

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Marijus Mickus

**Žiedinėje skaidulinėje lazerinėje grandinėje generuojamų ultratrumpųjų šviesos impulsų
charakteristikų tyrimai**

Magistro darbas

(studijų programa – Lazerinė fizika ir optinės technologijos)

Studentas

Marijus Mickus

Darbo vadovas

dr. Julijanas Želudevičius

Recenzentas

Prof. habil. dr. Valerijus Smilgevičius

Lazerių tyrimų centro direktorius

Doc. Dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

Turinys

| | |
|--|-----------|
| Įvadas | 3 |
| 1. Literatūros apžvalga | 4 |
| 1.1 Fazės moduliavimasis | 4 |
| 1.2 Impulsų plitimas dėl medžiagos dispersijos..... | 5 |
| 1.3 Impulsų stiprinimas Yb legiruotose skaidulose..... | 6 |
| 1.4 Ultratrumpųjų impulsų generavimo metodai..... | 7 |
| 1.5 Impulsų generavimo būdas pasinaudojant fazės moduliavimusi skaidulose ir dvigubu spektriniu filtravimu..... | 9 |
| 1.6 Spektrinis filtravimas naudojant difrakcines gardeles..... | 10 |
| 1.7 Optinių impulsų suspaudimas naudojant difrakcines gardeles | 11 |
| 2. Eksperimentiniai tyrimai | 14 |
| 2.1 Tyrimo schema | 14 |
| 2.2 Tyrimo rezultatai. | 15 |
| 2.2.1 Generacijos sužadinimas | 15 |
| 2.2.2 Optimalaus išmetimo paieškos esant fiksuotam filtravimo juostų atskyrimui..... | 18 |
| 2.2.3 Filtrų atskyrimo poveikio tyrimas..... | 19 |
| 2.2.4 Generuojamų impulsų laikinės charakteristikos | 24 |
| 2.2.5 Impulsų suspaudimas..... | 26 |
| Pagrindiniai rezultatai ir išvados..... | 31 |
| Literatūros sąrašas..... | 32 |
| Santrauka | 33 |
| Summary..... | 34 |

Įvadas

Ultratrumpus impulsus generuojantys lazeriai tampa vis plačiau taikomu įrankiu moksliniuose tyrimuose, medicinoje [1] ir pramonėje [2]. Tokiems taikymams dažnai pageidautina, kad naudojamas lazeris būtų patikimas, patvarus ir santykinai nebrangus. Potencialą išpildyti šiuos reikalavimus turi skaiduliniai lazeriai. Tačiau iki šiol plačiausiai naudojami ultratrumpus impulsus generuojantys lazeriai rėmėsi puslaidininkinių įsisotinamųjų sugėriklių naudojimu, kurie pasižymėjo ribota veikimo trukme ir patikimumu. Alternatyvus ir labai patrauklus metodas generuoti ultratrumpus impulsus skaidulose pasinaudojant pačios skaidulos netiesiškumais ir spektriniu filtravimo buvo pasiūlytas Lietuvos mokslininkų [3]. Šis metodas pasižymi plačiomis impulsų generavimo galimybėmis įgyvendinant skirtingas skaidulinės grandinės ir spektrinio filtravimo konfigūracijas. Todėl šiame darbe buvo tiriami itin trumpus šviesos impulsus generuojančios žiedinės grandinės ypatumai. Darbo metu buvo išmatuotos energetinės, laikinės ir spektrinės generuojamų impulsų charakteristikos. Taip pat buvo bandoma surasti grandinės konfigūracijas, leidžiančias pasiekti savaiminį generacijos startavimą. Toks itin trumpų impulsų generavimo būdas nereikalauja įsisotinančio sugėriklio naudojimo, dėl to potencialiai turėtų išsiskirti aukštu patikimumu ir ilgaamžiu veikimu. Siekiant sudaryti reikiamus filtravimo mazgus, kurie pasižymėtų Gausiniu ir pakankamo pločio atsaku spektre, buvo pasinaudota difracinių gardelių kampinės dispersijos ir vienmodės skaidulos erdvinio modos pasiskirstymo savybėmis.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Fazės moduliavimasis

Didelė dalis netiesinių optinių efektų šviesolaidyje atsiranda dėl kubinio netiesiškumo. Vienas ryškiausių šio netiesiškumo apsiereiškimų yra optinis Kerro efektas, kitaip tariant netiesinis lūžio rodiklis. Kero efektas apibūdinamas kaip terpės lūžio rodiklio priklausomybė nuo ja sklindančios šviesos intensyvumo I . Lūžio rodiklį šioje terpėje galime užrašyti taip :

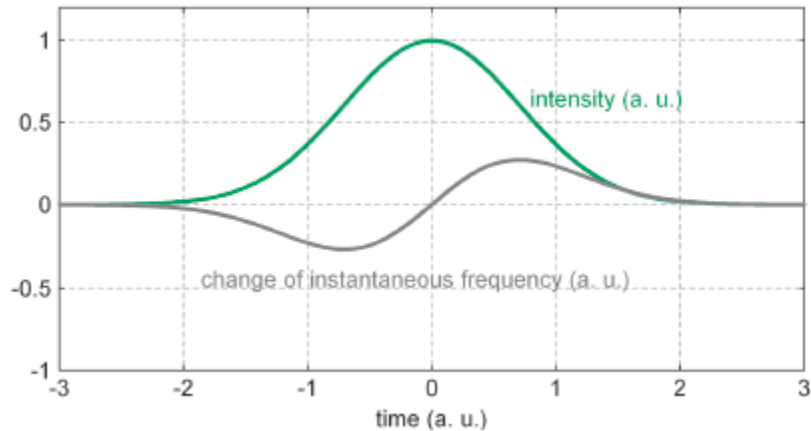
$$n = n_0 + n_1 I \quad (1.1)$$

čia n yra lūžio rodiklis, n_0 – lūžio rodiklis stebimas esant žemiems šviesos intensyvumams, n_1 – medžiagos netiesinis lūžio rodiklis, I – šviesos intensyvumas.

Kvarcinio stiklo netiesinis lūžio rodiklis palyginus su kitais stiklais arba kristalinėmis medžiagomis yra pakankamai mažas $n_1 = 2.7 * 10^{-20} m^2/W$. Nepaisant to, jo lemiamas poveikis itin trumpų impulsų charakteristikoms gali būti pakankami stiprus.

Pasekmės gaunamos dėl Kerro efekto šviesolaidyje yra tokios, kad medžiagoje sklindantis šviesos impulsas patiria nuo jo intensyvumo priklausantį fazės postūmį (užvėlinimą) - fazės moduliaciją. Fazinis šviesos impulsų moduliavimasis, vykstantis šviesolaidyje, leidžia išplėsti Gausinio impulso spektrą. Pasinaudojant fazės modulivimusi gali būti gaunami labai plataus spektro, plokščios viršūnės impulsai su beveik tiesine dažnio moduliacija (čirpu), kurie gali būti stiprinami stiprintuve ir vėliau suspaudžiami iki labai mažų trukmių [4]. Šiuo būdu įmanoma gauti labai didelės smailinės galios ir itin trumpus šviesos impulsus [4].

Žemiau pateiktame grafike galima pamatyti kaip atrodo optinio dažnio poslinkis po fazės moduliavimosi. Taip pat galima pastebėti, jog dažnio pokytis yra didžiausias toje vietoje kur intensyvumas keičiasi greičiausiai.



1 pav. Fazės moduliavimo sukeltas optinio dažnio pokytis (pilka kreivė) ir impulso intensyvumo gaubtinė (žalia kreivė).

1.2 Impulsų plitimas dėl medžiagos dispersijos

Lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio yra vadinama medžiagos dispersija. Normalioji dispersija pasireiškia tada, kai trumpėjant bangos ilgiui lūžio rodiklis didėja, o jam mažėjant pasireiškia anomali dispersija. Skleidžiant Teilorio eilute sklaidimo konstantos β kitimą galime išreikšti atskirus lūžio rodiklio dispersijos narius:

$$\beta(\omega) = \frac{\omega}{c} n(\omega)$$

$$= \beta(\omega_0) + \frac{d\beta}{d\omega} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} (\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3\beta}{d\omega^3} (\omega - \omega_0)^3 \dots \quad (1.2)$$

čia ω_0 – centrinis optinis kampinis dažnis ($2\pi c/\lambda_0$), c – šviesos greitis.

Grupinių greičių dispersija vadinama antra sklaidimo konstantos išvestinė pagal optinį kampinį dažnį. Šis parametras sąlygoja impulso laikinės gaubtinės išplitimą [5]. Sklindant impulsui dispersinėje terpėje, spektrinių komponentių fazės kinta nevienodai, todėl atsiranda kvadratinė dažninių komponentių fazės moduliacija šioje terpėje, o tai sąlygoja tiesinę optinio dažnio moduliaciją (nes dažnis yra laikinė fazės išvestinė). Tuomet sklindant impulsui yra išsaugoma jo

Gauso pavidalo gaubtinė, tačiau amplitudė mažėja, trukmė didėja, o turimas impulsas tampa faziškai moduluotas. Tokį reiškinį vadiname dispersiniu impulso plitimu. Dispersinis plitimo nuotolis L_d apibūdina jo spartą.

$$L_d = \frac{\tau_0^2}{2g_0} \quad (1.3)$$

Čia τ_0 – impulso trukmė, g_0 - grupinio greičio dispersijos koeficientas.

Esant sklidimo nuotoliui $z \ll L_d$ dispersinio plitimo galima nepaisyti, visais kitais atvejais jo indėlis žymus ir impulsas plinta laike [6].

