

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Lazerinių tyrimų centras

Giedrius Dubosas

AKTYVIAI SINCHRONIZUOTŲ MODŲ SKAIDULINIO LAZERINIO ŠALTINIO,  
VEIKIANČIO 1570 NM BANGOS ILGIŲ SRITYJE, CHARAKTERIZAVIMAS IR  
OPTIMIZAVIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės fizikos ir optinių technologijų  
studijų programa

Studentas

Giedrius Dubosas

Darbo vadovas

dr. Julijanas Želudevičius

Instituto/Centro direktorė/atstovė

dr. Dalia Kaškelytė

Vilnius 2023

## TURINYS

Įvadas.....	2
1. Šviesos sklidimas skaidulose .....	4
1.1. Visiškas vidaus atspindys .....	4
1.2. Skaitinė apertūra .....	4
1.3. Vienmodės ir daugiamodės skaidulos.....	5
1.4. Dvigubo apvalkalo skaidulos.....	6
1.5. Poliarizaciją išlaikantys šviesolaidžiai.....	6
2. Er, Er/Yb legiruoti skaiduliniai optiniai stiprintuvai ir jų savybės .....	8
2.1. Kaupinimo konfigūracijos .....	8
2.2. Lygmenų sistemos .....	8
2.3. Sugerties ir emisijos spektrai .....	10
2.4. Stiprinimo konfigūracijos .....	11
2.5. Sugertis iš sužadinto lygmens ir kiti parazitiniai reiškiniai .....	12
3. Ultratrumpų impulsų generavimo būdai .....	13
3.1. Pasyvi modų sinchronizacija.....	13
3.2. Aktyvi modų sinchronizacija .....	14
4. Mach-Zehnder'io elektrooptiniai modulatoriai ir jų savybės.....	17
5. Eksperimentinės schemas .....	19
5.1. Optinė eksperimentinė schema .....	19
5.2. Elektroninės eksperimentinės schemas .....	20
6. Eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	21
6.1. Harmoninės aktyvios modų sinchronizacijos veikos charakterizavimas ir optimizavimas	21
6.2. Generuojamų impulsų pasikartojimo dažnio valdymo tyrimai.....	29
Pagrindiniai rezultatai ir išvados: .....	34
Literatūros sąrašas .....	35
Aprobacija .....	37
Santrauka lietuvių kalba .....	38
Santrauka anglų kalba.....	39

## Įvadas

Optinis ryšys laisvoje erdvėje yra perspektyvi, greitai besivystanti technologija, turinti didžiulį susidomėjimą dėl jos galimybių dar labiau išplėsti duomenų perdavimo galimybes [1]. Ši technologija pasižymi didžiuliu pralaidumu ir dideliu pluošto kryptingumu lyginant su tradicinėmis ryšio linijomis, todėl galima taikyti erdvinį kanalų tankinimą ir padidinti ryšio saugumą. Įprastai norint duomenų srautą paversti optiniais impulsais naudojami du pagrindiniai metodai: pirmame tiesiogiai moduluojant pradinį lazerinį diodą, o antru būdu naudojant išorinį moduliatorių, kuris iš nuolatinės veikos spinduliuotės formuoja norimus impulsus [2]. Tačiau tokie metodai neleidžia generuoti itin trumpų impulsų ir turi labai ribotas galimybes generuoti didelės smailinės galios impulsus, todėl reikia papildomų optinių stiprintuvų. Esant fiksuotai smailinei galiai, impulso energija yra proporcinga impulso trukmei, todėl trumpinant impulso trukmę reikia mažiau energijos tai pačiai išėjimo smailinei galiai išlaikyti. Ši itin trumpų impulsų veikimo savybė yra svarbi optiniam ryšiui laisvoje erdvėje esant ribotiems energijos ištekliams, pavyzdžiui, palydoviniam optiniam ryšiui. Vienas iš būdų gauti ultratrumpuosius impulsus optiniam ryšiui - pradiniam impulsų šaltiniui naudoti sinchronizuotų modų lazerį, pageidautina - šviesolaidinį. Egzistuoja keli būdai pasiekti modų sinchronizaciją. Tai gali būti pasyvus modų sinchronizavimas naudojant įsisotinąsias medžiagas [3–5], stiklo netiesišku pagrįstos netiesinių sugėriklių konfigūracijos [6–8], konfigūracijos su spektro išplėtimu ir filtravimu [9,10], ir naudojant išorinį moduliatorių – aktyvių modų sinchronizacijos konfigūracijos [11]. Aktyviai sinchronizuotų modų impulsų generavimo būdas yra labiausiai tinkamas optinio duomenų perdavimo taikymams, kadangi leidžia tiesiogiai kontroliuoti generuojamų impulsų pasikartojimo dažnį, o tai reikalinga besikeičiant optinio kanalo pralaidumui. Taikant impulsų pozicijos moduliaciją (angl. PPM – pulse position modulation) ir esant fiksuotai vidutinei galiai, sumažinus impulsų pasikartojimo dažnį, gali būti padidinama impulsų smailinė galia, leidžianti kompensuoti padidėjusius kanalo nuostolius.

Šio darbo tikslas yra surinkti ir iširti aktyvios modų sinchronizacijos skaidulinį lazerinį šaltinį veikiantį ties 1571 nm bangos ilgiu. Šio darbo metu planuojama surinkti skaidulinio lazerio grandinę su Erbiu legiruota aktyviaja skaidula ir skaiduliniu elektrooptiniu moduliatoriumi, išmatuoti tokioje grandinėje generuojamų impulsų charakteristikas keičiant tam tikrus parametrus ir optimizuoti lazerio veikimą siekiant stabilios impulsų generacijos.

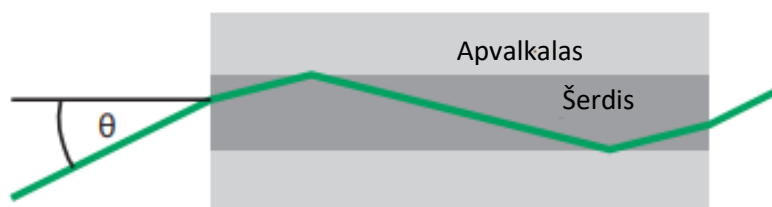
## Darbo uždaviniai

1. Surinkti aktyvios modų sinchronizacijos skaidulinę eksperimentinę schemą.
2. Pasiiekti stabilią impulsų generaciją optimizuojant lazerio veikimą ir išmatuoti grandinėje generuojamų impulsų charakteristikas.
3. Ištirti impulsų generavimo charakteristikas keičiant optinius ir elektroninius parametrus.
4. Nustatyti elektroninio aktyvaus moduliacijos dažnio valdymo įtaką generuojamų impulsų stabilumui.

## 1. Šviesos sklidimas skaidulose

### 1.1. Visiškas vidaus atspindys

Optinės skaidulos yra ypatinga bangolaidžių rūšis. Šviesolaidžius sudaro tokia medžiagos kompozicija, pro kurią šviesa gali laisvai sklisti, bet tuo pačiu metu ir ribojanti spinduliuotės išplitimą ar nukrypimą. Paprasčiausiu ir labiausiai paplitusiu atveju bangolaidžio efektas pasiekiamas naudojant optinės skaidulos šerdį, kurios lūžio rodiklis yra šiek tiek didesnis nei šalia esančio apvalkalo. Laiptelinio lūžio rodiklio šviesolaidžio atveju bangolaidžio efektas dažniausiai atsiranda dėl visiško vidinio atspindžio tarp šerdies ir apvalkalo, kuris pasireiškia spinduliuotei neviršijus kritinio kampo suvedant į skaidulą, 1.1 pav. [12]



1.1 pav. Šviesos sklidimas šviesolaidyje. [12]

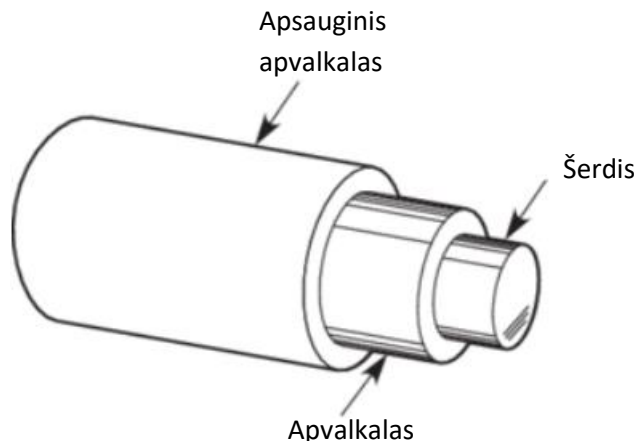
### 1.2. Skaitinė apertūra

Pagrindiniai parametrai, apibūdinantys šviesolaidį su laiptelinio lūžio rodikliu, yra šerdies skersmuo ir lūžio rodiklio skirtumas tarp šerdies ir apvalkalo. Nuo lūžio rodiklio skirtumo priklauso didžiausia kampo vertė, kuria gali kristi sklindantis šviesos spindulys į šviesolaidį norint patenkinti visiško vidaus atspindžio sąlygas ir sklisti šviesolaidžiu. Pasinaudojus šiuo kampu galima apskaičiuoti parametą vadinama skaitine apertūra (NA):

$$NA = \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)} = n_0 \sin(\theta_a);$$

Čia  $n_{co}$  – šviesolaidžio šerdies lūžio rodiklis,  $n_{cl}$  – apvalkalo lūžio rodiklis,  $n_0$  – aplinkos (oro) lūžio rodiklis.

Kuo didesnis šviesolaidžio šerdies diametras ir bangolaidžio skaitinė apertūra, tuo lengviau šviesa yra suvedama į tokį šviesolaidį. [13]



1.2 pav. Optinės skaidulos sandaros elementai. [14]

### 1.3. Vienmodės ir daugiamodės skaidulos

Optinį spinduliuotės sklidimą šviesolaidžiu galima apibūdinti išsklaidžius elektromagnetinio lauko pasiskirstymą modomis. Norint nustatyti kiek modų palaiko naudojama skaidula yra pasitelkiamas normuoto dažnio parametras  $V$ , kuris priklauso nuo šerdies spindulio ( $a$ ), bangos ilgio ( $\lambda$ ) ir skaitinės apertūros ( $NA$ ):

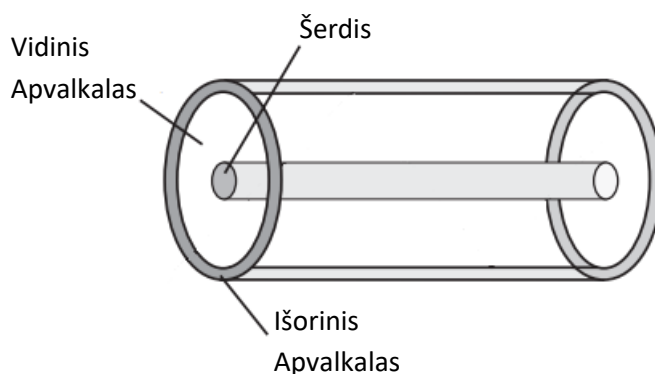
$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a \frac{1}{n_o} \sqrt{(n_{co}^2 - n_{cl}^2)};$$

Šviesolaidžiu gali sklisti tik viena, pagrindinė moda, kuomet  $V < 2,405$ . Tokia skaidula yra vienmodė tam tikram bangos ilgiui ir spinduliuotė išėjusi iš tokio šviesolaidžio pasižymi idealia pluošto „kokybe“, gali būti sufokusuota iki mažiausiai galimo matmens taško, kuris apribojamas difrakcijos, neatsižvelgiant į paleidimo į skaidulą sąlygas. Paleidimo sąlygos turi įtakos tik efektyvumui, su kuriuo optinis spindulys gali būti suvestas į skaidulą. Skaidulos, kurios netenkina  $V < 2,405$  sąlygos yra vadinamos daugiamodėmis - jos palaiko daugiau nei vieną skersinę modą per vieną perdavimo ašį ir įprastai turi didesnes šerdis. Daugiamodėms skaiduloms taip pat yra svarbios paleidimo į šviesolaidį sąlygos, kadangi tai nulemia galios pasiskirstymą modose. Papildomai daugiamodėse skaidulose patiriami nuostoliai spinduliuotei sklindant šviesolaidžiu yra didesni dėl didesnės skaitinės apertūros.

Kaip pastebima iš normuoto dažnio formulės, esant pastoviam bangos ilgiui ir siekiant išlaikyti vienmodį skaidulos veikimą, didinant šerdies dydį reikia mažinti skaitinę apertūrą, o tai reiškia, kad mažėja šerdies ir apvalkalo lūžio rodiklio skirtumas. Vienmodės skaidulos, kuriose pasiekiamas mažiausias įmanomas lūžio rodiklių skirtumas, o šerdies diametras didžiausias, kurį dar palaiko vienmodės skaidulos veikimas, vadinamos didelio modos ploto skaidulomis arba LMA. [12,15]

#### 1.4. Dvigubo apvalkalo skaidulos

Dvigubo apvalkalo šviesolaidžiai, tai šviesolaidžiai, kurie turi tris sluoksnius vietoje dviejų: šerdį, vidinį apvalkalą ir išorinį apvalkalą, 1.3 pav. Visi trys sluoksniai pagaminti iš medžiagų, kurių lūžio rodikliai yra skirtingi. Tokios skaidulos naudojamos siekiant išspręsti aukštos galios lazerių veikimo problemą - jeigu šerdis vienmodė, gaunamas labai geros kokybės pluoštas, tačiau į aktyvųjį šviesolaidį taip pat turi būti suvesta ir kaupinimo spinduliuotė. Turint tik vienmodę skaidulą, kaupinimo šaltinis privalo pasižymėti labai gera pluošto kokybe, o tai apriboja didžiausią galią, kurią galima pasiekti kaupinimui naudojant puslaidininkinius lazerinius diodus. Dažniausiai didelės galios diodai pasižymi prasta pluošto kokybe, todėl jų spinduliuotės negalima efektyviai suvesti į vienmodę šerdį. Daugiamodė šerdis palengvina kaupinimo suvedimą į skaidulą, tačiau netinka dėl prastos pluošto kokybės, kadangi neįmanoma užtikrinti, kad tokioje skaiduloje signalas sklis tik fundamentinėje modeje ir neišplis į aukštesnes. Šią problemą galima išspręsti pasitelkiant dvigubo apvalkalo šviesolaidžius, leidžiančius naudoti apvalkalo kaupinimo metodą. Tokiose skaidulose stiprinama optinė spinduliuotė vis dar sklinda vienmode šerdimi, išlaikant gerą spinduliuotės pluošto kokybę, o kaupinimo spinduliuotė suvedama į platų vidinį apvalkalą, kuris tęsiasi už šerdies ribų iki išorinio apvalkalo arba polimerinės dangos su gerokai mažesniu lūžio rodikliu. Dėl didesnės skaitinės apertūros ir didesnio ploto, apvalkalo kaupinimas gali palaikyti daugiau modų, kas leidžia naudoti prastesnės kokybės pluoštus gaunamus iš didelės galios puslaidininkinių lazerinių diodų. [12]

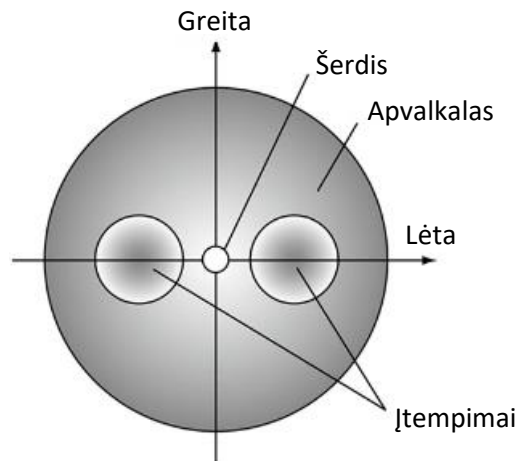


1.3 pav. Dvigubo apvalkalo skaidulos sandara. [13]

