

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Matas Plūkys

KOMPAKTIŠKO IMPULSINĖS VEIKOS 2-JŲ MIKRONŲ BANGOS ILGIO
LAZERIO SUKŪRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų
studijų programa

Studentas:

Matas Plūkys

Leista ginti

2019-06-06

Darbo vadovas:

dr. Arūnas Varanavičius

Centro direktorius:

doc., dr. Rytis Butkus

Vilnius 2019

Turinys

1. Įvadas.....	3
2. Literatūros apžvalga	4
2.1. Ankstyvoji 2-jų mikronų lazerių raida	4
2.2. Pasyvios kokybės moduliacijos 2-jų mikronų lazerių vystymosi raida.....	6
2.3. 2-jų mikronų lazerių taikymo apžvalga	7
2.3.1. Vėjo greičio matavimas, panaudojant doplerio lidaro sistemą.....	9
2.3.2. Vibrometrija	10
2.3.3. Medicina	11
2.3.4. Lidarai.....	12
2.4. Pasyvioji kokybės moduliacija	12
2.5. Spinduliuotės sugertis ir emisija Tm:YLF kristale.....	16
3. Eksperimentų metodai ir schemos	18
3.1. Kokybės moduliacijos veikoje veikiančio lazerio schemos	18
3.2. Lazerį kaupinančio pluošto tyrimo schema	20
3.3. Principinė termolėšio matavimo schema.....	20
3.4. Nuostoviojoje veikoje veikiančio lazerio schemos	21
4. Rezultatai ir jų aptarimas.....	23
4.1. Kaupinimo spinduliuotės charakteristikos.....	23
4.2. Kaupinimo spinduliuotės sugertis Tm:YLF kristale ir jame susidarantis termolėšis	26
4.3. Lazerio charakteristikos kvazi-nuostoviajame (CW) režime	28
4.4. Lazerio charakteristikos kokybės moduliacijos režime.....	32
5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados	35
Literatūros sąrašas	36
Santrauka	40
Summary.....	41

1. Įvadas

2-jų mikronų lazerinių šaltinių platus pritaikymas medicinoje, lidaruose, vibrometrijoje žadina mokslinį ir komercinį interesą sukurti universalų, kompaktišką, atsparų išorės poveikiams, veikiantį kambario temperatūroje lazerį.

Diodais kaupinamas kieto kūno lazeris pasyviojoje kokybės moduliacijos veikoje gali generuoti nanosekundžių eilės aukštos smailinės galios impulsus. Tokio tipo rezonatoriaus dizainas paprastas ir jame esančių elementų kaina palyginti nedidelė.

Nuo 2002 metų pasirodžius pirmiesiems moksliniams straipsniams apie kompaktiškus 2-jų mikronų diodais kaupinamus pasyvios kokybės moduliacijos lazerius, praėjo 17 metų. Per šį laiką išspausdinta keliasdešimt mokslinių straipsnių su eksperimentiniais rezultatais, kuriuose pristatyti lazeriai su vis naujomis lazerinėmis medžiagomis ir pasyvios kokybės modulatoriais. Iškyla noras apibendrinti mokslinius duomenis, palyginti lazerių išorinius parametrus ir pasirinkti galimai perspektyvią lazerinę medžiagą ir sugėriklių lazerio kūrimui.

Šiame darbe buvo pasirinkta kurti impulsinės veikos 2-jų mikronų bangos ilgio lazerį su Tm:YLF lazeriniu kristalu ir Cr:ZnSe pasyvios kokybės modulatoriumi.

Šio darbo tikslai:

- Ištirti kaupinančio pluošto spektrą, profilį ir optimizuoti fokusavimo parametrus.
- Išmatuoti kaupinimo spinduliuotės sugertį ir susidarantį termolęšį Tm:YLF kristale.
- Gauti generaciją 2-jų mikronų bangos ilgio lazeryje nuostoviojoje ir kokybės moduliacijos veikose.
- Užfiksuoti lazerio pluošto profilį.
- Ištirti spinduliuotės poliarizaciją.
- Ištirti impulsų energijos ir impulsų trukmės priklausomybes nuo įvairių rezonatoriaus parametrų, siekiant optimizuoti išorinius lazerio parametrus.

2. Literatūros apžvalga

2.1. Ankstyvoji 2-jų mikronų lazerių raida

Pirmieji 2-jų mikronų lazeriai pademonstruoti Belo laboratorijoje 1962 metais. Tulio Tm^{3+} ir Holmio Ho^{3+} trivalenčiai jonai, patalpinti $CaWO_4$ matricoje, spinduliavo atitinkamai 1,911 μm ir 2,046 μm bangos ilgio spinduliuotę. Kristalų temperatūra buvo palaikoma 77 K, juos laikant skysto azoto inde. Kaupinimui naudota gyvsidabrio lempa su filtrais. Išmatuota slenkstinė kaupinimo energija ir kaupinimo diapazonas [1] (žr. Lentelė nr.1)

Lazerio medžiaga	Temperatūra	Kaupinimo diapazonas	Bangos ilgis	Slenkstinė kaupinimo energija	Energijos lygmenys
$CaWO_4: Tm^{3+}$	77 K	460- 480nm	1911nm	60 J	$^3H_4 \rightarrow ^3H_6$
		1700- 1800nm	1916 nm	73 J	
$CaWO_4: Ho^{3+}$		440-460nm	2046nm	80J	$^6I_7 \rightarrow ^6I_8$
			2059nm	250J	

Lentelė nr. 1. Pirmųjų 2-jų mikronų lazerių generacijos parametrai.

Pavykus gauti koherentinės šviesos generaciją 2-jų mikronų srityje, susirūpinta dėl labai mažo efektyvumo, konvertuojant lempos kaupinimo spinduliuotę į koherentinę spinduliuotę. Manoma, kad mažą konversijos efektyvumą lemia siauros retųjų jonų sugerties spektro linijos. Samprotauta, kad efektyvumą būtų galima padidinti, lazerinį kristalą legiruojant papildomais skirtingais retaisiais jonais, kurių elektrinės savybės leistų jų sugertą energiją perduoti aktyviajam jonui [2].

1963 metais pademonstruota, kad yra įmanomas energijos pernešimas iš Er^{3+} jono į Tm^{3+} ir Ho^{3+} jonus. Ši savybė padėjo sumažinti lazerio generacijos slenkstį, $CaMoO_4$ matricą legiruojant kelių skirtingų rūšių jonais. Jonų absorbcijos spektrai susideda superpozicijos principu, o emisijos spektrai vienas kito neįtakoja. Santykinis intensyvumo pakitimas įvyksta dėl energijos pernešimo tarp lygmenų [3]. 1966 metais sekantis proveržis įvyko itrio aliuminio granato (YAG) matricą legiravus Er^{3+} , Yb^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} jonais. Pademonstruotas nuostoviosios veikos lazeris (CW), spinduliuojantis 7,6 W galios ir 2,123 μm bangos ilgio koherentinę spinduliuotę. Kaupinimui naudota 550W galios volframo lempa.

Lazeriniame kristale buvo palaikoma 77 K temperatūra. Šiame eksperimente bandyta generaciją pasiekti kristalą laikant kambario temperatūroje (295 K), tačiau generacijos slenkstis pasirodė esantis aukštas (1240J elektros energijos impulsas į FT-524 ksenono lempą) [4].

Vėliau 1971 metais įvyko svarbus proveržis panaudojus Itrio ličio fluorida (YLF) matricą. Ją legiravus Er³⁺, Tm³⁺ ir Ho³⁺ jonais, pasiekta 2,06 μm lazerio generacija kambario temperatūroje. Pasiektas generacijos slenkstis 35J su ksenono kaupinimo lempa [5]. Pastebėta, kad YLF matrica, legiruota Holmio jonais, pasižymi daug žadančiomis lazerinės medžiagos savybėmis kaip platus sužadavimo spektras, efektyvus energijos perdavimas tarp sensibilizatorių ir holmio jonų, didelis emisijos skerspjūvis, didelis stiprinimas ir žemas generacijos slenkstis. Pažymėtina ilga holmio Ho³⁺ jonų fluorescencijos gyvavimo trukmė, leidžianti išgauti didelės energijos lazerinius impulsus. Vėliau 1986 metais E. W. Duczynski ir G. Huber gavo kambario temperatūroje efektyvią 2.086 μm nuostoviosios veikos lazerinės spinduliuotės generaciją Cr,Tm,Ho:YScAl-granato ir Cr,Tm,Ho:YScGa-granato kristaluose[6].

Diodinių lazerių atsiradimas rinkoje devintajame dešimtmetyje paspartino Tm ir Ho kietakūnių lazerių vystymąsi. Atsiradusių diodinių lazerių bangos ilgiai tinka efektyviai kaupinti Tulio jonus sužadinant juos į ³H₄ energijos lygmenį. Tulio Jonai pasižymi kryžmine relaksacijos charakteristika, kai vienas kaupinimo fotonas sugertas jono ³H₄ energijos lygmenyje, sukuria 2 sužadintus jonus ³F₄ energijos lygmenyje. 1986 m. pademonstruotas pirmasis AlGaAs lazerinių diodų masyvu (bangos ilgis 785,5 nm) kaupinamas Tm,Ho:YAG lazeris, veikiantis 77 K temperatūroje [7], o vėliau 1987 m. pademonstruotas kambario temperatūroje veikiantis ir diodais kaupinamas Tm,Ho:LiYF₄ lazeris, spinduliuojantis 2.31 μm ir 2.08 μm spinduliuotę [8].

Vėliau Tm,Ho kietakūniai lazeriai tapo efektyvūs ir jau 1991 metais pademonstruotas Tm:Ho:YAG lazeris spinduliavo 2,1 μm bangos ilgio lazerinę spinduliuotę ir 22 mJ energijos impulsus (aktyvi rezonatoriaus kokybės moduliacija). Lidaras sugebėjo aptikti objektus už 145 km ir pamatuoti vėjo greitį už 20 km. Prieš tai lidaruose buvo naudojami CO₂ lazeriai [9].

2.2. Pasyvios kokybės moduliacijos 2-jų mikronų lazerių vystymosi raida

Pirmieji pasyvios kokybės modulatoriai 2- μm srityje pademonstruoti 1993 m. Tai buvo InGaAs puslaidininkiniai sugėrikliai, panaudoti su Cr,Tm:YAG ir Cr,Tm,Ho:YAG lazeriniais strypais. Po pirmųjų sugeneruotų impulsų, šie sugėrikliai buvo pažeidžiami. Jie nebuvo tinkami aukštomis smailinėms galioms [10].

1994 m. pademonstruotas pasyvios kokybės moduliacijos Tm,Cr:Y₃Al₅O₁₂ 2- μm srityje veikiantis lazeris su nauju Ho:YLiF₄ pasyvios kokybės modulatoriumi. Lazeris buvo kaupinamas 80 J lempa ir generavo 11 mJ energijos ir 45ns impulso trukmės impulsus. Pasiektas 16% efektyvumas generuojant pasyvios kokybės impulsus laisvosios veikos atžvilgiu [11]. Vėliau ta pati grupė 1996 m. pristatė naujus Ho:YVO₄ ir Ho:CaF₂ pasyvios kokybės modulatorius, kurie buvo pademonstruoti su ta pačia lazerine medžiaga Tm,Cr:Y₃Al₅O₁₂ 2- μm srityje. Sugeneruoti 84 mJ energijos ir 82 ns impulsai, lazerį kaupinant su 88 J lempa. Tiesa, neišvengta sugėriklio pažeidimų [12, 13]. Vėliau atsiradęs PbSe legiruoto fosfato stiklo sugėriklis tepasiekė 6 % pasyviosios moduliacijos efektyvumą, lyginant su laisvąja veika [14].

2001 m. įvyko proveržis 2-jų mikronų pasyvios kokybės moduliacijos srityje. Pademonstruotas efektyvus lempa kaupinamas lazeris su Cr²⁺:ZnSe sugėrikliu ir Ho:YAG, Tm:YAG lazerinėmis medžiagomis. Lyginant su laisvąja veika pasyvios kokybės moduliacijos efektyvumas pasiektas 5% Ho:YAG ir 16% Tm:YAG lazeriuose. Naudojant Tm:YAG kristalą su Cr²⁺:ZnSe pasyvios kokybės modulatoriumi yra gaunamas didesnis efektyvumas nei naudojant Ho:YAG su Cr²⁺:ZnSe todėl, nes absorbcijos ir emisijos skerspjūvių santykis σ_a / σ_e prie 2017nm (Tm:YAG) yra ~100, kai tuo tarpu prie 2090 (Ho:YAG) $\sigma_a / \sigma_e \sim 7$ [15].

2002-2012 metais baltarusų mokslininkų grupė įvykdė didelį proveržį diodais kaupinamų pasyvios kokybės moduliacijos lazerių srityje:

- Pirmieji pademonstravo efektyvų diodinį kaupinimą 2-jų mikronų pasyvios kokybės moduliacijos lazeriui [16].
- Pristatė naują KY(WO₄)₂ matricą [16, 17, 18].
- Pristatė naujus pasyvios kokybės modulatorius: Cr:ZnS ir PbS kvantiniais taškais legiruotą stiklo sugėriklį [18, 19].

Pasirodė, kad Tm:KY(WO₄)₂ kristalas su Cr:ZnS sugėrikliu gali generuoti aukšto pasikartojimo dažnio (18 kHz), aukšto efektyvumo (72% laisvos veikos ir 23% kaupinimo atžvilgiu), pakankamai trumpus (63 ns), tačiau mažos energijos (7 μJ) impulsus [16]. Lazeris su Tm:KY(WO₄)₂ kristalu ir PbS kvantiniais taškais legiruotu stiklo sugėrikliu generuoja 4 kHz pasikartojimo dažnio, 30 μJ energijos ir 8 ns trukmės impulsus. Toks lazeris pasižymi ~55% efektyvumu laisvosios veikos atžvilgiu ir ~11% lyginant su kaupinimo galia [18, 19]. Taipogi ši mokslininkų grupė parodė, kad Tm:YAG ir Cr²⁺:ZnSe kombinacija gali duoti 0,4 mJ energijos ir 300ns trukmės impulsus prie 4 kHz pasikartojimo dažnio [17]. Vėliau 2012-2013 m. su atsiradusiais fluoridų Tm:YLF ir Tm:LiLuF₄ kristalais pasiektos >1 mJ impulsų energijos, tačiau esant mažam efektyvumui (<4% kaupinimo atžvilgiu), naudojant Cr²⁺:ZnS sugėrikli [20, 21, 22]. Vėliau pasiektas šiek tiek geresni efektyvumas ~9% naudojant KLu(WO₄)₂ matricą ir Cr²⁺:ZnS sugėrikli [23].

Vėlesnis proveržis padarytas Izraelio mokslininkų grupės, kuri sugebėjo viršyti 4 mJ impulsų energijos ribą. 2015 m. pademonstruotas Tm:YLF lazeris su Cr²⁺:ZnSe pasyvios kokybės moduliatoriumi. Sugeneruoti 1885 nm bangos ilgio, 4,22 mJ energijos ir 26 ns trukmės impulsai, esant ~400 Hz pasikartojimo dažniui. Kaupinta 12 W galios ir 793 nm bangos ilgio AlGaAs lazeriniu diodu. Pasiektas pasyvios kokybės moduliacijos efektyvumas ~57% laisvosios veikos atžvilgiu ir ~14,16% lyginant su kaupinimo galia [24]. Vėliau ši mokslininkų grupė pristatė Tm:YAP lazerį su Cr²⁺:ZnS sugėrikliu, generuojantį 15kHz pasikartojimo dažnio impulsus [25]. Šio lazerio efektyvumas ~36%, lyginant su kaupinimo spinduliuotės galia.

