

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

Edvinas Varanavičius

MODŲ SINCHRONIZACIJOS REŽIMO TYRIMAS DIODINIO KAUPINIMO $ND : YVO^4$
LAZERYJE

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – LAZERINĖ TECHNOLOGIJA)

Studentas

Edvinas Varanavičius

Darbo vadovas

dr. Rimantas Grigonis

Recenzentas

dr. Julius Vengelis

Direktorius

prof. Aidas Matijošius

Vilnius 2022

Turinys

Įvadas	2
1 Literatūros apžvalga	3
1.1 Aktyvioji lazerio terpė ir jos optinis kaupinimas	3
1.2 $Nd:YVO^4$ lazerinis kristalas	5
1.3 Optiniai rezonatoriai.....	8
1.4 Pasyvi modų sinchronizacija	10
1.5 SESAM veidrodžiai	13
1.6 Impulsų spektro plėtimas	14
2 Eksperimentų metodai ir schemas	17
2.1 $Nd:YVO^4$ kristalo apatinio lazerinio lygmens užpildos įtaka lazerinei generacijai .	17
2.2 Diodinis kaupinimas	19
2.3 SESAM veidrodis	21
2.4 $Nd:YVO^4$ kristalo parametrai.....	23
2.5 Optiniai rezonatoriai ir jų modeliavimas	24
3 Rezultatai ir jų aptarimas	29
Pagrindiniai rezultatai ir išvados	44
Literatūros sąrašas	46
Santrauka	49
Summary	50

Įvadas

Modų sinchronizavimas lazeriuose sukuria sąlygas impulsinei lazerio veikai. Impulsų trukmė gali būti nuo $10^{-9}s$ iki $10^{-15}s$ trukmės. Tokie impulsai yra vadinami ultratrumpaisiais. Trumpa impulso trukmė ne tik leidžia pasiekti reikiamus intensyvumus netiesiniams procesams inicijuoti medžiagose, bet ir leidžia sekti itin sparčiai vykstančių procesų dinamiką [1–3]. Trumpiausi impulsai pasiekiami su pasyvia modų sinchronizacija. Labiausiai paplitę būdai pasiekti pasyvios modų sinchronizacijos veiką yra naudojant Kerr'o lęšį kuriančią medžiagą arba įsisotinančius puslaidininkinius veidrodžius (angl. trumpinys - SESAM) [4,5]. SESAM turi unikalias savybes leidžiančias, tinkamai optimizavus rezonatorių, paprastai realizuoti impulsinę lazerių veiką [6].

Intensyvi 914nm bangos ilgio spinduliuotė yra tinkama dvifotonėje netiesinėje mikroskopijoje, nes vienas plačiausiai naudojamų baltymų (žaliai fluorescuojantis baltymas) gali būti efektyviai žadinamas šio bangos ilgio spinduliuote [7,8]. Tokio bangos ilgio ultratrumpuosius impulsus su aukštu pasikartojimo dažniu galima generuoti sudėtingomis sistemomis tokiomis kaip titano safyro lazeris arba optinis parametrinis osciliatorius [9]. Sąlyginai paprasčiau generuoti tokią spinduliuotę galima su diodinio kaupinimo $Nd:YVO^4$ lazeriu.

Mokslinėje literatūroje yra nedaug darbų apie lazerius su $Nd:YVO^4$ aktyviaja terpe, generuojant 914nm bangos ilgio impulsus su SESAM veidrodžiu [10–12]. Visuose aprašytuose darbuose naudojamas 808nm bangos ilgio kaupinimas, ko pasekoje aktyviojoje terpėje pasireiškia nepageidaujami terminiai reiškiniai [13]. Kadangi nėra aprašytų darbų generuojant 914nm, kaupinant 880nm, įdomu ištirti ir optimizuoti tokio lazerio veikimą.

Šio darbo tikslas: ištirti 880nm bangos ilgio diodais kaupinamo $Nd:YVO^4$ lazerio veikimą pasyvios modų sinchronizacijos režime generuojant 914nm bangos ilgio spinduliuotę.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Identifikuoti ir optimizuoti veiksnius darančius įtaką efektyviai 914nm bangos ilgio generacijai $Nd:YVO^4$ kristale;
2. Rasti optimalią lazerio rezonatoriaus konfigūraciją pasyvios modų sinchronizacijos režimo realizavimui;
3. Pademonstruoti stabilią 914nm generacijos impulsinę veiką ir išmatuoti gautos spinduliuotės parametrus.

1 Literatūros apžvalga

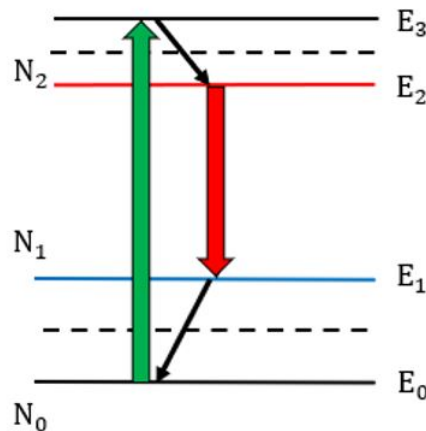
1.1 Aktyvioji lazerio terpė ir jos optinis kaupinimas

Kieto kūno osciliatorių aktyviosios terpės dažniausiai yra kristalinės medžiagos legiruotos pereinamųjų metalų arba retųjų žemės elementų priemaišiniais jonais [14]. Tokioje terpėje, legiruotoje įvairiais jonais, esant tam tikroms sąlygoms galima sukurti energinių lygmenų užpildos apgrąžą ir patalpinus tokią terpę į optinį rezonatorių, galime stebėti lazeriavimą [15,16]. Priemaišinių aktyvatorių jonų energetinių lygmenų sandara nulems lazerinės medžiagos spinduliuotės parametrus: lazerio bangos ilgį ir bangos ilgį, kuriuo kristalas kaupinamas. Lazerinių terpių matricos, į kurias įterptos priemaišos lazerio bangos ilgį nulems neženkliai, tačiau nuo jos stipriai priklausys mechaninės, terminės ir optinės savybės, kurios neretai ir nulemia lazerinės matricos pasirinkimą kieto kūno osciliatoriuose.

Kad būtų paprasčiau nagrinėti kieto kūno lazerinių medžiagų užpildos apgrąžas, dažniausiai yra nagrinėjami supaprastinti 3-4 lygmenų modeliai ir įskaitomi tik svarbiausi lygmenų ir polygmenų užpildų pokyčiai [17]. Tinkamų medžiagų pasirinkimui svarbūs ne tik spinduliniai, bet ir relaksaciniai nespinduliniai šuoliai, kurie vyksta dėl kristalo gardelės virpesių. Kadangi užpildos apgrąža yra sukuriama tarp lazerinio viršutinio ir lazerinio apatinio lygmenų, tai itin svarbu atsižvelgti ne tik į efektyvų kaupinimą į viršutinį lygmenį, bet ir į apatinio lazerinio lygmens užpildą. Kad medžiaga lazeriuotų ir vyktų optinis stiprinimas reikia sukurti sąlygas:

$$N_2 - N_1 > 0, \quad (1)$$

kur N_2 yra viršutinis lazerinis lygmuo, o N_1 - apatinis.



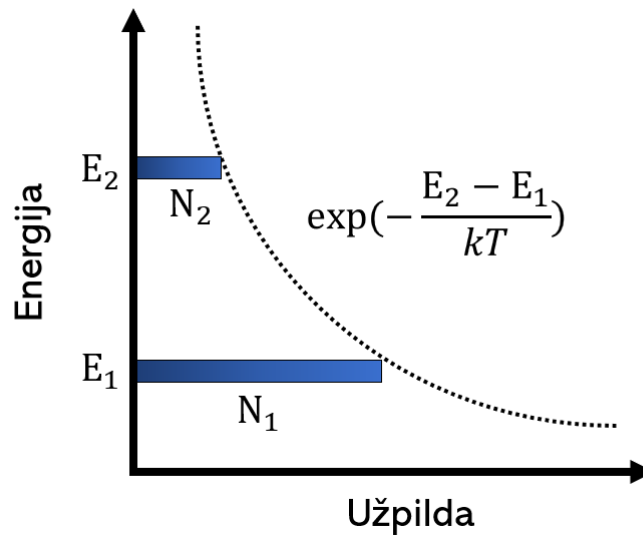
1 pav. Kvazi-trijų lygmenų lazerio energetinė diagrama. Žalia rodykle pažymėtas kaupinimo energetinis šuolis, o raudona rodykle pažymėtas lazerinis energetinis šuolis. N_2 – viršutinio lazerinio lygmens atomų skaičius, N_1 – apatinio lazerinio lygmens atomų skaičius, N_0 – pagrindinio lygmens atomų skaičius.

Kaip pažymėta 1 pav. pavaizduotoje schemoje lazerinį šuolį atitiks šuolis iš sužadinto E_2

lygmens į E_1 energijos lygmenį, o fotono dažnį arba bangos ilgį lems energijų tarpas tarp šių lygmenų, lygus:

$$\frac{N_1}{N_0} = \exp\left(\frac{-(E_1 - E_0)}{kT}\right). \quad (2)$$

Jeigu energijų tarpas tarp E_1 ir E_0 yra artimas kambario šiluminės užpildos energijai, tuomet apatinio lazerinio lygmens šiluminė užpilda bus didelė ir bus sunkesnės sąlygos sukurti užpildos apgražą tarp E_2 ir E_1 lygmenų. Lygiai toks pat sąryšis galioja ir lazeriniams lygmenims tarpusavyje. Terminėje pusiausvyroje, neesant optinio kaupinimo užpildos apgražos nebus.



2 pav. Santykinė lygmenų užpilda esant duotam energijų tarpui temperatūroje T pagal Boltzmann'o pasiskirstymą [18]

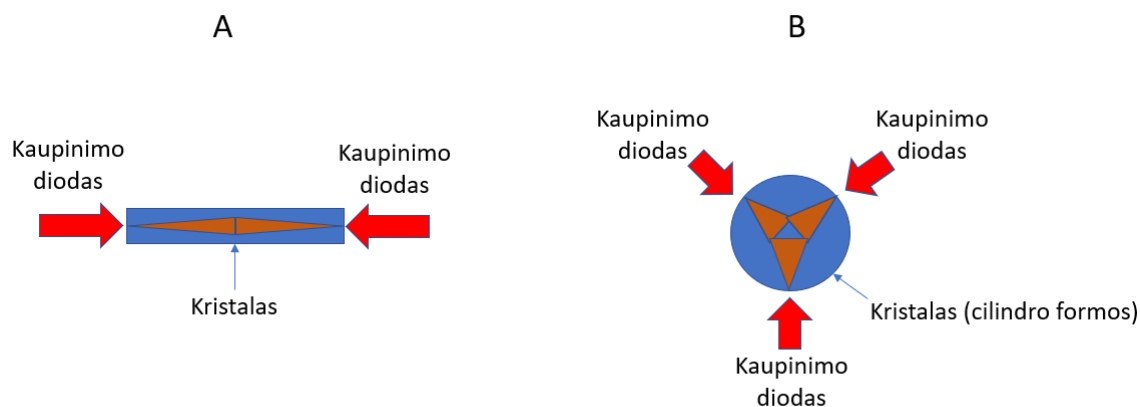
Tokiu atveju, matome, kad norint efektyvių kieto kūno lazerinių sistemų turime efektyviai kaupinti kristalą sukeliant kuo daugiau jonų į viršutinį lazerinį energijos lygmenį ir nepamiršti, kad didžiulę įtaką daro apatinio lazerinio lygmens užpilda, o kad ją sumažinti galime kristalą šaldyti. Pagal lygybę (5), esant fiksuotam energijų tarpui, mažesnė aukštesnio lygmens užpilda bus tuomet, kuomet temperatūra T bus mažesnė. Energija, kuri bus išspinduliuota atomų bus lygi:

$$E = \Delta N h \nu, \quad (3)$$

kur ΔN yra atomų skaičius, kurių energija dėl spindulinio šuolio nukrenta į žemesnį lygmenį. Jei norima palaikyti pastovų, stabilų lazeriavimą, tuomet reikia išlaikyti efektyvų pastovų kaupinimą. Užpildos apgraža taip pat yra sumažinama spontaninės emisijos, kuri vyksta visuomet be išimčių. Spontaninė emisija yra mažinama efektyviai optimizuojant rezonatoriaus veidrodžių

atspindžio koeficientų priklausomybes nuo bangos ilgio. Atspindžio koeficientai parenkami tokie, kad būtų stiprinamas tik tas lazerinis šuolis, kurį norime turėti lazerio išėjime.

Siekiant didelių lazerinės spinduliuotės galių arba siekiant kuo efektyviau veikiančios sistemos, kieto kūno osciliatoriams kaupinti naudojami diodinio kaupinimo lazeriniai moduliai. Svarbu parinkti tinkamo bangos ilgio kaupinimo modulį atsižvelgiant į aktyviosios terpės sugerties juostą kaupinimui, nes puslaidininkiniai lazeriai turi gana siaurą emisijos juostą, kuri nevisuomet persidengs su norimo naudoti kristalo sugerties juosta. Taip pat, svarbus faktas yra tai, kad tokių lazerinių modulių centrinis bangos ilgis priklauso nuo temperatūros ir dažniausiai charakteringas dydis yra $0.3nm/K$ [19]. Taip pat labai svarbu parinkti tinkamą kristalo kaupinimo schemą.

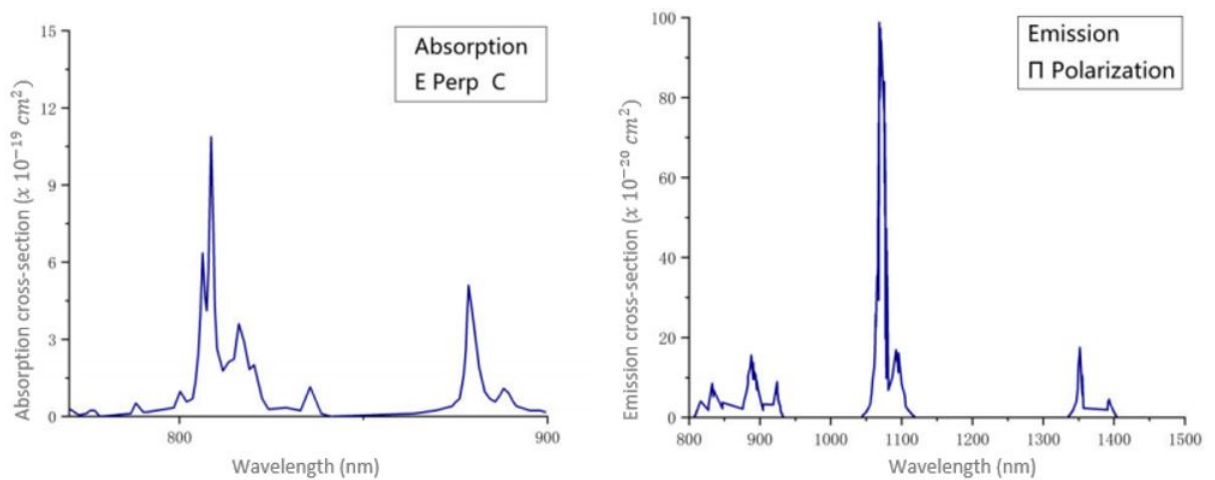


3 pav. Diodinio kaupinimo schemas, A – išilginio kaupinimo, B – skersinio kaupinimo schema

3pav. pavaizduotos dvi dažniausiai naudojamos kaupinimo schemas. Jei kristale yra didelis kvantinis defektas tarp kaupinimo ir lazerinio bangos ilgio ir lazerio galios ribojantis veiksnys yra termo-optiniai efektai, tuomet tam, kad sumažinti šiuos efektus naudojama skersinio kaupinimo schema. Ja pasiekiamas homogeniškas atomų sužadėjimas, tačiau yra stiprinamos aukštesnės eilės skersinės modos dėl to dažnai suprastėja pluošto kokybė. Ten, kur reikia geros pluošto kokybės ir termo-optiniai reiškiniai nėra ribojantis veiksnys didesnėms galioms pasiekti, išilginio kaupinimo schema yra daug optimalesnė. Išilginėje kaupinimo schemoje energijos perdavimas yra geresnis nes esant geram lazerio generacijos pluošto ir kaupinimo pluošto erdviniam persiklojimui didesnė dalis kaupinimo energijos yra panaudojama lazeriniams šuoliams generuoti, o geresnė pluošto kokybė pasiekama todėl, kad neprakaupintose kristalo vietose kaupinimo erdvinė moda veikia kaip minkšta apertūra aukštesnės eilės modoms.

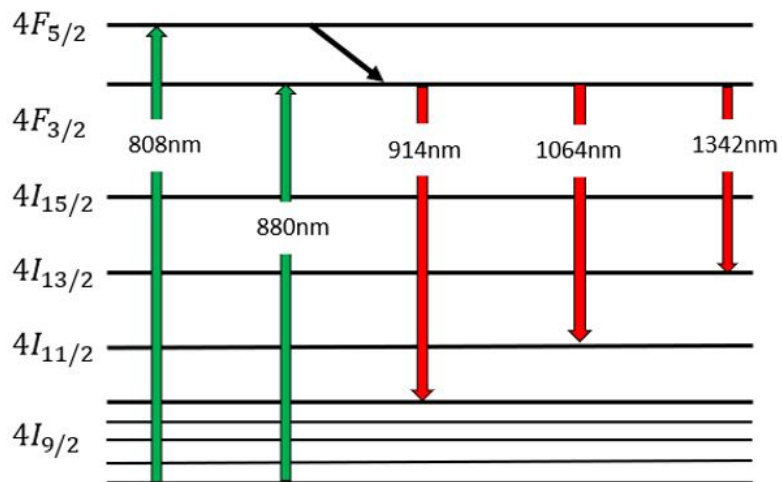
1.2 $Nd : YVO^4$ lazerinis kristalas

Daugiausia mokslinių darbų su $Nd : YVO^4$ lazeriniais kristalais yra atlikta generuojant $1064nm$ ir $1342nm$ bangos ilgio spinduliuotę. Tai yra tinkamas kristalas ir didelėms laisvo-



4 pav. $Nd:YVO^4$ kristalo sugerties (c ašies išpjovimu) ir emisijos (π poliarizacijai) skerspjūviai pateikti gamintojo *Laser – Crylink* techninėse kristalo specifikacijose

sios veikos lazerinėms galioms pasiekti ties $914nm$ centriniu bangos ilgiu [20, 21]. Taip pat yra pademonstruota $3ps$ ir $8.8ps$ trukmės impulsų pasyvios modų sinchronizacijos veika ties $914nm$ bangos ilgiu [10, 11]. Jeigu pavyktų pasiekti $1ps$ eilės trukmės, su dideliu pasikartojimo dažniu, gera pluošto kokybe, tuomet osciliatorius su $Nd:YVO^4$ aktyvia terpe, generuojantis ties $914nm$ bangos ilgiu galėtų tapti santykinai paprasta sistema, tinkama dvifotonei netiesinei mikroskopijai.



5 pav. $Nd:YVO^4$ kristalo pagrindiniai lazeriniai lygmenys. Žaliomis rodyklėmis pavaizduoti kaupinimo šuoliai ($808nm$ ir $880nm$), o raudonomis rodyklėmis pažymėti galimi spindulinės emisijos šuoliai ($914nm$, $1064nm$ ir $1342nm$) [22]

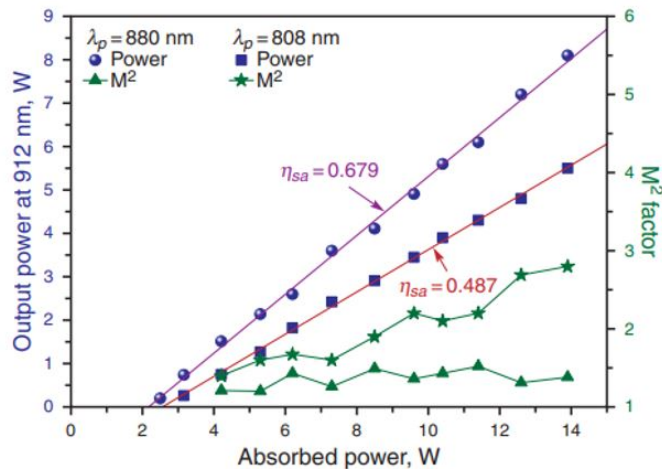
Iš 4 pav. matome, jog kristalas gerai sugeria ties $808nm$ ir $880nm$ juostomis ir turi didžiausią emisijos skerspjūvį ties $1064nm$. Pagrindinis iššūkis generuojant $914nm$ bangos ilgio

spinduliuotę lyginant su 1064nm yra ne tik tai, kad emisijos skerspjūvis ties 914nm yra 22 kartus mažesnis, bet ir tai kad tokia sistema elgiasi kaip kvazi-trijų lygmenų, skirtingai nei keturių lygmenų 1064nm veikime. Esminis skirtumas tarp keturių ir kvazi-trijų lygmenų sistemų yra tas, kad nekaupinamas kristalas keturių lygmenų sistemoje yra skaidrus 1064nm spinduliuotei dėl itin žemos $4I_{11/2}$ apatinio lazerinio lygmens užpildos, o kvazi-trijų lygmenų veikime, tam tikra kaupinimo sparta yra reikalingas užtikrinti skaidrumą ties 914nm dėl didžiulės reabsorbcijos, kuri atsiranda dėl didelės šiluminės apatinio lygmens užpildos. Į tai būtina atsižvelgti generuojant į $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ šuolius.

