

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Gabrielė Stanionytė

**SUBNANOSEKUNDINIŲ IMPULSŲ KOMBINUOTOS PARAMETRINIO STIPRINIMO  
SISTEMOS OPTIMIZAVIMAS**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų  
studijų programa

Studentas

Gabrielė Stanionytė

Leista ginti

2023-05-26

Darbo vadovas

dr. Julius Vengelis

Centro direktorė

dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius, 2023

# Turinys

Įvadas .....	3
<b>1. Teorinis įvadas</b> .....	4
<b>1.1 Netiesinė optika ir netiesiniai optiniai reiškiniai <math>\chi^{(2)}</math> terpėse</b> .....	4
<b>1.2 Skaliarinis ir vektorinis fazinis sinchronizmas</b> .....	6
1.2.1 Skaliarinis fazinis sinchronizmas .....	6
1.2.2 Vektorinis fazinis sinchronizmas .....	7
1.2.3 Fazinis sinchronizmas dviašiuose kristaluose .....	8
1.2.4. Fazinis kvazisinchronizmas.....	8
<b>1.3 Parametrinė šviesos generacija ir stiprinimas</b> .....	9
1.3.1 Parametrinė šviesos generacija.....	9
1.3.2 Parametrinis šviesos stiprinimas .....	10
1.3.3 Parametriniai šviesos stiprintuvai ir generatoriai .....	11
1.3.4 Subnanosekundinių impulsų parametrinių šviesos stiprintuvų ir generatorių apžvalga.....	13
<b>1.4 Mikrolazeris</b> .....	16
<b>1.5 Periodiškai orientuoti kristalai</b> .....	19
<b>1.6 LBO kristalas</b> .....	22
<b>1.7 Laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo metodas</b> .....	23
<b>2. Eksperimentinė dalis</b> .....	25
2.1 Eksperimento schemas ir pagrindinių elementų charakteristikos .....	25
2.2 Tyrimų rezultatų 1 diapazone aptarimas .....	28
2. 2. 1. Užkrato spinduliuotės šaltinio optimizavimas .....	29
2. 2. 2. Parametrinio šviesos stiprinimo tyrimo rezultatų aptarimas .....	34
2. 2. 3. Parametrinės šviesos generacijos ir stiprinimo modeliavimo rezultatai.....	38
2. 3 Tyrimų rezultatų 3 diapazone aptarimas .....	41
2. 3. 1. Užkrato spinduliuotės šaltinio optimizavimas .....	41
2. 3. 2. Parametrinio šviesos stiprinimo tyrimo rezultatų aptarimas .....	43
<b>Pagrindiniai rezultatai ir išvados</b> .....	48
Santrauka.....	49
Summary .....	50
Literatūros sąrašas .....	51
Padėka .....	55
Aprobacija.....	56

## Darbe vartojami pagrindiniai žymėjimai ir sutrumpinimai

MgO:PPLN – magnio oksidu legiruotas periodiškai orientuotas ličio niobato ( $\text{LiNbO}_3$ ) kristalas.

LBO – ličio triborato kristalas

BBO – beta bario borato kristalas

OPG – bėgančios bangos parametrinis šviesos generatorius

OPO – stovinčios bangos parametrinis šviesos generatorius

OPA – parametrinis šviesos stiprintuvas

1H, 2H, 3H – pirmoji, antroji, trečioji harmonika

TCSPC – laike koreliuotas pavienių fotonų skaičiavimas

$E(t)$  – elektrinis lauko stipris

$P(t)$  – poliarizuotumas

$P_{NT}$  – netiesinė poliarizuotumo dalis

$A_i(0)$  – pradinė šalutinės bangos amplitudė

$A_s(0)$  – pradinė signalinės bangos amplitudė

$c$  – šviesos greitis

$g$  – parametrinio stiprinimo koeficientas

$k$  – bangos vektorius

$l_c$  – koherentiškumo ilgis

$n$  – medžiagos lūžio rodiklis

$n_o$  – paprastosios bangos lūžio rodiklis

$n_e$  – nepaprastosios bangos lūžio rodiklis

$\omega_s$  – signalinės bangos dažnis

$\omega_p$  – kaupinimo bangos dažnis

$\omega_i$  – šalutinės bangos dažnis

$\Delta\lambda$  – spektro plotis

$\sigma$  – netiesinio ryšio koeficientas

$\chi^{(1)}$  – tiesinis optinis jautris

$\varepsilon_0$  – vakuumo dielektrinė skvarba

$\tau$  – trukmė

## Įvadas

XX a. buvo technologijų amžius, per šį laikotarpį vystėsi ganėtinai daug naujų technologijų ir naujų prietaisų. Vienas iš tokių prietaisų buvo lazeris, kuris tapo nepakeičiamas medžiagų apdirbime, mokslo tyrimuose, statybose, medicinoje, gynyboje ir kitose srityse [1]. Kadangi lazerių spinduliuotės bangos ilgį labai sunku pakeisti ir jis dažniausiai yra fiksuotas, praktikoje naudojami tam tikri prietaisai - parametriniai šviesos generatoriai ir stiprintuvai, kurie leidžia derinti bangos ilgius tolygiai, plačiame spektro diapazone. Parametriniai šviesos generatoriai (OPG) iš kaupinimo bangos generuoja dvi mažesnio dažnio bangas, o parametriniai šviesos stiprintuvai (OPA) generuoja skirtuminio dažnio bangą stiprinant užkrato bangą [2, 3]. Šie prietaisai gali būti naudojami įvairiose srityse: spektroskopijoje, įvairių cheminių medžiagų detekcijoje, netiesinėje mikroskopijoje, dujų ar lazeriniame atstumų matavime, biofotonikoje, biomedicinoje (odos ligų gydymas, tatuiruočių šalinimas) ar kitose srityse [1, 4 – 8].

Šiomis dienomis jau yra sukurta ganėtinai daug parametrinių šviesos stiprintuvų ir generatorių tiek ilgų impulso trukmių (daugiau nei 1 ns), tiek ultratrumpų (mažiau nei 100 ps) impulso trukmių diapazone, tačiau subnanosekundinių trukmių srityje (daugiau už 100 ps, tačiau mažiau nei 1 ns) sukurtų šių prietaisų yra nedaug [9 – 19]. Šių prietaisų kūrimo pagrindinis ribojimas: subnanosekundinių impulsų atveju parametrinės generacijos slenkstis yra didesnis negu netiesinės terpės pažeidimo slenkstis – terpė būna pažeidžiama greičiau negu įvyksta pats procesas (parametrinis stiprinimas arba generacija). Mokslininkai ieško būdų kaip būtų galima šią problemą išspręsti, vieni bando naudoti užkrato spinduliuotę, kiti naudoti terpę su labai dideliu netiesiškumu [2, 20].

Šio darbo tikslas – sukonstruoti ir ištirti subnanosekundiniais impulsais kaupinamą kombinuotą parametrinio stiprinimo sistemą bei ją optimizuoti. Kaip užkratus naudojant sugeneruotą signalinę bangą MgO:PPLN OPG ir jos antrą harmoniką (2H).

Darbo užduotys:

- Sukonstruoti subnanosekundinio parametrinio šviesos stiprinimo sistemą ir ją optimizuoti.
- Ištirti parametrinio šviesos stiprinimo sistemos užkratų spinduliuočių charakteristikas.
- Ištirti energines, spektrines, laikines OPA charakteristikas.

# 1. Teorinis įvadas

## 1.1 Netiesinė optika ir netiesiniai optiniai reiškiniai $\chi^{(2)}$ terpėse

Šiame skyriuje aptarsime netiesinę optiką – mokslą, kuris tiria reiškinius, kai šviesai sąveikaujant su medžiaga būna laikinai pakeičiamos optinės tos medžiagos savybės [2]. Norint aprašyti netiesines sąveikas tarp elektromagnetinio lauko ir medžiagų dalelių reikalingi tam tikri fizikiniai dydžiai: vieni nusako kaip medžiagos dalelės geba sąveikauti su elektromagnetiniu laiku bei jį kurti (elektrinis krūvis), o kiti charakterizuoja kaip laukas sugeba sąveikauti su tam tikromis medžiagos dalelėmis. Kaip yra žinoma iš elektromagnetizmo teorijos, elektromagnetinio lauko poveikis krūviams yra nusakomas magnetinio ir elektrinio lauko stipriais. Kai elektromagnetinis laukas veikia elektros krūvius, jie yra verčiami judėti ir tuo metu atsiranda papildomas medžiagos dalelių poslinkis, kuris yra kaip tam tikras medžiagos atsakas į išorinį lauką (aprašomas medžiagos poliarizuotumu). Poliarizuotumas išreiškiamas išraiška [2, 3]:

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

kur  $E(t)$  – elektrinis lauko stipris.  $P(t)$  – poliarizuotumas,  $\chi^{(1)}$  – tiesinis optinis jautris,  $\varepsilon_0$  – vakuumo dielektrinė skvarba.

Netiesinėje optikoje laikoma, kad netiesinio poliarizuotumo priedas yra mažas, netiesinis atsakas yra momentinis, šviesos elektrinis laukas gali būti palyginamas su medžiagos vidinio elektrinio lauko stipriu ir medžiaga laikoma skaidria, tuomet poliarizuotumas skleidžiamas laipsniu eilute (1).  $\chi^{(2)}$  ir  $\chi^{(3)}$  yra medžiagos parametrai, kurie apibūdina sąveika su elektriniu lauku (yra antrosios ir trečiosios eilės netiesiniai optiniai jautriai). Optinio jautrio vertės ganėtinai skiriasi, jos priklauso nuo laipsnio. Iš (2-4) formulių matoma, kad kuo optinio jautrio dydis mažesnis, tuo jo laipsnis yra didesnis [2, 3]. Netiesiniai optiniai reiškiniai pasireiškia tada, kai optinės spinduliuotės elektrinio lauko stipris yra palyginimas su atominio elektrinio lauko stipriu (t.y. yra labai didelis).

$$\chi^{(1)} \approx \frac{\pi}{2}, \quad (2)$$

$$\chi^{(2)} \approx 2 \times 10^{-12} \frac{m}{V}, \quad (3)$$

$$\chi^{(3)} \approx 4 \times 10^{-24} \frac{m^2}{V^2}. \quad (4)$$

Kai dielektrikas yra paveikiamas optine spinduliuote, naujų elektromagnetinių bangų šaltinis yra poliarizacija, kuri kinta laike. Bangų sklidimas, netiesinėse ir dispersijos neturinčiose terpėse yra aprašomas formule, kuri vadinama bangos lygtimi [2]:

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 P_{NT}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

kur  $c$  – šviesos greitis,  $P_{NT}$  – netiesinė poliarizuotumo dalis,  $n$  – medžiagos lūžio rodiklis. Iš (5) lygties galima pastebėti, kad krūviai bus greitinami, kai dešinė lygybės pusė nebus lygi 0. Greitinami krūviai spinduliuoja elektromagnetines bangas (tai yra žinoma iš elektromagnetizmo teorijos), tai galima pastebėti ir iš (5) lygties: kad terpės netiesinio atsako rezultatas ir yra terpės netiesinio atsako sukurtos naujos bangos [2, 3].

Toliau aptarsime parametrinius  $\chi^{(2)}$  netiesiškumo reiškinius. Jeigu norima generuoti platų spektrą, kuris būtų nuo UV iki IR spindulių, naudojamos medžiagos, kurių  $\chi^{(2)} \neq 0$ , to dažniausiai reikia, kai yra naudojami kietojo kūno lazeriai, nes jų aktyviosios terpės lygmenys mažai išplinta ir todėl spinduliuojamas spektras yra siauras.

Jeigu turime spinduliuotę iš dviejų skirtingų šaltinių, dažniu  $\omega_1$  ir  $\omega_2$  (tribangės sąveikos atvejis), tuomet po sąveikos su netiesine medžiaga, atsiras nauja komponentė dažniu  $\omega_3$ . Kadangi yra dvi skirtingos įeinančios spinduliuotės, tai elektrinį lauką medžiagoje galima aprašyti tokia lygtimi [2]:

$$E(t) = E_1 e^{-i\omega_1 t} + E_2 e^{-i\omega_2 t} + k.j., \quad (6)$$

o netiesinio kvadratinio poliarizuotumo bendra formos išraiška bus tokia [2]:

$$P^{(2)}(t) = \sum_n P(\omega_n) e^{-i\omega_n t}, \quad (7)$$

(7) formulę išskleidus gauname [2]:

$$P^{(2)}(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E^2(t) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} [E_1^2 e^{-2i\omega_1 t} + E_2^2 e^{-2i\omega_2 t} + 2E_1 E_2 e^{-i(\omega_1 + \omega_2)t} + 2E_1 E_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2)t} + k.j.] + 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} [E_1 E_1^* + E_2 E_2^*], \quad (8)$$

(7) ir (8) išraiškas patogiau nagrinėti, kai yra išrašytos netiesinio poliarizuotumo kompleksinės amplitudės, kuomet yra skirtingos dažnių komponentės [2]:

$$P(2\omega_1) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E_1^2, \quad (9)$$

$$P(2\omega_2) = \varepsilon_0 \chi^{(2)} E_2^2, \quad (10)$$

$$P(\omega_1 - \omega_2) = 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} E_1 E_2^*, \quad (11)$$

$$P(\omega_1 + \omega_2) = 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} E_1 E_2, \quad (12)$$

$$P(0) = 2\varepsilon_0 \chi^{(2)} (E_1 E_1^* + E_2 E_2^*). \quad (13)$$

(9) - (13) yra pateikti visi netiesiniai reiškiniai, kurie gali vykti, kai netiesiškumas yra antruoju laipsniu. (9) ir (10) yra antrosios harmonikos generacija (spinduliuotės dažnis padvigubėja), (11) – skirtuminio dažnio generacija (kai sąveikauja kaupinimo banga ir mažesnio dažnio banga (šalutinė ar siganlinė) ir susigeneruoja tam tikra skirtuminė dažnio banga ir banga, kuri yra mažesnio dažnio yra sustiprinama), (12) – suminio dažnio generacija (kai sąveikauja dvi kaupinimo bangos, kurių dažniai skirtingi ir susigeneruoja nauja banga, lygi kaupinimo bangų dažnių sumai) ir (13) – optinis lyginimas (kuomet kristale yra sukuriamas statinis elektrinis laukas). Matome, kad nebūtinai visi iš karto, bet gali atsirasti net 4 skirtingi dažniai, o kada kuris atsiras priklausys nuo

fazinio sinchronizmo sąlygų (žr. 1.2). Taip pat be šių išvardintų procesų dar yra ir parametrinis šviesos stiprinimas ir generacija (žr. 1.3)

## 1.2 Skaliarinis ir vektorinis fazinis sinchronizmas

### 1.2.1 Skaliarinis fazinis sinchronizmas

1.1 aprašytiems procesams veikti neužtenka tik didelės intensyvumo spinduliuotės, taip pat turi būti tenkinamas energijos tvermės dėsnis  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$  ( kai kurie dažniai atsiranda automatiškai) ir impulso tvermės dėsnis (pasako, ką reikia padaryti, kad procesas vyktų efektyviau arba kaip efektyviai procesas veikia). Impulso tvermės dėsnis yra dar vadinamas faziniu sinchronizmu ir jis gali būti pasiekiamas naudojant nekolinearią (vektorinis fazinis sinchronizmas) arba kolinearią (skaliarinis fazinis sinchronizmas) šviesos pluoštų sąveiką tam tikroje netiesinėje terpėje [2, 3].

Įsivaizduokime, kad sąveikauja pluoštai, kurie yra vienas kitam lygiagretūs, tai tuo atveju fazinio sinchronizmo sąlygą galima užrašyti tokia išraiška [2]:

$$\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 = 0, \quad (14)$$

kur  $k_j = \frac{n_j \omega_j}{c}$  yra bangos vektorius. (14) formulę galima išreikšti ir taip:

$$n_1 \omega_1 + n_2 \omega_2 = n_3 \omega_3, \quad (15)$$

kur  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ . Jeigu turėsime antrosios harmonikos generaciją, kai  $\omega_1 = \omega_2$  tai  $2\omega_1 = \omega_3$ , tai (15) lygtis atrodys taip [2]:

$$n(\omega_1) = n(2\omega_1). \quad (16)$$

Kadangi yra žinoma, kad medžiagos lūžio rodiklis didėja kai didėja ir dažnis (normali dispersija) tai norint patenkinti šią sąlygą praktikoje naudojami dvejopo lūžio (anizotropiniai) kristalai. Jie pasižymi tuo, kad sąveikos metu juose krentanti spinduliuotė suskyla į dvi bangas – nepaprastąją (e) ir paprastąją (o). Gali būti lygiagreti ir statmena poliarizacija kristalo vyriausiai ploštumai, kai yra lygiagreti tada yra nepaprastosios bangos, o kai statmena, tai paprastosios.

Anizotropiniuose kristaluose e ir o turi skirtingas poliarizacijas (skirtingas sklaidimo modas), šios modos turi skirtingus lūžio rodiklius  $n_o(\omega) \neq n_e(\omega)$ . Nepaprastosios bangos lūžio rodiklis pasižymi dar ir tuo, kad jis kinta ir nuo kampo  $\theta$  su optine kristalo ašimi (priklauso nuo sklaidimo krypties) [3, 20]. Dar vienas svarbus aspektas yra kampinis derinimas, kai lūžio rodiklis kinta, e poliarizacijos banga keičia bangos kritimo kampą į optinę kristalo ašį. Šį kampinį derinimą galima pasiekti tada, kai kristalo optinė ašis yra sukama krentančiosios spinduliuotės atžvilgiu. Jeigu turime neigiamą, vienašį kristalą ( $n_e < n_o$ ), tai antrosios harmonikos proceso metu kaupinimo bangos

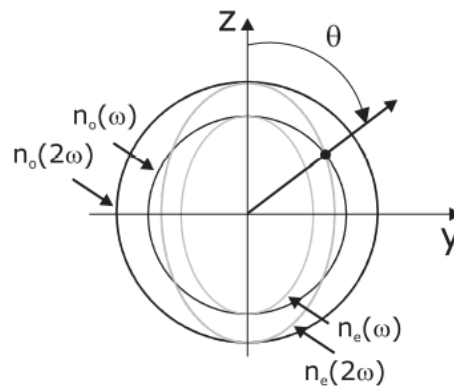
poliarizacija turi būti o, o antrosios harmonikos e, tuomet bus tenkinama fazinio sinchronizmo sąlyga. Tuomet bus gaunamas I tipo (oo – e) sinchronizmas [2, 3]. Šią sąlygą galima užrašyti lygtimi [2]:

$$n_e(2\omega, \theta) = n_o(\omega), \quad (17)$$

kur  $n_o$  – paprastosios bangos lūžio rodiklis,  $n_e$  – nepaprastosios bangos lūžio rodiklis.

Jeigu norima grafiškai (1 pav.) surasti kampą  $\theta$ , tuomet galima pasinaudi lūžio rodiklio elipsoido lygtimi:

$$\frac{1}{n_e(\theta^2)} = \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2}. \quad (18)$$



**1 pav.** Lūžio rodiklio elipsoidas neigiamam vienašiam kristalui ir fazinio sinchronizmo kryptis antrosios harmonikos generacijos atveju [2].

### 1.2.2 Vektorinis fazinis sinchronizmas

Kai kuriais atvejais neužtenka tik kolinearaus fazinio sinchronizmo, todėl naudojamas ir vektorinis fazinis sinchronizmas. Jis pasižymi tuo, kad sąveikaujančios bangos sklinda skirtingomis kryptimis ir tarp jų vektorių atsiranda kampas. Vektorinio fazinio sinchronizmo sąlyga užrašoma tokia lygtimi [2]:

$$\vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3. \quad (19)$$

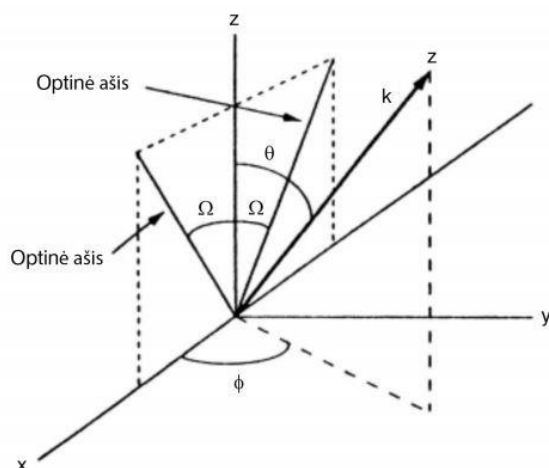
Jeigu norima surasti kampą tarp kaupinimo bangų vektorių  $\vec{k}_1$  ir  $\vec{k}_2$ , tai reikia žinoti  $\vec{k}_3$  vektoriaus kryptį ir fazinio sinchronizmo kampą  $\theta$ , tuomet kampas bus randamas pasinaudojant tokia išraiška [2]:

$$\cos \Phi = \frac{k_3^2 - k_2^2 - k_1^2}{2k_2k_1}. \quad (20)$$



### 1.2.3 Fazinis sinchronizmas dviašiuose kristaluose

Jeigu turime dviašį kristalą, tai jame svarbus yra kampinis fazinis sinchronizmas. Dviašiam kristale yra dvi optinės ašys, kurios yra nukreiptos tam tikru kampu  $\Omega$  į Z (kristalografine) ašį (2 pav.). Iš 2 pav. matome, kad yra dvi paprastosios bangos ir dvi statmenos poliarizacijos nepaprastosios bangos. Kadangi bangų greičiai yra vienodi, tai išilgai optinių ašių dvigubo šviesos lūžimo nėra. Šiuose dviašiuose kristaluose šviesos sklidimo kryptis gali būti nurodoma dviem kampais: kampu  $\varphi$  ir šviesos sklidimo krypties  $\vec{k}$  tarp sklidimo krypties ir X ašies ir kampu  $\theta$  tarp Z ašies (2 pav.), kai yra laikoma, kad X, Y, Z koordinačių sistema yra statmenomis ašimis. Dviašiuose kristaluose sinchronizmo tipai (I ir II) priklauso nuo to, kokia yra kaupinimo bangos poliarizacija. Norint išsiaiškinti kokia yra bendroji fazinio sinchronizmo priklausomybė  $\phi(\theta)$  reikia atlikti sudėtingų išraiškų (ketvirtosios eilės save kertantis paviršius) skaičiavimus, pasinaudojant skaitiniais metodais [21].



**2 pav.** Bangos sklidimo dviašiam kristalams schema [21].

### 1.2.4. Fazinis kvazisinchronizmas

Būna atvejų, kai neužtenka vektorinio ar kolinearaus fazinio sinchronizmo, todėl naudojamas fazinis kvazisinchronizmas. Jis naudojamas kai yra didelis kristalo efektinis netiesiškumas, plati skaidrumo sritis, aukštas optinės pažaidos slenkstis, taip pat kristaluose, kurie pasižymi nepakankamu dvejoju lūžiu. Pirmasis šio metodo idėją iškėlė Armstrongas su kolegomis 1962 m. Jie sugalvojo supjaustyti netiesinį kristalą tam tikromis plokštelėmis, kurių kiekvienos ilgis būtų  $L_c$ , o poto jas suklijavo, kad kas antroje plokštelėje optinės ašies kryptis būtų pasukama  $180^\circ$ . Šios terpės periodą buvo galima išreikšti taip [2]:

$$\Lambda = 2L_c = \frac{2\pi}{k_s + k_i - k_p} \quad (21)$$

Intensyvumas didėja koherentiniame sąveikos ilgyje  $L_c$ , o kai bangų fazės išsiskiria ir intensyvumas pradeda mažėti, tai bangų fazės būna suderinamos taip, kad intensyvumas vėl didėtų, kai bangos sklinda kitame  $L_c$ . Kai bangų fazių išsiderinimas yra didelis, tai energija sklinda viena kryptimi, o ne osciliuoja tarp sąveikaujančių bangų. Fazinio kvazisinchronizmo efektyvumas yra žemesnis, negu fazinio sinchronizmo atveju, tačiau jeigu yra naudojami maksimalūs netiesinio jautrio tenzoriaus elementai tai efektyvumą galima pasiekti labai didelį [2].