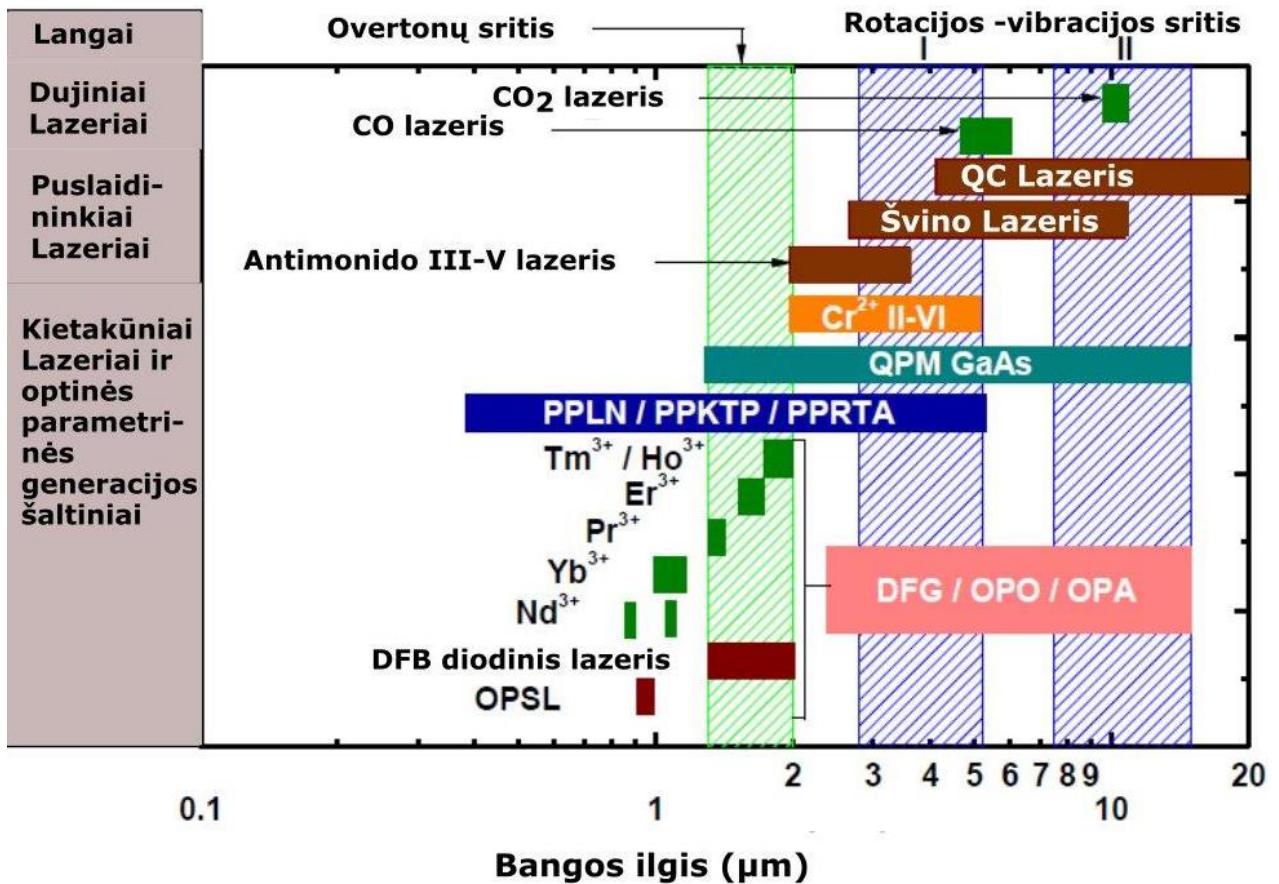
Nuo 2010 iki 2019 metų pristatyti keletas naujų sugėriklių (InGaAs/GaAs ir WSe₂), tačiau jų efektyvumas nėra didelis [26, 27]

2.3. 2-jų mikronų lazerių taikymo apžvalga

2-jų mikronų srityje veikiantys lazeriai randa pritaikymą keletose skirtingose srityse:

- (1) Skystas vanduo stipriai sugeria elektromagnetinę spinduliuotę 2-jų mikronų bangos ilgio srityje. Kadangi pagrindinė biologinių audinių sudedamoji dalis yra vanduo, apšviečiant juos 2 μm bangos ilgio koherentine spinduliuote, pasiekiamas kaitinimas mažame tūryje. Ši savybė leidžia lazerius panaudoti medicinos srityje [28, 29].
- (2) 2-jų mikronų lazeriniai šaltiniai gali efektyviai kaupinti optinius parametrinius generatorius [30]

(3) „Akiai saugus“ elektromagnetinių bangų diapazonas ir geras atmosferos pralaidumas 2-ju mikrometrų bangos ilgio diapazone lėmė lazerinių šaltinių panaudojimą objektų stebėjimo sistemose, raketų klaidinimo sistemose ir optinėje komunikacijoje [31]



1 pav. Lazerinės spinduliuotės šaltiniai infraraudojoje srityje

Infraraudonųjų spindulių šaltinių tipai išdėstyti 1 pav. Galime išskirti 2-ju mikronų srityje veikiančiuosius:

- (1) GaSb lazeriniai diodai (Antimonido III-V lazeriai). Tai pakankamai nauja technologija, aktyviai vystoma Lietuvos „Brolis Semiconductors“ kompanijoje [32-35]. Šie lazeriai pasižymi maža kaina ir kompaktiškumu. Numatomas pritaikymas raketų klaidinimo sistemose 1900-2450 nm. Apie impulsinę šio tipo lazerio veiką duomenų nepavyko rasti. 2014 metais pademonstruotas >1,2 W galios diodinis lazeris ir 9W galios diodinių lazerių juosta, veikiančys 2,1 μm bangos ilgio ruože nuostoviojoje veikoje [33].

2015 metais pademonstruotas $>0,5$ W galios lazeris, spinduliuojantis plačiame 2-2,5 μm bangos ilgių diapazone [35].

2018 metais pademonstruotas 2W galios diodinis lazeris, spinduliuojantis 2,1 – 2,3 μm bangos ilgio diapazone nuostoviojoje veikoje [32].

- (2) $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ kietakūniai lazeriai. Ši lazerių rūšis yra geriausiai ištyrinėta moksle ir rinkoje. Nuo 1962 m. ankstyvosios lazerio sukūrimo fazės iki šių dienų išbandyta daugybė matricių. Geriausių rezultatų pasiekta su YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), YLF (YLiF_4), KYW ($\text{KY}(\text{WO}_4)_2$), KLu ($\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$), YAP (YAlO_3), LiLuF (LiLuF_4) matricomis. Pradžioje kaupinta plataus spektro lempomis, todėl norint padidinti sugerties efektyvumą, Tulis ir Holmis legiruoti kartu vienoje matricioje su iterbio ir chromo jonais. Devintajame dešimtmetyje atsiradę GaAlAs lazeriniai diodai po trumpų išstūmė neefektyvų lempinį kaupinimą. Atsiradus diodiniam kaupinimui, nebebuvo būtinybės matricas legiruoti abiem Tulio ir Holmio jonais. Taip atsiskyrė ir išryškėjo šių retųjų jonų savybės įvairiuose lazeriuose [28].

Nuostoviojoje veikoje pasiekta įspūdinga vidutinė galia 240 W Tm:YAG lazeryje [36] ir net 885 W tulio šviesolaidiniame lazeryje [37].

Aktyvios kokybės moduliacijos Ho:Tm:LuLF lazeryje pasiekta $>1\text{J}$ impulso energija [38].

Modų sinchronizacijos veikoje Tulio šviesolaidiniai lazeriai generuoja 27 fs trukmės ir 156 μJ impulsus [39].

Pasyvios kokybės moduliacijos veikoje nuo 2002 metų pademonstruota daug įvairių diodais kaupinamų lazerių konfigūracijų [15-22]. Tm:YLF lazeryje sugeneruota 4,22 mJ energijos ir 26 ns trukmės impulsai, Tm:YAP lazeryje efektyviai sugeneruoti 0,6 mJ energijos impulsai prie 15 kHz pasikartojimo dažnio [25]. Tm:KY(WO_4)₂ lazeryje sugeneruoti trumpi 8ns trukmės impulsai [19].

- (3) $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ kietakūniai lazeriai veikia 1.9 - 3.5 μm bangos ilgio diapazone, tačiau jiems reikalingas kaupinimas 1.5–1.9 μm srityje [40].
- (4) Nd:YWO₄ lazeriu kaupinamas periodiškai polinto ličio niobato osciliatorius gali būti 2-jų mikronų lazerinis šaltinis [41], tačiau toks šaltinis gali būti sudėtingas ir brangus.

2.3.1. Vėjo greičio matavimas, panaudojant doplerio lidaro sistemą

Koherentinė doplerio lidaro sistema emituoja vieno dažnio šviesos pluoštą ir detektuoja išsklaidytą šviesą, kurios dažnis yra pasikeitęs dėl doplerio efekto. Šviesą sklaido dulkės esančios ore. Absoliutus išsklaidytos šviesos doplerio poslinkis yra matuojamas panaudojant dvibangį maišymą. Maišoma grįžusi šviesa su spinduliuote osciliatoriuje. Osciliatoriaus spinduliuotė yra identiška emituotai spinduliuotei. Dvibangio maišymo metu sugeneruojama radijo bangų spinduliuotė, kuri yra detektuojama fotodetektoriumi. Detektuojama radijo bangų spinduliuotė suteikia informaciją apie doplerio poslinkį ir tuo pačiu radialinį vėjo greitį emituojančios spinduliuotės kryptimi.

Reikalavimai lazeriniam šaltiniui, kuris galėtų būti doplerio lidaro sistemoje [42] :

- „Akiai saugus“ bangos ilgis. Šis reikalavimas įgalina skenuoti visose erdvės vietose, kur gyvena žmonės, gyvūnai ir paukščiai nepažeidžiant pastarųjų akių.
- Impulsų trukmė 100-400 ns. Pakankamai ilgi impulsai reikalingi užtikrinti siaurą dažnių juostą, kad būtų galima tiksliai pamatuoti doplerio poslinkį.
- Impulsų pasikartojimo dažnis nemažesnis kaip keletas šimtų Hz, kad būtų galima vidurkinti impulsus ir išgauti pakenčiamą spartą.
- Labai stabilus osciliatorius, kad užtikrinti į lidarą sugrįžusios spinduliuotės koherentinį maišimą su emituotos spinduliuotės kopija.

Doplerio lidaro sistemos pavyzdys yra kompanijos „Coherent Technologies, Inc.“ produktas „WindTracer“, naudojantis 2,025 μm bangos ilgio, 2 mJ impulso energijos, 350 ns impulsų trukmės, 500 Hz pasikartojimo dažnio lazerinį šaltinį. Tokia sistema yra pajėgi pamatuoti vėjo greitį už 5km, skenuojant 4,6 laipsnių/sk. greičiu ir matuojant vėjo greitį kas 2,3 laipsnius.

2.3.2. Vibrometrija

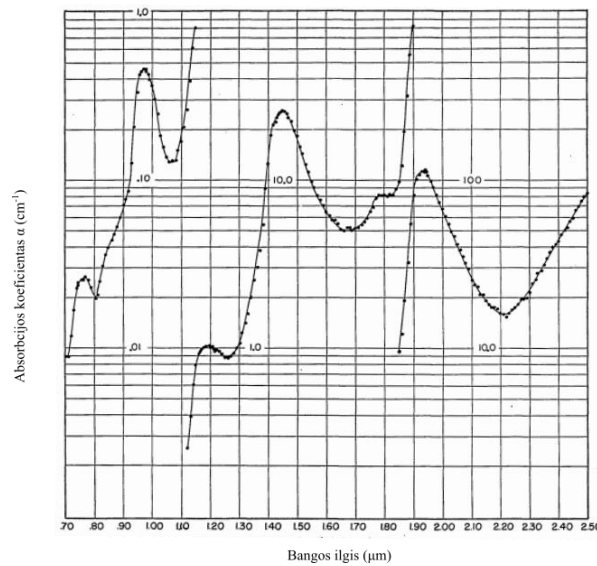
Vibrometrijoje naudojamas mikro-doplerio lidaras. Jo pagalba surandamos vibruojančios kietosios dalelės. Paprastai šių dalelių judėjimo greitis būna keli šimtai mikrometrų per sekundę. Matavimai yra naudingi ieškant struktūrinių defektų didelių matmenų ojektuose (pvz. tiltuose). Mikro-doplerio radaras naudoja koherentinę doplerio lidaro technologiją, panašią kaip vėjo greičio matavime. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad lazerinis siūstuvus veikia aukšto pasikartojimo dažnio režime. Dar gi pageidaujama trumpų impulsų, kad būtų tiksliau išmatuotas atstumas iki taikinio. Reikalavimų prieštara, atsirandanti trumpų impulsų poreikiui atstumo matavimui ir ilgų impulsų poreikiui greičio matavimui, išsprendžiama

panaudojant lazerinį šaltinį, emituojantį trumpų impulsų poras, kuriose impulsai yra atskirti vienas nuo kito keliais šimtais mikrosekundžių.

Vibrometrijoje taikytino lazerinio šaltinio pavyzdys yra 15 W, 2,1 mikrometro bangos ilgio Ho:YAG, 1-10 kHz lazerinis šaltinis. Aukšta Ho:YAG fluorescencijos trukmė įgalina didelės energijos impulsų generavimą, kai tuo tarpu kaupinama 1,94 μm nuostoviosios veikos Tm:YALO lazeriu [42].

2.3.3. Medicina

Vanduo stipriai sugeria elektromagnetinę spinduliuotę 2-jų mikronų bangos ilgio srityje. Ši savybė leidžia lazerius panaudoti medicinoje. Kaip galima matyti 2 pav., ties 1,94 μm bangos ilgiu yra vandens sugerties pikas $\alpha(1,94\mu\text{m}) = 114\text{cm}^{-1}$.



2 pav. Absorbcijos koeficientai vandenyje 20⁰C [2]

Pasinaudojus $I = I_0 e^{-\alpha x}$ išraiška, galime nesunkiai matyti, kad 1,94 μm spinduliuotė įsigeria į vandenį tik iki kelių šimtų mikrometrų gylio ($1/e^2$ aukštyje 175 μm). Dėl didelės sugerties vandenyje, kur pastarasis yra pagrindinė biologinių audinių sudedamoji dalis, pasiekiamas kaitinimas mažame tūryje. Tai leidžia preciziškai pjauti biologinius audinius. Dargi, kraujavimas pjaunant lazeriu yra lydymas krešėjimo, kas yra privalumas chirurginėse procedūrose [28].

Neurochirurgijoje, bronchoskopijoje, ginekologijoje, urologijoje ir bendrojoje chirurgijoje operacijos atliekamos nuostovios veikos lazeriu. Stubro operacijos ir atroskopinės chirurginės operacijos atliekamos su impulsinės veikos lazeriu. Dauguma operacijų yra atliekamos su Ho:YAG arba Tm:YAG lazeriu. Ho:YAG spinduliuoja 2,1 μm bangos ilgio spinduliuotę, o Tm:YAG lazeris 2 μm . Kadangi vandens sugertis yra didesnė prie 2 μm , tai Tm:YAG spinduliuotė įsiskverbia tik 100 μm į audinį, kai tuo tarpu Ho:YAG spinduliuotė įsiskverbia 300 μm .

Ho:YAG lazeriai naudojami akmenų skaldymui inkstuose, kadangi 2,1 μm bangos ilgis sukelia didesnį foto terminį efektą nei 2 μm [28].

2.3.4. Lidarai

Lidas yra labai panašus į radarą prietaisas. Lidaras, skirtingai nuo radaro, naudoja koherentinį spinduliuotės šaltinį 0,2-12 μm bangos ilgių diapazone. Kadangi lidarai naudoja daug mažesnio ilgio bangas nei radarai, jie gali išgauti didesnį tikslumą ir rezoliuciją. Tačiau atmosferinis pralaidumas riboja šių prietaisų panaudojimą. Lazerinio šaltinio spektras turi sutapti su atmosferiniais pralaidumo langais. Artimojoje infraraudonojoje srityje (0,8-2,5 μm) sugertį lemia vandens garai ir CO₂ dujos. Tačiau Maksimalus pralaidumas atmosferoje priklauso nuo aerolio koncentracijos ir sudėties. Didėjant spinduliuotės bangos ilgiui, aerolio sugertis mažėja [43].

