

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
PUSLAIDININKIŲ FIZIKOS KATEDRA

**Puslaidininkinių lazerių rezonatoriaus veidrodžių atspindžio
koeficiento nustatymas**

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Fizikos studijų programa

Studentas

R. Draugelis

Darbo vadovas

dr. A. Vizbaras

Recenzentas

doc. S. Nargelas

Katedros vedėjas

prof. habil. dr. G. Tamulaitis

Vilnius 2016

Turinys

1. Įvadas.....	3
2. Literatūros apžvalga	5
2.1 Panaudojimo sritys	5
3. Puslaidininkiniai lazeriai	7
3.1 Puslaidininkinio lazerio struktūra.....	7
3.2 Optinis stiprinimas	8
3.3 Fabry-Perot rezonatorius	11
3.4 Optinės dangos	12
3.5 Lazerio su išoriniu rezonatoriumi konfigūracijos	13
4. Eksperimento metodika	15
4.1 L-I-V matavimas.....	15
4.2 Kaminow atspindžio koeficiento matavimas	16
5. Bandinių paruošimas	19
6. Rezultatai.....	20
7. Išvados.....	29
8. Literatūros sąrašas	30
9. Santrauka	31
10. Summary.....	32

Ivadas

Lazerinių diodų (toliau -LD) rinka ėmė greitai plėstis, nuo pat pirmųjų atsiradimo dienų 1962 m. Remiantis 2004 metų statistikos duomenimis [1] jų buvo parduota daugiau nei 700 mln. vienetų. Pagrindinės to priežastys- plačios pritaikymo galimybės, prietaiso paprastumas, kompaktiškumas, patikimumas bei aukštas efektyvumas. Dėl šių savo savybių, lazeriniai diodai integruojami įvairiose sistemose, kurios naudojamos medicinos, gynybos, spektroskopijos ir kt. srityse.

Priklausomai nuo to, kokiems taikymams skirtas prietaisas, lazeriniai diodai gali veikti skirtingais režimais- vienmodžiu/ daugiamodžiu, didelės/mažos galios ir pan. Spektroskopijoje, dažniausiai pritaikomi lazeriniai šaltiniai pasižymintys dideliu šviesiu bei turintys siaurą spektrinę liniją. Šiam tikslui gali būti naudojami trys skirtingo tipo lazeriniai diodai- paskirstytojo atsako (anglų k. Distributed feedback laser-DFB), paskirstytojo Bragg'o reflektoriaus (anglų k. Distributed Bragg Reflector laser- DBR) bei išorinio rezonatoriaus (anglų k. External cavity diode laser- ECDL). Visi šie prietaisai emituoja labai siaurą spektrinę liniją, tačiau skiriasi kitomis savo savybėmis.

DFB lazeriniuose dioduose, auginimo metu prie p-n sandūros yra užauginama difrakcinė gardelė, kuri veikia kaip optinis filtras, leidžiantis gyvuoti tik vienai išilginei modai. Šie įtaisai pasižymi labai stabilium bangos ilgiu, kuris apsprendžiamas difrakcinės gardelės periodo ir gali būti temperatūriškai derinamas tik labai siaurame bangos ilgių diapazone. DBR lazerinių diodų struktūra panaši į DFB, bet jų ypatybė ta, kad selektuojančio elemento funkciją atlieka galinis rezonatoriaus veidrodis. Tuo tarpu ECDL sistemoje dažniausiai kombinuojamas superluminescencinis šviesos diodas su difrakcine gardele. Įjungus maitinimą, vyrauja spontaninė emisija ir lazerinė generacija nevyksta. Tai nulemia lazerinio diodo rezonatoriaus galinis veidrodis, kuris turi aukštą atspindžio koeficientą ($>95\%$) ir išėjimo veidrodis, kuris yra skaidrintas ir turi žemą atspindžio koeficientą ($\sim 10^{-4}$ eilės). Šios sistemos ypatybė ta, kad priklausomai nuo difrakcinės gardelės, pastatytos toliau nuo LD ir veikiančios kaip išėjimo veidrodis, pasukimo kampo, generuojama siaura (<100 kHz) [2] spektrinė linija, kuri gali būti derinama >100 nm bangos ilgių diapazone. Šios sistemos privalumas lyginant su DBR ir DFB yra tas, kad pačio lazerinio diodo gamybos procesas paprastesnis- gaminant DBR ir DFB puslaidininkiniai lydiniai turi būti išimami iš reaktoriaus proceso metu, tam kad būtų suformuota difrakcinė gardelė. Po to lydiniai vėl grąžinami į reaktorių ir auginami toliau. Dėl šios priežasties, tokio tipo LD pasižymi prastesnės kokybės kristaline sandara, atsiranda dislokacijos, dėl kurių gali sumažėti LD efektyvumas. Taip pat, svarbu užtikrinti, kad užaugintas LD šviestų ties norimu bangos ilgiu, nes galimas tik labai minimalus temperatūrinis derinimas. Tokiu būdu, išauga rizika, kad dėl dislokacijų, epitaksijos metu atsiradusių netikslumų ir kt. faktorių, užaugintas LD veiks ties kitu

bangos ilgiu arba jo efektyvumas bus žemas. Dėl šių priežasčių gamybos procesui taikomi papildomi reikalavimai, kurie apsunkina ir taip sudėtingą gamybos procesą.

Tuo tarpu ECDL naudojami LD yra užauginami neišimant kristalo iš reaktoriaus, kas nulemia mažesnę dislokacijų tankį ir didesnę efektyvumą. Taip pat galimybė derinti bangos ilgį supaprastina gamybos procesą.

Tam, kad ECDL veiktų gerai, reikia užtikrinti, kad optinis atsakas vyrautų ne nuo veidrodžio susidarančio skaldant lazerinių diodų masyvą, o nuo išorinio veidrodžio. Todėl šio darbo tikslas yra išmatuoti lazerinių diodų rezonatoriaus išėjimo veidrodžių, padengtų skirtingomis dielektrinėmis dangomis, atspindžio koeficientus, nustatyti optimalų atspindžio koeficientą, tinkamą diodinio lazerio su išoriniu rezonatoriumi, veikimui užtikrinti. Šio tyrimo metu ištirti GaSb puslaidininkiniai lazeriai, kurie buvo užauginti naudojant Veeco Gen200 Edge molekulinio pluoštelio epitaksijos sistemą. Darbas atliktas įmonėje UAB „Brolis Semiconductors“.

2 Literatūros apžvalga

2.1 Panaudojimo sritys

Karinė/gynybos pramonė

Lazeriniai diodai, veikiantys IR bangų ruože integruojami į gynybines, stebėjimo ir saugumo sistemas. Akiai nematoma spinduliuote apšviesti objektai gerai matomi pasitelkiant specialias SWIR (angl. k. Shortwave Infrared) kameras, kas suteikia galimybę matyti kokybišką vaizdą esant blogoms oro sąlygoms, bet koku paros metu. Lazeriniai diodai taip pat naudojami raketų nutaikymo, neutralizavimo ir sekimo sistemose.

Medicina

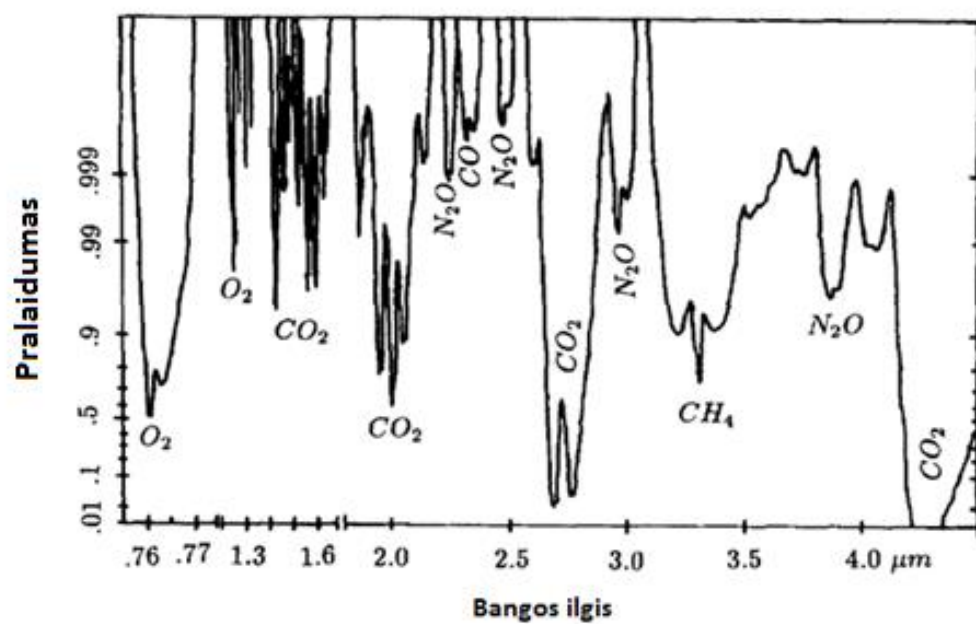
Puslaidininkiniai lazeriai naudojami medicininės diagnostikos srityje. Pagal žmogaus išskvepiamą orą nustatomos įvairių ligų diagnozės, atliekamos akies ragenos korekcijos operacijos, taip pat odos atnaujinimo procedūros. Paprastai šie šaltiniai yra patrauklesni už kieto kūno ar dujinius lazerius dėl savo kompaktiškumo, mažo energijos suvartojimo, pigumo ir prietaiso paprastumo.

Ultra-aukštos skyros spektroskopija, dujų jutikliai

Lazeriniai diodai, veikiantys infraraudonoje srityje, yra sėkmingai pritaikomi spektroskopijoje. Lazeriniai šaltiniai veikiantys ties 1,512 μm , 1,654 μm , 2,3 μm , bangos ilgiais suteikia galimybę tiksliai pataikyti į tokių molekulių, kaip NH_3 , H_2O , CO_2 , CO ir kt. sugerties juostas ir išmatuoti šių medžiagų koncentracijas įvairiose terpėse (1 pav.) [3]. Kiekvienos medžiagos molekulės turi savo sugerties savybes. Pagal tai, kaip lazerinė spinduliuotė paveikia medžiagos virpesinės ir vibracinės energijų lygmenis, galima nustatyti kokia tai medžiaga. Viena iš didžiausių pritaikymo sričių- dujų jutikliai, kurių paklausa laikui bėgant sparčiai auga, todėl siekiama sukurti kuo kompaktiškesnius, ilgaamžiškesnius, patikimesnius ir pigesnius jutiklius. Dėl savo mažų matmenų, šie jutikliai integruojami ne tik pastatuose, anglies kasyklose, bet ir automobilių dujų išmetimo sistemose ir kitose vietose, kur kompaktiškumas yra pirmas prioritetas.

