

**VILNIAUS UNIVERSITETO
FIZIKOS FAKULTETO
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS**

Mykolas Lipnickas

**LAZERIO IMPULSŲ PARAMETRŲ VALDYMAS NAUDOJANT AKTYVIAJĄ
ŠVIESOLAIDINĘ KILPĄ**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų studijų programa

Studentas

Mykolas Lipnickas

Darbo vadovas

dr. Andrejus Michailovas

Lazerinių tyrimų centro direktorius

doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2022

Turinys

Įvadas	4
Literatūros apžvalga.....	7
1.1. Impulso plėtimo būdai.....	7
1.1.1. Impulso plėtimas naudojant vėlinimo linijas	7
1.1.2. Impulso plėtimas naudojant netiesines medžiagas rezonatoriuje ar elektrooptinius procesus	9
1.1.3. Dispersinis impulsų plėtimas	10
1.2. Spektriškai riboti impulsai ir faziškai moduluoti impulsai.....	11
1.3. GHz impulsų pasikartojimo dažnio generavimas naudojantis laisvos erdvės elementais.....	14
1.3.1. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant Mikelsono interferometrus	14
1.3.2. GHz papliūpų formavimas naudojant Fabry-Pero interferometrus	15
1.3.3. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant vėlinimo linijas	16
1.4. Šviesolaidiniai GHz impulsų papliūpų formavimo būdai	17
1.4.1. GHz pasikartojimo dažnio impulsų sekos formavimas naudojantis moduliacijų nestabilumu.....	17
1.4.2. GHz impulsų pasikartojimo dažnio osciliatoriai.....	19
1.4.3. Impulsų pasikartojimo dažnio dauginimas naudojant kaskadinius pluošto daliklius.....	20
1.4.4. GHz papliūpų formavimas naudojant pasyviąsias šviesolaidines kilpas	21
2. Eksperimentinė dalis.....	23
2.1. Impulsų trukmės valdymas naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtru.....	23
2.2. Eksperimentiškai išmatuoti rezultatai valdant impulso trukmę naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą.....	26
2.3. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą	29
2.4. Eksperimentinė schema	30

2.5.	Papliūpų formavimo mechanizmai	32
2.5.1.	Trumposios papliūpos	32
2.5.2.	Ilgosios papliūpos	34
2.6.	Impulsų amplitudžių gaubtinės formos keitimas.....	36
2.7.	Pavienių impulsų amplitudžių valdymas impulsų papliūpose.....	37
2.8.	Papliūpų stiprinimas ir charakterizavimas.....	39
	Rezultatų aptarimas.....	42
	Išvados	43
	Literatūra.....	45
	Santrauka.....	48
	Summary	49

Ivadas

Šviesolaidiniai lazeriniai šaltiniai yra perspektyvūs lazerių tipai, nes turi nemažai privalumų, lyginant su kitų rūšių lazeriais. Šie lazeriai pasižymi geru stabilumu, gali būti labai kompaktiški, mažiau jautrūs išsiderinimui, yra atsparesni išorės poveikiams, pasižymi dideliu stiprinimo koeficientu ir aukšta gaunama erdvine pluošto kokybe sąlygota bangolaidinio spinduliuotės sklidimo.

Dabartinėje lazerinių šaltinių rinkoje svarbus aspektas yra šaltinio universalumas. Tokį universalumą suteikia galimybės derinti įvairius lazerinio impulso parametrus, tokius kaip bangos ilgis, smailinė galia, energija, trukmė, impulsų pasikartojimo dažnis, taip pat galimybė formuoti didelio pasikartojimo dažnio papliūpas. Gebėjimas kuo didesniame diapazone derinti šiuos parametrus leidžia vieną lazerinį šaltinį taikyti įvairioms sritims [1]. Vienas iš svarbių derinamų parametrų yra impulso trukmė. Impulso trukmės derinimas yra naudingas tokiose srityse kaip mikro, nano apdirbimas [2], biomedicinos diagnostika [3] ir kt.

Vienas iš dažnai taikomų būdų derinti trukmę yra - etalonų naudojimas lazerio rezonatoriuje, kai įstačius etaloną yra filtruojamos spektrinės komponentės. Šio metodo trūkumas susijęs su tuo, kad reikia fiziškai keisti rezonatoriuje esančius optinių elementų skaičių, dėl ko sudėtingėja pati sistema, patiriama nemažai nuostolių. Kitas būdas derinti impulsų trukmę yra naudojamas čirpuotų impulsų stiprinimo sistemose keičiant suminę sistemos dispersiją derinant impulsų spaustuvą [4]. Metodo naudojančio spaustuvo išderinimą trūkumas - sąlyginai mažas trukmės derinimo intervalas, dažniausiai siekiantis nuo šimtų femtosekundžių iki kelių dešimčių pikosekundžių. Šviesolaidiniuose lazeriuose, kuriuose yra naudojama čirpuotų impulsų stiprinimo technologija, impulsų trukmės valdymui galima panaudoti čirpuotas šviesolaidines Brego gardeles (*angl. chirped fiber Bragg grating (CFBG)*). su temperatūrinio gradiento valdymu išilgai gardelės [5]. Keičiant temperatūrinį gradientą, tai yra keičiant dispersiją, galima derinti trukmę nuo kelių šimtų pikosekundžių iki pusės nanosekundės. Plečiant impulsus čirpuotoje šviesolaidinėje Brego gardelėje nepatiriami itin dideli nuostoliai. Tai yra vienas iš metodo privalumų realizuojant faziškai moduluotus impulsus lazerinėje sistemoje.

Kita svarbi lazerinių sistemų savybė yra gebėjimas formuoti didelio dažnio ultratrumpų impulsų papliūpas. Gigahercinės (GHz) ultratrumpų impulsų papliūpos (*angl. burst*) yra perspektyvus metodas, leidžiantis ženkliai pagerinti medžiagos apdirbimo kokybę bei

apdirbimo greitį [6]. Medžiagą veikiant papliūpomis ženkliai mažiau energijos yra prarandama perduodant ją terminiu būdu. Įprastu megahercinio (MHz) dažnio pavienių impulsų režimu kiekvienas ateinantis impulsas turi medžiagą paveikti, įkaitinti iki abliacijos slenksčio, tokiu būdu yra prarandama didelė dalis energijos. Naudojant ultratrumpų impulsų GHz papliūpas, medžiaga nespėja išskirstyti jai suteikiamos energijos per laiko tarpą tarp impulsų. Dėl šios priežasties ženkliai padidinamas proceso efektyvumas - jis gali vykti greičiau ir galima naudoti mažesnes impulsų energijas, o tai padidina apdirbimo kokybę.

Dauguma metodų formuojant didelio pasikartojimo dažnio papliūpas turi trūkumą, jog impulsų amplitudės pačioje papliūpoje yra mažėjančios amplitudės ir nėra valdomos [7]. Šviesolaidiniuose metoduose taip pat dažnai susiduriama su problema, kad skirtingi papliūpos impulsai dėl skirtingos patiriamos dispersijos išplinta iki nevienodų impulso trukmių [8].

Perspektyvi technologija, kurioje yra pašalinami šie trūkumai yra aktyvioji šviesolaidinė kilpa [9]. Panaudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą gali būti formuojamos įvairaus pasikartojimo dažnio GHz papliūpos. Aktyvioji šviesolaidinė kilpa leidžia laisvai pasirinkti svarbias papliūpos charakteristikas - kaip impulsų skaičių papliūpoje ir impulsų amplitudžių kitimą. Naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą formuojamose papliūpose yra išlaikomas lygus laikinis atstumas tarp impulsų. Taip pat yra galimybė kontroliuoti medžiagos dispersiją, tam kad ultratrumpų impulsų trukmė papliūpoje būtų vienoda.

Kaip alternatyvą anksčiau minėtiems impulso trukmės derinimo būdams, taip pat gali būti naudojama aktyvi šviesolaidinė kilpa. Ši technologija gali leisti derinti impulso trukmę nuo keliasdešimt pikosekundžių iki šimtų pikosekundžių. Šiame metode naudojami spektriškai riboti impulsai, kurie išlaiko Gausinę impulso gaubtinės formą, kurią lemia naudojamo spektrinio filtro forma.

Taigi aktyvioji šviesolaidinė kilpa yra perspektyvus metodas leidžiantis universaliai valdyti įvairius lazerinio šaltinio impulsų parametrus.

Šio darbo tikslas yra pademonstruoti naują impulsų valdymo technologiją, pagrįstą impulsų spektriniu filtravimu aktyviojoje šviesolaidinėje kilpoje. Įvertinti impulso trukmės derinimo diapazoną bei charakterizuoti jų formas. Taip pat, pademonstruoti aktyviają šviesolaidinę kilpą suformuotų GHz papliūpų impulsų amplitudžių gaubtinės valdymą bei pavienių impulsų valdymą papliūpose. Šiam tikslui pasiekti buvo išskelti šie uždaviniai:

Uždaviniai:

1. Sukonstruoti šviesolaidinę lazerinę sistemą, skirtą impulsų trukmės derinimui nuo keliasdešimt iki kelių šimtų pikosekundžių trukmės, panaudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtru.
2. Teoriškai įvertinti, impulsų trukmės derinimo galimybes panaudojant aktyvią šviesolaidinę kilpą.
3. Eksperimentiškai išmatuoti trukmės derinimo diapazoną bei įvertinti impulsų laikinės gaubtinės formą.
4. Pademonstruoti trumpųjų (iki 10 ns) ir ilgųjų (nuo 20 ns iki 500 ns) papliūpų formavimą naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą.
5. Pademonstruoti trumpųjų ir ilgųjų GHz papliūpų amplitudžių gaubtinės valdymo galimybes keičiant stiprinimo sąlygas aktyviojoje šviesolaidinėje kilpoje.
6. Parodyti GHz papliūpos impulsų amplitudžių gaubtinės formos valdymo galimybes naudojant išorinį valdiklį – savavališkos bangos formos generatorių.
7. Realizuoti pavienių impulsų amplitudžių valdymą GHz impulsų papliūpose naudojant išorinį valdiklį – savavališkos bangos formos generatorių.

Šiems uždaviniams įgyvendinti buvo surinktos dvi šviesolaidinės lazerinės sistemos, kurias sudaro aktyvioji šviesolaidinė kilpa ir keli akustooptiniai modulatoriai. Pirmoji sistema yra pilnai šviesolaidinė, skirta impulsų trukmės valdymui. Antroje sistemoje papildomai naudojamas savavališkos bangos formos generatorius bei kelios stiprinimo pakopos. Rezultatų charakterizavimui buvo naudojami standartiniai prietaisai: oscilografas, fotodiodas, spektrometras, autokoreliatorius bei galios matuoklis.

Literatūros apžvalga

1.1. Impulso plėtimo būdai

1.1.1. Impulso plėtimas naudojant vėlinimo linijas

Impulso trukmė gali būti keičiama naudojantis pluošto dalikliais ir vėlinimo linijomis [10]. Impulso plėtimo technologija, naudojanti tik vėlinimo linijas, yra pasyvi ir naudojama plečiant nanosekundinius impulsus. Vėlinimo linijos gali būti įvairių konfigūracijų, trikampio, keturkampio, deimanto formos [10].

Tokio plėtimo pavyzdys pavaizduotas 1 pav. Impulsas kritęs į pluošto daliklį dalinamas į dvi dalis: pirmoji atsispindi, o sekančioji sklinda į vėlinimo liniją [11]. Impulsas sklindantis vėlinimo linijoje yra paslenkamas laike kito impulso atžvilgiu. Prasklidus vėlinimo liniją abu impulsai yra perklojami laike taip sudarant vieną prailgintą impulsą. Svarbi savybė yra ta, jog vėlinimas turi būti mažesnis nei impulso trukmė, tam, kad vienai iš kopijų prasklidus vėlinimo liniją impulsai vis dar persiklotų laike ir bendrai sudarytų vieną impulsą. Svarbiausi šios technologijos parametrai yra pluošto daliklio atspindžio koeficientas, vėlinimo linijos ilgis, lazerinio impulso erdvinis pluošto stabilumas ir pluošto skėstis. Vėlinimas (τ) priklauso nuo optinio kelio (L) vėlinimo linijoje ir šviesos greičio (c):

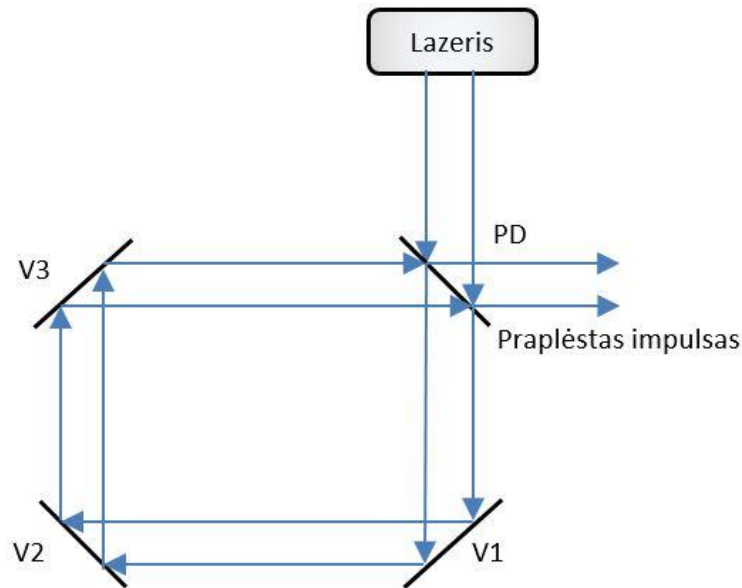
$$\tau = \frac{L}{c} \quad (1)$$

Spinduliuotės dalis cirkuliuojanti vėlinimo linijoje yra periodiškai sujungama su krentančia spinduliuote, tai reiškia, jog kiekvienas sekantis kritęs impulsas yra vis labiau praplečiamas, o jo amplitudė yra vėl dalinama. Taigi pirminis didelės amplitudės impulsas yra dalinamas į mažesnių amplitudžių ilgėjančių impulsų seką:

$$P(t) = Rp(t) + \sum_{n=1}^{\infty} R^{n-1}(1-R)^2 p(t - n\tau) \quad (2)$$

Čia: $P(t)$ - bendra išėjimo galia, $p(t)$ - į pluošto daliklį kritusio impulso galia, R - pluošto daliklio atspindžio koeficientas, n - apėjimų skaičius per vėlinimo liniją, τ - vėlinimas.

Tokios konfigūracijos optiniai plėstuvai su vėlinimo linijomis, gali išplėsti impulsus, kurių pradinė impulso trukmė yra nanosekundžių eilės (1 pav.). Norint plėsti subnanosekundinius impulsus galima naudoti Fabry-Perot interferometrus [11], kurie susideda iš dviejų arti vienas kito esančių veidrodžių, turinčių didelius atspindžio koeficientus (~98%). Plėtimo laipsnis tokia technologiniame išpildyme priklauso nuo atstumo tarp veidrodžių ir jų atspindžio koeficiento. Tokiu būdu gali būti plečiami impulsai, kurių pradinė impulso trukmė siekia kelis šimtus pikosekundžių [11].



1 pav. Impulso plėtimas naudojant vėlinimo liniją [10].

Pluošto skėstis gali sukelti tam tikrų iššūkių, kadangi vėlinimo linija keliaujančio besiplečiančio pluošto diametras gali tapti didesnis nei naudojamos optikos diametras. Tam, kad išspręsti šį trūkumą, gali būti naudojami konfokaliniai optiniai impulso plėstuvai (*angl. confocal optical pulse stretcher (COPS)*) [12]. Konfokaliniam optiniam impulsų plėstuve pluošto skėstis kompensuojama dėl konfokalinės plėstuvo prigimties, naudojant įgaubtus veidrodžius. Abiejų veidrodžių židinio nuotolis yra vienodas ir jame yra statomas pluošto daliklis. Vėlinimas tokioje konfigūracijoje priklauso nuo veidrodžių židinio nuotolio f ir šviesos greičio c :

$$\tau = \frac{4f}{c} \quad (3)$$

Išėjimo galia apibrėžiama pagal anksčiau apibrėžtą lygtį (2).

Pasyviame impulsų plėstuve kiekvieną kartą apėjus vėlinimo liniją, galia yra dalinama pusiau, taip gaunama seka su mažėjančios amplitudės impulsais. Tokia plėstuvo savybė

apriboja plėtimo laipsnį. Tačiau impulso plėtimas, naudojant vėlinimo linijas, gali būti ir aktyvus. Aktyviame plėtimo metode, vėlinimo linijoje yra integruojamas papildomas stiprintuvas, kuris kiekvieną kartą impulsui apėjus vėlinimo liniją jį sustiprina. Aktyvaus tipo plėstuvai yra ženkliai efektyvesni nei pasyvaus tipo ir gali pasiūlyti dvigubai didesnę impulso plėtimo diapazoną.

1.1.2. Impulso plėtimas naudojant netiesines medžiagas rezonatoriuje ar elektrooptinius procesus

Impulsų trukmės valdymas naudojant netiesines medžiagas yra dažniausiai naudojamas lazeriuose, kurie veikia kokybės moduliacijos veikoje. Lazeriai dirbantys kokybės moduliacijos režime tipiškaai generuoja impulsus, kurių trukmė yra dešimčių nanosekundžių eilės. Kokybės moduliacijos veikoje dirbančių lazerių trukmę galima valdyti į rezonatoriaus vidų patalpinus netiesinę medžiagą. Netiesinės medžiagos, tai tokios, kurių sugertis netiesiškai didėja augant šviesos intensyvumui.

Netiesinei medžiagai esant rezonatoriuje, jame patiriami nuostoliai taip pat pradeda augti netiesiškai, kas lemia ilgesnę formuojamo impulso trukmę. Nuo naudojamos netiesinės medžiagos ir lazerio intensyvumo priklauso, kokie procesai joje vyksta: daugiafotonė sugertis, harmonikų generacija, parametrinė generacija ar stimuliuota sklaida [1].

Daugiafotonė sugertis tai netiesinis procesas, kurio metu medžiaga yra sužadinama sugerdami du ar daugiau fotonų vienu metu. Daugiafotonė sugertis auga didėjant lazerinės spinduliuotės intensyvumui. Daugiafotonės sugerties naudojimas plečiant impulso trukmę turi privalumą, jog medžiagos atsakas yra greitas, dėl ko impulso plėtimas gali būti didelis ir impulso gaubtinė išlaikoma glotni. Impulso trukmė gali būti plečiama šimtus kartų [3].

