

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Jaunius Berškys

SPEKTROSKOPINĖS SISTEMOS KŪRIMAS TAIKANT DERINAMO EMISIJOS BANGOS
ILGIO KVANTINĮ KASKADINĮ LAZERĮ
Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Fotonikos ir nanotechnologijų
studijų programa

Studentas

Jaunius Berškys

Darbo vadovas

dr. Jan Devenson

Instituto atstovas

dr. Augustas Vaitkevičius

Vilnius 2023

TURINYS

1. ĮVADAS.....	3
2. LITERATŪROS APŽVALGA.....	5
2.1 Kvantinių kaskadinių lazerių veikimo principai	5
2.2 Kvantinių kaskadinių lazerių taikymai.....	9
2.3 Derinamieji kvantiniai kaskadiniai lazeriai.....	10
2.4 Lazerio briaunų praskaidrinimas.....	13
2.5 Kvantinio kaskadinio lazerio auginimas molekulinio pluoštelio epitaksija.....	14
2.6 Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių (FTIR) spektroskopija	17
2.7 Sinchroninis stiprintuvas.....	18
2.8 Lazerinių diodų charakterizavimas	21
3. EKSPERIMENTAS	22
3.1 Baldinio lako UV sukietinimo laipsnio spektroskopiniai tyrimai	22
3.2 Kvantinio kaskadinio lazerio aktyvios terpės projektavimas	23
3.3 Derinamo kvantinio kaskadinio lazerinės struktūros epitaksija.....	24
3.4 Lazerio elektrooptinių parametrų charakterizavimo matavimai	26
3.5 Kvantinių kaskadinių lazerių optinių ir elektrinių savybių tyrimo rezultatai.....	27
3.6 Polimerinės dangos UV sukietinimo užbaigtumo kontrolės sistemos tyrimas	31
3.7 Spektroskopinė sistema, naudojant kvantinį kaskadinį lazerį su derinamu bangos ilgiu, pasitelkiant išorinio rezonatoriaus konfigūraciją.....	34
REZULTATAI IR IŠVADOS.....	39
Literatūros sąrašas.....	40
Summary	42

1. ĮVADAS

Praplečiant puslaidininkinių šviesos šaltinių diapazoną į infraraudonųjų spindulių sritį atsivėrė plačios jų taikymo galimybės. Ypač paklausūs vidurinėsios infraraudonosios srities šaltiniai, nes šioje srityje daugelis organinių junginių turi charakteringas energijos sugerties juostas, susijusias su organinių molekulių rotaciniais bei vibraciniais judesiais. Tokiu būdu kompaktiški puslaidininkiniai infraraudonosios spinduliuotės šaltiniai puikiai tinka organinių junginių spektroskopiniams taikymams. Didelę paklausą turi ir koherentiniai derinamieji šviesos šaltiniai. Šiuo metu kvantiniai kaskadiniai lazeriai yra vienintelis koherentinių puslaidininkinių spindulių tipas, perklojantis visą vidurinėsios infraraudonosios spinduliuotės spektro sritį. Taipogi, šie šaltiniai yra kompaktiški bei pasižymi pakankamai plačiu derinamumu, kas dar labiau sustiprina jų patrauklumą spektroskopiniuose taikymuose. Vienas iš tokių šaltinių taikymų, kuris yra vystomas Fizinių ir technologijos mokslų centre (toliau – FTMC), yra polimerizacijos procesų kontrolė. Šis metodas yra aktualus gaminių kokybės užtikrinimui baldų pramonėje, poligrafijoje, maisto pakuočių gamyboje, kur jį numatyta taikyti UV spindulių aktyvuojamos polimerizacijos proceso užbaigtumo kontrolei.

Šiame darbe susipažinta su derinamų kvantinių kaskadinių lazerių aktyvios terpės projektavimo principais, jų auginimo technologija, taikant molekulinį pluoštelių epitaksiją, ir elektrinių bei optinių charakteristikų tyrimais. Pasitelkiant darbo autoriaus seniau sukurtą automatizuotą matavimo sistemą, iširtas FTMC suprojektuotas, molekulinį pluoštelių epitaksijos būdu užaugintas ir fotolitografijos būdu suformuotas kvantinis kaskadinis lazeris, kurio projektinis bangos ilgis yra 8,3 μm . Sukurta spektroskopinė sistema, naudojant kvantinį kaskadinį lazerį su derinamu bangos ilgiu, pasitelkiant išorinio rezonatoriaus konfigūraciją. Taip pat, iširta lazerio veikimo temperatūros bei srovės įtaka emisijos spektrui. Pagal iširtas savybes buvo parinktos lazerio veikimo srovės, atitinkančios emisijos spektrus, tinkančius atraminiam ir pagrindiniam atspindžio signalo matavimui, taikant jį baldinių plokščių polimerizacijos užbaigtumo kontrolei. Buvo surinktas matavimo stendas ir, taikant sukurtą lazerį bei parinktus veikimo parametrus, iširtas konceptas, padėsiantis matuoti baldinių plokščių UV sukietinimo užbaigtumą.

Darbo tikslas:

Sukurti derinamo emisijos bangos ilgio kvantinio kaskadinio lazerio pagrindu veikiančią spektroskopinę sistemą ir ištirti jos galimybes taikant UV sukietinimo polimerizacijos proceso kontrolei, baldų pramonėje.

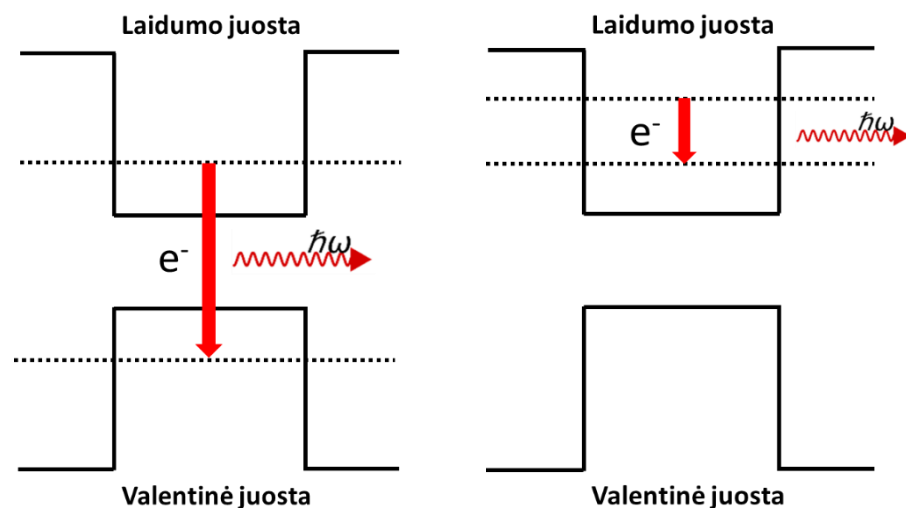
Išsikelti uždaviniai:

1. Molekulinių pluoštelių epitaksijos metodu užauginti kvantinių kaskadinių lazerių struktūrą, skirtą emisijai 8,3 μm srityje.
2. Išmatuoti suformuotų kvantinių kaskadinių lazerių diodų elektrines ir optines charakteristikas ir ištirti šių lazerių emisijos bangos ilgio derinimo galimybes.
3. Naudojant elektriniu būdu derinamą kvantinį kaskadinį lazerį, sukurti UV sukietinimo polimerizacijos proceso kontrolės prototipą, tinkantį taikymams baldų gamybos pramonėje.
4. Naudojant optinėmis dangomis praskaidrintus kvantinių kaskadinių lazerių lustus, sukurti derinamo bangos ilgio su išoriniu rezonatoriumi spektroskopinę sistemą ir ištirti jos charakteristikas.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

2.1 Kvantinių kaskadinių lazerių veikimo principai

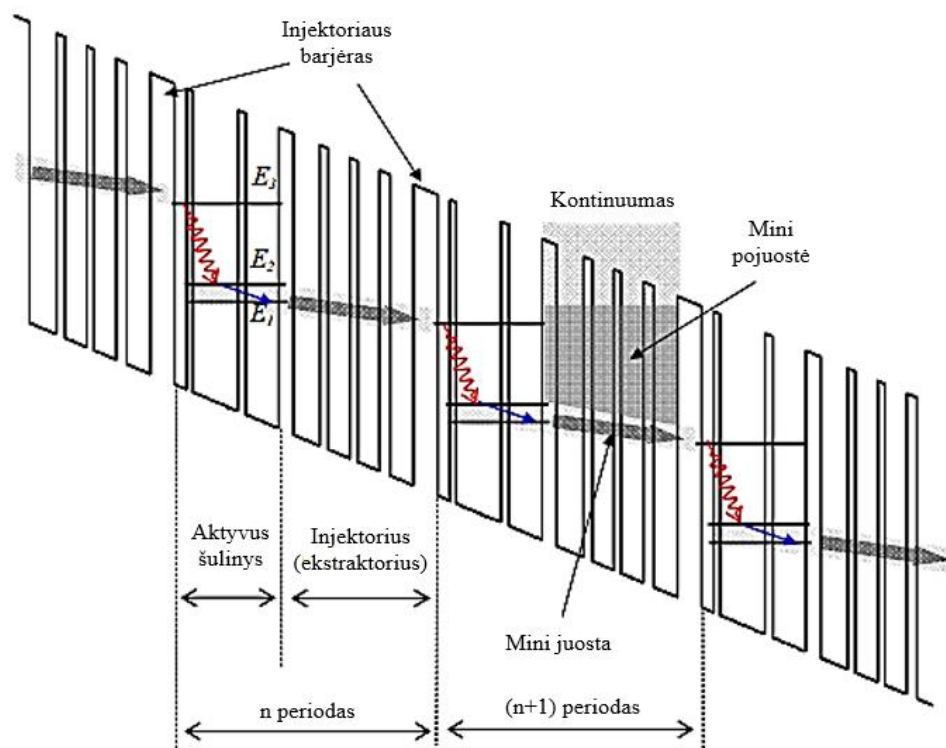
Puslaidininkinius šviesos šaltinius pagal fotono emisijos mechanizmą galima suskirstyti į dvi pagrindines grupes: tarpjuostiniai (*angl. interband*) puslaidininkiniai šviesos šaltiniai ir tarpojuostiniai (*angl. intersubband*) šviesos šaltiniai. Pirmuoju atveju fotonas yra emituojamas elektrono, esančio laidumo juostoje, ir skylės, esančios valentinėje juostoje, rekombinacijos metu (1 pav. kairėje). Antruoju atveju fotonas yra emituojamas laidumo juostos kvantinėje duobėje elektrono šuolio metu iš aukštesnę energiją turinčios pojuostės į žemesnę (1 pav. dešinėje). Tokiu būdu fotonų generacijos procesas vyksta dalyvaujant tik vieno tipo krūvininkams – elektronams ir toje pačioje juostoje (šiuo atveju laidumo juostoje). Dėl to, šio tipo spinduoliai yra laikomi vienpoliais.



1 pav. Elektrono rekombinacija su skylė emituojant fotoną (kairėje) ir elektrono šuolis laidumo juostoje į žemesnę pojuostę emituojant fotoną (dešinėje)

Būtent šiai kategorijai priklauso kvantiniai kaskadiniai lazeriai. Šių puslaidininkinių lazerių pavadinimas sufleruoja, kad kvantinės duobės yra nuosekliai sujungtos į kaskadus, kur tas pats elektronas, po šuolio į žemesnį lygmenį per supergardelėje suformuotą minijuostą, yra permetamas į kitą kvantinę duobę, kur vėl įvyksta elektrono šuolis. Šis procesas gali kartotis tiek kartų, kiek tokių periodų yra suformuota lazerio aktyviojoje terpėje. Tokiu būdu vienas elektronas sukuria tiek fotonų

lazeryje, kiek jame yra periodų. Tai yra vienas iš kaskadinės schemos panaudojimo privalumų. Kvantinio kaskadinio lazerio veikimo principas iliustruotas 2 pav.

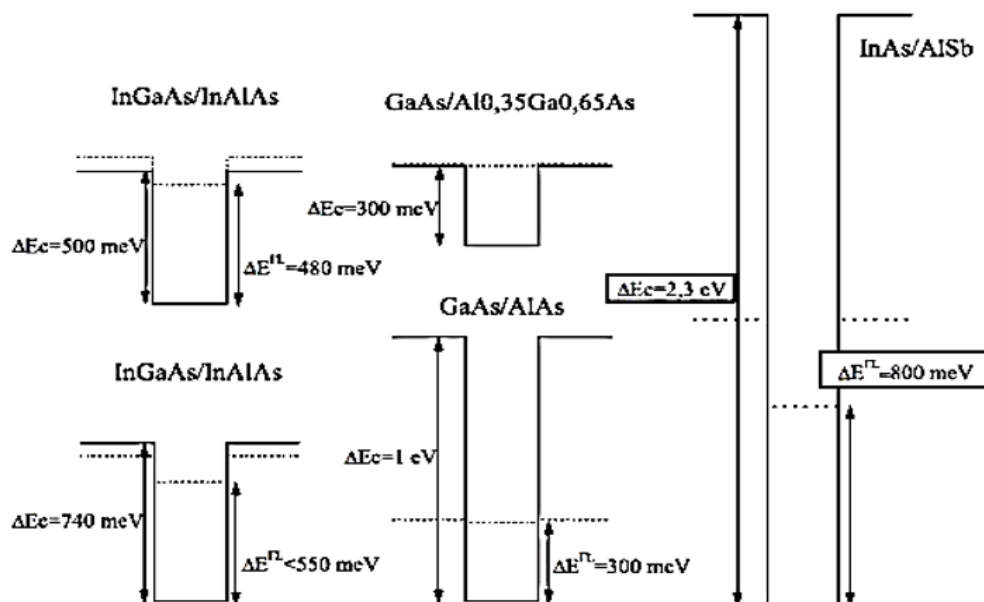


2 pav. Tipinio KKL laidumo juostos aktyviosios srities skerspjūvis

Antrasis labai reikšmingas šio tipo puslaidininkinių lazerių privalumas yra jų vienpoliškumas, dėl kurio šių lazerių veikimas nėra apsunkinamas nespindulinės Ožė (Auger) rekombinacijos, tad jie gali veikti ženkliai aukštesnėje temperatūroje [1], lyginant su tarpjuostiniais lazeriniais diodais. Dėl tos pačios priežasties, šio tipo lazeriai gali veikti prie labai mažų fotonų energijų, t. y. prie ilgų emisijos bangos ilgių. Tokiu būdu kvantiniai kaskadiniai lazeriai yra vienintelis puslaidininkinių lazerinių diodų tipas, perklojantis visą vidurinėsios ir tolimesios infraraudonosios spinduliuotės spektrą.

Emisijos bangos ilgis priklauso nuo sužadinto lygmens ir apatinio lygmens, tarp kurių įvyksta elektrono šuolis, energijų skirtumo. Keičiant aktyvios kvantinės duobės plotį galima reguliuoti atstumą tarp šitų lygmenų, tad naudojant tą pačią medžiagų sistemą, galima kurti kvantinius kaskadinius lazerius skirtingiems bangos ilgiams. Reikėtų pažymėti, kad didžiausią fotono energiją nusako kvantinės duobės ir barjero laidumo juostos padėčių trūkis. Tad, priklausomai nuo lazerio

paskirties, t. y. norimo emisijos bangos ilgio, ne visos medžiagos yra tinkamos. Natūralu, kad trumpesniai emisijos bangos ilgiui reikalingas ir didesnis laidumo juostos trūkis. 3 pav. parodyti skirtingų medžiagų sistemų, naudojamų kvantinių kaskadinių lazerių kūrimui, laidumo juostos sudūrimai.



