

**VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA**

Kasparas Sasnauskas

**DIDELĖS IŠVADINĖS GALIOS HIBRIDINIO ŠVIESOLAIDINIO-KIETAKŪNIO
LAZERIO TYRIMAI**

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Darbo autorius
Darbo vadovas
Recenzentas
Katedros vedėjas

Kasparas Sasnauskas
dr. Aleksėj M. Rodin
dr. Kęstutis Regelskis
prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2017

Turinys

ĮVADAS	3
1. Literatūros apžvalga.....	4
1.1. Diodinis kietojo kūno lazerių kaupinimas.....	4
1.2. IAG:Yb sužadavimo mechanizmas.....	4
1.3. Monokristalinis šviesolaidinis stiprintuvas	7
1.4. Monokristalinio šviesolaidinio stiprintuvo šiluminės savybės.....	9
1.5. Kaupinimas ties nuline fononų linija	10
1.6. Elektrooptinis efektas	11
1.7. Parazitinė lazerinė generacija stiprintuvuose	13
2. Tyrimo metodai.....	15
2.1. Monokristalinio šviesolaidinio IAG:Yb stiprintuvo tyrimas	15
2.1.1. Rezultatai: stiprinimo, juostos pločio ir trukmės	17
2.1.2. Pluošto kokybės matavimai	21
2.2. IAG:Yb 2x2x20mm 2 % legiravimo kristalinio stiprintuvo tyrimas	22
2.2.1. Kaupinimo konfigūracijos	23
2.2.2. Stiprinimo parametrų matavimai	26
2.2.3. Pluošto kokybės matavimai	29
2.3. IAG:Yb 2x2x20mm 2 % legiravimo kristalinio stiprintuvo tyrimas panaudojant užkrato impulsų retintuvą	32
2.3.1. Eksperimentai su vieno lėkio impulsų retintuvu.....	38
IŠVADOS	42
Literatūra.....	43
Santrauka.....	46
Summary.....	47

IVADAS

Ultraspartieji lazeriai tampa labai dažnai pritaikomi moksle ir industrijoje. Per šį dešimtmetį buvo ištobulinti diodais kaupinami lazeriai, pasiektos geresnės techninės charakteristikos, didesnis skaistis, patikimumas, šie lazeriai tapo labiau komerciškai prieinami.

Tam, kad diodais kaupinamuose lazeriuose būtų galima pasiekti dideles energijas kiekvienoje femtosekundinių impulsų voroje, dažnai naudojamos MOPA (angl. *master oscillator power amplifier*) schemos. Naudojami ir iterbiu legiruoti diskiniai regeneratyviniai stiprintuvai, galintys sustiprinti ultratrumpus impulsus iki keleto dešimčių milidžiaulių [1][2]. Šie stiprintuvai pasižymi itin dideliu stiprinimu ir išvadine energija esant mažam pasikartojimo dažniui, tačiau yra ribojami valdiklių greičio. Iterbiu legiruoti optiniai šviesolaidžiai taipogi gali būti naudojami stiprinant ultratrumpus impulsus. Jų didelis paviršiaus su tūriu santykis lemia gerą šilumos nunešimą, o tai leidžia pasiekti dideles vidutines galias, siekiančias keletą šimtų vatų [3]. Tačiau signalo ribojimas mažo skerspjūvio šviesolaidžių šerdyse sukuria netiesinius efektus: fazinę savimoduliaciją, savifokusaciją, kuri riboja smailinę galią ir impulso energiją. Kitas būdas stiprinti femtosekundinius impulsus, apie kurį ir bus kalbama šiame magistro darbe - iterbiu legiruotuose kristaluose naudojant keleto lėkių stiprintuvus. Nors tai reikalauja sudėtingų sistemų, plokštelinė (angl. *slab*) geometrija parodė, kad tai puikus metodas. Tačiau ir čia pasireiškia šalutiniai efektai, didesnis spektro siaurėjimas esant žemoms temperatūroms lemia impulsų ilgėjimą laike. Skaidulinio monokristalo idėja susieja šviesolaidžius su kristalais į vieną hibridinę sistemą, o tai būtent tai, ko reikia femtosekundinėms sistemų kūrimui.

Šiame magistro darbe analizuojamas didelės energijos ultratrumpųjų impulsų hibridinės technologijos modulinio lazerio kūrimas. Lazerinė sistema bus integruota su parametriniu stiprintuvu itin didelės smailinės galios kelių optinių ciklų impulsų generacijai. Didelės energijos ir smailinės galios ultratrumpųjų impulsų sąveika su medžiaga yra sparčiai besivystanti mokslo bei technologijos šaka, leidžianti tyrinėti procesus sąlygomis, nepasiekiamomis kitais metodais. Reliatyvistiniam režimui pasiekti reikalinga minimali 1 TW smailinė galia. Tai atveria sąveikos su medžiaga efektus, kurie įgalina tiek praktinius taikymus, kaip kietos Rentgeno spinduliuotės bei didelės energijos elektronų generacija plazmoje, tiek fundamentinius tyrimus, kaip medžiagų savybių tyrimai prie superaukštų temperatūrų, slėgių, elektrinio bei magnetinio lauko stiprių.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Diodinis kietojo kūno lazerių kaupinimas

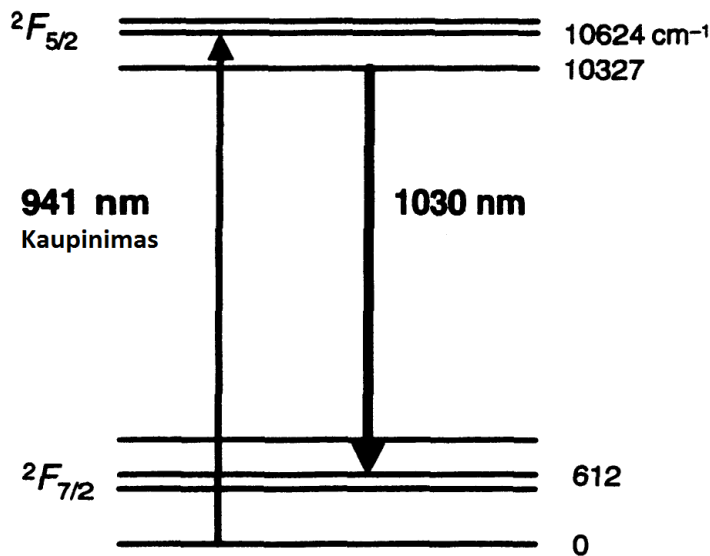
Vienas efektyviausių būdų kaupinti kietojo kūno lazerius - naudoti puslaidininkinius diodus, kaip kaupinimo šaltinius. Diodinis kaupinimas turi daug privalumų: kietojo kūno lazeris gali kaupti energiją metastabiliuose aukštesnės būsenos lygmenyse, kur diodinis lazeris neturi šios galimybės. Daugelį diodinių lazerių galima panaudoti kietakūnių lazerių kaupinimui didelėms energijoms pasiekti. Diodu kaupinamas kietojo kūno lazeris gali generuoti stabiliu vienu dažniu, nepriklausomai nuo atsako funkcijos. Kaupinimo diodo dažnis gali būti tiksliau sutapatintas su sugerties juosta taip sumažinant nepageidaujamą šilumos kaupimąsi lazerio kristale.

Kaupinamas strypas patiria didelius temperatūrinius gradientus, nukreiptus statmenai lazerio ašies, o tai lemia šiluminio lęšio efekto atsiradimą. Šis efektas pasireiškia tuo, kad lūžio rodiklio pokyčiai lemia mechaninius įtempius, kas sukelia paviršių iškraipymus bei spinduliuotės laužimą / fokusavimą. Kiekviena medžiaga turi skirtingus terminio lęšio koeficientus. Tam, kad galėtume pasiekti reikalingus išvadinės spinduliuotės parametrus, turime naudoti žymiai galingesnę kaupinimą, o tai nulemia kvazi-trijų lygmenų energijos juostų išsidėstymas. Apatinio IAG:Yb lazerio lygmens artumas prie pagrindinės būsenos, kartu su kaupinimo pluošto fotonų energija beveik atitinka viršutinio lazerio lygmens energiją – tai reiškia, jog šis lazeris turi mažiausią šilumos akumuliaciją kiekvienam sužadintam jonui iš daugelio kietojo kūno lazerio sistemų. Sugeneruotos šilumos su sugerta kaupinimo energija santykis siekia tik 9 %, kas yra žymiai mažiau nei IAG:Nd (40 %) ir kai kaupiname šią medžiagą GaAs lazeriniais diodais. Šią medžiagą kaupinant GaAs lazeriniais diodais sumažinami žalingi šiluminiai padariniai, tokie kaip įtempių sąlygotas dvejetainis lūžimas, šiluminis lęšis, kristalo įtrūkimai dėl per didelio kaupinimo intensyvumo [5].

1.2. IAG:Yb sužadinimo mechanizmas

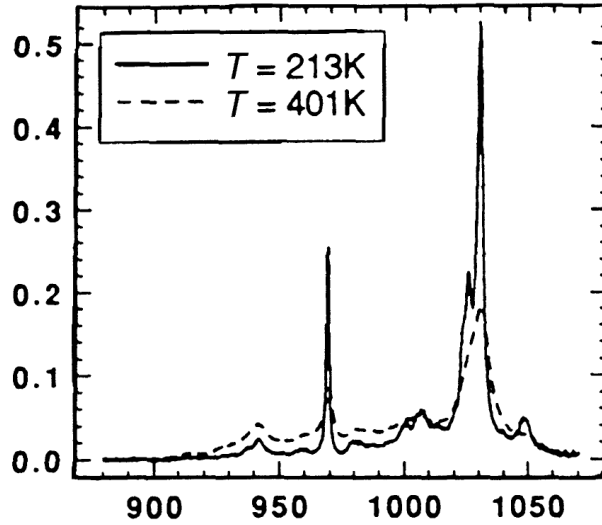
Svarbiausi energijos lygmenys, susiję su iterbio lazeriais, yra ${}^2F_{7/2}$ pagrindinio lygmens šuolis ir sužadintos būsenos ${}^2F_{5/2}$ šuolis. Šiuos lygmenis skiria 10000 cm^{-1} [6]. Relaksacija vyksta iš žemutinės sužadintos būsenos į viršutinę ${}^2F_{7/2}$ pagrindinę būseną, kuri yra 0,077 eV virš

pagrindinio lygmens, kai lyginant su IAG:Nd žemiausius lygmuo yra 0,26 eV virš pagrindinio žemutinio lygmens.



1 pav. Svarbiausi IAG:Yb energetiniai lygmenys

Kaip paminėta aukščiau, kadangi IAG:Yb viršutinė pagrindinė būseną yra žymiai arčiau pagrindinio lygmens, sistema tampa kvazi-trijų lygmenų, nes apatinis lygmuo yra užpildytas maždaug 5 % Yb legiravimo koncentracijos. Taigi, nėra galimybės dėl šiluminės relaksacijos pereiti į pagrindinį lygmenį ir sukurti inversiją – kaip tai vyksta keturių lygmenų lazeriuose, t.y. IAG:Nd. Iš tiesų, kaupinimas turi aplenkti absorbciją šuolio metu prieš tai kol įvyks užpildos apgrąža. Kaupinimo slenkstis yra žymiai aukštesnis nei su IAG:Nd, tačiau InGaAs diodiniai lazeriai gali kaupinti iki tokių didelių galių su 940 nm ir 969 nm bangos ilgiais [7].



2 pav. IAG:Yb spinduliuotės spektras esant 5.5 % legiravimui [7]

1 lentelė. IAG:Yb ir IAG:Nd parametrų palyginimas

Parametras	IAG:Yb	IAG:Nd
Sugerties maksimumas	941 nm	808 nm
Absorbcijos juostos plotis (FWHM)	18 nm	<2 nm
Absorbcijos skerspjūvis	$7.5 \times 10^{-25} m^2$	$7.7 \times 10^{-24} m^2$
Spontaninės emisijos maksimumas	1.030 μm	1.064 μm
Sustiprintos emisijos skerspjūvis	$2.1 \times 10^{-24} m^2$	$2.8 \times 10^{-23} m^2$
Viršutinio lygmens gyvavimo trukmė	960 μs	230 μs
Soties energija	92 kJ/m^2	6.7 kJ/m^2
Soties intensyvumas	97 MW/m^2	29 MW/m^2
Terminė akumuliacija	<9 %	37 %

2 lentelė. Tipiniai IAG:Yb lazerio parametrai

Lazerio bangos ilgis	1.03 μm
Lazerio šuolio tikimybė	$1.03 \times 10^3/s$
Viršutinio lygmens gyvavimo trukmė	960 μs
Lūžio rodiklis	1.82
Šiluminis laidumas	14 W/m-K
Veika	Kaupinama diodiniu kaupinimu

1.3. Monokristalinis šviesolaidinis stiprintuvas

Monokristaliniai šviesolaidiniai stiprintuvai suteikia galimybę ultratrumpuosius impulsus stiprinti iki didelių galių išsaugant schemos paprastumą [8]. Santykinai trumpas sąveikos ilgis ir didelis signalo pluošto diametras leidžia išvengti netiesinių efektų, stiprinant pikosekundinius ir sub-pikosekundinius impulsus. Nors ši technologiją vystoma jau dešimtmečius, tokio tipo stiprintuvai didelių galių lazeriuose pradėti naudoti tik dabar. Šie stiprintuvai išsiskiria savo konceptualumu, sujungiančiu geriausias šviesolaidžių ir kristalų savybes.

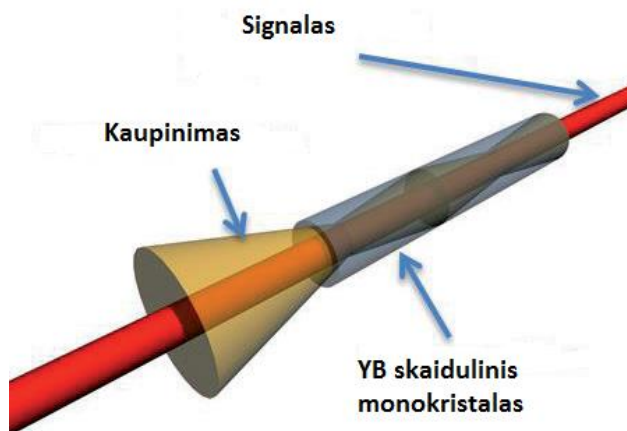
Stiprintuvai, paremti plokštelės formos kristalo (angl. *Innoslab*) technologija, pasižymi puikiais rezultatais vidutinės galios srityje esant dideliame pasikartojimo dažniui. Pastiprinimas iki 1.1 kW pademonstruotas su IAG:Yb plokštelės formos kristalu ir impulso trukme 615 fs [9]. Šios sistemos sudėtingumas ir nemažas lėkių skaičius be bangų nuvedimo kontrolės lemia sunkumus kuriant stabilią sistemą bei ją pritaikant industrijoje.

