

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Taikomosios elektrodinamikos ir telekomunikacijų institutas

Faustas Kriaučiūnas

INFRARAUDONOSIOS SPEKTRO SRITIES LAZERINIŲ DIODŲ ŽEMADAŽNĖ
TRIUKŠMINĖ SPEKTROSKOPIJA

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos
studijų programa

Studentas

Faustas Kriaučiūnas

Darbo vadovas

dokt. Justinas Glemža

Recenzentas

doc. Kęstutis Svirskas

Instituto direktorius

prof. Jonas Matukas

Vilnius 2020

Turinys

Įvadas	3
1. Literatūros apžvalga.....	4
1.1 Lazeriniai diodai	4
1.1.1 Fabri – Pero lazerinis diodas.....	4
1.1.2 Paskirstytojo grįžtamojo ryšio lazeriniai diodai (PGR).....	5
1.2 Lazerinių diodų generacijos sąlygos.....	5
1.3 Triukšmai	7
1.3.1 Šiluminis triukšmas.....	7
1.3.2 Generacinis-rekombinacinis triukšmas puslaidininkiuose.....	8
1.3.3 $1/f$ triukšmas.....	8
1.3.4 Šratinis triukšmas.....	9
1.3.5 Impulsinis triukšmas	9
1.4 Triukšmai lazeriniuose dioduose	10
1.4.1 Modų šuolių kuriamas triukšmas	10
1.4.2 Grįžtamojo ryšio sukeltas triukšmas	10
2. Lazerinių diodų triukšmų charakteristikų tyrimo metodika.....	11
3. Lazerinių diodų triukšmų charakteristikų rezultatai ir jų aptarimas	14
3.1 Eksperimento metu tirti bandiniai.....	14
3.3 Lazerinių diodų žemadažnių triukšmų charakteristikos	16
Išvados	26
Literatūra.....	27
Summary	28

Įvadas

Lazeriniai diodai (LD) yra pn sandūrą turintys įtaisai, kurie lazerinės generacijos metu spinduliuoja koherentinę šviesą. Pirmasis veikiantis GaAs lazerinis diodas buvo pagamintas 1962 m. Jis veikė tik impulsiniu režimu ir reikėjo atšaldyti iki skysto azoto temperatūros. Šiuo metu naudojami lazeriniai diodai yra spartesni ir kokybiškesni, yra naudojamos įvairios medžiagos jų aktyviesiems sluoksniams sudaryti, kas leidžia pasiekti norimos spinduliuotės bangos ilgį. Telekomunikacijų sistemose plačiai naudojami LD spinduliuojantys 1,3 μm ir 1,5 μm bangos ilgio spinduliuotę, pagaminti InGaAsP pagrindu [1].

Infraraudonoji spektro sritis nuo 2 μm iki 4 μm pasižymi stipriomis įvairių dujų molekulių sugerties linijomis. GaInAsSb lazeriniai diodai, spinduliuojantys šiame bangos ilgių intervale ir veikiantys kambario temperatūroje, pasižymi geresnėmis optinėmis ir elektrinėmis savybėmis lyginant su kitomis (2-4) μm bango ilgio LD medžiagų grupėmis. Tačiau gaminant GaSb pagrindu veikiančius LD ir norint pasiekti didesnę nei 3 μm spinduliuotę bei kad vyktų tiesioginiai tarpjuostiniai krūvininkų šuoliai, yra žymiai sunkiau. Tokius LD yra technologiškai sudėtinga pagaminti dėl būtinybės lazeriniams diodams naudoti AlGaInAsSb penkianarius junginius, kurie yra plačiai naudojami medicinoje ir karinėje pramonėje [2].

Kuriant optines ryšio sistemas bei siekiant patikimo prietaiso veikimo, reikia įvertinti naudojamų komponentų kokybę. Pradžiai reikėtų susipažinti su visais fizikiniais procesais, vykstančiais naudojamuose lazeriniuose dioduose. Vienas iš geriausių būdų yra žemadažnė triukšminė spektroskopija, nes žemo dažnio triukšmo (ypač $1/f$ fliktuacijų) intensyvumas yra susijęs su defektais puslaidininkiniame lazeryje. Tokia puslaidininkinio įtaiso analizė leidžia įvertinti prietaiso kokybę jo neišardžius [3].

Šio darbo tikslas – ištirti vienmodžių ir daugiamodžių InGaAsP/InP bei daugiamodžių GaInAsSb/GaSb lazerinių diodų triukšmų charakteristikas įvertinti abipusės koreliacijos koeficientą tarp elektrinių ir optinių fliktuacijų bei atlikti šių skirtingų medžiagų lazerinių diodų triukšmų charakteristikų palyginimą.

1. Literatūros apžvalga

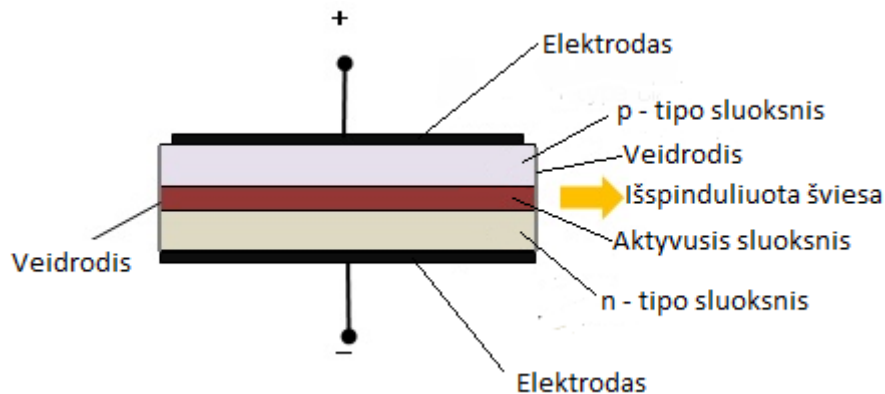
1.1 Lazeriniai diodai

Lazeriniai diodai (LD) yra *tipiški pn sandūros* įtaisai spinduliuojantys koherentinę šviesą, kurių veikimą lemia puslaidininkio elektrinės ir optinės savybės. Tokie dariniai yra sudaromi iš dviejų veidrodžių, kurie yra lygiagretūs tarpusavyje, ir aktyviojo sluoksnio, kuris yra statmenas veidrodžiams [1].

Šiame skyriuje nagrinėsime svarbiausius lazerinių diodų tipus, jų veikimo sąlygas ir charakteristikas.

1.1.1 Fabri – Pero lazerinis diodas

Lazerinio diodo darinys, kuris yra sudarytas iš dviejų veidrodžių ir aktyviojo sluoksnio galime vadinti Fabri – Pero rezonatoriumi (1 pav.). Tai yra pamatinis lazerinių diodų modelis, kuris iki šių laikų yra plačiai naudojamas. [1]



1 pav. LD su Fabri – Pero rezonatoriumi[4].

Tokio modelio veikimo principas yra pagrįstas šalutinių krūvininkų injekcija į aktyvųjį sluoksnį. Kai aktyvusis sluoksnis yra užpildomas krūvininkais bei kompensuojami nuostoliai, prasideda priverstinis spinduliavimas [1].

1.1.2 Paskirstytojo grįžtamojo ryšio lazeriniai diodai (PGR)

Paskirstytojo grįžtamojo ryšio lazerinio diodo sandara yra labai panaši į Fabri – Pero lazerinių diodų sandarą, vienintelis skirtumas yra tas, kad aktyviajame sluoksnyje yra suformuota gardelė, kuri sukuria periodinį lūžio rodiklio kitimą aktyviajame sluoksnyje. Dažniausiai yra naudojamas sinusinės bangos gardelės pavidalas, tokiu atveju lūžio rodiklis kinta tokiu būdu:

$$n_r(z) = n_{eq} + \Delta n_r \cos(2\beta_0 z + \Omega_g) \quad (1.1)$$

n_{eq} – ekvivalentinis daugiasluoksnio darinio lūžio rodiklis, Δn_r – lūžio rodiklių tarp gardelės viršutinės ir apatinės dalies skirtumas, Ω_g – fazių skirtumas rezonatoriaus gardelės centre, β_0 yra išreiškiamas tokiu būdu:

$$\beta_0 = 2\pi n_{eq} / \lambda_B \equiv m\pi / \Lambda \quad (1.2)$$

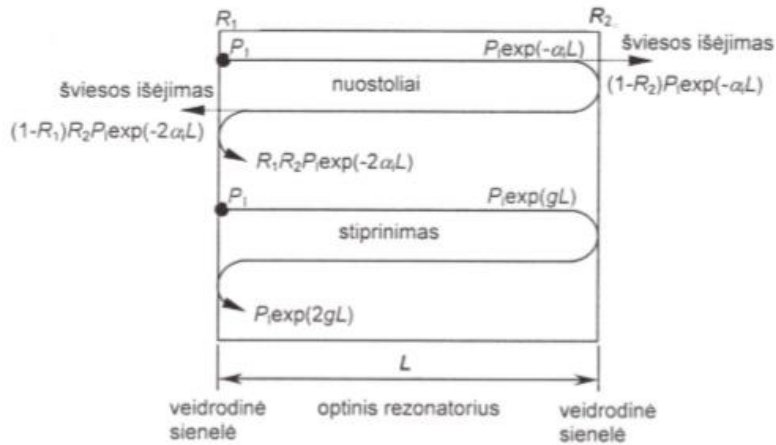
$m = 1, 2, 3, \dots$: Λ – gardelės žingsnis. Kadangi lūžio rodiklis kinta periodiškai gardelės žingsniu, gardelė atspindi tam tikrą bangos ilgį, kurį galime išreikšti tokia lygtimi[5]:

