### VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Ignas

STASEVIČIUS

# Pakopinio netiesiškumo įtaka femtosekundinio optinio parametrinio osciliatoriaus charakteristikoms

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

Fiziniai mokslai,

Fizika (N 002)

VILNIUS 2020

Disertacija rengta 2015–2020 metais Vilniaus universitete, Lazerinių tyrimų centre. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslų taryba ir MITA.

### Mokslinis vadovas:

**prof. dr. Mikas Vengris** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002).

### Gynimo taryba:

### **Pirmininkas:**

**Prof. habil. dr. Audrius Dubietis** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002).

### Nariai:

**doc. dr. Rytis Butkus** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002),

doc. dr. Vytautas Jukna (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002),

**dr. Tadas Balčiūnas** (Ženevos Universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002),

**prof. habil. dr. Kęstutis Staliūnas** (Katalonijos politechnikos universitetas, gamtos mokslai, fizika, N 002).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2020 m. gruodžio mėn. 18 d. 10:00 val. Nacionalinio fizinių ir technologijos mokslų centro A101 auditorijoje.

Adresas: Saulėtekio al. 3, NFTMC, A101 aud., Vilnius, Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto bibiliotekoje, Nacionalinio fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekoje bei VU interneto svetainėje adresu:

www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR NATURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Ignas

STASEVIČIUS

# Cascaded Nonlinearity Influence to Femtosecond Optical Parametric Oscillator Characteristics

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Physical sciences,

Physics (N 002)

VILNIUS 2020

This dissertation was written between 2015 and 2020 at Vilnius University, Laser Research Center.

The research was supported by MITA and Research Council of Lithuania.

### Academic supervisor:

Prof. Dr. Mikas Vengris (Physical sciences, Physics, N 002).

### **Dissertation Defense Panel:**

### **Chairman:**

**Prof. Habil. Dr. Audrius Dubietis** (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002).

### Members:

Assoc. Prof. Dr. Rytis Butkus (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002),

Assoc. Prof. Dr. Vytautas Jukna (Vilnius University, Natural Sciences, Physics, N 002),

**Dr. Tadas Balčiūnas** (University of Geneva, Natural Sciences, Physics, N 002),

**Prof. Habil. Dr. Kęstutis Staliūnas** (Universitat Politecnica de Catalunya, Natural Sciences, Physics, N 002).

The dissertation shall be defended at a public meeting of the Dissertation Defense Panel at 10:00 on 18 December 2020 in room A101 of Center of National Science and Technology.

Address: Sauletekio al. 3, NFTMC, Vilnius, Lithuania.

The text of this dissertation can be accessed at the Vilnius University Library, Center of National Science and Technology Library as well as on the website of Vilnius University:

www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

# Turinys

Turinys7			
Santrumpos			
1	Įva	das	9
	1.1	Tikslas ir uždaviniai	14
	1.2	Mokslinis darbo naujumas	15
	1.3	Mokslinis darbo aktualumas	16
	1.4	Ginamieji teiginiai	17
	1.5	Autoriaus publikacijos ir konferencijos	19
2	Pag	rindiniai rezultatai	22
	2.1	Pakopinio netiesiškumo tyrimas OPO s	u neigiama
	rezona	atoriaus GDD	
	2.2	Pakopinio netiesiškumo tyrimas OPO s	su teigiama
	rezonatoriaus GDD		
	2.3	OPO su neigiamu pakopiniu netiesiškumu	ir teigiama
	GDD solitonų tyrimai		
	2.4	Erdviniai pakopinio netiesiškumo efektai C	OPO 40
	2.5	OPO taikymai	46
3	Pag	rindinės išvados	50
4	Lite	eratūra	52

## Santrumpos

- OPO Optinis parametrinis osciliatorius
- BBO  $\beta$  bario borato kristalas (BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)
- LBO Ličio triborato kristalas (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)
- AHG Antrosios harmonikos generacija
- KPN Kvadratinis pakopinis netiesiškumas
- GDD Grupinio vėlinimo dispersija (fs<sup>2</sup>)
- Yb: KGW Iterbiu legiruotas kalio gadolinio volframato kristalas

### 1 Įvadas

Optinio parametrinio osciliatoriaus veikimas pirma karta pademonstruotas 1965 metais mokslininkų Giordmaine and R. C. Miller darbuose [1]. Praėjus 55 metams, buvo ištirti įvairūs efektai ir pademonstruoti išskirtiniai prietaiso parametrai. OPO buvo derinami nuo ultravioletinio [2, 3] iki vidurinio infraraudonojo spektro ruožo [4, 5], pademonstruota tiek nuolatinė veika [6, 7], tiek keleto optinių ciklų impulsai [8, 9], o vidutinę išvadinę galią pavyko pasiekti iki 30 W [10]. Komercinės OPO sistemos yra plačiai naudojamos taikymuose, kuriems reikalingas derinamas bangos ilgis. Kyla natūralus klausimas – kuo gali dar viena disertacija prisidėti prie taip plačiai ištirtos mokslo krypties? Šioje disertacijoje yra tiriami netiesiniai efektai, kurie anksčiau nebuvo pastebėti dėl nepakankamai didelių kaupinimo osciliatorių galių. Didėjant Yb legiruotų terpių išvadinei galiai (osciliatoriaus vidutinės galios viršija 10 W su 76 MHz pasikartojimo dažniu ir 120 fs impulso trukme), viršūninė kaupinimo galia tampa vis didesnė ir aukštesnių eilių netiesiniai efektai OPO rezonatoriuose tampa svarbūs prietaiso veikimui [11 - 14]. OPO kristalų medžiagos netiesiškumas indukuoja impulso ir pluošto savimoduliacijos efektus, kurie lemia impulso spektro plitimą ir erdvinį fokusavimąsi. Daugelio praėjimų rezonatoriaus sistemoje impulsas ir pluoštas pasiekia nuostovias būsenas, kurios yra jautrios nedideliems rezonatoriaus netiesiškumo pokyčiams. Nuostovi impulso būsena laike yra solitonas, kai netiesiškumas yra kompensuojamas priešingo ženklo tiesinės dispersijos nulemtos dažnio moduliacijos. Nuostovi pluošo būsena erdvėje yra rezonatoriaus moda, kurios parametrus lemia rezonatoriaus stabilumas.

Aptarti efektai yra plačiai aprašyti ir ištirti kietojo kūno femtosekundiniuose osciliatoriuose [15 - 17] ir tos žinios gali būti

pasitelktos aiškinant efektus matomus optiniuose parametriniuose osciliatoriuose. Nepaisant to, lazerinio stiprinimo terpese nera fazinio išderinimo parametro  $\Delta k$  nulemtų procesų. Net ir nedidelis fazinis nederinimas indukuoja pakopinio kvadratinio netiesiškumo efektus. Pakopinis kvadratinis netiesiškumas tai netiesinis procesas, kai sklindanti fundamentinio dažnio spinduliuotė yra konvertuojama į antrają harmoniką, kuri po koherentiškumo ilgio atstumo yra konvertuojama atgal į fundamentinį dažnį. Šis pakopinis procesas vyksta kvadratinio netiesiškumo terpėse, nuo to ir kilęs pakopinio kvadratinio netiesiškumo pavadinimas. Tokio pakopinio proceso pabaigoje spinduliuotės dažnis išlieka nepakitęs, bet proceso metu spinduliuotės dažnis laikinai pasikeičia iš fundamentinio į dvigubai didesnį. Esant faziniam išderinimui, šis dvigubai didesnis antrosios harmonikos dažnis sklinda kitu faziniu greičiu tol kol nėra konvertuojamas į fundamentinį dažnį. Tokio sklidimo rezultatas yra fazės poslinkis, kuri igyja fundamentinė spinduliuotė. Šis procesas yra tapatus sklidimui terpėje su papildomu netiesinio lūžio rodikliu  $d_{eff}^2 / \Delta k$  ( $d_{eff}$  yra efektinis kristalo netiesiškumas, kurio kilmė yra kvadratinis jautris  $\chi^{(2)}$ ), kurio ženklas gali būti keičiamas varijuojant fazinio nederinimo ženklą [18]. Šis pakopinis netiesinis lūžio rodiklis veikia kartu su medžiagos netiesiškumu, taigi bendras suminis netiesiškumas daro įtaką laikiniams ir erdviniams spinduliuotės parametrams. Absoliutinis pakopinio netiesiškumo dydis gali būti iki 10 kartų didesnis nei vidinis medžiagos elektroninis netiesiškumas [19].

Ankstesni DeSalvo *et al.* darbai išaiškino pakopinio netiesiškumo nulemtus efektus, kurie leido parodyti prieš tai aptartą pakopinio netiesiškumo proporcingumą  $d_{eff}^2 / \Delta k$  [18]. Gale *et al.* parodė, kad pakopinio netiesiškumo nulemtas netiesinis lūžio rodiklis gali būti išmatuotas naudojant Z-scan metodą. Jį galima išreikšti, kaip

### Įvadas

nuo kristalo pasukimo kampo priklausanti netiesini lūžio rodikli [19]. Šuminas et al. pademonstravo pakopinio netiesiškumo taikymus sistemose be rezonatoriaus: erdvėlaikinių šviesos "kulkų" ir superkontinuumo generavimą [20, 21]. Gale et al. ir Laenen et al. pirmą kartą parodė pakopinio netiesiškumo poveikį solitono impulso formavimuisi [19. 22]. Neigiamas ir teigiamas pakopinis netiesiškumas taip pat buvo panaudotas dažnio "šukų" generavime [23 - 25], nuolatinės veikos optiniuose parametriniuose osciliatoriuose [26] ir femtosekundiniuose lazeriniuose osciliatoriuose [27 - 31]. Nepaisant to, vis dar nėra atlikta išsamaus tyrimo apie pakopinio netiesiškumo poveiki femtosekundinio optinio parametrinio osciliatoriaus charakteristikoms. Tai ir paskatino atlikti šioje disertacijoje aprašytus tyrimus.

