

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Tadas Bučiūnas

GREITAVEIKIS PLAČIAI DERINAMO BANGOS ILGIO GaSb LAZERINIS
ŠALTINIS MOLEKULINEI SPEKTROKOPIJAI INFRARAUDONŲJŲ BANGŲ
SPEKTRINIAME DIAPAZONE

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Optoelektronikos medžiagų ir technologijų
studijų programa

Studentas

Tadas Bučiūnas

Leista ginti

2018-05-25

Darbo vadovas

Arūnas Miasojedovas

Instituto atstovas

prof. Eugenijus Gaubas

Vilnius 2018

Turinys

Įvadas.....	3
1. Puslaidininkinių lazeriniai diodai ir jų panaudojimas.....	4
1.1. Puslaidininkinių lazerių veikimo principai ir sandara.....	4
1.1.1. Sugertis, spontaninė ir priverstinė spinduliuotės puslaidininkiuose.....	4
1.1.2. Optinis stiprinimas puslaidininkyje.....	7
1.1.3. Būdingos lazerinių diodų struktūros.....	9
1.1.4. Fabry – Pérot rezonatorius.....	11
1.2. Derinamo bangos ilgio lazeriai su išoriniu rezonatoriumi.....	13
1.2.1. Lazerinės sistemos su išoriniu rezonatoriumi komponentai.....	15
1.2.2. Littrow konfigūracijos geometrija.....	18
1.2.3. Littman - Metcalf konfigūracija.....	19
1.3. Puslaidininkinių lazerių pritaikymas infraraudonajame diapazone.....	21
1.4. Puslaidininkinių lazerių integracija optiniuose grandynuose.....	23
2. Sistemos surinkimas ir metodika.....	25
2.1. Žemo dažnio veikos lazerinės sistemos surinkimas.....	25
2.2. Greitaveikės lazerinės sistemos surinkimas.....	26
2.3. Lazerinės emisijos LIV matavimas.....	27
2.4. Lazerinės spinduliuotės spektrinis matavimas.....	28
3. Tyrimo rezultatai.....	29
3.1. Stiprinimo lusto tyrimas.....	30
3.1.1. Voltamperinė charakteristika ir optinė galia.....	30
3.1.2. Spektrinis skirstinys.....	32
3.2. Žemo veikos dažnio Littman – Metcalf sistema.....	33
3.2.1. Emituojama optinė galia.....	33
3.2.2. Spektrinio skirstinio analizė ir valdymas.....	35
3.3. Greitaveikė Littman – Metcalf lazerinė sistema.....	38
3.3.1. Optinė galia.....	38
3.3.2. Spektrinių skirstinių savybės ir kalibravimas.....	39
3.4. Littman – Metcalf lazerinės sistemos pritaikymas spektroskopijoje.....	41
Išvados.....	45
Literatūros sąrašas.....	46
Santrauka.....	49
Summary.....	50

Ivadas

Puslaidininkinių lazerinių diodų (LD) technologijose vis daugiau mokslininkų dėmesio susilaukia trumpųjų infraraudonųjų elektromagnetinių bangų (angl., *Short Wavelength Infrared*, SWIR) diapazonas dėl įvairių inovatyvių pritaikymo galimybių [1]. Šio spektrinio ruožo emisija, lokalizuota tarp 1,1 μm – 2,5 μm bangos ilgių, gali būti pritaikoma industrinių linijų robotizavime, medicininėje diagnostikoje, telekomunikacijose, karinėje pramonėje, moksliniuose tyrimuose. Tokių platų pritaikymo spektrą lemia SWIR spinduliuotės savybės: biologiniai objektai šiame diapazone nespinduliuoja, emisiją galima valdyti įprastais stikliniais lęšiais, maža sklaida, selektyvi molekulių sugertis ir kt. Dėl minėtųjų priežasčių svarbu pasiekti efektyvią lazerinių diodų veiką SWIR diapazone.

Plačiau panagrinėkime puslaidininkinių lazerius medicininų spektroskopinių taikymų kontekste. Šis optoelektroninis prietaisas pasižymi kompaktiškumu, suvartoja mažai energijos dėl tiesioginio elektrinio kaupinimo, apibūdinamas ilgomis veikimo trukmėmis bei nuolatine veika kambario temperatūroje su galimybe efektyviai integruotis į elektrinius grandynus. SWIR diapazone spinduliuojantys LD patenka į vandens skaidrumo langą. Registruojami charakteringi C-H, O-H, N-H molekulių virpesiniai – rotaciniai sugerties rezonansai išsamiai apibūdina svarbius biologinius elementus kaip kraujo analites, kalogeną, šlapalą, laktatus, gliukozę ir kt [2],[3]. Tai atveria galimybes neinvazinėms, realaus laiko *in Vivo* procedūroms, galinčioms pakeisti ilgai trunkančius ir nekomfortabilius kraujo tyrimus [4]. Taip pat, didelės galios puslaidininkiniai lazeriai pritaikomi vėžio gydime ir terapijoje dėl nežymios audinių autofluorescencijos, ilgo prasiskverbimo gylio, mažos sklaidos ir aukšto našumo bei skenavimo rezoliucijos [5].

Minėtieji taikymai įgyvendinami pasitelkus puslaidininkinio stiprinimo lusto (SL) su išoriniu rezonatoriumi (angl., *External Cavity Diode Laser*, ECDL) konfigūraciją [6]. Tokia lazerinė sistema leidžia užtikrinti itin siaurą spektrinę liniją (<1 MHz) su didele optine galia (> 10 mW) ir bangos ilgio derinamumu itin plačiame diapazone (> 200 nm) [7]. Verta paminėti, kad norint tirti vyksmus gyvajame organizme reikia užtikrinti aukštą sistemos veikos dažnį (10 Hz ir daugiau spektrinio ruožo skenavimui). Tai leidžia užtikrinti microelektromechaninės sistemos (angl., micro-electro-mechanical systems, MEMS) pritaikomos bangos ilgio parinkimo procese. Norint pasiekti prietaiso veiką SWIR diapazone, vis dažniau pasirenkama inovatyvi GaSb medžiagų platforma. Tiesioginiai optiniai šuoliai pademonstruoti net iki 3,7 μm bangos ilgių su itin žemomis slenkstinėmis maitinimo srovėmis ir aukštomis galiomis [8]. Vis dėlto, komerciškai prieinami spektroskopiniai prietaisai SWIR diapazone yra itin brangūs ir nedemonstruoja aukštų parametrų.

Šio darbo tikslas yra GaSb medžiagų platforma paremto stiprinimo lusto su išoriniu rezonatoriumi charakterizavimas, emisinių savybių valdymas optimizuojant prietaiso veiką žemo ir aukšto dažnio

režimuose bei realizuoto lazerinio šaltinio pritaikymas spektrometriniuose tyrimuose matuojant itin mažą sugertimi pasižyminčias kraujo analites kaip gliukozę, šlapalas ar laktatas. Darbo tikslui įgyvendinti išsikeltos užduotys: stiprinimo lusto parinkimas ir integracija į išorinio rezonatoriaus konfigūraciją, optimalios veikos nustatymas valdant elektrinius ir terminius parametrus žemo dažnio veikoje bei aukštadažnės sistemos su MEMS veidrodžiu realizavimas, charakterizavimas ir pritaikomumo spektriniuose tyrimuose įvertinimas matuojant kraujo analites.

1. Puslaidininkinių lazeriniai diodai ir jų panaudojimas

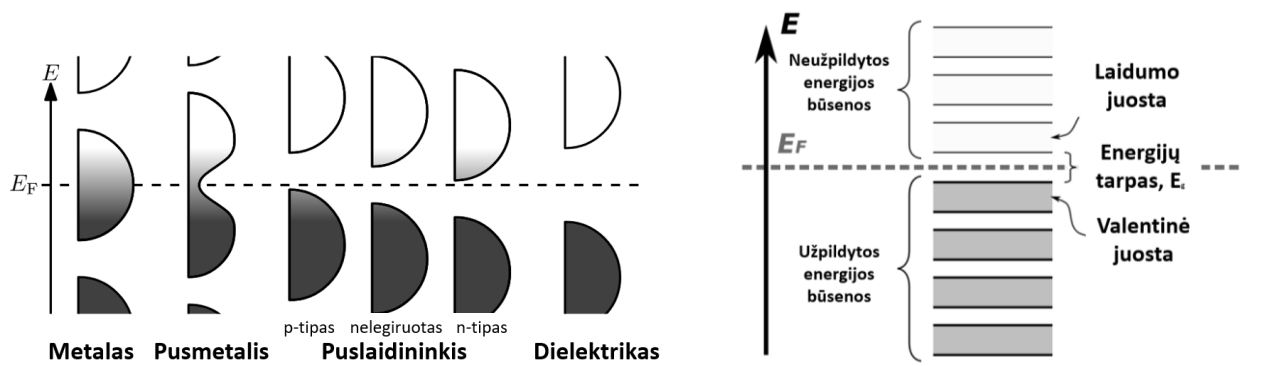
Nuo pirmojo puslaidininkinio lazerinio diodo pademonstruoto GaAs platformos pagrindu dar 1962 m. praėjus daugiau nei pusei amžiaus, LD tapo plačiausiai taikomais lazeriais pasaulyje [9]. Lazerių pramonė 2017 m. pasaulyje sukūrė produkcijos vertos 11 mlrd. JAV dolerių, kurios beveik pusę (45 %) sudarė puslaidininkiniai LD [10]. Šios technologijos demonstruoja stabilų 10 % produkcijos vertės kasmetinį augimą su pozityvia ateities perspektyva dėl plataus pritaikymo galimybių įvairiuose sektoriuose. Puslaidininkiniai lazeriai naudojami telekomunikacijose, optinėse laikmenose, vaizdinių įrašyme, spausdintuvuose, medžiagų apdirbime, kietakūnių lazerių kaupimui, medicininiams tikslams, pramoginiame apšvietime, barkodų skenavime, jutikliuose, mokslinių tyrimų metu ir kitur (išvardinta pagal reprezentuojamą pramonės dalies dydį). Lazeriniai diodai, pirmiausia realizuoti raudonoje-artimoje infraraudonoje (NIR) spektrinėje srityje palengva perdengė visą matomą spektrinį diapazoną nuo UV iki NIR ir dabar siekiama žengti toliau į IR sritį. Šiame skyriuje aptariama inovatyvių LD veika trumpųjų infraradonųjų bangų ruože (SWIR). Trumpai nagrinėjami pagrindiniai lazerinių diodų veikimo principai: spinduliuotės prigimtis ir mechanizmai, stiprinimo sąlygos, būdingi rezonatoriai ir tipinės struktūros. Toliau analizuojamos LD sistemos su išoriniu rezonatoriumi, leidžiančios pasiekti platų bangos ilgių derinimo diapazoną bei aukštą skenavimo dažnį ir pristatomos tokių sistemų novatoriškos taikymo kryptys.

1.1. Puslaidininkinių lazerių veikimo principai ir sandara

1.1.1. Sugertis, spontaninė ir priverstinė spinduliuotės puslaidininkiuose

Puslaidininkinės medžiagos užima tarpinę padėtį tarp laidžių ir dielektrinių medžiagų su išskirtinėmis emisijos savybėmis, nulemtomis darinio struktūros (stilizuota iliustracija pateikiama 1 pav. kairėje). Dujinėse medžiagose elektronų energijos lygmenys atskirti ir lokalizuoti, todėl generuojama emisija dėl elektrono tranzito iš aukštesnės sužadintos būsenos į žemesnę yra stipriai

spektriškai apibrėžta – panašėja į liniją. Priešinga situacija stebima kristalinėse struktūrose, kuriose sąveika tarp lygmenų yra ryškiai išreikšta – čia generuojama plataus spektro emisija dėl stipriai išplitusių ir delokalizuoatų energijos būsenų. Tačiau nesant sąveikai tarp atominių orbitalių realizuojamos siauros spektrinės linijos primenančios atominius elektronų šuolius (kietakūnių lazerių emisija). Puslaidininkinėse medžiagose atominių orbitalių sanklota lemia energijos lygmenų išplitimą, būsenos aprašomos kaip energijos juostos. Nelegiruotame nesužadintame puslaidininkyje žemiausia neužpildyta energijos būsenų juosta yra vadinama laidumo juosta, o aukščiausia užpildyta energijos juosta – valentine juosta (pavaizduota 1 pav. dešinėje). Energijų skirtumas tarp valentinės ir laidumo juostos vadinamas draustinės juostos tarpu (angl., *energy band gap*, E_g) ir yra vienas pagrindinių parametru aprašančių puslaidininkinės medžiagos elektrines ir optines savybes. Būdingos E_g vertės puslaidininkiuose varijuoja tarp 0,3 eV ir 3 eV [11]. Praktikoje taip pat naudojamas dydis yra Fermi lygmuo – tai hipotetinis elektronų energijos lygmuo apibrėžiamas Fermi-Dirako statistikoje, kuris, esant termodinaminei pusiausvyrai, turi 50 % tikimybę būti okupuotas elektrono. Šis lygmuo nebūtinai reprezentuoja realų energijos lygmenį, tačiau yra itin svarbus įvertinant elektrines puslaidininkio savybes.



1 pav. Schematiškas energijos juostų išsidėstymo palyginimas metale, pusmetalyje, puslaidininkyje ir dielektrike (kairėje). Puslaidininkinės medžiagos energijos būsenų diagrama (dešinėje). E_F – Fermi energijos lygmuo.

Laidumo juostos elektronas gali rekombinuoti su valentinės juostos kvazi-krūvininku skyje spinduliniu arba nespinduliniu būdu. Ši vyksmą išnagrinėti padeda energijos lygmenų išsidėstymo analizė k erdvėje. Puslaidininkio elektrono energijos laidumo (E_c) ir valentinės (E_v) juostų energijos priklausomybės nuo bangos skaičiaus k aprašomos kvadratinėmis lygtimis atsižvelgiant į impulso momento kvantavimą su Planko konstanta \hbar (pavaizduota 2 pav. kairėje):

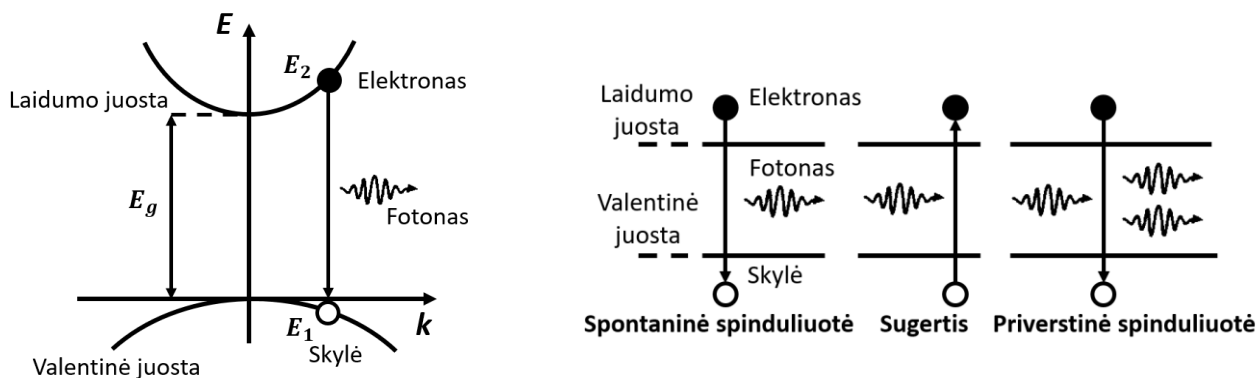
$$E_c = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e}, \quad E_v = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h}. \quad (1,2)$$

Kristalinės gardelės indukuojama sąveika įvertinama įvedant elektronų ir skylių efektines mases m_e ir m_h , atitinkamai. Valentinė juosta aprašoma neigiama parabole dėl teigiamo skylių krūvio.

Panagrinėkime 2 paveiksle pavaizduotą energijos juostų diagramą. Optinio sužadavimo ar spinduliavimo metu vyksta elektrono būsenos pasikeitimas statmena kryptimi ($k_1 = k_2$), nes išspinduliuojamo arba sugeriamo fotono impulso momentas yra nykstamai mažas palyginus su elektrono ar skylės impulsu. Sugeneruoto fotono energija yra lygi:

$$\hbar\omega = E_2 - E_1 \quad (3)$$

Termodinaminės pusiausvyros atveju krūvininkai lokalizuojasi mažiausios energijos būsenose, todėl emituojamų fotonų energija yra beveik lygi E_g . Puslaidininkinės medžiagos valentinės juostos maksimumas nebūtinai sutampa su laidumo juostos minimumu. Tokios medžiagos vadinamos netiesiatarpiais puslaidininkiais (Si, Ge, AlSb) ir yra itin retai pritaikomos optiniuose prietaisuose dėl neefektyvios fotonų generacijos pasireiškiančios poreikiu sugerti papildomą fononą, padedantį užtikrinti k vektoriaus tvermės dėsnį. Puslaidininkiniai netiesiatarpiai lazeriai įprastai nėra realizuojami. Krūvininko rekombinacija gali vykti ir nespinduliniu keliu. Dažniausiai tokiu atveju sužadinimas relaksuoja įvairiomis priemaišinėmis ar defektinėmis būsenomis, kai elektrono potencinė energija pavirsta šilumine energija. Nespindulinė rekombinacija yra vienas pagrindinių puslaidininkinių lazerių efektyvumo mažinimo mechanizmų (plačiau 1.2.2. skyriuje).



2 pav. Parabolinė energijos juostų diagrama atvaizduota k erdvėje tiesiatrapiame puslaidininkyje (kairėje). Adaptuota pagal [11]. Optiniai tarpjuostiniai šuoliai puslaidininkyje (dešinėje).

Išskiriamos trys pagrindinės optinių šuolių rūšys susijusios su tarpjuostiniu elektrono sužadimu arba relaksacija. Principinė tokių vyksmų schema vaizduojama 2 paveikslo dešinėje. Spontaninės emisijos vyksmas apibūdinamas elektrono ir skylės rekombinacija išspinduliuojant fotoną. Šis kvantinis reiškinys yra dažniausiai gamtoje sutinkama ne šiluminės prigimties emisija. Lazerių veika inicijuojama spontaninės emisijos. Šio proceso metu generuojami fotonai yra nekoherentiški –erdviškai ir laikiškai nekoreliuoti, fazė nekontroliuojama. Priešingos krypties optinis šuolis, kai fotonas yra sugeriamas ir elektronas yra sužadinas į aukštesnius energijos lygmenis vadinamas sugertimi arba priverstine sugertimi. Toks vyksmas yra atsakingas už įvairių objektų tiesioginę sąveiką su šviesa, matomoje srityje apibūdinamas žmogaus suvokimo nulemta spalvos

koncepcija. Puslaidininkinėse lazerinėse sistemose sugertis yra nepageidautinas procesas, mažinantis efektyvumą. Svarbiausias lazerio veiką apibūdinantis optinis šuolis – tai priverstinė spinduliuotė. Elektronų ir skylės poros rekombinacija inicijuojama kito draustinės juostos tarpo energiją atitinkančio fotono. Tokio vyksmo metu išspinduliuojami du koherentiniai fotonai – jų fazė, kryptis ir energija sutampa [11]. Pasitelkus priverstinę spinduliuotę galima pasiekti optinį stiprinimą, kuris apibūdina puslaidininkinio lazerinio diodo veiką.

1.1.2. Optinis stiprinimas puslaidininkyje

Optinis stiprinimas puslaidininkyje pasiekiamas užtikrinus sistemos veiką priverstinės spinduliuotės režimu ir įgyvendinus užpildos apgražos sąlygą. Puslaidininkiniai LD skiriasi nuo tradicinių kietakūnių lazerių tuo, kad kaupinimas realizuojamas elektriškai, o ne optiškai, kas leidžia žymiai padidinti šių prietaisų efektyvumą ir kartu žymiai palengvina reikalavimus taikymams. Užpildos apgraža puslaidininkiniame darinyje pasiekama injektuojant elektros srovę ir sužadinant elektronus iš valentinės į laidumo juostą. Tiesioginės krypties įtampa lema krūvininkų porų susidarymą ir rekombinaciją spinduliniu keliu. Elektronų išsidėstymą (W_C) puslaidininkio laidumo juostoje ir valentinės juostos užpildymą skylėmis (W_V) nusako Fermi-Dirako pasiskirstymai priklausantys nuo energijos E :

$$W_C = [1 + \exp\left(\frac{E - E_{FC}}{k_B T}\right)]^{-1} \quad \text{ir} \quad W_V = [1 + \exp\left(\frac{E - E_{FV}}{k_B T}\right)]^{-1}. \quad (4,5)$$

Lygtyse k_B simbolizuoja Bolcmano konstantą, T – absoliutinė temperatūra, E_{FC} ir E_{FV} – Fermi kvazi-lygmenų energija laidumo ir valentinei juostoms. Stiprinimas realizuojamas tik išorinių fotonų energijai viršijus E_g . Fermi lygmenų užpilda netiesiogiai priklauso nuo krūvininkų koncentracijos ir būsenų tankių:

$$N = N_C \frac{2}{\pi} \int_{E_C}^{\infty} Z_C(E) W_C(E) dE \quad \text{ir} \quad P = N_V \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{E_V} Z_V(E) [1 - W_V(E)] dE \quad (6,7)$$

N_C ir N_V žymi efektingą krūvininkų koncentraciją laidumo ir valentinėje juostose, Z_C ir Z_V – būsenų tankiai laidumo ir valentinėje juostose.

