

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte
Telekomunikāciju institūts

Ingrīda LAVRINOVIČA
Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorante

**JAUNĀS PAAUDZES AR RETZEMJU
ELEMENTIEM LEGĒTO OPTISKO ŠĶIEDRU
PASTIPRINĀTĀJU IZSTRĀDE UN
NOVĒRTĒJUMS**

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
Profesors *Dr. sc. ing.*
JURĢIS PORIŅŠ

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba vadītājam profesoram Jurgim Poriņam par motivāciju pētījuma sfēras izvēlē, vērtīgajiem praktiskajiem padomiem un ieteikumiem, kā arī pastāvīgo atbalstu visā promocijas darba izstrādes gaitā.

Liels paldies profesoram Sergejam Popovam par iespēju ERASMUS prakses ietvaros strādāt Zviedrijas Karaliskās Tehniskās universitātes Materiālzinību un nanofizikas katedras zinātniskajā laboratorijā.

Pateicos saviem kolēģiem: Andim Supem – par nozīmīgu palīdzību praktiskajos eksperimentos, Innai Kurbatskai – par lietderīgajām tematiskajām diskusijām, Viktoram Zagorskim un Janam Jeļinskim par atbalstu pedagoģiskajā darbā, kā arī ik vienam, ar kuriem esam kopā strādājuši, bet kuru vārds šeit nav pieminēts.

ACKNOWLEDGEMENT

Firstly, I would like to thank my supervisor Professor Jurgis Poriņš for the motivation with choosing the research field, practical advices, recommendations and permanent support during the development of present thesis.

Thanks to Professor Sergei Popov for providing me an ability to work at the laboratory of Materials and nanophysics of KTH Royal Institute of Technology during my ERASMUS traineeship.

I am very grateful to my colleagues: Andis Supe who helped with practical experiments, Inna Kurbatska for an active communication and valuable discussions, Viktors Zagorskis and Jans Jeļinskis for support with pedagogical work as well as everyone I had an honor to work with but whose name is not mentioned here.

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums:

“Jaunās paaudzes ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju izstrāde un novērtējums”;

Darba autors:

Ingrīda Lavrinoviča;

Darba saturs:

Telekomunikāciju nozares strauja attīstība un pārraidāmo datu apjoma pieaugums rada nepieciešamību palielināt viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas (*WDM*) kanālu skaitu, kā arī lietderīgāk izmantot šobrīd sakaru sistēmās pieejamo viļņa garumu diapazonu. Mūsdienā modernajās šķiedru optikas pārraides sistēmās pārsvarā tiek pielietoti ar erbiju leģētas optiskās šķiedras pastiprinātāji (*EDFA*), kuri darbojas *WDM* sistēmu C frekvenču joslā (1530 nm–1565 nm). Komerciālajās sakaru sistēmās tie lielākoties ir veidoti uz silīcija šķiedras bāzes, kur erbija (Er^{3+}) joniem pie 1550 nm raksturīgs ierobežots stimulētās emisijas joslas platums. Šādu pastiprinātāju trokšņa faktors un pastiprinājuma efektivitāte ļauj secināt, ka tipveida *EDFA* iespējas ir ierobežotas. Tas nozīmē, ka ir nepieciešami jauni risinājumi, kas nodrošinātu iespēju paplašināt optisko pastiprinātāju caurlaides joslu un iegūt lielākas izejas jaudas. Viens no šādiem risinājumiem ir vērsts uz materiālu ar plašāku pastiprinājuma spektru izpēti.

Promocijas darbā ar šķērsnobīdes metodi ir novērtēts erbija un iterbija leģētu optisko šķiedru efektīvais laukums, kā arī izpētīta dažāda garuma leģētu šķiedru izmantošanas iespēja optisko pastiprinātāju efektivitātes uzlabošanā. Pētījumu rezultātā ir sekmīgi realizēts kombinētais optiskais pastiprinātājs, kas dod iespēju paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no 47 nm līdz 82 nm. Promocijas darbā atspoguļoti pabeigtu pētījumu rezultāti, kas ļauj novērtēt ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru fizikālos parametrus un to pielietošanas iespējas optisko pastiprinātāju izveidē.

Darba apjoms:

103 lappuses, darbā ir 8 tabulas, 54 attēli, 110 literatūras avoti un 4 pielikumi.

ANNOTATION

Title of the thesis:

„Development and Assessment of New Generation Rare-earth doped Optical Fiber Amplifiers”;

Author of the thesis:

Ingrida Lavrinovica;

Content of the thesis:

The development of telecommunications applications as well as rapid increasing volume of transmitted data make it necessary to increase the number of channels in wavelength division multiplexing (*WDM*) transmission system and improve utilization of wavelength range currently applied in communication systems. Erbium-doped fiber amplifiers (*EDFA*) that are widely used in modern fiber-optic transmission systems operate in C spectral range of *WDM* system (1530 nm–1565 nm). However, in today’s commercial communications systems *EDFAs* are generally made of silica-based glass fiber, where at the region of 1550 nm erbium (Er^{3+}) ions show a limited stimulated emission bandwidth. Noise and gain characteristics of those amplifiers lead to the conclusion that conventional *EDFA* has almost reached its limits. This means that new solutions needed aimed at expansion of the optical amplifiers bandwidth and obtaining higher output power. One of the solutions is an investigation of a material with wider gain spectra.

Doctoral thesis covers an evaluation of the effective area parameter of erbium and ytterbium doped optical fibers with transverse shift measurement method as well as the possibility of improving optical amplifier’s efficiency by optimizing the length of doped fibers. As a result of the research, a combined optical amplifier has been successfully realized, which makes it possible to extend erbium gain band from 47 nm to 82 nm. The thesis reflects the completed research results, which allows evaluating the physical parameters of rare-earth doped optical fibers and their application in the development of optical amplifiers.

Thesis contains:

103 pages, 8 tables, 54 figures, 110 literature sources and 4 appendices.

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS.....	6
1. ĀTRDARBĪGO OPTISKO ŠĶIEDRU SAKARU SISTĒMAS UN TO DARBĪBU IEROBEŽOJOŠIE FAKTORI	8
1.1. Briljuēna-Mandelštama nelineārā izkliedes efekta pielietojums optiskā signāla pastiprināšanā	14
1.2. Nelineārā Ramana izkliedes efekta pielietojums optiskā signāla pastiprināšanā	16
1.3. Ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju analīze	19
1.4. Optisko parametrisko pastiprinātāju darbības apskats.....	24
1.5. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju darbības izpēte	27
1.6. Kombinēti optiskie pastiprinātāji.....	29
1.7. Optisko pastiprinātāju salīdzinājums un novērtējums	30
2. EDFA PASTIPRINĀTĀJA DARBĪBAS NOVĒRTĒJUMS ATKARĪBĀ NO LEĢĒTĀS ŠĶIEDRAS GARUMA UN IEROSINOŠĀ AVOTA JAUDAS.....	35
2.1. EDFA modeļa apraksts Optsim simulācijas programmā.....	37
2.2. Pastiprinātāja darbības izpēte tiešajā pumpēšanas virzienā.....	40
2.3. Pastiprinātāja darbības izpēte pretējā pumpēšanas virzienā	43
2.4. Eksperimentālais EDFA darbības novērtējums un salīdzinājums	46
Kopsavilkums	53
3. EFEKTĪVĀ LAUKUMA EKSPERIMENTĀLIE MĒRĪJUMI AR ŠĶĒRSNOBĪDES METODI	56
3.1. Mērījumu metodoloģijas un eksperimentālās shēmas apraksts	60
3.2. Erbija un iterbija leģētās šķiedras efektīvā laukuma mērījumi.....	64
4. ITERBIJA LEĢĒTU ŠĶIEDRU PIELIETOJUMS EDFA EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANĀ.....	68
4.1. Stimulētās emisijas norises process ar iterbiju leģētajās šķiedrās	69
4.2. Iterbija leģētu šķiedru priekšrocību un trūkumu apskats	71
4.3. EYCDFA pielietojums jaudīgā gaismas avota darbības izpētē	72
4.4. Kombinētā erbija un iterbija leģētas šķiedras pastiprinātāja eksperimentāla realizācija	78
Kopsavilkums	82
NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI.....	83
LITERATŪRAS SARAKSTS	86
PIELIKUMU SARAKSTS	94

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

ASE – Amplified Spontaneous Emission – pastiprināta spontānā emisija

B

BER – Bit Error Rate – bitu kļūdu intensitāte

D

DND – Direct Nanoparticle Deposition – tiešā nanodaļiņu nogulsnešanās tehnika

DRA – Distributed Raman Amplifier – sadalītais Ramana pastiprinātājs

DRB – Double Rayleigh Backscattering – dubultā Releja atpakaļatstarošana

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīvā viļņgarumdaļes blīvēšana

E

EDF – Erbium Doped Fiber – ar erbiju leģēta šķiedra

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – ar erbiju leģētas optiskās šķiedras pastiprinātājs

ESA – Excited State Absorption – ierosinātā stāvokļa absorbcija

EYCDFA – Erbium-Ytterbium co-doped Fiber Amplifier – ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras pastiprinātājs

EYCDF – Erbium-Ytterbium co-doped Fiber – ar erbija un iterbija joniem leģētā šķiedra

F

FF – Far Field – tālais lauks

FOPA – Fiber Optical Parametric Amplifier – parametriskais šķiedru optiskais pastiprinātājs

FMF – Few Mode Fiber – šķiedras ar ierobežoto modu skaitu

FOM – Figure Of Merit – labvērtības skaitlis

FWHM – Full Width Half Maximum – pilns platums līmenī viena puse

FWM – Four-Wave Mixing – četru viļņu mijiedarbe

H

HNLF – High Non-linearity Fiber – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

HDWDM – High Density Wavelength Division Multiplexing – augsta blīvuma viļņgarumdaļes blīvēšana

I

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector – Starptautiskā Telekomunikāciju Apvienība – Telekomunikāciju Standartizācijas Sektors

L

LOA – Linear Optical Amplifier – lineārais optiskais pastiprinātājs

LMAF – Large Mode Area Fibers – lielā modas lauka šķiedras

M

MCF – Multicore Fiber – daudzkodolu šķiedra

MCVD – Modified Chemical Vapor Deposition – modificētās ķīmiskās tvaika fāzes nogulsnešanas metode

MEF – Multi-element Fiber – vairāku elementu šķiedra

MFD – Mode Field Diameter – modas lauka diametrs

MOPA – Master Oscillator Power Amplifier – oscilatora jaudas pastiprinātājs

N

NA – Numeric Aperture – skaitliskā apertūra

NF – Near Field – tuvais lauks

NDFA – Neodymium Doped Fiber Amplifier – ar neodīmu leģētās optiskās šķiedras pastiprinātājs

NDFWM – Non-degenerate Four Wave Mixing – nedeģenerēta četru viļņu mijiedarbe

NRZ-OOK – Non-Return to Zero On/Off Keying – ieslēgts/izslēgts manipulācija ar bez atgriešanās uz nulli kodēšanu

P

PMD – Polarization Mode Dispersion – polarizācijas modu dispersija

R

REDFA – Rare - Earth - Doped Fiber Amplifier – ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātājs

S

SBS – Stimulated Brillouin Scattering – inducētā Briljuēna izkliede

SDM – Space-Division Multiplexing – telpdales blīvēšana

SM-SCF – Single-mode Singlecore fiber – viemodas vienkodola optiskā šķiedra

SNR – Signal-to-Noise-Ratio – signāla un trokšņa attiecība

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

SPM – Self-Phase Modulation – fāzes pašmodulācija

SPT – Spectral Propagation Technique – spektrālās izplatīšanās tehnika

SRS – Stimulated Raman Scattering – inducētā Ramana izkliede

SSE – Source Spontaneous Emission – avota spontāna emisija

SSMF – Standard Single-mode Fiber – standarta viemodas optiskā šķiedra

T

TDFA – Thulium Doped Fiber Amplifier – tūlija leģētās šķiedras pastiprinātājs

V

VBS – Variable Bandwidth Simulation technique – maināmās joslas simulācijas tehnika

VCSEL – Vertical-cavity surface-emitting laser – lāzers ar vertikālo rezonatoru

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana

X

XPM – Cross- Phase Modulation – fāzes šķērsmodulācija

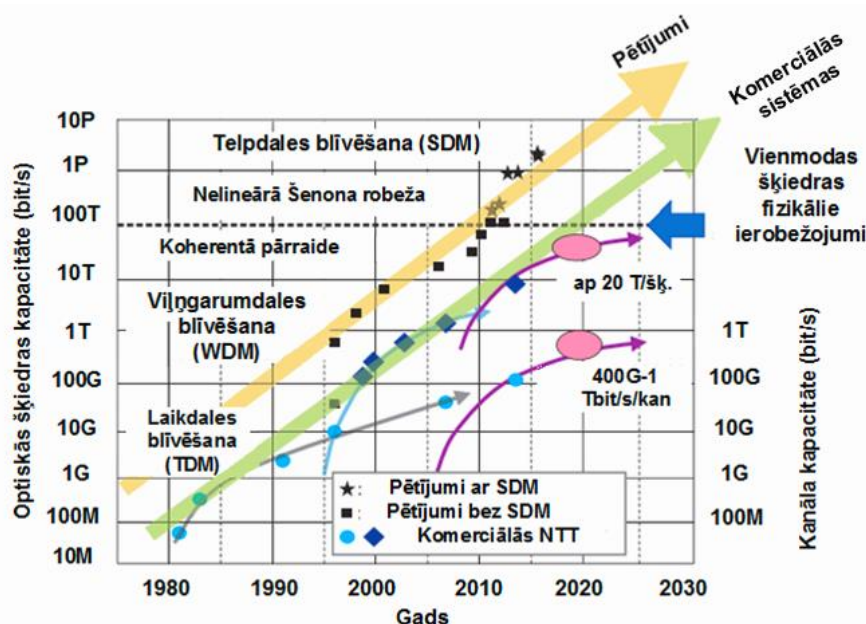
Y

YDF – Ytterbium Doped Fiber – ar iterbiju leģēta šķiedra

YDFA – Ytterbium Doped Fiber Amplifier – iterbijas leģētās šķiedras pastiprinātājs

1. ĀTRDARBĪGO OPTISKO ŠĶIEDRU ŠAKARU SISTĒMAS UN TO DARBĪBU IEROBEŽOJOŠIE FAKTORI

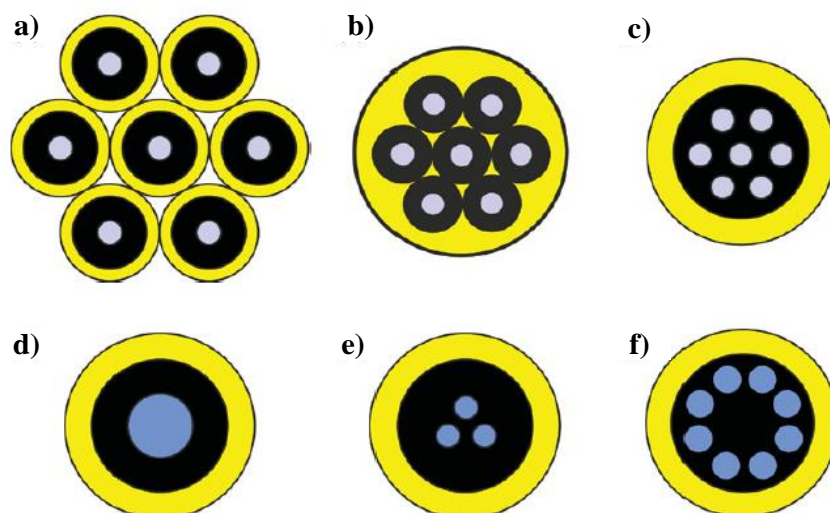
Mūsdienās telekomunikāciju nozare strauji attīstās. Šķiedru optikas pārraides sistēmas ir integrējušās dažāda mēroga datu pārraides tīklos: korporatīvie, piekļuves, un reģionālie tīkli, pilsētu un starppilsētu līnijas, transkontinentālie tīkli. Ģenerētās, pārraidītās un apstrādātās informācijas daudzuma eksponenciālais kāpums veicina dinamiskas izmaiņas telekomunikāciju tirgū [8], [36]. Kā redzams 1.1. attēlā, pēdējo četru gadu desmitu laikā datu pārraides ātrums optiskajās sakaru sistēmās ir palielinājies no 100 Mbit/s standarta vienmodas optiskajā šķiedrā 70. gados, līdz virs 24 Tbit/s mūsdienu komerciālās sistēmās [80].



1.1. att. Šķiedru optikas pārraides sistēmu evolūcija un attīstības tendences [62].

Respektīvi, ņemot vērā trafika pieaugumu un komerciālo risinājumu attīstības tendences ir nepieciešamība pēc pamattīkla saskarnes infrastruktūras adaptācijas datu pārraides ātrumam. Tas nozīmē, ka notiek pāreja no esošajiem 10, 40 un 100 Gbit/s kanālā uz terabītu tīkliem. Vadoties pēc avotā [78] datiem, jau ir palaistas un darbojas pārraides sistēmas ar ātrumu virs 100 Tbit/s, izmantojot tipveida vienmodas vienkodola optiskās šķiedras *SM-SCF* (angl. *Single-mode Singlecore fiber*) un apvienojot līdz 100 augstā blīvuma (*HDWDM*) kanālus ar laikdales *TDM* (angl. *Time-Division Multiplexing*) un telpdales *SDM* (angl. *Space-Division Multiplexing*) blīvēšanu.

Telpdales blīvēšanas tehnoloģijā (*SDM*) tiek raidīti vairāki savstarpēji atšķirīgi signāli, vienlaicīgi veidojot efektīvos telpiskos kanālus [1], [78]. Pastāv dažādas telpisko kanālu veidošanas metodes, kuru pamatā ir jaunā tipa optiskās šķiedras ar vairākiem kodoliem (1.2. att). No optisko pastiprinātāju izstrādes viedokļa nozīmīgākie ir risinājumi ar apvienoto optisko šķiedru masīviem (att. 1.2a, 1.2b, 1.2c), kuri turpmāk tiks aprakstīti detalizētāk.



1.2. att. Dažādas telpdales blīvēšanas realizācijas metodes: a) masīvs no vienmodas šķiedrām; b) vairāku atsevišķu šķiedru izvietošana kopējā apvalkā (*MEF*); c) daudzkodolu šķiedras (*MCF*); d) šķiedras ar ierobežoto modu skaitu (*FMF*); e) šķiedras ar savienotiem kodoliem; f) daudzkodolu šķiedras ar ierobežoto modu skaitu (*FM-MCF*) [75].

Masīvu veidošana no vienmodas šķiedrām ar vienu kodolu (att. 1.2a) un vairāku atsevišķu šķiedru izvietošana kopējā polimēra apvalkā (att. 1.2b) ir šobrīd visizplatītākās tehnikas, ko pielieto pārraides sistēmas caurlaides spējas palielināšanai [24]. Attēlā 1.2b redzamo risinājumu sauc par vairāku elementu šķiedru *MEF* (angl. *multi-element fiber*) [45].

MEF šķiedru izmantošana ir efektīvs risinājums optiskā signāla pastiprināšanā. Katra atsevišķa šķiedru masīva sastāvdaļa (visbiežāk tās ir vienmodas optiskās šķiedras, kuru kodols ir iegriezts ar erbija vai kāda cita retzemju elementa joniem) ir izvietota polimēra apvalkā, kuram ir mazāks atstarošanas koeficients nekā silīcijam. Tādā veidā starp visiem elementiem tiek nodrošināta pilnīgi optiskā saite [75].

Respektīvi, viena vai vairākas šādas sastāvdaļas veido nesējvidi, pa kuru uz šķiedru masīvu daudzmodu režīmā tiek raidīts ierosinošais signāls no pumpējošā avota ar mazāko starojuma intensitāti. Ierosinošais signāls strauji izplatās pārējās šķiedru masīva sastāvdaļās caur silīcija apvalku, kur notiek efektīvais absorbcijas process tajās šķiedrās, kuru serdenis ir iegriezts ar retzemju elementa joniem. Minētā procesa rezultātā tiek veidota apdzīvotības inversija, un attiecīgi tiek pastiprināts optiskais signāls, kurš izplatās iekš *MEF*. Pēc būtības *MEF* satur vairākus individuālos optiskos pastiprinātājus, kuriem ir kopīgs ierosinošais avots (parasti mazjaudīgā lāzērdiode, kas darbojas daudzmodu režīmā), turklāt minētais risinājums nodrošina ērtu savietojamību un ir ekonomiski izdevīgs, jo pumpēšanas moduļa ražošana ietilpst šķiedras ražošanas procesā.

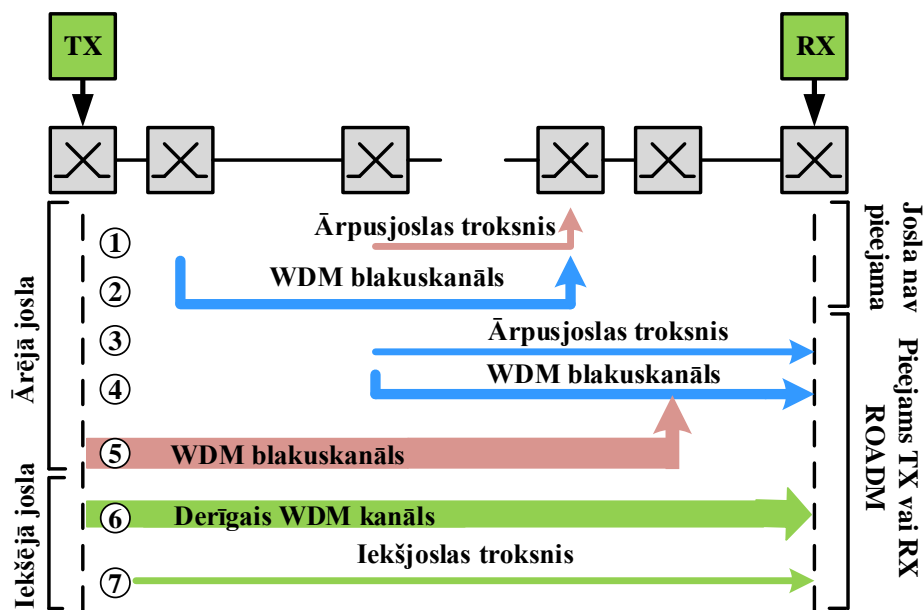
Daudzkodolu šķiedru *MCF* (angl. *Multicore Fibers*) koncepcijas pamatā ir vairāku neatkarīgo kodolu ar pietiekoši mazajiem savstarpējiem šķērstrokšņiem izvietošana starp vienā šķiedrā blakus esošajam kodoliem (att.1.2c). Respektīvi, tiek veidots masīvs no vienmodas šķiedru kodoliem, kas nav fiziski savienoti savā starpā. Jo lielāks ir attālums starp kodoliem, ko mazāka šķērstrokšņu ietekme. Šāda tipa šķiedras tiek sauktas arī par vāji savienotajām daudzkodolu šķiedrām [78]. Šobrīd maksimālais neatkarīgo kodolu skaits, ko praktiski pielieto

datu pārraidei lielos attāļumos ir no 12 līdz 19, kaut gan jau ir prezentētas šķiedras, kas satur 30 vienmodas kodolus [2], [10], [11].

Optisko pārraides sistēmu attīstības tendences liecina, ka notiek tīkla infrastruktūras pilnveidošana, viļņgarumdaļes blīvēšanas (WDM) tehnoloģijas attīstība, kā arī tiek modernizētas optisko šķiedru ražošanas tehnoloģijas, jauni optiskā signāla pastiprināšanas risinājumi un koherentā detektēšana [18], [25], [33], [100].

Datu pārraidei lielos attāļumos ar vājinājuma koeficientu mazāku par 0,2 dB/km šķiedru optikā pārsvarā tiek izmantota C frekvenču josla (1530–1550 nm) un L frekvenču josla (1565–1625 nm), kurās optisko pastiprinātāju caurlaides josla ietilpst 40 nm (5 THz). Savukārt ap 2020. gadu ir paredzams, ka kopējo optisko pastiprinātāju caurlaides joslu būtu nepieciešams paplašināt līdz 120 nm (15 THz), attiecīgi pārklājot arī S frekvenču joslas diapazonu (1460 nm–1530). Ņemot vērā minēto, kopējā pārraides sistēmas caurlaides spēja tiecās sasniegt ap 150 Tbit/s [63], [68].

Pieaugot pa vienu kanālu pārraidāmo datu apjomam, ir nepieciešamība pēc lielākajām optiskajām jaudām, tāpēc daudzkanālu sakaru sistēmas optimizācijas gaitā ir jāaskaras ar divām pamatproblēmām – caurlaides joslas un ieejas jaudas palielināšanos (1.3.att.).



1.3. att. Savstarpējo ietekmju shematiskais attēlojums nelineārajā datu pārraidē [33].

No signālu pārvades teorijas ir zināms, ka caurlaides josla attiecībā pret fiksēto signāls-troksnis parametru (SNR) tiek definēta ar maksimālo Šenona robežu η_{maks} [59]:

$$\eta_{maks} = \log_2 \left(1 + \frac{RE_b}{N_0 W} \right) \text{ [bits/s/Hz]}, \quad (1.1)$$

kur E_b – enerģijas daudzums viena bita pārraidei, R – sistēmas pārraides ātrums [bit/s], N_0 – trokšņa jaudas spektrālais blīvums, W – kanāla caurlaides spēja. Pieaugot optiskā signāla jaudai, palielinās arī starpkanālu šķērstrokšņi, ko izraisa impulsa kropļojumi nelineāro efektu ietekmē [17], [35], [92]. Vadoties pēc nelineārā Šenona robežas parametra, šobrīd pārraides sistēmas spektrālās efektivitātes palielināšanas potenciāls tiek ierobežots apmēram četras reizes

pieņemot, ka esošajās sistēmās tiek pārraidīti 2 biti uz simbolu) [6]. Respektīvi, ir jāpaplašina caurlaides josla, virzoties uz L frekvenču diapazonu.

Optiskās jaudas zudumus izraisa vājinājums optiskajās šķiedrās, kurš rodas izkliedes un absorbcijas procesu rezultātā, un tā ir aktuāla problēma pārraidot optisko signālu lielos attālumos. Standarta vienmodas optiskajā šķiedrā *SSMF* (*Standard Single-mode Fiber*) pie viļņa garuma 1550 nm vājinājums sastāda ap 0,2 dB/km. Palielinoties optiskās sakaru līnijas garumam ik pēc 50-100 km signāls tiek vājināts par 10-20 dB un tas ir jāatjauno [106].

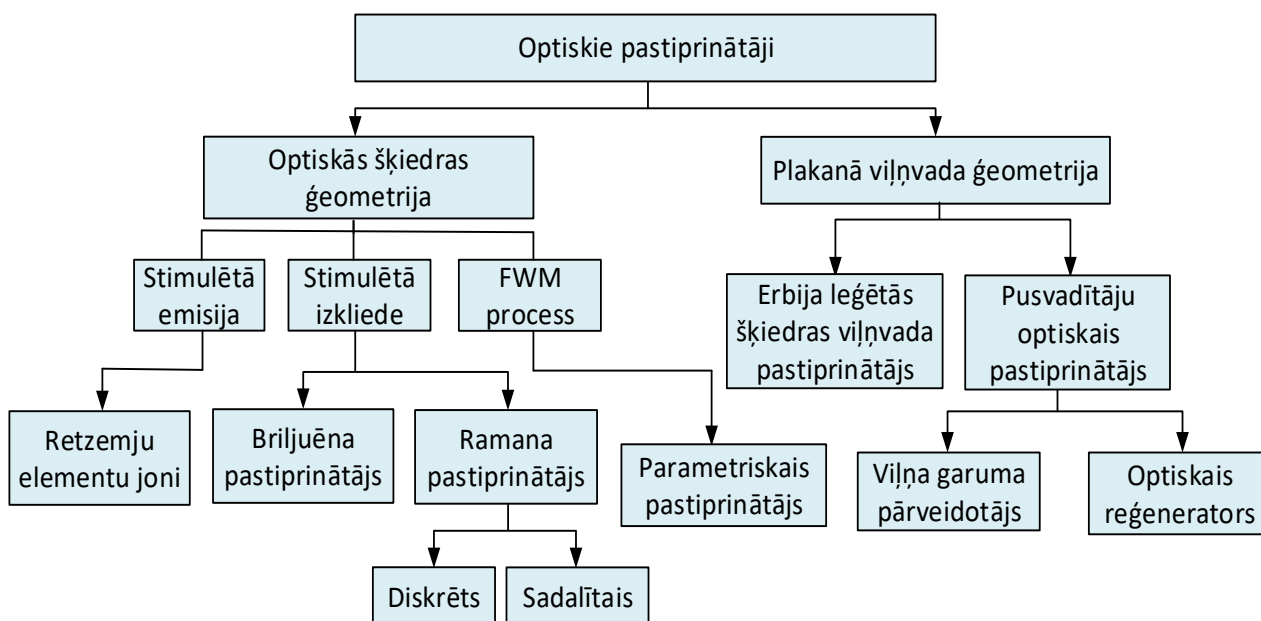
No visa iepriekš minētā var secināt, ka telekomunikāciju nozares straujā attīstība un pārraidāmo datu apjoma pieaugums nosaka vienu no stratēģiskajiem virzieniem, kas vērsts uz optiskā tīklā resursu izmantošanas optimizāciju un efektivitātes paaugstināšanu. Šāds virziens ir jaunā tipa optisko pastiprinātāju izstrāde, kas nodrošinātu lielākas izejas jaudas, kā arī paplašinātu pastiprināšanas viļņu garumu diapazonu [39], [63], [98].

Atšķirībā no reģeneratoriem, mūsdienu komerciālajās šķiedru optikas pārraides sistēmās pastiprinātāji nodrošina optiskā signāla pastiprināšanu bez optiski-elektriskās pārveidošanas. Tie ir pielāgojami datu pārraides ātrumam un modulācijas formātam, kā arī var vienlaicīgi pastiprināt vairākus optiskos signālus uzdotajā frekvenču diapazonā [83], [104], [108]. Telekomunikācijās izmantojamo optisko pastiprinātāju klasifikācija ir parādīta 1.4. attēlā. Pēc viļņvada ģeometrijas izšķir divas pastiprinātāju pamatkategorijas: optiskās šķiedras pastiprinātāji un plakanā viļņvada pastiprinātāji. Optiskās šķiedras pastiprinātājos ierosinotais starojums no viena vai vairākiem lāzeravotiem nonāk šķiedrā kopā ar ieejas signālu, turpretī pusvadītāju pastiprinātājiem apdzīvotības inversija tiek nodrošināta ar tiešo elektriskās strāvas ievadi caur elektrodziem pusvadītāja materiāla aktīvajā reģionā. Atkarībā no fizikālajiem procesiem, kuri veicina stimulēto emisiju un optiskā signāla pastiprināšanu, optiskos pastiprinātājus iedala sekojošās grupās:

- Pastiprinātāji, kuru darbības pamatā ir nelineārie optiskie efekti – pastiprinātāji uz Briljuēna-Mandelštama un Ramana izkliedes efektu bāzes, kā arī uz četru viļņu mijiedarbības (*FWM*) efekta balstīti pastiprinātāji (*FOPA*);
- Pastiprinātāji uz leģēto šķiedru bāzes, kur aktīvā vide ir ar retzemju elementu joniem leģēta optiskā šķiedra (*REDFA*);
- Lāzera tipa pusvadītāju pastiprinātāji, kuros fotona emisiju veicina elektronu un caurumu rekombinācija pusvadītājā tiešās strāvas iedarbībā, nevis ārējā pumpēšana ar optisko starojumu (*SOA*, *LOA*).

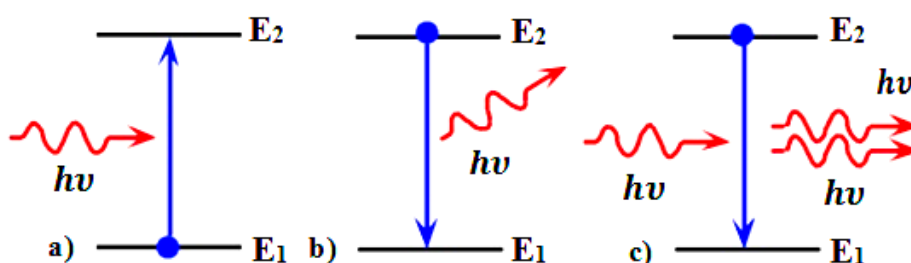
Pēc funkcionālās nozīmes ir iespējami trīs pastiprinātāju tipi:

- jaudas pastiprinātājs (*booster*), kas palielina raidītāja izejas jaudu;
- līnijas pastiprinātājs, kurš izvietots līnijas vidū, lai kompensētu zudumus;
- priekšpastiprinātājs, kas palielina raidītāja jūtīgumu un tiek uzstādīts līnijas sākumā.



1.4. att. Telekomunikācijās izmantojamo optisko pastiprinātāju klasifikācija [94].

Optiskais pastiprinātāja darbības princips ir līdzīgs lāzeram. Pastiprinātāja bāzi veido aktīvā fizikālā vide, kurā enerģētiskās pumpēšanas iedarbībā notiek lietderīgā fotonu emisija, un tiek palielināta starojuma jauda. Respektīvi, ierosināšanas rezultātā tiek veidota apdzīvotības inversija, kura ir optiskā signāla pastiprināšanas mehānisma pamatā. Lai izprastu minētā procesa fizikālo jēgu, ir jāapskata fotona emisijas un absorbcijas process (1.5. att.).



1.5. att. Fotona absorbcijas (a), spontānās emisijas (b) un stimulētās emisijas (c) attēlojums [49].

Valences joslas ietvaros elektrons var pāriet no enerģijas līmeņa E_1 (zemākais līmenis) uz augstāko enerģētisko līmeni E_2 (ierosinātais līmenis). Elektrona pāreju augstākajā līmenī veicina ārējā ierosināšana vai arī izejošā fotona ar enerģiju $h\nu_{12}$ absorbcija. Tālāk notiek absorbcijas process, un ierosinātais elektrons atgriežas atpakaļ zemākajā līmenī spontānās vai stimulētās emisijas iedarbībā. Elektrona pārejas intensitāte no enerģijas līmeņa E_1 uz ierosināto līmeni E_2 ir atkarīga no apdzīvotības blīvuma N_2 līmenī E_2 , kā arī no un fotonu koncentrācijas blīvuma $\rho(h\nu)$ ar enerģiju $h\nu = E_2 - E_1$.

Spontānās emisijas ietekmē ģenerēto fotonu fāzei, frekvencei un viļņa garumam ir gadījuma raksturs, jo elektrona pāreja sākotnējā stāvoklī notiek no jebkura līmeņa aktīvas vides ietvaros. Šāda tipa starojumam raksturīgs plašs spektrs un tas nav kohrentais. Spontānās

emisijas starojumu apzīmē ar koeficientu A_{21} , kuru sauc par Einšteina koeficientu. Pēc fizikālās nozīmes A_{21} ir varbūtība, ar kādu spontānā starojuma ietekmē elektrons pāriet no ierosinātā līmeņa E_2 uz zemāko līmeni E_1 [90].

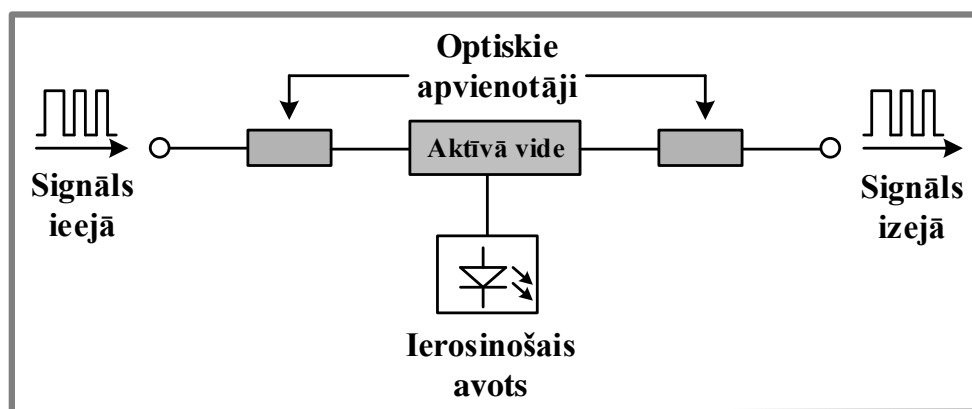
Stimulētā emisija rodas, ja ierosinātā elektrona pāreju uz zemāko stāvokli veicina ārējais katalizators (momentānais fotons). Emitētiem fotoniem kustoties vienā virzienā un saskaroties ar citiem ierosinātiem atomiem tiek stimulētas turpmākās inducētās pārejas, un fotonu skaits aug lavīnveidīgi. Emitētais fotons un momentānais fotons saskan pēc fāzes, tiem ir vienāda enerģija, jo ir spēkā vienādība $h\nu = E_2 - E_1$ (h – Planka konstante $6.6252 \cdot 10^{-34} [W \cdot s^2]$, ν – absorbētā fotona frekvence) un gaismas starojums ir koherents [90].

Stimulētās emisijas iedarbībā notiek optiskā signāla pastiprināšana, taču ir jāņem vērā arī konkurējošā procesa – absorbcijas ietekme. Tas nozīmē, ka elektrons var pāriet ne tikai no augšējā stāvokļa uz apakšējo, bet arī otrādi. Respektīvi, krītošā starojuma pastiprināšanai ir nepieciešams, lai stimulēto fotonu skaits, kurš ir proporcionāls ierosināto stāvokļu apdzīvotībai pārsniegtu absorbēto fotonu skaitu, kurš savukārt proporcionāls stabili stāvokļu apdzīvotībai.

Visbiežāk sistēma atrodas termodinamiskā līdzsvara stāvoklī, līdz ar ko ierosināto elektronu skaits ir ļoti mazs, jo izejošā fotona absorbētā enerģija nav pietiekoša, un stimulētās emisijas efekts nav izteikts. Termodinamiskā līdzsvara apstākļos enerģētisko līmeņu apdzīvotības blīvuma sadalījums atbilst Bolcmaņa statistiskajam sadalījumam [90]:

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right), \quad (1.2)$$

kur: k_B – Bolcmaņa konstante ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$) un T – absolūtā temperatūra Kelvīnos. No vienādības (1.2) ir redzams, ka apdzīvotības blīvums augstākajā līmenī E_2 ir mazāks nekā zemākajā līmenī E_1 . Lai nodrošinātu termodinamiskā nelīdzsvara apstākļus ir jāpalielina elektronu skaits ierosinātajā līmenī, jeb jāizveido apdzīvotības inversija, kas atbilst nosacījumiem $N_1 < N_2$, kur N_1 un N_2 ir apdzīvotības blīvumi zemākajā un augstākajā stāvoklī. Apdzīvotības inversija tiek panākta ar ārējo optisko vai elektrisko ierosinošo avotu. Ierosinošā avota enerģijas iedarbībā ieejas signāla fotons veicina elektronu pāreju uz zemāko līmeni, tādējādi pastiprinot optisko signālu [51]. Vienkāršota optiskā pastiprinātāja blokshēma ir parādīta 1.6. attēlā.



1.6. att. Optiskā pastiprinātāja darbības princips [51].

Svarīgākais optiskā pastiprinātāja parametrs ir pastiprinājuma koeficients G , kuru izsaka ar attiecību [5]:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (1.3)$$

kur: P_{out} – optiskā signāla jauda pastiprinātāja izejā un P_{in} – optiskā signāla jauda ieejā. Parasti pastiprinājuma koeficients tiek novērtēts vājo signālu pastiprināšanas režīmā pie nosacījuma $P_{out} < 0 \text{ dBm}$. Pastiprinājuma koeficientu izsaka decibelos no izejas un ieejas signāla jaudām dBm [51]:

$$G [\text{dB}] = P_{out} [\text{dBm}] - P_{in} [\text{dBm}] \quad (1.4)$$

Precīzāk pastiprinājuma koeficienta un pārējo optisko pastiprinātāju parametru nozīme ir aprakstīta darba 2. nodaļā, kur ir praktiski novērtēta ar erbiju leģētās optiskās šķiedras pastiprinātāja darbība atkarībā no leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas.

1.1. Briljuēna-Mandelštama nelineārā izkliedes efekta pielietojums optiskā signāla pastiprināšanā

Uz inducētās Briljuēna-Mandelštama izkliedes efekta bāzēto pastiprinātāju darbības pamatā ir šķiedras nelineārais optiskais efekts, kurš izpaužas kā Stoksa viļņa ģenerācija, kas izplatās pretējā virzienā un pārnes lielāko daļu ieejas enerģijas, ja tiek sasniegta robeža, ko sauc par Briljuēna sliekšni (ap 10 GHz viļņu garuma diapazonā 1550 nm).

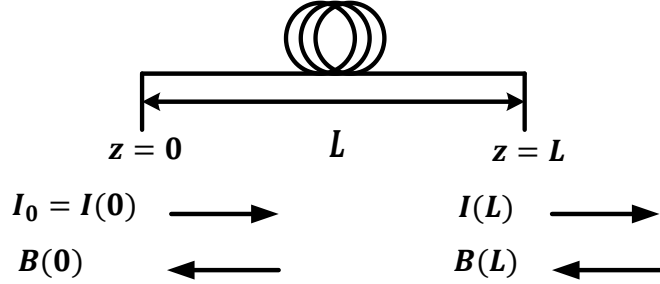
Palielinot krītošās gaismas intensitāti, sākot no kāda intensitātes lieluma (sliekšņa), krītošo un izkliedes viļņu materiālā klātbūtne palielina jaunu izkliedes efektu varbūtību. Krītošo un izkliedes viļņu kopējā ietekme noved pie vielas blīvuma nevienādīguma rašanās, proti, jaunu fononu rašanās, uz kuriem, savukārt, krītošais vilnis tiek izkliedēts. Tiklīdz izkliede kļūst par efektīvu un sāk pārsniegt gaismas vājinājumu, izkliede sāk lavīnveidīgi palielināties, un izkliedes intensitāte ātri kļūst samērojama ar krītošās gaismas intensitāti. Šo procesu ar akustiskiem fononiem aktīvās izkliedētās gaismas iedarbībā, sauc par inducēto Briljuēna izkliedi – *SBS* (angl. *Stimulated Brillouin scattering*). *SBS* var aprakstīt kā Stoksa, akustisko un uzsūpojošo viļņu parametrisku mijiedarbību. Respektīvi, optiskā signāla vilnis ar frekvenci ω_p mijiedarbībā ar akustisko vilni Ω_B ģenerē Stoka vilni ar frekvences nobīdi $\omega_s = \omega_p - \Omega_B$ [5].

SBS nosaka lāzera jaudas augšējo sliekšni. Savukārt sliekšņa līmenis ir atkarīgs no lāzera avota starojuma platuma (jo tas ir platāks, jo sliekšņa līmenis ir augstāks), optiskās šķiedras efektīvā laukuma A_{eff} (jo tas ir lielāks, jo sliekšnis ir augstāks), optiskās šķiedras garuma (līdz 10 km *SBS* var neņemt vērā) un signāla modulācijas veida.

Ja notiek jaudīgā pumpēšana pie frekvences ω_p , inducētā Briljuēna izkliede pastiprina vājo ieejas signālu pie frekvences Ω_B . Respektīvi, caur izkliedi vājāks signāls saņem daļu no pumpēšanas jaudas. Briljuēna izkliedes kvantitatīvās analīzes pamatā ir vienādojumi, kas apraksta ierosinoša viļņa I un Stoksa viļņa B izplatīšanos pa šķiedras garumu L [17]:

$$\frac{dI}{dz} = -gBI - \alpha_0 I \text{ un } \frac{dB}{dz} = -gBI + \alpha_0 B, \quad (1.5)$$

kur: g – Briljuēna pastiprinājuma koeficients, ja šķiedras garums ir robežās no 0 līdz L . Pastiprinājuma koeficients g ir maksimālais, ja ierosinošais vilnis un Stoksa vilnis sakrīt pēc polarizācijas, kā tas shematiski parādīts 1.7.attēlā.



