical properties," *PhD Thesis*, 2017.
- [69] E. Meyer, "Atomic force microscopy," *Progress in Surface Science*, vol. 41, no. 1, 1992.
- [70] E. Cordero, "Hydrogen Generation on Silicon Nanostructures," *Master thesis*, 2016.
- [71] M. Malinverni, "Optimization of NH<sub>3</sub>MBE grown p-doped (Al)Ga<sub>N</sub> layers and their implementation in long wavelength laser diodes and tunnel junctions," *EPFL scientific publications*, vol. 6747, 2015.
- [72] P. K. Patil, F. Ishikawa and S. Shimomura, "GaAsBi / GaAs MQWs grown by MBE using a two-substrate- temperature technique," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 725, pp. 694–699, 2017.
- [73] Y. Horikoshi, M. Kawashima and H. Yamaguchi, "Migration-Enhanced Epitaxy of GaAs and AlGaAs," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 27, no. 169, 1988.
- [74] D. C. Parrotta, R. Casula, J. Penttinen, T. Leinonen and J. Alan, "InGaAs-QW VECSEL emitting >1300-nm via intracavity Raman conversion," *Photonics West*, Conference paper, pp. 1–7, 2016.
- [75] O. G. Okhotnikov, *Semiconductor Disk Lasers Physics and Technology*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2010.
- [76] M. Raja, S. Brueck, M. Osinski, C. Schaus, J. McInerney, T. Brennan and B. Hammons, "Resonant periodic gain surface-emitting semiconductor lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 25, no. 6, pp. 1500–1512, Jun. 1989.
- [77] "Batop material parameters of Arsenides." <https://www.batop.de/information/information.html>.
- [78] S. Tumenas, V. Karpus, K. Bertulis and H. Arwin, "Dielectric function and refractive index of GaBi<sub>x</sub>As<sub>1-x</sub> (x = 0.035, 0.052, 0.075)," *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics*, vol. 9, no. 7, pp. 1633–1635, 2012.

## SANTRAUKA

### Artimosios infraraudonosios srities lazerinių struktūrų su III-V kvantinių duobių aktyviaja terpe formavimas ir tyrimas

Algirdas Jasinskas

Šiame darbe buvo auginamos ir charakterizuojamos optiškai kaupinamų puslaidininkinių lazerių (VECSEL) struktūros su dviejų tipų aktyviosiomis sritimis – GaAsBi ir InGaAs kvantinių duobių. InGaAs pasirinktas kaip gerai žinoma medžiaga, o GaAsBi junginio pritaikymas šiuose lazeriuose leistų sukurti naujos kartos pranašesnius NIR spinduliuotės šaltinius. VECSEL suderina pagrindinius puslaidininkinių ir kietakūnių lazerių privalumus – pasižymi kompaktiškumu, galimybe nesunkiai valdyti emisijos bangos ilgį bei aukštos kokybės pluoštu ir didelės galios veikimu, todėl yra labai patrauklūs įvairiems optoelektronikos taikymams.

Pirmojoje darbo dalyje tirtos molekulinė pluoštelių epitaksijos auginimo sąlygos, siekiant gauti InGaAs ir GaAsBi kvantinių duobių emisiją ties pasirinktais 1030 nm, 1064 nm ir 1160 nm bangos ilgiais. Nustatyta, kad tinkamiausia auginimo temperatūra InGaAs kvantinėms duobėms formuoti yra 560 °C, o GaAsBi kvantinėms duobėms – 370 °C. Taip pat gauta, kad siekiant šių QW emisijos bangos ilgių, InGaAs kvantines duobes reikia auginti palaikant 0,93 ir 1,225 In/Ga srautų santykius, o GaAsBi – 1,07 As/Ga srautų santykį.

VECSEL lazerinės struktūros su InGaAs ir GaAsBi kvantinių duobių aktyviaja terpe buvo sumodeliuotos teoriškai, paskaičiuoti tarpinių, dengiamųjų ir spinduliuotės ištrūkų sluoksnių storiai. VECSEL struktūrų modeliavimo rezultatai parodė, kad 1160 nm emisija pasiekama naudojant 10 nm storio GaAsBi kvantines duobes su 5% Bi, o 1030 nm ir 1064 nm emisijai išgauti tinkamiausios yra 7 nm InGaAs kvantinės duobės su 23,5% bei 26% In, atitinkamai minėtoms spektrinėms sritims.

Užaugintos lazerinės struktūros buvo charakterizuotos atspindžio ir fotoluminescencijos matavimais. Kvantinių duobių fotoluminescencijos smailės padėtys sutapo su rezonansiniais VECSEL struktūrų dažniais, dėl ko gautas didelis kvantinių duobių emisijos stiprinimas. Užaugintų struktūrų parametrai sutapo su modeliuotomis struktūromis. Darbe taip pat pateiktos rekomendacijos eksperimentinio lazerių testavimo stendo tobulinimui.

## SUMMARY

### Growth and investigation of near infrared laser structures with active region based on III-V quantum wells

Algirdas Jasinskas

In this work, optically-pumped semiconductor laser structures with InGaAs and GaAsBi quantum well active regions were grown and studied. InGaAs was chosen as a well-known semiconductor with mature technology, while GaAsBi was taken as a novel material for new generation NIR lasers. VECSELs combine main advantages of both, semiconductor and solid-state lasers, therefore are very attractive for various applications in photonics and optoelectronics.

In the first part of the work, molecular beam epitaxy growth conditions were studied in order to obtain quantum well emission at chosen wavelengths of 1030 nm, 1064 nm and 1160 nm. It was found, that optimal growth temperature for InGaAs quantum wells is 560 °C, while in the case of GaAsBi QWs it is 370 °C. Furthermore, In/Ga BEP ratio of 0,93 and 1,225 and As/Ga BEP of 1,07 during MBE growth result in quantum wells, emitting around those target wavelengths.

VECSEL structures with InGaAs and GaAsBi quantum well active regions were modelled and all other layers inside the structure (spacer, window, capping) were calculated. In these structures, 10 nm thick GaAsBi quantum wells with 5% of Bi were used in order to obtain emission wavelength of 1160 nm, while 7 nm thick InGaAs quantum wells with 23,5 and 26% of In resulted in emission wavelengths of 1030 nm and 1064 nm, respectively.

The grown structures were characterized by reflectance and room temperature PL measurements. Quantum well photoluminescence peaks were well-matched with resonant frequencies of VECSEL structures, which resulted in huge increase in emission. An attempt to obtain lasing from these structures will be made by improving the optical pumping setup, optimizing heat management in the structure and forming antireflective coatings.