

Dmitrijs Prigunovs

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

Promocijas darba kopsavilkums



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 darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji

Profesors Dr. sc. ing. VJAČESLAVS BOBROVS

Asociētais profesors Dr. sc. ing. TOMS SALGALS

Prigunovs, D. Efektīva optiskā pastiprinātāja izveide un veikspējas novērtējums sakaru sistēmās. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2026. 54 lpp.

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

Vāka attēla autors Dmitrijs Prigunovs.

<https://doi.org/10.7250/9789934373251>

ISBN 978-9934-37-325-1 (pdf)

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 fakultātē, 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: _____

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, trīs tabulas, astoņi pielikumi, kopā 93 lappuses, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 104 nosaukumi. Promocijas darbs apkopo astoņus no autora 19 zinātniskajiem oriģinālrakstiem. Zinātniskās publikācijas uzrakstītas angļu valodā un indeksētas SCOPUS, IEEE vai WoS datubāzē, to kopējais apjoms ir 69 lpp.

ANOTĀCIJA

Promocijas darbā izpētīti un analizēti vairāki zinātniskie pētījumi par *EDFA*, Ramana, *FOPA* un kombinēto optisko pastiprinātāju izmantošanu viļņgarumdales daudzkanālu sakaru sistēmās. Izmantotas datorsimulācijas programmas *RSoft OptSim* un *VPIphotonics Design Suite*. Galvenā uzmanība pievērsta optiskajiem pastiprinātājiem ar divu retzemju elementu leģēto šķiedru un apvalka pumpēšanu paņēmienu pašā šķiedrā.

Darbā novērtēta arī 50 ps elektrisko impulsu paplašināšanas metode, izmantojot augstas precizitātes notikumu taimeri, Beseļa un *Butterworth* filtrus, kā arī dažādus pašizgatavotus kaskādes zemfrekvenču filtrus (*LPF*). Analizēta *BER* veiktspēja gan optiskajā *B2B* konfigurācijā, gan konfigurācijā pēc 20 km pārraides *SMF* šķiedrā, izmantojot 50 ps impulsa ilgumu (τ) un dažādas pozīcijas platuma ilguma vērtības (Δ) – 50 ps, 100 ps un 200 ps.

Demonstrēta sfērisko lēcu jeb mikrosfēru izgatavošana, izmantojot komerciāli pieejamu lokizlādes metināšanas iekārtu *Fujikura-100P+*, kas tiek izmantota integrēto fotonikas ierīču vajadzībām.

Atslēgvārdi

Ar erbiju un iterbiju leģētas šķiedru optiskais pastiprinātājs (*EYDFA*), uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs (*FOPA*), lēcu šķiedra, impulsu pozīcijas modulācija (*PPM*)

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 Multiplexing – 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 leģētās šķiedras optiskais pastiprinātājs

EYDF – Erbium-Ytterbium Doped Fiber – ar erbiju un iterbiju leģēta šķiedra

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – ar erbiju leģētās 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 At Half Maximum – pilns platums līmenī viena puse no maksimuma

FBG-DCM – Fiber Bragg Grating Dispersion Compensation Module – šķiedras Brega režģa dispersijas kompensācijas modulis

H

HNLF – High Nonlinear Optical Fiber – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

G

GP – Generated Pulse – ģenerētais impulss

I

IL – Insertion Losses – ienestie zudumi

IR-UWB – Impulse Radio Ultra-Wideband – impulsa radio ultraplātjoslas

L

LPF – Low-Pass Filter – zemfrekvenču filtrs

M

MC – Multi-Core – daudzserdeņu

O

OPEX – Operating Expense – ekspluatācijas izdevumi

OOK – On-Off Keying – ieslēgšanas-izslēgšanas manipulācija

OBPF – Optical Band Pass Filter – optiskais caurlaides joslas filtrs

OB2B – Back-To-Back – optiskā tiešā savienojumā

OF – Optical Filter – optiskais filtrs

OSNR – Optical Signal-To-Noise Ratio – optiskā signāla un trokšņa 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 – pseidogadījuma bitu secība

PPM – Pulse Position Modulation – impulsu pozīcijas modulācija

Q

QPSK – Quadrature Phase-Shift Keying – kvadratūras fāzes manipulācija

R

REDFA – Rare Earth Doped Fiber Amplifier – ar retzemju elementu legētu optisko šķiedru pastiprinātājs

RA-FOPA – Raman-Based Parametric Amplifier On Optical Fiber – uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais Ramana parametriskais pastiprinātājs

S

SMF – Single Mode Fiber – vienmodas optiskā šķiedra

SDM – Spatial-Division Multiplexing – telpiskās dalīšanas multipleksēšana

SNR – Signal To Noise Ratio – signāla un trokšņa attiecība

SSE – Stimulated Spontaneous Emission – stimulēta spontānā emisija

SRS – Stimulated Raman Scattering – stimulēta Ramana izkliede

SBS – Stimulated Brillouin Scattering – stimulēta Briljuēna izkliede

ŠOPS – Fiber Optical Transmission System – šķiedru optiskā 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 PUMPĒŠANAS ŠĶIEDRAS PASTIPRINĀTĀJA NOVĒRTĒJUMS <i>DWDM</i> SAKARU SISTĒMĀ	17
1.1. Optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģēto šķiedru simulācijas modeļa apraksts	18
1.2. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras simulācijas modeļa novērtējums līdz 64 kanālu <i>DWDM</i> sakaru sistēmā	20
1.3. Dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras pastiprinātāja modeļa simulācijas un eksperimentālais novērtējums <i>DWDM</i> sakaru sistēmā līdz 48 kanāliem	24
2. OPTISKO ŠĶIEDRU PARAMETRISKO PASTIPRINĀTĀJU (<i>FOPA</i>) UN RAMANA ASISTĒTĀ <i>FOPA</i> PASTIPRINĀTĀJU VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS	31
2.1. <i>FOPA</i> un Ramana asistēta <i>FOPA</i> simulācijas modeļa apraksts 16 kanālu <i>DWDM</i> pārraides sistēmā	31
2.2. Pastiprinājuma spektra novērtējums <i>RA-FOPA</i> un viena pumpēšanas avota parametriskajam pastiprinātajam <i>FOPA</i>	32
2.3. Optiskā signāla un trokšņa attiecības (<i>OSNR</i>) novērtējums <i>RA-FOPA</i> un viena pumpēšanas avota parametriskajam <i>FOPA</i> pastiprinātajam 16 kanālu <i>DWDM</i> sistēmā	34
3. PIKOSEKUNŽU IMPULSU PAPLAŠINĀŠANAS VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS UN NOVĒRTĒJUMS <i>PPM</i> SAKARU SISTĒMĀ	36
3.1. Pašizgatavotā 450 MHz zemfrekvenču filtra dizaina modeļa apraksts	37
3.2. Impulsu paplašināšanas novērtējums, izmantojot dažādus pašizgatavotos <i>LPF</i> filtrus ...	37
4. LĒCU ŠĶIEDRU IZMANTOŠANAS APRAKSTS INTEGRĒTAJĀM FOTONIKAS IERĪCĒM	41
4.1. Lēcu šķiedru konstrukcijas un izgatavošanas procesa apraksts	41
4.2. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums, ja viļņa garums ir 1550 nm	42
SECINĀJUMI	46

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 dalīšanas multipleksēšanu (*WDM*), kas ļauj vienlaikus pārraidīt vairākus kanālus pa vienu optisko šķiedru [1–3]. Tomēr datu pārraide vienmēr ir saistīta ar dažādiem zudumiem, jo signāls pamazām rimst un jauda izkliedējas. Lai galaiekārta uztvertu signālu, tas ir jāpastiprina. Efektīvākais un tehnoloģiski visattīstītākais pastiprinātāju tips ir ar erbiju leģēts optiskais šķiedru pastiprinātājs (*EDFA*) [4–5]. Tā darbība balstās erbija jonu (Er^{3+}) stimulētā starojumā, kas ļauj pastiprināt signālus viļņu garuma diapazonā 1530–1565 nm, un šie pastiprinātāji tiek izmantoti *WDM* sakaru sistēmās, 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 tiem ir ierobežotā pastiprinājuma joslas platums, efektivitātes samazināšanās augstas pumpēšanas jaudas gadījumā, kā arī grūtības nodrošināt vienmērīgu pastiprinājumu daudziem kanāliem plašā spektrālajā diapazonā. Lai izvairītos no šīm problēmām, tiek aktīvi attīstīti kopīgi leģētie pastiprinātāji, kuru pamatā tiek izmantota *SMF* šķiedra, kas tiek leģēta ar $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ joniem. Šādai šķiedrai piemīt vairākas būtiskas priekšrocības. Ierbijam (Yb^{3+}) ir plaša absorbcijas josla 900–1060 nm diapazonā, un tas efektīvi pārvērš pumpēšanas enerģiju erbija jonu ierosmē. Šāda enerģijas pārejas shēma ļauj ievērojami palielināt pastiprinājuma efektivitāti, īpaši, ja viļņa garums ir 980 nm. Rezultātā $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētie pastiprinātāji (*EYDFA*) nodrošina augstāku izejas jaudu, mazāku nelineāro efektu ietekmi, kā arī stabilāku darbību daudzkanālu sakaru sistēmās.

Pateicoties šīm priekšrocībām, platjoslas *EYDFA* pastiprinātāji kļūst par neatņemamu mūsdienu optisko šķiedru sakaru sistēmu sastāvdaļu, nodrošinot efektīvu *DWDM* (blīva viļņgaruma dalīšanas multipleksēšanas) un *CWDM* (rupja 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 maģistrālajās līnijās, zemūdens kabeļu sistēmās, datu apstrādes centros un 5G/6G infrastruktūrā. 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 turpmākajai augstas kapacitātes un energoefektīvu optisko sakaru sistēmu attīstībai, kas veido pamatu jaunās paaudzes globālajiem telekomunikāciju tīkliem [7].

Optiskā signāla pastiprināšanas tehnoloģijām ir aktuāla lietojamība integrētajās fotonikas ierīcēs, kurās optiskā signāla ģenerēšanai tiek izmantotas optiskās mikrosfēras, kur optiskais signāls tiek ģenerēts ar nelineārā Kerra efekta palīdzību [8]. Galvenais iemesls ir tas, ka signāls ar frekvenču ķemmes palīdzību tiek ģenerēts diskrētās, vienādā attālumā sadalītās frekvenču līnijās. Šāda struktūra nodrošina precīzu un stabilu frekvenču ģenerāciju, un tā rezultātā tiek radīts koherents gaismas avots ar spektrāli ierobežotām līnijām. Šīs spektrāli ierobežotās līnijas tiek iegūtas, pateicoties frekvenču ķemmes stabilajai ģenerācijai un zemaļam fāzes troksnim, kas nodrošina to, 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, kas ir cieši izvietotas noteiktā attālumā cita no citas un “bloķētas” fāzē (nav fāžu nobīdes), tāpēc ar optisko frekvenču ķemmu palīdzību tiek iegūtas šauras spektrālās līnijas [10].

Impulsu pozicionālās modulācijas (*PPM*) paņēmiens tiek izmantots sakaru sistēmas, lai palielinātu energoefektivitāti un samazinātu signāla vājināšanos datu pārraides procesā [11]. *PPM* informācija tiek kodēta ar impulsa pozīciju laika logā, kas samazina trokšņu un nelineāro kropļojumu ietekmi. Izmantojot *EDFA* pastiprinātājus, signāla pastiprināšana notiek bez nepieciešamības veikt optoelektronisko pārveidošanu, saglabājot impulsu 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 attīstības virzieniem, tika definēts **promocijas darba mērķis** – izstrādāt un novērtēt dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras optisko pastiprinātāju elektrisko 50 ps impulsu paplašināšanās un lēcu šķiedru tehnoloģijas ātrgaitas optisko šķiedru sakaru sistēmas lietojumiem un integrētajām fotonikas ierīcēm.