Optiniai šviesolaidžiai - kitas būdas stiprinti ultratrumpuosius impulsus, norint pasiekti didelę vidutinę galią ir aukštą pasikartojimo dažnį [10]. Dėl puikaus šiluminio laidumo jie turi geras galios didinimo galimybes, tai lemia didelis paviršiaus su tūriu santykis. Visos šios savybės leidžia rinktis norimą kaupinimo būdą. Didžiausias trūkumas yra tai, kad signalas apribojamas mažame šerdies skerspjūvyje, kas sukelia netiesinius efektus tokius kaip fazinę savimoduliaciją, savifokusaciją. Dėl šių priežasčių yra pasiekama mažesnė smailinė galia ir impulso energija. Taigi, tokiu metodu stiprinant ultratrumpuosius impulsus, reikalinga naudoti faziškai moduluotus impulsus. Naudojant faziškai moduluotų impulsų stiprinimo metodą pasiekta 2.2 mJ ir 830 W vidutinė galia, tačiau būtent pritaikius dideles ir sudėtingas CPA (angl. *Chirped pulse*

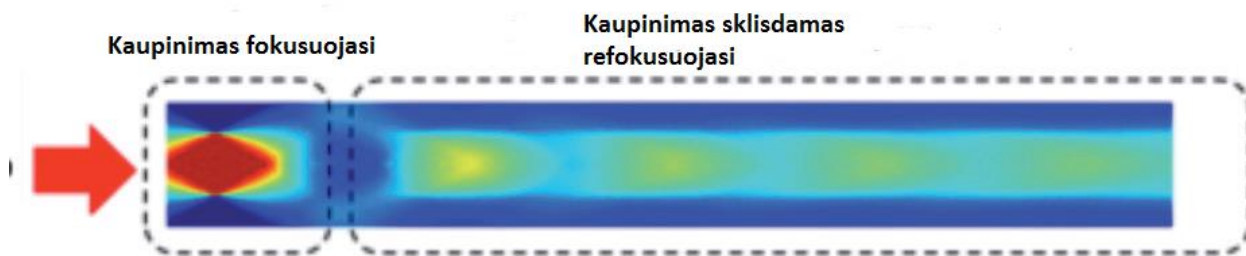
amplification) technologijas [11]. Atlikti eksperimentai be CPA parodė, jog galima pasiekti 42 % keitimo efektyvumą su 160 W išvadine galia, 5 MHz pasikartojimo dažniu ir $M^2 = 1.3$ [12].

Skaiduliniame monokristale kaupinimas sklinda vidaus atspindžiu, o signalas - laisvos erdvės sklidimu. Pirmus keletą milimetrų kaupinimas irgi sklinda kaip laisvoje erdvėje. Tokia geometrija suteikia keletą privalumų stiprinant ultratrumpuosius impulsus. Kaupinimas, sklisdamas visišku vidaus atspindžiu, geriau persikloja su signaline banga, lyginant su didžiąja dalimi kitų technologijų [13]. Didelis signalo pastiprinimas gali būti pasiektas tiek su vienos, tiek su dviejų lėkių technologijomis. Todėl galima išvengti regeneratyvinės stiprinimo pakopos, tuo pačiu pasiekiant veikas aukštuose pasikartojimo dažniuose.

Lyginant su IAG:Nd, IAG:Yb turi žymiai mažesnę kvantinę defektą, o tai leidžia pasiekti žymiai didesnes vidutines išvadinės galias. Jo emisijos linijos plotis taipogi platesnis ir leidžia stripinti sub-pikosekundinius impulsus, ko kol kas neįmanoma padaryti su IAG:Nd. Galiausiai, iterbio emisijos bangos ilgis atitinka daugelio šviesolaidinių sistemų emisijos bangos ilgį. Todėl IAG:Yb monokristalinis modulis yra puikus sprendimas stiprinant netiesinių efektų ir žemo pažeidimo slenksčio apribotus šaltinius [14].



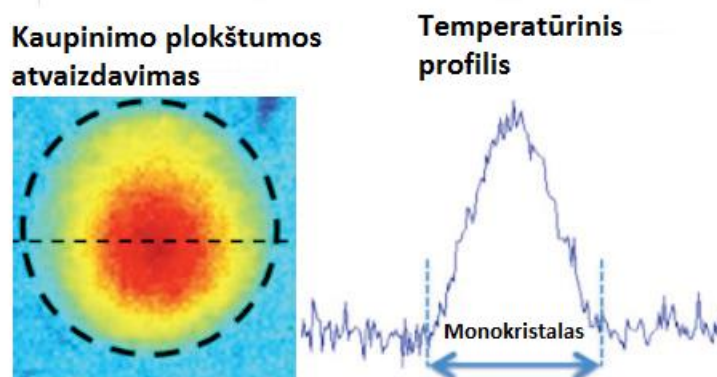
3 pav. Monokristalinis šviesolaidinis stiprintuvas [8]



4 pav. Kaupinimo sklidimas [8]

1.4. Monokristalinio šviesolaidinio stiprintuvo šiluminės savybės

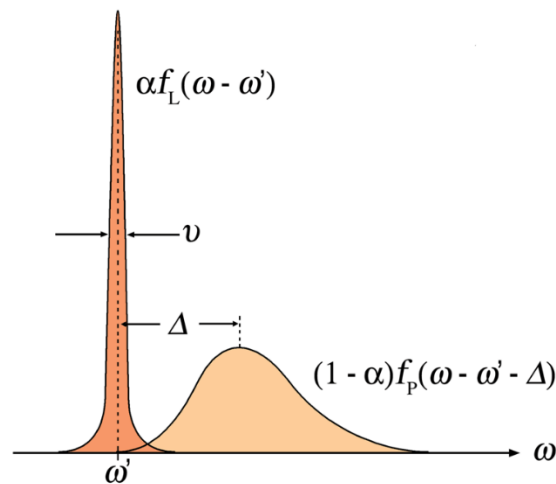
Monokristalinis šviesolaidinis stiprintuvas gali būti palygintas su įprastu kristalu – temperatūros nuvedimo ir sukuriama šiluminio lęšio požiūriu. Monokristalinio šviesolaidinio stiprintuvo mažas diametras, palyginus su įprastu kristalo strypu, leidžia sumažinti temperatūrinius skirtumus tarp kristalo krašto ir centro, kadangi šiluma nunešama per trumpesnę atstumą. Žemesnė temperatūra gali būti naudinga dėl spektroskopinių savybių, nes sumažėjus temperatūrai emisijos skerspjūvio didėjimas pasireiškia daugumai medžiagų ir ypač IAG:Yb [15]. Nors temperatūros gradientas turėtų būti toks pat abiem atvejais, šiluminio lęšio vertė turi būti panaši sugertam kaupinimui centrinėje kristalo dalyje. Pagrindinis trūkumas yra tai, jog mažo skersmens kristalas turi blogą šiluminį laidumą su laikikliu. Dėl šios priežasties buvo sukurtas „Taranio“ stiprintuvas, turintis puikų šiluminį laidumą bei užtikrinantis homogenišką aukštos temperatūros perdavimo koeficientą, o tai lemia mechaninių įtempių minimizavimą [16].



5 pav. Kaupinimo skaidulinio monokristalo atvaizdavimas [15]

1.5. Kaupinimas ties nuline fononų linija

Nulinė fononų linija ir fononų pašalinės juostos kartu sudaro linijos formą, atskirų, šviesą sugeriančių ir spinduliuojančių molekulių – chromoforų, susietų į matricą. Kai priimančiosios matricos yra perpildytos chromoforais, kiekvienas jų prisidės prie nulinio fononų linijos ir fononų šoninės sugerties ir emisijos spektrų. Esant netolygiam chromoforų pasiskirstymui, individualios nulinių fononų linijos ir šalutinių fononų pozicijos perstumiamos ir pradeda persikloti. 6 paveikslas demonstruoja tipinius elektroninius šuolius individualių chromoforų kietakūnėje matricoje. Nulinė fonono linija atitinka dažnį ω' , nustatomą pagal būdingus skirtumus energetinių lygmenų tarp žemutinio ir sužadino būsenos. Fononų šoninės juostos paslenkamos į aukštesnį absorbcijos dažnį ir žemesnį fluorescencijos dažnį. Dažnio tarpas Δ tarp nulinės fonono linijos ir fononų šoninės juostos smailės yra nustatomas pagal Franck-Condon principą. Pasiskirstymo intensyvumas turi didelę priklausomybę nuo temperatūros [17].



6 pav. Schematinis elektronų sužadino atvaizdavimas. Siauras komponentas su dažniu ω' yra nulinė fononų linija, o platesnis - šalutinis kraštas. Emisijos atveju santykinės pozicijos yra apgręžiamos

Iki šiol efektyvūs IAG:Yb lazeriai, paremti įvairiomis skirtingomis lazerių schemomis, tiek nuolatinėje veikoje, tiek ir impulsiniame režime naudojo standartinę plačios juostos 940 nm bangos ilgio kaupinimą, turintį gerą persiklojamumą (angl. *layering*) su sugerties lygmenimis.

Kitas būdas (kuris taip pat yra nagrinėjamas šiame darbe) kaupinti ties nuline fononų linija (angl. *zero phonon line*) (NFL) – 969 nm bangos ilgiu. Privalumas naudoti kaupinimą ties NFL

yra tas, kad kvantinis defektas sumažėja 3 procentais, kuris savo ruožtu sumažina šilumos kaupimąsi 32 procentais. Tai turi tiesioginį poveikį didinant bendrą sistemos efektyvumą [20]. Eksperimentiniai rezultatai rodo, jog siaurajuosčio 969 nm kaupinimo šaltinio panaudojimas IAG:Yb sistemose leidžia kurti kompaktiškas ir labai efektyvias lazerines sistemas. Lyginant su eksperimentais, atliktais naudojant įprastus 940 nm kaupinimo diodus, pastebėtas žymus išvadinės galios ir našumo prieaugis kaupinant jau minėtais diodais, stabilizuotais tūrine brego gardele [21].

Eksperimentuose su diskiniiais lazeriais buvo pademonstruotas stiprinimas ties nuline fononų linija. Rezultatai parodė, jog taip gali būti pasiekama dvigubai didesnė išvadinė galia. Kas liečia šiluminius efektus, taipogi pastebėtas skirtumas - kaupinant 250 W 940 nm ir 969 nm skirtingo tipo diodais, šiluminis gradientas siekė daugiau kaip 120 K [22].

1.6. Elektrooptinis efektas

Pokelso narvelis - tai įrenginys, skirtas poliarizacijai sukurti. Jis sudarytas iš vienašio dvejopo lūžio kristalo, įtvirtinto tarp dviejų elektrodų. Pokelso narvelis gali būti skersinis arba išilginis. Jeigu elektrinis laukas sukuriamas lygiagrečiai kristalo optiniai ašiai, tai bus išilginis pokelso narvelis, jei statmenai - tai skersinis. Išilginiam pokelso narveliui tam pačiam fazės pokyčiui sukurti reikia daug didesnės valdymo įtampos nei skersiniam Pokelso narveliui.

Elektrooptinis efektas (kitai dar vadinamas Pokelso efektu) specialiose kristalinėse optinėse medžiagose - tai paprastojo ir nepaprastojo spindulio lūžio rodiklio pokytis, atsirandantis dėl pridėto elektrinio lauko. Šis pokytis yra proporcingas elektriniam laukui. Elektrooptinis efektas buvo atrastas V. H. Rentgeno ir intensyviai tyrinėtas Pokelso 19 a. pradžioje. Elektrooptinis efektas yra netiesinės optinės prigimties, apibūdinamas kaip patogus būdas kontroliuoti sklindančios spinduliuotės fazę ir intensyvumą.

Pažymėtina, jog šis efektas lemia dvejopą spindulių lūžį, kuris priklauso nuo kristalą veikiančio elektrinio lauko. Kristalas atlieka sklindančios per jį šviesos spinduliuotės fazinę moduliaciją, taip pat tarp paprastojo ir nepaprastojo spindulių sukuria fazės poslinkį. Dėl elektrooptinio efekto išorinis elektrinis laukas keičia $(1/n^2)$; koeficientų vertes. Koeficientų verčių pokytis tiesiog proporcingas lauko stipriui kristalografiniemis kryptimis [7]. Lūžio rodiklio pokyčio Δn ir išorinio elektrinio lauko sąryšis išreiškiamas trečiojo rango elektrooptiniu tenzoriumi r :

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 r_{ij} E_j$$

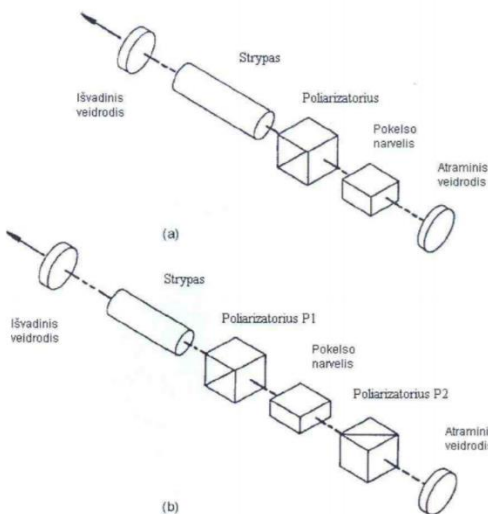
čia r_{ij} – elektrooptiniai koeficientai, $i=1, \dots, 6$ ir $j=1, 2, 3$.

Tenzorių r sudaro 18 r_{ij} koeficientų. Bendriausiu atveju medžiagos lūžio rodiklio anizotropinį pasiskirstymą galima užrašyti taip:

$$\left[\frac{1}{n_x^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1\right] x^2 + \left[\frac{1}{n_y^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2\right] y^2 + \left[\frac{1}{n_z^2} + \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3\right] z^2 + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 yz + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 xz + 2\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 xy = 1$$

Iš čia matyti, kad išorinis elektrinis laukas keičia medžiagos lūžio rodiklio elipsoido pagrindinių ašių vertes. Taip pat kartu sukuria papildomus skersinius lūžio rodiklio pokyčius xy , xz , yz . Taigi, šis elipsoidas keičia formą pagrindinių ašių kryptimis, o skersiniai lūžio rodiklio pokyčiai daro įtaką elipsoido sukimuisi erdvėje. Paveikus išoriniu lauku E_0 x , y , z koordinatės nesutampa su pagrindinėmis elipsoido kryptimis. Lūžio rodiklis pakinta x ir y kryptimis, dėl to kristale susidaro dvejetainis lūžis $\Delta n = n_o - n_e$. Kristalas tampa dviašiu, o spinduliuotės sklaidimo greitis priklauso nuo poliarizacijos.

Dėl greičių skirtumo tarp šių spinduliuočių pluoštų susidaro fazių skirtumas. Perėjus terpę, šių dviejų komponentų sumos rezultatas priklauso nuo pridėtos įtampos ir gali būti tiesiai, eliptiškai arba apskritimiškai poliarizuotas spindulys. Pirmuoju atveju tiesiai poliarizuotas spindulys perėjęs terpę tampa apskritimiškai poliarizuotu. Antru atveju, poliarizacija išlieka tiesiška, bet poliarizacijos plokštuma pasisuka 90° [23].



7 pav. Pokelso narvelis veikiant kaip: (a) ketvirčio bangos plokštelė; (b) pusės bangos plokštelė

7a pav. Impulso metu įjungiami įtampa elektrooptiniam narveliui, taip tiesiai poliarizuota šviesa pakeičiama į apskritimiškai poliarizuotą. Atspindėta veidrodžio spinduliuotė vėl grįžta į Pokelso narvelį ir pasukama dar kartą, kad spinduliuotė vėl tampa tiesiai poliarizuota ir statmena pradinei krypčiai. Poliarizatorius uždaro kelią spinduliuotei ir taip grįžtamasis optinis ryšys nesusidaro. Impulso pabaigoje įtampa išjungiami ir tiesiai poliarizuotas spindulys praeina be nuostolių.

7b pav. Įtampa turi būti įjungta, tada spindulys praeina Pokelso narvelį tarp dviejų sukryžiuotų poliarizatorių. Impulso pabaigoje Pokelso narveliui įjungiami įtampa, dėl to įeinančio spindulio poliarizacijos plokštuma yra pasukama 90° kampu. Poliarizatorius P2 praleidžia spindulį. Atsispindėjusi nuo veidrodžio šviesa vėl praeina poliarizatorių P2 ir Pokelso narvelį. Poliarizacijos plokštuma pasukama dar 90° kampu[7].