Pakopinio netiesiškumo nulemti efektai galėtu būti ignoruojami, jei fazinis nederinimas  $\Delta k$  būtų nykstamai mažas. Iš pirmo žvilgsnio atrodo, jog tai nėra sudėtinga užduotis teisingai parenkant fazinio sinchronizmo sąlygas ir sukant netiesinį kristalą. Iš tiesų, ši užduotis sunkesnė nei atrodo: baigtinė kristalo stiprinimo juosta lemia tai, kad ne visoms impulso spektrinėms komponentėms tenkinama fazinio sinchronizmo salyga; baigtinis kristalo erdvinio spektro priėmimo kampas lemia tai, kad ne visoms pluošto erdvinio spektro komponentėms tenkinama fazinio sinchronizmo sąlyga; galiausiai baigtinis kristalo temperatūrinis sinchronizmo jautrumas lemia tai, kad fazinio sinchronizmo sąlyga yra tenkinama tik siauram temperatūrų ruožui (kristalo spektrinio, erdvinio bei temperatūrinio fazinio sinchronizmo jautrumų apibrėžimai yra pateikti Nikogosyan et al. knygoje [32]). Taigi idealiu atveju pakopiniai kvadratinio netiesiškumo efektai gali būti ignoruojami, jei realūs pluošto ir aplinkos parametrai kinta mažiau nei leidžia atitinkami jautriai. Deja, visų šių parametrų vienalaikė kontrolė yra sudėtingas uždavinys ir pakopinio netiesiškumo nulemti efektai mažesniu ar didesniu mastu

#### Įvadas

visada matomi optiniuose parametriniuose osciliatoriuose bei stiprintuvuose.

Kiti efektai ribojantys optinių parametrinių osciliatorių viršūninės galios didinimą yra optinis komponentų pramušimas [33] bei terminiai efektai [34]. Šioje disertacijoje tirtos viršūninės galios vis dar buvo per mažos optinių komponentų pažeidimui, o tirtas spektrinis diapazonas neturėjo tiesinės bei netiesinės sugerties naudojamuose optiniuose kristaluose (LBO bei BBO draustinės juostos tarptas yra atitinkamai ~3.2 ir ~2.7 kartus didesnis nei 515 nm kaupinimo fotono energija [35]). Taigi, pakopinis netiesiškumas yra vienas iš pagrindinių efektų, ribojančių viršūninės galios didinimą optiniuose parametriniuose osciliatoriuose, o jo įtakos impulso ir pluošto parametrams tyrimas yra vienas iš šios disertacijos uždavinių.

Vis dėl to, su pakopiniu kvadratiniu netiesiškumu galima ne tik "kovoti", bet galima jį ir pasitelkti kaip nepamainomą įrankį. Pakopinio netiesiškumo indukuoto netiesinio lūžio rodiklio ženklą galima varijuoti keičiant fazininio nederinimo ženklą. Neigiamas netiesiškumas nėra įprastas reiškinys, nes gamtoje jis stebimas tik elektronų plazmoje arba medžiagose, kai sklindantis bangos ilgis yra tarp vienfotonio ir dvifotonių medžiagos sugerties rezonansų (laisvųjų krūvininkų generacija bei sugertis lemia neigiamą netiesiškumą, panašiai kaip plazmos atveju) [36]. Terminis pluošto išfokusavimas taip pat stebimas skysčiuose bei dujose [37]. Neigiamas pakopinis netiesiškumas gali būti panaudotas teigiamos grupinių greičių dispersijos kompensacijai, kuri išplečia impulsa laike. Tokia kompensacija leidžia sukurti unikalų derinamo bangos ilgio prietaisą, kuris generuoja impulsus - solitonus rezonatoriuje su teigiama grupinių greičių dispersija. Tokios eksperimentinės schemos veikimas pademonstruotas šioje disertacijoje. Dar daugiau, pakopinio ir medžiagos netiesiškumų sąveika ir optinio parametrinio osciliatoriaus rezonatoriaus grįžtamasis ryšys lemia impulsų voros netiesinę dinamiką – solitonus, chaosą, netiesines osciliacijas. Taigi valdomas netiesiškumas atveria duris į naują bei įdomią optinių parametrinių osciliatorių tyrimų sritį.

Optinio parametrinio osciliatoriaus galios didinimui trukdo pakopinio netiesiškumo efektai, bet kodėl tą galią reikėtų didinti? Į šį klausimą padeda atsakyti požiūris iš prietaiso taikymų perspektyvos. Femtosekundiniai optiniai parametriniai osciliatoriai yra prietaisai su unikaliu parametrų rinkiniu: trumpomis impulsų trukmėmis, plačiu bangos ilgių derinimo ruožu ir dideliu pasikartojimo dažniu [38]. Šie parametrai yra reikalingi taikymams, kuriuose stebimi greiti, bangos ilgiui jautrūs ir netiesiškai sužadinami procesai. Pagrindiniai taikymai, kuriuose šie parametrai yra aktualūs, yra netiesinė mikroskopija bei netiesinė fotopolimerizacija. Šiuose taikymuose, pluoštas yra fokusuojamas didelės skaitmeninės apertūros objektyvu, kuris turi nemažus pralaidumo nuostolius, vpač platesnėje bangos ilgių juostoje. Taip pat norint vaizdinti bandinius ar gaminti mikrodarinius greičiau, reikia didesnių impulso energijų, tam, kad laikas, per kurį yra sužadinamas vienas taškas objekte, būtų kuo mažesnis [39]. Abiems šiems reikalavimams reikia vis didesnės optinio parametrinio osciliatoriaus išvadinės viršūninės galios. Praktiniams taikymams taip prietaiso, kurio dydis būtų kuo pat reikia mažesnis. 0 femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose dydį lemia rezonatoriaus prizmių tarpusavio atstumas. Prizmių būtų galima išvengti, jei teigiama rezonatoriaus grupinių greičių dispersija būtų kompensuojama su neigiamu netiesiškumu, kaip kad pademonstruota šioje disertacijoje. Atlikus tyrimus buvo surinktas transportuojamas femtosekundinio OPO prototipas, kurio eksperimentiniai taikymai (netiesinės mikroskopijos, netiesinės polimerizacijos bei netiesinės optogenetikos srityse) aptarti šioje disertacijoje.

### Įvadas

## 1.1 Tikslas ir uždaviniai

Didėjančios Yb legiruotų terpių lazerinių kaupinimo šaltinių išvadinės galios, o kartu ir iššūkiai susiję su femtosekundinio optinio parametrinio osciliatoriaus galios didinimu, lemia šį uždavinį:

Ištirti pakopinio kvadratinio netiesiškumo poveikį didelės galios Yb osciliatoriumi sinchroniškai kaupinamo optinio parametrinio osciliatoriaus charakteristikoms; išbandyti naujus metodus siekiant kontroliuoti pakopinio kvadartinio netiesiškumo įtaką ir tokiu būdu leisti didinti optinio parametrinio osciliatoriaus išvadinę galią, kuri atvertų kelius naujiems prietaiso taikymams.

Norint pasiekti šį tikslą, moksliniai tyrimai buvo padalinti į šiuos uždavinius:

- Pakopinio kvadratinio netiesiškumo procesų, ribojančių prietaiso laikines ir erdvines charakteristikas, supratimas.
- Neigiamo pakopinio netiesiškumo panaudojimas generuojant solitonus iš optinio parametrinio osciliatoriaus rezonatoriaus su teigiama grupinių greičių dispersija.
- OPO prototipų surinkimas ir transportavimas testams savo srityje pirmaujančiose taikymų laboratorijose netiesinės mikroskopijos, netiesinės polimerizacijos bei netiesinės optogenetikos srityse.

# 1.2 Mokslinis darbo naujumas

Šie efektai ir taikymai šios disertacijos tyrimų metu buvo stebėti pirmą kartą:

- Ištirta suminio bei skirtuminio dažnio pakopinių netiesiškumų įtaka optinio parametrinio osciliatoriaus laikinėms charakteristikoms.
- Ištirta žemiausios bei aukštesnių eilių solitonų generacija femtosekundiniame optiniame parametriniame osciliatoriuje su teigiama rezonatoriaus grupinių greičių dispersija ir neigiamu pakopiniu netiesiškumu.
- Ištirtas pakopinio neteisiškumo nulemtas erdvinis fokusavimasis bei jo įtaka optinio parametrinio osciliatoriaus rezonatoriaus erdvinių modų formavimuisi.
- Pademonstruotas dviejų kanalų optinio parametrinio osciliatoriaus taikymas netiesinės optogenetikos srityje - buvo optiškai atliekamas vienalaikis neuronų aktyvumo (žadinant kalcio jonų indikatorių GCaMP) nuskaitymas ir neuronų (žadinant opsiną C1V1) sužadinimas pelėje *in-vivo*.

### 1.3 Mokslinis darbo aktualumas

Atlikti moksliniai tyrimai leido geriau suprasti efektus stebimus didelės galios optiniuose parametriniuose osciliatoriuose. Šie tyrimai padeda analizuoti pakopinio netiesiškumo nulemtą laikinių ir erdvinių charakteristikų prastėjimą, kai išvadinė galia yra didinama naudojant vis didesnės galios kaupinimo osciliatorius. Remiantis šiais rezultatais buvo surinktas transportuojamas optinio parametrinio osciliatoriaus prototipas. Prototipas buvo išbandytas savo srityje pirmaujančiose taikymų laboratorijose (Lietuvoje, Didžiojoje Britanijoje bei Vokietijoje), kurios derinamo bangos ilgio šaltinį išbandė galimose prietaiso taikymo srityse netiesinėje \_ mikroskopijoje, netiesinėje polimerizacijoje bei netiesinėje optogenetikoje.

# 1.4 Ginamieji teiginiai

- 1. Pakopinis kvadratinis netiesiškumas gali būti naudojamas siekiant mažinti (signalo impulso kokybė  $\Delta v \Delta \tau \sim 0.44$ ) arba kokybė didinti (signalo impulso  $\Delta v \Delta \tau \sim$ 3) fazinės savimoduliacijos reiškinius stebimus didelės galios femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose su teigiama arba neigiama tiesine rezonatoriaus grupinių greičių dispersija.
- 2. Optinio parametrinio osciliatoriaus rezonatoriaus antrajame židinyje įdėtas signalo antrosios harmonikos kristalas gali būti naudojamas kaip neigiamo netiesiškumo elementas (BBO atveju indukuojantis iki  $n_2 \sim -15 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ), kompensuojantis rezonatoriaus teigiamą grupinių greičių dispersiją (iki *GDD* ~ 5000 fs<sup>2</sup>) ir tokiu būdu leidžiantis solitono generaciją su gera impulso kokybe ( $\Delta v \Delta \tau \sim 0.44$ ). Tokiu būdu keitimo efektyvumas (OPO kristalo kampas) ir rezonatoriaus netiesiškumas (signalo AHG kristalo kampas) gali būti nepriklausomai derinami.
- Dideli pakopinio netiesiškumo indukuoti fazės poslinkiai leidžia generuotis aukštesnių eilių solitonams (iki 3 eilės), kurie pasižymi osciliacijomis (periodai nuo 11 iki 18 rezonatoriaus apėjimų), kurios stebimos tol kol solitonai nėra sutrikdomi 3 netiesinės dispersijos eilės.
- 4. Pakopinis kvadratinis netiesiškumas 2.5 mm ilgio LBO kristale su 20 GW/cm<sup>2</sup> spinduliuotės intensyvumu nulemia erdvinį pluošto fokusavimąsi (teigiamo lęšio laužiamoji geba iki  $D \sim 33$ m<sup>-1</sup>, neigiamo lęšio laužiamoji geba iki  $D \sim -9$  m<sup>-1</sup>), kuris yra pakankamai stiprus, jog išvestų stabilų rezonatorių už stabilumo

### Įvadas

zonos ribos, jei pradinis stabilumas yra arti (iki 5 % nuo viso stabilumo zonos pločio) stabilumo zonos krašto.