Šiems taikymams labiausiai tinka vienmodžiai, GaInAsSb pagrindu pagaminti lazeriniai diodai, pasižymintys siaura spektrine linija ($\sim 0,05 \text{ nm}$) ir pakankamai didele galia. Dažnai naudojamos lazerinių diodų sistemos, kurių bangos ilgis gali būti derinamas plačiame IR bangų ruože. Šios sistemos gali skanuoti spektrus ir išskirti skirtingų medžiagų koncentracijas. Negana to, pagal

nuskanuotų spektrų pločius ir jų padėtis vienas kito atžvilgiu, galima nustatyti dujų temperatūrą ir slėgį.

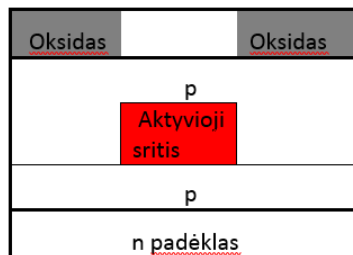


1 pav. Skirtingų medžiagų molekulių pralaidumo spektras. Adaptuota pagal [3]

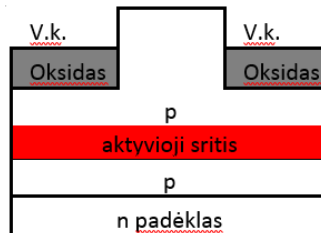
3 Puslaidininkiniai lazeriai

3.1 Puslaidininkinio lazerio struktūra

Lazerinė generacija vyksta aktyviojoje terpėje- srityje, kurios draustinių energijų tarpas mažas ir kuri apsupta dideliu draustinių energijų tarpu pasižyminčia medžiaga. Egzistuoja dvi pagrindinės lazerinių diodų struktūros- lūžio rodiklio valdomos ir kvazi-lūžio rodiklio valdomos (2-3 pav.) [4].



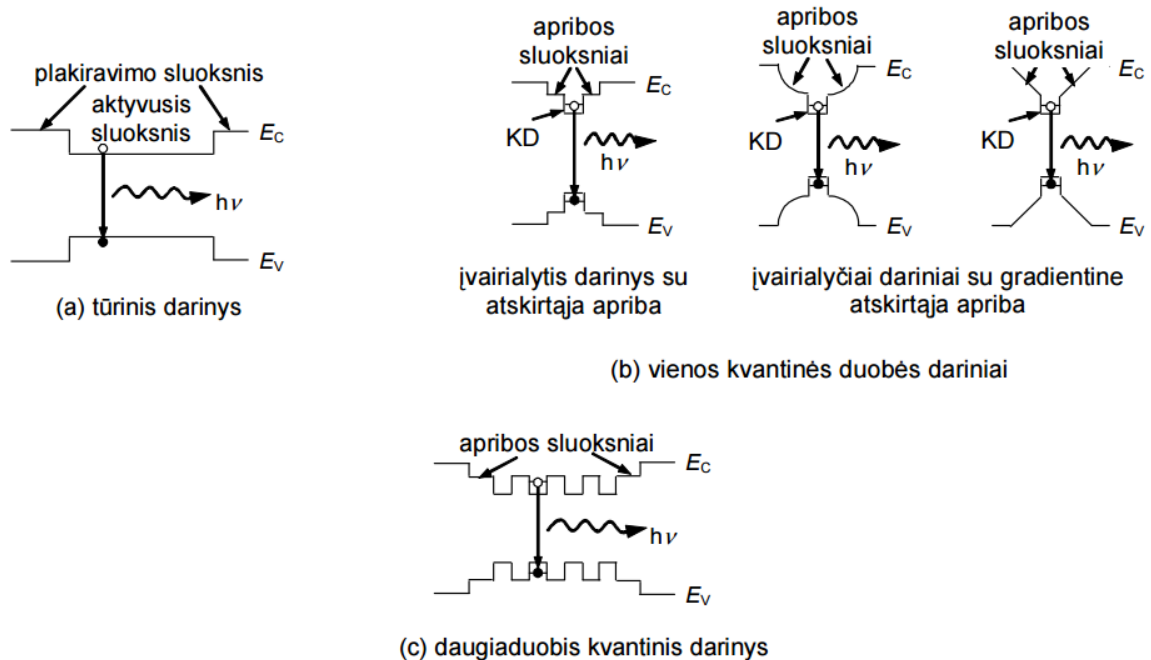
2 pav. Lūžio rodiklio valdoma puslaidininkinio lazerio struktūra



3 pav. Kvazi-lūžio rodiklio valdoma puslaidininkinio lazerio struktūra

Lūžio rodiklio valdomos struktūros suformuojamos dviejų epitaksijos procesų metu – užauginamas p sluoksnis, tuomet suformuojama aktyvioji terpė ir užauginami likę sluoksniai. Toks gamybos procesas kiek komplikotas ir rizikingas, nes su kiekvienu lazerinio diodo išėmimu iš reaktoriaus stipriai išauga klaidos tikimybė, taip pat ne taip tiksliai atkuriama kristalinė tvarka. Šios struktūros privalumas tas, kad fotonai yra labai tiksliai lokalizuojami.

Kvazi-lūžio rodiklio valdomos struktūros užauginamos vieno epitaksijos proceso metu, todėl išlaikoma aukšta kristalo kokybė. Krūvininkai yra injektuojami beveik lokaliai viršutinės mezos pagalba, todėl aktyviosios terpės plotis iš esmės apsprendžiamas mezos pločiu. Verta paminėti, kad injektuoti krūvininkai difunduoja į šonus atstumą, lygų mezos aukščiui.[4]



4 pav. Charakteringi puslaidininkinių lazerių aktyviosios terpės dariniai. Adaptuota pagal [5]

Aktyviojoje srityje formuojamos 1-20 nm pločio kvantinės duobės, siekiant užtikrinti geresnį krūvininkų lokalizavimą.

3.2 Optinis stiprinimas

Idealiuose puslaidininkiuose gali vykti trijų rūšių procesai: spontaninė spinduliuotė, priverstinė spinduliuotė ir sugertis [5]. Spontaninė spinduliuotė vyksta atsitiktinai skylei rekombinavus su elektronu ir išspinduliavus fotoną. Šio tipo spinduliuotė yra nekoherentinė, nes fotonų judėjimo kryptis, fazė ir energija yra skirtingi kiekvienam fotonui. Šiuo procesu paremtas puslaidininkinių šviestukų veikimas.

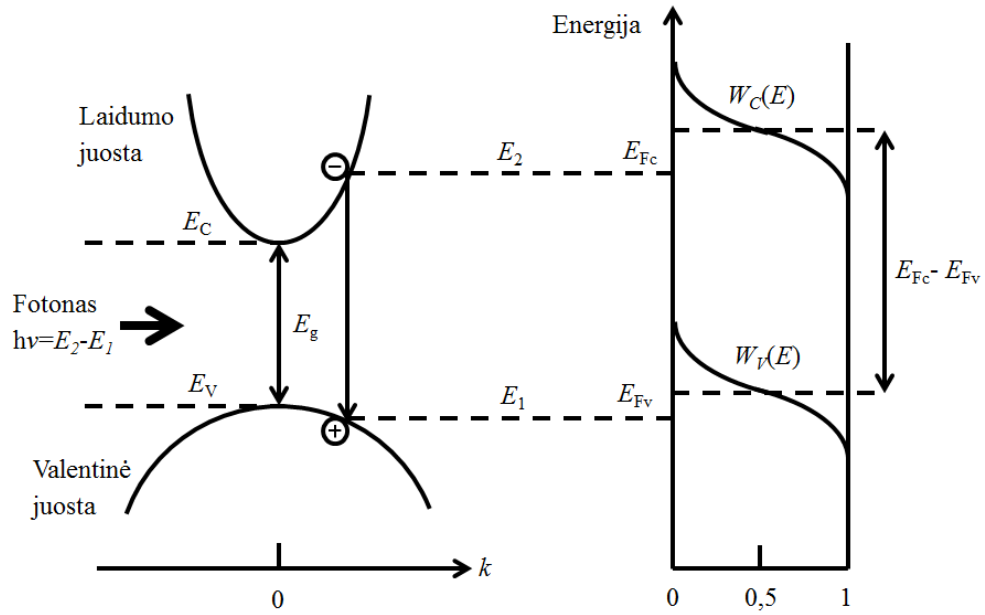
Priverstinė spinduliuotė yra svarbi lazeriniams diodams. Skylės ir elektrono rekombinaciją paveikia fotonas ir tuo metu yra sukuriamas kitas tokios pačios fazės ir krypties fotonas. Tokiu būdu gaunama koherentinė spinduliuotė.

Sugertimi vadinamas procesas, kurio metu medžiaga sugeria fotoną, tačiau spinduliavimas nevyksta. Šis procesas mažina daugelio puslaidininkinių prietaisų veikimo efektyvumą, nes tai lemia prietaiso šilimą.

Lazerinė generacija galima su sąlyga, kad kaupinimo energija viršys nuostolių energiją- kitaip tariant

bus sukurta užpildos apgrąža. Kvantinių šulinių lazeriuose, užpildos apgrąža įgyvendinama draustinių energijų juostoje. Krūvininkų pasiskirstymą nusako Fermi-Dirako funkcija

$$f(E, T) = \frac{1}{[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_b T}\right)]}, \quad (1)$$



5 pav. Elektroninių juostų diagrama ir Fermi-Dirako pasiskirstymai

Tikimybės elektronui užimti būseną valentinėje ir laidumo juostose

$$f_c(E, T) = \frac{1}{[1 + \exp\left(\frac{E - E_{FC}}{k_b T}\right)]}, \quad (2)$$

$$f_v(E, T) = \frac{1}{[1 + \exp\left(\frac{E - E_{FV}}{k_b T}\right)]}, \quad (3)$$

čia k_b - Boltzman'o konstanta, T - temperatūra, E_{FC} , E_{FV} Fermi kvazi-lygmenys laidumo ir valentinei juostoms. Kokia bus Fermi lygmens energija priklausys nuo to, kokia koncentracija krūvininkų bus kiekvienoje juostoje.

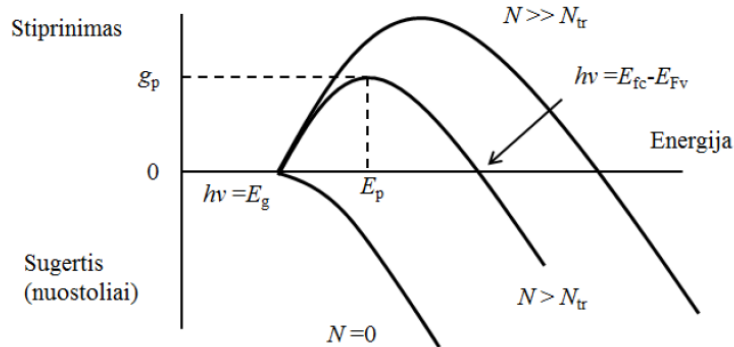
$$N = N_C \frac{2}{\pi} \int_{E_C}^{\infty} Z_C(E) W_C(E) dE \quad (4)$$

$$P = N_V \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{E_V} Z_V(E) [1 - W_V(E)] dE \quad (5)$$

Čia $N_{V,C}$ - efektinės valentinės ir laidumo juostų krūvininkų koncentracijos, o $Z_{V,C}$ - valentinės ir laidumo juostų būsenų tankiai.

