

VILNIAUS UNIVERSITETAS
IR
VALSTYBINIS MOKSLINIS TYRIMŲ INSTITUTAS
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Rokas Danilevičius

**SKAIDULINIŲ LAZERIŲ TECHNOLOGIJOS DIDELĖS
ENERGIJOS FEMTOSEKUNDINĖMS DERINAMO BANGOS
ILGIO OPTINĖMS PARAMETRINĖMS ČIRPUOTŲ IMPULSŲ
STIPRINIMO SISTEMOMS**

Daktaro disertacijos santrauka,
Fiziniai mokslai, fizika (02P)

Vilnius, 2017

Disertacija rengta 2012-2016 metais Fizinių ir Technologijos Mokslų Centro Lazerinių technologijų skyriuje ir kompanijoje EKSPLA.

Mokslinis vadovas:

Dr. Andrejus Michailovas (Fizinių ir Technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika - 02P).

Mokslinis konsultantas:

Dr. Nerijus Rusteika (Fizinių ir Technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika - 02P).

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas:

Prof. habil. dr. Audrius Dubietis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Nariai:

1. Dr. Arūnas Varanavičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);
2. Dr. Rimantas Grigonis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);
3. Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P);
4. Prof. dr. Valdas Pašiškevičius (Švedijos Karališkasis Technologijų institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2017 m. vasario mėn. 28 d. 10 val. FTMC Fizikos instituto salėje.

Adresas: Savanorių pr. 231, LT-02300 Vilnius, Lietuva.

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2017 m. sausio mėn. 28 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto, Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY
AND
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY
INSTITUTE OF PHYSICS

Rokas Danilevičius

**FIBER LASER BASED TECHNOLOGIES FOR HIGH ENERGY
FEMTOSECOND WAVELENGTH-TUNABLE OPTICAL
PARAMETRIC CHIRPED PULSE AMPLIFICATION SYSTEMS**

Summary of doctoral dissertation,
Physical Sciences, Physics (02P)

Vilnius, 2017

The research was performed in 2012-2016 at the Department of Laser Technologies of the Center for Physical Sciences and Technology and at company EKSPLA.

Scientific supervisor:

Dr. Andrejus Michailovas (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics - 02P).

Scientific advisor:

Dr. Nerijus Rusteika (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics - 02P).

Doctoral committee:

Chairman:

Prof. habil. dr. Audrius Dubietis (Vilnius university, Physical sciences, Physics – 02P).

Members:

1. Dr. Arūnas Varanavičius (Vilnius university, Physical sciences, Physics – 02P);
2. Dr. Rimantas Grigonis (Vilnius university, Physical sciences, Physics – 02P);
3. Prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis (Vilnius university, Physical sciences, Physics – 02P);
4. Prof. dr. Valdas Pašiškevičius (KTH Royal Institute of Technology, Physical sciences, Physics– 02P)

The thesis will be defended under open consideration in the Council of Physics on the 28th of February, 2017, 10 a.m. at the hall of CPST Institute of Physics.

Address: Savanoriu ave. 231, LT-02300 Vilnius, Lithuania.

Summary of the doctoral thesis was distributed on 28th of January, 2017.

Doctoral thesis is available at Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology libraries and accesible by link: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Turinys

Santrumpų sąrašas	6
Ižanga.....	7
Mokslinis naujumas	9
Praktinė nauda	9
Ginamieji teiginiai	10
Publikacijų sąrašas.....	10
Patentai	11
Disertacijos struktūra	11
1 Literatūros apžvalga.....	12
2 Femtosekundinės OPČIS sistemos šaltinis panaudojant pikosekundinio skaidulinio lazerio užkratą.....	12
2.1 Dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų impulsų lazerinis šaltinis	
12	
2.2 Skaidulinių lazerių technologija paremtas femtosekundinių impulsų gavimo būdas	18
3 SČIS sistemos optimizavimas pasitelkiant derinamo aukštesnės eilės dispersijos kompensavimo metodą	24
Teorinis modeliavimas	24
Eksperimentas	27
4 Femtosekundinė derinamo bangos ilgio OPČIS sistema naudojant pikosekundinio skaidulinio lazerio užkratą ir pikosekundinio DKKK lazerio kaupinimą	32
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	38
Summary.....	40
Literatūros sąrašas	42
Curriculum Vitae	48

Santrumpų sąrašas

AkF	autokoreliacinė funkcija
BIT	bangos ilgių tankintuvas
BŠS	baltos šviesos superkontinuumas
ČIS	čirpuotų impulsų stiprinimas
ČSBG	čirpuota skaidulinė Brego gardelė
DKKK	diodinio kaupinimo kietojo kūno (lazeris)
DMP	didelio modos ploto (skaidula)
DSOS	dažninės skyros optinė sklendė
FSM	fazės moduliavimasis
GGD	grupinių greičių dispersija
KS	kreivumo spindulys
NOPS	nekolinearus optinis parametrinis stiprintuvas
OPČIS	optinis parametrinis čirpuotų impulsų stiprinimas
OPS	optinis parametrinis stiprintuvas
PE	Peltjė elementas
PĮSV	puslaidininkinio įsisotinančio sugėriklio veidrodis
RS	regeneracinis stiprintuvas
SČIS	skaidulinis čirpuotų impulsų stiprinimas
SSE	sustiprinta spontaninė emisija
TED	trečios eilės dispersija

Ižanga

Femtosekundinės derinamo bangos ilgio lazerinės sistemos yra nepamainomos daugelyje mokslinių taikymų: ultrasparčius procesus tiriančiuose laikinės skyros žadinimo-zondavimo eksperimentuose (skirtuminės sugerties, fluorescencijos dažnio sumavimo, laikinės skyros fotoelektronų spektroskopijoje, laikinės skyros masės spektrometrijoje), femtosekundiniame CARS (*Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy*) ir kituose [1–7]. Titanu legiruotas safyras – vienintelis plačiai praktikoje naudojamas lazerinis kristalas, leidžiantis ženkliai derinti bangos ilgį dėl itin plačios stiprinimo juostos [8–10], tačiau didelės energijos femtosekundiniai Ti:safyro lazeriai paprastai optimizuojami ties fiksuotu centriniu bangos ilgiu [11]. Optinio parametrinio stiprinimo (OPS) reiškinio atradimas atvėrė galimybes išplėsti derinamumo ribas nuo UV iki MIR spektrinių diapazonų [12]. Realizuojant optinį parametrinį čirpuotų impulsų stiprinimo (OPČIS) metodą [13,14], galima pasiekti ekstremalius smailinius šviesos impulsų intensyvumus, kurie reikalingi šiuolaikiniuose lazerinės spinduliuotės sąveikos su medžiaga taikymuose, pavyzdžiui, aukštos eilės harmonikų generacijai, atosekundinės spartos procesų tyrimuose [15,16]. Kaip impulsų šaltinis didelės smailinės galios, ant optinio stalo telpančiose Vis-NIR OPČIS sistemose dažniausiai naudojamas Ti:safyro femtosekundinis osciliatorius [13,17,18]. Kitas populiarus plačiąjuosčio užkrato gavimo būdas - baltos šviesos superkontinuumo (BŠS) generavimas femtosekundiniais impulsais iš regeneracinių (Ti:safyro, Yb:KGW) stiprintuvų [19,20]. Abiem atvejais užkrato energija yra nJ eilės, todėl būtinas papildomas pastiprinimas femtosekundiniame OPS prieš pagrindinę OPČIS pakopą, kurioje impulsai išplečiami laike, parametriškai stiprinami ilgais, pikosekundiniais impulsais ir vėliau suspaudžiami iki femtosekundinės trukmės. Paprastai tokių sistemų kaupinimui naudojami pikosekundiniai Nd^{3+} jonais legiruotos aktyvios terpės kietojo kūno lazeriai [21–23].

Standartinė realizacija reikalauja naudoti sudėtingą femtosekundinę ČIS sistemą bei optinę ar elektroninę femtosekundinių ir pikosekundinių lazerių, kurie dažnai generuoja skirtingo bangos ilgio spinduliuotę, sinchronizaciją [24,25]. Impulsų kontrastas plačiame laikiniame diapazone taip pat labai svarbus daugelyje intensyvių laukų taikymų [14,26]. Femtosekundinių impulsų, sustiprintų regeneraciniuose stiprintuvuose, naudojimas parametrinio stiprinimo pakopose apriboja galimybes gauti aukšto kontrasto impulsus sistemos išėjime arba reikalauja sudėtingų metodų kontrasto pagerinimui [26].

Nuolat besivystančios femtosekundinių skaidulinių lazerių technologijos gali pasitarnauti ultrasparčių derinamo bangos ilgio sistemų tobulinimo procese. Skaiduliniai lazeriai turi begalę privalumų lyginant su kietojo kūno sistemomis - tai didelė vidutinė išvadinė galia, ideali pluošto kokybė, kompaktiškumas bei derinimo nereikiamybė. Platus Yb^{3+} legiruotų skaidulų emisijos spektras leidžia stiprinti femtosekundinius impulsus. Metodai skirti bangos ilgio derinimui skaiduliniame lazeryje buvo pademonstruoti jau prieš dešimtmetį ne tik telekomunikacijose naudojamuose bangos ilgiuose [27–29] bet ir

ties $1\ \mu\text{m}$ [30–32], tačiau jie apriboti siaurame bangos ilgių derinimo ruože bei dažnai yra sunkiai realizuojami.

Skaidulinių lazerių technologija taip pat gali būti sėkmingai taikoma OPČIS sistemose. Er^{3+} ir Yb^{3+} jonais legiruoti skaiduliniai lazeriai panaudoti kaip užkrato šaltiniai [33–35]. Didelės vidutinės galios, sub-ps trukmės impulsų Yb^{3+} stiprintuvai pritaikyti kaupinti kelių optinių ciklų OPČIS [36–38]. Skaidulinės OPČIS sistemos, kurių veikimas paremtas keturbangio maišymo procesu, buvo realizuotos eksperimentiškai [39–41]. Nors šių sistemų išėjime impulsų trukmės buvo palyginti ilgos (sub-ps eilės), teoriniais modeliavimais buvo pademonstruotos galimybės pasiekti kelių optinių ciklų impulsus [42].

Vienas didžiausių skaidulinių lazerių technologijų trūkumų – ribotos galimybės pasiekti dideles impulsų energijas ir dideles smailines galias. Skaidulų geometrija ir iš jos išplaukiančios puikios termooptinės savybės leidžia stiprinti spinduliuotę iki didelių vidutinių galių, bet nėra palanki didelės energijos ultratrumpiesiems impulsams. Stiprinant ultratrumpuosius impulsus, dideli intensyvumai mažo diametro skaidulos šerdyje bei ilgi sąveikos atstumai nulemia itin ženklią netiesinių efektų įtaką ir apriboja sistemos išėjime gaunamą impulsų smailinę galią. Paprastai netiesiniai efektai skaiduloje sumažinami pasinaudojant dviem pagrindiniais būdais. Pirmasis iš jų – aktyvios skaidulos modifikavimas padidinant modos diametrą ir taip sumažinant intensyvumą. Standartinių, komerciškai gaminamų didelio modos ploto (DMP) skaidulų šerdies diametras siekia $\sim 30\ \mu\text{m}$, o skaitinės apertūros yra sumažintos iki technologiškai pasiekiamo praktinio limitu (~ 0.06). Dar didesni šerdies diametrai gaunami mikrostruktūrizuotose fotoninių kristalų [43–45], chiralinės [46] ar kitokios geometrijos skaidulose. Kitas būdas išvengti netiesinių efektų – čirpuotų impulsų stiprinimas (SČIS), paremtas smailinės galios sumažinimu ultratrumpuosius impulsus išplečiant laike prieš stiprintuvą, o po stiprinimo suspaudžiant [47]. Norint gauti didelio kontrasto, spektriškai ribotus impulsus sistemos išėjime, būtina optimizuoti SČIS sistemą atsižvelgiant į dispersijos sąlygotus efektus, netolygią stiprinimo juostą. Tai nėra paprasta užduotis sistemose, kuriose impulsai skaidulomis nusklinda didelius atstumus bei yra stiprinami daugelyje stiprinimo pakopų [48]. Netgi išplėtus impulsus iki praktiškai realizuojamos ribos ($\sim 1\ \text{ns}$), smailinė galia vis dar apribojama labiausiai dominuojančio netiesinio efekto – fazės moduliavimosi (FSM). Daugiau nei 1 rad netiesinis fazės postūmis, sąlygotas FSM, paveikia impulsų spaudimą ir lemia ženklų suspaustų impulsų laikinį išplitimą bei smailinės galios sumažėjimą [49].

Turint omenyje skaidulinių ir kietojo kūno lazerių technologijų privalumus ir trūkumus, atrodo, kad hibridinis sistemos dizainas turėtų būti optimalus sprendimas, leidžiantis sukonstruoti kompaktišką, stabilų ir nesudėtingą femtosekundinį didelės energijos derinamo bangos ilgio lazerį. Toks buvo pagrindinis šio doktorantūros darbo tikslas.

Iš pradžių buvo parašytas ir ištobulintas modeliavimo programų paketas ultratrumpųjų impulsų dinamikai skaiduliniuose lazeriuose tirti. Skaitmeninis modeliavimas padėjo

suprasti kaip patogiai valdyti ir keisti ultratrumpųjų impulsų parametrus panaudojant tai praktiniam taikymui. Skaičiavimų ir eksperimentų išeigoje pavyko patobulinti SČIS sistemą. Galiausiai, sukauptos žinios buvo panaudotos išvystyti ir eksperimentiškai realizuoti naujo tipo hibridinę femtosekundinę didelės energijos derinamo bangos ilgio Vis-NIR OPČIS sistemą.

Mokslinis naujumas

Šio darbo mokslinis naujumas slypi sėkmingai pademonstruotų ir plačiai pripažintų skaidulinių ir kietojo kūno lazerių technologijų inkorporavime:

1. Sukurtas ir eksperimentiškai realizuotas unikalus dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų impulsų skaidulinis užkrato lazeris femtosekundiniam Yb ir pikosekundiniam Nd kietojo kūno lazeriams.
2. Pademonstruotas naujas, skaidulinių lazerių technologija paremtas būdas femtosekundiniams impulsams generuoti.
3. Teoriškai ir eksperimentiškai išanalizuotas metodas pagerinantis suspaustų impulsų kontrastą Yb SČIS sistemoje, sukuriant temperatūrinius gradientus čirpuotos skaidulinės Brego gardelės (ČSBG) impulsų plėstuve ir taip valdant dispersijos parametrus. Toks metodas pirmą sykį pademonstruotas bangos ilgių diapazone ties 1 μm .
4. Sukurta ir pirmą kartą eksperimentiškai realizuota kompaktiška femtosekundinė derinamo bangos ilgio OPČIS sistema su unikaliu plačiajuostės spinduliuotės šaltiniu, kuriame naudojamas spektriškai išplėstų pikosekundinių impulsų skaidulinis lazeris, suformuojantis užkrato impulsus pikosekundiniam diodinio kaupinimo kietojo kūno (DKKK) regeneraciniam stiprintuvui bei BŠS generavimui. Nauju metodu paremtoje scheme optiškai sinchronizuojami signalo ir kaupinimo impulsai. Taip ženkliai supaprastinama visa sistema. Naudojamos tik parametrinio femtosekundinių impulsų stiprinimo pakopos leidžia išlaikyti aukštą galutinių impulsų laikinį kontrastą.

Praktinė nauda

OPČIS sistemų vystymas – sparčiai auganti ultrasparčių lazerinių technologijų sritis. Kompaktiškų, patvarių ir derinimo nereikalaujančių skaidulinių lazerių naudojimas kartu su ištobulintomis kietojo kūno lazerių technologijomis vienoje OPČIS sistemoje turi didelį praktinį potencialą, kadangi tokiu būdu galima realizuoti paprastą ir patikimą šviesos šaltinį ultrasparčiai spektroskopijai ir daugeliui kitų taikymų.

Šis doktorantūros darbas praktiškai vertingas keliais aspektais:

1. Eksperimentiškai pademonstruotas naujas, užpatentuotas, skaiduline technologija paremtas dviejų optiškai sinchronizuotų bangos ilgių lazerinis šaltinis, kuris buvo sėkmingai panaudotas didelės energijos OPČIS sistemoje bendradarbiaujant su TU Wien mokslininkų grupe.

2. Atlikus skaičiavimus ir eksperimentus su temperatūriškai valdoma ČSBG, pasiektas ženklus suspaustų impulsų kontrasto pagerinimas, atvėręs galimybes tokį metodą pritaikyti naujose komercinėse lazerinėse sistemose, kurios šiuo metu yra baigiamos tobulinti kompanijoje EKSPLA.
3. Naujas metodas femtosekundiniams impulsams generuoti buvo eksperimentiškai patikrintas ir realizuotas kompaktiškoje hibridinėje didelės energijos derinamo bangos ilgio OPČIS sistemoje, kuri jau komerciškai gaminama. Šis produktas bus pagrindas pažangių femtosekundinių lazerinių sistemų mokslui ir technologijoms.

Ginamieji teiginiai

- S1. Dispersijos ir netiesiškumo parametru, turinčių įtaką ultratrumpųjų impulsų charakteristikoms, kontroliavimas skaiduliniame lazeryje atveria galimybes realizuoti dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų impulsų užkrato šaltinį femtosekundiniam Yb ir pikosekundiniam Nd kietojo kūno lazeriams su pakankama energija aukšto kontrasto sustiprintiems impulsams gauti.
- S2. Ultratrumpųjų impulsų laikinio ir spektrinio plėtimo metodai realizuoti pikosekundiniame visiškai skaiduliniame lazeryje kartu su siaurajuosčio kietojo kūno bei plačiąjuosčio optinio parametrinio stiprinimo technologijomis leidžia sukurti kompaktišką optiškai sinchronizuotą hibridinį femtosekundinį OPČIS sistemos šaltinį aukšto kontrasto kelių optinių ciklų impulsams stiprinti.
- S3. Temperatūra valdomos dispersijos ČSBG impulsų plėstuvo su 4 nepriklausomais Peltjė elementais panaudojimas femtosekundinėje Yb SČIS sistemoje leidžia ženkliai pagerinti suspaustų impulsų kontrastą, o nepriklausomų Peltjė elementų skaičiaus didinimas atveria galimybes itin tiksliai kontroliuoti dispersiją.
- S4. Kompaktiška femtosekundinė derinamo bangos ilgio Vis–NIR OPČIS sistema su viena stiprinimo pakopa, kurioje pasiekama didesnė nei 20 GW impulsų smailinė galia 680-960 nm bangos ilgių diapazone, gali būti realizuota panaudojant optiškai sinchronizuotus pikosekundinio skaidulinio lazerio užkratą ir pikosekundinio DKKK lazerio kaupinimą.

Publikacijų sąrašas

Publikacijos tiesiogiai susijusios su disertacijos tema:

- A1. **R. Danilevičius**, A. Zaukevičius, R. Budriūnas, A. Michailovas, and N. Rusteika, *Femtosecond wavelegth-tunable OPCPA system based on picosecond fiber laser seed and picosecond DPSS laser pump*, Opt. Express **24**, 17532 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.017532.
- A2. K. Michailovas, A. Baltuška, A. Pugžlys, V. Smilgevičius, A. Michailovas, A. Zaukevičius, **R. Danilevičius**, S. Frankinas, and N. Rusteika, *Combined Yb/Nd driver for optical parametric chirped pulse amplifiers*, Opt. Express **24**, 22261 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.022261.