#### 1.5. Poliarizaciją išlaikantys šviesolaidžiai

Vienas iš didžiausių skaidulų privalumų yra galimybė išlaikyti arba manipuluoti ateinančios šviesos poliarizaciją. Teoriškai, tiesiškai poliarizuotai šviesai sklindant idealia vienmode skaidula, turinčia apskritiminę simetriją, jos poliarizacija turėtų išlikti tokia pati, tačiau realiu atveju skaidula nėra ideali. Dėl gaminimo procese atsiradusių ar naudojimo metu patirtų pažeidimų bei aplinkos pokyčių, šviesolaidyje gali atsirasti geometriniai netobulumai

arba įtempimai, kurie pakeičia skaidulos simetriją, sukelia lūžio rodiklio pokyčius ir iškreipia poliarizaciją. Siekiant išspręsti šią problemą skaidulų gamintojai sukūrė poliarizaciją išlaikančius (PM) šviesolaidžius. Šie šviesolaidžiai gaminami su eliptinės formos šerdimis, taip sukeliant didžiulį dvejetainiškumą arba papildomai įterpiant papildomas priemaišas, kurios sukelia dirbtinius įtempimus skaiduloje. Dvejetainiškumas sukuria dvi perdavimo ašis skaiduloje – greitąją ir lėtąją, kurios yra atsparios išoriškai sukeltiems įtempimams, kaip parodyta 1.4 pav. Spinduliutei esant tiesiškai poliarizuotai ir tiksliai sulygiuotai kažkuriai skaidulos perdavimo ašiai, šviesa sklis šviesolaidžiu nepakeisdama savo poliarizacijos. [15,16]



1.4 pav. Poliarizaciją išlaikančios skaidulos iliustracija. [17]

Norint nustatyti šviesolaidžio poliarizacijos išlaikymą pasitelkiamas poliarizacijos ekstinkcijos parametras, kuris priklauso nuo nepageidaujamos poliarizacijos jėgos ( $P_{st}$ ) ir pageidaujamos poliarizacijos galios ( $P_v$ ):

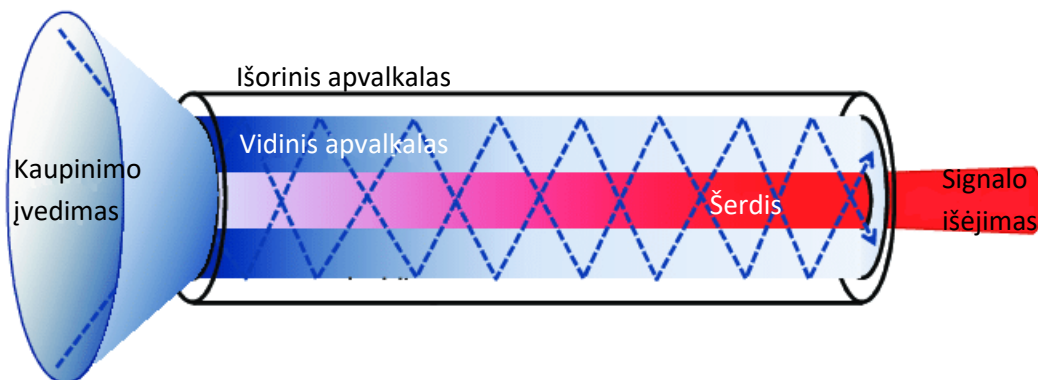
$$E = -10 \log_{10} \frac{P_{st}}{P_v}; [18]$$



## 2. Er, Er/Yb legiruoti skaiduliniai optiniai stiprintuvai ir jų savybės

### 2.1. Kaupinimo konfigūracijos

Stiprinant signalą šviesolaidyje kaupinimas gali būti suvestas tiek į skaidulos šerdį, tiek į jos apvaskalą.



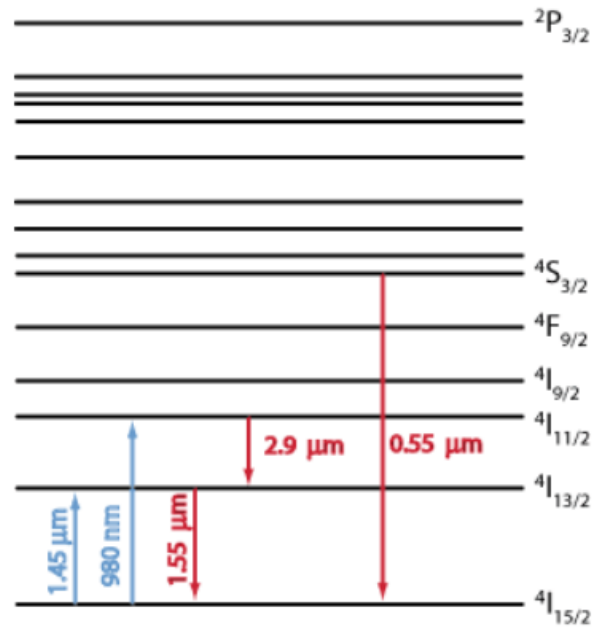
2.1 pav. Šviesolaidžio apvaskalo kaupinimo metodo iliustracija. [19]

Taikant kaupinimo į šerdį metodiką kaupinimo spinduliuotė yra vienmodė ir suvedama į vienmodės skaidulos šerdį, kurioje vyksta signalo stiprinimas. Šviesolaidžio apvaskalo lūžio rodiklis turi būti gerokai didesnis už šerdies lūžio rodiklį tam, kad šviesa nepatektų ir nesklisėtų apvaskale.

Apvaskalo kaupinimo konfigūracijoje, 2.1 pav., kaupinimo spinduliuotė yra daugiamodė ir įvedama į visą vidinį šviesolaidžio apvaskalą, o signalas keliauja ir yra stiprinamas vienmodėje šerdyje. Vidinį apvaskalą supa polimerinis išorinis apvaskalas su mažesniu lūžio rodikliu norint išvengti šviesos išėjimo iš skaidulos ir pasiekti visišką vidaus atspindį. Kaupinimas sužadina aktyvius jonus ir kaupinimo spinduliuotei kertant skaidulos šerdį sustiprina signalą.

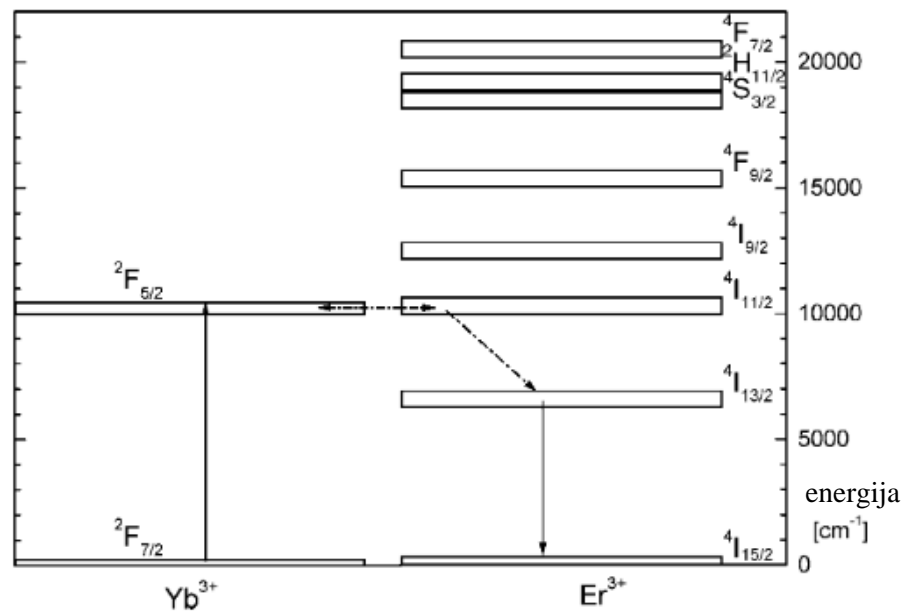
### 2.2. Lygmenų sistemos

Erbio legiruoto stiklo lygmenų sistema pavaizduota 2.2 pav. Aprašant vykstančius reiškinius dažniausiai apsiribojama 3 lygmenimis. Plačiausiai naudojamas perėjimas erbio legiruotose skaiduliniuose stiprintuvuose yra iš  ${}^4I_{13/2}$  lygmens į pagrindinį lygmenį  ${}^4I_{15/2}$ . Kaupinimo schemose dažniausiai pasitelkiamas  ${}^4I_{15/2}$  į  ${}^4I_{11/2}$  perėjimas. Multifononinis perėjimas, kuris yra palyginus greitas kvarciniuose stikluose vyksta iš  ${}^4I_{11/2}$  į  ${}^4I_{13/2}$ . Sužadintos būsenos  ${}^4I_{13/2}$  gyvavimo trukmė yra apie 8-10 ms, o visi kiti aukštesni sužadinti lygmenys pasižymi kelių mikrosekundžių gyvavimo trukmėmis dėl greito multifononinio skilimo. [20]



2.2 pav. Erbiu legiruoto stiklo lygmenų diagrama. [20]

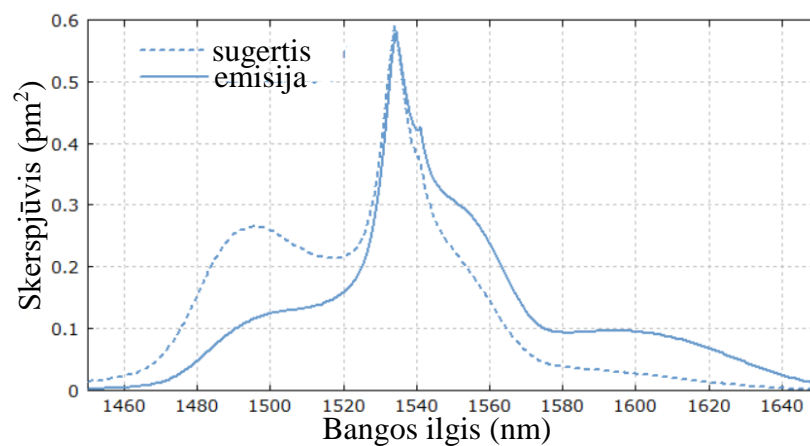
Erbio-iterbio sistemos energijos lygmenų diagrama parodyta 2.3 pav. Iterbis paprastai įterpiamas siekiant padidinti kaupinimo sugerties efektyvumą. Kaupinimo energija, kurią sugeria iterbio jonai, perduodama į erbio jono  $4I_{11/2}$  lygmenį, o po to idealiu atveju nespinduliniu būdu sužadintasis pereina į  $4I_{13/2}$  lygmenį ir yra išspinduliuojama  $1,5 \mu\text{m}$  spinduliuotė. Tačiau erbio jonų energijos lygmenų struktūra lemia daugybę pereinamųjų procesų, tokių kaip sužadintosios būsenos sugertis (ESA), dažnio aukštinimas ir kryžminė relaksacija, kurie užpildo  $4I^{11/2}$  ir  $4I^{13/2}$  lygmenis. Er→Yb grįžtamasis energijos perdavimas taip pat yra tikėtinas procesas. Taigi trumpas  $4I^{11/2}$  erbio energijos lygmens gyvavimo laikas yra pagrindinė sąlyga, kuri turi būti užtikrinta norint turėti efektyvią erbio-iterbio stiprinimo terpę. Kita vertus, norint išlaikyti žemą lazerio slenkstį, reikia didelio  $1,5 \mu\text{m}$  fluorescencijos kvantinio našumo.  $4I^{13/2}$  ir  $4I^{11/2}$  lygmenų gyvavimo laikas yra atitinkamai 8-9 ms ir kelios mikrosekundės. [21]



2.3 pav. Erbiu-iterbiu legiruoto stiklo energijos lygmenų diagrama. [22]

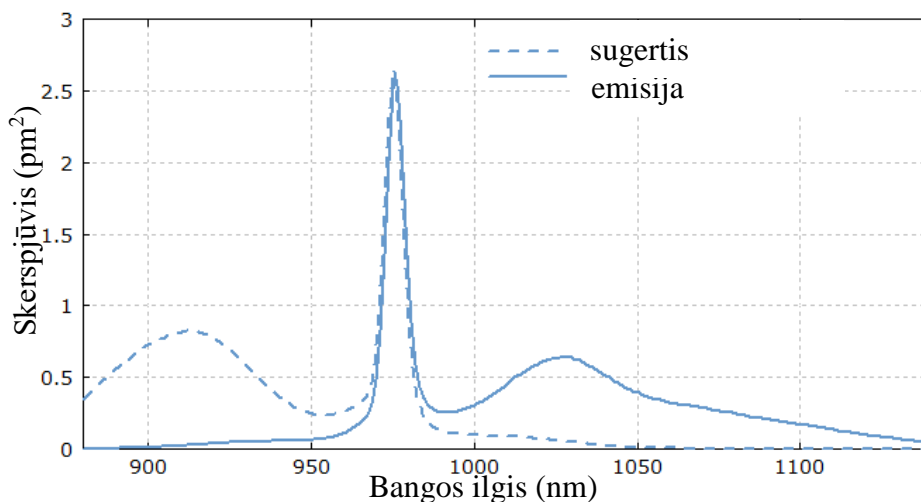
### 2.3. Sugerties ir emisijos spektrai

Erbiu legiruotas aliuminio silikatinis stiklas pasižymi persiklojusiais sugerties ir emisijos spektrais dėl šalia išdėstytų lygmenų, kaip parodyta 2.4 pav. Iš paveikslėlio galime matyti, kad sugertis vyksta intervale 1450-1630 nm ir turi du maksimumus ties ~1495 nm ir ~1535 nm, o emisija intervale 1470-1650 nm ir taip pat turi du maksimumus ~1535 nm ir ~1540 nm bangos ilgio srityje.



2.4 pav. Erbiu legiruoto stiklo sugerties ir emisijos spektrai. [20]

Erbiu-iterbiu legiruotas lydytas kvarcas pasižymi plačiomis iterbio sugerties ir erbio emisijos juostomis. Iterbio sugerties spektras parodytas 2.5 pav. Iš paveikslėlio galime matyti, kad sugertis vyksta intervale 850-1070 nm ir turi du maksimumus ties ~910 nm ir ~975 nm. Emisija tuo tarpu vyksta anksčiau parodytame 1470-1650 nm intervale su maksimalia verte ties 1535 nm ir 1540 nm bangos ilgiais.



2.5 pav. Iterbiu legiruoto stiklo sugerties ir emisijos spektrai. [23]

## 2.4. Stiprinimo konfigūracijos

Naudojant erbiu ir erbiu-iterbiu legiruotą aktyvią terpę stiprinimas gali būti pasiektas su keliomis kaupinimo ir stiprinamo signalo konfigūracijomis:

### A. Kaupinimas su matoma šviesa

Ankstyvieji erbiu legiruoti šviesolaidžiai buvo kaupinami su 514,5 nm šviesa, nes tuo metu tai buvo galingiausias kaupinimo šaltinis esantis laboratorijoje. Dėl sužadintos būsenos sugerties (ESA) tokiuose lazeriuose pasiekiamas generacijos slenkstis buvo kelios dešimtys milivatų. Prieš atsirandant 980 nm ir 1480 nm kaupinimo diodams buvo tiriama 532 nm bangos ilgio kaupinimo konfigūracija. Šie ankstyvieji eksperimentai greitai parodė poreikį paprastiems ir kompaktiškiems šviesos šaltiniams spinduliuojantiems ties 980 nm ir 1480 nm, kuriais būtų galima kaupinti erbio legiruotus šviesolaidžius be sužadintos būsenos sugerties nulemtų nuostolių.

### B. Kaupinimas su ~810 nm

Nepaisant gana stiprios ESA, nebrangūs, patikimi ir didelio galingumo GaAlAs lazeriniai diodai generuojantys 0,8  $\mu\text{m}$  spinduliuotę buvo išbandyti su Erbiu legiruotais šviesolaidžiais. Ankstyvieji tyrimai parodė, kad gali būti pasiekiamas žemas generacijos slenkstis (1-3 mW), tačiau tokios konfigūracijos pasižymėjo labai prastu našumu. Dėl prasto našumo ir 980 nm, 1480 nm lazerinių diodų atsiradimo, tyrimai su 800 nm kaupinimu buvo nutraukti.