 Femtosekundinis optinis parametrinis osciliatorius, derinamas 700 – 950 nm arba 950 - 1300 nm ribose yra universalus lazerinis šaltinis, tinkamas netiesinės mikroskopijos, netiesinės polimerizacijos bei netiesinės optogenetikos taikymuose.

# 1.5 Autoriaus publikacijos ir konferencijos

Šios disertacijos rezultatai pristatyti šiose publikacijose:

P1. K. Stankevičiūtė, I. Pipinytė, I. Stasevičius, J. Vengelis, G. Valiulis, R. Grigonis, M. Vengris, M. Bardauskas, L. Giniunas, O. Balachninaite, R.C. Eckardt, V. Sirutkaitis, "Femtosecond optical parametric oscillators synchronously pumped by Yb:KGW oscillator", Lithuanian Journal of Physics, Vol. 53, No. 1, 41–56 (2013).

P2. J. Vengelis, I. Stasevičius, K. Stankevičiūtė, V. Jarutis, R. Grigonis, M. Vengris, V. Sirutkaitis, "Characteristics of optical parametric oscillators synchronously pumped by second harmonic of femtosecond Yb:KGW laser", Optics Communications 338, 277–287 (2015).

P3. K. Ivanauskiene, I. Stasevicius, M. Vengris, V. Sirutkaitis, "Pulse-to-pulse instabilities in synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator", J. Opt. Soc. Am. B 36 (1), 131-139 (2019).

P4. I. Stasevicius, G. Martynaitis, M. Vengris, "Cascaded nonlinearities in high-power femtosecond optical parametric oscillator", J. Opt. Soc. Am. B 37 (3), 721-729 (2020).

P5. I. Stasevicius, M. Vengris, "Exploiting optical nonlinearities for group delay dispersion compensation in femtosecond optical parametric oscillators", Optics Express 28 (18), 26122-26136 (2020).

#### Įvadas

P6. I. Stasevicius, M. Vengris, "Controlled soliton formation in femtosecond optical parametric oscillator with positive group delay dispersion", J. Opt. Soc. Am. B 37 (10), 2956-2967 (2020).

P7. I. Stasevicius, M. Vengris, "Cascaded nonlinearity induced spatial domain effects in high power femtosecond optical parametric oscillator", Opt. Express 28 (22), 33490-33503 (2020).

Autorius pristatė disertacijos rezultatus šiose mokslinėse konferencijose:

C1. I. Stasevicius, M. Vengris, R. Danielius, "Development of simple and robust femtosecond optical parametric oscillator for multiphoton imaging", "Photonics West", USA, San Francisco, 2017.

C2. I. Stasevicius, M. Vengris, "Simple and robust femtosecond optical parametric oscillator for multiphoton imaging", "Focus On Microscopy", France, Bordeaux, 2017.

C3. I. Stasevicius, G. Martynaitis, M. Vengris, "Cascaded nonlinearity influence to high power femtosecond optical parametric oscillator", "Photonics West", USA, San Francisco, 2020.

Disertacijos rezultatai pristatyti mokslinėse konferencijose bendraautorių:

CO1. V. Purlys, D. Gailevicius, I. Stasevicius, V. Voiciuk, S. Vaisiunas, R. Gadonas, "Influence of Laser Wavelength for Direct Laser Writing Thresholds", "CLEO", Germany, Munich, 2017

CO2. Ting Fu, Isabelle Arnoux, Jan Döring, Hirofumi Watari, Ignas Stasevicius, Albrecht Stroh, "Navigating the translational

### Įvadas

roadblock: Towards highly specific and effective all-optical interrogations of neural circuits", "FENS 2020 Virtual Forum", online conference, 2020.

Pagrindiniai rezultatai

# 2 Pagrindiniai rezultatai

# 2.1 Pakopinio netiesiškumo tyrimas OPO su neigiama rezonatoriaus GDD

Šioje dalyje aprašyti tyrimai buvo publikuoti P4 publikacijoje ir pristatyti C3 konferencijoje.

rezonuojančios Dideli OPO bei kaupinimo bangu intensyvumai lemia laikinius netiesinius efektus. Vykstant stiprinimui fazinio išderinimo sąlygomis, kristale indukuojamas efektinis pakopinis netiesiškumas, kuris veikia kaip teigiamas arba neigiamas netiesinio lūžio rodiklio priedas prie bendro medžiagos elektroninio netiesiškumo. Pakopinio netiesiškumo įtaka buvo tirta Gale et al. bei Laenen et al. darbuose, kai rezonuojančios signalinės bangos centrinis bangos ilgis buvo arti prie fazinio sinchronizmo signalo antrajai harmonikai tame pačiame OPO kristale [19, 22]. Taip pat Gale et al. parodė, kad efektinis pakopinis netiesiškumas gali būti eksperimentiškai matuojamas Z-scan metodu ir gali būti išreikštas kaip nuo kristalo pasukimo kampo priklausantis  $n_2$  [19]. Šioje disertacijos tyrimų dalyje pademonstruota, kad efektinis pakopinis netiesiškumas gali būti stebimas bet kuriam rezonuojančiam bangos ilgiui, kuris yra parametriškai stiprinimas su faziniu nederinimu. Taip pat su Z-scan stendu ištirti ir palyginti BBO bei LBO netiesinių kristalų pakopiniai netiesiškumai.

Buvo tiriamas femtosekundinis optinis parametrinis osciliatorius kaupinamas Yb: KGW osciliatoriaus antrąja harmonika.

Optinė eksperimento schema pateikta 2.1 pav. Optinis parametrinis osciliatorius yra kaupinamas femtosekundiniu osciliatoriumi Flint (Light Conversion). Osciliatoriaus centrinis bangos ilgis 1030 nm, išvadinė galia yra 8 W, pasikartojimo dažnis 76 MHz, 120 fs impulso trukmė. Generuojama antroji kaupinimo osciliatoriaus harmonika, naudojant 2.5 mm ilgio BBO kristalą su skaidrinančiomis dangomis, sugeneruojama 4 W antrosios harmonikos ties 515 nm, keitimo efektyvumas 50 %. OPO rezonatoriaus grupinių greičių dispersija yra neigiama, naudojami neigiamai čirpuoti veidrodžiai, o bendra pilno praėjimo rezonatoriaus grupinių greičių dispersija siekia ~ -600 fs<sup>2</sup>. OPO rezonatoriaus veidrodžiai yra atsipindintys (R>99.95 %) bangos ilgių ruože nuo 820 nm iki 940 nm. Tyrimuose buvo naudojami du I tipo sąveikos OPO kristalai: a) 2 mm ilgio BBO kristalas ( $\theta = 24^\circ$ ); b) 2.5 mm ilgio LBO kristalas  $\theta = 14^\circ$ . Abu kristalai skaidrinti bangos ilgių ruože 1030 + 515 nm.



2.1 pav . Eksperimentinė schema. L1, L2, L3 – lęšiai antrosios harmonikos generavimui, kolimavimui ir fokusavimui į OPO kristalą. M1, M2, M3, M4 veidrodžiai antrosios harmonikos nuvedimui iki OPO rezonatoriaus su pralaidumu fundamentinei spinduliuotei. M5, M6 – kreivi rezonatoriaus veidrodžiai R= -200 mm. M7, M8, M9 – plokšti rezonatoriaus veidrodžiai. OC – išvadinis veidrodis T= 20 %. NL – netiesinis kristalas. BD1, BD2-likutinės šviesos sugėrikliai. FM – į pluošto kelią įdedamas veidrodis, PM – galios matuoklis, AC – autokoreliatorius, SM – spektrometras.

Tyrimų metu buvo pastebėta, kad ne tik išvadinė galia, bet ir kitos OPO charakteristikos priklauso nuo fazinio nederinimo  $\Delta k$ . Fazinis nederinimas buvo keičiamas dviem būdais: keičiant rezonatoriaus ilgį, o kartu ir vėlinimą bei centrinį bangos ilgį, esant fiksuotam kristalo pasukimo kampui; keičiant kristalo pasukimo kampą, esant fiksuotam rezonuojančiam bangos ilgiui. Impulso trukmės priklausomybė pateikta 2.2 pav. Matyti, jog tiek sukant kristalo kampą, tiek keičiant centrinį bangos ilgį impulso trukmė beveik tiesiškai priklauso nuo kristalo kampo arba nuo bangos ilgio. To priežastis – didėjant centriniam bangos ilgiui arba mažėjant kristalo išsukimo kampui, pakopinio netiesiškumo teigiamos vertės didėja ir efektyviai kompensuoja neigiamą rezonatoriaus grupinių greičių dispersiją, o tai leidžia generuotis apytiksliam solitono sprendiniui su vis trumpesne impulso trukme. 2.3 pav. pavaizduota išvadinės galios priklausomybė nuo kristalo kampo bei centrinio bangos ilgio (atvaizdavus horizontalioje ašyje fazinį nederinimą perskaičiuotą iš kristalo kampo bei bangos ilgio). Matyti, jog išvadinė galia reaguoja į fazinį nederinimą nepriklausomai nuo derinimo būdo. Rezultatai rodo, jog būtent fazinis nederinimas yra parametras labiausiai įtakojantis ne tik išvadinę galią, bet ir impulso trukmę (kartu ir impulso kokybę, kuri trumpėjant impulso trukmei artėja iki spektriškai ribotos vertės  $\Delta v \Delta \tau \sim 0.44$ ).



2.2 pav. A): Impulso trukmės priklausomybė nuo centrinio bangos ilgio, kai kristalo kampas yra fiksuotas ties 23.1° BBO kristalui ir ties 12.6° LBO kristalui. B) Impulso trukmės priklausomybė nuo kristalo sukimo kampo, kai centrinis bangos ilgis yra fiskuotas ties 850 nm. Ištisinės linijos žymi eksperimentinius rezultatus BBO (raudona kreivė) ir LBO (juoda kreivė). Trūkios linijos žymi skaitmeninio modeliavimo rezultatus.