A3. J. Želudevičius, **R. Danilevičius**, and K. Regelskis, *Optimization of pulse compression in a fiber chirped pulse amplification system by adjusting dispersion parameters of a temperature-tuned chirped fiber Bragg grating stretcher*, J. Opt. Soc. Am. B **32**, 812 (2015). DOI: 10.1364/JOSAB.32.000812.

Kitos publikacijos:

A4. J. Želudevičius, **R. Danilevičius**, K. Viskontas, N. Rusteika, and K. Regelskis, *Femtosecond fiber CPA system based on picosecond master oscillator and power amplifier with CCC fiber*, Opt. Express, **21**, 5338 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.005338.

A5. J. Adamonis, N. Rusteika, **R. Danilevičius**, and A. Krotkus, *A Compact Terahertz Burst Emission System Driven With 1 μ m Fiber Laser*, Opt. Comm. **293**, 61-64 (2013). DOI: 10.1016/j.optcom.2012.11.100.

Patentai

P1. N. Rusteika, A. Michailovas, **R. Danilevičius**, V. Vosylius, *Dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų šviesos impulsų generavimo būdas ir lazerinis šaltinis*. Patento numeris: LT6122. Patento išplėtimas Europos sąjungos ribose: *Method and laser source for generation of optically synchronized dual-wavelength ultrashort light pulses*. Patentinės paraiškos numeris: 14177007.3.

P2. N. Rusteika, **R. Danilevičius**, A. Zaukevičius, A. Michailovas, *Femtosekundinių šviesos impulsų gavimo būdas ir lazerinis šaltinis*. Patento numeris: LT6231. Patento išplėtimas Europos sąjungos ribose: *Method for generation of femtosecond light pulses, and laser source thereof*. Patentinės paraiškos numeris: 15159873.7.

Disertacijos struktūra

Disertacijos medžiaga suskirstyta į 4 pagrindines dalis. Iš pradžių, literatūros apžvalgoje aptariami metodai ir technologijos susijusios su darbo tema. Disertacijos tiriamąją dalį sudaro 3 skyriai. Pirmajame iš jų pristatomi du nauji skaiduline technologija paremti metodai OPČIS sistemoms ir jų eksperimentinė realizacija. Toliau aprašomas būdas suspaustų impulsų laikiniam kontrastui Yb SČIS sistemoje pagerinti. Galiausiai darbas apibendrinamas pristatant femtosekundinę didelės energijos derinamo bangos ilgio OPČIS sistemą, kurioje realizuotos visos doktorantūros studijų metu išvystytos naujos technologijos. Teorinio modeliavimo metodika pateikta disertacijos priede.

1 Literatūros apžvalga

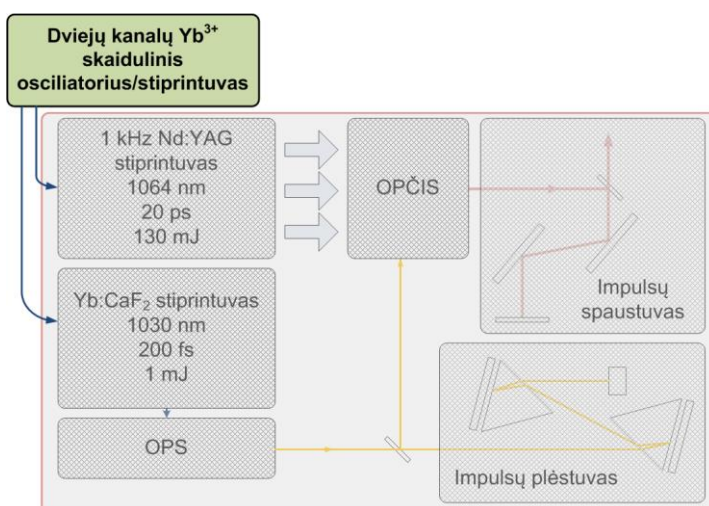
Literatūros apžvalgoje aptariami pagrindiniai ultrasparčių optinių parametrinių stiprintuvų veikimo principai bei tobulinimas. Apžvelgiama OPČIS technologija, ja paremtų lazerinių sistemų vystymas, taikymai bei pagrindiniai iššūkiai: signalo ir kaupinimo impulsų sinchronizavimas, dispersijos kompensavimas, plačiajuostės spinduliuotės generavimas bei kelių optinių ciklų režime veikiančių sistemų niuansai. Paskutinėje dalyje pristatoma SČIS technologija, jos privalumai, ribojimai bei naujausi pasiekimai.

2 Femtosekundinės OPČIS sistemos šaltinis panaudojant pikosekundinio skaidulinio lazerio užkratą

Šiame skyriuje aptariami du novatoriški, pirmą kartą eksperimentiškai pademonstruoti sprendimai femtosekundinėms OPČIS sistemoms. Pirmojoje skyriaus dalyje pristatomas visiškai skaidulinis užkrato lazeris, generuojantis dviejų bangos ilgių ultratrumpuosius impulsus didelės energijos OPČIS sistemos femtosekundiniam užkrato ir pikosekundiniam kaupinimo lazeriams. Remiantis šio darbo rezultatais, sukurtas ir eksperimentiškai realizuotas unikalus kelių optinių ciklų impulsų lazerinis šaltinis OPČIS sistemai. Šis šaltinis aprašytas antrojoje skyriaus dalyje.

2.1 Dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų ultratrumpųjų impulsų lazerinis šaltinis

Skyriuje pateikta medžiaga publikuota A2 bei aprašyta patente P1



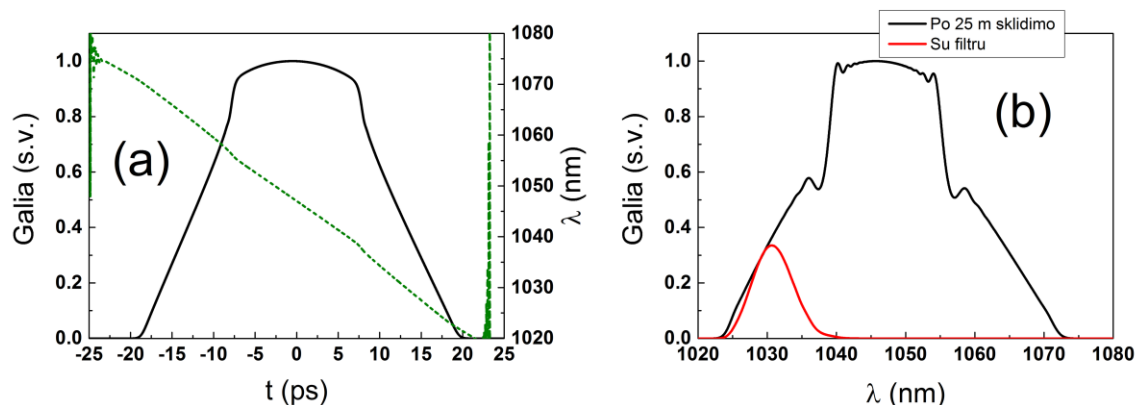
Pav. 2.1.1 Principinis OPČIS sistemos, aprašytos publikacijoje [63] išdėstymas. Dviejų bangos ilgių ultratrumpuosius impulsus generuojantis skaidulinis osciliatorius/stiprintuvas yra paryškintas schemoje. Šiame skyriuje neaptiriamos sistemos dalys: 1 kHz pasikartojimo dažnio Nd:YVO₄/Nd:YAG stiprintuvų blokas ir likusi OPČIS sistemos dalis užtušiuotos pilka spalva.

Siekiant optiškai sinchronizuoti skirtingo bangos ilgio ultratrumpuosius užkrato impulsus femtosekundinei OPS ir pikosekundinei OPČIS stiprinimo pakopoms didelės energijos OPČIS sistemoje (Pav. 2.1.1), sukurtas ir eksperimentiškai realizuotas dviejų kanalų visiškai skaidulinis lazeris.

Impulsai šiame lazeryje suformuoti pasinaudojant dispersijos ir Kero netiesiškumo sąlygotais efektais, veikiančiais optine skaidula sklindančius ultratrumpuosius impulsus.

Lazerio schemos veikimo principas gali būti lengvai paaiškinamas atliekant skaitmeninį impulso sklidimo modeliavimą, kuriame įskaitoma grupinių greičių (GGD) ir trečios eilės dispersija (TED) bei Kero netiesiškumas skaiduloje. Pradiniai impulso parametrai parinkti pagal eksperimentines sąlygas.

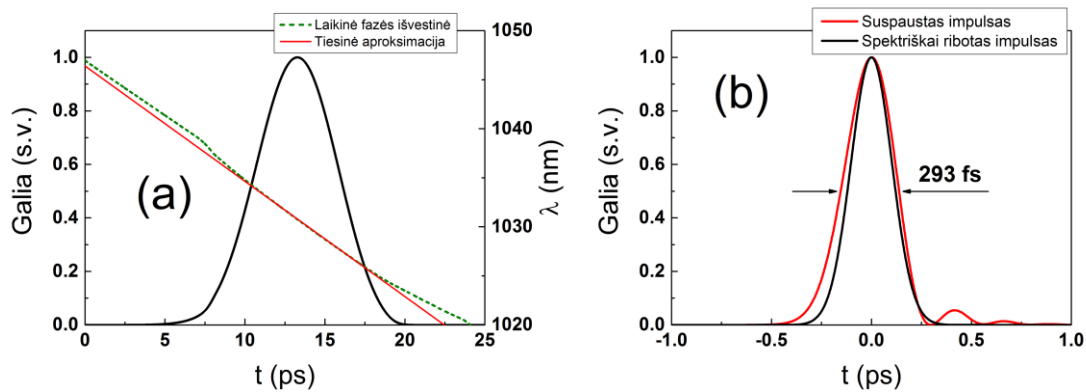
Iš pradžių, 3 ps trukmės, Gauso funkcijos pavidalo impulsas praleistas pro 25 m ilgio vienamodę, poliarizaciją išlaikančią skaidulą. Impulso pradinis centrinis bangos ilgis – 1047 nm. Skaidulos ilgis ir impulso energija parinkti taip, kad impulso spektras išplistų dėl fazės moduliavimosi (FSM) reiškinio pasiekiant 1030 nm ir 1064 nm bangos ilgius, kurie atitinka centrinius femtosekundinio OPS užkrato ir pikosekundinio OPČIS kaupinimo lazerių bangos ilgius. Impulso gaubtinė ir spektras po sklidimo skaiduloje yra pavaizduoti Pav. 2.1.2. GGD ir FSM efektams veikiant kartu buvo suformuota plokščioji impulso viršūnė [50]. Laikinė impulso fazės išvestinė (momentinis dažnis) po impulso gaubtinė kinta tiesiškai (Pav. 2.1.2(a), žaliai brūkšniuota kreivė).



Pav. 2.1.2 Ultratrumpasis impulsas po 25 m sklidimo vienamodę, poliarizaciją išlaikančia skaidula: (a) impulso gaubtinė (juoda kreivė) ir momentinis dažnis (žaliai brūkšniuota kreivė), išreikštas bangos ilgio vienetais; (b) impulso spektras (juoda kreivė) ir išfiltruota spektro dalis ties 1030 nm bangos ilgiu (raudona kreivė).

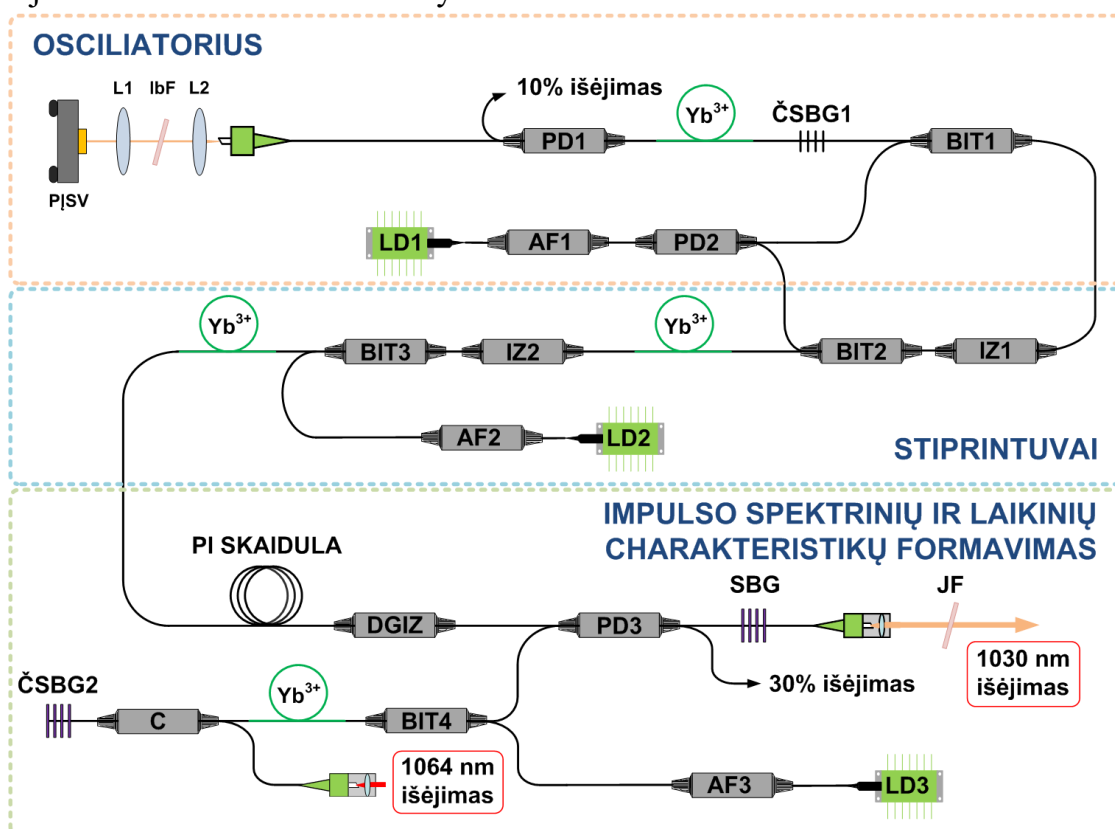
Užkrato impulsai Nd:YVO₄/Nd:YAG stiprintuvų blokui gaunami išfiltruojant siaurą spektrinį ruožą ties 1064 nm bangos ilgiu. Plačiajuosčiam Yb:CaF₂ stiprintuvui reikalingi impulsai, kurių spektras atitinka mažesnę nei 300 fs trukmę. Impulsų čirpas turi būti tiesinis, kad juos būtų galima nesunkiai suspausti difrakcinių gardelių spaustuviu. Šias charakteristikas tenkinantys impulsai gauti panaudojant 8 nm pločio, 1030 nm centrinio bangos ilgio, Gauso funkcijos formos filtrą.

Iš Pav. 2.1.3(a) matoma, kad išfiltruota dalis turi tiesinį čirpą. Impulsų spaudimas sumodeliuotas panaudojant 1000 rėžių/mm difrakcinės gardelės parametrus. Suspausto impulso gaubtinė pavaizduota Pav. 2.1.3(b). Nors dėl TED efekto atsirado impulso gaubtinės iškraipymai, suspausto impulso trukmė yra mažesnė nei 300 fs ir artima spektriškai riboto impulso trukmei.



Pav. 2.1.3 Išfiltruoto 1030 nm impulso spaudimas: (a) impulso gaubtinė prieš spaudimą (juoda kreivė) ir momentinis dažnis (žaliai brūkšniuota kreivė), tiesiškai aproksimuotas impulso gaubtinės pusplėčio ribose (raudona kreivė); (b) suspausto impulso gaubtinė (raudona kreivė) palyginta su spektriškai ribotojo impulso gaubtine (juoda kreivė).

Aprašytas dviejų bangos ilgių impulsų gavimo būdas buvo realizuotas eksperimentiškai. Visiškai skaidulinį lazerinį šaltinį sudarė pasyviu modų sinchronizacijos metodu veikiantis osciliatorius, dviejų pakopų stiprintuvas ir spektrinio bei laikinio impulsų formavimo dalis (Pav. 2.1.4). Vienamodė, poliarizaciją išlaikanti skaidula buvo naudojama visose šios sistemos dalyse.



Pav. 2.1.4 Dviejų bangos ilgių skaidulinio lazerio principinė schema. PĮSV – puslaidininkinio įsisotinančio sugėriklio veidrodys, L1,2 – sferiniai lęšiai, IbF – ilgabangis filtras, PD1-3 – pluošto dalikliai, ČSBG1,2 – čirpuotos skaidulinės Brego gardelės, BIT1-4 – bangos ilgių tankintuvai, IZ1,2 – izoliatoriai, DGIZ – didelės galios izoliatorius, SBG – skaidulinė Brego gardelė, AF1-3 – skaiduliniai juostiniai filtrai, JF – laisvos erdvės juostinis filtras, LD1-3 – lazeriniai diodai, C – cirkuliatorius, PI SKAIDULA – poliarizaciją išlaikanti optinė skaidula.

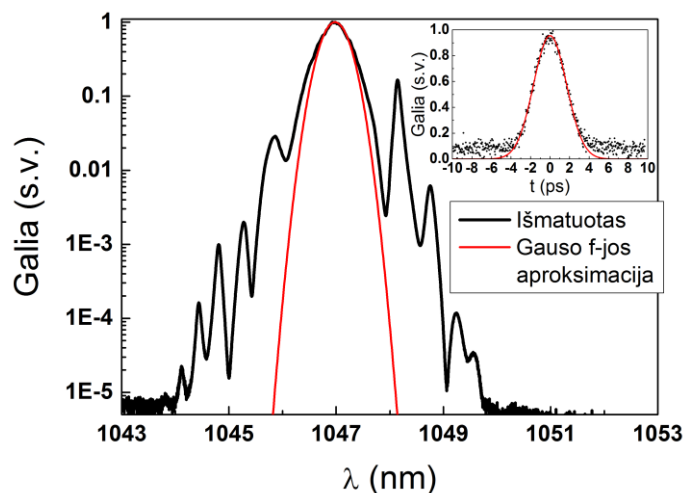
Čirpuota skaidulinė Brego gardelė (ČSBG1) ir puslaidininkinio įsisotinančio sugėriklio veidrodis (PĮSV) buvo panaudoti kaip galiniai osciliatoriaus rezonatoriaus veidrodžiai. ČSBG1 (~60% atspindys ties 1047 nm, 25 nm atspindžio spektro plotis, 4.5 ps/nm dispersija) buvo skirta osciliatoriaus generuojamų impulsų trukmei parinkti. Laisvos erdvės ilgabangis pralaidumo filtras (IbF), pastatytas prieš PĮSV mazgą leido derinti bangos ilgį. Derinant pluošto kritimo kampą į šį filtrą buvo nustatytas 1047 nm centrinis osciliatoriaus generuojamų impulsų bangos ilgis. Stabilus pasyvios modų sinchronizacijos režimas

užtikrintas panaudojant PĮSV, kuris buvo įdėtas į derinamą, ant poslinkio staliuko pastatytą veidrodžio laikiklį. Toks PĮSV mazgas leido patogiai suderinti atspindžio kampą bei optimizuoti sugėriklio poziciją pluošto atžvilgiu. Lazerinė spinduliuotė 12 mm židinio nuotolio lęšiu buvo sufokusuota į 7 μm dėmę ant PĮSV. Osciliatorius buvo kaupinamas per bangos ilgių tankintuvą (BIT) ir ČSBG1 naudojant 20% (apie 80 mW) lazerinio diodo (LD1)

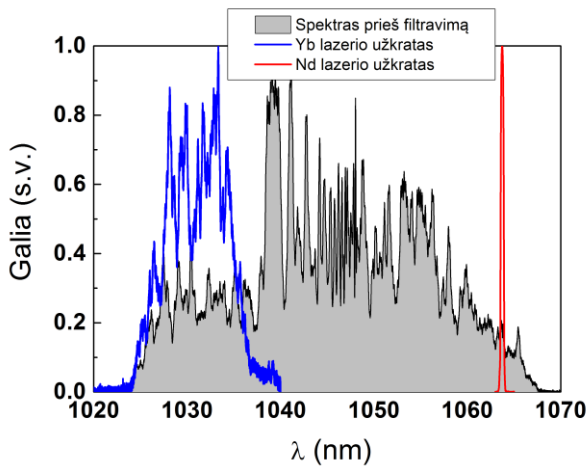
spinduliuotės. LD1 buvo apsaugotas nuo grįžtančios spinduliuotės skaiduliniu juostiniu filtru (AF1). Osciliatorius dirbo 60.3 MHz pasikartojimo dažniu ir generavo beveik spektriškai ribotus, 2.9 ps trukmės impulsus. Impulsų spektras, pavaizduotas Pav. 2.1.5, yra tipinis solitiniu režimu veikiančiam sinchronizuotų modų skaiduliniam lazeriui. Spekre, logaritminėje skalėje, matomas didelis skaičius šalutinių spektrinių smailių, kurios nebuvo pakankamai nufiltruotas, kadangi ČSBG1 atspindžio spektro plotis buvo daug didesnis už impulso spektrą.