### C. Kaupinimas su ~910 nm

Kaupinant erbio-iterbio stiprintuvus ties 910 nm galima pasiekti gerą sužadinto lygmens užpildymą. Tai reiškia, kad gaunamas beveik maksimalus galimas stiprinimas per ilgio vienetą. Tačiau stiprios savaiminės spinduliuotės

(ASE) atsiradimas ties 1 arba 1,5  $\mu\text{m}$  bei mažas konfigūracijos našumas riboja jos naudojimą stiprintuvuose.

#### D. Kaupinimas su 980 nm

Perėjimas iš  $^4I_{15/2}$  į  $^4I_{11/2}$  lygmenį atitinka sugerties juostos maksimumą ties  $\sim 980$  nm. Šioje juostoje kaupinami erbio bei erbio-iterbio stiprintuvai pasiekia ne tik vieną iš geriausių stiprinimą ir našumą, bet ir mažiausią triukšmo lygį (iki 3 dB). Didelis stiprinimas pasiekiamas dėl didelės sugerties šioje juostoje ir savaiminės spinduliuotės bei sužadintos būsenos sugerties nebuvimo šioje kaupinimo konfigūracijoje.

#### E. Kaupinimas su 1480 nm

Kaupinti erbiu legiruotus šviesolaidžius ties 1480 nm yra labai perspektyvu dėl mažos sužadintos būsenos sugerties šiam bangos ilgiui. Kaupinant ties 1,48  $\mu\text{m}$  taip pat pasiekiamas didesnis našumas nei su 980 nm dėl arti esančių signalo ir kaupinimo bangos ilgių, tačiau maksimalus stiprinimas būna mažesnis. Kitas esminis skirtumas lyginant su 980 nm yra tai, kad dėl priverstinės spinduliuotės šiame bangos ilgyje pasiekiamą maksimali inversija yra mažesnė ir naudojamas šviesolaidžio ilgis turi būti didesnis. [13,24,25]

### 2.5. Sugertis iš sužadinto lygmens ir kiti parazitiniai reiškiniai

Erbiu ir erbiu-iterbiu legiruotame šviesolaidyje kaupinimo metu gali pasireikšti nemažai parazitinių reiškinių, kurie žymiai pablogina stiprintuvo efektyvumą. Tai yra:

Sužadintos būsenos sugertis – dėl daugybės energijos lygmenų  $\text{Er}^{3+}$  legiruotame stiklo fotonai gali būti sugerti sužadintų jonų aukštesniame sužadintame lygmenyje  $^4I_{13/2}$ . Tuo atveju jonas pakyla į aukštesnį energijos lygmenį ir nurelaksuoja nespinduliniu būdu sukeldamas energijos nuostolius. Ši sužadintos būsenos sugertis gali sukelti didžiulius nuostolius stiprinimui, ypač prie didelių inversijų. Labiausiai šio reiškinio paveikiama 800 nm kaupinimo konfigūracija. Kaupinimo sugertis taip pat yra mažiausia esant šiam bangos ilgiui, todėl turi būti naudojama žymiai didesnė kaupinimo galia norint pasiekti tokį pat inversijos lygį kaip naudojant 980 ir 1480 nm kaupinimą.

Fotonų aukštinamasis dažnio keitimas – tai procesas, kurio metu dviejų ar daugiau fotonų sugertis lemia spinduliavimą prie trumpesnio bangos ilgio nei yra stiprinamas signalas, tai lemia prastesnį stiprintuvo efektyvumą. Aukštinimas Erbiu legiruotose skaidulose vyksta energijos perdavimo tarp kaimyninių jonų metu. Reiškinių tikimybė didėja prie didesnės erbio koncentracijos. Įprastai erbio koncentracijos lygis turėtų neviršyti kelių šimtų dalių per milijoną, tačiau tai reikalauja naudoti ilgas (kelių dešimčių metrų) skaidulas,

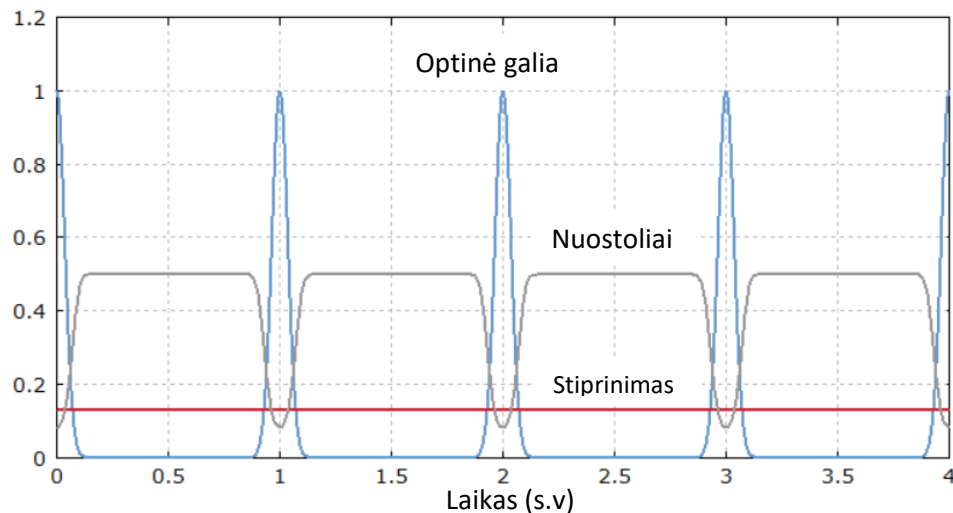
o tai nepraktiška. Dažnio aukštinimo tikimybė taip pat didėja kartu su inversijos augimu. Naudojant abipusį ir atgaline kryptimi nukreiptą kaupinimą su mažesne lokalia inversija įmanoma kažkiek sumažinti šio reiškinio poveikį.

Jonų porų indukuotas sužadavimo gesinimas – modeliuojant erbio legiruoto stiprintuvo veikimą pastebėta, kad aukštinamasis dažnio keitimo efektas negali paaiškinti visos neįsisotintos kaupinimo sugerties ties 980 nm, todėl buvo pasiūlytas jonų porų sukkelto sužadavimo gesinimo modelis. Vykstant tokiam efektui, du erbio jonai yra taip stipriai tarpusavyje susieti, kad jie negali būti abu vienu metu sužadintoje būsenoje. Kitaip sakant, energetinė pernaša tarp poros jonų yra daug spartesnė, negu pasiekama kaupinimo sparta. Tokių jonų porų daugėja didinant erbio koncentraciją šviesolaidyje, tai neleidžia gaminti stipriai legiruotus erbio aktyvius šviesolaidžius. Prie aukštų kaupinimo galių, įsisotinus izoliuotų jonų sugerčiai, jonų porų indukuotas sužadavimo gesinimas yra atsakingas už neįsisotintą kaupinimo sugertį. Tai lemia prastą stiprinimą, našumą ir didina signalo-triukšmo santykį. [13]

### **3. Ultratrumpų impulsų generavimo būdai**

#### **3.1. Pasyvi modų sinchronizacija**

Didžioji dalis sinchronizuotų modų lazerių yra moduluojami pasyviai, ypač tie, kurie naudojami labai trumpiems femtosekundiniams impulsams generuoti. Bendru atveju pasyvi modų sinchronizacija pasiekama, kuomet kiekvieną kartą, kai impulsas pataiko į įsisotinanti sugėriklį, jis prisotina sugertį, taip laikinai sumažindamas nuostolius sugėriklyje, kaip parodyta 3.1 pav. Esant pastoviai būsenai, lazerio stiprinimas gali būti prisotintas iki tokio lygio, kurio pakanka tik cirkuliuojančio impulso nuostoliams kompensuoti, o bet kokia mažesnio intensyvumo šviesa, kuri patenka į sugėriklį kitu metu, patirs didesnius nuostolius nei stiprinimą ir bus efektyviai slopinama. Taigi, sugėriklis gali slopinti ne tik nuolatinę pašalinę spinduliuotę, bet ir įvairius papildomus silpnesnius impulsus. Be to, jis nuolat slopina cirkuliuojančio impulso kraštus, todėl sugėriklis turi tendenciją mažinti impulso trukmę. Pastovioje būsenoje šis efektas atsveria kitus pašalinius poveikius, kaip chromatinė dispersija, kurie turi tendenciją ilginti impulsą. [26]



3.1 pav. Optinės galios ir nuostolių laikinė priklausomybė pasyviai sinchronizuotame lazeryje. [26]

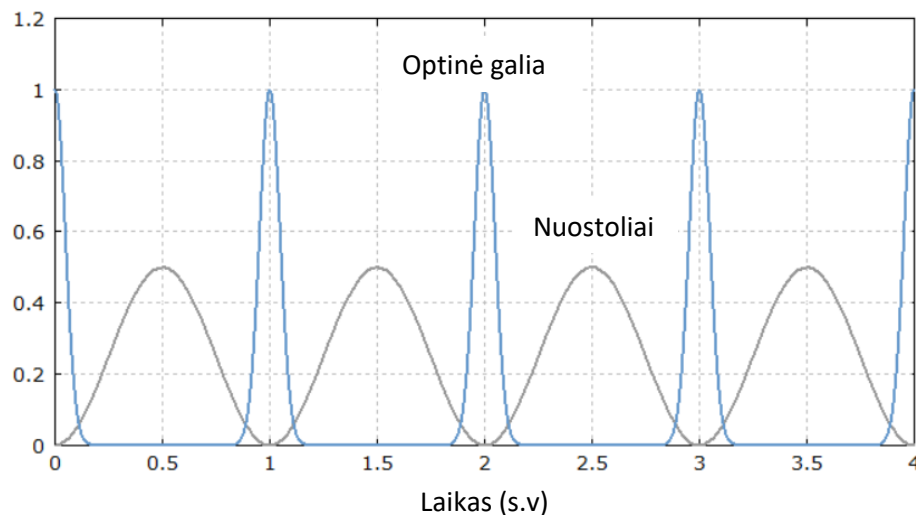
Palyginus su aktyvia modų sinchronizacija, pasyvios modų sinchronizacijos metodas leidžia generuoti daug trumpesnius impulsus. Iš esmės taip yra todėl, kad sugėriklis, valdomas labai trumpais impulsais rezonatoriaus nuostolius gali moduluoti daug greičiau nei bet koks elektroninis moduliatorius - kuo trumpesnis cirkuliuojantis impulsas, tuo greitesnė nuostolių moduliacija. Daugeliu (bet ne visais) atvejų sugėriklis taip pat gali pats pradėti sinchronizacijos procesą. Jei impulsų generavimo procesas prasideda automatiškai įjungus lazerį, tai vadinama savaimine sinchronizacija. Paprastai lazeris iš pradžių pradeda veikti daugiau ar mažiau tolygiai, tačiau su dideliais galios svyravimais. Tada kiekvieno rezonatoriaus apėjimo metu sugėriklis pirmenybę teikia šviesai, kurios intensyvumas šiek tiek didesnis – impulsams, nes ši šviesa gali truputį labiau prisotinti absorbciją nei mažesnio intensyvumo spinduliai. Tokiu principu po daugelio rezonatoriaus apėjimų liks tik vienas impulsas.

Tačiau ne visada pavyksta pasiekti savaiminį paleidimą. Apskritai lėtesni sugėrikliai yra tinkamesni savaiminei sinchronizacijai nei greiti sugėrikliai. Pavyzdžiui, Kerro lęšio efekto paremto netiesinio sugėriklio sinchronizuojami lazeriai dažnai nėra savaimė įsijungiantys - po įjungimo jie veikia nuolatinės veikos režimu, o sinchronizaciją pradeda tik tada, kai sukliamas papildomas trikdys. Savaiminį veikimą taip pat gali pristabdyti parazitiniai atspindžiai rezonatoriuje arba chromatinė dispersija. [26]

### 3.2. Aktyvi modų sinchronizacija

Bendru atveju aktyvi modų sinchronizacija apima periodinę rezonatoriaus nuostolių arba fazės pasikeitimo moduliaciją. Tai galima pasiekti, pavyzdžiui, naudojant akustooptinį arba elektrooptinį moduliatorių, Mach-Zehnder'io integruotą optinį moduliatorių arba puslaidinikinį elektroabsorbcijos moduliatorių. Jei moduliacija sinchronizuojama su

rezonatoriaus apėjimu, generuojami itin trumpi impulsai, sudarantys taisyklingą impulsų seką: išėjimo impulsas gaunamas kiekvieną kartą, kai cirkuliuojantis impulsas patenka į išėjimo daliklį. Pats modulatorius pasižymi dvejomis svarbiomis savybėmis. Pirmoji - pro moduliatorių šviesa gali praeiti tik tuo metu, kai nuostoliai yra minimalūs, kaip parodyta 3.2 pav. Taip impulsinė spinduliuotė „mato“ mažesnius nuostolius už bet kokią kitą rezonatoriuje cirkuliuojančią spinduliuotę. Kadangi besigeneruojantis impulsas įsotina lazerio stiprinimą taip, kad jo apėjimo stiprinimas susilygina su apėjimo nuostoliais, kitų cirkuliuojančių spinduliuočių apėjimo stiprinimas bus neigiamas, todėl laikui einant jos išnyks. Kita esminė savybė yra impulso trumpėjimas kaskart apeinant rezonatorių. Stiprinimas yra nežymiai neigiamas impulso kraštuose ir teigiamas impulso centre. Dėl to impulsai pastoviai trumpėja sklindant rezonatoriumi, kol šį netolygų stiprinimą atsveria kiti efektai, tokie kaip pačio stiprinimo juostos siaurėjimas arba chromatinė dispersija, dėl kurių impulsai plėtėja. [27,28]



3.2 pav. Optinės galios ir nuostolių laikinė priklausomybė aktyviai sinchronizuotame lazeryje. [27]

Generuojamų impulsų trukmė paprastai būna pikosekundžių eilės ir silpnai priklauso nuo tokių parametų kaip modulatoriaus moduliacijos gylis. Ši silpna priklausomybė pasireiškia dėl to, kad modulatoriaus impulsų trumpinimo poveikis mažėja, kuomet impulsų trukmė yra trumpesnė, o kiti impulsus ilginantys poveikiai, kaip stiprinimo juostos siaurėjimas ir chromatinė dispersija, tampa reikšmingesni. [27]

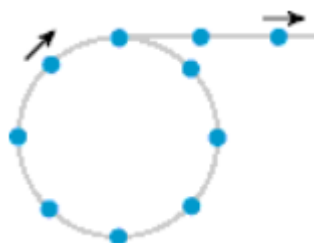
Vienas iš esminių reikalavimų stabiliam sinchronizuotų modų lazerio veikimui yra rezonatoriaus apėjimo laiko suderinimas su modulatoriaus signalo periodu, kad cirkuliuojantis impulsas visada praeitų pro moduliatorių su mažiausiais nuostoliais. Net labai mažas rezonatoriaus ir moduliacijos signalo dažnio nesutapimas gali sukelti stiprius nestabilumus. Tačiau, ilgalaikiam stabiliam veikimui nepakanka stabilaus fiksuoto rezonatoriaus suregulavimo, kad būtų sinchronizuotas veikimas tarp modulatoriaus ir



lazerio, kadangi gali atsirasti laike kintantys terminiai efektai, darantys įtaką apėjimo periodui. Todėl dažnai reikia grįžtamojo ryšio, kuris galėtų automatiškai reguliuoti moduliacijos dažnį arba lazerio rezonatoriaus ilgį. Dažnai naudojamas metodas yra regeneracinis sinchronizavimas [29]. Šiuo atveju modulatoriaus signalą generuoja ne laisvai veikiantis ar modifikuotas elektroninis osciliatorius, o yra gaunamas detektuojant generuojamų impulsų sekos intensyvumą. Tokios schemos yra ypač svarbios norint pasiekti derinamą impulsų pasikartojimo dažnį ir plačiai taikomos sinchronizuotų modų skaiduliniams lazeriams. [27]

Generuojamų impulsų pasikartojimo dažnis gali būti padidinamas taikant harmoninę modų sinchronizaciją, kuomet lazerio rezonatoriuje su pastoviu laiko intervalu cirkuliuoja keli itin trumpi impulsai, kaip parodyta 3.3 pav. Šis metodas dažnai taikomas didelio impulsų pasikartojimo dažnio skaiduliniuose lazeriuose, kadangi jų rezonatoriai negali būti pakankamai trumpi, kad vienu impulsu per apėjimą būtų galima pasiekti didelį pasikartojimo dažnį. Tačiau šis metodas taip pat susiduria su problemomis generuojant stabilią impulsų seką. Stabilumą pablogina supermodų triukšmai, be to cirkuliuojantys impulsai ne visada būna tarpusavyje faziškai koherentiniai. Supermodų triukšmas reiškia, kad nėra pasiekama stabili modų sinchronizacija rezonatoriuje. Lazeris gali peršokti į kitas skirtingas galimas modas arba ilgą laiką vienu metu svyruoti skirtingose modose. Tokie signalo triukšmai yra susiję su padidėjusiu aukšto dažnio lazerio triukšmu, pvz. laikiniu drebėjimu.