#### Pagrindiniai rezultatai



2.3 pav. Išvadinės OPO galios priklausomybė nuo fazinio nederinimo parametro naudojant BBO (raudona kreivė) arba LBO (juoda kreivė) kristalus. Ištisinės linijos žymi priklausomybę, kai kristalo kampas yra keičiamas palaikant centrinį bangos ilgį fiksuotą ties 850 nm. Trūkios linijos žymi priklausomybę keičiant vėlinimą bei centrinį bangos ilgį, kai kristalo kampas yra fiksuotas ties 23.1° BBO kristalui ir ties 12.6° LBO kristalui.

Disertacijos tyrimuose buvo palyginti didelės ir mažos kaupinimo galios režimai, buvo pastebėtas impulso trukmės nesutapimas su solitono lygtimi. Išmatuotos impulso trukmės. Tai rodo, kad OPO generuojami impulsai nėra klasikiniai solitonai. Nepaisant to, generuojamų impulsų kokybė buvo artima spektriškai riboto impulso kokybei  $\Delta v \Delta \tau \sim 0.44$ , taigi tiesinė rezonatoriaus apėjimo fazė yra apytiksliai kompensuojama netiesinės fazės. Pagrindinė šio reiškinio priežastis yra sinchroninis kaupinimas su femtosekundinės trukmės kaupinimo impulsais, kurie veikia kaip signalo impulsą formuojantis kaupinimo trukmės  $\tau \sim 120 fs$  langas, leidžiantis

formuotis apytiksliam solitono sprendiniui, kai intensyvumas yra mažesnis nei solitono slenkstis.

Siekiant suprasti fazinio sinchronizmo poveikį OPO charakteristikoms, buvo surinkta Z-scan matavimo schema, kurią naudojant buvo išmatuota netiesinė lūžio rodiklio priklausomybė nuo kristalo pasukimo kampo. Buvo išmatuotos netiesiškumo vertės OPO rezonatoriuje naudojamuose LBO bei BBO kristaluose. Rezultatai pateikti 2.4 pav. Matyti, jog optinio parametrinio stiprinimo (skirtuminio dažnio stiprinimo) atveju, pakopinio netiesiškumo sąlygotas netiesinis lūžio rodiklis yra priešingo ženklo negu kad antrosios harmonikos generacijos (suminio dažnio stiprinimo) atveju.

BBO ir LBO kristalų pakopinių netiesiškumų matavimai taip pat parodo, jog efektinių netiesiškumų absoliutūs dydžiai skiriasi dėl pakopinio netiesiškumo priklausomybės  $d_{\rm eff}^2$ . Kreivių pločiai skiriasi dėl skirtingų kristalų priėmimų kampų, kurie yra daug didesni LBO kristalo atveju. Taigi stebimi optinio parametrinio osciliatoriaus galios ir trukmės pokyčiai yra nulemti balanso tarp pakopinio bei medžiagos netiesiškumo bei rezonatoriaus dispersijos. Fazinis nederinimas (keičiant rezonatoriaus bangos ilgį arba sukant kristalą) indukuoja netiesinį lūžio rodiklį, kuris keičia balanso sąlygas ir kartu lemia impulso, artimo solitonui, trukmės kitimą. Eksperimentai buvo modeliuojami sprendžiant surištųjų lygčių optinio parametrinio stiprinimo uždavinį impulsams ir plokščioms bangoms. Modelis padėjo paaiškinti, kodėl ir kaip išvadinė galia, spektro plotis bei impulso trukmė kinta nepasiekus solitono slenksčio ir jį viršijus.

#### Pagrindiniai rezultatai



2.4 pav.  $n_2$  matavimas sukant netiesinį kristalą A) BBO ir B) LBO. Matavimai atlikti naudojant 1030 nm bangos ilgio, 120 fs, 8 W bei 76 MHz šaltinį, matuojami tie patys netiesiniai kristalai naudojami OPO rezonatoriuje. Juoda kreivė ir simboliai – eksperimentinis  $n_2$  matavimas; raudona kreivė – modeliavimas antrosios harmonikos generacijos (AHG) atveju; raudona kreivė ir simboliai – eksperimentinis keitimo efektyvumas; mėlyna kreivė – modeliavimas parametrinio stiprinimo (OPA) atveju.

# 2.2 Pakopinio netiesiškumo tyrimas OPO su teigiama rezonatoriaus GDD

Šioje dalyje aprašyti tyrimai buvo publikuoti P1 ir P5 publikacijose.

Antrojoje disertacijos dalvje buvo tiriamas femtosekundinis optinis parametrinis osciliatorius, kuriame solitonas generuojamas pasitelkiant teigiamos grupinių greičių dispersijos ir neigiamo pakopinio netiesiškumo balansą. Klasikinė solitono generacija realizuojama naudojant prizmių pora [19, 40] arba čirpuotus veidrodžius [41, 42], kurie įveda neigiamą grupinių greičių dispersiją teigiamam kristalo netiesiškumui kompensuoti. Plačiajuosčių čirpuotų veidrodžių dizainas yra sudėtingas uždavinys, nes plati atspindžio juosta lemia GDD osciliacijas, kurios turi neigiama itaka OPO laikiniams parametrams [43]. GDD poru su per perioda perslinktomis GDD osciliacijomis veidrodžių gamybos procesas yra sudėtingas ir brangus. GDD kompensacija su prizmių poromis neleidžia OPO integruoti i kompaktiška prietaisa dėl didelio atstumo tarp prizmių. Šie argumentai ir motyvavo išbandyti schemą, kurioje paprastai įvedama teigiama rezonatoriaus grupinių greičių dispersija (įdėjus stiklo plokšteles į rezonatorių) būtų kompensuota su neigiamu pakopiniu netiesiškumu. Kitu autorių darbuose neigiamas pakopinis netiesiškumas buvo panaudotas lazeriniuose rezonatoriuose, medžiagos bei oro netiesiškumui bei teigiamai GDD kompensuoti [27 - 31]. Taip pat jis buvo panaudotas kaip efektyvus metodas plataus spektro superkontinumui generuoti [21, 44] bei nuolatinės veikos optiniame parametriniame osciliatoriuje dažnių "šukoms" generuoti [26]. Šioje disertacijos dalyje neigiamo pakopinio netiesiškumo ir teigiamos GDD balansas pirmą kartą pademonstruotas sinchroniškai

kaupinamame femtosekundiniame optiniame parametriniame osciliatoriuje.

Buvo atliekamos dvi eksperimentų serijos: a) Rezonatoriuje naudojamas tik OPO kristalas, kurį išsukus iš fazinio sinchronizmo, buvo indukuojamas neigiamas pakopinis netiesiškumas; b) Rezonatoriuje naudojamas ir OPO kristalas, ir signalo antrosios harmonikos kristalas, įdėtas antrajame rezonatoriaus židinyje. OPO kristalas buvo orientuotas faziniame sinchronizme, o antrasis kristalas buvo išsuktas iš fazinio sinchronizmo, o tai indukuodavo neigiamą pakopinį netiesiškumą signalinei bangai.

Eksperimento schema pavaizduota 2.5 pav. Optinis parametrinis osciliatorius yra kaupinamas antraja Yb: KGW osciliatoriaus (Flint, Light Conversion) harmonika. Osciliatorius šviečia 12 W vidutinės galios su 140 fs impulso trukme ties 1030 nm centriniu bangos ilgiu ir 76 MHz pasikartojimo dažniu. 2.5 mm ilgio LBO kristale su AR dangomis 1030 + 515 nm generuojama antroji kaupinimo spinduliuotės harmonika, vidutinė galia 6 W ties 515 nm centriniu bangos ilgiu ir 50% keitimo efektyvumu. Tam, kad rezonatoriaus grupinių greičių dispersija būtų teigiama, į rezonatorių įdedamos amorfinio kvarco plokštelės (GP1, 14 mm storio, dengtos 650-1000 nm ruože su atspindžio koeficientu R<0.5 %). Didžiojoje dalyje eksperimentų į rezonatorių buvo įdėtos dvi stiklo plokštelės, suskaičiuota rezonatoriaus grupinių greičių dispersija yra 1800 fs<sup>2</sup> ties 860 nm. Rezonatoriaus veidrodžiai pasižymėjo dideliu atspindžio koeficientu spektro ruože nuo 770 iki 970 nm. OPO kristalas buvo 2.5 mm ilgio LBO kristalas (I tipo,  $\theta$ = 14°, Eksma Optics). Kristalas buvo dengtas AR dangomis 1030 + 515 nm. Dviejų kristalų eksperimente antrajame židinyje buvo naudojamas 0.7 mm storio BBO kristalas (I tipo,  $\theta$ = 24°, Eksma Optics). Kristalas buvo dengtas skaidrinančiomis dangomis 1030 + 515 nm. Abiejų kristalų dangos nebuvo optimalios signalinės bangos diapazonui, bet tyrimo tikslas buvo ištirti pakopinio

netiesiškumo efektus, nesiekiant maksimizuoti išvadinės prietaiso galios su optimaliai skaidrintais kristalais.



2.5 pav. Eksperimentinė schema. L1, L2, L3 – lęšiai antrosios harmonikos generacijai, kolimavimui bei fokusavimui į OPO kristalą. M1, M2, M3, M4 – veidrodžiai kaupinimo spinduliuotės nuvedimui iki OPO kristalo. M5, M6, M7, M8 – įgaubti rezonatoriaus veidrodžiai. M9, M10 – plokšti rezonatoriaus veidrodžiai. OC – išvadinis veidrodžia ant slankaus staliuko. LBO1 – antrosios harmonikos kristalas. LBO2 – OPO kristalas ant rotacinio staliuko. BBO – signalo antrosios harmonikos kristalas OPO rezonatoriuje. GP1, GP2 lydyto kvarco plokštelės rezonatoriaus viduje. BP – stiklo plokštelė rezonatoriuje Briusterio kampu. BD1, BD2, BD3 –gaudyklės. FM – įdedamas veidrodis. PM – galios matuoklis. OSC – oscilografas. AC – autokoreliatorius. SM – spektrometras.

Tiek OPO LBO, tiek signalo antrosios harmonikos AHG BBO kristalo fazinis nederinimas indukuoja neigiamą pakopinį netiesiškumą, kuris leidžia generuoti solitoną, jei rezonatoriaus grupinių greičių dispersija yra teigiama. Solitonas pasižymi faziškai riboto impulso kokybe su  $\Delta v \Delta \tau \sim 0.44$ . Eksperimento schema išsukant tik OPO kristalą pasižymi šiais privalumais: a) Paprastesnė eksperimentinė realizacija; b) Dėl platesnės OPO kristalo stiprinimo juostos mažiau nuo bangos ilgio priklausantis pakopinis netiesiškumas. Vieno kristalo schemos trūkumai: a) Apie 5 % didesni galios nuostoliai palyginus su dviejų kristalų schema; b) Keitimo efektyvumas ir pakopinis netiesiškumas yra surišti parametrai; c) Rezonatoriaus erdvinis išderinimas dėl kristalo sukimo.