Antros harmonikos generacija yra netiesinis procesas, kurio metu netiesinėje medžiagoje yra sugeriami du tokio pačio dažnio fotonai ir išspinduliuojamas vienas dvigubai didesnio dažnio fotonas. Patalpinus netiesinę medžiagą, kurioje generuojama antroji harmonika, lazerio rezonatoriuje yra sukuriama netiesinei nuostoliai, dėl to ilgėja generuojamo impulso trukmė. Antros harmonikos naudojimas impulso plėtimui yra geras metodas, kuomet antrąją harmoniką norima naudoti lazerio išėjime, nes impulso plėtimas yra atliekamas be papildomų nuostolių. Pasinaudojant antros harmonikos generacija impulsas gali būti išplečiamas dešimtis kartų [4].

Impulsų plėtimas išnaudojant elektrooptinius procesus paremtas grįžtamojo ryšio elektrine grandine [2]. Elemento, kuriuo moduluojama rezonatoriaus kokybė (Pokelso ar Kerro celėse), nuostolių sumažėjimo trukmė yra lėtinama, dėl to ilgesnį laiką yra generuojami impulsai, jų trukmė yra ilgesnė. Kokybės moduliacijos veikos pradžioje rezonatorius yra uždarytas – jame yra dideli nuostoliai. Dideli nuostoliai pasiekiami suteikiant didelę įtampą elektrooptiniam prietaisui, tam jog užpildos apgraža pasiektų pakankamai didelę vertę. Tuomet įtampa yra sumažinama, rezonatoriaus kokybė pagerėja ir sukaupta energija yra išspinduliuojama stipraus impulso pavidalu. Naudojant grįžtamojo ryšio elektrinę grandinę galime sulėtinti šį procesą, taip kad energija būtų išspinduliuojama per ilgesnį laiko tarpą – prailginant impulso trukmę. Tam rezonatoriuje yra talpinamas papildomas pluošto daliklis, kuris atspindi iki 10% spinduliuotės. Atspindėta spinduliuotė patenka į fotodetektorius ir pagal jo registruojamą signalą yra koreguojama įtampa tenkanti elektrooptiniam prietaisui, tokiu būdu kontroliuojant impulso trukmę ir jo formą. Plėtimas gali būti pasiekiamas iki šimtų kartų.

1.1.3. Dispersinis impulsų plėtimas

Ultratrumpųjų impulsų atveju dažniausiai naudojamas dispersinis impulso plėtimas. Dispersiniai metodai yra naudojami, dėl to, nes ultratrumpų impulsų spektro pločiai yra dideli, taigi dispersija daro didelę įtaką impulso trukmei. Impulsų plėtimui yra naudojamos įvairios dispersinių optinių elementų konfigūracijos, kuriose atsiranda skirtingas vėlinimas, skirtingiems bangos ilgiams. Impulsai sklindantys per dispersines terpes tampa faziškai moduluoti ir jų trukmė išplinta, nes spektriniai komponentai sklinda skirtingu greičiu. Optinių elementų dispersija gali būti teigiama arba neigiama. Teigiamos dispersijos atveju didesnio bangos ilgio spektriniai komponentai juda greičiau nei mažesnio bangos ilgio. Neigiamos dispersijos atveju yra atvirkščiai [13]. Faziškai moduluoti impulsą galima pasitelkiant skirtingus optinius elementus: šviesolaidį, prizmių porą, difrakcinę gardelę, čirpuotą šviesolaidinę arba tūrinę Brego gardelę.

Paprasčiausias būdas praplėsti impulsą dėl fazinės moduliacijos yra pasinaudojant šviesolaidžiu ir jo grupinių greičių dispersija. Impulsų trukmės praplėtimui iki šimtų pikosekundžių trukmės gali būti naudojami šviesolaidžiai, kurių ilgis yra keli šimtai metrų. Tačiau metodas turi trūkumų. Pirmiausiai patiriami nuostoliai šviesolaidyje, ypač tais atvejais kai naudojami šviesolaidžio ilgiai yra itin dideli. Taip pat naudojama smailinė galia negali būti

didelė, norint išvengti nepageidaujamų netiesinių efektų. Galiausiai faziškai moduluojant impulsą šviesolaidyje yra sunku kontroliuoti aukštesnių eilių dispersiją.

Naudojant difrakcines gardeles galima pasiekti ženkliai didesnius plėtimo laipsnius. Pradinė impulso trukmė gali padidėti tūkstančius kartų. Impulsų plėstuvas paremtas difrakcinių gardelių technologija leidžia realizuoti tokį impulso plėtimą. Impulsas, difragavęs nuo pirmosios gardelės išsiskiria į spektrines komponentes. Šios skirtingos spektrinės komponentės difraguoja skirtingais kampais ir nukeliauja skirtingą optinį kelią. Kirtus antrąją gardelę, spektrinės komponentės vėl yra surenkamos į lygiagrečią poziciją [4]. Tačiau dėl skirtingų spektrinių komponentų nueito skirtingo kelio - impulso trukmė yra išplečiama. Dispersinio plėtimo būdu, kuriame naudojamos tik dvi difrakcinės gardelės, galima gauti tik neigiamą dispersiją. Tačiau papildomai pasinaudojus lęšių poromis įmanoma pasiekti ir teigiamą dispersiją.

Didelis impulso plėtimas gali būti realizuojamas pasitelkiant čirpuotas šviesolaidines arba tūrinės Brego gardeles. Brego gardelės yra skaidrūs optiniai elementai periodiškai kintančiu lūžio rodikliu. Skirtingi bangos ilgiai yra atspindimi skirtingame medžiagos gylyje, taip sukuriant didelį spektrinių komponentių vėlinimą. Dėl pasiekiamos didelės dispersijos impulsai gali būti stipriai plečiami. Šviesolaidinių Brego gardelių privalumas yra toks, kad jos gali būti lengvai integruojamos šviesolaidinėse sistemose, tačiau tūrinės Brego gardelės yra atsparios didesnei smailinei galiai. Gaminant čirpuotas Brego gardeles aukštesnių eilių dispersija gali būti tiksliai kontroliuojama. Taigi gardelė gali būti gamina taip, kad kompensuotų visą sistemos dispersiją ir atitiktų naudojamą impulsų spaustuvą.

1.2. Spektriškai riboti impulsai ir faziškai moduluoti impulsai

Spektriškai riboti impulsai, pasižymi minimalia trukme nagrinėjamam impulsų spektrui. Spektriškai ribotų impulsų atveju visos spektrinės komponentės, esančios po impulso gaubtine, turi pastovią fazę. Tokio tipo impulsai yra dažniausiai generuojami sinchronizuotų modų veikoje [1]. Gaunama minimali trukmė yra apibrėžiama impulso trukmės ir spektro pločio sandaugos (*angl. time-bandwidth product*). Ši sandauga priklauso nuo impulso formos, pavyzdžiui Gausiniam impulsui yra lygi 0.441, o sekanto impulsui 0.315 [13]. Taigi spektriškai riboto impulso spektras ir impulso trukmė yra vienas nuo kito priklausantys dydžiai. Sumažėjus impulso spektro pločiui, spektriškai riboto impulso trukmė turi didėti. Gausinio

Impulso trukmės priklausomybė, spektriškai riboto impulso atveju, nuo spektro pločio nusakoma (4) priklausomybe:

$$\tau_{FWHM} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{1}{\Delta \lambda_{FWHM}} \quad (4)$$

čia: τ_{FWHM} – impulso trukmė, $\Delta \lambda_{FWHM}$ – spektro plotis.

Faziškai moduluoti impulsai yra tokie, kurių spektrinės komponentės, esančios po impulso gaubtine, yra skirtingų fazių. Fazinė moduliacija nulemia ir impulso nešančiojo dažnio ω_0 moduliacijas. Nešančiojo dažnio kitimo laike priklausomybę nuo fazės galime aprašyti lygtimi [14]:

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\varphi}{dt} \quad (5)$$

čia: $\omega(t)$ – dažnis, φ – fazė t – laikas

Kvadratinės fazinės moduliacijos atveju dažnio deviacija yra nusakoma:

$$\delta\omega = \omega - \omega_0 = \frac{2\gamma_0}{\tau_0^2} t \quad (6)$$

čia: γ_0 - fazinės moduliacijos parametras.

Fazinės moduliacijos parametras gali būti teigiamas arba neigiamas. Taigi kvadratinė fazinė moduliacija sukuria impulso nešančiojo dažnio tiesinę moduliaciją. Mokslinėje spaudoje ši fazinė moduliacija vadinama čirpu, o impulsai – faziškai moduluotais arba čirpuotais [14]. Kai fazinės moduliacijos parametras yra teigiamas, impulso priekyje būna didesnio bangos ilgio spektriniai komponentai, gale – mažesnio. Impulsų spektras yra praturtinamas naujais dažnio komponentais.

Spektriškai riboti ir faziškai moduluoti impulsai skiriasi savo savybėmis, panaudojimu ir valdymu. Faziškai moduluotų impulsų trukmės valdymas, iš esmės, gali būti laikomas tolydžiu, kai valdymui naudojamos čirpuotos šviesolaidinės Brego gardelės ir valdoma jų dispersija keičiant temperatūros pasiskirstymą išilgai gardelės. Impulso valdymo žingsnis priklauso nuo to, kaip tiksliai įmanoma valdyti temperatūrą, tai yra kaip tiksliai galime keisti dispersiją. Valdant faziškai moduluoto impulso trukmę naudojant kompresorių išderinimą,

valdymas taip pat gali būti tolydus ir panašiai kaip ir prieš tai minėtu atveju, žingsnis priklauso nuo to, koku žingsniu galime mechaniškai išderinti kompresorių [9].

Faziškai moduluoto impulso spektro plotis yra ženkliai platesnis nei spektriškai riboto impulso, kai jų trukmės yra vienodos. Sąlyginis spektro platumas yra nulemtas fazinės moduliacijos parametro γ .

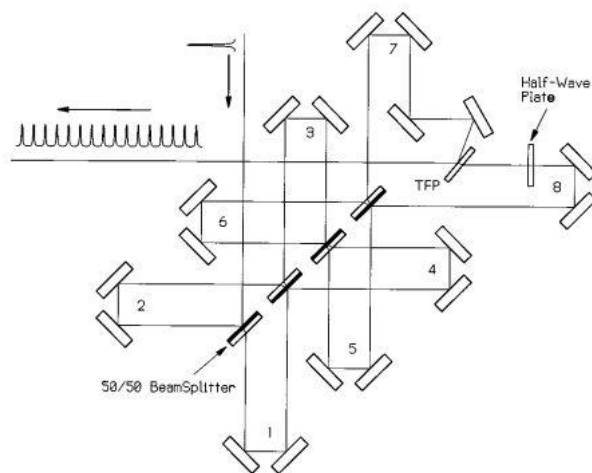
Laikine prasme, faziškai moduluoto impulso gaubtinės forma atitinka jo spektro formą. Tai gali lemti impulso gaubtinės moduliacijas, kai moduliacijų yra spektro gaubtinės formoje. Tuo tarpu spektriškai ribotų impulsų forma, priklauso nuo jo spektro formos. Jei ši forma yra Gausinė tuomet ir gaunamo impulso forma turi išlikti Gausinė.

Stiprinant faziškai moduluotus impulsus jų impulso gaubtinės forma yra stipriai deformuojama [15]. Deformacijos vyksta dėl to, kad spektrinės komponentės, esančios po impulso gaubtine patiria skirtingą stiprinimą, kadangi yra išsidėsčiusios skirtingose impulso gaubtinės dalyse. Spektrinės komponentės, esančios impulso priekyje yra stiprinamos labiau nes jos patiria nenuskurdintą stiprinimą. Skirtingas stiprinimas lemia impulso gaubtinės deformacijas ir spektro slinkimąsi į priekyje esančių spektrinių komponentių pusę. Spektriškai ribotų impulsų gaubtinė stiprinant išlieka artima Gauso formai, nes skirtingos spektrinės komponentes nepatiria skirtingo stiprinimo, kadangi jos yra sufazuotos po impulso gaubtine.

1.3. GHz impulsų pasikartojimo dažnio generavimas naudojantis laisvos erdvės elementais

1.3.1. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant Mikelsono interferometrus

Vieni pirmesnių metodų generuojant GHz impulsų pasikartojimo dažnius yra pagrįsti veikimu laisvoje erdvėje. Pirmieji metodai dažniausiai buvo pagrįsti pradinio impulso dalinimu ir impulsų vėlinimu. Vienas iš metodų yra naudoti kelis Mikelsono interferometrus [7]. Pirminis impulsas yra dalinamas į dvi lygias impulso kopijas. Viena padalinto impulso šaka yra pavėlinama kitos šakos atžvilgiu. Abiejų šakų impulsai vėl suvedami erdvėje ta pačia sklidimo kryptimi. Laikinis tarpas tarp suformuotų dviejų impulsų yra lygus įgytam vėlinimui tarp impulsų. Tokiu būdu galima gauti dviejų impulsų papliūpą su itin dideliu impulsų pasikartojimo dažniu. Jei norima turėti daugiau impulsų papliūpoje, galima naudoti keletą nuoseklių Mikelsono interferometrų.



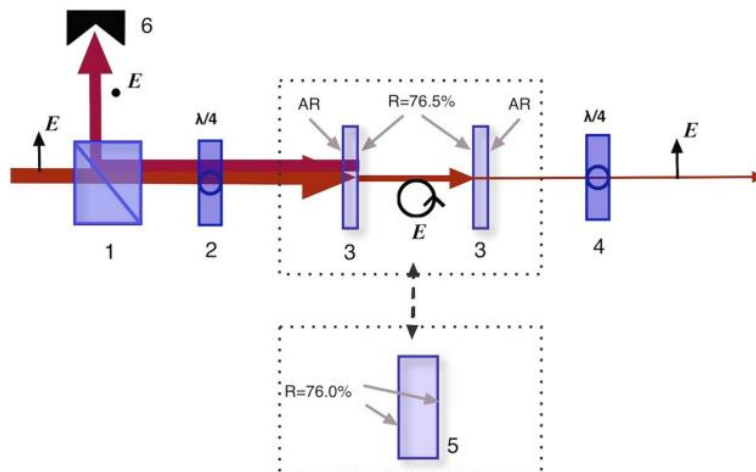
2 pav. GHz papliūpos formavimas naudojant nuoseklius Mikelsono interferometrus [7].

2 pav. yra pavaizduota GHz papliūpų formavimo schema sudaryta iš 4 Mikelsono interferometrų. Joje yra formuojama 16 impulsų papliūpa su 3 ps atskyrimu tarp impulsų, kas atitinka 333 GHz impulsų pasikartojimo dažnį [7].

1.3.2. GHz papliūpų formavimas naudojant Fabry-Pero interferometrus

Fabry-Pero interferometrai taip pat gali būti naudojami GHz impulsų pasikartojimo dažnių formavimui [16]. Fabry-Pero interferometrai yra patrauklūs, nes jų konstrukcija yra kompaktiška palyginus su kitais interferometrinių metodais ir jais galima formuoti impulsų sekas su itin mažu laikiniu atskyrimu tarp impulsų. Taip pat Fabry-Pero interferometrai suteikia galimybę valdyti impulsų pasikartojimo dažnį, nes šis priklauso nuo interferometro ilgio.

Naudojant Fabry-Pero interferometrus galima sukurti valdomą impulsų atskyrimą nuo 10 ps iki 8 ns, tokia schema yra pavaizduota 3 pav. [16]. Tokiam dideliame impulsų atskyrimo laiko intervalui pasiekti gali būti naudojami du interferometrai: vienas sukurti impulsų atskyrimui nuo 70 ps iki 8 ns, o kitas, ženkliai siauresnis, sukurti atskyrimui nuo 10 ps iki 70 ps, taip bendrai gaunant laiko intervalą nuo 10 ps iki 8 ns.

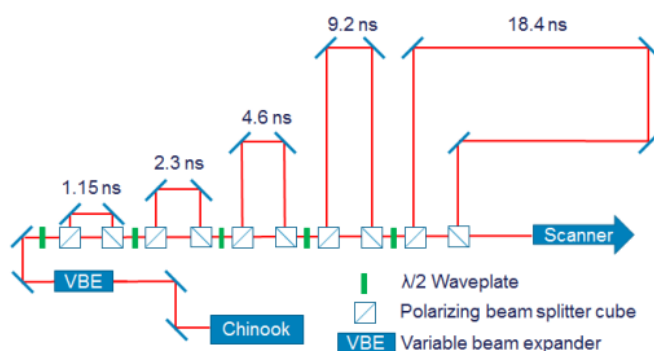


3 pav. GHz papliūpos formavimas naudojant Fabry-Pero interferometrus [16].

Ilgesniam impulso atskyrimui naudotas derinamas Fabry-Pero interferometras sudarytas iš dviejų plokščių, pusiau pralaidžių dielektrinių veidrodžių. Veidrodžiai yra tik dalinai pralaidūs, tai reiškia, kad dalis impulso atsispindi nuo vidinių paviršių. Taigi, impulsas yra užvėlinamas taip formuojant GHz pasikartojimo dažnio impulsų seką. Derinant atstumą tarp šių veidrodžių galima valdyti impulsų atskyrimo laiką arba pasikartojimo dažnį. Mažesniame impulsų atskyrimo laike formuoti buvo panaudota lydyto kvarco plokštelė, kurios paviršiai taip pat buvo tik dalinai pralaidūs, taip sukuriant ypač mažo ilgio Fabry-Pero interferometrą. Keičiant šios plokštelės plotį nuo 1 iki 7 mm buvo pasiektas impulsų laikinis atskyrimas nuo 10 iki 70 ps.