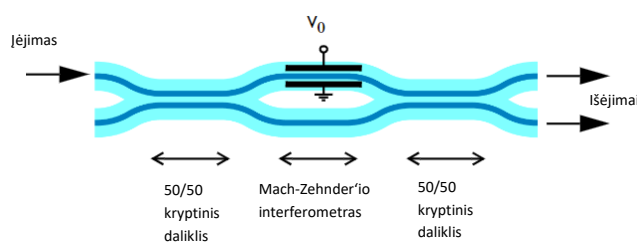
Egzistuoja įvairių supermodų triukšmo slopinimo metodų. Tai apima tokias priemones, kaip įvairių tipų spektrinių filtrų įterpimas į vidinę terpę, elektroninių grįžtamojo ryšio sistemų naudojimas, arba netiesinių ir dispersinių efektų išnaudojimas. Daugeliu atvejų dėl tokių reikalavimų harmoniniu režimu sinchronizuoto lazerio sistema tampa sudėtingesnė. Kita vertus, efektyviai nuslopinus supermodų triukšmą, harmoniškai sinchronizuoti lazeriai gali turėti gerokai mažesnę lazerio triukšmą, kaip pvz., laikinį drebėjimą ir fazės triukšmą, palyginti su įprastais sinchronizuotų modų lazeriais. [27,30,31]



3.3 pav. Harmoninių modų sinchronizacijos žiedinio lazerio schema. [30]

#### 4. Mach-Zehnder'io elektrooptiniai modulatoriai ir jų savybės

Optiniai modulatoriai yra naudojami elektriniu būdu valdyti per prietaisą einančios šviesos bangos išėjimo amplitudę arba fazę. Siekiant sumažinti prietaiso dydį ir valdančiąją įtampą, ryšių reikmėms naudojami bangolaidžiais pagrįsti modulatoriai. Optinėms savybėms valdyti išoriniu elektriniu signalu naudojamas elektrooptinis arba Pockelso efektas, kai kristalo dvigubas lūžis kinta proporcingai taikomam elektriniam laukui. Dėl lūžio rodiklio pokyčio pasikeičia per kristalą einančios optinės bangos fazė. Sujungus dvi bangas su skirtingu fazės pokyčiu, interferometriškai galima gauti amplitudės (intensyvumo) moduliaciją. Vienas iš tokių prietaisų yra Mach-Zehnderi'o modulatorius, pavaizduotas 4.1 pav.



4.1 pav. Mach-Zehnder'io modulatoriaus schema. [32]

Įvesties banga yra paleidžiama į bangolaidinį 50/50 šakotuvą ir šviesos galia po lygiai padalijama į abu šviesolaidžio išėjimus. Šie du bangolaidžiai sudaro dvi Mach-Zehnderi'o interferometro rankas. Vienoje iš šakų galima taikyti elektrinį lauką, kad būtų pakeistas medžiagos lūžio rodiklis ir taip konvertuota per tą atšaką sklindančios bangos fazė. Kai abu spinduliai vėl sujungiami naudojant kitą 50/50 šakotuvą, galimi du skirtingi scenarijai: jei dviejų atskirų atšakų optinis ilgis arba fazė yra vienodi, susilieję spinduliai yra vienodos fazės ir pasiekama konstruktyvioji interferencija ir šviesa patenka į pirmą išėjimą. O jei atskirų šakų optiniai ilgiai arba fazės yra skirtingi, susiliejant spinduliams santykinė fazė bus skirtinga. Esant fazės skirtumui lygiam  $\pi$  radianų atsiranda destruktvyioji interferencija ir šviesa patenka į antrą išėjimą. Todėl, priklausomai nuo santykinio fazių skirtumo, kurį įgyja padalyti spinduliai keliaudami dviem skirtingais keliais, šviesa efektyviau patenka į vieną arba kitą išėjimą. Taigi, keičiant naudojamą įtampą galima nuosekliai valdyti iš abiejų išėjimo bangolaidžių išeinančios šviesos intensyvumą. Nors modulatoriaus nebūtina naudoti nuo nulinio iki pat maksimalaus pralaidumo, taip maksimaliai padidinamas optinis perdavimas. Taip yra dėl netiesinių perdavimo charakteristikų, kurios priverčia svyravimus ties pralaidumo maksimumu ir nuliu sumažėti. Mach-Zehnderi'o modulatoriai taip pat gali būti naudojami skaitmeninei fazinei moduliacijai. Valdant moduliatorių aplink pralaidumo nulį, elektrinio lauko išėjimo ženklas pereina iš teigiamo į neigiamą, o tai atitinka staigų  $\pi$  fazės pokytį. Šios skaitmeninės charakteristikos turi pranašumų, palyginti su tiesine fazės moduliacija, kai fazės perėjimo metu perduodama energija. Siekiant išgauti didžiausią faziškai moduliuotą išėjimo galią, Mach-Zehnderi'o modulatorius yra šališkas

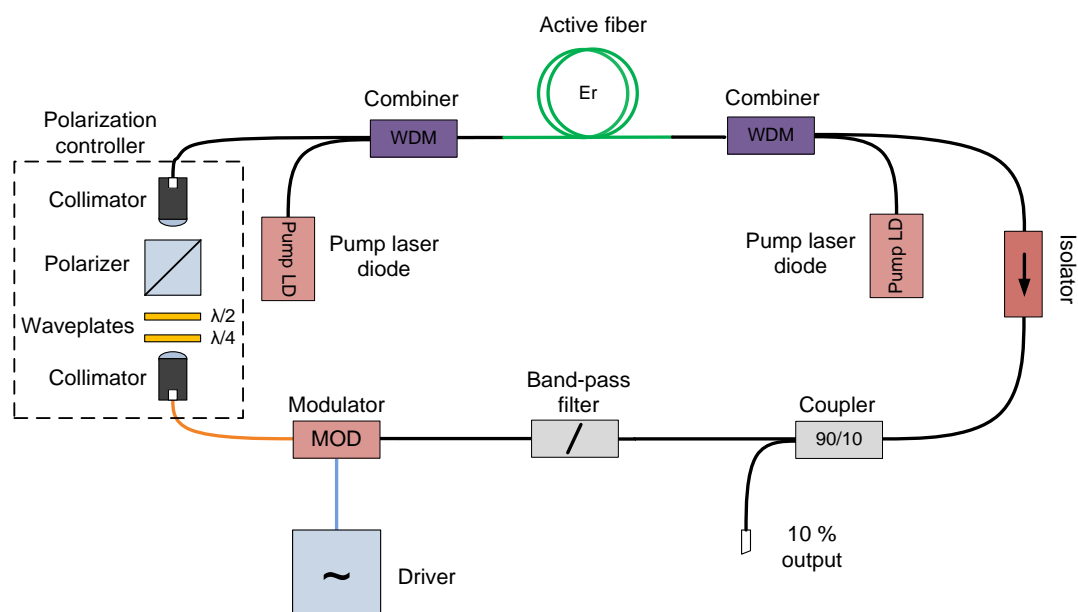
ties pralaidumo nuliu ir valdomas tarp dviejų iš eilės einančių pralaidumo maksimumų. Skaitmeninę fazės moduliaciją galima pasiekti naudojant mažą įtampą aplink nulinį tašką, taupant energiją, tačiau tai sukeltų papildomus įvesties nuostolius ir bangos formos iškraipymus.

Apskritai Mach-Zehnderi'o modulatoriai yra itin universalūs plačiajuosčiai įrenginiai, galintys moduluoti intensyvumą ir fazę. Juos taip pat galima naudoti kontroliuotam čirpo generavimui, priklausomai nuo modulatoriaus konstrukcijos, kuris gali būti pasitelktas dispersijos kompensavimui. Be to, modulatoriai gali būti naudojami generuoti didelės spartos, didelio tikslumo impulsų bangų formoms, kurios palengvina imtuvo konstrukcijos optimizavimą, paprastai naudojamą nuosekliai su duomenis moduliuojančiais Mach-Zehnderi'o modulatoriais. Dėl šių priežasčių Mach-Zehnderi'o modulatoriai dažnai naudojami didelio našumo šviesolaidiniuose ir FSO ryšio sistemose. [2,32,33]

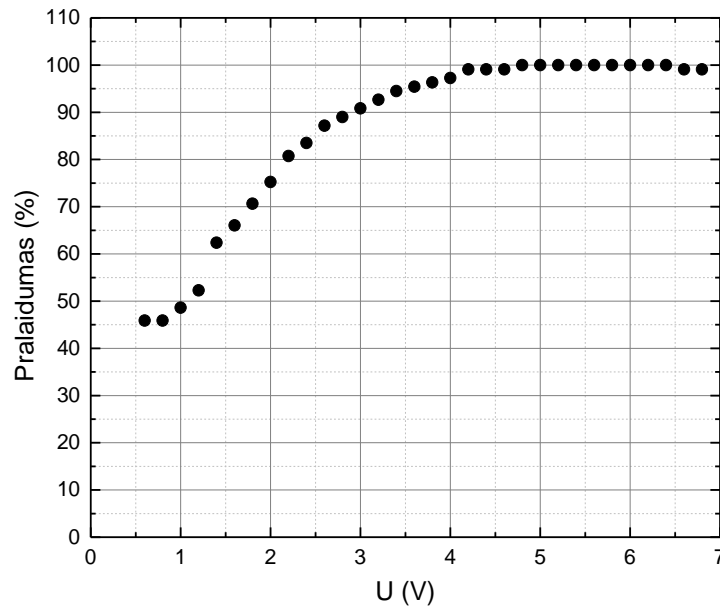
## 5. Eksperimentinės schemos

### 5.1. Optinė eksperimentinė schema

Darbe buvo tiriamas itin trumpų impulsų aktyviai sinchronizuotų modų šaltinis skirtas optiniam ryšiui. Principinė šaltinio schema pavaizduota 5.1 pav. Visi sistemoje naudoti šviesolaidžiai buvo poliarizaciją išlaikantys PANDA rūšies, išskyrus modulatoriaus išėjimo atšaką. Naudojamas aktyvaus šviesolaidžio ilgis nustatytas remiantis eksperimentiniais šviesolaidinio stiprintuvo efektyvumo matavimų duomenimis, gautais laisvos generacijos režime. Aktyvioji skaidula buvo kaupinama naudojant du 976 nm lazerinius diodus su vienmodžiais išėjimais. Pirmųjų eksperimentų metu į moduliatorių buvo paduodama pastovi įtampa, kad jis būtų visiškai atviras (maksimalus pralaidumas). Dėl riboto komponentų prieinamumo, eksperimentams pasirinktas modulatorius turėjo papildomų apribojimų. Vidutinė galia buvo apribota iki 100 mW, be to, modulatoriaus nuostoliai siekė 4,3 dB. Taip pat, dėl poliarizacijos išlaikymo problemų, grandinėje buvo prijungtas laisvos erdvės poliarizacijos valdiklis. Dėl šios priežasties schemoje atsirado papildomų perteklinių nuostolių. Schemos veikimo tyrimui pasirinkta naudoti 90/10 daliklį, kurio 10 % atšaka buvo naudojama grandinės charakterizavimui. Generuojamos spinduliuotės centrinio bangos ilgio stabilizavimui buvo naudojami 1570 nm centrinės bangos ilgio 13 nm ir 0,82 nm pralaidumo juostos pločio filtrai. Išmatuota modulatoriaus pralaidumo priklausomybė nuo įtampos parodyta 5.2 pav. Matoma, kad modulatorius pilnai atsidarydavo esant 4,8 V įtampai.



5.1 pav. Eksperimentinė schema. „Active fiber“ – aktyvus šviesolaidis, „Combiner“ – signalo ir kaupinimo tankintuvas, „LD“ – lazerinis diodas, „Isolator“ – izoliatorius, „Coupler“ – daliklis, „Band-pass filter“ – filtras, „Modulator“ – aktyvus modulatorius, „Polarization controller“ – poliarizacijos valdiklis.



5.2 pav. Išmatuota modulatoriaus pralaidumo priklausomybė nuo įtampos.

Banginių plokštelių suderinimas buvo optimizuojamas pagal vidutinę optinę galią daliklio išėjime. Taip pat išmatuotas visų komponentų pralaidumas. Įvertinti pralaidumo nuostoliai pateikti (1 lent.).

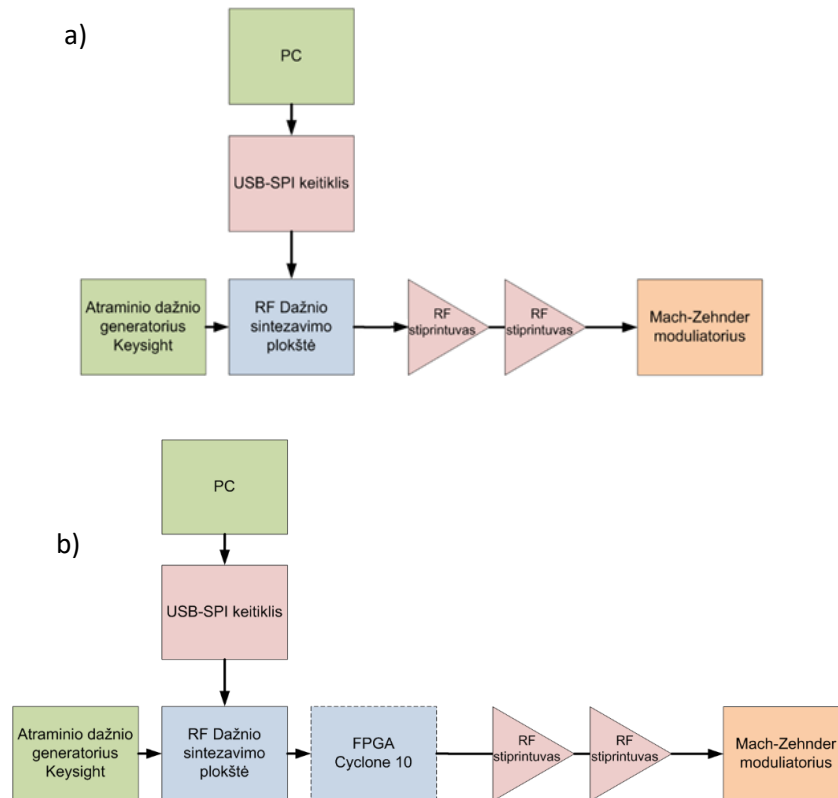
1 lentelė. Išmatuoti kiekvieno komponento pralaidumo nuostoliai.

Komponentas	Pralaidumo nuostoliai
Signalų ir kaupimo tankintuvas	0.13 dB (3 %)
Izoliatorius	0.46 dB (10 %)
Filtras	0.51 dB (11 %)
Poliarizacijos valdiklis	1.55 dB (30 %)
Modulatorius	4,8 dB (67 %)

## 5.2. Elektroninės eksperimentinės schemos

Pirmoje schemos konfigūracijoje, pavaizduotoje 5.3 a) pav., modulatoriaus valdymui buvo naudojama radijo dažnio (RF) sintezavimo elektronikos plokštė, galinti generuoti artimą sinusoidiniam signalą, kurio amplitudė 0,6 V, prie didelių dažnių (>2 GHz). Todėl eksperimentiškai buvo išbandytas impulsų generavimas tik harmoninės modų sinchronizacijos režimu. Modulatoriaus valdymo signalo dažnis buvo koreguojamas smulkiu žingsniu keičiant atraminio generatoriaus dažnį, kuris užduodavo RF sintezavimo elektronikos generuojamą dažnį. RF sintezavimo plokštės išėjime papildomai buvo naudojamas dviejų pakopų signalo stiprintuvas padidinantis generuojamų impulsų amplitudę iš 0,6 V į ~3 V.

