

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Gustas Liaugminas

IMPULSŲ PLĖTIMO/SPAUDIMO SKAIDULINIAME STIPRINTUVE, PANAUDOJANT  
TŪRINES BREGO GARDELES, TYRIMAI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – LAZERINĖ FIZIKA IR OPTINĖS TECHNOLOGIJOS)

Studentas

Gustas Liaugminas

Leista ginti

2019-05-23

Darbo vadovas

dr. Kęstutis Regelskis

L.e.p LTC Direktorius

dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

# Turinys

Įvadas .....	1
1 Teorinis įvadas .....	3
1.1 Tūrinės Brego gardelės .....	3
1.2 Čirpuoti impulsai .....	4
1.3 Dispersija .....	5
1.4 Čirpuotų impulsų stiprinimas .....	6
1.5 Impulsų plėtimo/spaudimo metodai .....	7
1.5.1 Prizmių sistema .....	9
1.5.2 Akustooptiniai impulsų formuotuvai .....	10
1.5.3 Čirpuotos Brego gardelės .....	11
2 Eksperimentas .....	13
2.1 Eksperimento metodika .....	13
2.2 Pluošto kokybės įvertinimas .....	15
2.3 Impulso plėtimo/spaudimo tyrimai .....	17
2.4 Skaidulos dispersijos kompensavimas .....	20
2.5 Impulso trukmės derinimas .....	21
3 Rezultatų aptarimas .....	23
Išvados .....	23
Santrauka .....	27
Priedas Nr. 1. ....	28

# Įvadas

Didelės galios lazerinių sistemų tobulinimas tapo vienu iš pagrindinių moderniosios fizikos uždavinių. Seniau didelės galios lazeriniais šaltiniais buvo laikomos teravatinės galios ( $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ ) spinduliuotę generuojančios sistemos, bet pastaruoju metu šis terminas dažniau naudojamas multiteravatinėms ir didesnės galios sistemoms. Tokių pikinės galios augimą lėmė didelis investavimas į mokslinius didelės galios ( $>1 \text{ PW}$ ) lazerių kompleksus ir jų skaičiaus augimas visame pasaulyje [1]. Didelės galios impulsiniai lazeriai atveria plačias galimybes tam tikruose taikomuosiuose ir fundamentiniuose tyrimuose. Medžiagų tyrimai esant ekstremalioms sąlygoms (didelėms energijoms ir laukams), leistų laboratorijos sąlygomis modeliuoti astrofizikinius reiškinius, tyrinėti kvantinius elektromagnetinius reiškinius ir vakuumo sandarą. Naudojant didelio intensyvumo lazerį, per kelis centimetrus būtų galima įgreitinti elementariąsias daleles iki kelių gigaelektronvoltų. Be šių tyrimų galingi impulsiniai lazeriai gali būti panaudoti ir medžiagų apdirbime, medicinoje, ir karyboje.

Didinti pikinę galią galima panaudojant ultratrumpus impulsus (subpikosekundinius ir femtosekundinius). Problema, su kuria buvo susidurta, tai stiprinančios terpės pažaidos slenkstis. Trumpi impulsai pasižymi didele pikine galia, kuri gali viršyti medžiagos pažaidimo slenkstį, – tai ilgą laiką trukdė tolesniam impulsų galios didinimui. Efektyvus metodas, išsprendžiantis šią problemą, buvo pasiūlytas 1985 metais (Strickland ir Mourou) ir leido pasiekti teravatų, o vėliau ir petavatų eilės galias. Čirpuotų impulsų stiprinimas, arba CPA (Chirped Pulse Amplification) pagrįstas trumpo impulso išplėtimu laike (sumažinant jo pikinę galią ir išvengiant savaiminio fokusavimo ir stiprinančios terpės pažaidimo), išplėsto impulso sustiprinimu ir suspaudimu iki pradinės trukmės. Daugumoje didelės galios impulsinių lazerinių sistemų šis metodas naudojamas iki šių dienų [2]. Taigi, didelės galios lazerinėse sistemose turi būti numatytas būdas impulsams išplėsti ir suspausti. Ultratrumpiems 30–50 fs impulsams tai padaryti gali būti sudėtinga, nes papildomai reikia kompensuoti ir optinių komponentų (lęšių, skaidrinančių dangų) sukeltą dispersiją. Dėl to impulso plėstuvai ir spaustuvai turi turėti galimybę valdyti optinių impulso komponentų vėlinimą tam, kad procesas būtų pilnai kontroliuojamas.

Metodai ir įranga, naudojama impulsų suspaudimui ir plėtimui, bus aptarta teorinėje šio darbo dalyje. Šio darbo tikslas ištirti impulsų spaudimui ir plėtimui laike naudojamą komponentą, sudarytą iš tūrinės Brego gardelės ir valdomą temperatūros gradientu. Rezultatai pateikiami eksperimentinėje darbo dalyje.

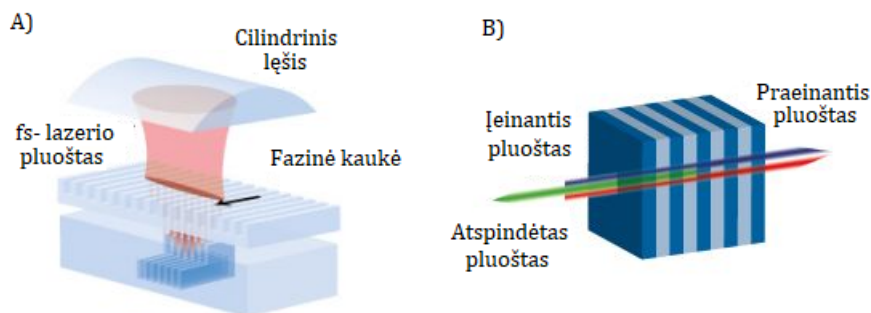
# 1 Teorinis įvadas

## 1.1 Tūrinės Brego gardelės

Tūrinės Brego gardelės – tai periodinės lūžio rodiklio moduliacijos, įrašytos į skaidrią medžiagą. Tūrinės gardelės pasižymi siauru spektriniu atsaku į krintančia spinduliuotę. Dėl savo unikalių savybių Brego gardelės naudojamos lazerinio pluošto spektriniam filtravimui, kombinavimui, bangos ilgio stabilizavimui.

Pagal veikimo pobūdį, tūrinės Brego gardelės gali būti nukreipiančio pluoštą arba jį atspindinčios. Jei lūžio rodiklio modifikacijos išdėstytos statmenai pluošto sklidimo krypčiai, tai Brego kampu sklindančios spektrinės komponentės bus nukreipiamos kita kryptimi nei likusios. Jei lūžio rodiklio modifikacijos išdėstytos pluošto sklidimo kryptimi, tai pereidama į didesnio lūžio rodiklio sritį dalis spinduliuotės praeina, o dalis atsispindi. Taip moduluojant lūžio rodiklį tam tikru periodu ir teisingai parenkant modifikacijų storį, galima atspindėti didžiąją tam tikro bangos ilgio spinduliuotės dalį.

Paprastai tūrinės gardelės gaminamos pasitelkiant UV (dažniau naudojamos su fotojautriomis medžiagomis) arba ultratrumpus impulsus (naudojamos su daugeliu skaidrių medžiagų). Įrašymas UV spinduliuote dažniau naudojamas su fotojautriomis medžiagomis, bet femtosekundinis įrašymas išplečia terpių, į kurias galima įrašyti gardeles, pasirinkimą. Femtosekundinis įrašymas vyksta atliekant medžiagos modifikaciją fokusuojant ultratrumpus impulsus medžiagos tūryje. Gardelės įrašymui naudojama fazinės kaukės įrašymo technologija, pavaizduota 1 pav. Įrašomų gardelių parametrai gali būti parenkami taip, kad gardelių atspindys būtų valdomas nuo kelių procentų iki 99%. Be to, femtosekundinio įrašymo metu galima įrašyti dviejų dimensijų darinius ir nuo vienos gardelės gauti skirtingus dažninius atsakus [3].



1 pav. Tūrinės Brego gardelės įrašymas (A) ir veikimo principas (B) [4].

## 1.2 Čirpuoti impulsai

Lazerinio impulso elektrinis laukas gali būti aprašomas šia išraiška:

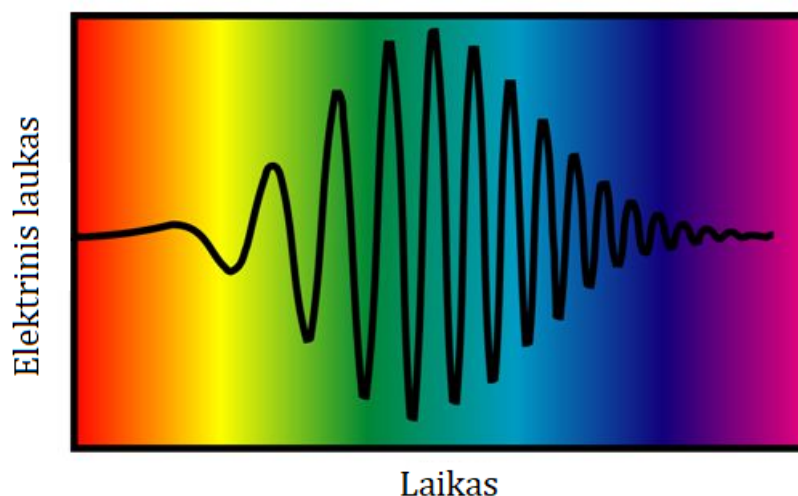
$$E(t) = \frac{1}{2} \sqrt{I(t)} \exp\{i[w_0 t - \phi(t)] + k \cdot j\}, \quad (1)$$

kur narys  $\phi(t)$  aprašo impulso fazės kitimą laike [5].

Lazerinio impulso čirpas gali būti suprantamas, kaip impulso dažnio priklausomybė nuo laiko. Teigiamas čirpas reiškia, kad impulsui sklindant laike jo dažnis auga, neigiamo čirpo atveju impulso dažnis mažėja.

Impulsas gali tapti čirpuotu sklindant skaidria terpe, kai pasireiškia chromatinės dispersijos reiškinyms arba esant netiesiniams reiškiniams, pavyzdžiui, fazinei savimoduliacijai. Čirpas gali būti pašalinamas leidžiant jam skliti per terpę su specialiai parinktu lūžio rodikliu.

Esant ribotam spektro pločiui, minimali impulso trukmė gaunama esant nuliniam čirpui. Esant šiai sąlygai, visos spektrinės impulso komponentės sklinda kartu neatskirtos laike t. y. turi pastovią spektrinę fazę.



2 pav. Čirpuotas impulsas [6].

Čirpo dydis gali būti nustatomas matuojant dažnio poslinkį laiko vienetui (Hz/s). Esant netiesiniam čirpui, ši vertė priklauso nuo laiko ir vienam impulsui nėra pastovus dydis.

