

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Goda Binkytė

**APLINKOS POVEIKIUI NEJAUTRUS FEMTOSEKUNDINIS
SKAIDULINIS LAZERIS GENERUOJANTIS 3W VIDUTINĘ OPTINĘ
GALIĄ BEI SUB-60FS TRUKMĖS IMPULSUS**

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMASIS DARBAS

Lazerinių technologijų studijų programa

Studentas

Goda Binkytė

Darbo vadovas

dr. Nerijus Rusteika

Centro direktorė

dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius

2023

TURINYS

1.	Įvadas	3
2.	Teorinė dalis	4
2.1	Šviesolaidžiai	4
2.2	Vienamodis ir daugiamodis šviesolaidžiai	4
2.3	Ultratrumpus impulsus generuojantis šviesolaidinis Mamyševo generatorius	6
2.4	Šviesolaidinis iterbiu legiruotas stiprintuvas	8
3.	Tyrimų metodika	11
3.1.	Skaidulinių komponentų suvirinimas	11
3.2.	Optomechanikos komponentų projektavimas, gamybos brėžinių paruošimas bei gamyba kompiuteriu valdomomis staklėmis	12
3.3.	Lazerių pagreitinto senėjimo testavimas	13
4.	Eksperimentinė dalis	14
4.1	Impulsų generatoriaus schema	14
4.2	Impulsų fazinės ir spektrinės moduliacijos grandinės optimizavimas	18
4.3	Impulsų stiprintuvo optimalios konfigūracijos nustatymas	20
4.4	Impulsų laikinės spūdos optimizavimas	23
5.	Prototipo surinkimas	29
5.1	Šviesolaidinės dalies bei valdymo bloko projektavimas	29
5.2	Optomechaninės grandinės projektavimas, gamyba ir surinkimas	30
6.1	Šviesolaidinio lazerinio šaltinio charakterizavimas	31
6.	Prototipo pagreitinto senėjimo tyrimai	34
7.	Prototipo testavimas daugiafotonės mikroskopijos laboratorijose	35
8.	Pagrindiniai rezultatai	37
9.	Išvados	38
	SANTRAUKA	39
	SUMMARY	40
10.	Literatūra	41

1. Įvadas

Šviesolaidiniai lazeriai, generuojantys itin trumpus šviesos impulsus, kai kuriose srityse gali būti pranašesni, palyginti su kietojo kūno lazeriais. Tačiau, pasiekti didelę smailinę galią iš šviesolaidinio ultratrumpus impulsus generuojančio lazerio ir kartu, kad tokio lazerio dizainas būtų stabilus esant aplinkos pokyčiams yra didelis iššūkis. Šiame darbe yra plačiai pritaikomas Lietuvoje išrastas ir užpatentuotas aplinkai nejautrus šviesolaidinis lazerinis šaltinis, pagrįstas Mamyševo regeneratoriumi. Jo pagalba galima pasiekti aukštą generuojamų impulsų energiją bei itin didelį spektro plotį. Visgi iš praktinio šviesolaidinio ultratrumpų impulsų generatoriaus (UIG) tiesiogiai galima gauti ~100 mW vidutinės optinės galios, kuri yra apribota rezonatoriaus viduje esančiuose komponentų optiniu atsparumu.

Siekiant sukurti femtosekundinį lazerinį šaltinį tinkamą plačiam biofotonikos ir įvairių kitų ratui, reikalinga kelių vatų išvadinė optinė galia. Dar aukštesnė galia galėtų būti naudinga kai kuriuose taikymuose, tačiau dažnai jos panaudojimą riboja biologinių bandinių atsparumas lazerinei spinduliutei. Siekiant pasiekti kuo aukštesnę smailinę galią šio darbo rėmuose buvo suprojektuota, surinkta bei optimizuota šviesolaidinė čirpuotų impulsų stiprinimo (angl. CPA) optinė grandinė, kurioje kaip užkrato šaltinis panaudotas UIG. Optimizavus optinės grandinės parametrus gauti 210 nJ energijos ir 58 fs trukmės impulsai, kurių smailinė galia sudaro 3.3 MW, o vidutinė galia – 3.2 W.

Šios optinės grandinės pagrindu buvo suprojektuotas, pagamintas bei surinktas lazerio prototipas su kuriuo buvo atlikti aplinkos poveikio (termociklavimas ir vibravimas), ilgalaikio veikimo bei įjungimų/išjungimų ciklų tyrimai. Buvo nustatyta, kad dėl itin paprastos ir efektyvios optinės grandinės bei stabilios optomechaninės bazės sukurtas prototipas yra nejautrus aplinkos poveikiui, todėl gali būti panaudotas praktiniuose tyrimuose.

Galiausiai, sukurtas prototipas buvo paskolintas daugiafotonę mikroskopiją atliekančioms laboratorijoms, kurios patvirtino lazerio tinkamumą šiam taikymui.

Darbo tikslas: Sukurti ir ištirti aukštos smailinės galios femtosekundinių impulsų šviesolaidinį šaltinį atsparų aplinkos poveikiui ir optimizuotą daugiafotoninės mikroskopijos taikymams.

Darbo užduotys:

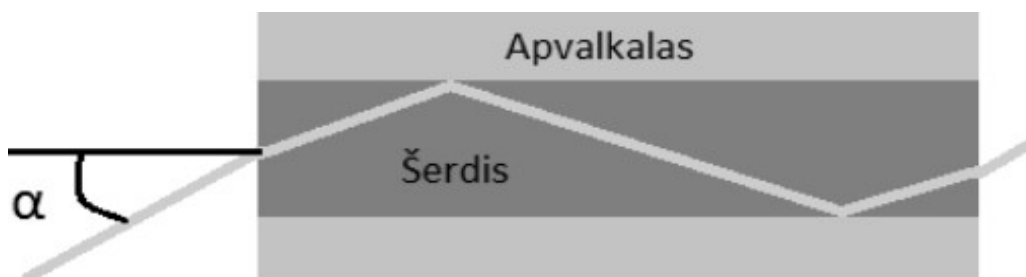
1. Ultratrumpų impulsų generatoriaus optimalios optinės konfigūracijos nustatymas.
2. Impulsų fazinės ir spektrinės moduliacijos grandinės optimizavimas.
3. Impulsų stiprintuvo optimalios konfigūracijos optimizavimas.
4. Impulsų laikinės spūdos optimizavimas.
5. Lazerio prototipo projektavimas ir surinkimas.
6. Aplinkos poveikio lazerio prototipo parametrams ištyrimas.

2. Teorinė dalis

2.1 Šviesolaidžiai

Šviesolaidis (optinė skaidula) – tai kvarcinio stiklo plonas ir lankstus siūlas. Optinės skaidulos iš esmės yra cilindriniai bangolaidžiai. Pagrindiniai šviesolaidžio sandaros elementai yra šie: šerdis, stiklo apvaskalas ir apsauginis apvaskalas (Pav. 1). Centrinė skaidulos dalis yra šerdis – gali turėti įvairių priemaišų (pvz. germanio), dėl ko susidaro didesnis lūžio rodiklis, ja sklinda visa spinduliuotė. Stiklo apvaskalo lūžio rodiklis yra mažesnis nei šerdies. Abu šiuos elementus gaubia apsauginis polimero sluoksnis, skirtas šviesolaidžio apsaugai nuo mechaninio ir aplinkos poveikio. Standartiniuose šviesolaidžiuose apsauginis apvaskalas nesąveikauja su skaiduloje sklindančia spinduliuote.

Šviesolaidžio veikimas pagrįstas visiškojo vidaus atspindžio reiškiniu. Spinduliui krintant į dviejų, skirtingų skaidrių terpių ribą, dalis šviesos atsispindi, o kita šviesos dalis keičia savo sklidimo trajektoriją ir pereina į kitą terpę. Kai šviesa krinta iš optiškai tankesnės terpės į optiškai retesnę, lūžio kampas yra didesnis už kritimo kampą. Kai kritimo kampas yra didesnis už tam tikrą ribinę vertę, visa šviesos bangos energija atsispindi [1-3].



Pav. 1. Šviesos spindulio visiškas vidaus atspindys optinėje skaiduloje.

2.2 Vienamodis ir daugiamodis šviesolaidžiai

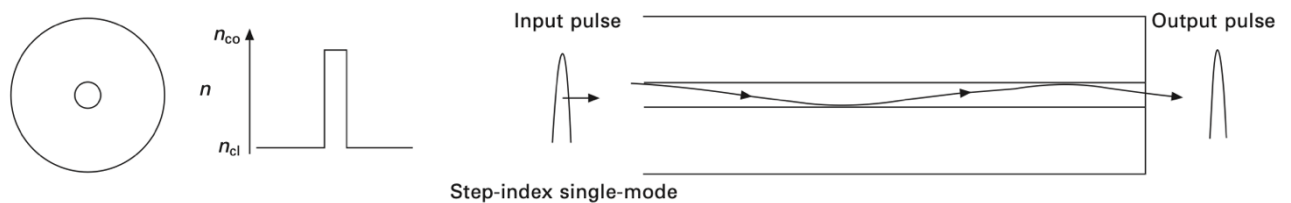
Kai optinės skaidulos šerdies diametras yra daug didesnis nei sklindančios bangos ilgis, tai šviesolaidžio veikimas yra aiškinamas geometrinės optikos principais, tai yra spindulių visiškuoju vidaus atspindžiu riboje tarp dviejų skirtingo lūžio rodiklių sričių. Bet, kai šerdies diametras yra palyginamas su bangos ilgiu, tai skaidula turi būti nagrinėjama kaip dielektrinis bangolaidis, kuriame šviesos sklidimą aprašo banginė lygtis, sudaroma iš Maxwell'o lygčių. Banginės lygties sprendiniai, tenkinantys kraštines sąlygas, nurodo tam tikrus šviesos elektromagnetinio lauko erdvinis skirstinius, kurie nesikeičia sklindant optine skaidula. Tokie elektromagnetinio lauko skirstiniai yra vadinami modomis. Norint apibrėžti, kiek modų gali sklisti šviesolaidžiu, yra įvedamas normuoto

dažnio parametras V , kuris priklauso nuo šviesolaidžio šerdies spindulio a , sklindančios bangos ilgio λ ir šviesolaidžio skaitinės apertūros NA :

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot NA = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \frac{1}{n_0} \sqrt{n_{ser.}^2 - n_{apv.}^2} \quad (1)$$

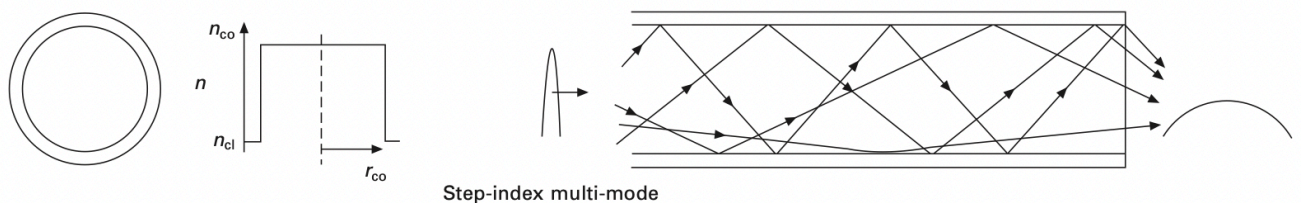
Kai $V < 2.105$, šviesolaidžiu gali sklisti tik viena pagrindinė moda (angl. fundamental mode) [1,4]. Tokie šviesolaidžiai vadinami vienamodžiais (tam tikram bangos ilgiui), o netenkinantys šios sąlygos – daugiamodžiais. Lazeriniams taikymams dažniausiai labiau pageidautinas yra vienamodis šviesolaidžio veikimas, kadangi spinduliuotė išėjusi iš vienamodžio šviesolaidžio pasižymi idealia šviesos pluošto „kokybe“ ir gali būti sufokusuojama iki mažiausių galimų (difrakcijos apribotų) matmenų.

Vienamodžių šviesolaidžių šerdys, lyginant su stiklo apvaskalu, yra labai mažos. Jų šerdies skersmuo dažniausiai būna nuo 6 iki 10 mikronų. Tokiu šviesolaidžiu galima perduoti tik vieną pagrindinę modą ir jame nėra šviesos atsispindėjimo (Pav. 2).



Pav. 2. Vienamodžio šviesolaidžio skerspjūvio schema [4].

Daugiamodžių optinių skaidulų šerdies skersmuo dažniausiai viršija 50 mikronų. Tokiuose šviesolaidžiuose spinduliuotė gali sklisti keliomis trajektorijomis. Galimas signalo išplitimas laike ir iškreipimas, dėl daugybės įmanomų sklidimo trajektorijų – skirtingomis trajektorijomis sklindantys spinduliai yra nevienodai užvėlinami. Kaip matosi (Pav. 3) įėjimo signalas nėra toks pat kaip išėjimo. Tai yra dėl to, jog signalas išplitęs laike, nes kiekvienas spindulys jame sklinda skirtingo ilgio keliais. Taip pat nebūtinai visi spinduliai (modos) yra sužadinti, dėl to atsiranda atsitiktiniai iškreipimai.



Pav. 3. Daugiamodžio šviesolaidžio skerspjūvio schema [4].

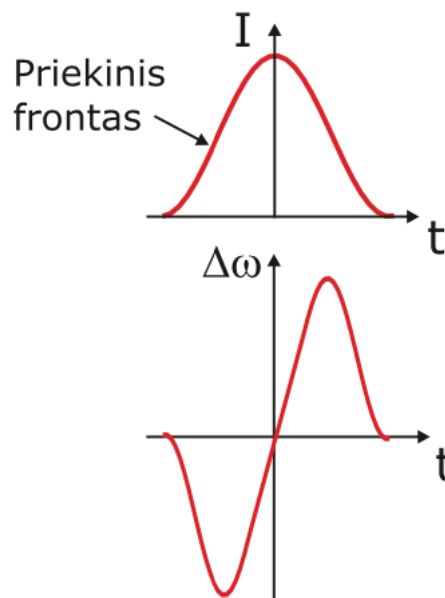
2.3 Ultratrumpus impulsus generuojantis šviesolaidinis Mamyševo generatorius

Vienas iš ultratrumpų impulsų generacijos šviesolaidinėje optinėje grandinėje būdų yra uždaramame optiniame rezonatoriuje panaudoti Mamyševo regeneratoriaus grandinę [5]. Šis būdas yra pagrįstas fazinės savimoduliacijos (angl. self-phase modulation) šviesolaidyje bei spektrinio filtravimo efektais. Kadangi impulso spektrinis plitimas priklauso nuo smailinės galios, optinis regeneratoriums veikia kaip netiesiniai optiniai vartai, kurie praleidžia tik tuos impulsus, kurių smailinė galia yra pakankamai didelė. Kadangi šviesolaidžiuose šviesa sklinda mažo skersmens šerdyje, net nedidelė optinė impulsų galia atitinka didelius intensyvumus. Dėl šių priežasčių pasireiškia netiesiniai efektai. Ultratrumpų impulsų režime vienas pagrindinių netiesiškumų yra Kerr'o efektas. Šis efektas lemia medžiagos lūžio rodiklio priklausomybę nuo spinduliuotės intensyvumo. Kerr'o efekto įtakotas lūžio rodiklis gali būti aprašytas:

$$n = n_0 + \left(\frac{3\chi^{(3)}}{4n_0^2 c \epsilon_0} \right) I = n_0 + n_2 I \quad (2)$$

čia n_0 yra šviesos lūžio rodiklis esant nedideliui intensyvumui, n_2 – netiesinis lūžio rodiklis (šviesolaidžiams naudojamame lydytame kvarce jis lygus $n_2 \approx 3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2\text{W}^{-1}$).

Viena pagrindinių Kerr'o efekto pasekmių – fazės moduliavimasis. Dėl fazės moduliavimosi atsiranda impulso momentinio dažnio pokytis ir impulso spektras praturtinamas naujais dažnio komponentais (Pav. 4).



Pav. 4. Šviesos impulso laikinė gaubtinė ir dažnio moduliacija [6].