Lai sasniegtu darba mērķi, tika definētas vairākas **promocijas darba aizstāvamās tēzes**.

1. Izmantojot 40 kanālu *DWDM* sakaru sistēmu ar izstrādāto $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras optiskā pastiprinātāja modeli un lietojot apvalka pumpēšanas paņēmieni šķiedrā, vismazāko pastiprinājuma starpību ($\Delta G < 9$ dB) ir iespējams iegūt, ja šķiedras garums ir 7 m.
2. Izmantojot atskaites impulsa 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 mikrosfēru, ir iespējams iegūt vismazākos savienojuma punkta zudumus, ja lēcas diametrs ir 129 μm .

PROMOCIJAS DARBA UZDEVUMI

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi un pierādītu definētās tēzes, bija nepieciešams veikt vairākus **promocijas darba uzdevumus**.

1. Simulācijas vidē *WDM* 64 kanālu sakaru sistēmā novērtēt dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras vidējo pastiprinājumu, trokšņa faktoru un pastiprinājuma starpību starp kanāliem atkarībā no *EYDF* laiduma garuma un signāla izplatīšanas virziena.
2. Eksperimentāli un simulācijas vidē *WDM* 40 kanālu sakaru sistēma novērtēt dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras pastiprinājuma koeficientu, ja ieejas jauda ir -20 dBm/uz kanālu, atkarībā no pumpēšanas jaudas un *EYDF* laiduma garuma.
3. Izstrādāt hibrīdu *RA-FOPA* un viena pumpēšanas avota *FOPA* pastiprinātāju, novērtēt tā veikspēju 16 kanālu *DWDM* sakaru sistēmā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu uz kanālu, nepārsniedzot uztvertā signāla robežvērtību ($\text{BER} \geq 1 \times 10^{-9}$).
4. Lietojot pārraidīto atskaites impulsa pozīcijas modulācijas (*TR-PPM*) signālus ar impulsa ilgumu 50 ps un pilna platuma līmenī viena puse no maksimuma (*FWHM*), novērtēt impulsa paplašināšanās ar dažādiem pašizgatavotajiem *LPF*.
5. Integrētajās fotonikas ierīcēs novērtēt savienojuma zudumus noteiktajiem lēcu izmēriem, ja viļņa garums ir 1550 nm.

DARBA APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

Autora promocijas darba rezultāti izklāstīti astoņos zinātniskajos rakstos un konferenču tēzēs, kas ir publicētas datubāzes žurnālos vai rakstu krājumos (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*).

Autora promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti prezentēti piecās 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., Šelis, O., Sics, P., Ostrovskis, A., Solovjova, T., Semenako, J., Aboltnijs, 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., Ozoliņš, 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 trīs zinātniskajos rakstos un konferenču tēzēs (*SCOPUS*, *WoS*, *IEEE*), kas iekļauti datubāzes 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. [doi: 10.3390/app11041702](https://doi.org/10.3390/app11041702).
2. Zakis K., Olonkins S., Udalcovs A., Lukosevics I. Prigunovs D., Grube J., Bikse L., Supē A., Ozolins O., Spolitis S., Bobrovs V. “Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for MultiChannel Operation. Photonics” 2022, 9, 457. [doi: 10.3390/photonics9070457](https://doi.org/10.3390/photonics9070457).
 3. Solovjova T., Semenako J., **Prigunovs D.**, Ortiz D, Spolitis S 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 biežāk tiek izmantotas *WDM* sakaru sistēmas un tiek aktīvi veikti vairāki pētījumi par šādu sistēmu komponentu izstrādi un to veiktspējas uzlabošanu [14–16]. *WDM* tehnoloģija ļauj daudz efektīvāk izmantot optiskās šķiedras resursus, salīdzinot 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 pa optisko šķiedru, un ievērojami ierobežo pārraides attālumu, jo uztvērēja galā esošo fotodetektoru jutība ir ierobežota. Tādēļ ir nepieciešams kompensēt pārraidītā signāla vājināšanos [21]. Pārraidītā signāla vājinājumu var kompensēt, izmantojot signāla reģeneratorus vai optiskos pastiprinātājus. Reģenerators ir sarežģīta ierīce, kas ietver gan elektroniskas, gan optiskas sastāvdaļas. Tam jādetektē pārraidītais optiskais signāls, jāpārvērš tas 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. *WDM* reģeneratoru izmantošana nav arī ekonomiski efektīva, jo pastāv alternatīva pieeja optisko zudumu kompensēšanai. 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, salīdzinot ar reģeneratoru risinājumiem [24].

Daudzmodu dubultapvalka ar erbiju leģētās 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 tieši vērsto pumpēšanas virzienu lietojums [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 saistībā ar to pastiprinājuma profilu un pumpēšanas pārveidošanas efektivitāti. Šie rādītāji ir atkarīgi no legētās šķiedras profila, absorbcijas/emisijas spektriem un ieejas signāla jaudas. Pamatojoties uz šo informāciju, lai apmierinātu pastāvīgi augšo pieprasījumu pēc lielākas tīkla jaudas, parastos *EDFA* var aizstāt ar alternatīvu pastiprināšanas risinājumu.

Šķiedru optiskie parametriskie pastiprinātāji (*FOPA*) ir inovatīvi pastiprinātāju veidi, ko var uzskatīt par vienu no iespējamajiem variantiem tradicionālo *EDFA* aizstājējiem. *FOPA* pastiprinājuma raksturlielumi parāda, kāpēc šāda tipa pastiprinātāji tuvākajā nākotnē, visticamāk, tiks plaši izmantoti visā pasaulē – no pieejamajām 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 īpašības, tie nodrošina virkni papildu lietojumu visu optisko signālu apstrādei, piemēram, viļņa garuma pārveidošanu, izmantojot četru viļņu sajaukšanās radītās tukšgaitas spektrālās komponentes, dispersijas kompensāciju, izmantojot fāžu konjugāciju, optiskā signāla reģenerāciju pārraides posma vidū, kā arī modulācijas formāta pārveidošanu [30–33]. *FOPA* veikspēju būtiski ietekmē vairāki faktori, piemēram, augsta pastiprinājuma jutība pret mijiedarbības spektrālo komponentu fāžu nesakrītību, stimulētā Briljuēna 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 *FOPA* veikspējas palielināšanai, 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, savukārt *FWM* ir ļoti atkarīga no attāluma starp kanāliem. Samazinot šo ietekmi, palielinās *FWM*. Atšķirībā no citām nelinearitātēm *FWM* var izraisīt jaudas samazināšanos un pasliktināt *DWDM* sistēmas veikspēju [35].

Optiskā signāla pastiprināšanas tehnoloģijām ir aktuālā lietojamība integrētajās fotonikas ierīcēs, kurās optiskā signāla ģenerēšanai tiek izmantotas optiskās mikrosfēras, kur optiskais

signāls tiek ģenerēts ar nelineārā Kerra efekta palīdzību [8]. Galvenais iemesls ir tas, ka signāls ar frekvenču ķemmes palīdzību tiek ģenerēts diskrētās, vienādā attālumā sadalītās frekvenču līnijās. Šāda struktūra nodrošina precīzu un stabilu frekvenču ģenerāciju, un tā rezultātā tiek radīts koherents gaismas avots ar spektrāli ierobežotām līnijām. Šīs spektrāli ierobežotās līnijas tiek iegūtas, pateicoties frekvenču ķemmes stabilajai ģenerācijai un zemajam fāzes troksnim, kas nodrošina to, 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, kas ir cieši izvietotas noteiktā attālumā viena no otras un “bloķētas” fāzē (nav fāžu nobīdes), līdz ar to ar optisko frekvenču ķemņu palīdzību tiek iegūtas šauras spektrālās līnijas [10].

Impulsu pozicionālā modulācija (*PPM*) tiek izmantota optisko šķiedru pārraides sistēmās, tostarp *DWDM* sakaru sistēmās, lai palielinātu energoefektivitāti un samazinātu signāla vājināšanos datu pārraidē [11]. *PPM* informācija tiek kodēta ar impulsa pozīciju laika logā, kas samazina trokšņu un nelineāro kropļojumu ietekmi. Izmantojot *EDFA* pastiprinātājus, signāla pastiprināšana notiek bez nepieciešamības veikt optoelektronisko pārveidošanu, saglabājot impulsu 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 ŠĶIEDRAS PASTIPRINĀTĀJA NOVĒRTĒJUMS *DWDM* SAKARU SISTĒMĀ

Telpiskās dalīšanas multipleksēšana (*SDM*) piesaista optiskos pastiprinātājus, kas tiek pumpēti ar apvalku, 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 šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) detalizētajai izpētei, izmantojot skaitliskās simulācijas, lai noteiktu piemērotāko *EYDFA* konfigurāciju, kas nodrošina vēlamo veikspēju un efektivitāti *WDM* sakaru sistēmu lietojumiem.

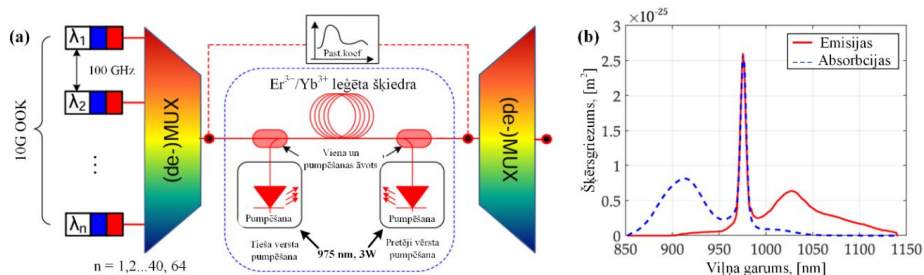
Simulācijas modelī tika izmantotas dubultapvalka *EYDFA* šķiedras, un iegūtie simulācijas rezultāti tika salīdzināti ar eksperimentālajiem rezultātiem. Tika pētīti pastiprinātāja raksturlielumi – pastiprinājuma koeficients, pastiprinājuma viendabīgums un trokšņa faktors – dažāda šķiedru garuma, kanālu skaita un ieejas signāla jaudas līmeņa gadījumā.

Ar apvalku pumpēti erbija (Er^{3+})/iterbija (Yb^{3+}) jonu leģētās šķiedras pastiprinātāji ir efektīvāki, ja izejas jauda ir liela, tomēr šim pastiprināšanas paņēmienam ir potenciāls arī telekomunikāciju lietojumos. Šāda veida pastiprinātājiem ir sarežģītas īpašības saistībā ar pastiprinājuma profilu un pumpēšanas pārveidošanas efektivitāti. Šie rādītāji ir atkarīgi no leģētās šķiedras profila, absorbcijas/emisijas spektriem un ieejas signāla jaudas. Šajā kontekstā tika izstrādāts un izpētīts $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ jonu leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) prototips ar apvalku pumpēšanu. Šī modeļa mērķis tika veltīts *EYDFA* konfigurācijai (leģētās 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 paredzēja eksperimentāli noteikt $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās 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. Optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru simulācijas modeļa apraksts

Izstrādātā *EYDFA* ar pumpētu apvalku izmantotais simulācijas modelis tā veikspējas raksturošanai parādīts 1.1. attēlā.