1.3 Impulsų stiprinimas Yb legiruotose skaidulose

Skaiduliniuose lazeriuose dažnai yra naudojama iterbiu legiruotas kvarcinis stiklas, kurio stiprinimo juosta yra labai plati (975-1200 nm). Ši aktyvi terpė taip pat leidžia pasiekti aukštą kvantinį našumą, kuris sumažina šiluminių efektų įtaką. Legiruojant kvarcinį stiklą iterbiu, sužadinto ir pagrindinio lygmens polygmenys išplinta, taip gaunant plačias spinduliavimosi ir sugerties juostas. Sugerties juosta yra nuo 850 nm iki 1070 nm, o spinduliavimo juosta siekia nuo 970 nm iki 1200 nm. Pasirinkus stiprinamo signalo ir kaupinimo skirtingas bangos ilgių kombinacijas, esant sąlygai $\lambda_{kaup.} < \lambda_{signal}$, yra pasiekiamas stiprinimas aktyvioje terpėje [7]. Norint gauti iš iterbiu legiruotos skaidulos daugiausiai energijos, stiprinamo signalo impulso energija turi būti lygi soties energijai, išreiškiamai taip:

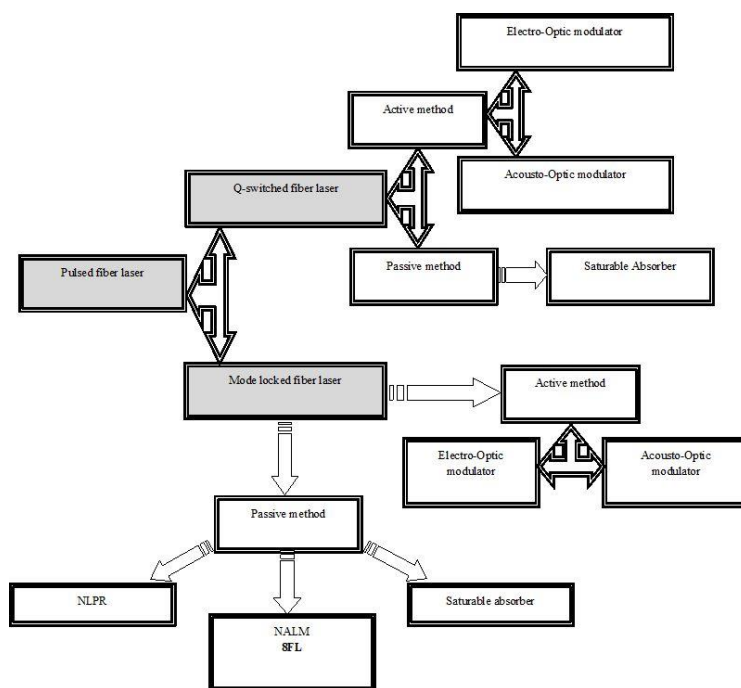
$$E_s = \frac{hf_s A_{eff}}{(\sigma_a + \sigma_e)} \quad (1.4)$$

h – Planko konstanta, f_s – stiprinamos spinduliuotės optinis dažnis, A_{eff} – efektyvus modos plotas, σ_a, σ_e – atitinkamai sugerties ir spinduliavimo skerspjūviai

Maksimali signalo impulso energija gaunama tokio skaidulinio stiprintuvo išėjime gali siekti net iki 10 kartų soties energijos.

1.4 Ultratrumpųjų impulsų generavimo metodai

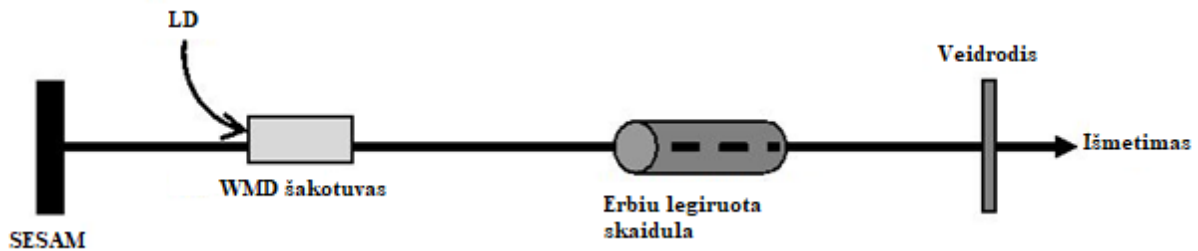
Ultratrumpųjų optinių impulsų generavimui lazerinėse grandinėse plačiai naudojami modų sinchronizacijos metodai. Taikant tokius metodus, lazeriniame rezonatoriuje yra įstatomas elementas aktyviai arba pasyviai moduliuojantis rezonatoriaus nuostolius ir tokiu būdu užtikrinantis ultratrumpųjų impulsų susiformavimą. Aktyvios modų sinchronizacijos atveju, tokiu elementu gali būti elektrooptinis arba akustooptinis moduliatorius. Tuo tarpu esant pasyviai modų sinchronizacijai, naudojamas tam tikras elementas pasižymintis nuo spinduliuotės smailinio intensyvumo priklausančiais nuostoliais. Dėl paprastesnio įgyvendinimo ir pasiekiamų itin trumpų impulsų trukmių (mažiau kaip pikosekundė), pasyvioji modų sinchronizacija yra šiuo metu plačiausiai naudojamas metodas ultratrumpųjų impulsų generavimui.



2 pav. Skirtingų tipų skaiduliniai lazeriai.

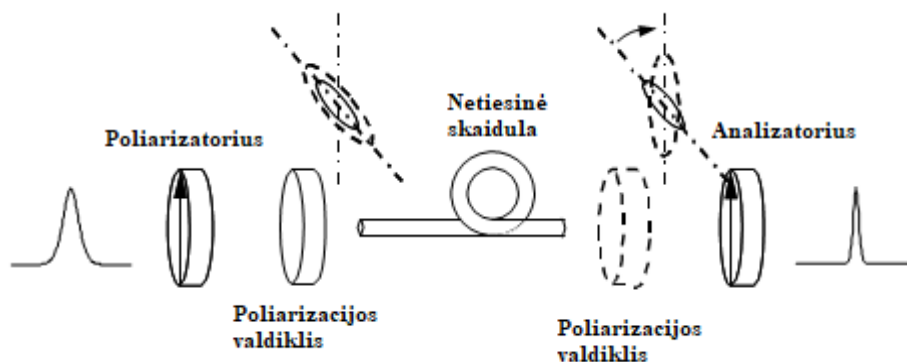
Skaiduliniuose lazeriuose pasyviai modų sinchronizacijai pasiekti yra naudojami 3 pagrindiniai būdai: pasitelkiant netiesiniu atsaku pasižyminčias medžiagas tokias kaip puslaidininkiniai įsisotinantis sugėrikliai (SESAM), netiesinio poliarizacijos sukimo metodas ir netiesinės (stiprinančios) kilpos metodas. Skaidulinio impulsinio lazerio su puslaidininkiniu įsisotinančiu sugėrikliu schema yra pavaizduota 3 pav. Be įsisotinančio sugėriklio (kuris kartu atlieka ir vieno

galinio veidrodžio vaidmenį), tokią schemą sudaro aktyvi terpė (legiruotas šviesolaidis), kaupinimo ir signalo šakotuvas, ir išvadinis veidrodis. Paprastai išvadinio veidrodžio funkciją atlieka skaidulinė Brego gardelė, kuri tam tikrais atvejais papildomai turi būti čirpuota. Pagrindinis skaidulinių lazerių su puslaidininkiniais įsisotinčiais sugėrikiais trūkumas yra ribota veikimo trukmė ir prastas patikimumas dėl puslaidininkinio įsisotinčio sugėriklio savybių ilgalaikės degradacijos [8].



3 pav. Synchronizuotų modų lazerinė sistema su įsisotinčiu sugėrikliu.

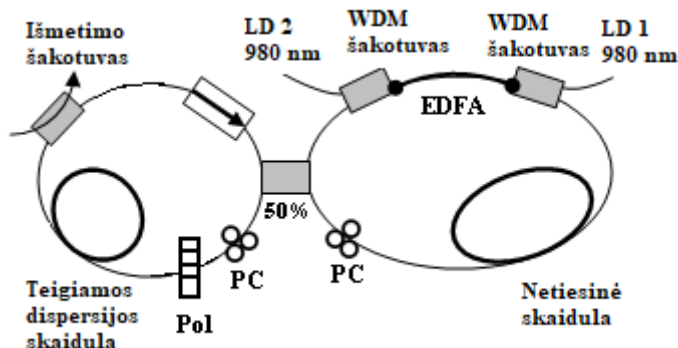
Netiesinio poliarizacijos sukimo metodas leidžia konvertuoti netiesiškumą sukeltus poliarizacijos pokyčius į intensyvumo pokyčius (4 pav.) ir tokiu būdu irgi pasiekti įsisotinčio sugėriklio efektą. Tačiau šis modų synchronizacijos metodas reikalauja poliarizacijos neišlaikančių skaidulų naudojimo, dėl ko tokių lazerių veikimas tampa neatsparus aplinkos pokyčiams (temperatūrai, vibracijoms).



4 pav. Netiesinio poliarizacijos sukimo schema.

Skaidulinio lazerio schema su netiesine stiprinančia kilpa yra pavaizduota 5 paveikslėlyje. Šiuo atveju nuo intensyvumo priklausantis kilpos atsakas pasiekiamas dėl stiprinimo atkarpos išdėstymo nesimetriškai kilpos atžvilgiu. Nors šis metodas leidžia generuoti ultratrumpus ir didelės energijos

impulsus, pagrindinis jo trūkumas yra generacijos susižadinimo sunkumai ir siauras darbinių parametų intervalas.

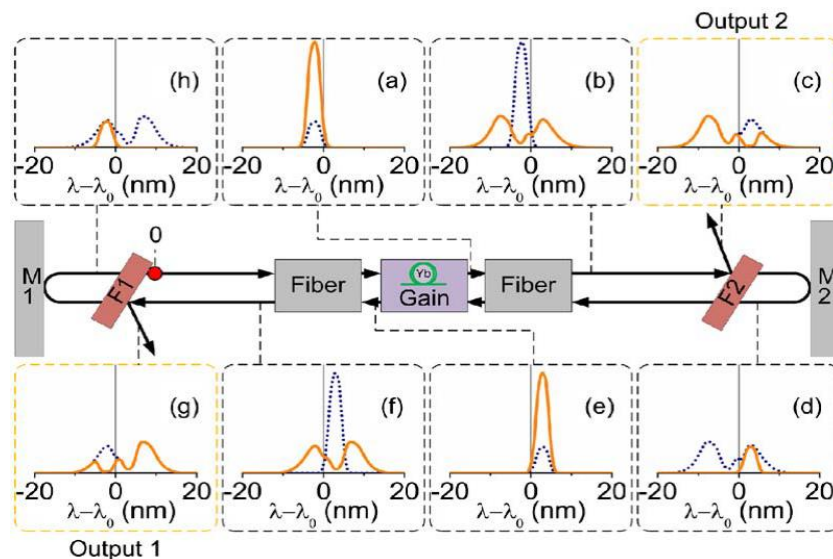


5 pav. Skaidulinio lazerio schema su netiesine stiprinančia kilpa.

