

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
TAIKOMOSIOS ELEKTRODINAMIKOS IR TELEKOMUNIKACIJŲ INSTITUTAS

Ryšard Masevič

DERINAMO BANGOS ILGIO LAZERIO, SKIRTO SKAIDULINĖMS OPTINĖMS
SISTEMOMS, KONSTRAVIMAS IR TYRIMAS

MAGISTRO STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Elektronikos ir telekomunikacijų technologijų studijų programa

Studentas

Ryšard Masevič

Darbo vadovas

doc. Maksim Ivanov

Konsultantas

doc. Šarūnas Svirskas

Instituto direktorius

prof. Robertas Grigalaitis

Vilnius 2024

Turinys

Įvadas.....	3
1. Literatūros analizė	4
1.1. Puslaidininkiniai lazeriai	4
1.1.1. Priverstinės spinduliuotės, sugerties ir stiprinimo principai lazeriniuose dioduose	4
1.1.2. Lazerinio diodo elementai	6
1.1.3. Lazerinių diodų su išoriniu rezonatoriumi veikimas ir charakteristikos	7
1.2. Difrakcinės gardelės, jų dispersija ir našumo charakteristikos.....	9
1.3. Echelle gardelė	13
1.4. Bangos ilgio derinimas keičiant rezonatoriaus ilgį	14
1.5. MEMS veidrodžiai	16
1.6. Banginio tankinimo moduliacija	17
1.7. Derinamų lazerių tyrimai.....	18
2. Tyrimų metodika	20
2.1. Darbo schema	20
2.2. Matavimų priemonės	23
3. Rezultatų aptarimas	27
3.1. Galios matavimas	27
3.2. MEMS veidrodžio skenavimo matavimai	28
3.3. Spinduliavimo spektro ir spektro pločio matavimai.....	29
Išvados.....	34
Literatūra	35
Summary	37
Santrauka	38

Įvadas

Puslaidininkiniai lazeriai yra neatsiejama telekomunikacijų sistemų ir susisiekimo dalis. Naudojantis jais mes galime perduoti skaitmeninius arba analoginius optinius signalus su didele sparta, mažais nuostoliais ir geresniu atsparumu nuo aplinkos veiksnių, nei kiti perdavimo būdai. Informacijos ir duomenų kiekio, bei poreikio šiems duomenims perduoti, didėjimas skatina persiuntimo spartos augimą, tuo pačiu optinių tinklų taikymą tiek versle, tiek paslaugų teikimą fiziniams asmenims. Tačiau su optiniais telekomunikacijų tinklais atsiranda problemų – atspindžiai pažeistose skaidulose arba atskirų kanalų slopinimas tankiojo banginio tankinimo moduliacijai (*angl. DWDM*). Norint ištirti perdavimo kanalo pralaidumą reikalingi prietaisai galintys pamatuoti jo charakteristikas.

UAB „Lifodas“ yra skaidulinės optikos technologijų įmonė, kuri specializuojasi skaidulinės optikos komponentų bei matavimo prietaisų gamyboje. Ši įmonė įsitraukusi į optinio laikinio reflektometro (OTDR) pasirinktame DWDM kanale, bei spektro analizatorių kūrimą ir gamybą. Abiejų šių prietaisų pagrindinis elementas yra derinamo bangos ilgio lazeris. Tai prietaisas, kuris gali spinduliuoti norimą bangos ilgį.

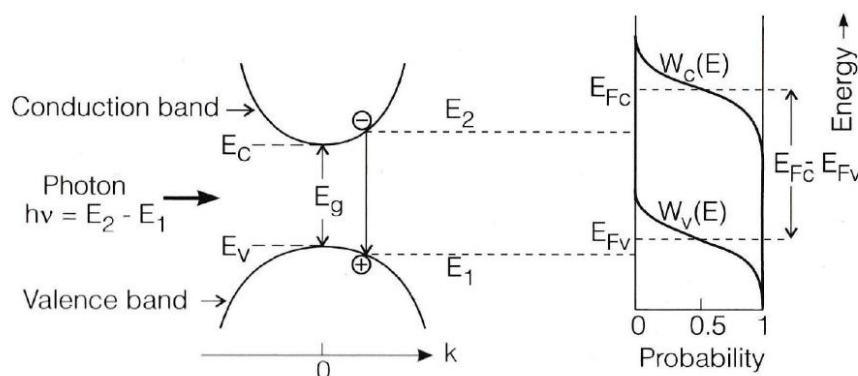
Šio darbo tikslas yra sukonstruoti tokį lazerį naudojant lengvai prieinamus komponentus ir patikrinti šio lazerio charakteristikas.

1. Literatūros analizė

1.1. Puslaidininkiniai lazeriai

1.1.1. Priverstinės spinduliuotės, sugerties ir stiprinimo principai lazeriniuose dioduose

Puslaidininkiniuose lazeriuose spinduliavimas atsiranda priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos, tarp elektronų ir skylių, metu. Tai įgyvendinama vykstant tarpjuostiniams šuoliams tarp valentinės ir laidumo juostų. Tam, kad sukurti priverstinę spinduliuotę reikia užtikrinti dvi sąlygas. Pirmoji būtinoji sąlyga reikalauja, kad puslaidininkiniame kristale daugiau atomų būtų sužadintoje būsenoje nei kad žemesnėje energijos būsenoje. Ši sąlyga yra vadinama užpildos apgrąža. Antroji svarbi sąlyga reikalauja, kad priverstinė spinduliuotė būtų intensyvesnė už savaiminę. Tam reikalingas optinis rezonatorius, tokiu būdu sukuriant grįžtamąjį ryšį naujai sugeneruotai koherentinei šviesai grįžti į terpę [1], [2].



1 paveikslas. Principinė juostų struktūra ir Fermi-Dirako pasiskirstymas laidumo ir valentinei juostoms [1].

Pusiausvyroje atomai yra užėmę daugiau žemesnių energijos lygmenų, nei aukštesnių, nes populiacija paklūsta Boltzmann'o šiluminio pasiskirstymo dėsnui. Užpildos apgrąžą įgyvendinti reikia tam, kad priverstinės rekombinacijos sugeneruota spinduliuotė nebūtų tiesiogiai sugerta žemesniuose lygmenyse esančių atomų. Tam, kad pasiekti ją reikia išoriškai kaupinti terpę injektuojant krūvininkus į puslaidininkinį prietaisą. Optinis stiprinimas gali būti pasiektas tuomet, kai stimuliuota rekombinacinė spinduliuotė stipriai kaupinamoje srityje viršija optinius nuostolius. Puslaidininkiniuose elektronų laidumo (W_C) ir valentinėje (W_V) juostose užimtumo tikimybės pasiskirstymas yra užrašomas Fermi-Dirac'o funkcijomis:

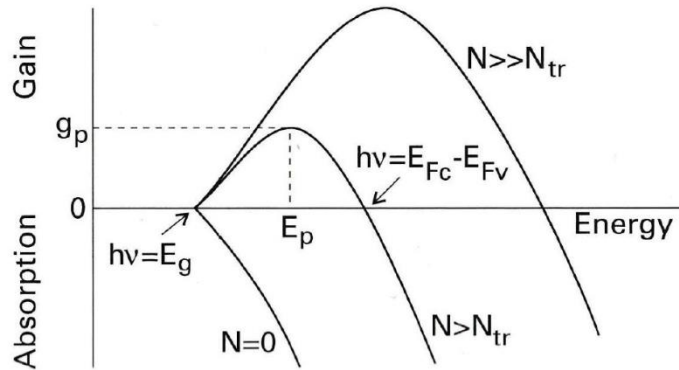
$$W_c(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{Fc}}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$W_v(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_{Fv}}{k_B T}\right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

kur k_B – Boltzmann‘o konstanta, T – absoliuti temperatūra, E – energija, E_{Fc} ir E_{Fv} yra laidumo ir valentinės juostų kvazi Fermi lygmenys. Juostų struktūra, bei tikimybių pasiskirstymas pavaizduotas 1 paveiksle [1]. Tarpjuostiniai šuoliai sukeliama tik tų fotonų, kurių energija $h\nu$ yra didesnė už draustinės juostos tarpą E_g . Priklausomai nuo injektuotų krūvininkų tankio arba nuo užimtumo tikimybės terpėje atitinkamai dominuos sugertis arba stiprinimas. Optinis stiprinimas tam tikros energijos fotonui atsvers sugertį, kai kvazi-Fermi lygmenų atskirtis viršys juostos pločio energiją. Ši sąlyga vadinama Bernardo – Duraffourgo sąlyga ir užrašoma šitaip:

$$E_{Fc} - E_{Fv} \geq h\nu = E_2 - E_1 \geq E_g \quad (3)$$

E_1 ir E_2 – energijos lygmenys tarp kurių vyksta sugertis. Šių Fermi lygmenų atskyrimui reikalingas krūvio injektavimas. Perėjimas iš sugerties į stiprinimą įvyksta, kai $h\nu = E_{Fc} - E_{Fv}$, kuomet pasiekiamas ribinis krūvininkų tankis N_{tr} (*angl. transparency carrier density*), o pasiskirstymo funkcija nurodyta 1 paveiksle [1] tenkina Bernardo – Duraffourgo sąlygą. Dėl elektronų energijos užimtumo pasiskirstymo ir Fermi-Dirak‘o sklendaus perėjimo, gaunamas optinis stiprinimas yra



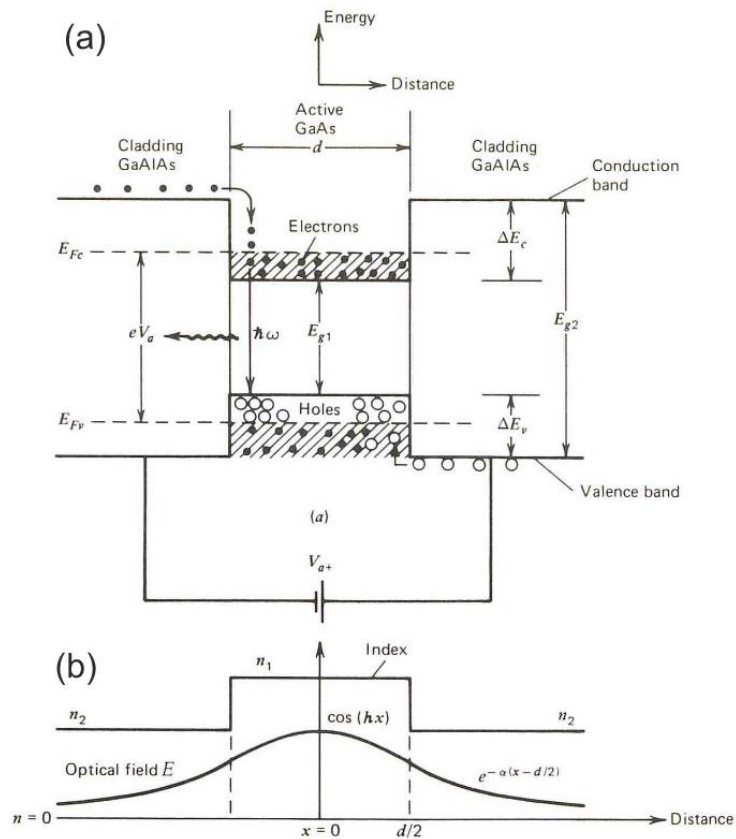
2 paveikslas. Schematinė optinio stiprinimo kreivė puslaidininkiniam įtaisui su skirtingais krūvininkų tankiais [1].

spektriškai išplatėjęs. Grafinė puslaidininkio stiprinimo kreivė su skirtingais krūvininkų tankiais pavaizduota 2 paveiksle [1]. Jame atvaizduota, kad didinat injektuotų krūvininkų tankį didėja tiek maksimali stiprinimo vertė g_p , tiek ir stiprinimo plotis, dėl ko platėja stiprinimo spektras [1].

1.1.2. Lazerinio diodo elementai

Paprasciausi puslaidininkiniai lazeriniai diodai turi šiuos elementarius, tačiau būtinus, elementus: stiprinimo terpę (arba aktyvioji terpė), optinį bangolaidį, rezonatorių, šoninę injektuoto krūvio apribojimo struktūrą [2].

Kaip jau minėta praeitame skyrelyje stiprinimo terpė yra aktyvioji sritis, kurioje vyksta priverstinė rekombinacija. Ji yra švari (nepaveikta priemaišinių medžiagų) ir įterpta tarp stipriai legiruotų p ir n tipo puslaidininkinių medžiagų su plačia draustine juosta, tokių būdu sukurdami pin dvigubą heterostruktūrą. Prijungus srovę tiesiogine kryptimi elektronai ir skylės pereina į aktyviają sritį ir sukuria galimybę įvykti priverstinei rekombinacijai [2]. Pavyzdinė energijos diagrama pavaizduota 3 paveiksle (a) [3].



3 paveikslas. Schematinė energijos diagrama pin lazeriniame diode prijungus srovę tiesiogine kryptimi (a) ir atspindžio koeficientas profilis apribojantis optinę bangą (b) [3].

Optinis bangolaidis susideda iš aktyviosios srities branduolio su aukšto lūžio rodiklio n_1 dielektriku apsupto žemo lūžio rodiklio n_2 dielektriku. Ši struktūra leidžia keliauti bangai viena kryptimi neprarandant energijos. Parinkus tinkamus parametrus, galima pasiekti tokią bangolaidžio savybę, kad juo sklįstų tik viena moda, kurios elektrinio lauko pasiskirstymas yra sukonzentruotas srities centre. Tai pasiekama jeigu parenkamas tinkamas lūžio rodiklio skirtumas tarp branduolio ir

supamo dielektriško lūžio rodiklių $\Delta n = n_1 - n_2$ ir branduolio srities plotis d (nelegiruota sritis) yra pakankamai siauras [3]. Bangos apribojimas lūžio rodikliu pavaizduotas 3 paveiksle (b).

Lazeriniuose dioduose grįžtamajam ryšiui sukurti naudojamas Fabri-Perot rezonatorius. Tai struktūra, sudaryta iš dviejų veidrodžių, vienas nuo kito atskirtų atstumu L , tipiška stiprinimo terpės ilgiu, kurios lūžio rodiklis yra n . Tokiame rezonatoriuje susidaro atsakas tik tokiu atveju, kai tarp veidrodžių yra stovinti banga. Ši sąlyga bus tenkinama, jei:

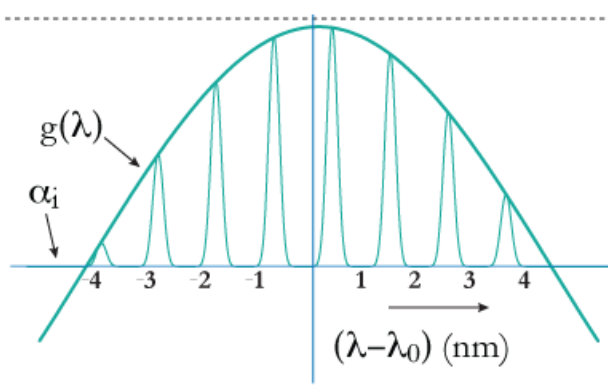
$$L = q \frac{\lambda}{2n}, \quad (4)$$

kur $q = 1, 2, 3, \dots$ – išilginės modos numeris. Taip pat yra ir kitokių rezonatorių kaip paskirstyto grįžtamojo ryšio (*angl. Distributed feedback*) ir paskirstyto Brego atšvaito (*angl. Distributed Bragg reflector*) struktūros įgyvendinamos pačiame lazerio terpės viduje [3].

