

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Karolis Jurkus

AUKŠTO PASIKARTOJIMO DAŽNIO OPTINIO PARAMETRINIO STIPRINTUVO
TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų
studijų programa

Studentas:	Karolis Jurkus
Leista ginti:	2018-05-28
Darbo vadovas:	dr. Rimantas Grigonis
Lazerinių tyrimų centro direktorius:	prof. habil. dr. Roaldas Gadonas

Vilnius 2018

Turinys

Įvadas	2
1. Teorinis įvadas	3
1.1. Optinio parametrinio stiprinimo principai	3
1.2. Baltos šviesos kontinuumo generacija skaidriose terpėse	4
2. Aukšto pasikartojimo dažnio parametrinio stiprintuvo kūrimas ir optimizavimas	5
2.1. Lazerinės sistemos architektūra	5
2.2. Superkontinuumo generacija kietakūnėse skaidriose medžiagose	7
2.3. Antrosios harmonikos generacija	11
2.4. Pirmosios stiprinimo pakopos optimizavimas	14
2.5. Antrosios stiprinimo pakopos optimizavimas	16
2.6. Impulsų laikinės ir dažninės charakteristikos	19
3. Praktinis optinio parametrinio stiprintuvo pritaikymas mikroskopijoje	23
3.1. Antros harmonikos vaizdinimo mikroskopija	23
3.2. Mikroskopo sistema ir jos panaudojimas biologiniam vaizdinimui	24
Pagrindiniai rezultatai	29
Literatūros sąrašas	30
Santrauka	32
Abstract	33

Ivadas

Optinis parametrinis stiprinimas yra vienas pažangiausių ir patogiausių būdų praplėsti fiksuoto bangos ilgio lazerinių šaltinių derinimo diapazoną. Šios technologijos pritaikymo spektras itin platus – optiniai parametriniai stiprintuvai naudojami aukštos galios impulsų generacijai, stipraus lauko fizikos eksperimentuose, spektroskopijoje, netiesinėje mikroskopijoje [1].

Mikroskopijoje, šiuo metu plačiausiai naudojami Ti:Sa arba optiniai parametriniai osciliatoriai [2]. Dėka jų aukšto impulsų pasikartojimo dažnio ir didelio smailinio intensyvumo, osciliatoriai yra vieni tinkamiausių šaltinių biologiniam vaizdinimui.

Komerčiniai optiniai parametriniai osciliatoriai paprastai veikia aukštu pasikartojimo dažniu (~80 MHz) ir generuoja daugiau nei 400 mW vidutinės galios ultratrumpuosius (<100 fs), tačiau mažos energijos (1-10 nJ) impulsus [3]. Nepaisant šių savybių, dėl sudėtingos konstrukcijos, optinių parametrinių osciliatorių kaina yra didelė, o bangos ilgių derinimas sudėtingas.

Kaip alternatyva osciliatoriams, gali būti naudojami optiniai parametriniai stiprintuvai, pasižymintys didesniu lankstumu ir paprastesne konstrukcija. Nors jie gali generuoti aukštos vidutinės galios ultratrumpuosius impulsus, tačiau ilgą laiką jų generuojamų impulsų maksimalus pasikartojimo dažnis buvo ribotas iki <2 MHz [4][5][6]. Dėka proveržių netiesinių kristalų ir lazerinių technologijų srityje, šiandien atsiranda galimybė turėti iki 10 MHz pasikartojimo dažniu veikiančius, aukštos vidutinės galios ir mažos energijos optinius parametrinius stiprintuvus. Toks šaltinis gali būti puikiai alternatyva įprastiniams lazeriniams šaltiniams netiesinėje mikroskopijoje.

Literatūroje kol kas nėra aprašytų 10 MHz pasikartojimo dažniu veikiančių optinių parametrinių stiprintuvų. Panašaus tipo sistemose [7], dėl mažos prieinamos energijos, baltos šviesos kontinuumui generuoti naudojami šviesolaidžiai, dėl ko padidėja sistemos kompleksiskumas ir jautrumas. Komerciškai yra prieinami iki 5 MHz dažniu veikiantys stiprintuvai [8].

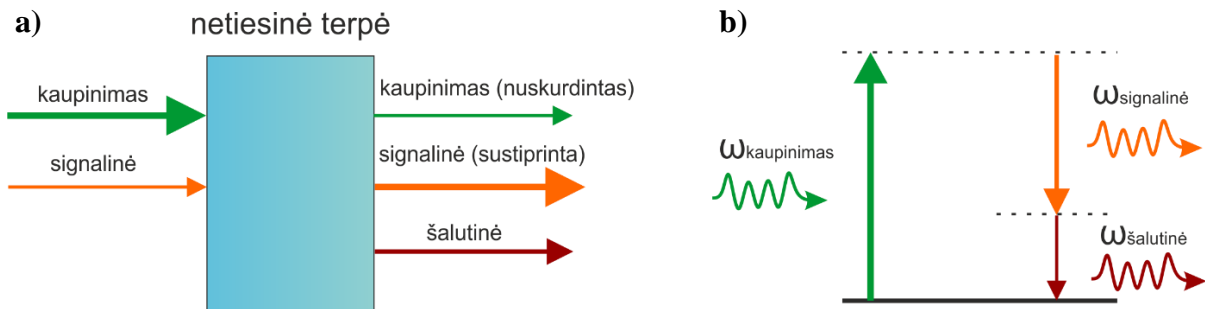
Šio darbo tikslas buvo sukurti ir optimizuoti 10 MHz pasikartojimo dažniu veikiančią femtosekundinį optinį parametrinį stiprintuvą, derinamą 660-940 nm, 1150-2340 nm bangos ilgių diapazone.

1. Teorinis įvadas

1.1. Optinio parametrinio stiprinimo principai

Optinis parametrinis stiprinimas tai antros eilės netiesinis procesas [9]. Šio proceso metu netiesiniame kristale vyksta energijos pernaša tarp trijų skirtingo dažnio bangų. 1 pav. pateikta principinė šio reiškinio iliustracija. Netiesiniame kristale energija iš didelio intensyvumo kaupinimo bangos (dažnio ω_p) perduodama mažesnio intensyvumo signalinei bangai (dažnio ω_s), kuri proceso metu yra stiprinama. Kadangi turi galioti energijos tvermės dėsnis, šios sąveikos metu generuojama ir trečioji, šalutinė ω_i dažnio banga [10]. Taigi galioja sąryšis

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i .$$



1 pav. Optinio parametrinio stiprinimo proceso principinis atvaizdavimas: a) kaip energijos tėkmės; b) kaip šuolių tarp virtualių lygmenų.

Tam, kad netiesinėje medžiagoje sugeneruotos bangos efektyviai stiprintųsi, tarp jų turi vykti konstruktyvi interferencija, t.y. turi būti išpildyta fazinio synchronizmo sąlyga $\Delta k = 0$ [10]:

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i = \frac{n_p \omega_p}{c} - \frac{n_s \omega_s}{c} - \frac{n_i \omega_i}{c} = 0 ,$$

Kur $n_{p,s,i}$ – medžiagos lūžio rodikliai kaupinimo, signalinei ir šalutinei bangoms, c – šviesos greitis vakuume. Principinė šios sąlygos idėja yra ta, jog efektyvus stiprinimas gali vykti tik tuomet, kuomet visų trijų bangų faziniai greičiai sutampa. Paprastai, visose medžiagose lūžio rodiklis didėjant šviesos dažniui didėja, tad izotropinėse medžiagose fazinis synchronizmas

negalimas. Dėl šios priežasties praktikoje naudojami anizotropiniai, dvejetainiai netiesiniai kristalai, kuriuose lūžio rodiklis priklauso ne tik nuo šviesos dažnio, bet ir nuo poliarizacijos, taigi ir nuo šviesos kritimo į kristalą krypties [10]. Keičiant kristalo orientaciją jo optinės ašies atžvilgiu, galima realizuoti fazinį sinchronizmą skirtingiems bangų ilgiams.

Priklausomai nuo parametrinėje sąveikoje dalyvaujančių bangų poliarizacijos, gali būti išskirti keli fazinio sinchronizmo tipai (1 lentelė) [9]. Lentelėje *e* ir *o* atitinkamai žymimi nepaprastą ir paprastą bangas. I-o tipo fazinis sinchronizmas pasižymi plačia stiprinamo signalo juosta ir didele dispersija. Tuo tarpu II-ojo tipo faziniam sinchronizmui būdinga siaura stiprinimo juosta.

1 lentelė. Fazinio sinchronizmo tipai teigiamiems ir neigiamiems vienašiams kristalams.

Sinchronizmo tipas	Teigimas vienašis	Neigiamas vienašis
	$n_e > n_o$	$n_e < n_o$
I tipas	ee – o	oo – e
	$n_p^o \omega_p = n_s^e \omega_s + n_i^e \omega_i$	$n_p^e \omega_p = n_s^o \omega_s + n_i^o \omega_i$
II tipas	oe – o	eo – e
	$n_p^o \omega_p = n_s^o \omega_s + n_i^e \omega_i$	$n_p^e \omega_p = n_s^e \omega_s + n_i^o \omega_i$

Parametrinio stiprinimo proceso metu nedalyvauja jokie realūs medžiagos lygmenys, tad iš principo parametrinė sąveika gali veikti bet kokiems bangų ilgiams. Varijuojant fazinio sinchronizmo sąlygomis, gali būti stiprinami įvairūs bangų ilgiai plačiame diapazone. Pagrindinis veiksnys ribojantis stiprinimo juostą yra medžiagos sugertis. Taigi optiniai parametriniai stiprintuvai gali būti panaudojami kaip prietaisai praplėsti lazerinių šaltinių galimybes.

1.2. Baltos šviesos kontinuumo generacija skaidriose terpėse

Baltos šviesos kontinuumas – tai erdvėje ir laike koherentinė labai plataus spektro spinduliuotė [9]. Kontinuumo generacijos reiškinys pirmą kartą stebėtas 1970 m [11]. Tai reiškinys, kurio metu ultratrumpam šviesos impulsui sklindant netiesine terpe, jo spektras išplinta šimtus ar net tūkstančius kartų. Kartais baltos šviesos kontinuumas dar vadinamas superkontinuumu.

Vykstant superkontinuumo generacijai dalyvauja daug netiesinių reiškinių sukeltų didelio intensyvumo spinduliuotės. Tarp tokių reiškinių yra impulso fazės moduliavimasis, keturbangis dažnių maišymas, savifokusavimasis, laikinis impulsų skilimas, plazmos formavimasis [12].

Baltos šviesos kontinuumas gali būti generuojamas įvairiose terpėse: dujose, skysčiuose, skaidriuose kietuosiuose kūnuose (tarp jų ir šviesolaidžiuose). Praktikoje patogiau naudoti kietasias medžiagas, dėl palyginti mažo generacijos slenksčio, tolygaus spektrinio pasiskirstymo ir paprastesnio praktinio išpildymo. Taip pat, dėl didelio stabilumo kietakūnės medžiagos superkontinuumui generuoti nukonkuruoja skysčius ir dujas [13]. Kuomet svarbus kuo mažesnis generacijos slenkstis, griebiamasi šviesolaidinių terpių, tačiau toks metodas reikalauja itin preciziško kaupinimo spinduliuotės įvedimo į terpę ir yra jautrus mechaniniams virpesiams. Šiuo atžvilgiu pranašesni yra tūriniai (ang. *bulk*) netiesiniai kristalai, kurie šiame darbe ir buvo nagrinėjami.