Tam, kad vyrautų ne sugertis, o stiprinimas reikalinga išpildyti Bernard-Duraffourg sąlyga, t.y. Fermi lygmenų energijų skirtumas turi būti didesnis už draustinių energijų tarpą (5 pav.)

$$E_{FC} - E_{FV} \geq h\nu = E_2 - E_1 \geq E_g \quad (6)$$



6 pav. Stiprinimo kreivės esant skirtingoms krūvininkų koncentracijoms

Iš 6 paveikslo matyti, jog injektuojamųjų krūvių koncentracija turi pasiekti skaidrumo sritį N_{tr} , o stiprinimo intervalas yra

$$E_g \leq h\nu \leq E_{FC} - E_{FV} \quad (7)$$

Taip pat matyti, kad didžiausias stiprinimas g_p pasiekiamas, kai energija lygi E_p . Ši vertė priklauso nuo krūvininkų tankio ir gali būti aprašoma tiesine funkcija [5]

$$g_p(N) = \alpha(N - N_{tr}) \quad (8)$$

Čia α -stiprinimo koeficientas. Tuo tarpu krūvininkų tankis priklauso nuo srovės, tekančios lazeriniu diodu ir nuo to, kaip greitai tie krūvininkai rekombinuoja

$$I = eR(N)V_a \quad (9)$$

čia $R(N)$ - rekombinacijos sparta, o V_a - aktyviosios terpės tūris. Rekombinacijos spartos išraiška realiams puslaidininkiams skiriasi priklausomai nuo to, ar lazeris veikia iki slenkstinėje

$$R(N) = aN + bN^2 + cN^3 \quad (10)$$

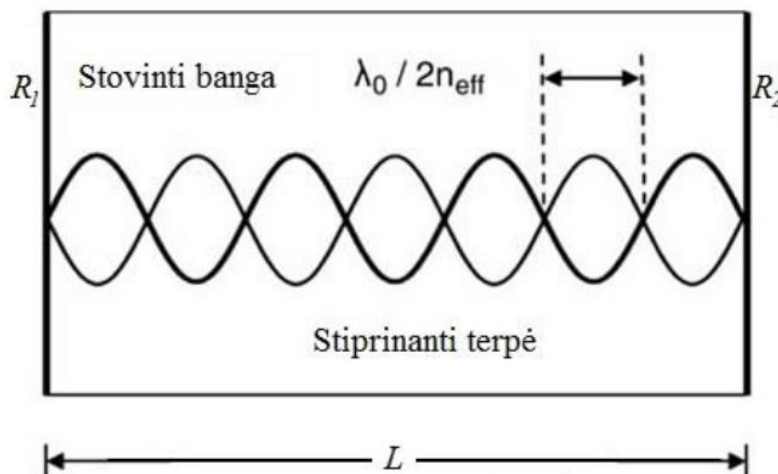
ar virš slenkstinėje srityje

$$R(N) = aN + bN^2 + cN^3 + R_{st}N_f \quad (11)$$

čia aN – nespindulinės rekombinacijos sparta, bN^2 – spontaninės spinduliuotės sparta, cN^3 – Ožė rekombinacijos sparta, o $R_{st}N_f$ – priverstinės spinduliuotės rekombinacijos sparta.

3.3 Fabry-Perot rezonatorius

Vienas iš būdų užtikrinti grįžtamąjį ryšį lazeryje yra Fabry-Perot rezonatoriaus suformavimas. Šio tipo rezonatorių sudaro du lygiagretūs veidrodžiai R_1 ir R_2 , pastatyti vienas nuo kito atstumu L ir stiprinanti terpė, kurios lūžio rodiklis n_{eff} [4]. Šio tipo rezonatoriaus schema pateikiama 7 pav.



7 pav. Fabry-Perot rezonatorius. Adaptuota pagal [4]

Šiam rezonatoriui būdinga stovinčios bangos sąlyga:

$$\nu_m = m \frac{c}{2n_0 L \cos \Theta} \quad (12)$$

kur ν_m – savasis rezonatoriaus dažnis, m – išilginės modos numeris, c – šviesos greitis, n_0 – aktyviosios terpės lūžio rodiklis, L – rezonatoriaus ilgis, Θ – kampas, kuriuo spinduliuotė krenta į rezonatoriaus veidrodį. Tam, kad vyktų lazerinė generacija reikia užtikrinti, kad stiprinimas būtų didesnis už difrakcinius, atspindžių, sklaidos ir sugerties sąlygojamus nuostolius. Kadangi puslaidininkinių lazerių rezonatorius labai trumpas, palyginus su kieto kūno ir kt. lazeriais, rezonatoriuje gali gyvuoti daug modų, todėl verta įsivesti tarpmodinio atstumo sąvoką:

$$\Delta \nu = \frac{c}{2n_0 L \cos \Theta} \quad (13)$$

Tam tikriems taikymams- dujų spektroskopijoje- režimas, kai rezonatoriuje gyvuoja daug modų nėra tinkamas, todėl kuriamos įvairios išorinio rezonatoriaus schemas siekiant sumažinti gyvuojančių modų skaičių.

3.4 Optinės dangos

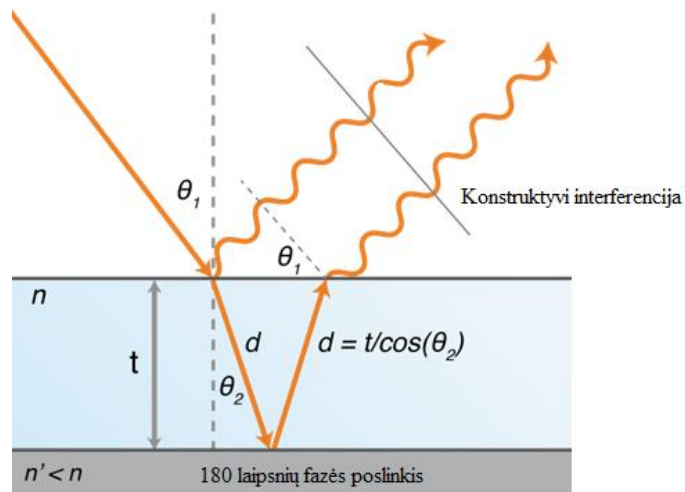
Lazeriniai diodai auginami reaktoriuose ant specialių auginimo padėklų. Priklausomai nuo lazerinio diodo medžiagos ir pageidaujamų savybių, parenkamas tam tikro kristalinės gardelės periodo padėklas. Vieno auginimo metu ant padėklo užaugus šimtams lazerių, jie yra atskiriami vienas nuo kito laužant padėklą tam tikrose vietose [10]. Tokiu būdu yra suformuojami rezonatoriaus veidrodžiai, kurių atspindžio koeficientas būna apie 33 % ir kuris bendru atveju gali būti įvertintas pasinaudojant formule:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (14)$$

Priklausomai nuo lazerio panaudojimo srities yra užgarinamos optinės dangos. Tam, kad lazerinę spinduliuotę sklistų tik į vieną pusę, galinis veidrodis padengiamas aukštą atspindžio koeficientą turinčia HR (anglų k. High reflective) danga. Išėjimo veidrodžio atspindžio koeficientas ECDL taikymams minimizuojamas iki 10^{-4} eilės [6] panaudojant AR (anglų k. Anti-reflective) dangas .

Optinės dangos veikimas paremtas eigos skirtumu, susidarančiu spinduliuotei sklindant skirtingą lūžio rodiklį turinčiomis medžiagomis. Spinduliuotei kritus į dviejų medžiagų sandūrą, dalis jos atspindi, o kita dalis praėjusi tam tikrą atstumą krentą į kitą medžiagų sandūrą ir yra atspindima. Priklausomai nuo to, koks kiekvienos medžiagos lūžio rodiklis ir sluoksnio storis sukuriamas bangos fazės poslinkis, taip formuojant konstruktyvią arba destruktivią interferenciją [6] (8 pav.)

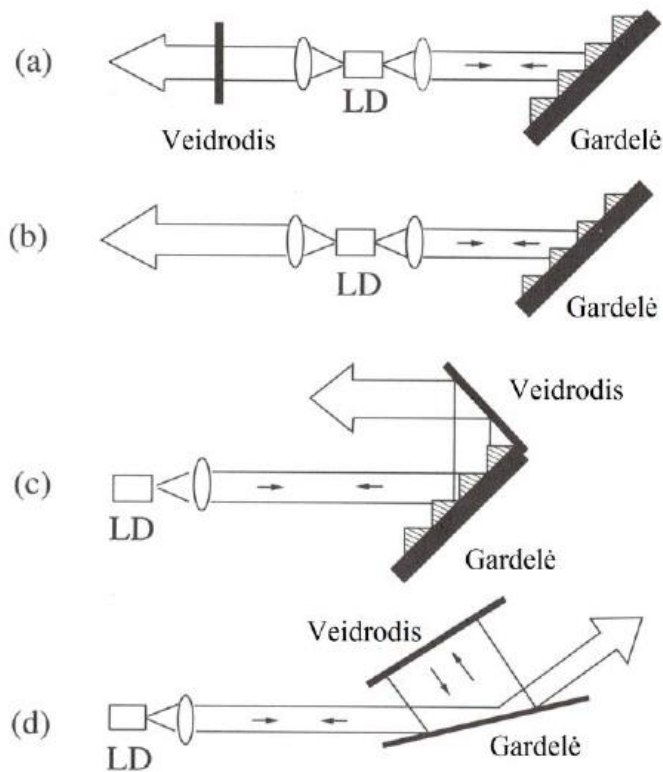
Medžiagos yra užgarinamos arba nusodinamos ant rezonatoriaus veidrodžių keliais etapais. Paprastai yra garinamas mažesnį lūžio rodiklį turinti medžiaga, po to aukštą rodiklį turinti medžiaga. Esant reikalui, gali būti formuojami ir daugiau sluoksnių. Paprastai GaSb lazeriniams diodams naudojamos Al_2O_3 , SiO_2 , Ga_2O_3 , Ta_2O_5 ir kt. dangos.