$$\lambda_{PGR} = 2n_{eq}\Lambda / m \quad (1.3)$$

1.2 Lazerinių diodų generacijos sąlygos

Vienas iš svarbiausių lazerinių diodų parametrų yra slenkstinė srovė, tai yra ta riba nuo kurios LD pradeda spinduliuoti koherentinę šviesą. Žemiau šio slenksčio išspinduliuotoji šviesa sklinda išilgai aktyviojo sluoksnio, nes jo lūžio rodiklis yra didesnis nei apvaskalinių sluoksnių. Šviesa sklinda optiniame rezonatoriuje atsispindėdama nuo veidrodžių, kur dėl šviesos sugerties aktyviajame ir apvaskaliniuose sluoksniuose atsiranda nuostoliai. Veidrodžių nuostoliai susidaro dėl to, kad atspindžio faktorius yra mažesnis nei 100 % (tik ką nuskelto kristalo atspindžio faktorius yra apie 30 %), o sklaidos nuostoliai atsiranda dėl aktyviojo sluoksnio nevienalytiškumo. Žinoma nuostolius galime sumažinti padengę veidrodžius labiau atsispindančia medžiaga, tačiau tai sumažintų LD galią. Turimo lazerinio diodo veidrodžių atspindžio koeficientus laikykime R_1 ir R_2 , optinio rezonatoriaus ilgis yra L . Nuostolius sudarytus aktyviajame sluoksnyje, dėl sugerties ir sklaidos galime žymėti koeficientu $\alpha_i(\text{cm}^{-1})$. Šviesai sklindant pirmyn ir atgal jos galia sumažėja $R_1 R_2 \exp(-2\alpha_i L)$

kartų, tačiau tuo pačiu metu vyksta ir stiprinimas, kurį išreikšime koeficientu $g(\text{cm}^{-1})$. Šviesos galia yra stiprinama $\exp(2gL)$ kartų. Tokiu atveju pirmyn ir atgal sklindančios šviesos galia pakis $R_1R_2\exp(\alpha_i-g)$ kartų [1].



2 pav. Stiprinimas ir nuostoliai optiniame rezonatoriuje [1].

Kai stiprinimas ir nuostoliai yra tokie patys, pirmyn ir atgal sklindančios šviesos galia yra lygi pradinei galiai – vyksta lazerinė generacija, kurią galime išreikšti tokia lygtimi:

$$R_1 R_2 \exp(g_{th} - \alpha_i) = 1 \quad (1.4)$$

g_{sl} - tai slenkstinis stiprinimo koeficientas, kuris yra:

$$g_{sl} = \alpha_i + \left(\frac{1}{2L}\right) \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right). \quad (1.5)$$

Pirmasis dešinės pusės narys (α_i) atitinka krūvininkų sugerties nuostolius aktyviajame suoksnyje, o antrasis atitinka veidrodžių sklaidos nuostolius.

Slenkstinės srovės tankis būtų išreiškiamas taip:

$$J_{sl} = d \left\{ \frac{\left[\alpha_i + \left(\frac{1}{L}\right) \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right]}{\beta \Gamma_a} \right\} + dJ_0 \quad (1.6)$$

Slenkstinė srovė gaunama padauginus slenkstinį srovės tankį iš aktyviosios srities ploto, jos dydis gaunamas teisingas tik idealiu atveju. Tikroji jos vertė yra didesnė dėl Ožė

rekombinacijos ir nespinduliuojamosios rekombinacijos kristalo defektuose ir paviršiuje įtakos.

Stiprinimo ir nuostolių sąryšis nepilnai aprašo lazerinės generacijos procesą. Norint, kad lazerinis diodas generuotų šviesą, sklindančios šviesos, praėjusios išilgai rezonatoriaus ir sugrįžusios atgal, fazė turi sutapti su pradine faze. Turi būti tenkinama fazių sąlyga [1]:

$$m\lambda_m = 2L; \quad (1.7)$$

$m(m = 1, 2, 3, \dots)$ – modos skaičius, o λ_m – modos bangos ilgis.[1]

1.3 Triukšmai

Fliktuacijos – tai atsitiktinis dydžių kitimas nuo jų vidutinės vertės. Tai yra vienas iš dažniausiai sutinkamų reiškinių elektroninėse grandinėse. Didelis triukšmų lygis, kuris atsiranda dėl įtaiso defektų ar struktūros netobulumo kenkia įrenginio veikimui. Todėl fliktuacijų tyrimai yra dažnai naudojami elektroninių prietaisų kokybei nustatyti [5].

Šiame skyriuje nagrinėsime, kokius triukšmus mes galime sutikti lazeriniuose dioduose.

1.3.1 Šiluminis triukšmas

Šiluminis triukšmas buvo jau žinomas atsirandant Brauno judėjimo kinetinei teorijai. 1927 metais, kai matavimuose naudojami stiprintuvai jau buvo patobulėję, Švedijoje gimęs fizikas Džonsonas (J. B. Johnson) pastebėjo, jog įėjime prijungus varžą, išėjime stebimos įtampos $u(t)$ intensyvumas didėja didinant varžą R ir keliant jos temperatūrą T . Fliktuacijų intensyvumą galime rasti pasinaudoję Naikvisto formule:

$$S_U = 4kTR \quad (1.8)$$

S_U – įtampos fliktuacijų spektrinis tankis, k – Bolcmano konstanta, T – temperatūra, R – laidininko varža [5].

Šiluminio triukšmo spektrinis tankis yra tiesiogiai proporcingas absoliutinei temperatūrai T , todėl naudojantis šia savybe yra konstruojami labai jautrūs termometrai – nuo labai mažų (0,1 K) iki kelių tūkstančių laipsnių temperatūros.

1.3.2 Generacinis-rekombinacinis triukšmas puslaidininkiuose

Generacinis-rekombinacinis triukšmas puslaidininkiuose įvyksta krūvininkams peršokant iš valentinės juostos į laidumo juostą atsitiktinai, dėl šiluminių gardelės virpesių suteiktos energijos. Jam peršokus iš valentinės juostos į laidumo juostą įvyksta generacija, o atvirkštinis vyksmas – elektrono šuolis iš laidumo juostos į valentinę juostą būtų rekombinacija. Kadangi šie du procesai vyksta atsitiktinai, tai galime teigti, jog krūvininkų skaičius N yra fliuktuojantis dydis, kurių kitimą galime išreikšti tiesine diferencialine lygtimi [5]:

$$\frac{d\Delta N(t)}{dt} = -\frac{\Delta N}{\tau_0} \quad (1.9)$$

τ_0 – vidutinė krūvininkų gyvavimo trukmė laidumo juostoje. Toks krūvininkų kitimas ΔN sukelia tekančios bandiniu nuolatinės srovės I_0 fliuktuacijas:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = \frac{\Delta I}{I_0} \quad (1.10)$$

1.3.3 $1/f$ triukšmas

Žemadažnis triukšmas arba dar žinomas kaip $1/f$ triukšmas – tai atsitiktiniai elektros srovės ar įtampos svyravimai, atsirandantys dėl medžiagos elektrinio laidžio arba elektroninių prietaisų parametrų atsitiktinių svyravimų ir nepastovumo. Tai yra vienas iš labiausiai nagrinėjamų triukšmų, kuris aptinkamas visur: puslaidininkiuose, metaluose, dielektrikuose, termoporose ir kitur. Jeigu tiriamojo bandinio elektrinė varža fliuktuoja, tai tekant ja nuolatinei srovei yra stebimas triukšmas, kurio galios spektrinis tankis yra proporcingas srovės kvadratui ir atvirkščiai proporcingas krūvininkų skaičiui N :

$$\frac{S_U}{U^2} = \frac{S_I}{I^2} = \frac{S_R}{R^2} \sim \frac{1}{N} \quad (1.11)$$

Šis žemadažnis triukšmas yra unikalus tuom, kad mažėjant dažniui jo galios spektrinis tankis didėja. Kai I/f triukšmo lygis tampa mažesnis nei šiluminis triukšmas arba generacinis – rekombinacinis, tokiu atveju jo matavimų atlikti toliau nebegalime[5].

1.3.4 Šratinis triukšmas

Puslaidininkinių diodų krūvininkai pralekia potencialinį barjerą nepriklausomai vienas nuo kito ir, šis vyksmas yra atsitiktinis dydis [5], o tai lemia šratinį triukšmą. Diodo tiesioginės srovės priklausomybė nuo įtampos būtų:

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right); \quad (1.12)$$

čia $I_s = \frac{eD_p p_n}{L_p} + \frac{eD_n n_p}{L_n}$ – šiluminiu būdu generuojamų nepagrindinių krūvininkų srovė; D_n , D_p – elektronų ir skylių difuzijos nuotoliai; n_p – skylių kiekis n srityje; p_n – elektronų kiekis p srityje.

Laikydami termodinaminės pusiausvyros sąlygų ($U = 0$), kai iš p į n ir iš n į p sritis teka vienodos srovės ir lygios I_s , kurios yra tarpusavyje nepriklausomos, kiekviena iš jų generuoja šratinį triukšmą, tokiu atveju srovės fliktuacijų spektrinis tankis būtų išreiškiamas taip [5]:

$$S_i(f) = 2e(I + 2I_s). \quad (1.13)$$

1.3.5 Impulsinis triukšmas

Impulsinis triukšmas paprastai yra nagrinėjamas objektuose turinčius mažą skaičių krūvininkų norint aptikti vieno krūvininko sukeltą triukšmą. Toks triukšmų analizavimas gali suteikti daug informacijos apie tiriamąjį objektą. Jis pasižymi pastovia amplitude, kuri gali išaugti iki kelių procentų vidutinės amplitudės.

Kaip ir $1/f$ ar generacinis-rekombinacinis triukšmai, impulsinis triukšmas irgi yra nagrinėjamas kaip tiriamojo objekto laidumo fliktuacijos [5].

1.4 Triukšmai lazeriniuose dioduose

1.4.1 Modų šuolių kuriamas triukšmas

Vieni iš svarbiausių šviesos šaltinio parametru yra amplitudės ir fazės triukšmas galintys pabloginti mūsų sistemos parametrus. Dėl vykstančio šratinio triukšmo elektronai, skylės ir fotonai elgiasi kaip kvantinės dalelės – jų generavimo ir išnykimo vyksmai yra atsitiktiniai. Tačiau žemuose dažniuose stebimas žemadažnis $1/f$ triukšmas užgožia šias fliktuacijas [6].