1.7. att. Ierosinošā viļņa un Stoksa viļņa izplatīšanas virzieni pa šķiedras garumu L vienmodas optiskajā šķiedrā, kur I_0 pumpējošā avota intensitāte ieejā un $B(L)$ Stoksa vilnis [16].

Stimulētās Briljuēna izkliedes rādītais optiskā signāla pastiprinājums pie ierosinošās jaudas P_p atbilst sakarībai [91]:

$$g = \frac{\gamma L_{eff} P_p}{A_{eff}}, \quad (1.6)$$

kur: γ – nelineārās izkliedes pastiprinājuma koeficients ($5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$), L_{eff} – šķiedras efektīvais garums un A_{eff} – šķiedras efektīvais laukums.

Būtiskākais Briljuēna pastiprinātāju trūkums ir šaura izejas signāla caurlaides josla (ap 50-100 MHz), kas ir maz salīdzinājumā ar Ramana pastiprinātājiem, kur caurlaides josla tuvojas 5 THz. Turklāt, pastiprinājums ir iespējams tikai tad, ja informatīvais signāls izplatās pretēji pumpējošā stara virzienam. Starp negatīvajām īpašībām jāmin arī tādi faktori kā maza signāla frekvences nobīde attiecībā pret pumpēšanas frekvenci (mazāka par 10 GHz) un šaurs pastiprinājuma spektrs, kas ierobežo iekārtas izmantošanu platjoslas pārraides sistēmās. Ņemot vērā minētās nepilnības, tie netiek plaši izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās, kaut arī pastāv iespēja nodrošināt vāja optiskā signāla pastiprinājumu par 20–30 dB ar mazām pumpēšanas jaudām (līdz 1mW) [82], [108].

Pastiprinātāji uz Briljuēna-Mandelštama izkliedes efektu bāzes ir aktuāli koherentās sistēmās, kur pamatideja balstās uz to, lai atsevišķi pastiprinātu tikai optisko nesējsignālu, bet modulācijas sānu joslas atstāt bez izmaiņām. Tādā veidā pastiprināts nesējsignāls darbojas kā ģenerators, kura fāze automātiski pielāgojas pārraidāmā signāla fāzei. Dotais paņēmieni labi strādā, ja pārraides ātrums ir mazāks par 100 Mbit/s. Vēl viena Briljuēna pastiprinātāja realizācija ir pārskaņojamais šaurjoslas optiskais filtrs kanālu izvēlei blīvajās daudzkanālu sakaru sistēmās ar dažu desmitu megabitu sekundē pārraides ātrumu kanālā. Piemēram, ja starpkanālu intervāls pieaug, bet datu pārraides ātrums nepārsniedz caurlaides joslu $\Delta\nu_B$ – ierosinošais avots var būt pieskaņots konkrētā kanāla pastiprināšanai [4].

1.2. Nelineārā Ramana izkliedes efekta pielietojums optiskā signāla pastiprināšanā

Pastiprinātājiem uz inducētās Ramana izkliedes efekta (*SRS*) darbības princips ir balstīts uz nelineāri-optiskās pumpēšanas enerģijas pārveidošanas Stoksa enerģijā vides fononu viļņa iedarbībā. Akustisko fononu gadījumā novēro iepriekš aprakstīto Briljuēna-Mandelštama izkliedi, savukārt optisko fononu gadījumā – Ramana izkliedi. Gan Ramana, gan Briljuēna-Mandelštama izkliedes var notikt plašā materiālu spektrā, tai skaitā izotropos cietos ķermeņos, šķidrumos, gāzēs un, protams, kristālos bez simetrijas centra. Abas šīs izkliedes ir četru fotonu procesi, kuros divi lāzera starojuma fotoni pazūd, bet to vietā rodas divi jauni fotoni ar citām frekvencēm: Stoksa un anti-Stoksa [4]. Šādu procesu var sadalīt divās pakāpēs, kur katra no tām ir divfotonu process ar divu fononu un viena fonona $\hbar\omega$ piedalīšanos.

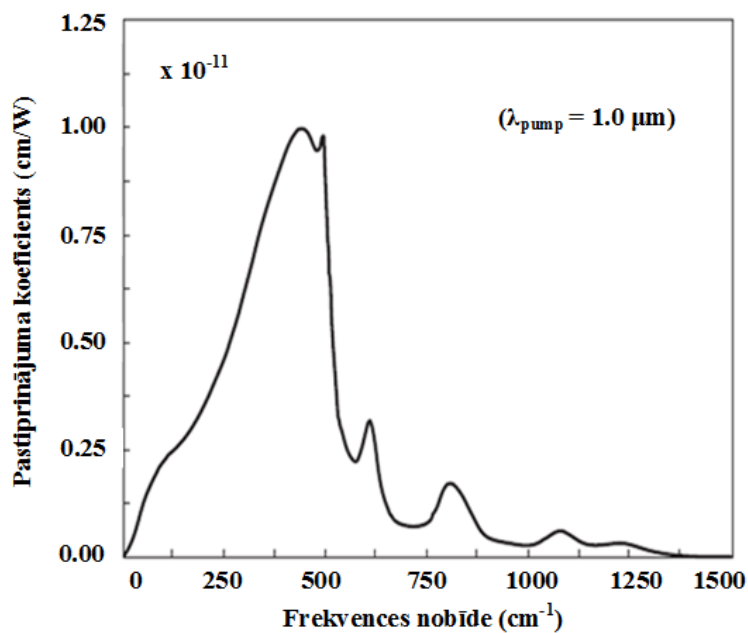
Izkliede notiek gan ar frekvences samazināšanos (Stoksa komponente: $\omega_l = -\omega_{ls}$; $\omega_s + \omega_l + \omega_n = -\omega_n$, gan ar frekvences palielināšanos (anti-Stoksa komponente: $\omega_l = \omega_s$; $\omega_n < 0$; $\omega_s + \omega_l + \omega_n = 2\omega_s$). Lauki ar frekvencēm ω_s un ω_n rada vides svārstības ar frekvenci $\omega_s - \omega_n$ (molekulārās vai optiskās vielas atomārā režģa svārstības Ramana izkliedes gadījumā, akustiskās režģa svārstības Briljuēna-Mandelštama izkliedes gadījumā), kuras izkliedē gaismu ar frekvenci ω_s . Frekvences izmaiņas parasti ir ievērojami lielākas Ramana izkliedes gadījumā (10^{12} – 10^{13} Hz) salīdzinot ar 10^9 – 10^{12} Hz *SBS* gadījumā.

Izmantojot jaudīgus ierosinošos avotus ir iespējams dabūt ģenerāciju uzreiz vairākos viļņu garumos, kas atbilst augstākās kārtas Stoksa komponentu ģenerācijai [99]. Ramana pastiprinājums G_R ir atkarīgs no tādiem faktoriem kā: šķiedras garums, vājinājums šķiedrā un serdes diametrs. Pastiprinājuma koeficients ir izsakāms ar funkciju no ierosinošās jaudas P_P :

$$G_R = \exp\left(\frac{g_R P_P L_{eff}}{A_{eff} k}\right), \quad (1.7)$$

kur: g_R – Ramana pastiprinājuma koeficients, A_{eff} un L_{eff} – šķiedras efektīvais laukums un garums, k – skaitliskais koeficients, kurš raksturo polarizācijas izmaiņas starp optisko jaudu un signālu [77], [95]. Lielums $g_R/A_{eff}k$ reprezentē Ramana pastiprinājuma efektivitāti, kuru izsaka mērvienībās [$W^{-1}km^{-1}$].

Ramana pastiprinājuma spektrs silīcija šķiedrā, kad ierosinošā avota un signāla viļņa garumi ir lineāri polarizēti parādīts 1.8. attēlā. Redzams, ka Stoksa viļņa nobīde ir robežās līdz 20 THz, savukārt maksimālais Ramana pastiprinājums atbilst 13,2 THz. Dotajā punktā starpība starp ierosinošā avota vilni un signāla vilni sastāda apmēram 100 nm. Inducētās Ramana izkliedes procesā fotoni tiek ģenerēti visā spektrālajā joslā, līdz ar ko arī visas frekvenču komponentes tiek pastiprinātas vienlīdzīgi. Bet, vistraucīgāk pieaug tā komponente, kura atbilst maksimālajam Ramana pastiprinājuma koeficientam g_R . Respektīvi, *SRS* procesā ģenerētā Stoksa viļņa frekvenci nosaka Ramana pastiprinājuma maksimums [4]. Optiskā signāla pastiprināšana izmantojot Ramana pastiprinātāju būs efektīva tikai tad, ja pumpējošā stara vērtība pārsniegs Ramana sliekšņa vērtību. Ramana sliekšņa vērtībai atbilst tāda ierosinošā avota jauda, kas nepieciešama, lai ierosinātā Stoksa viļņa jauda būtu vienāda ar pumpējošo jaudu viļņvada izejā [34].

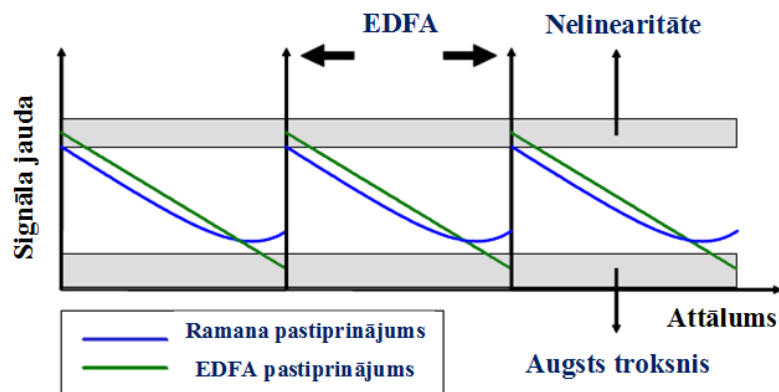


1.8. att. Ramana pastiprinājuma spektrs silīcija šķiedrā [4].

Izšķir divas Ramana optisko pastiprinātāju kategorijas: diskrētie un sadalītie. Lai uzskatāmāk redzētu atšķirību, jāapskata 1.9. attēls, kur tiek salīdzināts Ramana pastiprinātājs un *EDFA*. Diskrētajos pastiprinātājos (angl. *lumped amplifier*) tiek izmantotas speciālās šķiedras – ar erbiju leģēta šķiedra *EDFA* gadījumā (1.9. attēlā parādīts ar zaļo līniju) var arī paaugstinātas nelinearitātes šķiedra (angl. *high non-linearity fiber* – *HNLF*) Ramana pastiprinātāja gadījumā, kas samazina nepieciešamo signāla intensitātes līmeni, tādējādi veicinot *SRS*. Tas nozīmē, ka visi fizikālie procesi koncentrējas vienā diskrētajā komponentē (pastiprinātājā). Diskrētie pastiprinātāji parasti ir izvietoti pārraides līnijā ik pēc 80 km. Respektīvi, raidītais signāls, kurš tiek novājināts ejot cauri pārraides līnijas traktam katrā no diskrēto pastiprinātāju saturošajiem posmiem ir pastiprināts, un signāla jaudas līmenis tiek periodiski atjaunots pēc katra no šādiem posmiem. Praktiski diskrētos Ramana pastiprinātājus ir efektīvi izmantot sistēmās, kurās ir vairāk nekā 200 kanāli vai arī tiek izmantota caurlaides josla, kas pārsniedz 70 nm [14], [20].

Sadalītajā Ramana pastiprinātājā (angl. *distributed Raman amplifier* – *DRA*) optiskā signāla pastiprināšanas process ir nodrošināts caur visu raidošo šķiedru vai arī tās konkrēto posmu, jo *SRS* veicina enerģijas pārnesei no vairākiem ierosinošiem avotiem pa tiešo uz raidīto signālu. 1.9. attēlā ar zilo līkni ir shematiski parādītas signāla jaudas izmaiņas gadījumā, ja tiek pielietots sadalītais Ramana pastiprinātājs ar pumpēšanu pretējā virzienā.

Nemot vērā to, ka pastiprināšana notiek jau raidošajā šķiedrā, signāla jauda nesamazinās līdz kritiski zemajam līmenim pat tad, ja trokšņa faktora rādītājs ir augsts. Minētā īpašība dod iespēju uzlabot *SNR* parametru, līdz ar ko praksē sadalītie Ramana pastiprinātāji tiek pielietoti biežāk nekā diskrētie. Vēl viena nozīmīga priekšrocība ir iespēja iegūt līdzeno pastiprinājuma spektru, ja tiek izmantoti vairāki ierosinošie avoti ar pumpēšanu pie dažādiem viļņa garumiem. Sadalītos Ramana pastiprinātājus visbiežāk izmanto pārraides sistēmās, kas paredzētas lieliem attālumiem (piemēram, aizokeāna sakari).



1.9. att. Sadalītā un diskretā pastiprinātāja salīdzinājums [14].

Ramana pastiprinātājiem ir raksturīga plaša pastiprinājuma josla ($\sim 5\text{--}6$ THz) un tai nav konkrētu ierobežojumu t.i. pastiprinājums ir iespējams jebkurā viļņu garumu diapazonā, ja ir atbilstošs ierosinošais avots. Piemēram, ar pumpēšanu pie 1500 nm signāls tiek pastiprināts 1560–1570 nm joslā. Respektīvi, plaša pastiprinājuma josla dod iespēju pastiprināt ultra īsos impulsus, bet daudzkanālu sakaru sistēmas galvenais pozitīvais efekts ir iespēja pastiprināt uzreiz vairākus kanālus. Šāda tipa optiskos pastiprinātājus var izmantot S-joslā (1480...1520 nm) un L-joslā (1570...1610 nm), kā arī diapazonā no 1642 līdz 1672 nm [13], [20], [99], [104]. Apkopojot minēto var secināt, ka sadalīto Ramana pastiprinātāju izmantošana ir aktuāls un daudzsološs risinājums jaunās paaudzes platjoslas optisko pastiprinātāju izstrādē, taču pastāv būtiski ierobežojumi, ar kurām jāsaskaras veidojot optiskā signāla pastiprināšanas shēmu ar Ramana pastiprinātājiem.

Pirmais negatīvais faktors ir dubultā Releja atpakaļatstarošanās (angl. *double Rayleigh backscattering* – DRB). DRB izraisa divkārsots atpakaļejošs Releja starojums pārraidītā signāla virzienā, kuru papildus pastiprina Ramana ierosinošais avots. Tā kā Releja izkliede ir elastīgs process, DRB rezultātā rodas troksnis signāla joslā. Minētā problēma ir aktuāla, ja Ramana pastiprinātājos tiek izmantotas šķiedras ar mazo serdeņa diametru. Piemēram, dispersiju kompensējošās šķiedras (angl. *dispersion compensating fiber* – DCF) [13].

Otrais potenciālais trokšņa avots Ramana pastiprinātājos ir relatīvās intensitātes trokšņi virzienā no pumpēšanas uz signālu, kas ir aktuāli izmantojot ierosināšanu tiešajā virzienā. Turklāt, salīdzinājumā ar leģētās optiskās šķiedras pastiprinātājiem, pumpēšanai ir nepieciešami jaudīgākie gaismas avoti, kuru optiskā starojuma jauda tuvojas vai pārsniedz 1 W [34]. No šejienes seko, ka Ramana pastiprinātājiem raksturīga mazāka pumpēšanas efektivitāte nekā pastiprinātājiem, kuros tiek izmantotas ar retzemju elementiem leģētās šķiedras.

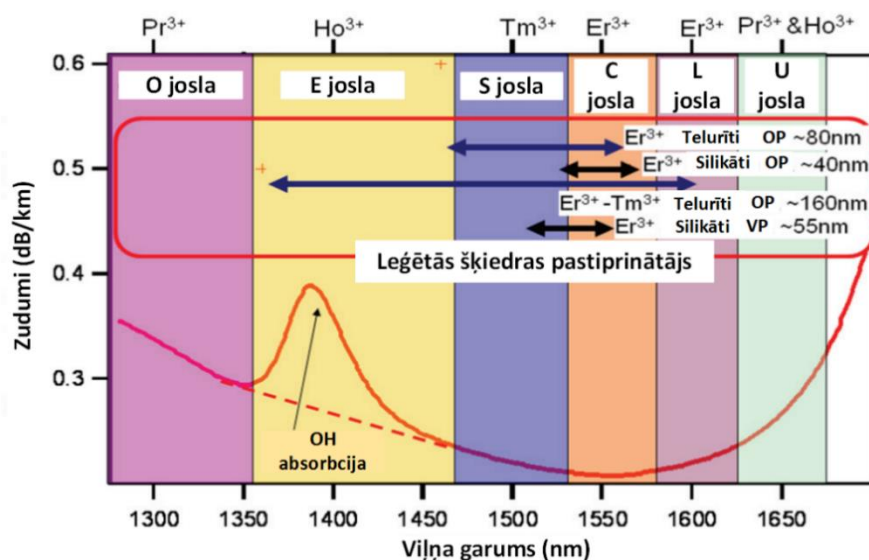
Trešā negatīvā īpašība ir izteikta jūtība pret polarizāciju. Tas nozīmē, ka maksimālais pastiprinājums iespējams tikai tad, ja ieejas signāls un ierosinošais avots ir savstarpēji polarizēti pēc virziena. Līdzko tie ir ortogonāli polarizēti – pastiprinājums samazinās, tāpēc pastiprinājuma efektivitātes palielināšanas nolūkos ir jāpiemēro ierosināšana ar diviem ortogonāli polarizētiem lāzeriem. Turklāt, izstrādājot platjoslas Ramana pastiprinātājus ir jāņem vērā ierosinošo avotu savstarpējā ietekme, jo tie arī ir pakļauti Ramana efekta ietekmei.

Rezultātā daļa jaudas no pumpējoša avota pie īsākajiem viļņa garumiem tiek pārnesta uz pumpējošo avotu ar garākajiem viļņa garumiem [4].

Visbeidzot, attīstoties šķiedru optikas pārraides sistēmu tehnoloģijai, optiskā signāla pastiprināšanas risinājumi ar Ramana pastiprinātājiem ir individuāli jāpielāgo katram konkrētajam gadījumam, jo savstarpējā integrācija nav iespējama.

1.3. Ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju analīze

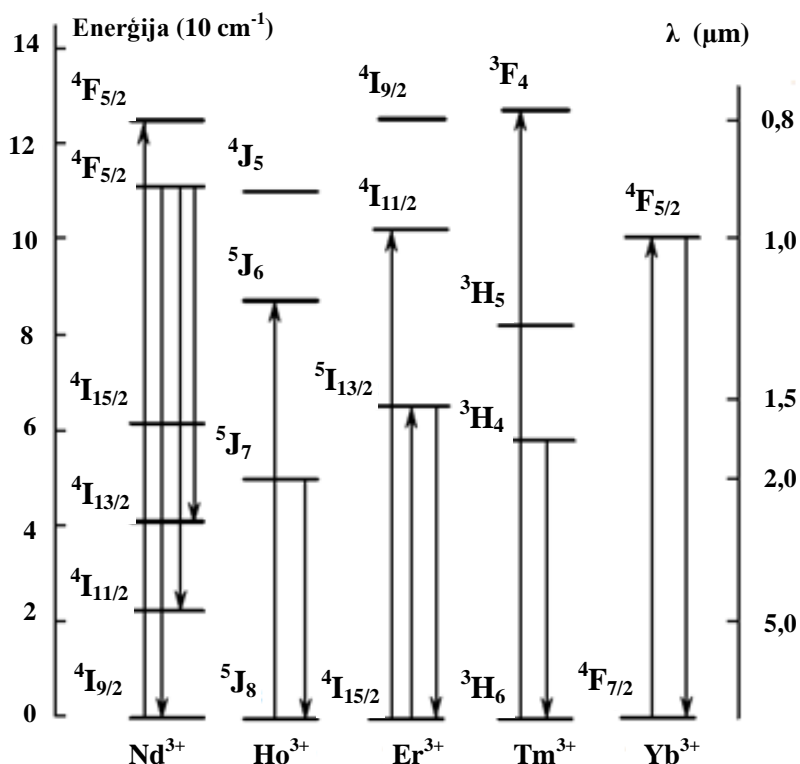
Ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātājos aktīvo vidi veido silīcija dioksīda optiskā šķiedra ar dažādiem piemaisījumiem (fluorīdi, sulfīdi, telurīti utt.), kura leģēta ar retzemju elementu joniem. Parasti tie ir lantanīdu grupas ķīmiskie elementi ar nr.57–71 Mendeļejeva periodiskajā tabulā. Retzemju elements tiek izvēlēts tā, lai būtu ārējās enerģijas absorbcijas zonas un inversijas apdzīvotība. Leģējošā elementa jonu absorbcijas un emisijas spektrs kopā ar piemaisījumiem nosaka iespējamus pumpēšanas viļņa garumus, kā arī tās viļņa garumu robežas, kurās ir iespējams lietderīgās stimulētās emisijas process (skat.1.10.att).



1.10. att. Zudumu mehānisms silīcija šķiedrā un retzemju elementu emisijas viļņa garumi [94].

Pirmajam caurspīdības logam pie viļņa garuma 1300 nm (O-josla) atbilst prazeodīms (Pr^{3+}), savukārt telekomunikācijās izmantojamam 1500 nm diapazonam (C-josla) – erbijs (Er^{3+}). No 1.8. arī redzams, ka kombinējot erbiju ar iterbiju ir iespējams paplašināt pastiprinājuma spektru līdz S-joslai. Ņemot vērā to, ka prazeodīma leģētās šķiedras pastiprinātāji šobrīd nav komerciāli izplatīti, jo optimālā pumpēšanas efektivitāte tiek sasniegta tikai tad, ja leģētās šķiedras diametrs ir mazāks par standarta optiskās šķiedras diametru – dotā darba ietvaros tie netika pētīti.

Enerģijas līmeņu pārejas retzemju elementiem, kuru praktiski izmanto šķiedru lāzeru un pastiprinātāju izveidē ir parādītas 1.11. attēlā. Tālāk tiek aprakstītas katra retzemju elementa raksturīgākās īpašības ar uzsvāru uz tām energoefektīvajām pārejām, kuras veicina stimulētās emisijas procesu. Vadoties pēc fizikālo parametru analīzes, ir novērtētas izmantošanas iespējas optiskā signāla pastiprināšanas risinājumu izstrādē.



1.11. att. Retzemju elementu enerģijas līmeņu shēma [103].

Neodīms (Nd^{3+}) Neodīma joniem ir izteiktas absorbcijas joslas redzamajā un infrasarkanajā diapazonā, taču ierosināšanai uz augstāko līmeni $^4F_{5/2}$ – ir jāizmanto pusvadītāju starojuma avots ar viļņa garumu 0,8 μm . Spīdības pamatjoslas ir izvietotas 0,92 μm , 1,06 μm un 1,34 μm diapazonā, no kurām efektīvākā ir 1,06 μm josla, kas atbilst enerģētiskajai pārejai $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ (dzīves ilgums ierosinātajā līmenī 0,5 ms) [103]. Neodīma leģētās šķiedras pastiprinātāji *NDFA* (*Neodymium Doped Fiber Amplifier*) darbojas 1340 nm viļņu diapazonā un pirmajā caurspīdības logā pie 1310 nm ir maz efektīvi. Bet, neodīma šķiedras ar dubulto membrānu var izmantot jaudīgajos lāzera avotos, kuru izejas jaudas pārsniedz vairākus kilovatus. Turklāt, plaša caurlaides josla ir piemērota arī ultraīsiem impulsam [101].

Holmijs (Ho^{3+}) Energoefektīvais pārejas process notiek starp līmeņiem $^5J_7 \rightarrow ^5J_8$ pie viļņa garuma ap 2 μm . Holmija leģētajām šķiedrām atbilst ierosināšanas viļņa garumi 1150 nm un 1950 nm. Ar holmija joniem leģētās šķiedras pastiprinātājs tiek izskatīts kā perspektīvs risinājums optiskā signāla pastiprināšanai 2050–2130 nm spektrālajā joslā, taču šobrīd tāds risinājums ir tikai izpētes stadijā un nav praktiski realizēts.

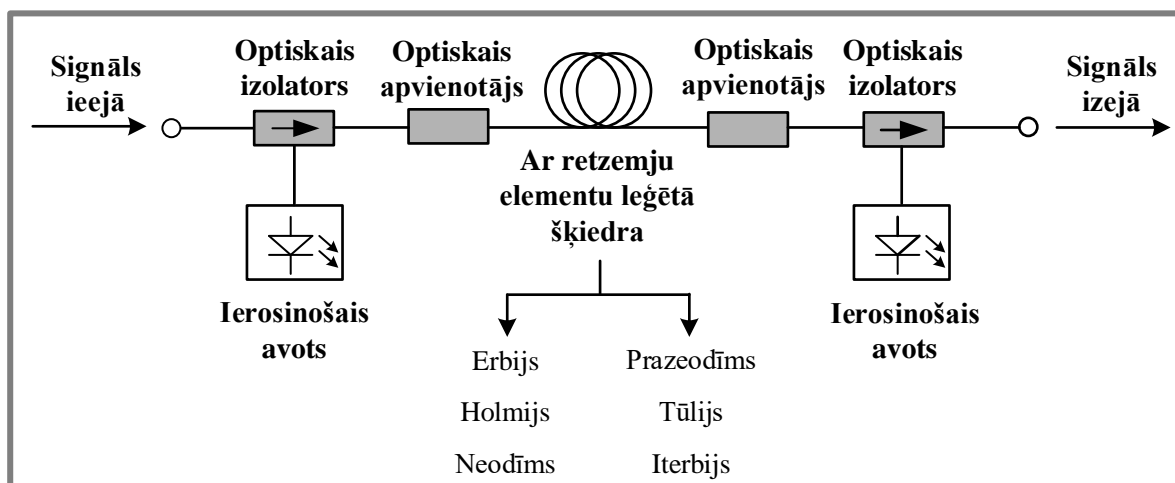
Erbijs (Er^{3+}) Erbija joniem ir raksturīga aktīvā pāreja starp līmeņiem $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ pie viļņa garumiem 1,53–1,60 μm un dzīves ilgums metastabilajā līmenī sastāda 10–12 ms. Erbija leģētās šķiedras pastiprinātājs *EDFA* (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) ir mūsdienās visplašāk

izmantots leģētās šķiedras pastiprinātājs, jo darba diapazons pilnīgi sakrīt ar telekomunikāciju pārraides sistēmās izmantotās optiskās šķiedras caurspīdības logu 1550 nm (t.i., minimālu zudumu diapazons vienmodas šķiedrai). Pumpēšanas efektivitāte ar erbiju leģētajai šķiedrai ir tuvu 100 % [101], [103].

Tūlijs (Tm^{3+}) Izstarojums notiek starp līmeņiem $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ ar ierosināšanu joslā pie viļņa garuma 790 nm vai 3H_5 pie viļņa garuma 1060–1250 nm. Lāzera starojuma spektrālais diapazons ir robežās 1850–2100 nm ar dzīves ilgumu metastabilajā līmenī 0,2 ms. Tūliju leģētās šķiedras pastiprinātājiem *T DFA* (*Thullium Doped Fiber Amplifier*) ir divi viļņa garumu diapazoni, kur notiek efektīvā stimulētā emisija: 1460 un 1650 nm. Tiem raksturīgas lielas izejas jaudas piesātinājuma režīmā, zems trokšņa faktors un polarizācijas neatkarīgs pastiprinājuma koeficients. Gadījumā, kad izejas jaudas ir ļoti lielas, tūlijam tiek pievienots iterbijs. Ņemot vērā minēto, *T DFA* ir viens no daudzsoļākajiem risinājumiem viļņgarumdales blīvēšanas sistēmas S-joslai (1460–1530 nm). Turklāt, kombinējot to ar *EDFA*, ir iespējams palielināt caurlaides joslu [81].

Iterbijs (Yb^{3+}) 1.11. attēla ir redzams, ka salīdzinājumā ar citiem elementiem iterbija enerģijas līmeņu struktūra ir vienkāršāka. Pamatlīmenim $^7F_{7/2}$ ir tikai viens līmenis $^2F_{5/2}$, respektīvi, iterbija leģētajai šķiedrai ir tikai viena absorbcijas josla ar sarežģītu formu, kura izveidojusies Starka sadalīšanās rezultātā. Absorbcijas joslai atbilst divi maksimumi ar centrēšanu pie 915 nm un 976 nm, tāpēc ierosināšanai parasti tiek izmantoti pusvadītāju lāzeravoti. Stimulētās emisijas spektru nosaka pāreja starp līmeņiem $^2F_{5/2} \rightarrow ^7F_{7/2}$ ar maksimumiem pie 978–972 nm, kā arī 1030–1040 nm. Dzīves ilgums metastabilajā līmeni sastāda 0,8 ms.

Vienkāršota ar retzemju elementiem leģētās optiskās šķiedras pastiprinātāja blokshēma ar diviem ierosinošiem avotiem ir parādīta 1.12. attēlā, savukārt tabulā 1.1. retzemju elementi tiek salīdzināti pēc emisijas viļņa garumiem un materiāla, no kura tiek ražota leģējamā optiskā šķiedra. Kā redzams, pārsvarā tiek izmantota silīcija dioksīda šķiedra, taču iespējams izmantot arī fosfātu un fluorīdu šķiedras.



1.12. att. Vienkāršota ar retzemju elementiem leģētās optiskās šķiedras pastiprinātāja blokshēma [82].

Aktīvo jonu, leģējamo elementu un emisijas viļņa garumu salīdzinājums [57]

Retzemju elementa jons	Leģējamās optiskās šķiedras materiāls	Emisijas viļņa garums
Neodīms (Nd^{3+})	Silikāta un fosfātu stikls	1,03–1,1 μm ; 0,9–0,95 μm ; 1,32–1,35 μm
Iterbijs (Yb^{3+})	Silikāta stikls	1,0–1,1 μm
Erbijijs (Er^{3+})	Silikāta, fosfātu un fluorīdu stikls.	1,5–1,6 μm ; 2,7 μm ; 0,55 μm
Tūlijs (Tm^{3+})	Silikāta, germānāta, fluorīdu stikls.	1,7–2,1 μm ; 1,45–1,53 μm ; 0,48 μm , 0,8 μm
Holmijs (Ho^{3+})	Silikāta, fluorcirkonāta stikls.	2,1 μm , 2,9 μm

Kā jau tika minēts, optiskā signāla pastiprināšana ar retzemju elementiem leģētajā šķiedrā sākas, kad ierosinošais fotons ierosina jonu zemākajā līmenī un tas pāriet uz augstāko enerģētisko līmeni. Absorbcijas un emisijas procesu starp diviem enerģētiskajiem līmeņiem raksturo absorbcijas un emisijas izkliedes šķērsgrīzumi $\sigma_{21}(\omega)$ un $\sigma_{12}(\omega)$, kas atbilst sakarībai [51]:

$$\sigma_{21}(\omega) = \sigma_{12}(\omega) \exp\left(\frac{\varepsilon T - \hbar\omega}{k_B T}\right), \quad (1.8)$$

kur k_B – Bolcmaņa konstante, T – absolūtā temperatūra un $\varepsilon(T)$ enerģijas daudzums, kas nepieciešams jona ierosināšanai augstākajā līmenī pie temperatūras T .

Absorbcijas un emisijas šķērsgrīzumi definē pastiprinājuma koeficientu, kurš ir viens no svarīgākajiem optiskā pastiprinātāja parametriem:

$$g(\omega) = \sigma_{21}(\omega)N_2 - \sigma_{12}(\omega)N_1, \quad (1.9)$$

kur: N_1 un N_2 ir attiecīgo enerģētisko līmeņu apdzīvotības blīvumi.

Ir gadījumi, kad leģējošās vielas joni absorbē ierosinošos fotonus un pastiprināšana nenotiek. Izplatītākās destruktīvās parādības ir pastiprinātā spontānā emisija ASE (angl. *Amplified Spontaneous Emission*) un signāla ierosinātā stāvokļa absorbcija ESA (angl. *Excited State Absorption*). ASE izpaužas kā spontāns signāls, pat tad, ja ieejā nekā nav un tas izsauc spontānus trokšņus. ESA gadījumā jons, kurš jau atrodas metastabilajā līmenī tiek atkārtoti ierosināts ar signāla fotonu un pārceļts uz vēl augstāko līmeni. Tāds process samazina metastabilā līmeņa apdzīvotību un atbilstoši – maksimāli iespējamo pastiprinājuma koeficientu.

Leģētais šķiedras posms, kas nepieciešams darbībai pastiprināšanas režīmā ir ļoti mazs (apmēram daži desmiti uz miljoniem apkārtējo atomu), tāpēc par aktīvo elementu jonu koncentrācijas mērvienību tiek pieņemta ppm (angl. *parts per million*, vai mlj^{-1}) [107].

Aktīvo jonu koncentrācija optiskās šķiedras serdenī ietekmē pastiprinājuma kvalitāti – jo lielāka koncentrācija, jo augstāka pastiprināšanas pakāpe. Taču tā nedrīkst būt pārāk liela, jo tad joni sāk veidot koncentrācijas atsevišķos apgabalos, jeb kamolus, un pastiprinātāja darbība pasliktinās. Faktiski atbilstošo jonu koncentrācija šķiedras serdenī nosaka to garumu, kas tiek

izmantots pastiprinātājā pie uzdotiem signāla un pumpēšanas līmeņiem. Lielākajai daļai komerciāli pieejamo šķiedru jonu koncentrācija ir robežās no 10 līdz 1000 ppm, taču tiek veikti pētījumi, kas vērsti uz augsti leģēto šķiedru izgatavošanu ar koncentrāciju, kas pārsniedz 1000 ppm [107].

Visām ar retzemju elementiem leģētajām šķiedrām ir sarežģīts laušanas koeficients, tāpēc tehnoloģijas ziņā šādu šķiedru ražošanas process ir ļoti smalks un darbietilpīgs. Ir jāņem vērā vairāki fizikālie un ķīmiskie faktori: leģējošā materiāla viendabīgums, iespēja nodrošināt pietiekoši augstu aktīvo jonu koncentrāciju un leģēt šķiedras ar lieliem serdeņa diametriem, kā arī iespējamie zudumi no piemaisījumu absorbcijas un izkliedes [28], [73], [102].

Šobrīd ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru ražošanā pārsvarā tiek izmantotas divas metodes: modificētās ķīmiskās tvaika fāzes nogulsņēšanas metode (angl. *modified chemical vapor deposition* – *MCVD*) un kompānijas *LIEKKI* izstrādāta tiešās nanodaļiņu nogulsņēšanās tehnika (angl. *Direct nanoparticle deposition* – *DND*). *MCVD* metodes pamatā ir kvarca iegūšana SiCl_4 oksidēšanas rezultātā ar turpmāko SiO_2 un GeO_2 pulvera nogulsņēšanos iekš rotējošās turbīnas. Praksē silīcija šķiedru leģēšana ar *MCVD* tehniku ir lēns process, turklāt retzemju elementu joni bieži vien veido klasterus. *DND* tehnoloģijas ietvaros visas sastāvdaļas, kas nepieciešamas šķiedras sagataves izveidei tiek nogulsnētas vienlaicīgi un pa tiešo (process ietver tikai vienu soli) [90].

Šķiedras konstrukcijā ir nozīmīgi tādi parametri kā modas lauka diametrs *MFD* (angl. *mode field diameter*) un skaitliskā apertūra *NA* (angl. *numeric aperture*), kura *EDF* šķiedrām parasti ir robežās no 0,23 līdz 0,25; laušanas koeficients un nogriešanas viļņa garums. Svarīgi ir arī tas, ka leģētās šķiedras serdeņa diametrs ir gandrīz uz pusi mazāks nekā standarta vienmodas šķiedrai līdz ar ko, lai nodrošinātu abu šķiedru savienošānu ar maziem zudumiem ir nepieciešamas speciālās iekārtas un programmatūra [107].

1.2. tabulā ir apkopoti tipveida ar erbiju leģēto optisko šķiedru (*EDF*) parametri, jo šobrīd tieši erbija šķiedras tiek visplašāk izmantotas ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju izveidē. Redzams, ka leģējošam retzemju elementiem var tikt pievienoti dažādi piemaisījumi: alumīnijs (Al_2O_3), fosfors (P_2O_5) un germānijs (GeO_2). Piemaisījumus parasti pievieno ar mērķi palielināt šķiedras laušanas koeficientu, taču savietojamības process atkarīgs no retzemju elementa daļējā spiediena, skābekļa daļējā spiediena un nogulsņēšanās temperatūras [107].

1.2.tabula

Raksturlielumu diapazons tipiskajām ar erbiju leģētajām šķiedrām C-joslā [107]

Viļņa garums (nm)	1520–1560
Modas pēdas diametrs	5,4–7,4 pie 1550 nm
Šķiedras diametrs (mm)	125±2.0
Šķiedras pārklājuma diametrs (mm)	250±15
Skaitliskā apertūra	0,21–0,24
Absorbcija pie pumpēšanas viļņa garuma (dB /m)	3,5–13,0 pie 980 nm
Šķiedras serdeņa materiāls	$\text{Er}^{3+} \text{Al}_2\text{O}_3 \text{GeO}_2 / \text{SiO}_2$

1.4. Optisko parametrisko pastiprinātāju darbības apskats

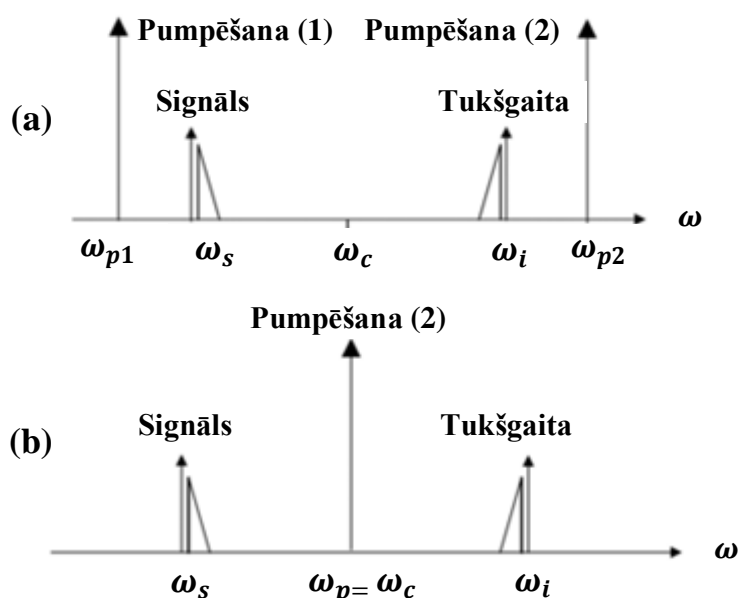
Parametrisko optisko pastiprinātāju *FOPA* (angl. *fiber optical parametric amplifier*) darbības pamatā ir četru viļņu mijiedarbes (*FWM*) efekts un trešās kārtas Kerra nelinearitāte λ^3 . Četru viļņu mijiedarbe (angl. *four wave mixing* – *FWM*) ir optisko šķiedru intermodulācijas fenomens, kas noteiktos apstākļos izraisa jaunu optisko viļņu rašanos pie jaunām frekvencēm, ja šķiedrā tiek palaisti vairāki optiskie signāli.

Četru viļņu mijiedarbi izraisa nelineārā polarizācija, kas pie noteiktiem apstākļiem var veicināt elektromagnētiskā viļņa ģenerēšanu ar jaunu frekvenci. *FWM* ir nelineārs, parametrisks process, ko izraisa Kerra efekts optiskajā šķiedrā. To var novērot, ja divi vai trīs optiskie viļņi ar dažādiem viļņu garumiem vienlaicīgi izplatās optiskajā šķiedrā. Gadījumā, kad šķiedrā izplatās trīs viļņi ar atšķirīgām frekvencēm ω_i , ω_j un ω_k , tiek ģenerēts ceturtais vilnis ar frekvenci ω_{ijk} , kuru var aprēķināt kā:

$$\omega_{ijk} = \omega_i + \omega_j - \omega_k \quad (1.10)$$

Minēto procesu sauc par nedeģenerēto četru viļņu mijiedarbi *NDFWM* (angl. *non-degenerate four wave mixing*). Ir iespējamās daudzas permutācijas no ω_i , ω_j un ω_k .

Savukārt, ja optiskajā šķiedrā izplatās tikai divi viļņi ar atšķirīgām frekvencēm, tad šāds process tiek saukts par daļēji deģenerētu četru viļņu mijiedarbi *PDFWM* (angl. *partially degenerate four-wave mixing*). Šajā gadījumā viens no sākotnējiem viļņiem izteiksmē (1.10) aizstāj gan ω_i , gan ω_j un tiek ģenerētas divas jaunas frekvences. Izteiksme (1.10) ļauj noteikt *FWM* izraisītā viļņa frekvenci, taču tas nedod nekādu informāciju, vai šis process notiks vai nenotiks, jo to savukārt nosaka fāzu saskaņotības nosacījums.



1.13. att. Parametrisko optisko pastiprinātāju izejas spektra shematisks attēlojums ar diviem pumpējošiem avotiem (a) un vienu pumpējošo avotu (b) [58].

Parametriskajā optiskajā pastiprinātājā viens vai divi viļņi ar leņķiskajām frekvencēm ω_{p1} un ω_{p2} darbojas kā ierosinošie avoti. Stoksa un anti-stoksa komponentes tiek attiecīgi definētas kā signāla un tukšgaitas viļņi. Respektīvi, ja uz ieeju tiek padots signāls ω_s , kurš atbilst pumpēšanas virzienam, ir ģenerēts jaunais vilnis pie frekvences ω_i , kurš pieaug līdz ar ieejas signālu, bet tukšgaitas spektrs ir derīgā signāla spoguļattēls ar centrālo frekvenci $\omega_c = \left(\frac{\omega_{p1} + \omega_{p2}}{2}\right)$. No minētā izriet, ka $\omega_s + \omega_i = 2\omega_c$. Turklāt, tukšgaitas spektrs ir apgriezts un kompleksi konjugēts. Dotais process ir attēlots 1.13.attēlā, kur ir shematiski parādīti *FOPA* izejas spektrs ar diviem pumpējošiem avotiem (a) un vienu pumpējošo avotu (b) [58].

Vispārīgākais *FOPA* darbības režīms ir pie nosacījuma, kad ieejā ir gan signāla, gan tukšgaitas komponentes, kuru amplitūdas var atšķirties. Apzīmējot tukšgaitas signālu ar $s(i)$ un pieņemot, ka tiek izmantota šķiedra bez zudumiem (vājinājuma koeficients $\alpha = 0$), sakarība starp optiskā parametriskā pastiprinātāja ieejas lauku $A_{k,in}$ un izejas lauku $A_{k,out}$ ($k = s, i$) izskatīsies sekojoši:

$$\begin{bmatrix} A_{s,out} \\ A_{i,out}^* \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} A_{s,in} \\ A_{i,in}^* \end{bmatrix}, \quad (1.11)$$

kur: $\begin{bmatrix} \cosh(\delta) & \sinh(\delta) \\ \sinh(\delta) & \cosh(\delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & s \\ s & c \end{bmatrix}$ ir inversā matrica un operands (*) apzīmē fāzes konjugāciju. Lai nonāktu pie formulā (1.11) redzamās reprezentācijas, tiek ieviestas fāzes nobīdes ieejā un izejā (attiecīgi c un s), kas atbilst nosacījumiem: $c^2 - s^2 = 1$; $c \pm s = e^{\pm\delta}$. No šejienes izriet parametriskā pastiprinātāja funkcija, kura izskatās sekojoši:

$$\delta = \sinh^{-1} \left[\frac{\gamma P_0}{g} \sinh(gL) \right], \quad (1.12)$$

kur: γ – šķiedras nelineārais koeficients; L – šķiedras garums; P_0 – summārā ierosinošā avota jauda (izmantojot divus avotus pieņem, ka jauda tiek sadalīta vienādi $P_0/2$); g – parametriskais pastiprinājuma koeficients vājo signālu režīmā, kurš tiek definēts kā $g^2 = (\gamma P_0)^2 - (k/2)^2$; k – kopējā viļņu vektora nesakritība: $k = \Delta\beta + \gamma P_0$ – diviem ierosinošiem avotiem un $k = \Delta\beta + 2\gamma P_0$ – vienam ierosinošam avotam, $\Delta\beta = \beta(\omega_s) + \beta(\omega_i) - \beta(\omega_{p1}) - \beta(\omega_{p2})$ ir lineārais viļņu vektora nesakritības koeficients, kuru nosaka tikai šķiedras dispersijas raksturlielumi un visu četru viļņu frekvences; $\beta(\omega)$ ir attiecīgais viļņu vektors pie frekvences ω [58].