1.5 Impulsų generavimo būdas pasinaudojant fazės moduliavimusi skaidulose ir dvigubu spektriniu filtravimu.

Pakankamai naujas ir perspektyvus būdas ultratrumpųjų impulsų generavimui skaidulose gali būti realizuotas pasinaudojant netisiniu fazės moduliavimosi reiškiniu skaidulose (lemiančiu impulso spektro plitimą) ir dvigubu/pakaitiniu spektriniu filtravimu. Skaidulinio impulsų generatoriaus veikimo principo ir spektrų kitimo seka yra pavaizduota 6 pav. Visų pirma, darome prielaidą, kad turime pirminį impulsą, kuris jau cirkuliuoja generatoriaus grandine. Pradedant pirmu filtru F1 (pradinis taškas pažymėtas numeriu „0“ 6 pav.), praėjęs impulsas atitinka spektrines komponentes, kurias praleidžia pirmasis filtras. Toliau impulsas yra sustiprinamas (gautas spektras pavaizduotas 6 pav. (a)) ir keliauja pro pasyvią skaidulą, kurioje dėl fazės moduliacijos yra spektriškai išplečiamas 6 pav. (b). Pasiekus antrą filtrą F2, impulsas spektriškai padalinamas. Dalis impulso, kuri nepatenka į antrojo filtro pralaidumo juostą yra atspindima į 2 išėjimą (6pav. (c)). Dalis, kuri patenka į F2 pralaidumo juostą praeina pro šį filtrą (6pav. (d)), yra atspindima M2 veidrodžio ir įvedama atgal į skaidulą. Antrasis filtras F2 praleidžia ilgesnius bangos ilgius palyginus su pirmuoju filtru F1 ir abiejų filtrų juostos nepersikloja. Tai reiškia, jog praeiti impulsas pro antrą filtrą gali tik dėl to, kad pasyvioje skaiduloje yra išplečiamas impulso spektras dėl savaiminės fazės moduliacijos. Toliau sklindantis impulsas yra sustiprinamas, pasyvioje skaiduloje

išplečiamas impulso spektras (dėl fazės moduliavimo) 6 pav. (f). Tuomet F1 filtras praleidžia tik trumpesnius bangos ilgius palyginus su F2 filtru (h), praėjusi impulso dalis atspindima M1 veidrodžio ir patenka atgal į šviesolaidį kur prasideda kitas ciklas, o atspindėti bangos ilgiai yra išvedami į 1 išėjimą (g). Šis stiprinimo, spektro išplėtimo, filtravimo ciklas yra kartojamas ir po kelių iteracijų yra gaunamas stabilus lazerio veikimas su tam tikra impulso energija bei trukme.



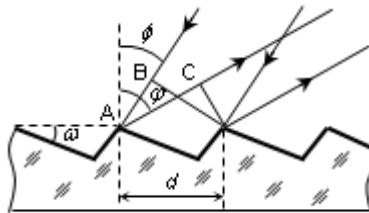
6 pav. Schema, kuri parodo kaip keičiasi impulso, sklindančio grandine, spektras. (a) – (h). Grafikuose galime matyti kaip atrodo spektrai tam tikrame etape (oranžinė kreivė) lyginant su praeitu etapu (mėlyna brūkšniuota kreivė) [9].

1.6 Spektrinis filtravimas naudojant difrakcines gardeles

Difrakcinė gardelė – tai elementas sudarytas iš daug periodiškai pasikartojančių rėžių (iškilimų, griovelių, plyšių) įgaubtame arba plokščiame paviršiuje. Ji yra naudojama kaip dispersinė sistema įvairiuose spektriniuose prietaisuose, kurie spinduliuotę išskaido į spektrą. Krintančios šviesos bangos frontą difrakcinės gardelės rėžiai išskaido į atskirus koherentinius pluoštelių. Šie koherentiniai pluoštai difragavę per šiuos rėžius sukuria spinduliuotės spektrą (atstojamąjį erdvinį šviesos stiprio pasiskirstymą). Šie elementai gali būti skaidrūs arba atspindintys. Gardelėse difragavęs šviesos intensyvumas priklausys nuo bangos ilgio [10] Kampinė dispersija - bangų

sklidimo krypties priklausomybė nuo optinio dažnio (formulė 1.5). Konkrečią spektro eilę m atitinkanti kampinė dispersija tuo didesnė, kuo mažesnis gardelės periodas [11].

$$\frac{d\phi}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos\phi} \quad (1.5)$$



7 pav. Paviršiaus profilis atspindinčios difrakcinės gardelės

1.7 Optinių impulsų suspaudimas naudojant difrakcines gardeles.

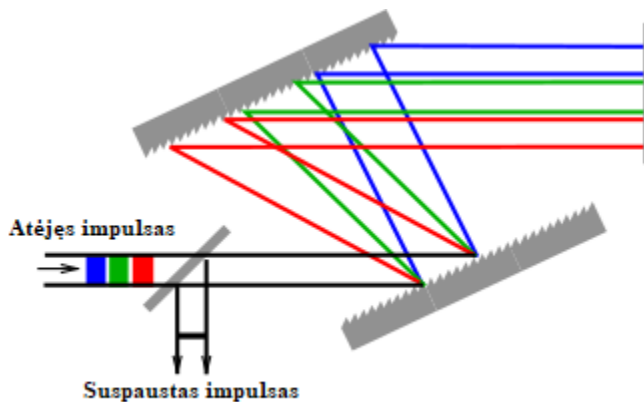
Yra žinomi keli būdai gauti optinių impulsų suspaudimui ar plėtimui. Pavyzdžiui, Ti:safyro moduluotos fazės impulsų stiprinimui reikia, kad impulsai būtų išplėsti iki kelių šimtų pikosekundžių. Tai reiškia, kad vienos spektrinės komponentės turės nueiti 10 cm ilgesnį kelią nei kitos. Paprasčiausias būdas išpildyti šią sąlyga yra naudojant difrakcinių gardelių spaustuvus bei plėstuvus, kurie pasižymi tam tikromis antros ir aukštesnės eilės dispersijos charakteristikomis. Neigiamos dispersijos atveju, didesnio dažnio (trumpesnių bangos ilgių) šviesa yra užvėlinama mažiau nei mažesnio dažnio šviesa. Teigiamai dispersijai yra viskas atvirkščiai. Čirpuotų impulsų stiprinime, spaustuvo (neigiama dispersija) ir plėstuvo (teigiama dispersija) įnešama dispersija turi viena kitą kompensuoti.

Paprasčiausias būdas čirpuotiems impulsams suspausti yra naudojant dviejų difrakcinių gardelių sistemą, kuri pavaizduota 8 paveikslėlyje. Norint suspausti impulsus, dvi difrakcinės gardelės turi būti orientuotos lygiagrečiai viena kitos atžvilgiu ir papildomai naudojamas gražinantis veidrodis tokiu būdu realizuojant dvigubą praėjimą, kad spektrinės komponentės būtų atgal apjungtos į

vientisą pluoštą. Šiuo atveju ilgesni bangos ilgiai keliauja ilgesnį atstumą (neigiama dispersija). Kartais naudojama tik viena difrakcinė gardelė su papildomais veidrodžiais užtikrinančiais, kad sklindantis pluoštas kirstų difrakcinę gardelę keturis kartus. Difrakcinių gardelių sistemos – spaustuvo – antros eilės dispersija gali būti derinama keičiant atstumą tarp gardelių. Įnešamos antros ir trečios eilės grupinių greičių dispersijos vertės gali būti suskaičiuotos naudojant šias formules :

$$GVD = \frac{2\lambda^3 L_g}{2\pi c^2 d^2 (1 - (\frac{\lambda}{d} \sin \alpha)^2)} \quad (1.5)$$

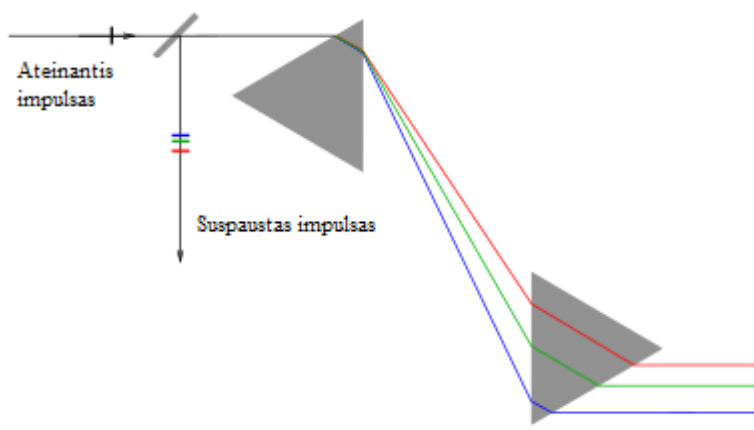
$$TOD = -GVD \frac{3\lambda}{2\pi c} \left(1 + \frac{\lambda (\frac{\lambda}{d} \sin \alpha)}{d (1 - (\frac{\lambda}{d} \sin \alpha)^2)} \right) \quad (1.6)$$



8 pav. Spaustuvo su difrakcinėmis gardelėmis schema.

Kitas optinių impulsų suspaudimo būdas yra vietoje difrakcinių gardelių naudoti prizmes kaip dispersinius elementus. Prizmių veikimas remiasi medžiagos dispersija ir šviesos lūžio dėsnium. Šioje konfigūracijoje ir spaustuvas, ir plėstuvas gali turėti tiek teigiamą, tiek neigiamą dispersiją priklausomai nuo prizmės matmenų bei medžiagos savybių iš kurios ji pagaminta (9 pav.). Įstačius lęšį tarp prizmių dispersijos ženklas gali būti pakeistas. Tačiau prizmės generuoja žymiai mažiau dispersijos lyginant su difrakcinėmis gardelėmis, esant tam pačiam atstumui tarp dispersinių

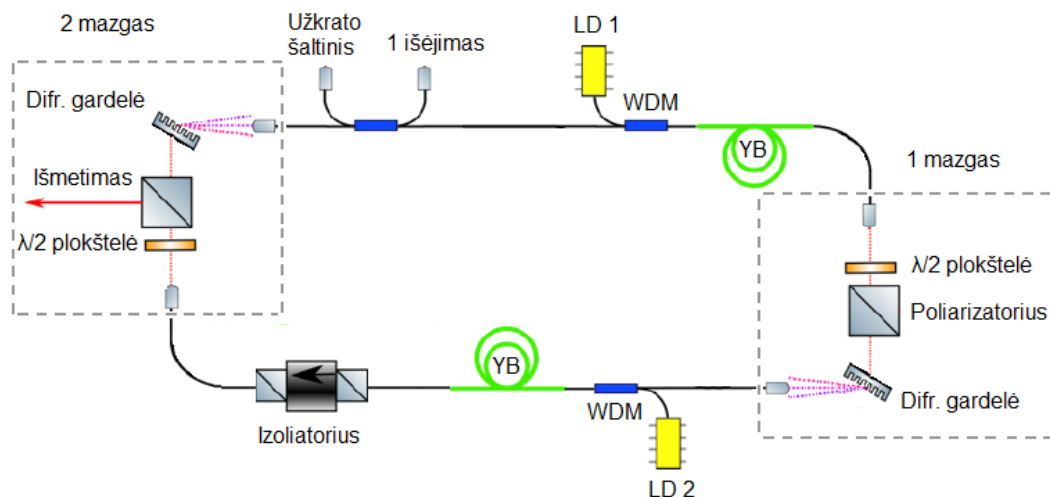
elementų. Prizmės kombinuojamos su difrakcinėmis gardelėmis, kai norima ištaisyti aukštesnių eilių dispersijas (toks darinys vadinamas „grisms“).



9 pav. Schema naudojant prizmes impulsų spūdai.

2. Eksperimentiniai tyrimai

2.1 Tyrimo schema.



10 pav. Impulsus generuojančios eksperimentinės grandinės schema.

