

VILNIAUS UNIVERSITETO
FIZIKOS FAKULTETO
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Karolis Lasickas

YB:KGW LAZERIU KAUPINAMO DERINAMO BANGOS ILGIO REGIMOJO DIAPAZONO
ULTRATRUMPŲJŲ ŠVIESOS IMPULSŲ ŠALTINIO TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – LAZERINĖ TECHNOLOGIJA)

Studentas	Karolis Lasickas
Darbo vadovas	dr. Rimantas Grigonis
Konsultantas	dokt. Rimantas Budriūnas
Recenzentas	dr. Rytis Butkus
Lazerinių tyrimų centro direktorius	doc. dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

Turinys

1. Įvadas	3
2. Teorijos apžvalga	4
2.1 Baltos šviesos kontinuumo generacija.....	4
2.2 Antrosios harmonikos generacija	5
2.3 Suminio dažnio generavimas ir parametrinis stiprinimas.....	6
2.4 Optinių medžiagų netiesinė sugertis.....	7
2.5 Impulsų spaustuvas.....	8
2.6 Literatūros apžvalga	9
3. Ultratrumpųjų šviesos impulsų tolydus derinimas regimajame diapazone	13
3.1 Bendroji eksperimento schema.....	13
3.2 Dviejų šakų optinis parametrinis stiprintuvas	13
3.3 Suminio dažnio generavimas.....	18
3.4 Impulsų spūda	22
3.5 Suminio dažnio antros harmonikos generacija.....	25
3.6 Rezultatų palyginimas	27
4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	29
5. Literatūros sąrašas	30
Santrauka.....	32
Summary	33

1. Įvadas

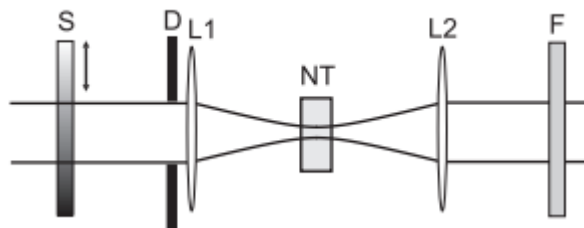
Įvairūs cheminiai ir biologiniai procesai gali būti tyrinėjami žadinimo - zondavimo spektroskopijos būdu. Naudojant ultrasparčių lazerių impulsus, tiriami tokie procesai kaip krūvių pernaša molekulėse. Daugelio chemijoje ir biologijoje svarbių medžiagų elektroninės sugerties juostos yra regimajame arba artimajame UV diapazone, todėl siekiant tirti šiose medžiagose vykstančius procesus reikalinga šio diapazono spinduliuotė [1]. Idealiu atveju spinduliuotės bangos ilgis turi būti derinamas. Tam yra naudojami optiniai parametriniai stiprintuvai. Laikinė skyra žadinimo-zondavimo spektroskopijos matavimuose priklauso nuo eksperimente naudojamų šviesos impulsų, todėl yra naudojami ultratrumpieji impulsai [2]. Kai naudojamas Yb:KGW lazeris, vienas iš plačiai taikomų metodų itin trumpiems impulsams regimojoje srityje generuoti yra nekolineariai trečia harmonika kaupinamas optinis parametrinis stiprintuvas, generuojantis trumpesnius nei 30 fs trukmės impulsus bangos ilgių srityje nuo 480 iki 980 nm [3]. Šios sistemos problema, kad norint pasiekti deklaruojamą derinimo diapazoną, kaupinimui naudojama 343 nm ultravioletinė spinduliuotė. Todėl sistema yra jautresnė aplinkos sąlygų pokyčiams, nes UV diapazonui pritaikyta optika yra jautri drėgmei, vyksta dvifotonė sugertis, greitesnis optinių elementų degradavimas, nulemiantis sistemos efektyvumo pokyčius [4]. Vengiant UV kaupinimo, dalį regimosios srities būtų galima padengti kitomis parametrinio stiprinimo ir harmonikų generacijos kombinacijomis, tačiau jos pasižymi įvairiais efektyvumo arba spektro pločio ribojimais, dažniausiai susijusiais su kontinuumo, naudojamo kaip pradinio šių sistemų užkrato, moduliacija aplink kaupinimo bangos ilgį.

Nekolineariai trečia harmonika kaupinimo optinio parametrinio stiprintuvo stabilus ir ilgalaikio veikimo problemos bei santykinai mažas efektyvumas buvo motyvacija atlikti šį eksperimentą. Šio darbo tikslas - suminio dažnio generavimo būdu gauti regimosios srities impulsus, kurių spektrai leistų impulsus suspausti iki ~30fs ar trumpesnių trukmių. Norint tai įgyvendinti buvo sukonstruotas dviejų atšakų optinis parametrinis stiprintuvas, vienu metu generuojantis derinamo ir fiksuoto bangos ilgio spinduliuotę, kuri naudota suminio dažnio generavimui.

2. Teorijos apžvalga

2.1 Baltos šviesos kontinuumo generacija

Baltos šviesos kontinuumas (superkontinuumas) yra itin plataus spektro spinduliuotė tiek laike tiek ir erdvėje, kuri sklinda šviesos pluošto pavidalu, priešingai nei Saulės ar šviestukų šviesa [5]. Pirmą kartą šis superkontinuumo generavimas buvo stebėtas 1970, mokslininkų Alfano ir Shapiro [6]. Tai yra reiškinys, kurio metu naudojant trumpą šviesos impulsą ir aštriai jį fokusuojant į netiesinę terpę, impulso spektro plotas išplinta per visą regimąjį diapazoną, kai kuriais atvejais apimdamas ir dalį ultravioletinės bei infraraudonosios spektro srities. Superkontinuumo generavimo metu pasireiškia skirtingi netiesinės optikos procesai vienu metu, tokie kaip keturbangis dažnių maišymas, priverstinė Ramano sklaida, impulso fazės moduliavimas, laikinis impulsų skilimas ir kiti. Pats spektro plitimas lyginant su žadinančiąja spinduliuote vyksta pastebimai plačiau į ultravioletinės spinduliuotės pusę nei į infraraudonosios.



1 pav. Superkontinuumo generavimo schema. *S*-slopintuvas, *D*-diafragma, *L1* ir *L2*-lęšių pora, *NT*-netiesinė terpė, *F*-filtras [5]

Superkontinuumo generavimas regimojoje spektro srityje yra realizuojamas medžiagose, turinčiose aukštą optinio pažeidimo slenkstį. Optiniuose parametriniuose stiprintuvuose naudojamos safyro (Al_2O_3) arba itrio aliuminio granato (YAG) netiesinės terpės [7]. 1 pav. matoma standartinė superkontinuumo generavimo schema. Turimas šviesos pluoštas yra stipriai fokusuojamas netiesinėje terpėje naudojant *L1* lęšį. Baltos šviesos kontinuumo generacijai femtosekundiniais impulsais pakanka mažų energijos verčių ($\sim 0.9 \mu\text{J}$ safyro netiesinėje terpėje ir $\sim 0.4 \mu\text{J}$ YAG kristale [7]). Praktikoje šios vertės gaunamos reguliuojant šviesos impulso energiją prieš netiesinę terpę su slopintuvu – kintamos pralaidumo vertės filtru, arba $\lambda/2$ plokštelės ir poliarizatorių pora. Tinkamos energijos vertės šviesos pluoštas fokusuojamas netiesinėje terpėje, o optimizuojamas keičiant energijos vertes bei lęšio poziciją. Susigeneravęs baltos šviesos kontinuumas kolimuojamas *L2* lęšiu. Superkontinuumo pluoštas sklinda pro *F* filtrą, kuris skirtas sumažinti fundamentinės spinduliuotės dalį superkontinuumo spektre. Vietoje jo gali būti naudojamas stiklas, dengtas didelio atspindžio

fundamentinės spinduliuotės danga (HR). Keičiant sugeneruotos spinduliuotės kritimo ant šio veidrodžio kampą, nukerpama spektro dalis, artima fundamentinei spinduliuotei.

2.2 Antrosios harmonikos generacija

Žiūrint iš istorinės pusės, tai yra pirmasis eksperimentiškai įgyvendintas netiesinės optikos reiškinys, atliktas P. Franken, A.E. Hill, C. W. Peters ir G. Weinreich Mičigano universitete 1961 metais [8]. Jos atsiradimą galima paaiškinti iš perturbacinio artinio, kai šviesos elektrinis laukas yra stiprus, tačiau jo nulemtas netiesinis poliarizuotumas yra mažas [9]. Tada poliarizuotumą išskleidžiame elektrinio lauko stiprio laipsnių eilute [5]:

$$P(t) = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E(t) + \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3(t) + \dots \quad (1)$$

Poliarizuotumą galima išreikšti į tiesinę ir netiesinę dalis:

$$P(t) = P^{(1)}(t) + P^{(2)}(t) + P^{(3)}(t) + \dots = P_T + P_{NT} \quad (2)$$

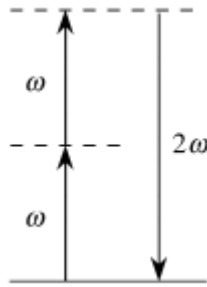
Iš 1 ir 2 formulių narys $P^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t)$ yra antros eilės netiesinis poliarizuotumas, dar kitaip vadinamas kvadratinio netiesinio poliarizuotumu, o $\chi^{(2)}$ antrosios eilės netiesinis optinis jautris. Netiesiniai reiškiniai egzistuoja, kai netiesinis poliarizuotumo priedas yra realus, todėl elektrinio lauko stiprio vertė turi būti didelė. Jei antrosios eilės netiesinis optinis jautris nėra nulinis, tada į netiesinę optinę terpę kritusios spinduliuotės elektrinis laukas bus:

$$E(t) = E e^{-i\omega t} + k.j. \quad (3)$$

Čia ω yra kritusiuos spinduliuotės dažnis, kuris netiesinėje terpėje sukurs netiesinį poliarizuotumą:

$$P^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) = 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} E E^* + (\varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2 e^{-2i\omega t} + k.j.) \quad (4)$$

Naujas dvigubo dažnio netiesinio poliarizuotumo narys lemia dvigubo dažnio spinduliuotės atsiradimą - generuojama antra harmonika [10].



2 pav. Energijos lygmenų diagrama apibūdinanti antros harmonikos generaciją

Antros harmonikos generavimo metu du vienodo dažnio fotonai netiesinėje terpėje sukuria vieną dvigubo dažnio fotoną, kuris turi dvigubai didesnę vieno fotono energiją [11]. Schematiškai tai pavaizduota 2 pav. – du dažnio ω fotonai yra sugeriami į virtualų energijos lygmenį, o tada išspinduliuojamas dažnio 2ω fotonas.

Kad pavyktų suminio dažnio generavimą įgyvendinti praktiškai, reikia tenkinti fazinio sinchronizmo sąlygas. Jas galime išreikšti iš bangų nedarnos vektoriaus, prilyginę jį nuliui:

$$\Delta k = k_2 - 2k_1 = 0 \quad (5)$$

Čia $2k_1$ yra 2ω dažnio netiesinės poliarizacijos bangos vektorius, dar kitaip vadinamas priverstiniu vektoriumi, o k_2 yra antrosios harmonikos dažniui 2ω savasis medžiagos bangos vektorius, kuris nurodo, kokių faziniu greičiu medžiagoje sklinda antros harmonikos banga [12]. Kadangi bangos vektorius yra lūžio rodiklio ir bangos dažnio santykis su šviesos greičiu, fazinio sinchronizmo išraišką galime pakeisti į tokią:

$$n(\omega_2) = n(2\omega_1) \quad (6)$$

Normalių dispersijų medžiagose ši lygybė neturi prasmės, todėl norint ją įgyvendinti naudojamos anizotropinės terpės, kuriose egzistuoja dvi skirtingos sklidimo bangos – *o* (ordinary) ir *e* (extraordinary) [13], kurios priklauso nuo sklidimo krypties anizotropinėje terpėje.

2.3 Suminio dažnio generavimas ir parametrinis stiprinimas

Suminio dažnio generavimo metu sukuriamą naują bangą, kurios dažnis didesnis už sumuojamų bangų. Norint turėti optimalią suminio dažnio generaciją, reikia optimizuoti kaupinimo bangų fotonų srautų tankį, nes du kaupinimo bangų fotonai sugeneruos vieną suminio dažnio fotoną. Fazinio sinchronizmo sąlyga tribangėje sąveikoje galime išreikšti taip:

$$\Delta \vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 = 0, \quad (7)$$

Paprastumo dėlei sakykime, kad bangų sklidimas yra kolinearus [14], tada išraiška supaprastėja:

$$k_1 + k_2 = k_3 \quad (8)$$

Analogiškai lygtis atrodo ir bangų dažnių atžvilgiu [15]:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 \quad (9)$$

Suminio dažnio generavimo procesas yra labai panašus į antros harmonikos generavimą, tik šiuo atveju su skirtingo dažnio kaupinimo fotonai sukuria vieną suminio dažnio fotoną.

Parametrinio stiprinimo metu anizotropiniame kristale sąveikauja su skirtingų dažnių impulsai. Didesnio dažnio spinduliuotė vadinama kaupinimo (Pump) ir žymima ω_p , o mažesnio dažnio vadinama signaline (Signal) ir žymima ω_s . Jeigu tenkinamos fazinio sinchronizmo sąlygos, tai stiprinimo metu kaupinimo fotonai stiprins signalinės bangos fotonus ir sudarys skirtuminio dažnio (Idler) spinduliuotę, kurios dažnis žymimas ω_i . Matematiškai skirtuminio dažnio spinduliuotę galime išreikšti lygtimi [16]:

$$\omega_I = \omega_P - \omega_S \quad (10)$$

Tai yra netiesinės optikos reiškinys, įgyvendinamas optiniuose parametriniuose stiprintuvuose. Skirtuminės bangos generavimas juose leidžia derinimo sritį išplėsti į infraraudonųjų bangų pusę.