Vienas svarbus baltos šviesos kontinuumo generacijos ypatumas yra tas, jog plačiausi spektrai generuojami medžiagose, turinčiose patį mažiausią netiesinį lūžio rodiklį n_2 [14]. Atvirkštinė priklausomybė galioja kontinuumo generacijos slenksčiams – didesnį netiesinį lūžio rodiklį turinčiose medžiagose jis yra mažesnis.

Baltos šviesos kontinuumas praktikoje naudojamas žadinimo – zondavimo spektroskopijoje, keleto optinio ciklų impulsų generacijai. Optiniuose parametriniuose stiprintuvuose superkontinuumas atlieka užkrato (signalinės bangos) vaidmenį.

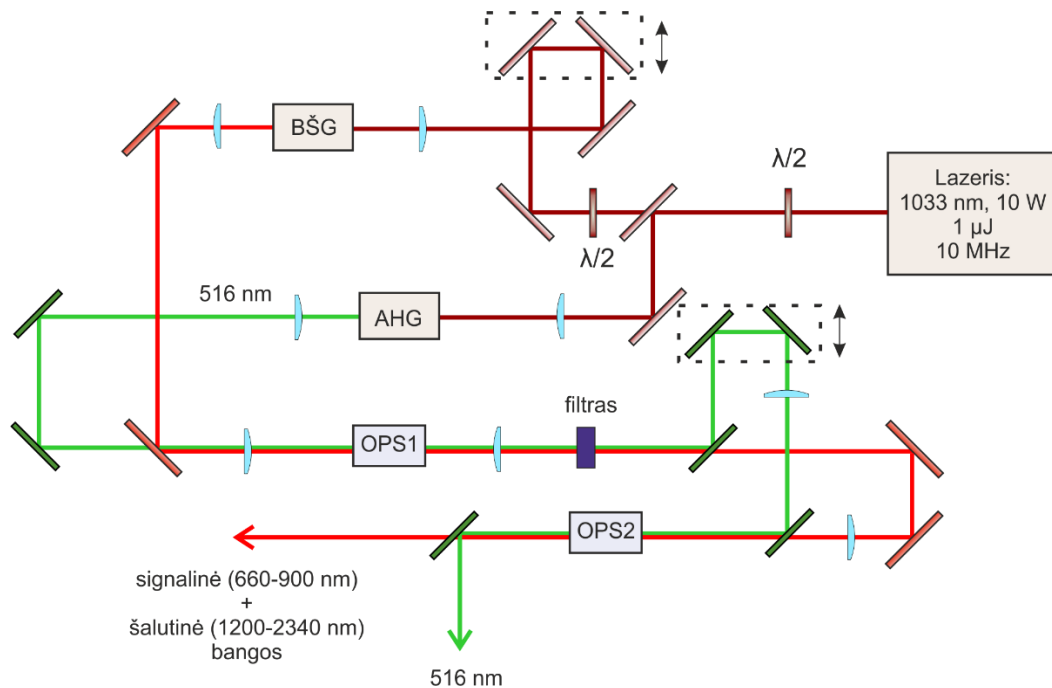
2. Aukšto pasikartojimo dažnio parametrinio stiprintuvo kūrimas ir optimizavimas

2.1. Lazerinės sistemos architektūra

Šiame darbe naudotą lazerinę sistemą sudarė aukštu pasikartojimo dažniu veikiantis femtosekundinis lazerinis šaltinis ir optinis parametrinis stiprintuvas, kurio charakteristikas ir siekta iširti bei optimizuoti.

Lazerinis šaltinis 10 MHz pasikartojimo dažniu generuoja 10 W vidutinės galios, 1 μJ energijos, <150 fs trukmės impulsus, kurių centrinis bangos ilgis 1033 nm. Lazero pluoštas po 1.4 karto didinančio teleskopo veidrodžiais nukreipiamas į optinį parametrinį stiprintuvą. Stiprintuvo principinė schema pateikta 2 pav. Sugeneruotų bangos ilgių derinimas galimas 660-940 nm bangos ilgių diapazone signalinei bangai ir atitinkamai 1150-2340 nm diapazone šalutinei bangai.

Darbe tirtą optinį parametrinį stiprintuvą galima suskirstyti į keturias sritis: plataus spektro superkontinuumo generacijos, antrosios harmonikos generacijos ir dviejų užkrato stiprinimo pakopų. Kiekviena iš jų buvo tirta ir optimizuota siekiant kuo efektyvesnio, stabilesnio ir puikiomis pluošto erdvinėmis charakteristikomis pasižyminčio stiprintuvo veikimo.



2 pav. Principinė darbe tirta optinio parametrinio stiprintuvo schema. BŠG – baltos šviesos generacijos kristalas, AHG – antrosios harmonikos generacijos kristalas, OPS – optinio parametrinio stiprinimo pakopos.

Šioje schemoje įvadinė lazerio spinduliuotė atenuatoriumi, sudarytu iš pusės bangos ilgio fazinės plokštelės ir poliarizatoriaus, padalinama į dvi šakas. Viena jų panaudojama antrajai harmonikai generuoti, o kita – superkontinuumo generacijai (detaliau kiekviena jų aprašoma

tolesniuose skyriuose). Užkrato spinduliuotė vėliau stiprinama dviejose stiprinimo pakopose. Abiejų stiprinimo kristalų kaupinimui naudota ta pati antrosios harmonikos spinduliuotė, o parametrinė sąveika realizuota kolinearioje konfigūracijoje. Po pirmojo stiprinimo naudotas spalvinis filtras blokuoja šalutinę spinduliuotę, tad antrajame kristale stiprinama tik signalinė banga.

2.2. Superkontinuumo generacijos tyrimas

Kuriant itin maža energija kaupinamą optinį parametrinį stiprintuvą vienas svarbiausių uždavinių ir iššūkių yra rasti sąlygas sugeneruoti stabilų baltos šviesos kontinuumą sunaudojant kuo mažiau energijos. Tai reikalinga tam, jog būtų galima kuo daugiau energijos išnaudoti stiprinimui. Šiam tikslui buvo išbandytos trys skirtingos medžiagos superkontinuumo generacijai: YAG, KGW ir safyras. Minimaliam generacijos slenksčiui palyginti, naudotas tas pats $f = +100$ mm židinio nuotolio lęšis fokusavimui į terpę. Rezultatai apibendrinti 2 lentelėje.

2 lentelė. Superkontinuumo generavimo sąlygų ir medžiagų charakteristikų palyginimo lentelė.

	Al ₂ O ₃ (safyras)	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ (YAG)		KGd(WO ₄) ₂ (KGW)	
Poliarizacija	-	-	-	$E \parallel X$	$E \parallel Y$
Kryptis	-	-	-	$k \parallel Z$	
Netiesinis lūžio rodiklis (10 ⁻¹⁶ cm ² /W)	3.1 ^a	6.9 ^b		15 ^c	20 ^c
Kristalo ilgis (mm)	4	5	8	5	
Generacijos slenkstis (μJ)	0.74	0.39	0.37	0.14	0.12
Stabilus veikimas (μJ)	>1	0.47	0.45	0.17	0.15

^a [15] ^b [16] ^c [17]

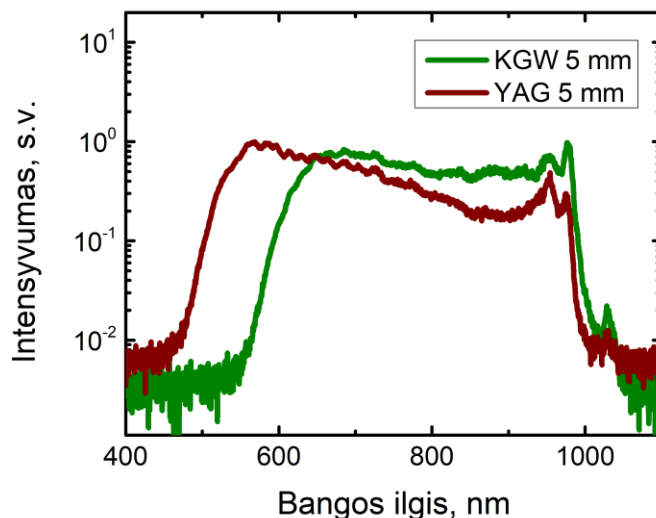
Atliekant eksperimentus, safyro kristale stabilaus baltos šviesos kontinuumo sugeneruoti nepavyko – jam reikalinga aukštesnė nei šiuo atveju prieinama energija. Tiek 5 mm tiek 8 mm YAG kristaluose pavyko sugeneruoti stabiliai šviečiantį superkontinuumą, tačiau tam reikėjo palyginus daug energijos – stabiliam veikimui užtikrinti reikia sunaudoti beveik 50 % turimos lazerio galios (4.7 W iš 10 W), paliekant tik nedidelę dalį antros harmonikos generacijai ir

stiprinimui. Tad YAG kristalai nėra tinkami naudoti mažos energijos optiniuose parametriniuose stiprintuvuose.

Eksperimento rezultatai parodė, jog mažiausios slenkstinės energijos atžvilgiu tinkamiausi naudoti yra KGW kristalai. Šiuose kristaluose sunaudota tik ~14 % lazerio galios, taigi lieka didelė dalis stiprinimo pakopoms kaupinti. Taip pat, atlikus ilgalaikius (>48 h) matavimus KGW kristale nepastebėti jokie pažeidimo požymiai.

Kitas svarbus kriterijus, ieškant tinkamiausio kristalo buvo generuojamo superkontinuumo spektro plotis. 3 pav.

palyginimui pateiktas YAG ir KGW kristalų superkontinuumo spektras regimajame diapazone. Matyti, jog YAG kristale sugeneruotas spektras driekiasi toliau į trumpųjų bangų pusę, tačiau šiuo atveju tai nėra didelis privalumas. Kadangi 516 nm (antrosios harmonikos) bangos ilgio spinduliuote kaupinamo optinio parametrinio stiprintuvo derinimo diapazono trumpųjų bangų kraštas BBO ir LBO kristaluose apribojamas iki apytiksliai 620 - 660 nm, platesnis baltos šviesos kontinuumo spektras <620 nm srityje nėra aktualus. Ribojimas atsiranda dėl parametrinės sąveikos metu sugeneruotos šalutinės bangos sugerties >2200 nm srityje.



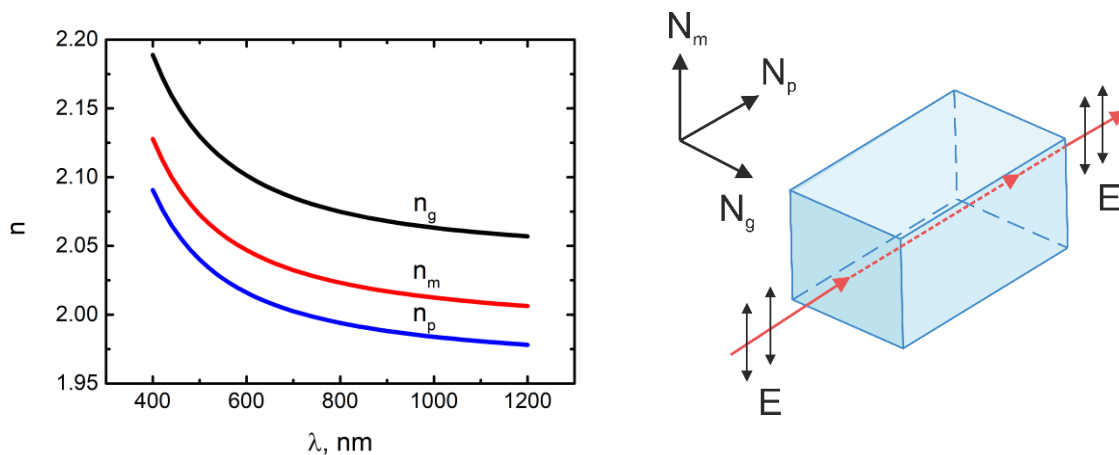
3 pav. Superkontinuumo spektrai sugeneruoti 5 mm ilgio KGW ir 5 mm ilgio YAG kristaluose.