Kā jau tika minēts, atšķirībā no citiem dotajā darbā aprakstītajiem pastiprinātājiem, stimulētās emisijas process parametriskajos pastiprinātājos ir balstīts uz materiāla nelineārajām īpašībām. Respektīvi, tiem ir raksturīgas vairākas īpašības, kuras varētu būt izmantotas pastiprinātāju efektivitātes uzlabošanā. Piemēram, zemāks trokšņa faktora parametrs, ātrgaitas signāla apstrāde, darbība viļņa garumu diapazonā, kurš atbilst optiskās šķiedras nulles dispersijas diapazonam u.c. Nozīmīgākās no šādām īpašībām ir aprakstītas zemāk [60], [93], [12].

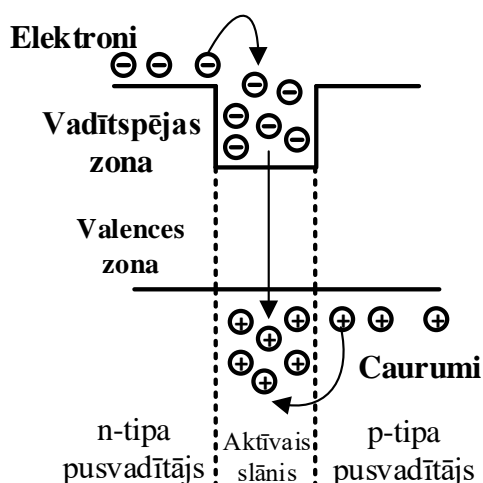
- a) **Regulējams pastiprinājuma spektrs.** Optiskā pastiprinājuma spektru pārsvarā nosaka šķiedras dispersijas raksturlielumi. Respektīvi, spektrs paplašinās līdz ar ierosinošā avota jaudas pieaugumu (jau ir eksperimentāli dati par vairākiem simtiem nm, kas pārsniedz EDFA raksturīgos 35 nm).
- b) **Regulējamā centrālā frekvence.** Mainoties viļņa garumam, Kerra nelinearitātes izmaiņas ir ļoti mazas, tāpēc faktiski parametrisko pastiprinājumu ir iespējams dabūt pie patvaļīgā pumpēšanas viļņa garuma. Vienīgais ierobežojums ir attiecīgo šķiedras dispersijas raksturlielumu nodrošināšana.
- c) **Viļņa garuma konversija.** Zināms, ka darbības pamatā ir četru viļņu mijiedarbības process, tāpēc, izmantojot vienu vai divus jaudīgus pumpēšanas avotus un ievadot ieejā vājo signālu – jaunais (tukšgaitas vilnis) pieaugs līdz ar signālu pastiprinātājā. Turklāt, tukšgaitas signāla informācija būs identiska nesošā signāla informācijai, bet ar citu frekvenci. Minētā īpašība ir aktuāla maršrutēšanas tehnoloģijās.
- d) **Fāzes konjugācija.** Tukšgaitas signālam raksturīga fāzes apvērse, ko var pielietot dispersijas kompensācijai pārraides šķiedrās, kā arī citu nelineāro efektu ietekmes samazināšanai.
- e) **Signālu apstrāde impulsu režīmā.** Kerra nelinearitātes atsaucē laiks ir tikai dažas femtosekundes, līdz ar ko ir iespējams regulēt pastiprinātāja parametrus pie ļoti lieliem pārraides ātrumiem (līdz pat teraherzu diapazonam).
- f) **Troksņa faktors (NF) - 0 dB.** Darbības pamatā ir vienādas fāzes un amplitūdas nodrošināšana gan ieejas, gan tukšgaitas signālam, līdz ar ko teorētiski troksnim jābūt 0 dB. Protams, praktiskā izmantošana pārraides līnijās rāda troksni arī parametriskajā pastiprinātājā, jo ir zudumi optiskajās šķiedrās, bet tās parasti nepārsniedz 3 dB, kas ir uz pusi mazāk nekā EDFA, kur troksņa faktora vērtības var sasniegt 6 dB un vairāk.

Apkopojot augstāk minētās īpašības, var secināt, ka salīdzinājumā ar *EDFA* jūtīgākie pēc fāzes parametriskie pastiprinātāji nodrošina zemāko troksņa faktoru, kā arī tiem piemīt signāla formas atjaunošanas funkcija (2R). Turklāt, parametriskajiem pastiprinātājiem ir raksturīgas lielas izejas jaudas (30 – 70 W) un augsts pastiprinājuma koeficients (līdz 50 dB). Tomēr, neskatoties uz visām priekšrocībām, šobrīd *FOPA* nav tendēts pilnībā aizvietot tradicionālos ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājos daudzkanālu *WDM* sakaru sistēmās. Viens no galvenajiem iemesliem ierobežotai *FOPA* izplatībai ir sarežģīta realizācija. Piemēram, veidojot parametriskos pastiprinātājus ir jāievēro vairāki nosacījumi: jānodrošina pilnīgā sinhronizācija pēc fāzes, stingri jākontrolē optiskās šķiedras garums, jākontrolē tukšgaitas viļņa stāvoklis un pastiprinājuma līmenis, kā arī pumpēšanas intensitāte [58], [67], [86].

Papildus minētajiem faktoriem, ir jāņem vērā hromatiskās un polarizācijas modu dispersijas ietekme, kas ir īpaši nozīmīgi ierosināšanas un signāla viļņa sinhronizācijas gaitā. Respektīvi, mūsdienās parametriskie optiskie pastiprinātāji pārsvarā tiek izmantoti lielā mēroga kontinentālajos tīklos.

1.5. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju darbības izpēte

Pusvadītāju optiskā pastiprinātāja (angl. *Semiconductor Optical Amplifier* – *SOA*) uzbūve ir līdzīga pusvadītāju lāzera uzbūvei ar rezonatora spoguļa atstarošanas koeficientu tuvu nullei. Atšķirība ir tāda, ka ieejas signāls iziet caur aktīvo vidi, iniciējot stimulēto emisiju un atbilstoši arī optiskā signāla pastiprinājumu. Respektīvi, fotona emisiju veicina elektronu un caurumu rekombinācija pusvadītājā tiešās strāvas iedarbībā, nevis ārējā pumpēšana ar optisko starojumu (1.14.att). Aktīvo vidi veido plāns kristālisks viļņveida slānis (*GaAl*)*As* starp *p* – vai *n* – tipa pusvadītājiem caur kuru tiek laista elektriskā strāva.



1.14. att. Elektronu un caurumu rekombinācijas process pusvadītāju optiskajā pastiprinātājā [97].

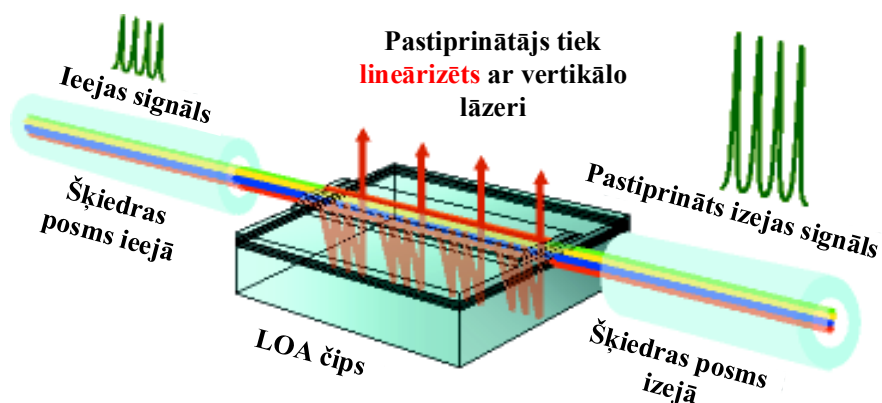
Konstruktīvi *SOA* tiek veidots uz aktīvās vides – taisnstūrveida pusvadītāja kristāla pamata. Kristāla ieejas un izejas šķautnes pārklātas ar $\lambda/4$ biezu daudzslāņu gaisinošo pārklājumu ar salāgotu laušanas koeficientu. Pārklājums izslēdz atgriezeniskās optiskās saites un ģenerāciju veidošanos. *SOA* un šķiedras savienošana jeb optisko vidi nodrošina pussfēriskas lēcas.

Viena no galvenajām *SOA* priekšrocībām ir plaša caurlaides josla, jo tie darbojas 1310 nm, 1400 nm, 1550 nm un 1610 nm viļņa garumu diapazonā, kā arī pastāv iespēja šo diapazonu paplašināt izmantojot lāzerus ar vairākiem kvantu punktiem. Otra nozīmīga priekšrocība ir mazi izmēri, kas nodrošina ērtu savietojamību ar citām optiskajām komponentēm, līdz ar ko *SOA* bieži izmantoto kā priekšpastiprinātājus, lai palielinātu raidītāja jūtīgumu. Svarīgi atzīmēt arī to, ka pusvadītāju pastiprinātāju darbībai nav nepieciešamas lielas ierosinošā avota jaudas. Tas ir iespējams pateicoties īsajam elektrona dzīves ilgumam augstākajā līmenī.

Pusvadītāju optiskajiem pastiprinātājiem raksturīgs augsts trokšņa faktors (no 7 līdz 12 dB), izteikta nelineāro efektu ietekme (starpkanālu šķērsmodulācija un četru viļņu mijiedarbība), pārejas trokšņi, kā arī lieli zudumi savienojumos. Turklāt, salīdzinājuma ar *EDFA* tie ir jūtīgi pret polarizāciju – divos ortogonālos stāvokļos pastiprinājuma vērtības var atšķirties par 4 – 8 dB.

Atšķirībā no ar retzemju elementiem iegūto šķiedru pastiprinātājiem, *SOA* praktisko izmantošanu ierobežo dažas konstruktīvās nepilnības – aktīvā slāņa šķēsgriezuma izmērs sastāda mikrona vienības, bet raidošai optiskajai šķiedrai tas ir ievērojami lielāks, tāpēc daļa gaismas nenonāk aktīvajā vidē un tiek izkliedēta. Rezultātā samazinās pastiprinātāja lietderības koeficients. Piemēram, maksimāli iegūstama signāla izejas jauda parasti nepārsniedz 10 mW [38]. Ņemot vērā minētos trūkumus, *SOA* izmantošana viļņgarumdaļes blīvēšanas sakaru sistēmās nav izdevīga, taču tie labi darbojas kā viļņa garuma pārveidotāji. Praksē pusvadītāju optiskos pastiprinātājus visbiežāk izmanto dispersijas kompensācijai, jo ir iespējams mainīt impulsu secību un atbilstoši arī dispersijas zīmi [109], [110].

Pēdējā laikā tiek plaši pētīts jauns pusvadītāju optisko pastiprinātāju tips ar pastiprinājuma koeficienta stabilizācijas funkciju, ko sauc par lineāro optisko pastiprinātāju *LOA* (angl. *linear optical amplifier*). Lineārais pusvadītāju pastiprinātājs sastāv no standarta *SOA* un vairākiem Brega atstarotājiem ar ļoti augstu atstarošanas koeficientu. Brega atstarotāji tiek izvietoti gan virs, gan zem aktīvās zonas un veido rezonatoru, kas kopā ar aktīvo vidi imitē lāzeri ar vertikālo rezonatoru *VCSEL* (angl. *Vertical-cavity surface-emitting laser*) [105]. Lineārā pastiprinātāja blokshēma ir parādīta 1.15.attēlā.



1.15. att. Lineārā pusvadītāju optiskā pastiprinātāja blokshēma [105].

Aktīvā vide tiek ievietota lāzera rezonatorā, kurš darbojas ārpus ieejošā optiskā signāla viļņa garumu diapazona. Pie šādiem nosacījumiem ieejas signālam nokļūstot rezonatorā mainīsies tikai izejas jauda, bet pastiprinājuma koeficients paliks bez izmaiņām. T.i. ģenerācijas režīmā zudumi rezonatorā un pastiprinājuma koeficients sakrīt pēc vērtības. Respektīvi, *VCSEL* lāzera izstarotā jauda darbojas kā pamatstarojums un nodrošina konstantu pastiprinājuma koeficientu. Lineāros optiskos pastiprinātājus ir iespējams izmantot jebkurā sakaru līnijas posmā 1300–1700 nm viļņu garumu diapazonā. Salīdzinājumā ar parastajiem pusvadītāju pastiprinātājiem *LOA* ir noturīgāks pret šķērstrokšņiem, kā arī nav atkarīgs no viļņa garuma un datu pārraides ātruma. Šobrīd lineārie optiskie pastiprinātāji pārsvarā ir izpētes stadijā un komerciāli netiek plaši izmantoti, taču nākotnē tas varētu būt perspektīvs risinājums *SOA* efektivitātes uzlabošanai [23], [56], [105].

1.6. Kombinēti optiskie pastiprinātāji

Optimālam pastiprinātājam, kuru izmanto šķiedru optikas pārraides sistēmās, jāatbilst sekojošiem pamatkritērijiem: jānodrošina plašs pastiprinājuma spektrs un augsts pastiprinājuma koeficients uzdotajā frekvenču diapazonā. Turklāt, jāminimizē lineārie un nelineārie signāla kropļojumi, kā arī trokšņa faktors. Ņemot vērā minēto, ir aktuāls tāds risinājums, ka kombinētie pastiprinātāji. Par kombinēto optisko pastiprinātāju (hibrīdpastiprinātāju) tiek uzskatīts dažāda tipa pastiprinātāju kaskādes slēgumi. Kombinēto pastiprinātāju risinājumi tiek pētīti vadoties pēc sekojošiem mērķiem:

- platjoslas sakaru sistēmu kapacitātes palielināšana;
- sakaru sistēmas kanālu skaita palielināšana pie uzdotā starpkanālu intervāla;
- nelineāro efektu ietekmes samazināšanas iespēja.

Hibrīdpastiprinātāju izstrāde ir sarežģīts process, jo ir jāņem vērā gan pastiprinātāju savstarpējais izvietoējums kaskādes slēgumā, gan arī katra konkrētā pastiprinātāja fizikālie parametri [50], [66]. Atkarībā no funkcionālās nozīmes kaskādes slēgumā var tikt apvienoti gan dažāda veida ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāji, gan arī Ramana un pusvadītāju pastiprinātāji.

a) **EDFA un sadalītais Ramana pastiprinātājs** Visplašāk izmantotais kombinētais risinājums pastiprinājuma spektra izlīdzināšanai. *EDFA* – Ramana pastiprinātāju lietderīga īpašība ir iespēja samazināt trokšņa faktoru, jo, kā jau tika minēts 1.2. nodaļā – Ramana pastiprinātājiem trokšņa faktors ir mazāks nekā *EDFA*.

b) **EDFA–EYCDFA** Līdzīgi *EDFA* – Ramana risinājumam, erbija – iterbija leģētās šķiedras hibrīdpastiprinātāja izmantošana kopā ar *EDFA* dod iespēju izlīdzināt pastiprinājuma spektru, jo tiek samazināts koncentrācijas slāpēšanas efekts, tādējādi palielinot pastiprinājuma efektivitāti.

c) **TDFA–EDFA** Parasti abi pastiprinātāji tiek saslēgti virknē un gan erbija, gan tūlija leģētajam šķiedrām jābūt ar pakāpjveida laušanas profilu. Šāda kombinācija ir viens no perspektīviem risinājumiem, jo dod iespēju paplašināt viļņa garumu diapazonu no 1430 nm–1530 nm. Vadoties pēc veiktajiem pētījumiem, jau ir eksperimentāli iegūts 20 dB pastiprinājums ar trokšņa faktoru mazāko par 7 dB [79].

d) **TDFA–Ramana** Raksturīgas plašas iespējas variēt ar dažādiem ierisinošā avota viļņa garumiem, līdz ar ko teorētiski var dabūt 20–24 dB pastiprinājumu viļņa garumu diapazonā 1460–1525 nm. Starp negatīvajām īpašībām jāmin pastiprinātās Releja izkliedes ietekme, ko ienes Ramana pastiprinātājs [32], [44].

1.7. Optisko pastiprinātāju salīdzinājums un novērtējums

Dotajā nodaļā tika aprakstīti un salīdzināti pēc fizikālajām īpašībām izplatītāko optisko pastiprinātāju veidi: pastiprinātāji uz Briljuēna-Mandelštama un Ramana izkliedes efektu bāzes, parametriskie optiskie pastiprinātāji, lāzera tipa pusvadītāju pastiprinātāji un pastiprinātāji uz leģēto šķiedru bāzes, no kurienes izriet pētījuma priekšmeta – ar retzemju elementu joniem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju (*REDFA*) izvēles pamatojums.

Optisko pastiprinātāju, kuru darbības pamatā ir nelineārais Briljuēna-Mandelštama izkliedes efekts izmantošanu platjoslas pārraides sistēmās ierobežo šaurs pastiprinājuma spektrs, kā arī signālā frekvences nobīde attiecībā pret pumpēšanas frekvenci. Tā ir mazāka par 10 GHz.

Ramana pastiprinātājiem raksturīga plaša pastiprinājuma josla (~ 5 THz) un lielas izejas jaudas, taču tie ir jutīgi pret polarizāciju, kā arī salīdzinājumā ar *EDFA*, tiem ir zemākā pastiprināšanas efektivitāte. Tas nozīmē, ka ierosināšanai ir jāizmanto jaudīgākie lāzeri, kas ir ekonomiski neizdevīgi. Ramana optiskos pastiprinātājus ir racionālāk izmantot kopā ar *EDFA* kombinēto risinājumu izstrādē.

Parametrisko optisko pastiprinātāju izplatību ierobežo sarežģīta realizācija, jo jāņem vērā hromatiskās dispersijas, polarizācijas modu dispersijas un polarizācijas atkarīgo zudumu (angl. *polarization dependent loss*) ietekme, kas ir īpaši nozīmīgi ierosināšanas un signāla viļņa sinhronizācijas gaitā.

Pusvadītāju optiskie pastiprinātāji (*SOA*) tiek plaši pielietoti mūsdienu sakaru sistēmās pateicoties kompaktajam izmēram un energoefektivitātei, jo stimulētā emisija notiek elektriskās strāvas iedarbībā. Diemžēl, atkarība no polarizācijas, izteikta nelineāro efektu ietekme un augsts trokšņa faktors (no 7 līdz 12 dB) ierobežo *SOA* pielietošanu optiskā signāla pastiprināšanai viļņgarumdaļes blīvēšanas sakaru sistēmās.

Apkopojot visu minēto, par promocijas darba pētījuma objektu tika izvēlēti ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāji *REDFA* (angl. *Rare – earth – Doped Fiber Amplifiers*). Salīdzinājumā ar Ramana un pusvadītāju pastiprinātājiem tie nav atkarīgi no polarizācijas un ir stabili pēc temperatūras, savukārt salīdzinājumā ar parametriskajiem pastiprinātājiem *REDFA* ir vienkāršāk realizēt praktiski. Respektīvi, uzlaboto *REDFA* pastiprinātāju izstrāde ir perspektīvs virziens, jo, apvienojot dažādu tipu leģētās šķiedras, ir iespējams iegūt plašāko pastiprinājuma joslu, kur iespējamais ieguvums ir ap 35 nm atkarībā no konkrētā leģējošā elementa, kā arī lielāko pastiprinājuma koeficientu, nezaudējot enerģiju uz siltumnovadi. Turklāt šobrīd ir aktuāli veidot optiskos pastiprinātājus uz čipa, kur pamatmērķis vērsts uz pastiprinātāja izmēru samazināšanu.

Priekšizpētes rezultātā ir noteikts, ka šķiedru optikas pārraides sistēmās ar tipveida *EDFA* pastiprinātājiem ir raksturīga ierobežota caurlaides josla un lieli ienestie trokšņi. Respektīvi, ir aktuāli uzlabot šo pastiprinātāju raksturlielumus, kā arī meklēt jaunus risinājumus ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru pastiprinātāju izveidē. Par noteicošo kritēriju tiek ņemta pastiprināšanas efektivitāte, jeb iespēja nodrošināt maksimālo pastiprinājuma koeficientu. Pastiprināšanas efektivitāte ir atkarīga no daudziem faktoriem, bet galvenokārt no leģētās šķiedras uzbūves.

Respektīvi, efektīvākā pumpēšanas enerģijas pārveide pastiprinātā signāla fotonos notiek tad, ja ierosināšana un signāls koncentrējas šķiedras serdenī. Pielietojot ierosināšanu serdenī, pastiprinātāja darbība tiek novērtēta pēc pumpēšanas sliekšņa jaudas P_{th} , kura proporcionāla šķiedras efektīvajam laukumam A_{eff} , absorbētai jaudai ε_p , stimulētās emisijas šķērsgriezuma izkliedei σ_e un pumpēšanas fluorescences dzīves ilgumam t_f . Atkarībā no šķiedras uzbūves, leģējošā piemaisījuma koncentrācijas un pumpēšanas viļņa garuma, sliekšņa jaudas vērtība ir robežās no milivata daļām līdz dažām milivata vienībām. Parasti tiek izvēlēta zemāka sliekšņa jaudas vērtība, kas proporcionāli atbilst sakarībai:

$$P_{th}^{\infty} = \frac{A_{eff}}{\sigma_e \tau_f \varepsilon_p} \quad (1.6)$$

Ņemot vērā izteiksmi (1.6), optiskā pastiprinātājā efektivitātes uzlabošanai ir jāpalielina leģētās šķiedras efektīvais laukums, pumpēšanas absorbcijas šķērsgriezuma izkliede un fluorescences dzīves ilgums, savukārt jāsamazina stimulētās emisijas šķērsgriezuma izkliede. Respektīvi, viens no perspektīviem risinājumiem leģēto optisko šķiedru izstrādē ir fokusēšanās uz lielākajām efektīvā laukuma parametra vērtībām [27], [89].

Apkopojot augstāk minētos faktus, tika izvirzīts **promocijas darba mērķis**: novērtēt ar retzemju elementiem leģētu telekomunikāciju optisko šķiedru parametrus, kā arī izstrādāt risinājumu optiskā signāla pastiprināšanas diapazona paplašināšanai viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas S (1460–1530 nm) un L (1565–1625 nm) joslās.

Uztādītā mērķa sasniegšanai, bija jāveic šādi **pamatuzdevumi**:

- 1) Izpētīt optiskajās sakaru sistēmās izmantojamās ar retzemju elementiem leģētas optiskās šķiedras, to īpašības un pielietošanas iespējas optiskajos pastiprinātājos.
- 2) Izstrādāt daudzkanālu sakaru sistēmas modeli datorsimulācijas programmā ar datu pārraides ātrumu līdz 40 Gbit/s ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju novērtēšanai.
- 3) Ar datorsimulācijas programmu novērtēt pastiprināšanas efektivitāti un trokšņa faktoru atkarībā no leģētās šķiedras garuma un jaudas ar erbiju leģētajām optiskajām šķiedrām.
- 4) Ar datorsimulācijas programmu novērtēt ar iterbiju leģētu optisko šķiedru pastiprināšanas efektivitāti un trokšņa faktoru atkarībā no leģētās šķiedras garuma un jaudas.
- 5) Izmantojot iegūtos simulāciju rezultātus, eksperimentāli novērtēt pastiprinājuma koeficientu, trokšņa faktoru un pastiprinātās spontānās emisijas parametru dažāda garuma ar erbiju un iterbiju leģētām optiskajām šķiedrām.
- 6) Ar divu šķiedru šķērsnobīdes metodi nomērīt efektīvo laukumu ar erbiju un iterbiju leģētām optiskajām šķiedrām, lai novērtētu nelineāro optisko efektu izpaušmi ar retzemju elementiem leģētās šķiedrās.
- 7) Pamatojoties uz iepriekš veikto analīzi un iegūtajiem rezultātiem, izpētīt ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru kombinēto pastiprinātāju parametrus optiskā signāla pastiprināšanas diapazona paplašināšanai viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas S (1460–1530 nm) un L (1565–1625 nm) joslās un salīdzināt iegūtos rezultātus.

Pētījumu metodika:

Promocijas darba izvirzīto uzdevumu realizācija un problēmu analīze tika veikta ar skaitliskām simulācijām un eksperimentāliem mērījumiem. Skaitliskajās simulācijās, izmantojot uz nelineārā Šrēdingera vienādojuma balstītu aprēķinu algoritmu ir novērtēti ar erbiju un iterbiju leģētu optisko šķiedru parametri: pastiprinājums un trokšņa faktors.

Efektīvā laukuma mērījumi erbija un iterbijā leģētajām šķiedrām, ir veikti izmantojot šķērsnobīdes metodi ar mikropozicionieri. Metodes pamatā ir interferometriskā šķērsnobīdes efektīvā laukuma mērīšanas tehnika, kas aprakstīta avotā [19]. Mērījumu gaitā tiek iegūts tālā lauka sadalījums, kurš ar Henkeļa transformāciju tiek pārrēķināts uz tuvā lauka sadalījumu. Ar *MATLAB* programmatūru no iegūtā tuvā laukā sadalījuma ir aprēķināts šķiedras efektīvais laukums A_{eff} .

Kombinētā erbija un iterbijā leģētās šķiedras pastiprinātāja praktiskā realizācija, veikta izmantojot nepārtrauktā starojuma lāzera pamatstarojumu; ierosinošo avotu, kurš nokonfigurēts darbībai tiešajā un pretējā virzienā, kā arī saslēdzot kopā noteiktā garuma ar Er^{3+} un Yb^{3+} joniem leģēto šķiedru posmus. Pastiprinājuma spektra novērtēšanai ir izmantos spektra analizators.

Promocijas darba jaunieguvumi:

1. Izstrādāta un aprobēta šķērsnobīdes metode ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru efektīvā laukuma novērtēšanai.
2. Eksperimentāli, apvienojot ar erbiju un iterbiju leģētas šķiedras segmentus, ir iegūts pastiprinājums viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm, kas dod iespēju paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no 47 nm līdz 82 nm.

Promocijas darba izstrādes gaitā iegūtie galvenie secinājumi:

1. Veicot *EDFA* pastiprinātāja datormodelēšanu, noteikts, ka pretējā virzienā pie 1480 nm ar 30 m erbija šķiedru un 500 mW ierosinošā avota jaudu ir iespējams iegūt 40,7 dB pastiprinājuma koeficientu, kas ir par 12 dB vairāk nekā ar analogisku šķiedras garumu tiešajā virzienā.
2. Praktiski konstatēts, ka ar 15 m garo *HWT* erbija šķiedru un divvirzienu *EDFA* pumpēšanu iespējams nodrošināt 14,4 dB pastiprinājumu ar minimālo ierosinošā avota jaudu 21,3 mW. Salīdzinot ar vienvirzienu pumpēšanu, ierosināšanai ir nepieciešams par 16 mW mazāk jaudas.
3. Ar eksperimentālo šķērsnobīdes metodi noteikts, ka efektīvā laukuma vērtības erbija šķiedrai pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm – pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Iterbijā šķiedras gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks: pie 1310 nm A_{eff} ir $106,2 \mu\text{m}^2$ un pie 1550 nm – $129,2 \mu\text{m}^2$. Respektīvi, kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē ir lietderīgāk izmantot ar iterbiju leģētas šķiedras.
4. Kombinētajā ar erbija un iterbijā joniem leģētās šķiedras jaudas pastiprinātājā (*EYCDFA*) ir efektīvi izmantot īsākās iterbijā šķiedras, jo ar 10 m *YDF* tiek iegūta stabila 36 dBm (5W) izejas jauda.

5. Ar kombinēto erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāju (*EYDFA*), izmantojot pumpēšanu pretējā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, ar ierosinošā avota jaudu 13,3 dBm ir iegūts maksimālais pastiprinājuma koeficients 8,4; 15,2 dBm jaudai atbilst 5 dB pastiprinājuma koeficients. Tādējādi ar pretējo *EYDFA* konfigurāciju tiek nodrošināts jaudas ietaupījums par 2 dBm.
6. Eksperimentāli ir iegūta paplašinātā spektrālā josla 1000–1100 nm robežās, kas var tikt izmantota kā ierosinošā avota pumpēšanas viļņa garums turpmākajā *EYDFA* izpētē.

Darba **praktiskā vērtība**

1. Promocijas darba zinātnisko pētījumu rezultāti izmantoti divu Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai.
2. Izstrādāts, iesniegts un publicēts patents par ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru efektīvā laukuma mērījumiem ar šķērsnobīdes metodi (patenta pieteikuma numurs P-16-103, publikācijas datums 20.06.2018).
3. Izstrādāts un iesniegts komercializācijas pieteikums “Optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšana ar šķērsnobīdes metodi”.
4. Kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) izpētes rezultātā ar iterbija šķiedru ir iegūta aktīvā ierosināšanās pie mazajām ierosinošā avota jaudām, kas ietilpst 13–15 dBm robežās.
5. Iegūts eksperimentāls apliecinājums tam, ka, apvienojot ar erbiju un iterbiju leģētu optisko šķiedru segmentus, ir iespējams paplašināt pastiprinājuma viļņa garumu diapazonu 1000–1100 nm joslā.

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti 11 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kā arī atspoguļoti vienā publikācijā zinātniskajā žurnālā, vienā Latvijas patenta pieteikumā, astoņos rakstos pilna teksta konferenču rakstu krājumos, piecos rakstos konferenču tēžu krājumos (skat. sarakstu 1. pielikumā).

Darbā izvirzītās **aizstāvamās tēzes**

1. *EDFA* un kombinētā *EYCDFA* pastiprinātāju kaskādes slēguma izmantošana oscilatora jaudas pastiprinātāja konfigurācijā var realizēt jaudīgu gaismas avotu ar izejas jaudu līdz 35,6 dBm.
2. Ar iterbiju leģētām optiskajām šķiedrām ir nepieciešams lielāks efektīvais laukums A_{eff} nekā ar erbiju leģētām optiskajām šķiedrām, lai iegūtu lielāku optisko pastiprinājumu.
3. Izmantojot 5 m garu erbija šķiedru un 5 m garu iterbija šķiedru kombinētajā *EYDFA* pastiprinātājā, ar ierosināšanu pretējā virzienā pie jaudas līmeņa 13,4 dBm iespējams eksperimentāli iegūt 8,4 dB lielo pastiprinājumu ar 2,5 dB trokšņa faktoru.

Promocijas darba apjoms ir 103 lappuses. Tajā ietilpst ievads, četras nodaļas, literatūras saraksts un pielikumi.

Ievaddaļā ir pamatota izvēlēta pētījuma virziena aktualitāte un noteikts promocijas darba pētījuma objekts.

Darba pirmajā nodaļā ir apskatīti aktuālie ātrdarbīgo šķiedru optikas pārraides sistēmu attīstības virzieni. Ir aprakstīti un pēc fizikālajām īpašībām salīdzināti izplatītākie optiskie pastiprinātāji, vadoties pēc šādiem kritērijiem: iespējas iegūt maksimālo pastiprinājuma koeficientu ar minimālo trokšņa faktora vērtību un ierosinošā avota jaudas patēriņu.

Otrajā nodaļā ar datorsimulācijām, kā arī eksperimentāli, pētīta ar erbiju legētas šķiedras pastiprinātāja *EDFA* pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora – atkarība no legētās šķiedras garuma un jaudas. Simulācijas mērķis ir novērtēt pastiprinājuma izmaiņas un provizoriski noteikt optimālos šķiedras garumus. Par optimālo kritēriju tiek pieņemts tas legētās šķiedras garums, ar kuru var iegūt maksimālo pastiprinājuma koeficientu. Ņemot vērā simulāciju rezultātus, ir veikti praktiskie eksperimenti pastiprinājuma efektivitātes novērtēšanai.

Darba trešajā nodaļā ir eksperimentāli nomērīts efektīvā laukuma A_{eff} parametrs ar erbiju un iterbiju legētām šķiedrām, izmantojot šķērsnobīdes metodi pie diviem viļņu garumiem: 1310 nm un 1550 nm.

Ceturtā nodaļa ir veltīta ar iterbiju legētu optisko šķiedru (*YDF*) lietošanas izpētei *EDFA* efektivitātes uzlabošanā. Veiktajiem pētījumiem ir divi posmi. Sākumā pētītas iterbija šķiedras fizikālās īpašības, stimulētās emisijas norises process un izanalizēta *YDF* izmantošana pastiprinājuma viļņa garumu diapazona paplašināšanai. Ar datorprogrammu ir modelēts oscilatora jaudas pastiprinātājs *MOPA*, lai novērtētu kombinētā pastiprinātāja izejas jaudas gadījumā, ja tiek izmantotas gan ar erbija, gan ar iterbija joniem dubultlegēta šķiedra. Nākamajā posmā ir veikta kombinētā ar erbiju un iterbiju legētās šķiedras pastiprinātāja *EYDFA* eksperimentāla realizācija, lai novērtētu *EDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora uzlabošanas iespējas, pievienojot ar erbiju legētajai šķiedrai papildus ar Yb^{3+} joniem legētas šķiedras posmu.

Nobeiguma daļā ir apkopoti promocijas darba galvenie secinājumi, kā arī dots īss ieskats turpmākajos pētījumos.

2. EDFA PASTIPRINĀTĀJA DARBĪBAS NOVĒRTĒJUMS ATKARĪBĀ NO LEĢĒTĀS ŠĶIEDRAS GARUMA UN IEROSINOŠĀ AVOTA JAUDAS.

Nozīmīgākie tehniskie parametri, kas nosaka ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju darbības efektivitāti ir pastiprinājuma koeficients, piesātinājuma jauda, pastiprinātā spontānā izstarojuma jauda un trokšņa faktors. Piesātinājuma jaudas parametrs raksturo pastiprinātāja maksimālo izejas jaudu un tas atšķiras katram konkrētajam *EDFA* modelim.

Svarīgākais optiskā pastiprinātāja raksturlielums ir pastiprinājums, kurš rodas gadījumā, kad ierosinošās jaudas iedarbībā tiek sasniegta maksimālā apdzīvotības inversija. Pastiprinājuma lielumu galvenokārt ietekmē momentānā signāla frekvence, kā arī lokālās iekšējās plūsmas intensitāte pastiprinātājā. Piemēram, apskatot aktīvo vidi kā viendabīgi paplašinātu divu enerģētisko līmeņu modeli, lokālais pastiprinājuma koeficients ir izsakāms kā [5]:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + \frac{P}{P_s}}, \quad (2.1)$$

kur: g_0 – pastiprinājuma koeficienta pīķa vērtība, ω – krītošā optiskā signāla frekvence, ω_0 – atomu pārejas frekvence, P – optiskā signāla jauda. Piesātinājuma jaudas parametru P_s nosaka aktīvās vides tips, savukārt parametrs T_2 tiek devēts par dipola relaksācijas laiku un ir relatīvi mazs (parasti < 1 ps) [5]. Pastiprinājuma koeficients G [dB] parāda attiecību starp signāla jaudu ieejā P_{in} un izejā P_{out} . Tas ir atkarīgs no signāla viļņa garuma, ieejas signāla jaudas un polarizācijas stāvokļa.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.2)$$

Ieviešot apzīmējumus $P(L) = P_{out}$, $P(0) = P_{in}$ un piemērojot $P(z) = P_{in} e^{gz}$, pastiprinājuma koeficients pie leģētās šķiedras garuma L tiek definēts kā $G(\omega) = e^{g(\omega)L}$. Gan pastiprinājums $G(\omega)$, gan pastiprinājuma koeficients $g(\omega)$ ir maksimāli pie nosacījuma $\omega = \omega_0$. Tie abi samazinās līdz ar signāla intensitāti, taču $G(\omega)$ krīt straujāk nekā $g(\omega)$. Praktiski pastiprinājuma koeficientam tiek piemērots apzīmējums G un tas tiek rēķināts kā jaudas attiecība pastiprinātāja izejā un ieejā, iekļaujot arī pastiprināto spontāno emisiju [31], [108]:

$$G = 10 \lg \left[\frac{(P_{out}(\lambda) - P_{ASE}(\lambda))}{P_{in}(\lambda)} \right], \quad (2.3)$$

kur: $P_{out}(\lambda)$ – jauda pastiprinātāja izejā pie viļņa garuma λ , $P_{in}(\lambda)$ – jauda pastiprinātāja ieejā pie viļņa garuma λ un $P_{ASE}(\lambda)$ – pastiprinātās spontānās emisijas jauda. Objektīvai pastiprinājuma koeficienta novērtēšanai ir jāņem vērā trīs noteicošie lielumi – vājo signālu pastiprināšanas koeficients (*gain at low signal*), pilns platums līmenī viena puse no maksimuma

(FWHM) -3 dB un piesātinājuma jauda izejā, jo tie var mainīties atkarībā no ieejas signāla viļņa garuma.

EDFA troksni definē kā pastiprināto spontāno emisiju *ASE* (angl. *Amplified Spontaneous Emission*). *ASE* pamatā ir spontāns fotonu izstarojums gadījumā, ja uz pastiprinātāja ieeju netiek padots nekāds signāls. Spontānās emisijas ietekmē ģenerēto fotonu fāzei, frekvencei un viļņa garumam ir gadījuma raksturs, jo elektrona pāreja sākotnējā stāvoklī notiek no jebkura līmeņa aktīvās vides ietvaros.

Spontānā izstarojuma spektrs atkarīgs no erbijas jonu enerģētisko zonu formas un no enerģētisko līmeņu apdzīvotības statistiskā sadalījuma. Izplatoties *EDFA* aktīvajā zonā spontāni, fotonu skaits palielinās, un tajā pašā viļņa garumā tiek ģenerēti sekundārie fotoni ar identisku polarizāciju, fāzi un izplatīšanas virzienu [74]. *ASE* nav korelēta ar pastiprinātāja ieejas signālu, bet ir tajā pašā frekvencē un atbilstoši darbojas kā trokšņa avots. *ASE* parametrs $[mW]$ ir saistīts ar pastiprinājuma koeficientu G un izsakāms kā [108]:

$$ASE = h \cdot \nu \cdot \frac{n_{sp}}{\eta} \cdot (G - 1), \quad (2.4)$$

kur: h – Planka konstante $6.6252 \cdot 10^{-34} [W \cdot s^2]$, ν – frekvence, n_{sp} – pastiprinātās spontānās emisijas koeficients un η – kvantu efektivitāte. Ideālajā gadījumā $n_{sp} = \eta = 1$, ja $G \gg 1$. Trokšņa faktors jeb trokšņa koeficients $N_f [dB]$ ir parametrs, kas parāda, kā ir izmainījusies koherentā ieejas signāla attiecība signāls-troksnis izejot cauri pastiprinātājam.

$$N_f = 10 \lg \left[\left(\frac{P_{ASE}}{h\nu \cdot \Delta\nu} \right) \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \right], \quad (2.5)$$

kur: P_{ASE} – pastiprinātās spontānās emisijas jauda, ν – signāla un atbilstošās *ASE* frekvence, $\Delta\nu$ – *ASE* viļņa spektrālā josla, P_{in} – signāla jauda pastiprinātāja ieejā un P_{out} – signāla jauda pastiprinātāja izejā. Parasti *EDFA* pastiprinātājiem trokšņa faktora vērtība ir ap 5 dB [9], [101], [106].

Praksē pastiprinātās spontānās emisijas mērīšanas un novērtēšanas process ir sarežģīts, jo pie viļņa garuma 1550 nm notiek *ASE* un derīgā signāla pārklāšanās. Turklāt, kopējā spontānā emisija pie šī viļņa garuma sastāv gan no *ASE* signāla, gan no pastiprinātās lāzera avota spontānās emisijas *SSE* (angl. *Source spontaneous emission*). Respektīvi, iekļaujot *SSE* iedarbību, kopējā trokšņa faktora izteiksme, pēc kuras tiek rēķināts trokšņa faktors būs [52]:

$$N_f = 10 \lg \left[\left(\frac{P_{ASE}}{G \cdot h\nu \cdot B_0} + \frac{1}{G} - \frac{P_{SSE}}{h\nu \cdot B_0} \right) \right], \quad (2.6)$$

kur: P_{ASE} – kopējā trokšņa spektrālā jauda ieskaitot *SSE*, P_{SSE} – lāzera avota spontānās emisijas jauda, B_0 – optiskā spektra analizatora efektīvais trokšņa joslas platums.

Apkopojot visu minēto, promocijas darba otrajā nodaļā tika novērtēta divu *EDFA* pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora atkarība no leģētās šķiedras garuma un jaudas. *EDFA* pastiprinātāja datormodelēšana ir veikta ar *RSoft Design Group*

(šobrīd *Synopsys RSoft*) izstrādāto programmu *OptSim Sample Mode* režīmā, savukārt eksperimentālie mērījumi realizēti Telekomunikāciju institūta „Šķiedru optiskās pārraides sistēmu” laboratorijā. Datormodelēšanas un praktisko eksperimentu gaitā tika novērtēta iespēja iegūt lielāko pastiprinājuma koeficienta un paplašināt viļņa garumu diapazonu.

Analītiskās priekšizpētes gaitā konstatēts, ka analizējot *EDFA* pastiprinātāja darbību, ir jāvadās pēc optimālā kritērija attiecībā pret pastiprinājuma efektivitāti. Šo optimālo kritēriju veido noteikta ar erbiju leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas kombinācija, kas nodrošinātu maksimālo pastiprinājuma koeficientu ar zemu trokšņa faktoru. Turklāt, risinājumam jābūt izdevīgam arī energoefektivitātes ziņā t.i. minimāli jāpatērē ierosinošā avota jauda. Ņemot vērā minētos nosacījumus, tika veikta *EDFA* parametru optimizācija, mērot pastiprinājuma koeficienta atkarību no ierosinošā avota jaudas dažāda garuma ar erbiju leģētajām šķiedrām.

2.1. *EDFA* modeļa apraksts *Optsim* simulācijas programmā

OptSim vidē ir pieejami dažādi *EDFA* pastiprinātāja modeļi, kurus var iedalīt divās kategorijās - vienkāršoti un fiziskie. Vienkāršotais modelis automātiski ģenerē pastiprinājumu uzdotā izejas jaudas līmeņa sasniegšanai, turpretī fiziskā modeļa darbības pamatā ir daudz sarežģītāks algoritms. Fiziskais *EDFA* modelis reprezentē detalizēto pastiprinājuma atkarību no piesātinājuma un viļņa garuma, tāpēc ir jādefinē tādi fizikāli lielumi kā leģētās šķiedras emisijas un absorbcijas koeficienti, ienestais vājinājums, kā arī pumpējošā lāzera parametri. Ņemot vērā to, ka darba gaitā ir jāmanipulē ar dažādiem leģētās šķiedras garumiem, ierosinošā avota jaudām un pumpēšanas virzieniem – simulācijām tika izvēlēts fiziskais *EDFA* modelis.