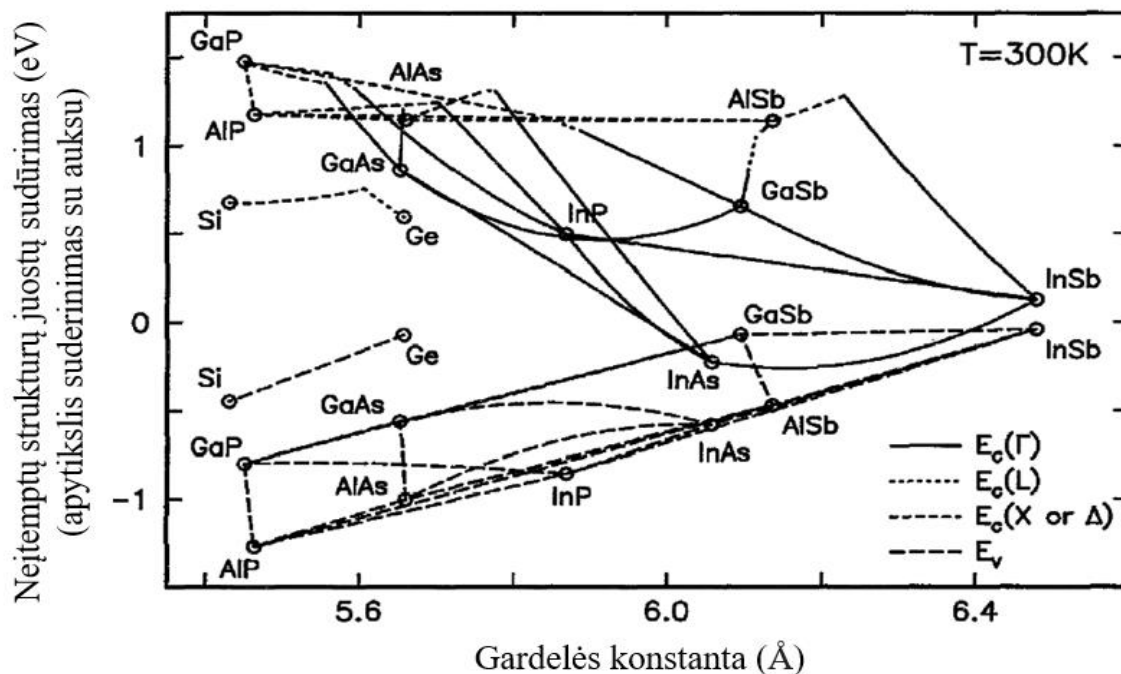
3 pav. Skirtingų medžiagų sistemų, naudojamų KKL kūrime, laidumo juostų kontrastai

Matyti, kad InAs/AlSb turi didžiausią trūkį laidumo juostoje. Tačiau yra ir kitas veiksnys, kuris lemia didžiausią galimą emituojamo fotono energiją – šoninio slėnio padėties energija, pavaizduota minėtame paveiksle punktyrine linija. Ji riboja aukščiausio sužadinto elektrono lygmens, kuris gali būti panaudotas elektrono šuoliui, padėtį kvantinėje duobėje. Galima matyti, kad InAs/AlSb medžiagų sistemoje ši energija taipogi yra aukštesnė, nei kitose medžiagų sistemose.

Dar vienas ne mažiau svarbus parametras, nusakantis lazerio našumą – elektrono efektinė masė kvantinėje duobėje. Lazerio aktyvios terpės stiprinimo koeficientas yra atvirkščiai proporcingas elektrono efektinei masei, tad mažesnė elektrono masė nulemia didesnę stiprinimą lazerio aktyviojoje terpėje. Ši vertė taipogi yra patraukliausia InAs/AlSb medžiagų sistemoje. Dėl šių priežasčių, InAs/AlSb medžiagų sistema buvo pasirinkta kvantinių kaskadinių lazerių, naudojamų šiame darbe, kūrimui.

Ne mažiau svarbus parametras yra medžiagų sistemos ir padėklo medžiagos suderinamumas. Diagramoje (4 pav.) galima pamatyti skirtingų puslaidininkių junginių valentinės ir laidumo juostos padėtis bei junginio kristalinės gardelės periodus, priklausomai nuo junginių sudėties. Ši diagrama

tikslingai atvaizduoja principus, pagal kuriuos yra parenkamos puslaidininkinių spinduolių medžiagos bei padėklai, ant kurių šios struktūros gali būti auginamos. Diagrama yra tinkama tiek tarpjuostiniams puslaidininkiniams šviesos šaltiniams, tiek tarpojuostiniams šaltiniams.



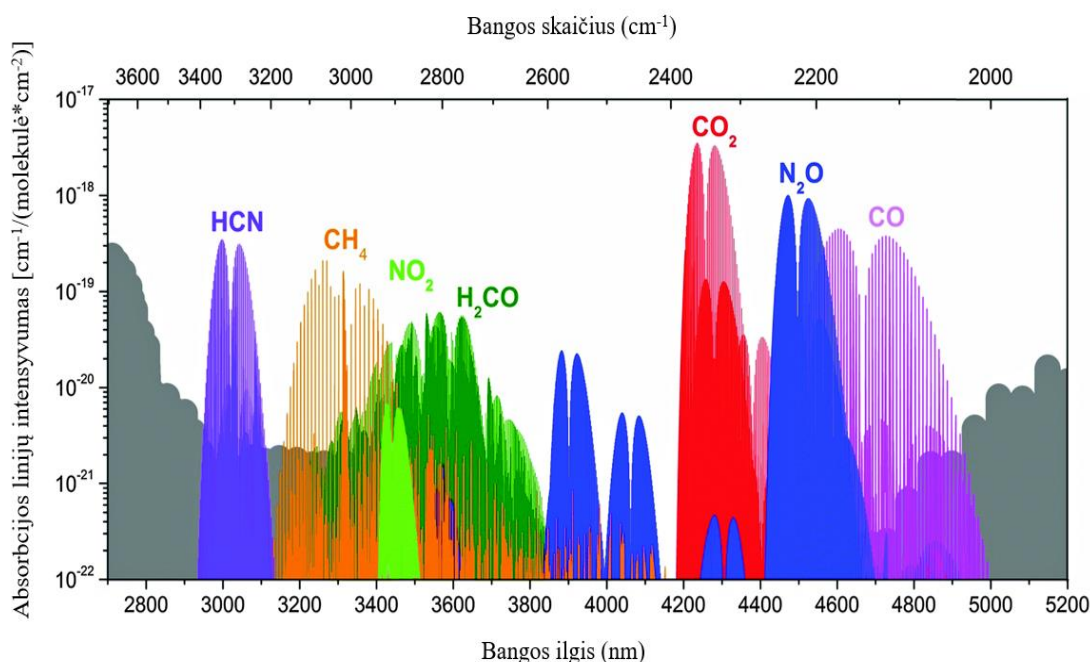
4 pav. Skirtingų puslaidininkinių medžiagų energijų diagrama, nurodanti laidumo juostos padėtį ir valentinę juostą, suslygiuota su Fermi lygmens pozicija aukse, priklausomai nuo medžiagos kristalinės gardelės konstantos (*angl. Lattice Constant*) [2]

Šiuo metu infraraudonajam spindulių ruožui yra naudojami tiek tarpjuostiniai lazeriniai diodai, tiek kvantiniai kaskadiniai lazeriai. Pastaruoju metu stipriai patobulėjo tarpjuostiniai kaskadiniai lazeriai, kuriuose kaskadinė schema yra pritaikyta tarpjuostiniams rekombinaciniams elektronų šuoliams. Tačiau tokių lazerių pasiekiamas spinduliuojamas bangos ilgis yra trumpesnis nei kvantinių kaskadinių lazerių. Šiai dienai, kambario temperatūroje ilgiausias emisijos bangos ilgis tarpjuostiniuose lazeriuose yra pademonstruotas ties 7.1 μm [3]. Tuo tarpu ilgiausias kvantinių kaskadinių lazerių emisijos bangos ilgis kambario temperatūroje – 17 μm [4]. Kalbant apie ribinius kvantinių kaskadinių emisijos bangos ilgius, galima išskirti trumpiausią pasiektą emisijos bangos ilgį – 2,65 μm [5] ir ilgiausią infraraudonosios srities pasiektą bangos ilgį – 20 μm [6]. Ilgiausias bangos ilgis pasiekiamas kvantiniams kaskadiniams lazeriams THz diapazone yra net 200 μm [7]. Taigi,

siekiant įgyvendinti šiame darbe iškeltą tikslą – sukurti lazerį, veikiantį 8,4 μm srityje – kvantinis kaskadinis lazeris tapo vieninteliu tinkamu šviesos šaltinio tipo pasirinkimu.

2.2 Kvantinių kaskadinių lazerių taikymai

Kvantiniai kaskadiniai lazeriai efektyviai veikia vidurinės infraraudonosios spinduliuotės (*angl. Mid-infrared – MIR*) ruože, kuris laikomas daugelio cheminių medžiagų optinio „pėdsako“ regionu. Šis regionas yra labai aktualus moksliniams ir praktiniams taikymams, kadangi daugelio molekulių fundamentinės rotacinės-vibracinės sugerties juostos yra būtent ten. Žemiau esančiame paveiksle (5 pav.) yra pavaizduoti kai kurių atmosferoje pasitaikančių kenksmingų organinių junginių molekulių MIR sugerties spektrai.



5 pav. Kenksmingų dujų sugerties spektrai MIR srityje [8]

Kadangi šios sugerties linijos yra labai intensyvios, tai leidžia pasiekti ypač didelę detekcijos jautrumą siekiantį dalis per milijardą ir dalis per trilijoną. Kvantinių kaskadinių lazerių panaudojimas suteikia galimybę detektoriams, veikiantiems MIR srityje, būti labai smulkiems, tad pati dujų detekcijos sistema gali būti rankoje telpantis įrenginys, pasižymintis greitu, selektyviu ir jautriu

detektavimu. Panašios dujų detekcijos sistemos yra naudojamos pramonėje – išmetamų dujų sudėties stebėjimams. Taip pat, šiems šaltiniams yra atverta paviršiaus atspindžio spektroskopijos taikymo niša.

Šiuo metu FTMC yra kuriami polimerizacijos proceso kontrolės jutikliai, veikiantys šių lazerių pagrindu. Siekiant parinkti tinkamą lazerio bangos ilgį, buvo ištirtos baldinių plokščių su skirtingais UV sukietinimo užbaigtumo laipsniais dangos. Iš pamatuotų spektrų nustatyta, kad polimerizacijos sugerties spektro atskirtis tarp skirtingų sukietėjimo laipsnių, kurie priklauso nuo konvejerio greičio, yra didžiausia 8,4 μm bangos ilgo srityje. Tai nulėmė šiame darbe tiriamo kvantinio kaskadinio lazerio projekcinio emisijos bangos ilgio pasirinkimą.

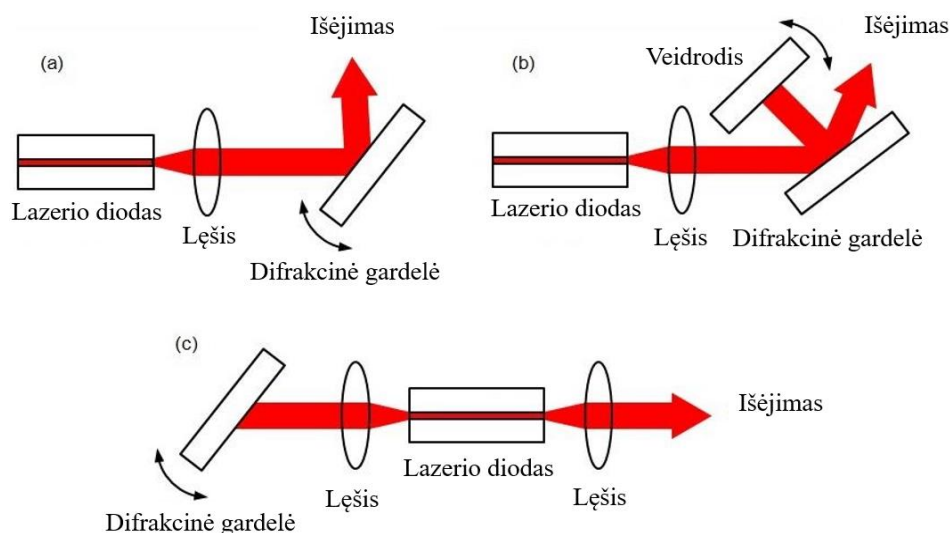
2.3 Derinamieji kvantiniai kaskadiniai lazeriai

Puslaidininkiniai infraraudonosios srities lazeriai dažniausiai yra taikomi spektroskopinio pobūdžio sistemose. Egzistuoja keli tokių sistemų tipai. Vienas tipas yra sistemos, kuriose sugertis arba atspindys yra matuojami keliose bangos ilgiuose, taikant kelis skirtingus lazerinius diodus. Šiuo atveju, vienas arba du lazeriniai diodai yra naudojami kaip atraminiai šaltiniai, atitinkantys spektro sritį, kuriai detektuojamas molekulinis junginys nedaro įtakos, ir vienas lazerinis šaltinis yra priderintas prie konkretaus junginio sugerties linijos. Įprastai, matuojami detektorių ar vieno detektoriaus gautų signalų santykiai. 5-8 μm sričiai skirtų lazerinių diodų kainos siekia 6000 eurų už vieną lazerinį diodą, tad šiai sričiai pritaikytų detektorinių sistemų kainos labai stipriai priklauso nuo panaudotų komponentų skaičiaus. Pigesnė ir universalesnė alternatyva yra derinamųjų lazerių panaudojimas. Egzistuoja keli derinamųjų puslaidininkinių diodų sudarymo principai. Jei reikalinga vienmodė emisija, paprastai yra taikoma viena iš išorinio rezonatoriaus suformavimo konfigūracijų. Derinamieji išorinio rezonatoriaus diodiniai lazeriai paprastai naudoja difrakcinę gardelę kaip bangos ilgio selektyvųjį elementą. Apskaičiuoti tinkamą difrakcinę gardelę taikymams galima pagal Brego dėsnį:

$$m\lambda = d(\sin(\theta_i) + \sin(\theta_d)) \quad (1)$$

Kur m – difragavusio spindulio eilė, λ – bangos ilgis, d – atstumas tarp kristalinės gardelės plokštumų, θ_i – kritusios bangos kampas, θ_d – difragavusios bangos kampas. Įprastą Littrow konfigūraciją (6 pav. – a) sudaro kolimuojantis lęšis ir difrakcinė gardelė. Pirmos eilės difrakcijos atspindys suteikia optinį atsaką lazerio diodo lustui, kurio dešinėje briaunoje uždėta praskaidrinanti danga. Emisijos bangos ilgis gali būti reguliuojamas sukinėjant difrakcinę gardelę. Naudojant šią sistemą nepalanku tai, kad reguliavimas keičia ir išėjimo spindulio kryptį, o tai yra nepatogu daugeliui

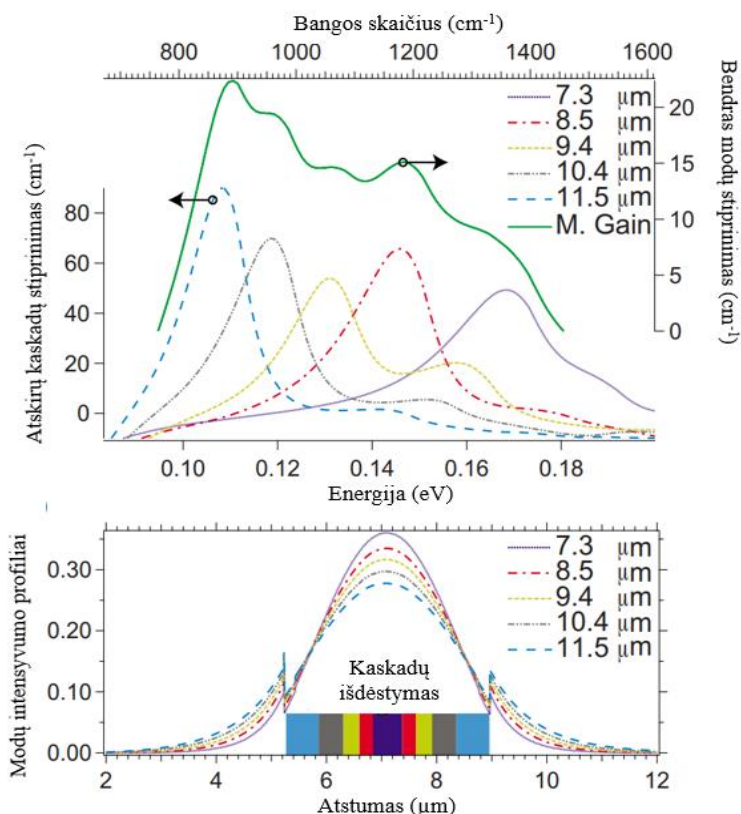
taikymų. Littman-Metcalf konfigūracijoje (6 pav. – b) gardelės orientacija yra fiksuota ir papildomas veidrodis naudojamas atspindėti pirmos eilės spindulį atgal į lazerio diodą. Bangos ilgis gali būti reguliuojamas sukinejant veidrodį. Ši konfigūracija užtikrina fiksuotą išėjimo spindulio kryptį ir yra linkusi turėti siauresnį bangos ilgio linijos plotį [9] dėl didesnio bangos ilgio selektyvumo (per rezonatoriaus apkeliavimą, bangos ilgiui priklausoma difrakcija vyksta du kartus vietoj vieno). Trūkumas yra tas, kad prarandamas nulinės eilės atspindys, atsispindintis nuo derinimo veidrodžio, todėl išėjimo galia yra mažesnė nei Littrow lazerio. Šiame darbe pasirinkta taikyti Kvazi-Littrow sistemą, pavaizduotą 6 pav. – c, kuomet viena arba abi lazerinio diodo keterų briaunų yra praskaidrinamos. Tam yra naudojamos dielektrinės praskaidrinimo dangos. Po to, šviesos pluoštas iš vienos iš briaunų yra kolimuojamas ir nukreipiamas į keičiamo kampo difrakcinę gardelę. Keičiant gardelės kampą, pagrindinis difrakcinis maksimumas yra gražinamas atgal į aktyviają terpę, sudarant stiprinimą tik tam tikro bangos ilgio fotonams.