1.1. 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*, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ fosfosilikāta stikla šķiedras ar dubulto apvalku absorbcijas un emisijas šķērsgriezumi ir eksperimentāli izmērīti ŠOPS laboratorijā un ievadīti kā ieejas dati simulācijas konfigurācijai (1.1. (b) att.). Līdz ar to komplektācijā ir trīs daļas:

- 1) n 10 Gb/s *OOK WDM* raidītāji;
- 2) *EYDFA* reālistiskais modelis, kas sastāv no paša *EYDFA*, optiskā pumpējoša gaismas avota (centrālais viļņa garums $\lambda_p = 975$ nm pie 25 °C, izejas jauda 3–5 W), lieljaudas optiskā apvienotāja/sadalītāja un pastiprinātāja testēšanas bloka, lai novērtētu tā raksturlielumus (piemēram, pastiprinājuma spektru un trokšņa koeficientu (*NF*));
- 3) *WDM* (de-)multiplexori un uztvērēji signāla kvalitātes novērtēšanai. Šī optiskā tiešā savienojuma (*OB2B*) iestatījuma galvenais komponents ir optiskās šķiedras modelis. Šī eksperimenta vajadzībām tika izmantota dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ šķiedra ar tieši vērsto pumpēšanas virzienu no *VPIphotonics Design Suite* simulācijas programmatūras. Saskaņā ar tā

aprakstu šis modelis ir balstīts divvirzienu signālu izplatīšanās vienādojumos un daudzlīmeņu jonu populācijas ātruma vienādojumos.

Šis modelis tika pielāgots *EYDF*, kur tika izmantoti nomērītie šķērsriezumi, 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, Er^{3+}/Yb^{3+} jonu enerģijas pārnesei, šķērsrelaksācijas efektus, ierosinātā stāvokļa absorbcija, Releja izkliedi un Kerra nelinearitāti. Iestatītās parametru vērtības redzamas 1. tabulā.

1. tabula

Pastiprinātāja iestatīšanas parametri

Sistēmas parametri	
Pārraides ātrums un modulācija	10 Gbps <i>NRZ-OOK</i>
Kanālu skaits (<i>n</i>)	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, ja temperatūra ir 25 °C
Pumpēšanas jauda	3 W, darbības diapazons 0,3–5 W
Virziens	Tieši vērsta signāla izplatīšanās
Legētās šķiedras parametri	
Garums	1 m līdz 10 m
Er^{3+} koncentrācija	$1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Yb^{3+} koncentrācija	$2 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$
Er^{3+}/Yb^{3+} šķērsrelaksācijas koeficients	$1 \times 10^{-22} \text{ m}^3/\text{s}$
Serdeņa laukums / iekšējā apvalka laukums ($A_{\text{serdenis}}/A_{\text{iekšējais apvalks}}$)	0,0058
Iekšējā apvalka laukums/ārējā apvalka laukums ($A_{\text{iekšējais apvalks}}/A_{\text{ārējais apvalks}}$)	0,9203

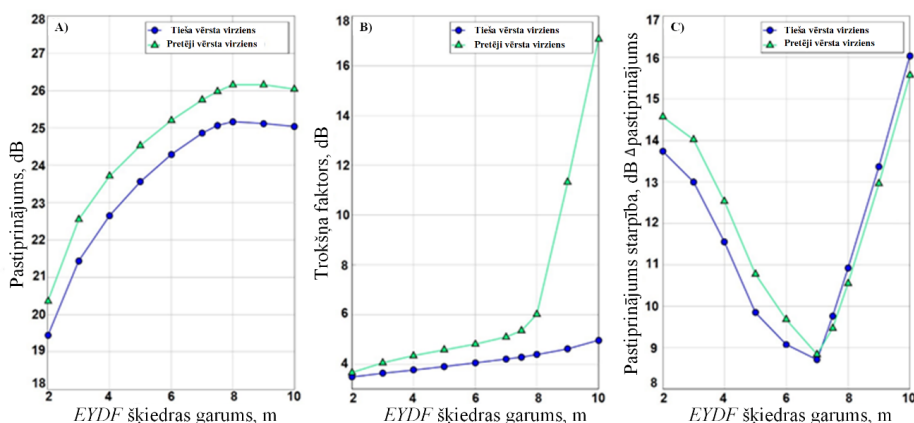
Simulācijas modeli tika iekļauti parametri, kas nosaka gan *WDM* sistēmu, gan testējamo *EYDFA*. Šajā gadījumā tika izmantots 10 Gb/s *NRZ-OOK* signāls, kura centrālās frekvences ir izvietotas C joslā (1530–1565 nm), izmantojot 100 GHz režģi ar kopējo kanālu skaitu līdz $n = 64$ (41.–64. kanāls atrodas ārpus C joslas ($f_c > 195,6 \text{ THz}$)). 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 “**Leģētās šķiedras parametri**” tika iekļauti *EYDF* izmērītie, aprēķinātie un dotie raksturlielumi, kas tika izmantoti maketu izveidošanai ar *EYDFA* ŠOPS laboratorijā.

1.2. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras simulācijas modeļa novērtējums līdz 64 kanālu *DWDM* sakaru sistēmā

Šajā apakšnodaļā novērtēti šādi *EYDFA* konfigurācijas parametri: $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras garums; tās absorbcijas un emisijas šķērsriezumi; pumpējošā signāla virziens, kā arī tika novērtēta no 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 kropļojumu, 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.

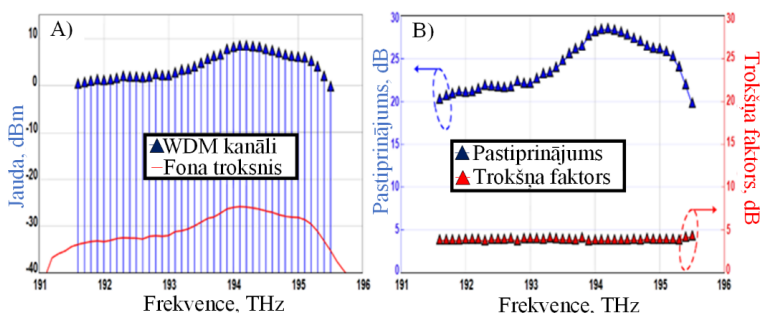


1.2. att. A) Vidējais pastiprinājums; B) vidējais trokšņa rādītājs; C) maksimālā pastiprinājuma starpība starp kanāliem atkarībā no *EYDF* garuma sistēmā ar 40 *WDM* kanāliem, ieejas signāla jauda -20 dBm uz kanālu ar 3 W 975 nm tieši (zilā krāsā) un pretēji (zaļā krāsā) vērsto pumpēšanas avotu.

Lai izvēlētos *EYDF* garumu un pumpējošā signāla virzienu, tika izmantotas 40 kanālu *WDM* sistēmā iegūtās līknes, kas parāda pastiprinātāja pastiprinājuma koeficienta izmaiņas, trokšņa koeficientu un maksimālās izejas jaudas atkarību no *EYDF* garuma (1.2. att.).

Iegūtie rezultāti rāda, ka maksimālais pastiprinājums tika sasniegts, ja *EYDF* garums ir 8 m neatkarīgi no pumpēšanas signāla virziena (1.2. A att.). Garāks *EYDF* nenodrošina lielāku pastiprinājumu, kas ir izskaidrojams ar pumpējošā starojuma izsīkšanu. Turpmāka legētās šķiedras garuma palielināšana ne tikai nevar radīt papildu pastiprinājumu, bet arī pastiprinātā signāla jauda sāk samazināties paša *EYDF* vājināšanās dēļ. Īpaši trokšņaināks pastiprinātājs kļūst tādā konfigurācijā, kurā signāls tiek pumpēts pretēji vērstaļ pumpēšanas virzienā (1.2. B att.). Šajā gadījumā trokšņa faktors nav lielāks par 4,5 dB (tieši vērstaļ pumpēšana) un 6 dB (pretēji vērstaļ pumpēšana).

Pastiprinājuma viendabīgums ir svarīga īpašība sistēmās ar vairākiem legējuma šķiedras garumiem. Ja visi *DWDM* kanāli netiek pastiprināti vienādi, jaudas starpība palielinās ar katru diapazonu, ierobežojot maksimālo pārraides attālumu. Vismazākā pastiprinājuma starpība ($\Delta G < 9$ dB) ir iegūta 7 m garā *EYDF* 975 nm pumpēšanas signālam gan tieši vērstaļ, gan pretēji vērstaļ pumpēšanā (1.2. C att.). Tā ir ievērojami lielāka īsākiem un garākiem *EYDF* segmentiem, kas liecina par to, ka šajā konkrētajā kombinācijā pumpējošai jaudai (3 W) un *EYDF* garumam (7 m) tika sasniegts atbilstošs jonu populācijas inversijas līmenis.



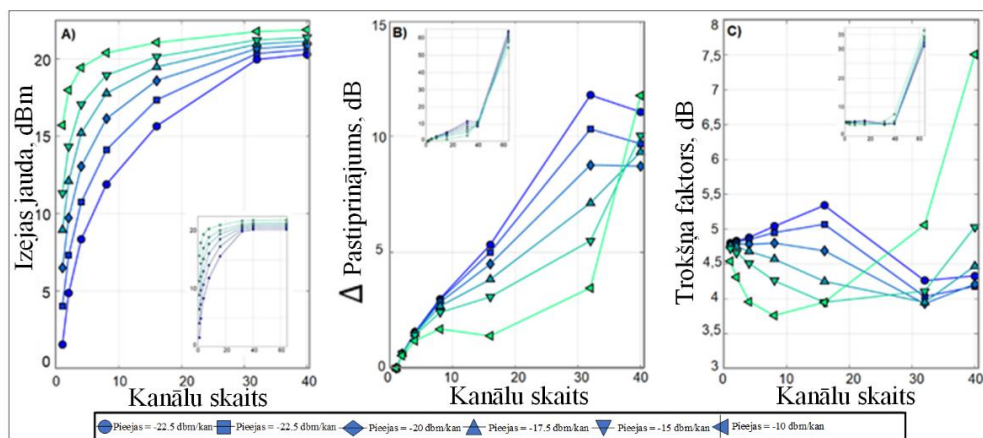
1.3. att. A) Optiskais spektrs, kas iegūts pie *EYDFA* izejas ar 7 m garu legēto šķiedru; B) vidējais pastiprinājums un trokšņa rādītājs sistēmā ar 40 *WDM* kanāliem, ieejas signāla jauda -20 dBm uz kanālu un ar 3 W 975 nm tieši (zilā krāsā) un pretēji (zaļā krāsā) vērstaļ pumpēšanas avotu.

Visbeidzot, tika izvēlēts izmantot pumpēšanas signālu ar pretēji vērsto pumpēšanas virzienu, tāpēc tika izvēlēts zemāks trokšņa koeficients, nevis lielāks pastiprinājums. 1.3. A attēlā redzams izejas jaudas spektrs, 1.3. B attēlā – katra *EYDFA* pastiprinātā *DWDM* kanāla individuālais pastiprinājums un trokšņa faktors.

Pastiprinātāja pastiprinājums un trokšņa faktors ir atkarīgs no viļņa garuma, tāpēc izejas spektrs nav vienmērīgs. Pastiprinātāja izejas jaudas līmeņi mainās no 0,1 dBm līdz 8,3 dBm katrā kanālā (dBm/uz kanālu, 1.3. A att.), un tā rezultātā pastiprinājuma starpība ir 19,7–28,3 dB un trokšņa faktors mainās no 3,7 dB līdz 4,2 dB (1.3. B att.). Ieejas optiskā jauda (*P_{IN}*) visos 40 izpētītajos *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 dBm/uz kanālu līdz –10 dBm/uz kanālu (1.4. att.).



