

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Ryčard Lebed

**1.3 μm BANGOS ILGIO LAZERIO IMPULSŲ GENERACIJA IR STIPRINIMAS Nd:YVO₄
KRISTALE**

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos studijų programa

Studentas

Ryčard Lebed

Leista ginti

2021-05-18

Darbo vadovas

dr. Aleksej Rodin

Centro direktorius

prof. Aidas Matijošius

VU Konsultantas

dr. Martynas Peckus

Vilnius, 2021

Turinys

1. Literatūros apžvalga	4
2. Teorinis įvadas.....	6
2.1 Aktyvios lazerinės terpės Nd:YVO ₄ savybės	6
2.2 Nuolatinės veikos stiprintuvai	8
2.3 Impulsinis stiprinimas	10
2.4 Išilginis kaupinimas	10
2.5 Šiluminiai efektai, šiluminis lęšis.....	11
2.6 Lazeriniai rezonatoriai.....	14
2.7 Trumpų impulsų generavimas moduluojant rezonatoriaus kokybę	15
3. Optinio stiprinimo schemas.....	17
4. Matavimų metodikos.....	19
4.1 Lazerinio pluošto skirstinio matavimas.....	19
4.2 Lazerio išvadinės galios matavimas.....	19
4.3 Spektro matavimas	19
4.4 Lazerio impulso trukmės nustatymas	20
4.5 Pluošto kokybės M^2 matavimai	20
5. Teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai.....	21
5.1 Šiluminio lęšio modeliavimas	21
5.2 Šiluminio lęšio matavimas	23
5.3 Impulsinės kaupinimo veikos realizavimas ir optimalios kaupinimo impulsų trukmės nustatymas.....	26
5.4 Skaidulinio 1064 nm bangos ilgio užkrato impulsų stiprinimo tyrimas.....	27
5.5 Nd:YAP 1341.5 nm bangos ilgio užkrato impulsų stiprinimo tyrimas	30
5.6 1342 nm bangos ilgio generacijos tyrimas Nd:YVO ₄ kristaluose.....	31
5.7 Kokybės moduliavimo 1342 nm bangos ilgio Nd:YVO ₄ osciliatorius naudojant pasyviają užtūrą V:YAG	33
5.8 1342 nm bangos ilgio impulsų dviejų ir keturių lėkių stiprinimas	34
6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados.....	40
7. Rezultatų sklaida.....	40
8. Literatūros sąrašas.....	41
Santrauka.....	43
Summary.....	44

Ivadas

Maliarija – viena labiausiai paplitusių ligų pasaulyje – kasmet suserga šimtai mln. gyventojų [1]. Šios ligos moksliniai tyrimai prasidėjo 1880 m., kai Nobelio premijos laureatas C. Laveran atrado pirmuosius parazitus sergančių žmonių kraujo eritrocituose [2]. Efektyvios vakcinės nuo maliarijos nėra, o sunkiausiais atvejais mirtingumas siekia 20% [1]. Ankstyva maliarijos diagnozė ir gydymas padeda sumažinti ligos sunkumą ir užkirsti kelią paciento mirčiai. Dažniausiai maliarija diagnozuojama atliekant kraujo lašo mikroskopinius tyrimus arba naudojantis greitais diagnostiniais testais (*ang. rapid diagnostic tests*). Abu metodai turi savo trūkumus. Mikroskopijos atveju – reikalinga speciali įranga, kuri gali būti ne visur prieinama, bei rezultatų tikslumas priklauso tiek nuo tyrėjo įgūdžių, tiek nuo kraujo bandinio. Testo atveju – mažas jautrumas, kas neleidžia tiksliai diagnozuoti maliarijos ligą ankstyvaisiais jos vystymosi etapais.

Pastaraisiais metais vykdomi neinvazinės maliarijos diagnostikos tyrimai, pagrįsti optoakustiniu principu kai sub-ns trukmės lazerio impulsas į kraujagysles sklinda per odą, o garso atsakas neša informaciją apie užkrėstų ląstelių buvimą. Diagnostika vyksta akimirksniu ir be skausmo. Tačiau prietaisai, kurių pagrindą sudaro kelių ns trukmės ir 532 nm bangos ilgio lazeriai turi savo ydų: didžiulė sugertis kitų kraujo komponentų, bei pigmentų, tokių kaip melaninas ir didžiulė šilumos dissipacija sveikuose ląstelėse. Kad sumažinti minėtą nereikalingą sugertį, pageidautina sub-ns impulsų trukmės 671 nm bangos ilgio spinduliuotė. Vienas iš būdų pasiekti pageidautinos spinduliuotės parametrus, tai sugeneruoti antrą harmoniką iš 1342 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotės. Tačiau komerciškai prieinami tokio bangos ilgio bei atitinkamos trukmės lazeriai turi savo trūkumų: nepakanka išvadinės energijos arba brangūs, užima daug vietos, reikalauja vandens šaldymo ir sunkiai prižiūrimi.

Šio **darbo tikslas** - ištirti daugialėkius stiprintuvus 1.34 μm bangos ilgio užkrato lazerio spinduliuotės stiprinimui, taikant kaupinimui didelio skaisčio lazerinius diodus.

Siekiant darbo tikslo, buvo sprendžiami šie **uždaviniai**:

- sumodeliuoti ir eksperimentiškai ištirti šiluminį lęšį indukuotą Nd:YVO₄ kristale;
- ištirti 1064 nm užkrato spinduliuotės stiprinimą Nd:YVO₄ kristale dviejų lėkių stiprintuvo atveju, bei nustatyti optimalias stiprinimo sąlygas;
- ištirti 1342 nm spinduliuotės generaciją Nd:YVO₄ kristale;
- ištirti 1.34 μm dviejų ir keturių lėkių spinduliuotės stiprintuvą Nd:YVO₄ kristalo pagrindu bei palyginti su 1064 nm užkrato bangos ilgio stiprinimu.

1. Literatūros apžvalga

Vieni iš pirmųjų tyrėjų pristačiusių anksčiau minėta optoakustinį neinvazinės maliarijos diagnostikos būdą buvo E. Lukianova-Hleba su moksline grupe 2013 metais [3]. Maliarijos parazitas, užkrėstame raudonajame kūnelyje, minta hemoglobinu, ko pasėkoje susikaupia šalutinis produktas hemozoinas (ang. *Hemozoin*). Apšviečiant atitinkama spinduliuote, hemozoinas kaista ir aplink jį susidaro spartus skysčio garavimas, kuris pasireiškia per spartų nm dydžio burbulų susidarymą, jų plėtimąsi ir galiausiai sproginimą. Burbulams susidarant bei sprogstant, suardomas infekuotas raudonasis kūnelis ir susidaro ultragarsinis signalas, kuris yra būdingas maliarijai. Pagal šį principą, šitie mokslininkai ir sukūrė pirmą prototipą tokiai diagnostikai. Tyrime buvo naudojamas 672 nm bangos ilgio, 20 Hz pasikartojamo dažnio lazeris. Spinduliuotė sufokusuojama ir nukreipiama į tiriamąjį mėginį su energijos tankiu 103 mJ/cm^2 ties spinduliuotės sąsmauka. Sugeneruojamas akustinis atgarsis detektuojamas su ultragarsiniu jutikliu ir stebimas per osciloskopą.

Tęsdami savo tyrimus, 2015 metais E. Lukianova-Hleba pristatė prototipą, jau išdirbtą maliarijai diagnozuoti [4]. Šiuo atveju buvo naudojamas kompaktiškas 532 nm bangos ilgio, 200 ps impulsų trukmės, 10 mJ energijos, 400 Hz pasikartojamo dažnio lazeris. Bangos ilgio pokytis, nulemtas, komerciškai atitinkamų 672 nm bangos ilgio lazerių nebuvimo, kadangi bandoma sukurti nebrangų, kompaktišką, stabilų maliarijos diagnozavimo prietaisą. Buvo atlikti eksperimentai su maliarija sergančiais ir sveikais pacientais. Pastebėta, jog didžiulę įtaką rezultatam turi melanino kiekis odoje, kadangi prie 532 nm melaninas gerai sugeria spinduliuotę, taip sudarydamas papildomus akustinius triukšmus, kurie sumažino diagnozavimo tikslumą.

Taip pat, E. Y. Lukianova-Hleba sukūrė laminarinio tekėjimo gydymo metodiką (ang. *laminar flow treatment*) [5]. Infekuotos ląstelės leidžiamos pro 1 mm skersmens vamzdelį, kuris yra apšviečiamas 532 nm bangos ilgio lazeriu. Laminarinis tekėjimas atitaikomas lazerio dažniui (10 – 40 Hz) tam, kad visos infekuotos ląstelės būtų apšviečiamos ir suardytos. Stebėtas infekuotų ląstelių sumažėjimas 95% per 24 valandų gydimą. Toks gydymo būdas, gali suteikti pranašumą, gydant maliariją, atsparią medikamentiniam gydymui.

Buvo nustatytas slenkstinis lazerio impulsų intensyvumas, ties kuriuo įvyksta nm dydžio burbulų generacija. Naudojantis 70 ps trukmės impulsus, buvo nustatytas minimalus nano-burbulų generacijos slenkstinis energijos tankis 10 mJ/cm^2 , tuo tarpu 12 ns trukmės impulsams slenkstinis energijos tankis siekė 40 mJ/cm^2 . Slenkstinio energijos tankio padidėjimas aiškinamas tuo, jog prie ilgesnių impulsų dalis šilumos nueina į išorę (vyksta terminė difuzija), kol dar hemozoinas yra žadinamas. Trumpesnių impulsų atveju, visa šiluma yra sugerama ir nėra jokio šilumos nuotėkio į

šalia esančias sveikas ląsteles, kas sumažina sveikų ląstelių pažeidimo tikimybę. Todėl apie 25% sveikų ląstelių buvo pažeista naudojantis 12 ns lazerį, lyginant su 2% pažeidimų 70 ps trukmės lazeriu. Taigi, buvo nustatyta, jog tokiam gydymui pranašesni yra sub-ns arba pikosekundinės trukmės lazeriai [5].

2015 m. C. Cai ir K.A. Carey tyrė, anksčiau minėtą, diagnozavimo metodą, bei nano-burbulų iniciavimo procesą naudodami 3 skirtingus bangos ilgius: 532 nm, 671 nm ir 820 nm [6]. Šiame darbe buvo naudojamos lazerio pasikartojimo dažnis 10 kHz ir impulsų trukmė 5 – 10 ns. Nustatytas santykis tarp hemozoino sugertos spinduliuotės ir raudonųjų kūnelių sugertos spinduliuotės. Šis santykis buvo 6 kartus didesnis prie 671 nm bangos ilgio nei prie 532 nm, kas leidžia pasiekti didesnę diagnozavimo tikslumą, bei diagnozuoti maliariją ankstesnėse jos vystymosi etapuose. Taigi nustatyta, jog 671 nm bangos ilgio spinduliuotė yra pranašesnė už 532 nm ir 820 nm bangos ilgio spinduliuotę. Taip pat, minėti tyrėjai nustatė slenkstinę energijos tankį, inicijuojantį nano-burbulų sprogamą: 35 mJ/cm² apšviečiant 532 nm bangos ilgiu ir 110 mJ/cm² apšviečiant 671 nm bangos ilgio spinduliuote. Prie didesnių verčių stebėtas akustinio signalo sumažėjimas. Toks akustinio signalo amplitudės sumažėjimas yra, dėl dalinai sugeriamo akustinio signalo, užkrėstų ląstelių suardymo momentu.

Tame pačiame tyrime apšviečiant lazerine spinduliuote užkrėstas ląsteles, C. Cai ir Kai A. Carey stebėjo infekuotų ląstelių fluorescencijos spektrus, kurie irgi yra charakteringi maliarijai [6]. Tėkmės citometrijos būdu (technologija, kurios pagalba, sudaromos sąlygos tirti ląstelę viena, po kitos) jiems pavyko pagerinti maliarijos indentifikavimo kraujyje tikslumą lyginant su nusistovėjusiais kraujo tyrimais. Mažiausias kiekis infekuotų kraujyje ląstelių, kurias jie sugebėjo aptikti, buvo 1000 kartų mažesnis negu standartiniais metodais.

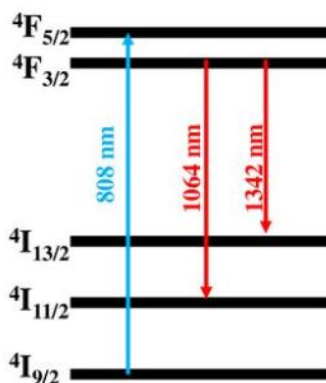
2016 m. Y.A. Menyav ir K.A. Caray savo darbe, tęsė optoakustinio diagnozavimo metodo tyrimą [7]. Šiuo atveju, buvo lyginamas anksčiau minėtas 671 nm bangos ilgio, 5 – 10 ns impulsų trukmės ir 10 kHz pasikartojimo dažnio lazeris, su komerciškai pigiu ir kompaktišku 1060 nm bangos ilgio, kintamos impulsų trukmės (800 ps, 5 ns ir 10 ns) Yb skaiduliniu lazeriu. Testams *in vivo* su pelėmis buvo nustatytas žemesnis slenkstis 671 nm bangos ilgio spinduliuotei, ypač prie mažesnės impulso trukmės. Tačiau taip pat buvo nustatyta, jog apšviečiant 1060 nm bangos ilgio spinduliuote, atitinkamas pelės venas, kurios yra artimiausios pagal dydį ir kraujo tėkmę žmogaus venoms, galima diagnozuoti maliariją su dideliu tikslumu, netgi jeigu bangos ilgis neoptimalus. Minimalus kiekis užkrėstų ląstelių kraujyje reikalingų maliarijai nustatyti yra 1000 kartų mažesnis, negu standartiniais kraujo tyrimais naudojamais maliarijai aptikti.

2020 m. pabaigoje K. Georgiev ir D.N. Georgieva paskelbė tarptautinėje konferencijoje Nd:YAP kristalo pagrindu, veikiančio lazerio su diodiniu kaupinimu tyrimų rezultatus [8]. Esant 100-125 Hz pasikartojimo dažniui jie išmatavo ~ 0.5 mJ išvadinių impulsų energiją. Kompaktiniame spinduolyje, naudojant V:YAG kristalą pasyviai kokybės moduliacijai, jie pasiekė 0.73 ns impulsų trukmę bei ~1 MW impulso smailinę galią. Šis lazeris buvo projektuojamas būtent maliarijos neinvazinei diagnostikai.

2. Teorinis įvadas

2.1 Aktyvios lazerinės terpės Nd:YVO₄ savybės

Neodimis (Nd) – cheminis elementas priklausantis retųjų žemės elementų grupei naudojamas trivalenčio jono formoje (Nd⁺³) kaip aktyvatorius kristalinėse arba stiklinėse matricose. Viena iš tokių matricų į kurią įterpiamas neodimis yra itrio vanadatas (YVO₄), taip sudarant aktyvią lazerinę terpę (Nd:YVO₄). Neodimio itrio vanadato pranašumas, lyginant su plačiai ištirtu Nd:YAG, yra penkis kartus didesnis stiprinimo skerspjūvis prie 1064 nm ir didesnė 808 nm bangos ilgio spinduliuotės sugertis. Šis Nd:YVO₄ privalumas buvo žinomas nuo XX amžiaus vidurio. Tačiau, tais laikais, ilgų Nd:YVO₄ kristalų išauginti nepavyko, o kadangi pagrindinis lazerinis kaupinimo elementas buvo lempos, kilo sunkumas tirti šiuos kristalus. Tyrimai suaktyvėjo, kai buvo sukurti didžiulio skaisčio lazeriniai diodai. Atsirado galimybė kaupinti mažų matmenų Nd:YVO₄ kristalus. Ganėtinai platus sugerties spektro plotis (apie 1.5 nm ties 808 nm) ir trumpas sugerties ilgis (34 cm⁻¹ Nd:YVO₄ lyginant su 7.3 cm⁻¹ Nd:YAG) suteikė galimybę generuoti lazerinę spinduliuotę kelių milimetrų ilgio kristaluose [9].



1 Pav. Principinė Nd:YVO₄ energijos lygmenų schema.

Pagrindiniai Nd:YVO₄ spinduliuojami bangos ilgiai yra 1342 nm ir 1064 nm. Energijos lygmenų schemoje (1 Pav.) 1342 nm spinduliuojimą atspindi šuolis iš 4F_{3/2} metastabilaus lygmens į 4I_{13/2} pagrindinį lygmenį, tuo tarpu 1064 nm spinduliuojimą, atspindi šuolis iš 4F_{3/2} į pagrindinio

lygmens polygmenį ${}^4I_{11/2}$ (1 Pav.) [10]. Pagrindinis kaupinimo bangos ilgis Nd:YVO₄ lazerinei spinduliuotei yra 808 nm (1 Pav.), nors norint sumažinti kvantinį defektą, galima kaupinti tiesiai iš pagrindinio energijos lygmens į ${}^4F_{3/2}$ lygmenį 880 nm spinduliuote.

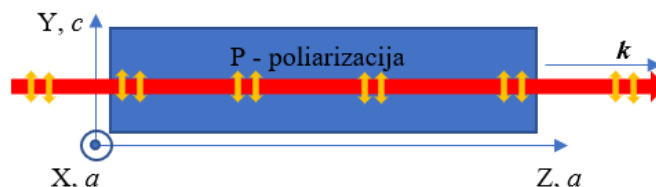
Lentelė 1. Pagrindiniai fizikiniai parametrai Nd:YVO₄ legiruoto 1% Nd³⁺ prie skirtingų bangos ilgių.

λ , nm	1064	1342
n_c	2.168	2.159
n_a	1.958	1.951
k_a , W/(mK)	5.1	
k_c , W/(mK)	5.23	
$\sigma_{//c}$, $\times 10^{-19}$ cm ²	25	6
$\sigma_{\perp c}$, $\times 10^{-19}$ cm ²	6.5	-
τ , μ s	90	110
α , cm ⁻¹	31	
dn/dT , $\times 10^{-6}$ K ⁻¹	8.5	

Šioje lentelėje pateikti dydžiai: λ – spinduliuotės bangos ilgis, n_a , n_c – lūžio rodikliai, k_a , k_c – šiluminis laidumo koeficientas, $\sigma_{//c}$, $\sigma_{\perp c}$ – stiprinimo skerspjūviai [11], τ – metastabilaus lygmens gyvavimo trukmė, α – sugerties koeficientas, dn/dT – termo-optinis koeficientas.

Pagrindiniai Nd:YVO₄ trūkumai, tai trumpa metastabilaus lygmens gyvavimo trukmė (apie $\tau = 100$ μ s, Nd:YAG $\tau = 200$ μ s), bei blogas šilumos laidumas (šilumos laidumo koeficientas 5.23 W/(mK) lyginant su 14 W/(mK) Nd:YAG [9]). Žemas šilumos laidumas sąlygoja indukuoto šiluminio lęšio padidėjimą. Lyginant su Nd:YAG, neodimio vanadato kristalo terminio pažeidimo slenkstis yra mažesnis, kas apriboja galimybę pasiekti didelį lazerinės spinduliuotės intensyvumą.

Nd:YVO₄ yra anizotropinė medžiaga. Dėl to, stiprinimas ir sugertis priklauso nuo kristalo pjūvio, kitaip sakant, nuo spinduliuotės sklaidimo optinės ašies atžvilgiu. Vienašis Nd:YVO₄ kristalas gaminamas dviejų pagrindinių pjūvių a ir c . Pirmuoju atveju, a - pjūvio (*ang. a - cut*), kaupinimas yra sugeriamas ir stiprinamas tik P - poliarizacijos spinduliuotės atveju. Kai spinduliuotės poliarizacija yra lygiagreti a ašiai (S - poliarizacija) sugertis ir stiprinimas mažesnis (2 Pav.). Sugerties ilgis 808 nm spinduliuotės P - poliarizacijai $\alpha = 31$ cm⁻¹, tuo tarpu S - poliarizacijai $\alpha = 10$ cm⁻¹, o stiprinimo skerspjūvis kinta tarp $\sigma = 25 \times 10^{-19}$ cm² P - poliarizacijai, iki $\sigma = 6.5 \times 10^{-19}$ cm² S - poliarizacijai 1064 nm bangos ilgiui [12]. Parametrų skirtumas, dėl medžiagos anizotropijos pateiktas 1 lentelėje.