Iš 5 pav. matosi, kad kaupinant 808nm ir 880nm bangos ilgiais ir bandant gauti generaciją ties 1342nm neišvengiamai atsirastų milžiniški termo-optiniai efektai dėl itin didelio kvantinio defekto [23]. Termo-optiniai reiškiniai dažnu atveju yra veiksnys ribojantis lazerio efektyvumą ir dažniausia daroma viskas, kad šie reiškiniai darytų kuo mažesnę įtaką veikimui. Akivaizdu, jog mažiausi termo-optiniai reiškiniai pasireikš generuojant 914nm ir kaupinant 880nm bangos ilgio spinduliuote.

1 lentelė. $Nd : YVO^4$ ir $Nd : GdVO^4$ kristalų parametrai [24]

Parametras	$Nd : YVO^4$	$Nd : GdVO^4$
Emisijos centrinis bangos ilgis λ_{nm}	912	914
Emisijos spektro plotis $\Delta\lambda_{nm}$	1.6	1.3
Emisijos skerspjūvis $\sigma_{em,eff} (*10^{-20} cm^2)$	6.6	4.8
Lazerinio lygmens gyvavimo trukmė μs	100	97



6 pav. $Nd : GdVO^4$ osciliatoriaus išvadinės galios ir M^2 priklausomybė nuo sugertos kaupinimo galios ties 880nm ir 808nm [13]

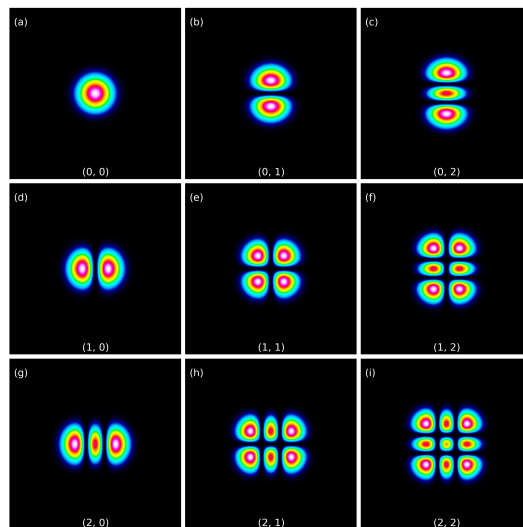
$Nd : GdVO^4$ kristalas yra labai panašus savo parametrais ir energetiniais lygmenimis. Kaip matome ir iš 1 lentelės, jie labai panašūs ir stiprinimu, emisijos spektro pločiu. Atliktame eksperimentiniame darbe siekiant išsiaiškinti koks kaupinimas efektyvesnis generuojant ties 912nm,

pademonstruota, kad kaupinant tiesiogiai į $4F_{3/2}$ emisijos juostą gaunamas mažesnis šilumos išsiskyrimas kristale, ko pasekoje padidėja laisvosios veikos osciliatoriaus išvadinė galia ir pluošto parametrai [13].

Identiškos priklausomybės kaip 6 pav. galima tikėtis ir generuojant su $Nd:YVO_4$ lazeriniu kristalu, nes abiejų kristalų šiluminės, optinės, mechaninės savybės, emisijos ir sugerties skerspjūviai, yra labai panašūs. Todėl toliau nagrinėjant $914nm$ osciliatoriaus veikimą naudotas $880nm$ kaupinimas. Vienintelis iššūkis pasirinkus tokį kaupinimą, yra tas, kad techniškai sudėtinga realizuoti kolinearų kaupinimą ir teko naudoti nekolinearų kaupinimą, nes $880nm$ bangos ilgis yra per artimas $914nm$ ir tinkamų dielektrinių veidrodžių gamyba tokiu atveju yra itin komplikuota. Visa tai išsamiau aptarta rezultatų aptarime.

1.3 Optiniai rezonatoriai

Optiniai rezonatoriai yra tam tikra tvarka išdėlioti veidrodžiai tarp kurių, rezonatoriaus ašimi sklindantys spinduliai atkartoja savo trajektorijas. Rezonatoriai gali būti padaryti labai įvairių formų, svarbiausia, kad rezonatoriuje osciliuojanti spinduliuotė turėtų kuo mažesnius difrakcinius nuostolius po daugelio kartų apėjimų [25]. Rezonatoriuje osciliuojant lazerinei spinduliuotei, rezonatoriaus ašies kryptimi susidaro stovinčios elektromagnetinės bangos. Šios stovinčios bangos, lazeriniuose optiniuose rezonatoriuose yra apytiksliai, banginių lygčių, Hermite'o - Gauss'o sprendiniai [26].



7 pav. Skirtingų eilių Hermite'o - Gauss'o modų intensyvumo skirstiniai

Kaip pavaizduota 7 paveiksle, intensyvumo skirstiniai, osciliuojantys optiniame rezonatoriuje gali būti labai įvairūs. Praktikoje realizuojami rezonatoriai su geriausia M^2 verte turinčia TEM_{00} moda, o kitos modos susidaro tik tuo atveju, jeigu netinkamai sujustiruotas kaupinimas arba yra difrakciniai nuostoliai TEM_{00} modai yra didesni nei kuriai nors kitai, aukštesnės eilės

modai.

Stabilios Hermite'o - Gauss'o stovinčios bangos rezonatoriuje susidarys tik tuo atveju, jeigu rezonatorius atitiks stabilumo sąlygas [27]. Stabilus rezonatorius gali būti sudarytas bent iš dviejų veidrodžių, kurių kreivumas ρ_1 ir ρ_2 (jei veidrodis plokščias, tai $\rho_i = \infty$) ir atstumas tarp jų $L = nL_0$, kur L_0 yra geometrinis atstumas tarp veidrodžių, o n yra lūžio rodiklis terpėje tarp veidrodžių. L atstumo verčių intervalas, su kuriuo rezonatorius yra stabilus yra aprašomas tokios sąlygos: rezonatoriui lygiagrečiai ašimi paleisti spinduliai tarp veidrodžių turi likti rezonatoriuje po begalybės kartų atsispindėjimų vienas nuo kito. Įvedus parametrą g_i (kur $i=1,2$):

$$g_i = 1 - \frac{L}{\rho_i}, \quad (4)$$

galima užrašyti rezonatoriaus stabilumo sąlygą:

$$0 < g_1 g_2 < 1, \quad (5)$$

Specializuotomis kompiuterinėmis programomis modeliuojant rezonatoriaus stabilumą, esant daugybei optinių elementų, yra įvertinamas ne teorinio tiesaus spindulio stabilumas, o TEM_{00} Gauss'o pluošto, įvertinant jo skėstį ir kitus parametrus. Dažniausiai modeliuojama atidžiai atsižvelgiant į Gauss'o modos diametrą ant atskirų optinių elementų. Svarbu, kad ant veidrodžių pluošto matmenys būtų mažesni nei pačio veidrodžio apertūra. Elementuose, kuriuose svarbus mažas modos diametras skiriamas itin didelis dėmesys. Netinkamai suderinus rezonatoriaus modos dydį aktyviajame lazeriniame elemente su kaupinimo spinduliuote, galimas toks atvejis, kad lazerinės generacijos rezonatoriuje nebus dėl nepakankamo kaupinimo arba kaupinimo modos sukurtos minkštos apertūros. Taipogi maži modų diametrai gali būti ir elementuose, kuriuose reikalingas didelis energijos įtėkis, nes sumažinant modos diametrą du kart, energijos įtėkis padidėja 4 kartus:

$$F[J/cm^2] = \frac{E[J]}{S[cm^2]}, \quad (6)$$

kur F - energijos įtėkis, E - lazerinės spinduliuotės energija rezonatoriaus viduje, o S - efektyvus pluošto plotas.

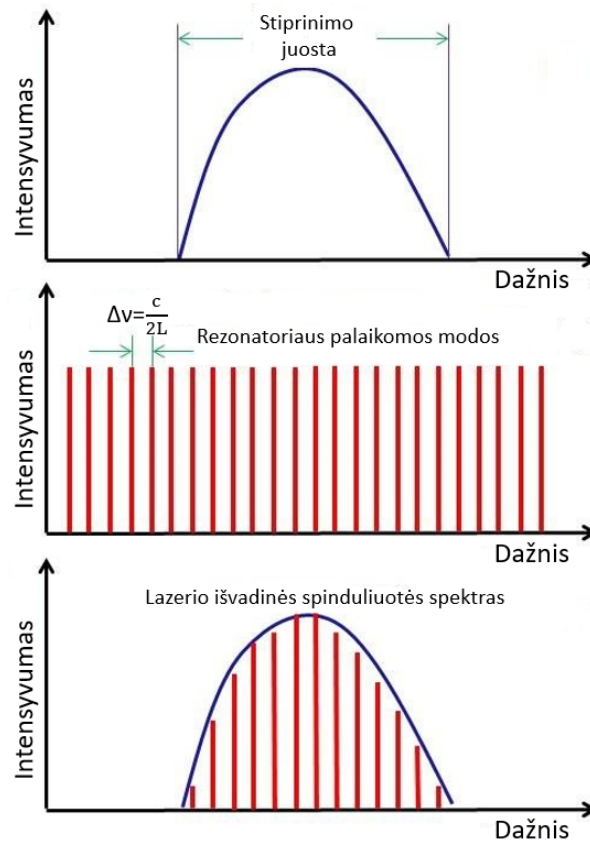
Jeigu vienoje rezonatoriaus vietoje bus maža moda, tai po tam tikro atstumo pluoštis turės kitokius matmenis, kadangi Gauss'o pluoštas sklindant erdvėje skečiasi. Kuo mažesnis Gauss'o pluošto diametras tuo didesnė skėstis, ko pasekoje modos dydžiai ant atskirų elementų rezonatoriuje būna labai skirtingi.

Nuostoliai rezonatoriuose yra kiek įmanoma mažinami tam, kad lazerinė spinduliuotė rezonatoriuje būtų stiprinama kuo efektyviau. Visi nauodojami veidrodžiai kieto kūno osciliatoriuose yra padengti specifinėmis dielektrinėmis dangomis, skirtomis atspindėti lazerinę spinduliuotę su atspindžio koeficientu 100% . Vienintelė išimtis yra išvadinis veidrodis, kuris yra pralaidus

lazerinei spinduliotei. Pralaidumo vertės gali būti įvairios ir labai priklauso nuo paties rezonatoriaus dizaino, stiprinimo ir kitų nuostolių rezonatoriuje ir siekia nuo 0.1% iki 30% ir daugiau. Taipogi reikia paminėti, kad nors specifikuojamas veidrodžio atspindžio koeficientas būtų 100%, ilgainiui rezonatoriuje osciliuojant intensyviai lazerinei spinduliotei gali įvykti optinių elementų dangų pažaida, kuri bėgant laikui vis didintų nuostolius ir tokie nuostoliai gali išaugti iki tokio lygio, kad stiprinimo aktyviajame elemente gali nebepakakti lazerinei generacijai palaikyti [28]. Kiti nuostoliai gali būti ne Briusterio kampu išsukti pralaidūs elementai ir įvairūs difrakciniai nuostoliai nuo nešvarumų arba dulkių ant optinių elementų.

1.4 Pasyvi modų sinchronizacija

Optiniame rezonatoriuje yra palaikomas tam tikras išilginių osciliuojančių modų skaičius, kuris priklauso nuo rezonatoriaus ilgio L , bei stiprinimo juostos pločio Θ .



8 pav. Viršuje pavaizduota lazerio stiprinimo dažnių juosta, viduryje rezonatoriaus palaikomos išilginės modos, o apačioje lazerio rezonatoriuje palaikomų ir stiprinamų dažnių spektras

Lazeris gali generuoti tam tikrą išilginių modų skaičių:

$$m = \frac{\Theta}{\Delta\nu}, \quad (7)$$

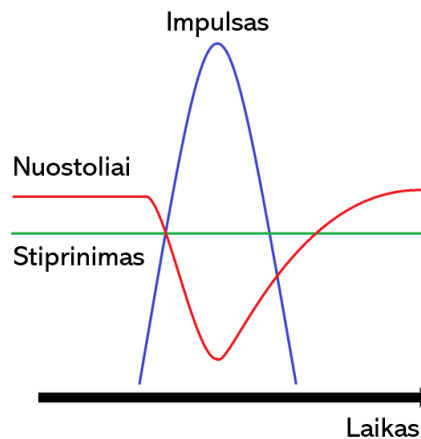
kur

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \quad (8)$$

$\Delta\nu$ - dažnių skirtumas tarp gretimų išilginių modų, o c - šviesos greitis vaakume. Vizualiai tai pakankamai gerai atvaizduoja 9 paveikslas. Kuo aktyvios terpės stiprinimo juosta yra platesnė, tuo daugiau išilginių modų gali osciliuoti ir stiprintis rezonatoriuje. Įprastai praktikoje kieto kūno osciliatoriuose modų skaičių ribojantis veiksnys yra būtent stiprinimo juostos plotis, o ne rezonatoriaus ilgis [19].

Nuolatinė veika veikiančiame osciliatoriuje išilginės rezonatoriaus modos fliktuoja. Fazės tarp gretimų modų yra atsitiktinės, būtent dėl to nuostoviosios veikos režime nusistovi vidutinis fliktuojantis elektromagnetinis laukas. Jeigu išilginės rezonatoriaus modos tam tikru laiko momentu būtų tarpusavyje sufazuotos, tokiu atveju rezonatoriuje susidarytų impulsas ir visa vidutinė galia būtų sukoncentruota trumpame laiko intervale, ko pasekoje pikinis spinduliuotės intensyvumas labai stipriai išaugtų. Toks reiškinys vadinamas modų sinchronizacija ir tokiu būdu gali būti gaunami ultratrumpieji lazerio impulsai (ps - fs trukmės).

Yra nemažai būdų pasiekti tokią lazerio veiką, bet visų būdų esmė yra sukurti laike kintančius pasotvius nuostolius. Norint trumpų, pikosekundinių ar femtosekundinių impulsų dažniausiai naudojami pasyviai nuostolius moduluojantys būdai, tokie kaip SESAM (puslaidininkiniai, įsisotinamieji nuostolius turintys veidrodžiai, angl.- "semiconductor saturable absorber mirrors") panaudojimas rezonatoriaus viduje ir/arba Kerr'o lęšio modų sinchronizacija.

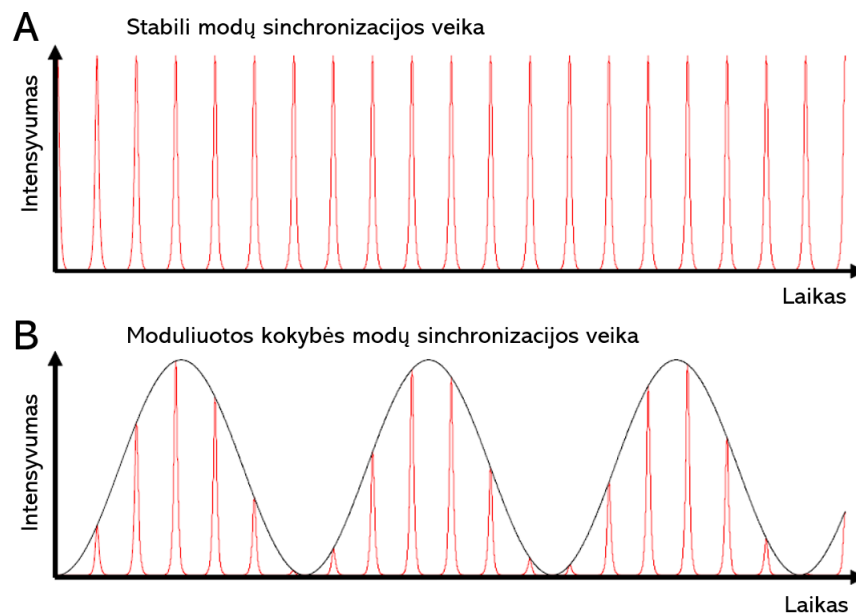


9 pav. Dinaminė pusiausvyra tarp spinduliuotės galios, stiprinimo ir nuostolių laike

Naudojant SESAM veidrodžius, pastovūs nuostoliai yra sukuriami neintensyviai, sotinančio energijos įtekio nepasiekiančiai spinduliuotei. Tuomet, kai chaotiškai laike kintančios modos susifazuoja ant SESAM veidrodžio, stipriai išauga intensyvumas ir puslaidininkio sluoksnis ant veidrodžio praskaidrėja taip sukurdamas mažesnius nuostolius sufazuotai spinduliuotei. Jeigu sklindnant rezonatoriumi toks impulsas neišsifazuoja ir išsilaiko, gali susidaryti dinaminė pusiausvyra tarp nuostolių kuriamų SESAM veidrodžio ir stiprinimo lazeriniame kristale, tokiu

būdu susikuria impulsas ir lazeris pereina į impulsinį pasyvios modų sinchronizacijos režimą.

Kaip ir pavaizduota 9 paveiksle, nuostoliai turi savo atsistatymo trukmę. Jie priklauso nuo SESAM dizaino ir jame esančių sluoksnių elektronų judrių. Nuostolių dydis turi būti kruopščiai parinktas, žinant aktyviosios lazerinės terpės stiprinimo dydį. Nuostoliai gali būti tokie dideli, kad gali būti užgoštas stiprinimas kristale ir bus prarasta generacija lazeryje. Esant modų sinchronizacijos veikai, impulsai iš rezonatoriaus emituojami tokiu dažniu, koks yra šviesos apėjimo aplink rezonatorių dažnis. Neesant pakankamam stiprinimui kristale arba per mažai kaupinimo spartai (dėl mažo sugerties skerspjūvio, prasto kaupinimo ir generacijos modų persiklojimo ir t.t.), rezonatoriuje gali būti stebima ne tik modų sinchronizacijos veika [29].

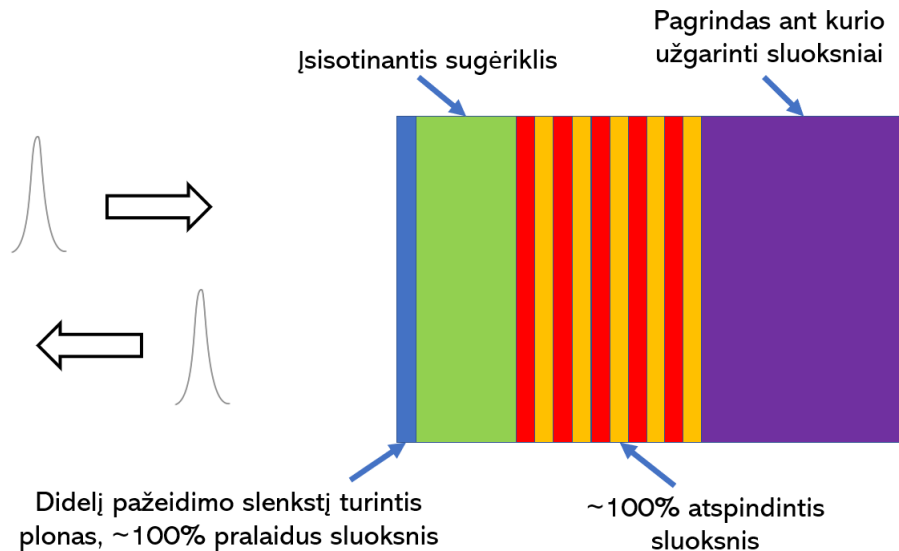


10 pav. A dalyje pavaizduota stabili modų sinchronizacijos veika, o B dalyje pavaizduota moduluotos kokybės modų sinchronizacijos veika

Kaip pavaizduota 10 paveiksle, tam tikrais laiko intervalais, moduluotos kokybės modų sinchronizacijos veikoje lazeris emituoja impulsų papliupas. Dažnu atveju tokia moduliacija stebima kHz dažniais ir yra nepageidaujamas veiksnys, kurio visais būdais stengiamasi išvengti [30]. Vienas iš būdų yra aktyvios lazerinės terpės kaupinimo spartos didinimas geriau perklojant kaupinimo ir rezonatoriaus modas. Kitas būdas, akivaizdu yra tinkamo SESAM veidrodžio pasirinkimas pagal jo specifikuojamus parametrus. Nors SESAM moduliacijos gylio didinimas dažnu atveju patrupina generuojamus impulsus, tačiau tai gali nulemti kokybės moduliacijos atsiradimą lazeryje. To pasekoje siekiama mažinti moduliacijos gylį, kad būtų užtikrinami mažesni nuostoliai rezonatoriaus viduje. Dar vienas galimas būdas yra rezonatorių optimizuoti taip, kad lazerio modos diametras ant SESAM veidrodžio būtų mažesnis. Tokiu būdu, prie tų pačių lazerio galių sukuriamas didesnis energijos įtėkis ant SESAM veidrodžio ir veidrodžio nuostoliai sumažinami su mažesne galia rezonatoriaus viduje.