Taip pat galima įvertinti grupinių greičių dispersijos dydį (sekundės kvadratu), reikalingą norint dispersiškai suspausti impulsą. Kitaip tariant, tai yra antros eilės dispersija, kuriai esant impulso trukmė yra mažiausia arba pikinė impulso galia yra didžiausia. Tačiau naudojant šį metodą čirpo įvertinimas gali būti klaidingas. Didėjant chromatinei dispersijai, nečirpuotam impulsui sklindant skaidria terpe, padidės ir dispersijos, reikalingos kompensuoti čirpą, vertė.

Nečirpuotam impulsui sklindant skaidria terpe, dėl netiesinio Kero efekto išplinta impulso spektras. Plačiam spektrui dažnio pokytis laike išauga, bet įskaičius medžiagos dispersiją

maksimalus suspaudimas gali sumažėti [7].

### 1.3 Dispersija

Chromatinė dispersija apibūdina fazinio ir grupinio greičių priklausomybę nuo optinio dažnio, šviesai sklindant skaidria terpe. Kadangi trumpi impulsai turi platų spektrą, tai atskirų komponentų faziniai greičiai skiriasi, dėl to atsiranda impulso plitimas laike.

Dispersijos įvertinimui šviesolaidyje naudojame fazinę konstantą  $\beta$ , kaip funkciją nuo kampinio dažnio, ir skleidžiame Teiloro eilute:

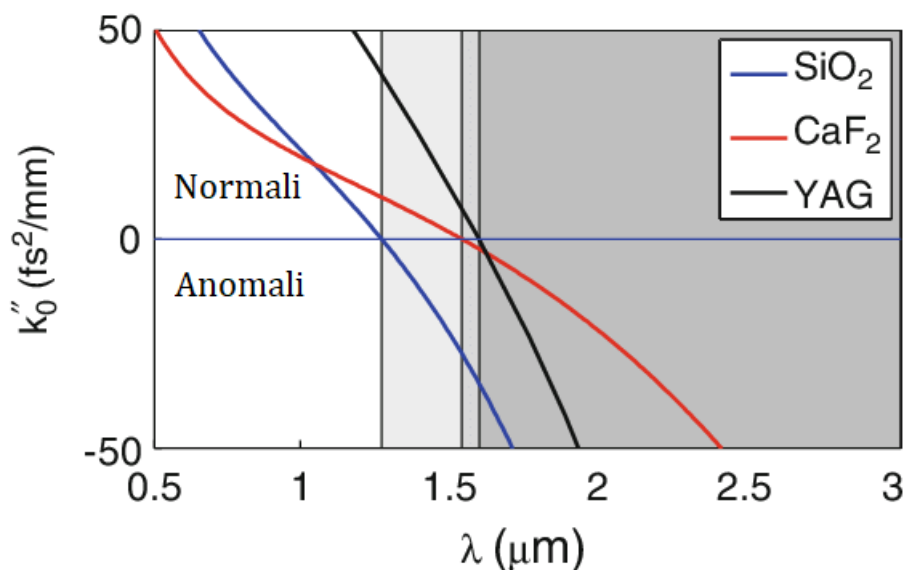
$$\beta(\omega) = \beta_0(\omega) + \frac{d\beta}{d\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2}(\omega - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} \frac{d^3\beta}{d\omega^3}(\omega - \omega_0)^3 + \dots \quad (2)$$

Paskutiniai du eilutės nariai apibūdina antros ir trečios eilės dispersijas. Vienamodžiuose šviesolaidžiuose tik antros ir trečios eilės dispersijos prisideda prie impulso plitimo laike. Antros eilės dispersija apibūdina grupinį vėlinimą arba grupinių greičių dispersiją. Trečios eilės dispersija pasireiškia plataus spektro ir itin trumpiems impulsams ir yra susijusi su grupinių greičių dispersijos priklausomybe nuo kampinio dažnio [8]. Grupinę greičių dispersiją galima aprašyti kaip funkciją nuo bangos ilgio. Taip gaunamas grupinių greičių dispersijos parametras:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3)$$

Tuo metu trečios eilės dispersijos parametras  $S$  gaunamas kaip  $D(\lambda)$  kreivės polinkis [9].

Dispersija gali būti skirstoma į normaliąją ir anomaliąją. Normalios dispersijos atveju, didėjant dažniui grupinis greitis mažėja, o anomalios dispersijos atveju, didėjant dažniui grupinis greitis didėja. Tarpe tarp normalios ir anomalios dispersijos dar yra ir nulinės dispersijos sritis. Šioje srityje impulsas gali sklisti neplisdamas laike dėl dispersijos. Nulinės dispersijos sritis gali kisti priklausomai nuo medžiagos, kuria sklinda impulsas. Stiklo šviesolaidyje ši sritis yra ties  $1,31 \mu m$  [10]. Norint išplėsti, o po to suspausti impulsus, reikia atsižvelgti į antros ir trečios eilės dispersijos parametrų ženklus. Jei impulsas buvo plečiamas tam tikru komponentu, turinčiu teigiamą dispersiją, o po to spaudžiamas kitu komponentu, turinčiu trečios eilės teigiamą dispersiją, tai tokiu atveju susidaro nesukompensuotos dispersijos perteklius, o tai blogina suspaustų impulsų kokybę [11].



3 pav. Kai kurių medžiagų grupinių greičių dispersijos priklausomybė nuo bangos ilgio [12].

## 1.4 Čirpuotų impulsų stiprinimas

Čirpuotų impulsų stiprinimo metodas pademonstruotas 1985 metais, ši technika leido išspręsti didelės galios stiprinimo sistemų problemą. Nors stiprinanti terpė gali sukaupti ir impulsui perduoti milidžaulių ar net džaulių eilės energijas, pikinė galia ir intensyvumas gali tapti tokie dideli, kad pradeda reikštis netiesiniai reiškiniai, tokie kaip fazės savimoduliacija, dėl ko išplinta impulso spektras, arba savaiminis fokusavimasis, kuris pažeidžia stiprinančią terpę ar kitus optinius komponentus.

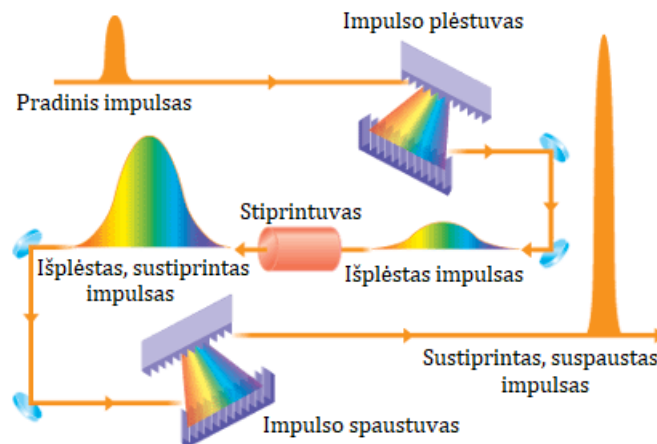
Čirpuotų impulsų stiprinimo metodas sudarytas iš trijų pagrindinių žingsnių:

1. Įnešant didelę dispersiją trumpas pradinis impulsas yra išplečiamas laike apie 1000 kartų. Taip sumažinama jo pikinė galia.
2. Platus, mažos pikinės galios impulsas yra sustiprinamas išvengiant netiesinių reiškinų įtakos.
3. Sustiprintas impulsas yra suspaudžiamas, naudojant priešingo ženklo dispersiją įnešančius elementus. Gaunamas didelės pikinės galios impulsas su trukme, atitinkančia pradinio impulso trukmę.

Impulso suspaudimui paprastai naudojama difrakcinių gardelių pora, kuri veikia plačiame bangos ilgių diapazone. Dispersija gardelėje sukurama dėl pluošto optinio kelio priklausomybės nuo bangos ilgio. Lygiagrečiai orientuotų difrakcinių gardelių poroje ilgesnio bangos ilgio komponentės keliauja ilgesnį kelią, taigi sukuriamas neigiamas grupinis greitis. Jei pro tokias gardeles keliauja teigiamai čirpuotas impulsas, tai impulsas trumpės, nes gardelės kompensuos

jo čirpą. Priešingu atveju, gardelės gali būti suderintos statmenai, tokiu atveju, impulsas bus plečiamas, eigos skirtumas tarp mėlynų ir raudonų komponentų bus padidinamas.

Gardelės gerai veikia ir esant dideliame modos diametru, taigi jas galima naudoti su erdvėje išplėstais labai galingais impulsais. Bendru atveju, CPA sistemai reikia 4 difrakcinių gardelių (2 suspaudimui, 2 išplėtimui). Impulsams, kurie išplečiami mažiau nei 1 ns, gali būti naudojama čirpuota Brego gardelė, kuri yra daug kompaktiškesnė nei difrakcinės gardelės.



4 pav. Čirpuotų impulsų stiprinimo principas [13].

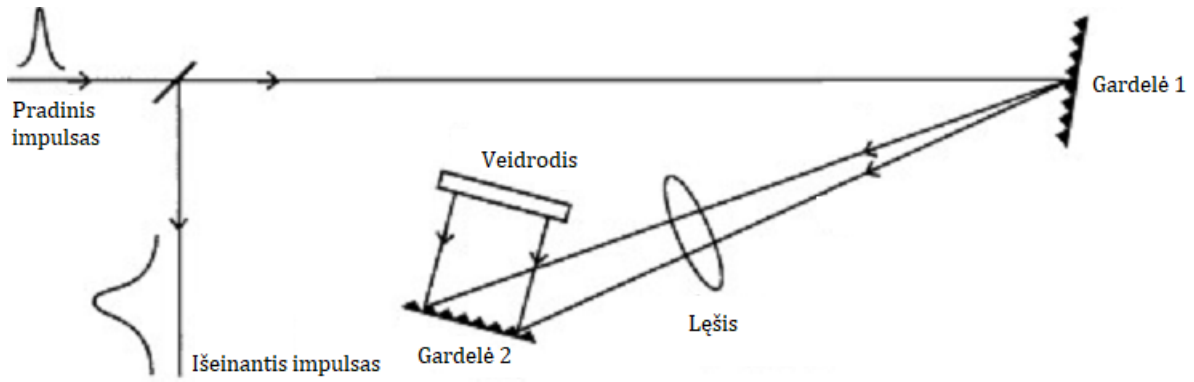
Paprasčiausiu atveju, plėstuvo ir spaustuvo dispersijos turėtų būti vienodos, bet skirtingo ženklo. Šių dispersijų nesutapimai gali atsirasti, jei stiprintuve pasireiškia pakankamai stipri dispersija arba netiesiniai reiškiniai. Bet kuriuo atveju, dispersijų suderinimas turi būti tikslus, ypač kai norima gauti labai trumpus impulsus arba išplėsti impulsą iki didelių trukmių.