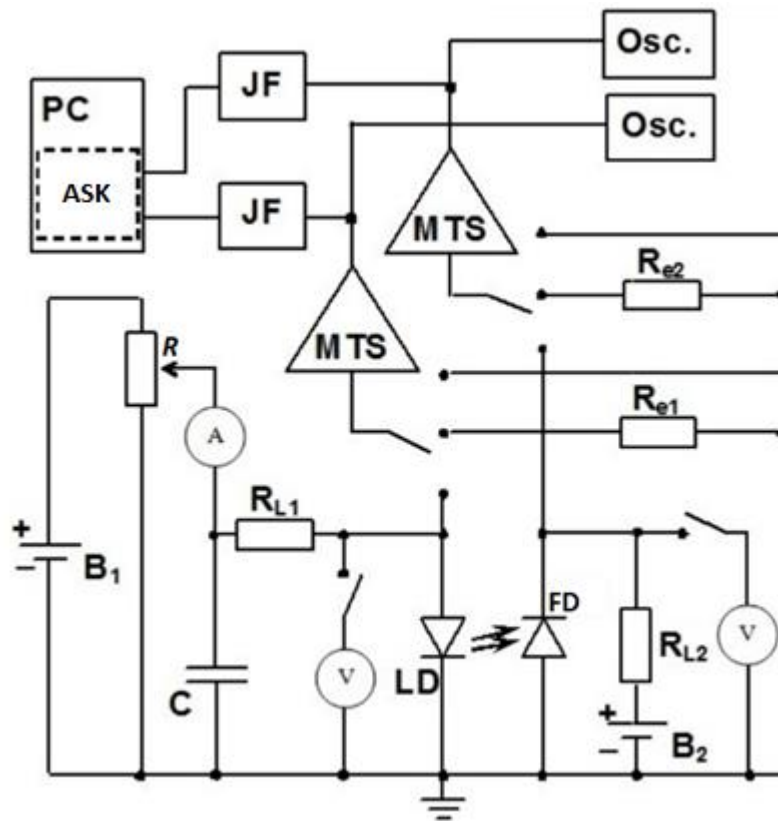
Vienmodžių arba kelias modas turinčių lazerinių diodų modų šuolių sukeltas amplitudės ir fazės triukšmas priklauso nuo neįprastos išilginių ir skersinių spinduliuojamų modų elgsenos, kuri atsiranda dėl temperatūros arba injekcinės srovės pokyčio. Modų šuolių metu išilginės modos konkuruoja tarpusavyje – atsitiktinai spinduliuoja tai viena, tai kita moda. Daugiamodžiuose LD modų persiskirstymo metu triukšmo priežastis yra atsitiktinis galios patekimas į vieną iš spinduliuojamų modų bei šuoliškas smailinės modos bangos ilgio kitimas, kai stiprinimo spektro didžiausia vertė pasislenka ties kitos išilginės modos bangos ilgiu [6].

1.4.2 Grįžtamojo ryšio sukeltas triukšmas

Grįžtamojo ryšio triukšmas gali atsirasti dėl nuo tam tikru atstumu esančio paviršiaus atsispindėjusio spindulio, kuris grįžęs atgal į LD rezonatorių blogina lazerinio diodo veikimo charakteristikas. Kai fazės skirtumas tarp pagrindinės ir atspindėtos bangos yra lygus $2\pi m$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) jos susideda, padidėja spinduliuotės galia, sumažėja slenkstinė srovė. Tačiau jeigu fazių skirtumas tarp šių bangų yra $(2\pi m - 1)$ slenkstinė srovė padidėja ir spinduliuotės galia sumažėja. Grįžusi atspindėta šviesa yra viena iš priežasčių amplitudės fliktuacijų atsiradimui. Dažniausiai tai atsispindi spinduliuotės galios charakteristikose – stebimi „bangavimai“. Vienas iš būdų norint išvengti šio atsitiktinio kitimo būtų įterpiant tarp lazerio skaidulos ir veidrodžio optinį izoliatorių [6].

2. Lazerinių diodų triukšmų charakteristikų tyrimo metodika

Eksperimentas buvo atliktas ekranuotoje patalpoje norint išvengti išorinių elektromagnetinių laukų poveikio, o pats bandinys matavimų metu buvo papildomai patalpintas metalinėje dėžėje. Siekiant išvengti bandinių kaitimo, lazeriniai diodai buvo pritvirtinti prie radiatorių, o matuojant jų spinduliuotės optinius spektrus buvo naudotas Peltjė elementas temperatūros stabilizavimui. InGaAsP LD spinduliuotei registruoti naudotas germanio fotodiodas, o GaInAsSb LD - švino selenido fotodiodas. InGaAsP LD spinduliuotės optiniai spektrai buvo išmatuoti naudojant „Advantest Q8341“ optinio spektro analizatorių.

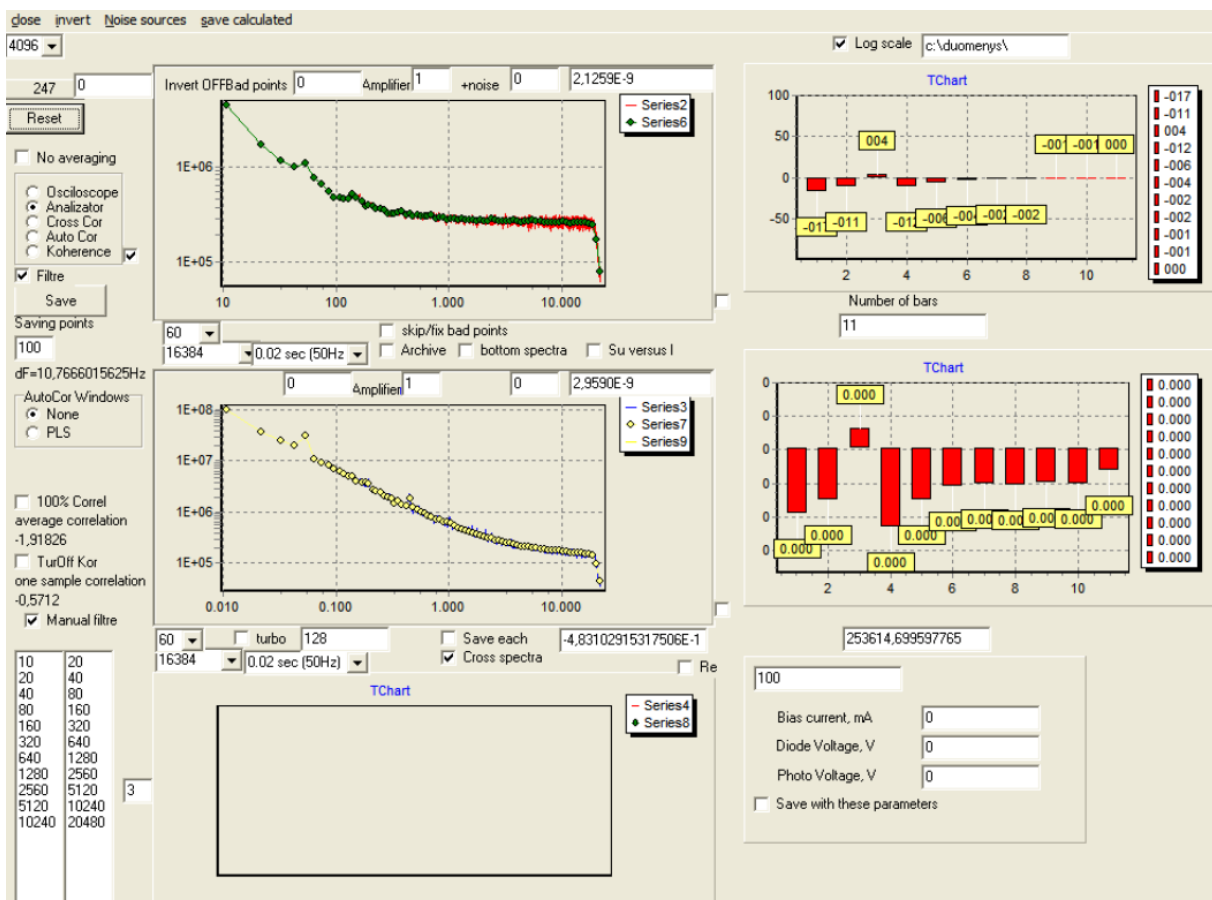


3 pav. Matavimo schema. LD – tiriamas lazerinis diodas, FD – naudojamas fotodiodas signalui registruoti, R_{L1} , R_{L2} – lazerinio diodo ir fotodiodo apkrovos varžos, B_1 , B_2 – naudojami maitinimo šaltiniai, C – kondensatorius, R_{e1} , R_{e2} – etaloninės varžos, MTS – mažo triukšmo stiprintuvas, PC – tyrimo metu naudojamas kompiuteris, JF – juostinis filtras, ASK – analogas-skaičius keitiklis, Osc – tyrimo metu naudojami oscilografai [4].

Visų pirma buvo išmatuotos lazerinių diodų voltamperinės charakteristikos naudojantis puslaidininkinių įtaisų analizatoriumi „Agilent Technologies B1500A“ ir keičiant

įtampą 0,01 V žingsniu. Tuomet buvo išmatuotos fotoįtampos (kuri proporcinga spinduliuotės galiai) priklausomybės nuo tekančios srovės ir nustatytos slenkstinės srovės.

Elektrinės ir optinės fliuktuacijos buvo stiprinamos mažo triukšmo stiprintuvais, tada naudojant analogas-skaičius keitiklį, kuris paverčia analoginį signalą į skaitmeninį, buvo atliekami optinio ir elektrinio triukšmo signalų matavimai dažnių intervale nuo 10 Hz iki 20 kHz. Speciali kompiuterinė programa atlikdavo sparčiąją Furjė transformaciją ir atvaizduodavo triukšmų spektrus, bei koreliacijos koeficientus ir jų vertes dažnių oktavose (4 pav.).



4 pav. Triukšmų matavimo kompiuterinė programa

Optinis triukšmas yra lazerinio diodo spinduliuotės galios fliuktuacijos detektuojamos fotodiodu, o elektrinis triukšmas yra paties lazerinio diodo įtampos fliuktuacijos.