1.5 SESAM veidrodžiai

SESAM (angl. Semiconductor saturable absorber mirror) yra puslaidininkinis įsiostinančių nuostolių veidrodis. Jo struktūra pavaizduota 11 paveiksle. Ant pagrindo padengta 100%



11 pav. SESAM veidrodžio struktūra

tam tikrą bangų ilgių diapazoną atspindinti dielektrinė danga, o ant dielektrinio veidrodžio padengtas įsisotinančius nuostolius turintis puslaidininkinis sluoksnis [31]. Jo veikimo principas yra toks, kad veidrodžio sotinantį energijos įtekį turinti spinduliuotė trumpu laiko momentu praskaidrina įsisotinantį sugėriklį (puslaidininkinį sluoksnį) ir spinduliuotė atsispindi su atspindžio moduliacijos gylio dydžiu didesniu atspindžio koeficientu, nei nesiekiančio energijos įtekio spinduliuotė. Taip sukuriama laike kintanti nuostolė. Patalpinus tokį elementą į lazerio rezonatorių, galima susikurti dinaminę pusiausvyrą tarp optinio stiprinimo ir moduluojamų nuostolių ir susidaro sąlygos pasyviai modų sinchronizacijai, kaip aptarta 1.4 skyrelyje.

Šių veidrodžių pagrindiniai specifikuojami parametrai yra bangos ilgis, kuriam optimizuotas veidrodis, aukšto atspindžio koeficiento bangos ilgių diapazonas ir atspindžio koeficientas ties atskirais bangų ilgiais, atspindžio koeficiento moduliacijos gylis, sugertis, sotinantį energijos įtekis, pažeidimo slenkstis ir moduluojamų nuostolių relaksacijos trukmė. Renkant SESAM veidrodį į visus parametrus privalu atsižvelgti. Lazeryje esant mažam stiprinimui, reikia kuo mažesnių nuostolių, kad būtų palaikoma ir stiprinama lazerinė spinduliuotė. Dilema ta, kad didinant moduliacijos gylį, lazeryje esant pakankamam stiprinimui galima generuoti trumpesnius impulsus. Dėl šios priežasties tenka varijuoti skirtingais parametrais siekiant turėti kuo trumpesnius impulsus lazeryje su SESAM.

Įsisotinančio sugėriklio sugertis laikinai sumažėja, tačiau nepatampa nulinė, dėl to labai svarbu aušinti tokį veidrodį, ypač, jeigu sugertis yra didelė. Papildomi šilumos šaltiniai lazerių

rezonatoriuose kelia atsirandančių nestabilumų problemas [16]. Dar viena problema yra SESAM optiniai pažeidimai įsostinančio sugėriklio sluoksnyje. Norint pasiekti didelius energijos įtekis ant SESAM, lazerio viduje specialiai mažinamas modos dydis, ko pasekoje ant veidrodžio paviršiaus yra didelis intensyvumas nuo kurio sugėriklis palaipsniui degraduoja ir sukuria vis didesnius nuostolius kol galiausiai įvyksta optinis pramušimas. Taip pat reikia atsižvelgti į dvifotonę sugertį, ypač trumpesnių nei 1ps impulsų atveju. Dvifotonė sugertis padidina bendrą sugertį tokiu dydžiu:

$$A_{TPA} = \beta I d = \frac{\beta F d}{t_p}, \quad (9)$$

kur β - dvifotonės sugerties koeficientas, I - impulso intensyvumas, d - sugėriklio storis, F - impulso energijos įtekis, t_p - impulso trukmė. Dvifotonės sugerties koeficientas yra nuo medžiagos priklausanti konstanta. Pavyzdžiui GaAs sluoksniui $\beta = 2.5 * 10^{-10} m/W$ [32].

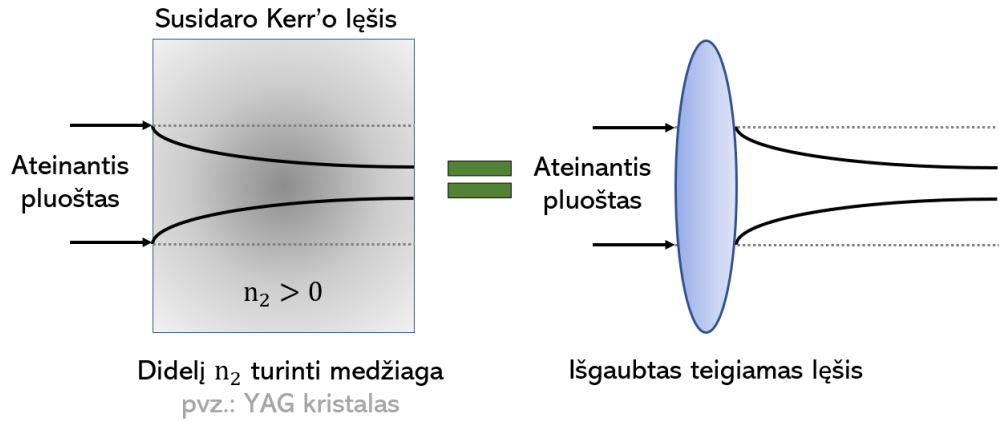
1.6 Impulsų spektro plėtimas

Norint impulsiniame lazeryje generuoti trumpesnius impulsus, reikia plėsti spinduliuotės spektrą, nes impulso spektro plotis yra tiesiogiai proporcingas impulso trukmei jeigu impulsas yra nečirpuotas. Todėl svarbu žinoti kokiais būdais galima padidinti impulsų spektro plotį.

Plačiai naudojamas būdas padidinti lazerio spektrinių komponentių skaičių modų sinchronizacijos režime yra impulsų fazinė savimoduliacija [33]. Ji pasireiškia tuomet, kai lazerio spinduliuotė sąveikauja su medžiaga. Šio reiškinio fizikinis mechanizmas yra toks: stiprus lazerio pluošto spektrinių komponentių elektrinis laukas gali indukuoti ženkly, nuo intensyvumo priklausantį lūžio rodiklio pokytį medžiagoje, kurioje sklinda pluoštas. Medžiaga su pakitusiu lūžio rodikliu perspinduliuoja spektrines komponentes su skirtingais indukuotais fazės pokyčiais ir taip pasireiškia fazinė savimoduliacija. Esant impulsinei lazerio veikai, kas ir pasireiškia lazeriui veikiant modų sinchronizacijos režime, laikinė intensyvumo variacija lemia fazinės savimoduliacijos variaciją laike. Kadangi fazės laikinė išvestinė atitinka kampinį elektromagnetinės bangos dažnį, tai fazinė savimoduliacija pasireiškia kaip elektromagnetinės bangos dažnio moduliacija ir impulsas praėjęs medžiagą, kurioje vyko šis efektas, turi platesnį spektrą. Norint indukuoti didelį spektro plėtimąsi, reikia indukuoto didelio fazės pokyčio.

Vykstant impulso fazinei savimoduliacijai vyksta ir Kerr'o efektas. Dėl Kerr'o efekto, esant medžiagos lūžio rodiklio pokyčiui atsiradusiam dėl didelio intensyvumo, medžiagoje sklindant impulsui susidaro Kerr'o lęšis, kuris gali stipriai iškreipti bangos frontą. Jeigu medžiagos, kuria sklinda impulsas, n_2 yra teigiamas, tai vyks pluošto savifokusacija.

Kerr'o lęšio modų sinchronizacijos režimas turi keleta pranašumų prieš pasyvios modų sinchronizacijos režimą su SESAM veidrodžiu. Visų pirma, tai nuostoliai rezonatoriuje moduliuojasi daug kartų greičiau nei su betkoku SESAM veidrodžiu. Netiesinio medžiagos atsako greitis yra greitesnis už fs impulsus, todėl tai niekada neriboja impulsų trukmės. Antra, tinkamai parin-



12 pav. Pluošto savifokusacija vykstanti Kerr'o efekto metu ir pluošto fokusavimo atitinkamo įprastiniu teigiamu išgaubtu lęšiu

kus rezonatoriaus veidrodžių konfigūracija, esant Kerr'o lęšio modų sinchronizacijai nuostoliai impulsiniame režime yra tokie pat kaip nuostoviojoje veikoje, ko pasekoje galima gauti didesnes išvadinės galias. Trečia, impulsų spektras gali ženkliai išplisti, ko pasekoje iš rezonatoriaus gali išeiti trumpesni impulsai [34].

Tam, kad impulso spektras stipriai išplistų, reikia indukuoti daug fazės pokyčio laike. Skaitmeniškai, sukaupą bendrą netiesinį fazės poslinkį praėjus per Kerr'o medžiagą parodo B integralas:

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 I(z) dz, \quad (10)$$

kur $I(z)$ yra impulso intensyvumas z koordinatėje (sklidimo ašies koord.), z yra pluošto padėtis sklidimo koordinatėje ir n_2 yra netiesinis medžiagos lūžio rodiklis. Intensyvumas yra lygus:

$$I = \frac{E}{S\Delta\tau}, \quad (11)$$

kur E - impulso energija, S - efektyvus pluošto plotas, $\Delta\tau$ - impulso trukmė. Kaip matome pagal 10 formulę, kuo didesnis pluošto intensyvumas, kuo didesnis medžiagos netiesinis lūžio rodiklis ir kuo ilgesnėje medžiagoje vyksta reikšminga fazinė savimoduliacija, tuo daugiau bendro netiesinio fazės pokyčio sukaupiami. Reikia tik turėti omenyje, kad esant per dideliu B , gali įvykti pluošto kolapsavimas, kai pluoštas susifokusuos į begalo mažą tašką, ko pasekoje įvyks medžiagos pažaida ir šio efekto nebestebėsime. Konstruojant lazerį veikiantį pasyvio modų sinchronizacijos režime reikia atsižvelgti į lazerio viduje pasiekiamą intensyvumą. Tam, kad intensyvumą padidinti, reikia specialiai konstruoti rezonatorių taip, kad lazerio modos dydis ten, kur bus įdėta Kerr'o medžiaga, būtų kuo mažesnis. Taip pat svarbi impulsų energija, t.y. rezonatoriaus ilgis. Kuo ilgesnis rezonatorius, tuo esant fiksuotai vidutinei galiai, gaunami

didesnės energijos impulsai.

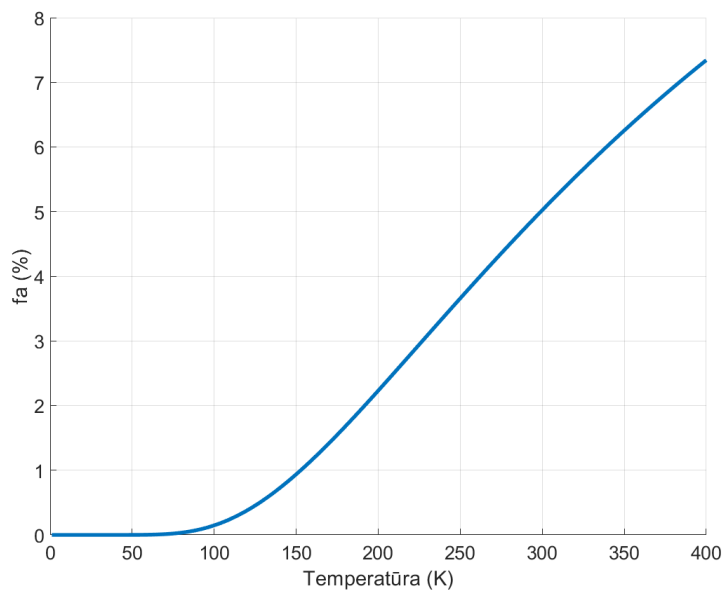
Idealiu atveju, tinkamai sukonfiguravus rezonatorių vos po kelių pluošto apėjimų (pirmyn ir atgal) per Kerr'o medžiagą, impulso spektras išplinta reikšmingai ir tinkamai suderinus grupinio vėlinimo dispersiją rezonatoriuje gaunami trumpesni solitoniniai impulsai. Gali būti ir taip, kad osciliatoriaus rezonatoriaus viduje niekaip nepavyksta sukurti sąlygu pakankamam intensyvumui pasiekti Kerr'o medžiagoje. Tokiu atveju galima impulsų spektrą plėsti ne rezonatoriaus viduje, o išorėje [35]. Tam reikėtų konstruoti atskirą lazerio stiprintuvą ir ženkliai padidinti iš osciliatoriaus gautų impulsų energiją ir vidutinę galią. Tuomet už rezonatorių galima sukonstruoti sistemą su Herriott'o cell'e, kurioje pluoštas Kerr'o medžiagą prasklistų daug (>10) kartų, ko pasekoje prisikauptų daug fazės pokyčio laike. Tokiu atveju impulsai taptu teigiamai čirpuoti, bet juos suspaudus neigiamo čirpo kompresoriumi (prizminiu kompresoriumi, gardeliniu kompresoriumi arba neigiamai čirpuotais veidrodžiais) galima gauti daug trumpesnius impulsus nei jie generuojami osciliatoriaus rezonatoriuje. Vienintelis tokios sistemos minusas yra lazerio pasikartojimo dažnio sumažėjimas, jeigu specifiniams taikymams yra reikalingas didelis pasikartojimo dažnis.

2 Eksperimentų metodai ir schemas

2.1 $Nd:YVO_4$ kristalo apatinio lazerinio lygmens užpildos įtaka lazerinei generacijai

Siekiant išsiaiškinti kiek įtakos kristalo stiprinimui ties $914nm$ daro aušinimas, galima įsivertinti kristalo apatinio lazerinio lygmens šiluminės užpildos priklausomybę nuo temperatūros. Kadangi vykstant lazerinei generacijai kristale lokaliai pasiekiamos didelės temperatūros, kvazi-trijų lygmenų sistemos lazerinis efektyvumas teoriškai turėtų būti vis mažesnis pasiekiant didesnes generacijos galias.

Boltzmann'o lygmenų užpilda parodo, kad aušinimas turi įtakos kvazi-trijų lygmenų sistemos lazeriavimui. Norint pasiekti efektyvų lazerių veikimą, reikia kuo didesnės užpildos apgrąžos, o kad ją pasiekti, reikia didinti kaupinimo spartą didinant kaupinimo modulio galią arba mažinti apatinio lygmens užpildą.



13 pav. Apatinio lazerinio lygmens užpildos faktoriaus priklausomybė nuo temperatūros. Boltzmann'o šiluminės užpildos faktorius, parodantis kokią dalį iš $4I_{9/2}$ visų sužadintų Nd^{3+} atomų yra apatiniame lazeriniame lygmenyje.

Skaičiuojant Boltzmann'o šiluminės užpildos faktorių apatiniame lazeriniame lygmeniui galima apskaičiuoti kokią dalį viso $4I_{9/2}$ lygmens užpildos sudaro apatinio lazerinio lygmens užpilda (viršutinis $4I_{9/2}$ lygmens polygmenis). Kadangi $4I_{9/2}$ lygmenį sudaro 5 polygmeniai, kurių tarpai nuo žemiausio polygmenio atvirkštiniais centimetrais yra 108, 173, 226 ir 433 atitinkamai, tai paskaičiavus kokius energijos tarpus tai atitinka pagal formulę:

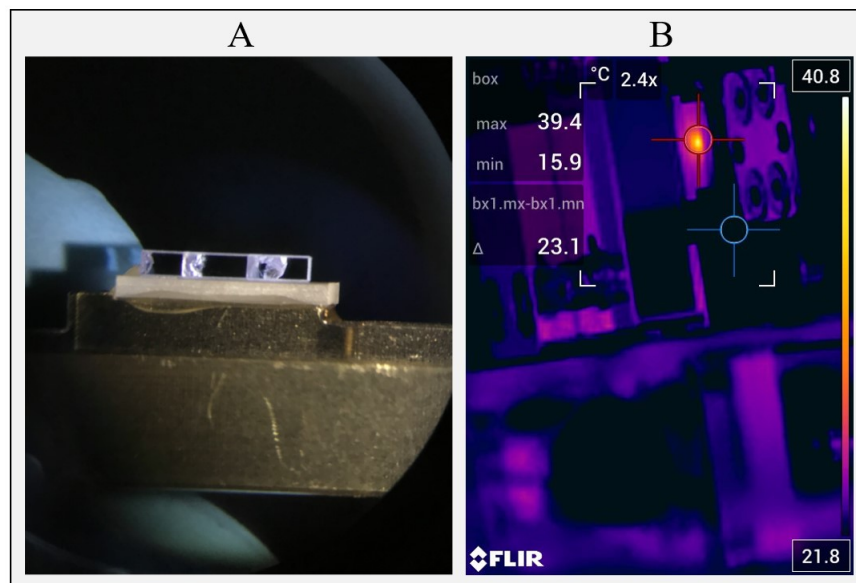
$$\Delta E = h\nu c, \quad (12)$$

kur h yra Planko konstanta, c - šviesos greitis vaakume, galime apskaičiuoti $Nd : YVO^4 4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ šuoliu atitinkančio 914nm bangos ilgį apatinio lazerinio lygmens santykinę užpildą:

$$fa = \frac{\exp\left(-\frac{hv(433)c}{kT}\right)}{\exp\left(-\frac{hv(433)c}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{hv(226)c}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{hv(173)c}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{hv(108)c}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{hv(0)c}{kT}\right)}, \quad (13)$$

kur k – Boltzmann‘o konstanta. Kaip rodo formulė, didėjant temperatūrai didės ir apatinio lazerinio lygmens užpilda. Kiekybiškai tirtų kristalų atveju tai pademonstruota rezultatų dalyje.

Atlikus skaičiavimus *Matlab* programa pagal 13 formulę, buvo gauta priklausomybė pavaizduota 13 paveiksle. Lyginant užpildą kambario temperatūroje $20^{\circ}C$ ($273K$) ir $50^{\circ}C$ ($323K$), matoma 1.3% didesnė lygmens užpilda aukštesnėje temperatūroje. Nuo $150K$ priklausomybė beveik tiesiškai didėjanti didėjant temperatūrai. Akivaizdu, kad eksperimente kriogeniškai šaldant kristalą būtų minimizuojama apatinio lazerinio lygmens užpilda ir kristalas veiktų efektyviau, tačiau tai būtų galima daryti tik tuo atveju, jeigu kristalas būtų patalpintas vaakuminėje kameroje. Priešingu atveju, dėl didžiulių temperatūrų skirtumų ir aukštos santykinės drėgmės šalia kristalo susidarytų vandens kondensatas, dėl kurio lazeris galimai nustotų veikti. Todėl viso eksperimento metu, bandant aušinti kristalą, aušinimo temperatūra buvo ne žemesnė nei $13^{\circ}C$, o siekiant efektyvesnės šilumos pernašos nuo kristalo maksimaliai didintas naudoto vandenins aušintuvo srautas: naudotas komercinis 800W galios vandens aušintuvas. Eksperimentuose kiekybiškai pademonstruota kokią įtaką 914nm bangos ilgio generacijai kristale turi kristalo darbinė temperatūra.



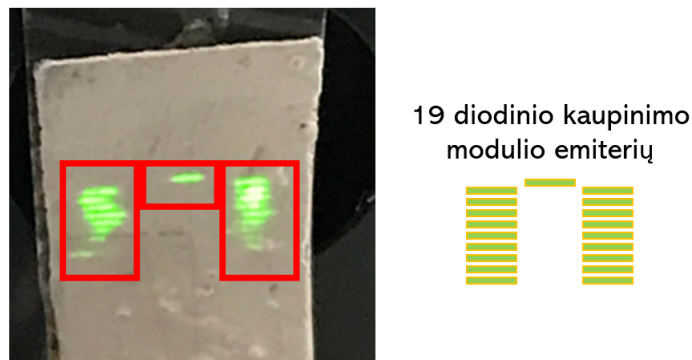
14 pav. A pavaizduotas skilęs $Nd : YVO^4$ kristalas, o B pavaizduota kristalo termo-nuotrauka esant lazerinei generacijai

Bandant gauti lazerinę generaciją pridėjus didelės galios diodinį kaupinimą ne tik, kad laze-

rio generacija tampa labai neefektyvi dėl pasiekiamų didelių temperatūrų kristale, bet kristalas skyla dėl per didelių temperatūrų skirtumų per jo tūrį. Eksperimento metu dėl šios priežasties skilęs kristalas pavaizduotas 14 pav. A dalyje. Esant lazerinei generacijai ir užtikrinant pastovų 16°C temperatūros vandens aušinimą kristalui, nufotografuota termo-nuotrauka pavaizduota 14 pav. B dalyje. Generacijos metu, kristalo kaupinimo ir lazerio modos persiklojimo taške užfiksuota $<40^{\circ}\text{C}$ temperatūra. Jeigu eksperimente būtų naudotas mažesnio bangos ilgio, efektyviau sugeriamas 808nm kaupinimas, darbinės temperatūros kristale būtų ženkliai didesnės. Dėl to pasirinktas 880nm kaupinimas turi aiškų privalumą ir gauta generacija su šiuo kristalu bus pademonstruota rezultatų skyriuje.