Reikalaujama, kad lazeriniai šaltiniai lidaruose būtų saugūs akiai. Elektromagnetinis bangos, kurių ilgis yra artimas 2-iems mikronams (2 μm), yra priskiriamos „akiai saugiam“ elektromagnetinių bangų diapazonui. Lazerinės sistemos, emituojančios ilgesnę nei 1,4 mikrono (>1,4 μm) bangos ilgio spinduliuotę, laikomos „Akiai saugiom“, nes šviesa šiame bangos ilgio diapazone yra daugiausiai sugerama žmogaus akies ragenoje ir nepasiekia žymiai jautresnės tinklainės. Dėl šios savybės 1,5 μm Erblio lazeris arba 2 μm Tulio ir Holmio lazeriai yra mažiau žmogaus akiai pavojingi, nei 1 μm panašios galios lazeriai. Iš kitos pusės, esant ilgesniam bangos ilgiui (ypatingai netoli 3 μm ir 10 μm), sugertis ragenoje labai padidėja (sugerties atstumas ragenoje <0,1mm). Tai reiškia, kad optiniai impulsai šiame bangos ilgio diapazone yra sugeriami ragenoje labai ploname sluoksnyje, ko pasekoje ragena gali būti pažeidžiama [44].

2.4. Pasyvioji kokybės moduliacija

Pasyviajai kokybės moduliacijai reikalingas elementas, kurio pralaidumas priklausytų nuo spinduliuotės srauto. Pasyvios kokybės modulatoriaus medžiagos pralaidumas padidėja, padidėjus fotonų srautui. Tokią medžiagą patalpinus į rezonatorių, ji absorbuoja spinduliuotę, kai spinduliuotės srautas santykinai nedidelis. Kaupinimo metu stiprinimui padidėjus ir viršijus nuostolius rezonatoriuje, spinduliuotės srautas greitai didėja ir pasyvios kokybės modulatorius praskaidrėja. Tai lemia mažesnius nuostolius rezonatoriuje, ko pasekoje sugeneruojamas didelės energijos impulsas.

Kadangi pasyvi kokybės moduliacija yra reguliuojama pačios lazerinės spinduliuotės, todėl ją naudojant nereikia aukštos įtampos šaltinio, greitų elektro-optinių valdiklių ir valdymo signalo generatoriaus. Kaip alternatyva aktyviajai kokybės moduliacijai, pasyvioji kokybės moduliacija lazeriui suteikia tokias charakteristikas kaip paprastas dizainas, maži matmenys, patikimumas, mažesnė kaina. Tačiau taikant pasyviają kokybės moduliaciją nėra galimybės pasinaudoti išoriniu jungikliu. Taip pat, pasyvus kokybės modulatorius prie didelio fotonų srauto nepraskaidrėja visiškai, o tai reiškia likutinius absorbcijos nuostolius.

Pirmieji įsisotinantis sugėrikliai buvo organiniai dažai, ištirpdyti organiniame tirpiklyje arba impregnuoti plonu sluoksniu celiuliozės acetate. Tačiau šie dažai pasirodė esantys jautrūs šviesai ir neilgaamžiai, dargi jie prastai veikia prie aukštesnės temperatūros. Pasyvios kokybės moduliacijos lazerių vystymąsi paspartino kristalų, legiruotų spinduliuotę sugeriančiais jonais, atsiradimas. Šie kristalai pasižymėjo didesniu ilgaamžiškumu ir patikimumu. Pirmoji tokio tipo pasirodžiusi medžiaga buvo $F_2:LiF$ kristalas su spalviniais centrais. Spalviniai centrai kristaluose yra sukuriami apšaudant juos gama spinduliais, elektronais arba neutronais. Šiuo metu dažniausiai pasitaikanti pasyvios kokybės moduliacijos medžiaga yra $Cr^{4+}:YAG$. Cr^{4+} jonai pasižymi dideliu sugerties skerspjūviu lazerinės spinduliuotės dažnių diapazone, o YAG kristalas suteikia geras chemines, termines ir mechanines savybes, kurios yra būtinos ilgaamžiškumui.

Kad medžiaga būtų tinkama pasyviai kokybės moduliacijai, jos sugerties skerspjūvis žemutiniame lygmenyje turi būti aukštas, o aukštesniojo energijos lygmens gyvavimo trukmė turi būti pakankamai didelė, kad lazerinė spinduliuotė užtikrintų žemutinio lygmens nuskurdinimą. Kai sugėriklis yra įdedamas į rezonatorių, jis yra neskaidrus tol, kol fotonų srautas nepasidarys pakankamai didelis, kad nuskurdintų žemutinį lygmenį. Kai viršutinis lygmuo yra pakankamai užpildytas, sugėriklis tampa

skaidrus lazerio spinduliutei. Ši būseną yra labai panaši kaip pasiekus visišką užpildos apgrąžą trijų lygių lazerinėje medžiagoje [45].

Iš reakcijos lygčių sprendinių apskaičiuojama absorbcijos koeficiento priklausomybė nuo intensyvumo [46]:

$$\alpha(E) = \frac{\alpha_0}{1 + E // E_s}, \quad (1)$$

Čia α_0 yra silpno signalo absorbcijos koeficientas, o E_s yra srautas, kuriam esant pradeda įsisotinti sugėriklis:

$$E_s = h\nu / \sigma_{gs}, \quad (2)$$

Kur σ_{gs} yra absorbcijos skerspjūvis žemutiniame lygmenyje.

Svarbios pasyvios kokybės modulatoriaus, arba kitaip įsisotinančio sugėriklio, savybės yra pralaidumas prie mažo srauto T_0 , srautas E_s , kuriam esant sugėriklis pradeda įsisotinti, maksimalus pralaidumas T_{\max} praskaidrėjus sugėrikliui. Sugėriklio pralaidumas, esant mažam signalui:

$$T_0 = \exp(-\alpha_0 l_s), \quad (3)$$

kur l_s yra sugėriklio ilgis. Norint paskaičiuoti Pralaidumo T_i priklausomybę nuo fotonų srauto, reikėtų įvertinti, kad fotonų srautas ir sužadintų jonų tankis yra funkcija, priklausanti nuo koordinatų (lokalizacijos) sugėriklyje. Panašiai kaip impulsų stiprinimo atveju, reikėtų spręsti Franz-Nodvik diferencialinę lygtį. Čia idealaus sugėriklio energijos pralaidumas T_i yra funkcija nuo įeinančio srauto:

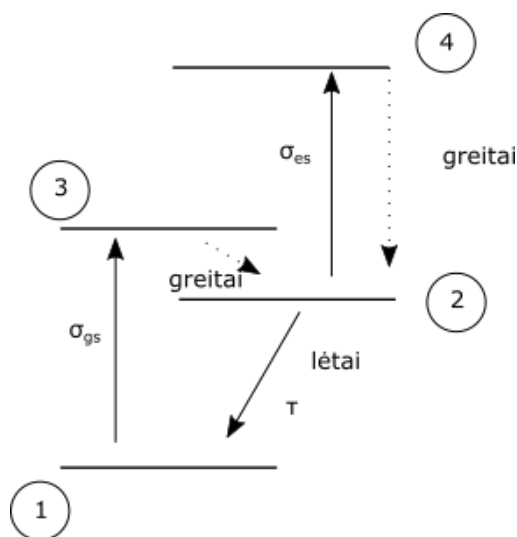
$$T_i = \frac{E_s}{E_i} \ln[1 + (e^{E_i/E_s} - 1)T_0]. \quad (4)$$

Lygtis 3.4 tampa $T_i = T_0$, kai $E_i \ll E_s$. Tai galime patikrinti:

$$\frac{E_i}{E_s} = x \Rightarrow T_i = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\ln(1 + (e^x - 1)T_0)}{x} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{(\ln(1 + (e^x - 1)T_0))'}{x'} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{e^x T_0}{1 + (e^x - 1)T_0} \right) = T_0 \quad (5)$$

Lygtis 3.4 tampa $T_i = 1$, kai $E_i \gg E_s$.

Praktikoje pasyvios kokybės modulatoriai niekada nepasiekia 100% pralaidumo. To priežastis yra fotonų sugertis sužadintame lygmenyje. Pasyvios kokybės moduliacijos sąlyga yra nuskurdintas žemutinis energijos lygmuo, tačiau dauguma medžiagų sugeria ir sužadintame lygmenyje. Tai yra iliustruota 3 paveikslėlyje, kur sužadinimas vyksta iš lygmens nr.2 į lygmenį nr. 4. Sugetis sužadintame lygmenyje lemia likutinius nuostolius rezonatoriuje, kai žemutinis lygmuo yra visiškai nuskurdintas. Lygmuo nr. 2 nėra nuskurdinamas dėl greitos relaksacijos lygmenyje nr. 4. Įsisotinantis sugėriklis yra naudingas pasyviai kokybės moduliacijai tik tada, kai $\sigma_{gs} > \sigma_{es}$



3 pav. Įsisotinancio sugėriklio energijos lygmenų schema, kur σ_{gs} ir σ_{es} yra atitinkamai žemutinio ir sužadinto lygmenų absorbcijos skerspjūviai, o τ -sužadinto lygmens gyvavimo trukmė

Neidealus sugėriklio pralaidumas gali būti aproksimuotas tokia išraiška:

$$T_n = T_0 + \frac{T_i - T_0}{1 - T_0} (T_{\max} - T_0), \quad (6)$$

kur T_i yra idealaus sugėriklio pralaidumas (žr. 4 formulę), o T_0 ir T_{\max} yra minimalus ir maksimalus pralaidumas.

Labiausiai paplitusi pasyvios kokybės moduliacijos medžiaga yra $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. Jos sugerties skerspjūvis žemutiniame lygmenyje yra $\sigma_{gs} = 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, o sužadintame $\sigma_{es} = 2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$. Sugėriklis pradeda sotintis prie srauto $E_s = 27 \text{ mJ} / \text{ cm}^2$.

Duotam kaupinimui arba lazerinės medžiagos stiprinimui, egzistuoja optimalus išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientas R ir neįsisotinusio sugėriklio pralaidumas T_0 . Kaip apskaičiuoti optimalius R ir

T_0 , kai žinomas lazerinis stiprinimas G_0 , kad lazeris generuotų didžiausios energijos impulsus, pateikta literatūroje [7]. Iš pradžių visi trys R , T_0 , G_0 dydžiai yra sunormuojami:

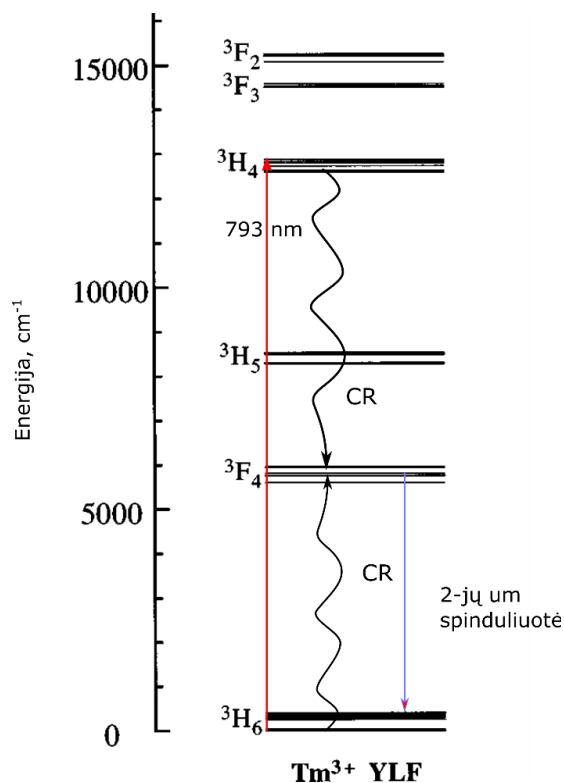
$$x = \frac{1}{\delta} \ln\left(\frac{1}{R}\right), \quad y = \frac{-\ln T_0}{\ln(G_0)}, \quad z = \frac{\ln G_0^2}{\delta}, \quad \delta = \delta_R + 2\sigma_{es} n_g l_s. \quad (7)$$

Tada surandamas lazerinės medžiagos stiprinimas G_0 ir optiniai nuostoliai δ_R . Gamintojas turėtų pateikti kristalo optinį tankį, kuriuo pasiremiant galima suskaičiuoti n_g ir δ . Žinant šiuos parametrus, galima apskaičiuoti z parametą ir pateiktame grafike [7] surasti x ir y parametų vertes. Tada optimalus išvadinio veidrodžio atspindys ir modulatoriaus optimalus pralaidumas:

$$R_{opt} = \exp(-x_{opt} \delta), \quad T_{opt} = \exp(-y_{opt} \ln G_0). \quad (8)$$

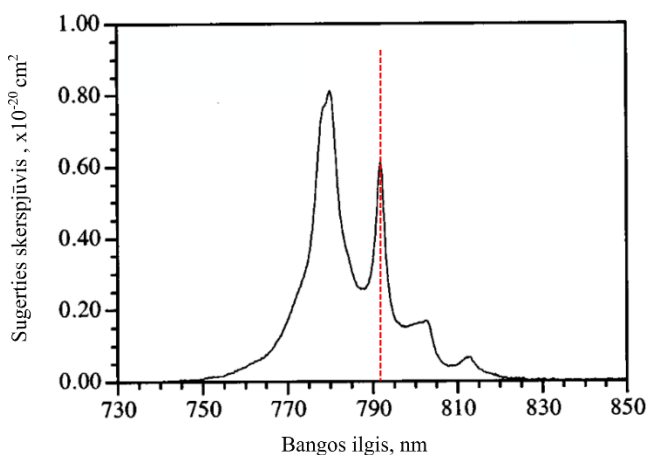
2.5. Spinduliuotės sugertis ir emisija Tm:YLF kristale

4 pav. pavaizduota Tm³⁺ jonų energetinė diagrama YLF matricoje [28, 46]. Joje galime matyti, kad tulio jonai gali būti sužadinti kaupinant 793nm bangos ilgio spinduliuote į ³H₄ energetinį lygmenį. Tada pasireiškia kryžminės relaksacijos (CR) procesas, kuris įvyksta tarp dviejų gretimų tulio jonų. Vykstant šiam nespinduliniam procesui, iš vieno tulio jono elektronas nurelaksuoja iš energetinio lygmens ³H₄ į energetinį lygmenį ³F₄, kai tuo tarpu kitame tulio jone elektronas sužadinas iš energetinio lygmens ³H₆ į energetinį lygmenį ³F₄. Šis procesas lemia dviejų sužadintų tulio jonų atsiradimą iš vieno kaupinimo fotono. Šio proceso kvantinis našumas yra artimas 2-iems. Kryžminės relaksacijos efektyvumas priklauso nuo lazerinės medžiagos legiravimo koncentracijos, kadangi šį procesą lemianti dviejų dipolių sąveika priklauso nuo atstumo tarp tulio jonų [28].

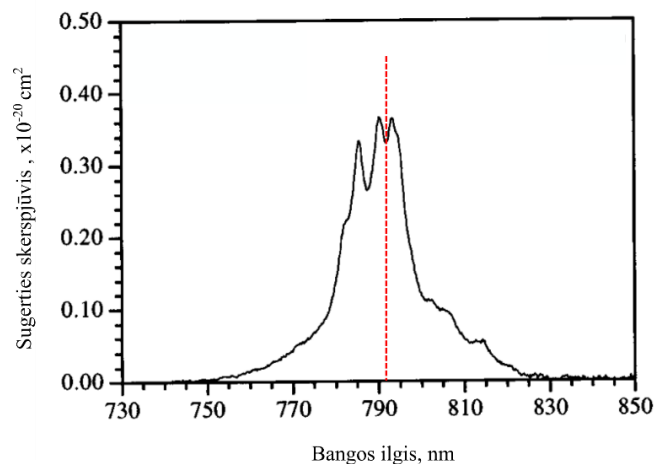


4 pav. Energijų diagrama Tm:YLF kristale

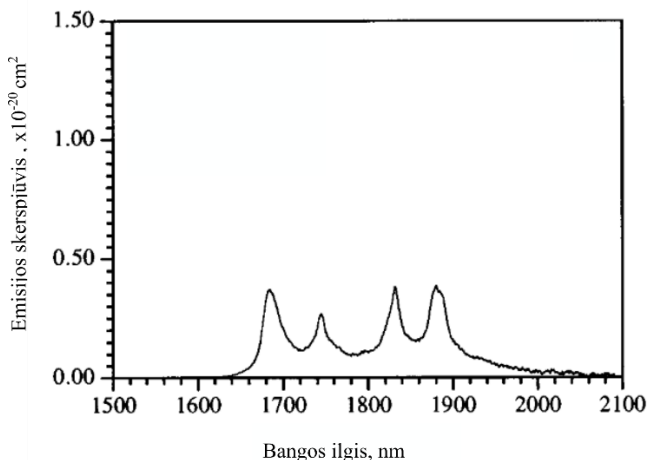
Kadangi YLF kristalas yra vienašis, jame pasireiškai sugerties skerspjūvio priklausomybė nuo poliarizacijos krypties. 5-ame ir 6-ame paveiklėliuose pavaizduota išmatuota sugerties skerspjūvio priklausomybė nuo bangos ilgio, kai elektronas tulio jone yra sužadinamas iš energetinio lygmens 3H_6 į lygmenį 3H_4 atitinkamai π ir σ poliarizacijoms. 7-ame ir 8-ame paveiklėliuose pavaizduota išmatuota emisijos skerspjūvio priklausomybė nuo bangos ilgio, kai elektronas tulio jone nurelaksuoja iš energetinio lygmens 3F_4 į lygmenį 3H_6 atitinkamai π ir σ poliarizacijoms [47].