6 pav. (a) Littrow, (b) Littman-Metcalf, (c) Kvazi-Littrow derinamo bangos ilgio konfigūracija. Adaptuota iš [10]

Svarbu pažymėti, kad tokios konstrukcijos derinamumo intervalas priklauso nuo aktyvios terpės spontaninės emisijos pločio. Tad, norint kurti lazerį derinamą plačiame intervale, turi būti atitinkamai tam pritaikyta ir lazerinio diodo aktyvioji sritis. Paprastiems vienmodžiams arba daugiamodžiams Fabry-Perot lazeriams, skirtiems emisijai ties tam tikru bangos ilgiu, aktyvios terpės projektavimo strategija yra orientuota į tik vienos energijos fotonų generaciją. Derinamajai aktyviajai terpei reikalinga galimybė generuoti fotonus plačiame intervale, taigi tam yra naudojamos skirtingos

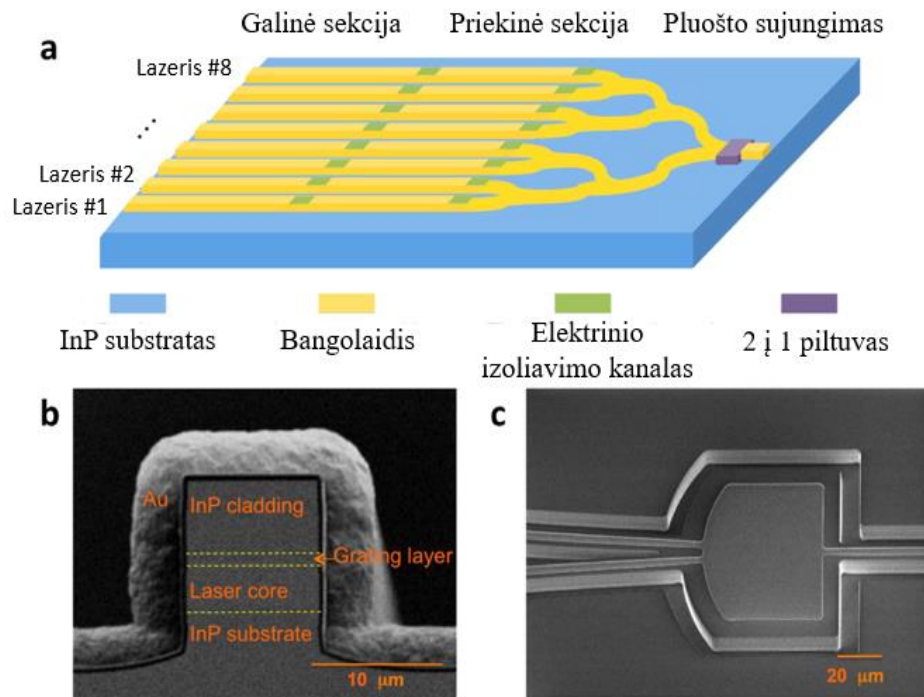
strategijos. Jei reikalingas derinamumas pakankamai siaurame intervale – naudojami dizainai, kurie praplečia energijos minijuostų plokščius. Tam įprastai tiek tarpjuostiniuose, tiek kvantiniuose kaskadiniuose lazeriuose yra padidinamas aktyvių kvantinių duobių, kuriose vyksta spinduliniai elektronų šuoliai, skaičius. Tačiau šis metodas nėra tinkamas tada, kuomet reikalingas platus derinimo intervalas. Kaskadiniuose lazeriuose (tiek tarpjuostiniuose, tiek tarpojuostiniuose) efektyviausias būdas yra sudėtinės struktūros taikymas. Tokiu atveju, kiekvienas lazerio aktyvios terpės periodas arba periodų grupė yra projektuojami skirtingiems emisijos bangos ilgiams (pav. 7).



7 pav. Sudėtinės aktyvios terpės formavimo principas. Adaptuota iš [11]

Šis metodas itin patogus projektuojant kvantinių kaskadinių lazerių aktyviają terpę. Ją galima suprojektuoti ir taip, kad, esant tam tikrai įtampai, visi periodai būtų rezonanso būsenoje ir šviestų vienu metu, ir taip, kad skirtinguose perioduose rezonansas atsirastų prie skirtingų įtampų. Pirmasis atvejis tinkamesnis lazeriams su išoriniu rezonatoriumi, o antrasis – kai norima bangos ilgį derinti keičiant lazerio maitinimo įtampą. Tokiu atveju iškyla problemos, kai reikalinga vienmodė emisija. Ši problema yra sprendžiama suformuojant, toje pačioje užaugintoje epitaksininiu būdu aktyviojoje terpėje, keturų matricą su skirtingo periodo paskirstyto grįžtamojo ryšio gardelėmis (*angl. Distributed*

Feedback – DFB) (pav. 8). Šviesa iš šių keturų yra suvedama į vieną bangolaidį. Tokiu būdu, pridėdant įtampą prie tam tikros keteros, išėjime atsiranda tik tam tikro bangos ilgio vienmodė spinduliuotė.



8 pav. Monolitinis derinamas kvantinis kaskadinis lazeris InP platformoje, suformuotas iš skirtingų emisijos bangos ilgių lazerinių diodų matricos. Adaptuota iš [12]

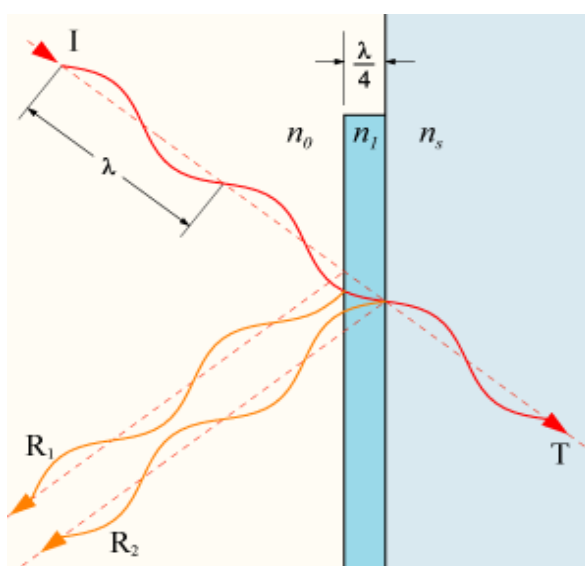
Kai nėra reikalingas vienmodis spinduliavimas, tinkamą bangos ilgį galima parinkti tiesiog keičiant lazerio maitinimo įtampą. Toks mechanizmas buvo pritaikytas lazeryje, kuris buvo skirtas pamatuoti baldinių plokščių lako UV sukietinimo polimerizacijos užbaigtumo laipsnį. Vienmodžiam spinduliavimui buvo panaudota Kvazi-Littrow derinamo bangos ilgio konfigūracija.

2.4 Lazerio briaunų praskaidrinimas

Kaip buvo aptarta praeitame – derinamųjų kvantinių kaskadinių lazerių – skyriuje, norint turėti derinamus lazerius su išorinio rezonatoriaus konfigūracija, lazerio briaunas reikia praskaidrinti. Jei lazeris nepraskaidrintas, lazerio viduje – tarp briaunų – susidarys stovinti banga, kuri priklausys nuo fizinių kristalo diametru, ir tai nulems dominuojantį priverstinės emisijos bangos ilgį.

Praskaidrinimas leidžia kontroliuoti rezonansą, susidarantį tarp lazerio ir difrakcinės gardelės, dėl kurio, keičiant difrakcinės gardelės kampą, keičiasi ir bangos ilgis.

Lazerio praskaidrinimas atliekamas taikant dielektrines dengiamąsias medžiagas ant lazerio diodų kraštų. Šios medžiagos yra sukurtos taip, kad maksimaliai sumažintų šviesos atspindžius, atsirandančius dėl šviesos sąveikos su lazerio diodo paviršiumi. Dengiamosios medžiagos struktūros sluoksnio storis yra pritaikytas norimos bangos ilgio ketvirtadaliui ($\lambda/4$), kad atspindys iš skirtingų sluoksnių interferuotų destruktvyviai (9 pav.).



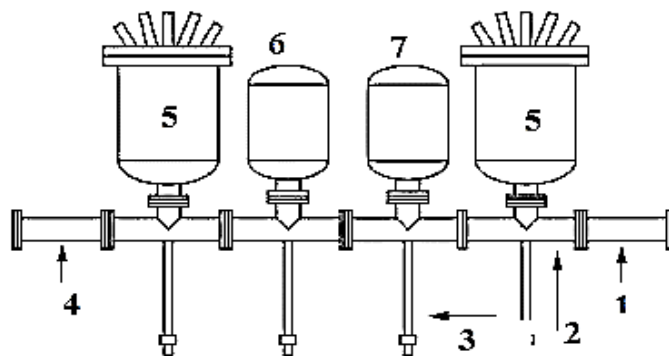
9 pav. Paviršiaus praskaidrinimas, kai šviesos banga atsispindint interferuoja destruktvyviai [13]

Tai reiškia, kad atsispindėjęs šviesos bangos frontas sugrižta į diodą faziškai pasislinkęs taip, kad slopina kitą atspindį. Toks pasirinkimas leidžia pasiekti beveik visišką atspindžio eliminaciją tam tikrame bangos ilgyje.

2.5 Kvantinio kaskadinio lazerio auginimas molekulinio pluoštelio epitaksija

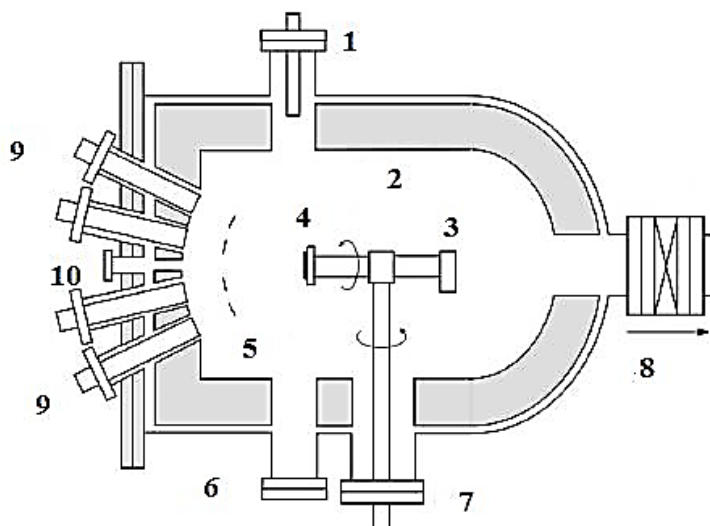
Epitaksinės technologijos buvo sukurtos šeštojo dešimtmečio pabaigoje [14]. Pagrindinės yra šios: garų fazės epitaksija, skysčio fazės epitaksija, metaloorganinė ir molekulinė pluoštelių epitaksija (MPE). Visi šiame darbe naudojami kvantiniai kaskadiniai lazeriai buvo užauginti molekulinė pluoštelių epitaksijos metodu. Molekulinio pluoštelio epitaksijos metu kristalinių struktūrų auginimas vyksta aukštame vakuume ant įkaitinto besisukančio kristalinio padėklo, ant kurio

absorbuojasi tiek atomai (Ga, Al, Bi...), tiek molekulės (As₄, As₂). Šiuolaikiniai reaktoriai yra sudaryti iš modulių, kurių kiekvienas turi savo funkciją. Šie moduliai tipinėje dviejų auginimo kamerų MPE mašinoje pavaizduoti 10 pav.:



10 pav. MPE mašinos tipinė schema. 1 – bandinio paruošimo kamera, 2 – perėjimo šliuzas, 3 – bandinio nuvedimo takelis, 4 – bandinio išėmimo kamera, 5 – auginimo kamera, 6 – bandinio analizės kamera, 7 – padėklo paruošimo kamera. Adaptuoja iš [15]

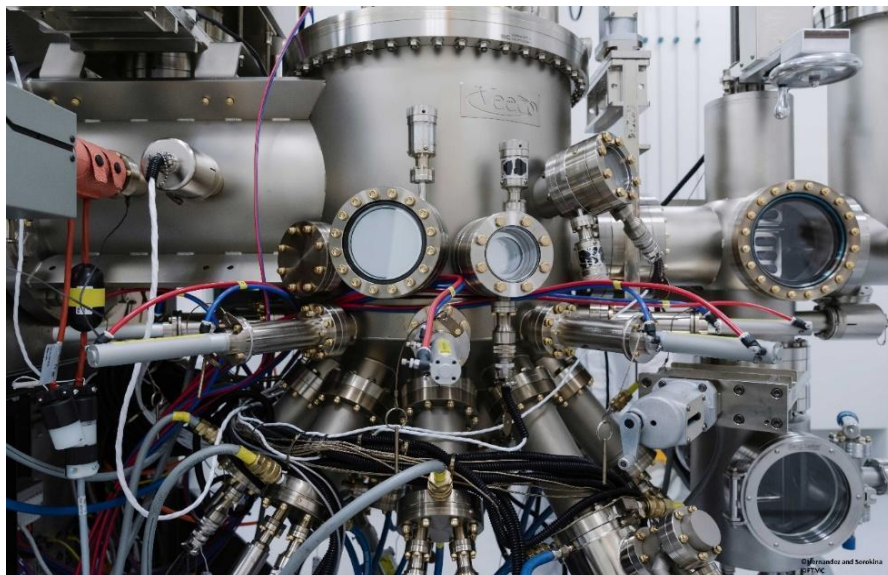
Pati svarbiausia MPE mašinos dalis yra auginimo kamera (11 pav.):



11 pav. MPE mašinos auginimo kamera. 1 – RHEED'o patranka, 2 – skysto azoto šarvas, 3 – jonų matuoklė, 4 – besisukantis padėklas, 5 – šaltinių sklendės, 6 – RHEED'o ekranas, 7 – padėklo manipulatorius, 8 – padėklo įvedimo/išvedimo anga, 9 – elementinių šaltinių celės, 10 – stebėjimo langelis. Adaptuota iš [15]

Tai yra didelė (~100 l) nerūdijančio plieno talpa su dviguba sienelių sistema, sutverta išlaikyti ypač aukšto vakuumo (UHV) sąlygas viduje. Auginimo kameros iš vidaus yra aušinamos skystu azotu tam, kad įkaitusios priemaišos ar nesureagavusios kitos dalelės (As, Ga, Bi) atsitrenkusios į sienelės prarastų šiluminę energiją ir nusėstų ant jų, užuot absorbavusios ant padėklo.

Kvantinių kaskadinių lazerių struktūros įprastai yra realizuojamos naudojant III ir V grupių junginių puslaidininkines medžiagų sistemas. Priklausomai nuo naudojamos medžiagų sistemos, pagal artimiausios gardelės konstantos principą yra parenkamas puslaidininkinis padėklas. Kartais yra naudojami padėklai su ženkliai besiskiriančia kristalinės gardelės konstanta. Tokiu atveju yra naudojami specialiai sukurti metamorfiniai buferiniai sluoksniai. FTMC KK lazeriams naudojamas Veeco GENXplor MBE reaktorius (12 pav.) turi In, Ga, Al III grupės elementų šaltinius ir As, Sb, Bi V grupės elementų šaltinius. Taip pat yra Si, Be ir Te šaltiniai, naudojami legiravimui. Tokiu būdu ne visos kvantiniams kaskadiniams lazeriams naudojamos medžiagų sistemos yra prieinamos.



12 pav. Veeco GENXplor MBE reaktorius

Šiuo metu yra auginamos InAs/Al(As)Sb ir InAsBi/AlAsSb ant InAs padėklų struktūros, InGaAs/AlAsSb ir InGaAs/AlInAs bei InGaAs/InGaAs ant InP padėklų struktūros. Tačiau pastarosios reikalauja InP apauginimo, todėl norint šį procesą atlikti, užauginti padėklai yra siunčiami FTMC partneriams. Šiame darbe buvo auginami InAs/Al(As)Sb medžiagų sistemos kvantiniai kaskadiniai lazeriai. Medžiagų sistemos pasirinkimo motyvai buvo išvardinti anksčiau. Be to, visos jų auginimui reikalingos medžiagos yra turimame reaktoriuje, tad jokie išoriniai epitaksiniai procesai nėra reikalingi ir lazeriniai diodai gali būti visiškai suformuoti naudojant tik FTMC turimą įrangą.