Išmatavus eksperimentines elektrines ir optines fliuktuacijas, buvo apskaičiuoti jų spektriniai tankiai palyginimo būdu su žinomos vertės etaloninių varžų kuriu šiluminiu triukšmu pasinaudojus šiomis formulėmis:

$$S_{EL} = 4kTR_{e1} \frac{S_{diodo} - S_{sist1}}{S_{Re1} - S_{sist1}} \quad (2.1)$$

Taip apskaičiuojamas elektrinio triukšmo spektrinis tankis, optinio triukšmo spektrinis tankis apskaičiuojamas analogiškai:

$$S_{opt} = 4kTR_{e2} \frac{S_{foto} - S_{sist2}}{S_{Re2} - S_{sist2}} \quad (2.2)$$

Šiose formulėse S_{foto} – suminis spinduliuotės galios ir sistemos fliuktuacijų spektrinis tankis, S_{diodo} - suminis lazerinio diodo ir matavimo sistemos fliuktuacijų spektrinis tankis, S_{Re1} , S_{Re2} – etaloninių varžų fliuktuacijų spektriniai tankiai, S_{sist1} ir S_{sist2} yra matavimo sistemų fliuktuacijų spektriniai tankiai, k – Bolcmano konstanta, R_{e1}, R_{e2} – etaloninės varžos, T - absoliučioji temperatūra.

Etaloninių varžų spektriniai tankiai bei matavimo sistemų spektriniai tankiai buvo matuojami perjungiant mažo triukšmo stiprintuve rankenėlę ir atitinkamai stiprintuvo įėjimą sujungiant su etalonine varža ar įėjimą užtrumpinant siekiant pamatuoti matavimo sistemos triukšmus.

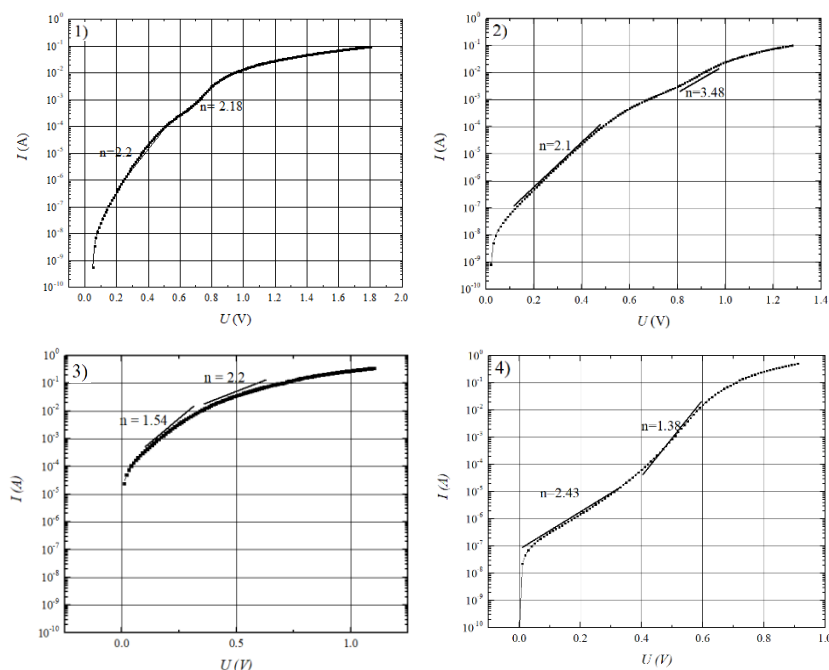
3. Lazerinių diodų triukšmų charakteristikų rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Eksperimento metu tirti bandiniai

Buvo tirti keturi lazeriniai diodai. Buvo parinkti du telekomunikacinėse sistemose naudojami lazeriniai diodai su InGaAsP kvantinėmis duobėmis. Pirmasis jų yra vienmodis PGR LD, kurio bangos ilgis yra $\lambda_1 = 1,5 \mu\text{m}$ (toliau darbe vadinamas LD1), o antrasis LD yra daugiamodis ir jo spinduliuojamas bangos ilgis $\lambda_2 = 1,3 \mu\text{m}$ (LD2). Šie bandiniai gauti bendradarbiaujant su Kanados McMaster universitetu. Kiti du LD yra pagaminti GaSb-pagrindu Lietuvoje, UAB Brolis Semiconductors. Tai daugiamodžiai FP lazeriniai diodai su GaInAsSb kvantinėmis duobėmis, kurių bangos ilgiai yra $2,4 \mu\text{m}$ (LD3) ir $1,9 \mu\text{m}$ (LD4).

3.2 Lazerinių diodų optinės ir elektrinės charakteristikos

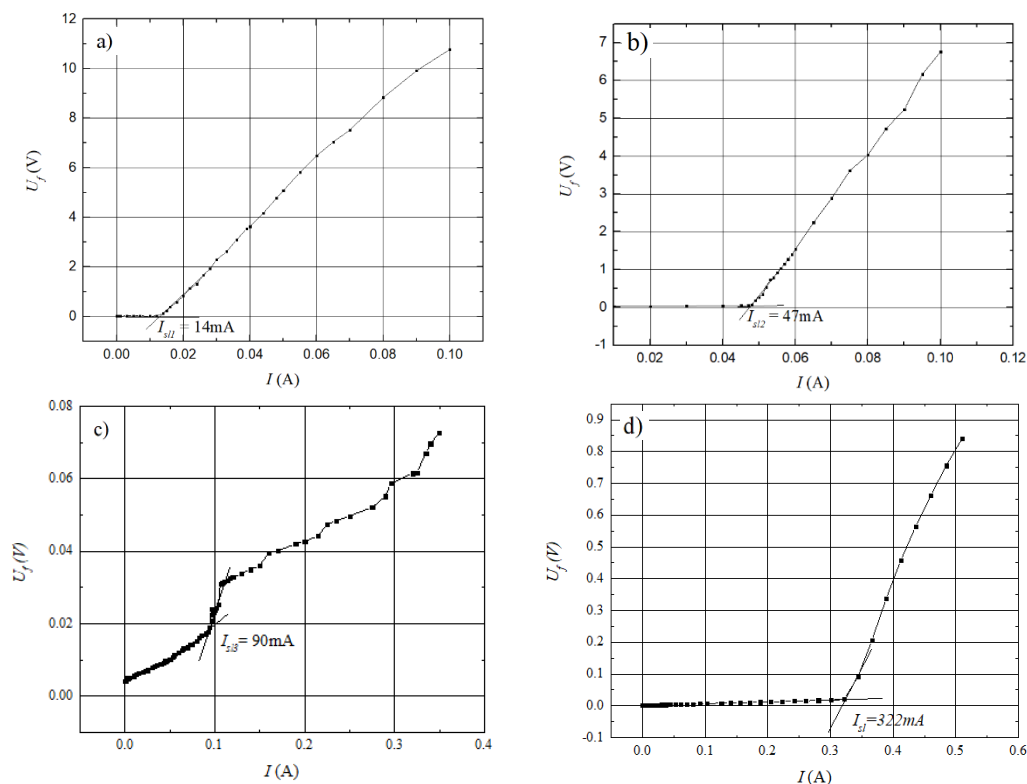
Labai svarbu prieš pradėdant analizuoti lazerinio diodo triukšmų charakteristikas įvertinti kitas jo elektrines charakteristikas. Žemiau yra pavaizduotos tirtų InGaAsP ir GaInAsSb lazerinių diodų voltamperinės charakteristikos.



5 pav. Tirtų lazerinių diodų voltamperinės charakteristikos: 1) InGaAsP vienmodis lazerinis diodas (LD1); 2) InGaAsP daugiamodis lazerinis diodas (LD2); 3) GaInAsSb daugiamodis lazerinis diodas (LD3); 4) GaInAsSb daugiamodis lazerinis diodas (LD4).

Iš gautų voltamperinių charakteristikų buvo apskaičiuoti voltamperinių charakteristikų neidealumo koeficientai n . Kai $n = 2$ lazeriniame diode vyksta rekombinacija pn sandūroje, kas ir yra matoma InGaAsP lazerinių diodų charakteristikose. Žemų srovių srityse, vienmodžio atveju iki 5mA, daugiamodžio atveju iki 1mA, vyksta generaciniai – rekombinaciniai procesai pn sandūroje. GaInAsSb lazeriniu diodų atveju, vienintelio LD3 lazerinio diodo neidealumo koeficientas žemų srovių srityje yra mažesnis nei 2, dėl vyraujančios difuzinės srovės komponentės tiriamajame bandinyje [3].

Dar vienas svarbus parametras, kurį svarbu nustatyti yra slenkstinė srovė, kurią stengiamasi mažinti, pavyzdžiui, įterpiant daugiau nei vieną kvantinę duobę į aktyvųjį sluoksnį. Žemiau yra pavaizduotos visų tirtų lazerinių diodų fotoįtampos priklausomybės nuo lazeriniu diodu tekančios srovės kambario temperatūroje (6 pav.).