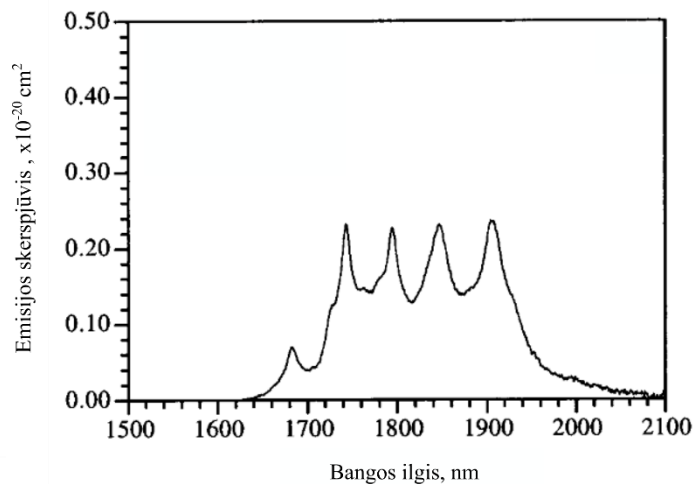
5 pav. Sugerties skerspjūvio iš lygmens 3H_6 į lygmenį 3H_4 priklausomybė nuo bangos ilgio π poliarizacijai



6 pav. Sugerties skerspjūvio iš lygmens 3H_6 į lygmenį 3H_4 priklausomybė nuo bangos ilgio σ poliarizacijai



7 pav. Emisijos skerspjūvio iš lygmens 3F_4 į lygmenį 3H_6 priklausomybė nuo bangos ilgio π poliarizacijai



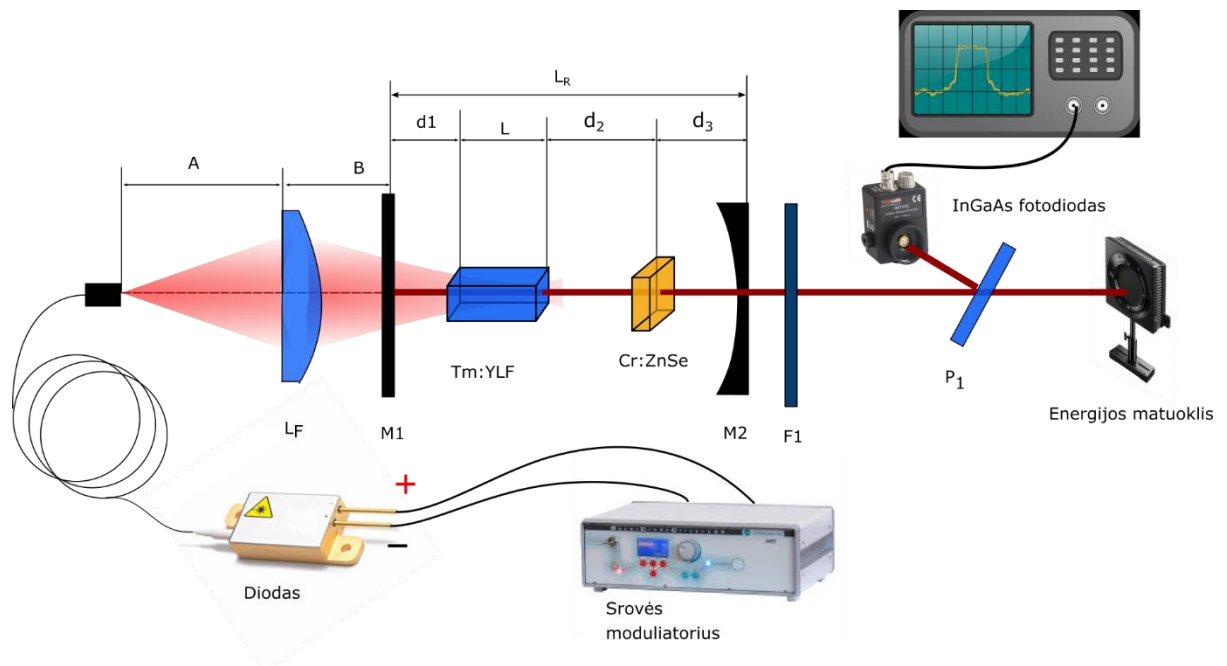
8 pav. Emisijos skerspjūvio iš lygmens 3F_4 į lygmenį 3H_6 priklausomybė nuo bangos ilgio σ poliarizacijai

3. Eksperimentų metodai ir schemos

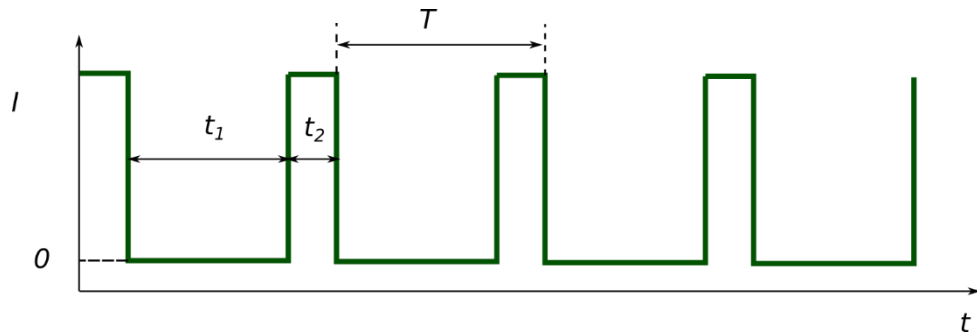
3.1. Kokybės moduliacijos veikoje veikiančio lazerio schemos

Pagrindinė eksperimentinė schema pavaizduota 9 pav. Ji susideda iš srovės modulatoriaus, kaupinimo diodo su šviesolaidiniu išvedimu, kaupinimo spinduliuotę fokusuojančio lęšio L_F , įvadinio veidrodžio $M1$, Tm:YLF kristalo, pasyvaus kokybės modulatoriaus Cr:ZnSe, išvadinio veidrodžio $M2$, Silicio filtro $F1$, optinio langelio P_1 , energijos matuoklio, InGaAs foto diodo, prijungto prie oscilografo. Detalias šių elementų specifikacijas žiūrėkite lentelėje nr. 2.

Srovės modulatorius valdo srovę, tekančią per kaupinimo diodą. Į diodą paduodamos srovės laikinė forma pavaizduota 10 pav. Laiko atkarpa t_1 srovė neteka ir laiko tarpą t_2 teka srovė I . Eksperimento metu srovės modulatoriumi buvo keičiami parametrai t_1 ir t_2 ir srovės stipris I . Taip pat buvo keičiami atstumai A ir B bei sugėriklio padėtis rezonatoriuje (atstumai d_2 ir d_3).



9 pav. Principinė lazerio, veikiančio impulsiniame režime, schema. Pažymėta: A – atstumas tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio L_F , B – atstumas tarp fokusuojančio lęšio L_F ir įvadinio veidrodžio $M1$, d_1 – atstumas nuo įvadinio veidrodžio $M1$ iki Tm:YLF kristalo briaunos, L – Tm:YLF kristalo ilgis, d_2 – atstumas tarp kristalo briaunos ir Cr:ZnSe pasyvaus kokybės modulatoriaus, d_3 – atstumas tarp Cr:ZnSe pasyvaus kokybės modulatoriaus ir išvadinio veidrodžio $M2$, L_R – atstumas tarp veidrodžių $M1$ ir $M2$, F_1 – silicio filtras, P_1 – neskaidrintas langelis.



10 pav. Srovės moduliatoriumi periodiškai keičiama diodu tekanti srovė I . Pažymėta: t_1 – Laiko tarpas, kai srovė neteka, t_2 – laiko tarpas, kai teka srovė I , T – moduliacijos periodas $T=t_1+t_2$.

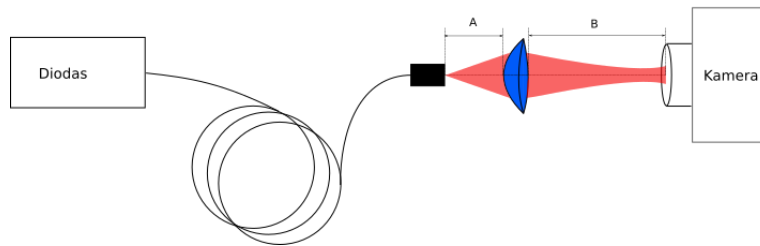
Elementas	Charakteristikos
Srovės moduliatorius	Modelis : IB Photonics Ltd., modelis LDPPS 200. Srovės priekinio/užpakalinio fronto trukmė: 50-2500ns.
Kaupinantis diodas	Modelis BWT, K793DAERN, Bangos ilgis 793 nm, šviesolaidžio šerdies storis 105 μm , Skaitinė apertūra 0,22.
Asferinis lęšis L_F	Modelis Thorlabs 354240-B, židinio nuotolis $f=8\text{mm}$, AR dangos ant abiejų paviršių: 600-1050nm.
Veidrodis M1	Abu veidrodžio paviršiai S1 ir S2 plokšti. Veidrodžio paviršius S1 padengtas danga HR@1850-1950 nm + HT@793nm (atspindžio koef. $R>99,7\%$ @1850-1950nm, $R<2,4\%$ @793nm). Veidrodžio paviršius S2 padengtas danga AR@793nm (atspindžio koef. $R<0,1\%$ @793nm)
Tm:YLF kristalas	Kristalo matmenys: 3x3x12mm. Kristalas legirtuotas 4% Tulio jonų. Kristalas išpjautas a-cut kryptimi. Abu kristalo paviršiai padengti dangomis AR@793+1910nm.
Cr:ZnSe sugėriklis	Matmenys: 2x2x0,693 mm. Gamintojo specifikuojamas pradinis pralaidumas $T_i=89\%$.
Veidrodis M2	Veidrodžio paviršiaus S1 kreivumo spindulys $R=300\text{mm}$, o paviršius S2 plokščias. S1 paviršius padengtas danga PR@1850-1950 (atspindžio koef. $R=80\%$ @1850-1950nm). Paviršius S2 padengtas danga AR@1850-1950nm.
Filtrai F1	Silicio filtras, padengtas AR dangomis 1850-1950nm diapazonui. Filtrai nepraleidžia spinduliuotės, kurios bangos ilgis $<1\mu\text{m}$.
Langelis P_1	Kvarcinio stiklo langelis be dangų.
Energijos matuoklis	Modelis – ophir PE50-DIF-C, piroelektrinis veikimo principas, spektrinis diapazonas 0,19-2,94 μm , energijos diapazonas 20 μJ - 10J.
InGaAs foto-diodas	Modelis – Thorlabs DET10D, spektrinis diapazonas 1,2-2,6 μm , priekinio ir užpakalinio fronto trukmė $<25\text{ns}$.
Oscilografai	Modelis – Rigol DS4034, dažnių juosta 350 MHz.

2. Lentelė. Prietaisų ir optinių elementų, panaudotų schemoje 4 pav., charakteristikos

3.2. Lazerį kaupinančio pluošto tyrimo schema.

Lazerį kaupinančio pluošto tyrimo schema pavaizduota 11 pav. Keičiant atstumą A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio, CCD kamera registruojamas pluošto profilis ir diametras $1/e^2$ aukštyje, esant skirtingiems atstumams B tarp lęšio ir CCD kameros sensoriaus.

CCD kameros modelis Dataray-WinCamD-UCD12, spektrinis diapazonas 355-1150nm, pikselio dydis 4,65 μm , išlaikymo trukmės diapazonas 40 μs -1000 ms.



11. pav. Diodo kaupinimo pluošto diametro matavimo schema. Matuojamas pluošto diametras keičiant atstumą A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio bei atstumą B tarp fokusuojančio lęšio ir CCD kameros sensoriaus.

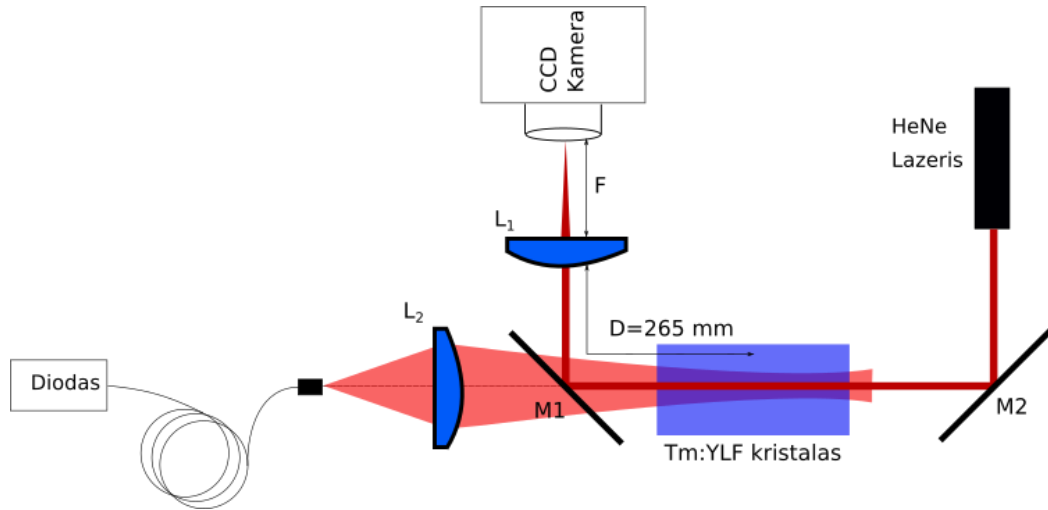
3.3. Principinė termolęšio matavimo schema.

Principinė termolęšio matavimo schema parodyta 12 pav. Tarp diodo spinduliuotę fokusuojančio lęšio L2 ir Tm:YLF kristalo pastatytas veidrodis M1 (žr. 2-ą lentelę), pasuktas 45 laipsnių kampų. Diodo spinduliuotė fokusuojama į kristalo centrą. HeNe lazerio pluoštas nukreipiamas į veidrodį M2, kuris pluoštą nukreipia į kristalo centrą. HeNe lazerio pluoštui perėjus kristalą, dalis pluošto atsispindi nuo veidrodžio M1 ir sklinda iki lęšio L1, kurio židinio nuotolis $f_1=100$ mm. Lęšis fokusuoja HeNe lazerio pluoštą atstumu F. Fokuso pozicija yra nustatoma stumdant CCD kamerą išilgai optinės ašies ir ieškant HeNe lazerio pluošto fokuso vietos. Termolęšio židinio nuotolį randame pasinaudoję tokia išraiška:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2}, \quad f_2 = \frac{f_1 - D}{\frac{f_1}{F} - 1}$$

F – efektinis židinio nuotolis. f_1 – lęšio L1 židinio nuotolis. f_2 – termolęšio židinio nuotolis. D-optinis kelias tarp kristalo centro ir L1 lęšio lygus 265 mm.

HeNe lazerio modelis Thorlabs-HNL050LB, bangos ilgis 632.8 nm, divergencija 1,7 mrad.



12 pav. Tm:YLF kristale susidarančio termolęšio matavimo schema. Pažymėta: L_2 - kaupinimo pluoštą fokusuojantis lęšis, M1- įvadinis rezonatoriaus veidrodis, pasuktas 45 laipsnių kampū, L_1 - 100 mm židinio nuotolio lęšis, M2- Sidabrinis veidrodis, D- optinis kelias tarp lęšio L_1 ir Tm:YLF kristalo centro.