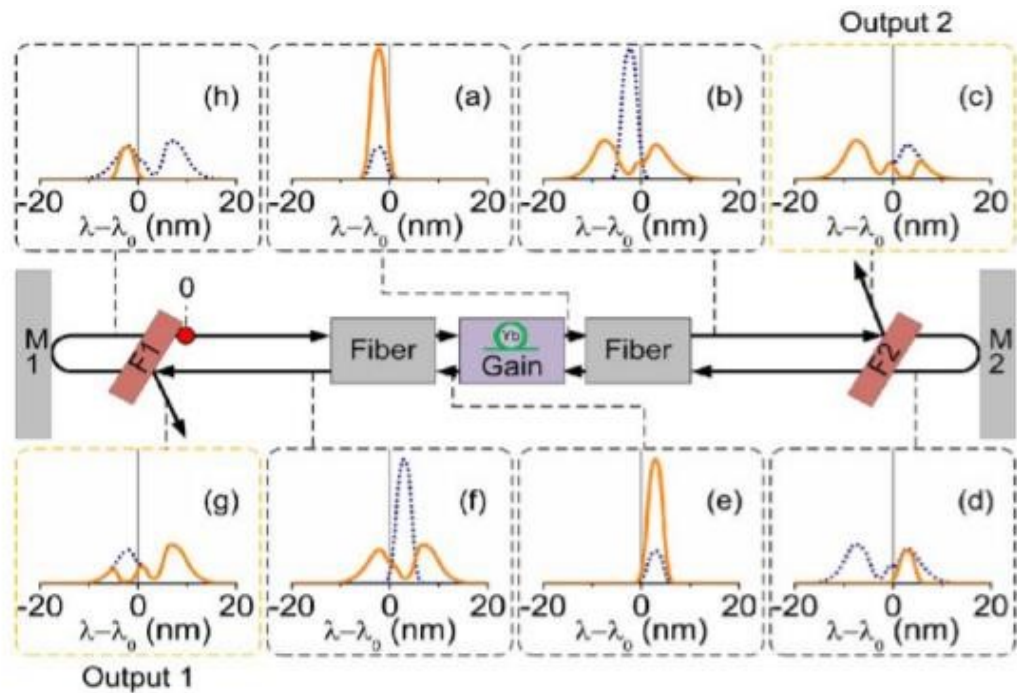
Dėl to pradinio nečirpuoto gausinio impulso spektras išplinta, o impulsas tampa faziškai moduluotu. Spektro plitimas ir gaubtinės forma priklauso nuo intensyvumo, netiesiškumo parametro ir pradinio impulso formos [7]. Gauso formos žadinančiajam impulsui sklindant netiesine terpe dažnių poslinkis yra simetriškas žadinančiojo impulso centrinio dažnio atžvilgiu, kadangi impulsas yra simetriškas. Jei žadinantysis impulsas yra nesimetriškas, tai spektro plitimo lygis skiriasi centrinio dažnio atžvilgiu į didesnių ir mažesnių dažnių puses. Realiuose šviesolaidžiuose, kuriuose pasireiškia chromatinė dispersija, kartu su spektrine vyksta ir impulsų laikinės gaubtinės formavimasis netiesinio impulsų plėtimosi metu.

Sklindant šviesos impulsui su gaubtine $|E(t)|^2$ netiesine medžiaga, kurios lūžio rodiklis, priklausantis nuo intensyvumo, charakterizuojamas $n = n_0 + \frac{1}{2}n_2|E(t)|^2$, skirtingos impulse dalys patiria skirtingą fazinį poslinkį:

$$\Delta\Phi(t) = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)n_2L|E(t)|^2}{2} \quad (3)$$

Dėl to impulsas tampa spektriškai praplėstas ir įgyja dažnio moduliaciją. Jei $n_2 > 0$, tai priekinis impulso frontas patiria dažnio poslinkį Stokso (raudonų bangos ilgių) kryptimi, tuo tarpu galinis frontas pasislenka anti-Stokso kryptimi – mėlynų bangos ilgių [6-8].

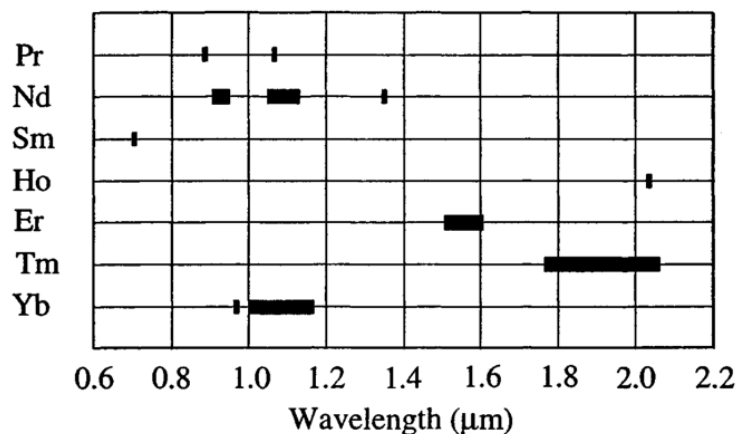
Naudojantis dvigubu spektriniu filtravimu ir fazės moduliavimosi reiškiniu, gali būti pasiektas netiesinis atsakas, kai impulsų smailinei galiai pasiekus tam tikrą slenkstį, padidėja pralaidumas. Itin trumpiems didelės energijos impulsams generuoti gali būti naudojama tokia optinės grandinės konfigūracija, kuri sudaryta iš aktyvaus ir pasyvaus šviesolaidžių atkarpų ir dviejų filtrų, kurie suderinti taip, kad jų spektrų persiklojimas yra labai mažas. Grandinė kaupinama su diodiniu lazeriu su skaiduliniu išėjimu. Diodinis lazeris spinduliuoja 975 nm centrinio bangos ilgio šviesą. Šviesolaidžiuose iš triukšmų, kurie yra ties filtrų persiklojimu, susiformuoja tam tikros trukmės triukšminis impulsas, kurio spektras atitinka filtro F1 pralaidumą. Impulsas dėl fazinės moduliacijos išplinta ir praėjęs pro filtrą F1 grįžta į aktyvią terpę, susistiprina ir toliau sklisdamas per pasyvią skaidulą patiria fazės moduliavimąsi ir spektro plitimą. Susistiprinęs, išplitęs ir išsmoduliavęs impulsas pasiekia filtrą F2. Šis filtras praleidžia tik ilgabangę impulso spektro dalį. Kita spektro dalis jame yra nufiltruojama. Iškirptas impulsas grįžta į aktyviąją skaidulą ir yra stiprinamas, patiria fazės moduliavimąsi ir spektro plitimą, kuris atitinka filtro F1 pralaidumą. Filtras F1 praleidžia tik trumpabangę impulso spektro dalį. Ciklas (Pav. 5) ir vėl kartojasi – filtrai praleidžia impulso spektro dalį kitam ciklui, tik jei spektras yra pakankamai išplitęs (dėl fazės moduliavimosi) [5].



Pav. 5. Impulso spektro fazės moduliavimosi schema. Atskiros schemos dalys (a) – (h) vaizduoja impulsų spektro kitimus, fazės moduliavimosi metu. Geltona kreivė vaizduoja esamą impulso spektro būseną, o punktyrinė kreivė – prieš tai buvusį spektrą [5].

2.4 Šviesolaidinis iterbiu legiruotas stiprintuvas

Skaiduliniais stiprintuvais yra vadinami optiniai stiprintuvai, kuriuose, dėl šerdyje esančių retųjų žemių elementų priemaišų (legiravimo), tokių kaip Erbis, Neodimis, Iterbis, Prazeodimis, Tulis, susidaro aktyvi stiprinimo terpė.

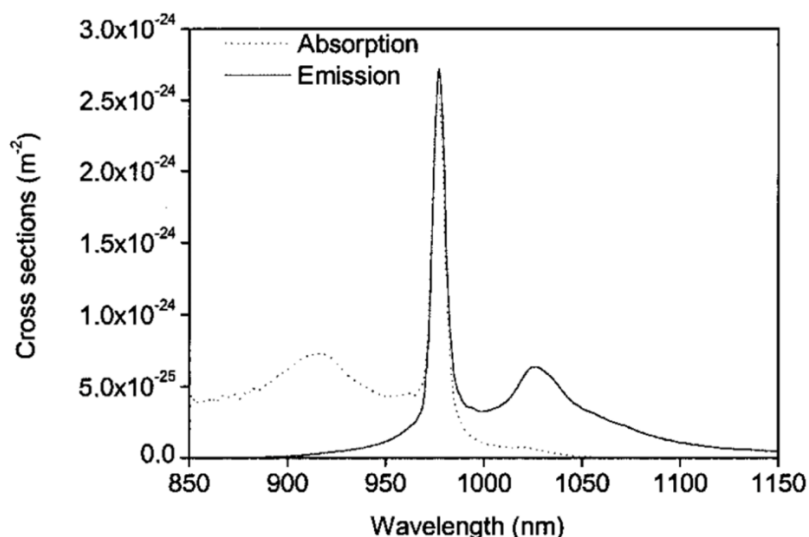


Pav. 6. Skirtingais retųjų žemių elementų jonais legiruotų šviesolaidinių stiprintuvų darbinių bangos ilgių intervalai [9].

Tokių stiprintuvų veikimas yra paremtas priverstinio spinduliavimo reiškiniu esant užpildos apgrąžai (daugiau jonų sužadintoje būsenoje negu pagrindinėje), kuri pasiekama kaupinant aktyvią terpę trumpesnio bangos ilgio (negu stiprinama) spinduliuote. Dėl puikių optinių bei mechaninių savybių dažniausiai yra naudojami lydyto kvarco šviesolaidžiai su anksčiau išvardintomis retųjų žemių

elementų priemaišomis. Šviesolaidžio legiravimo elementas dažnai pasirenkamas pagal konkretų praktinį stiprintuvo pritaikymą. Galima išskirti pagrindinius du taikymus: telekomunikacijų sritis (1.5 μm) – šis bangos ilgis sąlygoja Erbiu (Er) legiruotų šviesolaidžių terpės pasirinkimą; lazeriniams taikymams (975-1200 nm) dažniausiai naudojamas Iterbio jonais (Yb) legiruotos lydyto kvarco skaidulos. Svarbu pažymėti, kad ši aktyvioji terpė pasižymi labai plačia (virš 200 nm) stiprinimo juosta. Tai leidžia stiprinti pakankamai trumpus impulsus [10].

Iterbio jono energetinių lygmenų diagrama yra paprasta lyginant su kitais retųjų žemės elementais. Svarbūs yra du energetiniai lygmenys – pagrindinis lygmuo ($^2F_{7/2}$) ir sužadintas lygmuo ($^2F_{5/2}$). Jie atitinkamai skyla į keturis ir tris polygmenis. Iterbio jonų sugertį lemia šuoliai iš pagrindinio lygmens į sužadinto lygmens viršutinius polygmenis, o spinduliavimą – šuoliai iš sužadinto lygmens apatinių polygmenių į pagrindinio lygmens viršutinius polygmenis. Iterbiu legiruojant lydytą kvarcą pagrindinio ir sužadinto lygmenų polygmenys išplinta ir persikloja. Tai lemia plačias sugerties ir spinduliavimo juostas (Pav. 7). Sugerties skerspjūvių spektro intervalas yra nuo 850 nm iki 1070 nm. Spektre vaizduojami du maksimumai ties ~ 910 nm ir ~ 975 nm bangos ilgiais. Spinduliavimo skerspjūvių spektro intervalas yra nuo 970 nm iki 1200 nm ir jo maksimumai yra ties ~ 975 nm ir ~ 1030 nm. Sužadintojo lygmens gyvavimo trukmė yra apie 0.8 ms. Tačiau ji gali kisti apie 30% priklausomai nuo naudojamų skirtingų skaidulų priemaišų. Šviesolaidžiai su didesne germanio priemaišos koncentracija šerdyje, turi trumpesnę sužadinto lygmens gyvavimo trukmę. Stiprinimas tokioje aktyvioje terpėje gali būti pasiekiamas pasirenkant skirtingus kaupinimo ir stiprinimo signalo bangos ilgius, su sąlyga, jog $\lambda_{\text{kaup.}} < \lambda_{\text{signal.}}$.



Pav. 7. Iterbiu legiruoto kvarcinio stiklo sugerties (vientisa kreivė) ir spinduliavimo (punktyrinė kreivė) skerspjūviai [10].

Tokiu būdu 975 nm bangos ilgio kaupinimo panaudojimas leidžia išvengti stiprios savaiminės spinduliuotės generacijos (angl. amplified spontaneous emission, ASE) ties šiuo bangos ilgiu.

Kadangi sugerties ir išspinduliavimo skerspjūviai ties šiuo bangos ilgiu yra santykinai lygūs, užpildos apgražos lygis gali būti pasiekiamas tik iki 50%, tai reiškia, jog pasiekiamas dvigubai mažesnis maksimalus stiprinimo koeficientas, nei naudojant 910 nm kaupinimą, tačiau tai kompensuojama ženkliai sumažinta ASE. Šiuo atveju maksimalus stiprinimas pasiekiamas ties 1030 nm. Iterbio panaudojimo privalumas yra aukštesnių energetinių lygmenų nebuvimas, dėl ko panaikinama sugerties iš sužadinto lygmens galimybė. Tai leidžia gaminti aktyvius šviesolaidžius su dideliu legiravimo laipsniu ir atitinkamai dideliu stiprinimu šviesolaidžio ilgio vienetui, tokiu būdu sumažinant Kerr'o efekto įtaką.

3. Tyrimų metodika

3.1. Skaidulinių komponentų suvirinimas

Skaiduliniai lazeriai būna sudaryti iš daugelio skaidulinių komponentų, tokių kaip: optiniai filtrai, šakotuvai, izoliatoriai, cirkulatoriai, poliarizatoriai, bangos ilgio dalikliai. Norint surinkti skaidulinį lazerį, šiuos atskirus komponentus reikia sujungti. Yra keli sujungimo būdai, tokie kaip:

- Optinės jungtys (kai dvi skaidulos yra sujungiamos tikslaus, paprastai cirkonio keramikos, vamzdelio dėka). Šis sujungimo metodas nereikalauja labai brangios ir sudėtingos įrangos, bet turi didelį trūkumą – neatsikartojantys nuostoliai (PM 980 skaiduliniai nuostoliai yra 1 dB) dėl šviesolaidžio šerdies ekscentriškumo. Taip pat vienas iš trūkumų yra atspindys atgal (PM 980 atspindžio slopinimas yra 45-50 dB), ribotas poliarizacijos ekstinkcijos santykis (PER) (22-26 dB);

- Kitas dažniausiai naudojamas būdas yra šviesolaidžių suvirinimas. Šis būdas pasižymi puikomis spinduliuotės pralaidumo savybėmis – beveik nėra nuostolių (0.1 dB), beveik nėra atspindžio atgal (>70 dB), pasiekiamas aukštas PER (30-36 dB, priklauso kiek preciziškai suderinama). Pakankamai naudinga suvirinimo savybė yra dar tai, kad galima suvirinti du šiek tiek skirtingo tipo šviesolaidžius ir pasiekti artimas vienodiems šviesolaidžiams anksčiau išvardintas suvirinimo savybes.

Šis metodas yra esminis šviesolaidinių lazerių kūrimui bei gamybai. Šiame darbe buvo naudojamas lankinio elektros išlydžio šviesolaidžių suvirinimo būdas. Toks suvirinimo procesas prasideda nuo šviesolaidžių paruošimo procedūros. Imami du šviesolaidžių galai ir mechaniškai pašalinamas apsauginis apvalkalas, specialaus įrankio pagalba. Labai svarbu užtikrinti, kad šalinant apsauginį apvalkalą, šviesolaidis nebūtų mechaniškai pažeistas – nesukurti mechaniniai defektai ant stiklo paviršiaus. Tada skaidulų galai yra nuvalomi su spiritu, siekiant kuo labiau pašalinti apsauginio apvalkalo atplaišas. Sekantis žingsnis yra skaidulos nukirtimas. Norint sėkmingai suvirinti šviesolaidžius, reikia stačiu kampu nukirsti suvirinamų optinių skaidulų galus (paklaida iki 2 laipsnių). Tai yra atliekama su didelio tikslumo nukirtimo aparatu (šiuo darbe buvo naudojamas kompanijos „Fujikura“ CT-50 šviesolaidžių nukirtimo aparatas).