2 Pav. Nd:YVO₄ *a* - pjūvio kristalo optinės ašies schema, stiprinant P - polarizacija. X,Y,Z - geometrinės ašys (Dekarto koordinatinių ašys), *c*, *a* – kristalinės ašys, *k*- bangos vektorius.

Neodimio vanadato *a* - pjūvio kristalo pagrindu, buvo sukurta nemažai lazerių, spinduliuojančių 1064 nm ir 1342 nm bangos ilgius per pastaruosius 20 metų. Pradėdant, nuo rekordinio 35 W galios, 1342 nm bangos ilgio nuolatinės veikos lazeriu [13]. Šiuo atveju naudotas 0.3% Nd legiruotas 12×10×1 mm³ Nd:YVO₄ kristalas, patalpintas į 450 mm hybridinį rezonatorių. Gautas 35 W išvadinės galios lazeris su gera pluošto kokybe ($M^2 > 1.3$), kaupinant išilgai 130 W galios lazeriniais diodais. Taip pat, buvo sukurtas nanosekundinis lazeris spinduliuojantis dviejų bangos ilgių spinduliuotę: 1064 nm ir 1342 nm [14]. Tas realizuota Nd:YVO₄ *a* - pjūvio kristale naudojant optoakustinį kokybės moduliatorių. Spinduliuotė atskiriama naudojant veidrodį, atspindintį 1064 nm ir pralaidų 1342 nm bangos ilgio spinduliuotei. Pasiekta maksimali išvadinė galia 1.6 W, su pasikartojimo dažniu 10 kHz.

2.2 Nuolatinės veikos stiprintuvai

Generuojamos lazerinės spinduliuotės galią, arba impulsų energiją, atsižvelgiant į tam tikrus spektrinius ir erdvinius parametrus, galima pastiprinti lazeriniame stiprintuve. Tas daroma, tam, kad pastiprinti jau esamą spinduliuotę iki verčių, kurios tiesiogiai nepasiekiamos iš osciliatoriaus [15].

Lazeriniuose stiprintuvuose, kaip ir osciliatoriuose, kaupinimo dėka, aktyvioje terpėje sukurama užpildos apgrąža. Esant pakankamai užpildos apgrąžai, įvedant atitinkamo bangos ilgio spinduliuotę, dėl priverstinio spinduliavimo įvyksta šviesos srauto stiprinimas.

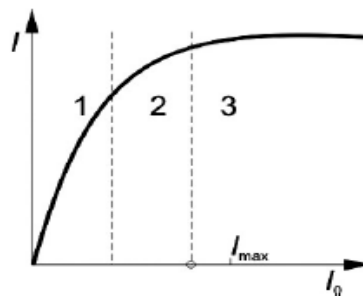
Priverstinio spinduliavimo stiprintuvai, būna vienalėkiai, daugialėkiai ir regeneraciniai, bei skiriasi pagal stiprinamos spinduliuotės veikas: nuolatinė ir impulsinė. Pagrindiniai dalykai į kuriuos reikia atsižvelgti kuriant lazerinį stiprintuvą:

- stiprinimo ir energijos gavimas. Kuriant lazerinius stiprintuvus yra galimas kompromisas tarp didelio stiprinimo ir didelės energijos gavimo;
- grįžtamasis ryšys, kuris gali sukelti parazitinę generaciją;
- potencialūs paviršiaus arba didesni pažeidimai. Didelė impulsų energija gali sukelti difrakcinius efektus arba savifokusavimą, kas gali pažeisti optinius elementus esančius stiprintuve;

- bangos fronto, pluošto arba impulsų formos iškraipymas stiprintuve.

Nagrinėjant nuolatinės spinduliuotės stiprintuvus reiktų atkreipti dėmesį į stiprinimo sotinimo efektą. Sotinimas atsiranda dėl užpildos apgražos kitimo ją veikiant spinduliuote aktyvioje terpėje, kas riboja maksimalų galios stiprinimą. Tas aiškinama tuo, jog užpildos vidutinė vertė nusistovi taip, jog kaupinimo galia išsklaidoma medžiagoje, yra lygi galiai, sugeriamai spinduliuotės. Pagrindinis parametras nusakantis stiprinimą yra G – stiprinimo koeficientas, kuris apibrėžiamas kaip $G = I/I_0$. Čia I – sustiprintos spinduliuotės intensyvumas, I_0 – įvadinės spinduliuotės intensyvumas.

Išvadinės spinduliuotės priklausomybė nuo įvadinės turi tris stiprinimo sritis: tiesinę, eksponentinę ir soties (3 paveikslas) [15].



3 Pav. Principinė spinduliuotės stiprinimo kreivė. 1) tiesinis stiprinimas, 2) eksponentinis stiprinimas, 3) stiprinimo sotis.

Eksponentinį (3 Pav.) mažo signalo lazerinį stiprinimą nusako formulė:

$$I = I_0 e^{(\alpha - \beta)L}. \quad (1)$$

Čia α – stiprinimo koeficientas, β – nuostolių koeficientas, o L – aktyviosios terpės ilgis.

Prie santykinai didesnių lazerinių intensyvumų stiprinimas tampa tiesiškas, priklausomybę nusako formulė (I_s – šiuo atveju soties srovė) (2) (3 Pav.):

$$I = I_0 + \alpha L I_s. \quad (2)$$

Išvadinio signalo vertė pasiekia maksimalią vertę, kai:

$$I_{max} = \frac{\alpha}{\beta} I_s. \quad (3)$$

Stiprintuvo išvadinės spinduliuotės intensyvumas priklauso nuo stiprinimo, nuostolių koeficiento, bei soties intensyvumo. Spinduliuotei sklindant aktyviaja terpe ir pasiekus pusiausvyrą tarp sugertos ir išsklaidytos energijos, stiprinimas toliau neauga (3 Pav).

2.3 Impulsinis stiprinimas

Anksčiau nagrinėtame stiprinimo atveju, daroma prielaida, jog stiprinimo spinduliuotė yra artima nuolatinei. Tačiau, dažnai tenka stiprinti šviesos impulsus, kurių trukmė yra mažesnė už sužadinto lygmens gyvavimo trukmę. Tokiu atveju, kai stiprinimo procesas vyksta daug sparčiau negu kaupinimo procesas, stiprinimas priklauso nuo energijos kiekio sukaupto kristale, prieš stiprinamos spinduliuotės įvedimą. Šiuo atveju mums aktualus yra energijos srauto pokytis [15,16]. Energijos srautas (F) tai energija perėjusi ploto vienetui. Energijos srauto priklausomybė nuo stiprinančios terpės ilgio L :

$$F = F_s \ln \left(1 + e^{\alpha L} \left(e^{\frac{F_0}{F_s}} - 1 \right) \right). \quad (4)$$

Čia, F_s – soties energijos srautas, F_0 – įvedamos energijos srautas, F – išvedamos energijos srautas, α – stiprinimo koeficientas.

Įvedus stiprinimo koeficiento formulę gauname Franco-Nodviko lygtį:

$$G = \frac{F_s}{F_0} \ln \left(1 + G_0 \left(e^{\frac{F_0}{F_s}} - 1 \right) \right). \quad (5)$$

Kaip ir nuostoviosios spinduliuotės stiprinimo atveju kai $F_0 \ll F_s$ yra eksponentinis mažo signalo stiprinimas (6), o kai $F_0 \gg F_s$ – tiesinis stiprinimas (7):

$$F = F_0 e^{\alpha L}, \quad (6)$$

$$F = F_0 + \alpha L F_s. \quad (7)$$

Didėjant energijos srautui, ypač didelio signalo atveju, stiprinimas pasiekia sotį ir išvadinę energijos srauto maksimalią vertę galima išreikšti per sotį:

$$F_{max} = \frac{\alpha}{\beta} F_s. \quad (8)$$

Šiuo atveju β – aktyvios terpės nuostolių koeficientas.

2.4 Išilginis kaupinimas

Kad sukurti užpildos apgražą kristale, kuri vėliau naudojama stiprinimui, aktyviają terpę reikia kaupinti. Optiškas kaupinimo šaltinis turi spinduliuoti kuo didesnę energiją spektrinėje dalyje, kurią sugeria aktyvioji terpė. Dažniausiai naudojami, kaupinimo šaltiniai tai inertinių dujų užpildytos išlydžio blykstės ir puslaidininkiniai lazerinei diodai. Šiais atvejais kaupinimo spinduliuotė gaunama

paverčiant elektros srovę į šviesą. Kaupinimas skirstomas į nekoherentinį (naudojamos dujų išlydžio lempos) ir koherentinį (šviesos diodai).

Lazeriniuose dioduose spinduliavimo procesas vyksta dėl perteklinių krūvininkų spindulinės rekombinacijos tiek tiesioginėse, tiek netiesioginiuose juostiniuose šuoliuose. Perteklinei krūvininkai injektuojami šviesos diode iš p-n sandūros, kai pastaroji yra įjungta laidžiąja kryptimi. Puslaidininkinės medžiagos energijos juostos plotis šiuo atveju griežtai lemia lazerio bangos ilgį. Aktualiausi šviesos diodai kieto kūno lazeriuose InGaAs.

Kieto kūno lazerių aktyviosios terpės kaupinamos diodų skirstomos pagal kaupinimo įvedimo geometriją: skersinis ir išilginis. Skersinės spinduliuotės atveju kaupinama spinduliuotė iš diodų nukreipiama į kristalą statmenai spinduliuotei. Išilginiu atveju kaupinimas per skaidulą ir fokusuojančią optiką nukreipiamas į kristalą išilgai stiprinamai spinduliuotei. Išilginio kaupinimo atveju reikia atkreipti dėmesį į tokius aspektus [15]:

- kaupinimo pluošto sąsmaukos dydžio santykį su užkrato pluoštu. Reikia parinkti atitinkamą sąsmaukos skersmenį tam, kad suderinti kaupinimo ir užkrato modas ir pasiekti didelį stiprinimą;
- kaupinimo pluoštas ir lazerinio užkrato pluoštas turi erdviškai persikloti. Tam, kad pasiekti kuo didesnę stiprinimą;
- kaupinimo pluošto intensyvumas turi būti mažesnis negu optinio pramušimo slenkstis.

2.5 Šiluminiai efektai, šiluminis lęšis

Kaupinant lazerine ar plačiajuostė spinduliuote aktyviąją terpę, dalis energijos virsta šiluma. Šiluma aktyviame elemente generuojama dėl:

- kaupinimo ir generavimo kvantų energijos skirtumo, kuris nespinduliniais šuoliais perduodamas matricos gardelei (kvantinis defektas);
- liuminescencijos kvantinio našumo, mažesnio už vienetą. Dalis sužadintų priemaišinių jonų, savo energiją iš viršutinio lazerinio šuolio lygmens, perduoda matricos gardelei ir neišspinduliuoja fotono;
- plačiajuostės nekoherentinio kaupinimo spinduliuotės tiesioginės sugerties aktyvaus elemento matricoje (daugiausia ultravioletinėje ir infraraudonojoje srityje). Dažniausiai aktualu lempiniam kaupinimui.

Dėl kaupinimo sugerties išyla terpė, kuri dažnai yra aušinama nevienodai. Taip susidaro temperatūrinis gradientas, ir terminiai įtempiai kristale, kas turi tiesioginę įtaką lūžio rodiklio

pokyčiui kristale. Du optinio iškraipymo reiškiniai, atsirandantys dėl nevienodo temperatūros aktyviame elemente pasiskirstymo ir jo sąlygotų terminių įtempių, yra:

- šiluminis lęšis;
- šilumos indukuotas dvejetainis lūžimas, dėl fotoelastinio efekto, atsiradus terminiams įtempiams.

Dažniausiai kristalas yra aušinamas tikrai iš išorės, taigi stipriausiai įkaitusi dalis yra centrinė, o arčiau strypo kraštų temperatūra kristalo mažesnė. Tokia temperatūros priklausomybė yra išreiškiama per r^2 (spindulis nuo centro), kristalui. Kadangi lūžio rodiklis proporcingas temperatūrai tai ir jis kinta kvadratiškai. Optinis pluoštas, pereidamas per aplinką su tokiu lūžio rodiklio pasiskirstymu, patiria tokius pat pokyčius, kaip ir perėjęs sferinį glaudžiamąjį lęšį. Šiuos teiginius atvaizduojančios formulės:

$$T(r) = T(r_0) + \frac{P}{4K}(r_0^2 - r^2), \quad (9)$$

$$n(r) = \frac{-P}{4\pi K} \frac{dn}{dT} r^2, \quad (10)$$

$$f = \frac{2\pi w^2 K}{P} \frac{dT}{dn}. \quad (11)$$

$T(r)$ – temperatūra atitolus r nuo centro, $T(r_0)$ – temperatūra prie krašto, I – spinduliuotės intensyvumas, K – šiluminis laidumas, $\frac{dn}{dT}$ – terminis optinis koeficientas, P – sugeneruota šiluminė galia, w – pluošto radiusas, f – židinio nuotolis, $n(r)$ – lūžio rodiklis, r_0 – spindulis kristalo, r – skaičiuojamas spindulis nuo kristalo centro.

Lūžio rodiklio pokytis nuo temperatūros yra pagrindinis reiškinys šiluminio lęšio formavimosi aktyvioje terpėje, tačiau prie didesnių kaupinimo galių, pasireiškia ir kiti procesai didinantys šiluminį lęšį – šiluminiai įtempiai susidarę dėl temperatūros netolygaus pasiskirstymo, bei skersgalio deformacijos efektas. Visus trys reiškiniai aprašo bendra formulė:

$$f = \frac{\pi K w^2}{P} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\varphi} n_0^3 + \frac{a r_0 (n_0 - 1)}{L} \right]^{-1}, \quad (12)$$

w – kaupinimo pluošto sąsmaukos spindulis, α – sugerties koeficientas, $C_{r,\varphi}$ – elastooptinis koeficientas, n_0 – lūžio rodiklis kambario temperatūros sąlygomis, atitinkamam spinduliuotės bangos ilgiui.

Antras lygties narys aprašo terminių įtempių indėlį ir trečias formulės narys aprašo skersgalio deformacijos indėlį į bendrą šiluminį lęšį. Prie mažų kaupinimo galių antras ir trečias formulės narys didžiulės įtakos bendram šiluminiam lęšiui nedaro. Tačiau išilgai kaupinant 140 W spinduliuote mažame pluošto dydyje Nd:YVO₄ kristale – buvo nustatyta, jog šiluminio lęšio, įtempių dalis sudaro 38.5%, o skersgalio deformacijos 21% [17].

Impulsinės veikos atveju temperatūrinio gradiento pasiskirstymas priklausys nuo kaupinimo impulso trukmės ir pasikartojimo dažnio. Jeigu yra kaupinama pavieniu šūviu ir kristalas spėja atvėsti iki kito šūvio, tada temperatūrinis gradientas bus aktualus tik šūvio atveju, ir spinduliuotė praeis tik vieną nusistovėjusi šiluminį lęšį. Tuo atveju, kai spinduliuotės pasikartojimo dažnis didelis ir kristalas nespėja atvėsti iki kito šūvio, tada yra pereinamasis laikotarpis, kol temperatūrinis gradientas kristale nusistovi ir priartėja prie nuolatinės veikos atvejo.

Aukščiau pateiktose formulėse priimta, jog šviesos spinduliuotė eina tolygiai per kristalą, pluoštas tobulai sukolimuotas, o taip pat pluošto dydis yra artimas kristalo dydžiui ir sugertis vyksta per visą kristalą. Išilginio kaupinimo atveju, kaupinimo spinduliuotė fokusuojama į kristalą ir kaupinimas vyksta mažame plote, modelis sudėtingėja. Šiuo atveju šiluminiam lęšiui daro įtaką pluošto sąsmaukos padėtis kristale, bei jos skersmens kitimas išilgai kristalo. Be to, didžiulės sugerties kristaluose, kaip Nd:YVO₄, išilginio kaupinimo atveju didžiuoji dalis spinduliuotės bus sugerta prie kristalo krašto. Atsižvelgiant į tai, susidaro temperatūrinis gradientas išilgai kristalo, o ne tik radialės kryptimi. Taip, pat šiluminis lęšis priklauso nuo kristalo geometrijos bei šilumos nuvedimo geometrijos. Atsižvelgus į visas paminėtas sąlygas yra kuriami, atskiri modeliai norint tiksliai nustatyti šiluminį lęšį. Pritaikant aukščiau pateiktas formules ir pritaikant pluošto geometriją [17], arba skaičiuojant temperatūrinį gradientą kristale [18].

2.6 Lazeriniai rezonatoriai

Būtina bet kurio lazerio dalis yra rezonatorius. Rezonatoriuje sudarytas iš dviejų veidrodžių kurių dėka spinduliuotė gražinama į aktyviają terpę, kuri, dėl sukurtos joje užpildos apgražos, gali stiprinti sklindančią per ją spinduliuotę. Aktyvi terpė gali užimti tik dalį rezonatoriaus arba visą rezonatorių (šiuo atveju atspindintis paviršiai garinami ant lazerinio strypo skersgalių). Paprasčiausias rezonatorius yra dviejų veidrodžių sistema. Vienas iš generuojamos spinduliuotės išvadinių veidrodžių yra dalinai skaidrus. Generacijos slenksčiui sumažinti būtina naudoti veidrodžius, kurių atspindžio koeficientas labai didelis, o sugertis maža. Šiuos reikalavimus tenkina veidrodžiai, gaminami iš daugiasluoksnių dielektrinių dangų. Rezonatorius daugiausia lemia pagrindines generuojamos spinduliuotės charakteristikas: monochromatiškumą, koherentiškumą, kryptingumą ir galią.

Kad sugeneruoti lazerinę spinduliuotę būtina tenkinti sužadavimo sąlygą [15], kuri nusako, jog vieno rezonatoriaus lėkio metu spinduliuotės patiriami nuostoliai turi būti kompensuoti aktyviosios terpės stiprinimu (13). Šiuo atveju į bendrą energijos balansą yra įtraukti naudingieji nuostoliai, dėl dalies spinduliuotės išvedamos per dalinai skaidrų veidrodį (naudingieji nuostoliai, r_1 , r_2), bei nuostoliai dėl spinduliuotės išbarstymo bei sugerties aktyviojoje terpėje ir rezonatoriaus veidrodžiuose (nenaudingi nuostoliai, β).

$$\alpha = \beta + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{r_1 r_2}. \quad (13)$$

Čia α – stiprinimo koeficientas, β – nenaudingų nuostolių koeficientas l – rezonatoriaus ilgis, r_1 , r_2 – veidrodžių atspindžio koeficientai. Kietojo kūno lazeriuose plačiausiai naudojamos rezonatoriaus konfigūracijos [16]:

- Plokščias ($R_1 = R_2 = \infty$);
- Didelio kreivumo spindulio veidrodžių ($R_1, R_2 \gg l$);
- Sferinis ($R_1 = R_2 = l/2$);
- Įgaubtai išgaubtas ($R_1 > l, R_2 = -(R_1 - l)$);
- Pusiausferinis ($R_1 = l, R_2 = \infty$).

Klasikinis rodiklis nusakantis rezonatoriaus stabilumą (14) bei stabilumo sąlyga (15):

$$g_{1,2} = 1 - \frac{d}{R_{1,2}}, \quad (14)$$

$$0 < g_1 g_2 < 1. \quad (15)$$

Čia $R_{1,2}$ – atitinkami rezonatoriaus veidrodžių kreivumo spinduliai, d – rezonatoriaus ilgis, g_1 , g_2 – stabilumo rodikliai.