Dėl pakankamai plataus spektro ir mažos generacijos energijos, tolesniems tyrimams buvo naudotas vien KGW kristalas. Siekiant surasti optimaliausias superkontinuumo generacijos

sąlygas, buvo išbandyti skirtingų židinio nuotolių fokusuojantys lęšiai. Rezultatai pateikti 5 pav. a). Matoma tendencija, jog naudojant trumpesnio židinio nuotolio lęšius generacijos slenkstis sumažėja. Vis dėlto pastebėta, jog fokusuojant į kristalą +50 mm židinio nuotolio lęšiu, kontinuumas tampa nestabilus, todėl +75 mm pasirinktas kaip optimaliausias variantas.

Taip pat, kadangi KGW yra dvejetainis laužiantis dviašis netiesinis kristalas, minimali energija reikalinga superkontinuumui sugeneruoti priklauso nuo kristalo orientacijos. Šį reiškinį galima paaiškinti detaliau panagrinėjus šio kristalo savybes.

Darbe naudotas N_p kristalografinės ašies kryptimi išpjautas kristalas. Šią ašį atitinka lūžio rodiklis n_p . Kitomis dvejomis pagrindinėmis ašimis N_m ir N_g lūžio rodiklis atitinkamai lygus n_m ir n_g . 4 pav. pavaizduota lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio visoms trimis pagrindinėms kristalo ašims. Kadangi kristalas išpjautas kryptimi lygiagrečia N_p ašiai, o kritusi spinduliuotė tiesiškai poliarizuota, tai priklausomai nuo kristalo orientacijos, poliarizacijos kryptis sutapatinama su N_m arba N_g ašimi ir šviesa sklinda kaip medžiaga, kurios lūžio rodiklis atitinkamai n_m ir n_g . Kadangi $n_g > n_m$, tai orientavus kristalą taip, kad poliarizacija sutaptų su N_g kryptimi, generacijos slenkstis bus mažiausias dėka didžiausio netiesinio lūžio rodiklio. Tas pats efektas būtų pasiekiamas ir pasukant kritusios šviesos poliarizaciją $\lambda/2$ plokštele, tačiau praktiniais sumetimais patogiau paversti kristalą 90° kampu išilgai pluošto sklidimo krypties.

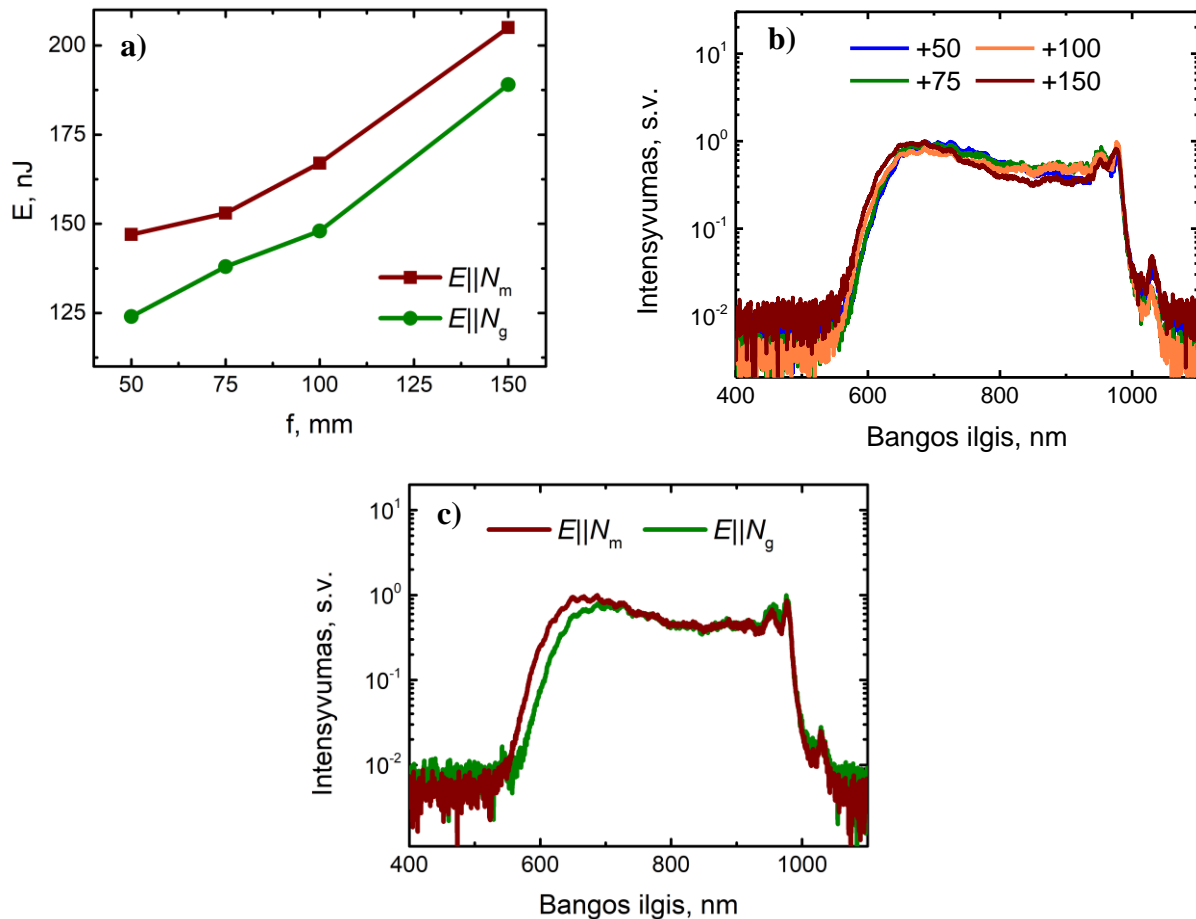


4 pav. KGW kristalo lūžio rodiklio priklausomybės nuo bangos ilgio grafikas trimis pagrindinėms kristalografinėms ašims.

Nuo kristalo orientacijos priklauso ir sugeneruoto superkontinuumo spektro plotis (5 pav. c). Matyti, jog orientavus kristalą taip, kad poliarizacijos kryptis būtų lygiagreti N_m kristalografinėi

ašiai, spektras į trumpųjų bangų pusę išplinta ~20-čia nm toliau. Taip pat šioje orientacijoje pluošto skirstinys pasižymėjo didesniu tolygumu. Orientavus kristalą taip, kad kritusios šviesos poliarizacijos kryptis būtų lygiagreti N_g ašiai, pluošto skirstinyje buvo matyti žiedas.

Nuo fokusuojančio lęšio židinio nuotolio spektro išplitimas skiriasi tik nežymiai – fokusuojant ilgesnio židinio nuotolio lęšiais, spektras išplinta labiau, tačiau skirtumas minimalus (5 pav. b). Galima pastebėti, jog trumpesnio židinio nuotolio lęšiais sugeneruotas spektras regimajame diapazone yra tolygesnis, t.y. intensyvumas mažiau varijuoja nuo bangos ilgio.



5 pav. a) Minimalios energijos reikalingos stabiliam superkontinuumui užtikrinti KGW kristale priklausomybės nuo fokusuojančio lęšio ir kristalo orientacijos grafikas; **b)** superkontinuumų sugeneruotų KGW kristale fokusuojant skirtingo židinio nuotolio lęšiais spektrai; **c)** superkontinuumų sugeneruotų KGW kristale spektro formos priklausomybės nuo kristalo orientacijos grafikas.

Nors N_g orientacijoje generacijos slenkstis yra mažesnis, tačiau dėl labiau išplitusio spektro ir tolydesnio pluošto profilio, tolimesniems tyrimams buvo pasirinkta kristalą orientuoti taip, kad poliarizacija sutaptų su N_m ašimi.

2.3. Antrosios harmonikos generacija

Lazerio antrosios harmonikos spinduliuotei generuoti buvo išbandyti du netiesiniai kristalai: β -BaB₂O₄ (BBO) ir LiB₃O₅ (LBO). Eksperimentams naudoti 2 mm ilgio I tipo BBO ($\theta = 23^\circ, \varphi = 90^\circ$) ir 2.5 mm bei 3.7 mm ilgio I tipo LBO ($\theta = 90^\circ, \varphi = 13.8^\circ$) kristalai. Lyginant šių dviejų kristalų tinkamumą antrajai harmonikai generuoti didžiausias dėmesys buvo skiriamas energijos keitimo efektyvumui, pluošto kokybei ir ilgalaikiam stabilumui, t.y. kristale neturėtų atsirasti jokių pažeidimų po ilgalaikio švitinimo fokusuota fundamentine lazerio spinduliuote.

Atliekant antrosios harmonikos generacijos eksperimentus, buvo išbandyti keletas skirtingo židinio nuotolio lęšių fokusavimui į anksčiau minėtus kristalus. Kaupinimui buvo naudojama 8.6 W galios lazerio spinduliuotė (likusi dalis sunaudota baltos šviesos kontinuumui). 3 lentelėje pateikti matavimų rezultatai.

3 lentelė. Antrosios harmonikos spinduliuotės vidutinės galios palyginimas skirtingiems netiesiniams kristalams.

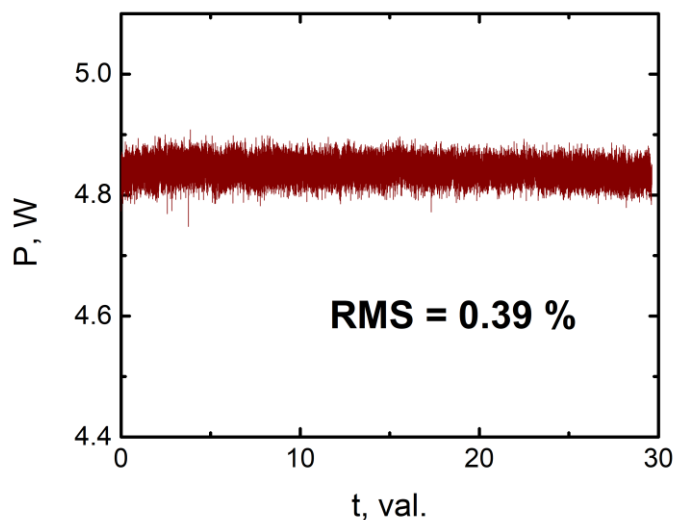
Židinio nuotolis, mm	Galia, W		
	LBO 2.5 mm	LBO 3.7 mm	BBO 2 mm
+150	4.35	- *	3.2 *
+175	4.45	- *	3.5 *
+200	4.9	4.2 **	4.7 **
Efektyvumas, %	57	48	54

* kristale vyko superkontinuumo generacija.