Osciliatoriaus pagrindinis išėjimas buvo suformuotas per ČSBG1. Vidutinė išėjimo galia siekė 3.5 mW. Nedidelė dalis spinduliuotės (~10%) buvo paimta per rezonatoriuje įvirintą PD1 (10/90) pluošto daliklį ir panaudota osciliatoriaus sinchronizacijai su visa sistema.

Osciliatoriaus generuojami impulsai toliau sustiprinti dviejų pakopų skaiduliniame stiprintuve. Pirmoji pakopa buvo kaupinama likusia LD1 lazerinio diodo galia (320 mW) iš PD2 daliklio 80% atšakos. Didelės galios (900 mW) vienamodis lazerinis diodas LD2 kaupino antrąją stiprinimo pakopą. Sustiprintų impulsų energija siekė 7.2 nJ, kas atitiko 435 mW vidutinę galią. Toliau impulsų spektras buvo išplėstas dėl FSM efekto panaudojant 11 m ilgio vienamodę skaidulą. Išplitęs spektras tęsėsi nuo 1025 nm iki



Pav. 2.1.5 Eksperimentiškai išmatuotas skaidulinio osciliatoriaus generuojamų impulsų spektras. Autokoreliacinė kreivė pateikta paveikslėlio viduje.



Pav. 2.1.6 Normuotas spektras prieš ir po filtravimo: pilka nuspalvinta sritis – spektras po plėtimo 11 m skaidulos (30% išėjimas pagal Pav. 2.1.4); mėlyna kreivė – 1030 nm išėjimas filtruojant laisvos erdvės juostiniu filtru; raudona – 1064 nm išėjimas.

1030 nm stiprintuvui. Juostinis laisvos erdvės filtras (JF) užblokavo Yb jonais legiruotoje aktyvioje terpėje nestiprinamo spektro dalį. Vidutinė galia už JF buvo 27 mW, kas atitiko 450 pJ impulso energiją.

Išmatuotas ~10 nm spektro plotis ir 4 ps impulso trukmė parodė, kad 1030 nm centrinio bangos ilgio impulsai buvo čirpuoti. Impulsų spektras gautas dėl FSM efekto atitiko <300 fs spektriškai riboto impulso trukmę. Čirpuotų impulsų spūdumas buvo patikrintas naudojant 1000 rėžių/mm difrakcinių gardelių kompresorių. Optimizavus atstumą tarp gardelių,

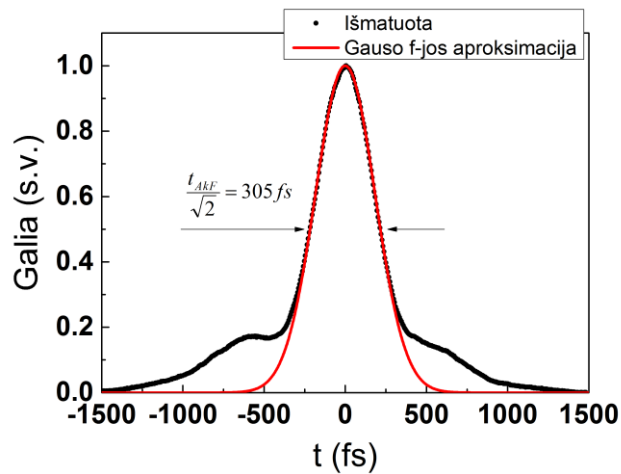
išmatuota autokoreliacinė kreivė (Pav. 2.1.7). Gauta 305 fs impulsų trukmė aproksimuojant Gauso funkcija. Autokoreliacinėje kreivėje matomas didelis pjedestalas, kurio kilmė – nesukompensuota skaidulos ir kompresoriaus TED.

Siauro spektro, 1064 nm centrinio bangos ilgio impulsai, atspindėti atgal nuo SBG toliau sklido pluošto daliklio BS3 30% atšaka link BIT4. Impulsų energija (~1.6 pJ) ir vidutinė galia (~0.1 mW) nebuvo pakankama efektyviam stiprinimui kietakūniame Nd regeneraciniame stiprintuve. Papildoma skaidulinė stiprinimo pakopa buvo sukonstruota norint padidinti užkrato impulsų energiją. Šioje pakopoje 1064 nm spinduliuotė buvo 100

1067 nm (Pav. 2.1.6) ir apėmė Yb ir Nd legiruotų aktyvių terpių stiprinimo juostas. Išmatuota spektriškai išplėstų impulsų trukmė - 15 ps.

Spektriškai išplitę impulsai buvo padalinti į dvi atšakas 30/70 pluošto dalikliu (PD3). 30% atšaka liko nenaudojama, o 70% atšaka buvo sujungta su siaurajuoste SBG, kuri atspindėjo atgal 0.4 nm pločio spektrą ties 1064 nm centru bangos ilgiu tolesniam stiprinimui.

Impulsų spektrinės komponentės, praėjusios pro SBG buvo panaudotos kaip užkratas femtosekundiniam



Pav. 2.1.7 Eksperimentiškai išmatuota suspaustų plačiajuosčio 1030 nm kanalo impulsų autokoreliacinė kreivė. Gauta 305 fs impulso trukmė aproksimuojant Gauso funkcija.

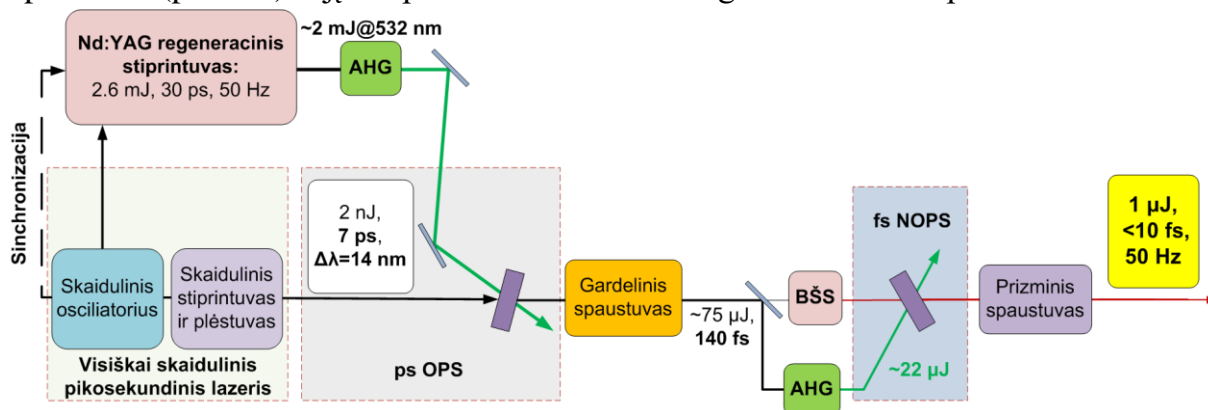
kartų pastiprinta iki 150 pJ energijos, kurios pakako norint gauti aukšto kontrasto impulsus iš regeneracinio stiprintuvo [21]. Išmatuota ~ 0.4 nm spektro pločio impulsų trukmė - 8.5 ps. Galiausiai, 1064 nm impulsai išplėsti laike panaudojant -2000 ps/nm dispersijos, 0.3 nm spektro pločio ČSBG2. Išmatuota išplėstų impulsų trukmė atitiko ~ 520 ps.

2.2 Skaidulinių lazerių technologija paremtas femtosekundinių impulsų gavimo būdas

Skyriuje pateikta medžiaga publikuota A1 bei aprašyta patente P2

Šiame skyriuje aprašyta naujo metodo, skirto generuoti femtosekundiniams impulsams, eksperimentinė realizacija. Šis metodas buvo panaudotas konstruojant OPČIS sistemos šaltinį, kuriame gauti kelių optinių ciklų impulsai ties 800 nm bangos ilgiu. Unikalioje schemoje panaudota praeitame skyriuje aprašyta dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų impulsų lazerio koncepcija bei naujas būdas femtosekundiniams impulsams suformuoti, parametriškai stiprinant ir spaudžiant skaiduliniame lazeryje spektriškai išplėstus impulsus bei generuojant baltos šviesos superkontinuumą (BŠS).

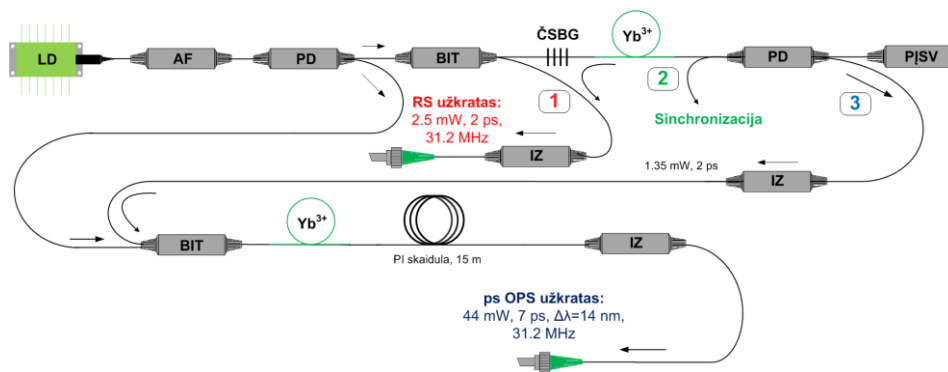
Naujo tipo šaltinio femtosekundinėms OPČIS sistemos principinė eksperimentinė schema pavaizduota Pav. 2.2.1. Šioje schemoje, kelių išėjimo kanalų pikosekundinis visiškai skaidulinis lazeris buvo panaudotas kaip užkratas optiniam parametriniam stiprintuvui (ps OPS) ir jį kaupinančiam Nd:YAG regeneraciniam stiprintuvui.



Pav. 2.2.1 OPČIS sistemos šaltinio principinė eksperimentinė schema. Kelių išėjimo kanalų visiškai skaidulinis pikosekundinis lazeris generavo užkrato impulsus optiniam parametriniam stiprintuvui (ps OPS) ir jį kaupinančiam Nd:YAG regeneraciniam stiprintuvui. Parametriškai sustiprinti čirpuoti pikosekundiniai impulsai buvo suspausti difracinių gardelių spaustuvas ir panaudoti BŠS generacijai. BŠS impulsai toliau sustiprinti parametriškai femtosekundiniame neekvilinearame OPS (fs NOPS) ir suspausti prizminiu spaustuvas.

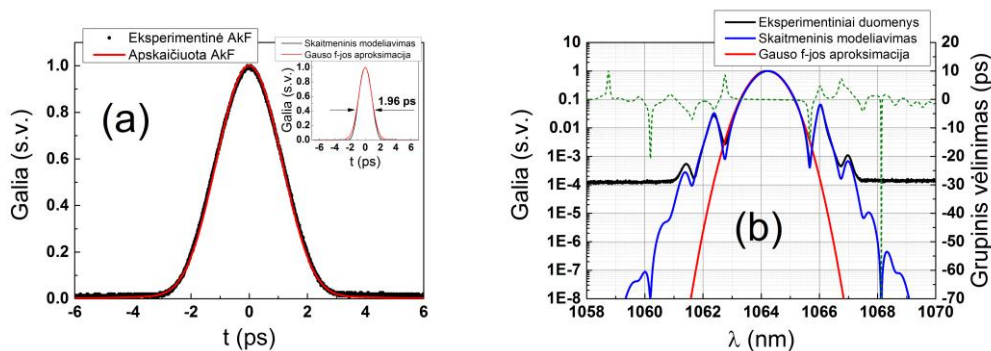
Detali sukonstruoto ir eksperimentiškai surinkto skaidulinio lazerio schema pateikta Pav. 2.2.2. Pasyvios modų sinchronizacijos būdu veikiantis visiškai skaidulinis osciliatorius generavo 2 ps impulsus ties 1064 nm centriniu bangos ilgiu. Impulsų trukmę nulėmė anomalios dispersijos (2 ps/nm) čirpuota skaidulinė Brego gardelė ČSBG. Stabilus vieno impulso generavimo režimas buvo užtikrintas panaudojant PĮSV. Lazeris veikė 31.2 MHz pasikartojimo dažniu.

Skaidulinio osciliatoriaus impulsų laikinės ir spektrinės savybės skirtinguose išėjimo kanaluose buvo ištirtos atliekant skaitmeninį modeliavimą. Modeliavimo tikslas buvo surasti nusistovėjusios impulsų gaubtinės sprendinius dviejuose osciliatoriaus išėjimo kanaluose. Pirmasis kanalas suformuotas per pluošto daliklį, įvirintą prie PĮSV mazgo rezonatoriaus viduje. Dalinai pralaidi ČSBG panaudota kaip antrasis išėjimo kanalas.



Pav. 2.2.2 Pikosekundinio visiškai skaidulinio lazerio schema. Sutrumpinimų reikšmės: LD – lazerinis diodas, AF – skaidulinis juostinis filtras, PD – pluošto daliklis, BIT – bangos ilgių tankintuvas, ČSBG – čirpuota skaidulinė Brego gardelė, PJSV – puslaidininkinio išsotinančio sugėriklio veidrodis, IZ – izoliatorius, PI – poliarizaciją išlaikanti, RS – regeneracinis stiprintuvas. Skaičiais 1, 2, 3 pažymėti osciliatoriaus išėjimo kanalai.

Teoriškai sumodeliuoti pluošto daliklio išėjimo kanalo impulsai palyginti su eksperimentiniais rezultatais (Pav. 2.2.3). Stiprinimo parametrai skaitmeniniame modelyje parinkti taip, kad pagrindinės spektrinės smailės ir šalia esančios šoninės smailės intensyvumų santykis sutaptų su eksperimentiniu matavimu. Pateiktas spektras (Pav. 2.2.3(b), juoda kreivė) buvo išmatuotas prie 1.65 mW vidutinės išėjimo galios. Siekiant išryškinti spektrinę impulso struktūrą pasirinkta logaritminė atvaizdavimo skalė. Teorinis ir eksperimentinis spektrai puikiai sutapo. Pagrindinės spektrinės smailės plotis pusės intensyvumo aukštyje – 1 nm. Visą spektrą sudarė 8 šoninės spektrinės smailės, iš kurių 4 gerai matomos ir eksperimentiniame matavime. Šios šoninės smailės – rezultatas konstruktyvios sąveikos tarp solitoninio impulso ir dispersinės bangos, atsirandančios rezonatoriuje susiformavusiam impulsui dalinai netenkinant solitoninio sklidimo sąlygų [51]. Toks spektras yra tipinis solitininio režimu veikiančiam sinchronizuotų modų skaiduliniam osciliatoriui.

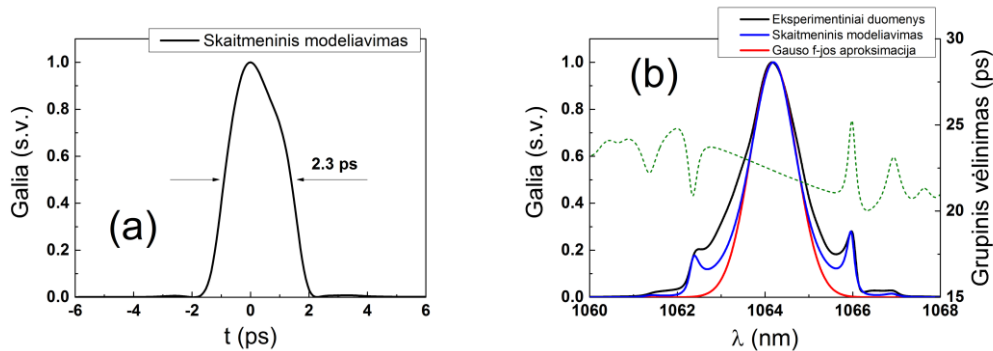


Pav. 2.2.3 Pluošto daliklio išėjimo kanalo impulsai: (a); apskaičiuota impulso autokoreliacinė funkcija (raudona kreivė) palyginta su išmatuota eksperimentiškai (juodi taškai); paveikslėlio viduje: sumodeliuota impulso gaubtinė (juoda kreivė), aproksimuota Gauso funkcija (raudona kreivė); (b) eksperimentiškai išmatuotas impulsų spektras (juoda kreivė) palygintas su teoriškai sumodeliuotu (mėlyna kreivė) bei aproksimuotas Gauso funkcija (raudona kreivė); žaliai brūkšniuota kreivė vaizduoja grupinį vėlinimą.

Iš grupinio vėlinimo kreivės (Pav. 2.2.3(b)) matoma, kad impulso spektrinės komponentės yra sufazuotos, o tai reiškia, kad pro pluošto daliklio kanalą išeinantys impulsai yra spektriškai riboti. Eksperimentiškai išmatuota autokoreliacinė funkcija

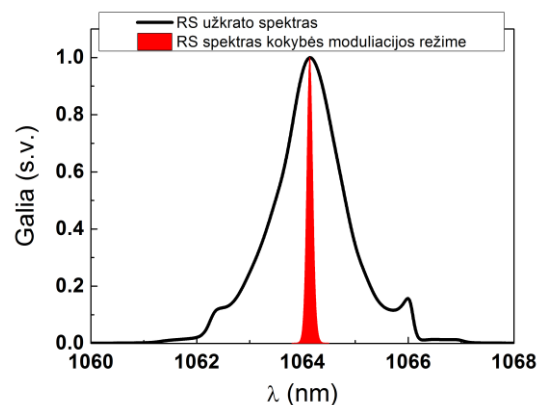
sutampa su apskaičiuota iš sumodeliuotos impulso gaubtinės (Pav. 2.2.3(a)). Impulso trukmė atitiko 1.96 ps, o forma minimaliai skyrėsi nuo Gauso funkcijos dėl statesnių šlaitų.