Fiziskā modeļa skaitļošanas pamatā ir *EDFA* intensitātes vienādojumu risināšana ar tā saucamo „efektīvā pārklājuma” aproksimāciju, respektīvi, katram viļņa garumam absorbcijas un emisijas koeficients [dB/m] tiek aprēķināts sareizinot absorbcijas un emisijas šķērsgriezuma laukumu [m²] ar koeficientu, kurš ir atkarīgs no šķiedras leģējošās vielas koncentrācijas un efektīvā laukuma, bet nav atkarīgs no viļņa garuma un krītošā stara optiskās jaudas [69].

EDFA intensitātes vienādojumi ir izteiksmes, kas apraksta absorbcijas un emisijas ātrumu. Piemēram, izmantojot pumpēšanu ar 980 nm ir formēts modelis ar trim enerģētiskajiem līmeņiem un gadījumā, ja paradās ierosinātā stāvokļa absorbcija (*ESA*) – tiek iekļauts arī ceturtais līmenis. Turpretī, izmantojot pretējo virzienu ar 1480 nm, bieži vien pietiek ar diviem enerģētiskajiem līmeņiem un populācijas intensitāti var aprakstīt ar vienādojumu:

$$\frac{dn_2}{dt} = +(R_{12} + W_{12})n_1 - (R_{21} + W_{21} + A_{21})n_2 \quad \frac{dn_1}{dt} = -\frac{dn_2}{dt}, \quad (2.7)$$

kur: n_1 un n_2 – pirmā ($^4I_{15/2}$) un otrā ($^4I_{13/2}$) līmeņa apdzīvotības blīvums, R_{12} – pumpēšanas absorbcijas ātrums, W_{12} – signāla absorbcijas ātrums, R_{21} – pumpēšanas emisijas ātrums; W_{21} – signāla emisijas ātrums, A_{21} – pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) ātrums. Izsakot absorbcijas un emisijas ātrumus caur pumpēšanas un signāla jaudām tiek iegūtas sakarības (2.8) un (2.9):

$$R_{ij} = \frac{P_P \sigma_{ij}^P \psi_P(R)}{h\nu_P}; i, j = 1, 2 \text{ (jauda)}; \quad (2.8)$$

$$W_{ij} = \frac{P_S \sigma_{ij}^S \psi_S(R)}{h\nu_S}; i, j = 1, 2 \text{ (signāls)}, \quad (2.9)$$

kur: $\sigma_{ij}^{PS}(v)$ – absorbcijas un emisijas šķēlums pumpēšanai un signālam (absorbcija pie $ij = 12$, emisija pie $ij=21$); $h\nu_{PS}$ – fotona enerģija un $\psi_{PS}(r, \theta)$ – normalizētās formas lineārā funkcija [26].

Intensitātes vienādojumi tiek risināti, ievērojot spektrāli stabili, stacionāru modeli dinamiskā fāzē. Aprēķinu tehnikas pamatā ir sarežģītu diferenciālo vienādojumu risināšana, ievērojot gan optiskos, gan elektriskos trokšņus, kā arī lineāro un nelineāro efektu ietekmi. Simulācijās ir piemērota laika apgabala sadales-soļa (angl. *time domain split - step*) jeb *TDSS* tehnika. Sadales-soļa metode tiek visplašāk izmantota, lai risinātu gaismas izplatīšanās vienādojumu [22]:

$$\frac{\partial A(t, z)}{\partial z} = \{L + N\}A(t, z), \quad (2.10)$$

kur: $A(t, z)$ – optiskais signāls, L – lineārais operators, kurš reprezentē dispersiju un citus lineāros efektus, N – nelineāros efektus aprakstošs operators [69].

Skaitļošanas rezultātā tiek veidotas pastiprinājuma un trokšņa faktora formas, kuras laika domēnā ir realizētas filtru veidā ar precīziem skaitliskiem algoritmiem. Ņemot vērā minēto, *EDFA* modelim ir jādefinē vairāki parametri, kurus iedala divās grupās – fizikālajos, kas apraksta uzdotās leģētās šķiedras īpašības un tādos, kas attiecas tieši uz pastiprinātāja realizēšanu (garums, vājinājums savienojumu ieejā un izejā, pumpēšanas viļņa garums, virziens u.c.). Fizikālie parametri tiek ierakstīti speciālā datu failā *DOPEDFIB.DAT*. Tie satur informāciju par absorbcijas un emisijas koeficientiem, vājinājuma vērtību uz katru metru un viļņa garumiem. Darbam tika izvēlēts standarta datu fails ar *OptSim* piedāvātiem eksperimentāliem datiem.

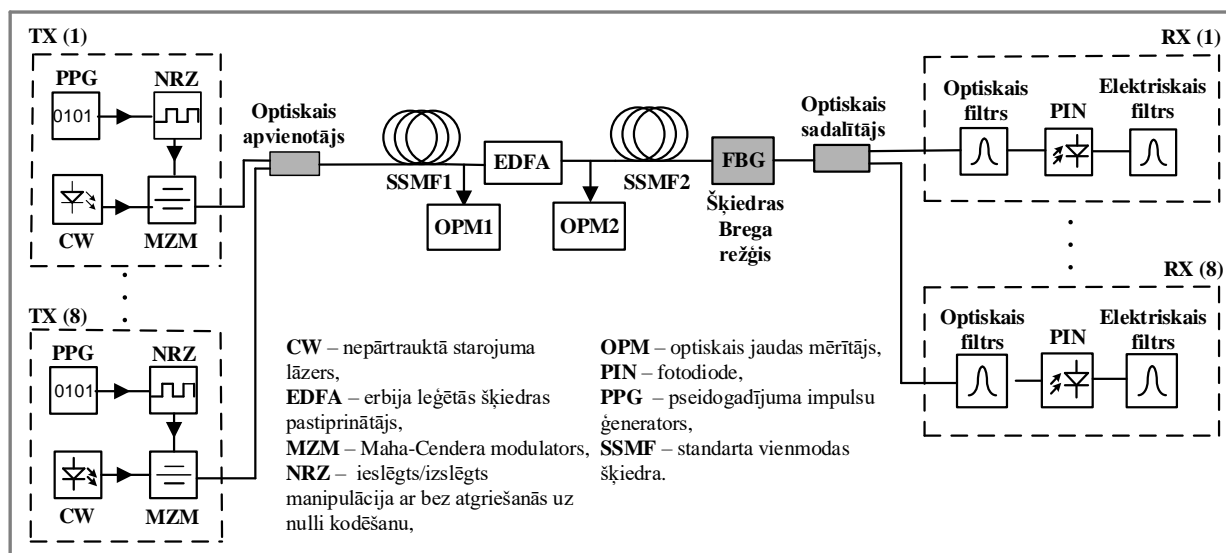
Pamatojoties uz iepriekš veiktajiem piloteksperimentiem [52], [53], *EDFA* pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora izpētei datorsimulācijas programmā tika izveidota 8 kanālu *WDM* sakaru sistēma ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s. Sakaru sistēmai ir piemērota *NRZ-OOK* (angl. *Non-Return to Zero On/Off Keying*) modulācija un 100 GHz starpkanālu intervāls, kurš ir izvēlēts saskaņā ar ITU rekomendāciju G.694.1 [37].

Respektīvi, pirmā kanāla frekvence pie viļņa garuma 1554,9 nm atbilst 192,8 THz un astotā kanāla frekvence pie viļņa garuma 1549,3 nm atbilst 193,5 THz. *EDFA* šajā sistēmā darbojas kā līnijas pastiprinātājs, jo līnijas pastiprinātājam nav izteikta nelineāro efektu ietekme.

[Leģētās šķiedras garumam jābūt tādām, lai varētu dabūt maksimālo pastiprinājumu pie uzdotās retzemju elementa jonu koncentrācijas. Gadījumā, kad šķiedra ir pārāk gara, tālajos galos parādīsies signāla absorbcija. Savukārt, ja garums būs nepietiekošs – pumpēšanas izstarojums netiks izmantots pilnā mērā. *EDF* garuma izvēli ietekmē arī pastiprināmā signāla

frekvence – jo signāla frekvence ir mazāka, jo lielāks erbija šķiedras garums ir nepieciešams [87], [106]. Izvēlētie leģētu šķiedru garumi ir 10 m, 15 m, 20 m, 25 m un 30 m, bet atbilstošas ierosinošā avota jaudas attiecīgi 200 mW, 300 mW, 400 mW un 500 mW. Minētās ierosinošā avota jaudas tika izvēlētas ar mērķi iegūt augstākas pastiprinājuma vērtības.

Pastiprinājuma un trokšņa faktora vērtības tika mērītas katrā WDM sistēmas kanālā tiešajā un pretējā virzienā – respektīvi, pie viļņa garumiem 980 nm un 1480 nm. Modelējamās sakaru sistēmas blokshēma ir redzama 2.1. attēlā.



2.1.att. Modelējamās 8 kanālu WDM sakaru sistēmas blokshēma.

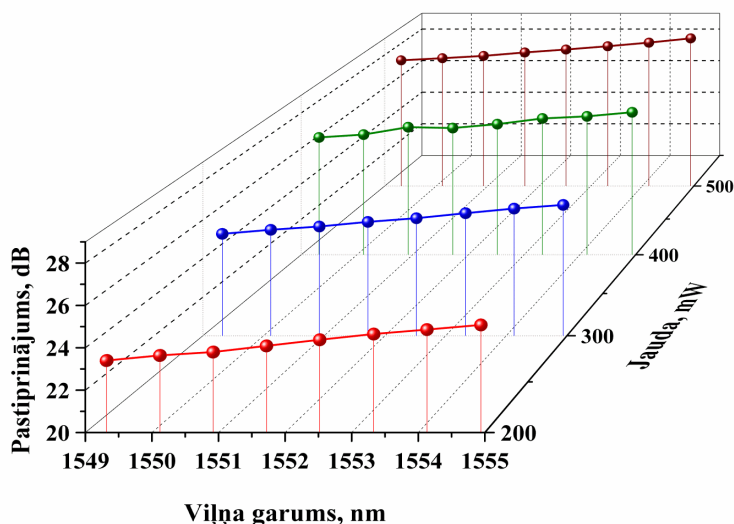
Raidītāja bloks sastāv no pseido-gadījuma impulsu ģenerators (PPG), kodu formētāja (NRZ), nepārtrauktā starojuma lāzera (CW) ar jaudu 1 mW un elektro-optiskā Maha-Cendera modulatora (MZM), kas kopā realizē NRZ-OOK modulācijas algoritmu. Pavisam tika izveidoti 8 tādi bloki atbilstoši pētāmās WDM sistēmas kanālu skaitam. Modulatora ienesto zudumu vērtība atbilst 3 dB.

Optiskā līnija, satur optiskās šķiedras ($SSMF1 = 74$ km) un ($SSMF2 = 40$ km), EDFA pastiprinātāju un dispersijas kompensācijas moduli (FBG). Šķiedru efektīvais laukums A_{eff} ir $80 \mu m^2$, dispersija $D=16$ [ps/nm/km], dispersijas slīpums $0,07$ [ps/nm²/km], vājinājums $\alpha = 0,2$ dB/km un nelineārais laušanas koeficients $2,5 \cdot 10^{-20}$ cm/W pie viļņa garuma 1550 nm.

EDFA līnijas pastiprinātāja konfigurācija tika izvēlēta, lai izvairītos no izteiktās nelineāro efektu ietekmes. Pastiprinātāja ieejā un izejā pieslēgts optiskais jaudas mērītājs OPM (angl. Optical Power Meter), lai kontrolētu signāla jaudas līmeni. Uztverošajā daļā signāls tiek detektēts ar foto uztvērēju un pārveidots elektriskajā formā.

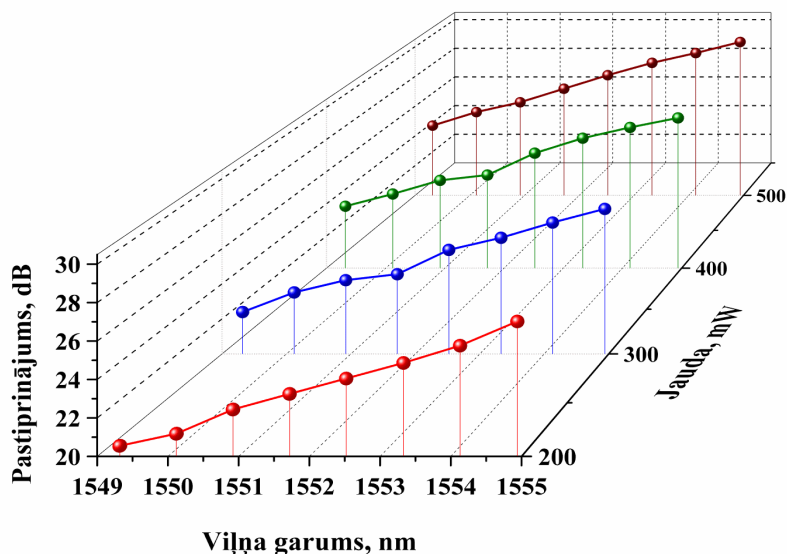
2.2. Pastiprinātāja darbības izpēte tiešajā pumpēšanas virzienā

EDFA datormodelešanas gaitā ir novērtēti optimālie pastiprinātāja parametri attiecībā pret pastiprinājuma koeficientu un trokšņa faktoru. Respektīvi – pie kādas pumpēšanas jaudas un legētās šķiedras garuma tiek nodrošināta augstāka pastiprinājuma vērtība. Analizējot *EDFA* pastiprinātāja darbību tiešajā pumpēšanas virzienā, augstākais pastiprinājuma koeficienta rādītājs atbilst 15 m un 30 m garajām legētām šķiedrām. Iegūtie rezultāti ir atspoguļoti 2.2. attēlā. Redzams, ka pie 200 mW ierosinošā avota jaudas 15 m garajai šķiedrai pastiprinājuma vērtība atbilst 24 dB un ir praktiski vienāda visiem *WDM* sistēmas kanāliem – atšķirība ir tikai 0,2 dB. Jaudai pieaugot līdz 300 mW pastiprinājuma koeficienta kāpums nav dinamisks: posmā no 1. līdz 4. pārraides sistēmas kanālam ir novērojams pieaugums par 2 decibeliem. Palielinot ierosinošā avota jaudu līdz 400 un 500 mW, pastiprinājuma koeficients pieaug par 3–4 dB, un attiecīgās vērtības sasniedz 27–28 dB. Svarīgi pieminēt, ka izmantojot 15 m garo *EDF* tiek iegūts vienmērīgs pastiprinājums visos *WDM* sistēmas kanālos.



2.2. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādam ierosinošā avota jaudām 15 m garajai *EDF* šķiedrai.

30 m garajai *EDF* šķiedrai (2.3.att.) piemērojot ierosināšanu ar 200 mW, 27 dB liels pastiprinājums atbilst 1. kanālam sakaru sistēmas kanālam. Beigu posmā (8. kanāls, 1549,3 nm) pastiprinājums lēnām samazinās līdz 20 dB. Palielinot jaudu līdz 300 – 400 mW, var novērot izteiktas pastiprinājuma koeficienta fluktuācijas – pirmajos kanālos vērtības ir 27–29 dB, bet beigās nokrīt līdz 23–24 dB. Maksimālā pastiprinājuma efektivitāte (29–30 dB) tiek sasniegta ar ierosinošā avota jaudu 500 mW. Vidējās pastiprinājuma koeficienta vērtības ar katru no legētās šķiedras paraugiem, kuras ir iegūtas saskaitot kopā rādītājus visos astoņos sakaru sistēmas kanālos, ir apkopotas 2.1. tabulā.



2.3. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 30 m garajai EDF šķiedrai.

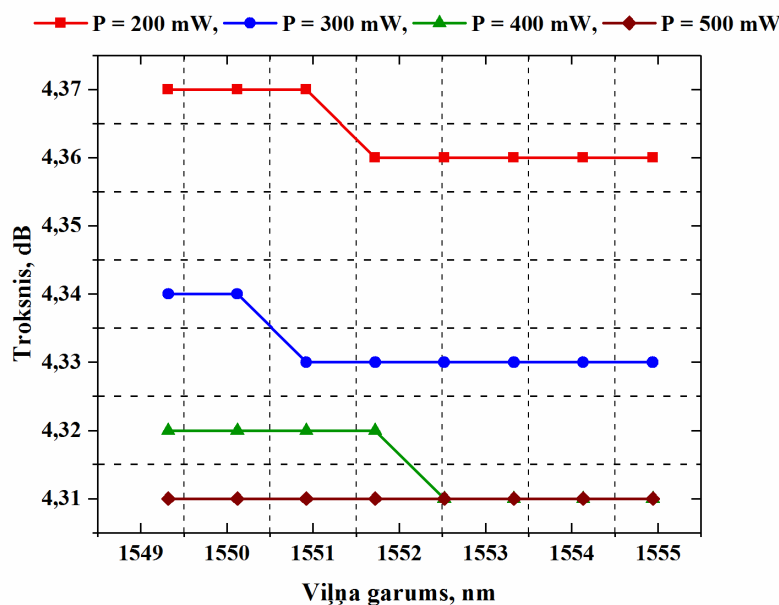
2.1. tabula

Vidējās pastiprinājuma koeficienta vērtības tiešajā pumpēšanas virzienā (980 nm)

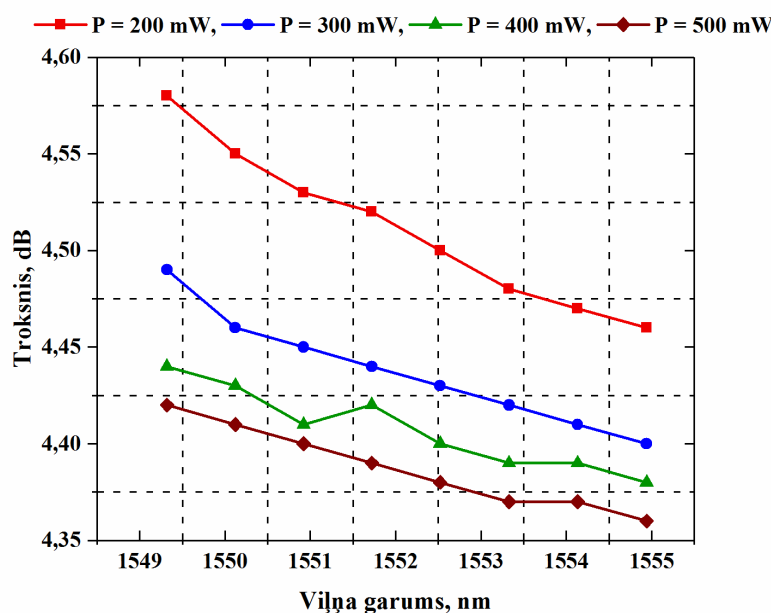
Jauda, mW	EDF = 10 m	EDF = 15 m	EDF = 20 m	EDF = 25 m	EDF = 30 m
	G, dB	G, dB	G, dB	G, dB	G, dB
200	24,0	24,2	24,1	23,9	23,6
300	25,8	26,0	25,9	25,7	25,4
400	26,1	27,7	27,2	26,1	26,6
500	27,9	28,3	28,2	27,9	27,6

Analizējot trokšņa faktora (NF) izmaiņas, nozīmīgākie rezultāti tika novēroti pie leģētās šķiedras garumiem 10 m un 30 m. Izmantojot 10 m garo erbija šķiedru (2.4.att.) NF vērtība ir pārsvarā konstanta un atbilst 4,3 dB. Mainot ierosinošā avota jaudas no 200 līdz 300 mW, trokšņa faktora izmaiņas katrā pārraides sistēmas kanālā ir ļoti mazas – par 0,1–0,2 dB. Jaudai pieaugot līdz 500 mW iegūtā trokšņa faktora līkne kļūst lineāra, kas nozīmē, ka pastiprinātās spontānās emisijas ietekme pie šādas konfigurācijas nav intensīva, un visi pārraides sistēmas kanāli tiek pastiprināti vienlīdzīgi. Aplūkojot attēlu 2.4. var novērot, ka pie īsākajiem viļņu garumiem (1549–1550 nm) NF vērtības ir augstākas nekā pie 1555 nm. Respektīvi, īsviļņu diapazonā absorbcijas un emisijas šķērsriezuma laukumi ir lielāki, līdz ar ko ir aktīvāka pastiprinātās spontānās emisijas izpausme.

Izmantojot 30 m garo šķiedru *NF* rādītājs tuvojās 5 dB, sasniedzot 4,5–4,6 dB vērtību (2.5.att). Izteiktākās trokšņa faktora fluktuācijas novērojamas pārraides sistēmas beigu posmā: 6.kanāls (1550,9 nm) pie 200 un 300 mW jaudām, kā arī 5. kanāls (1551,7 nm) pie 400 mW jaudas. Redzams, ka starpība starp trokšņa faktora vērtībām katrā kanālā joprojām ir nenožīmīga – atšķirības variējas robežās no 0,1 līdz 0,3 dB. Kopumā ar tiešo *EDFA* konfigurāciju, izmantojot 30 m garo *EDF*, ir iespējams dabūt 27 dB pastiprinājumu ar trokšņa faktoru 5 dB.



2.4. att. Trokšņa faktora raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 10 m garajai *EDF* šķiedrai.



2.5. att. Trokšņa faktora raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 30 m garajai *EDF* šķiedrai.

2.3. Pastiprinātāja darbības izpēte pretējā pumpēšanas virzienā

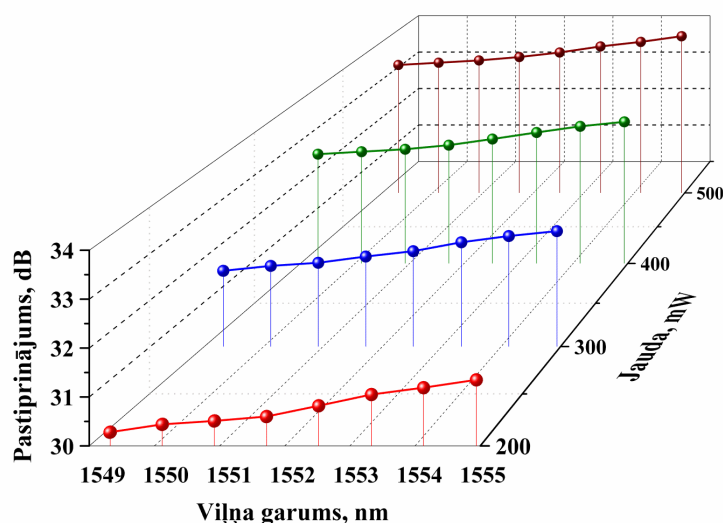
EDFA konfigurācija pretējā pumpēšanas virzienā pie viļņa garuma 1480 nm nodrošina stabilu pastiprinājumu katrā kanālā, un tas nozīmē, ka šajā gadījumā tiek ātrāk sasniegts piesātinājuma režīms. Līdzīgi kā tiešajā virzienā – arī šeit izteiktāks pastiprinājums novērojams pie leģētās šķiedras garumiem 15 m (2.6. att.) un 30 m (2.7. att.).

Izmantojot 15 m garu *EDF*, pastiprinājuma koeficients visos sistēmas kanālos stabili turas robežās 30–32 dB, kaut gan jauda katru reizi tiek palielināta par 100 mW. Pagarinot leģētu šķiedru līdz 30 m, pastiprinājuma koeficienta izmaiņas atkarībā no ierosinošā avota jaudas kļūst izteiktākas. Piemēram, pie 200 mW pastiprinājums ir 34–35 dB robežās, savukārt pie 400–500 mW jau sasniedz 40–43 dB. Vidējās pastiprinājuma koeficienta vērtības visiem leģētu šķiedru garumiem ir apkopotas 2.2. tabulā.

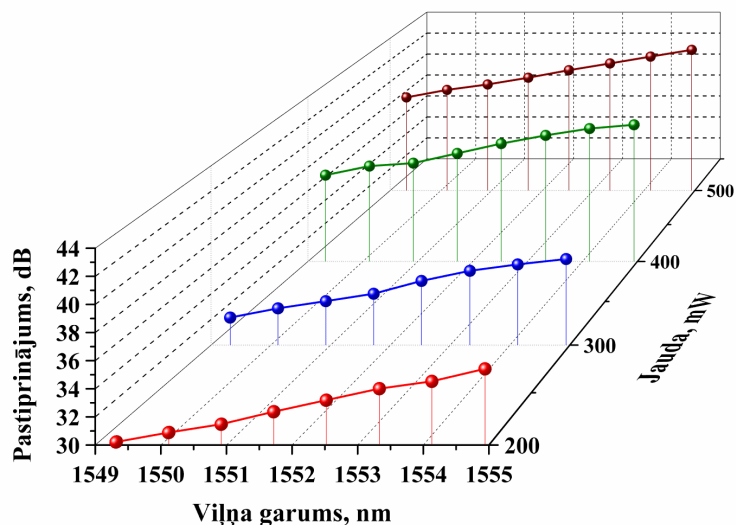
2.2.tabula

Vidējās pastiprinājuma koeficienta vērtības pretējā pumpēšanas virzienā (1480 nm)

Jauda, mW	<i>EDF</i> =10 m	<i>EDF</i> =15 m	<i>EDF</i> = 20 m	<i>EDF</i> =25 m	<i>EDF</i> =30 m
	G, dB	G, dB	G, dB	G, dB	G, dB
200	24,8	30,9	32,9	33,3	32,8
300	25,6	32,2	34,5	35,1	34,5
400	26,2	33,0	39,5	39,9	39,6
500	26,6	33,6	40,4	40,9	40,7

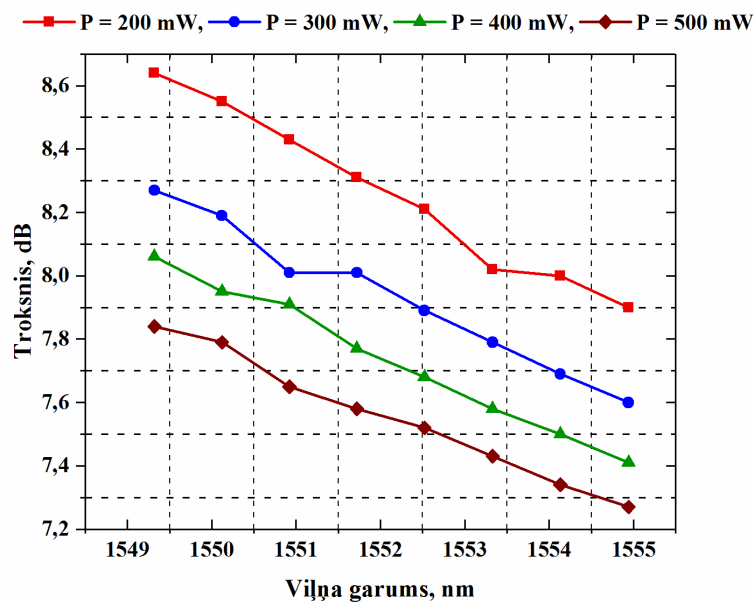


2.6. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 15 m garajai *EDF* šķiedrai.



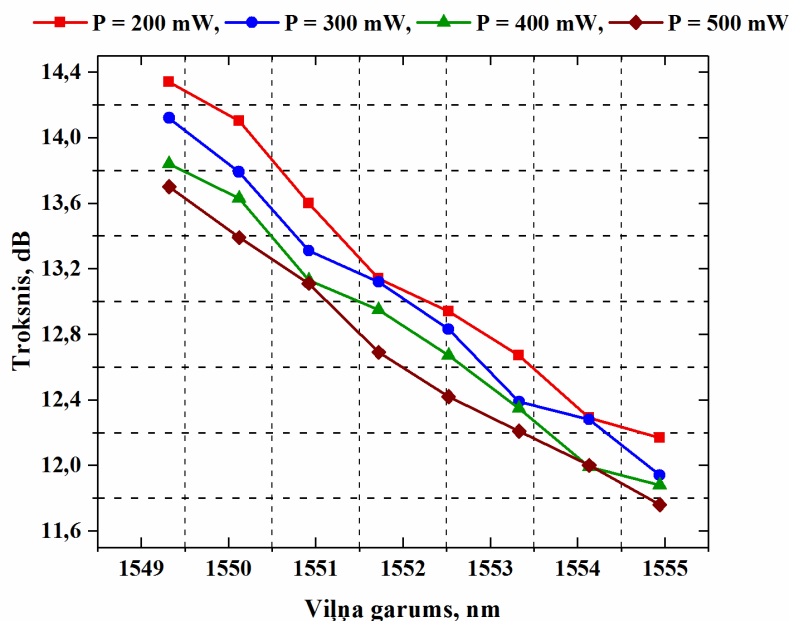
2.7. att. Pastiprinājuma raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 30 m garajai EDF šķiedrai.

EDFA konfigurācija pretējā virzienā pie 1480 nm veicina trokšņa faktora pieaugumu. 10 m un 15 m garajām EDF trokšņa faktora vērtības visos sistēmas kanālos atbilst 5–6 dB. Var teikt, ka šis rādītājs ir konstants, jo, pieaugot ierosinošā avota jaudai atšķirība sastāda vien 0,2–0,3 dB. Savukārt, pagarinot leģētu šķiedru līdz 20–25 m, troksnis pieaug līdz pat 8 dB. Nozīmīgākie trokšņa faktora mērījumu rezultāti ir iegūti ar 20 m (2.8.att.) un 30 m (2.9.att.) garajām šķiedrām.



2.8. att. Trokšņa faktora raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 20 m garajai EDF šķiedrai.

20 m garās *EDF* gadījumā trokšņa faktora koeficients ir tuvu 9 dB pie ierosinošā avota jaudas 200–300 mW, kas ir īpaši izteikts 1549–1550 nm viļņa garumu diapazonā. Pagarinot *EDF* līdz 30 m, tika iegūtas augstas trokšņa faktora vērtības, kas atbilst 12 dB sistēmas sākumposmā un līdz pat 14 dB sistēmas beigās. Augstās *NF* vērtības pretējā virzienā izskaidrojamas ar to, ka pie 1480 nm pumpēšanas enerģētiskais līmenis un ierosinātais enerģētiskais līmenis atrodas vienā joslā, līdz ar ko šādos apstākļos ir grūti dabūt pilno apdzīvotības inversiju $N_1 \sim 0$.



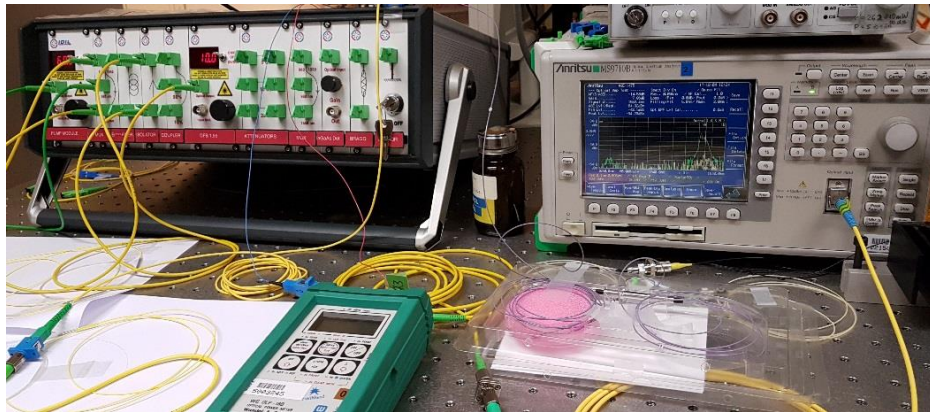
2.9. att. Trokšņa faktora raksturlīknes pie dažādām ierosinošā avota jaudām 30 m garajai *EDF* šķiedrai.

Apkopojot iegūtos simulāciju rezultātus tika konstatēts, ka ar tiešo *EDFA* konfigurāciju iespējams iegūt 24–27 dB pastiprinājumu ar stabilu trokšņa faktoru 4,4–4,5 dB robežās. Pumpēšana pretējā virzienā pie 1480 nm nodrošina lielāko pastiprinājumu līdz pat 30–40 dB, bet, pieaugot ierosinošā avota jaudai, pieaug arī trokšņa faktora vērtība, kura sasniedz 9–15 dB. *EDFA* datormodelešanas mērķis ir novērtēt pastiprinājuma koeficienta pieauguma dinamiku. Vadoties pēc iegūtajiem rezultātiem, ir secināts, ka palielinoties ierosinošā avota jaudai, pastiprinājums lineāri pieaug.

EDFA optimizācijas gaitā ir jāvadās pēc sekojošiem pamatuzdevumiem: jānodrošina augstāks pastiprinājuma koeficients, zems trokšņa faktors un maksimālā pumpēšanas efektivitāte. Praktiski šādus apstākļus ierobežo pastiprinātā spontānā emisija, kura izplatās tiešajā un pretējā virzienā, tādējādi samazinot derīgajam signālam paredzēto ierosinošā avota jaudu. Ņemot vērā minēto faktu un analizējot pastiprinājuma izmaiņas daudzkanālu sakaru sistēmas kontekstā, ir definēta “sliktākā” kanāla koncepcija, kas tālāk tika pārbaudīta eksperimentāli.

2.4. Eksperimentālais EDFA darbības novērtējums un salīdzinājums

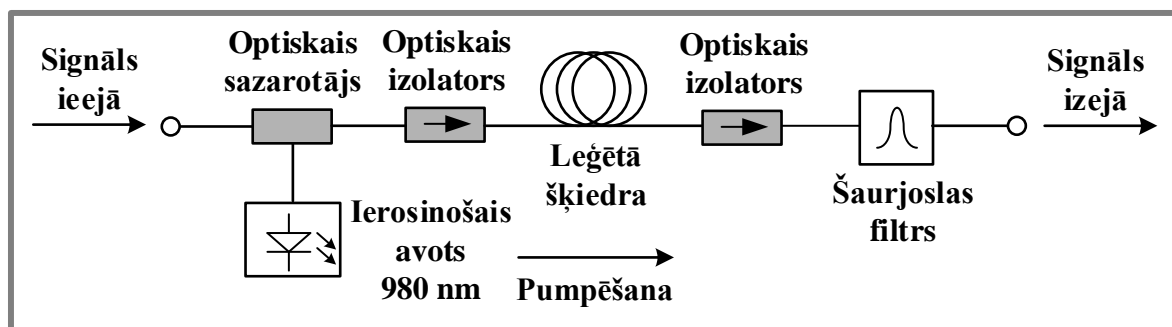
Vadoties pēc simulāciju gaitā iegūtajiem rezultātiem, kā arī iepriekš veiktajiem pētījumiem [53], RTU Telekomunikāciju institūta zinātniskajā laboratorijā ir izveidota *EDFA* eksperimentālā shēma (2.10.attēls), lai praktiski novērtētu pastiprinātāja darbību. Eksperimentālajos mērījumos ir izmantota konfigurācija ar pumpēšanu tiešajā virzienā, pretējā virzienā un divvirzienu pumpēšana. Šajos mērījumos ir izmantotas erbijs šķiedras no diviem ražotājiem: *Highwave (HWT)* un *Fibercore*.



2.10. att. *EDFA* pastiprinātāja realizācija laboratorijā.

Tika izpētīta *EDFA* spējas pastiprināt vājos signālus, kā arī noteikta pastiprinājuma efektivitāte dažāda garuma *EDF* paraugiem. Dažādu šķiedras paraugu izmantošana ir nepieciešama, lai novērtētu stimulētās emisijas dinamiku atkarībā no jaudas. Šāds paņēmieni dod iespēju atrast optimālos parametrus – leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas kombināciju, ko varētu izmantot uzlabotā optiskā pastiprinātāja izveidē.

Eksperimentālā shēma tiešajam virzienam redzama 2.11. attēlā. Ierosinošais avots darbojas pie viļņa garuma 980 nm (maksimālā jauda 80 mW) un nodrošina pumpēšanu 1550 nm joslā. Izmantotas ar erbijs leģētās šķiedras *HighWave HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* (garumi 5 m un 15 m) un *Highwave HWT-FIB-EDF-741* (garums 12 m), kuru tehniskās specifikācijas ir apskatāmas 4. pielikumā. Izmantotajām erbijs šķiedrām atšķiras tādi parametri kā absorbcijas koeficients, serdeņa rādiuss un skaitliskā apertūra, kā arī ir dažāda aktīvo jonu koncentrācija. Atšķirīgi fizikālie un ģeometriskie parametri ietekmē stimulētās emisijas norisi leģētajās šķiedrās, tāpēc ierosinošā avota jaudu diapazons katram šķiedras tipam un garumam arī ir dažāds.

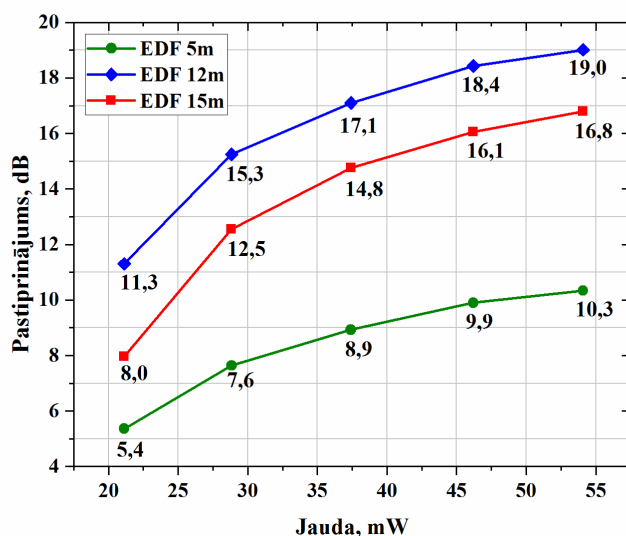


2.11. att. *EDFA* eksperimentālā blokshēma ar pumpēšanu tiešajā virzienā.

Konkrētie ierosinošā avota jaudas lielumi tika noteikti starpmērījumu gaitā, pētot ierosināšanas procesu pie dažādām jaudām, līdz ir noteikti nepieciešami parametri. Ieejas signāla līmenis visu mērījumu gaitā atbilst $-13,2$ dBm.

Sākumā ir veikti mērījumi pie zemā signāla līmeņa, jeb novērtēta *EDFA* spēja pastiprināt vājos signālus. Tas ir nepieciešams, lai iegūtu precīzāku pastiprinātāja darbības raksturojumu. Zināms, ka *EDFA* darbības pamatā ir nelineārais efekts, līdz ar ko nav racionāli veikt pastiprinājuma koeficienta mērījumus tikai pie augstā ieejas signāla līmeņa, jo netiek iegūta pietiekoši detalizēta pastiprinājuma dinamikas aina. Izvēlētie ierosinošā avota jaudas lielumi vājo signālu pastiprinājuma mērījumiem ir no 21,1 mW līdz 54,1 mW.

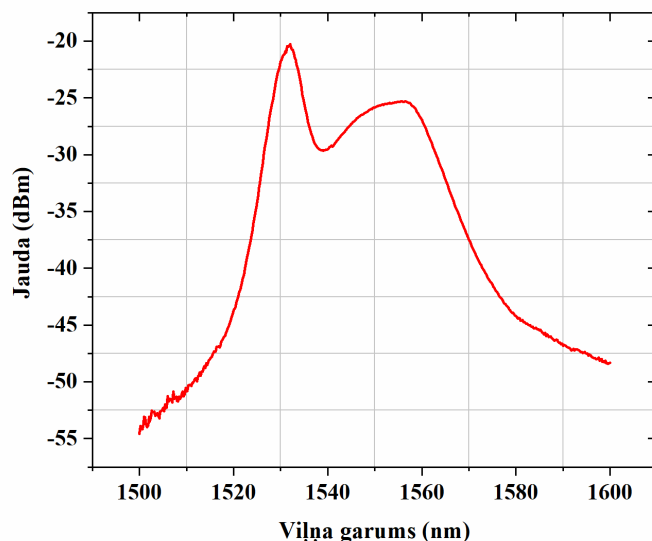
Attēlā 2.12 ir parādītas iegūtās vājo signālu pastiprinājuma raksturlīknes ar katru no minētajām erbija šķiedrām. Analizējot pastiprinājuma raksturlīknes tiešajā virzienā ir redzams, ka, pieaugot ierosinošā avota jaudai, visiem šķiedru paraugiem pastiprinājuma koeficients mainās par 1–2 dB. Energoefektivitātes ziņā optimālākais gadījums raksturīgs 12 m garajai šķiedrai, kad maksimālais 17,1 dB pastiprinājums ir iegūts pie ierosinošā avota jaudas 37,4 mW. Turklāt tika konstatēts, ka ar 15 m garo šķiedru tiek ātrāk sasniegts *EDFA* piesātinājuma režīms. Kā redzams 2.11. attēlā, palielinot ierosinošā avota jaudu no 46,2 līdz 54,1 mW, respektīvi, par 8 mW – pastiprinājums pieaug par 0,8 dB. Starp visiem paraugiem maksimālais pastiprinājuma koeficients 19,0 dB ir iegūts pie ierosinošā avota jaudas 54,1 mW.



2.12. att. Pastiprinājuma atkarība no ierosinošā avota jaudas 5 m, 12 m un 15 m garajām *HighWave* erbija šķiedrām tiešajā virzienā.

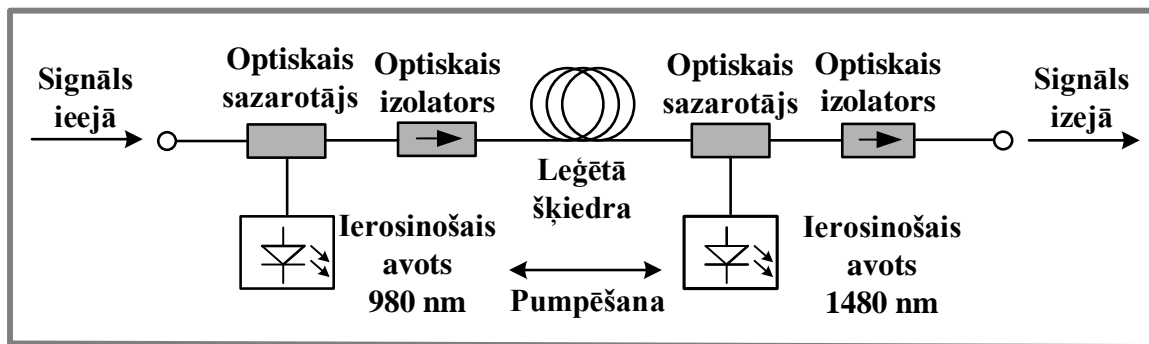
Eksperimentu gaitā tika uzņemtas arī pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) raksturlīknes, jo *ASE* ir galvenais *EDFA* trokšņa avots, kura pamatā ir elektronu un caurumu spontānā rekombinācija aktīvajā vidē. Respektīvi, fotoni tiek spontāni izstaroti visos virzienos, taču daļai no tiem izplatīšanās virziens ietilpst šķiedras skaitliskās apertūras apgabalā. Tādējādi spontāns starojums izplatās pa visu šķiedras garumu, mijiedarbojas ar erbija joniem un tiek pastiprināts ar stimulētu emisiju. Pēc būtības *ASE* spektru nosaka enerģētisko līmeņu stohastiskais sadalījums erbija atomos. Rezultātā parazitiskais *ASE* spektrs praktiski pārklājas ar lietderīgo

pastiprinājuma spektru. Salīdzinot iegūtos ASE spektrus pie ieejas signāla līmeņa -13.2 dBm, optimālākais rezultāts attiecībā pret tukšgaitas komponenti un derīgo signālu tika sasniegts ar 12 m garu EDF paraugu (2.13 attēls). Redzams, ka pie viļņa garuma 1550 nm ir visvairāk izteikts absorbcijas maksimums.