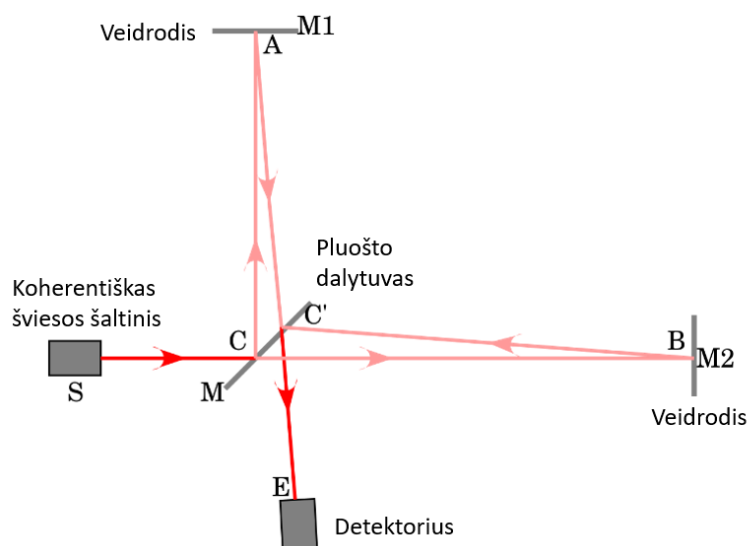
KK lazeris gali būti sudarytas net iš kelių tūkstančių sandūrinių sluoksnių. Trumpabangiuose KK lazeriuose didelė fotono energija yra pasiekama naudojant labai siauras aktyvias duobes, kurių plotis siekia keliolika angstromų. Labai nedidelė paklaida gali nulemti sąlyginai didelį emisijos bangos ilgio nuokrypį, tad reikalingas labai didelis įrangos kalibravimo tikslumas. FTMC naudojama specialiai sukurta auginimo greičio kalibravimo procedūra, kurioje panaudojamas dvigubų supergardių auginimo ciklas. Po kiekvienos iteracijos rentgeno difrakcijos metodu nustatomas supergardių periodas, III/V ir V/V elementų santykis bei kristalinių gardelių suderinamumas. Taip pat, dviguba gardelė leidžia preciziškai išmatuoti naudojamų medžiagų sistemų augimo greičius. Iteracijos kartojamos, kol medžiagų santykiai pasiekia reikiamas vertes ir visišką auginamos struktūros bei padėklo įtempimų balansą. Tokiu būdu sukalibruotų auginimo greičių paklaidos neviršija 1 procento.

2.6 Furjė transformacijos infraraudonųjų spindulių (FTIR) spektroskopija

Pagrindinis instrumentas, naudojamas siauratarpių puslaidininkių bei jų pagrindų kuriamų optoelektronikos prietaisų optiniam charakterizavimui, yra FTIR (*angl. Fourier Transform Infrared*) spektrometras, skirtas sugerties/atspindžio arba emisijos spektro infraraudonųjų (IR) spindulių ruože (tarp regimosios šviesos ir mikrobangų spinduliuotės). IR regionai yra skirstomi į artimą (nuo 0,7 μm iki 5 μm) [16], vidutinį (nuo 5 μm iki 25 μm) [16], ir tolimą (nuo 25 μm iki 350 μm) [16]. Artimasis regionas yra tas, kuris yra arčiau regimosios šviesos, tolimasis – kuris arčiau mikrobangų spinduliuotės, o vidutinis – regionas esantis tarp jų.

Pagrindinis infraraudonosios spinduliuotės šaltinis yra šiluminis spinduliavimas. Didinant kūno temperatūrą atsiranda ir didėja šiluminis spinduliavimas dėl dalelių krūvio pagreičio arba dipolio osciliavimų. Norint išmatuoti spinduliuojamos elektromagnetinės bangos ilgį pasitelkiama sugerties spektroskopija, kurios principas pagrįstas matuojant kiek daug šviesos absorbuos mėginys skirtinguose bangos ilgiuose.

FTIR spektroskope įvairaus dažnio infraraudonųjų spindulių spinduliuotė yra šviečiama į mėginį ir stebima kiek mėginys ją absorbavo. Tada, keičiama spinduliuotės dažnių kombinacija ir vėl atliekamas matavimas. Infraraudonosios spinduliuotės dažnių kitimas vykdomas šviečiant į Maikelseno (*angl. Michelson*) interferometrą – prietaisą, kuris kolimuotus spindulius nukreipia į pluošto dalytuvą, o spinduliai atsispindi nuo veidrodžių, iš kurių vienas juda.



13 pav. Maikelseno interferometro schema. Adaptuota iš [17]

Kiekvieną kartą pajudant veidrodžiui yra blokuojami ir praleidžiami skirtingų dažnių šviesos pluoštai. Šis procesas yra kartojamas daug kartų iki kol kompiuteris, surinkęs duomenis kaip kinta spinduliuotės sugertis nuo veidrodžio padėties (šie duomenys vadinami interferograma) ir pritaikęs Furjė transformaciją, gauna sugerties priklausomybę nuo bangos ilgio.

Norint pasiekti didesnę jautrumą yra naudojami skystu azotu šaldyti fotoelektriniai detektoriai. Tai fotonų detektoriai, kuriuose elektronai sužadunami tiesiogiai sugeriant spinduliuotę. Gyvsidabrio kadmio telūrido (MCT) detektoriai plačiausiai naudojami vidutinėje IR srityje [18]. Tačiau šie detektoriai neapima viso IR diapazono, nes elektronui sužadinti reikia minimalios energijos.

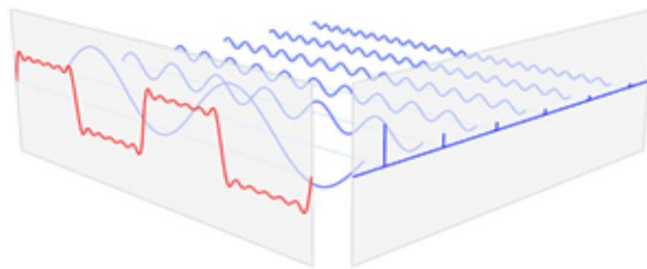
Laboratorijoje tiriamų lazerių emisijos spektrams išmatuoti buvo naudojamas Bruker Vertex 80 FTIR spektrometras, kuriame įdiegtas, skystu azotu šaldomas, gyvsidabrio kadmio telūrido (*angl. Mercury Cadmium Telluride – MCT*) detektorius. Šio detektoriaus ilgabangė jautrio riba yra 12,5 μm , tad jis puikiai atitinka tiriamųjų lazerių emisijos bangos ilgio sritį.

2.7 Sinchroninis stiprintuvas

Sinchroninis stiprintuvas (*angl. lock-in amplifier*) – prietaisas, skirtas pamatuoti periodinio elektrinio signalo amplitudę ir fazę. Stiprius signalus galima pamatuoti ir osciloskopu, bet norint pamatuoti silpną signalą, tai tampa labai sudėtinga. Be to, tampa sudėtinga atskirti matuojamą signalą nuo fono. Sinchroninis stiprintuvas skirtas išspręsti problemas, susijusias su mažo signalo radimu

triukšme. Tai galingas instrumentas galintis išskirti signalus, kurie yra milijoną kartų mažesni negu triukšmas, kuriame jį matuojame [19].

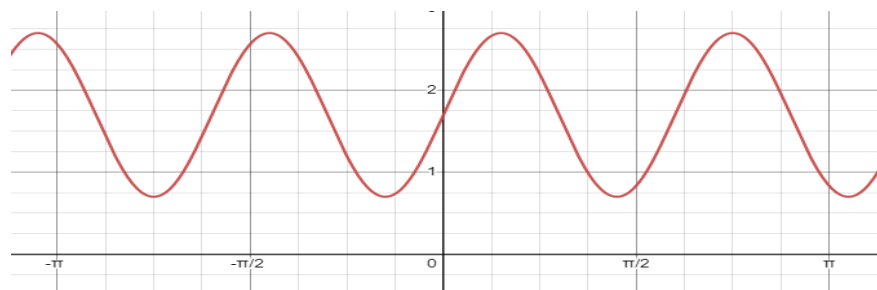
Norint sinchroninio stiprintuvo pagalba pamatuoti signalo amplitudę triukšme reikalingi du dalykai: oscilijuojantis triukšmingas signalas, kurį matuojame, ir atraminis signalas (*angl. reference signal*), kurio dažnis ir fiksuotas fazės santykis yra toks pat, kaip ir signalo, kurį norime pamatuoti.



14 pav. Bangos išskaidymas į skirtingų sinusinių bangų amplitudes ir dažnius

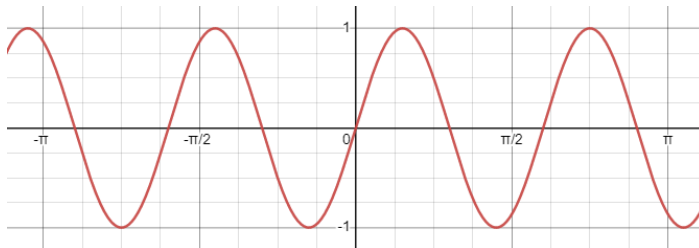
Pritaikant Furjė transformaciją, triukšmingą signalą galime laikyti sinusinių bangų, kurios turi skirtingus dažnius, amplitudes ir fazes, kombinacija (14 pav.), tad analizuojant kaip veikia sinchroninis stiprintuvas galime naudoti paprastą sinusinę funkciją.

Siekiant pamatuoti norimą signalą, pirmiausiai reikia pašalinti nuolatinės srovės (DC) komponentą iš matuojamo signalo (15 pav.).



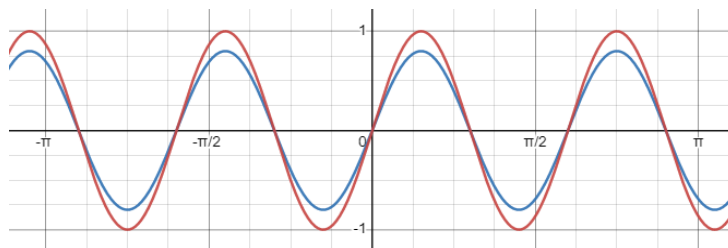
15 pav. Matuojamas signalas su nuolatinės srovės komponente

Pašalinus nuolatinės srovės komponentę (16 pav.) galima pastebėti, jog matuojant signalo amplitudės vidurkį, per visą signalą jis bus lygus nuliui, kadangi pusė laiko jis bus teigiamas ir pusė laiko neigiamas.



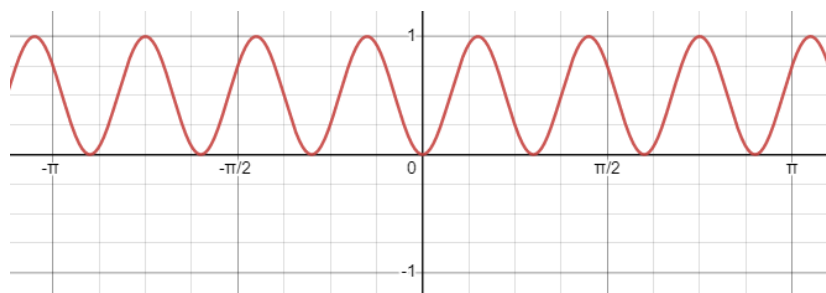
16 pav. Matuojamas signalas atėmus nuolatinės srovės komponentą

Triukšmingas signalas yra padauginamas iš atraminio signalo. Tai vadinama signalų maišymu, ir tokiu būdu gaunamas naujas signalas (17 pav.).



17 pav. Matuojamas signalas ir atraminis signalas šalia vienas kito

Sumaišius signalus (18 pav.), priklausomai nuo jų fazės skirtumo, gaunamo signalo vidurkis gali būti teigiamas arba neigiamas (arba nulis, jeigu fazių skirtumas $\theta = \pi n + \frac{\pi}{2}$).



18 pav. Sumaišytas matuotas ir nuorodinis signalas

Sumaišius triukšmingą signalą su atraminiu, visų skirtingų dažnių signalų laikinėje erdvėje vidurkis lygus nuliui arba yra labai arti nulio ir tik vienintelio signalo amplitudė nelygi nuliui yra ta, kurią norime matuoti. Reikia paminėti, jog sumaišant signalus, norimo matyti signalo amplitudė sumažėja per pusę ir dažnis padvigubėja. Kadangi yra pašalintas nuolatinės srovės komponentas ir likęs signalas yra tik tas, kurį norime matuoti, jį galime stiprinti ir išmatuoti.

Šiame darbe buvo naudojamas Stanford Research kompanijos sinchroninis stiprintuvas SR860 - 500 kHz DSP Lock-in amplifier. Jo pagalba išmatuotas kvantinių kaskadinių lazerių optinės emisijos intensyvumas, matuojant elektrinio signalo amplitudę iš spektrometre įmontuoto gyvsidabrio kadmio telūrido detektoriaus.

2.8 Lazerinių diodų charakterizavimas

Charakterizuojant lazerinį diodą, yra pateikiamos jo optinės ir elektrinės savybės. Lazerinio diodo optinė charakteristika yra jo emisijos spektras, spektro plotis, spektro smailės padėtis, jos padėties priklausomybė nuo temperatūros bei emisijos intensyvumo priklausomybė nuo srovės skirtingoms temperatūroms. Taip pat svarbus spontaninės emisijos spektras, kuris yra matuojamas prie srovės, žemesnės nei slenkstinė srovė. Šis spektras parodo, prie kokio bangos ilgio gali būti pasiekta efektyviausia lazerinė emisija bei kokios yra galimos lazerinės emisijos bangos ilgio derinimo ribos, jei bus pritaikytas derinamas išorinis rezonatorius.

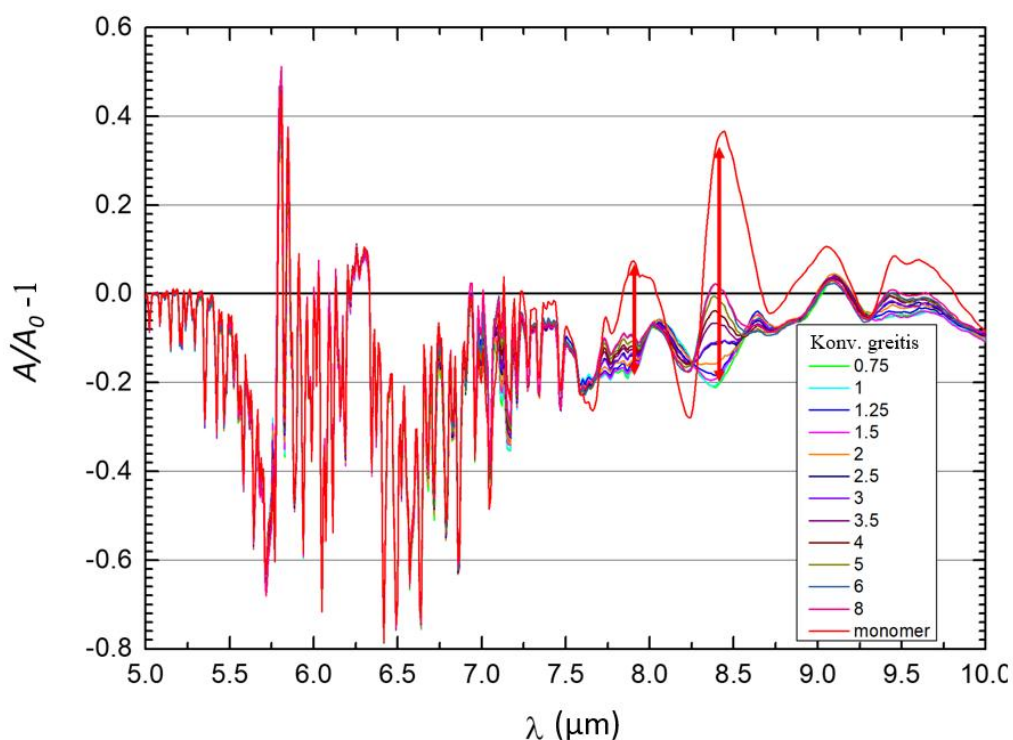
Pagrindinės lazerinio diodo elektrinės charakteristikos (tiek tarpjuostinių, tiek kvantinių kaskadinių lazerių) yra jo amper-voltinė charakteristika, iš kurios matyti, kaip lazerio įtampa priklauso nuo srovės, ir vat-amperinė, arba emisijos intensyvumo, priklausomybė nuo srovės. Kartais ji dar angliškai vadinama *Light-Current* (arba *L-I*) charakteristika, iš kurios nustatoma lazerinio diodo slenkstinė srovė ir optinės galios priklausomybė nuo srovės. Kai norima pateikti lazerio aktyvios terpės našumą ar medžiagos savybes, X skalėje yra atidedamas srovės tankis. Tokiu būdu pateikta charakteristika parodo ne pavienio diodo savybes, kurios gali priklausyti ir nuo lazerinio diodo geometrijos, bet būtent panaudotos medžiagų sistemos ir aktyvios srities dizaino unikalios savybes.