2.2 Diodinis kaupinimas

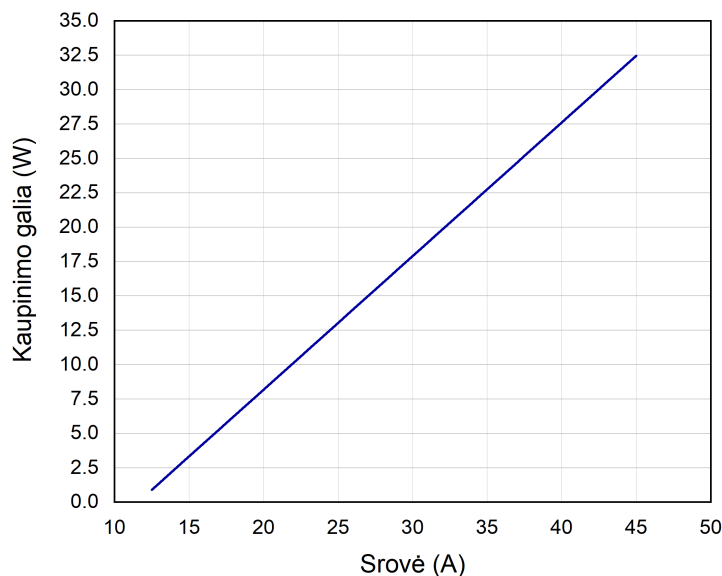
$4F_{3/2} \rightarrow 4I_{9/2}$ lazeriniams šuoliams incijuoti $Nd : YVO_4$ kristale pasirinktas 880nm bangos ilgio kaupinimo diodų modulis. Sugerties skerspjūvis 880nm bangos ilgiui yra 2 kartus mažesnis nei 808nm, . Kiti moksliniai darbai susiję su 914nm generacija $Nd : YVO_4$ kristale, yra padaryti naudojant 808nm kaupinimą su geresnėmis fokusuojamumo savybėmis nei šiame darbe. Pasirinkimas naudoti 880nm kaupinimą turi pranašumą tuom, kad tokiu būdu mažiau šiluminės energijos išsiskiria kristalo viduje ir rezonatoriui mažesnę įtaką darys termo-lęšis kristale.



15 pav. Diodinio kaupinimo modulių intensyvumo skirstinys atvaizduotas ant vizualizatoriaus kortelės ir schematiškai

Kaupinimo modulių intensyvumo skirstinį sudaro keliolika atskirų emiterių intensyvumo skirstinių. Intensyvumo skirstinys ant popierinio vizualizatoriaus pavaizduotas 13 paveiksle. Nors intensyvumo profilis iš pažiūros atrodo nepanaudojamas kristalo kaupinimui, specialiai pritaikyta optika visos emiterių modos $Nd : YVO_4$ kristale sufokusuotos į 160um diametro dėmę, kuri per visą 5mm kristalo ilgį nekito daugiau 5%.

Kaip matosi 16 paveiksle, keičiant srovę nuo 13A iki 45A kaupinimo moduliui, išvadinė galia keičiasi nuo 2 iki 32W. Reguluojant elektros srovę kaupinimo moduliui, buvo reguliuojama galia rezonatoriuose. Eksperimentiniame darbe naudotos didelės kaupinimo galios, nes naudotas $Nd : YVO_4$ kristalas neefektyviai sugeria šio bangos ilgio kaupinimą: sugertis tesie-

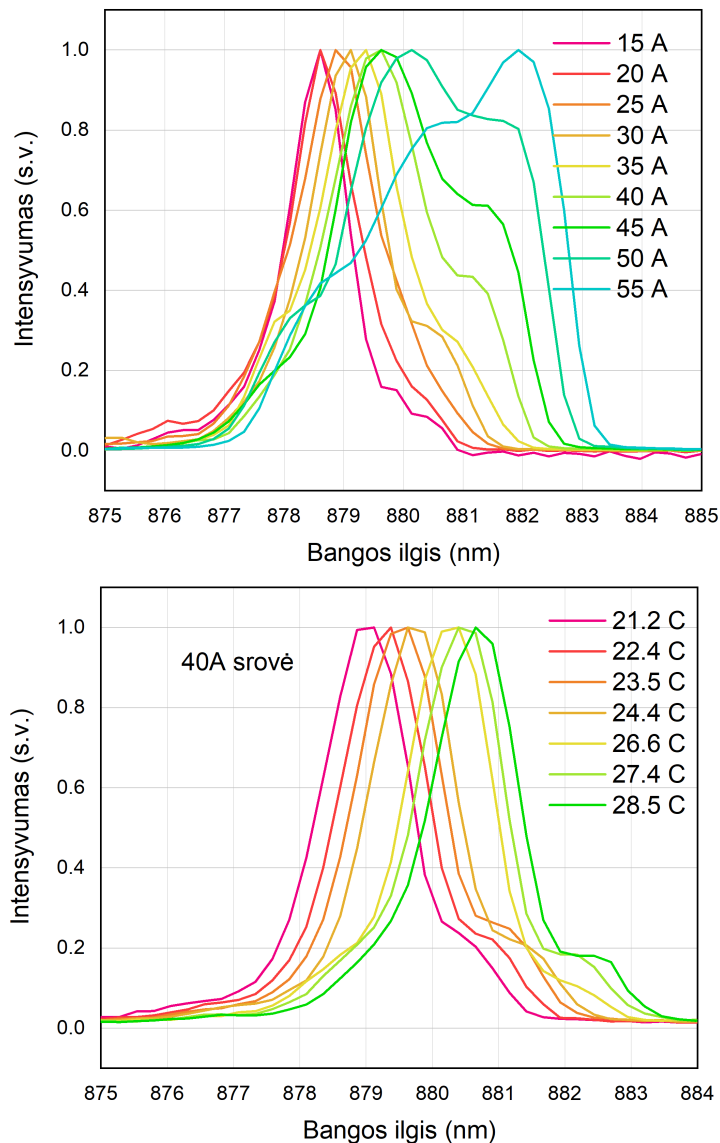


16 pav. Diodinio kaupinimo modulio išvadinės galios priklausomybė nuo srovės

čia apie 7 procentus. Kadangi kristale emisijos skerspjūvis 914nm spinduliuotei yra sąlyginai mažas, be to, kristale pasireiškia ženkliai reabsorbicija 914nm bangos ilgiui, naudotos kaupinimo galios lazerio generacijos slenksčiui pasiekti siekė $>10\text{W}$. Kadangi didesnei išvadinėi galiai pasiekti naudojamos didesnės elektrinės srovės, kaupinimo modulis ženkliai šilo ir buvo naudotas atskiras kaupinimo modulio aušinimas, stabiliai temperatūrai palaikyti.

Šviesos diodai turi savybę keisti spinduliuojamą bangos ilgį keičiantis temperatūrai. Didėjant temperatūrai, centrinis bangos ilgis slenkasi į ilgesnių bangos ilgių pusę. Taip yra todėl, kad mažėja energijų tarpas tarp spindulinių šuolių atitinkančių lygmenų. Šiame darbe naudoto kaupinimo modulio bangos ilgio priklausomybė nuo temperatūros buvo nustatyta 0.2nm/K . Tam, kad palaikyti pastovų efektyviausiai kristalo sugeriamą bangos ilgį, kaupinimo modulis buvo aušinamas reguliuojamas skirtingos temperatūros vandeniniu iš 800W komercinio aušintuvo. Be to, kad centrinį bangos ilgį buvo galima derinti derinant temperatūrą, didinant elektrinę srovę buvo pastebėtas spektro formos kitimas. Kaip pavaizduota 17 paveiksle, didėjant srovei plečiasi emituojamas spektras. Prie kaupinimo srovių $>50\text{A}$, kaupinimo spektras tapo išsikraipė tiek, kad ne visa jo dalis efektyviai pataiko į kristalo sugerties maksimumą. Į tai taip pat svarbu atsižvelgti, nes ne visa spektro sritis vienodai sugerama Nd:YVO_4 kristale. Dėl šio efekto buvo galima stebėti mažesnį išvadinės lazerio galios didėjimą prie didesnių kaupinimo galių.

Kaupinimo spektro forma nekito, jeigu esant fiksuotai kaupinimo srovei keista diodo temperatūra, keičiant vandeninio aušintuvo temperatūrą. Kaip pavaizduota 17 paveikslo apatinėje dalyje, prie 40A srovės, keičiant temperatūrą nuo 21.2°C iki 28.5°C (per $\Delta 7.3^\circ\text{C}$), kaupinimo



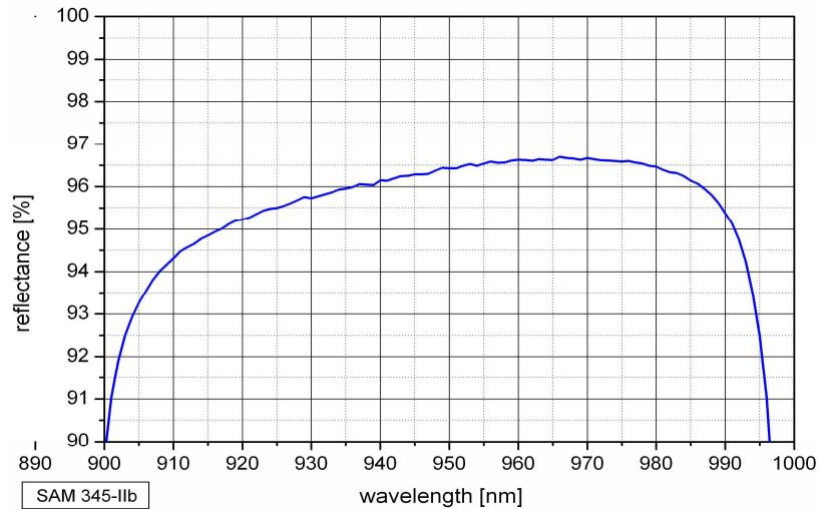
17 pav. Diodinio kaupinimo modulio spinduliuojamo spektro priklausomybės nuo kaupinimo srovės (viršuje) ir nuo kaupinimo modulio temperatūros (apačioje)

spektro centrinės smailės bangos ilgis didėjo nuo 878.9nm iki 880.7nm (per $\Delta 1.8nm$). Kaip bus parodyta rezultatų skyriuje, toks bangos ilgio kitimas turi reikšmingą įtaką generacijos efektyvumui.

2.3 SESAM veidrodis

Tam, kad pasiekti modų sinchronizacijos režimą $Nd : YVO^4$ lazeryje, šiame darbe buvo pasirinkta naudoti SESAM veidroді. Remiantis moksline literatūra yra žinoma, kad $Nd : YVO^4$ generacija ties 914nm yra labai jautri sąlyginai nedideliems nuostoliams. Dėl šios priežasties šiam baigiamajam darbui buvo naudotas SESAM veidrodis su kuo mažesniais nuostoliais ir kuo mažesniu moduliacijos gyliu. Vienintelis rastas tinkamas, komerciškai prieinamas veidrodis

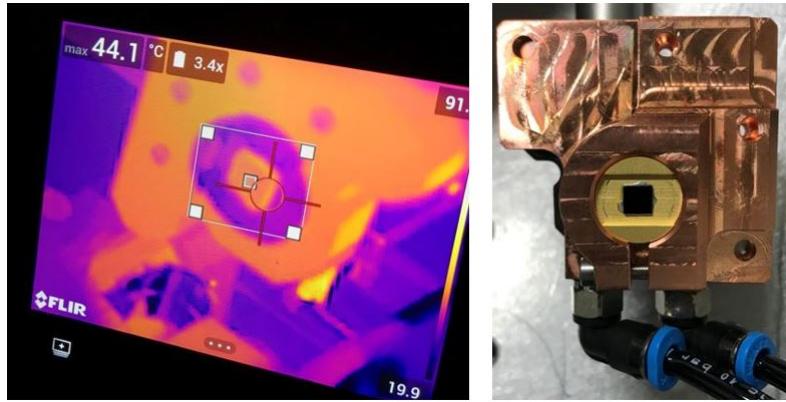
buvo kompanijos BATOP veidrodis SAM-940-4-1ps-x. Jo atspindžio koeficiento priklausomybė nuo bangos ilgio pavaizduota 18 paveiksle.



18 pav. BATOP kompanijos SESAM veidrodis SAM-940-4-1ps-x atspindžio koeficiento priklausomybė nuo bangos ilgio nesotinančiam intensyvumui. Kreivė iš gamintojo techninių specifikacijų duomenų lapo

914nm bangos ilgiui šis SESAM turi 5.5% nuostolių. Lygiai toks pat veidrodis naudotas ir 2005 ir 2006 metų moksliniuose straipsniuose, kur $Nd : YVO_4$ kristalu generuota 914nm spinduliuotė [10, 11]. Modeliuojant rezonatorius atidžiai atsižvelgta į SESAM sotinančio energijos įtekio vertę ($70\mu J/cm^2$). Norint pasiekti stabilią modų sinchronizacijos veiką, modos dydis rezonatoriuje ant SESAM turi būti toks, kad energijos įtekis būtų sotinamas bent 5 kartus daugiau nei nurodyta gamintojų specifikacijose, t.y. šiuo atveju apie $350\mu J/cm^2$, norint pasiekti stabilią modų sinchronizacijos veiką. Kaip bus pademonstruota rezultatuose, stabiliai modų sinchronizacijos veikai reikia užtikrinti ne tik didelį sotinantį energijos įtekį, bet tai priklauso ir nuo lazerio bei kaupinimo modų persiklojimo kristale. Šio SESAM veidrodis relaksacijos trukmė nurodyta apytiksliai 1ps. Tai sąlyginai greitas sugėriklis. Tokios relaksacijos trukmės pakanka, kad prieš kiekvienam impulsui ateinant į SESAM veidrodį, jo nuostoliai būtų vienodi ir atsistatę į pradines specifikuojamas vertes.

Tam, kad išvengtų rezonatoriaus nestabilumą dėl šiluminių reiškinių reikėjo įvertinti 3% sugerties įtaką SESAM temperatūrai. Kad tai padaryti, esant lazerinei generacijai padaryta veidrodis nuotrauka termovizoriumi. Kaip pavaizduota 19 paveiksle SESAM, esant 500mW galios laukui rezonatoriaus viduje, šilo iki $44^\circ C$. Tai pakankamai ženklus šilimas turint omenyje, kad laboratorijos bendra temperatūra eksperimento metu buvo $23^\circ C$. Dėl šios priežasties eksperimentiniame darbe SESAM veidrodis buvo patalpintas į vandeniu aušinamą žalvarinį laikiklį ir buvo palaikoma pastovi $20^\circ C$ temperatūra. Jeigu SESAM veidrodis nėra aušinamas ir jo temperatūra ženkliai pakyla, tai temperatūra gali turėti įtakos krūvininkų judriams ir kitoms puslaidininkinių sluoksnių charakteristikoms, ko pasekoje puslaidininkinis sluoksnis



19 pav. Kairėje pavaizduota termovizoriumi padaryta SESAM nuotrauka neesat aušinimo, su 500mW vidutinės galios generacija rezonatoriaus viduje o dešinėje - sesam veidrodis aušinamame laikiklyje

pradėtų veikti ne taip, kaip yra specifikuotas.

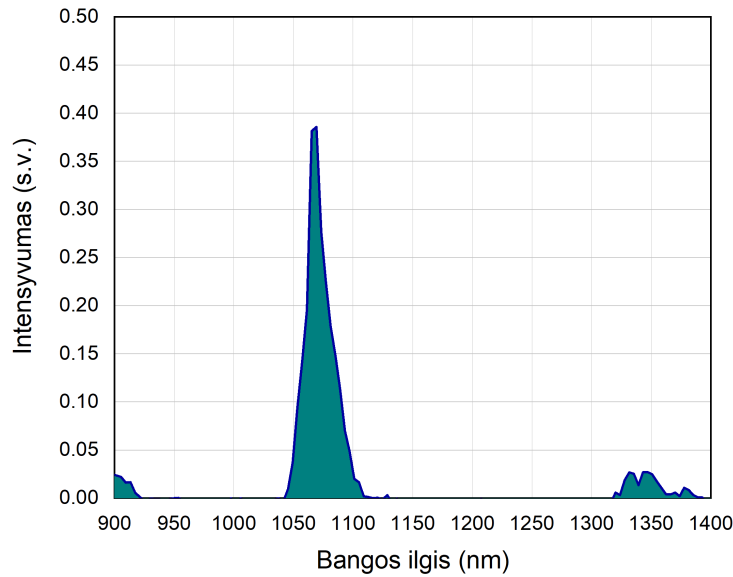
Idealiu atveju SESAM veidrodis, tinkamas 914nm bangos ilgio generacijai su $Nd : YVO^4$ kristalu turėtų turėti kiek įmanoma mažesnius šiluminius ir kitus nuo įsotavimo nepriklausančius nuostolius. Norint gauti didesnes išvadinės lazerio galias, reiktų SESAM veidrodžio su kuo mažesniu nuostolių moduliacijos gyliu, kadangi emisijos skerspjūvis 914nm generacijai aktyviajame elemente yra mažas. Kita vertus, norint gauti trumpesnes trukmes, reikia kuo didesnio moduliacijos gylio. Šie du tikslai prieštarauja vienas kitam ir norint rasti balansą reikėtų orientuotis į vertę, su kuria dar gaunamos tiek pakankamos išvadinės galios, tiek pakankamai trumpi impulsai. Šio baigiamojo darbo eksperimentui naudotas tinkamiausias SESAM, kuris yra komerciškai prieinamas, tačiau tai nebūtinai yra idealus ir optimizuotas optinis elementas šiam konstruojamam lazeriui.

2.4 $Nd : YVO^4$ kristalo parametrai

2 lentelė. Tirtų kristalų ilgiai ir koncentracijos

	1 kristalas	2 kristalas	3 kristalas
Kristalo ilgis	7mm	5mm	5mm
Nd^{3+} jonų koncentracija	0.2%	0.2%	0.3%

Siekiant optimizuoti $Nd : YVO^4$ kristalo 914nm lazerinę generaciją, šiame darbe tirti trys skirtingų parametrų kristalai. Kadangi literatūroje pateikiamų optimaliausių kristalų ilgiai ir koncentracijos varijuoja, eksperimentiškai matuojant atskirų kristalų stiprinimus ir lyginant jų veikimus laisvosios veikos osciliatoriuje ieškota optimaliausių kristalo parametrų [20]. Kaip pavaizduota 20 paveiksle, kaupinant kristalą galima stebėti aiškius nepageidaujamos spinduliuotės (1060nm ir 1340nm) fluorescencijos spektrus. Visi kristalai dengti pralaidžia danga 870nm -



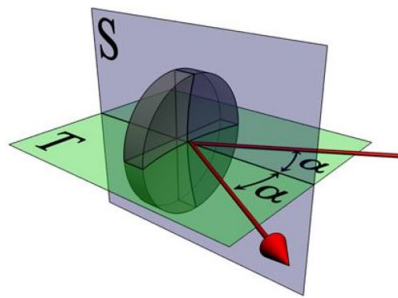
20 pav. $Nd : YVO^4$ kristalo fluorescencija registruota spektrometru, kaupinant kristalą 880nm spinduliuote. Intensyvumas normuotas į foninį 880nm kaupinimo intensyvumą

920nm ruože, tam, kad 914nm generacija ir 880nm kaupinimas sklisdamas per kristalo paviršius patirtų kuo mažesnius nuostolius, o nepageidaujama spinduliuotė patirtų kuo didesnius nuostolius. 2 lentelėje pateikti tirtų $Nd : YVO^4$ kristalų parametrai. Kristalų plotis ir aukštis 8mm ir 1.2mm. Iš abiejų kristalo plokštumų pritvirtintos šilumai laidžios safyro plokštelės, kurios priklijuotos prie aušinamų varinių detalių. Kadangi sąlyčio su aušinamomis detalėmis plotas didelis - eksperimento metu buvo užtikrinamas efektyvus aušinimas.

Optimaliausias kristalas parinktas pagal tai, kokias didžiausias išvades ir mažiausias generacijos slenkstines galias galima gauti su kristalu esant tokiom pačiom testavimo sąlygom. Eksperimentui pasinaudota komercinio rezonatoriaus schema pritaikyta 914nm bangos ilgio generacijai. Teoriškai, optimalūs kristalo ilgio ir koncentracijos parametrai labiausiai priklauso nuo to į kokio dydžio dėmę pavyksta sufokusuoti kaupinimą, kokios kaupinimo ir lazerinės generacijos pluošto sąsmaukos, koks jų persiklojimas kristale ir kaip efektyviai yra sugeriamas kaupinimo bangos ilgis. Kadangi viso eksperimento metu naudota identiška kaupinimo schema, nekeičiant kaupinimo modos parametru kristale tai toks optimaliausio kristalo įvertinimas yra teisingas.