Stiprinimui gali būti panaudoti įvairių tipų lazeriniai stiprintuvai (tiesiniai, regeneratyvini, šviesolaidiniai). Šviesolaidinių stiprintuvų maksimalią galią riboja netiesiniai reiškiniai, neskaitant gardelių įnešamų nuostolių (keli procentai), impulso energija gali siekti dešimtis mJ. Kietakūnėse terpėse dėl mažesnio sąveikos ilgio galimos didelės energijos, siekiančios kelis džaulius. Suspaudus tokius impulsus iki  $<1\text{ps}$ , galima gauti teravatų ar net petavatų eilės pikines galias [14].

## 1.5 Impulsų plėtimo/spaudimo metodai

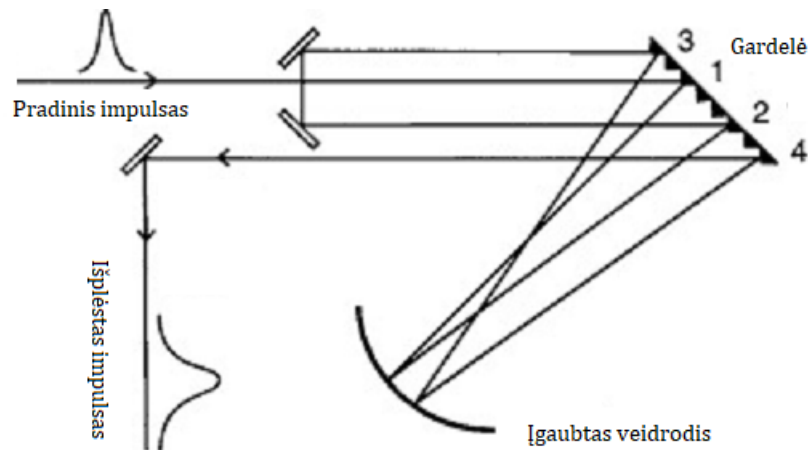
Be jau aptartos įprastos impulsų plėtimo/spaudimo schemos, gali būti panaudota schema, kurioje tarpe tarp gardelių įstatytas lęšis. Lęšio paskirtis – pakeisti grupinių greičių dispersijos ženklą.





5 pav. Čirpuotų impulsų plėstuvo konfigūracija su dviem gardelėm ir lęšiu [15].

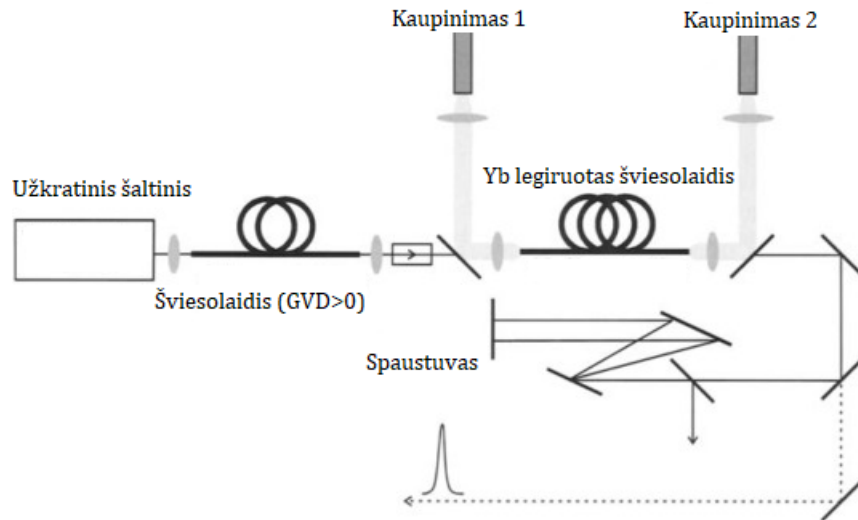
Praktikoje taip pat naudojamos ir vienos gardelės schemas. Pav. 6 pavaizduota konfigūracija užtikrina impulso išplėtimą, panaudojant vieną gardelę ir įgaubtą veidrodį. Šiuo atveju, schema yra paprastesnė, nes naudojama tik viena gardelė, tačiau reikia kelių papildomų veidrodžių ir daugiau apėjimų.



6 pav. Čirpuotų impulsų plėstuvo konfigūracija su viena difrakcine gardele [16].

Skaidulinėse schemose stiprinti trumpus impulsus yra sudėtingiau nei kietakūnėse terpėse. Dėl fazės savimoduliacijos ir grupinių greičių dispersijos, femtosekundinis impulsas gali neišlaikyti skaidulos šerdyje. Šių efektų įtaką galima sumažinti naudojant skaidulas su didesniu šerdies diametru, tačiau tuomet gali pasireikšti modų dispersija. Vis dėlto, naudojant tam tikro dizaino didelio modos ploto skaidulas, galima palaikyti vienamodį režimą ir padaryti kaupinimą efektyvesnį, suvedant į aktyvią skaidulą daugiau spinduliuotės ir sumažinant netiesinių efektų įtaką.

Skaidulinė CPA sistema išnaudoja šviesolaidžio sukeltą grupinių greičių dispersiją tam, kad plėsti impulsą. Pradinis kelių pikosekundžių trukmės impulsas praleidžiamas sklisti pasyviu šviesolaidžiu su teigiama grupinių greičių dispersija. Išplėstas impulsas sustiprinamas skaiduliniam iterbiu legiruotame stiprintuve. Tada, naudojant įprastą difrakcinių gardelių porą, impulsas suspaudžiamas iki pradinės trukmės.



7 pav. Čirpuotų impulsų plėstuvo konfigūracija su skaiduliniu plėstuvu [17].

### 1.5.1 Prizmių sistema

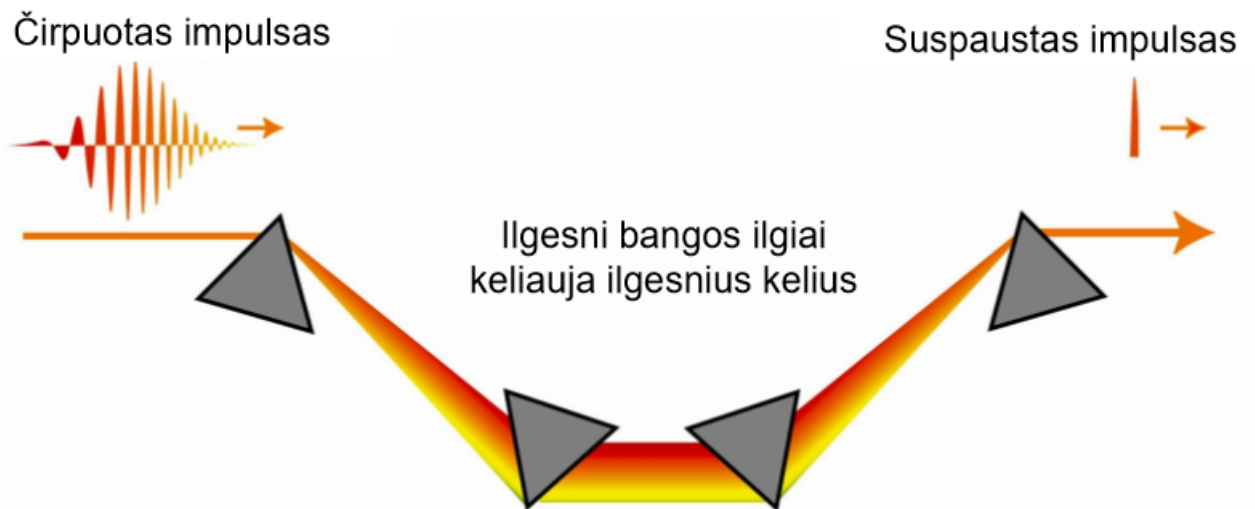
Kaip minėta anksčiau, trumpam impulsui sklindant dispersine terpe, dėl grupinių greičių vėlinimo jis tampa čirpuotas, t. y. spektrinės komponentės išėjimą pasiekia skirtingais laiko momentais, priklausomai nuo bangos ilgio. Šis efektas sukelia laikinį impulso plitimą ir pikinės galios mažėjimą. To galima išvengti panaudojant impulso kompresorių, turintį neigiamą dispersiją.

Įprastas metodas įvesti neigiamą vėlinimą – panaudoti kampinę dispersiją. Kampinė dispersija, nepaisant jos ženklo, įveda neigiamą grupinių greičių vėlinimą. Taigi impulsas, sklisdamas pro prizmę ar difrakcinę gardelę, patiria neigiamą grupinių greičių vėlinimą, kurio vertė priklauso nuo sklidimo atstumo. Naudojant vieną elementą, impulsas plinta erdvėje ir keičia sklidimo kryptį. Įstačius antrą, atvirkščiai pirmosios atžvilgiu orientuotą, prizmę, galima eliminuoti kampinę išeinančio pluošto dispersiją. Norint eliminuoti erdvinę dispersiją, reikia panaudoti dar vieną prizmių porą. Tokiu būdu keturios prizmės gali kompensuoti medžiagos sukeltą dispersiją ir atkurti kolimuotą pluoštą. Jos taip pat kompensuoja proceso metu atsirandantį impulso fronto pokrypį [18].

Tokio tipo impulsų kompresorius yra svarbus, tačiau nepraktiškas sistemos papildymas. Nors spektrinių komponentių sklidimo kelią galima tiksliai suderinti varijuojant vienos iš prizmių kampą, norint derinti dispersiją platesniame diapazone, reikia keisti atstumą tarp pirmosios ir trečios-ketvirtos prizmės (ir palaikyti šį atstumą vienodą), kas daro sistemą nekompaktišką. Be to, kompresorius turi griežtas suderinimo sąlygas, dėl to bet kokios derinimo paklaidos išeinantį impulsą gali iškraipyti ir laike, ir erdvėje, įskaitant kampinę dispersiją, impulso fronto pokrypį, erdvinį čirpą ir pluošto eliptiškumo didėjimą. Dažnai šie iškraipymai prizmių sistemose yra daugiau mažiau neišvengiami.

Kita problema naudojant prizmių sistemas – tai sudėtingas bangos ilgių derinimas. Suderi-

nus prizmes tam tikram bangos ilgių ruožui, o po to pakeitus bangos ilgį, prizmes reikia derinti iš naujo, o derinimas gali įnešti visus anksčiau minėtus iškraipymus. Tokią sistemą galima supaprastinti iki dviejų ar net vienos prizmės ir veidrodžio, bet jautrumas derinimui ir trikdžiams išlieka [19].



8 pav. Impulso suspaudimas panaudojant keturias prizmes [20].