OPO charakteristikų kitimas, sukant tik OPO kristalą ir nenaudojant antrojo kristalo, yra pateiktas 2.6 pav.



2.6 pav. A) OPO netiesinės fazės ir solitono eilės numerio priklausomybė nuo LBO kristalo pasukimo kampo. B) Eksperimentiniai ir skaitmeniškai modeliuoti spektrai, kai OPO LBO kristalas yra išderinimas iš tikslaus fazinio sinchronizmo ties 860 nm. C) Eksperimentinių ir skaitmeniškai modeliuotų signalo išvadinės galios bei impulso trukmių priklausomybė nuo kristalo pasukimo kampo. D) Eksperimentinių ir skaitmeniškai modeliuotų signalo spektro pločio (suskaičiuotų pagal 2  $\sigma$  kriterijų) ir impulso kokybės priklausomybė nuo kristalo pasukimo kampo, brūkšninė linija rodo spektriškai riboto Gausinės formos impulso kokybę ~ 0.44. Grafikuose A) ir C) neigiamo pakopinio netiesiškumo zonos (0, I, II) pažymėtos raudonos spalvos tonais žymi išvadines galias ir trukmes, reikalingas solitonams su atitinkama solitono eile N= 0, 1, 2. Visuose grafikuose centrinis bangos ilgis fiksuotas ties 860 nm.

Nepriklausomas netiesiškumo (naudojant AHG BBO kristalą) bei optinio parametrinio stiprinimo (naudojant OPO LBO kristalą) derinimas leidžia dirbti išlaikant didžiausią keitimo efektyvumą, t.y. atsukant OPO LBO kristalą į mažiausią fazinį nederinimą. Tuo tarpu AHG BBO kristalo sukimas leidžia valdyti neigiamą pakopinį netiesiškumą ir dirbti norimos zonos solitoniniame režime. Šio dviejų kristalų tyrimo rezultatai pateikti 2.7 pav.

Naudojant vieno (OPO LBO) bei dviejų kristalų (OPO LBO ir AHG BBO) metodus, buvo pademonstruota solitono generacija pasitelkiant neigiamą pakopinį netiesiškumą ir derinant bangos ilgius 770 - 970 nm srityje. Visoje bangos ilgių srityje abu metodai leido turėti impulsų kokybę < 0.6, impulso trukmę < 200 fs, pakopinio netiesiškumo indukuojami vidutinės galios nuostoliai buvo mažesni nei 20 %, o viršūninė galia išsukus kristalus išliko ta pati. Dviejų kristalų priėjimas turi du pagrindinius privalumus: a) derinant bangos ilgį ir vienu metu į priešingas puses sukant tiek LBO OPO, tiek AHG BBO kristalus, galima išvadinės pluošto pozicijos stabilizacija; b) galimybė beveik neišjustiruojant rezonatoriaus keisti neigiamą pakopinį netiesiškumą kompensuojant kintamą rezonatoriaus grupinių greičių dispersiją (kompensuojant GDD vertes +/- 1000 fs<sup>2</sup> su +/- 5 % AHG galios nuostoliais).

#### Pagrindiniai rezultatai



2.7 pav. A) OPO LBO ir AHG BBO netiesinės fazės ir solitono eilės numerio priklausomybė nuo AHG BBO kristalo pasukimo kampo. B) Eksperimentiniai ir skaitmeniškai modeliuoti spektrai, kai AHG BBO kristalas yra išderinimas iš tikslaus fazinio sinchronizmo ties 860 nm. C) Eksperimentinių ir skaitmeniškai modeliuotų signalo išvadinės galios bei impulso trukmių priklausomybė nuo AHG BBO kristalo pasukimo kampo. D) Eksperimentinių ir skaitmeniškai modeliuotų signalo spektro pločio (suskaičiuotu pagal 2  $\sigma$  kriteriju) ir impulso kokybės priklausomybė nuo kristalo pasukimo kampo, brūkšninė linija rodo spektriškai riboto Gausinės formos impulso kokybę ~ 0.44. Grafikuose A) ir C) neigiamo pakopinio netiesiškumo zonos (0, I, II) pažymėtos raudonos spalvos tonais žymi išvadines galias ir trukmes, reikalingas solitonams su atitinkama solitono eile N=0, 1, 2. Visuose grafikuose centrinis bangos ilgis fiksuotas ties 860 nm. OPO LBO kristalo kampas yra fiksuotas ties 12.7° optimaliam keitimo efektyvumui ties 860 nm.

# 2.3 OPO su neigiamu pakopiniu netiesiškumu ir teigiama GDD solitonų tyrimai

Šioje dalyje aprašyti tyrimai buvo publikuoti P3 ir P6 publikacijose.

Šioje dalyje tiriama aukštesnės eilės solitonų generacija naudojant teigiamą rezonatoriaus dispersiją ir neigiamą pakopinį netiesiškumą. Jei rezonatoriaus intensyvumas arba netiesiškumas yra pakankamai dideli, o netiesinis ilgis yra ženkliai trumpesnis už dispersinio plitimo ilgį, gali būti tenkinama aukštesnės eilės solitonų generacijos sąlyga. Optiniai parametriniai osciliatoriai, generuojantys aukštesnės eilės solitonus, kurie pasižymi periodinėmis laikinėmis bei spektrinėmis osciliacijomis, buvo tirti straipsniuose [45, 46, 47 – 49]. Neseniai buvo pademonstruoti darbai, tiriantys solitonus bei jų ypatybes sinchroniškai kaupinamuose femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose [48 – 50]. Aukštesnės eilės solitonų generacija femtosekundiniame OPO su neigiamu pakopiniu netiesiškumu ir teigiama rezonatoriaus GDD šiame darbe pristatyta pirmą kartą.

Solitonų generacijos ypatybės buvo tiriamos didelės išvadinės galios femtosekundiniame optiniame parametriniame osciliatoriuje kaupinamame antrąja Yb: KGW osciliatoriaus harmonika. Naudojama optinė schema beveik tokia pati kaip 2.5 pav. su šiais skirtumais: siekiant keisti rezonatoriaus dispersiją, eksperimente buvo naudojamos viena (GDD ~1200 fs<sup>2</sup>), dvi (GDD ~2000 fs<sup>2</sup>) arba keturios (GDD ~3700 fs<sup>2</sup>) lydyto kvarco plokštelės GP1. Naudojamas OPO kristalas buvo 2.5 mm ilgio LBO (1 tipo,  $\theta$ = 14<sup>0</sup>, Eksma Optics).

#### Pagrindiniai rezultatai

Kristalas buvo skaidrintas pirmajai ir antrajai harmonikai 1030 + 515 nm. Antrajame rezonatoriaus židinyje buvo naudojamas BBO kristalas (1 tipo,  $\theta=24^{0}$ , Eksma Optics). Buvo tiriami dviejų ilgių kristalai – 0.7 mm ir 2 mm ilgio. Kristalai buvo skaidrinti 1030 + 515 nm. Kristalų atspindžio koeficientai signalinei bangai buvo išmatuoti ir įskaityti skaitmeniniame modeliavime.

Neigiamas pakopinis netiesiškumas buvo naudojamas teigiamos rezonatoriaus grupinių greičių dispersijos kompensavimui. Ilgesnis signalo antrosios harmonikos kristalas (2 mm ilgio) indukavo pakankamai neigiamo pakopinio netiesiškumo kad būtų pasiektas 3 eilės solitono slenkstis. Generuojant aukštesnės eilės solitonus stebimos šios ypatybės: išvadinės galios padidėjimas, impulsų skilimas į fundamentinius solitonus perturbuojant trečios eilės dispersija, dispersinės bangos generacija, laikinės ir spektrinės osciliacijos su solitono periodu, kuris gali būti suskaičiuotas remiantis šia lygtimi [51]:

$$N_{solitono\ periodas} = \frac{\tau^2}{2|GDD|}$$
(2.1).

Šioje lygybėje N yra rezonatoriaus apėjimų skaičius, po kurio impulso laikinė ir spektrinė forma atsikartoja.  $\tau$  yra impulso trukmė, GDD yra rezonatoriaus grupinių greičių dispersija.

2.8 pav. yra parodyti impulsų ir spektrų matavimai oscilografu bei spektrometru. Rezonatoriaus centrinis bangos ilgis yra derinamas keičiant rezonatoriaus ilgį ir turint fiksuotus kristalo kampus. OPO LBO kristalo kampas yra fiksuotas optimaliai generacijai ties 860 nm. AHG BBO kristalo kampas yra fiksuotas ties 881 nm. Tokiu būdu rezonuojančiam 860 nm bangos ilgiui AHG BBO indukuotas pakopinis netiesiškumas yra neigiamas ir yra galima solitono generacija. Signalo bangos ilgiui didėjant link 881 nm, didėja neigiamo pakopinio netiesiškumo vertė, kuri leidžia palaikyti vis aukštesnės eilės solitonus. Oscilografo matavimų laikinė skleistinė atitinka 2000 ns, kurios apima ~152 rezonatoriaus apėjimus su 13.2 ns vieno apėjimo periodu. Impulso parametrai pateikti šalia 2.8 pav. spektrų – išvadinė galia, impulso trukmė bei impulso kokybė. II / III eilės solitonų perėjime matyti laikinės osciliacijos. Įstačius eksperimentinius skaičius į (2.1) lygybę galima suskaičiuoti solitono perioda pereinant tarp antrosios ir trečiosios solitono eilės: 15 rezonatoriaus apėjimų, kurie gerai atitinka oscilografu matuotas vertes. Solitono periodo mažėjimas didėjant rezonatoriaus išvadinei galiai gali būti aiškinamas rezonatoriaus grupinių greičių dispersijos sumažėjimu dėl pakopinio netiesiškumo įvedamos neigiamos antrosios eilės dispersijos. Osciliuojantis aukštesnės eilės solitonas generuojamas tol kol nėra sutrikdomas trečiosios eilės dispersijos. Esant sutrikdymui taip pat stebimi disperguojančios bangos trumpabangė arba ilgabangė komponentė (priklausomai nuo trečiosios eilės dispersijos ženklo). Ši spektrinė komponentė taip pat matyti ir eksperimentiniuose rezultatuose.

Praktinis šio tyrimo pritaikymas yra tas, kad antrosios bei trečiosios eilės solitonų generavimo rėžimas yra nestabilus ir nepageidautinas siekiant stabilios impulsų voros spektre bei laike. Tam kad šių efektų būtų išvengta, pakopinis netiesiškumas ir intensyvumas turi būti ribojami, kad nebūtų pasiektas antrosios eilės solitono slenkstis. Šie rezultatai leidžia giliau suprasti netiesinių ir tiesinių procesų nulemtus efektus, stebimus femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose su teigiama rezonatoriaus grupinių greičių dispersija ir neigiamu pakopiniu netiesiškumu.