** kristalas greitai pasižeisdavo.

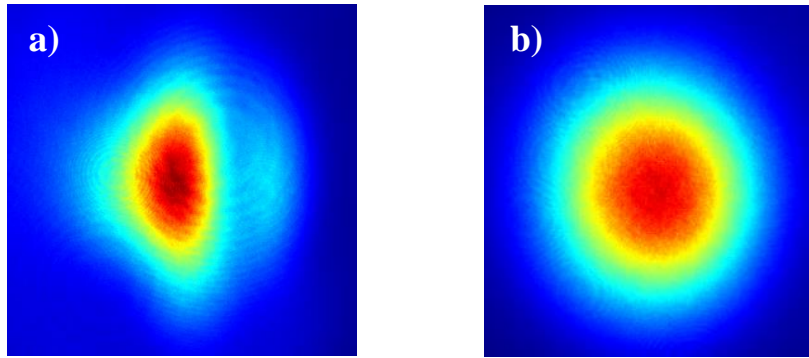
Matyti, jog vieninteliu 2.5 mm ilgio LBO kristalu buvo galima sugeneruoti stabiliai šviečiančią antrąją harmoniką, kurios generacijos metu nebuvo pažeidžiamas kristalas. Į šį kristalą

fokusuojant $f = +200$ mm židinio nuotolio lęšiu, energijos keitimo efektyvumas siekė 57 %. Atlikus ilgalaikius (>30 val.) bandymus, kristale nebuvo matyti pažeidimų. 6 pav. pateiktas antrosios harmonikos galios ilgalaikio stabilumo matavimo grafikas. Per 30 val. trukmės matavimą nebuvo užfiksuotas galios kritimas, o stabilumas siekė 0.39 %.



6 pav. Antrosios harmonikos spinduliuotės sugeneruotos 2.5 mm ilgio LBO kristale ilgalaikis vidutinės galios stabilumas.

Greta antrosios harmonikos generacijos efektyvumo palyginimo eksperimento, taip pat buvo palyginti ir sugeneruotos spinduliuotės pluošto profiliai (7 pav.). Pastebima, jog BBO kristaluose, pluoštas tampa eliptinis, dėl ko šis kristalas buvo atmestas, kaip potenciali terpė antrajai harmonikai generuoti. LBO atveju, pluoštas išlaiko apskritiminę formą. To priežastis yra didelis BBO kristalo pluošto skersinis nunešimas dėl dvejojimo lūžio. LBO kristaluose skersinio nunešimo kampas yra beveik 8 kartus mažesnis [18].



7 pav. Pluošto profiliai, kai antroji harmonika generuojama: a) BBO; b) LBO kristale.

Pluošto skersinis nunešimas apskaičiuotas teoriškai pasinaudojus SNLO programa [19]. 1-o tipo BBO kristaluose ($\theta = 23^\circ, \varphi = 90^\circ$) sugeneruotas antrosios harmonikos pluoštas nunešamas 56.98 mrad kampū. Skersinis nunešimas gali bŭt įvertintas formule:

$$\Delta = L \tan \rho, \quad (1)$$

kur L – kristalo ilgis, ρ – kampinis nunešimas.

Apskaičiavę randame, jog darbe naudotame 2 mm ilgio BBO kristalo išėjime antrosios harmonikos pluoštas nuo fundamentinės spinduliuotės pluošto atsiskiria per 114 μm išilgai skersinės koordinatės. Įvertinkime ir sufokusuotos fundamentinės spinduliuotės pluošto diametrą kristale:

$$d = \frac{4f\lambda M^2}{\pi D}, \quad (2)$$

kur f – lęšio židinio nuotolis, λ – bangos ilgis, M^2 – lazerio spinduliuotės kokybės parametras ($M = 1.05$), D – pluošto diametras prieš fokusuojantį lęšį ($D = 2.2$ mm intensyvumo pusės aukštyje). Iš (2)-os formulės randame, jog lazerio spinduliuotė sufokusuojama į 125 μm dėmę. Palyginę su skersiniu nunešimu (114 μm), matome, jog prasklidus 2 mm BBO kristalą, fundamentinės ir antrosios harmonikos pluoštai išsiskiria per beveik visą pluošto diametrą. Dėl šios priežasties mažėja energijos keitimo efektyvumas, o kartu prastėja ir pluošto kokybė – atsiranda eliptiškumas ta kryptimi, į kurią nunešama antrosios harmonikos banga.

Tuo tarpu 1-o tipo LBO kristale ($\theta = 90^\circ, \varphi = 13.8^\circ$) antrosios harmonikos pluoštas nunešamas 8.16 mrad kampū, taigi prasklidus 2.5 mm ilgio LBO kristalą, skersinis nunešimas siekia 20 μm . Šis nunešimas sudaro 1/6 sufokusuotos dėmės diametro, taigi nėra reikšmingas ir

visame kristalo ilgyje gali efektyviai vykti energijos į antrąją harmoniką keitimas, o skersinis nunešimas nesugadina pluošto profilio.

Apibendrinus rezultatus, nuspręsta, jog BBO kristalai nėra tinkama medžiaga generuoti antrąją harmoniką mažos energijos optiniuose parametriniuose stiprintuvuose, kuriuose pluoštai fokusuojami į mažą dėmę. Dėka geresnių pluošto erdvinių charakteristikų, energijos keitimo efektyvumo ir ilgalaikio stabilumo, kaip tarpė antrajai harmonikai generuoti buvo pasirinktas 2.5 mm ilgio LBO kristalas.

2.4. Pirmosios stiprinimo pakopos optimizavimas

Kaip ir antrosios harmonikos generavimo atveju, buvo lyginami du kristalai: I tipo 2 mm ilgio BBO ($\theta = 23^\circ, \varphi = 90^\circ$) ir 2.5 mm bei 3.7 mm ilgio I tipo LBO ($\theta = 90^\circ, \varphi = 13.8^\circ$). Analogiškai, reikšmingas buvo impulsų stiprinimo efektyvumas, pluošto kokybė bei ilgalaikis stabilumas. Greta šių savybių, siekta sugeneruoti ir kuo platesnio spektro impulsus su tikslu po paskutinės stiprinimo pakopos juos suspausti iki kiek galima mažesnės trukmės.

Antrosios harmonikos spinduliuotės pluoštas buvo kolimuojamas $f = +100$ mm židinio nuotolio lęšiu ir prieš pirmosios stiprinimo pakopos kristalą fokusuojamas $f = +75$ mm židinio nuotolio lęšiu. Dėl stiprintuvo kompaktiškumo, tas pats lęšis buvo naudojamas ir baltos šviesos kontinuumo pluoštui fokusuoti į kristalą. Ši lęšių konfigūracija buvo naudojama atliekant eksperimentus su 2.5 mm LBO ir 2 mm BBO kristalais. Esant toms pačioms sąlygoms 3.7 mm ilgio LBO kristale dėl pernelyg didelio spinduliuotės intensyvumo imdavo generotis nepageidaujamas superkontinuumas. Dėl šios priežasties, matavimams su 3.7 mm LBO kristalu antrosios harmonikos spinduliuotė buvo kolimuojama ne $f = +100$ mm, o $f = +75$ mm židinio nuotolio lęšiu siekiant sumažinti fokusavimo skaitinę apertūrą. Tai leido efektyviai stiprinti užkrato impulsus be jokių parazitinių reiškinių. Tokioje lęšių konfigūracijoje 2.5 mm LBO ir 2 mm BBO kristaluose nebebuvo galima pasiekti efektyvaus stiprinimo iki prasidedant nepagaudajamai superkontinuumo generacijai.

Parametrinis stiprinimas kristaluose buvo realizuojamas kolinearioje konfigūracijoje siekiant kuo efektyvesnio stiprinimo. Bangos ilgio derinimas buvo atliekamas keičiant kristalo

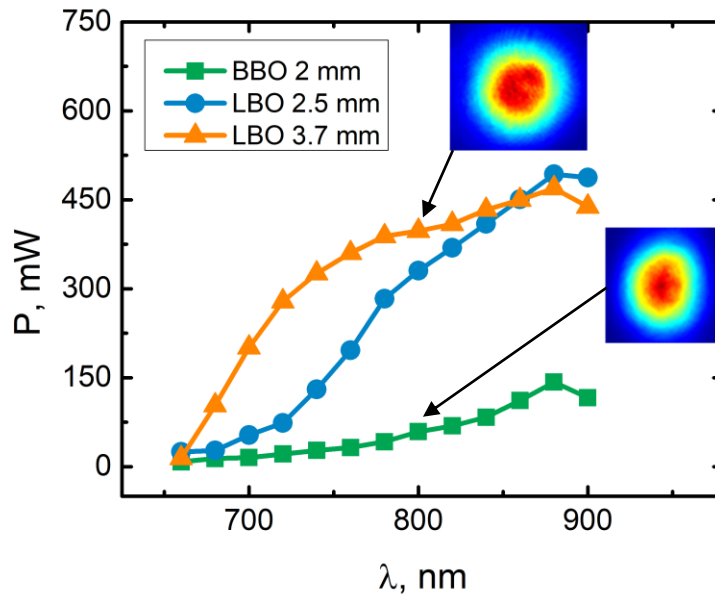
fazinio sinchronizmo kampą ir užkrato impulsų laikinį vėlinimą panaudojant motorizuotą vėlinimo liniją. Eksperimentiškai išmatuotos sustiprintos spinduliuotės vidutinės galios priklausomybės nuo bangos ilgio kreivės pateiktos 8 pav. Grafike matuota bendra signalinės ir šalutinės bangų vidutinė galia. Kaupinimui naudotos antrosios harmonikos spinduliuotės vidutinė galia siekė 4.9 W.

Matome, jog didžiausias stiprinimo efektyvumas pasiekiamas 3.7 mm ilgio LBO kristale. Taip pat, pastebėta, jog norint pasiekti efektyvų stiprinimą plonesniuose LBO ir BBO kristaluose reikia fokusuoti didesne skaitine apertūra, dėl ko atsiranda papildomų problemų: tenka dirbti arti kristalų pažeidimo slenksčio. Ilgesniame LBO kristale ši problema apeinama išnaudojant ilgesnį tarpbanginės sąveikos ilgį, dėl ko galima naudoti mažesnio intensyvumo spinduliuotę.

Palyginus BBO ir LBO kristaluose pastiprintus signalinės spinduliuotės pluoštus, taip pat matyti, jog, kaip ir antrosios harmonikos generacijos atveju, BBO kristale pastiprintas pluoštas tampa eliptinis (8 pav.). LBO kristale eliptiškumas siekia 0.98, o BBO kristale jis krenta iki 0.86. BBO kristaluose atsirandantis pluošto eliptiškumas atsiranda dėl tos pačios priežasties, kaip ir antrosios harmonikos generacijos atveju – skersinio pluošto nunešimo.

Nedidelį BBO kristalo efektyvumą galima paaiškinti didesniu šiems kristalams būdingu skersiniu nunešimu. Naudojant mažus, fokusuotus pluoštus, tai yra vienas pagrindinių veiksnių mažinančių energijos keitimo efektyvumą, nes sutrumpėja efektyvus tarpbanginės sąveikos ilgis. Kita priežastis mažinanti impulsų sąveikos ilgį – grupinis greičių nederinimas.

Apibendrinus rezultatus, matyti, jog LBO kristalai mažos energijos parametrinio stiprinimo pakopose yra tinkamesni naudoti nei BBO.