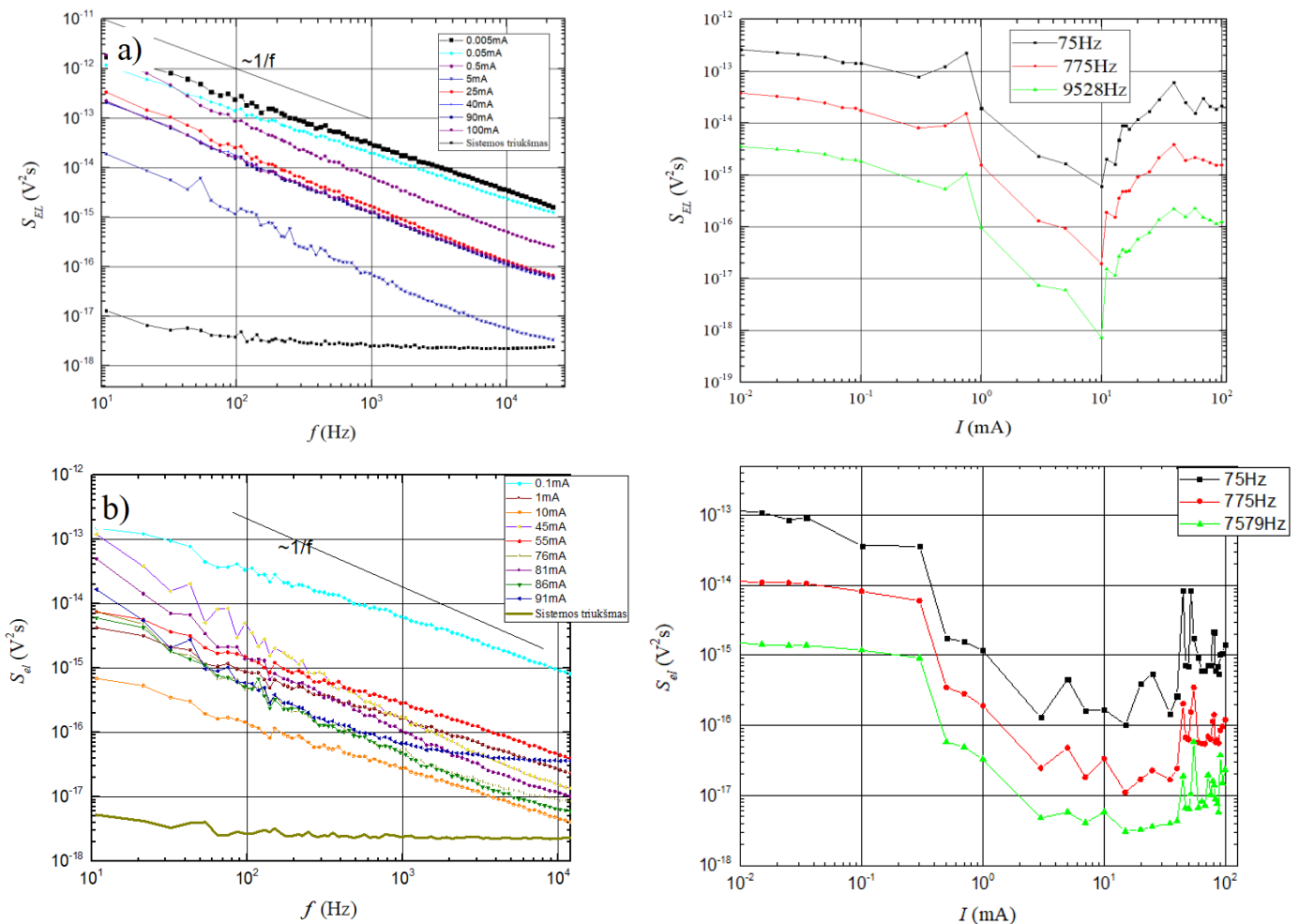
6 pav. Tirtų lazerinių diodų fotoįtampos priklausomybės nuo lazeriniu diodu tekančios srovės
- InGaAsP LD: a)LD1, b) LD2; GaInAsSb LD: c)LD3, d) LD4.

Iš 6 pav. nurodytų fotoįtampos priklausomybių nuo lazeriniu diodu tekančios srovės matome, kad pasiekus slenkstinę srovę ir toliau vykstant LD generacijai ši priklausomybė yra artimai tiesinei. Tačiau iš 6 pav. c) matosi, kad GaInAsSb daugiamodžio lazerinio diodo LD3 charakteristika labai skiriasi nuo kitų - jo fotodiodo įtampos lygis yra mažas,

registruojama labai silpna savaiminė spinduliuotė. Galima įtarti, kad šio LD kokybė yra prastesnė lyginant su kitais lazeriniais diodais ir todėl kambario temperatūroje negeneruoja.

3.3 Lazerinių diodų žemadažnių triukšmų charakteristikos

Norint detaliau išanalizuoti fizikinius procesus lazeriniuose dioduose buvo apskaičiuoti InGaAsP ir GaInAsSb lazerinių diodų elektriniai ir optiniai triukšmų spektriniai tankiai. Žemiau yra pavaizduotos tirtų InGaAsP lazerinių diodų elektrinių triukšmų spektrinių tankių charakteristikos.



7 pav. InGaAsP vienmodžio LD1 (a) ir daugiamodžio LD2 (b) lazerinio diodo elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo dažnio (kairėje) ir nuo srovės (dešinėje).

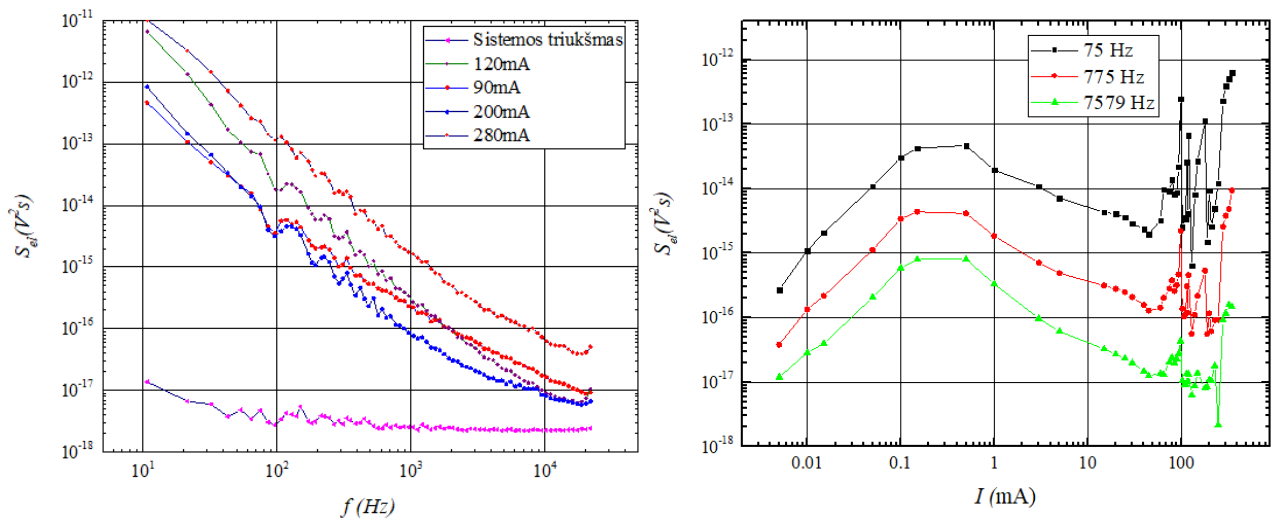
Žemų dažnių srityje lazerinių diodų elektrinio triukšmo spektriniai tankiai yra $1/f$ tipo.

Didinant injekcinę srovę elektrinis triukšmas mažėja, bet pasiekus slenkstinę srovę ir prasidėjus lazerinei generacijai triukšmas vėl didėja. Mažų srovių srityje, nuo 0,2 mA iki 1 mA abiejų InGaAsP lazerinių diodų charakteristikose matome mažą šuolį, kuris susijęs su

neidealumo koeficiento pokyčiu voltamperinėse charakteristikose. Toks gali būti pn sandūros su defektais identifikavimas [7].

InGaAsP daugiמודžio lazerinio diodo atveju prasidėjus lazerinei generacijai yra stebimos triukšmų smailės, kuomet elektrinių fliktuacijų lygis staigiai išauga. (7 pav. b). Taip yra dėl vykstančio modų šuolio reiškinio. Jo metu spektrinis tankis pakinta - stebimas atsiradęs papildomas generacinio – rekombinacinio triukšmo sandas, pavyzdžiui, kreivė 7 pav. b), kai $I = 91 \text{ mA}$ ir $f > 1 \text{ kHz}$.

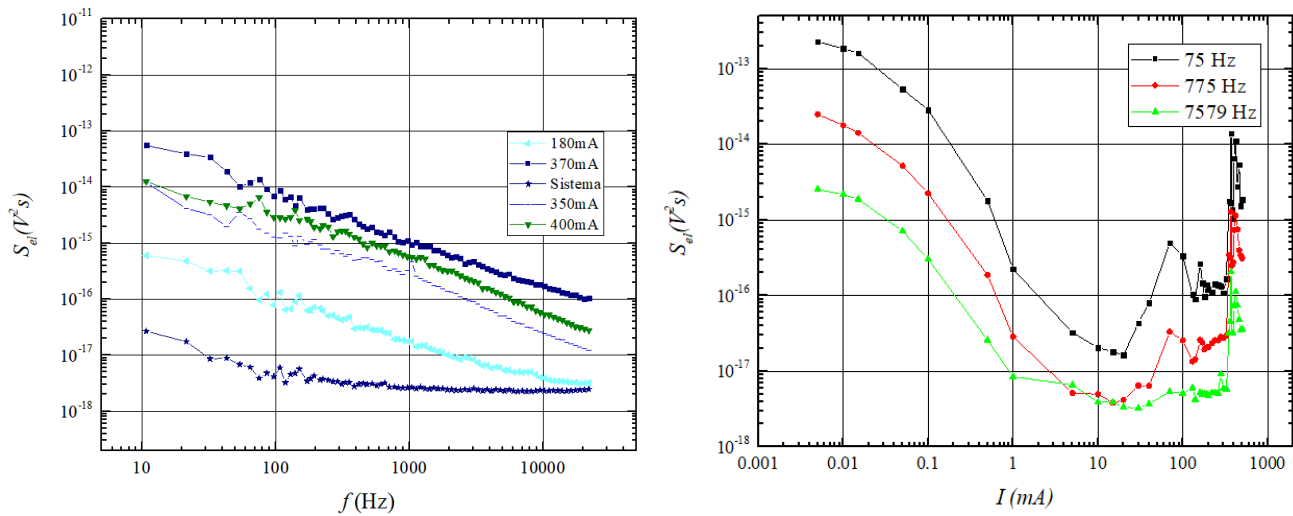
Žemiau yra parodytos GaInAsSb LD3 daugiמודžio lazerinio diodo elektrinio triukšmo spektrinių tankių charakteristikos (8 pav.).