Kitoje elektroninėje schemoje, pavaizduotoje 5.3 b) pav., RF sintezavimo elektronika buvo sujungta su FPGA (lauko programuojamu vartų masyvu) procesoriumi, užprogramuotu taip, kad išėjime būtų gaunami stabilaus pasikartojimo dažnio fiksuoto pločio elektroniniai impulsai. Valdymo impulsų amplitudė siekė 4 V, o impulsų plotis buvo 182 ps.



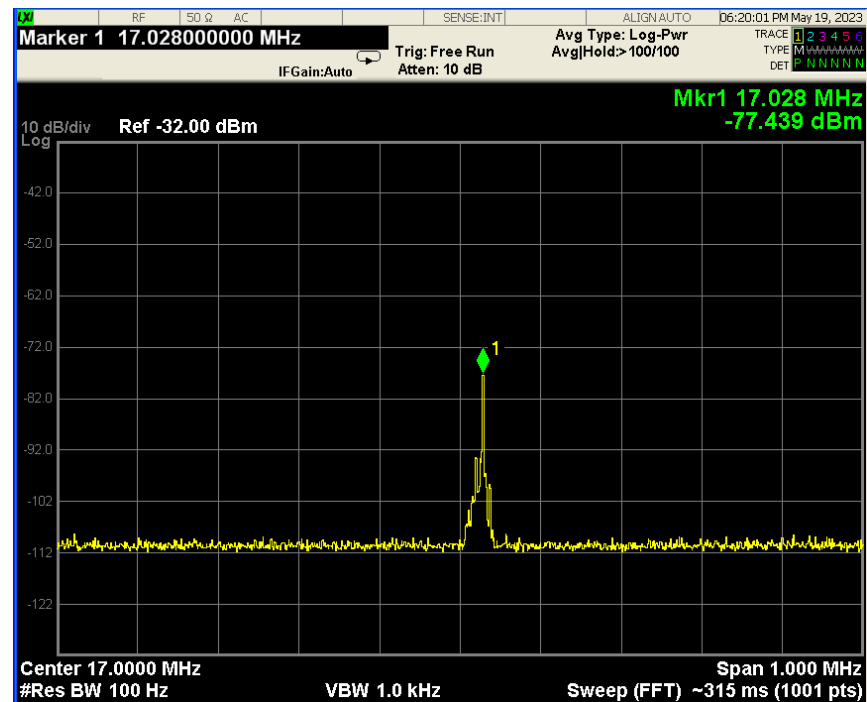
5.3 pav. a) Modulatoriaus valdymo schema generuojanti artimą sinusoidiniam signalą, b) modulatoriaus valdymo schema generuojanti stabilaus pasikartojimo dažnio fiksuoto impulsų pločio signalą. „FPGA“ - lauko programuojamas vartų masyvas.

## 6. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

### 6.1. Harmoninės aktyvios modų sinchronizacijos veikos charakterizavimas ir optimizavimas

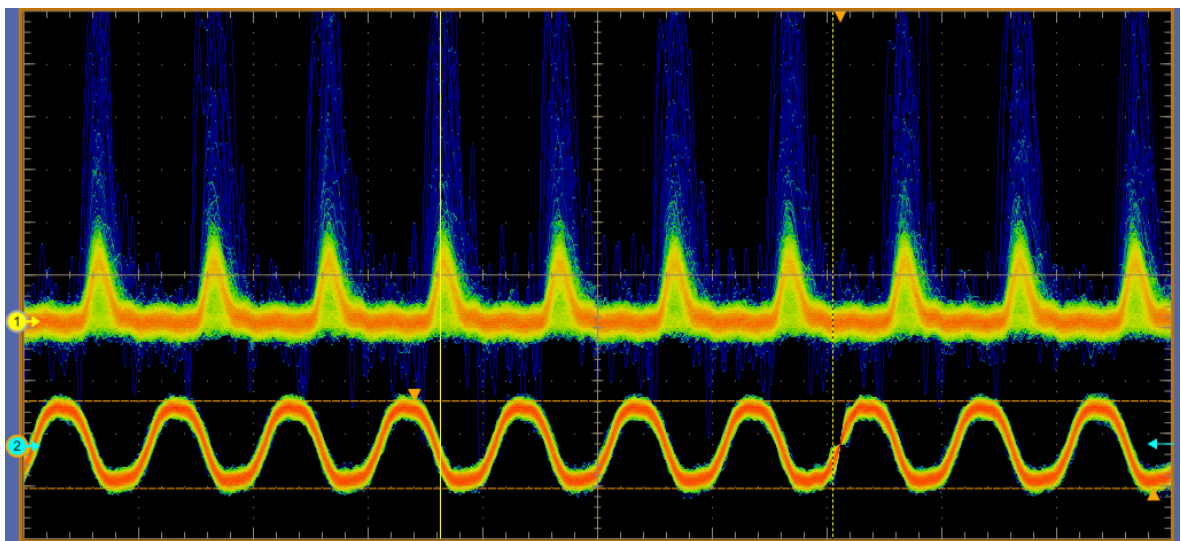
Pirmoje schemos konfigūracijoje buvo išbandytas siaurajuostis 1570 nm centrinio bangos ilgio filtras su 0,82 nm pralaidumo juosta. Pirmiausiai, siekiant iširti sukurtos schemos harmoninės aktyvios modų sinchronizacijos veikimą, buvo nustatomas grandinės impulso apėjimo laikas - fundamentinis dažnis. Tai atliekama paleidžiant schemoje kaupinimą be jokios impulsų moduliacijos su pilnai atidarytu modulatoriumi – šiuo atveju naudojant 4,8 V įtampą, ir schemos išėjimo šaką stebint su 15 ps impulsinio atsako fotodiodu, kuris pajungiamas į RF spektro analizatorių. Gaunamo fundamentinio dažnio RF

signalų spektro pavyzdys pavaizduotas 6.1 pav. Pirmoje schemos konfigūracijoje, naudojant tik paprastą RF sintezatorių, gautas grandinės fundamentinis dažnis – apie 25 MHz.



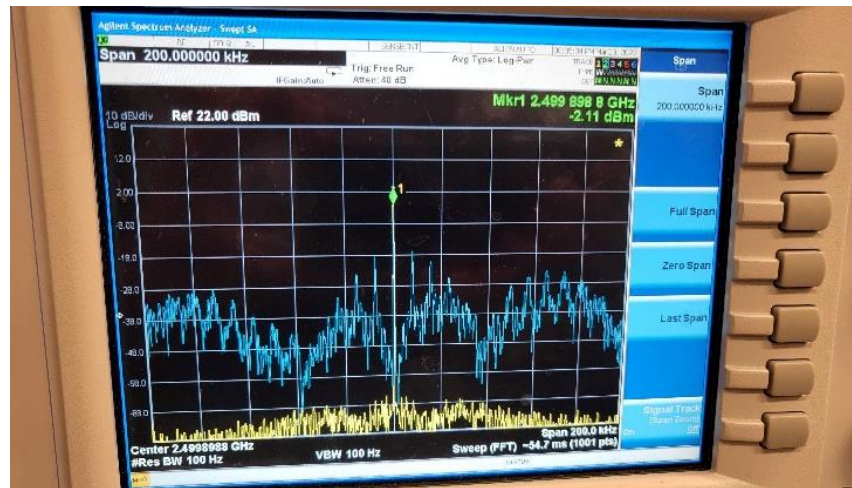
6.1 pav. Fundamentinio dažnio generuojamo signalo pavyzdys.

Nustačius schemos grandinės apėjimo laiką (fundamentinį dažnį) ir pasirinkus atitinkamą harmoniką (fundamentinio dažnio kartotinių skaičių) buvo galima tam tikrą elektroninį signalą paduoti į moduliatorių ir grandinės išėjime fotodiodu su oscilografu stebėti impulsų generaciją. Tačiau pastebėta, kad gaunama impulsų generacija yra nestabili, kaip pavaizduota 6.2 pav.



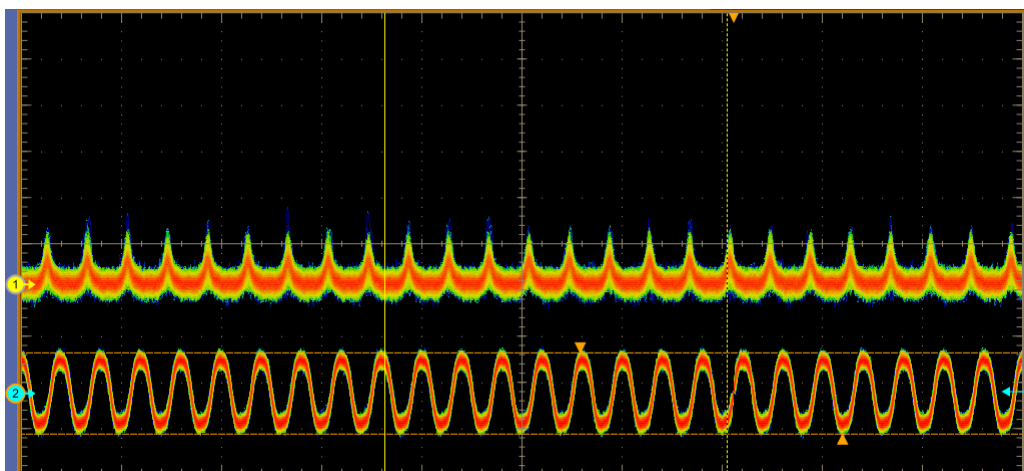
6.2 pav. Sugeneruoti impulsai (viršuje) naudojant 2,5 GHz sinusoidinio signalo moduliaciją. Apačioje matomas moduliatoriaus valdymo signalas.

Patikrinus naudojamą šaltinį nustatyta, kad triukšmai atsirado dėl prasto impulsinio maitinimo šaltinio naudoto RF sintezavimo plokštei maitinti. Sukeltų triukšmų palyginimas tarp skirtingų naudotų maitinimo šaltinių pavaizduotas 6.3 pav. Matoma, kad sugeneruotas signalas naudojant stabilų laboratorinį maitinimo šaltinį (atvaizduotas geltonai) pasižymi 30 dB mažesniu triukšmu, o signalo smailės stiprumas išlieka toks pat.



6.3 pav. Generuojamas RF signalas modulatoriaus valdymui (geltonai su nauju šaltiniu, mėlynai naudojant senąjį).

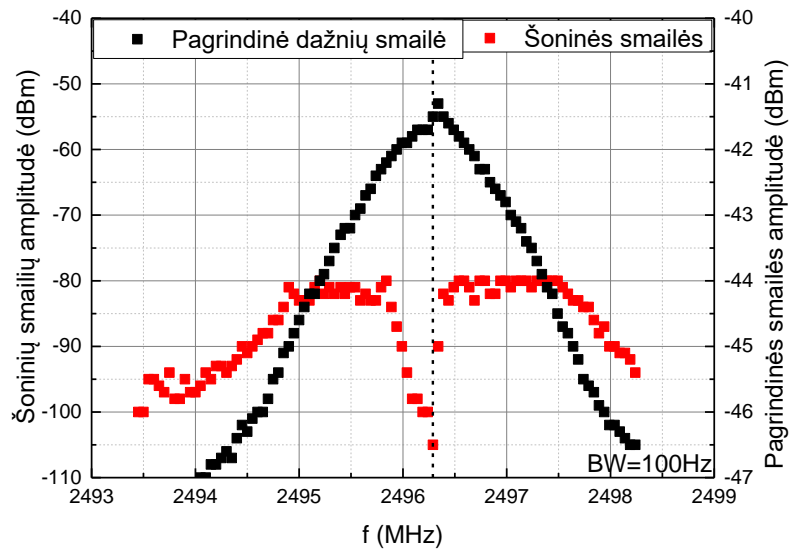
Naudojant stabilų laboratorinį šaltinį, gaunami generuojami impulsai, moduluojant RF sinusoidiniu signalu, pavaizduoti 6.4 pav. Konfigūracijoje buvo naudojamas pagal fundamentinį dažnį apskaičiuotas moduliavimo dažnis – 2496 MHz (atitinkantis 100 harmoniką), didžiausias galimas kaupinimas, kurį palaiko pasirinktas modulatorius, ir anksčiau išmatuota modulatoriaus pusinio atsidarymo įtampa – 2,5 V. Tačiau pastebėta, kad gauta impulsų generacija nėra visiškai stabili ir impulsų amplitudė šiek tiek fliktuoja.



6.4 pav. Generuojami impulsai (viršuje) naudojant 2496 MHz moduliacijos dažnį. Apačioje matomas modulatoriaus valdymo signalas.

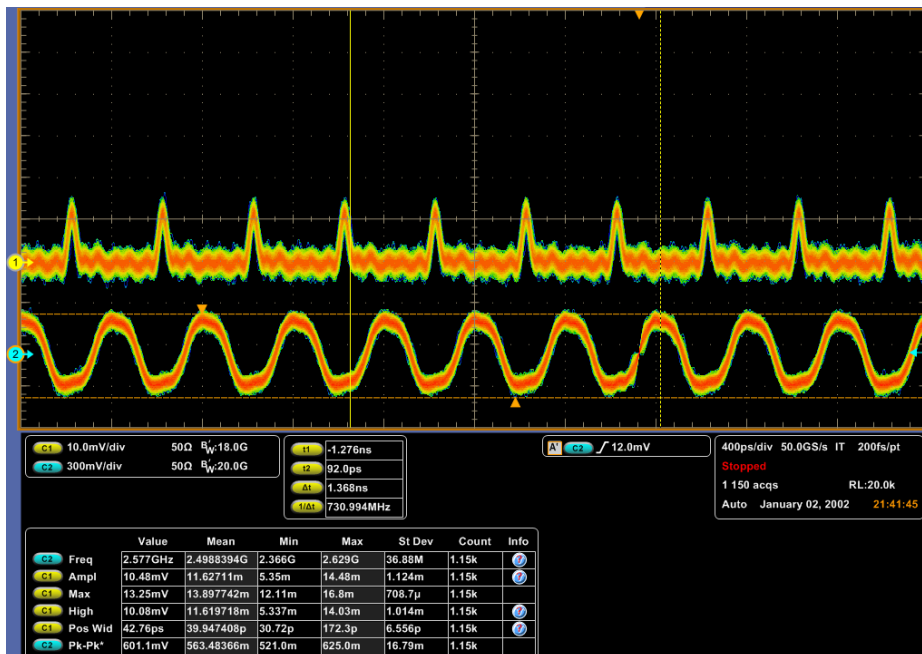


Dėl šios priežasties nuspręsta paderinti moduliavimo dažnį norint nustatyti stabilių impulsų generavimo dažnių sritį. Šiuo atveju stabilumas buvo fiksuojamas ne tik pagal oscilografe matomų impulsų charakteristikas, bet ir tikrinamas pagal RF signalo spektrą gaunamą iš fotodiodo: pagrindinės ir šoninių smailių amplitudes. Amplitudžių priklausomybė nuo moduliacijos dažnio pavaizduota 6.5 pav.



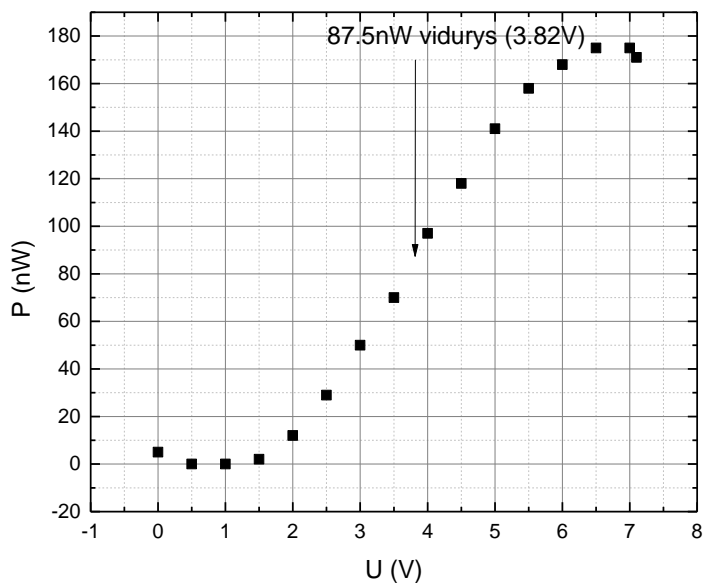
6.5 pav. RF signalo (iš fotodiodo) spektro smailių amplitudžių priklausomybė nuo moduliacijos dažnio.