### 1.3 Parametrinė šviesos generacija ir stiprinimas

Šiame skyriuje aptarsime tam tikrus skirtuminio dažnio generacijos atvejus: parametrinė šviesos generacija ir stiprinimas. Netiesinėje optikoje yra išskiriami parametriniai ir neparametriniai reiškiniai. Neparametriniai reiškiniai pasižymi tuo, kad jų metų terpės atomai užima realius lygmenis per virtualius lygmenis, proceso pabaigoje medžiagos atomai ar molekulės būna pakitę, jų būsenos būna pasikeitusios. Parametrinių reiškinų metu terpės atomai būna sužadunami į virtualius lygmenis, procesui pasibaigus atomų būsenos nebūna pasikeitę (medžiagos atomai sugrįžta į tą pačią kvantinę būseną, kokia ji buvo prieš sąveiką) [2, 3].

#### 1.3.1 Parametrinė šviesos generacija

Prieš aiškinantis kas yra parametrinė šviesos generacija aptarkime kas yra parametrinė fluorescencija ir superfluorescencija. Parametrinė fluorescencija tai tam tikra spinduliuotė, kuri atsiranda iš kvantinių fliuktuacijų (kvantinių triukšmų): signalinė ir šalutinė bangos atsiranda iš kvantinių triukšmų, o prieš sąveiką turime tik kaupinimo bangą. Kadangi šis reiškinys yra spontaniškas ir jo išvadinė galia nuo kaupinimo galios priklauso tiesiškai, tai jo efektyvumas yra ganėtinai mažas. Norint, kad signalo efektyvumas būtų didelis reikia arba turėti didelį kaupinimo bangos intensyvumą arba naudoti medžiagas, kurios pasižymi dideliu netiesiškumo koeficientu [2]. Kitas procesas, kuris pasižymi dideliu efektyvumu yra parametrinė fluorescencija. Kai yra didelis kaupinimo bangos intensyvumas tada parametrinės fluorescencijos signalas taip pat stiprėja ir auga eksponentiškai.

Parametrinės šviesos generacijos metu į kristalą krenta tik kaupinimo banga  $\omega_p$ , o sąveikos metu susigeneruoja dvi mažesnio dažnio bangos:  $\omega_i$  (šalutinė banga) ir  $\omega_s$  (signalinė banga). Signalinės ir šalutinės bangos dažniai skiriasi, signalinės dažnis yra didesnis.  $\omega_s$  ir  $\omega_i$  susigeneruoja iš kvantinio triukšmo [2]. Kai vyksta ši generacija, gali susidaryti įvairūs dažnių deriniai, tačiau kai yra sukuriama netiesinė poliarizacija, optinė spinduliuotė galės augti ir stiprėti tik tada, kai bus

tenkinamos tam tikros fazinio sinchronizmo sąlygos – energijos (22) ir impulso (23) tvermės dėsniai [2, 20]:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad (22)$$

$$k_p = k_s + k_i. \quad (23)$$

### 1.3.2 Parametrinis šviesos stiprinimas

Panagrinėsime kaip matematiškai būtų galima aprašyti parametrinį šviesos stiprinimo procesą paprasčiausiu atveju. Jeigu nėra kaupinimo nuskurdinimo ir turime plokščias, monochromatines bangas, tai tada surištųjų amplitudžių lygtis sutrumpintai galima parašyti tokiomis išraiškomis [2]:

$$\frac{dA_s}{dz} = i\sigma_s A_p A_i^* e^{i\Delta k z}, \quad (24)$$

$$\frac{dA_i}{dz} = i\sigma_i A_p A_s^* e^{i\Delta k z}, \quad (25)$$

kur  $A_i, A_p, A_s$  yra šalutinės, kaupinimo ir signalinės bangų amplitudės,  $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ , o  $\sigma$  – netiesinio ryšio koeficientas. Jeigu išspręsimė (24 – 25) lygčių sistema, tai bendru atveju gausime sprendinius, kurių išraiškos [2]:

$$A_s(z) = [A_s(0) (\cosh gz - \frac{i\Delta k}{2g} \sinh gz) + \frac{\kappa_s}{g} A_i^*(0) \sinh gz] e^{\frac{i\Delta k z}{2}}, \quad (26)$$

$$A_i(z) = [A_i(0) (\cosh gz - \frac{i\Delta k}{2g} \sinh gz) + \frac{\kappa_i}{g} A_s^*(0) \sinh gz] e^{\frac{i\Delta k z}{2}}, \quad (27)$$

kur  $A_i(0)$  – pradinė šalutinės bangos amplitudė,  $A_s(0)$  – pradinė signalinės bangos amplitudė, o  $g$  – parametrinio stiprinimo koeficientas, kurio formulė yra [2]:

$$g = \sqrt{\kappa_s \kappa_i^* - \frac{\Delta k^2}{4}}, \quad (28)$$

kur koeficientas  $\kappa_{s,i} = i\sigma_{s,i} A_p$ . Jeigu laikome, kad  $\Delta k = 0$  ir pradžioje neturime šalutinės bangos, tai išsprendus (26 – 27) lygtis gausime tokias išraiškas [2]:

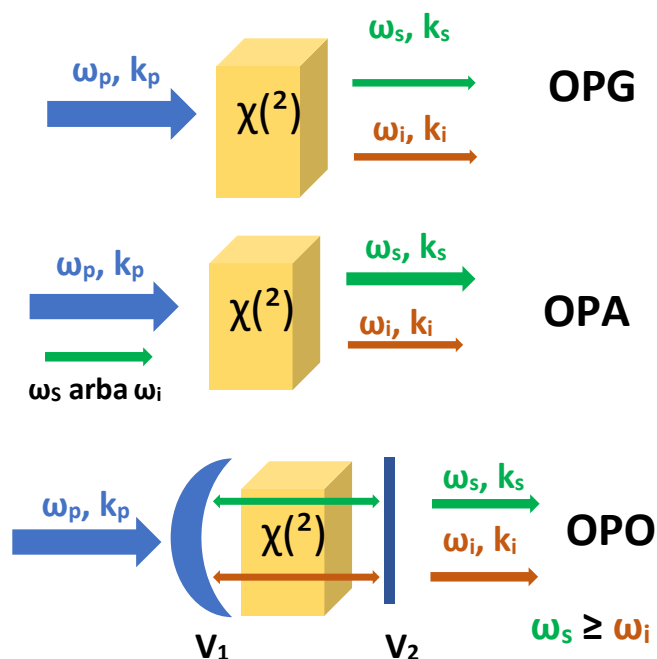
$$A_s(z) = A_s(0) \cosh gz \approx \frac{1}{2} A_s(0) e^{gz}, \quad (29)$$

$$A_i(z) = i \left( \frac{n_s \omega_i}{n_i \omega_s} \right) \frac{A_p}{|A_p|} A_s^*(0) e^{gz}. \quad (30)$$

(29 - 30) lygtys parodo atvejį, tai vyksta efektyvus parametrinis stiprinimas ir kai amplitudės auga eksponentiškai. Praktikoje taip pat naudojamos kelios stiprinimo pakopos, kurių pagalba galima išgauti dar didesnę stiprinimą [3, 20].

### 1.3.3 Parametriniai šviesos stiprintuvai ir generatoriai

Pirmasis parametrinis šviesos generatorius buvo pademonstruotas 1965 m. Jį sukūrė Džordžmainas, Mileris ir Achmanovas su bendradarbiais. Parametriniai šviesos generatoriai ir stiprintuvai yra dar vadinami parametriniais dažnio keitikliais, taip pat daugiaspalviais lazeriais, nes šiais prietaisais galima derinti dažnius plačiame diapazone nuo UV iki IR, impulso trukmė gali būti nuo nanosekundžių iki femtosekundžių [22]. Šie prietaisai naudingi, kai norima sugeneruoti bangos ilgius, kuriuos dėl stiprinimo terpės trūkumo sunku sugeneruoti su lazeriais ar lazeriniais stiprintuvais [1]. Parametriniai dažnio keitikliai skirstomi į parametrinius šviesos stiprintuvus (angl. *optical parametric amplifier*, OPA), bėgančios bangos parametrinius generatorius (angl. *optical parametric generator*) ir į stovinčios bangos parametrinius generatorius (angl. *optical parametric oscillator*, OPO) generatorius (3 pav.).

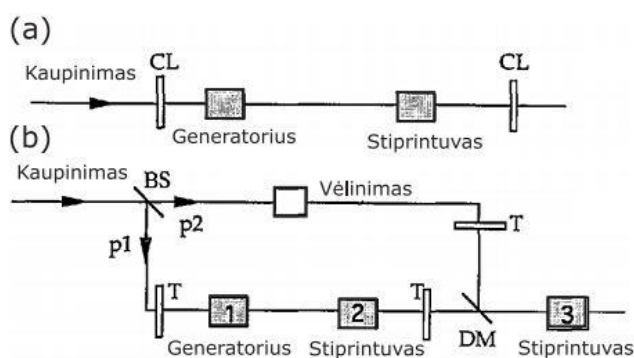


3 pav. Parametrinių šviesos dažnio keitiklių veikimo principai [23].

Pirmiausiai aptasime parametrinius šviesos stiprintuvus (OPA). OPA proceso metu kristalinė medžiaga nebūna kaitinama, taip yra todėl, kad proceso metu kaupinimo bangos energija yra pilnai paverčiama šalutinės ir signalinės bangų energijomis. OPA nuo lazerinių stiprintuvų skiriasi dar ir tuo, kad stiprintuvas veikia ir stiprina tik tada kai yra kaupinimas ir šis prietaisas turi ganėtinai platų dažnių diapazoną, nuo UV iki IR, tačiau diapazoną gali apriboti kristalo skaidrumo sritis arba fazinio synchronizmo sąlyga [1]. Parametriniai šviesos stiprintuvai pasižymi tuo, kad proceso metu kristalo įėjime yra intensyvi kaupinimo banga ir silpnesnė šalutinė arba signalinė

banga (sąveikauja dvi bangos). Šalutinė banga arba signalinė banga gali būti gauta parametrinės superfluorescencijos metu, taip pat superkontinuumo generacijos proceso metu (galima gauti platų spektrą) [24].

Parametriniai šviesos generatoriai skirstomi į stovinčios bangos ir bėgančios bangos. Bėgančios bangos parametriniai šviesos generatoriai (OPG) pasižymi tuo, kad juose stiprinimas yra didelis, tačiau pro netiesinį kristalą spinduliuotė praeina mažai kartų, nes šiame prietaise nenaudojamas rezonatorius. Su OPG kaip ir su OPA galima gauti platų dažnių derinimo diapazoną, taip pat OPG pasižymi ir didele išėjimo spinduliuotės energija [2]. Nors OPG stiprinimas gali būti ir vienu praėjimu, tačiau praktikoje OPG schemas susideda iš užkrato generacijos (parametrinė fluorescencija arba superkontinuumo generacija) ir tam tikrų stiprinimo pakopų [3, 20]. Kaip galima matyti, iš 4 pav. (a) šiame OPG prietaise yra du kristalai, vienas iš jų yra superfluorescencijos šaltinis (pirmasis kristalas), o kitas yra kaip stiprintuvas (antrasis).



**4 pav.** Principinės bėgančios bangos parametrinio šviesos generatoriaus schemas: (a) dviejų praėjimų, (b) daugelio praėjimų. BS - pluošto daliklis, CL – cilindriniai lęšiai, T – teleskopai pluošto matmenų valdymui, DM – dichroinis veidrodinis kaupinimo ir signalo pluoštų suvedimui [2].

4 pav. (a) schemoje susigeneravusios spinduliuotės spektrinis ir erdvinis pluoštas nėra geros kokybės, todėl norint pagerinti pluošto parametrus yra naudojamos papildomos stiprinimo pakopos, kurios yra pateiktos 4 pav. (b) kur stiprinimas būtų efektyvus ir erdvinės signalo savybės būtų panašios į Gauso pluošto [2].

Stovinčios bangos parametriniai šviesos generatoriai (OPO) pasižymi tuo, kad juose yra rezonatorius, kurio pagalba yra suformuojami aukštos kokybės spinduliuotės pluoštai (dėl skersinių modų atrankos) ir yra pasiekiamas didelis kaupinimo intensyvumas. OPO generatorių kaupinimui turi būti naudojama aukšto koherentiškumo ir didelio intensyvumo spinduliuotė. Šio prietaiso rezonatoriuje gali susidaryti stovinti banga, kai yra intensyvus kaupinimas. Stovinti banga sąveikauja su kristalu ir tik kai bus pasiektas fazinis sinchronizmas tada įvyks parametris

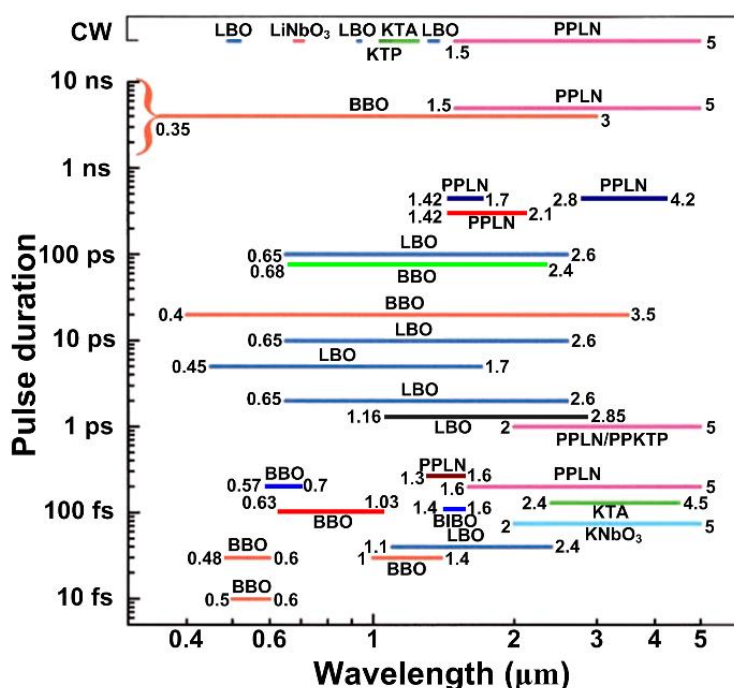
stiprinimas. OPO proceso metu nėra sužadunami realūs medžiagos lygmenys, todėl yra pasiekiamas didesnis proceso efektyvumas [1, 3].

OPO gali būti ir vienbangis (kai rezonatoriuje osciliuoja tik šalutinė arba tik signalinė banga) ir dvibangis (kai rezonuoja ir šalutinė ir signalinė bangos). Vienganbio OPO įėjimo veidrodis yra skaidrus kaupinimo bangai ir jis atspindi signalinę arba šalutinę bangą. Išėjimo veidrodis tik dalinai atspindi vieną iš bangų (signalinę arba šalutinę), o pilnai praleidžia kaupinimo bangą [2, 3].

Naudojant OPG, OPO ir OPA galima gauti impulsus, kurių trukmė gali būti nuo 50 fs iki 3 ps, impulsų energija nuo 0,2 - 5 mJ, o spektrinis derinimo diapazonas gali siekti net 0,3 μm iki 20 μm, bet tam naudojami papildomi prietaisai, dažniausiai diapazonas apima 1,15 μm iki 20 μm [22].

### 1.3.4 Subnanosekundinių impulsų parametrinių šviesos stiprintuvų ir generatorių apžvalga

Toliau aptarsime literatūroje rastus vienuoliką darbų, kuriuose tirti parametriniai šviesos stiprintuvai ir generatoriai, kurie veikia subnanosekundžių impulsų trukmių diapazone (subnanosekundiniai impulsai, tai impulsai, kurių trukmė mažesnė nei 1 ns, bet didesnė už 100 ps). 5 pav. pateikta įvairių parametrinių šviesos generatorių sistemų generuojamų impulsų trukmės ir spektrinės derinimo ribos. Kaip galima matyti, 100 ps – 1 ns trukmių diapazone OPA ir OPG prietaisų yra sukurta labai nedaug [22].



5 pav. Įvairių parametrinių šviesos generatorių sistemų spektrinės derinimo ribos ir generuojamų impulsų trukmės.

Viename tyrime [9] buvo pateiktas vieno praėjimo mid-IR parametrinis šviesos generatorius su mikrolazeriu. Mikrolazerio bangos ilgis buvo 1064 nm, pasikartojimo dažnis 30 Hz, energija 2,4 mJ, o trukmė 0,7 ns. Tyrime naudoti du kristalai – tiesiškai čirpuotas MgO:PPLN ir 30,6  $\mu\text{m}$  periodo MgO:PPLN. Su čirpuotu kristalu spektro derinimo diapazonas gautas 1770 – 2600 nm. Taip pat gauta efektyvi 1 mJ išėjimo energija su 40% efektyvumu [9].

Antrame tyrime [10] buvo aptarta subnanosekundinio OPG ir OPA konfigūracijos, naudojant magnio oksidu legiruotą periodiškai poliuotą ličio niobato kristalą - MgO:PPLN. Užkratui buvo naudojamas nuolatinės veikos paskirstyto grįžtamojo ryšio lazerinis diodas, o kaupinimui Nd:YAG mikrolazeris (1 kHz pasikartojimo dažnis, 1064 nm bangos ilgis ir generuojami 823 ps trukmės impulsai). OPG atveju išvadinė energija buvo gauta 31,9  $\mu\text{J}$ , o įjungus lazerinį diodą energija siekė 41,4  $\mu\text{J}$ . Kvantinės konversijos efektyvumas su užkratu 61,2%, o be užkrato 47,2%, tangentinis efektyvumas (toliau vadinama efektyvumas) su užkratu 41,8%, be užkrato 34% [10].

Trečiame tyrime [11] buvo gautas platus spektro derinimo diapazonas 1,42 - 1,7  $\mu\text{m}$  ir 2,8 - 4,2  $\mu\text{m}$ , kai buvo naudojamas OPG su cilindrinio LiNbO<sub>3</sub> kristalu (kuris buvo periodiškai poliuotas) ir Nd:YAG kaupinimo mikrolazeriu, kurio pasikartojimo dažnis 1 kHz, bangos ilgis 1064 nm, o impulsų trukmė 430 ps) [11].

Ketvirtame darbe [12] naudotas 3 cm PPLN kristalas, kuris buvo kaupinamas Nd:YAG antrąja harmonika 532 nm bangos ilgiu ir 900 ps impulso trukmės spinduliuote. Mikrolazeris veikė 40 kHz pasikartojimo dažniu. Kai buvo keičiama temperatūra nuo 30 – 150°C, tai signalinės bangos derinimo diapazonas buvo gautas nuo 640 – 685 nm, o trukmė 500 ps. Panaudojus užkratą – lazerinį diodą, kurio galia buvo 100 mW, 600 nm bangos ilgis, išvadinė galia padidėjo nuo 18 iki 25 mW [12].

Penktame darbe [13] buvo konstruotas ir tirtas OPG, naudojant PPLN kristalą. OPG kaupinimui naudotas Yb legiruotas šviesolaidinis stiprintuvas (bangos ilgis 1064 nm, pasikartojimo dažnis 7,14 kHz) ir Nd:YAG generatorius. Tyrime buvo naudojamas ir užkratas (1500 nm bangos ilgis), kuris vienu momentu buvo už stiprintuvo, o kitu tarp stiprintuvo ir kristalo. OPG spektro derinimo diapazonas gautas 1500 – 1546 nm, o signalo efektyvumas 29% [13].

Šeštame tyrime [14] buvo naudojamas PPKTP kristalas, kuris patalpintas į 1 cm ilgio rezonatorių. Kaupinimui buvo naudojamos dvi sistemos. Vienoje kaupinimo lazeris veikė 1 kHz pasikartojimo dažniu, generavo 1 ns trukmės 1064 nm bangos ilgio impulsus, kitoje lazerio pasikartojimo dažnis buvo keičiamas 1 – 10 kHz, bangos ilgis 1064 nm, o impulsų trukmė 500 ps. Tyrime buvo registruojama tik šalutinė banga. Naudojant pirmąjį kaupinimo lazerį šalutinės bangos išvadinė energija buvo 110  $\mu\text{J}$  (tie 2756 nm ilgiu, keitimo efektyvumas 12,4%), o naudojant antrąjį šaltinį šalutinės bangos energija gauta 50,7  $\mu\text{J}$  (keitimo efektyvumas 13,3%) [14].

Septintame darbe [15] buvo konstruotas ir tirtas OPO, naudojant silicio fosfido  $\text{CdSiP}_2$  (CSP) kristalą, kuris buvo patalpintas į 11 mm ilgio rezonatorių. Vienbangio osciliatoriaus kaupinimui buvo naudojama 1064 bangos ilgio ir 1 ns trukmės impulsai, kurių pasikartojimo dažnis buvo 1 kHz. OPO slenkstinė parametrinė generacijos vertė buvo gauta 120  $\mu\text{J}$ , o generuojamos šalutinės bangos spektras kito 6117 – 6554 nm diapazone [15]. Aštuntame tyrime [16] parametriniam šviesos stiprintuvui buvo naudojamas periodiškai poliutas ličio niobato (PPLN) kristalas. Kaupinimo šaltinis buvo mikrolazeris, kurio impulso trukmė 1 ns, o energija 157  $\mu\text{J}$ . Stiprintuvas galėjo generuoti subnanosekundinius impulsus (NIR) artimoje infraraudonoje srityje, o stiprinamos bangos derinimo diapazonas gautas 1,35 – 5  $\mu\text{m}$  [16].

Devintame darbe [17] aprašoma OPG ir OPA konfigūracijos. Kaupinimo šaltinis buvo Nd:YAG mikrolazeris, 1064 nm bangos ilgio ir 330 ps impulsų trukmės. OPG tyrimams naudojamas 5 cm ilgio MgO:PPLN kristalas. Buvo keičiama temperatūra iki 350°C ir generuojamos spinduliuotės derinimo diapazonas gautas 1399 – 4443 nm [17].

Dešimtame tyrime [18] pateiktas OPG, kuris buvo kaupinamas subnanosekundiniais impulsais. OPG tyrime buvo naudotas 50 mm MgO:PPLN kristalas, su 30  $\mu\text{m}$  periodinėmis gardelėmis, buvo keičiama kristalo temperatūra. OPG derinimo diapazonas gautas 1510-1638 nm, efektyvumas siekė 47,9%, išėjimo galia 134,1 mW [18].

Vienuoliktame darbe [19] aprašoma taip pat OPG ir OPA naudojant 20 mm MgO:PPLN kristalą. Kaupinimo šaltinis buvo mikrolazeris, kurio impulsų trukmė 520 ps, o pasikartojimo dažnis 1 kHz. OPG derinimo diapazonas gautas nuo 1442 – 4040 nm, kai buvo keičiamas kristalo gardelės periodas ir kristalo temperatūra. Signalinės bangos galia gauta nuo 23 – 265 mW, o efektyvumas nuo 23% iki 46%, efektyvumas priklausė nuo kaupinimo pluošto fokusavimo sąlygų. OPA tyrime panaudotas ir užkratas – daugiamodis nuolatinės veikos lazerinis diodas, kurio bangos ilgis buvo 1550 nm. Užkrato panaudojimas sumažino parametrinės generacijos slenkstį 1,5 karto, o signalinės bangos efektyvumą padidino ~ 4 – 20% [19].