3. EKSPERIMENTAS

3.1 Baldinio lako UV sukietinimo laipsnio spektroskopiniai tyrimai

Siekiant sukurti bekontaktį baldų plokščių polimerinio sluoksnio UV sukietinimo kontrolės būdą, buvo parengti baldinių plokščių fragmentų bandiniai, padengti UV kietinamo lako sluoksniu, ir skirtingu greičiu paleisti pro UV sukietinimo lempų modulį konvejeriye. Tokiu būdu gautas bandinių rinkinys su skirtingomis UV ekspozicijos dozėmis. Po to, bandiniai buvo patikrinti standartiniu įbrėžimo žymės metodu, dažnai taikomu ir gamyboje. Šio proceso metu, lako paviršius yra braižomas skirtingo minkštumo grafitiniais pieštukais, tikrinant liekančias žymes. Bandiniai, leidžiami pro UV lempas 1, 1,25 ir 1,5 m/s greičiu, buvo tinkamai sukietinti, likusieji – buvo neatsparūs įbrėžimams ir laikomi netinkamai sukietintais.

Norint iširti procesus, vykstančius lako monomero komponentėms virstant polimeru, FTIR spektrometro pagalba išmatuoti paruoštų bandinių santykiniai atspindžio spektrai. Santykinis (arba A/A_0) spektras – spektras, kurio intensyvumas atvaizduojamas kaip atspindžio intensyvumo amplitudės santykis su pasirinkto bangos ilgio atspindžio amplitude. Atraminis bangos ilgis pasirenkamas toks, kad jo amplitudė nepriklausytų nuo stebimo proceso įtakos. Išmatuota santykinų atspindžio spektrų šeima pavaizduota 19 pav.



19 pav. Baldinių plokščių fragmentų lako dangų, kietintų prie skirtingų UV ekspozicijos laikų santykiniai atspindžio spektrai sunormuoti į intensyvumą 5 μm bangos ilgyje

Siekiant padidinti šios aktyvios terpės derinamumą, nuspręsta taikyti gradientinį dizainą. Tai reiškia, kad visoje struktūroje kvantinių duobių pločiai turėtų keistis tolygiai ir proporcingai. Pirmas šios struktūros periodas turi būti pritaikytas apytiksliai 8 μm , o paskutinis – 8,4 μm emisijai. Tuo tikslu, modeliavimo būdu, kvantinės duobės visoje struktūroje buvo proporcingai mažinamos ir proporcingai didinamos. Nustatyta, kad pirmojo periodo kvantinių duobių pločiai turi būti padidinti 1,0215 kartų, tuo tarpu paskutiniojo periodo kvantinių duobų pločiai – proporcingai sumažinti 1,0568 kartų. Šie koeficientai turi būti taikomi InAs augimo greičiams šios lazerinės struktūros epitaksijos metu.

3.3 Derinamo kvantinio kaskadinio lazerinės struktūros epitaksija

Suprojektuoto kvantinio kaskadinio lazerio aktyviają terpę sudarė 35 periodai. Visa struktūra yra sudaryta iš 1 μm storio apatinio n-tipo ($n=2e18 \text{ cm}^{-3}$) InAs apdarinio sluoksnio, 2,5 μm storio n-InAs ($n=5e16 \text{ cm}^{-3}$) tarpiklio, aktyviosios terpės, viršutinio analogiško apatiniam tarpiklio ir 2 μm viršutinio apdarinio sluoksnio, kurio legiravimas yra analogiškas apatiniam. Struktūra buvo auginama ant n-tipo ($n=2e18 \text{ cm}^{-3}$) InAs 2 colių padėklo, naudojant InAs/Al(As)Sb medžiagų sistemą. Reikia pažymėti, kad šiame eksperimente naudojami ne klasikiniai AlSb barjerai, bet į juos įvedamas tam tikras kiekis arseno, kad būtų subalansuotos padėklo, kvantinių duobių ir barjerų kristalinės gardelės konstantos. Kadangi As kiekis AlSb barjeruose siekia tik apie 15 procentų, jis yra nurodytas skliausteliuose.

Prieš auginant lazerinę struktūrą atlikta eilė kalibracinių auginimų. Kaip jau buvo minėta, siekiant padidinti auginimo tikslumą, naudojamas dvigubų supergardių metodas. Šiuo atveju, ant padėklo auginamos dvi supergardiės su skirtingais periodais. Po to, išmatavus rentgeno difrakciją, nustatomi šių supergardių periodai ir, sprendžiant dviejų lygčių sistemą, surandami tikslūs kvantinių duobių ir barjerų augimo greičiai. Be to, užaugintos struktūros rentgeno difrakcijos modeliavimas leidžia tiksliai nustatyti bei pakoreguoti As ir Sb santykius. Kartais, InAs/Al(As)Sb kvantiniams kaskadiniams lazeriams, jei reikia sukalibruoti legiravimą, gali prireikti iki 8 kalibracinių procesų.

Nustačius tikslius auginimo greičius, kurie tiriamuoju atveju buvo 1,02 $\text{\AA}/\text{s}$ InAs sluoksniams prie 717 $^{\circ}\text{C}$ In šaltinio temperatūros ir 1,024 $\text{\AA}/\text{s}$ prie 1054 $^{\circ}\text{C}$ Al šaltinio temperatūros, šios vertės buvo panaudotos apskaičiuojant sluoksnių auginimo laikus auginimo programoje. Tačiau, siekiant užauginti derinamą kvantinį kaskadinį lazerį, pritaikytas auginimas su kvantinių duobių storio gradientu. Tuomet, pagal kalibracines kreives, nustatyta In šaltinio temperatūra, atitinkanti aktyvios terpės pirmosios kvantinės duobės auginimo metu 1,0215 karto didesnę greitį (atitinkamai didesnę srautą) ir 1,0568 karto mažesnę greitį (atitinkamai ir srautą) paskutinei kvantinei duobei. Tokiu būdu

In šaltinio temperatūra aktyvios terpės auginimo pradžios metu turi būti 719 °C, o aktyvios terpės auginimo pabaigos metu 715 °C. Atsižvelgiant į tai, kad aktyvios terpės auginimo programa trunka 8 val, apskaičiuotas In šaltinio temperatūros kitimo gradientas, sudaręs 0.008 °C per minutę.

Pati kvantinio kaskadinio lazerio auginimo procedūra nesiskiria nuo kalibracinių struktūrų auginimo procedūros. Padėklas yra įdedamas į molibdeno padėklo laikiklį, patalpinamą į kasetę bei įdedama į įkrovimo kamerą. Įkrovimo kameroje paleidžiamas pirminio vakuumo atsiurbimo rotacinis siurblys. Kai vakuumas pasiekia $\sim 3 \cdot 10^{-1}$ Torr lygį, įjungiamas turbomolekulinis vakuuminis siurblys. Kai vakuumas pasiekia $1 \cdot 10^{-7}$ Torr slėgį, įjungiamas pirminis padėklo atkaitinimas, kurio metu vandens molekulės turi desorbuotis nuo padėklo ir padėklo laikiklio. Temperatūra įkrovimo kameroje yra pakeliama iki 200 °C su 3 °C per minutę gradientu. Kai temperatūra pasiekia 200 °C, padėklas yra kaitinamas, kol slėgis įkrovimo kameroje nenukris iki $1 \cdot 10^{-8}$ Torr. Po to, kasetė su padėklu (ar padėklais) per šliuzą yra perkeliama į paruošimo kamerą, kurioje padėklas yra perkeliamas į antrinio atkaitinimo sektorių. Ten padėklas kaitinamas 1 valandą 300 °C temperatūroje. Šio žingsnio tikslas – nukaitinti organikos ir vandens likučius nuo padėklo. Vėliau, padėklas per šliuzą yra perkeliamas į auginimo kamerą.

Po padėklo perkėlimo į auginimo kamerą, prieš pradėdant auginimą, atliekama padėklo deoksidacijos procedūra, kurios metu įvyksta AsO molekulių desorbcija nuo padėklo paviršiaus. Tuo tikslu, padėklo temperatūra yra pakeliama iki 525 °C temperatūros As srauto atmosferoje. As srautas reikalingas As molekulių terminės desorbcijos kompensavimui nuo padėklo paviršiaus. Priešingu atveju, padėklo paviršiuje gali susidaryti In metalo lašai. Padėklo temperatūra yra stebima naudojant BandiT pirometrinę/spektrometrinę įrangą, o deoksidacijos procesas – naudojant didelės energijos elektronų atspindžio difrakcijos (*angl. Reflection High Electron Energy Diffraction – RHEED*) įrangą. Kai RHEED ekrane atsiranda aiškus pagrindinio elektronų pluošto atspindys bei aiškios difrakcinio vaizdo linijos, deoksidacijos procesas laikomas užbaigtu ir padėklo temperatūra yra sumažinama iki InAs buferinio sluoksnio auginimo temperatūros, kuri įprastai yra 515 °C. Auginamas 100 nm buferinis InAs sluoksnis ir temperatūra yra sumažinama iki lazerio auginimo temperatūros. Šiame darbe, siekiant išvengti sluoksnių interdifuzijos, ši temperatūra yra pakankamai žema: 425 °C. Po temperatūros stabilizavimo paleidžiama parengta auginimo programa. Pasibaigus programai, padėklas yra perdedamas į paruošimo kamerą ir po to – į įkrovimo kamerą. Tuomet, išjungiamas turbomolekulinis siurblys, po kiek laiko – ir rotacinis, ir paleidžiamas silpnas azoto srautas. Kai azoto slėgis pasiekia atmosferos slėgį, atsidaro įkrovimo kameros durelės ir užauginta lazerinė struktūra yra išimama. Būtent taip užauginta šiame darbe tiriamą kvantinio kaskadinio lazerio struktūra VIA0052.

Po epitaksijos proceso padėklas yra tiriamas Nomarski (Interferencinio diferencinio kontrasto) mikroskopu ir perduodamas rentgeno difrakcijos matavimams. Iš rentgeno difrakcijos yra nustatomas užaugintos struktūros periodas, pagal kurį galima nustatyti nuokrypį nuo projekcinio struktūros storio bei pamatyti sandūrų kontrastą (interdifuzijos buvimą/nebuvimą). Vėliau, lazerinė struktūra perduodama litografijos procesui atlikti. Po fotolitografijos bei metalizacijos procesų suformuojami lazerinių diodų prietaisai ir pradedamas jų testavimas.

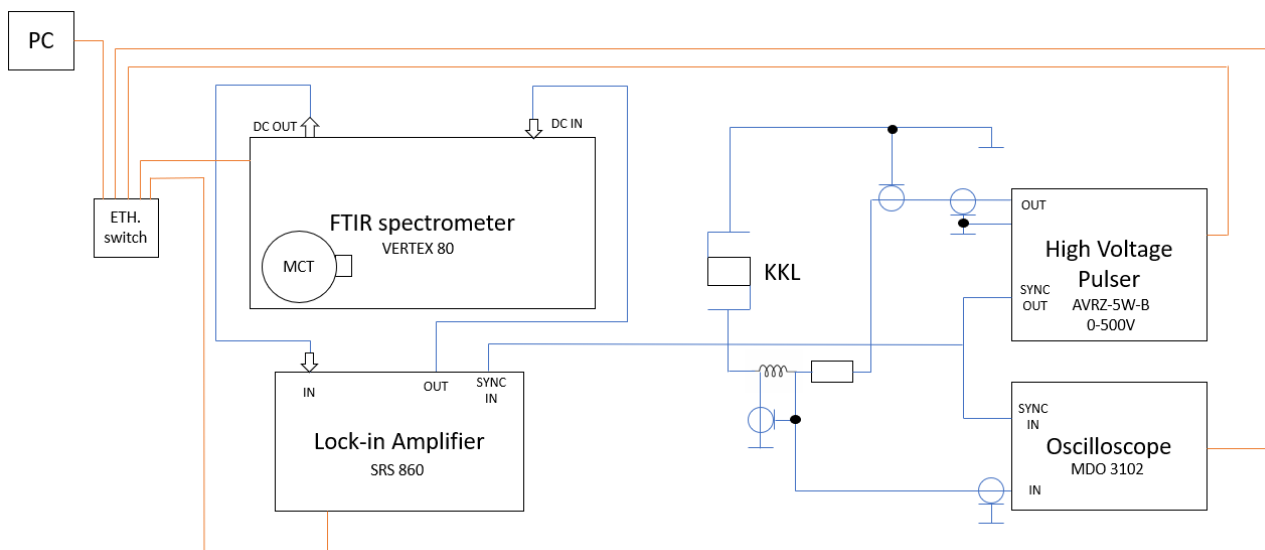
3.4 Lazerio elektrooptinių parametrų charakterizavimo matavimai

Atsižvelgiant į tai, kad darbe tiriamoje lazerinėje struktūroje yra 35 periodai, galima įsivertinti minimalią darbinę lazerinio diodo įtampą: $35 \cdot 207 \text{ meV} = 7,25 \text{ V}$. Įprastinės šio lazerių tipo srovės, priklausomai nuo kitos ilgio ir pločio, varijuoja nuo 1 A iki 20 A, tad sklaidoma galia gali siekti šimtus vatų. Kad lazerinė struktūra nebūtų perkaitinta, ji yra maitinama trumpais srovės impulsais. Šiuo atveju matavimams buvo naudojami ypač trumpi impulsai, kurių trukmės yra 100 ns. Naudojant klasikinius 50 omų banginės varžos koaksialinius kabelius buvo suderinta ir apkrovos varža. Tam panaudotas beindukcinis 50 omų rezistorius, jungiamas nuosekliai su testuojamu lazeriniu diodu.

Panaudojus spartųjį indukcinį zondą, kurio srovės/įtampos konversijos koeficientas yra 1, trumpojo srovės impulso atsakas buvo stebimas ir matuojamas osciloskope kaip įtampos impulsas, kurio vertė buvo su vienetiniu koeficientu verčiama į srovę. Metodo tikslumas patikrintas ant beindukcinės varžos parodė mažesnę nei 1 procento paklaidą.

Elektrinių ir optinių parametrų charakterizavimui buvo naudojamas aukštos įtampos impulsų generatorius AVTECH AVRZ-5W-B, leidžiantis generuoti ypač trumpus impulsus (nuo 12 ns iki 10 μs) su mažiau nei 6 ns impulso fronto trukme, esant įtampoms iki 500 V. Lazerinio diodo įtampai ir srovei matuoti panaudotas osciloskopas Tektronix MDO3102. Optinio signalo intensyvumui matuoti buvo naudojamas sinchroninis stiprintuvas SRS860 Lock-in Amplifier, o spontaninės ir lazerinės emisijos spektrams matuoti panaudotas Vertex 80 FTIR spektrometras.

Surinkto matavimo stendo konfigūracija pavaizduota 21 pav. AVTECH AVRZ-5W-B impulsų generatorius skirtas paduoti pasirinkto dažnio, amplitudės, uždelsimo bei įtampos impulso trukmę kvantiniam kaskadiniam lazeriui. Vienas Tektronix MDO3102 osciloskopo kanalas buvo panaudotas srovės matavimui iš indukcinio srovės zondo pagal aukščiau aprašytą metodiką, kitas kanalas – tiesioginiam įtampos matavimui lazeriniame diode. Emituojamas iš kvantinio kaskadinio lazerio spinduliuotės intensyvumas buvo matuojamas sufokusavus lazerio spinduliuotę į Vertex 80 FTIR spektrometro gyvsidabrio kadmio telūrido (*angl. Mercury Cadmium Telluride - MCT*) detektorių, prie kurio prijungtas sinchroninis stiprintuvas.