Eksperimentinė schema buvo sudaryta iš 2 skaidulinių stiprintuvų ir 2 spektrinio filtravimo mazgų. Kiekvieną iš filtravimo mazgų sudarė 2 optinės skaidulinės jungtys (su kolimatoriais), $\lambda/2$ banginė plokštelė, poliarizatorius ir pralaidumo difrakcinė gardelė. Šiame darbe visi elementai esantys pirmame mazge bus žymimi indeksu 1 (Poliarizatorius – Pol1, difrakcinė gardelė – DG1, $\lambda/2$ plokštelė – PL1, galia išmetime – P1), o antrame mazge esantys elementai bus žymimi indeksu 2 (Poliarizatorius – Pol2, difrakcinė gardelė – DG2, $\lambda/2$ plokštelė – PL2, galia išmetime – P2). Kiti schemos elementai tai: kaupinimo lazeriniai diodai (LD), tankintuvai pagal bangos ilgį (WDM), iterbiu legiruotos skaidulos (Yb), vienas mikrooptinis daliklis (80/20 dalinimo santykio) bei izoliatorius. Norint gauti kolimuotą pluoštą, optinės skaidulinės jungtys (su galuose privirintu stiklu be šerdies), kurios yra schemoje pavaizduotų filtravimo mazgų galuose, buvo įtvirtintos į keramiskines movas su lęšiu bei įstatytos į laikiklius. Kolimuotas pluoštas sklido iki mazguose esančių atviros erdvės difrakcinių gardelių. Schemos filtravimo mazguose, $\lambda/2$ banginės plokštelės

naudojamos poliarizacijai pasukti tam, kad būtų galima reguliuoti kokia spinduliuotės dalis yra išvedama į išėjimą (atspindima nuo poliarizatoriaus) ir kokia dalis lieka toliau cirkuliuoti grandinėje Impulsų generacija išsilaikydavo esant tam tikram banginės plokštelės pasukimo intervalui, kai išvedimo nuostoliai buvo ne per dideli. Pasukus banginę plokštelę už šio intervalo ribų, impulsų generacija dingdavo. Išėjimuose nuo poliarizatorių taip pat buvo matuojami ir spektrai. Skaidulinio mikrooptinio daliklio 20 % dalinimo santykio šakos buvo naudojamos kaip išėjimai filtravimo mazgų suderinimui. Viena iš daliklio šakų taip pat buvo naudojama ir impulsų iš užkrato šaltinio įvedimui į grandinę.

Skaidulinės grandinės su difrakcinėmis gardelėmis veikimo principas analogiškas 1.5 punkte nagrinėtam ultratrumpųjų impulsų generatoriui. Taip pat yra stiprinimo, spektro išplėtimo, filtravimo ciklai kartojami ir gaunamas stabilus lazerio veikimas su stabilia impulso energija bei trukme. Vienas iš skirtumų šioje schemoje yra toks, jog vietoj interferencinių pralaidumo filtrų yra naudojamos difrakcinės gardelės kaip filtrai, kuriuose praėjęs spindulys difraguoja (priklausomai nuo gardelės pasukimo kampo), o šviesolaidžio šerdis (kolimatorius) atlieka apertūros funkciją, atrenkančios tik tam tikrais kampais sklindančias spektrines komponentes ir suformuojančios filtravimo spektrinę juostą. Eksperimentinėje impulsų generatoriaus schemoje sudarius spektrinio filtravimo juostų tinkamą persiklojimą, padidinus kaupinimą bei pasinaudojus užkrato šaltiniu, buvo sužadinama impulsų generacija, kuri toliau vykdavo ir atjungus užkrato šaltinį.

2.2 Tyrimo rezultatai.

2.2.1 Generacijos sužadinimas

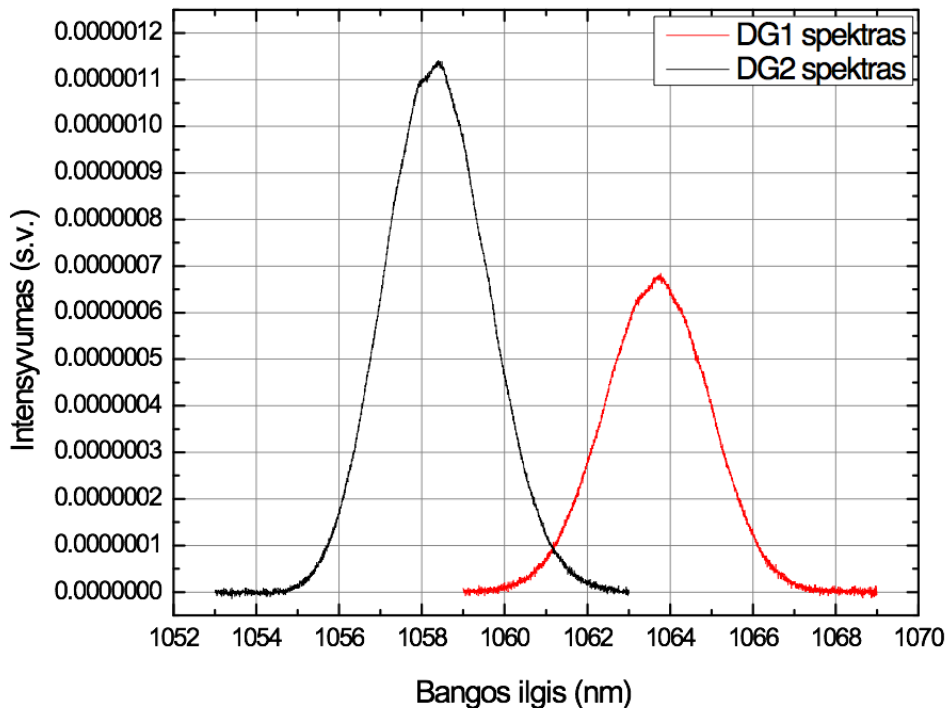
Remiantis tiesinės generatoriaus schemos tyrimų rezultatais, nepavyko gauti savaiminio susižadinimo žiedinio generatoriaus atveju. Pradinis tikslas buvo generuoti impulsus, kurių centrinis bangos ilgis yra ties 1064 nm. Tiriant eksperimentinę schemą, filtro DG1 centrinis bangos ilgis buvo visada fiksuotas ties 1063.73 nm. Savaiminės generacijos beieškant, buvo keičiamas filtro DG2 centrinis bangos ilgis 0.5 nm žingsniais (nuo 1061 nm iki 1064 nm), o kaupinimo srovė buvo keičiama abiejų lazerinių diodų kartu ($I_1 = I_2$), žingsniu lygiu 50 mA (nuo 559mW iki 983

mW). Paslinkus antros difrakcinės gardelės atspindžio bangos ilgį ties 1063.25 nm, kai filtruojamos spektrinės komponentės beveik sutampa, buvo gautas nuolatinės veikos lazeriavimas (1 lentelė).

1 lentelė. **Savaiminio užvedimo bandymų parametrai.**

| DG1 : 1064 nm | | |
|-----------------|-----------------|--------------------|
| Bangos ilgis | Kaupinimo srovė | Bandymo rezultatas |
| BG2 : 1061nm | I : 500-850 mA | Neužsivedė |
| BG2: 1061,5nm | I : 500-850 mA | Neužsivedė |
| BG2: 1062nm | I : 500-850 mA | Neužsivedė |
| BG2: 1062,5nm | I : 500-850 mA | Neužsivedė |
| BG2: 1063 nm | I : 500-850 mA | Neužsivedė |
| BG2: 1063,25 nm | I : 500-850 mA | CW generacija |

Kadangi savaiminės generacijos pasiekti nepavyko, generacijos sužadimui nuspręsta naudoti išorinį užkrato šaltinį. Bandymai parodė, kad eksperimentinėje schemoje impulsų generacija buvo pasiekama, kai sužadimui buvo naudojami 1064 nm bangos ilgio, ~10 ps trukmės, 39 MHz pasikartojimo dažnio užkrato impulsai.

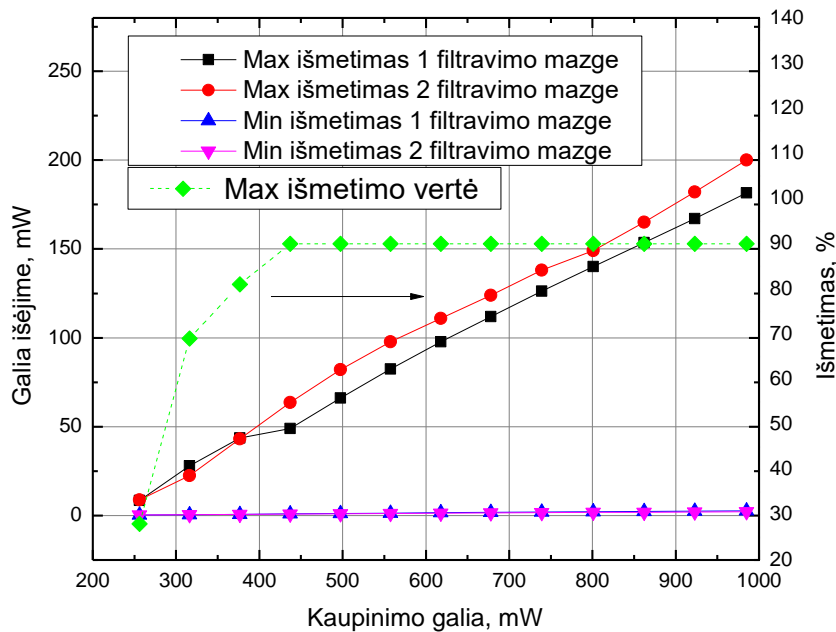


11 pav. Filtravimo mazgų atspindžio juostos, kai buvo pasiekiamas generacijos susižadindimas.

Užkratinių impulsų sekos galia (energija) buvo reguliuojama naudojant skaidulinį derinamą slopintuvą. Generacija susižadindavo esant 0,6 nJ užkratinių impulsų energijai, 985 mW suminei abiejų diodų kaupinimo galiai bei esant filtravimo mazgų atspindžios juostoms perklotoms kaip parodyta 11 pav. Kartais susižadindavo keli impulsai per apėjimo periodą. Pašaliniai impulsai dingdavo sumažinus pirmojo kaupinimo lazerinio diodo galią iki 144 mW. Žemiau šios ribos generacija dingdavo išvis. Pavieniai impulsai stabiliai išsilaikė derinant kaupinimą intervale nuo 256 mW iki 985 mW. Išmatuotas impulsų pasikartojimo dažnis, kai buvo generuojami pavieniai impulsai per periodą, siekė 26,60 MHz.