Vertinant grafiko rezultatus, didžiausios pagrindinės smailės pagal amplitudę dažnis beveik sutampa su mažiausių šoninių smailių dažniu. Pagal išmatuotus duomenis galima nustatyti moduliavimo dažnio plotį, kur vyksta impulsų generacija bei surasti optimalų darbinį tašką, kuriame generuojami stabiliausi impulsai. Šiuo atveju generacija vyksta 2,34 MHz pločio srityje, nuo 2495,1 MHz iki 2497,44 MHz (vertinant -3 dBm lygyje), o optimaliausias impulsų generavimo moduliavimo dažnis yra 2496,29 MHz. Gautas impulsų vaizdas ir stabilumas oscilografe, naudojant optimalų moduliacijos dažnį, pavaizduotas 6.6 pav. Gauti impulsai pasižymi didesniu stabilumu ir amplitude lyginant su ankstesniu matavimu, kas leidžia daryti išvadą, kad moduluojamas dažnis turi būti šiek tiek paslinktas į šoną nuo apskaičiuoto pagal fundamentinį dažnį.



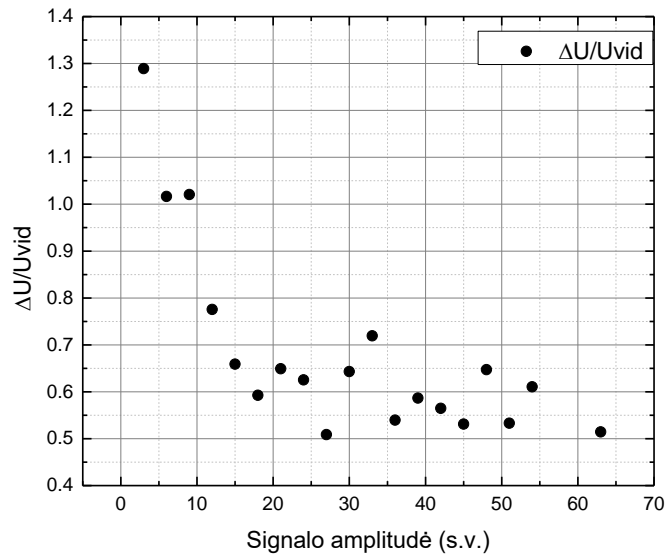
6.6 pav. Generuojami impulsai (viršuje) naudojant 2496,29 MHz moduliacijos dažnį. Apačioje matomas modulatoriaus valdymo signalas.

Norint įsitikinti, kad naudojama optimali modulatoriaus atidarymo įtampa, buvo atliktas papildomas modulatoriaus pralaidumo matavimas nuo įtampos. Gauti rezultatai pavaizduoti 6.7 pav. Iš jų galima matyti, kad naudojamo modulatoriaus nulinis taškas yra pastumtas į didesnių įtampų pusę, o pasiekus didžiausią modulatoriaus įtampą jis pradeda užsidarinėti. Gautas modulatoriaus atsidarymo ir užsidarymo poslinkis didesnių įtampų link galimai atsirado dėl pakitusių aplinkos sąlygų. Darbinis taškas moduliacijai buvo pasirinktas ties pralaidumo viduriniu tašku – 3,82 V.



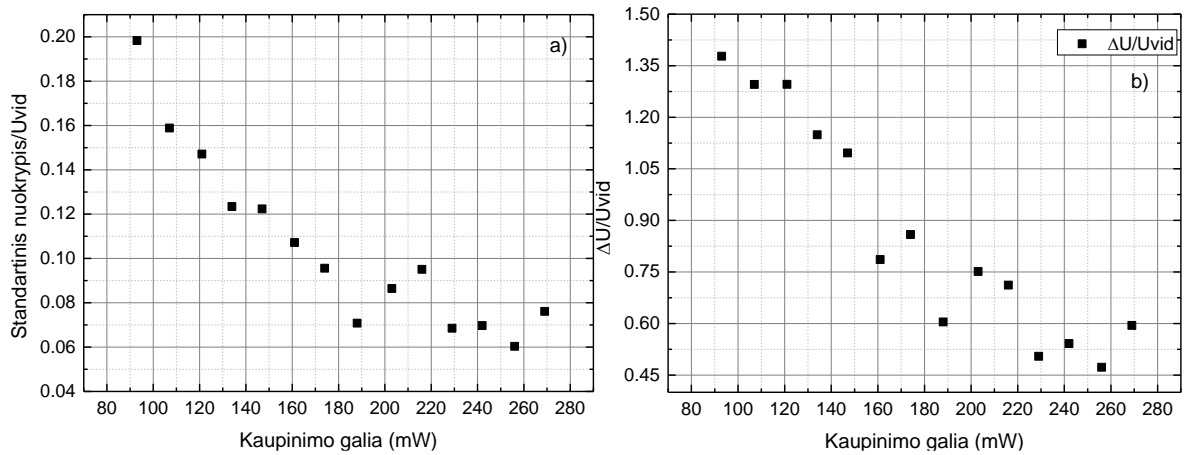
6.7 pav. Modulatoriaus pralaidumo priklausomybė nuo įtampos.

Impulsų generacijos stabilumą taip pat nuspręsta patikrinti keičiant moduliavimo signalo (iš RF sintezavimo plokštės) amplitudę. Tai buvo atliekama keičiant moduliacijos amplitudę programoje (naudojami sutartiniai vienetai) ir per oscilografą stebint generuojamų impulsų stabilumą. Gauti rezultatai pavaizduoti 6.8 pav. Matoma, kad šiuo atveju stabiliausi generuojami impulsai gaunami naudojant didžiausią signalo amplitudę.



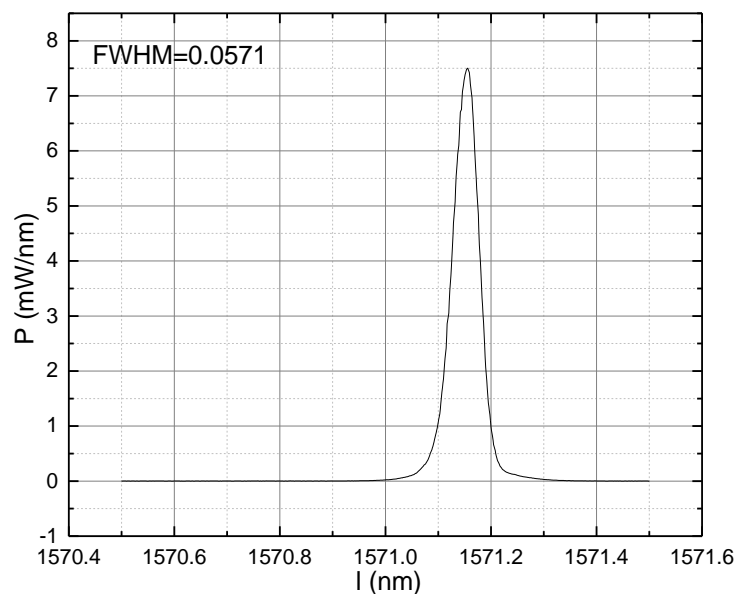
6.8 pav. Generuojamų impulsų stabilumo (maksimalios ir minimalios amplitudės skirtumo santykis su vidutine amplitude) priklausomybė nuo moduliacijos signalo amplitudės.

Galiausiai, buvo iširta kaupinimo galios įtaka generuojamų impulsų stabilumui. Nustatytos priklausomybės pavaizduotos 6.9 a) ir b) pav. Iš grafikų matoma, kad didinant kaupinimą, ir tuo pačiu stiprinimą, generuojamų impulsų stabilumas gerėja. Maksimalus galimas stiprinimas schemeje buvo apribotas modulatoriaus maksimalios vidutinės galios reikalavimais. Dėl šios priežasties didžiausias galimas kaupinimas buvo 269 mW.



6.9 pav. Generuojamų impulsų stabilumo priklausomybė nuo kaupinimo galios; a) amplitudės standartinio nuokrypio santykis su vidutine amplitude, b) maksimalios ir minimalios amplitudės skirtumo santykis su vidutine amplitude.

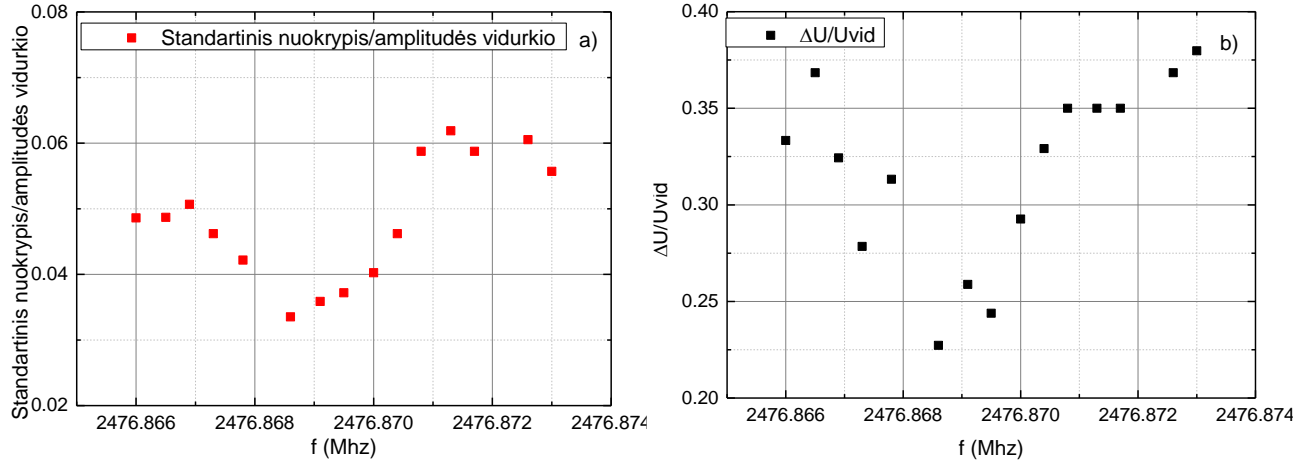
Nustačius optimalius signalo moduliacijos parametrus impulsų generacijai, buvo išmatuotas generuojamų impulsų spektras, pavaizduotas 6.10 pav. Įvertinus matoma, kad spektre gaunama vientisa smailė, iš ko galima spręsti, kad impulsų generacija yra pakankamai stabili. Gauto spektro plotis – 0,057 nm.



6.10 pav. Generuojamų impulsų spektras paduodant į modulatorių 2496,29 MHz valdymo signalą.

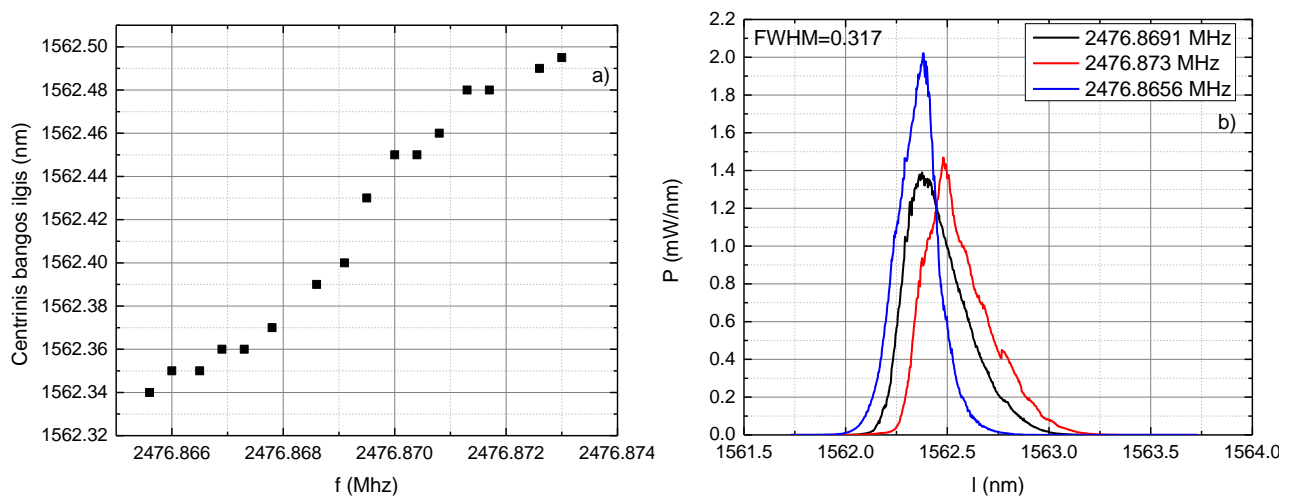
Kadangi siaurajuostis filtras gali stipriai įtakoti (įnešti apribojimus) generuojamų impulsų spektrą, nuspręsta išbandyti ir charakterizuoti schemą su plačiajuosčiu 13 nm pralaidumo juostos pločio filtru. Filtras buvo keičiamas norint nustatyti ar tokia konfigūracija veikia stabiliai bei iširti kaip pasikeičia impulsų spektras keičiant signalo moduliavimo dažnį.

Pirmiausiai, nustatyta generuojamų impulsų stabilumo priklausomybės nuo moduliacijos dažnio, pavaizduotos 6.11 a) ir b) pav., norint surasti optimalią moduliuojamų dažnių sritį. Matoma, kad stabili generavimo sritis yra siaura ir geriausias nustatytas moduliavimo dažnis šiuo atveju – 2476,86 MHz.



6.11 pav. Generuojamų impulsų stabilumo priklausomybė nuo moduliavimo dažnio; a) amplitudės standartinio nuokrypio santykis su vidutine amplitude, b) maksimalios ir minimalios amplitudės skirtumo santykis su vidutine amplitude.

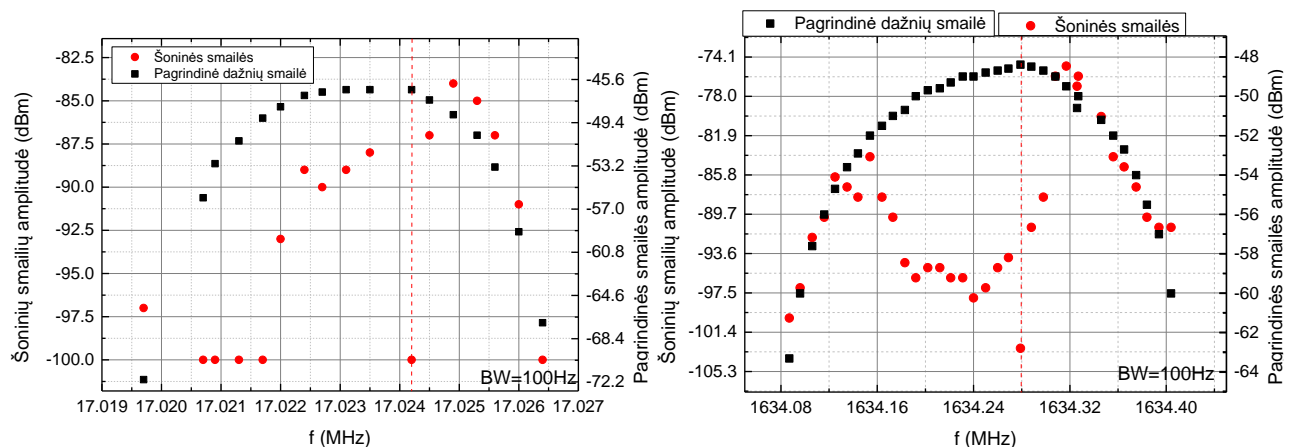
Atliekant moduliavimo dažnio keitimą, taip pat buvo pastebėtas impulsų spektro centrinio bangos ilgio slinkimas priklausomai nuo moduliavimo dažnio, kaip pavaizduota 6.12 a) pav. Įvertinus gaunama beveik tiesinė priklausomybė, kuomet impulsų centrinis bangos ilgis slenka ilgesnių bangų link didinant dažnį. Gautas spektro plotis, atvaizduotas 6.12 b) pav., naudojant optimalų moduliavimo dažnį – 0,317 nm. Lyginant su siaurajuosčiu filtru, šioje konfigūracijoje impulso spektras gaunamas virš 5 kartų platesnis.



