

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Ignas Balčiūnas

TERAVATŲ SMAILINĖS GALIOS DVIEJŲ OPTINIŲ CIKLŲ IMPULSŲ FORMAVIMAS
DAUGIAKRISTALINĖSE PARAMETRINIO STIPRINIMO SISTEMOSE

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų
studijų programa

Studentas:

Ignas Balčiūnas

Leisti ginti:

2018 06 06

Darbo vadovas:

dr. Arūnas Varanavičius

Centro direktorius:

prof. dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

1	Įvadas	2
2	Literatūros apžvalga	3
	2.1 Optiniai parametriniai reiškiniai	3
	2.2 Fazinis sinchronizmas	4
	2.3 Nekoliarus parametrinis šviesos stiprinimas	5
	2.4 Šviesos impulso dispersija	8
	2.5 Akustooptinis programuojamas dispersinis filtras	9
	2.6 Grizminis impulsų plėstuvus	11
	2.7 Ultratrumpųjų impulsų trukmės charakterizavimas „Chirpscan“ metodu	12
3	Ekspertimentų metodai ir schemas	13
	3.1 Bendra parametrinio čirpuotų impulsų stiprintuvo blokinė schema	13
	3.2 Skirtuminio dažnio impulsų generatorius	15
	3.3 Plačiajuostis nekoliarus femtosekundinis parametrinis stiprintuvus	16
	3.4 Išplėsto impulso charakterizavimo schema	17
	3.5 Didelės galios parametrinio čirpuotų impulsų stiprinimo sistema	18
	3.6 Impulsų spaustuvo schema	19
4	Rezultatai ir jų aptarimas	21
	4.1 Plataus spektro femtosekundinio užkrato formavimas	21
	4.2 Grizminio impulsų plėstuvo derinimas	24
	4.3 Plačiajuosčio užkrato stiprinimas OPCPA sistemoje	25
	4.4 Išplėsto impulso spaudimas	27
5	Pagrindiniai rezultatai ir išvados	30
	Literatūros sąrašas	31
	Santrauka	34
	Summary	35

1 Įvadas

Viena iš sparčiausiai besivystančių ultratrumpų impulsų panaudojimo sričių šiuo metu yra atosekundinio mokslo kryptis, kurioje yra stengiamasi stebėti bei valdyti elektronų judėjimą įvairiose medžiagose [1]. Šiems tyrimams yra reikalingi atosekundinės trukmės impulsai, kuriems gauti yra naudojami kitose lazerinėse sistemose sugeneruoti ultratrumpi, femtosekundinės trukmės, impulsai [2]. Kadangi atosekundinės trukmės impulsų generacijos efektyvumas yra labai mažas, juos siekiama generuoti su impulsais, kurių smailinė galia siekia teravatus ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Taip pat, norint su šiais impulsais generuoti pavienius atosekundinius impulsus (o ne jų seką po vienu kaupinimo impulsu) yra būtina, kad femtosekundinio lazerio impulso trukmė būtų kuo trumpesnė, t. y. apie du optinius ciklus [3].

Vienas efektyviausių šiuo metu žinomų ir intensyviai tiriamų metodų generuoti didelės energijos, keleto optinių ciklų šviesos impulsus yra optinis parametrinis čirpuotų impulsų stiprinimas (angl. *optical parametric chirped pulse amplification* - OPCPA) [4]. Šiuo metodu paremtose sistemose mažos energijos plačiajuostis femtosekundinės trukmės impulsas yra pirmiausiai išplečiamas laike, tada optiškai parametriškai pastiprinamas su pikosekundinės trukmės, didelės energijos kaupinimo impulsais ir vėl yra suspaudžiamas iki trukmės artimos spektru ribotai.

Yra pademonstruota tik keletas lazerinių sistemų paremtų šiuo metodu ir galinčių generuoti impulsus, kurių smailinė galia siektų teravatus, o trukmė būtų bent artima keliems optiniams ciklams [5–7]. Šiose lazerinėse sistemose parametrinis stiprinimas yra atliekamas BBO (β -bario borato) kristaluose išnaudojant visą su jais galimą pasiekti stiprinimo spektro juostą matomoje ir artimoje infraraudonoje spektro srityje. Norit generuoti dar trumpesnius impulsus reikėtų išplėsti čirpuotų impulsų parametriniuose stiprintuvuose stiprinamos spektrinės juostos plotį. Kadangi šioje optinės spinduliuotės srityje kristalo, stiprinančio platesnę spektro juostą, nėra, tai praplėsti stiprinimo juostą lieka tik dvi galimybės: arba vienoje sistemoje naudoti skirtingų bangos ilgių kaupinimą [8,9], arba naudoti daugiakristalines stiprinimo pakopas [10], t. y. spinduliuotę stiprinti arba su skirtingų rūšių kristalais, arba su daugiau vienodų, tik skirtingai suderintų, kad būtų stiprinami skirtingi spektriniai ruožai.

Mano darbo tikslas buvo išplėsti parametrinių stiprintuvų, aprašytų [7], stiprinamas spektrines juostas panaudojant daugiakristalines schemas bei juose pastiprintus impulsus naudojant adaptyvines dispersijos valdymo sistemas suspausti iki trukmių artimų spektru ribotoms.

2 Literatūros apžvalga

2.1 Optiniai parametriniai reiškiniai

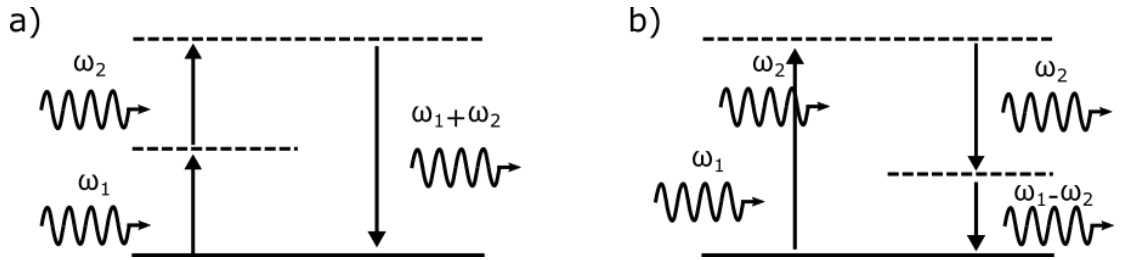
Netiesinėje optikoje yra nagrinėjami reiškiniai, kuriuose medžiagos poliarizacinis atsakas netiesiškai priklauso nuo šviesos elektrinio lauko stiprio [11]. Tokie reiškiniai atsiranda tuomet, kai šviesos elektrinis laukas yra stiprus, tačiau dėl jo atsiradęs netiesinio poliarizuotumo priedas yra mažas (taip vadinamas trikdinis šviesos ir medžiagos sąveikos artinys). Tokiu atveju medžiagos poliarizuotumo priklausomybę nuo optinės spinduliuotės elektrinio lauko stiprio galima skleisti elektrinio lauko stiprio laipsnių eilute:

$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(t) + \dots, \quad (1)$$

čia ϵ_0 yra vakuumo dielektrinė skvarba, $\chi^{(1)}$ - tiesinis optinis jautris, o $\chi^{(2)}$ ir $\chi^{(3)}$ yra atitinkamai antrosios ir trečiosios eilės netiesiniai optiniai jautriai. Šios lygties pirmasis narys aprašo tiesinį medžiagos atsaką, kuris pasireiškia tuo, kad paveikus dielektrinę medžiagą elektriniu lauku, indukuoti dipoliniai momentai (o taip pat ir naujai sugeneruotos elektromagnetinės bangos) svyruos žadinančio elektrinio lauko dažniu. Sekantis narys aprašo antrosios eilės (kvadratinį) netiesinį atsaką, kuris tampa reikšmingas tik prie žymiai didesnio elektrinio lauko stiprio, kadangi antrosios eilės netiesinis optinis jautris yra maždaug 10^{12} kartų mažesnis už pirmosios eilės jautrį. Maždaug tiek pat skiriasi ir antrosios bei trečiosios eilės optiniai netiesiniai jautriai, todėl norint medžiagoje indukuoti vis aukštesnės eilės netiesinius procesus, reikia užtikrinti vis didesnę į netiesinę terpę krintančios optinės spinduliuotės intensyvumą. Be to, antrosios eilės netiesiniai optiniai reiškiniai vyksta ne visose medžiagose, o tik tose, kurios neturi simetrijos centro (pavyzdžiui kristaluose), kai tuo tarpu kubinio netiesiškumo reiškiniai gali vykti visose medžiagose [12].

Iš Maksvelo lygčių galima išvesti, kad dielektrinėse terpėse tik laike kintanti poliarizacija yra naujų elektromagnetinių bangų šaltinis, todėl medžiaga sklindant pakankamai stipriam elektromagnetiniam laukui skirtingi netiesinio poliarizuotumo nariai lemia daugybę skirtingų netiesinės optikos reiškinių [12]. Pavyzdžiui, terpėse su kubiniu netiesiniu jautriu, esant dideliame į medžiagą krintančios spinduliuotės intensyvumui, galima stebėti trečios harmonikos generaciją. Toks procesas yra vienalaikis trijų krintančios spinduliuotės dažnio fotonų sugėrimas ir išspinduliavimas vieno, bet trigubai didesnio dažnio, fotono. Bendru atveju, tarus, kad kritusios spinduliuotės visi trys dažniai yra skirtingi, dėl kubinio netiesiškumo yra stebimi, taip vadinami, keturbangio dažnių maišymosi reiškiniai, kurių metu galima gauti daugybę skirtingų naujų dažnių. Taip pat, kubinio netiesiškumo terpėse galima stebėti ir šviesos saviveikos reiškinius - pluoštų fokusavimąsi ir impulsų fazės moduliavimąsi, kurie atsiranda dėl netiesinio poliarizuotumo įtakos medžiagos lūžio rodikliui.

Analogiškai, medžiagose, kuriose antros eilės optinis jautris nėra lygus nuliui, galima stebėti tribangio maišymosi reiškinius: antros harmonikos, suminio ir skirtuminio dažnio generaciją bei parametrinį stiprinimą (žr. 1 pav.). Parametrinio šviesos stiprinimo reiškinys yra analogiškas skirtuminio dažnio generacijai, vienintelis skirtumas yra tai, kad į netiesinę terpę yra įleidžiamos dvi bangos, iš kurių vienos galia yra paprastai daug kartų didesnė už kitos. Parinkus reikiamas sąlygas iš didesnio dažnio ir galios bangos (kaupinimo bangos) energija yra perduodama į mažesnio dažnio ir galios bangą (signalinę bangą). Tokio proceso metu lygiagrečiai dar yra generuojama ir trečia banga, vadinama šalutine arba skirtuminio dažnio banga, kurios dažnį ir atsiradimą nulemia energijos tvermės dėsnis [12].



1 pav. Energijos lygmenų diagramos vaizduojančios suminio a) ir skirtuminio dažnio b) generaciją. Išsigimusiu atveju, kai dviejų sugertų fotonų energijos yra vienodos, suminio dažnio generacija atitinka antrosios harmonikos generaciją

Visi išvardinti procesai yra vadinami parametriniais, o tai reiškia, kad tokių procesų metu sistema yra sužadinta ne į realų, bet į virtualų energijos lygmenį. Laikoma, kad procesai vykstantys per virtualius lygmenis yra labai spartūs, todėl parametriniai procesai įvyksta momentaliai. Be to, šių procesų metu nėra jokios sąveikos su medžiagos gardele (jokia spinduliuotės energijos dalis nėra perduodama medžiagai), todėl parametriniams procesams visada galioja spinduliuotės energijos tvermės dėsnis.

2.2 Fazinis sinchronizmas

Viena iš sąlygų, kuri turi būti patenkinta, kad parametrinis stiprinimas ar kitas, ankstesniame skyrelyje išvardintas, banginio maišymosi procesas vyktų efektyviai, yra fazinio sinchronizmo sąlyga. Pavyzdžiui, parametrinio stiprinimo metu patenkinus šią sąlygą, išilgai netiesinės terpės sugeneruotos naujos ω_s dažnio elektromagnetinės (signalinės) bangos bus tarpusavyje fazuotos taip, kad konstruktyviai prisidės prie bendro signalinės šviesos lauko ir todėl signalinė banga efektyviai perims energiją iš kaupinimo bangos (ta pati sąlyga galioja ir šalutinei bangai). Fazinio sinchronizmo sąlygą galima užrašyti taip:

$$\hbar k_k = \hbar k_s + \hbar k_i, \quad (2)$$

čia k_k , k_s , k_i yra atitinkami, stiprinime dalyvaujančių bangų, banginiai vektoriai, o \hbar - redukuota Planko konstanta.

Banginių vektorių galima išreikšti tokiu pavidalu:

$$k = \frac{n\omega}{c}, \quad (3)$$

kur n yra medžiagos lūžio rodiklis, o c - šviesos greitis. Tada perrašius (2) lygtį gauname:

$$n_k \omega_k = n_s \omega_s + n_i \omega_i. \quad (4)$$

Dabar iš (4) lygties matosi, jog patenkinti fazinio sinchronizmo sąlygą normalios dispersijos terpėje, kurioje lūžio rodiklis monotoniškai didėja didėjant dažniui, t. y. $n_k > n_s > n_i$, galima tik jei ta medžiaga yra anizotropinė. Anizotropinės medžiagos pasižymi tuo, jog jose yra galimos dvi spinduliuotės sklaidimo modos - paprastoji (o) ir nepaprastoji (e) bangos, kurioms lūžio rodikliai skiriasi. Paprastosios bangos lūžio rodiklis nepriklauso nuo optinės spinduliuotės sklaidimo krypties anizotropinėje terpėje ir bangos optinė indikatrixė (lūžio rodiklio paviršius) yra aprašomas sfera. Tuo tarpu nepaprastosios bangos lūžio rodiklis priklauso nuo spinduliuotės sklaidimo krypties kristalo optinės ašies atžvilgiu ir jos indikatrixė yra aprašoma elipsoidu. Tam tikruose kristaluose (pvz.: BBO kristale) dvi elipsoido pusašės sutampa, todėl toks kristalas turi tik vieną optinę ašį ir yra vadinamas vienaašiu. Be to, kristalai, kurių „e“ bangos lūžio rodiklis didesnis už „o“ bangos lūžio rodiklį yra vadinami teigiamais, o esant atvirkščiai – neigiamais. Nepaprastosios bangos lūžio rodiklis vienaašiam kristale gali būti apskaičiuotas pagal tokią formulę [11]:

$$n_e(\theta) = \sqrt{\left(\frac{\cos(\theta)}{n_o}\right)^2 + \left(\frac{\sin(\theta)}{n_e}\right)^2}^{-1}, \quad (5)$$

čia θ yra kampas tarp krintančios bangos \vec{k} vektoriaus ir kristalo optinės ašies.

Šiame darbe optiniam parametriniam stiprinimui buvo naudojami BBO (β -bario borato) ir LBO (ličio triborato) kristalai, kurie yra vienaašiai ir neigiami, todėl (4) sąlygą yra įmanoma patenkinti tik tuo atveju, jei kaupinimo (didžiausio lūžio rodiklio) banga yra „e“ poliarizacijos, o signalinė bei šalutinės bangos - „o“ poliarizacijos. Kitaip tariant, parametrinio stiprinimo procesas vyks efektyviai tik tada, kai kampas tarp krintančios į kristalą kaupinimo bangos ir kristalo optinės ašies bus parinktas taip, kad kristale sklindančios „e“ poliarizacijos (kaupinimo) bangos lūžio rodiklis pradėtų tenkinti (4) sąlygą. Toks fazinis sinchronizmas dar yra vadinamas I tipo arba oo - e sinchronizmu.