Kietojo kūno lazeriuose pagrindiniai mechanizmai, iškraipantys rezonatoriaus modų sandarą, yra šiluminiai. Kaip minėta anksčiau, optinis kaupinimas aktyviame elemente sukelia radialųjį temperatūros gradientą, dėl to aktyvioji terpė veikia kaip plonas glaudžiamasis lęšis, kurio židinio nuotolis f atvirkščiai proporcingas kaupinimo galiai. Į tai atsižvelgus, naudojami modifikuoti g_1 ir g_2 parametrai, nusakomi formulės:

$$g_{1,2} = 1 - \frac{d_{2,1}}{f} - \frac{d}{R_{1,2}}. \quad (16)$$

Čia $R_{1,2}$ – atitinkami rezonatoriaus veidrodžių kreivumo spinduliai, d – rezonatoriaus ilgis, g_1 , g_2 – stabilumo rodikliai, f – šiluminio lęšio židinio nuotolis, $d_{2,1}$ – atitinkami atstumai tarp veidrodžių ir šiluminio lęšio. Tuo tarpu, kai plokščias rezonatorius yra realizuojamas naudojant vieną iš veidrodžių, kaip kristalo dangą, prie kurios arti susidaro šiluminis lęšis, toki rezonatorių galima analizuoti, kaip pusiausferinį rezonatorių [22]. Tokio rezonatoriaus pluošto sąsmauka yra ant plokščio veidrodžio, o jos TEM₀₀ modos dydį nusako formulė [15]:

$$w^2 = \frac{\lambda d}{\pi} \sqrt{\frac{g_2}{g_1(1 - g_1 g_2)}}. \quad (17)$$

Čia w^2 – pluošto spindulis, λ – bangos ilgis, d – rezonatoriaus ilgis, R – kreivumo spindulis susidaręs dėl šiluminio lęšio. Čia svarbu atkreipti jog, mažinant rezonatoriaus ilgį pluoštas sąsmaukoje mažėja.

2.7 Trumpų impulsų generavimas moduluojant rezonatoriaus kokybę

Siekiant sugeneruoti nanosekundinius impulsus, kuriami rezonatoriai kuriuose vyksta rezonatoriaus kokybės moduliavimas. Modulatorius patalpinamas į rezonatorių. Kol vyksta aktyvios terpės kaupinimas, rezonatoriuje palaikoma žema kokybė (įnešami dideli nuostoliai). Nesant generavimo, aktyvioje terpėje sukuriama užpildos apgrąža, kuri daug kartų viršija slenkstinę užpildos apgrąžos vertę. Užpildos apgrąža apibrėžtu laiko momentu pasiekia sotį ir tada rezonatoriaus kokybė keičiama (sumažinami nuostoliai). Stiprinimo koeficientui viršijus slenkstinę vertę, reikalingą generacijai pasiekti, spinduliuojamas šviesos lauko intensyvumas sparčiai auga, „šluodamas“ užpildos apgrąžą. Taigi didžioji dalis energijos, sukauptos rezonatoriuje, bus spinduliuojama per labai trumpą laiką vieno milžiniško impulso pavidalu. Tokia osciliatoriaus impulso trukmė yra sąlygota fotono gyvavimo trukmės rezonatoriuje, bei laiko trukmė kuri reikalinga persijungti kokybės modulatoriui iš blogo pralaidumo į gerą kokybę.

Efektyvus milžiniškojo impulso generavimas pasiekiamas tuo atveju, kai sukaupta aktyvioje terpėje užpildos apgrąža ΔN itin viršija slenkstinę vertę ΔN_{sl} . Kitaip tariant, kuo didesnė dalis atomų sužadinama prieš pagerinant rezonatoriaus kokybę, tuo didesnė dalis rezonatoriuje sukauptos

energijos spinduliuojama milžiniškojo impulso pavidalu. Jeigu užpildos sukaupta tiek, kad tenkinama sąlyga $\Delta N \gg \Delta N_{st}$, tai maksimalią galią galima įvertinti iš paprastos formulės:

$$P_{max} = \frac{\Delta N h f}{2\tau}. \quad (18)$$

Čia ΔN – užpildos apgrąža sukaupta rezonatoriuje, h – Planko konstanta, f – dažnis, τ – modulatoriaus persijungimo trukmė. Svarbu atkreipti dėmesį, jog maksimali galia priklauso nuo modulatoriaus perjungimo trukmės, jeigu modulatorius persijungimo trukmė didesnė negu fotono gyvavimo trukmė rezonatoriuje tada milžiniškųjų impulsų generaciją neįvyks, o susikurs vora mažesnių lazerinių impulsų.

Yra keli moduliatorių tipai skiriasi jie perjungimo greičiu [16]:

- Mechaninis (besisukantis veidrodžiai, $\tau \approx 400$ ns)
- Akustooptinis (kvarco kristalas su pjezoelektriniu keitikliu, $\tau \approx 100$ ns)
- Elektrooptinis (Pokelso narvelis, $\tau \approx 10$ ns)
- Pasyvus (dažinių centrų kristalai, $\tau \approx 1 - 50$ ns)

Pasyviam kokybės modeliavimui naudojamos šviesą sugeriančios medžiagos, kurioms būdinga sugerties sotis, t. y. esant atitinkamam intensyvumui, jų sugertis, veikiant lazerio spinduliuotei, sumažėja arba išnyksta. Svarbus aspektai naudojant pasyvųjį moduliatorių:

- Modulatoriaus persijungimo trukmė turi būti kuo spartesnė.
- Sužadintų elektronų gyvavimo trukmė modulatoriuje, turi būti ilgesnė negu fotonų gyvavimo trukmė rezonatoriuje;
- Modulatoriaus sugerties skerspjūvis σ_a turi būti didesnis negu kristalo stiprinimo skerspjūvis σ_s ;
- Sužadintos būsenos sugerties skerspjūvis σ_{esa} turi būti daug mažesnis negu pagrindinės būsenos sugerties skerspjūvis σ_{gsa} .

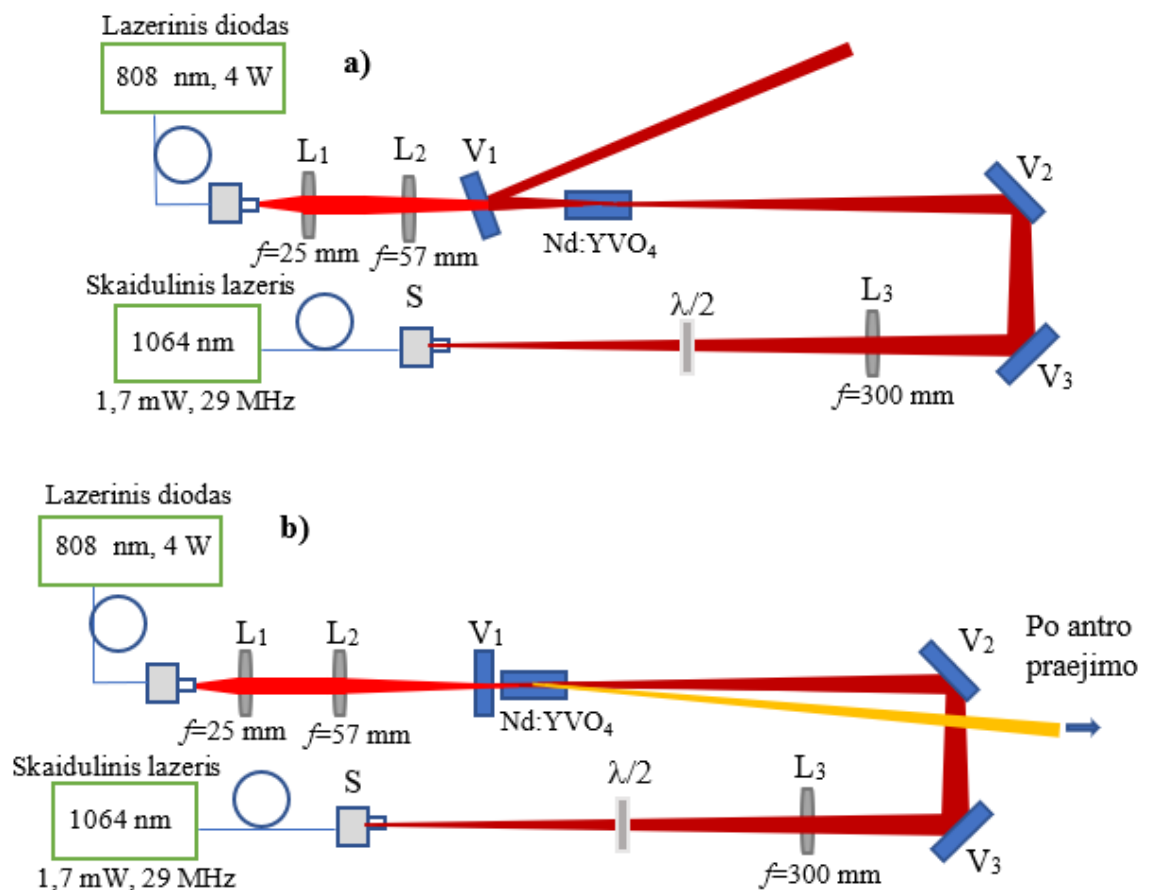
Literatūroje aptikti pasyvus modulatoriai naudojami ≈ 1.3 μm bangos ilgio ruože: V:YAG [22], Co:Spinel (Co:MgAl₂O₄) [23], Co:LMA (Co:LaMgAl₁₁O₁₉) [24]. Modulatorius V:YAG moduliuojant 1342 nm bangos ilgio spinduliuotę turi gerą santykį tarp sužadintos būsenos sugerties skerspjūvio ir pagrindinės būsenos sugerties skerspjūvio $\sigma_{esa} / \sigma_{gsa} = 0.1$ [22], kas nusako, jog mažai nuostolių dėl sužadintų elektronų šuolių į aukštesnes sužadintas būsenas. Palyginimui Co:LMA ir Co:SPINEL $\sigma_{esa} / \sigma_{gsa} = 0.07$ irgi turi šiuos santykius mažus, kas nusako, kad jie tinka naudoti rezonatoriaus kokybės modeliavimui. Tačiau pagrindinis pranašumas V:YAG tai santykis tarp Nd:YVO₄ emisijos skerspjūvio ir pagrindinio lygmens sugerties $\sigma_s / \sigma_a = 24$ (lyginant su Co:Spinel $\sigma_s / \sigma_a = 1.5$, lyginant su Co:LMA $\sigma_s / \sigma_a = 2.3$), kas nusako, jog stiprinimas kristale įsisotina greičiau

negu modulatorius praskaidrėja. V:YAG turi potencialą sugeneruoti 1.3 μm bangos ilgio spinduliuotės aukštos energijos sub-ns impulsus.

Per pastaruosius metus buvo atlikti skirtingi 1.3 μm bangos ilgio lazerių kokybės moduliacijos veikoje tyrimai, taikant V:YAG kristalą. Savo tyrime Q. Xue ir Q. Zheng pristatė Nd:YVO₄ kokybės moduliavimo 1342 nm bangos ilgio osciliatorių [25]. Nd:YVO₄ kristalas buvo kaupinamas 1.6 W nuolatinio išsiskyrimo kaupinimų. Pasiiekta osciliatoriaus išvadine impulso energija 1.43 μJ ir 29.5 ns impulsu trukme, su pasikartojimo dažniu 37.5 kHz.

3. Optinio stiprinimo schemos

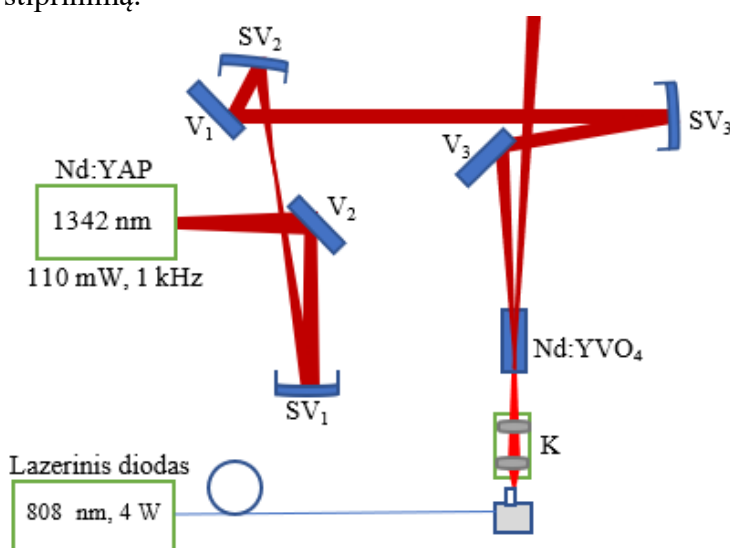
Šitame darbe buvo tiriami dviejų lėkių lazerio stiprintuvai 1064 nm ir 1342 nm bangos ilgio spinduliuotei stiprinti. Šiuo atveju stiprintuvo schemos skyrėsi, dėl skirtingų užkrato impulsų spinduliuotės parametrų (4, 5 Pav.). Pradžioje buvo naudojamas 1064 nm bangos ilgio skaidulinis užkrato lazeris, kurio pasikartojimo dažnis 29 MHz, vidutinė galia 1.7 mW ir impulsų trukmė ~7 ps.



4 Pav. Vieno lėkių a) ir dviejų lėkių b) 1064 nm užkrato bangos ilgio spinduliuotės stiprinimo schemos. L₁, L₂ – lęšiai, V₁ – 15° kritimo kampo atspindintis 1064 nm ir praleidžiantis 808 nm bangos ilgio spinduliuotę veidrodis, L₃ – fokusavimo lęšis (f = 400/300/200 mm), $\lambda/2$ – pusės bangos ilgio fazinė plokštelė, S – kolimatorius, V₂, V₃ – 45° kritimo kampo atspindintys veidrodžiai.

Spinduliuotė iš skaidulinio lazerio yra fokusuojama L_3 lęšiu ir nukreipiama į aktyvią lazerinę terpę veidrodžiais V_2 ir V_3 . Šiuo atveju lęšio židinio nuotoliai buvo 200, 300 arba 400 mm. Stiprinimui naudojamas, $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ Nd:YVO₄ kristalas išpjautas išilgai kristalinės ašies a (*ang. a-cut*), patalpintas į varinį šilumokaitį, tačiau kristalas aktyviai aušinamas nebuvo. Nd:YVO₄ kristalas iš vienos pusės padengtas danga pralaidžia 808 nm ir atspindinčia 1342 nm bangos ilgio spinduliuotę. Kaupinimo pluošto sąsmauka suformuojama kristale, kuo arčiau jo galinio paviršiaus. Tarp kristalo ir kolimatoriaus pastatytas separatorius (V_1) atspindintis 1064 nm ir praleidžiantis 808 nm bangos ilgio spinduliuotę. Jo dėka realizuojami vieno ir dviejų lėkių stiprintuvai. Pastiprinta spinduliuotė praėjusi kristalą nukreipiama į šoną (4 Pav. a) vieno lėkio stiprinimas) arba gražinama atgal mažu kampu (4 Pav. b) dviejų lėkių stiprinimas). Dviejų lėkių stiprinimo atveju kampas tarp krintančios į kristalą spinduliuotės ir po dviejų lėkių pastiprintos yra artimas $\sim 1^\circ$. Pusės bangos ilgio fazinė plokštelė $1/2$ naudojama tam, kad nustatyti užkrato pluošto poliarizaciją atitinkančia stiprintuvui, nes Nd:YVO₄ kristalas stiprina tik vienos poliarizacijos spinduliuotę. Kaupinimui naudojamas 4 W galios, 808 nm bangos ilgio lazerinis diodas (*BWT Beijing K808D09FN-4.000W*). Kaupinimo spinduliuotė sklinda 105 mm skersmens skaiduloje bei lešiais L_1 ($f = 25 \text{ mm}$) ir L_2 ($f = 57 \text{ mm}$) kuo arčiau Nd:YVO₄ kristalo galinio paviršiaus suformuojamas $\sim 240 \text{ mm}$ pluošto skersmuo, atitinkantis vienos skersinės modos (TEM_{00}) užkrato pluošto skersmeniui.

UAB „QS Lasers“ gamybos $\sim 1341 \text{ nm}$ bangos ilgio Nd:YAP užkrato lazeris veikia 1 kHz pasikartojimo dažniu kai vidutinė išvadinė galia siekė 110 mW, o impulsų energija – 0.11 mJ. Pluoštas sukolinuojamas dviejų sferinių veidrodžių pagalba (5 Pav. SV_1 ir SV_2), o tada fokusuojamas naudojant sferinį veidrodį SV_3 ($R = 300 \text{ mm}$) ir nukreipiamas į Nd:YVO₄ kristalą V_3 veidrodžiu. Užkrato sąsmaukos skersmuo kristale buvo $d \approx 200 \mu\text{m}$. Po pirmo lėkio spinduliuotė atsispindi nuo kristalo paviršiaus ir yra nukreipiama šalia veidrodžio V_3 krašto, taip realizuojant dviejų lėkių stiprinimą.

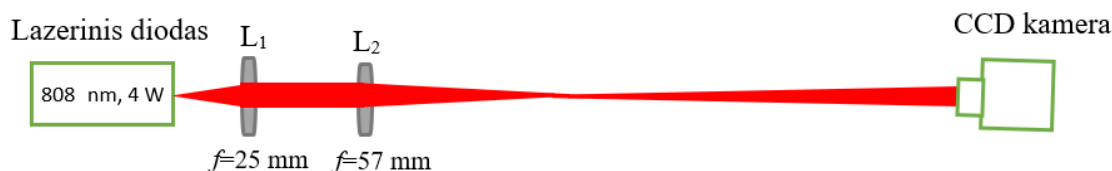


5 Pav. Principinė 1342 nm bangos ilgio dviejų lėkių stiprintuvo schema. V_1, V_2, V_3 – 45° kritimo kampo veidrodžiai 1342 nm bangos ilgiui, SV_1, SV_2, SV_3 – sferiniai veidrodžiai su atitinkamu kreivumo spinduliu: $R = 200 \text{ mm}$, $R = 150 \text{ mm}$ ir $R = 300 \text{ mm}$, K – kolimatorius kaupinimo spinduliuotei.

4. Matavimų metodikos

4.1 Lazerinio pluošto skirstinio matavimas.

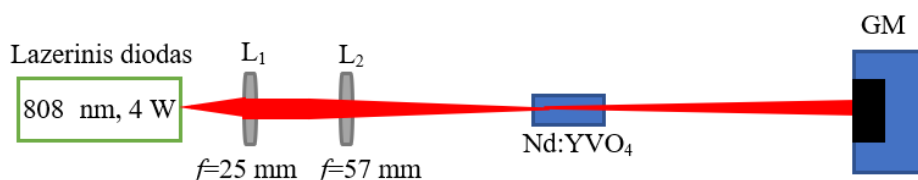
Pluošto skirstiniai, tiek 808 nm, tiek 1064 nm bangos ilgiui nustatomi naudojantis profilometru *Spiricon LT665*, kurio jautrumo diapazonas 190 – 1100 nm, o pikselių dydis 4.6 μm (6 Pav.). Tuo tarpų pluoštas 1342 nm bangos ilgio buvo stebimas naudojant *Xeva XC-130* profilometru, kurio jautrumo diapazonas 1100 – 1700 nm, o pikselio dydis 30 μm . Užkrato lazerio pluošto diametrai matuojami $1/e^2$ intensyvumo lygmenyje, ir vidurkinant matavimus per 1 minutę.



6 Pav. Principinė lazerinio diodo pluošto skirstinių matavimo schema. L_1 , L_2 – lęšiai kolimuojantį ir fokusuojantį lazerinio diodo spinduliuotę atitinkamai.