6.12 pav. a) Generuojamo impulso centrinio bangos ilgio priklausomybė nuo moduliavimo dažnio, b) generuojamų impulsų spektrai.

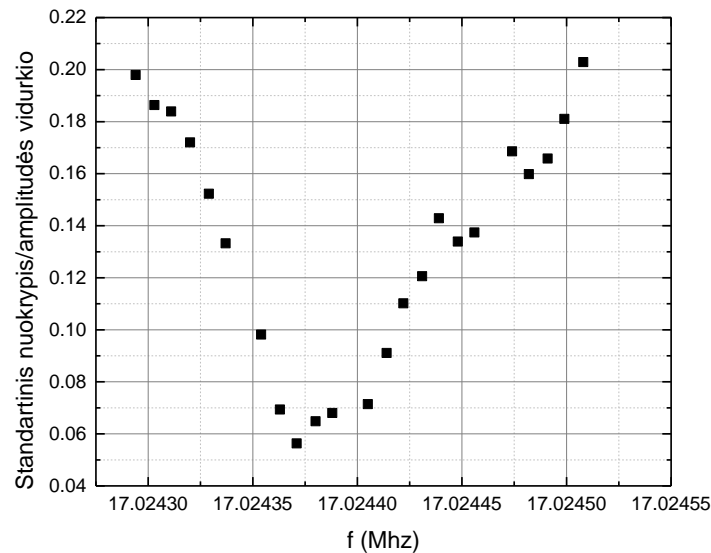
## 6.2. Generuojamų impulsų pasikartojimo dažnio valdymo tyrimai

Antroje elektroninės schemos konfigūracijoje buvo naudojamas siauro lango su derinamu pasikartojimo dažniu moduliavimas norint ištirti impulsų generavimo charakteristikas tiek fundamentinio dažnio generavimo veikoje, tiek harmoninio generavimo veikoje. Kaip ir su ankstesne schema, buvo tiriamas moduliavimo dažnio intervalas pagal pagrindinę smailę ir šonines smailes, pavaizduoti 6.13 pav., nustatant stabilių generuojamų impulsų dažnių intervalą. Vertinant grafikus, gauti rezultatai tarp fundamentalaus 17 MHz dažnio, 6.13 a) pav., ir 96 harmonikos 1634 MHz, 6.13 b) pav., žymiai skiriasi. Fundamentalaus dažnio režime impulsų generacija vyksta 5 kHz (vertinant -10 dBm lygyje) dažnio intervale su optimaliausiu impulsų generavimo tašku esant 17,0242 MHz pasikartojimo dažniui. Palyginimui, naudojant 96 harmonikos 1634 MHz dažnį, impulsų generacija vyksta 295,4 kHz (vertinant -10 dBm lygyje) dažnių plotyje su optimaliausiu impulsų generavimo tašku esant 1634,279 MHz. Taigi, matome, kad harmoniniame režime impulsų generacija pasireiškia 59 kartus didesniame dažnių intervale nei veikiant fundamentalaus dažnio režime.



6.13 pav. RF signalo (iš fotodiodo) dažninio spektro smailių amplitudžių priklausomybės nuo moduliacijos dažnio.

Norint tiksliau ištirti generuojamų impulsų stabilumą taip pat buvo nustatyta amplitudės svyravimų normuoto standartinio nuokrypio priklausomybė nuo moduluojamo dažnio, kaip pavaizduota 6.14 pav. Grafike matome, kad pagal išmatuotus duomenis, fundamentinio dažnio veikime optimalus moduliavimo dažnis stabilių impulsų generacijai, yra 17,02437 MHz. Sugeneruotų impulsų vaizdas matomas 6.15 pav. apačioje.



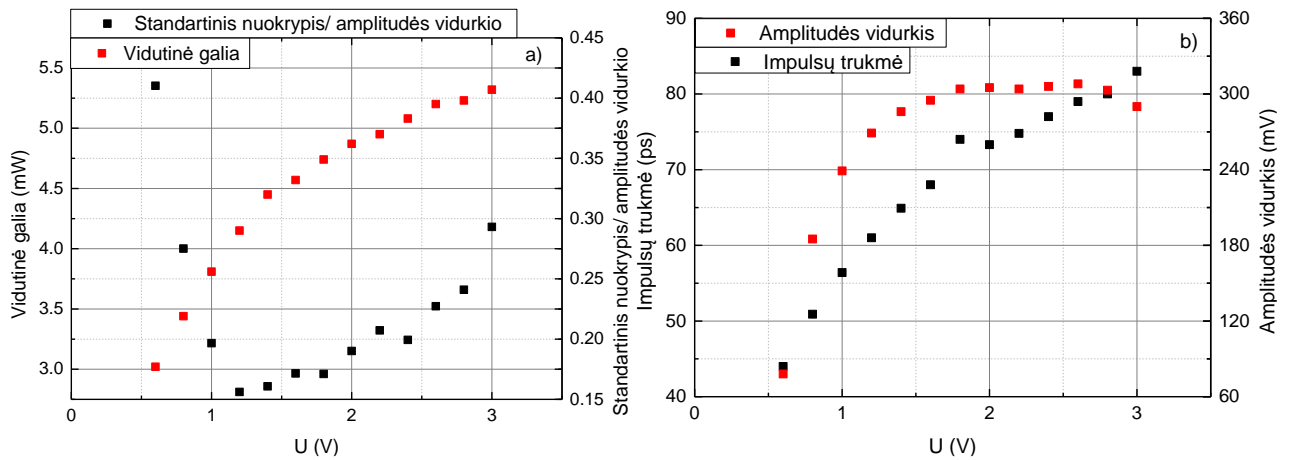
6.14 pav. Generuojamų impulsų stabilumo priklausomybė nuo moduliavimo dažnio.



6.15 pav. Generuojami impulsai (apačioje) naudojant 17,02437 MHz moduliavimo dažnį. Viršuje matomas modulatoriaus valdymo signalas.

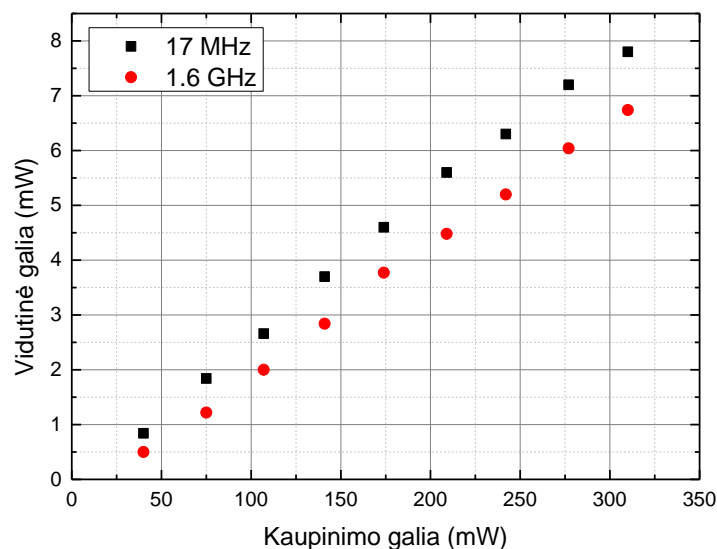
Dėl pakitusio moduliavimo signalo formos, kuomet šioje konfigūracijoje naudojami elektriniai impulsai, nuspręsta ištirti modulatoriaus fiksuotos įtampos pasirinkimo įtaką. Stabilumo ir vidutinės galios bei impulsų trukmės ir smailinės galios priklausomybės nuo modulatoriaus įtampos yra pavaizduotos 6.16 a) ir b) pav. Matavimai parodė, kad stabiliausia impulsų generacija pasireiškia intervale tarp 1,2 V ir 1,8 V, nepaisant to, kad vidutinė galia didėjo didinant modulatoriaus įtampą. Pastebėta, kad impulsų trukmė irgi didėja didinant moduliavimo signalo įtampą, o tai lemia, kad impulsų smailinė galia įsisotina,

kuomet modulatoriaus įtampa viršija 1,8 V. Atsižvelgus į gautus rezultatus nuspręsta tolimesniems matavimams naudoti 1,5 V darbinį tašką.



6.16 pav. a) Stabilumo ir vidutinės galios priklausomybė nuo modulatoriaus fiksuotos įtampos, b) Impulsų trukmės ir smailinės galios (impulsų amplitudės oscilografe) priklausomybė nuo modulatoriaus fiksuotos įtampos.

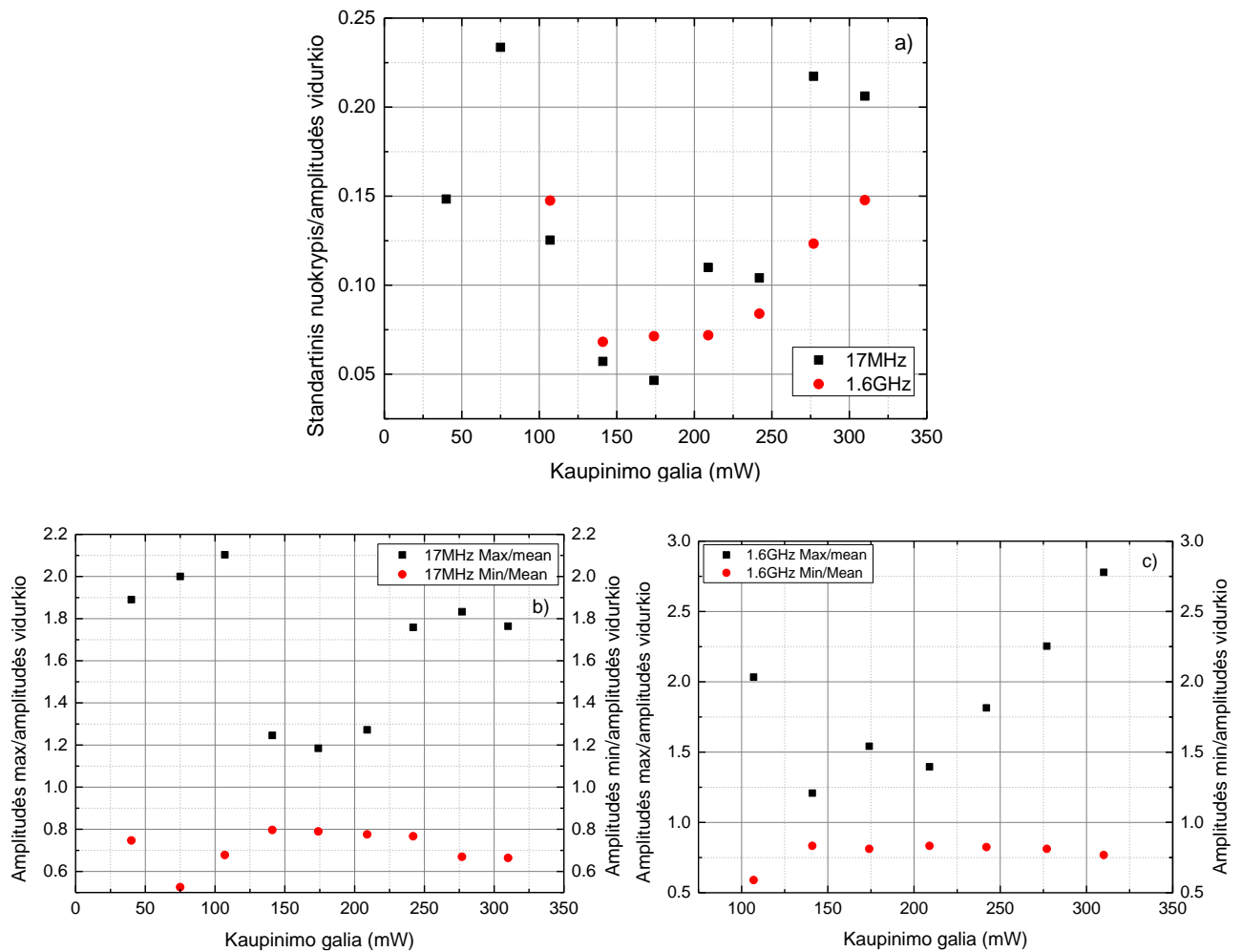
Dėl pakitusių moduliavimo dažnių taip pat nuspręsta ištirti kaupinimo įtaką vidutinei galiai ir generuojamų impulsų stabilumui. Vidutinės galios priklausomybė nuo kaupinimo galios, naudojant fundamentinį ir harmoninį veikimo režimus, pavaizduota 6.17 pav. Matoma, kad vidutinė galia beveik tiesiškai didėja nuo kaupinimo galios ir naudojant fundamentinį režimą gaunama net šiek tiek didesnė vidutinė galia. Šiuo atveju naudojant 310 mW kaupinimo galią fundamentiniame režime gaunama 7,8 mW vidutinė galia 10/90 daliklio išėjime, o harmoniniame – 6,74 mW.



6.17 pav. Vidutinių galių priklausomybė nuo kaupinimo galios.



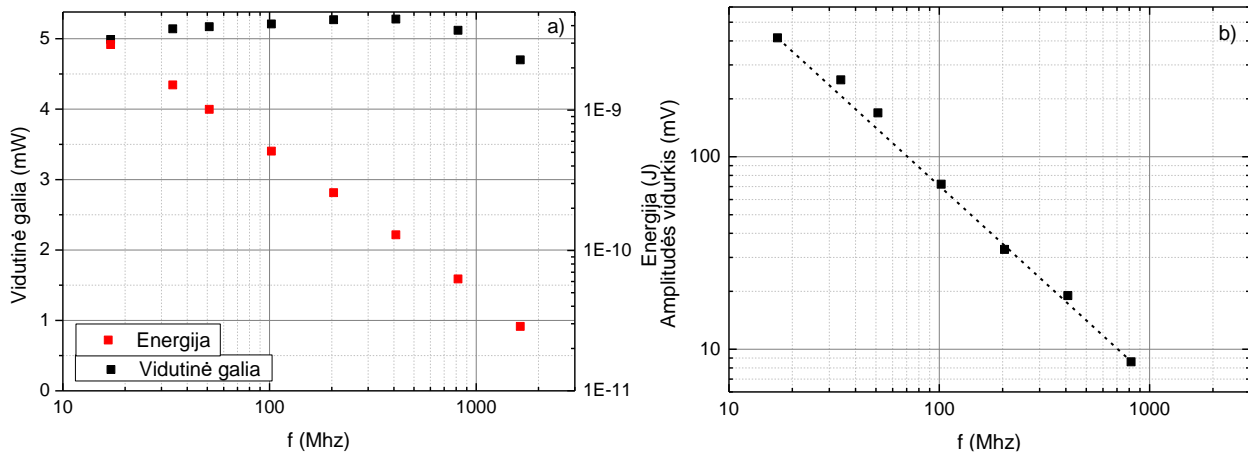
Tiriant kaupinimo galios įtaką generuojamų impulsų stabilumui, pastebėta, kad stabiliausia generacija, nepriklausomai nuo naudojamo dažnio, buvo pasiekta naudojant tą pačią kaupinimo galią – nuo 141 mW iki 209 mW. Generuojamų impulsų stabilumo priklausomybės nuo kaupinimo galios pavaizduotos 6.18 a), b) ir c) pav. Įvertinus gautus rezultatus matoma, kad veikiant 1,6 GHz režimu stabiliausia impulsų generavimo sritis yra šiek tiek pastūmėta prie mažesnių kaupinimo galių, tačiau abiejų pasikartojimo dažnių stabilumas viršijant 174 mW kaupinimą prastėja.



6.18 pav. Generuojamų impulsų stabilumo priklausomybės nuo kaupinimo galios; a) amplitudės standartinio nuokrypio santykis su vidutine amplitude, b) amplitudės maksimumo ir minimumo santykis su vidutine amplitude naudojant fundamentinį moduliacijos dažnį, c) amplitudės maksimumo ir minimumo santykis su vidutine amplitude naudojant 1,6 GHz moduliacijos dažnį.