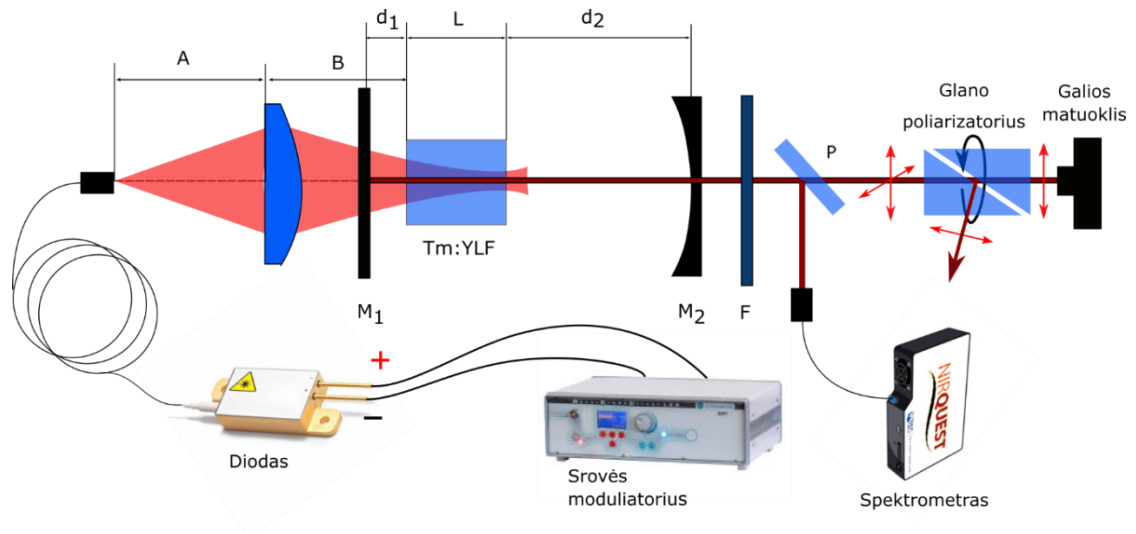
3.4. Nuostoviojoje veikoje veikiančio lazerio schemas

Nuostoviojoje veikoje veikiančio lazerio schema pavaizduota 13 pav. Srovės moduliatoriumi keičiant tekančios per diodą srovės parametrus (t_1 ir t_2), fokusavimo parametrus A ir B, atstumą d_2 ir glano poliarizatoriaus kampą, fiksuojama lazerio išvadinė galia matuoklyje. Galios matuoklio modelis Ophir 3A, galios matavimo diapazonas $10\mu\text{W}$ -3W, spektrinis diapazonas 0,19-20 μm .

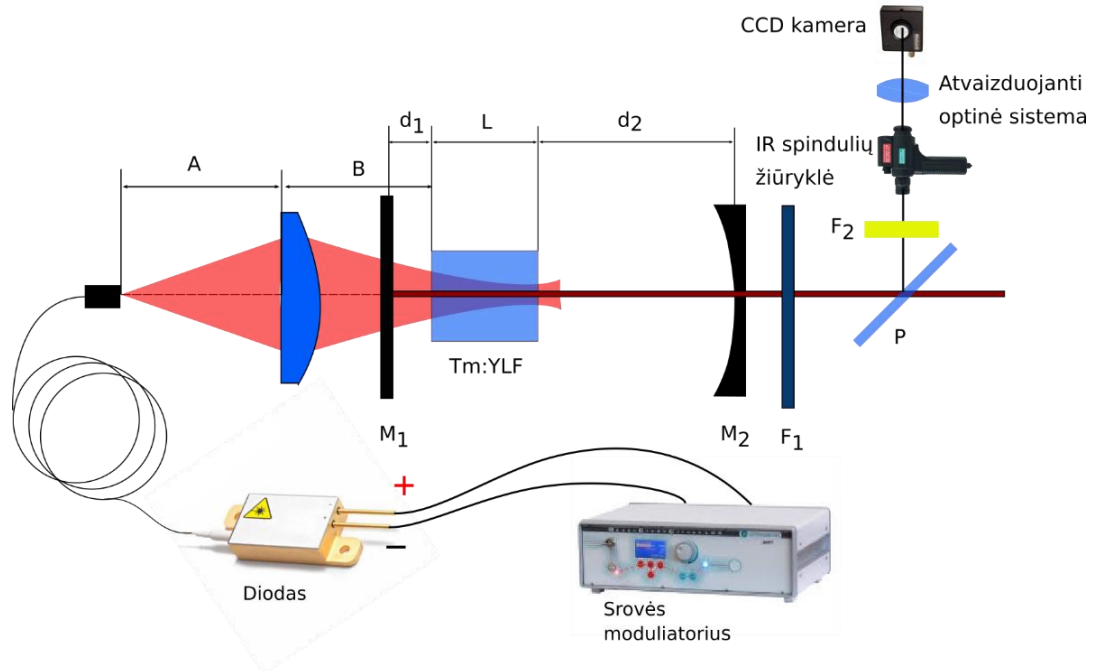
Spinduliuotės spektras registruojamas Ocean Optics NIRQuest – NQ512-2.5 modelio spektrometru. Spektrometro bangos ilgių diapazonas 900-2500 nm, rezoliucija 6,3nm (FWHM). Registruota su 1ms išlaikymo trukme.

Pluošto profilio registravimo schema pavaizduota 14 pav. Su pleištu P atskėlus dalį lazerio spinduliuotės, ji nukreipiama į juostinį filtrą F_2 . Lazerio spinduliuotei praėjus filtrą, ji patenka į infraraudonųjų spindulių žiūryklę. Spindulių žiūryklėje patekusi infraraudonoji spinduliuotė yra pakeičiama regimojo diapazono spinduliuote. Vėliau optinė sistema atvaizduoja matomąją spinduliuotę į CCD kamerą. Profilis registruojamas, kai rezonatoriaus parametrai $d_1=10\text{ mm}$, $d_2=35\text{mm}$.

Filtro F2 modelis Thorlabs-FB2000-500, jo pralaidumas 80% @ 1800-2200nm). Infraraudonųjų spindulių žiūryklės modelis ADOS-TECH- SM3R-2000-1, spektrinis diapazonas 350-2000nm, didinimas 1.8x.



13 pav. Nuostoviojoje veikoje veikiančio lazerio schema. Pažymėta: A-atstumas nuo šviesolaidžio galo iki fokusuojančio lęšio, B- atstumas nuo fokusuojančio lęšio iki Tm:YLF kristalo briaunos, d1- atstumas nuo įvadinio veidrodžio M1 iki kristalo briaunos, L- Tm:YLF kristalo ilgis, d2- atstumas nuo kristalo briaunos iki išvadinio veidrodžio M2, F- silicio filtras.



14 pav. Pluošto profilio registravimo schema. Pažymėta: A-atstumas nuo šviesolaidžio galo iki fokusuojančio lęšio, B- atstumas nuo fokusuojančio lęšio iki Tm:YLF kristalo briaunos, d1- atstumas nuo įvadinio veidrodžio M1 iki kristalo briaunos, L- Tm:YLF kristalo ilgis, d2- atstumas nuo kristalo briaunos iki išvadinio veidrodžio M2, F1- silicio filtras, P-pleištas pastatytas 45 laipsnių kampu, F2- juostinis filtras, praleidžiantis spinduliuotę 1750-2200nm srityje.

4. Rezultatai ir jų aptarimas

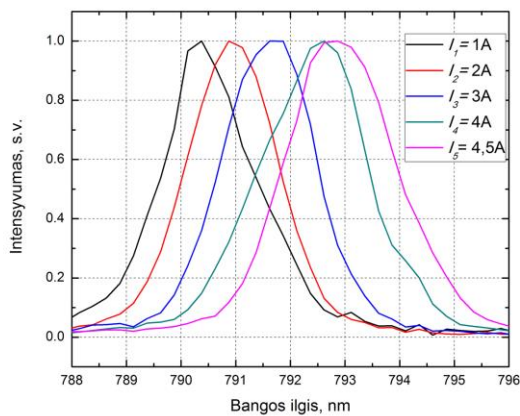
Šiame darbe buvo siekta sukurti kompaktišką, efektyvų, generuojantį 2-ųjų mikronų bangos ilgio nanosekundinius impulsus lazerį. Žvelgiant į literatūros apžvalgą 2.2. skyrelyje, prieš akis iškyla pasyvios kokybės moduliacijos 2-ųjų mikronų lazerių konfigūracijų pasirinkimas. Efektyvumo ir didelės impulsų energijos kriterijus geriausiai atitinka lazeris su Tm:YLF lazeriniu kristalu ir $Cr^{2+} : ZnSe$ pasyviu kokybės modulatoriumi [24]. Šią lazerinę medžiagą ir sugėriklį pasirinkta naudoti kuriant 2-ųjų mikronų lazerį šiame darbe. Detalios specifikacijos pateiktos 2-oje lentelėje 3.1. skyriuje.

Renkantis diodinį kaupinimą, buvo peržiūrėti Tm:YLF kristalo sugerties skerspjūviai (Žr 2.5. skyrelyje 5 ir 6 pav.). Kadangi kristalas yra dvejopai laužiantis, jo sugertis priklauso nuo kaupinančios spinduliuotės poliarizacijos. Kaupinančio diodo spinduliuotė gali būti dalinai poliarizuota. Labai patogu diodinį kaupinimą į kristalą atvesti per šviesolaidį, tačiau spinduliuotei sklindant šviesolaidžiu, spinduliuotė gali būti depoliarizuojama. Poliarizacijai išlaikyti turėtų būti nenaudojamas specialus poliarizaciją išlaikantis šviesolaidis. Kadangi siekta sukurti ekonomišką lazerį, kyla natūrali išvada kaupinti kristalą nepoliarizuota spinduliuote. Iš 5-o paveiklėlio matyti, kad π poliarizacijai egzistuoja du sugerties maksimumai ties 780 nm ir 793nm. Tačiau σ poliarizacijai tėra vienas sugerties maksimumas ties 793nm. Siekiant didesnio efektyvumo, pasirinkta kaupinti 793 nm bangos ilgiu, kad sugerties skerspjūvis būtų maksimalus abiem π ir σ poliarizacijoms..

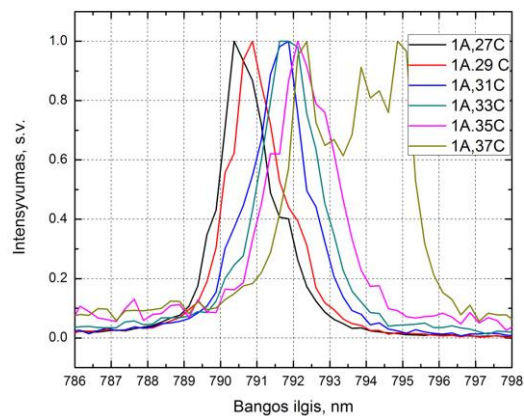
4.1. Kaupinimo spinduliuotės charakteristikos.

Pačioje eksperimento pradžioje buvo nuspręsta įsivertinti kaupinančio diodo spektrą, jo ampervatinę charakteristiką ir pluošto erdvinį pasiskirstymą, esant kelioms skirtingoms fokusavimo sąlygoms.

Kaupinimo pluošto tyrimui buvo surinkta 11 pav. aprašyta schema. Vėliau schemoje dar buvo panaudotas Ocean optics HR4000CG-UV-NIR modelio spektrometras. Išmatuotas kaupinančios spinduliuotės spektras ir jo priklausomybė nuo diodu tekančios srovės. Matavimų rezultatai pateikti 15-ame ir 16-ame paveikslėliuose. Juose matosi aiškiai, kad didinant diodo temperatūra arba srovę, spektras slenkasi į raudonąją pusę. Buvo pasirinktas temperatūros ir srovės darbinis taškas toks, kad diodo spektro maksimumas būtų artimas 793nm bangos ilgiui.

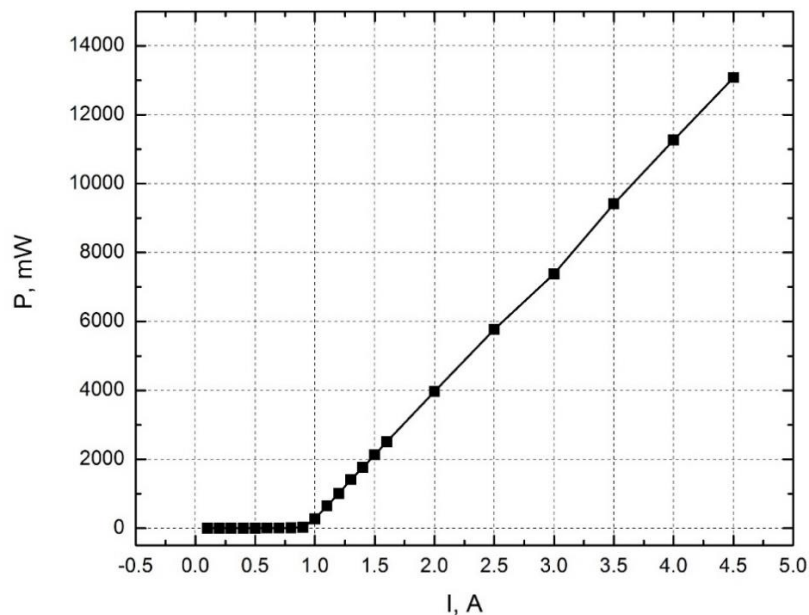


15 pav. Kaupinimo diodo spinduliuotės spektras, kai diodu tekančios srovės stipris $I_1=1A$, $I_2=2A$, $I_3=3A$, $I_4=4A$, $I_5=4,5A$. Diodo palaikoma temperatūra $28\text{ }^\circ\text{C}$. Matavimai atlikti su Ocean optics HR4000CG-UV-NIR modelio spektrometru

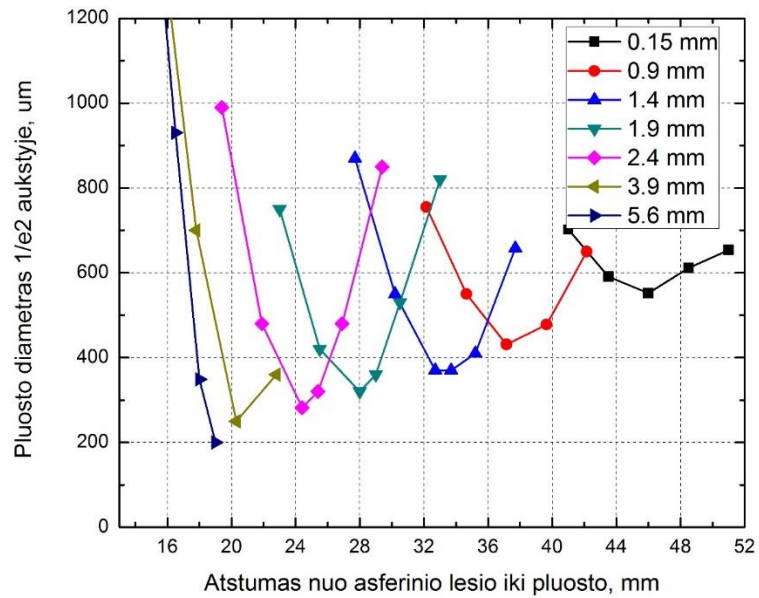


16 pav. Kaupinimo diodo spinduliuotės spektras, kai diodo temperatūra $T_1=27\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2=29\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3=31\text{ }^\circ\text{C}$, $T_4=33\text{ }^\circ\text{C}$, $T_5=35\text{ }^\circ\text{C}$, $T_6=37\text{ }^\circ\text{C}$. Diodu teka srovė, kurios stipris 1A. Matavimai atlikti su Ocean optics HR4000CG-UV-NIR modelio spektrometru

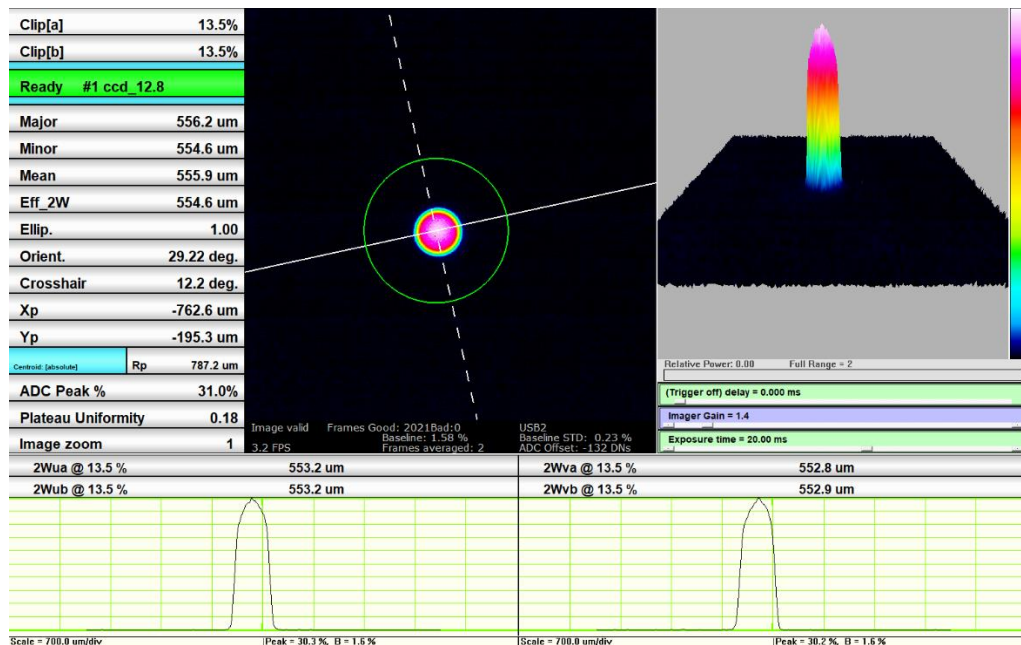
17-ame paveiklėlyje pateikta diodo ampervatinė charakteristika. Slenkstinė diodo srovė yra apie 1A. Diodo optinės galios priklausomybė nuo srovės yra tiesinio pobūdžio.