4.2 Lazerio išvadinės galios matavimas.

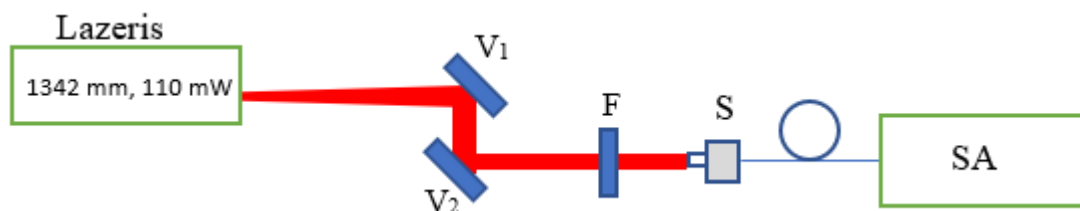
Užkrato spinduliuotės 1064 nm bangos ilgio išvadinė galia buvo matuojama su *Coherent PowerMax USB PS19* jutikliu. Šio šiluminio galios jutiklio diapazonas yra nuo 100 μW iki 1 W, skirtas nuo 300 nm iki 1100 nm bangos ilgių spinduliuotei. 1342 nm ir 808 nm bangos ilgio (7 Pav.) spinduliuotės galia buvo matuojama *Coherent PM10-19C*, kadangi buvo reikalingas didesnis išvadinės galios matavimo diapazonas (nuo 10 mW iki 10 W). Visi matavimai buvo vidurkinami 30 s.



7 Pav. Principinė praeinančios per Nd:YVO₄ strypą lazerinio diodo galios matavimo schema. Šviesa iš lazerinio diodo fokusuojama į Nd:YVO₄ kristalą su lęšiais L_1 ir L_2 . Praėjusi spinduliuotės galia matuojama su galios matuokliu (GM).

4.3 Spektro matavimas

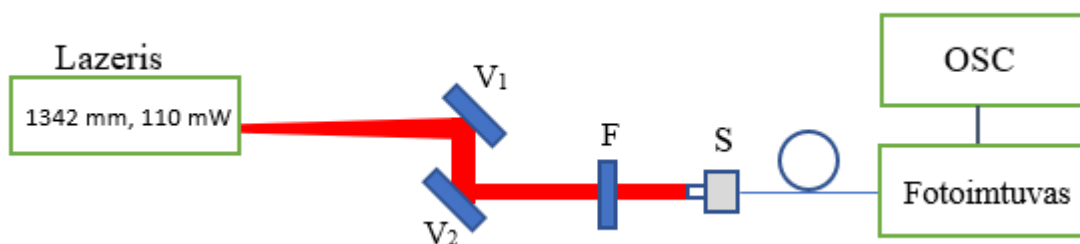
Užkrato lazerio 1342 nm bangos ilgio spektro matavimai buvo atliekami naudojantis spektro analizatorių *Ando AQ-6315A* (350 – 1750 nm spektro matavimo ruožas). Užkrato pluoštas buvo įvedamas iš lazerio į spektro analizatorių (SA) per skaidulą (8 Pav.). Taip pat, siekiant išvengti netiesinių efektų skaiduloje, prieš skaidulą buvo pastatytas šviesą barstantis matinis stiklas. Spektrai fiksuojami su 0.05 nm skyra, spektro matavimo vidurkis – 10.



8 Pav. Principinė užkrato lazerio spektro matavimo schema. V_1 ir V_2 veidrodžiai atspindintys 1342 nm ilgio spinduliuotę, F – filtras skirtas sumažinti lazerinę galią, S – skaidula.

4.4 Lazerio impulso trukmės nustatymas

Lazerio impulsų trukmės nustatymui (9 Pav.) buvo naudojamas osciloskopas *Teledyne LeCroy WaveMaster 8Zi-B* turintis 20 GHz dažnių juostą (OSC). Lazerio spinduliuotę nukreipiamą per skaidulą į InGaAs fotoimtuvą *Discovery Semiconductors DSC10ER* su dažnio juosta 50 GHz. Taip pat, prieš skaidulą buvo pastatytas šviesą barstantis matinis stiklas.



9 Pav. Principinė impulsų trukmės matavimo schema. V_1 ir V_2 veidrodžiai atspindintys 1342 nm ilgio spinduliuotę, F – filtras, skirtas sumažinti galią, S – skaidula, OSC – osciloskopas.

4.5 Pluošto kokybės M^2 matavimai

Pastiprintos spinduliuotės sklaidimo faktorius M^2 išmatuotas pasitelkiant *Ophir BeamSquared SP920* pluošto sklaidimo analizatorių, kartų su *Xeva XC-130* profilometru. Lazerio pluoštas buvo atitinkamai padidinamas ir sukolimuojamas, o aparato viduje įdėtas $f = 400$ mm glaudžiamasis lęšis. Matavimas buvo atliktas naudojantis *Beamsquared* programa.

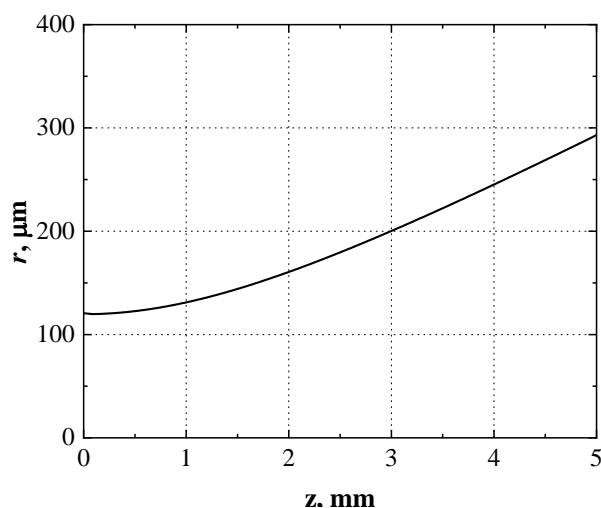
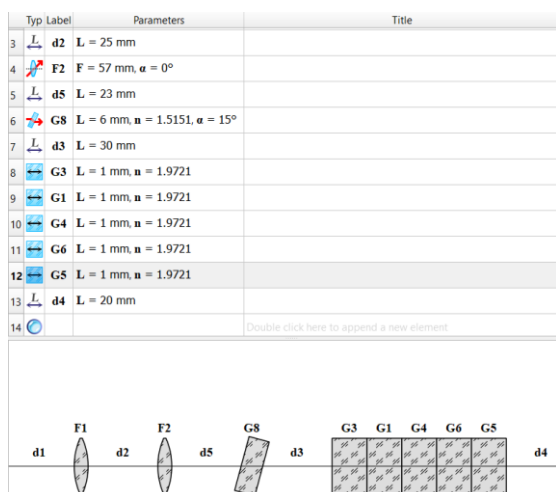
5. Teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai

5.1 Šiluminio lęšio modeliavimas

Šiluminis lęšis buvo skaičiuojamas pagal (12) formulę atsižvelgiant tik į pirmą narį (lūžio rodiklio pokytį nuo temperatūros). Kadangi naudojamuose formulėse priimama, jog pluoštas išlaikomas vienodas per visa kristalą, o mūsų atveju jis skečiasi kristale, buvo sukurtas modelis, kuomet skaičiuojamas šiluminis lęšis atskirose kristalo atkarpose, įvertinus pluošto skersmens kitimą. Modeliavimas atliktas naudojantis *ReZonator* programa, kuri leidžia įvertinti pluošto skersmens kitimą, optinėje schemoje. *ReZonator* programoje sukuriama optinė schema kuomet kaupinimo pluoštas yra sukolimuojamas ir sufokusuojamas į kristalą, taip kad sąsmauka būtų suformuota arti krašto (10 Pav.). Programoje Nd:YVO₄ strypas suskaidomas į 5 atskiras 1 mm storio dalis. Kadangi kiekvienoje dalyje spinduliuotės pluošto skersmuo kinta, buvo skaičiuojamas vidutinis skersmuo atitinkamai kristalo daliai. Toliau, nustatomas susidaręs šiluminis lęšis kiekvienai kristalo daliai (formulė 12). Galiausia buvo susumuoti šiluminių lęšių židinio nuotoliai kiekvienoje dalyje į vieną bendrą židinio nuotolį (formulė 19).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} + \frac{1}{f_5}. \quad (19)$$

Čia f_n – šiluminio lęšio židinio nuotolis atitinkantis kristalo daliai



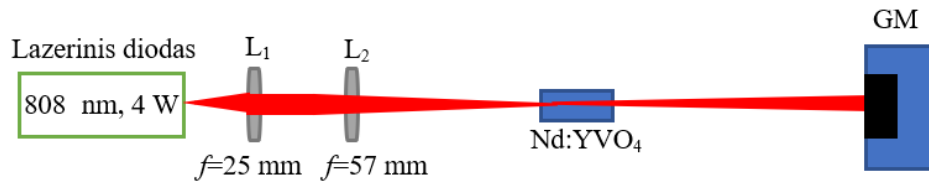
10 Pav. Pluošto sklaidimo modelis *ReZonator* programoje ir sumodeliuotas pluošto spindulio kitimas kristale.

Kad nustatyti indukuotą Nd:YVO₄ kristale šiluminį lęši buvo eksperimentiškai nustatomas sugerties koeficientas (11 Pav.). Tas buvo daroma tam, kad paskaičiuoti, kiek galios sugeria atskira kristalo dalis. Sugerties koeficientas nustatytas matuojant kaupinimo lazerinę galią praėjusią pro kristalą, ir paskaičiuojant pagal 21 formulę. Taip pat, buvo išmatuota optimali lazerinio diodo

temperatūra, kai šrypo sugertis buvo didžiausia. Keičiant temperatūrą diode, keičiasi spinduliuotės spektro centrinis bangos ilgis, o taip pat ir sugertis aktyviojoje stiprintuvo terpėje.

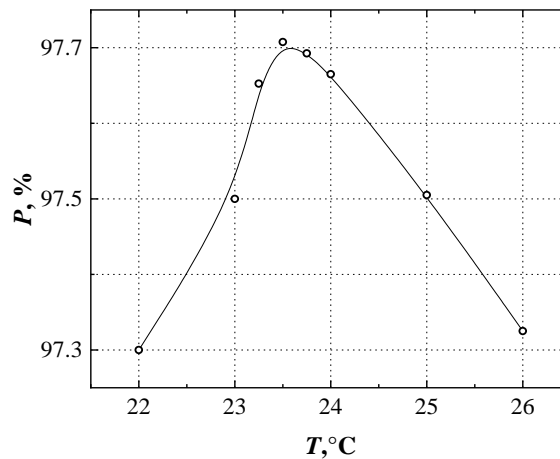
$$P(z) = P e^{\alpha L}, \quad (21)$$

$P(z)$ – kaupinio galia sugerta išilgai kristalo, L – ilgis, α – sugerties koeficientas.



11 Pav. Kristalo sugerties ilgio nustatymas. L_1 ir L_2 – kolimatoriaus lęšiai, GM – galios matuoklis.

Nustatyta optimali lazerinio diodo temperatūra $T = 23.5^\circ\text{C}$ (12 Pav.), prie kurios Nd:YVO₄ šrypo sugertis didžiausia. Kristalas šiuo atveju, sugeria apytiksliai 97.7% visos krentančios spinduliuotės. Taip pat, naudojant (21) formulę, buvo nustatytas sugerties koeficientas prie optimalios temperatūros: $\alpha = 7.5 \text{ cm}^{-1}$.



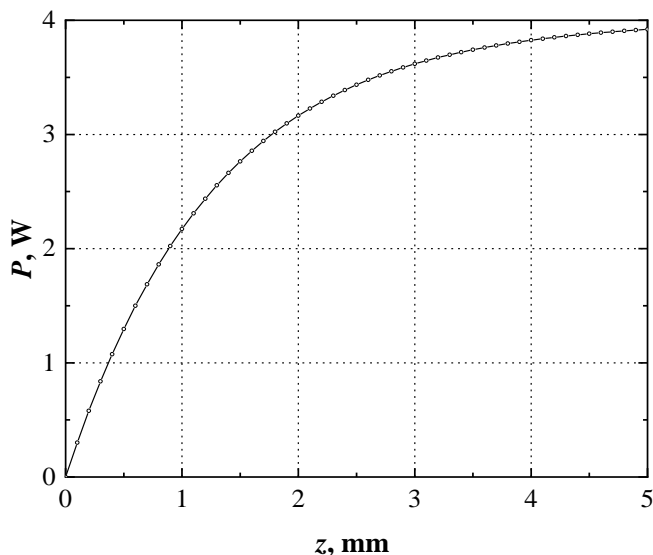
12 Pav. Sugertos Nd:YVO₄ kristale kaupinio spinduliuotės priklausomybė nuo lazerinio diodo temperatūros.

Pagal, sugerties koeficientą, *Matlab* programoje buvo sumodeliuota, sugertos kaupinio spinduliuotės galios priklausomybė kristale nuo kristalo ilgio (13 Pav.). Nustatytas kvantinis defektas atsižvelgiant tik į bangos ilgio skirtumą tarp kaupinamos ir stiprinamos spinduliuotės:

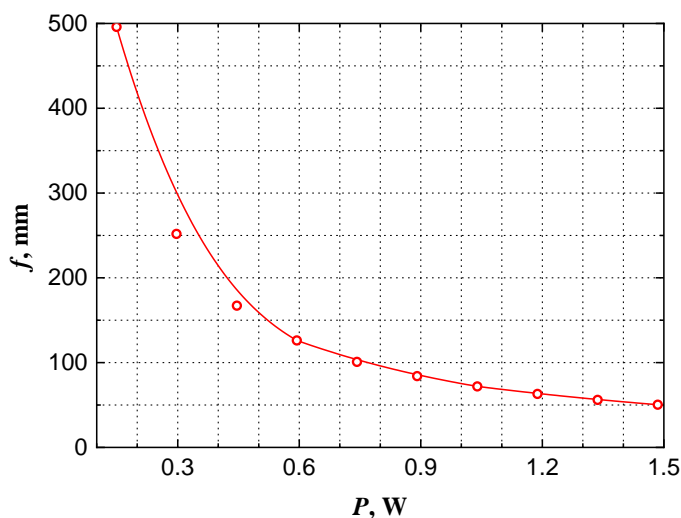
$$q = 1 - \frac{\lambda_{kaupinimo}}{\lambda_{emisijos}}. \quad (20)$$

Čia q – kvantinis defektas, $\lambda_{kaupinimo}$ – kaupinio spinduliuotės bangos ilgis, $\lambda_{emisijos}$ – bangos ilgis stiprinamos spinduliuotės. Kvantinis defektas suskaičiuotas 1342 nm bangos ilgio spinduliuotei: $\approx 40\%$.

Toliau buvo įvertinta šiluminė galia kiekvienoje strypo dalyje ir nustatytas šiluminis lęšis, pagal (12) formulės pirmą narį, kiekvienai kristalo daliai. Gauti židinio nuotoliai buvo susumuoti į vieną bendrą šiluminio lęšio židinio nuotolį (19). Gautos teorinės šiluminio lęšio židinio nuotolio vertės pateiktos 14 paveiksle.



13 Pav. Sugertos kaupinimo spinduliuotės galios (P) priklausomybė nuo Nd:YVO₄ ilgio (z).

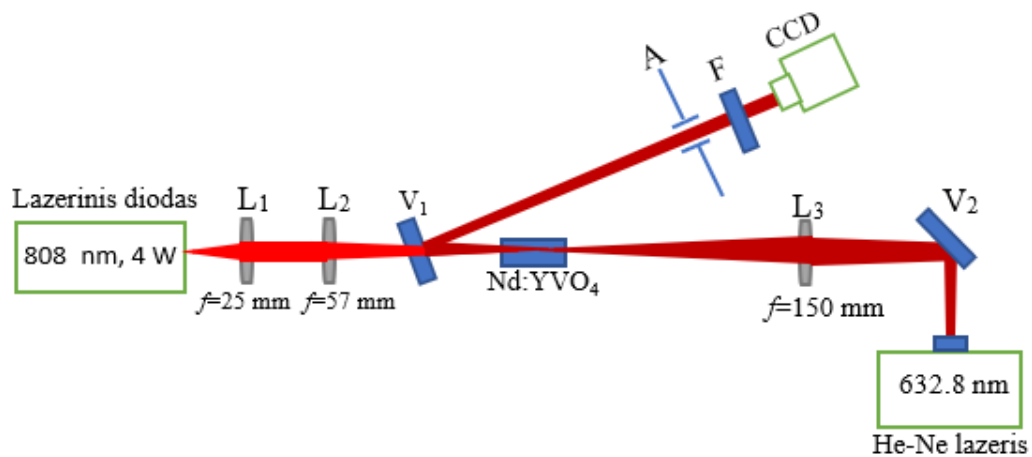


14 Pav. Sumodeliuoto šiluminio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo šiluminės galios sugeneruotos Nd:YVO₄ strype.

5.2 Šiluminio lęšio matavimas

Šiluminis lęšis buvo nustatomas stebint pluošto skersmens kitimą priklausomai nuo kaupinimo galios. Šiam tikslui buvo naudojamas He-Ne lazeris (25 LHR 121 Melles Griot). 632.8 nm bangos ilgio lazerio spinduliuotė buvo nukreipta veidrodžiu V₂ į lęšį ($f = 150$ mm) 13 cm atstumų bei sufokusuota į Nd:YVO₄ strypą 145 mm atstumu. Suformuotos pluošto sąsmaukos skersmuo ~ 210 μ m

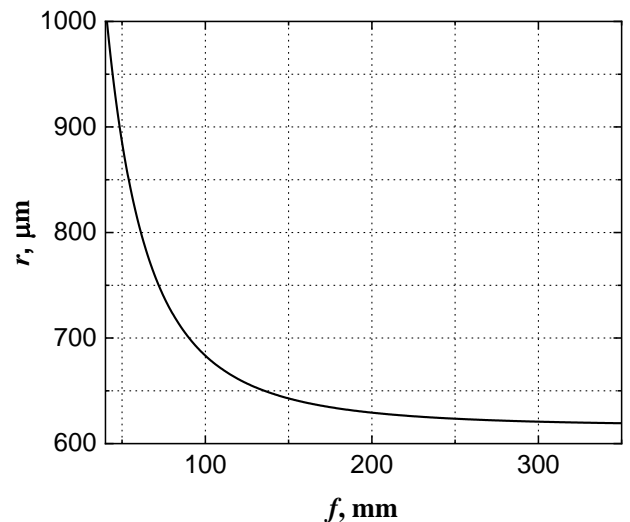
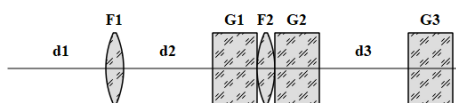
kristale (15 Pav.). Naudojamo He-Ne lazerio išvadinis pluošto diametras 0.6 mm, o pluošto kokybė $M^2 = 1.005$.



15 Pav. Šiluminio lęšio nustatymo schema. L_1 ir L_2 – kolimatoriaus lęšiai, V_1 – pralaidus 808 nm bangos ilgiui ir atspindintis 1064 nm separatorius, V_2 – veidrodys, L_3 – fokusuojantis lęšis, F – filtras nepraleidžiantis 808 nm bangos ilgio kaupinimo spinduliuotę, A – apertūra.

Tarp kristalo ir kolimatoriaus pastatytas separatorius V_1 praleidžiantis 808 nm bangos ilgio spinduliuotę. Nuo šito veidrodžio atsispindėjęs He-Ne spindulis yra nukreipiamas per filtrą (pralaidus 600 nm bangos ilgių srityje bei nupjaunantis >800 nm spinduliuotė). Tas daroma tam, kad nufiltruoti, kaupinimo spinduliuotę. Taip pat, naudojama apertūra uždengti atsiradusiuos likutinius atspindžius. Atstumas tarp veidrodžio ir CCD profilometro buvo ~ 315 mm. Toliau buvo fiksuojamas pluošto skersmens ($1/e^2$ intensyvumo lygyje) kitimas priklausomai nuo lazerinio diodo kaupinamos galios. Kad nustatyti šiluminio lęšio židinio nuotolį, buvo sumodeliuotas He-Ne lazerio spinduliuotės sklidimas iki profilometro, naudojant *ReZonator* programą (16 Pav.). Pagal nustatytą pluošto skersmens kitimą (lentelė 2) buvo nustatytas indukuotas Nd:YVO₄ strypė šiluminis lęšis.