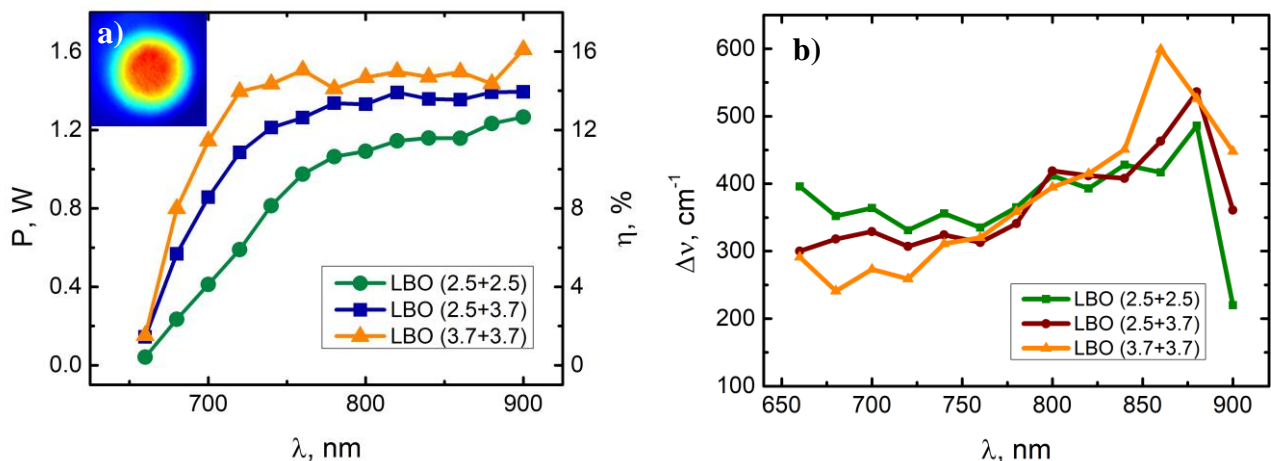


8 pav. Pirmojoje stiprinimo pakopoje sugeneruotų bangų vidutinės galios priklausomybė nuo stiprinamo bangos ilgio naudojant skirtingus netiesinius kristalus. Pavaizduota bendra signalinės ir šalutinės bangų galia.

2.5. Antrosios stiprinimo pakopos optimizavimas

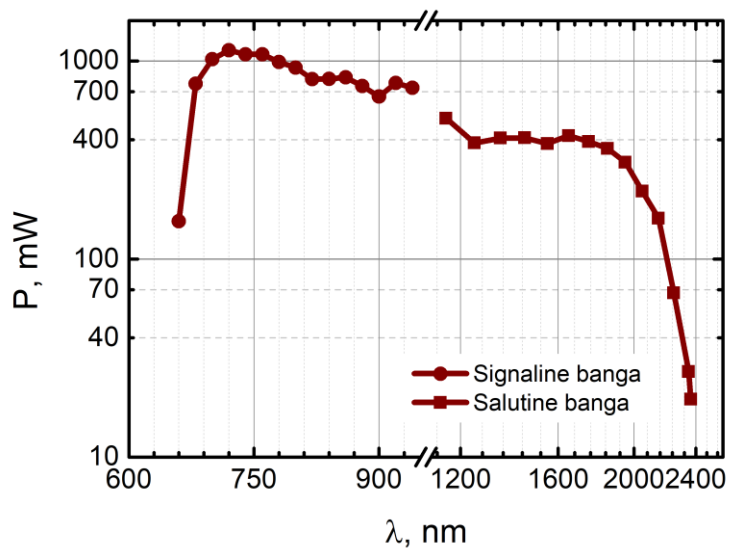
Tyrinėjant antrosios stiprinimo pakopos veikimą buvo išbandytas tas pats LBO ir BBO kristalų rinkinys. Atskyrus signalinę ir kaupinimo bangas dichroiniu veidrodžiu, sukolinuoti signalinės ir kaupinimo bangos pluoštai buvo fokusuojami į antrąjį stiprinimo kristalą atitinkamai $f = +175$ mm lęšiu signalinei ir $f = +150$ mm lęšiu kaupinimo bangai.

9 pav. a) pateiktas energijos keitimo efektyvumo į signalinę ir šalutinę bangas priklausomybės nuo bangos ilgio grafikas skirtingiems netiesiniams kristalams. Grafiko dešiniojoje ašyje atidėtas energijos keitimo efektyvumas rodo bendrą įvadinės 1033 nm bangos ilgio, 1 uJ (10 W) lazerio spinduliuotės energijos keitimą į signalinės ir šalutinės bangos energiją. 9 pav. b) dalyje atitinkamiems kristalams pateiktas spektro pločio priklausomybės nuo bangos ilgio grafikas. Matyti, jog abejoms pakopoms naudojant 3.7 mm LBO kristalus, galima pasiekti didžiausią efektyvumą. Taip pat, naudojant du 3.7 mm ilgio LBO kristalus gaunami plačiausi spektrai >760 nm ruože. Nors šie kristalai ir storesni už kitus bandytus, tačiau stiprinamo spektro plotis didžiojoje dalyje derinimo diapazono nenukenčia. Pagrindinė to priežastis galėtų būti ta, jog ilgesniame kristale pasiekiamas didesnis stiprinimo koeficientas, o fazinio sinchronizmo juostos plotis tiesiogiai proporcingas stiprinimui kristale, taigi didesnis stiprinimo koeficientas gali nustelbti fazinio sinchronizmo juostos pločio mažėjimą dėl ilgesnio kristalo ir grupinių greičių nederinimo [10].



9 pav. a) Abiejų stiprinimo pakopų energijos keitimo efektyvumo į signalinę ir šalutinę bangas. Išnašoje pateiktas pluošto profilis ties 800 nm bangos ilgiu naudojant abu 3.7 mm ilgio LBO kristalus; **b)** signalinės bangos spektro pločio priklausomybės nuo bangos ilgio grafikas skirtingiems netiesiniams kristalams.

9 pav. a) grafiko išnašoje pavaizduotas signalinės bangos pluošto profilis ties 800 nm bangos ilgiu abejuose stiprinimo pakopose naudojant 3.7 mm ilgio LBO kristalus. Matome, jog pluošto profilis tolygus, jame nematyti jokių iškreipimų, kuriuos galėtų sukelti aukštos galios kaupinimo spinduliuotė. Pluošto eliptiškumas siekė 0.97. Nors naudojant kitas kristalų kombinacijas, pluoštas išlaiko puikias savybes, tačiau dėl efektyvaus energijos keitimo ir pakankamai plačių spektrų, 3.7 mm ilgio LBO kristalai atrodo kaip tinkamiausi tokio tipo optiniame parametriniame stiprintuve. 10 pav. pateikta bendra derinimo kreivė signalinei ir šalutinei bangoms. Neužpildytas tarpas derinimo srityje tarp 940 nm ir 1150 nm atsiranda dėl parametrinio stiprinimo pakopose naudojamų I-o tipo kristalų. Kadangi šio tipo kristaluose signalinės ir šalutinės bangų poliarizacijos sutampa, artėjant bangos ilgiui prie išsigimusio režimo (~1030 nm) atsiranda interferencija tarp signalinės ir šalutinės bangų, dėl kurios spektre atsiranda moduliacija. Ši problema galėtų būti išspręsta, derinimo kreivė būtų tolydi, parametriniam stiprinimui naudojant II-o tipo netiesinius kristalus.

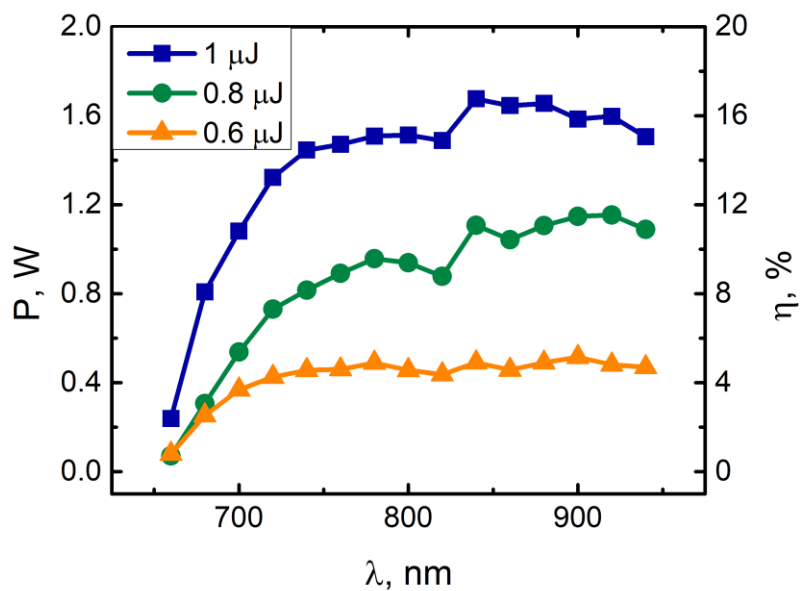


10 pav. Visas signalinės ir šalutinės bangų derinimo diapazonas.

Siekiant patikrinti galimybę sukonstruoti optinį parametrinį stiprintuvą pritaikyti dar mažesnės energijos (didesnio pasikartojimo dažnio) kaupinimo lazeriui, buvo atliktas išvadinės spinduliuotės galios priklausomybės nuo lazerio kaupinimo energijos tyrimas. Rezultatai pateikti 11 pav. Energijos keitimo efektyvumas skaičiuojamas nuo visos į optinį parametrinį stiprintuvą įvedamos spinduliuotės. Keičiant kaupinimo energiją, schemeje jokie esminiai pakeitimai nebuvo

atliekami išskyrus priderintas kaupinimo spinduliuotės (antrosios harmonikos) intensyvumas parametriniuose kristaluose keičiant fokusuojančio lęšio padėtį.

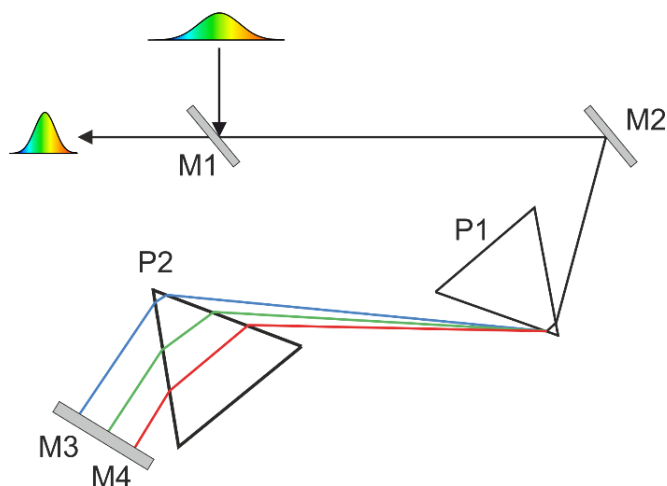
Matyti, jog net sumažinus lazerio kaupinimo energiją iki $0.8 \mu\text{J}$, energijos keitimo efektyvumas viršijo 10 %. Nors kaupinant $0.6 \mu\text{J}$ energijos spinduliuote maksimalus efektyvumas krenta iki 5 %, tačiau galima daryti išvadą, jog tokios konstrukcijos stiprintuvas iš esmės gali būti naudojamas su silpnais kaupinimo lazeriniais šaltiniais arba kaip didesnės lazerinės sistemos dalis panaudojant tik labai nedidelę dalį spinduliuotės.



11 pav. Optinio parametrinio stiprintuvo išvadinės spinduliuotės galios priklausomybės nuo kaupinimo energijos grafikas. Matuota bendra signalinės ir šaltinės bangų galia.

2.6. Impulsų laikinės ir dažninės charakteristikos

Po antrosios parametrinio stiprinimo pakopos sugeneruoti impulsai dėl dispersijos lieka teigiamai čirpuoti laike, o jų trukmė yra artima lazerio impulsų trukmei. Siekiant suspausti signalinės bangos impulsus iki minimalios trukmės, buvo sukonstruotas dviejų SF10 stiklo prizmių impulsų spaustuvas. Šio spaustuvo schema pateikta 12 pav. Principinis šio spaustuvo veikimas yra pagrįstas yra grupinių greičių vėlinimu skirtingoms impulsų spektrinėms komponentėms.