Pokelso reiškinys neįnertiškas, todėl jis plačiai taikomas sparčioms optinėms užtūroms bei aukštadažniams šviesos modulatoriams kurti[23].

1.7. Parazitinė lazerinė generacija stiprintuvuose

Lazeriuose ir jų stiprintuvuose su dideliu stiprinimo koeficientu, užkrato stiprinimas gali būti sutrikdytas. Šie efektai gali pasireikšti strypinių arba plokščių lazerių aktyviuose elementuose, visišku vidaus atspindžiu, Frenelio atspindžiais. Plono disko lazeriuose skersinis stiprinimas gali

būti didesnis nei išilgine kryptimi, taip, kad net silpni atspindžiai nuo disko briaunų gali sustiprinti parazitinių lazerio veikimą. Kadangi plono disko lazeriuose stiprinimas sistemiškai priklauso nuo skersinės ir išilginės dedamosios, parazitinė generacija tampa rimtu iššūkiu siekiant didesnės galios. Skaiduliniuose lazeriuose, Frenelio atspindys nuo šviesolaidžio galo gali sukelti parazitinę generaciją, netgi jei lazerio rezonatorius pertraukiamas kokybės moduliacijos (Pokelso celė). Šios problemos gali būti nuslopintos naudojant kampu šlifuotas skaidulas, kur atspindėta šviesa nenukeliauja šviesolaidžio šerdimi. Nors ir skaidulos viduje pasireiškusi Relėjaus sklaida gali sukelti lazerinę generaciją[24].

Parazitinės lazerinės generacijos rizika didžiausia, kai lazerinė sistema dirba nesoties režime. To pavyzdys - impulsinis kokybės moduliacijos lazeris kaupinimo periodu. Tarpiniais atvejais parazitinė generacija atsiranda tik esant žemam impulsų pasikartojimų dažniui, kada energija stiprinimo terpėje yra didesnė. Nustatyti tai ne visada paprasta, kadangi sunku išskirti parazitineą generacijos efektus nuo parazitinių atspindžių. Be to, dėl pakankamai didelio stiprinimo (~kelių dešimčių decibelų) – pasireiškia sustiprinta spontaninė emisija (ASE)[25]. Optinis spektras paprastai rodo aštrias ir nestabilias smailes parazitinės generacijos atveju, kai sustiprinta spontaninė emisija atvaizduoja lygesne spektro forma.

Parazitinės lazerinės generacijos dominuojantis šalutinis poveikis yra nepageidaujama energijos ekstrakcija, o tai riboja stiprinimą ar generaciją visiškai tiek galios, tiek energijos požiūriu. Taip pat tikėtina, kad parazitinis efektas daro įtaką koherentinės šviesos emisijos sklaidai erdvėje[26].

2. Tyrimo metodai

2.1. Monokristalinio šviesolaidinio IAG:Yb stiprintuvo tyrimas

Šio tyrimo tikslas - išbandyti femtosekundinio hibridinio (skaidulinio užkrato + kietakūnio stiprintuvo) lazerio technologiją.

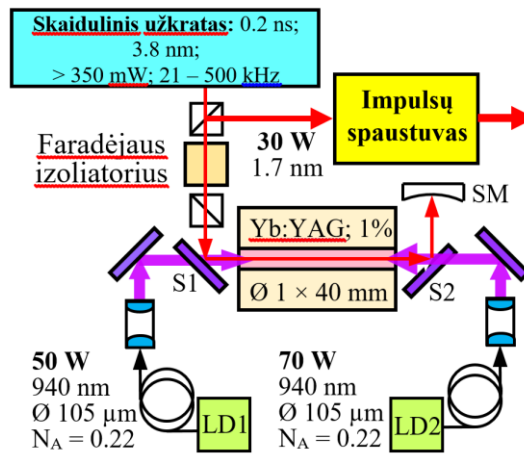
Šviesolaidiniai sinchronizuotų modų lazeriai, paremti SESAM (angl. Semiconductor saturable absorber mirror) technologija, yra nepralenkami dėl savo pluošto kokybės, kompaktiškumo ir paprastumo juos taikant. Tarp žinomų technologijų galios ir energijos didinimui IAG:Nd [27] ir IAG:Yb [16] monokristalinis šviesolaidinis stiprintuvas pasižymi geru persiklojimu tarp kaupinimo ir užkrato pluoštų dėl kaupinimo sklidimo visišku vidaus atspindžiu ir gero šiluminio nuvedimo. Šiame tyrime pademonstruotas ultratrumpųjų impulsų galios ir energijos keitimas siekiant stiprinti čirpuotus impulsus (CPA) [3] ir tiesioginio stiprinimo metodai [28]. Koherentinių pluoštų kombinavimas [29] ir padalintų impulsų stiprinimas [16] gali būti pritaikytas tolesniam impulsų smailinės galios didinimui.

Tyrimo metu buvo atliktas čirpuotų impulsų stiprinimas kompaktiškame IAG:Yb skaiduliniame kristaliniame stiprintuve su 210 ps trukmės ir 350 mW vidutinės išvadinės galios užkrato lazeriu esant 21, 100 ir 500 kHz pasikartojimo dažniams vieno ir dviejų lėkių konfigūracijose kaupinant iš galo 50 W ir 70 W 105 μm šviesolaidžio šerdies lazeriniais diodais ties 940 nm (NA = 0.22). Pagrindinė tyrimo užduotis buvo optimizuoti užkrato lazerio ir kaupinimo parametrus taip, jog būtų gautas maksimalus stiprinimo koeficientas išsaugant puikią išvadinio pluošto kokybę. Pastiprintų impulsų spektro pločio siaurėjimo tyrimas yra svarbus būsimiems impulsų kompresijos eksperimentams. Sustiprinti impulsai iš skaidulinio monokristalo ir apertūros stiprintuvo buvo suspausti naudojant dielektrinį gardelės kompresorių tam, kad galėtume ištirti ryšius tarp erdvinių ir spektrinių iškraipymų. Vėliau bus siekiama sukurti modulinę IAG:Yb lazerio sistemą su 50 mJ išvadine energija, 500 fs impulso trukme ties 100 Hz pasikartojimo dažniu. Šis lazeris bus panaudotas kaupinti 1 TW eilės optinį parametrinį čirpuotų impulsų stiprintuvą (OPCPA).

Užkrato lazeris buvo paremtas skaiduliniu pasyviai modų sinchronizuotu osciliatoriumi, generuojančiu 1 ps trukmės impulsus ties 1030 nm centriniu bangos ilgiu. Impulsai iš osciliatoriaus buvo sustiprinti vienamodžiam iterbiu legiruotame skaiduliniame stiprintuve. Dėl fazinės savimoduliacijos sustiprinti impulsai spektriškai išplėsti iki 3.8 nm spektro pločio pasyvioje

vienamodėje skaiduloje. Impulsai išplėsti iki ~210 ps trukmės taikant čirpuotą skaidulinę Brego gardelę su optimizuotu dispersijos profiliu tam, kad kompensuotume trečią dispersijos eilę.

Akustooptinis modulatorius buvo naudojamas kaip impulsų daliklis kontroliuoti pasikartojimo dažnį 21 – 500 kHz ribose. Po modulatoriaus, impulsai buvo toliau stiprinami iki daugiau nei ~350 mW vidutinės galios vienamodžiam kaupinam legiruotame šviesolaidyje. Maksimalią impulso energiją ribojo netiesiniai faziniai iškreipymai stiprintuve iki 14 uJ esant 21 kHz pasikartojimo dažniui.

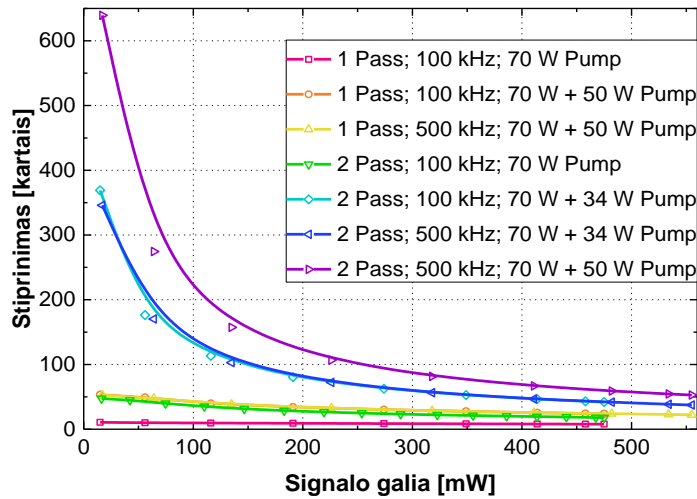


8 pav. Dvigubo galinio kaupinimo dviejų lėkių čirpuotų impulsų stiprinimo (CPA) skaiduliniam kristaliniam stiprintuvei principinė schema

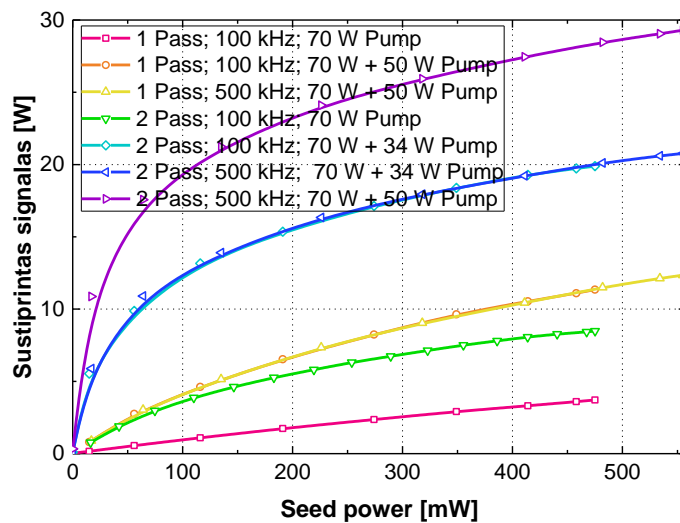
Užkrato lazerio kolimuoto pluošto diametras sumažintas iki ~0.4 mm toliau sklinda per IAG:Yb $\varnothing 1 \text{ mm}$ skersmens strypą, kurio ilgis 40 mm ir iterbio legiravimas 1 % (8 pav.) Vienas arba du skaiduliniai kaupinimo diodai sukuria ~0.42 mm sąsmauką 5 mm IAG:Yb kristalo tūryje, kristalas įlydytas tarp 15°C vandeniui aušinamo vario plokštės. Faradėjaus izoliatorius užtikrina užkrato lazerio apsaugą ir atskiria po antro lėkio grįžtančią sustiprintą spinduliuotę. Atstumas tarp sferinio veidrodžio ir lazerinio aktyvaus elemento buvo parinktas kompensuoti susidarantį šiluminį lęšį. Bendras stiprintuvo dydis kartu su dviejų lėkių stiprintuvo modulių dvigubo kaupinimo konfigūracijoje užėmė $200 \times 150 \text{ mm}^2$.

2.1.1. Rezultatai: stiprinimo, juostos pločio ir trukmės

Nedidelės užkrato lazerio galios 20 mW esant 500 kHz pasikartojimo dažniui atveju buvo pasiekti 50 ir 600 kartų stiprinimai atitinkamai vieno ir dviejų lėkių atveju esant 120 W bendram dviejų lazerio diodų kaupinimui dviejų lėkių kaupinimo konfigūracijoje (9 pav.) Esant 550 mW įvedimo galiai ir 500 kHz pasikartojimo dažniui, išvadinė galia maksimaliai pasiekia beveik 30 W po dviejų lėkių su 120 W kaupinimu (10 pav.)

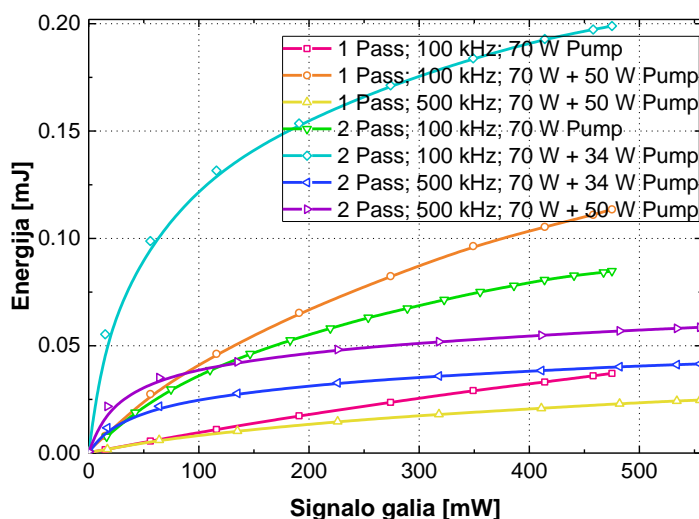


9 pav. Stiprinimo priklausomybė nuo užkrato lazerio galios

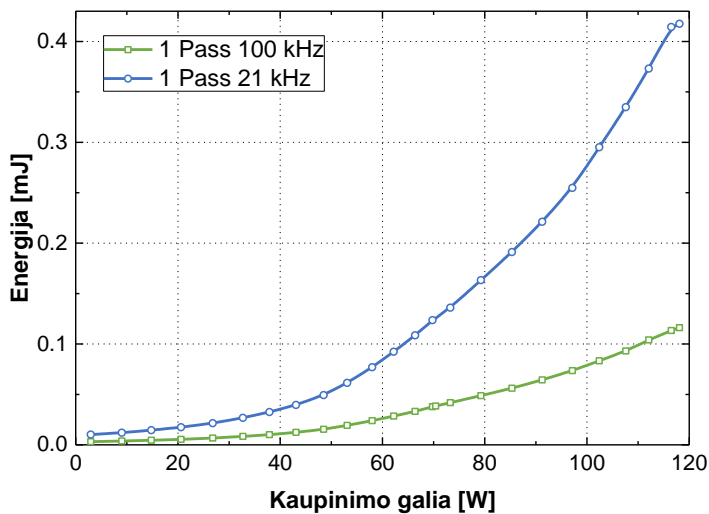


10 pav. Vidutinė išvadinės galios priklausomybė nuo užkrato lazerio galios

Pasiekta 0.2 mJ išvadinė impulso energija iš užkrato lazerio 4.7 μJ energijos ties 100 kHz pasikartojimo dažniu kaupinant 104 W ties 940 nm dviejų lėkių konfigūracijoje (11 pav.) Maksimali impulso energija, didesnė nei 0.42 mJ, pasiekta esant 21 kHz pasikartojimo dažniui viename lėkyje su 120 W vidutine kaupinimo galia (12 pav.) Tyrime nebuvo išbandytos dviejų lėkių konfigūracijos su didžiausiu kaupinimo lygiu esant žemesniam nei 100 kHz pasikartojimo dažniui tam, kad būtų išvengta antirefleksinės (AR) dangos suardymo strypiniame stiprintuve.