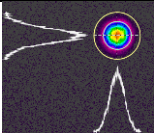
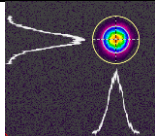
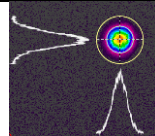
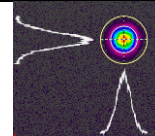
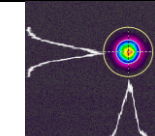
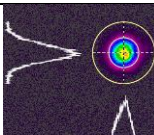
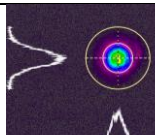
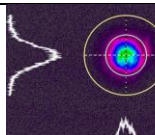
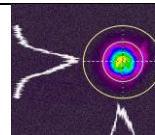
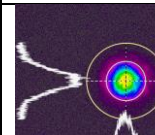
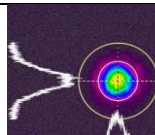
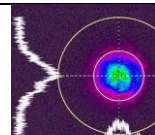
Typ	Label	Parameters	Title
1	L_1	$d1$ $L = 130$ mm	
2	$F1$	$F = 150$ mm, $\alpha = 0^\circ$	
3	L_2	$d2$ $L = 140$ mm	
4	$G1$	$L = 4$ mm, $n = 1.9929$	
5	$F2$	$F = 100$ mm, $\alpha = 0^\circ$	
6	$G2$	$L = 1$ mm, $n = 1.9929$	
7	$d3$	$L = 314.5$ mm	
8	$G3$	$L = 1$ mm, $n = 1$	



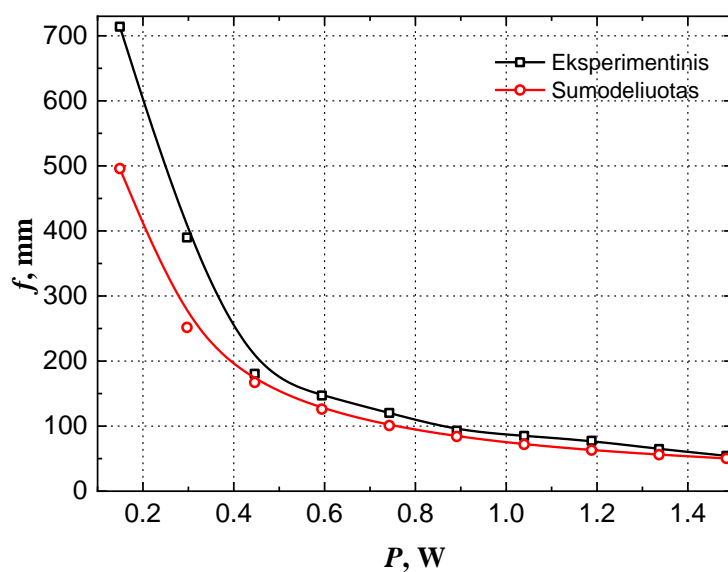
16 Pav. *ReZonator* programoje sumodeliuotas pluošto spindulio kitimas nuo šiluminio lęšio.

Pagal anksčiau pateikta būdą, nustatytas pluošto skersmuo d nuo lazerinio diodo kaupinimo galios 2 lentelėje. Pagal ši pluošto pokyti buvo įvertinamas šiluminis lęšis.

Lentelė 2. Pluošto skirstinio priklausomybė nuo lazerinio diodo kaupinimo galios.

Kaupinimo galia P , W	$P_k = 0$ W	$P_k = 0.4$ W	$P_k = 0.8$ W	$P_k = 1.2$ W	$P_k = 1.6$ W
Pluošto skirstinis ir pluošto skersmuo d , mm	 $d=1.244$ mm	 $d=1.246$ mm	 $d=1.247$ mm	 $d=1.277$ mm	 $d=1.301$ mm
$P_k = 2$ W	$P_k = 2.4$ W	$P_k = 2.8$ W	$P_k = 3.2$ W	$P_k = 3.6$ W	$P_k = 4$ W
	 $d=1.336$ mm	 $d=1.395$ mm	 $d=1.442$ mm	 $d=1.491$ mm	 $d=1.580$ mm
				 $d=1.580$ mm	 $d=1.692$ mm

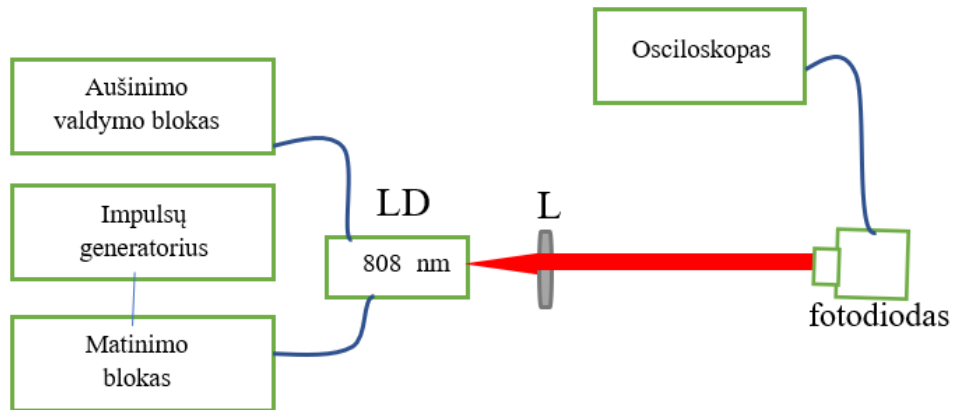
Šiluminio lęšio židinio nuotolio priklausomybės nuo šiluminės galios kristale pateikta 17 paveiksle. Prie maksimalios kaupinimo galios kristale susidaro $f = 54$ mm židinio nuotolio šiluminis lęšis. Sumodeliuotos kreivės, prie didesnių kaupinimo galių, paklaida sudaro $\approx 10\%$. Prie mažesnių kaupinimo galių paklaida didėja.



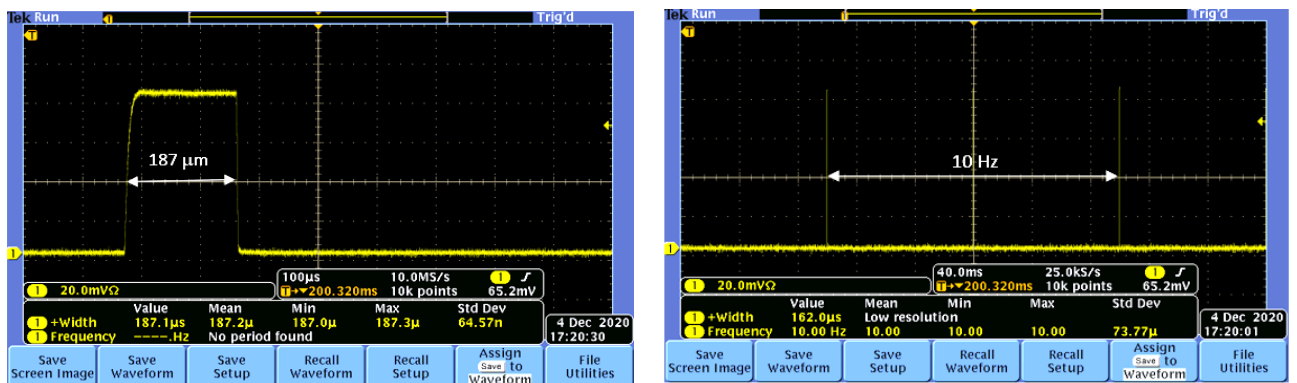
17 Pav. Sumodeliuoto ir eksperimentiškai nustatyto šiluminio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo šiluminės galios sugeneruotos Nd:YVO₄ kristale.

5.3 Impulsinės kaupinimo veikos realizavimas ir optimalios kaupinimo impulsų trukmės nustatymas.

Naudojamo lazerinio diodo impulsinė veika buvo realizuojama pagal principinę schemą pateikta 18 paveiksle. Fotodiodo dėka buvo tikrinamas pasikartojimo dažnis ir impulso trukmė (19 Pav.). Impulsinė veika, buvo realizuojama tam, kad sumažinti Nd:YVO₄ strypo šiluminę apkrovą, stiprinant 1 kHz pasikartojimo dažnio 1341 nm bangos ilgio užkrato impulsus.

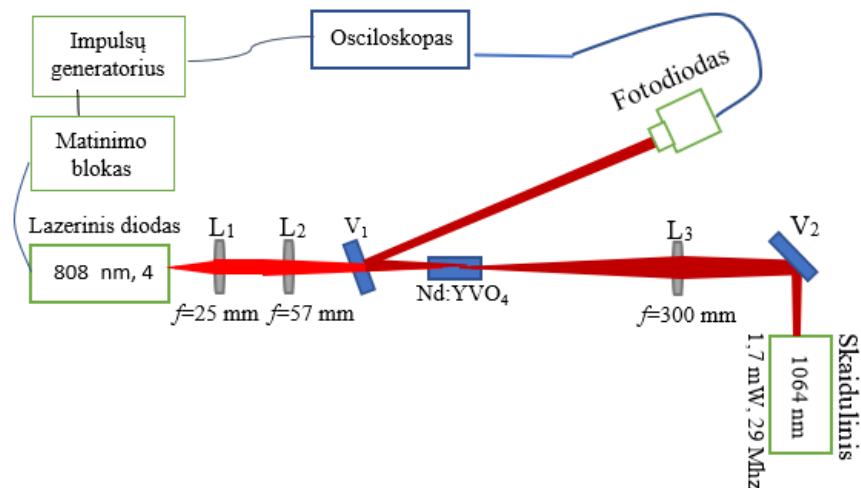


18 Pav. Impulsinės lazerinio diodo kaupinimo veikos realizavimas. LD – 4 W galios lazerinis diodas, L – kolimuojantis lęšis, impulsų vėlinimo generatorius (*Quantum Composers 9520*), lazerinių diodų maitinimo šaltinis (*Newport 500B*), lazerinių diodų TEC aušinimo valdymo blokas (*Newport 350B*), 300 MHz dažnių juostos osciloskopas Tektronix.

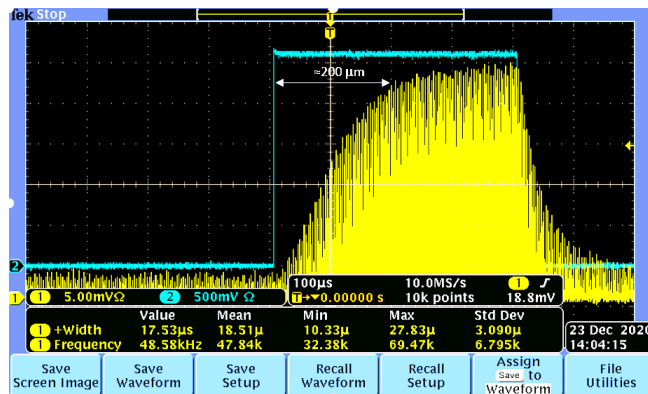


19 Pav. Kaupinimo impulsų trukmės ir pasikartojimo dažnio matavimai su osciloskopu.

Optimali lazerinio diodo kaupinimo impulsų trukmė buvo nustatoma stebint per osciloskopą pastiprintos 1064 nm bangos ilgio užkrato spinduliuotės impulsų voros sotį (20 Pav.). Kaupinant 10 Hz pasikartojimo dažniu, varijuojama kaupinimo impulso trukmė ir nustatoma trukmė, kai pasiekama 29 MHz pasikartojimo dažnio pastiprintų užkrato impulsų voros amplitudės sotis (21 Pav.). Tokiu būdu, nustatytą optimali kaupinimo trukmė siekė 200 μs.



20 Pav. Optimalios lazerinio diodo kaupinimo impulsų trukmės nustatymo schema a). L_1 , L_2 , L_3 – lęšiai, V_1 , V_2 – veidrodžiai.



21 Pav. Optimalios kaupinimo trukmės nustatymas: 400 μ s trukmės paleidimo impulsas iš vėlinimo generatoriaus – žydras ir fotodiode atsakas – geltonas.

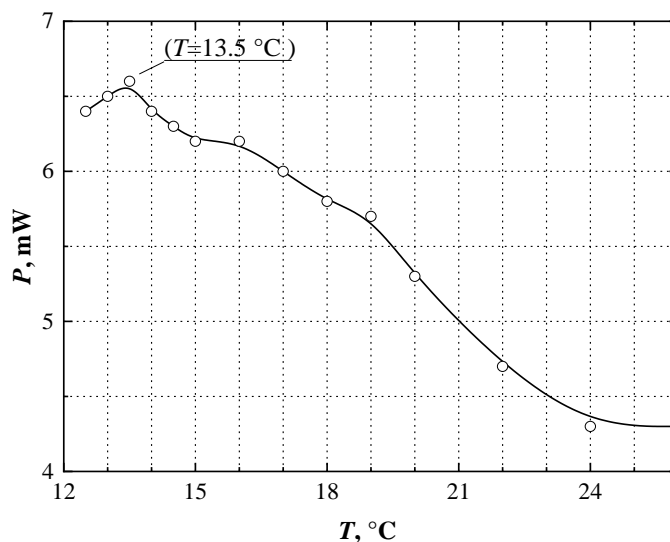
5.4 Skaidulinio 1064 nm bangos ilgio užkrato impulsų stiprinimo tyrimas

Surinktame vieno lėkio stiprintuvę, buvo optimizuotas 1064 nm bangos ilgio skaidulinio lazerio užkrato impulsų stiprinimas prie skirtingų užkrato spinduliuotės sąsmaukos dydžių Nd:YVO₄ kristale, panaudojant skirtingus glaudžiamuosius lęšius (Lentelė 3). Nustatytas užkrato spinduliuotės stiprinimo koeficientas prie maksimalios lazerinio diodo kaupinimo galios (Lentelė 3.)

Lentelė 3. Vieno lėkio stiprinimo koeficientai prie maksimalios 4 W lazerinio diodo kaupinimo galios ir skirtingų užkrato spinduliuotės sąsmaukos dydžių Nd:YVO₄ kristale. d – pluošto skersmuo, f – fokusuojantis lęšis, g – stiprinimo koeficientas.

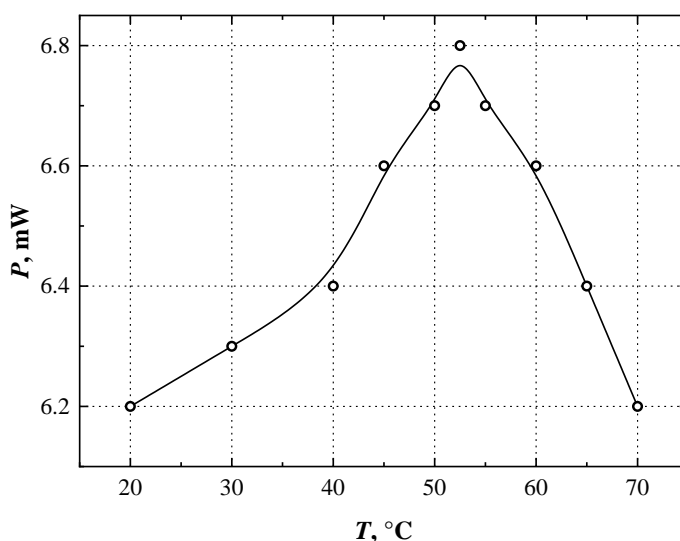
$d, \mu\text{m}$	f, mm	g, kartai
200	400	4
160	300	5.6
110	200	7.5

Didžiausias stiprinimo koeficientas ($g = 7.5$) buvo gautas prie mažiausio spinduliuotės sąsmaukos skersmens dydžio. Taip pat buvo nustatyta stiprinimui optimali lazerinio diodo temperatūra: 13.5°C . Keičiant lazerinio diodo temperatūrą, kaupinimo spinduliuotės centrinis bangos ilgis slenka $0.3 \text{ nm}/1^{\circ}\text{C}$ ir atitinkamai kinta Nd:YVO₄ išvadinė stiprintuvo galia (22 Pav.). Nors sumažinus lazerinio diodo temperatūrą iki 13.5°C kaupinimo spinduliuotės santykinė sugertis mažėja (12, 13 Pav.), tačiau užpildos apgraža pasiskirsto išilgai strypui gerinant šilumos nuvedimą iš įkaitinto strypo srities [19].



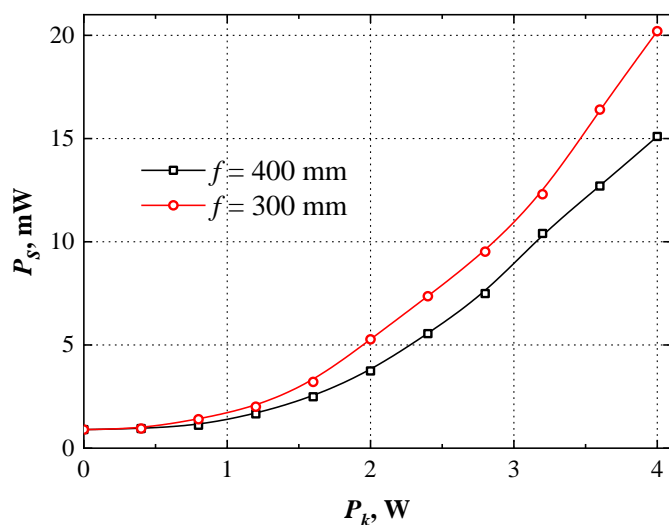
22 Pav. Pastiprintos užkrato spinduliuotės galios priklausomybė nuo lazerinio diodo temperatūros

Skaiduliniame užkrato lazeryje, yra naudojama tūrinė Brego gardelė (*ang. Volume Bragg Grating*). Keičiant jos temperatūrą kinta spinduliuojamas bangos ilgis 0.4 nm intervale. Nustatytą optimali temperatūra (50°C), prie kurios pasiekiamas didžiausias stiprinimas: atitinka 1064.3 nm bangos ilgiui (23 Pav.).



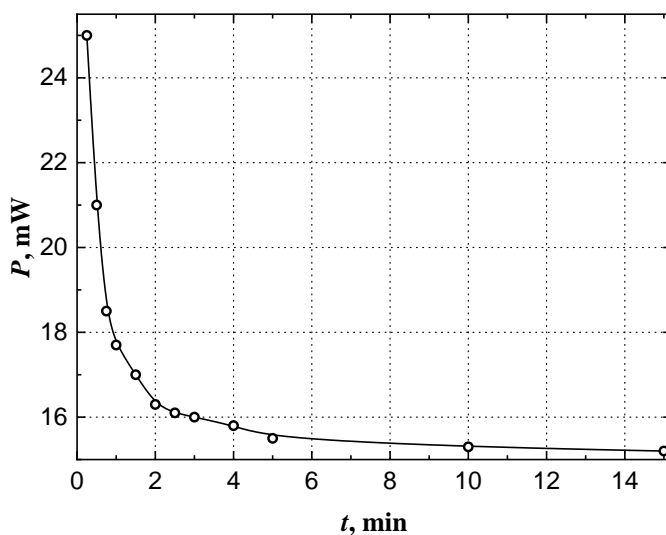
23 Pav. Pastiprintos spinduliuotės galios priklausomybė nuo skaidulinio užkrato lazerio tūrinės Brego gardelės temperatūros

Dviejų lėkių stiprintuvas buvo realizuojamas pagal anksčiau pateiktą schema (4 Pav.). Šiuo atveju buvo naudojami lėšiai su 300 mm ir 400 mm židinio nuotoliu. Taip pat atlikti išvadinės stiprintuvo galios matavimai vieno lėkio stiprintuvui.