Apribojimai krūvininkams, bei bangoms reikalingi ne tik statmenai sandūros kryptčiai bet ir vertikaliai. Yra trys struktūros kaip jas galima padaryti: stiprinimo valdymo, lūžio rodiklio valdymo arba paslėptosios heterostruktūros būdu. Apie šias struktūras nebus kalbama šiame darbe [2], [3].

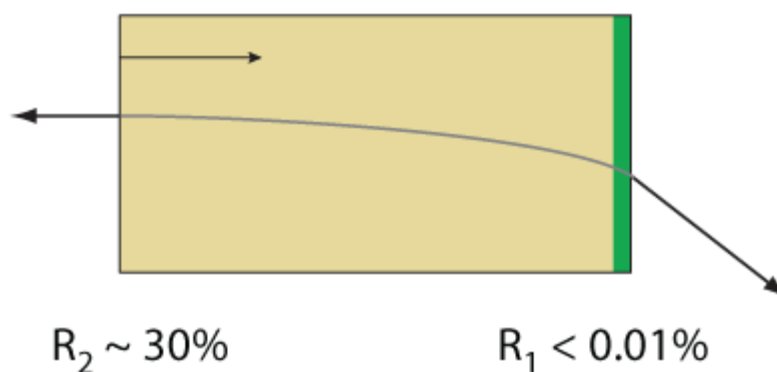
1.1.3. Lazerinių diodų su išoriniu rezonatoriumi veikimas ir charakteristikos

Lazeriai su vidiniu rezonatoriumi veikia daugiamodėje veikoje. Tai reiškia, kad visos bangos pakliūnančios po lusto stiprinimo kreivę yra generuojamos ir stiprinamos vienu metu (4 paveikslas). Tačiau yra sričių, kuriose pageidautina generuoti tik vieną po stiprinimo kreivę pakliūnančią



4 paveikslas. Fabri-Perot lazerio stiprinimo kreivė [4].

modą, kurios bangos ilgį būtų galima keisti. Tam pasiekti naudojami išoriniai bangos parinkimo elementai. Taip gaunami lazeriai su išoriniu rezonatoriumi.



5 paveikslas. Stiprinimo lustas su užlenktu bangolaidžiu [4].

Norint realizuoti tinkamą lazerio veiką reikia nuslopinti išilgines modas sustiprintas dėl vidinio Fabri-Perot rezonatoriaus grįžtamojo ryšio, nes jos kliudo išorinio rezonatoriaus grįžtamajam ryšiui. Tai galima atlikti pasitelkus į pagalbą kelis metodus. Pirmasis yra padengti vieną iš lusto paviršių neatspindinčia optine danga. Tai padeda, tačiau neatspindinčia optine danga padengto lusto vidinis grįžtamasis ryšys vis tiek išlieka ir gali daryti įtakos stabilumui ir optinei galiai. Norint labiau sumažinti atspindžio įtaką šis metodas yra taikomas kartu su antruoju metodu – užlenktu bangolaidžiu. Tokiu būdu išeinanti iš terpės spinduliuotė keliauja kampu. Kartu šie sprendimai iš esmės pašalina vidinio rezonatoriaus atsaką. Šie lazeriai angliškai vadinami Single-angle-facet (SAF). 5 paveiksle pavaizduota tokios struktūros schema [4].

Analizuojant rezonatorių yra nustatyta, kad daugeliui erdvinė rezonatorių būdingoji erdvinė moda yra Gauso spinduolio. Tai toks spinduolis, kurio fronto gaubtinė yra aprašoma Gauso funkcija. Jei ši sąlyga yra tenkinama, tai rezonatoriuje rezonansinės bangos susidarys taip pat kaip buvo aptarta praeitame skyrelyje. Atstumas tarp rezonansinių bangų (išreikštas dažniu) aprašomas formule

$$\nu_{q+1} - \nu_q = \frac{c}{2nL'} \quad (5)$$

kur ν – konkrečios modos dažnis, c – šviesos greitis. Tačiau lazerio rezonatorius gali palaikyti daugiau nei vieną tokią bangą jei spinduolio frontas nėra Gausinis. Taip atsitinka tuomet, kai rezonatoriuje sklinda aukštesnės eilės skersinės modos (*angl. transverse electromagnetic modes*). Žemiausio eilės TEM moda yra TEM₀₀, kuri tiesiog yra Gauso spinduolio. Kitos modos užrašomos taip – TEM_{mn}, kur indeksai m ir n nusako Hermito polinomo eilę (arba TEM_{p1} Laguerre polinomams). Jie svarbūs, kai skaičiuojamas elektrinio lauko pasiskirstymas konkrečiam taške. Priklausomai nuo to kokios simetrijos rezonatoriuje sklinda bangos, stebėsime skirtingus laukų pasiskirstymus. Šių modų dydis, lyginti su TEM₀₀ moda, yra didelis ir priklauso nuo spindulio pločio. Dėl to šių modų sklaidimo rezonatoriuje principą galima paaikškinti kaip tam tikrą plokščių bangų rinkinį, kurios individualiai nukeliauja šiek tiek skirtingus atstumus tarp rezonatoriaus veidrodžių, lyginant su Gauso

spinduoliu. Todėl stovinti (rezonansinė banga) kiekvienam spinduoliui atsiranda prie skirtingo dažnio [3].

Ši reiškinį taip pat galima analizuoti iš tūrinių (dielektrinio) bangolaidžių pusės. Tarkime turime rezonatorių kuriuo keliauja konkretaus bangos ilgio plokščia banga, kurios bangos vektorius kampu nukreiptas į bangolaidžio sienelę. Ši banga gali interferuoti su savimi tarp atspindžių nuo paviršių. Ar banga sklis rezonatoriuje priklauso nuo bangos sklidimo kampo ir nuo bangolaidžio matmenų. Tokia banga taip pat bus vadinama skersine moda. Bendruoju atveju tokio rezonatoriaus rezonansinis dažnis

$$f = \frac{c}{L} \sqrt{f_{mn}(m, n) + f_q(q)q^2} \quad (6)$$

kurioje $f_{mn}(m, n)$ ir $f_q(q)$ yra funkcijos, aprašančios bangolaidžio geometriją, q – išilginės modos numeris. Šią išraišką galima išreikšti ir cilindriniam bangolaidžiui tik pastariesiems modų indeksai bus užrašomi per radialines ir kampines modų eiles. Tokiu atveju m ir n koeficientus pakeis radialiniai p ir kampiniai l modų indeksai. Jei turime stačiakampį bangolaidį žinome, kad bangolaidyje sklindančių bangų dažnis

$$f = \frac{c}{L} \sqrt{f_m(m)m^2 + f_n(n)n^2 + f_q(q)q^2} \quad (7)$$

Lengva pamatyti, kad rezonatoriuje kuriame leidžiama sklisti daugiau, nei išilginėms modoms atsiras papildomos modos, spektre išsidėsčiusios tarp išilginių.

1.2. Difrakcinės gardelės, jų dispersija ir našumo charakteristikos

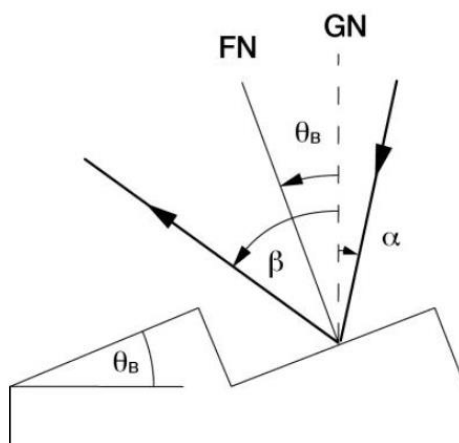
Difrakcinė gardelė yra periodiškai (arba pusiau periodiškai) pralaidžių arba atspindinčių elementų rinkinys, kurių dydis, arba atstumas, tarp šių elementų yra toks pat arba palyginamas su tiriamos šviesos bangos ilgiu. Šie elementai gali būti tiek siaurų plyšių, tiek siaurų atspindinčių griovelių rinkinys. Difrakcines gardeles galima skirstyti pagal skirtingus parametrus: geometriją, našumą, gamybos būdą arba pagal konkrečias jos pritaikymo sritis, tačiau pagrindinis būdas pagal ką jos yra skirstomos tai ar gardelė veikia pralaidumo ar atspindžio būdu. Pagrindinis gardelių pranašumas yra tai, kad jos pasižymi puikiu bangos pralaidumo ar atspindžio efektyvumu ir šviesos išsklaidymas erdvėje pagal bangos ilgį. Dėl to difrakcinės gardelės yra plačiai naudojamos bangos ilgio derinimui, kaip išilginių modų filtras [5].

Difrakcinių gardelių veikimo principas pagrįstas konstruktyviosios interferencijos atsiradimu. Šviesai, kurios bangos ilgis λ , krentant į gardelės paviršių dėl palyginamų režio matmenų

stebima difrakcija. Kiekviena iš šių skirtingais keliais sklindančių bangų interferuoja viena su kita. Dėl to atsiranda destruktivos ir konstruktyvios interferencijos sritys. Konstruktyvios interferencijos sąlyga yra išpildoma, kai kelio skirtumas, tarp dviejų to paties bangos ilgio spindulių, yra bangos ilgio kartotinis m . Iš to seka difrakcinės gardelės lygtis

$$\frac{m\lambda}{d} = \sin \alpha + \sin \beta. \quad (8)$$

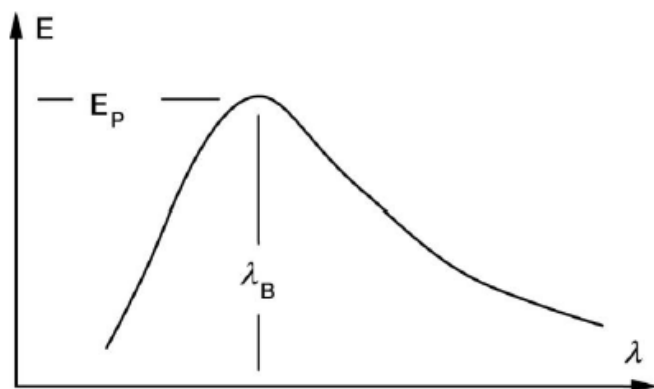
Šioje lygtyje α ir β yra atitinkamai krentančios ir atsispindėjusios bangos kampas matuojamas nuo gardelės paviršiaus normalės, m – difrakcijos eilė ir d – rėžių periodas. Visur kitur, kur kelio skirtumas netenkina sąlygos stebima destruktivi interferencija. Dažnai, kalbant apie gardelių specifikacijas, rėžių periodas yra pakeičiamas kitu dydžiu vadinamu rėžių dažniu arba rėžių tankiu, kurio sąryšis su periodu yra $G = 1/d$. Reikia paminėti, kad (8) yra paprasta gardelės lygtis ir taikoma tik tada, kai krintanti ir išsklaidyta šviesa yra toje pačioje plokštumoje ir yra statmena grioveliams (toje pačioje plokštumoje kaip difrakcinės gardelės normalė). [6], [7]



6 paveikslas. Įbrėžties gardelės profilis. GN – gardelės normalė, FN – rėžių normalė [6].

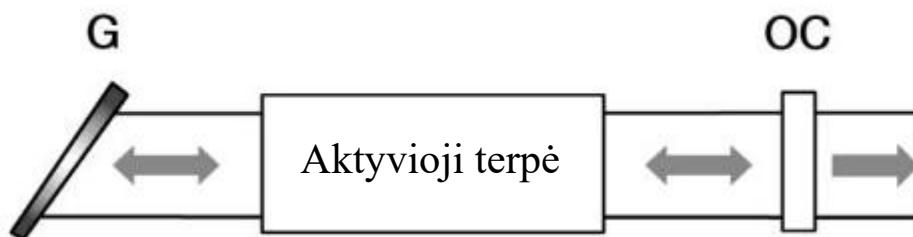
Difrakcijos paveikta banga vienu metu pasiskirsto į kelias difrakcijos eiles. Dėl to yra prarandama dalis jos. Difrakcijos efektyvumas yra apibūdinamas kaip krentančios optinės galios dalis, kuri patenka į tam tikrą gardelės eilę. Energijos pasiskirstymas į skirtingas gardelės eiles priklauso nuo įvairių parametru: kritimo ir difrakcijos kampo, krintančio pluošto poliarizacijos, medžiagos, iš kurios pagaminta gardelė, kompleksinio atspindžio koeficiento, griovelių profilio ir periodo. Išsamiai išanalizuoti jos našumą yra sudėtinga, tačiau bendro pobūdžio taisyklės gali būti pritaikomos. Dažnai naudojamos gardelės koherentinės šviesos derinimui yra rėžio gardelės (*angl. blazed grating*). Jos turi trikampio formos profilį kuris pavaizduotas 6 paveikslėlyje [6]. Jų privalumas: parinkus kampą θ_B tarp gardelės plokštumos ir rėžio paviršiaus (arba tarp gardelės ir griovelio normalės) galima didžiąją dalį galios nukreipti norimos difrakcijos eilės kryptimi. Taip yra

todėl, kad veidrodinio atspindžio geometrija priklauso ne nuo gardelės paviršiaus normalės, o tik nuo režio kampo θ_B . Šio tipo gardelės veikia prie konkrečių bangos ilgių vadinamų režio bangos ilgiais



7 paveikslas. Tipinė supaprastinta difrakcijos našumo kreivė [6].

λ_B . Tipinis tokios gardelės našumo grafikas yra pavaizduotas 7 paveiksle. Įprastai yra tik vienas maksimumas esantis λ_B konkrečiai difragavusios bangos eilei m . Esant λ_B galima parinkti tokį kritimo kampą, kad difragavusi banga grįžtų tokiu pačiu keliu kaip kritusi. Šis kampas sutampa su griovelio įbrėžio kampu [6], [7].



8 paveikslas. Lazerio bangos ilgio derinimo schema naudojant Littrow konfigūraciją. Šviesa iš stiprinimo terpės difragavusi nuo gardelės G grįžta į aktyviąją terpę iš kurios ji perduodama į pusiau pralaidų veidrodį OC kurį dalį spinduliuotės grąžina į rezonatorių [6].