2.4 Optinių medžiagų netiesinė sugertis

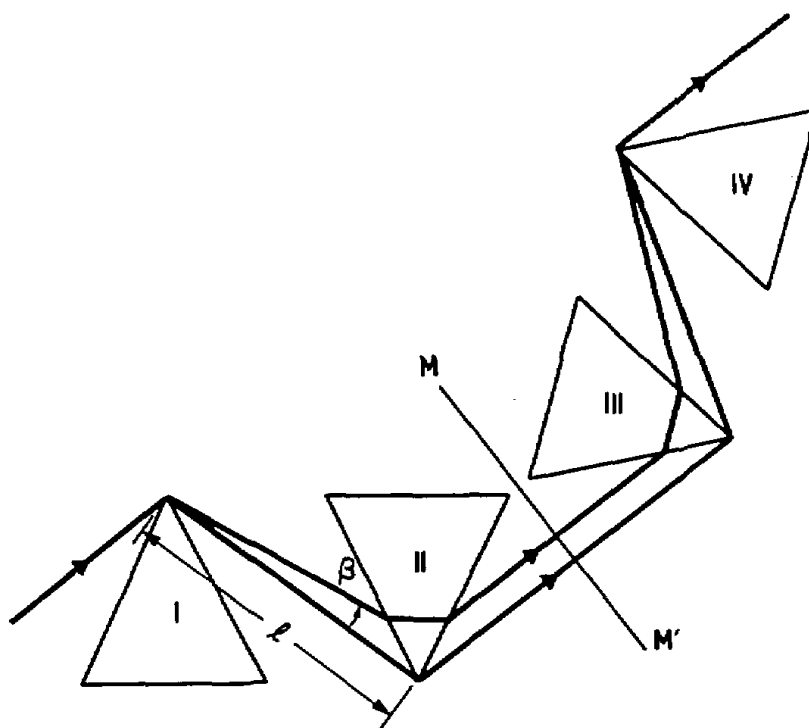
Visos skaidrios medžiagos pasižymi netiesine sugertimi. Tai reiškia, kad jų optinis pralaidumas priklauso nuo ta medžiaga sklindančios spinduliuotės intensyvumo. Plačiau aptarsime neparimetrinį procesą – dvifotonę sugertį. Ji pasireiškia, kai medžiaga sugeria du fotonus, kurie gali būti to paties arba skirtingo dažnio. Ši sugertis vyksta virtualiuose lygmenyse, pasižyminčiuose trumpa gyvavimo trukme, todėl dvifotonės sugerties tikimybė didėja, kai yra didelis spinduliuotės intensyvumas. Norint įvertinti medžiagos sugertį ją galima apskaičiuoti iš į medžiagą kritusios ir pro ją praėjusios energijos. Kadangi didesnio dažnio spinduliuotė pasižymi didesne vieno fotono energija, tai dvifotonės sugerties reiškinys labiausiai pasireiškia trumpesnių bangos ilgių srityje.

Naudojant ultratrumpųjų impulsų spinduliuotę, pasižyminčią dideliu intensyvumu, medžiagoje vyksta dvifotonė sugertis ir dalis joje esančių elektronų gali būti sužadinti iš valentinės juostos į laidumo. Jei sužadinti elektronai toliau sugers fotonų energiją, jie gali tapti pakankamai energingi, kad susidūrimo metu galėtų sužadinti papildomus elektronus. Toliau egzistuojant išorinei

spinduliuotei ir medžiagoje vykstant fotonų sugerčiai, gali prasidėti griūtinė jonizacija ir medžiagos struktūra negrįžtamai pakeičiama – įvyksta optinis pažeidimas. Šis procesas priklauso ir nuo spinduliuotės intensyvumo ir jos tipo – kaip minėta anksčiau, didėjant bangų dažniui, didėja ir vieno fotono energija, todėl sugėrus tokį fotoną pažeidimo tikimybė yra didesnė, lyginant su ilgesnių bangos ilgių spinduliuote [17]. Dėl šios priežasties sistemose, kuriose generuojama ultravioletinė spinduliuotė, naudojami optiniai elementai, pasižymintys skaidrumu didelio dažnio spinduliuotei, siekiant išvengti optikos pažeidimų. Stiprinant spinduliuotę su UV kaupinimu BBO kristale jame vyksta dvifotonė sugertis. Jei sistema veikia dideliu pasikartojimo dažniu, kristale susikaupia didelis šilumos kiekis, krinta stiprinimo efektyvumo vertė, o pats kristalas gali skilti.

2.5 Impulsų spaustuvas

Plataus spektro ultratrumpiesiems impulsams sklindant dispersine terpe, impulsas ilgėja. Norint jo trukmę sumažinti, reikia kompensuoti teigiamą grupinio vėlinimo dispersiją. Vienas iš būdų yra naudoti impulsų spaustuvą, sudarytą iš prizmių porų [18], kuris sukurtų neigiamą grupinio vėlinimo dispersiją (GVD). 3 pav. Keturių prizmių impulsų spaustuvas. Paimtas iš [18] parodyta tokio spaustuvo schema, sudaryta iš keturių identiškų prizmių.



3 pav. Keturių prizmių impulsų spaustuvas. Paimtas iš [18]

Ašis MM' yra šios schemos simetrijos ašis. Simbolis l žymi atstumą tarp pirmos ir antros prizmių viršūnių. β yra kampas tarp tiesės, jungiančios I ir II prizmių viršūnes bei spindulio, sklindančio nuo pirmos prizmės iki antrosios. Grupinio vėlinimo dispersijos formulė:

$$GDD(\omega) = -2 \frac{l_0}{c} \left[\left(2 \frac{d\beta}{d\omega} + \omega \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right) \sin(\beta) + \omega \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^2 \cos(\beta) \right] \quad (11)$$

Jei kampą $\beta(\omega_0)=0$, tai grupinio vėlinimo formulė supaprastėja:

$$GDD(\omega_0) = -2 \frac{l_0 \omega_0}{c} \left(\frac{d\beta}{d\omega} \Big|_{\omega_0} \right)^2 \quad (12)$$

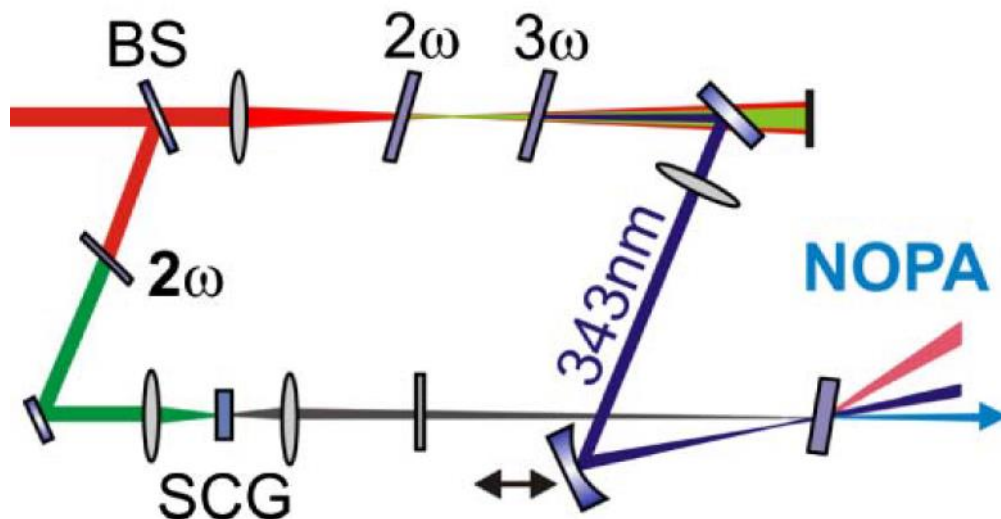
Šiuo atveju matoma, kad grupinio vėlinimo dispersija prizmių poroje yra neigiama ir priklauso tik nuo atstumo tarp abiejų prizmių ir kampinės dispersijos tarp jų.

Į pluoštą įkišamos antrosios prizmės kiekis prideda teigiamos dispersijos, todėl derinant impulsų spaustuvą reikia rasti optimalų atstumą tarp dviejų prizmių, kad antrosios prizmės įnešamas dispersijos kiekis bei atstumo tarp prizmių sukuriamas neigiamos dispersijos kiekis galėtų kompensuoti impulso čirpą. Taip pat vietoj 4 prizmių galima naudoti dvi prizmes. Už antrosios prizmės pastačius du statmenus veidrodžius, pro abi prizmes praėjusi spinduliuotė grįžtant keliaus pro tas pačias prizmes tokiais pačiais optiniais keliais, tik paslinktais į šoną erdvėje.

2.6 Literatūros apžvalga

Ultratrumpųjų impulsų regimojoje srityje poreikis nuolatos auga. Šie nekolineariuose optiniuose parametriniuose stiprintuvuose sugeneruoti impulsai dažniausiai naudojami ultragreitosis spektroskopijos taikymuose itin trumpoje laiko skalėje [19]. Femtosekundinė žadinimo – zondavimo spektroskopija yra pagrindinis būdas tirti elektronines ir vibracines tendencijas atominėse ar molekulinėse struktūrose. Fotofizinės ir fotocheminės relaksacijos procesai dažnai reikalauja didelės laikinės skyros, kurią pasiekti galima naudojant ultratrumpuosius impulsus žadinimui bei zondavimui. Taip pat spektroskopijoje aktualus parametras yra spinduliuotės fotonų energija, todėl impulsai turi būti derinamo bangos ilgio [20].

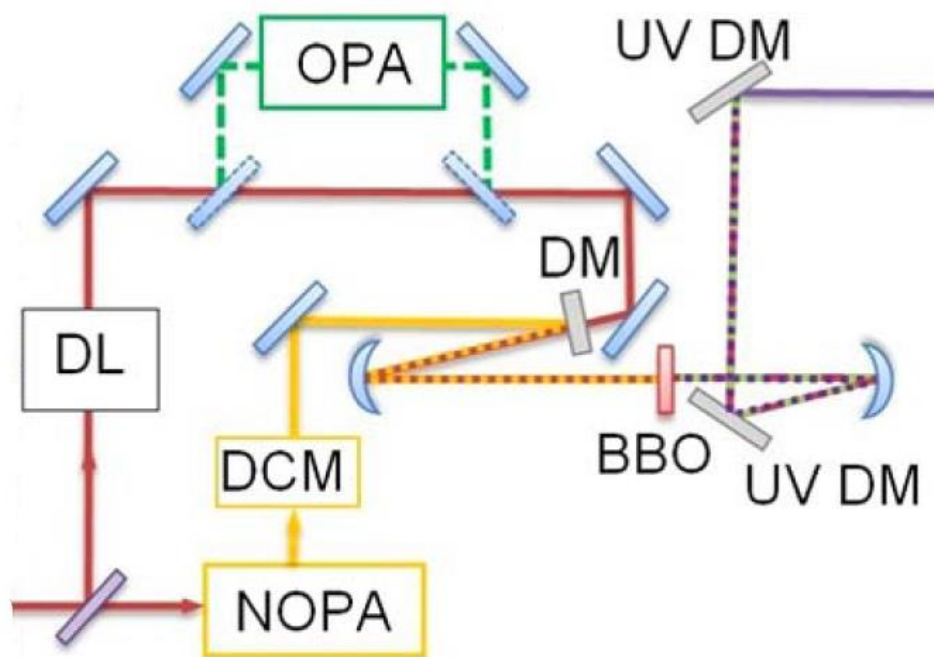
Viename iš literatūroje aprašytų eksperimentų [21], nekolinearus optinis parametrinis stiprintuvas buvo kaupinamas 1030 nm spinduliuotės antra ir trečia harmonika. Lazerio spinduliuotė buvo 300 fs trukmės, impulso energija 20 μ J, o pasikartojimo dažnis 1 MHz. Principinė šio eksperimento schema pavaizduota 4 pav.



4 pav. Nekolinarus optinio parametrinio stiprintuvo chema. Paimta iš [21]

Pluošto dalikliu iš buvo atsuktas $\sim 3 \mu\text{J}$ impulsas superkontinuumo generavimui, kuris vyko 4 mm storio YAG kristale. Likusi spinduliuotė, iš kurios generuojamos aukštesnės harmonikos, fokusuojama 250 mm židinio lęšiu. Antros harmonikos generavimo kristalas patalpintas prieš pluošto fokuso vietą, o trečios harmonikos generavimo kristalas už jos. Sugeneruota trečia arba antra harmonika iš bendro pluošto išskiriama pritaikytais dichroiniais veidrodžiais. Superkontinuumas buvo stiprinimas 3 mm storio BBO kristale. Pirmiausiai kaupinimui naudojama buvo antros harmonikos spinduliuotė. Trumpiausias pasiektas pastiprintas bangos ilgis 620 nm. Susidariusios skirtingos bangos ilgis virš 3 μm . Trumpesnės bangos ilgio impulsų generacija šiuo būdu buvo negalima, nes skirtinga banga tolsta į IR sritį, o BBO kristalas joje tampa nebe skaidrus, o sugeriantis. Vietoj antros harmonikos kaupinimo naudojant trečios harmonikos kaupinimą, buvo pademonstruoti bangos ilgiai, derinami nuo 500 nm. Šiuo atveju derinimo srities diapazonas buvo apribotas baltos šviesos kontinuumo. Literatūroje aprašyto eksperimento metu buvo pakeistos superkontinuumo generavimo sąlygos, norint gauti impulsus, artimesnius UV sričiai. Iš $\sim 3 \mu\text{J}$ fundamentinės spinduliuotės 0,7 mm storio BBO kristale buvo sugeneruota 0,7 μJ antros harmonikos spinduliuotės, kuri fokusuojama į YAG kristalą. Sugeneruotas superkontinuumas artimesnis UV sričiai. Stiprinant jį trečios harmonikos spinduliuote, pasiektas derinimo režis nuo 395 iki 640 nm. Maksimali sugeneruotų impulsų energija viršijo 1 μJ , o visame derinimo diapazone buvo ne mažesnė nei 0,5 μJ . Norint gauti trumpiausius impulsų trukmes, superkontinuumo ir kaupinimo spinduliuotės nekolinarumo kampas buvo keičiamas skirtingiems bangos ilgiams, optimizuojant fazinį derinimą. Impulsai buvo spaudžiami dviejų lydyto kvarco prizmių impulsų spaustuve. Diapazone nuo 440 iki 640 nm, jų trukmės buvo mažesnės nei 20 fs.

