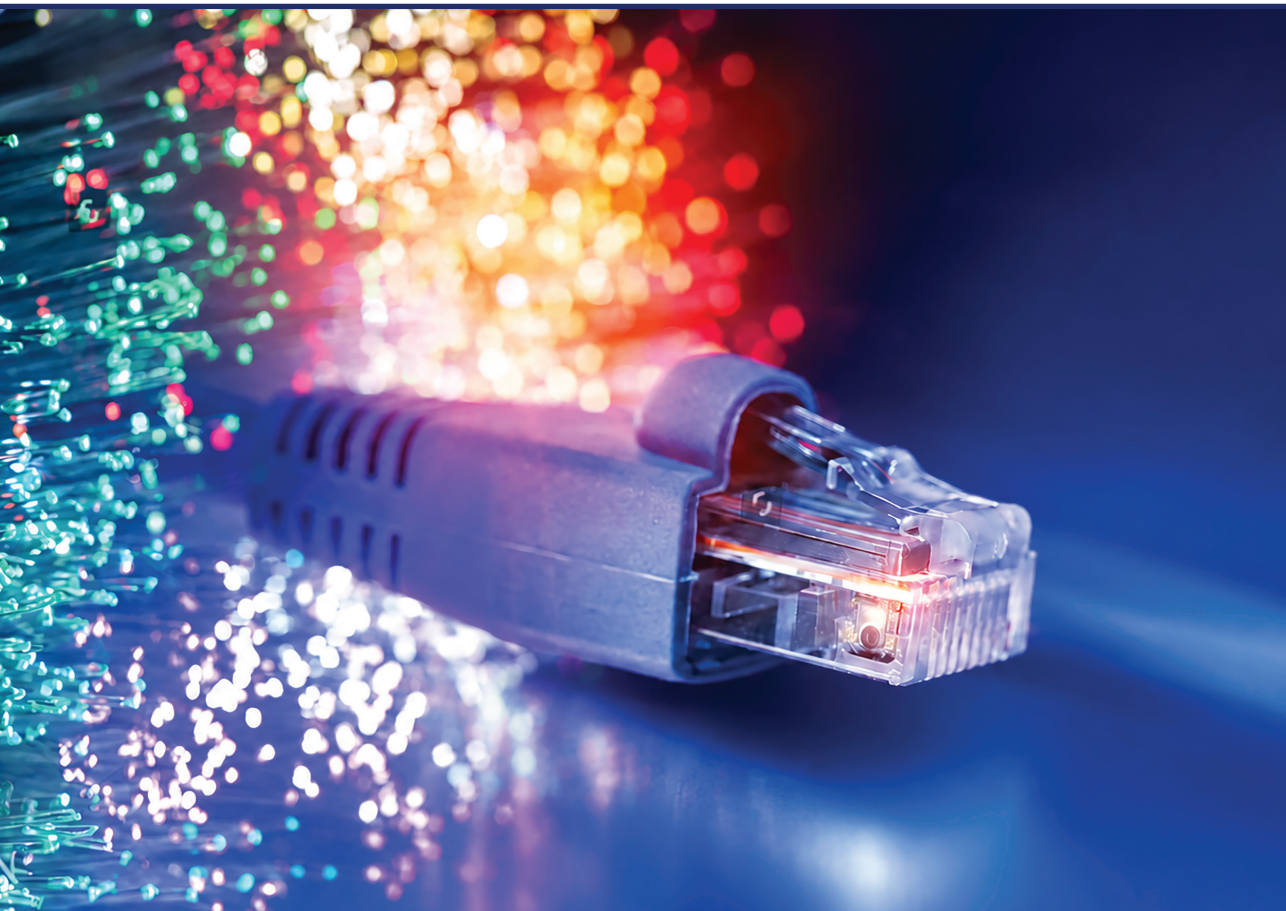


Dmitrijs Prigunovs

**EFEKTĪVA OPTISKĀ PASTIPRINĀTĀJA IZVEIDE
UN VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS SAKARU
SISTĒMĀS**

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte
Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts

Dmitrijs Prigunovs

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

EFEKTĪVA OPTISKĀ PASTIPRINĀTĀJA IZVEIDE UN VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS SAKARU SISTĒMĀS

Promocijas darbs

Zinātniskie vadītāji:

Profesors Dr. sc. ing. VJAČESLAVS BOBROVS

Asociētais profesors Dr. sc. ing. TOMS SALGALS

Rīga 2026

Prigunovs D. Efektīvu optisko pastiprinātāju izveide un veiktspējas novērtējums sakaru sistēmās. Promocijas darbs. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 163 lpp.

Iespēstas saskaņā ar RTU promocijas padomes "RTU P-08" 2026. gada 17. aprīļa lēmumu, protokols Nr. 49.

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (Ph. D.) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2026. gada 28. augustā plkst. 11.00 Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultāte, Rīgā, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Dr. sc. ing. Aleksandrs Ipatovs, Rīgas Tehniskā universitāte

Dr. sc. ing. Inga Brice, Latvijas Universitāte, Latvija

Dr. sc. ing. Anna Baldycheva, Ekseteras Universitāte, Apvienotā Karaliste

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (Ph. D.) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Dmitrijs Prigunovs

Datums: 22.06.2026.

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopa ar kopsavilkumu latviešu un angļu valodā. Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 54 attēli, 3 tabulas, 8 pielikumi, kopā 94 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi. Promocijas darbs apkopo 8 no autora 19 zinātniskajiem oriģinālrakstiem. Zinātniskās publikācijas uzrakstītas angļu valodā un indeksētas SCOPUS, IEEE vai WoS datubāzē, to kopējais apjoms ir 69 lpp.

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums: Efektīva optiskā pastiprinātāja izveide un veiktspējas novērtējums sakaru sistēmās

Darba autors: Dmitrijs Prigunovs

Promocijas darba 1.–3. nodaļā tika izpētīti un analizēti vairāki zinātniskie pētījumi par EDFA, Ramana, FOPA un kombinēto optisko pastiprinātāju izmantošanu viļņgarumdales daudzkanālu sakaru sistēmās. Pētījumu laikā tika izmantotas datortsimulācijas programmas RSoft OptSim un VPIphotonics Design Suite. Darba laikā galvenā uzmanība bija vērsta uz optiskajiem pastiprinātājiem ar divu retzemju elementu leģēto šķiedru un apvalka pumpēšanu paņēmienu pašā šķiedrā. Šādu platjoslas pastiprinātāju izmantošana WDM pārraides sistēmās ļauj nodrošināt lielāku un vienmērīgāku pastiprinājumu, kā arī uzlabot optisko šķiedru sakaru sistēmu efektivitāti.

Promocijas darba 4. nodaļā tika novērtēta 50 ps elektrisko impulsu paplašināšanas metode, izmantojot augstas precizitātes notikumu taimeru, Beseļa un Butterworth filtrus, kā arī dažādus pašizgatavotus kaskādes zemfrekvenču filtrus (LPF). Tika analizēta BER veiktspēja gan optiskajā B2B konfigurācijā, gan konfigurācijā pēc 20 km pārraides SMF šķiedrā, izmantojot 50 ps impulsa ilgumu (τ) un dažādas pozīcijas platumu ilguma vērtības (Δ): 50 ps, 100 ps un 200 ps.

Pēdējā promocijas darba nodaļā tika demonstrētas sfērisko lēcu jeb mikrosfēru izgatavošana, izmantojot komerciāli pieejamu lokizlādes metināšanas iekārtu Fujikura-100P+, kas tiek izmantota integrēto fotonikas ierīču vajadzībām. Tāpat pie dažādiem lēcu izmēriem tika novērtēti ienestie zudumi savienojuma vietās.

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

- ASE - Amplified Spontaneous Emission - pastiprinātā spontānā emisija
ADC - Analog-to-digital converter - platjoslas analogo ciparu pārveidotājs
AWG - Arrayed Waveguide Grating - viļņvadu masīva režģis

B

- BER - Bit-Error-Rate - bitu kļūdu attiecība

C

- CAPEX - Capital Expenditure - darbības izdevumi
CD - Chromatic dispersion - hromatiskā dispersija
CWDM - Coarse Wave Division Multiplexin - rupja spektrāla blīvēšana pēc viļņu garuma

D

- DWDM - Dense Wavelength Division Multiplexing - augsta blīvuma optiskās sistēmas
DSO - Digital Storage Oscilloscope - digitālais elektriskais osciloskops
DC - Double-core - dubultapvalks

E

- EYDFA - Erbium/ytterbium doped fiber amplifier - ar erbiju un iterbiju leģētas šķiedru optiskais pastiprinātājs
EYDF - Erbium/ytterbium doped fiber - ar erbiju un iterbiju leģēta šķiedra
EDFA - Erbium doped fiber - erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs

F

- FOPA - Fiber optical parametric amplifier - uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs
FWM - Four-wave mixing - četru viļņu mijiedarbe
FP - Filtered pulse - filtrēts impulss
FWHM - Full width of half maximum - pilns platums līmenī viena puse no maksimuma
FBG-DCM - Fiber Bragg Grating - Dispersion Compensating Module - šķiedras Bragga režģa dispersijas kompensācijas modulis

H

- HNLF - High nonlinear fiber - paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

G

GP - Generated pulse - ģenerētais impulss

I

IL - Insertion losses - ienestie zudumi

IR-UWB - Impulse radio ultra-wideband - impulsa radio ultraplatajoslas

L

LPF - Low-pass filter - zemfrekvenču filtrs

M

MC - Multi-core - daudzserdeņu

O

OPEX - Operating expense - ekspluatācijas izdevumi

OOK - On-Off Keying - signāla intensitātes modulācijas formāts

OBPF - Optical Band Pass Filter - optiskais caurlaides joslas filtrs

OB2B - Back-two-back - optiskā tiešā savienojumā

OF - Optical filter - optiskais filtrs

OSNR - Optical Signal-to-Noise Ratio - optiskā signāla-trokšņu attiecība

ODN - Optical Distribution Network - optiskais sadales tīkls

ONT - Optical terminal network - optiskā tīkla termināls

P

PON - Passive optical network - pasīvais optiskais tīkls

PRBS - Pseudorandom Binary Sequence - pseido gadījuma bitu secība

PPM - Pulse position modulation - impulsu pozīcijas modulācija

Q

QPSK - Quadrature Phase-Shift Keying - kvadrātūras fāzes manipulācija

R

REDFA - Rare earth doped fiber amplifier - ar retzemju optisko leģēto šķiedru pastiprinātājs

RA-FOPA - Raman-based parametric amplifier on optical fiber - Raman uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs

S

SMF - Single mode fiber - vienmodas optiskā šķiedra

SDM - Spatial-division multiplexing - telpiskās dalīšanas multipleksēšana

SNR - Signal to noise ratio - signāla trokšņu attiecību

SSE - Stimulated spontaneous emission - stimulēta spontānā emisija

SRS - Stimulated raman scattering - stimulēta Ramana izkliede

SBS - Stimulated raman scattering - stimulēta Briljuēna izkliede

ŠOPS - Fiber optical transmission system - šķiedru optikas pārraides sistēma

T

TDC - Time digital converter - laika-digitālais pārveidotājs

TR-PPM - Modulation of the transmitted reference pulse position - pārraidītā atskaites impulsa pozīcijas modulācija

U

UWB - Ultra-broadband - ultraplātjosla

SATURS

| | |
|---|----|
| 1. DUBULTAPVALKA AR DAŽĀDA RETZEMJU Er^{3+}/Yb^{3+} UN APVALKA PUMPEŠANAS ŠĶIEDRU PASTIPRINĀTĀJU NOVĒRTĒJUMS DWDM SAKARU SISTĒMĀ | 18 |
| 1.1. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras pumpēšanas fizikālā procesa apraksts | 19 |
| 1.2. EDFA pastiprinātāja pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora apraksts | 19 |
| 1.3. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru pārklāšanās koeficienta novērtējums | 21 |
| 1.4. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru absorbcijas un emisijas šķērsriezumu novērtējums 22 | |
| 1.5. Leģēto šķiedru elementu analīze | 23 |
| 1.6. Optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru simulācijas modeļa apraksts | 25 |
| 1.7. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru simulācijas modeļa novērtējums līdz 64. kanālu DWDM sakaru sistēmā | 27 |
| 1.8. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru pastiprinātāja modeļa simulācijas un eksperimentālais novērtējums līdz 48. kanālu DWDM sakaru sistēmā | 33 |
| 2. OPTISKO ŠĶIEDRU PARAMETRISKO PASTIPRINĀTĀJU (FOPA) UN RAMAN ASISTĒTA FOPA PASTIPRINĀTĀJU VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS | 39 |
| 2.1. FOPA UN RAMAN asistēta FOPA simulācijas modeļa apraksts 16. kanāla DWDM pārraides sistēmā | 39 |
| 2.2. Pastiprinājuma spektra novērtējums RA-FOPA un viena pumpēšanas avota parametriskais pastiprinātais FOPA | 40 |
| 2.3. Optiskā signāla trokšņa attiecība (OSNR) novērtējums RA-FOPA un viena pumpēšanas avota parametriskā FOPA pastiprinātājā 16. kanāla DWDM sistēmā | 42 |
| 3. AR RETZEMJU ELEMENTU LEĢĒTO ŠĶIEDRU PASTIPRINĀTĀJA NOVĒRTĒJUMS WDM-PON PĀRRAIDES SISTĒMĀ | 44 |
| 3.1. EDFA uzbūve un pastiprināšanas mehānisma apraksts | 44 |
| 3.2. EDFA divu līmeņu atomu sistēma | 48 |
| 3.3. EDFA trīs līmeņu atomu sistēmas apraksts | 48 |
| 3.4. Ar erbiju leģēto šķiedru pastiprinātāju simulācijas shēmas novērtējums WDM-POM 16. kanāla pārraides sistēmā | 50 |
| 3.5. Bitu kļūdu attiecības koeficienta un acu diagrammas novērtējums 16. kanāla WDM-PON pārraides sistēmā | 51 |
| 4. PIKOSEKUNŽU IMPULSU PAPLAŠINĀŠANAS VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS UN NOVĒRTĒJUMS PPM SAKARU SISTĒMĀ | 54 |
| 4.1. 512-TR-PPM viļņu formas ģenerācija | 56 |
| 4.2. Pašražotā 450 MHz zemfrekvenču filtra dizaina modeļa apraksts | 57 |
| 4.3. PPM sakaru sistēmas blokshēma un pētījuma metodikas apraksts, izmantojot augstās precizitātes notikumu taimeru | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. Impulsu paplašināšanas novērtējums, izmantojot Beseļa, Butterwooth un cita veida zemfrekvenču elektrisko filtru | 62 |
| 5. LĒCU ŠĶIEDRU IZMANTOŠANAS APRAKSTS UN NOVĒRTĒJUMS INTEGRĒTAJĀM FOTONIKAS IERĪCĒM..... | 72 |
| 5.1. Lēcu šķiedru konstrukcijas un izgatavošanas procesa apraksts | 72 |
| 5.2. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums atkarībā no lēcas diametra un bezserdeņa šķiedru garumiem | 75 |
| 5.3. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums pie viļņa garuma 1550 nm | 76 |
| SECINĀJUMI | 81 |

TĒMAS AKTUALITĀTE

Mūsdienu informācijas un komunikāciju tehnoloģiju attīstība ir saistīta ar nepārtrauktu pārraidāmās informācijas apjoma pieaugumu, kas prasa palielināt optisko šķiedru sakaru sistēmu caurlaidspēju un pārraides attālumu. Lai apmierinātu šīs prasības, plašu izplatību guvušas sistēmas ar viļņu garuma dalīšanu multipleksēšanu (WDM), kas ļauj vienlaikus pārraidīt vairākus kanālus pa vienu šķiedru [1-3]. Tomēr, datu pārraide vienmēr ir saistīta ar dažādiem zudumiem, jo signāls pamazām rimst un jauda izkliedējas, lai tas tiktu uztvert gala iekārta, tas ir jāpastiprina. Efektīvākais un tehnoloģiski visattīstītākais pastiprinātāju tips ir ar erbiju leģēts optiskais šķiedru pastiprinātājs (EDFA) [4-5]. Tā darbība balstās uz erbija jonu (Er^{3+}) stimulēto starojumu, kas ļauj pastiprināt signālus viļņu garuma diapazonā 1530–1565, kur EDFA pastiprinātāji tiek izmantoti WDM sakaru sistēma, pateicoties augstajai uzticamībai un savietojamībai ar esošo infrastruktūru. Tomēr, pieaugot prasībām pret WDM sistēmām — palielinoties kanālu skaitam, datu pārraides ātrumam un līniju garumam — parādījās tradicionālo EDFA ierobežojumi. Starp tām ir ierobežotā pastiprinājuma joslas platums, efektivitātes samazināšanās pie augstas pumpēšanas jaudas, kā arī grūtības nodrošināt vienmērīgu pastiprinājumu daudziem kanāliem plašā spektrālajā diapazonā. Lai pārvarētu šīs problēmas, tiek aktīvi attīstīti kopīgi leģētie šķiedras pastiprinātāji, kuru pamatā tiek izmantota vienmoda optiskā šķiedra kas tiek leģēta ar $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ joniem. Šādai šķiedrai piemīt vairākas būtiskas priekšrocības. Itterbijs (Yb^{3+}) ir plaša absorbcijas josla 900–1060 nm diapazonā un efektīvi pārvērš pumpēšanas enerģiju erbija jonu uzbudināšanā. Šāda enerģijas pārnese shēma ļauj ievērojami palielināt pastiprinājuma efektivitāti, īpaši pie 980 nm viļņa garuma. Rezultāta $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ optiskie pastiprinātāji (EYDFA) nodrošina augstāku izejas signāla jaudu, mazākus nelineāros efektu ietekmi, kā arī stabilāku darbību daudzkanālu signālu pārraides gadījumā. Pateicoties šīm priekšrocībām, platjoslas EYDFA pastiprinātāji kļūst par neatņemamu mūsdienu optisko šķiedru sakaru sistēmu sastāvdaļu, nodrošinot efektīvu DWDM (blīva viļņgaruma dalīšanas multipleksēšanas) un CWDM (spektrāla blīvēšana pēc viļņu garuma) tehnoloģiju attīstību [6]. Tie ļauj palielināt pārraides attālumu bez signāla reģenerācijas, paaugstināt tīkla energoefektivitāti un nodrošināt vienmērīgāku kanālu pastiprinājumu. Turklāt aktīvo šķiedru ražošanas tehnoloģiju attīstība un EYDFA spektrālo raksturlielumu optimizācija rada priekšnoteikumus to integrācijai jaunās optisko tīklu jomās - ātrgaitas maģistrālās līnijas, zemūdens kabeļu sistēmas un datu apstrādes centriem. Tādējādi $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju izpēte un pilnveidošana ir aktuāls zinātnisks un tehnisks uzdevums. Šīs ierīces nodrošina fundamentālas iespējas turpmākai augstas kapacitātes un energoefektīvu

optisko sakaru sistēmu attīstībai, kas veido pamatu jaunās paaudzes globālajiem telekomunikāciju tīkliem [7].

Optiskā signāla pastiprināšanas tehnoloģijas aktuālā pielietojamība integrētās fotonikas ierīcēs, kurās optiskā signāla ģenerēšanai tiek izmantotas optiskās mikrosfēras, kur optiskais signāls tiek ģenerēts ar nelinearu Kerra efekta palīdzību [8]. Galvenais iemesls ir tas, ka signāls ar frekvenču ķemmes palīdzību tiek ģenerēts diskrētās, ar vienādu attālumu sadalītās frekvenču līnijās. Šāda struktūra nodrošina precīzu un stabilu frekvenču ģenerāciju, kā rezultātā tiek radīts koherents gaismas avots ar spektrāli ierobežotām līnijām. Šīs spektrāli ierobežotās līnijas tiek iegūtas pateicoties frekvenču ķemmes stabīlai ģenerācijai un zemajam fāzes troksnim, kas nodrošina, ka tiek ģenerēti signāli, kas ir monohromatiski un ar mazām frekvences fluktuācijām [9]. Kerra efekta loma šajā procesā ir saistīta ar viena gaismas avota izmantošanu. Pateicoties šim nelineārajam procesam var veidot vairākas ķemmes līnijas, kuras ir cieši izvietotas noteiktā attālumā viena no otras un “bloķētas” fāzē (nav fāžu nobīdes), līdz ar to optisko frekvenču ķemmes tiek iegūtas šauras spektrālās līnijas [10].

Impulsu pozicionālā modulācijas (PPM) paņēmiens tiek izmantots sakaru sistēmas, lai palielinātu energoefektivitāti un samazinātu signāla vājināšanas datu pārraidē [11]. PPM informācija tiek kodēta ar impulsa pozīciju laika logā, kas samazina trokšņu un nelineāro kropļojumu ietekmi. Izmantojot EDFA pastiprinātājus, kuras signāla pastiprināšana notiek bez nepieciešamības veikt optoelektronisko pārveidošanu, saglabājot impulsa fāzes un amplitūdas struktūru. Tas nodrošina augstu uztvērēja jutību, palielina pārraides attālumu un spektrālās izmantošanas efektivitāti, kas ir īpaši svarīgi daudzkanālu DWDM sistēmām ar augstu caurlaidspēju. PPM izmantošana optisko šķiedru tīklos joprojām ir perspektīva joma, īpaši energoefektīviem un ļoti uzticamiem jaunās paaudzes optiskajiem sakaru kanāliem [12-13].

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS

Apkopojot iepriekš minētos faktus par šķiedru optisko pārraides sistēmu attīstībās virzieniem tika izvirzīts **promocijas darba mērķis:**

Izstrādāt un novērtēt Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras optisko pastiprinātāju, elektrisko 50 ps impulsa paplašināšanās un lēcu šķiedru tehnoloģijas priekš ātrgaitas optisko šķiedru sakaru sistēmas pielietojumiem un integrētajām fotonikas ierīcēm.

Lai sasniegtu uzstādīto mērķi tika izvirzītas sekojošas **promocijas darba aizstāvāmās tēzes:**

1. Izmantojot 40 kanālu DWDM sakaru sistēmu ar izstrādāto $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras optiskā pastiprinātāja modeli un pielietojot apvalka pumpēšanas paņēmieni šķiedrā, vismazāko pastiprinājuma starpību ($\Delta G < 9$ dB) ir iespējams iegūt pie 7 m šķiedras garuma.
2. Pielietojot atskaites impulsu pozīcijas modulācijas (TR-PPM) signālus ar 50 ps ieejas impulsa ilgumu un TR-PPM signāla demodulāciju ar izstrādāto elektrisko zemfrekvenču filtru (LPF), ir iespējams nodrošināt elektriskā impulsa paplašināšanu līdz vismaz 700 ps.
3. Integrētajām fotonikas ierīcēm, izmantojot nošķelto SMF-28 šķiedras galu un vienmodu optisko mikrosferu, ir iespējams iegūt vismazākos savienojuma punkta zudumus pie 129 μm lēca diametra.

PROMOCIJAS DARBA UZDEVUMI

Lai sasniegtu uzstādīto promocijas darba mērķi un pierādītu izvirzītās tēzes, bija nepieciešams veikt šādus **promocijas darba uzdevumus**:

1. Simulācijas vidē WDM 64. kanāla sakaru sistēmā novērtēt dubult-apvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras vidējo pastiprinājumu, trokšņa faktoru un pastiprinājuma starpību starp kanāliem atkarībā no EYDF šķiedras garuma un signāla izplatīšanas virziena.
2. Eksperimentāli un simulācijas vidē WDM 40. kanāla sakaru sistēma, novērtēt dubult-apvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras pastiprinājuma koeficientu pie ieejas jaudas -20 dBm/uz kanālu, atkarība no pumpēšanas jaudas un EYDF laiduma garuma.
3. Izpētīt un novērtēt EDFA optiskā pastiprinātāja veiktspēju atkarībā no pastiprinātāja izvietošanas optiskajā līnijā, mainot pumpēšanas signāla jaudu, signāla izplatīšanas virzienu, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla $\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.
4. Izstrādāt hibrīdu RA-FOPA un viena pumpēšanas avota FOPA pastiprinātāju, novērtēt tā veiktspēju 16. kanāla DWDM sakaru sistēma ar 10 Gbit/s datu pārraides uz kanāla, nepārsniedzot uztvertā signāla $\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.
5. Izmantojot Besseļa un Butterworth elektriskos filtrus ar dažādam caurlaidības joslām, novērtēt elektrisko 50 ps impulsa paplašināšanas metodi ar augstas precizitātes notikumu taimeru.
6. Pielietojot pārraidīto atskaites impulsa pozīcijas modulācijas (TR-PPM) signālus ar impulsa ilgumu 50 ps un pilna platuma līmenī viena puse no maksimuma (FWHM), novērtēt impulsa paplašināšanu ar vairāku veidu pašizgatavotiem zemfrekvenču filtriem (LPF).
7. Integrētajās fotonikas ierīces, novērtēt savienojuma zudumus noteiktiem lēcu izmēriem visā C joslā.

DARBA APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

Autora Promocijas darba rezultāti izklāstīti 8 Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (SCOPUS, WoS, IEEE) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos no 8 autoram esošajiem autora darbiem. Darba rezultāti prezentēti 5 konferencēs.

Autora Promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti prezentēti 5 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

1. Olonkins S., Supe A., Bobrovs V., **Prigunovs D.** "Comparison of Single-pump FOPA and Raman Assisted FOPA Performance in a 16 Channel DWDM Transmission System, "2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall), Xiamen, China, 2019, pp. 723-727, [doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021339](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021339).
2. **Prigunovs, D.**, Kudojars, R., Morevs, P., Parfjonovs, M., Supe, A., Matsenko, S., Krotov, A., Redka, D., Bobrovs, V., Salgals, T. Design and Evaluation of Rare-Earth-Doped Fiber Amplifier for WDM-PON Transmission Systems. In: 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2024), China, Chengdu, 21-25 April, 2024. [doi:10.1109/PIERS62282.2024.10618170](https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618170).
3. Spolitis S., **Prigunovs, D.**, Migla, S., Ortiz Blanco, D., Selis, O., Sics, P., Ostrovskis, A., Solovjova, T., Semenako, J., Abolitiņš, A. Demonstration of 512-TR-PPM Fiber Optical Transmission Link. In: 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2023), Czech Republic, Prague, 3-6 July, 2023, [doi:10.1109/PIERS59004.2023.10221307](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221307).
4. Sedulis A., Ostrovskis A., Zakis K., Rubuls K., Ortiz Blanco D., **Prigunovs D.**, Alnis J., Bobrovs V., Spolitis S. "Fabrication of Lensed Fibers with Arc Fusion Splicer for Telecommunication Applications". In: 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2023): Proceedings, Czech Republic, Prague, 3-6 July, 2023, [doi:10.1109/PIERS59004.2023.10221315](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221315).
5. Sedulis, A., Zurikovs, D., Rubuls, K., Murans, I., **Prigunovs, D.**, Salgals, T., Ortiz Blanco, D., Parfjonovs, M., Gegere, L., Ostrovskis, A., Ozolins, O., Bobrovs, V., Spolitis, S. Development and Assessment of a Lensed Fiber for Applications in Integrated Photonics. No: 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2024), Ķīna, Chengdu, 21.-25. aprīlis, 2024, [doi:10.1109/PIERS62282.2024.10618517](https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618517).

Autora Promocijas darba rezultāti izklāstīti 3 Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (SCOPUS, WoS, IEEE) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos.

1. Supe A., Olonkins S., Udaļcovs A., Gegere L., Murnieks R., **Prigunovs D.**, Senkans U., Grube J., Elsts E., Spolitis S., Ozoliņš O., Bobrovs V. “Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks”. Applied Sciences, 2021, Vol. 11, No. 4, Article number 1702. ISSN 2076-3417. Available from: [doi:10.3390/app11041702](https://doi.org/10.3390/app11041702).
2. Zakis, K.; Olonkins, S.; Udaļcovs, A.; Lukosevics, I.; **Prigunovs, D.**; Grube, J.; Bikse, L.; Supe, A.; Ozolins, O.; Spolitis, S.; Bobrovs V. “Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation. Photonics” 2022, 9, 457. <https://doi.org/10.3390/photonics9070457>.
3. T. Solovjova, J. Semenako, **D. Prigunovs**, D. Ortiz, S. Spolitis and A. Aboltins, "Picosecond Pulse Expansion Using The Low-Pass Filter in Event Timer-Based PPM Communication System, 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), Riga, Latvia, 2022, pp. 29-34, [doi:10.1109/MTTW56973.2022.9942566](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942566).

IEVADS

Mūsdienās arvien vairāk tiek ieviestas WDM komunikāciju sistēmas, un tiek aktīvi veikti vairāki pētījumi par šādu sistēmu komponentu izstrādi un to veiktspējas uzlabošanu [14-16]. WDM komunikāciju sistēmas ļauj daudz efektīvāk izmantot optiskās šķiedras resursus salīdzinājumā ar alternatīvām tehnoloģijām [17].

Datu pārraides ātrums WDM sakaru sistēmās tiek palielināts, katram kanālam piešķirot atsevišķu viļņa garumu, tādējādi vienā optiskajā šķiedrā vienlaikus pārraidot vairākus kanālu signālus. Kanālu skaita palielināšanai nepieciešami multipleksēšanas un demultipleksēšanas komponenti, kuru ienestais vājinājums ievērojami samazina signāla jaudu [18-20]. Turklāt, neskatoties uz to, ka optiskās šķiedras vājināšanās C joslas viļņu garuma diapazonā ir tikai 0,2 dB/km, tā uzkrājas, signālam izplatoties optiskajā šķiedrā, un ievērojami ierobežo pārraides attālumu, jo uztvērēja galā esošo fotodetektoru jutība ir ierobežota. Tādēļ ir nepieciešams kompensēt pārraidītā signāla vājināšanos [21]. Pārraidītā signāla vājinājums var kompensēt, izmantojot signāla reģeneratorus vai optiskos pastiprinātājus. Reģenerators ir ierīce, kas ietver gan elektroniskas, gan optiskas sastāvdaļas, kā arī tam jādetektē pārraidītais optiskais signāls, jāpārvērš to elektriskā signālā, jāapstrādā un jāreģenerē ar optiskā raidītāja palīdzību [22, 23]. Optisko signālu reģeneratoru izmantošana mūsdienu WDM sakaru sistēmās ir ekonomiski neizdevīgs un sarežģīts risinājums, jo tas prasa visu pārraidīto kanālu signālu demultipleksēšanu, uztveršanu, apstrādi un reģenerēšanu. Optiskie pastiprinātāji ļauj vienlaikus pastiprināt vairākus pārraidītos kanālu signālus bez demultipleksēšanas un papildu darbībām. Salīdzinot ar signālu reģeneratoru izmantošanu, optisko pastiprinātāju izmantošana ir efektīvs veids, kā kompensēt pārraidīto signālu jaudas zudumu, kas WDM sakaru sistēmu gadījumā ļauj ievērojami samazināt izmaksas, paplašinoties sistēmas kanālu skaitam. Tas ir arī ekonomiski izdevīgs risinājums vienkanālu WDM sistēmām salīdzinājumā ar reģeneratoru risinājumiem [24].

Daudzmodu dubult-apvalka erbija leģēta šķiedras pastiprinātāji plaši tiek izmantoti SDM tīklos, jo tiem ir zema enerģijas pārveidošanas efektivitāte. Lai risinātu šo problēmu, par efektīvu pieeju tiek uzskatīts iterbija (Yb^{3+}) un erbija (Er^{3+}) pastiprinātāja ar tiešo vērsto pumpēšanas virzienu pielietojums [25, 26]. Tomēr tas maina Er^{3+} leģēto šķiedru pastiprinātāja pastiprinājuma profilu un rada pastiprinājuma atšķirību starp optisko viļņu garumiem C joslā, ievērojami ierobežojot blīvas viļņu garuma dalīšanas multipleksēšanas (DWDM) sistēmas efektīvo joslu.

Erbija (Er^{3+})/iterbija (Yb^{3+}) pastiprinātājiem ir sarežģītas īpašības, jo īpaši ņemot vērā pastiprinājuma profilu un pumpēšanas pārveidošanas efektivitāti. Šie rādītāji ir atkarīgi no leģētas šķiedras profila, absorbcijas/emisijas spektriem un ieejas signāla jaudas. Pamatojoties uz šo informāciju, lai apmierinātu pastāvīgi augšo pieprasījumu pēc lielākas tīkla jaudas, EDFA var aizstāt ar alternatīvu pastiprināšanas risinājumu.

Šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji (FOPA) ir inovatīvi pastiprinātāju veidi, ko var uzskatīt par vienu no iespējamiem variantiem tradicionālo EDFA aizstājējiem. FOPA pastiprinājuma raksturlielumi parāda, kāpēc šāda tipa pastiprinātāji tuvākajā nākotnē, visticamāk, tiks plaši izmantoti visā pasaulē: no pieejamajiem zinātniskajām publikācijām ir zināms ka šāda tipa pastiprinātāji var nodrošināt pastiprinājumu līdz 70 dB [27] un pastiprinājuma joslas platumu līdz 270 nm [28-29].

Papildinot ievērojamas FOPA pastiprinājuma īpašībām, tie nodrošina virkni papildu lietojumu visu optisko signālu apstrādei, piemēram, viļņa garuma pārveidošanu, izmantojot četru viļņu sajaukšanas radītās tukšgaitas spektrālās komponentes, dispersijas kompensāciju, izmantojot fāžu konjugāciju, optisko signāla reģenerāciju pārraides posma vidū, kā arī modulācijas formāta pārveidošanu [30-33]. FOPA veiktspēju būtiski ietekmē vairāki faktori, tādi kā augsta pastiprinājuma jutība pret mijiedarbības spektrālo komponentu fāžu nesakrītību, stimulētā Briluēna izkliede (SBS), relatīvās intensitātes troksnis, četru viļņu sajaukšana (FWM), ko rada starpkanālu pārklāšanās ar divvirzienu pumpēšanu FOPA gadījumā - stimulētā Ramana izklienē (SRS) [34]. Neņemot vērā negatīvo ietekmi uz SRS, šīs šķiedras nelinearitāti var izmantot veiktspēju palielināšanai FOPA, izmantojot vienvirzienu pumpēšanas gaismas avotu, pastiprināšanas laikā parametriskā pastiprinātāja pumpēšanai, kuram ir nepieciešama papildu jauda, lai ierosinātu nepieciešamo nelinearitāti. Pārējās iepriekš minētās nelinearitātes ir nozīmīgas sistēmās ar augstu datu pārraides ātrumu, bet FWM ļoti atkarīga no attāluma starp kanāliem. Samazinot šo ietekmi, palielinās FWM. Atšķirībā no citām nelinearitātēm FWM varētu izraisīt jaudas samazināšanos un pasliktināt DWDM sistēmas veiktspēju [35].

Optiskā signāla pastiprināšanas tehnoloģijas aktuālā pielietojamība integrētās fotonikas ierīcēs, kurās optiskā signāla ģenerēšanai tiek izmantotas optiskās mikrosfēras, kur optiskais signāls tiek ģenerēts ar nelineāru Kerra efekta palīdzību [8]. Galvenais iemesls ir tas, ka signāls ar frekvenču ķemmes palīdzību tiek ģenerēts diskrētās, ar vienādu attālumu sadalītās frekvenču līnijās. Šāda struktūra nodrošina precīzu un stabilu frekvenču ģenerāciju, kā rezultātā tiek radīts koherents gaismas avots ar spektrāli ierobežotām līnijām. Šīs spektrāli ierobežotās līnijas tiek

iegūtas pateicoties frekvenču ķemmes stabilai ģenerācijai un zemajam fāzes troksnim, kas nodrošina, ka tiek ģenerēti signāli, kas ir monohromatiski un ar mazām frekvences fluktuācijām [9]. Kerra efekta loma šajā procesā ir saistīta ar viena gaismas avota izmantošanu. Pateicoties šim nelineārajam procesam var veidot vairākas ķemmes līnijas, kuras ir cieši izvietotas noteiktā attālumā viena no otras un “bloķētas” fāzē (nav fāžu nobīdes), līdz ar to optisko frekvenču ķemmes tiek iegūtas šauras spektrālās līnijas [10].

Impulsu pozicionālā modulācija (PPM) tiek izmantota optisko šķiedru pārraides sistēmās, tostarp DWDM sakaru sistēmas, lai palielinātu energoefektivitāti un samazinātu signāla vājināšanas datu pārraidē [11]. PPM informācija tiek kodēta ar impulsa pozīciju laika logā, kas samazina trokšņu un nelineāro kropļojumu ietekmi. Izmantojot EDFA pastiprinātājus, kuras signāla pastiprināšana notiek bez nepieciešamības veikt optoelektronisko pārveidošanu, saglabājot impulsa fāzes un amplitūdas struktūru. Tas nodrošina augstu uztvērēja jutību, palielina pārraides attālumu un spektrālās izmantošanas efektivitāti, kas ir īpaši svarīgi daudzkanālu DWDM sistēmām ar augstu caurlaidspēju. PPM izmantošana optisko šķiedru tīklos joprojām ir perspektīva joma, īpaši energoefektīviem un ļoti uzticamiem jaunās paaudzes optiskajiem sakaru kanāliem [12, 13].

1. DUBULTAPVALKA AR DAŽĀDA RETZEMJU $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ UN APVALKA PUMPĒŠANAS ŠĶIEDRU PASTIPRINĀTĀJU NOVĒRTĒJUMS DWDM SAKARU SISTĒMĀ

Telpiskās dalīšanas multipleksēšana (SDM) tiek izmantoti optiskie pastiprinātāji, kas tiek pumpēti ar apvalku, uzmanību sakarā ar to, ka tiem ir zema pumpēšanas jaudas pārveidošanas efektivitāte. Lai atrisinātu šo problēmu, par efektīvu pieeju tiek uzskatīts ar iterbija (Yb^{3+}) un erbija (Er^{3+}) jonu leģēts optiskais pastiprinātājs ar tieši vērsto pumpēšanas virzienu. Tomēr tās maina Er^{3+} leģēto šķiedru pastiprinātāja pastiprinājuma profilu un rada pastiprinājuma atšķirību C joslā, ievērojami ierobežojot blīvas viļņu garuma dalīšanas multipleksēšanas (DWDM) sistēmas efektīvo joslu. Šī nodaļa ir veltīta $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ ar apvalku pumpēšanas šķiedru pastiprinātāja (EYDFA) detalizētai izpētei, izmantojot skaitliskās simulācijas, lai noteiktu piemērotāko EYDFA konfigurāciju, kas nodrošina vēlamo veiktspēju WDM sakaru sistēmu pielietojumiem.

Simulācijas modelī tika izmantotas dubult-apvalka EYDFA šķiedras, kur iegūtie simulācijas rezultāti tika salīdzināti ar eksperimentālajiem rezultātiem. Pie dažādiem šķiedru garumiem, kanālu skaitiem un ieejas signāla jaudas līmeņiem tika pētīti šādi pastiprinātāja raksturlielumi: pastiprinājuma koeficients, pastiprinājuma viendabīgums, trokšņa faktors

Ar apvalku pumpēti erbija (Er^{3+})/iterbija (Yb^{3+}) jonu leģētas šķiedras pastiprinātāji ir efektīvāki pie lielām izejas jaudām, tomēr šim pastiprināšanas paņēmienam ir potenciāls arī ar telekomunikācijām pielietojumos. Šāda veida pastiprinātājiem ir sarežģītas īpašības, jo īpaši ir jāņem vērā pastiprinājuma profils un pumpēšanas pārveidošanas efektivitāti. Šie rādītāji ir atkarīgi no leģētas šķiedras profila, absorbcijas/emisijas spektriem un ieejas signāla jaudas. Šajā kontekstā tika izstrādāts un izpētīts $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ jonu leģētas šķiedras pastiprinātāja (EYDFA) prototips ar apvalku pumpēšanu. Šī modeļa mērķis tika veltīts EYDFA konfigurācijai (leģētas šķiedras garums, pumpēšanas jauda, ieejas signāla jauda), kas ir piemērota signāla pastiprināšanai daudzkanālu optisko šķiedru pārraides sistēmā ar blīvu viļņu garuma sadalījumu C joslā (1530-1565 nm). Šī pieeja paredz eksperimentāli noteikt $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētas šķiedras parametrus, izmantojot simulācijas konfigurāciju, lai noteiktu sākotnējo EYDFA konfigurāciju pirms eksperimentālu mērījumu veikšanas.

Eksperimentālais EYDFA prototips tika testēts dažādos apstākļos, izmantojot 48 kanālu blīvas viļņu garuma dalīšanas multipleksēšanas (DWDM, 100 GHz) sistēmu, lai novērtētu

absolūto pastiprinājumu un pastiprinājuma vienmērīgumu. Iegūtie rezultāti ļauj novērtēt apvalka pumpēšanas pastiprinātāja piemērotību platjoslas signālu pastiprināšanai.

1.1. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras pumpēšanas fizikālā procesa apraksts

Lai nodrošinātu efektīvu optisko signālu pastiprināšanu SDM optiskās šķiedras pārraides sistēmās, īpaša uzmanība tika pievērsta leģēta šķiedru pastiprinātājiem (DFA), kas tika pumpēti ar apvalku. Tie ir uzskatīti par vienu no vispiemērotākajām pastiprināšanas metodēm gan no kapitālieguldījumu (CAPEX), gan no ekspluatācijas izdevumu (OPEX) viedokļa [36].

Šādas signāla pastiprināšanas paņēmiena tika izmantots mazāk sarežģītas daudzmodu gaismas diodes, kas ievērojami samazina kopējo enerģijas patēriņu. Turklāt tikai viena pumpējoša avota izmantošana uzlabo izmaksu efektivitāti, palīdz samazināt daudzserdeņu pastiprinātāja izmērus un tādējādi, pārejot uz šādu pastiprinātāja implementāciju, ietaupa fizisko vietu statīvā. SDM tīklos parasti izmanto daudzserdeņu ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājus (MC-EDFA), jo tiem ir ārkārtīgi zema pumpēšanas pārveidošanas efektivitāte. Tas ir galvenais šo pastiprinātāju trūkums, kas rodas sakarā ar to, ka pastiprinātājs nepietiekami absorbē pumpējošo starojumu, līdz ar to izejas optiskās jaudas palielināšana ir problemātiska.

Lai pārvarētu šos ierobežojumus, lielākajā daļā pašreizējo lieljaudas optisko šķiedru pastiprinātāju izmanto pastiprinājuma nesējus ar erbija (Er^{3+}) un iterbija (Yb^{3+}) divvirzienu signāla pumpēšanu. Šajā gadījumā pastiprināšana notika divos posmos. Pirmajā posmā lielāko daļu 975 nm pumpējoša starojuma absorbē Yb^{3+} , kas tos uzbudina uz augstāku enerģiju, savukārt otrajā posmā uzbudinātie Yb^{3+} rezonanses ceļā daļu no enerģijas nodod Er^{3+} un uzbudina tos uz stāvokli ar lielāku enerģiju. Šādā veidā tika ievērojami uzlabota pumpēšanās starojuma absorbcija. Turklāt Yb^{3+} pievienošana ļauj palielināt atdalīšanu starp erbija joniem pastiprinājuma vidē, tāpēc Er^{3+}/Yb^{3+} leģēšana samazina Er^{3+} jonu grupēšanās iespēju, tādējādi ļaujot palielināt Er^{3+} koncentrāciju pastiprinājuma vidē salīdzinājumā ar parasto Er^{3+} leģētu šķiedru realizāciju [37]. Rezultātā, lai sasniegtu līdzīgu pastiprinājuma līmeni, ir nepieciešams īsāks Er^{3+}/Yb^{3+} leģējuma šķiedras garums.

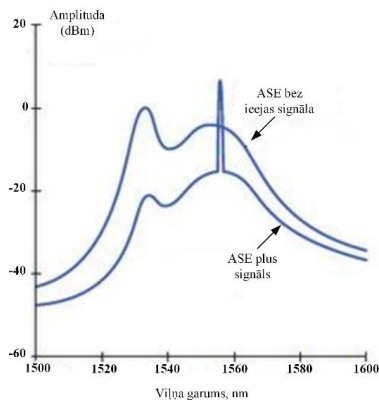
1.2. EDFA pastiprinātāja pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora apraksts

Pastiprinājuma koeficients – parāda attiecību starp signāla jaudu ieejā un izejā. Tas ir atkarīgs no signāla viļņa garuma, ieejas signāla jaudas un polarizācijas stāvokļa. Pastiprinājuma koeficients tiek rēķināts kā vidējās jaudas attiecība izejā un ieejā ņemot vērā pastiprināto spontāno emisiju [38-39].

$$G = 10 \log \left[\frac{P_{izejas}(\lambda_c) - P_{ase}(\lambda_c)}{P_{ieeja}(\lambda_c)} \right] \text{ [dB]} \quad (1)$$

kur P_{izeja} un P_{ieeja} ir attiecīgi pastiprinātā optiskā signāla izejas un ieejas jauda.

Pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientu G ietekmē daudzi faktori, piemēram, Er^{3+} koncentrācija, leģētas šķiedras garums un pumpēšanas jauda u. c. Tomēr, kad pumpēšanas jauda palielinās līdz noteiktai vērtībai (parasti tā ir -20 dBm), pastiprinātāja pastiprinājums samazinās, palielinot ieejas jaudu, un galu galā sāk piesātināties [40]. Galvenais trokšņu avots leģētajā šķiedru pastiprinātājā ir pastiprinātā spontānā emisija (ASE), kuras spektrs ir aptuveni tāds pats kā pastiprinātāja pastiprinājuma spektrs. Ideāla leģētā šķiedru pastiprinātāja trokšņa faktors ir 3 dB, bet praktiski izmantojamo pastiprinātāju trokšņa faktors var sasniegt 6-8 dB. ASE izcelsme ir elektronu un caurumu spontānā rekombinācija pastiprinātāja vidē. Kad erbijas jonus ierosina pumpēšanas jauda, joni, kas atrodas metastabilajā stāvoklī, var sadalīties atpakaļ pamatstāvoklī, ja nav ārēji stimulētas fotonu plūsmas (viļņu garuma 1550 nm signāla [41]).



1.1. att. ASE trokšņa spektrālais blīvums EDFA izejās spektra

Šo sabrukšanas parādību sauc par spontānu emisiju, kas rada plašu fotonu spektrālo fonu. Fotoni spontāni tiek emitēti visos virzienos, bet daļa no tiem tiek emitēti virzienā, kas ietilpst šķiedras skaitliskās apertūras robežās, un tādējādi šķiedra tos uztvers un vadīs. Izstarotie fotoni var mijiedarboties ar citiem leģētajiem joniem un tādējādi tiek pastiprināti ar stimulētu emisiju. Sākotnējā spontānā emisija tiek pastiprināta tāpat kā signāli, tādēļ to sauc par pastiprinātu spontāno emisiju. ASE pastiprinātāja trokšnis tiek izmantots gan tieši vērsta, gan pretēji vērsta pumpēšanas virzienā. Tomēr pretējā virzienā izplatītais ASE trokšnis var pasliktināt pastiprinātāja veiktspēju, jo ASE var samazināt inversijas līmeni un attiecīgi samazināt pastiprinātāja pastiprinājumu [42].

EDFA pastiprinātajos trokšņa faktors (NF) kvantitatīvi nosaka signāla trokšņa attiecības (SNR) pasliktinājumu, un izejas SNR vienmēr ir mazāks par ieejas SNR. Attiecīgi NF var definēt šādi:

$$NF = 10 \log \left[\left(\frac{P_{ASE}}{h\nu\Delta\nu} + 1 \right) \left(\frac{P_{signāls_ieēja}}{P_{signāls_izēja}} \right) \right] \text{ [dB]} \quad (2)$$

kur: P_{ASE} - pastiprinātās spontānās emisijas jauda; ν - signāla un attiecīgā ASE frekvence; $\Delta\nu$ - ASE viļņa spektrālās joslas platums; $P_{signāls_ieēja}$ un $P_{signāls_izēja}$ - attiecīgi signāla ieejas un izejas jauda.

Kad ieejas signāls tiek pastiprināts ar EDFA, stimulēta spontānā emisija (SSE) tiek pastiprināta un sāk veicināt EDFA ASE troksni, radot kļūdu trokšņa faktoru mērījumos:

$$NF = 10 \log \left(\frac{P_{ASE}}{Gh\nu B_0} + \frac{1}{G} - \frac{P_{SSE}}{h\nu B_0} \right) \text{ [dB]} \quad (3)$$

1.3. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru pārklāšanās koeficienta novērtējums

Lai palielinātu pumpēšanas efektivitāti, divkārsās leģētās optiskās šķiedras iekšējais apvalks tika veidots īpašā formā (piemēram, puķu formā [43], D formā [44], zieda formā [45] utt.). Tas uzlabo pumpēšanas absorbciju, daudzmoda režīma, kas fokusē pumpējošo gaismu uz leģētās šķiedras serdeni [46-48]. Divkārsā apvalka šķiedras viļņvada ģeometrija simulācijas modelī ir attēlota, izmantojot tā saukto pārklāšanās koeficientu.

EYDF ražotājs sniedz informāciju tikai par tā ģeometriskiem izmēriem (sk. 1.2. (a) att.) un $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ koncentrāciju attiecību. Pārklāšanās koeficients tika novērtēts, izmantojot RGB krāsu pieeju, kas balstās uz leģētās šķiedras šķērsriezuma, kas ir palielināts ar mikroskopa objektīvo lēcu, grafisko attēlu pēc apstrādes (sk. 1.3. (b) att.). Kopumā dubultapvalka optiskās šķiedras pārklāšanās koeficientu (Γ) definē kā attiecību starp serdes laukumu (A_c) un iekšējās apvalkas laukumu (A_{icl})

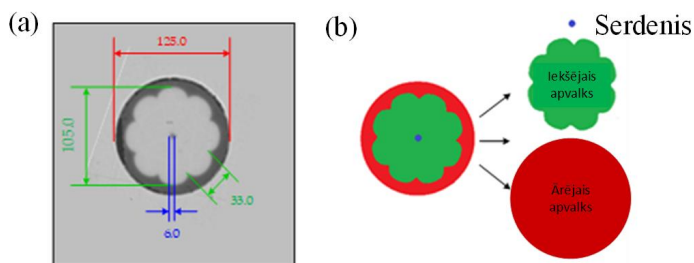
$$\Gamma = \frac{A_c}{A_{icl}} \quad (4)$$

kur Γ ir pārklāšanās koeficients, A_c ir serdes laukums, bet A_{icl} ir iekšējais apvalka laukums [45]. Tā platības novērtēšana kļūst par pašsaprotamu uzdevumu, jo šķiedru ražotāji parasti norāda tikai kopējus ģeometriskos izmērus, bet tādi parametri kā serdes un apvalka platība un jonu koncentrācija, kas ir ļoti svarīgi, veidojot un analizējot erbijā³⁺ leģēto optisko šķiedru pastiprinātājus (EDFA), paliek neatklāti. Vispirms mikroskopā iegūtais pelēkās skalas 1.2. attēls tika izmantots, lai noteiktu robežas starp serdi un iekšējo un ārējo apvalku.

Šis process varētu ietvert neprecizitāti šķiedras serdes un iekšējā apvalka malu neviennozīmīgas noteikšanas dēļ [49], tam ir nenozīmīga ietekme uz aprēķināto pārklāšanās koeficientu. Kad visas malas ir identificētas, katram segmentam tika piešķirta (Sarkana, Zaļa, Zila) krāsa, un tās tika pārkrāsotas (sk. **1.2. (a)** att.). Saskaita sarkano (ārējais apvalks), zaļo (iekšējais apvalks) un zilo (serdenis) pikseļu skaitu un izmanto aplēsēm.

Izmantots EYDF ar $A_c = 658$ pikseļi, $A_{icl} = 112\,828$ pikseļi un ārējā apvalka laukums $A_{ocl} = 122\,598$ pikseļi, kas tika dots $\Gamma = 0,0058$ un $A_{icl}/A_{ocl} = 0,9203$. Abus šos parametrus tālāk izmanto kā ieejas datus simulācijas konfigurācijai.

Pārklāšanās koeficients tika novērtēts, izmantojot ierosināto sarkano, zaļo, zilo (RGB) krāsu pieeju, ko piemēro EYDF šķērsriezuma attēliem, kas iegūti ar šķiedru mikroskopu (sk. **1.2. (a)** att.). Tā kā tika pieņemts, ka EYDFA darbosies optisko transporta tīklu metro piekļuves segmentos, tika ņemta vērā vairāku viļņu garumu darbība.



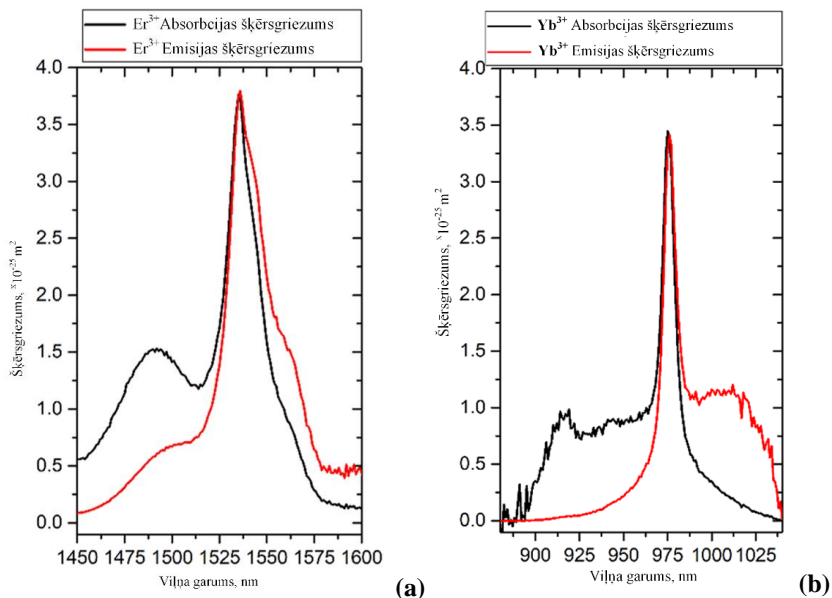
1.2. att. a) $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētas šķiedras šķērsriezuma mikroskopiskais attēls kopā ar tā ģeometriskajiem izmēriem; **b)** RGB attēlojums tā ārējam apvalkam (sarkans), iekšējam apvalkam (zaļais) un serdenim (zils), izmantojot pārklāšanās koeficienta novērtējumu.

1.4. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru absorbcijas un emisijas šķērsriezumu novērtējums

Lai novērtētu EYDF absorbcijas šķērsriezumu, tika izmantoti Er^{3+} un Yb^{3+} jonu absorbcijas spektri, kas iegūti, izmantojot mērīšanas iekārtu, kura sastāv no Agilent Cary 7000 universālā mērījumu spektrofotometra, FiberMate2™ optiskās šķiedras savienotāja sistēmas no Harrick Scientific Products Inc. un diviem dažāda garuma EYDF paraugiem.

Lai iegūtu atbilstošu signāla intensitāti, soļa lielums tika iestatīts uz 1 nm un spektrālās joslas platums uz 5 nm. Absorbcijas spektru mērījumiem ap 975 nm viļņu garumu tika

izmantots 1 m garš EYDF paraugs, savukārt 19 m garš paraugs tika izmantots viļņu garumiem ap 1550 nm.



1.3. att. Absorbcijas un emisijas šķērsgriezuma spektri, kas aprēķināti no absorbcijas mērījumiem un citiem parametriem (a) Er^{3+} un (b) Yb^{3+}

Tādējādi sanāk izvairīties no piesātinājuma efekta, kas varētu izkropļot absorbcijas spektru mērījumus. Absorbciju ap 975 nm attiecina attiecīgi uz Yb^{3+} un Er^{3+} $2_{F_{7/2}} \rightarrow 2_{F_{5/2}}$ un $4_{I_{15/2}} \rightarrow 4_{I_{11/2}}$ optisko pāreju, tomēr Er^{3+} ietekmi var neņemt vērā, jo tā absorbcijas šķērsgriezums ir ievērojami mazāks nekā Yb^{3+} [50, 51]. Turklāt saskaņā ar specifiskāciju EYDF ir 20 reizes lielāka Yb^{3+} koncentrācija salīdzinājumā ar Er^{3+} koncentrāciju. Absorbcijas šķērsgriezumu tika aprēķināts, izmantojot izmērītos absorbcijas spektrus, šķiedras serdes un iekšējās apvalka platības attiecību, tās garumu un $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ koncentrāciju. Emisijas šķērsgriezumu aprēķina, izmantojot McCumbera sakarību, kas savieno emisijas un absorbcijas spektrus (sk. 1.3. att.)

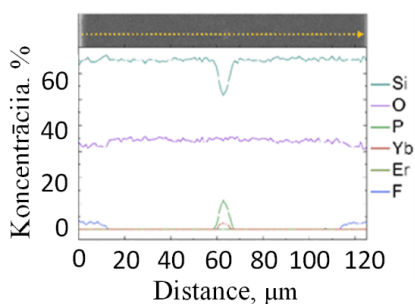
1.5. Leģēto šķiedru elementu analīze

Elementu analīze izvēlētajam divkārsī pārklātā EYDF šķērsgriezumam tika veikta, izmantojot skenējošu elektronu mikroskopiju (SEM), lai noteiktu leģējošo jonu koncentrāciju leģētās šķiedras serdē. Mērījumiem tika izmantots Thermo Scientific Helios UX 5, kas aprīkots ar enerģijas dispersīvās rentgenstaru spektroskopijas (EDS) detektoru. EDS punkta ID tika

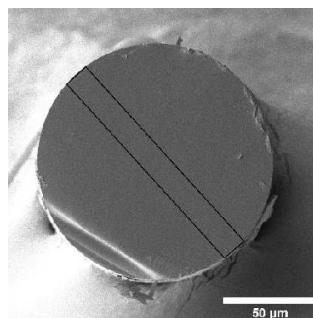
mērīts pie 15 kV, 0,40 nA 300 s. EYDF paraugs tika pārklāts ar plānu 30 nm zelta slāni, lai noteiktu elementu sadalījumu šķērsgriezumā, neradot virsmas lādiņa efektu.

Lineāro skenēšanu veica 125 punktos gar EYDF diametru. Mērījumu laiks aizņēma aptuveni pusstundu ar staru kūļa parametriem 20 kV un 0,40 nA. Spektru elementu kvantitatīvo noteikšanu veica, izmantojot Pathfinder X-ray Microanalysis programmatūru [52].

Šķiedras serdes elementārais sastāvs tika analizēts kā viena veida atomu procentuālais daudzums (%) attiecībā pret kopējo atomu skaitu paraugā. Attiecīgi tika iegūtas šādas vērtības: 61,71 % O (Skābeklis), 30,98 % Si (Silīcijs), 6,04 % P (Praseodīms), 0,06 % Er (Erbijs) un 1,21 % Yb (Yterbijs). Tomēr, veicot EDS līnijas skenēšanu visā šķiedras diametrā, kas tiek pārklāta ar plānu zelta slāni, aprēķinātais elementu sadalījums netika koriģēts attiecībā uz Au slāņa absorbciju. Tomēr **1.4. att.** redzams, ka šķiedras serdes apgabalos Yb, P (Fosfors) un Er aizstāj daļu Si atomu un F (Fluors) atrodas šķiedras malā aptuveni 10 μm platā gredzenā - otrajā apvalkā. Fluora gadījumā tas aizstāj skābekļa atomus ārējā apvalkā. Fosfors šķiedras serdē palielina silīcija dioksīda šķiedras laušanas koeficientu. Iekšējais apvalks sastāv no tīra silīcija dioksīda bez retzemju vai citu legējošo elementu piemaisījumiem. Ārējais apvalks sastāv no silīcija dioksīda, kas ir papildināts ar fluoru, lai samazinātu materiāla laušanas koeficientu.