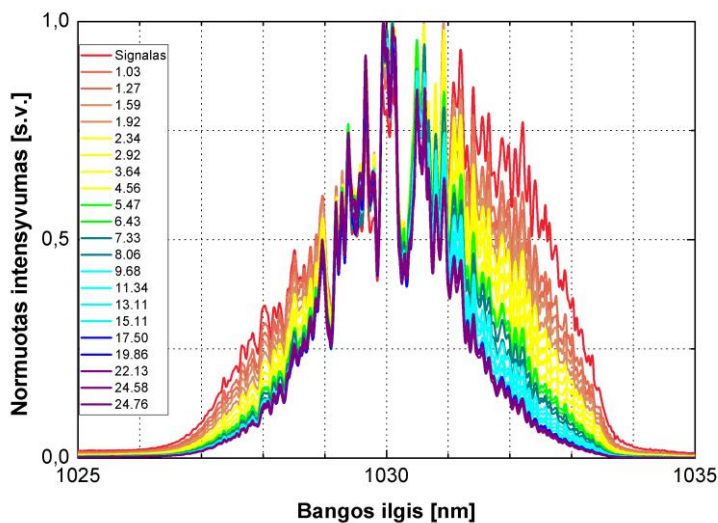


11 pav. Išvadinės energijos priklausomybė nuo užkrato lazerio galios

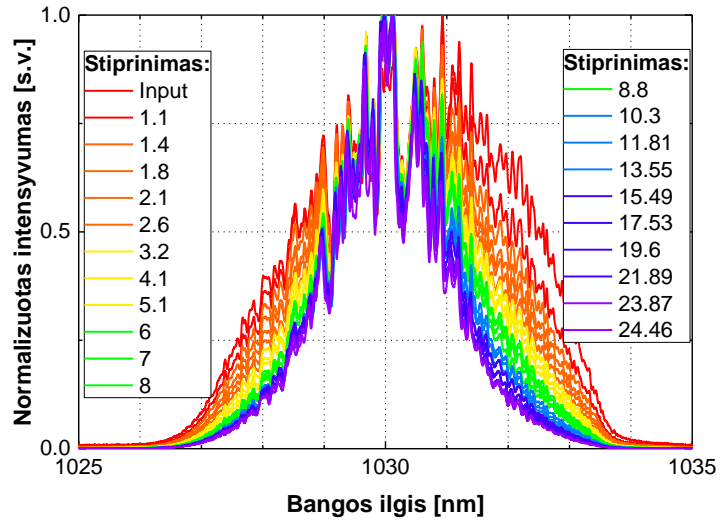


12 pav. Sustiprintos išvadinės energijos priklausomybė nuo kaupinimo galios

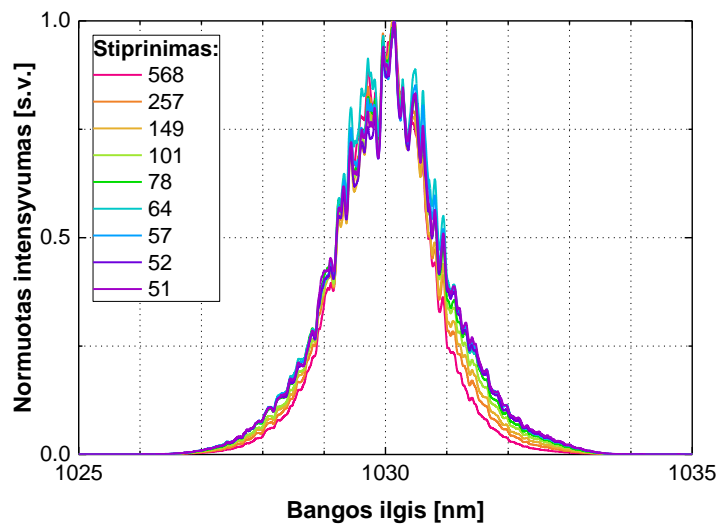
Stiprinimo juostos nulemtas spektro pločio siaurėjimo efektas palaipsniui siaurina sustiprintų impulsų optinį spektrą. Tokiu būdu spektro plotis pusės aukštyje FWHM pirmiausia sumažėja nuo 4.1 nm iki 1.8 nm (13 pav.). Vieno lėkio galinio kaupinimo konfigūracijoje esant 21 - 100 kHz pasikartojimo dažniui su maksimaliai 11.6 W išvadine galia eksperimento metu toliau sumažėja iki 1,7 nm (14 pav.) dviejuose lėkiuose esant 100 – 500 kHz su maksimalia išvadine galia, pasiekiančia 30 W. Rezultate, impulso trukmė tokiu būdu siaurėja (15 pav.) besistiprindama, pirmiausia nuo 210 ps iki 100 ps (16 pav.) po vieno lėkio kaupinant iš dviejų galų 120 W esant 100 kHz ir vėliau susiaurėja iki 78 ps dviejų lėkių konfigūracijoje. 85 ps impulso trukmė gauta dviejų lėkių stiprinime, kaupinant iš abiejų galų su 500 kHz ir puikia išvadine 30 W galia.



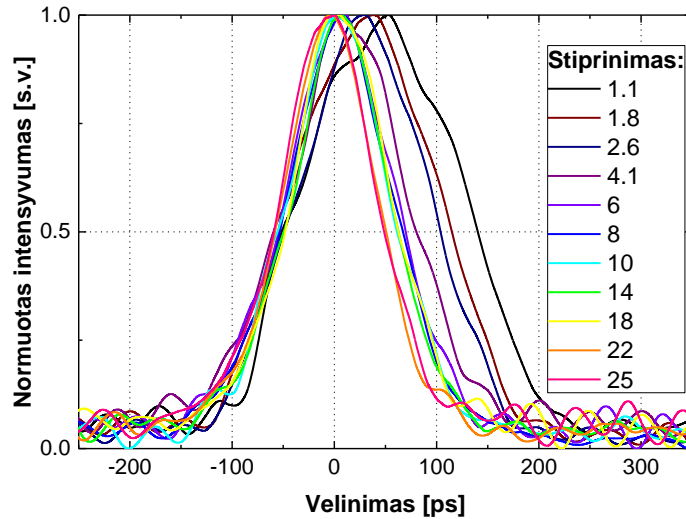
13 pav. Sustiprintų impulsų spektrų gaubtinės po vieno lėkio esant 500 kHz



14 pav. Sustiprintų impulsų spektrų gaubtinės po vieno lėkio esant skirtingam stiprinimui



15 pav. Sustiprintų impulsų gaubtinės spektras po dviejų lėkių esant 500 kHz



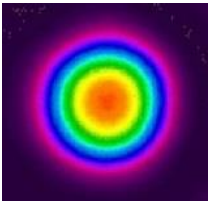
16 pav. Impulsų gaubtinės po vieno lėkio esant 100 kHz

2.1.2. Pluošto kokybės matavimai

Išmatuota pluošto kokybė vieno ir dviejų lėkių atveju esant skirtingoms kaupimo galioms ir užkrato lazerio pasikartojimo dažniams (duomenys pateikti 3 lentelėje). Pluošto kokybės parametras M^2 paprastai kinta nuo 1.04 iki 1.13 per stiprinimo procesą skaidulinio kristalo stiprintuve. Tipinis pluošto intensyvumo skirstinys užfiksuotas esant 500 kHz pasikartojimo dažniui ir 30 W išvadinei galiai (žr. 3 lentelės dešinėje pusėje).

3 lentelė. Pluošto sklidimo parametrai M^2 sustiprintų išvadinių pluoštų skirtingose CPA konfigūracijose ir 2D pluošto profilis.

Kaupinimo galia [W]	Užkrato pasikartojimo dažnis [kHz]	Išvadinė galia [W]	M^2_x	M^2_y
Vieno lėkio stiprintuvas				
70	21	2.6	1.09 ± 0.01	1.09 ± 0.01
120 (70 + 50)	21	8.8	1.06 ± 0.01	1.07 ± 0.01
70	100	3.71	1.04 ± 0.03	1.04 ± 0.04
120 (70 + 50)	100	11.6	1.09 ± 0.03	1.09 ± 0.03
Dviejų lėkių stiprintuvas				
70	100	8.6	1.061 ± 0.005	1.071 ± 0.006
105 (70 + 35)	100	20	1.093 ± 0.003	1.091 ± 0.004
120 (70 + 50)	500	29.5	1.128 ± 0.002	1.104 ± 0.002

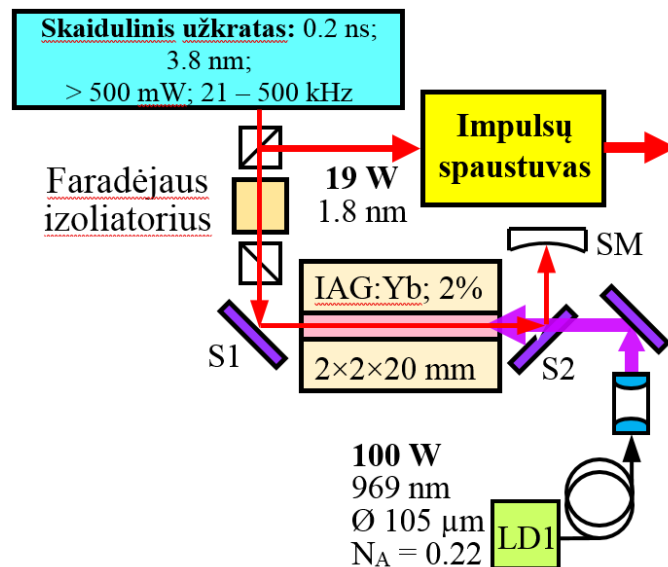


2D pluošto profilis po dviejų lėkių esant 500 kHz ir 120 W kaupinimo galiui

2.2. IAG:Yb 2x2x20mm 2 % legiravimo kristalinio stiprintuvo tyrimas

Tyrimo tikslas – ištirti ir optimizuoti išilginio kaupinimo IAG:Yb 2x2x20mm 2 % stiprintuvo konfigūraciją naudojant 1030 nm bangos ilgio skaidulinį užkrato lazerį su faziškai moduluotais impulsais bei taikant didelio skaisčio galingą 100W galios 969 nm bangos ilgio lazerinį diodą. Sustiprinti impulsai iš monokristalinio šviesolaidinio stiprintuvo ir didelės apertūros stiprintuvo bus suspausti naudojant dielektrinių gardelių kompresorių.

Tyrimė buvo atliktas faziškai moduluotų impulsų stiprinimas kompaktiškame IAG:Yb strypiniame vandeniū aušinamame kristaliniame stiprintuve su 210 ps trukmės ir 350 mW vidutinės išvadinės galios užkrato lazeriu esant 10, 21, 100 ir 500 kHz pasikartojimo dažniam vieno ir dviejų lėkių konfigūracijose kaupinant iš galo 100 W šviesolaidiniu 105 μm šerdies lazeriniu diodu ties 969 nm (NA = 0.22). Tyrimė svarbu pasiekti optimalią užkrato kaupinimo konfigūraciją, kad būtų gautas maksimalus stiprinimo koeficientas išsaugant puikią išvadinio pluošto kokybę.



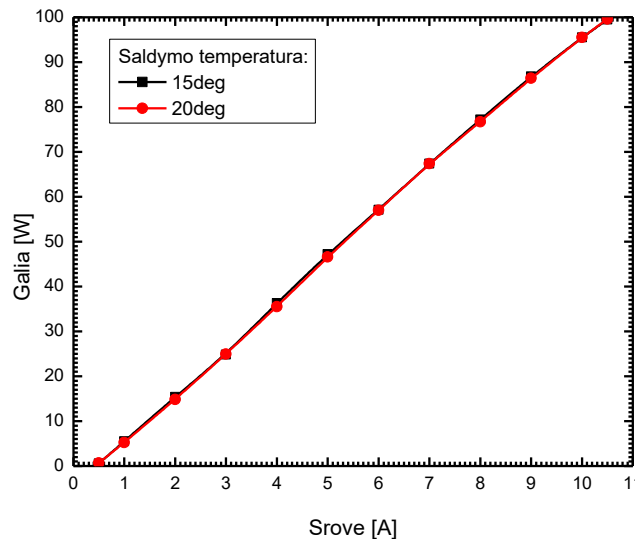
17 pav. Galinio kaupinimo dviejų lėkių faziškai moduluotų impulsų stiprinimo (CPA) strypiniame kristaliniame stiprintuve principinė schema

Užkrato lazerio kolimuoto pluošto skersmuo sumažintas iki ~ 0.4 mm toliau sklinda per IAG:Yb 2x2x20 mm strypą, kurio ilgis 20 mm ir iterbio legiravimas 2 % (17 pav.). Skaidulinis kaupinimo diodas sukuria ~ 0.42 mm sąsmauką IAG:Yb tūryje, kristalas įlydytas tarp 15°C

vandeniu aušinamo vario laikiklio. Faradėjaus izoliatorius užtikrina užkrato lazerio apsaugą ir atskiria po antro lėkio grįžtančią sustiprintą spinduliuotę. Atstumas tarp sferinio veidrodžio ir lazerinio aktyvaus elemento buvo parinktas kompensuoti susidarantį šiluminį lęšį.

2.2.1. Kaupinimo konfigūracijos

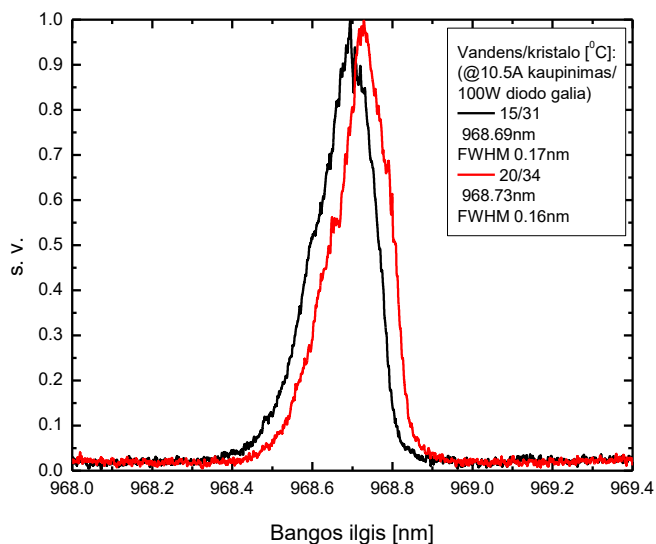
Išilginis diodinis kaupinimas leidžia pasiekti didelius kaupinimo galios tankius, sufokusuojant kaupinimo pluoštelį iki labai mažų matmenų [30]. Šiame eksperimente buvo ištirtas kaupinimo šaltinis su šviesolaidiniu išvadu – diodinis lazeris su integruota Brego gardele. Išmatuota lazerinio diodo išvadinės galios priklausomybė nuo srovės (18 pav.).



18 pav. Lazerinio diodo išvadinė galia nuo srovės

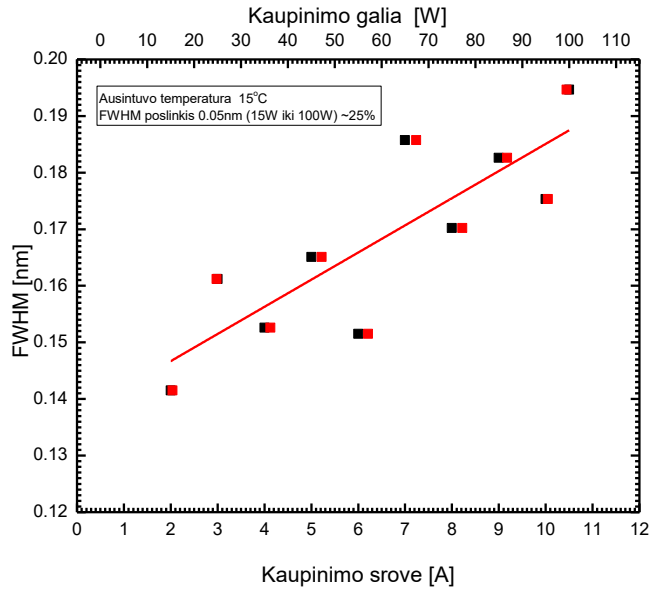
Kaupinimo šaltinyje esantis diodas su integruota Brego gardele yra žymiai pranašesnis už įprastus diodus [31]. Brego gardelė veikia kaip užtūra. Krintantis atitinkamų bangų srautas sąveikauja su gardele ir difraguoja. Kampas, kuriuo atsilenkia šis srautas po difrakcijos, sąlygojamas kristalinės gardelės struktūros ir krintančios bangos ilgio. Difraguojantys srautai pastebimi tik tuo atveju, kai srautai pastebimai interferuoja nuo lygiagrečių plokštumų. Brego gardelės naudojamos susiaurinti lazerinio diodo spektrinį plotį, suteikti daugiau terminio stabilumo lazeriniam šaltiniui [32]. Atlikus sistemos justiravimą su spektroanalizatoriumi užfiksuotas kaupinimo spinduliuotės spektras, praleistas per IAG:Yb stiprintuvą. Eksperimentiniai

duomenys, kaip nuo aušinamo vandens temperatūros kinta lazerinio diodo spektras esant maksimaliai ~100 W išvadinei galiai, pavaizduotas 19 paveiksle. Pastebėta, jog keliant temperatūrą spektras slenka į ilgesnių bangų sritį bei siaurėja.