Kito literatūroje aprašyto eksperimento metu ultratrumpieji impulsai, artimi UV sričiai, buvo generuojami suminio dažnio būdu [22]. Kaupinimui buvo naudojamas Ti:safyro lazeris, veikiantis 1 kHz pasikartojimo dažniu. Impulsų trukmė 100 fs, o centrinis bangos ilgis 800 nm. Principinė šio darbo schema pavaizduota 5 pav. Dalis fundamentinės spinduliuotės buvo atskelta ir naudota kaupinti nekolinearų optinį parametrinį stiprintuvą antrą harmoniką. Sugeneruoti plataus spektro impulsai 525 – 740 nm derinimo diapazone, kurių energija viršija 10 μJ ribą. Čirpuotais veidrodžiais buvo pakeista nekolineariame optiniame stiprintuve sugeneruotų impulsų dispersijos vertė, jie tapo neigiamai čirpuoti. Šia impulsai maišomi 50 μm storio BBO kristale su siauro spektro fundamentine spinduliuote arba optinio parametrinio stiprintuvo spinduliuote, kuri derinama nuo 650 iki 1050 nm. Sugeneruotų suminio dažnio impulsų bangos ilgiai derinami nuo 315 iki 380 nm, o energijos vertė siekia iki 1,5 μJ . Mažiausia impulso trukmė buvo 8,4 fs. Kadangi sugeneruoti suminio dažnio impulsai buvo neigiamai čirpuoti, galutinę jų spūdą pavyko realizuoti tiesiog leidžiant impulsams sklįsti per 400 μm storio lydyto kvarco plokštelę, kuri pasižymėjo teigiama dispersija.



5 pav. Principinė impulsų UV srityje generavimo schema, naudojant suminio dažnio generavimą. DL – vėlinimo linija, DM – dichroiniai veidrodžiai, OPA – optinis parametrinis stiprintuvas, NOPA – nekolinearus optinis parametrinis stiprintuvas, DCM – dvigubo čirpo veidrodžiai. Paimta iš [22]

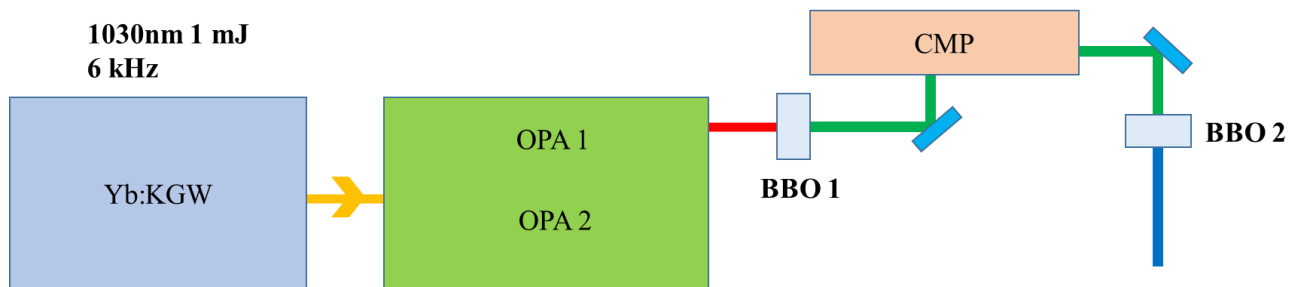
Nekolineari sąveika optiniuose parametriniuose stiprintuvuose leidžia generuoti plataus spektro impulsus, suspaudžiamus iki ultratrumpųjų trukmių, tačiau pastebimi ir tokios sąveikos trūkumai, atsirandantys dėl nesuderintų impulsų frontų [23]. Nesuderinti signalinio ir kaupinimo impulsų frontai pasireiškia erdvėje nehomogenišku išvadinių impulsų spektru, o tai gali trukdyti suspausti impulsus iki spektru ribotos trukmės, be to, esant nesuderintiems signalo ir kaupinimo impulsų

frontams, krenta stiprinimo efektyvumas. Šių problemų mastas didėja proporcingai pluoštų skersiniams matmenims ir atvirkščiai proporcingai impulsų trukmėms, todėl gali tapti ribojančiu faktoriumi parametriniuose stiprintuvuose, kaupinamuose femtosekundiniais šimtų μJ ir didesnės energijos impulsais.

3. Ultratrumpųjų šviesos impulsų tolydus derinimas regimajame diapazone

3.1 Bendroji eksperimento schema

Bendroji eksperimente naudotų prietaisų schema pavaizduota 6 pav. Ultratrumpųjų impulsų šaltinis Yb:KGW lazeris. Jo centrinis bangos - ilgis 1030 nm, impulso energija – 1 mJ, o pasikartojimo dažnis – 6 kHz. Su šiais parametrais lazerio impulsų trukmė 163 fs. Juo kaupinamas dvigubas optinis parametrinis stiprintuvas, generuojantis du skirtingų dažnių impulsus. Pirmoje šakoje generuojamas kintamo dažnio impulsas, o antroje-fiksuoto dažnio ir plataus spektro impulsas, kurio centrinis bangos ilgis 1460 nm. Jų spinduliai kolineariniu būdu sukertami 0.6mm storio BBO kristale, skirtame generuoti suminio dažnio spinduliuotę. Sugeneruota spinduliuotė suspaudžiama dviejų prizmių impulsų spaustuve. Po jo papildomai generuojama suminio dažnio antra harmonika 0.1mm storio BBO kristale.

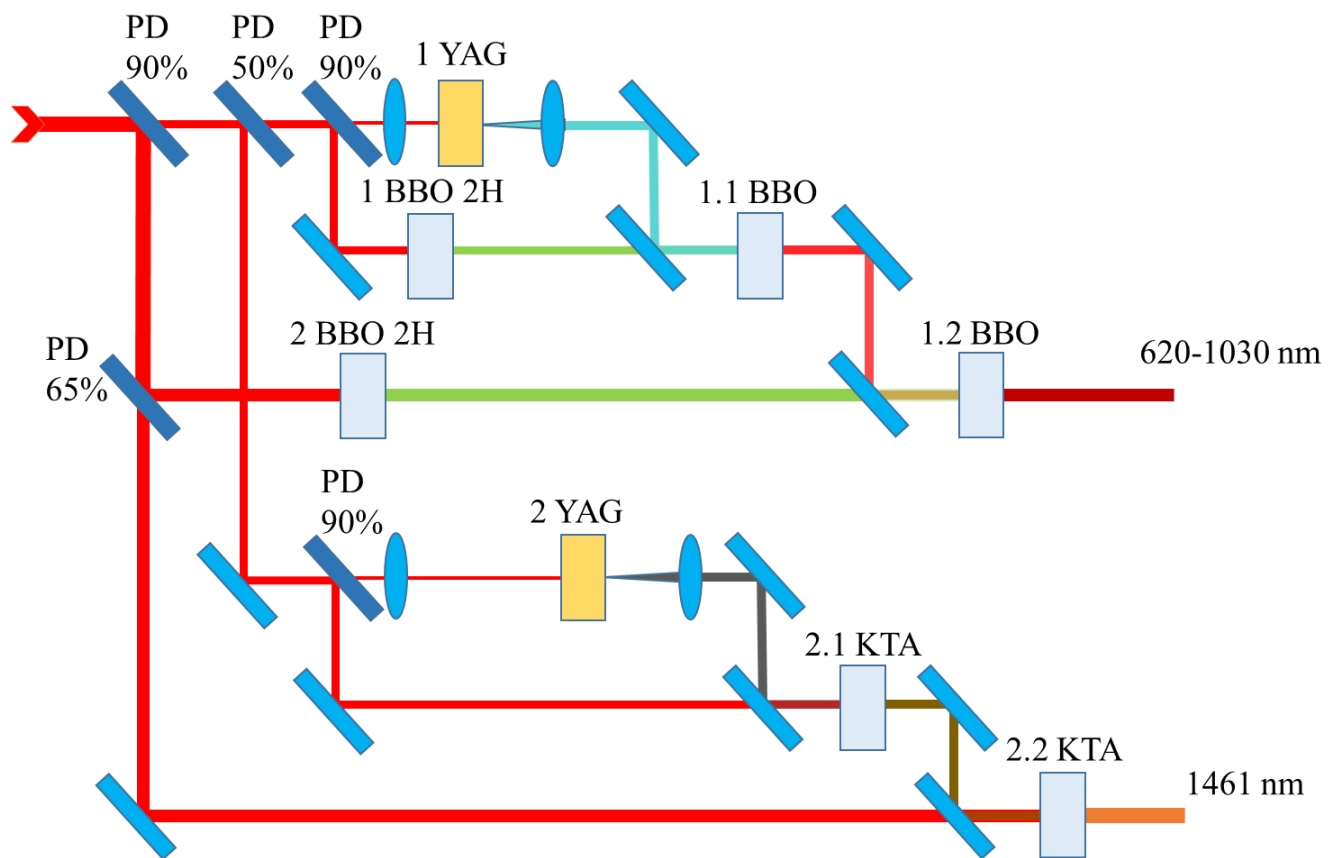


6 pav. Bendroji eksperimento schema. Yb:KGW-ultratrumpųjų impulsų šaltinis; OPA 1 ir OPA 2 – atitinkamai derinamo dažnių diapazono ir fiksuoto ties vienu bangos ilgiu optiniai parametriniai stiprintuvai; BBO 1 – suminio dažnio generavimui naudotas kristalas; CMP – dviejų prizmių impulsų spaustuvas; BBO 2 – antros harmonikos generavimo kristalas

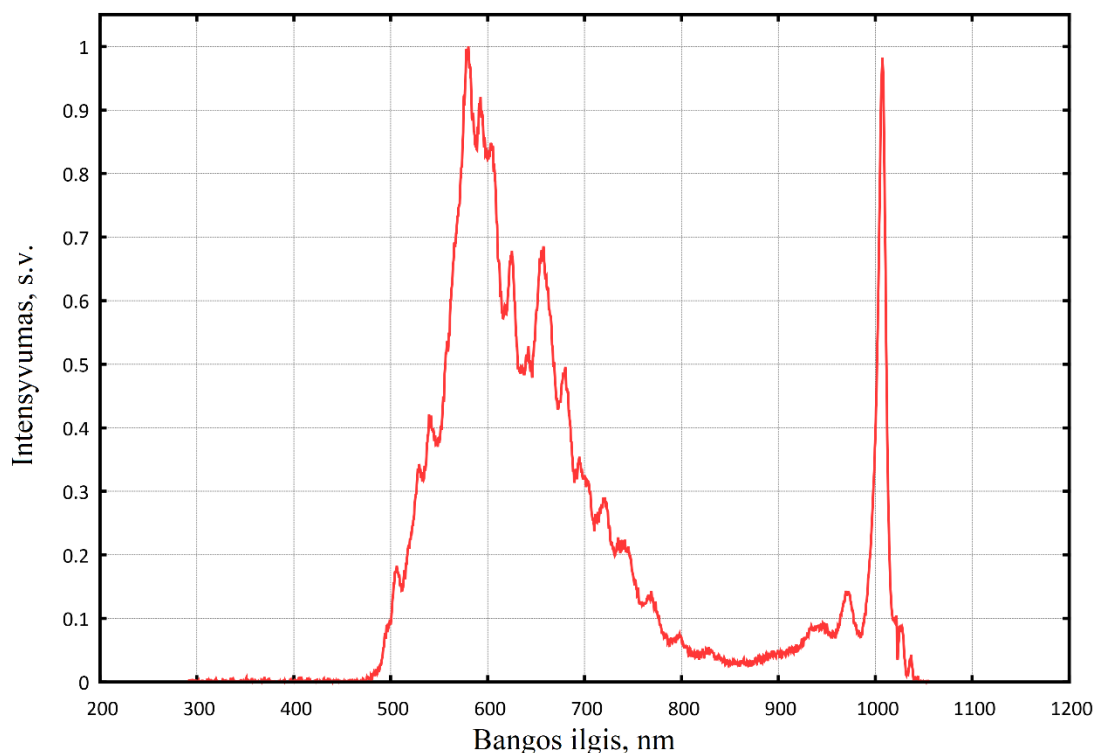
3.2 Dviejų šakų optinis parametrinis stiprintuvas

Viena pagrindinių ir sunkiausių šio darbo užduočių buvo dvigubo optinio parametrinio stiprintuvo surinkimas ir suderinimas. Jo principinė schema pavaizduota 7 pav. Pirmojoje, derinamo bangos ilgio parametrinio stiprintuvo dalyje, iš kaupinimui skirto 1 mJ lazerio spinduliuotės, naudojant kelis skirtingų verčių pluošto daliklius bei derinamą filtrą, keičiantį praėjusios energijos kiekį, 0.68 μ J energijos pluoštas buvo sufokusuotas į pirmąjį YAG kristalą +100 mm židinio nuotolio lęšiu. Netiesinėje terpėje sugeneruotas baltos šviesos kontinuumas, kurio spektras pavaizduotas 8 pav.

Panaudojant horizontaliai justruojamą veidrodį, padengtą fundamentinę spinduliuotę atspindinčia danga, iš spektro optimaliai iškerpama 1030 nm spinduliuotė, galinti iškraipyti spektrus, artimus šiam bangos ilgiui.