(a)



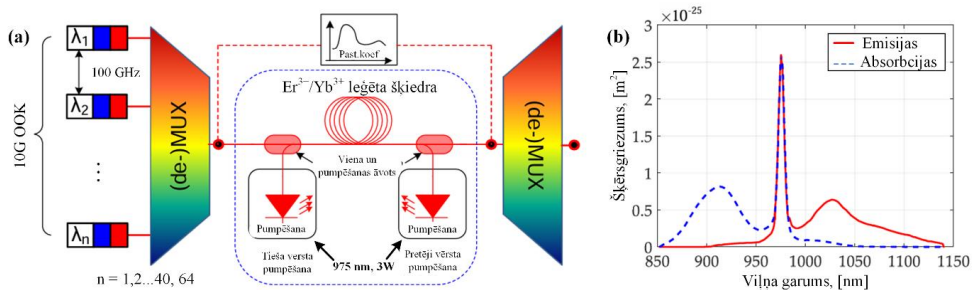
(b)

1.4. att. (a) EDS līnijas skenēšana, kas attēlota ar dzeltenu punktētu līniju un atbilstošu elementu sadalījumu zem tās; **b)** EYDF šķērsgriezums, kur melnais taisnstūris ir EDS līnijas skenēšanas apgabals

Pastiprināšanas procesiem ir svarīga retzemju elementu koncentrācija serdē. EDS mērījumi liecina, ka Yb^{3+} un Er^{3+} koncentrācija ir 1,21 % un 0,06 %, līdz ar to Yb^{3+} un Er^{3+} attiecība ir 20,17, kas ir tuvu EYDF datu lapā norādītajai – 20. Eksperimentāli iegūtas legējošo jonu koncentrācijas vērtības tika izmantotas, lai aprēķinātu absorbcijas/emisijas šķērsriezuma laukumus (sk. **1.4.** sadaļu).

1.6. Optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalku $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru simulācijas modeļa apraksts

Izstrādātā EYDFA ar pumpētu apvalku veikspējas raksturošanai izmantotais simulācijas modelis ir parādīts 1.5. attēlā.



1.5. att. a) vienkāršots simulācijas modelis ar apvalku pumpēšanu EYDFA; b) $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi, kuri tika izmērīti $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētajai šķiedrai, izmantojot spektru mērīšanas metodi, un ievadīti simulācijas modelī.

Simulācijas modelis tika realizēts, izmantojot VPIphotonics Design Suite [VPIphotonics], bet $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ fosfosilikāta stikla šķiedras ar dubulto apvalku absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi ir eksperimentāli izmērīti ŠOPS laboratorijā un ievadīti kā ieejas dati simulācijas konfigurācijai (sk. 1.1. (b) att.). Līdz ar to komplektācijā ir trīs daļas:

i) n 10 Gb/s OOK WDM raidītāji;

ii) EYDFA reālistiskais modelis, kas sastāv no paša EYDFA, optiskā pumpējoša gaismas avota (centrālais viļņa garums $\lambda_p = 975$ nm pie 25°C un izejas jauda 3-5 W), lieljaudas optisko apvienotāju/sadalītāju un pastiprinātāja testēšanas bloka, lai novērtētu tā raksturlielumus (piem., pastiprinājuma spektru un trokšņa koeficientu (NF)); un iii) WDM (de-)multiplexori un uztvērēji signāla kvalitātes novērtēšanai. Šī optiskā tiešā savienojuma (OB2B) iestatījuma galvenais komponents ir optiskās šķiedras modelis. Šī eksperimenta vajadzībām tika izmantots dubult-apvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ šķiedra ar tieši vērsto pumpēšanas virzienu no VPIphotonics Design Suite simulācijas programatūra. Šis modelis ir balstīts uz divvirzienu signālu izplatīšanās vienādojumiem un daudzlīmeņu jonu populāciju ātruma vienādojumiem. Šis modelis tika pielāgots EYDF, kur tika izmantoti nomērītie šķērsgriezumi, kā arī precizēti emisijas, absorbcijas spektri un pārklāšanās koeficienti, lai precizētu WDM signāla (~ 1550 nm) un pumpēšanas signāla (~ 975 nm) sasaisti un to izplatīšanos (kas ir atkarīga no šķiedras profila un

izmēriem). Simulācijas modelis tika izpētīts, izmantojot divvirzienu signāla pumpēšanu ņemot vērā vairākus aspektus, piemēram, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ jonu enerģijas pārnese, šķērsrelaksācijas efektus, uzbudinātā stāvokļa absorbciju, Releja izkliedi un Kerra nelinearitāti. Uzstādīšanas parametru vērtības ir attēlotas 1. tabulā. Simulācijas modelī tika iekļauti parametri, kas nosaka gan WDM sistēmu, gan testējamo EYDFA. Šajā gadījumā tika izmantots 10 Gb/s NRZ-OOK signāls, kura centrālās frekvences ir izvietotas C joslā (1530-1565 nm), izmantojot 100 GHz režģi ar kopējo kanālu skaitu līdz $n = 64$, 41.-64. kanāls atrodas ārpus C joslas ($f_c > 195,6$ THz).

Šāda veida pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu pastiprinātāja pastiprinājuma un trokšņa koeficienta raksturlielumu atkarību no viļņa garuma īpaši attiecībā uz lielu (>10 dBm/uz kanālu) un mazu (< 25 dBm/uz kanālu) ieejas signāla jaudu. Kategorijā "EYDFA pumpēšanas parametri" sniegta sīkāka informācija par optisko pumpējošo gaismas avotu un tā virzienu attiecībā pret signāla izplatīšanos. Visbeidzot, kategorijā "Iegētas šķiedras parametri" tika iekļauti EYDF izmērītie, aprēķinātie un dotie raksturlielumi, kuri tika izmantoti maketu izveidošanai ar EYDFA ŠOPS laboratorijā.

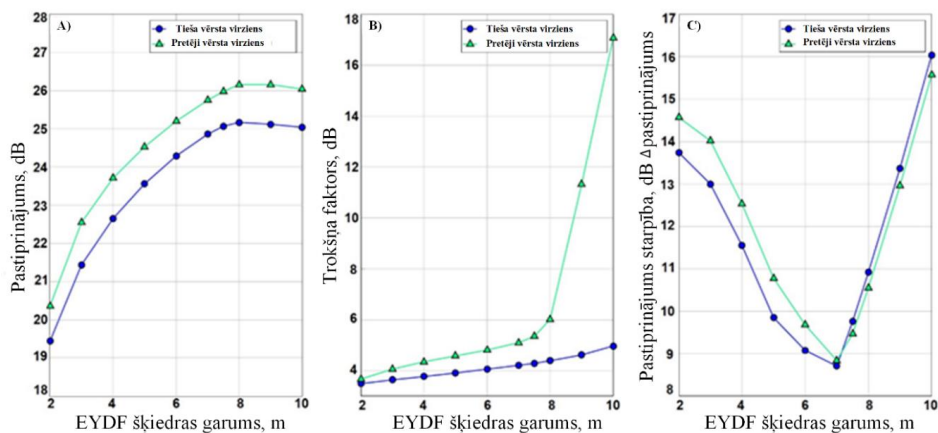
1. tabula Pastiprinātāja iestatīšanas parametri

| Sistēmas parametri | |
|--|---|
| Pārraides ātrums un modulācija | 10 Gbps NRZ-OOK |
| Kanālu skaits (n) | 1 līdz 64 |
| Sākuma frekvence | 191.60 THz |
| Kanālu intervāls | 100 GHz |
| Viena kanāla jauda | -25 dBm/uz kanālu līdz -10 dBm/uz kanālu |
| EYDFA pumpēšanas parametri | |
| Pumpēšanas viļņa garums | 975 nm pie 25 ⁰ C temperatūras |
| Pumpēšanas jauda | 3W, darbības diapazons 0.3 – 5 W |
| Virziens | Tieši vērsta signāla izplatīšanās |
| Iegētas šķiedras parametri | |
| Garums | 1 līdz 10 m |
| Er^{3+} koncentrācija | $1 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$ |
| Yb^{3+} koncentrācija | $2 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$ |
| Er/Yb šķērsrelaksācijas koeficients | $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Serdeņa laukums/iekšējā apvalka laukums ($A_{\text{serdenis}}/A_{\text{iekšējais apvalks}}$) | 0.0058 |
| Iekšējā apvalka laukums/ārējo apvalka laukums ($A_{\text{iekšējais apvalks}}/A_{\text{ārējais apvalks}}$) | 0.9203 |

1.7. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru simulācijas modeļa novērtējums līdz 64. kanālu DWDM sakaru sistēmā

Šajā apakšnodaļā tika novērtēti EYDFA konfigurācijas parametri, tādi kā, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras garums, tās absorbcijas un emisijas šķērsriezumi un pumpējoša signāla virziens, kā arī tika novērtēta viļņa garuma atkarīgo īpašību ietekme, pastiprinājuma vienmērīgums, trokšņa koeficients un maksimālā izejas jauda. Pirms EYDFA radītās jaudas samazinājuma novērtēšanas tika raksturota tā veiktspēja pie vairākiem viļņu garumiem, mainot DWDM kanālu skaitu un to jaudas līmeņus. Šo simulāciju pētījuma būtība bija atrast vispiemērotāko pastiprinātāja konfigurāciju, kas rada vismazāk izkropļojumu, vienlaikus nodrošinot iespējami vienmērīgāku pastiprinājuma spektru.

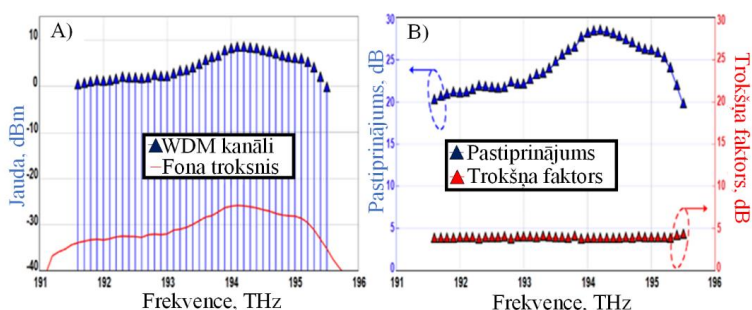
Šajā analizē tika izmantots optiskās pumpēšanas gaismas avots, kas darbojas pie $\lambda_p = 975$ nm un 3 W izejas jaudas. Šādas konfigurācijas vērtības tika izvēlētas, pamatojoties uz (ŠOPS) laboratorijas lieljaudas gaismas avota specifikācijām, kā arī tika ņemts vērā pumpēšanas signāla izplatīšanās virziens – tieši vērsts un pretēji vērsts. Lai izvēlētos EYDF garumu un pumpējošā signāla virzienu, tika izmantotas 40 kanālu WDM sistēma iegūtās līknes, kas parāda pastiprinātāja pastiprinājuma koeficienta mainīšanu, trokšņa koeficientu un maksimālās izejas jaudas atkarību no EYDF garuma (sk. 1.6. att.).



1.6. att. (a) Vidējais pastiprinājums, **(b)** vidējais trokšņa rādītājs un **(c)** maksimāla pastiprinājuma starpība starp kanāliem atkarībā no EYDF garuma sistēmā ar 40 WDM kanāliem, ieejas signāla jauda -20 dBm uz kanālu ar 3 W 975 nm tiešo (zils) un pretējo (zaļš) vērsto pumpēšanas avotu.

Iegūtie rezultāti rāda, ka maksimālais pastiprinājums tika sasniegts pie 8 m garām EYDF neatkarīgi no pumpēšanas signāla virziena (sk. **1.6. (a)** att.). Garāks EYDF nenodrošina lielāku pastiprinājumu, kas ir izskaidrojams ar pumpējošā starojuma izsīkšanu. Turpmāka leģētās šķiedras garuma palielināšana ne tikai nevar radīt papildu pastiprinājumu, bet arī pastiprinātā signāla jauda sāk samazināties paša EYDF vājināšanās dēļ. Pastiprinātājs kļūst trokšņaināks īpaši konfigurācijā, kurā signāls tiek pumpēts pretēji vērstajai pumpēšanas virzienā (sk. **1.6. (b)** att.). Šajā gadījumā trokšņa faktors nav lielāks par 4,5 dB (tieši vērstā pumpēšana) un 6 dB (pretēji vērstā pumpēšana). **1.6. (c)** att. parādīta maksimālā pastiprinājuma starpība, kas tika konstatēta no 1. līdz 40. kanālam (Ch1-Ch40) 40 kanālu DWDM sistēmā ar optisko ieejas jaudu -20 dBm/kanālā. Pastiprinājuma viendabīgums ir svarīga īpašība sistēmās ar vairākiem leģējuma šķiedras garumiem.

Ja visi DWDM kanāli netika pastiprināti vienādi, jaudas starpība palielinās ar katru diapazonu, ierobežojot maksimālo pārraides attālumu. Vismazākā pastiprinājuma starpība ($\Delta G < 9$ dB) ir iegūta 7 m garām EYDF gan 975 nm pumpēšanas signālam gan tieši vērstajā, gan pretēji vērstajā pumpēšanā. Tā ir ievērojami lielāka īsākiem un garākiem EYDF segmentiem, kas norāda uz to, ka šajā konkrētajā kombinācijā pumpējošai jaudai (3 W) un EYDF garumam (7 m) tika sasniegts atbilstošs jonu populācijas inversijas līmenis, līdz ar to šie parametri paliek nemainīgi. Visbeidzot, tika izvēlēts izmantot pumpēšanas signālu ar pretēji vērsto pumpēšanas virzienu, tāpēc tika izvēlēts zemāks trokšņa koeficients, nevis lielāks pastiprinājums. **1.7. (a)** att. parādīts izejas jaudas spektrs, bet **1.7. (b)** attēlā parādīts katra EYDF pastiprinātā DWDM kanāla individuālais pastiprinājums un trokšņa faktors.

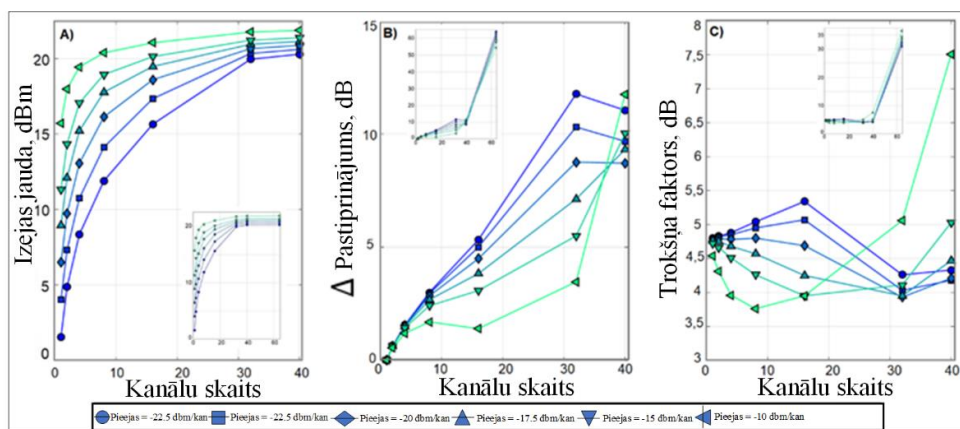


1.7. att. (A) Optiskais spektrs, kas iegūts pie EYDFA izejas ar 7 metrus garu leģētu šķiedru, un **(B)** vidējais pastiprinājums un trokšņa rādītājs sistēmā ar 40 WDM kanāliem, ieejas signāla jauda -20 dBm uz kanālu un ar 3 W 975 nm tieši (zilu) un pretēji (zaļu) vērsto pumpēšanas avotu.

Tā kā pastiprinātāja pastiprinājums un trokšņa faktors ir atkarīgs no viļņa garuma, izejas spektrs nav vienmērīgs. Pastiprinātāja izejas jaudas līmeņi mainās no 0,1 līdz 8,3 dBm katrā kanālā (dBm/uz kanālu, sk. **1.7. (a)** attēlu), kā rezultātā pastiprinājuma starpība ir 19,7-28,3 dB un trokšņa faktors no 3,7 dB līdz 4,2 dB, sk. **1.7. (b)** attēls). Ieejas optiskā jauda (pIN) visos 40 aplūkotajos WDM kanālos tika noteikta -20 dBm/uz kanālu.

Nākamie tika pētīti EYDFA raksturlielumi (pastiprinājums, maksimālā pastiprinājuma starpība un trokšņa koeficients) dažādos darbības apstākļos, mainot DWDM kanālu skaitu un to optiskās jaudas līmeņus.

Rezultātu analīžu laikā tika aplūkota DWDM konfigurācija ar 1, 2, 4, 8, 16, 32, 40 un 64 kanāliem, kur ieejas jaudas līmeņi ir iestatīti no -25 līdz -10 dBm/uz kanālu, sk. **1.8.** att.



1.8. att. (A) Izejas jauda, (B) maksimālā pastiprinājuma starpība un (C) maksimālie trokšņa rādītāji salīdzinājumā ar WDM kanālu skaitu un to ieejas jaudu EYDFA konfigurācijai ar 7 metru garu EYDF un $P_{\text{pumpēšana}} = 3 \text{ W}$ pie $\lambda_{\text{pumpēšana}} = 975 \text{ nm}$ tieši vērstajai pumpēšanai.

Izvides jaudas līknes rāda, ka, jo lielāks DWDM kanālu skaits, jo mazāka ir izejas jaudas starpība. Pastiprinātājs piesātinās, un galu galā tas nespēj pastiprināt vairāk par 40 DWDM kanāliem, pat ja tā jauda ir tikai 25 dBm/kanālā.

Analizējot izejas jaudas līkni pIN =25 dBm/uz kanālu, tika pamanīts, ka izejas jaudas līmenis palielinās par 3,5 dB, kad DWDM kanālu skaits tiek palielināts no diviem līdz četriem. Tomēr attiecīgais skaitlis ir 4,3 dB, ja DWDM kanālu skaits tika palielināts no 16 līdz 32 kanāliem.

Šāda uzvedība norāda uz to, ka mazjaudas optiskie signāli (t. i., ar mazu ieejas jaudu un/vai mazu kanālu skaitu) nespēj pilnībā izmantot populācijas inversiju, kas rodas pastiprinājuma nesējā. Līdz ar to neizmantotā populācijas inversijas daļa galu galā rada pārmērīgu pastiprinātas spontānās emisijas (ASE) troksni, kas rada sliktu trokšņa koeficientu, (sk. **1.8. (c)** att.). Turpretī liela ieejas jauda patērē iegūto populācijas inversiju tā, ka iegūtais pastiprinājums samazinās un izejas jauda sasniedz savu robežu. Izejas jauda palielinās par 0,3 dB, ja DWDM sistēmai ar 32 kanāliem pievieno papildu astoņus kanālus ($pIN = 25$ dBm/uz kanālu), un tā saglabājas līdzīga pat tad, ja kanālu skaits tika palielināts līdz 64. Lielāka pumpēšanas signāla jauda arī nenozīmē lielāku pastiprinājumu vai lielāku izejas jaudu.

Pat ja izmanto 4 W pumpēšanas signālu, 40 kanālu konfigurācijā ar $pIN = 20$ dBm/kanālu izejas jauda palielinās ne vairāk kā par 0,2-0,3 dB. Līdz ar to ierosinātā EYDFA maksimālā izejas jauda ir ierobežota līdz aptuveni +22 dBm.

Maksimālās pastiprinājuma starpības līknes (sk. **1.8. (b)** att.) rāda šādu tendenci: jo lielāka ieejas jauda, jo mazāka pastiprinājuma starpība DWDM sistēmā 4-32 kanāliem. Galvenais iemesls ir tas, ka, lai sasniegtu līdzīgu pastiprinājuma līmeni lielākas ieejas jaudas signāliem, tiek patērēta lielāka populācijas inversijas daļa. Pie noteikta populācijas inversijas līmeņa optiskie signāli ar lielāku jaudu ir mazāk pastiprināti un pastiprinājuma starpība starp kanāliem kļūst mazāka. Tomēr 40 DWDM kanāliem vērojama pretēja situācija, kad pastiprinājuma atšķirība kļūst lielāka, ja ieejas signāla jauda ir lielāka (piemēram, salīdzinot -25 dB/uz kanālu un -10 dBm/uz kanālu līknes). Šāda uzvedība rodas, tāpēc ka lielākas jaudas signāli efektīvāk iztukšo jonu populācijas inversiju. DWDM kanālu skaita palielināšana līdz 40 pie 25 dBm ieejas signāla maina vidējo populācijas inversijas līmeni visā EYDF uz vērtību, kas nodrošina vienlīdzīgu pastiprinājumu pārraides sistēmas frekvenču joslā. Tika novērots vienmērīgāks visu 40 DWDM kanālu pastiprinājums (pastiprināšana), ja $pIN = 25$ dBm/uz kanālu, savukārt 10 dBm/uz kanālu populācijas inversija izplūst daudz ātrāk, pirms tika sasniegta līdzīga viendabība. Līdzīga tendence vērojama arī EYDFA trokšņa koeficientam (sk. **1.8. (c)** attēls). Kanāliem ar $pIN -20$ dBm/ uz kanālu trokšņa faktors vispirms samazinās ar katru papildu DWDM kanālu, līdz kanālu skaits (un to kopējo jaudas līmenis) sasniedz noteiktu optimālo punktu, kuru pārsniedzot, trokšņa faktors sāk palielināties. Ja ir mazāk jaudas kanālu, trokšņa faktors vispirms palielinās par 0,5-1 dB un tad sāk samazināties, sasniedzot 4-4,5 dB no 32 līdz 40 DWDM kanāliem.

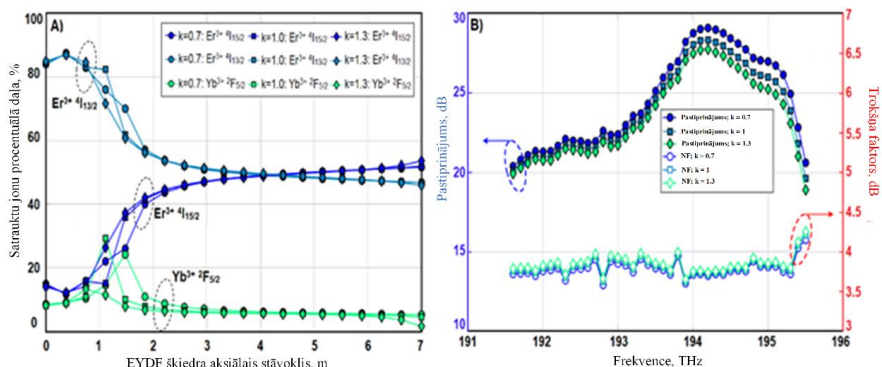
Pastiprinājuma starpība un trokšņu koeficients krasi palielinās, kad DWDM kanālu skaits pārsniedz 40, kas apstiprina pastiprinātāja joslas platuma ierobežojumus, un EYDF absorbē signālus ārpus darbības joslas (sk. **1.8.** (b,c) att.). $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētas šķiedras Yb^{3+} absorbē pumpēšanas starojumu un pēc tam rezonanses veidā nodod daļu savas enerģijas Er^{3+} , lai pastiprinātu signālu.

Tālāk tika veikta padziļināta analīze, parādot, kā EYDF absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi ietekmē pastiprināšanas procesu. Šim nolūkam tika pieņemts, ka šķērsgriezumi ir 70 % ($k = 1$) un 130 % ($k = 1,3$) no sākotnēji aprēķinātajām vērtībām ($k = 1$).

1.9. attēlā rāda veiktspējas atšķirību, izmantojot uzbudināto jonu procentuālo daudzumu (sk. **1.9.** (A) att.), viena kanāla pastiprinājumu un trokšņa koeficientu (sk. **1.9.** (B) att.). Tika novērots, ka $k = 0,7$ gadījumā uzbudināto Yb^{3+} procentuālā satura maksimums kļūst mazāks (aptuveni par 5 %) un pārvietojas tālāk uz EYDF, mainot tā aksiālo stāvokli.

Līdz ar to populācijas inversija tika izlīdzināta visos enerģijas līmeņos, ļaujot pastiprinātajam signālam uzkrāt zināmu daļu pumpējošas enerģijas un tādējādi uzlabojot tā spēju patērēt lielāku populācijas inversijas daļu.

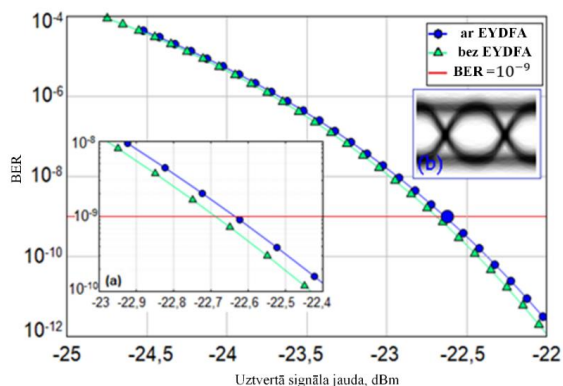
Tas pagarina EYDF garumu, kurā notiek efektīva signāla pastiprināšana, rezultātā palielinoties pastiprinājumam (par $\sim 0,7$ dB) un samazinoties trokšņa faktoram (par $\sim 0,1$ dB).



1.9. att. Jūtības analīze, kas parāda $\text{Yb}(3^+)$ absorbcijas un emisijas šķērsgriezumu ietekmi uz jonu ierosināšanām koeficientiem $k = 0.7, 1, 1.3$ izmērītajām vērtībām: (A) ierosinātā jonu procentuālā attiecība pret aksiālo stāvokli šķiedrā; (B) EYDFA vidējais pastiprinājums un maksimālais trokšņa rādītājs WDM sistēmā ar 40 kanāliem.

Turpretī lielākiem šķērsgrizumiem ($k = 1,3$) Yb^{3+} maksimums pārvietojas uz signāla/pumpēšanas avota pusi (aksiālā pozīcija = 0,7 m) un tika izlīdzināts, kas rada mazāku pastiprinājumu un augstāku trokšņa koeficientu.

Visbeidzot, tika novērtēta BER veiktspēja DWDM sistēmā 40 kanālu konfigurācijai ar EYDFA un bez tās (sk. **1.10.** att.). BER vērtības ir iegūtas četriem kanāliem: 1.kan ar $f_c = 191,6$ THz (C joslas sākums), 16.kan ar $f_c = 193,1$ THz (DWDM tīkla enkurfrekvence), 26.kan ar $f_c = 194,1$ THz (dod maksimālo pastiprinājumu) un 40.kan ar $f_c = 195,5$ THz (C joslas beigas), bet **1.10.** att. parādīta lielākā BER pie konkrētas uztvertās jaudas vērtības. Statistiski ticami rezultāti iegūti, kur tika izmantota 215-1 unikāli izsēta pseidogadījumā binārā secība (PRBS), lai iegūtu 213 bitus, ko izmanto simulācijās un BER korelācijas diagrammās, kas balstās uz stohastisko signāla un trokšņa faktoru. Konkrētāk, signālam tika pievienots troksnis, un konstatētā signāla varbūtības blīvuma funkcija tiek aproksimēta ar chi-kvadrāta funkciju. EYDFA parametri paliek nemainīgi (7 m EYDF, 3 W, 975 nm, tieši vērsta pumpēšana), un ieejas optiskā jauda ir noteikta -20 dBm uz katru WDM kanālu.



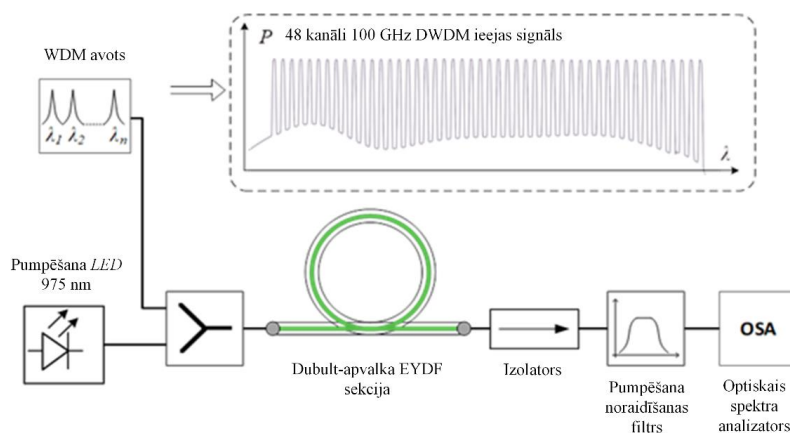
1.10. att. Sliktākais bitu kļūdu koeficients (BER) atkarībā no uztvertās optiskās jaudas, kas konstatēta 1.kan = 191,6 THz, 16.kan = 193,1 THz, 26.kan = 194,1 THz un 40.kan = 195,5 THz 40 kanālu WDM sistēmā ($p_{IN} = -20$ dBm/ uz kanālu) ar EYDFA un bez tā, kur ieliktnī (a) palielināts apgabals pie $BER = 10^{-9}$, bet ieliktnī (b) parādīta acu diagramma, kas uzņemta konfigurācijai ar pastiprinātāju pie $BER \sim 10^{-9}$

1.10. att. ir parādīts jaudas samazinājums zem 0,1 dB pie atskaites līmeņa $BER = 10^{-9}$, salīdzinot ar konfigurāciju bez pastiprinājuma. Šādus kropļojumu līmeņus var uzskatīt par nenozīmīgiem. Tomēr, pirms šādus pastiprinātājus var efektīvi izmantot optisko zudumu

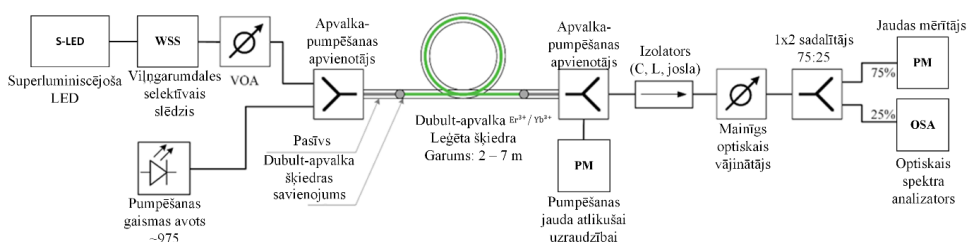
kompensēšanai WDM pārraides sistēmās, to pastiprinājuma spektri ir jāizlīdzina, piemēram, izmantojot pastiprinājuma izlīdzināšanas filtrus vai vairākus pastiprināšanas posmus.

1.8. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru pastiprinātāja modeļa simulācijas un eksperimentālais novērtējums līdz 48. kanālu DWDM sakaru sistēmā

Šajā apakšnodaļā tika aprakstīts simulācijas modelis, kas tika izmantots, lai novērtētu paredzamus galvenos darbības rādītājus pie dažādiem šķiedras garumiem. Šeit arī tika aprakstīts testējamā pastiprinātāja eksperimentālais modelis, kā arī tika salīdzinātas simulācijas un eksperimentālie iegūtie rezultāti. Šīs simulācijas shēma tika izveidota, izmantojot VPIphotonics Design Suite [43], kas ir attēlota **1.11.** att.



1.11. att. Simulācijas EYDFA WDM 48. kanālu shēma, ar apvalka pumpēšanas paņēmieni



1.12. att. Eksperimentāla EYDFA WDM 48. kanālu shēma, kas tika pumpēta ar apvalku

Ieejas signāls sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37.5 GHz joslas platumu atbilstošu uzstādījumiem iespējošajam WSS. Šis optisko nesēju signāls saturošs 48 kanālu interpretāciju emulējot optiskos nesējus (modulēto signālu datu kanālus WDM risinājumā). (sk. **1.11.** att.). Simulācijas modeļa mērķis ir noteikt pastiprinājuma

raksturlielumus un nodrošināt EYDF garuma un pumpēšanas parametru bāzes vērtības eksperimentālajai konfigurācijai. Simulācijas [53] modelis tika uzlabots vēl vairāk, izmantojot **1.12.** att. parādīto laboratorijas prototipu, kur tika izmērīts 3 m garas šķiedras pastiprinājums.

Attiecīgi tika iegūts fiktīvs (datu nemodulēts viļņu garums) WDM signāls, kas sastāv no 48 kanāliem, kuru joslas platums ir 37,5 GHz un kuri atrodas 100 GHz attālumā viens no otra, un tas ir parādīts **1.11.** attēla ieliktnī. Kā pumpēšanas gaismas avots tika izmantota lieljaudas daudzmodu diode, kas stabilizēta 30 °C temperatūrā ar 6 nm joslas platumu, izmantojot termoelektrisko dzesētāju (sk. **1.12.** att.).

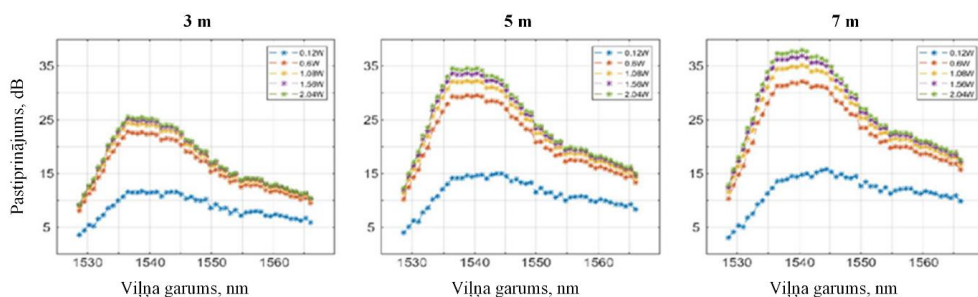
Šī pumpēšanas avota minimālās izejas jaudas sliekšnis ir 0,6 W, kā arī diodei ir svarīga aktīva temperatūras kontrole, jo pie augstākas temperatūras izejas jauda samazinās un spektrs pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem. Tālāk pārskatītais modelis tika izmantots, lai novērtētu optimālo EYDF garumu un pumpēšanas jaudu platjoslas signāla pastiprināšanai, kas tika izmantots iegūto rezultātu analīzei. Simulācijās izmantotie EYDF galvenie parametri ir apkopoti **2. tabulā.**

2. tabula Pastiprinātāja iestatīšanas parametri

| | |
|--|--|
| Sistēmas parametri | |
| Kanālu skaits | 48 |
| Kanālu nesējfrekvences diapazons | 191.35–196.05 THz |
| Starpkanālu intervāls | 100 GHz |
| Viena kanāla jauda (simulācija) | –20 dBm |
| Viena kanāla jauda (eksperimentāli) | –25 to –10 dBm |
| EYDFA pumpēšanas parametri | |
| Pumpēšanas viļņu garums | 973–977 nm pie 30 °C |
| Pumpēšanas jauda | 0.6–2.5 W |
| Pumpēšanas signāla virziens | Tieši vērsta pumpēšanas virziens |
| Leģētās šķiedras parametri | |
| Garums | 2–7 m |
| Er ³⁺ koncentrācija | 1x10 ⁻²⁵ m ⁻³ /s |
| Yb ³⁺ koncentrācija | 1x10 ⁻²⁶ m ⁻³ /s |
| Er ³⁺ /Yb ³⁺ šķērsrelaksācijas koeficients | 1x10 ⁻²² m ⁻³ /s |
| Pārklāšanās koeficients (at 1530 nm) | 0.0027 |
| Pārklāšanās koeficients (at 980 nm) | 0.9203 |

Tika konstatēts, ka, saglabājot zemāku diodes temperatūru, tiek panākts lielāks EYDFA pastiprinājums, nevis tuvāk EYDF absorbcijas maksimālajam viļņa garumam (976 nm). Pumpēšanas gaismas avota – diodes – spektrs bija centrēts ap 975 nm, kas ir ~ 1 nm zem EYDF maksimālās absorbcijas viļņa garuma. EYDF abos galos tika pievienoti plakani pumpēšanas šķiedru savienotāji. Tas tika izmantots, lai atdalītu pumpēšanas gaismu no pastiprinātā signāla. Optiskā jauda EYDF izejā tika kontrolēta gan pumpēšanai, gan DWDM signālam. Visbeidzot, tika analizēts izejas signāla spektrs, lai iegūtu katra kanāla pastiprinājumu. Šāds būtisks pieaugums nav novērojams citos pastiprinājuma spektra viļņu garuma apgabalos, t. i., pastiprinājuma profils ir nevienmērīgs.

Piemēram, pie 2 W pumpēšanas jaudas, ja EYDF garums tika palielināts no 3 līdz 5 m, viļņa garuma diapazonā no 1555 līdz 1565 nm tika iegūts papildu 5 dB, palielinot EYDF garumu līdz 7 m, iegūts papildu 2,8 dB. **1.13.** att. ir redzams, ka, palielinot EYDF garumu, palielinās izejas pastiprinājums 1535-1545 nm apgabalā, bet pastiprinājuma maksimums pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem.



1.13. att. Simulācijas rezultāti ar EYDFA pastiprinājumu -20 dBm/uz kanālu 48 kanālu signālam atkarībā no pumpēšanas jaudas (0,12-2 W) pie trim EYDF garumiem: (a) 3 m, (b) 5 m un (c) 7 m.

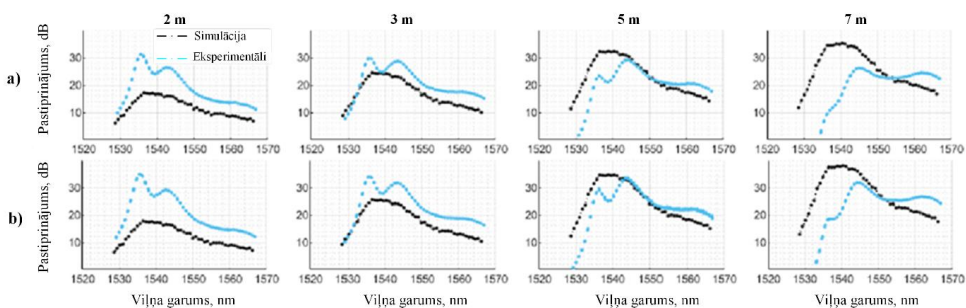
Attiecīgas pastiprinājuma vērtības ir apkopotas **3. tabulā**. Simulācijas rezultāti liecina, ka 3 m garas EYDF gadījumā pastiprinātājs rada gandrīz identiskus pastiprinājuma spektrus pie 1 W un 2 W pumpēšanas jaudas. Tas nozīmē, ka salīdzinoši īsiem EYDF posmiem 1 W pumpēšanas jauda ir pietiekama, lai nodrošinātu uzbudinātas Er^{3+} populācijas inversiju un saglabātu signāla pastiprinājumu. Līdz ar to pumpēšanas jaudu virs 1 W var uzskatīt par pārmērīgu šādām īsām leģētajām šķiedrām.

3. tabula. Simulācijas EYDFA pastiprinājuma attīstība

| EYDF garums, m | 3 | 5 | 7 |
|---|--------|--------|--------|
| Maksimālais pastiprinājums dB | 25.6 | 34.6 | 38 |
| Maksimālais pastiprinājuma viļņa garums, nm | 1536.4 | 1538.8 | 1540.4 |
| Δ Pastiprinājums, dB | - | 9.1 | 3.4 |

Pie 3 m garas EYDF gadījumā, palielinot pumpēšanas jaudu no 1 W līdz 2 W, iegūst tikai 0,8 dB papildu pastiprinājumu, tomēr garāki EYDF šķiedras posmi nodrošina lielāku pastiprinājuma pieaugumu (attiecīgi 2,3 dB un 2,8 dB, 5 m un 7 m garas EYDF gadījumā).

Šos rezultātus, kas tika iegūti ar simulācijas palīdzību, izmanto kā atskaites punktu, lai izvēlētos EYDF garumu un pumpēšanas jaudu simulācijas konfigurācijai Pirmā testēšana ŠOPS laboratorijā tika veikta, izmantojot EYDFA 7m šķiedras garumu, kas tika pumpēta ar 3W pumpēšanas jaudu. Iegūtie simulācijas rezultāti liecina par šaurāku un līdzenāku EYDFA pastiprinājuma profilu salīdzinājumā ar simulācijas rezultātiem; tas ir nobīdīts uz garākiem viļņu garumiem un tam ir straujš kritums zem 1544 nm. Tādējādi 7 m šķiedra EYDF ir pārāk gara izvēlētajam lietojumam; tāpēc mērījumus atkārti, izmantojot īsākus EYDF diapazonus (5 m, 3 m un 2 m), lai noteiktu piemērotāku garumu eksperimentālai konfigurācijai Eksperimentālo un simulācijas rezultātu salīdzinājums ir parādīts **1.14.** attēlā.

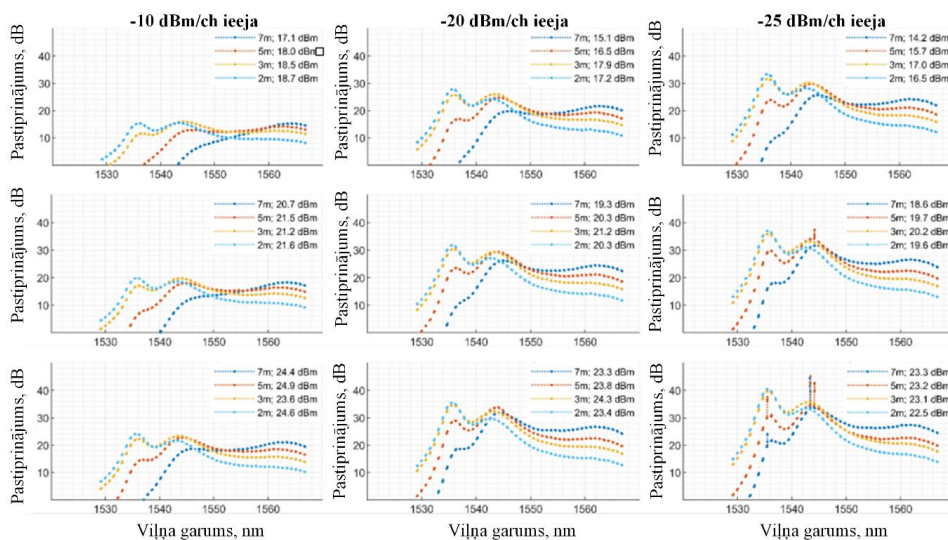


1.14. Eksperimentālie EYDFA pastiprinājuma mērījumi, kas tiek pārklāti ar simulācijas rezultātiem pie -20 dBm/uz kanāla signāla un pumpēšanas jaudas (a) 1 W un (b) 2 W.

Tuvākā atbilstība ir 3 m garai EYDF 1545-1560 nm viļņu garuma diapazonā. Eksperimentālie dati garākiem (5 m un 7 m) EYDF posmiem liecina par signāla absorbcijas parādīšanos 1530-1540 nm spektrālajā diapazonā, kas sakrīt ar Er^{3+} absorbcijas maksimumu (sk. **1.14.** att.).

Tas rada papildu signāla pastiprinājumu ap viļņa garuma pie 1560 nm. Simulācijas modelī signāla reabsorbcijs netika ņemta vērā. Simulācijas un eksperimentālo datu nesakrītība (īpaši attiecībā uz 2 m) varētu būt saistīta ar EYDF iekšējā apvalka īpašo formu (un tā pumpējošās fokusēšanas īpašībām), kas simulācijas modelī vienkāršotā veidā ir attēlota kā pārklāšanās koeficients. Simulācijas datus nevar izmantot, lai precīzi aprakstītu pastiprinājuma formu. Šie dati ir noderīgi, lai noteiktu laboratorijas iekārtas sākotnējās vērtības.

EYDFA konfigurācijas katra kanāla pastiprinājums tiek analizēts, izmantojot 48 kanālu fiktīvo WDM signālu, kas tika konstruēts, izmantojot platjoslas ASE trokšņa avotu un WSS (kā aprakstīts **1.9.** apakšnodaļā. Pēc filtrēšanas signāla jaudas līmeni regulē ar maināmu optisko vājinātāju. Jāņem vērā, ka DWDM kanālu/viļņu garumu skaitu ierobežo WSS darbības josla. Ar apvalku pumpēta EYDFA pastiprinājuma spektri tika uzņemti konfigurācijām ar EYDF laiduma garumiem 2 m, 3 m, 5 m un 7 m, bet signāla ieejas jauda palika nemainīga: -25 dBm, -20 dBm un -10 dBm uz kanālu (sk. **1.15.** att.).



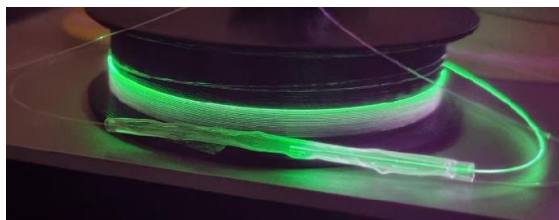
1.15. att. Eksperimentāli noteiktais EYDFA pastiprinājums pie trim dažādām ieejas signāla jaudām atkarībā no EYDF garuma un pumpēšanas jaudas (a) 0,6 W, (b) 1 W, (c) 2 W. Līkne katrā grafikā norāda šķiedras garumu un kopējo izejas jaudu.

Iegūtie pastiprinājuma spektri rāda, kā ar signāla ieejas jaudu -25 dBm uz kanālu tika novērots nevēlams lāzerstarojuma maksimums pie pumpēšanas jaudas virs 1 W. Pie visaugstākā signāla ieejas jaudas līmeņa (-10 dBm uz kanālu) pastiprinātāja izmantojamas joslas platums, palielinoties EYDF garumam, pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem. Pie zemākā signāla ieejas jaudas līmeņa (-25 dBm uz kanālu), palielinot EYDF garumu no 2 m līdz 5 m, 1544 nm viļņu garuma kanālu jaudas līmeņi paliek gandrīz nemainīgi (mazāk nekā 1 dB atšķirība), savukārt garāko viļņu garumā ir ievērojami lielāks pastiprinājums.

Ja EYDF garums tika palielināts no 5 m līdz 7 m, kanāli ar viļņu garumiem virs 1544 nm tika pastiprināti vēl vairāk. Tomēr kanāliem, kuru viļņu garums ir aptuveni 1536 nm, pastiprinājums samazinās par 10 dB, un zem 1536 nm vērojams straujš kritums. Šāds pastiprinājums ir izskaidrojams ar Er^{3+} populācijas inversiju.

Pumpēšanas gaismas mirdzums rodas no Er^{3+} augšupvērstās luminiscences, kas norāda uz augstu populācijas inversiju. Šis efekts samazinās, kad ieejas signāls tiek apvienots ar EYDFA pastiprināšanas signālu, jo daļa no uzbudinātā Er^{3+} atgriežas pamatstāvoklī, pastiprinot C joslas signālu.

Konkrētāk, Er^{3+} populācijas inversija [54], kas nepieciešama pastiprināšanai pie šiem viļņu garumiem, nav saglabājusies tik garā EYDF diapazonā, kā rezultātā pastiprinājuma spektri nav vienmērīgi. Turklāt tika novērots, ka EYDF pirmais metrs spīd zaļā krāsā, kad pumpēšanas avots ir aktīvs (sk. **1.16.** att.).



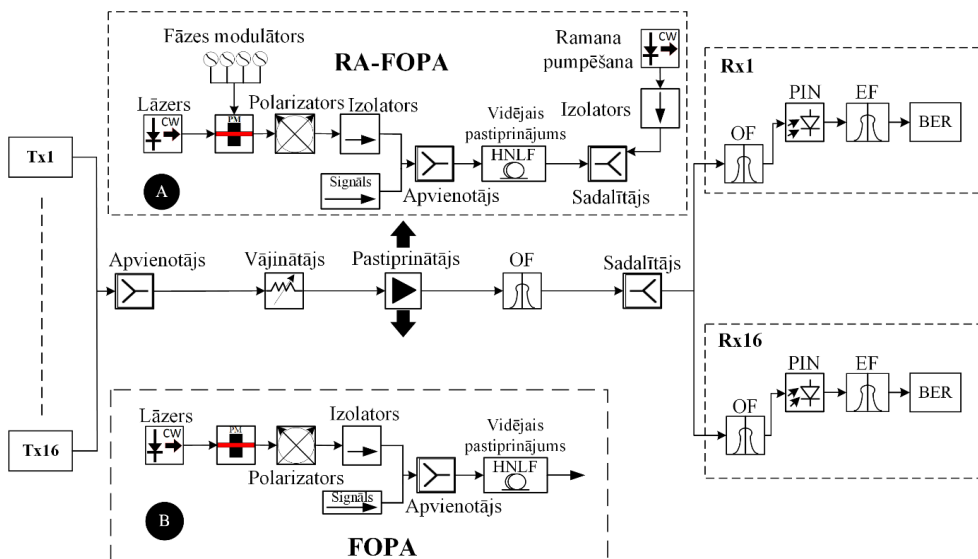
1.16. att. EYDF zaļā luminiscence ar ieslēgto pumpēšanas gaismas avotu. Violetā nokrāsa ir redzama, tādēļ ka no šķiedras noplūst pumpēšanas gaisma, ko uztver kamera. Lai izvairītos no iespējamās termiskās izplešanās ietekmes, no saplūšanas savienojuma aizsardzības uznavas ir noņemts tērauda stienis.

2. OPTISKO ŠKIEDRU PARAMETRISKO PASTIPRINĀTĀJU (FOPA) UN RAMAN ASISTĒTA FOPA PASTIPRINĀTĀJU VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS

Šajā nodaļā tika salīdzināta Ramana asistētā FOPA (RA-FOPA) risinājuma veiktspēja ar standarta viena pumpēšanas gaismas avota FOPA veiktspēju, kas nodrošina aptuveni tādu pašu pastiprināšanas līmeni 16 kanālu blīvās viļņu garuma dalīšanas multiplexēšanas (DWDM) pārraides sistēmā (sk. 2.1. att.). Pētījuma laikā galvenā uzmanība tika pievērsta kopējai jaudai, kas nepieciešama FOPA pastiprinātājam, lai nodrošinātu noteiktu pastiprinājuma līmeni pastiprinātā signāla kvalitātei.

2.1. FOPA UN RAMAN asistēta FOPA simulācijas modeļa apraksts 16. kanāla DWDM pārraides sistēmā

RA-FOPA un viena pumpējoša avota FOPA risinājumi tika izmantoti kā priekšpastiprinātāji un tika novietoti tieši pie optiskā vājinātāja izejas.



2.1. att. 16 kanālu 10 Gb/s WDM pārraides sistēmas simulācijas modelis ar NRZ-OOK modulācijas formātu un a) RA-FOPA priekšpastiprinātājs un b) viena pumpējoša avota FOPA priekšpastiprinātājs.

Pēc iziešanas caur priekšpastiprinātāju pastiprinātais signāls tiek nosūtīts caur 3 dB joslas caurlaides optisko filtru (OF), kuram joslas platums ir 15 nm un, izmantojot optisko sadalītāju ar 13,5 dB ienestiem zudumiem, pārraidāmais optiskais signāls tika sadalīts uz 16 PIN fotodiodēm balstītiem uztvērējiem ar jutību 23,9 dBm pie 10^{-12} atskaites bitu kļūdu attiecības (BER) robežvērtības. Katra uztvērēja ieejā signāls iet caur citu caurlaides joslas optisko filtru ar 3 dB joslas platumu 0,11 nm, lai filtrētu starojumu, kas pieder blakus esošajiem kanāliem. Divkārsa filtrēšana ir nepieciešama, jo katra filtra izkliedes koeficients ir 20 dB, līdz ar to ar viena filtra izmantošanu nepietiek, lai izslēgtu atlikušā pumpējošā starojuma ietekmi uz uztvertā signāla kvalitāti.

RA-FOPA risinājumā (parādīts **2.1. (a)** attēla punktā) 500 mW 192,92 THz pumpēšanas izejas starojums tika nosūtīts caur fāzes modulatoru, ko izmanto stimulētas Briljuēna izkliedes (SBS) mazināšanai, optisko polarizatoru, lai pārliecinātos, ka pumpēšanas polarizācijas stāvoklis sakrīt ar signāla polarizācijas stāvokli, optisko izolatoru un pēc tam tas tiek apvienots ar signālu, kas ir jāpastiprina.

Tālāk apvienotais signāls ar tieši vērsto pumpēšanas virzienu tika izplatās caur 1 km garu HNLF ar 1553 nm nulles dispersijas viļņa garumu un nelineārā koeficienta $15,0 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ vērtību, kas tiek izmantots kā pastiprinājuma vide un kurā notika signāla pastiprināšana.

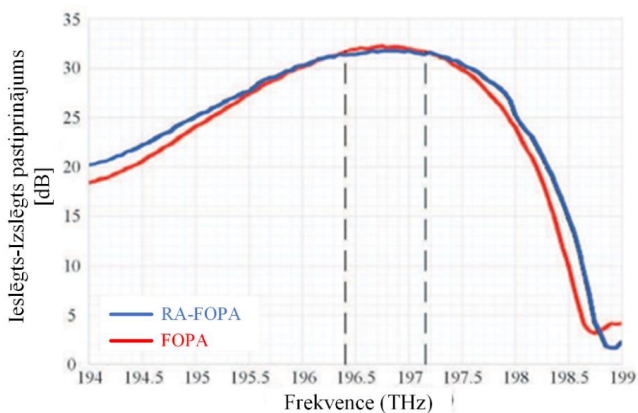
Otrā HNLF galā tika pieslēgts Ramana optiskais pastiprinātājs ar 500 mW pumpēšanas jaudu, kur optiskais signāls tika pārraidīts pretēji vērsti pumpēšanas virziena attiecība pret parametrisko (RA-FOPA) pumpēšanas signālu, Šāds Ramana pumpēšanas signāla izplatīšanās virziens HNLF tika izvēlēts, lai izvairītos no četru viļņu mijiedarbē (FWM) rašanās starp Ramana un parametrisko pastiprinātāja pumpēšanu. Viena pumpēšanas FOPA risinājuma struktūra ir līdzīga, bet šajā gadījumā nav Ramana pumpēšanas un pastiprinājumu nodrošina tikai parametriskā pumpēšana, kura jaudas un frekvences izvēle ir aprakstīta nākamajā apakšnodaļā.

2.2. Pastiprinājuma spektra novērtējums RA-FOPA un viena pumpēšanas avota parametriskais pastiprinātais FOPA

Šajā apakšnodaļā tika izpētīts simulācijas modelis ar Ramana asistēto FOPA un ar vienu pumpēšanas lāzera avota FOPA risinājumu, kā arī tika analizēti rezultāti, kas varētu nodrošināt aptuveni tādu pašu pastiprinājuma līmeni, un tika salīdzināti šo divu pastiprinājumu risinājumi pastiprinātā signāla kvalitātei.

Pastiprinājums 16 kanāliem, ko radīja RA-FOPA ar iepriekš aprakstīto konfigurāciju, vidēji ir 31,6 dB (no 31,4 dB 1. kanālā līdz 31,8 dB 9. kanālā). Tālāk tika iegūta pumpēšanas FOPA konfigurācija, kas nodrošināja aptuveni tādu pašu pastiprināšanas līmeni.

Eksperimenta mērķis bija atrast vienu FOPA pumpēšanas konfigurāciju, kas nodrošinātu pastiprinājumu katrā no 16 pastiprinātajiem kanāliem un kur kanālu pastiprinājums nebūtu mazāks par to pašu kanālu pastiprinājumu, ko rada RA-FOPA, izmantojot pēc iespējas mazāku pumpēšanas jaudu. Iegūtie rezultāti parādīja, ka mazākā pumpēšanas jauda, kas atbilda iepriekš minētajam nosacījumam, pie 755 mW ar pumpēšanas centrālo frekvenci 192,91 THz. Šāda pastiprinātāja konfigurācija nodrošināja signāla pastiprinājumu no 31,5 dB (16. kanāls) līdz 32 dB (7. kanāls). Pastiprinājuma spektrs, ko rada RA-FOPA un viena FOPA pumpēšana ar iepriekš aprakstītajām parametru konfigurācijām, ir parādīts **2.2. att.**



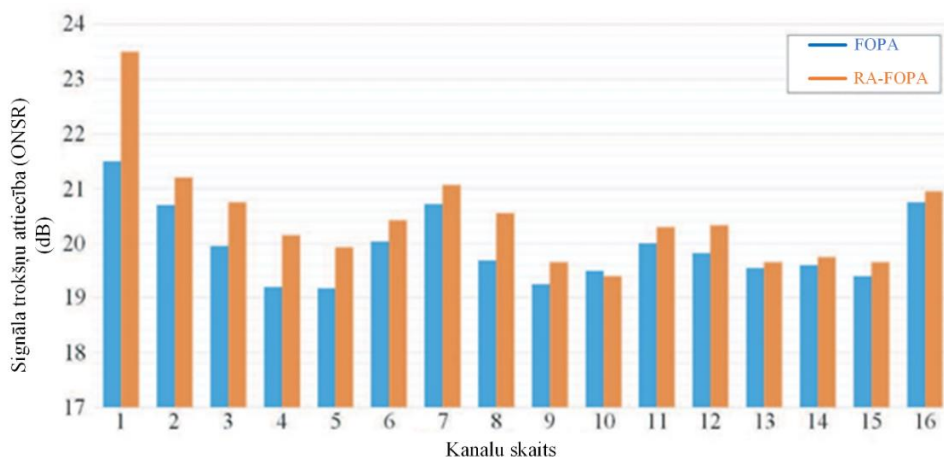
2.2. att. Viena pumpēšanas avota FOPA radītā ieslēgšanas un izslēgšanas pastiprinājuma spektrs (sarkanā līnija) un RA-FOPA radītā pastiprinājuma spektrs (zilā līnija).

Salīdzinot abu pastiprinātāju konfigurācijas, ir redzams, ka viena pumpēšanas FOPA risinājumam ir ievērojami augstāka pastiprināšanas efektivitāte, līdz ar to tas ir vispiemērotākais no enerģijas patēriņa viedokļa, lai nodrošinātu aptuveni tādu pašu pastiprināšanas līmeni. Tam ir nepieciešama par 245 mW mazāka pumpēšanas jauda nekā RA-FOPA risinājumam. Tomēr, kā parādīs turpmāk šajā nodaļā sniegtie rezultāti, RA-FOPA ir vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar standarta viena pumpēšanas FOPA.

Iegūtie **2.2.** att. rezultāti skaidri parāda RA-FOPA risinājuma priekšrocību, jo RA-FOPA pastiprinājuma spektra -3 dB joslas platums ir aptuveni par 0,1 THz platāks nekā viena pumpēšanas FOPA pastiprinājuma spektrs.

2.3. Optiskā signāla trokšņa attiecība (OSNR) novērtējums RA-FOPA un viena pumpēšanas avota parametriskā FOPA pastiprinātājā 16. kanāla DWDM sistēmā

Lai novērtētu abu pastiprinātāju veikspējas radītā trokšņa daudzumu, tika iegūta optiskā signāla trokšņa attiecība (OSNR) uztvērēja ieejā un salīdzināta katram no 16 kanāliem. No **2.3.** att. iegūtiem rezultātiem ir skaidri redzams, ka sistēmā RA-FOPA novērotās OSNR vērtības ir augstākas visos kanālos, izņemot 10. kanālu, kur OSNR sistēmā ar standarta FOPA ar vienu pumpēšanas avotu bija par 0,1 dB augstāka nekā sistēmā ar RA-FOPA risinājumu (attiecīgi 19,4 un 19,5 dB). Vislielākā OSNR atšķirība starp abām sistēmām ir vērojama 1. kanālā, kur to starpība sasniedza 2 dB, bet vidēji OSNR sistēmā ar RA-FOPA bija par 0,8 dB augstāka nekā sistēmā ar vienu pumpēšanas FOPA.



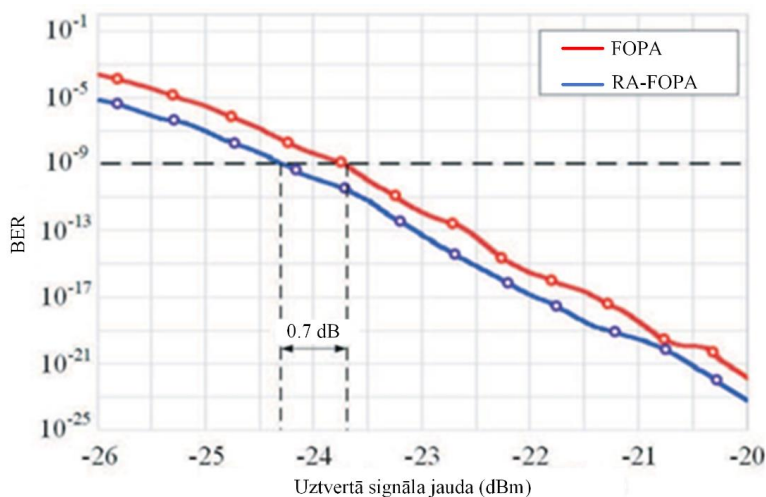
2.3. att. Katrā kanālā uztvertā signāla OSNR vērtības, kas iegūtas sistēmā ar vienu pumpēšanas FOPA (zilā krāsā) un sistēmā ar RA-FOPA risinājumu (oranžā krāsā).