8 pav. Optinės dangos nulemta konstruktyvi interferencija. Adaptuota pagal [6]

3.5 Lazerio su išoriniu rezonatoriumi konfigūracijos

Lazeris su išoriniu rezonatoriumi gali būti realizuotas daugeliu skirtingu būdų. Bendru atveju, visose konfigūracijose pasitelkiamas lazerinis diodas, lęšiai, veidrodžiai bei difrakcinė gardelė. Pagal elementų išdėstymą ir jų specifikaciją yra skiriamos keturios pagrindinės schemos, kurios pavaizduotos 9 pav. [7]



9 pav. Skirtingos optinio atsako schemas: a) ir b) dvipusio atsako išorinio rezonatoriaus dizainas; c) vienvpusio atsako Littrow konfigūracija; d) Littman-Metcalf konfigūracija. Adaptuota pagal [7]

9 (a) paveiksle pavaizduota schema, sudaryta iš lazerinio diodo, kurio abu rezonatoriaus veidrodžiai padengti AR dangomis, kolimuojančiųjų lęšių, veidrodžio ir difrakcinės gardelės. Pastaroji reikalinga, kad būtų atrenkamas vienas siauras bangos ilgis. 9 paveiksle (b) pavaizduota panaši schema, tačiau vietoje veidrodžio panaudotas optinis filtras. Šio tipo konfigūracijos patrauklios tuo, kad keičiant bangos ilgį, t.y. sukant difrakcinę gardelę, lazerio spindulys nekeičia savo trajektorijos, o taip pat, dėka skaidrintų rezonatoriaus veidrodžių, yra efektyviai slopinamas rezonansas lazeriniame diode. Verta paminėti tai, kad daugelio lazerinių diodų mezos plotis yra μm eilės, tad išstatyti elementus taip, kad spinduliuotė pataikytų į tokią mažą apertūrą dažnai kelia sunkumų.

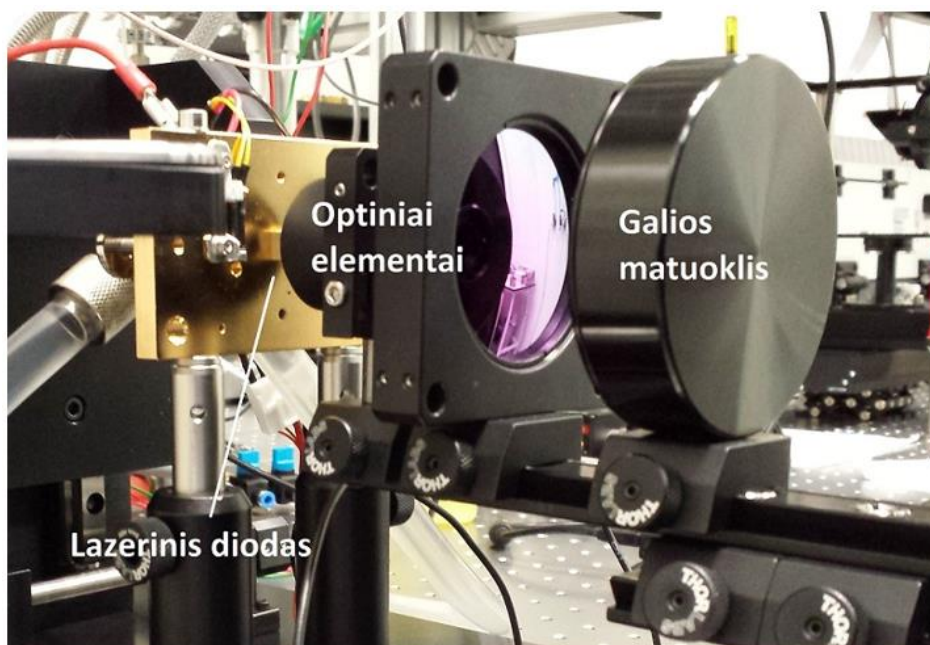
Littrow ir Littman-Metcalf konfigūracijos siūlo išeitį užginant HR dangą ant galinio veidrodžio, o AR dangą ant išėjimo veidrodžio. Difrakcinė gardelė ir veidrodis yra pritvirtinami ant platformos, kurios pasukimo kampas keičiamas naudojant pjezoelementą. Tokiu būdu lazerio generuojamas pluoštas nejuda suktis difrakcinei gardelei, taip pat žymiai supaprastėja visų elementų sulgiavimas. Deja, tačiau nors ir skaidrintas, rezonatoriaus išėjimo veidrodis, turi nenulinį atspindžio koeficientą, dėka kurio egzistuoja rezonansiniai efektai, kurie nulemia netobulą prietaiso veikimą.

4 Eksperimento metodika

4.1 L-I-V matavimas

Vienas iš lazerinio diodo charakterizavimo etapų yra L-I-V charakteristikos matavimas (10 pav.). Šio matavimo metu, registruojama įtampos ir optinės galios priklausomybė nuo maitinimo srovės. LD maitinimui gali būti naudojami du maitinimo šaltiniai: 1) „ILX Lightwave LDX-3232“, kurio didžiausia maitinimo srovė 4A; 2) „ILX Lightwave LDX-3612524“, kurio maksimali maitinimo srovė 130A. Pirmasis paprastai naudojamas vieno LD testavimui, antrasis- lazerinių diodų linuotėms, nes šių matavimų metu maitinami keletas lazerių vienu metu.

Pluošto kolimavimui naudojamas auksinis parabolinis veidrodis, kurio pagalba spinduliuotė nukreipiama į „ThermoFischer Nicolet 8700“ FTIR spektrometrą, kuris gali registruoti platų spinduliuotės spektrą - nuo 1 μm iki 20 μm .



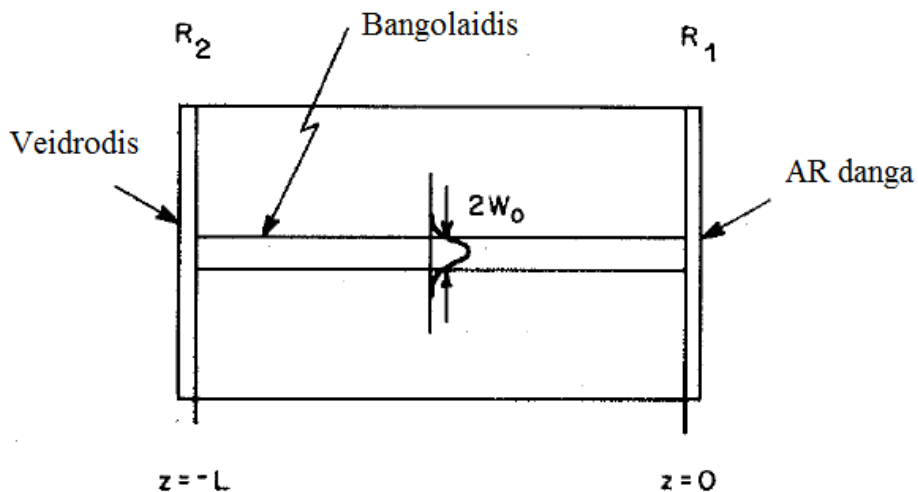
10 pav. L-I-V matavimų stendas

Taip pat stendą sudaro spinduliuotės galios matuoklis „Ophir 3A“, vandens aušintuvas, bei „Pyrocam III“ kamera, pluošto profiliui matuoti. Įtaisai montuojami ant specialių trijų ašių stalelių siekiant tikslesnio justiravimui.

4.2 Kaminow atspindžio koeficiento matavimas

Superliuminescenciniai šviesos diodai gali būti suformuoti užgarinus AR (anglų k. antireflective) dangą ant rezonatoriaus išėjimo veidrodžio siekiant minimizuoti optinį atsaką. Šiame poskyriuje pristatomas I. P. Kaminow, G. Eisenstein ir L. W. Stulz pademonstruotas eksperimentas, kuris pasiūlo galimybę išmatuoti veidrodžių atspindžio koeficientą, siekiantį $\sim 10^{-4}$ eilės. [8]

Tiriamas lazerinis diodas, kurio veidrodžių atspindžio koeficientai atitinkamai R_1 ir R_2 , o bangolaidžio ilgis L (11pav.). Spontaniškai kuriamas elektrinis laukas, judėdamas į kairę iš koordinatės $z = 0$ yra slopinamas G_- , o judėdamas į dešinę nuo $z = L$, stiprinamas G_+ .



11 pav. Lazerinis diodas, su R_2 galiniu ir R_1 išėjimo veidrodžiais. Adaptuota pagal [8]

Kai $R_1 = R_2 = R_l$,

$$G_- = G_+ = G_l \quad (15)$$

čia R_l - veidrodžio atspindžio koeficientas, susidarantis suskaldant lazerinių diodų masyvą. Po N pilnų pluošto apėjimų rezonatoriuje, elektrinio lauko vertė

$$E'(0) = E(0) \sum_0^N a^n = E(0)(1 - a)^{-1} \quad (16)$$

Čia $a = R_l e^{2j\beta L} e^{G_l}$ -vieno apėjimo stiprinimo koeficientas, kai $N \rightarrow \infty$, $2\beta L$ fazės postūmis.

Superliuminescenciniam diodui vieno apėjimo stiprinimo koeficientas lygus

$$a = \sqrt{R_1 R_2} e^{2j\beta L} e^{1/2(G_+ + G_-)} \quad (17)$$

Ir $a \ll 1$. Idealiu SLD $R_1 R_2 = 0$.