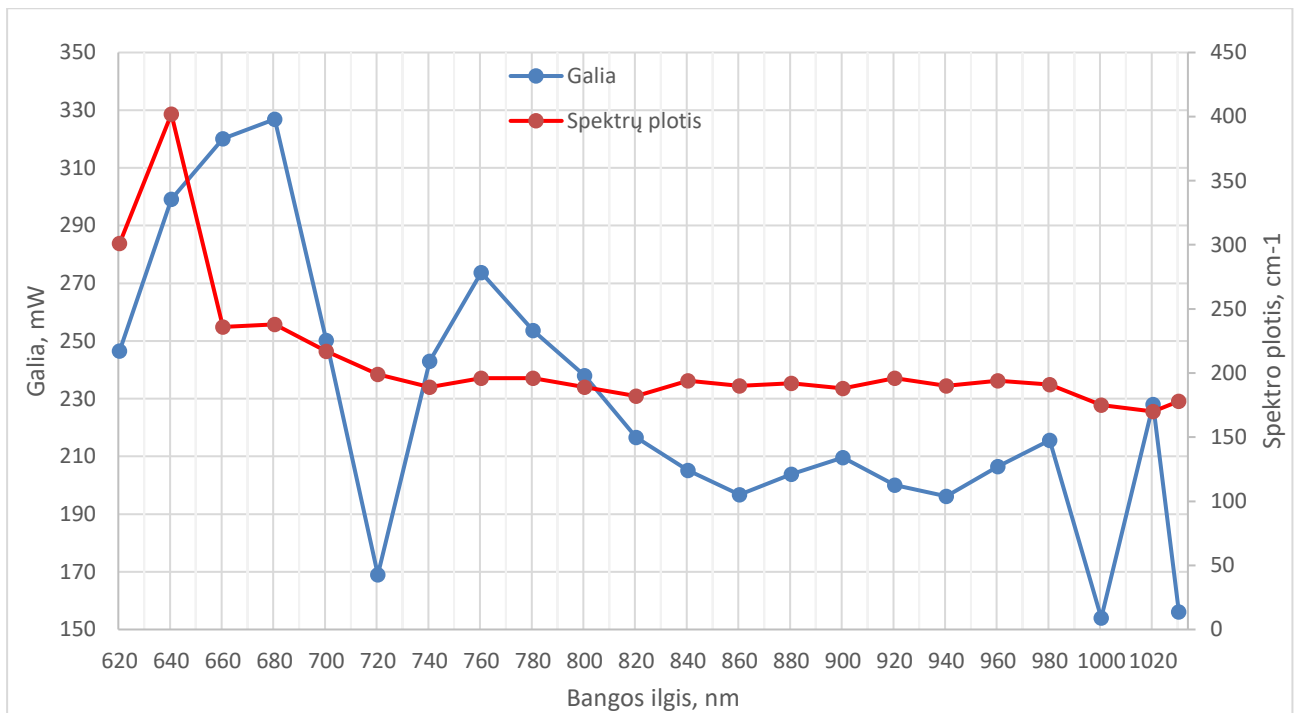


7 pav. Principinė dvigubo optinio parametrinio stiprintuvo schema



8 pav. Baltos šviesos kontinuumo, sugeneruoto 1 YAG kristale, spektras

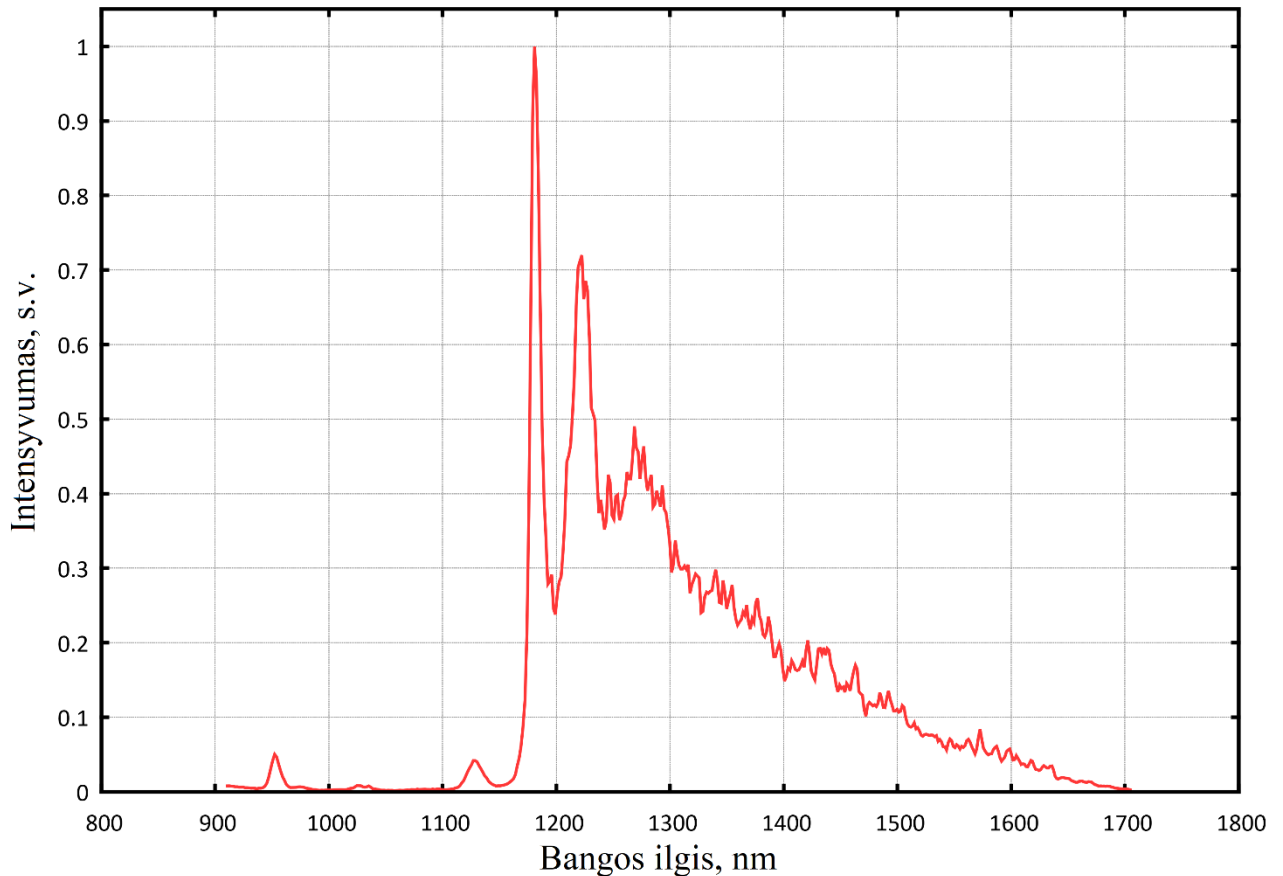
Dalis fundamentinės spinduliuotės ($40,3 \mu\text{J}$) naudojama antros harmonikos generavimui $0,8 \text{ mm}$ storio BBO kristale (pažymėtas kaip „1 BBO 2H“ 7 pav.). Sugeneruota $18,9 \mu\text{J}$ 515 nm spinduliuotės. Pirmojoje pakopoje ji sukertama su fokusuotu baltos šviesos kontinuumu 2 mm storio BBO kristale (1.1 BBO). Keičiant kristalo kampą ir erdvinę skyrą, generuojama kintamo dažnio ω_s banga, derinama diapazone nuo 620 iki 1030 nm . Antrojoje derinamo bangos ilgio parametrinio stiprintuvo pakopoje naudojama $567 \mu\text{J}$ fundamentinės spinduliuotės, iš kurios $0,85 \text{ mm}$ storio BBO kristale (2 BBO 2H) sugeneruojama $350 \mu\text{J}$ antros harmonikos. Ji sukertama su pirmojoje pakopoje sugeneruota ω_s banga, 2 mm storio BBO kristale (1.2 BBO), kurią pastiprina. Analogiškai keičiant abiejų pakopų kristalų kampus ir impulsų persiklojimą erdvėje, stiprinamas visas ω_s diapazonas. Abiejose pakopose stiprinimai vyksta nekolineariai. Tai buvo atlikta norint pašalinti susigeneravusią skirtuminę bangą iš pluošto, nes turimame stende nebuvo galimybės panaudoti papildomus dichroinius veidrodžius neprarandant automatizuoto veikimo visame diapazone be papildomo mechaninių elementų justiravimo. Gauti siauri spektrai, kurių plotis pusės spektro maksimumo aukštyje beveik visame diapazone varijuoja apie 200 cm^{-1} . Detalios spektrų pločių ir galios priklausomybės pavaizduotos 9 pav. $690\text{-}760 \text{ nm}$ diapazone galios kreivėje matosi didelis įdubimas.



9 pav. pirmosios stiprintuvo atšakos galios ir spektro pločio priklausomybė nuo generuojamos spinduliuotės bangos ilgio

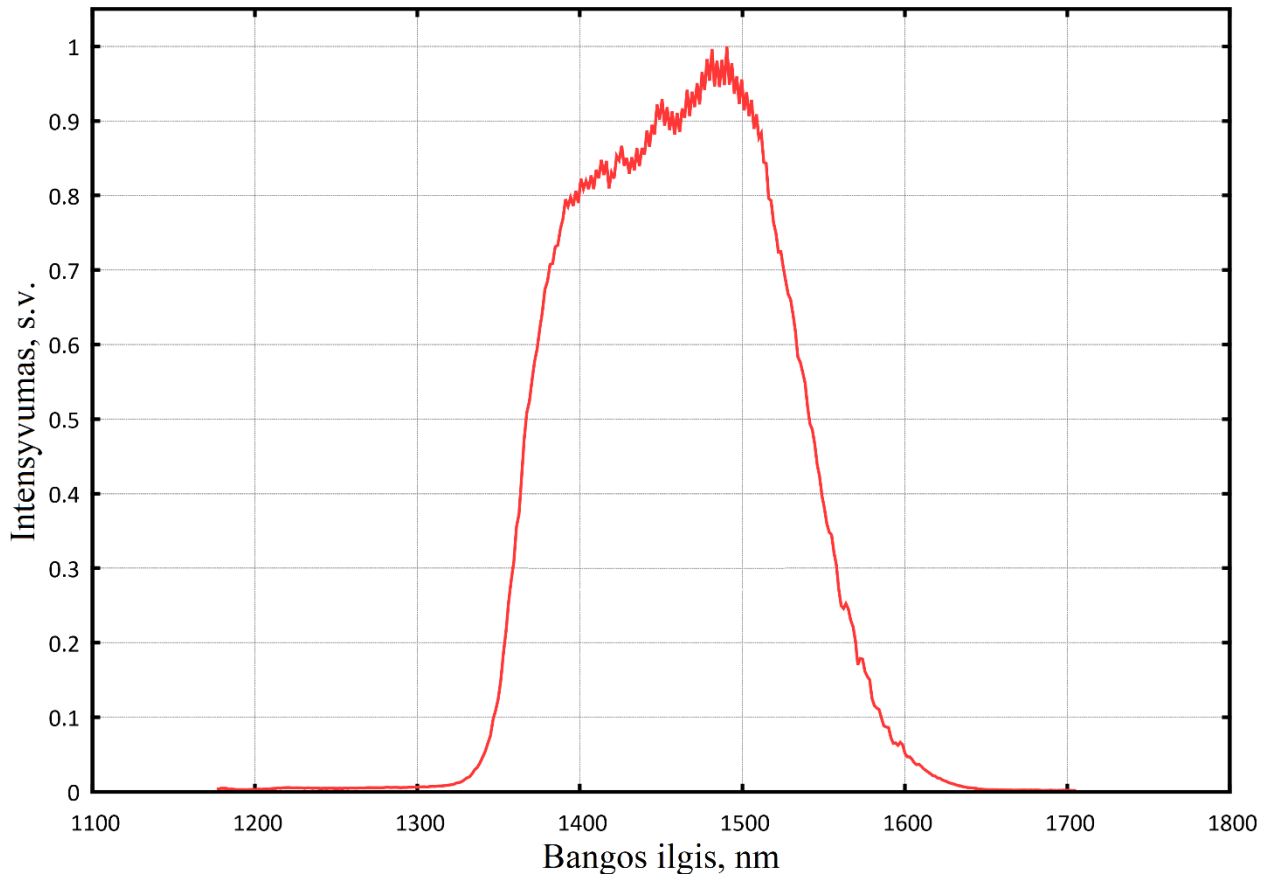
Jis atsiranda dėl išvadinio dichroinio veidrodžio nuostolių, kuris dalį naudingos spinduliuotės atspindi, nors jo paskirtis praleisti derinamos atšakos spinduliuotę. Didžiausi nuostoliai ties 720 nm bangos ilgiu. Prieš šį elementą išmatuota galia yra 447,4 mW, o už jo – 169 mW. Toliau į infraraudonąją spektro pusę, šis elementas veikia efektyviau, jo sukuriama nuostoliai krenta iki 30 %. Eksperimento metu tai buvo tinkamiausias elementas, siekiant įgyvendinti tolimesnius tikslus - suminio dažnio generavimą be papildomo elementų keitimo rankiniu būdu.

Derinant antrąją - fiksuoto bangos ilgio - optinio parametrinio stiprintuvo atšaką, 1,26 μ J energijos buvo fokusuota +250 mm židinio nuotolio lęšiu į antrąjį YAG kristalą. Derinant lęšio poziciją bei energijos kiekį, keičiant jį filtru, buvo surastos sąlygos, kurioms esant spektras ženkiai išplinta, tačiau dar neįvyksta pakartotinis impulso skilimas, kuris nulemtų spektro moduliacijos atsiradimą. Pats spektras pavaizduotas 10 pav. Čia taip pat buvo iškirpta likutinė fundamentinė spinduliuotė, sukant reflektine danga dengtą veidrodį, taip nukerpant sugeneruoto spektro dalį.