Impulsai gauti per ČSBG išėjimo kanalą ženkliai skyrėsi. Spinduliuotės vidutinė galia tokiomis pačiomis stiprinimo sąlygomis buvo 2.98 mW. Sumodeliuota 2.3 ps trukmės impulsų gaubtinė buvo asimetrinė ir neatitiko Gauso funkcijos formos (Pav. 2.2.5(a)). Impulsų spektro plotis pusės intensyvumo aukštyje buvo didesnis nei pluošto daliklio išėjimo kanalo atveju (1.25 nm), o grupinio vėlinimo kreivė (Pav. 2.2.5(b), žaliai brūkšniuota) parodė, kad impulsai teigiamai čirpuoti. Spektro išplitimo ir čirpo atsiradimo priežastis - GGD ir FSM efektai impulsams sklindant rezonatoriaus skaidula. Impulsų išvedimo per pluošto daliklį atveju, grupinis vėlinimas sukompensuotas atspindžio nuo ČSBG metu, kadangi ši ČSBG pasižymėjo priešingo nei skaidulos ženklo dispersija. Kita vertus, ČSBG neįnešė dispersijos praleidžiamai spinduliuotei, kas ir nulėmė rezultatus pavaizduotus Pav. 2.2.5. Papildomas spektro išplitimas, lyginant eksperimentinį spektrą su teoriniu, galėjo būti sąlygotas FSM efekto impulsams sklindant skaidula iki spektro analizatoriaus.



Pav. 2.2.5 ČSBG išėjimo kanalo impulsai: (a) sumodeliuota impulso gaubtinė (juoda kreivė); (b) eksperimentiškai išmatuotas impulso spektras (juoda kreivė) palygintas su skaitmeniškai sumodeliuotu (mėlyna kreivė) bei aproksimuotu Gauso funkcija (raudona kreivė) spektru; žaliai brūkšniuota kreivė vaizduoja grupinį vėlinimą.

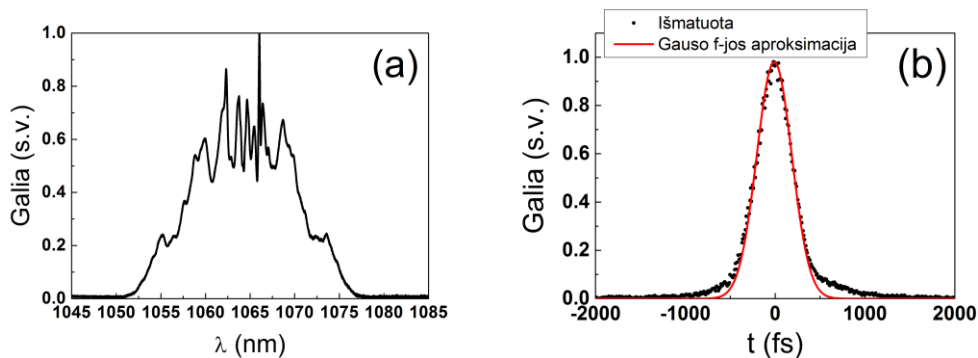
Eksperimentiškai sukonstruotas skaidulinis osciliatorius turėjo 3 išėjimo kanalus (Pav. 2.2.2). Pirmasis kanalas buvo suformuotas naudojant bangos ilgių tankintuvą (BIT) atskirti impulsams, praėjusiems pro ČSBG. Šie impulsai panaudoti kaip užkratas Nd:YAG regeneraciniam stiprintuvui (RS). Nors spinduliuotės vidutinė galia išėjime buvo apie 2.5 mW (~80 pJ impulso energija), palyginti nedidelė impulsų spektro dalis sutapo su Nd:YAG stiprinimo juosta



Pav. 2.2.4 Regeneracinio Nd:YAG stiprintuvo užkrato impulsų spektras. Raudonai nuspalvinta sritis atitinka RS stiprinamų impulsų spektrą kokybės moduliacijos režime, kuris parodo stiprinimo juostą.

Antrasis ir trečiasis išėjimo kanalai buvo sukonstruoti per poliarizuojantį pluošto daliklį (BS), įvirintą osciliatoriaus rezonatoriuje. Antrasis kanalas naudotas skaidulinio lazerio ir regeneracinio stiprintuvo sinchronizacijai. Spinduliuotė buvo nuvedama į fotodetektorių, kuris sugeneruodavo grįžtamojo ryšio signalą RS sinchronizacijos elektronikai.

Trečiasis kanalas buvo skirtas formuoti impulsams, tinkamiems BŠS generacijai. Visų pirma, impulsai pastiprinti Yb^{3+} legiruotame skaiduliniam stiprintuve. Po stiprinimo impulsų spektras išplėtas iki ~ 14 nm pasinaudojant FSM efektu vienamodėje, poliarizaciją išlaikančioje skaiduloje (Pav. 2.2.6(a)). Išmatuota spinduliuotės vidutinė galia po plėtimo – 44 mW (1.4 nJ impulso energija). Impulsų trukmė padidėjo iki ~ 7 ps dėl skaidulos dispersijos.



Pav. 2.2.6 (a) ps OPS užkrato impulsų spektras; (b) suspaustų impulsų, naudotų BŠS generacijai, autokoreliacinė kreivė. Išmatuota trukmė – 141 fs apksimuoiant Gauso funkcija.

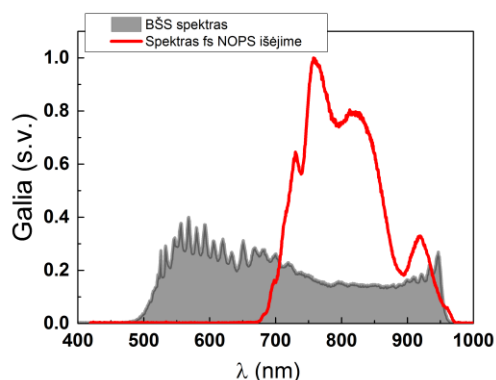
Spektriškai išplitę impulsai sustiprinti optiniame parametriniame stiprintuve (ps OPS pagal Pav. 2.2.1) iki 100 μJ energijos. Kaupinimui naudotas Nd:YAG regeneracinis stiprintuvas, kurio išėjime gautais 30 ps, 2.6 mJ energijos, 1064 nm centrinio bangos ilgio impulsais 9 mm LBO kristale sugeneruota antroji harmonika su $\sim 77\%$ keitimo efektyvumu. Kaupinimo lazerio pasikartojimo dažnis buvo 50 Hz. 6 mm ilgio, I tipo BBO kristale impulsai parametriškai sustiprinti $\sim 7 \cdot 10^4$ karto. Pasiiektas 5% energijos keitimo efektyvumas. Ši stiprinimo pakopa nebuvo efektyviai išnaudota dėl neoptimalaus signalo ir kaupinimo impulsų trukmių santykio (~ 0.2). Eksperimentiškai nustatytas impulsų momentinis energijos stabilumas – 0.25% rms. Šiam parametru įvertinti buvo matuojama kiekvieno impulso energija 15 s laiko intervale. Šis rezultatas leido teigti, kad parametrinis stiprintuvas dirbo artimame įsotintam stiprinimui režime, kadangi sustiprinto signalo ir kaupinimo impulsų energijos stabilumai buvo beveik lygūs.

Po parametrinio stiprinimo pakopos impulsai suspausti iki ~ 140 fs trukmės difrakcinių gardelių spaustuviu (Pav. 2.2.6(b)), kuriame naudotos 1000 rėžių/mm pralaidumo gardelės Littrow konfigūracijoje. Suspaustų impulsų kontrastą pablogino nesukompensuota spaustuvo ir skaidulos TED, kas matoma iš laikinio pjedestalo autokoreliacinėje kreivėje.

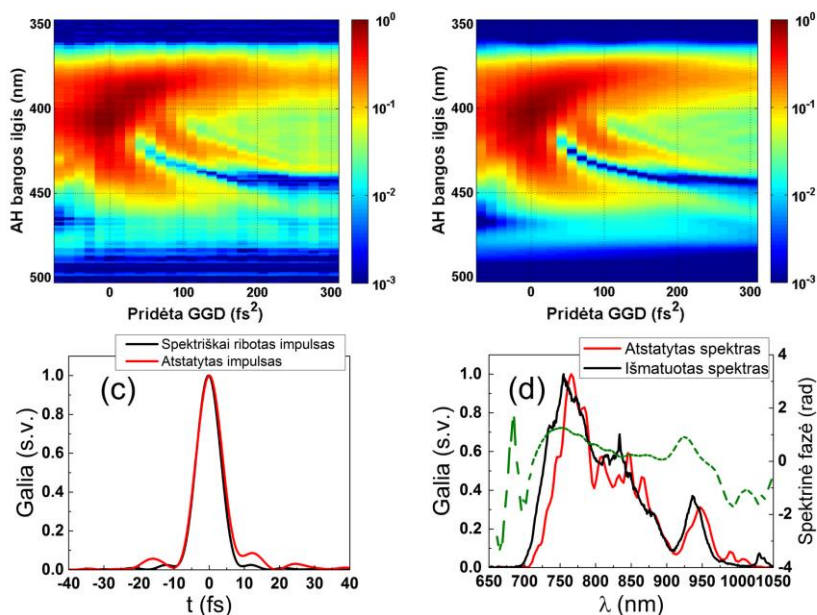
Nedidelė dalis sustiprintos ir suspaustos spinduliuotės ($\sim 0.7 \mu\text{J}$) sufokusuota į 5 mm storio safyro plokštelę BŠS generuoti (Pav. 2.2.7, pilkai nuspalsvinta sritis). Fokusavimo sąlygos ir impulso energija parinkti siekiant gauti tolygų ir stabilų BŠS.

Likusi spinduliuotės dalis ($\sim 70 \mu\text{J}$) panaudota antrajai harmonikai generuoti 2.5 mm storio BBO kristale ($\sim 32\%$ keitimo efektyvumas). 532 nm bangos ilgio impulsai buvo skirti stiprinti plataus spektro (690–960 nm) BŠS (Pav. 2.2.7, raudona kreivė) femtosekundiniame nekoliniariame OPS (fs NOPS) iki $\sim 1.5 \mu\text{J}$ energijos. Parametrinis stiprinimas buvo realizuotas 2 mm I tipo BBO kristale, esant $\theta \approx 24^\circ$ sinchronizmo kampui ir $\alpha \approx 2.4^\circ$ kampui tarp kaupinimo ir signalo bangų kristalo viduje. Tokiomis sąlygomis buvo siekiama gauti kuo platesnę parametrinio stiprinimo juostą [13,18]. Kaupinimo pluošto dydis buvo parinktas taip, kad būtų išvengta ženklios parametrinės fluorescencijos generacijos bei stiprinimo.

Norint gauti kuo trumpesnės trukmės impulsus už parametrinio stiprintuvo, buvo būtina kompensuoti medžiagos pro kurią sklido BŠS impulsai įneštą dispersiją. Pagrindiniai dispersijos šaltiniai – safyro plokštelė, kurioje buvo sugeneruotas BŠS bei BBO kristalas. Kad būtų išvengta nesukompensuotos TED sąlygotų impulso iškraipymų, impulsų spaudimui pasirinktas palyginti nedidelio TED/GGD santykio prizminis lydyto kvarco spaustuvas bei N-BK7 pleištu pora tiksliam dispersijos paderinimui.



Pav. 2.2.7 Baltos šviesos superkontinuumas, sugeneruotas 5 mm storio safyro plokštelėje (pilka nuspalvinta dalis) ir sustiprintų impulsų spektras fs NOPS išėjime (raudona kreivė). Siekiant atskirti 1064 nm spinduliuotę, panaudotas ilgabangis ($>970 \text{ nm}$) filtras.



Pav. 2.2.8 Parametriškai sustiprintų ir prizminiu kompresoriumi suspaustų BŠS impulsų charakterizavimas. Matavimai atlikti pasitelkiant *chirpscan* metodą: (a) eksperimentiškai išmatuota *chirpscan* diagrama; (b) skaitmeniškai atstatyta *chirpscan* diagrama; (c) atstatyto impulso gaubtinė (raudona kreivė) palyginta su spektriškai ribotu impulsu (juoda kreivė); (d) išmatuotas (juoda kreivė) ir atstatytas (raudona kreivė) impulsų spektrai bei atstatyta spektrinė fazė (žaliai brūkšniuota kreivė).

Chirpscan impulsų gaubtinės ir fazės charakterizavimo metodas [52] buvo naudojamas sustiprintų BŠS impulsų trukmės matavimui. *Chirpscan* diagramos ir atstatyto impulso gaubtinė bei spektras (raudonos kreivės) pavaizduoti Pav. 2.2.8. Atstatyto impulso trukmė pusės intensyvumo aukštyje atitiko 8.5 fs. Ši trukmė buvo labai artima spektriškai riboto impulso trukmei (7.9 fs), nustatytai iš eksperimentiškai išmatuoto impulsų spektro.

3 SČIS sistemos optimizavimas pasitelkiant derinamo aukštesnės eilės dispersijos kompensavimo metodą

Skyriuje pateikta medžiaga publikuota A3

Teoriniai skaičiavimai ir eksperimentai pristatomi šiame skyriuje susiję su SČIS sistemos analize bei optimizavimu. Nagrinėjama viena iš problemų, iškylančių tiek femtosekundinėse SČIS, tiek OPČIS sistemose: tai nesukompensuotos trečiosios ir aukštesnių eilių dispersijos sąlygotas impulsų laikinis išplitimas bei iškraipymai impulsų spaudimo pakopoje.

Vienas iš nesunkiai pritaikomų būdų dispersijos kompensavimui SČIS schemoje – specialiai parinktos dispersijos ČSBG naudojimas impulsų plėtimui. Komerciškai parduodami ČSBG plėstuvai gali būti pagaminti parenkant dispersijos parametrus net iki penktos eilės. Kita vertus, negalėjimas šių parametru paderinti eksperimentiškai realizuojant sistemą gali lemti prastus impulsų spaudimo rezultatus. Tokia reikiamybė atsiranda dėl paklaidų nustatant sistemos dispersiją bei skaidulos netiesiškumo sąlygotų efektų, kurie nulemia impulso fazės pokyčius. Galimybė derinti dispersijos parametrus taip pat leidžia paprasčiau modifikuoti eksperimentinę schemą.

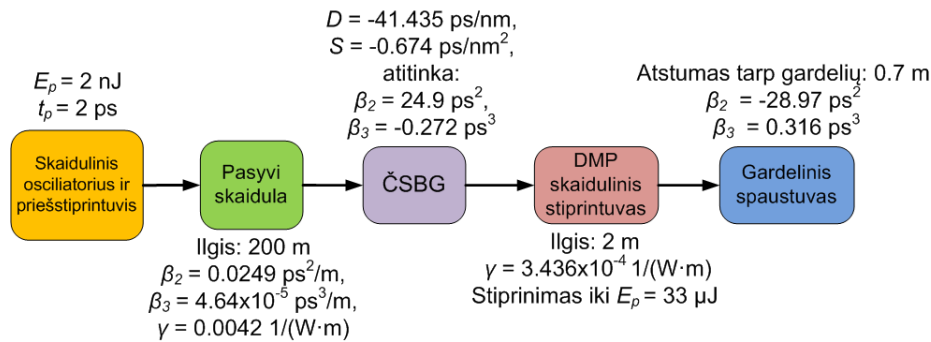
Šiame skyriuje aprašytas būdas gauti aukšto laikinio kontrasto femtosekundinius impulsus iš SČIS sistemos naudojant derinamos dispersijos ČSBG mazgą. Pradžioje, pikosekundiniai impulsai buvo sugeneruoti pasyvios modų sinchronizacijos būdu veikiančiame osciliatoriuje ir praleisti per vienamodę optinę skaidulą, kurioje, veikiant FSM ir GGD efektams, patyrė spektrinį ir laikinį išplitimą. Toliau, impulsams išplėsti laike iki kelių šimtų pikosekundžių panaudota ČSBG su temperatūrinio derinimo galimybe. Po plėtimo impulsai sustiprinti DMP skaiduliniame stiprintuve ir suspausti difrakcinių gardelių spaustuviu. Sukūrus netiesinį temperatūros pasiskirstymą išilgai ČSBG, buvo galima modifikuoti gardelės dispersines charakteristikas bei derinti TED ir aukštesnių eilių dispersiją. Taip buvo siekiama minimizuoti nesukompensuotą spektrinę fazę po impulsų spaudimo. Metodas buvo analizuotas skaitmeniškai ir patikrintas eksperimentiškai pritaikant ČSBG plėstuvą su 4 atskirai valdomais Peltjė elementais (PE). Optimizavus netiesinį temperatūros pasiskirstymą išilgai ČSBG, pasiektas ženklus impulsų suspaudimo pagerinimas.

Teorinis modeliavimas

Teoriniai skaičiavimai buvo atlikti siekiant sumodeliuoti netiesinio temperatūros pasiskirstymo išilgai ČSBG efektą SČIS sistemoje ir surasti optimalias sąlygas galimai eksperimentinei realizacijai. Skaitmeninio modeliavimo schema pateikta Pav. 3.1. Modelio parametrai buvo parinkti pagal eksperimentines sąlygas.

Sistemos užkrato šaltinis buvo pasyvios modų sinchronizacijos būdu veikiančias, visiškai skaidulinis, pikosekundinis osciliatorius, kurio centrinis bangos ilgis – 1064.63 nm. 2 ps trukmės osciliatoriaus impulsais sustiprinti iki 2 nJ energijos. Toliau, impulsai išplėsti laike iki daugiau nei 100 ps trukmės panaudojant 200 m ilgio vienamodę,

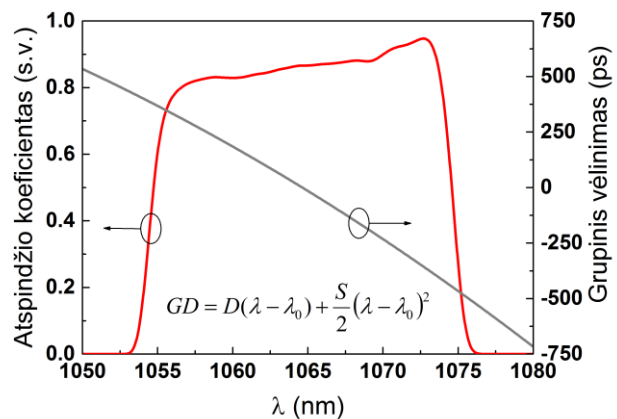
poliarizaciją išlaikančią skaidulą (modos diametras – 6.3 μm). Impulsų spektras išplito dėl FSM efekto.



Pav. 3.1 Principinė skaitmeninio modeliavimo schema. Kiekvienas blokas nurodo impulsų formavimo ir stiprinimo pakopas su skirtingais dispersijos ir netiesiškumo parametrais. E_p – impulso energija, t_p – impulso trukmė.

Tikslios ČSBG dispersijos parametrų vertės ir atspindžio spektras (Pav. 3.2) buvo gauti iš gamintojo. Grupinio vėlinimo kreivė, pavaizduota pilka spalva atitinka $D = -41.435$ ps/nm dispersijos parametru esant pastoviai 77 °C temperatūrai išilgai ČSBG. Dispersijos parametro išvestinės vertė ties centriniu bangos ilgiu – $S = -0.674$ ps/nm².