Paruoštas šviesolaidis yra įdedamas į suvirinimo aparato specialius laikiklius, kurie juda x, y ir z ašimis. Judantys laikikliai yra skirti tiksliai sulygiuoti skaidulų šerdis. Šiame darbe buvo naudotas „Fujikura FSM-45PM-LDF“ suvirinimo aparatas, kuris leidžia virinti poliarizaciją išlaikančius (PM) šviesolaidžius, kas yra itin svarbu siekiant šviesolaidinių grandinių stabilumo. Jis automatiškai patikrina ar šviesolaidžių galai yra tinkamai nuvalyti ir nukirsti reikiamu kampu. Jei viskas yra tinkama, tai skaidulos yra sulygiuojamos, suartinamos viena su kita ir suvirinamos naudojantis lankiniu elektros išlydžiu. Suvirinimo metu du šviesolaidžiai yra išlydomi ir sujungiami į vieną

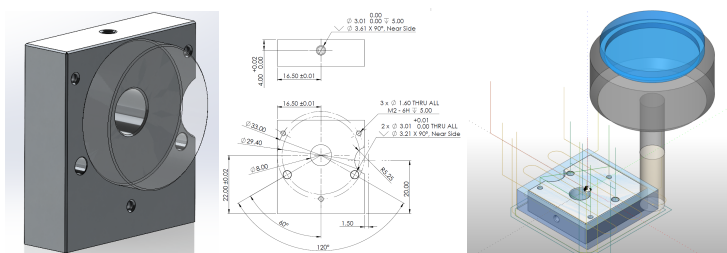
monolitinį šviesolaidį. Jeigu procesas yra tinkamai atliekamas, suvirinti šviesolaidžiai pasižymi labai mažais nuostoliais (~1%) bei poliarizacijos būsenos geru išlaikymu (>1:1000 kontrastas). Po suvirinimo šviesolaidis yra ištempiamas – taip yra patikrinama ar suvirinimo vieta yra patvari. Toks suvirinimas yra nejautrus ir aplinkos poveikiui, tokiam kaip temperatūra, vibracija, lankstymas. Taigi surinktas šviesolaidinis lazeris arba kitokia optinė grandinė yra ypač stabili ir gali veikti metų metais be jokio išorinio paderinimo. Tai yra esminis šviesolaidinių lazerių pranašumas prieš kieto kūno lazerius.

3.2. Optomechanikos komponentių projektavimas, gamybos brėžinių paruošimas bei gamyba kompiuteriu valdomomis staklėmis

Nuolatinės veikos šviesolaidiniai lazeriai praktiškai nereikalauja laisvos erdvės optikos (lęšių, veidrodžių, gardelių ir panašiai) bei jai tvirtinti reikalingos mechanikos, tačiau šviesolaidiniams femtosekundiniams lazeriams reikia nemažai pagalbinės optikos. Kaip pavyzdys, 100 nJ energijos ir 50 fs trukmės impulsai turi apie 2 MW smailinę galią. Tokių impulsų optinis intensyvumas $10 \mu\text{m}$ skersmens šerdies šviesolaidyje siektų $\sim 3 \text{ TW}/\text{cm}^2$. Toks intensyvumas, jei net ir nepažeistų šviesolaidžio, tačiau tikrai sukeltų tokius stiprius netiesinius iškraipymus, kad impulsai taptų labai „netvarkingos“ formos ir išilgėtų laike. Dėl šios fundamentinės priežasties visi bent kiek aukštesnės smailinės galios femtosekundiniai šviesolaidiniai lazeriai naudoja laisvos erdvės, t.y. ne šviesolaidinį, impulsų spaustuvą.

Ši laisvos erdvės optomechaninė dalis turi pasižymėti itin aukštu tikslumu bei ilgalaikiu stabilumu, kad lazeris veiktų daugelį metų be paderinimų. Visgi dėl to, palyginti su kieto kūno lazeriais, tik nedidelė dalis lazerių optinių elementų yra laisvoje erdvėje, tad šviesolaidinių lazerių jautrumas išderinimui yra gerokai mažesnis.

Šiame darbe buvo skirtas didelis dėmesys lazerių optomechanikos projektavimui, gamybai ir testavimui. Pirmiausia, kartu su kompanijos „Lilit“ konstruktoriais ir inžinieriais buvo sugalvoti principiniai optikos tvirtinimo būdai mechaniniuose laikikliuose. Tada šie sprendimai 3D maketavimo paketo SolidWorks pagalba būdavo suprojektuoti, padaromi technologiniai brėžiniai bei programa CNC staklėms (Pav. 8).



Pav. 8. Kairėje: suprojektuoto supaprastinto optomechaninio veidrodžio laikiklio 3D vaizdas; viduryje: jo technologinis brėžinys; dešinėje: CNC valdymo programos, skirtos laikiklio gamybai, grafinis atvaizdavimas.

3.3. Lazerių pagreitinio senėjimo testavimas

Nepaisant visų metodikose 1 ir 2 aprašytoms priemonėms lazerių patikimumui užtikrinti, pagaminti lazerių prototipai vis vien privalo būti papildomai testuojami. Taip yra dėl to, kad femtosekundinis lazeris yra labai sudėtingas įrenginys, susidedantis iš šimtų atskirų elementų, galinčių įtakoti jo veikimą.

Problema yra tai, kad lazeris pas klientą turės veikti bent keletą metų, o tiek laiko testuoti nėra optimalu, nes prarandamas komercinis potencialas. Kad šią problemą išspręsti projekto metu buvo panaudotas pagreitinio senėjimo testavimas. Jo esmė yra aiški – žinant kokie gedimo režimai yra labiausiai tikėtini sukelti itin nepalankias sąlygas, kad šiuos gedimus iššaukti.

Gedimus, pagal jų kilmę galima suskirstyti į dvi pagrindines gedimų grupes: optikos pažeidimus/degradaciją bei mechaninius gedimus, kai išsiderina optomechaniniai elementai ir dėl to nukenčia lazerio optiniai parametrai. Darbo metu buvo atliekami abiejų tipų gedimų pagreitiniai testai. Optiniai elementai buvo išbandomi su daug kartų aukštesne optine galia (tiek smailine, tiek vidutine), optiniai elementai buvo testuojami aukštose bei žemose temperatūrose bei esant skirtingai oro drėgmei. Tačiau bene svarbiausias femtosekundinių lazerių gedimo mechanizmas yra dėl optomechaninių elementų išsiderinimo. Taip yra todėl, kad femtosekundinis lazeris yra itin precizinė optinė sistema, kuri jautri net mažiausiems išsiderinimams. Kaip pavyzdys, $100 \mu\text{rad}$ ($\sim 0.006^\circ$) pluoštelio kampo nuokrypis jau gali sukelti ženklus optinių parametrų pokyčius, tačiau standartiniam $\frac{1}{2}$ colio (arba 12.7 mm) veidrodžiui, tai atitinka vos $0.5 \mu\text{m}$ krašto poslinkį! Ir toks (o dar geriau - ženkliai aukštesnis, taigi kalbame apie šimtus nanometrų) tikslumas turi būti išlaikomas daugelį metų.

Siekiant patikrinti sukurto lazerio prototipo ilgalaikį optomechaninį stabilumą darbe buvo panaudoti du industrijoje plačiai naudojami pagreitinio senėjimo testai – vibracinis testas ir termociklavimas (Pav. 9).



Pav. 9. Termociklavimo kamera (kairėje) ir vibravimo stendas (dešinėje) skirti pagreintiems senėjimo testams atlikti

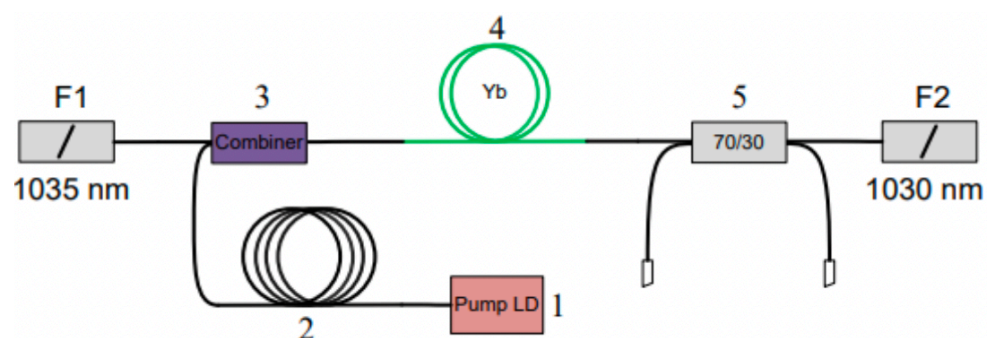
Abiejų šių testų tikslas yra sukelti lazerio optomechanikai stresinį poveikį, kuris realiomis sąlygomis galėtų atsirasti tik po daugelio metų veikimo. Vibracinio testo veikimo principas yra savaime suprantamas, o termociklo testas yra pagrįstas medžiagos plėtimosi principu, dėl kurio optikos elementai ir juos laikančios optomechaninės detalės daug kartų plečiasi ir traukiasi, ir, esant netinkam tvirtinimui, po daugelio ciklų nebegrįžta į pradines padėtis – optomechaninis mazgas išsiderina. Išmatavus lazerio optinius parametrus prieš ir po šių testų galima pastebėti, ar buvo ženkliai išderinta optinė sistema. Kadangi lazerio parametrai specifikuojami bent su 10% atsarga, tai jei po sendinimo testų neišmatuojamas didesnis nei 5% parametrų pokytis, galima gana užtikrintai teigti, kad normalaus veikimo metu, optiniai parametrai nenukris daugiau nei 10% nuo pradinių.

I darbo dalis. Eksperimentiniai tyrimai

4. Eksperimentinė dalis

4.1 Impulsų generatoriaus schema

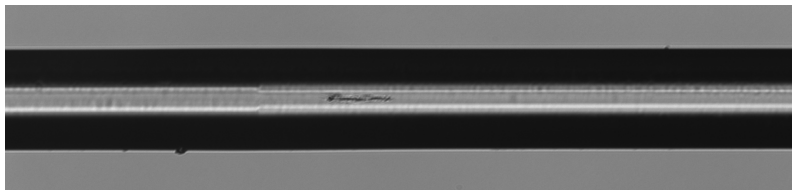
Tiesinė ultratrumpų impulsų generatoriaus schema pavaizduota (Pav. 10) Ši UIG konfigūracija yra kaupinama diodiniu lazeriu (1), su šviesolaidiniu išėjimu (2). Prie diodo šviesolaidžio yra privirintas kaupinimo ir signalo šakotuvas (3). Į iberbiu legiruotą aktyviają skaidulą (4), šakotuvus nukreipia kaupinimo spinduliuotę ir signalinę spinduliuotę. Po aktyviosios skaidulos, privirintas yra skaidulinis daliklis (5), kuris dalina spinduliuotę į dvi šakas tam tikru santykiu (šiam darbe buvo naudojamas 70/30 spinduliuotę paskirstantis daliklis). Prie dviejų laisvų skaidulinio daliklio galų yra privirinamos FC/APC jungtys – plataus spektro kanalo jungtis (6) ir siauro spektro kanalo jungtis (7). Generatoriaus grandinės kraštuose yra privirinti du spektriniai filtrai F1 ir F2.



Pav. 10. Tiesinė impulsų generatoriaus schema. 1 - kaupinimo diodas, 2 - kaupinimo atvedimo šviesolaidis, 3 - kaupinimo ir signalo šakotuvas, 4 - Iterbiu legiruota aktyvioji skaidula, 5 - skaidulinis daliklis, F1, F2 - spektriniai filtrai.

UIG startuojamas įjungus kaupinimo diodą. Kelis kartus pavyko gauti gerą startavimą. Vėliau startavimas nutrūko ir spontaninės emisijos galia žymiai sumažėjo. Nustatyta, kad įvyko pažeidimas tarp Yb legiruotos ir pasyvios skaidulos (Pav. 11). Toks pažeidimas įnešė ~70% nuostolių.

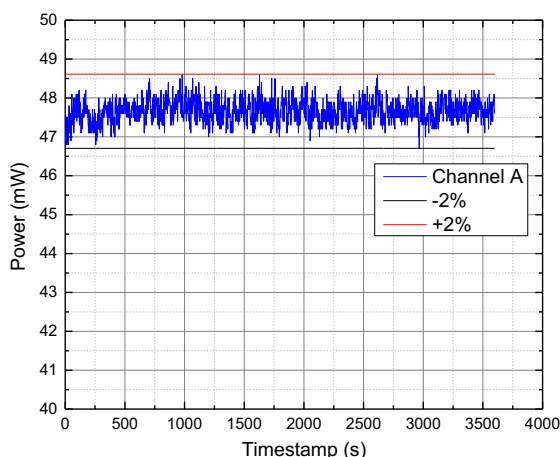
Suvirinimas perdarytas, po kurio galia atsistatė, tačiau pažeidimai ir toliau kartojosi. Buvo pridėta 30 cm apsauginės skaidulos, kas sumažino atsirandančių pažeidimų skaičių. Vėliau 70 cm vienamodės skaidulos atkarpa pakeista į didesnės šerdies šviesolaidį (modos skersmuo $\sim 11 \mu\text{m}$). Po šito pakeitimo pavyko startuoti bent 100 kartų be pažeidimų.



Pav. 11. Pažeidimo vaizdas per mikroskopą. Nuotraukoje matosi ir suvirinimas tarp didesnės (11 μm) ir mažesnės (7 μm) modos skersmens šviesolaidžių.

Su optimizuota šviesolaidžių konfigūracija buvo paleistas automatizuotas startavimo testavimas. Sėkmingai įvyko 19051 startavimo ciklų. Maksimali startavimo trukmė buvo 12 s.

Taip pat buvo atliktas trumpalaikis galios stabilumo patikrinimas (Pav. 12). Išmatuotas galios svyravimas (min-max) siekė $\pm 2\%$, o standartinis nuokrypis (RMS) apie 0.5%. Tai yra geri rezultatai aktyviai nestabilizuotai šviesolaidinei lazerinei sistemai.



Pav. 12. Trumpalaikis vidutinės galios stabilumas už izoliatoriaus.

Filtrų persiklojimo įtakos tyrimas. Buvo tikrinama kaip priklauso startavimo charakteristikos nuo filtrų persiklojimo. Vieno filtro (F2, Pav. 10) langas buvo fiksuotas ties 1030nm centriniu bangos ilgiu, o kito padėtis keičiama. Prie kiekvienos padėties atliekama 100 startavimo bandymų. Nustatyta, kad ši generatoriaus schema puikiai startuoja plačiame filtrų atskyrimo intervale nuo 5.2 nm iki 8 nm.

Iš mažo atskyrimo pusės veikimą riboja tai, kad nuolatinės veikos (angl. constant wave, CW) triukšmų galia jau susilygina su vidutine galia, kai generuojami impulsai. Dėl to kartais buvo stebėta, kad po startavimo iš impulsų generavimo schema persijungia atgal prie CW triukšmų. Taip pat, buvo

sunku išmatuoti startavimo laikus, nes galios skirtumas tarp impulsų generavimo veikos ir CW triukšmų buvo labai siauras (arba jo išvys nebuvo).

Iš didesnio atskyrimo pusės, viršijus 8 nm startavimo trukmės jau pradėjo staigiai didėti. Galbūt tai galima būtų kompensuoti padidinus kaupinimo galią, bet tai didintų komponentų optinio pramušimo riziką, todėl tai nėra perspektyvu.

Impulsų pasikartojimo dažnio keitimo tyrimai. Keičiami optinės grandinės skaidulos ilgiai, dėl ko keičiasi impulsų pasikartojimo dažnis ir buvo tikrinama ar startuoja UIG.