Vēl viena **2.3.** attēlā redzamā tendence, ko vērts pieminēt, ir tā, ka abās sistēmās zemākās OSNR vērtības novērotas centrālajos kanālos, bet augstākās - sistēmas sānu kanālos, kur pastiprinājuma līmenis šajos kanālos bija zemāks nekā centrālajos kanālos.

Tas liecina, ka ievērojamu trokšņa daļu rada starpkanālu pārklāšanās, ko rada kanāla pret kanāla FWM (CC-FWM) mijiedarbība.

2.4. Bitu kļūdu attiecības novērtējums RA-FOPA un viena pumpēšanas avota parametriskajā FOPA pastiprinātāja 16. kanāla DWDM sistēma

Lai novērtētu pastiprinātā signāla kvalitāti, tika iegūta BER vērtība atkarībā no detektētā signāla jaudas kanālā ar augstāko BER (9. kanāls) gan sistēmā ar RA-FOPA, gan sistēmā ar vienu pumpēšanas FOPA. Svarīgi pieminēt, ka BER vērtības netika iegūtas eksperimentu laikā, bet tās tika aprēķinātas, pamatojoties uz OSNR vērtībām. Iegūtās BER atkarības parādītas **2.4.** attēlā.



2.4. att. BER atkarība no uztvertā signāla jaudas 16. kanālā sistēmā ar RA-FOPA (zilā līnija) un sistēmā ar vienu pumpēšanas FOPA (sarkanā līnija).

No **2.4.** att. redzams, ka sistēmā ar RA-FOPA risinājumu tika novērots par 0,7 dB vājāks signāls pie BER robežvērtības zem 10^{-9} , nekā sistēmā ar standartu vienu pumpēšanu avotu FOPA.

3. AR RETZEMJU ELEMENTU LEĢĒTO ŠĶIEDRU PASTIPRINĀTĀJA NOVĒRTĒJUMS WDM-PON PĀRRAIDES SISTĒMĀ

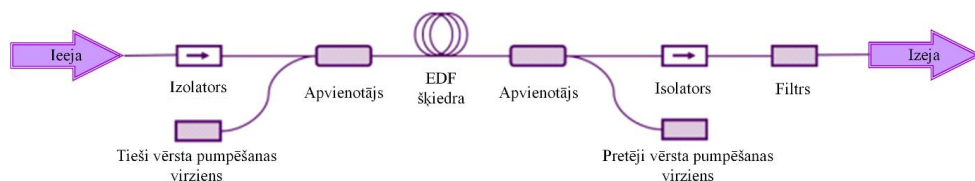
Viļņu garuma multipleksēšanas pasīvais optiskais tīkls (WDM-PON) tiek uzskatīts par daudzsološu platjoslas piekļuves risinājumu, jo tam ir gandrīz neierobežots joslas platums, tīkla drošība, vienkārša pārvaldība un modernizācijas iespējas [55]. Pasīvais optiskais tīkls (PON) ir uz optisko šķiedru balstīta tīkla arhitektūra, kas nodrošina daudz lielāku joslas platumu piekļuves tīklā nekā tradicionālie vara kabeļa tīkli. Viļņu garuma dalīšanas multipleksēšanas (WDM) iekļaušana PON iespēj nodrošināt daudz lielāku joslas platumu nekā standarta PON [56].

WDM-PON tiek uzskatīts par daudzsološu risinājumu, lai apmierinātu nākotnes platjoslas platuma prasības nākamās paaudzes (NG) platjoslas piekļuvei ar spēju nodrošināt vairāk nekā 10 Gb/s datu pārraides ātrumu uz vienu abonentu. Turklāt EDFA pastiprinātāju jomā notiek nepārtraukta attīstība un pilnveidošana, īpaši ņemot vērā tajos izmantotās leģētās šķiedras. EDFA ir visizplatītākais šķiedru pastiprinātājs tā īpašību un iegūtā pastiprinājuma dēļ. Optiskās šķiedras serdenis ir leģēts ar trīsvērtīgiem erbija joniem (Er^{3+}), un to var efektīvi pumpēt ar lāzeru ar viļņu garumiem 980 nm un 1480 nm vai tuvu tiem, un C joslas (1530-1565 nm) apgabalā līdz ~ 80 nm tiek novērots pastiprinājums. Būtībā ar EDFA var pastiprināt C joslu (no ~1525 nm līdz ~1565 nm) vai L joslu (no ~1570 nm līdz ~1620 nm). Galvenā atšķirība starp C un L joslas pastiprinātājiem ir tāda, ka L joslas pastiprinātājos tiek izmantota garāka leģētā šķiedra.

3.1. EDFA uzbūve un pastiprināšanas mehānisma apraksts

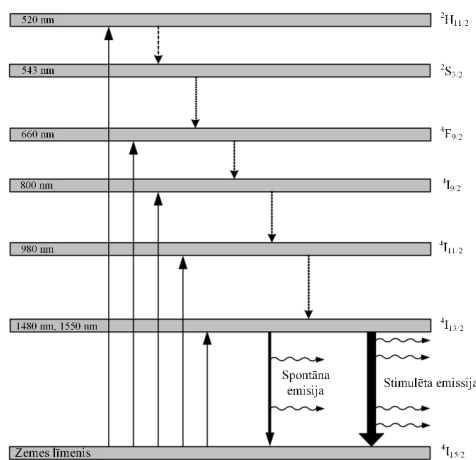
Ar erbiju leģēta šķiedra pastiprinātāja pamatstruktūra shēma attēlota. **3.1.** att. Vājš ieejas optiskais signāls iet caur optisko izolatoru, kas ļauj gaismai izplūst tiešā virzienā, un novērš atpakaļ izkļiedētā starojuma izplatīšanos. Signāls iet caur filtra bloku, kas bloķē pumpējošo gaismu viļņa garumā un ļauj pārējam starojumam iet cauri. Pēc tam signāls nonāk spolē ar šķiedru, kas ir leģēta ar retzemju elementu piemaisījumu, EDFA pastiprinātāju gadījumā - erbiju. Šis šķiedras posms ir vairākus metrus garš. Šis šķiedras posms ir pakļauts spēcīgam nepārtrauktam starojumam no viena vai vairākiem pusvadītāju pumpēšanas lāzeriem. Pumpēšanas lāzera starojums uzbudina piemaisījuma atomus, kuriem uzbudinātā stāvoklī ir ilgs relaksācijas laiks spontānai pārejai uz pamatstāvokli.

Vāja signāla klātbūtnē notiek piemaisījumu atomu inducēta pāreja no uzbudinātā stāvokļa uz pamatstāvokli, izstarojot gaismu ar tādu pašu viļņa garumu un fāzi kā iegūtajam signālam. Tad sadalītājs novirza pastiprināto lietderīgo signālu uz izejas šķiedru. Optiskais izolators pastiprinātāja izejā neļauj atpakaļstarotajam signālam no izejas segmenta iekļūt optiskā pastiprinātāja aktīvajā zonā.



3.1. att. Ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja pamatstruktūra

Katram brīvajam erbija jonam piemīt diskrēts enerģijas līmenis. Enerģijas līmenis attiecas uz konkrētu jonā esošās enerģijas daudzumu, kas atbilst absorbētai vai emitētai enerģijai. Pastiprināšana ar erbiju leģētajā šķiedrā ir cieši saistīta ar erbija jonu enerģijas līmeņa izmaiņām. Absorbējot enerģiju, palielināsies tās enerģijas līmenis, un otrādi - emitējot enerģiju, samazināsies enerģijas līmenis. Pastiprināšanas ziņā gaismas izstarošana ir saistīta ar fotonu izstarošanu. Parādīti iespējamie erbija jonu enerģijas līmeņi, kā arī iespējamās dažādas pumpēšanas joslas (sk. **3.2. att.**).



3.2. att. Erbija jonu enerģijas līmeņi, kas pastāv pumpēšanas joslām

Pumpēšanas gaismas avots pieviļņa garuma 980 nm nodrošina zema trokšņa līmeņa pastiprinātāja izvadi, bet šaurās absorbcijas joslas dēļ ir nepieciešama viļņa garuma precizitāte.

Pumpējot fotonu, absorbcija uzbudina erbijs jonus uz augstākiem enerģijas stāvokļiem. Augstākajos enerģijas līmeņos joni var izkliedēt enerģiju radiācijas ceļā, atbrīvojot fotonus vai pārvēršot enerģiju siltumā. Atbilstoši jonu enerģijas struktūrai katram enerģijas līmenim ir vairāki zvaigžņu līmeņi, kā arī katrs jons stikla molekulārās struktūras nejaušības dēļ piedzīvo atšķirīgu lauka stiprumu un orientāciju, kā rezultātā rodas atšķirīgs zvaigžņu sadalījums. Šī sašķelšanās izraisa lielu retzemju legēto šķiedru pastiprinātāja pastiprinājuma joslas platumu. Katram līmenim ir attiecīgi 7 un 8 zvaigžņu sadalījuma līnijas $4_{13/2}$ un $4_{15/2}$, kas rada 56 iespējamās pārejas starp šīm līnijām, kur zemā temperatūrā izplatās pie viļņu garuma 1550 nm joslā. Pie 300 K temperatūras joslas pietiekami pārklājas, nodrošinot vienmērīgu un nepārtrauktu pāreju. Palielinoties enerģijas plaisai starp līmeņiem, palielināsies arī fotonu izstarošanas tendence, pārejot uz zemākas enerģijas līmeņiem. Tādējādi pāreja starp $4_{13/2}$ un $4_{15/2}$ ir pārsvarā radiatīva, kas rada 1550 nm viļņu garuma apgabalu.

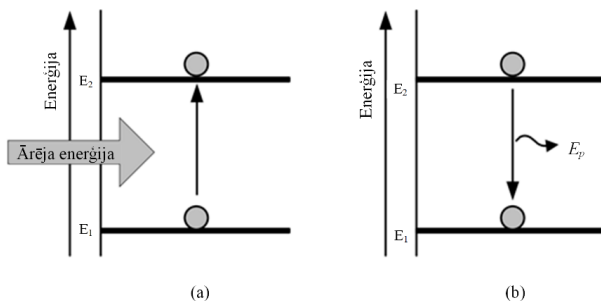
Savukārt pumpēšanas gaismas avots upieviļņa garuma 1480 nm nodrošina labāku jaudas pārveidošanas efektivitāti salīdzinājumā ar 980 nm pumpēšanas joslu. Saskaņā ar **3.2.** att. diskretās enerģijas vērtības atdala enerģijas starpības, kas atbilst kvantu fizikas likumiem. Zemes līmenis E_1 ($4_{15/2}$) norāda zemāko līmeni, bet E_2 ($4_{13/2}$) norāda augstāko līmeni. Jebkurš jons var diskreti pāriet uz citu līmeni, tādējādi mainot savu enerģijas līmeni.

Enerģijas starpība ΔE , atomam pārejot no augstāka līmeņa uz zemāku, atbrīvo fotonu kā enerģijas kvantu. Fotonam raksturīga vērtība enerģijai ir E_p , un to definē šādi:

$$E_p = hf = E_2 - E_1$$

E_1 un E_2 apzīmē atoma diskreto enerģiju pārejas laikā starp līmeņiem, kur $h = 6,626 \times 10^{-34}$. J.s ir Planka konstante un fotona frekvenci apzīmē ar f .

Atoma enerģijas līmeņa maiņai no zemāka līmeņa uz augstāku ir nepieciešama ārēja enerģija. Atoms šo enerģiju absorbē un pāriet uz augstāko līmenī. Pēc dabas atoms cenšas nokļūt zemākajā iespējamajā enerģijas līmenī. Enerģijas līmeņa pazemināšanās uz zemāku līmeni izstaro fotonus. Atomu apgādāšanas ar ārēju enerģiju procesu sauc par signāla pumpēšanu, kas ir parādīta **3.3.** att.



3.3. att. Atoms ar attiecīgo enerģijas līmeni: (a) gaismas absorbcija un (b) gaismas emisija.

Sākotnēji atoms atslābst pie E_1 līmeņa, kas ir zemākais enerģijas līmenis. Pieliktā ārējā enerģija tiek absorbēta atomā, un tas pārlec uz augstāko līmeni E_2 .

Šo stāvokli sauc par gaismas absorbciju. Gaismas emisija notiek, kad atoms no E_2 līmeņa nokāpj uz zemāku enerģijas līmeni. Gaismas emisija ir spontāna vai stimulēta. Spontāna gaismas emisija notiek, atomam nejauši atgriežoties zemākā enerģijas līmenī, bet stimulēta emisija notiek, kad fotoniem ir enerģija, kas ir vienāda ar enerģijas starpību starp E_2 un E_1 līmeni. Tas izraisa atoma atgriešanos uz E_1 līmeni, un tiek izstaroti vairāki fotoni, kuriem frekvence, fāze un polarizācija ir līdzīga tiem, kas to izraisīja. Tas ir parādīts **3.3. (b)** attēlā. Emisija var notikt divējādi:

1. Spontāna emisija, kad atomi nejauši atgriežas zemākā enerģijas līmenī. Saskaņā ar kvantu mehānikas teoriju spontānā emisija vienmēr ietver pāreju no augstākas enerģijas stāvokļa uz zemākas enerģijas stāvokli. Radusies spontānā emisija kļūst par pastiprinātāja radīto troksni, un to sauc par pastiprināto spontāno emisiju (ASE).
2. Stimulētā emisija, kad fotons (enerģiju nesošs atoms), kura enerģija ir vienāda ar enerģijas starpību starp E_2 un E_2 , mijiedarbojas ar atomiem E_2 , izraisot to atgriešanos E_1 un radot vēl vairāk fononu. To sauc arī par lavīnveida reizināšanu.

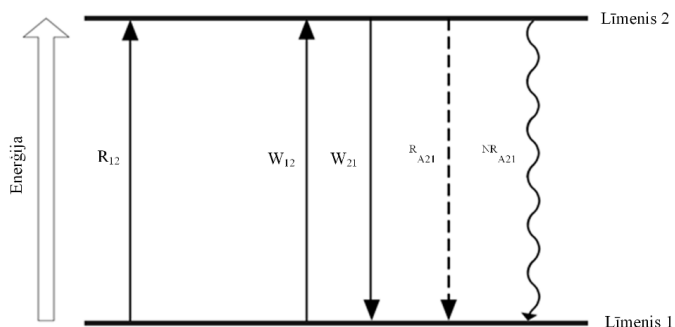
Stimulētās emisijas rezultātā radītajiem fotoniem enerģija parasti ir identiska tiem, kas to izraisīja, un līdz ar to ar tiem saistītajai gaismai ir tāda pati frekvence, fāze un polarizācija.

Turklāt, ja atomu stimulē izstarot gaismas enerģiju ar krītošu vilni, atbrīvotā enerģija var konstruktīvi papildināt vilni, nodrošinot signāla pastiprinājumu.

3.2. EDFA divu līmeņu atomu sistēma

Erbija labi atdalītu spektrālo līniju sauc par multipletu, kas sastāv no noteikta skaita paplašinātu atsevišķu enerģijas līmeņu.

Divu līmeņu sistēmā jonu populācija un ātruma vienādojumi ietver Erbija enerģijas līmeņu sistēmas 1. un 2. līmeni. Otrajā līmenī ir iesaistīts tikai 1480 nm pumpēšanas viļņa garuma absorbcijas šķērsgriezums no 1. līmeņa uz 2. līmeni, kā ir parādīts **3.4.** att.



3.4. att. Divu līmeņu sistēmas enerģijas līmenis

Zemes līmeni apzīmē ar 1. līmeni, bet metastabīlo līmeni - ar 2. līmeni. Metastabīlo līmeni definē kā līmeni, kurā sistēmas kalpošanas laiks ir ilgāks par 100 μ s, un tas ir parasts tāda stāvokļa kalpošanas laiks, ko var iztukšot ar atļautu optisko pāreju. R_{12} apzīmē kā pumpēšanas ātrumu starp 1. un 2. līmeni. Spontānās sabrukšanas ātrums no 2. un 1. līmeņa ir $A_2 = RA_{21} + NRA_{21}$. Tiek pieņemts, ka spontānā sabrukšana dominē pār radiatīvās sabrukšanas ātrumu, t. i., $RA_{21} \gg NRA_{21}$. Tādējādi spontānās sabrukšanas ātrumu no 2. līmeņa uz 1. līmeni var vienkāršot līdz A_{21} . Kopumā erbiju leģētās šķiedras pārejas ātrumu var definēt šādi [57]:

$$\sigma = \frac{I}{h\nu}$$

kur σ ir šķiedras šķērsgriezums, $h\nu$ ir joslas spraugas enerģija, kur h ir Planka konstante un, ν ir frekvence un I ir intensitāte.

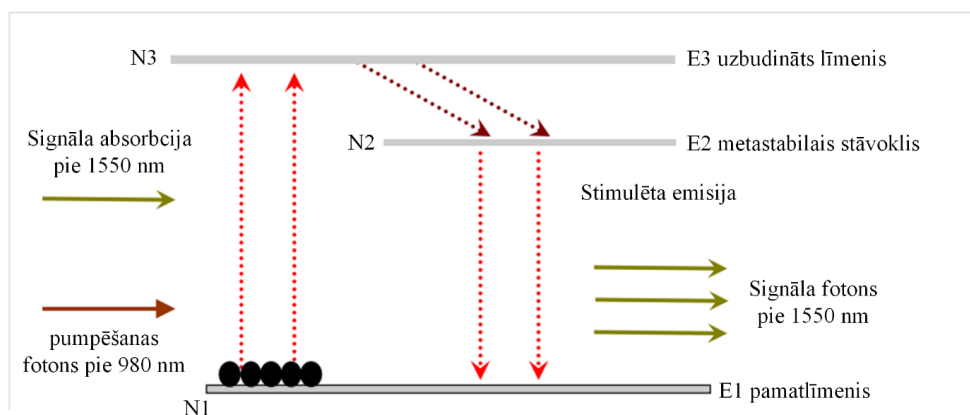
3.3. EDFA trīs līmeņu atomu sistēmas apraksts

Erbija jonu populācija trīs līmeņos tiek apzīmēta ar N_1 , N_2 , N_3 . Līdzsvara stāvoklī bez pumpēšanas signāla populācijas blīvums 3 līmeņos samazinās, kas nozīmē, ka $N_1 > N_2 > N_3$.

Pēc pumpēšanas signāla ievadīšanas Er^{3+} jonu populācijas blīvums trīs līmeņos tiek pielāgots, sekojot jonu kustībai starp līmeņiem, fotonu emisijai vai absorbcijai frekvencēs, kas rodas

enerģijas līmeņu starpības dēļ [58]. Līdzvērtīgi, pāreja no augstāka uz zemāku enerģijas līmeni izraisa fotona emisiju, kura enerģija ir vienāda ar starpību starp abiem līmeņiem.

Neizraisītā stāvoklī erbija jonu daudzums pamatlīmeņa enerģijas līmenī ir daudz lielāks nekā augstākajos enerģijas līmeņos. Lai panāktu pastiprinājumu, pastiprinājuma vidi sūknē ar ārēju enerģijas avotu, kas izraisa to, ka jonu skaits augstākajos enerģijas līmeņos pārsniedz jonu skaitu zemākajos līmeņos, t. i., tiek panākta populācijas inversija. Kad atbilstošas frekvences gaisma iet caur šādu vidi, tās fotoni stimulē uzbudināto elektronu pāreju uz zemākiem enerģijas līmeņiem, izraisot stimulētu fotonu emisiju, kuriem ir tāda pati frekvence, izplatīšanās virziens, fāze un polarizācija kā incidentālajiem fotoniem. Tādējādi ienākošais optiskais signāls tiek pastiprināts. To var labi izprast, aplūkojot Er^{3+} jonu enerģijas līmeņu diagrammu, kas parādīta 3.5. att.



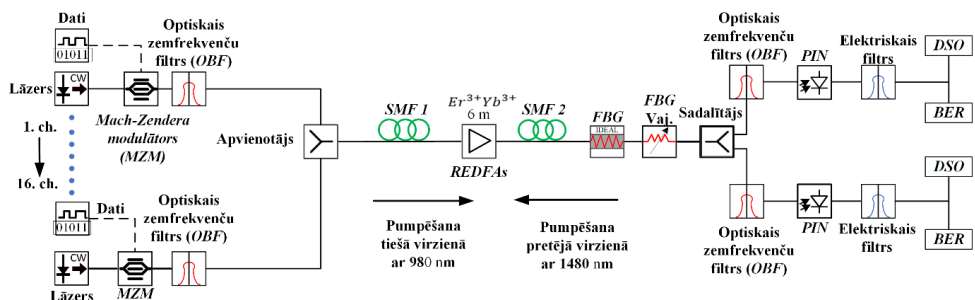
3.5. att. Er^{3+} jonu enerģijas līmeņi ar erbiju leģētajā šķiedrā

Realitātē šeit parādītie enerģijas līmeņi, kas attēloti kā atsevišķi, izplatās nepārtrauktā enerģijas joslā. Enerģijas starpība starp līmeņiem E1 un E3 atbilst gaismas fotonu enerģijai 980 nm. Kad gaismas viļņi ar šo viļņa garumu tiek pumpēti erbija leģētā šķiedrā, to absorbcija izraisa jonu pāreju no E1 uz E3. Pumpēšanai var izmantot arī gaismu ar viļņa garumu 1480 nm, bet pumpēšanas process ir efektīvāks pie 980 nm, kas nodrošina lielāku pastiprinājumu pie tāda paša pumpēšanas jaudas. Uzbudinātie joni ļoti īsu laiku paliek E3 līmenī un tad ātri pāriet uz E2 līmeni. Pārejas no E2 līmeņa uz E1 ilgums ir daudz ilgāks, apmēram 10 ms, un to pavada fotonu emisija viļņa garumā starp 1520 un 1570 nm [59, 60]. Ja pumpēšanas jauda ir pietiekami augsta, joni, kas nokrīt līdz līmenim E1, ātri tiek pacelti atpakaļ uz līmeni E3.

Šo divu procesu enerģijas rezultātā lielākā daļa jonu atrodas līmenī E2, t. i., tiek panākta populācijas inversija starp līmeņiem E2 un E1. Šādos apstākļos gaismas viļņi ar garumu 1520–1570 nm tiek pastiprināti ar stimulētu emisiju no līmeņa E2 uz līmeni E1.

3.4. Ar erbiju leģēto šķiedru pastiprinātāju simulācijas shēmas novērtējums WDM-POM 16. kanāla pārraides sistēmā

Šajā nodaļā mērķis bija pārbaudīt un validēt REDFA eksperimentālo prototipu dažādos apstākļos, izmantojot 16 kanālu WDM-PON modulētu pārraides sistēmu, kas darbojas C joslā, kur BER kvalitāte ir zemāka par 1×10^{-9} . REDFA pastiprinātāja prototips sākotnēji tika izstrādāts un veikts simulācijas vidē, lai pārbaudītu REDFA pastiprinātāja veiktspēju, kur datu pārraide tiek veikta matemātiskās modelēšanas vidē.



3.6. att. Eksperimentālā shēma 10 Gbit/s uz λ NRZ modulētai 100 GHz 16 kanālu WDM-PON pārraides sistēmai, kas balstīta uz REDFA

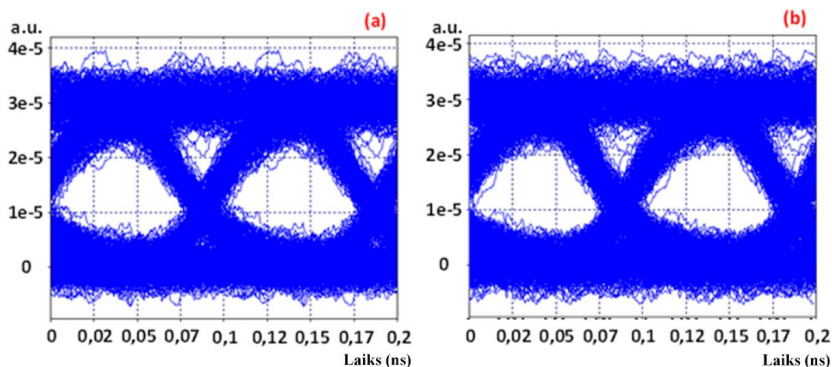
Šajā nodaļā tika analizēta REDFA pastiprinātāja veiktspēja, izmantojot divus dažādus lāzera avotus - tieši vērstās pumpēšanas (980 nm) un pretēji vērstās pumpēšanas (1480 nm) - ņemot vērā labāko REDFA pastiprinātāja konfigurāciju attiecībā uz saņemta signāla bitu kļūdu koeficientu (BER). Centrālā ofisa (CO) sistēmas arhitektūra sastāv no optiskās līnijas termināļa (OLT) ar sešpadsmit raidītājiem Tx. Katrs no 10 Gbit/s raidītājiem (Tx) sastāv no viena elektriskā pseidogadījumā binārā secība (PRBS) datu avota, NRZ draivera, kas kodē datus no datu avotiem, izmantojot bez atgriešanās nulles (NRZ) kodēšanas metodi, tādējādi ģenerējot NRZ signālu. Tiek izmantots nepārtrauktā viļņa garuma (CW) lāzers ar līnijas platumu 25 kHz un izejas jaudu +4 dBm [61]. Nepārtrauktā viļņa garuma CW lāzera avota izeja ir tieši savienota ar Mach-Zendera modulatoru (MZM), kam ir 3 dB iestarpinājuma zudumi un 20 dB izkliedes koeficients. CW lāzera centrālās frekvences tika noteiktas no 192,8 THz līdz 194,3 THz 100 GHz attālumā starp 16 kanāliem uz REDFA balstītai WDM-PON pārraides sistēmai.

WDM-PON pārraides sistēmas Tx daļā (no 1 līdz 16 kanāliem) veidotos optiskos signālus paraidīti caur optisko caurlaides optisko filtru (OBPF, 3 dB joslas platums 50 GHz). Tālāk optiskie signāli tiek savienoti ar optisko sakabes ierīci un palaisti standarta vienmodu šķiedras (SMF) savienojuma daļā, piemēram, optiskā sadales tīklā (ODN). REDFA optiskais pastiprinātājs atrodas starp divām SMF šķiedru savienojuma sekcijām, kur pirmā optiskās šķiedras sekcija (SMF_1) ir 50 km gara un otrā (SMF_2) ir 70 km gara. Visiem kanāliem ir veikta hromatiskās dispersijas (CD) kompensācija, izmantojot šķiedras Brega režģa dispersijas kompensācijas moduli (FBG-DCM). FBG-DCM ienesto zudumu (IL) simulācijai izmanto papildu 3 dB vājinātāju. Optiskais sadalītājs tika pieslēgts otrajā SMF savienojuma gala sekcijā. OBPF, kas tika izmantots katram Rx, ir 3 dB joslas platums 50 GHz, tāpēc tas sadala saņemto optisko signālu viļņu garumos un nodod to tālāk uz uztvērēja bloku. NRZ modulētie optiskie signāli iet caur optiskā savienojuma sekciju, kas sastāv no divām vienmodu šķiedras SMF sekcijām ar 50 km un 70 km attālumu un legētās šķiedras pastiprinātāja REDFA, kas sastāv no 6 m garas Er³⁺ legētās šķiedras. Signāla pastiprināšanai izmanto līdz 140 mW pumpēšanas jaudu, izmantojot tieši vērsto pumpēšanu ($\lambda = 980$ nm), un līdz 200 mW pumpēšanas jaudu izmanto pretēji vērsto pumpēšanu ($\lambda = 1480$ nm). Uztvērēja pusē ietver optiskā tīkla termināļus (ONT), kur katrs ONT sastāv no uztvērēja Rx. Katrs Rx sastāv no pusvadītāju fotouztvērēja PIN (jutība ir -20 dBm) un elektriskā Beseļa zemfrekvenču filtra (LPF, 3 dB joslas platums ir 10 GHz). Digitālais elektriskais osciloskops (DSO) un BER rādītājs tika izmantots, lai novērtētu bitu kļūdu koeficientu uztvertā signāla kvalitātei.

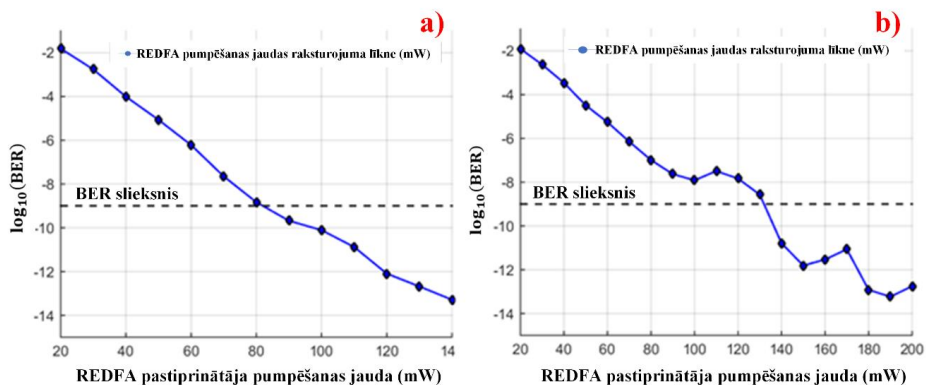
3.5. Bitu kļūdu attiecības koeficienta un acu diagrammas novērtējums 16. kanāla WDM-PON pārraides sistēmā

REDFA eksperimentālais prototips tika testēts dažādos apstākļos, izmantojot 100 GHz attālumā izvietotu 16 kanālu NRZ modulētu WDM-PON pārraides sistēmu, kas darbojas C joslā, kur par robežvērtību tiek izmantota BER kvalitāte zem 1×10^{-9} . Uztvertā signāla acu diagrammas pēc pārraides ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu 120 km garā SMF šķiedras savienojuma posmā ir redzamas **3.7.** att.

Šajā gadījumā REDFA pastiprinātājs izmanto 80 mW pumpēšanas jaudu tieši vērstajā pumpēšanā ($\lambda = 980$ nm), bet pretēji vērstās pumpēšanas gadījumā ($\lambda = 1480$ nm) izmanto 130 mW pumpēšanas jaudu. Apakšā redzams **3.7.** att. (a) un **3.7.** att. (b) punktā vissliktākā vidējā kanāla (8. kanālu) uztvertā signāla BER ir $1,86 \times 10^{-9}$ un $2,14 \times 10^{-9}$.



3.7. att. 10 Gbit/s uz λ NRZ modulētā un uztvertā signāla (8. kanāls) acu diagrammas 100 GHz attālumā starp 16 kanāliem WDM-PON pārraides sistēmā, kas balstīta uz REDFA (a) REDFA 80 mW pumpēšanas jaudu, izmantojot tieši vērsto pumpēšanu un (b) REDFA 130 mW pumpēšanas jaudu, izmantojot pretēji vērsto pumpēšanu.



3.8. att. 10 Gbit/s uz λ NRZ modulēta signāla BER (8. kanāls) atkarība no REDFA pastiprinātāja pumpēšana jaudas (mW) 100 GHz attālumā izvietotai 16 kanālu REDFA balstītai WDM-PON pārraides sistēmai: (a) ar pretēju izplatīšanos ($\lambda = 980$ nm) un (b) ar pretēju izplatīšanos ($\lambda = 1480$ nm)

Lai pārbaudītu BER veikspēju, tika iestāfītas tieši vērstas pumpēšanas ($\lambda = 980$ nm) un pretēji vērstas pumpēšanas ($\lambda = 1480$ nm) jaudas diapazonos no 20 mW līdz 140 mW un 20 mW līdz 200 mW. REDFA pastiprinātāja optimālās pumpēšanas jaudas novērtēšanu (pumpēšanas jauda (mW) pret BER) visnelabvēlīgākajam 8. kanālam, izvēloties pumpēšanas jaudu, izmantojot tieši vērsto pumpēšanu ($\lambda = 980$ nm, no 20 mW līdz 140 mW ar 10 mW soli) pie pretēji vērstās pumpēšanas ($\lambda = 1480$ nm, no 20 mW līdz 200 mW ar 10 mW soli).

Galvenais "sistēmas novērtēšanas kritērijs" ir 1×10^{-9} BER sliekšnis. Kā redzams **3.8.** attēlā, BER sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts, kur pumpēšanas jaudas ir 80 mW pie tieši vērsta pumpēšanas virziena ($\lambda = 980$ nm) un 130 mW pie pretēji vērsta pumpēšanas virziena ($\lambda = 1480$ nm).

KOPSAVILKUMS PAR PIRMO TĒZI

- Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka pastiprinātāja konfigurācijai ar 3 W pumpēšanas gaismas avotu pie 975 nm viļņu garuma WDM lietojumiem ir nepieciešams 7 m garš EYDF (ar iegūtajiem fizikālajiem parametriem) un tieši vērstais pumpēšanas virziens. Ņemot vērā zemo ieejas signāla jaudu (+20 dBm/ uz kanālu), EYDFA var izmantot līdz 40 DWDM kanālu pastiprināšanai C joslā, nodrošinot maksimālo izejas jaudu +22 dBm, 19,7-28,3 dB pastiprinājumu, 3,7-4,2 dB trokšņa koeficientu un jaudas samazinājumu (attiecībā pret sistēmu bez pastiprinājuma) zem 0,1 dB pie BER līmeņa 10^{-9} . Oriģinālas publikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem ir atrodami promocijas darba. **1.** pielikumā.

4. PIKOSEKUNŽU IMPULSU PAPLAŠINĀŠANAS VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS UN NOVĒRTĒJUMS PPM SAKARU SISTĒMĀ

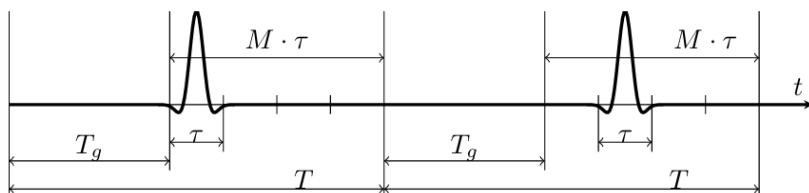
Impulsu pozīcijas modulācijas (PPM) paņēmieni ļauj ievērojami palielināt energoefektivitāti salīdzinājumā ar esošajām tehnoloģijām [62, 63]. PPM simbols (sk. 4.1. att.), kurā impulsam ir četras pozīcijas un visus simbolus atdala aizsarglaiks T_g , ir paredzēts informācijas apstrādei. Šajā attēlā ir arī parādīts, ka īpašajam lietderīgās slodzes intervālam ir kopējais laiks $M \cdot \tau = T - T_g$, kur M ir pozīciju skaits, τ ir vienas pozīcijas ilgums, T - simbola ilgums. Bitu skaitu, ko pārraida vienā simbolā B , var aprēķināt šādi:

$$B = \log_2 M$$

Simboli ar lielāku pozīciju skaitu M ietaupa enerģiju, savukārt lielāks pārraides ātrums tiek panākts, samazinot pozīciju skaitu. Datu pārraides ātrumu R var aprēķināt šādi:

$$R = \frac{B}{T}$$

PPM kā datu modulācijas metode būtībā izvirza šķietami vienkāršas prasības. Ir jānodrošina ļoti īsa impulsu ģenerēšana ar iespēju mainīt intervālu starp impulsiem. Noteikšanai ir daudz dažādu metožu. Viens no daudzsoļākajiem ātrgaitas PPM paņēmieniem ir tieša laika mērīšana ar notikumu taimera palīdzību. Notikumu taimera precizitāte ir viens no šīs modulācijas metodes ierobežojošajiem faktoriem [64]. Lai ietaupītu enerģiju, impulsiem jābūt pēc iespējas īsākiem, savukārt, lai veiktu detektēšanu, impulsu ilgumam jābūt pietiekami garam, lai to varētu fiksēt taimerī. Ļoti precīzs notikumu taimeris Eventech A033-ET [65, 66] var noteikt notikumus ar vidējo kvadrātisko precizitāti (RMS), kas ir aptuveni 3 ps, bet impulsam ir jābūt virs taimera impulsu noteikšanas sliekšņa – vismaz 700 ps. Tāpēc vairumā gadījumu pirms notikumu taimera detektēšanas ir jāveic impulsa formēšana, paplašināšana un automātiskā pastiprinājuma kontrole.



4.1. att. PPM signāla struktūra, kurā $M = 4$, $B = 2$ kodējumi “00” un “01”.

Impulsu formēšanas un paplašināšanas metodes tika plaši izmantotas dažādās jomās, kurās izmanto radiofrekvenču (RF) un optisko signālu ģenerēšanu, pārraidi, uztveršanu un laika mērījumus. Šim nolūkam izmanto analogās un digitālās tehnoloģijas. Pārskats [67] ir veltīts femtosekunžu impulsu ģenerēšanas vidē, kurā optisko viļņu formas tiek veidotas un ģenerētas, izmantojot Furjē sintēzes metodes. Nozīmīga laika izšķirtspējas uzlabošana ir parādīta [68], kur impulsu paplašināšana ir īstenota komplementārā metāla oksīda pusvadītāju (CMOS) un laika-digitālajā pārveidotājā (TDC).

Precīzas laika intervālu mērīšanas metodes ir īstenotas ar dažādām tehnoloģijām gigahercu, terahercu un arī optiskajās joslās [69, 70]. Impulsu formēšanu un paplašināšanu plaši izmanto arī dažādās optiskajās ierīcēs un sakaru sistēmās, biomedicīnas, radaru un attēlveidošanas sistēmās [67], platjoslas analogo ciparu pārveidotājos (ADC), ciparu signālu apstrādē [69], zemas jaudas ultraplātjoslas (UWB) sakaru sistēmās [71], dažādās mērierīcēs, laika intervālu mērīšanas sistēmās [70], programmējamos impulsu formēšanas filtros [72], laika marķēšanā kosmosa tehnoloģijām [73] un daudzos citos lietojumos.

UWB komunikācijām tika pētītas un ieviestas dažādas impulsu formas, bet UWB tehnoloģijās nozīmīgu vietu ieņem Gausa impulsa forma (šis impulss nodrošina ievērojamu līdzstrāvas (DC) komponenti), Gausa dubultā impulsa un Gausa monocikla impulsa forma [74]. Bezvadu tehnoloģijās lielākajā daļā impulsa radio ultraplātjoslas (IR-UWB) sistēmu tiek izmantots Gausa monocikla impulss, jo tam piemīt spektrālās īpašības un šo formu bez lielām grūtībām var ģenerēt pārraides ķēdē [75]. Tomēr UWB lietojumos liela nozīme ir arī dažādiem trapecveida un dažkārt zvanveida un trapecveida impulsiem. Impulsa formas izvēle impulsu sistēmās ir viens no galvenajiem apsvērumiem sistēmas projektēšanā. Līdz šim daudzi pētījumi, kuros aplūkota impulsu formas noteikšana, ir teorētiski un galvenokārt attiecas uz digitālajām UWB sakaru sistēmām. Grāmatas [75] 6. nodaļā aplūkotās dažas netradicionālas impulsu formas ģenerēšanas un izmantošanas īpatnības UWB, kur analizēti tā sauktie Hermit impulsi. Šajā analizē secināts, ka ir jāpieņem, ka uztvērējam ir pilnīga informācija par izplatīšanās kanālu un ka tiek realizēta perfekta sinhronizācija ar saņemto signālu.

Analogo IR-UWB sistēmu projektēšana ir vienkāršāka nekā digitālo [76], un tās var izmantot bez kanālu sinhronizācijas, kas prasa sarežģītus risinājumus [71]. UWB tehnoloģijas neizslēdz pārraides līniju, piemēram, koaksiālo kabeļu vai vītā pāra izmantošanu [77]. Zinātniskajā rakstā [78] ir ierosināts kombinēt optisko šķiedru un vītā pāra vai koaksiālo kabeļu tīklus piekļuves arhitektūras, kas balstītas uz UWB.

Jebkurā gadījumā, īpaši lineārā pārraides kanāla modelī, impulsu spektrālais blīvums tiek pēfīts ļoti rūpīgi, jo tas sniedz būtisku informāciju par impulsu raksturlielumiem un to formas izmaiņām pārraides kanālā. Parasti šo impulsu spektru nozīmīgās joslas sniedzas līdz pat 20 GHz [79-78]. Impulsu formu ietekmē ne tikai pārraides kanāla fiziskā vide, bet arī tā ierīces un komponenti. Tomēr ir arī gadījumi, kad impulsu forma un ilgums tiek mainīti apzināti, piemēram, piemērojot filtrēšanu [74].

Pārraidītā atskaites impulsa pozīcijas modulācija (TR-PPM) ir viens no visizplatītākajiem PPM veidiem. TR-PPM atšķiras no koherētās PPM modulācijas formāta ar to, ka katra kadra sākumā ir atsevišķs atskaites impulss, tādējādi novēršot vajadzību pēc laika sinhronizācijas starp raidītāju un uztvērēju. Ņemot vērā atskaites impulsa klātbūtni katrā kadrā, TR-PPM ir ļoti labi piemērota komunikācijai starp kustīgiem objektiem. Daudz dažādu PPM shēmu veidu, piemēram, daudzimpulsu pozicionēšanas modulācija (MPPM), optisko impulsu pozicionēšanas modulācija (OPPM), mainīga impulsa pozicionēšanas modulācija (VPPM) un iepriekš minētās DPPM un TR-PPM - tās visas tiek uzskatītas par energoefektīvām modulācijas shēmām, salīdzinot ar citām modulācijas metodēm [80]. Tā kā jebkuru informācijas apjomu var pārraidīt, izmantojot vienu impulsu (vai divus impulsus TR-PPM gadījumā), PPM shēmas var nodrošināt teorētiski neierobežotu enerģijas ietaupījumu salīdzinājumā ar citām modulācijas tehnikām, piemēram, "ieslēgts-izslēgts" manipulācija OOK, impulsu amplitūdas modulāciju (PAM) un kvadrātūras fāzes manipulācija (QPSK) [81]. Šī īpašība nozīmē arī to, ka energoefektivitāte palielinās, palielinoties iespējamo impulsu pozīciju skaitam M , jo ar to pašu enerģijas daudzumu pārraidītās informācijas apjoms kļūst nozīmīgāks [82]. Citos pētījumos arī secināts, ka PPM ir nepieciešama mazāka pārraides jauda nekā citām modulācijas metodēm, lai sasniegtu tādu pašu bitu kļūdu koeficientu (BER) [83]. Ir vērts atzīmēt, ka UWB signālus plaši izmanto lokalizācijai [84], un PPM signalizācija ļoti labi iekļaujas nākamā bita tīkla koncepcijā.

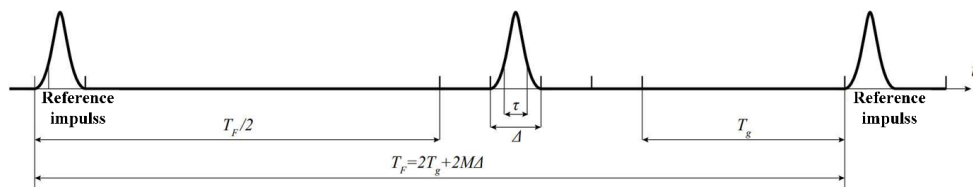
4.1. 512-TR-PPM viļņu formas ģenerācija

Datu impulsa atrašanās vieta datu apgabalā ir atkarīga no konkrētā datu simbola. Ja $M = 512$ pozīcijas definē kā datu apgabalu, datu impulss nes 9 bitu informāciju.

Datu apgabals ir sadalīts M laika nišās, un katra no tām atbilst attiecīgajam datu simbolam. Svarīgi atzīmēt, ka impulsa ilgumam nav nozīmes signāla pārraidē un tas nosaka tikai jaudas efektivitāti, tāpēc impulss var būt šaurāks vai platāks par pozīcijas platumu.

Šīs nodaļas pētījumā tika izmantots 50 pps impulsa platums, lai nodrošinātu augstu sakaru energoefektivitāti. 512 pozīcijas vienā simbolā ļauj sasniegt TR-PPM signāla pārraides ātrumu līdz 59,5 Mbps.

Izmantotā notikumu taimera ierobežojumu dēļ pie katra impulsa jāpieskaita aizsarglaiks $T_g = 50\text{ns}$. Izmantojot MATLAB skriptu, 9000 biti tika kodēti 512 TR-PPM viļņu formā un tālāk tika ielādēti PPG.

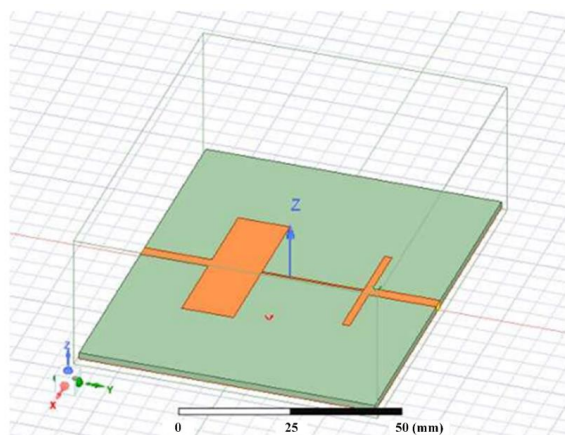


4.2. TR-PPM signāla vispārējā struktūra

4.2. Pašražotā 450 MHz zemfrekvenču filtra dizaina modeļa apraksts

LPF modeļa konstrukcija, kas tika izgatavota un izmantota šajā eksperimentā, ir parādīta

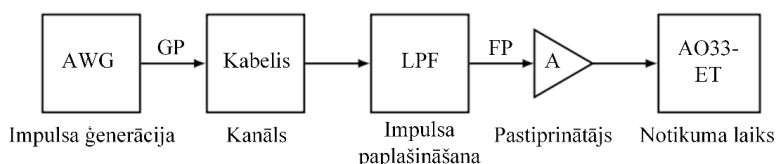
4.3. att. Diemžēl gan Ansys HFSS modelēšanas, gan eksperimenta laikā izrādījās, ka šādam pašizgatavotam LPF filtram ir nepietiekams vājinājums frekvenču joslā virs 4 GHz, kas izraisa ievērojamus izvērsto 512-TR-PPM impulsu formas kropļojumus. Jāņem vērā, ka šādu PPM signālu aizņemtā RF pamatjoslas joslas platums ir aptuveni 20 GHz.



4.3. att. Pašražotā 450 MHz LPF dizaina modelis

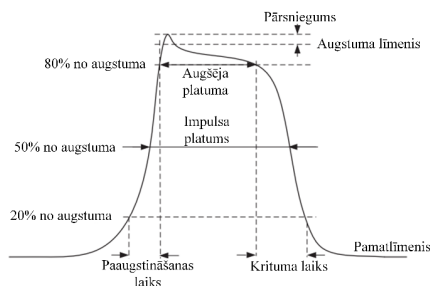
4.3. PPM sakaru sistēmas blokshēma un pētījuma metodikas apraksts, izmantojot augstās precizitātes notikumu taimeris

PPM sakaru sistēmas blokshēma ir parādīta 4.4. att., kurā signāla demodulācijai tika izmantots augstas precizitātes notikumu taimeris. Tā sastāv no impulsu ģeneratora ar PPM modulatoru - testēšanas nolūkos parasti izmanto patvaļīgu viļņu formas ģeneratoru (AWG), platjoslas kabeļa, zemfrekvenču filtra LPF, pastiprinātāja un notikumu taimeris. PPM modulators regulē impulsu ģeneratoru ar vēlamo viļņu formu pēc ienākošajiem digitālajiem datiem. Šajā pētījumā tika ņemti vērā unipolāri impulsi ar pilnu platumu pusē maksimuma (FWHM) 50 ps. Šos PPM impulsus sauc par ģenerētajiem impulsiem (GP).



4.4. att. PPM pārraides sistēmas blokshēma

LPF ir nepieciešams ienākošo impulsu paplašināšanai, un šī nodaļa ir veltīta dažādu LPF ietekmes uz ienākošo signālu novērtēšanai. LPF jāizvēlas tā, lai filtrētā impulsa (FP) ilgums pie FWHM būtu aptuveni 750 - 1000 ps, jo šādu ilgumu nosaka izvēlētais notikuma taimeris. Izmantotie 20 %, 50 % (FWHM) un 80 % viļņu formas atskaites līmeņi aprakstīti un paskaidroti 4.5. att. Plašāka informācija par impulsa parametriem atrodama IEEE standartā [85]. Ideālā gadījumā FP formai jābūt pēc iespējas plakanākai un ar pietiekami mazu pieauguma laiku un ne pārāk lielu krituma laiku, ja salīdzina ar impulsa ilgumu. Iepriekš minētos FP parametrus galvenokārt nosaka demodulācijai izmantotais taimeris. Šīs nodaļas pētījuma galvenais virziens ir dažādu veidu impulsu ģenerēšana ar dažādu LPF, kas nodrošina vajadzīgo impulsa ilgumu un notikumu taimera bezklūdu reakciju.



4.5. att. Galvenie impulsa parametri

FP viļņu formai nav stingru ierobežojumu. Impulsa formai jābūt pietiekami gludai, un tai jābūt ar noteiktu impulsa ilgumu. Turklāt FP jābūt pietiekami mazam pieauguma laikam, lai impulsa pozīcijas vai, citiem vārdiem sakot, laika zīmes mērījumu laikā būtu mazāka svārstīšanās.

Impulsi, kas tika izmantoti daudzos lietojumos (komunikācijās, radarā, sonārā u.c.), bieži vien ir vienkāršas pamata viļņu formas vai to kombinācijas. Sākotnējā pētījuma posmā tiek aplūkota divu veidu impulsu ģenerēšana: 1) Gausa vienpolārs impulss; 2) taisnstūra impulss. Lai gan šādas impulsu formas ir matemātiska idealizācija, tā tomēr sniedz labu ieskatu par impulsu izplatīšanos sakaru kanālā, to filtrēšanu un iespējām iegūt tādas FP viļņu formas un to ilgumu, kas nodrošinātu darbā izvirzītā mērķa sasniegšanu.

Šajā pētījumā, kas ir vērsts uz ģenerēto impulsu (GP), kuru ilgums ir aptuveni 50 ps, GP forma ir izvēlēta praktiski viegli ģenerējama. Turklāt saņemtajam impulsam jābūt transformējamam citā impulsā ar tādu formu un ilgumu, kas nodrošinātu pietiekami precīzus laika mērījumus ar iespējami mazāku svārstīgumu.

GP forma nosaka tā spektrālo platumu (frekvenču joslas platumu). Ja salīdzina impulsus ar vienādu ilgumu, tad vismazāko joslas platumu var panākt, izmantojot Gausa impulsu, savukārt visplašākais joslas platums (ideālā gadījumā - bezgalīgs) ir nepieciešams taisnstūra impulsam. Citu IR-UWB tehnoloģijās izmantoto impulsu formu - simetrisku un nesimetrisku trapecveida, trīsstūrīnu, paaugstinātu kosinusa impulsu - pieprasītais RF frekvenču joslas platums ir starp abu iepriekš minēto impulsu formu joslas platumu. Impulsa joslas platumu un spektrālās formas noteikšana un izpēte ir būtiska, izvēloties piemērotu LPF, lai iegūtu nepieciešamo FP formu un ilgumu [56]. Šajā nodaļā tika pētīta impulsa forma un līdz ar to arī tā aizņemtais joslas platums ir svarīgs impulsa paplašināšanai. Tas ir izskaidrots, veicot skaitliskos aprēķinus ar Bessela un Butterworth LPF ar dažādām kārtām un nogriešanas frekvencēm [86].

Eksperimentu laikā tas izrādījās piemērotāks trapecveida impulsa ģenerēšanai, tāpēc pētījumā tika pētīta precīzāka reālā impulsa aproksimācija ar trapecveida impulsu [87], kā arī vēl precīzāka aproksimācija ar zvaigžņveida trapecveida impulsu. Pēdējo divu impulsu spektri tika salīdzināti, un tika secināts, ka gadījumos, kad to pieauguma un krituma laiki ir relatīvi mazi (līdz 30 ps, ja impulsa ilgums ir ap 50 ps), vienkāršāka aproksimācija ar konusveida impulsu, kas izriet no zvaigžņveida trapeces, ir ar pilnīgi pietiekamu impulsa spektru un tā filtrēšana atšķiras minimāli.

Asimetrisks trapecveida impulss [87] ir interesants pats par sevi. No 4.5. att. var veidot gan simetrisku trapecveida impulsu, kura kāpuma laiks ir vienāds ar krišanas laiku, gan simetrisku un asimetrisku trīsstūrveida impulsu, kad augšējais ilgums ir 0, gan arī taisnstūrveida impulsu, kad kāpuma laiks un krišanas laiks ir vienāds ar nulli.

Ja ar laiku $\tau_{1/e}$ apzīmē Gausa impulsa ilgumu, tad impulss, kura līmenis ir $1/e$ no tā maksimālās vērtības A , tad šāda impulsa matemātiskā izteiksme aprēķināta šādi:

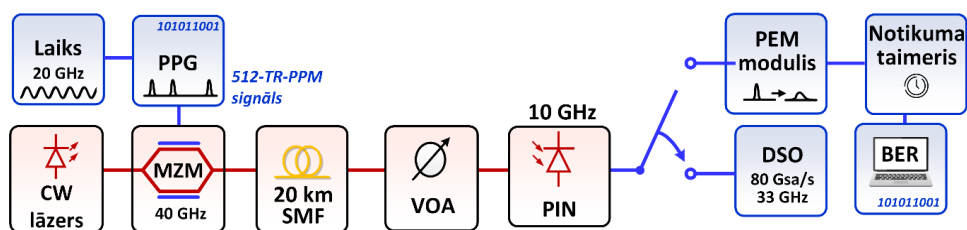
$$S_{1/e(t)} = A \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot t^2}{\tau_{1/e}^2}\right) \quad (5)$$

Gausa impulsa ilgumu līmenī τ_{1/p_u} ($p_u \leq 1$) var aprēķināt šādi:

$$\tau_{1/p_u} = \tau_{1/e} \cdot \sqrt{1n p_u} = \frac{\tau_{1/2}}{\sqrt{1n 2}} \cdot \sqrt{1n p_u} \quad (6)$$

Gausa impulsa pieauguma laiks no 20% līmeņa līdz 80% līmenim ir aprēķināts no (4) un ir $0,478 \cdot \tau_{1/p_u}$.

Iegūtas impulsu spektru (komplekso spektrālo blīvumu, spektra lielumu un spektra fāzi) analītiskās izteiksmes trapecveida un zvana formas trapecveida impulsiem. Kopā ar labi zināmajiem taisnstūra un Gausa impulsu spektrālajiem blīvumiem tās ir izmantotas skaitliski iegūto rezultātu pārbaudei, tomēr vietas ierobežojuma dēļ tie šeit nav sniegti. Eksperimentāli izveidota shēma ar impulsu paplašināšanas moduli (PPM) un notikumu taimeru ir parādīta 4.6. att.

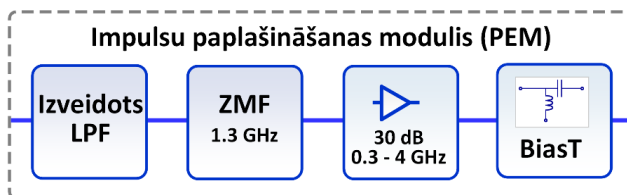


4.6. att. Eksperimentālā shēma 512-TR-PPM signāla ģenerēšanai, pārraidei un noteikšanai ar DSO vai notikumu taimeru ar pieslēgtu datoru, kas novērtē saņemtā PPM signāla BER

Sākumā tika ģenerēta 9000 bitu gara pseidogadījuma bitu secība (PRBS), kas MATLAB programmēšanas vidē tika pārveidota par 512 TR-PPM paraugu vektoru. Pēc apstrādes vērtība "1" atbilst augstam signālam, kas apzīmē impulsu, un 0 - atstarpei starp impulsiem, veidojot

izejas 512-TR-PPM kodētu elektrisko signālu. Vektoru, kas apraksta 512-TR-PPM viļņu formu, saglabā īpašā impulsu parauga ģeneratora (PPG) faila formātā un ielādē tā atmiņā, lai pēc pieprasījuma to varētu elektriski ģenerēt. Šo pašu PRBS secību vēlāk izmanto BER novērtēšanai uztvērējā. Elektriskais 512-TR-PPM signāls tika ģenerēts PPG ģeneratora (PPG, 33 GHz, Anritsu MU183020A) vienkanāla izejā. PPG izejas sprieguma svārstības ir 3,5 V_{pp}, kas ir pietiekamas, lai darbinātu optisko modulatoru bez papildu elektriskā radiofrekvences (RF) pastiprinātāja. Mikroviļņu signālu ģenerators (Anritsu, 31,8 GHz, MG3693C) ģenerē augstas fīrības pakāpes 20 GHz sinusoidālu signālu un darbojas kā PPG ārējais takts avots. 40 GHz Mach-Zehnder modulators (MZM, Photline MX-LN-40) ir tieši savienots ar PPG izeju, izmantojot 2,92 mm uz 1,85 mm savienotāja adapteri. MZM ieejai tika pieslēgta regulējama CW lāzera, kas darbojas 1552,52 nm (193,1 GHz, atbilstoši ITU-T DWDM grid specifikācijai).

Optiskā izejas jauda iestafta uz +7 dBm optiskajai (B2B) pārraidei un +9 dBm 20 km vienmodu šķiedras (SMF) pārraides konfigurācijai. Pēc optiskās modulācijas signāls tika pārraidīts pa 20 km ITU-T G.652 SMF šķiedru. SMF izeja ir savienota ar lineāru maināmu optisko vājinātāju (VOA, Keysight FVA-3150) ar 2 dB ienestiem zudumiem pie viļņu garuma 1550 nm. Optiskais signāls no VOA izejas tika nogādāts uz 10 GHz PIN fotodiodei (PIN, 8 GHz, Amonics PR10G), kur tas tika pārveidots atpakaļ elektriskajā signālā un pēc PPM moduļa šķērsošanas tika fiksēts ar 33 GHz reālā laika digitālo atmiņas osciloskopu (DSO, 80GSa/s, Keysight DSOZ334A) vai notikumu taimeris (Eventech, A033-ET), kā ir parādīts 4.6. attēlā. RF pamatjoslas joslas platums 512-TR-PPM signālam ar impulsa platumu 50 sekundes ir aptuveni 20 GHz. Optiskās B2B pārraides gadījumā 512-TR-PPM signāla impulsa platums, kas sākotnēji bija 50 sekundes, tika izmērīts 71 sekundes. Turklāt pēc 20 km garas SMF pārraides impulsa ilgums ir aptuveni 96 sekundes, jo PIN uztvērēja RF frekvenču joslas platums ir ierobežots optiskās šķiedras hromatiskās dispersijas ietekmē. Šajā eksperimentā tika izmantots notikumu taimeris, kuram ir ļoti svarīga impulsa viļņa forma un ilgums. Eksperimentālais PEM modulis, kas tika izstrādāts, izmantojot metodoloģiju, kuru jau tika atklājuši [88], ietver šādu shēmu (sk. 4.7. att.).



4.7. att. Eksperimentālā PEM impulsa paplašināšanas moduļa shēma

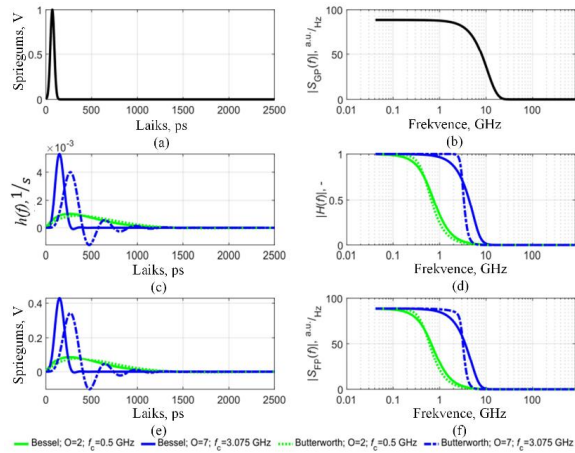
Skaitliskie aprēķini Ansys HFSS modelēšanas programmatūrā rāda, ka tika izmantots augstas kārtas elektriskais LPF, kuram ienestie zudumi strauji palielinās virs robežfrekvences, tas izraisa viļņveidīgu filtrētā impulsa viļņu formu. Viltus pulsācijas apstiprināja arī eksperimenti ar komerciāliem LPF, kas tika izgatavoti ar strauju ienesto zudumu palielinājumu apstāšanās joslā.