1.3.3. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant vėlinimo linijas

GHz pasikartojimo dažnio impulsų sekoms kurti laisvoje erdvėje galima pasinaudoti keliomis vėlinimo pakopomis [6]. Veikimo principas yra toks pat kaip naudojantis Mikelsono interferometru. Didelio pasikartojimo dažnio impulsų sekos yra kuriamos, pirmiausia, atliekant pirminį impulso dalinimą į dvi lygias dalis. Vienam iš dviejų suformuotų impulsų yra suteikiamas vėlinimas kito atžvilgiu. Suvedus impulsus į tą pačią sklaidimo kryptį jie jau sklinda su laikiniu atskyrimu, kuris lygus suteiktam vėlinimui. Impulsų skaičius tokioje sekoje yra didinamas naudojant kelias nuoseklias vėlinimo linijas. Kiekvienos sekančios pakopos



4 pav. GHz papliūpų formavimas naudojant 5 nuoseklias vėlinimo linijas [6].

vėlinimas turi būti padvigubintas [6]. GHz papliūpų formavimo schema, naudojanti vėlinimo linijas, yra pavaizduota 4 pav. Naudojant vėlinimo linijas buvo generuojama 0.864 GHz pasikartojimo dažnio papliūpa, iš pradinio 27 MHz impulsų pasikartojimo dažnio. Vėlinimo intervalai tarp impulsų buvo 1.15 ns.

Vienas iš pagrindinių metodų trūkumų naudojančių vėlinimo linijas yra tai, jog amplitudės papliūpoje yra dažnai nevienodos dėl skirtingų patiriamų nuostolių tarp vėlintų ir nevėlintų impulsų. Taip pat kuo didesni skaičių impulsų norima turėti papliūpoje, tuo jų amplitudė bus mažesnė. Kitas trūkumas yra tai, kad formuojant ilgos trukmės papliūpas optinė schema sudėtingėja. Optinėje schemoje atsiranda daugiau elementų, gali būti sunku ją derinti, schema tampa jautri išderinimui.

1.4. Šviesolaidiniai GHz impulsų papliūpų formavimo būdai

1.4.1. GHz pasikartojimo dažnio impulsų sekos formavimas naudojantis moduliacijų nestabilumu

Pasinaudojant moduliacijų nestabilumo efektu galima kurti impulsų sekas, kurių pasikartojimo dažnis yra šimtai GHz [17]. Moduliacijų nestabilumas (*angl. modulation instability (MI)*) – procesas, kurio metu nuolatinės veikos spinduliuotė virsta impulsine. Fazinė moduliacija lemia spektro plėtimąsi, tuomet šios naujos spektrinės komponentės yra stiprinamos dėka stiprios nuolatinės veikos spinduliuotės. Stiprinimas yra simetrinis centrinio dažnio atžvilgiu ir stiprinimo maksimumai yra gaunami paslinktame dažnyje:

$$\Omega_{max} = \pm \sqrt{\frac{2\gamma P_0}{|\beta_2|}} \quad (7)$$

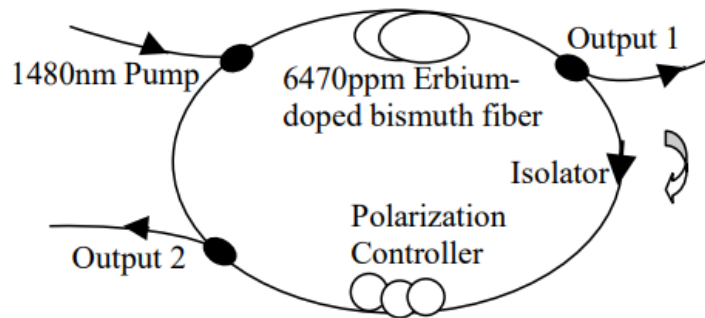
čia: γ yra netiesinis koeficientas, P_0 - spinduliuotės galia, β_2 - grupinio greičio dispersijos koeficientas.

Didžiausias stiprinimas gaunamas ties dažniais $\omega \pm \Omega_{max}$ ir tokiu būdu yra formuojama impulsinė seka, kurios dažnis:

$$f = \frac{\Omega_{max}}{2\pi} \quad (8)$$

Šis efektas yra pastebimas, kai didelio intensyvumo spinduliuotė sklinda vienamodžiam šviesolaidyje, veikiančiame anomalios dispersijos srityje. Procesą taip pat galima apibūdinti kaip keturbangį dažnių maišymąsi, tarp stiprios nešančiojo dažnio ω bangos ir dviejų šalutinių bangų su dažniais $\omega \pm \Omega_{max}$, dėl to, kad šioms bangoms dalinai tenkinama fazinio sinchronizmo sąlyga [18]. Periodinis bangų maišymasis sukelia nešančiojo dažnio intensyvumo moduliacijas, tai yra sukuria impulsus, kurių pasikartojimo dažnis gali siekti šimtus GHz.

Suderinus šviesolaidinio lazerio rezonatoriaus ilgį taip, jog rezonatoriaus apėjimo laikas būtų MI generuojamų impulsų n -osios eilės harmonika, galima realizuoti modų sinchronizacijos veiką.



5 pav. Pasyvios modų sinchronizacijos žiedinis rezonatorius veikiantis MI režime [17].

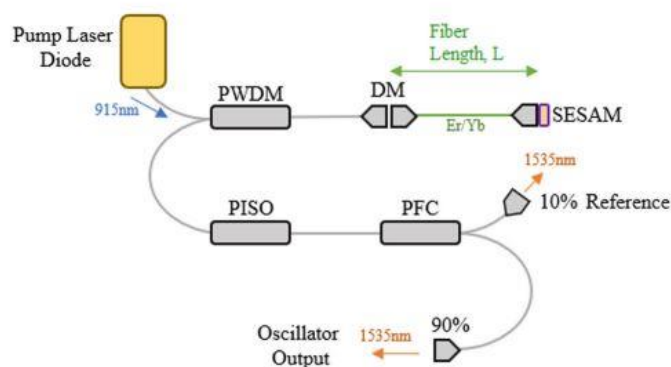
5 pav. yra pateiktas šviesolaidinis žiedinis rezonatorius, veikiantis modų sinchronizacijos veikoje dėka MI. Jame buvo gautas 5 ps laikinis impulsų atskyrimas arba 660 GHz pasikartojimo dažnis. Tačiau MI kraštinės stiprinimo sąlygos nulemia tai, jog generuoti impulsus su pasikartojimo dažniu mažesniu nei 100 GHz yra sudėtinga.

Panašų efektą įmanoma pastebėti veikiant ir normalioje dispersijos srityje. Nestabilių moduliacijų efektas gali būti realizuojamas dėka specifinių rezonatoriaus kraštinių sąlygų. Rezonatoriaus charakteristikos gali nulemti fazinį sinchronizmą tarp stiprios nešančiojo dažnio bangos ω ir silpnesnių šalutinių bangų Ω_{max} , kas lemia periodinį energijos perdavimą tarp šių bangų. Šis metodas vadinamas rezonatoriaus krašto indukuotos nestabilios moduliacijos (*angl. cavity induced modulation instability (CIMI)*) [19]. Vienas iš pagrindinių metodikos skirtumų yra tai, kad CIMI atveju nėra priklausomybės nuo dispersijos srities šviesolaidyje. Tokio tipo MI metodikos modifikacija yra ypatinga tuo, kad tokiu būdu galima gauti mažesnius pasikartojimo dažnius (mažiau nei 3 GHz), kas yra neįmanoma įprastame MI veikime.

Tačiau CIMI turi ir trūkumų, pasikartojimo dažnis gali būti valdomas tik keičiant sąlygas rezonatoriuje ir negali būti valdomas jokiais papildomais laikiniais ar spektriniais metodais.

1.4.2. GHz impulsų pasikartojimo dažnio osciliatoriai

Tipinių pasyvios modų sinchronizacijos režimu veikiančių šviesolaidinių osciliatorių pasikartojimo dažnis siekia dešimtis MHz. Impulsų pasikartojimo dažnis priklauso nuo rezonatoriaus ilgio, taigi, norint formuoti didelio pasikartojimo dažnio impulsų sekas, rezonatoriaus ilgis turi būti labai trumpas. Norint gauti 1 GHz impulsų pasikartojimo dažnį, rezonatoriaus ilgis turi būti 10 cm ilgio, o norint gauti 10 GHz šis ilgis jau būtų 1 cm. Tam, jog būtų pasiektas stabilus pasyvios modų sinchronizacijos režimas tokiuose trumpuose rezonatoriuose, kaupinimo sugertis ir stiprinimas turėtų būti itin dideli [8].

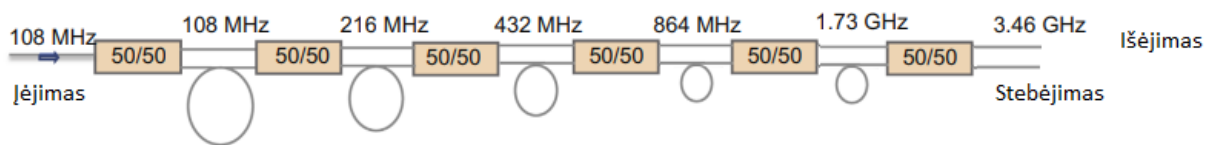


6 pav. GHz pasikartojimo dažnio osciliatorius [8].

6 pav. yra pavaizduota šviesolaidinio lazerio schema, kurioje realizuotas impulsų pasikartojimo dažnis iki 10 GHz [8]. Joje pasyvi modų sinchronizacija realizuota naudojant įsisotinantį puslaidininkinį veidrodį (*angl. semiconductor saturable absorber mirror (SESAM)*). Kaip aktyvi terpė buvo naudojamas šviesolaidis legiruotas erbiu ir iterbiu. Toks dvigubas legiravimas buvo atliekamas tam, kad būtų padidinta kaupinančios spinduliuotės sugertis (>300 dB/m). Kaupinimo spinduliuotė į rezonatorių buvo įvedama naudojantis plokščiomis šviesolaidinėmis jungtimis su tarp jų esančiu dichroniniu veidrodžiu, kuris praleidžia kaupinimo spinduliuotę ir atspindi 99% signalinės spinduliuotės. Tokiu būdu buvo pademonstruoti 1 GHz ir 2.2 GHz impulsų pasikartojimo dažniai. Didesnį impulsų pasikartojimo dažnį riboja SESAM pažeidimo slenkstis. Didėjant impulsų pasikartojimo dažniui, didėja signalo galia ir naudojamo kaupinimo galia.

1.4.3. Impulsų pasikartojimo dažnio dauginimas naudojant kaskadinius pluošto daliklius

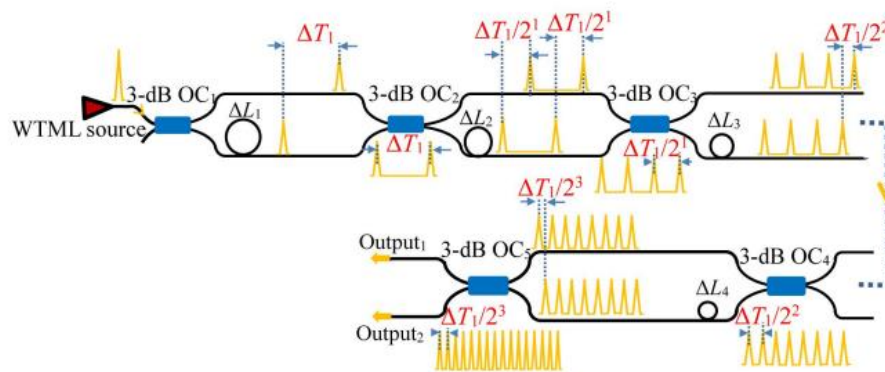
Vienas iš pilnai šviesolaidinių metodų naudojamų GHz pasikartojimo dažnio impulsų sekų realizavimui yra impulsų pasikartojimo dažnio dauginimas naudojant kaskadinius pluošto daliklius (*angl. repetition rate multiplication via cascade couplers (PRRM)*). Pritaikant PRRM metodą įprasta naudoti 50:50 dalinimo santykio šviesolaidinius daliklius. Impulsų pasikartojimo dažnio dauginimas gali būti nusakomas išraiška: $2^{(N-1)}$. Čia N yra šviesolaidinių daliklių skaičius. Pasikartojimo dažnio dauginimas yra realizuojamas dalinant pradinį impulsą į dvi dalis ir vienoje šakoje įvedant vėlinimą, kuris yra lygus pusei periodo tarp impulsų. Suvedus abi šakas atgal į vieną šviesolaidį impulsų pasikartojimo dažnis yra padvigubinamas.



7 pav. 108 MHz pasikartojimo dažnio didinimas iki 3.46 GHz naudojant PRRM [20].

7 pav. yra pateikta 6 pluošto daliklių PRRM sistema, kurioje pradinis 108 MHz pasikartojimo dažnis yra dauginamas iki 3.46 GHz pasikartojimo dažnio [20]. Metodikos trūkumai kyla iš sunkumo užtikrinant pluošto daliklių dalinimo santykio ir vėlinimo tikslumo atsikartojimą kiekvienoje šakoje. Nedideli dalinimo koeficiento skirtumai tarp pluošto daliklių kaskade lemia GHz impulsų sekos amplitudžių variaciją, o vėlinimo paklaidos lemia impulsų periodo neatsikartojimą impulsų sekoje. Išoriniai veiksniai, tokie kaip temperatūra, gali sukelti skirtingą vėlinimo šakų ilgio kitimą, dėl to gali atsirasti impulsų tirtėjimas (*angl. jitter*). Kitas trūkumas atsiranda naudojant ultra trumpus impulsus, nes skirtingą optinį kelią nuėję impulsai patiria skirtingą dispersiją. Tai lemia skirtingą impulsų trukmę pačioje GHz impulsų sekoje. Problema dėl skirtingos patiriamos dispersijos tarp impulsų, nusklidusių skirtingą optinį kelią, gali būti sprendžiama įterpiant papildomus elementus, kurie koreguoja dispersiją [21].

Siekiant pagerinti metodą gali būti pritaikomos papildomos modifikacijos, kurios pašalina kai kuriuos anksčiau minėtus trūkumus. Amplitudžių lygių skirtumas sekoje gali būti koreguojamas įvedant papildomus nuostolius kiekvienoje pluošto daliklio šakoje, taip keičiant dalinimo santykį. Norint sumažinti trukmės tarp impulsų variaciją papliūpoje galima naudoti schemą pavaizduotą 8 pav. Kitaip nei standartinėje PRRM schemoje vėlinimas tarp impulsų, padalintų pirmajame pluošto daliklyje, yra ženkliai mažesnis nei pusė periodo. Toliau sekantys pluošto dalikliai dvigubina pirmojo pluošto daliklio suformuotą pasikartojimo dažnį. Tokiu būdu yra formuojama didelio pasikartojimo dažnio impulsų seka, tačiau yra naudojamas mažesnis kiekis pluošto daliklių. Kuo mažesnis kiekis pluošto daliklių yra naudojamas, tuo mažesnis optinių kelių skirtumas tarp vėlinimo šakų, taigi tuo mažesnis trukmės kitimas.



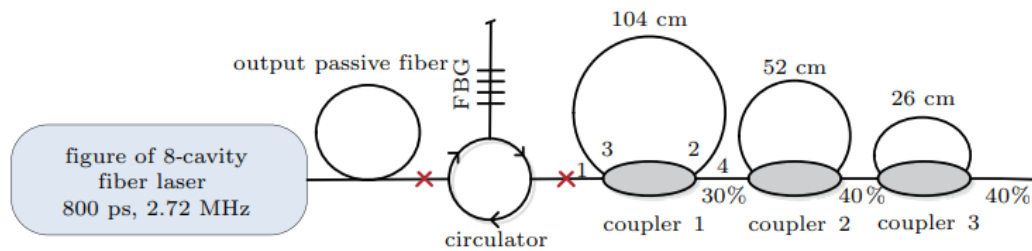
8 pav. 9 MHz dažnio didinimas iki 4.08 GHz naudojant PRRM su 4 pluošto dalikliais [22].

Tokiu būdu buvo pademonstruota, jog naudojant 4 pluošto daliklius iš pradinio 9 MHz pasikartojimo dažnio galima gauti 8 impulsų papliūpą, kurioje impulsus skiria 245 ps, kas reiškia, kad papliūpoje esančių impulsų pasikartojimo dažnis buvo 4.08 GHz [22].

1.4.4. GHz papliūpų formavimas naudojant pasyviausias šviesolaidines kilpas

Formuojant GHz pasikartojimo dažnio impulsų sekas galima panaudoti pasyvias šviesolaidines kilpas. Tai metodika, kurioje kaip ir pasikartojimo dažnio dauginime, naudojami šviesolaidiniai dalikliai. Šiuo atveju yra naudojami 50:50 dalinimo santykio šviesolaidiniai dalikliai, kuriuose viena išėjimo šaka yra jungiama su viena įėjimo šaka. Atsklidęs impulsas į vieną iš daliklio įėjimų yra dalinamas į dvi lygias dalis. Pirmajame išėjime impulsas toliau sklinda optine schema, tačiau antrasis daliklio išėjimas yra sujungtas su antruoju įėjimu, taip suformuojant kilpą. Kilpoje impulsas yra užvėlinimas. Šis vėlinimas yra lygus periodo tarp impulsų ir papildomo vėlinimo sumai. Atsklidus antram impulsui iš pradinės impulsų

pasikartojimo dažnio sekos, kilpoje užvėlintas impulsas atsiduria už antrojo impulso per minėtą papildomą vėlinimą. Tokiu būdu gaunama dviejų impulsų papliūpa su itin mažu laikiniu atskyrimu siekiančiu GHz impulsų pasikartojimo dažnį [23]. Ši dviejų impulsų papliūpa yra vėl dalinama šviesolaidiniame daliklyje. Jai suteikiamas papildomas vėlinimas ir ji atsiduria už trečiojo pagrindinio pasikartojimo dažnio impulso. Impulsų amplitudės formuojamoje papliūpoje yra mažėjančios.



9 pav. GHz papliūpų formavimas naudojant 3 nuoseklias pasyviašias šviesolaidines kilpas [24].

Taip pat gali būti naudojamos kelios nuoseklios kilpos, tam jog būtų kuriama papliūpa su panašia impulsų amplitude. Suderinus sekančių kilpų vėlinimus galima sukurti persiklojančius laike impulsus, kompensuojant energijos praradimą dėl impulsų dalinimo pasyviose šviesolaidinėse kilpose. Naudojant schemą su trimis nuosekliomis šviesolaidinėmis kilpomis (9 pav.) iš pirminio 2.67 MHz pasikartojimo dažnio buvo suformuota 0.79 GHz papliūpa, kurią sudarė 13 impulsų [24].