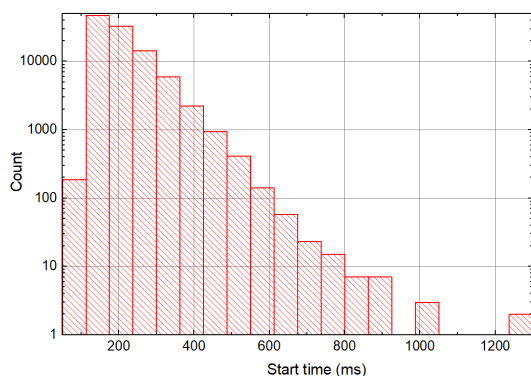
Rezultatai (Lentelė 1) rodo, kad šios schemos startavimo charakteristikos nėra jautrios skaidulos ilgiui. Tiesiog mažinant bendrą skaidulos ilgį (didinant dažnį) turi būti didinama ir startavimo kaupinimo galios vertė, o didinant bendrą skaidulos ilgį, startavimo kaupinimo vertė turi būti mažinama ir galbūt dar reiktų padidinti filtrų atskyrimą. Norimas dažnių intervalas 10-40 MHz yra nesunkiai pasiekiamas.

Lentelė 1. UIG veikimo tyrimo prie skirtingų impulsų pasikartojimo dažnio rezultatai.

Dažnis (MHz)	Startavimo srovė (A)	Startavimų skaičius	Max startavimo trukmė (s)	Min veikimo srovė (A)
10.01	3.7	2000	2	2.38
13.99	4	27000	3-4	2.22
17.54	3.7	2000	2	2.16
19.98	4	2000	6	2.15
21.67	4.75	9000	10	2.27
21.69	4.75	1000	0.1	2.2
23.93	4.75	100	4	2.35
28.3	5.25	1000	10	2.3
34.66	7.5	2200	5	2.65
37.7	8.8	100	7.9	2.8
39.4	9	3340	10	2.9

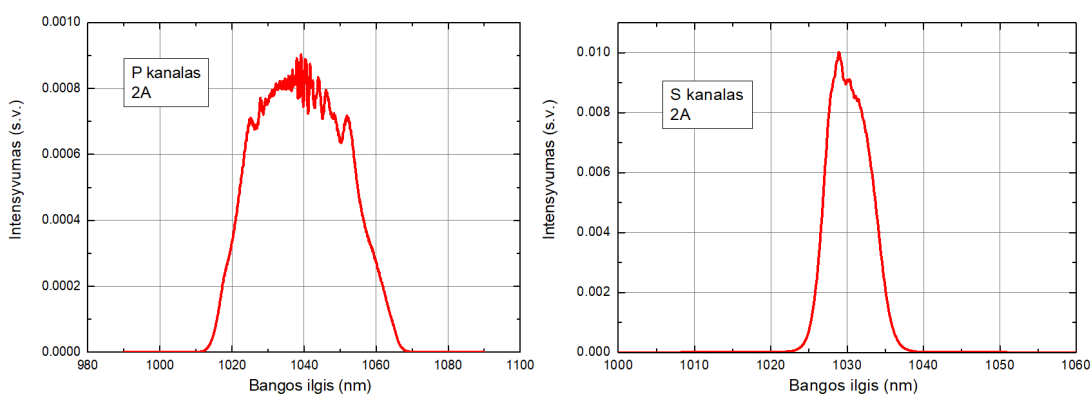
Tolesniems tyrimams optimalus pasikartojimo dažnis buvo pasirinktas 14 MHz. Pirma, generatorius puikiai veikia ties šiuo pasikartojimo dažniu. Antra, šis dažnis yra geras kompromisas netiesinės mikroskopijos taikymams – pakankamai žemas, kad užtikrinti aukštą impulsų energiją prie fiksuotos vidutinės galios ($E = P/D$), bet pakankamai aukštas, kad užtikrinti gerą vaizdinimo spartą (14 MHz = 1 MPix @ 14 kadru/s).

Su šia konfigūracija buvo paleisti ilgalaikiai startavimo bandymai. Visa schema sėkmingai atlaikė 104095 startavimų. Maksimali startavimo trukmė buvo vos 1.3 s. Startavimo laiko pasiskirstymo histograma pavaizduota Pav. 13. Gauti rezultatai su šia konfigūracija labai geri.



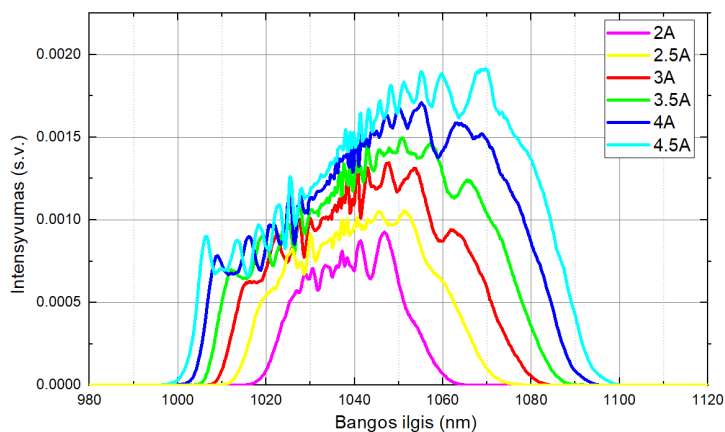
Pav. 13. 14 MHz dažnio konfigūracijos UIG startavimo trukmės histograma.

UIG generatorius turi du optinius išėjimus: prieš patenkant į filtrą (F2, Pav. 10) ir atsisprindėjus nuo jo. Šie išėjimai atitinkamai vadinami „platus“ ir „siauras“ kanalas. Žemiau pateikiami impulsų optiniai spektrai iš abiejų kanalų.



Pav. 14. UIG sugeneruotų impulsų optiniai spektrai iš plataus (kairėje) ir siauro (dešinėje) kanalo. Optinė galia buvo atitinkamai 43 mW (~3 nJ energija) ir 1.6 mW (~0.1 nJ energija) prie 2A srovės.

Matome, kad net prie žemos kaupinimo galios plataus spektro pilnas plotis siekia ~60 nm. Palyginimui žemiau pateiktas plataus kanalo spektro priklausomybė nuo kaupinimo srovės 30 MHz pasikartojimo dažnio konfigūracijoje. Prie aukštesnių kaupinimo galių galima sugeneruoti ~100 nm pločio spektrus.

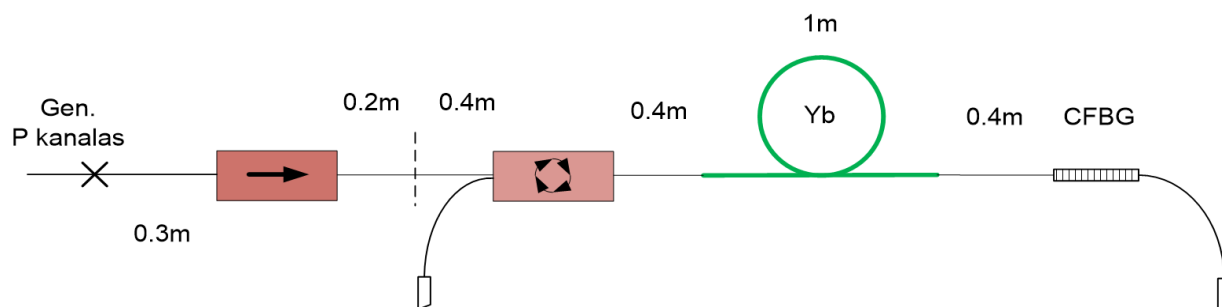


Pav. 15. Plataus kanalo spektro priklausomybė nuo kaupinimo srovės 30 MHz konfigūracijoje.

4.2 Impulsų fazinės ir spektrinės moduliacijos grandinės optimizavimas

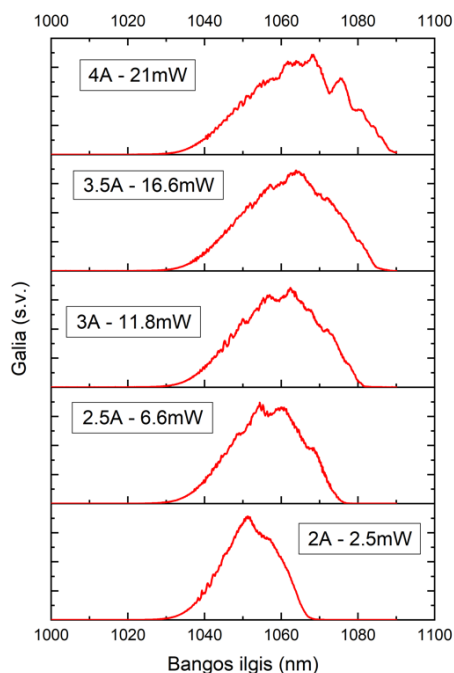
Norint pasiekti keleta vatų vidutinę galią iš šviesolaidinio lazerio, generatoriaus impulsus iš plataus kanalo reikia pastiprinti ~ 100 kartų. Tokiam stiprinimui pasiekti užtenka vieno praėjimo šviesolaidinio stiprintuvo. Tačiau norint už impulsų spaustuvo gauti < 100 fs trukmės impulsus reikia užtikrinti, kad spektras minimaliai susiaurėtų. Tam tikslui buvo optimizuojama stiprintuvo optinės grandinės parametrai. Be to, iš generatoriaus plataus kanalo išeinančių impulsų trukmė buvo ~ 5 ps, kurią nulemia optinio šviesolaidžio dispersija. Siekiant sustiprinti sugeneruotus impulsus iki > 100 nJ energijos, juos reikia išplėsti laike, o po stiprinimo suspausti (angl. chirped pulse amplification, CPA), tokiu būdu sumažinant parazitinius netiesinius efektus.

Impulsų plėtimo schemai buvo planuota naudoti cirkuliatorių su čirpuota skaiduline Brego gardele (CFBG). Privirinus plėtimo schemą tiesiogiai prie impulsų generatoriaus plataus spektro kanalo (P) pasirodė, kad generatorius nstartuoja – dingo net startavimo pulsavimas, liko tik CW spinduliavimas. Dėl to, prieš plėtimo schemą buvo įvirintas papildomas izoliatorius. Su papildomu izoliatoriumi generatorius vėl pradėjo gerai startuoti. Bendra impulsų plėtimo schema pavaizduota žemiau.



Pav. 16. Impulsų plėtimo ir spektro formavimo schema.

Pradžioje spektro formavimui naudota 1 m ilgio Yb legiruotos skaidulos atkarpa. Buvo išmatuoti spektrai po impulsų plėtimo ir spektro formavimo pakopos prie skirtingų generatoriaus kaupinimo LD srovių (Pav. 17). Kaip ir galima tikėtis, spektro plotis auga didinat UIG kaupinimo srovę.



Pav. 17. Išmatuoti spektrai po pradinės impulsų plėtimo schemos.

Vidutinės galios priklausomybė nuo generatoriaus kaupinimo srovės po plėtimo schemos pateikta žemiau.

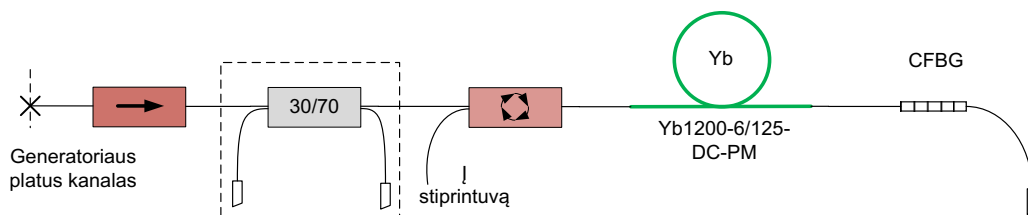
Lentelė 2. Vidutinė galia po impulsų formavimo grandinės.

I gen. (A)	P po cirk (mW)	P po FBG (mW)
2	6.6	3.5
2.5	15	6.9
3	24.3	10.5
3.5	33.1	14
4	42	17.5

Matome, kad prieš galios stiprintuvą dėl nuostolių belieka 10 mW vidutinės galios prie 3 A generatoriaus kaupinimo srovės.

Buvo nustatyta, kad atspindžiai neigiamai paveikia impulsų generatoriaus veikimą (generacijos susižadimą). Dalis spinduliuotės atspindėtos nuo CFBG gardelės patenka atgal į impulsų generatorių (dėl nepakankamos cirkulatoriaus izoliacijos) ir neleidžia pasiekti generacijos susižadimą, jei schemoje nenaudojamas papildomas izoliatorius. Papildomo izoliatoriaus naudojimas išaugina sistemos savikainą, todėl buvo nuspręsta detaliau ištirti kokie yra atspindžiai atgal ir kokius atspindžius gali toleruoti impulsų generatorius.

Atspindėjusios atgal spinduliuotės galia buvo matuojama privirinus 30/70 pluošto daliklį tarp mažos galios izoliatoriaus ir cirkuliatoriaus (Pav. 18). Išmatuota atspindžio atgal vertė buvo $\sim -30\text{dB}$ ($\sim 0.1\%$).

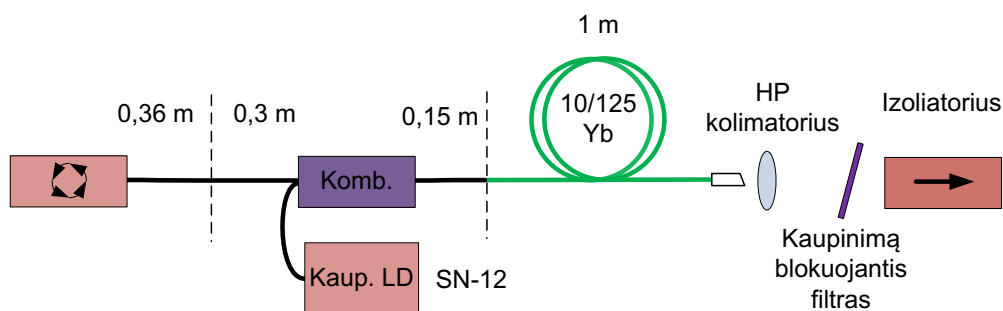


Pav. 18. Atspindžio atgal matavimo schema.

Matavimai parodė didesnę atspindį atgal nei buvo tikėtasi. Pagal specifikacijas, cirkuliatoriaus izoliacija esant darbiniam bangos ilgiui turėjo būti $>30\text{ dB}$. Papildomas slopinimas turėjo būti nulemtas Yb skaidulos ir CFBG. Siekiant patikrinti kokie bangos ilgiai yra atspindimi atgal, buvo išmatuotas atspindėtos spinduliuotės spektras. Buvo nustatyta, kad didžiausia atspindėtos spinduliuotės dalis atitinka spektro sritį $\sim 1060\text{ nm}$ – daug ilgesnius bangos ilgius negu pačių impulsų centrinis bangos ilgis. Tai paaiškina prastą cirkuliatoriaus izoliaciją, nes cirkuliatorius buvo optimizuotas 1030 nm centriniam bangos ilgiui ir jo charakteristikos atitinkamai prastėja slenkant toliau nuo optimizuoto bangos ilgio. Tikėtina, kad naudojant cirkuliatorių optimizuotą ilgesnių bangų spektro sričiai (pavyzdžiui $1040\text{-}1050\text{ nm}$), atspindys atgal galėtų būti labiau nuslopintas.

4.3 Impulsų stiprintuvo optimalios konfigūracijos nustatymas

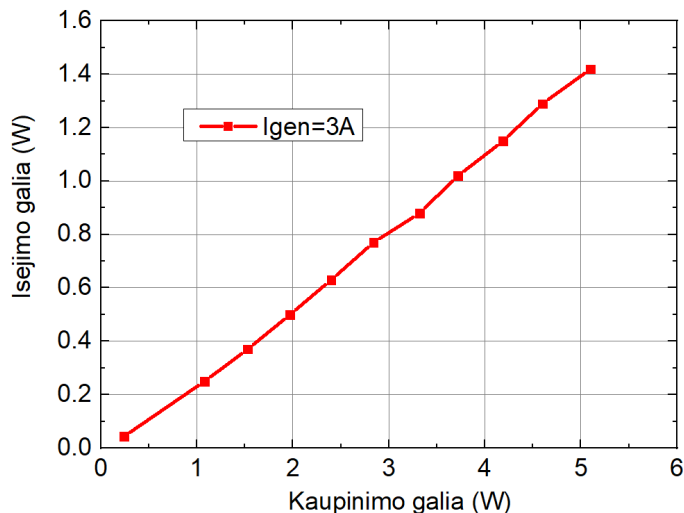
Siekiant patikrinti kaip pasikeis spektrai po stiprinimo, buvo surinkta stiprintuvo schema (Pav. 19) su išvedimu į laisvą erdvę. Spektrai po stiprintuvo buvo matuoti nuo stiklo pleišto, įvedant su kolimatoriumi į vienamodę poliarizaciją išlaikančią skaidulą, vedančią į spektro analizatorių.