Galia, praeinanti pro veidrodį R_1 lygi $(1 - R_1)|E(0)|^2|1 - a|^{-2}$. Suintegravus visą nekoherentinę spontaninės emisijos spinduliuotę per visą LD ilgį, visa optinė galia lygi

$$P(\lambda) = P_z(1 - R_1)|1 - a|^{-2} \quad (18)$$

Apibrėžiamas moduliacijos indeksas

$$m = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}} \quad (19)$$

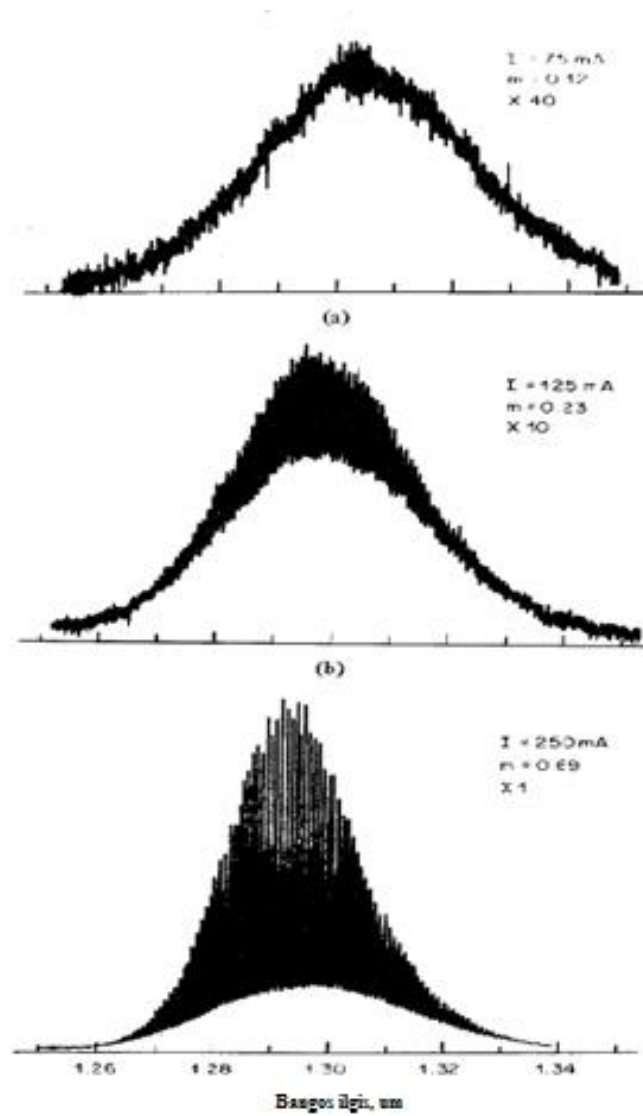
čia P_{max} ir P_{min} atitinkamai maksimali ir minimali galia. Šis dydis susietas su stiprinimo koeficientu šiuo sąryšiu:

$$m = \frac{2|a|}{1 + |a|^2} \quad (20)$$

Tuomet pasinaudojus

$$R_1 R_2 = (|a| R_l)^2 \quad (21)$$

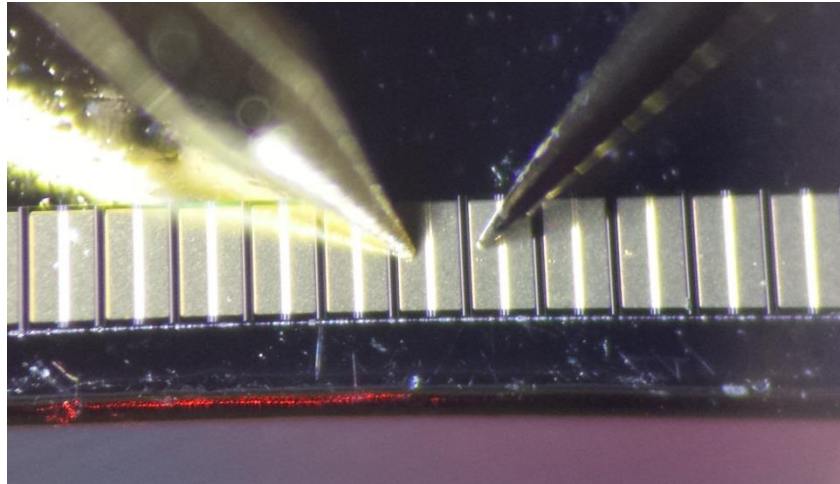
čia $|a|$ randamas iš 20 formulės, ties $I = I_{th}$. Tuomet matuojamas moduliacijos indeksas m prie tos pačios srovės ir apskaičiuojamas R_1 .



12 pav. Superliuminescencinio diodo spinduliavimo galia, kai $T = 20^\circ\text{C}$, (a) $I = 75 \text{ mA}$, $m = 0.12$, (b) $I = 125 \text{ mA}$, $m = 0.23$, (c) $I = 250 \text{ mA}$, $m = 0.69$. Adaptuota pagal [8]

5 Bandinių paruošimas

Šio darbo metu buvo matuojamos lazerinių diodų liniuočių (13 pav.) L-I-V ir spektrinės charakteristikos.

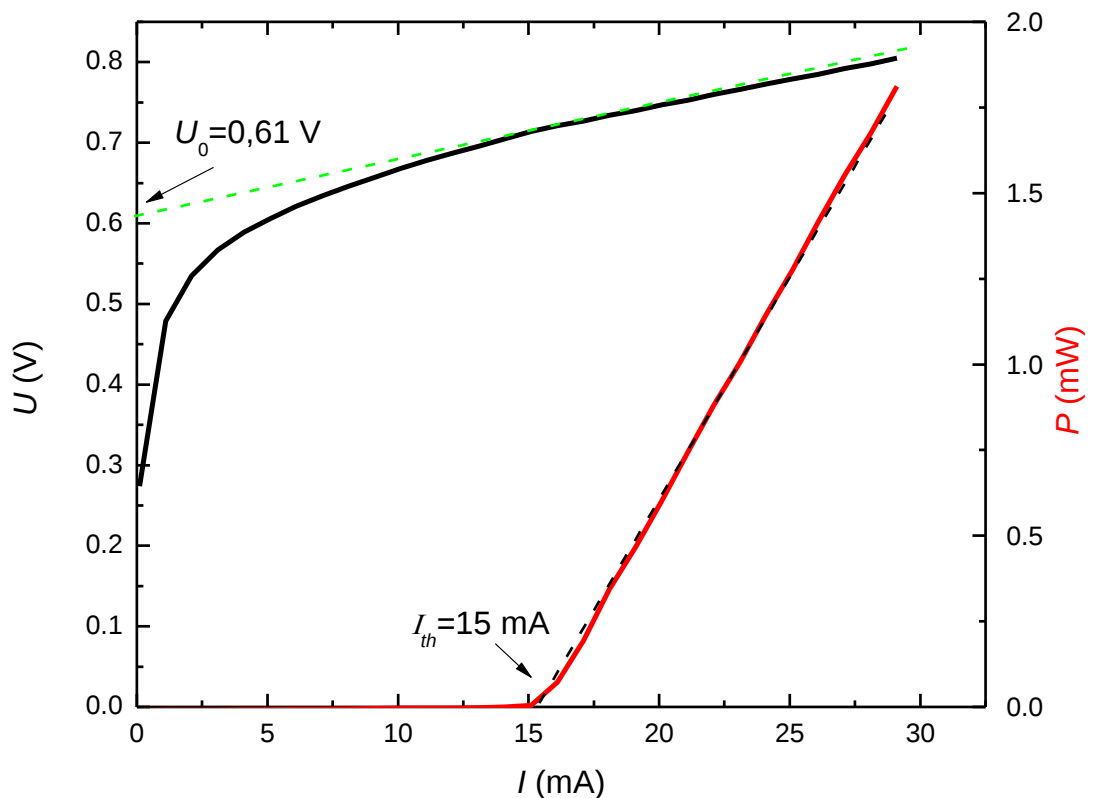


13 pav. GaSb lazerių liniuotė

Kiekvieną lazerinę liniuotę sudarė 31 lazerinis diodas, kurio kiekvieno rezonatoriaus ilgis buvo lygus 0,5 mm, mezos plotis 3 μm , o aukštis 2 μm . Šių lazerių specifikuojamas spinduliuojamas bangos ilgis yra 2,1 μm . Bandiniai pozicijuojami ant trimis kryptimis judančio stalelio ir prispaudžiami adatomis iš viršaus. Pastarosios atlieka viršutiniojo, p, kontakto vaidmenį, tuo tarpu n kontakto funkciją atlieka stalelis. Kontaktingomis adatomis prispaudus lazerinių diodų liniuotę prie platformos, vyksta justiravimas siekiant nukreipti kuo didesnę dalį spinduliuotės į galios matuoklį/spektrometrą.

6 Rezultatai

Pirmiausia buvo atliekami lazerinių diodų L-I-V charakteristikų matavimai, siekiant nustatyti lazerinio diodo slenkstinę generacijos srovę. Tam tikslui buvo panaudotos puslaidininkinių lazerių liniuotės, kurių rezonatoriaus išėjimo veidrodžiai dar nebuvo padengti jokiais optinėmis dangomis ir jų veidrodžių atspindžio koeficientai buvo lygūs 32,6 % (apskaičiuotas pagal 14 išraišką naudojant teorinę efektingą lūžio rodiklio vertę lygią 3,66). Išmatavus 31 lazerinio diodo (1 lazerinės liniuotės) generacijos slenkstį, aproksimuojant tiesinę galios priklausomybės nuo maitinimo srovės dalį, buvo nustatyta vidutinė slenkstinė srovė $I_{th} = 15 \text{ mA}$ (14 pav.).



14 pav. Lazerinio diodo L-I-V charakteristika, kai rezonatorių $R_1 = R_1 = R_2 = 0,326$

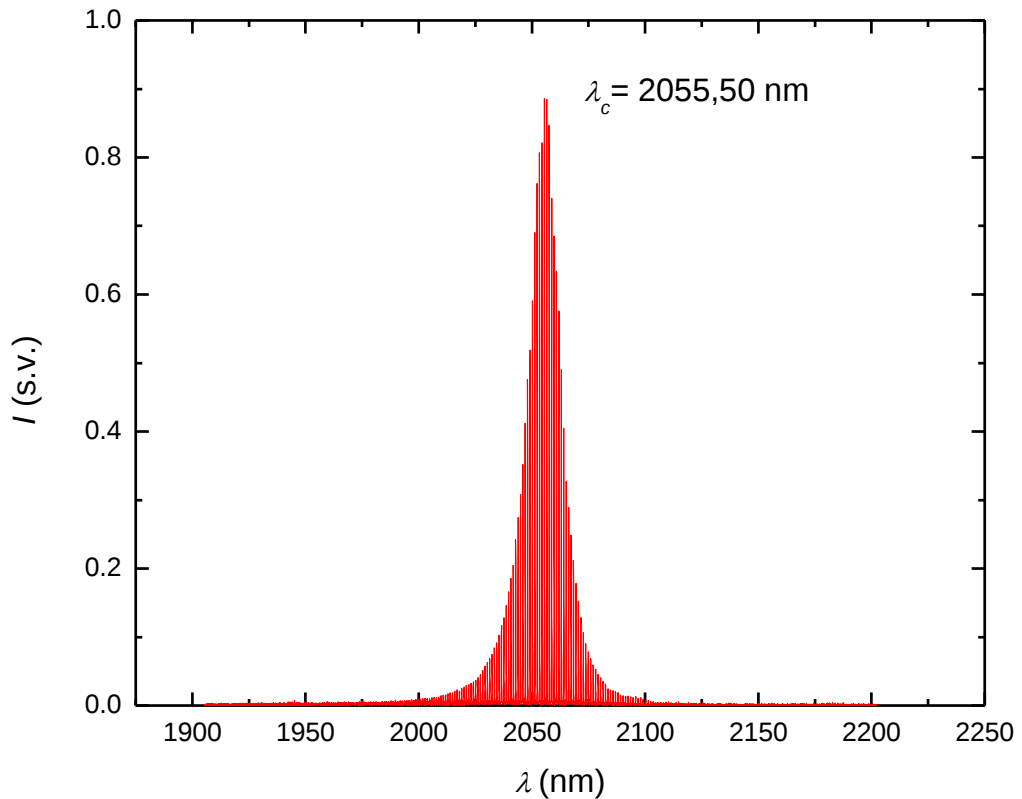
Taip pat atlikus įtampos priklausomybės nuo maitinimo srovės tiesinės dalies aproksimaciją buvo nustatyta vidutinė slenkstinė diodo atsidarymo įtampa $U_0 = 0,61 \text{ V}$. Ši įtampa parodo, kokios energijos fotonas turėtų būti, kad būtų sugertas arba sukeltų priverstinę spinduliuotę. Teoriškai ši energija turėtų sutapti su medžiagos draustinės juostos tarpu. Tam, kad būtų galima palyginti šias vertes buvo išmatuoti šių lazerių spektrai (15 pav.) iš kurių buvo nustatytas vidutinis centrinis bangos ilgis $\lambda_c = 2055,5 \text{ nm}$. Pasinaudojus formule

$$E = \frac{hc}{\lambda} = qU \quad (22)$$

buvo palygintos dvi energijos vertės. Duomenys pateikiami 1 lentelėje.