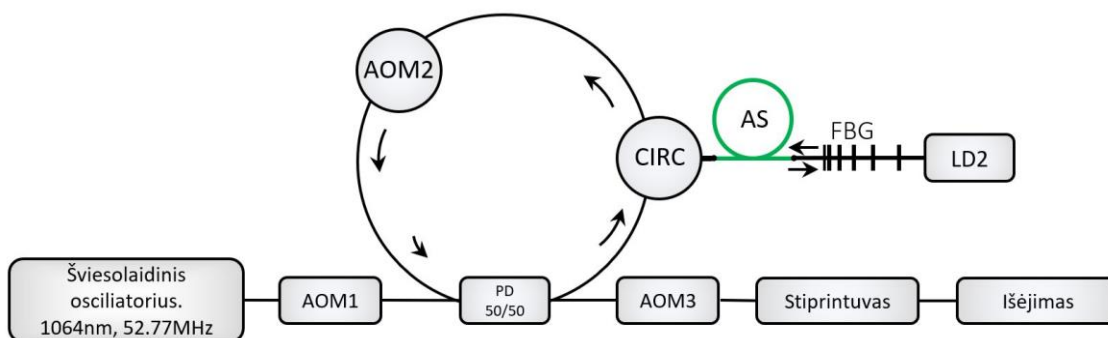
Naudojant pasyviąją šviesolaidinę kilpą generuojant GHz pasikartojimo dažnio papliūpas išlieka problemos, aptartos PRRM metode. Impulso amplitudės papliūpoje yra skirtingų amplitudžių. Šiuo atveju amplitudės mažėja dėl kiekvieno papildomo impulsų padalinimo šviesolaidiniame daliklyje. Pagrindinis metodo trūkumas yra tai, jog naudojantis šiuo metodu negalima formuoti ilgos trukmės (pločio) papliūpų.

2. Eksperimentinė dalis

2.1. Impulsų trukmės valdymas naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtru

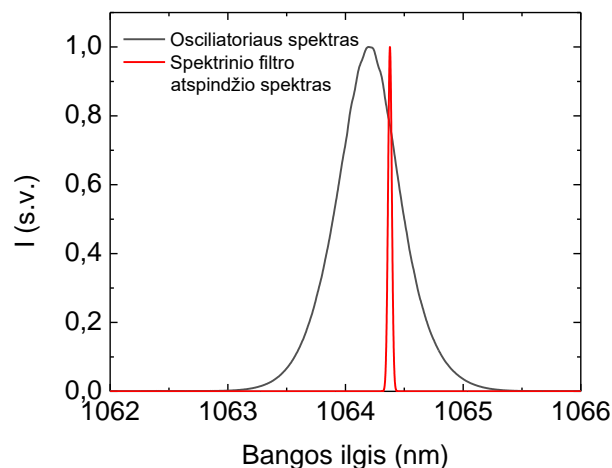
Darbe demonstruojamas impulsų trukmės plėtimas ir valdymas naudojantis aktyviaja šviesolaidine kilpa su integruotu spektriniu filtru [12]. Spektriškai ribotas impulsas patekęs į kilpą yra filtruojamas čirpuotos šviesolaidinės Brego gardelės, taip ženkliai susiaurinant impulso spektro plotį ir dėl to pailginant jo trukmę. Aktyviosios šviesolaidinės kilpos atveju valdymas yra paprastesnis, stabilesnis ir atsparesnis išderinimams, palyginus su kitais minėtais impulso trukmės valdymo metodais. Taip yra, dėl to, kad valdomas akustooptinio modulatoriaus vėlinimas, o ne temperatūra ar mechanikos pozicija.

Naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtru galima pasiekti derinimo diapazoną nuo 50 ps iki 400 ps ir gauti impulsus su glotnia laikine gaubtine. Eksperimentinė šviesolaidinės lazerinės sistemos schema, kurioje panaudota aktyvioji šviesolaidinė kilpa su integruotu spektriniu filtru, pateikiama 10 pav.



10 pav. Eksperimentinės šviesolaidinės lazerinės sistemos schema, kurioje panaudota aktyvi šviesolaidinė kilpa su integruotu spektriniu filtru. AOM1 – pirmasis akustooptinis modulatorius, PD 50:50 – 2x2 3dB pluošto daliklis, CIRC – cirkuliatorius, AS – iterbio jonais legiruotas šviesolaidis, FBG – šviesolaidinė Brego gardelė, LD – lazerinis diodas, AOM2 – antrasis akustooptinis modulatorius, AOM3 – trečiasis akustooptinis modulatorius.

Kaip šaltinis buvo naudojamas šviesolaidinis osciliatorius, kurio centrinis bangos ilgis yra 1064.3 nm, o spektro plotis – 0.6 nm (pavaizduotas 11 pav.). Pradinė osciliatoriaus impulsų trukmė buvo 3 ps. Osciliatorius veikė 52.77 MHz impulsų pasikartojimo dažniu ir spinduliuotės galia buvo 2 mW. Pirmasis akustooptinis moduliatorius (AOM1) pavaizduotas 10 pav., leido valdyti osciliatoriaus impulsų pasikartojimo dažnį. Impulsų pasikartojimo dažnio valdymas reikalingas laikinio tarpo tarp impulsų didinimui. Laikinio tarpo tarp impulsų praplėtimas (pasikartojimo dažnio mažinimas) yra reikalingas tam, kad kiekvienas impulsas galėtų apeiti kilpą bent 50 kartų prieš ateinant naujam impulsui iš osciliatoriaus. Eksperimentinėje sistemoje pasitelkiant AOM1 buvo naudojamas 200 kHz impulsų pasikartojimo dažnis, kas atitinka 5 μ s laikinį atstumą tarp impulsų. Maksimalus impulsų pasikartojimo dažnis (už AOM1), kuriuo galėtų veikti sistema yra 1 MHz, kas atitinka 1000 ns laikinį atstumą tarp pavienių impulsų. Tokiu atveju, tarp šių impulsų gali būti suformuota seka, kurią sudaro 50 impulsų.



11 pav. Osciliatoriaus ir spektrinio filtro spektrai.

Suformuota norimo pasikartojimo dažnio impulsų seka sklinda link aktyviosios šviesolaidinės kilpos. Pirmiausia, naudojant 50:50 šviesolaidinį daliklį, impulsas padalinamas į dvi kopijas, kur viena keliauja link išėjimo, o kita keliauja į kilpą. Kilpoje impulsas yra stiprinamas šviesolaidiniame stiprintuve. Be stiprinimo pakopos aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje nebūtų įmanoma pasiekti minėtų 50 apėjimų šviesolaidine kilpa, dėl didelių impulso patiriamų nuostolių. Šiuos nuostolius daugiausia nulemia kilpoje atliekamas stiprus spektrinis filtravimas, bei kilpoje esančių optinių komponentų nuostoliai. Toliau sustiprintas impulsas yra filtruojamas naudojant šviesolaidinę Brego gardelę, kurios atspindžio spektro plotis pusės maksimalaus intensyvumo lygyje (*angl. full width at half maximum (FWHM)*) yra 0.037 nm. Šis spektrinis filtravimas veikia atspindžio principu - nuo gardelės yra atspindima pradinio impulso

spektro dalis, kuri persikloja su filtruojančios gardelės atspindžio spektru. Spektriškai filtruojant pradinį impulsą yra ženkliai siaurinamas jo spektras. Kadangi impulsas yra spektriškai ribotas, toks ženklus spektro siaurinimas nulemia filtruoto impulso trukmės pailgėjimą. Jau po pirmo aktyvios šviesolaidinės kilpos apėjimo, impulso trukmė buvo prailginta iki ~50 ps.

Osciliatoriaus spektras buvo išmatuotas naudojant spektrometrą *Yokogawa AQ6370D*, kurio spektrinė skyra – 0.02 nm (11 pav.). Tame pačiame grafike taip pat pavaizduotas spektrinio filtro atspindžio spektras (teorinio Gausinio pasiskirstymo kreivė). Osciliatoriaus centrinis bangos ilgis buvo 1064.3 nm, o spektrinio filtro centrinis bangos ilgis, buvo 1064.37 nm. Šiuos centrinius bangos ilgius galime derinti keičiant osciliatoriaus rezonatoriuje naudojamos čirpuotos šviesolaidinės Brego gardelės temperatūrą ir filtro šviesolaidinės Brego gardelės temperatūrą. Verta paminėti, jog šviesolaidinės Brego gardelės, kuri schemoje naudojama kaip spektrinis filtras, centrinis bangos ilgis gali būti laisvai pasirenkamas gardelės gamybos proceso metu.

Spektriškai filtruotas ir sustiprintas impulsas toliau keliauja aktyviaja šviesolaidine kilpa link antrojo akustooptinio modulatoriaus (AOM2), kuris skirtas impulsų sekos valdymui. Tada impulsas sklinda atgal link pluošto daliklio, kur yra dar kartą dalinamas. Vienas impulsas keliauja link išėjimo, kitas - atgal į kilpą, kurioje filtruojamas, taip dar labiau siaurinant impulso spektrą ir ilginant impulso trukmę kiekvieno kilpos apėjimo metu. Pasiekus užsibrėžtą šviesolaidinės kilpos apėjimų skaičių, antrojo akustooptinio modulatoriaus (AOM2) pralaidumas yra sumažinamas iki minimalios vertės – sekos formavimas sustabdomas. Eksperimentinėje sistemoje AOM2 laikinis langas buvo nustatytas taip, jog impulsas kilpą apeitų daugiau nei 50 kartų. Atėjus naujam impulsui iš pirmojo akustooptinio modulatoriaus (AOM1) impulsų sekos formavimas pradamas iš naujo.

Impulsai išėję iš kilpos patenka į trečiąjį akustooptinį moduliatorių (AOM3), kuris išrenka konkretų vieną (ar kelis) impulsus iš visos impulsų sekos, kurią sudaro kintančios trukmės impulsai. Keičiant trečiojo akustooptinio modulatoriaus (AOM3) atsidarymo ir užsidarymo laiką, galima išrinkti impulsus, kuriuos norima charakterizuoti ir naudoti tolimesnėje lazerinės sistemos dalyje. Impulsai buvo pastiprinti papildomame stiprintuve iki 0,13 nJ energijos, pakankamos patogiam impulsų charakterizavimui (laikinės gaubtinės matavimui).

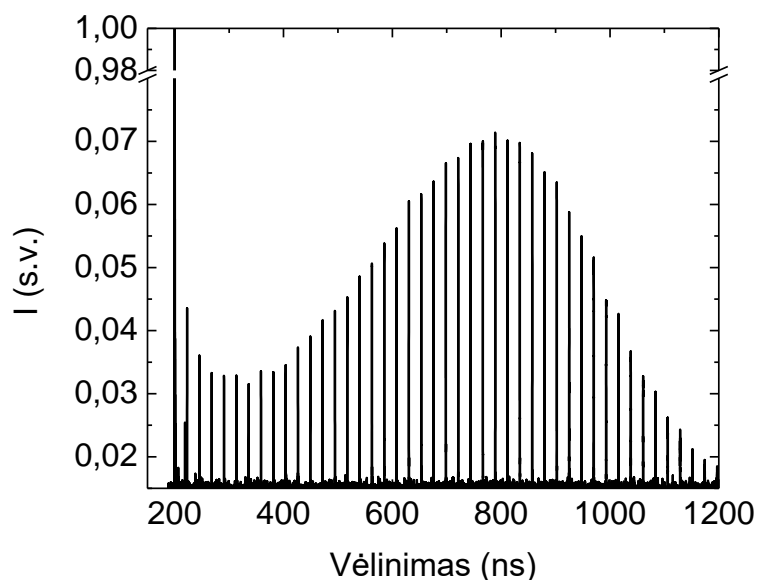
Šioje eksperimentinėje sistemoje (pavaizduotoje 10 pav.), tarpe tarp pagrindinio pasikartojimo dažnio impulsų, yra suformuotos sekos, kuriose impulso trukmė kinta nuo

mažiausios iki didžiausios, kai kiekvienu papildomu impulso apėjimu per kilpą yra siaurinamas jo spektras – didinama jo trukmė.

2.2. Eksperimentiškai išmatuoti rezultatai valdant impulso trukmę naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą

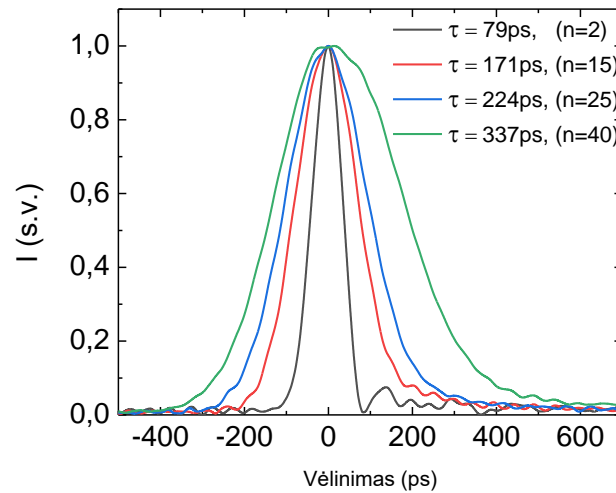
Eksperimentinėje sistemoje, kurioje buvo naudojama aktyvioji šviesolaidinė kilpa su integruotu spektriniu filtru, buvo gautos impulsų sekos, kurias sudarė 48 impulsai. Formuojamų sekų pasikartojimo dažnis – 200 kHz, pasikartojimo dažnis tarp seką sudarančių impulsų 52 MHz. Pirmasis laikinės evoliucijos impulsas yra tas, kuris pirmu etapu buvo padalintas ir nebuvo spektriškai filtruotas, dėl tos priežasties jo smailinis intensyvumas yra ženkliai didesnis nei visų kitų sekančių impulsų. Impulsų vora ir kiekvienas impulsas atskirai buvo matuojami naudojant oscilografą *Tektronix DPO 72004C*, kurio skanavimo greitis yra 100 GS/s, o dažnių juostos plotis 20 GHz. Impulsų trukmių detektavimui buvo naudojamas fotodetektorius *EOT 3500F*, kurio laikinė skyra ~50 ps.

Iš suformuotos impulsų sekos (12 pav.), pasitelkiant AOM3, buvo išrenkamas kiekvienas impulsas atskirai ir matuojami jo parametrai – spinduliuotės galia (įvertinama impulso energija) ir impulso laikinė gaubtinė.



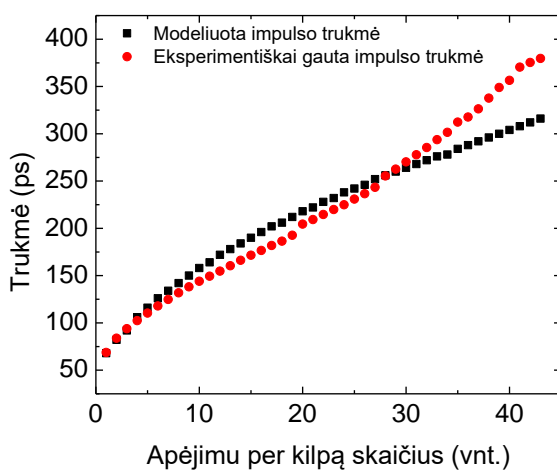
12 pav. Impulsų seka aktyviosios šviesolaidinės kilpos išėjime, kurioje impulsų trukmė kinta nuo 68 ps iki 380 ps.

13 pav. pateiktos impulsų gaubtinės po 2, 15, 25 ir 40 apėjimų aktyvia šviesolaidine kilpa. Impulso trukmė atitinkamai kinta nuo 79 ps (po dviejų apėjimų) iki 337 ps (po 40 apėjimų). Impulsų laikinės gaubtinės pasižymi glotnia laikine forma artima Gausinei.

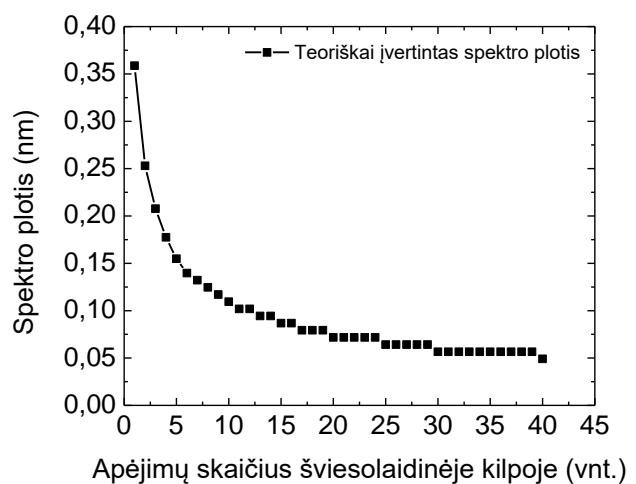


13 pav. Impulsų laikinės gaubtinės.

Trukmės derinimo intervalas buvo pasiektas nuo 68 ps iki 380 ps (14 pav.). Eksperimentiškai išmatuotos impulsų trukmių vertės buvo palygintos su teoriškai įvertintomis impulso trukmėmis. Teorinės trukmės buvo koreguotos įvertinant fotodetektoriaus laikinės skyros daroma įtaka formuotiems impulsams. Tai buvo atliekama atlikus konvoliucijos operaciją tarp teoriškai gauto Gausinio impulso ir fotodetektoriaus atsako funkcijos. Matoma, jog eksperimentiškai gautos trukmės nepilnai atitinka teorinio įvertinimo rezultatus. Tai galėtų



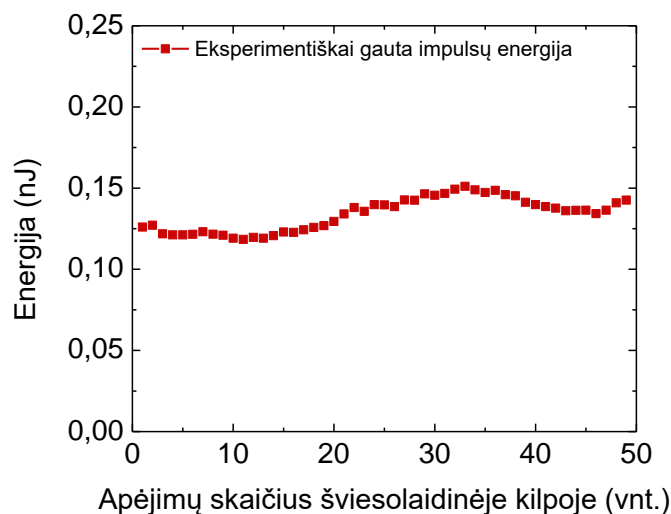
14 pav. Eksperimentinės ir teoriškai įvertintos impulso trukmės priklausomybė nuo apėjimų skaičiaus šviesolaidinėje kilpoje.