Pav. 19. Šviesolaidinio stiprintuvo schema.

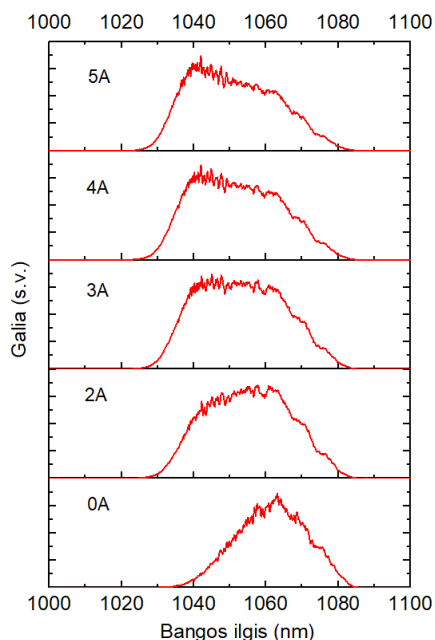
Surinkus stiprintuvą buvo išmatuota vidutinės išėjimo galios priklausomybė nuo kaupinimo galios (Pav. 20). Matome, kad pasiekta 1.4 W vidutinė spinduliuotės galia (140 kartų stiprinimas)

prie 5W kaupinimo, kas atitinka 28% optinį efektyvumą. Kadangi apie 40% kaupinimo galios buvo nesugerta, efektyvus našumas siekė ~50%. Tai gana tipinės vertės tokio tipo stiprintuvams.



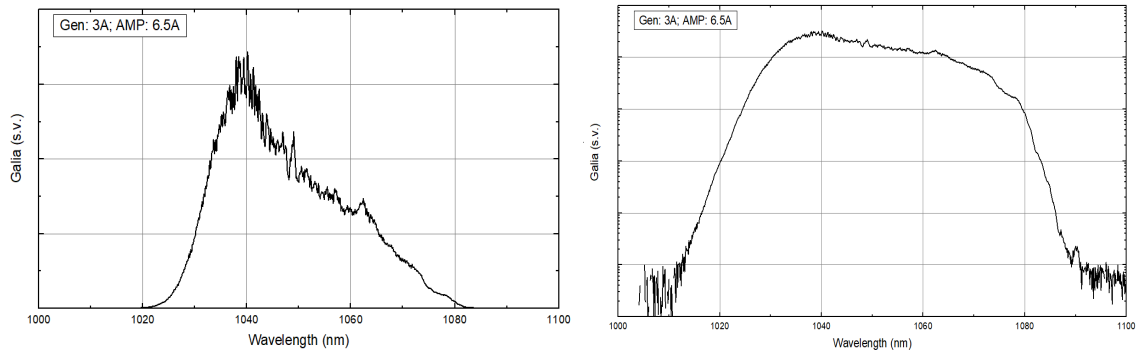
Pav. 20. Stiprintuvo išėjimo galios priklausomybė nuo kaupinimo galios.

Išmatavus impulsų spektrus po stiprintuvo buvo įvertinta kaip kinta spektrų centrinis bangos ilgis ir plotis priklausomai nuo stiprintuvo kaupinimo (0-5A, Pav. 21). Taip pat, buvo išmatuoti spektrai ir keičiant generatoriaus kaupinimo LD srovę. Nustatyta, kad spektrinės moduliacijos beveik nekinta keičiant stiprintuvo kaupinimą, o spektras plečiasi į trumpabangę sritį, kur Yb stiprinimas yra didesnis.



Pav. 21. Impulsų spektrai po stiprintuvo keičiant stiprintuvo kaupinimą (I gen. = 3 A).

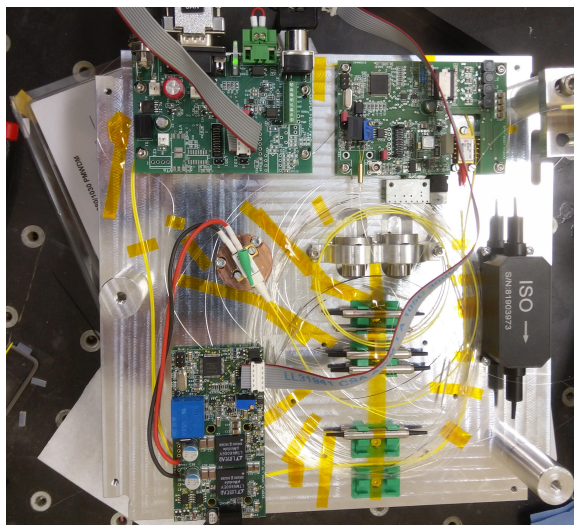
Padidinus kaupinimo srovę iki 6.5 A (5 W kaupinimo galios) ir optimizavus šviesolaidžių ilgius sistemoje buvo sugeneruoti impulsai, kurių optinis spektras pavaizduotas Pav. 22. Jis atitinka spektriškai ribotą impulsų trukmę ~66 fs, kas gerokai lenkia užsibrėžtus impulsų trukmės parametrus (<100 fs).



Pav. 22. Sugeneruotų impulsų spektras tiesinėje (kairėje) bei logaritminėje (dešinėje) skalėje prie maksimalios kaupinimo srovės (6.5 A). Vidutinė išėjimo galia buvo 1.4 W, o impulsų energija ~100 nJ.

Sugeneruotų impulsų spektras buvo itin „švarus“ – nesimato jokių netiesinių efektų, tokių kaip Ramano sklaida ar stipri fazės savimoduliacija. Logaritminėje skalėje spektras išlieka glotnus net -50 dB (10^{-5}) lygyje (Pav. 22, dešinėje). Taip pat nesimato stiprios spontantinės emisijos (ASE) spinduliuotės. Toks impulsų spektras leidžia tikėtis gerų jų spūdos rezultatų.

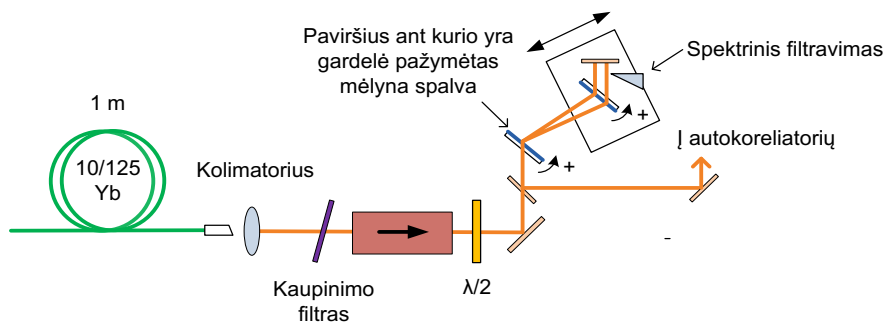
Aprašytas šviesolaidinio femtosekundinio lazerio maketas be impulsų spaustuvo (ultratrumpų impulsų generatorius, impulsų spektro bei fazės formuotuvai, galios stiprintuvai) pavaizduotas žemiau esančioje nuotraukoje. Matome, kad toks šviesolaidinis lazeris gali būti surinktas išties kompaktiškai.



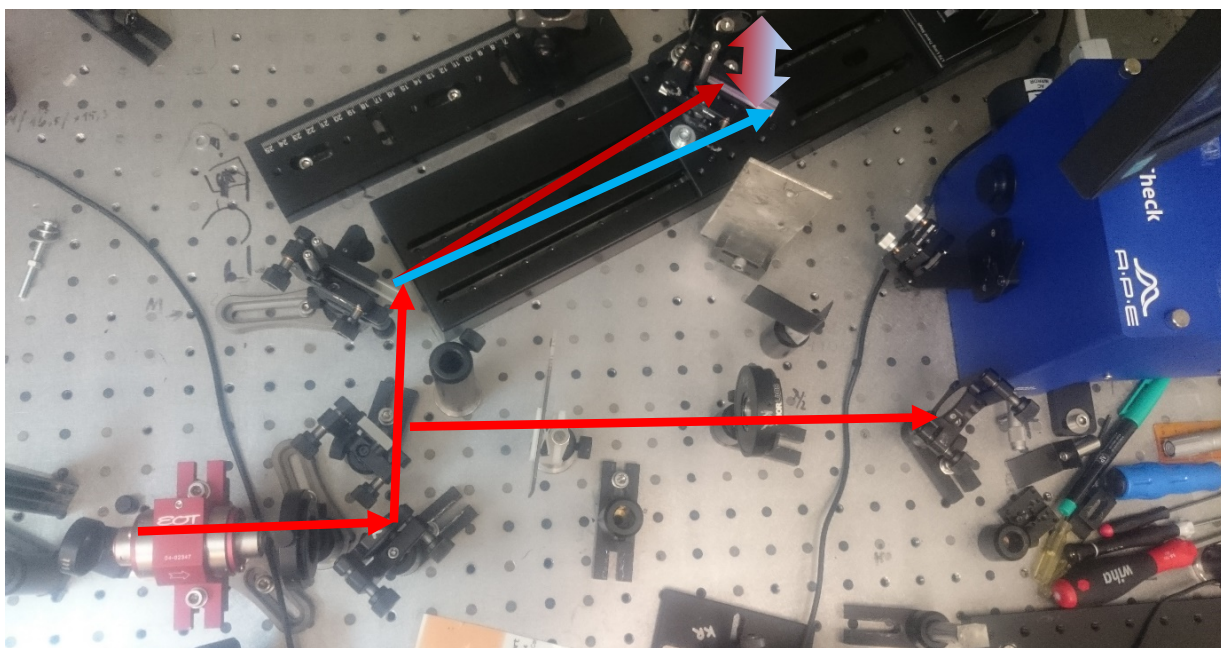
Pav. 23. Tiriamasis šviesolaidinio femtosekundinio lazerio maketas be impulsų spaustuvo.

4.4 Impulsų laikinės spūdos optimizavimas

Sugeneruoti, spektriškai bei faziškai moduluoti bei sustiprinti impulsai toliau buvo laikiškai spaudžiami. Buvo surinktas klasikinis dviejų difracinių gardelių impulsų kompresorius (Pav. 24Pav. 25). Visi gardelių laisvės laipsniai buvo suderinti naudojant optinius atspindžius nuo gardelių paviršių. Antra difraccinė gardelė buvo primontuota ant motorizuoto poslinkio staliuko, kas leido tiksliai derinti atstumą tarp gardelių.

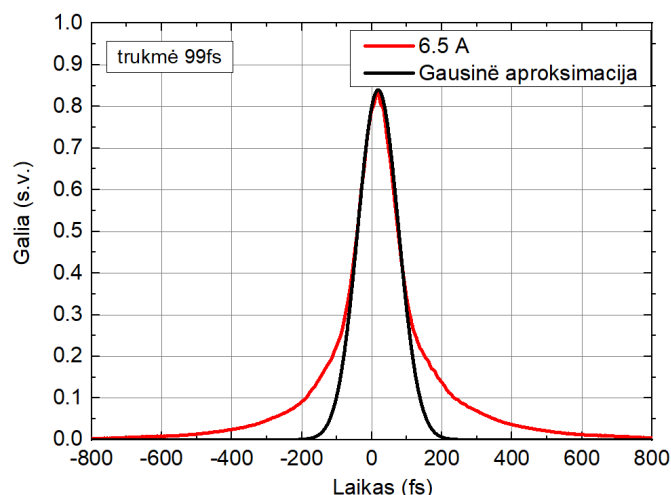


Pav. 24. Impulsų suspaudimo sistemos schema.



Pav. 25. Impulsų suspaudimo sistemos nuotrauka.

Surinkus impulsų spaustuvą buvo išmatuotas jo pralaidumas. Optimizavus pradinę poliarizaciją (kuri turi būti statmena kritimo į gardelę plokštumai), bendras impulsų spaustuvo efektyvumas siekė ~90%. Suspausti impulsai buvo matuojami naudojant APE Pulse Check autokoreliatorių. Atstumas tarp difracinių gardelių buvo optimizuojamas pagal realaus laiko autokoreliatoriaus parodymus, siekiant kuo geresnio impulsų suspaudimo (didžiausios smailinės galios). Pirmieji impulsų matavimai atskleidė ryškius autokoreliacinės kreivės „sparnus“. Įvertinta impulsų trukmė (laikant Gausinę impulsų gaubtinę) siekė 99 fs (Pav. 26), kas yra žymiai daugiau negu suskaičiuota spektriškai ribotų impulsų trukmė (~66 fs).

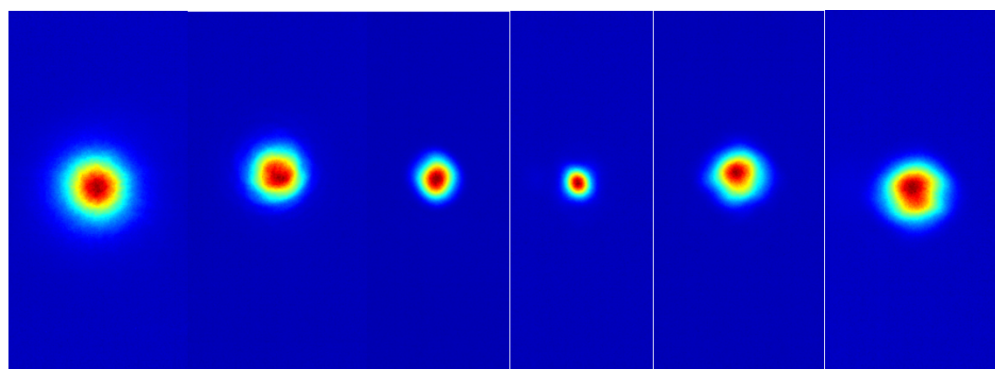


Pav. 26. Pirminės eksperimentinės autokoreliacinės kreivės palyginimas su Gauso funkcija.

Spektrinio filtravimo (nukirtimo) eksperimentai parodė, kad autokoreliacinės funkcijos sparnai gali būti šiek tiek nuslopinti užblokuojant trumpabangę impulsų spektro dalį. Tai papildomai sumažindavo impulsų trukmę iki 93 fs. Tačiau net su spektriniu filtravimu, impulsų suspaudimas buvo prastesnis negu tikėtasi remiantis skaičiavimais.

Blokuojant dalį impulsų spektro nebuvo pastebėta jokio pluošto pasiskirstymo po impulsų spaustuvo pokyčio. Tai patvirtina, kad spaustuvas buvo suderintas tinkamai.

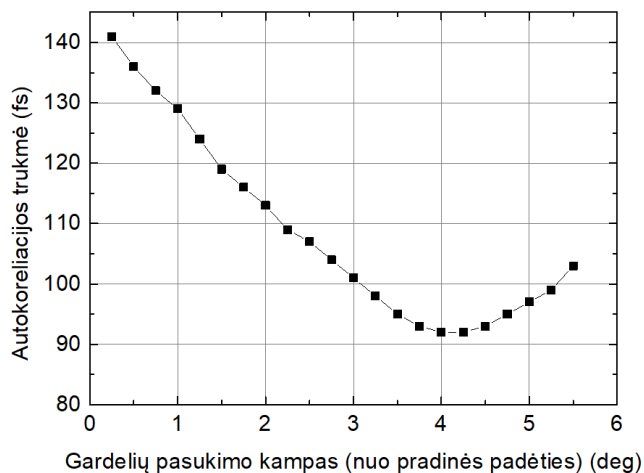
Detalesnei pluošto analizei, buvo atliktas pluošto intensyvumo pasiskirstymo z-skenavimas esant nedideliam stiprinimui. Pluoštas po spaustuvo buvo fokusuojamas naudojant $f=300$ mm lęšį, o pluošto intensyvumo pasiskirstymas matuojamas naudojant CMOS kamerą. Mažiausia užregistruota eliptiškumo parametro vertė buvo 0.9, o impulsų spaustuvo išderinimo požymių nebuvo pastebėta. Tačiau tam tikrose padėtyse buvo matomi tam tikri pluošto intensyvumo pasiskirstymo nukrypimai nuo Gausinio pasiskirstymo (Pav. 27).