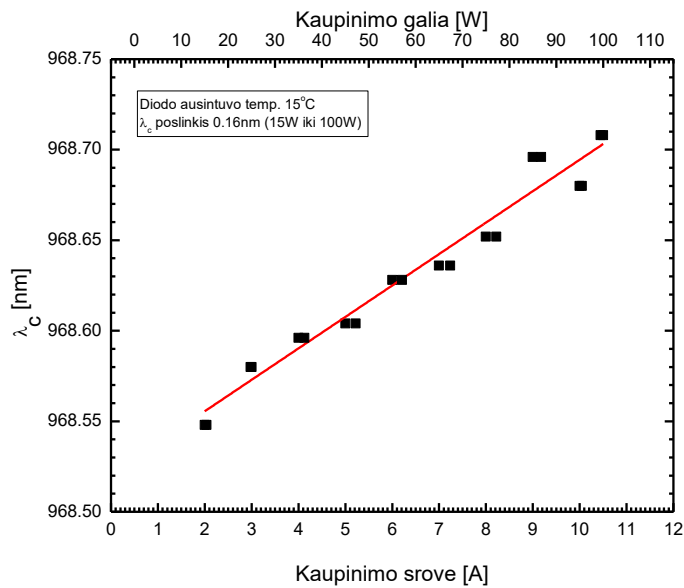


19 pav. Lazerinio 969 nm diodo spektras prie skirtingų vandens temperatūros verčių

Tolimesniuose spektriniuose matavimuose nustatyta fiksuota vandens aušintuvo temperatūra – 15 °C laipsnių. Pamatuota kaupinimo diodo spektro pločio pusės aukštyje (FWHM) priklausomybė nuo išvadinės galios, didinant srovės stiprį, spektras plinta. Kintant išvadinei galiai nuo 15 iki 100 W poslinkis atitinka 0.05 nm (FWHM) (20 pav.). Pats spektras taip pat pasislenka į ilgesnių bangų sritį per 0.16 nm (21 pav.).



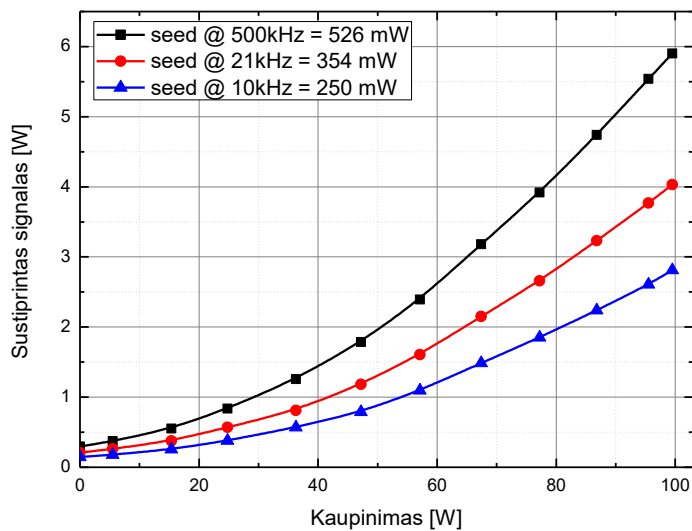
20 pav. Kaupinimo diodo spektro pločio pusės aukštyje (FWHM) priklausomybė nuo išvadinės galios



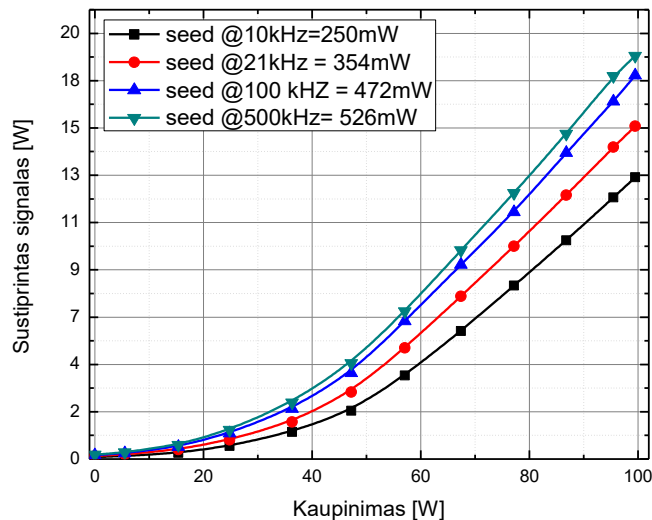
21 pav. Kaupinimo diodo spektro smailės poslinkio priklausomybė nuo išvadinės galios

2.2.2. Stiprinimo parametrų matavimai

Stiprinimas, atliktas šiame darbe, unikalus, nes kaupinimas vyksta ties 969 nm bangos ilgiu. Analizuojant literatūrą alternatyvių eksperimentų pavyko rasti tik su diskiniiais lazeriais [33]. Didelio užkrato galios 526 mW esant 500 kHz pasikartojimo dažniui atveju, 11 ir 35 kartų stiprinimai buvo pasiekti atitinkamai vieno ir dviejų lėkių atveju esant 100 W bendram kaupinimui. Esant 526 mW įvedimo galiai ir 500 kHz pasikartojimo dažniui, išvadinė galia maksimaliai pasiekia beveik 6 W po vieno lėkio (22 pav.) ir beveik 19 W dviejuose lėkiuose su 100 W kaupinimu (23 pav.). Tačiau dėl nuostolių separatoriuose, krentanti į kristalą galia buvo tik 80 W.

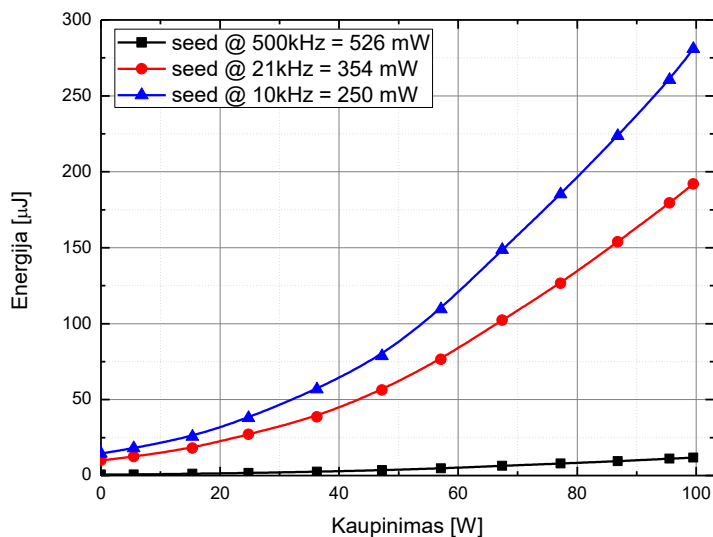


22 pav. Vidutinės išvadinės galios vieno lėkio atveju priklausomybė nuo kaupinimo diodo galios

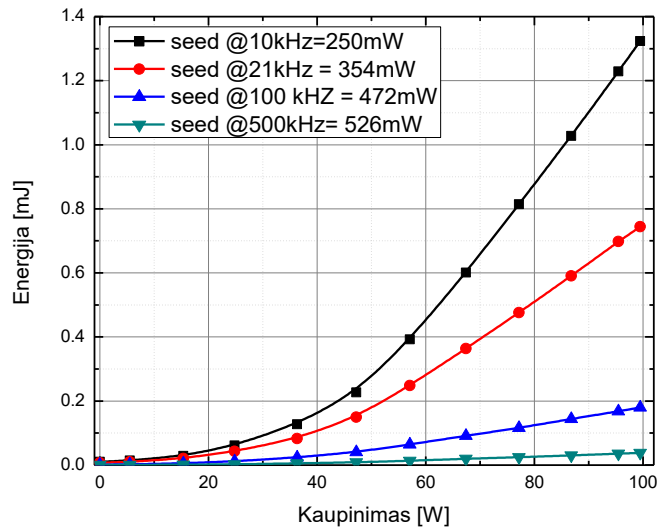


23 pav. Vidutinės išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo į kristalą galios esant dviem lėkiams

Pasiekta 714.5 μJ išvadinė impulso energija iš užkrato lazerio 17 μJ energijos ties 21 kHz pasikartojimo dažniu per du lėkius kaupinant 100 W ties 969 nm bangos ilgiu (25 pav.) Maksimali impulso energija, didesnė už 1.3 mJ, pasiekta esant 10 kHz pasikartojimo dažniui. Vieno lėkio atveju ties 10 kHz pasikartojimo dažniu gauti 290 uJ (24 pav.).

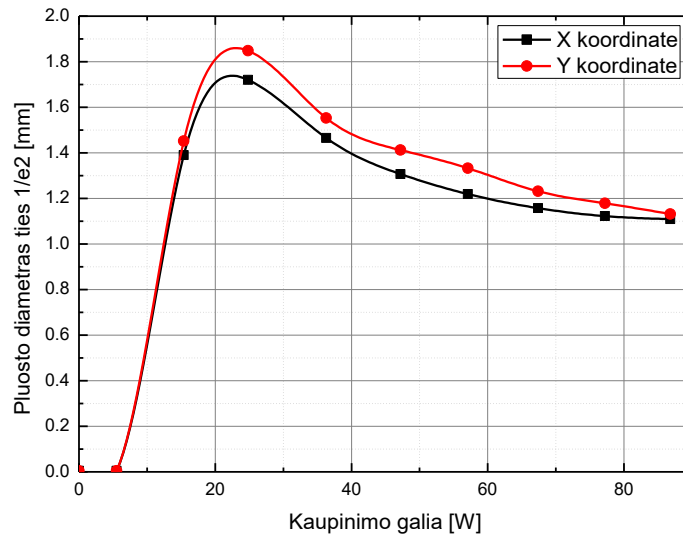


24 pav. Sustiprintos išvadinės energijos priklausomybė nuo kaupinimo diodo galios



25 pav. Sustiprintos išvadinės energijos priklausomybė nuo kaupinimo diodo galios

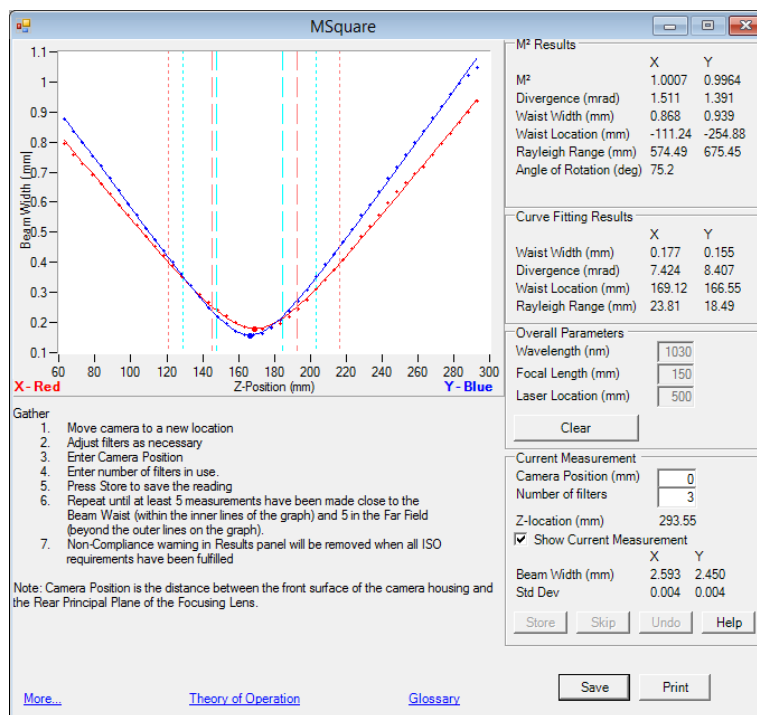
Stiprinant IAG:Yb 2x2x20 mm kristale pasireiškė lazerio pluošto skersmens kitimas esant skirtingoms kaupinimo galioms. Kaupinimo dėmės skersmuo kristale yra ~420um, o signalo dėmės skersmuo kristale ~400um. Esant kaupinimo diodo išvadinei galiai 0-30 W intervale pluošto skersmuo didėja. Intervale 30-100 W stebimas pluoštelio skersmens siaurėjimas (26 pav.). Verta paminėti, kad apie 5 procentai krentančio į kristalą kaupinimo diodo galios nėra sugerama. Taip pat sferinio veidrodžio parinkimas/tinkamumas ir jo pozicija kristalo atžvilgiu priklauso nuo pluošto bangos fronto kreivumo radiuso. Visgi, pluošto išvadiniai parametrai kinta, jeigu kinta terminio lęšio padėtis, ne tik jo židinio nuotolio poslinkis [34].



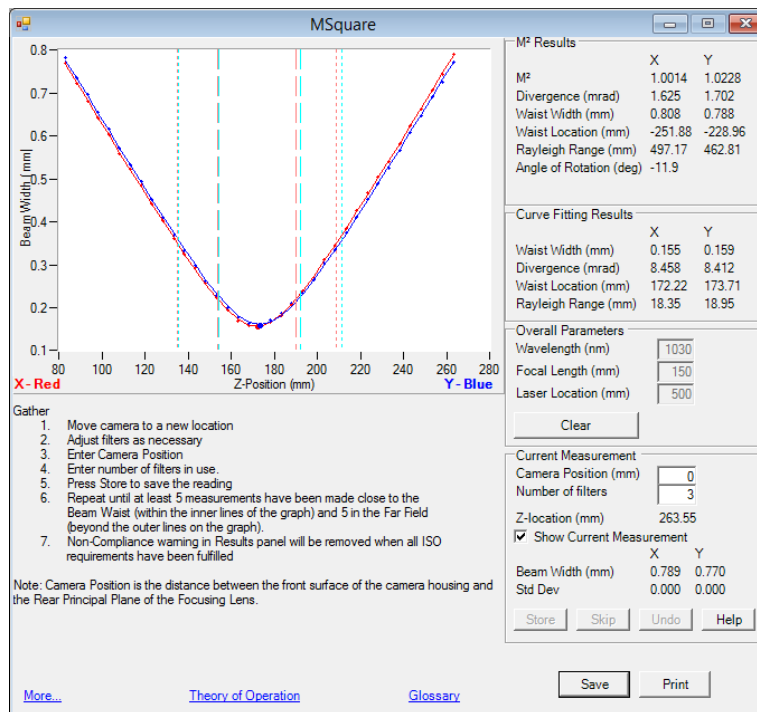
26 pav. Lazero pluošto skersmuo didėjant kaupinimo diodo galiai

2.2.3. Pluošto kokybės matavimai

Pluošto kokybė buvo išmatuota vieno ir dviejų lėkių atveju esant didžiausiam 100 W kaupinimo lygiui ir užkrato lazerio pasikartojimo dažniui 21 kHz, duomenys pateikti 4 lentelėje. Pluošto kokybės parametras M^2 išlieka paklaidos ribose nuo 1 iki 1.03 per stiprinimo procesą skaidulinio kristalo stiprintuve (27, 28 pav.). Tipinis pluošto intensyvumo skirstinys išmatuotas esant 500 kHz artimai 18.5 W išvadinei galiai (duomenys pateikti 4 lentelėje dešinėje).