Apibendrinant apžvalgą, galima matyti, kad subnanosekundinių parametrinių šviesos stiprintuvų ir generatorių yra sukurtų nedaug [18] ir [19] tyrimai yra atlikti 2022 metais, kas parodo kad tokių prietaisų kūrimas ir tyrimas yra aktualus ir šiomis dienomis. Paminėti prietaisai veikia infraraudonoje (IR) spektro srityje, regimojoje srityje jų beveik nėra. Kadangi vis didėja šių prietaisų poreikis rinkoje: spektroskopijoje, biomedicinoje (odos ligų gydymas, taip pat tatuiruočių šalinimas), netiesinėje mikroskopijoje, biofotonikoje, įvairių cheminių medžiagų detekcijoje todėl yra poreikis OPA kurti ne tik IR srityje, bet ir regimojoje.



## 1.4 Mikrolazeris

Šiame tyrime kaip kaupinimo šaltinis yra naudojamas mikrolazeris, todėl šiame skyriuje aptarsime kas jie yra ir kodėl jie yra naudingi. Terminas mikrolazeris apibūdina kieto kūno lazerius, kurių aktyvioji terpė yra kelių milimetrų matmenų. Šie lazeriai gali būti kaupinami lazeriniu diodu tiesiogiai arba naudojant šviesolaidžius. Naudojant šviesolaidžius galima dar labiau sumažinti mikrolazerio matmenis, lengviau keisti diodo temperatūrą taip pat geriau lazerio gaminimo ar gedimo atveju. Pirmąjį mikrolazerį išrado J.J. Zaykowski ir A. Mooradian 1989 metais, jis generavo  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ , o buvo kaupinamas titano safyro lazeriu [1, 25].

Mikrolazerius galima išskirti į kelias rūšis. Monolitiniai mikrolazeriai tai lazeriai, kurie sudaryti iš vienos kieto kūno lazerinės medžiagos ir dielektrinių veidrodžių, kurie yra užgarinti ant pačios lazerinės medžiagos poliruotų kraštų ir kaip kaupinio šaltinis yra naudojamas lazerinis puslaidininkinis diodas [25]. Kita mikrolazerių rūšis yra mikrolazeriai, kuriuose yra naudojamos papildomos lazerinės medžiagos arba naudojami tam tikri pasyvūs arba aktyvūs kokybės modulatoriai. Tačiau tokias medžiagas, kurios sudarytos iš kelių junginių ganėtinai sunku ir brangu pagaminti. Yra ganėtinai svarbu kaip tos medžiagos bus sujungtos, taip pat svarbu atsižvelgti, kad skirtingos medžiagos turi skirtingus lūžio rodiklius, turi ir skirtingą šiluminę plėtimąsi. Kaip ir monolitiniuose taip ir šiuose lazeriuose ant lazerinės medžiagos yra užgarinami arba užklijuojami dielektriniai veidrodžiai ir papildomi elementai. Su šio tipo lazeriais 1994 m. MacKinnon ir Sinclair sugeneravo antrąją harmoniką, o 1996 m. Matthews trečiąją taip pat vėliau pradėti gaminti aktyvios ir pasyvos kokybės moduliacijos mikrolazeriai [25].

Mikrolazeriuose naudojami aktyvieji elementai, dažniausiai Nd:YAG, Yb bei Nd legiruoti kristalai (KGW, YVO<sub>4</sub>, YAG ir kt.) Populiariausi yra Nd:YAG ir Nd:YVO<sub>4</sub>, kurie gali generuoti 1  $\mu\text{m}$  arba 1,3  $\mu\text{m}$  srityje, kartais ir 0,95  $\mu\text{m}$  [25]. Atsirandant vis daugiau naujų medžiagų mikrolazerių aktyviųjų elementų gamybai pradedama naudoti ir legiruotas keramines medžiagas, kaip pvz.: erbiu legiruoti stiklai arba kristalai, kurie gali generuoti spinduliuotę 1,5  $\mu\text{m}$  srityje [26]. Šiuo metu naudojant iterbio, titano, erbio ar holmio kristalus galima sugeneruoti impulsus nuo 800 nm iki 3000 nm bangos ilgių diapazone [25].

Su mikrolazeriais galima išgauti, kad impulso trukmė būtų mažesnė nei nanosekundė. Tam naudojamas kokybės moduliacijos režimas [27]. Šis režimas pasižymi tuo, kad lazeryje nuostoliai būna dideli tam tikrą laiko tarpą, o poto perjungiami į mažų nuostolių režimą (nuostoliai labai greitai sumažinami) ir taip susigeneruoja milžiniškas impulsas. Kokybės moduliacijos metodo tikslas yra koncentruoti lazerio spinduliuojamą energiją vienam impulsui ir padidinti spinduliuotės smailinę galią. Tokio impulso galia gali būti apie šimtus MW, o trukmė gali siekti keletą ns [24].

Mikrolazeriuose gali būti naudojami aktyvūs ar pasyvūs kokybės modulatoriai. Aktyvūs kokybės modulatoriai būtų akustooptiniai arba elektrooptiniai, o pasyvūs tai tam tikri praskaidrėjantys sugėrikliai ar SESAM puslaidininkinės struktūros [25]. Akustooptiniai tai tokie, kur ultragarsinis daviklis generuoja stovinčias slėgio bangas medžiagoje, taip suformuodamas lūžio rodiklio gardelę. Dažnai šiuose modulatoriuose naudojamas kvarco kristalas, kuris patalpinamas rezonatoriuje, kad sudarytų su rezonatoriaus optine ašimi Briusterio kampą. Prie kristalo būna prijungtas pjezoelektrinis keitiklis, kuris keičia elektrinius svyravimus į akustinius. Elektrooptiniai kokybės modulatoriai pasižymi tuo, kad juose vyksta greita moduliacija, taip pat reikalinga 1-10 kW eilės įtampa, tai būtų Pokelsio arba Kero narveliai. Šis kokybės valdymo metodas remiasi tuo, kad yra valdomi nuostoliai valdant ir keičiant šviesos poliarizaciją rezonatoriuje. Elektrooptinis sudarytas iš elektrooptinio modulatoriaus ir elemento, su kuriuo galima analizuoti poliarizaciją [24]. Yra tyrimų, kai mikrolazeryje naudojant Nd:YAG kaip aktyvųjį elementą, buvo gauta impulsų trukmė 270 ps, o energija 6,8 mJ. Naudojant Nd:YVO<sub>4</sub> ir kaupinant 1 W lazeriniu diodu impulsų trukmė gauta 115 ps, o galia 12 mJ. Dar kitame tyrime buvo gauti 8,8 ns impulsai, kurių pasikartojimo dažnis 2,25 MHz [25, 27].

Pasyvios kokybės modulatoriai mikrolazeriuose yra populiareni negu aktyvios kokybės modulatoriai. Dažniausiai naudojami praskraidinantys sugėrikliai [25]. Šie sugėrikliai pasižymi tuo, kad jų sugertis arba sumažėja arba išnyksta prie tam tikro intensyvumo. Tai leidžia reguliuoti lazerio kokybę. Pradiniu laiko momentu, kol kaupiama energija rezonatoriuje, dėl vyraujančios sugerties rezonatoriaus kokybė yra žema, o kai yra sukauptas tam tikras fotonų skaičius, sugėriklis praskaidrėja ir rezonatoriaus kokybė staiga padidėja ir susigeneruoja milžiniškas impulsas [24]. Mikrolazeriuose dažniausiai naudojami YAG:Cr<sup>4+</sup>, YAG:Cr<sup>3+</sup>, CaF<sub>2</sub>:Ho:Er, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Co<sup>2+</sup> ir kiti [27]. Mikrolazeryje naudojant Nd:YAG terpę ir Cr<sup>4+</sup> sugėriklį buvo gauti 290 ps trukmės impulsai, kurių bangos ilgis 1064 nm, taip pat galima pasiekti net 200 ps ar 148 ps impulsų trukmes. Jeigu kaupinama 1 W lazeriniu diodu, tai galima gauti impulsus, kurių energija yra iki 15 mJ, o jų galia gali būti iki 30 kW, kai yra 10 kHz pasikartojimu dažnis [26]. Galima gauti ir 250 mJ, kai yra 500 kW, esant 1 kHz pasikartojimų dažniui [25] taip pat kai yra 523 nm bangos ilgis, 265 ps impulso trukmė ir 100 Hz dažnis galima pasiekti ir 6,26 MW smailinę galia [28].

Kitas pasyvios kokybės modulatorius yra puslaidininkiniai prisotinantys sugerties veidrodžiai (SESAM). Šie veidrodžiai pasižymi tuo, kad jų atspindys didėja kai didėja ir spinduliuotės intensyvumas, taip pat juos gaminant galima keisti tam tikrus parametrus, kaip sugerties juostą, ar soties intensyvumą. Viename tyrime, kuriame buvo naudoti SESAM veidrodžiai buvo gauta 530 ps trukmės impulsai, dažniu 12 kHz, o jų didžiausia galia siekė 1,9 kW [29]. Dar kitame darbe, kuriame irgi buvo naudoti patobulinti SESAM veidrodžiai, skirtingas jų atspindžio

koeficientas, skirtingas storis, buvo pasiekta 10,6 kW galia 1,5  $\mu\text{m}$  diapazone, pasikartojimo dažnis viršijo 1 kHz, o impulso trukmė buvo 0,84 ns [30].

Jeigu mikrolazeriai yra kaupinami 1 W diodiniu lazeriu, tai jų impulsų pasikartojimo dažnis gali būti iki  $\sim 10\text{k Hz}$ , o didžiausia galia  $\sim 30\text{ kW}$ , bangos ilgis 1064 nm. Mikrolazeriai generuoja trumpus impulsus, kurių trukmė kartais gali būti net mažesnė nei 100 ps, bet dažniausiai mažiau nei 1 ns [1]. Jeigu norima gauti trumpesnius bangos ilgius naudojami netiesinės optikos tam tikri metodai, kai prie moduluotos kokybės rezonatoriaus dar įdedama papildoma netiesinio kristalo plokštelė. Su mikrolazeriais galima generuoti iš antrąją bei trečiąją harmonikas, kaupinti OPA ar naudoti kituose procesuose [31].

Mikrolazeriai yra kompaktiški, patikimi, tvirti, jų kaina yra mažesnė negu kitų lazerių todėl jie gali būti naudojami tatuiruočių šalinimui, mikroapdirbime, atstumo nustatymo sistemose, 3D skenavimui ir 3D vaizdavimui, biofotonikoje ir biomedicinoje, taip pat spektroskopijos tyrimuose, netiesinėje optikoje ar superkontinuumo generacijoje šviesolaidžiuose [1, 30, 31]. Rinkoje mikrolazeriai gaminami įvairūs, kelis jų parametrus galima palyginti pažiūrėjus į 1 lentelę, kurioje pateikta Lietuvos gamintojo „Standa“ mikrolazeriai [32].

**1 lentelė.** Tipiniai pasyvios kokybės moduliacijos veikos mikrolazerių parametrai, kurie paimti iš Lietuvos lazerių gamintojo „Standa“ [32].

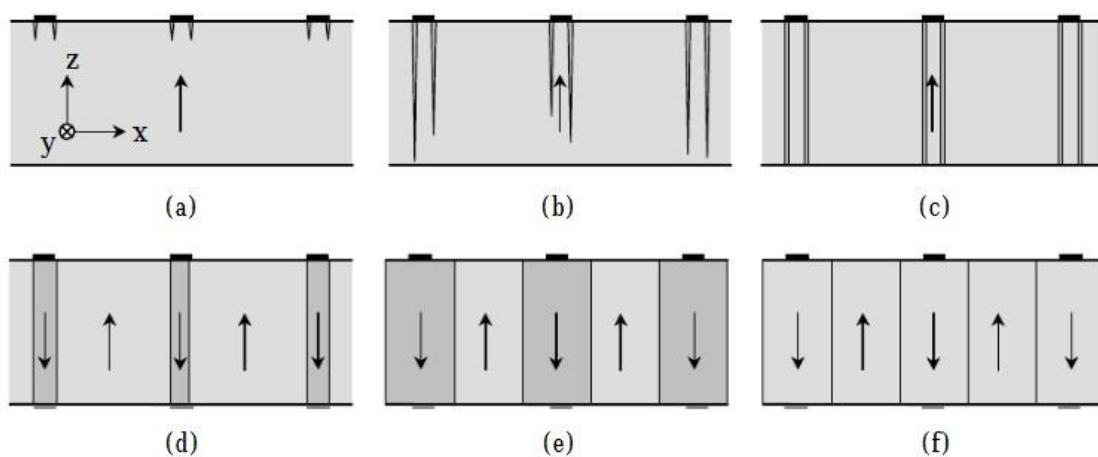
Aktyvioji terpė	Nd:YLF (3H)	Yb:YAG (2H)	Nd:YLF (2H)	Yb:YAG	Nd:YLF
Bangos ilgis, nm	349	515	527	1030	1053
Vidutinė išėjimo galia (max), mW	15	50	50	200	100
Pasikartojimo dažnis (max), Hz	100	10000	100	10000	100
Impulso trukmė (FWHM), ps	500	800	650	500 $\pm$ 50	650
Impulso energija, $\mu\text{J}$	150	5	500	20	1000
Lazerio galvutės matmenys, mm	$\varnothing 25 \times 74$	58 x 70 x 42.5	58 x 70 x 42.5	58 x 70 x 42.5	58 x 70 x 42.5

## 1.5 Periodiškai orientuoti kristalai

Nuo 1961 metų buvo atlikta labai daug įvairiausių eksperimentų periodiškai orientuotiems kristalams ir jų pritaikymams netiesinėse medžiagose ir procesuose. 1962 metais Bloembergenas atrado kvazisinchronizmą, tai buvo naujas fazių suderinimo būdas, kuris leido periodiškai moduluoti netiesinį medžiagos jautrį šviesos bangų sklidimo kryptimi išlaikant fazių neatitikimą apie nulinę vertę. Metodas buvo pritaikytas praktiškai, kai buvo atrastos elektinio lauko poliavimo technikos. Šiuo metu dažniausiai naudojami periodiškai poliuoti kristalai yra PPLT, PPLN, PPKTP ar PPRTA [33]. PPLN tinka ne tik parametrinei generacijai, bet ir suminio ar skirtuminio dažnių generacijoms bei antrosios harmonikos generacijai. Jis pasižymi plačia skaidrumo sritimi, dideliu netiesiškumu ir aukšta optine kokybe. Taip pat naudojamas ir PPLT (periodiškai orientuotas ličio tantalatas  $\text{LiTaO}_3$ ), tačiau abu šie kristalai pasižymi fotorefraktiškumu, kai kristale dėl stipraus elektrinio lauko poveikio atsiranda pakitusio lūžio rodiklio sritis. To išvengti galima legiruojant kristalą kitais junginiais arba jį kaitinti. Todėl vis daugiau naudojami  $\text{MgO:PPLN}$  (magnio oksidu legiruotas periodiškai orientuotas ličio niobato ( $\text{LiNbO}_3$ ) kristalas) ar PPKTP (periodiškai orientuotas kalio titanil-fosfatas  $\text{KTiOPO}_4$ ). PPKTP nėra pakankamai homogeniškas kai būna formuojami domenai, todėl yra atvejų, kai periodinė struktūra būna pažeista, taip pat šio kristalo gamyba yra brangesnė, bet galima pasiekti mažiausią fotorefraktiškumo efektą [34].  $\text{MgO:PPLN}$  pasižymi mažesne žalios spinduliuotės sukelta infraraudonosios spinduliuotės sugertimi, o kristalo legiravimas padidina fotolaidumą, tačiau kristale sunku suformuoti mažesnio periodo gardeles ir vistiek yra gana aukštas koercinis lauko stipris [35]. PPLN kristalai taip pat gali būti naudojami ir ilgųjų bangų IR riboje (atvejais iki  $6.6 \mu\text{m}$  ar  $7.3 \mu\text{m}$ ) [33].

Periodiškai orientuotų kristalų gamyba pasižymi tuo, kad ji skiriasi nuo paprastų kristalų gamybos būdų. Supjaustyti kristalą plonomis plokštelėmis ir tada plokšteles suklijuoti yra ganėtinai brangu ir neefektyvu. Nors toks būdas būdavo naudojamas IR spektrinėje srityje, kur gardelės periodas siekdavo keliasdešimt mikronų ir daugiau. Efektyvesnis būdas buvo išrastas 1993 metais, kai domenų orientavimui buvo naudojamas elektrinis laukas. Kristalo auginimo metu buvo pridamas statinis elektrinis laukas ( $\sim 20 \text{ kV/cm}$ ) ir lauko ženklas būdavo keičiamas reikiamu periodu. Elektrinio lauko keitimas leisdavo suformuoti reikalingas domenų struktūras [2]. Pirmiausia kristalas būdavo padengiamas elektrolitiniu kontaktu, kuris pašalina gaunamos struktūros priklausomybę nuo metalinių kontaktų pasirinkimo ir uždėjimo. Tada naudojami mikroelektrodai, tarp kurių kristalas yra patalpinamas ir taip sukuriama periodinė struktūra ant elektrodų. Ši struktūra atitinka tokį kristalo periodiškumą, kurio norima. Kristalo spontaninė poliarizacija turi skirtis nuo sukurto elektrinio lauko krypties [36].

Yra pagrindiniai šeši domeno kinetikos etapai (6 pav.). Pirmasis etapas yra kai formuojasi individualių domenų nukleacijos centrai. Tai yra tarsi domenų formavimosi pati pradžia. Domenų nukleacijos centrai dažniausiai atvaizduojami kaip šešiasienės piramidės, kurios turi heksagoninius pagrindus ir viršūnę. Kai šios viršūnės sklinda lygiagrečiai optinei ašiai tai jų pagrindo skersmuo didėja. Šio etapo metu, gali sumažėti kristalo efektyvumas kai gretimi domenai susilieja. Kitame etape baigia augti viršūnės ir tai atsitinka kai yra pasiekama priešinga kristalo pusė. Domenų sienelės išsilygina ir įvyksta ne plitimas į išorę, o staigus gretimų domenų susijungimas po elektrodais. Kai jau būna užpildyta erdvė po elektrodais, tada domenai plečiasi į šonus. Kartais būna taip, kad plitimas į šonus būna sulėtintas susikaupusių krūvių. Paskutinis formavimosi etapas yra susiformuotų domenų stabilizavimas [36].

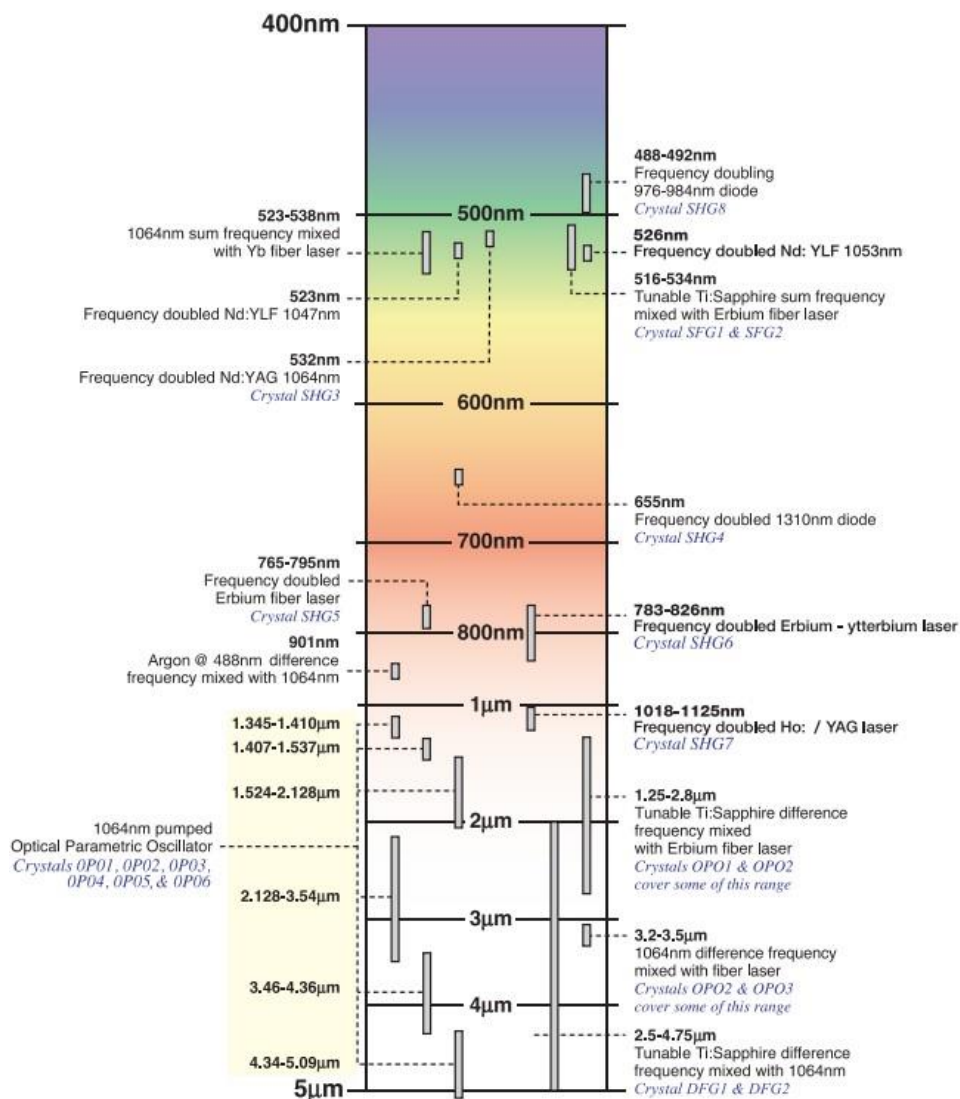


**6 pav.** Šeši domeno kinetikos etapai elektrinio lauko periodinio poliavimo metu: a) domenų nukleacijos centrų susidarymas; b) domeno viršūnės sklidimas link priešingo kristalo paviršiaus; c) domenų viršūnių pasiekimas priešingo kristalo paviršiaus; d) domenų susijungimas po elektrodais; e) domeno sienelių išplitimas iš po elektrodų; f) susiformavusių domenų stabilizavimas [36].

Yra daug įvairių periodiškai poliutų netiesinių medžiagų pritaikymų įvairuose netiesiniuose procesuose (2H, suminio ar skirtuminio dažnio generacija) aptarsime keletą iš jų. Viename darbe [37] buvo generuojama nuolatinės veikos Nd:YAG lazerio 2H, lazerio bangos ilgis 1064 nm, o galia 6.5 W. Buvo naudotas PPLN 5.3 cm ilgio kristalas, kurio gardelių periodas 6.5  $\mu\text{m}$ . Buvo gauta, kad 2H generuojama energija siekia 2.7 W [37]. Kitame tyrime [38] buvo naudojamas 5 cm ilgio PPLN kristalas, kuris turėjo 8 gardeles, kurių periodas buvo nuo 28.5 iki 29.9  $\mu\text{m}$ . Buvo naudojamas diodu kaupinamas Nd:YVO<sub>4</sub> lazeris, kuris buvo kaupinimo šaltinis OPO. Šalutinės bangos OPO derinimo diapazonas gautas nuo 3173 – 3917 nm, o signalinės bangos 1461 – 1601 nm kai buvo keičiamos

kristalo gardelės ir keičiama kristalo temperatūra nuo 91°C iki 173°C. Signalinės bangos galia siekė 1 W, trukmė buvo 34 ps, o impulsų pasikartojimo dažnis 235 MHz [38].