2.8 pav. A) Signalo išvadinės spinduliuotės matavimai oscilografu, kai signalo centrinis bangos ilgis yra jautriai didinamas nuo 850 iki 870 nm (didėjantis bangos ilgis grafikuose iš viršaus į apačią). B) Oscilografo matavimus atitinkantys spektro matavimai. Skaičiai parodo impulsų galią, trukmę bei kokybę. Romėniški skaičiai kairėje žymi impulso solitono eilės numerį, įvertintą iš skaitmeninio modeliavimo netiesinės fazės rezultatų. Visuose grafikuose OPO LBO kampas yra fiksuotas ties 12.7° optimaliam keitimo efektyvumui ties 860 nm, antrojo kristalo AHG BBO kampas yra fiksuotas ties 26.6° optimaliam keitimo efektyvumui ties 881 nm.

# 2.4 Erdviniai pakopinio netiesiškumo efektai OPO

Šioje dalyje aprašyti tyrimai buvo publikuoti P7 publikacijoje.

Dideli rezonuojančios bangos intensyvumai femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose lemia ne tik laikinius, bet ir erdvinius netiesinius efektus, stebimus stiprinimo kristaluose. Netiesiniai erdviniai efektai (fokusavimasis ir defokusavimasis), yra detaliai eksperimentiškai ir teoriškai analizuoti Kero lęšiu sinchronizuotų modų lazeriniuose rezonatoriuose [52, 53]. Taip pat erdvinis fokusavimasis ir defokusavimasis buvo tirti vieno praėjimo netiesiniuose kristaluose, kuriuose pakopinis netiesiškumas buvo išnaudotas impulsų savispūdai [20, 21, 54]. Tačiau fokusavimosi ir išsifokusavimo reiškiniai, atsiradę dėl pakopinio kvadratinio netiesiškumo OPO rezonatoriuose, vis dar tebėra menkai ištirti. Ši disertacijos dalis tiria pakopinio netiesiškumo nulemtus erdvinius efektus, stebimus rezonatoriui esant arti tiesinio stabilumo zonos krašto.

Šioje dalyje atliktų tyrimų metu buvo naudota eksperimentinė schema labai panaši į pateiką 2.1 pav. su skirtumais pateiktais apačioje. Femtosekundinis optinis parametrinis osciliatorius yra kaupinamas antrąja Yb: KGW osciliatoriaus harmonika, kaupinimo osciliatorius šviečia 12 W vidutinės galios su 76 MHz pasikartojimo dažniu bei 140 fs impulso trukme. Generuojant antrąją harmoniką 2.5 mm LBO kristale gaunama 6 W antrosios harmonikos galia. Rezonatoriaus grupinių greičių dispersija yra teigiama. Ji pasiekiama rezonatoriuje įdėjus dvi 14 mm storio stiklo plokšteles, kurios lemia tai, kad bendra rezonatoriaus antrosios eilės dispersija yra ~1900 fs<sup>2</sup> ties 860 nm. Rezonatoriaus sferiniai veidrodžiai M5 ir M6 yra pastatomi ant tiesinio transliacinio staliuko ir keičiant jų tarpusavio atstumą yra keičiamas rezonatoriaus stabilumas. Tokiu būdu rezonatorius yra suderinamas prie stabilumo zonos krašto, kur veika vis dar stabili, bet jautrumas netiesiniam lęšiui yra ženkliai padidėjęs.

2.9 pav. yra parodyti matuotų bei skaitmeniškai modeliuotų pluoštų diametro priklausomybė nuo OPO kristalo pasukimo kampo. Skaitmeninis modeliavimas yra atliekamas sprendžiant surištujų lygčių sistemą netiesiniame kristale ir modeliuojant pluošto sklidimą rezonatoriuje. Eksperimentiškai išmatuoti pluošto intensyvumo skirstiniai pateikti 2.9 pav., skaitmeniškai sumodeliuoti pluoštų skirstiniai pateikti 2.9 pav., o užregistruoti spektrai - 2.9 pav. Neigiamas kristalo pasukimo kampas lemia teigiama pakopini netiesiškumą, o kartu ir teigiamą netiesinį lešį. Iš spektrų matyti, jog ties neigiamais kristalo pasukimo kampais matyti ryški fazinės moduliacijos įtaka, kuri pasireiškia dėl vienodų netiesiškumo bei rezonatoriaus dispersijos ženklų. Tuo tarpu ties teigiamais kristalo pasukimo kampais, neigiamas pakopinis netiesiškumas bei teigiama rezonatoriaus dispersija lemia solitono impulso formavimasi ir glotnų Gauso kreivės formos spektrą. Plačiau šis efektas aptartas santraukos dalyje 2.3.

2.9 pav. matyti, jog atsukus kristalą į teigiamas kampo vertes bei įvedus neigiamą pakopinį netiesiškumą (kartu ir defokusuojantį lęšį), rezonatorius tampa nestabilus ir generuoja pluoštą, primenantį TEM01 modą. Asimetrija matoma vienoje ašyje (Y), nes įvedus neigiamą lęšiuką Y koordinatės stabilumo parametras netenkina stabilaus rezonatoriaus sąlygos (-1< (A+D)/2 < 1), o X koordinatė šią sąlygą vis dar tenkina. X ir Y koordinačių stabilumų skirtumas atsiranda dėl nedidelio kritimo kampo ir atspindžio nuo sferinių veidrodžių, kurie lemia rezonatoriaus astigmatizmą. Skaitmeniškai modeliuojant iš pakopinio netiesiškumo indukuotos netiesinės fazės galima paskaičiuoti ekvivalentų erdvinio lęšiuko židinio nuotolį. Derinant fazinį sinchronizmą netiesinis lęšis keičiasi iš  $f \sim 30 \text{ mm} (D \sim 33 \text{ m}^{-1})$ ties  $\Delta \theta \sim -0.5^{\circ}$  iki  $f \sim -110 \text{ mm} (D \sim -9 \text{ m}^{-1})$  ties  $\Delta \theta \sim 0.9^{\circ}$ . Skaitmeniškai modeliuojant pluoštą ties  $\Delta \theta \sim 0.7^{\circ}$  kampu matyti, jog tai ne aukštesnės TEM01 eilės moda, o nestabilus rezonatorius, kuriame pluoštas praėjimas nuo praėjimo vaikšo zigzago trajektorija. Sumodeliuotas dviejų gretimų praėjimų išvadinis pluoštas pateiktas 2.10 pav.



2.9 pav. A) Eksperimentiškai matuotų ir skaitmeniškai modeliuotų pluošto antros eilės momentų radiusų (2 $\sigma$ ) priklausomybė nuo kristalo pasukimo kampo. Radiusai skaičiuojami atskirai sferinių veidrodžių lenkimo plokštumoje (X) ir jai statmenoje (Y). Žali taškai žymi kristalo kampus, ties kuriais apačioje pavaizduoti pluoštai bei impulsų spektrai. Raudonos spalvos fonas žymi eksperimentiškai stebėtą nestabilaus arba smarkiai eliptiško pluošto zoną. B) Eksperimentiškai matuoti išvadiniai pluoštai, atitinkantys skirtingus kristalo pasukimo kampus  $\Delta\theta$ . C) Skaitmeniškai modeliuoti išvadiniai pluoštai, atitinkantys skirtingus kristalo pasukimo kampus  $\Delta\theta$ . D) Eksperimentiškai išmatuoti išvadinių impulsų spektrai, atitinkantys skirtingus kristalo pasukimo kampus  $\Delta\theta$ . Visuose grafikuose centrinis bangos ilgis yra fiksuotas ties 860 nm.

#### Pagrindiniai rezultatai



2.10 pav. A) Skaitmeniškai modeliuotas nuostovios būsenos N-tojo praėjimo išvadinis pluoštas. B) Skaitmeniškai modeliuotas nuostovios būsenos N+1-jo praėjimo išvadinis pluoštas. Abiejuose grafikuose kristalo pasukimo kampas yra  $\Delta \theta$ =+0.45°, centrinis bangos ilgis fiksuotas ties 860 nm. Nuostovi būsena apibrėžia praėjimas nuo praėjimo nekintančią išvadinę galią.

Taigi, stiprūs pakopinio netiesiškumo indukuoti erdviniai lęšiukai kintantys nuo f~ 30 mm iki f~ -110 mm, veikimas arti stabilumo zonos krašto bei rezonatoriaus astigmatizmas lemia asimetrines, praėjimas praėjimo erdvines nestabilias nuo rezonatoriaus modas. Taip šioje disertacijoje pat buvo pademonstruota, kad OPO su faziniu nederinimu stabilumas turi būti skaičiuojamas kaip žiedinio rezonatoriaus su dviem kristalais, nors eksperimentiškai jis surenkamas kaip tiesinis. To priežastis – pirmyn ir atgal rezonatoriuje sklindančio impulso "matomi" skirtingi netiesiniai lešiai. Pirmasis lešis yra nulemtas pakopinio netiesiškumo, atsirandančio parametrinio stiprinimo metu. Impulsui grįžtant antrasis lęšis yra nulemtas tik medžiagos netiesiškumo, nes kaupinimo impulso tuo metu nėra. Dar vienas svarbus pastebėjimas - skaičiavimai rodo, jog turint platu OPO generacijos spektra ir dirbant ne faziniame sinchronizme, kraštinės spektrinės komponentės patirs skirtingas pakopinio netiesiškumo vertes, o tai lems ašinę chromatinę fokusavimosi aberaciją. Tai galėtų būti vienas iš trukdžių, siekiant generuoti trumpus ( $\tau \sim 25$  fs) impulsus iš optinio parametrinio osciliatoriaus.

# 2.5 OPO taikymai

Šioje dalyje aprašyti tyrimai buvo pristatyti CO1 ir CO2 konferencijose.

Sinchroniškai kaupinami femtosekundiniai optiniai parametriniai osciliatoriai yra nepamainomi moksliniai irankiai dėl išskirtinės parametrų kombinacijos: derinamo bangos ilgio, didelio impulsų pasikartojimo dažnio, trumpos impulso trukmės bei geros pluošto kokybės. Atlikus tyrimus aptartus santraukos dalyse, "Light Conversion" buvo surinktas transportuojamas optinio parametrinio osciliatoriaus maketas, kuris buvo nugabentas į savo srityje pirmaujančias taikymu laboratorijas. Disertacijoje vra pademonstruoti taikymai šiose srityse: netiesinėje mikroskopijoje (laboratorija Didžiojoje Britanijoje, Oksforde), netiesinėje polimerizacijoje (laboratorija Lietuvoje, Lazerinių Tyrimų Centre) bei netiesinėje optogenetikoje (laboratorija Vokietijoje, Maince). Šioje santraukoje aptariamas OPO taikymas netiesinėje optogenetikoje.