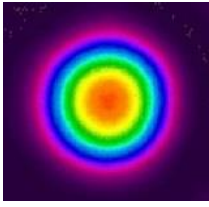
27 pav. Sustiprinto išvadinio pluošto sklaidimo parametrai M^2 X ir Y koordinatėms vieno lėkio atveju



28 pav. Sustiprinto išvadinio pluošto sklaidimo parametrai M^2 X ir Y koordinatėms dviejų lėkių atveju

4 lentelė. Sustiprintų išvadinių pluoštų sklaidimo parametrai M^2 ir 2D pluošto profilis.

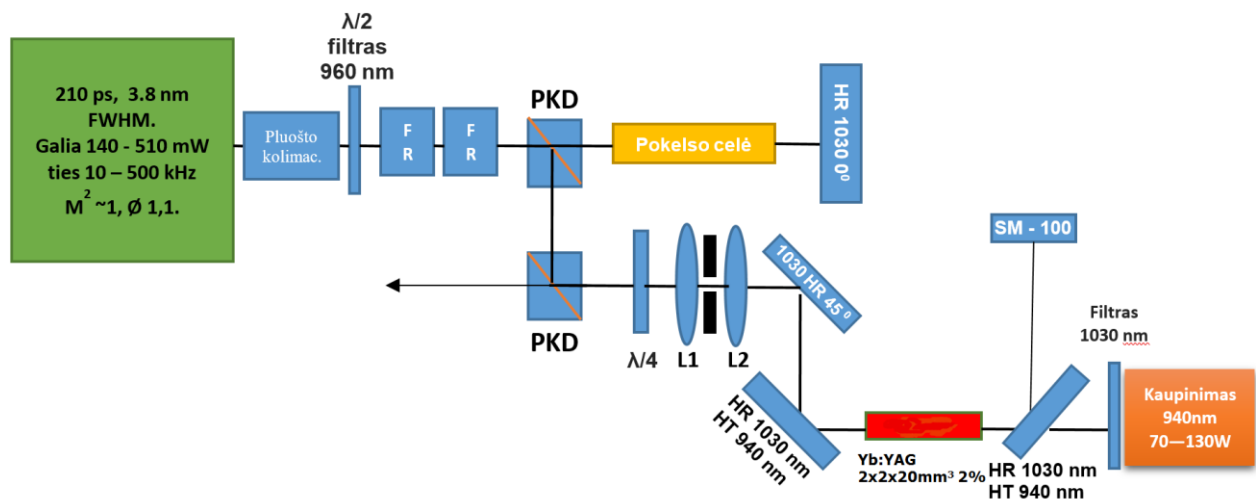
Kaupinimo galia [W]	Užkrato pasikartojimo dažnis [kHz]	Išvadinė galia [W]	M^2_x	M^2_y
Vieno lėkio stiprintuvas				
100	21	4	1.0 ± 0.01	1.0 ± 0.01
Dviejų lėkių stiprintuvas				
100	21	15	1.01 ± 0.01	1.023 ± 0.01



2D pluošto profilis po dviejų lėkių esant 500 kHz ir 100 W kaupinimo galiai

2.3. IAG:Yb 2x2x20mm 2 % legiravimo kristalinio stiprintuvo tyrimas panaudojant užkrato impulsų retintuvą

Remiantis pirmo bei antro tyrimo etapuose atliktais matavimais, pradėta rinkti vienos pakopos energijos stiprintuvo schema. Darbo tikslas šiame etape buvo išbandyti stiprintuvą esant 100 Hz pasikartojimo dažniui siekiant maksimalios impulsų energijos. Naudota išilginio kaupinimo IAG:Yb stiprintuvo konfigūracija su 1030 nm bangos ilgio skaiduliniu užkrato lazeriu. 2x2x20mm 2% legiravimo kristalui kaupinti parinkti diodai su skirtinga išvadine galia nuo 75 iki 135 W ties 940 nm bangos ilgiu. Norint valdyti skaidulinio užkrato lazerio impulsų pasikartojimo dažnį ir sumažinti skleidžiamą parazitinę ASE spinduliuotę nuspręsta naudoti retintuvą - elektrooptinį pokelso kristalą. Surinkta schema pavaizduota 29 pav.

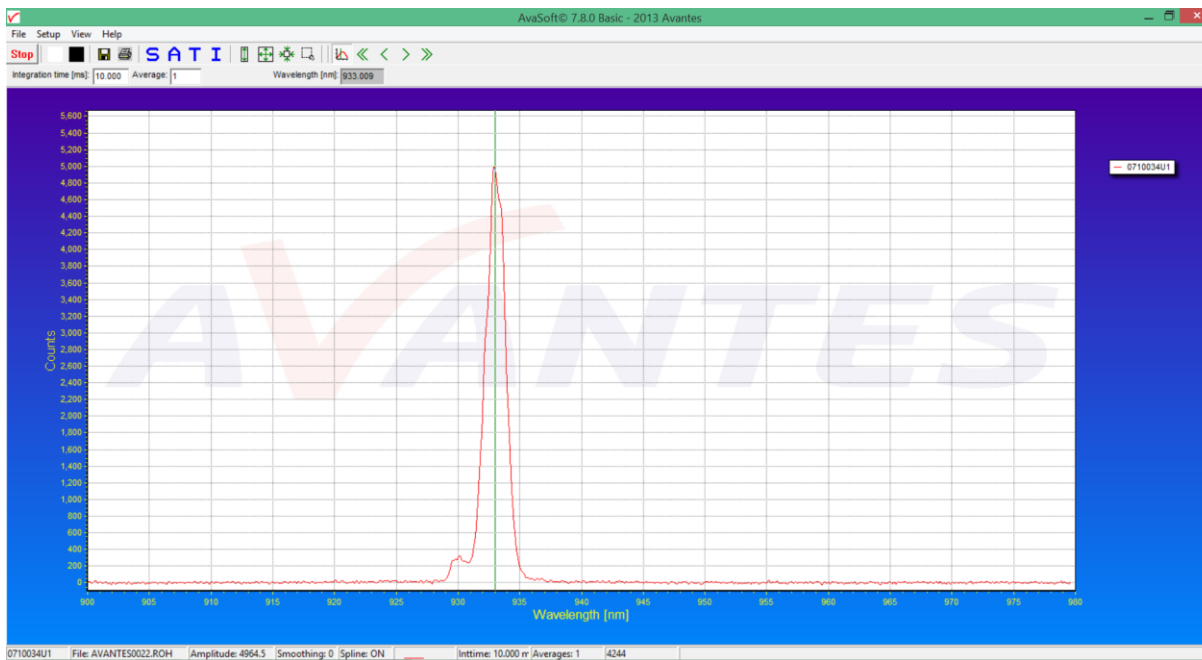


29 pav. Kaupinimo iš galo dviejų lėkių strypiniame Yb:YAG 2x2x20mm³ 2% kristaliniame stiprintuve schema

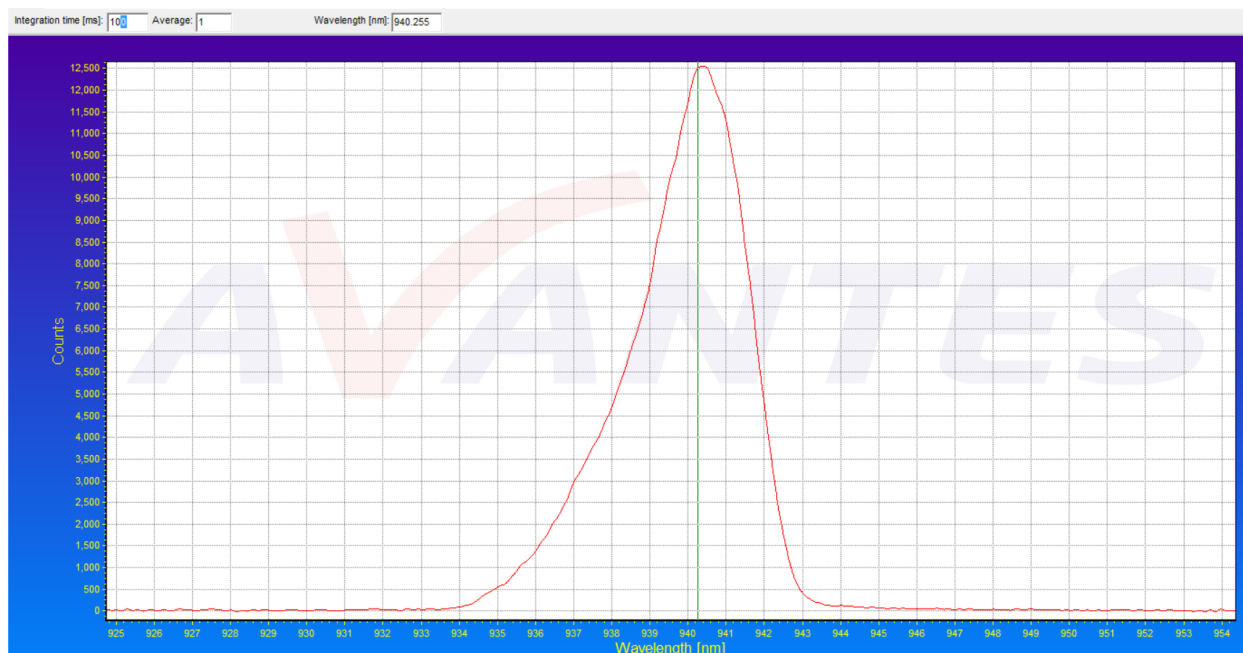
FR – Faradėjaus rotatorius, PKD – polarizacinis kubas daliklis, L1, L2 – lęšiai, SM – sferinis veidrodis, Yb:YAG 2x2x20mm³ 2% strypas

Pirmiausia pabandyta skaidulinio užkrato lazerio spinduliuotę suvesti į kristalą naudojant 0.5x teleskopą, sudarytą iš dviejų antirefleksine danga dengtų lęšių. Panaudoti skirtingo židinio nuotolio L1 = 150 mm ir L2 = 75 mm lęšiai; atstumas tarp L1 ir L2 = 305 mm, užkrato lazerio pluošto diametras sukolinuotas į 0.58 mm pluošto diametrą. Buvo parinktas atstumas tarp L2 ir kristalo - 10 cm, o atstumas nuo kaupinimo iki kristalo - 12 cm.

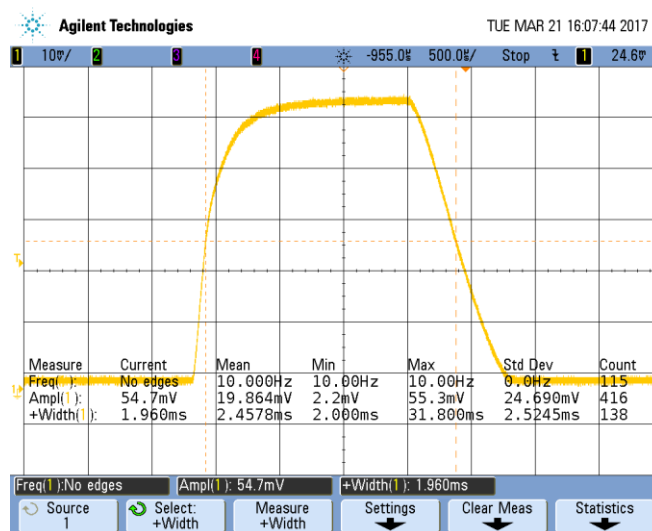
Pirmiausia darbo pradžioje buvo kaupinama su 70 W diodiniu lazeriu, spinduliuojančiu ties 940 nm bangos ilgiu impulsiniame režime (30 pav.). Tačiau kambario temperatūroje centrinis bangos ilgis nusistovėjo ties 933 nm. Pakėlus temperatūrą iki 44°C laipsnių, spektras paslinktas per 7 nm ir pasiektas 940 nm centrinis bangos ilgis (31 pav.). Diodo impulso trukmė 1 ms ir 10 % darbinio ciklo (angl. *duty cycle*). Užkrato lazeris veikė ties 10 kHz pasikartojimo dažniu naudojant akustooptinį moduliatorių, tačiau su impulsų retintuvu (pokelso narveliu) dažnis sumažintas iki 100 Hz. Tam pasiekti naudotas aukštos įtampos šaltinis, ant pokelso narvelio kritusi įtampa siekė ~2kV. Išbandytas pasikartojimo dažnio derinamumas su pokelso narveliu, naudojant sinchronizaciją nuo išorinio generatoriaus. Pabandyta karpyti impulsus iki 100 Hz pasikartojimo dažnio (32 pav.).



30 pav. 70 W kaupinimo diodo spektras kambario temperatūroje



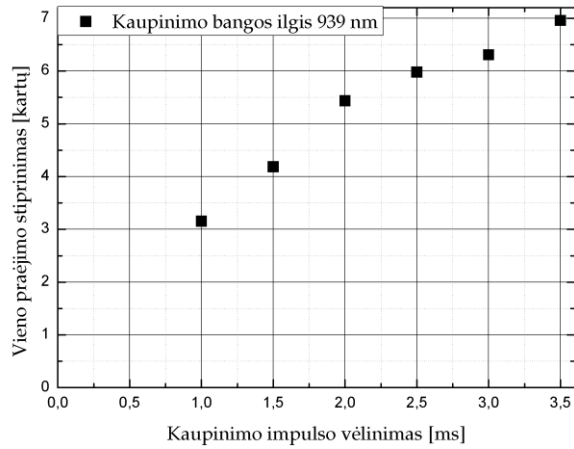
31 pav. 70 W kaupinimo diodo spektras esant 44°C temperatūrai



32 pav. Pasikartojimo dažnio sumažinimas iki 100 Hz sinchronizuojant nuo išorinio generatoriaus

Vieno impulso generatoriumi susinchronizuoti užkrato bei kaupinimo lazeriai su pokelso narvelio valdymo plokšte. Užkrato lazerio 15 μJ energija esant 100 Hz pasikartojimo dažniui suvedama į stiprintuvą. Pluoštą formuojančio teleskopo pagalba pluošto diametras suformuojamas į 0.58 mm diametrą. Šioje konfigūracijoje maksimali sustiprinta išvadinė energija siekė 35 μJ po

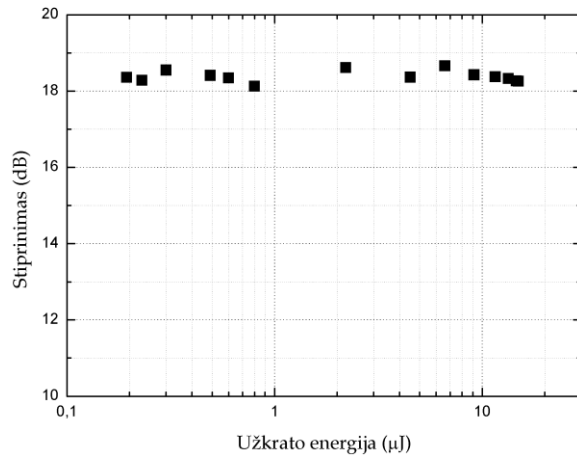
vieno lėkio. Eksperimentinės stiprinimo koeficiento po vieno lėkio vertės nuo kaupinimo impulsų trukmės pavaizduotos 33 pav.