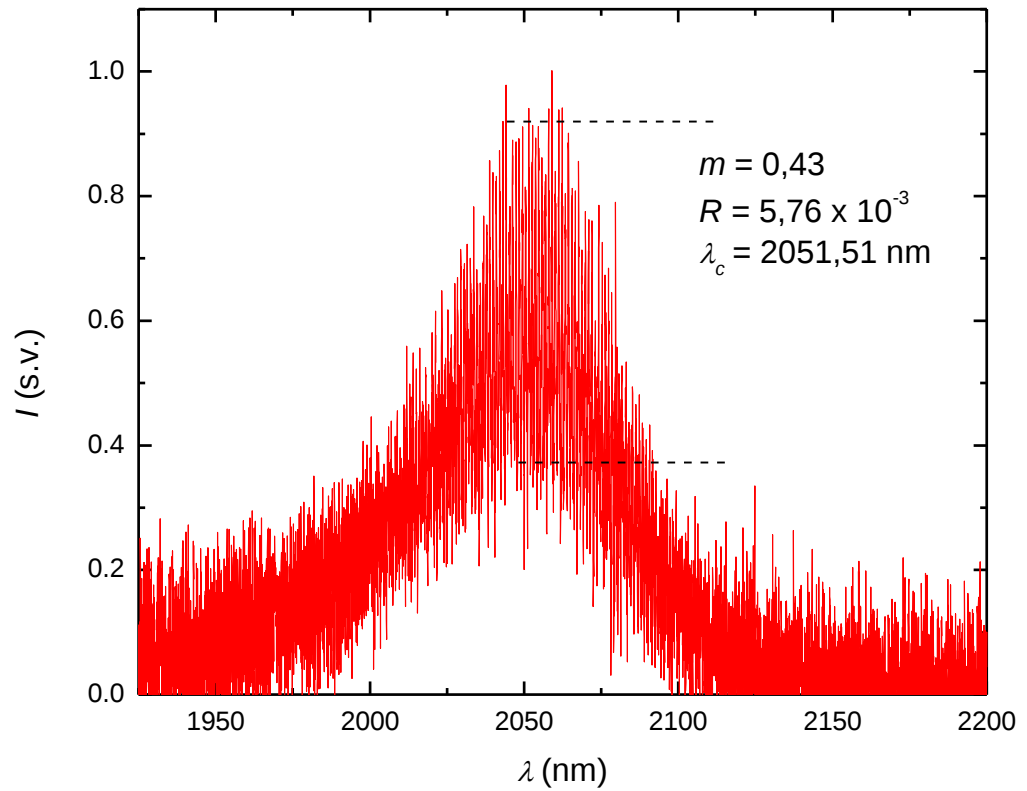
1 lentelė. Kvanto energijos palyginimas su diodo atsidarymo energija.

$E = \frac{hc}{\lambda}, \text{ eV}$	$E = qU, \text{ eV}$
0,61	0,61



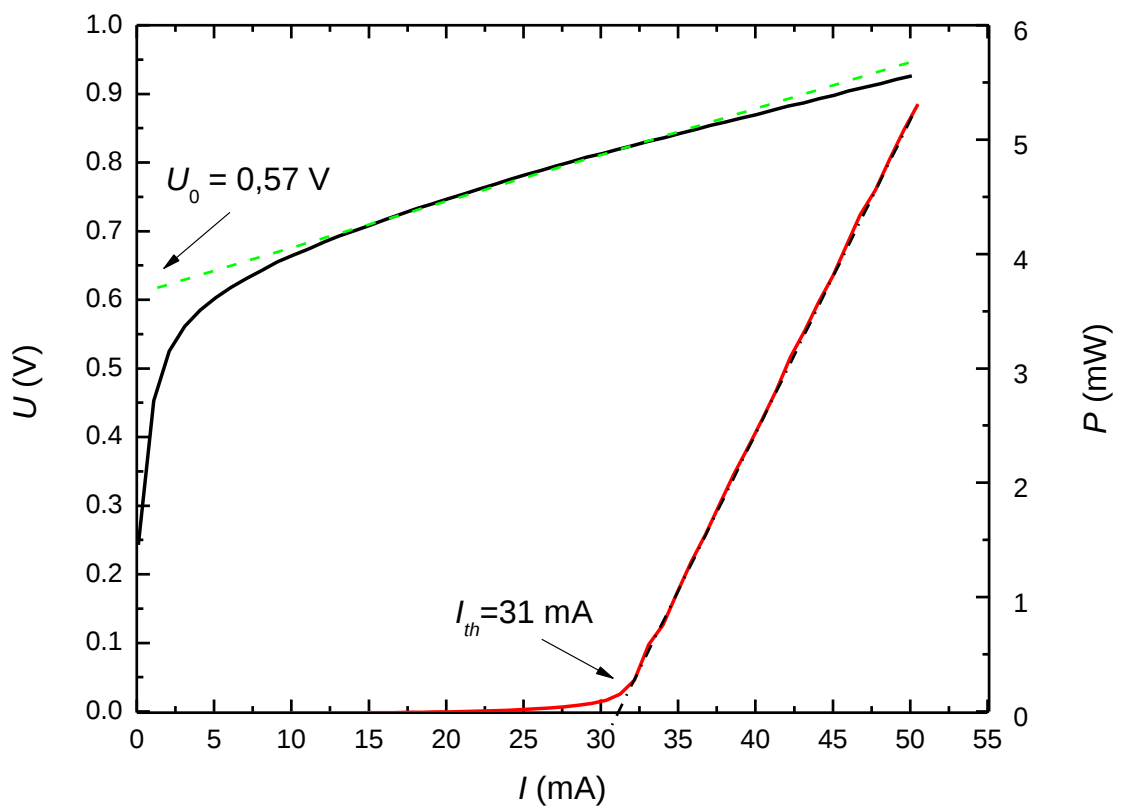
15 pav. Tipinis lazerio spektras, kai rezonatorių $R_1 = R_2 = 0,326$; $I = 15 \text{ mA}$

Kitas etapas buvo padengti lazerius optinėmis dangomis. Pasitelkus joninio dulkinimo metodą [9], galinis rezonatoriaus veidrodis buvo padengtas Si ir SiO_2 dangų kombinacija, tokių būdu suformuojant 95 % spinduliuotės atspindintį veidrodį. Tuo tarpu išvadinis rezonatoriaus veidrodis buvo padengtas $\lambda/4 \text{ Ta}_2\text{O}_5$ sluoksniu, siekiant sumažinti atspindžio koeficientą iki minimalaus ir kuris buvo nustatytas eksperimentiniu būdu.



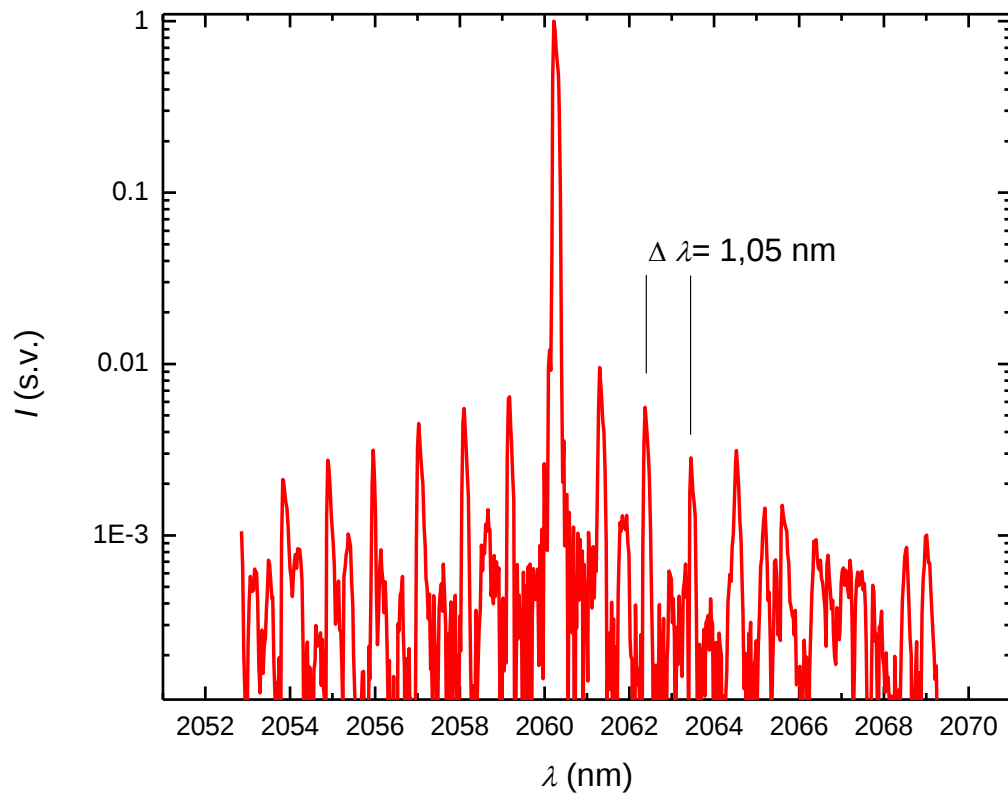
16 pav. Tipinis lazerio spektras, kai rezonatorių veidrodžių $R_1 = 0,95$; $R_2 = 5,76 \times 10^{-3}$; $I = 15$ mA

Pasinaudojus užregistruotu spektru pavaizduotu 16 paveiksle, apskaičiuotas moduliacijos gylis, o pritaikius 21 formulę buvo apskaičiuotas vidutinis rezonatoriaus išėjimo veidrodžio atspindžio koeficientas $R_2 = 5,76 \times 10^{-3}$. Taip pat buvo išmatuota slenkstinė generacijos srovė $I_{th} = 31$ mA, kuri išaugo 16 mA lyginant su prieš tai išmatuotų lazerių slenkstine srove. Tai nulėmė ženklus optinio atsako sumažėjimas rezonatoriuje, dėl nuskaidrinto išvadinio veidrodžio.