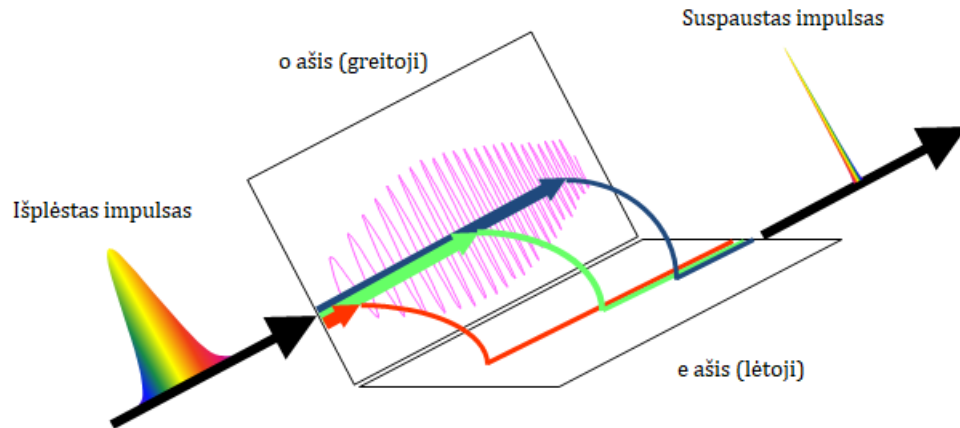
### 1.5.2 Akustooptiniai impulsų formuotuvai

Dispersijos kompensavimui lazerinėse sistemose būtina panaudoti prizmių, gardelių poras ar dispersinius veidrodžius. Šie metodai nors ir efektyvūs, tačiau neleidžia kompensuoti aukštesnių eilių dispersijos, be to, nėra valdomi programiškai. Net jei impulso plėtimo ir spaudimo mazgai yra idealiai suderinti, papildoma dispersija gali atsirasti dėl kitų optinių komponentų, naudojamų sistemoje, įnešamos dispersijos.

Akustooptinio impulsų formuotuvo veikimo principas pagrįstas poliarizacijos moduliavimu dvejopai laužiančiame kristale. Paleidus impulsą sklįsti kristalo greitąja ašimi, įėjimo poliarizacija yra pasukama statmenai, taigi sklinda lėtąja ašimi. Poliarizacijos pasukimas vyksta tik akustinei bangai sklindant kristalu. Optinis dažnis, kuris bus pasukamas į lėtąją ašį, priklauso nuo akustinės bangos, sklindančios kristalu, dažnio. Moduluojant akustinės bangos dažnį, pasirinktu dėsningumu galima skirtingas spektrines impulso komponentes pasukti skirtingais laiko momentais, taip kontroliuojant komponentių sklidimo greitį kristale.

Akustooptinio formuotuvo trūkumai – tai mažas efektyvumas (didžiausias apie 50%), ribotas pasiekiamas grupinis vėlinimas ir ribotas panaudojimas didelio intensyvumo impulsams. Vis dėlto, toks prietaisas gerai papildo įprastą CPA sistemą. Dažnai dėl stiprintuvo ir kitų optinių komponentų įnešamos papildomos dispersijos, neišvengiamai impulsas suspausti į pradinę trukmę. Pastačius akustooptinį formuotuvą prieš plėtimo mazgą ir tinkamai jį užprogramavus,

galima dirbtinai įvesti impulso formos iškreipimus, kurie, sklisdami pro plėtimo, stiprinimo ir spaudimo mazgus, kompensuos ir pasieks pradinę impulso trukmę [21].



9 pav. Akustooptinis impulso suspaudimas [22].

### 1.5.3 Čirpuotos Brego gardelės

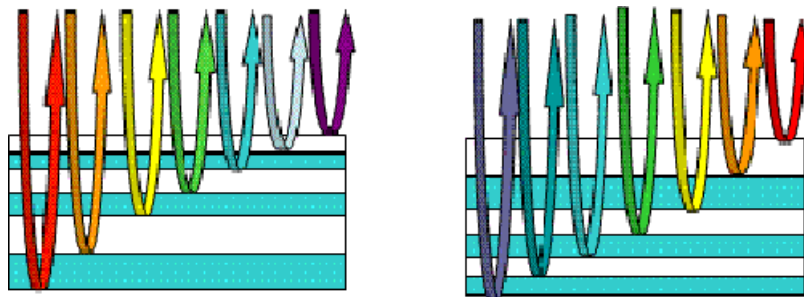
Pagrindinis čirpuoto veidrodžio veikimo principas yra nepastovios periodinės struktūros, įrašytos medžiagos tūryje. Priešingai nei paprastoje tūrinėje gardelėje, čirpuotoje gardelėje lūžio rodiklio modifikacijos yra nevienodo storio.

Įprastoje Brego gardelėje kiekvienoje sandūroje dalis krintančios spinduliuotės yra atspindima, o likusi dalis praeina gilyn. Jei sluoksnio storis lygus ketvirčiui bangos ilgio, atspindžiai interferuoja konstruktyviai, taip pasiekiamas didelis atspindys. Čirpuotoje gardelėje struktūra yra periodiškai kintančio storio, tokiu būdu gali būti atspindimas labai platus spektras. Grupinių greičių vėlinimo kontrolei reikia tinkamai parinkti skirtingų lūžio rodiklių sluoksnių storius. Tokia struktūra lemia skirtingus prasiskverbimo storius skirtingoms spektrinėms komponentėms. Šitaip skirtingų bangos ilgių komponentės atsispindi skirtingame gylyje ir dėl to nukeliauja skirtingus kelius. Tokiomis struktūromis galima kompensuoti ir teigiamą, ir neigiamą dispersiją, viskas priklauso nuo to, kokia tvarka bus išdėstyta aperiodinė struktūra.

Vienas iš tokios struktūros trūkumų – tai grupinių greičių dispersijos osciliacijos, impulsui sklindant per gardelę. Viena iš priežasčių – tai Frenelio atspindys stiklo-oro sandūroje. Problema galima išspręsti panaudojant papildomą antireflekcinę struktūrą arba gardelės optimizavimo algoritmus.

Tokio tipo gardelės dažnai naudojamos skaidulinėse schemose, nes skirtingo lūžio rodiklio sluoksnius galima įrašyti į šviesolaidį ir integruoti į sistemą, nenaudojant laisvos erdvės komponentų. Čirpuota Brego gardelė sukuria didelę dispersiją mažame impulso sklidimo kelyje. Trūkumas naudojant tokį metodą skaidulinėse schemose yra tas, kad sustiprinus ir suspaudus impulsą, šviesolaidžio šerdyje pasiekiamas didelis galios tankis, galintis sukelti pažeidimą. Dėl

to didelės galios schemose naudojamos didesnio paviršiaus ploto čirpuotos tūrinės Brego gardelės, įrašytos stikle. Įvedant pluoštą į tokias gardeles, galima pluoštą išplėsti erdveje, taip padidinant pažeidimo slenkstį [23, 24].



10 pav. Teigiamą ir neigiamą dispersiją kompensuojantys čirpuoti veidrodžiai [25].

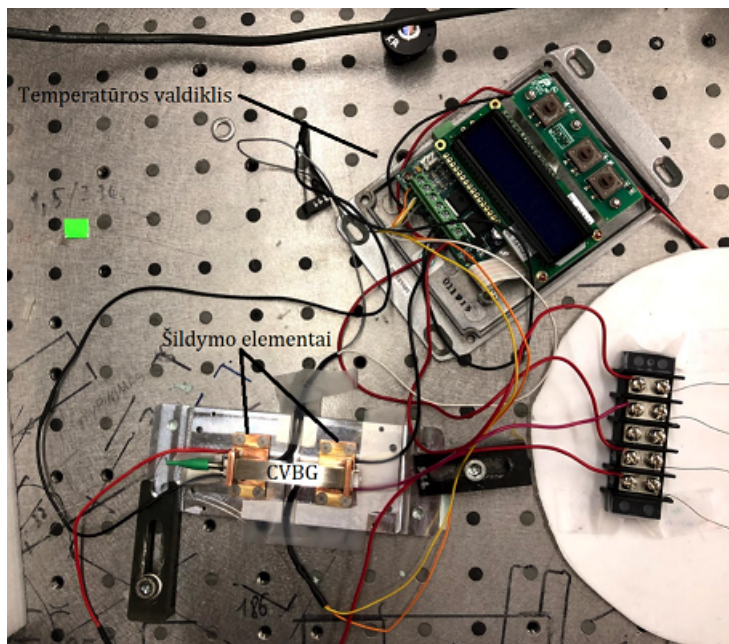
## 2 Eksperimentas

### 2.1 Eksperimento metodika

Šio darbo metu buvo tiriamos impulso plėstuvo ir kompresoriaus, sudaryto iš čirpuotų tūrinių Brego gardelių (CVBG), charakteristikos.

Impulsų plėstuvą sudaro temperatūriškai derinama, stikle įrašyta tūrinė Brego gardelė su skaiduline jungtimi. Abiejuose komponento galuose įtaisyti elektroniskai valdomi termoelementai, kurių temperatūras galima valdyti nepriklausomai vieną nuo kito. Tarp CVBG komponento galų esant nevienodoms temperatūroms, išilgai stiklo susidaro temperatūrų gradientas, dėl ko šiek tiek pasikeičia gardelės atspindimi bangos ilgiai. Sukuriant tiesinį temperatūros gradientą išilgai CVBG, gali būti derinama antros eilės dispersija.

CVBG galų temperatūros gradientas gali būti derinamas atitinkamai nuo 15 °C ir iki 110 °C arba 110 °C ir 15 °C. Impulsų spaudimui naudojama identiška CVBG, įmontuota specialia-me laikiklyje ir apsuhta 180 laipsnių kampu atžvilgiu impulso plėstuvo. CVBG elementas su temperatūros valdikliu pavaizduoti 11 pav.

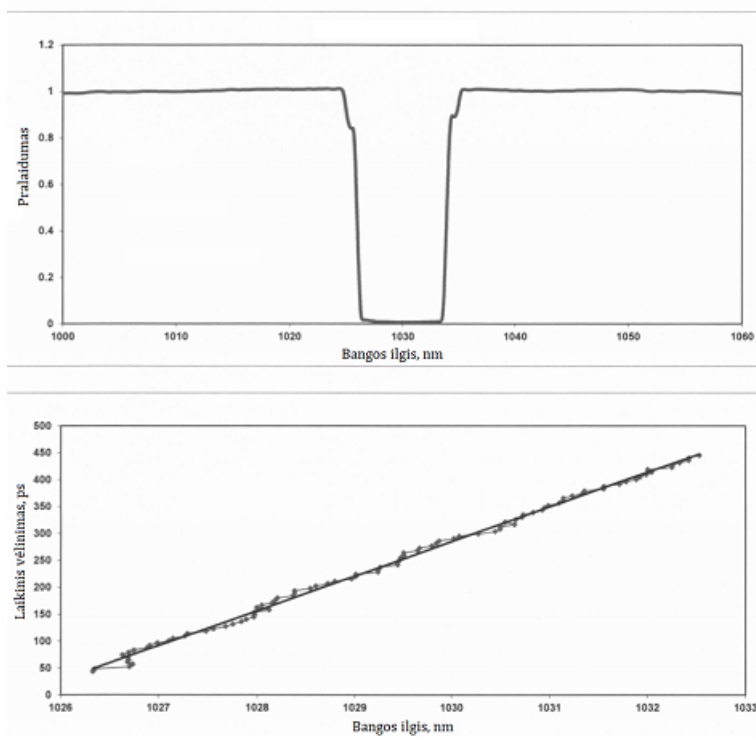


11 pav. Darbe naudotas CVBG elementas ir temperatūros valdiklis.