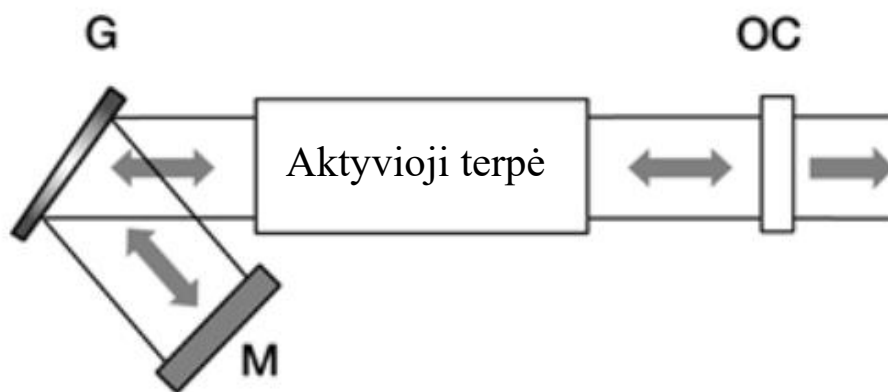
Lazerinė terpė stiprina bangas plačiame optiniame spektre. Naudojant gardelę vietoje veidrodžio galima sudaryti tokias sąlygas, kad tik vieno bangos ilgio spinduliuotė iš to spektro būtų atspindima atgal, o kita šviesa būtų išsklaidoma. Keičiant gardelės kampą galima keisti bangos ilgį, kuriam tenkinama generavimo sąlyga. Egzistuoja keli būdai kaip gardeles galima pritaikyti išoriniuose rezonatoriuose bangos ilgio derinimui. Littrow konfigūracija yra viena iš dažniausiai naudojamų. Jos struktūrinė schema pavaizduota 8 paveiksle, kuriame raide G yra pažymėta gardelė, o OC išėjimo veidrodis grąžinantis didžiąją dalį spinduliuotės atgal į rezonatorių. Šioje struktūroje panaudojama gardelės savybė grąžinti difrakcijos išsklaidytą bangą tokiu pačiu keliu atgal į stiprinimo terpę. Dėl tos priežasties rekomenduojama naudoti tokią difrakcinę gardelę, kurios režio kampas yra artimas kritimo kampui, tokiu būdu pasiekiant maksimalų difrakcijos efektyvumą.

Kadangi kritimo ir difrakcijos kampai sutampa gaunama modifikuota difrakcijos lygtis Littrow sąlygai:

$$m\lambda = 2d \sin \theta_B. \quad (9)$$

Šios konfigūracijos trūkumas yra tai, kad norint keisti bangos ilgį reikia keisti difrakcinės gardelės pasukimo kampą. Taip pat norint pasiekti didesnę raišką rezonatoriaus konfigūraciją tenka derinti kartu su spindulio plėtikliu, kad apšviesti didesnę gardelės paviršiaus plotą.

Rėžio bangos derinimas naudojant gardelę susietą su veidrodžiu arba su antra gardele pavaizduotas 9 paveiksle. Tokia konfigūracija yra vadinama Littman-Metcalf. Jos privalumas yra tai, kad gauti didesnei raiškai nebereikalingas spindulio plėtiklis, nes spindulys nuo gardelės difraguoja du kartus. Be to derinti bangos ilgį galima jau nebesukant gardelės, o sukant su ja susietą veidrodį. Šios konfigūracijos trūkumas – mažesnė išspinduliuojama galia lyginant su Littrow struktūra.



9 paveikslas. Lazerio bangos ilgio derinimo schema naudojant Littman-Metacalf konfigūraciją. Spinduliuotė nuo gardelės G yra retroreflektuota veidrodžio M, dėl ko šviesa dar karta difraguoja [6].

Pagrindinis difrakcinių gardelių tikslas – išsklaidyti šviesą erdvėje pagal bangos ilgius. Pataikęs į gardelę skirtingos lazerio spindulio bangų komponentės bus išsklaidytos, kurių kiekviena sklis kita kryptimi. Dydis D , vadinamas kampine dispersija, apibūdina kampinį arba erdvinį bangų atskyrimą. Jei laikysime, kad kritimo kampas į gardelę yra pastovus, tai dispersiją galima paskaičiuoti iš difrakcinės gardelės lygties diferencijuojant kampų sklaidą bangos ilgių intervalui

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\lambda \cos \beta}. \quad (10)$$

Jeigu šią išraišką analizuotume esant Littrow sąlygai ($\alpha = \beta$) išraiška supaprastėja ir tampa

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{2}{\lambda} \tan \beta. \quad (11)$$

Tai parodo, kad duotam bangos ilgiui kampinė dispersija priklauso tik nuo kritimo ir difrakcijos kampų.

Dar vienas svarbus parametras kalbant apie derinamų lazerių kūrimą naudojant gardeles yra spektrinė rezoliucija. Šis dydis yra apibūdinama kaip gardelės savybė atskirti dvi gretimas skirtingo bangos ilgio bangas vieną nuo kitos. Teorinę skiriamąją gebą spinduliui, krentančiam į difrakcinę gardelę, galima aprašyti kaip *m-osios* eilės, naudojamos konfigūracijoje, sandauga su apšviestų griovelių skaičiumi *N*. Naudingiau šią išraišką užrašyti išvedus difrakcijos eilę iš gardelės lygties. Tuomet atrodys štai taip:

$$R = \frac{Nd(\sin \alpha + \sin \beta)}{\lambda}. \quad (12)$$

Šioje lygtyje *N* ir *d* sandauga dažnai užrašoma kaip apšviestų rėžių (dėmės) plotis žymimas raide *W*. Tuomet lygtis atrodys šitaip [6].

$$R = \frac{W(\sin \alpha + \sin \beta)}{\lambda}. \quad (13)$$

Tai parodo, kad norint turėti gerą skiriamąją gebą, reikalingas kuo didesnis spindulio diametras.

1.3. Echelle gardelė

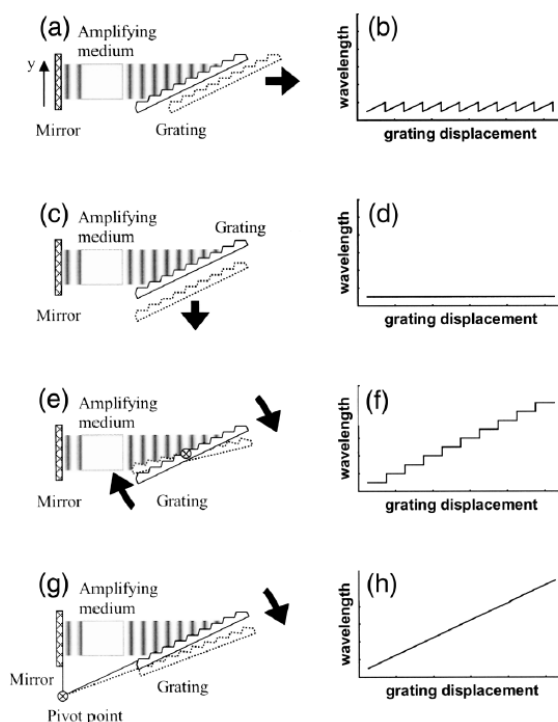
Atskirai reikėtų paanalizuoti ir konkretų įbrėžio gardelių tipą vadinamą echelle gardelėmis. Šio pobūdžio atspindžio gardelė apibūdinama kaip stambesnių rėžių ir didelių rėžio kampų gardelė. Tipiniai echelle rėžių tankiai svyruoja 20 – 316 rėžių į milimetrą, o įbrėžties kampai parenkami nuo 40° ir gali siekti 78°. Dėl šių parametrų echelle naudojamos dideliuose difrakcijos kampuose ir, tuo pačiu, aukštose eilėse (tipiškai eilė nėra žemesnė nei $|m| = 10$) [6], [7].

Jos pasižymi dvejomis savybėmis. Pirmoji tai didelė bangų dispersija. Tai leidžia pagaminti kompaktiškas optines sistemas bei išgauti aukštą skiriamąją gebą atitinkamo dydžio gardelei. Taip pat, kadangi šio tipo gardelėms pritaikomi visi įbrėžties gardelių dėsniai išgaunami aukšti difrakcijos našumai naudojant arti įbrėžties kampo. Antroji savybė – aukštos eilės difrakcijos efektyvumas yra praktiškai nepriklausomas nuo bangos poliarizacijos. Dėl to galima pritaikyti skaliarinius našumo skaičiavimo metodus [6], [8], [9].

Be šių privalumų, echelle turi ir trūkumų. Pagrindinis jų – difrakcijų eilių persiklojimas. Spektro persiklojimo plotis yra tuo didesnis kuo difrakcijos eilė yra aukštesnė. Tam išvengti sistemoje reikia naudoti siauresnį spektrą arba pritaikyti kitokius atrinkimo metodus kaip atkirtos filtrai, jutikliai, reaguojantys į konkretų spektrą, arba pritaikius kryžminę dispersiją (papildomą gardelę arba prizmę) [6], [10].

1.4. Bangos ilgio derinimas keičiant rezonatoriaus ilgį

Bangos ilgio keitimą lazeryje galima įgyvendinti keliais būdais. Šiam darbui aktualus yra bangos ilgio derinimas keičiant krentančio spindulio kampą į gardelę. Kaip jau buvo minėta prieš tai, iš išilginių modų patenkančių į stiprinimo terpės stiprinamą spektrą, parenkama viena. Tai galima atlikti keliais skirtingais metodais: keičiant į gardelę krentančio spindulio kampą, keičiant rezonatoriaus ilgį arba pasinaudojus abejais iš šių metodų. Šie būdai pavaizduoti 10 paveiksle [11]. Keičiant gardelės kampą taip, kad sukimosi ašis yra lazerinės spinduliuotės kritimo taške, keičiamas difrakcijos bangos ilgis grįžtantis į stiprinimo terpę (10 paveikslo (e) ir (f)). Rezonatoriui esant fiksuoto ilgio atstumas tarp modų nesikeis, keisis tik gardelės filtro praleidžiamas bangos ilgis. Jis ir bus stiprinamas. Dėl to keičiant kampą gardelės praleidžiamas spektras kis šuoliškais žingsniais – diskrečiais laipteliais. Šių žingsnių atstumas yra nulemtas išilginių modų atstumo. Apibendrinus, bangos derinamos plačiame spektre ir apribotos tik stiprinimo terpės stiprinimo spektro.



10 paveikslas. Būdai keisti gardelės padėtį ir atitinkamas bangos ilgio pokytis [11].

Sekantis būdas yra keisti išorinio rezonatoriaus ilgį (10 paveikslo (a) ir (b)). Tokį paderinamumą lemia tai, kad išilginių modų atstumas atvirkščiai proporcingas rezonatoriaus ilgiui. Tai reiškia, kad išilginei modai judant gardelės filtro aplinkoje, kis stiprinamas bangos ilgis. Jei

gretimai modai bus suteiktos geresnės sąlygos nei prieš tai buvusiai, bus stiprinama pastaroji, o bangos ilgis pakis šuoliškai ir turės pjūklo formą. Šiuo būdu derinant bangos ilgį turėsime labai siaurą spinduliavimo spektrą, tačiau to spektro ribose, bangos tarp modų šuolių kis nenutrūkstamai.

Paskutinis ir aktualiausias šiam darbui būdas yra bangos ilgio derinimas naudojant, kartu, rezonatoriaus ilgio ir gardelės kampo keitimą (10 paveikslo (g) ir (h)). Naudojantis prieš tai minėtais būdais galima gauti nenutrūkstamą bangos ilgio derinimą (be modų šuolių) plačiame intervale. Norint tai pasiekti reikalingas tinkamas gardelės sukimosi taškas per kurį difrakcinės gardelės filtras judės tuo pačiu greičiu kaip ir išilginė moda. Laikykime, kad gardelė G pastatyta atstumu L , kuris yra rezonatoriaus ilgis, nuo ašies pradžios O . Pirmos eilės difrakcijos lygtis kuomet gardelės kampas θ :

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (14)$$

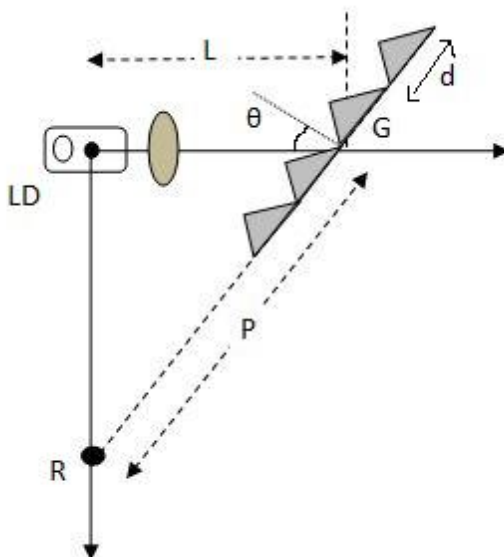
Rezonansinių modos bangos ilgis nustatomas iš formulės

$$\lambda_q = 2L/q, \quad (15)$$

kurioje q – išilginės modos skaičius. Tokiu atveju laikydami, kad gardelės sukasi apie tašką R taip, kad išilginė modos bangos ilgis sutampa su gardelės difrakcijos bangos ilgiu. Tokiu būdu sulyginę (12) ir (13) lygtis gauname

$$\sin \theta = L/qd. \quad (16)$$

Lygtyje sandauga qd yra lygi atstumui P . Šią sąlygą tenkinanti schema pavaizduota 11 paveiksle [12].

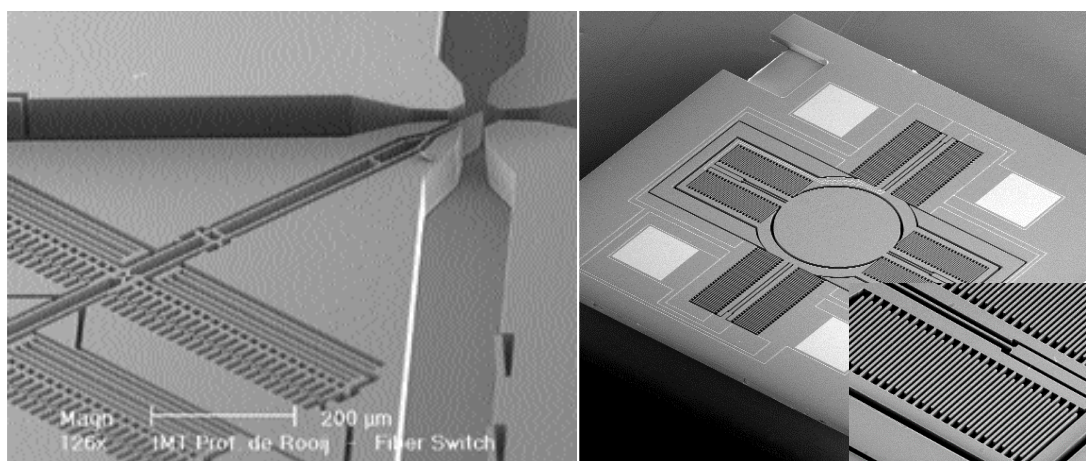


11 paveikslas. Tolydziai derinamo bangos ilgio lazerio diagrama [12].