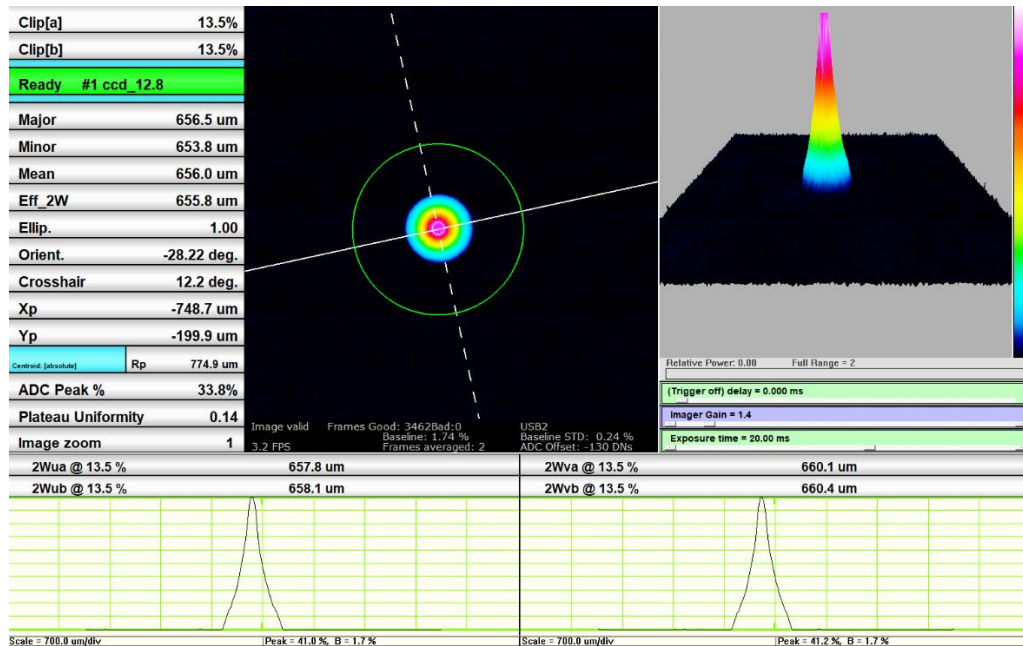
17 pav. Lazerį kaupinančio diodo ampervatinė charakteristika



18 pav. Išmatuota kaupinimo pluošto diametro $1/e^2$ aukštyje priklausomybė nuo atstumo B tarp fokusuojančio lęšio ir CCD kameros sensoriaus. Matavimai atlikti prie skirtingų atstumų A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio.



19 pav. Kaupinimo pluošto profilis atstumu B=46 mm nuo fokusuojančio lęšio, kai atstumas tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio A=0,15 mm. Matuota DataRay CCD kamera WinCamD UCD12. Kameros pikselio dydis 4.65 μm , spektrinis diapazonas nuo 355 iki 1150 nm.



20 pav. Kaupinimo pluošto profilis atstumu B=51 mm nuo fokusuojančio lęšio, kai atstumas tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio A=0,15 mm.

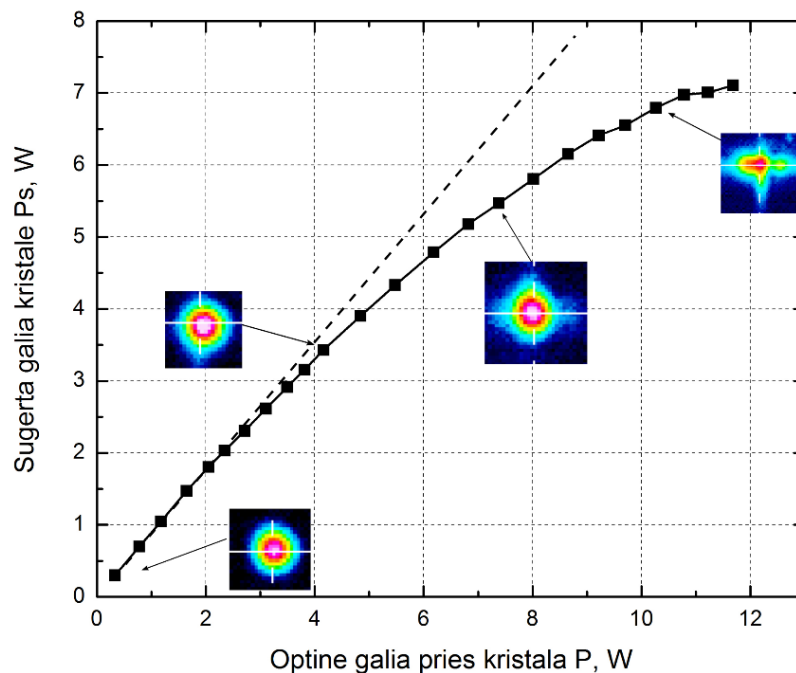
18-ame paveikslėlyje išmatuota kaupinimo pluošto diametro $1/e^2$ aukštyje priklausomybė nuo atstumo B tarp fokusuojančio lęšio ir CCD kameros sensoriaus. Matavimai atlikti prie skirtingų atstumų A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio. Matome, kad kai šviesolaidis yra arčiausiai fokusuojančio lęšio ($A = 0.15$ mm), pluošto diametras kinta intervale tarp $550\text{--}700\mu\text{m}$. Didinant atstumą A, pluoštas fokusuojamas aštriau.

Vėliau vykdant eksperimentus kvazi-nuostoviojoje veikoje, buvo optimizuojamas atstumas A, užtikrinantis didžiausią lazerio išvaidinę galią.

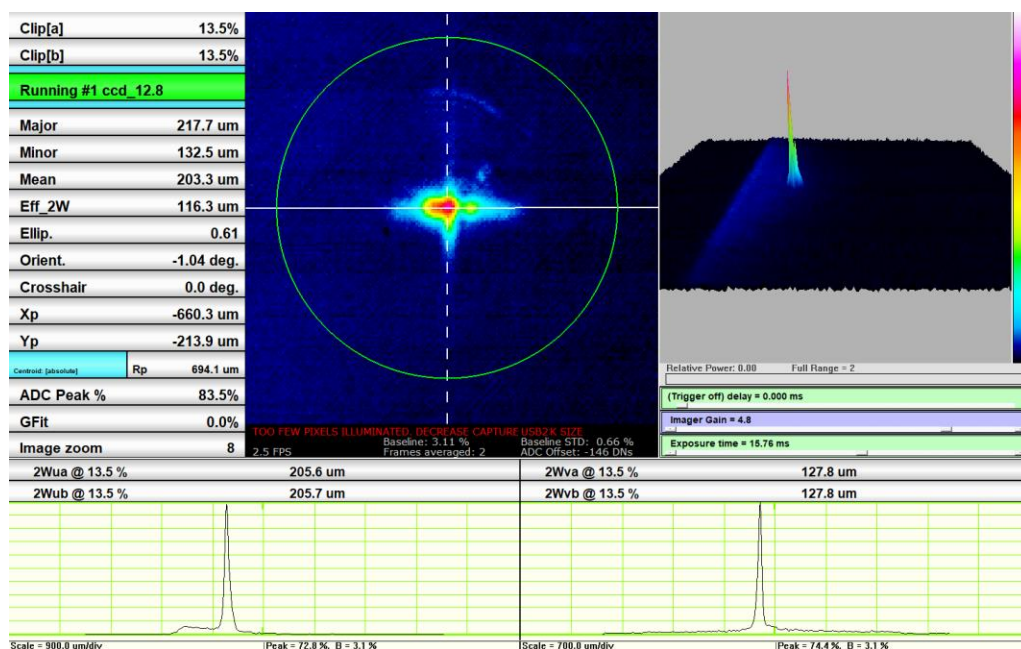
4.2. Kaupinimo spinduliuotės sugertis T_m :YLF kristale ir jame susidarantis termolėšis

Surinkus informaciją apie kaupinimo charakteristikas, nutarta ištirti kaupinimo spinduliuotės sugertį T_m :YLF kristale ir dėl šios sugerties atsirandantį termolėšį. Matavimo schema pateikta 12 pav.

Išmatuota sugertos T_m :YLF kristale kaupinimo spinduliuotės galios priklausomybė nuo kaupinimo diodo optinės galios pateikta 21 pav. Priklausomybė įgauna aiškų netiesinį pobūdį, kai kristalas sugeria $>3\text{W}$ kaupinimo spinduliuotės galios.



21 pav. Dujinio lazerio pluošto profiliai L1 židinio plokštumoje, kai kristalas sugeria skirtingą kaupinimo spinduliotės galią



22. pav. Dujinio lazerio pluošto profilis 100 mm lęšio židinio plokštumoje, kai kristalas sugeria 6,8 W kaupinančios optinės spinduliuotės

Išmatuotas termolėšis x ir y ašimis, naudojantis 3.3. skyriuje aprašyta schema ir metodika. Įvertintas termolėšio židinio nuotolis, pateiktas 3-ioje lentelėje. Pažymėtina, kad susidaręs termolėšis yra cilindrinis ir neigiamas abejomis ašimis.

Sugerta kaupinimo galia kristale, mW	Termolėšio židinio nuotolis x ašimi f_{2x} , mm	Termolėšio židinio nuotolis y ašimi f_{2y} , mm
6800	-1998	-5665
6400	-3165	-8415

3 Lentelė. Apskaičiuotas termolėšio židinio nuotolis x ir y ašims. Matavimai atlikti pagal 3.3. skyriuje išdėstytą metodiką.

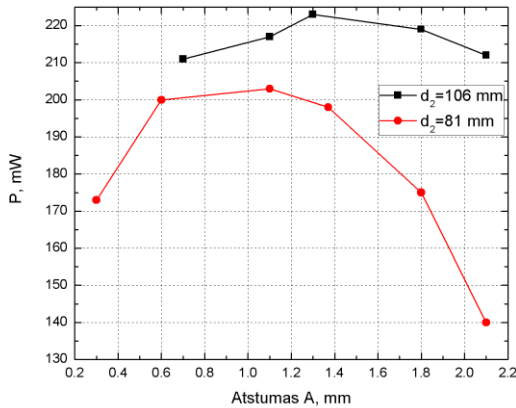
Užfiksuoti dujinio lazerio pluošto profiliai, jam prasklidus pro Tm:YLF kristalą, kai kristalas kaupinamas skirtingos galios kaupinančia spinduliuote. Dujinio lazerio pluošto profilio kitimo tendencija pavaizduota 21 pav. Kristalui sugeriant 6,8 W kaupinančios spinduliuotės, dujinio lazerio pluoštas įgauna nesimetrinę formą (žr. 22 pav.). Spėjama, kad šio reiškinių priežastis gali būti kristale atsiradęs kristalo centro atžvilgiu nesimetriškas temperatūrinis gradientas, kurį galėjo lemti kristalo varinio laikiklio konstrukcija.

4.3. Lazerio charakteristikos kvazi-nuostoviajame (CW) režime

Vėliau nutarta ištirti lazerio generaciją kvazi-nuostoviajame režime. Kvazi-nuostovusis režimas reiškia tokią lazerio veiką, kada diodas lazerį kaupina su pertraukomis pagal 10 pav. pateiktą laikinę charakteristiką.

Sustačius 13 pav. pateiktą schemą, išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo atstumo A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio, esant skirtingo ilgio rezonatoriams. Priklausomybė pateikta 23 pav. Joje galima įžvelgti, kad skirtingo ilgio rezonatoriams egzistuoja optimalus atstumas A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio, kuriam esant lazerio išvadinė galia didžiausia.

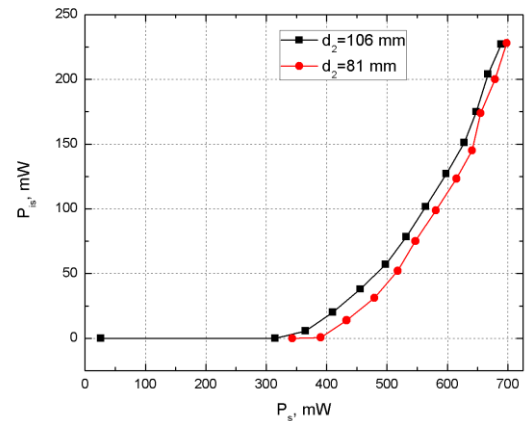
Vėliau optimizavus kaupinimo dėmę, buvo išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo kristale sugertos kaupinimo galios, esant skirtingo ilgio rezonatoriams. Priklausomybė pateikta 24 pav. Joje galime matyti, kad pasiektas 35% konversijos efektyvumas prie 700 mW kristalo sugerties. Lazeris generavo maksimaliai 230 mW galios spinduliuotę kvazi-nuostoviajame režime. Kadangi kaupinimo impulsų pasikartojimo dažnis yra 5 Hz, tai šioje veikoje sugeneruojamas 46 mJ energijos impulsai.



23 pav. Lazerio išėjimo galios P priklausomybė nuo atstumo A tarp šviesolaidžio galo ir fokusuojančio lęšio (žr. į lazerio schemą 13 pav.), esant skirtingo ilgio rezonatoriams. Atstumas B buvo koreguojamas, parenkant didžiausią išėjimo galią.

Lazerio konfigūracijų parametrai:

1. $d_1=15\text{mm}$, $d_2=106\text{mm}$, $t_1=180\text{ms}$, $t_2=20\text{ms}$.
2. $d_1=15\text{mm}$, $d_2=81\text{mm}$, $t_1=180\text{ms}$, $t_2=20\text{ms}$.



24 pav. Lazerio išvadinės galios P_{is} priklausomybė nuo kristale sugertos kaupinimo spinduliuotės galios P_s (žr. į lazerio schemą 13 pav.).

Lazerio konfigūracijų parametrai:

1. $d_1=15\text{mm}$, $d_2=106\text{mm}$, $A=1,3\text{ mm}$, $t_1=180\text{ms}$, $t_2=20\text{ms}$.
2. $d_1=15\text{mm}$, $d_2=81\text{mm}$, $A=1,1\text{ mm}$, $t_1=180\text{ms}$, $t_2=20\text{ms}$.