2.3 Nekolinearus parametrinis šviesos stiprinimas

Jeigu tariame, kad galime nekreipti dėmesio į kaupinimo nuskurdinimą, tada signalui, parametrinio stiprinimo metu, nusklidusiam atstumą L netiesine terpe, parametrinis stiprinimo

koeficientas G gali būti užrašytas taip:

$$G = \frac{I_s(L)}{I_s(0)} = 1 + \frac{\Gamma^2}{g^2} \sinh^2(gL), \quad (6)$$

kur I_s yra signalo intensyvumas, o

$$g = \sqrt{\Gamma^2 - \left(\frac{\Delta k}{2}\right)^2}, \quad (7)$$

čia Δk yra banginių vektorių fazinis nederinimas, t. y. $\Delta \vec{k} = \vec{k}_k - \vec{k}_s - \vec{k}_{skirt}$, kur \vec{k}_i yra atitinkamai kaupinimo, signalinės ir skirtuminės bangų banginiai vektoriai. Netiesinis koeficientas Γ yra lygus:

$$\Gamma = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 I_k}{n_i n_s n_k \lambda_i \lambda_s \epsilon_0 c}. \quad (8)$$

Remiantis (6) - (8) lygtimis, parametrinio stiprinimo koeficientas, fiksuotoje netiesinėje terpėje, priklauso nuo trijų pagrindinių parametrų - kaupinimo bangos intensyvumo, netiesinės medžiagos ilgio ir banginių vektorių fazinio nederinimo. Pailginus netiesinę terpę, padidinus kaupinimo bangos intensyvumą ar sumažinus banginėje sąveikoje dalyvaujančių bangų fazinį nederinimą - optinės spinduliuotės stiprinimas didės. Esant fiksuotam netiesinės terpės ilgiui ir kaupinimo intensyvumui, didžiausias signalo stiprinimas yra kai $\Delta k = 0$. Kadangi Δk priklauso nuo signalo bangos ilgio, tai efektyvų plačiajuostį stiprinimą bus galima pasiekti tik tada, kai fazinio nederinimo priklausomybė nuo signalo bangos ilgio kis labai nežymiai apie fazinio sinchronizmo tašką, kuriame Δk yra lygus nuliui. Tada išskleidus Δk priklausomybę nuo bangos ilgio Teiloro eilute ir ją truputėli pertvarkius, galima gauti tokią išraišką:

$$\frac{\partial \Delta k}{\partial \omega_s} = -\frac{\partial k_s}{\partial \omega_s} + \frac{\partial k_i}{\partial \omega_i}, \quad (9)$$

pilną skleidimą Teiloro eilute ir (9) lygties išvedimą galima rasti [13]. Prisiminus grupinio greičio išraišką:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}. \quad (10)$$

ir įsistačius ją į (9), gauname:

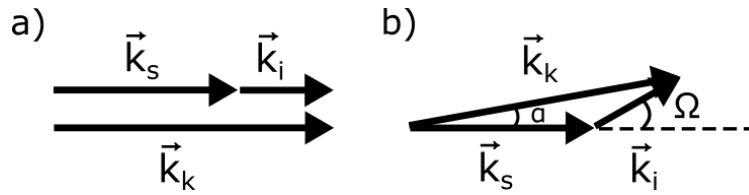
$$\frac{\partial \Delta k}{\partial \omega_s} = \frac{1}{v_{g,i}} - \frac{1}{v_{g,s}}. \quad (11)$$

Matome, kad norint sustiprinti platų signalo spektrą, bet jau pirmu artiniu ($\frac{\partial \Delta k}{\partial \omega_s} = 0$), reikia kuo labiau suderinti signalo ir šalutinės bangos grupinius greičius netiesinėje terpėje, t. y. siekti, kad būtų tenkinama sąlyga $v_{g,s} = v_{g,i}$. (11) sąlyga aprašo, taip vadinamą, kolinearą sąveiką, kurios metu visi tribangėje sąveikoje dalyvaujantys pluoštai kristalu sklinda vienoda kryptimi

(žr. 2 (a) pav.). Tokioje sąveikoje parametrinio stiprintuvo spektrinės stiprinimo juostos ima nebeužtekti, jei norima gauti trumpesnius nei 30 fs impulsus [12]. Labiau praplėsti stiprinamą spektro juostą, galima pasitelkus nekolinearią (arba kitaip vektorinę) sąveiką (žr. 2 (b) pav.). Šios sąveikos metu tarp šalutinės bangos ir signalo pluoštų yra parenkamas tam tikras kampas, kad jų grupinių greičių projekcijos signalo sklidimo kryptimi taptų lygios, t. y. siekiama patenkinti tokią sąlygą:

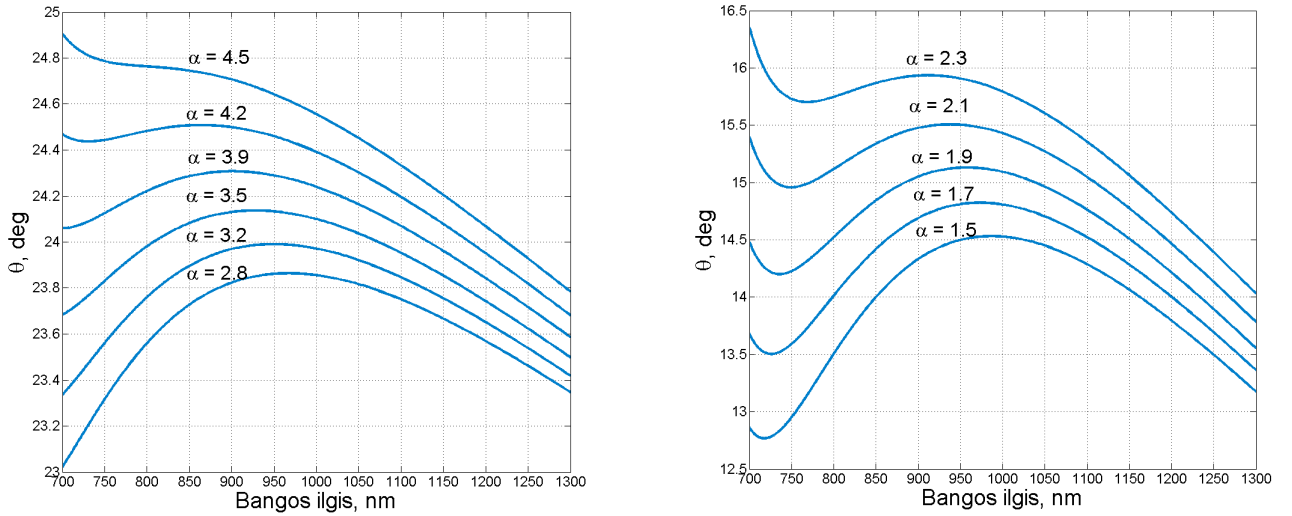
$$v_{g,s} = v_{g,i} \cos \Omega, \quad (12)$$

kur kampas Ω yra pavaizduotas (2 (b) pav.). Paprastai eksperimento metu patogiau vietoj kampo Ω naudoti kampą α tarp signalinės ir kaupinimo bangų kryptių, kuris yra vadinamas nekolinearumo kampu.



2 pav. Kolinearosios a) ir nekolineariosios b) trijų bangų sąveikos vektorinė diagrama

Įvertinti kokio pločio spektrai gali būti stiprinami ir kaip jie priklauso nuo nekolinearumo kampo galima iš 3 pav.



3 pav. Fazinio synchronizmo kreivės stiprinamam spektrui (kaupinant su 515 nm bangos ilgio spinduliuote) prie skirtingų išorinių nekolinearumo kampų BBO kristale - kairėje ir LBO kristale - dešinėje. Čia θ yra synchronizmo kampas (kitais žodžiais - kampas tarp krintančios bangos banginio vektoriaus bei kristalo optinės ašies), o α - nekolinearumo kampas

Šiame paveikslėlyje su SNLO programine įranga [14] yra sumodeliuotos fazinio sinchronizmo kreivės stiprinamam spektrui prie skirtingų neekvilinearumo kampų BBO ir LBO kristaluose, kai kaupinimo bangos ilgis yra 515 nm, t.y. antra Yb:KGW lazerio harmonika. Matosi, kad BBO kristale plačiausias stiprinamas spektras gali siekti nuo 700 iki 1100 nm, kai išorinis neekvilinearumo kampas yra ~ 4 laipsniai. Toks neekvilinearumo kampas, kai stiprinamas plačiausias spektras, dar yra vadinamas magiškuoju kampu. Platesnio spektro BBO kristale efektyviai stiprinti nesigauna, nes ilgabangėje dalyje sinchronizmo kreivės sparčiai užsilenkia. Tuo tarpu LBO kristale magiškas kampas yra beveik du kartus mažesnis - maždaug 2 laipsniai. Taip pat, plokščiausia sinchronizmo kreivių vieta yra truputėli pasislinkusi į ilgesnių bangos ilgių pusę, todėl plačiausias stiprinamas spektras LBO kristaluose gali siekti maždaug nuo 850 nm iki 1300 nm.

2.4 Šviesos impulso dispersija

Šviesos impulsui sklindant dispersine terpė įvairių harmoninių dažninių komponentų ω , esančių superpozicijoje ir sudarančių patį impulsą, lūžio rodikliai $n(\omega)$ yra skirtingi, todėl jie sklinda skirtingais faziniais greičiais ir nusklidus tokį patį atstumą įvairių dažninių komponentų fazijų pokyčiai nėra vienodi. Tai reiškia, kad terpės pradžioje fazuoti dažniniai komponentai sklisdami medžiaga išsifazuos ir dėl to keisis impulso forma bei trukmė.

Jei tarsime, kad terpė, kuria sklinda elektromagnetinė spinduliuotė, yra tiesinė, izotropinė bei skaidri, tai šviesos impulso laikinę formą galima įvertinti atlikus atvirkštinę Furje transformaciją impulso spektrui [15]:

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\varphi(\omega)} e^{i\omega t} d\omega, \quad (13)$$

čia $S(\omega)$ yra ω dažnio bangos spektrinė amplitudė, o $\varphi(\omega)$ - jos fazė.

Iš (14) lygties matosi, kad norint nustatyti kaip impulsui sklindant dispersinėje terpėje kinta jo gaubtinė, reikia nustatyti dvi funkcijas: funkciją $\varphi(\omega)$, kuri nusako skirtingų dažninių komponentų fazinius ryšius bei funkciją $S(\omega)$, kuri nusako ω dažnio bangos spektrinę amplitudę. Pastaroji gali būti gana paprastai išmatuota eksperimentiškai su spektrometru, tačiau $\varphi(\omega)$ priklausomybę nustatyti yra sunkiau ir tam yra pasitelkiami sudėtingesni eksperimentiniai metodai naudojantys netiesinės optikos metodus, pvz.: „Chirpscan“ metodas, kuris aprašytas viename iš sekančių skyrelių. Pati impulso spektrinė fazė dažniausiai yra sudėtingos formos kreivė ir norint ją aprašyti yra pasitelkiamas Teiloro eilutės skleidinys:

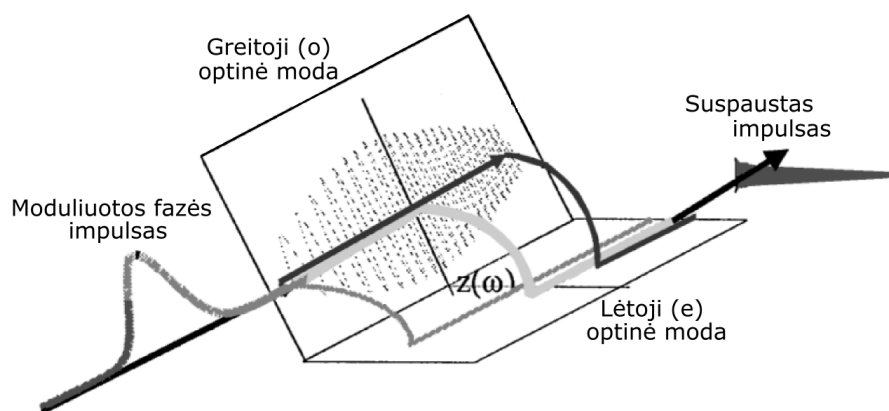
$$\varphi(\omega) = \varphi(\omega_0) + \left. \frac{\partial \varphi}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} \Omega + \frac{1}{2!} \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} \Omega^2 + \frac{1}{3!} \left. \frac{\partial^3 \varphi}{\partial \omega^3} \right|_{\omega=\omega_0} \Omega^3 + \dots, \quad (14)$$

čia ω_0 yra centrinis dažnis, o $\Omega = \omega - \omega_0$ [15].

Šioje lygtyje pirmasis narys aprašo nešančiojo dažnio bangos maksimumo fazinį poslinkį impulso gaubtinės maksimumo atžvilgiu ir kol impulso trukmė nėra keletas optinių ciklų, impulso formai ir trukmei didelės įtakos neturi. Antrasis narys yra susijęs su impulso grupinio vėlinimu, tai yra laiku, per kuri impulsas nusklinda iš vieno taško į kitą. Šis koeficientas daro įtaką tik impulso atvykimo laikui, kuris eksperimentuose dažniausiai nėra labai svarbus, kadangi jį galima kompensuoti pasitelkus, pavyzdžiui, paprasta vėlinimo linija. Trečiasis, ketvirtasis ir didesnės eilės skleidinio nariai jau yra atsakingi už impulso formos bei trukmės kitimą. Pavyzdžiui, narys su antrosios eilės išvestine yra vadinamas grupinio vėlinimo dispersija (GVD) arba antrosios eilės dispersija. Šis narys aprašo grupinio vėlinimo priklausomybę nuo bangos ilgio. Tai reiškia, kad prasklidę medžiagą (kurią pasiekė tuo pačiu laiko momentu) skirtingi dažniniai komponentai atvyks skirtingu laiku ir dėl to impulsas taps čirpuotu ir ilgės.