1.5. MEMS veidrodžiai

MEMS (*angl. Micro-electromechanical systems*) yra gamybos technologija, kurios būdu yra kuriami maži integruoti prietaisai arba sistemos apjungiančios mechaninius ir elektroninius komponentus. Jie gaminami integrinių grandynų metodais tokiais kaip litografija, paviršiaus mikroapdirbimu, bei ėsdinimu. Šių gamybos metodų pagalba mechanizmų matmenys gali siekti nuo kelių milimetrų iki kelių mikrometrų. Naudojant šias technologijas galima pagaminti prietaisus galinčius įvykdyti įvairius veiksmus, bei reaguoti į įvairius fizikinius ar cheminius veiksnius. Dėl jų mažų matmenų MEMS įrenginiai turi plačias taikymo sritis tiek industrijoje, tiek ir vartotojų rinkoje [13].

Šiam darbui aktualiausia sritis yra MEMS prietaisų taikymas optikos, bei telekomunikacijų srityse. Tokie prietaisai dažniausiai turi integruotus mikro veidrodžius arba sklendes. Šių komponentų pagalba MEMS įrenginiai gali blokuoti arba nukreipti šviesą reikiama kryptimi paveikus elektriniu signalu. Komponentų valdymas yra pasiekiamas naudojant šukų mechanizmą. Šis mechanizmas tipiška susideda iš judančios ir stacionarios šukų persiklojančių viena su kita. Fiksuotos šukos tvirtinamos prie prietaiso pagrindo tuo tarpu kitos šukos tvirtinamos prie judinamo komponento. Sukūrus tarp tų dviejų šukų elektrinį lauką, dėl kurio judančios šukos atsitraukia nuo fiksuotų šukų kartu judindamos ir komponentą [14]. Tokių komponentų pavyzdžiai pavaizduoti 12 paveiksle [15], [16].



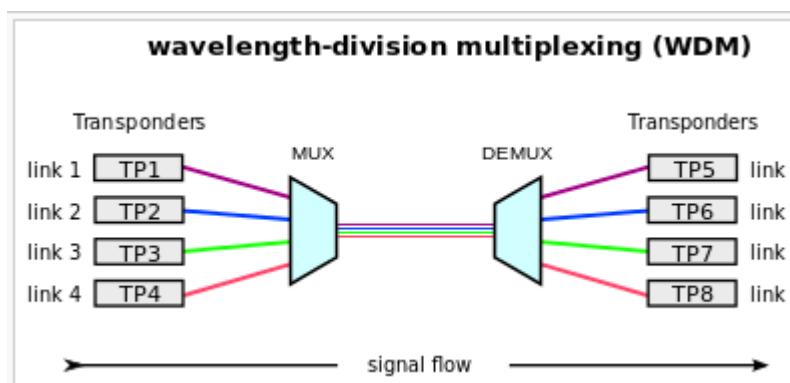
12 paveikslas. Sklendės ir veidrodžio struktūra MEMS prietaisuose [15], [16].

Šio mechanizmo pagalba MEMS prietaisai turi labai plačias taikymo sritis. MEMS komponentai su sklende taikomi skaidulinėje optikoje, kur šviesos spindulys išeinantis iš skaidulos gali būti nukreiptas į vieną iš dviejų skaidulų priklausomai nuo to ar sklendė yra uždaryta ir nuo jos atsispindėjo šviesos spindulys, ar ne ir šviesa praėjo netrukdoma. Toks MEMS prietaisas būtų

vadinamas veidrodiniu MEMS jungikliu. Sudėtingesniai jungikliui gauti, šiuos komponentus galima sudėti į $N \times M$ matricą, taip leidžiant nukreipti bet kurią iš N įėjimų į bet kurią iš M išėjimų. MEMS veidrodžių matricos plačiai naudojamos šviesos projektoriuose, kuriuose vaizdas ant ekrano gaunamas dėl tinkamu kampu parinktų veidrodžių. Taip pat MEMS prietaisai optikoje naudojami ir derinamų bangos ilgio lazerių kūrimo [17], [18]. Šiuo atveju vietoje atspindinčio paviršiaus šukos judina mikroskopinę difrakcinę gardelę. Gardelai pritvirtintai prie judančių šukų galima keisti gardelės kampą optinio kelio atžvilgiu, taip keičiant spinduliuojama bangos ilgį. (pati gardelė yra MEMS).

1.6. Banginio tankinimo moduliacija

Šviesolaidinėmis sistemomis signalas yra perduodamas naudojantis tankio banginio tankinimo (*angl. Wavelength division multiplexing – WDM*) metodu. Šio signalo perdavimo būdu spektras yra padalijamas į smulkesnius nešlio signalus, tokiu būdu skirtingo bangos ilgio lazerine spinduliuote signalą galima perduoti tuo pačiu šviesolaidžiu. Tai yra naudinga norint plėsti tinklo talpą (dydį) be naujų šviesolaidžio trasų.



13 paveikslas. Banginio dažninio tankinimo operacinė schema [19].

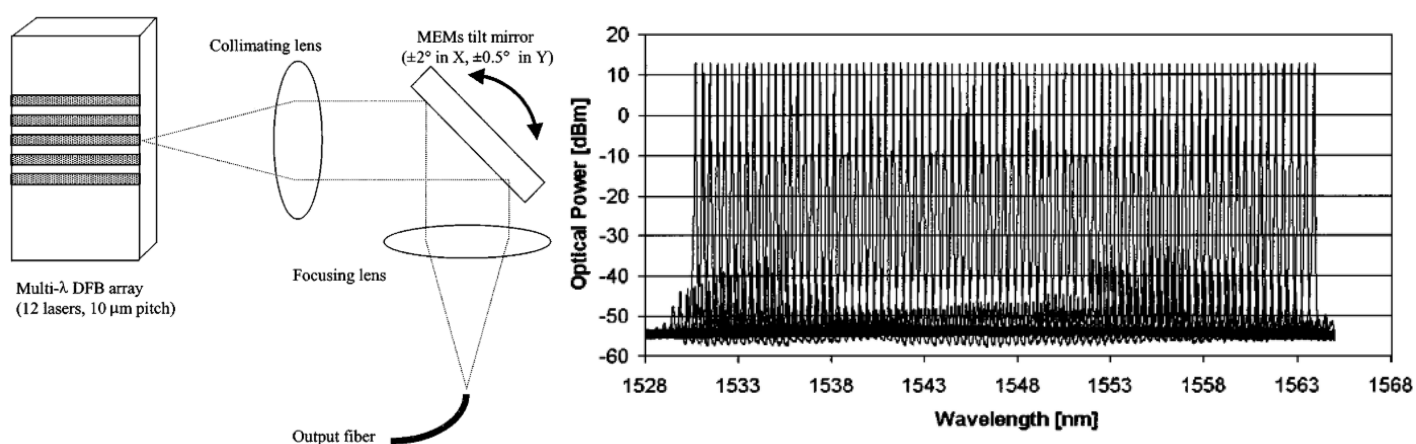
WDM principas ir veikimo schema pavaizduoti 13 paveiksle. Prie siųstuvo stovintis tankintuvas (*angl. multiplexer*) sujungia kelis signalus į vieną tuo tarpu prie imtuvo stovintis retintuvas (*angl. demultiplexer*) leidžia atskirti kiekvieną iš signalų.

Banginio tankinimo moduliacijos padalintos į tris pagrindines grupes: paprastoji banginio tankinimo moduliacija (BWDM), retoji banginio tankinimo moduliacija (CWDM) ir tankioji banginio tankinimo moduliacija (DWDM). BWDM yra paprasčiausia technologija kurioje naudojami 1310nm ir 1550nm spektro sritys, kurios įprastai padalintos į ne daugiau kaip dešimt kanalų. CWDM palaiko daug didesnį skaičių kanalų ir operuoja daug platesnėje bangos ilgių srityje: nuo 1270nm iki 1610nm kuriame kiekvienas kanalas išsidėstęs kas 20nm taip sudarydamas 18 kanalų. DWDM veikia

toje pačioje spektro srityje kaip ir CWDM tik kanalai išdėlioti daug tankiau – ne rečiau kaip 0.8nm atstumu vienas nuo kito, dėl ko ši technologija yra sudėtingiausia, nes reikalauja įrangos kuri spinduliuotu siauresnius dažnių spektrus.

1.7. Derinamų lazerių tyrimai

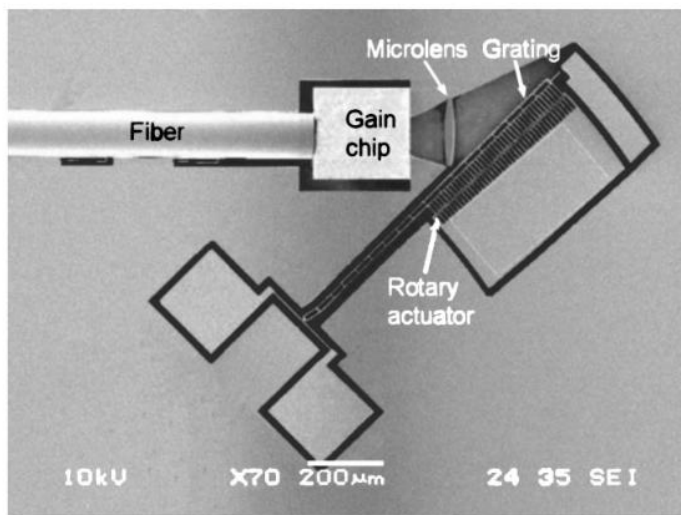
Derinamo bangos ilgio lazeriai yra labai plati lazerių sritis kurių pritaikymų galima rasti pradedant nuo telekomunikacijos sričių siunčiant signalus šviesolaidžiais iki molekulinės analizės mokslinėse srityse. Šiame skyriuje apžvelgsiu keletą atrinktų straipsnių, kuriuose analizuojami derinamo bangos ilgio lazeriai naudojantys MEMS arba panašius elementus bangos ilgiui nustatyti.



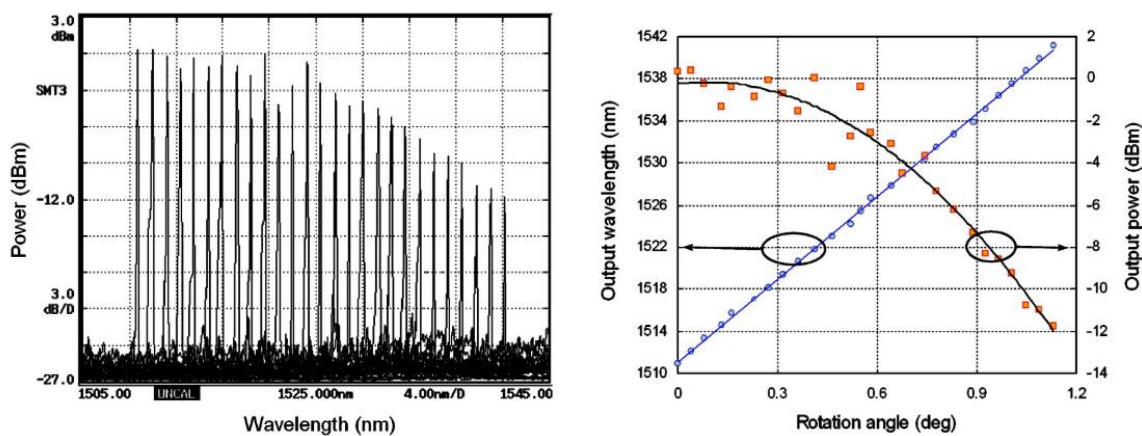
14 paveikslas. Derinamo lazerinio schema. MEMS pakrepiamas veidrodžius židinio centre kolimuojančio lęšio plokštuma parenka vieną lazerį iš DFB matricos ir leidžia elektroniniam tiksliai bangos derinimui (kairė); Sudėti modulio spektrai (dešinė) [20].

DFB (angl. *Distributed feedback*) lazerių matrica yra vienas iš būdų kaip šioje pastraipoje aptariamo šaltinio autoriai atliko tyrimus su derinamo bangos ilgio lazeriu. Schematinė tokio lazerio diagrama pavaizduota 14 paveikslo kairioje pusėje. Paketą sudaro 12 skirtingų DFB lazerių, sugebančių išspinduliuoti vieną fiksuotą bangos ilgį, kurį siaurame spinduliavimo spektre galima pakeisti keičiant lazerinės terpės temperatūrą. Išspinduliuojama lazerio šviesa kolimuojama ant MEMS veidrodžio, kurio pagalba norimas DFB lazerio išėjimas sufokusuojama į šviesolaidį ir išvedamas į išėjimą. Rezultatai parodyti 14 paveikslo dešinėje kur pavaizduota intervalas, kuriame gaunamas lazerio paderinamumas. Šaltinio autoriai parodė, kad MEMS pagalba galima paprastesniu būdu nukreipti norimo lazerio spinduliuotę į šviesolaidį [20]. Tokios lazerinės sistemos trūkumas yra tai, kad nebus pasiektas nuoseklus bangos ilgio kitimas, nes sistema reikalauja persijungimo nuo vieno lazerio prie kito.

Kito straipsnio autoriai tyrė integruoto lazerio veiką naudojant puslaidinikinį stiprinimo lustą, kurio spektras pakliūna į C juostą, ir kurio spinduliuotė kolimuojama į mikromechaniškai apdorotą MEMS įbrėžties gardelę. Šie komponentai sudėti į vieną silicio lustą ir išdėlioti taip, kad sudarytų Littrow konfigūraciją pavaizduotą 15 paveiksle. Šios sistemos matmenys: 2 mm x 1.5 mm x 0.6 mm. Autoriai pademonstravo lazerio derinamumą, greitą bangos ilgio nustatymą 30.3 nm intervale ir daug kompaktiškesnį dizainą. Tyrimai taip pat parodė, kad spinduliavimo galia tam tikram bangos ilgiui priklausė nuo gardelės kokybės, t.y. kaip gerai gardelė atspindi skirtingo bangos ilgio spinduliuotę, bei lęšio padėties. Gardelės rėžiai yra itin smulkūs (312.5 rėžių/mm) ir straipsnio paskelbimo metu procesas nebuvo pakankamai geras pagaminti norimo profilio gardelę. Tai atsispindėjo rezultatuose pavaizduotuose 16 paveiksle. Keičiant kampą, ženkliai kinta spinduliuotės galia [21].



15 paveikslas. Vieno lusto integruotas lazeris [21].