Aprēķini liecina, ka pietiekamu impulsa platumu un minimālas svārstības filtrētā impulsa viļņu formā var panākt, ja izmanto filtru ar 3. kārtas Beseļa pārneses funkciju un 450 MHz griezumam frekvenci. Šāds zemfrekvences filtrs nodrošina arī to, ka impulsa augšupejošā mala ir pēc iespējas stāvāka.

4.4. Impulsa paplašināšanas novērtējums, izmantojot Beseļa, Butterwooth un cita veida zemfrekvenču elektrisko filtru

Divu dažādu formu, Gausa un trapecveida, unipolāru 50 ps GP izplešanās tika aprēķināta un novērtēta skaitliski. Gausa GP laika funkcija $S_{GP}(t)$ un tā lieluma spektrs $|S_{GP}(f)|$ ir parādīti **4.8.** att. (a) un **4.8.** att. (b), kā arī pētāmo GP formas attiecīgi ir parādīti **4.13.** att. Skaitliskajam impulsa izplešanās aprēķinam tika izmantoti Matlab sniegto divu veidu LPF filtru - Beseļa un Butterwortha - frekvenču raksturlielumi. Katram filtra tipam tika ieviests dažādu kārtu robežfrekvenču kopums. Augstākā LPF filtra kārtā tika ierobežota ar 7, ņemot vērā turpmākās praktiskās ieviešanas iemeslus. Skaitliskajiem aprēķiniem robežfrekvenču kopums tika izvēlēts galvenokārt saskaņā ar robežfrekvencēm no reālu LPF datu lapām, kas paredzētas izmantošanai reālos mērījumos. Attiecīgi **4.8.** att. (c) un **4.8.** att. (d) punktā parādīta impulsa reakcijas funkcija $h(t)$ un nodošanas funkcijas lielums $|H(f)|$ diviem galējiem kopumiem - minimālajai kārtībai, minimālajai nogriešanas frekvencei, maksimālajai kārtībai, maksimālajai nogriešanas frekvencei - abiem pētītajiem filtru veidiem. **4.8.** attēlā, Butterworth filtra pārneses funkcija ir stāvāka, īpaši augstākas kārtas gadījumā, un arī Butterworth filtra impulsa reakcijas laika funkcijā parādās svārstība.

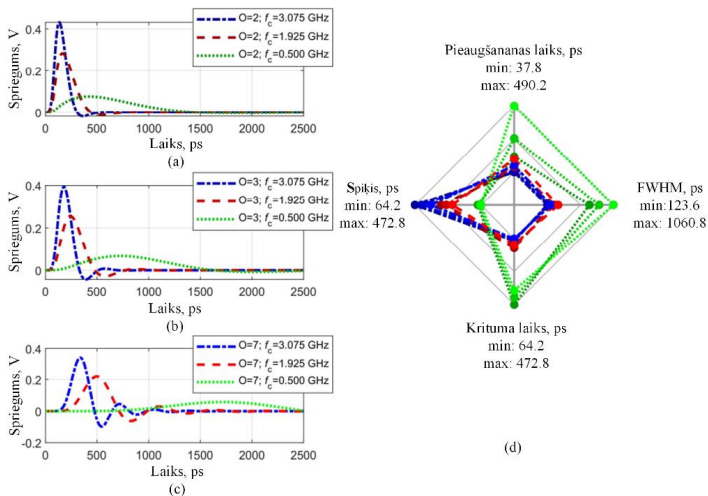
Filtrēta impulsa signāla (FPs) laika funkcijas $S_{PF}(t)$ tika iegūtas divos veidos - reizinot GP spektru $S_{GP}(f)$ ar filtra $H(f)$ pārneses funkciju, kam sekoja apgrieztā Furjē transformācija, izmantojot GP laika funkcijas konvolūciju ar filtra impulsa reakcijas laika funkciju. Rezultāti tika salīdzināti savā starpā, lai garantētu signāla modelēšanas precizitāti. FP laika funkcijas un to lieluma spektri, kas iegūti pēc filtrēšanas ar abu veidu filtriem ar ekstrēmām kārtas un robežfrekvences kopām, parādīti attiecīgi **4.8.** att. (e) un **4.8.** att. (f).



4.8. att. Aprēķinātie laika un spektrālie raksturlielumi 50 ps Gausa impulsa, kas tika filtrēts ar Beseļa un Butterworth LPF ar dažādu kārtību (O) un robežfrekvencēm (f_c)

Beseļa un Butterworth filtru ar dažādu kārtību un nogriežņu frekvenci ietekme uz Gausa GP izvērsumu ir parādīta ar $S_{FF}(t)$ laika funkcijām, sk. **4.9.** att. (a), **4.9.** att. (c), **4.10.** att. (a) un **4.10.** att. (c). Arī galvenie pētāmā filtrēta impulsa (FP) raksturlielumi - FWHM, pieauguma laiks, krituma laiks, $S_{FF}(t)$ maksimālā vērtība - ir apkopoti **4.9.** att. (d) un **4.10.** att. (d).

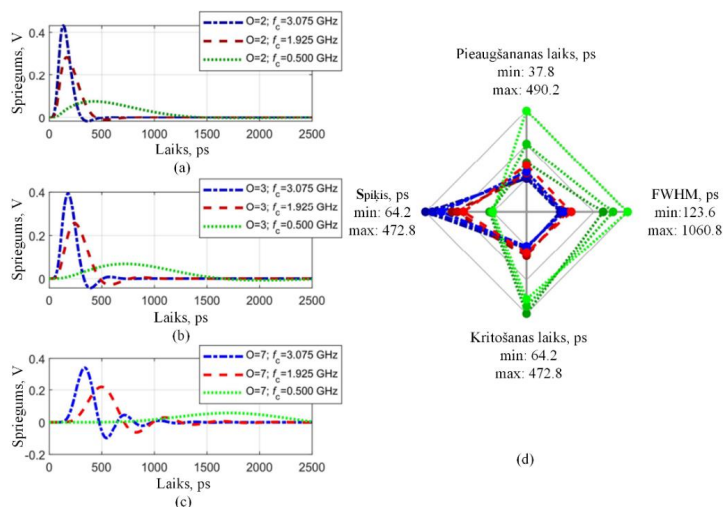
Piemēram, **4.9.** att. gaiši zaļā kontūra raksturlielumu grafiks atbilst gaiši zaļajam laika grafikam - izvēršanas ar Beseļa LPF ar 7. kārtu un robežfrekvenci 0,5 GHz rezultāts.



4.9. att. Aprēķinātais Gausa 50 ps impulss, kas filtrēts ar Beseļa LPFs, kur O ir filtra kārtā, f_c ir izslēgšanas frekvence, S_{peak} ir $s_{FF}(t)$ maksimālā vērtība

Šo izvērsumu raksturo visgarākais pieauguma laiks (270,6 ps) un visgarākais impulsa ilgums (667,8 ps), kā arī mazākā $S_{PF}(t)$ maksimālā vērtība (0,08 V). Savukārt tumšāks zilais kontūrs atbilst izvērsumam ar 2. kārtas Beseļa LPF ar izslēgšanas frekvenci 3,075 GHz ar šādām īpašībām - visīsākais pieauguma laiks (34,2 ps), vismazākais impulsa ilgums (106,2 ps) un vislielākā $S_{PF}(t)$ maksimālā vērtība (0,46 V).

Katra ģenerēta impulsa (GP) maksimālā vērtība bija 1,00 V. Lielākās un mazākās vērtības ir nosauktas izmeklējamu kārtu un frekvenču kopu ietvaros.



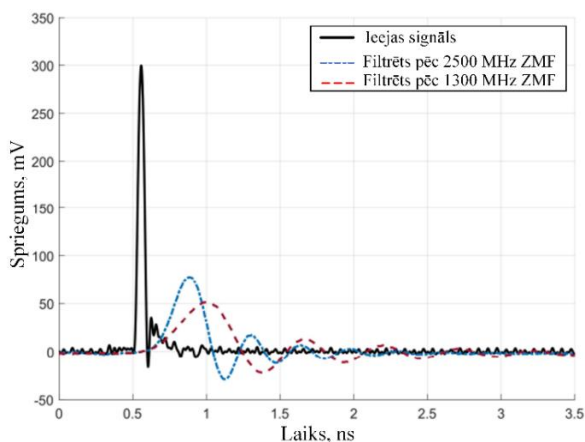
4.10. att. Aprēķinātais Gausa 50 ps impulss, kas filtrēts ar Butterworth LPFs, kur O ir filtra kārtā, f_c ir izslēgšanas frekvence, S_{peak} ir $S_{FP}(t)$ maksimālā vērtība

Lai paplašinātu 50 ps impulsus, piemērojot filtrēšanu ar reāliem LPF (sk. 4.8. att.), tika izveidota eksperimentāla mērījumu shēma. 4.11. att.).



4.11. att. Mērījumu shēma, kas tika izmantota elektrisko impulsu paplašināšanas izpētei, izmantojot LPF

Tajā iekļauts patvaļīgais viļņu formas ģenerators (AWG Keysight M8195) [87], 80 cm radio-caur šķiedru (RF) kabelis (DC- 40 GHz), testējama prototips, kas šajā gadījumā ir LPF, un digitālais signāla osciloskops (DSO), Keysight DSAZ334A, 80 GSa/s, 33 GHz) paplašināto viļņu formu uzņemšanai, kur LPF ir tieši savienots ar DSO ieeju. Vispirms Matlab vidē tika sintezēti ideāli 50 ps ilguma impulsi ar taisnstūra formu un 5 ns periodu. Šis 5 ns periods darbojas kā aizsargjosla, kas ļauj novērot pilnu filtrēšanas ietekmi uz ieejas viļņu formu. Pēc tam viļņu forma tiek saglabāta AWG specifiskā faila formātā un ielādēta tās atmiņā. Tālāk sagatavoto viļņu formu atskaņo AWG pirmajā izejas portā ar maksimālo paraugu ņemšanas ātrumu, kas ir 65 GSa/s. Kā redzams 4.12. att., AWG ģenerētā 50 ps impulsa formai nav ideālas taisnstūra formas - tai ir slīpas pārejas.



4.12. att. Nomērītā oriģinālā 50 ps ieejas signāla salīdzinājums ar komerciālo zemfrekvenču filtru filtrētajiem signāliem

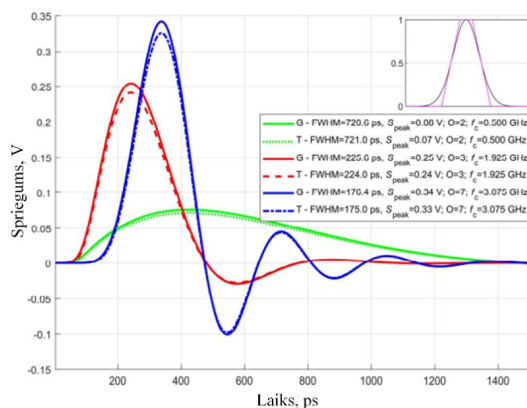
To var izskaidrot ar AWG ierobežoto analogās joslas platumu. Šajos mērījumos tika izmantoti divi komerciāli LPF no Mini-Circuits [89, 90], kuru galvenie tehniskie parametri apkopoti 4. tabulā un pētāmo LPF ieejas 50 ps impulsa maksimums līdz maksimumam ir 310 mV.

Ja mērījumu shēmā ir ievietots VLFX-2500+ LPF, uztvertais signāls no pīķa līdz maksimumam spriegums uz DSO ieejas ir zemāks un vienāds ar 106 mV, bet VLFX-1300+ LPF gadījumā tas ir vēl zemāks un attiecīgi ir vienāds ar 73 mV. Relatīvos skaitļos nozīmē 65,8 % no sprieguma maksimuma līdz maksimumam samazinājumu (FWHM) VLFX-2500+ LPF gadījumā un 76,5 % VLFX-1300+ LPF gadījumā, ja salīdzina ar sākotnējā 50 ps impulsa viļņa formas spriegumu.

4. tab. Implementēta LFP parametri

| LPF modelis | VLFX-2500+ | VLFX-1300+ |
|--|--------------------------|----------------------------|
| Caurlaides josla | DC–2500 (Loss<1.5 dB) | DC– 1300 (Loss< 1.2 dB) |
| Robežfrekvence (Ienestie zudumi 3 dB), MHz | 3075 | 1925 |
| Aiztures josla (Ienestie zudumi<30 dB), MHz | 3675 | 2300 |
| Izolācija (Frekvence.<20 GHz), dB | 30 | 40 |
| VWSR (:1): | (a) 24.33 | (a) 10.00 |
| (a) Stopband: | (b) 1.39 | (b) 1.20 |
| (b) Passband: | | |

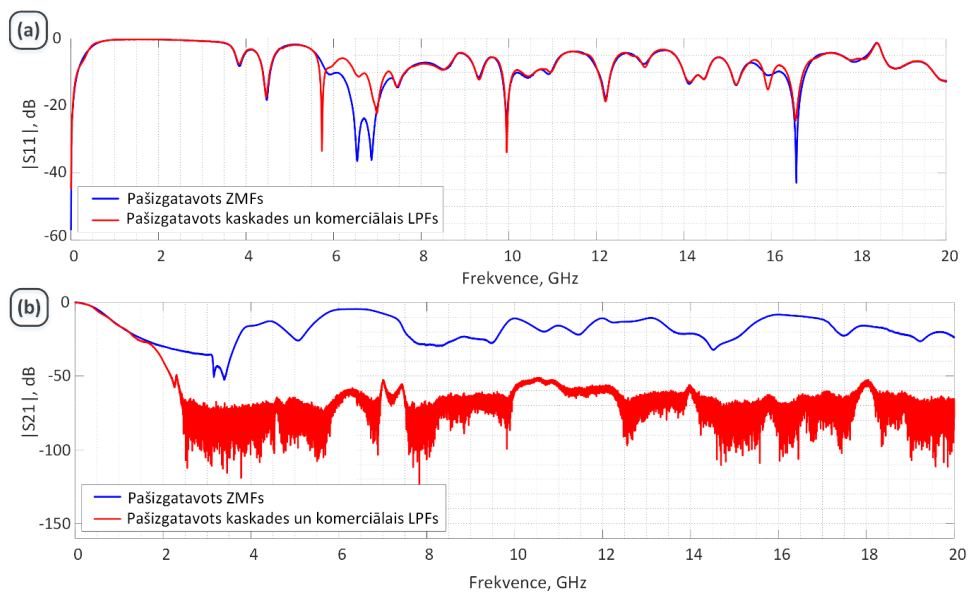
Kā parādīts **4.12.** attēlā, lielāku signāla paplašinājumu iegūst ar LPF, kura caurlaides josla aptver DC līdz 1300 MHz (VLFX-1300+). Izmērītais paplašinātā impulsa ilgums VLFX-2500+ LPF gadījumā ir 230 ps, bet VLFX-1300 LPF gadījumā - 364 ps, kas liecina par zemfrekvenču filtru ievērojamu paplašināšanas spēju. Tomēr jāatzīmē, ka šis paplašinājums tika realizēts ar enerģijas zudumu (ienestie zudumi un signāla atstarošanās) un signāla izkropļojumu aprēķināšanas palīdzību, kas parādīta **4.12.** att. kā viļņu formas pulsācijas ar periodisku raksturu un krītošu amplitūdu. Jāņem vērā, ka **4.12.** attēlā redzamā informācija par laika aizturi, ko ievieš LPF, ir izlaista, lai vizuāli labāk attēlotu un salīdzinātu filtrētos signālus.



4.13. att. Aprēķinātie Gausa (G) un trapecveida (T) 50 ps impulsi, kas filtrēti ar Butterworth LPF, kur O ir filtra kārtā, f_c ir izslēgšanas frekvence, S_{peak} ir $sFP(t)$ maksimālā vērtība

Iegūtie rezultāti rāda, ka Beseļa un Butterworth tipa impulsu izplešanās filtrus var izmantot ar dažādiem kārtas un izslēgšanas frekvences komplektiem. Izvēloties filtru tipu, kārtu un nogriežņu frekvenci, jāņem vērā šādi apstākļi - nepieciešamie FP raksturlielumi, lai turpmākā ierīce darbotos pareizi, kā arī izvēlēta filtra modeļa īstenošanas sarežģītība. Vienkāršas struktūras filtru ar zemu kārtu izvēle var novest pie nepietiekamas GP paplašināšanas. Turpretī dažu veidu filtru, piemēram, Butterworth filtra, augstāka kārtā var radīt ievērojamas FP svārstības. Turklāt, kā tika novērots skaitliskā novērtējuma laikā, ja filtra robežfrekvence ir mazāka, tad impulsa izplešanās ir lielāka, bet zemāka ir arī FP laika funkcijas maksimālā vērtība, kas pēc tam prasa lielāku signāla pastiprinājumu. Turklāt zema robežfrekvence prasa lielus filtra fiziskos izmērus. Var pamanīt, ka, skaitliski aprēķinot izplešanos ar Butterworth tipa filtru ar 7. kārtu un robežfrekvenci 3,075 GHz, impulsa laika funkcija pēc izplešanās ir līdzīga impulsa laika funkcijai pēc izplešanās, kurai tika izmantots LPF VLFX-2500+ - sk. **4.12.** un **4.13.** att.

Pašizgatavota LPF izmērītie S-parametri ir parādīti **4.14.** att. kur zilās līknes S-parametri tika iegūti, izmantojot vektoru tīkla analizatoru (Rohde & Schwarz, 20 GHz, R&S ZNB20).

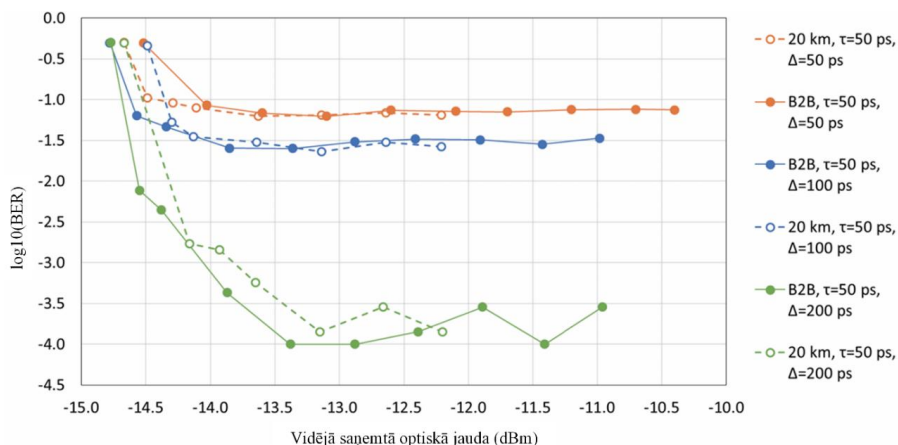


4.14. att. Izmērītie S-parametri: a) S_{11} līkne (zilā krāsā) pašu LPF un (sarkanā krāsā) pašu LPF un komerciālo LPF kaskādes savienojums, b) S_{21} līkne (zilā krāsā) pašu LPF un (sarkanā krāsā) pašu LPF un komerciālo LPF kaskādes savienojumu

Lai novērstu nepietiekamu vājinājumu, komerciālais LPF (DC-1300 MHz caurlaides josla, Mini-Circuits VLFX 1300+) tika savienots ar pašizgatavoto kaskādē LPF filtru. Izmērītie S parametri ir parādīti **4.14.** attēlā kā sarkanās līknes. Kaskādes LPF ar 450 MHz robežfrekvenci un komerciālu filtru ar 1300 MHz robežfrekvenci nodrošina nepieciešamā impulsa ilguma palielināšanās virs 700 ps sliekšņa (notikuma taimera prasība). Tajā pašā laikā PPM saglabā paplašināto PPM impulsu stāvas augšupejošās malas un nenozīmīgas impulsu svārstības. Pēc apstrādes, savienojot pašizgatavotu kaskādes un komerciālos LPF, paplašināto 512-TR-PPM signālu pastiprina ar RF pastiprinātāju (30 dB pastiprinājums, 30-4000 MHz), un, izmantojot novirzes tee (BiasT, 20 kHz 45 GHz, SHF BT45), tika pievadīts papildu slīpuma spriegums, lai optimizētu paplašināto 512-TR-PPM viļņu formu uztveršanu ar notikumu taimeri (Eventech, A033-ET). Izmantojot iepriekš minēto PPM moduli, uztvērēja daļā tika paplašināti saņemtie 512-TR PPM impulsi līdz 978 ps, nodrošinot stabilu taimera darbību.

Zemas kārtas TR-PPM signālus var demodulēt, izmantojot uztvertā signāla autokorelāciju [91]. Signāliem ar lielu pozīciju skaitu M ir nepieciešamas sarežģītākas metodes. Šajā pētījumā tika izmantota 512 TR-PPM signāla demodulators ir balstīts uz notikumu taimera (Eventech, A033-ET) un programmatūras ietvars, kas tika aprakstīts [92]. A033-ET ir datorizēta ierīce, kas reģistrē laika tagus (neapstrādātus datus) kā absolūtos laikus ar augstu precizitāti (aptuveni 3 sekundes vidējā ģeometriskā vērtība), un ir iespējams reģistrēt notikumus ar ātrumu 20 M notikumu sekundē. Notikumu taimeris nevar noteikt īsus impulsus, piemēram, 50 ps. Tāpēc tika izveidots PEM modulis, kas nodrošināja 512 TR-PPM impulsus ar aptuveni 978 ps ilgumu (sk. **4.7.** att.). A033-ET ir 50 ns nāves laika, kas nepieciešams, lai taimeris apstrādātu un uzkrātu datus. Tādēļ ir izvēlēts piemērots kadra garums, lai iekļautu šo intervālu. Kā parādīts **4.6.** att., personālais dators (attēlots kā BER) tika savienots ar notikumu taimeri, lai veiktu PPM demodulāciju un secīgu BER novērtēšanu saņemtajam 512-TR-PPM signālam. Personālajā datorā darbojas programmatūras ietvars, kas uzrakstīts Python programmēšanas valodā. Tas sazinās ar notikumu taimeri un dekodē saņemtos laika tagus datu simbolos. Programmatūra nodrošina arī papildu kļūdu korekciju un pulksteņa signāla izsekošanu. Relatīvās laika pozīcijas tiek aprēķinātas no dotās pozīcijas ilguma un pēc tam pārveidotas binārajos datos, izmantojot Gray kodu, nodrošinot, ka viens pozīcijas impulss o komplekts radīs tikai viena bita kļūdu. Pēc PPM signāla demodulācijas BER veikspēju novērtē, salīdzinot pārraidīto un saņemto bitu sekvenču. Pēc notikumu taimera noteikšanas tiek novērtētas saņemtā 512-TR-PPM signāla BER vērtības.

512-TR-PPM signālu BER raksturojums pēc optiskās B2B pārraides un pēc 20 km SMF pārraides, izmantojot impulsa ilgumu (τ) 50 ps un pozīcijas platuma ilgumu (Δ) attiecīgi 50 ps, 100 ps un 200 ps, pārrādīts **4.15.** att.



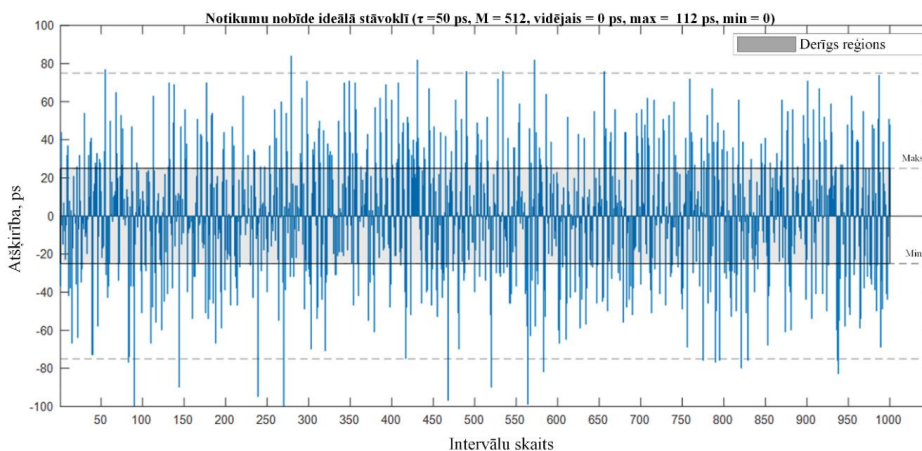
4.15. att. BER attiecībā pret vidējo saņemto optisko jaudu 512-TR-PPM signāliem pirms un pēc 20 km SMF pārraides

512-TR-PPM signāls ar impulsa platumu 50 ps un pozīcijas platumu 200 ps uzrādīja visaugstāko veiktspēju, sasniedzot relatīvi zemu BER - 1×10^{-4} .

Turpretī 512-TR-PPM signāls ar impulsa platumu 50 ps un stingrāku pozīcijas platumu 50 ps uzrādīja BER līdz $2,5 \times 10^{-2}$. Pārraides veiktspēja pēc 20 km SMF šķiedras pārraides ir līdzīga, un tai ir nenozīmīga ietekme uz aprēķināto 512-TR-PPM signāla BER. Dati, kas parādīti **4.16.** att., parāda impulsa laiku σ , kas noteikts pikosekundēs no paredzētās pozīcijas apgabala un iegūts no A033-ET notikumu taimera. Intervālu starpība ir noteikta, analizējot notikumu taimera absolūtās laika zīmes. Iegūtie rezultāti izskaidro, kāpēc BER šaurākām impulsu pozīcijām bija ievērojami lielāka. Galvenais BER pasliktināšanās iemesls ir relatīvi liels džitteris (aptuveni 50 pps RMS) notikumu taimera ievadā. Turklāt pulksteņa signāla ģenerators frekvences dreifa dēļ visi intervāli starp impulsiem 512-TR-PPM viļņu formā vienmērīgi paplašinās vai sašaurinās.

Starpība starp paredzamajiem un faktiskajiem intervāliem irniecīga: 50 ps pozīcijas platumu izmantošana būtiski ietekmē BER, salīdzinot ar garāku PPM viļņu formu.

Laika nobīdi var korigēt uztvērēja programmatūrā, pielāgojot intervālus zināmai pulksteņa nobīdes vērtībai. To var veikt arī automātiski, izsekojot laiku starp divu blakus esošo TR-PPM kadru sākuma impulsiem vai nosūtot īpašus izmēģinājuma kadrus.



4.16. att. Notikumu nobīde no ideālās pozīcijas 512-TR-PPM signāliem pēc 20 km SMF pārraides ar 50 ps pozīcijas platumu (pelēkā zona)

KOPSAVILKUMS PAR OTRO TĒZI

- Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka 512-TR-PPM ir darbīgs modulācijas veids tālsatiksmes sakariem, kur energoefektivitāte ir ļoti svarīgs faktors. TR-PPM galvenā priekšrocība ir tās stabilitāte, ņemot vērā katrā kadrā iekļautos atskaites impulsus. Šis pētījums pierāda, ka ir iespējams izmantot programmatūru, lai labotu nelielas neprecizitātes signāla ģenerēšanā, ko galvenokārt pieļauj noteikšanas metode, t. i., notikumu taimeris. Izmantojot PPM moduli uztvērēja daļā, ir iespējams paplašināt saņemtos 512-TR-PPM impulsus līdz 978 ps, nodrošinot stabilu notikuma taimera darbību. Oriģinālas publikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promocijas darba 5. Pielikumā.

- Iegūtie rezultāti liecina, ka 50 ps impulsu paplašināšanai līdz 700 ps var izmantot Beseļa tipa un Butterworth tipa LPF ar 2. līdz 7. kārtu un izslēgšanas frekvenci no 0,5 GHz līdz 3,075 GHz. Ierobežojot svārstības paplašinātajā impulsā, nevajadzētu izmantot Butterworth tipa 3. vai augstākas kārtas filtru. Ja tika izmatoti Butterworth tipa filtri, izvērstā impulsa pieauguma laiks ir garāks nekā tādas pašas kārtas un nogriežņa frekvences Beseļa filtriem.

Orģinālas publikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promocijas darba. **6.**
Pielikumā.

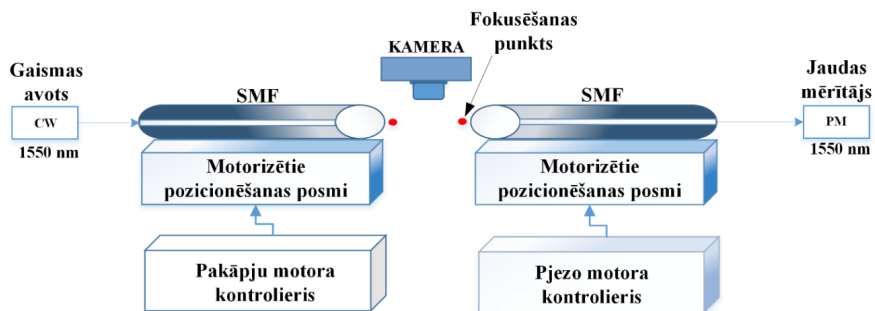
5. LĒCU ŠĶIEDRU IZMANTOŠANAS APRAKSTS UN NOVĒRTĒJUMS INTEGRĒTAJĀM FOTONIKAS IERĪCĒM

Šajā nodalā tika demonstrēta sfērisku lecu šķiedru (SLF) ražošana, izmantojot komerciāli pieejamu loka izlādes metināšanas iekārtu (Fujikura-100P+), kas ir izplatīta optisko šķiedru sakaru un fotonikas jomā izmantota iekārta. Galvenais pētījuma mērķis ir noteikt, cik viegli ar šo izgatavošanas metodi var manipulēt ar svarīgiem lecu šķiedru parametriem, piemēram, darba attālumu un plankuma izmēru [93-98]. Šis novērtējums ietver ražošanas vienkāršību, izgatavoto paraugu konsekveni un nepieciešamo iterāciju skaitu, lai precizētu konkrētajam lietojumam nepieciešamos lēcas parametrus. Izgatavotos paraugus salīdzina ar komerciālās klases lecu šķiedras izstrādājumiem, kurus izmanto kā salīdzinošo bāzi.

5.1. Lēcu šķiedru konstrukcijas un izgatavošanas procesa apraksts

Izplatīta un efektīvākā optisko lecu ražošanas metode ir saistīta ar telekomunikāciju loka izlādes metināšanas izmantošanas iekārtām. Šajā gadījumā divu elektrodu radītā elektriskā loka palīdzība tiek kausētas šķiedras, tādējādi savienojot, sašaurinot un veidojot mikrolēcas. Tomēr galvenie šīs metodes trūkumi ir nevienmērīga šķiedras sildīšana un ilgs ražošanas laiks (līdz pat vairākiem minūtēm), atkarīga no lēcas diametra. Tas palielina ģeometrijas izkropļojuma risku, galvenokārt no smaguma ietekmes dēļ, bet arī no ārējiem faktoriem, piemēram, vibrācijas, kas rodas procesa laikā. Vēl viens ierobežojuma faktoriem ir tas, ka elektriska loka metināšanas iekārta parasti ir divas elektrodus, kas izraisa nevienmērīgu optiskā šķiedra ārējās virsmas karsēšanu. Tas ierobežo iespēju precīzi veidot lēcas struktūras. Tas viss var izraisīt struktūras asimetriju, īpaši, ja šķiedras nav perfekti izlīdzinātas loka izlādes laikā [99, 100].

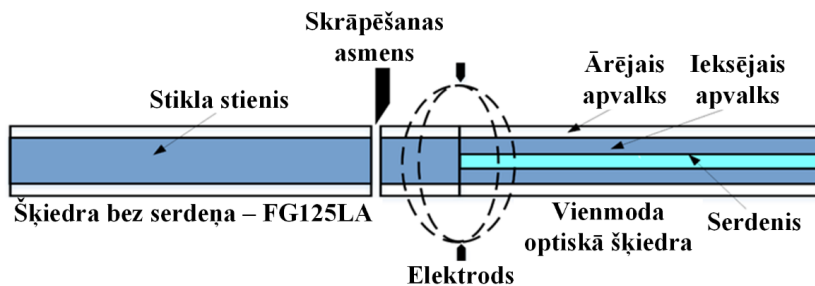
No sākuma tika izmērīti sistēmas raksturīgie, jeb references ienestie zudumi, ko rada savienotāji un pašas šķiedras. Pēc tam šķiedru savienojuma aukla tiek pārgriezta uz pusēm un tiek izmērīti arī iegūtie brīvās telpas zudumi no cieši savienotām SMF (ITU-T G.652) šķiedrām, kas tika izmantots kā atskaites punkts, lai noteiktu izgatavoto lecu šķiedru ienestos zudumus. Mērījumu eksperimentāla shēma tiek attēlota **5.1. att.**



5.1. att. Eksperimentālā shēma raksturīgajā sistēmā iestarpinājumu zudumu mērīšanai. CW: nepārtrauktā viļņa garuma lāzera avots; PM: optiskās jaudas mērītājs

Šķiedru gali tiek nostiprināti skavās, kas atrodas uz motorizētajiem pozicionēšanas posmiem. Šos motorizētos pozicionēšanas pakāpienus var pārvietot "x", "y" un "z" virzienā, un tajos ir soļu motori plašākai šķiedru izlīdzināšanai un pjezo motori smalkākai regulēšanai, lai sasniegtu vislabāko savienojuma pozīciju. Mikroskopi ir novietoti virs abiem šķiedru galiem un to sānos, lai uzraudzītu to izlīdzināšanu.

Izkliedētās šķiedras izgatavošanu veic, izmantojot šādus posmus. Kā redzams **5.2. att.**, vienu no SMF šķiedras galiem ievieto saplūšanas sadalītājā kopā ar nošķelto bezserdeņa šķiedras galu.

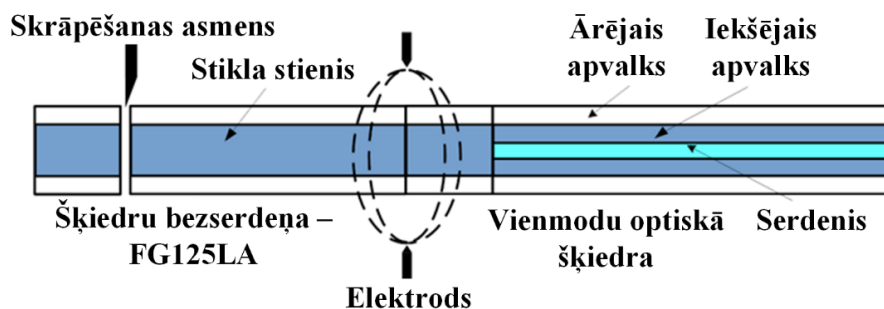


5.2. att. SMF šķiedras un bezserdeņa šķiedras savienošanas process

Pēc tam abas SMF un bezserdeņa šķiedras tiek sakausētas, izmantojot Fujikura (FSM-P100+) metināšanas iekārtu, izmantojot automātisko loka ciklu, kas tās uzkaršē ar elektriskā loka palīdzību un kontrolētā ātrumā savieno šķiedras. Sakausēšanas savienošanas process var aizņemt tikai dažas sekundes, kamēr šķiedru gali tiek uzkaršēti līdz 2000 °C un savienoti kopā [101].

Pēc savienošanas šķiedra bez serdes tika nošķelta, lai iegūtu vajadzīgo garumu, kas šajā gadījumā ir 2, 3 un 4 mm no savienojuma punkta (sk. **5.3. att.**).

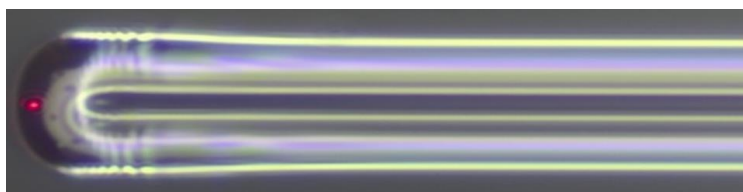
Šie garumi tika izvēlēti tāpēc, ka tos var viegli un precīzi sagriezt, izmantojot pieejamo ierīci, un tas palīdzēs atrast pamatu optimālākajiem rezultātiem, jo bezserdeņa šķiedras garums potenciāli var ietekmēt rezultātu.



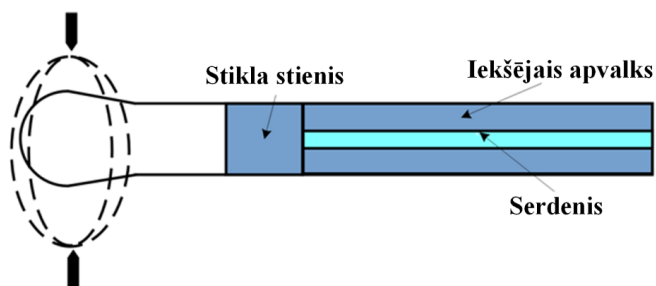
5.3. att. Savienota bezserdeņa šķiedra, kas nogriezta noteiktā attālumā

Tālāk šo hibrīda šķiedras daļu atkārtoti ievieto savienotājierīcē, un tā tiek speciāli iestatīta, lai izgatavotu lēcas ar vēlamajiem izmēriem. Šajā eksperimentā lēcu diametrs tiek mainīts no 130 μm līdz 165 μm katram bezserdeņa šķiedras garumam ar 5 μm soli (8 paraugi katram bezserdeņa šķiedras garumam).

Šāda diapazona iemesls ir tas, ka šajā gadījumā savienošanas iekārta neizveido funkcionējošu lēcu zem 130 μm , bet virs 165 μm iznākums vairāk piemīt mikrosfēru nekā lēcu šķiedrai. Pēc procesa pabeigšanas (sk. **5.4. att.**) paraugs tiek ievietots testēšanas iekārtā [102]



(a)



(b)

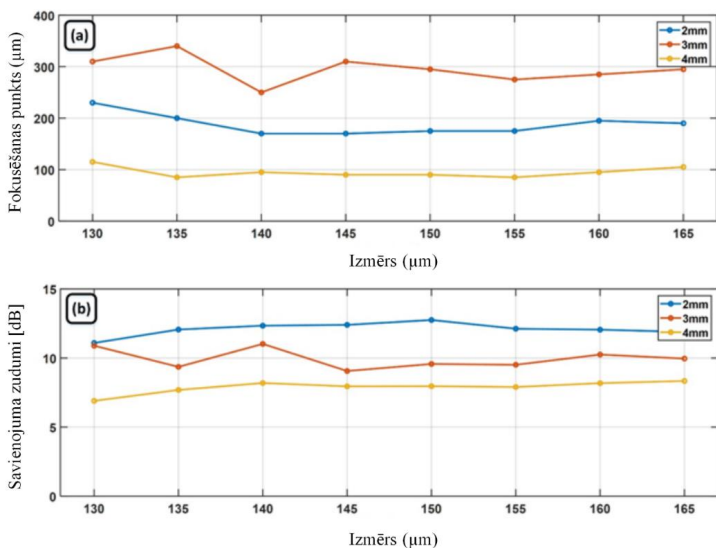
5.4. att. Izgatavota lēca šķiedra - (a) no mikroskopa, (b) zīmēts modelis

Pēc tam izkliedēto šķiedras gabalu novieto uz pozicionēšanas posma pretī nošķeltajam SMF šķiedras galam. Šeit, izmantojot soļu motorus, abus izlīdzina tā, lai z un y ass sakristu un nebūtu redzams nobīdes leņķis.

Pēc tam fokusa punktu iegūst, pārvietojot lēcu pa x asi, vienlaikus uzraugot novērotos iestarpinājuma zudumus. Šajā gadījumā pēkšņs zudumu vērtības pieaugums pretstatā pakāpeniskai izmaiņai var potenciāli norādīt uz fokusa punktu tieši pirms vai aiz dotā x marķiera. Pēc tam zemāko zudumu vērtību sasniedz, nedaudz regulējot pjezoregulatoru pa visām asīm, tādējādi skenējot uztverto fokusa punkta apgabalu.

5.2. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums atkarībā no lēcas diametra un bezserdeņa šķiedru garumiem

Katra parauga savienojuma zudumi un fokusa punkts ir attēloti **5.5. (a)** attēlā, savukārt savienojuma zudumi atkarībā no katras lēcas diametra dažādiem bezserdeņa šķiedru garumiem ir grafiski attēloti **5.5. (b)** att. No grafika skaidri redzams, ka, palielinot bezserdeņa šķiedras gabala garumu, savienojuma zudumi un fokusa attālums samazinās, jo samazinās punkta lielums.



5.5. att. Izmērīts a) lēcas fokusa punkts un bezserdeņa šķiedras garums attiecībā pret lēcas izmēru un b) lēcas kopējie zudumi un bezserdeņa šķiedras garums attiecībā pret lēcas izmēru

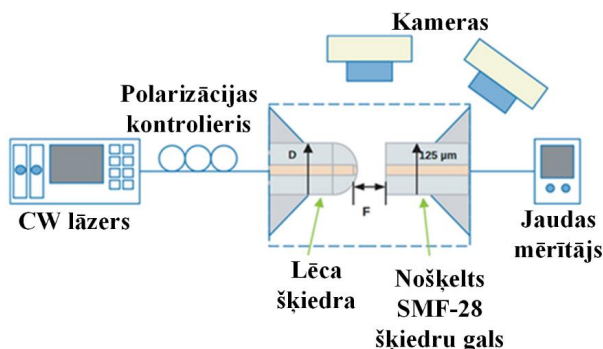
Šķiedras 2 mm un 4 mm paraugiem (pēc 130 μm diametra) ir līdzīga zudumu rādītāju tendence, ņemot vērā vērā, ka $\pm 0,3$ dB ir reāli pieļaujama kļūda. Tāpēc šos rezultātus var uztvert kā konstantu taisni, kā arī 3 mm paraugi ir izņēmums no vispārējās tendences.

Iegūtiem datiem bija lielāka nobīde, un tā izlīdzinājās tikai virzienā uz lielākiem objektīvu izmēriem. Eksperimentālajā fāzē dati neatbilda gaidām, tāpēc eksperimenti tika atkārtoti. Pēc papildu eksperimentu veikšanas parādījās tas pats modelis. Vienīgais saprātīgais izskaidrojums varētu būt tāds, ka sistēmai ir noteiktas preferences starp bezserdeņa šķiedras garumu un lēcas izmēru. Gadījumā, ja izvēlētais bezserdeņa šķiedras garums ir pārāk mazs, savienošanas procesa laikā daļa SMF šķiedras saplūst lēcā un beigās nav pamanāms fokusa punkts. Optiskajos sakaros lēca šķiedra var arī palīdzēt efektīvi savienot gaismu optiskajā šķiedrā, kas var uzlabot sistēmas kopējo efektivitāti.

5.3. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums pie viļņa garuma 1550 nm

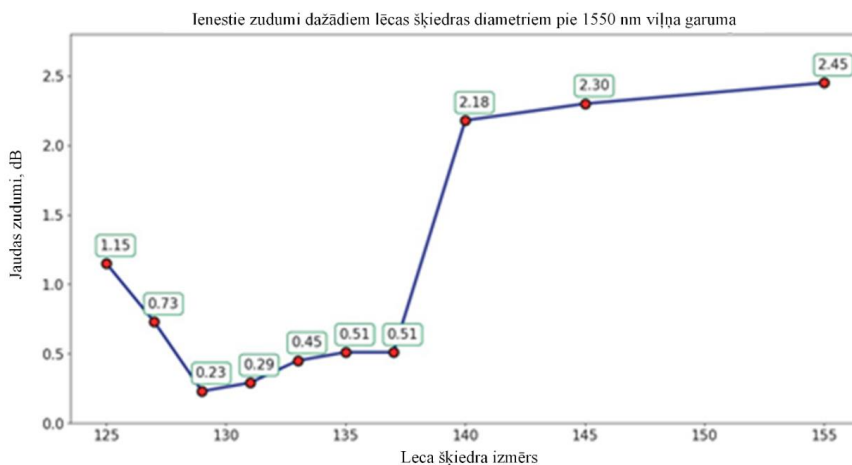
Pirmais solis lēcu šķiedras ražošanas procesā ir testēšanas iekārtas kopējo zudumu mērīšana. Katram šeit izmantotajam šķiedras gabalam un savienotajam ir raksturīgs zuduma rādītājs. Tāpēc sākumā, lai noteiktu bāzes references vērtību, tiek izmantots negriezts šķiedras savienojuma kabelis. Savienojuma šķiedras vads tika sagriezts uz pusēm, ņemot vērā sistēmas jaudas zudumus. Tas dod mums brīvās telpas zuduma skaitli, kur SMF (ITU-T G.652) šķiedras

divi gali ir cieši savienoti attiecībā pret to serdes profiliem. Ideālā gadījumā tas pievieno tikai papildu 0,5 līdz 1 dB zudumu references mērījuma skaitlim un pārraides jaudas ziņā tam jābūt vienādam vai lielākam nekā labākajiem lēcu šķiedru paraugiem. Izmantojama testēšanas shēma attēlota X. att. Lai izlīdzinātu abus šķiedras galus un izveidotu lēcu šķiedru standarta šķiedras savienojumam, tiek izmantoti divi Thorlabs motorizētie pozicionēšanas posmi. Uz šiem posmiem atrodas divas šķiedras skavas, kas stingri tur paraugus vietā, lai nodrošinātu optimālu mērījumu stabilitāti. Skavas var pārvietot X, Y un Z virzienā, izmantojot soļdzinējus plašākai izlīdzināšanai vai pjezo motorus precīzai regulēšanai un absolūti labākās savienojuma pozīcijas atrašanai. Divi mikroskopi ir novietoti tieši virs un sānos, lai nodrošinātu optimālu redzamību un uzraudzību. Pārraides šķiedras gals (tiešais lāzera izvades elements) tika ievietots vienā galā kausēšanas metināšanas iekārtā. Eksperimentu laikā tika izmantots metināšanas iekārta Fujikura modelis FSM-100P+. Atšķirībā no iepriekšējā aprakstīta pētījumā [103] tika nolemts atteikties no papildu bezserdeņa šķiedru savienošanas. Tas tika pamatots ar to, ka maziem lēcas šķiedras diametriem joprojām būs neskarts, tādējādi neradot papildu izkliedi, kā arī izslēgtu divu veidu šķiedru saplūšanas punktu. Eksperimentālā izmantota shēma tiek attēlota 5.6. attēla.



5.6. att. Eksperimentālā shēma pārraides testēšanai starp nošķelto SMF šķiedru un sagatavoto lēcu šķiedru. Šeit CW apzīmē nepārtraukta viļņa garuma lāzera avotu.

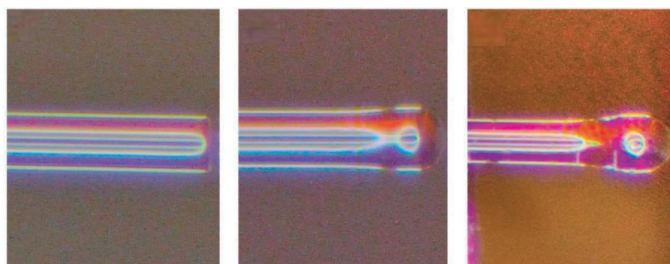
No 5.7. att. redzamajiem rezultātiem var secināt, ka savienojuma zudumi nav lineāri saistīti ar lēcu šķiedras diametru. Tendence sākas ar negatīvu slīpumu, un labākie rezultāti faktiski tika novēroti pie aptuveni 129 μm lēcas izmērs. Tālāk vērojams pakāpenisks un straujš pieaugums, kas beigās izlīdzinās. Šādus rezultātus varētu izskaidrot šādi: ļoti mazu izmēru gadījumā šķiedras gals nevar izveidot pietiekami labu lēcas formu, jo apkārt var nebūt pietiekami daudz materiāla, lai veidotu formu. Varētu būt arī tā, ka loka izlādes jauda nav pietiekama un to nevar palielināt, jo tas vienkārši veido lielāku lēcu.



5.7. att. Savienojuma zudumi noteiktam lēcu šķiedras izmēram pie 1550 nm viļņa garuma

Palielinoties izmēram, lēcas šķiedras problēmas cēlonis varētu būt saistīts ar šķiedras serdes nevienmērīgu kausēšanu un tai sekojošo deformāciju. Laboratorijā izgatavotas lēcas šķiedras princips balstās uz to, ka gaisma daļēji izkļiedējas no serdes daļas gala un pēc tam tika fokusēta metināšanas iekārta lēcas formas dēļ. Tomēr, lēcas izmērs pārāk izmainās, rezultāti kļūst ievērojami sliktāki. Šis sliekšnis iestājas pie aptuveni 140 μm lēcas izmēra, kur **5.8. att.** (mikroskopa attēls) redzamas izkropļotās serdes attīstības fāzes.

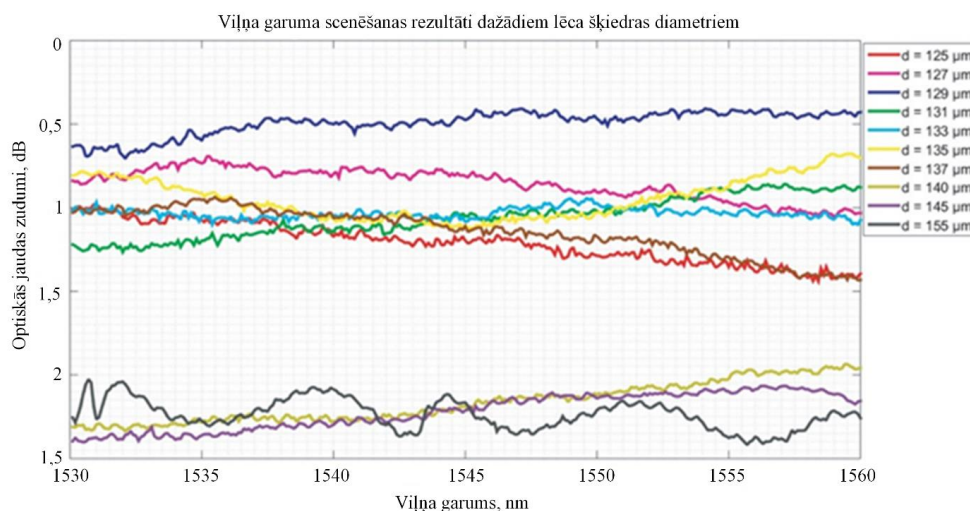
Jāatzīmē, ka testēšanas posmā lēcas izmērs no 125-137 μm diametrs tika testēts plašāk nekā no 140-155 μm diametrs, kas nebija prioritāte, jo mazāk lēcas diametrs deva labākus rezultātus [104]. Tāpēc pakāpeniskajam pieaugumam diagrammas beigās varētu būt nejaušs raksturs, un iepriekš minēto iemeslu dēļ tam vajadzētu būt stāvākam.



5.8. att. Pakāpeniska lēcas šķiedras diametra palielināšanās un tai sekojoša serdes deformācija: (a) nošķelts šķiedras gals ar 125 μm diametru (savienots ar mazu jaudu, kas neveido lēcas formu tikai šķiedras serdes daļā), (b) izgatavota lēca šķiedra ar 131 μm diametru, (c) izgatavota lēca šķiedra ar 155 μm diametru.

Eksperimenta noslēdzošajā daļā tika izpētīti un novērtēti zudumu izmaiņas rādītāji lēca šķiedru sistēmā, ja tie tiek pakļauti viļņa garuma svārstībām. Tas ir potenciāli svarīgs faktors, lai noteiktu to lietderību optisko mikroshēmu testēšanā. Optisko mikroshēmu viļņvadiem mēdz būt atšķirīgas reakcijas uz dažādām optiskām frekvencēm, un šī informācija ir būtiska esošo konstrukciju darbībai, kā arī nākotnes paraugiem. Tas nozīmē, ka, lai izslēgtu šo faktoru optisko lēcu šķiedru testēšanā, ir nepieciešama zināma konsekventa lēca šķiedras reakcija.

5.9. attēlā var novērot, ka arī labākajiem paraugiem (127-135 μm) ir tendence būt ar vairāk vai mazāk nemainīgām reakcijām uz lāzera frekvences izmaiņām. Nelielas novirzes var rasties no nelielām šķiedras stāvokļa izmaiņām un telpas un šķiedras temperatūras svārstībām.



5.9. att. Lēca šķiedras reakcija uz lāzera frekvences izmaiņām (lāzera scenēšana optiskajā C joslā)

Teorētiski pat liela izmēra lēca šķiedras uzrāda tikai 0,5 dB optiskās jaudas novirzi, kas ir parasti pieļaujamās kļūdas robežās. Tomēr tendences līnija ir vairāk vai mazāk lineāra, kas neliecina par nejaušām sistēmas parametru izmaiņām. Turklāt mūsdienu optiskās ierīces ir daudz precīzākas un jutīgākas pret lāzera jaudas izmaiņām. Tāpēc šo tendenci nevar ignorēt, un to var uzskatīt par iemeslu, lai mērījumos neiekļautu lielu lēcas izmēru.

KOPSAVILKUMS PAR TREŠO TĒZI

Veicot eksperimentālus eksperimentus, tika konstatētas, ka demonstrētās pašu izgatavotās lēcu šķiedras var aizpildīt šo lomu, ka vienlaikus saglabājot pieņemamus veiktspējas rādītājus. Pieņemot, ka ražošanas process ir izstrādāts, šo paraugu izgatavošanas laiks ir līdz pusstundai.

Frekvences nobīdes reakcija ir konsekventa un uzticama labākajām lēcu šķiedrām, kas varētu būt svarīgākais faktors, neskatot absolūtos zudumu rādītājus tikai vienam noteiktam viļņa garumam. Tāpēc var apgalvot, ka šim nolūkam lēcu šķiedras izgatavošana no standarta SMF-28 šķiedras gabala var dot diezgan apmierinošus rezultātus, jo šīm maza diametra lēcu šķiedrām ir zemi zudumu rādītāji, optimāla fokusēšanas spēja un laba reakcija uz lāzera frekvences izmaiņām, kas padara tās par labu izvēli zemākas precizitātes optisko ierīču testēšanas vajadzībām. Oriģinālas publikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – promocijas darba. **8.** Pielikumā.

SECINĀJUMI

1. EYDFA ar apvalka pumpēšanu darbību raksturo, izmantojot izstrādāto simulācijas sistēmu, kas balstīta uz mērījumu datiem. Analizējot pastiprinātāja pastiprinājumu, trokšņa koeficientu un jaudas zudumu, tika novērots tā piemērotību darbībai metro piekļuves optiskajos transporta tīklos, kur parasti tiek izmantotas DWDM sakaru sistēmas tehnoloģijas. Pirmkārt, eksperimentāli tika raksturots dubultā apvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ kopīgi leģēto šķiedru, kas tika izmantota kā pastiprinājuma vidi izmantotajam pastiprinātāja prototipam, lai izstrādātu un analizētu eksperimentālo EYDF prototipu. Tālāk tika testēts testējam dažādas EYDFA konfigurācijas dažādos darbības apstākļos (ieskaitot dažāda garuma leģētas šķiedras, pumpēšana signāla izplatīšanās virzienus, signāla ieejas jaudu utt.), lai atklātu parametru iestatījumus, kas nodrošina labākās pastiprināšanas īpašības, proti, augstu un vienmērīgu pastiprinājumu un zemu trokšņa koeficientu. Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, tika secināts, ka pastiprinātāja konfigurācijai ar 3 W pumpēšanas gaismas avotu pie 975 nm viļņa garuma WDM lietojumiem ir nepieciešams 7 m garš EYDF (ar iegūtajiem fizikālajiem parametriem) un tieši vērsto pumpēšanas virzienu. Ņemot vērā zemu ieejas signāla jaudu (-20 dBm/ uz kanālu), EYDFA var izmantot līdz 40 DWDM kanālu pastiprināšanai C joslā, nodrošinot maksimālo izejas jaudu +22 dBm, 19,7-28,3 dB pastiprinājumu, 3,7-4,2 dB trokšņa koeficientu un jaudas samazinājumu (attiecībā pret sistēmu bez pastiprinājuma) zem 0,1 dB pie BER līmeņa 10^{-9} .

2. Tika izstrādāt apvalka pumpēšanas EYDFA pastiprinātāja prototips, izmantojot skaitliskās simulācijas un eksperimentālo izveidoto modeli. Tika noteikts EYDFA konfigurāciju (kopīgi leģēta šķiedras garums, pumpēšanas jauda, ieejas signāla jauda), kas piemērota signāla pastiprināšanai daudzkanālu optiskās šķiedras pārraides sistēmā ar blīvu viļņu garuma sadalījumu C joslā. EYDFA tika izmantots komerciālu dubultapvalka EYDF šķiedru kā aktīvo pastiprināšanas vidi. Tāpēc vispirms eksperimentāli tika noteikts EYDF raksturlielumus (konkrēti, Er^{3+} un Yb^{3+} absorbcijas un emisijas šķērsgriezumus un pārklāšanās koeficientus). Tad šie dati tika ievadīti simulācijas modelī, lai noteiktu dažus sākotnējos EYDFA iestatījumus, piemēram, EYDFA garumu un pumpēšanas jaudu, kas nepieciešama, lai nodrošinātu vēlamo pastiprinājumu, pirms pārejas uz laboratorijas parametru konfigurācijām. Visbeidzot, tika izmantots izstrādāts prototips, lai pētītu EYDFA absolūto pastiprinājumu un pastiprinājuma vienveidību dažādos apstākļos, izmantojot 48 kanālu DWDM sistēmu ar -20 dBm/ch. ieejas jaudu. Iegūtie rezultāti liecina, ka EYDFA pastiprinātāja prototips, kas sastāv

no 5 m EYDF šķiedras garuma, kur optiskais pumpēšanas gaismas avots, kas tika izmantota daudzmodu gaismas diode ar 2 W izejas jaudu, nodrošina praktisku pastiprinājumu līmenī viļņu garuma diapazona 1534-1565 nm. Šajā viļņu garuma diapazonā EYDFA nodrošina >21 dB pastiprinājumu uz kanālu ar 12 dB pastiprinājuma koeficientu, pastiprinot 48 kanālus ar 100 GHz attālumu starp kanāliem.

3. Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka BER sliekšnis 1×10^{-9} tika sasniegts pie 80 mW pumpēšanas jaudas pie tieši vērētās pumpēšanas izplatīšanas ($\lambda = 980$ nm) un pie 130 mW pumpēšanas jaudas pie pretēji vērētās pumpēšanas izplatīšanas ($\lambda = 1480$ nm) 10 Gbit/s NRZ modulētam saņemtajam sliktākajam uz λ darbinātajam signālam.

1. Salīdzinot visu kanālu OSNR vērtības pēc pastiprināšanas, tika konstatēts, ka OSNR sistēmā ar RA-FOPA ir vidēji par 0,8 dB lielāks nekā sistēmā ar vienu pumpēšanas FOPA. Šādu rezultātu var izskaidrot šādi. FWM process, ko FOPA izmanto signāla pastiprināšanai, ir ļoti atkarīgs no mijiedarbojošos spektrālo komponentu (pumpējošo un signāla) fāžu nesakritības. No vienas puses, tālāk signāls un parametriskais pastiprinātāja pumpēšana kopīgi izplatās HNLF, jo lielāka ir šī uzkrātā fāžu nesakritība, jo mazāka ir FWM efektivitāte. No otras puses, FWM efektivitāte pieaug kopā ar mijiedarbojošos spektrālo komponentu jaudu. Tas attiecas ne tikai uz pumpējošo-sigņāla mijiedarbību (pastiprināšana), bet arī uz kanāla-kanāla mijiedarbību (CC-FWM). Tāpēc, ja parametriskajam pastiprinātāja pumpēšanai ir papildu barošanas avots visā pastiprināšanas procesā, galvenā pastiprinājuma daļa tiek radīta tālāk HNLF, kur CC-FWM un parametriskās pastiprināšanas efektivitāte ir zemāka nekā pastiprināšanas vides sākumā. Atšķirība CC-FWM radīto starpkanālu pārklāšanās radija 0,7 dB jaudas samazinājumu sistēmā ar standarta viena pumpēšanas avota FOPA salīdzinājumā ar sistēmu ar RA-FOPA risinājumu, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

5. Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka 512-TR-PPM ir darbīgs modulācijas veids tālsatiksmes sakariem, kur energoefektivitāte ir ļoti svarīgs faktors. TR-PPM galvenā priekšrocība ir tās stabilitāte, ņemot vērā katrā kadrā iekļautos atskaites impulsus. Iegūtie rezultāti pierāda, ka ir iespējams izmantot programmatūru, lai labotu nelielas neprecizitātes signāla ģenerēšanā, ko galvenokārt pieļauj noteikšanas metode, t. i., notikumu taimeris. Notikumu taimera izmantošana PPM signāla atklāšanai sniedz daudzas priekšrocības, piemēram, iespēju analizēt neapstrādātus datus (laika zīmes) un piemērot ciparu signāla apstrādi korekcijai uztvērējā. Izmantojot PPM moduli uztvērēja

daļā, tika sasniegts paplašināt saņemtos 512-TR-PPM impulsus līdz 978 ps, nodrošinot stabilu notikuma taimera darbību.