Puslaidininkyje darinyje konkuruoja priverstinė sugertis ir priverstinė spinduliuotė. Esant mažoms injekcinėms srovėms ir silpnai juostų užpildai dominuoja sugertis. Tuo tarpu, aukštų injekcinių srovių atveju, laidumo ir valentinės juostos užsipildo (laidumo juosta – elektronais, o valentinė – skylėmis), realizuojama užpildos apgraža ir vyksta priverstinė spinduliuotė. Užpildos apgražos vyksmo sąlyga aprašoma Bernard-Duraffourg nelygybe:

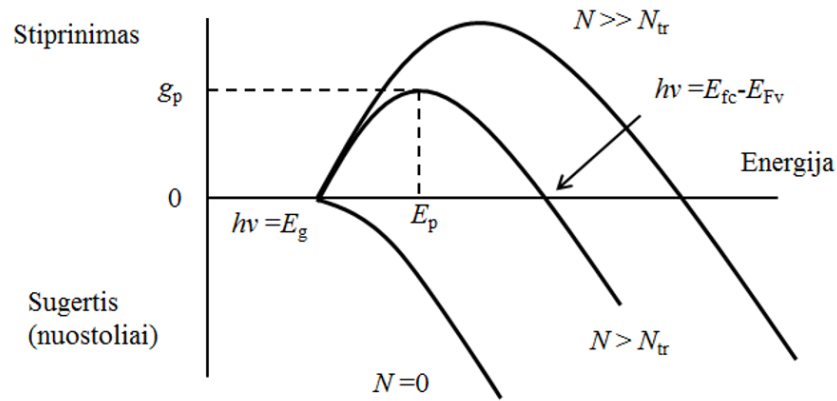
$$E_{FC} - E_{FV} \geq h\nu = E_2 - E_1 \geq E_g, \quad (8)$$

kuri teigia, kad Fermi kvazi-lygmenų energijų išsiskyrimas turi viršyti draustinės juostos tarpą E_g . Fermi kvazi-lygmenų išsiskyrimą lemia injektuojami krūvininkai. Optinio stiprinimo vertė susilygina

su sugerties verte injektavus ribinį krūvininkų tankį N_{tr} . Šiuo atveju Fermi kvazi-lygmenų energijos skirtumas yra lygus fotono energijai: $E_{Fc} - E_{Fv} = h\nu$. Optiniam stiprinimui būdingas spektrinis išplitimas dėl Fermi-Dirako skirstinio ir būsenų tankio priklausomybės nuo energijos (vaizduojama 3 pav.). Stiprinimo diapazonas tęsiasi nuo E_g iki $E_{Fc} - E_{Fv}$, su stiprinimo smaile ties E_p energija įgyjančia g_p vertę. Krūvininkų tankiui artėjant prie N_{tr} , maksimali stiprinimo vertė g_p aproksimuojama tiesine krūvininkų tankio priklausomybės funkcija [11]:

$$g_p(N) = a(N - N_{tr}), \quad (9)$$

kur a – stiprinimo koeficientas priklausantis nuo krūvininkų tankio.



3 pav. Optinio stiprinimo arba nuostolių kreivės esant trims skirtingoms krūvininkų koncentracijoms.

Injekcinę LD srovę apibūdina krūvininkų rekombinacijos mechanizmai. Srovei apibūdinti naudojama lygtis:

$$I = eR(N)V \quad (10)$$

kur e – elektrono krūvis, R žymi rekombinacijos spartą, V – aktyviosios srities tūrį. Puslaidininkiuose sistemos rekombinacijos sparta empiriškai aproksimuojama kubiniu polinomu priklausančiu nuo krūvininkų koncentracijos N (su prielaida, kad injektuojama vienodai elektronų ir skylių):

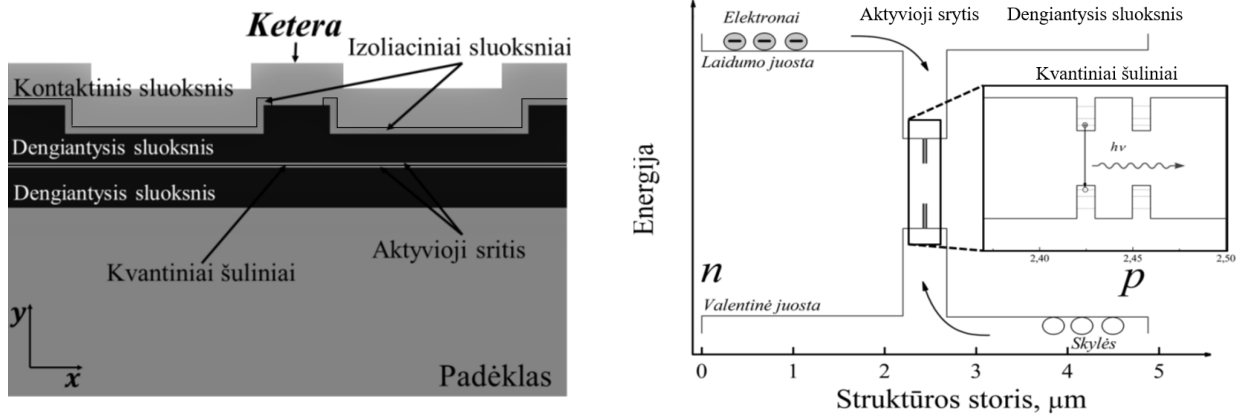
$$R(N) = AN + BN^2 + CN^3 \quad (11)$$

Pirmasis narys atsakingas už tiesinę nespindulinę rekombinaciją. Koeficientas A vadinamas Šoklio-Rydo-Holo proceso koeficientu, kurio metu elektronas rekombinuoja giliose (energijos požiūriu) defektiniuose lygmenyse atsiradusiais dėl gardelės netobulumo arba priemaišiniuose lygmenyse. Antrasis (11) lygties narys su spinduliniu koeficientu B reprezentuoja spontaninę emisiją ir kvadratiškai priklauso nuo krūvininkų tankio, nes spindulinės rekombinacijos metu dalyvauja du krūvininkai. Dėl kvadratinės priklausomybės esant aukštomis injekcinės srovės vertėms spindulinė rekombinacija ima dominuoti. Injekcinei srovei viršijus slenkstinę vertę ir išaugus fotonų tankiui, pastarieji paskatina sužadavimo relaksaciją spinduliniu būdu – atsiranda priverstinės spinduliuotės dedamoji tiesiškai priklausanti nuo krūvininkų koncentracijos ir aprašoma priverstinės emisijos sparta.

Dar padidėjus LD srovei emisijos efektyvumas ima sparčiai mažėti dėl padidėjusios kubinės (trijų krūvininkų sąveikos) rekombinacijos vadinamos Ožė rekombinacija. Šio vyksmo metu energija yra perduodama trečiajam krūvininkui, kuris yra sužadinas į aukštesnį energijos lygmenį, nespinduliniu būdu. Dėl Ožė rekombinacijos sistema ima prarasti energiją šilumos pavidalu. Šis mechanizmas yra itin svarbus ilgiabangių puslaidininkinių lazerių veiką ribojantis reiškinys.

1.1.3. Būdingos lazerinių diodų struktūros

Lazerinių diodų veikimas pagrįstas srovės injektavimu į aktyviąją sritį, kurioje efektyviai realizuojama spindulinė rekombinacija. LD struktūra suformuojama epitaksinio auginimo metu ant padėklo y kryptimi (4 pav. kairėje). Padėklo kristalinės struktūros gardelės konstanta turi būti artima epitaksinio dengiamojo sluoksnio gardelės konstantai, taip sumažinant įtemptis ir defektų susidarymo tikimybę. Ant padėklo formuojamas dengiamasis sluoksnis, kuris atlieka dvi funkcijas. Pirmiausia šis sluoksnis supa aktyvųjį LD sluoksnį ir padeda lokalizuoti krūvininkus: laidumo juostoje sukuriama energijos barjeras elektronams, o valentinėje juostoje – skylėms. Kadangi dengiamajam sluoksniui būdingas didesnis draustinis energijų tarpas šis sluoksnis taip pat palengvina krūvininkų injekciją iš kontaktų. Kita svarbi dengiamojo sluoksnio funkcija – šviesos erdvinė lokalizacija. Kadangi dariniai su didesniu E_g įprastai pasižymi mažesniu lūžio rodikliu, o aktyviajam sluoksniui būdinga mažesnė E_g vertė (taigi ir didesnis lūžio rodiklis). Vadinasi, dengiamasis sluoksnis veikia kaip bangolaidis išlaikydamas šviesą aktyviojoje srityje ir lokalizuodamas pluoštą y kryptimi. Siekiant pagerinti minėtąsias dengiamojo sluoksnio savybes pasirenkamas gradientinis E_g kitimas, tačiau tokių struktūrų gamyba yra žymiai sudėtingesnė. Pagrindinis LD veikimą nusakantis sluoksnis yra aktyvioji sritis, kurioje vyksta spindulinė rekombinacija. Dėl mažo draustinio energijų tarpo, krūviai efektyviai lokalizuojami šiame sluoksnyje. Taip pasiekiamas aukštas krūvininkų tankis, reikalingas užpildos apgrąžos realizavimui ($> 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) [11].



4 pav. Lazerinio diodo statmenasis pjūvis epitaksijos kryptimi (kairėje). Energijos juostų diagrama elektronams ir skylėms pavaizduota daugybinio kvantinio darinio atveju (dešinėje).

Įprastos puslaidininkinės heterosandūros aktyviajame LD sluoksnyje pakeičiamos žymiai našesnėmis kvantinėmis struktūromis. Pagrindinis kvantinio šulinio skirtumas nuo tradicinės heterosandūros – nanometrinių dydžių eilės sluoksnių storiai (4 pav. dešinėje). Aktyviajame sluoksnyje suformuojami labai ploni (< 20 nm) mažesnės draustinės juostos tarpo sluoksniai (dažniausiai keletas), kuriuose vyksta kvantiniai šuoliai. Energijos lygmenys tokioje struktūroje yra kvantuoti ir tiksliai apibrėžti, būsenų tankis praranda kvadratinę energijos priklausomybę, būdinga tūriniam kristalams. Kvantinio šulinio atveju būsenų tankio funkcija aprašoma laiptuota priklausomybe [12]. Krūvininkai injektuoti į tokią struktūrą yra efektyviai lokalizuojami: elektronai laidumo juostos šulinio žemiausiame kvantiniame lygmenyje, o skylės – valentinės juostos kvantiniame šulinyje. Svarbu paminėti tai, kad kvantinio šulinio energijos lygmenų padėtis priklauso nuo šulinio pločio. Tokia priklausomybė leidžia valdyti emituojamo fotono bangos ilgį, parenkant kvantinio šulinio plotį. Derinant su auginamo kvantinio darinio kompozicija, galima realizuoti tikslų lazerinio diodo bangos ilgio kontroliavimą. Vis dėlto, kvantiniuose šuliniuose pasireiškia kvantinės sąspaudos Štarko efektas (angl., *Quantum-confined Stark effect*), mažinantis spindulinės rekombinacijos efektyvumą. Išoriniame elektriniame lauke (prijungus injekcinę srovę) kvantinių šulinių dugnai išsikreipia ir elektronų bei skylių banginių būsenų sanklota sumažėja [13]. Didėjant kvantinio šulinio matmenims šio efekto reikšmė auga, ribodama efektyvius kvantinio darinio matmenis.

Lazerinio diodo struktūra užbaigiama pasitelkiant litografijos metodą, kuriuo suformuojamas viršutinis kontaktas. Fotolitografijos būdu išėsdinama ketera, kuri funkcionuoja kaip krūvininkų injekcinis kanalas į aktyviąją sritį. Keteros šonai padengiami izoliaciniu sluoksniu, užtikrinančiu efektyvų srovės lokalizavimą ties ketera. Tokiu būdu realizuojama krūvininkų srauto valdymas x kryptimi. Krūvininkų lokalizacija x ir y kryptimis suformuoja puslaidininkinio lazerio skersinę modą. Tuo tarpu, z kryptimi krūvininkai nėra apribojami. LD rezonatorius suformuojamas atlikus kristalo skėlimą z krypties atžvilgiu. Skylimas vyksta per kristalines gardelės plokštumą, todėl nuskeltas

paviršius yra itin lygus ir veikia kaip rezonatoriaus veidrodis. Įprastai tokių veidrodžių atspindžio koeficientai siekia apie 30 % priklausomai nuo puslaidininkio lūžio rodiklio. Siekiant efektyvios LD veikos tokių atspindžio koeficientų vertės netenkina, todėl vienas veidrodis dengiamas aukšto atspindžio koeficiento (angl., high-reflectivity, HR) danga, o ant išėjimo veidrodžio formuojama skaidrinanti danga (angl., anti-reflective, AR). Lazerinių diodų rezonatoriaus ilgis įprastai varijuoja tarp 0,3 mm ir 2 mm [11].

1.1.4. Fabry – Pérot rezonatorius

Lazerinio diodo grįžtamasis ryšys sukuriamas pasitelkiant Fabry – Pérot rezonatorių. Tai pačios paprasčiausios konfigūracijos rezonatorius sudarytas iš stiprinimo terpės (LD atveju tai aktyviosios srities darinys su būdingu efektyviuoju lūžio rodikliu n_{eff} apie 3,5) bei dviejų statmenai pozicijuotų veidrodžių su skirtingais atspindžio koeficientais R_1 ir R_2 . Stiprinimo terpė atsakinga už priverstinės spinduliuotės generavimą, o veidrodžiai sukuria teigiamą grįžtamąjį ryšį, būtina procesui palaikyti. Svarbi funkcija tenka rezonatoriaus ilgiui L . Šis parametras atlieka moduliaciją (pavaizduota 5 pav. kairėje) ir kartu nulemia krūvininkų injekcijos tankį apribodamas fizinį stiprinimo terpės dydį.

Optinis stiprinimas rezonatoriuje realizuojamas įveikus nuostolius. LD rezonatoriaus nuostoliai α apibrėžiami kaip vidinių stiprinimo terpės nuostolių α_i ir veidrodžių nuostolių α_m suma:

$$\alpha = \alpha_i + \alpha_m \quad (12)$$

Vidinius nuostolius sudaro laisvųjų krūvininkų sugertis puslaidininkyje ir kristalinės struktūros nehomogeniškumai. Šie nuostoliai išauga padidinus priemaišų koncentraciją arba defektų kiekį. Vis dėlto, dominuojantys nuostoliai patiriami nuo veidrodinių paviršių, nes sugeneruota spinduliuotė turi būti išvesta iš rezonatoriaus. Veidrodžių nuostoliai nusakomi lygtimi:

$$\alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (13)$$

kur L žymi rezonatoriaus ilgį. Taigi apibrėžus nuostolius, stiprinimas g rezonatoriuje užrašomas lygtimi:

$$g = \Gamma_{am} - \alpha_i - \alpha_m, \quad (14)$$

čia Γ_{am} – aktyviosios srities sukuriamas stiprinimas. Šis dydis priklauso nuo pasirinktos puslaidininkinės medžiagos ir aktyviosios srities struktūros. Pagrindinė modos stiprinimo sąlyga: optinio lauko amplitudė ir fazė po vieno stiprinimo ciklo (praėjusi pro stiprinimo terpę, atsispindėjusi nuo veidrodžio ir dar kartą praėjusi pro stiprinimo terpę) turi sutapti. Taigi slenkstinis stiprinimas g_{th} nusakomas formule:

$$g_{th} = \alpha_i + \alpha_m. \quad (15)$$

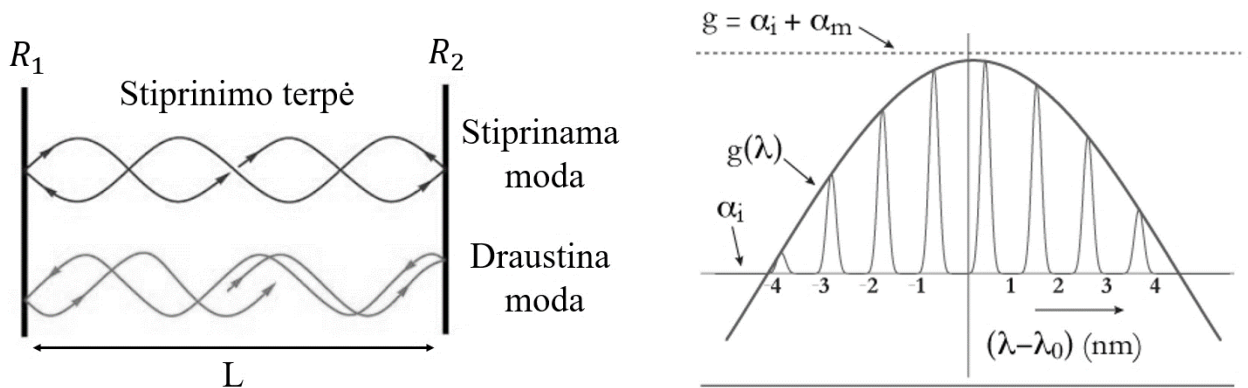
Ši lygtis atspindi amplitudės pastovumo sąlygą. Tuo tarpu, fazės pastovumas pasiekimas, kai po vieno ciklo fazės pokytis yra sveikas 2π kartotinis. Tokiu būdu galime apibrėžti išilginių modų λ_m skirstinį:

$$\lambda_m = \frac{2n_{eff}L}{m}, \quad (16)$$

kur m žymi modų skaičių. Kaip matyti, stiprinamų modų skaičius priklauso nuo efektyviojo lūžo rodiklio, rezonatoriaus ilgio ir generuojamos emisijos bangos ilgio. Didelis rezonatoriaus ilgio ir spinduliuotės bangos ilgio santykis lemia labai didelį generuojamų modų skaičių. Įprastame GaSb lazeriniame diode su 1 mm ilgio rezonatoriumi leistinų modų skaičius siekia net apie 3000. Viena nuo kitos modos atskiriamos tarpmodiniu atstumu $\Delta\lambda_m$:

$$\Delta\lambda_m = \frac{\lambda_m^2}{2n_{eff}L}. \quad (17)$$

Tarpmodinis atstumas ir stiprinimo gaubtinės plotis nusako stiprinamų modų kiekį. Efektyviausias stiprinimas pasireiškia modai, kuri yra lokalizuota arčiausiai stiprinimo kreivės centro (pavaizduota 5 pav. dešinėje). Vis dėlto, esant aukštoms injekcinėms srovėms (ypač aktualu didelės galios LD) daug modų patiria stiprinimą, todėl emituojamas pluoštas spektriškai išplinta.

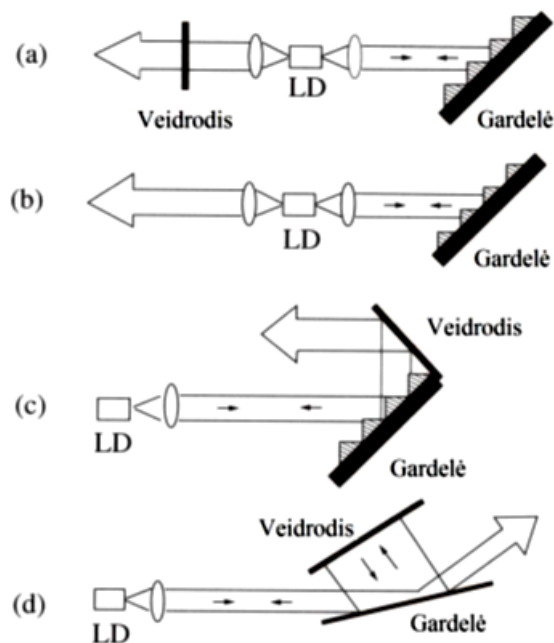


5 pav. Kairėje pavaizduota Fabry – Pérot rezonatoriaus supaprastinta schema, kurioje grafiniu būdu pateikiama stiprinamos modos sąlyga ir draustina moda (plačiau tekste). R_1 ir R_2 žymi veidrodžių atspindžio koeficientus. Dešinėje vaizduojamas išilginių Fabry – Pérot modų spektras ir optinio stiprinimo gaubtinė (simboliai paaiškinti tekste).

Fabry – Pérot rezonatorius nėra selektyvus išilginėms modoms ir veikia daugiamodžiu režimu. Įvairiems taikymams reikalaujantiems precizinio pluošto valdymo ir aukštos spektrinės skyros tokia veika nėra optimali. Norint realizuoti LD vienmodę veiką dažniausiai pasirenkama išorinio rezonatoriaus konfigūracija.

1.2. Derinamo bangos ilgio lazeriai su išoriniu rezonatoriumi

Lazerinių sistemų su išoriniu rezonatoriumi (ECDL) dizainas gali būti labai įvairus, tačiau praktinį sistemos pasirinkimą apriboja grįžtamo ryšio realizavimas lemiantis spinduliuotės išėjimo kryptį, spektrinį atrankumą, efektyvumą ir kitus parametrus. Sistemų konfigūracijos dažiausiai skiriasi ne naudojamais elementais, tačiau jų išdėstymo dizainu (plačiau apie naudojamus komponentus 1.2.1 skyriuje). Grįžtamo ryšio valdymas pasiekiamas parenkant rezonatoriaus optinių dangų atspindžio koeficientus. Įprastai spinduliuotė iš tokios sistemos išvedama per mažo atspindžio koeficiento optinį paviršių. Tam naudojamos skaidrinančios AR dielektrinės dangos, atspindinčios iki 5 % spinduliuotės. Inovatyviuose taikymuose pasirenkamas lenktas rezonatoriaus mezos dizainas, leidžiantis užtikrinti nykstamai mažą (10^{-5}) rezonatoriaus veidrodžio atspindžio koeficientą. Kitas rezonatoriaus veidrodis padengiamas didelio atspindžio koeficiento HR danga užtikrinančia efektyvų grįžtamąjį ryšį.



6 pav. Lazerinės sistemos, gebančios užtikrinti optinį grįžtamąjį ryšį: a) dvipusio išorinio rezonatoriaus dizainas su išoriniu veidrodžiu; b) dvipusio išorinio rezonatoriaus dizainas su vidiniu veidrodžiu; c) vienusio išorinio rezonatoriaus dizainas Littrow konfigūracijoje; d) vienusio išorinio rezonatoriaus dizainas Littman – Metcalf konfigūracijoje [14].

Aptarkime keletą skirtingų lazerinių diodų sistemų su dvipusio išorinio rezonatoriaus dizainu. Dvipusis rezonatorius sukuriamas leidžiant optinei spinduliuotei ištrūkti iš aktyviosios lazerinio diodo terpės per abi puses, kaip pavaizduota 6 paveikslėlyje [14]. 6 a) vaizduojamas dvipusis išorinis rezonatorius su lazeriniu diodu, kurio abu veidrodžiai padengti AR dangomis. Emisija iš vienos pusės yra kolimuojama ir nukreipiama į gardelę, kuri atlieka bangos ilgio parinkimo funkciją. Kitoje

rezonatoriaus pusėje lokalizuojamas veidrodis, kurio atspindžio koeficientas leidžia valdyti grįžtamojo ryšio efektyvumą ir užtikrina spinduliuotės išvedimą. 6 b) paveiksle pavaizduotas atvejis, kuriame išorinis veidrodis pašalinamas, o jį pakeičia ant LD struktūros užgarinama dielektrinė AR danga, leidžianti valdyti grįžtamojo ryšio efektyvumą. Tokių dvipusių išorinių rezonatorių privalumai yra vidinių rezonansų susidarymo apribojimas ir spinduliuotės pluošto pastovumas bangos ilgio derinimo metu. Kita vertus, toks dizainas lemia sudėtingą sistemos suvedimą ir optimizavimą dėl poreikio išvesti spinduliuotę per abu rezonatoriaus galus. Taip pat, sunku išvengti nuostolių atsirandančių dėl papildomų optinių elementų.