Plėtimo ir spaudimo elementai buvo beveik identiški, t. y. jų parametrai skyrėsi labai nežymiai. Abiejų elementų parametrai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Darbe naudotų tūrinių Brego gardelių parametru palyginimas.

<i>Parametrai:</i>	CVBG 1	CVBG 2
Centrinis bangos ilgis :	1030 nm	1029,9 nm
Spektro plotis (FWHM):	8 nm	8,1 nm
Difrakcijos našumas :	88 %	88 %
Ilgis :	50 mm	50 mm
$M^2$ :	1,3	1,3
Plėtimo koeficientas :	64	64
Išplėtimo trukmė :	512 ps	518 ps



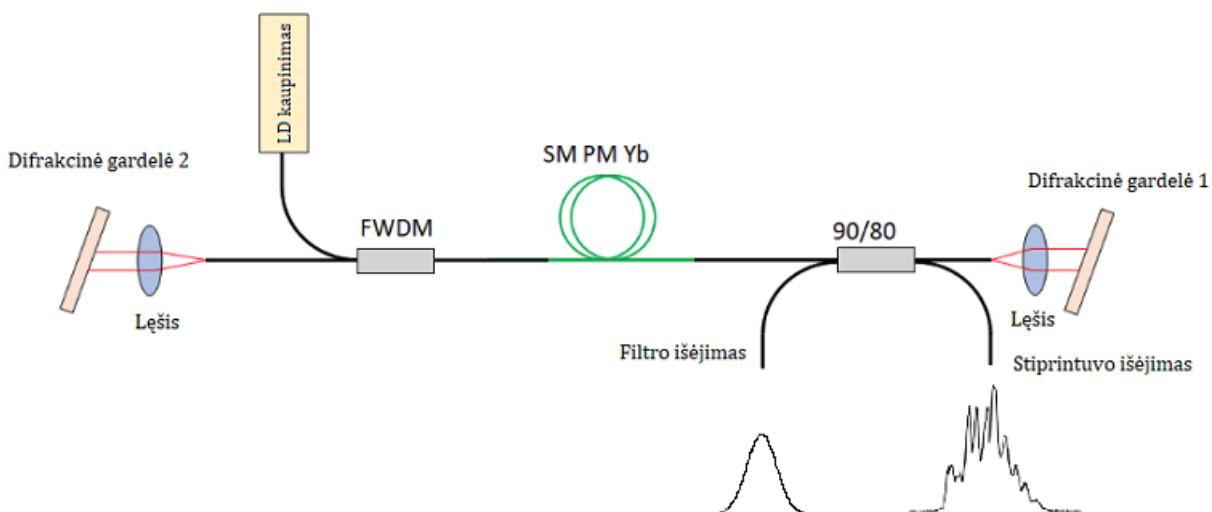
12 pav. Viršuje – VBG pralaidumo priklausomybė nuo bangos ilgio. Apačioje – VBG laikinio vėlinimo priklausomybė nuo bangos ilgio.

Kaip užkratinis šaltinis, šiame darbe buvo naudojamas skaidulinis impulsų generatorius, kurio veikimas paremtas fazės savimoduliacija, stiprinimu ir pakaitiniu spektriniu filtravimu. Generatoriaus schema pavaizduota 13 pav.

Generatoriaus stiprintuve įvedus kaupinimo spinduliuotę, pradeda generuotis atsitiktinės trukmės ir amplitudės triukšminiai impulsai. Susigeneravus pakankamai trumpam ir galingam triukšminiam impulsui, jam sklindant šviesolaidžiu dėl fazinės savimoduliacijos išplinta impulso spektras. Platus impulso spektras yra filtruojamas difrakcine gardele, iš jo išfiltruojama Gausinė dalis, kuri grįžta atgal į grandinę, yra stiprinama, plečiama ir vėl filtruojama. Taip sudarius tinkamas sąlygas (tinkamai parinkus šviesolaidžio ilgį, stiprinimą, filtrų perklojimą), grandinėje

gali cirkuliuoti itin stabilūs ultratrumpi impulsai.

Kaip matyti iš 13 pav, generatoriaus schema turi pluošto daliklį, išvedantį pluoštą per du išėjimus. Pro vieną iš išėjimų išeina impulsai, paveikti fazinės savimoduliacijos ir turintys platų spektrą, pro kitą išeina impulsai, atspindėti nuo difrakcinės gardelės, jų spektras siauras. Impulsų spektrai iš šių išėjimų pavaizduoti darbo priede Nr. 1.



13 pav. Užkratinių impulsų generatoriaus schema.

Filtro išėjime generatorius generuoja spektriškai ribotus 570 fs trukmės impulsus, turinčius siauresnį spektrą (3 nm) nei gardelės atspindimas spektras. Stiprintuvo išėjime spektras platesnis (40 nm) nei gardelės atspindimas spektro plotis. Bandymai buvo atliekami su impulsais iš abiejų šio generatoriaus išėjimų.

## 2.2 Pluošto kokybės įvertinimas

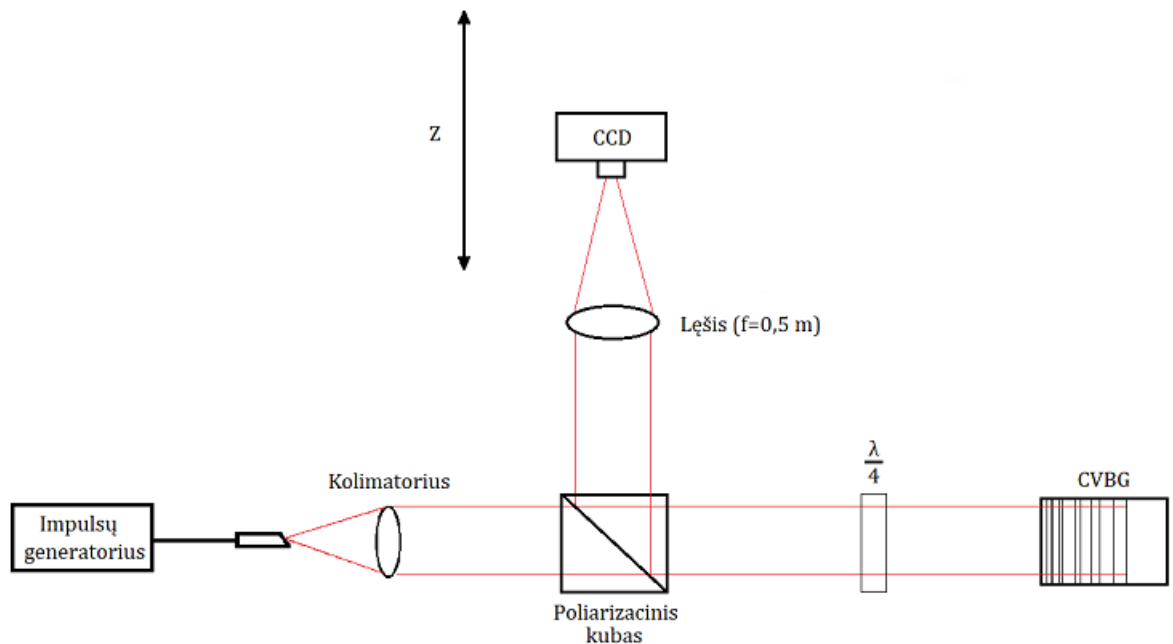
Prieš impulso plėtimo ir spaudimo tyrimus norėta išsiaiškinti, kokią įtaką pluošto kokybei daro CVBG elementas, ir ar toks elementas gali būti panaudotas galutinėje CPA schemeje impulsų spaudimui.

Matavimo realizavimui buvo surinkta schema, pavaizduota 14 pav. Schema sudaro jau aptartas impulsų generatorius, iš kurio išėjęs pluoštas yra sukolinuojamas, praeina poliarizacinį kubą ir  $\frac{\lambda}{4}$  plokštelę, kur pluošto poliarizacija iš tiesinės tampa apskritimine. Tuomet spinduliuotė yra atspindima čirpuotos Brego gardelės, dėl ko pasikeičia apskritiminės poliarizacijos kryptis, pluoštas praeina pro  $\frac{\lambda}{4}$  plokštelę, kur spinduliuotė tampa tiesinė, bet statmena ateinančiai į plokštelę spinduliuotei. Dėl to poliarizacinis kubas atspindi pluoštą statmenai, tuomet



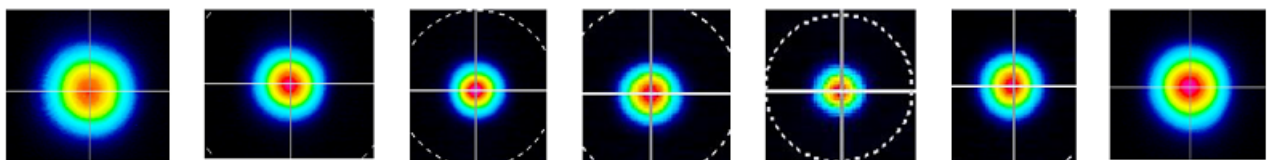
jis yra fokusuojamas didelio židinio nuotolio lęšio (0,5 m). Išilgai pluošto sklaidimo krypties yra statoma CCD kamera, kurią slankiojant Z kryptimi galima išmatuoti pluošto intensyvumo skirstinius skirtingose pluošto sklaidimo taškuose.

Skenuojant CCD kamerą išilgai pluošto sklaidimo krypties, vizualiai galima įvertinti, kokie iškreipymai atsiranda pluoštui atsispindėjus nuo gardelės, o pastačius gardelę taip, kad atstumas tarp gardelės ir lęšio būtų lygus dvigubam lęšio židinio nuotoliui, tokia pačia atstume lęšis atvaizduos pluoštą gardelės viduje. Taip pat galima įvertinti pluošto eliptiškumą.



14 pav. Pluošto iškreipimų matavimo schema.

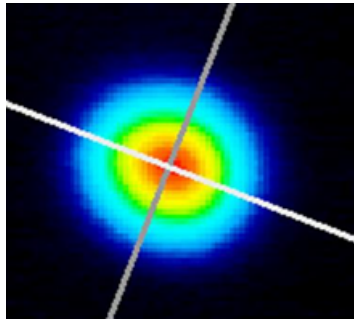
Skenuojant kamerą pluošto fokuso aplinkoje, pluošto iškreipymai nebuvo pastebėti. Atsiranda nežymus eliptiškumas, kuris blogiausioje išmatuotoje padėtyje buvo apie 0,94 naudojant CVBG 1 komponentą. Kadangi tolesniuose matavimuose naudojama ir plėtimo, ir spaudimo gardelė, tai toks pat pluošto įvertinimas buvo atliktas ir su CVBG 2 gardele. Naudojant CVBG 2 gardelę, didelių pluošto iškreipimų taip pat nepastebėta, tačiau atsiranda didesnis eliptiškumas (0,89).