2.5 Akustooptinis programuojamas dispersinis filtras

Įvairiose čirpuotų impulsų stiprinimo sistemose naudojamų impulsų spaustuvų įnešama dispersija turi būti tiksliai lygi visų kitų sistemoje esančių optinių elementų, įskaitant ir impulso plėstuvą, įnešamų dispersijų sumai, tik su priešingu ženklu. Siekiant vėl suspausti tokiose sistemose pastiprintus ultratrumpus impulsus iki jų spektru ribotos trukmės šias dispersijas reikia suderinti iki kuo aukštesnės eilės. Paprastai, šiam darbui atlikti sistemoje papildomai yra naudojami specialūs prietaisai gebantys ribotame diapazone kompensuoti įvairias dispersijos eiles. Vienas iš tokių prietaisų yra akustooptinis programuojamas dispersinis filtras (AOPDF) [16]. Jo veikimas yra pagrįstas šviesos ir garso bangų sąveika medžiagoje. AOPDF vykstantys procesai pavaizduoti 4 pav. (paveikslėlis pritaikytas iš [17]). Per anizotropinį kristalą yra paleidžiama sklįsti akustinė banga, kuri yra sugeneruojama pjezoelektrinio keitiklio, kuris yra sužadinas laikiniu signalu (radijo bangų) sugeneruotu prietaiso valdymo bloko. Akustinė banga sklinda išilgai kristalo ir sukelia lokalius tankio svyravimus, kurie savo ruožtu sukelia lokalius lūžio rodiklio kitimus. Šis periodiškai kintantis lūžio rodiklis šviesos bangą veikia kaip difrakcinę gardelę. Būtent šiuo atveju optinės bangos difragavimas nuo akustinės bangos reiškia optinės bangos energijos perdavimą kristale iš vienos modos į kitą modą, t.y. į statmenos poliarizacijos įėjusios bangos atžvilgiu modą. Šios dvi optinės modos akustooptine sąveika gali būti efektyviai susietos tik tarp jų esant faziniam sinchronizmui, todėl jei akustinė banga kažkurioje lokatioje kristalo vietoje turi tam tikrą erdvinį dažnį, tai toje vietoje efektyviai difraguoti gali tik labai siauras spektrinių komponentų ruožas. Difrakcijos efektyvumas, o ir išėjusios bangos amplitudė, priklauso nuo akustinės bangos galios difrakcijos taške.



4 pav. Akustooptinio programuojamojo dispersinio filtro (AOPDF) veikimo principas

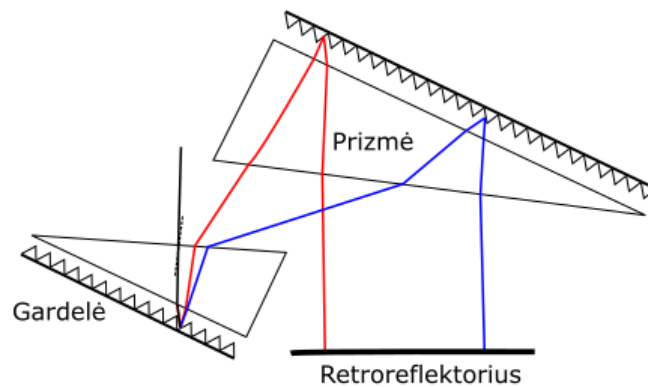
Kitaip tariant, į akustooptinių moduliatorių siunčiamas optinis impulsas, poliarizuotas kristalo „o“ ašies kryptimi. Kiekvienas optinį impulsą sudarantis optinis dažnis sklinda kristalu tol, kol pasiekia tašką, kuriame akustinės gardelės erdvinis dažnis yra tinkamas pervesti to optinio dažnio bangą į „e“ poliarizacijos modą, kurios lūžio rodiklis yra skirtingas. Šviesa, išeinanti iš kristalo kitoje modoje nei įėjusi šviesa, bus sudaryta iš visų spektrinių komponentų, kurios tam tikrose kristalo vietose difragavo nuo akustinės bangos. Kadangi grupiniai greičiai „o“ ir „e“ modose skiriasi, tai kiekvienas optinis dažnis bus vėlinamas skirtingai. Tuo pasinaudojus galima suprogramuoti tokią akustinės bangos formą, kuri galėtų pridėti kristalu sklindančiam impulsui bet kokią norimą papildomą fazę ir taip, pavyzdžiui, kompensuoti prieš kristalą esančių kitų optinių elementų dispersiją tokiu būdu vėl suspaudžiant impulsą laike iki spektru ribotos trukmės arba padėtų suderinti impulsų plėstuvo ir spaustuvo dispersijas čirpuotų impulsų stiprinimo sistemose. Kristalo galinis paviršius paprastai yra nupjautas kampu, todėl skirtingose modose sklindančios bangos kristalo gale yra atskiriamos erdvėje viena nuo kitos ir nesusimaišo.

Tokio tipo akustooptiniai filtrai paprastai gaminami iš paratelūrito TeO_2 , kuris regimojoje spektro srityje pasižymi dideliu lūžio rodikliu ($n = 2,5$) ir stipria grupinio vėlinimo dispersija. Didžiausią galimą vėlinimą tarp optinio spektro komponentų riboja modulatoriaus kristalo ilgis ir skirtingos poliarizacijos bangų grupinių greičių skirtumas (pavyzdžiui, AOPDF su 25 mm ilgio kristalu grupinio vėlinimo riba yra maždaug 3 ps). Difrakcijos efektyvumas, kaip jau minėjau, stipriai priklauso nuo akustinės bangos amplitudės, kuri priklauso nuo pasirinktos akustinės bangos formos (kurią savo ruožtu lemia norima pridėti spektrinė fazė), tačiau geriausiais atvejais efektyvumas siekia maždaug 10 – 15%. Išskyrus apribojimą maksimaliam grupiniam vėlinimui, su AOPDF galima bent jau teoriškai kompensuoti bet kokios formos šviesos impulso fazės iškreipimus.

2.6 Grizminis impulsų plėstuvas

Grizmė yra difrakcinės gardelės ir prizmės junginys [18]. Grizminio plėstuvo, sudaryto iš grizmių poros, optinė schema pavaizduota 5 pav. Šiame paveikslėlyje taip pat yra parodytas pluošto kelias per dvi grizmes ir retroreflektorių, kuris paskleistą erdvėje spinduliuotę nuleidžia (arba pakelia) ir grąžina tokiu pačiu keliu atgal per grizmes taip vėl ją surenkant į pluoštą.

Grizminį plėstuvą yra patogiu naudoti optiniuose parametriniuose čirpuotų impulsų stiprinuvuose, nes jis gali išplėsti impulsus laike įnešdamas neigiamą dispersiją, todėl sistemos gale sustiprinti impulsai gali būti spaudžiami stiklo strypuose, kurie visoje regimojoje ir artimojoje IR srityje pasižymi teigiama dispersija [19]. Neigiama dispersija grizmėse yra gaunama pasitelkiant pluošto sklidimo geometriją, t. y. naudojant elementus (prizmes ir gardeles), kurie įneša kampinę dispersiją taip sudarant sąlygas ilgesniems bangos ilgiams nusklusti ilgesnį atstumą nei trumpesniems. Tokios sistemos įnešamos dispersijos kiekis priklauso nuo šviesos sklidimo geometrijos, todėl dispersiją galima tam tikrose ribos tolydžiai derinti ir taip pritaikyti prie kitų sistemos dalių (pavyzdžiui, impulsų spaustuvo) dispersijos.



5 pav. Plėstuvo sudaryto iš grizmių poros schema

Impulsų plėstuvo pavaizduoto 5 pav. antros eilės dispersija (GVD) tiesiškai priklauso nuo atstumo tarp prizmių viršūnių, o trečios (TED) ir antros eilės dispersijų santykis (TED/GVD) gali būti reguliuojams keičiant pluošto kritimo kampą į pirmąją prizmę. Būtina paminėti, kad tokio plėstuvo pridedama antros ir trečios eilių dispersijos yra neigiamos. Tai, o taip pat ir kompaktiškas pačio plėstuvo dydis, yra grizminio plėstuvo didžiausias privalumas prieš gardelinį ar prizminį, ar jų poros, plėstuvus, kadangi pastarieji gali kompensuoti tik optinių medžiagų antros arba trečios eilės dispersijas, bet ne abi iš karto. Taip pat, vien tik prizminio plėstuvo atveju, bandant išplėsti ultratrumpo impulso trukmę nuo kelių šimtų femtosekundžių iki keliasdešimties pikosekundžių, atstumas tarp prizmių, kaip ir pati antroji prizmė, pasidaro labai didelis.

Vienas iš grizminio plėstuvo minusų yra tai, kad daugiausiai dėl didelio skaičiaus atspindžių nuo optinių paviršių, jie pasižymi mažu pralaidumo koeficientu, kuris paprastai siekia 10-25 %.

2.7 Ultratrumpųjų impulsų trukmės charakterizavimas „Chirpscan“ metodu

Vieni iš labiausiai paplitusių ultratrumpųjų impulsų charakterizavimo metodų yra FROG [20] ir SPIDER [21] metodai, kurie yra pagrįsti atitinkamai autokoreliacijos ir spektrinės interferometrijos principais. Šiame darbe buvo naudotas dar vienas metodas vadinamas „Chirpscan“. Šis metodas yra iš metodų klasės, kuriuose nežinomas elektrinis laukas yra paveikiamas seka fazės funkcijų tuo pat metu registruojant šio lauko antrosios harmonikos spektrą. Šių fazinių funkcijų forma yra fiksuota, tačiau amplitudė arba poslinkis gali būti keičiami ir yra apibūdinami parametru p . Fazinė moduliacija gali būti realizuojama programuojamais aktyviais [22, 23] arba pasyviais optiniais komponentais [24]. Matavimo rezultatai yra dvimačiai pėdsakai $I_{AH}(\omega, p)$, aprašantys antrosios harmonikos spektro priklausomybes nuo parametro p .

Būtent šiame darbe naudoto „Chirpscan“ metodo atveju, parenkama fazės funkcija yra antros eilės dispersija, o parametras p - pridėtos dispersijos amplitudė. Šią fazę prideda ir keičia eksperimentinėje schemeje naudotas akustooptinis programuojamas dispersijos filtras (AOPDF). Tokiu atveju, iš „Chirpscan“ matavimo gaunamų duomenų forma yra matuojamo signalo antrosios harmonikos spektrinio intensyvumo priklausomybė nuo modulatoriumi pridėtos antros eilės dispersijos amplitudės. Literatūroje yra parodyta, jog $I_{AH}(\omega, p)$ suteikia pilną informaciją apie tiriamąjį impulsą [23]. Norint apdoroti šiuos duomenis yra naudojami algoritmai, kurie bando iteraciniu būdu skaitmeniškai generuoti tokius elektrinius laukus su kuriais gautas „Chirpscan“ pėdsakas $I_{AH}(\omega, p)$ kuo geriau atitiktų eksperimentiškai išmatuotą.

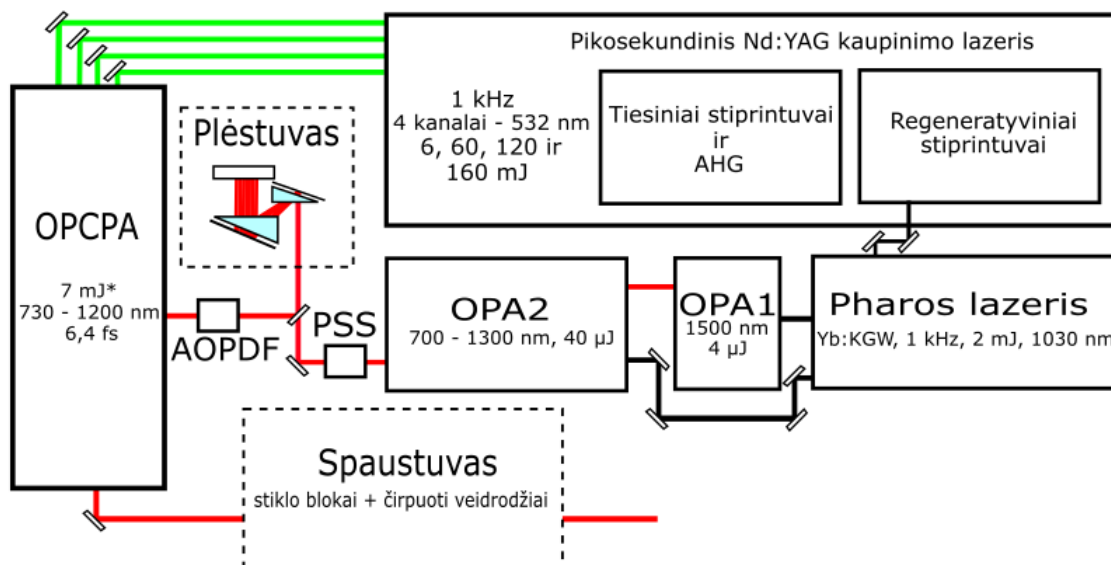
Vienas iš „Chirpscan“ metodo privalumų yra tai, kad matavimo esmė yra charakterizuojamo signalo antrosios harmonikos spektro registravimas, todėl matavimo schema yra daug paprastesnė nei FROG ar SPIDER atvejais. Jeigu programuojamas akustooptinis fazės modulatorius jau yra eksperimentinėje sistemos schemeje ir jo nereikia papildomai nusipirkti, tai tada charakterizuoti impulso trukmei tereikia tik antrosios harmonikos kristalo ir spektrometro su filtru užblokuoti fundamentinio dažnio spinduliutei. Kitas pranašumas - daugeliu atveju „Chirpscan“ pėdsaką $I_{AH}(\omega, p')$ yra paprasta interpretuoti savarankiškai, nenaudojant, kompiuterinių algoritmų, kadangi egzistuoja aiškios tipinės pėdsakų formos, atitinkančios tam tikrus paprastus impulso fazinės moduliacijos atvejus [23]. Pavyzdžiui, jei sistemoje yra nekompensuota trečia dispersijos eilė, tai pėdsake antrosios harmonikos signalo forma primins paprastą tiesę, o jei nekompensuota ketvirta eilė - parabolę ir t.t. Ši sąlybė yra ypatingai naudinga ir sutaupo daug laiko bandant suspausti impulsus parametriniuose čirpuotų impulsų stiprintuvuose.

3 Eksperimentų metodai ir schemas

3.1 Bendra parametrinio čirpuotų impulsų stiprintuvo blokinė schema

Pagrindinę eksperimentinę sistemą, pavaizduotą 6 pav., galima suskirstyti į kelias pagrindines dalis: femtosekundinius bei pikosekundinius parametrinius stiprintuvus su juos kaupinaniais lazeriais ir impulsų plėtos bei spūdos modulius.

Femtosekundinę sistemos dalį sudaro femtosekundinis Yb:KGW aktyvios terpės kaupinimo lazeris „PHAROS“ (UAB MGF „Šviesos konversija“) bei nekolinearus parametrinis stiprintuvas (OPA2) su jo užkrato generatoriumi (OPA1). Tuo tarpu pikosekundinę sistemos dalį sudaro didelės galios pikosekundinis Nd:YAG aktyvios terpės kaupinimo lazeris (UAB „EKSPLA“) bei femtosekundinėje dalyje sugeneruotą užkratą stiprinantis nekolinearus čirpuotų impulsų parametrinis stiprintuvas (OPCPA). Po femtosekundinės sistemos dalies dar yra pluošto krypties ir padėties stabilizavimo modulis padedantis atkartoti tokias pačias pluošto įvedimo į impulsų plėstuvą sąlygas, kuris pats yra sudarytas iš dviejų grizmių. Galiausiai, sistemos pabaigoje, yra sustiprintų impulsų spaustuvas sudarytas iš stiklo blokų bei čirpuotų veidrodžių. Taip pat tarp impulsų plėstuvo ir spaustuvo yra įdėtas akustooptinis programuojamas dispersijos filtras skirtas dideliu tikslumu suderinti jų įnešamas dispersijas.