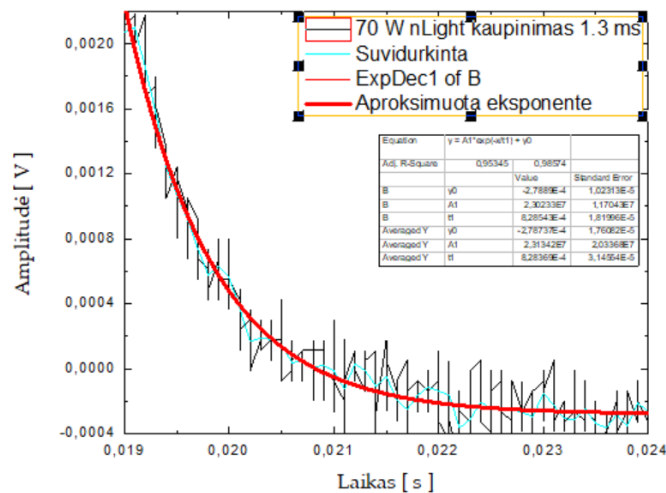
33 pav. Stiprinimo koeficiento priklausomybė nuo kaupinimo impulsų trukmės po vieno lėkio

Toliau buvo pakeisti teleskopo lęšiai į $L1 = 160$ mm ir $L2 = 75$ mm. Atstumas tarp kaupinimo ir kristalo - 10 cm, o atstumas tarp teleskopo lęšio ir kristalo – 22 cm. Toks pakeitimas leido pasiekti kaupinimo pluoštelio dėmę ~ 0.5 mm. Taip pat atlikti pakeitimai kaupinimo geometrijoje, pereita prie nuolatinės veikos (CW) kaupinimo, kuris pasiekė 110 μ J stiprinimą vieno lėkio atveju. Sujustiravus schemą išmatuota ASE gyvavimo trukmė - 1.3 milisekundės 70 W kaupinimui (35 pav.).

Dviejų lėkių schemoje gauta maksimali išvadinė energija 1 mJ, mažo signalo stiprinimo atveju >18 dB (34 pav.). Siekiant 3.5 mJ energijos ties 100 Hz reikėjo panaudoti galingesnį kaupinimą.



34 pav. Mažo signalo stiprinimas po dviejų lėkių kaupinant 70 W diodu



35 pav. ASE gyvavimo trukmės matavimas 70 W kaupinimui (~1,3 ms)

Remiantis pasiektais rezultatais su dviejų lėkių stiprintuvu, buvo surinktas keturių lėkių stiprintuvas. Nekeičiant įvedamos kaupinimo galios pavyko gauti 1.6 mJ energiją panaudojant 70 W kaupinimo galią. 5 lentelėje pateikti šioje ir kitose jau paminėtose konfigūracijose naudoti lazeriniai diodai, maitinimo ir šaldymo įrenginiai bei pateikti jų palyginimai su gamykliniais parametrais.

5 lentelė. Eksperimentuose naudotų prietaisų parametrai

n-LIGHT diodas 940 nm	Išmatuota
Korpuso temperatūra 25 (°C)	In 17 – Out 21 (°C)
Centrinis bangos ilgis 939 (nm)	939.13 (nm)
Galia 75 (W)	73.6 (W)
Srovė 14 (A)	14 (A)
Įtampa 10.6 (V)	10.7 (V)

LIMO 100 W	Išmatuota
Korpuso temperatūra 30 (°C)	40 (°C)
Centrinis bangos ilgis 939 (nm)	938 (nm)
Galia 100 (W)	73.6 (W)
Srovė 45(A)	45 (A)
n-LIGHT diodas 940 nm	Išmatuota
Korpuso temperatūra 30 (°C)	27 (°C)
Centrinis bangos ilgis 939 (nm)	939 (nm)
Galia 135 (W)	125 (W)
Srovė 14 (A)	14 (A)
Įtampa 24 (V)	24 (V)

Maitinimo šaltinis	Aušintuvas
Delta elektronika SM 120 – 25 D	Termotek 10-35
Delta elektronika SM 15-100	2x Ekspla PS800SR
Limo SM 15-100	

Atlikti matavimai parodė, jog IAG:Yb kristale nesugertos šviesos dalis kinta. Kaupinant 70 W nuolatinės spinduliuotės (CW) nesugerta šviesos dalis sudaro 8 %, kuomet impulsinėje veikoje esant 1 ms impulsiniam kaupinimui – iki 3 %. Išbandyti įvairūs būdai siekiant atsikratyti parazitinės spinduliuotės tarp sferinio ir plokščio veidrodžio bei retintuvo. Išderinus sistemą smarkiai nukenčia stiprinimas. Įdėtas Faradėjaus rotatorius ir vietoj $\lambda/4$ įdėta $\lambda/2$ fazinė plokštelė. Geresniam stiprinimui surasti buvo keičiami ir atstumai tarp veidrodžių, tuo pačiu ir pačio pokelso narvelio langas ir įtampa. Išbandyta pakeisti pasikartojimo dažnį į 10 kHz esant 0.6 mm dėmei ir 130 W kaupinimui. Po vieno lėkio pasiektas 0.55 mJ stiprinimas esant 125 W kaupinimui. Tačiau įstačius sferinį veidrodį antram lėkiui vėl užsirezonavo parazitinė spinduliuotė bei prasimušė kristalo praskaidrinimo danga. Eksperimentai ir matavimų duomenys susisteminti ir pavaizduoti 6 lentelėje.

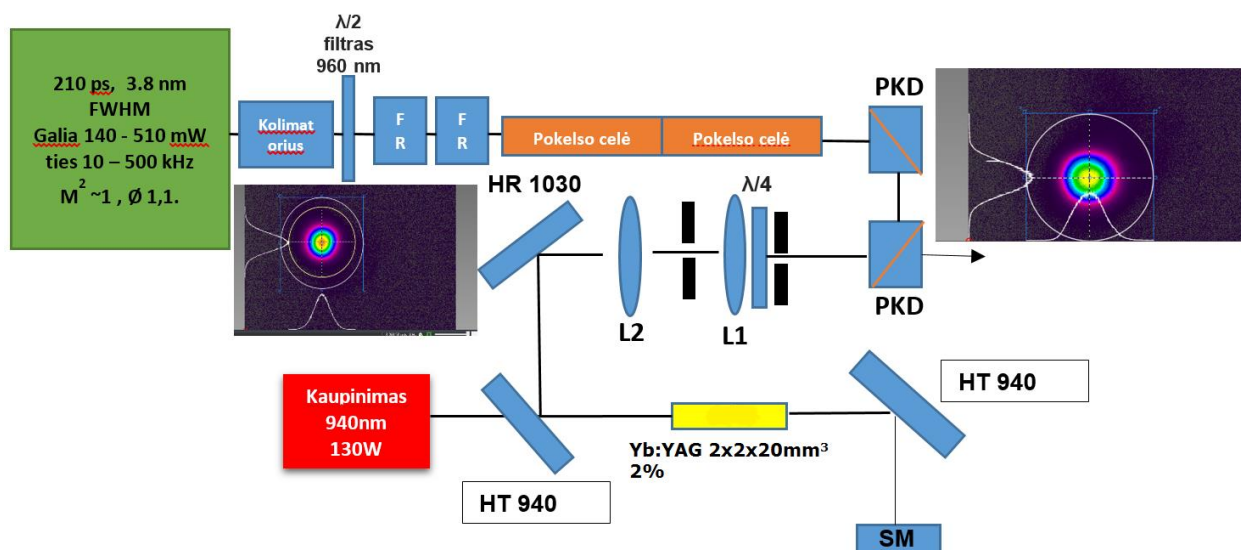
6 lentelė. Skirtingų eksperimentinių lazerinės sistemos konfigūracijų rezultatų suvestinė

Užkrato ir kaupinimo lazerio dėmė sąsmaukoje	Užkrato ir kaupinimo sąsmaukos atstumas nuo lėšio	Kaupinimas	Impulso trukmė	Energija po 1 lėkio	Energija po 2 lėkio	Diodo parametrai	Problemos
0.6 mm	11 ir 12 cm	70W n-LIGHT 940nm	1 ms (6.7W) CW (63W)	40 uJ 100 uJ	- 0.7 mJ	40 °C 15 °C 939nm	Per mažas impulsinio stiprinimo koeficientas
0.5 mm	12 ir 22 cm	70W N-light 940nm	1ms 1.5ms 2ms 2.5ms CW	58 uJ 77 uJ 96 uJ 110 uJ 135uJ	- 0.9 mJ	40-34 °C 939 nm 15 °C	Reikia didesnio kaupinimo
0.5 mm 4 lėkiai	12 ir 22 cm	70W n-LIGHT 940nm	CW	-	Po 4 lėkių 1.6 mJ	15 °C	Seperatorius prasimuša ir pasireiškia parazitinės osciliacijos
0.6 mm	12 ir 8 cm	100 W LIMO 940 nm	CW	120 uJ	0.9 mJ	-	Parazitinės osciliacijos generuojasi nuo 80 W
0.6 mm	12 ir 11 cm	130 W n-LIGHT	0.4 ms (55 W) 0.5 ms (65 W) CW (125 W)	0.2 uJ 0.33 uJ 0.46 uJ	-	35 °C 33 °C 27°C	Parazitinė spinduliuotė, Susidaro rezonatorius

2.3.1. Eksperimentai su vieno lėkio impulsų retintuvu

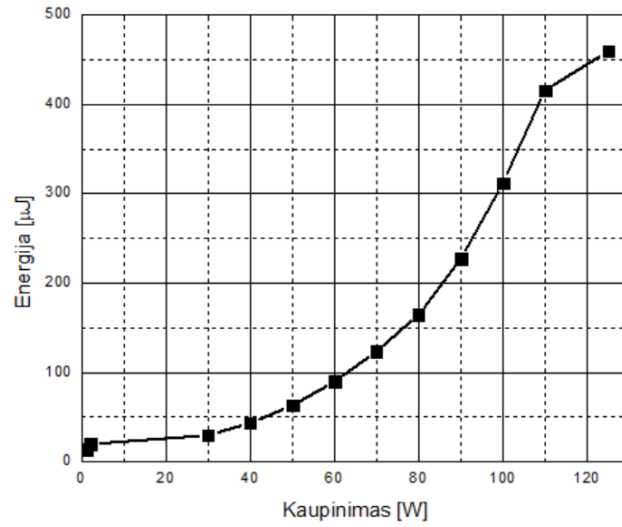
Surinkta nauja schema (36 pav.) su dvigubu pokelsu. Po vieno lėkio esant 125 W kaupinimui, 0.6 mm dėmei bei 100 Hz pasikartojimo dažniui pasiekta 0.46 mJ energija (37 pav.).

Šioje konfigūracijoje panaudojus dvigubą pokelso narvelį išvengta parazitinių efektų. Vieno lėkio schemoje atlikti matavimai parodė gan gerą stiprinimą - ~16 db (38 pav.). Po dviejų lėkių pasireiškė parazitinė generacija, užsirezonavusiu tarp tarp PKD ir sferinio veidrodžio. Separatorius buvo pramuštas su 0.65 mm dėme ir 0.746 mJ impulso energija. Buvo pamatuoti ir užfiksuoti pluoštelio vaizdai su CCD kamera skirtingose lazerinės sistemos vietose. Išmatuotas lazerinis pluoštelis po dvigubo pokelso. Įsitikinta, jog nėra kliuvimo už kristalo kraštų ir kaupinimas su užkrato lazeriu yra gerai sujustuotas (39 ir 40 pav.).

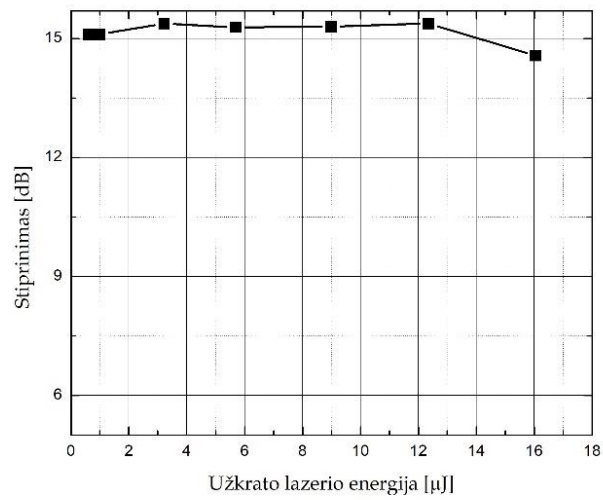


36 pav. Kaupinimo iš galo dviejų lėkių strypiniame Yb:YAG 2x2x20mm³ 2% kristaliniame stiprintuve schema su dvigubu pokelsu

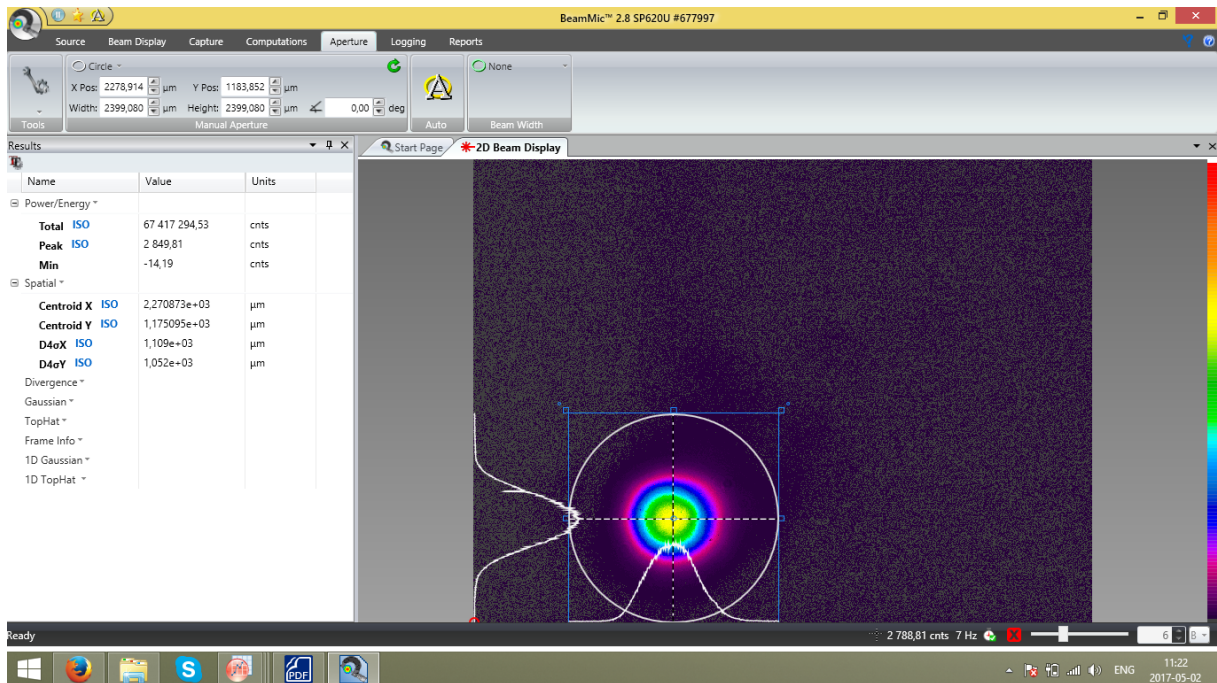
FR – Faradėjaus rotatorius, PKD – poliarizacinis kubas daliklis, L1, L2 – lęšiai, SM – sferinis veidrodis, Yb:YAG 2x2x20mm³ 2%