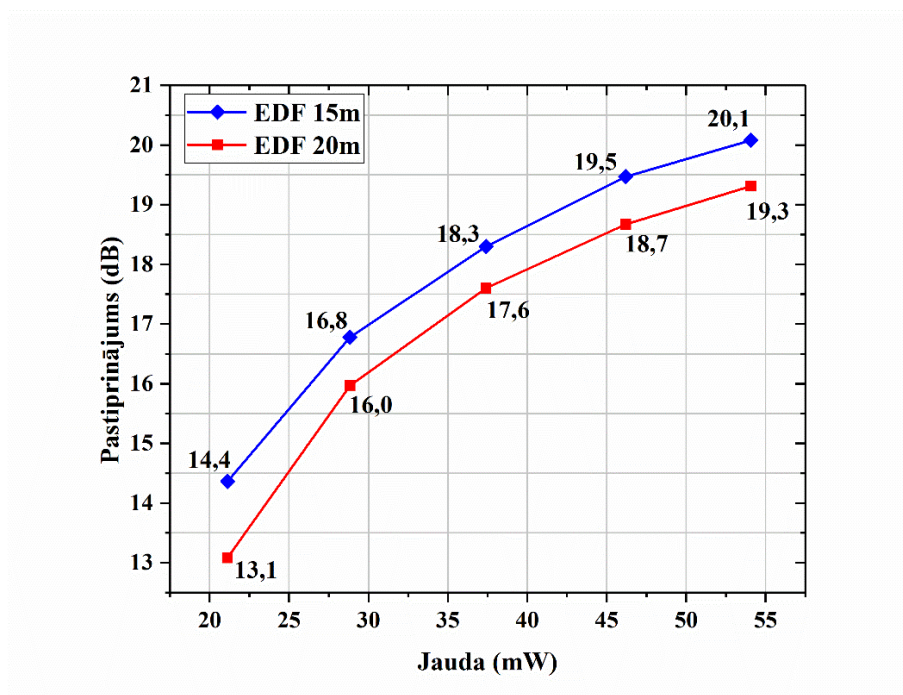
2.13. att. Pastiprinātās spontānās emisijas spektrs 12 m garajai *HighWave* erbijā šķiedrai.

Nākamajā eksperimentā tika piemērota divvirzienu pumpēšana. Teorētiski, ar divvirzienu EDFA pumpēšanu ir jānodrošina izejas jaudas pieaugums un augstāks pastiprinājuma koeficients. Šajā gadījumā ir izmantoti divi lāzeri, un notiek vienlaicīga pumpēšana savstarpēji pretējos virzienos. Pumpēšanu pretējā virzienā nodrošina 1480 nm gaismas avots, kam piemīt augsta kvantu efektivitāte un tiešajā virzienā tiek izmantots 980 nm gaismas avots. Ieejas jaudas līmenis 980 nm ierosinošam avotam paliek nemainīgs ($-13,2$ dBm), savukārt 1480 nm avota jauda nofiksēta pie līmeņa 11,2 dBm. Dotajos mērījumos tiek izmantoti erbijā šķiedras paraugi no cita ražotāja *Fibercore I-12 (980/125)*, kuru garumi atbilst 2 m un 5 m. EDFA blokshēma ar divvirzienu pumpēšanas konfigurāciju ir redzama 2.14. attēlā.



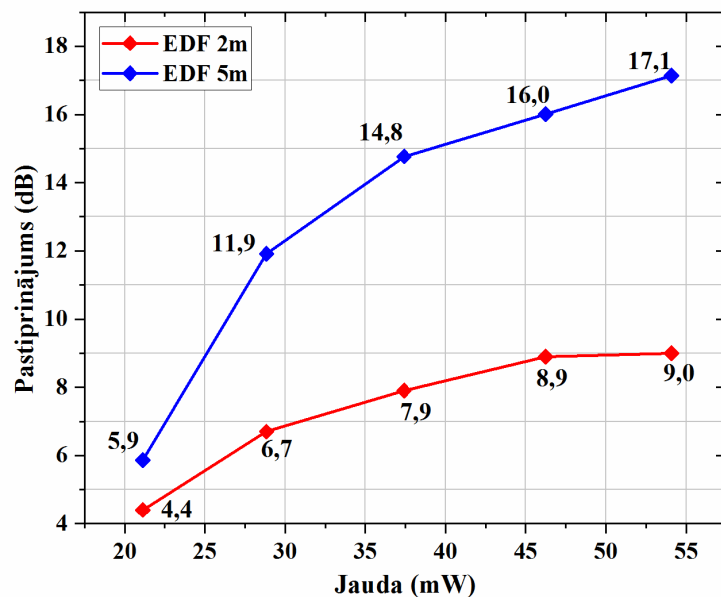
2.14. att. EDFA eksperimentālā shēma ar divvirzienu pumpēšanu.

Izmantojot vienlaicīgu pumpēšanu savstarpēji pretējos virzienos ar 15 m garo *Highwave* leģētās šķiedras paraugu (2.15 attēls) pie minimālās ierosinošā avota jaudas, kura atbilst 21,3 mW, tiek iegūts 14,4 dB pastiprinājums. Tas ir nozīmīgs rādītājs salīdzinājumā ar vienvirziena pumpēšanu, kur šāda pastiprinājuma koeficienta sasniegšanai bija nepieciešami 37,4 mW. Respektīvi, divvirzienu pumpēšanas izmantošana 15 m garās *EDF* gadījumā dod būtisku ieguvumu no energoefektivitātes viedokļa: ir nepieciešama līdz pat 16 mW mazākā jauda. Maksimāli iegūtais pastiprinājums ar 15 m un 20 m garajām šķiedrām ir 19–20 dB.



2.15. att. Pastiprinājuma atkarība no ierosinošā avota jaudas
15 m un 20 m garajām *HighWave* erbija šķiedrām izmantojot divvirzienu pumpēšanu.

Izmantojot 2 m garu *Fibercore EDF* paraugu *EDFA* darbības izpētē ar divvirzienu pumpēšanu (2.16 attēls), maksimāli iegūtais pastiprinājums ir 9 dB pie ierosinošā avota jaudas 46,2 mW. Pagarinot šķiedru līdz 5 m, maksimālā pastiprinājuma pieaugums ir 7,2 dB. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar abiem šķiedru paraugiem, var secināt, ka divvirzienu *EDFA* konfigurācijas izmantošana dod iespēju izmantot īsākas šķiedras, kas ir nozīmīgi optiskā pastiprinātāja konstrukcijā.



2.16. att. Pastiprinājuma atkarība no ierosinošā avota jaudas 2 m un 5m garajām *Fibercore* erbijā šķiedrām izmantojot divvirzienu pumpēšanu.

Tālāk tika veikti pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma mērījumi. Pastiprinājuma koeficienta piesātinājumu nosaka lokālais pastiprinājuma koeficients $g(\omega)$. Atsaucoties uz sakarību (2.1), lokālais pastiprinājuma koeficients $g(\omega)$ samazinās līdzko ieejas signāla jauda P_{in} ir pielīdzināma piesātinājuma jaudas parametram P_s .

Pieaugot signāla jaudai pastiprinājuma faktors G krīt, un minēto parādību sauc par pastiprinājuma koeficienta piesātinājumu. Pastiprinājuma faktors $G(\omega)$ un lokālais pastiprinājuma koeficients $g(\omega)$ ir maksimāli pie nosacījuma, kad momentānā signāla frekvence atbilst pastiprinājuma maksimumam ($\omega = \omega_0$).

Piesātinājuma apgabalā optiskā signāla pastiprinājums pieaug lineāri. Tas notiek tik ilgi, kamēr ieejas signāla intensitātes I_s vērtība pārsniedz piesātinājuma intensitāti I_{piesat} . Līdzko tiek saniegts *EDFA* piesātinājuma režīms, pastiprinājuma koeficients samazinās atbilstoši piesātinājuma faktora likumam:

$$\frac{1}{1 + \frac{I_s}{I_{piesat}}}. \quad (2.11)$$

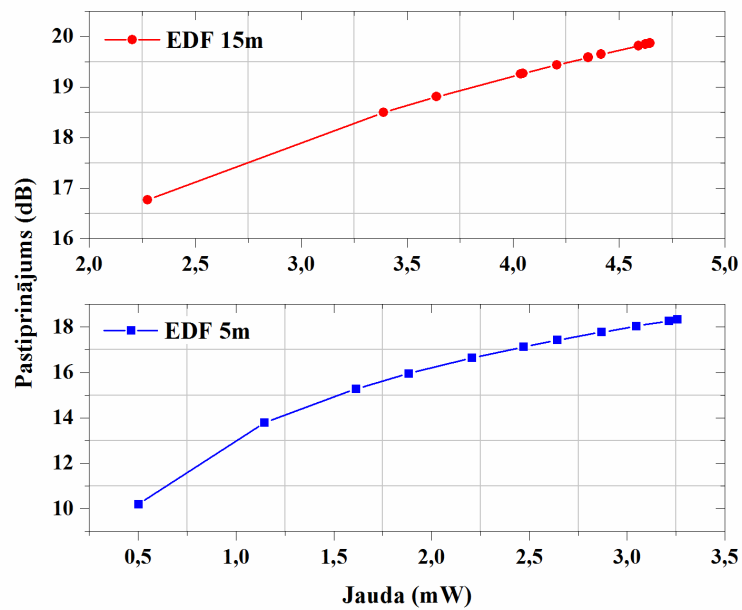
Attiecība starp I_s un I_{piesat} palielinās salīdzinājumā ar vienotību $I_s/I_{piesat} \gg 1$, un signāla izmaiņas piesātinājuma reģionā nosaka sakarība:

$$\frac{dI_s}{dz} = I_{piesat} \left(\frac{I_p - 1}{I_p + 1} \right) \sigma_s N, \quad (2.12)$$

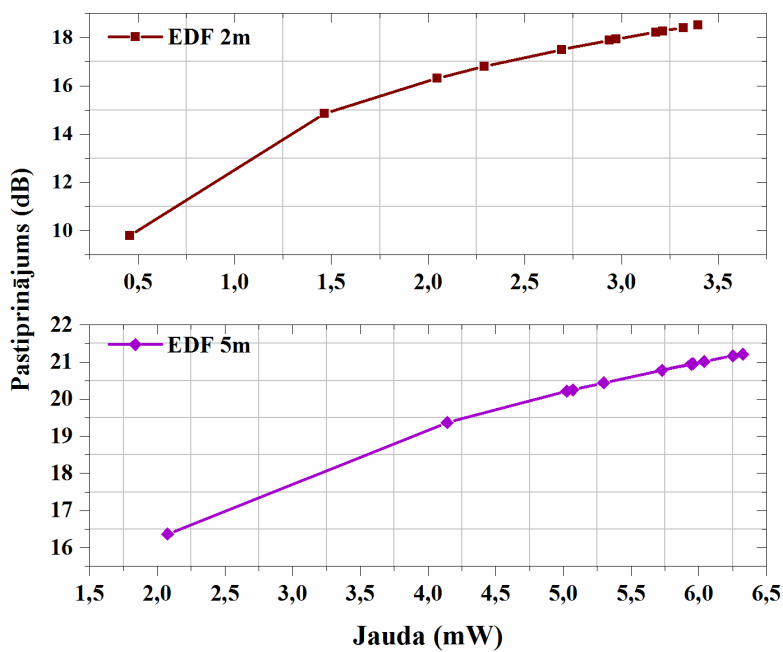
kur: I_p – pumpēšanas intensitāte, N – apdzīvotības inversija, σ_s – signāla absorbcijas un emisijas šķērsgrizumi. Piesātinājuma intensitāte I_{piesat} ir lineāri atkarīga no ierosinošā avota jaudas, kura, savukārt, nosaka pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma intensitāti. Piesātinājuma izejas jauda ir apgriezti proporcionāla šķiedras emisijas šķērsgrizumam, līdz ar ko 1530 nm apgalā piesātinājuma jaudas vērtība ir lielāka nekā pie 1550 nm [5].

Nozīmīgākie no iegūtajiem pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma mērījumu rezultātiem ar *HighWave* un *Fibercore* erbija šķiedru paraugiem ir parādīti 2.17 un 2.18 attēlos. Salīdzinot maksimālā pastiprinājuma koeficienta rādītājus 5 m un 15 m garajām *Highwave* šķiedrām (2.17.att), redzams, ka, pagarinot erbija šķiedru par 10 m, starpība starp iegūtā pastiprinājuma vērtībām ir 2 dB robežās (iegūtais pastiprinājums ir attiecīgi 18,3 dB un 19,8 dB). Analizējot iegūtos rezultātus, ir secināts, ka 5 m garu šķiedru ir izdevīgāk izmantot, vadoties pēc ierosinošā avota jaudas ietaupījuma, jo maksimālais pastiprinājums iegūts ar jaudu 3,3 mW, kas ir par 1,3 mW mazāk nekā 15 m *EDF* gadījumā (4,6 mW).

Izmantojot *Fibercore* erbija šķiedru (2.18.att) maksimāla pastiprinājuma koeficienta vērtība 2 m garajai šķiedrai ir 18,5 dB, savukārt 5 m šķiedrai tā ir 21,2 dB. No tā izriet secinājums, ka, izmantojot 5 m garu *Fibercore* paraugu, tiek iegūts par 3 dB lielāks pastiprinājums, nekā ar *Highwave EDF* pie līdzvērtīgās ierosinošā avota jaudas (3,4 mW). Apkopojot iegūtos *EDFA* piesātinājuma koeficienta mērījumu rezultātus, ir redzams, ka leģētās šķiedras garums 5 m ir optimālais risinājums gan pastiprinājuma efektivitātes, gan jaudas ietaupījuma ziņā.



2.17. att. Pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma novērtējums dažāda garuma *Highwave* erbija šķiedrām.



2.18. att. Pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma novērtējums dažāda garuma *Fibercore* erbija šķiedrām.

Kopsavilkums

Šajā nodaļā ar datorsimulācijas programmu, kā arī eksperimentāli tika pētīta ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EDFA*) pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora atkarība no leģētās šķiedras garuma un jaudas. Respektīvi, tika meklēta optimāla leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas kombinācija, kas nodrošinātu maksimālo pastiprinājuma koeficientu un zemu trokšņa faktoru.

EDFA pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora izpētei datorsimulācijas programmā *OptSim* tika izveidota 8 kanālu sakaru sistēma ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s, kur *EDFA* darbojas kā līnijas pastiprinātājs. Leģētu šķiedru garumi ir 10 m, 15 m, 20 m, 25 m un 30 m, bet atbilstošas ierosinošā avota jaudas attiecīgi 200 mW, 300 mW, 400 mW un 500 mW. Simulācijas veiktas pie starpkanālu intervāla 100 GHz.

Veicot *EDFA* pastiprinātāja darbības izpēti tiešajā pumpēšanas virzienā, augstākais pastiprinājuma koeficients tika iegūts ar 15 m un 30 m garajām leģētām šķiedrām. Zemāk ir apkopoti nozīmīgākie secinājumi un rezultāti:

- izmantojot 15 m garu erbija šķiedru un ierosinošā avota jaudu 200 mW ir iegūts 24 dB pastiprinājums, kurš ir vienmērīgi sadalīts starp visiem pārraides sistēmas kanāliem: pastiprinājuma koeficienta starpība katrā kanālā ir 0,2 dB robežās. Palielinot ierosinošā avota jaudu līdz 400 un 500 mW, pastiprinājuma koeficients pieaug par 3–4 dB, un attiecīgās vērtības sasniedz 27–28 dB. Trokšņa faktora vērtība, kas tika novērtēta pēc katrā *WDM* sistēmas kanālā pie šādas konfigurācijas ir 4,3 dB. Salīdzinot simulāciju rezultātus tika noteikts, ka konstatēts, ka tieši šāda trokšņa faktora vērtība arī ar 10 m garu *EDF* šķiedru, kur pastiprinājuma koeficienta diapazons ir 25–28 dB.
- izmantojot 30 m garu *EDF* maksimālā pastiprinājuma efektivitāte (29–30 dB) ir sasniegta, piemērojot 500 mW pumpēšanu. Trokšņa faktora rādītājs ir tuvu 5 dB (4,5–4,6 dB) robežās. Izteiktākās trokšņa faktora fluktuācijas novērojamas pārraides sistēmas beigu posmā: 6. kanāls (1550,9 nm) pie 200 un 300 mW jaudām, kā arī 5. kanāls (1551,7 nm) pie 400 mW.
- apkopojot *EDFA* simulāciju rezultātus tiešajā virzienā ar visiem šķiedru garumiem, tika konstatēts, ka, palielinot ierosinošā avota jaudu, ir iespējams iegūt vienlīdzīgi augstu pastiprinājuma koeficientu gan ar 10 m, gan ar 15 m garajām *EDF*, līdz ar ko resursu ziņā 10 m garums ir izdevīgāks risinājums.

EDFA pastiprinātāja darbības simulācija pretējā pumpēšanas virzienā parādīja, ka augstākais pastiprinājuma koeficients, kurš atbilst 40,7 dB tika sasniegts ar 30 m garu leģētu šķiedru. Pretvirziena pumpēšanas izmantošana veicina trokšņa faktora pieaugumu, kurš sasniedz 9–15 dB. Iegūtie rezultāti parāda, ka ar *EDFA* konfigurāciju pretējā virzienā pie 1480 nm tiek ātrāk sasniegts piesātinājuma režīms. Minētais secinājums izriet no tā, ka, palielinot ierosinošā avota jaudu ik par 100 mW (200–500 mW robežās), pastiprinājuma koeficienta izmaiņas nepārsniedz 1 dB.

Datormodelēšanas mērķis ir novērtēt, kā mainās pastiprinājuma pieaugums atkarībā no leģētās šķiedras garuma un ierosinošā avota jaudas. Apkopojot rezultātus ir secināts, ka

pastiprinājums lineāri pieaug, kā arī ir iegūti provizorisks leģētu šķiedru garumi, ar kuriem tālāk veikta *EDFA* eksperimentālā izpēte. Iegūtie rezultāti ir atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. Experimental measurement of erbium-doped optical fibers characteristics for EDFA performance optimization// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, – 2019. – No.2. – pp. 1–10. (*Apstiprināts publicēšanai raksts*).
2. **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Czech Republic, Prague, July 6–9. – 2015. – pp. 502–505.
3. **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Riga, Latvia, November 5–6. – 2015. – pp. 34–37.

RTU Telekomunikāciju institūta zinātniskajā laboratorijā ir veikta *EDFA* eksperimentālās shēmas izveide ar mērķi izpētīt *EDFA* darbību izmantojot pastiprinātāja konfigurāciju ar pumpēšanu tiešajā virzienā, pretējā virzienā un piemērojot divvirzienu pumpēšanu. Eksperimentālajos mērījumos ir izmantotas erbija šķiedras no diviem ražotājiem: *Highwave (HWT)* un *Fibercore*.

Izanalizējot iegūtos rezultātus vājo signālu pastiprināšanas režīmā ar *EDFA* konfigurāciju tiešajā virzienā pie 980 nm un ieejas signāla līmeņa –13,2 dBm, ir noskaidrots, ka augstākā pastiprinājuma efektivitāte ir raksturīga 15 m *HWT* šķiedrai, kur maksimālais 16,8 dB pastiprinājums ir iegūts pie ierosinošā avota jaudas 54,1 mW un 12 m garajai erbija šķiedrai, kur pastiprinājuma koeficients pie tās pašas jaudas sastāda 19,0 dB.

Ar divvirzienu *EDFA* pumpēšanu, kad 1480 nm gaismas avots (ieejas jaudas līmenis –13,2 dBm) ir pieslēgts pretējā virzienā un tiešajā virzienā tiek izmantots 980 nm gaismas avots (ieejas jauda 11,2 dBm) ir konstatēts būtisks ieguvums no energoefektivitātes viedokļa salīdzinājumā ar vienvirziena pumpēšanu:

- ar 15 m garo *Highwave* leģētās šķiedras paraugu pie minimālās jaudas, kura atbilst 21,3 mW tiek iegūts 14,4 dB pastiprinājums. Respektīvi, salīdzinājumā ar vienvirziena pumpēšanu šādam šķiedras garumam ir nepieciešama līdz pat 16 mW mazākā jauda; maksimāli iegūtais pastiprinājums ar 15 m un 20 m garajām *HWT* šķiedrām ir 19–20 dB.
- veicot mērījumus ar 2 m garu *Fibercore* šķiedras paraugu maksimāli iegūtais pastiprinājums ir 9 dB pie ierosinošā avota jaudas 46,2 mW. Pagarinot šķiedru līdz 5 m, maksimālā pastiprinājuma pieaugums atbilst 7,2 dB (attiecīgi 17,1 dB).
- eksperimentālo mērījumu gaitā konstatēts, ka divvirzienu *EDFA* konfigurācijas un *Fibercore* paraugu izmantošana dod iespēju samazināt šķiedras garumu, kas ir nozīmīgi optiskā pastiprinātāja konstrukcijā.

Tālāk tika veikti pastiprinājuma koeficienta piesātinājuma mērījumi. Salīdzinot rezultātus 5 m un 15 m garajām *HWT* šķiedrām pēc maksimālā pastiprinājuma koeficienta vērtībām, tās atšķiras par 1 dB: rezultāti ir attiecīgi 19,8 dB un 18,3 dB. *Fibercore EDF* gadījumā lielākais pastiprinājums 18,5 un 21,2 dB atbilst šķiedras garumiem 2 m un 5 m.

Apkopojot datormodelēšanas un eksperimentālo mērījumu rezultātus secināts, ka šobrīd izmantotajam *EDFA* pastiprinātājam ir raksturīga ierobežota caurlaides josla, kā arī augsts trokšņa faktora rādītājs. Turklāt, kā parādīja simulāciju rezultāti – pastiprinājums pie dažādiem viļņa garumiem ir nevienmērīgs, ko izraisa atšķirīga erbija jonu koncentrācija. Faktiski šo optisko pastiprinātāju funkcionālās iespējas ir jau izsmeltas, un daudzkanālu pārraides sistēmu caurlaides joslas paplašināšanās rada nepieciešamību pēc lielākajām *EDFA* pastiprinātāju izejas jaudām. Respektīvi, ir aktuāli risinājumi, kas vērsti uz jaunā tipa optisko pastiprinātāju izstrādi ar mērķi iegūt plašāko pastiprinājuma spektru.

Viens no šādiem risinājumiem variantiem ir kombinēto risinājumu izmantošana. Kā jau tika aprakstīts 1.6 apakšnodaļā, kombinēti optiskie pastiprinātāji tiek realizēti ar diviem paņēmieniem. Pirmkārt, ir iespējams apvienot dažāda tipa optiskos pastiprinātājus kaskādes slēgumā un otrkārt, izmantot optiskās šķiedras, kuras ir leģētas ar vairāku retzemju elementu joniem.

No veiktajiem eksperimentāliem mērījumiem ar *EDFA* ir iegūti erbija leģētu šķiedru garumi: 5 – 20 m, ar kuriem var nodrošināt augsto pastiprinājuma koeficientu 16–20 dB robežās. Turpmāk šie lielumi tiks izmantoti kombinēto risinājumu izstrādē ar mērķi novērtēt iterbija leģētu optisko šķiedru pielietošanu *EDFA* efektivitātes uzlabošanā.

Darba 3.nodaļa ir veltīta efektīvā laukuma A_{eff} izpētei ar retzemju elementiem leģētajās optiskajās šķiedrās, jo šķiedras efektīvais laukums ir nozīmīgs parametrs nelineāro efektu ietekmes analīzē.

3. EFEKTĪVĀ LAUKUMA EKSPERIMENTĀLIE MĒRĪJUMI AR ŠĶĒRSNOBĪDES METODI

Priekšizpētes rezultātā, ir secināts, ka viens no perspektīviem risinājumiem *EDFA* pastiprinātāja efektivitātes uzlabošanā ir erbijā leģētās šķiedras (*EDF*) un iterbijā leģētās šķiedras (*YDF*) apvienošana, jo, kombinējot abu šķiedru lietderīgās īpašības – *YDF* noturību pret nelineāriem efektiem un *EDF* darbību pie 1550 nm, ir iespējams paplašināt pastiprinājuma joslu. Izstrādājot optiskos pastiprinātājus, būtiski ir precīzi noteikt leģētu šķiedru parametrus, tādus kā šķiedras nelineārais koeficients un efektīvais laukums.

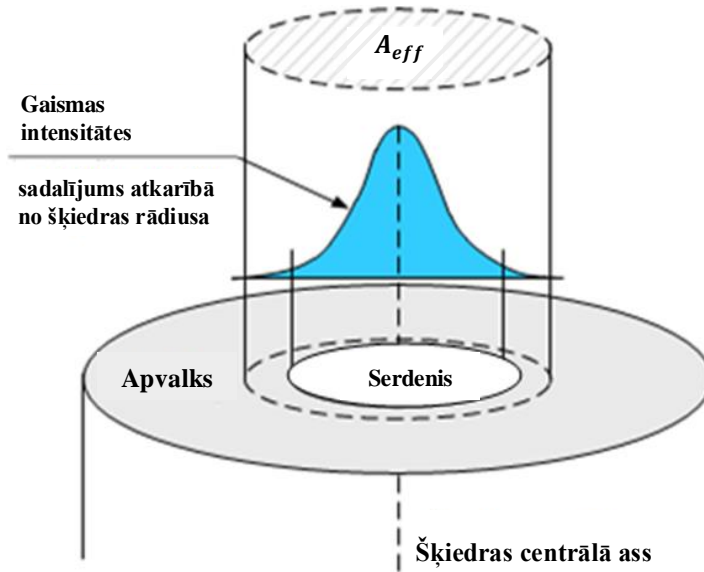
Šķiedras efektīvais laukums A_{eff} ir atkarīgs no vairākiem šķiedras parametriem, tādiem kā serdeņa rādiuss, kā arī no kodola un apvalka laušanas koeficientu starpības. Efektīvā laukuma parametram ir noteicošā loma nelineāro efektu ietekmes analīzē. Optiskā signāla kropļojumus nelineāro efektu ietekmē apraksta izteiksme:

$$kP_0L_{eff} = \frac{kP_0}{g} [\exp(gL) - 1] = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2}{A_{eff}} \frac{P_0}{g} [\exp(gL) - 1] \quad (3.1)$$

kur: k – nelineārais koeficients, L_{eff} – šķiedras efektīvais garums, n_2 – laušanas koeficients, A_{eff} – šķiedras efektīvais laukums, P_0 – vidējā ieejas jauda katrā pārraides sistēmas kanālā, g – vidējais pastiprinājuma koeficients un L – leģētās šķiedras garums. Respektīvi, analizējot izteiksmi (3.1) ir redzams, ka nelineāro efektu samazināšanas nolūkos ir jāpalielina efektīvais laukums A_{eff} un pastiprinājuma koeficients g [7]. Efektīvā laukuma parametra definīcijas pamatā ir gaismas intensitātes sadalījums optiskajā šķiedrā (skat. 3.1. att.) [55].

Visi nelineārie efekti ir atkarīgi no elektromagnētiskā lauka izplatīšanās vidē, taču praktiski optiskā starojuma intensitāte tiek novērtēta pēc pārraidāmā signāla jaudas, kura tiek nomērīta šķiedras izejā un ieejā. Nomērītā optiskā jauda ir izsakāma kā integrālis no intensitātes sadalījuma pa visu šķiedras šķērsgriezuma laukumu. Gadījumā, ja intensitātes sadalījums I serdē ar laukumu A_{serde} ir vienmērīgs, intensitāti var aprēķināt no nomērītās jaudas P :

$$I = \frac{P}{A_{serde}} \quad (3.2)$$



3.1.att. Gaismas intensitātes sadalījums vienmodas optiskajā šķiedrā.

Taču vienmodas šķiedrā lauks nav vienmērīgi sadalīts. Turklāt, tas var pat pilnībā neaizpildīt visu serdes tilpumu. Respektīvi, lauka sadalījums šķiedras gareniskās ass virzienā ir lielāks, nekā serdes apvalka zonā ar tieksmi pieaugt par vērtību, ko nosaka nelineārais koeficients [19]. Respektīvi, aprēķinos izmantojot vienādojumu (3.1), t.i. pieņemot, ka šķiedras serdenī ir vienmērīgs intensitātes sadalījums, netiks pietiekami novērtēta šķiedras centrālās garenass vērtība un pārvērtēta vērtība pie serdes apvalka robežvirsmas. Tādējādi šķiedru optikā tiek izmantoti tādi parametri kā modas lauka diametrs MFD (angl. *mode field diameter*) un efektīvais laukums A_{eff} . Modas lauka diametrs raksturo radiālo gaismas intensitātes sadalījumu uz šķiedras gala virsmas. Efektīvā laukuma parametrs tika ieviests ar mērķi novērtēt nelineāros efektus, no iegūtā reālā optiskās intensitātes sadalījuma šķiedrā [15], [19].

Šķiedras efektīvais laukums ir nozīmīgs parametrs, jo lielākā daļa optiskā starojuma intensitātes ir koncentrēta tieši šķiedras serdenī [65]. Respektīvi, tas ir atkarīgs no šķiedras parametriem, tādiem kā serdes rādiuss, kā arī no kodola un apvalka laušanas koeficientu starpības [4]. A_{eff} pamatā ir modālā lauka sadalījums un, aprēķinot optisko intensitāti pēc izteiksmes (3.1), ar to var aizvietot parametru A_{serde} . Efektīvo laukumu definē kā:

$$A_{eff} = \frac{2\pi \left(\int_0^\infty |E_a(r)|^2 r dr \right)}{\int_0^\infty |E_a(r)|^4 r dr} = \frac{2\pi \left(\int_0^\infty I(r) r dr \right)}{\left(\int_0^\infty I^2(r) r dr \right)}, \quad (3.3)$$

kur: $E_a(r)$ ir elektromagnētiskā lauka sadalījums fundamentālai modai un $I(r)$ ir tuvā lauka intensitāte pie rādiusa r no šķiedras centrālās garenvirziena ass [64]. Standarta šķiedrām ar pakāpjveida profilu A_{eff} ir ļoti aproksimējams ar Gausa sadalījuma funkciju pēc rādiusa ω amplitūdas punktos $1/e$. Šajā gadījumā efektīvā laukuma izteiksme izskatīsies šādi:

$$A_{eff} = \pi \omega^2(\lambda), \quad (3.4)$$

kur $\omega(\lambda)$ ir šķiedras modas lauka rādiuss pie viļņa garuma λ nanometros.

Gadījumā, ja šķiedras ģeometrija neatbilst standarta vienmodas šķiedras pakāpjveida profilam (piemēram, šķiedras ar nobīdīto un izlīdzināto dispersiju) – modas lauka rādiuss nevar tikt aproksimēts ar Gausa funkciju. Šādā gadījumā A_{eff} aprēķināšanai pēc formulas (3.4) tiek ieviests papildus lielums, kuru sauc par Namihiras korekcijas faktoru k_{Nam} , kurš ir atkarīgs no šķiedras tipa un viļņa garuma [19]. Izteiksme (3.5) ir saucama par “Namihira relāciju”.

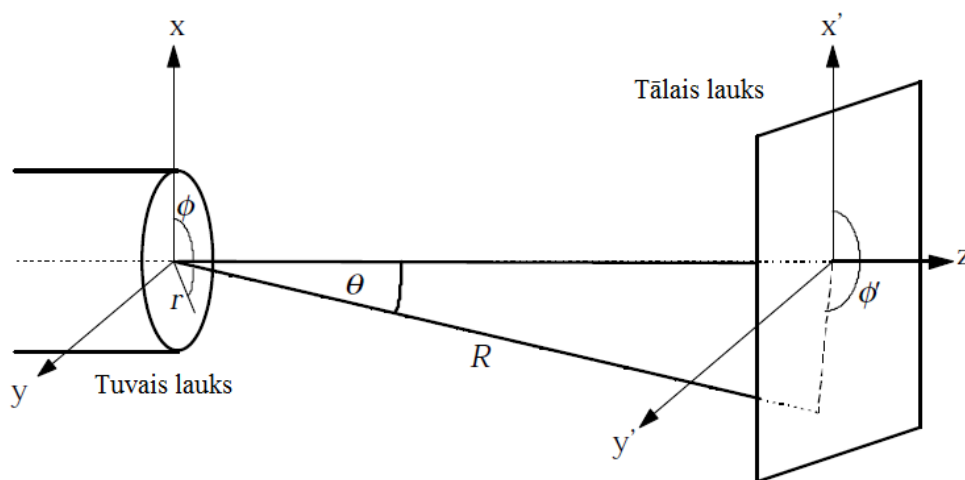
$$A_{eff} = k_{Nam} \pi \omega^2(\lambda) \quad (3.5)$$

Namihira relācijas priekšrocība ir tāda, ka visām no jauna izstrādātajām šķiedrām tiek norādīts modas lauka diametrs. Tomēr korekcijas faktora trūkums ir tā atkarība no viļņa garuma, līdz ar ko k_{Nam} jānosaka katram šķiedras tipam atsevišķi. No tā izriet, ka ir aktuāli veikt reālus efektīvā laukuma mērījumus.

Optiskajam signālam izplatoties vienmodas šķiedrā un sasniedzot šķiedras galu, signāls tiek izstarots ārā un nonāk apkārtējā vidē, kuru veido gaiss. Tipveida vienmodas optiskās šķiedras serdeņa diametrs ir no 8 līdz 10 μm . Respektīvi, tas ir pielīdzināms pārraidāmā optiskā signāla viļņa garumam, kurš parasti ir robežās 1,3 līdz 1,65 μm . Pie šādiem nosacījumiem ir spēkā viļņu teorija. Gaismai izejot no šķiedras notiek difrakcija, un elektromagnētiskā lauka izplatīšanās pārvēršas no tuvā lauka sadalījuma par tālā lauka sadalījumu. Tuvais lauks parasti tiek definēts kā reģions starp ω^2/λ pēc šķiedras gala virsmas, savukārt tālais lauks ir piemērojams lielākajam atālumam [15], [19]. Optiskā starojuma intensitātes sadalījumu tālajā laukā var izteikt ar difrakcijas integrāli no tuvā lauka sadalījuma (3.6):

$$\psi(R, \theta) = O(\theta) \frac{k}{iR} \exp(ikR) \int_0^\infty E_a(r) J_0(rp) r dr \quad (3.6)$$

kur: R un θ – divas sfēriskās polārās koordinātas, $J_0(rp)$ – nulltās kārtas Beseļa funkcija, $O(\theta)$ – novirzes faktors, kas ir vienāds ar $\cos(\theta)$. Optiskā viļņa kārtas numurs k izsakāms ar vienkāršu izteiksmi $k = 2\pi/\lambda$, kur λ ir viļņa garums.



3.2.att. Tuvā un tālā lauka sadalījuma ģeometriskais attēlojums vienmodas optiskajā šķiedrā [19].

Novērotā tālā lauka amplitūdu apraksta vienādojuma (3.6) reālā daļa, kuru var izteikt kā

$$F(p) = 0(\theta) \int_0^{\infty} E_a(r) J_0(rp) r dr = 0(\theta) HT(E_a(r)), \quad (3.7)$$

kur: $HT(E_a(r))$ ir tuvā lauka sadalījuma Henkela transformācija, savukārt atbilstošo inverso Henkela transformāciju apraksta vienādojums (3.8).

$$E_a(r) = \int_0^{\infty} \left[\frac{F(p)}{O(\theta)} \right] J_0(rp) dp = HT^{-1} \left[\frac{F(p)}{O(\theta)} \right], \quad (3.8)$$

kur: $|F(p)|^2$ ir leņķiskais intensitātes sadalījums šķiedras gala virsmā un $p = k \sin(\theta)$. Kā redzams no vienādojumiem (3.7) un (3.8), tuvā un tālā lauka sadalījumi ir savstarpēji saistīti ar tiešo un inverso Henkela transformāciju. No tā izriet, ka, pielietojot inverso Henkela transformāciju, var iegūt tuvā lauka sadalījumu un otrādi. Modas lauka diametrs tuvajā laukā (NF) un tālajā laukā (FF) tiek attiecīgi definēts ar izteiksmēm (3.9) un (3.10) [15], [19]:

$$MFD_{NF} = 2\sqrt{2} \left\{ \frac{\int_0^{\infty} |F(p)|^2 p dp}{\int_0^{\infty} |E'_a(r)|^2 r dr} \right\}^{1/2}, \quad (3.9)$$

$$MFD_{FF} = 2\sqrt{2} \left\{ \frac{\int_0^{\infty} |E_a(r)|^2 r dr}{\int_0^{\infty} |F(p)|^2 p^3 dp} \right\}. \quad (3.10)$$

Standarta vienmodas optiskajām šķiedrām ($SSMF$), kuras pielieto šķiedru optikas pārraides sistēmās, efektīvā laukuma vērtība ir ap $80\text{--}100 \mu\text{m}^2$, lielā modas lauka šķiedrām $LMAF$ (angl. *Large Mode Area Fibers*) A_{eff} var pārsniegt $1000 \mu\text{m}^2$, savukārt fotonisko kristālu šķiedras izceļas ar ļoti mazām A_{eff} (zem $10 \mu\text{m}^2$) [70].

Pēdējo gadu laikā vadošie optisko šķiedru ražošanas uzņēmumi ir sākuši aktīvi strādāt pie jaunās klases optisko šķiedru izstrādes, kur uzsvars tiek likts uz lielo efektīvā laukuma A_{eff} vērtību un maziem zudumiem (angl. *ultralow-loss, large effective area fiber*). Piemēram, ir jau prezentētas optiskās šķiedras ar A_{eff} diapazonu $120\text{--}155 \mu\text{m}^2$ un vājinājuma koeficientu $0,1460 \text{ dB/km}$ virszemes un zemūdens pārraidei. Lai provizoriski novērtētu ieguvumu no lielā efektīvā laukuma šķiedru izmantošanas salīdzinājumā ar standarta vienmodas šķiedru ($SSMF$), tiek ieviests lielums, ko sauc par labvērtības skaitli (angl. *Figure of Merit, FOM*). FOM ir izsakāms decibelos [dB] un atbilst sakarībai [98]:

$$FOM = 10 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}^{SMF}} \right) - (\alpha - \alpha^{SMF}) \times L - 10 \log_{10} \left(\frac{L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}^{SMF}} \right) \quad (3.11)$$

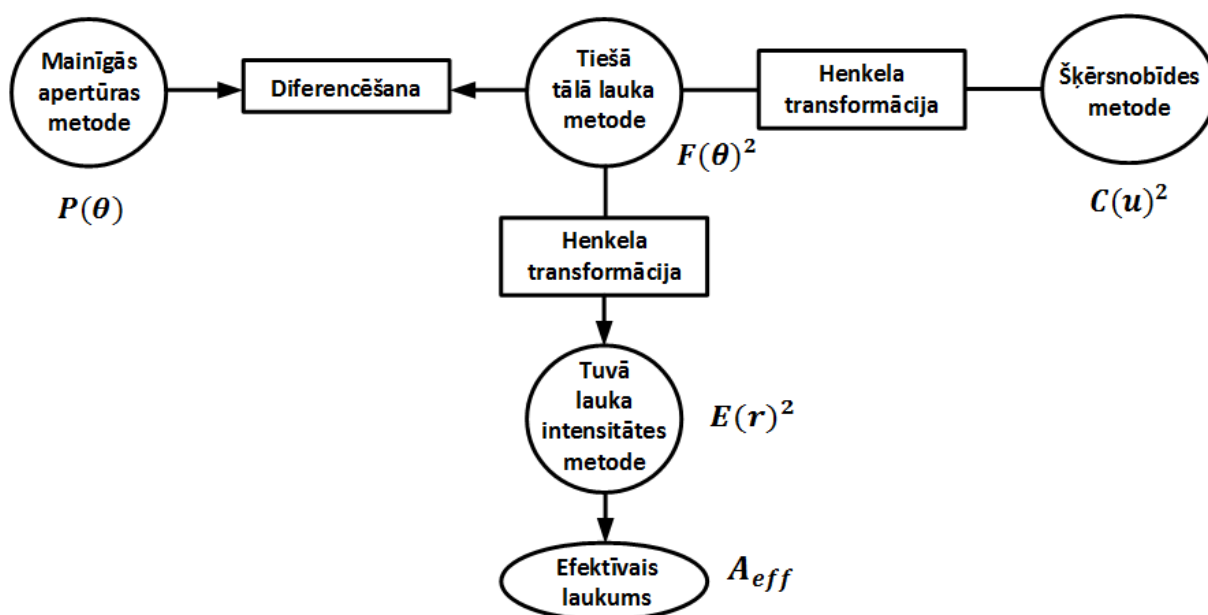
Formulā (3.11) FOM parametrs parāda attiecības signāls-troksnis (SNR) izmaiņas šķiedrām ar lielo efektīvo laukumu salīdzinājumā ar $SSMF$. Pirmajā reizinātāja ietilpst efektivitātes

novērtējums pēc A_{eff} radītāja un vājinājuma α ($\frac{dB}{km}$), bet otrajā pēc šķiedras posma garuma L un efektīvā garuma L_{eff} . No sakarības (3.11) skaidri redzams, ka viens no fundamentālajiem risinājumiem mūsdienu pārraides sistēmās ir izmantot optiskās šķiedras ar lielo efektīvo laukumu un mazo ienesto vājinājumu [29], [42].

3.1. Mērījumu metodoloģijas un eksperimentālās shēmas apraksts

Izstrādājot ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātājus ir svarīgi precīzi noteikt leģētu šķiedru parametrus, tādus kā šķiedras efektīvais laukums un nelineārais koeficients. Dotajiem lielumiem ir noteicošā loma nelineāro efektu ietekmes analizē, kā arī atbilstošās optisko pastiprinātāju konfigurācijas izvēlē, taču optisko šķiedru specifikācijās šie parametri parasti nav norādīti. Pastāv vairākas efektīvā laukuma noteikšanas metodes:

- mainīgās apertūras metode,
- tiešā tālā lauka skenēšanas metode,
- tuvā lauka intensitātes metode,
- šķērsnobīdes metode.

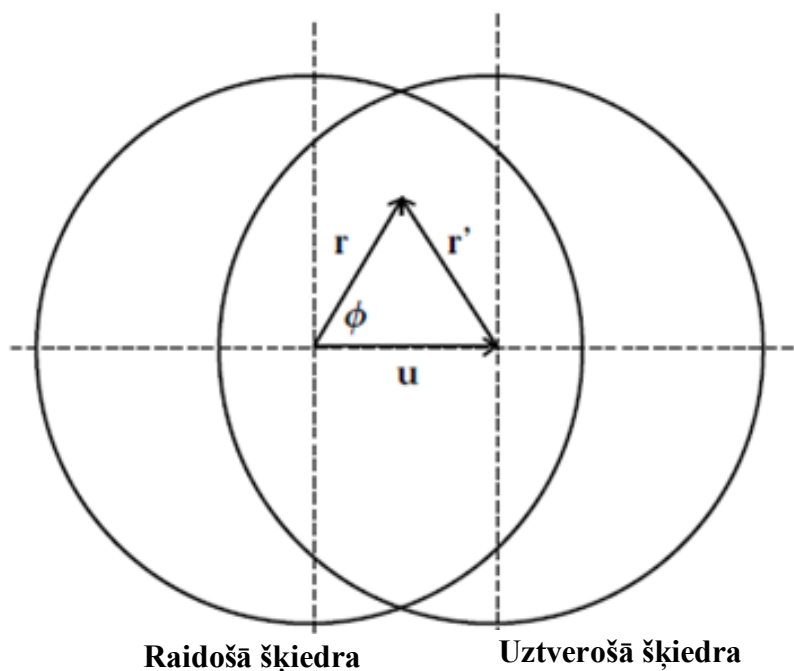


3.3.att. Savstarpējās sakarības starp efektīvā laukuma noteikšanas metodēm [43].