21 pav. Lazerio elektrooptinių savybių matavimo stendo schema

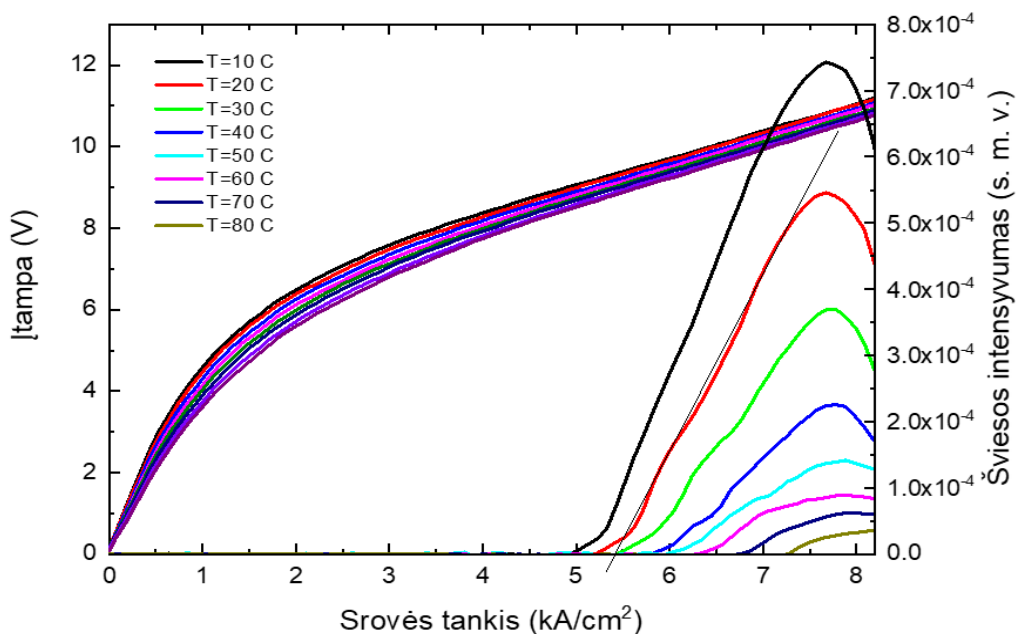
Kompiuteris, AVTECH AVRZ-5W-B impulsų generatorius, Tektronix MDO3102 osciloskopas bei SRS 860 Lock-in Amplifier yra sujungti su vietiniu tinklu (LAN) per komutatorių – prietaisą, skirtą valdyti duomenų srautus taip, kad jie pasiektų reikiamą adresatą su mažiausiais praradimais ir maksimaliu greičiu. Komunikacija tarp matavimo prietaisų ir valdymo programos vykdoma Ethernet sąsaja, TCP/IP protokolu. Kiekvienam prietaisui buvo priskirtas unikalus IP adresas, kurį įvedus į programinę įrangą, kompiuteris žinojo, kur siųsti duomenis.

Valdymo programa buvo parašyta NI LabView 2009 programinėje aplinkoje, kurioje galima valdyti ir nuskaityti duomenis iš prietaisų.

3.5 Kvantinių kaskadinių lazerių optinių ir elektrinių savybių tyrimo rezultatai

Po molekulinė pluoštelių epitaksijos buvo atlikta užaugintos struktūros fotolitografija bei suformuoti keli kvantinių kaskadinių lazerių prietaisai. Kvantinio kaskadinio lazerinio diodo VIA0052-4-2 išmatuotos voltamperinės charakteristikos ir šviesos intensyvumo priklausomybės nuo srovės ir temperatūros yra pavaizduotos 22 pav. Šio lazerio slenkstinė srovė esant 20 °C temperatūrai yra 5,42 kA/cm². Remiantis voltamperine priklausomybe, pastebimas srovės nuotėkis diode. Idealiame kvantiniame kaskadiniame diode kylant įtampai – srovės tankis turi būti nulinis, ir pradėti didėti tik pasiekus energijos lygmenų rezonansą. Tai gali lemti KKL diodo struktūros dizaino netobulumas arba lazerinio kristalo epitaksinio formavimo metu susidarę kristaliniai defektai. Šis

srovės nuotėkis galimai ir lemia aukštesnes bandinio slenkstines sroves. Prie aukštesnių srovių šviesos intensyvumas pradeda sparčiai mažėti. Šis reiškinys pastebimas, kai įtampa lazeryje pakyla tiek, kad rezonansinė srovė teka per lygmenis, iš kurių nevyksta spinduliniai elektronų šuoliai.

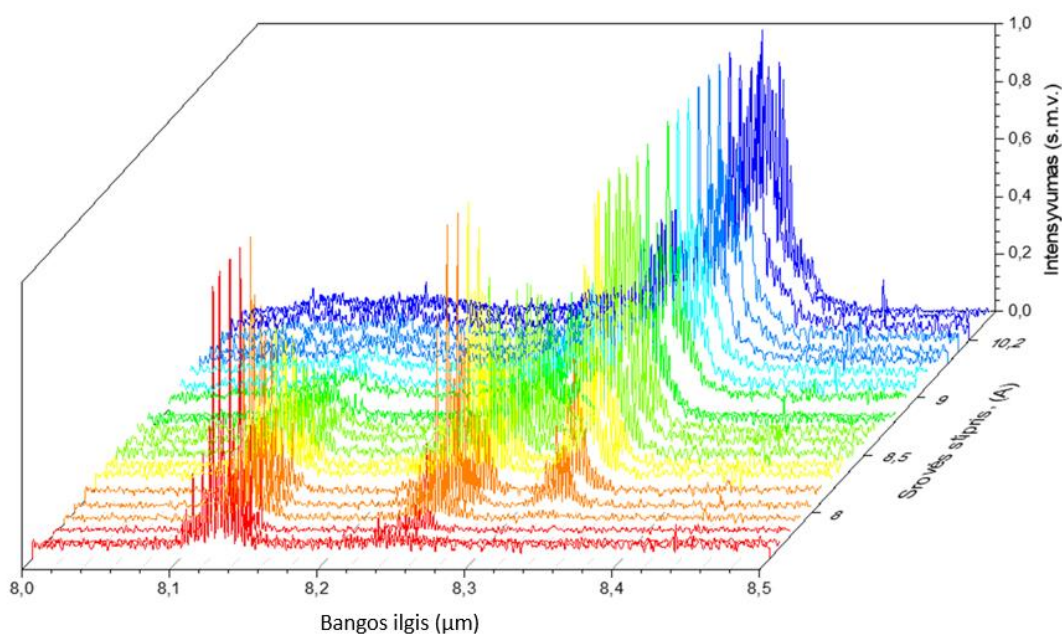


22 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio diodo (VIA0052) voltamperinė charakteristika ir šviesos intensyvumo priklausomybė nuo srovės tankio, išmatuota naudojant 100 ns impulsus su 2.5 kHz pasikartojimo dažniu prie skirtingų temperatūrų

Išmatuotos elektrooptinės charakteristikos leidžia nustatyti darbinį šio lazerinio diodo režimą. Iš grafiko kreivių šeimos matyti, kad darbiniai srovių tankiai prie 10 °C temperatūros yra intervale nuo 5,2 A/cm² iki 7,5 A/cm². Tuo tarpu prie kambario temperatūros šis intervalas kiek siauresnis: nuo 5,5 A/cm² iki 7,5 A/cm². Taip pat matyti, kad lazeris užtikrintai gali veikti iki 80 °C temperatūros. Nepaisant gan stipraus srovės nuotėkio, šio lazerinio diodo slenkstinės srovės yra būdingos šio tipo lazeriams (įprastai jos būna nuo 1 iki 10 kA/cm²). Šiuo atveju tyrimo tikslas sukurti elektros srove (arba įtampa) derinamą kvantinį kaskadinį lazerį. Tad galima matyti ir srovių intervalą, kurį galima saugiai naudoti lazerio derinimui. Taipogi emisijos bangos ilgis priklauso ir nuo temperatūros, tad matomas ir temperatūrų intervalas, kuriame galima testuoti lazerio spektrines charakteristikas.

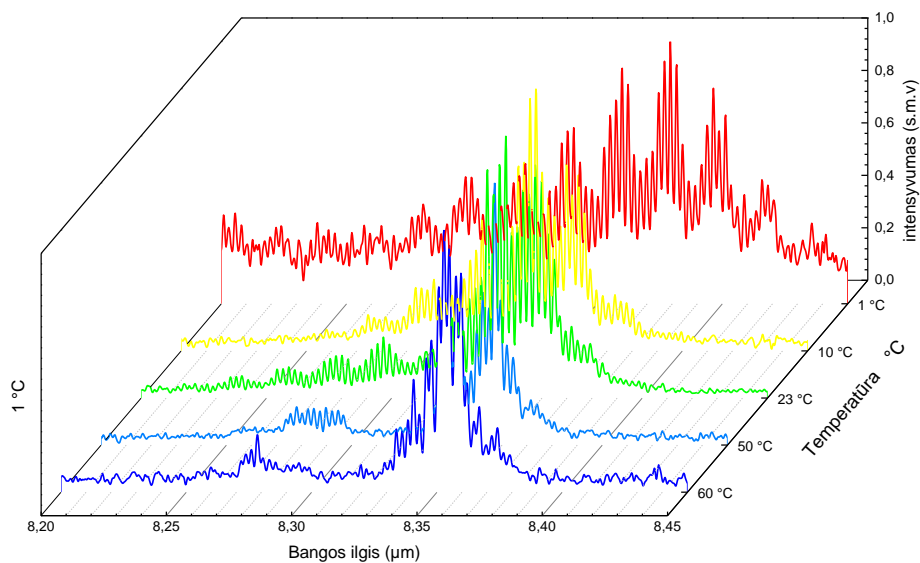
Siekiant sužinoti lazerio derinamumo galimybes, pamatuotas jo emisijos spektras prie skirtingų srovių kambario temperatūroje. Išmatuoti spektrai yra pateikti 23 pav. Čia matyti, kad lazerio bangos ilgis, keičiant srovės stiprį, yra derinamas nuo 8,12 μm iki 8,36 μm. Pastebimas ir

emisijos spektro sričių diskretiškumas, siejamas su Fabry-Perot rezonatoriaus schema. Šiuo atveju turėti tolydaus emisijos smailės padėties kitimo nuo srovės negalima, tačiau galima derinti emisijos sritį.

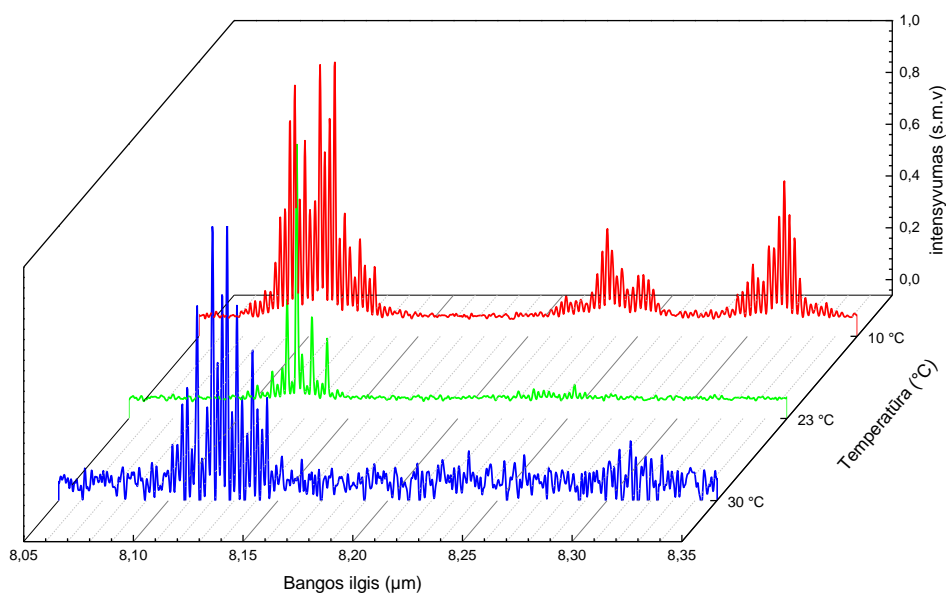


23 pav. Derinamo kvantinio kaskadinio lazerio diodo VIA0052-4-2 emisijos spektrai prie skirtingų srovės stiprių, išmatuoti kambario temperatūroje (impulsai 2.5 kHz, 100 ns)

Lazerinio diodo spektrą galima derinti ne tik keičiant įtampą struktūroje, bet ir keičiant temperatūrą, nuo kurios neženkliai pasikeičia aktyvios terpės lūžio rodiklis. Tuo tikslu lazeris buvo uždėtas ant termoelektrinio Peltier šaldymo elemento, o jo spektrų priklausomybės nuo temperatūros iširtos prie ribinių srovių (7,7 A ir 10,5 A). Matavimo rezultatai pateikti 24 pav. ir 25 pav.



24 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio diodo (VIA0052-4-2) spektro pokytis nuo temperatūros prie 10,5 A, 100 ns impulsus su 2,5 kHz pasikartojimo dažniu prie skirtingų temperatūrų

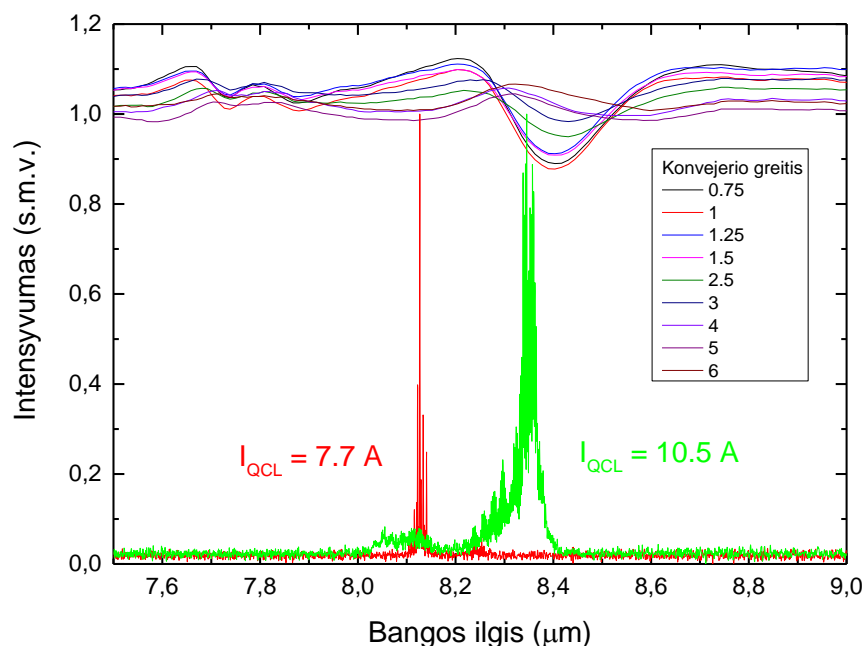


25 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio diodo (VIA0052-4-2) spektro pokytis nuo temperatūros prie 7,7 A, 100 ns impulsus su 2,5 kHz pasikartojimo dažniu prie skirtingų temperatūrų

Iš pateiktų spektrų matyti, kad emisijos smailės padėties postūmis yra neženklaus, tačiau prie mažesnės temperatūros atsiranda papildomos modos, kurios nėra naudingos šio tyrimo polimerizacijos proceso kontrolei. Tokiu būdu buvo nustatyta, kad atraminiam bangos ilgiui lazeryje

yra tinkama emisijos spektro sritis ties 8,12 μm , atitinkanti 7,7 A srovę ir pagrindinio atspindžio matavimo sritis ties 8,36 μm , atitinkanti 10,5 A srovę.

Prie parinktų veikimo srovių išmatuoti lazerio emisijos spektrai yra pavaizduoti kartu su tiriamųjų baldinių plokščių santykiniais atspindžio spektrais (pav. 26).