6 pav. Bendra eksperimento blokinė schema. Pažymėta: OPA1 - skirtuminio dažnio generatorius generuojantis užkratą OPA2 stiprintuvui, OPA2 - nekolinearus optinis parametrinis stiprintuvas generuojantis plataus spektro signalą, PSS - pluošto stabilizavimo sistema, AOPDF - programuojamas akustooptinis dispersijos filtras, OPCPA - optinis parametrinis čirpuotų impulsų stiprintuvas, taip pat paveiklėlyje yra atskirai išskirtas pikosekundinis kaupinimo lazeris bei grizminis plėstuvai ir iš stiklo strypų bei čirpuotų veidrodžių sudarytas impulso spaustuvas

Femtosekundinėje dalyje kaupinimo impulsai abiemis parametriniams stiprintuvams yra generuojami „PHAROS“ lazerio. Šiuose eksperimentuose naudojamas modelis yra ypatingas tuo, jog turi du išėjimus, po vieną kiekvienam parametriniui stiprintuvui (OPA1 ir OPA2). Tai yra reikalinga tam, kad būtų galima atskirai kiekvienam stiprintuvui keisti kaupinimo impulso trukmę ir taip pasiekti optimaliausią stiprinimo efektyvumą. Į kolinearų stiprintuvą (OPA1), siunčiami iki maždaug 200 fs trukmės (120 μ J energijos) pačiame „Pharos“ lazeryje suspausti impulsai, o į nekolinearų stiprintuvą (OPA2) keliauja nespaušti, maždaug 300 ps trukmės (1830 μ J energijos) impulsai, kurie yra suspaudžiami (iki maždaug 350 - 400 fs) prieš stiprinimo pakopas su atskiru gardelinio spaustuviu OPA2 stiprintuvo viduje.

Plataus spektro signalinis impulsas yra formuojamas per keletą etapų. Pirmiausia, skirtuminio dažnio generatoriuje (OPA1), kaupinamame Yb:KGW lazerio spinduliuotės antrąja harmonika yra sugeneruojami 1,5 μ m centrinio bangos ilgio impulsai, kurių gaubtinės fazė yra pasyviai stabilizuota. Juos fokusuojant į itrio aliuminio granato (YAG) kristalą, generuojamas 0,5 μ m - 1,6 μ m bangos ilgius apimantis baltos šviesos kontinuumas, kurio dalis toliau naudojama nekolineariam parametriniam stiprintuvui (OPA2) užkrėsti. Užkratas femtosekundiniame parametriniame stiprintuve stiprinamas iki maždaug 40 μ J energijos ir tada išplečiamas grizminiu plėstuvu iki ~ 60 ps trukmės bei yra siunčiamas į OPCPA sistemą, kurioje yra stiprinamas pikosekundinės trukmės kaupinimo impulsais dviejose nekolineariose stiprinimo pakopose iki maždaug 7 mJ bei 6,4 fs spektru ribotos trukmės. Nors iš viso OPCPA turi keturias stiprinimo pakopas, šiame darbe yra demonstruojami rezultatai gauti tik iš pirmų dviejų pakopų.

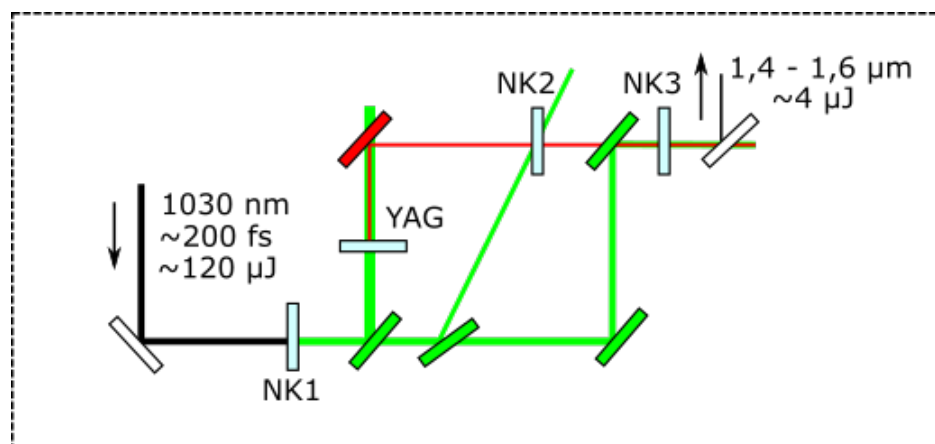
Kadangi signalo spektras yra platus (730 nm - 1200 nm) ir turi didelį impulso plėtros koeficientą ($\sim 10^4$), atliekant impulso spūdą būtina kompensuoti aukštas dispersijos eiles. Tai atlikti vien pasyviais komponentais yra labai sudėtinga arba neįmanoma, todėl sistemoje yra naudojamas programuojamos dispersijos akustooptinis modulatorius „Dazzler“ (Fastlite Inc., Prancūzija), kuriuo ištaisomi palyginti nedidelio masto, tačiau sudėtingos formos neatitikimai tarp plėstuvo ir spaustuvo (jo vieta sistemoje yra po plėstuvo, prieš pirmą stiprinimo pakopą). Impulso spauidimo modulį sudaro didesnio ir mažesnio lūžio rodiklių stiklo blokų rinkinys pradiniam impulso spauidimui iki maždaug 200 - 300 fs bei keturios porų čirpuotų veidrodžių (8 atspindžiai) skirtų pabaigti suspausti impulsą iki artimos trukmės spektru ribotai, t. y. $\sim 6,4$ fs.

Kaupinimo ir signalo impulsų sinchronizacija tarp femtosekundinės ir pikosekundinės sistemos dalių yra užtikrinama užkrečiant Yb:KGW ir Nd:YAG stiprintuvus vieno Yb:KGW osciliatoriaus impulsais. Dėl pakankamai plataus šio osciliatoriaus generuojamų impulsų spektro maždaug ~ 50 pJ energijos yra spektriniame ruože ties 1064 nm ir jis gali būti užkrato šaltiniu ne tik Yb:KGW, bet ir Nd:YAG aktyviųjų medžiagų pagrindu veikiančioms lazerinio stiprinimo sistemoms. Dalis užkrato yra nusiunčiama į čirpuotus impulsus stiprinantį femtosekundinį Yb:KGW regeneratyvinį stiprintuvą (esantį PHAROS lazerio viduje), stiprinantį 1030 nm centrinio bangos ilgio ir maždaug 10 nm spektro pločio impulsus. Kita užkrato dalis nukreipiama į Nd:YAG stiprinimo sistemą (t. y. pikosekundinį kaupinimo lazerį), pirmiausiai į keletą rege-

neratyvinių stiprintuvų, o paskui į tiesinius stiprintuvus pasiekti reikiamas didesnes energijas (jau sugeneravus antrą harmoniką keturiuose kanaluose yra gaunami - 6, 60, 120 ir 160 mJ energijos impulsai). Vienas šio lazerio privalumų yra tas, kad visuose keturiuose kanaluose yra suformuojami plokščios laikinės ir erdvinės formos antrosios harmonikos kaupinimo pluoštai (pluoštai yra maždaug 12 eilės super Gauso formos). Dėl to kaip yra formuojami šie pluoštai truputėli skiriasi impulsų trukmės skirtinguose kanaluose - pirmame ir antrame kaupinimo impulso trukmė yra apie 110 - 120 ps, o kituose dviejuose apie 80 - 90 ps. Daugiau apie šį kaupinimo lazerį galima rasti čia [7].

3.2 Skirtuminio dažnio impulsų generatorius

Skirtuminio dažnio generatoriaus schema yra pavaizduota 7 pav. Šis stiprintuvus, iš tikrųjų, yra pritaikytas generuoti stabilios gaubtinės fazės impulsus, tačiau ši sąlybė darbe nebuvo tyrinėta, OPA1 stiprintuvus buvo naudotas tik sugeneruoti užkratą OPA2 stiprintuvui. Stabilios gaubtinės fazės impulsai bus reikalingi ateityje įvairiems šios sistemos taikymams, pavyzdžiui, aukštųjų harmonikų generacijai.



7 pav. Supaprastinta skirtuminio dažnio generatoriaus (OPA1) schema. Pažymėta: NK - netiesinis kristalas, YAG - itrio aliuminio granato kristalas

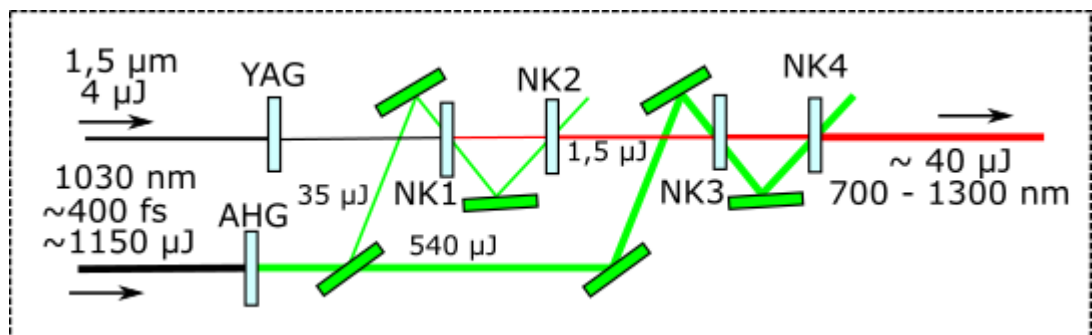
Šio stiprintuvo veikimo principas yra toks: iš pat pradžių, banginės plokštelės ir poliarizatoriaus (schemoje neparodyta) pagalba yra pasirenkama norima iš „Pharos“ lazerio ateinančio pluošto energija (maždaug apie 120 μJ). Šis pluoštas jau yra praėjęs pro vidinį „PHAROS“ lazerio impulsų spaustuvą ir yra suspaustas iki maždaug 200 fs trukmės (ši vertė yra optimizuojama žiūrint į stiprintuvo išėjimą ir siekiant gauti kuo didesnę energijos keitimą). Toliau pluoštas yra fokusuojamas į 2 mm β -bario borato (BBO) kristalą, kuriame yra generuojama jo antra harmonika (515 nm) su maždaug ~60 % efektyvumu. Antros harmonikos pluoštas toliau yra padalinamas į tris dalis, maždaug 1 μJ keliauja į kontinuumo šaką, o 15 μJ ir ~56 μJ atitinkamai į pirmą ir antrą stiprinimo pakopas.

Kontinuumo šakoje antros harmonikos pluoštas yra sufokusuojamas į YAG kristalą, kuriame yra sugeneruojamas baltos šviesos kontinuumas, kurio dalis yra parametriškai stiprinama pirmojoje stiprinimo pakopoje, t. y. 2 mm BBO kristale. Kadangi pasyviai stabilizuotą gaubtinės fazę tokioje scheme turi tik šio stiprinimo metu sugeneruota skirtuminio dažnio banga, tai priklausomai nuo norimo išėjime gauti skirtuminio bangos ilgio yra stiprinamas 760 - 820 nm užkrato bangos ilgių ruožas (atitinkantis 1600 - 1380 nm skirtuminius bangos ilgius) iki maždaug 0,4 - 0,8 μJ .

Tokia impulso energija yra per maža planuojamiems jo taikymams, todėl signalinis impulsas yra dar pastiprinamas antrojoje stiprinimo pakopoje. Norint išvengti skirtuminio dažnio bangos erdvinio čirpo, antrojoje stiprinimo pakopoje signalo stiprinimas vyksta tik kolinearioje sąveikoje. Kai signalas 2 mm BBO kristale (antrojoje stiprinimo pakopje) yra sustiprinamas iki maždaug 10 μJ , tada skirtuminėje bangoje yra maždaug 4 - 5 μJ energijos - keletą kartų daugiau nei reikia norint su ja sugeneruoti baltos šviesos kontinuumą OPA2 stiprintuve. Taikymams reikalinga skirtuminio dažnio banga nuo signalinės ir kaupinimo bangų yra atskiriama panaudojant keletą tik pastarąsias bangas atspindinčių dielektrinių veidrodžių.

3.3 Plačiajuostis nekolinearus femtosekundinis parametrinis stiprintuvas

Supaprastinta plačiajuosčio femtosekundinio nekolinearaus stiprintuvo schema pavaizduota 8 pav. Stiprintuvas užkrečiamas baltos šviesos kontinuumu, sugeneruotu į YAG kristalą fokusuojant impulsus iš skirtuminio dažnio generatoriaus. Kadangi impulsai, ateinantys iš OPA1 stiprintuvo, turi pasyviai stabilizuotą gaubtinės fazę, tai ir nauji jų sugeneruoti impulsai turės stabilią gaubtinės fazę (t.y. OPA2 stiprintuve sustiprinti ir iš jo išėję impulsai taip pat turės stabilizuotą impulso gaubtinės fazę).



8 pav. Supaprastinta plačiajuosčio nekolinearaus parametrinio stiprintuvo schema. Pažymėta: NK - netiesinis kristalas, YAG - itrio aliuminio granato kristalas, AHG - antros harmonikos generacijos kristalas

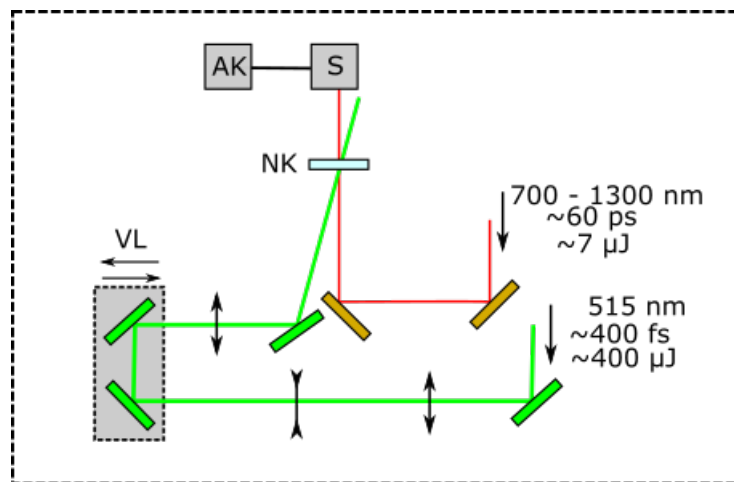
Kaupinimui yra naudojama antroji „Pharos“ lazerio harmonika sugeneruota 0,8 mm BBO kristale (AHG kristalas, 7 pav.) su maždaug 50 % efektyvumu. Kaip jau anksčiau minėta,

kadangi iš „Pharos“ lazerio išėjęs, jo vidiniame impulsų spaustuve nesuspaustas, fundamentinio dažnio impulsas yra praleidžiamas pro gardelinį impulsų spaustuva (lygiai tokį patį kaip ir esantį „Pharos“ lazerio viduje), pritvirtintą prie OPA2 stiprintuvo korpuso, tai kaupinimo impulsų trukmė gali būti reguliuojama nepaveikiant stiprinimo sąlygų OPA1 stiprintuve ir yra parinkta tokia, kad neribotų stiprinamo signalo spektro bei būtų gaunamas kuo didesnis energijos keitimo iš kaupinimo į signalą koeficientas.

Pirmojoje pakopoje užkratas yra stiprinamas su $\sim 35 \mu\text{J}$ energijos turinčia kaupinimo banga dviejuose kristaluose (NK1 ir NK2 kristalai). Stiprinimui abiejuose kristaluose yra naudojamas tas pats kaupinimo pluoštas. Pirmiausiai 2,5 mm ličio triborato (LBO) kristale yra pastiprinama ilgabangė spektro dalis (maždaug nuo 800 nm iki 1300 nm), o trumpabangė spektro dalis - 2 mm BBO kristale. BBO kristale yra naudojamas 4 laipsnių nekolinearumo kampas, LBO - 2 laipsnių. Nors abiejuose kristaluose yra naudojamas tas pats kaupinimo pluoštas, tačiau yra galimybė jiems abiemis keisti kaupinimo impulso vėlinimą (schemoje vėlinimo linijos nepavaizduotos), todėl galima tiksliai pasirinkti kokius spektro ruožus stiprina abu kristalai.