Pav. 27. Pluošto po kompresoriaus intensyvumo pasiskirstymai. Kameros padėties koordinatės einant nuo kairės į dešinę: 110 mm, 129 mm, 157 mm, 175 mm, 205 mm, 215 mm.

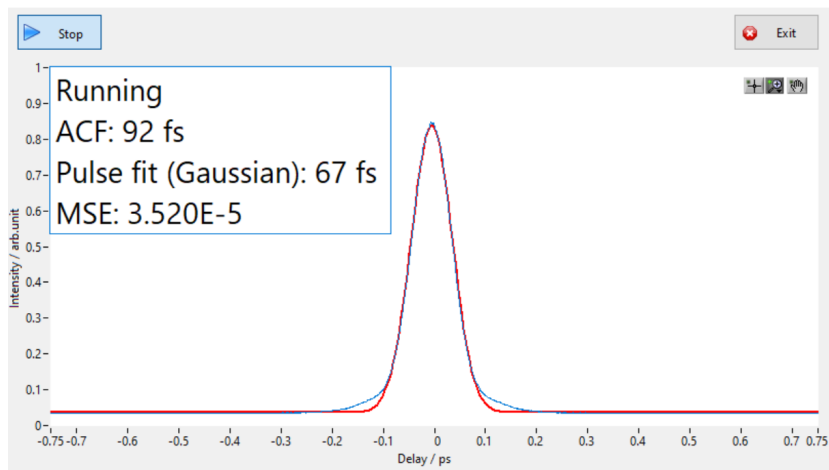
Siekiant pagerinti impulsų suspaudimą, buvo matuojama autokoreliacija ir tuo pat metu keičiamas difrakcinių gardelių pasukimas 0.25 laipsnių žingsniu. Abi difrakcinės gardelės buvo

pasukamos vienodu kampu, tokiu būdu išlaikant jų lygiagretumą. Optimalus impulsų suspaudimas buvo pasiektas pasukus gardeles 4 laipsnių kampu (Pav. 28). Atstumas tarp gardelių buvo optimizuojamas po kiekvieno kampo paderinimo. Po difrakcinių gardelių pasukimo paderinimo, optimalus atstumas tarp gardelių sumažėjo iki ~23 cm.



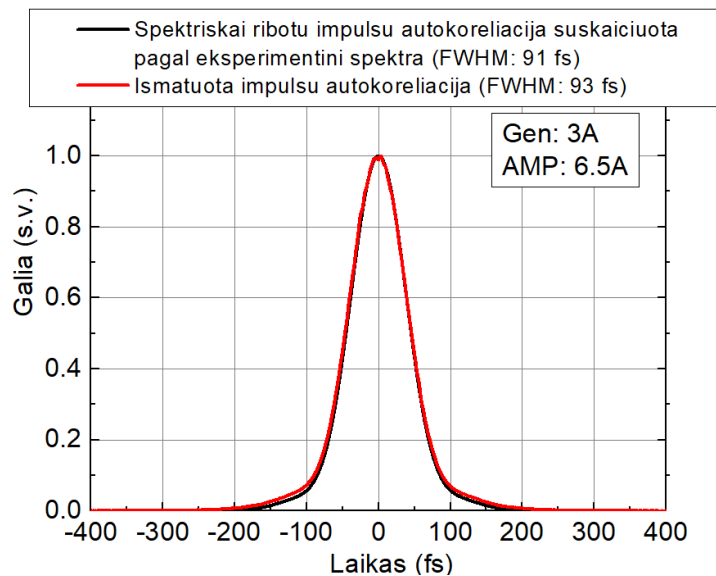
Pav. 28. Impulsų autokoreliacijos kreivės trukmė priklausomai nuo gardelių pasukimo kampo.

Po gardelių kampo optimizacijos, suspaustų impulsų autokoreliacijos trukmė sumažėjo iki 92 fs, kas atitinka 67 fs impulsų trukmę taikant Gausinę aproksimaciją. Išmatuota suspaustų impulsų autokoreliacija (po gardelių kampo optimizavimo) pasižymėjo labai artima Gausinei forma su minimaliais „sparnais“.



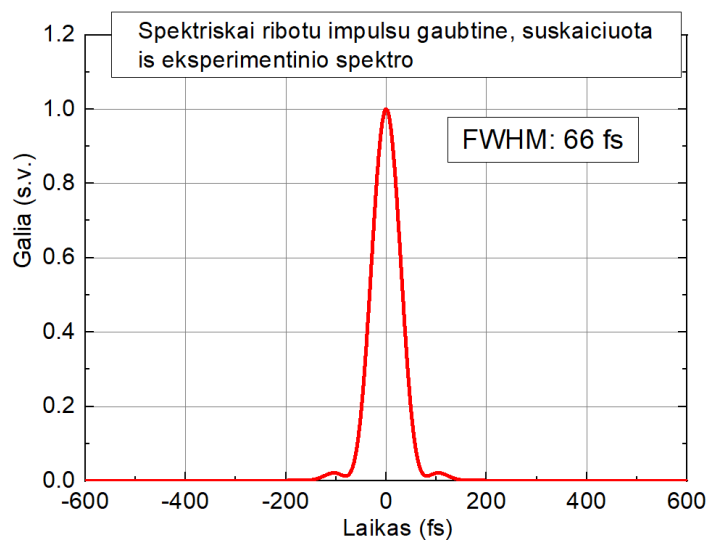
Pav. 29. Autokoreliatoriumi išmatuotos suspaustų impulsų autokoreliacinės funkcijos po difrakcinių gardelių kampo optimizacijos.

Po gardelių kampo optimizacijos gauti eksperimentiniai rezultatai puikiai atitiko suskaičiuotą teorinę spektriškai ribotų impulsų trukmę ir gaubtinę. Suskaičiuavus teoriškai gautų impulsų autokoreliacijos funkciją ir palyginus ją su eksperimentiškai išmatuota, buvo matomas beveik idealus sutapimas (Pav. 30). Tai reiškia, kad eksperimentinės autokoreliacinės kreivės „sparnai“ atsiranda dėl impulsų spektro formos, o ne dėl dispersijos nesuderinimo.



Pav. 30. Palyginimas išmatuotos impulsų autokoreliacinės funkcijos (raudona kreivė) su teoriškai suskaičiuota spektriškai ribotų impulsų autokoreliacija (juoda kreivė).

Kadangi eksperimentinė ir teorinė autokoreliacinės funkcijos puikiai sutapo, galima teigti, kad eksperimentiškai gauti suspausti impulsai turi gaubtinę identišką suskaičiuotų impulsų gaubtinei. Iš čia galima teigti, kad eksperimentiškai suspaustų impulsų trukmė buvo 66 fs (Pav. 31). Sugeneruotų impulsų kokybė taip pat buvo puiki, su minimaliais nukrypimais nuo Gauso funkcijos. Šie nukrypimai yra įtakoti sustiprinto spektro formos, kuri nėra gausinė.



Pav. 31. Spektriškai ribotų impulsų laikinė gaubtinė suskaičiuota pagal eksperimentinį impulsų spektrą.

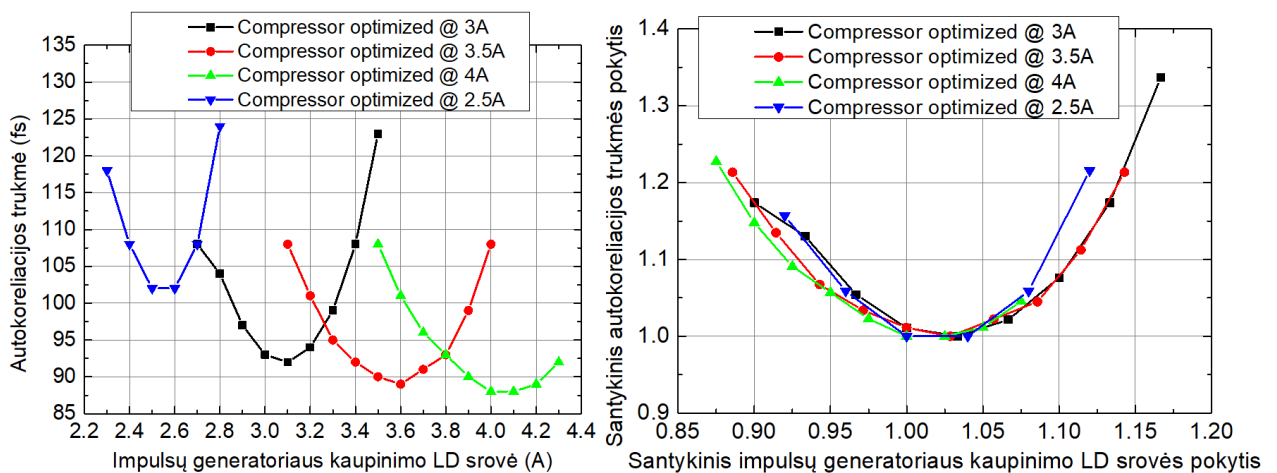
Siekiant patikrinti sistemos jautrumą išderinimui, buvo išmatuoti suspaustų impulsų pokyčiai, kai buvo išderinami kai kurie sistemos parametrai.

Skaidulinio stiprintuvo stiprinimas. Stiprinimas buvo keičiamas modifikuojant kaupinimo lazerinio diodo srovę. Buvo nustatyta, kad suspaustų impulsų autokoreliacija yra nejautri stiprinimo

pokyčiui. Keičiant stiprintuvo kaupinimo lazerinio diodo srovę intervale 2A – 6.5A, impulsų autokoreliacija beveik nesikeitė.

Impulsų generatoriaus kaupinimo srovė. Buvo nustatyta, kad impulsų suspaudimas priklauso nuo impulsų generatoriaus kaupinimo. Padidinus arba sumažinus impulsų generatoriaus LD srovę, impulsų autokoreliacijos trukmė padidėja, tačiau šis padidėjimas gali būti kompensuojamas paderinus atstumą tarp difrakcinių gardelių. Po atstumo tarp gardelių optimizavimo, mažiausia galima suspaustų impulsų trukmė buvo gaunama esant didžiausiai impulsų generatoriaus LD srovei ir atitinkamai didžiausiai impulsų energijai iš impulsų generatoriaus (Pav. 32, kairėje).

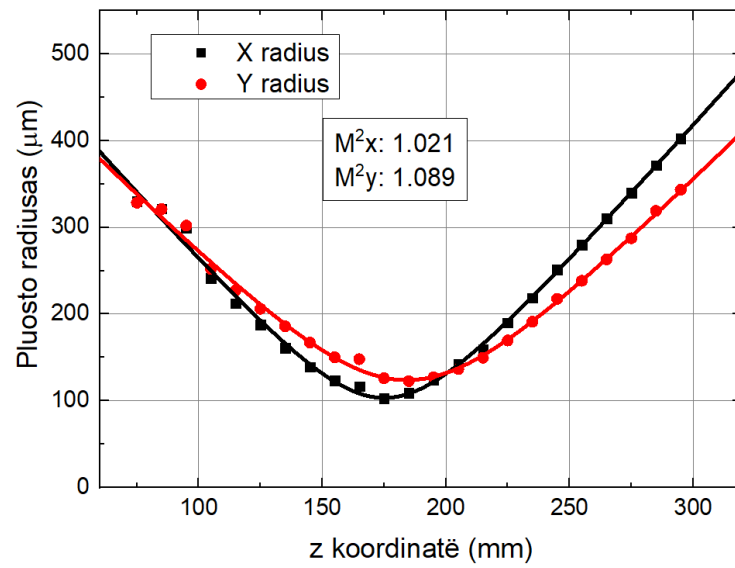
Impulsų generatoriaus kaupinimo LD srovės išderinimo intervalas, atitinkantis vienodą impulsų trukmės padidėjimą, padidėja padidinus pradinę impulsų generatoriaus kaupinimo LD srovės vertę (kuriai yra optimizuojamas atstumas tarp gardelių). Tačiau paskaičiavus santykinį impulsų trukmės padidėjimą priklausomai nuo santykinio generatoriaus kaupinimo LD srovės pokyčio, didelio skirtumo, tarp atvejų atitinkančių skirtingas pradines kaupinimo LD srovės vertes, nesimato (Pav. 32, dešinėje). Praktiškai šie rezultatai reiškia, jog kaupinimo srovei bei tuo pačiu išėjimo galiai iš UIG kintant +/-10% impulsų spūda pasikeistų +/-7 fs. Tai yra jautrumas nėra labai aukštas ir tinka tolesniam produkto išdirbimui.



Pav. 32. Iš kairės – impulsų autokoreliacijos trukmės priklausomai nuo impulsų generatoriaus kaupinimo LD srovės. Iš dešinės – santykinės autokoreliacijos trukmės priklausomai nuo santykinės impulsų generatoriaus kaupinimo LD srovės.

Buvo išmatuoti pluošto intensyvumo pasiskirstymai po impulsų spaustuvo naudojant z-skenavimo metodiką ir Cinogy CMOS kamerą. Optinės galios nuslopinimui prieš kamerą buvo naudojama pusės bangos ilgio plokštelė su poliarizatoriumi ir neutralaus tankio filtrai. Naudojant poliarizatorių, optinė galia buvo nuslopinama 10 kartų ir tolesnis slopinimas buvo vykdomas naudojant neutralaus tankio filtrus. Pluošto fokusavimui buvo naudojamas F=300 mm lęšis, charakterizuojant pluoštą po spaustuvo, ir F=150 mm lęšis, matuojant pluoštą po skaidulinio stiprintuvo ir impulsų spaustuvo.

Išmatuota vidutinė pluošto kokybės vertė abiem kryptimis buvo <1.1 , kas iš esmės atitinka difrakcijos apribotą Gausinį pluoštą, t.y. jis gali būti laikomas idealiu. Nors buvo pastebėtas nemažas pluošto eliptiškumas (~ 0.8), tačiau jis buvo nulemtas neidealiam sujustiruoto kolimatoriaus lęšio.



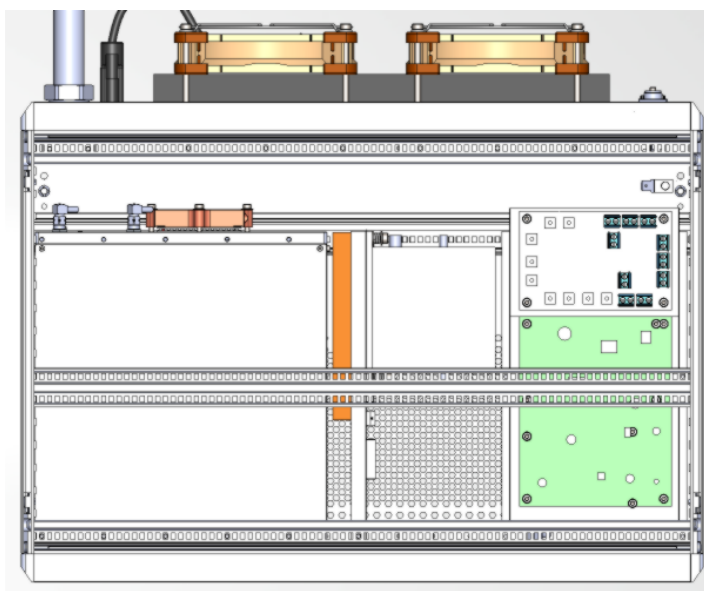
Pav. 33. Pluošto kokybės parametro matavimai po impulsų spaustuvo.

II darbo dalis. Prototipo surinimas ir testavimas

5. Prototipo surinkimas

5.1 Šviesolaidinės dalies bei valdymo bloko projektavimas

Siekiant, kad kuriamas lazerinis šaltinis būtų kiek įmanoma patogesnis klientų naudojimui, kartu su įmonės „Litilit“ inžinieriais buvo nuspręsta, kad produktą sudarys du atskiri mazgai – valdymo blokas ir lazerinė galva. Valdymo bloko išmatavimai buvo pasirinkti atitinkantys 19 colių standarto U3 formato stovų laikiklį, kas leidžia patogų šio bloko integravimą į įvairias optines sistemas, tokias kaip daugiafotoniniai mikroskopai, polimerizacijos staklės ir kt. Šiame bloke buvo patalpinta šviesolaidinė optinė grandinė bei lazerių valdymo elektronika (Pav. 34).