2.5 Optiniai rezonatoriai ir jų modeliavimas

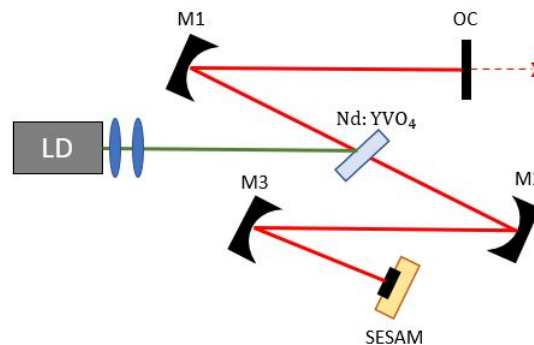
Optiniai rezonatoriai konstruoti naudojant dielektrinius didelio (>99.9 %) atspindžio koeficiento veidrodžius ties 900-920nm veidrodžius. Vienintelė išimtis dėl atspindžio koeficiento yra išvadinis veidrodis, kurio atspindžio koeficientas eksperimentų metu buvo 93% arba 96%. Rezo-



21 pav. Grafiškai pavaizduotos tangentinė ir sagitalinė plokštumos REZONATOR rezonatorių modeliavimo programoje

natorių dizainą riboja turimų sferinių veidrodžių kreivumo nominalai: $R = 200mm$ ir $R = 100mm$. Nuo kreivumo radiusų ir nuo reikalingų lazerio modų diametrų dydžių lazeriniame kristale ir ant SESAM veidrodžio priklausė elementų išdėstymo tvarka ir atstumai, atsižvelgiant į bendrą rezonatoriaus stabilumą, stabiliai Gauss'o modai palaikyti. Visų veidrodžių apertūros: 12.7mm diametro.

Sekantis žingsnis buvo kompiuterinės programos REZONATOR pagalba sumodeliuoti stabilų rezonatorių. Šios programos algoritmas įvertina Gauss'o pluošto fronto kreivumą, difrakciją nuo kiekvieno elemento rezonatoriuje, skaičiuodamas ABCD matricų metodu. Programa pluošto parametrus ant kiekvieno elemento įvertina dvejose plokštumose: tangentinėje ir sagitalinėje, dėl to galima įvertinti suvienodinta pluošto skėstis šiomis abejomis kryptimis (21 pav.).

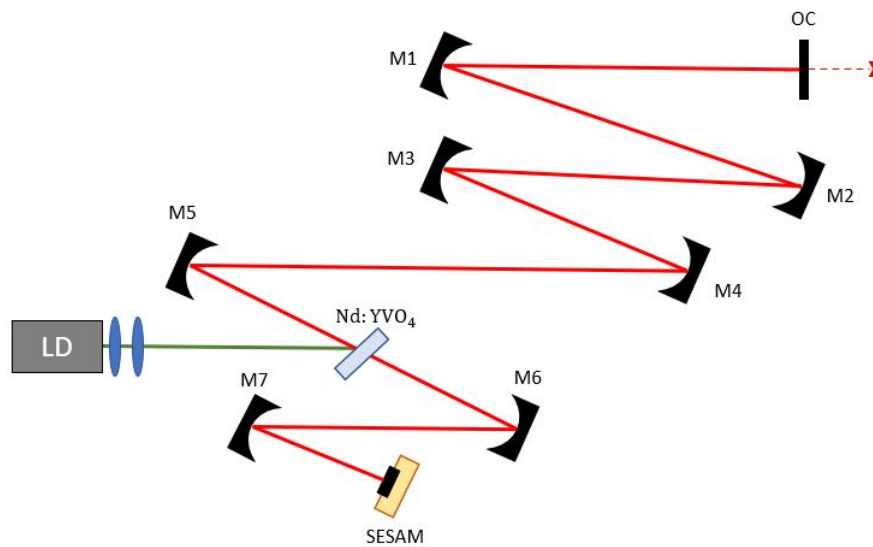


22 pav. A rezonatoriaus schema

22 paveiksle pavaizduota pirmojo, A rezonatoriaus principinė schema. Pirmasis rezonatorius su stabiliomis veikimo zonomis sumodeliuotas ir realizuotas panaudojant tris $R=100mm$ HR914 veidrodžius, vieną plokščią HR914 ir vieną 93 proc. atspindintį (išvaidinį) HR914 veidrodį. Bendras rezonatoriaus ilgis 46.5cm. Modų sinchronizacijos atveju, tokio ilgio rezonatoriuje susidarytų 322MHz pasikartojimo dažnio impulsinė lazerio veika. Plokščias HR914 veidrodis gali būti pakeistas anksčiau aprašytu SESAM veidrodžiu, vienintelis skirtumas tas, kad SESAM veidrodis turi 4 proc. sugerties nuostolius. Tarp kiekvieno iš rezonatoriaus elementų atstumai parinkti taip, kad net ir atsiradus termolėšiumi aktyviajame elemente (kristale), rezonatoriaus

stabilumo zonos neišeitų iš ribų. Modos diametras $Nd:YVO_4$ kristale REZONATOR programa įvertintas $130\mu m$ diametro Gauss'o pluošto dėme ir $96\mu m$ diametro dėme ant SESAM veidrodžio. Tam, kad tokiu rezonatoriumi būtų pasiektas gamintojo specifikuojamas SESAM veidrodžio sotinantis energijos įtėkis, rezonatoriumi reikia pasiekti bent 85mW išvadinę galia.

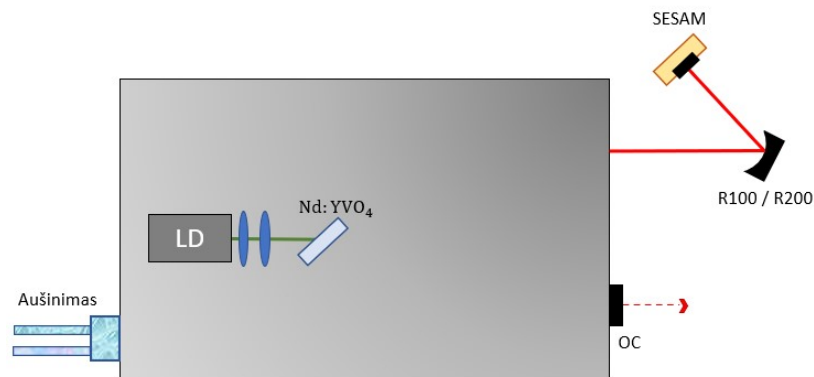
Aktyviosios terpės kaupinimui tiek A rezonatoriuje tiek ir kituose, naudotas 880nm kaupinimo modulis su 19 emiterių. Kristalas rezonatoriaus modos atžvilgiu kaupinamas nekolineariai. Nekolinearus kaupinimas mažina kaupinimo ir lazerio modų erdvinį persiklojimą kristale. Toks techninis sprendimas pasirinktas dėl to, kad dielektriniai veidrodžiai negali būti arti 100 procentų pralaidūs 880nm bangos ilgiui ir arti 100 procentų atspindėti 914nm spinduliuotę dėl per mažo bangų ilgio tarpo tarp jų. Jeigu ant HR914 veidrodžio būtų dengta HT880 danga, pralaidumas 880nm toli gražu nesiektų 100proc. ir kaupinimui atsirastų papildomi nuostoliai. Būtent dėl to, nuspręsta naudoti nekolinearų kaupinimą. Nekolinearumo kampas visose šiame darbe aptariamose rezonatoriuose siekė apytiksliai 2 laipsnius.



23 pav. B rezonatoriaus schema

23 paveiksle pavaizduota antroji, B rezonatoriaus schema. Antrasis rezonatorius su stabiliomis veikimo zonomis sumodeliuotas ir realizuotas panaudojant tris $R=100mm$ HR914 veidrodžius (schemoje M7, M6 ir M5 veidrodžiai), vieną plokščią HR914, kuris gali būti pakeistas SESAM veidrodžiu įnešant papildomus nuostolius, keturis HR910 $R=200mm$ (schemoje atitinka M1, M2, M3 ir M4) ir vieną 93 proc. atspindintį (išvaidinį) HR914 veidrodį (schemoje pažymėtas OC). Bendras rezonatoriaus ilgis 136.8cm. Modų sinchronizacijos atveju, tokio ilgio rezonatoriuje susidarytų 109MHz pasikartojimo dažnio impulsinė lazerio veika. Rezonatoriaus ilginimas teoriškai turi padėti stabilizuotis dinaminei pusiausvyrai tarp SESAM veidrodžio kintančių nuostolių ir stiprinimo kristale. Kaip ir A rezonatoriuje, tarp kiekvieno iš optinių elementų atstumai parinkti taip, kad net ir atsiradus termolėšiumi aktyviajame elemente (kristale),

rezonatoriaus stabilumo zonos neišeitų iš ribų. Modos diametras $Nd:YVO_4$ kristale REZONATOR programa įvertintas $120\mu m$ diametro Gauss'o pluošto dėme ir $90\mu m$ diametro dėme ant SESAM veidrodžio. Tam, kad tokiu rezonatoriumi būtų pasiektas gamintojo specifikuojamas SESAM veidrodžio sotinantis energijos įtėkis, rezonatoriumi reikia pasiekti bent 26mW išvadinę galią. Tai yra mažesnė galia nei A rezonatoriuje, nes lazerio modos diametras ant SESAM elemento yra šiek tiek mažesnis. Taip pat svarbu paminėti, kad praktiškai realizuojant šią rezonatoriaus schemą, dėl tam tikrų atstumų tarp veidrodžių ir mechaninės laikiklių struktūros buvo sudėtinga sujustruoti rezonatorių. Tam, kad gerai sujustruoti visus elementus, kai kurie veidrodžiai su kitais schemeje esančiais elementais sudarė apie 5 laipsnių kampus. Tai gali įnešti papildomus nuostolius ir Gauss'o skersinės modos nestabilumus, skirtingą pluošto skėstį skirtingomis kryptimis ir kitus nuostolius.



24 pav. C ir D rezonatorių schema

24 paveiksle pavaizduota tirtų rezonatorių C ir D principinė schema. A ir B rezonatoriai modeliuoti atsižvelgiant į tai, kokio nominalo sferiniai veidrodžiai buvo galimi naudoti eksperimente. Be to, rezonatorių schemas statytos ant optinio stalo su atskirais laikikliais kiekvienam elementui, kas neprideda stabilumo atliekant tyrimą. Dėl šios priežasties C ir D rezonatoriai konstruoti pasinaudojant komercinio lazerio osciliatoriaus schema, ją modifikuojant su keliais papildomais elementais ir pritaikant visą optika atspindėti atspindėti 914nm bangos ilgį. Komercinis osciliatorius buvo aušinamas 800W galios vandeniniu aušintuvu ir viso korpuso temperatūra buvo stabiliai palaikoma $20^{\circ}C$. Naudota kaupinimo schema buvo identiška A ir B rezonatoriams. Esminiai skirtumai tarp C ir D rezonatorių yra naudotas sferinio veidrodžio nominalas. C schemeje naudotas 200mm kreivumo radiuso HR914 veidrodis, o D schemeje 100mm kreivumo radiuso HR914 veidrodis. Abu jie pastatyti tokiu atstumu, kad REZONATOR programos modelyje, schema būtų stabili palaikyti Gauss'o modą, o ant SESAM veidrodžio C schemos atveju modos diametras būtų $108\mu m$, o D schemos atveju $55\mu m$. Be minėtų skirtumų skyrėsi ir išvadinio veidrodžio OC pralaidumas. C ir D schemeje jis buvo 4%. Toks nominalas pasirinktas ne atsižvelgiant į optimaliausią nominalą norint pasiekti didžiausią išvadinę galią, bet į tai, kad lazeriuojančio pluošto energija rezonatoriaus viduje būtų didesnė.

Rezonatorių ilgiai tokie, kad modų sinchronizacijos atveju osciloskopu būtų stebima 70MHz dažnio impulsų vora C atveju ir 72MHz dažnio vora D atveju.

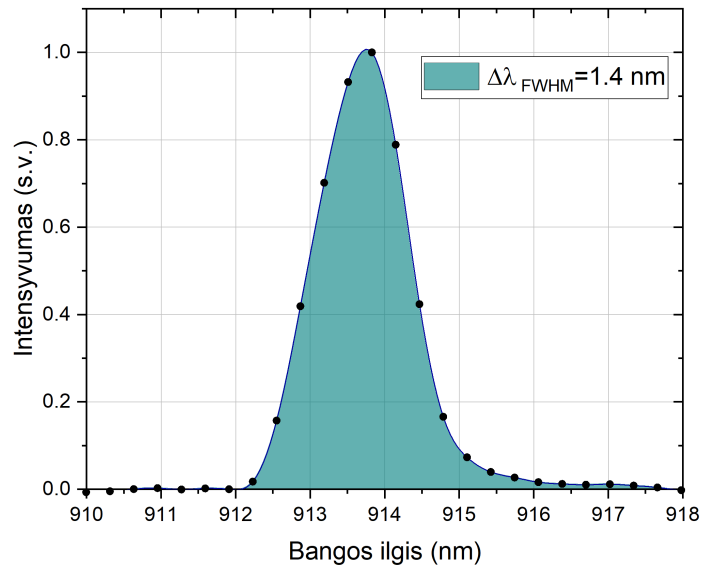
3 lentelė. A, B, C, D rezonatorių pasikartojimo dažnis, modos diametras kristale ir ant SESAM

Rezonatorius	Pasikartojimo dažnis (MHz)	Moda kristale (diametras, μm)	Moda ant SESAM (diametras, μm)
A	322	130	96
B	109	120	90
C	70	185	108
D	72	160	55

3 lentelėje surašyti pagrindiniai rezonatorių parametrai, į kuriuos atsižvelgiant daromos išvados apie pasyvią modų sinchronizaciją generuojant 914nm bangos ilgį su $Nd : YVO_4$ kristalu, kaupinant 880nm bangos ilgiu. Gautų generacijų veikos, modų sinchronizacijos režimai aprašyti rezultatų skyriuje.

3 Rezultatai ir jų aptarimas

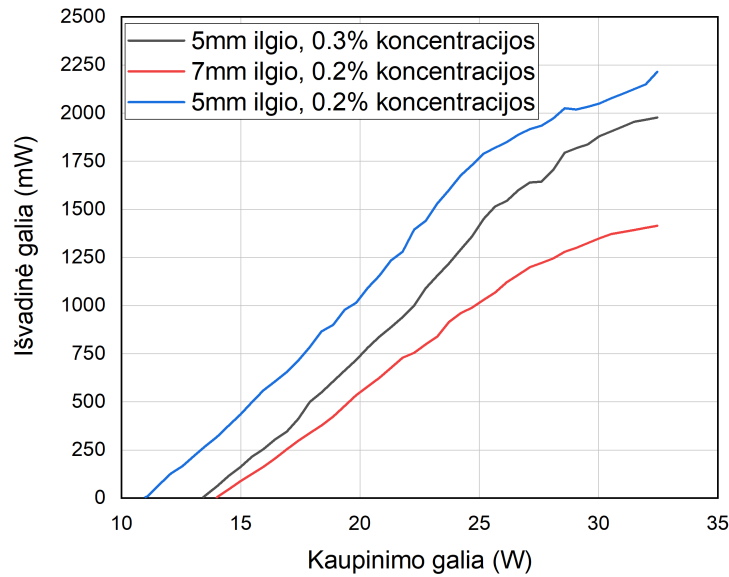
Prieš tiriant pasyvios modų sinchronizacijos režimą $Nd : YVO^4$ kristalu, visų pirma gauta nuostoviosios veikos generacija pasinaudojant komercinio rezonatoriaus schema. 0.3nm skyros spektrografu išmatuotas lazerinės generacijos išvadinės spinduliuotės spektras.



25 pav. Lazerio išvadinės spinduliuotės spektras

Kaip pavaizduota 25 paveiksle, 914nm centrinio bangos ilgio spektro plotis siekia 1.4nm, o spektras turi vieną aiškiai išreikštą maksimumą, o visa spektro forma praktiškai atitinka Gauss'o funkcijos pavidalą. Tokio, sąlyginai siauro spektro generacijos ir buvo tikėtasi remiantis kitais aprašytais darbais mokslinėje literatūroje. Spektriškai ribotų Gauss'inių impulsų atveju, impulsų trukmė turėtų būti 880fs. Tai tik teorinė vertė, kuri optimistiškiausiu realiu solitoninių impulsų atveju turėtų būti apie 1ps. Visų tirtų rezonatorių atveju stebėta identiško spektro generacija.

Pasyvios modų sinchronizacijos režimas šiame darbe pasiektas pasinaudojant reikšmingus nuostolius turinčiu SESAM veidrodžiu, o 914nm generacija $Nd : YVO^4$ kristale yra neefektyvi. Visų pirma iš trijų skirtingų surastas kristalas, kurio ilgis ir koncentracija optimaliausi generuoti 914nm su naudoto diodinio kaupinimo konfiguracija. Pasinaudojant komercinio rezonatoriaus schema, rezonatoriuose pakeičiant tik kristalą, siekta išsiaiškinti kuris iš 2 lentelėje paminėtų yra tinkamiausias tęsti eksperimentus ir tirti pasyvių modų sinchronizaciją. Tyrimo metu atsižvelgta į slenkstinę kaupinimo galią generacijai pasiekti, bei išvadinės galios efektyvumą tarpusavyje lyginant kaupinimo galios ir išvadinės galios santykius. Visi kristalai į rezonatorių įdėti taip, kad lazerio moda su kristalo paviršiais sudarytų Briusterio kampą. Tai reikalinga tam, kad būtų minimizuoti sklidimo per paviršius nuostoliai vienai iš poliarizacijų. Kaip pavaizduota 26

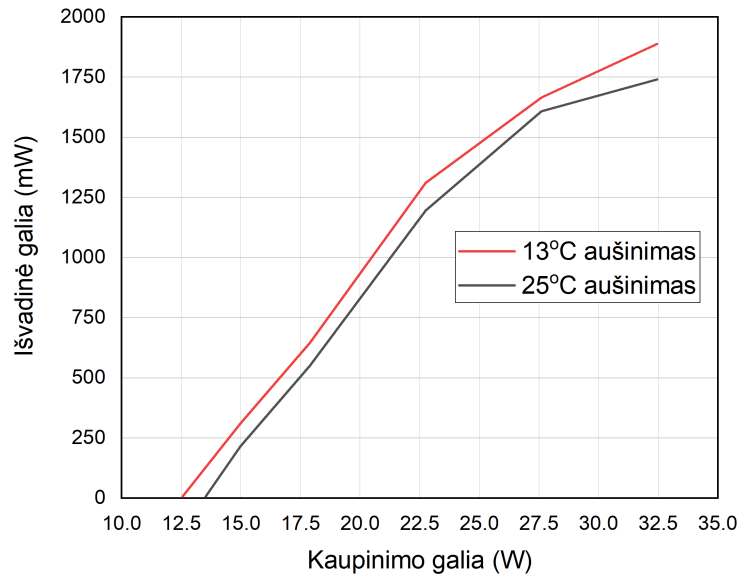


26 pav. Išvadinės galios kreivės su skirtingų parametrų $Nd : YVO^4$ kristalais

paveiksle, didžiausios išvadinės galios gautos su 5mm ilgio, 0.2% Nd jonų koncentracijos kristalu. Slenkstinė kaupinimo galia su 7mm ilgio, 0.2% Nd jonų koncentracijos kristalu siekė 14W, su 5mm ilgio, 0.3% siekė 13.4W, o su 5mm ilgio, 0.2% - 11W. Tai reikšmingas skirtumas, turint omenyje, kad SESAM veidrodis įneš papildomus 5.5% nuostolius. Lazerio efektyvumas su kiekvienu iš kristalų atitinkamai: 4.5%, 6.2% ir 6.8%. Visuose tolimesniuose eksperimentuose naudotas 5mm ilgio, 0.2% koncentracijos kristalas.

Siekiant dar labiau padidinti 914nm generacijos efektyvumą, tirta kristalo aušinimo temperatūros įtaka generacijos efektyvumui. 27 paveiksle pavaizduotos dvi išvadinės galios kreivės esant skirtingom kristalo aušinimo temperatūrom: 13°C ir 25°C. Gauta priklausomybė įrodo, jog $Nd : YVO^4$ kristalu generuojant 914nm bangos ilgį, elgiasi kaip kvazi-trijų lygmenų sistema, kurioje esant aukštesnei kristalo darbinei temperatūrai, stipriau pasireiškia reabsorbcija dėl didesnės apatinio lazerinio lygmens užpildos ir lazeris veikia mažiau efektyviai. Esant 25°C kristalo aušinimui slenkstinė kaupinimo galia generacijai pasiekti buvo 13.5W, o esant 13°C kristalo aušinimui, slenkstinė galia mažesnė – 12.5W. Tai yra gana didelis skirtumas turint omenyje, kad kristalo aušinimo vandens temperatūra tepasikeitė per 12°C. Vien dėl tokio skirtumo, kad pasiekti pradinę generaciją didesnės temperatūros atveju reikia bent 1W daugiau galios 880nm kaupinimo.