Apskatot savstarpējās sakarības starp minētajām efektīvā laukuma noteikšanas metodēm (3.3.attēls) ir redzams, ka visprecīzāko rezultātu nodrošina tuvā lauka intensitātes metode, jo efektīvā laukuma vērtība tiek iegūta pa tiešo no nomērītajiem datiem. Rēķinot efektīvo laukumu ar kādu no pārējām metodēm, gala rezultāta iegūšanai ir jāpiemēro skaitliskie datu apstrādes algoritmi (diferencēšana vai Henkela transformācija), līdz ar ko pastāv aprēķinu kļūdas varbūtība. Izvēloties konkrēto mērījumu metodi ir jāņem vērā praktiskās realizācijas iespēja,

līdz ar ko nevar teikt, ka minētā tuvā lauka intensitātes metode vienmēr būs efektīvākais variants.

Promocijas darba ietvaros efektīvā laukuma mērījumi erbija un iterbija leģētām šķiedrām veikti izmantojot šķērsnobīdes metodi. Konkrētās metodes izvēles pamatā ir Rīgas Tehniskās universitātes Telekomunikāciju institūta "Šķiedru optiskās pārraides sistēmu" laboratorijas tehniskais nodrošinājums, kurā ir realizēti eksperimentālie mērījumi. Šķērsnobīdes metodē tiek izmantota sekojoša tehnika: optiskā jauda tiek pārraidīta no vienas šķiedras otrā, šo šķiedru asis ir paralēlas, bet sāniski nobīdītas viena no otras, kā tas parādīts attēlā 3.4.



3.4.att. Divu šķiedru galu virsmas ģeometriskā interpretācija.

Jauda, kas pāriet no raidošās šķiedras uztverošajā šķiedrā ir pārklāšanās integrāļa $C(u)$ kvadrāts, savukārt pārklāšanas integrālis tiek definēts kā [15]:

$$C(u) = \iint_S E_a(|r|)E_a(|r - u|)dr, \quad (3.12)$$

kur: $|u|$ - optisko šķiedru centrālo asu savstarpējā nobīde, r un r' šķiedru serdeņu rādiusi. Integrēšana jāveic pa visu apgabalu S , kurā ietilpst abu šķiedru gala virsmas. Pārklāšanas laukumu var izteikt kā konvolūcijas integrāli polārajās koordinātēs:

$$C(u) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} E_a(r)E_a(r')rdrd\phi = [E_a(r) * E_a(r')] \quad (3.13)$$

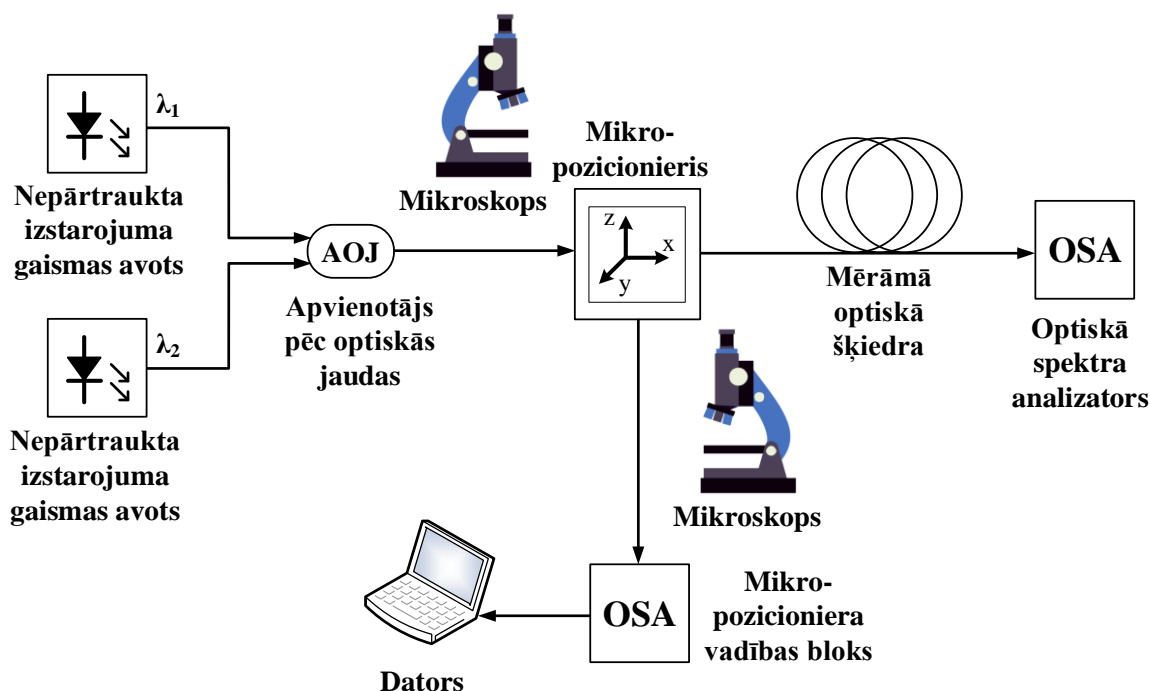
kur $r'^2 = u^2 + r^2 - 2ru \cos(\phi)$, $r' = |r'|$, $r = |r|$ un $*$ apzīmē divdimensionālu konvolūciju.

Henkela transformācija no konvolūcijas ir [19]:

$$H\{C(u)\} = H\{E_a(r) * E_a(r)\} = F^2(p), \quad (3.14)$$

kur $F^2(P)$ ir šķiedras tālā lauka jaudas sadalījums. Vadoties pēc izteiksmes (3.12), jaudas sadalījuma funkcija $C^2(u)$ atbilst fundamentālās modas tuvā lauka sadalījumam. Respektīvi, piemērojot inverso Henkela transformāciju, ar Matlab programmatūru no eksperimentāli iegūtā tuvā laukā sadalījuma tiek aprēķināts šķiedras efektīvais laukums A_{eff} .

Atšķirībā no avotā [19] aprakstītās interferometriskās šķērsnobīdes metodes, interferometrs netiek izmantots, un tālā lauka sadalījuma noteikšana ir realizēta izmantojot pārskaņojamu lāzera gaismas avotu, mikropozicionieri un optiskās jaudas mērītāju [21], [72]. Šķiedras savstarpēji tiek nobīdītas prom no centrālā punkta vienas ass ietvaros, un soļu nobīde ir veikta tikai vienā virzienā – pa šķiedras diametru. Tas ir izveidots tādēļ, lai nodrošinātu augstāku mērījumu precizitāti un jaudas sadalījuma atbilstību Gausa sadalījumam. Jaudas sadalījuma vērtības tika noteiktas, mainot mikropozicioniera soli attiecīgās (X, Y vai Z) ass virzienā. Eksperimentālā shēma optiskā starojuma jaudas sadalījuma tālajā laukā iegūšanai parādīta 3.5.attēlā. Tā sastāv no nepārtraukta starojuma gaismas avotiem 1310 nm (λ_1) un 1550 nm (λ_2), Y veida apvienotāja pēc optiskās jaudas, diviem mikroskopiem ar palielinājumu 150 reizes, mikropozicioniera, mikropozicioniera vadības bloka, datora, mērāmajām optiskajām šķiedrām un spektra analizatora.

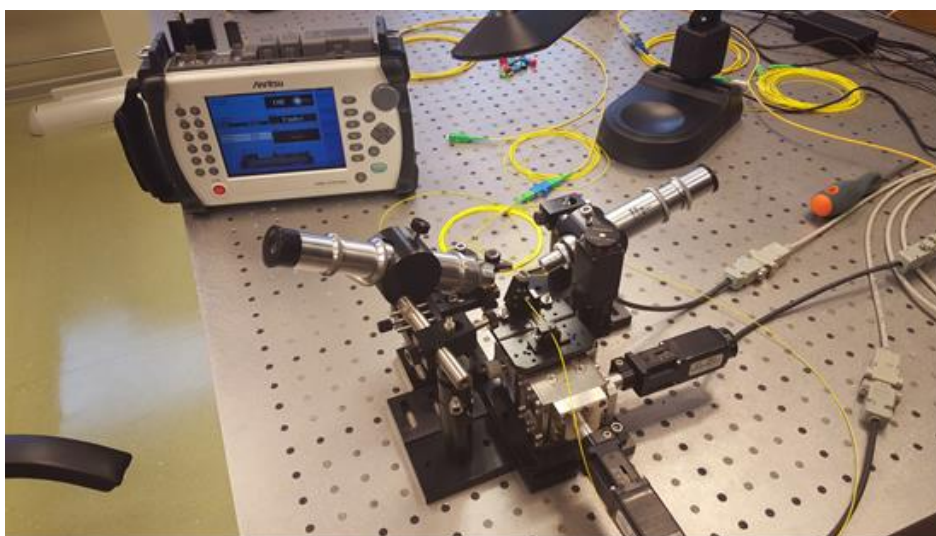


3.5. att. Mērījumu blokshēma optiskā starojuma jaudas sadalījuma tālajā laukā iegūšanai.

Lai atvieglotu mērīšanas procesa gaitu un izvairītos no raidītājšķiedras gala pārslēgšanas starp gaismas avotiem, tiek izmantots šķiedru Y tipa sazarotājs. Leģētās erbija un iterbija šķiedras tiek sametinātas attiecīgi ar reflektometra un ar gaismas avota savienotājšķiedrām. Lai veiktu šķērsnobīdes mērījumus ļoti svarīgi novietot optiskās šķiedras pareizā, t.i. taisnā līnijas stāvoklī. Zināms, ka leņķiskā nobīde ienes optiskajā sistēmā vislielākos zudumus, tāpēc, lai

izvairītos no šīs nobīdes, tika izmantoti divi mikroskopi, katrs ar palielinājumu 150 reizes. Praktiski tika novērots, ka ar diviem mikroskopiem tomēr ir par maz, un būtu noderīgi izmantot arī trešo mikroskopu, lai vienlīdzīgi labi kontrolētu visas 3 asis: X, Y un Z.

Viena no mērījuma aprīkojuma svarīgām sastāvdaļām ir mikropozicionieris (skat. 3.6.att.), ar kuru tika veikta precīza šķiedru nobīde trīs dažādos virzienos (koordinātu asis X, Y, Z). Mikropozicioniera precizitāte ir tieši atkarīga no soļu motora precizitātes, kas nodrošina šo šķiedras nobīdi. Katrs motors tiek atsevišķi elektriski kontrolēts. Soļu motori ir guvuši atzinību pateicoties iespējai savienot tos un kontrolēt ar datoru palīdzību. Šķērsnobīdes mērīšanas metode paredz noturību pret ārējās vides iedarbību, kā arī nodrošina mērīšanu reālos ekspluatācijas apstākļos. Mikropozicioniera mazākā soļa izmērs ir $0,16\ \mu\text{m}$, bet vienlaikus ir iespējams veikt pārbīdes pa visu šķiedras diametru (tipiski $125\ \mu\text{m}$). Izvērsti mikropozicioniera tehniskie dati ir apskatāmi 4. pielikumā.

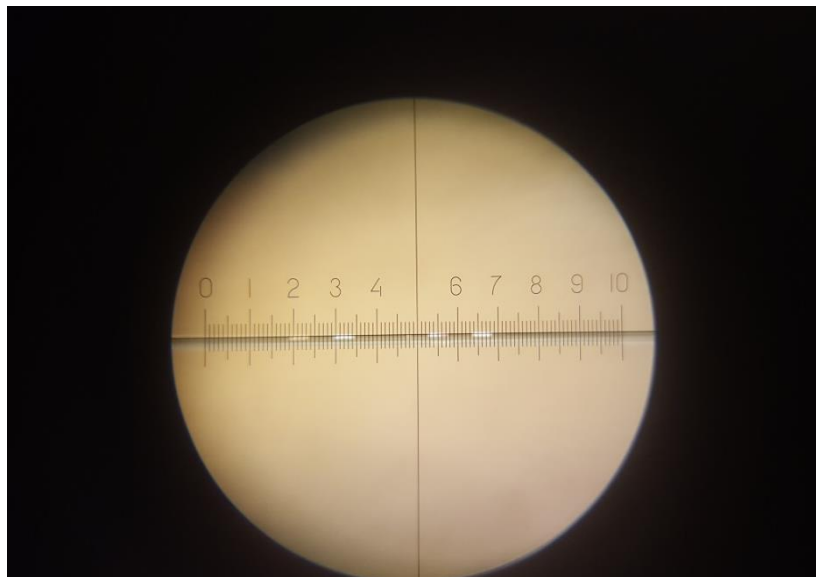


3.6. att. Eksperimentālā shēma efektīvā laukuma mērīšanai ar mikropozicionieri *Standa 8SMC1-USBh*.

Optiskā šķiedra pirms mērījumu veikšanas iepriekš tika speciāli sagatavota, veicot savienotāju uzgaļu tīrīšanu, izlīdzināšanu, references mērījumus un savienotāju galu metināšanu. References mērījumiem tiek ieslēgts gaismas avots un ar jaudas mērītāja palīdzību nolasīti jaudas lielumi gan ar $1310\ \text{nm}$, gan ar $1550\ \text{nm}$ gaismas avotiem. Iegūtie references mērījumi tiek piefiksēti un izmantoti kā atskaites punkti efektīvā laukuma mērījumos.

Šķērsnobīdes mērījumos ir ļoti svarīgi novietot optiskās šķiedras precīzi vienu pret otru, t.i. tā, lai tās atrastos uz vienas garenass. Pozicionēšana ir veikta ar divu mikroskopu palīdzību. Pēc vizuālās inspekcijas, raugoties mikroskopā uz šķiedru savstarpējo novietojumu, kā viens no beigu soļiem, lai pārliecinātos, ka šķiedras atrodas taisni viena otrai pretī, tajās tiek spīdināta redzamā gaisma. Redzamajai gaismai ieplūstot no raidītājšķiedras uztvērējšķiedrā, nevajadzētu būt pamanāmām atstarošanās vietām. Ja tomēr šīs atstarošanās vietas ir redzamas, tad ir nepieciešama šķiedru pārpozicionēšana. Attēlā 3.7 ir parādīta aina, ko var redzēt skatoties mikroskopā uz savstarpēji pretēji novietotajām šķiedrām. Kad šķiedras ir sagatavotas mērījumiem, tiek veikta vienas šķiedras gala pārbīde attiecībā pret otru pa vienu no

šķērsnobīdes asīm. Veicot mērījumus abi gaismas avoti (1310 nm un 1550 nm) tiek izmantoti pamīšus. Mērījumu gaitā viena no šķiedrām sākotnēji tiek pārbīdīta tā, lai nepārklātos ar otras šķiedras gala virsmu. Pēc tam, šī šķiedra pakāpeniski tiek bīdīta pa vienu no šķērsnobīdes asīm un vienlaicīgi tiek fiksēta optiskā jaudas mērāmās šķiedras izejā. Nobīde tiek veikta tikai vienā virzienā – pa šķiedras diametru, līdz abu šķiedru galu virsmas atkal pilnībā nepārklājas. Mērījumu rezultātā tiek iegūts optiskās jaudas sadalījums pa mērāmās šķiedras šķērsgrizumu.

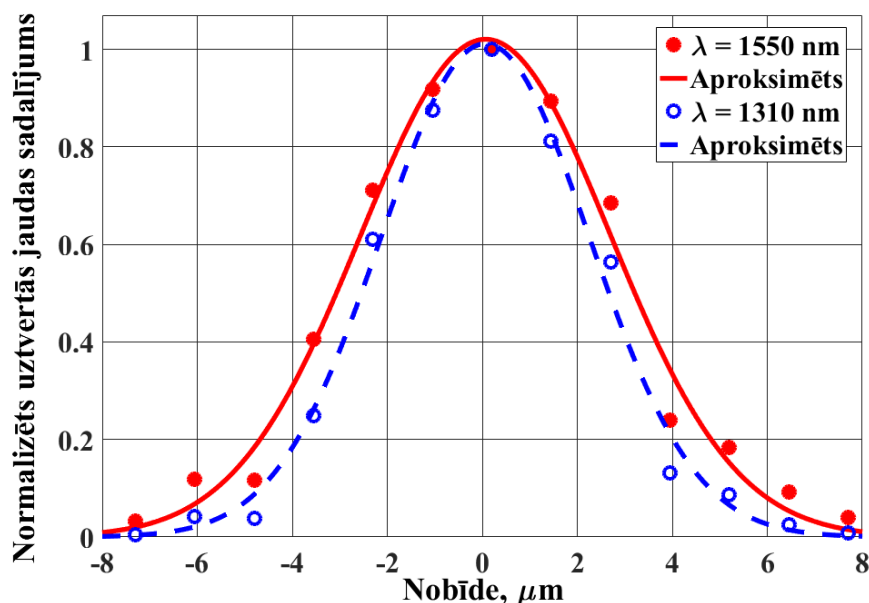


3.7.att. Šķiedru savstarpējā novietojuma aina mikroskopā.

Šķiedra pakāpeniski tiek bīdīta pa vienu no šķērsnobīdes asīm un vienlaicīgi tiek fiksēta optiskā jauda mērāmās šķiedras izejā. Tiek izvēlēts veikt divu šķērsnobīdes asu nobīdi. Proti, Z un Y ass nobīdi, jo X ass ir izmantota šķiedru savstarpējā attāluma regulēšanai. Nobīde tiek veikta tikai vienā virzienā – pa šķiedras diametru, līdz abu šķiedru galu virsmas atkal pilnībā nepārklājas. Rezultātā tiek iegūts optiskās jaudas sadalījums pa mērāmās šķiedras šķērsgrizumu. Ņemot vērā to, ka efektīvā laukuma parametrs tiek noteikts ar mērķi novērtēt legētu šķiedru izmantošanu optiskā pastiprinātāja izveidē, jaudas sadalījuma mērījumi ir veikti pie diviem jaudas līmeņiem.

3.2. Erbija un iterbija legētās šķiedras efektīvā laukuma mērījumi

Izmantojot šķērsnobīdes metodi eksperimentāli tika iegūts erbija legētās šķiedras *HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* un iterbijā legētās šķiedras *LIEKKI Yb 1420-1560 / 15%* tālā lauka jaudas sadalījums. Izmantojamo šķiedru tehniskie dati ir apskatāmi 4. pielikumā. Apstrādājot mērījumu rezultātus ar programmā *MATLAB* realizēto aprēķinu algoritmu, tika iegūts tuvā lauka sadalījums. Erbija legētās šķiedras tuvā lauka sadalījums pie viļņa garumiem 1310 nm un 1550 nm ir parādīts 3.8. attēlā. Redzams, ka pie abiem viļņu garumiem raksturīgākām ir izteikta linearitāte. Aprēķinātās A_{eff} vērtības ir apkopotas tabulā 3.1.



3.8. att. Optiskā starojuma tuvā lauka sadalījums pa šķiedras šķēsgriezumam pie viļņu garumiem 1310 un 1510 nm erbija leģētai šķiedrai.

3.1. tabula

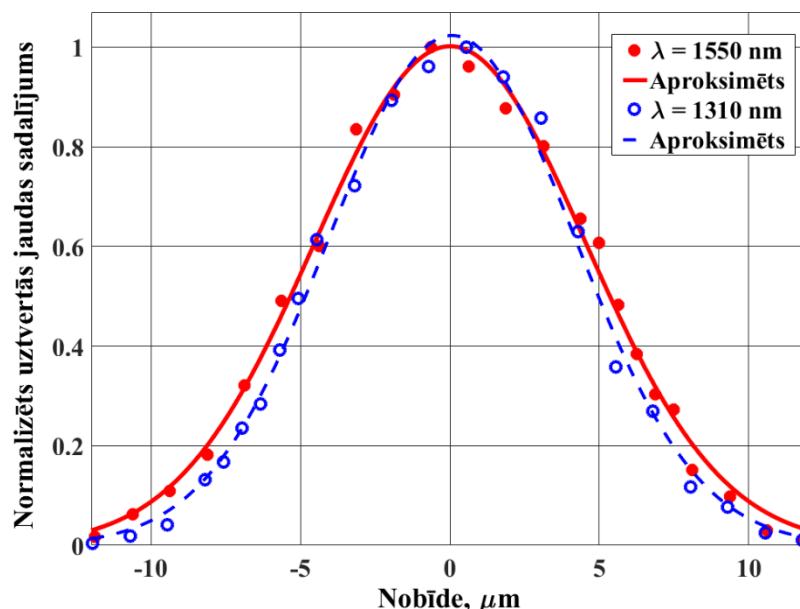
Erbija leģētās šķiedras *HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* efektīvā laukuma mērījumu rezultāti atkarībā no viļņa garuma

Pozīcija	Jauda, dBm	Viļņa garums 1310 nm		Jauda, dBm	Viļņa garums 1550 nm
		$A_{eff}, \mu\text{m}^2$			$A_{eff}, \mu\text{m}^2$
P ₁ (Y ass)	-30,2	30,2		-27,7	42,7
P ₁ (Z ass)	-30,5	36,5		-27,1	57,1
P ₂ (Y ass)	-27,4	30,3		-26,9	43,5
P ₂ (Z ass)	-26,9	35,8		-26,5	56,9

Rezultāti parāda, ka *EDF* šķiedrai efektīvā laukuma vērtības pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Kā redzams no 3.1. tabulas, veicot A_{eff} mērījumus pie dažādiem gaismas avota izejas jaudām, tiek iegūtas atšķirīgas šķiedras efektīvā laukuma vērtības. Pie viļņa garuma 1310 nm erbija šķiedrai starpības starp A_{eff} vērtībām ir $0,1 \mu\text{m}^2$ (P_1) un $0,7 \mu\text{m}^2$ (P_1), savukārt pie 1550 nm attiecīgi $0,8 \mu\text{m}^2$ un $0,2 \mu\text{m}^2$. Respektīvi, efektīvā laukuma mērījumi pie dažādam jaudām sniedz plašāku informāciju par optiskā starojuma sadalījuma raksturu pētāmajā šķiedrā.

Tuvā lauka sadalījums iterbija leģētāja šķiedrā pie viļņa garumiem 1310 nm un 1550 nm parādīts 3.9. attēlā. Salīdzinājumā ar erbija šķiedru, optiskā starojuma tuvā lauka sadalījumam iterbija šķiedrā ir izteikts eksponenciāls raksturs. Analizējot iegūtās efektīvā laukuma vērtības (3.2.tabula) var uzreiz redzēt, ka iterbija leģētajai šķiedrai A_{eff} parametrs ir lielāks nekā *EDF*. Ja salīdzina pēc vidējās vērtības pie abiem jaudas līmeņiem iegūtos datus, tad 1310 nm gadījumā A_{eff} ir vidēji $105,8 \mu\text{m}^2$ un $75,4 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm $129,4 \mu\text{m}^2$ un $95,1 \mu\text{m}^2$.

Novērtējot atšķirības starp efektīvā laukuma vērtībām, kas nomērītas pie jaudas līmeņiem P_1 un P_2 rezultātu starpība ir $3 \mu\text{m}^2$ robežās. Respektīvi, pie viļņa garuma 1310 nm A_{eff} starpība ir $0,9 \mu\text{m}^2$ un $2,5 \mu\text{m}^2$, bet pie viļņa garuma 1510 nm $0,4 \mu\text{m}^2$ un $2,5 \mu\text{m}^2$.



3.9. att. Optiskā starojuma tuvā lauka sadalījums pa šķiedras šķēsgriezumu pie viļņu garumiem 1310 un 1510 nm iterbija leģētai šķiedrai.

3.1. tabula

Iterbija leģētās šķiedras *LIEKKI Yb 1420-1560 / 15%* efektīvā laukuma mērījumu rezultāti atkarībā no viļņa garuma

Pozīcija	Jauda, dBm	Viļņa garums 1310 nm	Jauda, dBm	Viļņa garums 1550 nm
		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$		$A_{\text{eff}}, \mu\text{m}^2$
P_1 (Y ass)	-30,9	106,2	-23,6	129,6
P_1 (Z ass)	-33,6	76,6	-23,0	96,5
P_2 (Y ass)	-30,7	105,3	-20,6	129,2
P_2 (Z ass)	-30,3	74,1	-20,1	94,0

Apkopojot *EDF* un *YDF* efektīvā laukuma eksperimentālo mērījumu rezultātus tika izdarīti šādi secinājumi:

- Efektīvā laukuma mērījumos ar šķērsnobīdes metodi ir ļoti svarīgi precīzi novietot optiskās šķiedras vienu pret otru, lai tās atrastos uz vienas garenass. Mērījumu gaitā šķiedras tika savstarpēji nobīdītas prom no centrālā punkta vienas ass ietvaros, un soļu nobīde ir veikta tikai vienā virzienā – pa šķiedras diametru. Šāds paņēmieni nodrošina augstāku mērījumu precizitāti un jaudas sadalījuma atbilstību Gausa sadalījumam.
- Analizējot jaudas sadalījuma grafikus var redzēt, ka erbija šķiedrām raksturīga izteiktāka linearitāte, savukārt iterbija leģētās šķiedras gadījumā jaudas sadalījumam ir eksponenciāls raksturs.

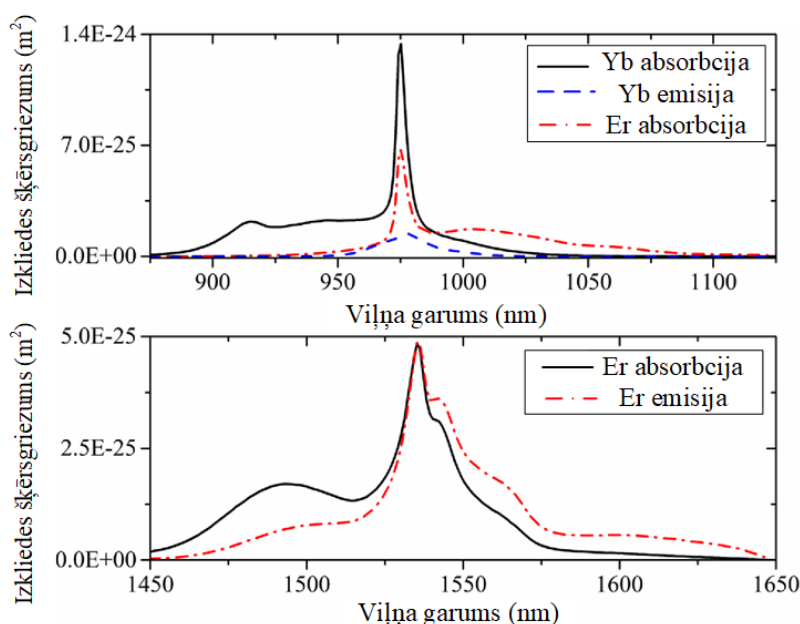
- *EDF* šķiedrai efektīvā laukuma vērtības pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. *YDF* gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks nekā erbija šķiedrai. Pie 1310 nm A_{eff} ir vidēji $105,8 \mu\text{m}^2$ un $75,4 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm $129,4 \mu\text{m}^2$ un $95,1 \mu\text{m}^2$. Iegūtie rezultāti parāda, ka kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē ir lietderīgāk izmantot ar iterbiju leģētās šķiedras, kurām raksturīgs lielāks efektīvais laukums.
- Efektīvā laukuma parametra lielums ir atkarīgs no optiskā pastiprinātāja pielietošanas sfēras. Ja ir mērķis uzlabot pastiprinājuma un ierosinošā avota jaudas raksturlīkni - modas lauks ir jāsamazina. Šajā gadījumā priekšroka tiek dota šķiedrām ar mazākajiem A_{eff} rādītājiem, jo ir iespējams kombinēt dažādus ierosinošā avota un ieejas signāla viļņa garumus, kas ir nozīmīgi daudzkanālu viļņgarumdales blīvēšanas pārraides sistēmās. Ja prioritātē ir lielāko izejas jaudu iegūšana, efektīvāk izmantot šķiedras ar augstāko A_{eff} .

4. ITERBIJA LEĢĒTU ŠĶIEDRU PIELIETOJUMS EDFA EFEKTIVITĀTES UZLABOŠANĀ

Pieaugot kanālu skaitam pārraides sistēmā, palielinās arī nelineāro efektu ietekme, no kuriem izteiktākie ir četru viļņu mijiedarbe (*FWM*) un fāzes šķērsmodulācija (*XPM*). Apvienojot erbija (*EDF*) un iterbija (*YDF*) leģētās šķiedras kombinēto risinājumu izstrādē ir iespējams samazināt nelineāro efektu izpaušmi, bet vienlaicīgi nodrošināt lielākas optisko pastiprinātāju izejas jaudas. Erbija šķiedrā ar iterbija piemaisījumiem enerģijas pāreja no ierosinātā iterbija Yb^{3+} stāvokļa tiek izmantota apdzīvotības veidošanai starp erbija Er^{3+} enerģijas līmeņiem, veicinot stimulētās emisijas procesu un optiskā signāla pastiprināšanu [7].

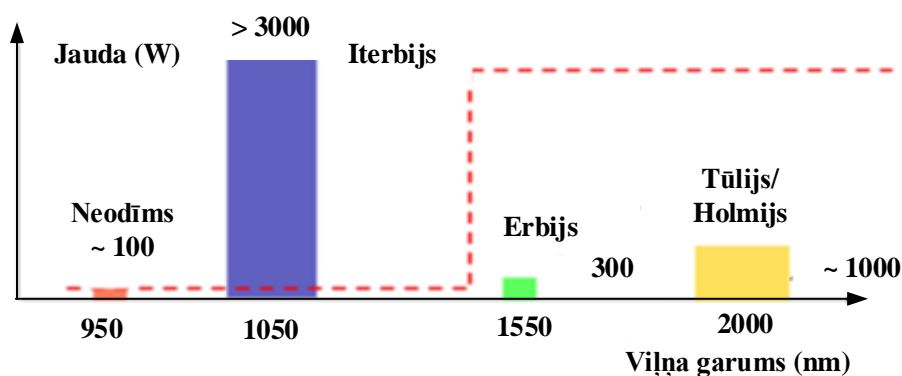
Silīcija šķiedrai, kuras serdeņa leģējums satur Er^{3+} un Yb^{3+} jonus, ir raksturīga augstāka energoefektivitāte, jo aktīvo jonu ierosināšanai nepieciešama mazāka ierosinošā avota jauda. Tas notiek tādēļ, ka erbija spektrālajā joslā pie viļņa garuma 1550 nm ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYCDFA*) darbojas vienmodas režīmā, savukārt iterbija joslā pie 975 nm – daudzmodu režīmā. Tādējādi ir iespējams paplašināt ierosinošā avota viļņa garuma diapazonu, jo iterbijam ir raksturīgs plašs absorbcijas spektrs 800–1100 nm diapazonā un emisijas spektrs 950 līdz pat 1150 nm (skat. 4.1. attēls) [3], [61], [71].

Analizējot iterbija absorbcijas un emisijas izkliedes šķērs griezumus var secināt, ka pie viļņa garuma 910 nm absorbcijas izkliedes šķērs griezumums ir relatīvi plašs, bet zems, tāpēc augsto pastiprinājuma vērtību iegūšanai ir jānodrošina lielas pumpēšanas jaudas. Kopumā apmēram 97% no iterbija augšējā enerģētiskā līmeņa apdzīvotības ir sasniedzamas tikai pielietojot jaudīgos ierosinošos avotus, taču tas veicina arī pastiprinātās spontānās emisijas pieaugumu. Respektīvi, maksimālā pumpēšanas efektivitāte atbilst viļņa garumam 975 nm, kur ir attiecīgi augstākā absorbcijas izkliede.



4.1. att. Absorbcijas un emisijas izkliedes šķērs griezumi ar erbiju un iterbiju leģētajā šķiedrā [88].

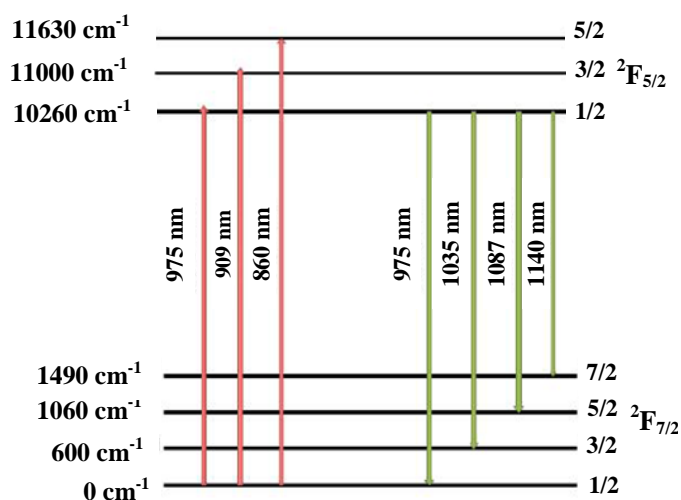
Iterbijam piemīt vairākas lietderīgas materiālās īpašības: zems kvantu defekts starp absorbēto ierosinošo gaismu un emitēto signālu, kā arī iespēja piemērot leģēšanas tehnoloģiju ar augstu aktīvo jonu koncentrāciju. Minētās īpašības nodrošina zemu temperatūras slodzi un ierosinošā avota jaudas optimizācijas funkciju. Respektīvi, regulējot šķiedru lāzera temperatūru, ir iespējams nodrošināt pumpējošā avota stabilitāti pēc izejas jaudas [28]. Maksimālās jaudas, kuras nodrošina dažādi retzemju elementi attiecīgajā viļņu garumu diapazonā ir parādītas attēlā 4.2. Teorētiski iterbija maksimālās izejas jaudas var pārsniegt 3000 W, kas ir desmit reizes vairāk nekā erbija gadījumā, taču šāds rādītājs nav viennozīmīgs un atkarīgs no izmantojamās konfigurācijas.



4.2. att. Dažādu retzemju elementu salīdzinājums pēc izejas jaudām [88].

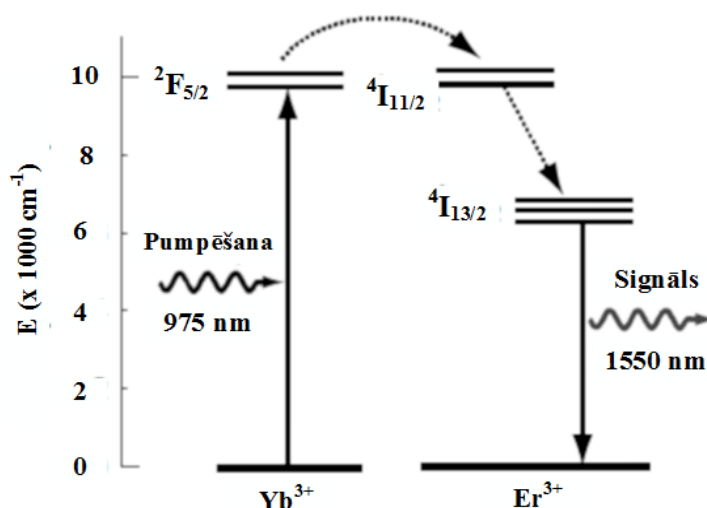
4.1. Stimulētās emisijas norises process ar iterbiju leģētajās šķiedrās

Atkarībā no ierosinošā avota viļņa garuma, iterbija leģētajās šķiedrās tiek piemērota 3 vai 4 kvazi līmeņu elektronu struktūra (4.3.att.). Redzams, ka pie viļņa garuma zem 1080 nm zemākais lāzera pārejas stāvoklis ir ļoti tuvs pamatstāvoklim. Stimulētās emisijas procesā ir iesaistīti tikai divi enerģētiskie līmeņi – apakšējais un augšējais ierosinātais līmenis. Starka efekta iedarbībā, tie tiek sadalīti apakšlīmeņos, starp kuriem notiek ierosināšana un energoefektīvā pāreja.



4.3. att. Yb³⁺ energoefektīvo līmeņu struktūra [30].

Pārejas starp enerģētiskajiem līmeņiem ar erbija un iterbija joniem legētajā šķiedrā ir parādītas 4.4. attēlā. Iterbija joni tiek ierosināti uz līmeni $^2F_{5/2}$ ar pumpējošo avotu, kurš darbojas viļņa garumu diapazonā 800–1100 nm, un Yb energoefektīvo pāreju rezultātā erbija joni tiek ierosināti uz līmeni $^4I_{11/2}$. Dotajā procesā iterbija joni atgriežas līmenī $^2F_{7/2}$. Neradiatīvo procesu rezultātā, ierosināti erbija joni no līmeņa $^4I_{11/2}$ pāriet uz līmeni $^4I_{13/2}$ un veido populācijas inversiju starp līmeņiem $^4I_{13/2}$ un $^4I_{15/2}$, kas stimulētās emisijas iedarbībā veicina optiskā signāla pastiprināšanu [7], [47], [84].



4.4. att. Energoefektīvo līmeņu struktūra Er–Yb sistēmā [7].

Yb^{3+} un Er^{3+} jonu mijiedarbības efektivitāti pozitīvi ietekmē abu retzemju elementu ķīmiskās īpašības. Piemēram, erbijam un iterbijam ir vāja šķīdība silīcija dioksīdā, kā arī vienādi jonu rādiusi. Respektīvi, joni savstarpēji korelē un veido klasterus, tādējādi samazinot savstarpējo attālumu un stimulējot enerģētiskās pārejas starp līmeņiem.

Salīdzinājumā ar erbija šķiedru, ar erbija un iterbija joniem legētā šķiedra *EYCDF* absorbē vairāk enerģijas, jo iterbijam raksturīgs lielāks absorbcijas šķērsriezuma laukums, tāpēc iterbija joni absorbē maksimumu no ierosinošā avota jaudas. Parasti *EYCDF* šķiedras iekšējais apvalks ir veidots no tīra silīcija ar oktagonālo diametru 125 μm un skaitlisku apertūru 0,46, kas nodrošina savietojamību ar komerciāli pieejamiem jaudīgiem ierosinošiem avotiem [85].

4.2. Iterbija leģētu šķiedru priekšrocību un trūkumu apskats

Izanalizējot būtiskākās ar iterbiju leģētās šķiedras fizikālās īpašības un stimulētās emisijas norises mehānismu, var izdalīt vairākus ieguvumus no Yb^{3+} piemaisījumu pielietošanas ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju izveidē.

Pirmkārt, tiek nodrošināts dabiski līdzens pastiprinājuma spektrs viļņu garumu diapazonā 1550–1570 nm, līdz ar ko nav jāpiemēro pastiprinājumu izlīdzinošie filtri, kas ir aktuāli daudzkanālu viļņgarumdaļes blīvēšanas sakaru sistēmās.

Ar kombinēto *EYCDFA* pastiprinātāju ir iespējams nodrošināt līdz pat desmit reizēm lielākas izejas jaudas nekā *EDFA*, jo atkarībā no konfigurācijas iterbija izejas jaudas var pārsniegt līdz pat 3000 W [88]. Turklāt iterbija jonu ierosināšanai ir iespējams izmantot lētākos ierosinošos avotus, kuros nav aktuāla stabilizācija pēc temperatūras, kas ir ekonomiski izdevīgi.

Otrkārt, plaša iterbija absorbcijas josla dod iespēju manipulēt ar dažādiem ierosinošā avota viļņu garumiem, t.i. paplašināt viļņa garumu diapazonu. Visbiežāk tiek piemērots 300 nm solis ar centrēšanu pie 930 nm.

Treškārt, silīcija šķiedras leģēšana ar augstās koncentrācijas iterbija joniem veicina efektīvāko absorbcijas procesu un attiecīgi ļauj samazināt izmantojamās šķiedras garumus. Pēdējā svarīga priekšrocība ir iespēja veikt ierosināšanu ar cietvielu neodīma kristāla lāzeri (*Nd:YAG*) pie viļņa garuma 1064 nm. Tas nodrošina augsto pumpēšanas efektivitāti, jo, kā jau tika minēts – Yb^{3+} absorbē maksimumu no ierosinošā avota jaudas, tāpēc ir plašas iespējas manipulēt ar dažādiem ierosinošā avota viļņa garumiem diapazonā no 980 līdz pat 1100 nm. [96].

Starp negatīviem faktoriem, kādēļ ar iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāji (*YDFA*) nav tik plaši izmantoti kā *EDFA* ir jāmin nepieciešamā viļņa garuma ierosinošo avotu pieejamība (lāzeri, kas darbojas 600–800 nm diapazonā nav plaši komerciāli izplatīti) un sarežģīta iterbija šķiedras ražošanas tehnoloģija. Respektīvi, *YDFA* pastiprinātāju izstrādes gaitā ir jāņem vērā vairāki iterbija šķiedras parametri, no kuriem svarīgākie ir dotā darba 3. nodaļā pētītais efektīvais laukums, kā arī šķiedras serdeņa un apvalka materiāls jāizvēlas tā, lai dobuma konstrukcija būtu salāgota pēc atstarotāja viļņa garuma un intensitātes [90], [96].

4.3. EYCDFA pielietojums jaudīgā gaismas avota darbības izpētē

Lai izprastu *Er–Yb* sistēmas darbības principu, kā arī novērtētu ar erbija un iterbija joniem leģētu šķiedru nozīmi kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē, dotajā nodaļā ar datorsimulācijas programmu tika izpētīts erbija un iterbija leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYCDFA*). Kombinētais risinājums ir realizēts caur divu optisko pastiprinātāju: *EDFA* un *EYCDFA* kaskādes slēgumu, kas tiek saukts par *MOPA* (angl. *Master Oscillator Power Amplifier*), jeb oscilatora jaudas pastiprinātāju. *MOPA* ir efektīvākais risinājums jaudīgo impulsu ģenerēšanai, turklāt tas ir viegli pārskatāms, līdz ar ko nodrošina plašas vadības un pilnveidošanas iespējas [76]. Respektīvi, *EYCDFA* tika pētīts kā jaudīgais koherentā starojuma avots, vadoties pēc avotos [41], [48] dotajiem šķiedru parametriem. Simulāciju mērķis ir novērtēt pastiprinātāja izejas jaudas izmaiņas atkarībā no iterbija leģētās šķiedras garuma, kā arī pastiprināšanas efektivitāti un trokšņa faktoru.

Signāla, ierosinošās jaudas un trokšņa izplatīšanos *EYCDFA* nosaka stāvokļa vienādojumi. Optiskā starojuma plūsmas jaudu leģētās šķiedras pastiprinātāja serdenī apzīmē ar P [W], leģējošā elementa koncentrācijas zemākajā un ierosinātajā līmenī attiecīgi N_1 un N_2 [m^{-3}], bet emisijas un absorbcijas koeficientus ar σ_e un σ_a [m^2]. Tādā gadījumā optiskajam signālam ar jaudu P izplatoties aktīvajā vielā, enerģijas daudzums, ko absorbē pamatstāvokļa atomi dimensijās [W/m] un jaudas pieaugums uz šķiedras garuma vienību būs vienāds ar $\sigma_e \times P \times N_2$ [W/m] [40]. Pieņemot, ka bezgalīgi mazajā attālumā dz ir spēkā tikai stimulētais izstarojums un absorbcija, prognozējamās jaudas izmaiņas atbilst sakarībai (4.2):

$$P_{x+1} = P_x + (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) * P_x dz; \quad (4.2)$$

Gadījumā, ja pastiprinātas spontānās emisijas ietekme netiek ņemta vērā, iterbija telpiski atkarīgās apdzīvotības un enerģijas izplatīšanās stāvokļa vienādojumi ir salīdzinoši vienkārši:

$$P_{x+1} = P_x + (\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) * P_x dz; \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} = & \frac{D}{hcA} \sum_{j=1}^j \lambda_j^p [\sigma_a(\lambda_j^p) N_1 - \sigma_e(\lambda_j^p) N_2] * P_p(\lambda_j^p) \\ & + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^k \lambda_k^s [\sigma_a(\lambda_k^s) N_1 - \sigma_e(\lambda_k^s) N_2] * P_s^\pm(\lambda_k^s) - \frac{N_2}{\tau}; \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$N_1 = N_T - N_2; \quad (4.4)$$

$$\frac{dP_p(\lambda_j^p)}{dz} = D [\sigma_e(\lambda_j^p) N_2 - \sigma_a(\lambda_j^p) N_1] * P_p(\lambda_j^p) - \alpha P_p(\lambda_j^p); \quad (4.5)$$

$$\frac{dP_s^\pm(\lambda_k^s)}{dz} = \Gamma [\sigma_e(\lambda_k^s) N_2 - \sigma_a(\lambda_k^s) N_1] * P_s^\pm(\lambda_k^s) - \alpha P_s^\pm(\lambda_k^s). \quad (4.6)$$

kur: N_T – iterbija jonu koncentrācija; signāla un ierosinošā avota jaudas tiek sadalītas divās spektrālās komponentēs: $P_p(\lambda_j^p)$ ir j – tā kanāla ierosinošā jauda, savukārt $P_s^+(\lambda_k^s)$ vai $P_s^-(\lambda_k^s)$ ir attiecīgi k – tā kanāla ierosinošās jaudas tiešajā un pretējā virzienā; c – gaismas ātrums vakuumā; α – šķiedras vājinājuma koeficients; τ – augšējā stāvokļa fluorescences dzīves ilgums; A – leģētās šķiedras efektīvais laukums; D, Γ – ierosināšanas un signāla koeficienti leģētajā posmā. Izteiksme (4.2) apraksta apdzīvotības inversijas izmaiņas augšējā līmenī stimulētās emisijas un absorbcijas ietekmē gan signālam, gan ierosinošām avotam. Izteiksmes (4.4), (4.5) apraksta ierosinošā avota un signāla jaudas izmaiņas pa visu leģētās šķiedras posmu [40].