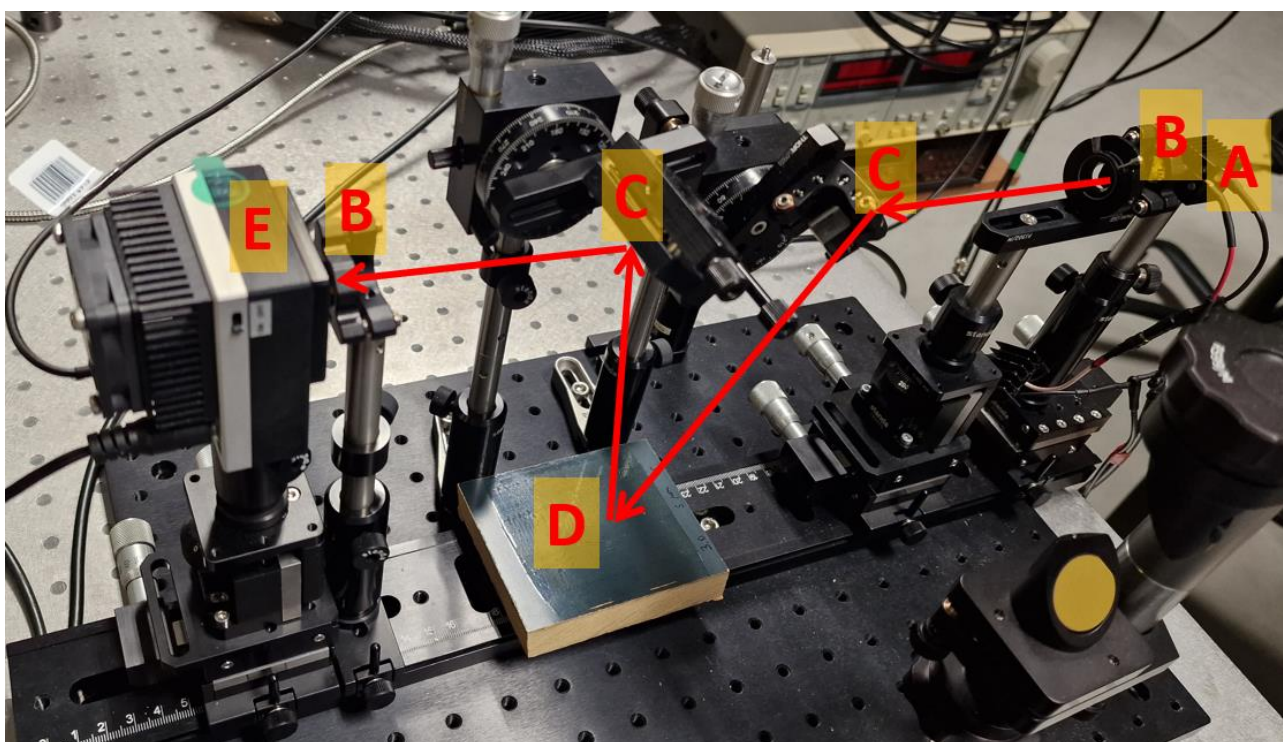


26 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio VIA0052-4-2 emisijos spektrai išmatuoti prie parinktų 7,7 A ir 10,5 A srovių bei tiriamųjų baldinių plokščių santykiniai atspindžio spektrai

3.6 Polimerinės dangos UV sukietinimo užbaigtumo kontrolės sistemos tyrimas

Siekiant patikrinti sukurto kvantinio kaskadinio lazerio tinkamumą baldinių plokščių lako dangos polimerizacijos proceso užbaigtumo kontrolei, surinktas matavimo stendo prototipas. Optinė spindulio nukreipimo ir surinkimo sistema pavaizduota 27 pav. Ją sudaro kvantinis kaskadinis lazeris VIA0052-4-2, kolimuojantis ZnSe lęšis, erdvinis filtras, reguliuojamo kampo nukreipimo veidrodis, reguliuojamo kampo surinkimo veidrodis, fokusuojantis ZnSe lęšis ir plačiajuostis greitaveikis gyvsidabrio kadmio telūrido detektorius. Optinė schema surinkta 10 laipsnių kampo atspindžio konfigūracijoje. Sistema sujusitruojama ir, siekiant padidinti zondavimo plotą, sumažinti priklausomybę nuo atstumo ir paviršiaus nelygumų, yra neženkliai išfokusuojama. Medžio drožlių

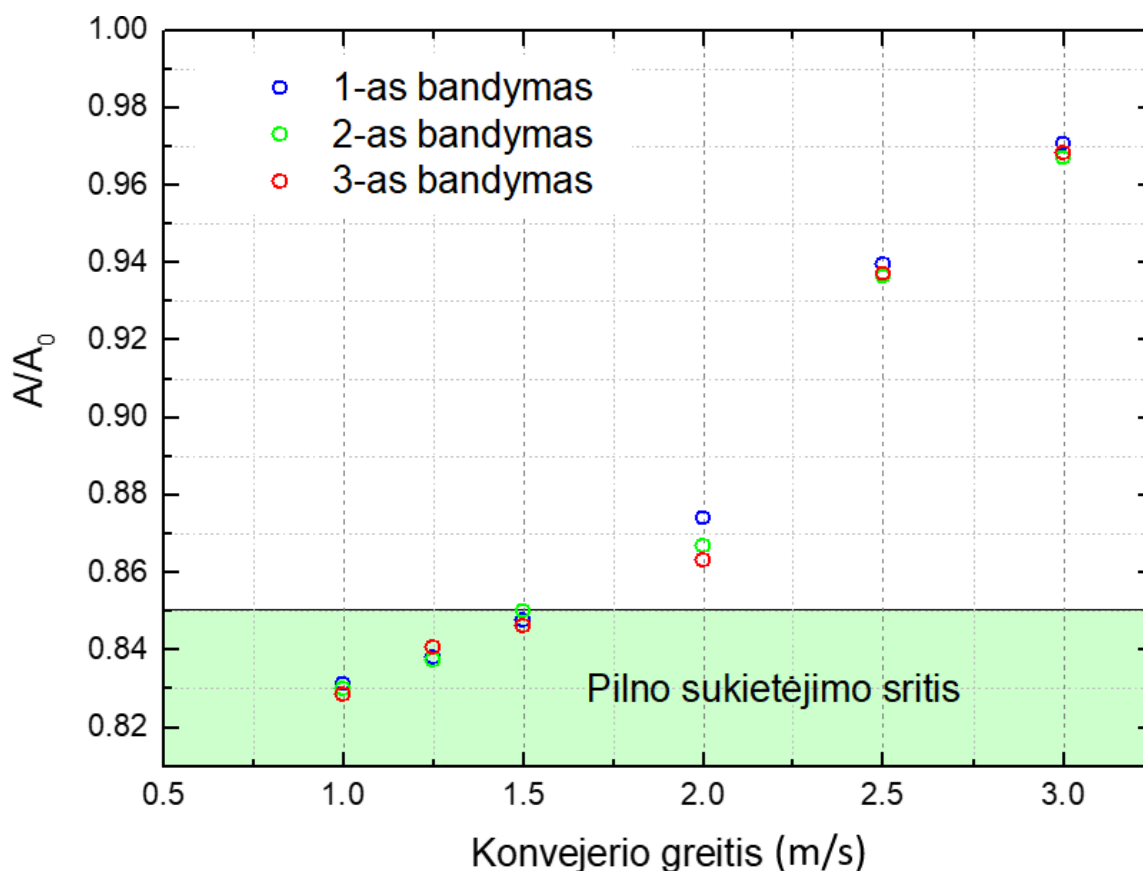
plokštelės su skirtingai paruoštomis polimerinėmis dangomis matuojamos po kelis kartus, skirtingai pozicionuojant jas zondavimo srityje. Nustatyta, kad šioje konfiguracijoje pakankamai stiprus signalas, užtikrinantis didelį signalo/triukšmo santykį gali būti pasiektas maksimaliame 20 cm atstumu, kurį riboja optinių komponentų išmatavimai. Toks atstumas yra laikomas tinkamu atstumu taikymams proceso kontrolei realiuoju laiku gamybos linijoje.



27 pav. Optinė spindulio nukreipimo ir surinkimo sistema. A – kvantinis kaskadinis lazeris, B – lęšiai, C – reguliuojami nukreipimo veidrodžiai, D – detektorius zonduojama polimerinė danga, E – IR spinduliuotės. Raudona linija pavaizduotas optinis lazerio spindulio kelias

Naudojant aukščiau aprašytą optinę spindulio nukreipimo ir surinkimo sistemą bei lazerio maitinimo ir kontrolės įrenginius, buvo zonduojamos prie skirtingų konvejerio greičių sukietintos polimerinės dangos. Siekiant patikrinti matavimų atsikartojamumą bei patikimumą, visų bandinių matavimai buvo kartojami 3 kartus. Kiekvienas bandinys matuotas prie dviejų lazerio maitinimo srovių, atitinkančių pagrindinį ir atraminį atsaką. Atspindėto signalo intensyvumas nuskaitytas nuo sinchroninio stiprintuvo. Naudoti šie matavimų parametrai: lazerio atraminė srovė: 7,7 A; lazerio pagrindinė srovė: 10,5 A; lazerio impulso trukmė: 100 ns, pasikartojimo dažnis: 2,5 kHz; sinchroninio stiprintuvo integravimo konstanta 30 ms.

Sukietintų dangų minkštumo testai parodė, kad bandiniai, sukietinti prie greičių 1,5 m/s ir mažiau yra visiškai sukietėję. Tokiu būdu šie bandiniai gali būti išskirti į atskirą grupę. Optinių matavimų rezultatai pateikti 28 pav.

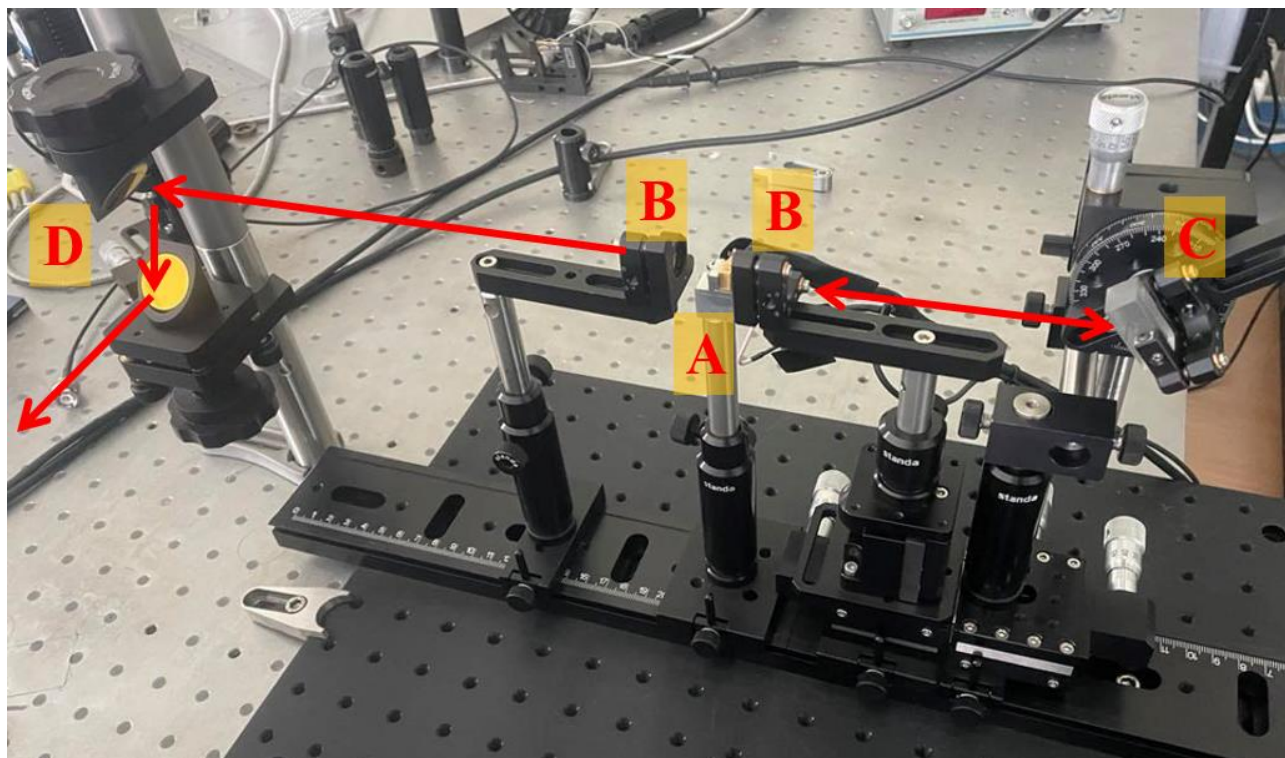


28 pav. Grafinis $\Delta A/A_0$ santykio atvaizdavimas, esant trims skirtingiems matavimams, išmatuotas nuo bandinių, paruoštų prie skirtingų konvejerio greičių

Iš grafiko matyti, kad kiekviena matavimų grupė, atlikta ant to pačio bandinio nepersidengia su kitais matavimais ir ryškiai atspindi kiekvieno bandinio sukietinimo charakteristikas. Sritis, kurioje $\Delta A/A_0$ santykis yra mažesnis už 0,85 gali būti laikoma pakankamo sukietinimo (pakankamos polimerizacijos) indikatoriumi. Matavimai parodė, kad šio optinio zondavimo metodo paklaida stacionariose sąlygose neviršija 2%. Tokiu būdu šios stacionarios sistemos matavimų pasikartojamumas siekia 98%.

3.7 Spektroskopinė sistema, naudojant kvantinį kaskadinį lazerį su derinamu bangos ilgiu, pasitelkiant išorinio rezonatoriaus konfigūraciją

Kuriant spektroskopinę sistemą su derinamu išoriniu rezonatoriumi pritaikyta Kvazi – Littrow sistemos konfigūracija (6 pav. – c). Spektroskopinė sistema, taikant kvantinį kaskadinį lazerį su derinama išorinio rezonatoriaus konfigūracija, pavaizduota 29 pav.

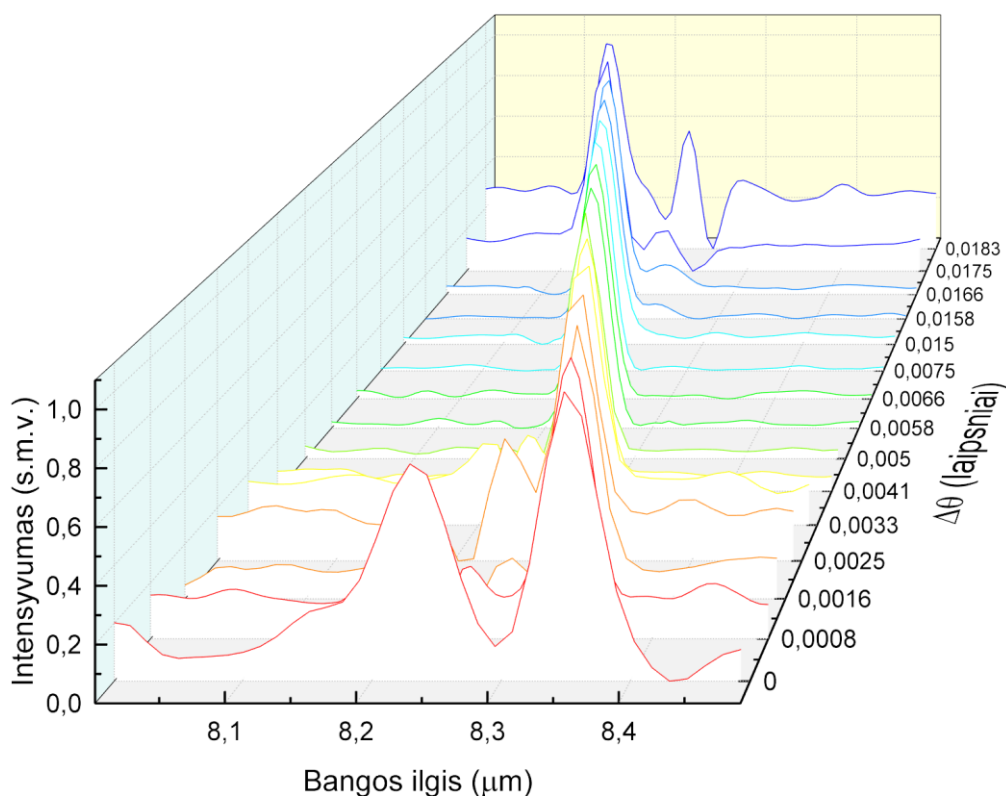


29 pav. Kvantinis kaskadinis lazeris su derinama išorinio rezonatoriaus konfigūracija. A – kvantinis kaskadinis lazeris, B – lęšiai, C – difrakcinė gardelė, D – periskopas. Raudona linija pavaizduotas optinis lazerio spindulio kelias

Sistemos pagrindinis elementas – kvantinis kaskadinis lazeris (bandinys VIA0052-4-7), kurio lustas iš vienos pusės padengtas praskaidrinančiuoju TiO_2 sluoksniu. Praskaidrinimo dangai padengti buvo pritaikytas magnetroninio dulkinimo metodas. Procesas atliktas FTMC Fizikinių technologijų skyriaus laboratorijoje. Atsižvelgiant į emisijos bangos ilgį ($8,4 \mu\text{m}$) ir TiO_2 lūžio rodiklį ($1,8$) numatytame bangos ilgių intervale, apskaičiuotas praskaidrinimo dangos storis sudarė $1,17 \mu\text{m}$. Praskaidrinta kvantinio kaskadinio lazerio briauna atsukta į difrakcinę gardelę. Lazerio lustas tuo tarpu patalpintas tarp dviejų ZnS kolimuojančių lęšių. Lazerio pluoštas kolimuojamas į reguliuojamo kampo difrakcinę gardelę, skirtą bangos ilgio derinimui. Eksperimente naudotos difrakcinės gardelės griovelių tankis lygus 150 mm^{-1} ir rėžio polinkio kampas (*angl. blaze angle*) – 35° . Difrakcinė gardelė

pritaikyta $10,6 \mu\text{m}$ bangos ilgio spinduliuotei, tad nulinės eilės difrakcinio maksimumo padėtis kiek skiriasi nuo režio polinkio kampo. Taikant Brego formulę (1), perskaičiuotas difrakcinės gardelės padėties kampas $8,1 \mu\text{m}$ bangos ilgiui lygus $37,41^\circ$.