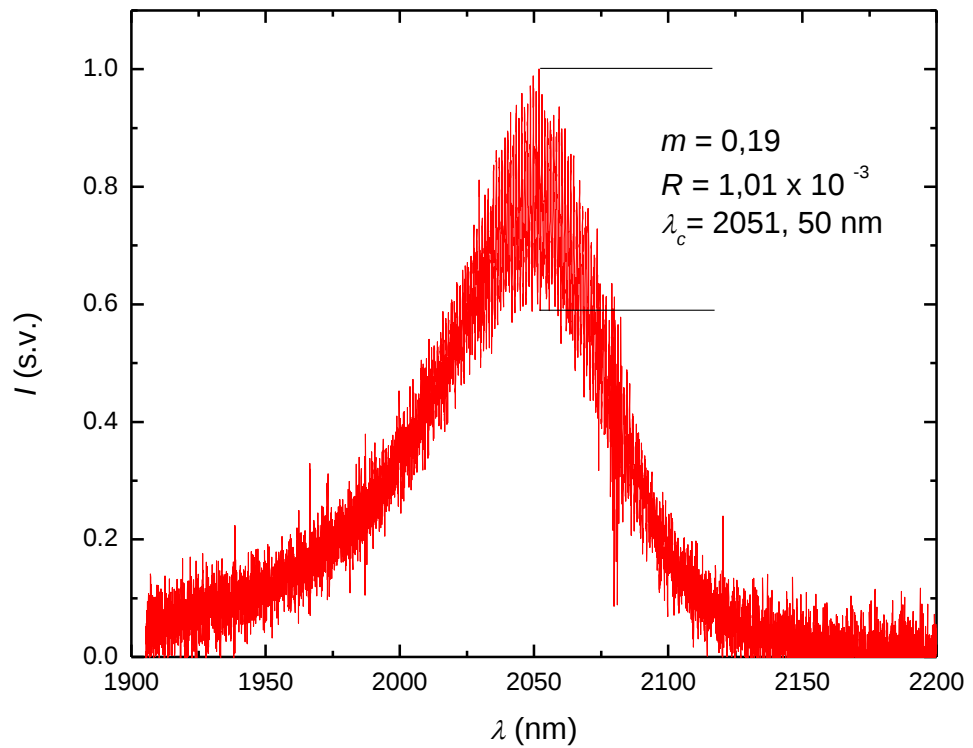
17 pav. Lazerinio diodo L-I-V charakteristika, kai rezonatorių $R_2 = 0,95$; $R_1 = 5,76 \times 10^{-3}$

Kitas etapas – lazerinės struktūros tikslios efektinio lūžio rodiklio vertės įvertinimas, kai yra suformuotos AR/HR dangos. Tam tikslui buvo stebima lazerinė generacija esant 31 mA maitinimo srovei. Pasinaudojus užregistruotu spektru (18 pav.) buvo išmatuotas atstumas tarp dviejų išilginių modų ir pasinaudojus 13 formule apskaičiuotas efektinis lūžio rodiklis lygus 3,26.

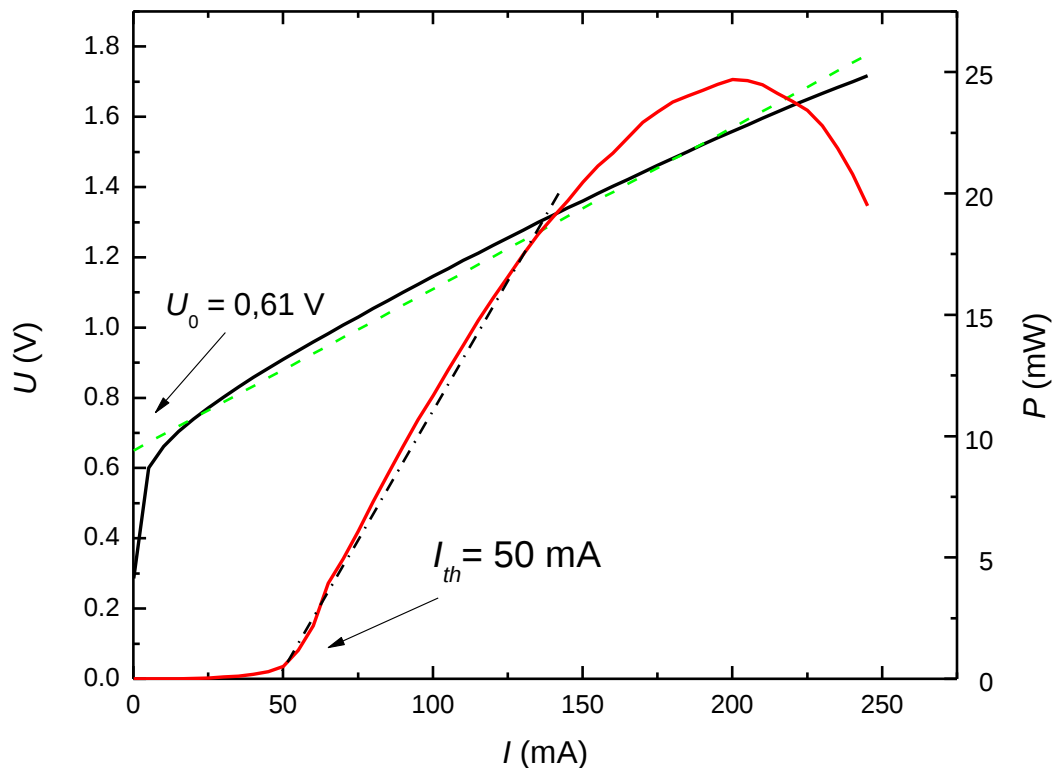


18 pav. Tipinis lazerio spektras , kai $I = 31 \text{ mA}$

Ši efektinio lūžio rodiklio vertė buvo panaudota modeliuojant optinės dangos dizainą ir formuojant optines dangas ant kitos tokios pačios lazerinės liniuotės kaip ir buvo matuota prieš tai. Išmatuotos L-I-V ir spektrinės charakteristikos pavaizduotos 19-20 paveiksluose. Matyti, kad atspindžio koeficientas sumažėjo ženkliai iki $R_2 = 1,01 \times 10^{-3}$. Išmatuota slenkstinė generacijos srovė siekė 50 mA. Taip pat buvo pastebėta, kad pasiekus 210 mA maitinimo srovę spinduliuotės intensyvumas $P_{max} = 25 \text{ mW}$ ima mažėti. Ši srovės vertė atitinka maksimalią spinduliuotės galią, esant minimaliam rezonatoriaus kuriamam optiniam atsakui.



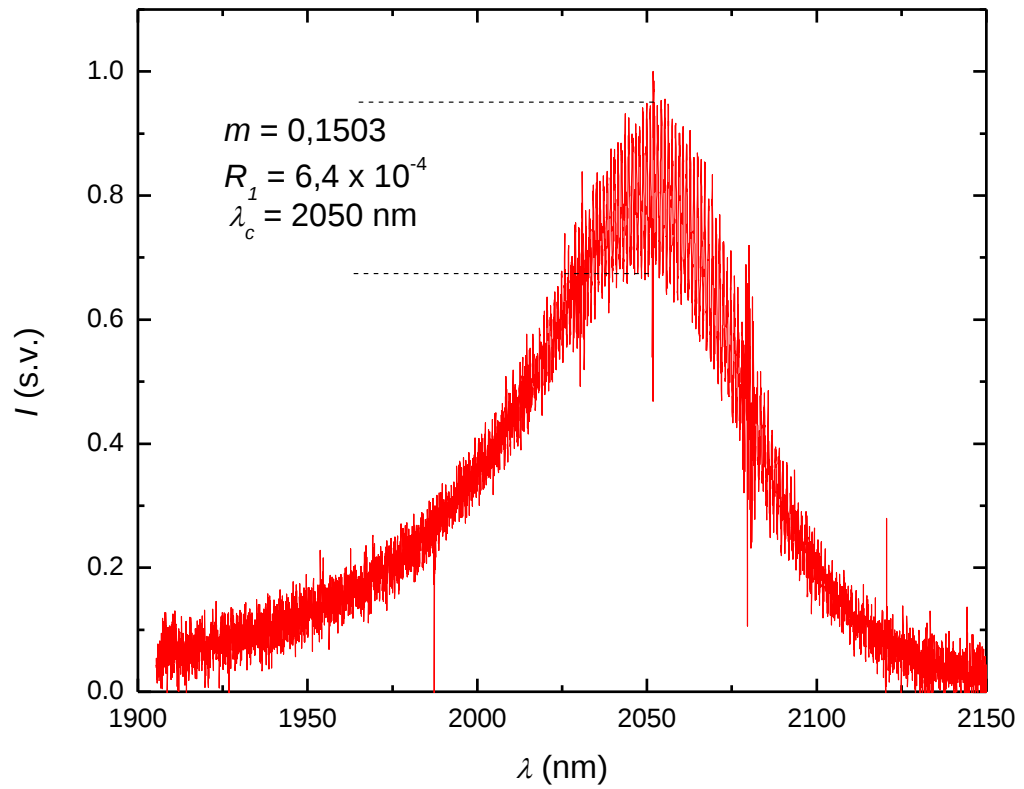
19 pav. Tipinis lazerio spektras, kai rezonatoriaus veidrodžių $R_2 = 0,95$; $R_1 = 1,01 \times 10^{-3}$; $I = 15 \text{ mA}$