15 pav. Pluošto skirstiniai fokuso aplinkoje naudojant CVBG 1 komponentą.

Iš gerosios CVBG 1 buvo pagamintas kompresorius, o blogoji CVBG 2 buvo panaudota plėstuvo pagaminimui. Pluošto eliptiškumas plėstuvo charakteristikų ženkliai nepaveikia.

Panaudojus CVBG 2 buvo pagaminta temperatūra derinamas impulsų plėstuvas. Dėl eliptiškumo gali atsirasti nežymūs įvedimo į optinę skaidulą nuostoliai. Geroji CVBG 1 kompresoriumi pasirinkta siekiant, kad lazerio išėjime būtų užtikrinta gera suspaustų impulsų pluošto kokybė.



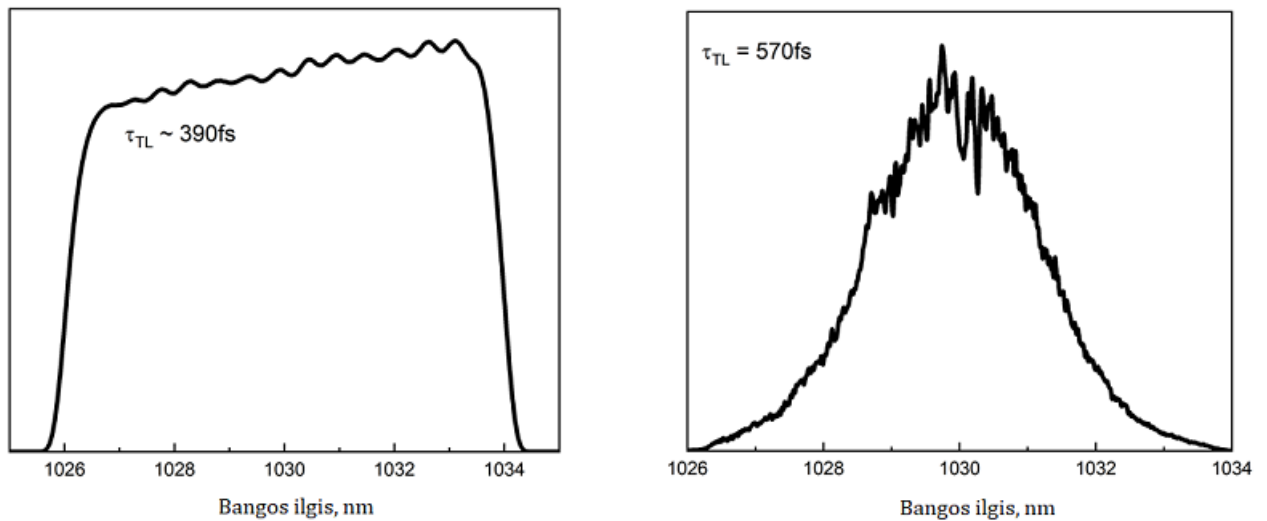
16 pav. Didžiausio eliptiškumo (0,89) padėtis pluošte naudojant CVBG 2 komponentą.

### 2.3 Impulso plėtimo/spaudimo tyrimai

Nustačius, kuris CVBG bus naudojamas plėtimui, o kuris spaudimui, prie CVBG 2 galų buvo pritaisyti termo elementai, kuriais buvo valdomas temperatūros gradientas išilgai komponento.

Prieš spaudžiant impulsus, spektro analizatoriuje buvo stebimas CVBG gardelės spektrinis atsakas. Į gardelę iš generatoriaus išėjimo buvo paleidžiamas impulsas ir spektro analizatoriuje stebimas nuo gardelės atspindėtas spektras. Bandytas buvo atliekamas naudojant ir plataus, ir siauro spektro generatoriaus išėjimus. Kaip matyti iš 12 pav., CVBG turi tam tikro pločio pralaidumo langą, o tai reiškia, jog platesnio spektro spinduliuotė bus filtruojama gardelės ir bus gaunamas siauresnis spektras, o tai neleidžia suspausti impulso iki spektriškai ribotos trukmės.

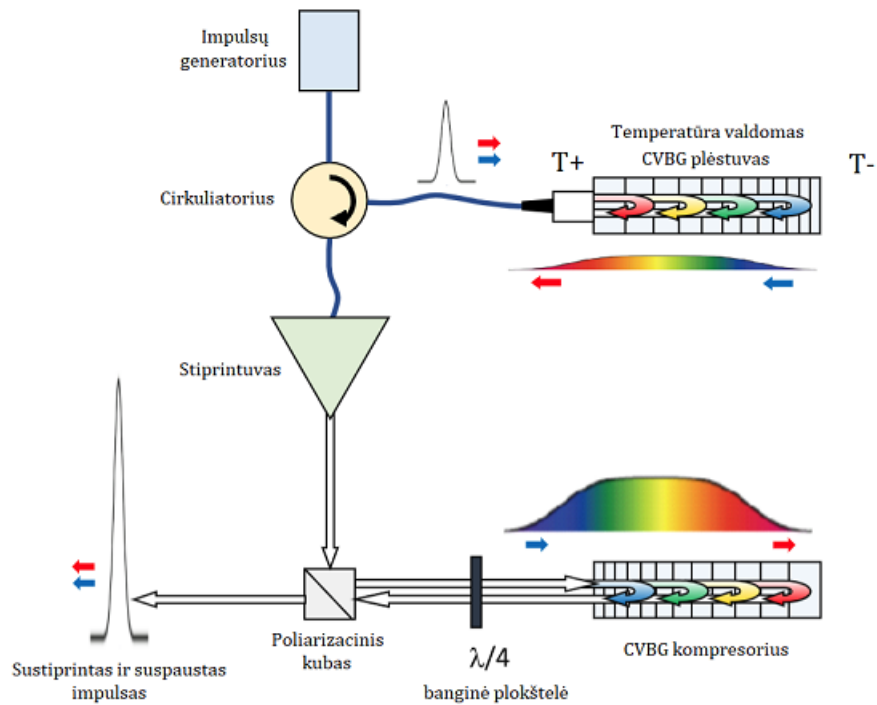
Matavimo rezultatai pateikti 17 pav. Plataus spektro generatoriaus išėjimo spektras buvo padaugintas iš gardelės pralaidumo spektro ir taip gautas gardelės atspindėtas spektras. Siauro spektro išėjimas buvo išmatuotas spinduliuotei atsispindėjus nuo gardelės. Iš rezultatų matyti, kad, kaip ir minėta, gardelė susiaurina į ją ateinantį platų spektrą dėl to, kad turi siauresnį spektrą nei ateinančio impulso spektras. Matuojant su siauru spektru, pastebėta, kad spektro plotis nesikeičia, tačiau spektro viršūnėje atsiranda šiek tiek triukšmų. Šie matavimai leidžia ne tik įvertinti gardelės įtaką spektrui, bet ir užduoda spektriškai riboto impulso trukmę, į kurią po to bus bandoma suspausti impulsą. Plataus spektro impulsui ši trukmė lygi 390 fs, o siauro spektro impulsui – 570 fs. Impulso trukmė atitinka visą jo plotį pusės aukštyje (FWHM).



17 pav. Plataus spektro signalas iš generatoriaus išėjimo, padaugintas iš gardelės pralaidumo funkcijos (kairėje), ir siauro spektro signalas iš kito generatoriaus išėjimo, atsispindėjęs nuo tūrinės Brego gardelės (dešinėje).

Impulsų plėtimo ir spaudimo matavimams buvo surinkta schema, pavaizduota 18 pav. Šią schemą sudaro impulsų generatorius, cirkulatorius, impulsų plėstuvus (CVBG 2), stiprintuvas, impulsų spaustuvas (CVBG 1), poliarizacinis kubas ir ketvirčio bangos ilgio plokštelė. Schemos veikimo principas ir pluošto sklidimo eiga yra tokia:

1. Impulsų generatorius generuoja sąlyginai mažos vidutinės galios impulsus (0,1 mW, 10 MHz).
2. Skaidulinis cirkulatorius nukreipia signalą į temperatūra valdomą CVBG 2, kur impulsas yra išplečiamas laike.
3. Nuo CVBG 2 atsispindėjęs, laike išplėstas impulsas išvedamas per trečią cirkulatoriaus išėjimą ir yra stiprinamas stiprintuve iki 100 mW.
4. Sustiprintas signalas yra atspindimas poliarizacinio kubo, o  $\frac{\lambda}{4}$  banginė plokštelė paverčia spinduliuotę apskritimine.
5. Impulsas pasiekia CVBG 1 su priešingo ženklo dispersija (CVBG 1 apsukta 180 laipsnių kampą atžvilgiu CVBG 2) ir yra suspaudžiamas.
6. Suspaustas impulsas vėl praeina pro banginę plokštelę ir poliarizacinį kubą, taip išėjime gauname sustiprintus ir suspaustus impulsus.

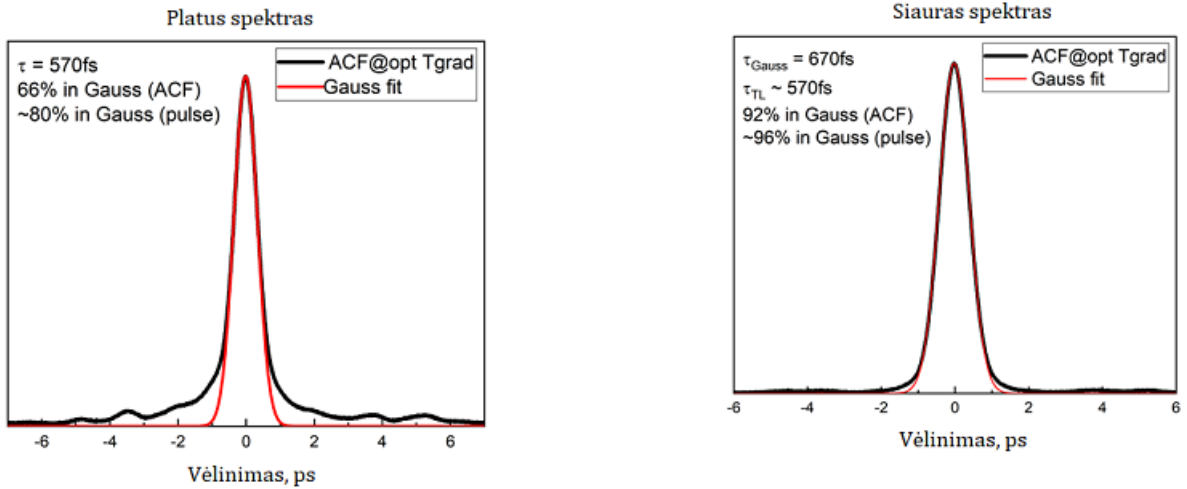


18 pav. Impulsų spaudimo tyrimų schema.