Antrojoje stiprinimo pakopje iki maždaug 1,4 - 1,6 μJ energijos pastiprintas signalas yra dar kartą, iki maždaug 40 μJ , stiprinamas 2,5 mm LBO ir 2 mm BBO kristalų kombinacijoje, kuri yra kaupinama maždaug 540 μJ energijos kaupinimo impulsais. Kaip ir pirmojoje pakopoje, taip ir šioje yra galimybė abiemis kristalams atskirai keisti vėlinimą, nors naudojamas tas pats kaupinimo pluoštas.

3.4 Išplėsto impulso charakterizavimo schema



9 pav. Impulso čirpo ir trukmės po impulso plėtimo modulio matavimo schema. Pažymėta: NK - netiesinis kristalas, VL - vėlinimo linija, S - spektrometras, AK - asmeninis kompiuteris

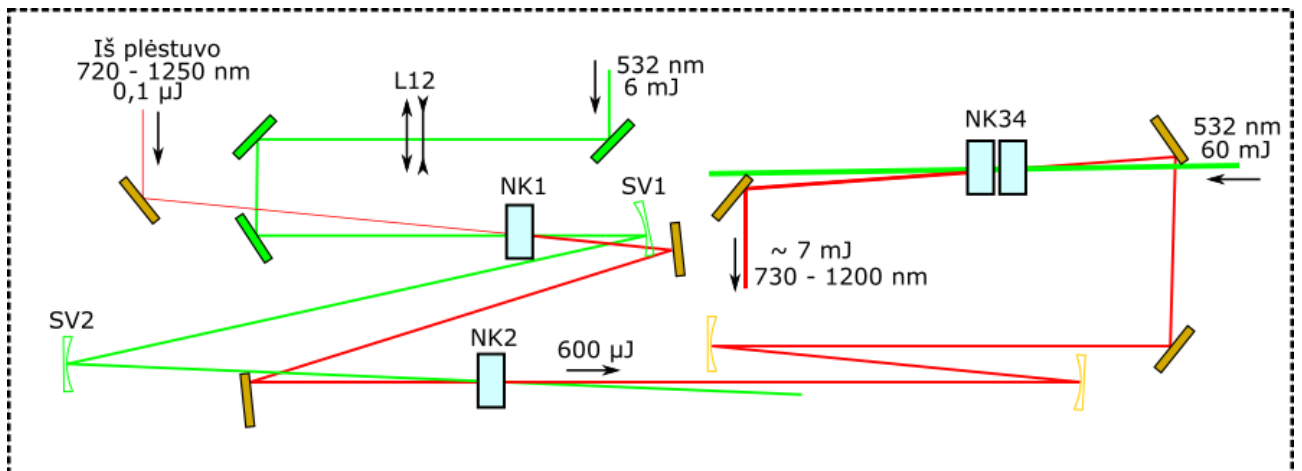
Impulso čirpo ir trukmės po impulso plėtimo grizminiame plėstuve matavimo schema pavaizduota 9 pav. OPA2 stiprintuve sugeneruotas ir grizminiame plėstuve laike išplėstas impulsas yra skenuojamas trumpu, maždaug 150 kartų trumpesniu, impulsu, kuris yra likutinis OPA2

stiprintuvo antrosios pakopos kaupinimas. Skenavimas yra vykdomas tam tikru žingsneliu vėlinant kaupinimo impulsą signalinio impulso atžvilgiu, tuo pačiu metu šiuo impulsu vykdam išplėsto signalinio impulso parametrinį stiprinimą atskirame BBO kristale. Kadangi vienas šioje sąveikoje dalyvaujantis impulsas yra čirpuotas ir žymiai ilgesnis už kitą, tai registruojami sustiprinto signalo spektrai yra labai siauri.

Atlikus šį eksperimentą yra gaunamas dvimatis pėdsakas vaizduojantis sustiprinto signalo spektro kitimą nuo kaupinimo impulso vėlinimo. Apdorojus šiuos duomenis galima gauti čirpuotą signalinį impulsą sudarančių bangos ilgių priklausomybę nuo grupinio vėlinimo iš kurios galima lengvai išvertinti išplėsto impulso trukmę. Taip pat, kadangi ši kreivė praktiškai yra (14) formulės išvestinė (t. y. pirmoji spektrinės fazės išvestinė), tai ją aproksimavus polinomu, gauti koeficientai bus proporcingi atitinkamoms plėstuvo pridedamos dispersijos eilių vertėms. O tai yra patogiu žinoti, nes šias vertes galima lyginti su impulsų spaustuvo ir kitų optinių elementų pridedamomis dispersijomis ir tikrinti, ar dar skirtumas tarp impulsų plėstuvo ir spaustuvo pridedamos dispersijos neviršijo akustooptinio programuojamo dispersijos filtro galimų pridėti įvairių eilių dispersijos verčių (viršijus šias ribas tiesiog nebeišeitų vėl suspausti sustiprinto impulso iki jo spektru ribotos trukmės).

3.5 Didelės galios parametrinio čirpuotų impulsų stiprinimo sistema

Supaprastinta optinio parametrinio čirpuotų impulsų stiprinimo sistemos schema yra pateikta 10 pav.



10 pav. Didelės galios parametrinio čirpuotų impulsų stiprinimo sistemos schema. Pažymėta: NK - netiesinis kristalas, L12 - lęšių pora, SV - sferinis veidrodis

Sustiprinti femtosekundinėje sistemos dalyje ir išplėsti iki maždaug 60-65 ps signaliniai impulsai yra stiprinami dviejose pikosekundinėse stiprinimo pakopose su 6 ir 60 mJ energijos kaupinimo pluoštais. Viena iš kaupinimo lazerio sąvybių yra tai, kad visuose spinduliuotės išėjimo kanaluose yra suformuojami plokščios erdvinės (ir laikinės) formos antrosios harmonikos kaupi-

nimo pluoštai (pluoštai yra maždaug 12 eilės super Gauso formos). Norint išlaikyti kaupinimo pluošto profilį plokščią jį reikia atvaizduoti iš kaupinimo lazerio vidaus, nuo antros harmonikos generacijos kristalo, kur jo profilis dėl difrakcijos dar yra nespėjęs pasikeisti (iš plokščio profilio). Atvaizduoti pluoštą yra būtina, kadangi kaupinimo pluošto profilis sklisdamas tolyn labai stipriai keičiasi, o pakitęs profilis arba neleistų efektyviai pastiprinti signalinio impulso, arba, dar blogiau, stiprinimo metu dėl lokalių intensyvumo padidėjimų pažeistų kristalą, kuriame vyksta parametrinis stiprinimas.

Į pirmąjį kristalą pirmojoje stiprinimo pakopoje (NC1) atvaizduoti kaupinimo pluoštui yra naudojama lešių pora (L12), kurios dėka galima parinkti atvaizdo vietą ir pluošto dėmės matmenis tame atstume, o į antrąjį kristalą (NC2) kaupinimo pluoštas atvaizduojamas dviejų sferinių veidrodžių pagalba (SV1 ir SV2). Pirmojoje stiprinimo pakopoje abiejuose kristaluose kaupinimo dėmės dydis yra maždaug apie 1 mm, o antrojoje pakopoje kaupinimo pluoštas atvaizduojamas kaupinimo lazerio viduje esančiais lęšiais į 6 mm dėmę (šie lęšiai 10 pav. nėra pavaizduoti). Antrojoje pakopoje dėl vietos trūkumo yra fiziškai neįmanomas kaupinimo atvaizdavimas iš vieno kristalo į kitą, kaip pirmojoje pakopoje, todėl kristalai yra vienas šalia kito (dvigubame kristalų laikiklyje, atskirti maždaug 1 mm oro tarpo). Tokia konfigūracija yra galima, nes kaupinimo ir signalo pluoštai yra gana dideli ir per kristalų ilgį, sukirsti maždaug 3 laipsnių nekolinearumo kampu, nespėja reikšmingai vienas iš kito išbėgti.

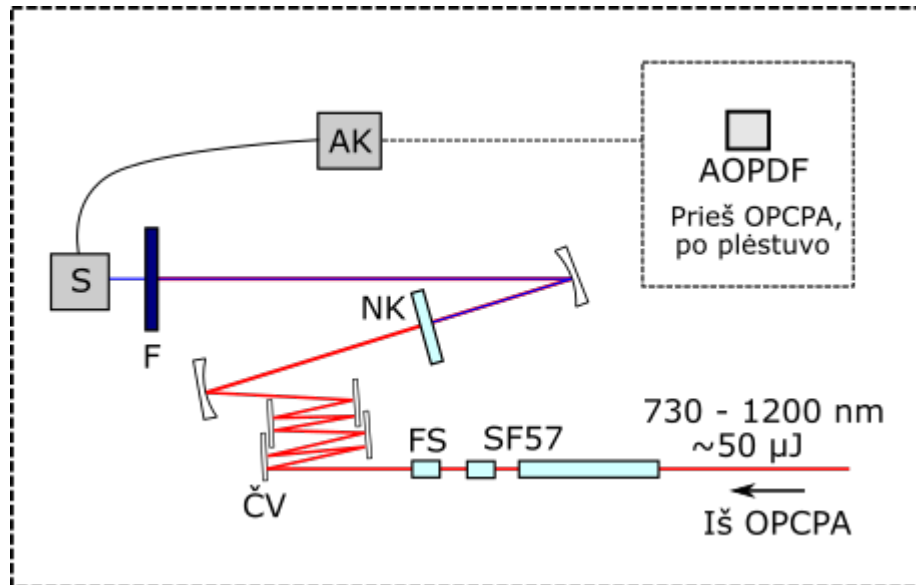
Pirmojoje stiprinimo pakopoje užkratas nuo maždaug 0,1 - 0,15 μJ , tiek jo lieka po impulsu plėstuvo, paprastai yra sustiprinamas iki 500 - 600 μJ su 6 mJ energijos kaupinimo impulsais dviejose LBO kristaluose. Pirmasis LBO kristalas yra 15 mm ilgio, o antrasis - 10 mm ilgio. Nekolinearumo kampo dydis abiejais atvejais yra apie 1,7 laipsnio. Antrojoje pakopoje yra naudojami du 6 mm BBO kristalai. Nekolinearumo kampas (maždaug 3 laipsniai) šioje pakopoje yra parinktas toli nuo magiškojo kampo, todėl sinchronizmo kreivės tampa panašios į paraboles. Tokiu atveju galima taip parinkti BBO kristalų sinchronizmo kampus, kad vienas iš jų stiprintų signalo spektro centrą, o kitas - spektro kraštus. Tokiu būdu yra pastiprinamas beveik visas norimas signalinio impulso spektras iki maždaug 7 mJ energijos (su 60 mJ kaupinimo impulsu).

3.6 Impulsų spaustuvo schema

Bendroji impulsų spaustuvo schema yra pavaizduota 11 pav. Impulsų spaustuvą sudaro du, 5 ir 25 cm ilgio, SF57 stiklo strypai ir vienas, 5 cm ilgio, lydyto kvarco stiklas bei 4 čirpuoti veidrodžiai nuo kurių pluoštas atsispindi 8 kartus. Į spaustuvą yra praleidžiama tik dalis signalinio impulso, sustiprinto OPCPA sistemoje, energijos, t. y. maždaug apie 50 μJ , taip užsitikrinant kad stikluose nevyktų jokia nepageidaujama fazinė moduliacija.

Impulsai yra spaudžiami pasitelkiant „Chirpscan“ metodiką, t. y. yra registruojama impulso antrosios harmonikos spektro priklausomybė nuo AOPDF keičiamos antros eilės dispersijos. Antroji harmonika yra generuojama 10 μm storio BBO kristale, ją nuo fundamentinio dažnio

spinduliuotės atskiria tam skirtas filtras. Praėjusi filtrą spinduliuotė yra šviesolaidžiu surenkama į spektrometrą. Tokiu būdu yra išmatuojami dvimačiai pėdsakai iš kurių programine įranga galima kiekybiškai atkurti matuojamą impulsą. Impulso atkūrimo programos veikimas yra paremtas apibendrintųjų projekcijų algoritmu [25], pačią programinę įrangą sukūrė ir leido pasinaudoti Vilniaus universiteto, lazerinių tyrimų centro, dokt. Rimantas Budriūnas.



11 pav. Impulsų spaustuvo kartu su „Chirpscan“ matavimu schema. Pažymėta: AOPDF - akustooptinis programuojamas dispersijos filtras, FS - lydyto kvarco stiklas, NK - netiesinis kristalas, F - filtras, S - spektrometras, ČK - čirpuotas veidrodis, AK - asmeninis kompiuteris

Priklausomai nuo pasirinkto antrosios eilės dispersijos skenavimo intervalo, vieno pėdsako išmatavimas ir interpretavimas gali užtrukti nuo keliasdešimties sekundžių iki kelių minučių. Atlikus eksperimentinių duomenų interpretavimą, jei impulsas nėra suspaustas iki jo spektru ribotos trukmės, galima grįžtamuju ryšiu į AOPDF, esantį po impulsų spaustuvo, nusiųsti reikiamus fazės pataisymus. Kol impulsas visiškai suspaudžiamas gali prireikti nuo kelių iki keliolikos šio matavimo iteracijų.

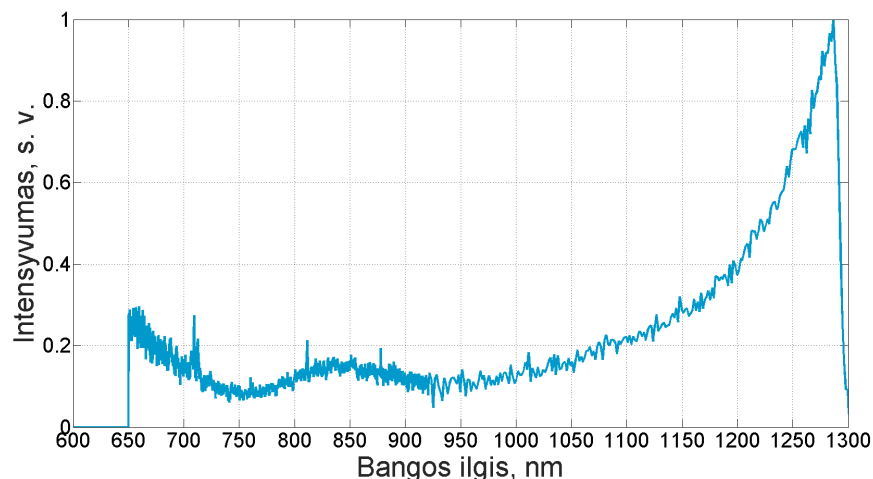
4 Rezultatai ir jų aptarimas

4.1 Plataus spektro femtosekundinio užkrato formavimas

Vienas iš šio darbo uždavinių buvo sugeneruoti plataus spektro signalą, kurio spektru ribota trukmė būtų mažiau 2,2 optinių ciklų, kai spektro centrinis bangos ilgis yra 850 - 975 nm intervale (impulso trukmė tokiu atveju turėtų būti apie 6 - 7 fs) ir kuris turėtų kuo daugiau energijos.