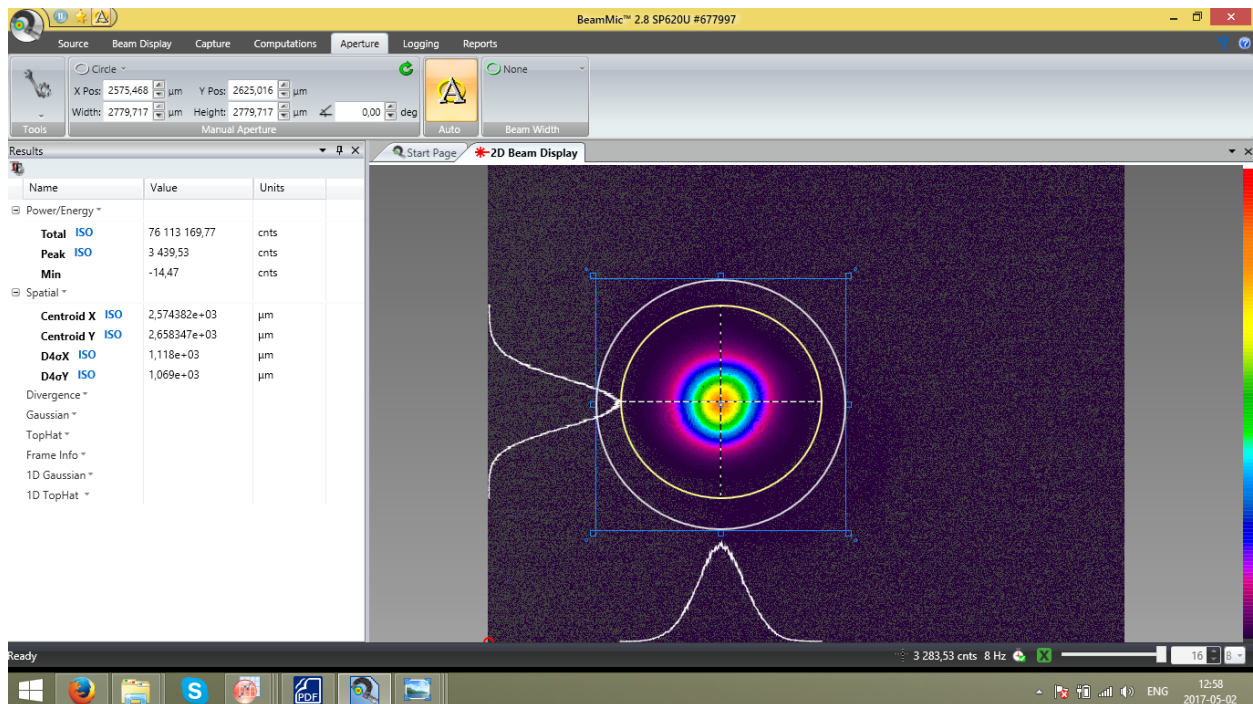
37 pav. Pastiprinto po vieno lėkio užkrato priklausomybė nuo kaupinimo galios



38 pav. Užkrato signalo stiprinimas



39 pav. Lazerinio pluošto po dvigubo pokelso vaizdas esant 100 Hz pasikartojimo dažniui



40 pav. Lazerinio pluošto vaizdas po teleskopo esant 100 Hz pasikartojimo dažniui

IŠVADOS

Darbe lyginami dviejų lėkių čirpuotų impulsų stiprintuvai. Eksperimentuose dėmesys skiriamas monokristaliniam IAG:Yb šviesolaidiniam kristalui bei didelės apertūros IAG:Yb 2 % legiravimo $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ strypui.

Šių strypų kaupinimui buvo naudojami didelio skaisčio lazeriniai diodai, kurių galia siekė 140 W. Taip pat schemoje naudotas 100 W išvadinės galios 969 nm bangos ilgio diodas. Pagrindinis eksperimentinio darbo tikslas buvo pasiektas - iširtos geriausios kaupinimo konfigūracijos pirmai čirpuotų impulsų stiprinimo pakopai bei po antros stiprinimo pakopos suspausti impulsai iki kelių šimtų femtosekundžių. Gauti rezultatai bus panaudoti kuriant kaupinimo šaltinį 1 TW klasės optiniam parametriniam čirpuotų impulsų stiprintuvui.

IAG:Yb čirpuotų impulsų stiprinimu paremtas $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ legiruotas 2 % strypinis stiprintuvas leido pasiekti 13.5 W išvadinę galią esant 100 kHz pasikartojimo dažniui kaupinant 70 W, o monokristaliniame skaiduliniame stiprintuve esant toms pačioms sąlygoms - 8.5 W. Tiek šviesolaidinis kristalinis stiprintuvas „Taranis“, tiek didelės apertūros $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ IAG:Yb pasižymi puikiomis išvadinio pluošto savybėmis. Gautas pluošto kokybės parametras $M2 \sim 1.1$ su nedidele sferine aberacija ties 70 W kaupinimo galia. Esant vidutinei kaupinimo galiai, žemesnei nei 140 W, IAG:Yb $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ legiruotas 2 % stiprintuvas lenkia komerciškai prieinamą monokristalinį skaidulinį stiprintuvą savo stiprinimu, siekiančiu: $\sim 42 \text{ dB}$, išvadine galia: 48 W, keitimo efektyvumu: $\sim 40 \%$ išlaikant beveik tokią pat išvadinio pluošto kokybę. Bendras puikus veikimas, justiravimo paprastumas daro IAG:Yb strypus, legiruotus 2 % iterbiu, geriausiu pasirinkimu didelių išvadinųjų galių ir energijų čirpuotų impulsų stiprinime. Sustiprinti impulsai su 1.3 mJ išvadine energija buvo gauti naudojant būtent $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ strypą esant 10 kHz pasikartojimo dažniui. Sustiprinti impulsai buvo suspausti 1700 rėžių/mm difraccinių gardelių pora iki 600 fs su 80 % efektyvumu.

Literatūra

- [1] A. V. Okishev, “Highly efficient room-temperature Yb:YAG ceramic laser and regenerative amplifier,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 7, p. 1199, Apr. 2012.
- [2] T. Metzger, A. Schwarz, C. Y. Teisset, D. Sutter, A. Killi, R. Kienberger, and F. Krausz, “High-repetition-rate picosecond pump laser based on a Yb:YAG disk amplifier for optical parametric amplification,” *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 14, p. 2123, Jul. 2009.
- [3] X. Délen, Y. Zaouter, I. Martial, N. Aubry, J. Didierjean, C. Hönninger, E. Mottay, F. Balembois, and P. Georges, “Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 2, pp. 109–11, Jan. 2013.
- [4] T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki, F. Jansen, S. Hädrich, H. Carstens, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, “Fiber chirped-pulse amplification system emitting 38 GW peak power,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 1, p. 255, Jan. 2011.
- [5] W. T. Silfvast, *Laser Fundamentals*. Cambridge University Press, 2004.
- [6] J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, and F. Gan, “Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 9, p. 1975, Sep. 2003.
- [7] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering (Google eBook)*. Springer, 2006.
- [8] X. Délen, A. Aubourg, L. Deyra, F. Lesparre, I. Martial, J. Didierjean, F. Balembois, and P. Georges, “Single crystal fiber for laser sources,” 2015, vol. 9342, p. 934202.
- [9] P. Russbueltd, T. Mans, J. Weitenberg, H. D. Hoffmann, and R. Poprawe, “Compact diode-pumped 11 kW Yb:YAG Innoslab femtosecond amplifier,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 24, p. 4169, Dec. 2010.
- [10] C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, “High-power fibre lasers,” *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 11, pp. 861–867, Oct. 2013.
- [11] T. Eidam, S. Hanf, E. Seise, T. V. Andersen, T. Gabler, C. Wirth, T. Schreiber, J. Limpert, and A. Tünnermann, “Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 2, p. 94, Jan. 2010.
- [12] V. Markovic, A. Rohrbacher, P. Hofmann, W. Pallmann, S. Pierrot, and B. Resan, “100W class compact Yb:YAG single crystal fiber amplifier for femtosecond lasers without CPA,” 2016, p. 972609.
- [13] X. Délen, S. Piehler, J. Didierjean, N. Aubry, A. Voss, M. A. Ahmed, T. Graf, F. Balembois, and P. Georges, “250 W single-crystal fiber Yb:YAG laser,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 14, pp. 2898–900, Jul. 2012.
- [14] X. Délen, L. Deyra, A. Benoit, M. Hanna, F. Balembois, B. Cocquelin, D. Sangla, F. Salin, J. Didierjean, and P. Georges, “Hybrid master oscillator power amplifier high-power narrow-linewidth nanosecond laser source at 257 nm,” *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 6, pp. 995–7, Mar. 2013.
- [15] T. Y. Fan, “Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1457–1459, Jun. 1993.
- [16] J. Pouysegur, B. Weichelt, F. Guichard, Y. Zaouter, C. Hönninger, E. Mottay, F. Druon, and P. Georges, “Simple Yb:YAG femtosecond booster amplifier using divided-pulse amplification,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 9, pp. 9896–904, May 2016.
- [17] K. K. Rebane, “Zero-Phonon Lines in the Spectroscopy and Photochemistry of Impurity-Doped Solid Matter,” in *Zero-Phonon Lines*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 1–19.

- [18] T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano, "Temperature dependence and optimization of 970-nm diode-pumped Yb:YAG and Yb:LuAG lasers," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 24, p. 5149, Aug. 1999.
- [19] B. Weichelt, A. Voss, M. A. Ahmed, and T. Graf, "Enhanced performance of thin-disk lasers by pumping into the zero-phonon line," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 15, p. 3045, Aug. 2012.
- [20] M. Smrž, T. Miura, M. Chyla, S. Nagisetty, O. Novák, A. Endo, and T. Mocek, "Suppression of nonlinear phonon relaxation in Yb:YAG thin disk via zero phonon line pumping," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 16, p. 4919, Aug. 2014.
- [21] V. Jambunathan, T. Miura, L. Těsnohlídková, A. Lucianetti, and T. Mocek, "Efficient laser performance of a cryogenic Yb:YAG laser pumped by fiber coupled 940 and 969 nm laser diodes," *Laser Phys. Lett.*, vol. 12, no. 1, p. 15002, Jan. 2015.
- [22] M. Smrz, T. Miura, M. Chyla, A. Endo, and T. Mocek, "Advantages of zero phonon line pumping in 100kHz Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier," in *2013 IEEE Photonics Conference*, 2013, pp. 55–56.
- [23] F. Consoli, R. De Angelis, L. Duvillaret, P. L. Andreoli, M. Cipriani, G. Cristofari, G. Di Giorgio, F. Ingenito, and C. Verona, "Time-resolved absolute measurements by electro-optic effect of giant electromagnetic pulses due to laser-plasma interaction in nanosecond regime," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 27889, Sep. 2016.
- [24] Storm and M. E., "Reduction of parasitic lasing," 1994.
- [25] X. Liang, Y. Leng, C. Wang, C. Li, L. Lin, B. Zhao, Y. Jiang, X. Lu, M. Hu, C. Zhang, H. Lu, D. Yin, Y. Jiang, X. Lu, H. Wei, J. Zhu, R. Li, Z. Xu, W. Grigsby, G. Hays, K. Madison, A. Maltsev, J. Colvin, M. J. Edwards, R. W. Lee, P. Patel, D. Price, B. A. Remington, R. Shepherd, A. Wootton, J. Zweiback, E. Liang, and K. A. Kieley, "Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti:sapphire amplifier."
- [26] C. Wandt, S. Karsch, and U. Schramm, "Development of a Joule-class Yb:YAG amplifier and its implementation in a CPA system generating 1 TW pulses," 2014.
- [27] A. Rodin, K. Sasnauskas, A. Dement'ev, D. Bričkus, A. Michailovas, A. Aleknavičius, and J. Didierjean, "Investigation of Beam Quality in Nd:YAG Crystal Fiber Amplifier," *Laser Optics 2014*, St.Peterburg, June 30 - July 4, 2014.
- [28] J. Saby, D. Sangla, P. Deslandes, and F. Salin, "Non CPA High Energy Picosecond laser based on Single-Crystal Fiber Amplifier," in *Advanced Solid State Lasers*, 2014, p. ATh2A.28.
- [29] M. Kienel, M. Müller, S. Demmler, J. Rothhardt, A. Klenke, T. Eidam, J. Limpert, and A. Tünnermann, "Coherent beam combination of Yb:YAG single-crystal rod amplifiers.," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 11, pp. 3278–81, Jun. 2014.
- [30] X. Délen, S. Piehler, J. Didierjean, N. Aubry, A. Voss, M. A. Ahmed, T. Graf, F. Balembois, and P. Georges, "250 W single-crystal fiber Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 14, p. 2898, Jul. 2012.
- [31] I. Martial, F. Balembois, J. Didierjean, and P. Georges, "Nd:YAG single-crystal fiber as high peak power amplifier of pulses below one nanosecond.," *Opt. Express*, vol. 19, no. 12, pp. 11667–79, Jun. 2011.
- [32] G. B. Venus, A. Sevia, V. I. Smirnov, and L. B. Glebov, *High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback*, vol. 5711. 2005.
- [33] M. Chyla, T. Miura, M. Smrz, P. Severova, O. Novak, A. Endo, and T. Mocek, "Zero-phonon-line pumped 1 kHz Yb:YAG thin-disk regenerative amplifier," 2013, p. 85991Q.
- [34] J. Shang, X. Zhu, and G. Zhu, "Analytical approach to thermal lensing in end-pumped

Yb:YAG thin-disk laser," *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 32, p. 6103, Nov. 2011.

Kasparas Sasnauskas

DIDELĖS IŠVADINĖS GALIOS HIBRIDINIO ŠVIESOLAIDINIO-KIETAKŪNIO LAZERIO TYRIMAI

Santrauka

Šiame darbe lyginamos monokristalinių skaidulinių ir didesnių apertūrų IAG:Yb kristalų stropiniai dviejų lėkių čirpuotų impulsų stiprintuvai ir jų galimybės. Kaupinimo šaltiniams naudoti didelio skaisčio 940 nm šviesolaidiniai lazeriniai diodai su bendra 140 W išvadine galia. Užkrato lazerio impulsai buvo sustiprinti iki ~30 W monokristaliniame stiprintuve, o didelės apertūros stropiniame stiprintuve iki ~50 W, išlaikant pluošto kokybę $M2 \sim 1.1$. Sustiprinti impulsai buvo suspausti difracinių gardelių pora iki ~600 fs su 80 % efektyvumu. Pagrindinis tyrimo tikslas buvo atrasti geriausią kaupinimo konfigūraciją čirpuotų impulsų stiprinimui. Suspausti impulsai gauti po čirpuotų impulsų stiprinimo antroje pakopoje bus panaudoti kaupinti 1 TW klasės optinį parametrinį čirpuotų impulsų stiprintuvą (OPCPA).

HIGH POWER OUTPUT HYBRID FIBER-SOLID STATE LASER INVESTIGATION

Summary

We compare performance of double-pass chirped pulse amplifier based on a single crystal fiber versus the larger aperture Yb:YAG rods. High brightness fiber coupled laser diodes with overall power of up to 140 W at 940 nm wavelength were used as a pump source. Emitted by fiber laser seed pulses were amplified up to ~ 30 W in a single crystal fiber and up to ~ 50 W in the larger aperture rods both featuring beam quality of $M^2 \sim 1.1$. Amplified pulses were compressed by diffraction grating down to ~ 600 fs with 80 % efficiency. The main goal of present investigation was to identify the best end-pumped configuration for the first cascade of CPA. Compressed pulses after the second cascade of CPA will be used for the pumping of 1 TW class optical parametric chirped pulse amplifier (OPCPA).