15 pav. Teoriškai įvertinto spektro pločio priklausomybė nuo apėjimų skaičiaus šviesolaidinėje kilpoje.

būti siejama su eksperimente naudoto spektrinio filtro atspindžio spektro forma, kuri nėra idealiai Gausinė, kaip teoriniu atveju. Verta paminėti, kad fotodetektoriaus atsako funkcija daro įtaka ir didesnių impulso trukmių matavimams, tačiau kuo didesnė impulso trukmė palyginus su fotodetektoriaus laikine skyra, tuo ši įtaka yra mažesnė.

Taip pat buvo teoriškai įvertintas kiekvieno impulso spektro pločio kitimas, priklausomai nuo impulsų apėjimų skaičiaus šviesolaidinėje kilpoje (15 pav.). Matyti, jog jau po pirmojo apėjimo spektro plotis sumažėjo nuo 0.6 nm iki 0.36 nm. Būtent dėl to jau po pirmojo apėjimo impulso trukmė išauga nuo pradinės 3 ps trukmės iki išmatuotos – 68 ps.



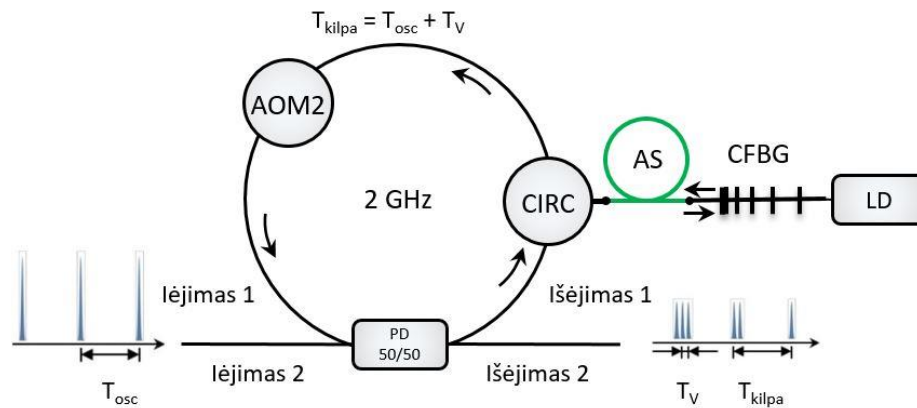
16 pav. Energijos priklausomybė nuo apėjimų skaičiaus šviesolaidinėje kilpoje.

Įvertinta kiekvieno impulso energijos priklausomybė nuo apėjimų skaičiaus aktyvia šviesolaidinė kilpa pateikiama 16 pav. Impulsų energija kinta tarp 0.13 nJ ir 0.15 nJ, kas sudaro apie 15 % energijos kitimą. Šis impulsų energijos kitimas nėra itin didelis ir skirtingos trukmės impulsai, galėtų būti sėkmingai stiprinami lazerinėse sistemose iki kur kas didesnių impulsų energijų.

Taigi, panaudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtru, galima realizuoti platų pradinės impulso trukmės derinimą, siekiantį nuo 68 ps iki 380 ps. Taip pat, impulso gaubtinės formos išlieka artimos Gausinei formai ir jos priklauso nuo filtravimui naudojamos šviesolaidinės čirpuotos Brego gardelės atspindžio spektro formos.

2.3. GHz impulsų papliūpų formavimas naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą

Šiame darbe pademonstruotas GHz papliūpų formavimas naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą, kurios schema nurodyta 17 paveiksle. Šio metodo veikimas paremtas impulsų dalinimu šviesolaidiniame daliklyje, bei impulsų vėlinimu suformuotoje kilpoje.



17 pav. Aktyvios šviesolaidinės kilpos schema. PD 50/50 – 2x2 3 dB šviesolaidinis daliklis, CIRC – cirkuliorius, AS – iterbio jonais legiruotas šviesolaidis, CFBG – čirpuota šviesolaidinė Brego gardelė, LD – lazerinis diodas, AOM2 – antrasis akustooptinis moduliatorius [9].

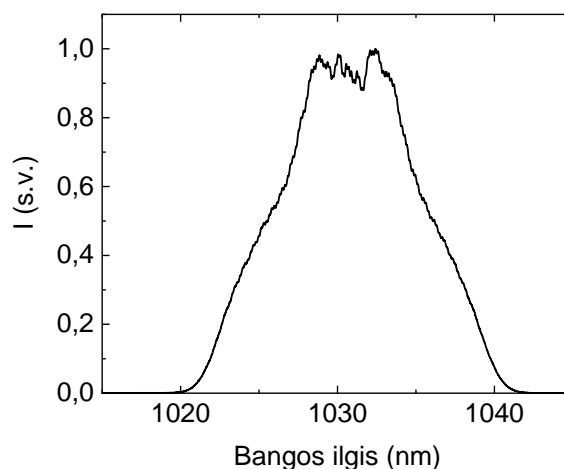
Šioje kilpoje yra naudojami aktyvūs elementai, tokie kaip akustooptinis moduliatorius, iterbio jonais legiruotas šviesolaidis, bei pasyvus elementas - dispersiją kompensuojanti čirpuota šviesolaidinė Brego gardelė. Pradinis impulsas yra dalinamas į dvi replikas 2x2 šviesolaidiniame daliklyje, kurio dalinimo santykis – 50:50. Vienas iš pluošto daliklio išėjimų yra sujungtas su įėjimu, taip formuojant kilpą. Kilpoje sklindantis impulsas yra vėlinamas periodu T_{kilpa} , šio vėlinimo vertė yra lygi periodo tarp pagrindinio impulsų pasikartojimo dažnio T_{osc} ir papildomos vėlinimo dedamosios T_V sumai. Užvėlintas impulsas apėjęs kilpą laike atsiranda už antrojo pagrindinio pasikartojimo dažnio impulso, tokiu būdu suformuojant papliūpą su ženkiai didesniu impulsų pasikartojimo dažniu. Papildoma vėlinimo dedamoji nusako laikinį atskyrimą (taip pat ir impulsų pasikartojimo dažnį) tarp užvėlinto impulso ir antrojo impulso, kuris yra iš oscilatoriaus pasikartojimo dažnio sekos. Sekančiame impulsų papliūpų formavimo etape dviejų impulsų papliūpa vėl dalinama pluošto daliklyje ir patiria tokį patį vėlinimą – atsiranda už trečiojo pagrindinio pasikartojimo dažnio sekos impulso, suformuojama trijų impulsų papliūpa. Toks procesas tęsiasi iki tol, kol kilpoje nebeleidžiama skliti impulsams. Impulsų sklidimo sustabdymas atliekamas sumažinant kilpoje esančio akustooptinio moduliatoriaus (AOM2) pralaidumą. GHz papliūpos formavimas naudojant

aktyviają šviesolaidinę kilpą skiriasi nuo formavimo naudojant pasyvias šviesolaidines kilpas. Joje yra naudojamas AOM2, kuris leidžia valdyti impulsų kiekį formuojamose papliūpose. Keičiant stiprinimo sąlygas stiprinimo pakopoje esančioje aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje, galima gauti vienodos amplitudės impulsus formuotoje papliūpoje, kas yra itin sudėtinga naudojant pasyviają šviesolaidinę kilpą. Taip pat aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje yra naudojama čirpuota šviesolaidinė Brego gardelė, kurios dispersija yra parinkta taip, jog kompensuotų impulso patiriamą dispersiją per vieną apėjimą kilpoje. Tokiu būdu po impulsų suspaudimo galima pasiekti panašią impulsų trukmę suformuotose impulsų papliūpose. Formuojamos papliūpos impulsai gali būti vienodos amplitudės, panašios trukmės bei atstumas tarp impulsų yra identiškas.

2.4. Eksperimentinė schema

Eksperimente naudojama schema susideda iš šviesolaidinio užkrato, impulsų plėstuvo, aktyvios šviesolaidinės kilpos, trijų akustooptinių moduliatorių, bei kelių stiprinimo pakopų. Užkrato impulsų pasikartojimo dažnis siekė 50.35 MHz, toks dažnis atitinka 4.05 m ilgio rezonatorių. Šio užkrato centrinis bangos ilgis yra 1030 nm, spektro plotis FWHM lygyje yra 11 nm (18 pav.) ir spinduliuotės galia 20 mW. Principinė eksperimentinės sistemos schema pateikta 19 pav.

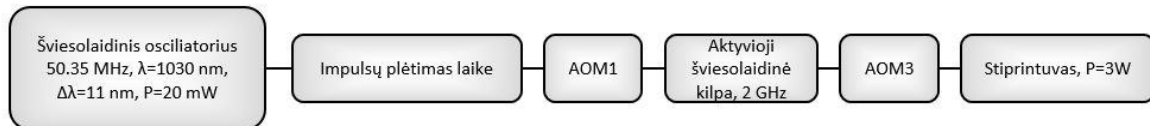
Impulsas buvo išplėstas laike naudojant čirpuotą šviesolaidinę Brego gardelę. Impulsų plėtimas atliktas prieš aktyviają šviesolaidinę kilpą, leidžia sumažinti impulsų intensyvumą ir



18 pav. Užkrato spektras.

išvengti nepageidaujamų netiesinių efektų, impulsus stiprinant šviesolaidiniuose stiprintuvuose.

Pradinis osciliatoriaus generuojamų impulsų pasikartojimo dažnis yra valdomas arba koreguojamas pirmajame akustooptiniame moduliatoriuje (AOM1). Tokia valdymo galimybė yra būtina norint formuoti didelio pločio GHz papliūpas.



19 pav. Eksperimentinė schema. AOM1 – pirmasis akustooptinis moduliatorius, AOM3 – trečiasis akustooptinis moduliatorius.

Eksperimentinėje sistemoje naudojama aktyvi šviesolaidinė kilpa, kurioje yra formuojamos papliūpos. Bendras kilpos šviesolaidžio ilgis buvo tiksliai parenkamas taip, jog bendras kilpos apėjimo laikas atitiktų osciliatoriaus impulsų periodą su papildomu 450 ps vėlinimu. Šis vėlinimas nusako impulsų pasikartojimo dažnį suformuotose papliūpose. Šiuo atveju 450 ps vėlinimas atitinka 2.2 GHz impulsų pasikartojimo dažnį papliūpose. Apėjimo laikas yra tiksliai valdomas keičiant bendrą šviesolaidinės kilpos ilgį. Reikalingas ilgis apskaičiuojamas prie osciliatoriaus rezonatoriaus ilgio pridėdam šviesolaidžio ilgį, kurį šviesa nusklinda per 450 ps, kas atitinka 11.3 cm.

Kilpa susideda iš šviesolaidinio daliklio, dalinančio impulsą į dvi lygias dalis. Kilpoje esanti stiprinimo pakopa yra reikalinga tam, jog būtų kompensuojami visų komponentų, esančių aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje, nuostoliai. Priklausomai nuo stiprinimo lygio šioje stiprinimo pakopoje, galima pasiekti krentančios, lygios arba augančios amplitudės impulsų papliūpas. Čirpuota šviesolaidinė Brego gardelė esanti kilpoje kompensuoja aktyvios šviesolaidinės kilpos šviesolaidžio dispersiją. Dėka to šis metodas gali būti sėkmingai panaudotas ultratrumpųjų impulsų papliūpų formavimui. Galiausiai kilpoje esantis antrasis akustooptinis moduliatorius (AOM2) valdo impulsų skaičių GHz impulsų papliūpoje.

Suformuotos GHz papliūpos patenka į trečiąjį akustooptinį moduliatorių (AOM3), esantį eksperimentinėje grandinėje. Šis moduliatorius atlieka kelias funkcijas. Pirmoji yra išrinkti norimą suformuotą papliūpą. Kiekvienoje sekančioje papliūpoje yra vienu impulsu daugiau, nei praeitoje, pavyzdžiui, formuojant 20 impulsų GHz papliūpą yra gaunama 20 papliūpų seka, kai galutinę sudaro 20 impulsų. Taigi, naudojantis trečiuoju moduliatoriumi galima išsirinkti norimo impulsų skaičiaus papliūpą iš visos papliūpų formavimo sekos. Antroji funkcija – valdyti suformuotų papliūpų amplitudžių gaubtinę naudojant išorinį valdiklį -

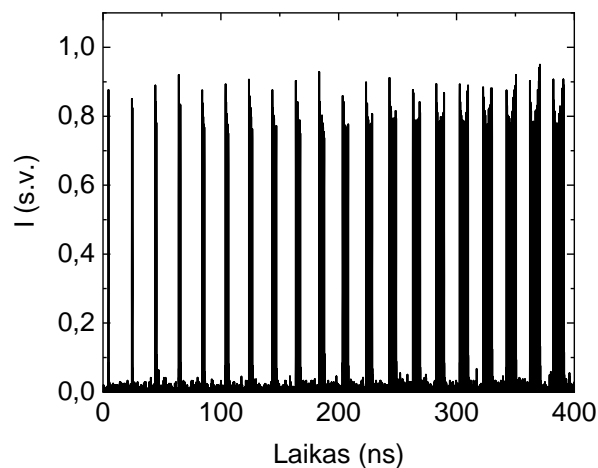
savavališkos bangos formos generatorių (*angl. arbitrary waveform generator (AWG)*). Pasitelkiant AWG yra keičiama akustooptinio modulatoriaus (AOM3) pralaidumo funkcija. Taigi, parenkant specifinę pralaidumo funkciją galima suformuoti įvairių formų GHz papliūpas.

Galiausiai suformuotos, norimo impulsų kiekio, papliūpos pastiprinamos šviesolaidiniame stiprintuve iki 3 W vidutinės lazerinės spinduliuotės galios.

2.5. Papliūpų formavimo mechanizmai

2.5.1. Trumposios papliūpos

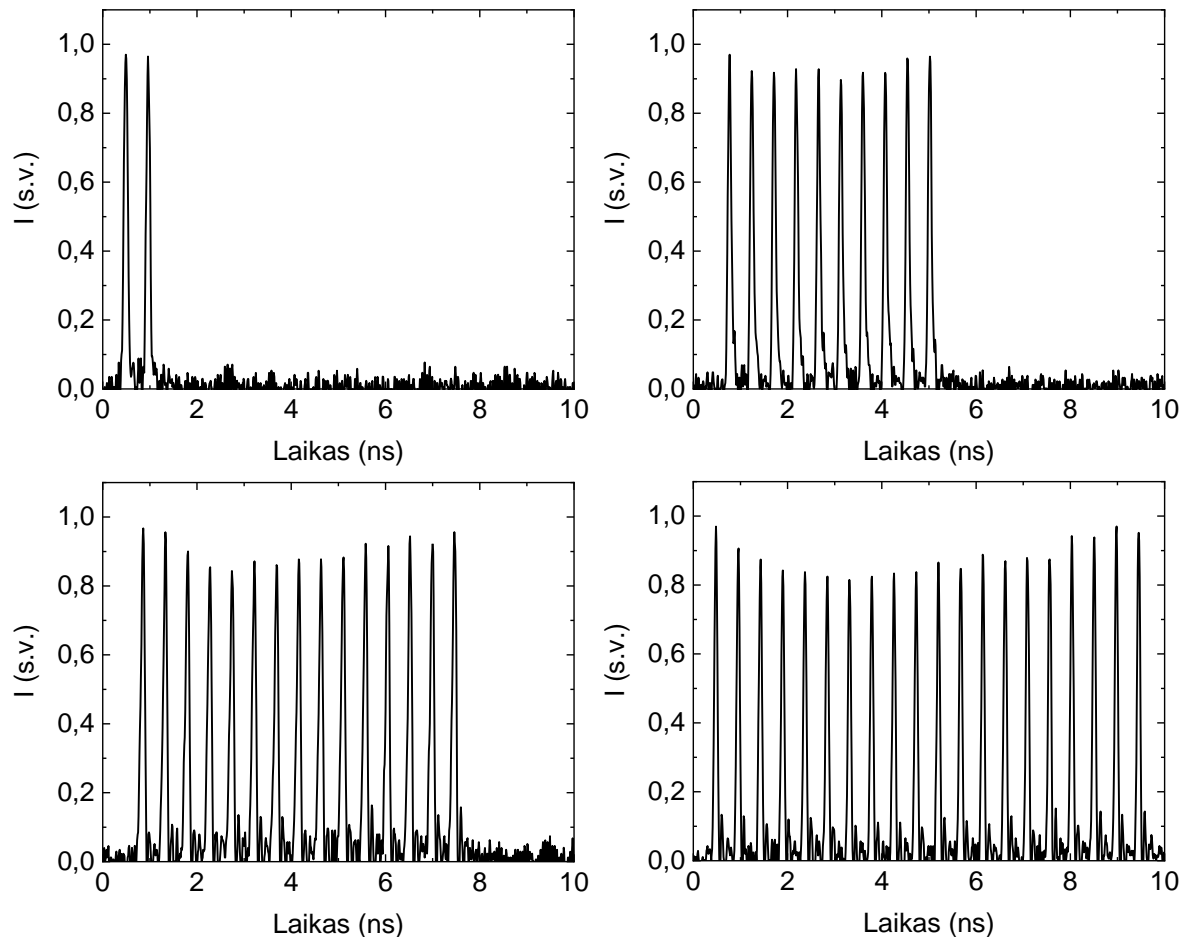
Trumpųjų impulsų papliūpų režime buvo suformuotos iki 20 impulsų (iki 10 ns pločio) turinčios GHz papliūpos. Šiame veikos režime pirmasis akustooptinis modulatorius (AOM1) signalo nemoduliuoja, tai yra į kilpą sklinda 50.35 MHz pasikartojimo dažnio impulsų seka. Atėjęs impulsas yra dalijamas pusiau, padalintas impulsas prasklinda kilpa ir yra užvėlinamas 450 ps. Išėjęs impulsas atsiranda už antrojo impulso, kuris yra iš osciliatoriaus pasikartojimo dažnio sekos. Tokiu būdu gaunama 2 impulsų GHz papliūpa. Šie du impulsai yra pakartotinai dalinami pluošto daliklio, tik šiuo atveju jau du impulsai prasklinda kilpa, įgydami papildomą 450 ps vėlinimą ir praėję kilpą atsiranda už trečiojo pagrindinio pasikartojimo dažnio impulso.



20 pav. Papliūpos, kurią sudaro 20 impulsų, formavimo seka.