To siekiant, OPA1 stiprintuvas buvo suderintas taip, kad jo išėjime būtų galima gauti maždaug 4 μ J energijos impulsus, kurių centrinis bangos ilgis buvo 1500 nm. Šiame stiprintuve generuojamo skirtuminio dažnio signalo centrinio bangos ilgio pasirinkimas šiuo atveju nebuvo labai svarbus, kadangi beveik nuo visų šiame stiprintuve galimų sugeneruoti skirtuminio dažnio signalų (1350 - 1600 nm spektriniame intervale) OPA2 stiprintuve būdavo galima sugeneruoti stabilūs ir nemoduliuoto spektrinio intensyvumo baltos šviesos kontinuumo spektrus. Būtent 1500 nm bangos ilgis buvo pasirinktas, kadangi generuojant šį signalą OPA1 stiprintuvas veikė labai stabiliai, t. y. generuojamų impulsų energijos vienos valandos vidutinis kvadratinis nuokrypis buvo tik 0,25 %. Taip pat, šis bangos ilgis buvo pakankamai toli nuo 1300 nm bangos ilgio, kuris yra OPA2 stiprintuve stiprinamo spektro kraštas, todėl po baltos šviesos kontinuumo generacijos skirtuminio dažnio signalą buvo galima lengvai pašalinti panaudojant filtrą.

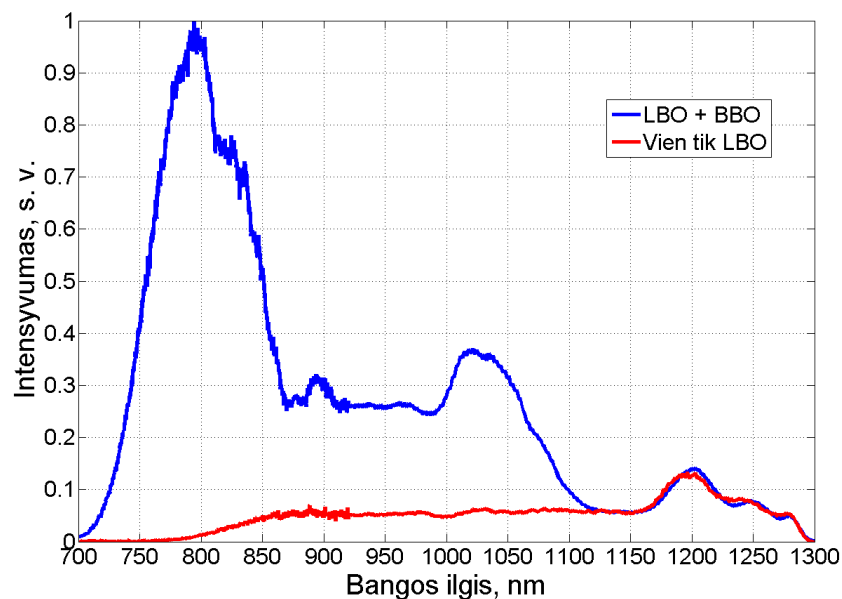
Su dalimi skirtuminio dažnio impulso energijos OPA2 stiprintuvo viduje, YAG kristale sugeneruoto baltos šviesos kontinuumo spektras yra pavaizduotas 12 pav. Šis spektras ilgabangėje dalyje turi statų šlaitą dėl anksčiau minėto filtro skirtu užblokuoti skirtuminio dažnio bangą po kontinuumo generacijos. Trumpabangėje srityje status šlaitas atsiranda dėl to, kad spektro trumpabangę pusę matuojantis spektrometras tai daro tik nuo 600 nm, todėl registruojant labai silpnus signalus (kaip ir buvo šiuo atveju) tame ruože dėl spektrinio intensyvumo kalibracijos atsiranda daug triukšmo ir tuos bangos ilgius reikia užblokuoti.



12 pav. Kaip OPA2 stiprintuvo užkratas naudojamas baltos šviesos kontinuumo spektras.

Šis 12 pav. pavaizduotas kontinuumo spektras buvo stiprinamas nekolineariame optiniame parametriniame stiprintuve (OPA2). Jame stiprinamo signalo spektro ribas netiesiogiai nusako iš karto už stiprintuvo stovintis akustooptinis programuojamas dispersinis filtras (AOPDF), kuris praleidžia spinduliuotę tik 720 - 1250 nm bangos ilgių ruože. Šio ribojimo niekaip negalima apeiti, kadangi norint sugeneruotus impulsus suspausti iki jų spektru ribotos trukmės šis prietaisas yra būtinas. Stiprinti tokio pločio spektrą buvo nuspręsta LBO ir BBO kristalų konfigūracijoje t. y. pirmiausiai ilgabangę kontinuumo dalį (>1100 nm) pastiprinti LBO kristale taip praplėčiant spektrą, kur neefektyviai stiprina BBO kristalas, o tada likusią spektro dalį kiek išeina pastiprinti BBO kristale.

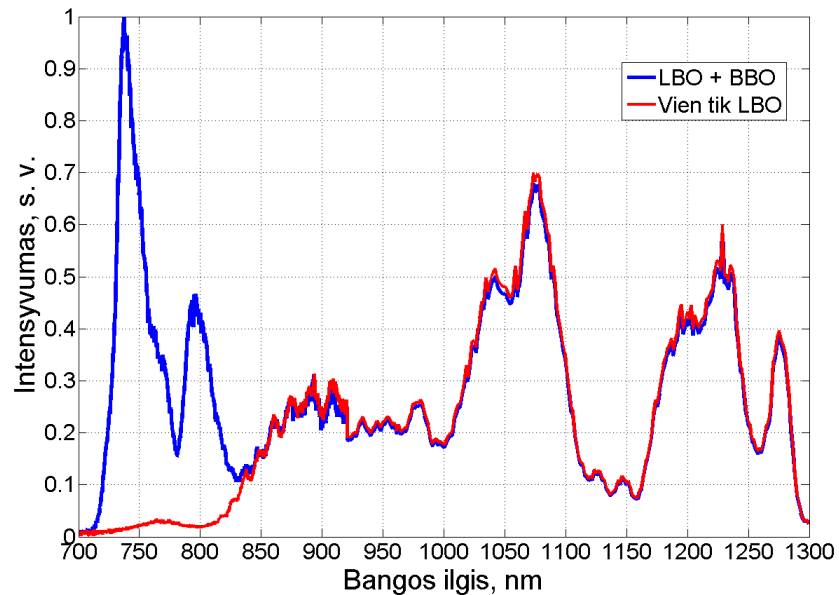
Verta paminėti, kad pirmojoje ir antrojoje stiprinimo pakopose buvo išbandytos įvairios kristalų konfigūracijos, pavyzdžiui, po vieną LBO kristalą abiejose stiprinimo pakopose, po jų poras, po skirtingų kristalų poras ir t. t. Tačiau pasirinktos stiprinimo konfigūracijos leido lengviausiai įvykdyti (o ne visose konfigūracijose tai pavykdavo) reikiamo iš šio stiprintuvo gauti stiprinamo signalo spektro pločio ir energijos reikalavimus.



13 pav. Pirmojoje OPA2 stiprintuvo pakopoje sustiprintas signalo spektras. Mėlyna spalva yra pavaizduotas spektras sustiprintas bendroje LBO ir BBO kristalų konfigūracijoje, o raudona - spektro dalis sustiprinta tik pirmajame iš dviejų kristalų - LBO kristale

13 pav. yra pavaizduotas pirmojoje stiprintuvo pakopoje sustiprintas signalo spektras. Mėlyna spalva yra pavaizduotas spektras sustiprintas bendroje LBO ir BBO kristalų konfigūracijoje, o raudona - spektro dalis pastiprinta tik pirmajame iš dviejų kristalų - LBO kristale. Abu kristalai yra kaupinami tuo pačiu kaupinimo pluoštu ir su 35 μ J energijos kaupinimo impulsais po LBO kristalo yra gaunami $\sim 0,6$ μ J, o pridėjus BBO - maždaug 1,5 μ J energijos signaliniai impulsai. Abiems kristalams sinchronizmo bei nekolinearumo kampai buvo parinkti taip, kad

būtų stiprinami plačiausi spektrai, tačiau stengiantis optimizuoti stiprinimą LBO kristale taip, kad būtų gaunama kuo daugiau energijos srityje, kurios šioje konfigūracijoje neperdengia BBO kristalo stiprinimo juosta.



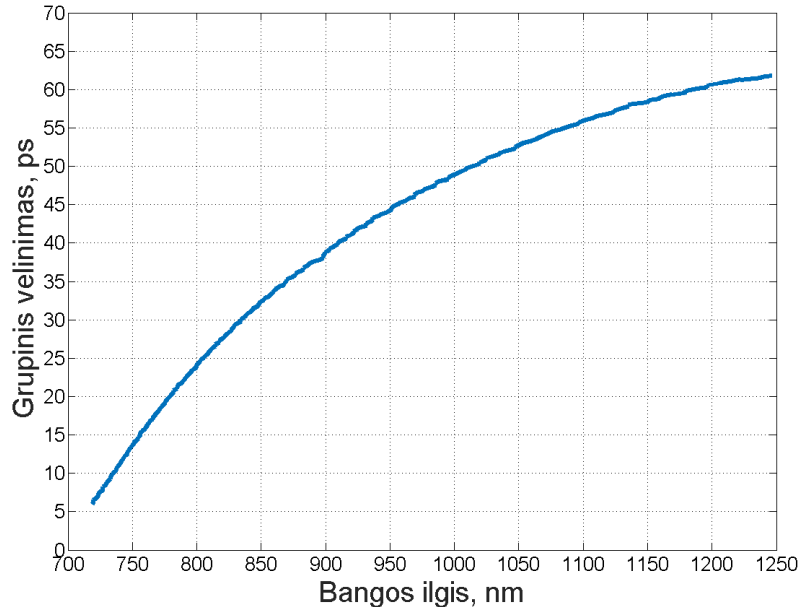
14 pav. Antrojoje OPA2 stiprintuvo pakopoje sustiprintas signalo spektras. Mėlyna spalva yra pavaizduotas spektras sustiprintas bendroje LBO ir BBO kristalų konfigūracijoje, o raudona - spektro dalis sustiprinta tik pirmajame iš dviejų kristalų - LBO kristale

14 pav. yra pavaizduotas antrojoje stiprintuvo pakopoje sustiprintas signalo spektras. Antrojoje OPA2 stiprintuvo stiprinimo pakopoje buvo pasirinkta lygiai tokia pati stiprinimo konfigūracija kaip ir pirmojoje pakopoje, t. y. buvo pasirinktas signalo stiprinimas LBO ir BBO kristalų poroje. Šioje pakopoje dėl vietos trūkumo BBO kristalo nekolinearumo kampas fiziškai negalėjo būti didesnis nei 3 laipsniai, o toks kampas yra gana toli nuo magiškojo kampo (magiškas kampas yra maždaug 4 laipsniai), todėl BBO kristale stiprinamas spektras yra labai siauras, žr. 14 pav. Tačiau nors BBO kristalo nekolinearumo kampas ir nėra visiškai optimalus, bet sustiprinto signalo spektras tęsiasi per visą reikiamą spektrinį intervalą ir yra tinkamas naudoti kaip užkratas OPCPA sistemai. 14 pav. pavaizduoto signalinio impulso spektru ribota trukmė yra apie 4,3 fs (arba 1,4 optinio ciklo, kai centrinis bangos ilgis yra 960 nm). Taip pat, šio impulso energija yra apie 40 μJ (7 % keitimas). Jei antroje pakopoje stiprina vien tik LBO kristalas, tada signalinio impulso energija - 32 μJ . Toks mažas keitimas yra iš dalies, kad antrojoje stiprinimo pakopoje BBO kristalas stiprina labai siaurą spektrą ir kad LBO kristalai buvo derinami ne gauti geriausią keitimą abiejų kristalų konfigūracijoje (padarant taip, kad stiprinimo juostos labiau persiklotų), o siekiant gauti kuo daugiau energijos ilgabangėje spektro dalyje. Taip buvo daroma kompensuoti tai, kad impulsų plėstuvo pralaidumas ilgabangėje spektro dalyje yra kelis kartus mažesnis nei trumpabangėje spektro dalyje.

4.2 Grizminio impulsų plėstuvo derinimas

Sekantis uždavinys buvo suderinti grizminį plėstuvą OPA2 stiprintuve sustiprintam plačiajuosčiui signalui išplėsti. Pirmiausiai buvo surinktas pats grizminis plėstuvas, t. y. gardelės ir prizmės sudėtos į laikiklius bei sustatytos ir sureguliuotos taip, kad pro plėstuvą praeitų visas spektras. Tada eksperimentiškai buvo surastas toks atstumas tarp prizmių viršūnių, kad išplėsto impulso trukmė būtų apie 60 ps, kuri yra optimali signalinio impulso trukmė jį stiprinti paskutinėse OPCPA pakopose. Taip pat, grizmės buvo išstatytos taip, kad jų pridedamos trečios ir antros dispersijų santykis AOPDF pridedamos fazės ribose sutaptų su atitinkamu impulsų spaustuvo pridedamų dispersijų santykiu.

Impulsų plėstuvą buvo bandoma charakterizuoti su 3. 4 skyrelyje pavaizduota eksperimentine schema, t. y. buvo matuojamas impulso čirpas bei apytiksliai įsivertinama išplėsto impulso trukmė. Šie matavimai buvo daromi tam, kad nebūtų, taip, jog bet kaip išplėtus impulsą grizminiame plėstuve ir vėliau jį spaudžiant stikluose bei taisant fazę su AOPDF, nepaaiškėtų, kad norint visiškai suspausti impulsą reikia pridėti didesnį kiekį kažkokios dispersijos eilės negu programuojamas dispersijos filtras gali pridėti. Plėstuvo derinimas, kol buvo pasiekti norimi rezultatai, vyko iteraciniu būdu: pirmiausiai buvo perstumdomi grizmių elementai, tada patikrinama ar pro plėstuvą praeina visas signalo spektras, ir galiausiai, atliekami matavimai.



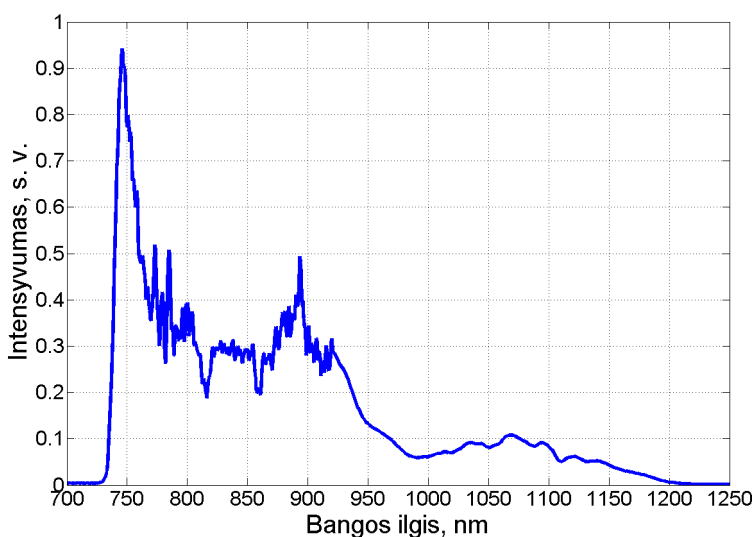
15 pav. Grizminių plėstuvu išplėsto impulso trukmės ir čirpo matavimo duomenys.