Kitas tyrimas [39] pasižymėjo tuo, kad OPO kaupinimui buvo naudojama nuolatinės veikos Nd:YVO<sub>4</sub> lazerio 2H (bangos ilgis 532 nm, o galia 0.8-3.3 W). Buvo naudojamas 2.4 cm PPKTP kristalas, kuris turėjo 19 periodu nuo 8.96 iki 12,194 μm ir 2.5 cm PPLN kristalas su 23 periodais nuo 6.51 iki 9.59 μm. OPO šalutinės bangos derinimo diapazonas gautas nuo 1096 – 2830 nm, o signalinės bangos 656 – 1035 nm kai buvo keičiamos gardelės ir keičiama kristalo temperatūra (PPLN nuo 140°C iki 200°C, o PPKTP nuo 20°C iki 80°C) [39]. Dar viename darbe [40] buvo naudojamas elektrooptinio derinimo metodas, kurio esmė tokia, kad periodiškai poliutas kristalas buvo padalintas į 3 viendodas dalis. Pirma ir trečia dalis buvo su 50% veikimo ciklu, o antra dalis liko nepoliuota ir šioje dalyje buvo taikoma aukšta įtampa, kuri gali pakeisti kristalo lūžio rodiklį. Buvo keičiama įtampa nuo -180 iki +1050 V ir OPO derinimo diapazonas gautas nuo 1562 – 1664 nm [40]. Dar daugiau pritaikymų galima matyti 7 pav.



7 pav. PPLN kristalų pritaikymas UV – IR srityse [41].

## 1.6 LBO kristalas

Šiame darbe naudojamas Ličio triborato ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ ) kristalas. Jis pirmą kartą buvo užaugintas 1988 metais, jį užaugino *Chuangtian Chen* su kolegomis [42]. LBO kristalas naudojamas įvairiuose netiesinės optikos eksperimentuose, OPA/OPO procesuose, taip pat su ultravioletiniais lazeriais, nes pasižymi geru ultravioletinių spindulių pralaidumu, LBO skaidrumo sritis yra 0.155 - 3.2  $\mu\text{m}$  (0% pralaidumo lygyje) [43].

LBO yra neigiamas vienašis kristalas, kuris pasižymi puikiomis mechaninės savybės, todėl jį lengva poliruoti, taip pat jis yra nehigroskopiškas ir chemiškai stabilus. Šis kristalas priklauso  $mm2$  taškinei simetrinei grupei aukščiausią vertę turintis matricinis elementas yra 0,67 pm/V, o kristalo gardelės konstantos yra:  $a = 8.46 \text{ \AA}$ ,  $b = 7.38 \text{ \AA}$ ,  $c = 5.13 \text{ \AA}$  [33]. Paviršiaus optinio pramušimo slenkstinis intensyvumas 10 ns trukmės impulsams yra 1  $\text{GW}/\text{cm}^2$  matomoje spektro srityje [2].

LBO skirtingose plokštumose efektinio netiesiškumo išraiškos gaunamos tokios [43]:

YZ plokštumoje:

$$d_{oeo} = d_{eoo} = d_{31} \cos \theta, \quad (31)$$

XY plokštumoje:

$$d_{ooe} = d_{32} \cos \phi, \quad (32)$$

XZ plokštumoje:

$$d_{eoe} = d_{oee} = d_{32} \sin^2 \theta + d_{31} \cos^2 \theta, \quad (33)$$

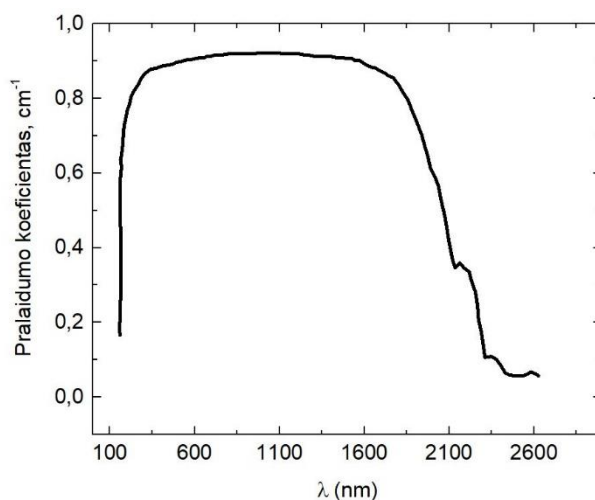
kur  $d_{32} (1.0642 \mu\text{m}) = 0.85 \text{ pm}/\text{V}$ ,  $d_{31} (1.0642 \mu\text{m}) = 0.67 \text{ pm}/\text{V}$  - koeficientai LBO kristalui iš netiesiškumo tenzorius,  $\phi$  ir  $\theta$  kampai tarp krentančios spinduliuotės ir kristalo Z bei X ašių [43].

(34 – 36) formulių išraiškos yra LBO kristalo dispersiją apibūdinančių Zelmajerio formulių išraiškos, jos pateiktos skirtingoms plokštumoms [42]:

$$n_Z^2 = 2,5865 + \frac{0,01310}{\lambda^2 - 0,01223} - 0,01862\lambda^2 + 4,5778 \times 10^{-5}\lambda^4 - 3,2526 \times 10^{-5}\lambda^6, \quad (34)$$

$$n_Y^2 = 2,5390 + \frac{0,01277}{\lambda^2 - 0,01189} - 0,01849\lambda^2 + 4,3025 \times 10^{-5}\lambda^4 - 2,9131 \times 10^{-5}\lambda^6, \quad (35)$$

$$n_X^2 = 2,4542 + \frac{0,01125}{\lambda^2 - 0,01135} - 0,01388\lambda^2. \quad (36)$$



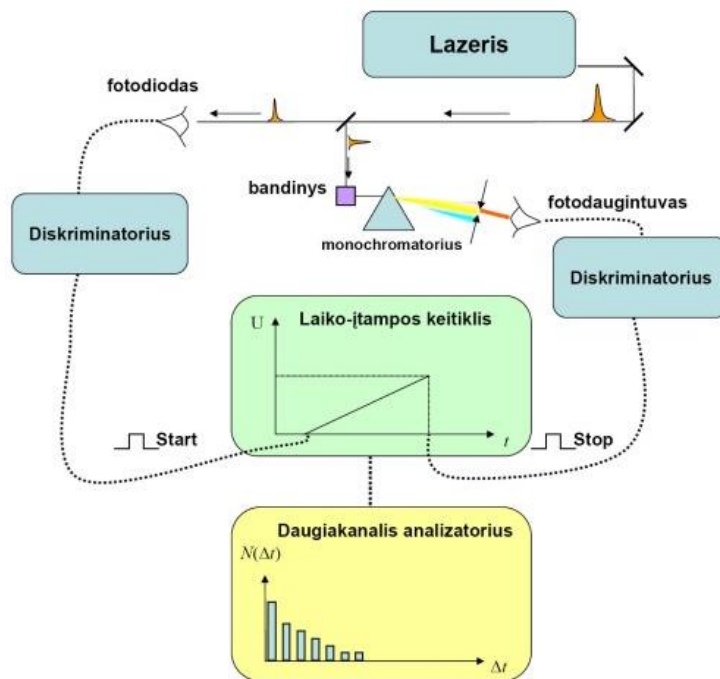
**8 pav.** LBO kristalo pralaidumo koeficiento priklausomybė nuo spinduliuotės bangos ilgio, kristalo storis 1 cm [44].

## 1.7 Laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo metodas

Kadangi šiame tyrime buvo ištirtos ir impulsų trukmės laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo metodu (TCSPC), todėl šiame skyriuje aptarsime kas yra šis metodas ir kuo jis naudingas. TCSPC metodas pasižymi tuo, kad kai molekulė yra sužadinta didelio pasikartojimo dažnio lazeriniu impulsu, po tam tikro laiko tarpo  $\Delta t$  ji išspinduliuoja fotoną, jeigu molekulė sužadinta daugeliu impulsų, gautos vertės pasiskirsto pagal tam tikrą tikimybę [45, 46].

TCSPC metodo principinė schema yra pateikta 9 pav. Iš lazerio išėjusi spinduliuotė pluošto dalikliu yra padalinama į dvi dalis. Viena impulso šviesos dalis nukreipiama į fotodiodą, kuris sugeneruoja elektrinį impulsą. Toliau impulsas patenka į diskriminatorių, kuris iš nežinomos formos impulso sugeneruoja „start“ impulsą (skaitmeninį elektroninį impulsą). Toliau impulsas patenka į laiko – įtampos keitiklį. Šis prietaisas išduoda įtampą, kuri yra proporcinga laiko tarpui tarp dviejų elektrinių signalų. Kita impulso šviesos dalis yra nukreipiama į bandinį ir jį sužadina. Išspinduliuotos bandinio molekulės fluorescencijos fotoną užregistruoja fotodaugintuvas ir toliau fotonas patenka į diskriminatorių ir pereina į laiko – įtampos keitiklį. Šis fluorescencijos signalas vadinamas „stop“ signalu. Taip laiko – įtampos keitiklyje atsiranda tam tikra įtampa, kuri yra proporcinga trukmei tarp bandinio sužadavimo ir fotono išspinduliavimo. Ši įtampa užrašoma kitame prietaise, kuris vadinamas daugiakanaliu analizatoriumi. Tai yra elektroninis prietaisas, kuris gali paskirstyti įtampas į atskirus kanalus, pagal jų vertę. Atlikus eksperimentą daugelį kartų gaunama fluorescencijos gesimo kinetika (laikinis fluorescencijos trukmės pasiskirstymas) [45 - 47].





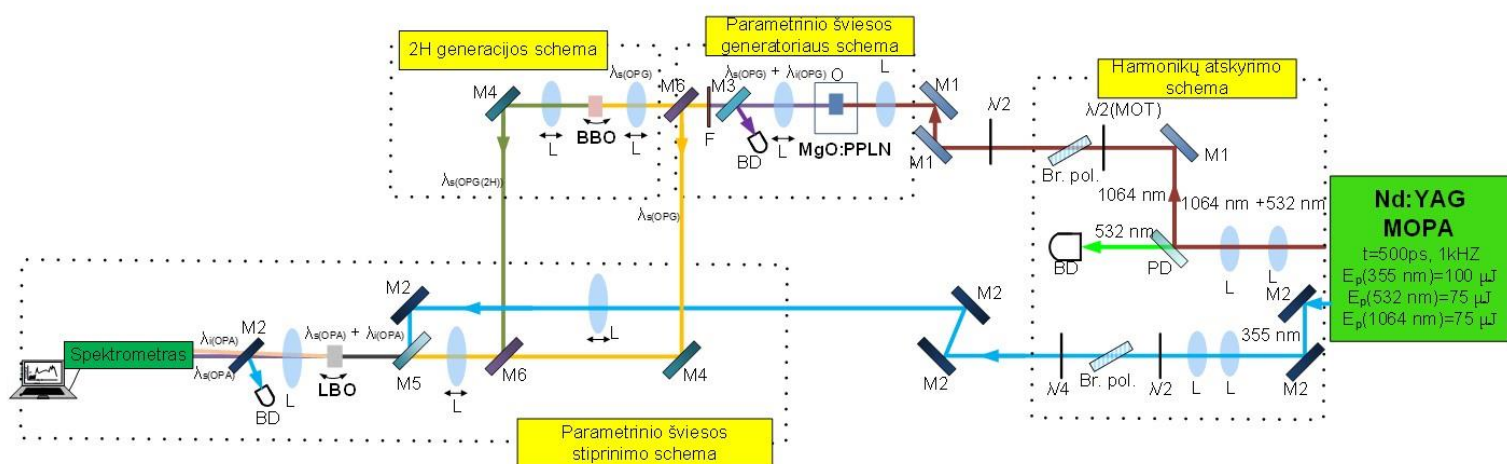
9 pav. Laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo eksperimento schema [45].

TCSPC metodas turi ir privalumų ir trūkumų. Keli svarbiausi privalumai yra tai, kad šiam metodui nėra svarbus lazerio stabilumas, taip pat nereikia didelių lazerio intensyvumų. Šis metodas yra santykinai pigus. Taip pat šiuo metodu metu galima skaičiuoti fotonus tol, kol signalo – triukšmo santykis pasieks norimą ribą (metodas yra kaupiamasis). Kalbant apie TCSPC trūkumus svarbu paminėti tai, kad šis metodas elektroninis, taigi jo laikinė skyra nėra labai gera, ji gali pasiekti 50 ps, tačiau prietaisai vis tobulinami ir bandoma ją pagerinti. Taip pat šis metodas yra pritaikytas vienam bangos ilgiui - vienu metu registruojama fluorescencijos kinetika tik vienam bangos ilgiui. Bet šie trūkumai nesustabo šio prietaiso naudojimo praktikoje. TCSPC naudojama aptikti pavienius fotonus, optinėje tomografijoje, laiko skyros mikroskopijoje, fluorescencijos gyvavimo trukmės matavimuose ir kitose srityse [45 – 48].

## 2. Eksperimentinė dalis

### 2.1 Eksperimento schemas ir pagrindinių elementų charakteristikos

Šiame skyriuje aptarsime konstruotą ir optimizuotą kombinuoto parametrinio šviesos stiprinimo eksperimentinę schemą (10 pav.). Siekiant realizuoti parametrinį šviesos stiprinimą, kaupinant subnanosekundiniais impulsais regimojoje spektro srityje, šiame darbe buvo kombinuojamas MgO:PPLN parametrinis šviesos generatorius, kuriame generuota signalinė banga ir jos 2H, veikė kaip užkrato spinduliuočių šaltiniai LBO parametriniame šviesos stiprintuve. Visų naudotų elementų paaiškinimas pateiktas 10 pav. aprašyme.



**10 pav.** Optimizuota kombinuoto parametrinio šviesos stiprintuvo matavimo schema: **PD** – pluošto daliklis; **BD** – pluošto gaudyklė; **Br. pol.** – Briusterio poliarizatorius; **O** – krosnelė; **MgO:PPLN** – magnio oksidu legiruotas periodiškai orientuotas ličio niobato ( $\text{LiNbO}_3$ ) kristalas; **F** – IKS7 ir FB1750–500 (ThorLabs) filtrai; **L** – lęšis;  $\lambda/2$  –  $\lambda/2$  plokštelė; **BBO** – beta borato kristalas; **M1** –  $\lambda = 1064$  nm veidrodis (AOI =  $45^\circ$ ); **M2** –  $\lambda = 351 - 361$  nm veidrodis (AOI =  $45^\circ$ ); **M3** – HR@532 nm + 1064 nm, HT@1410-2128 nm veidrodis; **M4** – Auksinis veidrodis; **M5** – S1: HR@355 nm, HT@700 – 2200 nm (AOI =  $45^\circ$ ) veidrodis; **M6** – Auksinis veidrodis įdėtas į atsilenkiantį laikiklį; **LBO** – Ličio triborato kristalas.

Eksperimente buvo naudota mikrolazerio sistema, kurią pagamino lietuvių įmonė „Standa“. Ši mikrolazerio sistema pasižymi tuo, kad pačiame lazeryje yra stiprinimo pakopa, taip pat ir harmonikų moduliai (lazeris optimizuotas trečiajai harmonikai, bet galima naudoti ir pirmąją bei antrąją). Aktyvioji terpė šioje sistemoje buvo Nd:YAG kristalai, o pati sistema - pasyviai moduluotos kokybės veikos. Sistemos išvade turime tris bangos ilgius, kurių pasikartoji dažnis 1 kHz. Pirmoji harmonika (1H) buvo 1064 nm bangos ilgio, impulsų energija siekė 75  $\mu\text{J}$ , o

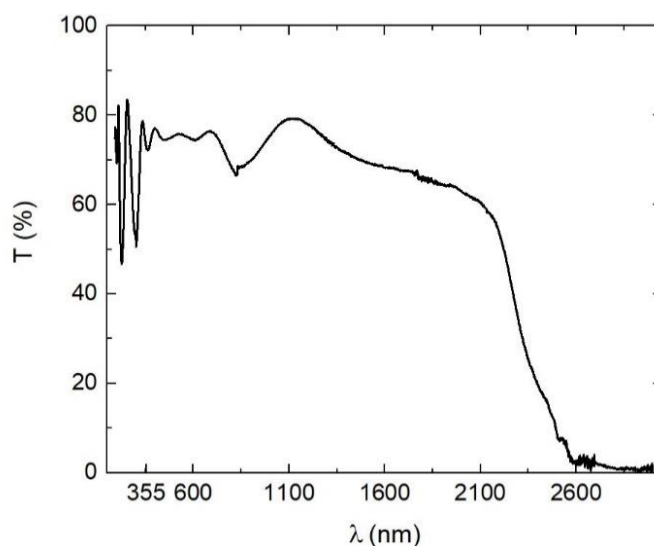
impulsų trukmė 400 ps, antroji harmonika (2H) 532 nm ir 75  $\mu$ J ir trečioji (3H) 355 nm, 100  $\mu$ J, impulsų trukmė 500 ps. Trukmių matavimai buvo atlikti naudojant TCSPC metodą.

Šiame tyrime pirmoji lazerio harmonikos spinduliuotė buvo naudojama kaip kaupinimo šaltinis parametriniame šviesos generatoriuje. 1H nuo antrosios harmonikos buvo atskirta pluošto dalikliu ir veidrodėliais nukreipta į lęšį ( $f = 75$  mm) ir tada į MgO:PPLN kristalą. Lęšis buvo naudojamas norint sufokusuoti 1H spinduliuotę į kristalą. Signalinės ir šalutinės bangų generacijai buvo naudotas periodiškai orientuotas 5% MgO:PPLN kristalas, kuris buvo 1 cm pločio, 0,5 cm storio, 5 cm ilgio ir sudarytas iš 10 gardelių ( $A = 27,58; 27,91; 28,28; 28,67; 29,08; 29,52; 29,98; 30,49; 31,02; 31,59$   $\mu$ m). Kristalas buvo patalpintas į krosnelę, kuri galėjo būti kaitinama iki 200°C, 0,1°C tikslumu. Krosnelė buvo valdoma temperatūros valdikliu („HC Photonics“, TC038–PC) ir padėta ant staliuko, kuris leido lengvai keisti kristalo gardeles, keičiant kristalo aukštį ir padėtį. Signalinės ir šalutinės bangos kolimavimui buvo naudojamas lęšis ( $f = 75$  mm). Kadangi sugeneruota signalinė banga buvo naudojama kaip užkrato šaltinis parametriniame šviesos stiprintuve, tai naudojant filtrus IKS7 ir FB1750–500 (ThorLabs) bei veidrodį (HR@532 nm + 1064 nm, HT@1410-2128 nm) šalutinė ir likusi kaupinimo spinduliuotė buvo nufiltruojama.

Kadangi buvo tirti 1 ir 3 diapazonas (apie juos plačiau bus 2.2 skyriuje), tai 1 diapazono atveju užkrato šaltinis buvo signalinė banga iš MgO:PPLN OPG, kuri auksiniais veidrodžiais buvo nukreipta į LBO (ličio triborato) kristalą. O 3 diapazono atveju, užkrato šaltinis buvo MgO:PPLN OPG sugeneruota 2H. 2H generavimui buvo naudojamas BBO (beta bario borato) kristalas. Kristalo ilgis 15 mm, o išpjautas  $\theta = 20,75^\circ$  ir  $\phi = 90^\circ$  I tipo faziniam sinchronizmui. BBO kristalas buvo su skaidrinančiomis dangomis (P/P@((705-1064)nm + (1410-212/) nm). Prieš kristalą buvo naudojamas lęšis ( $f = 75$  mm) su kuriuo buvo sufokusuojama MgO:PPLN OPG signalinė banga. O iš kristalo išėjusi spinduliuotė su cilindriniais lęšiais ( $f = 25$  mm) ir ( $f = 100$  mm) buvo sukolinuota ir auksiniais veidrodžiais nukreipta į LBO kristalą.

Kad parametrinis šviesos stiprinimas įvyktų, turi būti tenkinamos fazinio sinchronizmo sąlygos – kaupinimo ir užkrato spinduliuotės erdvėje ir laike turi sutapti. Kad taip įvyktų, tyrime 3H spinduliuotę (kaupinimo spinduliuotę) reikėjo pavėlinti laike, tam buvo naudojami veidrodžiai ir po jų kaupinimo spinduliuotė taip pat buvo nukreipta į LBO kristalą.



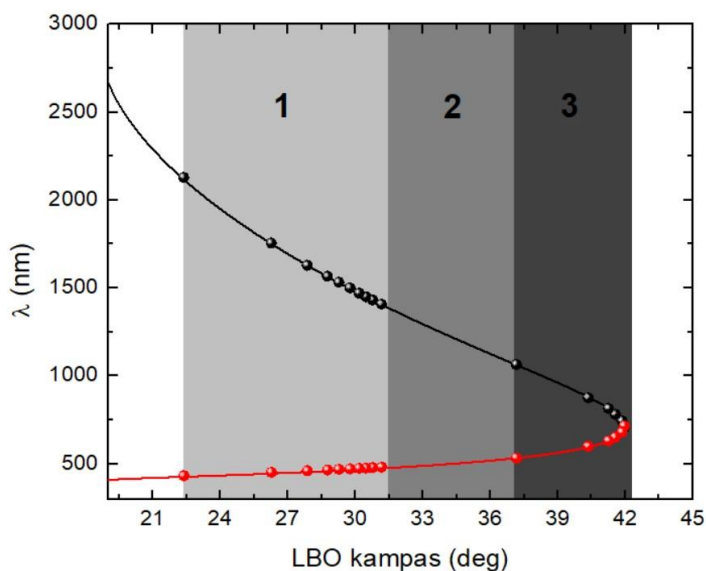


**12 pav.** LBO kristalo, padengto skaidrinančiomis dielektrinėmis dangomis, pralaidumo spektras.

Atskirti likusią kaupinimo spinduliuotę buvo panaudotas M2 veidrodis, kuris nukreipė spinduliuotę į pluošto gaudyklę. Tyrime matuojant spinduliuotės galią buvo naudojami „Ophir“ galios matuokliai, o matuojant 2H ir signalinės bangų spektrus naudotas „Avantes“ spektrometras, kurio bangos ilgių diapazonas nuo 350 nm – 1100 nm. Trukmių matavimams buvo naudotas laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo modulis „PicoHarp300“, o MgO:PPLN OPG signalinės bangos spektrams ir spektro pločiams „ANDO AQ6317C“ optinis spektro analizatorius ir „Ocean Optics“ spektrometras, kurio bangos ilgių diapazonas nuo 900 – 2500 nm.