Panagrinėkime vienus išorinio rezonatoriaus konfigūracijų ypatybes. 6 c) paveikslėlyje vaizduojamas itin plačiai pritaikomas Littrow dizainas [15]. Šioje konfigūracijoje ant vienos LD pusės užgarinama HR danga, kuri užtikrina emisijos eigą tik viena kryptimi. Bangos ilgio valdymas analogiškai atliekamas gardelės pasukimu, tačiau pluoštas išvedamas per išorinį veidrodį. Tokios sistemos pagrindiniai privalumai yra paprastas suvedimas ir lygiavimas, nes spinduliuojama tik viena kryptimi, užtenka padengti tik vieną veidrodį AR danga, stabili veika, komerciškai patrauklus dizainas. Vis dėlto, tokia sistema turi ir trūkumų. Net ir aukštos kokybės AR danga neužtikrina vidinių rezonansų pašalinimo. Taip pat, bangos ilgio skenavimo metu lazerinio pluošto padėtis kinta erdvėje. Tačiau šie trūkumai nusveriami Littrow konfigūracijos privalumų.

Vienas sudėtingiausių tačiau kartu ir išskirtines spektrines savybes demonstruojančių vienus išorinio rezonatoriaus konfigūracijos pavyzdžių yra Littman – Metcalf dizainas [16]. Tai yra trijų veidrodžių rezonatorius, kurį sudaro HR danga padengtas galinis LD veidrodis, AR danga padengtas priekinis LD veidrodis ir išorinis veidrodis. Lazerinė spinduliuotė, sukolimuota lęšiu, suvedama į gardelę, kurios pirmos eilės difrakcijos maksimumas nukreipiamas į išorinį veidrodį. Spinduliuotė nuo šio veidrodžio grąžinama atgal per gardelę į LD aktyviąją terpę taip realizuojant grįžtamąjį ryšį. Tuo tarpu, nulinės eilės difrakcinis maksimumas yra išėjimo spindulys. Toks dvigubas lazerinio pluošto praėjimas per gardelę lemia stipriai išaugusią spektrinę skyra ir aukštą grįžtamojo ryšio efektyvumą, kuris valdomas parenkant difrakcinės gardelės režio kampą (plačiau 1.2.1. skyriuje). Littman – Metcalf konfigūracijoje bangos ilgio derinimas, skirtingai nei kitose minėtose sistemose, atliekamas veidrodžio pasukimu, o gardelės padėtis lieka pastovi. Tai lemia spinduliuotės krypties pastovumą bangos ilgio skenavimo metu. Pakeitus įprastą veidrodį su mikrometrinio tikslumo žingsniniu motoru į mikro-elektro-mechaninį (MEMS) veidrodį galima užtikrinti itin aukštą (šimtų Hz) viso spektrinio diapazono skenavimo dažnį. Vis dėlto, pagrindinis šios sistemos trūkumas palyginus su Littrow konfigūracija yra mažesnė spinduliuotės galia, dėl papildomo atspindžio nuo veidrodžio, kuris difragavęs nuo gardelės nėra grąžinamas į rezonatorių ir nedalyvauja stiprinimo procese.

1.2.1. Lazerinės sistemos su išoriniu rezonatoriumi komponentai

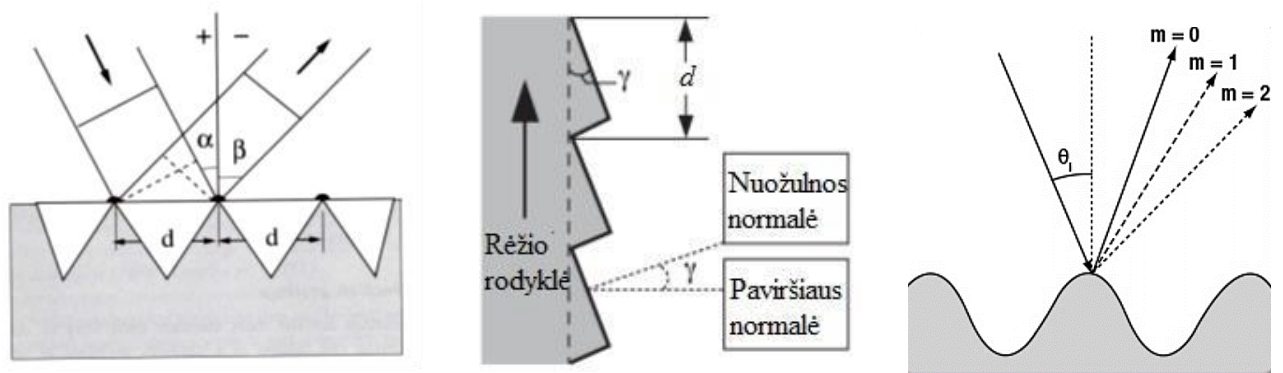
Vieni pagrindinių efektyvios ir stabilios ECDL sistemos elementų yra elektriniai komponentai, tokie kaip srovės ir temperatūros valdikliai. Tiesa, kad LD gali veikti injektuojant srovę iš paprastos AA tipo baterijos su srovę apribojančiu rezistoriumi. Tačiau norint užtikrinti efektyvią ir ilgalaikę veiką reikia išlaikyti pastovią srovę (o ne įtampą, nes voltamperinė priklausomybė pasižymi dideliu statumu) be elektrinių šuolių, kurie galėtų pažeisti lazerinį diodą. Komerciškai prieinami srovės šaltiniai pasižymi mažu srovės triukšmo lygiu ir turi apsaugas nuo srovės perviršių. Taip pat, būtina stabilizuoti LD temperatūrą. Nuo temperatūros priklauso ne vien LD emisijos spektrinis skirstinys, bet ir nevaldant šilumos nuvedimo, aktyviojo sluoksnio varža žymiai sumažėja ir LD yra pažeidžiamas [17]. Kad taip neatsitiktų, naudojami termoelektriniai temperatūros valdikliai. Vienas iš komponentų yra Peltje elementas, kuris atlieka temperatūros palaikymo funkciją. Tai yra dviejų skirtingų laidininkų sandūra, kurioje, priklausomai nuo srovės tekėjimo krypties, vienas laidininkas šyla, o kitas šąla. Pasitelkiant elektroninį valdymą su grįžtamoju ryšiu (PID valdiklis) pasiekiamas preciziškas temperatūros stabilizavimas. Kitas temperatūros valdiklio komponentas registruoja LD išskiriamą šilumą. Šiuo tikslu dažniausiai pasirenkami termistoriai – šilumai jautrūs rezistoriai su teigiamu arba neigiamu varžos priklausomybės nuo temperatūros koeficientu.

Realizavus efektyvią LD veiką, kitas žingsnis - kolimuoti ir valdyti lazerinio pluošto pavidalą. LD matmenys siekia šimtus mikrometrų, su keleto mikrometrų aktyviosios srities mezomis. Dėl itin mažų matmenų pasireiškianti difrakcija lemia labai didelę pluošto skėstį – viena ašimi gali siekti net 90°. Todėl kolimuojantys lęšiai pasižymi aukšta skaitine apertūra ir trumpu židinio nuotoliu [14]. Įprasti sferiniai lęšiai nėra tinkami, nes LD emisijai būdingas elipsės formos erdvinis skirstinys. Taip nutinka dėl to, kad epitaksinio auginimo kryptimi aktyviosios srities matmenys yra žymiai labiau apriboti nei statmeną kryptimi. Norint užtikrinti tinkamą kolimaciją, fokusavimą ir bangos fronto korekciją, naudojami difrakcijos apriboti cilindriniai lęšiai ar lęšių sistemos. Pasitelkus cilindrinį lęšių sistemas galima pasiekti minimalią aberacijų įtaką, spinduliuotės sklaidą ir kartu kompensuoti natūraliai atsirandantį astigmatizmą. Pastarasis nurodo atstumą tarp stipriai difraguojančios pluošto ašies (vadinamos greitąja ašimi) ir silpnai difraguojančios ašies (lėtosios ašies) išeities taškų. Paprastai LD būdingas astigmatizmas yra mikronų eilės dydis, todėl dažniausiai pasirenkami asferiniai lęšiai sukuria kolimuotą elipsės pavidalo pluošto skirstinį. Vis dėlto, realizuojant didelės galios LD su plačiomis aktyviosios srities mezomis astigmatizmas stipriai išauga ir būtina naudoti cilindrinį lęšių sistemą, kuri kompensuoja abiejų ašių divergenciją individualiai. Pluošto kryptis SWIR diapazone veikiančiose sistemose valdoma auksu padengtais (dažnai su papildomomis apsauginėmis dangomis) veidrodžiais, tačiau galima naudoti ir sidabrinis ar aliuminius veidrodžius su nedideliu efektyvumu praradimu (atspindžio koeficientas > 95 %).

Bangos ilgio derinimas plačiame spektriniame diapazone yra išskirtinis ECDL bruožas įgyvendinamas panaudojant difrakcinę gardelę. Ši periodinė struktūra sukuria interferencinį lazerinio pluošto skirstinį, išskirdama skirtingų bangos ilgių spektrus erdviškai. Difrakcinė gardelė sudaroma iš periodinių storio variacijų nekintančio lūžio rodiklio terpėje (paviršinė gardelė) arba periodinio lūžio rodiklio kitimo pastovaus storio medžiagoje (tūrinė gardelė). Konstruktyvi interferencija gardelėje realizuojama, kai dviejų vienodo bangos ilgio spindulių eigos skirtumas yra sveikas to bangos ilgio kartotinis m [18]. Difrakcijos sąlyga aprašoma lygtimi:

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (18)$$

kur m – difrakcijos eilė, λ – spindulio bangos ilgis, d – gardelės periodas, α – kritimo kampas, β – atspindžio kampas. Difrakcinės gardelės geometrija vaizduojama 7 paveikslėlyje. ECDL sistemose dažniausiai pasirenkamos kampu įrėžtos paviršinės difrakcinės gardelės. Pagrindinis tokių gardelių privalumas – keičiant įrėžio kampą γ galima parinkti maksimalų difrakcijos efektyvumą tam tikroje difrakcinėje eilėje, nes atspindžio geometrija tokioje gardelėje apibrėžiama ne paviršiaus normalės atžvilgiu, o įrėžio kampo atžvilgiu. Taip valdomas optinės galios kiekis difragavusiame spindulyje palyginus su kritusia optine galia. Littrow konfigūracijoje svarbu užtikrinti maksimalią optinę galią nulinėje difrakcinėje eilėje, kuri atsakinga už lazerinę emisiją. Tuo tarpu, Littman – Metcalf konfigūracijoje pirmosios difrakcinės eilės spinduliuotė turi sudaryti apie 10 % visos spinduliuotės, kad būtų sukuriamas efektyvus grįžtamasis ryšys rezonatoriuje. Neseniai išskirtinio dėmesio ECDL konfigūracijoje (ypač Littman – Metcalf) susilaukė tūrinės difrakcinės gardelės atmaina – holografinė difrakcinė gardelė. Interferencinė struktūra užrašoma dviejų lazerinių spindulių suvedimu į tūrinį fotorezisto sluoksnį. Valdoma ekspozicija lemia ne staigių įrėžių, o sinuso pavidalo lūžio rodiklio moduliacijos užrašymą. Toks moduliacijos tolydumas stipriai sumažina pluošto sklaidymą, sukeltą struktūros netobulumo. Taip pat, lazerinis apdirbimas leidžia pasiekti aukštas įrėžių vertes (3600 mm^{-1}). Vis dėlto, sudėtinga sukurti kampu įrėžtą holografinę difrakcinę gardelę ir difrakcijos efektyvumas (pirmojo interferencinio maksimumo intensyvumas palyginus su veidrodiniu atspindžiu) yra mažesnis palyginus su įprastomis paviršinėmis difrakcinėmis gardelėmis [19]. Nors esant sąlygai, kad atstumas tarp įrėžių yra artimas ar lygus krintančios spinduliuotės bangos ilgiui, pasiekiamas palyginamas ar net aukštesnis difrakcijos efektyvumas nei kampu įrėžtose difrakcinėse gardelėse. Būtent holografinė difrakcinė gardelė naudojama šiame darbe realizuojant Littman – Metcalf išorinio rezonatoriaus konfigūraciją.



7 pav. Paviršinės difrakcinės gardelės schema (kairėje) su pagrindiniais difrakciją apibūdinančiais dydžiais, kampu įrėžtos gardelės schema su pavaizduota rėžio kryptimi bei rėžio kampu γ (viduryje) ir holografinės difrakcinės gardelės schema (dešinėje) [18].

Littman – Metcalf konfigūracijoje svarbus vaidmuo tenka bangos ilgio atranką atliekančiam veidrodžiui. Difrakcinės gardelės spektriškai išskleisto pluošto viena spektrinė dedamoji yra gražinama veidrodžiu atgal į rezonatorių. Dėl šios priežasties būtina užtikrinti stabilų ir gerai atsikartojantį veidrodžio poslinkį. Tokį reikalavimą efektyviai įgyvendina mikrometrinio tikslumo žingsninis variklis, prie kurio pritvirtinamas veidrodis. Realizuojama stabili veika tik itin žemame skenavimo dažnių diapazone (iki 0,1 Hz). Didėjant veidrodžio poslinkio greičiui nekompensuoja ma judėjimo inercija ir susiduriama su eksperimento atkartojamumo problemomis. Inovatyvus pasirinkimas norint pasiekti efektyvią aukštadažnę veiką su itin geru atkartojamumu ir stabilumu yra mikro-lektro-mechaniniai veidrodžiai. Šie prietaisai įprastai veikia dėl Lorencio jėgos atsiradimo magnetiniame lauke esančiame laidinike tekant elektros srovei. Minėtoji jėga lemia precizinį veidrodžio pasukimą apie fiksuotą ašį. Tokių prietaisų pritaikymas telekomunikacijose, lazerinių spindulių valdyme, sensoriuose, spektrometrijoje, vaizdų atkūrimo ir kt. įgauna vis didesnę pagreitį, nulemtą išstobulėjusių mažų matmenų objektų apdirbimo technologijų [20]. Tokie veidrodžiai, tikima, kad gali būti efektyviai pritaikomi optiniuose jungikliuose šviesolaidiniame internete ar net optiniuose kompiuteriuose [21]. Littman – Metcalf konfigūracijoje panaudojamas MEMS veidrodis leidžia pasiekti net 200 Hz viso spektrinio diapazono skenavimo dažnį, kas žymiai palengvina gyvųjų organizmų tyrimo galimybes *in Vivo*. Aukštas spektroskopinio prietaiso veikos dažnis užtikrina homogenišką emisijos sklaidos terpę tiek spektrinio ruožo pradžioje, tiek ir pabaigoje dėl sąlyginai lėtai vykstančių gyvybinių procesų (apie 2 Hz). Taip pat, dėl itin mažos masės ir precizinio apdirbimo (paviršiaus mikro-apdirbimas, litografijos metodai, elektronusodinimas ir kt.) MEMS veidrodis nepatiria susidėvėjimo (veika siekia 10^{12} ciklų) ir pastebimų veikos pakitimų. Vis dėlto, esant tokios sistemos gedimams juos pašalinti praktiškai neįmanoma nepakeičiant viso MEMS bloko.

1.2.2. Littrow konfigūracijos geometrija

Vienas svarbiausių tikslų norint užtikrinti derinamo bangos ilgio lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi stabilią veiką – realizuoti platų derinimą be modų šuolių (angl., *mode hopping*). Tokį darbo režimą nesunku pasiekti Littrow konfigūracijoje. Pagrindinė sąlyga – vienu metu valdyti bangos ilgį parenkančios gardelės pasukimo kampą LD ašies atžvilgiu ir išorinio rezonatoriaus ilgį. Paprasčiausias būdas realizuoti minėtas sąlygas yra Littrow gardelės pasukimas aplink tam tikrą ašį [22]. Pirmiesiems tokio tipo ECDL buvo būdingas tik 15 nm bangos ilgio derinamumas [15]. Vis dėlto, vienas naujausių SWIR diapazone spinduliuojančių LD pademonstruotas ties 2250 nm centriniu bangos ilgiu pasižymi išpūdingu 170 nm derinimo ruožu [23].

Norint pasiekti tolydų ECDL sistemos derinimą neužtenka keisti gardelės pasukimo kampą ar išorinio rezonatoriaus ilgį. Apsiribojant vien tik gardelės pasukimu bangos ilgis keičiamas netolygiai. Lazerinėje terpėje generuojamos stovinčios bangos (lazerinės modos), kurias gardelė atrenka kaip nuostolius indukuojantis filtras. Bangos ilgiai parenkami tik peršokant nuo vienos modos iki kitos rezonatoriaus modos. Tokiu būdu pasiekiamas laiptiškas bangos ilgio valdymas. Tuo tarpu, vien tik rezonatoriaus ilgio kitimas lemia lazerio modų spektrinės pozicijos poslinkį. Trumpame derinimo diapazone lazerio bangos ilgis sutampa su lazerinių modų pokyčiu, tačiau pasiekus atvejį, kai gretima moda geriau sutampa su gardelės filtro funkcija, lazerio spinduliuojama moda pasikeičia šuoliškai [24]. Šiuo atveju registruojamas pjūklinio tipo bangos ilgio pokytis.

Nenutrūkstamas bangos ilgio derinimas realizuojamas užtikrinus išilginės rezonatoriaus modos bangos ilgio λ_q ir minimalių nuostolių bangos ilgio λ_r tandeminį kitimą skenavimo eigoje. Tai pasiekama atliekant koordinuotą gardelės posūkį ir poslinkį apie fiksuotą ašį. Principinė schema pateikiama 8 paveikslėlyje. Lazerinės spinduliuotės ašies ir gardelės plokštumos susikirtimo taškas pažymėtas G . Ašies pradžia pažymėta O , $OG = L$ – išorinio rezonatoriaus ilgis. Pirmos eilės difrakcijos maksimumas nukreipiamas atgal į LD rezonatorių. Kai gardelės posūkio kampas θ , periodas d , tada gardelės filtruojamas bangos ilgis λ_r nusakomas lygtimi [14]:

$$\lambda_r = 2d \sin \theta. \quad (19)$$

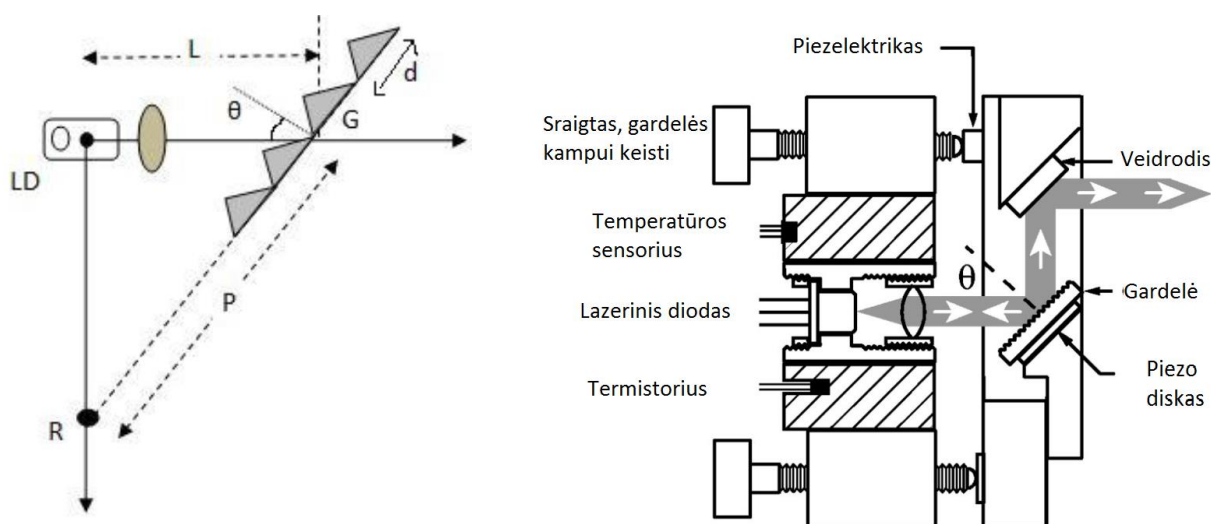
Rezonansinės modos bangos ilgis λ_q yra lygus:

$$\lambda_q = \frac{2L}{q}, \quad (20)$$

čia q – modos numeris. Galime tarti, kad gardelė sukasi apie ašį R taip, kad modos bangos ilgis λ_q yra ties mažiausių nuostolių bangos ilgiu λ_r . Sulyginant šias dvi lygtis gauname:

$$\sin \theta = L/qd \quad (21)$$

Panagrinėjus 8 paveikslėlio schemą kairėje matome, kad $\sin \theta = L/P$. Nesunku padaryti išvadą, kad lazerinio diodo veika be modų šuolių pasiekama, kai $P = qd$. Kitaip tariant, optimali gardelės sukimosi ašies padėtis, lemianti tolydų bangos ilgio derinimą, yra pasiekama taške R [14].



8 pav. Littrow geometrijos apskaičiavimą iliustruojanti schema (kairėje) [14]. Eksperimentuose pritaikoma konfigūracija, leidžianti stabilizuoti lazerinio diodo išeinančios spinduliuotės kryptingumą ir iliustruojanti elementus, reikalingus užtikrinti efektyvią Littrow ECDL veiką (dešinėje) [15].

Šiame skyriuje aptartai Littrow konfigūracijai gali prilygti nedaug plataus bangos ilgio diapazonu pasižyminčių sistemų. Pasiekama itin aukšta emisijos bangos ilgio valdymo kokybė su gera erdvine ir spektrine skyra bei užtikrinant didelę spinduliuotės galią (ypač realizuojant nuostoviąją veiką) [23]. Vienas didžiausių šios sistemos trūkumų yra kintanti išeinančio spindulio pozicija vykstant skenavimui – gardelės kampo pokytis lemia emisijos krypties kitimą. Šią problemą iš dalies galima išspręsti panaudojant papildomą veidrodį lazerinio pluošto išvedimui iš sistemos [15].