Tokia papliūpų evoliucija buvo tęsiama iki 20 impulsų. 20 impulsų papliūpos formavimo seka yra pavaizduota 20 pav. Galutinės papliūpos impulsų skaičius valdomas antruoju akustooptiniu modulatoriumi (AOM2), sumažinant spinduliuotės pralaidumą iki 0.

Suformuotos skirtingo impulsų skaičiaus papliūpos buvo charakterizuotos naudojant oscilografą *Tektronix DPO 72004C*, kurio parametrai – 100 GS/s ir 20 GHz dažnių juostos plotis. Impulsų trukmių detektavimui buvo naudojamas fotodetektorius *EOT 3500F*, kurio dažnių juostos plotis – 15 GHz (laikinė skyra ~50 ps).

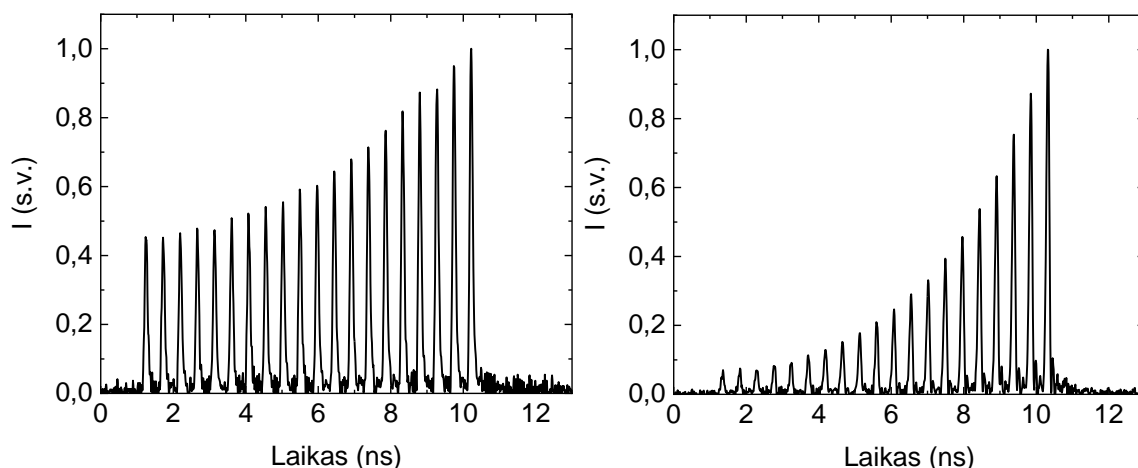


21 pav. Suformuotos 2, 10, 15 ir 20 impulsų GHz papliūpos.

Gautos skirtingo ilgio papliūpos pavaizduotos 21 paveiksle. Pavaizduotos 2, 10, 15 ir 20 impulsų GHz papliūpos.

Valdant impulsų stiprinimą stiprinimo pakopoje esančioje aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje, galima gauti panašių, kaip pavaizduota 21 pav., arba augančių amplitudžių GHz papliūpas (22 pav.). Eksperimentiškai buvo pademonstruoti impulsų amplitudžių (pirmo ir paskutinio) santykiai nuo 1:2 iki 1:15 esant skirtingam impulsų kiekiui GHz papliūpose. 22 pav. yra pavaizduota 20 impulsų papliūpos su amplitudžių santykiu 1:2 ir 1:15.

Toks amplitudžių valdymas papliūpoje yra naudingas papliūpą toliau stiprinant sekančiose stiprinimo pakopose. Stiprinant lygių amplitudžių papliūpą, dėl stiprinimo soties, pirmasis impulsas yra stiprinamas labiau nei paskutinis. Taigi, po stiprinimo prarandama

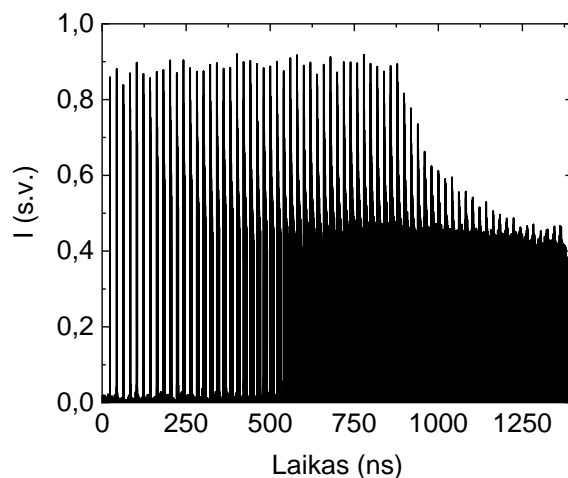


22 pav. 20 impulsų papliūpos su skirtingu amplitudžių santykiu tarp pirmojo ir paskutiniojo impulso. Kairėje santykis - 1:2, dešinėje - 1:15.

lygių amplitudžių savybė ir amplitudžių gaubtinė tampa besileidžianti. Tačiau, jei modifikuojama papliūpos impulsų amplitudžių gaubtinė patenkanti į stiprinimo pakopą, taip jog pirmojo impulso amplitudė yra mažesnė nei paskutiniojo tiksliai, tiek kiek amplitudžių santykis pasikeičia stiprinimo metu, galime gauti lygių amplitudžių papliūpą jau po impulsų stiprinimo galios stiprintuve.

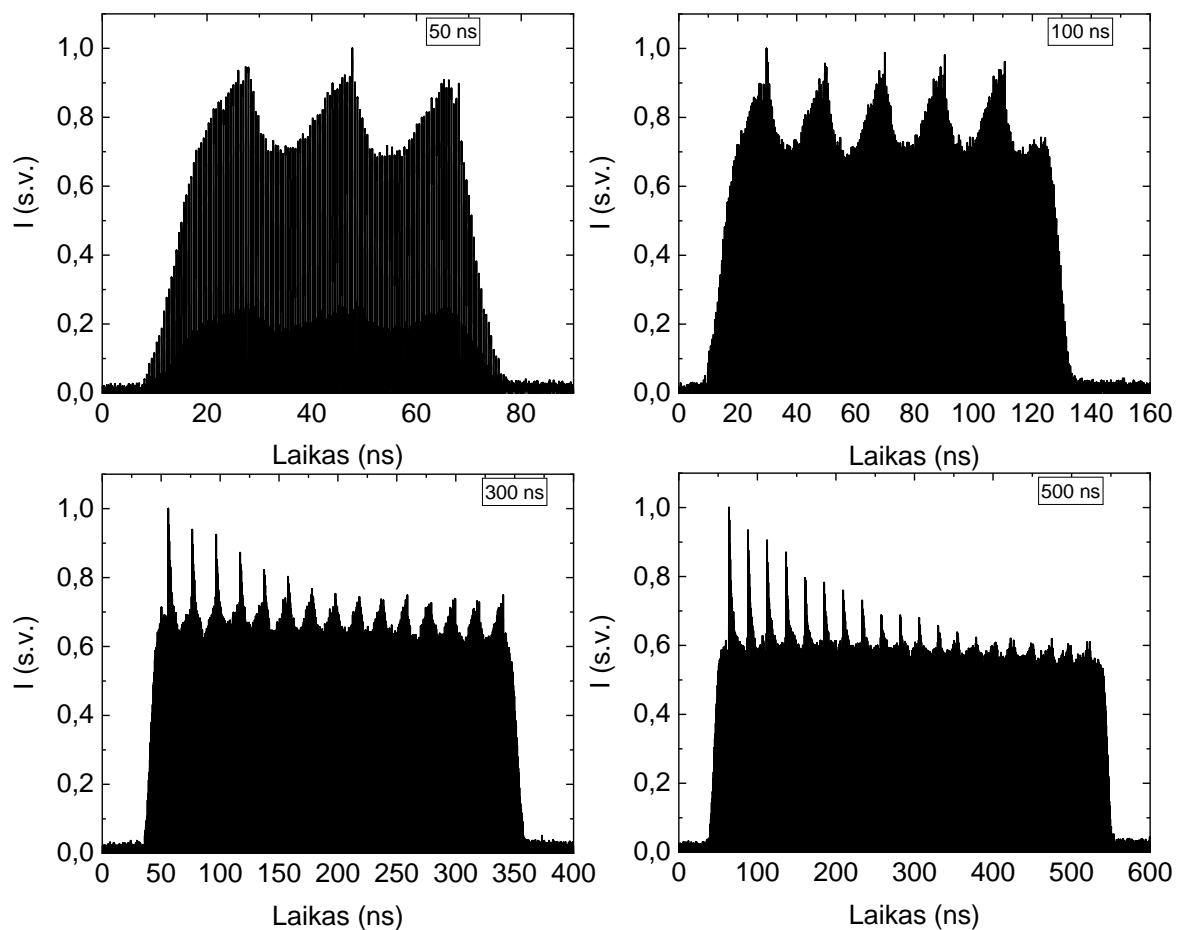
2.5.2. Ilgosios papliūpos

Ilgųjų papliūpų, kurių plotis siekia nuo 20 ns iki 500 ns, režime impulsų skaičius papliūpoje yra ženkliai didesnis, siekiantis tūkstančių impulsų papliūpoje. Šiame režime pirmojo (AOM1) ir antrojo (AOM2) akustooptinių moduliatorių pralaidumas buvo keičiamas



23 pav. 500 ns ilgosios papliūpos formavimo seka.

skirtingais laiko momentais. Formuojantis papliūpoms, su kiekvienu kilpos apėjimu, papliūpa pailgėja vienu impulsu, tačiau laikinis tarpas tarp pirmųjų papliūpų impulsų visada išlieka lygus užkrato periodui T_{osc} . Tačiau laiko tarpas tarp papliūpos paskutinio impulso ir po jos sekančios papliūpos pirmo impulso visada sumažėja per T_V , nes kiekvienu kilpos apėjimu kilpoje padaugėja vienu impulsu. Taigi yra papliūpa iš N impulsų, kuriai susiformavus $N * T_V \geq T_{osc}$, o tai reiškia tai, kad laikinio tarpo tarp papliūpų nebelieka. Tokia impulsų seka yra pilnai užpildyta. Pirmasis akustooptinis moduliatorius (AOM1) užsidaro tuomet, kai kilpa pilnai užsipildo impulsais. Jei pirmasis akustooptinis moduliatorius (AOM1) nebūtų uždaromas, iš užkrato atėję nauji impulsai persiklotų laike su impulsais jau esančiais kilpoje. Antrasis akustooptinis moduliatorius (AOM2) yra naudojamas valdyti GHz papliūpos plotį. Šviesolaidinė kilpa yra pilnai užpildyta joje cirkuliuojančia impulsų vora. Per kiekvieną pilną kilpos apėjimą yra suformuojama antra tokio pat pločio papliūpa, kuri atsiduria už pirmosios. Tokia papliūpa yra vadinama ilgąją papliūpa. Valdant antrojo akustooptinio moduliatoriaus (AOM2) pralaidumo trukmę, valdome kiek kartų papliūpa gali prasklisti kilpa, tai yra bendrą



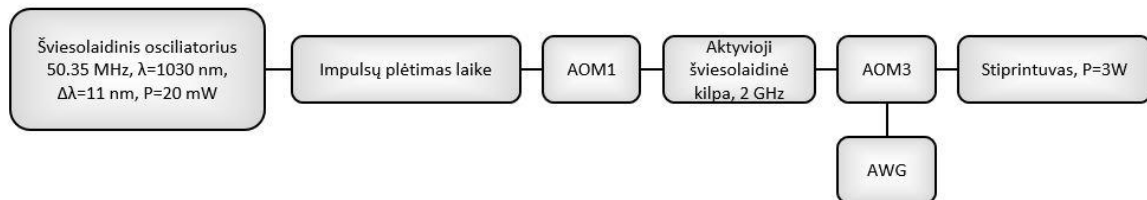
24 pav. Išrinktos 50, 100, 300 ir 500 ns trukmės papliūpos.

suformuotos papliūpos ilgį. Uždarius antrąjį akustooptinį moduliatorių (AOM2), ilgų impulsų papliūpų formavimas yra nutraukiamas. 500 ns papliūpos formavimo seka pavaizduota 23 pav.

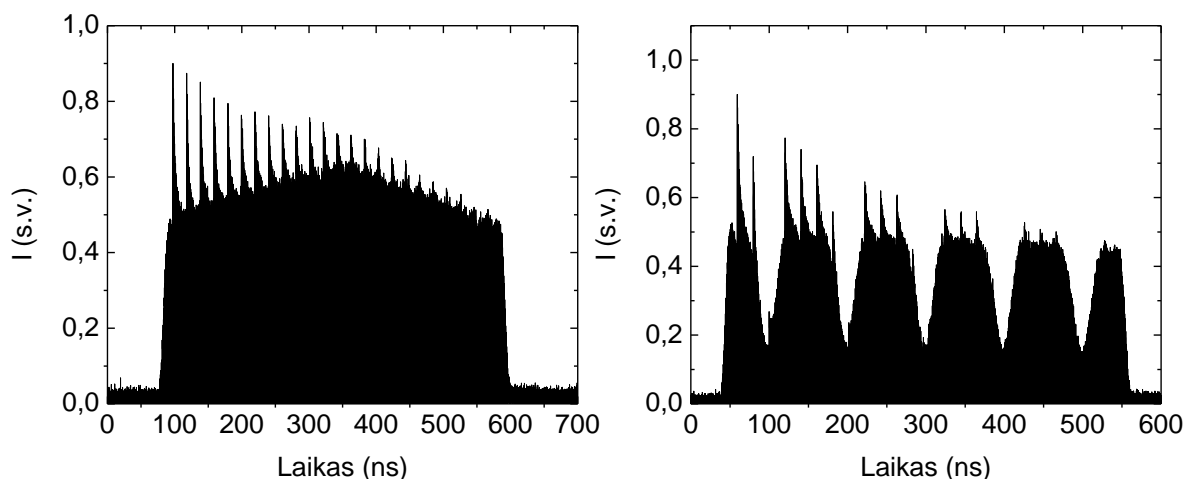
Naudojantis trečiuoju akustooptiniu moduliatoriumi (AOM3) buvo išrenkamos suformuotos papliūpos iš visos jų formavimo sekos. 24 pav. pavaizduotos 50, 100, 300 ir 500 ns pločio išrinktos papliūpos. Šiuo atveju papliūpų pasikartojimo dažnis buvo nustatomas 700 kHz. Stiprinimas aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje buvo koreguojamas tam, kad suformuoti, kuo lygesnių amplitudžių papliūpas. Matomi periodiniai amplitudės padidėjimai ir sumažėjimai gali būti susiję su stiprinimo sotimi pasireiškiančia šviesolaidiniame stiprintuve esančiame šviesolaidinėje kilpoje.

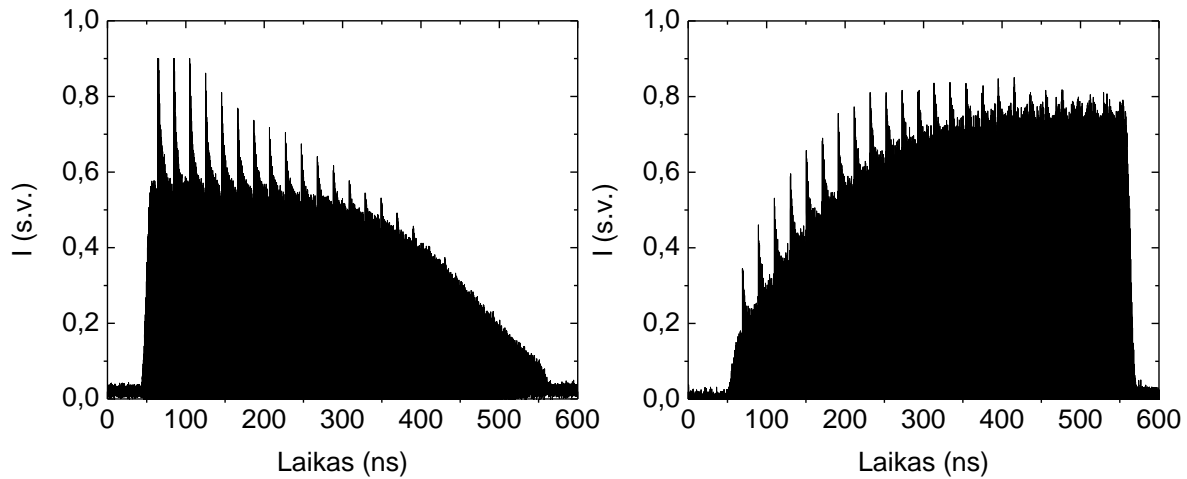
2.6. Impulsų amplitudžių gaubtinės formos keitimas

Naudojantis AWG (*Agilent 33521A*), kurio generuojamų impulsų dažnis yra 30 MHz, o maksimalus taškų skaičius 250 MSa/s, buvo valdoma trečiojo akustooptinio moduliatoriaus (AOM3) pralaidumo funkcija, keičiant papliūpos impulsų amplitudžių gaubtinę. Blokinė eksperimentinė schema pavaizduota 25 pav.



25 pav. Papliūpos impulsų amplitudžių gaubtinės valdymas, keičiant AOM3 pralaidumo funkciją. AOM1 – pirmasis akustooptinis moduliatorius, AOM3 – trečiasis akustooptinis moduliatorius.



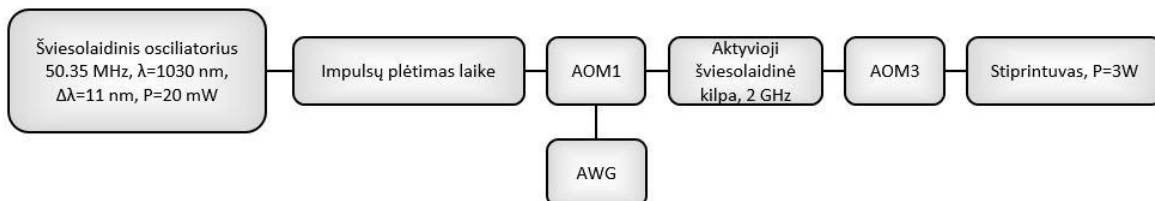


26 pav. Skirtingos impulsų amplitudžių gaubtinės formos 500 ns trukmės ilgojoje papliūpoje.

26 pav. pavaizduotos suformuotos skirtingų formų amplitudžių gaubtinių papliūpos. Buvo pademonstruotos krentančios ir kylančios eksponenčių formos gaubtinės, trikampio formos gaubtinė bei gaubtinė su 5 sinusiniais iškirpimais esant 500 ns pločio impulsų papliūpai.