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

Izejas jaudas līknes rāda, ka, jo lielāks *DWDM* kanālu skaits, jo mazāka ir izejas jaudas starpība. Pastiprinātājs piesātinās, un rezultātā tas nespēj pastiprināt vairāk par 40 *DWDM* kanāliem, pat tad, 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 tiek palielināts no 16 līdz 32 kanāliem. Šāda uzvedība liecina par 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 rezultātā rada pārmērīgu pastiprinātas spontānās emisijas (ASE) troksni, kas rada sliktu trokšņa koeficientu, (1.4. 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 tiek palielināts līdz 64. Lielāka pumpēšanas signāla jauda arī nenozīmē lielāku pastiprinājumu vai lielāku izejas jaudu. Pat tad, ja tiek izmantots 4 W pumpēšanas signāls 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.

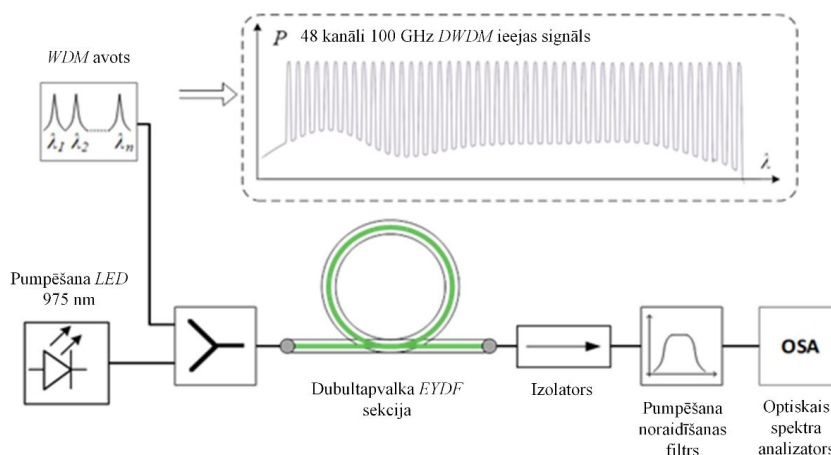
Maksimālās pastiprinājuma starpības līknes (1.4. B att.) rāda šādu tendenci: jo lielāka ieejas jauda, jo mazāka pastiprinājuma starpība *DWDM* sistēmā ar 4–32 kanāliem. Galvenais iemesls ir tas, ka, lai sasniegtu līdzīgu pastiprinājuma līmeni lielākas ieejas jaudas signāliem, tiek patērēta lielāka populācijas inversijas daļa. Noteiktā populācijas inversijas līmenī optiskie signāli ar lielāku jaudu ir mazāk pastiprināti un pastiprinājuma starpība starp kanāliem kļūst mazāka.

Tomēr 40 *DWDM* kanāliem vērojama pretēja situācija – 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 jaudas maina vidējo populācijas inversijas līmeni visā *EYDF* uz vērtību, kas nodrošina vienlīdzīgāku pastiprinājumu pārraides sistēmas frekvenču joslā. Tika novērots vienmērīgāks visu 40 *DWDM* kanālu pastiprinājums, ja ir iestāta $pIN = 25$ dBm/uz kanālu, savukārt 10 dBm/uz kanālu populācijas inversija izplūst daudz ātrāk, pirms tiek sasniegta līdzīga viendabība. Līdzīga tendence vērojama arī *EYDFA* trokšņa koeficientam (1.4. C att.). 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, ko

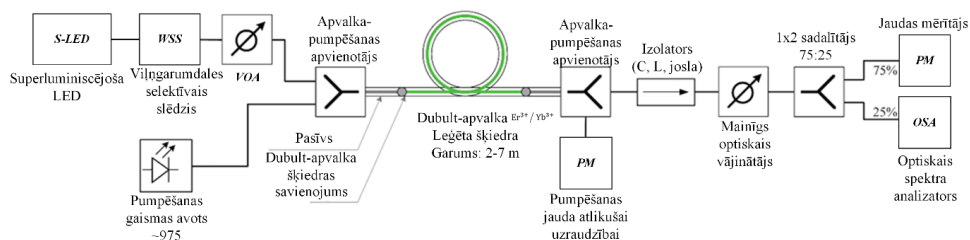
pārsniedzot, trokšņa faktors sāk palielināties. Ja ir mazāk jaudas kanālu, trokšņa faktors vispirms palielinās par 0,5–1 dB un tad sāk samazināties, sasniedzot 4–4,5 dB 32–40 DWDM kanāliem.

1.3. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras pastiprinātāja modeļa simulācijas un eksperimentālais novērtējums DWDM sakaru sistēmā līdz 48 kanāliem

Šajā apakšnodaļā aprakstīts simulācijas modelis, kas tika izmantots, lai novērtētu paredzamus galvenos darbības rādītājus dažādu šķiedras garumu gadījumā. Šeit arī tika aprakstīts testējamā pastiprinātāja eksperimentālais modelis, kā arī salīdzināti simulācijas un eksperimentāli iegūtie rezultāti. Šīs simulācijas shēma tika izveidota, izmantojot *VPI Photonics Design Suite* [36], kas redzama 1.5. attēlā. Ieejas signāls sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37,5 GHz joslas platumu atbilstoši iestatītajam WSS. Šis optisko nesēju signāls satur 48 kanālu interpretāciju, emulējot optiskos nesējus (modulēto signālu datu kanālus WDM risinājumā, 1.5. att.). Simulācijas modeļa mērķis ir noteikt pastiprinājuma raksturlielumus un nodrošināt EYDF garuma un pumpēšanas parametru pamata vērtības eksperimentālajai konfigurācijai. Simulācijas [37] modelis tika uzlabots vēl vairāk, izmantojot 1.6. attēlā redzamo laboratorijas prototipu, kur tika izmērīts 3 m garas šķiedras pastiprinājums.



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



1.6. att. Eksperimentālā *EYDFA* WDM 48 kanālu shēma, kas tika pumpēta ar apvalku.

Attiecīgi tika iegūts fiktīvs (datu nemodulēts viļņu garums) WDM signāls, kas sastāv no 48 kanāliem, kuru joslas platums ir 37,5 GHz un kas atrodas 100 GHz attālumā cits no cita, kā redzams 1.5. attēlā. Kā pumpēšanas gaismas avots tika izmantota lieljaudas daudzmodu diode, kas stabilizēta 30 °C temperatūrā ar 6 nm joslas platumu, izmantojot termoelektrisko dzesētāju (1.6. att.). Šī pumpēšanas avota minimālās izejas jaudas sliekšnis ir 0,6 W, kā arī diodei ir svarīga aktīva temperatūras kontrole, jo augstākā temperatūrā izejas jauda samazinās un spektrs pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem.

Šī pumpēšanas avota minimālās izejas jaudas sliekšnis ir 0,6 W. Šai diodei ir svarīga aktīva temperatūras kontrole, jo augstākā temperatūrā izejas jauda samazinās un spektrs pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem. Tika konstatēts, ka, saglabājot zemāku diodes temperatūru, tiek panākts lielāks *EYDFA* pastiprinājums.

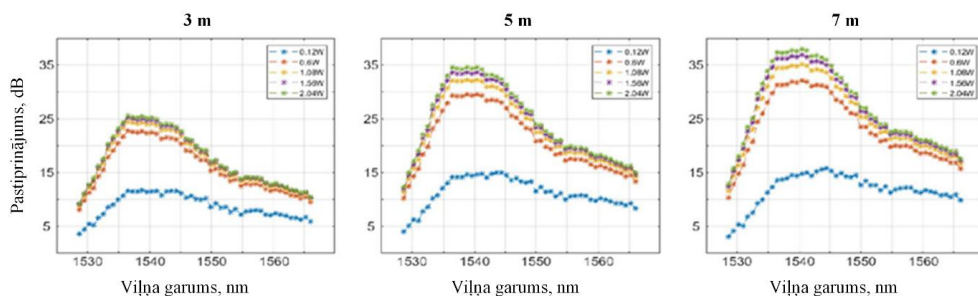
Tālāk esošais modelis tika izmantots, lai novērtētu optimālo *EYDF* garumu un pumpēšanas jaudu platjoslas signāla pastiprināšanai, kas tika izmantots iegūto rezultātu analīzei. Simulācijās izmantotie *EYDF* galvenie parametri apkopoti 2. tabulā.

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.

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 dB līdz –10 dBm
EYDFA pumpēšanas parametri	
Pumpēšanas viļņa 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	$1 \times 10^{-25} \text{ m}^{-3}/\text{s}$
Yb ³⁺ koncentrācija	$1 \times 10^{-26} \text{ m}^{-3}/\text{s}$
Er ³⁺ /Yb ³⁺ šķērsrelaksācijas koeficients	$1 \times 10^{-22} \text{ m}^{-3}/\text{s}$
Pārklāšanās koeficients (1530 nm)	0,0027
Pārklāšanās koeficients (980 nm)	0,9203

Ja pumpēšanas jauda ir 2 W, EYDF garums tika palielināts no 3 m līdz 5 m, viļņa garuma diapazonā no 1555 nm līdz 1565 nm tika iegūts papildu 5 dB, attiecīgi palielinot EYDF garumu līdz 7 m, iegūts papildu 2,8 dB. 1.7. attēlā redzams, ka, palielinot EYDF garumu, palielinās izejas pastiprinājums 1535–1545 nm apgabalā, bet pastiprinājuma maksimums pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem.



1.7. att. Simulācijas rezultāti ar *EYDFA* pastiprinājumu -20 dBm/uz kanālu 48 kanālu signālam atkarībā no pumpēšanas jaudas (0,12–2 W), ja *EYDF* garums ir: a) 3 m; b) 5 m; c) 7 m.

1.7. attēlā redzams, ka, palielinot *EYDF* garumu, palielinās izejas pastiprinājums 1535–1545 nm apgabalā, bet pastiprinājuma maksimums pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem. Attiecīgas pastiprinājuma vērtības ir apkopotas 3. tabulā. Simulācijas rezultāti liecina, ka 3 m garas *EYDF* gadījumā pastiprinātājs rada gandrīz identiskus pastiprinājuma spektrus, ja pumpēšanas jauda ir 1 W un 2 W. Attiecīgas pastiprinājuma vērtības apkopotas 3. tabulā. Tas nozīmē, ka salīdzinoši īsiem *EYDF* posmiem 1 W pumpēšanas jauda ir pietiekama, lai nodrošinātu ierosinātas Er^{3+} populācijas inversiju un saglabātu signāla pastiprinājumu. Līdz ar to pumpēšanas jaudu virs 1 W var uzskatīt par pārmērīgu šādām īsām legētajām šķiedrām.

3. tabula

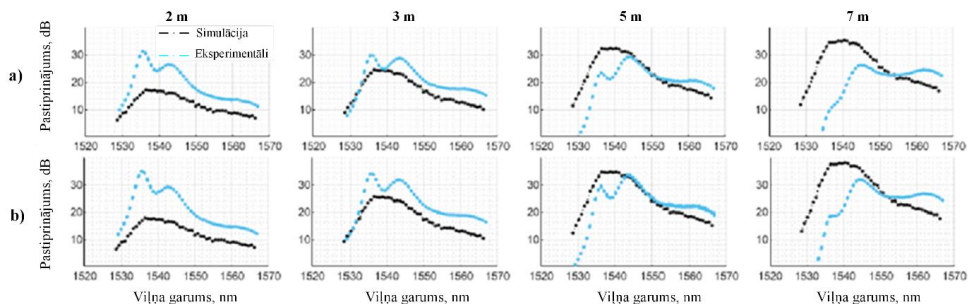
Simulācijas *EYDFA* pastiprinājuma attīstība

<i>EYDF</i> 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

Ja *EYD* garums ir 3 m, palielinot pumpēšanas jaudu no 1 W līdz 2 W, tiek iegūts tikai 0,8 dB papildu pastiprinājums, 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).