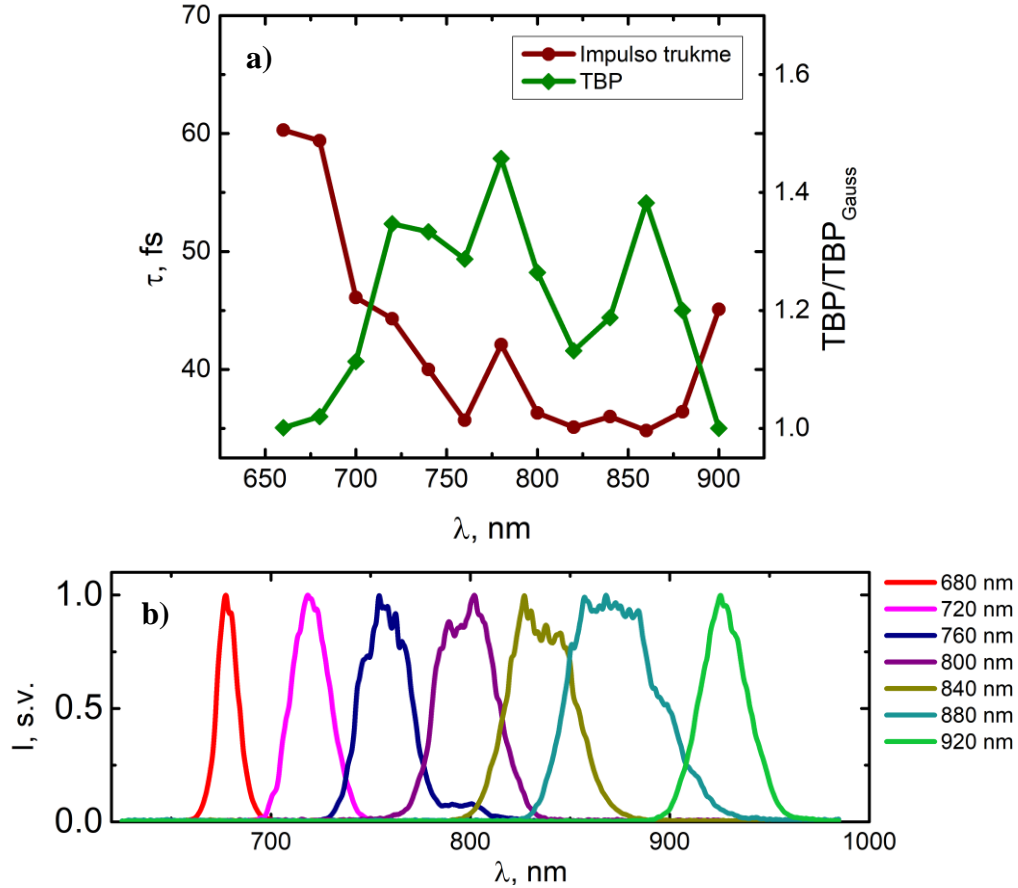
12 pav. Signalinės bangos impulsų spaustuvas.

Į impulsų spaustuva ateinantys teigiamai čirpuoti impulsai veidrodžiais M1 ir M2 briusterio kampu nukreipiami į pirmąją prizmę P1, kuri išskleidžia pluoštą į atskiras spektrines komponentes. Toliau šios komponentės keliauja link antrosios prizmės P2, kurioje ilgesnės bangos prasklinda didesnę optinį kelią, nei trumpesnės, taip įvedant neigiamos dispersijos. Dėl papildomos neigiamos dispersijos ilgosios ir trumposios komponentės suartinamos laike ir impulsas trumpėja, tačiau lieka erdvinis bangų ilgių pasiskirstymas. Tam, kad panaikinti erdvinį čirpą, impulsai prasklidę prizmę P2, atspindimi retroreflektoriais M3, M4 ir grįžta tuo pačiu keliu per prizmes P2 ir P1, tik jau kitame aukštyje. Galiausiai spaustuvo išėjime impulsų spektrinės komponentės lieka vėl suvestos į pluoštą, o laike impulsas sutrumpėja.

Abi prizmės P1 ir P2 pagamintos iš tos pačios medžiagos – SF10, o jų viršūnės išpjautos 60° kampu. Atstumas tarp prizmių yra fiksuotas ir lygus 320 mm (tarp prizmių viršūnių), tačiau prizmė P2 pritaisyta ant slankiojančios motorizuotos linijos, tam kad būtų galima keisti optinį kelią kurį impulsai prasklinda joje. Keičiant šį kelią, varijuojama įnešama neigiama dispersija, kas leidžia optimizuoti impulsų trukmę visiems signalinės bangos ilgiams.

Eksperimentiškai išmatuotos suspaustų signalinės bangos impulsų trukmės prasklidus spaustuva pateiktos 13 pav. Impulsų trukmės matavimai atlikti naudojant daugiašūvį autokoreliatorių. Greta pateiktas impulso trukmės ir spektro pločio sandaugos (TBP - ang. Time-Bandwidth Product) parametro santykio su TBP parametru idealiam spektriškai ribotam impulsui

priklausomybės nuo bangos ilgio grafikas. TBP parametras yra spektro pločio ir impulso trukmės sandauga, charakterizuojanti, kaip arti idealių yra suspausti impulsai.

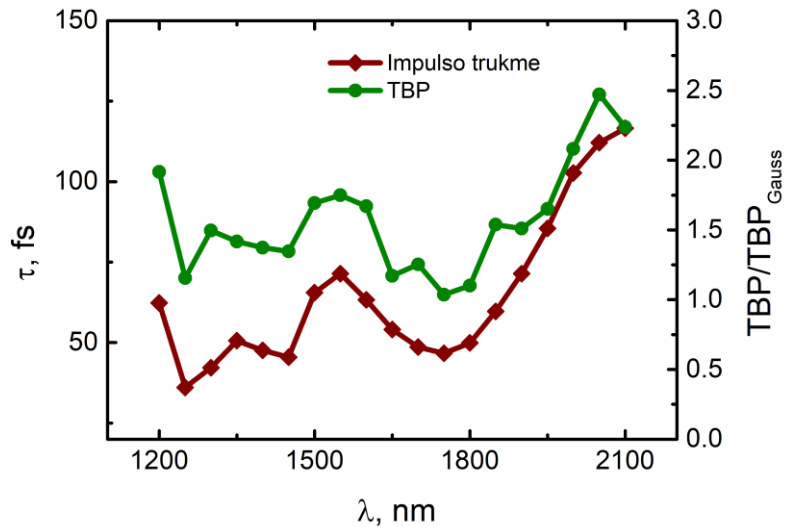


13 pav. a) Signalinės bangos impulso trukmės spūdos rezultatų grafikas; **b)** Signalinės bangos spektrai.

Matyti, jog visame signalinės bangos diapazone impulsai suspaudžiami iki 34 – 60 fs trukmės, o TBP parametras neviršija 1.5. Sumažinti TBP parametro vertę, t.y. suspausti impulsų dar arčiau spektriškai ribotos trukmės galimai neleido prizminiame spaustuve įnešama papildoma trečios eilės dispersija.

Kadangi parametrinio stiprinimo metu sugeneruota šalutinė banga yra priešingai čirpuota nei signalinė, t.y. čirpuota neigiamai, jos impulsams suspausti reikalinga įvesti papildomai teigiamos dispersijos. Šiam tikslui buvo naudojamas ZnSe stiklas. Priklausomai nuo šalutinės bangos ilgio, reikalingas vis kitoks kiekis teigiamos dispersijos, norint suspausti impulsus iki kiek

įmanoma mažesnės trukmės, taigi spūda buvo naudojami trijų skirtingų ilgių ZnSe stikliukai: 3 mm, 5 mm ir 10 mm ilgio. Impulsų spūda buvo optimizuojama į šalutinės bangos pluošto kelią įstatant tokio ilgio stikliuką, kad impulsai susispaustų iki minimalios galimos trukmės. 1150 – 135 nm bangų ilgių ruože naudotas 3 mm ilgio, 1350 – 1550 nm naudotas 5 mm, o 1550 – 2300 nm diapazone 10 mm ilgio ZnSe stiklas. Impulsų trukmės matavimų rezultatai pateikti 14 pav.



14 pav. Šalutinės bangos impulso trukmės spūdos rezultatų grafikas.

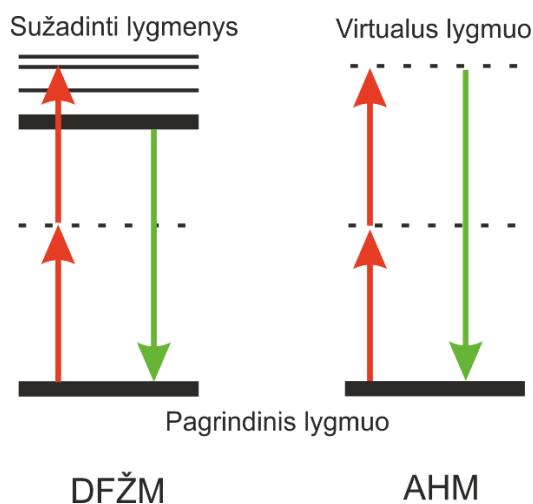
Šalutinės bangos 1200-2100 nm diapazone impulsai suspausti iki 35 – 120 fs, o TBP/TBP_{Gauss} santykis mažesnis už 2.5 visoje derinimo srityje. Tokios trukmės impulsai yra tinkami naudoti įvairiuose mikroskopijos ir spektroskopijos praktiniuose taikymuose [20]. Tolesniame skyriuje ir aptariamas praktinis šio optinio parametrinio stiprintuvo generuojamos spinduliuotės pritaikymas.

3. Praktinis optinio parametrinio stiprintuvo pritaikymas mikroskopijoje

3.1. Antrosios harmonikos vaizdinimo mikroskopija

Antrosios harmonikos vaizdinimo mikroskopija (AHM) yra viena iš netiesinės daugiafotonės mikroskopijos rūšių, paremta antrosios harmonikos generacija bandinyje. AHM jau spėjo įsitvirtinti, kaip patikimas įrankis tirti ląstelių ir audinių struktūrą bei jų funkcijas. Šis būdas yra patraukli alternatyva įprastam, fluorescencija paremtam, daugiafotoniui vaizdinimui.

AHM, kaip ir dvifotonė fluorescencijos žadinimo mikroskopija (DFŽM), paremta vienalaikė dviejų fotonų sąveika bandinyje (15 pav.). Tačiau, priešingai nei DFŽM, kur bandinys sugeria du fotonus ir išspinduliuoja vieną, mažesnės energijos fluorescencijos fotoną, AHM sugertis nevyksta, nes antrosios harmonikos generacijos metu dalyvauja tik virtualūs energiniai lygmenys. Šio tipo mikroskopijoje, bandinį apšvietus intensyvia spinduliuote, bandinys išsklaido du kartus didesnės energijos fotonus (du kartus mažesnio bangos ilgio nei žadinama), kaip antrosios harmonikos spinduliuotę. Ši isklaidyta šviesa surenkama detektoriumi, kas leidžia stebėti bandinio struktūrą.



15 pav. Dvifotonės fluorescencijos žadinimo (DFŽM) ir antros harmonikos mikroskopijos (AHM) principų palyginimas.