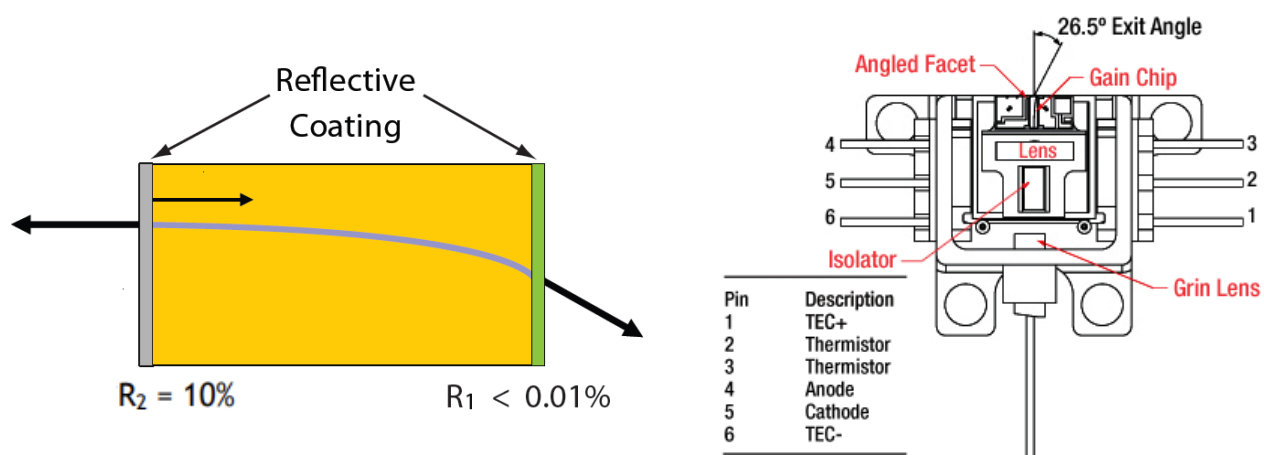
16 paveikslas. Integruoto lazerio bangos ilgio derinimo charakteristikos. a) Sudėti spektrai esant skirtingiems išėjimo bangos ilgiams; b) bangos ilgis ir galia kitimas nuo sukimosi kampo [21].

Sekančio straipsnio autorių tiriamas lazeris yra gana artimas šio darbo tyrimo objektui. Jie siekė ištirti išorinės erdmės diodinį lazerį derinamą plačiame diapazone be modų šuolių naudojantis stiprinimo lustą, įbrėžties difrakcinę gardelę ir veidrodį valdomą pjezolelertiniu keitikliu. Komponentai sudėti į Littman-Metacalf konfigūraciją aptartą 1.2 skyrelyje. Autoriam pavyko ištirti ir pademonstruoti šio lazerio platų bangos ilgio nustatymo diapazoną su siauresniu nei 100 kHz linijos pločio spinduliavimo spektru, 65 dB signalo triukšmo santykiu ir daugiau nei 14.8 dBm galios signalu visame veikimo intervale. Visa tai autorių teigimu gauta be modų šuoliu [22].

2. Tyrimų metodika

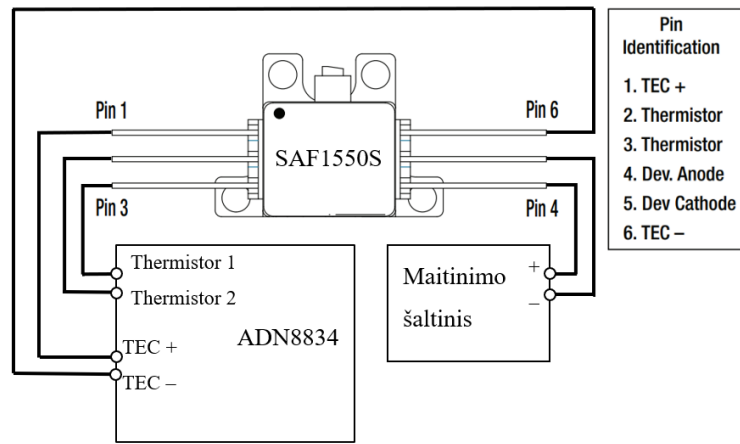
2.1. Darbo schema

Šiame darbe derinamo bangos ilgio lazerio konstravimui buvo pasirinktas Thorlabs SAF1550S2 stiprinimo lustas. Šio lusto struktūra turi išlenktą bangolaidį, kurio viena iš pusių yra padengta neatspindinčia optine danga, kita – optiškai susiejama šviesolaidžiu. To nauda buvo aptarta



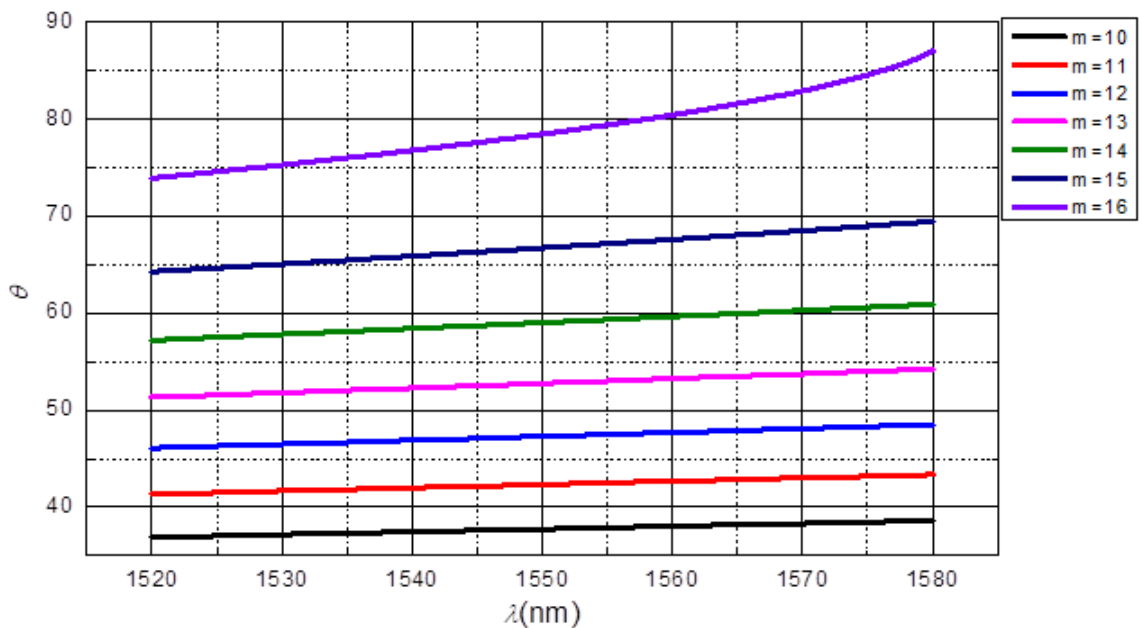
17 paveikslas. stiprinimo lusto (kairė) ir konstrukcijos (dešinė) piešinys [4], [23].

literatūros apžvalgoje. Lusto iliustracija pavaizduota 17 paveiksle. Šio lusto tipinis spinduliuojamas šviesos spektras yra 1530 – 1570 nm kurio centrinis bangos ilgis yra 1550 nm. Šis generuojamas spektras pakliūna į vadinamąją *C-band* sritį. Stiprinimo lusto komplekte taip pat yra integruotas termoelektrinis aušintuvas (TEC), bei optinis izoliatorius neleidžiantis iš išorinės linijos ateinančiai spinduliuotei atsirandančiai dėl išorinių linijos atspindžių paveikti lazerį. TEC aušintuvui kontroliuoti buvo naudojamas EVAL-ADN8834 temperatūros kontroleris, kuris buvo maitinamas Mastech HY1803D nuolatinės srovės maitinimo šaltiniu. Lazeris buvo maitinamas savadarbiu srovės šaltiniu. Jungimo schema pavaizduota 18 paveiksle.



18 paveikslas. SAF1550S2 jungimo schema [23].

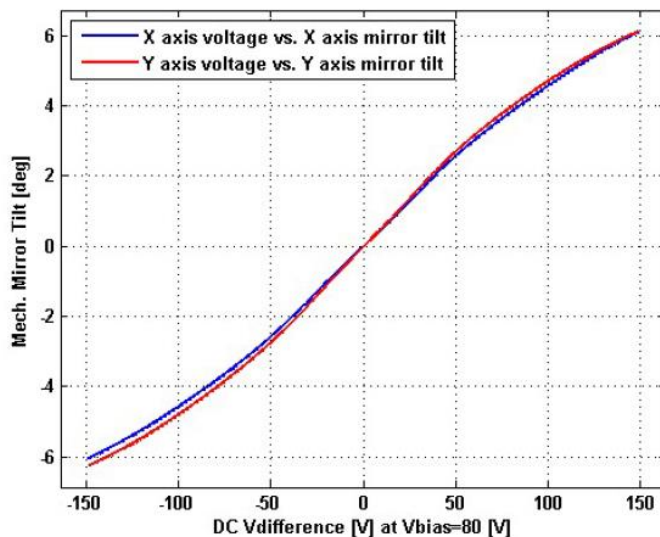
Išeinančiai iš lusto spinduliuotei kolimuoti naudojamas Thorlabs 355230-C asferinis lęšis. Lęšio židinio nuotolis – 4.51 mm. Asferiniai lęšiai yra sukuriami taip, kad sumažintų sferinę aberaciją ir dažnai yra geriausias sprendimas, kai reikia sukolimuoti spindulį sklindantį iš optinės skaidulos ar lazerinio diodo.



19 paveikslas. Kritimo ir difrakcijos kampo Littrow konfigūracijoje priklausomybė nuo spinduliuojamo bangos ilgio aukštesnėse difrakcijos eilėse.

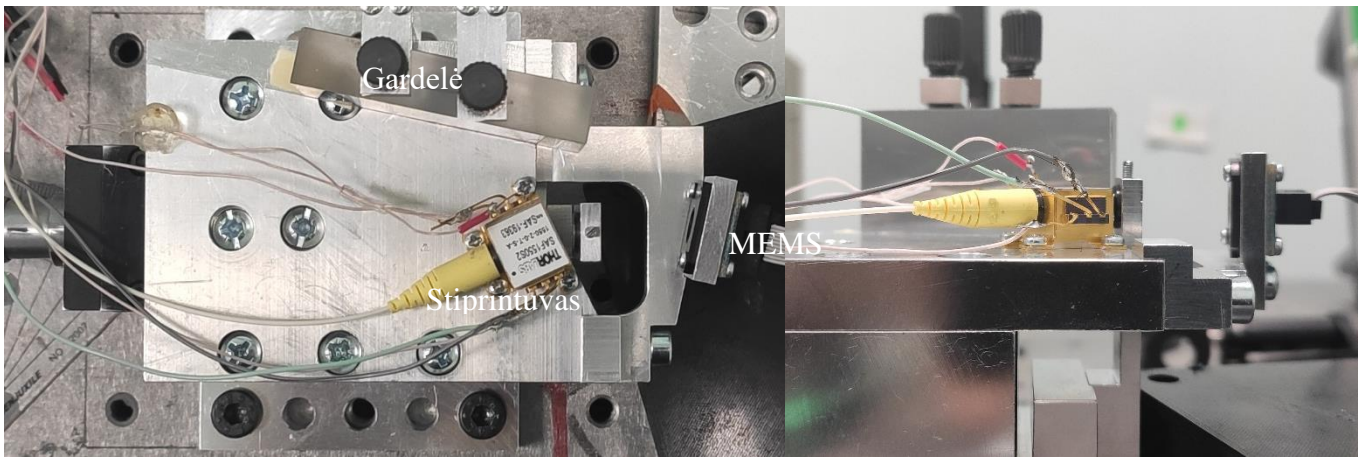
Vienmodei lazerio veikai pasiekti buvo naudojama difrakcinė gardelė. Jos pagalba lazeryje sukuriamas grįžtamasis ryšys. Tam naudojama Thorlabs GE2550-0875 echelle difrakcinė gardelė. Šios gardelės režių tankis $G = 79$ režiai/mm, o įbrėžties kampas – $\theta_B = 75^\circ$. Dėl staus įbrėžties kampo gardelės našumas yra koncentruojamas prie pastarojo kampo aukštesnių eilių srityje. Gardelė pastatoma į Littrow konfigūraciją, kad krentanti ir difragavusi banga keliautu tuo pačiu keliu. Iš Littrowo gardelės difrakcijos lygties (9) gauname, kad efektyviausia gardelės padėtis lusto

spinduliuojamam spektrui yra 16 difrakcijos eilėje ($m = 16$). Taip pat iš gardelės lygties buvo patikrinta ar gretimas difrakcijos spektras persikloja. Iš 19 paveikslo matosi, kad 16-os eilės difrakcijos kampai nepersikloja su žemesnės eilės kampais. Tai reiškia, kad papildomų spektro atrinkimo priemonių pritaikyti nereikės.



20 paveikslas. Mechaninio kampo priklausomybė nuo diferencinės įtampos.

MEMS veidrodžiui buvo pasirinktas Mirrorcle S30406. MEMS integruoto veidrodžio diametras yra 1.6 mm padengtas aliuminio sluoksniu. Šis veidrodis gali atsilenkti 6.1541° apie x ašį ir 6.1297° apie y ašį į abi puses. MEMS veidrodis turi keturias pavaras (po dvi ant kiekvienos iš ašių), kurias galima kontroliuoti atskirai viena nuo kitos laikantis tam tikrų sąlygų: maksimali diferencinė įtampa (įtampų skirtumas tarp dviejų ant tos pačios ašies esančių pavarų) ant x ir y ašių – 148 V, kai tipinis pavarų priešįtampis (*angl. bias voltage*) – 80 V, bei maksimali įtampa ant vienos iš pavarų negali viršyti 157 V. Diferencinių įtampų sąryšis su atsilenkimo kampu ant x ir y ašių pavaizduotas 20 paveiksle. Kaičiant kampą x kryptimi, keisime kritimo kampą į gardelę tuo pačiu keisdami spinduliuojamą bangos ilgį. Virš veidrodžio yra pritvirtinta diafragma pašalinanti nereikalingus atspindžius nuo greta veidrodžio esamų paviršių.



21 paveikslas. Derinamas lazeris Littrow konfigūracijoje su MEMS veidrodžiu optiniame kelyje.

Surinkto lazerio konfigūracija pavaizduota 21 paveiksle. Visi lazerį sudarantys komponentai sudėti taip, kad iš stiprinimo lusto išėjusi spinduliuotė, sukolinuota lęšio, kristų į MEMS veidrodį, pastatytą rezonatoriaus viduje. Nuo MEMS veidrodžio atsispindėjusi spinduliuotė nukreipiama į echelle gardelę. Gardelė ir veidrodis pastatyti taip, kad keičiant MEMS veidrodžio kampą, į gardelę krintančio ir difragavusio spindulio kampas sutaptų su mums reikalingu pasiekti derinamo lazerio spinduliuojamu spektru. Įvertintas rezonatoriaus ilgis pavaizduotoje komponentų konfigūracijoje tarp kraštinių C-juostos spinduliavimo spektrų kis tarp 6.3 cm 1530 nm bangos ilgiui ir 9.6 cm 1570 nm bangos ilgiui.