Pav. 34. Suprojektuoto lazerio valdymo bloko su integruota šviesolaidine grandine bei valdymo elektronika vidaus vaizdas.

Kadangi valdymo blokas generuoja nemažai šilumos (~100 W), jo aušinimui buvo pasitelkti ventiliatoriai. Valdymo elektronikai didelių reikalavimų dėl jos išdėstymo nėra, tad pagrindinis kriterijus yra surinkimo bei pajungimo patogumas. Tuo tarpu šviesolaidinė grandinė dar turi būti gerai aušinama ir apsaugota nuo mechaninių pažeidimų, tad ji patalpinta į atskirą metalinį korpusą su geru šilumos nuvedimu.

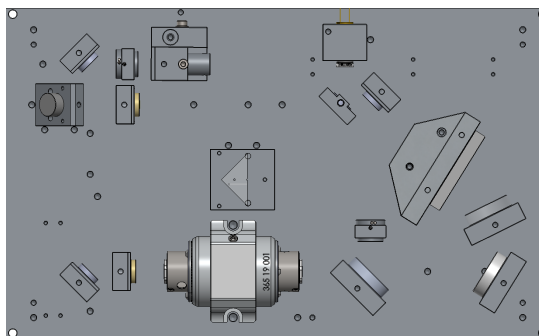
Pati šviesolaidinė grandinė išliko beveik nepakitusi nuo maketo sukurto 1 darbo dalyje, tik buvo padidinta naudojamo kaupinimo lazerinio diodo galia nuo 5 W iki 10 W, kad pasiekti aukštesnę optinę galią lazerio išėjime. Sugeneruoti, sustiprinti faziškai bei spektriškai moduluoti impulsai buvo perduoti metaliniu šarvu apsaugotu šviesolaidžiu į lazerinę galvą, kurioje laisvoje erdvėje suformuojamas norimas pluoštas bei atliekama impulsų spūda.

5.2 Optomechaninės grandinės projektavimas, gamyba ir surinkimas

Principinė šviesolaidinio femtosekundinio lazerio laisvos erdvės optinė schema išliko iš esmės nepakitusi lyginant su naudota makete. Prieš projektuojant optomechaninę grandinę, pirmiausia buvo sukurti laikiklių mazgai. Jų kūrimo principai aprašyti Metodikoje 3.2. Sukūrus optomechaninius mazgus, jie buvo išdėstyti pagal optinę schemą atsižvelgiant į gabaritus. Lazerinio produkto laisvos erdvės optomechaninė grandinė buvo patalpinta į atskirą suprojektuotą korpusą, kuris su valdymo bloku sujungtas šarvu apsaugotu šviesolaidžiu.

Suprojektuoto femtosekundinio šviesolaidinio lazerio optomechaninė grandinė pavaizduota Pav. 35. Ją sudaro trys pagrindiniai funkciniai elementai: šviesolaidinis kolimatorius, skirtas šviesos iš šviesolaidžio išvedimui į laisvą erdvę, optinis izoliatorius, skirtas apsaugoti šviesolaidinį lazerį nuo iš išorės grįžusios atspindėtos spinduliuotės, bei impulsų kompresorius, skirtas suspausti faziškai moduluotus optinius impulsus iki spektriškai ribotos trukmės. Grandinėje taip pat naudojami veidrodžiai pluošto nukreipimui bei lęšiai jo sklaidimo priderinimui.

Suprojektuoti optomechaniniai elementai buvo pagaminti CNC staklėmis ir išplauti panaudojant cheminius tirpalus. Tada į juos buvo įtvirtinti optiniai elementai, o laikikliai su optiniais elementais įtvirtinti ant mechaninės bazės. Optinė schema buvo suderinta panaudojant sumažintos galios spinduliuotę iš šviesolaidžio ir pravedant lazerinį pluoštelį per numatytas optinių elementų vietas. Galutinis derinimas buvo atliktas stebint optinius lazerio parametrus – vidutinę galią, pluošto bei impulsų formą.



Pav. 35. Šviesolaidinio lazerio laisvos erdvės supaprastinta optomechaninė grandinė.

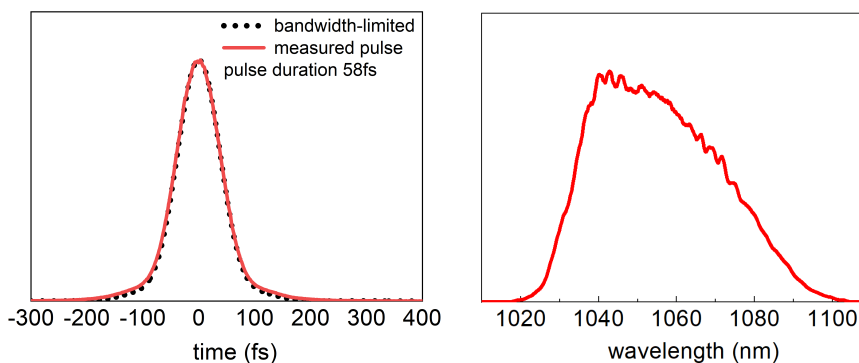
Be aukščiau aprašyto lazerio optomechanikos gamybos bei surinkimo, buvo atlikta parengiamieji darbai, kurių tikslas buvo patikrinti sukurtų optomechaninių mazgų ilgalaikį stabilumą bei atitikimą lazerio reikalavimams. Tai pasiekti pagal buvo atlikti tyrimai, kurių rezultatai, dėl jų labai techninio pobūdžio, šiame darbe nepateikiami. Tačiau apibendrinus buvo padaryta išvada, kad visi sukurti ir patobulinti laikikliai pasižymi aukštu mechaniniu stabilumu, kuris yra tinkamas tolesniam lazerio vystymui.

Tiek optomechaninių laikiklių, tiek lazerio prototipo korpuso projektavimas buvo atliekamas padedant kompanijos Lilitit mechanikos konstruktoriams bei inžinieriams.

6.1 Šviesolaidinio lazerinio šaltinio charakterizavimas

Surinkus į valdymo bloką šviesolaidinę grandinę bei valdymo elektroniką ir suderinus optomechaninę grandinę jie buvo uždaryti į apsauginį korpusą. Pilnai surinkus produkto prototipą, jis buvo detalai charakterizuojamas. Pirmiausiai buvo išmatuoti prototipo optiniai parametrai. Femtosekundinių lazerių taikymams labiausiai svarbūs yra šie optiniai parametrai – optinė galia bei impulsų energija, lazerinio pluošto forma, impulsų laikinė kokybė bei trukmė ir optinis spektras.

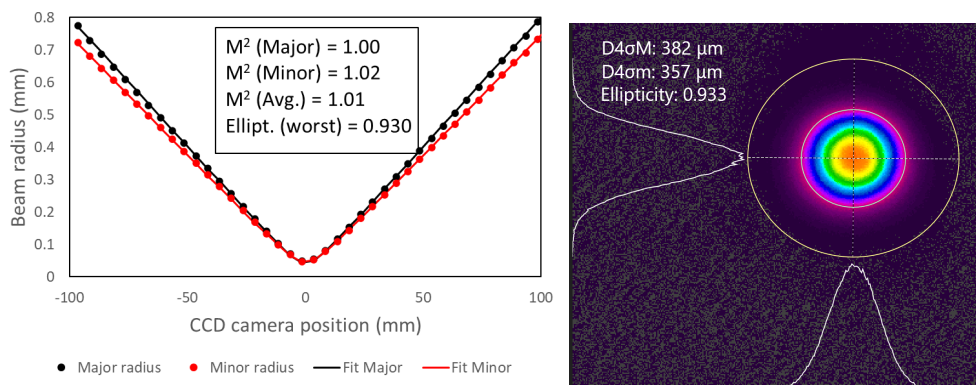
Skenuojančiu autokoreliatoriumi (APE PulseCheck) išmatuoti šviesolaidinio femtosekundinio lazerio prototipo impulsai pavaizduoti Pav. 36 (kairėje). Šalia pavaizduotas optiniu spektro analizatoriumi išmatuotas lazerio spektras. Pirmiausia, išmatuota impulsų trukmė (58 fs) yra šiek tiek trumpesnė, nei pirmoje projekto veikloje pademonstruotame makete (66 fs). Šis skirtumas buvo pasiektas optimizavus impulsų generatoriaus spektrą, dėl ko išėjimo spektras iš lazerio pasiekė net 1100 nm bangos ilgį (makete ilgabangė riba buvo ~1080 nm). Mažesnė impulsų trukmė padidina impulsų smailinę galią esant tai pačiai vidutinei galiai, kas yra labai patrauklu netiesiniams taikymams. Taip pat galima pastebėti jog kaip ir lazerio maketo atveju, impulsų trukmė yra labai arti spektriškai ribotos (Pav. 36, taškuota linija) – impulsas yra optimaliai suspaustas ir neturi nekompensuotos fazės.



Pav. 36. Femtosekundinio šviesolaidinio lazerinio šaltinio prototipo impulsų autokoreliacija (kairėje) ir optinis spektras (dešinėje).

Kitas labai svarbus lazerio parametras – jo pluošto kokybė. Femtosekundinių impulsų lazeriai dažniausiai pasižymi artimu Gausiniam pluoštui, tačiau net nedideli nukrypimai nuo idealios Gausinės formos gali ženkliai pabloginti netiesinio mikroskopo erdvinę skyrą (tiek vaizdinimo plokštumoje, tiek gylyje) bei sumažinti netiesinį signalą. Pluošto kokybės matavimui panaudotas standartinis industrijoje z-skenavimo metodas, kai pluoštelio kelyje pastatomas lęšis ir su kamera matuojamas jo skersmuo išilgai sklidimo krypties. Iš šio matavimo rezultatų galima nustatyti du

svarbiausius pluošto parametrus: pluošto kokybės parametą ($M^2 = 1$ idealaus Gausinio pluoštelio atveju) bei eliptiškumą ($\epsilon = 1$ Gausiniam pluošteliiui). Aprašytas matavimas buvo atliktas panaudojant kalibruotą Spiricon SP920s CCD kamerą, o matavimo rezultatai pateikti **Pav. 37**.



Pav. 37. Kairėje: femtosekundinio šviesolaidinio lazerio pluošto kokybės matavimas z-skenavimo metodu; dešinėje: pluošto profilis lęšio židinyje („tolimas laukas“).

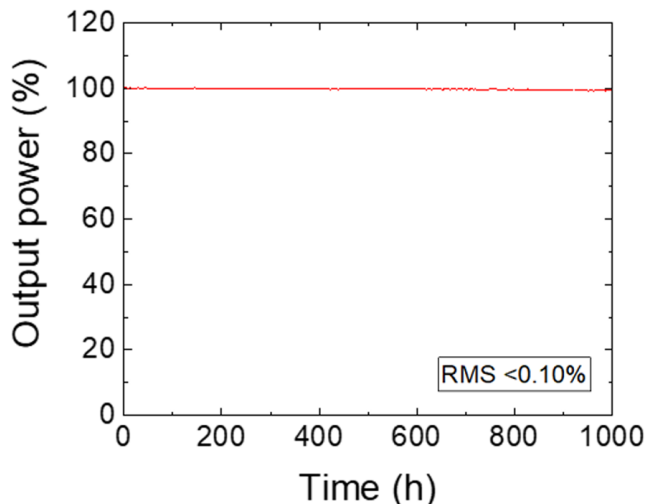
Išmatuota lazerio prototipo pluošto kokybė ($M^2 = 1.01$) faktiškai atitinka idealų Gausinį pluoštelį, o eliptiškumas taip pat labai geras ($\epsilon = 0.93$). Gautas rezultatas vėlgi geresnis nei iš lazerio maketo ($M^2 = 1.06$, $\epsilon = 0.9$). Tam įtakos turėjo du faktoriai: visų pirma buvo patobulinta šviesolaidinio kolimatoriaus konstrukcija, kas leido pasiekti geresnį pluošto eliptiškumą bei kokybę; antra – buvo panaudota aukštesnės klasės pluošto vaizdinimo kamera, kuri labai tiksliai atkuria pluošto profilį, kas sumažino M^2 parametro matavimo paklaidas.

Galiausiai terminiu galios matuokliu buvo išmatuota femtosekundinio šviesolaidinio lazerio vidutinė optinė galia, kuri siekė 3.2 W. Visų aprašytų matavimų santrauka pateikta **Lentelė 3**.

Lentelė 3. Femtosekundinio šviesolaidinio lazerio išmatuoti pagrindiniai optiniai parametrai.

	Femtosekundinis šviesolaidinis lazeris
Išėjimo galia	3.2 W
Impulsų pasikartojimo dažnis	15.1 MHz
Impulsų energija	210 nJ
Impulsų trukmė	58 fs
Spektro sritis	1020-1100 nm
Pluošto kokybė M^2	1.01
Pluošto eliptiškumas ϵ	0.93

Po optinių parametų matavimų prototipas buvo įjungtas ir paliktas veikti darbinėje (laboratorijos) aplinkoje. Laboratorijos temperatūra buvo palaikoma 20 ± 1 °C. Šviesolaidinio lazerio prototipas buvo paliktas veikti 1000 val. Ilgalaikio veikimo metu buvo matuojama vidutinė optinė galia, o matavimo rezultatai pateikti **Pav. 38**. Matome, kad viso veikimo metu prototipo optinė galia buvo itin stabili (RMS triukšmas 0.1%).



Pav. 38. Ilgalaikio femtosekundinio šviesolaidinio lazerio prototipo veikimo tyrimai. Išmatuota vidutinė optinė galia.

Pirminio prototipo testavimo rezultatai buvo labai teigiami. Nebuvo nustatyta jokių esminių trūkumų, dėl kurių kuriama lazerinė sistema galėtų neatitikti šios klasės produktams taikomų reikalavimų. Konkrečiai, išmatuoti optiniai parametrai (impulsų trukmė bei kokybė, pluošto kokybė, spektro plotis bei kokybė) atitiko maketų tyrimų metu nustatytas tikslines vertes. Surinkto šviesolaidinio lazerio prototipo galutinis bendras vaizdas yra pateiktas **Pav. 39**.

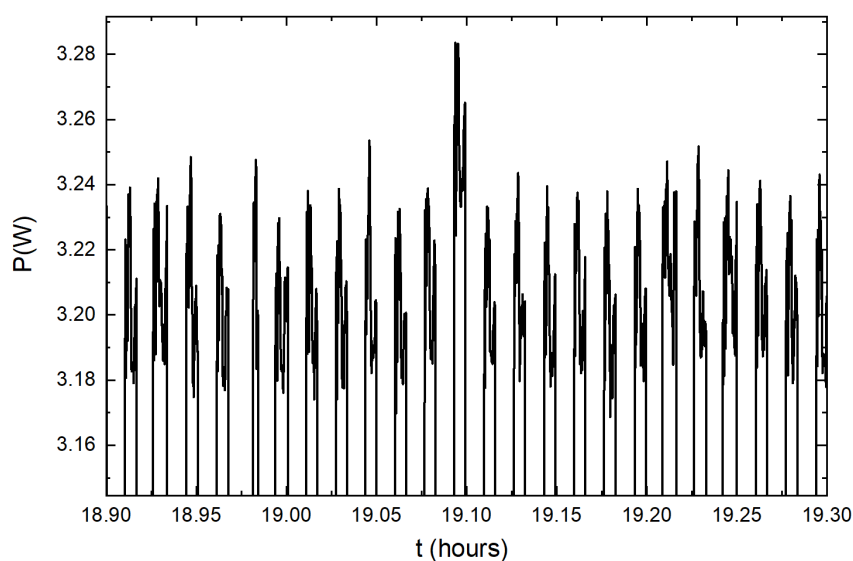


Pav. 39. Patobulintas femtosekundinio šviesolaidinio lazerio prototipas.

6. Prototipo pagreitinio senėjimo tyrimai

Norint įsitikinti, kad sukurtas produktas galės veikti daugelį metų, buvo pritaikyta pagreitinio senėjimo testavimo metodika 3.3. Papildomai, be metodikoje aprašytų vibracinių bei termociklavimų testų, taip pat buvo atliktas prototipo daugkartinis (3000 kartų) paleidimo bei išjungimo testas.