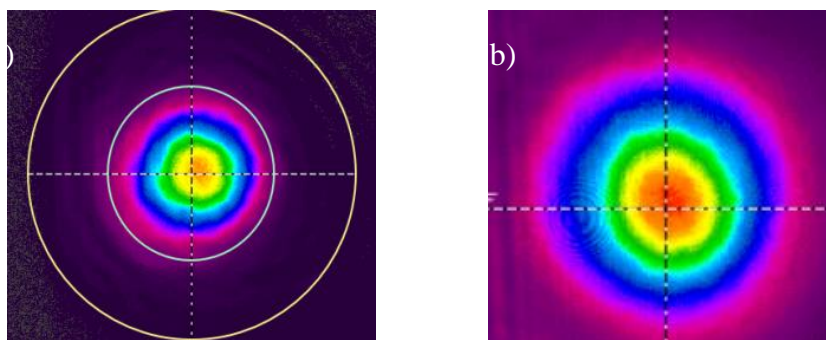
24 Pav. Pastiprintos dviejų lėkių stiprintuve spinduliuotės galios priklausomybė (P_s) nuo kaupinimo galios (P_k) prie skirtingų užkrato spinduliuotės sąsmaukos skersmens dydžių.

Nustatytas maksimalus $g = 15.4$ kartų stiprinimas prie užkrato spinduliuotės sąsmaukos skersmens $d = 200 \mu\text{m}$ ir >20 kartų prie užkrato sąsmaukos skersmens $d = 150 \mu\text{m}$ (24 Pav.). Taip pat, buvo pastebėtas stiprinimo koeficiento kritimas laikui bėgant (25 Pav.) dėl temperatūros kilimo, kadangi Nd:YVO₄ kristalas šilumokaityje nėra aktyviai aušinamas ir stiprinimo skerspjūvis mažėja temperatūrai kylant [20].



25 Pav. Pastiprintos spinduliuotės galios priklausomybė nuo veikos trukmės.

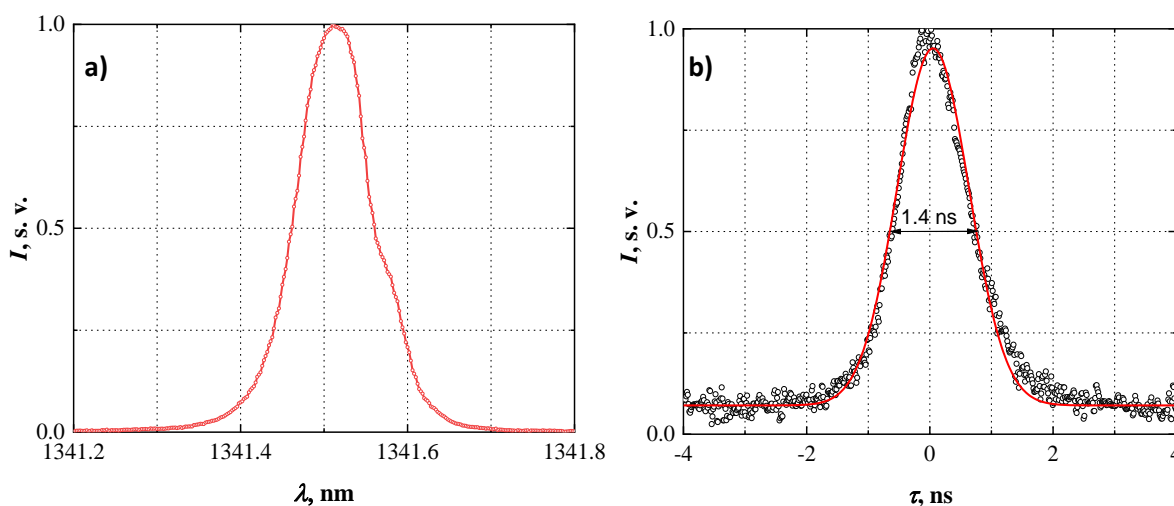
Registruojant pluošto skirstinį prieš ir po dviejų lėkių stiprintuvo, pluošto iškraipymų nepastebėta (26 Pav.).



26 Pav. Pluošto skirstinys 1064 nm bangos ilgio prieš stiprinimą a) ir po stiprinimo b).

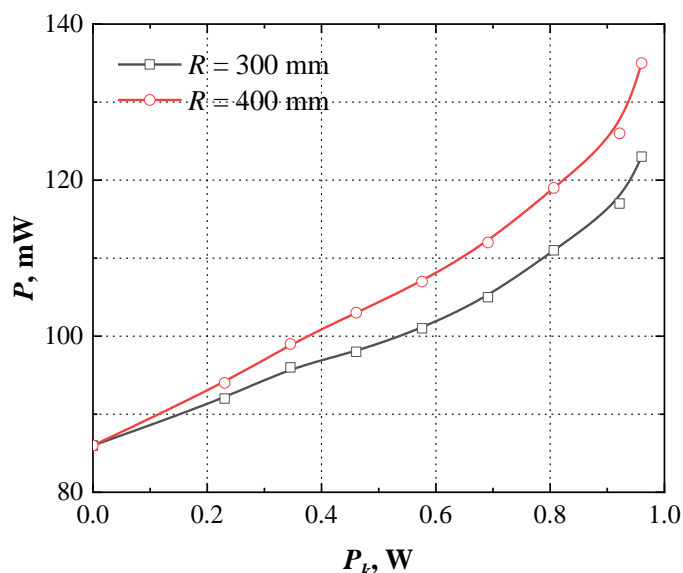
5.5 Nd:YAP 1341.5 nm bangos ilgio užkrato impulsų stiprinimo tyrimas

Buvo nustatyta naudojamo Nd:YAP užkrato lazerio impulsų trukmė ir išmatuotas jų spektras. Išmatuota impulsų trukmė ~ 1.4 ns (27 Pav. b) ir nustatytas centrinis bangos ilgis: $\lambda_c = 1341.5$ nm (27 Pav. a). Nd:YAP lazeris veikė 1 kHz pasikartojimo dažniu.



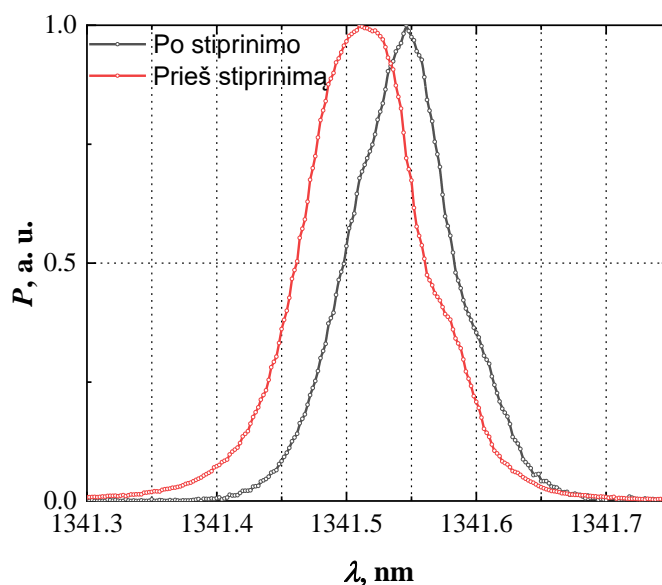
27 Pav. Nd:YAP užkrato lazerio impulsų spektro a) ir laikinė gaubtinės b).

Sukurtame, 1342 nm bangos ilgio dviejų lėkių stiprintuve, buvo matuojamas stiprinimas fokusuojant Nd:YAP užkrato lazerio spinduliuotę dviem skirtingais sferiniais veidrodžiais – su kreivumų $R = 300$ mm ir $R = 400$ mm (5 Pav.). Suformuojamos sąsmaukos skersmuo $d \approx 150$ μ m ir $d \approx 200$ μ m Nd:YVO₄ kristale atitinkamai. Gautas maksimalus stiprinimas $G \sim 1.6$ kartų, prie mažesnės sąsmaukos (28 Pav.) ir 240 μ s kaupinimo impulsų trukmės.



28 Pav. Išvadinės spinduliuotės galios priklausomybė nuo kaupinimo impulsų galios dviejų lėkių stiprintuve prie skirtingų užkrato spinduliuotės sąsmaukos dydžių.

Toks mažas stiprinimas po dviejų lėkių sąlygotas tuo, jog Nd:YVO₄ stiprinimo spektras nepersikloja su Nd:YAP užkrato lazerio spinduliuotės spektru. Nepastiprintas ir pastiprintas Nd:YAP spinduliuotės spektras (29 Pav.) rodo centrinio bangos ilgio ($\lambda_c = 1341.5$ nm) poslinkį $\Delta\lambda \approx 0.05$ nm.



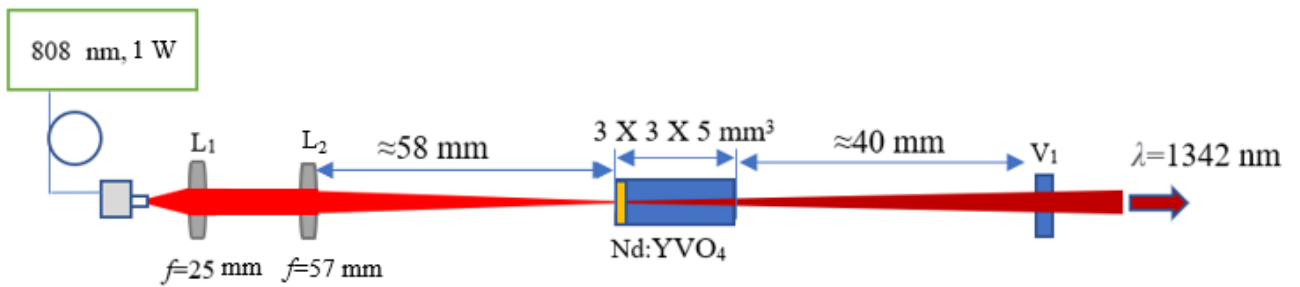
29 Pav. Nd:YAP užkrato ir pastiprintos Nd:YVO₄ stiprintuve spinduliuotės spektrai.

5.6 1342 nm bangos ilgio generacijos tyrimas Nd:YVO₄ kristaluose

Tolimesniam tyrimo darbui buvo sukurtas osciliatorius Nd:YVO₄ kristalo pagrindu generuojantis 1342 nm bangos ilgio spinduliuotę (30 Pav.). Kaip ir anksčiau lazerinio diodo kaupinimo pluoštas buvo fokusuojamas į Nd:YVO₄ kristalą arti paviršiaus. Kaupinimo pluošto sąsmaukos skersmuo $d \approx 240$ μm šiuo atveju tenkina TEM₀₀ modos generacijos sąlygą. Rezonatorius

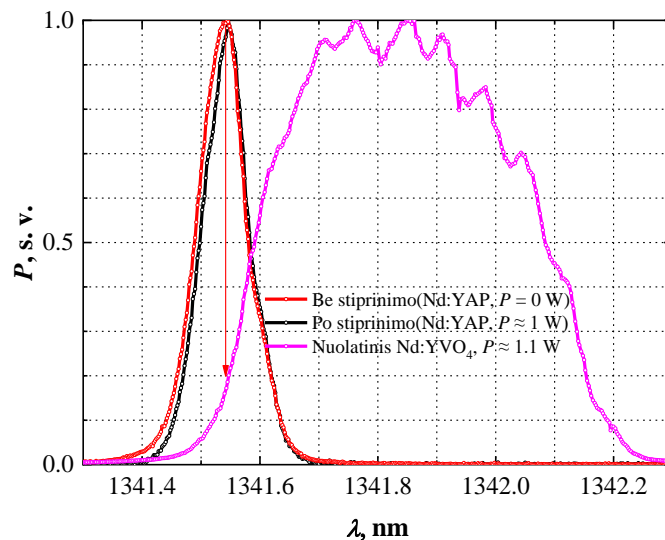
$l \approx 45$ mm ilgio sukuriamas tarp kristalo veidrodinės dangos 100% atspindinčios 1342 nm bangos ilgio spinduliuotė ir dalinai pralaidaus išvadinio veidrodžio su atspindžio koeficientu $R \approx 99\%$.

Lazerinis diodas



30 Pav. Principinė 1342 nm bangos ilgio osciliatoriaus schema. L_1 , L_2 – kaupinimo kolimatoriaus lęšiai, Nd:YVO₄ – aktyvioji lazerio terpė, V_1 – plokščias dalinai skaidrus išvadinis veidrodis.

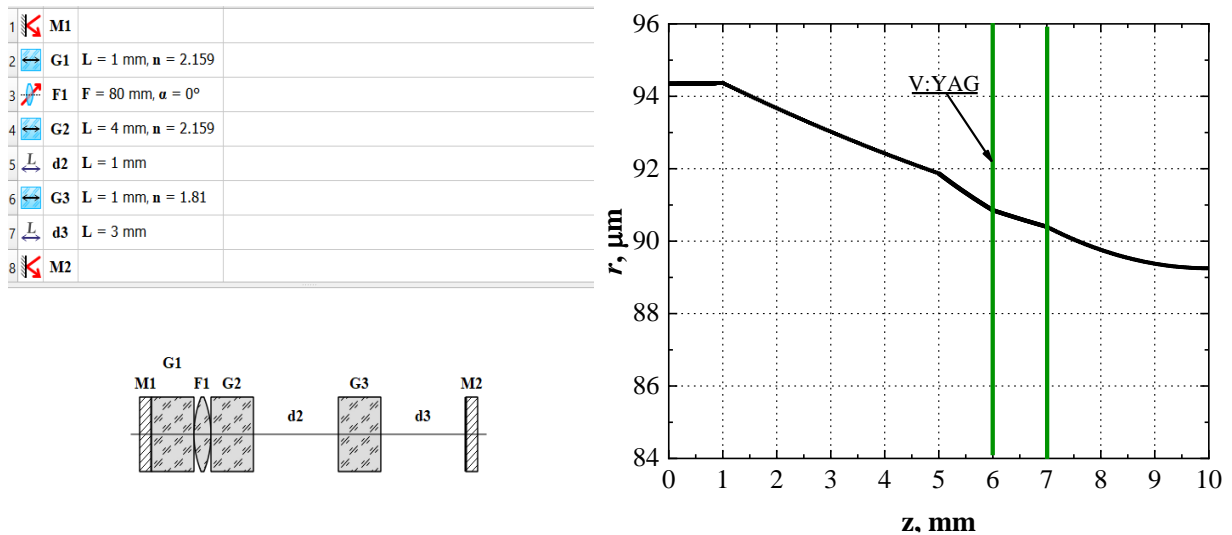
Išmatuotas Nd:YVO₄ osciliatoriaus spektras virš generacijos slenksčio (kaupinimo vidutinė galia $P \approx 1.1$ W), kai lazerinė spinduliuotė tampa stabili (31 Pav.). Akivaizdus Nd:YVO₄ stiprinimo spektrinės juostos ir Nd:YAP užkrato lazerio centrinio generacijos bangos ilgio nesutapymas. Nd:YAP užkrato lazerio centrinis bangos ilgis $\lambda_c = 1341.5$ nm paslinkęs ~ 0.3 nm lyginant su Nd:YVO₄ emisijos spektru ties $\lambda_c \approx 1341.8$ nm. Spekto juostos plotis Nd:YAP impulsų $\Delta\lambda = 0.1$ nm, tuo tarpu, Nd:YVO₄ osciliatoriaus laisvos generacijos juostos plotis – $\Delta\lambda \approx 0.5$ nm. Tai aiškinama tuo, jog Nd:YVO₄ osciliatoriaus atveju yra žadinama keletą išilginių modų lyginant su Nd:YAP kokybės moduliacijos užkrato lazerio spinduliuote, kur realizuotas vienos išilginės modos generavimas. Šiuo atveju stebimas nežymus Nd:YAP ir Nd:YVO₄ spektro juostų persiklojimas tiesiogiai daro įtaką stiprinimui. Todėl Nd:YAP užkrato lazerio 1341.5 nm bangos ilgio spinduliuotė stiprinimui Nd:YVO₄ kristale yra neefektyvi.



31 Pav. Nd:YVO₄ nuolatinės spinduliuotės emisijos spektras ir Nd:YAP užkrato ir pastiprintų impulsų spektrai. P – kaupinimo galia.

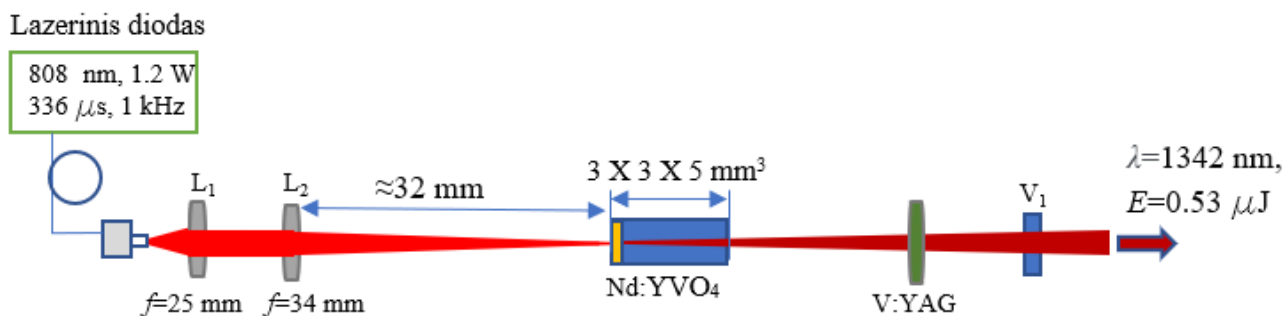
5.7. Kokybės moduliavimo 1342 nm bangos ilgio Nd:YVO₄ osciliatorius naudojant pasyviają uztūrą V:YAG

Kadangi Nd:YAP užkrato lazerio spinduliuotės stiprinimas neviršijo 2 kartų, buvo sukurtas 1342 nm bangos ilgio Nd:YVO₄ kokybės moduliavimo osciliatorius ir panaudotas dviejų ir keturių lėkių stiprintuvuose. Buvo siekiama sub-ns išvadinių impulsų trukmės. Naudojant *ReZonator* programą, buvo sumodeliuotas TEM₀₀ modos pluošto kitimas įskaitant anksčiau nustatytą Nd:YVO₄ kristale šiluminį lęšį ir V:YAG pasyviają uztūrą (32 Pav.).



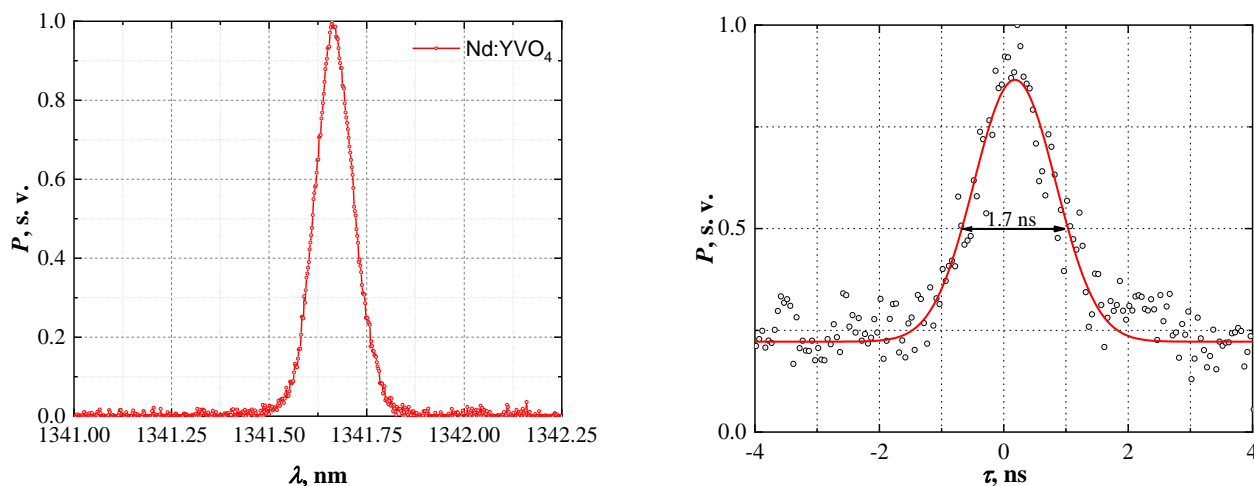
32 Pav. Pluošto sklaidimo modelis *ReZonator* programoje ir sumodeliuotas pluošto spindulio kitimas rezonatoriuje. Žalia linija pažymi modulatoriaus dalį.