Optimizavus impulsų plėstuvą, gauta impulso trukmė pavaizduoti 15 pav. Matome, kad išplėstam signaliniame impulse 720 nm bangos ilgis nuo 1250 nm bangos ilgio yra laike yra nutolęs šiek tiek mažiau nei 60 ps. Impulso čirpas grizmių derinimo metu būdavo surandamas šią kreivę aproksimuojant polinomu. Kadangi ši kreivė nusako grupinio vėlinimo priklaus-

mybę nuo dažnio, tai ji yra ne kas kita, o spektrinės fazės pirmoji išvestinė, todėl polinomo koeficientai yra proporcingi įvairios dispersijos eilėm. Tada šitie duomenys būdavo lyginami su teoriškai suskaičiuotomis vertėmis su kuriomis impulsas turėtų būti suspaustas iki spektru ribotos trukmės ir jei reikia būdavo koreguojamas grizmių išstatymas.

4.3 Plačiajuosčio užkrato stiprinimas OPCPA sistemoje

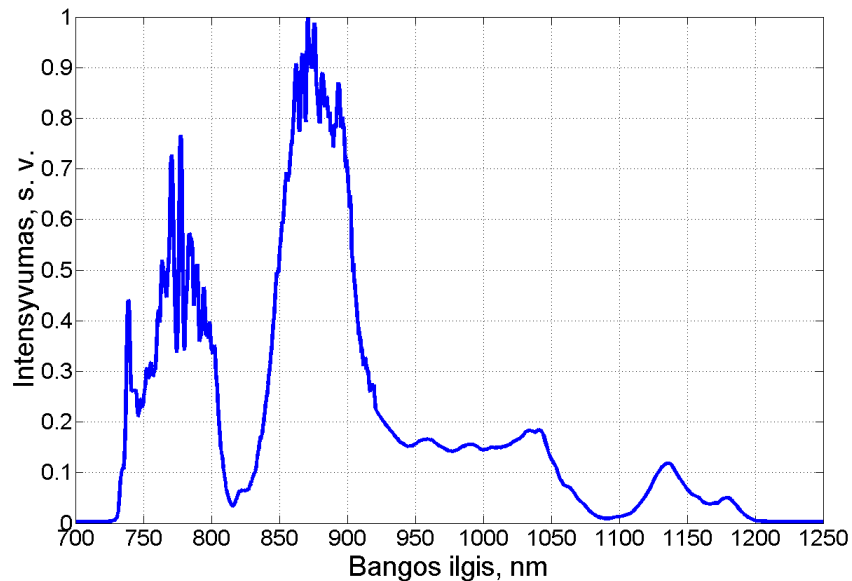
Kitas uždavinys buvo sustiprinti femtosekundinėje dalyje sugeneruotą užkratą OPCPA sistemoje. Kaip jau anksčiau minėta (žr. schemą 10 pav.), signalo stiprinimas OPCPA sistemoje šio darbo metu buvo atliekamas dviejose pakopose. Pirmojoje pakopoje užkratas buvo stiprinamas dviejuose LBO kristaluose. Tokios konfigūracijos pasirinkimą įtakojo tai, kad po impulsų plėstuvo užkrato impulso energija yra labai maža ir siekia maždaug 0,1 - 0,15 μJ . Norint pastiprinti tokį impulsą iki kelių šimtų mikrodžiaulių energijos reikia arba didinti kaupinimo intensyvumą arba ilginti kristalus, kuriuose vyksta parametrinis stiprinimas. Ištyrus, kad užkratą stiprinant 4 - 6 mm ilgio kristaluose su kaupinimo intensyvumu artimu kristalo dangos pažeidimo slenksčiui nebuvo gaunamos reikalingos impulso energijos, buvo nuspręsta naudoti ilgus (10 mm ir ilgesnius) LBO kristalus. Naudojant tokio ilgio kristalus BBO kristalai atkrenta automatiškai, kadangi jų magiškasis neekvivalencijos kampas yra dvigubai didesnis už LBO kristalų magiškąjį kampą, o tai stiprinimo metu, kadangi ir signalo ir kaupinimo pluošto diametras yra apie 1mm, labai sugadina stiprinamo pluošto profilį. Daugiau nei dviejuose kristaluose stiprinti pirmojoje pakopoje neleido fizinės galimybės, kadangi į kiekvieną kristalą reikėtų iš naujo atsivaizduoti kaupinimo profilį su dviejais sferiniais veidrodžiais, kas užimtų daug vietos, kurios šio stiprintuvo optinėje schemoje buvo labai mažai.



16 pav. Sustiprintas signalinės bangos spektras pirmojoje OPCPA stiprinimo pakopoje.

Būtent dėl šių priežasčių buvo nuspręsta pirmojoje pakopoje naudoti du LBO kristalus, pirmasis kristalas buvo 15 mm ilgio, o antrasis - 10 mm. Abiems kristalams buvo naudojamas tas pats 6 mJ energijos kaupinimo pluoštas (kaupinimo intensyvumas apie 9 GW/cm^2), tačiau norint antrame kristale išlaikyti tokį patį plokščią kaupinimo pluošto profilį reikėjo jį papildomai dviejais sferiniais veidrodžiais atvaizduoti į antrąjį kristalą. Pirmajame kristale užkrato impulsas buvo stiprinamas nuo maždaug 0,1 μJ iki 200 μJ energijos. Antrajame kristale signalinis impulsas buvo dar kelis kartus pastiprinamas iki maždaug 650 μJ .

Sustiprinto signalo spektras, po pirmos OPCPA stiprinimo pakopos, yra pavaizduotas 16 pav. Tokio impulso spektru ribota trukmė yra 5,6 fs (arba 2 optiniai ciklai, kai centrinis bangos ilgis yra 850 nm). Abiejuose kristaluose kaupinimo ir signalo pluoštai yra sukirsti apie 1,7 laipsnio nekolinearumo kampą, o kristalų ilgiai yra parinkti siekiant gauti kuo geresnę energinį keitimą bei kuo daugiau energijos ilgabangėje spektro dalyje.



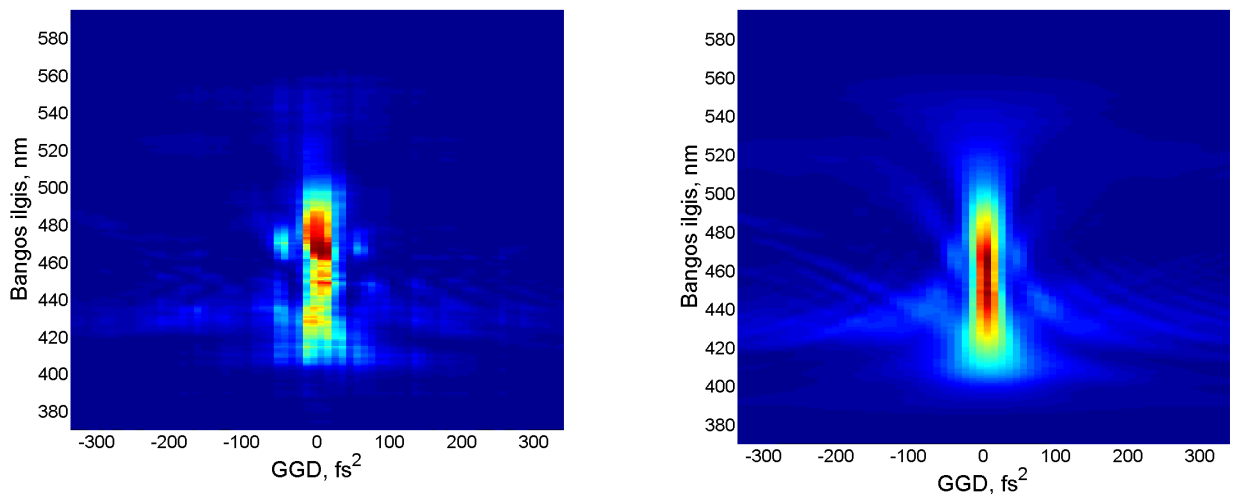
17 pav. Sustiprintas signalinės bangos spektras antrojoje OPCPA stiprinimo pakopoje.

Antrojoje stiprinimo pakopoje signalas buvo stiprinamas dviejuose 6 mm ilgio BBO kristaluose (jie buvo sudėti dvigubamae kristalų laikiklyje, tarp dviejų kristalų buvo maždaug 1 mm tarpelis). Ši konfigūracija buvo pasirinkta dėl to, kad antrojoje stiprinimo pakopoje buvo vietos tik vienam kaupinimo pluošto atvaizdavimui, todėl į vieną laikiklį sudėti du kristalai buvo vienintelis sprendimas. Buvo naudojami BBO kristalai, kadangi naudojant LBO kristalus buvo gautas labai panašus sustiprintas spektras, bet šiek tiek mažiau energijos negu signalą stiprinant su BBO kristalais. Buvo naudojami du kristalai, kadangi nei vien tik su LBO, nei vien tik su BBO kristalu tokio plataus spektro sustiprinti nepavyko. Kadangi pluoštų diametrai šioje pakopoje yra dideli, maždaug 6 mm, tai pirmojoje pakopoje matytas pluošto profilio su-
byrėjimo efektas dėl pluoštų išbėgimo antrojoje pakopoje yra minimalus. Kaupinimo ir signalo

pluoštai buvo sukirsti maždaug 3 laipsnių nekolinearumo kampu ir tai leido stiprinti spektrinį ruožą nuo 730 nm iki maždaug 1200 nm. Nekolinearumo kampas buvo specialiai parinktas toli nuo magiškojo kampo, kad būtų galima abiem kristalams parinkti skirtingus sinchronizmo kampus ir stiprinti skirtingas spektro dalis. Gautas spektras yra pavaizduotas 17 pav. Pirmasis BBO kristalas stiprina užkrato spektro centrinę dalį, o antrasis - abu spektro kraštus. Tokioje kristalų konfiguracijoje pastiprinto signalo energija siekė 7 mJ, kai kaupinimo energija buvo 60 mJ (intensyvumas - 4 GW/cm^2). Šioje pakopoje sustiprinto impulso spektru ribota trukmė - 6,2 fs (arba 2,1 optinio ciklo, kai centrinis bangos ilgis - 860 nm).

4.4 Išplėsto impulso spaudimas

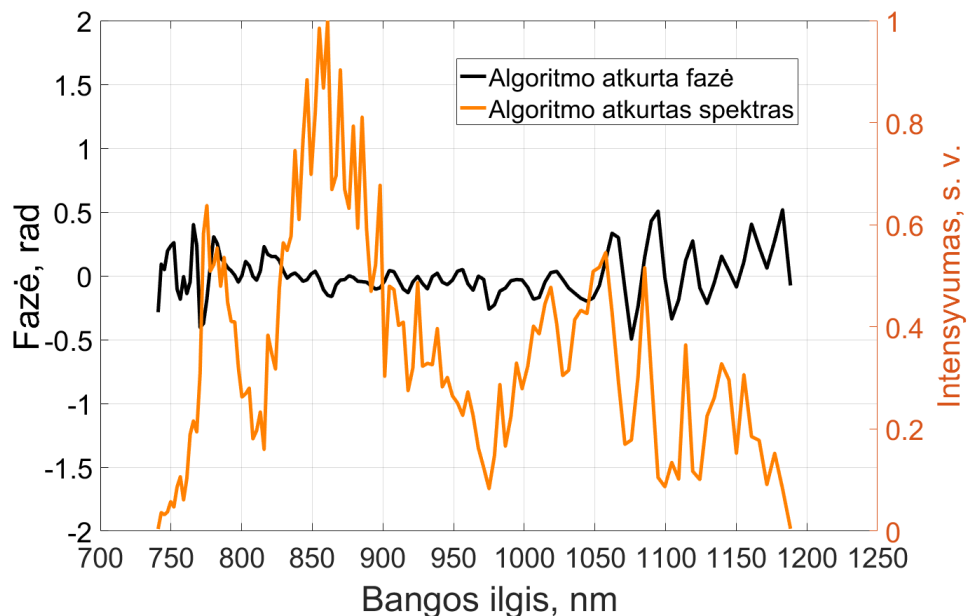
Sustiprintas dviejose OPCPA stiprinimo pakopose signalinis impulsas toliau buvo spaudžiamas spaustuve sudarytame iš stiklo strypų ir čirpuotų veidrodžių. Pats impulso spaudimo procesas yra bandymas akustooptiniu programuojamu dispersiniu filtru sukompensuoti aukštesnės eilės dispersijas apie kurias informaciją suteikia atliekami „Chirpscan“ matavimai. Šių matavimų interpretavimas buvo atliekamas programine įranga parašyta doktoranto Rimanto Budriūno. Toks impulsų spaudimas nėra trivialus, kadangi yra daug rankinio darbo siekiant su AOPDF preciziškai kompensuoti skirtumą tarp impulsų plėstuvo ir spaustuvo įnešamų dispersijų (kartais net iki dešimtos dispersijos eilės). Kadangi tik kai visas „Chirpscan“ metodu išmatuotas pėdsakas yra maždaug tūkstančio kvadratinų femtosekundžių ribose veikia impulso atkūrimo algoritmas. Impulsų spaudimo rezultatai yra pateikti 18 - 20 paveikslėliuose.



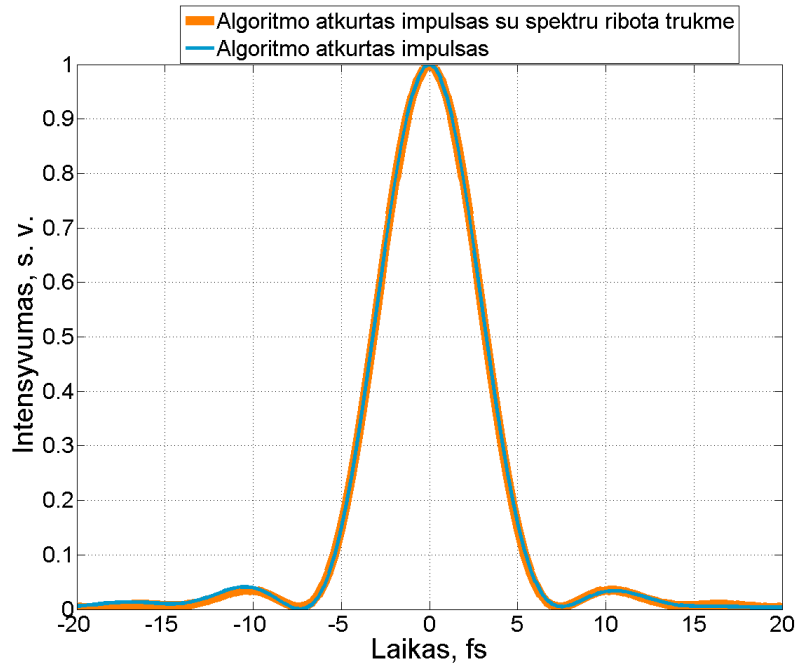
18 pav. „Chirpscan“ metodu eksperimentiškai išmatuotas (kairėje) ir algoritmo atkurtas (dešinėje) dvimatis pėdsakas. Abiejuose paveikslėliuose yra pavaizduota antros harmonikos spektro priklausomybė nuo grupinio vėlinimo dispersijos (GVD)

18 pav. yra pavaizduotas spaudžiamo impulso „Chirpscan“ metodu eksperimentiškai išmatuotas dvimatis pėdsakas, o dešinėje - atkūrimo algoritmo atkurtas dvimatis pėdsakas. Kuo šie du pėdsakai yra panašesni, tuo algoritmas geriau atspėjo eleketrinį lauką sukūriantį tokį pėdsaką ir tuo tiksliau bus atkurti impulso parametrai (trukmė ir spektras).