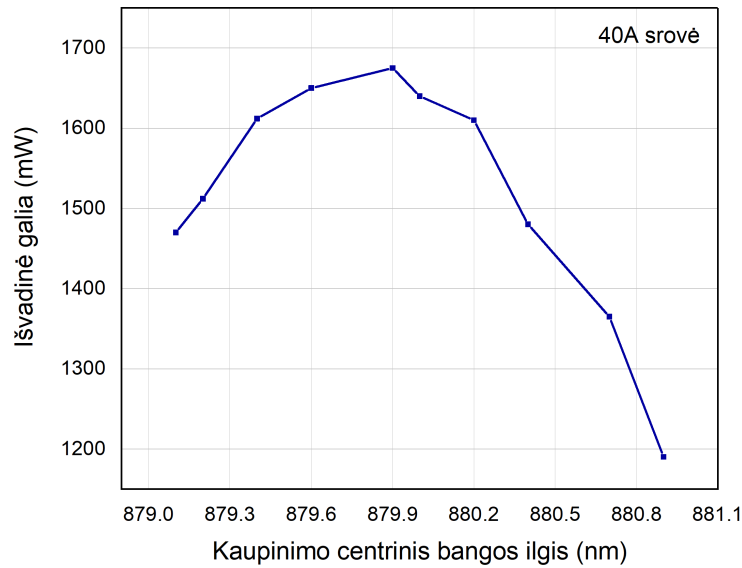
Jeigu aušinimo nebūtų arba jis dingtų – kristalas akimirksniu skiltų dėl didžiulių mechaninių įtempių atsirandančių dėl temperatūrų skirtumų. Kaip minėta anksčiau, pagal 13 formulę galima teoriškai įsivertinti kokia yra apatinio lazerinio lygmens užpilda lyginant su viso $4I_{9/2}$ lygmens užpilda. Palyginimui paimti du matuoti taškai ties 28.6W kaupinimo galia ir skirtin-



27 pav. Išvadinės galios kreivės esant skirtingoms $Nd:YVO^4$ kristalo aušinimo temperatūroms

gais kristalų aušinimais. Ties šia kaupinimo galia, esant $13^\circ C$ aušinimo temperatūrai, kristalo darbinė temperatūra modų centre fiksuota termovizoriumi buvo $40^\circ C$, o esant $25^\circ C$ aušinimo temperatūrai, kristalo maksimali temperatūra $50^\circ C$. Taigi, buvo $10^\circ C$ skirtumas kristalo darbiname taške. Paskaičiavus Boltzmann'o užpildos faktorių ties abejomis kristalo temperatūromis, gaunamos vertės $fa = 5.6\%$ ties $50^\circ C$ ir $fa = 5.3\%$ ties $40^\circ C$. Skirtumas tarp užpildos faktorių yra tik 0.3% , tačiau toks nedidelis skirtumas lemia šiek tiek mažesnę stiprinimą kristale, dėl ko išorėje matuojama mažesnė išvadinė galia. Taigi, temperatūros valdymas šiame kristale yra itin svarbus faktorius siekiant optimizuoti sistemą su $Nd:YVO^4$ kristalu.

Sekantis eksperimentas atliktas su tuo pačiu kristalu. Fiksavus $28.6W$ pastovią kaupinimo galią ir $13^\circ C$ pastovų aušinimą, atskirai nuo visos sistemos keistas kaupinimo modulio aušinimas. Kaip ir pademonstruota anksčiau, didinant kaupinimo modulio srovę (keliant išvadinę galią) keičiasi spektro forma ir slenkasi kaupinimo modulio emituojamas bangos ilgis. Esant fiksuotai galiai, keičiant kaupinimo modulio temperatūrą galima stumdyti kaupinimo bangos ilgį. Didinant temperatūrą nuo $21.2^\circ C$ iki $29.5^\circ C$ galima tolygiai stumdyti spektrą $879.1nm$ – $880.9nm$ ribose. Tai yra ypač svarbu optimizuojant $914nm$ generaciją, nes tiksliai nepataikius į kaupinimo sugerties juostą bus pastebimas osciliatoriaus efektyvumo sumažėjimas. 28 paveiksle kiekybiškai pademonstruota kaupinimo modulio centrinio bangos ilgio įtaka išvadinei osciliatoriaus galiai esant fiksuotam $28.6W$ kaupinimui. Maksimali išvadinė galia gauta kaupinimo bangos ilgiui esant $879.9nm$ ir galia tolygiai mažėjo spektrą slankiojant į trumpesnę ir ilgesnę pusę nuo optimalios vertės. Nors spektro centrinis bangos ilgis buvo koreguojamas santykinai nedaug, nepataikius spektro per $0.5nm$ nuo optimalios vertės, stebimas 10% ga-



28 pav. Išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo centrinio bangos ilgio esant fiksuotai kaupinimo galiai

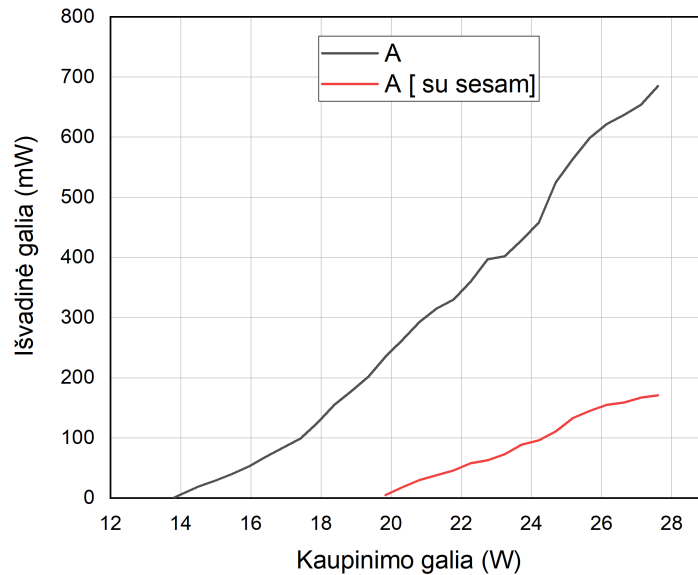
lios sumažėjimas. Taigi, optimaliam $Nd : YVO^4$ osciliatoriaus veikimui su didesniu stiprinimu būtina priderinti 880nm kaupinimo bangos ilgį.

Taigi, pademonstruoti trys svarbūs veiksniai siekiant efektyvios 914nm generacijos su $Nd : YVO^4$ kristalu kaupinant 880nm bangos ilgio diodiniu moduliui:

1. $Nd : YVO^4$ kristalo ilgis ir aktyvių Nd jonų koncentracija, atrinkus šių parametų vertes atsižvelgiant į mokslinę literatūrą ir iš kelių nominalių eksperimentiškai atrinkus optimaliausią variaciją.
2. $Nd : YVO^4$ kristalo aušinimo temperatūra, kuri turi būti kiek įmanoma žemesnė iki saugios ribos, kuomet nėra rizikos susidaryti kondensatui ant įkaitusių kristalo paviršių.
3. Diodinio kaupinimo modulio centrinis bangos ilgis, kuris gali ir turi būti priderintas keičiant diodinio modulio temperatūrą, atsižvelgiant į 914nm generuojamą išvadinę galią.

Sekantis tyrimų etapas dedikuotas 914nm generacijos skirtinguose rezonatoriuose tyrimui ir pasyvios modų sinchronizacijos režimo optimizavimui juose. Visais anksčiau minėtais A, B, C ir D rezonatoriais gauta lazerinė generacija. Visų pirma generacija gauta su HR914 veidrodžiu vietoje SESAM elemento, o vėliau, HR galinis veidrodis pakeistas į 5.5% nuostolius turinčiu SESAM, kuris rezonatoriuje sukūrė nuo intensyvumo priklausančius nuostolius, ko pasekoje stebėta ir modų sinchronizacija. Išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios A rezonatoriuje ir priklausomybė pavaizduota 25 paveiksle. Slenkstinė kaupinimo galios vertė vietoje SESAM esant HR914 veidrodžiui 13.8W, o rezonatoriuje esant patalpintam

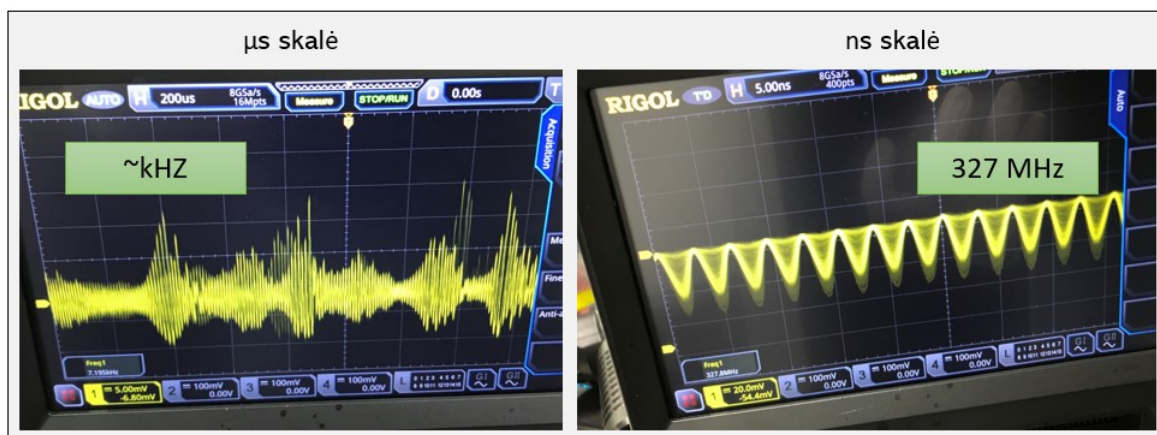
SESAM - 19.8W. Toks didelis skirtumas yra dėl papildomų nuostolių rezonatoriuje. Didžiausia išvadinė galia su SESAM veidrodžiu siekia 171mW. Lazerių efektyvumas dažnai įvertinamas iš kaupinimo ir lazerio išvadinės galios kreivių, kreives aproksimuojant tiesine funkcija. A rezonatoriaus atveju, efektyvumas be SESAM veidrodžio gautas 5%, o su - 2.2%. Efektyvumas sumažėjo 2.3 karto. Taip nutiko dėl didesnių nuostolių įneštų SESAM.



29 pav. A rezonatoriaus išvadinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios

Nepaisant sumažėjusios išvadinės galios, rezonatorius modeliuotas taip, jog sotinančiam energijos įtekiui pasiekti ant įsisotinančio sugėriklio, pakaktų 85mW išvadinės galios. Taigi, keičiant elektrinę srovę kaupinimo moduliui, t.y. didinant kaupinimo galią, buvo reguliuojama energijos įtekio vertė ant SESAM. Išvadinis lazerio pluoštas nukreiptas į greitą atsaką turintį fotodiodą, kuris prijungtas prie osciloskopo. Energijos įtekis buvo tolygiai keičiamas nuo $1\mu J$ iki $180\mu J$ ir stebima signalo laikinė charakteristika osciloskope.

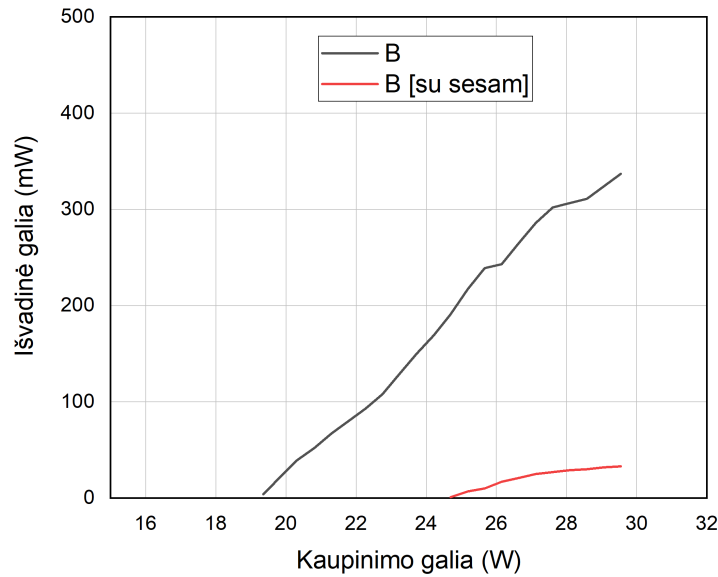
Išvadinei lazerio emituojamai galiai esant 171mW, o energijos įtekiui - $180\mu J$ stebėta nestabili modų sinchronizacijos veika tiriamame lazeryje. Energija ant nuostolius moduliuojančio elemento buvo 2.5 karto persotinta. Osciloskopo laikinei skalei esant μs stebimas triukšmingas, chaotiškas signalo moduliacijos kitimas kHz dažniu. Tapatį gautą triukšmingą signalą stebint ns laiko skalėje, matyti 327MHz dažnio impulsų vora. Stebimo signalo amplitudė triukšmingai moduluota apie 95 procentais. Galima sakyti, kad modų sinchronizacijos režimas praktiškai pastoviai dinginėja. Tokie triukšmingi impulsai praktinio panaudojimo neturi. Taip pat nepavyko išmatuoti generuojamų triukšmingų impulsų autokoreliacijos ir įvertinti impulsų trukmę. Nepavyko galimai dėl to, kad impulsų voros amplitudė per daug moduluota, ko pasekoje ir matuojamoje autokoreliacijos kreivėje buvo stebimas chaotiškas triukšmas. Nors SESAM 2.5



30 pav. A rezonatoriaus išvadinės spinduliuotės laikinės charakteristikos fiksuotos osciloskopu

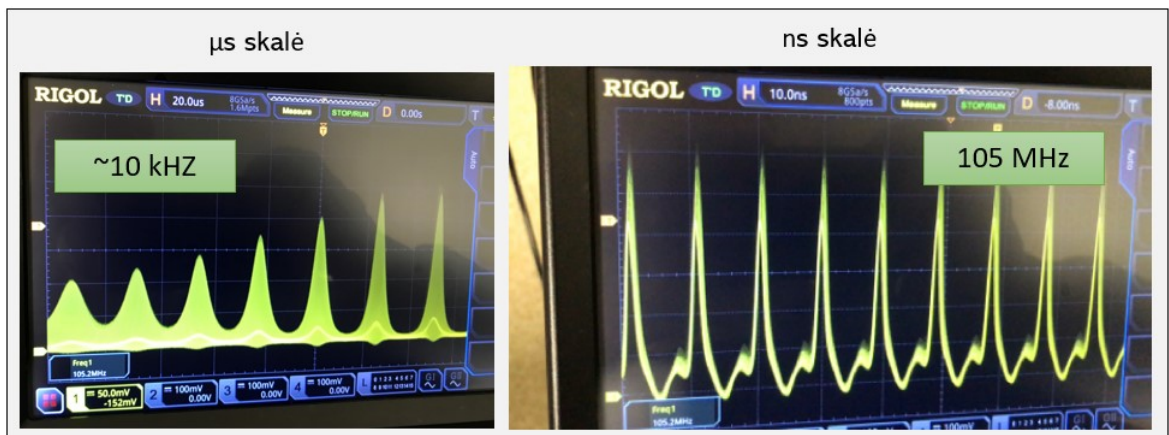
karto persotintas, stabilios modų sinchronizacijos pasiekti šiuo lazerio rezonatoriumi nepavyko. Tam įtakos turi ir trumpas rezonatorius, nes besiformuojančių impulsų energija sąlyginai maža, o tai sunkina impulso išgyvenimą lazerio rezonatoriuje, jeigu jo energijos nepakanka pilnai praskaidrinti SESAM. Kadangi nuostoliai impulsams šiame rezonatoriuje yra per dideli, impulsų vora tai užgęsta tai vėl atsiranda, o kokybės moduliacija yra chaotiška, tai glaima teigti, kad vis nauji impulsai besiformuoja iš spontaninės emisijos, nes kiekviena nauja impulsų papliūpa visiškai užgęsta ir neišgyvena rezonatoriuje, o kiekviena nauja papliūpa atsiranda po nenuspėjamo laiko tarpo, atsitiktiniu momentu su atsitiktiniu fazės poslinkiu tarp papliūpų. Sekantys tirti rezonatoriai yra šiek tiek ilgesni, ko pasekoje lazerio dažnis mažesnis ir impulsiniame režime, kiekvienas impulsas bus didesnės energijos. Tai turėtų padėti impulsų papliūpoms išlikti rezonatoriuje visiškai neužgęstant ir turėtų formuotis stabilesnė kokybės moduliacija.

Sekantis tirtas B rezonatorius. Jis taipogi sėkmingai sujustiruotas ir gauta 914nm generacija $Nd:YVO_4$ kristalu rezonatoriuje galiniam veidrodžiui esant pilnai atspindinčiam ir esant SESAM elementui, turinčiam nuostolius. Išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios priklausomybė pavaizduota 27 paveiksle. Slenkstinė kaupinimo galios vertė vietoje SESAM esant HR910 veidrodžiui 19.3W, o rezonatoriuje esant patalpintam SESAM - 24.7W. Didžiausia išvadinė galia su SESAM veidrodžiu siekia 33mW. Taip pat kaip A rezonatoriui, įvertintas lazerio efektyvumas. Efektyvumas be SESAM veidrodžio gautas 3.5%, o su - 0.7%. Apskaičiavus šių efektyvumų santykį matosi, kad su SESAM veidrodžiu B rezonatoriuje generacijos efektyvumas krenta 5 kartus. Tai dar didesnis kritimas nei A atveju ir tam didžiąją įtaką turi bendrai didesni rezonatoriaus nuostoliai, kadangi norint tinkamai sujustiruoti B rezonatorių, veidrodžius teko išsukti didesniais kampais nei numatyta modeliuojant REZONATOR programa. Dideliais >10 laipsnių kampais išsukti elementai gali nebepat gerai atspindėti spinduliuotę, nes 100 procentų atspindžio koeficientas tam tikram bangos ilgiui galioja tik tam tikram kampų ruože. Nepaisant to, kad lazeryje sugeneruota išvadinė galia sąlyginai nedidelė, pavyko pasiekti sotinantį energijos įtekį ant SESAM, nes rezonatorius buvo modeliuotas taip,



31 pav. B rezonatoriaus išvadinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios

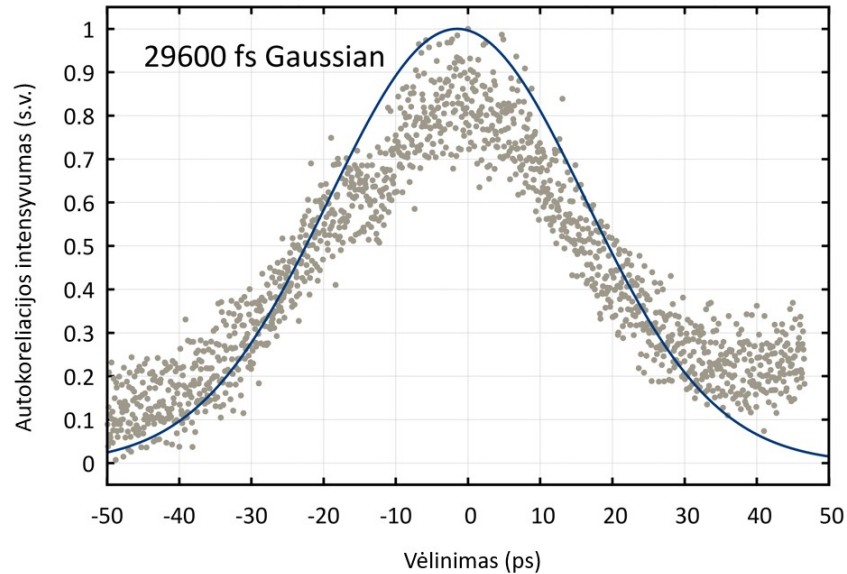
kad įtėkis būtų pasiekiamas išvadinei galiai esant bent 29mW.



32 pav. B rezonatoriaus išvadinės spinduliuotės laikinės charakteristikos fiksuotos osciloskopu

Kaip ir A rezonatoriaus tyrime, išvadinė lazerio spinduliuotė nukreipta į tą patį greitą fotodiodą ir signalo laikinės charakteristikos stebėtos osciloskope. Išvadinei lazerio emituojamai galiai esant 33mW, o energijos įtėkiui - $125\mu\text{J}/\text{cm}^2$ stebėta stabilesnė modų sinchronizacijos veika nei A rezonatoriuje. Osciloskopo laikinei skalei esant μs stebima kokybės moduliacija 40kHz dažniu. Tapatį signalą stebint ns laiko skalėje, matyti 105MHz dažnio impulsų vora su daugmaž 30 procentų siekiančia amplitudės moduliacija. Nors SESAM persotinimas nesiekia 2 kartų ir yra sotinamas mažiau nei A lazeryje, prie stabilesnės modų sinchronizacijos veikos prisidėjo didesnė impulsų energija dėl ilgesnio rezonatoriaus ir 8% mažesnė lazerio moda $Nd : YVO^4$ kristale. Didesnis energijos tankis spinduliuotę stiprinančioje terpėje lėmė stabilesnę

besiformuojančių impulsų vorą. Kokybės moduliacija turi aiškų besikartojantį dažnį ir skirtingų amplitudžių impulsų papliūpos formuojasi nuspėjamai - susiformuoja dinaminė pusiausvyra tarp stiprinimo ir kintančių nuostolių.