8 pav. GaInAsSb daugiמודžio lazerinio diodo LD3 elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo dažnio (kairėje) ir elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės (dešinėje).

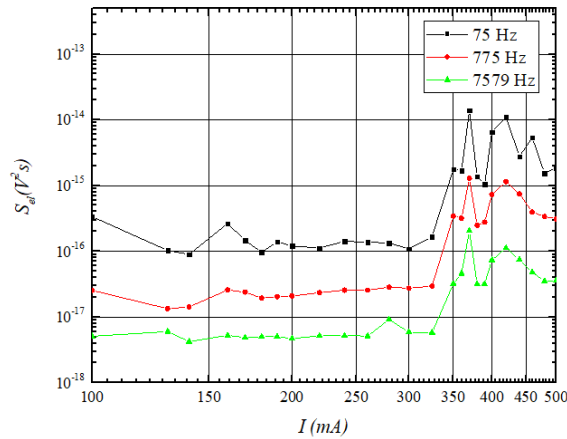
Elektrinio triukšmo spektrinio tankio priklausomybė nuo srovės gerokai skiriasi nuo InGaAsP LD. Matome, kad priešlenkstinėje srityje triukšmas didėja ir nuo 0,5 mA pradeda mažėti. Puslaidininkiniuose dariniuose tiek $1/f$, tiek $1/f^2$ tipo spektrai gaunami dėl daugybės Lorencio tipo spektrų su skirtingomis relaksacijos trukmėmis superpozicijos. Lorencio pavidalo spektrinis tankis yra būdingas generaciniam-rekombinaciniam triukšmui. Jį lemia krūvininkų generacijos – rekombinacijos atsitiktiniai procesai su tam tikra charakteringa relaksacijos trukme [7].

Toliau buvo atlikti GaInAsSb daugiamodžio lazerinio diodo LD4 elektrinio triukšmo spektrinių tankių matavimai.



9 pav. GaInAsSb daugiamodžio lazerinio diodo LD4 elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo dažnio (kairėje) ir elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės (dešinėje).

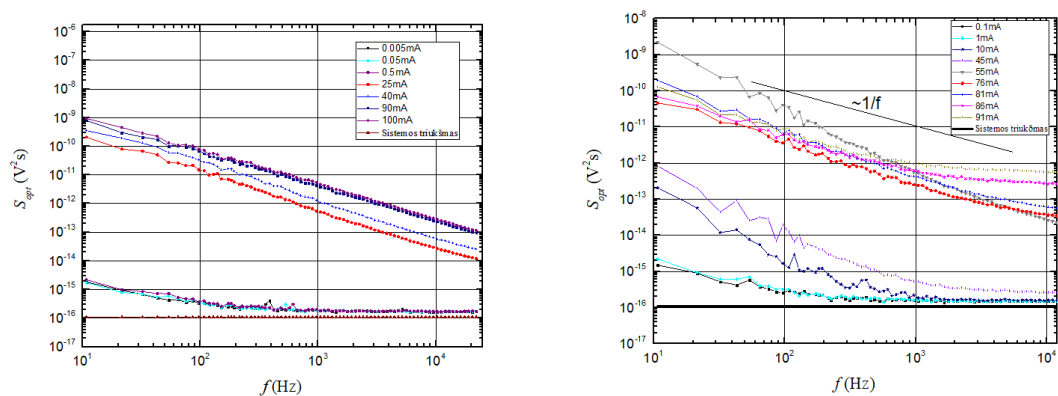
Iš 9 pav. elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės matome, kad ši charakteristika daug panašesnė į InGaAsP LD atitinkamas charakteristikas (7 pav.). Priešslenkstinėje srityje elektrinio triukšmo lygis artėjant prie slenkstinės srovės vertės mažėja, bet triukšmo lygis pradeda didėti daug anksčiau negu pasiekiamas generacijos slenkstis - maždaug nuo 20mA. O pasiekus slenkstinę srovę triukšmas staiga išauga dėl vykstančios išilginių modų konkurencijos ir modų šuolių reiškinio. Šių reiškinų nulemtos triukšmų smailės aiškiai matomos 10 pav.. Priešslenkstinėje ir stabilioje (nevykstant modų šuoliams) veikoje spektriniai tankiai yra $1/f$ pobūdžio visame dažnių diapazone, kaip ir telekomunikacinėse sistemose naudojamuose lazeriniuose dioduose.



10 pav. GaInAsSb daugiמודzio lazerinio diodo LD 4 elektrinio triukšmo spektrinio tankio priklausomybė nuo srovės

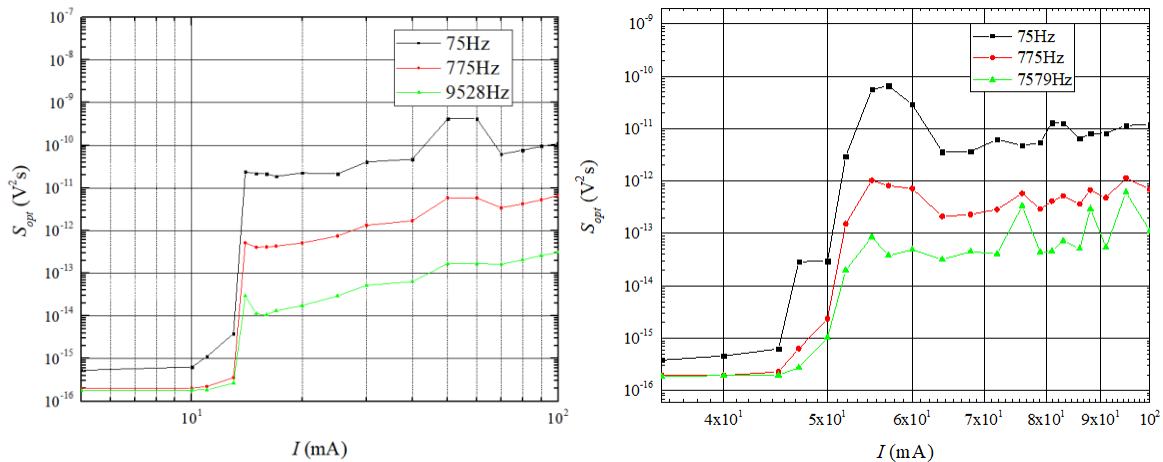
Visų tirtų lazerinių diodų (išskyrus LD3) elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės yra panašios. InGaAsP (LD1 ir LD2) ir GaInAsSb (LD4) lazerinių diodų elektrinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybėse aiškiai matome, kad kol LD srovė yra maža, stebimo elektrinio triukšmo lygis aukštas. Taip yra dėl didelio žemadažnio $1/f$ triukšmo intensyvumo, kuris atsiranda dėl susidariusių defektų aktyviajame ir pasyviajame sluoksniuose[8]. Iš pradžių srovė teka pro defektų suformuotus kanalus, o srovei didėjant, šių defektų poveikis mažėja, ir srovė jau teka didesniu bandinio skerspjūviu [3], todėl elektrinio triukšmo spektrinis tankis mažėja.

Tuo pačiu metu buvo matuojamas lazerinių diodų optinis triukšmas. Optinis triukšmas, kaip ir elektrinis, lazeriniuose dioduose, yra $1/f$ tipo. Jis buvo registruojamas kaip fotodiode atsiradusios įtampos fliktuacijos (11 pav.).



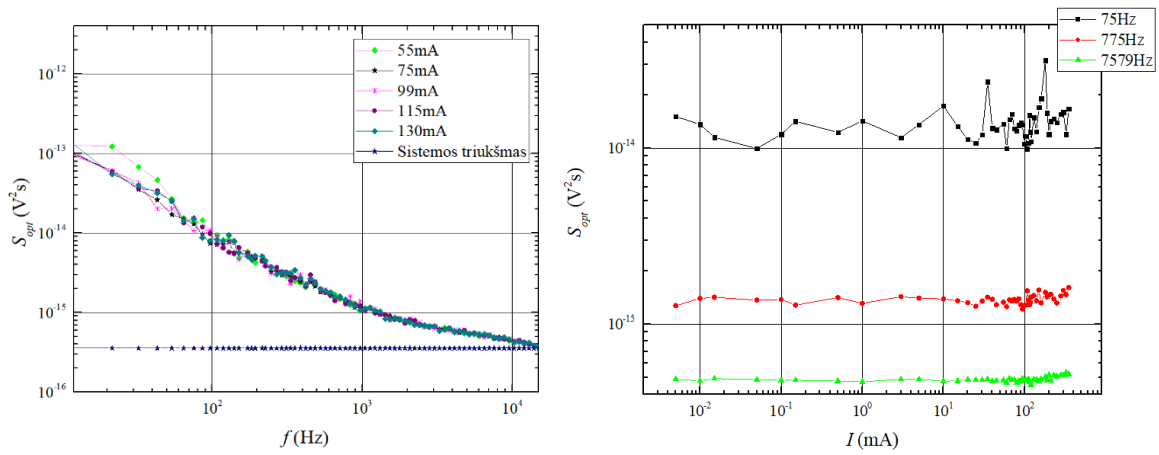
11 pav. InGaAsP vienmodžio lazerinio diodo LD1 (kairėje) ir InGaAsP daugiמודzio lazerinio diodo LD2 optinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo dažnio (dešinėje);

Dar neprasidėjus lazerinei generacijai yra stebimas mažas $1/f$ pobūdžio triukšmas, pereinantis į šiluminį triukšmą, kuriam nuosekliai sujungtos fotodiode apkrovos varžos (11 pav.). Prasidėjus lazerinei generacijai $1/f$ tipo fliktuacijos išauga ir stebimos visame dažnių diapazone (11 pav.). InGaAsP daugiamodžio lazerinio diodo atveju matome, kad aukštų dažnių srityje, pavyzdžiui, kai srovė yra 86mA ar 91mA, optinio triukšmo spektras pakinta (kaip ir šio LD elektriniame triukšme). Tai rodo, kad vyksta modų šuoliai (12 pav.).