Modelyje panaudotas šiluminis lęšis, atitinkantis 1.2 W kaupinimo galiai. Nd:YVO₄ kristalas kaupinamas lazerinių diodų impulsinėje veikoje. Kaupinimo impulso trukmė $\approx 300 \mu\text{s}$ su pasikartojimo dažniu 1 kHz. Kaupinimo pluoštas sąsmaukoje buvo sumažintas iki $d \approx 150 \text{ mm}$ kad būtų artimas rezonatoriaus TEM₀₀ modai: santykis tarp rezonatoriaus TEM₀₀ modos skersmens ir kaupinimo pluošto sąsmaukos ≈ 1.2 karto. Buvo nustatyta rezonatoriaus ilgio intervalas $l = 10 - 25 \text{ mm}$, kuriame rezonatoriaus stabilumas $0.7 > g_1 g_2 > 1$. Nanosekundiniams impulsams sugeneruoti, į osciliatorių buvo įstatomi V:YAG kristalai su skirtingais pralaidumo koeficientais $T_0 \approx 40, 60, 70\%$. Įstačius modulatorių buvo optimizuojamas rezonatoriaus ilgis, stebima išvadinė energija bei impulsų trukmė. Naudotų modulatorių storis 1 mm. Nors pasyviają uztūrą su pralaidumo koeficientu 40% praskaidrinti nepavyko, generacija pavyko $l < 20 \text{ mm}$ ilgio rezonatoriuje su uztūros pralaidumo koeficientais 70% ir 60%. Su 70% pralaidumo uztūra buvo nestabiliai gauti 2.3 ns trukmės ir $E \approx 0.3 \mu\text{J}$ energijos impulsai. Galiausiai, 60% pralaidumo modulatorius užtikrino stabilią kokybės moduliacijos veiką su išvadinė impulsų energija 0.53 μJ . Tuomet atstumas tarp išvadinio veidrodžio ir modulatoriaus sudarė $\sim 3 \text{ mm}$, o bendras rezonatoriaus ilgis $\sim 14 \text{ mm}$.



33 Pav. Principinė 1342 nm bangos ilgio kokybės moduliavimo rezonatoriaus schema. L₁, L₂ – kaupinimo spinduliuotės kolimatoriaus lęšiai, Nd:YVO₄ – aktyvioji lazerio terpė, V₁ – plokščias dalinai skaidrus išvadinis veidrodis HR = 99%., V:YAG – pasyvioji užtūra

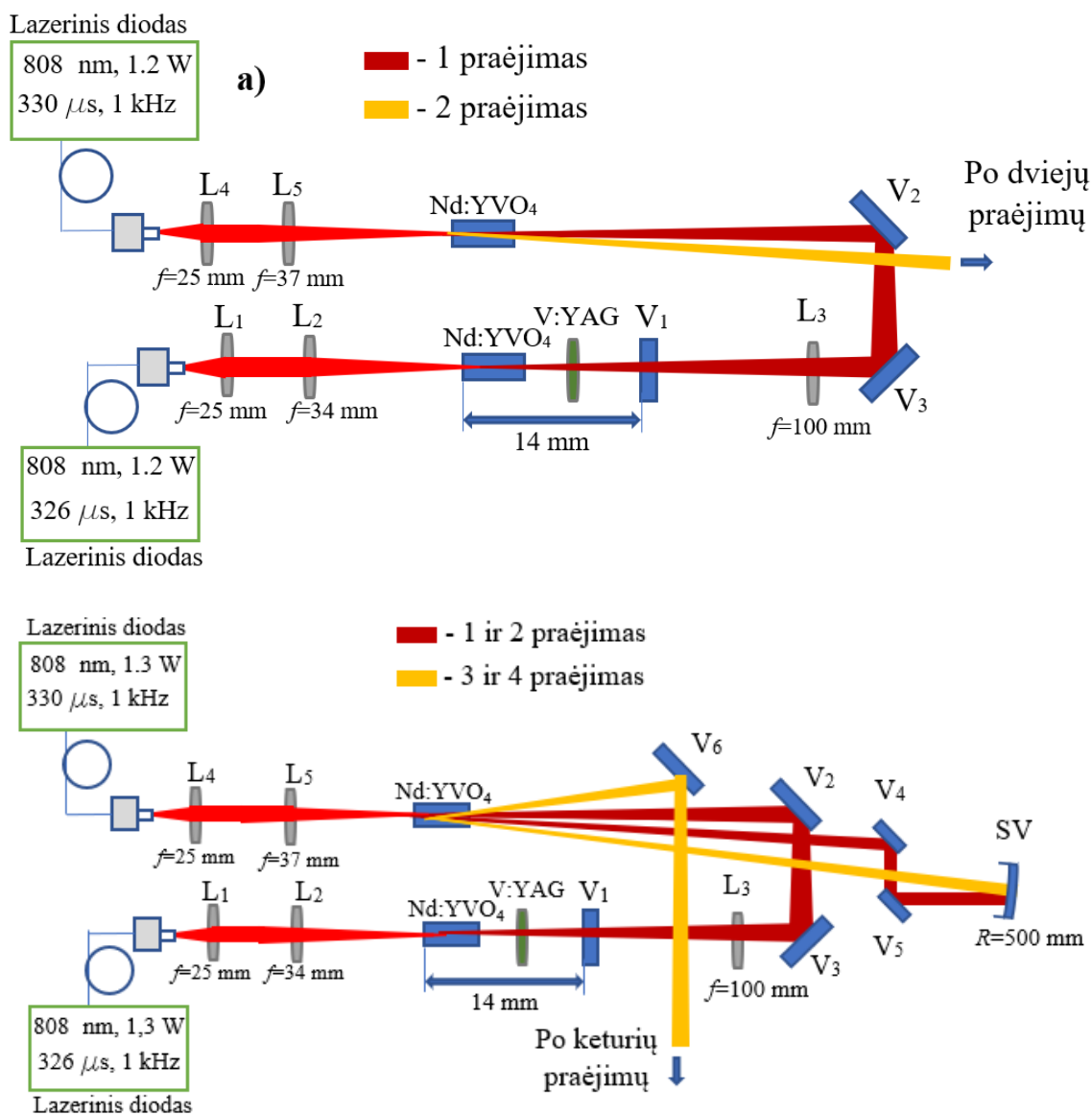
Buvo išmatuota lazerinio impulso trukmė ir spektrinė gaubtinė (33 pav.). Gautas kokybės moduliavimo impulsų spektras susiaurėjo iki $\Delta\lambda = 0.1$ nm FWHM lygmenyje lyginant su 31 Pav., o centrinis bangos ilgis pasislinko trumpesnių bangos ilgių link: $\lambda_c = 1341.6$ nm.



33 Pav. Nd:YVO₄ kokybės moduliavimo osciliatoriaus impulso spektro a) ir laikinė gaubtinė b).

5.8 1342 nm bangos ilgio impulsų dviejų ir keturių lėkių stiprinimas

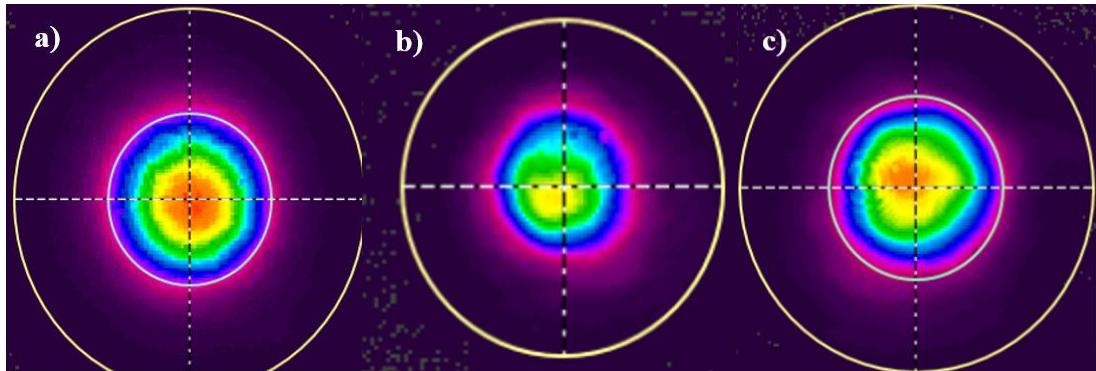
Lazerinio diodo kaupinimo pluoštas buvo sukolimuotas ir sufokusuotas į Nd:YVO₄ kristalą naudojantis L₄ ir L₅ lęšius (34 Pav.). Kaupinimo spinduliuotės sąsmaukos skersmuo $d = 170$ μ m suformuojama kuo arčiau kristalo galinio paviršiaus. Kaupinamų impulsų trukmė buvo 330 μ s prie 1 kHz pasikartojimo dažnio, su išvadine vidutine galia ≈ 1.2 W. Stiprintuvo ir osciliatoriaus kaupinimo impulsai sinchronizuoti laike, kad stiprintuve susikaupti maksimali užpildos apgraža, tuo momentu kai osciliatoriaus impulsai patenka į kristalą. Siekiant maksimalaus stiprinimo, eksperimentiškai buvo nustatytas optimalus uždelsimas $t = 90$ μ s tarp osciliatoriaus ir stiprintuvo kaupinimo impulsų paleidimo.



34 Pav. Dviejų lėkių a) ir keturių lėkių b) kokybės moduluoto Nd:YVO₄ 1342 nm užkrato bangos ilgio impulsų stiprinimo schemas. L₁, L₂, L₃, L₄ – kaupinimo spinduliuotės kolimatoriaus lėšiai, Nd:YVO₄ – aktyvioji lazerio terpė, V₁ – plokščias dalinai skaidrus išvadinis veidrodys, V:YAG – pasyvioji užtūra, V₂, V₃, V₄, V₅, V₆ – 45° kritimo kampo atspindintis veidrodžiai, SV – sferinis veidrodys su kreivumo spinduliu $R = 500$ mm.

Spinduliuotė iš osciliatoriaus sufokusuojama naudojant L₃ lėšį ($f = 100$ mm) ir nukreipiama į kristalą su V₂ ir V₃ veidrodžiais taip, kad užkrato spinduliuotės $d \approx 150$ μ m skersmens sąsmauka persiklotu kristale su kaupinimo spinduliuotės sąsmauka. Be to, užkrato spinduliuotė nukreipiama mažu $\approx 1^\circ$ kampu į kristalą, kad optinis kelias įvedamos spinduliuotės ir po dviejų praėjimų pastiprintos spinduliuotės nesutaptų. Šiuo atveju 2 lėkių ir 4 lėkių stiprinimo schema realizuojama panaudojant kristalo galinį paviršių, kuris atspindi 1342 nm bangos ilgio spinduliuotę. Keturių praėjimų schema (34 Pav. b) realizuojama nukreipiant pastiprintą spinduliuotę po dviejų praėjimų stiprinimo atgal į kristalą, naudojant veidrodį SV su kreivumo spinduliu $R = 500$ mm. Sferinio

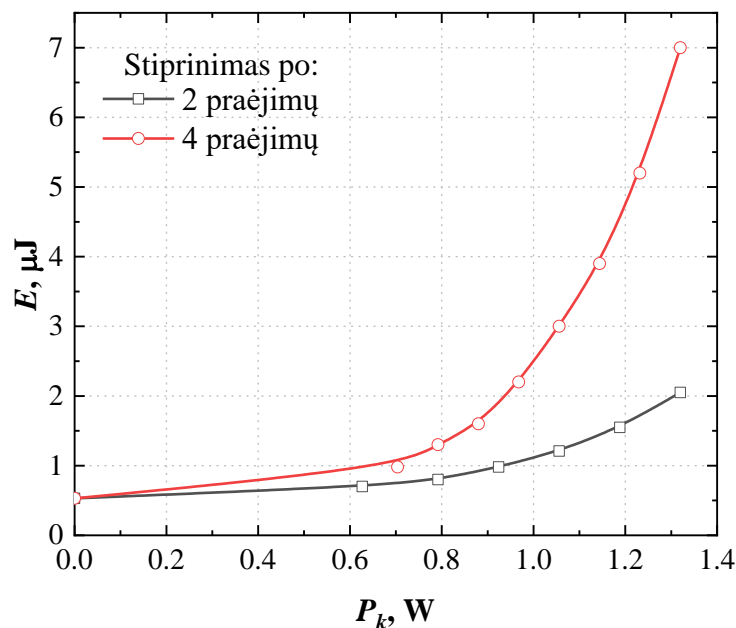
veidrodžio dėka realizuojamas vaizdo pernešimas, tam kad išlaikyti atgal įvedamos spinduliuotės sąsmaukos skersmenį kristale. Sferinio veidrodžio atstumas $l = 215$ mm nuo kristalo galinio paviršiaus buvo suderintas su šiluminiu lęšiu. Lyginant su dviejų lėkių stiprintuvu spinduliuotė nukreipiama į kristalą didesniu kampu. Tarp gražinamos į kristalą spinduliuotės ir pastiprintos spinduliuotės po 4 praėjimų kampas $\approx 4^\circ$. Veidrodžio V_6 pagalba spinduliuotė po 4 lėkių stiprinimo nukreipiama iš schemos. Kadangi spinduliuotė sklinda arti veidrodžių kraštų, galimi pluošto difrakciniai iškraipymai. Pluošto skirstiniai buvo stebimi naudojant Xeva CCD kamerą (35 Pav.).



35

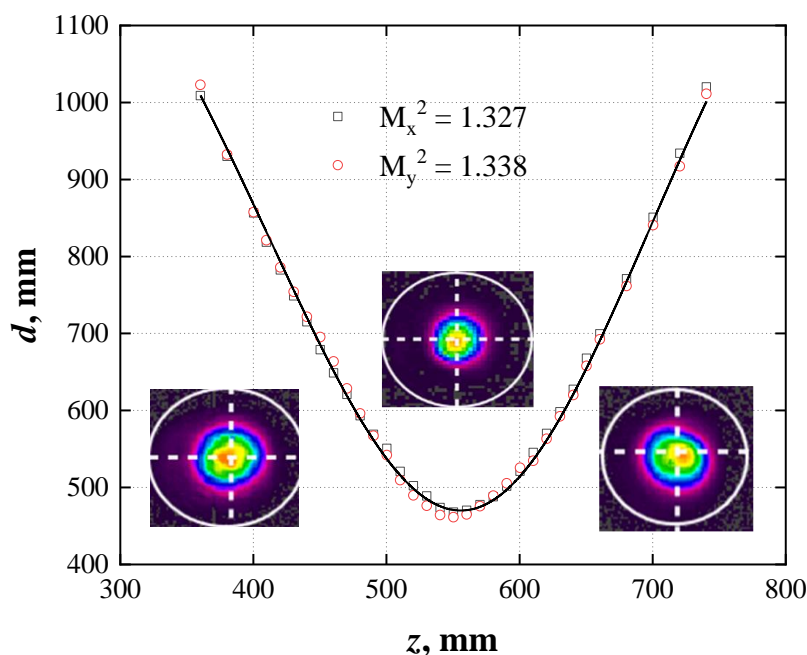
35 Pav. Užkrato 1342 nm bangos ilgio skirstiniai – a), po 2 lėkių stiprinimo – b) ir po 4 lėkių – c)

Nd:YVO₄ osciliatoriaus spinduliuotė po dviejų lėkių buvo pastiprinta $g \approx 3.9$ kartų ir po keturių lėkių $g \approx 13.4$ kartų (36 Pav.). Kadangi 3 – 4 lėkių spinduliuotė įvedama platesniu kampu, blogėja stiprinamo pluošto sąsmaukos persiklojimas su kaupinimo pluoštu ir atitinkamai sumažėja stiprinimas lyginant su stiprinimu po 1 – 2 lėkių.



36 Pav. Išvadinės spinduliuotės energijos priklausomybė nuo kaupinimo galios po dviejų ir keturių lėkių stiprinimo.

Dviejų lėkių Nd:YVO₄ užkrato impulsų stiprinimas 2 kartus didesnis lyginant su Nd:YAP užkrato impulsų stiprinimu. Tai suteikia galimybę per keturis praėjimus pastiprinti UAB „QS Lasers“ gaminamų Nd:YVO₄ osciliatorių išvadinę impulsų energija iki 1 mJ, panaudojant dvigubai galingesnę lazerinį diodą. Taip pat buvo išmatuotas pluošto sklaidimo kokybės faktorius $M^2 \approx 1.33$ (37 Pav.), panaudojant 2 kartų pluošto mažinantį teleskopą ir M^2 matuoklį *Ophir BeamSquared SP920*. Pluošto skirstinys atitinka Gauso skirstinį, išmatuotas sklaidimo faktorius. Pluošto iškraipymai atsiranda dėl to kad stiprinimo schemoje įvadinė spinduliuotė nukreipiama mažu kampu kaupinimo spinduliuotės atžvilgiu. Tačiau po keturių lėkių stiprinimo pasiektas 97% apvalumo pluoštas.



37 Pav. Pastiprinto pluošto sklaidimo kokybės M^2 matavimai bei erdviniai skirstiniai prieš sąsmauką, sąsmaukoje ir už sąsmaukos.

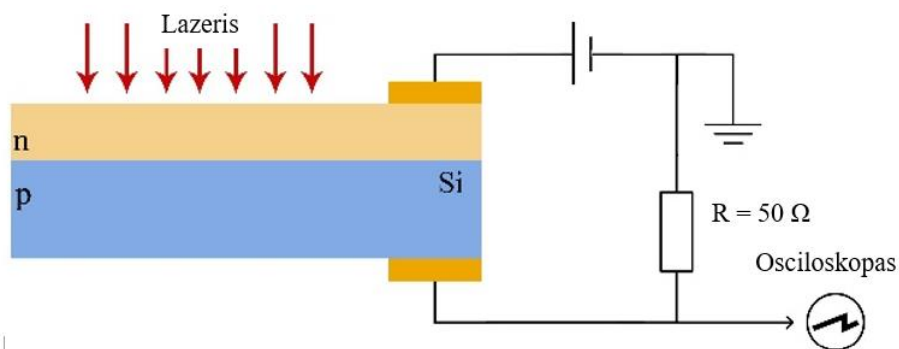
5.9 Nd:YVO₄ lazerio 1342 nm bangos ilgio impulsų pritaikymas karštųjų krūvininkų sužadinimui puslaidininkiuose

Sukurtas tyrimų metu kokybės moduliavimo Nd:YVO₄ lazeris buvo sėkmingai panaudotas karštųjų krūvininkų sužadinimui silicio p-n sandūroje. Tyrimas buvo atliktas dalyvaujant FTMC Elektroninių Vyksmų laboratorijos mokslininkais.

Karštieji krūvininkai - tai laisvieji krūvininkai, elektronai ir skylės, kurių energija yra didesnė už pusiausvyrinę. Puslaidininkinėje p-n sandūroje, esant krūvininkų kaitinimui, galima stebėti fotoįtampą, kurios poliškumas yra priešingas klasikinei fotoįtampai. Pavyzdžiui, tokios karštųjų krūvininkų fotoįtampos ypatumai buvo tirti silicio p-n sandūroje, apšviestoje CO₂ lazerio

spinduliuote, kurios fotono energija $h\lambda = 0.117$ eV yra ženkliai mažesnė už Si draudžiamosios energijos tarpą $E_g = 1.12$ eV [23]. Apšviečiant Si darinius 1064 nm bangos ilgio lazerio spinduliuote, karštųjų krūvininkų fotoįtampą yra labai sunku detektuoti, kadangi fotono energija yra artima draudžiamosios energijos tarpui, ir šiuo atveju dominuoja fundamentinė sugertis, sąlygojanti elektrono-skyklės generavimą.