Eksperimentuose naudojamas šviesos šaltinis buvo dviejų optinių parametrinių osciliatorių, kaupinamų vienu kaupinimo šaltiniu, sistema. Kaupinimo šaltinis turėjo 16 W išvadinę galią ties 1030 nm bangos ilgiu, 76 MHz pasikartojimo dažnį, generuojant antrąją harmoniką pavyko sugeneruoti 8 W išvadinę antrosios harmonikos galią, kuri yra padalinta per pusę dviejų optinių parametrinių osciliatorių kaupinimui. Pirmasis OPO yra derinamas 700–960 nm juostoje, antrasis yra derinamas 950–1300 nm juostoje, impulsų trukmės svyruoja nuo ~100 fs iki ~160 fs. Tokiu būdu yra realizuojama sistema su dviem kanalais, kurie yra nepriklausomai

#### Pagrindiniai rezultatai

derinami. Tokios sistemos galios derinimo kreivė yra pateikta 2.11 pav.



2.11 pav. Dviejų nepriklausomai derinamų OPO kanalų sistemos išvadinės galios priklausomybė nuo bangos ilgio.

Optogenetika yra nauja neurobiologijos mokslo šaka, kurios tyrimo objektas yra neuronų funkcijų valdymas juos apšviečiant šviesa. Neuronai yra genetiškai modifikuojami, siekiant juose išreikšti šviesai jautrius baltymų kompleksus. Taigi tokiu būdu optogenetika apima dvi mokslo sritis – optiką ir genetiką. Naudojant keletą baltymų kompleksų, jautrių skirtingiems spektriniams šviesos ruožams, galima vienu metu ir nuskaityti neuronų tinklo aktyvumą, ir jį kontroliuoti. Neuronų kontrolei yra pasitelkiamas rodopsino tipo baltymas C1V1, sugėrus šviesą atidarantis jonų kanalus ir priverčiantis neuroną perduoti veikimo potencialą (elektrinį signalą). Neuronų aktyvumui nuskaityti yra naudojamas kalcio jonų indikatorius baltymas GCaMP, kuris sugėręs šviesą pereina į fluorescuojančią būseną, jautrią aplinkinei kalcio jonų koncentracijai, o kartu ir sklindančiam

elektriniam signalui. Lazerinis šaltinis su dviem nepriklausomai derinamais kanalais leistų vienu metu sužadinti ir nuskaityti neuronų aktyvumą. Naudojant dvifotonį sužadinimą, įmanoma vienu metu sužadinti tik vieną neurono ląstelę bei atlikti tai gyvuose bandiniuose neinvaziškai (vaizdinant per suplonintą kaukolę arba per stikliuką įdėta kaukolėje). Taigi, dviejų kanalų optinis parametrinis osciliatorius leidžia su vienu kanalu ties ~900 nm sužadinti indikatorių GCaMP, taip nuskaitant neuronų aktyvumą. Su kitu kanalu ties >1040 nm bangos ilgiu tuo pat metu galima sužadinti opsiną C1V1, taip indukuojant neurono aktyvumą [55].

Eksperimentas buvo atliktas gyvoje pelėje *in vivo*, vienu metu buvo atliekamas aktyvumo nuskaitymas naudojant 920 nm pirmojo kanalo spinduliuotę bei aktyvumo sužadinimas naudojant antrojo kanalo 1100 nm spinduliuotę. Neuronų vaizdai pateikti 2.12 pav., parodomi neuronai išreiškiantys indikatorių GCaAMP bei opsiną C1V1. Eksperimento metu penkiuose neuronuose kas 10 sekundžių yra trumpam įjungiama 1100 nm spinduliuotė (200 mW vidutinė galia ties bandiniu). Neuronų aktyvumas sužadinant GCaMP į fluorescuoti galinčią būseną yra stebimas visas 60 sekundžių. Su netiesiniu 1100 nm sužadinimu yra stebimas GCaMP fluorescencijos padidėjimas, o kartu ir neuronų aktyvumo pakitimas. Tokia eksperimentinė sistema leidžia atlikti įvairius biologinius eksperimentus, tokius kaip greta esančių neuronų žadinimas ir elektrinio impulso grandinės stebėjmas, pelės vizualinis bei tiesioginis lazerinis žadinimas bei neuronų atsako stebėjimas.

### Pagrindiniai rezultatai



2.12 pav. A) Kontrolinis dvifotonės fluorescencijos vaizdas vaizdinant GCaMP ir C1V1 išreiškiančius neuronus (kairėje žalias + raudonas vaizdas), atskirai GCaMP (centre žalias vaizdas) ir C1V1 (dešinėje raudonas vaizdas) išreiškiančių ląstelių vaizdas. Pažymėti neuronai vienu metu išreiškiantys ir GCaMP ir C1V1, kurie buvo panaudoti žadinimo eksperimentui. Vaizdinamas II/III pelės smegenų sluoksnis per kaukolėje įdėtą langelį, 200 µm vaizdinimo gylis. B) Keturių viršutiniame paveiksle pažymėtų neuronų GCaMP fluorescencijos laikinis signalas. Ties raudonais pažymėjimais įjungiamas C1V1 žadinimas ties 1100 nm spinduliuote. Sužadinimo momentais stebimas fluorescencijos padidėjimas žymi padidėjusį neuronų elektrinį aktyvumą, sukeltą netiesinės optinės sugerties.

Pagrindinės išvados

# 3 Pagrindinės išvados

- 1. Optinio parametrinio osciliatoriaus kristalo išsukimas lemia derinamo ženklo bei dydžio pakopinį netiesiškumą, kuris gali būti naudojamas siekiant mažinti arba didinti fazinės savimoduliacijos reiškinius stebimus didelės galios femtosekundiniuose optiniuose parametriniuose osciliatoriuose su teigiama arba neigiama tiesine rezonatoriaus grupinių greičių dispersija (skyrius 2.1).
- Optinio parametrinio osciliatoriaus rezonatoriaus antrajame židinyje įdėtas signalo antrosios harmonikos kristalas gali būti naudojamas kaip neigiamo netiesiškumo elementas, kompensuojantis rezonatoriaus teigiamą grupinių greičių dispersiją ir tokiu būdu leidžiantis solitono generaciją su gera impulso kokybe (skyrius 2.2).
- Dideli pakopinio netiesiškumo indukuoti fazės poslinkiai leidžia generuotis aukštesnių eilių solitonams, kurie pasižymi osciliacijomis, kurios stebimos tol kol solitonai nėra sutrikdomi aukštesnių netiesinės dispersijos eilių (skyrius 2.3).
- 4. Optinio parametrinio osciliatoriaus kristalo pakopinis netiesiškumas nulemia erdvinį pluošto fokusavimąsi, kuris yra pakankamai stiprus, jog išvestų stabilų rezonatorių už stabilumo zonos ribos, jei pradinis stabilumas yra arti stabilumo zonos krašto (skyrius 2.4).
- Femtosekundinis optinis parametrinis osciliatorius, derinamas 700 – 950 nm arba 950 - 1300 nm ribose yra universalus lazerinis šaltinis, tinkamas netiesinės mikroskopijos, netiesinės polimerizacijos bei netiesinės optogenetikos taikymuose. Didelio pasikartojimo dažnio ir plačios bangos ilgių derinimo

juostos kombinacija yra unikalus parametras tarp derinamo bangos ilgio prietaisų (skyrius 2.5).

## 4 Literatūra

- J. A. Giordmaine and R. C. Miller, "Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO<sub>3</sub> at optical frequencies", Phys. Rev. Lett. 14 (24), 973 (1965).
- [2] Majid Ebrahimzadeh, Gordon Robertson, and Malcolm H. Dunn, "Efficient ultraviolet LiB3O5 optical parametric oscillator", Optics Letters 16, (10), 767-769 (1991).
- [3] C. Gu, M. Hu, J. Fan, Y, Song, B. Liu, L. Chai, C. Wang, D. T. Reid, "High power tunable femtosecond ultraviolet laser source based on an Yb-fiber-laser pumped optical parametric oscillator", Optics Express 23, (5), 6181-6186 (2015).
- [4] Toomas H. Allik, Suresh Chandra, David M. Rines, Peter G. Schunemann, J. Andrew Hutchinson, and Richard Utano, "Tunable 7–12-μm optical parametric oscillator using a Cr,Er:YSGG laser to pump CdSe and ZnGeP2 crystals", Optics Letters 22, (9), 596-599 (1997).
- [5] S. Chaitanya Kumar, J. Krauth, A. Steinmann, K. T. Zawilski, P. G. Schunemann, H. Giessen, M. Ebrahim-Zadeh, "High-power femtosecond mid-infrared optical parametric oscillator at 7 μm in CdSiP<sub>2</sub>", Optics Letters 40, (7), 1398-1401 (2015).
- [6] M. E. Klein, D.-H. Lee, J.-P. Meyn, K.-J. Boller, and R. Wallenstein, "Singly resonant continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a diode laser", Optics Letters 24, (16) 1142-1144 (1999).
- [7] G. K. Samanta, M. Ebrahim-Zadeh, "Continuous-wave singlyresonant optical parametric oscillator with resonant wave coupling", Optics Express **16**, (10), 6883-6888 (2008).
- [8] S. Chaitanya Kumar, A. Esteban-Martin, T. Ideguchi, M. Yan, S. Holzner, T.W. Hänsch, N. Picqué and M. Ebrahim-Zadeh, "Few-

cycle, Broadband, Mid-infrared Optical Parametric Oscillator Pumped by a 20-fs Ti:sapphire Laser", Laser and Photonics Reviews 8 (5), 86-91 (2014).