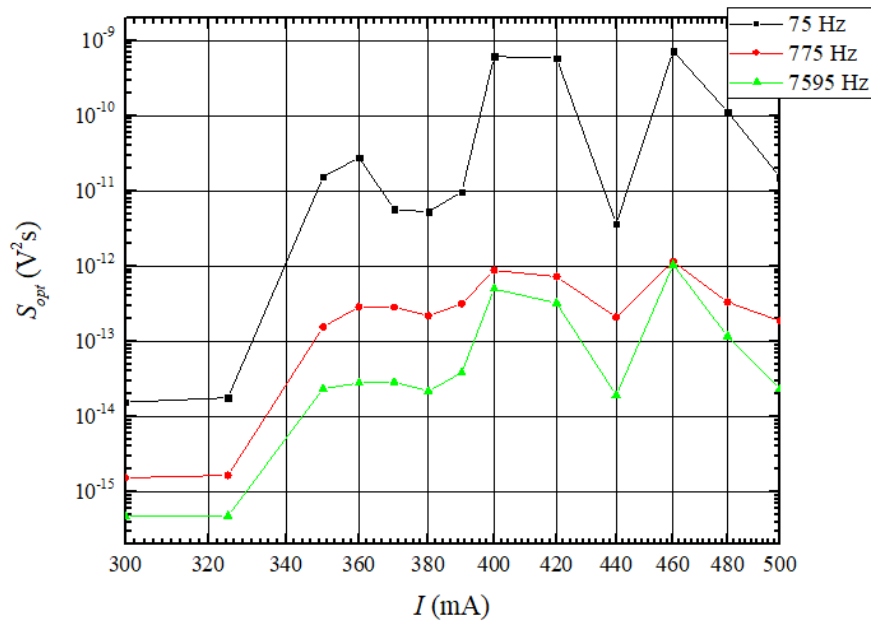
12 pav. InGaAsP vienmodžio lazerinio diodo LD1 (kairėje) ir daugiamodžio lazerinio diodo LD2 (dešinėje) optinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės

Iš tirtų GaInAsSb lazerinių diodų optinio triukšmo spektrinių tankių charakteristikų buvo pastebėta, kad lazerinio diodo LD3 sukeltos įtampos fliktuacijos nekito (13 pav.), kadangi jis pasižymi ypatingai silpna spinduliuote. Aiškiai matosi, kad tai nėra priverstinės spinduliuotės sukeltas triukšmas, - tai savaiminės spinduliuotės ir matavimo sistemos triukšmai. Tai, kad šis LD3 kambario temperatūroje negeneruoja ir pasižymi visai kitokia elektrinio triukšmo priklausomybe nuo srovės, leidžia teigti, kad šis bandinys yra mažiausiai kokybiškas, t. y. pasižymi daug didesniu defektų tankiu lyginant su kitais LD. Šio LD bangos ilgis yra didžiausias, didėjant bangos ilgiui darosi vis technologiškai sudėtingiau pagaminti tokius kokybiškus lazerinius diodus [2].



13 pav. GaInAsSb lazerinio diodo LD3 optinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo dažnio (kairėje) ir optinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės (dešinėje).

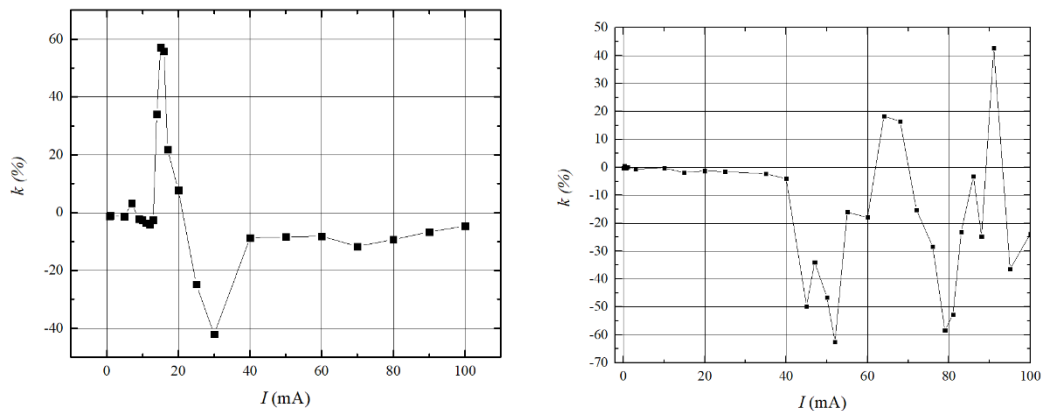
Kito GaInAsSb daugiamodžio lazerinio diodo LD4 optinio triukšmo spektrinio tankio priklausomybėje nuo srovės aiškiai matome, jog pasiekus slenkstinę srovę ir prasidėjus lazerinei generacijai fotodiode registruojamos įtampos fluktuacijos staigiai išauga (14 pav.) bei vyksta modų šuoliai.



14 pav. GaInAsSb daugiamodžio lazerinio diodo LD4 optinio triukšmo spektrinių tankių priklausomybės nuo srovės.

3.4 Koreliacijos koeficiento tarp elektrinio ir optinio triukšmo matavimai

Kaip jau buvo minėta, abipusės koreliacijos koeficientas tarp optinių ir elektrinių triukšmų buvo registruojamas spektrinių tankių matavimo metu kompiuteryje esančia programa. InGaAsP vienmodžio ir daugiamodžio lazerinio diodo abipusės koreliacijos koeficiento nuo srovės priklausomybė visame tirtame dažnių intervale (10 Hz – 20 kHz) yra parodyta 15 pav.

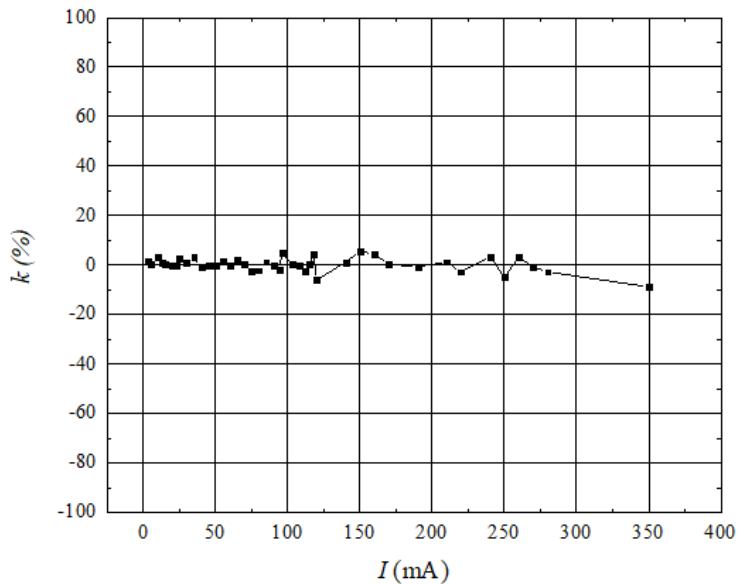


15 pav. InGaAsP vienmodžio LD1 (kairėje) ir daugiamodžio LD2 (dešinėje) lazerinio diodo abipusės koreliacijos koeficiento nuo srovės priklausomybės visame tirtame dažnių intervale (10 Hz-20 kHz).

Iš InGaAsP abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybės nuo srovės matome, kad vienmodžiui lazeriniam diodui pasiekus slenkstinę srovę koreliacijos koeficientas išauga iki 60 procentų. Taip atsitinka, nes prasidėjus lazerinei generacijai optinis triukšmas staigiai padidėja ir yra $1/f$ tipo, todėl labai koreliuoja su taip pat išaugusiu elektriniu $1/f$ triukšmu. Koreliacijos koeficientas tampa teigiamas, kuomet rekombinuojant didesniam krūvininkų skaičiui kvantinėse duobėse, yra išspinduliuojama daugiau fotonų ir atvirkščiai [3]. Taigi, teigiamas koreliacijos koeficientas yra susijęs su aktyviaja LD sritimi.

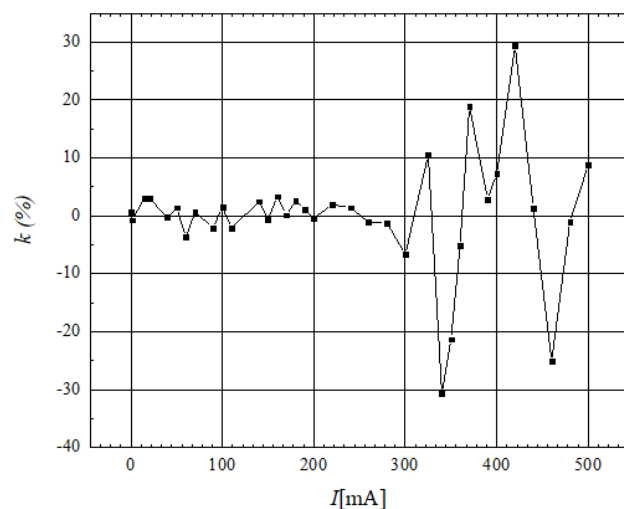
Iš InGaAsP daugiamodžio lazerinio diodo abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybės nuo srovės priklausomybės (15 pav.), ties slenkstinės srovės verte stebimos neigiamos koreliacijos koeficiento vertės. Neigiamas koreliacijos koeficientas atsiranda dėl defektų, esančių srityje su aktyviuoju LD sluoksniu, poveikio [3]. Šie defektai nulemia krūvininkų nuotėkį iš aktyviosios srities. Bet modų šuolių metu abipusės koreliacijos koeficientas įgauna teigiamas vertes pavyzdžiui, kai srovė yra 65mA, 91mA.

Matuojant GaInAsSb daugiamodžio LD3 lazerinių diodų abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybes nuo srovės buvo pastebėta, kad šio prastesnės kokybės lazerinio diodo koreliacija artima nuliui (17 pav.), kadangi pats LD negeneravo, jo savaiminė spinduliuotė ypatingai silpna, o matavimo sistemos triukšmai su elektrinėmis fliktuacijomis nekoreliuoja [9].



17 pav. GaInAsSb LD3 abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybė nuo srovės visame tirtame dažnių intervale (10 Hz – 20 kHz).