## 2.2 Tyrimų rezultatų 1 diapazone aptarimas

Norint pasiekti parametrinį šviesos stiprinimą subnanosekundinių kaupinimo impulsų atveju LBO kristale, turi būti naudojamas ne tik kaupinimo spinduliuotės šaltinis, bet ir užkrato. Kadangi buvo norima gauti signalinės bangos derinimo diapazoną visoje regimoje srityje, todėl buvo naudojami skirtingi užkrato spinduliuotės šaltiniai, kurie buvo parinkti pagal MgO:PPLN spinduliuotę ir pagal LBO kristalo sąveiką. LBO kristalo derinimo kreivė buvo išskirta į 3 diapazonus, kurie pavaizduoti 13 pav.: tiesė atitinka teorines vertes, juodi taškai iš signalinės bangos spektrų, raudoni taškai iš šalutinės bangos spektrų, o pilkai pažymėtos vietos rodo 3 skirtingus LBO kristalo kampų diapazonus. Eksperimentiškai pavyko ištirti 1 ir 3 diapazonus, nors buvo atlikta bandymų ir su 2 diapazonu, tačiau šio diapazono užkrato šaltinio efektyvumas nesiekė nei 0,01%. Kai buvo tirtas pirmasis diapazonas kaip užkrato šaltinis buvo naudojama MgO:PPLN OPG signalinė banga, o kai tirtas 3 diapazonas sugeneruota 2H nuo MgO:PPLN OPG signalinės bangos (apie tai bus plačiau 2.3 skyrelyje). Šiame skyriuje aptarsime 1 diapazono užkrato šaltinio ir parametrinio šviesos stiprinimo gautus eksperimento rezultatus.

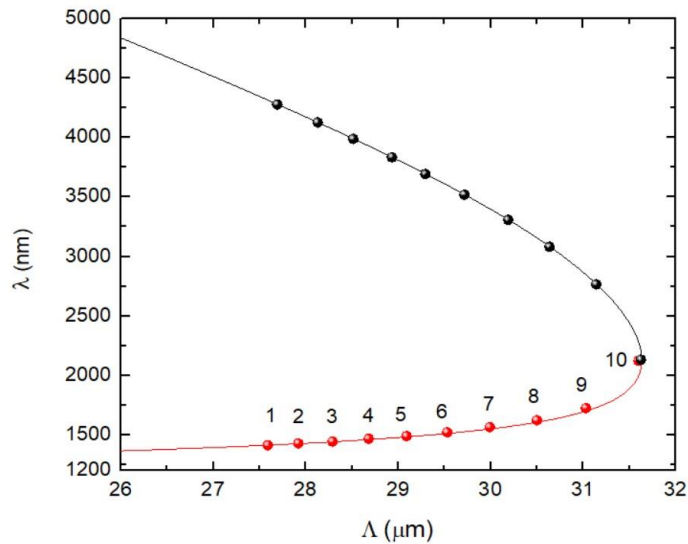


**13 pav.** LBO kristalo derinimo kreivė I tipo faziniam sinchronizmui. 1 ir 3 skaičiais pažymėti LBO kampų diapazonai, kuriuos keičiant šiame darbe buvo generuota ir tirta spinduliuotė.

## 2. 2. 1. Užkrato spinduliuotės šaltinio optimizavimas

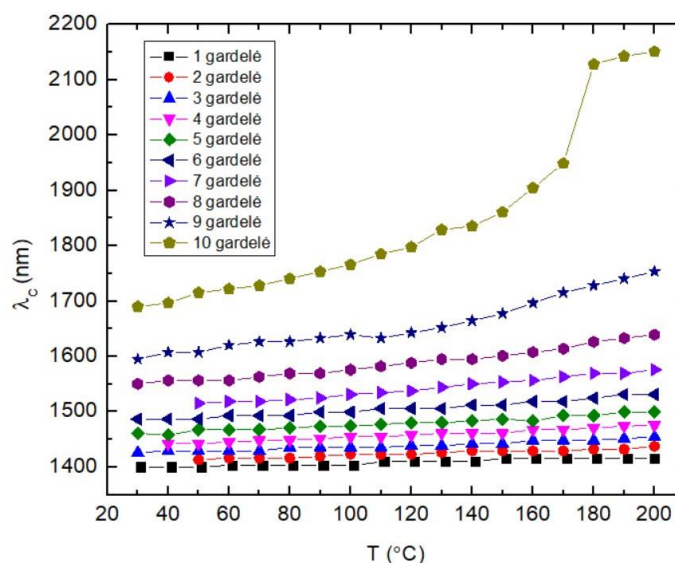
Kaip jau minėta anksčiau, parametriniame šviesos generatoriuje sugeneruota signalinė banga ir buvo šio diapazono užkrato spinduliuotės šaltinis. Parametrinio šviesos generatoriaus kaupinimui buvo naudojama mikrolazerio pirmoji harmonika, kurios maksimali galia iš lazerio buvo 75 mW, bet naudota 68 mW. Buvo naudojamas periodiškai orientuotas 5% MgO:PPLN kristalas, kuris buvo 1 cm pločio, 0,5 cm storio, 5 cm ilgio ir sudarytas iš 10 gardelių ( $\Lambda = 27,58 \mu\text{m}; 27,91 \mu\text{m}; 28,28 \mu\text{m}; 28,67 \mu\text{m}; 29,08 \mu\text{m}; 29,52 \mu\text{m}; 29,98 \mu\text{m}; 30,49 \mu\text{m}; 31,02 \mu\text{m}; 31,59 \mu\text{m}$ ). Kristalas buvo patalpintas į krosnelę, kuri galėjo būti kaitinama iki  $200^\circ\text{C}$ ,  $0,1^\circ\text{C}$  tikslumu.

Eksperimentas prasidėjo nuo MgO:PPLN kristalo derinimo kreivės matavimo, kai kaupinimo galia buvo maksimali 68 mW, o kristalo temperatūra  $180^\circ\text{C}$ . Duomenys pateikti 14 pav. Raudoni taškai iš signalinės bangos spektrų, juodi taškai iš šalutinės bangos spektrų, o tiesė atitinka teorines vertes. Iš grafiko galima matyti, kad eksperimentas atitiko teorinius skaičiavimus. Generacijos metu MgO:PPLN kristalo gardelių periodai buvo nuo  $27,7 \mu\text{m}$  iki  $31,63 \mu\text{m}$ , kurie 14 pav. pažymėti 1 – 10 skaičiais.



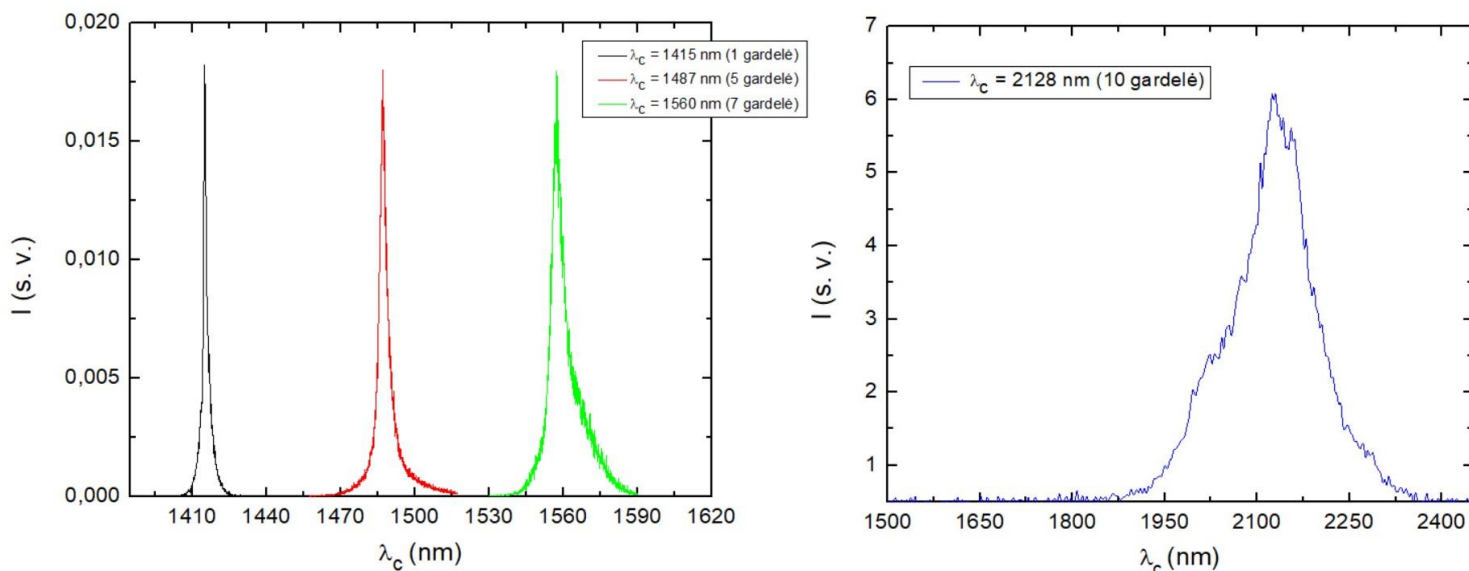
**14 pav.** MgO:PPLN kristalo derinimo kreivė, kai kristalo temperatūra 180°C. Skaičiai žymi MgO:PPLN gardelių numeraciją.

Toliau buvo nustatytos temperatūrinio derinimo kreivės. Kristalo temperatūra buvo keičiama nuo 30 iki 200°C, kas 5°C. Kelios kreivės pateiktos 15 pav. Buvo gauta, kad generuojamos signalinės bangos diapazonas yra nuo 1400 – 2150 nm, artimojoje IR spektro dalyje. Iš 15 pav., galima matyti, kad didėjant temperatūrai signalinės bangos ilgis taip pat didėja, kai yra mažesnio periodo gardelės signalinės bangos pokytis nėra didelis, o kai naudojamos didesnio periodo gardelės, tai pokytis matomas didesnis: (1 gardelės ( $\Lambda = 27,58 \mu\text{m}$ ) signalinės bangos derinimo diapazonas yra nuo 1400 – 1416 nm, 5 gardelės ( $\Lambda = 29,08 \mu\text{m}$ ) yra nuo 1461 – 1500 nm, o 10 gardelės ( $\Lambda = 31,59 \mu\text{m}$ ) yra didžiausias, siekia 1690 – 2150 nm). Didžiausias pokytis yra todėl, kad ties 180°C yra pasiekiamas išsigimęs režimas, kai signalinės ir šalutinės bangos ilgiai sutampa ir jie persikloja, todėl išplinta generuojamos spinduliuotės spektras ir derinimo diapazonas gaunamas platesnis.



**15 pav.** Temperatūrinio derinimo kreivės.

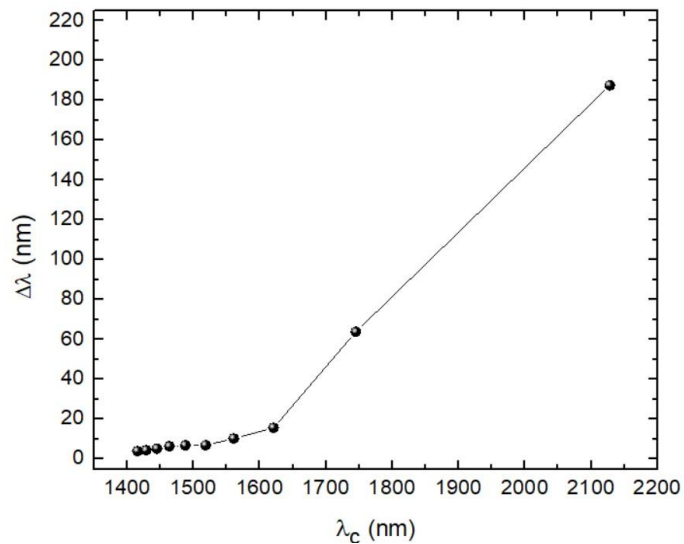
Toliau buvo išmatuoti signalinės bangos spektrai ir įvertintas jų spektro plotis, kai matavimo metu temperatūra siekė  $T = 180^{\circ}\text{C}$ , nes tokioje temperatūroje buvo pasiektas išsigimęs režimas, kurio metu signalinės ir šalutinės bangų ilgiai sutampa. 16 pav. kairėje pateikti keli signalinės bangos spektrai, kurie buvo pamatuoti optiniu spektro analizatoriumi, o dešinėje pateiktas spektras, kuris buvo pamatuotas su „Ocean Optics“ spektrometru. Kaip galima matyti didėjant signalinės bangos ilgiui, spektro plotis taip pat didėja, taip yra dėl pasiekto išsigimusio režimo.



**16 pav.** Signalinės bangos spektrai, kai  $T = 180^{\circ}\text{C}$ : kairėje: spektrai matuoti su optiniu spektro analizatoriumi; dešinėje: matuota su „Ocean Optics“ spektrometru.

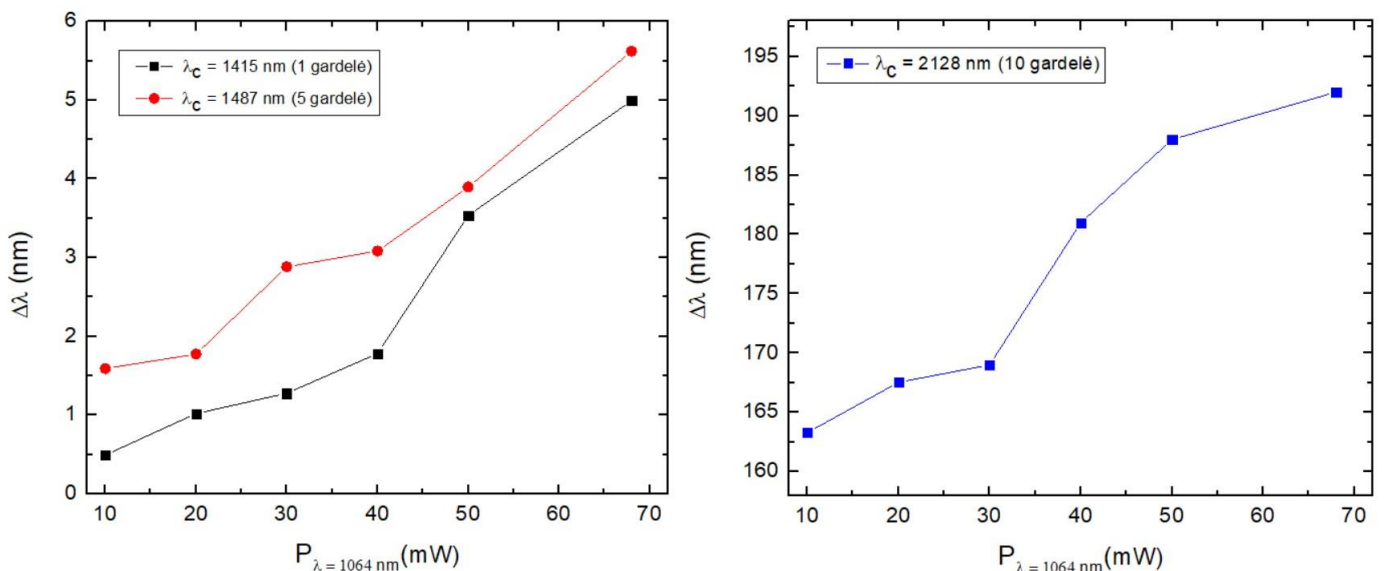
Toliau taip pat buvo įvertintas ir spektro plotis, pradžioje įvertintas kaip vidutinis kvadratinis spektro plotis (RMS), o po to perskaičiuota į FWHM, kai buvo maksimali užkrato kaupinimo galia. Iš 17 pav. galima matyti, kad spektro plotis svyruoja nuo 3,9 iki 15,6 nm 1 – 8 gardelėms ( $\lambda = 27,58\text{--}30,49\ \mu\text{m}$ ), 9 gardelei ( $\lambda = 31,02\ \mu\text{m}$ ) yra 63,8 nm, o 10 ( $\lambda = 31,59\ \mu\text{m}$ ) gardelės spektro plotis gautas 187 nm (dėl išsigimusio režimo). Jeigu spektro plotį palyginsime su kaupinimo spektro pločiu, kuris yra  $\Delta\lambda \approx 5\ \text{pm}$  (FWHM lygyje), gausime, kad signalinės bangos spektrai išplinta daug kartų ir turint omenyje, kad impulsų trukmės yra subnanosekundinės, galima teigti, kad spektras nėra spektriškai ribotas. Taip yra dėl to, kad spektras tampa moduluotu dėl fazinio sinchronizmo dažnių juostos pločio ir dėl savaiminio fazės moduliavimosi reiškinių.





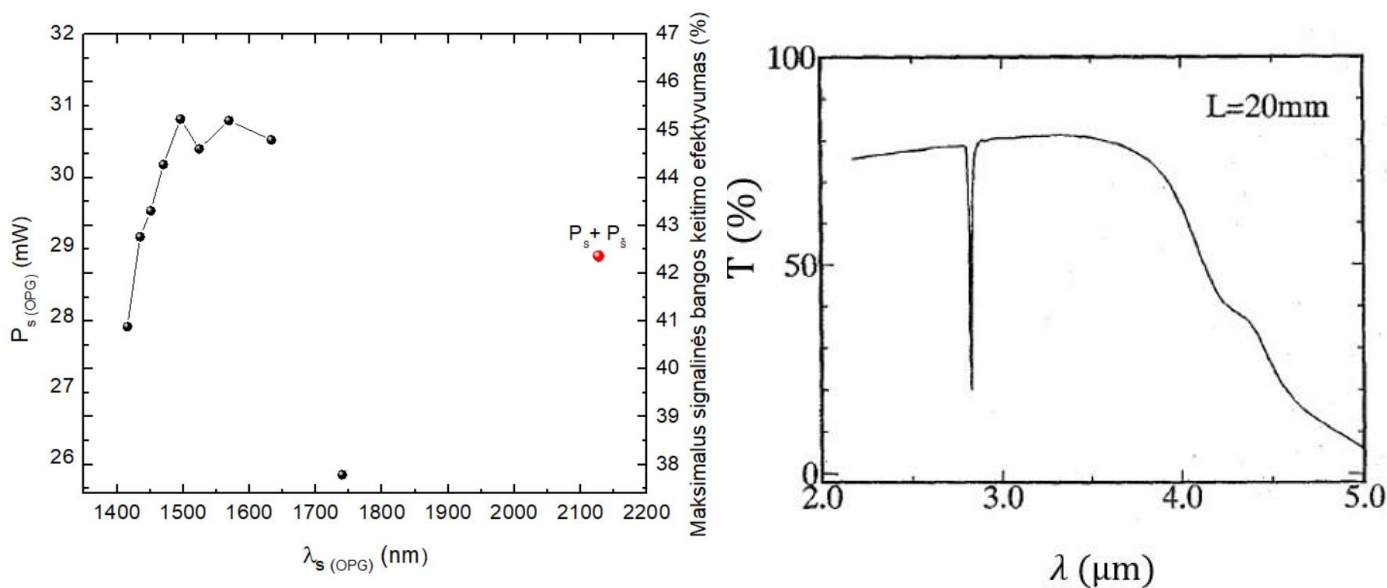
**17 pav.** Signalinės bangos spektrų pločių priklausomybė, kai kristalo  $T = 180^\circ\text{C}$  ir maksimali užkrato kaupinimo galia ( $P_{\lambda=1064\text{ nm}} = 68\text{ mW}$ ).

Spektro pločiai taip pat buvo įvertinti kai buvo keičiama MgO:PPLN OPG kaupinimo ( $P_{\lambda=1064\text{ nm}}$ ) galia 10 – 68 mW ribose ir kristalo temperatūra buvo  $180^\circ\text{C}$ . Iš 18 pav. galima matyti, kad 1 gardelės ( $L = 27,58\ \mu\text{m}$ ) spektro plotis svyravo nuo 0,4 – 4,9 nm, 5 gardelės ( $L = 29,08\ \mu\text{m}$ ) nuo 1,5 – 5,6 nm o 10 gardelės ( $L = 31,59\ \mu\text{m}$ ) nuo 163 – 192 nm. Toks didelis skirtumas tarp 1 gardelės ir 10 yra todėl, kad 10 gardelė realizuoja OPG veiką išsigimusiam režime, kai signalinė ir šalutinė bangos persikloja ir todėl žymiai labiau išplinta spektras.



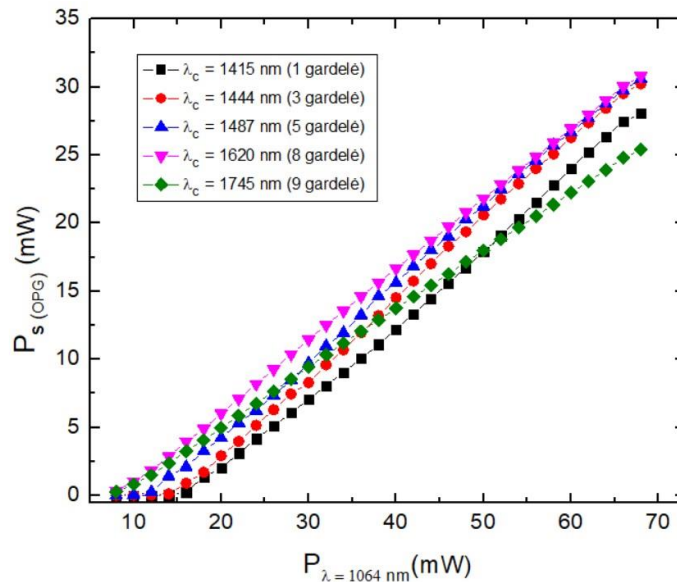
**18 pav.** Signalinės bangos spektrų pločių priklausomybė nuo  $P_{\lambda=1064\text{ nm}}$  galios, kai kristalo  $T = 180^\circ\text{C}$ . Kairėje: 1 gardelė ( $L = 27,58\ \mu\text{m}$ ) ir 5 gardelė ( $L = 29,08\ \mu\text{m}$ ); dešinėje: 10 gardelė ( $L = 31,59\ \mu\text{m}$ ).

Tiriant užkratą taip pat buvo svarbu išsiaiškinti kokia yra signalinės bangos galios priklausomybė nuo signalinės bangos ilgio ir koks yra užkrato spinduliuotės generavimo efektyvumas. Iš 19 pav. galima matyti, kad didžiausia signalinės bangos galia siekė 30,8 mW, o maksimalus signalinės bangos keitimo efektyvumas 45,2%. Ties 9 gardele ( $\lambda_c = 1740$  nm) matomas staigus signalinės bangos galios kritimas. Taip yra dėl OH jonų sugerties LiNbO<sub>3</sub> kristale. Kaip galima matyti iš 19 pav. dešinėje esančio grafiko, ties  $\lambda = 2828$  nm yra pralaidumo sumažėjimas, o šis bangos ilgis atitinka 9 gardelės šalutinės bangos ilgį, todėl jeigu krenta ir šalutinės bangos galia, tai atitinkamai ir signalinės bangos galia bus mažesnė.



**19 pav.** Kairėje: MgO:PPLN OPG signalinės bangos galios priklausomybė ir efektyvumas nuo signalinės bangos ilgio, kai kristalo  $T = 180^\circ\text{C}$ ; dešinėje: 7% MgO legiruoto LiNbO<sub>3</sub> kristalo pralaidumo kreivė, kai kristalo ilgis 20 mm [50].

Iš 20 pav. pateikto grafiko matome, kad signalinės bangos generacijos slenkstis sumažėja, didėjant kaupinimo galiai. Pavyzdžiui, 1 – 3 gardelėms ( $A = 27,58 - 28,28$   $\mu\text{m}$ ) slenkstis yra 14 mW, 5 gardelei ( $A = 29,08$   $\mu\text{m}$ ) 12 mW, o 9 ( $A = 31,02$   $\mu\text{m}$ ) slenkstis yra mažesnis negu 8 mW. Generacijos slenkstis priklauso nuo gardelės periodo, kuo jis mažesnis tuo generacijos slenkstis didesnis. Taip yra dėl stiprinimo koeficiento, kuris priklauso nuo signalinės ir šalutinės bangos ilgių sandaugos. Kadangi signalinės ir šalutinės bangos ilgiai skiriasi nuo gardelės periodo, tai stiprinimo koeficientas irgi skiriasi, kuo bangų ilgių santykis didesnis, tuo mažesnis koeficientas ir todėl gaunamas didesnis generacijos slenkstis.