6. Rezultāti liecina, ka pozīcijas platums būtiski ietekmē PPM signāla BER. Galvenais šķērslis, kas traucē sasniegt zemu BER pie šaurākiem laika intervāliem, ir džitteris, kas ļauj sasniegt lielāku datu pārraides ātrumu notikumu taimera ieejā. Neprecīzs PPM modulators var ievadīt džitteri viļņu formā, izmantojot PPG, kas nav būtiski nozīmīgs džittera cēlonis. Daudz lielāku ietekmi, iespējams, rada PPM uztvērēju analogā priekšējā daļa, kas sastāv no PEM, kurā ietilpst RF pastiprinātājs un novirzes elementi.

7. Nobeigumā, lēcu šķiedru paraugi tika izgatavoti no bezserdeņa šķiedras, izmantojot komerciāla loka izlādi metināšanas iekārtu. Gaismas stars vairāk diverģē, savienojot garāku bezserdeņa šķiedras gabalu ar SMF. Kombinējot ar izgatavoto lēcu fokusa īpašībām, tas nodrošina stingrāku fokusu, kā rezultātā samazinās ienestie zudumi savienojuma vietā. Lēcu šķiedras ar augstu savienojuma zudumu var izmantot dažādās lietojumprogrammās, kurās nepieciešama precīza gaismas fokusa un kontroles. Neskatoties uz lielākiem savienojuma zudumiem, šie pielietojumi ietver biomedicīnisko attēlveidošanu vai FBG sensorus, kur lēcu šķiedras augstie savienojuma zudumi var palīdzēt samazināt nevēlamus atspoguļojumus un uzlabot signāla trokšņa attiecību. Kopumā lēcu šķiedras ar augstiem savienojuma ienestiem zudumiem var būt noderīgas mikroshēmu pielietojumos, kas prasa precīzu gaismas savienojuma kontroli, augstu signāla trokšņa attiecību un zemu signāla atstarojumus.

IZMANTOTIE LITERATŪRAS ĀVOTI

1. Lipatov D.S., Lobanov A.S., Guryanov A.N., Umnikov A.A., Abramov A.N., Khudyakov M.M., Likhachev M.E., Morozov O.G. “Fabrication and Characterization of Er/Yb Co-Doped Fluorophosphosilicate Glass Core Optical Fibers”. *Fibers* **2021**, 9, 15. <https://doi.org/10.3390/fib9030015>.
2. “Cisco visual networking index — Forecast and methodology 2017–2022, cisco systems,” WhitePaper, No. 1, 2018.
3. Routray S. K., A. Javali, R. Nyamangoudar, and L. Sharma, “Latching on to Keck’s Law: Maintaining the high speed trends in optical communication,” 4th Int. Conf. Advanced Com- puting and Communication Systems (ICACCS 2017), 1–5, Coimbatore, 2017, [doi: 10.1109/ICACCS.2017.8014637](https://doi.org/10.1109/ICACCS.2017.8014637).
4. He L, Chen Y, Yin X, Gu Z, Liu S, Li W, Xing Y, Chu Y, Dai N, Li J. “High-efficiency cladding-pumped Er/Yb co-doped alumino-phosphosilicate fiber for an extended L-band amplification”. *Opt Lett.* 2024 Jan 1;49(1):61-64. [doi: 10.1364/OL.509954](https://doi.org/10.1364/OL.509954). [PMID: 38134152](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38134152/).
5. Putrina J., Olonkins S., and Bobrovs V. “Investigation of in-line EDFA performance dependence on channel spacing in WDM transmission systems” 2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), 17–21, Riga, 2016, [doi: 10.1109/RTUWO.2016.7821848](https://doi.org/10.1109/RTUWO.2016.7821848).
6. Lipatov D., Egorova O., Rybaltovsky A., Abramov A.; Lobanov A.; Umnikov A., Yashkov, M.; Semjonov, S. “Highly Er/Yb-Co-Doped Photosensitive Core Fiber for the Development of Single-Frequency Telecom Lasers”. *Photonics* **2023**, 10, 796. <https://doi.org/10.3390/photonics10070796>.
7. Yu W., Yan P., Xiao Q., Qi T., Li D., Gong M. “Power scalability of a continuous-wave high-power Er-Yb co-doped fiber amplifier pumped by Yb-doped fiber lasers”. *Appl Opt.* 2021 Mar 1;60(7):2046-2055. [doi: 10.1364/AO.416515](https://doi.org/10.1364/AO.416515). [PMID: 33690297](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33690297/).
8. Féron P., Rasoloniaina A., Huet V., Le Cren E., Trebaol S., Nunzi Conti G., Serier-Brault H., Mortier M., Dumeige Y. “High gain selective amplification in whispering gallery mode resonators: analysis by cavity ring down method”, *Proceedings Volume 8600, Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XV; 8600G* (2013) <https://doi.org/10.1117/12.2002821>.
9. Tough Euan John, “Integrated Optical Frequency Comb Generation For Photonic Terahertz Synthesis”, 2 February, 2024.

10. Zhang Hao., Chang Bing., Li Zhaoyu., Liang Yu-Pei., Qin Chen-Ye., Wang Chun., Xia Han-Ding, Tan Teng., Yao Bai-Cheng. “Coherent optical frequency combs: From principles to applications”, *Journal of Electronic Science and Technology*, Volume 20, Issue 2, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jnlest.2022.100157>.
11. Shu Haowen., Shen Bitao., Chang Huajin., Han Junhao., Xiao Jiong., Wang Xingjun. "Microcomb technology: from principles to applications," *Photon. Insights* 3, R09 (2024). [doi: 10.3788/PI.2024.R09](https://doi.org/10.3788/PI.2024.R09).
12. Gao D., Li T., Xie Z., He Y., Han X., Jia S., Wang W., and Xie X. (2022) “Performance evaluation of the high-speed deep-space optical communication system assisted by preamplified thresholded pulse-position modulation”. *Front. Phys.* 10:987994. [doi: 10.3389/fphy.2022.987994](https://doi.org/10.3389/fphy.2022.987994).
13. Hyun Y., Park H., Han S. "Enhanced Pulse-Position Optical Modulation based on Optical Delay Interferometer for Satellite Optical Communication" in 2024 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2024), paper Th1K_5.
14. Cisco Systems Inc. DWDM Networking Primer. ONS 15454 MSTP. White paper. – October 2003. – 87 p.
15. Gumaste A., Antony T. “DWDM Network Designs and Engineering Solutions”. – USA: Cisco Press, 2002. – 368 p. ISBN: 978-1-58705-074-9.
16. Zyskind, J., Srivastava, A. *Optically. Amplified WDM Networks*. First edition. – USA: Academic Press, 2011. – 502 p. ISBN: 978-0-12-084590-3.
17. Hecht J. *Understanding Fiber Optics*. Fourth Edition. – NJ: Prentice Hall, 2002. – 780 p. ISBN: 978-0-1302-7828-9.
18. Ramaswami R., Sivarajan K., Sasaki G. *Optical Networks: A Practical Perspective*. Third Edition. – USA: Morgan Kaufmann, 2009. – 928 p. ISBN: 978-1-5586-0-4452.
19. Yoshikane N., Tsuritani T. “Recent progress in space-division multiplexing optical network technology”. In *Proceedings of the 2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)*, Barcelona, Spain, 18–21 May 2020; pp. 1–4. [doi: 10.23919/ONDM48393.2020.9133031](https://doi.org/10.23919/ONDM48393.2020.9133031).
20. Takeshima K., Tsuritani T., Igarashi K., Morita I., Tsuchida Y., Maeda K., Saito T., Watanabe K., Sasa T., Imamura K., et al. “WDM/SDM transmission of 76 128-Gbit/s Nyquist-pulse-shaped DP-QPSK Signals over 4,200 km using cladding pumped 7-Core

- EDFA". 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, China, 2015, pp. 1-3, [doi: 10.1109/OECC.2015.7340111](https://doi.org/10.1109/OECC.2015.7340111).
21. Dutton H.J.R. Understanding Optical Communications. – NJ: Prentice Hall, 1998. – 760 p. ISBN: 978-0-1302-0-1416.
 22. Chomycz B. Planning Fiber Optics Networks. – USA: McGraw Hill Professional, 2009. – 320 p. ISBN: 978-0-07-164269-9.
 23. Matsumoto, K., Seno, K., Mizuno T., Yanagimachi S., Gaborv E.L.T.D., Mivamoto Y. “Experimental demonstration of a SDM node with low power consumption MC-EDFA and SPOC-based WSS arrays”. In Proceedings of the 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, 7–11 July 2019; pp. 1–3. [doi: 10.23919/PS.2019.8817883](https://doi.org/10.23919/PS.2019.8817883).
 24. Thyagarajan K., Ghatak A. Fiber Optic Essentials. NJ: John Wiley & Sons, 2007. – 259 p. ISBN: 978-0-470-09742-7.
 25. Thouras J., Pincemin E., Amar D., Gravey P., Morvan M., Moulinard, M.-L. “Introduction of 12 cores optical amplifiers in optical transport network” Performance study and economic impact. In Proceedings of the 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1–5 July 2018; pp. 1–4. [doi: 10.1109/ICTON.2018.8473674](https://doi.org/10.1109/ICTON.2018.8473674).
 26. Jain S., Castro C., Jung, Y., Hayes, J., Sandoghchi, R., Mizuno T., Sasaki Y., Amma Y., Miyamoto Y., Bohn M., et al. “32-core erbium/ytterbium-doped multicore fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system”. Opt. Express 2017, 25, 32887–32896, [doi:10.5258/SOTON/D0246](https://doi.org/10.5258/SOTON/D0246).
 27. Torounidis T., Andrekson P. A., Olsson B.-E., “Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain”. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No. 10, 11941196, May 2006, [doi: 10.1109/LPT.2006.874714](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.874714).
 28. Jamshidifar, M., A. Vedadi, and M. E. Marhic, Continuous-wave one pump fiber optical parametric amplifier with 270 nm gain bandwidth, Proc. ECOC, paper 1.1.4, Sep. 12, 2009, [doi: 10.1109/LPT.2006.874714](https://doi.org/10.1109/LPT.2006.874714).
 29. Jamshidifar M., Vedadi A., Marhic M. E. in: Tech. Digest of 37th ECOC 2009, paper Mo1.1.4, Vienna, 2009.

30. Karasek M., Honzatko P., Vojtech J., Radil J., “Multi-wavelength conversion at 10Gb/s and 40Gb/s based on 2 pumps FOPA”. 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, 14, Stockholm, 2011, doi: [10.1109/ICTON.2011.5970951](https://doi.org/10.1109/ICTON.2011.5970951).
31. Gnauck A. H., Jopson R. M., “Dispersion compensation for optical fiber systems, Optical Fiber Telecommunications”. IIIA, 162195, I. P. Kaminow and T. L. Koch, Eds., Academic, San Diego, CA, 1997, doi: [10.1109/35.387557](https://doi.org/10.1109/35.387557).
32. Wang J., Ji Hua., Hu Hao., Mulvad H-C., Galili M., Palushani E., Jeppesen P., Yu J., Oxenlowe L.K. “All-optical 2R regeneration of a 160-Gbit/s RZOOK serial data signal using a FOPA” IEEE Photonics Conference 2012, 108-109, Burlingame, CA, 2012, doi: [10.1109/IPCon.2012.6358512](https://doi.org/10.1109/IPCon.2012.6358512).
33. Wang Ju., Yu Jinlong., Luo Jun., Wang W., Han B., Wu Bo., Yang E. “40-Gb/s 2-channel all-optical 3R regeneration using data-pumped fiber parametric amplification based on HNLF”. Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 86-87, Shanghai, 2010, doi: [10.1109/ACP.2010.5682823](https://doi.org/10.1109/ACP.2010.5682823).
34. Marhic M. E. “Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices” 366, Cambridge University Press, University of Wales, Swansea, 2007, doi: [10.1017/CBO9780511600265](https://doi.org/10.1017/CBO9780511600265).
35. Agrawal Govind P. — Nonlinear Fiber Optics, 5th ed., Academic Press, 2013.
36. Ono H.; Takenaga K., Ichii K., Yamada M. “Amplification technology for multi-core fiber transmission”. In Proceedings of the 2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Montreal, QC, Canada, 14–16 July 2014; pp. 146–147, doi: [10.1109/SUM.2014.82](https://doi.org/10.1109/SUM.2014.82).
37. Baker C.C., Burdett A., Friebele E.J., Rhonehouse D.L., Kim W., Sanghera J. “Rare earth co-doping for increased the efficiency of resonantly pumped Er-fiber lasers”. Opt. Mater. Express **2019**, 9, 1041–1048, doi: [10.1364/OME.9.001041](https://doi.org/10.1364/OME.9.001041).
38. Kong E. “Erbium-Doped Fiber Amplifier”. Education Kit Manual, Ver. 2.0. – Hong Kong: Amonics Ltd., 2004. – 29 p.
39. Jeong Y., Yoo S., Codemard Christophe., Nilsson J., Sahu J.K., Payne D.N., Horley R., Turner, P.W., Hickey L.M.B., Harker A.T., Lovelady M. and Piper A. (2007) “Erbium:ytterbium co-doped large-core fiber laser with 297W continuous-wave output power”. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 13 (3), 573-579, doi: [10.1109/JSTQE.2007.897178](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2007.897178).
40. Zhang L., Du Y., Xi Y., Li J., Zhao C. "Gain characteristics of erbium doped fiber amplifier," Proc. SPIE 7157, 2008 International Conference on Optical Instruments and

- Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications, 715714 (2 February 2009), <https://doi.org/10.1117/12.807099>.
41. Lavrinovica I., Porins J. "Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system," 2015 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO), Riga, Latvia, 2015, pp. 34-37, [doi: 10.1109/RTUWO.2015.7365714](https://doi.org/10.1109/RTUWO.2015.7365714).
 42. D'Ingillo R., Castronovo A., Straullu S., Curri V. "Polynomial Modeling of Noise Figure in Erbium-Doped Fiber Amplifiers". *Fibers* 2025, 13, 34. <https://doi.org/10.3390/fib13030034>.
 43. Várallyay Z., Szabó A., Rosales A., Gonzales E., Tobioka H., Headley C. "Accurate modeling of cladding pumped, star-shaped, Yb-doped fiber amplifiers". *Opt. Fiber Technol.* **2015**, 21, 180–186, <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.11.003>.
 44. Jeong Y., Sahu J.K., Payne D.N., Nilsson J. "Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power". *Opt. Express* 2004, 12, 6088–6092, [doi:10.1364/OPEX.12.006088](https://doi.org/10.1364/OPEX.12.006088).
 45. Supe A., Spolitis S., Elsts E., Murnieks R., Dok, G., Senkans U., Matsenko S., Grube J., Bobrovs V. "Recent developments in cladding-pumped doped fiber amplifiers for telecommunications systems". In Proceedings of the 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 19–23 July 2020; pp. 1–6, [doi: 10.1109/ICTON51198.2020.9203436](https://doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203436).
 46. Muendel M. H. "Optimal inner cladding shapes for double-clad fiber lasers" in Proc. Lasers and Electro-Optics Conference (CLEO'96), 1996, pp. 209.
 47. Kouznetsov D., Moloney J., "Efficiency of pump absorption in double-clad fiber amplifiers". Part II: Broken circular symmetry," *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 19, pp. 1259–1263, 2002, [doi:10.1364/JOSAB.18.000743](https://doi.org/10.1364/JOSAB.18.000743).
 48. Morehead J. J., Muendel M. H. "Nearly circular pump guides" *Proc. SPIE*, vol. 7914, p. 79142Y, 2011, <https://doi.org/10.1117/12.877211>.
 49. Lee S.W., Lee S.Y., Pahk H.J. "Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for TFT-LCD 2D critical dimension measurement". *Curr. Opt. Photonics* **2018**, 2, 69–78, [doi:10.3807/COPP.2018.2.1.069](https://doi.org/10.3807/COPP.2018.2.1.069).

50. Huang F., Liu X., Ma Y., Shuai K., Hu L., Chen D. "Origin of near to middle infrared luminescence and energy transfer process of Er³⁺/Yb³⁺co-doped fluorotellurite glasses under different excitations". *Sci Rep* **5**, 8233 (2015). <https://doi.org/10.1038/srep08233>.
51. Sun T., Fu Y., Zhang X., Yan J., Wang F., Zhang D. "Gain enhancement of polymer waveguide amplifier based on NaYF₄: Er³⁺,Yb³⁺ nanocrystals using backward pump scheme". *Opt. Commun.* **488**, 126723 (2021), [doi:10.1016/j.optcom.2020.126723](https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126723).
52. Pathfinder™ X-ray Microanalysis Software. Available online: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/IQLAADGABKFAQOMBJE> (accessed on 20 January 2022).
53. Supe A., Olonkins S., Udalcovs A., Senkans U., Murnieks R., Gegere L., Prigunovs D., Grube J., Elsts E., Spolitis S.; Ozolins, O., Bobrovs V. "Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks". *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1702, <https://doi.org/10.3390/app11041702>.
54. Bai X., Wang M., Yang Y., Liu Z., Jia W. "Experimental and Theoretical Analysis on Pump Spectral Propriety of Single Frequency Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier". *J. Phys. Commun.* **2021**, *5*, 015005, [doi:10.1088/2399-6528/abd8ec](https://doi.org/10.1088/2399-6528/abd8ec).
55. Breuer D., Geilhardt F., Hülsermann R, Kind M., Lange C., Monath T., Weis E. "Opportunities for Next-Generation Optical Access", *IEEE Communications Magazine*, Vol.49, NO.2, February 2011, ppS16-S24, [doi: 10.1109/MCOM.2011.5706309](https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5706309).
56. Wong E. "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies" *Journal of lightwave technology* VOL. 30, NO. 4, February 15, 2012, [doi: 10.1109/JLT.2011.2177960](https://doi.org/10.1109/JLT.2011.2177960).
57. Bouzid B. "Theoretical analysis of erbium doped fiber amplifier," 2011 Saudi International Electronics". *Communications and Photonics Conference (SIECPC)*, Riyadh, Saudi Arabia, 2011, pp. 1-5, [doi: 10.1109/SIECPC.2011.5876989](https://doi.org/10.1109/SIECPC.2011.5876989).
58. Honde V., Mhatre A., Tonde S., Barkul Supriya., Pund P, "Performance Analysis of WDM Network Based on EDFA Amplifier with Different Pumping Techniques", May, 2016, <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v4i4.2037>.
59. Giles C. R., Desurvire E. "Modeling erbium-doped fiber amplifiers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 271-283, Feb. 1991, [doi: 10.1109/50.65886](https://doi.org/10.1109/50.65886).
60. Zhu Wen., Qian Li., Helmy Amr S. "Implementation of three functional devices using Erbium doped Fibers: An Advanced Photonics Lab", 2000, [doi:10.1117/12.2207348](https://doi.org/10.1117/12.2207348).
61. Cobrite DX1 "CoBrite DX1 – Tunable Laser" technical specification, 1-2 pp., 2024.

62. Zhou Z., Liang B., Cao Y., Zhang M. (2022, January). MPPM Spectrum Analysis Based on PPM. In 2022 14th International Conference on Computer Research and Development (ICCRD) (pp. 356-362). IEEE, [doi: 10.1109/ICCRD54409.2022.9730597](https://doi.org/10.1109/ICCRD54409.2022.9730597).
63. Tang W., Wang S., Xu Y., Yu, Z. (2022). "The research process, application, and the future development of pulse-position modulation". Journal of Physics: Conference Series, 2384(1), 012026. [doi:https://doi.org/10.1088/1742-6596/2384/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2384/1/012026).
64. Migla S., Rubuls K., Tihomorskis N., Salgals T., Ozolins O., Bobrovs V., Spolitis S., Aboltins A. "Ultra-Wideband Analog Radio-over-Fiber Communication System Employing Pulse-Position Modulation". Appl. Sci. 2025, 15, 4222. <https://doi.org/10.3390/app15084222>.
65. Eventech Ltd, Event Timer A033-ET / usb. [Online]. Available: <http://eventechsite.com/en/products/event-timer-a033-et/>
66. Migla S., Selis O., Sics P. E., Pudzs M., Zeltins M., Aboltins A. "A Design of UWB Communication Testbed with Event Timer-based PPM Demodulator," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 691-694, [doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037100](https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037100).
67. Weiner A. M., "Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators" Review of Scientific Instruments, vol. 71, no. 5, pp. 1929–1960, may 2000, [doi:10.1063/1.1150614](https://doi.org/10.1063/1.1150614).
68. Chen C.-C., Chu C.-H., "All-digital pulse-expansion-based CMOS digital-to-time converter" Review of Scientific Instruments, vol. 88, no. 2, p. 024704, feb 2017, [doi:10.1063/1.4975099](https://doi.org/10.1063/1.4975099).
69. Mahjoubfar A., Churkin D. V., Barland S., Broderick N., Turitsyn S. K., Jalali B. "Time stretch and its applications" Nature Photonics, vol. 11, no. 6, pp. 341–351, jun 2017, [doi:10.1038/nphoton.2017.76](https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.76).
70. Kalisz J. "Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution," Metrologia, vol. 41, no. 1, pp. 17–32, dec 2003, [doi:10.1088/0026-1394/41/1/004](https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/004).
71. Chandrakasan A. P., Lee F. S., Wentzloff D. D., Sze V., Ginsburg B. P., Mercier P. P., Daly D. C., Blázquez R. "Low-power impulse UWB architectures and circuits" Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 332–352, 2009, [doi: 10.1109/JPROC.2008.2008787](https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008787).
72. Rajesh N., Pavan S., "Programmable analog pulse shaping for ultra-wideband applications" in Proceedings- IEEE International Symposium on Circuits and Systems, vol. 2015-July. IEEE, may 2015, pp. 461–464, [doi: 10.1109/ISCAS.2015.7168670](https://doi.org/10.1109/ISCAS.2015.7168670).

73. Time Tag.Space, “Time Tagging Technology with Picosecond Resolution for Space Applications,” 2020. [Online]. Available: https://www.silicon-alps.at/wp-content/uploads/2021/01/TimeTag_Space_WhitePaper_Nov20208.pdf
74. Nguyen C., Miao M. “Fundamentals of UWB Impulse Systems,” in Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers”. Springer, Cham, 2017, pp. 7–24, [doi:10.1007/978-3-319-53107-6_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53107-6_2).
75. Han J., Nguyen C. “A new ultra-wideband, ultra-short monocycle pulse generator with reduced ringing” pp. 206–208, jun 2002, [doi: 10.1109/LMWC.2002.1009996](https://doi.org/10.1109/LMWC.2002.1009996).
76. Harjani R., Harvey J., Sainati R. “Analog/RF physical layer issues for UWB systems” in Proceedings of the IEEE International Conference on VLSI Design, vol. 17. IEEE Comput. Soc, 2004, pp. 941–948, [doi: 10.1109/ICVD.2004.1261052](https://doi.org/10.1109/ICVD.2004.1261052).
77. Santhoff J., Moore and S. A. “Ultra-wideband communication through twisted-pair wire media” November. 2004.
78. Matin M., “Ultra-Wideband Communications”. Rijeka: Intech Open, July. 2011, [doi: 10.5772/941](https://doi.org/10.5772/941).
79. Ghavami M., Michael L. B., Kohno R. “Ultra-Wideband Signals and Systems in Communication Engineering”. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, may 2006, [doi: 10.1002/9780470060490](https://doi.org/10.1002/9780470060490).
80. Ahmed F., Ali S., Jawaid M. M. “A review of modulation schemes for visible light communication”. IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, Vol. 18, No. 2, 117, 2018, [doi: 10.1109/COMMNET.2019.8742376](https://doi.org/10.1109/COMMNET.2019.8742376).
81. Elganimi, T. Y., “Performance comparison between OOK, PPM and PAM modulation schemes for Free Space Optical (FSO) communication systems”. Analytical study, International Journal of Computer Applications, Vol. 79, No. 11, 2227, 2013, [doi: 10.5120/13786-1838](https://doi.org/10.5120/13786-1838).
82. Li T., H. Zhou., M. Yi. “Gray coded PPM performance with imperfect slot synchronization in optical communication”. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO Technical Digest, 12, [doi: 10.1109/CLEOPR.2009.5292732](https://doi.org/10.1109/CLEOPR.2009.5292732).
83. Elganimi T. Y., “Studying the BER performance, power- and bandwidth-efficiency for FSO communication systems under various modulation schemes”. 2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2013, 16, 2013, [doi: 10.1109/AEECT.2013.6716426](https://doi.org/10.1109/AEECT.2013.6716426).

84. Cimdins, M., S. O. Schmidt, and H. Hellbruck. "Comparison of I/Q- and magnitude-based UWB channel impulse responses for device-free localization". 2021 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2021 Proceedings, 17, 2021.
85. IEEE Instrumentation and Measurement Society, "IEEE Standard for Transitions Pulses and Related Waveforms, IEEE Std 181-2011," IEEE, Standard September, 2011.
86. Mathworks, "Bessel analog filter design- MATLAB besself." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/besself.html?s_tid=mwa_osa_a
87. Keysight Technologies, M8195A 65 GSa/s Arbitrary Waveform Generator M8197A Multi-Channel Synchronization Module, 2020. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/en/pd-2443793pn-M8195A/65-gsa-s-arbitrary-waveform-generator>
88. Solovjova T., Semenako J., Prigunovs D., Ortiz D., Spolitis S., and Aboltins A., "Picosecond pulse expansion using the low-pass filter in event timer-based PPM communication system", Proceedings of 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications, MTTW 2022, 2934, 2022. [doi: 10.1109/MTTW56973.2022.9942566](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942566).
89. Mini-circuits, Low Pass Filter VLFX-1300. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/VLFX-1300.pdf>
90. —, Low Pass Filter VLFX-2500+. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/VLFX-2500+.pdf>
91. Munirathinam R., Aboltins A., Pikulins D., Grizans J. "Chaotic non-coherent pulse position modulation based ultra-wideband communication system". 2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), 52-57, 2021, [doi: 10.1109/MTTW53539.2021.9607075](https://doi.org/10.1109/MTTW53539.2021.9607075).
92. Migla S., Selis O., Sics P. E., Pudzs M., Zeltins M., Aboltins A. "A Design of UWB Communication Testbed with Event Timer-based PPM Demodulator," 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 691-694, [doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037100](https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037100).
93. Piccirillo F., Giaquinto M., Ricciardi A., and Cusano A. "(INVITED) Miniaturized lenses integrated on optical fibers: Towards a new milestone along the lab-on-fiber technology roadmap" Results Opt., 2021, vol. 6, p. 100203. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100203>.

94. Ghenuche, R., Rigneault, H., Wenger J. "Hollow-core photonic crystal fiber probe for remote fluorescence sensing with single molecule sensitivity" *J. Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 27, p. 28379. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028379>.
95. Allen K.W., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Pryamikov A.D., Mojaverian N., Limberopoulos N.I., Astratov V.N. "Photonic jets produced by microspheres integrated with hollow-core fibers for ultraprecise laser surgery" *Proc. 15th Int. Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Cartagena, 2013, p.1. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602908>.
96. Zelgowski, J., Abdurrochman, A., Mermet, F., Pfeiffer, P., Fontaine, J., and Lecler, S., "Photonic jet subwavelength etching using a shaped optical fiber tip". *Opt. Lett.*, 2016, vol. 41, no. 9, p. 2073. <https://doi.org/10.1364/OL.41.002073>.
97. Bouaziz, D., Chabrol, G., Guessoum, A., Demagh, N.E., and Lecler, S., *Photonics*, 2021, vol. 8, no. 9, p. 373. <https://doi.org/10.3390/photonics8090373>.
98. Xiong, Y. and Xu, F. "Multifunctional integration on optical fiber tips". *Adv. Photonics*, 2020, vol. 2, no. 6, p. 064001. <https://doi.org/10.1117/1.AP.2.6.064001>.
99. Guzowski B., Lakomski M., Cywinski M. "Proximity sensors based on ball-lensed optical fibers," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 104, p. 012031, Jan. 2016, [doi: 10.1088/1757-899X/104/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/104/1/012031).
100. Fan K.-C., Hsu H.-Y., Hung P.-Y., Wang W. "Experimental study of fabricating a microball tip on an optical fibre," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, vol. 8, no. 9, pp. 782–787, Sep. 2006, [doi: 10.1088/1464-4258/8/9/012](https://doi.org/10.1088/1464-4258/8/9/012).
101. Ito K., Miyamori M., Sato R., Takayanagi H., Yusa H., Homma, T. (2018). "History and vision of optical fiber fusion splicing technology". *SEI Technical Review*. 51-54.
102. Kim Jae-Beom., Jeon Jaehun., Hwang Kyungmin., Kim Daniel Y., Jeong Ki-Hun. "Objective-lens-free confocal endomicroscope using Lissajous scanning lensed-fiber," *J. Optical Microsystems* 1(3) 034501 (28 May 2021) <https://doi.org/10.1117/1.JOM.1.3.034501>.
103. Sedulis A., Ostrovskis A., Zakis K., Rubuls K., Ortiz D., Prigunovs D., Alnis J., Bobrovs V. "Fabrication of lensed fibers with arc fusion splicer for telecommunication applications," *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 1066–1070, Prague, Czech Republic, Jul. 03–06, 2023, [doi: 10.1109/PIERS59004.2023.10221315](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221315).
104. Ryu S-Y., Choi H-Y., Na J., Choi W-J., Lee B-H. "All-fiber probe for optical coherence

tomography". Proc. SPIE 6847, Coherence Domain Optical Methods and Optical Coherence Tomography in Biomedicine XII, 68472L (18 February 2008), <https://doi.org/10.1117/12.766316>.

PIELIKUMI

RAKSTS-1: Cladding-Pumped ErbiumYtterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks

Supe, A.; Olonkins, S.; Udalcovs, A.; Senkans, U.; Mūrnieks, R.; Gegere, L.; **Prigunovs, D.**; Grube, J.; Elsts, E.; Spolitis, S.; et al. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks. Appl. Sci. 2021, 11, 1702. <https://doi.org/10.3390/app11041702>.

Article

Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks

Andis Supe^{1,*}, Sergejs Olonkins², Aleksejs Udalcovs², Ugis Senkans¹, Rihards Mūrnieks^{1,3}, Lilita Gegere^{1,2}, Dmitrijs Prigunovs^{1,2}, Jurgis Grube⁴, Edgars Elsts⁴, Sandis Spolitis^{1,3}, Oskars Ozolins^{1,5} and Vjaceslavs Bobrovs¹

- ¹ Institute of Telecommunications, Riga Technical University, 1048 Riga, Latvia; Ugis.Senkans@rtu.lv (U.S.); Rihards.Murnieks@rtu.lv (R.M.); Lilita.Gegere@rtu.lv (L.G.); Dmitrijs.Prigunovs@rtu.lv (D.P.); Sandis.Spolitis@rtu.lv (S.S.); Oskars.Ozolins@ri.se (O.O.); Vjaceslavs.Bobrovs@rtu.lv (V.B.)
- ² AFFOC Solutions, 3016 Kalnciems, Latvia; Sergejs.Olonkins@rtu.lv (S.O.); aud@kth.se (A.U.)
- ³ Communication Technologies Research Center, Riga Technical University, 1048 Riga, Latvia
- ⁴ Institute of Solid State Physics, University of Latvia, 1063 Riga, Latvia; jurgis.grube@cfi.lu.lv (J.G.); Edgars.Elsts@cfi.lu.lv (E.E.)
- ⁵ Networks Unit, RISE Research Institutes of Sweden, 164 40 Kista, Sweden
- * Correspondence: Andis.Supe@rtu.lv; Tel.: +371-25685880



Citation: Supe, A.; Olonkins, S.; Udalcovs, A.; Senkans, U.; Mūrnieks, R.; Gegere, L.; Prigunovs, D.; Grube, J.; Elsts, E.; Spolitis, S.; et al. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1702. <https://doi.org/10.3390/app11041702>

Academic Editor: Miroslaw Klinkowski

Received: 15 January 2021
Accepted: 10 February 2021
Published: 14 February 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Space-division multiplexing (SDM) attracts attention to cladding-pumped optical amplifiers, but they suffer from a low pump power conversion efficiency. To address this issue, ytterbium (Yb³⁺) and erbium (Er³⁺) co-doping is considered as an effective approach. However, it changes the gain profile of Er³⁺-doped fiber amplifiers and induces the gain difference between optical wavelengths in the C-band, significantly limiting the effective band of the dense wavelength-division multiplexed (DWDM) system. This paper is devoted to a detailed study of a cladding-pumped Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber amplifier (EYDFA) through numerical simulations aiming to identify a configuration, before assembling a similar EYDFA in our laboratory premises that ensures the desired performance. The simulation model is based on a commercial double cladding EYDF whose parameters are experimentally extracted and fed to the EYDFA setup for the system-level studies. We investigate the wavelength dependence of the amplifier's characteristics (absolute gain, gain uniformity, noise figure) and bit error rate (BER) performance for several DWDM channels and their optical power. The obtained results show that a 7 m long EYDF and co-propagating pump direction is preferable for the EYDFA with a 3 W pump source at 975 nm and with the given gain medium characteristics for WDM applications. For instance, it ensures a gain of 19.7–28.3 dB and a noise figure of 3.7–4.2 dB when amplifying 40 DWDM channels with the input power of –20 dBm per channel. Besides, we study EYDFA gain bandwidth and the maximum output power when operating close to the saturation regime and perform a sensitivity analysis showing how the doped fiber's absorption and emission cross-sections impact the amplification process through energy transfer from Yb³⁺ to Er³⁺. Finally, we quantify the power penalty introduced by the EYDFA; the results show that it is not higher than 0.1 dB when amplifying 40 × 10 Gbps non-return-to-zero on-off keying signals from –20 dBm/channel.

Keywords: bit error rate; cladding-pumped optical amplifier; doped fiber amplifiers; erbium/ytterbium co-doping; optical fiber network; simulation; wavelength division multiplexing

1. Introduction

An immense variety and accessibility of multimedia services, such as Netflix, YouTube, etc., together with optical fiber penetration in rural areas and growing numbers of end users, have caused a tremendous increase in internet traffic that now must be supported by telecom infrastructure [1,2]. This puts pressure on infrastructure providers, including optical network carriers. Therefore, they are looking for cost-efficient solutions able to support

them in the future and even in cases of global emergency. As the COVID-19 pandemic has shown, both telecom infrastructure providers and service providers get entrusted with a role of technological pillars, bonding humanity and supporting our society and business in daily activities such as remote work and distance education. Considering these aspects of growth rates of internet traffic, the versatility of broadband and multimedia services, as well as cost and energy efficiencies, space-division multiplexing (SDM) is considered as one of the biggest breakthroughs in fiber-optic communications able to support the sustainable evolution of telecom networks and services [3–5]. To ensure cost-efficient optical signal amplification in SDM-based fiber-optic transmission systems, cladding-pumped doped fiber amplifiers (DFAs) have attracted increased attention. They are considered as one of the most suitable amplification approaches from the perspective of both capital expenditure (CAPEX) and operational expenditure (OPEX) [6]. Such amplification schemes allow for using high-power uncooled multimode laser diodes as pumping sources, which significantly reduces the overall power consumption. Furthermore, the use of only one pumping source improves the cost-efficiency, helps to reduce the size of a multicore amplifier, and thus saves physical space in a rack when migrating to such an amplifier implementation [2].

Although multicore erbium-doped cladding-pumped fiber amplifiers (MC-EDFAs) are commonly used in SDM networks [2,7,8], they have an extremely low pump conversion efficiency. This is the main drawback of such amplifiers, which arises due to insufficient absorption of the pumping radiation by the gain medium [9]. Therefore, the increase in the output optical power is problematic. The typical output power values for MC-EDFAs are 14–17 dBm [10,11]. To overcome these limits, most of the current high-power optical fiber amplifiers use the gain media with erbium (Er^{3+}) and ytterbium (Yb^{3+}) co-doping. In this case, the amplification happens through two stages. In the first stage, the major part of 975 nm pumping radiation is absorbed by the Yb^{3+} that excites them to a state with higher energy. In the second stage, the excited Yb^{3+} resonantly transfer a portion of energy to Er^{3+} and excites them to a state with higher energy. In such a way, the absorption of the pumping radiation is significantly enhanced [12–14]. Furthermore, adding Yb^{3+} allows an increase in the separation between erbium ions in the gain medium, therefore, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doping minimizes the possibility of clustering among Er^{3+} , thus allowing an increase in Er^{3+} concentration in the gain medium compared to the common implementation of erbium-doped fibers [9]. As the result, shorter lengths of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber are required to achieve similar levels of amplification.

In recent years, cladding-pumped DFA solutions have been studied intensively to reveal the pros and cons that they potentially bring once deployed in SDM networks. In the following section, we briefly cover solutions that tackle the transmission performance limits [5,15], the wideband operation limits [16,17], and quantify their impact on network cost and energy efficiency performance [5,18]. For instance, a 40% power consumption reduction can be achieved by replacing the conventional core-pumped EDFAs with cladding-pumped 32-core EYDFAs [18]. Furthermore, the larger number of cores of MC amplifiers support larger savings. Similar conclusions are found in [5]; the authors have estimated that, by substituting all inline EDFAs in a 2230 km long loop between Paris and Marseille with cladding-pumped 12-core EYDFAs, the costs associated with signal amplification could be reduced by 33%. Moreover, a 55% reduction in the link's total power consumption would be achieved by the year 2035. Such significant cost and energy savings encourage the research in this area. A hero-experiment, demonstrating a 1 Pbps transmission over a 205 km long 32-core multicore fiber (MCF), is reported in [15] where an inline core-pumped 32-core EDFA is used for optical loss compensation. Remarkably, the authors mention that the amplifier's saturation (and not fiber nonlinearities and inter-core crosstalk (IC-XT)) was the main factor preventing the achievement of an even longer transmission. A cladding-pumped co-doped DFA addresses this issue at the expense of amplification bandwidth.

A wideband operation of MC-EDFAs, covering the C and the L optical bands, is studied in [16,17]. In the first case, a 19-core EDFA was used to achieve a 207 Tbps

transmission over a 1500 km long 12-core MCF. A transoceanic distance of more than 8000 km is demonstrated in [17] where the authors used a 31.4 km long recirculation loop, consisting of a 19-core MCF and two cladding-pumped MC-EDFAs (for the C and the L bands separately) for the inline amplification of the dual-polarization quadrature phase-shift keying (DP-QPSK) signals. When it comes to long-haul transmission, amplifier characteristics, e.g., noise figure (NF), gain profile, etc., can significantly decrease the number of amplification spans a signal can traverse before impairments degrade its quality below a certain threshold. Using the transmission link configuration with an MC-EYDFA and with a standard EDFA, the authors in [5] investigate the impact that the IC-XT has on the maximum transmission distance (without regeneration) when operating with the 400G dual-polarization 16-ary quadrature amplitude modulation (DP-16QAM). The investigation relies on the Gaussian noise (GN) model [19] to estimate the signal-to-noise ratio (SNR) after each 80 km long fiber span using the amplifier's NF and the IC-XT component. The results show that, for the considered scenario, the maximum transmission distance decreases from 11 spans to only eight spans when replacing the conventional inline EDFAs (NF = 4.5 dB) with the MC-EYDFAs (NF = 4.5 dB). For NF = 6.5 dB, the corresponding numbers are 11 and six spans, respectively. Therefore, the design of MC-EYDFAs should be carefully considered to reduce the impact on the maximum transmission distance while enabling cost and power savings. Yet, the impact that the design specifications of a cladding-pumped EYDFA (e.g., the length of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber, pump power and propagation directions, and $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ emission cross-sections) have on the amplifier's characteristics remain unclear, especially, when it comes to the wavelength dependence. This latter aspect is of importance for the use of such amplifiers to compensate optical losses in networks/links exploiting wavelength division multiplexing (WDM).

Therefore, in this article, we investigate the characteristics of an EYDFA under different operating conditions to assess the suitability for operation in a metro-access segment of optical transport networks where the dense wavelength-division multiplexing (DWDM) solutions are normally used. To perform the analysis, we have developed a simulation framework, consisting of a DWDM transmission system with up to 64×10 Gbps DWDM channels allocated using the fixed 100 GHz grid and a single-core cladding-pumped EYDFA of our design. The amplifier's model is adjusted using the experimentally extracted characteristics (e.g., overlap factor, absorption, and emission cross-sections) of the commercial $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber. The fiber's core is rare-earth-doped phosphosilicate glass, the inner cladding is pure silica, and the outer cladding is fluorine-doped silica glass. The EYDFA performance is evaluated in terms of gain (G), noise figure (NF), and the output signal bit error ratio (BER). We analyze the wavelength dependence of these characteristics by varying the number of DWDM channels and their optical power levels and scaling the fiber's emission and absorption cross-sections. Furthermore, we quantify the power penalty due to the amplification of 40×10 Gbps non-return-to-zero on-off keying (NRZ-OOK)-modulated wavelength channels. Note that a single-core configuration of the cladding-pumped EYDFA is used throughout the research to exclude distortions related to inter-core crosstalk (IC-XT) and cross-gain modulation and build a reference cladding-pumped EYDFA model for further studies.

The rest of the article is organized as follows. The simulation setup, alongside the description of the measurements and estimations of the gain medium parameters, is described in Section II. Section III analyzes the amplifier's performance under different operating conditions (number of DWDM channels, input optical power, absorption and emission characteristics of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doping) and quantifies the induced power penalty. Finally, Section IV summarizes the research findings.

2. Experimental Setup and Principles

The simulation setup used to characterize the performance of the developed cladding-pumped EYDFA is shown in Figure 1. It is realized using VPIphotonics Design Suite [20], yet the absorption and emission cross-sections of the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped phosphosilicate

glass double-cladding fiber are experimentally measured in our laboratory and fed as the input data to the simulation setup (Figure 1b). Besides, the overlap factor is estimated using the proposed red, green, blue (RGB) color approach applied to the EYDF cross-section images taken by a fiber microscope (Figure 2). As we assume that EYDFA will be operated in metro-access segments of optical transport networks, the multi-wavelength operation is considered. Consequently, the setup includes three parts: (i) $n \times 10$ Gbps OOK WDM transmitters; (ii) the realistic model of our EYDFA, consisting of the EYDF itself, optical pump source (central wavelength $\lambda_p = 975$ nm at 25 °C and output power 3–5 W), high-power optical combiners/splitters, and the amplifier’s test unit for the evaluation of its characteristics (e.g., gain spectrum and noise figure (NF)); and (iii) WDM (de-)multiplexers and receivers for signal quality estimation (not shown in Figure 1).

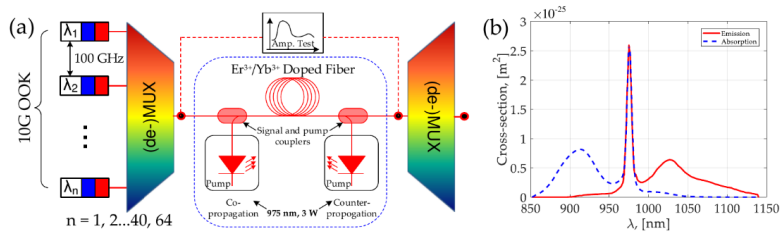


Figure 1. (a) Simplified simulation setup of the cladding-pumped $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber amplifier (EYDFA); (b) absorption and emission cross-sections experimentally determined for the $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped fiber using the absorption spectra measurement method.

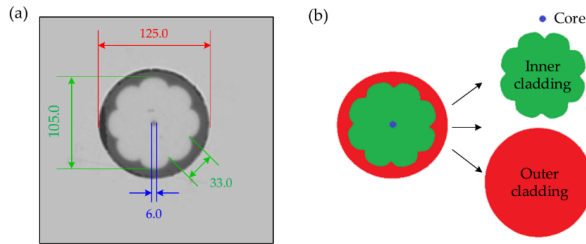


Figure 2. (a) Microscope image of the EYDF cross-section together with its geometrical measures, and (b) RGB representation of its outer cladding (red), inner cladding (green), and core (blue) used for the overlap factor estimation.

The key component of this optical back to back (OB2B) setup is a fiber model. For our purposes, we use a stationary fiber model from VPIphotonics Design Suite [20] that can be used for $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped cladding-pumped fiber amplifiers. According to its description, this model is based on the bidirectional propagation equations for signals and multilevel rate equations for ion populations. To tune this model with the respect to our EYDF, we use the measured cross-sections to specify the emission and absorption spectra, and the overlap factors to specify the WDM signal (~1550 nm) and the pump signal (~975 nm) coupling and their propagation (which depends on fiber profile and dimensions). The model is resolved in both the longitudinal and transverse directions considering the number of effects, e.g., $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ energy transfer, cross-relaxation effects,

excited-state absorption, Rayleigh scattering, and Kerr nonlinearity. The summary of the setup parameters is given in Table 1.

Table 1. Summary of the amplifier's schematic parameters.

| System Parameters | |
|--|--|
| Bitrate and modulation | 10 Gbps non-return-to-zero on-off keying |
| Number of channels (n) | 1, 2, 4, 8, 16, 32, 40, 64 (41–64 outside of C-band) |
| The carrier frequency of the first/last channel | 191.6/195.5 THz |
| Channel spacing | 100 GHz |
| Single channel power | −25 dBm/channel to −10 dBm/channel |
| EYDFA Pump Parameters | |
| Pump wavelength | 975 nm at temperature = 25 °C |
| Pump power | 3 W, (operational range 0.3–5 W) |
| Direction | Co-/counter propagation |
| Doped fiber parameters | |
| Length | 1–10 m |
| Er ³⁺ concentration | $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ |
| Yb ³⁺ concentration | $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ |
| Er ³⁺ /Yb ³⁺ cross-relaxation coefficient | $1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Core area/inner cladding area ($A_{\text{core}}/A_{\text{inner cladding}}$) | 0.0058 |
| Inner cladding area/outer cladding area ($A_{\text{inner cladding}}/A_{\text{outer cladding}}$) | 0.9203 |

The simulation model includes parameters that specify both the WDM system and the EYDFA under test. In this case, we operate with a 10 Gbps NRZ-OOK signal whose central frequencies are arranged across the C-band (1530–1565 nm) using a 100 GHz grid. Although we consider the WDM configuration with the total number of channels up to $n = 64$, channels 41–64 are outside of the C-band ($f_c > 195.6 \text{ THz}$). They are used to highlight the wavelength dependence of the amplifier's gain and noise figure characteristics, especially for high ($> -10 \text{ dBm/channel}$) and low ($< -25 \text{ dBm/channel}$) input signal powers. The category "EYDFA pump parameters" provides details about the optical pump source and its direction with respect to the signal propagation. Finally, the category "doped fiber parameters" includes the measured, estimated, and given characteristics of our EYDF used to build the EYDFA in the laboratory.

To estimate the EYDF absorption cross-section, we use Er³⁺ and Yb³⁺ ion absorption spectra obtained using a measurement setup consisting of Agilent's Cary 7000 Universal Measurement Spectrophotometer [21], FiberMate2TM Fiber Optic Coupler system from Harrick Scientific Products Inc. [22], and two EYDF samples of different lengths. A 1 m long EYDF sample is used to perform the absorption spectra measurements around a 975 nm wavelength, whereas a 19 m long sample was used for wavelengths around 1550 nm. In such a way, we avoid the saturation effect that might distort the absorption spectra measurements. The absorption around 975 nm is attributed to ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ and ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ optical transitions of Yb³⁺ and Er³⁺, respectively. However, the impact of Er³⁺ can be neglected since its absorption cross-section is significantly lower than that of Yb³⁺ [23]. Furthermore, according to the specification, the EYDF has a 20 times higher Yb³⁺ concentration compared to the Er³⁺ concentration. The absorption cross-section is estimated using the measured absorption spectra, the ratio between the fiber's core and

inner cladding areas, its length, and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ concentrations. The emission cross-section is estimated using the McCumber relation [24] connecting emission and absorption spectra.

Finally, the overlap factor is estimated using the RGB color approach that relies on the graphical post-processing of images of the doped fiber cross-section magnified by a microscope objective lens (see Figure 2). In general, the overlap factor (Γ) of double-cladding optical fiber is defined as a ratio between its core area (A_c) and inner cladding (A_{icl}) area [25]:

$$\Gamma = \frac{A_c}{A_{icl}} \quad (1)$$

Since the inner cladding is usually formed into a specific shape (e.g., star shape [25], D shape [26], or even flower shape [27]), the estimation of its area becomes a task in itself since fiber manufacturers tend to provide only overall geometrical dimensions, whereas parameters such as core and cladding areas and ion concentrations, which are crucial when building and analyzing doped fiber amplifiers (DFAs), remain unrevealed. Similarly, in our case, the manufacturer of the EYDF provides information only about its geometrical dimensions (see Figure 2a) and the ratio between $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ concentrations. Therefore, the overlap factor is estimated using the proposed RGB approach.

First, the gray-scale image from the microscope is used to identify the borders between the core, the inner cladding, and the outer cladding. Although this process may include a certain error due to the ambiguous edge detection of the fiber's core and inner cladding [28], it has an insignificant impact on the estimated overlap factor. When all edges are identified, an RGB color is assigned to each segment and they are recolored (see Figure 2b). The number of red (outer cladding), green (inner cladding), and blue (core) pixels are counted and used for the estimations.

For our EYDF, $A_c = 658$ pixels, $A_{icl} = 112,828$ pixels, and the outer cladding area $A_{ocl} = 122,598$ pixels, which gives us $\Gamma = 0.0058$ and $A_{icl}/A_{ocl} = 0.9203$. Both these parameters are further used as input to the simulation setup.

3. Results and Discussion

In this section, we reveal how the EYDFA's configuration parameters, such as the $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fiber's length, its absorption and emission cross-sections, and the pump signal direction, impact its wavelength-dependent characteristics, namely, gain uniformity, noise figure, and maximum output power. Before the evaluation of an EYDFA-induced power penalty, we characterize its performance for a multiwavelength scenario by varying the number of DWDM channels and their power levels. The goal of these simulations is to find the most appropriate amplifier configuration that introduces the least distortion while ensuring the most uniform gain spectrum possible. Throughout the analysis, we use an optical pump source operating at $\lambda_p = 975$ nm and 3 W of output power. These values are selected based on the specifications of our high-power light source in the laboratory. We consider both the co-propagation and counter-propagation directions for the pump signal.

To select the length of the EYDF and the direction of the pump signal, we use the curves obtained for a 40-channel WDM system showing how the amplifier gain, noise figure, and the maximum output power change with the EYDF length (see Figure 3). The results show that the maximum gain is reached for an 8 m long EYDF regardless of the pump direction (Figure 3a). A longer EYDF does not result in a higher gain, which is explained by the depletion of the pump radiation. A further increase in doped fiber length not only cannot produce additional gain, but the amplified signal power also starts to decrease due to the attenuation of the EYDF itself. Furthermore, the amplifier becomes noisier, especially for the configuration where the signal and the pump are launched in the counter-propagating directions (Figure 3b). Otherwise, the noise figure is not larger than 4.5 dB (co-propagation) and 6 dB (counter-propagation). Finally, Figure 3c shows the maximum gain difference detected for Channels 1 to 40 (Ch1–Ch40) in the 40-channel DWDM system with the input optical power of -20 dBm/channel.

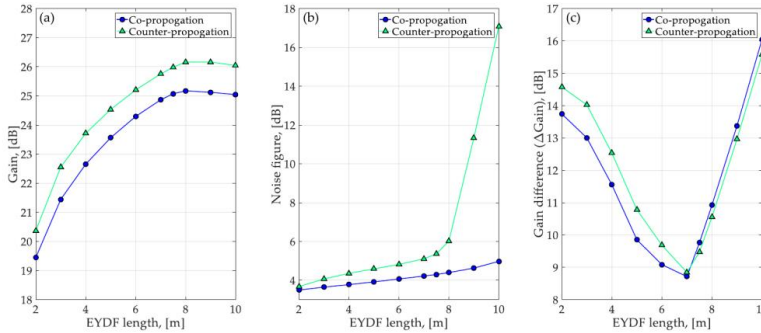


Figure 3. The amplifier’s (a) gain, (b) noise figure, and (c) maximum gain difference between the channels as a function of the EYDF length. Lines connecting data points are only included as a guide. The characteristics are obtained considering a 40-channel dense wavelength-division multiplexed (DWDM) system with an input optical power (p_{IN}) of -20 dBm/channel and a 3 W pump source at $\lambda_p = 975$ nm coupled in the co-propagating (blue) and counter-propagating (green) directions.

The gain uniformity is an important characteristic, especially for systems with several amplification spans. Unless all DWDM channels are amplified equally, the power difference increases with every span, limiting the maximum transmission distance. The smallest gain difference ($\Delta G < 9$ dB) is obtained for a 7 m long EYDF for both the co-propagation and counter-propagation of the 975 nm pump signal. It is significantly larger for shorter and longer EYDF segments, which indicates that an appropriate level of ion population inversion is achieved for this specific combination of the pump power (3 W) and the EYDF length (7 m). Therefore, we keep these parameters unchanged. Finally, we choose to use the pump signal in the co-propagation direction. Although the counter-propagation ensures a 0.9–1 dB higher gain, its cost is a higher noise figure, which is almost 1 dB higher compared to the co-propagation case. Therefore, we choose a lower noise figure over a higher gain. Figure 4a shows the output (parametrized) spectrum, whereas Figure 4b shows the individual gain and noise figure of each EYDFA-amplified DWDM channel. Due to the wavelength-dependent gain and noise figure of the amplifier, the output spectrum is not uniform. Specifically, the amplifier’s output power levels change from 0.1 to 8.3 dBm per channel (dBm/channel, see Figure 4a), resulting in a gain difference of 19.7–28.3 dB, and the noise figure changes from 3.7 dB to 4.2 dB (Figure 4b). The input optical power (p_{IN}) was set to -20 dBm/channel in all 40 WDM channels considered.

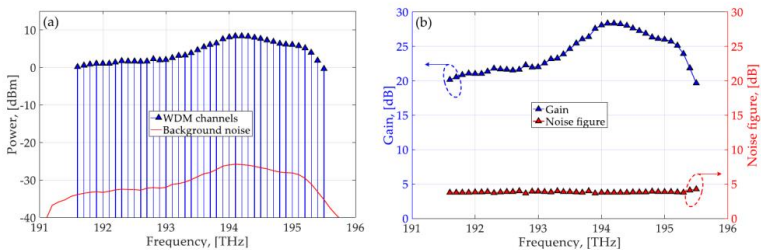


Figure 4. (a) Optical spectrum at the output of the EYDFA (7 m EYDF, 3 W, 975 nm, co-propagation), (b) individual gain and noise figure of each amplified DWDM channel with $p_{IN} = -20$ dBm/channel.

Next, we explore the EYDFA characteristics (namely gain, maximum gain difference, and noise figure) under different operating conditions by varying the number of DWDM channels and their optical power levels. During the analysis, we consider a DWDM configuration with 1, 2, 4, 8, 16, 32, 40, and 64 channels, whose power levels are set between -25 and -10 dBm/channel, see Figure 5. The output power curves (Figure 5a) show that the higher the number of DWDM channels, the smaller the output power difference. The amplifier saturates and eventually it fails to amplify more than 40 DWDM channels even if their power is as low as -25 dBm/channel. When analyzing the output power curve for $p_{IN} = -25$ dBm/channel, we have noticed that the output power levels increase by 3.5 dB when the number of DWDM channels is increased from two to four. However, the corresponding number is 4.3 dB when the number of DWDM channels is increased from 16 to 32 channels. Such behavior indicates that low-power optical signals (i.e., with low input power and/or a small number of channels) are not able to completely exploit the population inversion generated in the gain media. Consequently, the unused portion of the population inversion eventually generates an excessive amount of amplified spontaneous emission (ASE) noise, which results in a poor noise figure, see Figure 5c. On the contrary, high input power consumes the achieved population inversion, in such a way that the obtained gain is reduced and the output power reaches its limit. For instance, the output power increases by 0.3 dB when an additional eight channels ($p_{IN} = -25$ dBm/channel) are added to a DWDM system with 32 channels, and it remains similar even when the number of channels is increased to 64. A higher pump signal power also does not result in a higher gain or a higher output power. Even if a 4 W pump signal is used, the output power increases by not more than 0.2–0.3 dB for a 40-channel configuration with $p_{IN} = -20$ dBm/channel. Therefore, the maximum output power of the proposed EYDFA is limited to approximately 22 dBm.

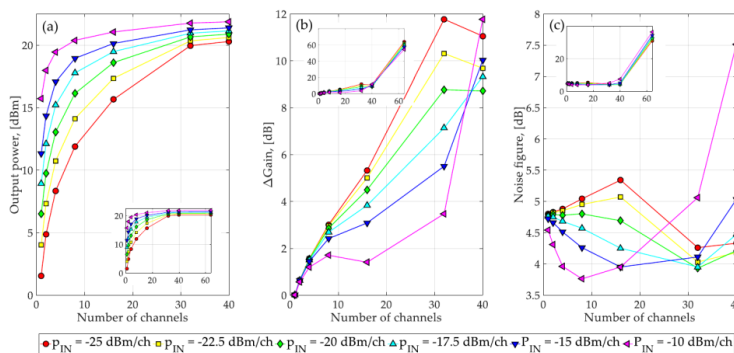


Figure 5. (a) Output power, (b) maximum gain difference, and (c) maximum noise figures vs. the number of DWDM channels and their input power for the EYDFA configuration with a 7 m long EYDF and $p_{PUMP} = 3$ W at $\lambda_p = 975$ nm coupled in the co-propagation direction. Lines connecting data points are only included as a guide.

The maximum gain difference curves (Figure 5b) show the following trend—the higher the input power, the smaller the gain difference in a DWDM system with 4–32 channels. The main reason is that a higher portion of population inversion is consumed to achieve similar levels of amplification for higher input power signals. Therefore, at a certain level of population inversion, optical signals with higher power get less amplified and the gain difference between the channels becomes smaller. However, the opposite situation is observed for 40 DWDM channels, where the gain difference becomes higher for higher input signal powers (e.g., compare -25 dB/channel and -10 dBm/channel curves). Such behavior

occurs because higher power signals drain the ion population inversion more efficiently. The increase in the DWDM channel count to 40 in the case of a -25 dBm input signal changes the average level of population inversion throughout the EYDF to a value that provides more equal gain in the transmission system frequency band. Therefore, we observe a more uniform gain (amplification) of all 40 DWDM channels with $p_{IN} = -25$ dBm/channel, whereas for -10 dBm/channel, the population inversion is drained much faster before the similar uniformity is achieved. A similar tendency is observed for the EYDFA's noise figure (Figure 5c). For channels with $p_{IN} \geq -20$ dBm/channel, the noise figure first decreases with every additional DWDM channel until the number of channels (and their combined power level) reaches a certain optimum point, exceeding which the noise figure starts increasing. For fewer power channels, the noise figure first increases by 0.5–1 dB and then starts decreasing, reaching 4–4.5 dB for 32–40 DWDM channels. The insets in Figure 5b,c show that the gain difference and the noise figure increasing dramatically when the number of DWDM channels exceeds 40, which confirms the bandwidth limitations of the amplifier. Signals outside the operation band get absorbed by the EYDF.

In $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped fibers, Yb^{3+} absorb the pump radiation and then resonantly transfer a portion of their energy to Er^{3+} for signal amplification. We perform a sensitivity analysis showing how the absorption and the emission cross-sections of our EYDF impact the amplification process. For this purpose, we assume the cross-sections to be 70% ($k = 1$) and 130% ($k = 1.3$) of the initially estimated values ($k = 1$). Figure 6 shows the differences in the performance characterized using the excited ion percentage (Figure 6a), per channel gain, and noise figure (Figure 6b). We observe that, for $k = 0.7$, the peak of the excited Yb^{3+} percentage becomes smaller (approximately by 5%) and moves further into the EYDF by changing its axial position. Consequently, the depletion of the population inversion is smoothed out on all energy levels, allowing the amplified signal to accumulate a certain part of the pump energy and therefore improving its ability to consume larger portions of the population inversion. This extends the length of the EYDF where the signal amplification occurs effectively, leading to a higher gain (by ~ 0.7 dB) and a lower noise figure (by ~ 0.1 dB). On the contrary, for larger cross-sections ($k = 1.3$), the Yb^{3+} peak moves towards the signal/pump source (axial position = 0.7 m) and gets smoothed out, which brings a lower gain and a higher noise figure.