2.2. Matavimų priemonės

Atliekant tolimesnius tyrimus derinamo bangos ilgio lazerio charakteristikų testavimui buvo padaryti šie eksperimentai:

1. Išspinduliuotos šviesos galios priklausomybė nuo maitinimo srovės (vatamperinė charakteristika);
2. Nevienalaikis generuojamos galios pasiskirstymas, nuo į MEMS paduodamos įtampos;
3. Generavimo diapazono ir linijos pločio matavimai.

Vatamperinei priklausomybei pamatuoti MEMS veidrodis buvo nustatytas tokiu kampu, kad kritusi ir atsispindėjusi spinduliuotė būtų ties centriniu bangos ilgiu ($\lambda = 1550$ nm). Tuomet keičiant srovę stebimas galios pokytis. Galia matuojama FOD 1204 optiniu galios matuokliu.

Galios priklausomybė nuo į MEMS veidrodį paduodamos įtampos matuojama keičiant įtampą x ir y kryptimis ir stebint galią spinduliuojamą iš derinamo lazerio. MEMS jungiamas prie 4 kanalų DAC (*angl. digital-to-analog converter*) keitiklio, kurio valdymui pasirinkta MATLAB

programavimo platforma. Naudojantis šia platforma, buvo rašomos programos duodančios komandas, koku kampu atsilenkti veidrodžiui. Kiekviena iš x ir y ašių turi po dvi pavaras (iš viso turime keturis narius: x_+ , x_- , y_+ ir y_-). Kiekvienai iš pavarų reikia nurodyti konkrečią įtampą kurios paskaičiuojamos iš šių formulių:

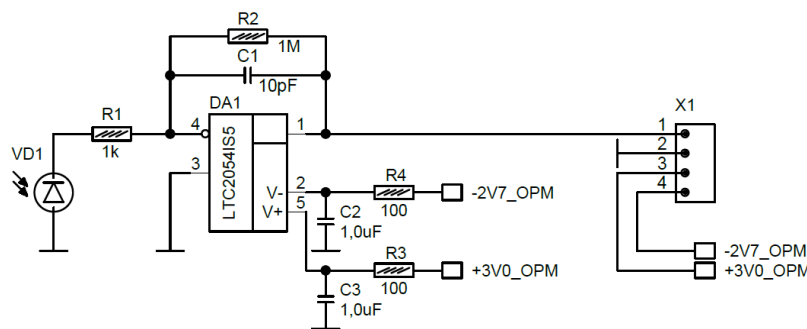
$$x_+ = (x_{Diff} + 2V_{Bias})/2, \quad (17)$$

$$x_- = (2V_{Bias} - x_{Diff})/2, \quad (18)$$

$$y_+ = (y_{Diff} + 2V_{Bias})/2, \quad (19)$$

$$y_- = (2V_{Bias} - y_{Diff})/2, \quad (20)$$

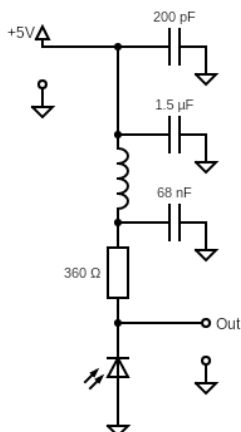
kur x_{Diff} ir y_{Diff} yra diferencinės įtampos ant x ir y ašių, o V_{Bias} – priešįtampis. Keičiant kampą buvo skenuojama difrakcinė gardelė prie fiksuoto priešįtamčio $V_{Bias} = 80$ V. Gardelė buvo skenuojama naudojant įterptinius *for* ciklus, kurių viename keičiama y ašis, kitame – x ašis. Tai buvo atliekama kaip įmanoma efektyviau: vietose, kuriose lazerio veika išnykdavo, buvo peršokama į sekantį skenavimo ciklą. Lazerio išspinduliuota galia buvo užfiksuota fotodiode, kurio sugeneruota maža srovė paduodama į transimpedanso stiprintuvą, iš kurio užregistruota įtampa (22 paveikslas). Įtampa matuota PicoScope 2405A osciloskopu. Pamatavus, rezultatai buvo atvaizduoti grafiškai. Šie rezultatai taip pat atvaizduoti naudojant MATLAB grafikų braižymo funkciją *isosurface*. Ši funkcija leidžia aiškiau nubrėžti grafikus reikalaujančius trijų ašių.



22 paveikslas. Transimpedanso stiprintuvo schema.

Spektro tyrimams keliuose taškuose buvo naudojamas ANDO 6317B spektro analizatorius. Pasirinkus kelias x ir y koordinatas atitinkančias įtampas įvertinamas visas pasiektas spinduliuojamas spektras, bei kaip jis kinta keičiant x koordinatę atitinkančią įtampą fiksuotu žingsniu.

Detaliau įvertinti spektro formos ir pločio matavimus pasinaudojome optiniu heterodinavimu. Tai metodas pagrįstas optinio maišymo arba dažnių maišymo fizikiniu principu.



23 paveikslas. Pin diodo elektrinio prijungimo schema.

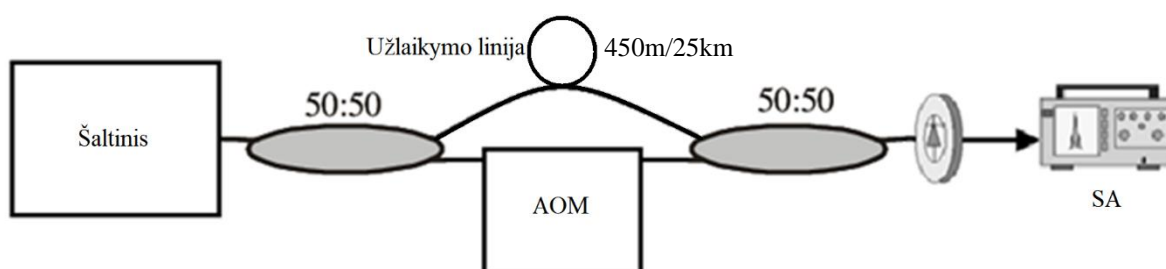
Puslaidininkinis diodas naudojamas kaip dviejų skirtingų dažnių bangų maišytuvas. Jis leidžia nustatyti tų bangų amplitudžių sandaugos fotosrovę atsiradusią dėl dviejų vienas kitam gretimų dažnių ω_1 ir ω_2 . Krentant dviejų dažnių bangoms į diodą, atsiranda skirtuminiai ir suminiai dažniai. Suminiai dažniai nepriimami dėl diodo ribotos dažninės charakteristikos. Gaunama fotosrovės išraiška:

$$i = R[P_1 + P_2 + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos((\omega_1 - \omega_2) + (\varphi_1 + \varphi_2))]. \quad (21)$$

Lygtyje R yra fotodiode jautrumas, P_1 ir P_2 – optinė galia φ_1 ir φ_2 – dažnių fazės. Dydis $2\sqrt{P_1 P_2} \cos((\omega_1 - \omega_2) + (\varphi_1 + \varphi_2))$ įprastai vadinamas tarpiniu dažniu. Sujungus du optinius spektrus į vieną ir jais apšvietus foto diodą gaunamas maišytas signalas, kuris analizuojamas elektroniniu spektro analizatoriumi [24]. Maišytas signalas bus paduodamas į pin PD-1150 fotodiode. Šio pin diode elektrinė jungimo schema atvaizduota 23 paveiksle [24].

Kad atlikti heterodinavimą buvo naudotasi akusto-optiniu moduliatoriumi. Šis prietaisas naudoja kvarco kristalą ir pjezoelektrinį keitiklį, kurio pagalba kristale sugeneruojamos bėgančios bangos. Garso bangos medžiagoje sukuria sritis kur atomai yra suartėję arba nutolę vienas nuo kito. Kitaip tariant medžiaga keliauja skersinės bangos. Dėl sutankėjusių ir praretėjusių sričių sukurama difrakcinė gardelė, pro kurią keliaujanti šviesa difraguoja tam tikru kampu θ , priklausančiu nuo to, koks yra akustinės bangos dažnis. Dėl gardelės atsiradimo prigimties m – tosios eilės difragavusios bangos dažnis bus paslinktas dažnių srityje per tiek, koks yra akustinės bangos dažnis: $f = f_{opt} + mf_{ac}$. Akustinėms bangoms kristale generuoti buvo naudojamas Γ 4-143 aukštadažnis generatorius. Matavimo schema atvaizduota 24 paveiksle. Spinduliuotė iš derinamo lazerio skaiduliniu dalytuvu

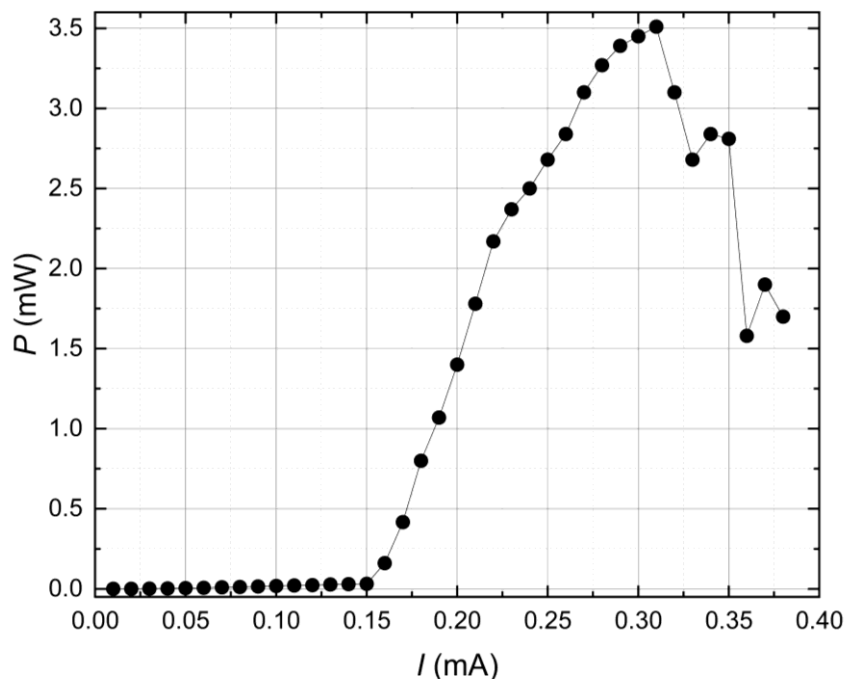
padalinama į dvi dalis, viena iš jų pereina pro akusto-optinį moduliatorių (AOM). Jame bangos ilgis pamoduliuojamas, t.y. spektre paslenkamas per 82 MHz pradinio signalo atžvilgiu. Toks dažnis buvo pasirinktas tiksliai dėl to, kad AOM 1535 nm – 1570 nm bangos ilgiui veikia efektyviausiai. Po to padalytos spinduliuotės grąžinamos atgal ir heterodinavimo metodu matuojamos RIGOL DSA832E spektro analizatoriumi, kurio dažnių diapazonas 9 kHz – 3.2 GHz. Analizė buvo atlikta derinamo bangos ilgio lazeriui su MEMS veidrodžiu naudojant 450 m užlaikymo liniją. Taip pat, palyginimui buvo paimtas Santec TSL-710 derinamo bangos ilgio lazeris (taip pat su 450 m linija). Kitu matavimu heterodinuojant buvo išmatuota tiriamo lazerio spektro pločio ir stabilumo priklausomybė nuo spinduliavimo spektro naudojant 25 km užlaikymo liniją.



24 paveikslas. Spektro matavimas heterodinavimo metodu naudojant akusto optinį moduliatorių [24].

3. Rezultatų aptarimas

3.1. Galios matavimas

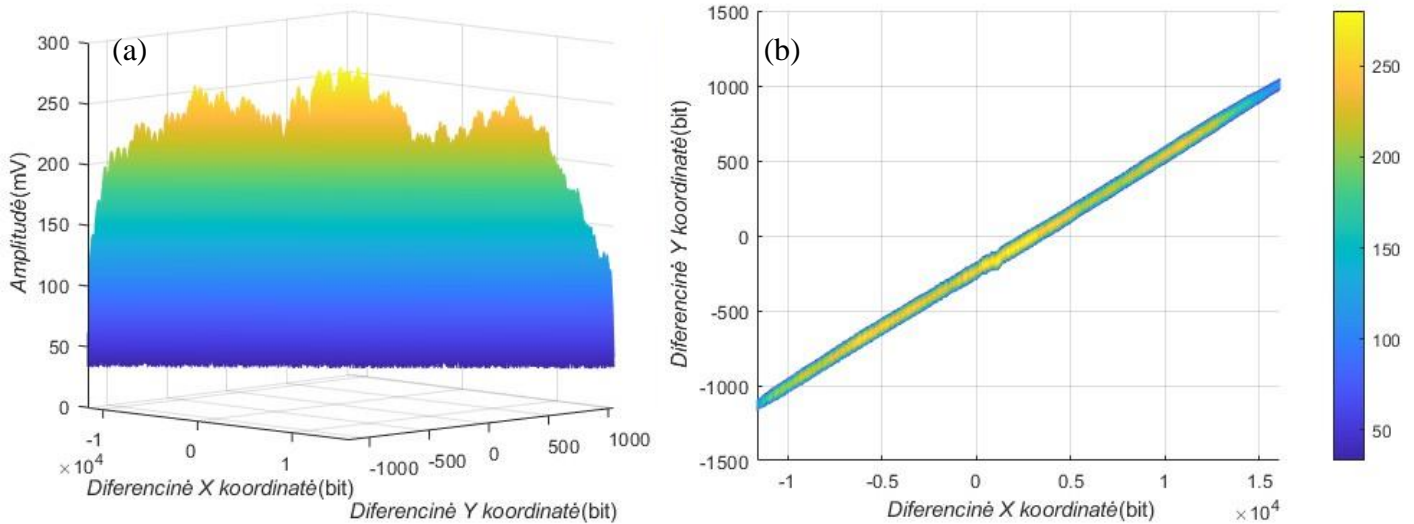


25 paveikslas. Derinamo bangos ilgio lazerio galios priklausomybė nuo srovės veikiant 1550 nm bangos ilgyje.