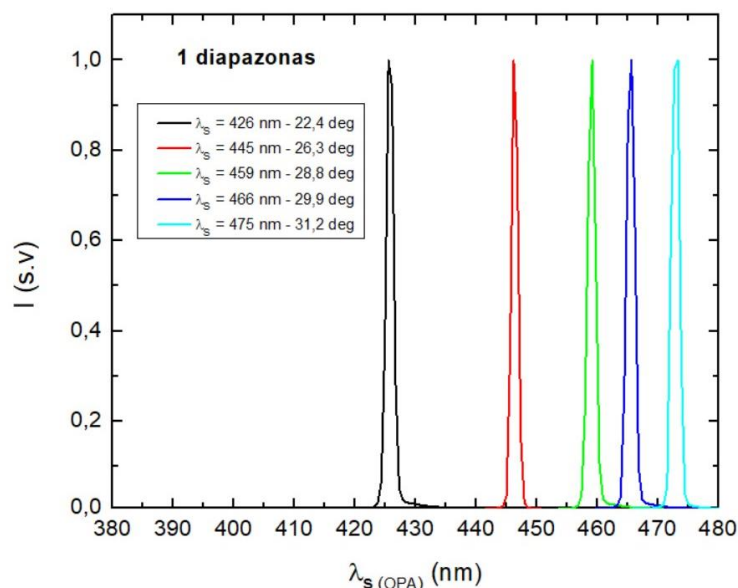


**20 pav.** MgO:PPLN OPG signalinės bangos galios priklausomybė nuo kaupinimo ( $P_{\lambda=1064 \text{ nm}}$ ) galios, kai kristalo  $T = 180^\circ\text{C}$ .

## 2. 2. 2. Parametrinio šviesos stiprinimo tyrimo rezultatų aptarimas

Šiame skyriuje aptarsime 1 diapazono parametrinio šviesos stiprinimo LBO kristale tyrimo rezultatus. Kaip minėta 2.2.1 dalyje, 1 diapazono parametrinio šviesos stiprintuvo užkratas buvo MgO:PPLN OPG sugeneruota signalinė banga, kurios spektras išplito nuo 1400 – 2150 nm, keičiant MgO:PPLN kristalo gardelių periodus. Kaupinimo šaltinis buvo mikrolazerio 3H, kurios maksimali galia pirmame diapazone buvo 86 mW, o bangos ilgis 355 nm. Kai LBO kristalą pasukame tam tikru kampu (13 pav.) ir suleidžiame užkrato ir kaupinimo bangas į kristalą, tada susigeneruoja skirtuminio dažno banga (darbe ją vadinsime signaline banga), o iš užkrato sustiprėja tam tikra spektro komponentė – darbe ją vadinsime šalutine banga.

Iš 13 pav. galima matyti, kad 1 diapazono srityje stiprinimo metu LBO kristalo kampų diapazonas buvo nuo  $22,5^\circ$  iki  $31,3^\circ$ . Toliau buvo išmatuoti signalinės bangos spektrai pasukant LBO kristalą įvairiais kampais. Kadangi signalinės bangos spektro plotis yra mažesnis už „Avantes“ spektrometro skyrą, todėl tyrėme tik spektro centrinio bangos ilgio kitimą. Iš 21 pav. matome, kad eksperimentiškai signalinės bangos derinimo diapazonas gautas nuo 426 nm iki 475 nm, nors teoriškai turėtų būti nuo 410 nm iki 710 nm. Užkratas apribojo signalinės bangos derinimą, nes 1 diapazone užkrato spinduliuotės derinimo diapazonas buvo nuo 1400 – 2150 nm, tai atitinkamai ir gautos signalinės bangos tokiame diapazone.

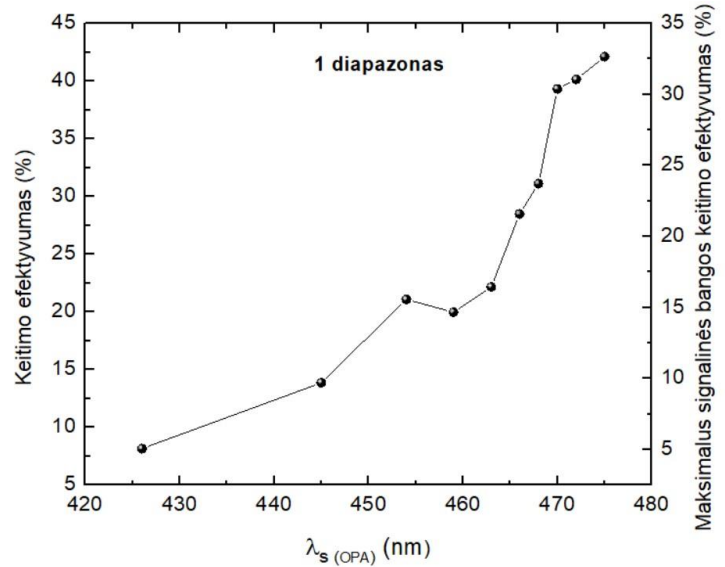
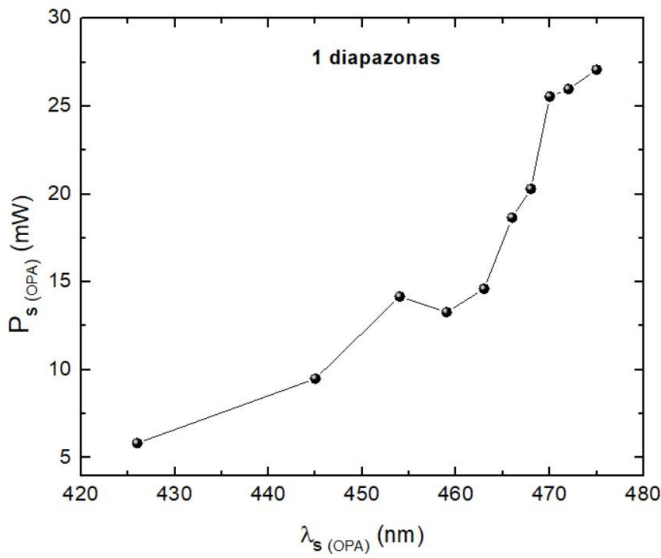


**21 pav.** 1 diapazono signalinės bangos spektrai esant skirtingiems LBO kristalo kampams.

Toliau buvo atliktas tyrimas kaip keičiasi signalinės bangos galia, kai yra keičiamas signalinės bangos ilgis. Ši priklausomybė pateikta 22 pav. kairėje. Matavime buvo naudojama maksimali kaupinimo galia (86 mW) ir maksimali užkrato galia. Iš grafiko galima matyti, kad maksimali signalinės bangos galia, ties 475 nm siekia 27 mW, o ties 426 nm 5,8 mW. 22 pav. dešinėje taip pat pateikta ir koks yra maksimalus 1 diapazono parametrinio šviesos stiprintuvo keitimo efektyvumas:

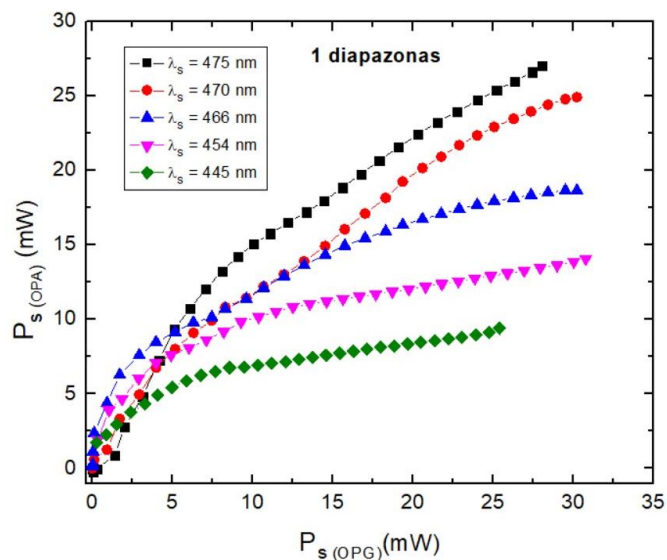
$$\eta = \frac{P_s + P_i}{P_k} \quad (37)$$

kur  $P_s$ ,  $P_i$ ,  $P_k$  – signalinės, šalutinės, kaupinimo bangos galia. Didžiausias efektyvumas gautas ties 475 nm (42,1%), o mažiausias ties 426 mW (8,1%). Tokia galia ir toks efektyvumas gautas dėl užkrato spinduliuotės buvimo, kadangi užkrato galia didėja kai didėja bangos ilgis, tai atitinkamai ir signalinės bangos galia didėja, kai didėja signalinės bangos ilgis.



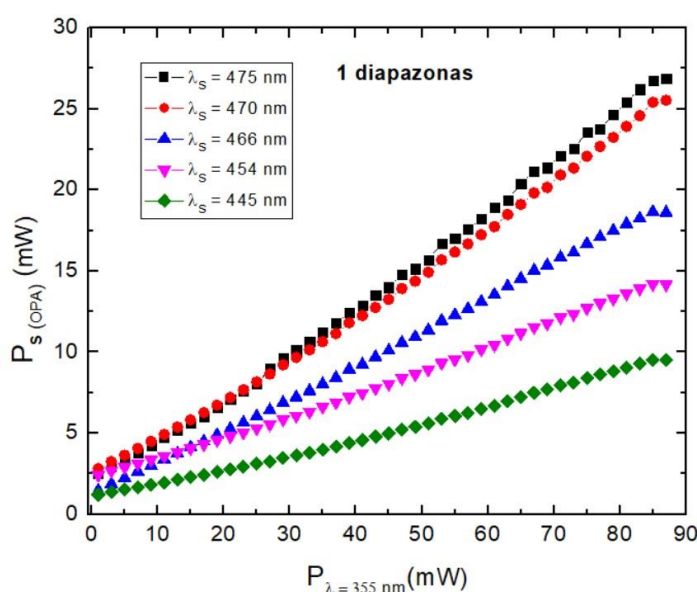
**22 pav.** Kairėje: Signalinės bangos galios kitimas kintant signalinės bangos ilgiui, kai kaupinimo galia yra maksimali ( $P_{\lambda=355 \text{ nm}} = 86 \text{ mW}$ ); dešinėje: OPA keitimo efektyvumai.

Darbe taip pat ištirta ir signalinės bangos galios priklausomybė nuo užkrato spinduliuotės galios, kai buvo maksimali kaupinimo galia (86 mW). Šių priklausomybių grafikas yra pateiktas 23 pav. Matavime užkrato galia keitėsi, kai buvo keičiama užkrato kaupinimo galia. Iš 23 pav. galima matyti, kad kai buvo mažinama užkrato galia, signalinės bangos galia mažėjo – maksimali signalinės bangos galia atitiko maksimalią užkrato spinduliuotės galią. Tai yra susiję su užkrato spektro siaurėjimu ir užkrato intensyvumo mažėjimu. Kai mažėja užkrato kaupinimo galia, siaurėja ir užkrato spektras ir dėl to kaip tik gali padidėti atskirų spektro komponentių intensyvumas, tačiau kai yra mažinama užkrato kaupinimo spinduliuotės galia, atitinkamai mažėja ir pačio užkrato spinduliuotės galia, todėl keičiasi atskirų spektro komponentių intensyvumas ir mažėja signalinės bangos galia.



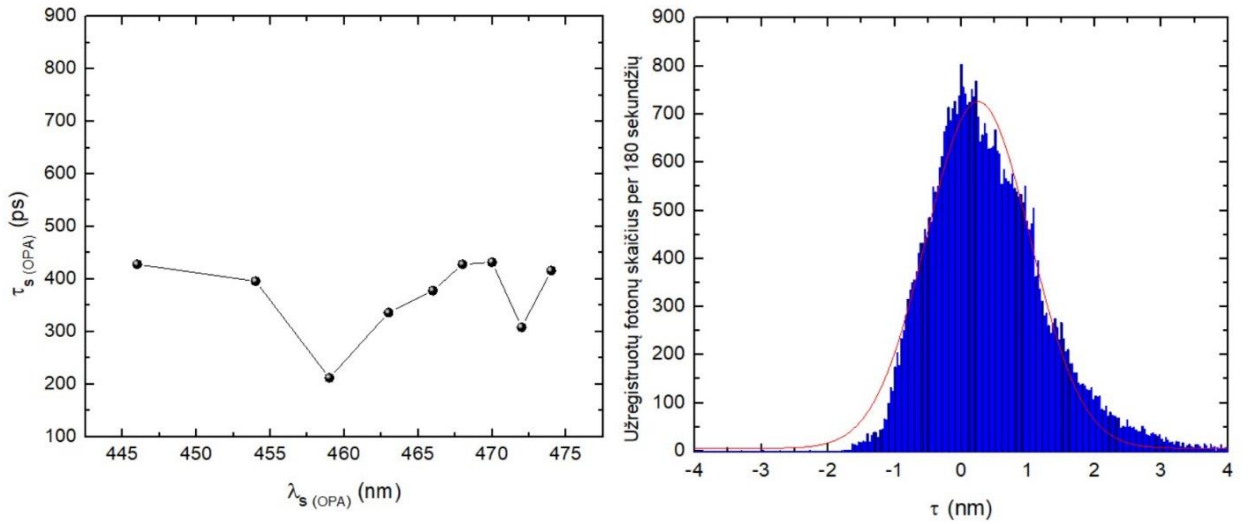
**23 pav.** Signalinės bangos galios priklausomybė nuo užkrato galios ( $P_{s(OPG)}$ ), kai maksimali kaupinimo galia ( $P_{\lambda=355 \text{ nm}} = 86 \text{ mW}$ ).

Toliau taip pat buvo iširta ir signalinės bangos galios priklausomybė nuo kaupinimo bangos galios. Šios priklausomybės pateiktos 24 pav. Jeigu yra mažinama kaupinimo galia tai signalinės bangos galia mažėja tiesiškai. Signalinės bangos parametrinio stiprinimo slenkstis yra prie labai mažų galių ir jis panašus daugeliui bangos ilgių, taip yra dėl to, kad yra naudojamas užkratas ir stiprinimas prasideda jau nuo užkrato spinduliuotės. Slenksčio mažėjimą taip pat gali lemti ir kristalo netiesinės sąveikos efektyvumas. Iš 24 pav. taip pat matome, kad kai kaupinimo galia 85 mW yra pasiekiamas soties veikimo režimas ir signalinės bangos galia didinant kaupinimo galią nebeauga, tai parodo, kad tyrime buvo parinktos optimalios fokusavimo sąlygos ir prietaisas yra optimizuotas.



**24 pav.** Signalinės bangos galios priklausomybė nuo  $P_{\lambda=355 \text{ nm}}$ , kai  $P_{s(OPG)}$  galia maksimali.

Taip pat buvo pamatuotos ir signalinės bangos impulsų trukmės. Matavimas buvo atliktas naudojant TCSPC metodą – laike koreliuotų pavienių fotonų skaičiavimo metodą. Buvo matuojama per kiek laiko signalinės bangos fotonai pasiekia fotonų skaitliuką optinio signalo atžvilgiu (optinis signalas buvo mikrolazerio 2H). Gautos trukmės buvo aproksimuotos pagal Gauso funkciją ir nubraižytos histogramos, viena histograma pateikta 25 pav. Impulso trukmė įvertinta  $1/e^2$  lygyje, o naudota „PicoHarp300“ skiriamoji geba 16 ps. Iš 25 pav. matome, kad OPA generuojamos signalinės bangos impulsų trukmės yra subnanosekundinių trukmių diapazone nuo 212 iki 432 ps. Tačiau 426 nm signalinės bangos impulsų trukmė buvo gauta 686 ps, taip yra dėl užkrato spinduliuotės išsigimusio režimo, kuriame signalinės ir šalutinės bangos susilieja ir jų impulsai laike persikloja, todėl matuojant trukmę ji gaunasi didesnė, negu kitų signalinių bangų.



**25 pav.** Kairėje: signalinės bangos impulsų trukmės prie skirtingų bangos ilgių, dešinėje: išmatuotos signalinės bangos ( $\lambda_{s(OPA)} = 468$  nm) TCSPC histograma su Gauso funkcija.

### 2. 2. 3. Parametrinės šviesos generacijos ir stiprinimo modeliavimo rezultatai

**Parametrinė šviesos generacija PPLN kristale.** Šiame skyriuje trumpai aptarsime skaitmeninio modeliavimo rezultatus. Buvo modeliuotos tribangės sąveikos lygtys, įskaitančios netiesinę sąveiką periodiškai poliutuotame kristale, laikinę dispersiją ir pluošto difrakciją [20]:

$$\frac{\partial S_1}{\partial z} = i(k_1 - k_{10} - \frac{\beta^2}{2k_{10}})S_1 + m(z)\sigma_1 FT[A_2^* A_3] e^{i\Delta kz} \quad (38)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial z} = i(k_2 - k_{20} - \frac{\beta^2}{2k_{20}})S_2 + m(z)\sigma_2 FT[A_1^* A_3] e^{i\Delta kz} \quad (39)$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial z} = i(k_3 - k_{30} - \frac{\beta^2}{2k_{30}})S_3 - m(z)\sigma_3 FT[A_1 A_2] e^{-i\Delta kz} \quad (40)$$

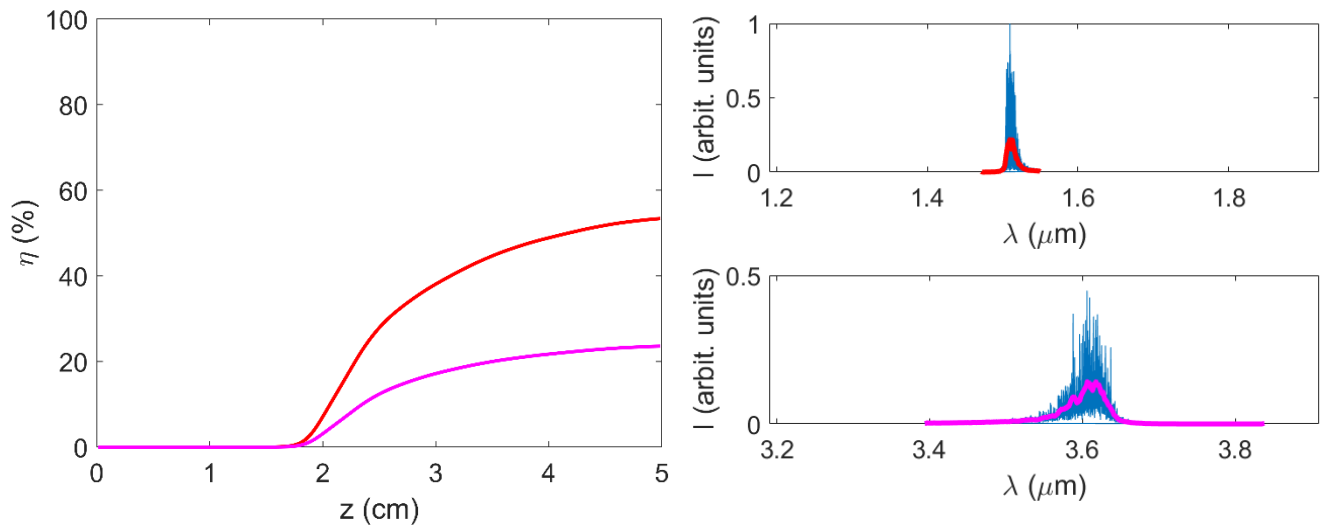
$S_j(\Omega, \beta)$  yra kompleksinės amplitudės,  $A_j(t, r)$  Furjė transformacija. Indeksai 1, 2, 3 atitinka signalinę, šalutinę ir kaupinimo bangas. Buvo taikomas erdvinis-laikinis modelis, laikant, kad yra simetrija azimutinio kampo atžvilgiu,  $t$  yra laikas,  $r$  – radialioji koordinatė cilindrinėje koordinačių sistemoje,  $z$  – išilginė koordinatė. Elektrinis laukas randamas pagal  $E(t, r, z) = \Re [A(t, r, z) e^{ik_{j0}z - i\omega_{j0}t}]$ .  $k_j = \frac{\omega_j n_j(\lambda_j)}{c}$  yra bangos skaičius, kuris yra bangos ilgio  $\lambda$  bei kampinio dažnio  $\omega$  funkcija,  $c$  yra šviesos greitis,  $n_j(\lambda)$  yra lūžio rodiklis, skaičiuotas pagal Zelmejerio formules [51]. Netiesinės sąveikos koeficientas  $\sigma_j = d_{eff} \omega_{j0} / (c n_j(\lambda_{j0}))$ , čia  $d_{eff}$  efektyvus netiesiškumo koeficientas,  $j_0$  žymi centrinę bangos ilgį arba dažnį,  $\Delta k = k_{30} - k_{10} - k_{20}$ . Funkcija  $m(z)$  lygi arba +1 arba -1. Ji keičia ženklą kas  $\frac{\Lambda}{2}$ , čia  $\Lambda$  – periodinio poliavimo periodas.

Modeliavimas buvo atliktas naudojant simetrizuoto padalijimo žingsnių Furjė metodą (angl. *k. symmetrized split-step Fourier transform method*): kiekviena atkarpėlė  $\Lambda$  buvo padalinta į 8 ekvidistancinių dalių. Ribinės kaupinimo sąlygos buvo pasirinktos:  $A_3(t, r, z = 0) = a_{30} \exp(-2 \ln 2 \frac{t^2}{\tau^2} - \frac{r^2}{d^2})$ , čia impulso trukmė  $\tau = 400$  ps, pluoštelio radiusas  $d = 50$   $\mu\text{m}$ , o  $a_{30}$  pradinė amplitudė. Kaupinimo banga buvo Gausinis subannosekundinis impulsinis pluoštas.

Kraštinės sąlygos signalinei ir šalutinei bangoms užrašomos taip:  $A_{1,2}(t, r, z = 0) = a_{1,20} \exp(-2 \ln 2 \frac{t^2}{\tau^2} - \frac{r^2}{d^2}) \xi_{1,2}(t, r)$ . Čia  $\xi_{1,2}(t, r)$  nepriklausomi Gausiniai triukšmai su nuliniu vidurkiu ir vienetine dispersija.  $a_{1,20}$  užduoda kvantino triukšmo lygį, kuris apskaičiuotas remiantis tuo, kad nusklidus mažą atstumą  $h_z$ , signalo koreliacinė funkcija lygi  $R_{11}(t_1, t_2, r_1, r_2) = 2h_z^2 \sigma_1^2 \delta_{20} R_{33}$ . Čia  $R_{33}$  yra pradinio kaupinimo koreliacinė funkcija, o  $\delta_{20} = \frac{\hbar \omega_{20}}{2V \epsilon_0 n_2^2(\lambda_{20})} e^{-\tau^2/\mu_t^2} e^{-\rho^2/\mu_r^2}$ ,  $\hbar$  yra redukuota Planko konstanta,  $V = S h_z$ ,  $S$  yra kaupinimo pluošto skerspjūvio plotas.  $\tau = t_2 - t_1$ , o  $\mu_t$  yra laiko atkarpa, kuri atitinka spektro plotį, daug didesnę už kaupinimo impulso spektro plotį. Analogiškai  $\rho = r_2 - r_1$ , o  $\mu_r$  yra labai maža erdvinė atkarpa, lyginant su kaupinimo koreliaciniu atstumu. Šalutiniam triukšmui skaičiuoti reikėtų sukeisti indeksus 1 ir 2 vietomis.