Protams, reālajos apstākļos vienmēr ir jāņem vērā arī pastiprinātās spontānās emisijas ietekme. Iterbijam ir trīs ASE joslas, katrā no kurām parazītiskais signāls intensīvi pārklājas ar derīgā signāla viļņa garumiem. Izteiktākā ASE josla atbilst 978 nm, kur raksturīga strauja emisija, bet arī ātra reabsorbcija, samazinoties ierosinošai jaudai. Pie viļņa garuma 1023 nm pastiprinātā spontānā emisija pieaug, jo šis viļņa garums atbilst blīvai augšējā stāvokļa apdzīvotībai, savukārt pie 1060 nm tā jau kļūst par vienīgo starojuma avotu leģētajā šķiedrā [61]. Respektīvi, ievērojot ASE, iterbija telpiski atkarīgās apdzīvotības un enerģijas izplatīšanās stāvokļa vienādojumi ir aprakstāmi ar izteiksmēm (4.6) un (4.7). Kopējā vienādojumu sistēma izskatīsies šādi:

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} = & \frac{D}{hcA} \sum_{j=1}^j \lambda_j^p [\sigma_a(\lambda_j^p) N_1 - \sigma_e(\lambda_j^p) N_2] * P_p(\lambda_j^p) \\ & + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{k=1}^k \lambda_k^s [\sigma_a(\lambda_k^s) N_1 - \sigma_e(\lambda_k^s) N_2] * P_s^\pm(\lambda_k^s) \\ & + \frac{\Gamma}{hcA} \sum_{l=1}^L \lambda_l^{ASE} [\sigma_a(\lambda_l^{ASE}) N_1 - \sigma_e(\lambda_l^{ASE}) N_2] * [P_{ASE}^+(\lambda_l^{ASE}) + P_{ASE}^-(\lambda_l^{ASE})] - \frac{N_2}{\tau} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$N_1 = N_T - N_2;$$

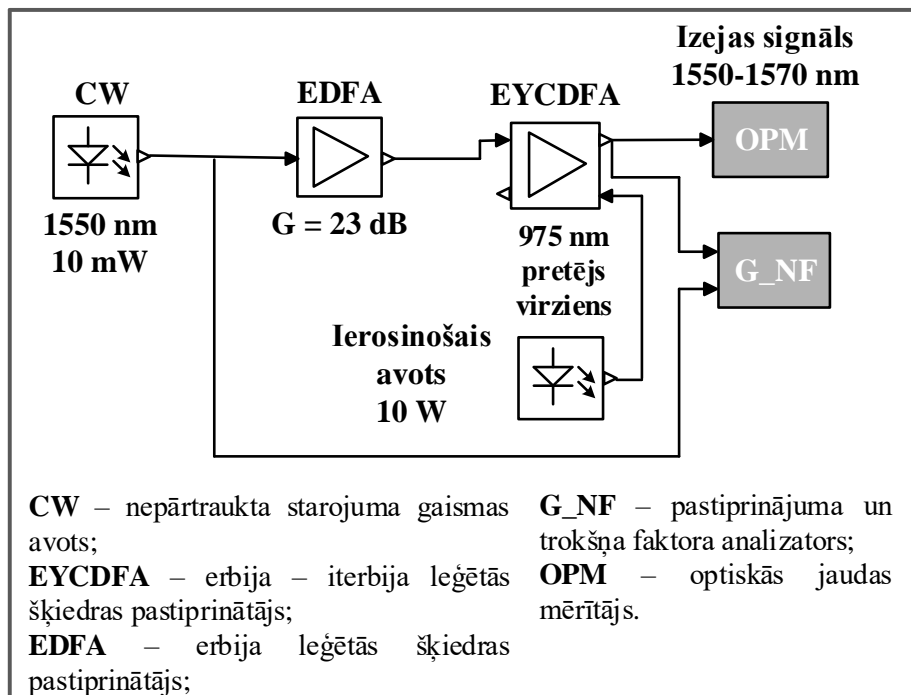
$$\begin{aligned} \frac{dP_p(\lambda_j^p)}{dz} = & D[\sigma_e(\lambda_j^p) N_2 - \sigma_a(\lambda_j^p) N_1] * P_p(\lambda_j^p) - \alpha P_p(\lambda_j^p) \\ \frac{dP_s^\pm(\lambda_k^s)}{dz} = & \Gamma[\sigma_e(\lambda_k^s) N_2 - \sigma_a(\lambda_k^s) N_1] * P_s^\pm(\lambda_k^s) - \alpha P_s^\pm(\lambda_k^s) \\ \frac{dP_{ASE}^\pm(\lambda_l^{ASE})}{dz} = & \Gamma[\sigma_e(\lambda_l^{ASE}) N_2 - \sigma_a(\lambda_l^{ASE}) N_1] * P_{ASE}^\pm(\lambda_l^{ASE}) - \alpha P_{ASE}^\pm(\lambda_l^{ASE}) \\ & + \Gamma \sigma_e(\lambda_l^{ASE}) N_2 \frac{2hc^2 \Delta \lambda}{[\lambda_l^{ASE}]^3}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

kur: $P_{ASE}^+(\lambda_l^{ASE})$ un $P_{ASE}^-(\lambda_l^{ASE})$ ir ASE signāls jaudas tiešais vai pretējs izplatīšanās virziens l -tā kanālā un $\Delta\lambda$ ir ASE starpkanālu intervāls. Izteiksme (4.6), kura iegūta no pārveidotās sakarības (4.2), parāda apdzīvotības intensitātes izmaiņas augšējā līmenī ASE absorbcijas un emisijas ietekmē. Sakarība (4.8) apraksta ASE signāla jaudas izmaiņas visā šķiedras garumā abos izplatīšanās virzienos [40].

Kombinētā risinājuma datormodelēšana tika veikta *OptSim* programmas *Block mode* režīmā, pielietojot fizisko *EYCDFA* modeli. Fiziskā modeļa pamatā ir stāvokļa vienādojumu risināšana kombinētā pastiprinātāja stacionāram stāvoklim, ņemot vērā inversijas apdzīvotības blīvuma un optiskās jaudas izmaiņas pa visu leģētās šķiedras garumu. Pumpēšanas iedarbībā tiek ierosināti gan Er^{3+} , gan Yb^{3+} joni. Pārejas procesu rezultātā daļa iterbija enerģijas tiek atdota erbijam.

Kombinētā jaudas pastiprinātāja blokshēma ir parādīta 4.5. attēlā. Pirmais kaskādes slēguma posms sastāv no 1550 nm nepārtrauktā starojuma gaismas avota (*CW*) ar izejas jaudu 10 mW un *EDFA*, kurš pieslēgts kā priekšpastiprinātājs. *EDFA* priekšpastiprinātājam ir iestatīts fiksētais 23 dB pastiprinājums, kas izvēlēts vadoties pēc eksperimentālajiem datiem no avota [46].

Nākamajā kaskādes slēguma posmā tiek realizēts jaudas pastiprinātājs, kuru veido kombinētais ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYCDFA*) un ierosinošais avots ar jaudu 10 W. 975 nm pumpēšanas viļņa garums atbilst maksimālai iterbija jonu absorbcijas zonai, tāpēc ir iespējams veikt mērījumus arī ar īsākajiem leģētās šķiedras posmiem bez izteiktas nelineāro efektu ietekmes.

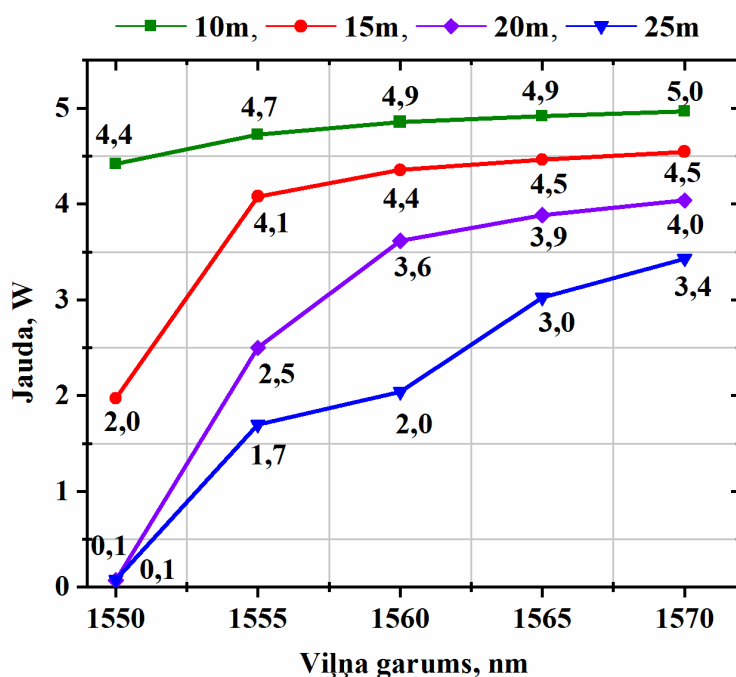


4.5. att. Kombinētā jaudas pastiprinātāja blokshēma.

Modelī ir izmantota iterbija šķiedra ar dubulto apvalku. Serdeņa diametrs ir 30 μm , iekšējā apvalka diametrs 650 μm un serdeņa profils veidots pēc LP_{01} modas. Erbija leģētās šķiedras garums ir konstants, savukārt iterbija šķiedrām garums tika mainīts no 10 līdz 25 m ar soli 5 m. Izejas signāla jauda ir mērīta ar optisko jaudas mērītāju viļņa garumu diapazonā 1550–1570 nm. Kaskādes slēguma maksimāli iespējamā izejas jauda ir apmēram 150 W [54].

Iegūtie rezultāti parāda, ka stabilāka izejas jaudas raksturlīkne viļņa garumu diapazonā 1550–1570 nm atbilst 10 m garai *YDF* šķiedrai, kur kombinētā pastiprinātāja izejas jaudas ir 36 dBm (4–5 W) robežās (att.4.6). Pagarinot iterbija šķiedru līdz 15 m, diapazonā no 1555 nm līdz 1565 nm jauda pieaug, savukārt, sākot ar 1570 nm *EYCDFA* pāriet piesātinājuma režīmā. Maksimālā iegūtā jaudas vērtība 15 m garai šķiedrai ir 36,5 dBm (4,5 W). Attēlā 4.6 redzams, ka abiem minētajiem šķiedru garumiem (10 un 15 m) pastiprinātāja izejas jaudas raksturlīknes ir samērā vienmērīgas ar starpību 0,1–0,2 W robežās.

20 m garajai *YDF* pie viļņa garuma 1550 nm izejas jauda ir mazāka par 30 dBm (1 W), savukārt pie 1555 nm ir novērojams jaudas kāpums līdz 34 dBm (2,5 W). Maksimālā izejas jauda šādai *EYCDFA* konfigurācijai ir 4 W.



4.6. att. *EYCDFA* jaudas izmaiņas pie dažādiem iterbija šķiedru garumiem.

Izmantojot 25 m garo iterbija šķiedru, maksimālā *EYCDFA* izejas jaudas vērtība atbilst 35 dBm (3,4 W). Respektīvi, palielinot leģētās šķiedras garumu divas reizes, jauda samazinās par 1 dBm. Vidējās jaudas vērtības viļņa garumu diapazonā 1550–1570 nm katram iterbija šķiedras garumam ir apkopotas 4.1 tabulā.

4.1 tabula

Vidējās *EYCDFA* izejas jaudas vērtības dažādiem iterbija šķiedras garumiem

YDF garums, m	Jauda, W	Jauda, dBm
10	4,8	36,8
15	3,9	35,9
20	2,8	34,5
25	2,0	33,0

EYCDFA pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora mērījumu rezultāti ir apkopoti 4.2 tabulā. No tabulas 4.2. redzams, ka maksimālajam *YDF* garumam (25 m) atbilst minimālais pastiprinājums (20,1 dB). Tas izskaidrojams ar enerģētiskajām pārejām starp iterbija un erbija joniem. Respektīvi, *MOPA* kaskādes slēgumā Yb^{3+} joni pāriet līmenī N_6 , kurš atbilst erbija līmenim N_3 , kur ir minimālā pastiprinātās spontānās emisijas ietekme. Respektīvi, ierosinošā avota jaudas iedarbībā aktīvā elementa joni tiek pakļauti vienīgi lietderīgās stimulētās emisijas iedarbībai.

4.2 tabula

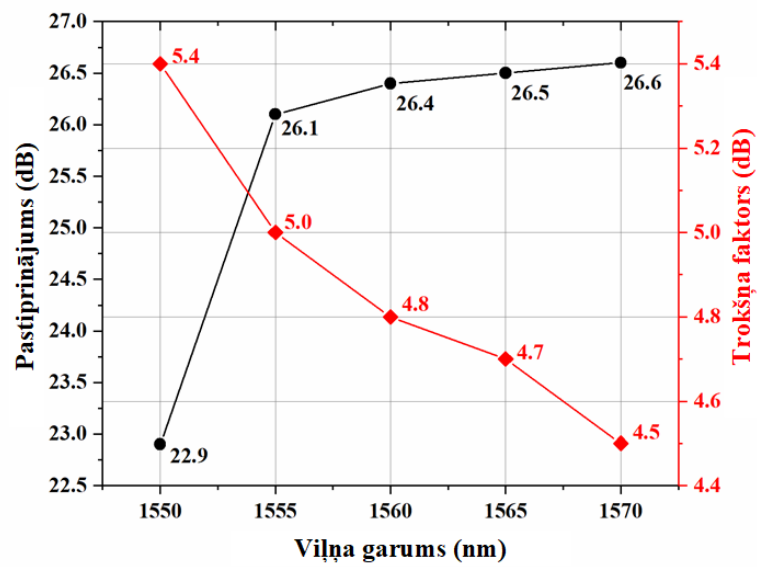
Vidējās *EYCDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora vērtības dažādiem iterbija šķiedras garumiem

YDF garums, m	Pastiprinājums, dB	Trokšņa faktors, dB
10	26,8	4,4
15	25,7	4,9
20	24,4	5,4
25	20,1	6,2

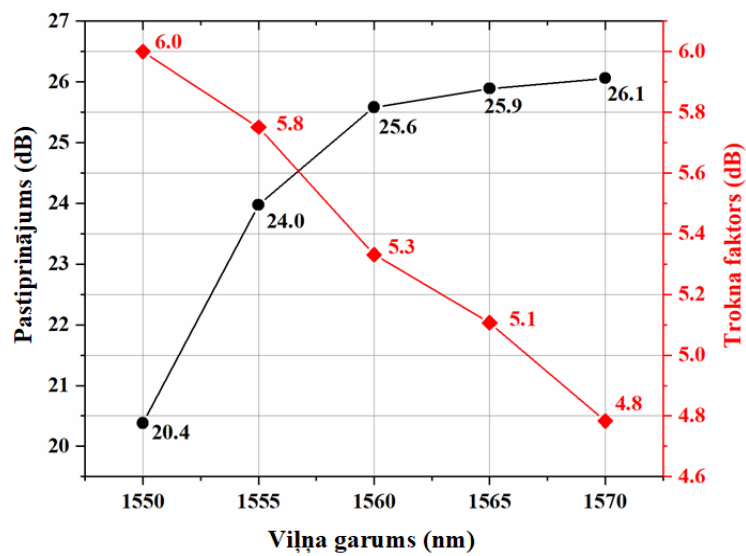
Nozīmīgākās pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora raksturlīknes ir parādītas 4.7 un 4.8. attēlos. Analizējot pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora mērījumu rezultātus, augstākais pastiprinājuma koeficients 26,6 dB tika iegūts gadījumā, kad iterbija šķiedras garums *EYCDFA* pastiprinātājā ir 15 m.

Apkopojot kombinētā erbija un iterbija leģētās šķiedras jaudas pastiprinātāja darbību atkarībā no izmantotās iterbija šķiedras garuma ir iegūti sekojošie secinājumi:

- Pielietojot 10 m garu iterbija šķiedru 1550–1570 nm diapazonā tiek iegūta stabila 36 dBm (5 W) izejas jauda, savukārt izmantojot 25 m garu iterbija šķiedru, maksimālā *EYCDFA* jaudas vērtība atbilst 35 dBm (3,4 W). Respektīvi, pagarinot iterbija šķiedras garumu divas reizes, jauda samazinās par 1 dBm.
- Kombinētā pastiprinātāja darbība ir atkarīga no vairākiem leģētu šķiedru parametriem: serdeņa un apvalka diametra, absorbcijas un emisijas koeficienta, kā arī šķiedras efektīvā laukuma.



4.7. att. EYCDFA pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes 15 m garajai īterbija šķiedrai.

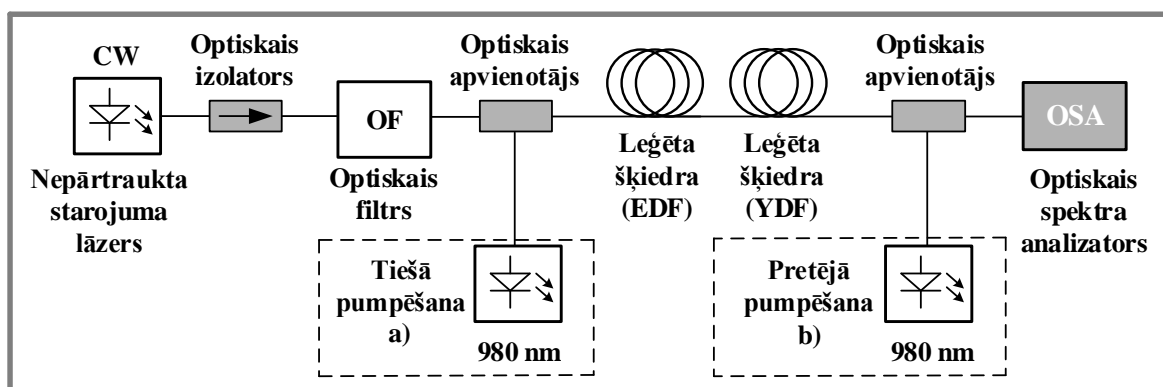


4.8. att. EYCDFA pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes 20 m garajai īterbija šķiedrai.

4.4. Kombinētā erbija un iterbija leģētās šķiedras pastiprinātāja eksperimentāla realizācija

Dotajā nodaļā, vadoties pēc simulāciju gaitā iegūtajiem rezultātiem tiek pētītas *EDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora uzlabošanas iespējas, pievienojot erbija leģētājai šķiedrai papildus Yb^{3+} leģētās šķiedras posmu. Šie pētījumi ir veikti doktorantūras prakses laikā Zviedrijas Karaliskajā Tehniskajā universitātē, Materiālzinību un nanofizikas katedras zinātniskajā laboratorijā.

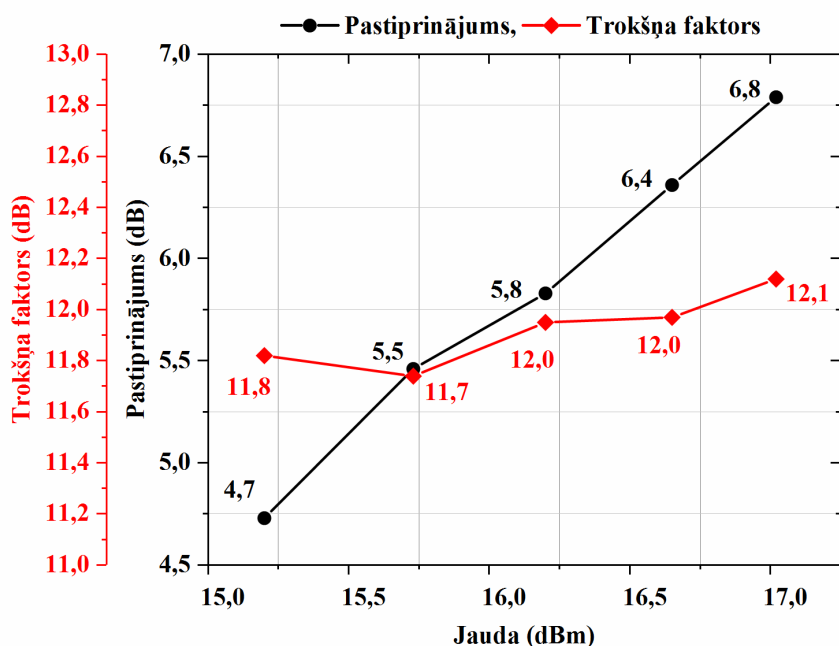
Darba gaitā ir praktiski izveidots kombinētais erbija un iterbija leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYDFA*), kurā ietilpst 5 m garš *EDF* posms un 5 m garš *YDF* posms, kā arī novērtētas šī risinājuma pielietošanas iespējas optiskā signāla pastiprināšanai vairākas spektrālajās joslās. Konkrētie leģētu šķiedru garumi tika izvēlēti optimizācijas gaitā. Respektīvi, bija jāveic spektrālie mērījumi ar dažādiem leģētu šķiedru paraugiem, līdz ir novērota abu retzemju elementu jonu vienlaicīga ierosināšanās. Spektrālie starpmērījumi ir nepieciešami tādēļ, ka iterbijam pie viļņa garuma 975 nm notiek aktīvs absorbcijas process ar augstu oscilēšanas pakāpi, bet atkārtotā absorbcija izraisa lielus jaudas zudumus neierosinātajā erbija šķiedrā. Izveidotā kombinētā pastiprinātāja eksperimentālā shēma ir parādīta 4.9. attēlā.



Att. 4.9. Kombinētā erbija un iterbija leģētās šķiedras pastiprinātāja eksperimentālā shēma ar pumpēšanu tiešajā virzienā (a) un pretējā virzienā (b) pie 980 nm.

Zemās jaudas (-30,6 dBm) nepārtraukta starojuma lāzers (CW) ar atgriezenisko saiti darbojas kā pamatstarojums. Tas nodrošina enerģijas plūsmu uz ierosinošo avotu, tāpēc pamatstarojuma jaudai jābūt mazākai. *EYDFA* darbība tiek pētīta abos pumpēšanas virzienos, līdz ar ko arī 980 nm ierosinošais avots sākumā tika nokonfigurēts darbībai tiešajā virzienā (a) un pēc tam pretējā virzienā (b). Erbija šķiedrai *EDF HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* raksturīgs 5,45 dB/m absorbcijas koeficients, 4,1 μm serdeņa rādiuss un skaitliskās apertūras rādītājs 0,22. Iterbija šķiedras *YDF LIEKKI Yb1200-4/125* serdeņa rādiusa un skaitliskās apertūras parametri ir analogiski *EDF*, savukārt absorbcijas koeficients atbilst 280 dB/m. Yb^{3+} jonu koncentrācija sastāda 15 %. Abu leģētu šķiedru papildus specifikācijas ir apskatāmas 4. pielikumā. *EYDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora vērtības ir nomērītas pie ierosinošā avota jaudas no 13,4 līdz 17,0 dBm.

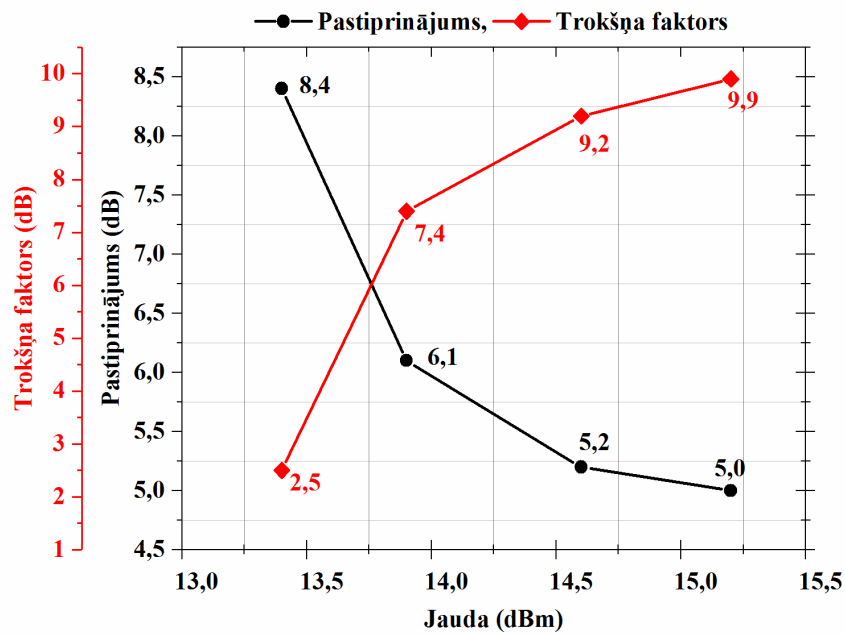
Izmantojot pumpēšanu tiešajā virzienā pie 980 nm (skat. att. 4.10.), signāla pastiprināšana sākas pie jaudas līmeņa 15,2 dBm. Augstākās pastiprinājuma koeficienta vērtības atbilst 5,8 dB pie 16,2 dBm un 6,8 dB pie 17,0 dBm. Šādi rādītāji ir maksimāli, ko iespējams iegūt ar tiešā virziena *EYDFA* konfigurāciju, jo tālāk palielinot ierosinošā avota jaudu pastiprinātājs pāriet piesātinājuma režīmā, un stimulētās emisijas process nenotiek. Trokšņa faktora vērtība atbilst stabilai vērtībai 12 dB, ar nenožīmīgām svārstībām 0,1 dB robežās.



Att. 4.10. *EYDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes izmantojot pumpēšanu tiešajā virzienā pie 980 nm.

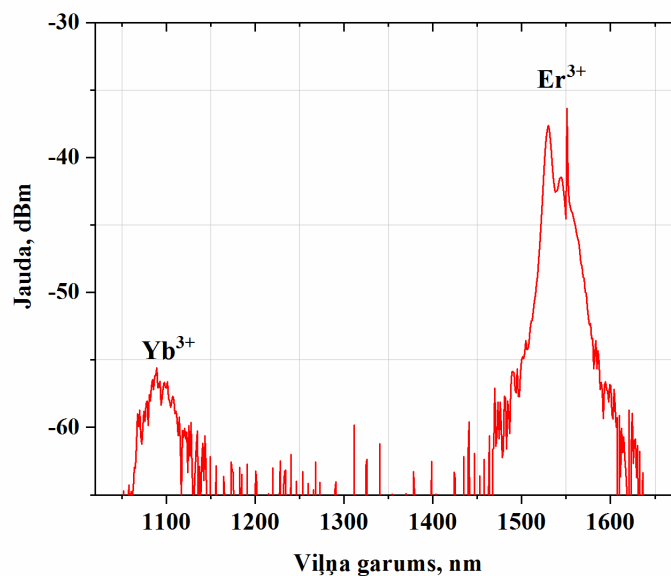
Rezultējošais pastiprinājuma un trokšņa faktora grafiks pumpēšanai pretējā virzienā apskatāms 4.11. attēlā. Maksimālās pastiprinājuma vērtības atbilst 8,4 dB pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm un 6,1 dB pie 13,9 dBm. Salīdzinot pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes redzams, ka trokšņa radītājs ir lielāks par pastiprinājumu. Racionālākais izskaidrojums šāda veida netipiskai parādībai ir saistīts ar izteikto pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) iedarbību. Respektīvi, gadījumā, kad *ASE* ir pārāk intensīva, tā veicina daļējo pastiprinājuma piesātinājumu (pašpiesātinājumu), tādējādi samazinot derīgajam signālam paredzēto optiskās jaudas daudzumu.

Palielinot ierosinošā avota jaudas līdz 14,6–15,2 dBm, tika iegūtas mazākas pastiprinājuma vērtības, kas atbilst 5 dB. Šāds rezultāts dod iespēju secināt, ka, piemērojot *EYDFA* pumpēšanu pretējā virzienā, ir iespējams iegūt lielāko pastiprinājumu pie zemākajām ierosinošā avota jaudām. Izstrādājot kombinētos optiskos pastiprinātājus, tas ir nozīmīgs ieguvums energoefektivitātes ziņā.



Att. 4.11. *EYDFA* pastiprinājuma un troksņa faktora raksturlīknes izmantojot pumpēšanu pretējā virzienā pie 980 nm.

Kombinētā pastiprinātāja ASE spektrs parādīts attēlā 4.12. Var redzēt, ka iterbija jonu stimulētais starojums darbojas kā papildus ierosinošais avots, kurš rezultējas jaudas pieaugumā un attiecīgi optiskā signāla pastiprinājumā viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm. Respektīvi, izmantojot kombinēto risinājumu ar virknē saslēgtajiem *EDF* un *YDF* posmiem, ir iespējams paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no standarta 47 nm līdz 82 nm, tādējādi pārklājot viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmas C (1530–1565 nm) un L (1565–1625 nm) frekvenču joslas.



Att. 4.12. Kombinētā pastiprinātāja ASE spektrs.

Izanalizējot simulāciju un eksperimentālo mērījumu rezultātus, tika iegūti šādi secinājumi:

- Izmantojot *EYDFA* konfigurāciju ar pumpēšana pretējā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, ierosinošā avota jaudas palielināšana noved pie mazākajiem pastiprinājuma koeficienta rādītājiem. Respektīvi, maksimālās pastiprinājuma vērtības atbilst 8,4 dB pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm, savukārt pie 15,2 dBm pastiprinājuma koeficients sasniedz vien 5 dB. Iegūtajam rezultātam ir tiešā praktiskā nozīme no energoefektivitātes viedokļa.
- Praktiski noteikts, ka, izmantojot kombinēto risinājumu ar virknē saslēgtajiem erbija un iterbija šķiedras posmiem, ir iespējams paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no esošajiem 47 nm līdz 82 nm.
- Paplašinātā spektrālā josla 1000–1100 nm robežās var tikt izmantota kā ierosinošā avota pumpēšanas viļņa garums turpmākajai *EYDFA* izpētei. Turklāt, iegūto 1100 nm iespējams izmantot monitoringa un sensoru sistēmās.
- *EYCDFA* darbība ir atkarīga no vairākiem leģētu šķiedru parametriem: serdeņa un apvalka diametriem, absorbcijas un emisijas koeficienta, kā arī šķiedras efektīvā laukuma un Er/Yb jonu koncentrācijas. Ņemot vērā šos faktorus, kombinētā erbija un iterbija pastiprinātāja darbību iespējams uzlabot, pielietojot leģētās šķiedras ar augtāko retzemju elementa jonu koncentrāciju.

Kopsavilkums

Darba 3. nodaļā ar šķērsnobīdes metodi ir veikti efektīvā laukuma eksperimentālie mērījumi ar erbiju un iterbiju leģētām optiskajām šķiedrām pie diviem viļņa garumiem: 1310 nm un 1550 nm. Šķiedras efektīvais laukums ir atkarīgs no vairākiem šķiedras parametriem, tādiem kā serdeņa rādiuss, kā arī no kodola un apvalka laušanas koeficientu starpības. Efektīvā laukuma parametram ir noteicošā loma nelineāro efektu ietekmes analīzē, tāpēc izstrādājot optiskos pastiprinātājus, ir būtiski precīzi noteikt šo fizikālo lielumu.

Šobrīd tiek izmantotas vairākas aprobētas efektīvā laukuma mērīšanas metodes, no kurām vēl neviena nav standartizēta. Viena no plaši pielietotām metodēm ir balstīta uz optisko šķiedru šķērsnobīdi. Tās pamatā ir sekojoša tehnika: optiskā jauda tiek pārraidīta no vienas šķiedras otrā, šo šķiedru asis ir paralēlas, bet sāniski nobīdītas viena no otras. Metodes priekšrocība salīdzinājumā ar interferometrisko metodi ir vienkārša realizācija, bet precīzi efektīvā laukuma mērījumu rezultāti.

Ar eksperimentālo šķērsnobīdes metodi iegūtie efektīvā laukuma mērījumi pie diviem dažādiem jaudas līmeņiem parāda, ka: erbija šķiedrai A_{eff} vērtības pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Iterbijas šķiedras gadījumā pie 1310 nm A_{eff} ir $106,2 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm $129,2 \mu\text{m}^2$. Efektīvā laukuma mērījumu rezultāti parāda, ka kombinēto optisko pastiprinātāju izstrādē ir lietderīgi izmantot ar iterbiju leģētās šķiedras, kurām ir lielāks efektīvais laukums.

Darba 4. nodaļā tika novērtēta iespēja izmantot ar iterbiju leģētās optiskās šķiedras *EDFA* efektivitātes uzlabošanā. Sākumā tiek pētītas iterbijas šķiedras fizikālās īpašības, stimulētās emisijas norises process, un ir izanalizēta *YDF* izmantošana pastiprinājuma viļņa garumu diapazona paplašināšanai. Ar datorprogrammu modelēts oscilatora jaudas pastiprinātājs *MOPA*, lai novērtētu kombinētā pastiprinātāja izejas jaudas gadījumā, ja tiek izmantotas gan ar erbiju, gan ar iterbiju joniem dubultleģētā šķiedra. Erbija leģētās šķiedras garums ir konstants, savukārt iterbijas šķiedrām garums tika manīts no 10 līdz 25 m ar soli 5 m.

Nākamajā posmā ir eksperimentāli realizēts kombinētais erbija un iterbijas leģētās šķiedras pastiprinātājs *EYDFA*, lai novērtētu *EDFA* pastiprinājuma un trokšņa faktora uzlabošanas iespējas, pievienojot erbija leģētājai šķiedrai papildus ar Yb^{3+} joniem leģētās šķiedras posmu.

Izmantojot *EYDFA* pumpēšanu tiešajā virzienā pie 980 nm augstākās pastiprinājuma koeficienta vērtības atbilst 5,8 dB pie ierosinošā avota jaudas 16,2 dBm un 6,8 dB pie jaudas 17,0 dBm. Trokšņa faktora vērtība atbilst stabilai vērtībai 12 dB, ar svārstībām 0,1 dB robežās.

Pumpēšanai pretējā virzienā pie 980 nm maksimāli iegūtās pastiprinājuma koeficienta vērtības atbilst 8,4 dB pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm un 6,1 dB pie 13,9 dBm. Augstākais trokšņa faktora rādītājs šādai *EDFA* konfigurācijai ir 9,9 dB. Analizējot pastiprinājuma un trokšņa faktora raksturlīknes noskaidrots, ka pretējās pumpēšanas gadījumā trokšņa rādītājs ir lielāks par pastiprinājumu. Racionālākais izskaidrojums tādai netipiskai parādībai ir saistīts ar izteikto pastiprinātās spontānās emisijas (*ASE*) iedarbību.

NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI

Optiskās jaudas zudumus izraisa vājinājums optiskajās šķiedrās, kurš rodas izkliedes un absorbcijas procesu rezultātā, un tā ir aktuāla problēma pārraidot optisko signālu lielos attālumos. Respektīvi, ir jānodrošina jaudas rezerves, jo, bitu plūsmas uzturēšanai raidītājam ir jāpadod jaudīgāks signāls, atbilstoši – tas ir jāpastiprina. Šādam nolūkam tiek izmantoti optiskie pastiprinātāji, jo atšķirībā no reģeneratoriem tie nodrošina optiskā signāla pastiprināšanu bez optiski – elektriskās pārveidošanas. Optiskie pastiprinātāji ir pielāgojami datu pārraides ātrumam un modulācijas formātam, kā arī var vienlaicīgi pastiprināt vairākus optiskos signālus plašā frekvenču diapazonā.

Darba pirmajā nodaļā ir aprakstīti un salīdzināti pēc fizikālajām īpašībām izplatītākie optiskie pastiprinātāji. Izšķir trīs optisko pastiprinātāju pamatgrupas: pastiprinātāji, kuru darbības pamatā ir nelineārie optiskie efekti – uz Briljuēna-Mandelštama un Ramana izkliedes efektu bāzes, kā arī uz četru viļņu mijiedarbes (*FWM*) efekta balstīti pastiprinātāji (*FOPA*); pastiprinātāji uz leģētu šķiedru bāzes, kur aktīvā vide ir ar retzemju elementu joniem leģēta optiskā šķiedra (*REDFA*) un lāzera tipa pusvadītāju pastiprinātāji, kuros fotona emisiju veicina elektronu un caurumu rekombinācija pusvadītājā tiešās strāvas iedarbībā, nevis ārējā pumpēšana ar optisko starojumu (*SOA*, *LOA*). Katram pastiprinātāju tipam ir noteiktas īpašības, priekšrocības un trūkumi.

Respektīvi, apskatot katrai pastiprinātāju grupai raksturīgas fizikālās īpašības un darbības principus, konstatēts, ka atbilstošākais risinājums, kurš vērsts uz viļņu garumu diapazona paplašināšanu ir ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru pastiprinātāju (*REDFA*) izmantošana. Atkarībā no leģējošā elementa *REDFA* nodrošina iespēju paplašināt caurlaides joslu līdz 35 nm. Būtiskākā *REDFA* priekšrocība, salīdzinājumā ar Ramana pastiprinātājiem un *SOA* ir neatkarība no polarizācijas stāvokļa un stabilitāte pēc temperatūras, savukārt salīdzinājumā ar parametriskajiem pastiprinātājiem (*FOPA*), tos ir vienkāršāk realizēt praktiski.

Erbija leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EDFA*) ir mūsdienās visplašāk izmantots leģētās šķiedras pastiprinātājs, jo darba diapazons pilnīgi sakrīt ar telekomunikāciju pārraides sistēmās izmantotās optiskās šķiedras caurspīdības logu 1550 nm, taču *EDFA* pastiprinātājam ir raksturīga ierobežota caurlaides josla, kā arī augsts trokšņa faktora rādītājs. Ņemot vērā doto faktoru, ir aktuāli risinājumi, kas vērsti uz jaunā tipa optisko pastiprinātāju izstrādi ar mērķi iegūt plašāko pastiprinājuma spektru.

Otrajā nodaļā veiktajiem pētījumiem ir divi posmi. Sakumā, ar simulācijām, tika pētīta ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EDFA*) pamatparametru – pastiprinājuma koeficienta un trokšņa faktora atkarība no leģētās šķiedras garuma un jaudas. Simulācijas mērķis ir novērtēt pastiprinājuma izmaiņas un noteikt optimālos šķiedras garumus. Par optimālo kritēriju tiek pieņemts tas leģētās šķiedras garums, ar kuru var iegūt maksimālo pastiprinājuma koeficientu. Apkopojot visus simulāciju rezultātus ir secināts, ka pastiprinājums lineāri pieaug, kā arī ir iegūti provizoriskie leģētu šķiedru garumi, ar kuriem tālāk veikta *EDFA* eksperimentālā izpēte.

Eksperimentālā *EDFA* darbības izpēte ir veikta izmantojot konfigurāciju ar pumpēšanu tiešajā virzienā un piemērojot divvirzienu pumpēšanu. Eksperimentālo mērījumu gaitā tika novērtēta *EDFA* spēja pastiprināt vājos signālus, kā arī pastiprinājuma koeficienta

piesātinājums. Šajos mērījumos ir izmantotas erbija šķiedras no diviem ražotājiem: *Highwave* (*HWT*) un *Fibercore*. Izmantotajām erbija šķiedrām atšķiras tādi parametri kā absorbcijas koeficients, serdeņa rādiuss un skaitliskā apertūra, kā arī ir dažāda aktīvo jonu koncentrācija. Respektīvi, atšķirīgie šķiedru fizikālie un ģeometriskie parametri ietekmē optiskā pastiprinātāja darbību.

Darba trešajā nodaļā ir veikta efektīvā laukuma A_{eff} parametra izpēte, jo dotajam parametram ir noteicošā loma nelineāro efektu ietekmes analīzē. Eksperimentāli novērtētas efektīvā laukuma parametra izmaiņas erbija un iterbija leģētām šķiedrām, izmantojot šķērsnobīdes metodi pie diviem viļņu garumiem: 1310 nm un 1550 nm.

Ceturtajā nodaļā ir praktiski izveidots kombinētais erbija un iterbija leģētās šķiedras pastiprinātājs (*EYDFA*), kurā ietilpst 5 m garš *EDF* posms un 5m garš *YDF* posms, kā arī novērtētas šī risinājuma pielietošanas iespējas optiskā signāla pastiprināšanai vairākās spektrālajās joslās.

1. Veicot *EDFA* pastiprinātāja datormodelēšanu tiešajā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, tika konstatēts, ka pie ierosinošā avota jaudas 200 mW 15 m garajai erbija šķiedrai pastiprinājuma koeficienta vērtība ir 24 dB un tā ir praktiski vienāda visos pārraides sistēmas kanālos – atšķirība ir tikai 0,2 dB. Jaudai pieaugot līdz 400 mW un 500 mW, pastiprinājuma vērtības sasniedz 27–28 dB. Svarīgi pieminēt, ka, izmantojot 15 m garo šķiedru, iegūtais pastiprinājums ir vienmērīgi sadalīts starp visiem sakaru sistēmas kanāliem. Trokšņa faktora vērtība šādai *EDFA* konfigurācijai ir 4,3 dB robežās.
2. *EDFA* pastiprinātāja darbības modelēšana pretējā pumpēšanas virzienā pie 1480 nm nodrošina maksimālo pastiprinājuma koeficientu 40,7 dB, izmantojot 30 m garu erbija šķiedru. Respektīvi, no pastiprinājuma efektivitātes viedokļa šāds šķiedras garums ir optimāls, jo nodrošina par 12 dB lielāku pastiprinājuma koeficientu, taču trokšņa faktora rādītājs sasniedz 9–15 dB.
3. Eksperimentāli noteikts, ka vāju signālu pastiprināšanas režīmā ar 15 m garu *HWT* erbija šķiedras paraugu un divvirzienu *EDFA* pumpēšanu iespējams iegūt 14,4 dB pastiprinājumu ar minimālo ierosinošā avota jaudu 21,3 mW. Tādējādi tiek nodrošināts jaudas ietaupījums līdz 16 mW, salīdzinot ar vienvirziena pumpēšanu, kur analogiskā pastiprinājuma koeficienta sasniegšanai ir jāpatērē 37,3 mW.
4. Ar šķērsnobīdes metodi nomērītas efektīvā laukuma vērtības ar erbiju leģētai šķiedrai pie 1310 nm atbilst $36,5 \mu\text{m}^2$, savukārt pie 1550 nm – pieaug līdz $57,1 \mu\text{m}^2$. Iterbija šķiedras gadījumā A_{eff} parametrs ir lielāks: pie 1310 nm $A_{\text{eff}} = 106,2 \mu\text{m}^2$, pie 1550 nm – $129,6 \mu\text{m}^2$. Svarīgi atzīmēt, ka, veicot A_{eff} mērījumus pie dažādiem gaismas avota izejas jaudām, tiek iegūtas atšķirīgas šķiedras efektīvā laukuma vērtības. Erbija šķiedras gadījumā starpība starp A_{eff} rādītājiem, kas nomērītas pie jaudas līmeņiem P_1 un P_2 , ir līdz $1 \mu\text{m}^2$, savukārt iterbija šķiedrai – $3 \mu\text{m}^2$ robežās. Respektīvi, efektīvā laukuma mērījumi pie dažādam jaudām sniedz plašāku informāciju par optiskā starojuma sadalījuma raksturu pētāmajā šķiedrā.