25 paveiksle pavaizduota derinamo bangos ilgio lazerio galios priklausomybė nuo srovės (vatamperinė charakteristika) veikiant ties centriniu C juostos bangos ilgiu – 1550 nm. Iš grafiko nustatyta slenkstinė srovė $I = 160$ mA. Iki šios ribos lazeris veikia kaip šviesos diodas. Peržengus slenkstinę srovę spinduliuojama galia auga monotoniškai ir pasiekia maksimalią 3.5 mW galią kai lazerio maitinimo srovė 310 mA. Iš šios priklausomybės matyti, kad ji yra tiesinė iki tam tikros vertės po kurios seka galios svyravimai. Toje srityje lazeris veikia nestabiliai. Taip yra todėl kad keičiant kaupinimo (maitinimo) srovę išilginės modos bangos ilgis ties kuriuo veikia lazeris keičiasi (pasislenka). Pasiekus tam tikrą srovę įvyksta modos šuolis kuomet iš vienos modos veikimo pereiname prie kitos arba šokinėjama nuo vienos prie kitos. Dėl to tolimesni matavimai buvo atlikti tiesinėje (stabilioje) lazerio veikimo srityje.

3.2. MEMS veidrodžio skenavimo matavimai

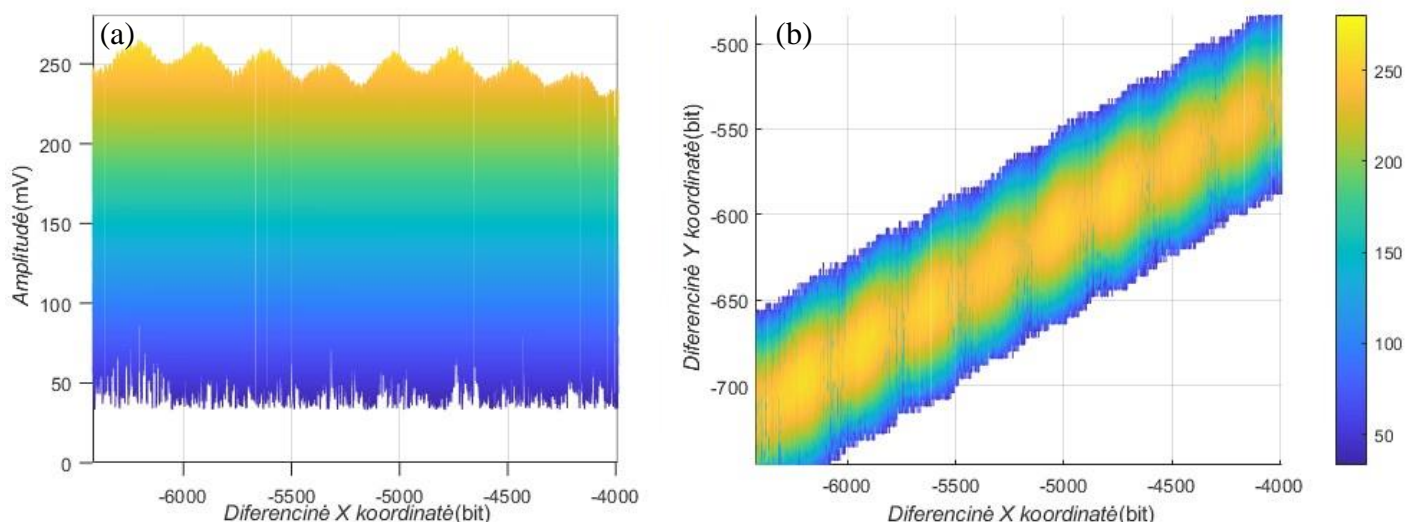
Šiame poskyryje aptarsime rezultatus gautus praskenavus difrakcinę gardelę, keičiant diferencinę įtampą ant x ir y ašių prie fiksuotos priešįtampio vertės $V_{Bias} = 80$ V. Šie rezultatai grafiškai pavaizduoti 26 paveiksle (a) ir (b) grafikuose. Grafike ant x ir y ašių pavaizduotos diferencinės įtampų vertės tuo tarpu spalva žymi spinduliuotės amplitudę. Iš grafiko matoma, kad keičiant x koordinatę, taip pat reikia keisti ir y koordinatę, kad stiprintuvas veiktų kaip lazeris.



26 paveikslas. Spinduliavimo amplitudės priklausomybė nuo diferencinės įtampos paduotos į x ir y ašis išreikštos bitų vertėmis. $V_{Bias} = 80$ V. (a) – visos ašys matomos; (b) – pagal x ir y ašis.

Taip yra todėl, kad keičiant polinkio kampą ant x ašį valdančių pavarų, nėra garantuota, kad y kryptimi kampas prie tos pačios bitų vertės išliks toksai pat, kad užtikrinti tinkamas sąlygas lazerio spinduliuotei grįžti tuo pačiu keliu į stiprinimo lustą. Todėl keičiant kampą x ašimi teko atlikti pataisymus ir y ašyje. Tai pat prie šio efekto gali prisidėti jei MEMS veidrodis yra mažu kampu pasuktas. Tokiu atveju pakeitus kampą x ašimi spindulys nekris į gardelę statmenai režiams ir nebegrįš į stiprinimo terpę.

Iš 26 (a) paveikslo matyti, kad amplitudė, keičiant x koordinatę, kinta nemonotoniškai. Iš arčiau šie grafikai pavaizduoti 27 (a) ir (b) paveiksluose. Amplitudė pasiskirsčiusi į intensyvumo salas. Spinduliuotės intensyvumas panašus į moduluotą amplitudės priklausomybę, kuri periodiškai kinta keičiant MEMS įtampą. Tokia spinduliuojamos amplitudės priklausomybė panaši į išilginių modų šuolius. Keičiant MEMS pasvirimo kampą kartu keičiame ne tik stiprinamą bangos ilgį, bet ir rezonatoriaus ilgį. Kintant jam, keičiasi išilginių modų padėtis spektre. Idealiu atveju norima pasiekti tokį bangos ilgio kitimą, kad išilginė moda sutaptų su gardelės atspindimu bangos ilgiu. Dėl drastiško rezonatoriaus ilgio kitimo keičiant spindulio kritimo kampą, išilginė moda kinta sparčiau nei kad filtro praleidžiama moda.



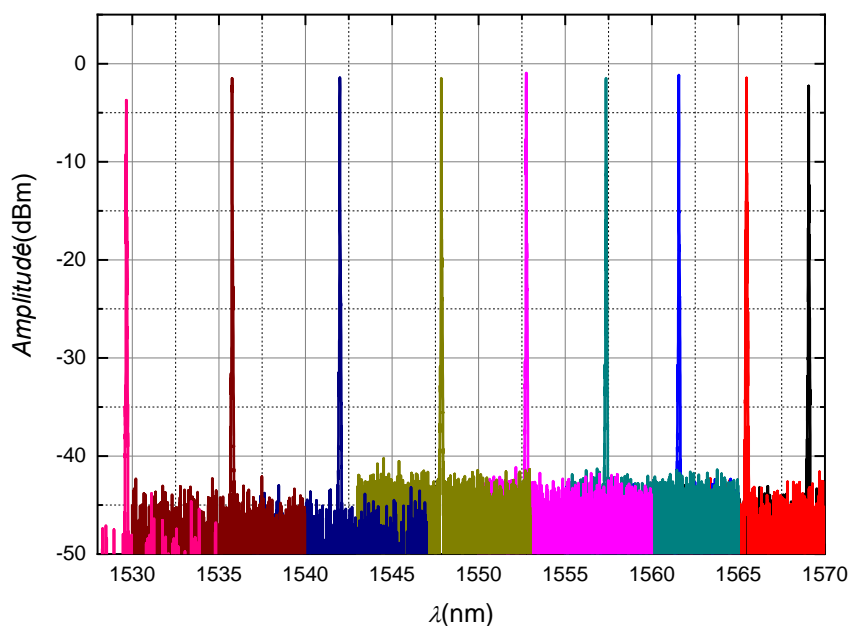
27 paveikslas. Priartinta spinduliavimo amplitudės priklausomybė nuo diferencinės įtampos paduotos į x ir y ašis išreikštos bitų vertėmis. $V_{Bias} = 80$ V. (a) – pagal amplitudę ir x koordinatę; (b) – pagal x ir y koordinates.

Šie pasikartojantys amplitudės svyravimai parodo, kad derinamo bangos ilgio lazerio veika be modų šuolių negauta. Iš literatūros šaltinių apžvalgos 1.4 paragrafe ir 10 paveikslo galima teigti, kad komponentai yra išdėlioti tarpiniame variante tarp 10 paveiksle nurodytų (e) ir (g) struktūrų. Taip nustatyta, nes sukimosi ašis yra ne ties gardelės paviršiumi ar taške lygiagrečiam pusiau pralaidžiam lęšiui/veidrodžiui, bet tarpe tarp tų taškų, kur stovi MEMS veidrodis. Todėl tolygiai keisti bangos ilgį šioje konfigūracijoje galimai neįmanoma dėl rezonatoriaus geometrijos ir stacionariai įtvirtintų rezonatoriaus komponentų (MEMS ir echelle gardelės). Šios problemos sprendimui būtų galima pasitelkti papildomus rezonatoriaus ilgio kompensavimo metodus. Parinkus tinkamą MEMS veidrodį valdančių šukų gamybos architektūrą, bei tinkamai maitinant kiekvieną iš jų, galima pasiekti kokį MEMS veikimo režimą, kuriame pavaros, be x ir y sukimosi ašių, valdytų trečią z ašį, leidžiančią MEMS veidrodžiui pasistumti aukštyn. Taip pat šiai problemai spręsti padėtų lazerinės sistemos mažinimas. Rezonatoriaus ilgio sumažinimas pats savaime monotoniškumo problemos neišspręs, tačiau kartu su MEMS veidrodžiu valdomu kompensavimu, tai leistų sekti išilginę modą su kuo mažiau modų šuolių.

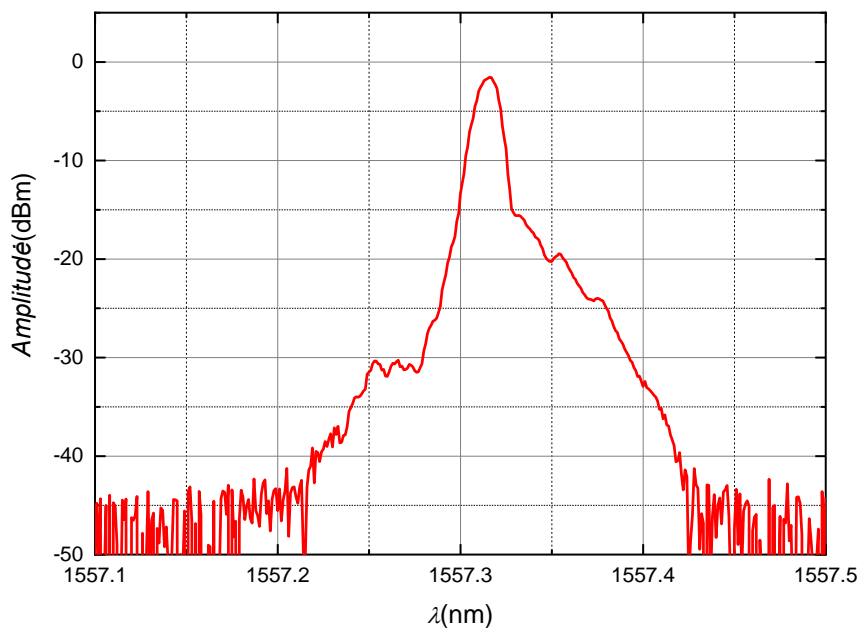
3.3. Spinduliavimo spektro ir spektro pločio matavimai

Šiame poskyryje aptarsime rezultatus gautus iš spektrinės lazerio analizės. 28 paveiksle pavaizduotas bangos ilgis keliose spektro padėtyse, keičiant MEMS veidrodžiui paduodamą įtampą fiksuotu žingsniu. Iš grafiko matome, kad bangos ilgį galima paderinti nuo 1529.66 nm iki

1569.06nm. Taigi sugeneruotas spektras pakliūna į C juostą. Iš grafiko matyti, kad kiekviename taške pamatuotų bangos ilgio optinio signalo santykis su triukšmu yra didesni nei 40dB.



28 paveikslas. Perklotas derinamo lazerio spinduliuojamas spektras keliuose taškuose.



29 paveikslas. Derinamo bangos ilgio lazerio veikiančio 1557.33nm bangos ilgyje optinis spektras.

Taip pat matome, kad atstumas tarp pamatuotų bangos ilgių mažėja, didėjant bangos ilgiui. Šio rezultato buvo tikėtasi, nes iš Littrowo gardelės difrakcijos lygties (9) ir kaip 15 paveiksle buvo grafiškai atvaizduota, bangos ilgis keičiant kritimo kampą priklauso netiesiškai. Ketinama šią vietą išspręsti tolimesnėse šio lazerio vystymo žingsniuose, kuomet pereisime prie norimo bangos ilgio nustatymo įgyvendinimo. Šiam tikslui pasiekti jau pradėti atlikti pirmieji žingsniai. Šiuo metu

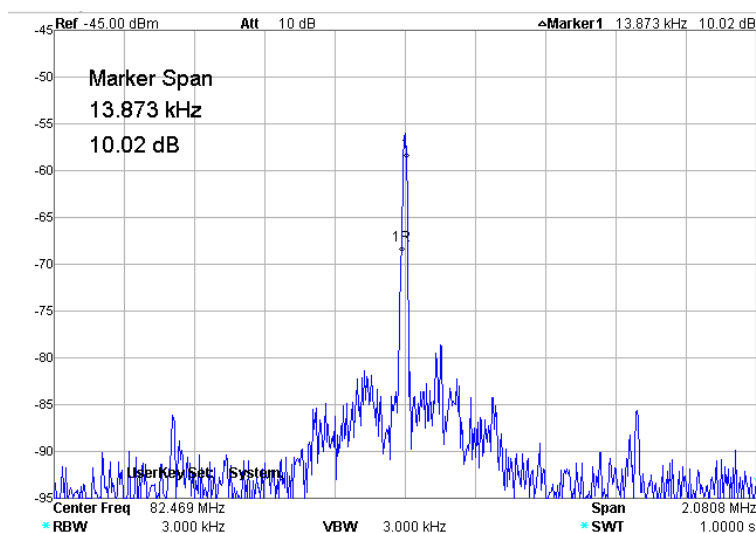
apsistota prie bangos ilgio parinkimo per išorinį grįžtamąjį ryšį, kuriame naudojami du fotodetektoriai. Viena iš detektorių šviesa atkeliauja pro skaidulą kuri pasižymi stipriu nuo bangos ilgio priklausomu slopinimu. Teoriškai, taip vienu metu ant abiejų detektorių pamatavus spinduliavimo intensyvumą, galima atlikti bangos ilgio nustatymą be spektro analizatoriaus.

29 paveiksle pavaizduota viena iš pamatuotų viršūnių. Iš šio grafiko įvertinti koks derinamo bangos ilgio lazerio juostos plotis negalime. Grafike stebimas spektras atitinka optinio spektro analizatoriaus aparatinę funkciją (pasiekta maksimali prietaiso skyra). Todėl buvo naudotasi heterodinavimo metodu maišant signalus.