10 pav. Baltos šviesos kontinuumo, sugeneruoto 2 YAG kristale, spektras

Fiksuoto bangos ilgio atšaka taip pat turėjo dvi stiprinimo pakopas. Pirmojoje superkontinuumas buvo fokusuotas į 3 mm storio KTA kristalą (7 pav. pažymėtas kaip „2.1 KTA“ elementas) ir sukirtas su 43,1 μJ fundamentinės spinduliuotės. Suderinus impulsų persiklojimą erdvėje bei kristalo fazinio sinchronizmo kampą, vyksta optinis parametrinis stiprinimas. Buvo gauta plataus spektro signalinė banga. Antrojoje stiprinimo pakopoje ji sukertama su 308 μJ 1030 nm spinduliuotės. Tai vyksta 5 mm storio KTA kristale (2.2 KTA). Keičiant abiejų spindulių sukirtimo nekolinearumo kampą [24] bei optimizuojant kristalo padėtį ir impulsų erdvinę skyrą, randama plačiausio spektro vertė. 11 pav. pavaizduota 1461 nm plataus spektro spinduliuotė. Jos vertė pusės maksimumo aukštyje siekia 827 cm^{-1} . Šio dviem pakopom pastiprinto plataus spektro impulso energija yra 54,8 μJ .



11 pav. Antrosios atšakos fiksuoto bangos ilgio spektras po abiejų stiprinimo pakopų

3.3 Suminio dažnio generavimas

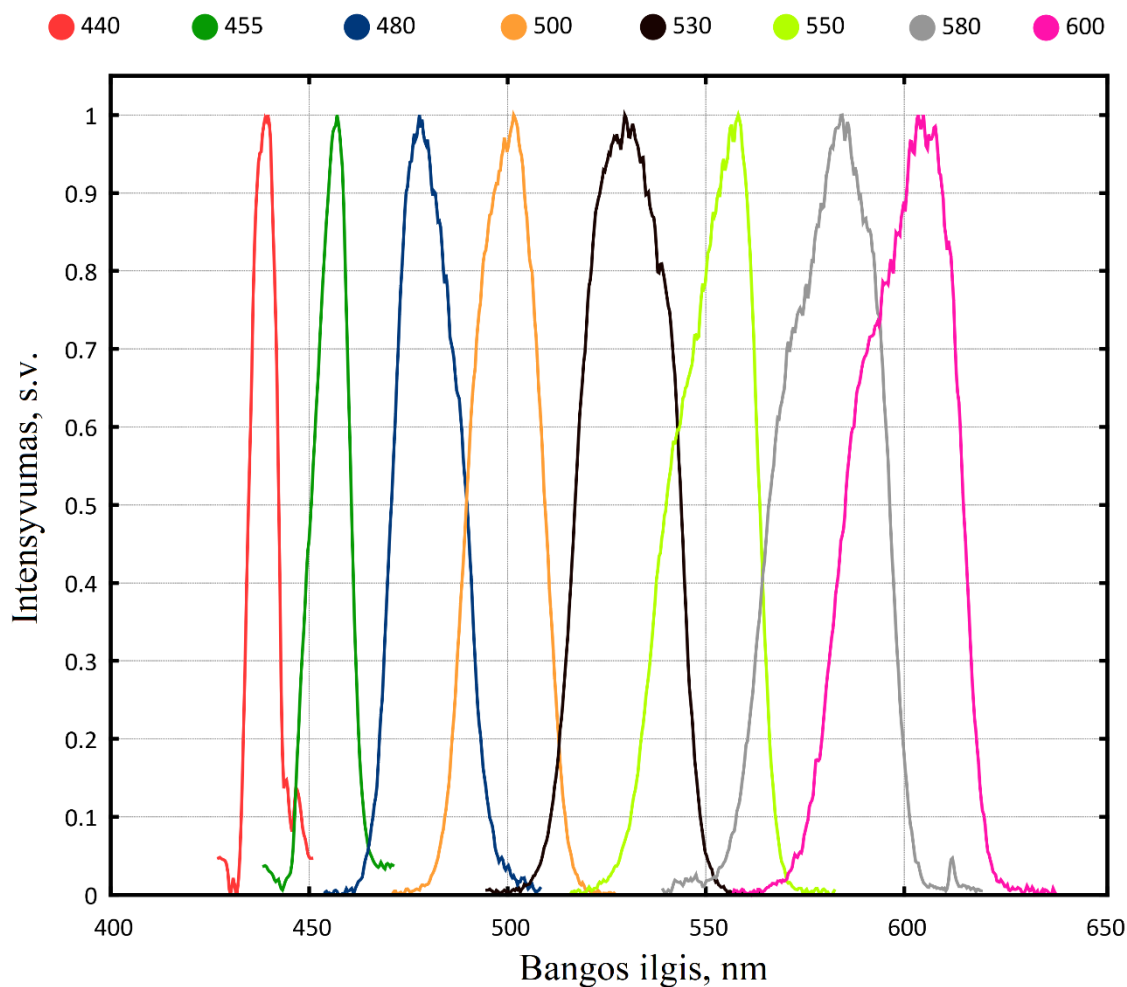
Ekperimentinio prietaiso korpuse pavyko sutalpinti ne tik dvišakį optinį parametrinį stiprintuvą, bet ir papildomus optinius elementus, skirtus abiejų spindulių kolineariam išėjimui. Taip pat papildoma vėlinimo linija, kompensuoti atsirandančią erdvinę impulsų skyrą dėl derinamo bangos ilgio prietaiso bangos ilgių keitimo. Abi atšakos erdvėje suvedamos į vieną sklidimo kelią pasinaudojant dichroiniu veidrodžiu, pro kurį praleidžiama derinamo bangos ilgio atšakos spinduliuotė ir nuo kurio atspindima plataus spektro spinduliuotė. Panaudojus papildomą sidabrinį veidrodį, iš prietaiso abi spinduliuotės išeina kolinearios. Išorėje prijungtas papildomas motorizuotas kristalo mazgas, kuriame patalpintas 0,6 mm storio BBO kristalas, skirtas generuoti suminį dažnį.

Norint praktiniu būdu generuoti suminį dažnį, reikia pataikyti tiek erdvinės skyros kompensavimą, tiek kristalo kampą. Pasinaudojus SNLO kompiuterine programa, skirta modeliuoti skirtingas bangų sąveikas netiesiniuose kristaluose, rasta patogiausia suminio dažnio sąveika, norint nustatyti pradinis derinimo parametrus. Buvo naudotas II tipo BBO kristalas, kuris buvo orientuotas taip, jog jame vyktų sąveika $1460 \text{ nm } (o) + [620-1030] \text{ nm } (e) = [440 - 600] \text{ nm } (e)$. Būtent šis

sąveikos variantas buvo pasirinktas dėl galimybės sumuoti plataus spektro o poliarizacijos bangą su siauresnio spektro e poliarizacijos banga, neprarandant spektro pločio. Taip yra, nes esant tokiai sąveikai ir tokiems sinchronizmo kampams, suminio dažnio impulso grupinis greitis yra labai artimas o bangos grupiniam greičiui. Kristalas buvo pasuktas į teorinės vertės poziciją. Siekiant nustatyti erdvinės skyros kompensavimo linijos poziciją, optiniame parametriniame stiprintuve buvo išmatuoti abiejų atšakų optiniai keliai, kurių kiekvienas buvo ilgesnis nei 2 metrai. Atsižvelgiant į kelių skirtumą, sukirtimui naudojamas dichroinis veidrodis buvo perstatytas toliau nuo prietaiso išėjimo, taip vienu metu pailginant fiksuoto bangos ilgio impulso sklidimo kelią bei sutrumpinant derinamo atšakos kelią. Toliau kelių skirtumo kompensavimui naudojamas dviejų veidrodžių elementas buvo pritvirtintas motorizuotos linijos eigos vidurinėje padėtyje. Kelis kartus rankiniu būdu pakeitus sklidimo kelių skirtumą (perkėlinėjant elementus), pavyko rasti padėtį, kurioje vyksta suminio dažnio generavimas ir jį galima optimizuoti naudojant tik motorizuotą vėlinimo liniją.

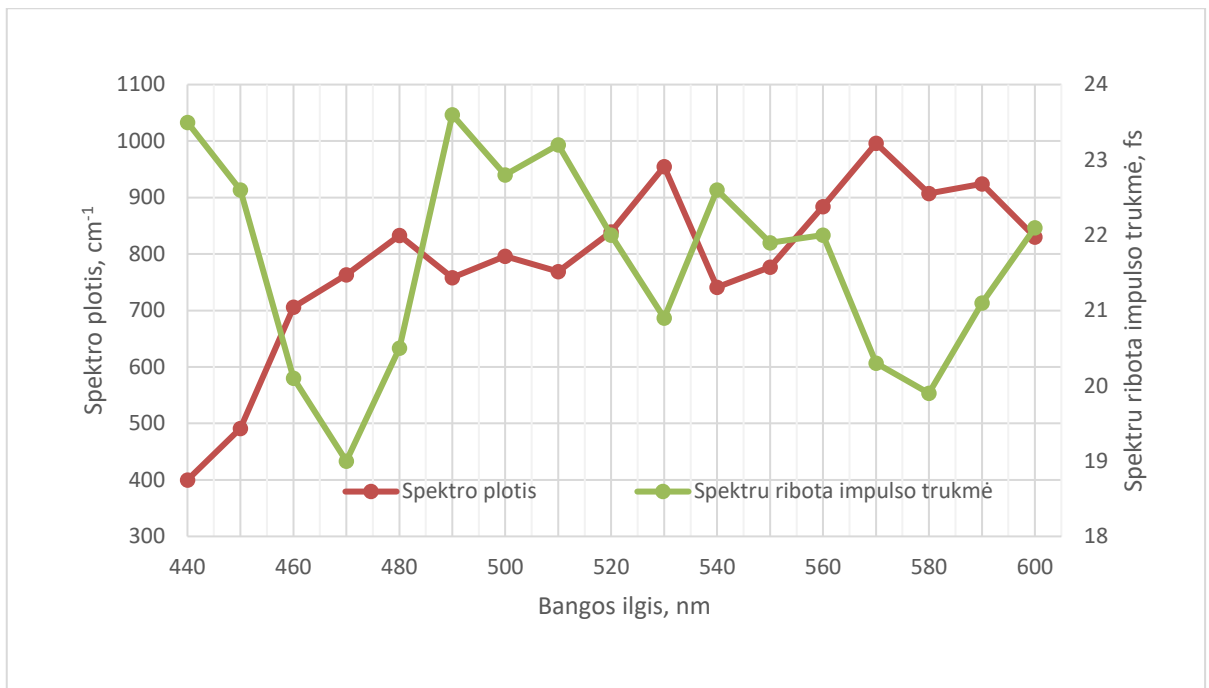
Sugeneravus pirmąjį suminio dažnio spektrą, buvo optimizuotas kolinearumas. Po kristalo naudojant bangų atskyriklį (dviejų dichroinių veidrodžių porą) išmatuota impulso energija. Optimizavus ją kristalo pasukimo bei vėlinimo linijos motorais, taip pat ji buvo optimizuota derinant spindulių sukirtimą parametrinio stiprintuvo viduje esančiu dichroiniu veidrodžiu. Tada pašalinus išorinių dichroinių veidrodžių porą bei paeiliui uždengiant pirmos ir antros optinio parametrinio stiprintuvo atšakos spindulius, tolimame lauke derinamas jų sukirtimas, justiruojant stiprintuvo išvadinių veidrodį. Interakcijos kartojamos kelis kartus, kol pasiekiamas maksimalus kolinearumo lygmuo.

Sugeneravus pirmąjį suminio dažnio spektrą, sąveika buvo ištirta keičiant optinio parametrinio stiprintuvo pirmosios atšakos bangos ilgį visame jo derinimo diapazone, optimizuojant vėlinimą bei kristalo kampą. Taip pat keičiamos išorinių dichroinių veidrodžių poros, priklausomai nuo suminio dažnio spinduliuotės bangos ilgio.



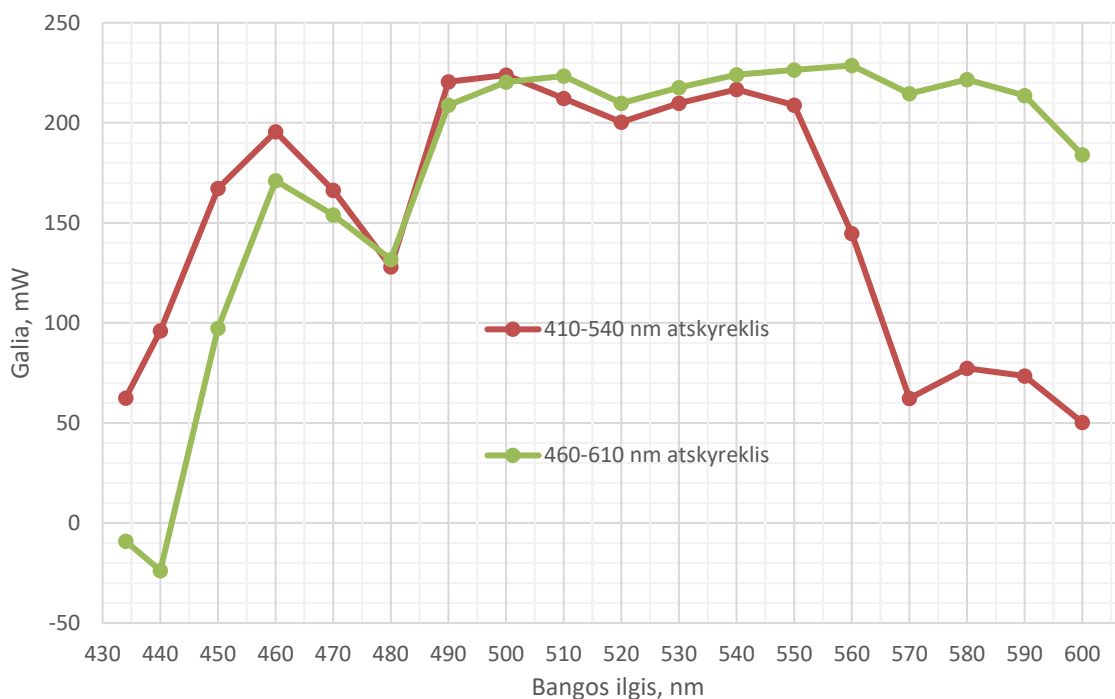
12 pav. 8 suminio dažnio spektrai

Ekspimento metu derinamos atšakos signalinę (620-1030 nm) spinduliuotę ir antrosios atšakos fiksuotą 1461 nm bangos ilgio spinduliuotę sukirtus kristale, eksperimentiškai gautos SFG vertės nuo 440 nm iki 600 nm. 12 pav. pavaizduoti aštuoni suminio dažnio spektrai, gauti šiuo būdu. Pirmieji spektrai, artimiausi UV sričiai yra siauresni, $400 - 491 \text{ cm}^{-1}$ pločio pusės maksimumo aukštyje. Tačiau nuo 460 nm iki pat suminio dažnio generavimo pabaigos, spektrų pločiai $706 - 996 \text{ cm}^{-1}$. Jų spektru ribota impulso trukmė $19 - 23,6 \text{ fs}$. Detalesnės priklausomybės grafiškai pavaizduotos 13 pav.