1.2.3. Littman - Metcalf konfigūracija

Šiame skyriuje bus aptariama vienos modos plataus bangos ilgių diapazono derinimu pasižyminti Littman – Metcalf lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi geometrija. Kaip ir Littrow konfigūracijoje, pagrindinis tikslas yra apskaičiuoti gardelės posūkio ašies poziciją, kuri užtikrintų tandeminių difrakcijos kampo ir rezonatoriaus ilgio kitimą visame gardelės derinimo ruože.

Nors pirmieji darbai, nagrinėjantys tinkamas lazerinės sistemos konfigūracijas, buvo atlikti ne su puslaidininkiniais lazeriais, teorinis pagrindimas išlieka analogiškas [16],[25]. Norint užtikrinti nenutrūkstamą bangos ilgio derinimą, turi būti tenkinamos dvi lygtys vienu metu:

$$\lambda = \frac{2}{N} L(\phi) = \frac{2}{N} (l_f + l_t(\phi)) \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{d}{m} (\sin \theta_0 + \sin \phi) \quad (23)$$

kur $L(\phi)$ – išorinio rezonatoriaus ilgis, l_f – atstumas nuo galinio veidrodžio iki difrakcinės gardelės, $l_t(\phi)$ – atstumas nuo gardelės iki bangos ilgį valdančio veidrodžio, N – modų skaičius, d – gardelės periodas, m – difrakcinė eilė, θ_0 – pluošto kritimo kampas ir ϕ – difrakcijos kampas (9 pav.) Lygtis (22) nurodo, kad rezonatoriaus ilgis turi būti lygus bangos ilgio kartotiniui, o lygtis (23) atspindi difrakcijos sąlygą nuo gardelės. Jei pasirenkame veidrodžio sukimo ašies padėtį sutampančią su gardelės ir veidrodžio plokštumomis ir priskiriame atstumą nuo gardelės centro iki šios ašies taško vertei l_p , gauname:

$$L(\phi) = l_f + l_p \sin \phi. \quad (24)$$

Įstate (24) lygtį į (22) lygtį, išreiškiame:

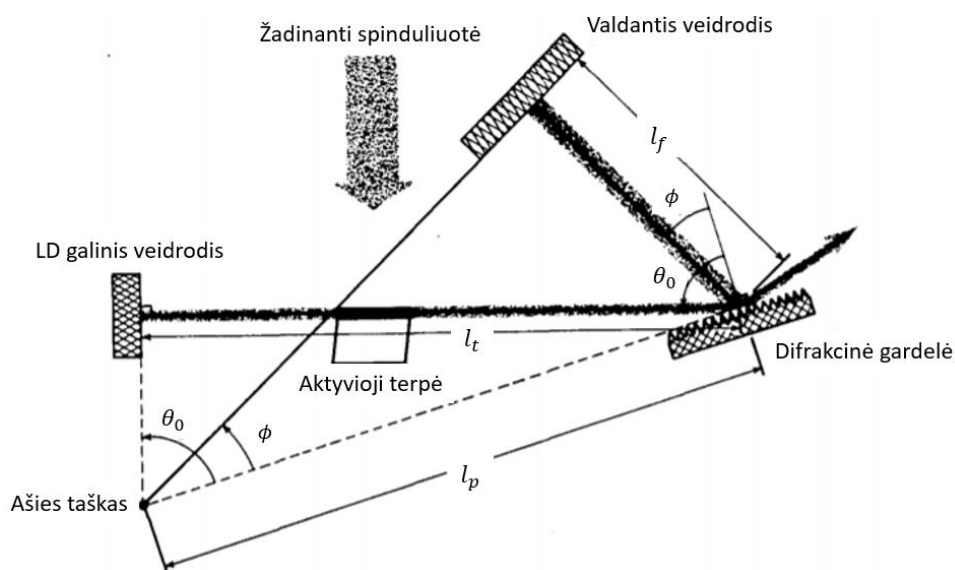
$$\lambda = \frac{2}{N} (l_f + l_p \sin \phi). \quad (25)$$

Palyginę (23) ir (25) lygtis, matome, kad įgyvendinus šias sąlygas:

$$\frac{2}{N} l_f = \frac{d}{m} \sin \theta_0, \quad (26)$$

$$\frac{2}{N} l_p = \frac{d}{m} \quad (27)$$

nenutrūkstamas bangos ilgio derinimas pasiekiamas visame veidrodžio poslinkio kelyje [25]. Įprastai sutinkamose sistemose pasirenkama kampu įrėžta gardelė, į kurią lazerinis pluoštas krenta itin dideliu kampu, todėl $\sin \theta_0 \approx 1$ ir $l_p \approx l_f$. Tai dar labiau palengvina veidrodžio sukimosi ašies paieškos procedūrą.

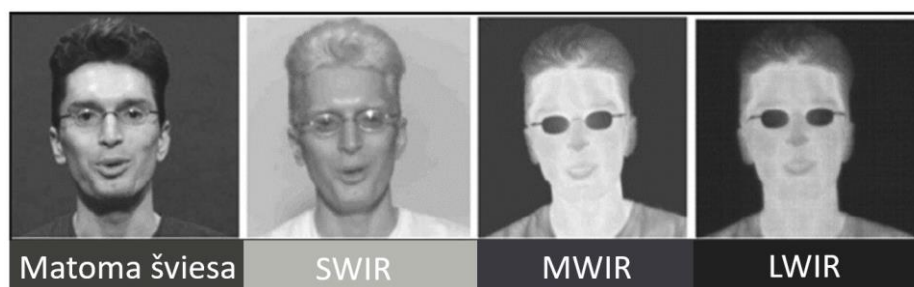


9 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos geometrija. Adaptuota pagal [25].

Tokia ECDL sistema iškelia aukštus reikalavimus mechaniniam veidrodžio pasukimui. Nustatyta, kad tik pusės bangos ilgio (šio darbo atveju apie $1\ \mu\text{m}$) netolygumų užtenka, kad sistema būtų išvesta iš stabilios veikos ir pasireikštų modų šuoliai. Taip pat, didelė mažų sistemos fliuktuacijų įtaka byloja apie suvedimo ir konfigūravimo jautrumą. Dėl šios priežasties norint pasiekti efektyvią veikia su plačiu derinimo diapazonu būtina naudotis preciziškais mikrometrinius poslinkius leidžiančius realizuoti poslinkio ir kampo valdymo kinematinis elementus.

1.3. Puslaidininkinių lazerių pritaikymas infraraudonajame diapazone

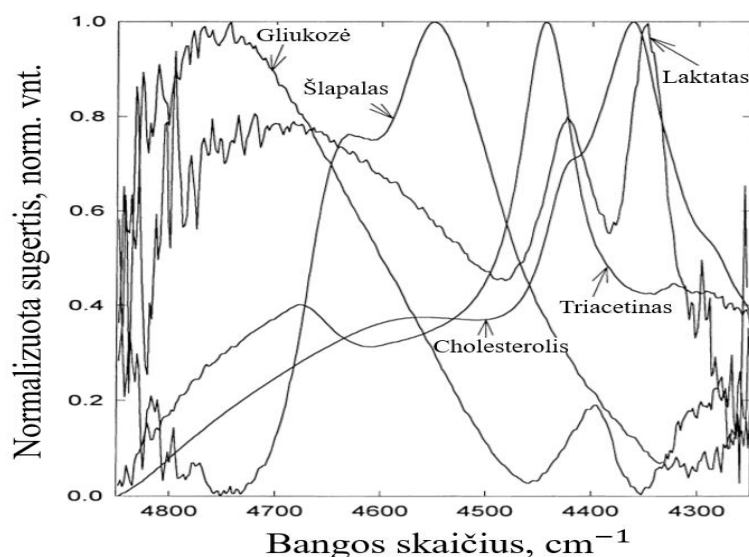
Trumpųjų infraraudonųjų bangų diapazone (SWIR) atrasta daug inovatyvių puslaidininkinių lazerinių diodų taikymo krypčių. Viena neįprasčiausių – vaizdinimas. Skirtingai nei ilgųjų bangų infraraudonajame ruože (LWIR), kuriame žmogaus kūnas ima spinduliuoti (žmogaus kūno spinduliuotės maksimumas lokalizuotas netoli $10\ \mu\text{m}$), SWIR srityje vyksta tik emisijos atspindžio nulemtas vizualizavimas (pavaizduota 10 pav.) [26]. Tai leidžia užtikrinti aukštą vaizdinimo skiriamąją gebą. Taip pat, šiame diapazone emituojama aukštesnėje atmosferoje relaksuojančios hidroksilio molekulės bei kiti naktinio dangaus kūnai, kas įgalina SWIR ruožo detektorių panaudoti kaip dieninio ir naktinio matymo prietaisą [1]. Dažniausiai tokios apšvietos neužtenka, todėl pasinaudojama sklaidytos lazerinės spinduliuotės apšvietimu. Tokio apšvietimo privalumas – jis nėra matomas žmogaus akiai, todėl leidžia atlikti aukštos skyros slaptą vizualizavimą. Tai labai vertinga tiek kariniais tikslais, tiek ir saugumo ar socialiniais tikslais. Dėl aukštesnio nei matomos spinduliuotės bangos ilgio, šis diapazonas naudojamas ilgo nuotolio vizualizavimui sunkiomis oro sąlygomis kaip lietus, rūkas ar dulkės, nes Reilėjaus sklaidai būdinga stipri priklausomybė nuo bangos ilgio ($\sim\lambda^{-4}$). Kitas svarbus privalumas – SWIR ruože veikiančių prietaisų optikai galima pritaikyti įprastus stiklinius lęšius dėl itin gero jų pralaidumo, tuo tarpu, LWIR diapazone naudojami brangūs germanio lęšiai [27].



10 pav. Pavyzdys, kuriame palyginamas matomos šviesos, SWIR, MWIR ir LWIR diapazonuose atvaizduoto žmogaus portretas. Adaptuota pagal [26].

Kita plati SWIR emiterių ir detektorių pritaikymo sritis yra robotizuota industrinė gamyba. Technologijoms tobulėjant gamybinėse linijose siekiama minimizuoti „žmogiškąjį faktorių“. Tokią funkciją gali atlikti sudėtinga sistema, gebanti identifikuoti vykdomo proceso netobulumus ir juos pašalinti. Naudojama emiterio-detektoriaus konfigūracija, kai reikia lazeriu sužadinti tiriamojo objekto spinduliuotę (pvz., organinių molekulių relaksaciją) arba užtenka tik detektoriaus, jei signalas yra sukuriamas pačiame objekte (temperatūrinis efektas, elektroluminescencija). SWIR srityje galima nustatyti įvairių plastikų sudėtį dėl skirtingų spektrinių žymenų, įvertinti temperatūros sukeltus defektus metalo, stiklo ar plastiko gamyboje [28]. Taip pat, skaidrių plastikų apdirbimo srityje sėkmingai pritaikomi aukštesnių bangos ilgių puslaidininkiniai lazeriai. Efektyvus pritaikymas pasiekiamas dėl gebėjimo suderinti tam tikro plastiko sugerties juostos padėtį su emituojama lazerine spinduliuote. Aukšta išėjimo galia realizuojama sujungus lazerinius diodus lygiagrečiai į liniuotes arba platinant aktyviają sritį. Vis dėlto, tokie galios didinimo metodai prastina lazerinio pluošto parametrus, daugiamodis spindulys sunkiau fokusuojamas.

Lazeriniai įvairių dujų jutikliai – puikiai pritaikomi tiek individualiam naudojimui, tiek ir spektroskopijoje, aplinkosaugoje ar kt. Toks pritaikymas reikalauja prietaiso ilgaamžiškumo, greitaveikos ir patikimumo. Įprastai naudojami cheminiai jutikliai nepasižymi veikos pastovumu, nes aktyvusis sluoksnis, veikiamas aplinkos sąlygų, laikui bėgant keičia savo atsako funkciją. Taip pat, tokiems detektoriams būdingas siauras dinaminis diapazonas, lėta veika, bei problematiška įvairių dujų analizė [29]. Šiuos trūkumus galima įveikti pasitelkiant lazerinių diodų sistemą ar lazerinį diodą su išoriniu rezonatoriumi. Tokie prietaisai pasižymi aukštu veikos stabilumu, siaura žadinančios emisijos linija ir labai greita atsako funkcija (paprastai kHz – MHz eilės sparta). Galimybė skanuoti platų spektrinį ruožą ECDL konfigūracijoje stipriai pagerina pavienių dujų dedamųjų išskyrimą iš dujų mišinio.



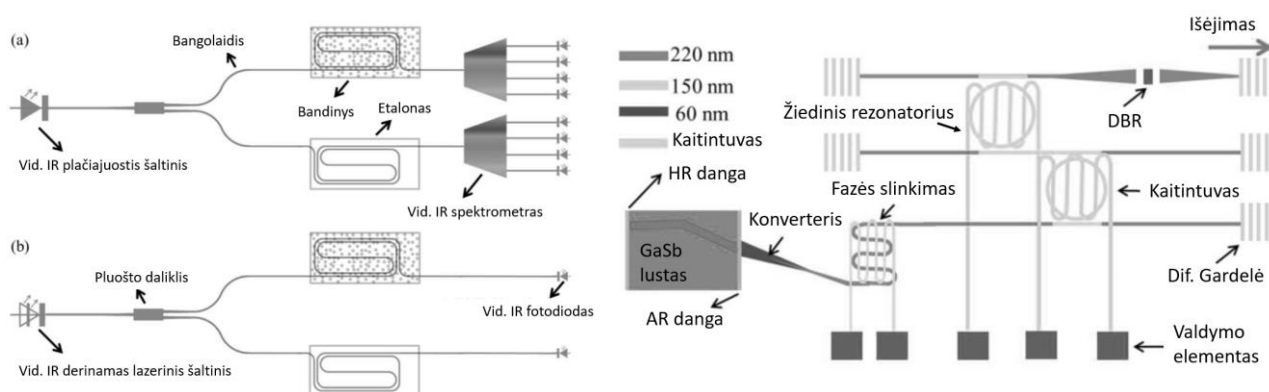
11 pav. Svarbių žmogaus biologinių junginių sugerties spektrai 2050 nm – 2350 nm diapazone. Adaptuota pagal [30].

Vienas novatoriškiausių plačiame spektriniame diapazone derinamo puslaidininkinio lazerio su išoriniu rezonatoriumi pritaikymų yra neinvazinė medicininė diagnostika, o didelės galios lazerių – lazerinės chirurgijos plėtojimas. SWIR diapazonas, kuriame veikia GaSb platforma pagrįsti stiprinimo lustai (1,9 – 2,5 μm), yra žinomas kaip potencialus svarbių žmogaus biologinių skysčių tyrimo objektas (pavaizduota 11 pav.). Čia registruojami kraujo analičių, kalogeno, gliukozės, laktatų, šlapalo spektriniai skirstiniai, kurių nustatymas leidžia efektyviai užtikrinti diabeto, sepsio, sąnarių, inkstų, odos ar kt. organizmo veikos sutrikimų prevenciją [30]. ECDL lazerinė sistema ateityje gali būti pritaikoma kaip individualus neinvazinis spektroskopijos įrankis skirtas svarbiausių žmogaus organizmo funkcijų stebėjimui. Jau dabar demonstruojami darbai, kuriuose lazerinės sistemos taikomos skenuojant žmogaus iškvepiamą orą ir nustatant astmą ar plaučių vėžį [29]. SWIR diapazone spinduliuojantys lazeriai gali būti efektyviai taikomi vėžio gydyme ir terapijoje, nes tokiai ilgiabangei spinduliuotei būdinga didesnė skvarba į audinius. Taip pat, audiniai patys šiame ruože neautofluorescuoja, todėl siekiant vizualizuoti piktybinį naviką chirurgijos metu, skyra žymiai išauga [5]. Aukštos galios nuostoviosios veikos GaSb lazerinių diodų fokusuotas pluoštas pritaikomas audinio suardymui šiluminiu būdu atlikti. Tai yra itin efektyvus metodas dėl aukštos vandens sugerties ties 2 μm ar ties 3 μm . Taip pat, pats piktybinis auglys pasižymi išaugusia sugertimi SWIR diapazone dėl žymiai padidėjusios medžiagų apytakos ir pakitusios audinio sandaros [3].

1.4. Puslaidininkinių lazerių integracija optiniuose grandynuose

Sėkmingą puslaidininkinių lazerinių diodų pritaikymą įvairiose srityse lemia gebėjimas efektyviai integruoti į lustus ir minimizuoti optines – elektronines sistemas. Bene geriausias tokios integracijos pavyzdys yra jau seniai egzistuojančios ir žymią technologinę patirtį turinčios silicio elektronikos suderinimas su III-V grupės puslaidininkinėmis medžiagomis [31]. Silicio elektronikos patirtis panaudojama kuriant aukštos kokybės ir potencialiai pigios masinės gamybos silicio ant izoliatoriaus (angl., silicon on insulator, SOI) fotoninius darinius su dideliu optiniu laidumu 2 – 4 μm spektriniame diapazone. Silicio ir silicio dioksido bangolaidžiai pasižymi dideliu lūžio rodiklio kontrastu (3,7 ir 1,4) leidžiančiu pluoštą išlaikyti net atliekant artimus 90° bangolaidžio posūkius. Tai užtikrina maksimalų sistemos kompaktiškumą ir signalo/triukšmo santykį spektroskopiniuose gėstančiojo lauko sugerties prietaisuose, kurių skyra yra tiesiogiai susijusi su spinduliuotės ir tiriamojo objekto sąveikos kelio ilgiu (pavaizduota 12 pav. kairėje). Dažniausiai pasirenkamos dvi konfigūracijos: spektriškai plačiajuosčio žadinimo šaltinio su fotoniniu bangos ilgio diferencijavimo mechanizmu arba siaurajuosčio derinamo lazerinio diodo su fotodiodu sistema. Pastaroji pranašesnė dėl

komponentų paprastumo ir mažesnio detekcijos kanalų skaičiaus, tačiau sudėtingiau realizuoti derinamo bangos ilgio lazerį. Be to, susiduriama su problemomis siekiant suderinti puslaidininkinius emisijos šaltinius su silicio technologijomis. Nors jau daug metų bandoma inicijuoti spinduliuotę silicyje, netiesiatarpės prigimties apeiti nepavyksta. Tiesiogiai užauginti III – V grupės tiesiatarpės puslaidininkines medžiagas ant silicio itin sudėtinga dėl didelio kristalinių gardelių nesutapimo, todėl tenka pasirinkti kitus metodus. Vienas populiariausių ir tinkamų masinei gamybai metodų yra šampavimo principu paremtas puslaidininkinių šviesos šaltinių perkėlimas ir pritvirtinimas ant silicio plokštės (angl., transfer printing).



12 pav. Kairėje iliustruoti dviejų milimetrinių matmenų spektroskopų veikimo principai: a) plačiajuosčio žadinimo schema su fotonine bangos ilgio diferenciacijos sistema b) derinamo lazerinio diodo žadinimo schema su fotodiodu. Dešinėje vaizduojama GaSb/silicio hibridinio lazerio su išoriniu rezonatoriumi schema. Pagal [30].

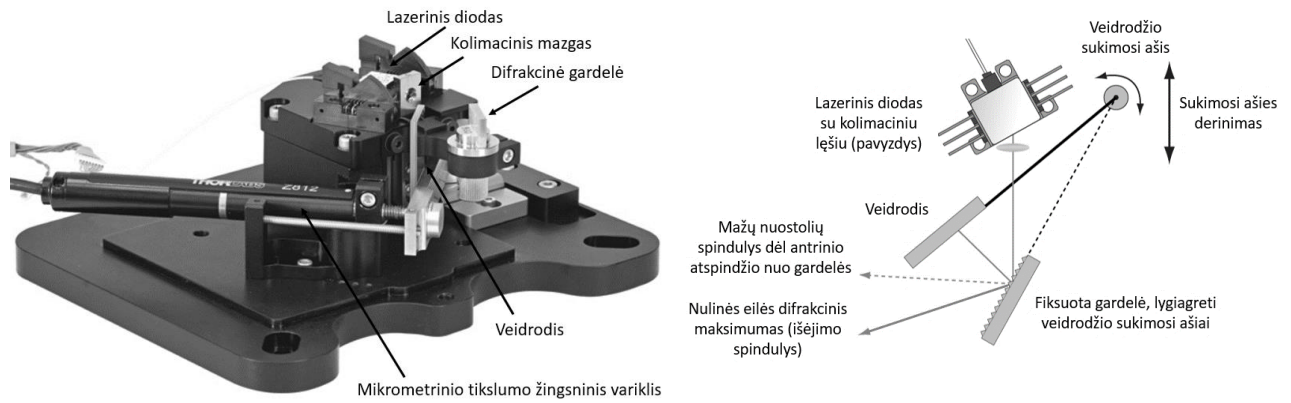
Derinamo bangos ilgio lazerinis šaltinis gali būti realizuojamas pasitelkiant SOI technologijų bazę. Tokia inovatyvi sistema leidžia pereiti nuo sudėtingos ir masyvios Littrow ar Littman – Metcalf konfigūracijos prie milimetrinių matmenų stabilios veikos prietaiso. GaSb stiprinimo lustas sujungiamas su SOI sistema pasinaudojant kampu pozicijuotu bangolaidžiu taip sumažinant pašalinius atspindžius [31] (12 pav. dešinėje). Bangos ilgio derinimas atliekamas Vernier filtro, sudaryto iš termiškai valdomų dviejų mikro-žiedinių rezonatorių tandemo, fazės poslinkį atliekančio elemento kvazi-tolydžiam derinimui ir paskirstytojo Brego atspindžio elemento (angl., distributed Bragg reflector, DBR), pagalba. Dviejų skirtingo diametro mikro-žiedinių rezonatorių rezonansinis pralaidumas valdomas kaitintuvais kontroliuojant žiedų radiusą ir lūžio rodiklį. Tai leidžia pasiekti plataus diapazono, netolydų bangos ilgio derinimą. Fazės poslinkio elementas keičia Fabry – Pérot rezonatoriaus ilgį taip užtikrindamas derinimą siaurame bangos ilgių diapazone. Pademonstruotas 58 nm derinimas su 52 dB šoninių modų slopinimo koeficientu ties 2030 nm centriniu bangos ilgiu su 3,8 mW optine galia [31]. Realizuojamas bangos ilgio derinimo žingsnis siekia 0,7 nm. Tokie parametrai yra užtektini spektroskopiniams gyvųjų organizmų tyrimams ir gali ateityje būti sėkmingai pritaikomi dėl itin mažų matmenų ir robotizuoto, sąlyginai pigaus gamybos proceso.