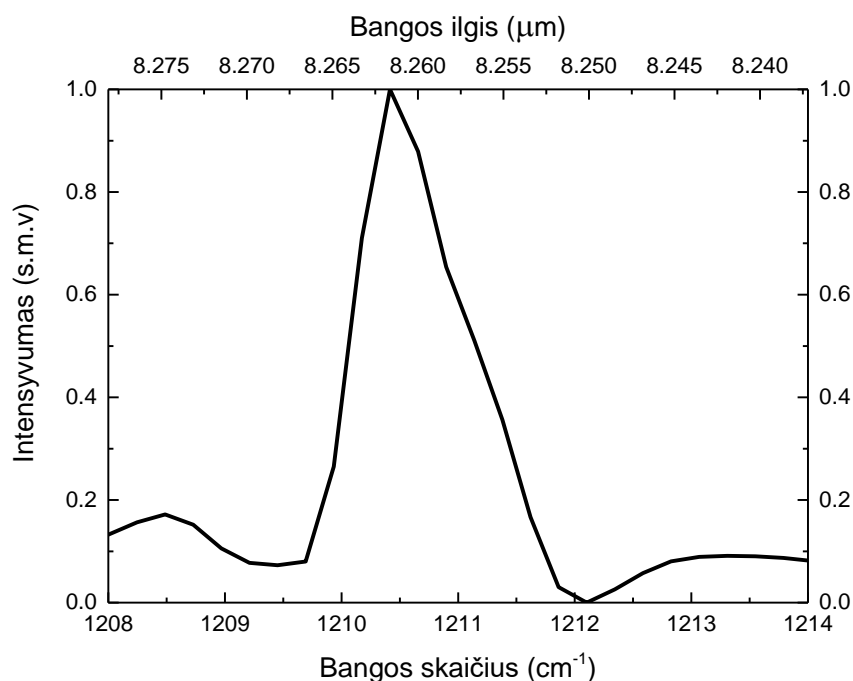
Atsispindėjęs spindulys nuo difrakcinės gardelės yra sufokusuojamas atgal į lazerį. Pro neskaidrintą briauną išėjusi spinduliuotė kolimuojama ir pro periskopą nukreipiama į FTIR spektrometrą. Signalas iš spektrometre esančio šaldomo MCT detektoriaus perduodamas į sinchroninį stiprintuvą, iš kurio gali būti nuskaitomas ir stebimas tiesiogiai, bei grąžinamas atgal į spektrometrą tolimesniam apdorojimui. Sistema eksperimento metu buvo justiruojama stebint signalo iš detektoriaus amplitudę. Sujustiravus sistemą, keičiant difrakcinės gardelės padėties kampą, FTIR spektrometro pagalba, buvo nuskaitomi lazerio spinduliuotės spektrai. Išmatuotų spektrų priklausomybės nuo difrakcinės gardelės padėties kampo pateiktos 30 pav.



30 pav. Kvantinio kaskadinio lazerio VIA0052-4-7 bangos ilgio spektro priklausomybė nuo difrakcinės gardelės kampo pokyčio

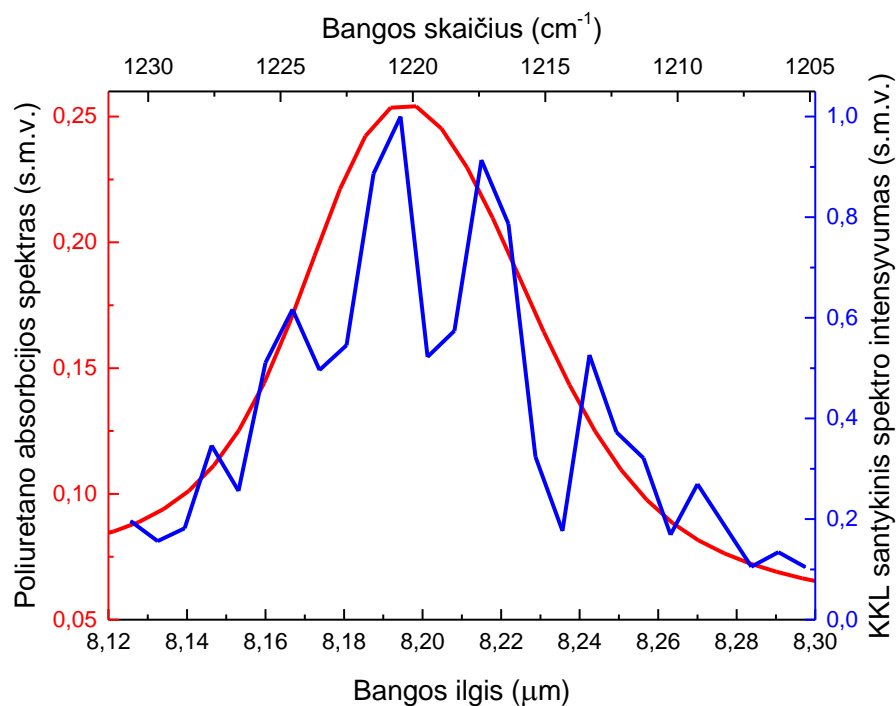
Iš pateiktų spektrų matyti, kad naudojant išorinio rezonatoriaus konfigūraciją buvo pasiektas lazerio emisijos bangos ilgio derinimo intervalas nuo $8,12 \mu\text{m}$ iki $8,38 \mu\text{m}$, o bangos ilgio pokytis

nuo difrakcinės gardelės kampo lygus $0,308 \mu\text{m}/\text{arcmin}$. Taip pat matyti, kad beveik visame derinimo intervale emisijos spektras yra vienmodis. Reikėtų pažymėti, kad kraštinėse pozicijose pasireiškia ir vidinės lazerio rezonatoriaus modos. Jos atsiranda dėl nepilno briaunos praskaidrėjimo. Dėl to, lazerio veikimo srovė buvo parenkama žemiau slenkstinės lazerio srovės, išmatuotos be išorinio rezonatoriaus. Spektro sritis, kur nepasireiškia vidinės rezonatoriaus išilginės modos, išmatuota taikant aukštą 1 cm^{-1} spektrometro matavimo rezoliuciją. Išmatuotas spektras pateiktas 31 pav. Čia matyti, kad pritaikyta išorinio rezonatoriaus konfigūracija leido pasiekti vienmodę emisiją, kurios spektro smailės pusplotis neviršija 1 cm^{-1} . Toks lazerio emisijos spektro plotis yra tinkamas spektroskopiniams taikymams. Ypač atsižvelgiant į tai, kad daugelio ne dujų fazės junginių sugerties linijų plotis yra ženkliai didesnis, o kuriama spektroskopinė sistema yra skirta 50 cm^{-1} pločio sugerties juostoms.



31 pav. Derinamo bangos ilgio spektro plotis

Siekiant patikrint sukurtos sistemos taikymo spektrometrijoje galimybes, buvo išmatuotas polimerinio bandinio (poliuretano), turinčio ryškias sugerties linijas sukurtos sistemos bangos ilgio derinimo srityje (bangos ilgio ruože tarp $8,12 \mu\text{m}$ iki $8,30 \mu\text{m}$), spektras. Šio bandinio absorbcijos spektras pateiktas 32 pav.



32 pav. Bandinio pralaidumo spektras išmatuotas su FTIR spektrometru ir derinamojo KKL išorinio rezonatoriaus sistema

Grafike raudona linija pavaizduotas FTIR spektrometru išmatuotas absorbcijos spektras, o mėlyna – spektras, išmatuotas naudojant sukurtą keičiamo bangos ilgio lazerio spektrometrinę sistemą. Grafike galima matyti, kad sukurtos spektrometrinės sistemos pagalba išmatuotas spektras turi banguotą spektro smailės formą, kuri visiškai atkartoja poliuretano absorbcijos spektro fragmentą. Banguota spektro smailės forma yra dėl išoriniame rezonatoriuje susidarancios interferencijos. Ši interferencija susidaro dėl optinio kelio poslinkio, atsirandančio dėl difrakcinės gardelės sukimosi ašies išcentravimo. Šis reiškinys gali būti eliminuotas pakeitus difrakcinės gardelės laikiklio konfigūraciją. Tačiau, nepaisant lazerinio spektrometro pagalba išmatuoto spektro netolydumo, matuojamo spektro forma pilnai gali būti išskirta iš gaunamo spektro smailių sujungimo. Šis grafikas leidžia įvertinti ir sukurtos spektrometrinės sistemos rezoliuciją, kuri gali būti įvertinta kaip vienos smailės spektro struktūroje pusplotis. Remiantis tuo, šios sukurtos spektroskopinės sistemos rezoliucija yra 1 cm^{-1} .

Apibendrinant, šiame tyrime buvo sukurtos ir išbandytos dviejų skirtingų tipų lazerinės spektroskopinės sistemos, skirtos bangų ilgių intervalui nuo 8,12 μm iki 8,38 μm , kuris yra tinkamas taikymui baldų pramonėje UV kietinamo lako polimerizacijos kontrolei. Pademonstruota elektriniu būdu (keičiant maitinimo įtampą) derinamojo lazerio pagrindu veikianči polimerizacijos proceso kontrolės sistema, leidžianti efektyviai nustatyti UV kietinamo lako polimerizacijos proceso užbaigtumą. Tačiau, ši sistema turi labai siaurą taikymo sritį. Siekiant ištirti sukurtų kvantinių kaskadinių lazerių taikymo spektrometrijoje galimybes, buvo sukurta derinama išorinio rezonatoriaus sistema ir ištirtos jos savybės. Skirtingai nuo elektriniu būdu derinamos sistemos, ši sistema leidžia tolygiai derinti lazerio emisijos bangos ilgį ir taikyti ją spektrometrijoje.

REZULTATAI IR IŠVADOS

REZULTATAI

1. Naudojant molekulinį pluoštelį epitaksijos metodą, sėkmingai užauginti kvantiniai kaskadiniai lazeriai, kurių emisijos bangos ilgis (apie 8,3 μm) specialiai pritaikytas UV sukietinimo polimerizacijos proceso stebėjimui.
2. Išsamiai išanalizuotos užaugintų lazerių elektrooptinės savybės, sukuriant bazinius duomenis apie jų veikimo parametrus ir galimybes pritaikyti spektroskopijoje.
3. Naudojant užaugintus kvantinius kaskadinius lazerius, sukurta ir išbandyta UV sukietinimo polimerizacijos proceso kontrolės sistema. Įrodyta, kad elektrinis bangos ilgio derinimo metodas yra efektyvus ir tinkamas taikyti jį UV sukietinimo polimerizacijos proceso kontrolei baldų gamybos linijoje.
4. Naudojant praskaidrintą kvantinio kaskadinio lazerio lustą buvo suformuotas išorinis rezonatorius, leidžiantis keisti emisijos bangos ilgį 38 cm^{-1} intervale 1 cm^{-1} tikslumu ir pademonstruotos šios sistemos taikymo spektroskopijoje galimybės.

IŠVADOS

1. Kvantiniai kaskadiniai lazeriai yra patikimas ir derinamas šaltinis infraraudonųjų spindulių spektroskopijai.
2. Sukurta spektroskopinė sistema rodo taikymo pramonėje potencialą, ypač kokybės kontrolės procesuose.
3. Būsiami darbai turėtų būti sutelkti į lazerinių lustų skaidrinimo metodus, lazerių derinamumo ir efektyvumo didinimą, siekiant išplėsti jų taikymo sritis.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- [1] YOSHINAGA, H., et al. (2020). *Mid-infrared Quantum Cascade Laser Operable in High Temperature* (200 C). Sei Technical Review.
- [2] DEVENSON, J. (2010). *InAs/AlSb Short Wavelength Quantum Cascade Lasers*. Doktoro Disertacija.
- [3] DALLNER, M., Hau, F., Höfling, S., & Kamp, M. (2015). InAs-based interband cascade lasers emitting around 7 μm with threshold current densities below 1 kA/cm^2 at room temperature. *Applied Physics Letters*, 106.
- [4] NGUYEN V.an, H., Loghmari, Z., Philip, H., Bahriz, M., Baranov, A. N., & Teissier, R. (2019). Long Wavelength ($\lambda > 17 \mu\text{m}$) Distributed Feedback Quantum Cascade Lasers Operating in a Continuous Wave at Room Temperature. *Photonics*.
- [5] CATHABARD, O., Teissier, R., Devenson, J., Moreno, J. C., & Baranov, A. N. (2010). Quantum cascade lasers emitting near 2.6 μm . *Applied Physics Letters*, 96.
- [6] BHRIZ, M., Lollia, G., Laffaille, P., Baranov, A. N., & Teissier, R. (2013). InAs/AlSb quantum cascade lasers operating near 20 μm . *Electronics Letters*, 49.
- [7] WALTHER, C., Fischer, M., Scaliari, G., Terazzi, R., Hoyler, N., & Faist, J. (2007). Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz. *Applied Physics Letters*.
- [8] Vainio, M., & Halonen, L. (2016). Mid-infrared optical parametric oscillators and frequency combs for molecular spectroscopy. *Physical Chemistry Chemical Physics*.
- [9] Ye, C., & Wei, T. K. (2004). *Tunable External Cavity Diode Lasers*. Hackensack, NJ: World Scientific.
- [10] White, S. E., & Cataluna, M. A. (2015). Unlocking Spectral Versatility from Broadly-Tunable Quantum-Dot Lasers. *Photonics*, 2.
- [11] HUGI, A., Terazzi, R., Bonetti, Y., Wittmann, A., Fischer, M., Beck, M., Faist, J., & Gini, E. (2009). External cavity quantum cascade laser tunable from 7.6 to 11.4 μm . *Applied Physics Letters*.
- [12] ZHOU, W., Bandyopadhyay, N., Wu, D., et al. (2016). Monolithically, widely tunable quantum cascade lasers based on a heterogeneous active region design. *Scientific Reports*.

- [13] DrBob. (2004). Optical-coating. Wikimedia Commons. Prieiga internetu: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical-coating-2.png>
- [14] DAVEY, J. E., PANKEY, T. (1968). Epitaxial GaAs films deposited by vacuum evaporation. *Journal of Applied Physics*, 39(4), p. 1941–1948.
- [15] HENINI, M. (2018). Molecular Beam Epitaxy – From Research to Mass Production.
- [16] Infrared Processing and Analysis Center. (2012). Near, Mid and Far-Infrared. Retrieved from <https://archive.ph/20120529003352/http://www.ipac.caltech.edu/Outreach/Edu/Regions/irregions.html#selection-191.2-191.5>
- [17] Krishnavedala. (2014). Michelson Interferometer.
- [18] SPRAGG, R. A. (2017). *In Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry* (Third Edition).
- [19] (2022). 500kHz Lock-In Amplifier. Retrieved from <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/catalog/SR860c.pdf>

Summary

Jaunius Berškys

DEVELOPMENT OF A SPECTROSCOPIC SYSTEM USING TUNABLE EMISSION WAVELENGTH QUANTUM CASCADE LASER

Expanding the range of semiconductor light sources into the infrared region has opened up broad application possibilities. Mid-infrared sources are particularly in demand, as many organic compounds in this range have characteristic energy absorption bands related to the rotational and vibrational motions of organic molecules. Tunable semiconductor infrared radiation sources are therefore well-suited for spectroscopic applications involving organic compounds. Coherent tunable light sources are especially sought after. Currently, quantum cascade lasers are the only type of coherent semiconductor radiation covering the entire spectrum of middle infrared radiation. Additionally, these sources are highly compact and exhibit a sufficiently wide tunability, further enhancing the attractiveness of these light sources in spectroscopic applications. One of the applications for these sources, which is being developed at the Center for Physical and Technological Sciences, is the control of polymerization processes. Particularly, this method is relevant for ensuring product quality in the furniture industry, printing, and food packaging production, where it is intended to be used for monitoring the completeness of UV radiation-induced polymerization processes.

In this work, the principles of designing tunable quantum cascade laser active regions were studied, along with their growth technology using molecular beam epitaxy, and investigations of electrical and optical characteristics. FTMC-designed quantum cascade laser with a projected wavelength of 8,3 μm was grown using molecular beam epitaxy and shaped through photolithography. Additionally, the parameters of operating temperature and current on the emission spectrum of this laser was examined. Based on the studied properties, operating currents were selected to match emission spectra suitable for reference, which was 7,7 A corresponding to 8,12 μm wavelength, and main reflectance, which was 10,5 A corresponding to 8,36 μm . These signal measurements were used for controlling the completeness of furniture boards polymerization process. A measurement setup was assembled, and using the developed laser and selected operating parameters, the concept of measuring the completeness of UV curing of furniture boards was achieved. However, this system has a very narrow application scope. In order to explore the potential applications of the developed quantum cascade lasers in spectrometry, a system with tunable external

resonator in Quasi-Littrow configuration was created and its properties were investigated. The tunability of the system using diffraction grating was achieved from 8,12 μm to 8,38 μm with the wavelength shift depending on diffraction grating angle equal to 0.308 $\mu\text{m}/\text{arcmin}$. Using Quasi-Littrow configuration our laser achieved single mode emission with the width of 1 cm^{-1} . Unlike the electrically tunable system, this system allows for the continuous tuning of the laser emission wavelength and its application in spectrometry.