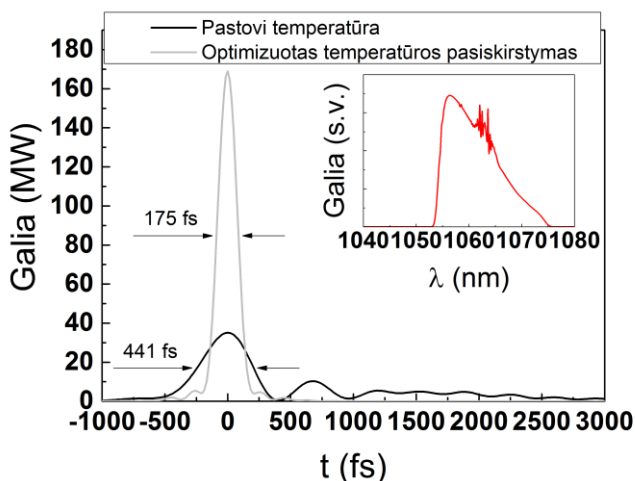
Išplėsti impulsai sustiprinti DMP skaiduliniam stiprintuve (modos diametras – 22 μm) iki 33 μJ energijos. Modeliavime įskaitytas nuo bangos ilgio priklausantis stiprinimo koeficientas, apskaičiuotas pagal Yb³⁺ jonais legiruotos skaidulos sugerties ir emisijos skerspjūvius. Galiausiai impulsai suspausti naudojant 1600 rėžių/mm difrakcinių gardelių spaustuvo dispersijos parametrus.



Pav. 3.2 Išmatuotas ČSBG atspindžio spektras ir apskaičiuota grupinio vėlinimo kreivė esant pastoviai 77 °C temperatūrai išilgai gardelės.

Atstumas tarp gardelių buvo parinktas pagal maksimalią suspausto impulso smailinę galią. Optimaliai suspausto impulso gaubtinė pavaizduota Pav. 3.3 (juoda kreivė). Impulso galinio fronto osciliacijos parodo, kad jis ženkliai paveiktas nesukompensuotos impulsų plėstuvo–spaustuvo TED. Impulso spektre (Pav. 3.3 viduje) matomų moduliacijų kilmė – netiesinis stiprinimas DMP skaiduloje (apskaičiuota B-integralo vertė – 1.36π rad). Tai taip pat nulėmė suspausto impulso kontrasto pablogėjimą. Šie efektai sukuria liekamąją netiesinę fazę, kurios sukompensavimas nėra įmanomas naudojant standartinį difrakcinių gardelių spaustuva.

Sekantis skaitmeninio modeliavimo žingsnis buvo spektriškai ribotų impulsų, atitinkančių Pav. 3.3 viduje pavaizduotą spektrą apskaičiavimas. Norint nustatyti



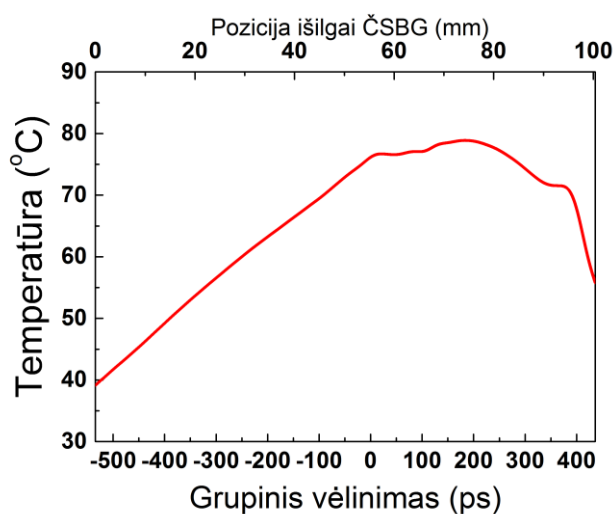
Pav. 3.3 Suspausto impulso gaubtinė SČIS sistemos išėjime įskaitant (pilka kreivė) ir neįskaitant (juoda kreivė) netiesinių temperatūros pasiskirstymą išilgai ČSBG. Sustiprinto impulso spektras pavaizduotas paveikslėlio viduje.

vėlinimas prieš ČSBG plėstuvą $GD_{prieš}(\lambda)$ bei pačios ČSBG ($GD_{\check{C}SBG}(\lambda)$, Pav. 3.2, pilka kreivė) taip pat buvo žinomi. Sukeičiant šių funkcijų argumentus su reikšmėmis, nustatytas kiekvieną grupinio vėlinimo tašką atitinkantis bangos ilgio postūmis. Turint šiuos duomenis, buvo galima apskaičiuoti reikalingą temperatūros pasiskirstymą:

$$T(GD) = \frac{\lambda_{opt-prieš}(GD) - \lambda_{\check{C}SBG}(GD)}{k\lambda_{\check{C}SBG}(GD)} + T_0. \quad (3.1)$$

Ši formulė gauta naudojantis Brego bangos ilgio poslinkio priklausomybės nuo temperatūros pokyčio tiesine aproksimacija [54]:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B k \Delta T. \quad (3.2)$$



Pav. 3.4 Apskaičiuotas temperatūros pasiskirstymas išilgai ČSBG, kuris reikalingas norint gauti spektriškai ribotus impulsus sistemos išėjime. Apatinė horizontali ašis rodo grupinio vėlinimo vertes, viršutinė – poziciją išilgai ČSBG.

temperatūros pasiskirstymą išilgai ČSBG, kuris leistų panaikinti impulso fazės iškreipimus ir gauti artimus spektriškai ribotiems impulsams SČIS sistemos išėjime, atliktas atvirkštinio sklaidimo modeliavimas [53].

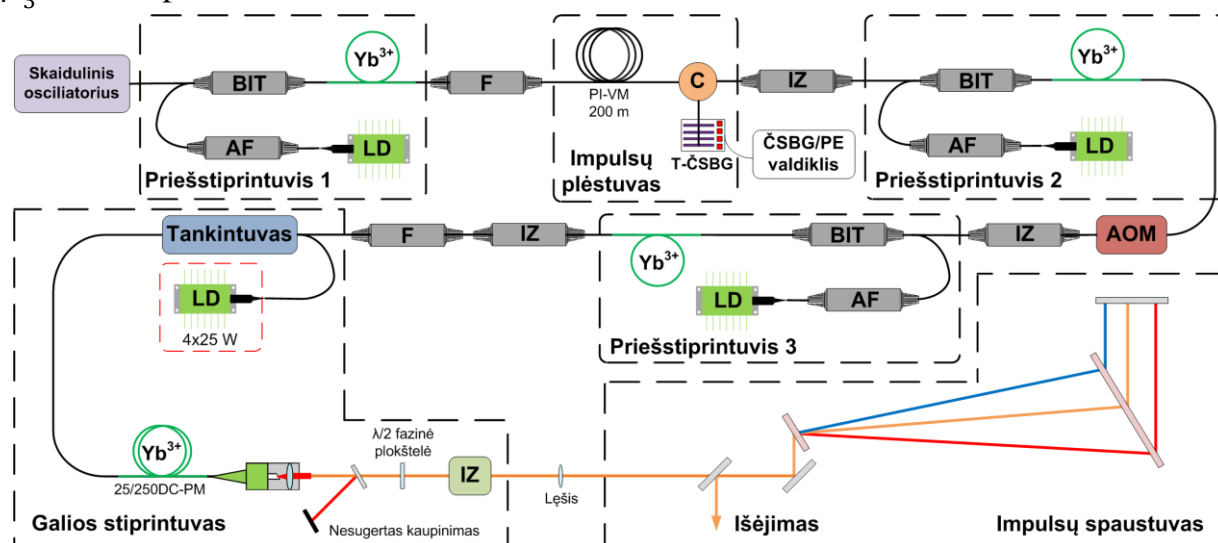
Spektriškai ribotų impulsų atvirkštinis sklaidimas sumodeliuotas iki vietos tarp ČSBG ir DMP stiprintuvo. Tada apskaičiuota grupinio vėlinimo funkcija nuo bangos ilgio $GD_{opt}(\lambda)$, kuri atitiko optimalų impulsų suspaudimą. Grupinis

Nuo temperatūros priklausantis lūžio rodiklio pokytis yra dominuojantis veiksnys, lemiantis Brego bangos ilgio poslinkį, todėl terminio plėtimosi įtaka nebuvo įskaityta. k yra termooptinis koeficientas ($k = 7 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), kuris buvo nustatytas matuojant nuo temperatūros priklausantį siaurajuostės SBG atspindžio spektro centrinio bangos ilgio poslinkį. T_0 - nominali ČSBG temperatūra (77 °C).

Apskaičiuotas temperatūros pasiskirstymas, reikalingas spektriškai ribotiems impulsams sistemos išėjime gauti, pavaizduotas Pav. 3.4. Modeliavimo metu nustatyta, kad temperatūros vertės labai nepasikeitė nuo nominalios vertės ir varijavo ~30 °C intervale. Tokios sąlygos buvo tinkamos realizuoti eksperimentiškai. Skaičiavimai parodė ženklų impulsų kontrasto pagerinimą SČIS sistemos išėjime. Gauta 2.52 karto trumpesnė suspaustų impulsų trukmė ir 4.8 karto didesnė smailinė galia (Pav. 3.3, pilka kreivė). Toks spektrinės fazės kompensavimo būdas buvo patikrintas eksperimentinėje schemeje.

Eksperimentas

Principinė eksperimento schema pavaizduota Pav. 3.5. Sistemoje naudotos tik poliarizaciją išlaikančios skaidulos. Ultratrumpieji 2 ps trukmės impulsai sugeneruoti visiškai skaiduliniame pasyvios modų synchronizacijos režimu veikiančiame osciliatoriuje, kurio centrinis bangos ilgis – 1064.63 nm. Osciliatoriaus impulsai buvo sustiprinti Yb³⁺ jonais legiruotoje vienamodėje skaiduloje iki 2 nJ energijos. Toliau impulsai išplėsti laike ir spektre dėl dispersijos ir FSM efektų 200 m ilgio skaiduloje. Pagrindinis impulsų laikinis plėtimas atliktas specialiai parinktų dispersijos parametru ČSBG su temperatūrinio derinimo galimybėmis (TeraXion Inc.). ČSBG parametrai esant pastoviai temperatūrai buvo aprašyti praeitame skyrelyje (Pav. 3.2). Suminiai impulsų plėstuvo mazgo (200 m optinės skaidulos ir ČSBG) dispersijos parametrai: $\beta_2 = 29.91 \text{ ps}^2$, $\beta_3 = -0.263 \text{ ps}^3$.

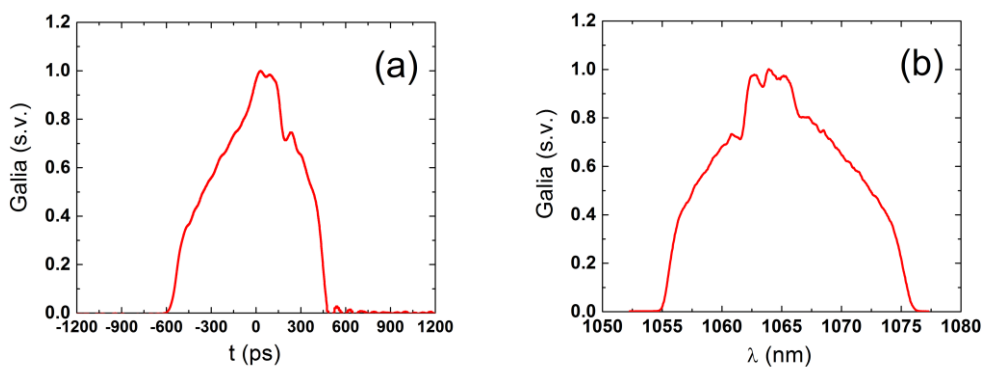


Pav. 3.5 Eksperimentiškai realizuotos SČIS sistemos su derinamu ČSBG impulsų plėstuvu schema. Santrumpos atitinka: LD – lazerinis diodas, AF – skaidulinis juostinis filtras, F – SSE filtras, IZ – izoliatorius, BIT – bangos ilgių tankintuvas, T-ČSBG – ČSBG mazgas su temperatūrinio derinimo galimybe, AOM – akustooptinis moduliatorius, C – cirkuliatorius, PI-VM – poliarizaciją išlaikanti vienamodė skaidula, 25/250DC-PM – Yb³⁺ jonais legiruota, dvigubo apvalkalo, poliarizaciją išlaikanti DMP skaidula.

Temperatūra išilgai ČSBG buvo derinama 4 PE, atskirtais vienas nuo kito 33 mm atstumu. Tokiu ČSBG mazgu buvo galima sukurti pastovų temperatūros gradientą GGD koeficiento paderinimui, arba nustatyti skirtingus temperatūros gradientus 3 atkarpose

išilgai ČSBG, siekiant pakeisti aukštesnių dispersijos eilių parametrus. Temperatūros derinimo diapazonas buvo: 35–120 °C. Aukštesnių dispersijos eilių keitimas buvo labai apribotas (tik 4 PE). Naudojant daugiau PE ir taip kontroliuojant didesnę skaičių temperatūros gradientų, įmanoma keisti ČSBG dispersijos parametrus su daug didesniu tikslumu. Tokie ČSBG mazgai su 32 varžiniais kaitinimo elementais [55] ir 10 PE [56] jau buvo pademonstruoti medžiagos dispersijos kompensavimui telekomunikacinių sistemų taikymuose.

Išmatuota impulsų gaubtinė ir spektras po plėstuvo mazgo pavaizduoti Pav. 3.6. Už 200 m plėtimo skaidulos impulsų spektras buvo šiek tiek platesnis nei ČSBG atspindžio juosta, todėl spektro kraštai buvo apriboti. Išmatuota impulsų trukmė pusės intensyvumo aukštyje – 761 ps.

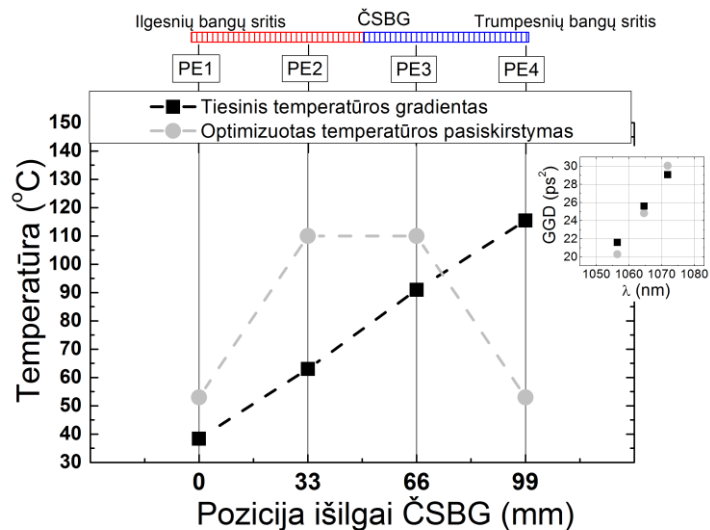


Pav. 3.6 (a) Išplėsto impulso laikinė gaubtinė išmatuota 35 ps atsako trukmės fotodiodu ir 20 GHz oscilografu; (b) išplėstų impulsų spektras.

Išplėsti impulsai buvo sustiprinti vienamodžiam skaiduliniam stiprintuve (Priešstiprintuvis 2, pagal Pav. 3.5), po kurio impulsų pasikartojimo dažnis sumažintas nuo 30 MHz iki 100 kHz panaudojant akustooptinį moduliatorių (AOM). Toliau impulsai dar syki stiprinti 3-ame priešstiprintuvyje ir, galiausiai, galios stiprintuve, kuriame buvo naudojama 25 μm šerdies diametro, Yb³⁺ legiruota, dvigubo apvalkalo DMP skaidula. Kaupinimo spinduliuotė iš 976 nm lazerinių diodų ir stiprinami impulsai buvo suvedami į DMP skaidulą pasitelkiant kaupinimo ir signalo tankintuvą (ITF Labs). Sukonstruotas galios stiprintuvo mazgas buvo visiškai monolitinis.

Impulsai po stiprinimo suspausti panaudojant difrakcinių gardelių spaustuvą. Spaustuvą sudarė dvi 1600 rėžių/mm gardelės (LightSmyth technologies Inc.), kurių difrakcijos efektyvumas viršijo 94%. Optimali impulsų spūda gauta nustačius atstumą tarp gardelių lygų ~0.7 m, kas sutapo su teoriniu modeliavimu. Apskaičiuoti spaustuvo dispersijos parametrai: $\beta_2 = -28.97 \text{ ps}^2$; $\beta_3 = 0.316 \text{ ps}^3$. Galima pastebėti, kad tokiu atveju TED nėra visiškai kompensuojama (plėstuvo mazgo $\beta_3 = -0.263 \text{ ps}^3$). Toks nesutapimas atsirado todėl, kad parinkti ČSBG dispersijos parametrai buvo skirti kompensuoti vien gardelinio spaustuvo (esant 0.6 m atstumui tarp gardelių), tačiau nebuvo atsižvelgta į 200 m skaidulos, kuri į eksperimentinę schemą buvo įtraukta vėliau, dispersiją.

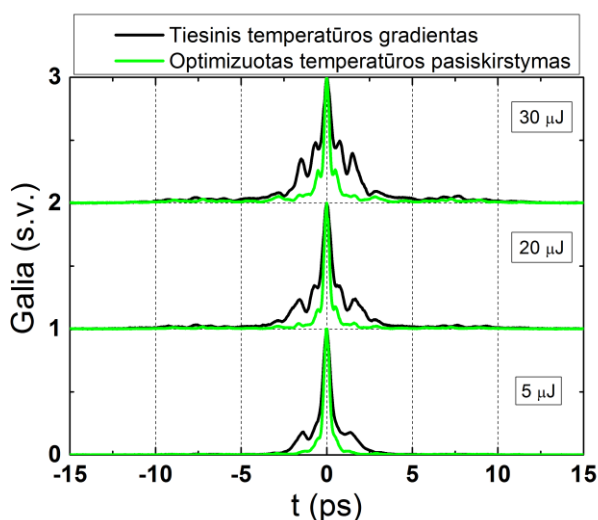
Impulsų laikiniam charakterizavimui po spaudimo išmatuotos autokoreliacinės funkcijos. Iš pradžių buvo analizuojama impulsų spūda, kai nustatyta pastovi ČSBG temperatūra arba pastovus temperatūros gradientas. Kiekvienam temperatūros nustatymui atstumas tarp difracinių gardelių buvo paderinamas siekiant gauti optimalų suspaudimą. Impulsų spūda buvo šiek tiek geresnė nustačius pastovų temperatūros gradientą,



Pav. 3.7 Temperatūros vertės išilgai ČSBG, kontroliuojamos PE. Juodi kvadratai – pastovus temperatūros gradientas. Pilki taškai – atskirai nustatytos kiekvieno PE temperatūros, prie kurių gaunamas optimalus suspaudimas. Paveikslėlio viduje – įvertintas GGD kitimas nuo bangos ilgio, esant temperatūros pasiskirstymams, pavaizduotiems pagrindiniame grafike.