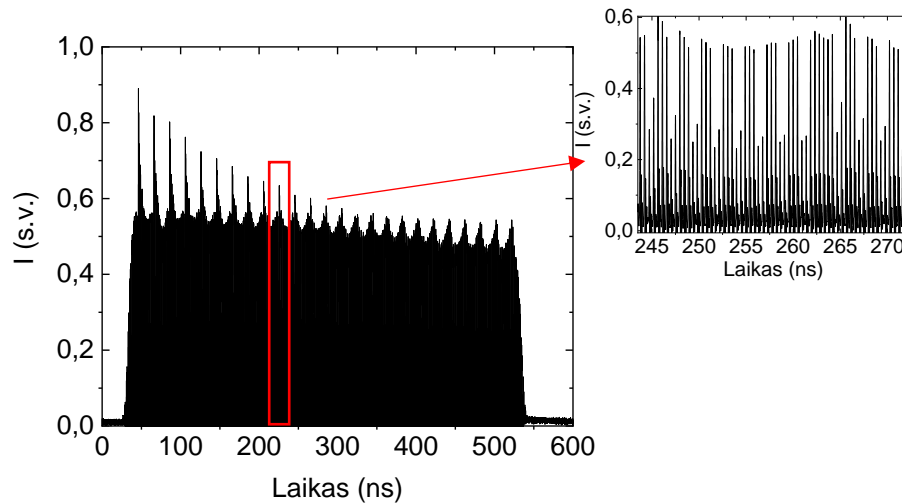
2.7. Pavienių impulsų amplitudžių valdymas impulsų papliūpose

Norint įgyvendinti pavienių impulsų amplitudžių valdymą GHz impulsų papliūpoje buvo naudojama AWG prijungtu prie pirmojo akustooptinio modulatoriaus (AOM1). Ši schema pavaizduota 27 pav.



27 pav. Pavienių impulsų amplitudžių valdymas, keičiant AOM1 pralaidumo funkciją. AOM1 – pirmasis akustooptinis modulatorius, AOM3 – trečiasis akustooptinis modulatorius.

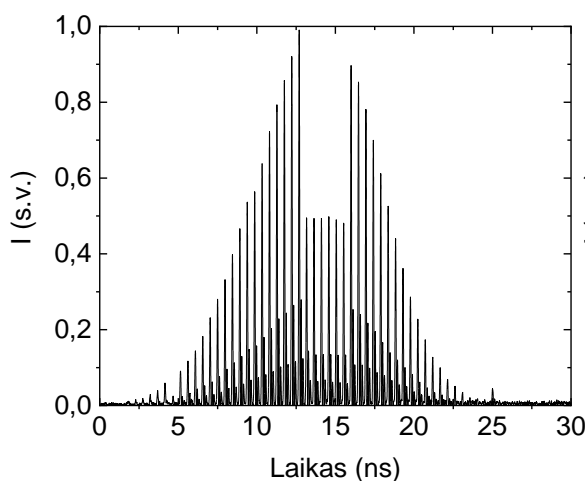
Tokiu būdu, valdomos impulsų, patenkančių į aktyviąją šviesolaidinę kilpą, amplitudės. Taigi, kiekvieno impulso amplitudė gali būti valdoma atskirai, jeigu naudojama eksperimentinė įranga (AWG) neriboja šio valdymo galimybių. Eksperimentiškai pademonstruotas atskirų amplitudžių valdymas pateiktas 28 pav. Šiuo atveju pasiektas valdymas, kai trys impulsai yra praleidžiami, o sekančių dviejų impulsų amplitudė yra modifikuojama. Pavienio impulso amplitudės, šiuo atveju, nepavyko valdyti, dėl to, jog naudojamo generatoriaus dažnis buvo 30 MHz, o osciliatoriaus pasikartojimo dažnis 50.35 MHz. Taigi generatoriaus generuojamas



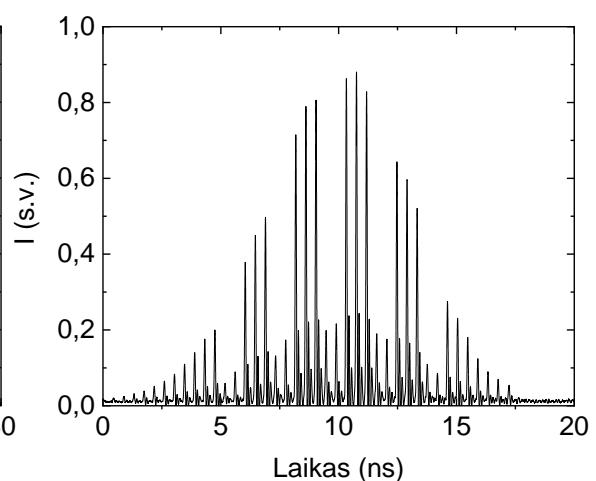
28 pav. 500 ns trukmės papliūpa, kurioje praleidžiami 3 impulsai, 2 nuslopunami.

signalų dažnis yra mažesnis nei dažnis, kuriuo generuojami nauji impulsai osciliatoriuje. Dėl to šiuo atveju naudojant AWG buvo pasiektas dviejų impulsų valdymas.

Su AWG valdant pirmojo akustooptinio modulatoriaus (AOM1) pralaidumą galima pasiekti momentinį pasirinkto impulso amplitudės kitimą, kai tuo tarpu valdant trečiojo akustooptinio modulatoriaus (AOM3) pralaidumą, amplitudės keičiasi tolygiai ir priklauso nuo pralaidumo funkcijos sugeneruotos AWG. 29 pav. pateikta 20 ns pločio papliūpa, kurios viduryje yra atskirai valdomos 6 impulsų amplitudės. Šiuo atveju amplitudės buvo nustatomos iki pusės maksimalios amplitudės, kurios lygį galima reguliuoti. 30 pav. pavaizduota papliūpa, kurioje trys impulsai buvo praleidžiami, o sekančių dviejų amplitudė buvo modifikuota. Taigi



29 pav. 20 ns trukmės papliūpa su nuslopinais 6 impulsais iki 50 % maksimalios amplitudės.



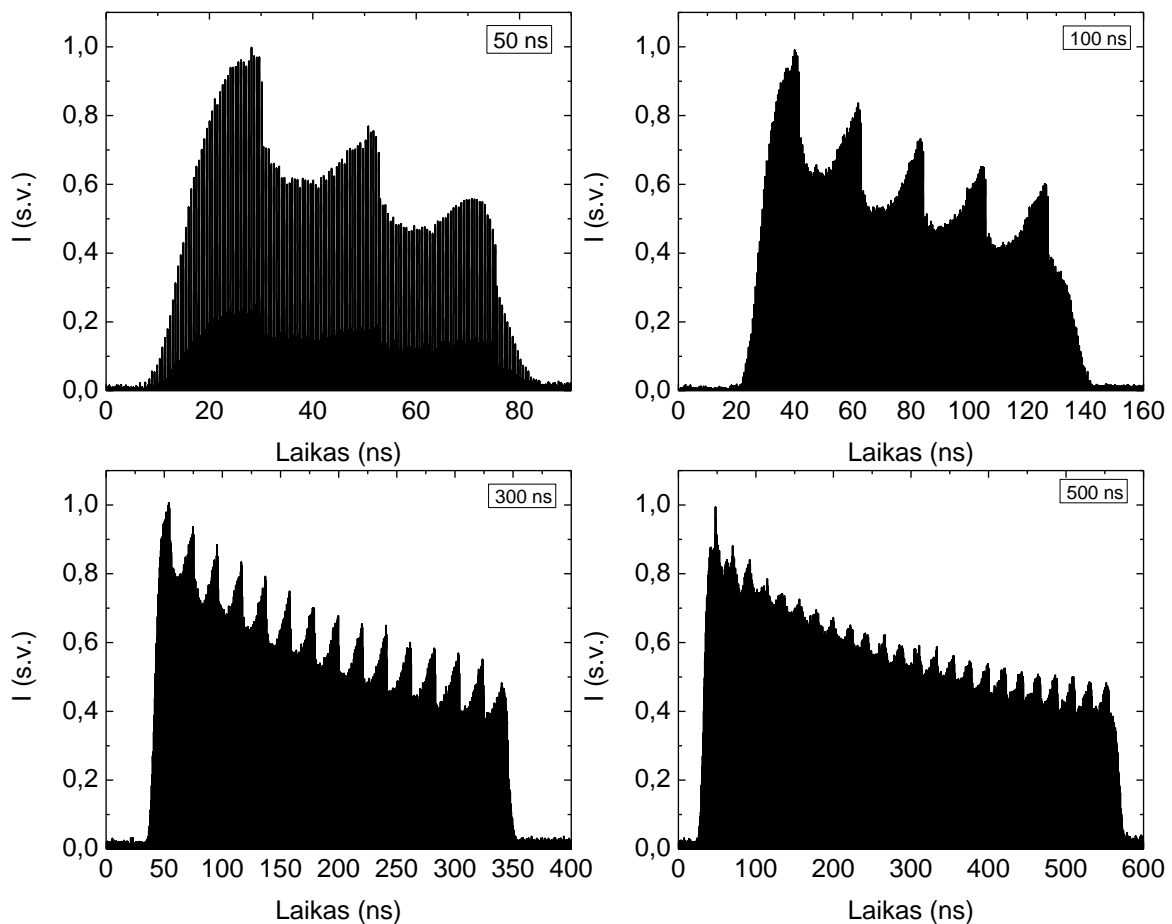
30 pav. 20 ns trukmės papliūpa, kurioje praleidžiami 3 impulsai, slopinami 2.

naudojant AWG buvo pademonstruotas pasirinktų impulsų amplitudžių valdymas impulsų papliūpose.

2.8. Papliūpų stiprinimas ir charakterizavimas

Suformuotos ilgosios ir trumposios papliūpos toliau buvo stiprinamos laisvos erdvės Yb:YAG stiprintuve iki 30 W vidutinės spinduliuotės galios. Stiprinant trumpąsias papliūpas buvo gauta 31.5 W vidutinė galia esant 1 MHz pasikartojimo dažniui, bei 27.6 W vidutinė galia naudojant 200 kHz pasikartojimo dažnį. Taigi didžiausia gauta papliūpos energija siekė 138 μ J. Pasitelkiant stiprinimo valdymą aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje buvo suformuotos vienodų ir kylančių amplitudžių trumposios papliūpos.

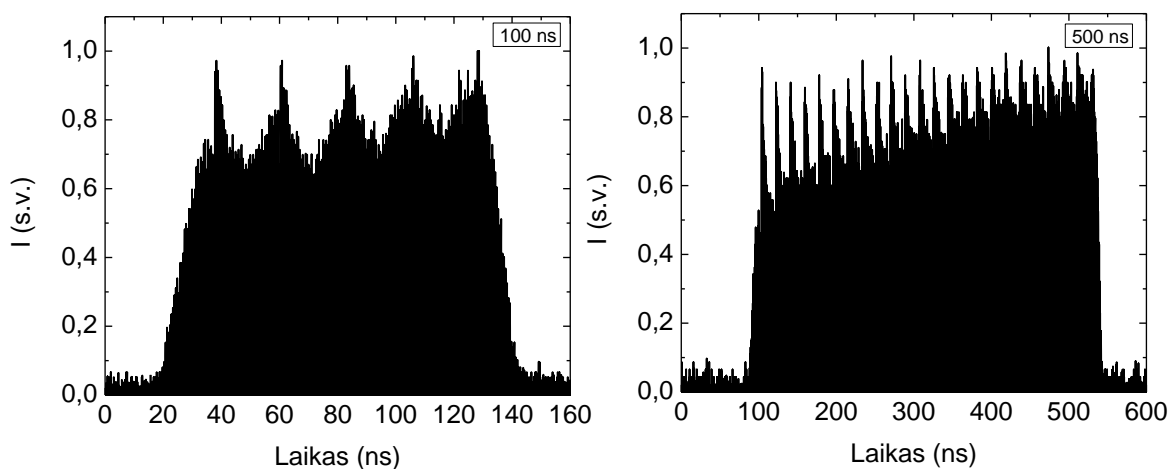
Sekančiu etapu buvo stiprinamos ilgosios papliūpos. Sustiprinus lygių amplitudžių ilgąsias papliūpas, buvo gautos papliūpos su mažėjančia impulsų energija dėl stiprintuve pasireiškiančios stiprinimo soties. Pirmieji papliūpos impulsai yra sustiprinami ženkliai



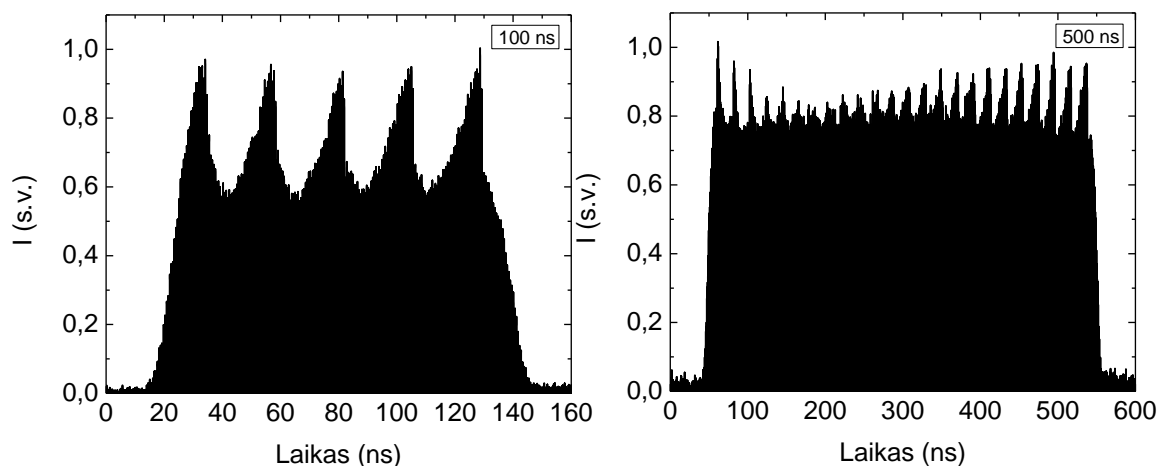
31 pav. Sustiprintos 50, 100, 300 ir 500 ns trukmės lygių amplitudžių papliūpos.

daugiau nei paskutiniai papliūpos impulsai taip iškreipiant papliūpos impulsų amplitudžių gaubtinę. Stiprinimo sotes įtaka impulsų amplitudžių gaubtinei tampa vis didesnė ilgėjant papliūpos ilgiui. Sustiprintos lygių amplitudžių ilgiosios papliūpos pavaizduotos 31 pav.

Pasitelkiant savavališkos bangos formos generatorių ir moduluojant AOM3 pralaidumo funkciją, galima kompensuoti stiprinimo metu modifikuojamą papliūpos formą. Jei stiprinamos papliūpos amplitudžių gaubtinė yra kylančios eksponentės formos, po stiprinimo impulsų amplitudės tampa lygios. 32 pav. pateiktos stiprinamos kylančių amplitudžių papliūpos. Gautas sustiprintos papliūpos pavaizduotos 33 pav.

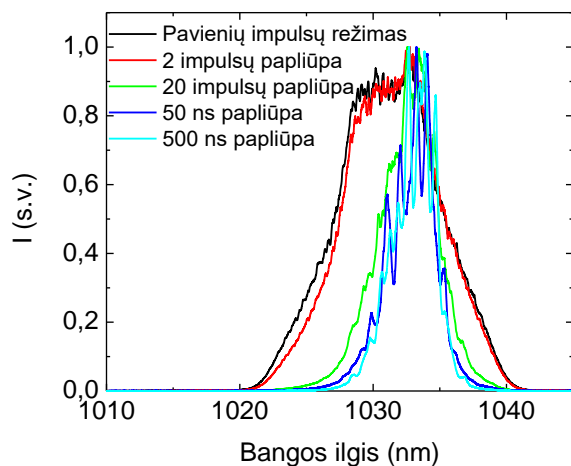


32 pav. Stiprinamos 100 ir 500 ns kylančių amplitudžių papliūpos.

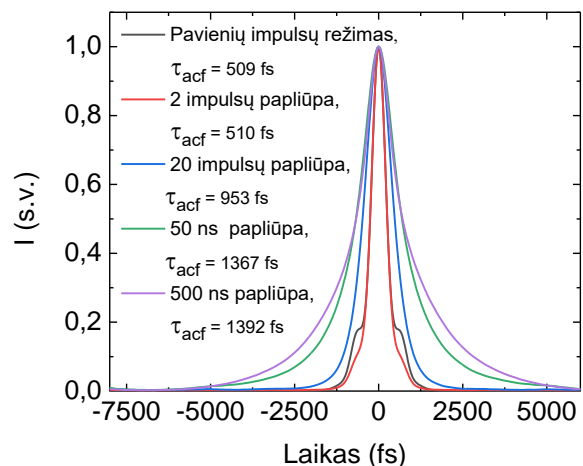


33 pav. Gautas sustiprintos 100 ir 500 ns papliūpos.

Gautos papliūpos buvo charakterizuojamos. Gauta, jog ilgųjų papliūpų energija naudojant 233 kHz impulsų papliūpų pasikartojimo dažnį yra 135 μ J (31.6 W vidutinė galia).



34 pav. Ilgųjų ir trumpųjų sustiprintų papliūpų spektrai.



35 pav. Ilgųjų ir trumpųjų sustiprintų papliūpų autokoreliacinės funkcijos.

Sustiprintos papliūpos toliau buvo spaudžiamos spaustuve iki minimalios trukmės. Buvo matuojami suspaustų papliūpų spektrai ir vidutinė impulsų trukmė.

Spektrai, pavaizduoti 34 pav., ilgėjant papliūpos ilgiui pradeda siaurėti. Tai pasireiškia dėl kilpoje naudojamos čirpuotos šviesolaidinės Brego gardelės atspindžio spektro Gausinės formos. Centrinė naudojamo spektro dalis yra pilnai atspindima, tačiau kraštuose atspindys yra keliolika procentų mažesnis. Taigi, kuo daugiau kartų impulsai apeina kilpą, tai yra kuo ilgesnė papliūpa, tuo labiau siaurinamas spektras. 34 pav. matoma, kad spektras ženkliai susiaurėja jau po pirmųjų 20 apėjimų. Pavienių impulsų režime spektro plotis yra 8.06 nm (FWHM), o 20 impulsų papliūpos 4.56 nm – spektro plotis susiaurėja 1.75 karto. Toliau spektro siaurėjimas yra palyginus nežymus – 500 ns ilgosios papliūpos spektro plotis yra 3.15 nm.