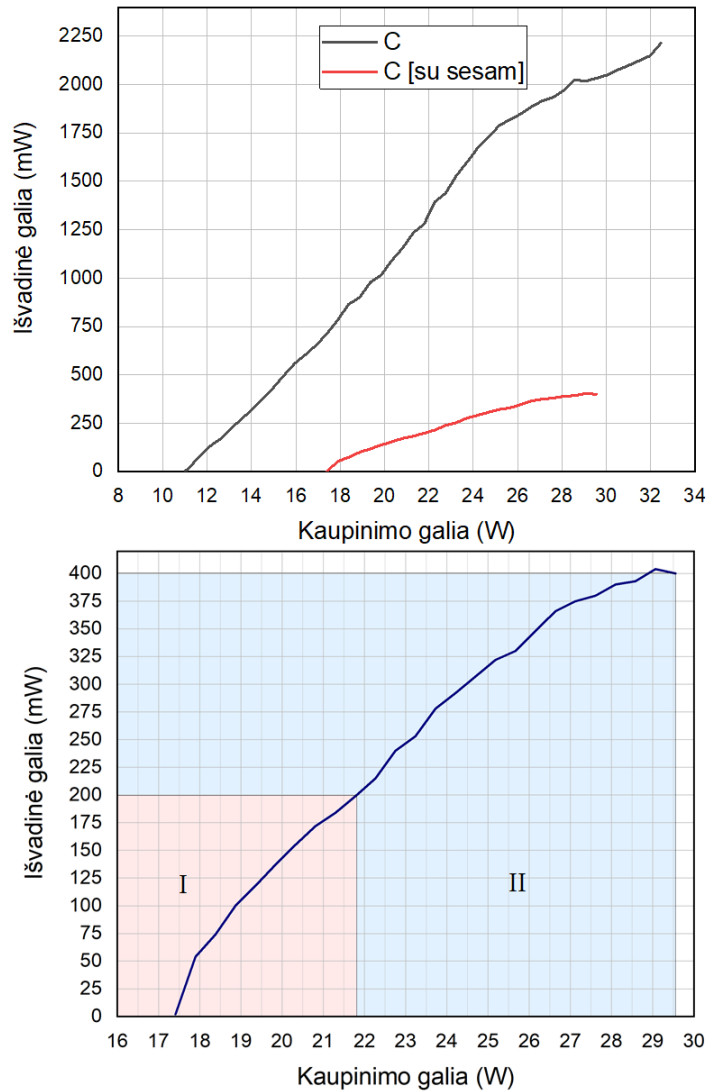


33 pav. B rezonatoriaus impulsų išmatuota autokoreliacijos funkcija

Kadangi moduluotos amplitudės impulsai esant stabiliam kaupinimui neužgėso ir impulsų vora B lazeryje generavosi nenutrūkstamai, tai komerciniu autokoreliatoriumi pavyko išmatuoti susiformavusių impulsų trukmę. Autokoreliacinė funkcija, kaip pavaizduota 29 paveiksle, aproksimuota Gauss'ine funkcija ir tokio impulso trukmė 30ps. Trukmę pamatuoti buvo eksperimentiškai sudėtinga dėl pakankamai didelės impulsų amplitudės moduliacijos. Nors impulsai daug stabilesni nei A rezonatoriuje, tokia veika nėra tinkama praktiniams taikymams ir lazeriui generuojant impulsus tokio pobūdžio veikoje su 33mW vidutine galia nėra praktinio panaudojimo galimybių. Tarpusavyje lyginant A ir B lazerius ir juose stebėtus modų sinchronizacijos režimus, galima prieiti išvados, kad lazerio pasikartojimo dažnio mažinimas ilginant rezonatoriu padeda stabilizuotis impulsams dėl didesnės jų energijos.

Kaip ir minėta anksčiau, C ir D lazeriams konstruoti pasinaudota aušinamo komercinio lazerio osciliatoriaus rezonatoriaus schema, kuri modifikuota veikai su SESAM elementu. Stabili rezonatoriaus temperatūra aušinamame korpuse, ilgesnis rezonatorius ir optimaliais kampais suderinti optiniai rezonatoriaus elementai leidžia tikėtis didesnių C ir D lazeriuose pasiekiamų išvaidnių galių, bei stabilesnės modų sinchronizacijos veikos. Be paminėtų skirtumų, didesnę spinduliuotės energijos tankį $Nd : YVO^4$ kristale ir ant SESAM veidrodžio leido pasiekti mažiau pralaidus - 4% pralaidumo išvaidinis veidrodis.

Išmatuota lazerio išvaidinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios C lazeryje esant ir neesant SESAM elementui rezonatoriuje pavaizduota 34 paveiksle viršuje. Apačioje pavaizduota išvaidinės galios kreivė su SESAM, suskirstyta į dvi atskiras veikos zonas I ir II.

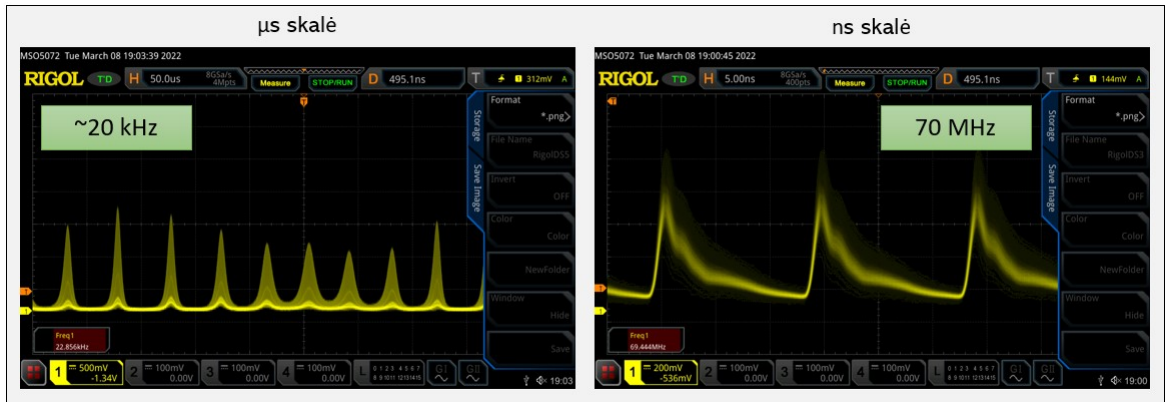


34 pav. C rezonatoriaus išvadinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios

Slenkstinė kaupinimo galios vertė vietoje SESAM esant HR910 veidrodžiui 12.5W, o rezonatoriuje esant patalpintam SESAM - 19.3W. Lazerio efektyvumas su SESAM - apie 1.3%, o su HR veidrodžiu vietoje SESAM apie 6.8%. Efektyvumų skirtumas 5.5%, kaip ir anksčiau aptartuose rezonatoriuose atsirado dėl SESAM elemento nuostolių. Nors išvadinės galios nėra ženkliai didesnės lyginant su A lazeriu, mažiau pralaidus išvadinis veidrodis, ženkliai ilgesnis rezonatorius leido pasiekti daug didesnius impulsų energijos įtėkius ant SESAM elemento, ko pasekoje, tikėtasi pasiekti pasyvios modų sinchronizacijos veiką be kokybės moduliacijos.

C lazeryje I veikos zona pažymėta 34 pav. atvaizduoja generacijos sritį, kur impulsinio režimo stebėti osciloskopu nepavyko visai. I veikos zonoje lazeris veikia nuostoviojoje veikoje. Didinant diodinio kaupinimo galią ir pasiekus energijos įtėkį ant SESAM elemento lygų $1500\mu J/cm^2$, lazeris perėjo į pasyvios modų sinchronizacijos režimą su kokybės moduliacija. C lazeryje tokia veika pasiekta su daug kartų labiau sotinančiu energijos įtėkiu ant SESAM nei

B rezonatoriuje. Tam didžiausią įtaką darė tai, kad C lazeryje lazerio modos dydis kristale yra 1.55 karto didesnis nei B atveju. Dėl šios priežasties, tam, kad susinchronizavus modoms, impulsas nenustotų sklisti rezonatoriuje ir išgyventų, reikėjo daug didesnio energijos tankio spinduliuotę stiprinančiame kristale, kad stebėtume 35 paveiksle atvaizduotą pasyvios modų sinchronizacijos režimą.

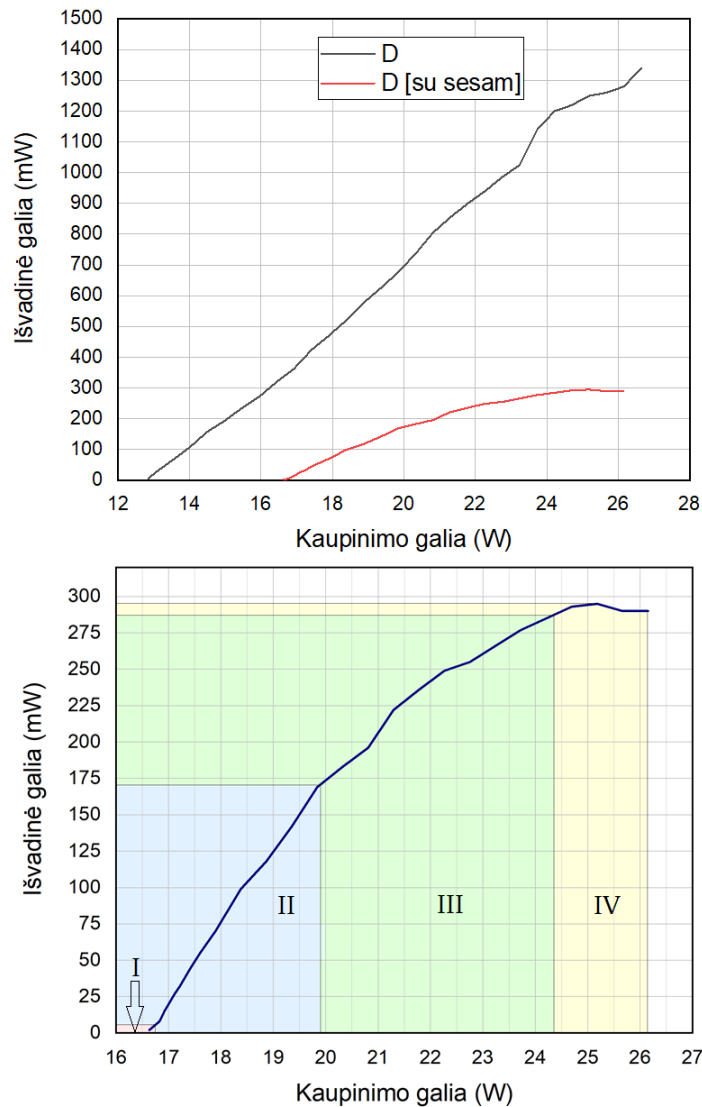


35 pav. C rezonatoriaus išvadinės spinduliuotės laikinės charakteristikos fiksuotos osciloskopu

Osciloskopo laikinei skalei esant μs stebima kokybės moduliacija 20kHz dažniu. Tą patį signalą stebint ns laiko skalėje, matyti 70MHz dažnio impulsų vora su daugmaž 30 procentų siekiančia amplitudės moduliacija. Amplitudės moduliacijos gylis stebint 20kHz dažnio moduliacijos vorą yra mažesnis, lyginant su B lazeriu. Nors didinant kaupinimo galią, pasiekta sotinančio energijos įtėkio vertė ant SESAM yra $2700\mu J/cm^2$, lazerio impulsinės veikos be kokybės moduliacijos stebėti nepavyko. Kadangi rezonatoriaus veika II zonoje prasidėjo persotinant SESAM >20 kartų, o ankstesniuose rezonatoriuose panaši veika stebėta persotinant tik >2 kartus, tikėtina, kad tai galėjo nulemti per didelis lazerio modos dydis kristale. Kadangi vienas šio darbo tikslų yra pasiekti lazerio veikimą su stabilios amplitudės impulsų vora, o šiuo rezonatoriumi to pasiekti nepavyko, tirta sekanti lazerio konfigūracija.

Tam, kad pasiekti dar didesnę energijos tankį ant SESAM, tirtas ketvirtas, D rezonatorius, kuriame modos dydis yra mažiausias iš visų tirtų rezonatorių. Taip pat, D rezonatoriuje lazerio modos dydis 14% mažesnis nei C. To pasekoje tikėtasi pasyvios modų sinchronizacijos režimą su kokybes moduliacija stebėti esant mažesniai energijos įtėkiui ant SESAM, o esant didesnėms išvadinėms galioms ir pasiekus >50 kartų SESAM persotinimą, pagaliau užveikinti $Nd : YVO_4$ lazerį pasyvios modų sinchronizacijos režime su stabilia impulsų vora be kokybės moduliacijos.

36 paveiksle viršuje pavaizduota D rezonatoriaus išvadinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios esant ir neesant SESAM. Kaip ir visuose kituose lazeriuose, generacijos efektyvumas įdėjus nuostolius moduluojantį elementą krito. Šiuo atveju jis krito nuo 5% iki 1.1%. 36 pav. apačioje pavaizduota D lazerio išvadinės galios kreivė suskirstyta į 4 skirtingas veikos zonas I, II, III ir IV. I veikos zona, taip pat kaip ir C lazeryje, žymi nuostoviają lazerio generaciją. Ji lazeryje pasireiškė vos pasiekus lazerinės generacijos slenkstį - 16.6W kaupinimo. Padidinus



36 pav. D rezonatoriaus išvadinės galios priklausomybės nuo kaupinimo galios

kaupinimo galią vos per 0.3W, pradėta stebėti tokia pat lazerio veika kaip ir C lazerio II zonoje. Šį kart, sotinantis energijos įtekis, reikalingas ant SESAM veidrodžio, tam, kad stebėti modų sinchronizacijos veiką buvo $200\mu J/cm^2$ ir persotinimas buvo labiau panašus į A ir B atvejus. Taip nutiko dėl to, kad lazerio modos dydis kristale sumažėjo pakankamai, kad rezonatoriaus viduje užgimę impulsai išsilaikytų esant mažesnės galios kaupinimui.

37 paveiksle pavaizduota D rezonatoriaus II veikimo zonoje laikinė išvadinės spinduliuotės charakteristika mikrosekundžių ir nanosekundžių skalėse. Mikrosekundžių skalėje matomos periodinės apie 10kHz dažnio amplitudės moduliacijos, o nanosekundžių skalėje matomi 72MHz pasikartojimo dažnio impulsai. Impulsų voros amplitudė moduluota per apytiksliai 50%. Tolygiai didinant kaupinimo galią, kokybės moduliacijos dažnis vis didėjo - išreikšti amplitudžių maksimumai artėjo vienas kito, o pasiekus $4200\mu J/cm^2$ sotinantį energijos įtekį ant SESAM, su 19.8W kaupinimu į $Nd : YVO^4$ kristalą, pasiekta III'ioji lazerio veika. 38 paveiksle pavaizduo-



37 pav. D rezonatoriaus (II veikos zona) išvadinės spinduliuotės laikinės charakteristikos fiksuotos osciloskopu

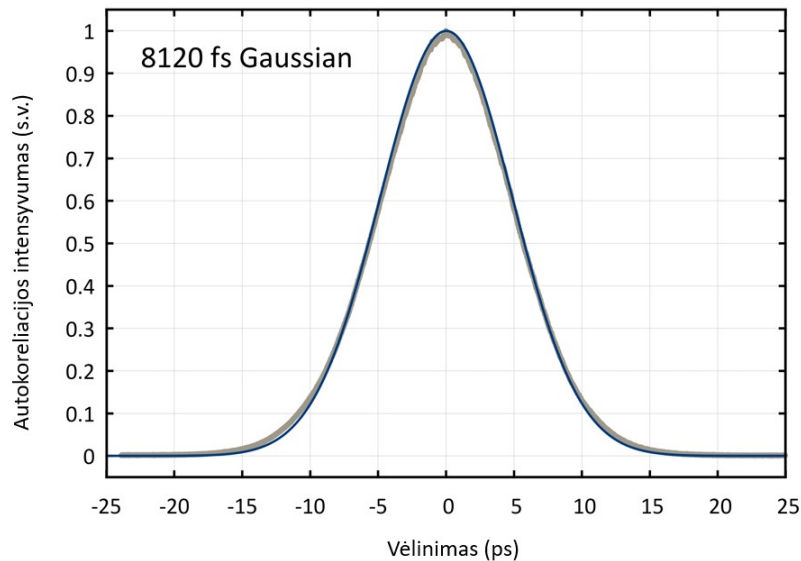
ta laikinė išvadinės spinduliuotės charakteristika mikrosekundžių ir nanosekundžių skalėse III veikimo zonoje D lazeryje. Kaip matome pasiekta pastovios amplitudės pasyvioji modų sinchronizacijos veika. Mikrosekundžių skalėje nematyti jokios moduliacijos, o nanosekundžių skalėje matoma labai stabili impulsinė lazerio veika 72MHz dažniu. SESAM veidrodis, tokiai veikai pasiekti, persotintas >60 kartų. D lazerio išvadinėi galiai esant nuo 170mW iki 290mW, rezonatoriuje stabiliai generavosi impulsai. Tokios laikinės impulsų voros charakteristikos primena impulsinę veika komerciniuose lazeriniuose kieto kūno osciliatoriuose.



38 pav. D rezonatoriaus (III veikos zona) išvadinės spinduliuotės laikinės charakteristikos fiksuotos osciloskopu

Kiekviename tirtame rezonatoriuje A, B, C ir D moduluotos kokybės modų sinchronizacijos veika pradėta stebėti esant pakankamai skirtingoms energijos tankio vertėms ant SESAM veidrodžio. Intuityviai sprendžiant, energijos įtekio vertės su kuriomis stebima pradinė, nestabili modų sinchronizacijos veika, turėtų būti vienodos arba bent jau artimos viena kitai skirtingose rezonatoriaus konfigūracijose, kadangi buvo naudotas tokių pat parametrų SESAM veidrodis. Iš tikrųjų taip nėra, kadangi visų konfigūracijų rezonatoriuose skiriasi lazerio modų dydis aktyviajame elemente. Tuo pačiu skiriasi ir lazerio bei kaupinimo modų persiklojimas

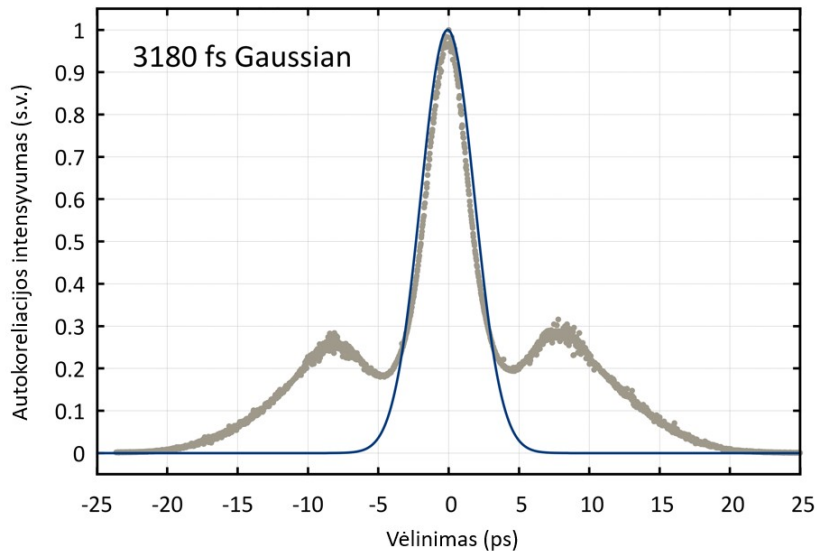
kristale. Aktyvaus elemento stiprinimo sotes energija yra sotes energijos srauto ir generacijos modos ploto aktyviajame elemente sandauga. Nuo aktyvaus elemento stiprinimo sotes energijos priklauso energijos srautas, reikalingas ant SESAM veidrodžio norint pasiekti stabilią modų sinchronizacijos veiką, todėl dėl generacijos ir kaupinimo modų kristale persiklojimo skirtumų tarp tirtų skirtingų rezonatorių priklausė slenkstinė kaupinimo galia, ties kuria prasidėjo lazerio veikimas modų sinchronizacijos režime.