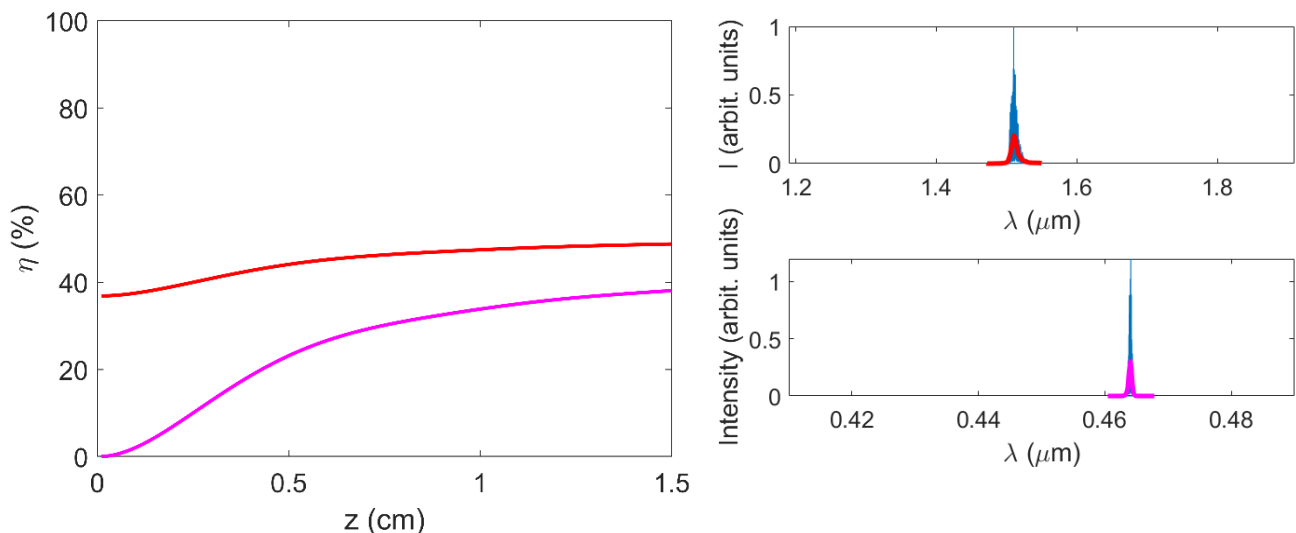
Laiko intervalas buvo pasirinktas nuo  $[-4\tau, 4\tau]$ . Laiko intervalas buvo suskirstytas į 32768 lygius žingsnius. Erdvinis intervalas buvo  $(0, 10d]$ , kuris sudalintas į 80 dalių. Laikinėms funkcijoms taikyta Furjė transformacija, tuo tarpu erdvinei funkcijai pritaikyta Hankelio transformacija. Modeliavime maksimali kaupinimo galia buvo 70 mW. Kristalo temperatūra buvo 180 °C, kristalo ilgis 5 cm, periodas  $\Lambda = 29.52$   $\mu\text{m}$ , kaupinimo bangos ilgis 1064 nm. Rezultatai pateikti 26 pav., maksimalus signalinės bangos keitimo efektyvumas gautas 53%. Iš 16 pav. matome, kad 6 gardelės ( $\Lambda = 29.52$   $\mu\text{m}$ ) efektyvumas eksperimentiškai siekia 44,6%. Šis neatitikimas yra dėl to, kad modeliavime nebuvo atsižvelgta į kristalo periodinio poliavimo netobulumus bei elementų nuostolius.





**26 pav.** Skaitmeninio modeliavimo rezultatai, raudona kreivė atitinka signalinę bangą, o rožinė kreivė šalutinę bangą. Kairėje: OPG keitimo efektyvumas; dešinėje: signalinės ir šalutinės bangos spektrai (integruoti pagal kampą).

**Parametrinis šviesos stiprinimas LBO kristale.** Parametrinis šviesos stiprinimas antros pakopos LBO kristale buvo modeliuojamas taikant (38 - 40) netiesnės sąveikos lygtis, kuriose funkcija  $m(z) = 1$  visame kristale. Zelmejerio formulės, lūžio rodikliai ir  $d_{eff}$  buvo paimti iš programos Parametrika [52], LBO kristalui išpjautam XY plokštumoje, pirmo tipo (ooe) sąveikai. Kaupinimo kraštinė sąlyga užrašoma taip pat kaip ir PPLN kristalo atveju, impulso trukmė  $\tau = 500$  ps, pluoštelio radiusas  $d = 90$   $\mu\text{m}$ . Kaupinimo bangos ilgis 355 nm, kristalo ilgis 1,5 cm. Laikinis ir erdvinis langai liko tokie patys kaip pirmos pakopos modeliavime. Erdviniame laikiniame modelyje vėl buvo tarta, kad yra simetrija azimutinio kampo atžvilgiu, ir nebuvo įskaitytas erdvinio nunešimo kampas. Kadangi 90  $\mu\text{m}$  pluoštelis nunešamas per 5 mm, tai buvo suskaičiuotas taip pat ir 5 mm ilgio kristalas. Užrašant kraštinę sąlygą, buvo tarta, kad  $A_2(t, r, z = 0) = 0$ , o užkrato amplitudė  $A_1(t, r, z = 0)$  atitiko signalo amplitudę PPLN kristalo išėjime. Rezultatai pateikti 27 pav. maksimalus signalinės bangos keitimo efektyvumas gautas 38%, o trukmė gauta 425 ps. Iš 22 pav. matome, kad efektyvumas eksperimentiškai siekia 22,1%. Šis neatitikimas yra dėl to, kad modeliavime nebuvo atsižvelgta į erdvinį pluoštų nunešimą.



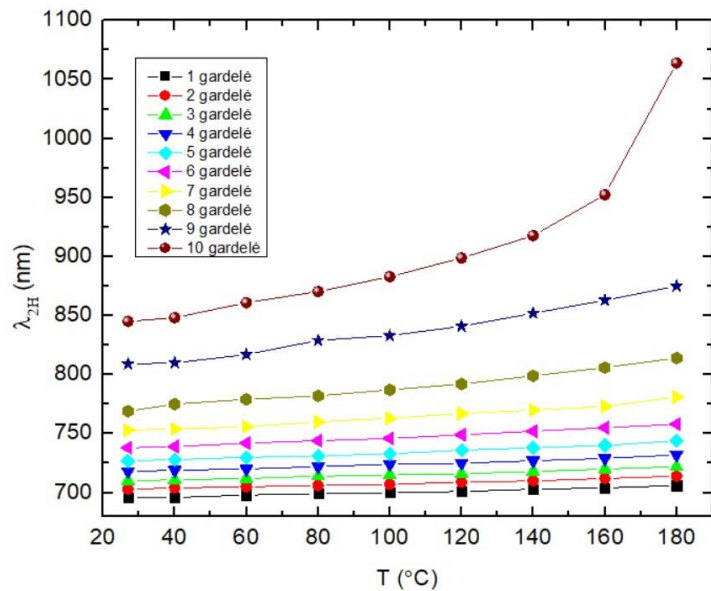
**27 pav.** Skaitmeninio modeliavimo rezultatai, rožinė kreivė atitinka signalinę bangą, o raudona kreivė šalutinę bangą, kairėje: OPA keitimo efektyvumas; dešinėje: signalinės ir šalutinės bangos spektrai (integruoti pagal kampą).

## 2. 3 Tyrimų rezultatų 3 diapazone aptarimas

### 2. 3. 1. Užkrato spinduliuotės šaltinio optimizavimas

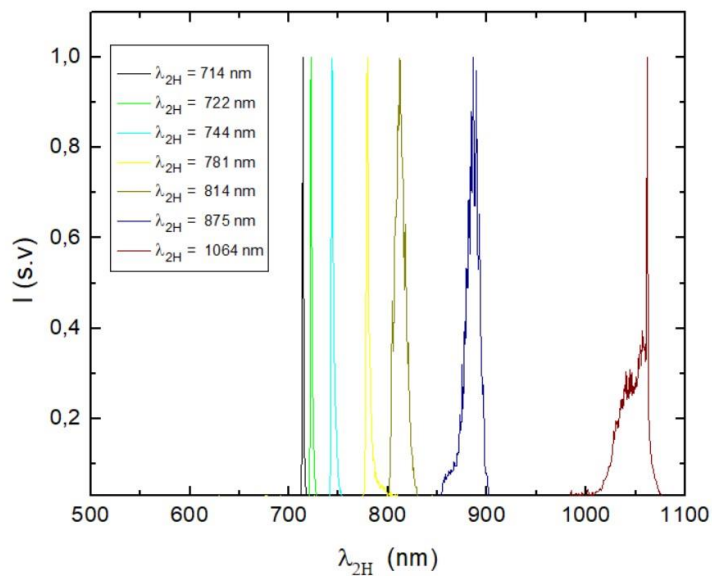
2.2 skyriuje aptarėme 1 diapazono tyrimų rezultatus, šiame skyriuje aptarsime 3 diapazoną. Kaip jau minėta anksčiau, norint pasiekti parametrinį šviesos stiprinimą, turi būti naudojamas ir užkrato šaltinis. Kai buvo tiriamas 3 diapazonas užkrato šaltinis buvo sugeneruota 2H nuo MgO:PPLN OPG signalinės bangos.

Eksperimentas prasidėjo nuo temperatūrinio derinimo kreivės. MgO:PPLN kristalo temperatūra buvo keičiama nuo 27°C iki 180°C, kas 20°C. Kelios kreivės pateiktos 28 pav. Buvo gauta, kad generuojamos 2H bangų diapazonas yra nuo 700 – 1064 nm, artimojoje IR spektro dalyje. Iš 28 pav., galima matyti, kad didėjant temperatūrai 2H bangos ilgis taip pat didėja, kai yra MgO:PPLN mažesnio periodo gardelės tai 2H bangos pokytis nėra didelis, o kai naudojamos didesnio periodo gardelės, tai pokytis matomas didesnis: (1 gardelės ( $\Lambda = 27,58 \mu\text{m}$ ) 2H derinimo diapazonas yra nuo 700 – 706 nm, 5 gardelės ( $\Lambda = 29,08 \mu\text{m}$ ) yra nuo 727 – 744 nm, o 10 gardelės ( $\Lambda = 31,59 \mu\text{m}$ ) yra didžiausias, siekia 845 – 1064 nm. Didžiausias pokytis yra todėl, kad ties 180°C yra pasiekiamas išsigimęs režimas, kai MgO:PPLN OPG signalinės ir šalutinės bangos ilgiai sutampa ir jie persikloja, todėl išplinta generuojamos spinduliuotės spektras. Jeigu išplinta signalinės bangos spektras, tai ir 2H generuojamos spinduliuotės spektras ties 10 gardele gaunamas platesnis.



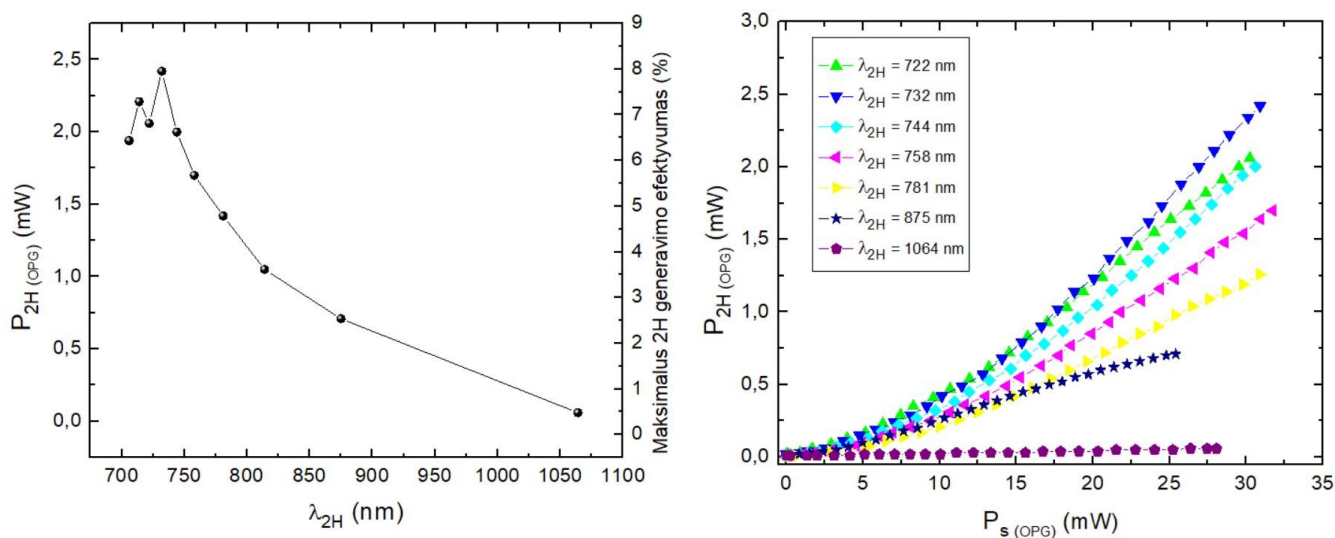
28 pav. 2H temperatūrinio derinimo kreivės.

Toliau buvo išmatuoti signalinės bangos spektrai. Kadangi 2H spektro plotis yra mažesnis už „Avantes“ spektrometro skyrą, todėl tyrėme tik spektro centrinio bangos ilgio kitimą. Matavimo metu MgO:PPLN temperatūra siekė  $T = 180^{\circ}\text{C}$ , nes tokioje temperatūroje buvo pasiektas išsigimęs režimas, kurio metu signalinės ir šalutinės bangų ilgiai sutampa. 29 pav. pateikti keli 2H spektrai, galima matyti, kad generuojamos 2H bangų diapazonas gautas nuo 700 – 1064 nm, artimojoje IR spektro dalyje. Gautas spektro diapazonas užtikrino, kad parametrinio šviesos stiprintuvo bangos ilgių derinimo ribos bus 3 diapazone (13 pav.).



29 pav. MgO:PPLN OPG 2H spektrai.

Tiriant užkratą taip pat buvo svarbu išsiaiškinti kokia yra 2H galios priklausomybė nuo 2H bangos ilgio ir koks yra užkrato spinduliuotės efektyvumas. Iš 30 pav. galima matyti, kad didžiausia 2H galia (2,24 mW) buvo ties 732 nm, maksimalus 2H generavimo efektyvumas 7,8%, o mažiausia galia (0,6 mW) ties 1064 nm ir efektyvumas 0,2%. Toks efektyvumas gautas dėl BBO kristalo ir  $P_{s(OPG)}$  intensyvumo. 2H generacijai buvo naudojamas 15 mm ilgio BBO kristalas, kurio kampinis sinchronizmo plotis yra siauras, todėl 2H generuojasi siaurame diapazone ir pasiekia tik tokią galią. Taip pat toks kristalas pasirinktas todėl, nes buvo norima santykinai mažą  $P_{s(OPG)}$  intensyvumą kompensuoti netiesinės terpės ilgiu ir taip pasiekti didžiausią 2H bangos galią. Iš 30 pav. dešinėje pateikto grafiko matome, kad 2H generacijos slenkstis yra labai mažas, siekia 1 – 3 mW atitinkamiems 2H bangos ilgiams, taip yra dėl parinktų fokusavimo sąlygų bei netiesinės terpės (BBO kristalo) netiesiškumo.



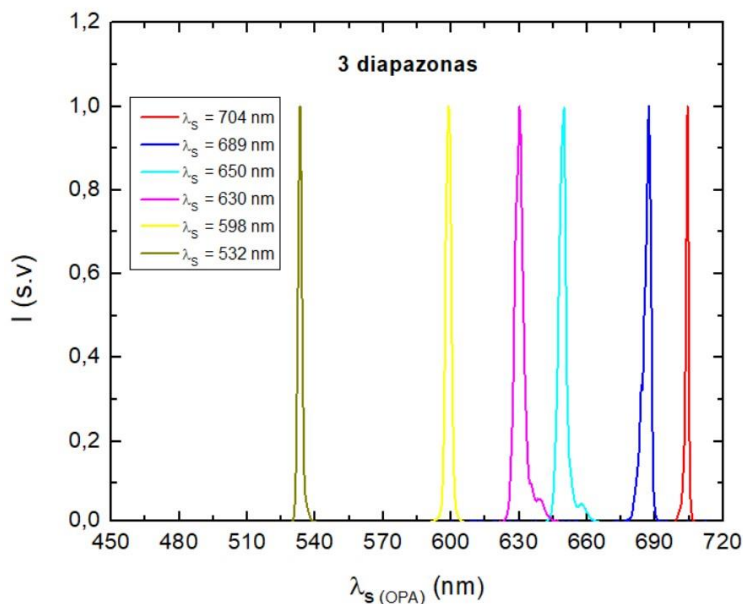
**30 pav.** Kairėje: 2H galios priklausomybė ir efektyvumas nuo 2H bangos ilgio; dešinėje: 2H galios priklausomybė nuo  $P_{s(OPG)}$  galios.

### 2. 3. 2. Parametrinio šviesos stiprinimo tyrimo rezultatų aptarimas

Šiame skyriuje aptarsime 3 diapazono parametrinio šviesos stiprinimo gautus eksperimento rezultatus. Kaip minėta 2.2.1 dalyje, 3 diapazono parametrinio šviesos stiprintuvo užkratas buvo sugeneruota 2H nuo MgO:PPLN OPG signalinės bangos. 2H spektras išplito nuo 700 – 1064 nm, keičiant MgO:PPLN kristalo gardelių periodus. Kaupinimo šaltinis buvo mikrolazerio 3H, kurios maksimali galia trečiame diapazone buvo 83 mW, o bangos ilgis 355 nm.

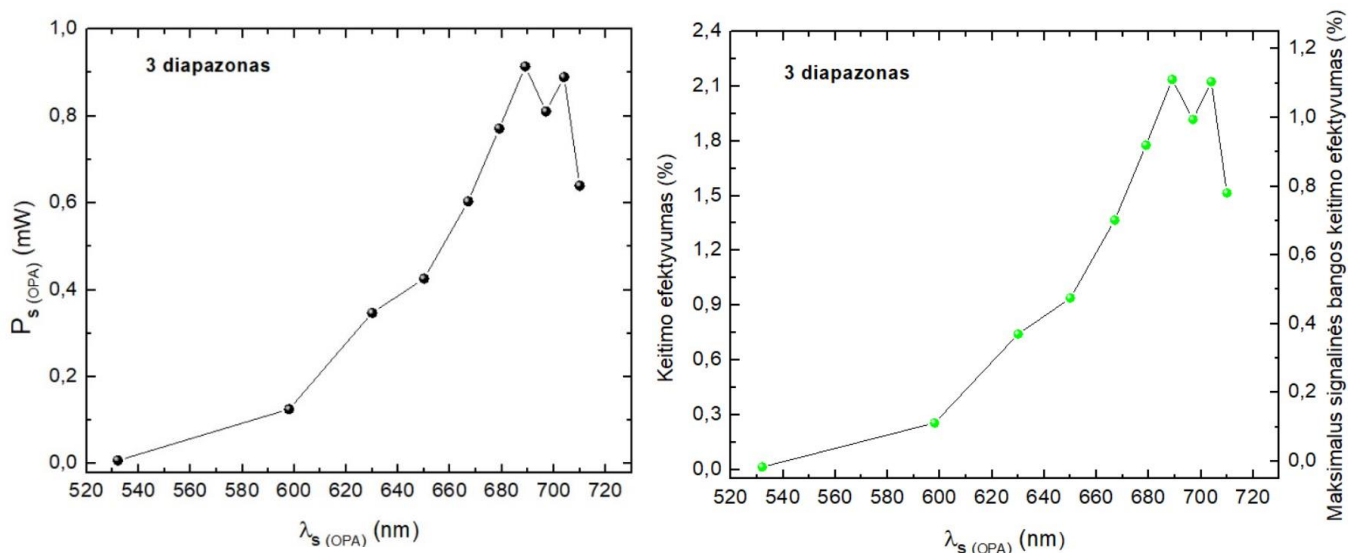
Iš 13 pav. galima matyti, kad 3 diapazono srityje stiprinimo metu LBO kristalo kampų diapazonas buvo nuo  $37,2^\circ$  iki  $42^\circ$ . Toliau buvo išmatuoti signalinės bangos spektrai pasukant LBO kristalą įvairiais kampais. Kadangi signalinės bangos spektro plotis yra mažesnis už „Avantes“

spektrometro skyrą, todėl tyrėme tik bangos ilgio, o ne spektro pločio kitimą. Iš 31 pav. matome, kad eksperimentiškai signalinės bangos derinimo diapazonas gautas nuo 532 nm iki 710 nm, nors teoriškai turėtų būti nuo 410 nm iki 710 nm. Užkratas apribojo signalinės bangos derinimą, nes 3 diapazone užkrato spinduliuotės derinimo diapazonas buvo nuo 700 – 1064 nm, tai atitinkamai ir gautos signalinės bangos tokiame diapazone.



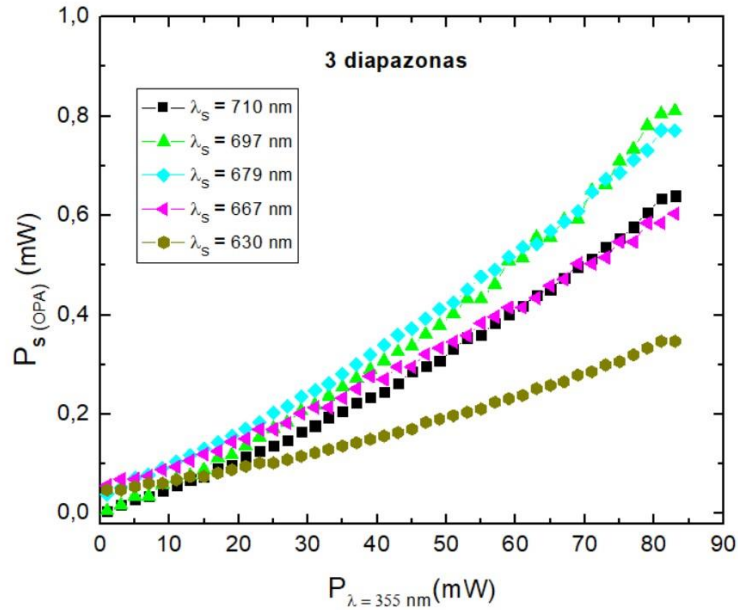
**31 pav.** 3 diapazono signalinės bangos intensyvumo spektrai esant skirtingiems LBO kristalo kampams.

Toliau buvo atliktas tyrimas kaip keičiasi signalinės bangos galia, kai yra keičiamas signalinės bangos ilgis. Ši priklausomybė pateikta 32 pav. kairėje. Matavime buvo naudojama maksimali kaupinimo galia (83 mW) ir maksimali užkrato galia. Iš grafiko galima matyti, kad maksimali signalinės bangos galia, ties 689 nm siekia 0,91 mW, o ties 532 nm 0,007 mW. 32 pav. dešinėje taip pat pateikta ir koks yra maksimalus 3 diapazono parametrinio šviesos stiprintuvo keitimo efektyvumas ( $\eta$ ), formulė pateikta (37). Didžiausias efektyvumas gautas ties 689 nm (2,1%), o mažiausias ties 532 mW (0,01%). Tokia galia ir toks efektyvumas gautas dėl užkrato spinduliuotės galios, kadangi užkrato maksimali galia siekė tik 2,24 mW. Užkrato galia didėjant bangos ilgiui mažėja (30 pav.), tačiau signalinės bangos galia, didėjant bangos ilgiui kaip tik didėja (32 pav.), tai yra todėl, kad užkrato bangos ilgių didėjimas, atitinka signalinės bangos ilgių mažėjimą (pavyzdžiui: jei užkrato bangos ilgis 1064 nm, tai signalinės bangos ilgis 532 nm, o jeigu užkrato 782 nm, tai signalinės 650 nm).