2.2.2 Optimalaus išmetimo paieškos esant fiksuotam filtravimo juostų atskyrimui

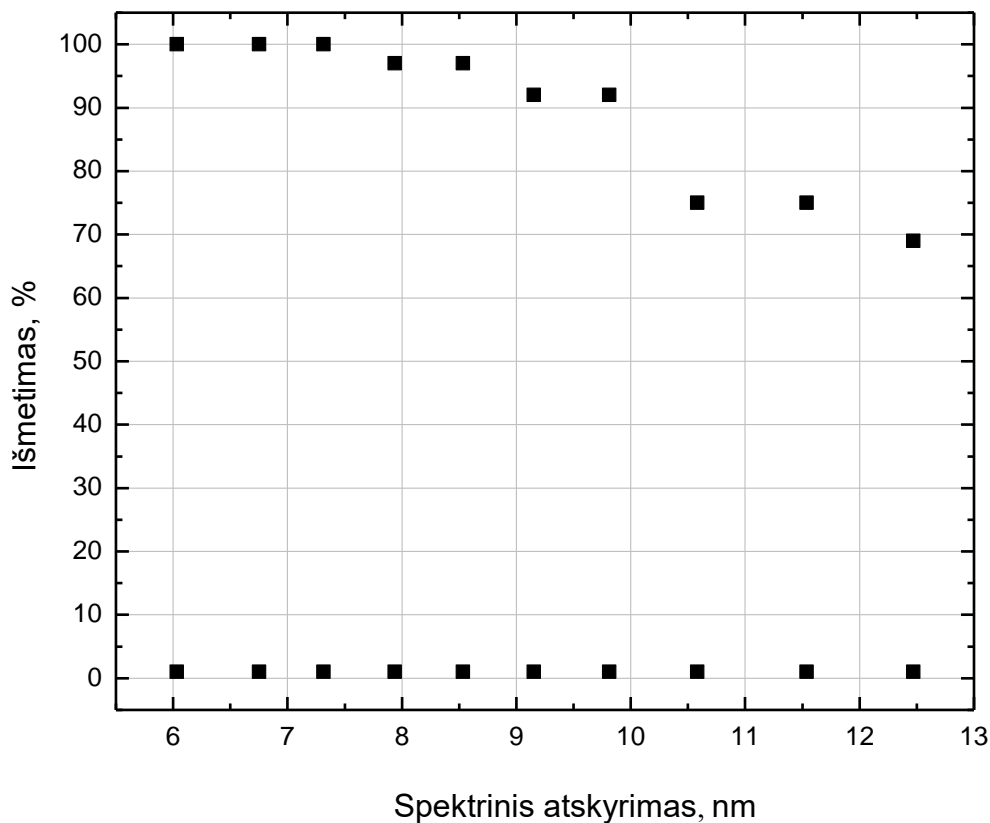
Generatoriuje esant fiksuotam atskyrimui ir 1,105 W kaupinimui, pavieniai impulsai stabiliai išsilaikė derinant išmetimą 1 filtravimo mazge intervale 0 – 90 %, o 2 filtravimo mazge intervale 0 – 81 %. Norint išlaikyti stabilius pavienius impulsus, išmetimas galėjo būti maksimizuojamas tik viename iš mazgų, kai kitame mazge buvo nustatomas minimalus išmetimas. Visa tai buvo matuojama, kai buvo gauta generacija ir atjungtas užkratinis impulsų šaltinis (užvedant prie 983 mW kaupinimo galios). Mažinant kaupinimo galią, maksimalaus galimo išmetimo vertė (kai generacija nedingsta) taip pat mažėjo.



12 pav. Maksimalios ir minimalios galios išėjimuose priklausomybė nuo kaupinimo galios.

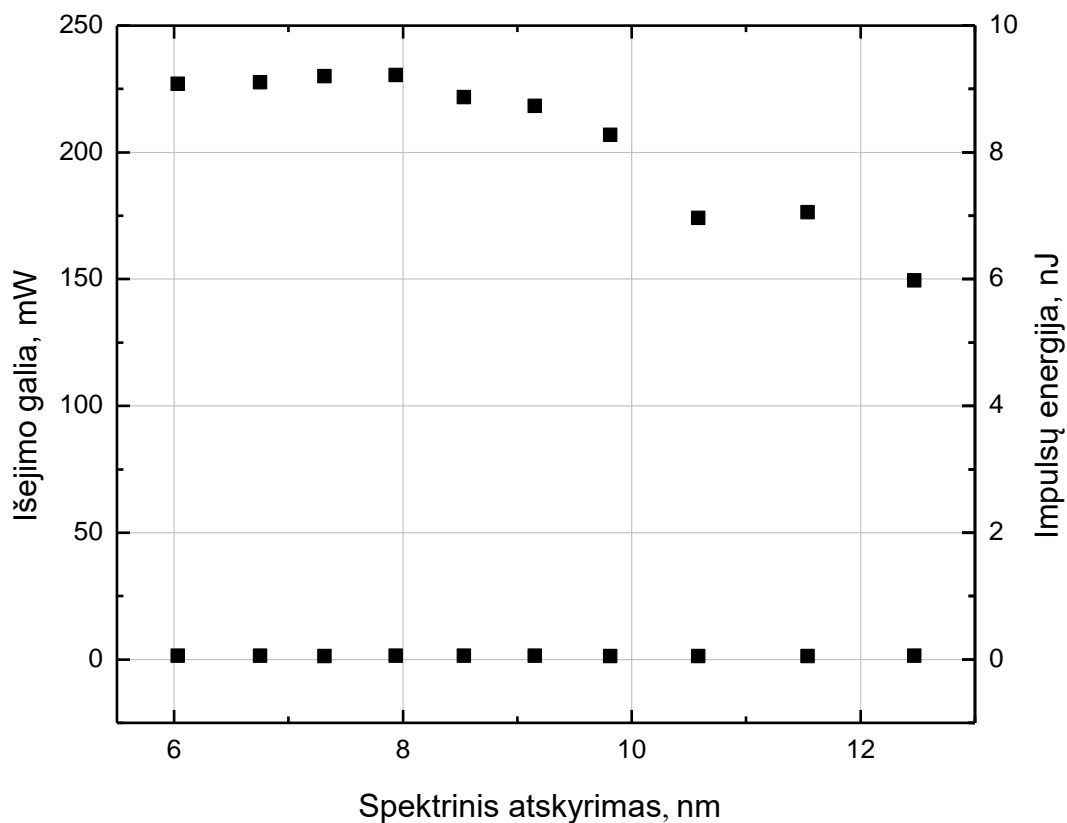
2.2.3 Filtrų atskyrimo poveikio tyrimas

Siekiant nustatyti kokią įtaką filtrų juostų spektrinis atskyrimas turi impulsų generacijai (galiai išėjime), buvo atlikti generuojamų impulsų galios (energijos) priklausomybės nuo filtrų spektrinio atskyrimo matavimai. Tam tikslui, impulsų generacija buvo sužadinama kai išmetimas buvo nustatomas minimalus, o kaupinimo galia fiksuota (985 mW). Tada buvo atjungiamas užkrato šaltinis, nustatomas norimas DG2 centrinis bangos ilgis (toku būdu keičiant filtrų atskyrimą) ir keičiama išmetimo vertė. Buvo nustatyta, kad kuo labiau buvo atskiriamos filtrų juostos viena nuo kitos, tuo mažesnė buvo maksimalaus išmetimo vertė (13 pav.). Didinant išmetimą daugiau negu galimas maksimalus, impulsų generacija dingdavo.

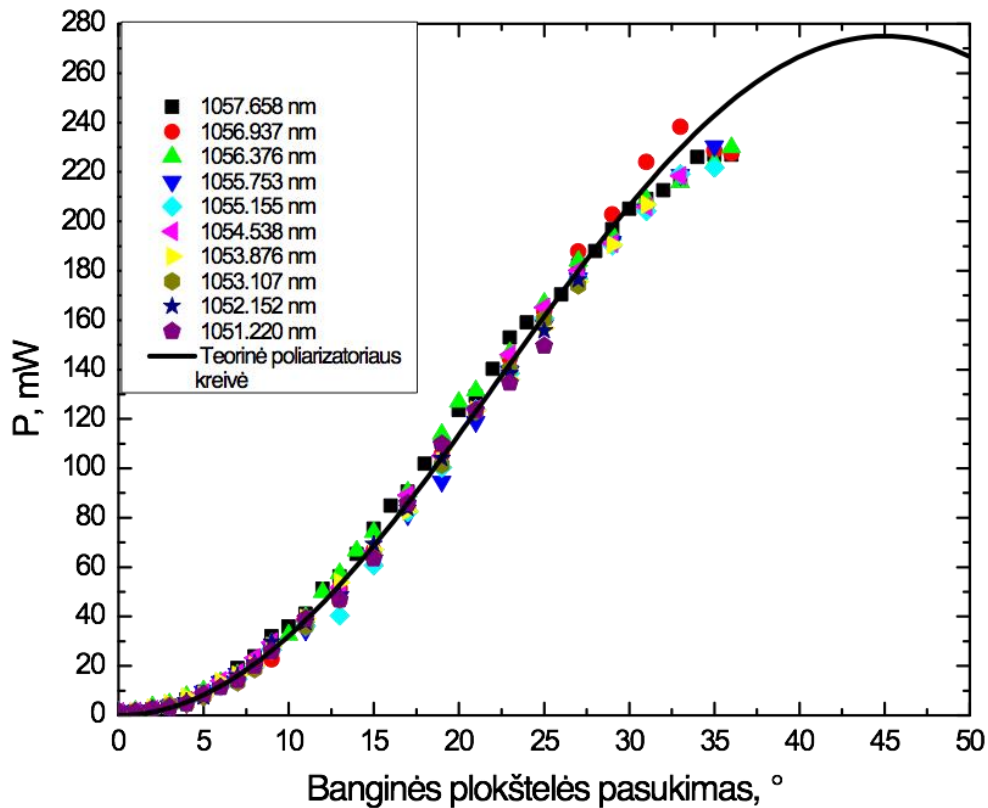


13 pav. Maksimalios/minimalios išmetimo vertės priklausomybė nuo spektrinio atskyrimo.

Impulsų galia (energija) poliarizatoriaus išėjime irgi mažėjo kai filtrų atskyrimas didėjo, kaip galime matyti 14 paveikslėlyje. Šis galios mažėjimas atitiko išmetimo nuo poliarizatoriaus kitimą priklausomai nuo banginės plokštelės pasukimo (15 pav.). Tai reiškia, kad grandinėje cirkuliuojančių impulsų energija išlieka vienoda prie skirtingų filtrų juostų atskyrimų. Taigi didėjant atskyrimui sumažėja tik maksimalūs grandinės toleruojami išmetimo nuostoliai.