13 pav. Suminio dažnio generavimo spektrų pločio ir spektrų ribotos impulso trukmės priklausomybė nuo bangos ilgio

Suminio dažnio energijos buvo išmatuotos už bangų atskyriklių bei dviejų lęšių teleskopo, skirto pluošto kolimavimui. Bangų atskyriniai sudaryti iš dichroinių veidrodžių poros, pritvirtintos prie magnetinio paduko, leidžiančio greitai ir tiksliai juos pakeisti dirbant su skirtingais bangos ilgiais. Viena veidrodžių pora buvo pritaikyta dirbti diapazone nuo 410 iki 540 nm, o kita nuo 460 iki 610 nm.

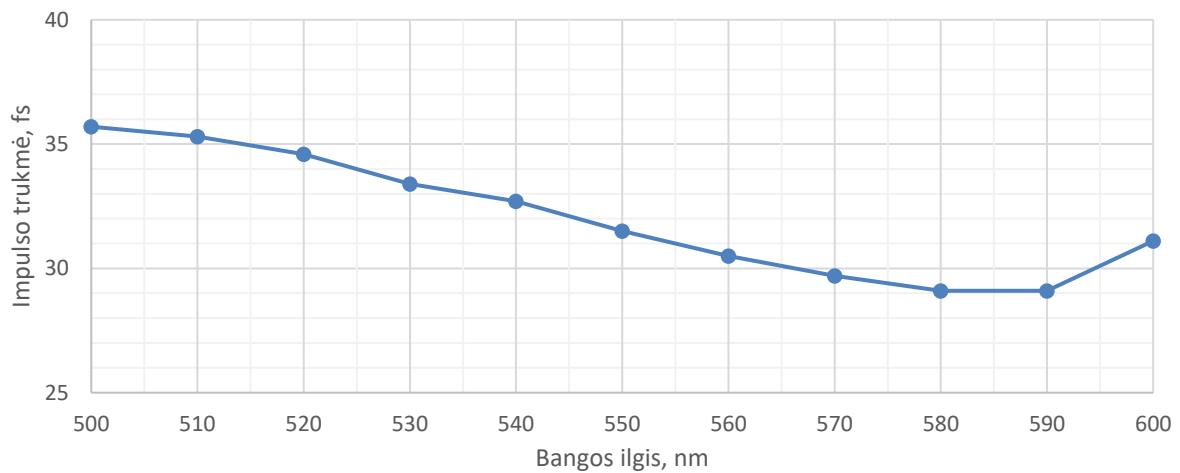


14 pav. Suminio dažnio galios priklausomybė nuo bangos ilgio, naudojant skirtingus dichroinius veidrodžius

Suminio dažnio energijos priklausomybė matuojama kad 10 nm, ties maksimaliomis energijos vertėmis norimam bangos ilgiui. Tada matuojamas tas pats diapazonas, tik 2 milimetrais pavėlinus vieną impulsą kito atžvilgiu, kad impulsai nepersiklotų laike ir negeneruotų suminio dažnio. Tokiu būdu išmatuojama suminio dažnio generavimui naudojamos spinduliuotės dalis, kurios neatskiria dichroiniai veidrodžiai. Šių dviejų energijų skirtumą laikome tikrąja energijos verte. 14 pav. ji pavaizduota su abiejų bangų atskyriklių poromis. Matome, kad 460 - 610 nm atskyriklių optimalu naudoti nuo 480 nm bangos ilgių, siekiant turėti mažiausius galimus energijos nuostolius. Lyginant abiejų atšakų energiją ir sugeneruotų impulsų energiją, vidutinis suminio dažnio generavimo proceso efektyvumas 35,8 %. Didžiausia energijos keitimo vertė ties 560 nm bangos ilgiu - 43,15 %. Ties šiuo bangos ilgiu taip pat didžiausias sugeneruoto suminio dažnio energijos keitimas, lyginant su visa dvišakiui optiniui parametriniui stiprintuvui skirta lazerio energija – 3,8 %.

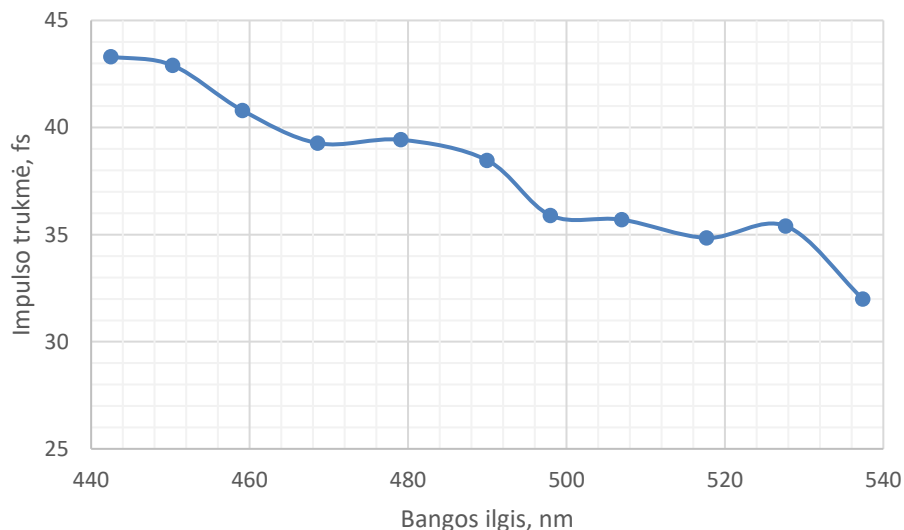
3.4 Impulsų spūda

Norint gauti trumpiausias galimas suminio dažnio generavimo impulsų trukmes, reikėjo juos suspausti. Pirmiausiai reikėjo pakeisti sugeneruotos spinduliuotės poliarizaciją iš horizontalios į vertikalią. Tam buvo pasitelktas periskopas, sudarytas iš dviejų sidabrinių veidrodžių, suklijuotų 90° kampu. Impulsų suspaudimui naudojamas dviejų prizmių kompresorius. Į jį sklindantis spindulys dviem veidrodžiais atspindimas į pirmąją prizmę, spindulių kritimo kampas artimas Briusterio kampui. Derinant kompresorių, jis buvo keistas ne vieną kartą, ieškant optimalios padėties. Taip pat mechaniškai buvo derinamas spindulio kelias tarp pirmos ir antros prizmės, papildomai įterpiant du veidrodžius bei keičiant atstumą tarp jų, taip siekiant gauti optimalių dispersijos kiekį. Pro antrą prizmę praėję spinduliai atsispindi nuo dviejų veidrodžių ir tokiu pačiu keliu grįžta atgal, tik sklisdami 10 mm šone, kol galiausiai atsispindi nuo paskutinio veidrodžio ir sklinda tolyn, už kompresoriaus. Kai kompresorius yra optimaliai suderintas, kiekvienam skirtingam suminio dažnio bangos ilgiui suspausti naudojama tik antroji motorizuota prizmė, kurios padėtį keičiame, taip optiniame kelyje keisdami dispersinės medžiagos kiekį. Suspausti impulsai buvo matuojami įmonės „Light Conversion“ autokoreliatoriumi „GECO“. Kadangi jo veikimo principas paremtas antros harmonikos generavimu, jo veikimas apribotas vidinių optinių elementų bei foto diodo jautrumu, priklausomu nuo bangos ilgio. Mažiausia ribinė šio autokoreliatoriaus vertė yra 500 nm. Juo išmatuotų impulsų trukmių priklausomybės nuo bangos ilgio pavaizduotos 15 pav.



15 pav. Autokoreliatoriumi išmatuotų suspaustų impulsų trukmių priklausomybės nuo bangos ilgio

Spekto diapazone nuo 500 iki 600 nm suspaustų impulsų trukmės, išmatavus autokoreliatoriumi, siekia nuo 29 iki 36 fs. Matuojant artimesnių UV sričiai impulsų trukmes buvo panaudotas dažninės skyros optinio strobavimo metodas (angliškas trumpinys FROG). Detalios impulsų trukmių priklausomybės nuo bangos ilgio pavaizduotos 16 pav. Diapazonas nuo 500 iki 540 nm buvo išmatuotas tiek autokoreliacijos būdu, tiek ir FROG'u. Lyginant abiejų matavimo būdų rezultatus, autokoreliacijos metodu išmatuotų impulsų trukmės mažesnės vidutiniškai 0,43 fs. Kadangi rezultatų matavimai buvo atliekami ne vieną dieną, galėjo pasikeisti optinio parametrinio stiprintuvo išvesties spinduliuotė, iš jos generuojamo suminio dažnio charakteristikos. Tačiau skirtingų matavimų metu gautų paklaidų dydis yra minimalus.

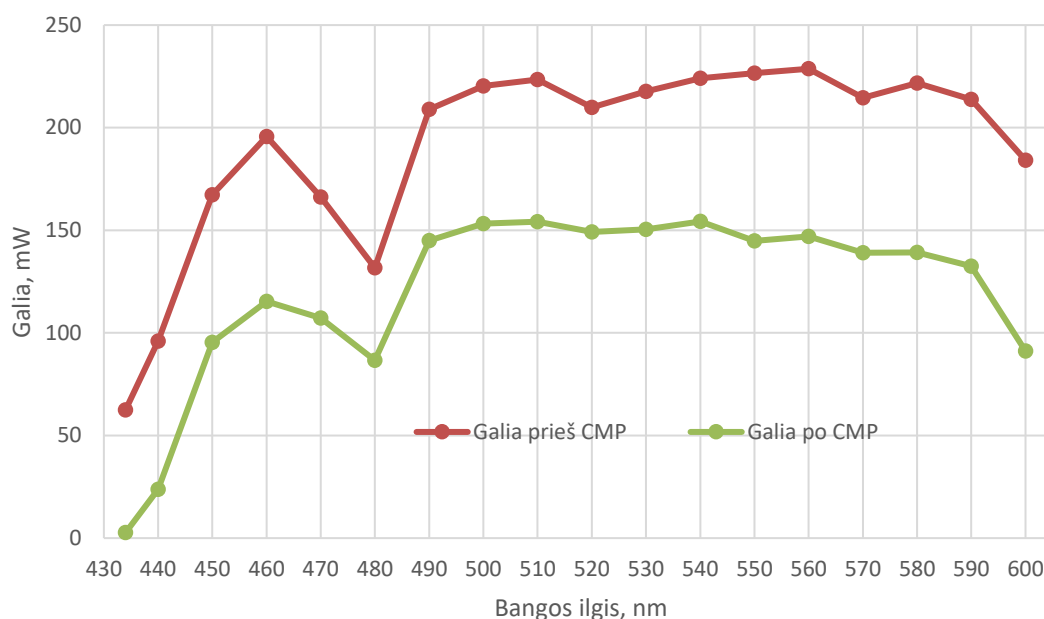


16 pav. FROG išmatuotų suspaustų impulsų trukmių priklausomybės nuo bangos ilgio

Norint turėti dar mažesnes trukmes, artimesnes spektru ribotoms trukmėms, kurios siekia sub 20 fs, reikia keisti kompresorių. Reikia ieškoti prizmių poros, pagamintos iš kitokios medžiagos. Nes impulso trukmei esant mažesnei nei 30 fs, didelę įtaką daro ir aukštesniųjų eilių dispersijos, kurias

galima kompensuoti parenkant prizmių medžiagą. Taip pat naudoto kompresoriaus optinis kelias tarp abiejų prizmių buvo suderintas mechaniškai, motorizuotai keičiamas tik antros prizmės kiekis, įkišamas į pluoštą. Norint gauti mažesnes trukmes reikia turėti galimybę motorizuotai keisti ne tik prizmės vietą, į kurią pataiko pluoštas, bet ir atstumą tarp abiejų prizmių, kurį motorizuotai galima derinti kiekvienam bangos ilgiui, o ne visam spektrų diapazonui.

Impulsų galios buvo išmatuotos ir po impulsų spaustuvo. Jų priklausomybės nuo bangos ilgio pavaizduotos 17 pav.