2. Sistemos surinkimas ir metodika

Šiame skyriuje bus trumpai aptariamasi Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi veikiančiu aukšto (100 – 200 Hz) ir žemo (apie 0,1 Hz) dažnio režimais surinkimo procesas bei nagrinėjami pagrindiniai naudoti matavimo metodai sistemoms charakterizuoti. Analizuojamos voltamperinės charakteristikos, LD emisinės galios priklausomybės nuo srovės bei spektrinių savybių panaudojant FTIR ir fotodiodą matavimo sistemos. Taip pat, trumpai aptariamasi *LabView2014* ir *Python 2.7* programavimo platformomis atlikti lazerinės emisijos registravimo ir manipuliavimo procesai siekiant optimizuoti ECDL konfigūraciją

2.1. Žemo dažnio veikos lazerinės sistemos surinkimas

Šiame darbe nagrinėjamos žemo dažnio Littman – Metcalf lazerinės sistemos su išoriniu rezonatoriumi surinkimas pagrįstas *Thorlabs* įmonės gaminama sistema *TLK-L1550M* (13 pav. kairėje). Naudojamas analogiškas sistemos padėklas, veidrodis su laikikliu bei veidrodžio pasukimą mikrometriniu tikslumu valdantis programuojamas variklis *ZST213*. *TLK-L1550M* sistema suderinta veikti 1550 nm – 1950 nm bangos ilgių srityje, todėl norint ją pritaikyti LD, kurio veikos centrinis bangos ilgis yra 2250 nm, reikia atlikti nemažai pakeitimų. Pirmiausia, skiriasi LD laikiklis, kuris turi būti pritaikytas TO-can lazerinio diodo korpusui įtvirtinti. Taip pat, naudojamas skirtingos konfigūracijos kolimacinis mazgas. Precizinį xyz koordinatų erdvės valdymą užtikrinantis lęšio laikiklis, sumodeliuotas naudojantis *SolidWorks2015* 3D grafine platforma ir pagamintas pagal užsakymą. Difrakcinės gardelės laikiklis pakeistas į naują, veidrodžio pasukimo ašies tašką (grafiškai pavaizduotas ašies taškas iliustruotas 12 pav. dešinėje), atitinkantį stovelį pagamintą analogišku būdu kaip ir kolimacinis mazgas. LD srovės ir temperatūros valdymas atliekamas naudojant *Arroyo 6340 Series ComboSource*, pasižymintį aukštu tikslumu bei itin žemu triukšmo lygiu.



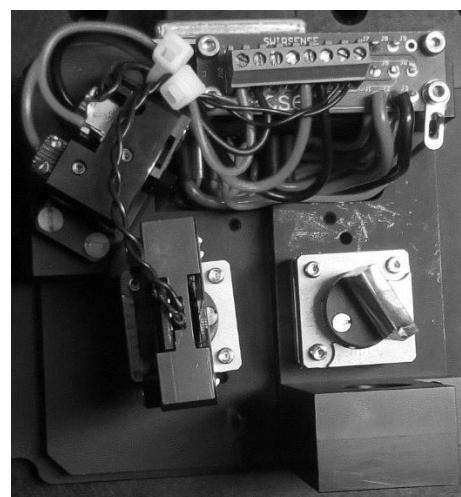
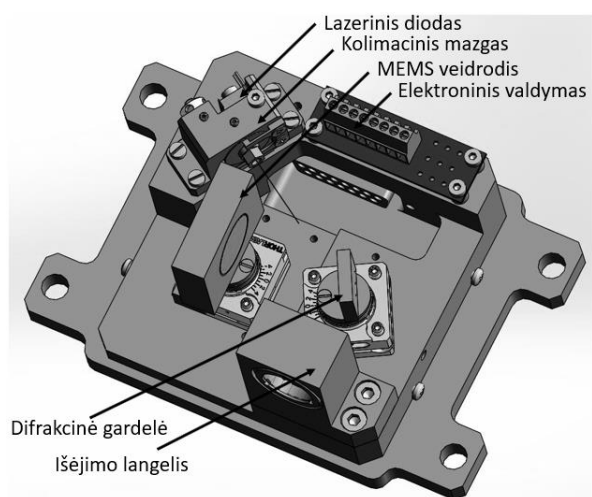
13. pav. Kairėje pavaizduotas Littman – Metcalf lazerinės sistemos pavyzdys (*TLK-L1550M*, Thorlabs). Dešinėje iliustruotas minėtosios sistemos veikimo principas (pagal thorlabs.com).

Trumpai aptarkime pagrindinius lazerinės sistemos surinkimo žingsnius. Pirmiausia, lazerinis diodas pritvirtinamas ant Littman – Metcalf sistemos LD laikiklio. Patikrinama diodo veika. Toliau formuojamas kolimacinis mazgas ir atliekamas lazerinio pluošto kolimavimas (spindulių lygiagretumo sąlygos realizavimas). Šiuo tikslu naudojamas įgaubtas veidrodis su 508 mm atstumo židinio nuotoliu, kurio fokuso taške pasiekiamas mažiausiai išplitęs pluošto skerspjūvis. Pluošto krypties horizontaliosios padėties fiksavimas atliekamas išlyginant spindulio padėtį už kolimacinio mazgo ir už pusės metro nuo lazerinio pluošto išėjimo. Toliau į sistemą įvedama difrakcinė gardelė ir pozicionuojama į teoriškai apskaičiuotą padėtį. Kadangi veidrodžio padėtis menkai kontroliuojama dėl pasirinktos konfigūracijos, reikia derinti difrakcinės gardelės poziciją. Nuo gardelės atsispindėjusio lazerinio pluošto horizontalumas užtikrinamas pirmąjį difrakcinį maksimumą gražinant atgal į lazerinį diodą, taip realizuojant Littrow konfigūraciją ir stebint lazerinės sistemos galios išaugimą dėl pasiekto vienmodės veikos režimo. Tada gardelė pasukama siekiant užtikrinti Littman – Metcalf konfigūraciją atitinkantį posūkio kampą. Mažomis iteracijomis pasiekama optimali veika. Paderinamas kolimacinis mazgas, kuris leidžia kontroliuoti grįžtamojo ryšio efektyvumą siaurame diapazone. Pasiekus efektyvią ECDL veiką matuojami pagrindiniai lazerinio diodo veiką apibūdinantys parametrai (3 skyrius).

2.2. Greitaveikės lazerinės sistemos surinkimas

Aukšto dažnio veikos sistemos surinkimo procesas paremtas Littman-Metcalf konfigūracijos reikalavimų suderinimu su mikro-elektro-mechaninio veidrodžio veika. Apskaičiavus veidrodžio padėties tašką (pagal 1.2.3. skyriuje pateikiamą metodiką), *SolidWorks2015* programa sumodeliuojamas sistemos dizainas ir individualios jos dalys (14 pav. kairėje). Prietaiso sandara yra analogiška žemo dažnio veikos sistemai: lazerinio diodo laikiklis, leidžiantis sukti LD apie savo ašį,

kolimacinis mazgas valdantis atstumą tarp LD ir kolimuojančiojo asferinio lęšio, difrakcinė gardelė, atliekanti bangos ilgio filtro funkciją ir mikro-elektro-mechaninis veidrodis pakeičiantis įprastą veidrodį su mikrometrinio poslinkio varikliuku. Pastarasis elementas, *Sercalo MMI42-1-AU*, užtikrina aukštą sistemos veikos dažnį (iki 200 Hz) ir gerą atkartojamumą. Vis dėlto, minėtasis veidrodis yra stacionarus, tai yra, virpantis apie fiksuotą ašį. Toks Littman – Metcalf konfigūracijos pažeidimas leidžia tikėtis modų šuolių vykstant bangos ilgio derinimo procesui. Dėl šios priežasties, sistemos suderinimas turi būti dar tikslesnis, o mikro-elektro-mechaninio veidrodžio posūkiai apie savo ašį turi būti itin maži, siekti maksimaliai keletą laipsnių.



14. pav. Kairėje vaizduojama aukšto dažnio veikos Littman – Metcalf išorinio rezonatoriaus konfigūracijos schema nubraižyta *SolidWorks2015* programiniu bloku. Dešinėje pavaizduota surinkta Littman – Metcalf lazerinė sistema.

Surinkta greitaveikė lazerinė sistema vaizduojama 14 paveikslo dešinėje. Surinkimo proceso eiga yra analogiška žemo dažnio veikos prietaisui. Šios sistemos atveju dar svarbesnis vaidmuo tenka lazerinio pluošto horizontalumo išlaikymui dėl itin griežtai apibrėžtų išorinio rezonatoriaus generavimo sąlygų. Mikrometrinio tikslumo poslinkio laikikliai naudojami gardelės ir mikro-elektro-mechaninio veidrodžio pozicionavimui, ECDL veikos užtikrinimui bei optimizavimui.

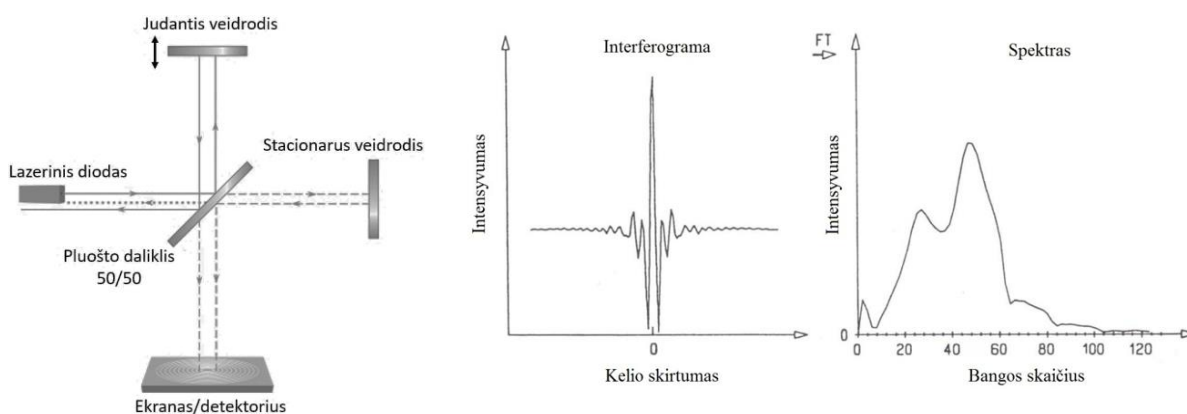
2.3. Lazerinės emisijos LIV matavimas

Viena pagrindinių lazerinio diodo veiką apibūdinančių charakteristikų – tai emituojamos spindulinės galios, srovės ir įtampos sąryšis žymimas LIV. Ši trijų dydžių tarpusavio priklausomybė leidžia įvertinti LD įsijungimo slenkstines vertes, taip pat, parodo, kokia maksimalia srove gali veikti prietaisas nepatirdamas neigiamų pasekmių. Šios priklausomybės žinojimas leidžia vienareikšmiškai nustatyti optimalius darbo taško parametrus esant įvairioms LD padėklo temperatūroms. Šio darbo metu LIV charakteristikos išmatuotos pasinaudojant *LabView2014* programiniu bloku, leidžiančiu

vienu metu valdyti LD srovės (kartu ir įtampas) vertes ir registruoti galios matuoklio parodymus. Eksperimente naudotas plataus galios ir spektrinio diapazono piroelektrinis galios matuoklis *Ophir Photonics 3A-PF-12*. Srovės ir temperatūros valdymas realizuotas pasinaudojant *Arroyo 6340 Series ComboSource* valdiklį.

2.4. Lazerinės spinduliuotės spektrinis matavimas

Pagrindinis instrumentas siekiant išmatuoti lazerinio diodo ar dominančio objekto emisijos ar sugerties spektrą infraraudonoje srityje yra Furjė transformacijos IR spinduliuotės spektrometras (FTIR). Šio prietaiso veikimo principas pagrįstas Maikelsono interferometro pagrindu (15 pav. kairėje). LD pluoštas padalijamas į dvi vienodas dalis pluošto daliklyje, viena dalis atsispindi nuo stacionaraus veidrodžio, o kita – nuo judančio veidrodžio. Taip sukuriamas kintantis fazės poslinkis, atsakingas už teigiamos arba neigiamos interferencijos vaizdą detektoriuje. Detektoriuje registruojamas vaizdas atitinka emisijos autokoreliacijos funkciją, kurios Furjė transformacija dažnio erdvėje atspindi spektrinį energijos tankio skirstinį (15 pav. dešinėje) [32]. Interferogramos maksimalią vertę atitinka vienodus atstumus tarp Maikelsono interferometro veidrodžių nuėję spinduliai, kuriantys konstruktyvią interferenciją. Šonuose registruojamos intensyvumo variacijos turinčios priklausomybę nuo bangos ilgio. Furjė transformacijos principas nurodo, kad siaura autokoreliacijos funkcija atitinka platų spektrinį skirstinį ir atvirkščiai. FTIR prietaisams būdingi privalumai: gera skiriamoji geba, visas spektras išmatuojamas vienos ekspozicijos metu (skirtingai nei prietaisuose su difrakcine gardele), didelis optinis pralaidumas. Šiame darbe spektriniai tyrimai atlikti su dviem FTIR spektrometrais: plačiajuosčiu šviesolaidiniu *OSA205* ir *FTIR Nicolet 8700* spektrometrais.



15 pav. Maikelsono interferometro schema pritaikoma Furjė transformacijos IR spektrometruose (kairėje). Spektrometro generuojama interferograma ir jos spektras, gautas atlikus Furjė transformaciją (dešinėje).

Žemo dažnio lazerinės sistemos veikiančios išorinio rezonatoriaus konfigūracijoje spektrinis skirstinys registruojamas pasinaudojant fotodetektorių. Šiuo tikslu naudojamas sustiprintos veikos

InGaAs fotodiodas *PDA10DT(-EC)* veikiantis 0.9 - 2.57 μm bangų ruože. Fotodetektorius nėra selektyvus bangos ilgiui, todėl būtina atlikti sistemos kalibravimą su FTIR spektrometru. Kalibracinė kreivė nubrėžiama *LabView2014* programa leidžiančia vienu metu valdyti bangos ilgį derinančio veidrodžio pasukimą ir registruoti spektrometro rezultatus. Taip susiejama veidrodžio žingsninio variklio padėtis su bangos ilgiu. Vis dėlto, parašyta programa, kuri kiekvieno veidrodžio žingsnio metu susieja atitinkamą bangos ilgio vertę, yra itin žemo veikos dažnio. Taip veikiantis lazeris geba nuskenuoti visą bangos ilgio derinimo diapazoną per maždaug dvi minutes. Apribojimai sukuriama iš programinės pusės. Todėl siekiant optimizuoti prietaiso bangos ilgio skenavimo greitį parašyta nauja programa, leidžianti susieti variklio poziciją su laiku ir įvykus matavimui konvertuoti laiką į bangos ilgį. Nors programiniu požiūriu sistemos matavimas pasidaro sudėtingesnis (reikia dviejų kalibracinių spektrų), tačiau pasiektas apie 13 s trukmės bangos ilgio skenavimo ciklas (veikos dažnis išauga daugiau nei 9 kartus). Tokį greitį apriboja veidrodį judinančio variklio maksimalus judėjimo greitis. Taigi, pasitelkus *LabView2014* programinį paketą optimizuotas lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi aukšto dažnio bangos ilgio skenavimo režimas.

Aukšto dažnio lazerinės sistemos spektrinių skirstinių atkūrimas pareikalauja dar daugiau skirtingų etapų. Dėl didelio informacijos srauto greičio, fotodetektoriaus duomenys turi būti registruojami itin dideliu dažniu (norint geros spektrinės skyros reikia užtikrinti bent 2 MHz nuskaitymo dažnį vienam kanalui). Duomenų srautas fiksuojamas pasinaudojant aukštadažnį oscilografą *TiePie Handyscope HS6 DIFF*. Programinis paketas *LabView2014* ima riboti sistemos veikos dažnį, dėl šios priežasties pasirenkama *Python 2.7* programinė kalba. Tokio prietaiso sudėtingiausias uždavinys – bangos ilgio skalės susiejimas su laiku. Išmatuoti mikro-elektromechaninio veidrodžio posūkio kampo ir emisijos bangos ilgio tarpusavio priklausomybę FTIR spektrometru neužtenka. Dėl didelio dažnio veidrodžio virpėjimo metu spektriniai skirstiniai išsiskiria nuo stacionariai ties tam tikrais kampais matuojamų spektrų. Kalibracijai pasirinkta metodika yra patentuojama, todėl smulkiau šiame darbe nėra aptariama.

3. Tyrimo rezultatai

Norint pritaikyti lazerinį diodą išorinio rezonatoriaus konfigūracijoje susiduriama su optimizacijos problema. Siekiant išgauti maksimaliai aukštas optinės galios vertes pasiekiami itin siauri spektriniai skirstiniai (įprasta lazerinė veika), tuo tarpu, optimizavus bangos ilgio derinimo diapazoną sunku užtikrinti pakankamą prietaiso optinę galią (tokia situacija būdinga šviestukams). Efektyviausias kompromisas – puslaidininkinis stiprinimo lustas (angl., *gain chip*, SL). Tai puslaidininkinė stiprinimo terpė, pritaikyta lazerio su išoriniu rezonatoriumi veikai. Stiprinimo lustas

neįterptas į išorinio rezonatoriaus sistemą veikia kaip puslaidininkinis šviesos šaltinis, pagrįstas superliuminescencijos vyksmu. Superliuminescencija vadinamas priverstine emisija sustiprintos spontaninės spinduliuotės vyksmas. Minėtasis reiškinys realizuojamas rezonatoriuje be grįžamojo ryšio: šviesos pluoštas per rezonatorių pereina tik vieną kartą ir yra sustiprinamas, tačiau lazeriavimo sąlyga nėra įgyvendinama. Nykstamai mažas optinis grįžtamasis ryšys lemia žemas optinės galios vertes, tačiau platų bangos ilgių derinimo ruožą. Sudarius išorinį rezonatorių galima išrinkti vieną derinimo juostos modą ir užtikrinti selektyvų grįžtamąjį ryšį. Taip realizuojamas vienmodis itin siauros spektrinės linijos tačiau plačiame bangų ilgių diapazone derinamas lazeris su aukšta optine galia.

Nykstamai mažas optinis grįžtamasis ryšys lazeriniame diode pasiekiamas ne vien užgaminant praskaidrinančią dangą ant išvadinio SL paviršiaus, tačiau ir pasukant aktyviosios srities keterą kampu. Taip žymiai sumažinamas ruožas, kuriame tenkinamos tam tikros modos lazerinio generavimo sąlygos, tačiau pasireiškia optinis stiprinimas. Dar efektyvesnis metodas naudojamas šiame darbe analizuojamame SL. Ketera virš aktyviosios srities yra užlenkiama kampu. Bangolaidžio lenkimo kombinavimas su praskaidrinančių dangų užgaminimu leidžia pasiekti išvadinio veidrodžio atspindžio koeficiento vertes artimas 10^{-5} .

Šiame skyriuje bus tiriami stiprinimo lusto elektriniai ir optiniai parametrai, norint išsiaiškinti, kokias sąlygas reikia užtikrinti, kad diodas būtų tinkamas išorinio rezonatoriaus sudarymui. Toliau minėtasis stiprinimo lustas integruojamas į žemadažnę ir aukštadažnę Littman – Metcalf konfigūracijas, kuriose nustatomos pagrindinės optinės ir elektrinės savybės. Toliau įvertinamas bangos ilgio derinimo valdymas terminiu ir elektriniu metodais bei apibūdinamas nagrinėtos lazerinės sistemos pritaikomumas spektroskopiniuose tyrimuose.

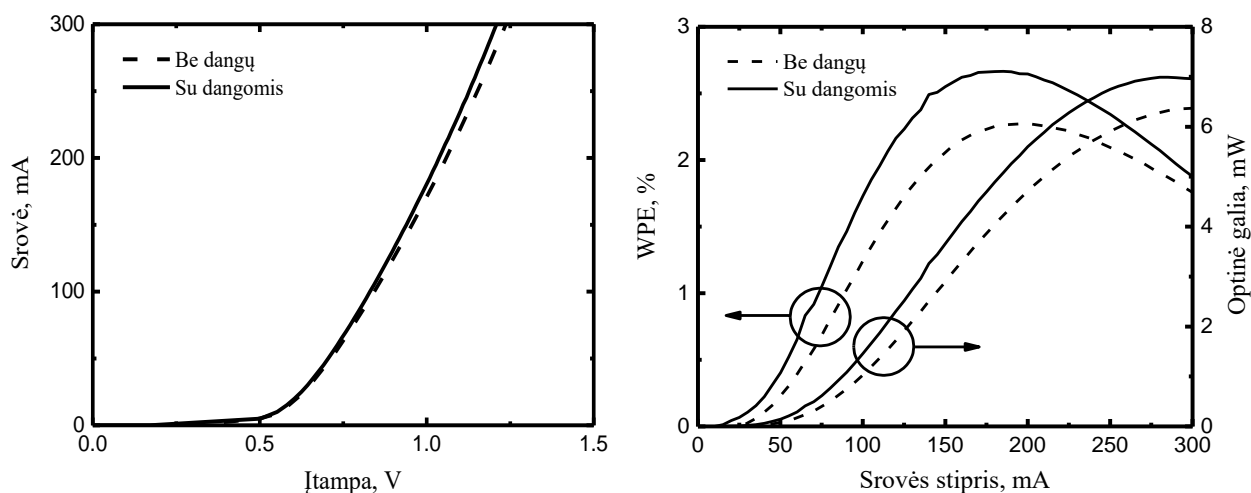
3.1. Stiprinimo lusto tyrimas

3.1.1. Voltamperinė charakteristika ir optinė galia

Analizei pasirinktas 2250 nm centrinio bangos ilgio SL su dvių kvantinių šulinių aktyviojo sluoksnio sandara. Kvantinės struktūros padvigubinimas leidžia tikėtis itin aukštos optinės galios verčių. Suformuotas 1 mm ilgio rezonatorius, ant kurio buvo užgautos optinės dangos. Išvadinis veidrodis padengiamas skaidrinančiu Ta₂O₅ sluoksniu, o ant galinio veidrodžio suformuojamas keletas Si/SiO₂ $\lambda/4$ interferencinių sluoksnių porų. SL uždedamas ant TO-can laikiklio.