Žemiau pateiktuose paveiksluose matomi pora matavimų atliktų linijos pločiui įvertinti. 30 paveiksle yra heterodinavimo metodu pamatuotas tiriamojo derinamo bangos ilgio lazerio spinduliuojamas spektras 1550nm bangos ilgyje su 450 m užlaikymo linija. Iš išsaugotos nuotraukos įvertintas linijos plotis 3dB lygyje (*angl. full width at half maximum arba FWHM*) yra apie 25 kHz. Gautas matavimas palygintas su TSL-710 derinamu lazeriu. Šio lazerio spektras pavaizduotas 31 paveiksle. TSL-710 lazerio FWHM yra apie 10 kHz. Tai pat matome kad tiriamo lazerio spektro plotis išplatėja pamatavus 10 dB ir 20 dB lygyje. Tai leidžia įvertinti jog tiriamas lazeris nėra toks stabilus tačiau pastarojo spektro plotis yra palyginamas su TSL-710 lazeriu.



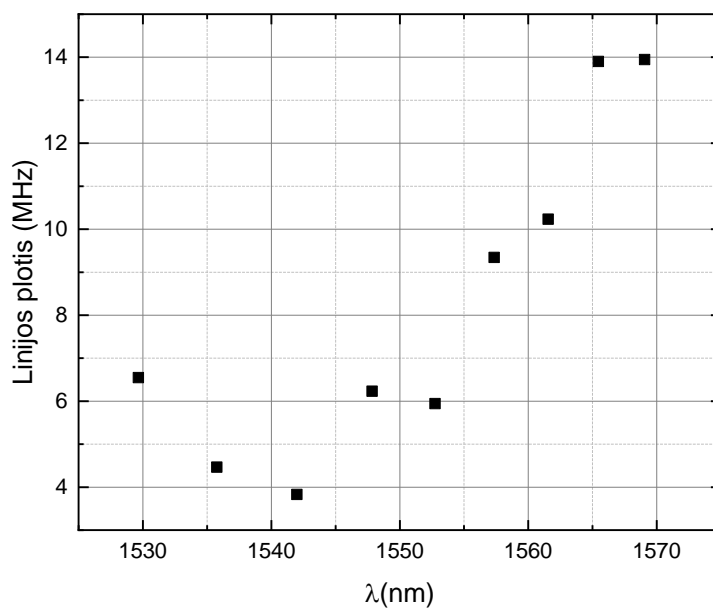
30 paveikslas. Tiriamo derinamo bangos ilgio lazerio spektro plotis su 450m užlaikymo linija spinduliuojant 1550nm spektrą.



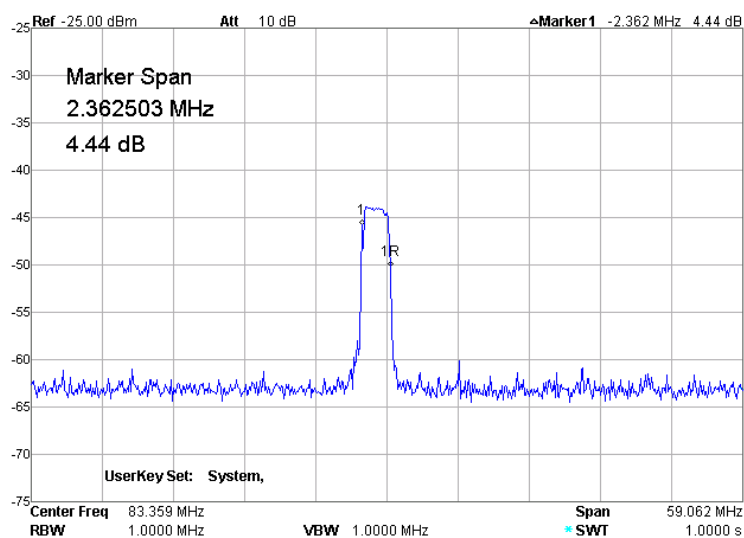
31 paveikslas. Santec TSL-710 derinamo bangos ilgio lazerio spektro plotis su 450m užlaikymo linija spinduliuojant 1550nm spektrą.

32 paveiksle pavaizduotas linijos plotis keliuose spinduliuojamo spektro vietose. Matavimas atliktas heterodinavimo metodu su 25 km užlaikymo linija. Iš grafiko matome, jog spektro plotis svyruoja nuo 4 MHz iki 14 MHz. Taip pat grafiko taškai išsidėstę „U“ formos pavidalu. Tokia priklausomybė atsiranda nes didžiausias stabilumas pasiekiamas esant didžiausiam suminiam stiprinimui. Lustas kiekvieną bangos ilgį stiprina skirtingu efektyvumu. Dėl to ir spinduliuojamas spektro juosta pakis. Taip pat išoriniai komponentai, tokie kaip gardelė, daro įtaką spektro pločiui. Kampas, kuriuo šviesa krenta į gardelę ir su mažiausiais nuostoliais grįžta atgal yra įbrėžties kampas (θ_B). Tolstant nuo jo, spinduliuotė grįš mažesniu efektyvumu.

33 paveiksle pavaizduotas TSL-710 spinduliuojamas linijos stabilumas 1550 nm bangos ilgiui. Išmatuotas linijos stabilumas – 2.3 MHz. Palyginus su 32 paveikslo grafiku TSL-710 juostos plotis geresnis, nei tiriamojo lazerio, tačiau palyginamas. Taip pat reiktų paminėti, kad Santec lazeris turi lazerio spinduliuotę stabilizuojančias sistemas, tuo tarpu tiriamam lazeryje jų nėra.



32 paveikslas. Linijos pločio priklausomybė nuo spinduliuojamo bangos ilgio FWHM lygyje. Matavimas atliktas heterodinavimo metodu su 25 km užlaikymo linija.



33 paveikslas. Santec TSL-710 derinamo bangos ilgio lazerio spektro plotis su 25 km užlaikymo linija spinduliuojant 1550 nm spektrą.

Išvados

Šiame tyrime buvo ištirtos sukurto derinamo bangos ilgio lazerio charakteristikos. Rezultatai parodė:

1. Pavyko pagaminti keičiamo bangos ilgio lazerį ir pademonstruoti jo veikimą keičiant spinduliuojamą bangos ilgį visoje C juostoje (1530 – 1565 nm), kai bangos ilgio keitimui naudojamas įtampa valdomas mikroelektromechaninis veidrodis;
2. Keičiant bangos ilgį amplitudė kinta nemonotoniškai, kas indikuoja modų šuolius;
3. Tiriamojo lazerio juostos plotis ir stabilumas FWHM palyginamas su komerciniu derinamu lazeriu, tačiau -10 dB ir -20 dB amplitudės lygyje juostos plotis yra platesnis;
4. Ateityje planuojama siaurinti spinduliuojamą linijos plotį, mažinti lazerio matmenis, bei pritaikyti rezonatoriaus ilgio kompensavimą naudojant MEMS ir pasiekti bangos ilgio nustatymą nenaudojant išorinių prietaisų.

Literatūra

- [1] J. Buus, M.-C. Amann, ir D. J. Blumenthal, *Tunable laser diodes and related optical sources*, 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2005.
- [2] R. D. Diehl, Sud., *High-power diode lasers: fundamentals, technology, applications, with contributions by numerous experts*. Topics in applied physics, no. v. 78. Berlin ; New York: Springer, 2000.
- [3] J. Vengelis ir A. Dubietis, „Laser physics (Lecture notes)“. Vilnius University Laser Research Center, 2020 m.
- [4] „Single Frequency Lasers Tutorial“, Thorlabs. Žiūrėta: 2022 m. birželio 1 d. [Interaktyvus]. Adresas: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9024
- [5] J. E. Harvey ir R. N. Pfisterer, „Understanding diffraction grating behavior: including conical diffraction and Rayleigh anomalies from transmission gratings“, *Opt. Eng.*, t. 58, nr. 08, p. 1, rugpj. 2019, doi: 10.1117/1.OE.58.8.087105.
- [6] C. Palmer, „DIFFRACTION GRATING“, p. 253.
- [7] E. G. Loewen ir E. Popov, *Diffraction gratings and applications*. Optical engineering, no. 58. New York: M. Dekker, 1997.
- [8] D. J. Schroeder ir R. L. Hilliard, „Echelle efficiencies: theory and experiment“, *Appl. Opt.*, t. 19, nr. 16, p. 2833, rugpj. 1980, doi: 10.1364/AO.19.002833.
- [9] E. Loewen, D. Maystre, E. Popov, ir L. Tsonev, „Diffraction efficiency of echelles working in extremely high orders“, *Appl. Opt.*, t. 35, nr. 10, p. 1700, bal. 1996, doi: 10.1364/AO.35.001700.
- [10] E. Loewen, D. Maystre, E. Popov, ir L. Tsonev, „Echelles: scalar, electromagnetic, and real-groove properties“, *Appl. Opt.*, t. 34, nr. 10, p. 1707, bal. 1995, doi: 10.1364/AO.34.001707.
- [11] L. Levin, „Mode-hop-free electro-optically tuned diode laser“, *Opt. Lett.*, t. 27, p. 237–9, kovo 2002, doi: 10.1364/OL.27.000237.
- [12] F. Traptilisa, „Characterization and Development of an Extended Cavity Tunable Laser Diode“, Master of Science, San Jose State University, San Jose, CA, USA, 2014. doi: 10.31979/etd.a9y3-mswm.
- [13] „An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)“, 2002.
- [14] S. Gupta, T. Pahwa, R. Narwal, B. Prasad, ir D. Kumar, „Optimizing the Performance of MEMS Electrostatic Comb Drive Actuator with Different Flexure Springs“, 2012.
- [15] R. R. A. Syms ir D. F. Moore, „Optical MEMS for telecoms“, *Mater. Today*, t. 5, nr. 7, p. 26–35, rugpj. 2002, doi: 10.1016/S1369-7021(02)00839-8.

- [16] Y.-H. Seo, K. Hwang, H. Kim, ir K.-H. Jeong, „Scanning MEMS Mirror for High Definition and High Frame Rate Lissajous Patterns“, *Micromachines*, t. 10, nr. 1, Art. nr. 1, saus. 2019, doi: 10.3390/mi10010067.
- [17] M. Hoffmann ir E. Voges, „Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems“, *J. Micromechanics Microengineering*, t. 12, nr. 4, p. 349–360, liep. 2002, doi: 10.1088/0960-1317/12/4/301.
- [18] C. Wen, W. Deng, ir Y. Li, „Technology of optical MEMS in optical communication“, pristatytas Asia-Pacific Optical and Wireless Communications, C. F. Lam, C. Fan, N. Hanik, ir K. Oguchi, Sud., Wuhan, China, geg. 2004, p. 122. doi: 10.1117/12.523389.
- [19] A. Admin, „The Comparison Of WDM And TDM“, Fiber Optical Networking. Žiūrėta: 2024 m. gegužės 12 d. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.fiber-optical-networking.com/the-comparison-of-wdm-and-tdm.html>
- [20] B. Pezeshki ir kt., „20-mW widely tunable laser module using DFB array and MEMS selection“, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, t. 14, nr. 10, p. 1457–1459, spal. 2002, doi: 10.1109/LPT.2002.802392.
- [21] A. Q. Liu, X. M. Zhang, D. Y. Tang, ir C. Lu, „Tunable laser using micromachined grating with continuous wavelength tuning“, *Appl. Phys. Lett.*, t. 85, nr. 17, p. 3684–3686, spal. 2004, doi: 10.1063/1.1812595.
- [22] A. Zhang ir kt., „Study on external cavity diode laser with a wide mode-hopping free tuning range“, *Front. Phys.*, t. 10, gruodž. 2022, doi: 10.3389/fphy.2022.1093179.
- [23] thorlabs, „SAF1550S2 Tunable laser gain chip with TEC“, thorlabs.com. [Interaktyvus]. Adresas: <https://www.thorlabs.com/drawings/d28e199947314ff3-6BDE394D-9589-3E02-0699D69DF0D6CA43/SAF1550S2-SpecSheet.pdf>
- [24] A. Garcia, I. E. Zaldivar Huerta, J. Rodriguez, ir M. del R. Gomez Coli, „Photonic Components for Analog Fiber Links“, *Optical Communication*, N. Das, Sud., InTech, 2012. doi: 10.5772/48416.

Summary

The aim of the work is to construct a tunable semiconductor laser using off the shelf parts and analyse its primary characteristics.

Laser was constructed in a Littrow configuration, where active medium is a thermoelectrically cooled half-butterfly assembly semiconductor gain chip which operates in 1530-1570nm range. For one of the external cavity reflectors an echelle diffraction grating was chosen for its high angular dispersion and for wavelength tuning a MEMS mirror was installed inside resonator.

Power vs current measurements and power dependence vs MEMS supply voltage were made. Spectral characteristics were also taken to analyse laser wavelength tunability and spectral linewidth as well as stability. From power vs current measurement a common laser diode dependence was observed. Analysis of power dependence on voltage showed non-monotonic power intensity dependence on MEMS supply voltage, which indicates mode hopping. Tunability measurement showed the possibility to change emitted light wavelength in the entire C-band. Stability and spectral linewidth are similar to a commercial laser at half magnitude, however spectral linewidth should be improved at -10 dB and -20 dB levels.

Santrauka

Šio darbo tikslas yra sukonstruoti derinamo bangos ilgio lazerį naudojant lengvai prieinamus komponentus ir patikrinti šio lazerio charakteristikas.

Lazeris buvo sukonstruotas pagal Littrow konfigūraciją, kur aktyvioji terpė yra termoelektriniu būdu aušinamas puslaidininkinis stiprinimo lustas, veikiantis 1530–1570 nm diapazone. Vietoj vieno iš išorinio rezonatoriaus veidrodžių buvo pasirinkta echelle difrakcinė gardelė parinkta dėl didelės kampinės dispersijos, o bangos ilgio derinimui rezonatoriaus viduje buvo įmontuotas MEMS veidrodis.

Buvo matuojama lazerio vatamperinė charakteristika, bei galios priklausomybė nuo MEMS maitinimo įtampos. Spektrinės charakteristikos buvo pamatuotos siekiant įvertinti lazerio bangos ilgio paderinamumą, bei spinduliuojamą linijos plotį ir stabilumą. Matuojant galios priklausomybę nuo srovės pamatuota įprasta lazerinio diodo charakteristika. Galios priklausomybės nuo įtampos analizė parodė nemonotonišką galios intensyvumo pokytį keičiant MEMS maitinimo įtampą, o tai parodo modų šuolius. Bangos ilgio derinimo matavimas parodė galimybę keisti bangos ilgį visoje C juostoje. Spektriniai linijos pločio ir stabilumo matavimai pusės amplitudės lygyje (FWHM) parodė panašius rezultatus kaip ir komercinis derinamo bangos ilgio lazeris, tačiau spektrinis linijos plotis -10 dB ir -20 dB lygyje turi būti pagerintas.