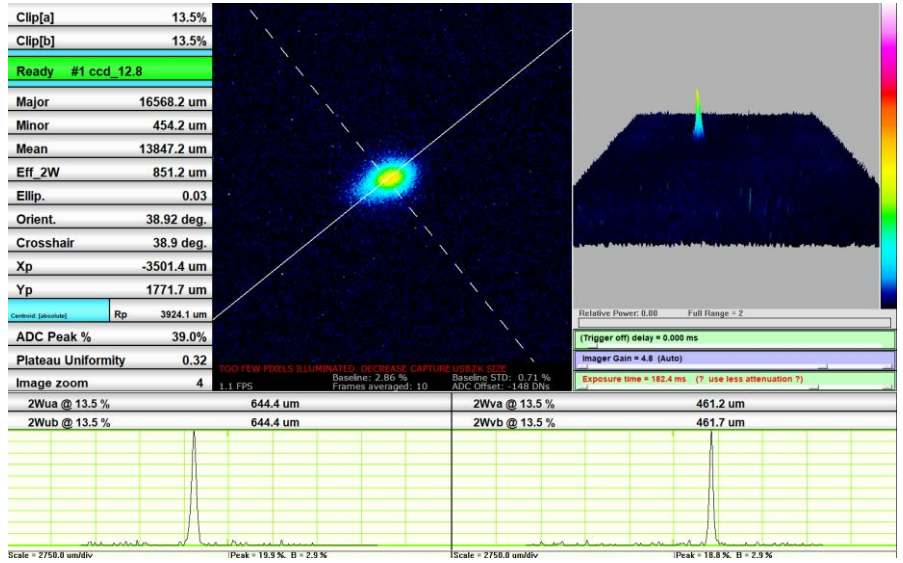
Lazerio pluošto profilis, užfiksuotas pagal 3.4. skyrelyje aprašytą metodiką, pateiktas 26 pav. Reikia pažymėti, kad stebimas profilio vaizdas yra padidintas $\times 1,8$ karto. Taip pat pluošto profilis buvo užfiksuotas ant Thorlabs-VRC6S modelio kortelės (žr. 25 pav).

Išmatuota lazerio išvadinės galios priklausomybė nuo glano pasukimo kampo pateikta 27 pav. Lazerio išvadinės spinduliuotės dominuojanti poliarizacija yra horizontali. Išmatuotas poliarizacinis kontrastas

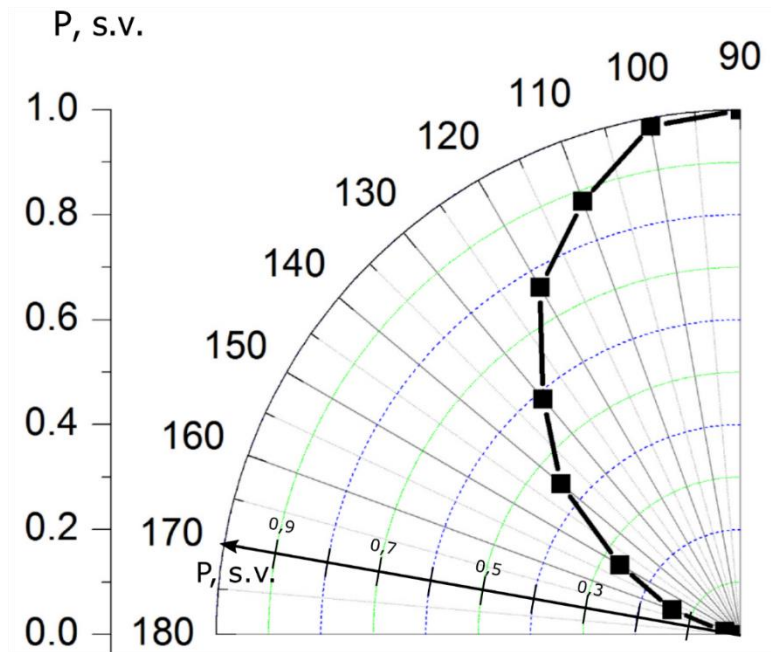
1:308.



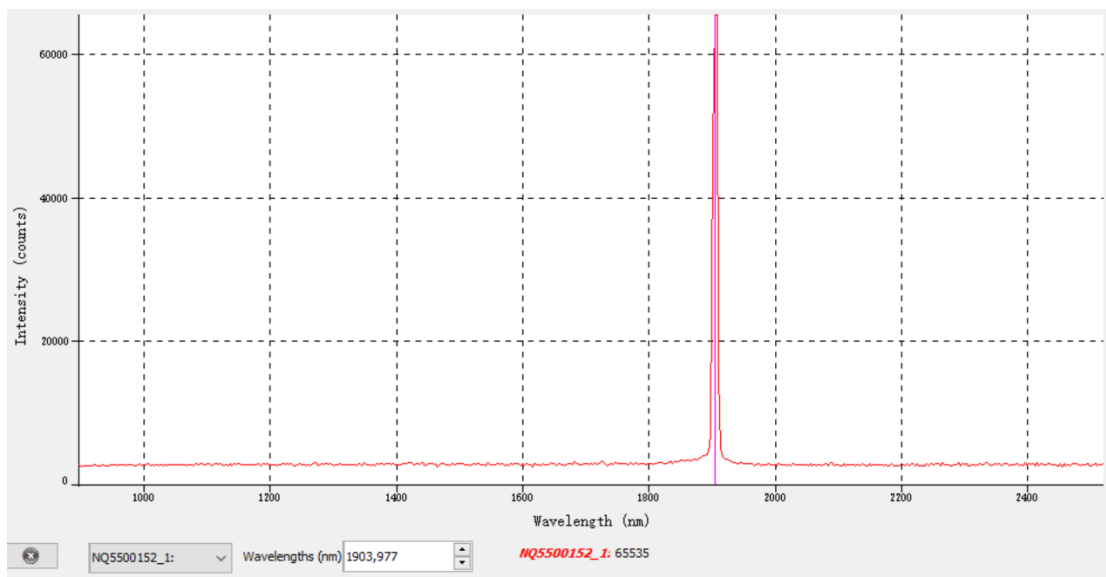
25 pav. Užregistruotas lazerio pluošto profilis CW veikoje ant Thorlabs-VRC6S kortelės



26 pav. Užregistruotas lazerio pluošto profilis CW veikoje, naudojantis 3.4. skyrelyje pateikta metodika. CCD kameros sensoriaus atstumas iki iššadinio veidrodžio ~40cm.



27 pav. Polinėje koordinatų sistemoje atvaizduota lazerio iššadinės galios priklausomybė nuo glano poliarizatoriaus pasukimo kampo. Lazerio galia pateikta santykiniais vienetais. Matavimo schema pateikta 13-ame paveikslėlyje.

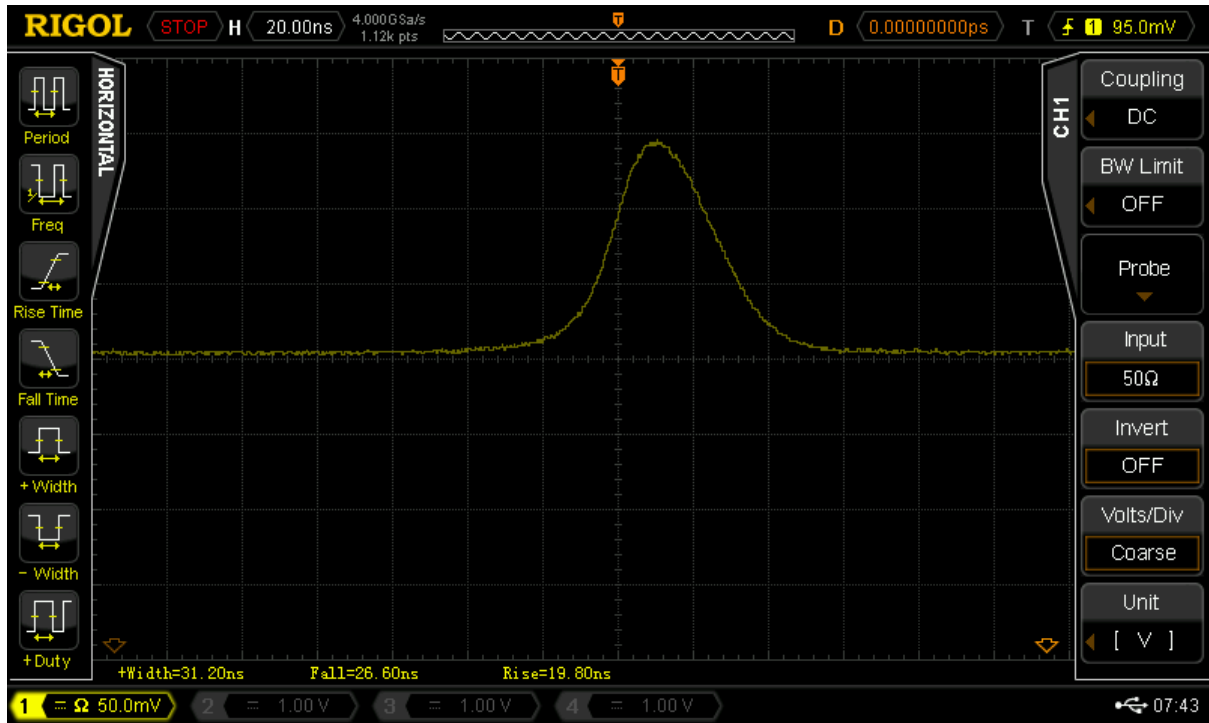


28 pav. Spektrograma, užfiksuota lazeriui veikinat kvazi-nuostoviajame režime. Lazerio schema pateikta 13-ame paveiklėlyje.

Išmatuotas lazerinės spinduliuotės spektras. Spektrometro modelis ir specifikacijos pateiktos 3.4. skyriuje. Užfiksuota spektro smailė randasi ties 1904 nm bangos ilgiu. Reikia pažymėti, kad naudoto spektrometro rezoliucija yra tik 6,3 nm. Literatūroje pateiktame eksperimente, kur buvo tiriamas panašus lazeris su Tm:YLF kristalu ir Cr:ZnSe sugėrikliu, užfiksuota spektrinė smailė ties 1908 nm bangos ilgiu [24].

4.4. Lazerio charakteristikos kokybės moduliacijos režime

Paprastai nuostoviojoje veikoje generacijos metu stebimi daugybė nereguliarių, kintančios amplitudės ir dažnio impulsai. Šiame eksperimente kokybės moduliacijos režime stebėti pavieniai reguliarūs gausinės formos dešimčių nanosekundžių trukmės impulsai. Tipinė šių impulsų forma pavaizduota oscilogramoje 29 pav.

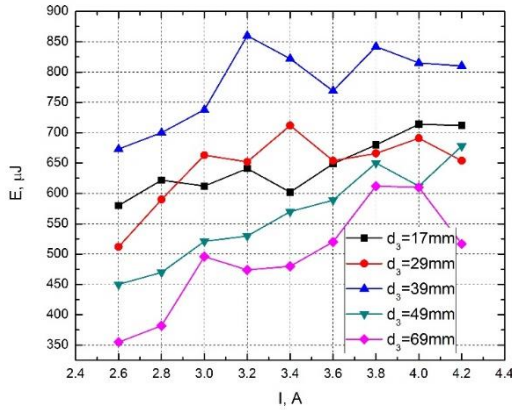


29 pav. Tipinė impulso t_p laikinė forma, užfiksuota oscilografe. Impulso trukmė matuota pusės amplitudės aukštyje (FWHM). Naudotas InGaAs fotodetektorius, specifikuotas 2-oje lentelėje.

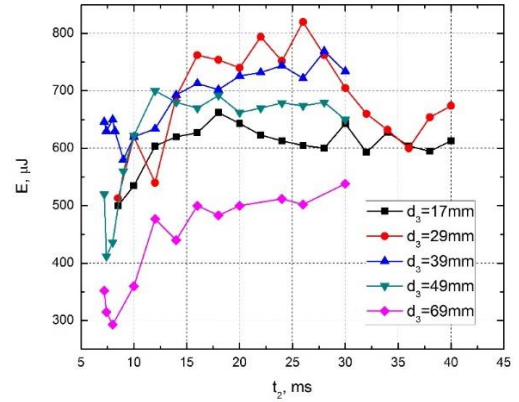
Optimizuojant lazerio kokybės moduliacijos veiką, siekta gauti kuo didesnę impulso energiją ir kuo trumpesnius impulsus. Optimizuotini parametrai yra išvadinio veidrodžio atspindžio koeficientas, nuostoliai rezonatoriuje, sugėriklio pradinis pralaidumas, rezonatoriaus ilgis ir sugėriklio padėtis rezonatoriuje. Kadangi turėtas tik vienas išvadinis veidrodis, o sugėriklis buvo mažų matmenų, ko pasekoje nebuvo galima jo pasukti briusterio kampu, liko galimybė optimizuoti tik keičiant sugėriklio padėtį rezonatoriuje ir rezonatoriaus ilgį.

Lazerio, veikiančio kokybės moduliacijos režime, schema pateikta 9 pav. Energijos matuoklyje buvo registruojama impulso energijos priklausomybė nuo srovės I , kaupinimo impulso trukmės t_2 , sugėriklio

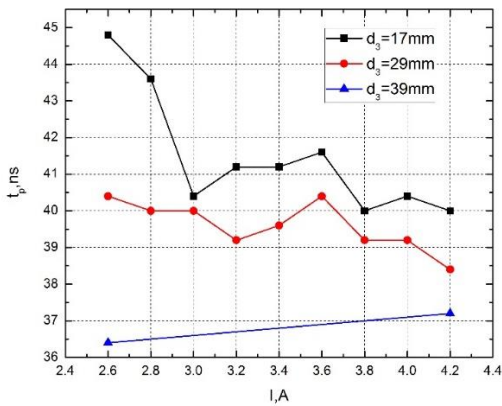
atstumo iki išvadinio veidrodžio d_3 . Trukmė $t_1 = 1000$ ms buvo nekeičiama viso eksperimento metu, laseriui dirbant impulsinėje veikoje.



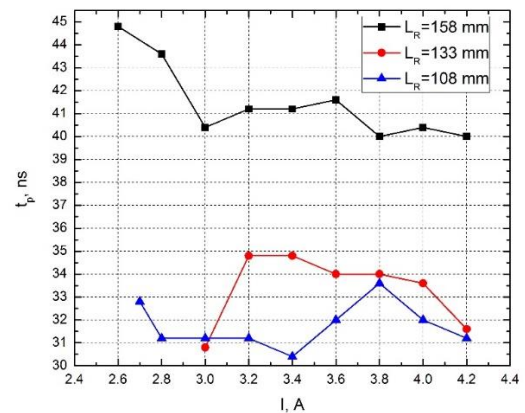
30. pav. Impulso energijos priklausomybė nuo srovės I ir Cr:ZnSe sugėriklio atstumo iki išvadinio veidrodžio d_3 , kai kaupinančio impulso trukmė $t_2 = 16$ ms. Rezonatoriaus ilgis $L_R = 158$ mm



31. pav. Impulso energijos priklausomybė nuo kaupinimo impulso trukmės t_2 ir Cr:ZnSe sugėriklio atstumo iki išvadinio veidrodžio d_3 , kai diodu tekanti srovė $I = 3$ A. Rezonatoriaus ilgis $L_R = 158$ mm



32. pav. Impulso trukmės t_p priklausomybė nuo srovės I ir Cr:ZnSe sugėriklio atstumo iki išvadinio veidrodžio d_3 , kai kaupinančio impulso trukmė $t_2 = 16$ ms. Rezonatoriaus ilgis $L_R = 158$ mm. Impulso trukmė matuota pusės aukštyje (FWHM)



33. pav. Impulso trukmės t_p priklausomybė nuo srovės I ir rezonatoriaus ilgio L_R , kai kaupinančio impulso trukmė $t_2 = 16$ ms. Cr:ZnSe sugėriklio atstumas iki išvadinio veidrodžio $d_3 = 17$ mm nekinta. Impulso trukmė matuota pusės aukštyje (FWHM)

Paveikslėliuose nr. 30 ir 31 pateiktos energijos priklausomybės atitinkamai nuo srovės I ir kaupinimo trukmės t_2 , esant skirtingiems Cr:ZnSe sugėriklio atstumams iki išvadinio veidrodžio. Abejuose paveikslėliuose galime matyti, kad impulso energija priklauso nuo sugėriklio atstumo iki išvadinio veidrodžio. Optimaliausias atstumas galėtų būti d_3 : 29-39 mm. Esant šiam atstumui, impulsų energija išauga ~1,5 karto, lyginant kai $d_3=69$ mm. Galime matyti 30-ame paveikslėlyje, kad impulso energija auga, didinant kaupinimo trukmę t_2 iki 15 ms. Dar padidinus impulso trukmę, galime įžvelgti įsisotinimo tendenciją.