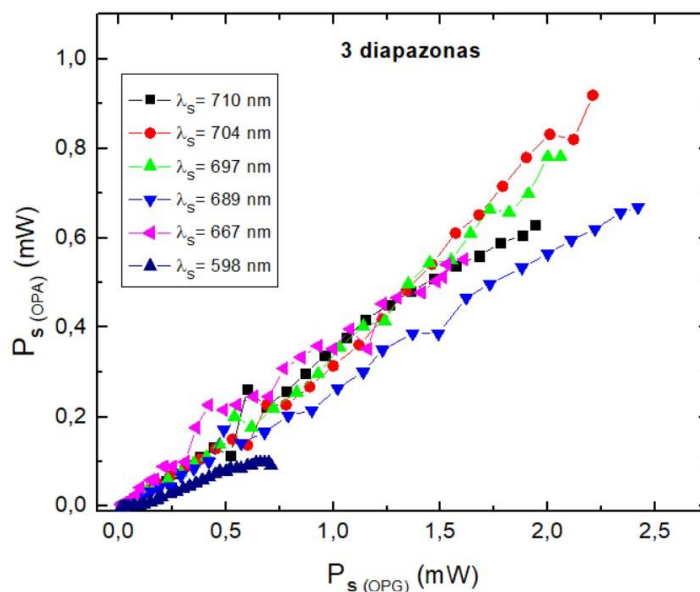
**32 pav.** Kairėje: Signalinės bangos galios kitimas kintant signalinės bangos ilgiui, kai kaupinimo galia yra maksimali ( $P_{\lambda=355\text{ nm}} = 83\text{ mW}$ ); dešinėje: OPA keitimo efektyvumai .

Darbe taip pat ištirta ir signalinės bangos galios priklausomybė nuo užkrato spinduliuotės galios, kai buvo maksimali kaupinimo galia (83 mW). Šių priklausomybių grafikas yra pateiktas 33 pav. Matavime užkrato galia keitėsi, kai buvo keičiama MgO:PPLN OPG kaupinimo galia. Iš 33 pav. galima matyti, kad maksimali signalinės bangos galia atitiko maksimalią užkrato spinduliuotės galią - kai buvo mažinama užkrato galia, signalinės bangos galia mažėjo. Tai yra susiję su užkrato intensyvumo mažėjimu ir užkrato spektro siaurėjimu. Kai mažėja užkrato kaupinimo galia, siaurėja ir užkrato spektras ir dėl to kaip tik gali padidėti atskirų spektro komponentių intensyvumas, tačiau kai yra mažinama užkrato kaupinimo spinduliuotės galia, atitinkamai mažėja ir pačio užkrato spinduliuotės galia, todėl keičiasi atskirų spektro komponentių intensyvumas ir mažėja signalinės bangos galia.



**33 pav.** Signalinės bangos galios priklausomybė nuo  $P_{s(OPG)}$ , kai maksimali kaupinimo galia ( $P_{\lambda=355 \text{ nm}} = 83 \text{ mW}$ ).

Toliau taip pat buvo ištirta ir signalinės bangos galios priklausomybė nuo kaupinimo bangos galios, ji pateikta 34 pav. Jeigu yra mažinama kaupinimo galia tai signalinės bangos galia mažėja tiesiškai. Signalinės bangos parametrinio stiprinimo slenkstis yra prie labai mažų galių ir jis panašus daugeliui bangos ilgių, taip yra dėl to, kad yra naudojamas užkratas ir stiprinimas prasideda jau nuo užkrato spinduliuotės. Slenksčio mažėjimą taip pat gali lemti ir erdvinio nunešimo kampas kristale bei kristalo netiesinės sąveikos efektyvumas.



**34 pav.** Signalinės bangos galios priklausomybė nuo  $P_{\lambda=355 \text{ nm}}$ , kai  $P_{s(OPG)}$  galia maksimali.

Apibendrinant matome, kad sukonstruota subnanosekundinių impulsų kombinuota parametrinio stiprinimo sistema LBO kristalo pagrindu veikia, tačiau sugeneruota skirtuminio dažnio banga (signalinė banga) nėra visoje regimoje spektro srityje. Norint turėti OPA visoje regimoje srityje, reikia turėti užkrato spinduliuotės šaltinį, kurio diapazonas būtų platesnis. Visi atlikti matavimai pasitarnaus ateityje kuriant efektyvesnes parametrinio šviesos stiprintuvo schemas. Tolimesnės tyrimų kryptys – 2 diapazono užkrato šaltinio optimizavimas ir parametrinio šviesos stiprintuvo kūrimas visoje regimoje spektro srityje.



## Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Sukonstruota, ištirta ir optimizuota subnanosekundiniais impulsais kaupinama LBO kristalo kombinuota parametrinio šviesos stiprinimo sistema, kaip užkratą naudojant sugeneruotą signalinę bangą MgO:PPLN OPG ir jos antrą harmoniką (2H).
2. Eksperimentiškai pasiektas signalinės bangos derinimo diapazonas 426 – 475 nm spektro srityje (1 diapazonas) ir 532 – 710 nm (3 diapazonas), kuri riboja užkrato spinduliuotės spektro derinimo ribos (atitinkamai 1400 – 2128 nm ir 700 – 1064 nm).
3. Maksimalus pasiektas parametrinio šviesos stiprintuvo keitimo efektyvumas priklauso nuo užkrato šaltinio spinduliuotės intensyvumo: 1 diapazone efektyvumas yra 42,1%, o 3 diapazone 2,1%. 1 diapazone pasiektas soties veikimo režimas rodo, kad prietaisas yra optimizuotas esamomis sąlygomis.
4. Skaitinio modeliavimo rezultatai kokybiškai sutapo su matavimų duomenimis. Tiek eksperimento matavimai laike koreliuotų pavienių fotonų metodu, tiek skaitinis modeliavimas patvirtino, kad 1 diapazone signalinės bangos impulsų trukmės yra subnanosekundžių trukmių diapazone.

Gabrielė Stanionytė

### **Subnanosekundinių impulsų kombinuotos parametrinio stiprinimo sistemos optimizavimas**

Kadangi lazerių spinduliuotės bangos ilgį labai sunku pakeisti ir jis dažniausiai yra fiksuotas, praktikoje naudojami parametriniai šviesos generatoriai ir stiprintuvai, kurie leidžia tolygiai derinti bangų ilgius plačiame spektro ruože. Šie prietaisai gali būti naudojami įvairiose srityse: tiek spektroskopijoje, tiek įvairių cheminių medžiagų detekcijoje, netiesinėje mikroskopijoje, dujų ar lazerinių nuotolių detektavime, biofotonikoje, biomedicinoje (odos ligų gydymas, tatuiruočių šalinimas) ar kitose srityse. Šiomis dienomis jau yra sukurta ganėtinai daug parametrinių šviesos stiprintuvų ir generatorių tiek ilgų impulso trukmių (daugiau nei 1 ns), tiek ultratrumpų (mažiau nei 100 ps) impulso trukmių diapazone, tačiau subnanosekundinių trukmių srityje (daugiau už 100 ps, tačiau mažiau nei 1 ns) sukurtų šių prietaisų yra nedaug.

Šio darbo tikslas – sukonstruoti ir ištirti subnanosekundiniais impulsais kaupinamą kombinuotą parametrinio stiprinimo sistemą bei ją optimizuoti. Kaip užkratus naudojant sugeneruotą signalinę bangą MgO:PPLN OPG ir jos 2H

Darbe buvo ištirtos energinės, spektrinės ir laikinės OPA charakteristikos. Skirtuminio dažnio bangos (signalinės bangos) derinimo diapazonas 1 diapazone gautas 426 – 475 nm, o 3 diapazone 532 – 710 nm, kurį riboja užkrato spinduliuotės spektro derinimo ribos (1400 – 2128 nm ir 700 – 1064 nm). 1 diapazone maksimali signalinės bangos galia 475 nm bangos ilgiui buvo 27 mW, o pilnas keitimo efektyvumas ties 475 nm gautas 42,1%, 3 diapazone maksimali galia 0,91 mW, o efektyvumas 2,1% ties 689 nm. 1 diapazone buvo pasiektas LBO OPA soties veikimo režimas, kai kaupinimo galia 85 mW, kuris rodo, kad prietaisas yra optimizuotas. Atlikti skaitinio modeliavimo rezultatai parodė kokybiškai panašius rezultatus į eksperimento rezultatus.

## Summary

Gabriele Stanionyte

### **Optimization of Subnanosecond Pulse Combined Optical Parametric Amplifier System**

Because the wavelength of laser radiation is very difficult to change and is usually fixed, in practice certain devices called parametric light generators and amplifiers, which allow the wavelengths to be evenly change over a wide spectrum. These devices can be used in spectroscopy, biophotonics, detection of various chemicals, nonlinear microscopy, gas or laser range detection, biophotonics, biomedicine and in other areas. Quite a number of parametric light amplifiers and generators have been developed these days in the range of long pulse durations (more than 1 ns), ultrashort (less than 100 ps) pulse durations, however subnanosecond pulse (less than 1 ns and more than 100 ps) generators only few have been invented.

The purpose of this work was to construct and investigate combined and optimized optical parametric amplifier system and used generated signal wave and second-harmonic generation in signal wave in MgO:PPLN OPG as a seed.

In this work the spectral, energy and temporal characteristics of OPA were measured. The difference frequency wave (signal wave) tuning range was 426 – 475 nm in range 1, and in range 3 was 532 – 710 nm, which was limited by the tuning limits of the seed radiation spectrum (1400 – 2150 nm and 700 – 1064 nm). The maximum signal power in range 1 at 475 nm was 27 mW and the overall conversion efficiency at 475 nm obtained 42,1%, in range 3 the maximum signal power was 0,91 mW, efficiency 2,1% at 689 nm. In range 1 saturation mode of LBO OPA operation was achieved with a pump power of 85 mW, which indicates that the device is optimized. Furthermore, numerical simulations displayed qualitatively similar results to the experimental results.

## Literatūros sąrašas

- [1] <https://www.rp-photonics.com> (lankyta 2023-03-24).
- [2] A. Dubietis, *Netiesinė optika*. (Vilniaus Universiteto leidykla, Vilnius 2011).
- [3] R. L. Sutherland, *Handbook of Nonlinear Optics*, (Marcel Dekker, New York 2003).
- [4] K. Fradkin-Kashi, A. Arie, P. Urenski, and G. Rosenman, Mid-infrared difference-frequency generation in periodically poled KTiOAsO<sub>4</sub> and application to gas sensing, *Optics Letters* **25**(10), 743 (2000).
- [5] A. Fix, C. Büdenbender, M. Wirth, M. Quatrevalet, A. Amediek, C. Kiemle and G. Ehret, Optical Parametric Oscillators and Amplifiers for Airborne and Spaceborne Active Remote Sensing of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, *Proc. SPIE* **8182**, 818206 (2011).
- [6] S. Cussat-Blanc, A. Ivanov, D. Lupinski, and E. Freysz, KTiOPO<sub>4</sub>, KTiOAsO<sub>4</sub>, and KNbO<sub>3</sub> crystals for mid-infrared femtosecond optical parametric amplifiers: Analysis and comparison, *Applied Physics* **B 70**(Suppl. 1), 247–252 (2000).
- [7] K. Thyagarajan and A. Ghatak, *Lasers: Fundamentals and Applications* (Springer Science & Business Media, London, 2010).
- [8] D. Richter, B. P. Wert, A. Fried, P. Weibring, J. G. Walega, J. W. C. White, B. H. Vaughn and F. Tittel, High-precision CO<sub>2</sub> isotopologue spectrometer with a difference-frequency-generation laser source, *Optics Letters* **34**(2), 172-174 (2009).
- [9] H. Ishizuki and T. Taira, Mid-Infrared optical-parametric generation pumped by sub-nanosecond microchip laser, *Optics Express* **24**(2), 1046-1052 (2016).
- [10] L. Liu *et al.*, Sub-nanosecond periodically poled lithium niobate optical parametric generator and amplifier pumped by an actively Q-switched diode-pumped Nd : YAG microlaser, *Laser Physics* **27**(5), 1–6 (2017).
- [11] J. Fève, Continuous tuning of a microlaser-pumped optical parametric generator by use of a cylindrical periodically poled lithium niobate crystal, *Optics Letters* **28**(12), 1028–1030 (2003).
- [12] E. Hérault, S. Forget, G. Lucas-leclin, P. Georges, and U. Paris-sud, Continuously tunable visible compact laser source using optical parametric generation in microlaser-pumped periodically poled lithium niobate, *Advanced Solid-State Photonics* 10–13 (2003).
- [13] M. D. Cocuzzi, K. L. Schepler, and P. E. Powers, Narrow-Bandwidth, Subnanosecond, Infrared Pulse Generation in PPLN Pumped by a Fiber Amplifier – Microchip Oscillator, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **15**(2), 372–376 (2009).
- [14] G. Marchev, P. Dallochio, F. Pirzio, A. Agnesi, G. Reali, V. Petrov, A. Tyazhev,

- V.Pasiskevicius, N. Thilmann and F. Laurell, Sub-nanosecond, 1–10 kHz, low-threshold, non critical OPOs based on periodically poled KTP crystal pumped at 1,064 nm, *Applied Physics* **109** (2), 211-214 (2012).
- [15] V. Petrov, G. Marchev, P. G. Schunemann, A. Tyazhev, K. T. Zawilski and T. M. Pollak, Subnanosecond, 1 kHz, temperature-tuned, noncritical mid-infrared optical parametric oscillator based on CdSiP<sub>2</sub> crystal pumped at 1064 nm, *Optics Letters* **35**(8), 1230-1232 (2010)
- [16] J. J. Zayhowski, Periodically poled lithium niobate optical parametric amplifiers pumped by high-power passively Q-switched microchip lasers, *Optics Letters* **22**(3), 169-171 (1997).
- [17] A. C. Chiang, Y. C. Huang, Y. W. Fang, and Y. H. Chen, Compact, 220-ps visible laser employing single-pass, cascaded frequency conversion in monolithic periodically poled lithium niobate, *Optics Letters* **26**(2), 66-68 (2001).
- [18] Kai Zhong *et al.*, Tunable narrow-linewidth high-peak-power sub-nanosecond optical parametric generator by injection seeding, *Optics Express* **30**(10), 16479-16488 (2022).
- [19] Jonas Banys, Justina Savickytė, Ona Balachninaite, Simona Armalyte, Viktorija Tamulienė, Vygandas Jarutis and Julius Vengelis, Performance investigation of high-efficiency widely tunable subnanosecond opticalparametric generator and amplifier based on MgO:PPLN, *Optics Express* **30**(13), 23163 - 23176 (2022).
- [20] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics* ed. 3 (Academic press, New York 2008).
- [21] O. Balachninaite, R. Butkus, E. Gaižauskas, V. Kudriašov, M. Maciulevičius, V. Sirutkaitis, V. Smilgevičius, V. Vaičaitis, *Netiesinės optikos laboratoriniai darbai*. (Vilniaus Universiteto leidykla, Vilnius 2008).
- [22] M. H. Dunn and M. Ebrahimzadeh, Parametric Generation of Tunable Light from Continuous-Wave to Femtosecond Pulses, *Science* **286**, 1513–1518 (1999).
- [23] [http://s.lasercenter.vu.lt/ppt/parametriniai\\_sviesos\\_prietaisai.pdf](http://s.lasercenter.vu.lt/ppt/parametriniai_sviesos_prietaisai.pdf) (lankyta 2023-04-16).
- [24] A. Dubietis, *Lazerių fizika. Paskaitų konspektas*.
- [25] J. J. Zayhowski and U. States, *Microchip Lasers* **2** 415–423 (2017)
- [26] R. Fluck, R. Häring, R. Paschotta, E. Gini, H. Melchior, and U. Keller, Eyesafe pulsed microchip laser using semiconductor saturable absorber mirrors, *Applied Physics Letters* **72**, 3273 (1998).
- [27] J. J. Zayhowski, *Microchip lasers*, *Optical Materials* **11**(2-3), 255–267 (1999).

- [28] R. Bhandari and T. Taira, > 6 MW peak power at 532 nm from passively Q-switched Nd : YAG / Cr 4 + : YAG microchip laser, *Optics Express* **19**(20), 19135–19141 (2011).
- [29] G. J. Spühler, A passively Q-switched Yb : YAG microchip laser, *Applied Physics B* **72**, 285–287 (2001).
- [30] R. Paschotta, R. Fluck, E. Gini, H. Melchior, U. Keller, and R. Ha, Passively Q - switched microchip laser at 1 . 5  $\mu\text{m}$ , *Journal of the Optical Society of America B* **18**(12), 1805–1812 (2001).
- [31] Denker, B, *Handbook of solid-state lasers: materials, systems and applications*, (2013).
- [32] <http://www.standa.lt> (lankyta 2023-04-17).
- [33] David N. Nikogosyan, *Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey*, (Springer New York 2005).
- [34] K. Nakamura, J. Kurz, K. Parameswaran, and M. M. Fejer, Periodic poling of magnesium oxide-doped lithium niobate, *Applied Physics* **91**(7), 4528-4534 (2002).
- [35] T. Ren, J. Yu, M. Sang, W. Fu, W. Ni, Y. Kang, S. Li, Y. Hu and R. Shi, Real-time monitoring in fabrication of PPKTP crystals utilizing electro-optical effect, *Frontiers of Optoelectronics* **1**(1), 151–155 (2008).
- [36] G. D. Miller, Periodically poled lithium niobate: modeling, fabrication and nonlinear-optical performance, Doctoral thesis, Department of electrical engineering, Stanford university (1998).
- [37] G.D. Miller, R.G. Batchko, W.M. Tulloch, D.R.Weise, M.M. Fejer, R.L. Byer: 42%-efficient single-pass CW second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate, *Optics Letters* **22**(24), 1834–1836 (1997).
- [38] T. Graf, G. McConnell, A.I. Ferguson, E. Bente, D. Burns, M.D. Dawson: Synchronously pumped optical parametric oscillation in periodically poled lithium niobate with 1-W average output power, *Applied Optics* **38**(15), 3324–3328 (1999).
- [39] U. Strößner, J.-P. Meyn, R. Wallenstein, P. Urenski, A. Arie, G. Rosenman, J. Mlynek, S. Schiller, A. Peters: Single-frequency continuous-wave optical parametric oscillator system with an ultrawide tuning range of 550 to 2830 nm, *Journal of the Optical Society of America B* **19**(6), 1419–1424 (2002).
- [40] P. Gross, M.E. Klein, H. Ridderbusch, D.-H. Lee, J.-P. Meyn, R.Wallenstein, K.-J. Boller: Wide wavelength tuning of an optical parametric oscillator through electro-optic shaping of

- the gain spectrum, *Optics Letters* **27**(16), 1433–1435 (2002).
- [41] <https://www.thorlabs.com> (lankyta 2023-04-18).
- [42] D. N. Nikogosyan, Lithium Triborate ( LBO ) A Review of Its Properties and Applications, *Applied Physics* **190**, 181–190 (1994).
- [43] <http://lt.wisoptic.com> (lankyta 2023-04-20).
- [44] <https://www.altechna.com/> (lankyta 2023-04-21).
- [45] Mikas Vengris, *Kinetinė spektroskopija: paskaitų konspektas*.
- [46] W. Becker, *Advanced Time-Correlated Single Photon Counting Technique*, (Springer Berlin, Heidelberg 2005).
- [47] D. O'Connor, D. Phillips, *Time-correlated single photon counting* (Academic Press, London 1984).
- [48] <https://www.picoquant.com/> (lankyta 2023-04-28).
- [49] <http://www.iso.org> (lankyta 2023-04-28).
- [50] S. Lin, Y. Tanaka, S. Takeuchi and T. Suzuki, Improved dispersion equation for MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal in the infrared spectral range derived from sum and difference frequency mixing, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **32** (1), 124-126 (1996).
- [51] O. Paul, A. Quosig, T. Bauer, M. Nittmann, J. Bartschke, G. Anstett, and J. A. L'Huillier, “Temperature-dependent Sellmeier equation in the MIR for the extraordinary refractive index of 5% MgO doped congruent LiNbO<sub>3</sub>,” *Appl. Phys. B* **86**(1), 111–115 (2006).
- [52] <http://web.vu.lt/ff/v.pyragaite/index.php?id=Parametrika> (lankyta 2023-05-17).

## Padėka

Noriu išreikšti nuoširdžią padėką doc. dr. Viktorijai Tamulienei už darbe naudoto teorinio modelio kūrimą ir konsultavimą visais su teoriniu modeliu iškilusiais klausimais ir doktorantui Jonui Baniui už pagalbą konstruojant eksperimento schemą ir atliekant matavimus.



## Aprobacija

Studentė yra bendraautorė šių straipsnių:

1. G. Stanionytė, V. Tamulienė, R. Grigonis, and J. Vengelis, Investigation of a widely-tunable subnanosecond BBO-based optical parametric amplifier. Lithuanian Journal of Physics, **62**(1), 1–11 (2022). (<https://doi.org/10.3952/physics.v62i1.4695>).
2. G Stanionytė, E Vėjalytė, V Tamulienė, V Jarutis and J. Vengelis, Subnanosecond widely-tunable in the visible spectrum range LBO based optical parametric amplifier. Journal of Optics, **24**(4), 045506-1-9 (2022). (<https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac58a2>).

Studentė pristatė ar yra bendraautorė šiuose pranešimuose:

1. G. Stanionytė, V. Tamulienė, J. Vengelis, Investigation of parametric amplification system for subnanosecond pulses, 44th Lithuanian National Physics Conference, October 6 – 8, Vilnius, Lithuania 2021.
2. G. Stanionytė, J. Vengelis, Construction and investigation of subnanosecond OPG/OPA, 64th International conference for students of physics and natural sciences “Open Readings 2021”, March 16 – 19, Vilnius, Lithuania 2021.
3. G. Stanionytė, V. Tamulienė, J. Vengelis, R. Grigonis, Construction and investigation of BBO subnanosecond optical parametric amplifier, 65th International conference for students of physics and natural sciences “Open Readings 2022”, March 15 – 18, Vilnius, Lithuania 2022.
4. J. Vengelis, G. Stanionytė, E. Vėjalytė, V. Tamulienė and V. Jarutis, Investigation of LBO and BBO subnanosecond optical parametric amplifiers operating in the visible spectrum range, International conference “SPIE Photonics Europe”, April 3 – 7, Strasbourg, France 2022
5. V. Tamulienė, G. Stanionytė, J. Vengelis, Tunable Optical Parametric Amplification of Subnanosecond Light Pulses in LBO and BBO Nonlinear Crystals, ECAMP14 14th European conference on Atoms Molecules and Photons June 27- July 1, 2022 Vilnius, Lithuania.
6. J. Vengelis, G. Stanionytė, S. Armalytė, V. Tamulienė, Investigation of dual-crystal subnanosecond LBO optical parametric amplifier operating in the visible spectrum range,

10th EPS-QEOD Europhoton conference, 28 August – 2 September, 2022, Hannover, Germany.

7. A. Stravinskaitė, G. Stanionytė, J. Banys, J. Vengelis, Development and investigation of subnanosecond pulse combined optical parametric amplifier system, 66th International conference for students of physical and natural sciences “Open Readings 2023”, April 18 – 21, Vilnius, Lithuania 2023.