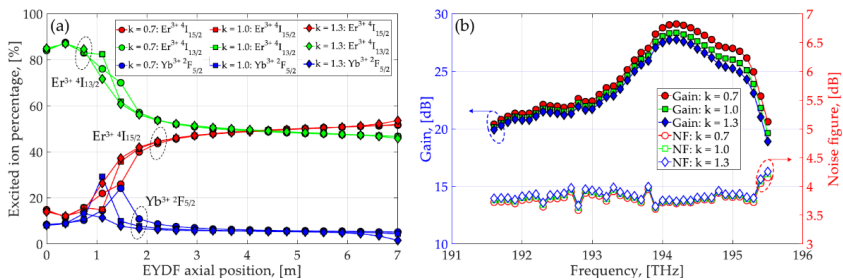


Figure 6. Sensitivity analysis showing the impact that the fiber’s absorption and emission cross-sections have on ion excitation for coefficients $k = 0.7, 1, 1.3$ of the initially estimated cross-section values: (a) excited ion percentage vs. axial position in the doped fiber; (b) the EYDFA average gain and the maximum noise figure of the 40-channel DWDM system.

Finally, the BER performance is evaluated for a 40-channel configuration of the DWDM system with and without the EYDFA (see Figure 7). The BER values are obtained for four channels: Ch1 with $f_c = 191.6$ THz (the beginning of the C-band), Ch16 with $f_c = 193.1$ THz (the anchor frequency of the DWDM grid), Ch26 with $f_c = 194.1$ THz (gives the peak gain), and Ch40 with $f_c = 195.5$ THz (the end of the C-band), but Figure 7 shows the largest

BER at a particular value of the received power. To obtain statistically reliable results, we use a $2^{15}-1$ uniquely seeded pseudorandom binary sequence (PRBS) to obtain 2^{13} bits used for the simulations and BER estimation that relies on the stochastic signal and noise representation. Specifically, the noise is added to the signal and the probability density function of the detected signal is approximated with the chi-square function. The EYDFA parameters remain unchanged (7 m EYDF, 3 W, 975 nm, co-propagation), and the input optical power is set to -20 dBm per WDM channel.

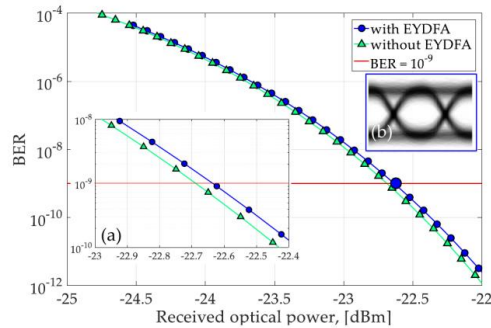


Figure 7. The worst bit error rate (BER) vs. received optical power detected for Ch1 = 191.6 THz, Ch16 = 193.1 THz, Ch26 = 194.1 THz, and Ch40 = 195.5 THz in a 40-channel WDM system ($P_{IN} = -20$ dBm/channel) with and without the EYDFA where inset (a) zooms into the area at $BER = 10^{-9}$ and inset (b) shows the eye diagram captured for the configuration with the amplifier at $BER \approx 10^{-9}$.

The results in Figure 7 shows the power penalty below 0.1 dB at the reference level of $BER = 10^{-9}$ compared to the configuration without the amplification. Such distortion levels can be considered as negligible. However, its gain spectra should be flattened out, e.g., by using gain flattening filters or several amplification stages, before such amplifiers can be efficiently used for optical loss compensation in WDM transmission systems. However, this aspect deserves separate attention and thus will be addressed in future work.

4. Conclusions

The performance of the cladding-pumped EYDFA is characterized using the developed measurement data-based simulation framework. Through the analysis of the amplifier's gain, noise figure, and power penalty, we assess its suitability for operation in metro-access optical transport networks where DWDM techniques are normally deployed. First, we experimentally characterize the double cladding Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped fiber used as a gain medium for our amplifier to come up with the realistic model of the EYDF. Next, we test different EYDFA configurations under different operating conditions (including various doped fiber lengths, pump propagation directions, signal input power, etc.) to reveal parameter settings ensuring the best amplification characteristics, namely, high and uniform gain, and low noise figure. Finally, its power penalty is quantified using 40×10 Gbps NRZ-OOK signals and the DWDM system configuration with and without the EYDFA. The results show that the amplifier configuration with a 3 W pump source at 975 nm requires a 7 m long EYDF (with the obtained physical parameters) and a co-propagation pumping direction for WDM applications. Considering a reasonably low input signal power (~ -20 dBm/channel), the EYDFA can be used to amplify up to 40 DWDM channels across the C-band, ensuring a maximum output power of +22 dBm, a gain of 19.7–28.3 dB, a noise figure of 3.7–4.2 dB, and a power penalty (with respect to a system without amplification) below 0.1 dB at a BER level of 10^{-9} . Finally, the performed

sensitivity analysis for EYDF cross-sections shows how the energy transfer from Yb³⁺ to Er³⁺ ions impacts the amplifier's gain and noise figure values. Specifically, a $\pm 30\%$ change in the cross-sections results in minor gain and noise figure changes—0.7 dB and 0.1 dB, respectively. The revealed characteristics are of importance for assembling and testing an in-house-made cladding-pumped EYDFA.

Author Contributions: Conceptualization, A.S., S.O., A.U., R.M., S.S., V.B.; methodology, A.S., S.O., A.U., U.S., D.P., V.B.; software, S.O., A.U., L.G., R.M., J.G., E.E.; validation, U.S., D.P., L.G., J.G., E.E., O.O.; formal analysis, S.O., U.S., D.P., L.G., O.O., V.B.; investigation, A.S., S.O., A.U., R.M., J.G., E.E., S.S., O.O.; resources, S.S., O.O., V.B.; data curation, A.S., S.O., A.U., U.S., D.P., L.G.; writing—original draft preparation, A.S., S.O. and A.U.; writing—review and editing, S.O., A.U., R.M., J.G., S.S., O.O., V.B.; visualization, A.S., S.O., A.U., S.S., J.G.; supervision, S.S., O.O., V.B.; project administration, S.S., V.B.; funding acquisition, S.S., J.G., V.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work has been supported by the European Regional Development Fund project No. 1.1.1.1/18/A/068.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The Institute of Solid State Physics, University of Latvia as a Center of Excellence has received funding from the European Union's Horizon 2020 Framework Programme H2020-WIDESPREAD-01-2016-2017-TeamingPhase2 under grant agreement No. 739508, project CAMART².

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Cisco Inc. *Cisco Annual Internet Report (2018–2023)*; Cisco: San Jose, CA, USA, 2020.
2. Yoshikane, N.; Tsuritani, T. Recent progress in space-division multiplexing optical network technology. In Proceedings of the 2020 International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Barcelona, Spain, 18–21 May 2020; pp. 1–4.
3. Puttnam, B.J.; Sugizaki, R.; Rademacher, G.; Luis, R.S.; Eriksson, T.A.; Klaus, W.; Awaji, Y.; Wada, N.; Maeda, K.; Takasaka, S. High data-rate and long distance mcf transmission with 19-core C+L band cladding-pumped EDFA. *J. Light. Technol.* **2020**, *38*, 123–130. [\[CrossRef\]](#)
4. Jain, S.; Thipparapu, N.K.; Barua, P.; Sahu, J.K. Cladding-pumped Er/Yb-doped multi-element fiber amplifier for wideband applications. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2015**, *27*, 356–358. [\[CrossRef\]](#)
5. Thouras, J.; Pincemin, E.; Amar, D.; Gravey, P.; Morvan, M.; Moulinard, M.-L. introduction of 12 cores optical amplifiers in optical transport network: Performance study and economic impact. In Proceedings of the 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 1–5 July 2018; pp. 1–4.
6. Ono, H.; Takenaga, K.; Ichii, K.; Yamada, M. Amplification technology for multi-core fiber transmission. In Proceedings of the 2014 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series, Montreal, QC, Canada, 14–16 July 2014; pp. 146–147.
7. Takeshima, K.; Tsuritani, T.; Igarashi, K.; Morita, I.; Tsuchida, Y.; Maeda, K.; Saito, T.; Watanabe, K.; Sasa, T.; Imamura, K.; et al. WDM/SDM transmission of 76×128 -Gbit/s Nyquist-pulse-shaped DP-QPSK Signals over 4,200 km using cladding pumped 7-Core EDFA. In Proceedings of the 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, China, 28 June–2 July 2015; pp. 1–3.
8. Matsumoto, K.; Seno, K.; Mizuno, T.; Yanagimachi, S.; Gabory, E.L.T.D.; Mivamoto, Y. Experimental demonstration of a SDM node with low power consumption MC-EDFA and SPOC-based WSS arrays. In Proceedings of the 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, 7–11 July 2019; pp. 1–3.
9. Baker, C.C.; Burdett, A.; Friebele, E.J.; Rhonehouse, D.L.; Kim, W.; Sanghera, J. Rare earth co-doping for increased the efficiency of resonantly pumped Er-fiber lasers. *Opt. Mater. Express* **2019**, *9*, 1041–1048. [\[CrossRef\]](#)
10. Ono, H. Gain Control in Multi-core EDFA with hybrid-pumping. In Proceedings of the 2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), Fukuoka, Japan, 7–11 July 2019; pp. 1–3.
11. Sugizaki, R. Recent technologies on multicore EDFA. In Proceedings of the 2018 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM)—IEEE Photonics Conference, Reston, VA, USA, 30 September–4 October 2018; pp. 261–262. [\[CrossRef\]](#)
12. Wei, S.; Yao, B.; Chen, Y.; Mao, Q. Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier with Dual-Wavelength Auxiliary Signal Injection of 1030 and 1040 nm. *IEEE Photonics J.* **2020**, *12*, 1–9. [\[CrossRef\]](#)
13. Anashkina, E.A. Laser sources based on rare-earth ion doped tellurite glass fibers and microspheres. *Fibers* **2020**, *8*, 30. [\[CrossRef\]](#)

14. Koptev, M.Y.; Anashkina, E.A.; Bobkov, K.K.; Likhachev, M.E.; Levchenko, A.E.; Aleshkina, S.S.; Semjonov, S.L.; Denisov, A.N.; Bubnov, M.M.; Lipatov, D.S.; et al. Fibre amplifier based on an ytterbium-doped active tapered fibre for the generation of megawatt peak power ultrashort optical pulses. *Quantum Electron.* **2015**, *45*, 443–450. [CrossRef]
15. Kobayashi, T.; Nakamura, M.; Hamaoka, E.; Shibahara, K.; Mizuno, T.; Sano, A.; Kawakami, H.; Isoda, A.; Nagatani, M.; Yamazaki, H.; et al. 1-Pb/s (32 SDM/46 WDM/768 Gb/s) C-band dense SDM transmission over 205.6-km of single-mode heterogeneous multi-core fiber using 96-Gbaud PDM-16QAM channels. In Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference Postdeadline Papers, Los Angeles, CA, USA, 19–23 March 2017; p. Th5B.1.
16. Soma, D.; Beppu, S.; Maeda, K.; Takasaka, S.; Suqizaki, R.; Takahashi, H.; Tsuritani, T. Long-haul MCF transmission using full C+L-band 19-core cladding-pumped EDFA. In Proceedings of the 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, Italy, 23–27 September 2018; pp. 1–3.
17. Puttnam, B.; Rademacher, G.; Luis, R.; Eriksson, T.; Klaus, W.; Awaji, Y.; Wada, N.; Maeda, K.; Takasaka, S.; Sugizaki, R. 8007 km C + L band transmission over MCF with 19-core cladding-pumped EDFA. In Proceedings of the 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), Dublin, Ireland, 23–25 September 2019; pp. 1–4.
18. Jain, S.; Castro, C.; Jung, Y.; Hayes, J.; Sandoghchi, R.; Mizuno, T.; Sasaki, Y.; Amma, Y.; Miyamoto, Y.; Bohn, M.; et al. 32-core erbium/ytterbium-doped multicore fiber amplifier for next generation space-division multiplexed transmission system. *Opt. Express* **2017**, *25*, 32887–32896. [CrossRef]
19. Poggiolini, P.; Bosco, G.; Carena, A.; Curri, V.; Jiang, Y.; Forghieri, F. The GN-model of fiber non-linear propagation and its applications. *J. Light. Technol.* **2013**, *32*, 694–721. [CrossRef]
20. VPIphotonics GmbH. VPItransmissionMaker 11.0. Available online: <https://www.vpiphotonics.com/> (accessed on 10 December 2020).
21. Agilent Cary 7000 Universal Measurement Spectrophotometer. Available online: <https://www.agilent.com/en/product/molecular-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-accessories/cary-universal-measurement-accessory-uma> (accessed on 12 December 2020).
22. Harrick Scientific Products Inc., FiberMate2™ Fiber Optic Coupler System. Available online: <https://www.harricksci.com/ftir/accessories/group/FiberMate2%E2%84%A2-Fiber-Optic-Coupler> (accessed on 12 December 2020).
23. Huang, F.; Liu, X.; Ma, Y.; Kang, S.; Hu, L.; Chen, D. Origin of near to middle infrared luminescence and energy transfer process of Er³⁺/Yb³⁺-co-doped fluorotellurite glasses under different excitations. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 8233. [CrossRef] [PubMed]
24. McCumber, D.E. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra. *Phys. Rev.* **1964**, *136*, A954–A957. [CrossRef]
25. Váralyay, Z.; Szabó, A.; Rosales, A.; Gonzales, E.; Tobioka, H.; Headley, C. Accurate modeling of cladding pumped, star-shaped, Yb-doped fiber amplifiers. *Opt. Fiber Technol.* **2015**, *21*, 180–186. [CrossRef]
26. Jeong, Y.; Sahu, J.K.; Payne, D.N.; Nilsson, J. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Opt. Express* **2004**, *12*, 6088–6092. [CrossRef] [PubMed]
27. Supe, A.; Spolitis, S.; Elsts, E.; Murnieks, R.; Doke, G.; Senkans, U.; Matsenko, S.; Grube, J.; Bobrovs, V. Recent developments in cladding-pumped doped fiber amplifiers for telecommunications systems. In Proceedings of the 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 19–23 July 2020; pp. 1–6.
28. Lee, S.W.; Lee, S.Y.; Pahk, H.J. Precise edge detection method using sigmoid function in blurry and noisy image for TFT-LCD 2D critical dimension measurement. *Curr. Opt. Photonics* **2018**, *2*, 69–78.

2. Pielikums

RAKSTS-2: Cladding-Pumped ErYb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation.

Zakis, K.; Olonkins, S.; Udalcovs, A.; Lukosevics, I.; **Prigunovs, D.**; Grube, J.; Bikse, L.; Supe, A.; Ozolins, O.; Spolitis, S.; et al. Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation. *Photonics* 2022, 9, 457. <https://doi.org/10.3390/photonics9070457>.

Article

Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation

Kaspars Zakis ^{1,2,*}, Sergejs Olonkins ³, Aleksejs Udalcovs ¹, Ingars Lukosevics ⁴, Dmitrijs Prigunovs ^{1,3}, Jurgis Grube ⁴, Liga Bikse ⁴, Andis Supe ¹, Oskars Ozolins ¹, Sandis Spolitis ^{1,2} and Vjaceslavs Bobrovs ¹

- ¹ Institute of Telecommunications, Riga Technical University, LV-1048 Riga, Latvia; aleksejs.udalcovs@gmail.com (A.U.); dmitrijs.prigunovs@rtu.lv (D.P.); andis.supe@rtu.lv (A.S.); oskars.ozolins@rtu.lv (O.O.); sandis.spolitis@rtu.lv (S.S.); vjaceslavs.bobrovs@rtu.lv (V.B.)
 - ² Communication Technologies Research Center, Riga Technical University, LV-1048 Riga, Latvia
 - ³ AFFOC Solutions, LV-3016 Kalnciems, Latvia; sergejs.olonkins@rtu.lv
 - ⁴ Institute of Solid State Physics, University of Latvia, LV-1063 Riga, Latvia; ingars.lukosevics@cfi.lu.lv (I.L.); jurgis.grube@cfi.lu.lv (J.G.); liga.bikse@cfi.lu.lv (L.B.)
- * Correspondence: kaspars.zakis@rtu.lv

Abstract: Cladding-pumped erbium (Er³⁺)/ytterbium (Yb³⁺)-co-doped fiber amplifiers are more advantageous at high output powers. However, this amplification technique also has potential in telecom-related applications. These types of amplifiers have complex properties, especially when considering gain profile and a pump conversion efficiency. Such metrics depend on the doped fiber profile, absorption/emission spectra, and the input signal power. In this context, we design, build and characterize an inhouse prototype of cladding-pumped Er³⁺/Yb³⁺-co-doped fiber amplifier (EYDFA). Our goal is to identify the EYDFA configuration (a co-doped fiber length, pump power, input signal power) suitable for signal amplification in a multichannel fiber-optic transmission system with a dense wavelength allocation across the C-band (1530–1565 nm). Our approach involves experimentally determining the Er³⁺/Yb³⁺-co-doped fiber's parameters to be used in a simulation setup to decide on an initial EYDFA configuration before moving to a laboratory setup. An experimental EYDFA prototype is tested under different conditions using a 48-channel dense wavelength division multiplexing (DWDM, 100 GHz) system to evaluate the absolute gain and gain uniformity. The obtained results allow the cladding pump amplifier's suitability for wideband signal amplification to be assessed. The developed prototype provides >21 dB of gain with a 12 dB ripple within 1534–1565 nm. Furthermore, we show that the gain profile can be partially flattened out by using longer EYDF spans. This enhances signal amplification in the upper C-band in exchange for a weaker amplification in the lower C-band, which can be marginally improved with higher pump powers.

Keywords: absorption and emission spectra; cladding-pumped doped fiber amplifier; erbium/ytterbium co-doping; fiber-optic systems; overlap factor; wavelength division multiplexing



Citation: Zakis, K.; Olonkins, S.; Udalcovs, A.; Lukosevics, I.; Prigunovs, D.; Grube, J.; Bikse, L.; Supe, A.; Ozolins, O.; Spolitis, S.; et al. Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation. *Photonics* **2022**, *9*, 457. <https://doi.org/10.3390/photonics9070457>

Received: 10 June 2022
Accepted: 26 June 2022
Published: 28 June 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Cladding-pumped erbium (Er³⁺)/ytterbium (Yb³⁺)-co-doped amplifiers are typically associated with high-power laser systems and their applications. However, telecom-related applications have also gained momentum by proving their particular significance in such applications. The multifold of different fiber structures and techniques can be designed to address specific telecom amplifier needs, for instance, a multi-cladding optical fiber with a non-circular symmetry that aims to enhance pump absorption via twisting and coiling [1], the reduction in nonlinear effects with tapered fiber [2], fiber dispersion engineering [3,4]. The simulation of cladding-pumped doped fiber amplifier performance is also of particular interest due to the necessity of obtaining initial estimates of the key performance indicators, such as noise figure (NF) and gain [5]. The cladding pumping technique is more

advantageous over core pumping amplifiers at high output powers (typically >100 mW). Additionally, in the case of cladding-pumping, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doping (compared to pure Er^{3+} doping) allows for significantly improved pump utilization and reduced noise figure, especially at higher input power. The noise figure is expected to be <5 dB (comparable to typical core-pumped EDFAs), increasing above 1545 nm with higher pump power [6].

Commercial single-core erbium (Er^{3+})/ytterbium (Yb^{3+})-co-doped fiber amplifiers for C-band operation typically cover the wavelength range between 1540–1560 nm (± 5 nm), a reduction in bandwidth compared to typical erbium (Er^{3+}) doped fiber amplifiers. However, detailed information on amplifier gain and NF wavelength dependence as a function of signal and/or pump power, are normally not included in technical data sheets. It is also difficult to carry out a fair comparison between amplifiers of different manufacturers since the used pumping scheme, core or cladding, is unknown. The technique used may be inferred from the typical output power and pump current values if such data are provided.

In this paper, we describe an $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -co-doped fiber amplifier (EYDFA) suitable for telecom applications (signal gain around 30 dB and output power up to 23 dBm). Our goal is to explore the wavelength dependence of the amplifier's gain based on EYDF length, input signal and pump power. For a complete understanding of the amplifier's gain evolution within the fibers, a series of measurements were performed with a wideband multi-channel input signal. EYDFA testing was conducted by amplifying a 48-channel dense wavelength division multiplexed (DWDM) signal on a 100 GHz frequency grid that covers the entire C-band.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 describes the experimental extraction of the EYDF characteristics (specifically, Er^{3+} and Yb^{3+} absorption and emission cross-sections and overlap coefficient) required for finetuning the EYDFA simulation setup. The simulation and experimental setups used to characterize the EYDFA's performance are given in Section 3. In Section 4, we present the experimental results, characterizing the performance of our in-house cladding-pumped EYDFA. Finally, Section 5 concludes the paper.

2. Characterization of the Erbium/Ytterbium-Co-Doped Fiber Parameters

Part of our research is devoted to the validation of the previously developed cladding-pumped EYDFA simulation model (see the description in Section 3 and [5]). The laboratory setup is used to fine-tune the simulation model, the accuracy of which is primarily determined by the double-clad EYDF parameters, being the gain medium. The simulation model uses EYDF's absorption and emission cross-sections and the so-called overlap factor [5]. The dopant ion cross-section is calculated based on absorption spectra measurements and other parameters, such as dopant ion concentrations, fiber core and cladding refractive indices. Manufacturers typically do not provide information on these doped fiber properties. Accordingly, this section gives a more detailed description of all the experimental setups used to obtain the missing physical parameters of the EYDF: (a) Er^{3+} and Yb^{3+} concentrations, (b) core and inner cladding overlap factor, (c) refractive index profile, and (d) $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ absorption and emission spectra and cross-sections [7,8]. The fiber under test is an $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ -co-doped double-clad fiber that has a flower-shaped inner cladding, which is discussed further in Section 2.2.

2.1. Doped Fiber Elemental Analysis

Elemental analysis for the selected double-clad EYDF cross-section was carried out using scanning electron microscopy (SEM) to determine the dopant ion concentrations in the doped fiber's core. Thermo Scientific Helios UX 5 equipped with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) detector was used for the measurements. The EDS point ID was measured at 15 kV and 0.40 nA for a live time of 300 s. The EYDF sample was covered with a thin 30 nm gold layer to detect elemental distribution in the cross-section without causing a surface-charging effect. The line scan was measured at 125 points along the diameter of the EYDF. The measurement time was approximately half an hour with beam parameters

20 kV and 0.40 nA. Elemental quantification of the spectra was carried out using Pathfinder X-ray Microanalysis Software [9]. The elemental composition of the fiber core was analyzed in terms of the atomic percentage (at%) of one kind of atom relative to the total atoms in the sample and resulted in the following values: 61.71% O, 30.98% Si, 6.04% P, 0.06% Er and 1.21% Yb. However, for the EDS line scan across the diameter of the fiber, it was covered with a thin gold layer, and the calculated elemental distribution was not corrected with respect to Au layer absorption. Nevertheless, Figure 1 clearly shows that in the core regions Yb, P, and Er replace some part of the Si atoms and that fluorine is located at the edge of the fiber in an approximately 10 μm-wide ring—the second cladding. In the case of fluorine, it replaces oxygen atoms in the outer shell. Phosphorus in the fiber core increases the silica fiber refractive index. The inner cladding consists of pure silica without any traces of rare-earth or other dopant elements. The outer cladding consists of silica doped with fluorine to reduce the material refractive index.

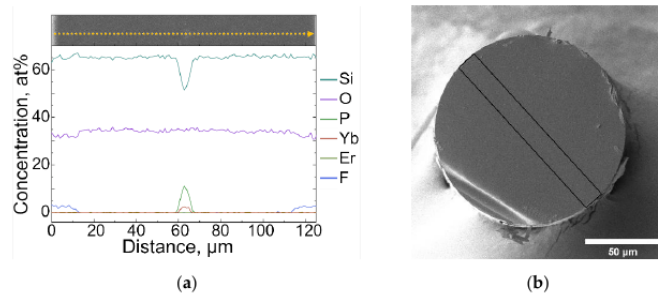


Figure 1. (a) EDS line scan represented by the yellow dotted line with the corresponding elemental distribution underneath; (b) EYDF cross-section where the black rectangle is the EDS line scan region.

For the amplification processes, the concentration of the rare-earth elements in the core is important. The EDS measurements show that Yb³⁺ and Er³⁺ concentrations are 1.21 at% and 0.06 at%, respectively. Consequently, the Yb³⁺ to Er³⁺ ratio is 20.17, which is close to the EYDF datasheet specification of 20. The experimentally obtained dopant ion concentration values were used to calculate absorption/emission cross-section areas (see Section 2.4).

2.2. Overlap Factor Calculation

To increase pumping efficiency, the inner cladding of double-clad doped optical fiber is often formed into a specific shape (e.g., star-shape [10], D-shape [11], flower-shaped [12], etc.). This improves pump absorption by supporting modal regimes that focus pump light toward the doped fiber’s core. The waveguide geometry of a double-clad fiber in the simulation model is represented using the so-called overlap factor. The overlap factor is defined as the following ratio:

$$\Gamma = \frac{A_c}{A_{icl}}, \tag{1}$$

where Γ is the overlap factor, A_c is the core area, and A_{icl} is the inner cladding area [10].

Fiber manufacturers tend to only provide overall geometrical dimensions without specifically providing core or inner-cladding areas. Accordingly, the estimation of A_c and A_{icl} becomes a task in itself. The overlap factor was obtained by analyzing the EYDF cross-section image, as shown in Figure 2a.

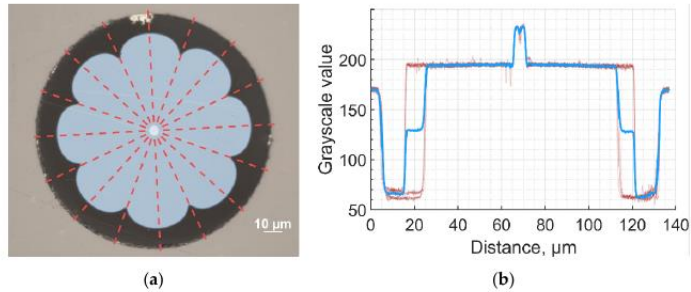


Figure 2. (a) Double-clad EYDF cross section; (b) the resulting line profiles in red with their average shown in blue.

The fiber’s cross-section in the visible spectral range is measured using the Eclipse LV150N microscope [13] with the Plan FLUOR BD objective lens from Nikon [14] coupled with the DS-Fi3, 5.9 Mpixel (2880 × 2048) camera [15]. A total of eight different crossings were selected from the cross-section image (see red dashed lines in Figure 2) all crossing the center. Measurements (pixel grayscale values versus diameter) are averaged to minimize image noise, as well as to account for the fiber’s imperfections, as shown in Figure 2b. Using this approach, four regions can be distinguished—two outer/inner cladding boundaries and two inner cladding/core boundaries. The exact position of the boundaries is calculated by fitting each transition region with a separate sigmoid function as described in [16]:

$$Z(x) = \frac{A}{1 + e^{c(x-x_0)}} + B, \tag{2}$$

where:

- Z(x) fiber profile;
- x position;
- A, B, c sigmoid function fitting coefficients;
- x₀ edge of the boundary.

We obtained the overlap factor value of 0.0027 and outer cladding diameter of 127.03 ± 0.01 μm, which is around 2 μm larger than the measurement of 125 μm specified by the manufacturer.

2.3. Refractive Index

The fiber’s core and cladding refractive indices are needed as inputs for absorption and emission cross-section calculations. Measurements of the refractive index difference can be seen in Figure 3.

The difference between the core and the first cladding is n₁ – n₂ = 0.0138 ± 0.0003, and the difference between the first cladding and the second cladding is n₂ – n₃ = 0.0239 ± 0.0003 at the wavelength of 633 nm. A reference value is required to calculate the absolute values of each refractive index. We suppose that the most robust reference, in this case, would be the inner cladding consisting of pure silica. The composition of this region was verified using an SEM elemental analysis, and it was found that the composition was most likely SiO_{1.9}. With this information and by referencing [17], we calculated the following refractive index values:

- Outer cladding n₃ = 1.505 ± 0.004;
- Inner cladding n₂ = 1.529 ± 0.004;
- Core n₁ = 1.543 ± 0.004.

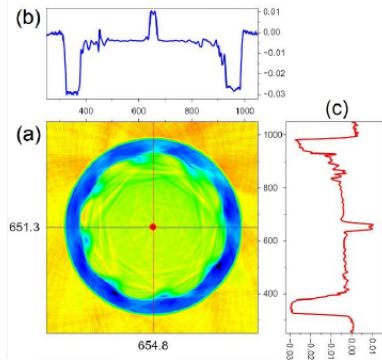


Figure 3. (a) EYDF cross-section refractive index difference measurements: (b) along the horizontal axis, (c) along the vertical axis.

2.4. Absorption and Emission Cross-Section

To estimate the EYDF’s absorption and emission cross-sections, we obtained the absorption spectra. The absorption spectra measurements were performed using a measurement setup consisting of Agilent’s Cary 7000 Universal Measurement Spectrophotometer [18] coupled with the FiberMate2™ Fiber Optic Coupler system from Harrick Scientific Products Inc [19]. The step size was set to 1 nm and spectral bandwidth to 5 nm to obtain an appropriate signal intensity.

An EYDF absorption cross-section was calculated from Er³⁺ and Yb³⁺ absorption spectra using two EYDF samples of different lengths. A 1 m-long EYDF sample was used to perform the absorption spectra measurements around 975 nm wavelength, whereas a 19 m-long sample was used for wavelengths around 1550 nm. In such a way, we avoided the saturation effect that can distort the absorption spectra measurements. The absorption around 975 nm was attributed to the optical transition of Yb³⁺: ²F_{7/2} → ²F_{5/2} and Er³⁺: ⁴I_{15/2} → ⁴I_{11/2}. Nonetheless, the impact of Er³⁺ on absorption in the 975 nm spectral range can be neglected since its absorption cross-section is significantly lower than for Yb³⁺ [20]. Furthermore, according to the previously mentioned concentration measurements, the EYDF has a 20 times higher Yb³⁺ concentration compared to the Er³⁺ concentration, further reducing the Er³⁺ absorption impact in the spectral region centered around 975 nm. Absorption around 1550 nm is attributed to Er³⁺ transition ⁴I_{15/2} → ⁴I_{13/2} because Yb³⁺ does not have absorption bands, other than ²F_{7/2} → ²F_{5/2}, in the infrared spectral region.

Finally, the absorption cross-section of Er³⁺ and Yb³⁺ was estimated using the measured absorption spectra, overlap factor, length, and Yb³⁺/Er³⁺ concentrations. The emission cross-section was estimated using the McCumber relation [21], which is related to rare-earth element emission and absorption. The output of this calculation is given in Figure 4.

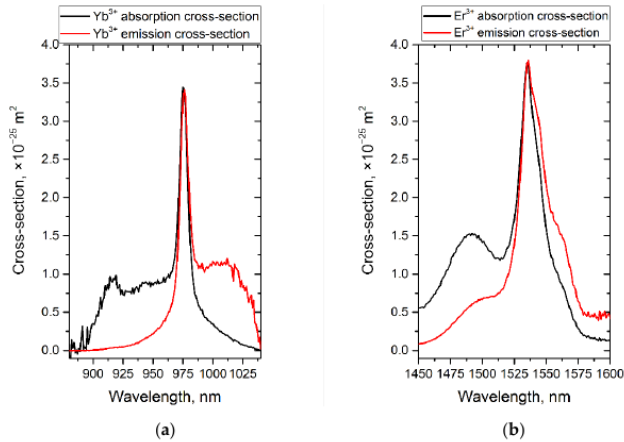


Figure 4. Absorption and emission cross-section spectra calculated from absorption measurements and other parameters for (a) Yb^{3+} and (b) Er^{3+} .

3. Amplifier Model and Setup

Cladding-pumped EYDFAs have the potential to be used as booster amplifiers for metro-access networks operating in the optical C-band (1530–1565 nm). DWDM signal allocation is typical for these types of networks. Accordingly, the first step is to create a wideband multichannel signal for testing the amplifier’s performance. In our case, we use a 48-channel signal with 100 GHz channel spacing at -20 dBm per channel (dBm/ch) fully covering the entire C-band.

This section is divided into two subsections where, first, we describe the simulation model that we use to estimate the expected key performance indicators over a range of fiber lengths and, second, we describe the experimental setup of the amplifier under test.

3.1. Simulation Setup

The experimentally obtained EYDF emission and absorption cross-sections and the calculated overlap factor are used as input parameters in the simulation setup of the cladding-pumped EYDFA. This simulation setup is built using VPIphotonics Design Suite [22]; its simplified diagram is shown in Figure 5. The input signal is represented using the experimentally measured spectrum of the 48-channel DWDM signal (see the description in Section 3.2). The main purpose of the simulations is to determine the gain characteristics and provide baseline values of the EYDF length and pump parameters for the experimental setup. Our model from [5] was further improved after measuring the gain of a 3 m-long fiber using the laboratory setup shown in Figure 6.

The revised model was then used to estimate the optimal EYDF length and pump power for a wideband signal amplification used in the further measurements that are analyzed in the Results section. The model is based on bidirectional signal propagation equations and multilevel rate equations for ion populations [23,24]. It is resolved in both the longitudinal and transverse directions considering several effects, such as $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ energy transfer, Rayleigh scattering, Kerr nonlinearity, excited-state absorption, and cross-relaxation effects [23]. The main parameters of the EYDF used in the simulations are summarized in Table 1. The EYDF output optical signal is sent through an optical isolator and a band-pass optical filter having a trapezoid-type transfer function (193.75 THz center

frequency and 5 THz bandwidth) to filter out any residual pump light before obtaining the output amplified signal spectrum.

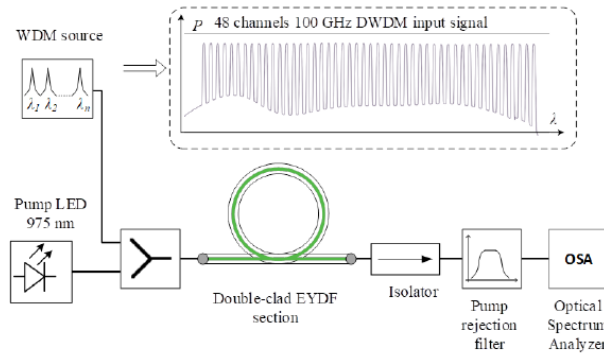


Figure 5. Simplified simulation setup of the cladding-pumped EYDFA.

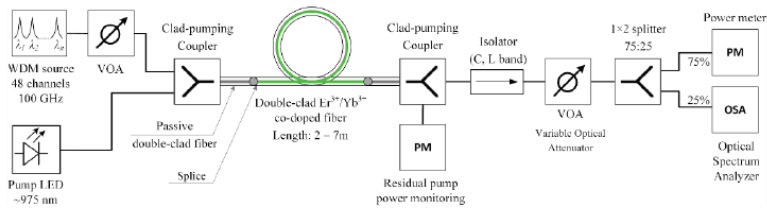


Figure 6. Simplified experimental setup of the cladding-pumped EYDFA. Amplifier’s optical section is between two clad-pumping fiber couplers.

Table 1. Amplifier test setup parameters.

| System parameters | |
|---|--|
| Number of channels | 48 |
| Channels carrier frequency range | 191.35–196.05 THz |
| Channel spacing | 100 GHz |
| Single-channel power (simulation) | −20 dBm |
| Single-channel power (experimental) | −25 to −10 dBm |
| EYDFA pump parameters | |
| Pump wavelength | 973–977 nm at 30 °C |
| Pump power | 0.6–2.5 W |
| Pumping direction | Co-propagating |
| Doped fiber parameters | |
| Length | 2–7 m |
| Er ³⁺ concentration | $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ |
| Yb ³⁺ concentration | $2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$ |
| Er ³⁺ /Yb ³⁺ cross-relaxation coefficient | $1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$ |
| Overlap factor (at 1530 nm) | 0.0027 |
| Overlap factor (at 980 nm) | 0.9203 |

3.2. Experimental Setup

To assess the per-channel gain of the experimental EYDFA, we used the input signal that was constructed by filtering a wideband ASE noise source (covering C and L optical bands with a -10 dB bandwidth of 1526–1630 nm) using a wavelength-selective switch (WSS). The WSS has a granularity of 12.5 GHz and a bandwidth of 4.825 THz. Accordingly, a dummy (data-unmodulated wavelengths) WDM signal, consisting of 48 channels that are each 37.5 GHz in bandwidth and located 100 GHz apart from each other, was obtained and is shown in the inset of Figure 5. As the pump source, a high-power multimode diode stabilized at 30 °C with a 6 nm bandwidth using a thermoelectric cooler was used in the setup (see Figure 6).

The minimum output power threshold of this pump source is 0.6 W. The active temperature control is important for this diode since, at higher temperatures, the output power decreases, and the spectrum shifts towards longer wavelengths. It was found that keeping the diode’s temperature lower resulted in higher EYDFA gain rather than being closer to the EYDF peak absorption wavelength (976 nm). The pump diode spectrum was centered around 975 nm, which is ~ 1 nm below the EYDF peak absorption wavelength.

Clad-pumping fiber couplers were connected to both ends of the EYDF. They were used to couple the signal and the pump into double-clad fiber and then to separate the signal from the residual pump, respectively. Optical power at the EYDF output was monitored for both the pump and the DWDM signal. Finally, the spectrum of the output signal was analyzed to obtain the per-channel gain.

4. Results and Discussion

In this section, we present and analyze the results obtained using the previously described simulation and experimental setups. First, we describe our observations related to spontaneous emission emergence. Subsequently, we analyze the amplifier’s gain at different pump power levels and EYDF lengths using experimental and numerical simulations results, revealing the performance of our in-house cladding-pumped EYDFA.

During the initial phase of working with the experimental EYDFA setup (ASE noise measurements and single-channel amplification), it was observed that the amplifier tends to amplify ASE noise, and thus produces stochastic peaks at the output spectrum. Under certain conditions, our EYDFA acted as an unstable laser; therefore, this aspect is studied more in detail. Optical spectra measured for the EYDFA configuration with no input signal are captured in Figure 7.

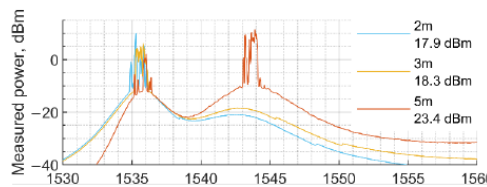


Figure 7. Optical spectra measured for the EYDFA configuration with no input signal with a pump power of 2 W. Lasing is seen that is temporally unstable both in wavelength (within 1 nm) and peak power.

Here, unstable lasing can be observed with no input signal. In the case of the 2 m and 3 m short EYDF spans, lasing is observed around 1536 nm (corresponding to Er^{3+} emission peak; see Figure 4) when the pump power approaches 0.6 W, which corresponds to the threshold current of the pump source. For the 5 m-long EYDF span, we do not observe lasing at 1536 nm; instead, lasing happens around 1544 nm. With the pump power increased to 2 W, we observed a significantly higher lasing at 1544 nm and some (minor) lasing at 1536 nm. Increasing the EYDF length resulted in a more uniform gain profile in

the 1544–1565 nm region, as well as a gradual reabsorption of the emission at 1536 nm. The intensity of the observed lasing is proportional to the EYDF length. Yet, it can be mitigated using a sufficiently powerful C-band signal and a power splitter to dump the excess pump light (see Figure 6). It is likely that a laser cavity within the EYDFA is formed due to reflections from connectors, which eventually produces a pulsating laser. It is possible that, with these measurements, we observe the starting phase of a random fiber laser that was demonstrated in [25,26] for cladding-pumped EYDF at similar pump power levels.

The simulation results summarizing the EYDFA gain characteristics are given in Figure 8. It is shown that increasing the EYDF’s length results in the output gain increase in the 1535–1545 nm region, but the gain peak shifts towards longer wavelengths. The corresponding gain values are summarized in Table 2. Such a significant increase is not observed in other wavelength regions of the gain spectrum, i.e., the gain profile is uneven. For instance, at 2 W pump power when the EYDF’s length is increased from 3 to 5 m, an additional 5 dB is gained in the range between 1555 and 1565 nm, and an additional 2.8 dB is gained if the EYDF’s length is further increased to 7 m.

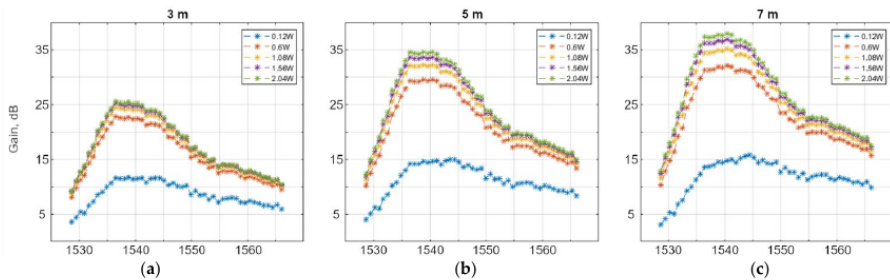


Figure 8. Simulation results showing the EYDFA gain for a -20 dBm/ch 48-channel signal depending on the pump power (0.12–2 W) at three EYDF lengths: (a) 3 m, (b) 5 m and (c) 7 m.

Table 2. Simulated EYDFA gain evolution.

| EYDF length, m | 3 | 5 | 7 |
|--------------------------|--------|--------|--------|
| Gain max., dB | 25.6 | 34.6 | 38 |
| Peak gain wavelength, nm | 1536.4 | 1538.8 | 1540.4 |
| Δ Gain, dB | - | 9.1 | 3.4 |

Our simulations also show that, in the case of a 3 m-long EYDF, the amplifier produces gain spectra that are almost identical at 1 W and 2 W pump powers. This means that, for relatively short EYDF spans, 1 W of pump power is enough to ensure excited Er^{3+} population inversion to maintain signal amplification. Consequently, using pump powers above 1 W can be considered excessive for such short doped fiber spans. For example, in the case of the 3 m-long EYDF, increasing the pump power from 1 W to 2 W gives only 0.8 dB of additional gain. However, longer EYDF spans provide a larger gain increase (2.3 dB and 2.8 dB in the case of the 5 m- and 7 m-long EYDF, respectively). These results, obtained via simulations, are used as a baseline to select the EYDF length and pump power for the experimental setup. Accordingly, the first laboratory test was performed using a 7 m-long EYDF span pumped with 3 W. The obtained experimental results show a narrower and flatter EYDFA gain profile compared to the simulations; it is shifted towards longer wavelengths and has a steep drop below 1544 nm. Hence, the 7 m-long EYDF is too long for the chosen application; therefore, the measurements are repeated using shorter EYDF spans (5 m, 3 m, and 2 m) to determine a more appropriate length.

The comparison between the experimental and simulation results is shown in Figure 9. The closest match is in the case of the 3 m-long EYDF in the wavelength range of 1545–1560 nm. Experimental data for longer (5 m and 7 m) EYDF sections shows the appearance of signal reabsorption in the spectral range 1530–1540 nm that coincides with the Er^{3+} maximum absorption (see Figure 4). This results in additional signal gain around 1560 nm. It is evident that signal reabsorption has not been taken into the account by our simulation model to the required degree. Simulations and experimental data mismatch (especially for 2 m) may be related to the specific shape of the EYDF’s inner cladding (and its pump-focusing properties), which is represented in a simplified form in the simulation model as a coefficient (overlap factor). Although simulation data cannot be used to accurately describe the gain shape, these data are useful for determining the initial values of the laboratory setup.

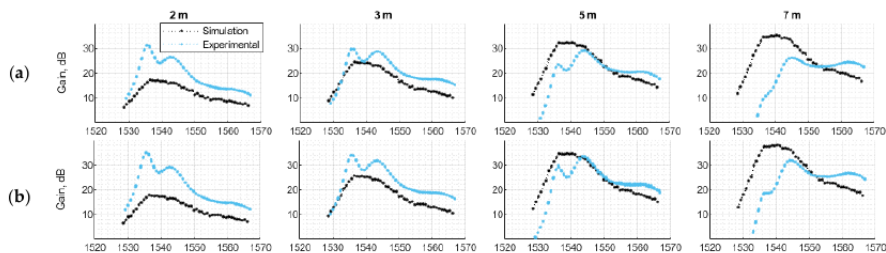


Figure 9. Experimental EYDFA gain measurements overlaid on simulation results at -20 dBm/ch signal power and a pump power of (a) 1 W and (b) 2 W.

The per-channel gain of the EYDFA setup is analyzed using a 48-channel dummy WDM signal constructed using the wideband ASE noise source and WSS (as described in Section 3). After filtering, the signal power level is adjusted with a variable optical attenuator. Note that the number of DWDM channels/wavelengths is limited by the operating band of the WSS. The gain spectra of the cladding-pumped EYDFA are captured for the configurations with the EYDF span lengths of 2 m, 3 m, 5 m, and 7 m, while the signal input power is kept constant at -25 dBm/ch, -20 dBm/ch, and -10 dBm/ch (see Figure 10).

We observed undesirable lasing peaks at pump power above 1 W for the cases with the signal input power of -25 dBm/ch. At the highest signal input power level (-10 dBm/ch), the amplifier’s usable bandwidth shifts towards longer wavelengths as the EYDF length increases. At the lowest signal input power level (-25 dBm/ch) when increasing the EYDF length from 2 m to 5 m, the power levels of channels at 1544 nm remain almost unchanged (less than 1 dB difference), whereas the longer wavelengths experience significantly higher gain. If the EYDF length is further increased from 5 m to 7 m, channels with wavelengths above 1544 nm are amplified even more. However, the gain is decreased by 10 dB for channels at around 1536 nm and a rapid drop-off was seen below 1536 nm. Such amplification is explained by the Er^{3+} population inversion. Specifically, the high population inversion [27] of Er^{3+} required for the amplification at these wavelengths was not maintained throughout such a long EYDF span, which results in the non-uniformity of the gain spectra. Additionally, we observed that the first meter of the EYDF glows in green when the pump source is active (shown in Figure 11). This glow originates from the Er^{3+} upconversion luminescence, indicating a high population inversion. The effect diminishes when the input signal is coupled into the EYDFA for the amplification as some of the excited Er^{3+} return to the ground state by amplifying our C band signal.

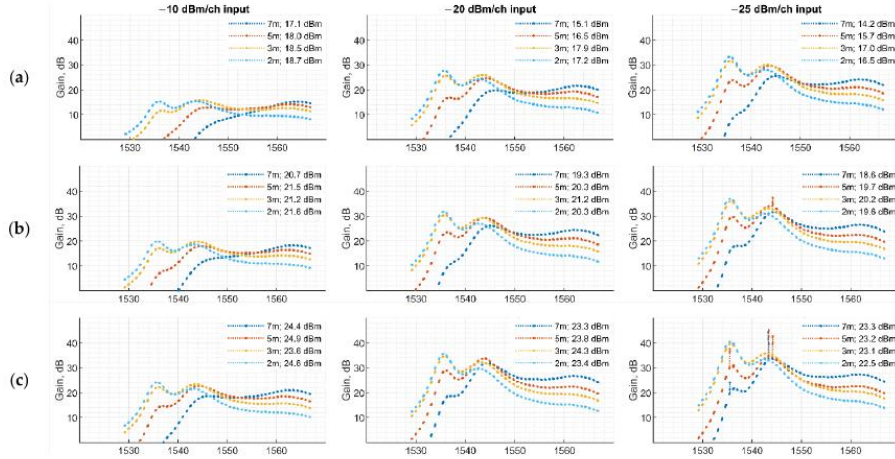


Figure 10. Experimentally determined EYDFA gain at three different input signal powers vs. EYDF length and pump power of (a) 0.6 W, (b) 1 W, (c) 2 W. Legend on each graph shows fiber length and total output power.

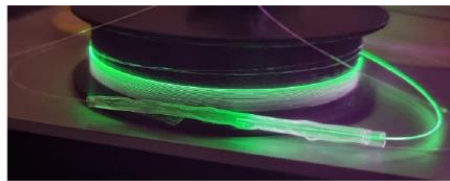


Figure 11. Green luminescence of the EYDF while pump is active. A purple tinge is also visible due to some pump light leaking from the fiber that is picked up by the camera. The fusion splice protection sleeve had its steel rod removed to avoid potential thermal expansion effects.

Figure 12 shows that, regardless of the signal input power, a portion of the pump power that is absorbed by the 5 m EYDF span increases only by 0.5 dB, even when the pump power is increased from 0.6 W to 2.5 W and then further to 3.5 W.

For the 2 m EYDF, the pump power absorption remains nearly constant. A slight mismatch at low pump powers is explained by the instability of the output power when the pump diode is biased slightly below or at its specified minimum threshold current. For any given operational pump power, the major portion of the signal amplification is achieved within the first few EYDF meters, having reached a point of power saturation. Total output power increases only by 1 dB when the fiber length is increased from 2 m to 5 m. The signal output power is not strongly dependent on its input power, even for levels above those reasonably expected in telecom links. Given the absorption peak at 1536 nm, longer EYDF lengths cannot be used for the wavelength channel transmission at these lower wavelengths as the signal loss is not sufficiently counteracted by the gain in this part of the spectra. The longer the EYDF length, the more the lower wavelengths are absorbed and the more their power is redistributed to longer wavelengths, effectively shifting the usable bandwidth towards the far end of the optical C-band.

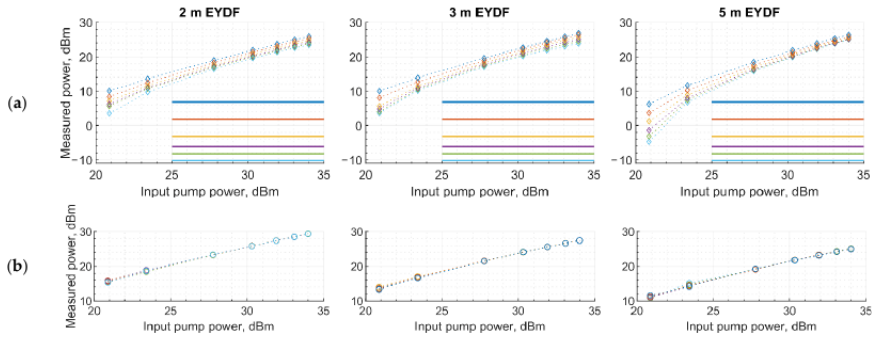


Figure 12. Measured power for (a) output signal and (b) residual pump coming out of the EYDF. Horizontal lines indicate total input signal power and correspond to -10 (top), -15 , -20 , -23 , -25 , -27 (bottom) dBm per channel.

5. Conclusions

In this paper, we show the process of designing an inhouse cladding-pumped EYDFA prototype using numerical simulations and experimental characterization. We identified the EYDFA configuration (a co-doped fiber length, pump power, input signal power) suitable for the signal amplification in a multichannel fiber-optic transmission system with dense wavelength allocation across the C-band. For the EYDFA, we used a commercial double-clad EYDF as an active medium. Therefore, we first experimentally determined the EYDF characteristics (specifically, Er^{3+} and Yb^{3+} absorption and emission cross-sections and overlap coefficients). Then, these were fed into a simulation model to determine some initial EYDFA settings, e.g., the EYDFA length and the pump power required to ensure the desired amplification, before moving to a laboratory setup. Finally, we used the developed prototype to investigate the EYDFA’s absolute gain and gain uniformity under different conditions using a 48-channel DWDM system with -20 dBm/ch. input power. The obtained results reveal that the EYDFA setup, consisting of a 5 m-long EYDF span that is optically pumped by a multimode diode with 2 W pump power, ensures practical levels of amplification in the 1534–1565 nm band. Across this wavelength range, the EYDFA provides >21 dB per-channel gain with 12 dB gain ripple when amplifying 48 channels at 100 GHz spacing.

For pump powers up to 2 W, the population inversion of Er^{3+} required for signal amplification in the wavelength region below 1544 nm is not maintained throughout EYDF spans longer than 5 m. This causes a gain increase in the upper C-band, which occurs due to signal reabsorption from the lower C-band. Furthermore, during the EYDFA characterization, we observed unstable lasing for the EYDFA configurations when combining high pump power and low input signal power. For the input signal power below -20 dBm/ch, the EYDFA generated some lasing modes even when the pump power was as low as 0.6 W. Two peaks were distinguished at 1536 and 1544 nm. The intensity of those peaks is proportional to the EYDF length; however, such behavior can be eliminated by increasing the power of the input C-band signal.

Author Contributions: Conceptualization, K.Z., A.S., S.S., O.O., J.G., V.B.; methodology, K.Z., A.U., A.S., S.O., J.G.; validation, K.Z., A.S., J.G.; formal analysis, A.U., A.S., S.O., I.L., J.G., L.B.; investigation, K.Z., A.U., D.P., A.S., S.S., O.O., S.O., I.L., J.G., L.B.; data curation, K.Z., A.U., A.S., S.O., J.G.; writing—original draft preparation, K.Z., A.U., A.S., S.S., S.O., I.L., J.G., L.B.; writing—review and editing, K.Z., A.U., A.S., O.O., J.G.; visualization, K.Z., S.O., I.L., J.G., L.B.; supervision, A.S., S.S., J.G., V.B.; project administration, A.S., S.S., J.G., V.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work is supported by the European Regional Development Fund project No. 1.1.1.1/18/A/068.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data that supports the findings of this study are available within the article.

Acknowledgments: The Institute of Solid State Physics, University of Latvia, as a Center of Excellence, has received funding from the European Union's Horizon 2020 Framework Programme H2020-WIDESPREAD-01-2016-2017-TeamingPhase2 under grant agreement No. 739508, project CAMART2. We express our gratitude to rer. nat. Nicoletta Haarlamert from Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering IOF for the refractive index measurements of ytterbium/erbium-co-doped fibers.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Peterka, P.; Koška, P.; Jasim, A.A.; Kanagaraj, N.; Aubrecht, J.; Kamrádek, M.; Podrazký, O.; Todorov, F.; Kašík, I.; Honzátko, P. Enhanced Pump Absorption Efficiency in Coiled and Twisted Double-Clad Fibers for Fiber Lasers. In Proceedings of the 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Angers, France, 9–13 July 2019; pp. 1–4. [CrossRef]
- Andrianov, A.V.; Skobelev, S.A.; Balakin, A.A.; Anashkina, E.A.; Litvak, A.G. Tapered Multicore Fiber for High-Power Laser Amplifiers. *IEEE Photonics J.* **2022**, *14*, 1505606. [CrossRef]
- Anashkina, E.A.; Andrianov, A.V. Design and Dispersion Control of Microstructured Multicore Tellurite Glass Fibers with In-Phase and Out-of-Phase Supermodes. *Photonics* **2021**, *8*, 113. [CrossRef]
- Marisova, M.P.; Andrianov, A.V.; Leuchs, G.; Anashkina, E.A. Dispersion Tailoring and Four-Wave Mixing in Silica Microspheres with Germanosilicate Coating. *Photonics* **2021**, *8*, 473. [CrossRef]
- Supe, A.; Olonkins, S.; Udalcovs, A.; Senkans, U.; Mūrnieks, R.; Gegere, L.; Prigunovs, D.; Grube, J.; Elsts, E.; Spolitis, S.; et al. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 1702. [CrossRef]
- Matte-Breton, C.; Ryf, R.; Fontaine, N.K.; Essiambre, R.-J.; Chen, H.; Kelly, C.; Messaddeq, Y.; LaRochelle, S. Modeling and Characterization of Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-Doped Fibers for Amplification in Communication Systems. *J. Lightwave Technol.* **2020**, *38*, 1936–1944. [CrossRef]
- Al-Azzawi, A.A.; Almkukhtar, A.A.; Reddy, P.H.; Dutta, D.; Das, S.; Dhar, A.; Paul, M.C.; Zakaria, U.N.; Ahmad, H.; Harun, S.W. Compact and Flat-Gain Fiber Optical Amplifier with Hafnia-Bismuth-Erbium Co-Doped Fiber. *Optik* **2018**, *170*, 56–60. [CrossRef]
- Miluski, P.; Kochanowicz, M.; Zmojda, J.; Dorosz, D.; Lodziński, M.; Baranowska, A.; Dorosz, J. Eye Safe Emission in Tm³⁺/Ho³⁺ and Yb³⁺/Tm³⁺ Co-Doped Optical Fibers Fabricated Using MCVD-CDS System. *Opt. Mater.* **2020**, *101*, 109711. [CrossRef]
- PathfinderTM X-ray Microanalysis Software. Available online: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/IQLAADGABKFAQOMBJE> (accessed on 20 January 2022).
- Várallyay, Z.; Szabó, Á.; Rosales, A.; Gonzales, E.; Tobioka, H.; Headley, C. Accurate Modeling of Cladding Pumped, Star-Shaped, Yb-Doped Fiber Amplifiers. *Opt. Fiber Technol.* **2015**, *21*, 180–186. [CrossRef]
- Jeong, Y.; Sahu, J.K.; Payne, D.N.; Nilsson, J. Ytterbium-Doped Large-Core Fiber Laser with 1.36 KW Continuous-Wave Output Power. *Opt. Express* **2004**, *12*, 6088–6092. [CrossRef] [PubMed]
- Supe, A.; Spolitis, S.; Elsts, E.; Mūrnieks, R.; Doke, G.; Senkans, U.; Matsenko, S.; Grube, J.; Bobrovs, V. Recent Developments in Cladding-Pumped Doped Fiber Amplifiers for Telecommunications Systems. In Proceedings of the 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 19–23 July 2020; pp. 1–6. [CrossRef]
- Eclipse LV150N and LV150NA | Upright Microscopes | Nikon Metrology. Available online: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/industrial-microscopes/upright-microscopes-eclipse-lv150n-and-lv150na> (accessed on 16 December 2021).
- Nikon | Industrial Metrology | Objectives for Industrial Microscopes. Available online: <https://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/microscope/industrial-microscopes/accessory/objective/> (accessed on 16 December 2021).
- DS-Fi3 | Digital Sight Cameras | Nikon Metrology. Available online: <https://www.nikonmetrology.com/en-gb/industrial-microscopes/digital-sight-cameras-ds-fi3> (accessed on 16 December 2021).
- Lee, S.W.; Lee, S.Y.; Park, H.J. Precise Edge Detection Method Using Sigmoid Function in Blurry and Noisy Image for TFT-LCD 2D Critical Dimension Measurement. *Curr. Opt. Photon. COPP* **2018**, *2*, 69–78.
- Ma, H.-P.; Yang, J.-H.; Yang, J.-G.; Zhu, L.-Y.; Huang, W.; Yuan, G.-J.; Feng, J.-J.; Jen, T.-C.; Lu, H.-L. Systematic Study of the SiOx Film with Different Stoichiometry by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition and Its Application in SiOx/SiO2 Super-Lattice. *Nanomaterials* **2019**, *9*, 55. [CrossRef] [PubMed]

18. Multi-Angle Absolute Specular Reflectance, Cary UMA | Agilent. Available online: <https://www.agilent.com/en/product/molecular-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-spectroscopy/uv-vis-uv-vis-nir-accessories/cary-universal-measurement-accessory-uma> (accessed on 16 December 2021).
19. RonD FiberMate2TM Fiber Optic Coupler. Available online: <https://www.harricksci.com/ftir/accessories/group/FiberMate2%E2%84%A2-Fiber-Optic-Coupler> (accessed on 16 December 2021).
20. Huang, F.; Liu, X.; Ma, Y.; Kang, S.; Hu, L.; Chen, D. Origin of near to Middle Infrared Luminescence and Energy Transfer Process of Er³⁺/Yb³⁺-co-Doped Fluorotellurite Glasses under Different Excitations. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 8233. [[CrossRef](#)]
21. McCumber, D.E. Einstein Relations Connecting Broadband Emission and Absorption Spectra. *Phys. Rev.* **1964**, *136*, A954–A957. [[CrossRef](#)]
22. VPIphotonics Design SuiteTM—Overview. Available online: <https://www.vpiphotonics.com/Tools/DesignSuite/> (accessed on 16 December 2021).
23. VPIphotonics GmbH. *VPIcomponentMaker Fiber Optics User's Manual*; VPIphotonics GmbH: Berlin, Germany, 2020; pp. 176–204.
24. VPIphotonics GmbH. *VPIcomponentMaker Fiber Optics Module Reference*; VPIphotonics GmbH: Berlin, Germany, 2020.
25. Meng, Q.; Li, J.; Wu, H.; Han, B.; Wang, Z. Cladding-Pumped Erbium-Ytterbium Co-Doped Random Fiber Laser. In Proceedings of the 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), Wuzhen, China, 7–10 August 2017; pp. 1–2. [[CrossRef](#)]
26. Meng, Q.; Wu, H.; Han, B.; Li, J.; Wang, Z. LD-Pumped Random Fiber Laser Based on Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber. *Photonics Sens.* **2020**, *10*, 181–185. [[CrossRef](#)]
27. Bai, X.; Wang, M.; Yang, Y.; Liu, Z.; Jia, W. Experimental and Theoretical Analysis on Pump Spectral Propriety of Single Frequency Erbium-Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier. *J. Phys. Commun.* **2021**, *5*, 015005. [[CrossRef](#)]

RAKSTS-3: Comparison of Single-pump FOPA and Raman Assisted FOPA Performance in a 16 Channel DWDM Transmission System.