Reikia paminėti, kad šiame darbe temperatūra valdomas buvo tik impulsų plėstuvas. To turi pakakti, kadangi impulso plėtimą suderinus su kompresoriaus dispersija, impulsas turėtų susispausti iki spektriškai ribotos trukmės. Tarpe tarp plėstuvo ir spaustuvo esant papildomiems komponentams, įnešantiems papildomą dispersiją (stiprintuvas, šviesolaidis, pluošto daliklis ir t. t.), plėstuvas gali išplėsti impulsą daugiau arba mažiau, taip, kad sklindant per juos dispersija susikompensuotų ir impulsas galėtų susispausti kompresoriuje iki pradinės trukmės.

Naudojant aprašytą schemą, parinkus temperatūrų skirtumą tarp plėstuvo galų  $dT=7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , impulsai iš plataus spektro generatoriaus išėjimo buvo suspausti iki 570 fs, nors spektriškai riboto impulso trukmė 390 fs. Gautos autokoreliacinės funkcijos buvo aproksimuotos Gausine funkcija, siekiant įvertinti, kiek suspaustas impulsas yra artimas Gausiniam. Plataus spektro impulsui gautas autokoreliacinės funkcijos kontrastas 66 %, impulso kontrastas 80 %, tiek energijos yra Gauso impulse, o kita energijos dalis sudaro pjedestalą. Manoma, kad dalis pjedestalo galėjo atsirasti dėl to, kad gardelės pralaidumo funkcija yra stačiakampės formos, dėl to ją praėjusio plataus spektro impulso spektras tampa stačiakampiu. Stačiakampio formos spektrui atlikus Furje transformaciją, gauname, kad laikinis impulso vaizdas yra *sinc* funkcijos pavidalo su slobstančiomis osciliacijomis kraštuose, ką ir galime matyti iš suspausto impulso laikinio vaizdo.

Siauro spektro impulsas optimaliausiai buvo suspaustas iki 670 fs (spektriškai ribota trukmė 570 fs), naudojant  $dT=5,7$  °C temperatūrų skirtumą tarp plėstuvo galų. Autokoreliacinės funkcijos kontrastas 92%, o impulso kontrastas yra 96% (tokią dalį sudaro Gauso impulsas), kontrastas geresnis nei naudojant platų spektrą. Spektriškai ribotų ir eksperimentinių trukmių neatitikimas gali būti susijęs su komponentų neidealumais, taip pat su autokoreliatoriaus artefaktais.



19 pav. Impulsų spaudimo tyrimų rezultatai: suspaustas plataus spektro impulsas (kairėje), kai spektras platesnis nei CVBG atspindžio juostos plotis, ir suspaustas siauro spektro impulsas (dešinėje).

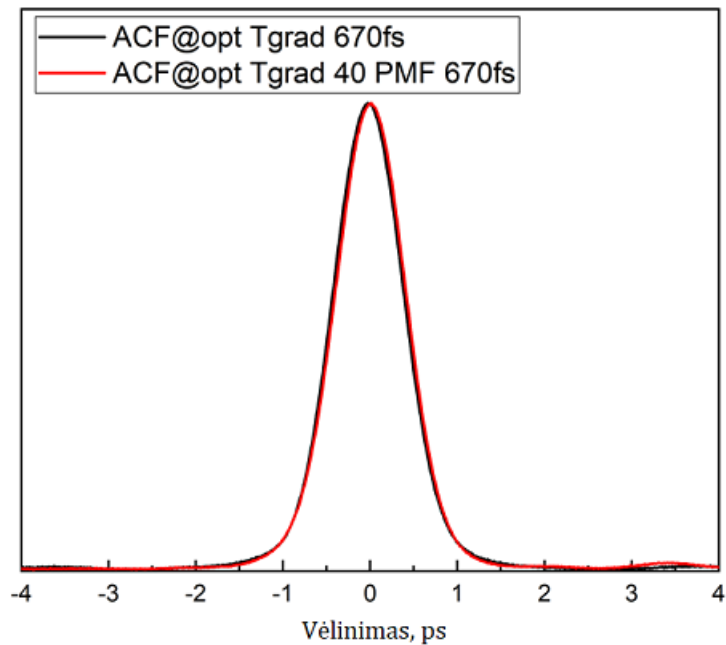
## 2.4 Skaidulos dispersijos kompensavimas

Šio darbo metu taip pat buvo bandoma kompensuoti pasyvaus vienamodžio šviesolaidžio dispersiją. Tam tikslui tarp impulsų plėstuvo ir kompresoriaus buvo įterpta 40 metrų pasyvaus šviesolaidžio. Skaidulos dispersiją pavyko kompensuoti sudarius  $dT=29$  °C temperatūros gradientą, t. y. 22 °C daugiau nei optimalus suspaudimas, nesant įterpto šviesolaidžio.

Taigi, 22 laipsnių temperatūrų skirtumas CVBG kompensuoja 40 metrų pasyvios skaidulos. Žinant, kad SiO<sub>2</sub> šviesolaidžio, ties 1030 nm,  $GVD=0,018973 \frac{ps^2}{m}$ , o ilgis  $L=40$  m, galima rasti CVBG dispersijos koeficientą vienam laipsniui Celsijaus:

$$\frac{GVD \cdot L}{\Delta T} = \frac{0,018973 \cdot 40}{22} = 0,035 \frac{ps^2}{^\circ C} \quad (4)$$

Palyginimui, iš praktikos žinoma, kad čirpuotos skaidulinės gardelės dispersijos koeficientas yra  $0,030 ps^2$  vienam laipsniui Celsijaus.



20 pav. Siauro spektro impulsų spaudimas be (juoda kreivė) ir su (raudona kreivė) 40 m ilgio skaidula. 40 m skaidulos kompensavimui reikalingas 22 °C temperatūrų skirtumas tarp CVBG galu.

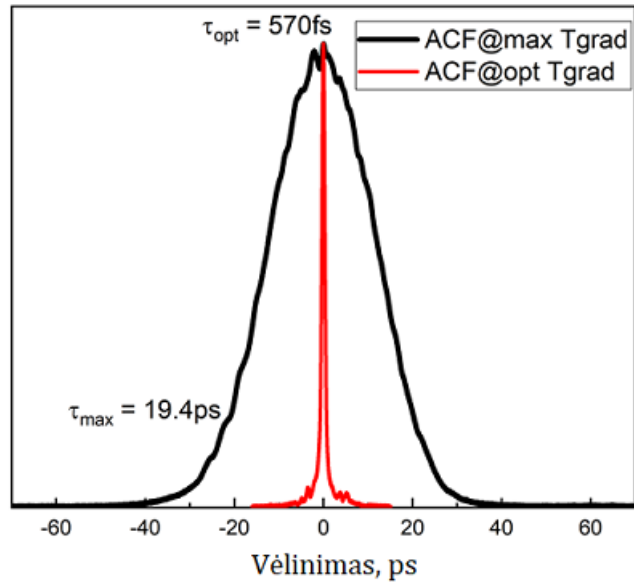
## 2.5 Impulso trukmės derinimas

Kuriant lazerinę sistemą, dažnai yra poreikis turėti galimybę derinti impulso trukmę nuo minimalios trukmės iki dešimčių pikosekundžių. Šioje darbo dalyje buvo siekiama ištirti impulso trukmės derinimo galimybes, keičiant impulso plėstuvo temperatūros gradientą.

Eksperimento schema buvo tokia pati, kaip impulso spaudimo tyrimuose ir yra pavaizduota 18 pav. Matavimams buvo naudotas plataus spektro generatoriaus išėjimas. Kaip minėta anksčiau, maksimaliai plataus spektro impulsas susispaudžia iki 570 fs, naudojant 5,7 °C temperatūros gradientą. Keičiant plėstuvo temperatūros gradientą, plėstuvo ir kompresoriaus dispersijos tampa nebesuderintos. Impulsas, sklisdamas per plėstuvą, yra išplečiamas daugiau, nei kompresorius gali suspausti. Nesukompensuota dispersija lemia impulso pailgėjimą, kuris gali būti valdomas plėstuvo temperatūra. Panaudojus maksimalų temperatūros gradientą  $dT=58$  °C, impulsas buvo išplėstas iki 19,4 ps, t. y. 34 kartus ilgesnis už maksimaliai suspaustą impulsą.

Tokie patys matavimai buvo atlikti naudojant siauro spektro generatoriaus išėjimą. Panaudojant maksimalų galimą temperatūrinį gradientą, impulsas buvo išplėstas iki 9,3 ps (apie 14 ilgesnis už pradinį impulsą).

Optimizavus schemą, impulsą turėtų būti galima išplėsti nuo 500 fs iki 50 ps, o panaudojant temperatūros valdymą ir plėstuve, ir spaustuve, impulsas gali būti išplėstas nuo 500 fs iki 100 ps.



21 pav. Plataus spektro impulsas, maksimaliai suspaustas iki 570 fs (raudona kreivė) ir išplėstas iki 19,4 ps, naudojant maksimalų temperatūrinį gradientą (juoda kreivė).

### 3 Rezultatų aptarimas

Darbo metu buvo ištirtas impulsų plėtimas ir spaudimas naudojant porą čirpuotų tūrinių Brego gardelių, iš kurių viena valdoma temperatūros gradientu. Abi naudotos CVBG turėjo nežymiai besiskiriančius parametrus, tačiau viena iš gardelių turi didesnę įtaką pluošto eliptiškumui ir buvo panaudota kaip impulsų plėstuvas.

Darbe buvo naudojamas impulsų generatorius, kurio veikimas paremtas fazine savimoduliacija ir pakaitiniu spektriniu filtravimu. Tokio tipo Generatorius turi du išėjimus – plataus spektro (40 nm) ir siauro spektro (3 nm). Plataus spektro išėjime generuojami impulsai turi platesnį spektrą nei CVBG elementai, o siauro spektro išėjime generuojami impulsai visiškai telpa į CVBG atspindimo spektro dalį, tačiau spektre atsiranda šiek tiek triukšmų.

Spaudžiant plataus spektro impulsus, kai spektras platesnis už gardelės atspindimą spektrą, impulsas susispaudė iki 570 fs (spektriškai riboto impulso trukmė 390 fs). Siauro spektro pločio impulsas susispaudė daug tiksliau (spektriškai ribota trukmė 570 fs, eksperimentiškai susispaudė iki 670 fs) ir jokių žymių iškraipymų ir nuokrypių nuo idealios Gauso funkcijos nepastebėta. Eksperimentinės ir spektriškai ribotos trukmių neatitikimas galbūt buvo nulemtas autokoreliatoriaus tikslumo, taip pat CVBG komponentų neidealumo. Lygi impulso forma leidžia manyti, kad optimizavus sistemą impulsas turėtų susispausti iki teorinės vertės.