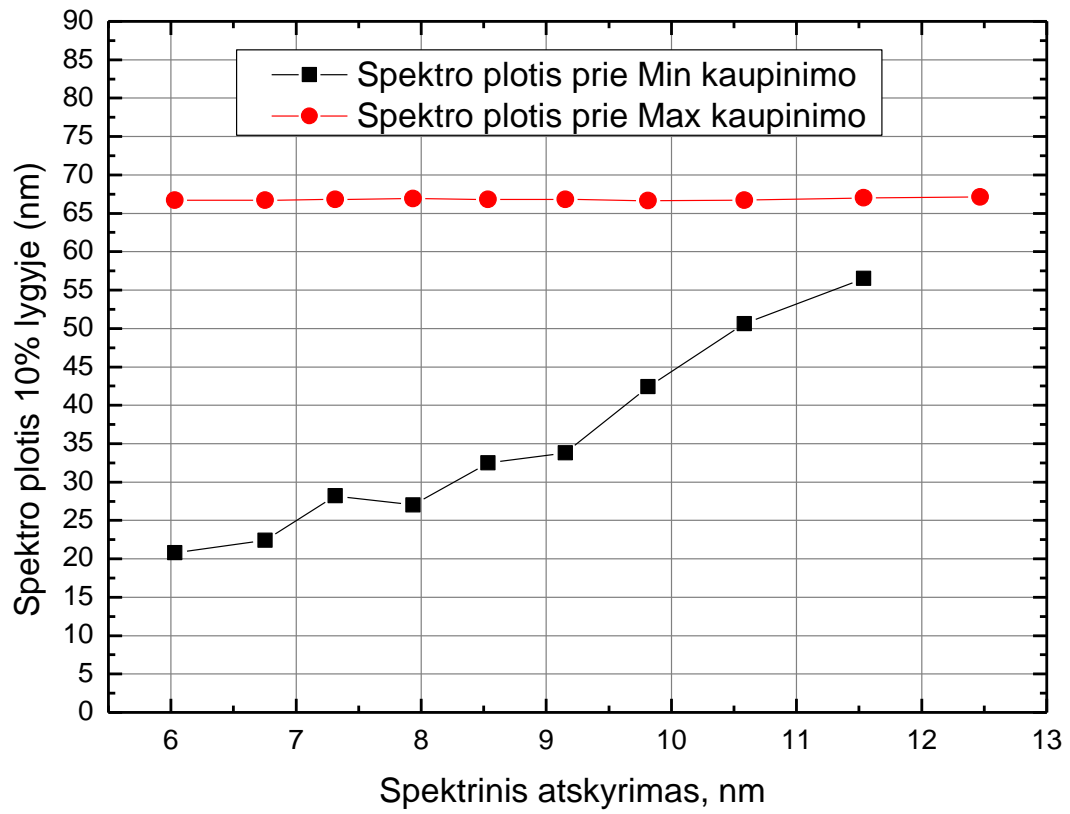


14 pav. Maksimalios/minimalios galios/energijos priklausomybė nuo filtrų juostų atskyrimo.

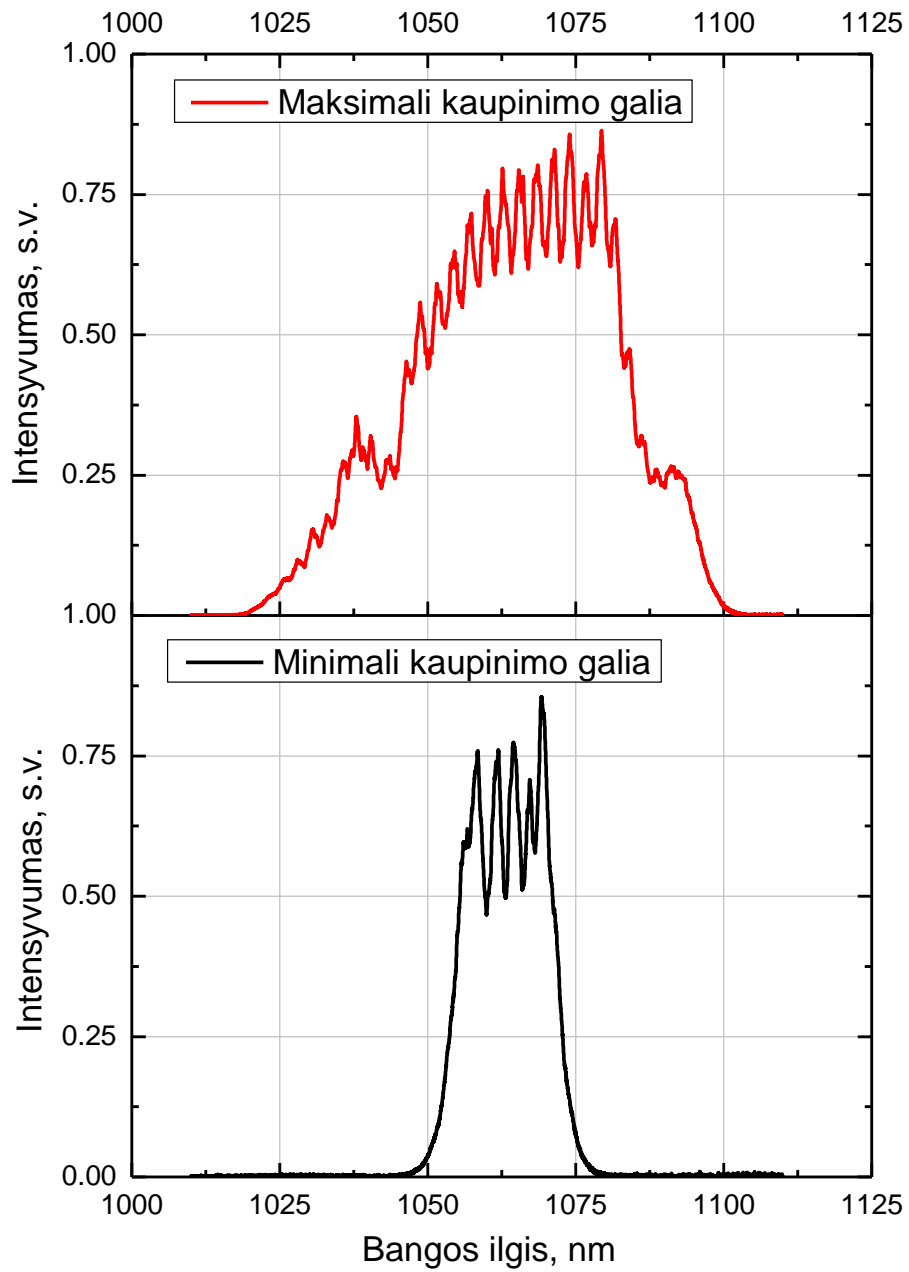


15 pav. Galios priklausomybė nuo banginės plokštelės pasukimo esant skirtingiems atskyrimams.

Išmatavus generuojamų impulsų spektrus (P2 išėjime) priklausomai nuo filtravimo spektrinių juostų atskyrimo buvo nustatyta, kad impulsų spektro plotis beveik nepriklauso nuo filtrų atskyrimo esant maksimaliam kaupinimui. Tačiau, didėjant atskyrimui, minimali kaupinimo vertė kai dar yra palaikoma impulsų generacija irgi didėja. Dėl to, esant didžiausiam matuotam atskyrimui ir mažiausiam kaupinimui (kai generacija nedingsta) yra gaunamas platesnis generuojamų impulsų spektras negu esant mažiausiam matuotam atskyrimui.



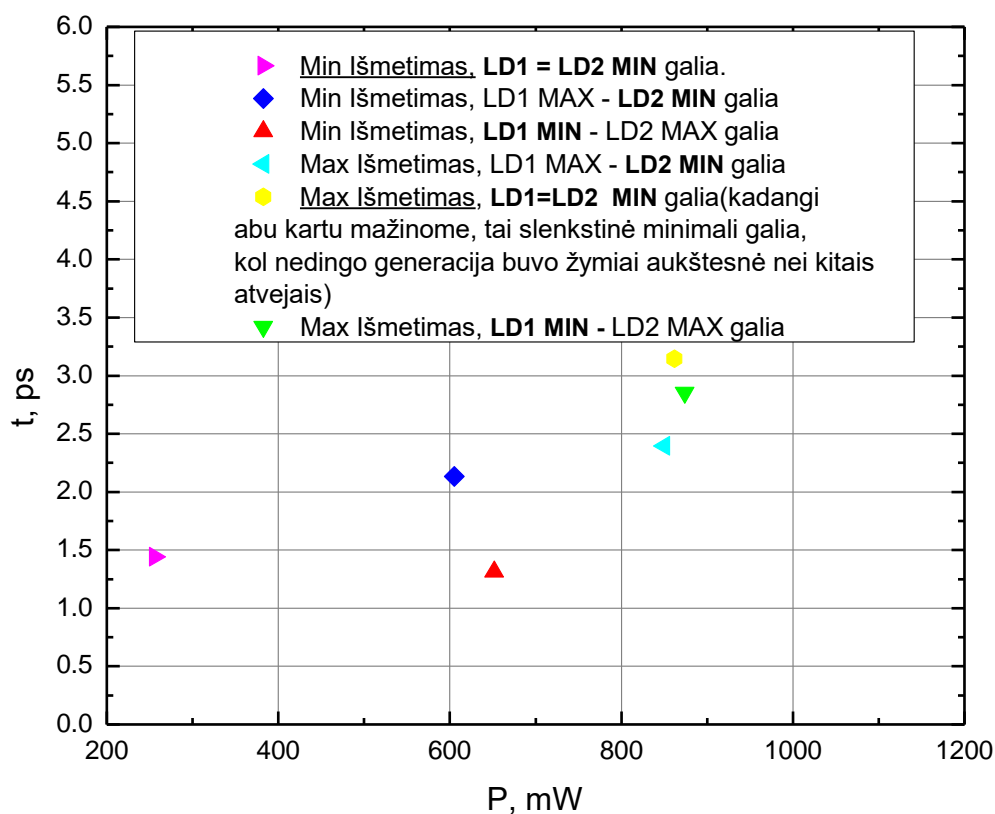
16 pav. Spekro plotis 10 % lygyje priklausomybė nuo spektrinio atskyrimo, esant minimaliam/maksimaliam kaupinimui.



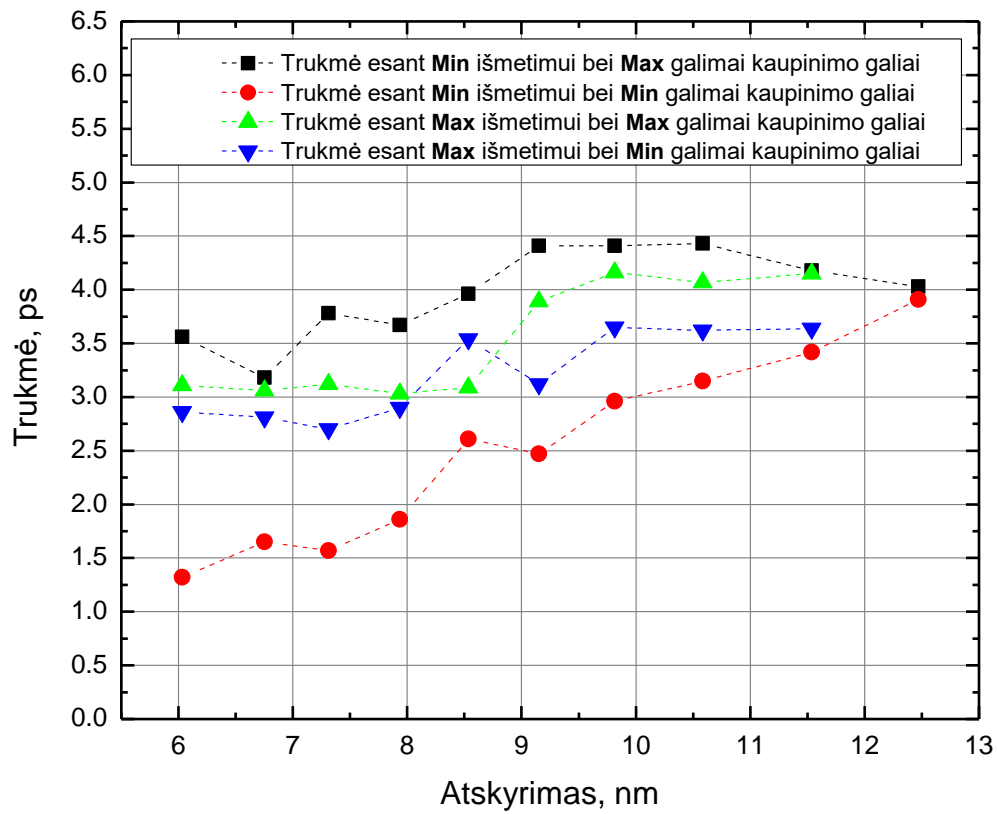
17 pav. Impulsų spektrai esant 6,75 nm atskirumui ir dviems skirtingoms kaupinimo galios vertėms.