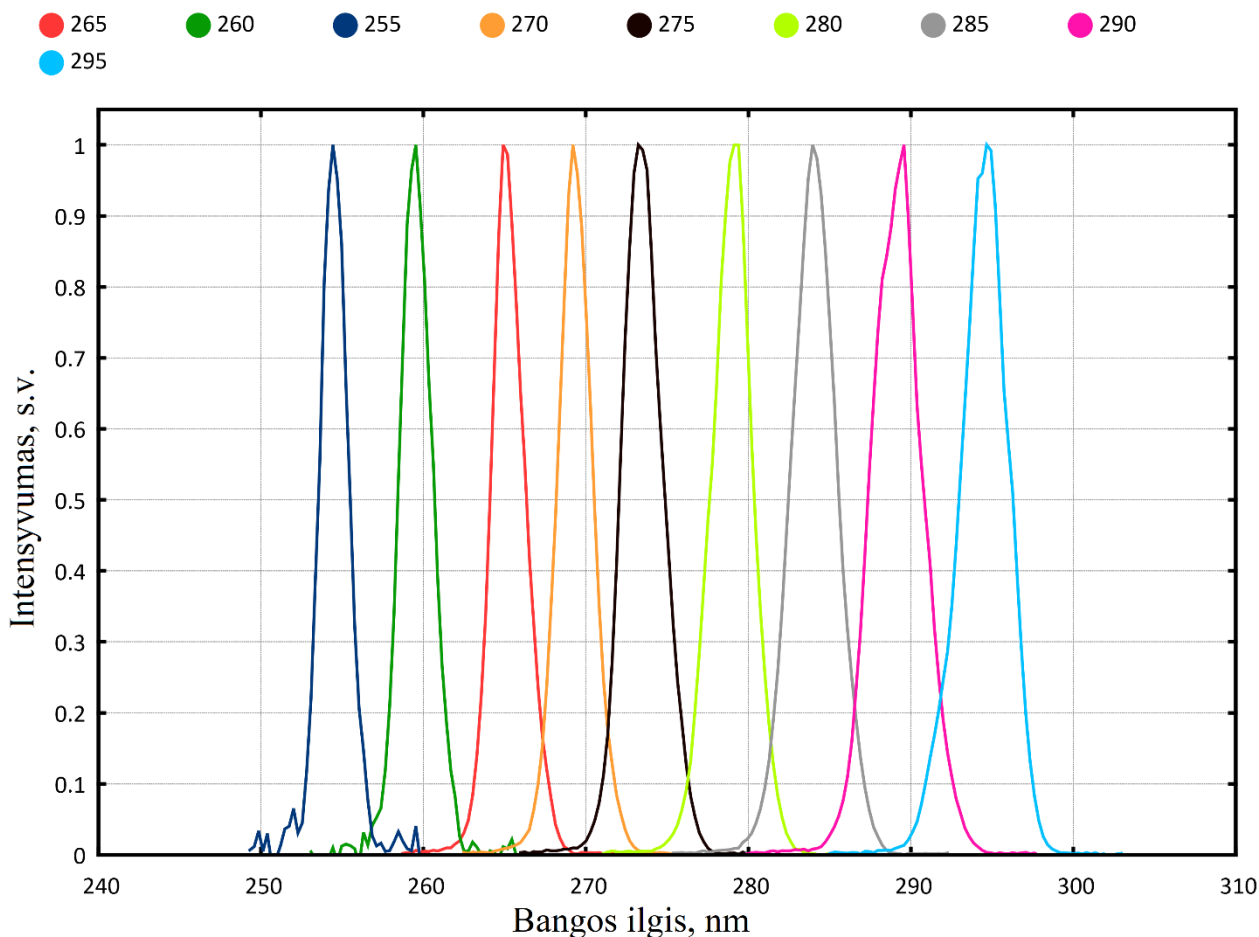
17 pav. Impulsų energijos priklausomybė nuo bangos ilgio prieš impulsų spaustuovą ir po jo

Pirmi keli bangos ilgiai, artimiausi UV sričiai, impulsų spaustuve patyrė didelius nuostolius. Galia prie 434 nm bangos ilgio po kompresoriaus liko tik 4%, lyginant su jos pradine verte. Tačiau atmentus kraštinius bangos ilgius, vidutinis impulsų spaustuvo efektyvumas, lyginant energiją prieš jį ir po jo siekia 65,3 %. Dideli kompresoriaus nuostoliai atsiranda dėl atspindžių jo viduje. Spinduliuotė jo viduje nukreipiama sidabriniais veidrodžiais. Impulsai nuo patekimo į kompresorių iki išėjimo iš jo nuo veidrodžių atsispindi 9 kartus. Taip pat spindulys keturis kartus krinta į prizmę bei keturis kartus nuo jos atsispindi. Norint sumažinti spausžiamų impulsų prarandamos energijos kiekį, reikia keisti kompresoriaus sandarą. Jei būtų galimybė keisti optinio kelio ilgį tarp dviejų prizmių nenaudojant papildomų veidrodžių poros, būtų galima spinduliuotės kelyje sidabrinų veidrodžių kiekį sumažinti nuo 9 iki 5 kartų.

Didžiausias suminio dažnio galia po kompresoriaus yra ties 540 nm bangos ilgiu - 154,23 mW. Tai yra 68,8 % galios, kuri buvo išmatuota prieš kompresorių ties šiuo bangos ilgiu. Lyginant su pradine lazerio spinduliuotės galia, kuria buvo kaupinamas dvišakis optinis parametrinis stiprintuvas, pasiektas 2,57 % keitimo efektyvumas po impulsų spaustuvo.

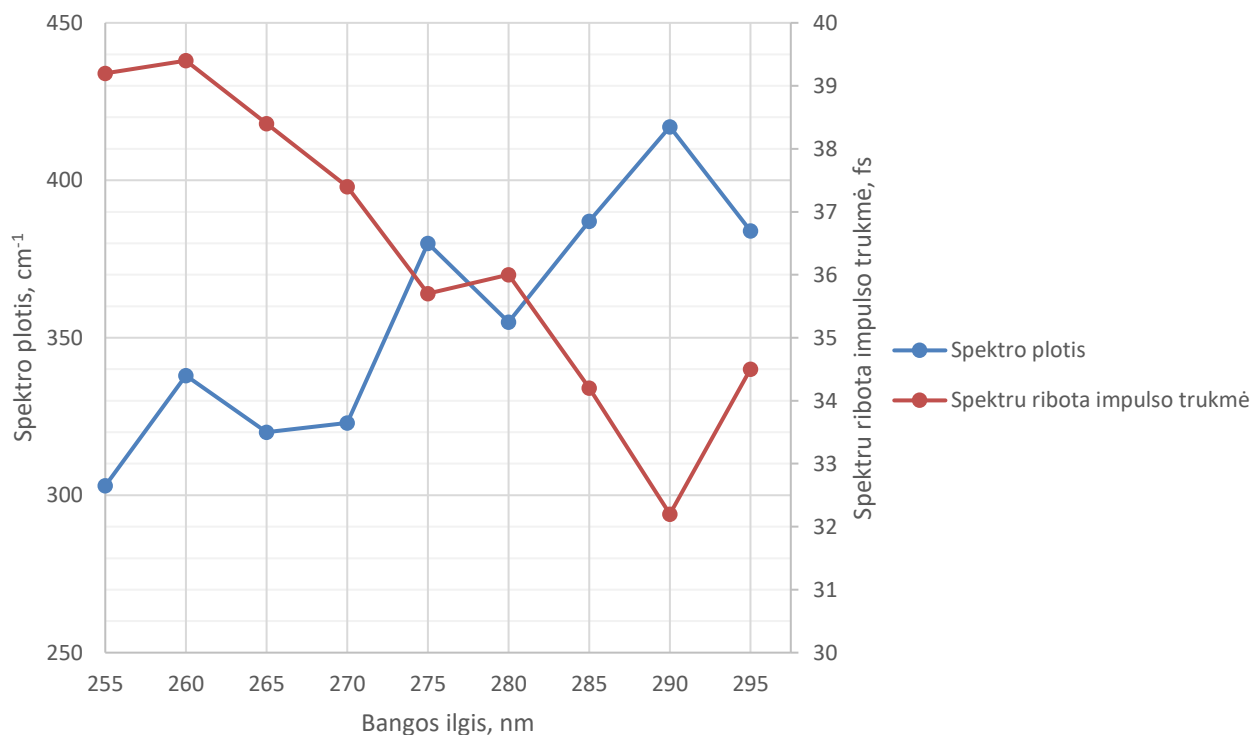
3.5 Suminio dažnio antros harmonikos generacija

Naudojant suspaustus impulsus už impulsų spaustuvo, buvo generuota suminio dažnio antra harmonika. Pasitelktas išorinis motorizuotas kristalo pasūtkio mazgas. Antros harmonikos generavimas vyko 0,1 mm storio BBO kristale. Jo priekinė dalis buvo skaidrinta bangos ilgiams nuo 470 iki 600 nm, o galinė pusė bangos ilgiams nuo 235 iki 300 nm, taip mažinant atspindžių sukeltus nuostolius. Norint padidinti antros harmonikos keitimo efektyvumą, buvo naudotas papildomas dviejų lęšių teleskopas, mažinantis spinduliuotės diametrą prieš kristalą. Sugeneruota antros harmonikos spinduliuotė diapazone nuo 225 iki 295 nm. Dalis antros harmonikos spektrų pavaizduota 18 pav.



18 pav. Antros harmonikos spektrai

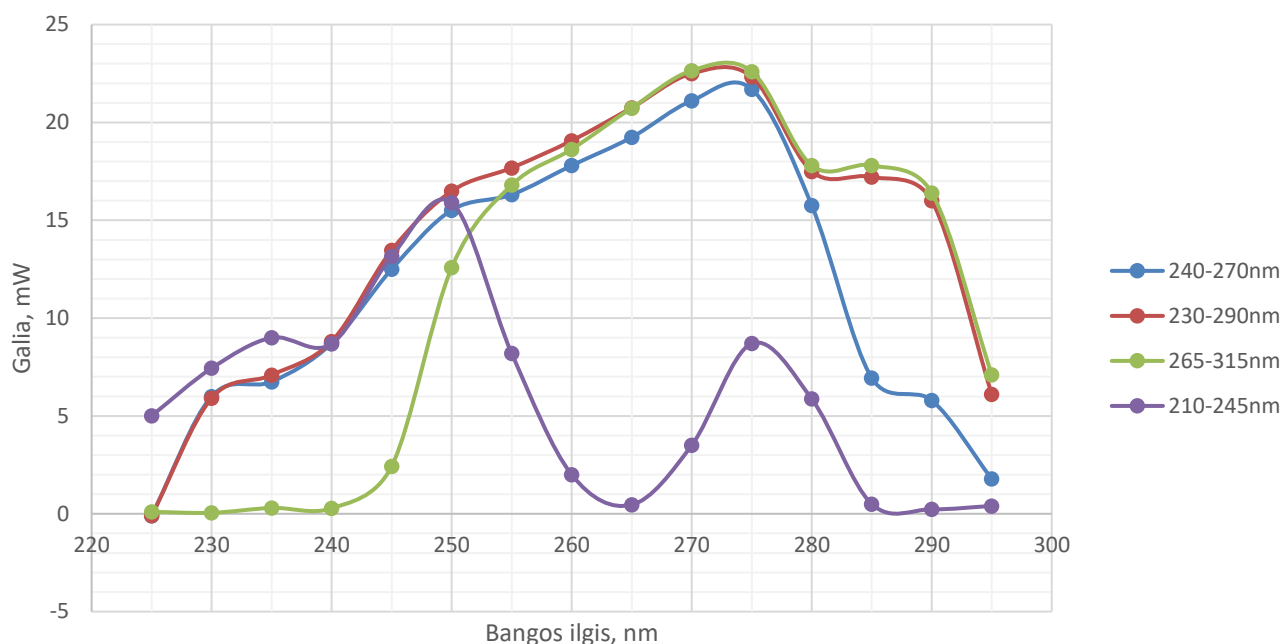
Artimesnių į UV sritį spektrų ne pavyko išmatuoti dėl spektrometro matavimo diapazono slenksčio bei spinduliuotės nuvedimo į spektrometrą naudojamo šviesolaidžio, kuris tampa nebeskaidrus bangos ilgiems, mažesniems už 250 nm.



19 pav. Antros harmonikos impulsų spektro pločio ir spektru ribotos impulso trukmės priklausomybė nuo bangos ilgio

Antros harmonikos impulsų spektro pločio ir spektru ribotos impulso trukmės priklausomybė nuo bangos ilgio pavaizduota 19 pav. Iš spektro atlikus Furje transformaciją, spektru ribota impulso trukmė antros harmonikos impulsuose diapazone nuo 255 iki 295 nm yra 32,2 -39,4 fs režyje.

Norint atskirti suminio dažnio ir antros harmonikos spinduliuotę už kristalo buvo naudojamos skirtingiems bangos ilgiams pritaikytos 4 dichroinių veidrodžių poros: nuo 210 iki 245 nm, nuo 240 iki 270 nm, nuo 265 iki 315 nm ir nuo 230 iki 290 nm. Suminio dažnio antros harmonikos generavimo galios priklausomybė nuo bangos ilgio, naudojant skirtingas dichroinių veidrodžių poras, pateikta 20 pav.



20 pav. Suminio dažnio antros harmonikos generavimo galios priklausomybė nuo bangos ilgio, naudojant skirtingas dichroinių veidrodžių poras

Intervale 225 – 245 nm geriausiai veikia dichroinių veidrodžių pora, pritaikyta 210 - 245 nm diapazonui. Nuo 245 iki 265 nm didžiausia galia gaunama naudojant 230 – 290 nm sričiai pritaikytus dichroinius veidrodžius. Likusioje spektro dalyje geriausius rezultatus gauname naudojant 265 – 315 nm srities optinių elementų porą. Keista, bet 240 – 270 nm sričiai pritaikyta dichroinių veidrodžių pora veikė mažiau efektyviai nei platesniam diapazonui pritaikyti bangų atskyrekliai, pritaikyti dvigubai platesnei spektro sričiai.