Šie rezultāti, kas tika iegūti ar simulācijas palīdzību, tiek izmantoti kā atskaites punkts, lai izvēlētos *EYDF* garumu un pumpēšanas jaudu simulācijas konfigurācijai. Pirmā testēšana

ŠOPS laboratorijā tika veikta, izmantojot *EYDFA*, kur šķiedras garums ir 7 m, kas tika pumpēta ar 3 W pumpēšanas jaudu. Iegūtie simulācijas rezultāti liecina par šaurāku un līdzenāku *EYDFA* pastiprinājuma profilu, salīdzinot ar simulācijas rezultātiem; tas ir nobīdīts uz garākiem viļņu garumiem, un tam ir straujš kritums zem 1544 nm. Tādējādi 7 m gara *EYDF* šķiedra ir pārāk gara izvēlētajam lietojumam; tāpēc mērījumi tika atkārtoti, izmantojot īsākus *EYDF* diapazonus (5 m, 3 m un 2 m), lai noteiktu piemērotāku garumu eksperimentālai konfigurācijai. Eksperimentālo un simulācijas rezultātu salīdzinājums redzams 1.8. attēlā.



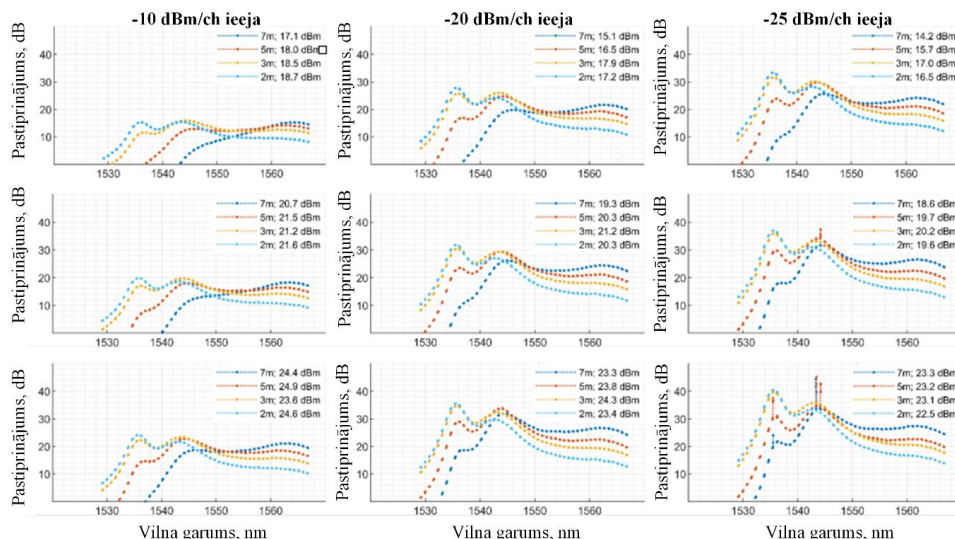
1.8. att. Eksperimentālie *EYDFA* pastiprinājuma mērījumi, kas tiek pārklāti ar simulācijas rezultātiem pie -20 dBm/uz kanāla signāla un pumpēšanas jaudas: a) 1 W; b) 2 W.

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 (1.8. att.). Tas rada papildu signāla pastiprinājumu, ja viļņa garums ir 1560 nm.

Simulācijas modelī signāla reabsorbija netika ņemta vērā. Simulācijas un eksperimentālo datu nesakritība (īpaši attiecībā uz 2 m) varētu būt saistīta ar *EYDF* iekšējā apvalka īpašo formu (un tā pumpējošas 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 tika analizēts, izmantojot 48 kanālu fiktīvo *WDM* signālu, kas tika konstruēts, izmantojot platjoslas ASE trokšņa avotu un *WSS*. Pēc filtrēšanas signāla jaudas līmeņi tika regulēti 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; -10 dBm uz kanālu (1.9. att.).



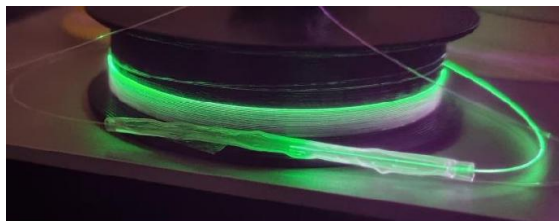
1.9. att. Eksperimentāli noteiktais *EYDFA* pastiprinājums trīs dažādu ieejas signāla jaudu gadījumā atkarībā no *EYDF* garuma un pumpēšanas jaudas: a) 0,6 W; b) 1 W; c) 2 W. Līkne katrā grafikā norāda šķiedras garumu un kopējo izejas jaudu.

Iegūtie pastiprinājuma spektri rāda, kā ar signāla ieejas jaudu -25 dBm uz kanālu tika novērots nevēlams lāzerstarojuma maksimums, ja pumpēšanas jauda ir virs 1 W. Pie pašā augstākā signāla ieejas jaudas līmeņa (-10 dBm uz kanālu) pastiprinātāja izmantojamās joslas platums, palielinoties *EYDF* garumam, pārvietojas uz garākiem viļņu garumiem. Ja signāla ieejas jaudas līmenis ir zemāks (-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 tiek palielināts no 5 m līdz 7 m, kanāli ar viļņu garumu 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+} augšup vērstās luminiscences, kas liecina par augstu populācijas inversiju. Šis efekts samazinās, kad ieejas signāls tiek apvienots ar *EYDFA* pastiprināšanas signālu, jo daļa no ierosināta Er^{3+} atgriežas pamatstāvoklī, pastiprinot C joslas signālu.

Konkrētāk, Er^{3+} populācijas inversija [38], kas nepieciešama pastiprināšanai, ja ir šāds viļņu garums, nav saglabājusies tik garā *EYDF* diapazonā, un tā rezultātā pastiprinājuma spektri nav vienmērīgi. Turklāt tika novērots, ka *EYDF* pirmais metrs spīd zaļā krāsā, kad pumpēšanas avots ir aktīvs (1.10. att.).



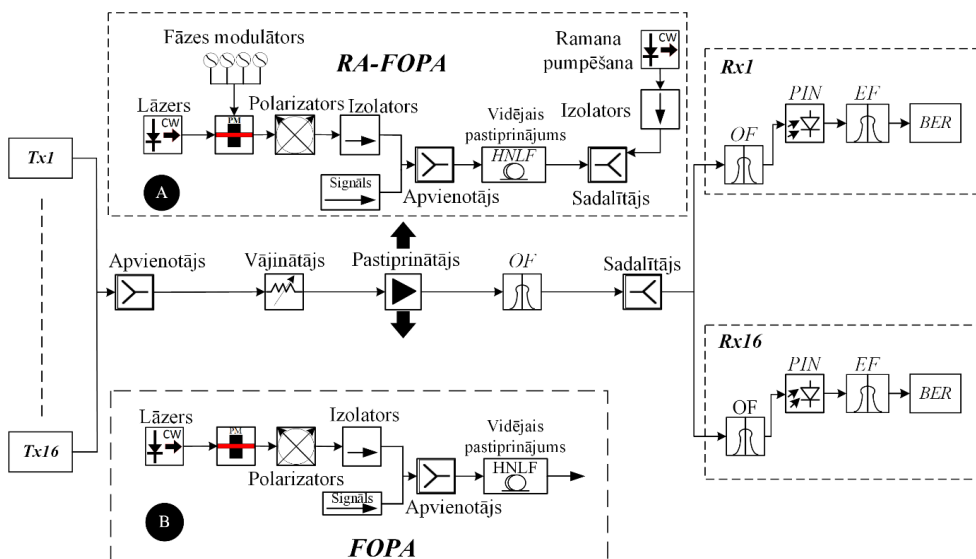
1.10. att. *EYDF* zaļā luminiscence ar ieslēgto pumpēšanas gaismas avotu. Violetā nokrāsa ir redzama tādēļ, ka no šķiedras noplūst pumpēšanas gaisma, ko uztver kamera. Lai izvairītos no iespējamās termiskās izplešanās ietekmes, no saplūšanas savienojuma aizsardzības uzdeva ir ņemts tērauda stienis.

2. OPTISKO ŠĶIEDRU PARAMETRISKO PASTIPRINĀTĀJU (*FOPA*) UN RAMANA ASISTĒTĀ *FOPA* PASTIPRINĀTĀJU VEIKTSPĒJAS NOVĒRTĒJUMS

Šajā nodaļā 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 multipleksēšanas (*DWDM*) pārraides sistēmā (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 Ramana asistēta *FOPA* simulācijas modeļa apraksts 16 kanālu *DWDM* pārraides sistēmā

RA-FOPA un viena pumpējoša avota *FOPA* risinājumi tika izmantoti kā priekšpastiprinātāji un tika novietoti tieši pie optiskā vājinātāja izejas. Pētāmais simulācijas modelis redzams 2.1. attēlā.



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

Pēc iziešanas caur priekšpastiprinātāju pastiprinātais signāls tiek nosūtīts caur 3 dB joslas caurlaides optisko filtru (OF), kura joslas platums ir 15 nm, un, izmantojot optisko sadalītāju ar 13,5 dB ienestiem zudumiem, pārraidāmais optiskais signāls tika sadalīts 16 *PIN* fotodiodēs 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 (2.1. a) att. punktā) 500 mW 192,92 THz pumpēšanas izejas starojums tika nosūtīts caur fāzes modulatoru, ko izmanto stimulētas Briljuēna izkliedes (*SBS*) mazināšanai, optisko polarizatoru, lai pārlicinātos, 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.

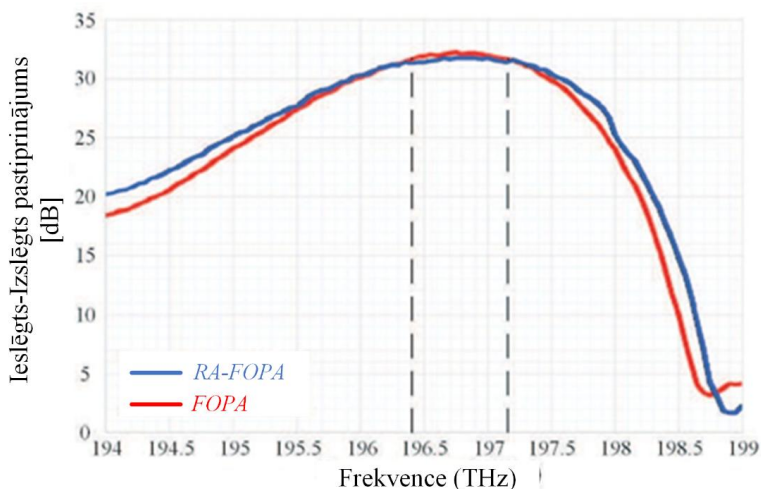
Otrā *HNLF* galā tika pieslēgts Ramana optiskais pastiprinātājs ar 500 mW pumpēšanas jaudu, kur optiskais signāls tika pārraidīts pretēji vērsti pumpēšanas virzienā pret parametrisko (*RA-FOPA*) pumpēšanas signālu. Šāds Ramana pumpēšanas signāla izplatīšanās virziens *HNLF* tika izvēlēts, lai izvairītos no četru viļņu mijiedarbes (*FWM*) rašanos starp Ramana un parametriskā pastiprinātāja pumpēšanu. Viena pumpēšanas *FOPA* risinājuma struktūra ir līdzīga, bet šajā gadījumā nav Ramana pumpēšanas, tāpēc 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 parametriskajam pastiprinātajam *FOPA*

Šajā apakšnodaļā aprakstīts izpētītais 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 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, ir 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, redzams 2.2. attēlā.