- [9] R. A. McCracken, D. T. Reid, "Few-cycle near infrared pulses from a degenerate 1 GHz optical parametric oscillator", Optics Letters 40, (17) 4102-4105 (2015).
- [10] Mark S. Webb, Peter F. Moulton, Jeffrey J. Kasinski, Ralph L. Burnham, Gabe Loiacono, and Richard Stolzenberger, "Highaverage-power KTiOAsO4 optical parametric oscillator", Optics Letters 23, (15) 1161-1163 (1998).
- [11] Gabriel Amiard Hudebine, Eric Freysz, "Tunable and chirp free femtosecond signal pulses generated by a PPLN OPO pumped by Ytterbium fiber laser chirped pulses," Proc. SPIE 10902, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVIII, 109020M (4 March 2019)
- [12] T. Petersen, J. D. Zuegel, J. Bromage, "High-average-power, 2μm femtosecond optical parametric oscillator synchronously pumped by a thin-disk, mode-locked laser", Optics Express 25, (8), 8840-8844 (2017).
- [13] T. Lang, T. Binhammer, S. Rausch, G. Palmer, M. Emons, M. Schultze, A. Harth, U. Morgner,"High power ultra-widely tuneable femtosecond pulses from a non-collinear optical parametric oscillator (NOPO)" Optics Express 20, (2), 912-917 (2012).
- [14] Tobias P. Lamour, Derryck T. Reid, "650-nJ pulses from a cavity-dumped Yb: fibre pumped ultrafast optical parametric oscillator" Optics Express 19, (18), 912-917 (2011).
- [15] Shai Yefet and Avi Pe'er, "A Review of Cavity Design for Kerr Lens Mode-Locked Solid-State Lasers", Appl. Sci. 3, 694-724 (2013).

- [16] O. Pronin, J. Brons, *Kerr-lens mode-locked High power thin-disk* oscillators, IntechOpen (2018).
- [17] O. Pronin, J. Brons, C. Grasse, V. Pervak, G. Boehm, M. C. Amann, V. L. Kalashnikov, A. Apolonski, F. Krausz, "Highpower 200 fs Kerr-lens mode-locked Yb:YAG thin-disk oscillator" Optics Letters 36, (24), 4746-4748 (2011).
- [18] R. DeSalvo, D. J. Hagan, M. Sheik-Bahae, G. Stegeman, W. E. Van Stryland, "Self-focusing and self-defocusing by cascaded second-order effects in KTP," Optics Letters 17, (1) 28-30 (1992).
- [19] G. M. Gale, M. Cavallari, and F. Hache, "Femtosecond visible optical parametric oscillator," J. Opt. Soc. Am. B 15, (2) 702-714 (1998).
- [20] R. Šuminas, G. Tamošauskas, G. Valiulis, A. Dubietis, "Spatiotemporal light bullets and supercontinuum generation in β-BBO crystal with competing quadratic and cubic nonlinearities," Optics Letters 41, (9) 2097-2100 (2016).
- [21] R. Šuminas, G. Tamošauskas, V. Jukna, A. Couairon, A. Dubietis, "Second-order cascading-assisted filamentation and controllable supercontinuum generation in birefringent crystals," Optics Express 25, (6) 6746-6756 (2017).
- [22] R. Laenen, H. Graener, A. Laubereau, "Evidence for chirp reversal and self-compression in a femtosecond optical parametric oscillator," J. Opt. Soc. Am. B 8, (5) 1085-1088 (1991).
- [23] I. Ricciardi, S. Mosca, M. Parisi, F. Leo, T. Hansson, M. Erkintalo, P. Maddaloni, P. D. Natale, S. Wabnitz, M. D. Rosa, "Optical Frequency Combs in Quadratically Nonlinear Resonators", Micromachines 11 (2), 230, (2020).
- [24] J. Szabados, D. N. Puzyrev, Y. Minet, L. Reis, K. Buse, A. Villois, D. V. Skryabin, I. Breunig, "Frequency com generation via cascaded second-order nonlinearities in microresonators", Phys. Rev. Lett. **124** (20), 203902, (2020).

- [25] A. S. Kwligy, A. Lind, D. D. Hickstein, D. R. Carlson, H. Timmers, N. Nader, F. C. Cruz, G. Ycas, S. B. Papp, S. A. Diddams, "Mid-infrared frequency comb generation via cascaded quadratic nonlinearities in quasi-phase-matched waveguides", Optics Letters 23 (8), 1678-1681, (2018).
- [26] V. Ulvila, C. R. Phillips, L. Halonen, M. Vainio, "Frequency comb generation by a continuous-wave pumped optical parametric oscillator based on cascading quadratic nonlinearities", Optics Letters 38 (21), 4281-4284 (2013).
- [27] F. Saltarelli, A. Diebold, I. J. Graumann, C. R. Phillips, U. Keller, "Self-phase modulation cancellation in a high-power ultrafast thin-disk laser oscillator", Optica 5 (12), 1603-1606 (2018).
- [28] A. S. Mayer, C. R. Phillips, U. Keller, "Watt-level 10-gigahertz solid-state laser enabled by self-defocusing nonlinearities in an aperiodically poled crystal", Nature Communications 8, 1673 (2017).
- [29] L. J. Qian, X. Liu, F. W. Wise, "Femtosecond Kerr-lens mode locking with negative nonlinear phase shifts", Optics Letters 24 (3), 166-168 (1999).
- [30] G. Cerullo, S. D. Silvestri, A. Monguzzi, D. Segala, V. Magni, "Self-starting mode locking of a cw Nd:YAG laser using cascaded second-order nonlinearities", Optics Letters 20 (7), 746-748 (1995).
- [31] S. T. Lin, C. H. Huang "Effects of nonlinear phase in cascaded mode-locked Nd: YVO4 laser", Optics Express 27, (2) 504-511 (2019).
- [32] V. G. Dmitriev, G. G. Gurzadyan D. N. Nikogosyan, *Handbook* of Nonlinear Optical Crystals, Springer (1999).
- [33] H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka, M. Yoshimura, T. Sasaki, T. Kamimura, K. Yoshida, "Dependences of Laser-Induced Bulk Damage Threshold and Crack Patterns in Several Nonlinear

Crystals on Irradiation Direction", Japanese Journal of Applied Physics **45**, (2A), 766-769 (2006).

- [34] T. Petersen, J. D. Zuegel, J. Bromage, "Thermal effects in an ultrafast BiB3O6 optical parametric oscillator at high average powers", Applied Optics **56**, (24), 6923-6929 (2017).
- [35] D. Nikogosyan, Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey, Springer, (2015).
- [36] M. S. Bahae, D. C. Hutchings, D. J. Hagan, E. W. Van Stryland "Dispersion of Bound Electronic Nonlinear Refraction in Solids", IEEE Journal of Quantum Electronics 27, (6), 1296-1309 (1991).
- [37] Christian R. Rosberg, Francis H. Bennet, Dragomir N. Neshev, Per D. Rasmussen, Ole Bang, Wieslaw Krolikowski, Anders Bjarklev, and Yuri S. Kivshar, "Tunable diffraction and selfdefocusing in liquid-filled photonic crystal fibers", Optics Express 15, (19), 12145-12150.
- [38] J. Bewersdorf, S.W. Hell, "Picosecond pulsed two-photon imaging with repetition rates of 200 and 400 MHz", Journal of Microscopy, **191** (1), 28-38,(1998).
- [39] Volker Andresen, Stephanie Alexander, Wolfgang-Moritz Heupel, Markus Hirschberg, Robert M.Hoffman, PeterFriedl, "Infrared multiphoton microscopy: subcellular-resolved deep tissue imaging", Current Opinion in Biotechnology 20, (1), 54-62 (2009).
- [40] M. Ghotbi, A. Esteban Martin, M. Ebrahim Zadeh, "BiB3O6 femtosecond optical parametric oscillator", Optics Letters 31, (21) 3128-3130 (2006).
- [41] T. Gottschalll, J. Limpert, A. Tunnermann, "Ultra-short pulse fiber optical parametric oscillator," Optics Letters 42, (17) 3423-3426 (2017).
- [42] J. Hebling, E. J. Mayer, J. Kuhl, R. Szipocs, "Chirped-mirror dispersion-compensated femtosecond optical parametric oscillator", Optics Letters 20, (8), 919-921 (1995).

- [43] J. Vengelis, I. Stasevicius, K. Stankeviciute, V. Jarutis, R. Grigonis, M. Vengris, V. Sirutkaitis, "Characteristics of optical parametric oscillators synchronously pumped by second harmonic of femtosecond Yb:KGW laser", Optics Communications 338, 277-287 (2015).
- [44] H. Guo, B. Zhou, M. Steinert, F. Setzpfandt, T. Pertsch, H. Chung, Y. Chen, M. Bache, "Supercontinuum generation in quadratic nonlinear waveguides without quasi-phase matching", Optics Letters 40 (4), 629- 632 (2015).
- [45] K. Ivanauskiene, I. Stasevicius, M. Vengris, V. Sirutkaitis, "Pulse-to-pulse instabilities in synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator", J. Opt. Soc. Am. B 36 (1), 131-139 (2019).
- [46] D. T. Reid, J. M. Dudley, M. Ebrahimzadeh, W. Sibbett, "Soliton formation in a femtosecond optical parametric oscillator," Optics Letters 19, (11) 825-827 (1994).
- [47] D. Descloux, C. Laporte, J. B. Dherbecourt, J. M. Melkonian, M. Raybaut, C. Drag, A. Godard, "Spectrotemporal dynamics of a picosecond OPO based on chirped quasi-phase-matching", Optics Letters 40 (2), 280-283 (2015).
- [48] C. Ning, Z, Zhang, "Multi-soliton formation in femtosecond degenerate optical parametric oscillators", Optics Letters 45 (3), 734-737 (2020).
- [49] C. F. O' Donnell, S. C. Kumar, T. Paoletta, M. Ebrahim-Zadeh, "Widely tunable femtosecond soliton generation in a fiberfeedback optical parametric oscillator", Optica 7 (5), 426-433 (2020).
- [50] V. Tamuliene, M. Vengris, V. Sirutkaitis, "Theoretical investigation of pulse-to-pulse instabilities in synchronously pumped femtosecond optical parametric oscillator", J. Opt. Soc. Am. B 37 (2), 473-477 (2020).

- [51] F. Salin, P. Grangier, G. Roger, A. Brun, "Observation of High-Order Solitons Directly Produced by a Femtosecond Ring Laser", Phys. Rev. Lett. 56 (11), 1132-1136, (1986).
- [52] G. Cerullo, S. De Silvestri, V. Magni, L. Pallaro, "Resonators for Kerr-lens mode-locked femtosecond Ti:sapphire lasers", Optics Letters 19, (11) 807-809 (1994).
- [53] A. Penzkofer, M. Wittmann, M. Lorenz, E. Siegert, S. Macnamara "Kerr lens effects in a folded-cavity four-mirror linear resonator", Optical and Quantum Electronics 28, 423-442 (1996).
- [54] M. Seidel, J. Brons, G. Arisholm, K. Fritsch, V. Pervak, O. Pronin, "Efficient High-Power Ultrashort Pulse compression in Self-Defocusing Bulk Media", Scientific Reports 7, 1410 (2017).
- [55] A. Stroh, Optogenetics: A Roadmap, Springer (2018).

# UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius El. p. info@leidykla.vu.lt, www.leidykla.vu.lt Tiražas 20 egz.