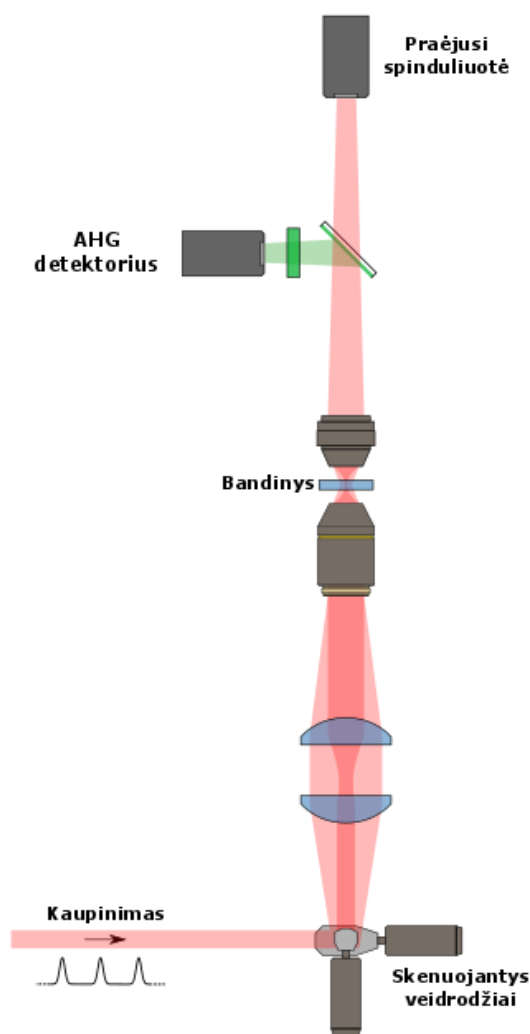
AHM pasižymi keletu privalumų audinių ir ląstelių vaizdinimui. Kadangi antrosios harmonikos generacijos metu nedalyvauja realūs lygmenys, t.y. molekulės nesužadamos,

išvengiami tokie nepageidaujami efektai, kaip fototoksiškumas ar fotoblyškimas. Taip pat, kadangi daugelis biologinių terpių generuoja ryškius antros harmonikos signalus, nebėra būtinybės naudoti molekulių žymėjimui naudoti dažiklius, kurie gali paveikti natūralų biologinės sistemos funkcionavimą. Be to, naudojant artimojo infraraudonojo diapazono spinduliuotę, galima įsiskverbti giliau į audinius ir formuoti trimačius vaizdus.

Svarbu paminėti, jog antrosios harmonikos generacija galima tik necentrosimetrinėse molekulėse, randamose tokiuose biologiniuose audiniuose, kuriuose yra kolagenų [21], miozino [22] ar tubulino [23]. Kolagenas yra labiausiai paplitęs baltymas žmogaus kūne [24], tad kadangi jis randamas jungiamuosiuose audiniuose, antrosios harmonikos signalas gali būti sėkmingai generuojamas odoje, kauluose ar raumenyse [25]. Tai leidžia tokius audinius vaizdinti panaudojant AHM. Taip pat, kolagenas pasižymi struktūra puikiai tinkančia antrosios harmonikos generacijai dėl savo didelio anizotropiškumo ir tankaus išsidėstymo. Dėka šių savybių, sugeneruotas antrosios harmonikos signalas koherentiškai stiprinamas pasikartojančiose kolageno struktūrose.

3.2. Mikroskopo sistema ir jos panaudojimas biologiniam vaizdinimui

Siekiant patikrinti galimybę darbe aprašytą optinį parametrinį stiprintuvą panaudoti praktiškai, buvo sukonstruotas skenuojantis antrosios harmonikos vaizdinimo mikroskopas, kurio žadinimo šaltinis ir buvo darbe tirtas parametrinis stiprintuvas. Principinė mikroskopo schema pateikta 16 pav.



16 pav. Antros harmonikos generacijos vaizdinimo mikroskopo principinė schema.

Į mikroskope esančius skenuojančius veidrodžius nukreipta optinio parametrinio stiprintuvo sugeneruota šalutinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis 1200 nm. Skenuojantys veidrodžiai reikalingi pluošto praskenavimui per visą bandinio plokštumą. Toliau pluoštas lęšiniu teleskopu padidinamas, kad užimtų visą objektyvo apertūrą ir objektyvu fokusuojamas į bandinį. Fokusavimui naudotas Olympus PCN Plan 40x/0.65 objektyvas, kurio skaitinė apertūra $NA=0.65$. Spinduliuotė filtruojama tiek, kad bandinį pasiektų ~ 9 mW galios šviesa.

Ašinė skyra įvertinta registruojant trečios harmonikos, sugeneruotos stiklo-oro sandūroje, signalą ir skenuojant z kryptimi išilgai pluošto sklaidimo krypties. Trečia harmonika generuota

bandinio vietoje įstačius ploną stiklo plokštelę. Skenavimo rezultatai parodė, jog ašinė skyra buvo 8.8 μm. Pasinaudoję Abė's difrakcijos formulėmis skyrai [25]:

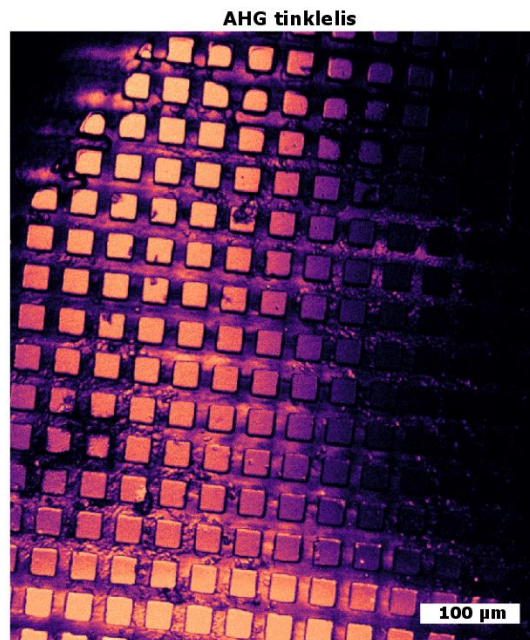
$$d_z = \frac{2 \lambda}{NA^2}$$

$$d_{xy} = \frac{\lambda}{2NA}$$

galime apytiksliai įsivertinti, jog skyra X ir Y koordinatėmis mūsų atveju yra 1.1 μm.

Už objektyvo šviesa vėl surenkama lęšiu, o sugeneruotas antros harmonikos signalas atskiriamas filtrais praleidžiančiais signalą 550 – 750 nm bangos ilgių ruože. Nufiltruota antros harmonikos spinduliuotė nukreipiama į detektorių. Vaizdinami bandiniai buvo pozicijuoti ant motorizuoto pozicionavimo staliuko judančio XYZ koordinatėmis. Vaizdas registruojamas raštriškai skenuojant bandinio paviršių.

Pirmiesiems bandymams mikroskopu užregistruoti vaizdą buvo panaudotas plonas 25 μm storio metalinis tinklelis pritvirtintas prie antrą harmoniką generuojančio 350 μm storio BBO kristalo paviršiaus. Kristale sugeneruota antroji harmonika apšviečia tinklelį ir leidžia vizualiai stebėti ir išskirti jo kontūrus (17 pav.).



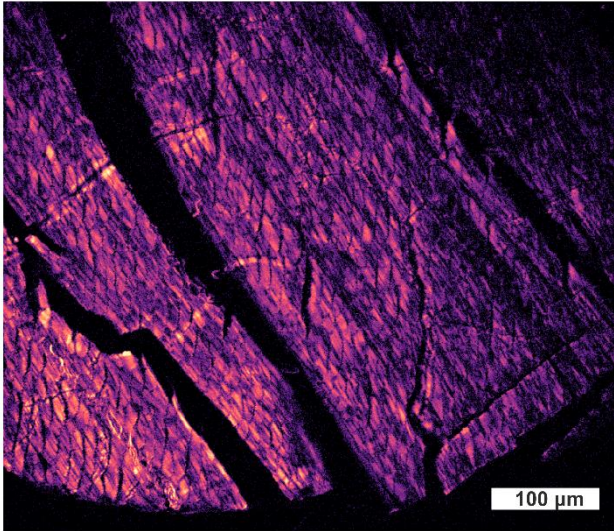
17 pav. Metalinio tinklelio ant antrą harmoniką generuojančio kristalo vaizdas.

Toliau buvo išbandyti gyvo organizmo – žiurkės, bandiniai. Tam buvo naudotas įvairių žiurkės organų bandinių mikromasyvas. Kiekvieno bandinio storis – 5 μm . Mikroskopu užregistruoti žiurkės skeleto raumenų, inkstų, žarnos, plaučių ir kitų bandinių vaizdai. Pagrindiniai rezultatai pateikti 18 pav.

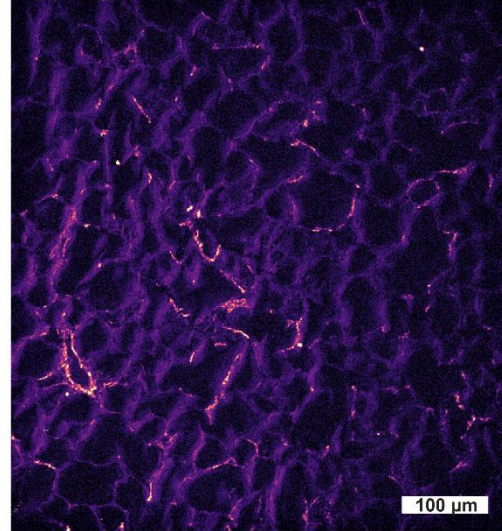
Matome, jog darbe tirtu optiniu parametriniu stiprintuvu sujungtu su mikroskopu galime gauti aiškius bandinių vaizdus. Verta atkreipti dėmesį į tai, jog kai kurie audiniai (pavyzdžiui, raumens) generavo stipresni antros harmonikos signalą ir matomi ryškiau (ypač lyginant su plaučių vaizdu). Taip yra dėl to, kad raumenyse gausu miozino ir jis išsidėstęs pakankamai tvarkingai ilgame atstume – tai leidžia antrosios harmonikos signalui konstruktyviai stiprintis kaupinimo spinduliuotei sklindant bandiniu [20]. Tas pats galioja ir apšvitinus gaubtinės žarnos bandinį – gaubtinėje žarnoje yra didelė koncentracija kolageno, kuris išsidėstęs tankiai ir periodiškai, kas taip pat didina generuojamą signalą. Tuo tarpu plaučiuose medžiagų, pasižyminčių dideliu netiesiškumu (tokių kaip miozinas ar kolagenas), yra nedaug, o ir išsidėstę jie netvarkingai. Dėl šios priežasties bandinyje antroji harmonika generuojama neefektyviai ir dėl netvarkingo išsidėstymo interferuoja destruktvyviai, kas silpnina matomą signalą.

Apibendrinant, galime teigti, jog darbe tyrinėtas ir sukonstruotas femtosekundinis optinis parametrinis stiprintuvas gali būti sėkmingai pritaikytas mikroskopijoje.