Lazeris, panaudojus sukurtą valdymo programą, buvo automatiškai įjungiamas, palaikomas 50 s ir išjungiamas 10 s. Iš viso buvo atlikta 3000 tokių ciklų. Šio testo metu buvo matuojama lazerio vidutinė galia. Išmatuotos optinės galios kreivės fragmentas testo metu pavaizduotas (Pav. 40). Po testo buvo patikrinta, jog visi įjungimai sėkmingai pavyko (užregistruota >3 W išėjimo galia).



Pav. 40. Šviesolaidinio femtosekundinio lazerio įjungimų/išjungimų testo fragmentas. Iš viso lazeris buvo testuojamas 50 val su 1 min įjungimų periodu (3000 kartų).

Vėliau prototipas buvo patalpintas į terminę kamerą (Pav. 9, kairėje), kurioje atliktas temperatūros ciklavimo testas (+10...+80 °C, 50 kartų, temperatūros kilimo ir kritimo laikas – po 1 val). Šis testas leidžia nustatyti ar itin aukšto tikslumo optomechaniniai elementai yra tinkamai ir stabiliai įtvirtinti ir ar laikui bėgant lazeris neišsiderins. Po testo vėl išmatuoti optiniai parametrai.

Galiausiai, po termociklavimo, prototipas buvo pastatytas ant vibravimo stendo (Pav. 9, dešinėje) ir buvo atliktas vibravimo testas (0.5 g 10-500 Hz dažnio skenavimo laikas – 1 val). Kaip ir termociklavimas, šis testas leidžia nustatyti ar optomechaniniai elementai yra tinkamai ir stabiliai įtvirtinti. Taip pat yra patikrinama ar nėra laisvų konstrukcinių elementų.

Visi pagrindiniai prototipo optiniai parametrai buvo fiksuojami prieš ir po kiekvieno testo. Testų rezultatų santrauka pateikta Lentelė 4.

Lentelė 4. Femtosekundinio šviesolaidinio lazerio prototipo optinių parametų prieš ir po testavimų matavimų rezultatai.

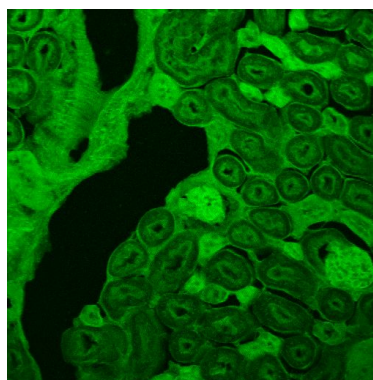
Parametras Testas	Išėjimo galia, W		Impulsų trukmė, fs		Pluošto kokybė M^2		Pluošto eliptiškumas	
	Prieš	Po	Prieš	Po	Prieš	Po	Prieš	Po
Ijungimai/išjungimai, 3000 kartų	3.18	3.21	58	58	1.01	1.01	0.93	0.93
Termociklavimas, nuo +10°C iki +80°C, 50 ciklų	3.21	3.20	58	61	1.01	1.02	0.93	0.92
Vibravimas, 0.5 g, 10 - 500 Hz, 1 val	3.20	3.15	61	60	1.02	1.02	0.92	0.92

Iš lentelėje pateiktų rezultatų matome, kad jokių esminių parametų pokyčių po atliktų pagreitinoto senėjimo testų nepastebėta. Tai yra parengiamojo darbo, atlikto kuriant bei testuojant lazerio optomechanines komponentes, pasekmė.

7. Prototipo testavimas daugiafotonės mikroskopijos laboratorijose

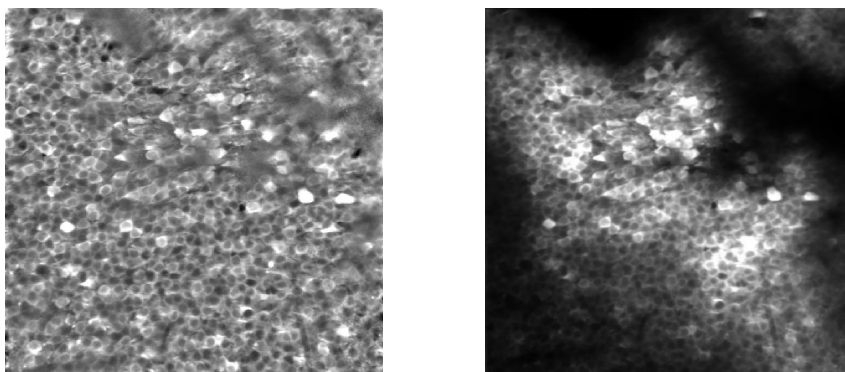
Galiausiai sukurtas lazerio prototipas buvo nusiųstas išmėginimui į daugiafotonės mikroskopijos laboratorijas.

Šviesolaidinis lazeris buvo paskolintas kompanijai Thorlabs, kuri yra viena rinkos lyderių gaminant daugiafotonius mikroskopus. Jie atliko bandomuosius tyrimus su pelės inkstų vaizdinimu (Pav. 41). Gauti rezultatai buvo labai teigiami lyginant su kitų kompanijų panašios klasės produktais.



Pav. 41. Pelės inksto pjūvio vaizdas gautas registruojant antros harmonikos signalą apšviečiant darbe sukurto femtosekundinio šviesolaidinio lazerio prototipu. Nuoroda: Thorlabs (naudojant Bergamo II multifotoninį mikroskopą).

Sukurtas femtosekundinis šaltinis taip pat buvo paskolintas Kembridžo Universiteto neuromokslo tyrimų grupei, kuriai vadovauja dr. Julija Krupič. Jie atliko bandomuosius tyrimus su pelės smegenų ląstelėmis bei palygino rezultatus su grupės turimu titano safyro femtosekundiniu lazeriu ties 1050 nm bangos ilgiu (Pav. 42).



Pav. 42. Hipokempuso CA1 ląstelės pelėje. Vaizdinimo gylis apie 200 μm . Vienos ląstelės dydis apie 20 μm . Vaizdinimas atliktas in vivo, pelei naviguojant virtualios realybės aplinkoje. Kairėje: panaudotas darbe sukurtas femtosekundinis šaltinio prototipas; dešinėje: Ti:Safyro lazeris. Nuoroda: Kembridžo Universitetas, dr. Julija Krupič.

Maksimali panaudota lazerių galia buvo 150 mW, iš kurių apie 50 mW pasiekė pelės smegenis. Daugiau vidutinės galios naudoti negalima dėl audinių kaitinimo. Taigi esant 150 mW abiejų šaltinių galiai, integruotas signalas iš bandinio, panaudojant darbe sukurtą femtosekundinį lazerį, buvo net apie 8 kartus stipresnis. Tai galima paaiškinti ženkliai aukštesne projektinio lazerio, lyginant su titano safyro lazeriu, smailine impulsų galia (ant bandinio atitinkamai 50 kW ir 6 kW). Ženkliai aukštesnė smailinė galia gauta dėl apie 5 kartus aukštesnės impulsų energijos prie tos pačios vidurinės galios (dėl žemesnio pasikartojimo dažnio – 15 MHz vs 80 MHz) bei ženkliai mažesnės trukmės (58 fs vs 90 fs). Taigi sukurtas femtosekundinis lazeris puikiai tinka multifotoninės mikroskopijos taikymams.

8. Pagrindiniai rezultatai

1. Optimizuotai UGI schemai buvo atlikta >10 tūkst. startavimo matavimų. Rezultatai parodė, kad maksimali startavimo trukmė buvo 1,3 s, o labiausia tikėtina ~200 ms.
2. Optimizavus impulsų stiprintuvo šviesolaidžių ilgį, buvo sugeneruoti impulsai, kurių spektras atitinka spektriškai ribotą impulsų trukmę ~66 fs. Suoptimizavus kampą tarp difrakcinių gardelių, suspaustų impulsų autokoreliacijos trukmė siekė 92 fs, kas atitinka 67 fs impulsų trukmę taikant Gausinę aproksimaciją bei faktiškai sutampa su spektriškai ribota impulsų trukme.
3. Tikrinant sistemos jautrumą išderinimui, buvo išderinami kai kurie sistemos parametrai ir matuojami suspaustų impulsų pokyčiai. Rezultatai parodė, kad suspaustų impulsų autokoreliacija yra nejautri stiprinimo pokyčiui, o impulsų suspaudimas priklauso nuo UIG kaupinimo. Nustatyta, jog kintant UIG išėjimo galiai $\pm 10\%$, impulsų spūda keičiasi apie 7 fs, t.y. jautrumas nėra aukštas.
4. Optimizuotos optinės grandinės pagrindu buvo suprojektuotas bei surinktas šviesolaidinio femtosekundinio lazerio prototipas.
5. Išmatuota šviesolaidinio lazerio prototipo impulsų trukmė – 58 fs. Tai praktiškai atitinka spektriškai ribotą trukmę bei parodo, kad impulsų spūda yra optimali.
6. Išmatuotas lazerio prototipo pluošto kokybės parametras gautas $M^2 = 1.01$, o eliptiškumas $\epsilon = 0.93$. Tai yra labai geri rezultatai, faktiškai atitinkantys simetrinę Gausinę pluoštą ($M^2 = 1$, $\epsilon = 1$)
7. Su prototipu buvo atliktas ilgalaikis vidutinės optinės galios tyrimas – lazeris veikė 1000 val. prie pastovios 20 ± 1 °C temperatūros – veikimo metu prototipo galia buvo labai pastovi (RMS ~0.1%).
8. Su prototipu buvo atliktas daugkartinis įjungimo/išjungimo testas. Visi 3000 įjungimai sėkmingai pavyko.
9. Su prototipu atlikus 50 termociklų $+10^\circ\text{C} - +80^\circ\text{C}$ temperatūromis bei vibravimo 0.5 g. 10-500 Hz 1 val. testą ir palyginus lazerio parametrus prieš ir po testo, rezultatai neviršijo nustatytų parametru pokyčio ribų.
10. Prototipas buvo paskolintas daugiafotonės mikroskopijos taikymams, kurie parodė, jog sukurtas lazerinis šaltinis puikiai tinka šiam taikymui.

9. Išvados

Šiame darbe buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai siekiant sukurti praktišką femtosekundinį šviesolaidinį šaltinį tinkantį įvairiems taikymams bei išnaudojant ultratrumpų impulsų generatoriaus bei iterbiu legiruotų šviesolaidinių stiprintuvų privalumus. Suprojektavus, charakterizavus bei optimizavus impulsų generatoriaus, šviesolaidinio stiprintuvo grandines bei priderinus gardelinį impulsų spaustuva, buvo gauti itin aukštos kokybės spektriškai riboti ir itin mažos trukmės ir aukštos energijos femtosekundiniai impulsai. Ištyrinėtas suspaustų impulsų jautrumas skirtingiems šviesolaidinio lazerio parametrams parodė, kad jautrumas nėra per didelis ir galima realizuoti praktiškai veikiančią femtosekundinį lazerį tinkamą biofotonikos bei kitiems taikymams.

Buvo pagamintas produkto prototipas ir atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių metu buvo sukurti produkto optomechaniniai laikikliai, suprojektuota optomechaninė laisvos erdvės grandinė ir bendras prototipo dizainas. Sukurtas prototipas buvo detaliam optiškai charakterizuotas, atlikti ilgalaikio veikimo bandymai, kurie parodė, jog lazerio pagrindinės savybės atitinka nustatytas maketavimo metu. Taip pat buvo atlikti pagreitinimo testai (įjungimų/išjungimų, vibraciniai, termociklavimo). Testai buvo sėkmingi ir parodė, jog prototipas yra tinkamas praktiniams taikymams.

Galiausiai, sukurtas prototipas buvo paskolintas tarptautinio lygio daugiafotoninės mikroskopijos laboratorijoms, iš kurių gali gauti labai teigiami atsiliepimai.

Apibendrinus galima teigti, kad visi pagrindiniai darbo tikslai ir užduotys buvo sėkmingai realizuotos, o sukurtas femtosekundinis šviesolaidinis šaltinis gali būti toliau komercializuojamas.

Aplinkos poveikiui nejautrus femtosekundinis skaidulinis lazeris generuojantis 3W vidutinę optinę galią bei sub-60fs trukmės impulsus

Goda Binkytė

SANTRAUKA

Šiame darbe „Aplinkos poveikiui nejautrus femtosekundinis skaidulinis lazeris generuojantis 3W vidutinę optinę galią bei sub-60fs trukmės impulsus“ buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai siekiant sukurti praktišką femtosekundinį šviesolaidinį šaltinį tinkantį biofotonikos taikymams bei išnaudojant ultratrumpų impulsų generatoriaus bei iterbiu legiruoatų šviesolaidinių stiprintuvų privalumus. Suprojektavus, charakterizavus schemą, buvo gauti itin aukštos kokybės spektriškai riboti ir itin mažos trukmės ir aukštos energijos femtosekundiniai impulsai, kurių jautrumas nėra didelis ir galima realizuoti praktiškai veikiančią femtosekundinį lazerį.

Buvo suprojektuotas ir surinktas lazerio prototipas, kuris buvo detaliam optiškai charakterizuotas bei atlikti ilgalaikio veikimo bandymai. Taip pat buvo atlikti pagreitinto senėjimo (įjungimų/išjungimų, vibraciniai, termociklavimo) testai, kurie buvo sėkmingi ir parodė, jog prototipas yra tinkamas komercializacijai. Apibendrinant šiame darbe buvo sukurtas aplinkos poveikiui nejautrus aukštos smailinės femtosekundinių impulsų galios šviesolaidinis lazeris tinkantis daugiafotonės mikroskopijos bei kitiems taikymams.

Environmentally stable femtosecond fiber laser generating 3W average optical power and sub-60fs pulse duration

Goda Binkytė

SUMMARY

In this work, "Environmentally stable femtosecond fiber laser generating 3W average optical power and sub-60fs pulse duration", experimental studies were carried out in order to create a practical femtosecond fiber optic source suitable for biophotonics applications and utilizing the advantages of ultrashort pulse generator and ytterbium doped fiber optic amplifiers. After designing and characterizing the scheme, high quality spectrally limited and very short duration high energy femtosecond pulses were obtained, the sensitivity of which is not high and it is possible to realize a practically working femtosecond laser.

Prototype of the laser was produced and optically characterize. Also, long-term performance tests were successfully carried out. Accelerated aging tests (on/off, vibration, thermal cycling) were also performed, which were also successful and showed that the prototype was suitable for commercialization. To summarize a practical environmentally stable high peak power femtosecond pulse fiber laser suitable for multiphoton microscopy and other applications was created.

10. Literatūra

- [1]. F. Mitschke, *Fiber Optics: Physics and Technology* (Springer, 2010).
- [2]. D. Čiplys, A. Krotkus, V. Smilgevičius, *Šviesolaidžių optika*, Vilnius: Vilniaus Universitetas, 2008.
- [3]. R. H. Stolen and R. P. De Paula, "Single-mode fiber components," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 11, pp. 1498-1511, Nov. 1987, doi: 10.1109/PROC.1987.13911.
- [4]. A. Argyros, S.J. Eichhorn, J.W.S. Hearle, M. Jaffe, T. Kikutani, *Structure, properties and characteristics of optical fibres*, Woodhead Publishing, Volume 2, 2009.
- [5]. Kęstutis Regelskis, Julijanas Želudevičius, Karolis Viskontas, and Gediminas Račiukaitis, "Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering," *Opt. Lett.* 40, 5255-5258 (2015).
- [6]. Dubietis, *Netiesinė optika*, Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2011.
- [7]. R.H. Stolen, C. Lin, Self-phase-modulation in silica optical fibers, *Phys. Rev. A* 17(4), 1448-1454 (1978).
- [8]. Masataka Nakazawa, Michael S. Stix, Erich P. Ippen, and Hermann A. Haus, "Theory of the synchronously pumped fiber Raman laser with self-phase modulation," *J. Opt. Soc. Am. B* 4, 1412-1421 (1987).
- [9]. M. J. F. Digonnet, *Fibre lasers based on rare earth-doped oxide glass*, in *Properties, Processing and Applications of Glass and Rare Earth-Doped Glasses for Optical Fibres*, ed. D. Hewak (INSPEC, 1998).
- [10]. Paschotta, R., Nilsson, J., Tropper, A. C., & Hanna, D. C., Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 33(7), 1049–1056, 1997.