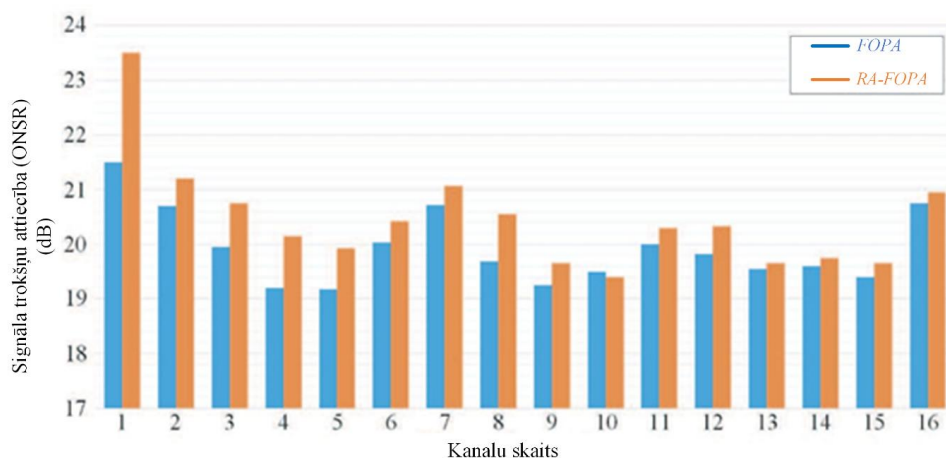
2.2. att. Viena pumpēšanas avota *FOPA* radītā ieslēgšanas un izslēgšanas pastiprinājuma spektrs (līnija sarkanā krāsā) un *RA-FOPA* radītā pastiprinājuma spektrs (līnija zilā krāsā).

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 turpmākie šajā nodaļā sniegtie rezultāti, *RA-FOPA* ir vairākas priekšrocības, salīdzinot ar standarta viena pumpēšanas *FOPA*.

Iegūtie rezultāti (2.2. att.) 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 un trokšņa attiecības (*OSNR*) novērtējums *RA-FOPA* un viena pumpēšanas avota parametriskajam *FOPA* pastiprinātājam 16 kanālu *DWDM* sistēmā

Lai novērtētu abu pastiprinātāju radītā trokšņa daudzumu, tika iegūta optiskā signāla trokšņa attiecība (*OSNR*) uztvērēja ieejā un salīdzināta katram no 16 kanāliem. No iegūtajiem rezultātiem (2.3. att.) ir skaidri redzams, ka sistēmā ar *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 $19,4$ dB 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*.

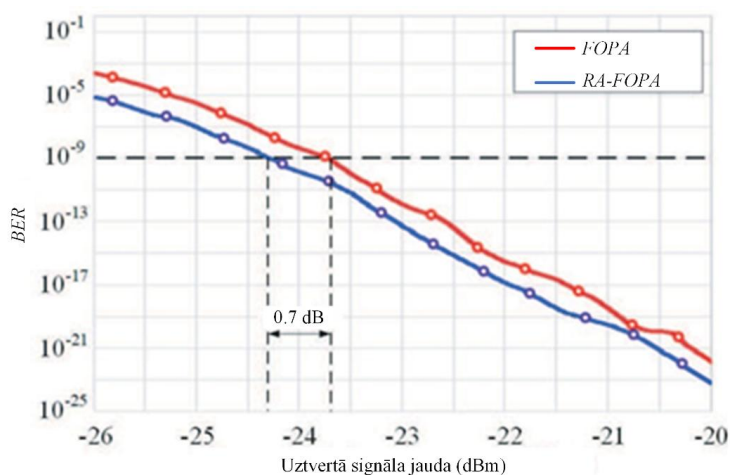


2.3. att. Katrā kanālā uztvertā signāla *OSNR* vērtības, kas iegūtas sistēmā ar vienu pumpēšanas *FOPA* (zilā krāsā) un sistēmā ar *RA-FOPA* (oranžā krāsā).

Vēl viena 2.3. attēlā redzamā tendence, ko vērts pieminēt, ir tāda, 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 parametriskajam *FOPA* pastiprinātājam 16 kanālu *DWDM* sistēmā

Lai novērtētu pastiprinātā signāla kvalitāti, tika iegūta *BER* vērtība atkarībā no uztvertā 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 redzamas 2.4. attēlā, kur redzams, ka sistēmā ar *RA-FOPA* risinājumu tika novērots par 0,7 dB vājāks signāls, ja *BER* robežvērtības ir zem 10^{-9} , nekā sistēmā ar standarta vienu pumpēšanu avotu *FOPA*.



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

KOPSAVILKUMS PAR 1. TĒZI

- Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka pastiprinātāja konfigurācijai ar 3 W pumpēšanas gaismas avotu, ja viļņu garums ir 975 nm, *WDM* lietojumiem ir nepieciešama 7 m garš *EYDF* (ar iegūtajiem fizikālajiem parametriem) un tieši vērtais 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, ja *BER* līmenis ir 10^{-9} .

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

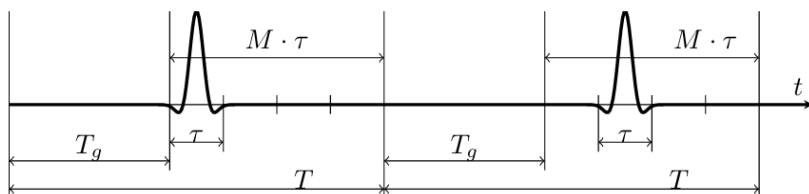
Impulsu pozīcijas modulācijas (PPM) paņēmieni ļauj ievērojami palielināt energoefektivitāti, salīdzinot ar esošajām tehnoloģijām [39, 40]. PPM simbols (4.1. att.), kurā impulsam ir četras pozīcijas un visus simbolus atdala aizsarglaiks T_g , ir paredzēts informācijas apstrādei. Šajā attēlā ir arī parādīts, ka īpašajam lietderīgās slodzes intervālam ir kopējais laiks $M \times \tau = T - T_g$, kur M – pozīciju skaits, τ – vienas pozīcijas ilgums, T – simbola ilgums. Bitu skaitu, ko pārraida vienā simbolā B, var aprēķināt šādi:

$$B = \log_2 M. \quad 3.1.$$

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

$$R = \frac{B}{T}. \quad 3.2.$$

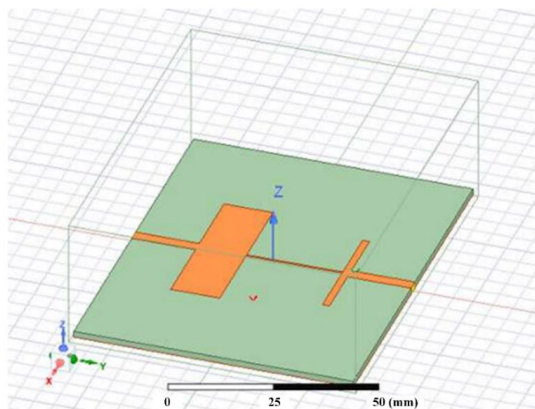
PPM kā datu modulācijas metode nosaka šķietami vienkāršas prasības. Ir jānodrošina ļoti īsa impulsu ģenerēšana ar iespēju mainīt intervālu starp impulsiem. Noteikšanai ir daudz dažādu metožu. Viens no daudzsološākajiem ātrgaitas PPM paņēmieniem ir tieša laika mērīšana ar notikumu taimera palīdzību. Notikumu taimera precizitāte ir viens no šīs modulācijas metodes ierobežojošajiem faktoriem [41]. Lai ietaupītu enerģiju, impulsiem jābūt pēc iespējas īsākiem, savukārt, lai veiktu detektēšanu, impulsu ilgumam jābūt pietiekami garam, lai to varētu fiksēt taimeri. Ļoti precīzs notikumu taimeris *Eventech A033-ET* [42, 43] 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.



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

3.1. Pašizgatavotā 450 MHz zemfrekvenču filtra dizaina modeļa apraksts

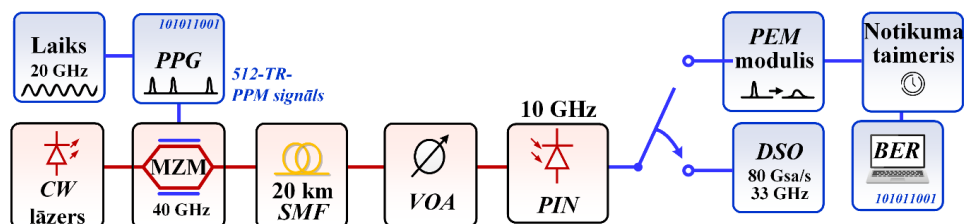
LPF modeļa konstrukcija, kas vēlāk tika izgatavota un izmantota šajā eksperimentā, parādīta 3.2. attēlā. Diemžēl gan *Ansys HFSS* modelēšanas, gan eksperimenta laikā izrādījās, ka šādam pašizgatavotam *LPF* filteram ir nepietiekams vājinājums frekvenču joslā virs 4 GHz, kas izraisa ievērojamus izvērsto pārraidītā atskaites impulsa pozīcijas modulācija (*512-TR-PPM*) impulsu formas kropļojumus. Jāņem vērā, ka šādu *PPM* signālu aizņemtās RF pamatjoslas joslas platums ir aptuveni 20 GHz.



3.2. att. Pašizgatavotā 450 MHz *LPF* dizaina modelis.

3.2 Impulsu paplašināšanas novērtējums, izmantojot dažādus pašizgatavotos *LPF* filtrus

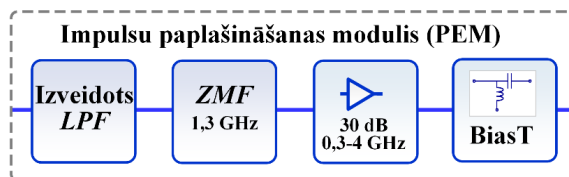
Eksperimentāli izveidota shēma ar impulsu paplašināšanas moduli (*PPM*) un notikumu taimeris parādīta 3.3. attēlā. Vispirms tika ģenerēta 9000 bitu gara pseidogadījuma secība (*PRBS*), kas *MATLAB* programmēšanas vidē tika pārveidota par *512 TR-PPM* paraugu vektoru. Pēc apstrādes vērtība “1” atbilst augstam signālam, kas apzīmē impulsu, un “0” – atstarpei starp impulsiem, veidojot izejas *512-TR-PPM* kodētu elektrisko signālu.