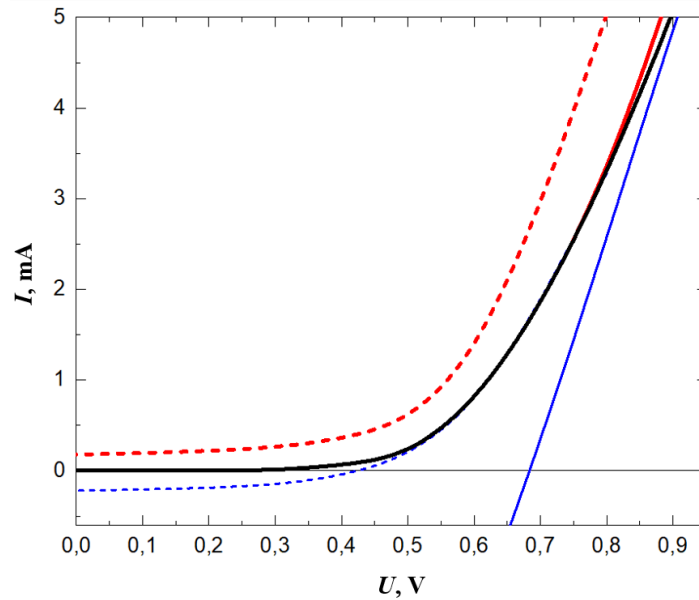
Krūvininkų kaitinimui panaudojant mažesnės fotono energijos lazerio spinduliuotę (1.342 μm bangos ilgis atitinka $h\lambda = 0.92$ eV) tikimasi pasiekti galimybę tirti karštųjų krūvininkų fotovoltaiškos reiškinius, kai fotono energija yra artima draudžiamosios energijos tarpui, bet vis daugiau šviesos sugeria laisvieji krūvininkai. Karštųjų krūvininkų įtaka saulės elementų darbui įskaitome tik per jų termalizaciją. Termalizacijos procese laisvieji krūvininkai atiduoda perteklinę energiją puslaidininkio gardelei, taip pakaitindami elementą. Tačiau tiesioginio karštųjų krūvininkų reiškinių, sukuriančio priešingo poliškumo fotovoltaiškos vyksmus, įtaka saulės elementų efektyvumui nėra ištirta.



38 Pav. Bandinys ir fotosrovės matavimo schema.

Tyrime panaudoti pramoninių silicio saulės elementų (UAB Solitekas LT) išpjauti segmentai, $\approx 3 \times 3$ mm² didžio, n-tipo emiterio legiravimo lygis buvo apie 10^{20} cm⁻³, p bazės – 10^{16} cm⁻³. Bandinio ir matavimo schema pateikta 38 paveiksle. Lazerio spinduliuotė į bandinį buvo nukreipta iš viršaus (nuo emiterio pusės), kaip įprastiniame saulės elemente. Osciloskopu *Teledyne LeCroy WaveMaster 8Zi-B* buvo tiriami fotosrovės, tekančios 50 Ω apkrovos varža, impulsai. Buvo pastebėta, jog apšviečiant puslaidininkį 1064 nm bangos ilgio spinduliuote, karštųjų krūvininkų fotosrovė beveik neteka (39 Pav.), ji pastebima esant didelei tiesioginei įtampai (virš 0.8 V), kai p-n sandūros potencialinis barjeras tampa pakankamai žemas, ir silpnai pakaitinti krūvininkai gali jį įveikti. Krūvininkų generacijos sąlygota fotosrovė yra labai stipri (išsistinė mėlyna charakteristika 39 Pav.). Tuo tarpu, apšviečiant tą patį darinį 1342 nm bangos ilgio spinduliuote, net ir nesant išorinės įtampos ($U = 0$) galima stebėti karštųjų krūvininkų fotosrovę (39 Pav. raudona taškinė kreivė), kurios

didumas šiuo atveju yra jau palyginamas su generacine fotosrove (mėlyna taškinė kreivė). Matyti, jog didinant tiesioginę įtampą (mažinant sandūros potencialinio barjero aukštį), sudaromos vis palankesnės sąlygos karštųjų krūvininkų fotosrovei. Karštųjų krūvininkų fotosrovė didėja, tuo pačiu mažėja generacijos sąlygota fotosrovė.



39 pav. Si p-n darinio voltamperinės charakteristikos: tamsoje (juoda linija) ir apšviečiant 1064 nm (ištisinės linijos) ir 1342 nm (taškinės linijos) bangos ilgio lazerio spinduliuote. Mėlynos linijos – generavimo sąlygota fotosrovė, raudonos – karštųjų krūvininkų fotosrovė.

6. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

- Sumodeliuota indukuoto Nd:YVO₄ kristale šiluminio lęšio židinio nuotolio priklausomybė nuo kaupinimo galios atitinka eksperimentiškai nustatytai 808 nm bangos ilgio lazerinio diodo 1 – 4 W galios kitimo ribose.
- Optimizavus vieno lėkio Nd:YVO₄ stiprintuvą, buvo pasiektas ~7 kartų 1064 nm bangos ilgio skaidulinio užkrato lazerio impulsų stiprinimas ir ~22 kartus – dviejų lėkių stiprintuvo atveju.
- Nd:YAP lazerio ~1341.5 nm bangos ilgio 1 kHz pasikartojimo dažnio ir ~1.4 ns trukmės užkrato impulsai buvo pastiprinti ~1.6 karto dviejų lėkių Nd:YVO₄ stiprintuve su impulsiniu kaupinimu.
- Nd:YVO₄ osciliatoriaus spinduliuotės spektro juostos centrinis bangos ilgis ~1341.8 nm paslinkęs ~0.3 nm lyginant su Nd:YAP užkrato impulsų centriniu bangos ilgiu. Nežymus spektrinių juostų persiklojimas neleidžia efektyviai stiprinti Nd:YAP užkrato impulsus Nd:YVO₄ stiprintuve.
- Buvo sukurtas kokybės moduluotas Nd:YVO₄ spinduolis generuojantis ~1342 nm bangos ilgio, 0.53 μJ išvadinės energijos, 1.7 ns trukmės ir 1 kHz pasikartojimo dažnio impulsus. Keturių lėkių Nd:YVO₄ stiprintuve šie impulsai buvo pastiprinti 13.4 kartus ir išmatuotas pluošto sklaidymo kokybės faktorius $M^2 = \sim 1.3$. Pluošto iškrypimus lemia netobulas užkrato ir kaupinimo sąsmaukos persiklojimas stiprintuvo kristale.
- Tyrimo rezultatai leidžia keturių lėkių Nd:YVO₄ stiprintuve pastiprinti UAB „QS Lasers“ gaminamų Nd:YVO₄ lazerių impulsų energiją iki 1 mJ, taikant galingesnę kaupinimo lazerinį diodą.
- Tyrimo metu sukurtas 1342 nm bangos ilgio Nd:YVO₄ lazeris buvo sėkmingai panaudotas karštųjų krūvininkų sužadinimui silicio p-n sandūroje, dalyvaujant FTMC Elektroninių Vyksmų laboratorijos mokslininkais.

7. Rezultatų sklaida

Šie rezultatai taip pat buvo pristatytos konferencijose:

- R. Lebed and A.M. Rodin, Nd:YVO₄ amplifiers seeded with Nd:YAP and Nd:YVO₄ laser pulses at 1.34 μm for non-invasive blood diagnostics, 64th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences "Open Readings'2021", book of abstracts, Vilnius, 16–19 March 2021. <http://www.openreadings.eu/thesismanager/thesis21/219Lebed.pdf>
- R. Lebed, A. Rodin, Sub-ns lazerio neinvazinei kraujo diagnostikai tyrimai, Lietuvos Mokslo Tarybos organizuojama studentų mokslinę konferenciją, 2021 m. gegužės 11 d.: Preliminarios renginio programos 4 psl.

8. Literatūros sąrašas

- [1] WHO. World Malaria Report 2019. *Switzerland: World Health Organization*. p. 4–10, (2019).
- [2] C. L. A Laveran, B. H. Kean, K. E. Mott, ir A. J. Russell. A newly discovered parasite in the blood of patients suffering from malaria. Parasitic etiology of attacks of malaria. *Reviews of infectious diseases*, 908-911, (1982).
- [3] E. Y. Lukianova-Hleb, K. M. Campbell, P. E. Constantinou ir kiti. Hemozoin-generated vapor nanobubbles for transdermal reagent-and needle-free detection of malaria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**(3), 900-905, (2014)
- [4] E. Y. Lukianova-Hleb, S. Bezek, R. Szigeti, A. Khodarev, T. Kelley ir kiti. Transdermal diagnosis of malaria using vapor nanobubbles. *Emerging infectious diseases*, **21**(7), 1122, (2015).
- [5] E. Y. Lukianova-Hleb ir D. O. Lapotko. Malaria theranostics using hemozoin-generated vapor nanobubbles. *Theranostics*, **4**(7), 761, (2014).
- [6] C. Cai, K. A. Carey, D. A. Nedosekin, Y. A. Menyaev ir kiti. In vivo photoacoustic flow cytometry for early malaria diagnosis. *Cytometry Part A*, **89**(6), 531-542, (2016).
- [7] Y. A. Menyaev, K. A. Carey, D. A. Nedosekin, M. Sarimollaoglu ir kiti. Preclinical photoacoustic models: application for ultrasensitive single cell malaria diagnosis in large vein and artery. *Biomedical optics express*, **7**(9), 3643-3658, (2016).
- [8] K. Georgiev, D. N. Georgieva, A. Trifonov ir kiti.. Sub-ns, High Energy, Passively Q-switched Laser at 1.3 μm . *Laser Applications Conference* (pp. JTh2A-12). *Optical Society of America*. (2020, October)
- [9] A. Sennaroglu. Efficient continuous-wave operation of a diode-pumped Nd: YVO₄ laser at 1342 nm. *Optics communications*, **164**(4-6), 191-197, (1999).
- [11] R. Zhou, E. Li, B. Zhang, X. Ding, Z. Cai, W. Wen, ir kiti. Simultaneous dual-wavelength CW operation using 4F_{3/2}–4I_{13/2} transitions in Nd: YVO₄ crystal. *Optics communications*, **260**(2), 641-644, (2006).
- [10] A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher, ir J. W. Eler Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd: YVO₄. *Journal of Applied Physics*, **48**(12), 4907-4911, (1977).
- [12] Y. F. Chen, ir Y. P. Lan. Comparison between c-cut and a-cut Nd: YVO₄ lasers passively Q-switched with a Cr⁴⁺: YAG saturable absorber. *Applied Physics B*, **74**(4-5), 415-418, (2002).
- [13] Y. Yan, H. Zhang, Y. Liu, X. Yu, H. Zhang, J. He, ir J. Xin. Near-diffraction-limited, 35.4 W laser-diode end-pumped Nd: YVO₄ slab laser operating at 1342 nm. *Optics letters*, **34**(14), 2105-2107, (2009).

- [14] C. Wang, Y. Wen, Y. H. Wang, ir C. T. Wu. 1064/1342 nm dual-wavelength double electro-optical Q-switched Nd: YVO₄ laser. *Optics Communications*, **479**, 126404, (2021).
- [15] E. Gaižauskas ir V. Sirutkaitis, *Kieto kūno lazeriai*, Vilniaus Universiteto Leidykla, Vilnius (2008).
- [16] W. Koechner, Solid-state laser engineering, volume 1 (Springer, 2013).
- [17] Z. Ma, D. Li, J. Gao, N. Wu ir Du, K.. Thermal effects of the diode end-pumped Nd: YVO₄ slab. *Optics communications*, **275**(1), 179-185, (2007).
- [18] B. Chen, Y. Chen, J. Simmons, T. Y. Chung, ir M. Bass. Thermal lensing of edge-pumped slab lasers-I. *Applied Physics B*, **82**(3), 413-418, (2006).
- [19] M. Nie, Q. Liu, E. Ji, X. Fu ir M. Gong. Gain change by adjusting the pumping wavelength in an end-pumped Nd: YVO₄ amplifier. *Applied Optics*, **55**(18), 4946-4951, (2016).
- [20] X. Délen, F. Balembois, ir P. Georges. Temperature dependence of the emission cross section of Nd: YVO₄ around 1064 nm and consequences on laser operation. *JOSA B*, **28**(5), 972-976, (2011).
- [22] G. Shayeganrad ir L. Mashhadi. Efficient analytic model to optimum design laser resonator and optical coupling system of diode-end-pumped solid-state lasers: influence of gain medium length and pump beam M² factor. *Applied optics*, **47**(5), 619-627, (2008).
- [21] A. M. Malyarevich, I. A. Denisov, K. V. Yumashev, V. P. Mikhailov, R. S. Conroy, ir B. D. Sinclair. V: YAG-a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, **67**(5), (1998).
- [22] H. Y. Lin, D. Sun, N. Copner ir W. Z. Zhu. Nd: GYSGG laser at 1331.6 nm passively Q-switched by a Co: MgAl₂O₄ crystal. *Optical Materials*, **69**, 250-253. (2017).
- [23] H. T. Huang, J. L. He, C. H. Zuo ir kiti. Co²⁺: LMA crystal as saturable absorber for a diode-pumped passively Q-switched Nd: YVO₄ laser at 1342 nm. *Applied Physics B*, **89**(2), 319-321, (2007).
- [24] Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu, ir L. S. Qian. LD-pumped passively Q-switched Nd: YVO₄/LBO red laser with V: YAG. *Optics & Laser Technology*, **38**(7), 540-543, (2006).
- [25] S. Ašmontas, J. Gradauskas and E. Širmulis. Hot carrier silicon phototransistor. *Infrared and Optoelectronics Materials and Devices*, **1512**, 131-134, (1991).

1.3 μm BANGOS ILGIO LAZERIO IMPULSŲ GENERACIJA IR STIPRINIMAS Nd:YVO₄ KRISTALE

Santrauka

Greitas, tikslus ir nebrangus kraujo diagnostikos metodas yra būtinas maliarijos ankstyvajam gydymui ir likvidavimui. Pastaraisiais metais vykdomi neinvazinės maliarijos diagnostikos tyrimai, pagrįsti opto-akustiniu principu, kai sub-ns trukmės lazerio impulsas į kraujagysles sklinda per odą, o garso atsakas neša informaciją apie užkrėstų ląstelių buvimą. Aiškiausias akustinis atsakas pasiektas esant lazerio bangos ilgiui $\sim 0.67 \mu\text{m}$ o mažiausiai žalingi sveikom ląstelėms yra sub-ns impulsai.

Iki šiol vienintelis perspektyvus sprendimas, kuris tuo pačiu metu atitinka $\sim 0.67 \mu\text{m}$ lazerio bangos ilgio, sub-ns impulso trukmės ir išvadinės energijos reikalavimus, yra antrosios harmonikos generacija iš Nd-legiruotos aktyvios terpės lazerio spinduliuojančio $\sim 1.34 \mu\text{m}$ bangos ilgio impulsus. Tačiau komerciškai prieinamų lazerių dydis, patikimumas ir kaina nėra tinkami. Todėl šiame darbe buvo tiriamas nebrangus ir patikimas dviejų ir keturių lėkių Nd:YVO₄ stiprintuvas naudojant išilginį kaupinimą didelio skaisčio 808 nm bangos ilgio lazeriniais diodais.

Dviejų lėkių Nd:YVO₄ stiprintuve, kaupinant 4 W galios nuolatinės veikos lazeriniu diodu, buvo pasiektas ~ 23 kartų 1064 nm bangos ilgio 7 ps trukmės ir 1.7 mW vidutinės galios skaidulinio užkrato lazerio impulsų stiprinimas esant 29 MHz pasikartojimo dažniui. Dviejų lėkių Nd:YVO₄ stiprintuve su impulsiniu $\sim 300 \mu\text{s}$ trukmės ir 1.2 W vidutinės galios kaupinimu, buvo pasiektas < 2 kartų $\sim 1341.5 \text{ nm}$ bangos ilgio 1.6 ns trukmės ir $\sim 100 \text{ mW}$ vidutinės galios Nd:YAP užkrato lazerio impulsų stiprinimas esant 1 kHz pasikartojimo dažniui. Toks žemas stiprinimas paaiškinamas ne tik mažu emisijos skerspjūvių 1342 nm bangos ilgio, bet ir mažu persiklojimu Nd:YAP ir Nd:YVO₄ spektrinių juostų. Taikant pasyviają V:YAG užtūrą, Nd:YVO₄ kristalo pagrindu buvo sukurtas $\sim 1342 \text{ nm}$ bangos ilgio spinduliuotės osciliatorius. Jo išvadinė impulso energija siekė $0.53 \mu\text{J}$, o impulso trukmė 1.6 ns, esant 1 kHz pasikartojimo dažniui. Esant anksčiau nusakytam impulsiniam kaupinimui, buvo pasiektas ~ 3.9 kartų užkrato impulsų stiprinimas po dviejų praėjimų, o po keturių praėjimų pasiektas ~ 13.4 kartų stiprinimas.

Tyrimo metu sukurtas 1342 nm bangos ilgio Nd:YVO₄ lazeris buvo sėkmingai panaudotas karštųjų krūvininkų sužadimui silicio p-n sandūroje, dalyvaujant FTMC Elektroninių Vyksmų laboratorijos mokslininkais.

GENERATION AND AMPLIFICATION OF 1.34 μm WAVELENGTH RADIATION IN Nd:YVO₄ CRYSTAL

Summary

Fast, accurate and inexpensive of blood diagnosis is critical for the early treatment and eradication of malaria. In recent years, studies of noninvasive malaria diagnostics have been performed based on the opto-acoustic principle, where a laser pulse of sub-ns duration propagates through the skin and the sound response carries information about the presence of infected cells. The clearest acoustic response was achieved at laser wavelength of 672 nm and the least harmful to healthy cells are sub-ns pulses.

To date, the only viable solution that simultaneously meets the requirements for $\sim 0.67 \mu\text{m}$ laser wavelength, sub-ns pulse duration and output energy is second harmonic generation from Nd-doped laser radiation at 1.34 μm . However, the size, reliability, and cost of commercially available lasers are not suitable. Therefore, we are investigating the feasibility of inexpensive and reliable two- and four-pass end-pumped Nd:YVO₄ amplifiers using high-brightness pumping laser diodes at 808 nm wavelength.

In a two-pass Nd:YVO₄ amplifier at continuous-wave pump power of 4 W, a ~ 23 -fold amplification of 7 ps seed pulses from a fiber laser at a wavelength of 1064 nm with an average input power of 1.7 mW and a repetition rate of 29 MHz was achieved. In a two-pass Nd:YVO₄ amplifier, under conditions of pulsed pumping with pulse duration 300 μs and average power 1.2 W, the gain factor < 2 was achieved, for 1.4 ns pulses of Nd:YAP oscillator at a wavelength of ~ 1341.5 nm with an average power of ~ 100 mW at a repetition rate of 1 kHz. Such low amplification is explained not only by the low emission cross-sections of 1342 nm, but also by the small overlap of the Nd:YAP and Nd:YVO₄ spectral bands. Using passive Q-switch V:YAG, 1342 nm wavelength radiation oscillator was developed based on the Nd:YVO₄ crystal, with output pulse energy of 0.53 μJ , pulse duration of 1.7 ns at repetition rate of 1 kHz. With the previously described pulsed pumped conditions, a ~ 3.9 -fold amplification was achieved after two passes, and 13.4-fold amplification was achieved after four passes.

The 1342 nm wavelength Nd:YVO₄ laser developed during the study was successfully used to excite hot carriers at the silicon p-n junction with the participation of scientists from the FTMC Laboratory of Electronic Processes.