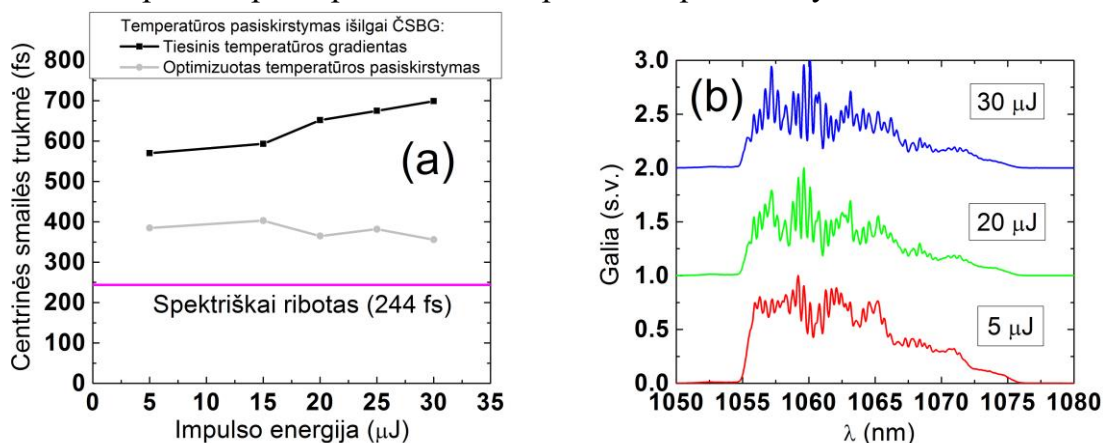
pavaizduotą Pav. 3.7 juodais taškais, palyginus su pastovios temperatūros atveju (gradientas lygus nuliui). Tai parodo, kad kitoks nei pradinis TED/GGD santykis buvo labiau tinkamas. Toliau PE temperatūros buvo optimizuojamos atskirai, realiu laiku stebint suspaustų impulsų autokoreliacinę kreivę. Iš pradžių temperatūros vertės buvo keičiamos grubiais žingsniais, siekiant surasti temperatūrų intervalą, kuriame autokoreliacinės funkcijos trukmė bei pjedestalas mažėja, o smailinė galia didėja. Vėliau kiekvieno PE temperatūra buvo tikslinama, gaunant autokoreliacinę kreivę su didžiausia smailine galia. Turint omenyje, kad temperatūros derinimo mazgą sudarė tik 4 PE, dispersijos parametrai buvo keičiami 3-ose atkarpose išilgai ČSBG. Geriausi impulsų spūdos rezultatai eksperimentiškai pasiekti su temperatūros pasiskirstymu, kuris pavaizduotas pilkais taškais Pav. 3.7. Tikslesnė optimizacija galėtų būti atlikta pasitelkiant skaitmeninį paieškos algoritmą, kuris patikrintų visas įmanomas temperatūrų kombinacijas smulkiu žingsniu. Eksperimentiškai gautas optimalus temperatūros pasiskirstymas kokybiškai panašus į apskaičiuotą teorinio modeliavimo metu (Pav. 3.4), tačiau skyrėsi kiekybiškai. Galima to priežastis – apribotos temperatūrinio derinimo galimybės eksperimente. Turint tik 4 PE paremtą temperatūros valdymą, nebuvo įmanoma tiksliai atkurti teorinio modeliavimo metu numatyto optimalaus temperatūros profilio. Papildomai atliktas kontroliuojamos temperatūros taškų skaičiaus įtakos gardelei modeliavimas parodė, kad smailinė suspausto impulso galia ženkliai didėja padidinus taškų skaičių nuo 4 iki 10. Turint 10 kontroliuojamos temperatūros taškų, impulso smailinė galia viršija 80% spektriškai riboto impulso smailinės galios. Toliau didinant taškų skaičių, ši vertė pasiekia 98%. Šie rezultatai gauti teigiant, kad temperatūra kinta tiesiškai tarp kontroliuojamos temperatūros taškų.

Autokoreliacinės funkcijos, atitinkančios atvejus, kai buvo nustatytas optimizuotas temperatūros pasiskirstymas bei pastovus temperatūros gradientas palygintos Pav. 3.8. Nepaisant to, kad temperatūros derinimo galimybės buvo labai apribotos, pastebėtas ženklus impulsų spūdos pagerinimas prie optimizuoto ČSBG temperatūros pasiskirstymo. Impulsų išėjimo energijoms siekiant $30 \mu\text{J}$ (vidutinė galia – 3 W), autokoreliacinės kreivės, atitinkančios optimizuotą ČSBG temperatūros pasiskirstymą turėjo žymiai mažesnę pjedestalą, palyginus su atveju, kai temperatūros profilis buvo tiesinis.



Pav. 3.8 Suspaustų impulsų autokoreliacinės funkcijos prie skirtingų impulsų energijų ir ČSBG temperatūros nustatymų. Juoda kreivė – pastovus temperatūros gradientas išilgai ČSBG; žalia kreivė – kiekvieno PE temperatūra atskirai optimizuota, siekiant gauti optimalų suspaudimą.

gradiento atveju, bet ilgesnė nei spektriškai riboto impulso trukmė, apskaičiuota iš eksperimentiškai išmatuoto spektro. Didėjant impulso energijai, autokoreliacinės funkcijos centrinės smailės trukmė didėja prie pastovaus temperatūros gradiento, tačiau išlieka beveik pastovi prie optimizuoto temperatūros pasiskirstymo.



Pav. 3.9 (a) Autokoreliacinės funkcijos pagrindinės smailės trukmė pusės intensyvumo aukštyje priklausomai nuo impulso energijos; (b) sustiprintų impulsų spektrai prie skirtingų energijų.

Optimalus temperatūros pasiskirstymas, nulėmęs geresnę impulsų spūdą, privertė gardelės GGD parametražą kisti greičiau (Pav. 3.7 viduje), kas reiškia absoliutinės TED

vertė padidėjimą. Kadangi esant pastoviai ČSBG temperatūrai plėtimo mazgo TED buvo mažesnė nei TED įnešama impulsų spaustuvo, TED vertės padidėjimas dėl nustatyto temperatūros pasiskirstymo išilgai ČSBG gali būti laikomas pagrindine priežastimi dėl kurios buvo pagerinta impulsų spūda.

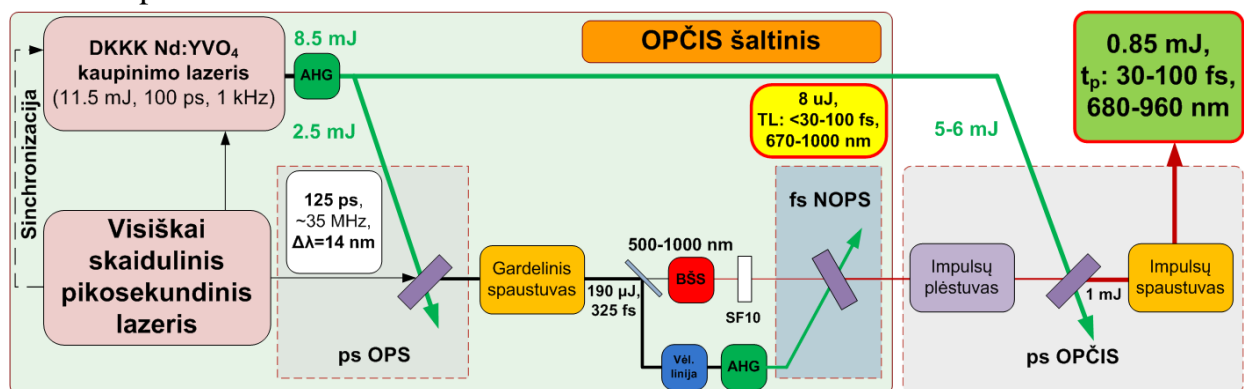
Prie didesnių nei 30 μJ impulso energijų pastebėti ženklūs impulsų iškraipymai po spaudimo, kurie negalėjo būti panaikinti derinant ČSBG temperatūros pasiskirstymą ar atstumą tarp gardelių spaustuve. Šių iškraipymų priežastimi galėjo būti spektrinės moduliacijos, užfiksuotos po galios stiprintuvo ir išryškėjusios prie didesnių impulso energijų (Pav. 3.9(b)). Čirpuotų impulsų spektrinės amplitudės moduliacijos veikiant FSM efektui sukelia spektrinės fazės iškraipymus, kas pablogina impulsų kontrastą po spaudimo [57]. Šias moduliacijas būtų galima sumažinti kruopščiai konstruojant visą sistemą – ypač naudojant aukštos kokybės skaidulinius komponentus, turinčius idealiai tolygias spektrines atsako funkcijas.

4 Femtosekundinė derinamo bangos ilgio OPČIS sistema naudojant pikosekundinio skaidulinio lazerio užkratą ir pikosekundinio DKKK lazerio kaupimą

Skyriuje pateikta medžiaga publikuota A1

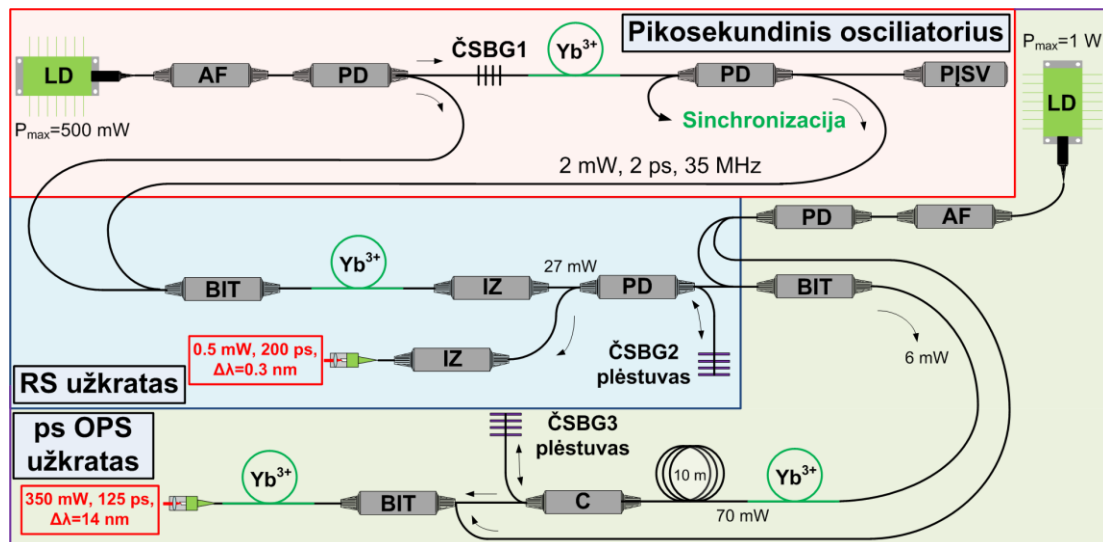
Šiame skyriuje aptariama kompaktiškos femtosekundinės, derinamo bangos ilgio OPČIS sistemos eksperimentinė realizacija, inkorporuojant unikalų plataus spektro impulsų šaltinį, pristatytą 2.2 skyriuje. Sistemoje panaudotas pikosekundinis skaidulinis lazeris, kuriame suformuoti užkrato impulsai pikosekundiniam DKKK regeneraciniam stiprintuvui bei spektriškai išplitę impulsai BŠS generavimui. Šis darbas apjungė visus ankstesniuose skyriuose aprašytus unikalios sprendimus, paremtus hibridinėmis skaidulinių ir kietojo kūno lazerių technologijomis į vieną OPČIS sistemą.

Principinė femtosekundinės derinamo bangos ilgio OPČIS sistemos schema pateikta Pav. 4.1. Ją sudarė OPČIS šaltinis, paremtas BŠS generavimu ir parametriniu stiprinimu femtosekundiniais impulsais bei pikosekundinis OPČIS stiprintuvas. Kaupinimui naudotas pikosekundinis DKKK Nd:YVO₄ lazeris.



Pav. 4.1 Principinė eksperimentinė femtosekundinės derinamo bangos ilgio OPČIS sistemos schema. Kelių kanalų visiškai skaidulinis pikosekundinis lazeris buvo panaudotas kaip užkratas DKKK kaupinimo lazeriui bei optiniam parametriniam stiprintuvui (ps OPS), suformuojant impulsus, tinkamus BŠS generavimui. BŠS impulsai, pastiprinti femtosekundiniame nekoliniariame OPS (fs NOPS) realizuojant bangos ilgio derinimą, toliau išplėsti laike, sustiprinti vienos pakopos OPČIS stiprintuve ir suspausti iki keliasdešimt femtosekundžių impulsų trukmių.

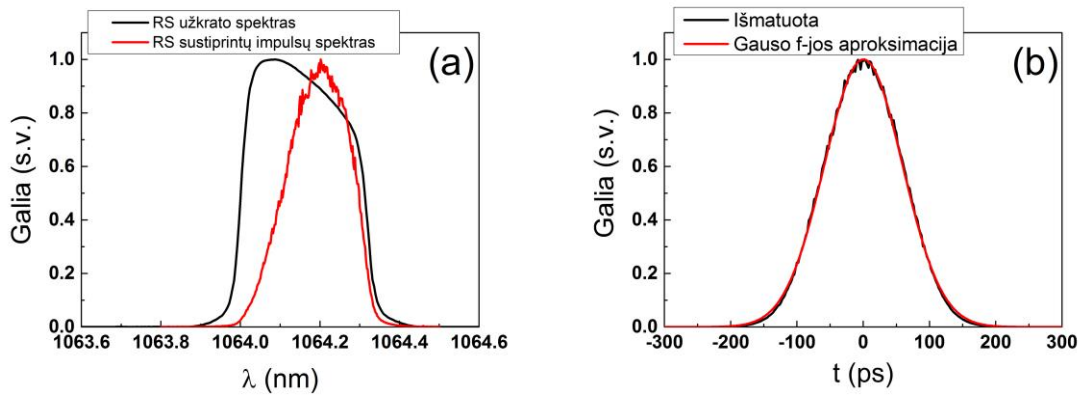
Sistemos impulsų šaltinis buvo monolitinis skaidulinis pikosekundinis lazeris, kurio detali schema pateikta Pav. 4.2. Lazerį sudarė 3 pagrindinės dalys: pikosekundinis osciliatorius, užkrato regeneraciniam stiprintuvui (RS) formavimo pakopa bei užkrato formavimo pikosekundiniam optiniam parametriniam stiprintuvui (ps OPS) dalis.



Pav. 4.2 Principinė visiškai skaidulinio pikosekundinio lazerio schema. Pasyvios modų sinchronizacijos būdu veikiantis skaidulinis osciliatorius generavo 2 ps trukmės impulsus, kurie buvo padalinti į dvi atšakas. Vienoje atšakoje suformuoti siauro spektro, čirpuoti užkrato impulsai DKKK regeneraciniam stiprintuvui. Kita atšaka buvo skirta plataus spektro (~14 nm) impulsų formavimui, kurie vėliau sustiprinti parametriškai, suspausti iki femtosekundinės trukmės ir panaudoti BSS generavimui.

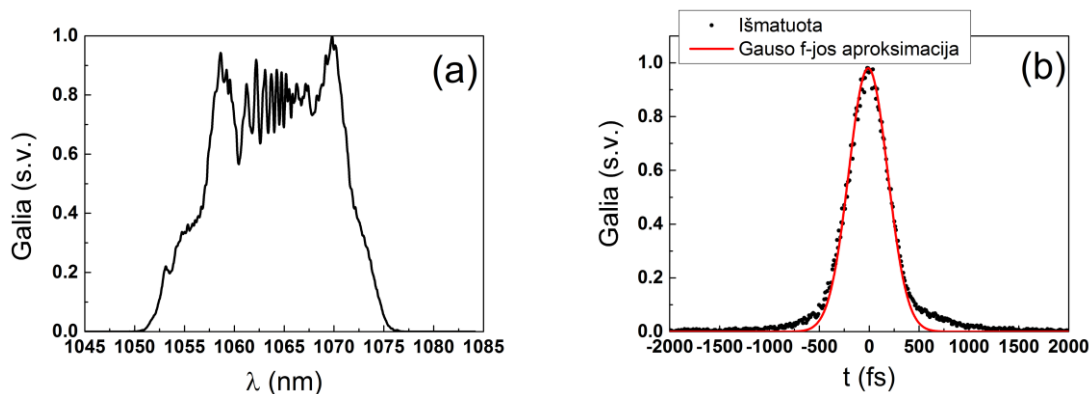
Pasyvios modų sinchronizacijos būdu veikiantis skaidulinis osciliatorius generavo 2 ps spektriškai ribotus impulsus ties 1064.15 nm centriniu bangos ilgiu. Impulsų trukmė ir centrinis bangos ilgis priklausė nuo čirpuotos skaidulinės Brego gardelės (ČSBG1) kompleksinio atspindžio profilio. Stabilus vieno impulso generavimo režimas 35 MHz pasikartojimo dažniu buvo pasiektas kaip rezonatoriaus galinį veidrodį naudojant puslaidininkinį išisotinantį sugėriklį (PISV). Osciliatoriaus stiprinimo terpę sudarė poliarizaciją išlaikanti, vienamodė, Yb³⁺ jonais legiruota skaidula, kaupinama 976 nm bangos ilgio lazerinio diodo (LD) spinduliuote per ČSBG1. Osciliatoriuje buvo sukonstruoti 2 išėjimo kanalai per 70/30 dalinimo santykio pluošto daliklį (PD), įvirintą rezonatoriaus viduje. Prie vieno iš kanalų buvo prijungtas fotodetektorius, skirtas skaidulinio lazerio sinchronizacijai su regeneraciniu stiprintuvu. Vidutinė osciliatoriaus išėjimo galia – 2 mW.

Ultratrumpieji osciliatoriaus generuojami impulsai buvo sustiprinti iki 25 mW skaiduliniame Yb³⁺ stiprintuve ir padalinti į dvi atšakas 50/50 dalikliu. Pirmoje atšakoje impulsai išplėsti iki ~200 ps siaurajuoste ČSBG2 bei atspindėti atgal pro 50/50 daliklį į RS užkrato išėjimą, kurio impulsų charakteristikos pavaizduotos Pav. 4.3. Varžinis šildymo elementas buvo naudojamas centrinio ČSBG2 bangos ilgio valdymui, siekiant suderinti užkrato spektrą su RS stiprinimo maksimumu (Pav. 4.3(a)). Išplėsti impulsai sustiprinti Nd:YVO₄ regeneraciniame stiprintuve bei vieno praėjimo Nd:YVO₄ tiesiniame stiprintuve iki 11.5 mJ prie 1 kHz pasikartojimo dažnio. Sustiprintų čirpuotų impulsų spektro plotis ir trukmė buvo apytiksliai du kartus trumpesni nei užkrato impulsų dėl stiprinimo juostos siauravimo efekto regeneraciniame stiprintuve. OPČIS kaupinimo lazerio išėjime išmatuoti 98 ps trukmės impulsai (Pav. 4.3(b)).



Pav. 4.3 (a) Regeneracinio Nd:YVO₄ stiprintuvo užkrato impulsų spektras (raudona kreivė atitinka išmatuotą RS išėjimo spektrą); (b) Regeneracinio stiprintuvo išėjimo impulsų autokoreliacinė kreivė (juoda). Nustatyta 98 ps impulso trukmė ties puse intensyvumo maksimumo aproksimuojant Gauso funkcija (raudona kreivė).

Antroji skaidulinio lazerio atšaka panaudota BŠS generavimui tinkamiems impulsams formuoti. Pradžioje impulsai sustiprinti iki 2 nJ energijos Yb³⁺ jonais legiruotoje skaiduloje. Po stiprinimo impulsų spektras išplėstas iki ~14 nm dėl FSM efekto vienamodėje, poliarizaciją išlaikančioje, 10 m ilgio skaiduloje (Pav. 4.4(a)).