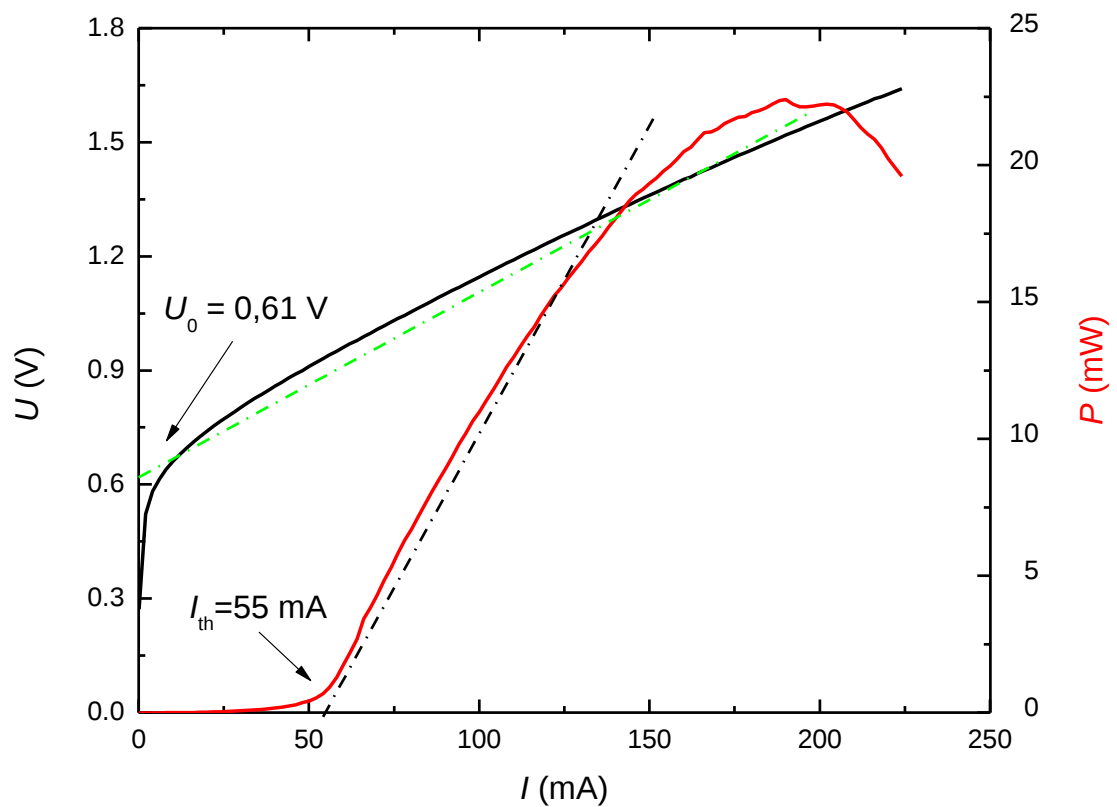
20 pav. Lazerinio diodo L-I-V charakteristika, kai rezonatorių $R_2 = 0,95$; $R_1 = 1,01 \times 10^{-3}$

Atlikus keletą skirtingų parametrų iteracijų modeliuojant ir formuojant optines dangas, galiausiai buvo parinkta parametrų kombinacija, kuri išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientą minimizavo

iki $R_1 = 6,4 \times 10^{-4}$ (21 pav.), slenkstinė maitinimo srovė išaugo iki $I_{th} = 55$ mA , o maksimali spinduliuotės galia atitiko $P_{max} = 22,5$ mW (22pav.).

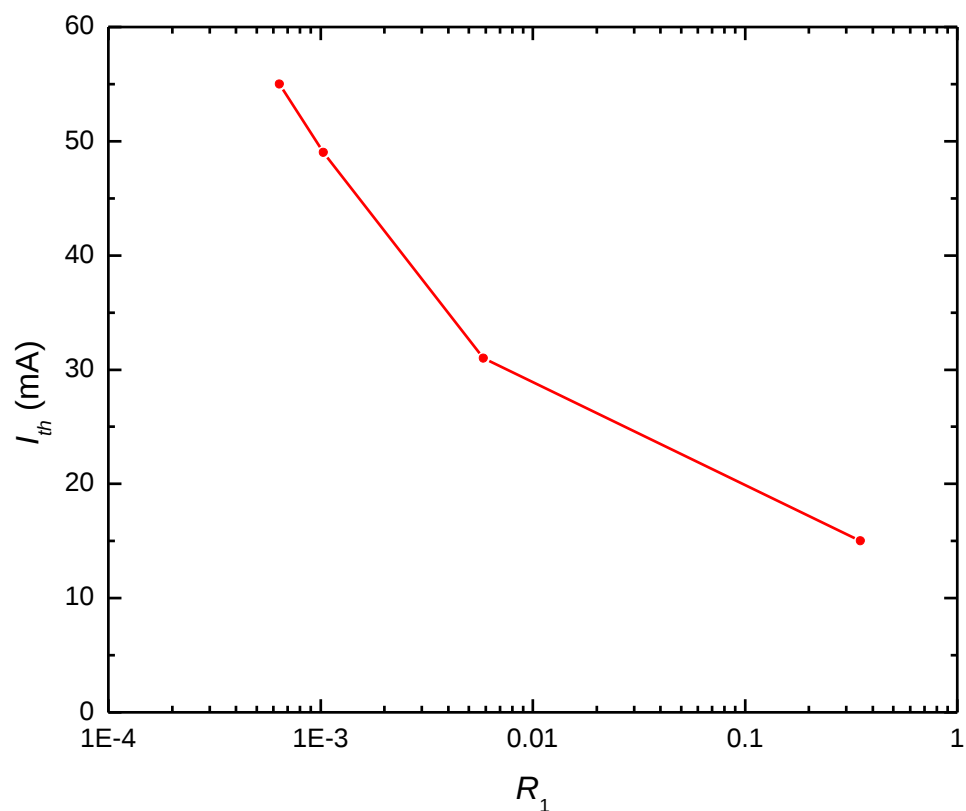


21 pav. Tipinis lazerio spektras, kai rezonatoriaus veidrodžių $R_2 = 0,95$; $R_1 = 6,4 \times 10^{-4}$; $I = 15$ mA



22 pav. Lazerinio diodo L-I-V charakteristika, kai rezonatorių $R_2 = 0,95$; $R_1 = 6,4 \times 10^{-4}$

Remiantis 23 paveikslu galima teigti, kad dėl silpnėjančio optinio grįžamojo ryšio rezonatoriuje slenkstinė generacijos srovė auga, dėl mažesnio fotonų, kurie sustiprina spontanine spinduliuotę, skaičiaus liekančio rezonatoriuje.



23 pav. Slenkstinės generacijos srovės priklausomybė nuo išvadinio veidrodžio atspindžio koeficiento

Šių tyrimų metu atspindžio koeficientas buvo sumažintas beveik 10 kartų lyginant su pradine verte. Siekiant dar patikslinti šį rezultatą būtų galima išbandyti kitus atspindžio koeficiento matavimo metodus, naudoti tikslesnę matavimo įrangą. Taip pat ženklėsniam atspindžio koeficiento sumažėjimui pasiekti būtų galima formuoti tam tikru kampu lenktą bangolaidį [7].

7 Išvados

1. Puslaidininkinio lazerio, pagaminto GaSb pagrindu ir veikiančio ties $\lambda = 2,05 \mu m$ bangos ilgiu, išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientas gali būti sumažintas iki $6,4 \times 10^{-4}$ vertės panaudojant $\lambda/4$ Ta₂O₅ optinės dangos sluoksnį.
2. Tyrimo metu nustatyta, kad dėl rezonatoriaus kuriamo grįžtamojo ryšio sumažėjimo ir fotonų skaičiaus, galinčio sustiprinti spontanine emisiją, sumažėjimo aktyviojoje terpėje, esant $6,4 \times 10^{-4}$ išvadinio veidrodžio atspindžio koeficiento vertei pasiekti lazerinę generaciją reikia 40 mA didesnės maitinimo srovės, nei esant išvadiniam veidrodžiui, kurio atspindžio koeficientas lygus 0,326.
3. Siekiant sumažinti rezonatoriaus išvadinio veidrodžio atspindžio koeficiento vertę iki mažesnės nei $6,4 \times 10^{-4}$, reikia pasitelkti kitus atspindžio mažinimo metodus.

8 Literatūros sąrašas

- [1] Kincade, Kathy; Stephen Anderson (2005). "Laser Marketplace 2005: Consumer applications boost laser sales 10%". Laser Focus World 41(1). Archived from the original on September 27, 2007.
- [2] I. Šimonytė, E. Dvinelis, R. Songaila, A. Trinkūnas, ir M. Greibus, „High-power CW GaSb type-I gain chips as single-frequency sources for widely-tunable spectroscopy in the mid-infrared.“
- [3] K. Vizbaras, E. Dvinelis, M. Greibus, ir R. Songaila, „High power continuous-wave GaSb-based superluminescent diodes as gain chips for widely tunable laser spectroscopy in the 1.95 – 2.45 μm wavelength range“, t. 011103, p. 2–6, 2015.
- [4] J. Buus, M.-C. Amann, ir D. J. Blumenthal, Tunable Laser Diodes and Related Optical Sources, 2nd, Secon. 2005.
- [5] S. Pralgauskaitė, Optoelektronikos įtaisai telekomunikacijų sistemose (mokymosi priemonė). 2010.
- [6] Hemant Kumar Raut, Anand Ganesh, A. Sreekumaran Nairb and Seeram Ramakrishna, Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review; Received 15th March 2011, Accepted 7th June 2011
- [7] C. Ye, „Tunable External Cavity Diode Lasers.“ p. 262,69 2004.
- [8] I. P. Kaminow, G. Eisenstein, ir L. W. Stulz, „Measurement of the modal reflectivity of an antireflection coating on a superluminescent diode“, Quantum Electronics, IEEE Journal of, t. 19, nr. 4. p. 493–495, 1983.
- [9] R. Diehl, High-Power Diode Lasers: Fundamentals, Technology, Applications. Springer Science & Business Media, 2003.
- [10] P. W. Epperlein, Semiconductor Laser Engineering, Reliability and Diagnostics: A Practical Approach to High Power and Single Mode Devices. John Wiley & Sons, 2013.

Santrauka

Pagrindinis šio darbo tikslas buvo išmatuoti GaSb puslaidininkinių lazerių rezonatoriaus išvadinio veidrodžio, kuris buvo dengiamas skirtingomis dielektrinėmis dangomis, atspindžio koeficientą P . Kaminow pasiūlytu metodu ir nustatyti, kokios dangos reikia, kad šis koeficientas būtų mažiausias. Šis metodas pagrįstas moduliacijos gylio matavimu iš spektrinės superliuminescencinio lazerinio diodo charakteristikos. Šių matavimų metu buvo nustatyta, kad mažiausią, $6,4 \times 10^{-4}$ atspindžio koeficientą galima pasiekti padengiant išvadinį rezonatoriaus veidrodį $\lambda/4$ Ta₂O₅ sluoksniu. Taip pat nustatyta slenkstinės generacijos srovės priklausomybė nuo rezonatoriaus veidrodžio atspindžio koeficiento vertės.

Summary

By Rokas Draugelis

“Measurement of reflective index of resonator mirrors in semiconductor laser“

The main purpose of this study was to measure modal reflectivity of output facet of GaSb superluminescent laser diode which was coated with ultra-anti-reflective coating. This study was based on P. Kaminow method which offers measurement of modulation depth of Fabry-Perot resonator at the threshold current of the original laser. It was found out that minimum reflectivity value of the output facet of $6,4 \times 10^{-4}$ can be achieved by applying thin $\lambda/4$ Ta₂O₅ film. During the research it was also determined threshold current dependence to output facet reflectivity.