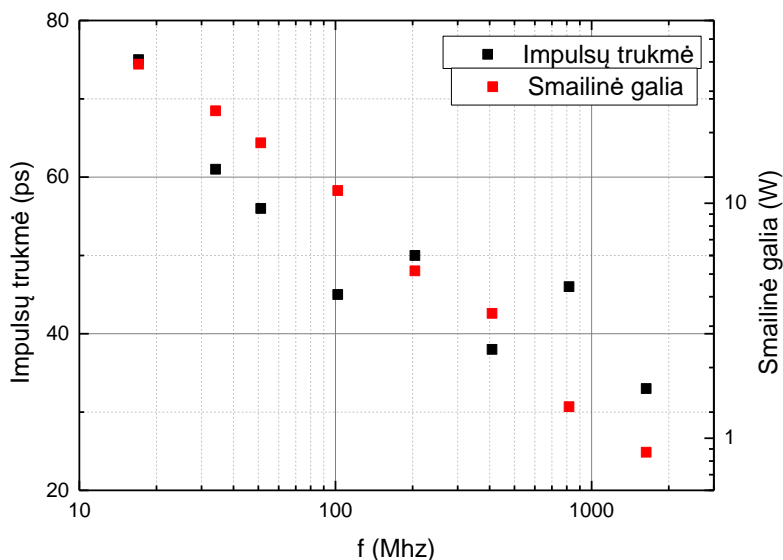
Galiausiai, nuspręsta iširti impulsų charakteristikų pokytį keičiant moduliavimo dažnį nuo fundamentinio iki 96 harmonikos. Dėl to pirmiausiai buvo nustatyta vidutinės galios ir impulsų energijos priklausomybės nuo dažnio, pavaizduotos 6.19 a) pav. Įvertinus rezultatus matoma, kad vidutinė galia labai nežymiai priklauso nuo naudojamo moduliavimo dažnio ir

išlieka beveik tokia pati keičiant pasikartojimo dažnį. Tuo tarpu, energija yra atvirkščiai proporcinga - kuo didesnė naudojama dažnio harmonika, tuo mažesnė impulsų energija. Impulsų energijos kitimas papildomai buvo patikrintas naudojant lėtą 1 GHz fotodiodą (6.19 b) pav). Gauti išmatuoti rezultatai pakankamai tiksliai atitinka atvirkštinį proporcingumą dažniui.



6.19 pav. a) Vidutinės galios ir impulsų energijos priklausomybė nuo dažnio, b) Amplitudės vidurkio (proporcingo impulsų energijai) priklausomybė nuo dažnio.

Matuojant generuojamų impulsų trukmės ir smailinės galios priklausomybę nuo dažnio (6.20 pav.), pastebėta, kad impulsų trukmė šiek tiek mažėja didinant pasikartojimo dažnį, tačiau nepaisant to, impulsų smailinė galia keitėsi beveik 45 kartus, nuo 39,08 W iki 0,87 W, keičiant dažnį 96 kartus. Taigi, įvertinus rezultatus matoma, kad tokios konfigūracijos impulsinis lazeris leidžia lengvai valdyti generuojamų impulsų smailinę galią, o tai ypač naudinga optinio ryšio taikymams.



6.20 pav. Generuojamų impulsų trukmės ir smailinės galios priklausomybės nuo pasikartojimo dažnio.

**Pagrindiniai rezultatai ir išvados:**

1. Atlikus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio tyrimus nustatyta, kad generuojamų impulsų stabilumui kertinę įtaką turi modulatoriaus valdymo signalo triukšmai.
2. Ištyrus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio generuojamų impulsų spektrus harmoninės generacijos veikoje, kai skaidulinėje grandinėje naudojami siaurajuostis ir plačiajuostis filtrai, nustatyta, kad siaurajuosčio filtro naudojimas skaidulinėje grandinėje lemia ryškų generuojamų impulsų spektro pločio sumažėjimą net žemiau filtro juostos pločio.
3. Įvertinus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio generuojamų impulsų energijos priklausomybę nuo impulsų pasikartojimo dažnio, nustatyta, kad impulsų energija keičiasi atvirkščiai proporcingai pasikartojimo dažniui, kadangi vidutinė galia išlieka beveik tokia pati keičiant pasikartojimo dažnį.
4. Ištyrus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio generuojamų impulsų trukmės priklausomybę nuo impulsų pasikartojimo dažnio, nustatyta, kad impulsų trukmė didėja didėjant impulsų pasikartojimo dažniui ir dėl to impulsų smailinė galia nėra tiksliai atvirkščiai proporcinga impulsų pasikartojimo dažniui.

## Literatūros sąrašas

1. M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Commun. Surv. Tutor.* **16**, 2231–2258 (2014).
2. D. O. Caplan, "Laser communication transmitter and receiver design," in *Free-Space Laser Communications* (Springer New York, 2007), pp. 109–246.
3. U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Honninger, N. Matuschek, and J. Aus der Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2**, 435–453 (1996).
4. Y.-W. Song, S. Yamashita, C. S. Goh, and S. Y. Set, "Carbon nanotube mode lockers with enhanced nonlinearity via evanescent field interaction in D-shaped fibers," *Opt. Lett.* **32**, 148 (2007).
5. T. Chen, C. Liao, D. N. Wang, and Y. Wang, "Passively mode-locked fiber laser by using monolayer chemical vapor deposition of graphene on D-shaped fiber," *Appl. Opt.* **53**, 2828 (2014).
6. I. N. Duling, "All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror," *Opt. Lett.* **16**, 539 (1991).
7. V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson, and D. N. Payne, "Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation," *Electron. Lett.* **28**, 1391 (1992).
8. D. J. Richardson, R. I. Laming, D. N. Payne, V. Matsas, and M. W. Phillips, "Selfstarting, passively modelocked erbium fibre ring laser based on the amplifying Sagnac switch," *Electron. Lett.* **27**, 542 (1991).
9. Z. Liu, Z. M. Ziegler, L. G. Wright, and F. W. Wise, "Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator," *Optica* **4**, 649 (2017).
10. K. Regelskis, J. Želudevičius, K. Viskontas, and G. Račiukaitis, "Ytterbium-doped fiber ultrashort pulse generator based on self-phase modulation and alternating spectral filtering," *Opt. Lett.* **40**, 5255 (2015).
11. Th. Pfeiffer and G. Veith, "40 GHz pulse generation using a widely tunable all-polarisation preserving erbium fibre ring laser," *Electron. Lett.* **29**, 1849 (1993).
12. R. Paschotta, *Field Guide to Optical Fiber Technology* (SPIE, 2010).
13. L. Dong and B. Samson, *Fiber Lasers: Basics, Technology, and Applications* (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017).
14. "Fiber Optic Basics," <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>. Žiūrėta [2023-05-20].
15. J. Želudevičius, "Šviesolaidiniai trumpų impulsų stiprintuvai: technologijos ir savybės," *7*; 12–14; 24–25; (n.d.).
16. F. Mitschke, *Fiber Optics* (Springer Berlin Heidelberg, 2010).
17. Lfiber, "PM Fiber Patch Cord, Polarization Maintaining Fiber Jumpers," <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>. Žiūrėta [2023-05-20].
18. A. Méndez and T. F. Morse, eds., *Specialty Optical Fibers Handbook* (Academic Press, 2007).
19. M. N. Zervas, "High power ytterbium-doped fiber lasers — fundamentals and applications," *Int. J. Mod. Phys. B* **28**, 1442009 (2014).
20. D. R. Paschotta, "Erbium-doped Gain Media," [https://www.rp-photonics.com/erbium\\_doped\\_gain\\_media.html](https://www.rp-photonics.com/erbium_doped_gain_media.html). Žiūrėta [2023-05-20].
21. N. A. Tolstik, V. E. Kisel, N. V. Kuleshov, V. V. Maltsev, and N. I. Leonyuk, "Er,Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>—efficient 1.5 μm laser crystal," *Appl. Phys. B* **97**, 357–362 (2009).
22. J. F. Phillips, T. Töpfer, H. Ebendorff-Heidepriem, D. Ehrhart, and R. Sauerbrey, "Spectroscopic and lasing properties of Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup>-doped fluoride phosphate glasses," *Appl. Phys. B* **72**, 399–405 (2001).
23. D. R. Paschotta, "Ytterbium-doped Laser Gain Media," [https://www.rp-photonics.com/ytterbium\\_doped\\_laser\\_gain\\_media.html](https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_laser_gain_media.html). Žiūrėta [2023-05-20].

24. W. J. Miniscalco, "Erbium-doped glasses for fiber amplifiers at 1500 nm," *J. Light. Technol.* **9**, 234–250 (1991).
25. X. Bai, M. Wang, Y. Yang, Z. Liu, and W. Jia, "Experimental and theoretical analysis on pump spectral propriety of single frequency Erbium-Ytterbium co-doped fiber amplifier," *J. Phys. Commun.* **5**, 015005 (2021).
26. D. R. Paschotta, "Passive Mode Locking," [https://www.rp-photonics.com/passive\\_mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/passive_mode_locking.html). Žiūrēta [2023-05-20].
27. D. R. Paschotta, "Active Mode Locking," [https://www.rp-photonics.com/active\\_mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/active_mode_locking.html). Žiūrēta [2023-05-20].
28. D. R. Paschotta, "Mode Locking," [https://www.rp-photonics.com/mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html). Žiūrēta [2023-05-20].
29. G. R. Huggett, "MODE-LOCKING OF CW LASERS BY REGENERATIVE RF FEEDBACK," *Appl. Phys. Lett.* **13**, 186–187 (1968).
30. D. R. Paschotta, "Harmonic Mode Locking," [https://www.rp-photonics.com/harmonic\\_mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/harmonic_mode_locking.html). Žiūrēta [2023-05-20].
31. M. Nakazawa, K. Tamura, and E. Yoshida, "Supermode noise suppression in a harmonically modelocked fibre laser by selfphase modulation and spectral filtering," *Electron. Lett.* **32**, 461 (1996).
32. "Mach–Zehnder Modulator," <https://www.comsol.com/model/mach-8211-zehnder-modulator-15061>. Žiūrēta [2023-05-20].
33. "1.4. Mach-Zehnder modulator (MZM) — Luceda Academy documentation," [https://academy.lucedaphotonics.com/training/topical\\_training/mzm/mzm.html](https://academy.lucedaphotonics.com/training/topical_training/mzm/mzm.html). Žiūrēta [2023-05-20].

## Aprobacija

Studentas yra bendraautorius šių straipsnių:

1. Julijanas Želudevičius, Giedrius Dubosas, Vitas Švedas, Martynas Milaševičius, and Kęstutis Regelskis, "Detection of the angle-of-arrival of an optical beam by means of interference optical filters for free-space optical communication," *Appl. Opt.* 61, 7000-7009 (2022). (<https://doi.org/10.1364/AO.464023>).
2. Julijanas Želudevičius, Giedrius Dubosas, and Kęstutis Regelskis, "Investigation of multipass Yb-doped fiber amplifiers," *Appl. Opt.* 60, 10332-10342 (2021). (<https://doi.org/10.1364/AO.443529>).

Studentas yra bendraautorius šiuose pranešimuose:

1. J. Želudevičius, G. Dubosas, and K. Regelskis, "Fiber-Based Transceiver Design for Improved Reception in Free-Space Optical Communication Systems," in *Frontiers in Optics + Laser Science 2021*, C. Mazzali, T. (T.-C.) Poon, R. Averitt, and R. Kaindl, eds., Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2021), paper JW7A.107.

## Santrauka lietuvių kalba

Aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio, veikiančio 1570 nm bangos ilgių srityje, charakterizavimas ir optimizavimas

Giedrius Dubosas

Šio darbo tikslas - ištirti aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio veikimą 1570 nm bangos ilgio srityje ir impulsų generavimo charakteristikas keičiant aktyvios moduliacijos dažnį, moduliacijos gylį ir spektrinį filtravimą. Surinkta skaidulinio lazerio grandinė su Erbiu legiruota aktyvia skaidula ir skaidulinio elektrooptiniu moduliatoriumi. Aktyvi skaidula buvo kaupiama iš abiejų galų naudojant 976 nm bangos ilgio nuolatinės veikos spinduliuotės lazerinius diodus su vienmodžiais išėjimais. Elektrooptinis moduliatorius valdomas naudojant sinusoidinį arba impulsinį RF signalą su stabiliu pasikartojimo dažniu.

Ištyrus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinį lazerinį šaltinį nustatyta, kad impulsų generacijai šviesolaidinėje grandinėje didelę įtaką turi tiek moduliuojamo signalo parametrai, tiek ir naudojamos skaidulinės grandinės ypatybės. Pagrindinį poveikį generuojamų impulsų stabilumui turėjo eksperimente naudojamo moduliatoriaus valdymo signalo triukšmai, tačiau ne mažesnę įtaką darė netiksliai pasirinkti moduliavimo dažniai ar moduliatoriaus atidarymo įtampos. Ištirtam generuojamų impulsų stabilumui didžiulį papildomą poveikį turėjo naudojamas skaidulinės grandinės kaupinimas. Nustatyta, kad didinant kaupinimą, ir tuo pačiu stiprinimą, generuojamų impulsų stabilumas gerėja bent jau eksperimente naudotų kaupinimo verčių ribose. Atliktas tyrimas su dviem spektrinių filtrų konfigūracijomis taipogi parodė, kad siaurajuosčio filtro naudojimas skaidulinėje grandinėje lemia ryškų generuojamų impulsų spektro pločio sumažėjimą net žemiau naudoto filtro juostos pločio.

Ištyrus aktyviai sinchronizuotų modų skaidulinio lazerinio šaltinio generuojamų impulsų pasikartojimo dažnio valdymą išsiaiškinta impulsų energijos priklausomybė nuo pasikartojimo dažnio ir nustatyta, kad impulsų energija keičiasi atvirkščiai proporcingai pasikartojimo dažniui. Taip pat pastebėta, kad išmatuota vidutinė galia labai nežymiai priklauso nuo naudojamo moduliavimo dažnio ir išlieka beveik tokia pati keičiant pasikartojimo dažnį. Atliekant tyrimą ištirta generuojamų impulsų trukmės priklausomybė nuo impulsų pasikartojimo dažnio. Nustatyta, kad impulsų trukmė didėja didėjant impulsų pasikartojimo dažniui ir dėl to impulsų smailinė galia nėra tiksliai atvirkščiai proporcinga impulsų pasikartojimo dažniui.

## **Santrauka anglų kalba**

Characterization and optimization of actively mode-locked fiber laser source operating at 1570 nm wavelength

Giedrius Dubosas

The aim of this work is to investigate the performance of an actively mode-locked fiber laser source operating at 1570 nm wavelength and the pulse generation characteristics by varying the active modulation frequency, modulation depth and spectral filtering. Fiber laser circuit with an Erbium-doped active fiber and a fiber electro-optic modulator was assembled. Active fiber was pumped through both ends using 976 nm continuous wave laser diodes with single-mode fiber outputs. The electro-optic modulator was controlled using sinusoidal or pulsed RF signal with fixed repetition rate.

The investigation of a fiber laser source for active mode-locking showed that the pulse generation in a fiber optic circuit is strongly influenced both by the parameters of the modulated signal, and by the characteristics of the fiber circuit. The stability of the generated pulses was mainly influenced by the control signal noise of the modulator used in the experiment, but was also affected by inaccurate choice of modulation frequency or modulator opening voltages. The stability of the pulses is additionally strongly influenced by laser pumping. It has been found that the stability of the generated pulses improves with increasing gain, at least in the range of pump power levels used in this experiment. A study with two filter configurations has also shown that the use of a narrowband filter in the fiber circuit results in a significant reduction in the spectral width of the generated pulses, even below the filter bandwidth.

The control of the repetition rate of the pulses generated by an actively mode-locked fiber laser source has been investigated. It was determined that the energy of the generated pulses changes inversely with the repetition rate. It was also observed that the measured average power is only marginally dependent on the modulation frequency used and remains almost the same when changing the repetition rate. The study also investigated the dependence of the width of the generated pulses on the pulse repetition rate. It was found that the width of the pulses increases with increasing pulse repetition rate and that, as a result, the peak power of the pulses is not exactly inversely proportional to the pulse repetition rate.