32-ame ir 33-ame paveikslėliuose pateiktos impulso trukmės t_p priklausomybės nuo srovės I , Cr:ZnSe sugėriklio atstumo iki išvadinio veidrodžio d_3 ir rezonatoriaus ilgio L_R . 32-ame paveikslėlyje galime įžvelgti tendenciją, kad didinant atstumą d_3 , t.y. stumiant sugėriklį arčiau kristalo, trukmė mažėja. Dar galime įžvelgti, kad didėjant srovei I , impulso trukmę galima sumažinti keletu nanosekundžių. 33-ame paveikslėlyje pateiktoje priklausomybėje matome, kad trumpinant rezonatorių, impulso trukmė t_p mažėja.

Taigi, esant optimaliam atstumui d_3 : 29-39 mm ir rezonatoriaus ilgiui $L_R = 106$ mm, generuojami impulsai su smailine galia ~28 kW. Neoptimizavus šių parametru, smailinė galia gali sumažėti iki 10-11 kW.

5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Surinkta Tm:YLF lazerio schema, kurioje buvo išbandyti laisvosios ir kokybės moduliacijos režimai. Išmatuotas kristale susidarančio termolėšio židinio nuotolis.
2. Impulsinėje kvazi-nuostoviojoje veikoje gauti 46 mJ energijos impulsai, lazerį kaupinant 5 Hz pasikartojimo dažnio impulsais. Šioje veikoje užfiksuotas lazerio pluošto profilis, išmatuotas spektras, ištirta poliarizacija.
3. Kokybės moduliacijos režime, esant fiksuotam rezonatoriaus ilgiui, egzistuoja optimali sugėriklio pozicija. Pasiiekta 0,85 mJ išvadinio impulso energija, optimizavus kaupinančio impulso parametrus.
4. Kokybės moduliacijos režime gauti dešimčių nanosekundžių trukmės impulsai. Impulsų trukmė mažėja, kai rezonatoriaus ilgis yra mažinamas. Sumažinus rezonatoriaus ilgį nuo 158mm iki 108mm, impulso trukmė sumažėjo nuo 41ns iki 30 ns.

Literatūros sąrašas

- [1] L. F. Johnson, Optical Maser Characteristics of Rare-Earth Ions in Crystals *Journal of Applied Physics*, 34, p. 897, 1963
- [2]] E. Geusic, L. G. Van Uitert, Coherent oscillations from Tm³⁺, Ho³⁺, Yb³⁺ and Er³⁺ Ions in yttrium aluminum garnet, *Appl. Phys.*, 7, p.127, 1965
- [3] L. F. Johnson, L. G. Van Uitert. J. J. Rubin, and R. A. Thomas, Energy Transfer from Er³⁺ to Tm³⁺ and Ho³⁺ Ions in Crystals, *Physical Review* , 133, 1964
- [4] L.F. Johnson, J.E. Geusic and L.G. Van Uitert , Efficient, high power coherent emission from Ho³⁺ ions in yttrium aluminum garnet, assisted by energy transfer, *Appl. Phys.*, 8, p. 200, 1966
- [5] Yehoshua Kalisky, *The Physics and Engineering of Solid State Lasers*, 2006
- [6] E. W. Duczynski, Huber, V. G. Ostroumov, I. A. Shcherbakov , cw double cross pumping of the 5I7–5I8 laser transition in Ho³⁺-doped garnets, *Appl. Phys.* , 48, p. 1562, 1986
- [7] Degnan, J. J., Optimization of highly Q-switched lasers, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31(11), 1995
- [8] G. Kintz, L. Esterowitz, and R. Allen, *Tunable Solid State Lasers*, 20, 1987
- [9] Jirong Yu, Bo C. Trieu, Ed A. Modlin, Upendra N. Singh, Michael J. Kavaya, Songsheng Chen, Yingxin Bai, Pual J. Petzar, Mulugeta Petros , 1 J/ pulse Q -switched 2 μm solid-state laser, *Optics Letters*, 31(4), p. 462-464, 2006
- [10] Kenneth L. Schepler, Brian D. Smith, Frank Heine, Guenter Huber, *Passive Q-switching and mode locking of 2-um lasers*, *Optics, Electro-Optics and Laser Applications in Science and Engineering*, 1993
- [11] Y.-K. Kuo, M. Birnbaum, W. Chen, *Appl. Phys. Lett.* 65, p. 3060, 1994
- [12] Y.-K. Kuo and M. Birnbaum, *Appl. Opt.* 35, p. 881, 1996
- [13] Y.-K. Kuo, M. Birnbaum, F. Unlu, and M.-F. Huang, *Appl. Opt.* 35, 2576, 1996
- [14] A. M. Malyarevich, P. V. Prokoshin, M. I. Demchuk, K. V. Yumashev, A. A. Lipovskii, *Appl. Phys. Lett.*, 78, 572, 2001
- [15] Tzong-Yow Tsai, Milton Birnbaum, Q-switched 2-μm lasers by use of a Cr²⁺:ZnSe saturable absorber, *Applied Optics*, 40(36), p. 6633-6637, 2001

- [16] L. E. Batay, A. N. Kuzmin, A. S. Grabtchikov, V. A. Lisinetskii, V. A. Orlovich, A. A. Demidovich, A. N. Titov, V. V. Badikov, S. G. Sheina, V. L. Panyutin, M. Mond, S. Kuck, Efficient diode-pumped passively Q-switched laser operation around 1.9 μm and self-frequency Raman conversion of Tm-doped KY(WO₄)₂, Appl. Phys. Lett. 81, p. 2926, 2002
- [17] Mond, M., Heumann, E., Huber, G., Kuck, S., Levchenko, V. I., Yakimovich, V. N., Kuleshov, N. V. (n.d.), Passive Q-switching of a diode-pumped Tm:YAG laser by Cr/sup 2+/:ZnSe, Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, CLEO/Europe, 2003
- [18] M.S. Gaponenko, I.A. Denisov, V.E. Kisel, A.M. Malyarevich, A.A. Zhilin, A.A. Onushchenko, N.V. Kuleshov, K.V. Yumashev, Diode-pumped Tm:KY(WO₄)₂ laser passively Q-switched with PbS-doped glass, Applied Physics B, 2008
- [19] M.S. Gaponenko, A.A. Onushchenko, V.E. Kisel, A.M. Malyarevich, K.V. Yumashev, and N.V. Kuleshov, Compact passively Q-switched diode-pumped Tm:KY(WO₄)₂ laser with 8 ns/30 μJ pulses, Laser Physics Letters, 9, p. 291-294, 2012
- [20] Raffaele Faoro, Martin Kadankov, Daniela Parisi, Stefano Veronesi, Mauro Tonelli, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Martha Segura, and Xavier Mateos, Passively Q-switched Tm:YLF laser, 37 (9), p. 1517-1519, 2012
- [21] Haohai Yu, Valentin Petrov, Uwe Griebner, Daniela Parisi, Stefano Veronesi, and Mauro Tonelli, Compact passively Q-switched diode-pumped Tm:LiLuF₄ laser with 1.26 mJ output energy, Optics Letters, 37 (13), p. 2544-2546, 2012
- [22] Yufen Dai, Yanyan Li, Xiao Zou, Benxue Jiang, Yin Hang, Yuxin Leng, Compact passively Q-switched Tm:YLF laser with a polycrystalline Cr:ZnS saturable absorber, Optics & Laser Technology, 57, p.202-205, 2013
- [23] Martha Segura, Martin Kadankov, Xavier Mateos, Maria Cinta Pujol, Joan Josep Carvajal, Magdalena Aguiló, Francesc Díaz, Uwe Griebner, and Valentin Petrov, Passive Q-switching of the diode pumped Tm³⁺:KLu(WO₄)₂ laser near 2- μm with Cr²⁺:ZnS saturable absorbers, Optics Express, 20, 2012
- [24] Arik Kornfeld, Daniel Sebbag, Udi Ben-Ami, Eran Shalom, Gilad Marcus, Salman Noach, High pulse energy passive Q-switching of a diode-pumped Tm:YLF laser by Cr:ZnSe, Laser Phys. Lett., 12, 2015
- [25] Brian Cole and Lew Goldberg, Highly efficient passively Q-switched Tm:YAP laser using a Cr:ZnS saturable absorber, Optics Letters, 42, p. 2259-2262, 2017

- [26] Baoquan Yao, Yi Tian, Gang Li, and Yuezhu Wang, InGaAs/GaAs saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched dual-wavelength Tm:YAP lasers, 18 (13), p. 13574-13579, 2010
- [27] Lihua Cao, Wenjing Tang, Shengzhi Zhao, Ying Li, Xiaodong Zhang, Na Qi, Dechun Li, 2 μm Passively Q-switched all-solid-state laser based on WSe₂ saturable absorber, Optics & Laser Technology, 113, p. 72–76, 2019
- [28] Karsten Scholle, Samir Lamrini, Philipp Koopmann and Peter Fuhrberg, 2 μm Laser Sources and Their Possible Applications, LISA laser products OHG Germany, 2010
- [29] Fried, N. M., & Murray, K. E., High-Power Thulium Fiber Laser Ablation of Urinary Tissues at 1.94 μm . Journal of Endourology, 19, 2005
- [30] Cole, B., Goldberg, L., Chinn, S., Pomeranz, L. A., Zawilski, K. T., Schunemann, P. G., & McCarthy, J. (2018). Compact and efficient mid-IR OPO source pumped by a passively Q-switched Tm:YAP laser. Optics Letters, 43 (5), p. 1099-1102, 2018
- [31] Charles D. Phelps, Diode pumped, 2 micron, Q-switched thulium Y3Al5O12 (Tm:YAG) microchip laser, Air force research laboratory, p. 119, 2011
- [32] Edgaras Dvinelis, Greta Naujokaitė, Mindaugas Greibus, Donatas Buivydas, Augustinas Trinkūnas, Kristijonas Vizbaras, Augustinas Vizbaras, "Band I DIRCM laser based on GaSb direct diode technology", Laser Technology for Defense and Security XIV, 10637, 2018
- [33] Augustinas Vizbaras, Edgaras Dvinelis, Augustinas Trinkūnas, Ieva Šimonytė, Mindaugas Greibus, Mindaugas Kaušylas, Tomas Žukauskas, Ramunas Songaila, Kristijonas Vizbaras, "High-performance mid-infrared GaSb laser diodes for defence and sensing applications", Laser Technology for Defense and Security X, 9081, 2014
- [34] Ieva Šimonytė, Edgaras Dvinelis, Ramūnas Songaila, Augustinas Trinkūnas, Mindaugas Greibus, Kristijonas Vizbaras, Augustinas Vizbaras, "High-power CW GaSb type-I gain chips as single-frequency sources for widely tunable spectroscopy in the mid-infrared", Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIII, 9755, 2016
- [35] Edgaras Dvinelis, Augustinas Trinkūnas, Mindaugas Greibus, Mindaugas Kaušylas, Tomas Žukauskas, Ieva Šimonytė, Ramūnas Songaila, Augustinas Vizbaras, Kristijonas Vizbaras, "High-performance GaSb laser diodes and diode arrays in the 2.1-3.3 micron wavelength range for sensing and defense applications", Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII, 9370, 2015

- [36] B. Callicoatt, G. Bennett, M. Hinckley, E. Petersen, A. Schober and G. Wagner, "High average power Tm:YAG waveguide lasers," ,Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), p. 1-2, 2017
- [37] P. F. Moulton et al., "Tm-Doped Fiber Lasers: Fundamentals and Power Scaling," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 15, p. 85-92, 2009
- [38] Jirong Yu, Bo C. Trieu, Ed A. Modlin, Upendra N. Singh, Michael J. Kavaya, Songsheng Chen, Yingxin Bai, Pual J. Petzar, and Mulugeta Petros , 1 J/pulse Q-switched 2 μm solid-state laser. Optics Letters, 31(4), p. 462-464, 2006
- [39] Charles W.Rudy , Michel J.F.Digonnet, Robert L.Byer, Advances in 2- μm Tm-doped mode-locked fiber lasers, Optical Fiber Technology, 20(6), p. 642–649, 2014
- [40] E. Sorokin, S. Naumov, I.T. Sorokina , “Ultrabroadband infrared solid-state lasers” (a review mainly concerning Cr²⁺ and Cr⁴⁺ lasers), IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 11 (3), p. 690-720, 2005
- [41] H. H. P. Th. Bekman, J. C. van den Heuvel, F. J. M. van Putten, Ric Schleijsen, Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques, Technologies for Optical Countermeasures, 5615, 2004
- [42] Timothy J. Carrig , Novel Pulsed Solid-State Sources for Laser Remote Sensing, Coherent Technologies, 2004
- [43] Jean-Pierre Cariou , Béatrice Augere, Matthieu Valla, Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology, C.R. Physique, 7, 213-223 p., 2006
- [44] R. Paschotta, article on 'eye-safe lasers' in the Encyclopedia of Laser Physics and Technology, Wiley-VCH, 2008.
- [45] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, Springer Science + Business Media, 2006
- [46] M. Hercher: Appl. Opt., 6, p. 947, 1967
- [47] Brian M. Walsh, Branching ratios, cross sections, and radiative lifetimes of rare earth ions in solids: Application to Tm³⁺ and Ho³⁺ ions in LiYF₄ , Journal of applied physics, 83, 1997

Matas Plūkys

KOMPAKTIŠKO IMPULSINĖS VEIKOS 2-JŲ MIKRONŲ BANGOS ILGIO LAZERIO SUKŪRIMAS

Santrauka

Šiame darbe buvo apžvelgta ankstyvoji 2-jų mikronų lazerių vystymosi raida 1962-1991 metų laikotarpiu. Šiuo laikotarpiu atsirado efektyvios YLF ir YAG matricos, legiruotos Tulio ir Holmio jonais. Devintajame dešimtmetyje atsiradęs diodinis kaupinimas padidino šių lazerių efektyvumą. Apžvelgti 1993-2019 metais atsiradę ir vystęsi pasyvios kokybės moduliacijos 2-jų mikronų lazeriai. Palyginti šių lazerių impulsų trukmės, energijos, pasikarojimo dažnio ir efektyvumo parametrai.

Apžvelgti 2-jų mikronų lazerių taikymo pavyzdžiai vėjo greičio matavimo sistemose, vibrometrijoje, medicinoje ir lidaruose. Pateikiami pasyviosios kokybės moduliacijos mechanizmo principai. Taip pat pateikiami sugerties ir emisijos spektrai Tm:YLF kristale.

Surinkta Tm:YLF lazerio schema su Cr:ZnSe sugėrikliu, kurioje buvo išbandyti laisvosios ir kokybės moduliacijos režimai. Išmatuotas kristale susidarančio termolėšio židinio nuotolis.

Impulsinėje kvazi-nuostoviojoje veikoje gauti 46 mJ energijos impulsai, lazerį kaupinant 5 Hz pasikartojimo dažnio impulsais. Šioje veikoje užfiksuotas lazerio pluošto profilis, išmatuotas spektras, ištirta poliarizacija.

Kokybės moduliacijos režime gauti 0,85 mJ energijos ir dešimčių nanosekundžių trukmės impulsai, lazerį kaupinant 1 Hz pasikartojimo dažnio impulsais. Energija pasiekta optimizuojant kaupinimo diodo srovę, kaupinimo impulso trukmę ir kokybės modulatoriaus poziciją rezonatoriuje.

Matas Plūkys

DEVELOPMENT OF COMPACT PULSED LASER OPERATING AT 2 MICROMETER WAVELENGTH

Summary

The early development of 2-micron lasers during the period of 1962-1991 was reviewed. At that time, the effective YLF and YAG matrices doped with holmium and thulium ions were introduced. In 1980's emerged diode pumping increased the efficiency of 2-micron lasers.

Passive Q-switched 2-micron laser evolution during the period of 1993-2019 was reviewed. The available laser parameters of pulse duration, energy, frequency and efficiency have been compared.

2-micron laser application in fields of wind speed measurement, vibrometry, medicine and LIDAR's were reviewed. The principles of passive quality switching are presented. Absorption and emission spectra in Tm: YLF crystal are also provided.

During this work, the Tm: YLF laser scheme was constructed. It was tested in both quasi free-running and passive Q-switching modes. Cr: ZnSe absorber was used for Q-switching. Thermal lens in Tm:YLF was estimated.

In quasi-free-running mode, 46 mJ of energy pulses were obtained at 5 Hz pumping rate. The laser beam profile and spectrum were measured. The laser polarization was investigated.

In passive Q-switching mode, pulses of 0.85 mJ energy and tens of nanosecond length were obtained. Laser worked at 1 Hz repetition rate. The energy was achieved by optimizing the pumping diode current, pumping pulse duration and absorber position in the resonator.