Šis spektro siaurėjimas taip pat atsispindi vidutinės impulsų trukmės dinamikoje. Impulsų trukmės autokoreliacinės funkcijos pateiktos 35 pav. Impulso trukmė pavienių impulsų režime yra 358 fs ($\tau_{acf} = 509$ fs) (FWHM), o 20 impulsų papliūpos trukmė 667 fs ($\tau_{acf} = 953$ fs) - trukmė pailgėja 1.85 karto. Taigi, šis trukmės ilgėjimas taip pat siejamas su spektro siaurėjimu didėjant aktyvios šviesolaidinės kilpos apėjimų skaičiui. Ilgosios 500 ns papliūpos vidutinė impulso trukmė pailgėja iki 964 fs ($\tau_{acf} = 1392$ fs). Impulso trukmės ilgėjimo galima sumažinti arba išvengti naudojant gardelę, kurios atspindžio spektras yra tolygus. Šiuo atveju tikėtina pasiekti mažesnes impulso trukmes, artimas pavienių impulsų režime.

Rezultatų aptarimas

Naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su spektriniu filtravimu galima pasiekti impulso trukmės derinimą nuo 68 ps iki 380 ps, esant 48 vieno impulso apėjimams šviesolaidine kilpa ir impulsų pasikartojimo dažniui – 200 kHz. Naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su spektriniu filtravimu gaunamas impulsas, kuris yra artimas spektriškai ribotam ir kurio laikinė gaubtinė artima Gausinei.

Palyginus eksperimentiškai išmatuotas impulsų trukmes su teoriškai įvertintomis, matyti nedidelis rezultatų neatitikimas, kuris gali būti siejamas su ne idealiai Gausine spektrinio filtro forma.

Naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą buvo suformuotos trumposios 2 GHz papliūpos, kurias sudarė nuo 2 iki 20 impulsų. Keičiant stiprinimo sąlygas stiprinimo pakopoje esančioje aktyviojoje šviesolaidinėje kilpoje, buvo pademonstruota trumpų GHz impulsų papliūpų gaubtinės formavimo galimybė suformuojant lygios arba kylančios impulsų amplitudės papliūpas.

Pasitelkiant stiprinimą kilpoje ir papliūpos pločio kontroliavimą naudojant akustooptinį moduliatorių (AOM2), pademonstruotas ilgųjų papliūpų formavimas, kurių plotis siekė nuo 20 ns iki 500 ns ir amplitudės išlaikytos panašiam lygyje.

Suformuotos papliūpos buvo išskirtos naudojant trečiąjį akustooptinį moduliatorių (AOM3). Naudojantis savavališkos bangos formos generatoriumi pademonstruotas suformuotų papliūpų impulsų amplitudžių gaubtinės formos valdymas. Norint parodyti valdymo galimybes suformuotos kretančios eksponentės, kylančios eksponentės, trikampio ir 5 sinusinių iškirpimų impulsų amplitudžių gaubtinės.

Išbandytos pavienių impulsų 2 GHz papliūpoje valdymo galimybės ir pademonstruotas įvairus dviejų impulsų amplitudžių valdymas ilgosiose 2 GHz papliūpose.

Trumposios ir ilgosios papliūpos sėkmingai sustiprintos išlaikant stačiakampio formos papliūpas. Ilgųjų papliūpų atveju stačiakampio formos papliūpų formavimui papildomai pasitelktas savavališkos bangos formos generatorius moduliuojantis akustooptinio modulatoriaus (AOM3) pralaidumą. Trumpųjų papliūpų maksimali pasiekta energija 138 μJ , o ilgųjų papliūpų 135 μJ . Suspaudus suformuotas papliūpas visais atvejais gauta impulso trukmė buvo mažesnė nei 1 ps.

Išvados

1. Naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą galima plėsti ir valdyti impulso trukmes. 49 ir tolimesnių apėjimų šviesolaidine kilpa registravimą apriboja šių sekos impulsų amplitudė. Impulsų energija sekoje yra pastovi, tačiau trukmė ilgėja, dėl šios priežasties registruojamų impulsų amplitudė mažėja.
2. Norint padidinti trukmės derinimo intervalą, schemoje su aktyviąją šviesolaidine kilpa ir spektriniu filtravimu, reikėtų modifikuoti stiprinimo pakopas optinėje schemoje taip, kad geriau stiprintųsi galiniai sekos impulsai. Tam būtų galima kilpoje naudoti eksponentiškai augantį kaupinimą.
3. Naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą, eksperimentiškai gauta trukmės priklausomybė nuo filtravimų skaičiaus yra artima tiesinei, tai nesutampa su teorinio įvertinimo gautais rezultatais, ypač prie ilgesnių trukmių. To priežasčių išsiaiškinimui reikėtų tolimesnių tyrimų.
4. Naudojant aktyviąją šviesolaidinę kilpą gali būti formuojamos GHz papliūpos. Papliūpų parametrai, tokie kaip impulsų amplitudės, papliūpų trukmė ir forma gali būti itin lanksčiai valdomi keičiant įvairius naudotos optinės schemos parametrus:

	AOM ₁	AOM ₂	AOM ₃	I (LD)
Amplitudė	(+)*	-	(+)*	(+)*
Trukmė	-	(+)*	(+)*	+/-
Forma	(+)*	-	(+)*	(+)*

* Pademonstruota šiame darbe.

5. Derinamų parametrų yra daug, taigi parametrai turi būti optimizuojami eksperimentiškai, pagal proceso, kuriame naudojamos papliūpos, efektyvumą.
6. Formuojamose papliūpose laikinis tarpas tarp impulsų yra identiškas, nes impulsai vėlinami ta pačia šviesolaidine kilpa.
7. Pavienių impulsų valdymas gali būti realizuojamas išoriškai valdant pirmojo akustooptinio modulatoriaus (AOM1) pralaidumą, tačiau tam reikia generatoriaus, kurio dažnis būtų ne mažesnis nei osciliatoriaus pasikartojimo dažnis.
8. Stačiakampių ilgųjų papliūpų formavimui galima pasitelkti savavališkos bangos formos generatorių, kuriuo moduluojama trečiojo akustooptinio modulatoriaus (AOM3) pralaidumo funkcija.

9. Formuotų papliūpų spektro siaurėjimas ir impulso trukmės ilgėjimas galimai susijęs su aktyvioje šviesolaidinėje kilpoje naudojamos čirpuotos šviesolaidinės Brego gardelės atspindžio spektro netolygumais. Taigi, naudojant gardelę, kurios atspindžio spektras yra tolygus, tikėtina pasiekti mažesnes impulso trukmes, artimas pavienių impulsų stiprinimo režimo atvejui.

Literatūra

1. R. Khare, P. K. Shulka, "Temporal Stretching of Laser Pulses", *Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission*, 205-226 (2010), DOI: 10.5772/12856.
2. S. Chard, T. S. McComb, Y. Chen, M. Barty, Y. K. Kwon, "Control of pulse duration and shape in a 400-W Q-switched 532-nm laser", *Proc. SPIE 10511, Solid State Lasers XXVII: Technology and Devices* 7 pp., (2018), DOI: [10.1117/12.2290087](https://doi.org/10.1117/12.2290087).
3. A. D. Izzo, J. T. Walsh, Jr., E. D. Jansen, M. Bendett, J. Webb, H. Ralph, and C. P. Richter, "Optical Parameter Variability in Laser Nerve Stimulation: a study of pulse duration, repetition rate, and wavelength", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **54**(6), 1108 - 1114 (2007), DOI: [10.1109/TBME.2007.892925](https://doi.org/10.1109/TBME.2007.892925).
4. S. Frakinas, "Controlling of Temporal and Spectral Characteristics of Ultrashort Fiber Lasers By Nonlinear Effects", Vilnius: Vilnius University, Physical Sciences, Physics (02P) (2018).
5. T. Bartulevicius, L. Veselis, K. Madeikis, A. Michailovas, N. Rusteika, "Compact femtosecond 10 μ J pulse energy fiber laser with a CFBG stretcher and CVBG compressor", *Optical Fiber Technology* **45**, 77–80 (2018), DOI: 10.1016/j.yofte.2018.06.006.
6. J. Kleinert, Z. Lin, H. Matsumoto, "Ultrafast laser ablation of copper with ~ GHz bursts", *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXIII*, 1051902 (2018), DOI: 10.1117/12.2294041.
7. Siders, C., Siders, J., Taylor, A., Park, S. and Weiner, A., "Efficient high-energy pulse-train generation using a 2^n -pulse michelson interferometer.", *Applied Optics*, **37**(22), 5302-5305 (1998), DOI: 10.1364/AO.37.005302.
8. H. Muñoz-Marco, J. Abreu-Afonso, G. Sardiello, P. Pérez-Millán, "Theoretical and experimental comprehensive study of GHz-range passively mode-locked fiber lasers", *Applied Optics*, **59**(23), 6817-6827 (2020), DOI: [10.1364/AO.394072](https://doi.org/10.1364/AO.394072).
9. T. Bartulevicius, K. Madeikis, L. Veselis, V. Petrauskiene, A. Michailovas, "Active fiber loop for synthesizing GHz bursts of equidistant ultrashort pulses", *Optics Express*, **28**(9), 13059-13067 (2020). DOI: 10.1364/OE.389056.
10. J. Kojima, Q. V. Nguyen, "Laser pulse-stretching with multiple optical ring cavities," *Applied Optics* **41**(30), 6360-6370 (2002), DOI: 10.1364/AO.41.006360.

11. M. D. Skeldon, S. T. Bui, "Temporal pulse-width control of a regenerative amplifier with intracavity etalons", *Proc. SPIE 1869, Intracavity and Extracavity Control of Laser Beam Properties* **1869**, 120-127 (1993), DOI: [10.1117/12.148379](https://doi.org/10.1117/12.148379).
12. R. Khare, P. K. Shulka, G. K. Mishra, C. Mukherjee, S. Talwar, V. K. Dubey, P. Saxena, J. K. Mittal, "A novel confocal optical pulse stretcher for laser pulses", *Optics Communications* **282**(19), 3850-3853 (2009), DOI: [10.1016/j.optcom.2009.06.041](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.06.041).
13. S. Schiemann, W. Hogervorst, W. Ubachs, "Fourier-transform-limited laser pulses tunable in wavelength and in duration (400-2000 ps)", *IEEE Journal of Quantum Electronics* **34**(3), 407-412 (1998), DOI: 10.1109/3.661446.
14. J. C. Diels, W. Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena" (Second Edition), *Academic Press*, 1-60 (2006), DOI: 10.1016/B978-012215493-5/50002-1.
15. J. Limpert, F. Roser, T. Schreiber, A. Tunnermann, "High-power ultrafast fiber laser systems", *IEEE J Sel Top Quantum Electron* **12**(2), 233-244 (2006), DOI: [10.1109/JSTQE.2006.872729](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2006.872729).
16. A. Okhrimchuk, S. Fedotov, I. Glebov, V. Sigaev, P. Kazansky, "Single shot laser writing with sub-nanosecond and nanosecond bursts of femtosecond pulses", *Scientific Reports*, **7**(1), 16563 (2017), DOI: 10.1038/s41598-017-16850-z.
17. Y. Gong, P. Shum, D. Tang, C. Lu, X. Guo, "660GHz Solitons Source Based on Modulation Instability in Short Cavity", *Optics Express*, **11**(20), 2480-2485 (2003), DOI: 10.1364/OE.11.002480.
18. C. de Matos, D. Chestnut, J. Taylor, "Low-threshold self-induced modulational instability ring laser in highly nonlinear fiber yielding a continuous-wave 262-GHz soliton train", *Optics Letters*, **27**(11), 915-917 (2002), DOI: 10.1364/OL.27.000915.
19. D. Tang, J. Guo, Y. Song, L. Li, L. Zhao, D. Shen, "GHz pulse train generation in fiber lasers by cavity induced modulation instability", *Optical Fiber Technology*, **20**(6), 610-614 (2014), DOI: [10.1016/j.yofte.2014.08.002](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.08.002).
20. C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, Ö. Akçaalan, F. Ilday, "3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser", *Optics Communications*, **366**, 404-409 (2016), DOI: [10.1016/j.optcom.2015.12.064](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.064).
21. B. Dromey, M. Zepf, M. Landreman, K. O'Keeffe, T. Robinson, S. Hooker, "Generation of a train of ultrashort pulses from a compact birefringent crystal array", *Applied Optics*, **46**(22), 5142-5146 (2007), DOI: 10.1364/AO.46.005142.

22. J. Liu, X. Li, S. Zhang, M. Han, H. Han, Z. Yang, “Wavelength-Tunable Burst-Mode Pulse With Controllable Pulse Numbers and Pulse Intervals”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **25**(4),1-6 (2019), DOI: 10.1109/JSTQE.2018.2863541.
23. K. Wei,, P. Wu, R. Wen, J. Song, Y. Guo, X. Lai, “High power burst-mode operated sub-nanosecond fiber laser based on 20/125 μ m highly doped Yb fiber”, *Laser Physics*, **26**(2), 025104 (2016), DOI: 10.1088/1054-660X/26/2/025104.
24. K. Wei, P. Jiang, B. Wu, T. Chen, Y. Shen, “Fiber laser pumped burst-mode operated picosecond mid-infrared laser”, *Chinese Physics B*, **24**(2), 024217 (2015), DOI: 10.1088/1674-1056/24/2/024217.

Santrauka

Lazerinių šaltinių rinkoje svarbus aspektas yra šaltinio universalumas, kuris leidžia lazerinį šaltinį taikyti įvairioms sritims. Tokį universalumą suteikia galimybė kuo plačiau derinti pagrindinius lazerinio impulso parametrus.

Impulso trukmė yra svarbus lazerinių šaltinių parametras, nulemiantis daugelį panaudojimų. Galimybė derinti impulso trukmę dideliame intervale yra didelis lazerinių sistemų privalumas. Naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą su integruotu spektriniu filtravimu galima pasiekti platų impulso trukmės valdymą nuo keliasdešimt iki šimtų pikosekundžių. Didelis technologijos privalumas yra, tai kad impulsų laikinės gaubtinės išlieka artimos Gausinio skirstinio formai visame impulso trukmės derinimo diapazone.

GHz papliūpos yra perspektyvi metodika medžiagų apdirbime galinti suteikti didesnę efektyvumą, apdirbimo greitį ir apdirbimo kokybę. Formuojant GHz papliūpas dažnai susiduriama su problema, kad papliūpos impulsų amplitudės yra nevaldomos ir dažnai yra mažėjančios, taip pat dauguma metodų nesuteikia galimybės derinti formuojamų papliūpų pločio ar formuojamų sekų formos ir nėra pritaikyti ultra trumpiems impulsams. GHz papliūpų formavimas naudojant aktyviają šviesolaidinę kilpą suteikia unikalią galimybę valdyti papliūpų impulsų amplitudes ir aktyviai valdyti formuojamų papliūpų plotį bei formą. Taip pat GHz papliūpų formavimas yra tinkamas ultra trumpiems impulsams, dėl esančio dispersijos kompensavimo kilpoje. Taigi metodas suteikia didelį lankstumą formuojant papliūpas. Parametrus galima laisvai optimizuoti pagal papliūpų naudojimo paskirtį. Papildomai pasitelkiant akustooptinį moduliatorių, kurio pralaidumo funkcija yra kontroliuojama savavališkos bangos formos generatoriumi, galime formuoti įvairių formų papliūpas. Galima formuoti stačiakampio formos impulsų paketus, taip pat galima formuoti augančios amplitudės papliūpas, kas yra ypač naudinga norint stiprinti papliūpas, dėl nevienodo impulsų stiprinimo papliūpoje. Naudojant pakankamai greitą savavališkos bangos formos generatorių galima kontroliuoti kiekvieno impulso amplitudę.

Taigi aktyvi šviesolaidinė kilpa yra perspektyvus ir universalus metodas leidžiantis plačiame diapazone valdyti šviesolaidinio lazerinio šaltinio impulso trukmę išlaikant Gausinę impulso gaubtinę. Taip pat aktyvi šviesolaidinė kilpa yra itin lanksti technologija GHz papliūpų formavimui, leidžianti pritaikyti formuojamų papliūpų parametrus pagal panaudojimo sritį.

Summary

Laser source versatility is an important aspect of a laser system, which provides an opportunity to use the laser system for multiple applications. The systems versatility is defined by its ability to control the fundamental laser pulse parameters.

Laser pulse duration is one of the most important laser source parameters, which determines the possible applications of the laser system. A big advantage of a laser source is the ability to control the pulse duration in a large range. An active fiber loop with integrated spectral filtering enables pulse duration control from tens to hundreds of picoseconds. One of the main advantages of this technology is that the formed pulses retain a Gaussian like temporal form in the whole pulse duration tuning range.

GHz bursts is a perspective method for material processing, the method provides enhanced efficiency, processing speed and processing quality. Common problems while forming GHz burst are the lack of control of the pulse amplitude within the burst, which is usually decaying. Also, most methods do not permit any control of the length of a formed GHz bursts and cannot be used to change the form of the bursts and are not well suited for ultra-short pulses. On the other hand, GHz burst forming with an active fiber loop provides a unique opportunity to control pulse amplitude within the burst, actively control the length and form of the GHz burst and is well suited for ultra-short pulses, because it incorporated dispersion compensation within the loop. GHz burst forming with an active fiber loop has a lot of flexibility and can be fine-tuned for specific applications. Additionally, when using an acousto-optic modulator that has a transmission function which is controlled by an arbitrary wave generator it is possible to form bursts of varies forms. It allows forming of rectangular shaped pulse packets as well as a rising pulse amplitude bursts that are particularly useful when amplifying GHz bursts, because of the unequal amplification of pulses within the burst. Single pulse amplitude control within the burst, if possible, when using a sufficiently fast arbitrary wave generator.

Therefor active fiber loop technology is a perspective and universal method that allows the control of a laser pulse duration in a large range while preserving a Gaussian like temporal form. Additionally, this technology provides a versatile approach to forming GHz bursts. GHz burst forming with an active fiber loop allows customizing of the formed burst according to a specific application.