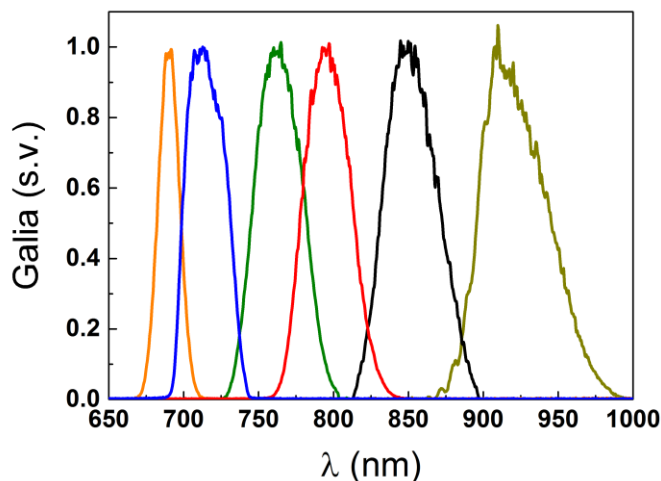
Pav. 4.4 (a) ps OPS užkrato impulsų spektras; (b) suspaustų impulsų, naudotų BŠS generavimui autokoreliacinė funkcija. Impulsų trukmė atitiko 325 fs aproksimuojant Gauso funkcija.

Toliau impulsai išplėsti laike iki 125 ps plačiajuoste ČSBG3. Šios gardelės parametrai buvo parinkti taip, kad ČSBG3 antrosios ir trečiosios eilės dispersija būtų sukompensuota difrakcinių gardelių spaustuviu. Tokiu būdu buvo siekiama gauti trumpesnę impulsų trukmę ir geresnį kontrastą. Už ČSBG3 plėstuvo impulsai buvo dar sykį sustiprinti iki 350 mW (10 nJ impulso energija) ir nukreipti į pikosekundinį OPS.

DKKK kaupinimo lazerio impulsais buvo sugeneruota antroji harmonika su 74% keitimo efektyvumu (8.5 mJ@532 nm) 6 mm ilgio LBO kristale. Tada antrosios harmonikos spinduliuotė buvo padalinta į dvi atšakas. Pirmoji atšaka (2.5 mJ) buvo skirta ps OPS kaupinimui. Šiame parametriniame stiprintuve panaudotas 7 mm I tipo BBO kristalas (fazinio sinchronizmo kampas $\theta \approx 23^\circ$). Gauta 190 μ J sustiprinto impulso energija su 7.6% kaupinimo energijos keitimu į signalinę bangą. Išmatuotas ~0.6% rms impulsų energijos stabilumas, fiksuojant kiekvieno impulso energiją 15 s matavimo intervale. Kadangi toks stabilumas buvo panašus į kaupinimo impulsų stabilumą, galima teigti, kad

parametrinis stiprintuvas dirbo netoli soties režimo. Signalų ir kaupinimo impulsų trukmių santykis buvo lygus 1.25. Tokiu būdu buvo siekiama ne tik gauti didelį stiprinimo efektyvumą, bet ir nufiltruoti signalinių impulsų spektrines moduliacijas (Pav. 4.4(a)), atsiradusias dėl FSM efekto bei taip pagerinti suspaustų impulsų kontrastą. Už ps OPS pakopos impulsai suspausti iki 325 fs trukmės (Pav. 4.4(b)) difrakcinių gardelių spaustuviu, kuriame buvo naudojamos 1600 rėžių/mm pralaidumo gardelės. Bendras spaustuvo efektyvumas buvo lygus 63%.

Nedidelė dalis parametriškai sustiprintų ir suspaustų impulsų energijos (~1 μJ) buvo panaudota BŠS generavimui 5 mm storio safyro plokštelėje. Kadangi eksperimento sąlygos buvo identiškos aprašytoms 2.2 skyriuje, BŠS spektras atitiko pavaizduotą Pav. 2.2.7. Su likusia energijos dalimi (115 μJ) 2.5 mm storio BBO kristale sugeneruota antroji harmonika. Gautas ~57% energijos keitimo efektyvumas (65 μJ@532 nm). Ši spinduliuotė buvo skirta BŠS stiprinimui femtosekundiniame nekoliniariame OPS (fs NOPS). Parametrinis stiprinimas realizuotas 1.2 mm storio I tipo BBO kristale, esant $\theta = 24^\circ$ fazinio sinchronizmo kampui ir $\alpha \approx 2.4^\circ$ nekoliniariumo kampui.

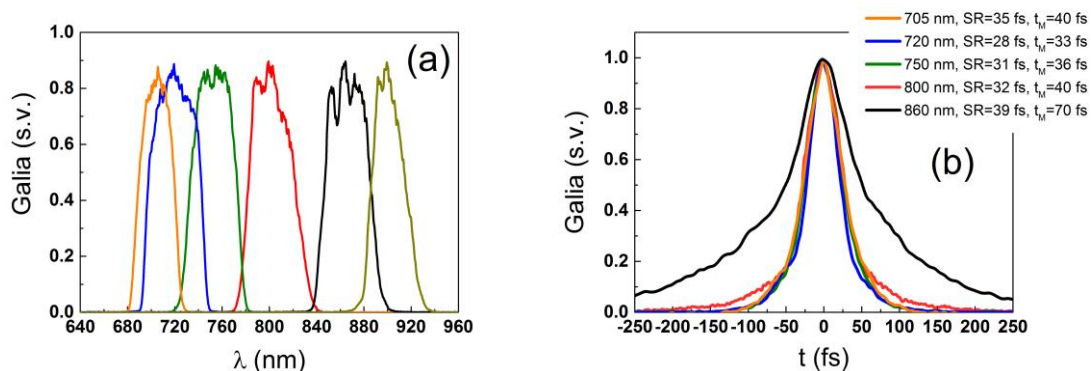


Pav. 4.5 Fs NOPS išėjimo spektrai derinamo bangos ilgio (670–1000 nm) režime.

Kadangi vienas iš šio darbo tikslų buvo realizuoti derinamo bangos ilgio OPČIS, BŠS impulsai prieš stiprinimą buvo išplėsti iki ~1.2 ps trukmės 10 mm storio SF10 stikle. Bangos ilgio derinimas vyko keičiant laikinį persiklojimą tarp kaupinimo ir čirpuotų signalo impulsų parametriniame stiprintuve (fs NOPS). Apie 300 fs trukmės kaupinimo impulsai stiprindavo skirtingas išplėsto signalinių impulsų dalis taip apribojant jų spektrą ir keičiant centrinį bangos ilgį. BŠS impulsai buvo sustiprinti iki 8 μJ energijos. Impulsų spektrai atitiko 30–35 fs spektriškai ribotų impulsų trukmes (Pav. 4.5). Bangos ilgio derinimo diapazonas (670–1000 nm) buvo apribotas BBO kristalo stiprinimo juostos duotomis fazinio sinchronizmo sąlygomis.

Tolesniam stiprinimui OPČIS pakopoje impulsai išplėsti laike iki 40 ps trukmės *Treacy* tipo [58] difrakcinių gardelių spaustuviu. Plėtimui panaudotos 1500 rėžių/mm difrakcinės gardelės. Bendras plėstuvo efektyvumas buvo lygus ~85%. Išplėsto impulso trukmė buvo pasirinkta siekiant optimizuoti stiprinimo efektyvumą bei išlaikyti pakankamą sustiprintų impulsų spektro plotį [59]. OPČIS stiprintuvui naudotas I tipo BBO kristalas (7 mm). Plataus spektro impulsai sustiprinti iki 1 mJ energijos kaupinant DKKK lazerio antrąja harmonika (iki 5 mJ). Sustiprintų impulsų momentinis energijos stabilumas buvo lygus

0.5% rms. *Offner* tipo [60] spaustuvas, kurio bendras efektyvumas siekė 85% buvo naudotas impulsams suspausti po stiprinimo. Spaustuvas buvo sudarytas iš vienos 1500 rėžių/mm difrakcinės gardelės ir dviejų sferinių koncentrinų Ag veidrodžių. Pirmasis veidrodis buvo įgaubtas ($KS = 500$ mm), antras išgaubtas ($KS = -250$ mm). Kai pluošto kritimo kampas į spaustuvo difrakcinę gardelę sutampa su kritimo kampų į impulsų plėstuvo gardeles, toks plėstuvo–spaustuvo mazgas yra visiškai save kompensuojantis visų dispersijos eilių atžvilgiu [60,61].



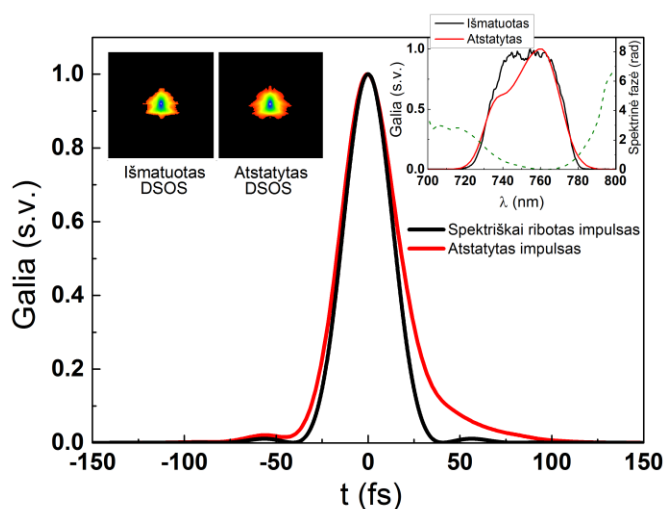
Pav. 4.6 (a) Impulsų spektrai OPČIS sistemos išėjime derinant bangos ilgį; (b) eksperimentiškai išmatuotos suspaustų impulsų autokoreliacinės kreivės prie skirtingų bangos ilgių. Impulsų trukmės apskaičiuotos aproksimuojant Gauso funkcija (dekonvoliucijos parametras: ~ 1.41). Legendoje surašytos suspaustų impulsų trukmės palygintos su spektriškai ribotomis impulsų trukmėmis.

Impulsų spektrai OPČIS sistemos išėjime prie skirtingų bangos ilgių pavaizduoti Pav. 4.6(a). Kiekvienam centriniam bangos ilgiui buvo optimizuojamas atstumas tarp impulsų spaustuvo gardelės ir įgaubto sferinio veidrodžio, siekiant gauti kuo trumpesnes impulsų trukmes. Impulsai buvo charakterizuoti daugiašūviu antrosios harmonikos DSOS autokoreliatoriumi [62]. Eksperimentinės schemos konstrukcija apribojo galimybes idealiai suspausti impulsus visame bangos ilgių derinimo diapazone Pav. 4.6(b). Sistemoje nebuvo įmanoma tiksliai suvienodinti kritinius impulsų plėstuvo ir spaustuvo geometrinius parametrus kartu derinant centrinį bangos ilgį. Tai lėmė impulsų fazės iškraipymus dėl nesukompensuotos trečios dispersijos eilės, kas matoma iš autokoreliacinės kreivės ties 860 nm bangos ilgiu (Pav. 4.6(b)), kurioje ryškus pjedestalas bei suspausto impulso trukmė beveik du kartus didesnė nei spektriškai riboto. Impulsų spaustuvo–plėstuvo schema bus optimizuota netolimoje ateityje, tokiu būdu sudarant galimybes suspausti impulsus iki trumpesnių nei 40 fs trukmių visame bangos ilgių derinimo diapazone.

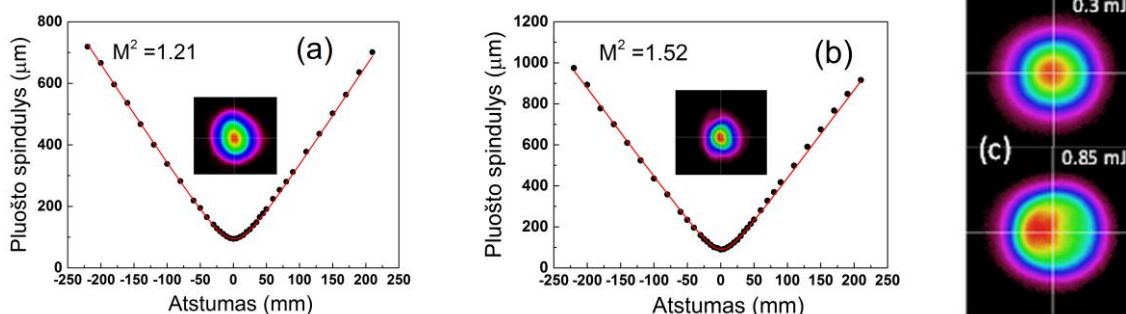
Šioje eksperimentinėje realizacijoje impulsų plėstuvo ir spaustuvo geometrija buvo optimizuota 705–800 nm centrinių bangos ilgių diapazone. Šioje spektro srityje gautos trumpesnės nei 40 fs bei artimos spektriškai ribotoms impulsų trukmės. Matavimui ties 750 nm centriniu bangos ilgiu buvo atliktas impulso gaubtinės atstatymas (Pav. 4.7) naudojant DSOS algoritmą [62]. DSOS atstatymo paklaida buvo lygi 0.38% naudojant 256×265 taškų matricą. Impulso trukmė nustatyta iš autokoreliacinės kreivės sutapo su atstatyta iš DSOS duomenų ir atitiko 36 fs. Iš Pav. 4.7 matoma, kad impulso fazė nėra

visiškai sukompensuota: impulso gaubtinės forma asimetrinė su lėtai krintančiu galiniu frontu.

Siekiant įvertinti pluošto kokybę sistemos išėjime, atliktas pluošto spindulio matavimas priklausomai nuo atstumo iki sąsmaukos. Prie nedidelių sustiprinto impulso energijų (<0.3 mJ) pluošto kokybės parametras M^2 buvo lygus 1.21 (Pav. 4.8(a)). Esant didžiausiai sustiprinto impulso energijai, pluošto kokybė pablogėjo ($M^2 = 1.52$) (Pav. 4.8(b)). Labiausiai tikėtina to priežastis – parametrinė rekonversija ties pluošto centre dalimi OPCIS stiprinimo kristale.



Pav. 4.7 Suspausto impulso gaubtinė (raudona kreivė), atstatyta iš antrosios harmonikos DSOS matavimo palyginta su spektriškai ribotu impulsu (juoda kreivė), apskaičiuotu iš eksperimentiškai išmatuoto spektro. Paveikslėlio viduje – išmatuotas impulso spektras (juoda kreivė) palygintas su atstatytu spektru (raudona kreivė) bei atstatyta spektrinė faze (žaliai brūkšniuota kreivė).



Pav. 4.8 Pluošto spindulys (4σ) sistemos išėjime priklausomai nuo atstumo iki sąsmaukos padėties prie (a) nedidelių impulso energijų (<0.3 mJ) ir (b) didžiausios gautos impulso energijos sistemos išėjime (0.85 mJ); (c) pluoštų skirstiniai OPCIS kristalo plokštumoje prie 0.3 mJ ir 0.85 mJ sistemos išėjimo energijų.

Šis efektas buvo patikrintas išmatuojant sustiprinto signalo pluošto profilį BBO kristalo plokštumoje, statmenoje sklaidimo kryptiai, naudojant 4-f atvaizdavimo sistemą (Pav. 4.8(c)). Esant maksimaliam kaupinimo intensyvumui, pluošto pagrindinė smailė pasilenka nuo simetrijos centro dėl parametrinės rekonversijos bei nekolinearios stiprinimo geometrijos sąlygoto pluoštų išsibėgimo.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Sukonstruotas ir eksperimentiškai realizuotas unikalus, visiškai skaidulinis, dviejų bangos ilgių optiškai sinchronizuotų impulsų lazerinis šaltinis. Jame suformuoti užkrato impulsai didelės energijos OPČIS sistemos femtosekundiniam Yb:CaF₂ ir pikosekundiniam Nd:YVO₄/Nd:YAG stiprintuvams. Ultratrumpieji, 10 nm spektro pločio impulsai gauti iš 1030 nm skaidulinio lazerio kanalo. Šie impulsai buvo suspausti išorėje iki beveik spektriškai ribotos 305 fs trukmės. Stipriai čirpuoti, 520 ps trukmės impulsai gauti iš 1064 nm kanalo. Užkrato energija abiejuose išėjimuose buvo pakankama aukšto kontrasto sustiprintiems impulsams gauti.
2. Sukonstruotas ir eksperimentiškai realizuotas naujo tipo šaltinis femtosekundinėms OPČIS sistemoms. Visiškai skaidulinis pikosekundinis lazeris buvo panaudotas generuoti Nd:YAG kaupinimo lazerio užkrato impulsams bei BŠS generacijai. Tokiu būdu ženkliai supaprastinta OPČIS sistemos užkrato ir kaupinimo impulsų sinchronizacija. Eksperimentiškai išmatuota beveik spektriškai ribota 8.5 fs OPČIS užkrato šaltinio impulsų trukmė, kuri atitinka 3 optinius ciklus ties 800 nm bangos ilgiu. Tokie impulsai gali būti stiprinami kelių optinių ciklų OPČIS sistemose iki ekstremalių smailinių galių.
3. Išanalizuota femtosekundinė SČIS sistema su derinamos temperatūros ČSBG impulsų plėstuvu. Skaitmeninis modeliavimas parodė, kad optimizuojant temperatūros pasiskirstymą išilgai ČSBG galima ženkliai pagerinti impulsų spūdą ir pasiekti trukmės artimas spektriškai ribotam impulsui. Šis metodas išbandytas eksperimentiškai panaudojant ČSBG plėstuvą su 4 nepriklausomai derinamais PE. Nepaisant apribotų temperatūros derinimo galimybių, eksperimentų metu pastebėtas aiškus impulsų suspaudimo pagerinimas, sumažinant laikinį pjedestalą bei pasiekiant iki 50% trumpesnes impulsų trukmes, lyginant su atveju, kai temperatūros pasiskirstymas buvo pastovus ar kito tiesiškai. Šie rezultatai parodo metodo tinkamumą SČIS sistemose, kuriose reikia tiksliai suderinti aukštesnes dispersijos eiles. Naudojant ČSBG su didesniu skaičiumi PE bei turint galimybes tiksliai valdyti temperatūros pasiskirstymą, galima tikėtis beveik spektriškai ribotų impulsų sistemos išėjime. Remiantis šio darbo rezultatais, panaši impulsų plėtimo ir spaudimo schema buvo realizuota OPČIS sistemos šaltinyje.

4. Sukonstruota kompaktiška femtosekundinė derinamo bangos ilgio OPČIS sistema naudojant pikosekundinį monolitinį skaidulinį užkrato lazerį bei pikosekundinį DKKK kaupinimo lazerį. Skaidulinio oscilatoriaus sugeneruoti impulsai buvo spektriškai išplėsti optinėje skaiduloje, sustiprinti parametriškai, suspausti iki kelių šimtų femtosekundžių trukmės ir panaudoti baltos šviesos superkontinuumui generuoti, kuris toliau buvo stiprinamas femtosekundiniame plačiajuosčiame nekolineariame optiniame parametriniame stiprintuve. Aukštos laikinės ir erdvinės kokybės impulsai, kurių energija siekė 0.85 mJ, o minimali trukmė – sub-40 fs (>20 GW smailinė galia) gauti po vienos OPČIS stiprinimo pakopos ir impulsų spaustuvo. Bangos ilgio derinamumas pademonstruotas 680–930 nm diapazone. Ši unikali koncepcija atvėrė naujas galimybes kompaktiškų femtosekundinių didelės energijos derinamų lazerinių sistemų vystymui bei taikymams, pasitelkiant ir inkorporuojant skaidulinių ir kietojo kūno lazerių technologijų privalumus.