Darbe pademonstruotas šviesolaidžio dispersijos kompensavimas valdant impulsų plėstuvo temperatūros gradientą. Tarp plėstuvo ir spaustuvo įterpus 40 m pasyvaus vienamodžio šviesolaidžio, jo dispersija buvo sukompensuota sudarius papildomą 22 °C temperatūros skirtumą plėstuve. Tai rodo, kad naudojant tokio tipo CPA sistemą galima išvengti komponentų, esančių tarp plėstuvo ir spaustuvo, dispersijos įtakos. Iš šio bandymo buvo suskaičiuota, kiek dispersijos galima kompensuoti sudarius vieno laipsnio temperatūros skirtumą tarp CVBG galų. Gauta vertė yra lygi  $0,035 \frac{ps^2}{\Delta T}$ .

Taip pat, eksperimento metu buvo siekiama išbandyti impulso trukmės valdymo galimybes. Galimybė valdyti impulso trukmę programiškai leistų pritaikyti impulso trukmę prie specifinių taikymų, kuriems gali reikėti ilgesnės nei spektriškai riboto impulso trukmės. Naudojant vieną temperatūra valdomą CVBG elementą, šiuo atveju, plėstuva, impulsą galima išplėsti 34 kartus iki 19,4 ps. Optimizavus schemą, realizavus temperatūros gradiento valdymą ir spaustuve, galima pasiekti platesnį trukmės valdymo intervalą (nuo spektriškai ribotos iki 100 ps).



## Išvados

1. Naudojant čirpuotų temperatūra valdomų tūrinių Brego gardelių porą, galima išplėsti ir suspausti impulsus iki artimos riboto spektro impulso trukmės.
2. Darbe pademonstruota galimybė pilnai kompensuoti 40 m vienamodės skaidulos sukeltą dispersiją.
3. Tirtoje schemoje galima valdyti impulso trukmę ir, sudarant 58 °C temperatūros skirtumą tarp plėstuvo CVBG galų, impulso trukmė pakeičiama nuo 570 fs iki 19,4 ps.
4. Impulsų plėstuvą ir spaustuvą sudaranti CVBG pora, dėl kompaktiškumo ir paprasto suderinimo, gali būti panaudota daugelyje čirpuotų impulsų stiprinimo sistemų.

## Literatūros sąrašas

- [1] <https://eli-laser.eu>
- [2] Yakovlev, I. V, *Stretchers and compressors for ultra-high power laser systems*. Quantum Electronics, **44(5)**, 393–414. (2014)
- [3] <https://www.iap.uni-jena.de>
- [4] D. Richter, C. Voigtländer, R. Becker, J. Thomas, A. Tünnermann, and S. Nolte, *Efficient volume Bragg gratings in various transparent materials induced by femtosecond laser pulses*, in CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper CM3\_4.
- [5] [https://www.brown.edu/research/labs/mittleman/sites/brown.edu.research.labs.mittleman/files/uploads/lecture6\\_0.pdf](https://www.brown.edu/research/labs/mittleman/sites/brown.edu.research.labs.mittleman/files/uploads/lecture6_0.pdf)
- [6] <http://frog.gatech.edu/chirp.html>
- [7] <https://www.rp-photonics.com/chirp.html>
- [8] <https://www.newport.com/n/the-effect-of-dispersion-on-ultrashort-pulses>
- [9] G. F. R. Chen, T. Wang, C. Donnelly, and D. T. H. Tan, *Second and third order dispersion generation using nonlinearly chirped silicon waveguide gratings*, Opt. Express **21**, 29223–29230. (2013)
- [10] [https://www.rp-photonics.com/chromatic\\_dispersion.html](https://www.rp-photonics.com/chromatic_dispersion.html)
- [11] [http://www.esparama.lt/es\\_parama\\_pletra/filai/ESFproduktai/2012\\_mokslinio\\_tyrimo\\_ataskaita.pdf](http://www.esparama.lt/es_parama_pletra/filai/ESFproduktai/2012_mokslinio_tyrimo_ataskaita.pdf)
- [12] Julius Darginavičius, Donatas Majus, Vytautas Jukna, Nail Garejev, Gintaras Valiulis, Arnaud Couairon, and Audrius Dubietis, *Ultrabroadband supercontinuum and third-harmonic generation in bulk solids with two optical-cycle carrier-envelope phase-stable pulses at 2  $\mu\text{m}$* , Opt. Express **21**, 25210–25220. (2013)
- [13] Service, R. F, *Laser Labs Race for the Petawatt*. Science, **301(5630)**, 154–156. (2003)
- [14] R. Paschotta, *Handbook of Solid-State Lasers*. (2013)
- [15] <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/chirped-pulse>
- [16] Halina Abramczyk, *Introduction to Laser Spectroscopy*. (2005)

- [17] G. Sucha, H. Endert, *Femtosecond fiber lasers hit power highs*, Laser Focus World **36 (8)**, 133-136. (August, 2000)
- [18] R. L. Fork, O. E. Martinez, and J. P. Gordon, *Negative dispersion using pair of prisms* Opt. Lett. **9**, 150–152. (1984)
- [19] S. Akturk, X. Gu, P. Gabolde, and R. Trebino, *The general theory of first-order spatio-temporal distortions of Gaussian pulses and beams* Opt. Express **13**, 8642–8661. (2005)
- [20] S. Akturk, X. Gu, M. Kimmel, and R. Trebino, *Extremely simple single-prism ultrashort-pulse compressor*. Optics Express, **14(21)**. (2006)
- [21] P. Tournois, *Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems*. Optics Communications, **140(4-6)**. (1997)
- [22] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AOPDF\\_principle.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AOPDF_principle.png)
- [23] R. Szipöcs, C. Spielmann, F. Krausz, and K. Ferencz, *Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers.*, Optics Letters, **19(3)**, 201. (1994)
- [24] N.Matuschek, , F. X. Kartner, and U. Keller, *Theory of double-chirped mirrors*, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **4(2)**, 197–208. (1998)
- [25] <https://www.munich-photonics.de/about-us/service-centre/multilayer-coating-laboratories/scientific-basis/>

INVESTIGATION OF PULSE STRETCHING/COMPRESSION IN A FIBER AMPLIFIER  
BY USING VOLUME BRAGG GRATING

**Summary**

Since the invention of a first solid state laser, scientists have tried to achieve highest possible peak power in order to fulfil the need for industrial and fundamental research applications. The two main mechanisms for increasing peak power of a pulsed laser are by increasing pulse energy or by decreasing its temporal width. Soon however the limits of the amplifying medium were reached as the short pulse became powerful enough to damage the amplifying medium.

Things started to move forward again when G. Mourou introduced the method of chirped pulse amplification (CPA). The idea behind this method is that short low power pulse is stretched temporarily to decrease its peak power, amplified to a certain level, while avoiding to reach the damage threshold for amplifying medium, and compressed again to the initial duration.

Two of the main parts in such system are pulse stretcher and compressor. There are many ways of stretching and compressing the pulse but they all have their limitations. Diffraction gratings are sensitive to alignment precision, prisms require huge spatial separation for larger stretching or compression, fiber require a lot of material, chirped fiber bragg grating have low damage threshold and chirped mirror require multiple pass to stretch pulse to the proper level.

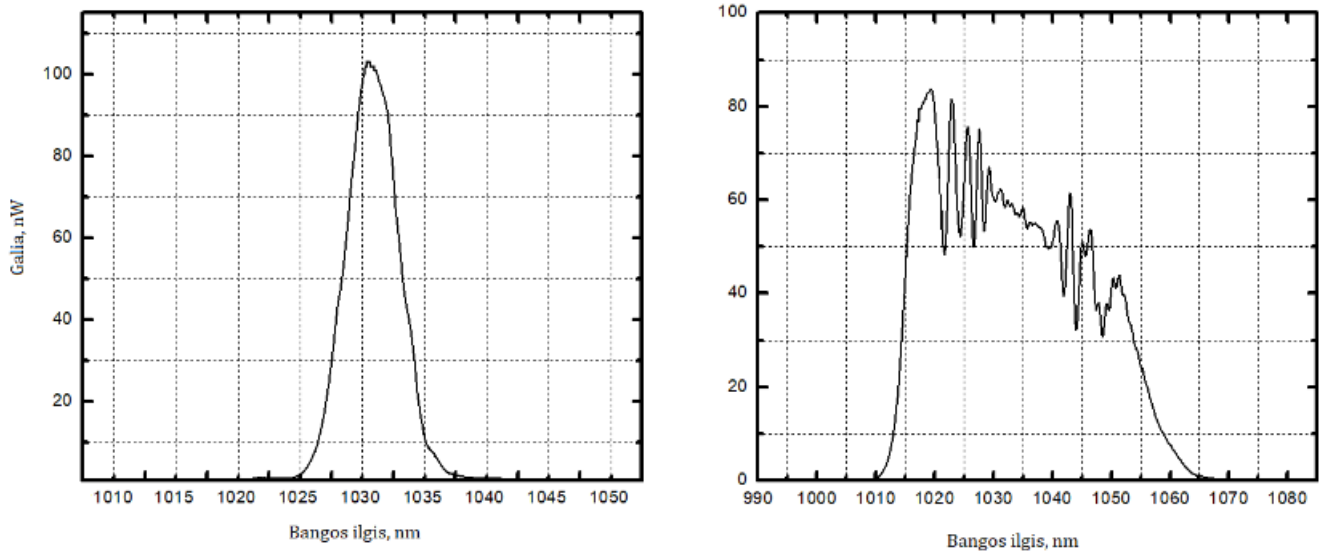
As a possible alternative to these methods we investigate chirped volume Bragg grating with a temperature controlled dispersion, which allows to achieve high peak power due to its large volume and compensates large amount of dispersion in very short length.

In this experiment two chirped volume Bragg gratings were used. Stretcher had thermal control over its two ends to create temperature gradient along the crystal and to compensate dispersion of compressor as well as dispersion of components between them.

Experiment was conducted using narrow and broad spectrum pulses. Narrow spectrum pulses were amplified and compressed to 670 fs (transform limited 570 fs) but had a smooth shape therefore we think its possible to reach transform limited pulse length by optimizing our setup. Broadband pulse had higher deviation from transform limited pulse and changed its shape from Gaussian to sinc function. There were also some attempts made to compensate single mode fiber dispersion. By adding 40 m fiber between compressor and stretcher, we were able to compensate fiber dispersion by creating a temperature gradient of  $dT=29$  °C between the two ends of CVBG stretcher. Ability to control pulse length was also demonstrated. By under compensation of the compressor dispersion it is possible to compress the pulse to larger pulse length if there is need for that. In our case we were able to extend pulse from 670 fs to 19,4 ps by using largest possible temperature gradient in our system.

## Priedas Nr. 1.

### Spektrai generatoriaus išėjimuose



22 pav. Siauras spektras viename iš generatoriaus išėjimų (kairėje) ir platus spektras kitame generatoriaus išėjime (dešinėje).