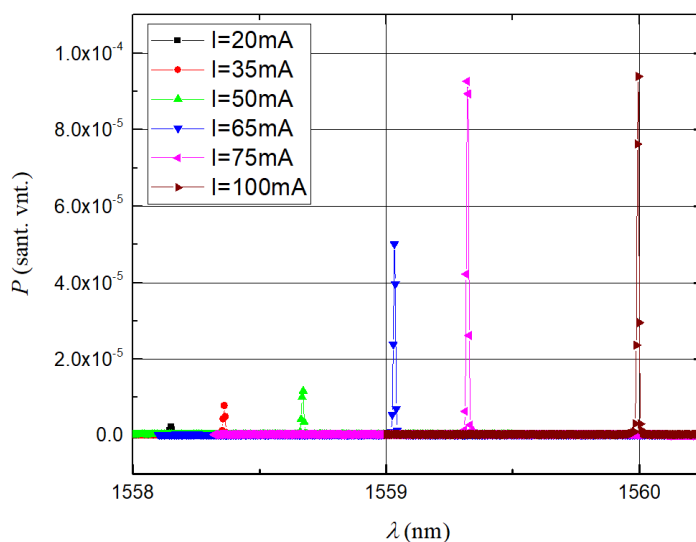
Kitas tirtas GaInAsSb lazerinis diodas LD4 pasižymėjo geresnėmis optinėmis savybėmis (lyginant su pirmu GaInAsSb LD3 lazeriniu diodu). Iš abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybės nuo srovės (18 pav.) matosi, jog pasiekus slenkstinę srovę, koreliacijos koeficientas išauga. Didžiausia pasiekta koreliacijos koeficiento vertė, kai $I = 420\text{mA}$, yra tik apie 30%. Kaip matyti iš šio 18 pav., šiuo atveju modų šuolių nulemtos elektrinio ir optinio triukšmų smailės koreliuoja tiek teigiamai, tiek neigiamai. Taigi, modų šuolių metu triukšmo charakteristikoms įtaką daro skirtingi defektai, tiek aktyviojoje srityje, tiek sąlytyje su ja [3].



18 pav. GaInAsSb lazerinio diodo abipusės koreliacijos koeficiento priklausomybė nuo srovės visame tirtame dažnių intervale (10 Hz – 20 kHz)

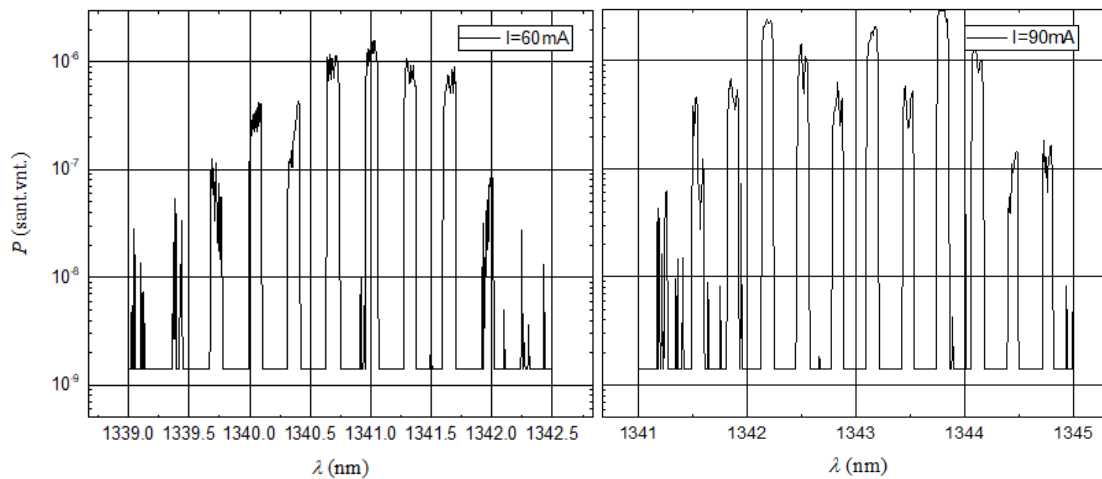
3.5 Lazerinių diodų spinduliuotės spektro matavimas

Naudojant spektro analizatorių buvo išmatuoti InGaAsP lazerinių diodų optiniai spinduliuotės spektrai. PGR LD1 šie spektrai pateikti 19 pav.. Keičiant srovę spinduliuotės bangos ilgis pakito per ~ 2 nm. Injekcinės srovės pokytis turi daug įtakos lazerinio diodo temperatūrai ir Džaulio šilumai. Didėjant temperatūrai kinta lazerinio diodo rezonatoriaus parametrai bei draudžiamosios energijos juosta, todėl bangos ilgis kinta [10].



19 pav. Vienmodžio paskirstytojo grįžtamojo InGaAsP lazerinio diodo LD1 optiniai spektrai tekant skirtingo dydžio srovėms.

InGaAsP daugiamodžio lazerinio diodo atveju kintant injekcinei srovei kinta ir pn sandūros temperatūra, dėl kurios kinta ir bangos ilgis. Tačiau priešingai nei vienmodžiam LD, daugiamodžiam LD lazerinės generacijos metu stebime intensyvius modų šuolius.. Modų šuolių metu išilginių modų intensyvumas kinta atsitiktinai laike, kurį laiką jos konkuruoja. Šis pokytis sukelia papildomus nereikalingus triukšmus, kurie gali pabloginti lazerinio diodo ir tokios telekomunikacinės ryšio linijos veikimą. Šiuos pokyčius galime pastebėti spinduliuotės spektro matavimuose prieš prasidedant modų šuoliui ir jam vykstant (20 pav). Prieš prasidedant modų šuoliui yra stebimas tolygus išilginių modų pasiskirstymas, matoma centrinė didžiausio intensyvumo išilginė moda ir aplink ją išsidėsčiusios silpnosios intensyvumo modos, o paties modų šuolio metu matome keletą ar daugiau panašaus intensyvumo modų konkuruojančių tarpusavyje [6, 9].



20 pav. Daugiamodžio lazerinio diodo LD2 spinduliuotės spektras prieš prasidedant modų šuoliui (kairėje) ir spinduliuotės spektras vykstant modų šuoliui (dešinėje).

Išvados

- Vienmodžių ir daugiamodžių InGaAsP, tiek ir GaInAsSb lazerinių diodų elektrinių ir optinių triukšmų spektriniai tankiai žemuose dažniuose yra $1/f$ pobūdžio stabilioje lazerinės generacijos veikoje.
- Vykstant daugiamodžių InGaAsP ir GaInAsSb lazerinių diodų generacijai stebimi modų šuoliai, kurių metu ženkliai išauga elektrinio ir optinio triukšmų lygis.
- Iš abipusės koreliacijos koeficiento tarp elektrinių ir optinių triukšmų priklausomybių nuo srovės stiprio galima sužinoti tiek slenkstinės srovės vertes, tiek ir modų šuolių srovių vertes.
- Iš visų tirtų lazerinių diodų išsiskyrė GaInAsSb LD3 lazerinis diodas, kuris kambario temperatūroje negeneravo bei pasižymėjo visiškai kitokia elektrinio triukšmo nuo srovės stiprio priklausomybe.

Literatūra

- [1] V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, *Lazeriniai diodai* (VU FF Radiofizikos katedra, Vilnius, 2000).
- [2] K. Vizbaras, A. Vizbaras, A. Andrejew, C. Grasse, S. Sprengel, M.-C. Amann, Room-temperature type-I GaSb-based lasers in the 3.0 – 3.7 μm wavelength range, Proc. SPIE 8277, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XI, 82771B (2012).
- [3] V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, Light-emitting diode quality investigation via low frequency noise characteristics, Solid-State Electronics, **54**, 781-786 (2010).
- [4] <https://www.fiberlabs.com/glossary/about-semiconductor-laser-diode/> (tikrinta 2020 – 05 – 20).
- [5] V. Palenskis, *Fliktuacijos elektroninėse sistemose* (Vilniaus Universitetas, Vilnius, 1998).
- [6] S. Pralgauskaitė, *Optoelektronikos įtaisai telekomunikacijų sistemose* (Vilnius: VU I-kla, 2010) 196 p.
- [7] B. Šaulys, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, G. Kulikauskas, Light-Emitting Diode Degradation and Low-Frequency Noise Characteristics, Acta Physica Polonica A, **119**, 514-520 (2011).
- [8] F. Kriauciūnas, *Infraraudonosios spektro srities lazerinių diodų žemadažnė triukšminė spektroskopija*. Bakalauro studijų profesinės praktikos ataskaita (Vilnius: 2019) 20 psl.
- [9] V. Palenskis, J. Matukas, B. Šaulys, Analysis of electrical and optical fluctuations of light – emitting diodes by correlation method, Lithuanian Journal of Physics, **49**(4), 453-460 (2009).
- [10] T. Ascente, Laser diode intensity noise induced by mode hopping Romanian Reports in Physics, **59**(1) 87-92 (2007).

Low-frequency noise spectroscopy of IR laser diodes

Summary

Laser diodes are widely used semiconductors in optical communication systems. Therefore, we must evaluate their electrical and optical noise for their optimal performance.

The main objective of this work was to investigate electrical and optical noise, cross-correlation coefficient and then analyse the outcome with theoretical information. Four laser diodes were tested in this experiment: a single – mode InGaAsP laser diode, multi – mode InGaAsP laser diode and two multi-mode GaSb-based laser diodes.

All semiconductor laser diodes have $1/f$ electrical and optical fluctuations in low frequency region at stable lasing operation. During mode – hopping additional Lorentzian-type components are visible in noise spectra. Lorentzian-type spectrum is characteristic for generation-recombination noise, while $1/f$ noise is due to superposition of many generation-recombination events.

The measurement of cross-correlation between electrical and optical fluctuations allows us to evaluate the device quality. Above the threshold positive correlation coefficient is occurring while both optical and electrical fluctuations are $1/f$ type. Negative coefficient is related with the defects in the interface of the active layer.

This experiment shows us that low frequency noise spectroscopy analysis is a good way to describe the quality of our semiconductor devices.