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

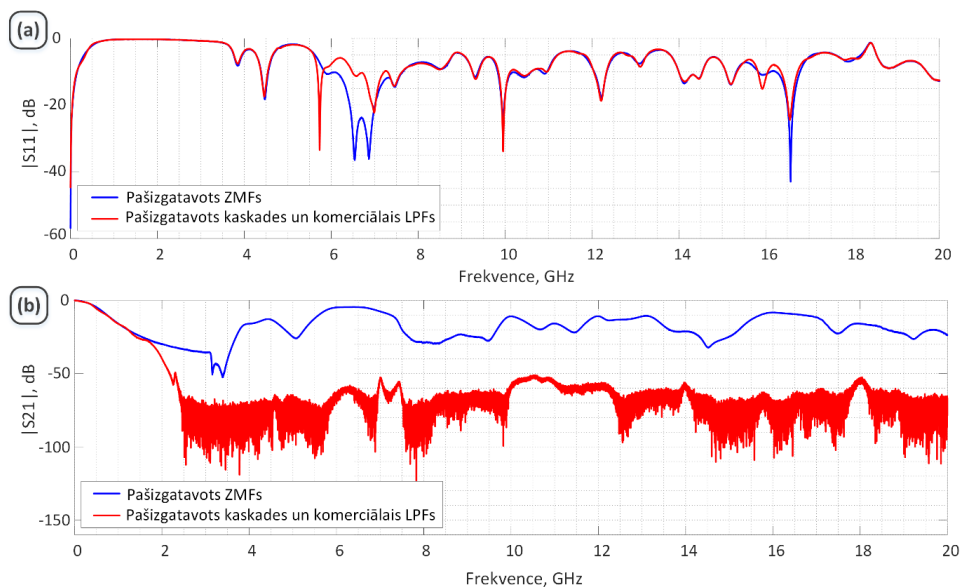
Vektoru, kas apraksta *512-TR-PPM* viļņu formu, saglabā īpašā impulsu parauga ģeneratora (*PPG*) faila formātā un ielādē tā atmiņā, lai pēc pieprasījuma to varētu elektriski ģenerēt. Šo pašu *PRBS* secību vēlāk izmanto *BER* novērtēšanai uztvērējā. Elektriskais *512-TR-PPM* signāls tika ģenerēts *PPG* ģeneratora (*PPG*, 33 GHz, *Anritsu MUI83020A*) vienkānāla 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 precizitātes 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 tiek pieslēgta regulējama *CW* lāzera, kas darbojas 1552,52 nm (193,1 GHz, atbilstoši *ITU-T DWDM grid* specifikācijai), izejas jauda.

Optiskā izejas jauda iestatīta 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 lineāro maināmu optisko vājinātāju (*VOA*, *Keysight FVA-3150*) ar 2 dB ienestiem zudumiem, viļņu garums 1550 nm. Optiskais signāls no *VOA* izejas tika nogādāts uz 10 GHz *PIN* fotodiodi (*PIN*, 8 GHz, *Amonics PRI0G*), 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 tas redzams 3.3. 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, kas jau tika atklāta [68], ietver 3.4. attēlā redzamo shēmu.



3.4. 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 pārnese funkciju un 450 MHz griezumta frekvenci. Šāds zemfrekvences filtrs nodrošina arī to, ka impulsa augšupejošā mala ir pēc iespējas stāvāka.



3.5. att. Izmērītie S parametri: a) S_{11} līkne (zilā krāsā) pašizgatavoto *LPF* un (sarkanā krāsā) pašizgatavoto *LPF* un komerciālo *LPF* kaskādes savienojums; b) S_{21} līkne (zilā krāsā) pašizgatavoto *LPF* un (sarkanā krāsā) pašizgatavoto *LPF* un komerciālo *LPF* kaskādes savienojumu.

Pašizgatavotā *LPF* izmērītie S parametri redzami 3.5. attēlā, kur zilās līknes S parametri tika iegūti, izmantojot vektoru tīkla analizatoru (*Rohde & Schwarz*, 20 GHz, *R&S ZNB20*). Lai novērstu nepietiekamu vājinājumu, komerciālais *LPF* (*DC-1300 MHz* caurlaides josla, *Mini-Circuits VLFX 1300+*) tika savienots ar pašizgatavoto kaskādes *LPF* filtru. Izmērītie S parametri redzami 3.5. attēlā (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 (*BiasT*, 20 kHz 45 GHz, *SHF BT45*), tika pievadīts papildu slīpuma spriegums, lai optimizētu paplašināto *512-TR-PPM* viļņu formu uztveršanu ar notikumu taimeru (*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 [44]. Signāliem ar lielu pozīciju skaitu M ir nepieciešamas sarežģītākas metodes. Šajā pētījumā tika izmantots *512 TR-PPM* signāla demodulators, kas balstīts notikumu taimerē (*Eventech, A033-ET*), un programmatūras ietvars, kas tika aprakstīts [45]. *A033-ET* ir datorizēta ierīce, kas reģistrē laika tagus (neapstrādātus datus) kā absolūtos laikus ar augstu precizitāti (aptuveni 3 sekundes vidējā ģeometriskā vērtība), un ar to palīdzību 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 (3.5. att.). *A033-ET* ir 50 ns ilgums, kas nepieciešams, lai taimeris apstrādātu un uzkrātu datus.

KOPSAVILKUMS PAR 2. 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.

4. LĒCU ŠĶIEDRU IZMANTOŠANAS APRAKSTS INTEGRĒTAJĀM FOTONIKAS IERĪCĒM

Šajā nodaļa demonstrēta sfērisku lecu šķiedru (*SLF*) ražošana, izmantojot komerciāli pieejamu lokizlādes metināšanas iekārtu (*Fujikura-100P+*), kas ir plaši izmantota iekārta optisko šķiedru sakaru un fotonikas jomā. Galvenais pētījuma mērķis ir noteikt, cik viegli ar šo izgatavošanas metodi var manipulēt ar svarīgiem lecu šķiedru parametriem, piemēram, darba attālumu un diametra izmēru [46–51]. Šis novērtējums ietver ražošanas vienkāršību, izgatavoto paraugu konsekvenci un nepieciešamo iterāciju skaitu, lai precizētu konkrētajam lietojumam nepieciešamos lēcas parametrus. Izgatavotie paraugi tiek salīdzināti ar komerciālās klases lecu šķiedras izstrādājumiem, kas tiek izmantoti kā salīdzinošā bāze.

4.1. Lēcu šķiedru konstrukcijas un izgatavošanas procesa apraksts

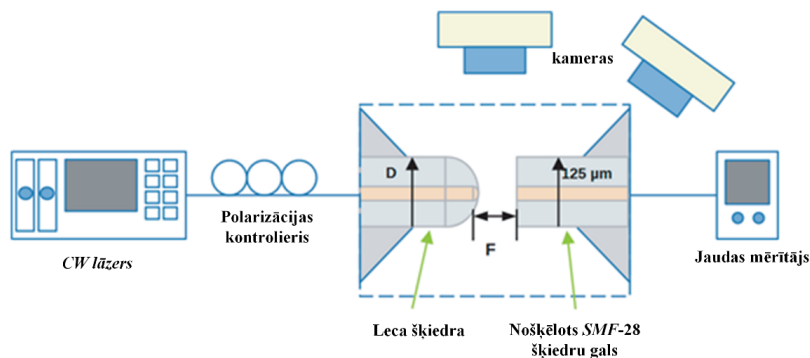
Izplatītākā un efektīvākā optisko lecu ražošanas metode ir saistīta ar telekomunikācijas sfērā izmantotajām lokizlādes metināšanas iekārtām. Šajā gadījumā divu elektrodu radītais elektriskais loks sakausē šķiedras, tādējādi savienojot, sašaurinot un veidojot mikrolēcas. Tomēr galvenie šīs metodes trūkumi ir nevienmērīga šķiedras sildīšana un ilgs metināšanas laiks (līdz pat vairākām minūtēm) atkarībā no lēcas diametra. Tas palielina ģeometrijas izkropļojuma risku galvenokārt smaguma ietekmes dēļ, bet arī ārējo faktoru dēļ, piemēram, vibrācijas, kas rodas ražošanas procesa laikā. Vēl viens ierobežojuma faktors ir tāds, ka elektriskā loka metināšanas iekārta parasti satur divus elektrodus, kas izraisa nevienmērīgu optiskās šķiedras 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 [52, 53].

Pirmais solis lecu šķiedras ražošanas procesā ir testēšanas iekārtas kopējo zudumu mērīšana. Katram izmantotajam šķiedras gabalam un savienotajam ir raksturīgs zuduma rādītājs. Tāpēc sākumā, lai noteiktu pamata references vērtību, tika izmantots negriezts šķiedras savienojuma kabelis. Savienojuma šķiedras vads tika sagriezts uz pusēm, ņemot vērā sistēmas jaudas zudumus. Tas ļauj iegūt brīvās telpas zuduma skaitli, kur *SMF (ITU-T G.652)* šķiedras divi gali ir cieši savienoti attiecībā pret to serdeni profiliem. Ideālā gadījumā tas pievieno tikai papildu no 0,5 līdz 1 dB zudumu references skaitli, un pārraides jaudas ziņā tam jābūt vienādam vai lielākam nekā labākajiem lecu šķiedru paraugiem. Lai izlīdzinātu abus šķiedras galus un izveidotu lecu šķiedru standarta šķiedras savienojumam, tika 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 pjezomotorus precīzai regulēšanai un labākās savienojuma pozīcijas atrašanai. Divi mikroskopi ir novietoti tieši virs savienojuma vietas un tās sānos, lai nodrošinātu optimālu redzamību un uzraudzību. Pārraides šķiedras gals (tiešais lāzera izvades elements) tika ievietots metināšanas iekārtas vienā galā. Eksperimentu laikā tika izmantots metināšanas iekārtas *Fujikura* modelis *FSM-100P+*.

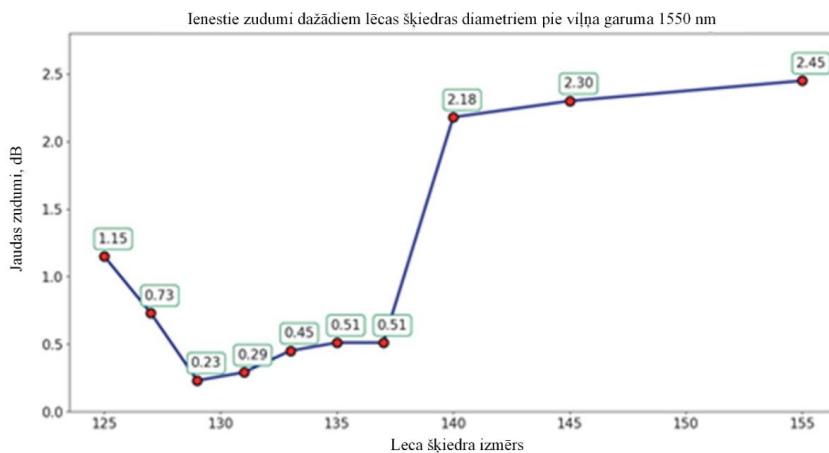
4.2. Savienojuma vietā ienesto zudumu novērtējums, ja viļņa garums ir 1550 nm

Atšķirībā no iepriekšējā aprakstīta pētījumā [54] tika nolemts atteikties no papildu bezserdeņa šķiedru savienošanas. Tas tika pamatots ar to, ka maziem lēcu šķiedras diametriem tas joprojām nebūs skarts, tādējādi neradot papildu izkliedi, kā arī izslēgtu divu veidu šķiedru savienošanas punktu. Eksperimentālā izmantota shēma redzama 4.1. attēlā.