5. Kombinētā ar erbija un iterbija joniem leģētās šķiedras jaudas pastiprinātāja (*EYCDFA*) izpētes gaitā noteikts, ka, lietojot 10 m garu iterbija šķiedru, 1550–1570 nm diapazonā tiek iegūta stabila 36 dBm (5 W) izejas jauda. Izmantojot 25 m garu iterbija šķiedru, maksimālā *EYCDFA* jaudas vērtība atbilst 35 dBm (3,4 W). Tādējādi, pagarinot iterbija šķiedras garumu divas reizes, jauda samazinās par 1 dBm.
6. Izmantojot kombinētā ar erbiju un iterbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (*EYDFA*) konfigurāciju ar pumpēšanu pretējā virzienā pie viļņa garuma 980 nm, maksimāli iegūtais pastiprinājuma koeficients pie ierosinošā avota jaudas 13,3 dBm ir 8,4 dB. Palielinot ierosinošā avota jaudu līdz 15,2 dBm, maksimālais pastiprinājuma koeficients sasniedz tikai 5 dB. Respektīvi, ar pretējo *EYDFA* pumpēšanu tiek nodrošināts jaudas ietaupījums par 2 dBm.
7. Analizējot eksperimentāli iegūto kombinētā *EYDFA* pastiprinātāja spektru, ir noteikts, ka iterbija jonu stimulētais starojums darbojas kā papildu ierosinošais avots. Šāds process veicina jaudas pieaugumu un attiecīgi optiskā signāla pastiprināšanu viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm. Paplašinātā spektrālā josla var tikt praktiski izmantota kā ierosinošā avota pumpēšanas viļņa garums turpmākajai kombinētā pastiprinātāja izpētei.

Promocijas darba pētījumu rezultāti izmantoti divu Latvijas zinātniski pētniecisko projektu realizācijai: Valsts pētījumu programmas „Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai (SOPHIS)” projekts nr. 4 - tehnoloģiju izstrāde gudro pilsētu attīstībai. Projekts līg. Nr.10-4/VPP-4/11, 2014. g.- 2017.g.; Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai, Eiropas Sociālā fonda CPZ projekts Nr.2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016 2013.-2015. g.

Promocijas darba pētījumu rezultāti izmantoti divu Latvijas zinātniskās pētniecības projektu realizācijai: valsts pētījumu programmas “Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai & viedai pilsētai un sabiedrībai (SOPHIS)” projekts nr. 4 – tehnoloģiju izstrāde gudro pilsētu attīstībai. Projekta līg. Nr. 10-4/VPP-4/11, 2014.–2017. g.; Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai, Eiropas Sociālā fonda CPZ projekts Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016 2013.–2015. g.

Promocijas darba gaitā ir veiksmīgi sasniegti šādi jaunieguvumi:

1. Izstrādāta un aprobēta šķērsnobīdes metode ar retzemju elementiem leģētu optisko šķiedru efektīvā laukuma novērtēšanai.
2. Eksperimentāli, apvienojot erbija un iterbija leģētās šķiedras segmentus, ir iegūts pastiprinājums viļņa garumu diapazonā 1000–1100 nm, kas dod iespēju paplašināt erbija pastiprinājuma joslu no 47 nm līdz 82 nm.

Nobeigumā jāuzsver, ka optisko pastiprinātāju izpēte ir perspektīvs un efektīvs virziens mūsdienu šķiedru optikas pārraides sistēmās. Iegūtie promocijas darba rezultāti var tikt tālāk izmantoti kombinēto risinājumu izstrādē, jo, vadoties pēc šobrīd aktuālajām tendencēm ar retzemju elementiem leģēto optisko šķiedru ražošanas industrijā, tiek pētītas arī tūlija (Tm^{3+}) un bismuta (Bi^{3+}) šķiedras. Respektīvi, autores turpmākā pētniecības darbība ir vērsta uz šo šķiedru izmantošanas iespēju izpēti optiskā signāla pastiprināšanā.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Abedin, K.S. Recent developments of multicore multimode fiber amplifiers for SDM systems// Proceedings of the 21st OptoElectronics and Communications and International Conference on Photonics in Switching (OECC/PS). – Niigata-shi, Japan, July 3–7. – 2016. – Article number 7718285.
- [2] Abedin, K.S. Taunay, T.F. Fishteyn, M. DiGiovanni, D.J. Supradeepa, V.R. Fini, J.M. Yan, M.F. Zhu, B. Monberg, E.M. Dimarcello, F.V. Cladding-pumped erbium-doped multicore fiber amplifier// Optics Express. – 2012. – Vol.20, No.18. – pp. 20191–20200.
- [3] Ahmad, R., Chatigny, S. and Rochette, M. Broadband amplification of high power 40 Gb/s channels using multimode Er-Yb doped fiber// Optics Express. – 2010. – Vol.18, No.19. – pp.1–11.
- [4] Agrawal, G. P. Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition, – USA: Academic Press, Burlington, – 2007. – 529 p.
- [5] Agrawal, G. P. Fiber-Optic Communication Systems, USA: John Wiley & Sons, New York, – 1997. – 576 p.
- [6] Agrell, E. et al. Roadmap of optical communications// Journal of Optics. – 2016. – Vol.18, No.063002. – pp. 40.
- [7] Aiso, K., Tashiro, Y., Suzuki, T., Yagi, T. Development of Er/Yb Co-doped Fiber for High-Power Optical Amplifiers// Furukawa Review. – 2001. No. 20, – pp. 41–45.
- [8] Alarcon, A. Data center optics at the heart of the hyperdata world// EXFO Inc. White Paper. – 2017.
- [9] Alvarado, A., Ives, D.J., Savory, S. J. and Bayvel, P. Impact of Amplifier Noise Figure on Network Throughput// Proceedings of Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). – Anaheim, USA, March 20–24. – 2016. – pp.1–3.
- [10] Amma, Y., Hosokawa, T., Ono, H., Ichii, K., Takenaga, K., Matsuo, S., Yamada, M. Ring-Core Multicore Few-Mode Erbium-Doped Fiber Amplifier// IEEE Photonics Technology Letters. – 2017. – Vol.29, No.24. – pp. 2163–2166.
- [11] Amma, Y. et al. High-density Multicore Fiber with Heterogeneous Core Arrangement// Proceedings of the Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). – Los Angeles, USA, March 22–26. – 2015. – pp. 1–3.
- [12] Andrekson, P.A. Optical Fiber-based Phase Sensitive Amplifiers and their Application in Optical Communication Systems// Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). – San Jose, USA, June 5–10. – 2016, – pp.1–2.
- [13] Ania-Castanon, J. D., Turitsyn, S. K. and Chernikov, S. Raman Amplifiers: Distributed Raman amplification speeds communication// Laser Focus World. – January 2006.
- [14] Applications for Distributed Raman Amplification// Finisar Corporation White paper. – November 2012.
- [15] Artiglia, M. et al. Mode Field Diameter Measurements in Single-Mode Optical Fibres// IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1989. – No.7. – pp. 1139–1152.

- [16] Bayvel, P., Radmore, P. and Giles, I.P. All-fibre Brillouin amplifiers in single mode fibres and fibre ring resonators// IEE Colloquium on Optical Amplifiers for Communications. – 1992. – pp. 19/1–19/4.
- [17] Bayvel, P., Maher, R., Xu, T., Liga, G., Shevchenko, N. A., Lavery, D., Alvarado, A., Killey, R. I. Maximizing the optical network capacity// Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2016. – Vol. 374, No. 2062. – pp. 20140440.
- [18] Bennett, G., Wu, K.T., Malik, A., Roy, S. and Awadalla, A. A Review of High-Speed Coherent Transmission Technologies for Long-Haul DWDM Transmission at 100G and Beyond, Integrated Circuits for Communications// IEEE Communications Magazine. – 2014. – pp.102–110.
- [19] Billington, R. Effective Area of Optical Fibres - Definition and Measurement Techniques// Centre for Optical and Environmental Metrology, National Physical Laboratory.
- [20] Binh, L.N., Huynh, T.L., Sargent, S. and Kirpalani, A. Fiber Raman Amplification in Ultra-high Speed Ultra-long Haul Transmission: Gain Profile, Noises and Transmission Performance// MECSE-1 Technical Report, Monash University, – 2007. – pp. 22.
- [21] Bobrovs V., Ivanovs G. Parameter Evaluation of a Dense Optical Network// Electronics and Electrical Engineering. – 2006. No.4. – pp. 33–36.
- [22] Bobrovs, V., Makovejs, S., Porins, J. and Ivanovs, G. Demonstration and Analysis of Dual Nature of Stimulated Raman Scattering in Fiber Optical Communications Systems// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2006, No. 2. – pp.34–46.
- [23] Borghesani, A. Semiconductor Optical Amplifiers for Advanced Optical Applications// Proceedings of International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). – Nottingham, United Kingdom, June 18–22. – 2006. – Vol.1 – pp. 119–122.
- [24] Chen, H., Fontaine, N.K., Ryf, R., Jin, C., Huang, B. et.al. Demonstration of cladding-pumped six-core Erbium-doped fiber amplifier// Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol.34, No.8. – pp. 1654–1660.
- [25] Coherent WDM Technologies// Infinera Corporation White paper. – 2016. Document Number: WP-CT-04-2016. – pp.16.
- [26] Çokrak, A.Cem., Altuncu, A. Gain and Noise Figure Performance of Erbium Doped Fiber Amplifiers // Journal of Electrical & Electronics Engineering. – 2004. – Vol.4, No.2. – pp.1112–1122.
- [27] Desai, P., Shah, F., Rare Earth Doped Fibers// Department of Electronics and Communication Engineering, Institute of Technology, Nirma University, – India: Ahmedabad, – pp. 1–4.
- [28] Dignon, Michael J.F. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Second Edition, Revised and Expanded, – USA: Marcel Dekker, 2001. – 795 p.
- [29] Downie, J.D., Li, M. J. and Makovejs, S. Optical fibers for flexible networks and systems [Invited]// OSA Journal of Optical Communications and Networking. – 2016. – Vol.8, No.7. – pp. A1–A11.

- [30] Durairaj, V. Amplification in Ytterbium-doped fibers (Master Thesis)// Aalto university, School of Electrical Engineering. – Finland: Helsinki. – 2013. – 54 p.
- [31] Eilchi, M., Parvin, P. Gain Saturation in Optical Fiber Laser Amplifiers// IntechOpen. – 2016. – pp. 297–320.
- [32] Emami, S. D., Hajireza, P., F. Abd-Rahman, F., Abdul-Rashid, H.A., Ahmad, H. and Harun, S. W. Wideband hybrid amplifier operating in S-band region// Proceeding of the Progress In Electromagnetics Research (PIERS). – Cambridge, USA, July 5–8. – 2010. – pp. 301–313.
- [33] Essiambre, R. J. and Tkach, R.W. Capacity Trends and Limits of Optical Communication Networks// Proceedings of the IEEE. – 2012. – Vol.100, No. 5. – pp.1036–1055.
- [34] Felinskyi G.S., Korotkov P.A. Raman Threshold and Optical Gain Bandwidth in Silica Fibers// Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2008. –Vol.11, No.4. – pp. 360–363.
- [35] Foschini, G. J. and Gans, M. J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas// Wireless Personal Communications. – 1998. – Vol. 6, No. 3. – pp. 311–335.
- [36] Idachaba, F., Ike, D. U. and Hope, O. Future Trends in Fiber Optics Communication// Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE). – London, U.K., July 2–4. – 2014.
- [37] ITU-T G. 694.1, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// International Telecommunication Union. – 2012. – pp. 1–16.
- [38] Ivaniga, T. and Ivaniga, P. Comparison of the Optical Amplifiers EDFA and SOA Based on the BER and Q-Factor in C-band // Hindawi Advances in Optical Technologies. – Vol. 2017. – pp.1–9.
- [39] Galdino, L., Edwards, A., Ionescu, M., James, J., Pelouch, W., Sillekens, E., Semrau, D., Lavery, D., Killey, R.I., Barnes, S., Bayvel, P. and Desbruslais. S. 120 Tbit/s Transmission over Single Mode Fibre using Continuous 91 nm Hybrid Raman-EDFA Amplification. arXiv:1804.01845 [physics.app-ph]. – 2018. – pp. 1–3.
- [40] Hao, L. Ytterbium-doped fiber amplifiers: Computer modeling of amplifier systems and a preliminary electron microscopy study of single ytterbium atoms in doped optical fibers (Master Thesis)// McMaster Univeristy. – Canada: Hamilton. – 2011. – p.165.
- [41] He,Y., Han, Q., Ning, J. and Xiao, H. A Review of Recent Development of Efficient High-Power Continuous-Wave Er-Yb Codoped Fiber Amplifiers// Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering. – 2012. – Vol.5, No.2. – pp. 96–102.
- [42] Hogan, H. (Ed.) Getting More Out of Telecom Fiber// Photonics Spectra magazine. – 2018. – Vol.52, No.3. – pp. 36–39.
- [43] Humphrey, D.A. et.al. Comparison of three techniques for effective area measurement of single-mode optical fibres// NIST Special Publication. – 2000. Vol. 953. – pp.61–64.
- [44] Jain, P., Vashist, K. and Gupta, N. Comparison Study of Hybrid Optical Amplifier// International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET). – 2014. – Vol.3,No.9. – pp. 1289–1292.

- [45] Jain, S., Rancaño, V. J. F., May-Smith, T. C., Petropoulos, P., Sahu, J. K., and Richardson, D. J. Multi-Element Fiber Technology for Space-Division Multiplexing Applications// Optics Express. – 2014. – Vol. 22, No. 4. – pp. 3787–3796.
- [46] Jeong Y., Sahu, J. K., Soh, D. B. S., Codemard, C. A. and Nilsson, J. Tunable single-frequency ytterbium-sensitized erbium-doped fiber MOPA source with 150 W (51.8 dBm) of output power at 1563 nm // Proceedings on Optical Fiber Communication Conference (OFC). – Anaheim, USA, March 6–11. – 2005. – pp. 1–3.
- [47] Jollivet, C., Farley, K., Carter, A. and Tankala, K. Multiple applications benefit from advances in high-performance Er:Yb co-doped double-clad fiber// Laser Focus World. – September 2016. – pp. 51–56.
- [48] Kaczmarek, P., Sobon, G., Waz, A., Dudzik, G. et al. A universal all-in-fiber coherent light source at wavelength 1550 nm and output power 5 W// Photonics Letters of Poland. – 2017. – Vol. 6, No. 1. – pp. 20–22.
- [49] Kasap, S.O. Principles of Electronic Materials and Devices, 3rd Edition, – USA: McGraw-Hill Higher Education, New York, 2005. – 768 p.
- [50] Kaur, I. and Gupta, N. Hybrid Fiber Amplifier (Optical Communications Systems ed. by Das, N.). Book Chapter 4. InTech. – pp. 103–122.
- [51] Keiser, G. Optical Fiber Communications, 5th Edition, – India: Tata McGraw-Hill Education, New Delhi, – 2013. – 688 p.
- [52] **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings on Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Riga, Latvia, November 5–6. – 2015. – pp. 34–37.
- [53] **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G., Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of the Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Prague, Czech Republic, July 6–9. – 2015. – pp. 502–505.
- [54] **Lavrinovica I.**, Porins J., An improvement of EDFA efficiency by using Ytterbium co-doped optical fibers// Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). – Bulgaria, Varna, June 6–9. – 2016. – pp. 1–3.
- [55] **Lavrinovica, I.**, Porins, J., Bruklitis, E., Supe, A. Evaluation of Effective Area and Nonlinearity Coefficient of Erbium-Ytterbium Doped Optical Fibers// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – China, Shanghai, August 8–11. – 2016. – pp. 3438–3441.
- [56] Linear Optical Amplifier Brochure on Lightwavestore.com/ Internets. – http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC-SOA-001C_pdf5.pdf.
- [57] Mandana, N., Badeka, P., Chahande, P., Briley, B. A Survey on Rare Earth Doped Optical Fiber Amplifiers// Proceedings of the Electro/Information Technology (EIT) IEEE International Conference. – South Dakota, USA, May 9–11. – 2013. – p. 4.

- [58] Marhic, M.E., Andrekson, P.A., Petropoulos, P., Radic, S., Peucheret, Ch. and Jazayerifar, M. Fiber optical parametric amplifiers in optical communication systems// Laser Photonics and Reviews. – 2015. – Vol.9, No.1. – pp. 50–74.
- [59] Materials for the course EE7950: Statistical Communication Theory: Shannon's Channel Capacity// University of Alberta, Faculty of Electrical and Computer Engineering. – Canada: Edmonton.
- [60] Miglani, R., Malhotra, J.S., Gaba, G.S. Gain profile analysis in fiber optical parametric amplifiers using SBS technique// Proceedings of the International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN). – Brno, Czech Republic, October 6–7. – 2015. – Vol.1. – 59 p.
- [61] Miskowiec A., Roberts T.M., Quimby, R.S. (Advisor) Limitations on Gain in Rare-Earth-Doped Fiber Amplifiers due to Amplified Spontaneous Emission (Final Project)// Worcester Polytechnic Institute. – USA: Massachusetts. – 2009. – 124 p.
- [62] Miyamoto, Y. and Takenouchi, H. Metro Dense Space-division-multiplexing Optical Communications Technology for Petabit-per-second Class Transmission// NTT Technical Review Regular Articles. – 2014. – pp. 1–7.
- [63] Morioka, T. New Generation Optical Infrastructure Technologies: EXAT Initiative Towards 2020 and Beyond// IEEE. – 2009. – pp. 1–2.
- [64] Namihira, Y., Relationship between nonlinear effective area and mode field diameter for dispersion shifted fibres// Electronic Letters. – 1994. – Vol.30, No.3. – pp. 263–264.
- [65] Namihira, Y., Miyagi, K., Abdur Razzak, S.M. Relationship between Effective Area and Mode Field Diameter for Photonic Crystal Fibers// IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol.47, No.11. – pp. 20–24.
- [66] Olonkins, S. Parametrisko un kombinēto pastiprinātāju pielietojuma izpēte WDM sakaru sistēmās, promocijas darbs// RTU Izdevniecība. – 2015. – 159 lpp.
- [67] Olsson, S. L.I., Karlsson, M. and Andrekson, P.A. Nonlinear phase noise mitigation in phase-sensitive amplified transmission systems// Optic Express. – 2015. – Vol.23, No.9. – pp. 11724–11740.
- [68] Ono, H. Optical Amplification Technologies for Space Division Multiplexing// NTT Technical Review. – 2017. – Vol.15, No.6. – pp. 1–6.
- [69] RSoft Design Group, Inc. OptSim Sample mode. – USA: RSoft Design Group, 2010. – pp. 551.
- [70] Paschotta, R. article on Effective mode area in the Encyclopedia of Laser Physics and Technology/ Internets. – https://www.rp-photonics.com/effective_mode_area.html.
- [71] Paschotta, R., Nilsson, J., Tropper, A. C. and Hanna, D. C. Ytterbium-doped fiber amplifiers// IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1997. – Vol.33, No.7. – pp. 1049–1056.
- [72] Porins, J., Bobrovs, V., Supe, A. Evaluation of Effective Area of Erbium Doped Fibers// Lithuanian Journal of Physics. – 2012. – Vol.52, No.1. – pp.19–23.
- [73] Premaratne, M., Agrawal, G.P. Light propagation in gain media. Optical Amplifiers, – USA: Cambridge University Press, New York. – 2011. – 284 p.

- [74] Ramesh, M., Rao, R., Richards, J., Manohar, J., Balamurugan, A. M., Sivasubramanian, A. Erbium Doped Fiber Amplifiers: State Of Art// International Journal of Scientific & Technology research. – 2013. – Vol.2, No.5. – pp. 316–319.
- [75] Richardson, D. J. New optical fibres for high-capacity optical communications// Philosophical Transactions of the Royal Society. – 2016. – A. 374: 20140441. – pp.1–18.
- [76] Ronak R. Vashi, Arpan H. Desai and Amit H. Choksi Modeling of Gain Flattening using EDFA-EYCDFA in Cascading Mode// International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS). – 2013. – Vol. 2, No.4. – pp.135–137.
- [77] Rosberg, Z., Zalesky, A., Vu, H. L. and Zukerman, M. Analysis of OBS networks with limited wavelength conversion// IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2006. – Vol. 14, No.5. – pp. 1118–1127.
- [78] Saitoh, K. Multicore Fiber Technology// Journal of Lightwave Technology. – 2016. – Vol.34, No.1. – pp. 55–65.
- [79] Sakamoto, T., Aozasa, Sh. , Yamada, M. and Shimizu, M. Hybrid Fiber Amplifiers Consisting of Cascaded TDFA and EDFA for WDM Signals// Journal of Lightwave Technology. – 2006. – Vol.24, No.6. – pp.2287–2295.
- [80] Semrau, D., Xu, T., Shevchenko, N., Paskov, M., Alvarado, A., Killey, R. and Bayvel, P. Achievable information rates estimates in optically amplified transmission systems using nonlinearity compensation and probabilistic shaping// Optics Letters, – 2017. – Vol.42, No.1. – pp. 121–124.
- [81] Sen, R. and Pal, A. Rare Earth Doped Fibers for Fiber Laser: Opportunities and Challenges// Proceedings of the International Conference on Fiber Optics and Photonics. – Chennai, India, December 9–12. – 2012. – Vol.1. – 804 p.
- [82] Senior, J. M. Optical fiber communications principle and practice: Third Edition, – UK: Pearson Education Limited, – 2009. – 1076 p.
- [83] Shaymal, B and Ajoy, G. Guided Wave Optics and Photonic Devices, – USA: – CRC Press, 2017. – 564 p.
- [84] Sheng, Z., Han, Q. , Tang, X., Chen, Y. , Deng, H. , Song, H. Cascade co-pumping - A new way of efficient pumping of high-power rare-earth co-doped fiber lasers and amplifiers// Proceedings of 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON). – Wuzhen, China, August 7–10. – 2017. – pp. 1–3.
- [85] Shirakawa, A., Suzuki, H. , Tanisho, M. and Ueda, K. Yb-ASE-Free Er Amplification in Short-Wavelength Filtered Er:Yb Photonic-Crystal Fiber// Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). – San Diego, USA, February 24–28. – 2008.
- [86] Shunsuke, O. Fiber Optics Parametric Amplifier as Optical Signal Processor (Optical Fibre, New Developments ed. by Lethien, Ch.). Book Chapter 21, – InTechOpen. 2009.
- [87] Stimple, J. R. Testing Erbium-Doped Fiber Amplifiers// The Hewlett-Packard Journal. – 1997. – Article 12. – pp. 1–8.
- [88] Supradeepa, V. R., Yan, F., Nicholson, J. W. Raman Fiber Lasers// Journal of Optics. – 2017. – Vol.19, No.2. – pp. 26.

- [89] Tanabe, S. Development of Rare-Earth Doped Fiber Amplifiers for Broad Band Wavelength-Division-Multiplexing Telecommunication - Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation// IPAP Books 2. – 2005, – pp.101–112.
- [90] Ter-Mikirtychev, V. Fundamentals of Fiber Lasers and Fiber Amplifiers, – Switzerland: Springer International Publishing, – 2014. – 269 p.
- [91] Terra, O., Grosche, G. and Schnatz, H. Brillouin amplification in phase coherent transfer of optical frequencies over 480 km fiber// Optics Express. – 2010. –Vol.18, No.15. – pp.1–10.
- [92] Tse, D. and Viswanath, P. Fundamentals of Wireless Communication, – U.K: Cambridge University Press, – 2006. – 585 p.
- [93] Torounidis, T., Andrekson, P. A., Olsson, B. E. Fiber-optical parametric amplifier with 70-dB gain // IEEE Photonics Technology Letters. – 2006. – Vol.18, No.10. – pp. 1194–1196.
- [94] Urquhart, P. (Ed.) Advances in Optical Amplifiers// InTech. –2011. – pp. 435.
- [95] Wei, W., Qingji, Z., Yong, O. and David, L. High-performance hybrid-switching optical router for IP over WDM integration// Photonic Network Communications. – 2005. – Vol.9, No.2. – pp. 139–155.
- [96] Zervas. M. High power ytterbium-doped fiber lasers - Fundamentals and applications// International Journal of Modern Physics B, – 2014. – Vol.28, No.12. – pp. 36.
- [97] Zimmerman, D.R. and Spiekman, L.H. Amplifiers for the Masses: EDFA, EDWA, and SOA Amplets for Metro and Access Applications// Journal of Lightwave Technology. – 2004. – Vol. 22, No.1. – pp.63–70.
- [98] Zhu, B., Peckham, D., McCurdy, A. H., Lingle, R., Palsdottir, B., Yan , M. F., Wisk, P. W. and DiGiovanni, D. J. Large-Area Low-Loss Fibers and Advanced Amplifiers for High-Capacity Long-Haul Optical Networks [Invited]// OSA Journal of Optical Communications and Networking. – 2016. – Vol.8, No.7. – pp. A55–A63.
- [99] Воронин, В.Г., Наний, О.Е. Основы нелинейной волоконной оптики: учебное пособие. – Москва, Университетская книга, – 2011. – 128 с.
- [100] Гуркин, Н.В., Трешиков, В. Н., Наний, О. Е. Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с// Фотон-Экспресс, – 2014. – 4 (116). – 24–27 с.
- [101] Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. - М.: EXFO, 2001.
- [102] Жиро А. Технологии производства оптических волокон. Обзор последних разработок // Кабели и провода. – 2009. – 4 (317). 22–27 с.
- [103] Курков А.С., Дианов Е.М. Непрерывные волоконные лазеры средней мощности // Квантовая электроника. – 2004. – 34, (10). 881–899 с.
- [104] Макаров Н.С. Оптические волоконные усилители информационных сигналов // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). – 2002. Выпуск 6. 191–199 с.
- [105] Наний О.Е. Линейные оптические усилители – новый класс полупроводниковых усилителей// Lightwave Russian Edition. – 2003. (2). – 27 с.

- [106] Никоноров Н.В., Шандаров С.М. Волноводная фотоника. Учебное пособие. Курс лекций – СПб: СПбГУ ИТМО, – 2008. – 143 с.
- [107] Справки-Специальные оптические волокна. / Internets. – <http://www.focoms.com/referencesR.htm>.
- [108] Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети, – М.: Эко-Трендз, – 2001. – 267 с.
- [109] Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи – Москва: Техносфера, – 2003. – 590 с.
- [110] Червяков Г., Раздобудько В. Введение в Радиооптику. Издание 2-е. - Москва: Учебно-методический и издательский центр “Учебная литература”, – 2009. - 260 с.

PIELIKUMU SARAKSTS

1. pielikums.

Ziņojumu starptautiskajās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, rakstu konferenču tēžu krājumos, Latvijas patentu, Starptautisko un Latvijas zinātniski pētniecisko projektu saraksts.

2. pielikums.

Latvijas Republikas patenta pieteikuma Nr. P-16-103 iesniegšanas apstiprinājuma kopija.

3. pielikums.

ERASMUS + doktorantūras prakses rekomendācija no profesora Sergeja Popova.

4. pielikums.

Eksperimentos izmantoto iekārtu un komponentu tehniskās specifikācijas.

Ziņojumu starptautiskajās konferencēs, publikāciju zinātniskajos žurnālos, rakstu pilna teksta konferenču rakstu krājumos, rakstu konferenču tēžu krājumos, Latvijas patentu, Starptautisko un Latvijas zinātniski pētniecisko projektu saraksts.

Zinojumi starptautiskajās konferencēs

1. **Lavrinovica I.**, Supe A., Udalcovs A., Ozolins O., Popov S. and Porins J. Exploration of Optical Amplifiers Based on Erbium (Er^{3+}) and Ytterbium (Yb^{3+}) Doped Fiber Segments and Their Emerging Applications// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Japāna**, Tojama, 1.–4. augusts, 2018 (**Invited**).
2. Nazarovs V., Jelinskis J., Porins J. **Lavrinovica I.**, Supe A. and Aispurs V. Architecture and research of M2M wireless mesh networks// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Krievija**, Sanktpēterburga, 22.–25. maijs, 2017.
3. Maharjan R., **Lavrinovica I.**, Supe A., Porins J. Minimization of FWM Effect in Nonlinear Optical Fiber using Variable Channel Spacing Technique// Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). **Latvija**, Rīga, 3.–4. novembris, 2016.
4. Shakya S., Supe A., **Lavrinovica I.**, Porins J. Different Optical Fiber Nonlinear Coefficient Experimental Measurements// 6th International Work Shop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN). **Portugāle**, Lisabona, 18.–20. oktobris, 2016.
5. **Lavrinovica I.**, Porins J., Bruklitis E., Supe A. Evaluation of Effective Area and Nonlinearity Coefficient of Erbium-Ytterbium Doped Optical Fibers// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), **Kīna**, Šanhaja, 8.–10. augusts, 2016.
6. **Lavrinovica I.**, Porins J. An improvement of EDFA efficiency by using Ytterbium co-doped optical fibers// IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom 2016). **Bulgārija**, Varna, 6.–9. jūnijs, 2016.
7. **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). **Latvija**, Rīga, 5.–6. novembris, 2015.
8. **Lavrinovica I.**, Porins J. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). **Čehijas Republika**, Prāga, 6.–9. jūlijs, 2015.
9. **Lavrinovica I.**, Porins J., Investigation of EDFA performance in 8 channel WDM transmission system// 11th conference Developments in Optics and Communications (DOC2015). **Latvija**, Rīga, 8.–10. aprīlis, 2015.
10. Bajpayee P., Porins J., **Lavrinovica I.**, Investigation of PMD in 40 GBit/s Coherent QPSK Transmission System, Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Telecommunications Section. **Latvia**, Riga, 17th October, 2014.

11. **Lavrinoviča I.**, Porins J., Supe A. EDFA pastiprināšanas režīmu novērtējums 16 kanālu WDM sakaru sistēmā// 54. RTU studentu zinātniskā un tehniskā konference, Telekomunikāciju sekcija. **Latvija**, Rīga, 10. maijs, 2013.
12. Osipova K., **Lavrinoviča I.**, Parts R., ADSL adaptēšanās spēja// 53. RTU studentu zinātniskā un tehniskā konference, Telekomunikāciju sekcija. **Latvija**, Rīga, 17. aprīlis, 2012.

Publikācijas zinātniskajos žurnālos

1. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. Experimental Measurement of Erbium-doped Optical Fibers Characteristics for EDFA Performance Optimization// Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2019. – No. 2. – pp. 1–10. (Apstiprināts publicēšanai).

Raksti pilna teksta konferenču rakstu krājumos

1. **Lavrinovica I.**, Supe A., Udalcovs A., Ozolins O., Popov S. and Porins J. Exploration of Optical Amplifiers Based on Erbium (Er^{3+}) and Ytterbium (Yb^{3+}) Doped Fiber Segments and Their Emerging Applications// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). - Japan, Toyama, August 1–4. – 2018. – pp. 237–240. **(Invited)**.
2. Nazarovs V., Jelinskis J., Porins J., **Lavrinovica I.**, Supe A. and Aispurs V. Architecture and research of M2M wireless mesh networks// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Russia, Saint Petersburg, May 22–15. – 2017. – pp. 2500–2503.
3. Maharjan R., **Lavrinovica I.**, Supe A., Porins J. Minimization of FWM Effect in Nonlinear Optical Fiber using Variable Channel Spacing Technique// Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Latvia, Riga, November 3–4. – 2016. – pp. 1–4.
4. Shakya S., Supe A., **Lavrinovica I.**, Porins J. Different Optical Fiber Nonlinear Coefficient Experimental Measurements// Proceedings of 6th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN). – Portugal, Lisbon, October 18–19. – 2016. – pp. 1–4.
5. **Lavrinovica I.**, Porins J., Bruklitis E., Supe A. Evaluation of Effective Area and Nonlinearity Coefficient of Erbium-Ytterbium Doped Optical Fibers// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – China, Shanghai, August 8–11. – 2016. – pp. 3438–3441.
6. **Lavrinovica I.**, Porins J. An improvement of EDFA efficiency by using Ytterbium co-doped optical fibers// Proceedings of IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom). – Bulgaria, Varna, June 6–9. – 2016. – pp. 1–3.
7. **Lavrinovica I.**, Porins J. Noise Figure Analysis of EDFA with different pumping configurations in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO). – Riga, Latvia, November 5–6. – 2015. – pp. 34–37.

8. **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Czech Republic, Prague, July 6–9. – 2015. – pp. 502–505.

Raksti konferenču tēžu krājumos

1. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. Evaluation of effective area of ytterbium doped optical fiber// Developments in Optics and Communications (DOC 2016). – Riga, Latvia, March 21–23. – 2016. – p. 49.
2. **Lavrinovica I.**, Porins J. Investigation of EDFA performance in 8 channel WDM transmission system// Developments in Optics and Communications (DOC 2015). – Riga, Latvia, April 8–10. – 2015. – p. 59.
3. **Lavrinovica I.**, Porins J., Ivanovs G. Estimation of EDFA performance in 40 Gbit/s 8 channel DWDM transmission system// Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Book of Abstracts. – Czech Republic, Prague, July 6–9. – 2015. – p. 576.
4. **Lavrinovica I.**, Porins J., Supe A. An estimation of EDFA amplification states in 16 channels WDM communication system// Riga Technical University 54th Student Scientific Conference Telecommunications Section. – Riga, Latvia, May 10. – 2013. – p. 26.
5. Osipova K., **Lavrinovica I.**, Parts R. ADSL system adaptivity// Riga Technical University 53rd Student Scientific Conference Telecommunications Section. – Riga, Latvia, April 17. – 2012. – p. 48.

Latvijas patenti

Lavrinoviča I., Poriņš J., Supe A., Ivanovs Ģ. Ar retzemju elementiem leģētu telekomunikāciju optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšanas sistēma, P-16-103, (publikācijas datums 20.06.2018.).

Dalība projektos

Latvijas zinātniskās pētniecības projekti

1. Valsts pētījumu programmas “Kiberfizikālās sistēmas, ontoloģijas un biofotonika drošai&viedai pilsētai un sabiedrībai (SOPHIS)” projekts nr. 4 – tehnoloģiju izstrāde gudro pilsētu attīstībai. Projekts līg. Nr. 10-4/VPP-4/11, 2014.–2017. g.
2. Viedās pilsētas tehnoloģijas dzīves kvalitātes uzlabošanai, Eiropas Sociālā fonda CPZ projekts Nr. 2013/0008/1DP/1.1.1.2.0/13/APIA/VIAA/016 2013.–2015. g.

Latvijas Republikas patenta pieteikuma Nr. P-16-103 iesniegšanas apstiprinājuma kopija.

LATVIJAS REPUBLIKAS PATENTU VALDE	
Citadeles iela 7 (70), Rīga ☒ Pasta adrese: a/k 824, Rīga, LV 1010, Latvija	
☎ Telefons +371 67099640 Fax +371 67099650	

Adresāts:

Irīna BOIKO, RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
 Kaļķu iela 1, 214.kab.
 Rīga, LV-1658
 Latvija

PAZIŅOJUMS (R2)

Jūsu šifrs	Mūsu šifrs P-16-103	Mūsu datums 16.12.2016
------------	-------------------------------	----------------------------------

Informējam Jūs, ka sakarā ar zemākminēto pieteikumu par izgudrojuma patenta izsniegšanu

(21) Pieteik. P-16-103
 (22) Pieteik. dat. 16.12.2016
 (72) izgudrotājs
 Ingrida LAVRINOVIČA, Lomonosova iela 8A, Daugavpils, LV-5451, LV
 Jurģis PORIŅŠ, Martas iela 1-8, Rīga, LV-1011, LV
 Andis SUPE, Pļavas iela 13-16, Cēsis, Cēsu nov., LV-4101, LV
 Ģirts IVANOVŠ, Matīsa iela 65-6, Rīga, LV-1009, LV
 (71) pieteicējs
 RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE, Kaļķu iela 1, Rīga, LV-1658, LV
 (54) Ar retzemju elementiem iegūtu telekomunikāciju optisko šķiedru efektīvā laukuma mērīšanas sistēma



(lūdzam Jūs informēt Patentu valdi par ievērotajām kļūdām)
Latvijas Republikas Patentu valdē ir saņemti sekojoši materiāli:

iesniegums par patenta piešķiršanu izgudrojumam	3 eks.
izgudrojuma apraksts	3 eks.
patenta pretenzijas	3 eks.
zīmējumi	3 eks.
patenta kopsavilkums	3 eks.latv./ang.

Atgādinām Jums, ka ekspertīze iespējama tikai tādā gadījumā, ja iesniegtajiem dokumentiem tiks pievienoti sekojošie:

A. mēneša laikā no pieteikuma iesniegšanas dienas
 dokuments par pieteikuma nodevas samaksu EUR 120,-

Valsts reģistru un dokumentācijas departamenta reģistru Eksperte

I. Boiko

ERASMUS + doktorantūras prakses rekomendācija no profesora Sergeja Popova.



KTH Royal Institute of Technology
School of Engineering Sciences
Department of Material- and Nano- Physics

Kista, 12/31/2017

RECOMMENDATION LETTER

To whom it may concern,

With this letter I want to acknowledge researcher Ingrida Lavrinovica from Riga Technical University. I have been supervising Ingrida Lavrinovica during her ERASMUS traineeship held within the School of Engineering Sciences at KTH, Royal Institute of Technology, between the 1st of November 2017 and the 31st of December 2017.

Here, Ingrida Lavrinovica has made an independent research in the area of rare-earth doped optical fiber amplifiers for high speed optical transmission systems. Her tasks included the measurements of different pump and signal light source parameters, an analysis of doped optical fiber amplifier experimental model, and combination of two different rare-earth element (erbium and ytterbium) doped fibers for amplifier design.

Ingrida Lavrinovica was competent enough for the performed research. She demonstrated good skills in a laboratory, as well as ability to cooperate with a team during test setup assembly, measurement process and experimental data interpretation. During her guest research period, Ingrida Lavrinovica has shown high motivation to perform experimental work. She quickly gains new skills and shows willingness to broaden her knowledge and experience. Finally, she is a friendly and open-minded person to interact with.

Sincerely,
Sergei Popov

Sergei Popov, Ph.D.
Professor
Department of Material- and Nano- Physics
KTH Royal Institute of Technology
School of Engineering Sciences

Address:
P.O. Box Electrum 229
Isafjordsgatan 22
SE-164 40 Kista
SWEDEN

E-mail: sergeip@kth.se

4. pielikums.

Eksperimentos izmantoto iekārtu un komponentu tehniskās specifikācijas
 Erbija leģētās šķiedras *HighWave HWT-FIB-EDF-EXC-BAND-002* pases dati

Absorbcijas koeficients pie 1530 nm	5,45 dB/m
Absorbcijas koeficients pie 1480 nm	2,4 dB/m
Nogriešanas viļņa garums	942 nm
Ienesta vājinājums pie 1200 nm	2,8 dB/km
Primārā apvalka diametrs	125 +/- 1 µm
Sekundārā apvalka diametrs	245 +/- 10 µm
Serdeņa rādiuss	4,1 µm
Skaitliskā apertūra (NA)	0,22

Erbija leģētās šķiedras *HighWave HWT-FIB-EDF-741* pases dati

Absorbcijas koeficients pie 1530 nm	7,5 dB/m
Absorbcijas koeficients pie 1480 nm	2,8 dB/m
Nogriešanas viļņa garums	1014 nm
Ienesta vājinājums pie 1200 nm	< 10 dB/km
Primārā apvalka diametrs	125 +/- 1 µm
Sekundārā apvalka diametrs	245 +/- 10 µm
Serdeņa rādiuss	3,2 µm
Skaitliskā apertūra (NA)	0,26

Erbija leģētās šķiedras *Fibercore" I-12 (980/125)* pases dati

Šķiedras tips	I-12 (980/125)
Absorbcijas koeficients pie 979 nm	11,2 dB/m
Vājinājums pie 1200 nm	4,3 dB/km
Sekundārā apvalka diametrs	239,2 µm
Serdeņa rādiuss	0,1 µm
Nogriešanas viļņa garums	950 nm
Primārā apvalka diametrs	124,8 µm
Modas lauka diametrs	6,1 µm
Skaitliskā apertūra (NA)	0,22
Darbības viļņa garums	1550 nm

Iterbija leģētās šķiedras *LIEKKI Yb 1420-1560 / 15%* passes dati

Absorbcijas koeficients pie 1500 nm	280 dB/m
Nogriešanas viļņa garums	1510 nm
Serdeņa koncentriskums	< 0,7 μm
Apvalka diametrs	125 μm
Serdeņa rādiuss	4,1 μm
Skaitliskā apertūra (NA)	0,22



Anritsu MS9710B optiskais spektra analizators

Specifikācijas:

Viļņa garumu diapazons	600 nm līdz 1750 nm
Minimālā viļņu garuma izšķirtspēja	0,07 nm
Maksimālā viļņu garuma izšķirtspēja	1 nm
Minimālais ienestais vājinājums	- 90 dBm
Maksimālais ienestais vājinājums	10 dBm
Mērījumu precizitāte	0,4 dB
Maksimālais izvērse laiks	500 ms



JDSU/W&G OLP-18B optiskais jaudas mērītājs

Specifikācijas:

Viļņa garumu diapazons	800 nm līdz 1700 nm
Fotodiodes tips	InGaAs
Šķiedras tips	9/125 – 50/125 μm
Standarta pārskatājamie viļņa garumi	850, 980, 1310, 1480, 1550, 1652 nm
Attēlotais diapazons	-60 dBm līdz +26 dBm
Maksimālais jaudas līmenis	+26 dBm
Mērījumu precizitāte	0,4 dB
Maksimālais izvēršes laiks	500 ms



Anritsu AF4A400 sērijas 1,48 μm lāzerdiode ar ITC510 kontroles bloku

Specifikācijas:

Optiskās izejas jaudas	140~200 mW/700 mA
Iebūvētais optiskais izolators	+
Iekšējā kontroles fotodiode (PD) ar termoelektrisko dzesētāju	+
SMF un PMF savienotāju atbalsts	+



Soļu motors ar ar USB interfeisu Standa 8SMC1-USBhF

Specifikācijas:

Electrical

- Average current per phase of stepping motor up to 1.5A
- Stepper motor power supply voltage up to 40V
- Short circuit, overcurrent, overvoltage and temperature protections
- Screw mounted and easy to change current sense resistors
- Multi-purpose 40 pin connector for embedded applications
- A number of additional connectors (15 pin D-Sub, USB type A, 2x USB type B, DC input)
- Synchronization Input/Output
- Different ways of power supply, including single power, dual power and USB power

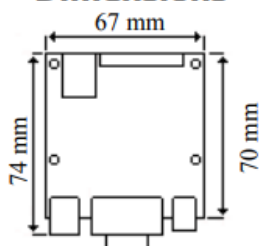
Motion

- Resolution: full step, 1/2, 1/4, 1/8
- Speed: 2-5000 steps/s
- Programmable speed and trip points
- Programmable accel and decel ramps
- Soft start/stop mode

Control

- Two knobs and three LEDs for manual control and local indication
- Two programmable limit switches and emergency stop switch
- Quadrature encoder or Revolution sensor
- Remote control via USB 1.1 interface

Dimensions



Programming

- Graphical user interface SMCView for Windows 2000/XP/Vista
- Drivers and dynamic link library for Windows 2000/XP/Vista/Mobile host programming
- Set of virtual instruments for National Instruments LabVIEW