2.2.4 Generuojamų impulsų laikinės charakteristikos

Siekiant charakterizuoti generuojamus impulsus, buvo išmatuotos impulsų autokoreliacijos esant skirtingoms darbinėms sąlygoms. Matavimų rezultatai parodė, kad grandinėje generuojami yra čirpuoti impulsai, kurių trukmė yra žymiai didesnė, negu spektriškai ribota trukmė paskaičiuota iš spektro. Taip pat buvo nustatyta, kad impulsų trukmė šiek tiek didėja didinant kaupinimą (18 pav.). Tai gali būti aiškinama tuo, kad didėjant kaupinimui plėtėja generuojamų impulsų spektras ir, veikiant skaidulos dispersijai, platesnis spektras lemia didesnę impulsų išplitimą laike. Esant minimaliam kaupinimui (kai generacija dar nedingsta), generuojamų impulsų trukmė taip pat šiek tiek didėjo ir didinant filtrų spektrinį atskyrimą (19 pav.).



18 pav. Išmatuotos trukmės priklausomybė nuo keičiamos kaupinimo galios, o atskyrimas fiksuotas ties užvedimo sąlygomis.

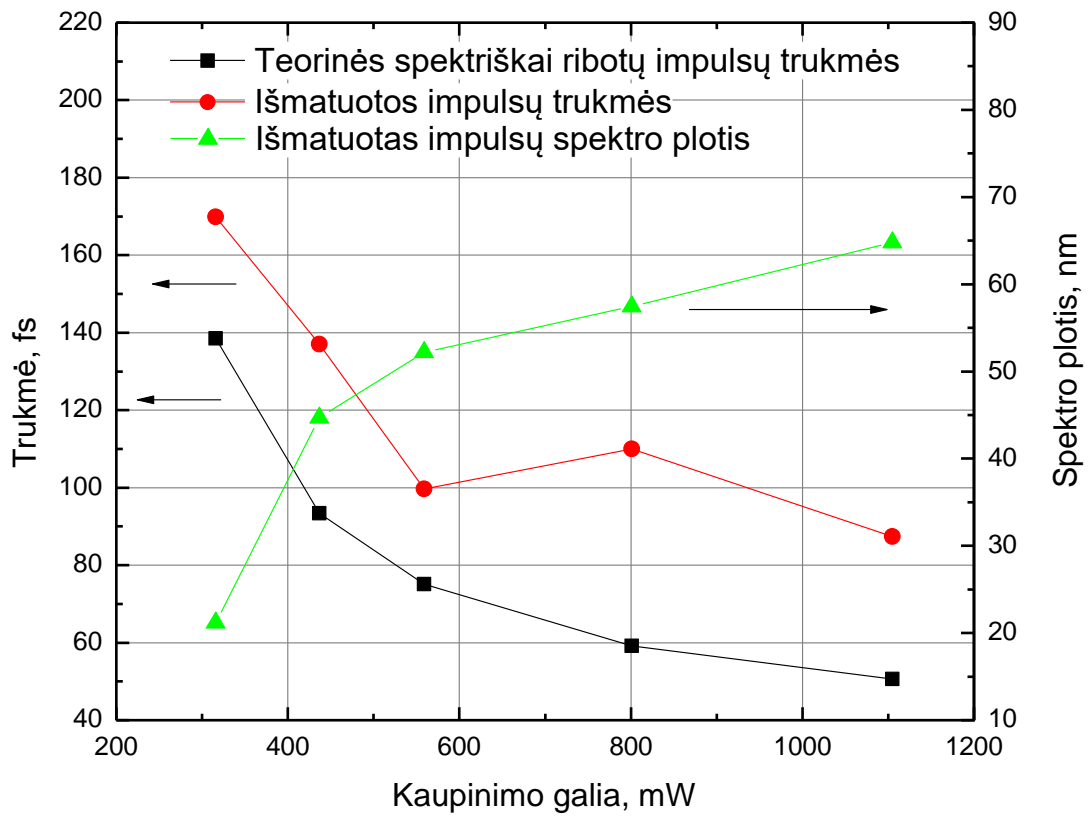


19 pav. Išmatuotos trukmės priklausomai nuo atskyrimo esant skirtingoms išmetimo ir kaupinimo sąlygoms.

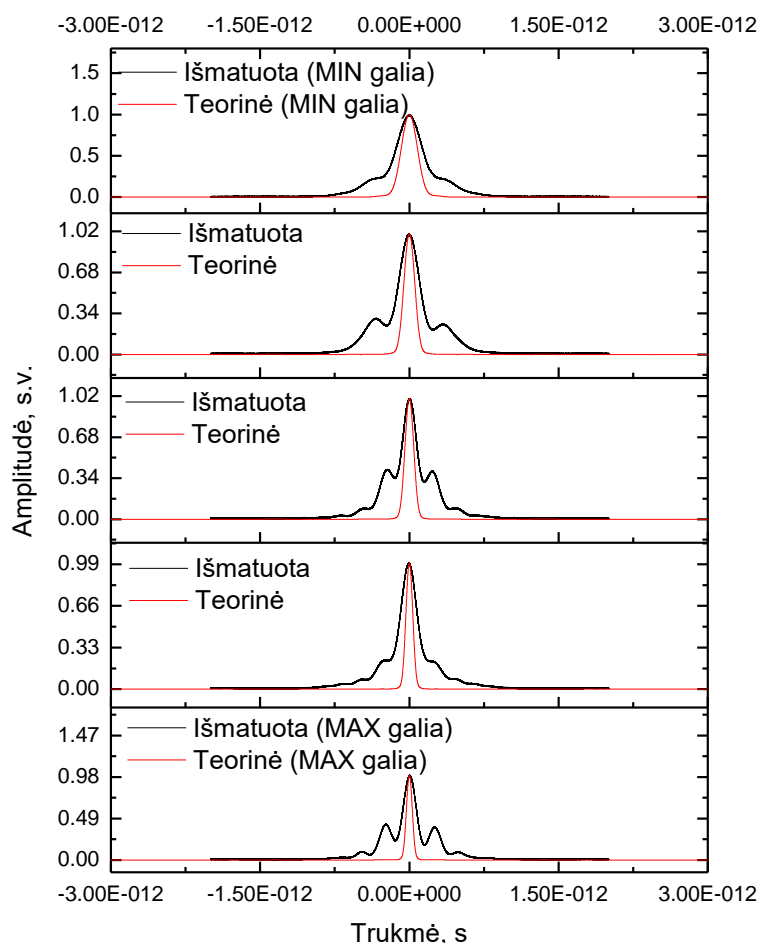
2.2.5 Impulsų suspaudimas.

Tiriamoje grandinėje generuojami impulsai yra veikiami fazės moduliavimo reiškinių ir skaidulos dispersijos. Abu šie reiškiniai įneša daugiausiai tiesinį čirpą (neatsižvelgiant į aukštesnės eilės narius), dėl to impulsai gali būti suspaudžiami naudojant difraccinių gardelių spaustuva. Pirminė spaustuvo konfiguracija (atstumas tarp gardelių) buvo paskaičiuota remiantis išmatuotais generuojamų impulsų parametrais: spektrų pločiu ir impulso trukme. Vėliau, surinkus difraccinių gardelių spaustuva, atstumas tarp gardelių buvo paderinamas realiuoju laiku, stebint impulsų autokoreliaciją ir optimizuojant suspaudimą.

Impulsų suspaudimo tyrimo rezultatai parodė, kad suspaustų impulsų trukmė priklauso nuo kaupinimo galios (20 pav.). Trumpiausia trukmė buvo pasiekama esant didžiausiai kaupinimo galiai. Tačiau, iš išmatuotų impulsų autokoreliacijų taip pat galima pastebėti, kad suspaustų impulsų forma nebuvo ideali Gausinė. Buvo stebimos satelitinės smailės, charakteringos esant nesukompensuotam trečios eilės dispersijos poveikiui. Neidealų impulsų suspaudimą rodo ir tai, kad išmatuotos impulsų trukmės (paskaičiuotos iš autokoreliacinių kreivių) yra didesnės negu spektriškai ribotų impulsų trukmės paskaičiuotos iš išmatuotų spektrų (21 pav.). Analizuojant išmatuotų trukmių santykį su spektriškai ribotomis trukmėmis, galima pastebėti, kad suspaudimas yra geriausias esant minimaliam kaupinimui (kai impulsai ilgesnis), o didėjant kaupinimui suspaudimas blogėja.

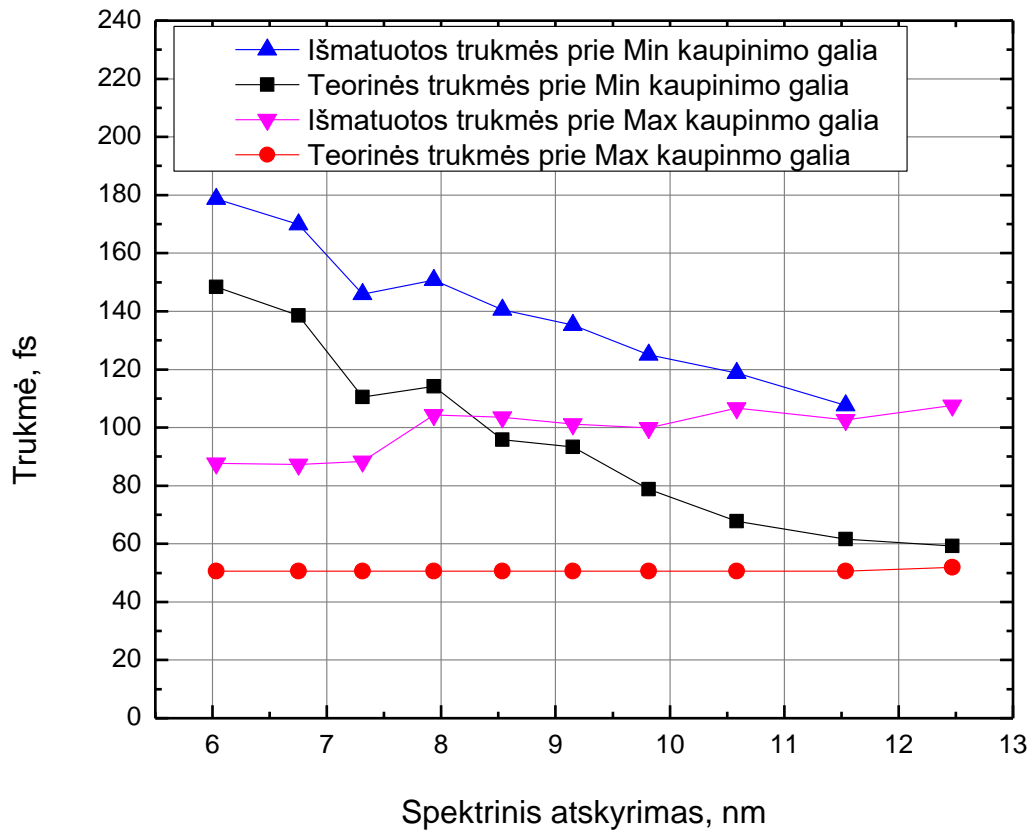


20 pav. Turint fiksuotą 6,75 nm spektrinę atskyrimą gautos suspaustų impulsų trukmės bei spektro pločio priklausomybės nuo kaupinimo galios.