S. Olonkins, A. Supe, V. Bobrovs and **D. Prigunovs**, "Comparison of Single-pump FOPA and Raman Assisted FOPA Performance in a 16 Channel DWDM Transmission System," *2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - Fall)*, Xiamen, China, 2019, pp. 723-727, [doi: 10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021339](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021339).

Comparison of Single-pump FOPA and Raman Assisted FOPA Performance in a 16 Channel DWDM Transmission System

Sergejs Olonkins, Andis Supe, Vjaceslavs Bobrovs, and Dmitrijs Prigunovs

Institute of Telecommunications, Riga Technical University, Riga, Latvia

Abstract— In this paper the authors implement a Raman assisted fiber optical parametric amplifier solution and compare the its configuration with the configuration obtained for a standard single-pump parametric amplifier that ensured approximately the same level of amplification. The simulation results are obtained in a 16 channel dense wavelength multiplexed transmission system with intensity on-off keying modulation and 50 GHz channel spacing. Both amplifiers are used as preamplifiers in the transmission system under attention. While comparing the amplifiers the main focus is on the total amount of power required for the amplifier to ensure a certain level of amplification, and the quality of the amplified signal.

1. INTRODUCTION

Under the influence of the all-time growing demand for higher network capacity, huge effort is being made to increase the throughput of modern optical transmission systems, especially, wavelength multiplexed (WDM) transmission systems [1, 2]. Optical amplifiers are one of the key elements of WDM transmission systems, as the usable wavelength band in such systems is limited by the gain bandwidth ensured by the applied signal amplification solution. The gain bandwidth of Erbium-doped fiber amplifiers (EDFA), the type of amplifiers that is commonly used in WDM systems, is highly limited by the material characteristics of the gain medium [3]. Therefore, it is evident that to keep up with the constantly growing demand for higher network capacity, conventional EDFAs will need to be replaced by an alternative amplification solution.

Fiber optical parametric amplifiers (FOPAs) are an innovative type of amplifiers, that can be considered as one of the possible replacements of conventional EDFAs. Gain characteristics of FOPAs demonstrate why this type of amplifiers is likely to be widely used all around the world in near future: gain up to 70 dB [4] and gain bandwidth up to 270 nm [5] was reported. Additionally, to remarkable gain characteristics, FOPAs provide a number of additional application for all-optical signal processing, such as: wavelength conversion by utilizing the four-wave mixing produced idler spectral components, dispersion compensation by utilizing phase conjugation in the middle of a transmission link, $2R$ and $3R$ all-optical signal regeneration ($2R$ — signal power and form regeneration; $3R$ — signal power, form, and phase regeneration) and modulation format conversion [6–10].

Unfortunately, performance of FOPAs is highly affected by several factors, such as: high gain sensitivity to phase mismatch between the interacting spectral components, stimulated Brillouin scattering (SBS), relative intensity noise, four-wave-mixing (FWM) produced inter-channel crosstalk and, in case of dual-pump FOPAs, stimulated Raman scattering (SRS) [11].

Despite the negative impact on SRS, this fiber non-linearity can also be used to increase the performance of single-pump FOPAs by supplying additional power to the parametric pump during amplification. In this paper the authors compare the performance of such Raman assisted FOPA (RA-FOPA) solution with the performance of a standard single-pump FOPA, that ensure approximately the same level of amplification in a 16 channel dense wavelength division multiplexed (DWDM) transmission system. During the research the focus is on the total amount of power required for the amplifier to ensure a certain level of amplification, and the quality of the amplified signal.

2. SIMULATION SETUP

The main purpose of this section is to introduce the simulation model used within this research. This simulation model represents a 16 channel DWDM transmission system with 10 Gbps transmission speed per channel, non-return to zero intensity on-off keying (NRZ-OOK) modulation, 50 GHz channel spacing and a parametric preamplifier. This model is displayed in Fig. 1.

As can be seen from Fig. 1, the output radiation of all 16 channels, that occupy the frequency band from 196.4 THz till 197.15 THz (from 1520.6 nm till 1526.4 nm), is combined into a single optical flow and sent through an optical attenuator with total input signal attenuation of 37 dB, that in our case represents approximately 150 km of transmission fiber and insertion loss of a fiber

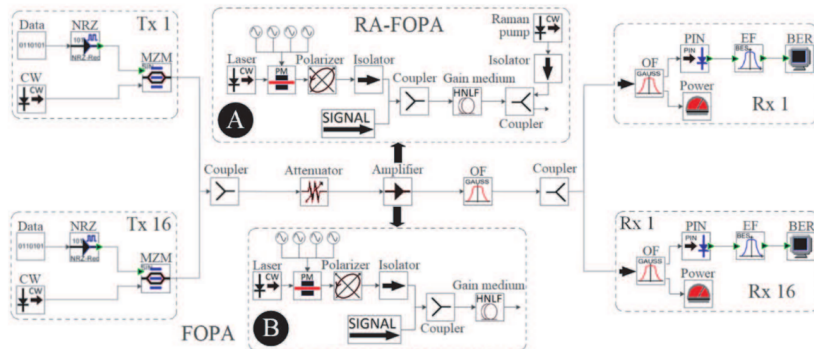


Figure 1: Simulation model of 16 channel 10 Gbps WDM transmission system with NRZ-OOK modulation format and (a) a RA-FOPA preamplifier or (b) a single-pump FOPA preamplifier.

Bragg grating, that is required for dispersion compensation purposes. The power of the signal at the input of the amplifier was approximately -42 dBm in each of the 16 channels.

As it was already mentioned previously, the RA-FOPA and the single-pump FOPA solutions were used as preamplifiers and are positioned right at the output of the optical attenuator. After passing through the preamplifier, the amplified signal is sent through a bandpass optical filter (OF) with 3-dB bandwidth of 15 nm, and is divided among 16 PIN photodiode based receivers with sensitivity of -23.9 dBm at 10^{-12} reference bit-error ratio (BER) by using an optical splitter with 13.5 dB insertion loss. At the input of each receiver the signal passes another bandpass optical filter with -3 dB bandwidth of 0.11 nm to filter out radiation that belongs to the neighbour channels. Double filtering is required because the extinction ratio of each filter is 20 dB, and, therefore, usage of a single filter is not enough to exclude the impact of the remaining pump radiation on the quality of the detected signal.

In the RA-FOPA solution (displayed in Fig. 1(a)) the output radiation of the 500 mW 192.92 THz pump is sent through a phase modulator, that is used for SBS mitigation, an optical polariser, to make sure that the state of polarization of the pump coincides with the state of polarization of the signal, an optical isolator, and then, is combined with the signal to be amplified. Afterwards the combination of the signal and the pump co-propagate through a 1 km long HNLF with 1553 nm zero-dispersion wavelength and a nonlinear coefficient of $15.0 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$, that is used as the gain medium and where signal amplification takes place. On the other end of the HNLF a 500 mW 206.13 THz Raman pump is sent in the counter-propagating direction in respect to the signal and the parametric pump. Such propagation direction of the Raman pump in the HNLF was chosen in order to avoid arising of FWM between the Raman and the parametric pumps.

The structure of the single-pump FOPA solution is similar, but in this case there is no Raman pump and the gain is ensured only by the parametric pump, the selection of the power and the frequency of which is described in the next section.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section the results obtained in simulation models with the Raman assisted FOPA and with the single-pump FOPA solution are introduced and analysed. The approach was to obtain the gain and noise characteristics of an RA-FOPA, the configuration of which could ensure BER values below 10^{-9} in all 16 channels, then, to find such single-pump FOPA configuration that would ensure approximately the same level of amplification, and, afterwards, to compare the quality of the amplified signal of these two amplification solutions.

As it was mentioned in the previous section, the RA-FOPA had the following configuration: the parametric pump had power of 500 mW with 192.92 THz central frequency, and the Raman pump had the same power (500 mW), but with 206.13 THz central frequency, that in respect to the signal and the parametric pump was counter-propagating in the 1 km long HNLF. The gain for

the 16 channels, produced by the RA-FOPA with the above described configuration, was 31.6 dB in average (from 31.4 dB in the 1st channel to 31.8 dB in the 9th channel).

Afterwards, such configuration of the single-pump FOPA that ensured approximately the same level of amplification was obtained. The goal was to find such configuration of the single-pump FOPA, that could ensure that gain for each of the 16 amplified channels would not be less than the gain for the same channels, produced by the RA-FOPA, using as low pump power as possible. The obtained results have shown that the lowest pump power that met the above mentioned condition was 755 mW, in this case pump central frequency of 192.91 THz was used. Such amplifier configuration ensured from 31.5 dB (16th channel) to 32 dB (7th channel). The gain spectrum produced by the RA-FOPA and the single-pump FOPA with above described configurations is displayed in Fig. 2.

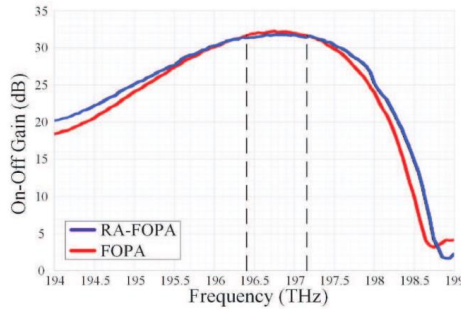


Figure 2: Spectra of the on-off gain produced by the single-pump FOPA (red line) and of the gain produced by the RA-FOPA (blue line).

If we compare the configurations of the two amplifiers, it is evident, that the single-pump FOPA solution has significantly higher amplification efficiency and, therefore, is the likely to be used from the power consumption point of view, as it required by 245 mW less pump power than the RA-FOPA solution to ensure approximately the same level of amplification. But, as the results introduced further in this article will show, the RA-FOPA has a number of advantages in respect to the standard single-pump FOPA. Fig. 2 clearly shows the 1st advantage of the RA-FOPA solution — the -3 dB bandwidth of the gain spectrum of the RA-FOPA is approximately by more than 0.1 THz wider than the gain spectrum of the single-pump FOPA.

To assess the amount of noise produced by the two amplification solutions, optical signal-to-noise ratio (OSNR) at the input of the receiver was obtained and compared for each of the 16 channels. The obtained results are displayed in Fig. 3.

Figure 3 clearly indicates that OSNR values observed in the system with the Raman assisted FOPA are higher in all channels except for the 10th channel, where the OSNR in the system with the standard single-pump FOPA was by 0.1 dB higher than in the system with the RA-FOPA solution (19.4 and 19.5 dB respectively). The highest difference in OSNR between the two systems is observed in the 1st channel, where it has reached 2 dB, but, in average OSNR in the system with the RA-FOPA was by 0.8 dB higher than in the system with the single-pump FOPA. Another tendency worth mentioning, that is observed in Fig. 3, is that in both systems lowest OSNR values are observed in the center channels, but the highest — in the side channels of the system, even though the level of amplification in these channels was lower than in the center channels. This shows that a significant part of noise is caused by inter-channel crosstalk, produced by channel-channel FWM (CC-FWM) interactions.

To assess the quality of the amplified signal, the dependence of BER values on the power of the detected signal in the channel with the highest BER (9th channel) was obtained both in the system with the RA-FOPA and in the system with the single-pump FOPA. It is important to note that BER values were not obtained directly, but were calculated based on OSNR values. The obtained dependencies are displayed in Fig. 4.

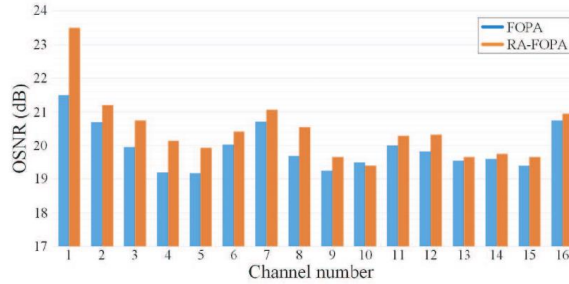


Figure 3: OSNR values of the detected signal obtained in each channel of the system with the single-pump FOPA (blue) and of the system with the RA-FOPA solution (orange).

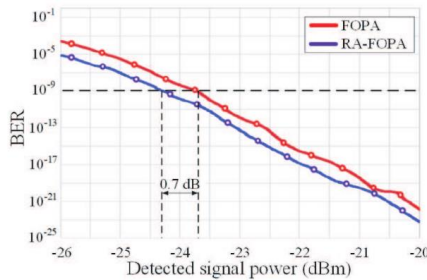


Figure 4: BER dependency on the power of the detected signal in the 9th channel in the system with the RA-FOPA (blue line) and in the system with the single-pump FOPA (red line).

Figure 4 shows that in the system with the RA-FOPA solution, by 0.7 dB weaker signal can be received to obtain BER below 10^{-9} , than in the system with the standard single-pump FOPA.

4. CONCLUSIONS

The aim of this research was to compare the performance of RA-FOPA and a standard single-pump FOPA preamplifiers in a 16 channel DWDM transmission system. The comparison was made in the same operating conditions — both amplifiers used exactly the same gain medium (1 km long HNLF) and both produced approximately the same gain for the input signal with -42 dBm power in each channel.

A 500 mW 192.92 THz parametric pump was used in the RA-FOPA solution, that in its turn was amplified by the 500 mW 206.13 THz counter-propagating Raman pump. Such configuration has amplified the input signal by 31.4–31.8 dB. Approximately the same gain was ensured also by the single-pump FOPA (31.5–32 dB), where a 755 mW 192.91 THz pump was used. Even though that the achieved gain was almost the same, the -3 dB bandwidth of the gain produced by the RA-FOPA was by 0.1 dB wider. It is important to point out that the RA-FOPA required by 245 mW more pump power than the single-pump FOPA to ensure the previously mentioned level of amplification.

After comparing the OSNR values of all channels after amplification it was found that OSNR in the system with the RA-FOPA was in average by 0.8 dB higher than in the system with the single-pump FOPA. Such result can be explained in the following way. FWM process, that is utilised in FOPAs for amplifying the signal, is highly dependent on the phase mismatch between the interacting spectral components (pump and the signal). On one hand, the further the signal and

the parametric pump co-propagate into the HNLF, the higher is this accumulated phase mismatch, the lower is the efficiency of FWM. But on the other hand, the efficiency of FWM rises together with the power of the interacting spectral components. This applies not only to the pump-signal interactions (amplification) but also to channel-channel interactions (CC-FWM). Therefore, if the parametric pump has an additional power supply throughout the whole process of amplification, the main part of the gain is produced further in the HNLF, where the efficiency of CC-FWM and parametric amplification is lower than at the beginning of the gain medium. In such a way, the signal power becomes significant enough to generate CC-FWM interactions when the efficiency of the CC-FWM itself has already decreased. As result, the amplifier generates less signal impairments for a certain level of amplification, than in the case when a standard single-pump FOPA solution is used. This also explains why the RA-FOPA required higher pump power to ensure a certain level of amplification than the standard single-pump FOPA.

The previously mentioned difference in CC-FWM produced inter channel crosstalk has resulted in 0.7 dB power penalty in the system with the standard single-pump FOPA in respect to the system with the RA-FOPA solution.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been supported by the European Regional Development Fund project No. 1.1.1.1/18/A/068.

REFERENCES

1. "Cisco visual networking index — Forecast and methodology 2017–2022, cisco systems," *White Paper*, No. 1, 2018.
2. Routray, S. K., A. Javali, R. Nyamangoudar, and L. Sharma, "Latching on to Keck's Law: Maintaining the high speed trends in optical communication," *4th Int. Conf. Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS 2017)*, 1–5, Coimbatore, 2017.
3. Putrina, J., S. Olonkins, and V. Bobrovs, "Investigation of in-line EDFA performance dependence on channel spacing in WDM transmission systems," *2016 Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, 17–21, Riga, 2016.
4. Torounidis, T., P. A. Andrekson, and B.-E. Olsson, "Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, No. 10, 1194–1196, May 2006.
5. Jamshidifar, M., A. Vedadi, and M. E. Marhic, "Continuous-wave onepump fiber optical parametric amplifier with 270 nm gain bandwidth," *Proc. ECOC*, paper 1.1.4, Sep. 1–2, 2009.
6. Karásek, M., P. Honzátko, J. Vojtěch, and J. Radil, "Multi-wavelength conversion at 10 Gb/s and 40 Gb/s based on 2 pumps FOPA," *2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks*, 1–4, Stockholm, 2011.
7. Gnauck, A. H. and R. M. Jopson, "Dispersion compensation for optical fiber systems," *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, 162–195, I. P. Kaminow and T. L. Koch, Eds., Academic, San Diego, CA, 1997.
8. Wang, J., et al., "All-optical 2R regeneration of a 160-Gbit/s RZOOK serial data signal using a FOPA," *IEEE Photonics Conference 2012*, 108–109, Burlingame, CA, 2012.
9. Wang, J., et al., "40-Gb/s 2-channel all-optical 3R regeneration using data-pumped fiber parametric amplification based on HNLF," *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 86–87, Shanghai, 2010.
10. Olonkins, S., A. Supe, I. Lyashuk, and J. Porins, "Demonstration of binary PolSK to OOK modulation format conversion using a single-pump fiber optical parametric amplifier," *2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP)*, 955–959, Manchester, 2014.
11. Marhic, M. E., *Fiber Optical Parametric Amplifiers, Oscillators and Related Devices*, 366, Cambridge University Press, University of Wales, Swansea, 2007.

RAKSTS-4: Design and Evaluation of Rare-Earth-Doped Fiber Amplifier for WDM-PON Transmission Systems.

D. Prigunovs et al., "Design and Evaluation of Rare-Earth-Doped Fiber Amplifier for WDM-PON Transmission Systems," *2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Chengdu, China, 2024, pp. 1-6, [doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618170](https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618170).

Design and Evaluation of Rare-Earth-Doped Fiber Amplifier for WDM-PON Transmission Systems

Dmitrijs Prigunovs¹, Ricards Kudojars¹, Patriks Morevs¹, Mareks Parfjonovs¹,
Andis Supe¹, Svitlana Matsenko¹, Aleksandr Krotov¹,
Dmitrii Redka¹, Vjaceslavs Bobrovs¹, and Toms Salgals^{1,2}

¹Institute of Telecommunications

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

²Nanophotonics Research Laboratory (NANO-Photon Lab.)

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

Abstract— With the increasing demand for high-speed and bandwidth-intensive applications, the deployment of wavelength-division multiplexing passive optical network (WDM-PON) systems has gained significant traction. This work addresses the critical aspects of designing and maintaining rare-earth-doped fiber amplifiers (REDFAs) for WDM-PON transmission systems, focusing on optimizing performance, reliability, and ease of maintenance. The design phase involves meticulously exploring rare-earth-doped fibers, emphasising selecting dopants that enhance amplification efficiency and maintain signal integrity across multiple wavelengths. Experimental results and performance evaluations highlight the designed REDFA's effectiveness in enhancing WDM-PON systems' transmission capabilities. The findings advance the understanding of rare-earth-doped fiber amplifiers and provide practical guidelines for deploying and maintaining high-performance WDM-PON transmission systems in telecommunications networks. This research lays the foundation for more robust and efficient next-generation (NG) optical access networks capable of meeting the escalating demands of modern communication infrastructures. An experimental model of REDFA is tested in different conditions using a 16-channel non-return-to-zero (NRZ) modulated WDM-PON transmission system operated in C-band, where BER quality below 1×10^{-9} is used as a threshold. Designed REDFA is realized with both co-propagation (980 nm) and counter-propagation (1480 nm) pump laser configuration to find optimal pumping laser parameters for the maximum performance of the optical communication system.

1. INTRODUCTION

Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (WDM-PON) is regarded as a promising broadband access solution because of its almost unlimited bandwidth, network security, simple management and upgradeability [1]. Passive Optical Network (PON) is an optical fiber-based network architecture that supports a much higher bandwidth access network than traditional copper-based networks. The inclusion of wavelength-division multiplexing (WDM) in PON offers the ability to support much higher bandwidth than in standard PONs [3]. WDM PONs are considered as a promising solution to meet the future bandwidth requirements of next-generation (NG) broadband access, with a capability to deliver more than 10 Gbps per subscriber [2].

We are witnessing ever-increasing demands for optical data networks, and the demands are not only for higher transmission speeds [3] but also for vital network capabilities that will allow long distances to be covered. Two main ways to solve this task are using higher data rates (Gbit/s per λ) and by expanding the transmission spectral region toward the shorter wavelength range (up to 1300 nm), specifically used for short-range transmission, e.g., data center interconnects (DCI). When a signal passes through the optical fiber, it is gradually attenuated by various physical or external factors, and it is advisable to build optical amplifiers into the transmission route.

Optical amplifiers could be divided into solid-state amplifiers and doped fiber amplifiers.

Solid-state amplifiers use a wide range of doped solid-state materials and different geometries to amplify optical signals. The variety of materials allows the amplification of different wavelengths while the shape of the medium can distinguish between more suitable for energy of average power scaling. Doped fiber amplifiers (DFAs) are optical amplifiers that use a doped optical fiber as a gain medium to amplify an optical signal [4].

There are various types of optical amplifiers: Erbium-Doped Fiber Amplifier (EDFA), Semiconductor Optical Amplifier (SOA), Thulium-Doped Fiber Amplifier (TDFA), Praseodymium-Doped

Fiber Amplifier (PDFA), Optical Parametric Amplifier (OPA), Ytterbium-Doped Fiber Amplifier (YDFA) and others. EDFA operates based on the principles of stimulated emission in erbium-doped fibers, allowing for the amplification of optical signals in the 1550 nm wavelength range [4]. Raman amplifiers utilize the Raman scattering effect in optical fibers to amplify signals by transferring energy between photons [5]. SOAs use semiconductor materials to amplify optical signals through the injection of current into the semiconductor [6]. TDFA employs thulium-doped fibers for signal amplification, typically in the mid-infrared wavelength range [7]. PDFA utilizes praseodymium-doped fibers for signal amplification [8]. OPA amplifies signals through a non-linear optical process called parametric amplification [9].

EDFA amplifiers are commonly used in optical networks due to their properties and resulting gain. In addition, there is continuous development and improvement in the field of EDFA amplifiers, especially considering the doped fibers used therein [10]. The EDFA is the most deployed fiber amplifier due to their properties and resulting gain. The core of an optical fiber is doped with trivalent erbium ions (Er^{3+}) and can be efficiently pumped with a laser at or near wavelengths of 980 nm and 1480 nm, and gain is exhibited in the C-band (1530–1565 nm) region up to ~ 80 nm. Basically C-band (~ 1525 nm to ~ 1565 nm) or L-band (~ 1565 nm to ~ 1610 nm) can be amplified by EDFAs. The principal difference between C- and L-band amplifiers is that a longer length of doped fiber is used in L-band amplifiers. EDFAs have found wide application in WDM for amplification [10, 11].

2. STRUCTURE OF WDM-PON TRANSMISSION SYSTEM

Wavelength division multiplexing (WDM) is the ultimate solution for fast, efficient, and secure bandwidth allocation in passive optical networks, and it is the subject of research proposals for next-generation NG broadband access [12]. WDM-PONs among the most widely used technology for high-capacity optical communication systems that introduce reasonable data transmission rates and large bandwidths.

Typical WDM-PON architecture includes a central office (CO), two cyclic arrayed waveguide gratings (AWGs), a trunk or feeder fiber, a series of distribution fibers, and optical network units (ONUs) at the subscriber premises as shown in Fig. 1. The first cyclic AWG located at the CO multiplexes downstream wavelengths to the ONUs and demultiplexes upstream wavelengths from the ONUs. The trunk fiber carries the multiplexed downstream wavelengths to the second cyclic AWG located at a remote node e.g., remote terminal (RT). The second AWG demultiplexes the downstream wavelengths and directs each one into a distribution fiber for transmission to the ONUs [13]. The downstream and upstream wavelengths allocated to each ONU are intentionally spaced at a multiple of the free spectral range (FSR) of the AWG, allowing both wavelengths to be directed in and out of the same AWG port that is connected to the destination ONU [14]. In Fig. 1, the downstream wavelengths destined for ONU 1, ONU 2, ..., and ONU N, are denoted as $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, respectively. Likewise, upstream wavelengths from ONU 1, ONU 2, ..., and ONU N, that are destined for the CO are denoted $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$, respectively. In a standard WDM PON, wavelength channels are spaced 100 GHz (0.8 nm) apart according to spectral grid allowance

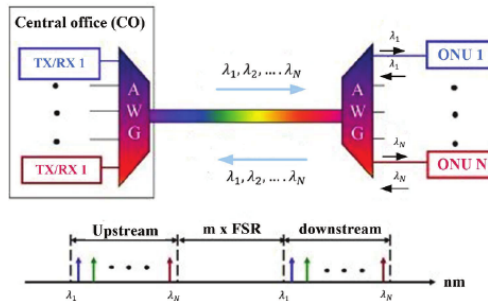


Figure 1: Structural scheme of WDM-PON architecture. Inset: Allocation of upstream and downstream wavelength channels into two separate wavebands.

following ITU-T G.694.1 recommendation. In systems classified as dense WDM-PON (DWDM), a channel spacing of 50 GHz or less is deployed [15, 16]. However, a WDM PON has a physical point-to-multipoint communication (P2MP) topology and logical peer-to-peer (P2P) connections are facilitated between the CO and each ONU. Here, the main distance limiting part is insertion loss (IL), therefore it is necessary to perform $\lambda_1, \lambda_2, \dots$, and λ_N modulated optical carrier signal amplification.

3. EXPERIMENTAL SETUP OF 100 GHz SPACED 16-CHANNEL REDFA-BASED WDM-PON TRANSMISSION SYSTEMS

The goal is to test and validate the experimental prototype of REDFA in different conditions using a 16-channel non-return-to-zero (NRZ) modulated WDM-PON transmission system operated in C-band, where BER quality below 1×10^{-9} is used as a threshold. The REDFA amplifier prototype was initially designed and experimentally validated in a laboratory environment. To test the performance of the REDFA amplifier, the data transmission is performed in a mathematical modeling environment. Emission and absorption spectra were obtained using standard measurement methods, where the co-doped erbium (Er^{3+}) fiber length was 20 m; please see Fig. 2. The mathematical model is used to characterize the performance of the developed rare-earth-doped fiber amplifier as shown in Fig. 3.

Authors have analyzed REDFA amplifier performance by applying of two different pump lasers, co-propagation (980 nm) and counter-propagation (1480 nm) pump laser, considering the best REDFA amplifier configuration in terms of received signal bit-error-rate (BER). Central office CO consists of an optical line terminal (OLT) with sixteen transmitters Tx in systems architecture.

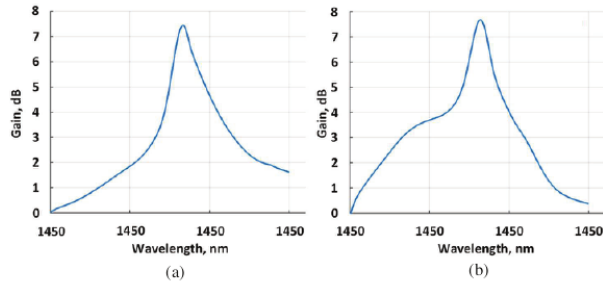


Figure 2: Measured (a) absorption and (b) emission cross-section spectra of the Er^{3+} co-doped optical fiber used for REDFA amplifier prototype.

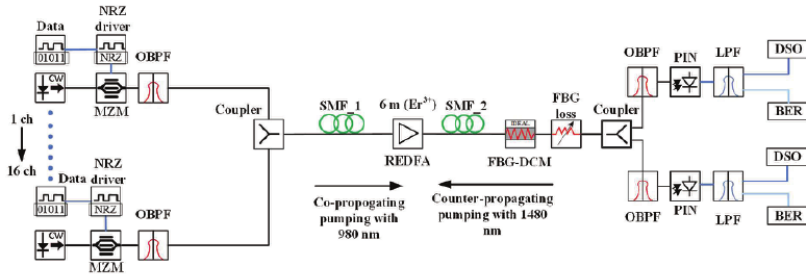


Figure 3: Experimental setup of 10 Gbit/s per λ NRZ modulated 100 GHz spaced 16-channel REDFA-based WDM-PON transmission system.

Each of the 10 Gbit/s transmitters (Tx) consists of one electrical pseudo-random bit sequence (PRBS) data source, an NRZ driver, which encodes the data from data sources by using the non-return zero (NRZ) encoding technique in such a way generating NRZ signal. The light source continuous wavelength (CW) laser with a linewidth of 25 KHz and an output power of +4 dBm is used [17]. Continuous wavelength CW laser source output is directly connected to the Mach-Zehnder modulator (MZM), which has a 3 dB insertion loss and 20 dB extinction ratio. Central frequencies for CW lasers were set from 192.8 THz to 194.3 THz for 100 GHz spaced 16-channel REDFA-based WDM-PON transmission system. The formed optical signals in the Tx part (1 to 16 channels) of the WDM-PON transmission system are passed through an optical bandpass filter (OBPF, 3-dB bandwidth of 50 GHz).

Next, optical signals are coupled by optical coupler and launched into a standard single-mode fiber (SMF) link section e.g., optical distribution network (ODN). REDFA optical amplifier are located between two SMF fiber link sections, where the first optical fiber section (SMF_1) is 50 km and the second (SMF_2) is 70 km long.

Chromatic dispersion (CD) post-compensation by fiber Bragg grating dispersion compensation module (FBG-DCM) is realized for all channels. Additional 3 dB attenuator is used for simulation of FBG-DCM's insertion loss (IL). An optical coupler follows at second SMF link end section.

An OBPF used for each Rx, has 3-dB bandwidth of 50 GHz, therefore divides the received optical signal into wavelengths and passes it on to the receiver section.

The NRZ modulated optical signals pass an optical link section consisting of two single-mode fiber SMF sections with a distance of 50 km and 70 km and rare-earth-doped fiber amplifier REDFA consisting of 6 m long co-doped erbium Er^{3+} fiber. Providing signal amplification, up to 140 mW pump power is used in Co-propagation ($\lambda = 980 \text{ nm}$), and up to 20 mW pump power is used for Counter-propagation ($\lambda = 1480 \text{ nm}$).

Receiver side consists of users or optical network terminals (ONTs), where each ONT consists of receiver Rx. Each Rx consists of a semiconductor photoreceiver PIN (sensitivity is -20 dBm for BER of 10^{-12}), electrical Bessel low-pass filter (LPF, 3-dB bandwidth is 10 GHz), and digital electrical oscilloscope (DSO) to evaluate the quality of the received signal, e.g., BER of the received signal pattern.

4. RESULTS AND DISCUSSION

An experimental prototype of REDFA is tested in different conditions using a 100 GHz spaced 16-channel NRZ modulated WDM-PON transmission system operated in C-band, where BER quality below 1×10^{-9} is used as a threshold. Fig. 4. shows eye diagrams of the received signal after transmission at the 10 Gbit/s data rate over a total 120 km SMF fiber link section. In this case, the REDFA amplifier uses co-propagating ($\lambda = 980 \text{ nm}$) 80 mW pump power while counter-propagating ($\lambda = 1480 \text{ nm}$) uses 130 mW pump power. As it is shown in Figs. 4(a) and 4(b), the BER of the received signal of the worst performing middle channel (8-channel) is 1.86×10^{-9} and 2.14×10^{-9} .

To test the BER performance against, the co-counter propagating ($\lambda = 980 \text{ nm}$) and counter-propagating ($\lambda = 1480 \text{ nm}$) pump powers were set in ranges of (20 mW to 140 mW) and (20 mW

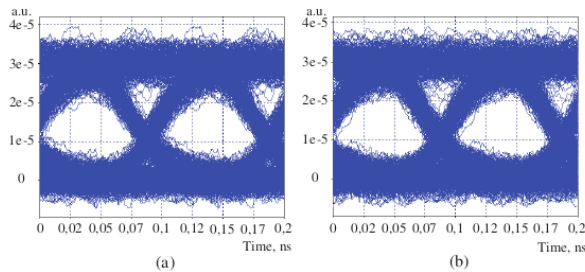


Figure 4: Eye diagrams of 10 Gbit/s per λ NRZ modulated and received signal (8th channel) of 100 GHz spaced 16-channel REDFA-based WDM-PON transmission system (a) Co-propagating REDFA 80 mW pump power and (b) Counter-propagating REDFA 130 mW pump power.

to 200 mW), respectively. Authors consider evaluating the optimal pumping power of REDFA amplifier (pumping power (mW) versus BER) for the worst performing 8th channel while choosing the pump power co-counter propagating ($\lambda = 980$ nm, from 20 mW up to 140 mW with a 10 mW step) and counter-propagating ($\lambda = 1480$ nm, from 20 mW up to 200 mW with a 10 mW step). The BER threshold of 1×10^{-9} to be the main criteria for the system's evaluation. As it is shown in the Fig. 5, the BER threshold of 1×10^{-9} has been reached at pumping power of 80 mW at co-propagating ($\lambda = 980$ nm), and at the pumping power of 130 mW at counter-propagating ($\lambda = 1480$ nm).

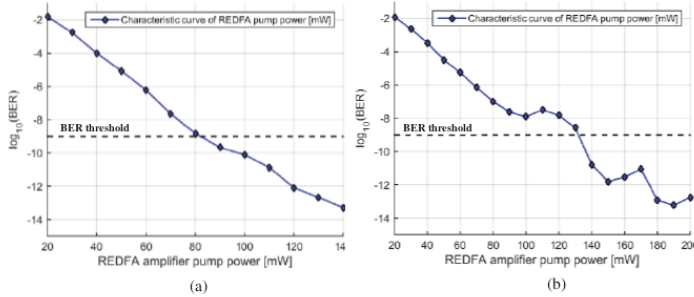


Figure 5: BER of 10 Gbit/s per λ NRZ modulated signal (8th channel) versus pumping power (mW) of REDFA amplifier for 100 GHz spaced 16-channel REDFA-based WDM-PON transmission system: (a) co-counter propagating ($\lambda = 980$ nm) and (b) counter-propagating ($\lambda = 1480$ nm).

5. CONCLUSION

In this paper, we have tested and validated the experimental prototype of rare-earth-doped fiber amplifier (REDFA) in different conditions using a 16-channel non-return-to-zero (NRZ) modulated wavelength-division multiplexing passive optical network (WDM-PON) transmission system operated in C-band (1530–1565 nm), where BER quality below 1×10^{-9} is used as a threshold. Emission and absorption spectra were obtained using standard measurement methods; the data transmission is performed in a mathematical modeling environment. We have realized and tested an experimental prototype of REDFA in two different conditions using both: co-propagation (980 nm) and counter-propagation (1480 nm) pump laser configuration to find optimal pumping lasers parameters for the maximum performance of 10 Gbit/s per λ NRZ modulated 100 GHz spaced 16-channel REDFA-based WDM-PON transmission system. To test the BER performance, the co-counter propagating ($\lambda = 980$ nm) and counter-propagating ($\lambda = 1480$ nm) pump powers were set in ranges of (20 mW to 140 mW) and (20 mW to 200 mW). The BER threshold of 1×10^{-9} has been reached at pumping power of 80 mW at co-propagating ($\lambda = 980$ nm), and at the pumping power of 130 mW at counter-propagating ($\lambda = 1480$ nm) for 10 Gbit/s NRZ modulated received worst performing per λ operated signal. The obtained performance indicators verify the feasibility of the simulated transmission system.

REFERENCES

1. Breuer, D., F. Geilhardt, R. Hülsermann, M. Kind, C. Lange, T. Monath, and E. Weis, "Opportunities for next-generation optical access," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 49, No. 2, S16–S24, 2011, DOI: 10.1109/MCOM.2011.5706309.
2. Salgals, T., S. Spolitis, S. Olonkins, and V. Bobrovs, "Investigation of 4-PAM modulation format for use in WDM-PON optical access systems," *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS)*, 2450–2454, St. Petersburg, Russia, 2017, DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262162.
3. Ozolins, O., T. Salgals, H. Louchet, M. Joharifar, R. Schatz, M. Gruen, T. Dippon, B. Krüger, D. Che, Y. Matsui, Y. Fan, A. Udalcovs, L. Zhang, X. Yu, S. Spolitis, V. Bobrovs, S. Popov,

- and X. Pang, "Optical amplification-free 200 Gbaud on-off keying link for intra-data center communications," *2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 1–3, San Diego, CA, USA, 2022.
4. Prigunovs, D., P. Morevs, M. Parfjonovs, T. Salgals, R. Kudojars, and V. Bobrovs, "Performance analysis of hybrid raman-EDFA amplifier in WDM transmission systems," *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2023) Proceedings*, Czech Republic, Prague, July 3–6, 2023, DOI:10.1109/PIERS59004.2023.10221537.
 5. Wu, H., J. Zhao, D. Ouyang, Y. Chen, M. Liu, Q. Lue, and S. Ruan, "Pulse-profile-maintaining characteristics of gain-switched nanosecond raman fiber laser and amplifier," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 14, No. 4, 1–6, Art No. 1545206, August 2022, DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3195757.
 6. Tsutsumi, T., T. Sakamoto, Y. Sakai, T. Fujiwara, H. Ou, Y. Kimura, and K. Suzuki, "Long-reach and high-splitting-ratio 10G-EPON system with semiconductor optical amplifier and N : 1 OSU protection," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, No. 8, 1660–1665, April 15, 2015, DOI: 10.1109/JLT.2015.2399500.
 7. Khan, M. M. and N. S. Gurjar, "Pump and signal optimization in thulium doped fiber amplifiers for S-band with amplified spontaneous emission and ion-ion interactions," *2022 IEEE 9th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, 1–6, Prayagraj, India, 2022, DI: 10.1109/UPCON56432.2022.9986482.
 8. Anashkina, E. A. and A. V. Kim, "Numerical simulation of ultrashort mid-IR pulse amplification in praseodymium-doped chalcogenide fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 35, No. 24, 5397–5403, December 15, 2017, DOI: 10.1109/JLT.2017.2775864.
 9. Wu, D., Z. Wu, Z. Xu, J. Zhou, P. P. Shum, Z. Cai, H. Fu, and H. Xu, "Compact continuous wave optical parametric amplifier for tunable 1.44–1.50 μm laser radiation," *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, 1–3, Hangzhou, 2016, DOI: 10.1109/ICOON.2016.7875843.
 10. Sindhi, U., R. Patel, K. Mehta, and V. Mishra, "Performance analysis of 32 channel WDM system using erbium doped fiber amplifier," *Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunication*, Vol. 2, No. 2, April 2013.
 11. Mishra, R., N. K. Shukla and C. K. Dwivedi, "Performance analysis and implementation of different pumping techniques on an EDFA amplifier," *2017 Third International Conference on Sensing, Signal Processing and Security (ICSSS)*, 39–44, Chennai, India, 2017.
 12. Ahmed, S. and M. Islam, "A technical review on optical access networks," *Nonlinear Dynamics*, Vol. 6, 79–95, 2018, 10.22457/pindac.v6n2a3.
 13. Kolar, J., J. Latal, A. Dhar, M. C. Paul, and Z. Wilcek, "Implementation of a thermally loaded EDFA amplifier into a WDM-PON optical network," *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1–6, Girona, Spain, 2017.
 14. Kataoka, N., G. Cincotti, N. Wada, and K.-I. Kitayama, "Demonstration of asynchronous, 40 Gbps \times 4-user DPSK-OCDMA transmission using a multi-port encoder/decoder," *2011 37th European Conference and Exhibition on Optical Communication*, 1–3, Geneva, Switzerland, 2011.
 15. Bach, H.-G., R. Kunkel, G. G. Mekonnen, R. Zhang, and D. Schmidt, "100 Gb/s photoreceivers for coherent and direct detection," *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 1–3, Los Angeles, CA, USA, 2011.
 16. Cvijetic, N., M.-F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, D. Qian, and T. Wang, "1.2 Tb/s symmetric WDM-OFDMA-PON over 90 km straight SSMF and 1 : 32 passive split with digitally-selective ONUs and coherent receiver OLT," *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*, 1–3, Los Angeles, CA, 2011.
 17. Cobrite DX1, "CoBrite DX1 — Tunable laser," *Technical Specification*, 1–2, 2024.

RAKSTS-5: Picosecond Pulse Expansion Using The Low-Pass Filter in Event Timer-Based PPM Communication System.

T. Solovjova, J. Semenako, **D. Prigunovs**, D. Ortiz, S. Spolitis and A. Aboltins, "Picosecond Pulse Expansion Using The Low-Pass Filter in Event Timer-Based PPM Communication System," 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), Riga, Latvia, 2022, pp. 29-34, [doi: 10.1109/MTTW56973.2022.9942566](https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942566).

Picosecond pulse expansion using the low-pass filter in event timer-based PPM communication system

Tatjana Solovjova
*Institute of Radioelectronics
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 tatjana.solovjova@rtu.lv*

Janis Semenako
*Institute of Radioelectronics
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 janis.semenako@rtu.lv*

Dmitrijs Prigunovs
*Institute of Telecommunications
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 dmitrijs.prigunovs@rtu.lv*

Dilan Ortiz
*Institute of Telecommunications
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 dilan.ortiz@rtu.lv*

Sandis Spolitis
*Institute of Telecommunications
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 sandis.spolitis@rtu.lv*

Arturs Aboltins
*Institute of Radioelectronics
 Riga Technical University
 Riga, Latvia
 aboltins@rtu.lv*

Abstract—Pulse position modulation (PPM) is a highly energy-efficient signaling technique in which the information is encoded in the time position of short pulses. However, due to the limited bandwidth of PPM receiver, detecting very short pulses could be challenging. The electrical pulse expansion can be applied to overcome this limitation. This is especially important in ultra-high precision timer applications in PPM signal demodulation. The paper discusses the radio frequency (RF) low-pass filter (LPF) application for pulse expansion purposes. Analytical and experimental results demonstrate the expansion of electrical pulses having 50 ps duration at full width at half maximum (FWHM) using several types of LPFs. The impact of the filter parameters on the PPM pulse shape, amplitude, and duration is discussed.

Index Terms—Filtering, Low-pass filters, Ultra wideband communication, Time measurement, Energy efficiency, Jitter, Modulation, Physical layer

I. INTRODUCTION

Energy efficiency is one of the critical aspects of modern communication systems. Nowadays, with a huge amount of information to be transmitted, systems associated with microwave or optical frequency bands become increasingly power hungry. One of the possible and highly effective techniques for encoding information using short pulses is pulse position modulation (PPM) [1].

This signaling technique leads to a significant increase in power efficiency compared to existing technologies. Fig. 1 shows the PPM symbol in which the pulse has four positions. All symbols are separated by a guard time T_g for information processing. As it is shown in Fig. 1 the specific payload interval has total time duration $M \cdot \tau = T - T_g$, where M is number of positions, τ is duration of one position, T duration of symbol. The number of bits transmitted per symbol B can be calculated as:

$$B = \log_2 M \tag{1}$$

Symbols with a larger number of positions M save energy, whereas higher transmission speed is achieved by minimizing the number of positions. Data transfer speed R can be calculated as follows:

$$R = \frac{B}{T} \tag{2}$$

PPM as a data modulation technique essentially sets seemingly simple requirements. It is necessary to ensure the generation of very short pulses with the possibility of changing the interval between pulses. For detection, there are a lot of different techniques. One of the most promising techniques for high-speed PPM is direct time measurement by event timer. The accuracy of the event timer is one of the limiting factors for this modulation technique. To save energy, pulses must be as short as possible, whereas, for the detection, pulse duration must be long enough for latching the timer. For example, the very precise event timer Eventech A033-ET [2], can detect events with the root mean square (RMS) accuracy of about 3 ps, but the pulse must be above the timer pulse detection threshold at least for 700 ps. Therefore, in most cases, it is necessary to perform pulse shaping, expansion, and automatic gain control before detection by the event timer.

This paper is organized as follows: Section II is devoted to the review of the current state-of-the-art in the area of impulse radio ultra-wideband (IR-UWB) pulse expansion, Section III outlines research subject and provides some theory, Section

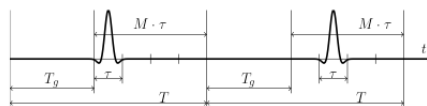


Fig. 1. Structure of example PPM signal having $M = 4$, $B = 2$ encoding "00" and "01"

IV provides numerical modelling of different low-pass filters (LPFs) and their impact on 50 ps pulses. Section V presents lab experiments with different microwave LPFs. Section VI is aimed to provide a comparative analysis of numerical modeling and practical lab experiments. Finally, Section VII draws conclusions made by the authors of this research.

II. RELATED WORK

Pulse shaping and expansion methods are widely used in various areas which employ generation, transmission, reception, and time measurements of radio frequency (RF) and optical signals. Analog and digital technologies are used for this purpose. The review [3] is devoted to the field of femtosecond pulse generation, in which optical waveforms are formed and generated using Fourier synthesis methods. The important improvement of the timing resolution is shown in [4], where the pulse expansion is implemented in the complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) time-to-digital converter (TDC). Accurate time interval measurement methods are implemented with various technologies in Gigahertz, Terahertz, and also optical bands [5], [6]. Pulse shaping and pulse expansion are widely used also in various optical devices and communication systems, biomedical, radar and imaging systems [3], wideband analog-to-digital converter (ADC) and digital signal processing [5], low-power ultra-wideband (UWB) communication systems [7], various measuring devices, time interval measuring systems [6], programmable pulse shaping filters [8], time tagging for space technology [9] and many other applications.

Various pulse shapes for UWB communications are being studied and implemented, but a significant place in UWB technologies is occupied by Gaussian pulse shape (this pulse provides a significant direct current (DC) component), Gaussian doublet pulse and Gaussian monocycle pulse [10]. In wireless technologies, the Gaussian monocycle pulse is used in most IR-UWB systems because of its spectral characteristics and because this shape can be generated in a transmission circuit without much difficulty [11]. However, various trapezoidal and sometimes bell-shaped trapezoidal pulses also play an important role in UWB applications. Choosing pulse shape in impulse systems is one of the main considerations in the system's design. Until now, many studies which address pulse shaping are mostly of theoretical importance and mainly refer to digital UWB communication systems. Chapter 6 of the book [1] looks at some features of non-traditional pulse shape generation and use in UWB, where so-called Hermit pulses are analyzed. This analysis concludes that it needs to be assumed that the receiver has complete information about the propagation channel and that the perfect synchronization to the received signal is realized.

The design of analog IR-UWB systems is simpler than the same digital ones [12] and could be used without channel synchronization that requires complex solutions [7]. UWB technologies do not exclude the use of transmission lines such as coaxial cables or twisted pair [13]. For example, in work

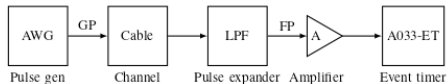


Fig. 2. Block diagram of a PPM transmission link

[14], it is proposed to combine optical fiber and twisted-pair or coaxial cable networks in access architectures based on UWB.

In any case, especially in a transmission channel linear model, the spectral density of the pulses is studied very carefully because it gives essential information about the characteristics of the pulses and their shape changes in the transmission channel. As a rule, the significant bands of the spectra of these pulses extend up to 20 GHz [1], [6]. Not only does the physical medium of the transmission channel affect pulse shape, but also the devices and components of the transmission channel have a significant impact. However, there are also cases when the shape and duration of the pulses are changed knowingly, for example, by applying filtering [10].

III. SYSTEM DESCRIPTION AND THEORY

Fig. 2 shows a block diagram of a PPM communication system which employs high accuracy event timer for the demodulation. It consists of a pulse generator with PPM modulator - for testing purposes arbitrary waveform generator (AWG) is usually used, wideband cable, LPF, amplifier, and event timer.

The PPM modulator governs the pulse generator with the desired waveform following incoming digital data. In this research, unipolar pulses with an full width at half maximum (FWHM) of 50 ps are considered. These PPM pulses will be referred to as generated pulses (GPs).

LPF is necessary for expanding the incoming pulses, and this research is devoted to evaluating the impact of different LPFs on the incoming signal. LPF must be chosen so that the pulse duration of the filtered pulse (FP) at FWHM is about 750 – 1000 ps, as the selected event timer dictates such duration. The reference levels of 20%, 50% (FWHM) and 80% of waveform, used in this paper are explained in

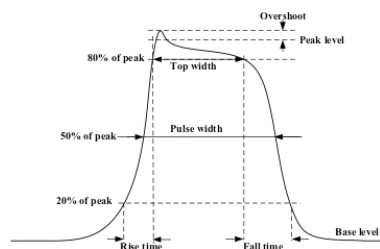


Fig. 3. Key parameters of the pulse.

Fig. 3. More information on pulse parameters can be found in IEEE standard [15]. In the ideal case, the shape of the FP must be as flat as possible and with a sufficiently small rise time and not a very large fall time if compared to the pulse duration. The aforementioned FP parameters are primarily determined by the timer used for demodulation. The main topic of this research is the transformation of GPs of various types by LPF that provide the necessary pulse duration and ensure an error-free response of the event timer.

In the research presented here, a model of a metallic cable-based transmission system (coaxial cable) is used, and pulses with a DC component are considered because such pulses propagate in lines with lower losses and distortions due to their spectral characteristics and their expansion in time is easier to implement in practice.

There are no strict limits to the FP waveform. The pulse shape must be smooth enough and has to have a specified pulse duration. Moreover, the FP must have a sufficiently small rise time to have less jitter during the pulse position or in other words time tag measurements.

Pulses employed in many applications (communications, radar, sonar, etc.) often turn out simple basic waveforms or their combinations. In the initial stage of the investigation, the generation of two types of pulses is considered: 1) Gaussian unipolar pulse; 2) rectangular pulse. Although such pulse forms are mathematical idealizations, it nevertheless gives a good insight into the propagation of pulses in the communication channel, their filtering, and the possibilities of obtaining such FP waveforms and their durations that would ensure the achievement of the goal set in the work.

In this research, which is focused on GPs having a duration around 50 ps, the shape of GPs is chosen to be practically easy to generate. Moreover, the received pulse must be possible to transform into another pulse with a shape and duration that would ensure sufficiently accurate time measurement with the lowest possible jitter.

The shape of the GP determines its spectral width (frequency bandwidth). If we compare pulses with the same duration, the lowest bandwidth can be achieved using a Gaussian pulse, whereas the broadest bandwidth (in an ideal case – infinite) is required by a rectangular pulse. The required RF bandwidth of other pulse shapes used in IR-UWB technologies - symmetric and non-symmetrical trapezoidal, triangular, raised cosine pulses - are between the bandwidth of the two pulse shapes mentioned above. Identification and study of the pulse bandwidth and spectral shape are essential when selecting a suitable LPF to obtain the required FP shape and duration [1]. Here, it is investigated whether the pulse shape and thus also its occupied bandwidth are important for pulse broadening. It is explained by performing numerical calculations with Bessel and Butterworth LPFs of different orders and cut-off frequencies [16].

In practice, it turns out to be more suitable for generating a trapezoidal pulse, and therefore in the study a more accurate approximation of a real pulse with a trapezoidal pulse was explored [17] and an even more accurate approximation with

a bell-shaped trapezoidal pulse was also investigated. The spectra of the last two pulses were compared and it was concluded that in cases when their rise and fall times are relatively small (up to 30 ps, if the pulse duration is around 50 ps), a simpler approximation with a cone-shaped pulse, which results from a bell-shaped trapezoidal, is completely sufficient pulse spectrum and its filtering differ minimally.

An asymmetrical trapezoidal pulse [17] is interesting in itself. In accordance with Fig. 3 it can be used to form both a symmetric trapezoidal pulse rise time is equal to fall time, symmetrical and asymmetric triangular pulses when top duration is 0, as well as a rectangular pulse when rise time and fall time are zero.

If time $\tau_{1/e}$ denotes the duration of the Gaussian, the pulse at a level $1/e$ of its maximum value A , then its mathematical expression of such pulse is:

$$s_{1/e}(t) = A \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot t^2}{\tau_{1/e}^2}\right) \quad (3)$$

The Gaussian pulse duration at the level τ_{1/p_u} ($p_u \leq 1$) may be calculated according to the formula

$$\tau_{1/p_u} = \tau_{1/e} \cdot \sqrt{\ln p_u} = \frac{\tau_{1/2}}{\sqrt{\ln 2}} \cdot \sqrt{\ln p_u} \quad (4)$$

Rise time from 20% level till 80% level for Gauss pulse is calculated from (4) and is $0.478 \cdot \tau_{1/2}$.

Analytical expressions of the spectra of the pulses (complex spectral densities, magnitude spectrum and phase spectrum) for trapezoidal and bell-shaped trapezoidal pulses have been obtained. Along with well-known spectral densities of rectangular and Gaussian pulses they have been used for the verification of the numerically obtained results. However, due to space limitations, they are not presented here.

IV. NUMERICAL EVALUATION OF PULSE EXPANSION

The expansion of unipolar 50 ps GPs of two different shapes, namely, Gaussian and trapezoidal, was calculated numerically and evaluated. The time function of Gaussian GP $s_{GP}(t)$ and its magnitude spectrum $|S_{GP}(f)|$ are shown in Fig. 4(a) and Fig. 4(b), respectively. Also, the shapes of the studied GPs are shown in the inset of Fig. 7. For numerical calculation of pulse expansion, the frequency characteristics provided by Matlab, of two types of LPF filters - Bessel and Butterworth - were used. For every type of filter, a set of different orders and cut-off frequencies was implemented. The highest order of LPF filter was limited by 7, because of reasons for subsequent practical implementation. For numerical calculation, the set of cut-off frequencies was selected mainly according to the cut-off frequencies from data sheets of real LPFs, intended for use in real measurements.

In Fig. 4(c) and Fig. 4(d), respectively, impulse response function $h(t)$ and magnitude of transfer function $|H(f)|$ for two extreme sets - the minimum order, the minimum cut-off frequency and the maximum order, the maximum cut-off frequency - are shown for both investigated types of filters. As it is seen, the transfer function of the Butterworth filter

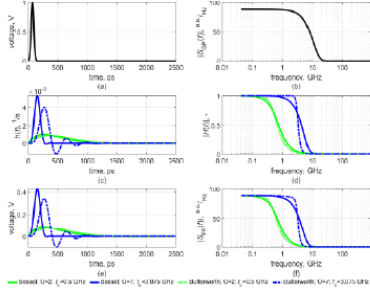


Fig. 4. Computed time and spectral characteristics of 50 ps Gaussian pulse filtered by Bessel and Butterworth LPFs with different order (O) and cut-off frequencies (f_c).

is steeper, especially in the case of higher order and also in time function of the impulse response of Butterworth filter oscillations appear.

Time functions of FPs $s_{FP}(t)$ were obtained in two ways - using multiplication of spectrum of GP $S_{GP}(f)$ with transfer function of filter $H(f)$ and followed by inverse Fourier transform and using convolution between the time function of GP and time function of impulse response of filter. The results were compared to each other to guarantee the accuracy of the modeling. Time functions of FPs and their magnitude spectrums obtained after filtering with both types of filters with extreme sets of order and cut-off frequency are shown in Fig. 4(e) and Fig. 4(f), respectively.

Influence of Bessel filters with different order and cut-off frequency and of Butterworth filters with different order and cut-off frequency on expansion of Gaussian GP is shown by time functions of $s_{FP}(t)$ in Fig. 5(a) to 5(c) and Fig. 6(a) to 6(c). Also the main characteristics of FP under focus - FWHM, rise time, fall time, peak value of $s_{FP}(t)$ - are summarized in Fig. 5(d) and Fig. 6(d), respectively. Both - the time functions plot and the characteristics plot of Fig. 5 and Fig. 6, respectively, have same legend. For example, in Fig. 5 the lightest green contour in characteristics plot corresponds to lightest green time plot - result of expansion by Bessel LPF with order 7 and cut-off frequency 0.5 GHz. This expansion characterizes with the longest rise time (270.6 ps) and the longest pulse duration (667.8 ps) and the smallest peak value of $s_{FP}(t)$ (0.08 V). While the darkest blue contour corresponds to expansion by 2nd order Bessel LPF with cut-off frequency 3.075 GHz with following characteristics - the shortest rise time (34.2 ps) and the smallest pulse duration (106.2 ps) and the largest peak value of $s_{FP}(t)$ (0.46 V). Peak value of every GP was 1.00 V. The largest and the smallest values are named within investigated sets of orders and frequencies.

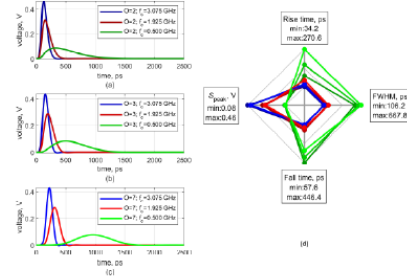


Fig. 5. Computed Gaussian 50 ps pulse filtered by Bessel LPFs, where O is filter order, f_c is cut-off frequency, S_{peak} is peak value of $s_{FP}(t)$.

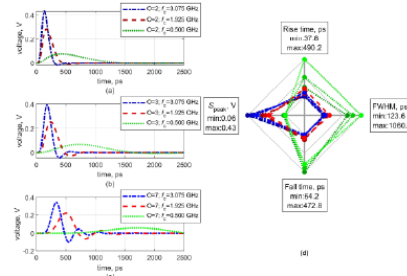


Fig. 6. Computed Gaussian 50 ps pulse filtered by Butterworth LPFs, where O is filter order, f_c is cut-off frequency, S_{peak} is peak value of $s_{FP}(t)$.

V. EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTRICAL PULSE EXPANSION USING LOW-PASS ELECTRICAL FILTERS

We created the experimental measurement setup to explore how the 50 ps pulses can be expanded by applying filtering by real LPFs, as shown in Fig. 4. As it is shown in Fig. 8, the setup is relatively simple - it includes an AWG Keysight M8195 [17], 80 cm RF cable (DC - 40 GHz), and device under test, which in this case is LPF and digital storage oscilloscope (DSO), Keysight DSAZ334A, 80 GSa/s, 33 GHz) to capture expanded waveforms. LPF is directly attached to the input of DSO.

First, ideal 50 ps duration pulses having a rectangular shape and a period of 5 ns are synthesized in Matlab environment. This 5 ns period acts as a guard band, allowing to observe full filtering impact on the input waveform. Then the waveform is saved into an AWG-specific file format and loaded into its memory. Next, the prepared waveform is played on AWG's first output port at a maximal sample rate 65 GSa/s. As shown in Fig. 9, the shape of 50 ps pulse generated by AWG doesn't have an ideal rectangular shape, it has slope transitions. The limited analog bandwidth of AWG can explain

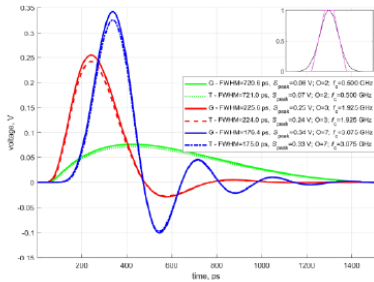


Fig. 7. Computed Gaussian (G) and trapezoidal (T) 50 ps pulses filtered by Butterworth LPFs, where O is filter order, f_c is cut-off frequency, S_{peak} is peak value of $s_{FP}(t)$. The inset shows the shapes of the studied Gaussian and trapezoidal GPs.