39 pav. D rezonatoriaus (III veikos zona) išmatuota impulsų autokoreliacijos funkcija

Autokoreliatoriumi išmatuota stabilių impulsų trukmė. 39 paveiksle pavaizduota impulsų autokoreliacijos funkcija. Kadangi autokoreliacijos funkcija puikiai atitinka Gauss'o funkcijos formą, aproksimavus autokoreliaciją Gauss'o formos kreive, išmatuota impulsų trukmė 8.1ps. Trumpesnės trukmės nei 8ps pasiekti nepavyko. Pagal [31], SESAM veidrodžiu gautų impulsų trukmė priklauso ir nuo SESAM moduliacijos gylio ΔR . Kuo ΔR didesnis, tuo didesniai skaičiui lazerio modų reikia susifazuoti norint praskaidrinti veidrodžio nuostolius ir sklisti rezonatoriuje su mažesniais nuostoliais. Straipsnyje [11] taip pat gaunama 8.8ps impulsų trukmė, kur naudojamas kitokio bangos ilgio kaupinimas, kitokia rezonatoriaus schema, tačiau lygiai toks pat, to paties gamintojo SESAM veidrodis. Vertinant gautų impulsų trukmę pagal spektro plotį, akivazidu, jog gautų impulsų trukmė nėra spektru ribota. Gausinių impulsų atveju, sandauga $\Delta\nu * \Delta\tau = 0.44$ atitinka spektriškai ribotų impulsų trukmę. Gautų impulsų atveju sandauga yra lygi 4.1. Galima nuspėti, kad gauti impulsai yra čirpuoti. Tam, kad išsiaiškinti ar impulsai teigiamai ar neigiamai čirpuoti, galima įnešti daug teigiamos arba daug neigiamos dispersijos impulsams ir iš naujo pamatuoti trukmes. Priklausomai nuo į kurią pusę trukmės pailgėja arba sutrumpėja galima spręsti apie čirpo ženklą. Kadangi gauti impulsai tokie ilgi, kad teigiamos dispersijos impulsui išplėsti arba suspausti reikėtų pernelyg daug, o pakankamam kiekiui neigiamos dispersijos įnešti reikėtų konstruoti gardelinį kompresorių, o tam sąlygų nebuvo, tai

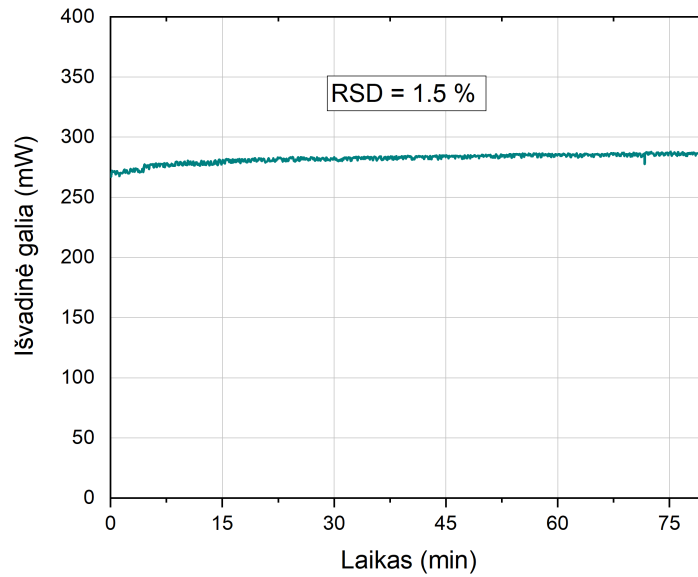
eksperimento metu impulsų suspausti išorėje bandyta nebuvo.



40 pav. D rezonatoriaus (IV veikos zona) išmatuota impulsų autokoreliacijos funkcija

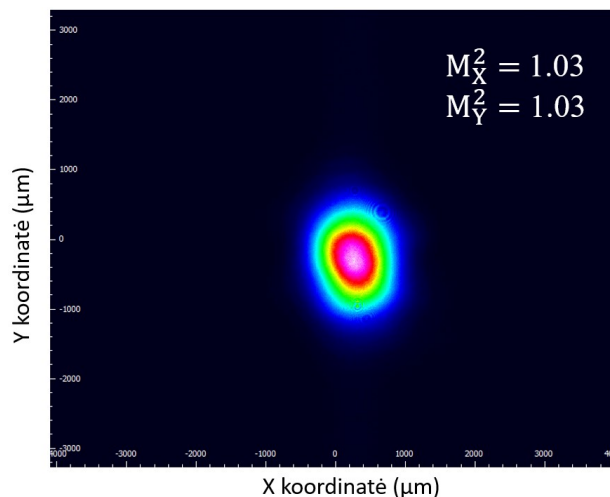
D lazeryje padidinus kaupinimą iki 24.2W ir daugiau, lazeris pradėjo veikti dviejų impulsų režimu. Energijos įtėkis ant SESAM viršytas $7200\mu\text{J}/\text{cm}^2$, kas yra daugiau nei 100 kartų daugiau nei specifikuojama SESAM sotinančio energijos įtėkio vertė. 40 paveiksle pavaizduota D rezonatoriaus veikiančio IV režime impulsų autokoreliacijos funkcija. Iš jos matyti, kad autokoreliacijos funkciją sudaro trys išreikšti maksimumai: vienas didžiausias ir aplink jį vienodais atstumais nutolę du žemesni maksimumai. Taip autokoreliacijos funkcija atrodo tuomet, kada lazeris vienu metu generuoja du impulsus. Taip nutinka tuomet, kai impulsai keliaudami per aktyvųjį elementą nenusineša visos užpildos apgražos ir kristale esat pakankamai dideliai kaupinimo spartai susidaro palankios sąlygos generuoti dar vienam impulsui. Impulsai mažiau sotina aktyvųjį elementą, tačiau labiau sotina nuostolius moduluojantį SESAM. Stebimos autokoreliacijos funkcijos maksimumai nutolę vienas nuo kito per apytiksliai 8ps. Reiškia, kad toks laiko tarpas yra tarp gretimų impulsų, besigeneruojančių rezonatoriuje 72MHz dažniu. Kad rezonatoriuje generuojasi du impulsai, pasinaudojant osciloskopu, pastebėti nepavyko, nes mažiausia galima stebėti laiko skalė yra nanosekundinė.

Kieto kūno lazeriai veikiantys pasyvios modų sinchronizacijos režime su SESAM yra žinomi tuom, kad daug kartų persotinus nuostolius moduluojantį elementą, per laiką susiformuoja SESAM puslaidininkinių sluoksnių optiniai pažeidimai. Kadangi stabili modų sinchronizacijos veika D lazeryje stebėta energijos įtėkiui ant SESAM esant $4200\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ir daugiau, o specifikuojamas SESAM pažaidos slenkstis yra ties $3000\mu\text{J}/\text{cm}^2$, įvertintas D lazerio galios stabilumas laike veikiančiam III veikoje (generuojant stabilią impulsų vorą). 41 paveiksle pavaizduotas minėtas išvadinės galios stabilumas per kiek daugiau nei 1 valandą. Santykinis standartinis galios nuokrypis per matavimo laiką - 1.5%. Kadangi komerciniams lazeriams santykinis standartinis galios nuokrypis dažniausiai specifikuojamas $>0.5\%$ per 24 matavimo valandas, tai galima



41 pav. D rezonatoriaus išvadinės galios stabilumas III veikoje per 1 valandą pastovios generacijos

teigti, kad šiame darbe pasiektas stabilumas ne pakankamai geras rinkos standartais, tačiau pakankamai geras, kad lazerį veikiančią tokioje veikoje būtų galima naudoti taikymams. Ilgesnio laiko tarpo ilgalaikio galios stabilumo matavimas neatliktas, nes po 90 minučių matavimo prasidėjo ženklaus galios kritimas ir stabilios modų sinchronizacijos veikos perėjimas į moduluotos kokybės (II režimo) veiką. Tai nutiko dėl beatsirandančio optinio pažeidimo ant SESAM veidrodžio, nes perjustiravus paskutinius veidrodžius iki SESAM elemento ir su SESAM grąžinant lazerio atspindį atgal ant lazerio optinės ašies, galia visiškai atsistato ir lazeris grįžta į stabilią modų sinchronizacijos veiką be moduliacijos (III veika).



42 pav. D rezonatoriaus išvadinio pluošto intensyvumo skirstinys fiksuotas su silicine kamera

Pasinaudojant silicio pagrindo CCD kamera įvertintas D lazerio pluošto III veikoje eliptiškumas ir intensyvumo profilis (pavaizduotas 43 paveiksle). Eliptiškumas (pluošto matmenų santykis statmenose plokštumose) matuojant 50cm nuo lazerio išvadinio veidrodžio yra 0.83, o intensyvumo profilis atitinka Gauss'o funkciją. Taip pat komerciniu matuokliu pamatuotas pluošto M^2 statmenose plokštumose. Pamatuotas M_x^2 ir M_y^2 50cm atstumu nuo lazerio išvadinio veidrodžio yra 1.03. Ši vertė yra artima idealiai ir yra nulemta naudojamo 880nm kaupinimo, kurio dėka dėl mažo kvantinio defekto tarp kaupinimo ir generacijos spinduliuotės kristale išsiskiria nedaug šilumos ir lazerio pluoštas nepatiria skėsties iškreipymų sklisdamas per $Nd:YVO_4$ kristalą. Puikūs pluošto parametrai demonstruoja gautų impulsų galimybę būti fokusuotiems su puikiomis fokusavimosi savybėmis ir būti panaudotiems įvairiems taikymams kur pritaikomumą turi 8ps trukmės stabilūs, 914nm centrinio bangos ilgio, aukšto, 72MHz pasikartojimo dažnio impulsai.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Pirmą kartą realizuotas $914nm$ bangos ilgio $Nd : YVO^4$ lazerio veikimas su $880nm$ diodiniu kaupinimu. Lazeris veikia sąlyginai neefektyviai dėl $914nm$ reabsorbcijos ir mažos $880nm$ sugerties kristale. Didžiausias lazerio efektyvumas su rezonatoriaus konfigūracija be SESAM veidrodžio siekė 6.8% , o su SESAM - 1.3% .
2. Nustatyta, kad $914nm$ generacijos efektyvumui $Nd : YVO^4$ kristale įtaką daro kristalo ilgis ir koncentracija, kristalo aušinimo temperatūra, bei kaupinimo bangos ilgis. Sumažinus kristalo aušinimo temperatūrą nuo $25^\circ C$ iki $13^\circ C$, slenkstinė kaupinimo galia lazeriui nukrito per $1W$. Taip pat eksperimente parodyta, kad kaupinimo modulio temperatūrai pakitus per $2.5^\circ C$, kaupinimo centrinis bangos ilgis nukrypsta per $0.5nm$ nuo nustatytos optimalios $879.9nm$ vertės, ko pasekoje išvadinė osciliatoriaus galia sumažėja per 10% .
3. Pademonstruotos skirtingos, $914nm$ bangos ilgio pasyvios modų sinchronizacijos veikos keturiuose skirtinguose A, B, C ir D lazerio rezonatorių konfigūracijose su SESAM veidrodžiu. D rezonatoriuje pademonstruota stabili $72MHz$ pasikartojimo dažnio impulsų vora be kokybės moduliacijos.
4. Išmatuota stabilių $270mW$ vidutinės galios Gauss'inių impulsų trukmė $8.1ps$. Impulsų spektro plotis - $1.4nm$. $\Delta\nu * \Delta\tau$ sandauga gautiems impulsams lygi 4.1 - impulsai nėra spektriškai riboti. Tam, kad gauti trumpesnius impulsus reikėtų geriau $914nm$ bangos ilgiui optimizuoto SESAM veidrodžio.

Literatūros sąrašas

- [1] U. Keller, Recent developments in compact ultrafast lasers, *nature* 424(6950), 831–838 (2003).
- [2] M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, Ultrafast lasers: technology and applications, volume 80 (CRC Press, 2002).
- [3] S. Backus, C. G. Durfee III, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn, High power ultrafast lasers, *Review of scientific instruments* 69(3), 1207–1223 (1998).
- [4] T. Brabec, C. Spielmann, P. Curley, F. Krausz, Kerr lens mode locking, *Optics letters* 17(18), 1292–1294 (1992).
- [5] D. Sutter, L. Gallmann, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, V. Scheuer, G. Angelow, T. Tschudi, G. Steinmeyer, U. Keller, Sub-6-fs pulses from a sesam-assisted kerr-lens mode-locked ti: sapphire laser: at the frontiers of ultrashort pulse generation, *Applied Physics B* 70(1), S5–S12 (2000).
- [6] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, J. A. Der Au, Semiconductor saturable absorber mirrors (sesam's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers, *IEEE Journal of selected topics in QUANTUM ELECTRONICS* 2(3), 435–453 (1996).
- [7] B. Chen, T. Jiang, W. Zong, L. Chen, Z. Zhang, A. Wang, 910nm femtosecond nd-doped fiber laser for in vivo two-photon microscopic imaging, *Optics express* 24(15), 16544–16549 (2016).
- [8] M. Schneider, S. Barozzi, I. Testa, M. Faretta, A. Diaspro, Two-photon activation and excitation properties of pa-gfp in the 720–920-nm region, *Biophysical journal* 89(2), 1346–1352 (2005).
- [9] P. T. So, C. Y. Dong, B. R. Masters, K. M. Berland, Two-photon excitation fluorescence microscopy, *Annual review of biomedical engineering* 2(1), 399–429 (2000).
- [10] A. Schlatter, L. Krainer, M. Golling, R. Paschotta, D. Ebling, U. Keller, Passively mode-locked 914-nm nd:yvo4 laser, *Optics letters* 30(1), 44–46 (2005).
- [11] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Leveque-Fort, M. Fontaine-Aupart, Diode-pumped passively mode-locked nd:yvo4 laser at 914 nm, *Optics letters* 31(2), 214–216 (2006).

- [12] L. Sun, L. Zhang, H. Yu, L. Guo, J. Ma, J. Zhang, W. Hou, X. Lin, J. Li, 880 nm ld pumped passive mode-locked tem00 nd: Yvo4 laser based on sesam, *Laser Physics Letters* 7(10), 711 (2010).
- [13] Y. Lü, X. Zhang, J. Xia, A. Zhang, X. Yin, L. Bao, Highly efficient continuous-wave 912 nm nd:gdvo4 laser emission under direct 880 nm pumping, *Laser Physics Letters* 6(11), 796–799 (2009).
- [14] G. Huber, C. Kränkel, K. Petermann, Solid-state lasers: status and future, *JOSA B* 27(11), B93–B105 (2010).
- [15] W. Koechner, *Solid-state laser engineering*, volume 1 (Springer, 2013).
- [16] E. Gaižauskas, V. Sirutkaitis, *Kietojo kūno lazeriai*, VU leidykla (2008).
- [17] A. Bargelis, A. Dementjev, V. Sirutkaitis, *Lazerinė technologija* (Vilniaus universitetas, Vilnius, 2008).
- [18] W. Koechner, M. Bass, *Solid-state lasers: a graduate text* (Springer Science & Business Media, 2006).
- [19] J. Pocius, *Puslaidininkiais lazeriais kaupinamo yb:kgw femtosekundinio lazerio veikos dinamika ir spinduliuotės parametrų optimizavimas* (2009).
- [20] F. Chen, J. Sun, R. Yan, X. Yu, Reabsorption cross section of nd³⁺ -doped quasi-three-level lasers, *Scientific reports* 9(1), 1–8 (2019).
- [21] P. Jiang, X. Ding, Q. Sheng, B. Li, X. Yu, G. Zhang, B. Sun, L. Wu, J. Liu, W. Zhang, et al., Efficient 914-nm nd:yvo4 laser under double-end polarized pumping, *Applied optics* 55(5), 1072–1075 (2016).
- [22] A. Singh, S. Sharma, P. Mukhopadhyay, S. Oak, Dual wavelength operation in diode-end-pumped hybrid vanadate laser, *Pramana* 75(5), 929–934 (2010).
- [23] X. Ding, S.-J. Yin, C.-P. Shi, X. Li, B. Li, Q. Sheng, X.-Y. Yu, W.-Q. Wen, J.-Q. Yao, High efficiency 1342 nm nd:yvo4 laser in-band pumped at 914 nm, *Optics express* 19(15), 14315–14320 (2011).
- [24] W. Gong, Y. Qi, Y. Bi, A comparative study of continuous laser operation on the 4f_{3/2}–4i_{9/2} transitions of nd:gdvo4 and nd:yvo4 crystals, *Optics communications* 282(5), 955–957 (2009).
- [25] K. W. Busch, A. Hennequin, M. A. Busch, *Mode formation in optical cavities* (1999).

- [26] F. Schepers, T. Bexter, T. Hellwig, C. Fallnich, Selective hermite–gaussian mode excitation in a laser cavity by external pump beam shaping, *Applied Physics B* 125(5), 1–8 (2019).
- [27] N. Hodgson, H. Weber, *Optical resonators: fundamentals, advanced concepts, applications*, volume 108 (Springer Science & Business Media, 2005).
- [28] C. J. Hood, H. Kimble, J. Ye, Characterization of high-finesse mirrors: Loss, phase shifts, and mode structure in an optical cavity, *Physical Review A* 64(3), 033804 (2001).
- [29] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking, *JOSA B* 16(1), 46–56 (1999).
- [30] E. P. Ippen, *Principles of passive mode locking*, *Applied Physics B* 58(3), 159–170 (1994).
- [31] J. Hoon, *Sesam design and characterization*, Royal institute of technology, Master of science thesis 72 (2010).
- [32] S. J. Bepko, Anisotropy of two-photon absorption in gaas and cdte, *Physical Review B* 12(2), 669 (1975).
- [33] Y. Shen, G.-Z. Yang, *Theory of self-phase modulation and spectral broadening*, in *The Supercontinuum Laser Source* (Springer, 2016), 1–32.
- [34] R. Akbari, A. Major, Kerr-lens mode locking of a diode-pumped yb: Kgw laser using an additional intracavity kerr medium, *Laser Physics Letters* 15(8), 085001 (2018).
- [35] K. Fritsch, M. Poetzlberger, V. Pervak, J. Brons, O. Pronin, All-solid-state multipass spectral broadening to sub-20 fs, *Optics letters* 43(19), 4643–4646 (2018).

Edvinas Varanavičius

MODŲ SINCHRONIZACIJOS REŽIMO TYRIMAS DIODINIO KAUPINIMO $Nd : YVO^4$
LAZERYJE

Santrauka

Plečiantis dvifotonės mikroskopijos rinkai, atsirado poreikis paprastesniems, specializuoto taikymo lazeriams generuojantiems ultratrumpuosius impulsus apie $900nm - 920nm$ bangos ilgių diapazone. Kadangi dauguma tokių komercinių sistemų yra brangios ir sudėtingos (titano-safyro osciliatorius, optinis parametris osciliatorius), kilo mintis pabandyti realizuoti pasyvios modų sinchronizacijos režimą $Nd : YVO^4$ lazeryje. Kadangi kristalas turi sugertį ties $880nm$ bangos ilgiu ir gali generuoti $914nm$ bangos ilgį, dėl mažo kvantinio defekto kristale išsiskirtų sąlyginai nedaug šilumos, o tai turi nemažai privalumų kaip pavyzdžiui mažas termo-lėšis kristale.

Šio darbo tikslas ištirti $880nm$ bangos ilgio diodais kaupinamo $Nd : YVO^4$ lazerio veikimą pasyvios modų sinchronizacijos režime generuojant $914nm$ bangos ilgio spinduliuotę.

Šiame darbe sukonstruoti keturi skirtingi lazerio rezonatoriai, su kuriais pirmą kartą realizuotas $914nm$ bangos ilgio lazerio veikimas su $880nm$ diodiniu kaupinimu. Nustatyta, kad $914nm$ generacijos efektyvumui $Nd : YVO^4$ kristale įtaką daro kristalo ilgis ir koncentracija. Taip pat įtaką daro kristalo aušinimo temperatūra, nes dėl lazerio bangos ilgio reabsorbcijos ir didelės apatinio lazerinio lygmens terminės užpildos, krenta lazerio efektyvumas. Kuo mažesnė kristalo temperatūra, tuo efektyviau veikia lazeris. Kadangi kaupinimui naudotas diodinis modulis, o didinant kaupinimo galią, diodai vis labiau kaito, keitėsi kaupinimo centrinis bangos ilgis, o tai ženkliai keitė lazerio efektyvumą. Ištirta modų sinchronizacijos veika keturiuose skirtinguose lazerio rezonatoriuose. Pasiiekta veika su stabilia $72MHz$ pasikartojimo dažnio impulsų vora be kokybės moduliacijos. Išmatuota stabilų $270mW$ vidutinės galios Gauss'inių impulsų trukmė $8.1ps$. Impulsų spektro plotis - $1.4nm$. $\Delta\nu * \Delta\tau$ sandauga gautiems impulsams lygi 4.1 - sugeneruoti impulsai nėra spektriškai ribotos trukmės. Tam, kad pasiekti trumpesnes trukmes, reikia geriau $914nm$ bangos ilgiui optimizuoto SESAM veidrodžio.

MODE-LOCKED REGIME INVESTIGATION IN DIODE-PUMPED $Nd:YVO_4$ LASER

Summary

As two-photon microscopy global market gets bigger and bigger, there has been a need for simpler, specialized lasers that generate ultra-short pulses of wavelengths region from 900nm to 920nm. Since most of these commercial systems are expensive and complex (titanium-sapphire oscillator, optical parametric oscillator), the idea arose to try to implement a passive mode synchronization in a $Nd:YVO_4$ laser. Because the crystal has an absorption at a wavelength of 880nm and can generate a wavelength of 914nm, a small amount of heat is released in the crystal due to a small quantum defect, which has a number of advantages such as a small thermo-lens in the crystal.

The aim of this work was to investigate the operation of a 880nm wavelength diode-pumped $Nd:YVO_4$ laser in passive mode-locked regime generating 914nm wavelength radiation.

In this work, four different laser resonators were constructed. For the first time 914nm laser operation was realised with 880nm diode-pumping. The generation efficiency of 914nm in the $Nd:YVO_4$ crystal was found to be affected by the crystal length and concentration. The cooling temperature of the crystal also influences laser efficiency, because of the 914nm wavelength reabsorption and high thermal filling of the lower laser level, which reduces the efficiency of the laser. The lower the temperature of the crystal, the more efficient the laser. As the diode module was used for pumping, and as the pumping power increased, the central wavelength of the diode changed, which significantly changed the efficiency of the laser. Mode-locked regime was realised in four different laser resonators. Stable 72MHz repetition rate pulse train without q-switching was observed. The duration of stable 270mW average power Gaussian pulses was measured 8.1ps. Pulse spectrum width - 1.4nm. The product of $\Delta\nu * \Delta\tau$ is 4.1 - generated pulses are not transform-limited. Better optimised SESAM for 914nm is needed to reach shorter pulse durations.