Galios matavimai buvo atliekami išmatavus didžiausią energijos vertę po antros harmonikos generavimo kas 5 nm. Tada atlikti pakartotiniai galios matavimai ties tais pačiais bangos ilgiais, bet antros harmonikos kristalą pasukus 8 laipsniais nuo maksimalios antros harmonikos generavimo vertė. Tai yra suminio dažnio spinduliuotės fonas, praėjęs pro bangų atskyreklį. Šių dviejų energijų skirtumas laikomas tikrąja antrosios harmonikos generavimo verte, kuri ir pateikta 20 pav.

3.6 Rezultatų palyginimas

Gautus suminio dažnio generavimo rezultatus galima pabandyti palyginti su rinkoje esančiu produktu – trečia harmonika kaupinamu nekoliniariu optiniu parametriniu stiprintuvu, pagamintu įmonėje UAB “Light Conversion”. Jų siūlomo prietaiso derinimo sritis apima diapazoną nuo 500 iki 900 nm. Šio eksperimento metu pademonstruota generacija, šiek tiek labiau nutolusi į UV spinduliuotę ir baigiasi regimajame diapazone. Suminio dažnio generavimas įgyvendintas diapazone nuo 440 nm iki 600. Taip pat sugeneruota antra harmonika, kurios derinimo diapazonas nuo 225 iki

295 nm. Eksperimento metu pademonstruotas sistemos veikimas su 1 mJ kaupinimu ir 2,57% keitimo efektyvumu po impulsų suspaudimo ties 540 nm bangos ilgiu. Tuo tarpu rinkoje esančio produkto maksimali siūloma kaupinimo vertė – 200 μJ , o pasiektas keitimo pikas ties 580 nm bangos ilgiu nurodomas ne mažesnis nei 1.3%. Ši vertė taip pat yra nurodyta, kai impulsas jau suspaustas kompresoriuje, kas suteikia papildomų galios nuostolių. Verta paminėti, kad trečia harmonika nekolineariai kaupinamas optinis parametrinis stiprintuvas 500-580 nm spinduliuotės diapazone generuoja $\sim 500 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ spektro pločio impulsus. Analogiškame diapazone eksperimento metu pavyko pasiekti 741 – 996 cm^{-1} vertes.

Derinamo bangos ilgio atšaką galima lyginti su šios įmonės siūlomu prietaisu, kaupinamu Yb:KGW lazerio didele energija. Derinamo bangos ilgio atšaką galima traktuoti kaip optinį parametrinį stiprintuvą, kaupinamą 612 μJ energijos spinduliuote. Ši vertė gauta susumavus baltos šviesos kontinuumo generacijai bei abiejų pakopų kaupinimui naudotos fundamentinės spinduliuotės vertes. Spinduliuotės generavimo efektyvumo pikas yra ties 720 nm ir siekia 12.17 %. Įmonės siūlomo didelės energijos (kaupinimas nuo 400 iki 2000 μJ) optinio parametrinio stiprintuvo energijos keitimo efektyvumo maksimali vertė ne mažesnė nei 9 %. Jų prietaiso spektro pločiai bangos ilgių diapazone nuo 700 iki 960 nm yra 100 – 220 cm^{-1} . Eksperimento metu šiame diapazone gautos vertės yra 182 – 217 cm^{-1} .

4. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Eksperimento metu surinktas ir suderintas optinis parametrinis stiprintuvas, generuojantis dvi skirtingas bangas. Siauro spektro atšakoje generuojama 620 - 1030 nm signalinė, o plataus spektro atšakoje fiksuoto 1460 nm.

2. Įgyvendinta suminio dažnio generavimo sąveika, naudojant abi optinio parametrinio stiprintuvo atšakas. Suminio dažnio generacijos būdu pasiektas derinimo diapazonas nuo 434 nm iki 600 nm, kuris buvo praplėstas į UV sritį nuo 225 iki 295 nm antros harmonikos generavimo būdu.

3. Parinkti abiejų atšakų parametrinio stiprintuvo bangos ilgiai leido panaudoti sąveiką, kurioje itin mažas grupinių greičių nederinimas tarp plačiajuosčio kaupinimo ir suminio dažnio impulsų. Tai leido naudoti storą kristalą, buvo pasiektas didelis suminio dažnio efektyvumas, kurio didžiausia vertė 43,15 % ties 560 nm.

3. Darbo metu gauti platūs spektrai. Tipinis spektro plotis pusės maksimumo aukštyje yra 800 cm^{-1} - 900 cm^{-1} srityje. Impulsų trukmės gautos visame suminio dažnio diapazone yra 29 - 44 fs ribose.

4. Lyginant su komerciniu nekolineariai Yb:KGW lazerio trečia harmonika kaupinamu optiniu parametriniu stiprintuvu, pademonstruoti panašūs spektro pločiai ir impulso trukmės, didesnis galios keitimo efektyvumas, spektro derinimas artimesnis UV sričiai. Darbe tirta sistema pasižymi dideliu privalumu - išvengiama UV kaupinimo.

5. Literatūros sąrašas

- [1] A. H. Zewail, Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond, *J. Phys. Chem.*, **104**(24), 5660 - 5694 (2000)
- [2] O. Brian, J. K. Haub, Y. He, R. T. White, Spectroscopic Applications of Pulsed Tunable Optical Parametric Oscillators, *Tunable Laser Applications*, 2nd edn, Chapter 2, 15-95 (New York, 2009)
- [3] M. Liebel, C. Schnedermann, P. Kukura, Sub-10-fs pulses tunable from 480 to 980 nm from a NOPA pumped by an Yb:KGW source, *Opt. Lett.*, **39** (14), 4112 - 4115 (2014)
- [4] J. Menapace, B. Penetrante, P. Miller, T. Parham, M. Nichols, J. Peterson, D. Golini, Combined advanced finishing and UV-laser conditioning for producing UV-damage-resistant fused silica optics, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 56 – 67 (2002)
- [5] A. Dubietis, *Netiesinė optika* (VU leidykla, Vilnius, 2011)
- [6] R. R. Alfano, *The supercontinuum Laser Source - The Ultimate White Light* (Springer-Verlag, New York, 2016)
- [7] M. Bradler, P. Baum, E. Riedle, Femtosecond continuum generation in bulk laser host materials with sub- μ J pump pulses, *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, **97**(3), 561 – 574 (2009)
- [8] P. Franken, A. Hill, C. Peters, G. Weinreich, Generation of Optical Harmonics, *Phys. Rev. Lett.*, **7**(4), 118 - 120 (1961)
- [9] L. Lugiato, F. Prati, M. Brambilla, *Nonlinear Optical Systems* (Cambridge University Press, 2015)
- [10] A. P. Stabinis, G. Valiulis, *Ultratrumpųjų šviesos impulsų netiesinė optika* (Vilnius, 2008)
- [11] R. Boyd, *Nonlinear optics 1-67* (Elsevier Science, USA, 2003)
- [12] O. Balachninaite, R. Butkus, E. Gaižauskas, V. Kudriašov, M. Maciulevičius, V. Sirutkaitis, V. Smilgevičius, V. Vaičaitis, *Netiesinės optikos laboratoriniai darbai* (Vilniaus Universiteto leidykla, Vilnius 2008)
- [13] L. A. Aleman-Castaneda, M. Rosete-Aguilar, Deviation from orthogonal polarization for ordinary and extraordinary rays in uniaxial crystals, *J. Opt. Soc. Am. A*, **33**(4), 677 – 682 (2016)
- [14] J. Shah, Ultrafast luminescence spectroscopy using sum frequency generation, *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**(2), 276-288 (1988)
- [15] R. Baumgartner, T. Byer, Optical parametric amplification, *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**(6), 432-444 (1979)
- [16] Y. R. Shen, *Principles Of Nonlinear Optics* (Wiley-Interscience, 2002)

-
- [17] L. Gallais, D. B. Douti, M. Commandre, G. Batavičiūtė, E. Pupka, M. Ščiuka, L. Smalakys, V. Sirutkaitis, A. Melninkaitis, Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials, *J. Appl. Phys.*, **117**(22), 223103-1 – 223103-14 (2015)
- [18] R. L. Fork, O. E. Martinez and J. P. Gordon, Negative dispersion using pairs of prisms, *Opt. Lett.*, **9**(5), 150 – 152 (1984)
- [19] T. Kobayashi, A. Baltuska, Sub-5 fs pulse generation from a noncollinear optical parametric amplifier, *Meas. Sci. Technol.*, **13**(11), 1671 – 1682 (2002)
- [20] D. Brida, S. Bonora, C. Manzoni, M. Marangoni, P. Villoresi, S. Silvestri, G. Cerullo, Generation of 8.5-fs pulses at 1.3 μm for ultrabroadband pump-probe spectroscopy, *J. Opt. Soc. Am. A*, **17**(15), 12510 – 12515 (2009)
- [21] M. Bradler, E. Riedle, Sub-20 fs μJ -energy pulses tunable down to the near-UV from a 1 MHz Yb-fiber laser system, *Opt. Lett.*, **39**(9), 2588 – 2591 (2014)
- [22] R.B. Varillas, A. Candeo, D. Viola, m. Garavelli, S. De Silvestri, G. Cerullo, C. Manzoni, Microjoule-level, tunable sub-10 fs UV pulses by broadband sum-frequency generation, *Opt. Lett.*, **39**(13), 3849 – 3852 (2014)
- [23] A. Zaukevičius, V. Jukna, R. Antipenkov, V. Martinėnaitė, A. Varanavičius, A. P. Piskarskas, G. Valiulis, Manifestation of spatial chirp in femtosecond noncollinear optical parametric chirped-pulse amplifier, *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**(12), 2902 – 2908 (2011)
- [24] C. W. Hsu, C. C. Yang, Broadband infrared generation with noncollinear optical parametric processes on periodically poled LiNbO₃, *Opt. Lett.*, **26**(18), 1412 - 1414 (2001)

YB:KGW LAZERIU KAUPINAMO DERINAMO BANGOS ILGIO REGIMOJO DIAPAZONO ULTRATRUMPŲJŲ ŠVIESOS IMPULSŲ ŠALTINIO TYRIMAS

Santrauka

Moksliniuose taikymuose didelio populiarumo sulaukia lazerinės sistemos, generuojančios ultratrumpuosius impulsus. Plačiai paplitęs jų taikymas žadinimo – zondavimo spektroskopijoje, tyrinėjant įvairias medžiagas ir jos tarpusavio ryšius. Šiems eksperimentams svarbu ne tik maža trukmė, bet ir fotonų energija, todėl tokius impulsus generuojantys prietaisai turi būti derinamo bangos ilgio. Lazerių gamyba užsiimančios įmonės siūlo sprendimus tokiems poreikiams. Dažniausiai tai yra nekolineariai trečia harmonika kaupinami optiniai parametriniai stiprintuvai. Tačiau parametrinio stiprinimo generacijai naudojant UV spinduliuotę atsiranda problemų. Dėl didelės fotonų energijos gali vykti dvifotonė sugertis. Taip pat tokioje sistemoje naudojama UV bangos ilgių spinduliuotei pritaikyta optika yra jautresnė drėgmei, reikalingas papildomas azoto dujų naudojimas siekiant ją sumažinti, greičiau degraduoja optiniai elementai, todėl mažėja sistemos efektyvumas bei stabilumas

Šiame darbe buvo tiriamas suminio dažnio generavimas dviašiu optiniame parametriniame stiprintuve, kaupiname femtosekundiniu Yb:KGW lazeriu. Tikslas gauti trumpus impulsus regimojoje ir UV srityje, tačiau išvengiant UV spinduliuotės kaupinimo. Sukonstruotas prietaisas turėjo siauro spektro derinamo bangos ilgio atšaką ir plataus spektro, fiksuoto 1460 nm bangos ilgyje atšaką.

Iš abiejų atšakų impulsų sugeneruotas plataus spektro suminis dažnis, derinamas diapazone nuo 434 iki 600 nm. Jo impulsai buvo suspausti dviejų prizmių impulsų spaustuviu. Gautos trukmės visame derinimo diapazone nuo 29 iki 44 fs. Iš suspaustų suminio dažnio impulsų sugeneruota antra harmonika diapazone nuo 225 iki 295 nm. Palyginus optinio parametrinio stiprintuvo kaupinimo energiją su didžiausia suminio dažnio generavimo energijos verte po impulsų spaustuvo, keitimo efektyvumas siekia iki 2,57%. Suminio dažnio generavimo efektyvumas, lyginant su sąveikaujančių impulsų energijomis, siekia 43,15 %.

INVESTIGATION OF TUNABLE SOURCE OF ULTRAFAST VISIBLE PULSES BASED ON
AN Yb:KGW LASER

Summary

Pump-probe spectroscopy is one of application fields in which ultrashort pulse laser systems are widely used. For this application not only pulse duration is important but also photon energy, so systems must have tunable wavelength option. Laser companies can offer UV pumped noncollinear optical parametric amplifier (NOPA). However, UV pulses have high photon energies so two-photon absorption is likely to happen. Also optical elements designed to work in this spectral regime are more sensitive to moisture so NOPA must be purged with nitrogen gas. But still in the end optical elements degrade faster which results in lost system energy and stability.

In this thesis we explore sum frequency generation (SFG) in double optical parametric amplifier pumped by femtosecond Yb:KGW laser. Goal is to get adjustable output range and short pulse duration without using UV. One branch was narrow-band tunable spectra and another broadband fixed at 1461 nm.

Using pulses from both branches, sum frequency was generated. It was tunable from 434 to 600 nm. Pulse durations after compression in two prism compressor were from 29 to 44 fs. These pulses then were used for second-harmonic generation, which broadened tunable range from 225 to 295 nm. Comparing this OPA pump energy with highest SFG value after compressor, energy conversion efficiency is up to 2,57 %. SFG efficiency was up to 43,15 %, compared with the total energy of the interacting pulses.