Summary

1. A novel optically synchronised dual-wavelength laser source was constructed and experimentally realised. All-in-fiber design laser was used to seed both femtosecond Yb:CaF₂ and picosecond Nd:YAG amplifiers of the high energy OPCPA system. Ultrashort pulses at 1030 nm wavelength with a spectral bandwidth of 10 nm were produced from one output channel of the laser and compressed externally to 305 fs which was close to a transform-limited pulse duration. Strongly chirped 520 ps duration pulses at 1064 nm wavelength were formed at the second output of the laser. Both channels provided sufficient amount of seed energy for the further amplification.
2. A novel front-end for femtosecond OPCPA was constructed and experimentally realised using all-in-fiber picosecond laser which served both as an optical seed source for Nd:YAG amplifier and as a driving source for WLC generation. This approach has immensely simplified the synchronisation between seed and pump lasers. The experimentally measured pulse duration of the parametrically amplified WLC was 8.5 fs. This corresponded to 3 optical cycles and nearly transform limited pulse duration, which could be used for few-cycle OPCPA reaching extremely high peak intensity fields with excellent pulse contrast.
3. The femtosecond FCPA system with the temperature-tunable CFBG stretcher was investigated. The numerical analysis has shown that significant pulse compression improvement down to transform-limited duration is possible by optimising temperature distribution along the CFBG stretcher. This concept was tested experimentally by using the CFBG stretcher with 4 independent TEC elements. Despite the limited 4-point temperature tuning, by optimising the temperature distribution along CFBG, a significant pulse compression improvement, manifested by the lower pedestal and up to 50 % shorter duration of the autocorrelation function, compared to the case when temperature distribution was constant or linear, was experimentally achieved. This indicates the suitability of this method for FCPA systems for the higher-order dispersion parameter tuning. By using CFBG with a significantly larger number of TEC elements and careful management of temperature distribution nearly transform-limited pulses should be achievable as predicted by the numerical calculations.

4. A compact femtosecond tunable OPCPA system with a picosecond monolithic fiber seed laser and a picosecond DPSS pump laser was developed. Pulses from the fiber laser were spectrally broadened in optical fiber, parametrically amplified, compressed to femtosecond duration and then used to generate white light supercontinuum signal which was later preamplified in a femtosecond broadband non-collinear optical parametric amplifier. After OPCPA amplifier and compressor high spatio-temporal quality pulses with energy up to 0.85 mJ and pulse duration down to sub-40 fs (>20 GW peak power) were obtained. Wavelength tunability in the spectral range of 680–930 nm was experimentally demonstrated. This concept opens a path for the development of compact femtosecond high energy tunable hybrid laser systems, incorporating advantages of fiber and solid-state laser technologies, which may be adopted in a variety of ultrafast laser applications.

Literatūros sąrašas

- [1] R. Berera, R. van Grondelle, and J. T. M. Kennis, "Ultrafast transient absorption spectroscopy: principles and application to photosynthetic systems," *Photosynth. Res.* **101**, 105–118 (2009). DOI: 10.1007/s11120-009-9454-y.
- [2] Y.-Z. Ma, J. Stenger, J. Zimmermann, et al., "Ultrafast carrier dynamics in single-walled carbon nanotubes probed by femtosecond spectroscopy," *J. Chem. Phys.* **120**, 3368 (2004). DOI: 10.1063/1.1640339.
- [3] T. C. Kippeny, M. J. Bowers, A. D. Dukes, et al., "Effects of surface passivation on the exciton dynamics of CdSe nanocrystals as observed by ultrafast fluorescence upconversion spectroscopy," *J. Chem. Phys.* **128**, 84713 (2008). DOI: 10.1063/1.2834692.
- [4] N. Pontius, P. S. Bechthold, M. Neeb, and W. Eberhardt, "Ultrafast Hot-Electron Dynamics Observed in Pt₃⁻ Using Time-Resolved Photoelectron Spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.* **84**, 1132–1135 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.1132.
- [5] I. V. Hertel and W. Radloff, "Ultrafast dynamics in isolated molecules and molecular clusters," *Reports Prog. Phys.* **69**, 1897–2003 (2006). DOI: 10.1088/0034-4885/69/6/R06.
- [6] T. Balciunas, A. Melninkaitis, G. Tamosauskas, and V. Sirutkaitis, "Time-resolved off-axis digital holography for characterization of ultrafast phenomena in water," *Opt. Lett.* **33**, 58 (2008). DOI: 10.1364/OL.33.000058.
- [7] D. Pestov, M. Zhi, Z.-E. Sariyanni, et al., "Femtosecond CARS of methanol-water mixtures," *J. Raman Spectrosc.* **37**, 392–396 (2006). DOI: 10.1002/jrs.1482.
- [8] P. F. Moulton, "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃," *J. Opt. Soc. Am. B* **3**, 125 (1986). DOI: 10.1364/JOSAB.3.000125.
- [9] E. J. Mayer, J. Möbius, A. Euteneuer, W. W. Rühle, and R. Szipócs, "Ultrabroadband chirped mirrors for femtosecond lasers," *Opt. Lett.* **22**, 528 (1997). DOI: 10.1364/OL.22.000528.
- [10] P. G. Antal and R. Szipocs, "Tunable, low-repetition-rate, cost-efficient femtosecond Ti:sapphire laser for nonlinear microscopy," *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **107**, 17–22 (2012). DOI: 10.1007/s00340-011-4830-7.
- [11] S. Backus, C. G. Durfee, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "High power ultrafast lasers," *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 1207–1223 (1998). DOI: 10.1063/1.1148795.
- [12] G. Cerullo and S. De Silvestri, "Ultrafast optical parametric amplifiers," *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 1 (2003). DOI: 10.1063/1.1523642.

- [13] S. Witte and K. S. E. Eikema, "Ultrafast Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **18**, 296–307 (2011). DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2118370.
- [14] A. Dubietis, R. Butkus, and A. P. Piskarskas, "Trends in chirped pulse optical parametric amplification," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12**, 163–172 (2006). DOI: 10.1109/JSTQE.2006.871962.
- [15] K. Midorikawa, "High-Order Harmonic Generation and Attosecond Science," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 90001 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.090001.
- [16] T. Popmintchev, M.-C. Chen, D. Popmintchev, et al., "Bright Coherent Ultrahigh Harmonics in the keV X-ray Regime from Mid-Infrared Femtosecond Lasers," *Science* **336**, 1287–1291 (2012). DOI: 10.1126/science.1218497.
- [17] N. Ishii, L. Turi, V. S. Yakovlev, et al., "Multimillijoule chirped parametric amplification of few-cycle pulses," *Opt. Lett.* **30**, 567 (2005). DOI: 10.1364/OL.30.000567.
- [18] S. Witte, R. T. Zinkstok, W. Hogervorst, and K. S. E. Eikema, "Generation of few-cycle terawatt light pulses using optical parametric chirped pulse amplification," *Opt. Express* **13**, 4903 (2005). DOI: 10.1364/OPEX.13.004903.
- [19] A. M. Siddiqui, G. Cirimi, D. Brida, F. X. Kärtner, and G. Cerullo, "Generation of <7 fs pulses at 800 nm from a blue-pumped optical parametric amplifier at degeneracy," *Opt. Lett.* **34**, 3592 (2009). DOI: 10.1364/OL.34.003592.
- [20] T. Stanislauskas, R. Budriūnas, R. Antipenkov, et al., "Table top TW-class OPCPA system driven by tandem femtosecond Yb:KGW and picosecond Nd:YAG lasers," *Opt. Express* **22**, 1865 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.001865.
- [21] J. Adamonis, R. Antipenkov, J. Kolenda, et al., "High-energy Nd : YAG-amplification system for OPCPA pumping," *Quantum Electron.* **42**, 567–574 (2012). DOI: 10.1070/QE2012v042n07ABEH014689.
- [22] D. Herrmann, L. Veisz, R. Tautz, et al., "Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification," *Opt. Lett.* **34**, 2459 (2009). DOI: 10.1364/OL.34.002459.
- [23] N. Ishii, C. Y. Teisset, T. Fuji, et al., "Seeding of an eleven femtosecond optical parametric chirped pulse amplifier and its Nd³⁺ picosecond pump laser from a single broadband Ti:Sapphire oscillator," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **12**, 173–180 (2006). DOI: 10.1109/JSTQE.2006.871930.
- [24] H. Fattahi, C. Y. Teisset, O. Pronin, et al., "Pump-seed synchronization

- for MHz repetition rate, high-power optical parametric chirped pulse amplification," *Opt. Express* **20**, 9833 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.009833.
- [25] S. Prinz, M. Häfner, M. Schultze, et al., "Active pump-seed-pulse synchronization for OPCPA with sub-2-fs residual timing jitter," *Opt. Express* **22**, 31050 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.031050.
- [26] J. M. Mikhailova, A. Buck, A. Borot, et al., "Ultra-high-contrast few-cycle pulses for multipetawatt-class laser technology," *Opt. Lett.* **36**, 3145 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.003145.
- [27] J. Hansryd, P. A. P. A. Andrekson, M. Westlund, et al., "Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **8**, 506–520 (2002). DOI: 10.1109/JSTQE.2002.1016354.
- [28] Z. Yue, K. K. Y. Cheung, Y. Sigang, P. C. Chui, and K. K. Y. Wong, "Ultra-Widely Tunable, Narrow Linewidth Picosecond Fiber-Optical Parametric Oscillator," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22**, 1756–1758 (2010). DOI: 10.1109/LPT.2010.2085078.
- [29] M. E. Marhic †, P. A. Andrekson, P. Petropoulos, et al., "Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems," *Laser Photon. Rev.* **9**, 50–74 (2015). DOI: 10.1002/lpor.201400087.
- [30] K. Viskontas and N. Rusteika, "All-fiber wavelength-tunable picosecond nonlinear reflectivity measurement setup for characterization of semiconductor saturable absorber mirrors," *Opt. Fiber Technol.* **31**, 74–82 (2016). DOI: 10.1016/j.yofte.2016.06.005.
- [31] L. Zhang, S. Yang, X. Wang, et al., "Photonic Crystal Fiber Based Wavelength-Tunable Optical Parametric Amplifier and Picosecond Pulse Generation," *IEEE Photonics J.* **6**, 1–8 (2014). DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2353616.
- [32] T. Gottschall, T. Meyer, M. Baumgartl, et al., "Fiber-based optical parametric oscillator for high resolution coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy," *Opt. Express* **22**, 21921 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.021921.
- [33] D. Kraemer, M. L. Cowan, R. Hua, K. Franjic, and R. J. Dwayne Miller, "High-power femtosecond infrared laser source based on noncollinear optical parametric chirped pulse amplification," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 813 (2007). DOI: 10.1364/JOSAB.24.000813.
- [34] C. Erny, C. Heese, M. Haag, L. Gallmann, and U. Keller, "High-repetition-rate optical parametric chirped-pulse amplifier producing 1- μ J, sub-100-fs pulses in the mid-infrared," *Opt. Express* **17**, 1340 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.001340.

- [35] R. Riedel, M. Schulz, M. J. Prandolini, et al., "Long-term stabilization of high power optical parametric chirped-pulse amplifiers," *Opt. Express* **21**, 28987 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.028987.
- [36] F. Tavella, A. Willner, J. Rothhardt, et al., "Fiber-amplifier pumped high average power few-cycle pulse non-collinear OPCPA," *Opt. Express* **18**, 4689 (2010). DOI: 10.1364/OE.18.004689.
- [37] S. Hädrich, S. Demmler, J. Rothhardt, et al., "High-repetition-rate sub-5-fs pulses with 12 GW peak power from fiber-amplifier-pumped optical parametric chirped-pulse amplification.," *Opt. Lett.* **36**, 313–5 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.000313.
- [38] J. Rothhardt, S. Demmler, S. Hädrich, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Octave-spanning OPCPA system delivering CEP-stable few-cycle pulses and 22 W of average power at 1 MHz repetition rate," *Opt. Express* **20**, 10870 (2012). DOI: 10.1364/OE.20.010870.
- [39] D. Bigourd, L. Lago, A. Mussot, et al., "High-gain fiber, optical-parametric, chirped-pulse amplification of femtosecond pulses at 1 μm ," *Opt. Lett.* **35**, 3480–3482 (2010). DOI: 10.1364/OL.35.003480.
- [40] C. Caucheteur, D. Bigourd, E. Hugonnot, et al., "Experimental demonstration of optical parametric chirped pulse amplification in optical fiber," *Opt. Lett.* **35**, 1786 (2010). DOI: 10.1364/OL.35.001786.
- [41] Y. Zhou, Q. Li, K. K. Y. Cheung, et al., "All-fiber-based ultrashort pulse generation and chirped pulse amplification through parametric processes," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22**, 1330–1332 (2010). DOI: 10.1109/LPT.2010.2055557.
- [42] A. Mussot, A. Kudlinski, P. B. D'Augères, and E. Hugonnot, "Amplification of ultra-short optical pulses in a two-pump fiber optical parametric chirped pulse amplifier.," *Opt. Express* **21**, 12197–203 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.012197.
- [43] L. Dong, X. Peng, and J. Li, "Leakage channel optical fibers with large effective area," *J. Opt. Soc. Am. B* **24**, 1689 (2007). DOI: 10.1364/JOSAB.24.001689.
- [44] J. Limpert, F. Stutzki, F. Jansen, et al., "Yb-doped large-pitch fibres: effective single-mode operation based on higher-order mode delocalisation," *Light Sci. Appl.* **1**, e8 (2012). DOI: 10.1038/lsa.2012.8.
- [45] T. T. Alkeskjold, M. Laurila, L. Scolari, and J. Broeng, "Single-mode ytterbium-doped large-mode-area photonic bandgap rod fiber amplifier," *Opt. Express* **19**, 7398 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.007398.
- [46] X. Ma, C. Zhu, I. Hu, A. Kaplan, and A. Galvanauskas, "Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 μm diameter cores," *Opt. Express* **22**, 9206 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.009206.

- [47] L. Shah and M. Fermann, "High-Power Ultrashort-Pulse Fiber Amplifiers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**, 552–558 (2007). DOI: 10.1109/JSTQE.2007.896096.
- [48] T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki, et al., "Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power," *Opt. Express* **19**, 255 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.000255.
- [49] M. D. Perry, T. Ditmire, and B. C. Stuart, "Self-phase modulation in chirped-pulse amplification," *Opt. Lett.* **19**, 2149 (1994). DOI: 10.1364/OL.19.002149.
- [50] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics 4th Edition* (Elsevier, 2007). ISBN: 978-0-12-369516-1.
- [51] D. U. Noske, N. Pandit, and J. R. Taylor, "Source of spectral and temporal instability in soliton fiber lasers," *Opt. Lett.* **17**, 1515 (1992). DOI: 10.1364/OL.17.001515.
- [52] V. Loriot, G. Gitzinger, and N. Forget, "Self-referenced characterization of femtosecond laser pulses by chirp scan," *Opt. Express* **21**, 24879 (2013). DOI: 10.1364/OE.21.024879.
- [53] M. Tsang, D. Psaltis, and F. G. Omenetto, "Reverse propagation of femtosecond pulses in optical fibers," *Opt. Lett.* **28**, 1873 (2003). DOI: 10.1364/OL.28.001873.
- [54] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, 2nd ed. (Academic Press, Elsevier, 2010). ISBN: 978-0-12-372579-0. DOI: 10.1016/B978-0-12-372579-0.00012-0.
- [55] S. Matsumoto, T. Ohira, M. Takabayashi, K. Yoshiara, and T. Sugihara, "Tunable dispersion equalizer with a divided thin-film heater for 40-Gb/s RZ transmissions," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **13**, 827–829 (2001). DOI: 10.1109/68.935817.
- [56] T. Sugihara, K. Ishida, K. Shimomura, K. Shimizu, and Y. Kobayashi, "Adaptive dispersion compensation for 40 Gbit/s RZ transmission by using Bragg gratings," *IEICE Trans. Commun.* **84**, 1153–1158 (2001).
- [57] D. N. Schimpf, E. Seise, J. Limpert, and A. Tünnermann, "The impact of spectral modulations on the contrast of pulses of nonlinear chirped-pulse amplification systems," *Opt. Express* **16**, 10664 (2008). DOI: 10.1364/OE.16.010664.
- [58] E. Treacy, "Optical pulse compression with diffraction gratings," *IEEE J. Quantum Electron.* **5**, 454–458 (1969). DOI: 10.1109/JQE.1969.1076303.
- [59] J. Moses, C. Manzoni, S.-W. Huang, G. Cerullo, and F. X. Kaertner, "Temporal optimization of ultrabroadband high-energy OPCPA," *Opt. Express* **17**, 5540 (2009). DOI: 10.1364/OE.17.005540.
- [60] G. Cheriaux, B. Walker, L. F. Dimauro, et al., "Aberration-free stretcher

- design for ultrashort-pulse amplification," *Opt. Lett.* **21**, 414 (1996). DOI: 10.1364/OL.21.000414.
- [61] O. Martinez, "3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fiber compensation in 1.3-1.6 μm region," *IEEE J. Quantum Electron.* **23**, 59–64 (1987). DOI: 10.1109/JQE.1987.1073201.
- [62] D. J. Kane and R. Trebino, "Characterization of arbitrary femtosecond pulses using frequency-resolved optical gating," *IEEE J. Quantum Electron.* **29**, 571–579 (1993). DOI: 10.1109/3.199311.
- [63] G. Andriukaitis, T. Balčiūnas, S. Ališauskas, et al., "90 GW peak power few-cycle mid-infrared pulses from an optical parametric amplifier," *Opt. Lett.* **36**, 2755 (2011). DOI: 10.1364/OL.36.002755.

Curriculum Vitae

Asmeninė informacija

Vardas, pavardė	Rokas Danilevičius
Gimimo data	1987 m. birželio 24 d.
Gimimo vieta	Vilnius
Tautybė	Lietuvis
El. paštas	danileviciusr@gmail.com

Išsilavinimas

2012–2016	Fizikos krypties (O2P) doktorantūros studijos Vilniaus universitetas ir VMTI Fizinių ir technologijos mokslų centras
2010–2012	Fizikos magistro laipsnis Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, studijų programa: lazerinė fizika ir optinės technologijos
2006–2010	Fizikos bakalauro laipsnis Vilniaus universitetas, Fizikos fakultetas, studijų programa: kompiuterinė fizika
2002–2006	Vidurinis išsilavinimas (su pagyrimu) Vilniaus jėzuitų gimnazija

Darbo patirtis

2012–iki dabar	UAB „EKSPLA“, Naujų produktų kūrimo skyrius - inžinierius, projektų vadovas.
2010–2012	UAB „EKSPLA“, Gamybos skyrius - inžinierius.
2016–iki dabar	Fizinių ir technologijos mokslų centras – jaunesnysis mokslo darbuotojas. Projekto NUCLEFASAR vykdytojas.
2012–2014	Fizinių ir technologijos mokslų centras – jaunesnysis mokslo darbuotojas. Projekto SKAIDLAZ vykdytojas.
2012–2013	Fizinių ir technologijos mokslų centras – inžinierius. Projekto TERAOPT vykdytojas.
2011–2012	Fizinių ir technologijos mokslų centras – inžinierius. Projekto FEMTOSKAIDULA vykdytojas.