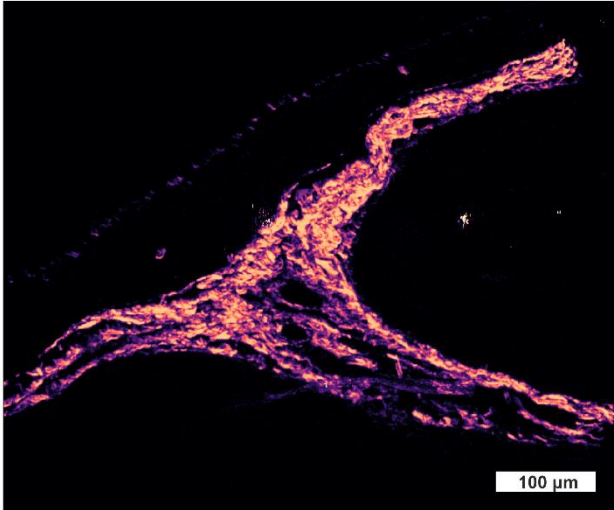
Žiurkės skeleto raumuo



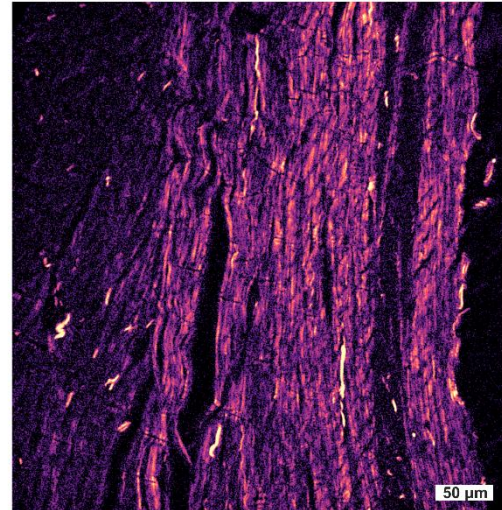
Žiurkės plaučiai



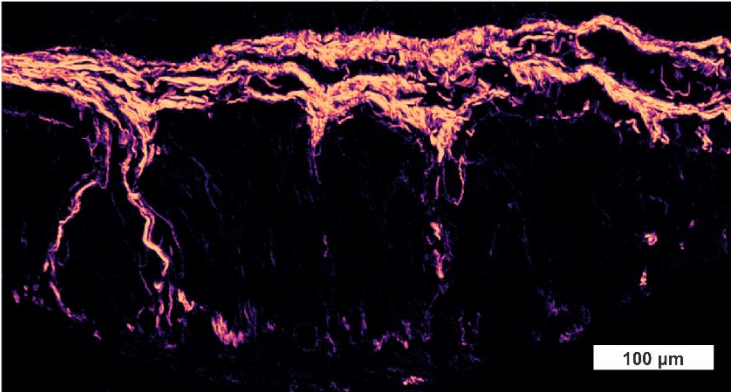
Žiurkės gaubtinė žarna



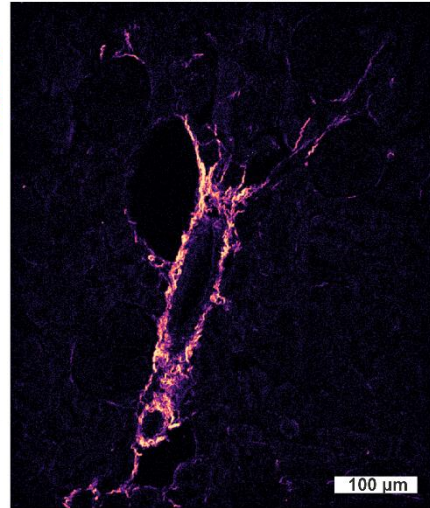
Žiurkės širdies raumuo



Žiurkės gaubtinė žarna



Žiurkės inkstas



18 pav. Įvairių žiurkės bandinių antrosios harmonikos vaizdai.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Darbo metu buvo sukonstruotas femtosekundinis optinis parametrinis stiprintuvas ir pirmą kartą pademonstruota jo veika kaupinant $1 \mu\text{J}$ energijos impulsais, kurių pasikartojimo dažnis 10 MHz.
2. Ištirta stiprintuvo veika naudojant skirtingas netiesines medžiagas superkontinuumo, antrosios harmonikos generacijai ir parametrinio stiprinimo pakopoms.
3. Maksimalus pasiektas lazerio spinduliuotės energijos keitimo į signalinę ir šalutinę bangas efektyvumas siekia 16 %. Maksimali išvadinė galia lygi 1.2 W signalinei (750 nm) ir 0.4 W šalutinei (1640 nm) bangai.
4. Pademonstruota išvadinės spinduliuotės impulsų spūda signalinei bangai iki 34 – 60 fs ir 35 – 120 fs šalutinei bangai.
5. Darbe tirtas optinis parametrinis stiprintuvas gali būti sėkmingai panaudotas antrosios harmonikos generacijos mikroskopijoje, kaip kaupinimo šaltinis.

Literatūros sąrašas

- [1] G. Cerullo, S. De Silvestri, Ultrafast optical parametric amplifiers, *Rev. Sci. Instrum.* **74**(1), 1–18 (2003)
- [2] Claire Lefort, A review of biomedical multiphoton microscopy and its laser sources, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**, 423001 (2017)
- [3] <http://www.spectra-physics.com/products/ultrafast-lasers/mai-tai>
- [4] J. Rothhardt, S. Hädrich, D. N. Schimpf, J. Limpert, A. Tünnermann, High repetition rate fiber amplifier pumped sub-20 fs optical parametric amplifier, *Opt. Express* **15**, 16729-16736 (2007)
- [5] Christian Schriever, Stefan Lochbrunner, Patrizia Krok, Eberhard Riedle, Tunable pulses from below 300 to 970 nm with durations down to 14 fs based on a 2 MHz ytterbium-doped fiber system, *Opt. Lett.* **33**, 192-194 (2008)
- [6] J. Nillon, O. Cregut, C. Bressler, S. Haacke, 2 MHz tunable non collinear optical parametric amplifiers with pulse durations down to 6 fs, in *19th International Conference on Ultrafast Phenomena*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2014), pp. 09.Wed.P3.57
- [7] Alexander Killi, Andy Steinmann, Guido Palmer, Uwe Morgner, Hartmut Bartelt, Jens Kobelke, Megahertz optical parametric amplifier pumped by a femtosecond oscillator, *Opt. Lett.* **31**, 125-127 (2006)
- [8] http://www.spectraphysics.com/assets/client_files/files/documents/datasheets/EurOPA%20Data%20Sheet.pdf
- [9] A. Dubietis, *Netiesinė optika*, Vilniaus universiteto leidykla 2011
- [10] C. Manzoni, G Cerullo, Design criteria for ultrafast optical parametric amplifiers. *J. Opt.* **18**, 103501 (2016)
- [11] R. R. Alfano, S. L. Shapiro, Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass, *Physical Review Letters* **96**, 193901 (2006)
- [12] Aleksei M Zheltikov, Let there be white light: supercontinuum generation by ultrashort laser pulses, *Phys.-Usp.* **49**, 605 (2006)

- [13] Alfano Robert, Supercontinuum Generation in Materials (Solids, Liquids, Gases, Air). In: *The Supercontinuum Laser Source*. (Springer, New York, 2006)
- [14] A. Brodeur, S. L. Chin, Band-gap dependence of the ultrafast white-light continuum, *Physical Review Letters* **80**, 4406-4409 (1998)
- [15] A. Major, F. Yoshino, I. Nikolakakos, J.S. Aitchison, P.W.E. Smith, *Opt. Lett.* **29**, 602 (2004)
- [16] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer, Berlin, 2006)
- [17] A. Major, J.S. Aitchison, P. W. E. Smith, F. Druon, P. Georges, B. Viana, Z-scan measurements of the nonlinear refractive indices of novel Yb-doped laser crystal hosts, *Appl. Phys. B* **80**, 199–201 (2005)
- [18] M. J. Guardalben, J. Keegan, L. J. Waxer, V. Bagnoud, I. A. Begishev, J. Puth, J. D. Zuegel, Design of a highly stable, high-conversion-efficiency, optical parametric chirped-pulse amplification system with good beam quality, *Opt. Express* **11**, 2511-2524 (2003)
- [19] <http://www.as-photonics.com/snlo>
- [20] C. Lefort, A review of biomedical multiphoton microscopy and its laser sources, *Journal of Physics D: Applied Physics* **50**, 42 (2017)
- [21] R. M. Williams, W. R. Zipfel, W. W. Webb, Interpreting second-harmonic generation images of collagen I fibrils, *Biophys. J.*; **88**(2): 1377–1386 (2005).
- [22] S. V. Plotnikov, A. Millard, P. Campagnola, W. Mohler, Characterization of the myosin-based source for second-harmonic generation from muscle sarcomeres, *Biophys. J.*; **90**(2), 328–339 (2006)
- [23] D. A. Dombeck, K. A. Kasischke, H. D. Vishwasrao, M. Ingelsson, B. T. Hyman, W. W. Webb, Uniform polarity microtubule assemblies imaged in native brain tissue by second-harmonic generation microscopy, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*; **100**(12), 7081–7086 (2003)
- [24] H. Lodish, A. Berk, C. A. Kaiser, M. Krieger, A. Bretscher, H. Ploegh, A. Amon, M. P. Scott, *Molecular cell biology* (W.H. Freeman and Company, New York, 2013)
- [25] G. Cox, E. Kable, M. D. Gorrel, Three-dimensional imaging of collagen using second harmonic generation, *J. Struct. Biol.*, **141**(1), 53–62 (2003)

Santrauka

Karolis Jurkus

AUKŠTO PASIKARTOJIMO DAŽNIO OPTINIO PARAMETRINIO STIPRINTUVO TYRIMAS

Optinis parametrinis stiprinimas yra vienas patraukliausių metodų keisti lazerinio šaltinio bangos ilgį plačiame diapazone. Kai kuriems taikymams didelės reikšmės turi aukštas impulsų pasikartojimo dažnis (>2 MHz) ir santykinai didelė vidutinė spinduliuotės galia. Esant tokiam aukštam pasikartojimo dažniui, lazeriai generuoja labai mažos energijos impulsus, kas komplikuoja optinio parametrinio stiprintuvo konstravimą. Šiame darbe pirmą kartą demonstruojamas 10 MHz pasikartojimo dažniu ir <1 μ J energijos impulsais kaupinamo femtosekundinio optinio parametrinio stiprintuvo veikimas.

Darbe aprašomi optinio parametrinio stiprintuvo optimizavimo eksperimentai ir jų rezultatai. Kiekybiškai palyginimas skirtingų netiesinių terpių tinkamumas baltos šviesos kontinuumo, antrosios harmonikos generacijai ir parametriniam stiprinimui.

Aprašytas optinis parametrinis stiprintuvas efektyviai generuoja spinduliuotę 660 – 900 nm ir 1200 – 2340 nm bangos ilgių diapazone.

Darbo metu sukonstruotas optinis parametrinis stiprintuvas sėkmingai pritaikytas antrosios harmonikos generacijos mikroskopijoje biologiniams objektams vaizdinti.

Abstract

Karolis Jurkus

INVESTIGATION OF HIGH REPETITION RATE OPTICAL PARAMETRIC AMPLIFIER

Optical parametric amplification is one the most attractive methods for tuning the wavelength of a laser source in a broad range. For some applications high repetition rate (>2 MHz) and relatively high average power is of most importance. However, at such high repetition rates, conventional lasers generate very low-energy pulses which complicates the operation of an optical parametric amplifier. In this work, for the first time operation of a femtosecond optical parametric amplifier pumped by <1 μJ energy pulses at 10 MHz repetition rate is demonstrated.

In this work, experiments and results of such optical parametric amplifier optimization are presented. Different nonlinear media are quantitatively compared regarding their suitability for white light continuum, second harmonic generation and parametric amplification

The described optical parametric amplifier effectively generates radiation in the 660 – 900 nm and 1200 – 2340 nm wavelength range.

The optical parametric amplifier developed during this work was successfully employed as a pump source in second harmonic generation microscopy for imaging of biological samples.