Įvertinti SL elektriniai parametrai prieš ir po optinių dangų uždėjimo. Panagrinėjus voltamperinę charakteristiką (16 pav. kairėje) matyti, kad pokyčiai nėra žymūs. Taip ir turėtų būti, nes optinės dangos menkai keičia elektrines savybes. Nustatyta tiesioginės veikos atsidarymo įtampa

lygi 0,63 V, būdinga GaSb platformai [7]. Veikiant 200 mA injekcine srove dinaminė varža (apibūdinanti voltamperinės charakteristikos statumą darbiniam taške) lygi 1,8 Ω . Tokia maža dinaminė varža reiškia, kad santykinai nedideli tiesioginės įtampos pokyčiai gali sukelti žymius srovės pokyčius. Taip pat, žema dinaminės varžos vertė indikuoja efektyvią veiką, nes yra tiesiogiai susijusi su nuoseklia varža apibūdinančia šiluminius nuostolius dėl apvaskalinių sluoksnių ar kontaktų varžų.



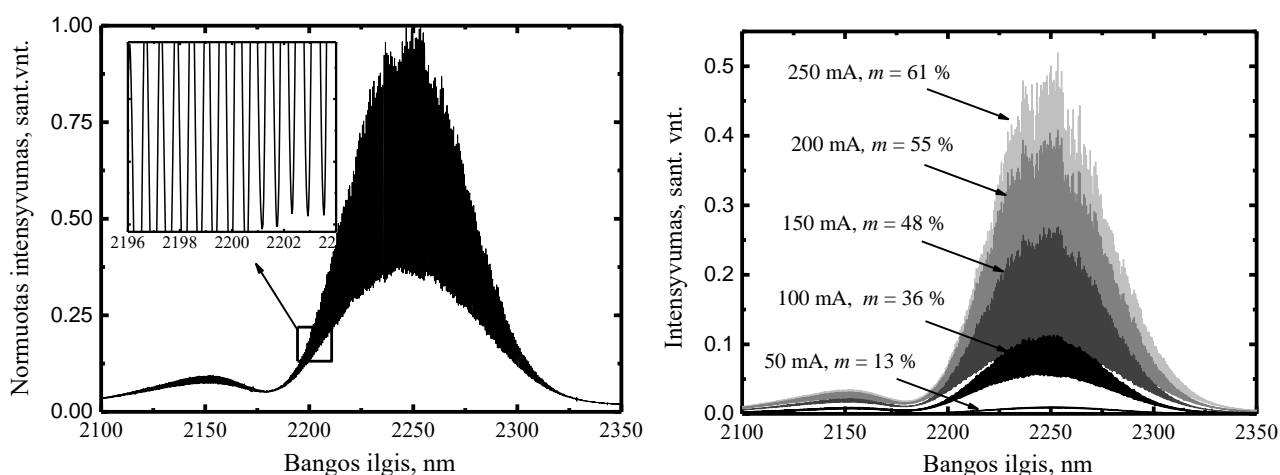
16 pav. Stiprinimo lusto voltamperinė charakteristika (kairėje). Optinės galios ir WPE priklausomybė nuo srovės stiprio (dešinėje) esant 20 °C temperatūrai. Pateikiami duomenys demonstruojantys skaidrinančių dangų indėlį.

Emituojamos optinės galios priklausomybėse nuo injektuojamos srovės stebimas išaugimas po optinių dangų užgarinimo (16 pav. dešinėje). Maksimali optinė galia registruojama ties 280 mA pakilo nuo 6,3 mW iki 7 mW (11 % išaugimas) esant 20 °C temperatūrai. Optinių dangų indėlis nėra pastovus skirtingų SL atveju. Kitokios konfigūracijos dioduose stebimas net 3 kartų optinės galios išaugimas. Toks nežymus pokytis gali byloti apie optinės dangos neoptimalumą arba tai, kad grįžtamasis ryšys yra efektyviai minimizuotas bangolaidžio lenkimu. Toliau didinant injekcinės srovės stiprį stebimas optinės galios sumažėjimas. Taip nutinka dėl OŽė kubinės rekombinacijos nario pasireiškimo (plačiau skaityti 1.2.2. skyriuje).

Lazerinių diodų efektyvumą apibūdina bendrasis našumas (angl., *Wall-Plug Efficiency*, WPE), apibrėžiamas kaip spindulinio srauto santykis su elektrine galia, reikalinga sugeneruoti srautą. Šis įvertis dažniausiai pasirenkamas apibūdinant lazerių veiką, nes atsižvelgia į maitinimo šaltinio bei aušinimo bloko generuojamus nuostolius. Maksimali WPE vertė lygi 2,7 % pasiekama ties 175 mA su optinėmis dangomis. Vienmodžiai didelės galios (šimtai mW ar net W eilės) lazeriniai diodai realizuoti SWIR diapazone su itin aukšta smailine WPE verte > 25 % [33]. Tačiau siekiant užtikrinti platų spektrinį derinimo ruožą aptariamo SL optinės galios ir našumo vertės yra puikiai tinkamos.

3.1.2. Spektrinis skirstinys

Stiprinimo lusto spektrinis skirstinys stipriai skiriasi nuo įprasto lazerinio diodo spektro. 17 pav. kairėje pateikiamas FTIR spektrometru išmatuotas SL spektrinis skirstinys, kuriam būdingas 82,6 nm plotis ties puse intensyvumo maksimumo verte (angl., *Full Width at Half Maximum*, FWHM). Toks didelis spektrinės juostos plotis nurodo akivaizdų SL skirtumą nuo įprastų LD, kuriems būdinga sub-nanometrų eilės FWHM vertės. SL spektrinė gaubtinė tęsiasi nuo maždaug 2050 nm iki 2350 nm, kas leistų pasiekti bangos ilgio derinimą net 300 nm diapazone realizavus išorinio rezonatoriaus konfigūraciją. Vis dėlto, spektro kraštuose lokalizuotoms modoms sudėtinga užtikrinti efektyvų stiprinimą, todėl eksperimentiškai pasiekiamas derinimo ruožas yra mažesnis.



17 pav. Stiprinimo lusto spektrinis skirstinys esant 150 mA srovei ir 20 °C temperatūrai (kairėje). Įterptinis grafikas vaizduoja Fabry – Pérot modų interferencinę moduliaciją. Spektrinio skirstinio priklausomybė nuo injekcinės srovės su apskaičiuotais moduliacijos koeficientais (dešinėje).

Panagrinėkime SL spektrinio skirstinio pobūdį. Matoma, varpo formos gaubtinė, kurios centrinis maksimumas lokalizuotas ties 2250 nm. Šalia jos išsidėsčiusi žymiai mažesnio intensyvumo antrinė gaubtinė, kurios maksimumas yra ties 2125 nm. Įprastai toks antrinis spektrinis skirstinys nėra stebimas. Manoma, kad jis galėjo atsirasti dėl kvantinio šuolio iš aukštesnių kvantinių lygmenų. Visa SL spektro gaubtinė pasižymi periodine moduliacija (17 pav. įterptinis grafikas). Ši moduliacija vaizduoja Fabry – Pérot rezonatoriaus užduodamą modos dažnį. Teoriškai įvertinamas tarpmodinis atstumas $\Delta\lambda_m$ apskaičiuojamas pagal (17) lygtį yra lygus 0,69 nm, tuo tarpu, nustatyta grafiškai eksperimentinė vertė lygi 0,63 nm. Toks geras sutapimas patvirtina Fabry – Pérot modų susidarymą dėl ne tobulai mažo išvadinio veidrodžio atspindžio koeficiento. Tokia sistema apibūdinama moduliacijos parametru m , parodančiu moduliacijos gylį procentais. Spektrinė moduliacija apskaičiuojama pagal formulę:

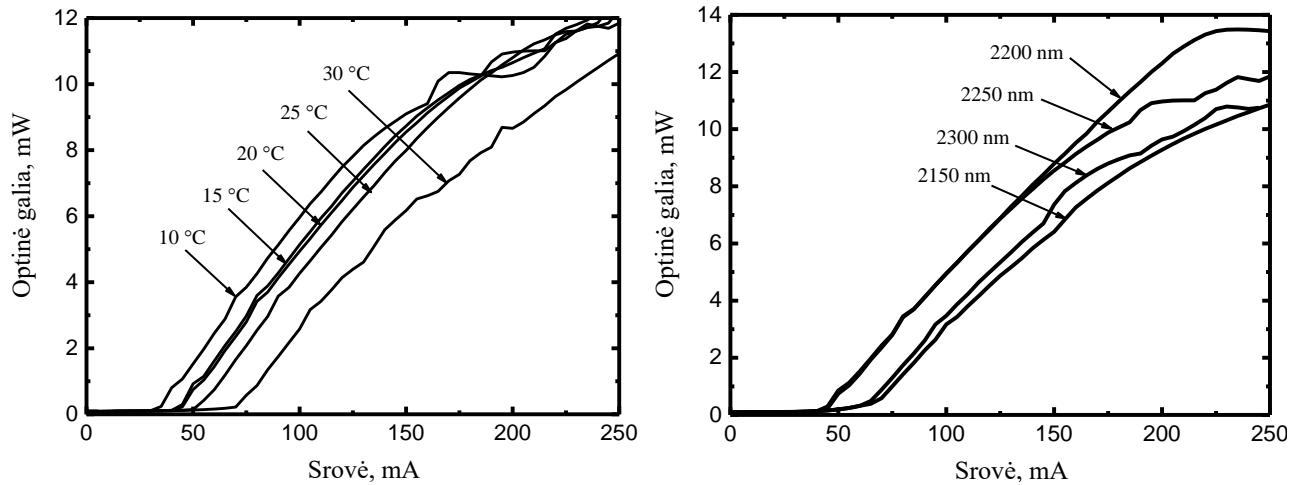
$$m = \frac{P_{MAX} - P_{MIN}}{P_{MAX} + P_{MIN}}, \quad (29)$$

kur P_{MAX} ir P_{MIN} žymi atitinkamai didžiausią ir mažiausią intensyvumo vertę ties SL spektro viršūne. Paprastai įvertinant m dydi imamas siauras intervalas ties spektro viršūne ir atliekamas vidurkinimas. Analizuojamo SL atveju m vertė kinta nuo 13 % ties 50 mA iki 61 % ties 250 mA (pavaizduota 17 pav. dešinėje). Didelės moduliacijos vertės nėra optimalios išorinio rezonatoriaus konfigūracijai, nes indikuoja pakankamai efektyvų grįžtamąjį ryšį rezonatoriuje, kuris gali sukelti problemų dėl savi-generacijos didinant injekcinę srovę. Dėl šios priežasties derėtų sumažinti SL injekcinę srovę ir nustatyti darbinį tašką ties 200 mA ar mažiau, siekiant efektyvios veikos išorinio rezonatoriaus konfigūracijoje. Vis dėlto, dauguma taikymų reikalauja auštų galios tankių, todėl būtina atlikti sistemos veikos optimizavimą, norint realizuoti auštą galią ir stabilią veiką.

3.2. Žemo veikos dažnio Littman – Metcalf sistema

3.2.1. Emituojama optinė galia

Stiprinimo lusto integracija į Littman – Metcalf išorinio rezonatoriaus konfigūraciją lemia selektyvių generavimo sąlygų užtikrinimą pavienėms modoms bangos ilgio skenavimo diapazone. Taip pat, SL ima veikti kaip lazerinis diodas, kurio veikos įsijungimą apibūdina generavimo slenksčio vertė I_{TH} . Optinės galios priklausomybė nuo injekcinės srovės (pateikiama 18 pav.) leidžia nustatyti generavimo slenkstį pasinaudojant pirmosios išvestinės metodu. Įvertinama tiesinės galios priklausomybės nuo srovės stiprio srities išvestinė dP/dI . Injekcinės srovės vertė ties 50 % dP/dI maksimalios vertės nurodo generavimo slenkstį. Nustatytas generavimo slenkstis lygus 45mA ties 15 °C ir 20 °C padėklo temperatūromis. Tuo tarpu, mažinant temperatūrą iki 10 °C, generavimo slenkstis nukrenta iki 34 mA, o didinant temperatūrą iki 30 °C – pakyla net iki 72 mA. Tokia generavimo slenksčio priklausomybė nuo temperatūros paaiškinama, draustinio energijų tarpo, būsenų tankio, krūvininkų koncentracijos bei spindulinės rekombinacijos koeficiento priklausomybėmis nuo temperatūros.

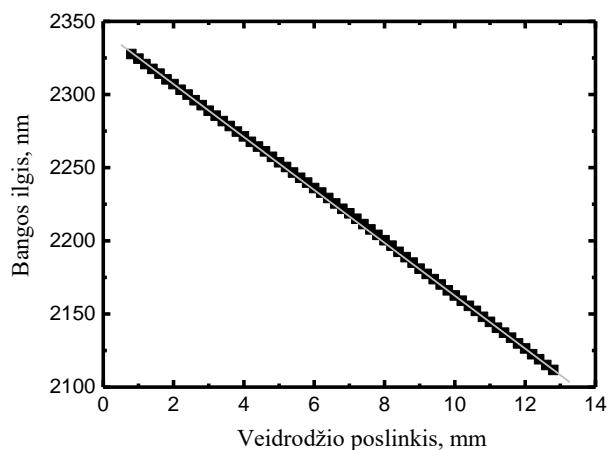


18 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo optinės galios priklausomybė nuo srovės. Kairėje pateikiama veikos priklausomybė nuo temperatūros ties 2250 nm, dešinėje vaizduojama priklausomybė nuo generuojamos spinduliuotės bangos ilgio esant 15 °C temperatūrai.

Optinės galios skirstiniai išmatuoti skirtingose SL temperatūrose ir spektrinio diapazono vietose atskleidžia optimalias veikos sąlygas. Pirmiausia matyti, kad optinės galios vertė pakyla nuo 7 mW SL konfigūracijoje iki 12 – 13 mW Littman – Metcalf konfigūracijoje. Prasidėjęs lazerinis generavimas yra dominuojantis rekombinacijos mechanizmas, nutolinantis Ožė rekombinacijos pasireiškimą ir leidžiantis padidinti prietaiso optinę galią. Temperatūrinė priklausomybė parodo, kad stabiliausia veika pasiekama 15 °C ir 20 °C temperatūrose, nes kreivės yra tolydžios, nestebimos žymios fluktuacijos ar šuoliai. Tuo tarpu, 10 °C ir 25 °C temperatūrose esant aukštomis galios vertėms matomi kreivės bangavimai, kurie paaiškinami modų šuolių pasireiškimu ar daugiamodės veikos atsiradimu. Toks prietaiso veikimas nėra stabilus, todėl derėtų disponuoti mažesnėmis injekcinės srovės vertėmis arba vengti minėtųjų temperatūrų verčių. Optinės galios priklausomybės nuo srovės įvairiuose stiprinimo gaubtinės taškuose (18 pav. dešinėje) taip pat padeda apibrėžti efektyviausios ir stabiliausios sistemos veikos sritį. Matyti, kad netoli centrinio 2250 nm bangos ilgio lazeriavimo slenkstis yra 45 mA, tuo tarpu, toliau nuo centro stiprinimo sąlygos sudėtingėja ir generavimo slenkstis padidėja iki 67 mA. Vadinas, realus lazeriavimo slenkstis 15 °C temperatūroje yra bent 68 mA. Taip pat, stebimas optinės galios kreivės nestabilumas pasireiškia skirtinguose bangos ilgių srityse prie skirtingų injekcinės srovės verčių. Todėl siekiant minimizuoti nepageidautinus modų šuolius ar daugiamodę veiką, rekomenduotina apriboti sistemos veikimą 150 mA srove. Taigi, optinės galios priklausomybė nuo srovės skirtingose temperatūrose ir derinimo diapazono srityse nurodo efektyviausios ir stabiliausios veikos sritį – temperatūros ruožas kinta tarp 15 °C ir 20 °C, o srovė varijuoja tarp 70 mA – 150 mA (norint pasiekti aukštesnes galios vertes injekcinę srovę galima padidinti iki 200 mA).

3.2.2. Spektrinio skirstinio analizė ir valdymas

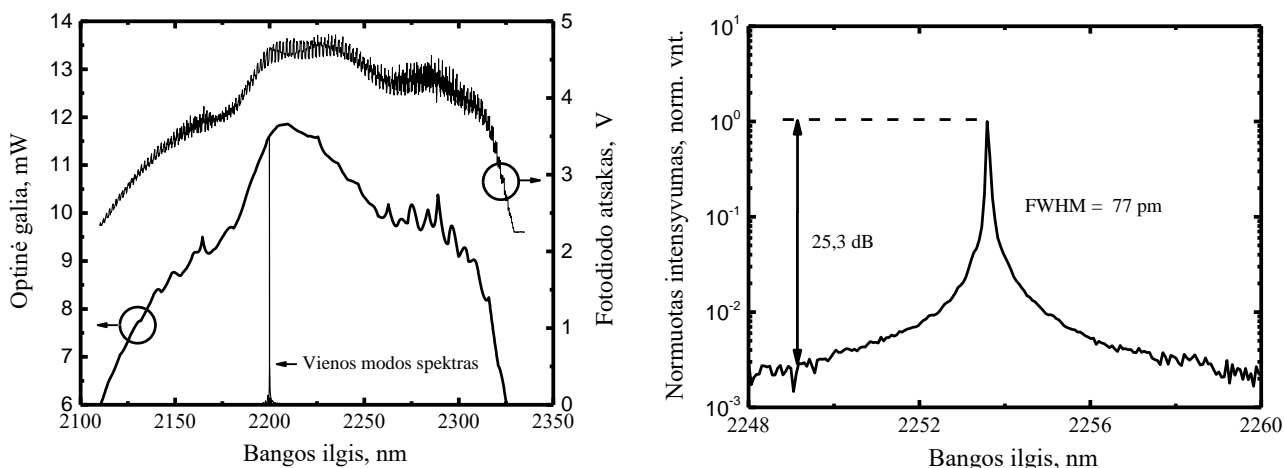
Lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi viena pagrindinių charakteristikų yra bangos ilgių derinimo diapazonas. Svarbu užtikrinti lazerinio diodo vienmodę veiką visame ruože, norint sistemą pritaikyti spektroskopiniams tikslams. Lazerinis sužadimas dažniausiai naudojamas kartu su fotodiodo detektoriumi, kuris nėra jautrus bangos ilgiui, vadinasi, siekiant išmatuoti analito sugerties ar atspindžio spektrą skenuojant, būtina užtikrinti siaurą vienos modos skirstinį ir eliminuoti modų šuolius. Bangos ilgio derinimas gali būti atliekamas keičiant LD temperatūrą ar srovę, tačiau toks derinimas yra siaurajuostis ir spektroskopijos taikymams netinkamas. Littman – Metcalf konfigūracijos bangos ilgio derinimas atliekamas mechaniškai – veidrodžio pasukimu mikrometriniu tikslumu (19 pav.). Matyti, kad realizuojamas labai plataus 218 nm bangos ilgio derinimo diapazonas ties 200 mA esant 15 °C (bangos ilgis išmatuojamas FTIR spektrometru). Pasirenkama maksimali injektuojamos srovės vertė atlikus spektrinio diapazono, kuriame nepasireiškia veikos stabilumo trikdžiai, analizę. Nubrėžiama kalibracinė kreivė susieja veidrodžio poziciją su bangos ilgiu. Tiesinė priklausomybė nurodo, kad derinimo diapazone nėra stebimi modų šuoliai ar daugiamodė veika. Minėtieji vyksmai būtų vaizduojami kaip žymūs nuokrypiai nuo tiesės.



19 pav. Bangos ilgio kalibracinė kreivė, nurodanti sąryšį tarp veidrodžio poslinkio ir generuojamos spinduliuotės bangos ilgio, išmatuota esant 15 °C temperatūrai ir 200mA srovei. Pilka linija leidžia įvertinti netiesiškumą.

Toliau panagrinėsime spektrinio skirstinio, generuojamo lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi, pobūdį ir vienos modos spektrą. Optinės galios skirstinio ir fotodiodo atsako priklausomybės nuo bangos ilgio vaizduojamos 20 pav. kairėje. Matome, kad tiek galios matuokliu, tiek fotodiodu išmatuoti spektrai demonstruoja analogiškas tendencijas. Gaubtinės skiriasi dėl skirtingų spektrinio jautrio funkcijų šiuose prietaisuose. Spektriniam skirstiniui būdinga netaisyklingos formos gaubtinė. Įdomu tai, kad maksimalios galios lazerinė veika realizuojama ne ties 2250 nm, kur lokalizuota stiprinimo lusto emisijos spektro viršūnė, o ties 2200 nm. Tai parodo,

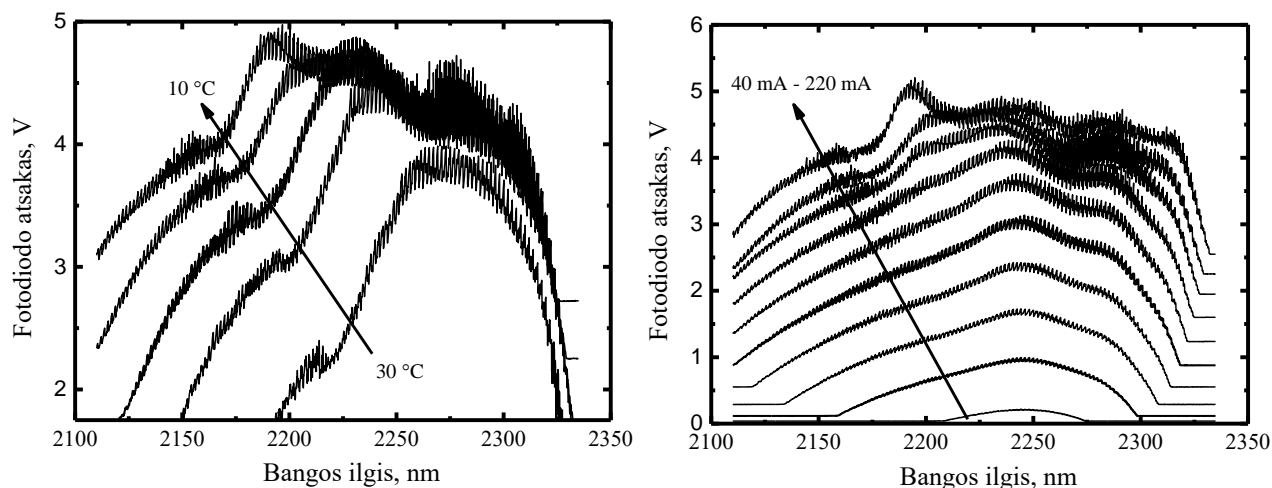
kad lazerinio generavimo sąlyga yra stipriai paveikiama difrakcine gardele sudaromo grįžtamojo ryšio spektrinio pobūdžio (difrakcinės gardelės pirmasis interferencinis maksimumas turi būdingą difrakcijos spektrinį skirstinį). Fotodiodo spektrinis atsakas leidžia išskirti moduliaciją susidariusią dėl Fabry – Pérot rezonatoriaus išilginių modų. Įvertinus tarpmodinį atstumą galima nustatyti Fabry – Pérot rezonatoriaus ilgį – 0,3 mm. Tokia vertė yra artima atstumui nuo lazernio diodo išėjimo veidrodžio iki kolimavimo lęšio (darbinis atstumas yra 0,25 mm), tarp kurių gali susidaryti stovinčios išilginės modos. Vienos modos iš bangos ilgio derinimo diapazono spektras vaizduojamas 20 pav. dešinėje. Logaritmiame mastelyje pavaizduotas spektras leidžia nustatyti šoninių modų slopinimo santykį (angl., *Side Mode Suppression Ratio*, SMSR). SMSR vertė parodo stiprinamos pagrindinės išilginės modos ir artimiausių modų amplitudžių santykį decibelais. Analizuojamo LD vienos spektrinės linijos SMSR vertė yra 25,3 dB (manoma, kad ši vertė yra apribota spektrometro skyros). Tai nurodo, kad didžioji dalis spinduliuotės yra koncentruojama pagrindinėje išilginėje modoje. Spektrinės juostos plotis ties puse maksimalaus intensyvumo yra 77 pm. Tokia vertė yra artima spektrometro skiriamosios gebos ribai (100 pm). Dėl šios priežasties galima teigti, kad spektrinės linijos plotis yra apribotas matavimo prietaiso. Taigi, platus spektrinis derinimas su itin siaura emisine linija užtikrina pritaikomumą kaip aukštos skyros spektroskopijos prietaisą.