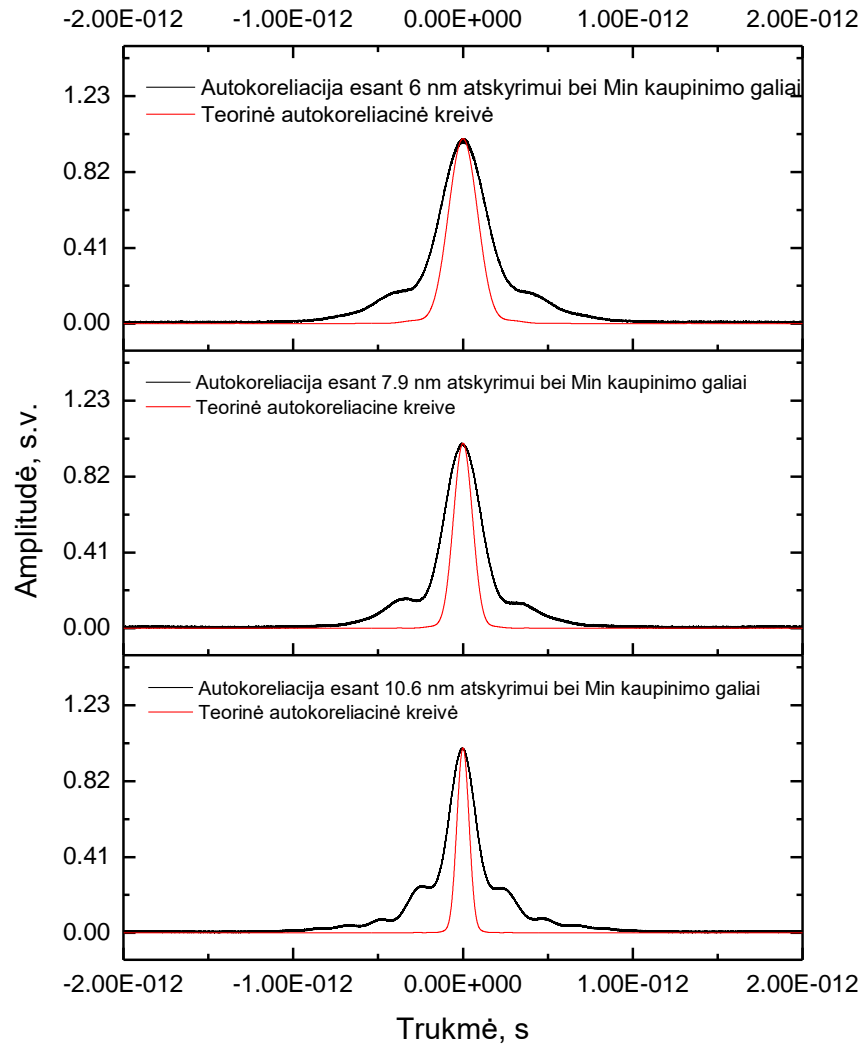


21 pav. Prie 6.75 nm atskyrimo išmatuotos autokoreliacinės kreivės, kai galia nuo maksimumo pasiekia minimumą, ir palygintos su teorinėmis autokoreliacinėmis kreivėmis.

Ištyrus impulsų suspaudimą priklausomai nuo filtrų spektrinių juostų atskyrimo, buvo nustatyta, kad mažiausiai pasiekiamą impulsų trukmę (esant didžiausiam kaupinimui) nepriklauso nuo filtrų spektrinio atskyrimo (22 pav.). Tačiau, didėjant spektriniam atskyrimui, mažėja didžiausia impulsų trukmė po suspaudimo ir tuo pačiu siaurėja impulsų trukmės kitimo intervalas derinant kaupinimą. Tai atitinka impulsų spektro pločio pokyčius priklausomai nuo spektrinio atskyrimo.



22 pav. Suspaustų impulsų trukmės priklausomybės nuo spektrinio atskyrimo esant minimaliai ir maksimaliai kaupinimo galiai.



23 pav. Išmatuotos autokoreliacinės kreivės, kurios užfiksuotos prie skirtingų atskirimų (6 nm, 7,9 nm bei 10,6 nm) ir palygintos su teorinėmis spektriškai ribotų impulsų autokoreliacinėmis kreivėmis, kai kaupinimas minimalus.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

Ištirus žiedinės konfigūracijos impulsus generuojančią skaidulinę grandinę, buvo nustatytos šios grandinės konfigūracijos charakteristikos.

1. Atlikus generacijos susižadavimo tyrimus, buvo nustatyta, kad savaiminis generacijos susižadavimas tokioje grandinėje neįvyksta. Impulsų generacija gali būti sužadinta tik naudojant išorinį impulsinį šaltinį.
2. Ištirus generuojamos impulsinės spinduliuotės vidutinės galios (išėjime nuo poliarizatoriaus) priklausomybę nuo filtrų spektrinių juostų atskyrimo esant fiksuotai kaupinimo galiai, buvo nustatyta, kad maksimali vidutinė galia mažėja didėjant filtrų spektrinių juostų atskyrimui.
3. Ištirus generuojamų impulsų spektrines ir laikines charakteristikas, buvo nustatyta, kad nesuspauštų impulsų trukmė didėja didinant kaupinimo galia, nes generuojamų impulsų spektras plėtėja.
4. Suspaudus generuojamus impulsus difrakcinių gardelių spaustuve, buvo nustatyta, kad suspaustų impulsų trukmė mažėja, didėjant kaupinimo galiai. Šis trukmės mažėjimas yra lemiamas impulsų spektro plėtėjimo.

Literatūros sąrašas

1. C. Xu and F. W. Wise, "Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy," *Nature Photonics* 7, 875–882 (2013).
2. X. Liu, D. Du, and G. Mourou, "Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses," *IEEE Journal of Quantum Electronics* 33, 1706–1716 (1997).
3. K. Regelskis, J. Želudevičius, K. Viskontas, and G. Račiukaitis, "Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering," *Optics Letters* 40, 5255–5258 (2015).
4. D. Strickland and G. Mourou, „Compression of amplified chirped optical pulses,“ *Opt. Commun.* 56, 219–221 (1985).
5. F. Mitschke, *Fiber Optics: Physics and Technology* (Springer, 2010).
6. A.P. Stabinis, G. Valiulis, *Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika*, (Vilnius, 2008).
7. R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, and D. C. Hanna, „Ytterbium-doped fiber amplifiers,“ *IEEE J. Quantum Electron.* 33, 1049–1056 (1997).
8. K. Viskontas, K. Regelskis, and N. Rusteika, "Slow and fast optical degradation of the SESAM for fiber laser mode-locking at 1 μm ," *Lithuanian Journal of Physics* 54, (2014).
9. K. Regelskis, J. Želudevičius, K. Viskontas, G. Račiukaitis, „Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering,“ *Opt. Lett.*, 5255-5258 (2015).
10. R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings* (Burlington, MA, 2010).
11. A. Weiner, *Ultrafast Optics* (Hoboken, New Jersey, 2009).

Santrauka

Ultratrumpus impulsus generuojantys lazeriai rėmėsi puslaidininkinių įsisotinančių sugėriklių naudojimu, kurie pasižymėjo ribota veikimo trukme ir patikimumu. Alternatyvus ir labai patrauklus metodas generuoti ultratrumpus impulsus skaidulose pasinaudojant pačios skaidulos netiesiškumais ir spektriniu filtravimo buvo pasiūlytas Lietuvos mokslininkų [3]. Šis metodas pasižymi plačiomis impulsų generavimo galimybėmis įgyvendinant skirtingas skaidulinės grandinės ir spektrinio filtravimo konfigūracijas. Todėl šiame darbe buvo tiriami itin trumpus šviesos impulsus generuojančios žiedinės grandinės ypatumai.

Darbo metu buvo išmatuotos energetinės, laikinės ir spektrinės generuojamų impulsų charakteristikos. Taip pat buvo bandoma surasti grandinės konfigūracijas, leidžiančias pasiekti savaiminį generacijos startavimą.

Atlikus generacijos susižadinimo tyrimus, buvo nustatyta, kad savaiminis generacijos susižadinimas tokioje grandinėje neįvyksta. Impulsų generacija gali būti sužadinta tik naudojant išorinį impulsinį šaltinį. Ištyrus generuojamos impulsinės spinduliuotės vidutinės galios (išėjime nuo poliarizatoriaus) priklausomybę nuo filtrų spektrinių juostų atskyrimo esant fiksuotai kaupinimo galiai, buvo nustatyta, kad maksimali vidutinė galia mažėja didėjant filtrų spektrinių juostų atskyrimui. Ištyrus generuojamų impulsų spektrines ir laikines charakteristikas, buvo nustatyta, kad nesuspaustų impulsų trukmė didėja didinant kaupinimo galia, nes generuojamų impulsų spektras plėtėja. Taip pat suspaudus generuojamus impulsus difrakcinių gardelių spaustuve, buvo nustatyta, kad suspaustų impulsų trukmė mažėja, didėjant kaupinimo galiai. Šis trukmės mažėjimas yra lemiamas impulsų spektro plėtimosi.

Marijus Mickus

Investigation of a ring fiber circuit which generates ultrashort light pulses

SUMMARY

In this work was investigated ultrashort pulse Yb-doped ring fiber generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering. Influence of pump power and filter spectral band separation parameters on the pulse generation and on the received pulse parameters were investigated. It was found that that pulses can't be generated without external pulse source. Maximum average power decreases with increasing fiber generator's spectral separation of filter bands when pump power is fixed. It was discovered that with increasing filter spectral band separation, the generated pulse spectra becomes wider and the duration of pulses increases with increasing pump power. Also the duration of the compressed pulses was decreasing with increasing pump power.