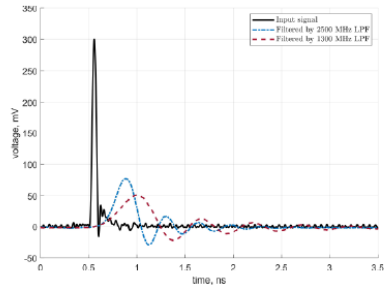


Fig. 9. Comparison of measured original 50 ps input signal with the filtered signals by commercial low pass filters.

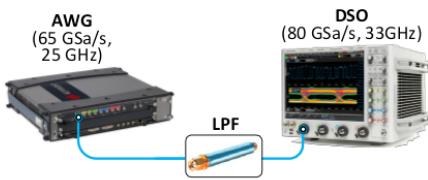


Fig. 8. The measurement setup used to investigate electrical pulse expansion using LPFs.

it. In these measurements, we use two commercial LPFs from Mini-Circuits [18], [19] having the key technical parameters summarized in Table I.

As it is shown in Fig. 9, the peak-to-peak voltage of the input 50 ps pulse on the input of investigated LPFs is 310 mV. When VLFX-2500+ LPF is inserted in the measurement scheme, the received signal peak-to-peak voltage on DSO input is lower and equal to 106 mV, while in the case of VLFX-1300+ LPF, it is even lower and equal to 73 mV, respectively.

In relative numbers, it means 65.8% peak-to-peak voltage reduction for VLFX-2500+ LPF and 76.5% for VLFX-1300+ LPF if compared against the voltage of the original 50 ps pulse waveform.

As shown in Fig. 9, a larger signal expansion is obtained by LPF, having the passband covering DC to 1300 MHz (VLFX-1300+). The measured duration of expanded pulse in the case of VLFX-2500+ LPF is 230 ps, while in the case of VLFX-1300 LPF, it is 364 ps, showing significant expansion capability of low-pass filters. However, it should be noted that this expansion is realized on the cost of energy loss (insertion loss and signal reflection) and signal distortion, observed in Fig. 9 as waveform ripples with a periodic nature and falling amplitude.

Please note that in Fig. 9, information about time delay

introduced by LPFs is omitted for better visual representation and comparison of filtered signals.

VI. RESULTS AND DISCUSSION

As shown by numerical evaluation and experiment, pulse expansion filters of Bessel type and Butterworth type could be used with different sets of order and cut-off frequency. While selecting the type, order, and cut-off frequency the following circumstances should be taken into account - the required characteristics of FPs for the subsequent device is working properly and also the complexity of implementing the chosen filter model. Selection of filters of simple structure with low order can lead to insufficient expansion of GP. In contrast, higher order of some types of filters, for example, of Butterworth filter, can lead to the appearance of significant oscillations of FP. Also, as it was observed during the numerical evaluation, if the cut-off frequency of the filter is smaller, then expansion of pulse is higher, but also lower is the peak value of time function of FP, that subsequently will require larger amplification of the signal. Moreover, low cut-off frequency requires large physical dimensions of the filter.

It can be noticed that, if numerically calculated expansion by the filter of Butterworth type with 7th order and cut-off frequency 3.075 GHz, the time function of pulse after

TABLE I
SUMMARY OF IMPLEMENTED LPF.

| LPF model | VLFX-2500+ | VLFX-1300+ |
|---|----------------------------|----------------------------|
| Passband, MHz | DC – 2500 (Loss<1.5 dB) | DC – 1300 (Loss<1.2 dB) |
| Cut-off frequency (Loss 3 dB), MHz | 3075 | 1925 |
| Stopband (Loss<30 dB), MHz | 3675 | 2300 |
| Isolation (Freq.<20 GHz), dB | 30 | 40 |
| VSWR (1): (a) Stopband: (b) Passband: | (a) 24.33 (b) 1.39 | (a) 10.00 (b) 1.20 |

the expansion is similar to the time function of pulse after expansion for which LPF VLFX-2500+ was used - see Fig. 7 and Fig. 9.

VII. CONCLUSIONS

This paper is devoted to the development of the models of low-pass filter for expanding the length of electrical pulses from 50 ps to 700 ps. This research aims to bring new knowledge about the employment of passive filters in the pulse expansion problems in impulse radio ultra-wideband systems.

After summarizing the obtained results, the main conclusions are as follows:

- For 50 ps pulse expansion to 700 ps LPFs of Bessel type and Butterworth type with order from 2nd to 7th and cut-off frequencies between 0.5 GHz and 3.075 GHz could be used.
- If there is a requirement for limited oscillations in the expanded pulse, then a filter of Butterworth type of 3rd or higher order shouldn't be used.
- Usage of Butterworth filters leads to the longer rise time of expanded pulse compared to Bessel filters of the same order and cut-off frequency.
- For the mentioned parameters of pulses and filters, the shape of the generated pulse can vary between Gaussian and trapezoidal without significant influence on the characteristics of the filtered pulse.

During the design phase of the filter model, the limitations of the practical implementation of passive filters of a given type and for the given frequency band must be taken into account.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the Latvian Council of Science, grant No. lzp-2021/1-0475, "Picosecond-resolution pulse position modulation for beyond-the-limits energy efficiency of communications"

REFERENCES

- [1] M. Ghavami, L. B. Michael, and R. Kohno, *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, may 2006.
- [2] Eventech Ltd, *Event Timer A033-ET / ush*. [Online]. Available: <http://eventechsite.com/en/products/event-timer-#033-et/>
- [3] A. M. Weiner, "Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators," *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 5, pp. 1929–1960, may 2000.
- [4] C.-C. Chen and C.-H. Chu, "All-digital pulse-expansion-based CMOS digital-to-time converter," *Review of Scientific Instruments*, vol. 88, no. 2, p. 024704, feb 2017.
- [5] A. Mahjoubfar, D. V. Churkin, S. Barland, N. Broderick, S. K. Turitsyn, and B. Jalali, "Time stretch and its applications," *Nature Photonics*, vol. 11, no. 6, pp. 341–351, jun 2017.
- [6] J. Kalisz, "Review of methods for time interval measurements with picosecond resolution," *Metrologia*, vol. 41, no. 1, pp. 17–32, dec 2003.
- [7] A. P. Chandrakasan, F. S. Lee, D. D. Wentzloff, V. Sze, B. P. Ginsburg, P. P. Mercier, D. C. Daly, and R. Blázquez, "Low-power impulse UWB architectures and circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 332–352, 2009.
- [8] N. Rajesh and S. Pavan, "Programmable analog pulse shaping for ultra-wideband applications," in *Proceedings - IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 2015-July. IEEE, may 2015, pp. 461–464.

- [9] TimeTag.Space, "Time Tagging Technology with Picosecond Resolution for Space Applications." 2020. [Online]. Available: https://www.silicon-alps.de/wp-content/uploads/2021/01/TimeTag_Space_WhitePaper_Nov20208.pdf
- [10] C. Nguyen and M. Miao, "Fundamentals of UWB Impulse Systems," in *Design of CMOS RFIC Ultra-Wideband Impulse Transmitters and Receivers*. Springer, Cham, 2017, pp. 7–24.
- [11] J. Han and C. Nguyen, "A new ultra-wideband, ultra-short monocycle pulse generator with reduced ringing," pp. 206–208, jun 2002.
- [12] R. Harjani, J. Harvey, and R. Sainati, "Analog/RF physical layer issues for UWB systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on VLSI Design*, vol. 17. IEEE Comput. Soc, 2004, pp. 941–948.
- [13] J. Santhoff and S. A. Moore, "Ultra-wideband communication through twisted-pair wire media," nov 2004.
- [14] M. Matn, *Ultra Wideband Communications*. Rijeka: IntechOpen, jul 2011.
- [15] IEEE Instrumentation and Measurement Society, "IEEE Standard for Transitions , Pulses , and Related Waveforms, IEEE Std 181-2011," IEEE, Standard September, 2011.
- [16] Mathworks, "Bessel analog filter design - MATLAB bessef." [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/bessef.html?s_tid=mw_osa_a
- [17] Keysight Technologies, *M8195A 65 GSa / s Arbitrary Waveform Generator M8197A Multi-Channel Synchronization Module*, 2020. [Online]. Available: <https://www.keysight.com/en/pd-2443793-pn-M8195A/65-gsa-s-arbitrary-waveform-generator>
- [18] Mini-circuits, *Low Pass Filter VLFX-1300*. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/VLFX-1300.pdf>
- [19] —, *Low Pass Filter VLFX-2500+*. [Online]. Available: <https://www.minicircuits.com/pdfs/VLFX-2500+.pdf>

6. Pielikums

RAKSTS-6: Demonstration of 512-TR-PPM Fiber Optical Transmission Link.

S. Spolitis et al., "Demonstration of 512-TR-PPM Fiber Optical Transmission Link," 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1416-1422, [doi: 10.1109/PIERS59004.2023.10221307](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221307).

Demonstration of 512-TR-PPM Fiber Optical Transmission Link

Sandis Spolitis^{1,2}, Dmitrijs Prigunovs¹, Sandis Migla³, Dilan Ortiz¹, Oskars Selis³,
Pauls Eriks Sics³, Armands Ostrovskis^{1,2}, Tatjana Solovjova³,
Janis Semenjako³, and Arturs Aboltins³

¹Institute of Telecommunications, Riga Technical University, Riga, Latvia

²Communication Technologies Research Center, Riga Technical University, Riga, Latvia

³Institute of Microwave engineering and Electronics, Riga Technical University, Riga, Latvia

Abstract— In this paper, we demonstrate a data transfer over a 20 km long single-mode fiber (SMF) optical communication link using a transmitted-reference pulse position modulated (TR-PPM) signals with a pulse duration of 50 ps. Employment of position widths (time bins) of 50, 100, and 200 ps with 512 positions per one symbol allows achieving a transmission rate of up to 59.5 Mbps. Implementation of a robust PPM communication with a very low duty cycle over the C-band fiber optical links, where the typical signal attenuation for standard SMF fiber is around 0.2 dB/km at 1550 nm wavelength, paves the way to long-reach high energy-efficiency data transmission links. After photodetection by high-speed PIN photodiode, precisely detecting a high number of pulse positions with 50 ps accuracy is challenging. Therefore, we demonstrate TR-PPM signal demodulation using a high-accuracy event timer A033-ET. To enable the operation of this event timer, PPM pulses at the input of this timer are expanded to at least 700 ps using our developed pulse duration expansion module, which includes an in-house manufactured electrical low-pass filter (LPF) and other supporting radio frequency components.

1. INTRODUCTION

The exponential growth of Internet data traffic and the progress of the information and communication technology (ICT) sector pushes the complex telecommunication infrastructure to upgrade the transmission capacity and improve the energy efficiency of communication systems. Based on the latest data, ICT is responsible for 5–9% of global electricity use and around 3% of greenhouse gas emissions [1]. Fiber optical links with well-selected and advanced signal modulation and coding formats can meet these demands. Typically, modern fiber optical links in interconnection, access, and metro-access network architecture levels use direct detection on-off keying modulation (OOK) with non-return-to-zero (NRZ) line code [2].

To improve energy efficiency, the pulse position modulation (PPM) format, which has high interest from the research field of free space optical communication (FSO) links [3], can also be realized in direct-detection fiber optic systems [4]. In PPM, one of the most promising ultra-wideband (UWB) modulation formats, information is encoded into the time between the signaling pulses. Coherent PPM employs signaling frames where each frame contains a single pulse in one of M fixed-width time slots. The amount of information transmitted by one frame can be expressed as $\log_2 M$ bits. Although signaling pulses can be of arbitrary shape and duration, employing very short pulses paves the way to creating communication systems with low average transmitted signal power. Transmitted reference pulse position modulation (TR-PPM) is one of the most common forms of PPM. TR-PPM differs from coherent PPM modulation format with the need for a separate reference pulse at the beginning of each frame thus eliminating the need for time synchronization between transmitter and receiver. Considering the presence of the reference pulse in each frame, TR-PPM is very well suited for communication between moving objects. However, using a reference signal comes at the cost of data transmission speeds and energy efficiency compared to other PPM types such as differential pulse position modulation (DPPM). Although there are many different types of PPM schemes, like multi-pulse position modulation (MPPM), overlapping pulse position modulation (OPPM), variable pulse position modulation (VPPM), and previously mentioned DPPM and TR-PPM, they are all considered energy-efficient modulation schemes when compared to other modulation techniques [5]. Because any amount of information can be transmitted using a single pulse (or two pulses in the case of TR-PPM), PPM schemes can provide theoretically unlimited energy saving when compared to other modulation techniques such as OOK, pulse amplitude modulation (PAM), and quadrature phase shift keying (QPSK) [6]. This feature also means that the power efficiency increases with the number of possible pulse positions M because the amount of information transmitted with the same amount of energy is more significant [7]. Other studies have

also concluded that PPM requires less transmission power than other modulation methods to reach the same bit error rate (BER) value [8]. It is worth mentioning that UWB signals are widely employed for localization [9] and PPM signaling fits very well with the concept of the next-generation network which will provide simultaneous communication, localization and sensing.

The remainder of this paper is organized as follows. Section 2 demonstrates and explains the experimental setup we used to generate, transmit, and detect 512-TR-PPM modulated signal. System performance results are represented and discussed in Section 3. At last, the main conclusions are drawn.

2. EXPERIMENTAL SETUP

Figure 1 shows the experimental setup with the PPM pulse expansion module (PEM) and event timer. A 9000-bit long pseudo-random bit sequence (PRBS) is generated and converted into a vector of 512-TR-PPM samples in a MATLAB programming environment. After processing, value “1” corresponds to a high signal representing pulse and “0” to space between pulses, forming an output 512-TR-PPM encoded electrical signal. The vector describing the 512-TR-PPM waveform is saved in pulse pattern generator (PPG) specific file format and loaded in its memory to be electrically generated on demand. The same PRBS sequence is later used for BER estimation in the receiver.

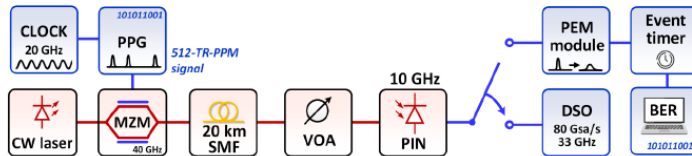


Figure 1: Experimental setup of 512-TR-PPM signal generation, transmission, and detection by DSO or event timer with connected computer estimating BER of received PPM signal.

An electrical 512-TR-PPM signal is generated on the single-ended output of the PPG generator (PPG, 33 GHz, Anritsu MU183020A). The PPG output voltage swing is 3.5 V_{pp}, sufficient to drive the optical modulator without an additional electrical radio frequency (RF) amplifier. Microwave signal generator (Anritsu, 31.8 GHz, MG3693C) generates high-purity 20-GHz sinusoidal signal and acts as an external clock source for PPG. 40 GHz Mach-Zehnder modulator (MZM, Photline MX-LN-40) is directly connected to PPG output using a 2.92-mm to 1.85-mm connector adaptor. The output power of the tunable CW laser operating on 1552.52 nm (193.1 THz, matching ITU-T DWDM grid specification) is connected to the input of MZM. It is set to +7 dBm for optical back-to-back (B2B) transmission and +9 dBm for a 20 km single-mode fiber (SMF) transmission setup. After optical modulation, the signal is transmitted over 20 km of ITU-T G.652 SMF fiber. The output of SMF is connected to a linear variable optical attenuator (VOA, Keysight FVA-3150) with 2 dB insertion loss at 1550 nm. The optical signal from VOA output is delivered to a 10-GHz PIN photodiode (PIN, 8-GHz, Amonics PR10G), where it is converted back to the electrical signal and captured by a 33-GHz real-time digital storage oscilloscope (DSO, 80 GSa/s, Keysight DSOZ334A) or event timer (Eventech, A033-ET) after passing the PEM module as demonstrated in Figure 2. RF baseband bandwidth of 512-TR-PPM signal with a pulse width of 50 ps is around 20 GHz. In the case of optical B2B transmission, the width of the 512-TR-PPM signal pulse, which initially was 50 ps, was measured to be 71 ps. Furthermore, after 20 km SMF transmission, the pulse duration is about 96 ps due to the limited RF bandwidth of the PIN receiver and the effect of chromatic dispersion in the optical fiber.

The pulse waveform and pulse duration are very important for the event timer used in this experiment. The experimental PEM module, developed using the methodology already presented by us in [10], contains the following hardware, as shown in Figure 2.

Numerical calculations in Ansys HFSS modeling software show that when the high-order electrical LPF for which the insertion loss increases rapidly above the cutoff frequency is used, this causes ripples in the waveform of the filtered pulse. Spurious ripples were also confirmed by experiments with commercial LPFs made with a sharp increase in insertion loss in the stop band. Calculations show that sufficient pulse width and minimal oscillations in the filtered pulse waveform can be

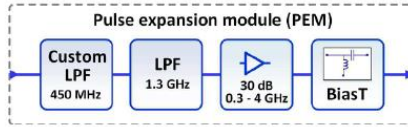


Figure 2: Setup of experimental PPM pulse expansion module.

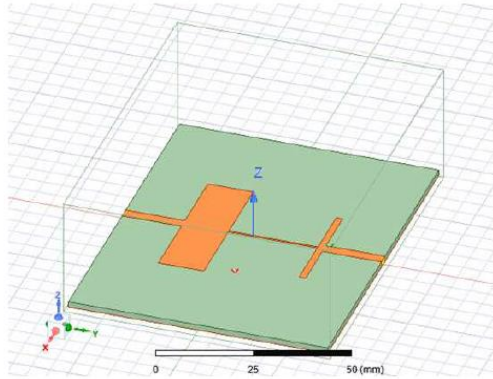


Figure 3: Design model of 450-MHz in-house manufactured LPF.

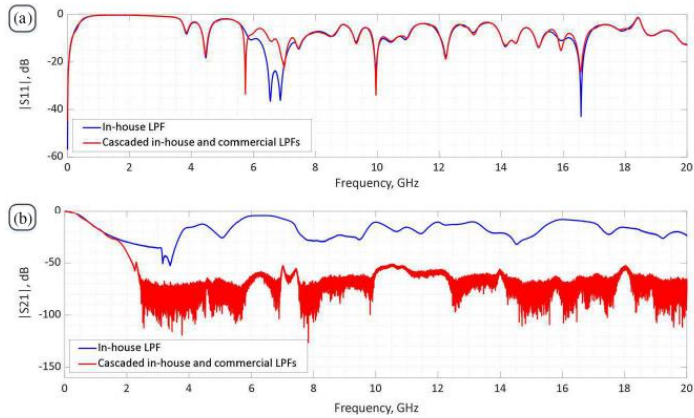


Figure 4: Measured S -parameters: (a) S_{11} curve of (blue) bare in-house LPF and (red) cascaded connection of in-house and commercial LPFs, (b) S_{21} curve of (blue) bare in-house LPF and (red) cascaded connection of in-house and commercial LPFs.

achieved if a filter with a 3rd-order Bessel transfer function and a cut-off frequency of 450 MHz is used. Such a low-pass filter also ensures the pulse rising edge is as steep as possible. The design of modeled LPF, which was later manufactured and used in this experiment is shown in Figure 3.

Unfortunately, both Ansys HFSS modeling and experiment showed us that such an in-house LPF filter has insufficient attenuation in the frequency band above 4 GHz, which causes a noticeable distortion of the shape of the expanded 512-TR-PPM pulses. Please note that such a PPM signal's occupied RF baseband bandwidth is around 20 GHz.

Measured S -parameters of in-house LPF are shown in Figure 4 as blue curves S -parameters are obtained using a vector network analyzer (Rohde & Schwarz, 20 GHz, R&S ZNB20). To fix insufficient attenuation, the commercial LPF (LPF, DC-1300 MHz passband, Mini-Circuits VLFX-1300+) was connected in cascade with our in-house built LPF. The measured S parameters of the cascaded connection of in-house and commercial LPFs are shown in Figure 4 as red curves.

By cascading an in-house LPF with a cut-off frequency of 450 MHz and a commercial filter with a cut-off frequency of 1300 MHz, the required pulse duration expansion over the 700 ps threshold (event timer requirement) is ensured. At the same time PEM keeps steep rising edges of expanded PPM pulses and negligible oscillations of pulses.

After processing by the cascaded connection of the in-house and commercial LPFs, the expanded 512-TR-PPM signal is then amplified by an RF amplifier (30 dB gain, 30–4000 MHz), and an additional bias voltage is delivered by using a bias tee (BiasT, 20 kHz–45 GHz, SHF BT45) to optimize expanded 512-TR-PPM waveform for reception by event timer (Eventech, A033-ET). Using the above-mentioned PEM module in the receiver part, we broadened the received 512-TR-PPM pulses up to 978 ps providing stable timer operation.

2.1. Generation of 512-TR-PPM Waveform

As shown in Figure 5, the TR-PPM signal sequence generation begins with a reference pulse, which indicates the start of the frame with duration T_F . The data region commences after half the frame. The data region depends on the position width Δ and the total number of positions M . Therefore, the whole data region's duration equals $M\Delta$.

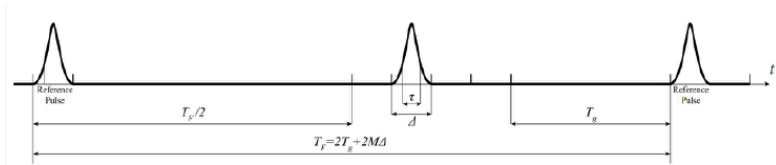


Figure 5: The overall structure of the TR-PPM signal.

The data impulse location in the data region depends on the particular data symbol. If $M = 512$ positions define the data region, the data pulse carries 9 bits of information. The data region is divided into M slots, with each slot corresponding to the given data symbol. It is important to note that pulse duration does not play a role in signal transmission and only determines power efficiency. Therefore, the pulse could be narrower or broader than the position width. This research uses a 50 ps pulse width to provide high energy efficiency of communication. 512 positions per one symbol allow achieving a transmission rate of TR-PPM signal up to 59.5 Mbps. The guard time $T_g = 50$ ns has to be added after each pulse because of the limitations of the employed event timer. 9000 bits were encoded in 512-TR-PPM waveform using a MATLAB script and later loaded into PPG.

2.2. Detection and Demodulation of 512-TR-PPM Signal

Although low-order TR-PPM signals can be demodulated using auto-correlation of the received signal [11], signals with a large number of positions M require more elaborate techniques. The 512-TR-PPM demodulator employed in this research is based on the event timer (Eventech, A033-ET) and software framework presented in [12]. The A033-ET is a computer-based device that records time tags (raw data) as absolute times with high accuracy, about 3 ps RMS, and it is possible to register events at the rate of $20M$ events per second. The event timer cannot detect short pulses as 50 ps. Therefore PEM module, which provided 512-TR-PPM pulses with about 978 ps duration, was constructed, as shown in Figure 2. The A033-ET has a 50 ns dead time, representing the time required for the timer to process and accumulate data. As a result, a suitable frame length is selected to accommodate this interval.

As shown in Figure 1, a personal computer (depicted in the figure as BER) is connected to an event timer for PPM demodulation and sequentially BER estimation of the received 512-TR-PPM

signal. The software framework, written in Python, runs on the PC. It communicates with the event timer and decodes the received time tags into data symbols. The software also provides optional error correction and clock signal tracking. The relative time positions are computed from the given position duration and then transformed to binary data using Gray code, ensuring that one position's pulse offset will cause just a one-bit error. After the PPM signal demodulation, the BER performance is estimated offline by comparing transmitted and received bit sequences.

3. RESULTS AND DISCUSSION

After detection by the event timer, BER values of the received 512-TR-PPM signal are estimated. Figure 6 represents the estimated BER performance of 512-TR-PPM signals after optical B2B transmission and after 20 km SMF transmission by utilizing pulse duration (τ) of 50 ps and position width durations (Δ) of 50 ps, 100 ps, and 200 ps, respectively.

As shown in Figure 6, 512-TR-PPM signal having a pulse width of 50 ps and position width of 200 ps shows the highest performance reaching a relatively low BER of 1×10^{-4} . In contrast, 512-TR-PPM signal with 50 ps pulse width and stricter 50 ps position width demonstrates BER up to 2.5×10^{-2} . Transmission performance after 20 km SMF fiber transmission is similar and has negligible impact on the estimated 512-TR-PPM signal BER.

The data presented in Figure 7 shows the pulse time offset in picoseconds from the intended position region and is acquired from the A033-ET event timer. The interval difference has been

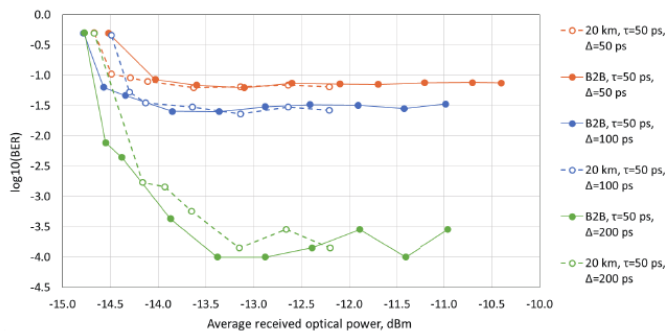


Figure 6: BER versus average received optical power for 512-TR-PPM signals before and after 20 km of SMF transmission.

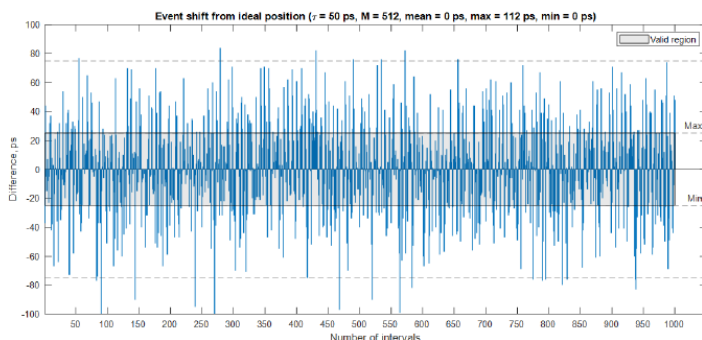


Figure 7: Event shift from the ideal position for 512-TR-PPM signals after 20 km of SMF transmission with 50 ps position width (a gray area).

determined by analyzing the event timer absolute time tags. The results explain why the BER for narrower pulse positions was significantly larger. The main reason for BER deterioration is a relatively large jitter (about 50 ps RMS) at the input of the event timer.

Additionally, due to the frequency drift of the clock signal generator, all intervals between the pulses in the 512-TR-PPM waveform expand or contract uniformly. Although the difference between expected and actual intervals is tiny, using a position width of 50 ps significantly impacts the BER over a more extended PPM waveform. Clock drift can be corrected in receiver software by adjusting the intervals to the known value of the clock drift. Also, this can be done automatically by tracking the time between the start pulses of two adjacent TR-PPM frames or sending dedicated pilot frames.

4. CONCLUSION

In this paper, we have shown successful transmission of 512-TR-PPM signal using position width (time bin) durations 50, 100, and 200 ps, enabling a transmission rate of up to 59.5 Mbps.

The results show that position width significantly impacts the BER of the received PPM signal. The main obstacle to achieving low BER at narrower time bins, which enable achieving higher bitrates, is the jitter at the input of the event timer. Although an inaccurate PPM modulator can introduce jitter into the waveform, employed PPG was likely not a significant contributor to the observed jitter. A much more severe impact is probably caused by the PPM receiver's analog front-end, consisting of PEM, which includes an RF amplifier and bias tee elements.

Despite these shortcomings, results show that 512-TR-PPM is a viable modulation scheme for long-distance communications where energy efficiency is crucial. The main advantage of TR-PPM is its stability considering the reference pulses included in every frame.

This research proves the viability of using software to correct minor inaccuracies in signal generation, mainly allowed by the detection method, i.e., event timer. Using the event timer for PPM signal detection provides many advantages, such as the ability to analyze the raw data (time tags) and apply digital signal processing for corrections in the receiver.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by the Latvian Council of Science, grant No. lzp-2021/1-0475, "Picosecond-resolution pulse position modulation for beyond-the-limits energy efficiency of communications".

REFERENCES

1. European Commission, Strategic Foresight Report, "Twinning the green and digital transitions in the new geopolitical context," Vol. 36, 2022, ISBN 978-92-76-53819-6.
2. Belkheir, M. and M. Rouissat, "Performance analysis of RZ-PPM coding in optical wireless systems," *Proceedings — 2019 6th International Conference on Image and Signal Processing and Their Applications, ISPA 2019*, 1-3, 2019, <https://doi.org/10.1109/ISPA48434.2019.896684>.
3. Xu, F., M.-A. Khalighi, and S. Bourennane, "Coded PPM and multi-pulse PPM and iterative detection for free-space optical links," *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 1, No. 5, 404, 2009, <https://doi.org/10.1364/JOCN.1.000404>.
4. Tang, W., S. Wang, Y. Xu, and Z. Yu, "The research process, application, and the future development of pulse-position modulation," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2384, No. 1, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2384/1/012026>.
5. Ahmed, F., S. Ali, and M. M. Jawaid, "A review of modulation schemes for visible light communication," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 18, No. 2, 117, 2018.
6. Elganimi, T. Y., "Performance comparison between OOK, PPM and PAM modulation schemes for Free Space Optical (FSO) communication systems: Analytical study," *International Journal of Computer Applications*, Vol. 79, No. 11, 22-27, 2013.
7. Li, T., H. Zhou, and M. Yi, "Gray coded PPM performance with imperfect slot synchronization in optical communication," *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO — Technical Digest*, 1-2, <https://doi.org/10.1109/CLEOPR.2009.5292732>.
8. Elganimi, T. Y., "Studying the BER performance, power- and bandwidth-efficiency for FSO communication systems under various modulation schemes," *2013 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2013*, 1-6, 2013, <https://doi.org/10.1109/AEECT.2013.6716426>.

9. Cimmins, M., S. O. Schmidt, and H. Hellbruck, "Comparison of I/Q- and magnitude-based UWB channel impulse responses for device-free localization," *2021 International Conference on Localization and GNSS, ICL-GNSS 2021 — Proceedings*, 1-7, 2021.
10. Solovjova, T., J. Semenako, D. Prigunovs, D. Ortiz, S. Spolitis, and A. Aboltins, "Picosecond pulse expansion using the low-pass filter in event timer-based PPM communication system," *Proceedings of 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications, MTTW 2022*, 29-34, 2022, <https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942566>.
11. Munirathinam, R., A. Aboltins, D. Pikulins, and J. Grizans, "Chaotic non-coherent pulse position modulation based ultra-wideband communication system," *2021 IEEE Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*, 52-57, 2021.
12. Migla, S., O. Selis, P. E. Sics, M. Pudzs, M. Zeltins, and A. Aboltins, "A design of UWB communication testbed with event timer-based PPM demodulator," *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2022 — Proceedings*, 691-694, 2022, <https://doi.org/10.1109/UkrMW58013.2022.10037100>.

RAKSTS-7: Fabrication of Lensed Fibers with Arc Fusion Splicer for Telecommunication Applications.

A. Sedulis et al., "Fabrication of Lensed Fibers with Arc Fusion Splicer for Telecommunication Applications," 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1066-1070, [doi: 10.1109/PIERS59004.2023.10221315](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221315).

Fabrication of Lensed Fibers with Arc Fusion Splicer for Telecommunication Applications

Arvids Sedulis¹, Armands Ostrovskis^{1,2}, Kaspars Zakis^{1,2}, Kristaps Rubulis^{1,2}, Dilan Ortiz¹,
Dmitrijs Prigunovs¹, Janis Alnis³, Vjaceslavs Bobrovs¹, and Sandis Spolitis^{1,2}

¹Institute of Telecommunications

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

²Communication Technologies Research Center

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

³Institute of Atomic Physics and Spectroscopy

University of Latvia, 3 Jelgavas Street, 1004 Riga, Latvia

Abstract—The field of telecommunications is constantly evolving and looking for new inventions to improve transmission speeds, transmission quality, reduce costs, etc. One of the most promising innovations of recent times is photonic integrated circuits. These have arisen as a consequence of miniaturization trends and increased demand for higher data transmission speeds and pave the way to a very cost-effective future-minded technology. A significant problem for these chips is the inherently high insertion loss when coupling light into the chip. It is possible, for instance, to use various types of on-chip optical coupler configurations, e.g., focusing grating couplers, to mitigate it to some extent. Still, the high loss makes testing devices that use such technologies difficult and time-consuming. Alternatively, one can use so-called lensed fibers, which are relatively easier to work with and can effectively reduce the insertion loss of incoming light. In this paper, we demonstrate the ‘in-house’ production of spherical lensed fibers (SLF) by using a commercially available arc fusion splicer, which is a common piece of equipment used in the field of fiber optical communications and photonics. Our main goal is to establish how easily this fabrication method allows for manipulating important lensed fiber parameters, such as working distance and spot size. This evaluation includes the ease of production, the consistency of the fabricated samples, and the number of iterations required to hone in on the lens parameters required for the specific application. The fabricated samples are compared to commercial-grade lensed fiber products, which are used as a baseline comparison.

1. INTRODUCTION

Semiconductor components such as laser diodes, light-emitting diodes, and photodiodes are very commonly used in optical communications. These devices work by converting electrical signals into light photons or vice versa in a photovoltaic conversion process. They are used to efficiently couple the optical fiber to the component and can significantly simplify the connection between semiconductor devices and optical fibers.

Optical fibers with microlenses at their ends, also called lens fibers, are widely used in fiber sensors, in integrated and fiber optics to change the parameters of transmitted radiation [1, 2]. Lensed fibers have a distinct intrinsic property, similar to the regular converging lens, where they create a tight focal spot some distance from the fiber edge. This tight focal spot can be used to couple light into an optical chip or collect light from a laser. Moreover, lensed fibers are often the method of choice in interfacing optical fiber technology for active devices and waveguides. Such fibers provide high-performance data transmission while occupying a fraction of the space and cost compared to bulk free-space lensed optics alternatives. They also have desirable characteristics such as compactness, stability, and the absence of bulky lenses [3, 4].

Lensed fibers are typically created to match the emission profiles of the receiving or transmitting device to which they are coupled. They are necessary for connecting single-mode fibers to integrated circuits (under conditions when the diameter of the propagating optical radiation mode is about $9\ \mu\text{m}$ at a wavelength of $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$) and lensed fibers exceed the mode diameter in the waveguide of the integrated circuit by three to forty times, due to for such a difference at the junction and optical signal losses. Such fibers can be produced in several shapes, depending on the beam pattern that is required for the application [5, 6].

In this research, a spherical lensed fiber is manufactured and utilized, where the end of the optical fiber is fixed into a conical shape for the apex to match precisely with the core of the fiber. SLFs tend to have an excellent coupling efficiency for light with circular beam patterns. These

types of fibers are commonly used for optical waveguides, laser diodes, silicon wire waveguides, and for illuminating very small areas.

This paper demonstrates the ‘in-house’ production of spherical lensed fibers with widely available industrial equipment using single-mode fiber (SMF) and a coreless fiber part spliced to one end, which consists of a pure silica glass rod and an acrylate coating [6]. The absence of a waveguide makes this termination fiber useful for reducing back reflections or preventing damage to the fiber end face in high-power applications [7].

2. DESIGN AND FABRICATION OF THE LENSED FIBER

First, the inherent system losses from connectors and fibers themselves are measured. Afterward a fiber patch cord is sliced in half, and the resulting free space loss from the closely coupled SMF (ITU-T G.652) fibers is measured as well, which is used as a reference for the determination of manufactured lensed fiber insertion losses. An example of the measurement setup is shown in Fig. 1.

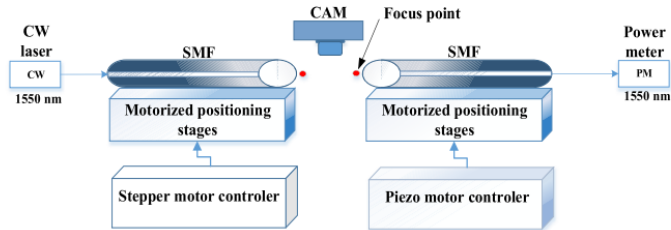


Figure 1: Experimental setup in the inherent system for the measurement insertion losses. CW: Continuous wavelength laser source; PM: optical power meter.

Fiber ends are installed in the clamps, which sit on top of the motorized positioning stages. These motorized positioning stages can be moved in “x”, “y”, and “z” directions and contain stepper motors for broader fiber alignment and piezo motors for finer adjustment in order to achieve the best coupling position. Microscopes are positioned above and on the side of the two fiber ends to monitor their alignment.

The fabrication of the lensed fiber is done with the following steps. As seen from Fig. 2, one of the SMF fiber ends gets inserted into the fusion splicer along with a cleaved end of a coreless fiber.

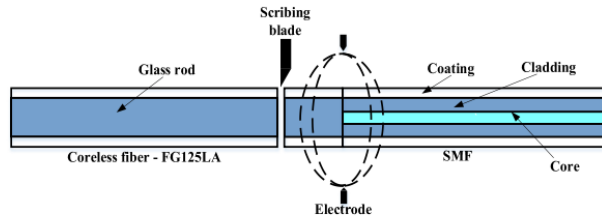


Figure 2: Splicing process of SMF fiber and coreless fiber.

Both pieces of SMF and coreless are then fused using a fusion splicer, Fujikura (FSM-P100+), by an automatic arc cycle that heats them up in an electric arc and feeds the fibers together at a controlled rate. The fusion splice process may only take a few seconds while the fiber ends are heated up to 2000°C and joined together.

As seen from Fig. 3, after splicing, the coreless fiber is cleaved to obtain the desired length, which in this case is 2, 3, and 4 mm from the splice point. The reason these lengths were chosen is

that they can be easily and precisely cut using the available equipment, and this will help find a basis for the most optimal results since the length of the coreless fiber could potentially influence the result.

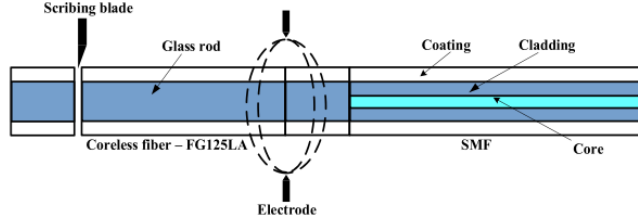


Figure 3: Spliced coreless fiber cut at the specified distance.

This hybrid fiber part is subsequently reinserted into the splicer and set up specifically for making lenses with the desired sizes. For this experiment, the diameter of the lens is changed from $130\ \mu\text{m}$ to $165\ \mu\text{m}$ for each coreless fiber length with a step of $5\ \mu\text{m}$ (8 samples for each coreless fiber length). The reason for this range is that the splicing machine, in our case, does not create a functioning lens below $130\ \mu\text{m}$, while above $165\ \mu\text{m}$, the output resembles more like a microsphere than an actual lens.

After the process is done (see Fig. 4), the sample is taken to the testing setup. The lensed fiber piece is then placed at the positioning stage opposite the cleaved SMF fiber end. Here, using stepper motors, both are aligned in such a way that the z and y axis match, and there is no visible offset angle present. Afterward, the focus point is acquired by moving the lens along the x -axis while at the same time monitoring the observed insertion loss. Here a sudden increase in loss value, as opposed to gradual change, can potentially indicate a focus point being present just before or after the given x marker. The lowest loss value is then achieved by slightly adjusting the piezo controller along all the axis, therefore, scanning the perceived focal point area.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The coupling loss and the focus point of each sample are documented and shown in Fig. 5, while coupling losses in relation to the diameter of each lens for different coreless fiber lengths are graphically displayed in Fig. 5 as well. From the graph, it is clearly visible that by increasing the length

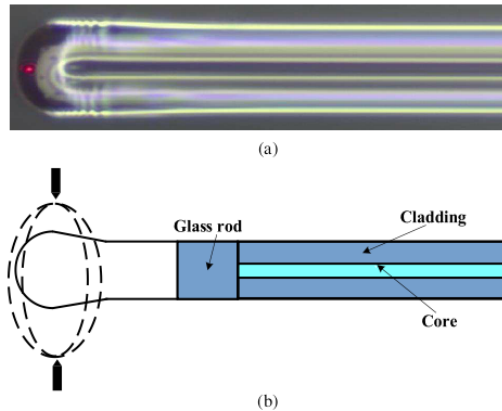


Figure 4: Fabricated lensed fiber — (a) from the microscope, (b) drawn model.

of the coreless fiber piece, the coupling loss and focus distance decreases due to the reduction of the spot size.

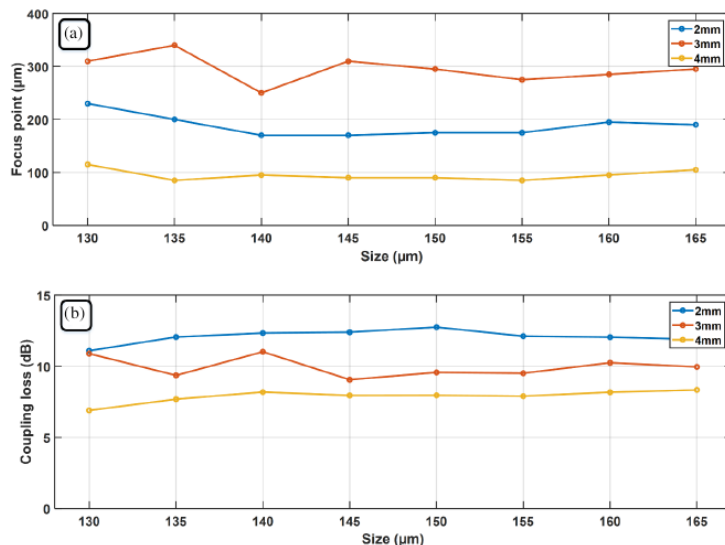


Figure 5: Measured (a) the focal point of the lens and length of coreless fiber in relation to the size of the lens and (b) total loss of the lens and length of coreless fiber in relation to the size of the lens.

The 2 mm and 4 mm samples (after 130 μm diameter) seemed to have a similar trend of the loss figures if we consider the fact that ± 0.3 dB is the realistic margin of error. Therefore, these results could be perceived as a constant straight line. The 3 mm samples seemed to be an exception to the general trend. Here the data appeared to have a higher offset, and it only leveled off towards the bigger lens sizes. In the experimental phase, the data did not match our expectations, so our experiments were repeated, and the same pattern emerged. The only reasonable explanation would be that the system has certain preferences between coreless fiber length and the size of the lens.

In the case where the chosen coreless fiber length is too small, during the splicing process, a part of the SMF fiber will fuse into the lens, and there is no discernible focus point in the end. In optical communications, the lensed fiber can also help in the efficient coupling of light into the optical fiber, which can enhance the system's overall efficiency.

4. CONCLUSION

In conclusion, lensed fiber samples were fabricated from a coreless fiber by utilizing the arc discharge of a commercial fusion fiber splicer. The laser beam diverges more by splicing a longer piece of the coreless fiber to a SMF. Combined with the focusing properties of the fabricated lenses, this leads to a tighter focus, resulting in lower coupling losses. Lensed fibers with high coupling loss can be used in various applications requiring precise light focusing and control. Despite the increased coupling loss, these applications include biomedical imaging or FBG sensors where the lensed fiber's high coupling loss can help reduce unwanted reflections and improve the signal-to-noise ratio. Overall, lensed fibers with high coupling loss can be useful in microchip applications that require precise control of light coupling, high signal-to-noise ratio, and low reflections.

ACKNOWLEDGMENT

This research has been supported by European Social Fund within project No. 8.2.2.0/20/I/008 and Riga Technical University Master Grant program. Communication Technologies Research Center,

Riga Technical University (RTU) acknowledges support from RTU Science Support Fund.

REFERENCES

1. Piccirillo, F., M. Giaquinto, A. Ricciardi, and A. Cusano, "Miniaturized lenses integrated on optical fibers: Towards a new milestone along the lab-on-fiber technology roadmap," *Results Opt.*, Vol. 6, 100203, 2021.
2. Shiraiishi, K. and S. I. Kuroo, "A new lensed-fiber configuration employing cascaded GI-fiber chips," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No. 6, 787-794, Jun. 2000.
3. Bise, R. T. and D. J. Trevor, "Surface absorption in microstructured optical fibers," *Proc. OFC 2004*, Paper WI4, Los Angeles, CA, 2004.
4. Ryu, S. Y., H. Y. Choi, J. Na, W. J. C. Na, and B. H. Lee, "Lensed fiber probes designed as an alternative to bulk probes in optical coherence tomography," *Appl. Opt.*, Vol. 47, 1510-1516, 2008.
5. Mohammad, A., *Fiber Optics Engineering*, Springer Science & Business Media, 2009.
6. Salgals, T., J. Alnis, O. Ozolins, A. Andrianov, V. Anashkina, E. A. Brice, I. Berkis, X. R. Pang, A. Udalcovs, J. Porins, S. Spolitis, and V. Bobrovs, "Silica microsphere WGMR-based Kerr-OFC light source and its application for high-speed IM/DD short-reach optical interconnects," *Appl. Sci.*, Vol. 12, 4722, 2022.
7. Ouyang, D., C. Guo, S. Ruan, Y. Wu, J. Yang, H. Lin, and H. Wei, "Theoretical and experimental analysis of splicing between the photonic crystal fiber and the conventional fiber using grating fibers," *Appl. Opt.*, Vol. 51, No. 36, 8516-8520, Dec. 2012.

RAKSTS-8: Development and Assessment of a Lensed Fiber for Applications in Integrated Photonics.

A. Sedulis et al., "Development and Assessment of a Lensed Fiber for Applications in Integrated Photonics," 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Chengdu, China, 2024, pp. 1-5, [doi: 10.1109/PIERS62282.2024.10618517](https://doi.org/10.1109/PIERS62282.2024.10618517).

Development and Assessment of a Lensed Fiber for Applications in Integrated Photonics

Arvids Sedulis^{1,2}, Deniss Zurikovs¹, Kristaps Rubulis^{1,3}, Ints Murans^{1,2}, Dmitrijs Prigunovs¹,
Toms Salgals^{1,2}, Dilan Ortiz^{1,2}, Mareks Parfjonovs¹, Lilita Gegere¹,
Armands Ostrovskis^{1,3}, Oskars Ozolins¹, Vjaceslavs Bobrovs¹, and Sandis Spolitis^{1,3}

¹Institute of Telecommunications

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

²Nanophotonics Research Laboratory

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

³Communication Technologies Research Center

Riga Technical University, Azenes Street 12, LV-1048, Riga, Latvia

Abstract— Fiber-based optical devices are becoming increasingly important in different fields, such as signal transmission systems, environmental sensing, metal cutting, and medicine. Fiber lenses are receiving much attention in these cases due to their many applications. This technology has been present for more than two decades, since mainstream optical fiber adoption, and has been evolving. Currently, there are various lensed fibers commercially available on the market. However, this still presents many challenges and complications. With the development of advanced integrated photonics devices, the demand for certain types of lensed fibers has increased, and compatibility could be better. In this paper, we are demonstrating the manufacturing of working lensed fibers in a laboratory environment from the standard telecommunication optical single-mode fiber (SMF) using a fiber arc fusion splicer to make cost-effective, well-performing lensed fibers with potentially good compatibility with integrated photonics devices.

1. INTRODUCTION

Optical fibers, which possess a microlens profile at the exit node, more commonly known as lensed fibers, are widely used in many fields, including optical telecommunications and nanophotonics [1, 2]. Lensed fibers operate on the same basic principles as converging lenses. Both devices converge incoming light into a tight focal spot at some distance from the lens's surface, otherwise known as their focal point. This principle, intrinsic to lensed fibers, can be used to collect and converge light from a laser source, which then can be inserted into optical devices such as optical chips. It's a simple design with many advantages compared to alternative bulk free-space lensed optics. These fibers can be used to facilitate high-performance data transmission while being relatively compact and stable [3, 4]. Lensed fibers are typically designed with the specific use scenario [5, 6], and coupled device in mind. In other words, each optical device will have optimal input and output parameters and specific properties that these fibers have to match. They are crucial in connecting a single-mode fiber (SMF) line and an integrated circuit. The underlying reason for this necessity is the small size of the waveguide which is embedded into the circuit scheme, which is 3 to 10 times smaller than the core size of a standard single-mode optical fiber (e.g., SMF-28) [7].

In this research, we manufacture a spherical lensed fiber within a laboratory environment, using commercially available ITU-T G.652 fiber (SMF-28) and Fujikura FSM-100P+ arc fusion splicer [8, 9]. Then, the prepared lensed fiber is tested in the test station located on an pneumatic optical vibration isolated table, where the loss figure of a single wavelength and a wavelength sweep are obtained. These figures are analyzed and compared against other alternatives available on the market.

2. DESIGN AND FABRICATION OF LENSED FIBER

The first step of the lensed fiber manufacturing process is to measure the total loss of the testing setup. Each fiber piece and connector used here has an intrinsic loss figure. Therefore, in the beginning, an uncut fiber patch cord is used to determine the baseline reference. The connecting fiber patch cord is sliced in half when the system losses are considered. This gives us the free space loss number, where two ends of SMF (ITU-T G.652) fiber are closely aligned in relation to their core profiles. In an ideal case, this only adds an extra 0.5 to 1 dB loss to the reference measurement

Authorized licensed use limited to: Riga Technical University. Downloaded on January 07, 2026 at 11:25:10 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

1

number and should be equal or higher in terms of transmission power to the best-lensed fiber samples. An illustrative example of the testing setup can be seen in Fig. 1.

In order to align both fiber ends and to make a lensed fiber to a standard fiber connection, two Thorlabs motorized positioning stages are used. On top of these stages sit two fiber clamps, which firmly hold the samples in place to ensure optimal measurement stability. Clamps can be moved in X , Y , and Z directions via stepper motors for broader alignment or via piezo motors for fine-tuning and finding the absolute best coupling position. Two microscopes are positioned directly above and on the side for optimal viewing and monitoring experience. The fabrication process of the lensed fibers goes as follows. The transmitting fiber end (direct laser output piece) is placed into one end of a fusion splicer. For the duration of the experiments, the Fujikura model FSM-100P+ was used.

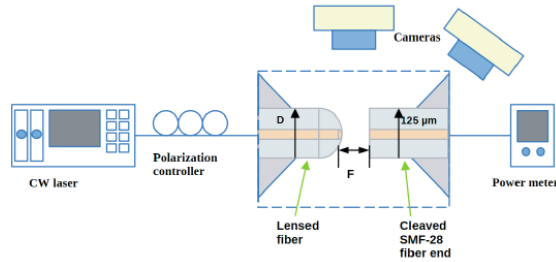


Figure 1: Experimental setup for testing the transmission between the cleaved SMF fiber and prepared lensed fiber. Here, CW stands for continuous wavelength laser source.

Unlike in the preceding research [9], it was decided to do away with additional coreless fiber splicing. The reasoning behind it was that for small lens diameters, the core would still be intact, therefore not creating additional scattering. That would also exclude the splicing point between the two types of fibers. Before splicing can begin, dedicated software inputs the splicing parameters into the system, such as fiber feeding speed, preheating time, and absolute power in bits. The splicer executes the instructions by deploying an arc discharge, which heats up the fiber end to temperatures up to 2000 degrees Celsius. During this time, fiber is adjusted, and its end forms a sort of lens profile due to surface tension taking effect. The splicing process is calibrated such that the lensed fiber sample ends up having a diameter in the range of 125 to 155 μm . Bigger sizes end up creating a microsphere, which is not optimal for such uses, and 125 μm is the diameter of the fiber, which defines the lower size limit.

After the splicing process is completed, the sample is connected to the testing setup. The lensed fiber end is placed opposite the cleaved SMF fiber end. By adjusting the Z and X axes' stepper motors, both fiber core profiles end up in the same geometrical plane. Afterward, the focus point is acquired by moving the lens along the X -axis while simultaneously monitoring the observed insertion loss. Here, instead of gradual change, a sudden increase in loss value can indicate a focus point being present just before or after the given point on the X -axis. The lowest loss value is then achieved by slightly adjusting the piezo controller along all the axes, therefore scanning the perceived focal point area.

3. RESULTS AND DISCUSSION

From the results shown in Fig. 2, it is safe to deduce that the coupling losses are not linearly correlated to the lensed fiber diameter. The trend starts off on a negative slope, and the best results were actually observed at around 129 μm . Then, there is a gradual and sharp increase, which levels out at the end. Such results could be explained as follows. For very small sizes, the fiber end cannot quite form into a good enough lens form since there might not be enough material around to make the shape. It could also be the case that the arc discharge power isn't insufficient and cannot be increased, as that simply makes a bigger lens. As the size increases, the lensed fiber system starts to experience secondary, possibly effects like zeroing of the core gain. The main

cause of the problem seems to be the uneven melting and subsequent distortion of the fiber core. The whole principle of a laboratory-made lensed fiber relies on the light partially scattering from the end of the core section and thereafter being made more focused by the lens shape.

However, as the core gets changed too much, the results become noticeably worse. This threshold seems to happen at around 140 μm lens size, where the distorted core evolution phases can be seen in Fig. 3 (microscope image).

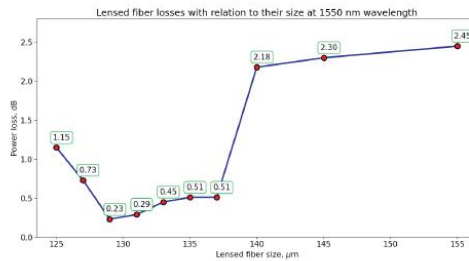


Figure 2: Coupling losses for specific-sized lensed fibers at 1550 nm wavelength.

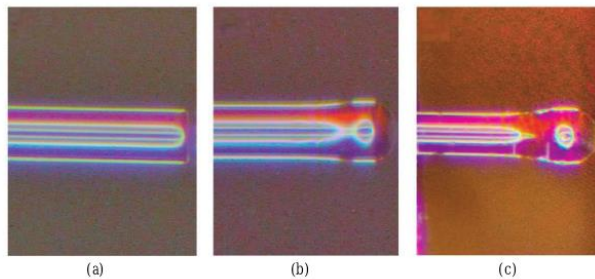


Figure 3: The gradual increase in lensed fiber diameter and subsequent core distortion. (a) Cleaved fiber end with 125 μm diameter (spliced with low power, which doesn't create a lensed shape only on the fiber core part), (b) fabricated lensed fiber of 131 μm diameter, (c) fabricated lensed fiber of 155 μm diameter.

It is worth noting that during the testing phase, 125 to 137 μm diameters were tested more extensively than 140–155 μm , which was not a priority. Therefore, the gradual increase at the end of the graph might be random in nature and should be steeper for the reasons mentioned earlier.

The next part of the experiment was to see how the loss figures within the lensed fiber system change when they are subject to a wavelength sweep. This is a potentially important factor in determining their usefulness in optical chip testing. Optical chip waveguides tend to have different responses to different optical frequencies, and this information is crucial for the operation of existing designs as well as for future samples. That means some consistent response from the lensed fiber is necessary to exclude this factor in optical chip testing. In Fig. 4, one can observe that the best designs (127–135 μm) also tend to have more or less constant responses to changes in laser frequency. Small deviations can result from small changes in the fiber positions and fluctuations in room and fiber temperature. In theory, even the big-sized lensed fibers only show a deviation of 0.5 dB of optical power, which is within the normally accepted margin of error. However, the trend line is more or less linear, which doesn't indicate any random changes in the system parameters. In addition to that, modern optical devices are far more accurate and sensitive to changes in laser power. Therefore, the trend cannot be ignored and can be considered as a reason for excluding large lensed fiber sizes in measurements.

Authorized licensed use limited to: Riga Technical University. Downloaded on January 07, 2026 at 11:25:10 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

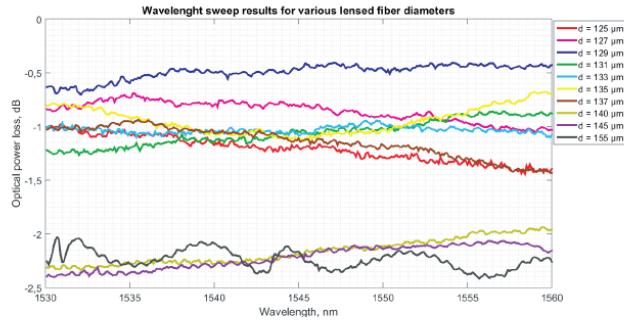


Figure 4: Lensed fiber response to changes in laser frequency (laser sweep in optical C-band).

4. CONCLUSION

In conclusion, the lensed fiber manufactured in the laboratory using a commercial arc fusion splicer can be useful in simple use cases. Assuming one has access to the right software and hardware, the fabrication process is quite simple, relatively inexpensive, and quick. In our experiments, we found out that the best samples can come quite close to cleaved fiber free space coupling loss numbers. If some decrease in relative laser power is acceptable, these fibers can even be used in cases where the optical device, like an optical chip, has an optical coupler attached to it, where lensed fibers are not necessary. The smaller focal point can, in theory, help couple light into the device since the illuminated area becomes much smaller than the coupler size. In cases where simpler optical devices are used, lensed fibers become an absolute necessity, but the cost of potentially breaking an expensive commercially available sample might not be entirely justified. Demonstrated in-house-made lensed fibers can fill that role while keeping the performance figures to an acceptable level. Assuming the production process is worked out, the production time of these samples is up to half an hour. The frequency shift response is consistent and reliable for the best lensed fibers, which might be the second most important factor apart from the absolute loss figure for only one given wavelength. Therefore, it can be stated that for this purpose, making a lensed fiber from a standard SMF-28 fiber piece can yield quite satisfactory results, as these small diameter lensed fibers have low loss figures, optimal focusing ability, and good response to changes in laser frequency, which make them a good choice for lower precision optical device testing needs.

ACKNOWLEDGMENT

This research has been supported by the Riga Technical University (RTU) Master Grant program. Communication Technologies Research Center and Nanophotonics research laboratory at RTU acknowledge support from the RTU Science and Innovation Support Fund.

REFERENCES

1. Khorasaninejad, M., et al., "Achromatic metasurface lens at telecommunication wavelengths," *Nano Lett.*, Vol. 15, No. 8, 5358–62, 2015.
2. Docter, B., et al., "Discretely tunable laser based on filtered feedback for telecommunication applications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 16, No. 5, 1405–1412, 2010.
3. Zheng, W., "Optic lenses manufactured on fiber ends," *2015 Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 1–7, Shenzhen, China, 2015.
4. Ryu, S. Y., et al., "Lensed fiber probes designed as an alternative to bulk probes in optical coherence tomography," *Appl. Opt.*, Vol. 47, 1510–1516, 2008.
5. Rivera, D. R., et al., "Use of a lensed fiber for a large-field-of-view, high-resolution, fiber-scanning microendoscope," *Opt. Lett.*, Vol. 37, 881–883, 2012.
6. Shcherbakov E. A., et al., "Industrial grade 100 kW power CW fiber laser," *Advanced Solid-State Lasers, Coors Inc., Optica Publishing Group, AT&T 2 Paris, France*, 2013.

Authorized licensed use limited to: Riga Technical University. Downloaded on January 11, 2025 at 11:22:16 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

7. Karanushkin P. V. and R. S. Ponomarev, “The optical fiber with a taper lens to light input into the waveguide of a small diameter,” *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017.
8. Salgals, T., et al., “Silica microsphere WGMR-based Kerr-OFC light source and its application for high-speed IM/DD short-reach optical interconnects,” *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 9, 4722, 2022.
9. Sedulis, A., et al., “Fabrication of lensed fibers with arc fusion splicer for telecommunication applications,” *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 1066–1070, Prague, Czech Republic, Jul. 03–06, 2023.



Dmitrijs Prigunovs Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrozinātnē (2019) un inženierzinātņu akadēmisko maģistra grādu telekomunikācijās (2021). Kopš 2019. gada strādā RTU, sākotnēji ieņemot zinātniskā asistenta amatu, patlaban ir Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks un lektors.

Zinātniskā darbība saistīta ar šķiedru optisko sakaru sistēmām, optiskajiem pastiprinātājiem, *WDM* tehnoloģijām. Piedalījies Eiropas Savienības un RTU pētniecības projektos, ir vairāku starptautiski indeksētu zinātnisko publikāciju līdzautors.

Papildus zinātniskajam darbam docē studiju kursus šķiedru optisko pārraides sistēmu un informācijas optiskās apstrādes fizikas jomā, kā arī vada/konsultē bakalaura un maģistra darbu izstrādi.