20 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo emisijos spektras išmatuotas fotodiodu, galios matuokliu ir FTIR spektrometru (kairėje). Vienos spektrinės linijos išplitimas išmatuotas FTIR spektrometru (dešinėje). Matavimai atlikti esant 15 °C temperatūrai ir 200mA srovei.

Spektrinis skirstinio pavidalas gali būti valdomas padėklo temperatūra ir injekcine srove. Stebima stipri spektrinio derinimo ruožo priklausomybė nuo padėklo temperatūros (21 pav. kairėje). Mažėjant temperatūrai spektras plečiasi į mėlynąją bangos ilgių skalės pusę. Derinimo diapazonas nuo 130 nm ties 30 °C išauga iki 222 nm ties 10 °C. Toks derinimo juostos išplitimas paaiškinamas stipria draustinės juostos pločio priklausomybe nuo temperatūros. Taip pat, matoma spektrinio skirstinio gaubtinės variacija kintant temperatūrai, kuri daugiausiai susijusi su aukštesnės energijos kvantinio lygmens emisijos įsijungimu, pasireiškiančiu dėl žemiausių kvantinių būsenų užpildymo.

Panašios tendencijos stebimos ir spektro priklausomybėje nuo injektuojamos srovės stiprio (21 pav. dešinėje). Bangos ilgio derinimo ruožas nuo 66 nm ties 40 mA srove išauga iki 222 nm ties 220 mA. Derinimo diapazonas eksperimentiškai galėtų būti ir didesnis, tačiau šią vertę apriboja variklio, veidrodžio pasukimo kampa, eigos kelias. Spektrinės gaubtinės pobūdis srove valdomas skirtingai nei temperatūra. Stebimas spektro plitimas į abi puses nuo centrinės 2250 nm vertės didinant srovę. Tai paaiškinama stiprinimo gaubtinės kėlimu virš nuostolių tiesės kaip aptariama 1.2.4. skyriuje.



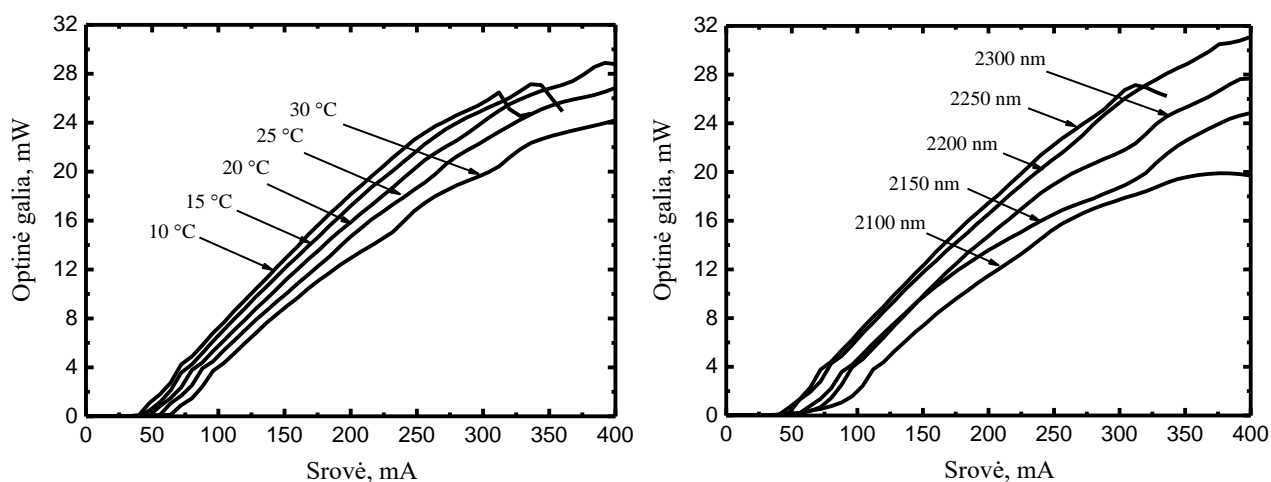
21 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo spinduliuotės spektrai išmatuoti fotodiodu esant skirtingoms lazerinio diodo pagrindo temperatūroms (10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C) ties 200 mA (kairėje) ir spektrinių skirstinių priklausomybė nuo injekcinės srovės intervale 40 mA – 220 mA esant 15 °C temperatūrai.

Littman – Metcalf konfigūracija leidžia realizuoti ne vien plačiame spektriniame ruože derinamo lazerinio diodo veiką su itin gera spektrine skiriamąja geba, bet ir užtikrina galimybę valdyti spektrinio skirstinio savybes. Valdymas pasiekiamas keičiant LD temperatūrą ir srovės stiprį ir yra labai svarbi savybė, padedanti pritaikyti prietaiso veiką prie konkrečių spektroskopinių taikymo poreikių. Toks sistemos lankstumas ir paprastumas iškelia prietaisą virš komerciškai prieinamų tačiau labai sudėtingų FTIR spektrometrų. Vis dėlto, žemas bangos ilgio skenavimo dažnis apriboja tokios sistemos taikymus gyvųjų organizmų tyrimuose. Itin greitai vykstantys apytakiniai procesai, lemia bangos ilgio skenavimo nevienalaikiškumą dėl kintančio terpės homogeniškumo. Spektroskopinio eksperimento atkartojamumas pasidaro komplikuoatas. Šią problemą padeda išspręsti bangos ilgio skenavimo dažnio padidinimas, kuris nėra įmanomas pasitelkiant įprastą judantį veidrodį. Toliau ir aptarsime greitaveikės Littman – Metcalf lazerinės sistemos su MEMS veidrodžiu pagrindinius parametrus ir veikos ypatumus.

3.3. Greitaveikė Littman – Metcalf lazerinė sistema

3.3.1. Optinė galia

Analogiškas stiprinimo lustas, pritaikytas greitaveikėje lazerinėje sistemoje su MEMS veidrodžiu, demonstruoja aukštesnius optinės galios parametrus. Pagrindinė emisijos našumo išaugimo priežastis – pasirinkta difrakcinė gardelė su daugiau nei dvigubai didesniu pirmojo difrakcinio atspindžio efektyvumu palyginus su anksčiau naudota (maksimalus difrakcijos efektyvumas pasireiškia ties 1200 nm palyginus su 600 nm). Panagrinėjus optinės galios priklausomybę nuo injekcinės srovės įvairiose temperatūrose, matomas dėsningas generavimo slenksčio augimas nuo 41 mA ties 10 °C iki 69 mA ties 30 °C (22 pav. dešinėje), stebėtas ir žemadažnėje lazerinėje sistemoje. Nežymi lazerinės veikos slenksčio variacija palyginus su žemo dažnio veikos sistema siejama su stiprinimo lustų neidentiškumu. Vis dėlto, padidėjęs grįžtamasis ryšys, sukuriama difrakcinė gardelė, lemia maksimalios leistinos srovės išaugimą (iki 300 mA ties 10 °C ir iki 400 mA ties 30 °C) ir daugiau nei dvigubą optinės galios išaugimą ties 2250 nm bangos ilgiu. Pasiekiamos 28,8 mW optinės galios vertės su 390 mA ties 20 °C temperatūra. Tačiau stebimas emisijos galios kreivių bangavimo, netolygumo atsiradimas lemia veikos apribojimą iki 300 mA, norint realizuoti stabilią ir vienmodę lazerinę veiką.



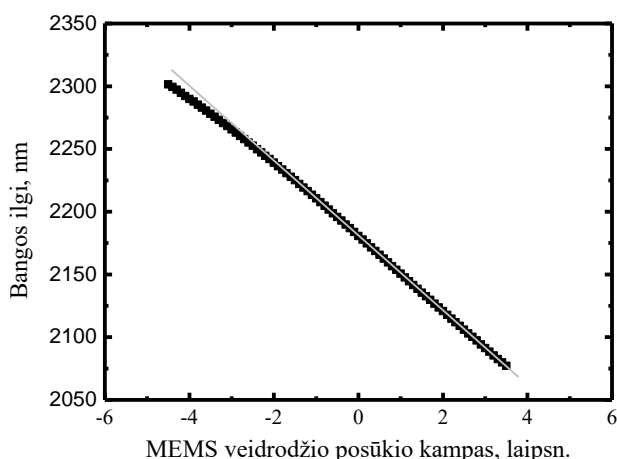
22 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo optinės galios priklausomybė nuo srovės aukštadažnėje skenavimo sistemoje. Kairėje pateikiama veikos priklausomybė nuo temperatūros ties 2250 nm bangos ilgiu, dešinėje vaizduojama priklausomybė nuo generuojamos spinduliuotės bangos ilgio esant 15 °C temperatūrai.

Aukštadažnio prietaiso veikos diapazonas patikslinamas panagrinėjus optinės galios priklausomybę nuo srovės įvairiose spektrinio ruožo srityse (22 pav. dešinėje). Matome, kad lazeriavimo slenkstis pakyla nuo 46 mA (2250 nm) net iki 92 mA (2100 nm) ties 15 °C temperatūra. Tokia generavimo slenksčio variacija yra paaiškinama sunkesniu lazerinio generavimo sąlygų

tenkinimu ties stiprinimo gaubtinės kraštais. Taip pat, optinės galios kreivės nestabilus augimas didinant srovę nurodo veikos apribojimą iki 250 mA. Vis dėlto, net žymiai sumažinus injekcinės srovės vertes (nuo prietaiso leidžiamos 400 mA vertės iki 250 mA), maksimali optinė galia siekia 22,3 mW su minimalia galia stiprinimo gaubtinės kraštuose – daugiau nei 15 mW. Tokios auštos optinės galios vertės leidžia efektyviai pritaikyti šį prietaisą spektrometriams taikymams (plačiau 3.4. skyriuje).

3.3.2. Spektrinių skirstinių savybės ir kalibravimas

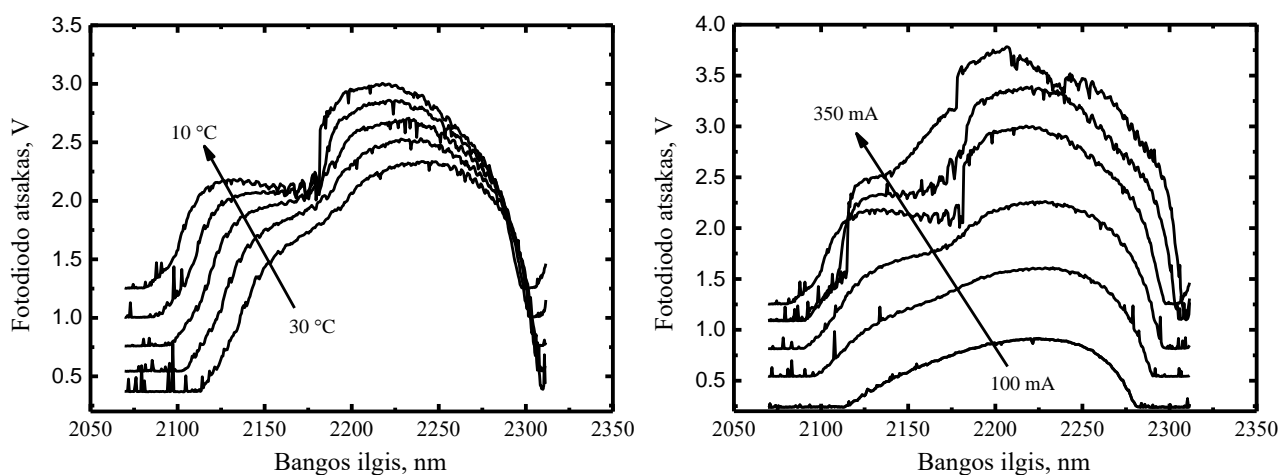
Panagrinėkime greitaveikės Littman – Metcalf lazerinės sistemos spektrinius parametrus. Analizuojamo prietaiso bangos ilgio derinimo diapazonas įvertintas keičiant MEMS veidrodžio posūkio kampą (programiškai perduodant kalibruotas įtampos vertes) ir išmatuojant emisijos atsaką FTIR spektrometru (kalibracinė kreivė pateikiama 23 pav.). Nustatytas itin platus skenavimo ruožas siekiantis 224,3 nm esant 15 °C temperatūrai ir 230 mA srovei. Toks platus bangos ilgio derinimo diapazonas pasiekiamas minimizavus sistemos grįžtamojo ryšio nuostolius, atsirandančius difrakcinėje gardelėje. Vis dėlto, nustatyta, kad sąryšis tarp bangos ilgio ir MEMS veidrodžio posūkio kampo nėra tiesiškas esant didelėms kampų vertėms. Tai yra susiję su sistemos suvedimo netobulumu – nulinės vertės MEMS posūkio kampas nukrypsta nuo lazerinio generavimo gaubtinės centro. Tokie nežymūs neatitikimai lengvai įvertinami ir anuliuojami atliekant sistemos bangos ilgio kalibravimą.



23 pav. Bangos ilgio kalibracinė kreivė, nurodanti sąryšį tarp MEMS veidrodžio posūkio kampo ir generuojamos spinduliuotės bangos ilgio, išmatuota esant 15 °C temperatūrai ir 230mA srovei. Pilka linija leidžia įvertinti netiesiškumą.

Toliau analizuojamas spektrinio skirstinio pavidalo valdymas keičiant padėklo temperatūrą ir injekcinę srovę (24 pav.). Temperatūros pokytis lemia bangos ilgio derinimo diapazono kitimą, panašų į aptartą 3.2. skyriuje. Registruojamas spektrinės gaubtinės pločio didėjimas mažėjant

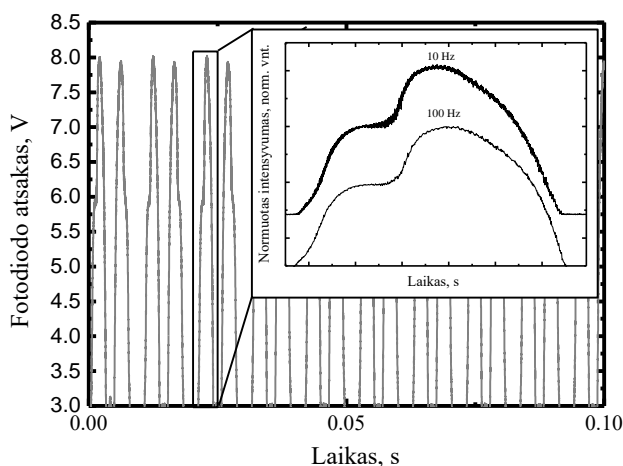
temperatūrai: nuo 195 nm ties 30 °C iki 225 nm ties 10 °C esant 250 mA injekciniai srovei (spektras rekonstruotas pasitelkiant optinės galios matuoklio rodmenis). Derinimo juostos plitimas siejamas su draustinės juostos pločio priklausomybe nuo temperatūros. Taip pat, mažėjant temperatūrai ir didėjant emisijos efektyvumui krūvininkai užpildo žemiausią kvantinį šulinį ir ima okupuoti aukštesnės energijos kvantines būsenas. Tai lemia žymų trumpabangės stiprinimo gaubtinės dalies išaugimą, kartu su hipsochrominiu poslinkiu, atsirandančiu dėl šiluminio poveikio draustinės energijos juostos pločiui. Optimali veika realizuojama padėklo temperatūrai esant 15 °C. Prietaiso bangos ilgio derinimo diapazonas taip pat gali būti valdomas parenkant injekcinės srovės vertes. Matyti, kad spektrinis ruožas kinta nuo 163 nm ties 100 mA injekciniai srove iki 224,3 nm ties 250 mA ir ima mažėti toliau didinant srovę. Šis bangos ilgio derinimo ruožo mažėjimas paaiškinamas nestabilios veikos atsiradimu dėl emisijos daugiamodiškumo. Esant per didelei injekciniai srovei generavimo sąlygos tenkinamos daugiau nei vienai modai. Tai lemia spektrinės gaubtinės netolygumą, staigių laiptiško šuolių pasireiškimą. Sistemos nestabilumas nusako, kad prietaiso srovė turėtų būti apribota iki 250 mA. Toks veikos apribojimas sutampa su nustatyta nagrinėjant lazerinės sistemos optinės galios vertes.



24 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo spinduliuotės spektras esant skirtingoms lazerinio diodo temperatūroms (10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C) ties 250 mA (kairėje) ir spektrinių skirstinių priklausomybė nuo injekcinės srovės intervale 100 mA – 350 mA esant 15 °C temperatūrai.

Norint užtikrinti greitaveikės lazerinės sistemos skenavimo pastovumą būtina atlikti vienalaikį bangos ilgio skalės kalibravimą. Šioje sistemoje neužtenka prietaiso bangos ilgio skalės kalibracijos atliktos FTIR spektrometru. MEMS veidrodžiui judant aukštu dažniu stebimas spektrinio ruožo iškraipymas, kuris gali būti kompensuojamas tik vienalaikiu bangos ilgių skalės kalibravimu. Bangos ilgio ruožas skenuojamas sinuso dėsnio keičiant veidrodžio posūkio kampo vertes tarp -5 laipsnių ir 5 laipsnių (25 pav. pavaizduotas 0,1 s trukmės skenavimas, per kurį išmatuota 20 spektrų veidrodžiui judant pirmyn ir atgal 100 Hz dažniu). Matavimai atliekami laiko, o ne bangos ilgio erdvėje.

Įterptiniame grafike matyti, kad skenavimo dažnį sumažinus nuo 100 Hz iki 10 Hz, spektrinė raiška išauga, tačiau spektrinio skirtinio pobūdis nepakinta. Dėl šios priežasties, platiems kraujo analičių spektriniam skirstiniams išmatuoti 100 Hz sisteminis dažnis (200 Hz įskaičius dvigubą spektro skenavimą) yra puikiai tinkamas. Vis dėlto, spektrai išmatuoti laiko erdvėje yra nereprezentatyvūs. Norint atlikti precizišką laiko konversiją į bangos ilgį surenkamas papildomas kalibracinis mazgas, kurio sandara dėl konfidencialumo reikalavimų negali būti detalizuojama šiame darbe.



25 pav. Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinio diodo spinduliuotės spektras aukštadažnėje veikoje (10 Hz ir 100 Hz) prieš laiko skalės konversiją į bangos ilgį esant 230 mA srovei ir 15 °C temperatūrai.

Greitaveikės Littman – Metcalf sistema potencialiai gali būti pritaikoma in situ neinvaziniuose tyrimuose dėl puikių emisinių ir mechaninių parametrų. Toks prietaisas leidžia pasiekti itin aukštą optinės galios ir spektrinio diapazono vertes pareikalaudamas sudėtingesnio kalibravimo proceso. Vis dėlto, svarbiausias tokios ECDL sistemos privalumas yra aukštas spektrinio skenavimo dažnis, įgalinantis prietaisą pritaikyti gyvųjų organizmų tyrimuose. Sistemai veikiant >100 Hz dažniu organizmo kraujotakos nulemti sklaidos terpės pokyčiai (apibūdinami 1-2 Hz dažniu) yra lengvai atmetami. Taip pat, žymiai lengviau užtikrinti eksperimento atkartojamumą ir išlaikyti stabilias tyrimo sąlygas sumažinant sąveikos trukmę. Toliau analizuojamos tokio prietaiso pritaikymo galimybės spektroskopijoje.