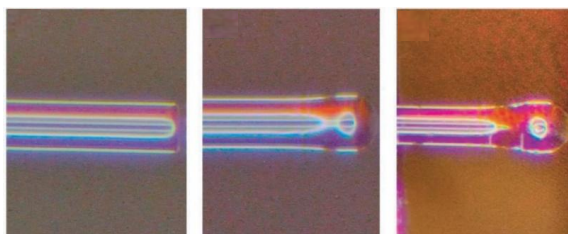
4.1. att. Eksperimentālā shēma pārraides testēšanai starp nošķelto *SMF* šķiedru un sagatavoto lēcu šķiedru. Šeit *CW* apzīmē nepārtrauktā viļņa garuma lāzera avotu.

Ņemot vērā rezultātus (4.2. att.), var secināt, ka savienojuma zudumi nav lineāri saistīti ar lēcu šķiedras diametru. Tendence sākas ar negatīvu slīpumu, un labākie rezultāti faktiski tika novēroti, ja lēcas izmērs ir aptuveni 129 μm . 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 šo formu. Varētu būt arī tā, ka loka izlādes jauda nav pietiekama un to nevar palielināt, jo tā vienkārši veido lielāku lēcu. Palielinoties izmēram, lēcu šķiedras veidošanas problēmas cēlonis varētu būt saistīts ar šķiedras serdeņa nevienmērīgu sildīšanu un tam sekojošo deformāciju.



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

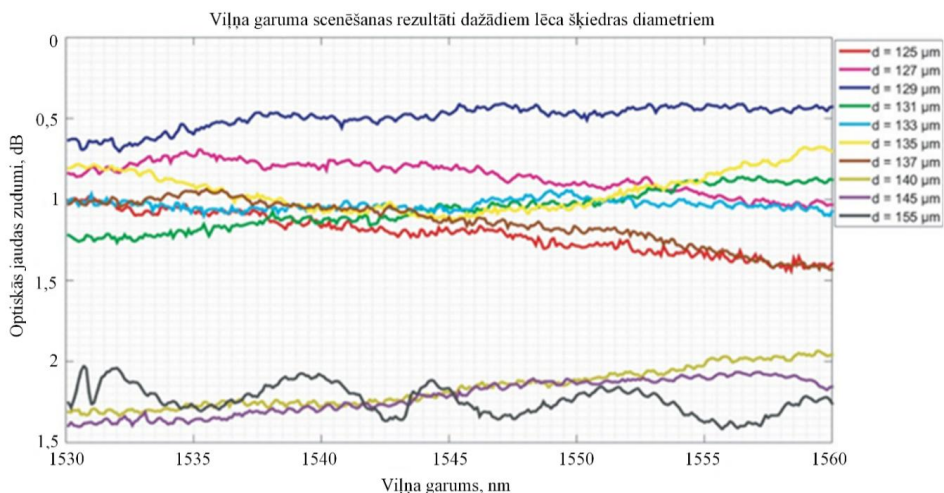
Laboratorijā izgatavotas lēcu šķiedras princips balstās tajā, ka gaisma daļēji izkliedējas no serdeņa gala un pēc tam tā tika fokusēta metināšanas iekārtā lēcas formas dēļ. Tomēr lēcas izmērs pārāk izmainās, un attiecīgi rezultāti kļūst ievērojami sliktāki. Šis sliekšnis iestājas, ja lēcas izmērs ir aptuveni 140 μm, 4.3. attēlā (mikroskopa attēls) redzamas izkropļotās serdes attīstības fāzes. Jāatzīmē, ka testēšanas posmā lēcas, kuru diametrs ir 125–137 μm, tika testētas plašāk nekā lēcas, kuru diametrs ir 140–155 μm, jo mazāks diametrs deva labākus rezultātus [55]. Tāpēc pakāpeniskajam pieaugumam diagrammas beigās varētu būt nejaus raksturs, kā arī iepriekš minēto iemeslu dēļ tam vajadzētu būt stabilākam.



4.3. att. Pakāpeniska lēcu šķiedras diametra palielināšanās un tam sekojoša serdes deformācija: (a) nošķelts šķiedras gals, diametrs – 125 μm (savienots ar mazu jaudu, kas neveido lēcas formu tikai šķiedras serdes daļā); (b) izgatavota lēcu šķiedra, diametrs – 131 μm; (c) izgatavota lēcu šķiedra, diametrs – 155 μm.

Eksperimenta noslēdzošajā daļā tika izpētīti un novērtēti zudumu izmaiņas rādītāji lēcu 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 optiskajām 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 lēcu šķiedras reakcija. 4.4. attēlā redzams, 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 nelielu šķiedras stāvokļa izmaiņu dēļ, kā arī telpas un šķiedras temperatūras svārstību rezultātā.



4.4. att. Dažādu lēcu izmēru reakcija uz lāzera frekvences izmaiņām (lāzera slaucīšana optiskajā C joslā)

Teorētiski pat liela izmēra lēcu 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 3. TĒZI

Veicot eksperimentālos eksperimentus, tika konstatēts, ka demonstrētās pašu izgatavotās lēcu šķiedras var samazināt zudumus, 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, neskaitot 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.

SECINĀJUMI

1. *EYDFA* ar apvalka pumpēšanu darbību apraksta, izmantojot izstrādāto simulācijas sistēmu, kas balstīta mērījumu datos. Analizējot pastiprinātāja pastiprinājumu, trokšņa koeficientu un jaudas zudumu, tika novērota tā piemērotība darbībai metro piekļuves optiskajos transporta tīklos, kur parasti tiek izmantotas *DWDM* sakaru sistēmu tehnoloģijas. Pirmkārt, eksperimentāli tika raksturota dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētā šķiedra, kas tika izmantota kā pastiprinājuma vide izmantotajam pastiprinātāja prototipam, lai izstrādātu un analizētu eksperimentālo *EYDF* prototipu. Tālāk tika testētas dažādas *EYDFA* konfigurācijas dažādos darbības apstākļos (ieskaitot dažāda garuma leģētās šķiedras, pumpēšanas signāla izplatīšanās virzienus, signāla ieejas jaudu utt.), lai noteiktu 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, ja viļņa garums ir 975 nm, *WDM* lietojumiem ir nepieciešams 7 m gara *EYDF* (ar iegūtajiem fizikālajiem parametriem) un tieši vērsta pumpēšanas virziens. 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, ja BER līmenis ir 10^{-9} .

2. Tika izstrādāts apvalka pumpēšanas *EYDFA* pastiprinātāja prototips, izmantojot skaitliskās simulācijas un eksperimentāli izveidoto modeli. Tika noteikta *EYDFA* konfigurācija (kopīgi leģētās šķiedras garums, pumpēšanas jauda, ieejas signāla jauda), kas piemērota signāla pastiprināšanai daudzkanālu optiskās šķiedras pārraides sistēmā ar blīvu viļņu garuma sadalījumu C joslā. *EYDFA* izmantoja komerciālu dubultapvalka *EYDF* šķiedru kā aktīvo pastiprināšanas vidi. Tāpēc vispirms eksperimentāli tika noteikti *EYDF* raksturlielumi (konkrēti, Er^{3+} un Yb^{3+} absorbcijas un emisijas šķērsriezumi un pārklāšanās koeficienti). Pēc tam 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 izstrādātais 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 izmantoja daudzmodu gaismas

diodi ar 2 W izejas jaudu, nodrošina praktisku pastiprinājumu līmeni viļņu garuma diapazonā 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. 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*. Rezultātu var izskaidrot šādi: *FWM* process, ko *FOPA* izmanto signāla pastiprināšanai, ir ļoti atkarīgs no mijiedarbojošo spektrālo komponentu (pumpējošo un signāla) fāžu nesakritības. No vienas puses, tālāk signāla un parametriskā 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 mijiedarbojošo spektrālo komponentu jaudu. Tas attiecas ne tikai uz pumpējošo signāla mijiedarbību (pastiprināšana), bet arī uz kanāla pret kanāla mijiedarbību (*CC-FWM*). Tāpēc, ja parametriskā 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. *CC-FWM* radīto starpkanālu pārklāšanās radīja 0,7 dB jaudas samazinājumu sistēmā ar standarta viena pumpēšanas avota *FOPA*, salīdzinot ar sistēmu ar *RA-FOPA* risinājumu, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

4. 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, bija iespējams paplašināt saņemtos *512-TR-PPM* impulsus līdz 978 ps, nodrošinot stabili notikuma taimera darbību.

5. Lēcu šķiedru paraugi tika izgatavoti no bezserdeņa šķiedras, izmantojot komerciālo lokizlādes metināšanas iekārtu. Gaismas stars vairāk diverģē, savienojot garāku bezserdeņa šķiedras gabalu ar *SMF*. Iegūtie rezultāti pierāda, ka, kombinējot šķiedru ar izgatavoto lēcu fokusa īpašībām, tas nodrošina stingrāku fokusu, un tā rezultātā samazinās savienojuma zudumi. Lēcu šķiedras ar lieliem savienojuma vietā esošajiem zudumiem var

izmantot dažādās lietojumprogrammās, kurās nepieciešams precīzs gaismas fokuss un kontrole. Neskatoties uz lielākiem savienojuma zudumiem, šie lietojumi ietver biomedicīnisko attēlveidošanu vai *FBG* sensorus, kur lēcu šķiedru lieli savienojuma zudumi var palīdzēt samazināt nevēlamus atspoguļojumus un uzlabot signāla un trokšņa attiecību. Kopumā lēcu šķiedras ar lieliem savienojuma vietā ienestajiem zudumiem var būt noderīgas mikroshēmu lietojumos, kas prasa precīzu gaismas savienojuma kontroli, augstu signāla un 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. [doi: 10.3390/fib9030015](https://doi.org/10.3390/fib9030015).
2. “Cisco visual networking index — Forecast and methodology 2017–2022, cisco systems”, White Paper, 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 Computing 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. [doi: 10.3390/photonics10070796](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; 86000G (2013) [doi: 10.1117/12.2002821](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. [doi: 10.1016/j.jnlest.2022.100157](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. 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, doi: [10.1016/j.yofte.2014.11.003](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.11.003).
37. 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, doi: [10.3390/app11041702](https://doi.org/10.3390/app11041702).
38. 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).
39. 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).

40. 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: 10.1088/1742-6596/2384/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2384/1/012026).
41. 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. [doi: 10.3390/app15084222](https://doi.org/10.3390/app15084222).
42. Eventech Ltd, Event Timer A033 ET / usb. [Online]. Available: <http://eventechsite.com/en/products/event-timer-a033-et/>.
43. 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).
44. 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).
45. 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).
46. 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. [doi: 10.1016/j.rio.2021.100203](https://doi.org/10.1016/j.rio.2021.100203).
47. 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. [doi: 10.1364/OE.20.028379](https://doi.org/10.1364/OE.20.028379).
48. 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. [doi: 10.1109/ICTON.2013.6602908](https://doi.org/10.1109/ICTON.2013.6602908).

49. 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. [doi: 10.1364/OL.41.002073](https://doi.org/10.1364/OL.41.002073).
50. Bouaziz, D., Chabrol, G., Guessoum, A., Demagh, N.E., and Lecler, S., *Photonics*, 2021, vol. 8, no. 9, p. 373. [doi: 10.3390/photonics8090373](https://doi.org/10.3390/photonics8090373).
51. Xiong, Y. and Xu, F. “Multifunctional integration on optical fiber tips”. *Adv. Photonics*, 2020, vol. 2, no. 6, p. 064001. [doi: 10.1117/1.AP.2.6.064001](https://doi.org/10.1117/1.AP.2.6.064001).
52. 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).
53. 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).
54. 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, [doi: 10.1109/PIERS59004.2023.10221315](https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023.10221315).
55. 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), [doi: 10.1117/12.766316](https://doi.org/10.1117/12.766316).



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.