Algoritmo atkurtas spektras su spektrine faze yra pavaizduotas 19 pav., o 20 pav. yra pavaizduotas palyginimas tarp algoritmo atkurto impulso su atkurta spektrine faze ir tarp algoritmo atkurto impulso, kai ta fazė visam spektrui yra lygi nuliui, t. y. visi spektriniai komponentai yra sufazuoti (toks impulsas dar yra vadinamas spektriškai ribotu). Šių impulsų trukmės pusės aukštyje yra vienodos ir yra lygios 6.4 fs, o tai atitinka 2.2 optinio ciklo (kai centrinis bangos ilgis yra 870 nm). Nors impulsas buvo suspaustas iki jo spektru ribotos trukmės, ši trukmė yra 0,2 fs ilgesnė negu spektru ribota trukmė iškart po antrosios OPCPA stiprinimo pakopos. Toks neatitikimas atsiranda, nes „Chirpscan“ matavimo schemeje, prieš šviesolaidį yra naudojamas filtras fundamentinio dažnio spinduliuotei nufiltruoti. Šio filtro sugerties kraštas tęsiasi iki maždaug 590 nm, todėl labai maža dalis antros harmonikos signalo yra jo dalinai sugeriamas, o tai lemia spektro susiaurėjimą ir mažą impulso trukmės pailgėjimą.



19 pav. Algoritmo atkurtas spektras bei jo fazė



20 pav. Algoritmo atkurto impulso ir spektru riboto impulso palyginimas

Įvertinus, kad impulsų spaustuvas įneša maždaug 12 % nuostolių, tokia impulso spūda leidžia teigti, jog šioje sistemoje (po dviejų OPCPA stiprinimo pakopų) yra generuojami ~ 1 TW (0,96 TW) smailinės galios ir ~ 2 optinių ciklų (2,2 optinių ciklų) impulsai. Šio darbo metu įgytas žinias panaudojus kitoms dviejoms stiprinimo pakopoms suderinti yra planuojama impulso smailinę galią padidinti iki maždaug 6 TW.

5 Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Femtosekundinio nekolinearinio optinio parametrinio stiprintuvo stiprinimo pakopose BBO ir LBO kristalų porų panaudojimas įgalino formuoti $\sim 40 \mu\text{J}$ energijos OPCPA sistemos užkrato impulsus, kurių spektras apima 700 - 1300 nm spektrinį ruožą ir atitinka 1,5 optinio ciklo spektru ribotų impulsų trukmę.
2. Parodyta, kad preciziškai parinkus AOPDF akustinės bangos formą ir grizmių parametrus, užkrato impulsą galima išplėsti iki 60 ps ir jo fazines charakteristikas labai tiksliai priderinti prie spaustuvo dispersijos tokiu būdu realizuojant impulsų spūdą iki spektru ribotos trukmės.
3. Plačiajuosčio užkrato stiprinimas pikosekundinio kaupinimo optiniame parametriniame čirpuotų impulsų stiprintuve, sudarytame iš dviejų daugiakristalinių stiprinimo pakopų, leidžia pasiekti 7 mJ energiją impulse, kurio spektro plotis atitinka 6,2 fs spektru riboto impulso trukmę. Eksperimentiškai pademonstruota sustiprintų impulsų spūda iki 6,4 fs trukmės.
4. Pritaikius daugiakristalines parametrinių stiprintuvų schemas, naudojant BBO ir LBO kristalus, OPCPA sistemos išvade galima generuoti 1 TW smailinės galios dviejų optinių ciklų impulsus.

Literatūros sąrašas

- [1] P. B. Corkum, F. Krausz, Attosecond science, *Nature Physics* **3**, 381 – 387 (2007).
- [2] P. Antoine, A. L’Huillier, M. Lewenstein, Attosecond pulse trains using high-order harmonics, *Phys. Rev. Lett.* **77**(7), 1234–1237 (1996).
- [3] M. Chini, K. Zhao, Z. Chang, The generation, characterization and applications of broadband isolated attosecond pulses, *Nature Photonics* **8**, 178–186 (2014).
- [4] A. Dubietis, G. Jonušauskas, A. Piskarskas, Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in bbo crystal, *Opt. Commun.* **88**, 437–440 (1992).
- [5] S. Witte, R. T. Zinkstok, A. L. Wolf, W. Hogervorst, W. Ubachs, K. S. E. Eikema, A source of 2 terawatt, 2.7 cycle laser pulses based on noncollinear optical parametric chirped pulse amplification, *Opt. Express* **14**(18), 8168–8177 (2006).
- [6] D. Herrmann, L. Veisz, R. Tautz, F. Tavella, K. Schmid, V. Pervak, , F. Krausz, Generation of sub-three-cycle, 16 tw light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification, *Opt. Express* **34**(16), 2459 – 2461 (2009).
- [7] R. Budriūnas, T. Stanislauskas, J. Adamonis, A. Aleknavičius, G. Veitas, D. Gadonas, S. Balickas, A. Michailovas, A. Varanavičius, 53 w average power cep-stabilized opcpa system delivering 5.5 tw few cycle pulses at 1 khz repetition rate, *Opt. Express* **25**(5), 5797 (2017).
- [8] D. Herrmann, C. Homann, R. Tautz, M. Scharrer, P. S. Russell, F. Krausz, L. Veisz, E. Riedle, Approaching the full octave: Noncollinear optical parametric chirped pulse amplification with two-color pumping, *Opt. Express* **18**(18), 18752 (2010).
- [9] D. E. Rivas, A. Borot, D. E. Cardenas, G. Marcus, X. Gu, D. Herrmann, J. Xu, J. Tan, D. Korman, G. Ma, W. Dallari, G. D. Tsakiris, I. B. Földes, S. W. Chou, M. Weidman, B. Bergues, T. Wittmann, H. Schröder, P. Tzallas, D. Charalambidis, O. Razskazovskaya, V. Pervak, F. Krausz, L. Veisz, Next generation driver for attosecond and laser-plasma physics, *Sci. Rep.* **7**, 5224 (2017).
- [10] H. Fattahi, H. G. Barros, M. Gorjan, T. Nubbemeyer, B. Alsaif, C. Y. Teisset, M. Schultze, S. Prinz, M. Haefner, M. Ueffing, A. Alismail, L. Vamos, A. Schwarz, O. Pronin, J. Brons, X. T. Geng, G. Arisholm, M. Ciappina, V. S. Yakolev, D. Kim, A. M. Azzeer, N. Karpowicz, D. Sutter, Z. Major, T. Metzger, F. Krausz, Third-generation femtosecond technology, *Optica* **1**(1), 2334–2536 (2014).

- [11] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics, Third Edition* (Academic Press, JAV, 2008).
- [12] A. Dubietis, *Netiesinė optika* (VU leidykla, Vilnius, 2011).
- [13] C. Homann, *Optical parametric processes to the extreme: From new insights in first principles to tunability over more than 4 octaves* (University of München, Vokietija, 2012).
- [14] Snlo programine iranga, <http://www.as-photonics.com/products/snlo>, paskutinį kartą tikrinta: 2018-05-10.
- [15] A. P. Stabinis, G. Valiulis, *Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika* (VU leidykla, Vilnius, 2008).
- [16] P. Tournois, Acousto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems, *Opt. Express* **16**(19), 245–249 (1997).
- [17] F. Verluise, V. Laude, Z. Cheng, C. Spielmann, P. Tournois, Amplitude and phase control of ultrashort pulses by use of an acousto-optic programmable dispersive filter: pulse compression and shaping, *Opt. Express* **25**(8), 575–577 (2000).
- [18] J. Zheng, H. Zacharias, Design considerations for a compact grism stretcher for non-collinear optical parametric chirped-pulse amplification, *Appl. Phys. B* **96**(2), 445–452 (2009).
- [19] F. Tavella, Y. Nomura, L. Veisz, V. Pervak, A. Marcinkevičius, F. Krausz, Dispersion management for a sub-10-fs, 10 tw optical parametric chirped-pulse amplifier, *Opt. Lett.* **32**(15), 2227–2229 (2007).
- [20] R. Trebino, D. Kane, Using phase retrieval to measure the intensity and phase of ultrashort pulses: frequency-resolved optical gating, *J. Opt. Soc. Am. A* **10**(5), 1101–1111 (1993).
- [21] C. Iaconis, I. A. Walmsley, Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses, *Opt. Lett.* **23**(10), 792–794 (1998).
- [22] V. V. Lozovoy, I. Pastirk, M. Dantus, Ultrashort laser pulse spectral phase characterization and compensation, *Opt. Lett.* **29**(7), 775–777 (2004).
- [23] V. Loriot, G. Gitzinger, N. Forget, Self-referenced characterization of femtosecond laser pulses by chirp scan, *Opt. Express* **21**(21), 24879–24893 (2013).
- [24] M. Miranda, C. L. Arnold, T. Fordell, F. Silva, B. Alonso, R. Weigand, A. L’Huillier, H. Crespo, Characterization of broadband few-cycle laser pulses with the d-scan technique, *Opt. Express* **20**(17), 18732–18743 (2012).

- [25] K. DeLong, R. Trebino, Improved ultrashort pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating, *J. Opt. Soc. Am. A* **11**(9), 2429–2437 (1994).

TERAVATŲ SMAILINĖS GALIOS DVIEJŲ OPTINIŲ CIKLŲ IMPULSŲ FORMAVIMAS
DAUGIAKRISTALINĖSE PARAMETRINIO STIPRINIMO SISTEMOSE

Santrauka

Viena iš sparčiausiai besivystančių ultratrumpų impulsų panaudojimo sričių šiuo metu yra atosekundinio mokslo kryptis, kurioje yra stengiamasi stebėti bei valdyti elektronų judėjimą įvairiose medžiagose. Šiems tyrimams yra reikalingi atosekundinės trukmės impulsai, kuriems gauti yra naudojami kitose lazerinėse sistemose sugeneruoti ultratrumpi, femtosekundinės trukmės, impulsai, kurių smailinė galia siekia teravatus ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Norint su šiais impulsais generuoti pavienius atosekundinius impulsus (o ne jų seką po vienu kaupinimo impulsu) yra būtina, kad femtosekundinio lazerio impulso trukmė būtų kuo trumpesnė, t. y. tik keli optiniai ciklai.

Vienas efektyviausių šiuo metu žinomų ir intensyviai tiriamų metodų generuoti didelės energijos, keletu optinių ciklų šviesos impulsus yra optinis parametrinis čirpuotų impulsų stiprinimas (angl. *optical parametric chirped pulse amplification* - OPCPA). Yra pademonstruota tik keletas lazerinių sistemų paremtų šiuo metodu ir galinčių generuoti impulsus, kurių smailinė galia siektų teravatus, o trukmė būtų bent artima keliems optiniams ciklams. Mano darbo tikslas buvo išplėsti vienos iš šių sistemų parametrinių stiprintuvų stiprinamas spektrines juostas panaudojant daugiakristalines schemas bei juose pastiprintus impulsus naudojant adaptyvines dispersijos valdymo sistemas suspausti iki trukmių artimų spektru ribotoms.

Darbo metu surinkto femtosekundinio nekolineariaus optinio parametrinio stiprintuvo stiprinimo pakopose BBO ir LBO kristalų porų panaudojimas įgalino formuoti $\sim 40 \mu\text{J}$ energijos OPCPA sistemos užkrato impulsus, kurių spektras apima 700 - 1300 nm spektrinį ruožą ir atitinka 1,5 optinio ciklo spektru ribotų impulsų trukmę. Tada, buvo pademonstruota, jog preciziškai parinkus AOPD akustinės bangos formą ir grizmių parametrus, užkrato impulsą galima išplėsti iki 60 ps ir jo fazines charakteristikas labai tiksliai priderinti prie spaustuvo dispersijos. Galiausiai, plačiajuosčio užkrato stiprinimas pikosekundinio kaupinimo optiniame parametriniame čirpuotų impulsų stiprintuve, sudarytame iš dviejų daugiakristalinių stiprinimo pakopų, leido pasiekti 7 mJ energiją impulse, kurio spektro plotis atitinka 6,2 fs spektru riboto impulso trukmę. Eksperimentiškai buvo pademonstruota sustiprintų impulsų spūda iki 6,4 fs trukmės.

Apibendrinus, šio darbo metu pritaikius daugiakristalines parametrinių stiprintuvų schemas, naudojant BBO ir LBO kristalus, OPCPA sistemos išvade buvo gauta 1 TW smailinės galios dviejų optinių ciklų impulsai.

Ignas Balčiūnas

GENERATION OF FEW-CYCLE AND TERAWATT PEAK POWER PULSES USING MULTICRYSTAL OPTICAL PARAMETRIC AMPLIFIERS

Summary

Attosecond science is one of the fastest developing fields in the ultrafast laser physics. This field focuses on the observing and controlling electronic movement in various substances. Flashes of light of attosecond duration have to be used in these experiments. To generate attosecond pulses, pulses of femtosecond duration and peak power of several terawatts are needed. Moreover, in order to generate isolated attosecond pulses, duration of these femtosecond pulses have to be several optical cycles.

One of the most effective way to generate terawatt peak power and few cycle pulses is optical parametric chirped pulse amplification. There are demonstrated only a few laser systems capable of generating terawatt peak power and close to several optical cycles pulses. The aim of this work was to broaden the amplification bandwidth of one of those systems using multicrystal amplification schemes to generate few cycle pulses.

During this work femtosecond noncollinear amplifier using BBO and LBO crystals as an amplification medium in its amplification stages was constructed. Generation of $\sim 40 \mu\text{J}$ energy pulses 700 - 1300 nm spectral bandwidth was demonstrated. Later this seed pulse was broadened to 60 ps and amplified in the optical parametric chirped pulse amplifier. In this amplifier several multicrystal amplification stages were used. Generation of 7 mJ energy and 6,2 fs bandwidth limited pulses was demonstrated in this amplifier. However, experimentally these pulses were compressed to 6,4 fs duration.

In conclusion, during this work multicrystal amplification schemes were adapted to the optical parametric chirped pulse amplifier. This led to the generation of 1 TW peak power two optical cycles pulses.

Balčiūnas, Ignas. *Teravatų smailinės galios dviejų optinių ciklų impulsų formavimas daugiakristalinėse parametrinio stiprinimo sistemose*: Lazerinės fizikos ir optinių technologijų magistro studijų baigiamasis darbas. Vad. dr. Arūnas Varanavičius. Vilnius: Vilniaus universitetas Fizikos fakultetas, 2018, 35 p.

Darbe yra bandoma pritaikyti daugiakristalines parametrinių stiprintuvų schemas, naudojant BBO ir LBO kristalus, OPCPA sistemoje gauti teravatinės smailinės galios kelių optinių ciklų impulsus. Pademonstruota plačiajuosčio užkrato generacija, jo plėtimasis laike, stiprinimas optiniame parametriniame stiprintuve ir spūda. Buvo gauti 1 TW smailinės galios dviejų optinių ciklų impulsai.