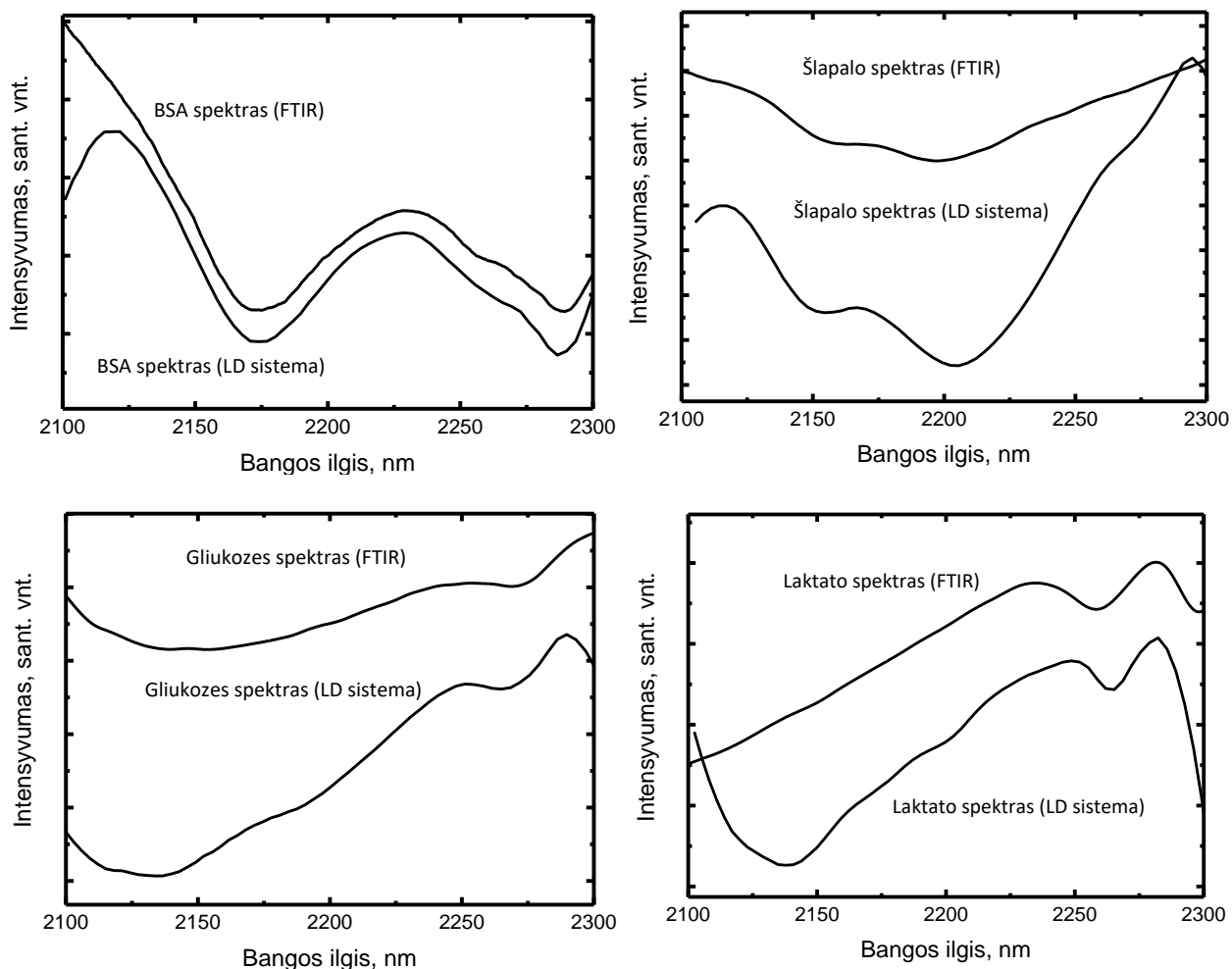
3.4. Littman – Metcalf lazerinės sistemos pritaikymas spektroskopijoje

Littman – Metcalf išorinio rezonatoriaus lazerinis šaltinis suderintas su fotodiodu gali efektyviai veikti kaip spektrometrinis prietaisas. Šiai hipotezei patvirtinti pasirinktos keturios kraujyje aptinkamos molekulės su padidintomis koncentracijomis: galvijų serumas albuminas (baltymas, spektrine sugertimi panašus į žmogaus kraujyje aptinkamą žmogaus serumą albuminą,

BSA, 50 g/l koncentracija), gliukozė (30 mM, žmoguje aptinkama koncentracija 3 – 10 mM), šlapalas (30 mM, kraujyje įpratai aptinkama 3 – 8 mM) ir laktatas (50 mM, po intensyvaus sporto vertės siekia 15 – 25 mM). Šių kraujo analičių koncentracijos nustatymas neinvaziniu būdu leistų efektyviai kovoti su tokiais ligomis kaip diabetas, sepsis, inkstų ligos ir kt. Minėtųjų kraujo analičių tyrimai SWIR spektriniame diapazone yra sunkiai realizuojami dėl menko šaltinių pasirinkimo ir mažų optinių galių bei dominuojančios vandens sugerties juostos (smailė ties 1940 nm), ant kurios šlauto lokalizuoti šie spektriniai skirstiniai. Aptariamų kraujo analičių sugerties koeficientas SWIR diapazone yra iki trijų eilių (10^3) silpnesnis nei fundamentinių sugerties juostų esančių NIR diapazone sugertis [34]. Dar vienas tokius tyrimus apsunkinantis reiškinys – stipri vandens sugerties juostos spektrinė priklausomybė nuo temperatūros. Nustatyta, kad vandens temperatūros pokytis 1 °C sukelia tarp 2 ir 8 kartų didesnę sugerties pokytį nei 1 mM koncentracijos gliukozės tirpalas [35]. Dėl šios priežasties svarbu stabilizuoti bandinio temperatūrą.

Efektyvus būdas patikrinti Littman – Metcalf lazerinės sistemos pritaikomumą spektroskopiniams tyrimams – palyginti optinio pralaidumo spektrus su FTIR spektrometru. Minėtasis prietaisas geba išskirti itin silpnus signalus ir pasižymi geru signalo ir triukšmo santykiu, tačiau optinio sužadavimo šaltinis yra kur kas silpnesnis nei lazeriniame prietaise. Eksperimentas vykdomas matuojant kraujo analičių optinį pralaidumą 2100 nm – 2300 nm diapazone 1 mm storio kiuvetėje ištirpinus bandinius TBS (angl., tris-buffered saline) tirpale. Matavimas FTIR spektrometru atliekamas 100 kartų vidurkinant vieną spektrą (eksperimento trukmė apie 5 min.), o Littman – Metcalf lazerine sistema – spektriniai skirstinių imtis išmatuojama tik per 0,3 s. Optinio pralaidumo spektrai apskaičiuojami padalinus TBS su analizuojama kraujo analite pralaidumo spektrą iš pavienio TBS spektro. Rezultatai pateikiami 26 paveiksle, visi spektrai nėra sunormuoti siekiant išlaikyti optinės sugerties gylio mastelį. Nustatyta, kad esant aukštam sugerties koeficientui (sugerties juostos matomos ant vandens sugerties gaubtinės) BSA atveju abu prietaisai demonstruoja panašius rezultatus. Stebimos ryškios optinio pralaidumo juostos su smailėmis ties 2173 nm, 2258 nm ir 2288 nm aptinkamos literatūroje [34]. Kitokia situacija registruojama labai silpna sugertimi pasižyminčių kraujo analičių spektruose. Matyti, kad šlapalo optinio pralaidumo juostų išsidėstymas sutampa (2153 nm ir 2204 nm, analogiškai [34]) matuojant abiem metodais, tačiau sugerties intensyvumo skirtumas tarp pirmo ir antro maksimumų skiriasi daugiau nei 3 kartus. Lazerinės sistemos pritaikymas lemia aukštesnį optinį žadinimą, kas leidžia geriau išskirti silpnų spektrinių skirstinių sugertį. Ši tendencija dar labiau išryškėja gliukozės ir laktatų tyrime. Gliukozės pralaidumo spektre matoma ryški juosta ties 2268 nm ir išplitusi juosta apie 2150 nm. Šių juostų sugerties intensyvumo skirtumas išsiskiria analogiškai 3 kartus tarp FTIR ir lazerinės sistemos matavimų. Taip pat, Littman – Metcalf sistema užfiksuoja dar viena nežymi optinio pralaidumo juosta ties 2190 nm, kuri yra nematoma su FTIR spektrometru. Negalima atmesti galimybės, kad ši juosta atsiranda kaip sisteminė

paklaida, nes literatūroje ji nėra aptinkama. Vis dėlto, tokios didelės optinės galios prietaisai šioje spektrinėje juostoje, autoriaus žiniomis, dar nebuvo pasitelkti, kas paaiškintų šios juostos neidentifikavimą. Lazerine sistema matuojant spektrinio diapazono kraštus matomi iškraipymai, atsirandantys dėl žadinančios spinduliuotės intensyvumo kritimo. Tai gerai iliustruoja laktato spektras, kuriame registruojama sugertis ties 2262 nm, o 2298 nm sugerties smailė iškreipiama. Taip pat, silpna 2200 nm spektrinė juosta yra matoma tik su lazeriniu prietaisu, o sugerties juosta ties 2140 nm yra žymiai iškreipiama dėl žadinimo intensyvumo kritimo.



26 pav. Greitaveikiu Littman – Metcalf konfigūracijos lazeriniu diodu ir FTIR spektrometru išmatuotų galvijų serumo albumino (BSA, 50 g/l), šlapalo (30mM), gliukoės (30 mM) ir laktato (50mM) pralaidumo spektrinių skirstinių palyginimai.

Littman – Metcalf lazerinis spektrometras pasižymi savybėmis leidžiančiomis jį pritaikyti ne vien greitiems silpna optine sugertimi pasižyminčių kraujo analičių tyrimams, bet ir suteikiantis galimybę ateityje realizuoti neinvazinius kraujo tyrimus. Aukštas veikos dažnis pasiekiamas su MEMS veidrodžiu (iki 200 Hz), didelė optinė galia (viršijanti 20 mW), gera spektrinė skyra (priklausanti nuo interferometro FSR vertės) ir veikia 2100 nm – 2300 nm diapazone (spinduliuotė

įsiskverbia į odą keletą milimetrų [34]) leidžia tikėtis pozityvių tolesnių tyrimų siekiant optimizuoti šią sistemą neinvazinių tyrimų srityje.

Pratęsiant atliktus tyrimus, planuojama realizuoti sistemą integruojant daugiau Littman – Metcalf lazerinių šaltinių leidžiančių perdengti platesnį spektrinį diapazoną ir efektyviau išmatuoti visą dominančių kraujo analičių sugerties spektrinį diapazoną. Taip pat, labai svarbu tiksliai įvertinti vandens sugerties intensyvumą, norint tinkamai atimti foną (angl., baseline).

Išvados

- Siekiant realizuoti plačiai derinamą lazerį, efektyviausia panaudoti puslaidininkinį stiprinimo lustą su dideliu optiniu stiprinimu ir skaidriomis išorinio išėjimo veidrodžio danga (atspindžio koeficientas 10^{-5}). GaSb kvantiniais šuliniais pagrįsta struktūra ir lenktos keteros bangolaidžio koncepcija yra optimalus pasirinkimas ilgųjų bangų ruože.
- Pademonstruotas aukšto skenavimo dažnio išorinio rezonatoriaus Littman – Metcalf lazerinis šaltinis su GaSb stiprinimo lustu turintis itin platų bangos ilgių derinimo ruožą (>200 nm) su išskirtine spektrine skyra (< 77 pm) ir aukšta optine galia (22,3 mW) ties centriniu 2250 nm bangos ilgiu.
- Analizuojamo prietaiso emisinės savybės gali būti efektyviai valdomos termiškai ir elektriškai. Tai leidžia atlikti sistemos optimizavimą ir pritaikyti prie konkrečių poreikių.
- Realizuotas spektrometrinis prietaisas sėkmingai išbandytas įvairių kraujo analizių tyrimui 2100 nm – 2300 nm spektriniame diapazone su itin aukštu skenavimo dažniu (200 Hz). Tai atveria galimybes neinvaziniams tyrimams.

Literatūros sąrašas

- [1] M. P. Hansen and D. S. Malchow, “Overview of SWIR detectors, cameras, and applications,” in *Proceedings SPIEE*, 2008, vol. 6939, no., p. 69390I.
- [2] L. S. Rothman *et al.*, “The HITRAN2012 molecular spectroscopic database,” *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 130, pp. 4–50, 2013.
- [3] D. C. Sordillo, L. A. Sordillo, P. P. Sordillo, L. Shi, and R. R. Alfano, “Short wavelength infrared optical windows for evaluation of benign and malignant tissues,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 22, no. 4, p. 45002, 2017.
- [4] A. Caduff *et al.*, “Non-invasive glucose monitoring in patients with Type 1 diabetes: A Multisensor system combining sensors for dielectric and optical characterisation of skin,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 9, pp. 2778–2784, 2009.
- [5] O. T. Bruns *et al.*, “Next-generation in vivo optical imaging with short-wave infrared quantum dots,” *Nat. Biomed. Eng.*, vol. 1, no. 4, p. 56, Apr. 2017.
- [6] K. Vizbaras *et al.*, “High power continuous-wave GaSb-based superluminescent diodes as gain chips for widely tunable laser spectroscopy in the 1.95-2.45 μ m wavelength range,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 1, 2015.
- [7] I. Šimonytė, E. Dvinelis, R. Songaila, A. Trinkūnas, and M. Greibus, “High-power CW GaSb type-I gain chips as single-frequency sources for widely-tunable spectroscopy in the mid-infrared,” *SPIE OPTO*, vol. 9755, pp. 2–9, 2016.
- [8] S. Stephan, D. Frederic, and A. Markus-Christian, “Novel InP- and GaSb-based light sources for the near to far infrared,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 11, p. 113005, 2016.
- [9] M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, and G. Lasher, “Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, no. 3, pp. 62–64, 1962.
- [10] G. Overton, A. Noguee, D. Belforte, and C. Holton, “Annual Laser Market Review & Forecast: Where have all the lasers gone? - Laser Focus World,” *Laser Focus World*, no. 1, pp. 1–24, 2017.
- [11] R. Diehl, *High-Power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications*. Springer Science & Business Media, 2003.
- [12] S. G. Anjum and M. J. Siddiqui, “Multiple Quantum Well Based Lasing Nanostructures : A Review,” pp. 278–282, 2013.
- [13] Y. Shi, J. H. Zhao, J. Sarathy, G. Olsen, and H. Lee, “Quantum confined stark effect in GaInAsSb/AlGaAsSb quantum wells grown by molecular beam epitaxy,” *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 3, pp. 248–250, 1997.

- [14] C. Ye, *Tunable external cavity diode lasers*. Texas, USA: A and M University, 2004.
- [15] C. J. Hawthorn, K. P. Weber, and R. E. Scholten, "Littrow configuration tunable external cavity diode laser with fixed direction output beam," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 72, no. 12, pp. 4477–4479, 2001.
- [16] M. G. Littman and H. J. Metcalf, "Spectrally narrow pulsed dye laser without beam expander.," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 14, pp. 2224–2227, 1978.
- [17] J. I. Pankove, "Temperature Dependence of Emission Efficiency and Lasing Threshold in Laser Diodes," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 4, no. 4, pp. 119–122, 1968.
- [18] N. Bonod and J. Neauport, "Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 8, no. 1, p. 156, 2016.
- [19] C. Palmer and E. Loewen, "Diffraction Grating Handbook (6th edition)," vol. 5, 2005.
- [20] G. Cedex, "Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems: Recent developments and LETI activities," vol. 4076, no. 33, pp. 12–21, 2000.
- [21] K. Prachi, "Feasibility Study of Novel Optical MEMS for Nano Computing Applications," *Comput. Commun.* 2008., pp. 293–296, 2008.
- [22] M. de Labachellerie and G. Passedat, "Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 3, p. 269, 1993.
- [23] I. Šimonytė *et al.*, "Single-frequency infrared tunable lasers with single-angle-facet gain chips for sensing applications," *SPIE, Quantum Sens. Nano Electron. Photonics*, vol. 10111, p. 101110H, 2017.
- [24] W. R. Trutna and L. F. Stokes, "Continuously Tuned External Cavity Semiconductor Laser," *J. Light. Technol.*, vol. 11, no. 8, pp. 1279–1286, 1993.
- [25] K. Liu and M. G. Littman, "Novel geometry for single-mode scanning of tunable lasers," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 3, p. 117, 1981.
- [26] M. Kanti Bhowmik *et al.*, "Thermal Infrared Face Recognition – A Biometric Identification Technique for Robust Security system," *Rev. Refinements New Ideas Face Recognit.*, vol. 6, 2011.
- [27] C. Taylor and M. Borden, "LWIR-transmitting windows," no. 13, 1996.
- [28] S. SERRANTI, R. PALMIERI, and G. BONIFAZI, "Quality control based on SWIR and NIR hyperspectral imaging approaches: recovered aggregates from demolition waste recycling," in *17th International Conference on Near Infrared Spectroscopy*, 2015.
- [29] Alexander Bachman, "Antimonide Based Vertical cavity surface emitting lasers," *Walter Schottky Institut. Munich*, 2010.
- [30] K. H. Hazen, M. A. Arnold, and G. W. Small, "Measurement of glucose and other analytes in undiluted human serum with near-infrared transmission spectroscopy," *Anal. Chim. Acta*, vol.

- 371, no. 2–3, pp. 255–267, 1998.
- [31] R. Wang *et al.*, “III–V-on-Silicon Photonic Integrated Circuits for Spectroscopic Sensing in the 2–4 μm Wavelength Range,” *Sensors*, vol. 17, no. 8, p. 1788, 2017.
 - [32] P. R. Griffiths and J. A. de Haseth, *Fourier transform infrared spectrometry*, vol. 83. 1986.
 - [33] A. Vizbaras *et al.*, “High-performance single-spatial mode GaSb type-I laser diodes around 2.1 μm ,” *SPIE Photonics West 2014-OPTO Optoelectron. Devices Mater.*, vol. 8993, no. FEBRUARY 2014, p. 899319, 2014.
 - [34] J. Qian, “Glucose Monitoring in Various Matrices with Near-Infrared Spectrometry and Chemometrics,” *Thesis*, 2013.
 - [35] X. Zhang and J. H. Yeo, “Temperature influence on non-invasive blood glucose measurement,” *Proc. SPIE*, vol. 7186, no. 1, p. 71860R–71860R–7, 2009.

Santrauka

Darbą atliko: Tadas Bučiūnas
Darbo vadovas: Arūnas Miasojedovas

Greitaveikis plačiai derinamo bangos ilgio GaSb lazerinis šaltinis molekulinei spektroskopijai infraraudonųjų bangų spektriniame diapazone

Puslaidininkiniai lazeriniai diodai užima vis didesnę pasaulinės rinkos dalį dėl savo išskirtinių savybių: žemo energijos suvartojimo, ilgaamžės veikos, tvirtumo, spektrinio diapazono derinamumo bei nuolatinės veikos kambario temperatūroje su efektyvia integracija ir minimizacija. Inovatyvus Littman – Metcalf konfigūracijos lazerinis diodas su išoriniu rezonatoriumi pasižymi plačiu bangos ilgių derinimo diapazonu bei itin aukšta spektrine skyra. Vienmodė veika užtikrinama pasinaudojant difrakcine gardele kaip optiniu filtru, o bangos ilgio derinimas realizuojamas veidrodžio, valdančio grįžtamąjį ryšį, poslinkiu. Pakeitus įprastą veidrodį mikro-elektro-mechaniniu (MEMS) veidrodžiu pasiekiamas itin aukštas bangos ilgio ruožo skenavimo dažnis (iki 200 Hz). Toks lazeris, veikiantis trumpųjų infraraudonųjų elektromagnetinių bangų (SWIR) ruože, gali būti pritaikomas neinvazinės medicinos, spektroskopijos ar dujų jutiklių technologijose. Šio darbo tikslas yra Littman – Metcalf sistemos charakterizavimas, emisinių savybių valdymas optimizuojant prietaiso veiką žemo ir aukšto dažnio režimuose bei realizuoto lazerinio šaltinio pritaikymas spektrometriniuose tyrimuose. Nustatyta, kad efektyviausias minėtosios sistemos emisinio šaltinio pasirinkimas yra stiprinimo lustas su GaSb kvantiniais šuliniais, lenktos keteros bangolaidžiu bei praskaidrinta išėjimo danga. Stiprinimo lusto įterpimas į Littman – Metcalf konfigūraciją užtikrina itin platų bangos ilgių derinimo diapazoną (224 nm) su išskirtinę spektrinę skyrą (< 77 pm) ir aukštą optinę galią visame ruože (> 15 mW). Centrinis gaubtinės bangos ilgis lokalizuotas ties 2250 nm. Tokio lazerinio diodo su išoriniu rezonatoriumi emisinės savybės efektyviai valdomos termiškai (padėklo temperatūra) bei elektriškai (injekcinės srovės dydžiu), kas leidžia optimizuoti prietaiso veiką įvairiems taikymams. Suderinta su fotodiodu Littman – Metcaf aukštadažnė lazerinė sistema pritaikyta spektroskopiniame kraujo analizių (galvijų serumo albumino, gliukozės, laktato ir šlapalo) tyrime 2100 nm – 2300 nm diapazone. Nustatyta, kad šis prietaisas nenusileidžia FTIR spektrometro spektrinėms savybėms ir leidžia žymiai padidinti skenavimo greitį (trejomis eilėmis). Puikūs minėtosios lazerinės sistemos parametrai leidžia tikėtis efektyvaus pritaikymo neinvaziniuose medicininiuose tyrimuose SWIR diapazone.

Summary

Prepared by: Tadas Bučiūnas
Research advisor: Arūnas Miasojedovas

High-performance GaSb-based widely swept wavelength laser source for infrared molecular spectroscopy applications

Semiconductor laser diodes occupy ever more expanding proportion of the worldwide market due to their outstanding attributes, such as, low energy consumption, longevity, rigidity, spectral tunability and continuous wave operation at room temperature with a capability of integration and minimization. Innovative Littman – Metcalf external cavity diode laser configuration offers a wide wavelength tunability with an exceptional spectral resolution. Single-mode regime is ensured by employing diffraction grating as an optical filter, while spectral tuning is achieved by incrementing the position of the external feedback mirror. Incorporation of micro-electro-mechanical (MEMS) mirror allows to increase frequency of wavelength range scan up to 200 Hz. Laser diode operating at short-wavelength infrared (SWIR) region could be successfully implemented in non-invasive medicine, spectroscopy or gas sensor technologies. The aim of this work is to characterize Littman – Metcalf laser system in order to optimize and control principal optical/electrical properties in low and high frequency regimes to demonstrate efficient spectroscopic device. It is established that the most effective emission source of this scheme is a gain chip based on GaSb quantum well structure with curved waveguide and anti-reflection front mirror coating. Application of the gain chip in Littman – Metcalf configuration granted wide-range wavelength tunability (222 nm) with exceptional spectral resolution (< 77 pm) and high optical power (> 15 mW) in the entire range of spectral tuning. The center of the envelope is located at 2250 nm, corresponding to SWIR domain. Emission parameters can be controlled by thermal (temperature of the holder) and electrical (injection current) measures, which enables optimization of the device operation in order to satisfy different applications. High frequency Littman – Metcalf laser system accompanied with photodiode can be employed as a spectroscopic device to measure absorption spectra of blood analytes (such as bovine serum albumin, glucose, lactate and urea) in 2100 nm – 2300 nm spectral range. It is demonstrated that the performance of the external cavity diode laser system is comparable to FTIR spectrometer, nonetheless, with highly increased single scan speed (up to three orders of magnitude). Exceptional parameters of the Littman – Metcalf laser system supports an assumption that it could be effectively implemented in noninvasive medical research in SWIR range.