

Mareks Parfjonovs

HIBRĪDA PLATJOSLAS PASTIPRINĀTĀJA IZSTRĀDE ŠOPŠ RISINĀJUMIEM

Promocijas darbs



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

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

Mareks Parfjonovs

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

HIBRĪDA PLATJOSLAS PASTIPRINĀTĀJA IZSTRĀDE ŠOPS RISINĀJUMIEM

Promocijas darbs

Zinātniskais vadītājs
profesors *Dr. sc. ing.*
VJAČESLAVS BOBROVS

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2024. gada 23.februārī plkst. 15:00, Rīgas Tehniskās universitātes Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē, Rīgā, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Asociētais profesors *Dr. sc. ing.* Aleksandrs Ipatovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesore *Dr. sc. comp.* Anita Jansone,
Liepājas Universitāte

Asociētais profesors *Dr. phys.* Jānis Alnis,
Latvijas Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Mareks Parfjonovs (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras avotu saraksts, 77 attēli, 15 tabulas un 51 formula, kopā 123 lappuses. Literatūras sarakstā ir 160 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Darba nosaukums: "Hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrāde ŠOPS risinājumiem";

Darba autors: Mareks Parfjonovs;

Promocijas darbs "Hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrāde ŠOPS risinājumiem" ir visaptveroša izpēte par inovatīva hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrādi un ieviešanu šķiedru optiskajās pārraides sistēmās. Reaģējot uz arvien pieaugošo pieprasījumu pēc lielākas tīkla jaudas un datu pārraides efektivitātes, šis pētījums cenšas risināt problēmas, kas saistītas ar optiskā signāla pastiprināšanu lielos attālumos mūsdienu optisko sakaru tīklos.

Šī pētījuma galvenie mērķi ietver jauna hibrīda pastiprinātāja izveidi, kas izmanto dažādu pastiprināšanas tehnoloģiju stiprās puses, vienlaikus mazinot to individuālos ierobežojumus. Darbā ir apskatīti teorētiskie principi un praktiskie apsvērumi, kas ir hibrīda platjoslas pastiprinātāja pamatā, izmantojot dažādas optisko pastiprinātāju tehnoloģijas. Tā mērķis ir optimizēt signāla kvalitāti un pārraides efektivitāti optisko šķiedru tīklos, jo īpaši gadījumos, kad optiskais vājinājums un joslas platuma paplašināšana ir kritiski faktori.

Stingri izpētot hibrīda platjoslas pastiprinātāja uzbūvi, veiktspējas novērtējumu un reālās pasaules lietojumus, šis darbs veicina jaunāko optisko sakaru tehnoloģiju attīstību. Šeit sniegtie atklājumi un atziņas var ievērojami uzlabot optisko pārraides sistēmu iespējas un tiem ir galvenā loma, lai apmierinātu pieaugošās mūsdienu lieljaudas datu tīklu prasības.

Kopumā šis pētījums sniedz vērtīgu ieguldījumu optiskās šķiedras pārraides jomā un sola turpināt platjoslas sakaru sistēmu attīstību un uzlabošanu.

ANNOTATION

Title of the thesis: "Development of an Hybrid Broadband Amplifier for FOTS Solutions"

Author of the thesis: Mareks Parfjonovs;

This doctoral work, "Development of a Hybrid Broadband Amplifier for Fiber Optical Transmission System Solutions," represents a comprehensive investigation into the design, development, and implementation of an innovative hybrid broadband amplifier for fiber optical transmission systems. In response to the ever-increasing demand for higher network capacity and data transmission efficiency, this research endeavours to address the challenges associated with optical signal amplification over extended distances in modern optical communication networks.

The core objectives of this study involve the creation of a novel hybrid amplifier that leverages the strengths of different amplification technologies while mitigating their individual limitations. The thesis delves into the theoretical principles and practical considerations underlying the hybrid broadband amplifier, drawing from various optical amplifier technologies. It seeks to optimize signal quality and transmission efficiency in fiber optic networks, especially in scenarios where optical attenuation and bandwidth expansion are critical factors.

Through a rigorous exploration of the design, performance evaluation, and real-world applications of the hybrid broadband amplifier, this work contributes to advancing the state-of-the-art in optical communication technologies. The findings and insights presented herein have the potential to significantly enhance the capabilities of optical transmission systems and play a pivotal role in meeting the escalating demands of contemporary high-capacity data networks.

Overall, this research offers a valuable contribution to the field of fiber optical transmission and holds promise for the continued evolution and improvement of broadband communication systems.

TĒMAS AKTUALITĀTE

Saskaņā ar jaunāko CISCO prognozi globālā IP datu plūsma tuvāko 5 gadu laikā palielināsies gandrīz trīs reizes. Iemesli tam ir arvien lielāks galalietotāju skaits, kā arī jauni un uzlaboti esošie kvalitatīvie pakalpojumi. Tādējādi, lai nodrošinātu informācijas pārraidi reālā laikā, ir nepieciešami lielāki datu pārraides ātrumi. Tas rada jaunas problēmas optiskās pārraides sistēmām, viena no tām ir optisko signālu pastiprināšana. Optiskais signāla pastiprinātājs ir neatņemama daļa no mūsdienu šķiedru optikas pārraides sistēmu (ŠOPS) elementu kopas. Optisko pastiprinātāju pielietojumu klāsts ir plašs – no zemu izmaksu, nelielu attālumu piekļuves tīkliem, līdz reģionālajiem tīkliem t.i. ļoti lielu attālumu starpkontinentālajiem zemūdens tīkliem. Optiskie pastiprinātāji ir ļoti aktuāli arī signālu apstrādes tehnikas kontekstā, kas balstās uz nelineāro optisko efektu (NOE) lietojumu. Piemēram, vairāku viļņu garuma gaismas avoti, viļņu garuma pārveidotāji, pilnīgi optiskie reģeneratori u.c. Šādiem pielietojumiem parasti ir vajadzīga liela optiskā jauda. Leģēto šķiedru pastiprinātāju optisko īpašību pētījumi ir bijuši visaptveroši attiecībā uz atšķirīgiem leģējumiem un dažādiem leģējumiem vienā šķiedrā.

Mūsdienu optiskajās sakaru sistēmās biežāk sastopamie pastiprinātāji ir erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs un Ramana efekta šķiedras pastiprinātājs. Lielu un ļoti lielu attālumu tīklos izmanto hibrīdus risinājumus, kas sastāv gan no EDFA, gan no Ramana pastiprinātājiem.

Pumpēšanas apvalkā metode pastiprinātāju pielietojumiem arī ir plaši pētīta. Uzska, ka aktuāls pētījumu virziens ir abu risinājumu kombinācija (dažādi leģējumi un apvalkā pumpēšana). Tomēr ir nepieciešami būtiski sagaidāmo pastiprinātāju papildu pētījumi, lai uzlabotu pastiprinājuma vienmērīgumu, trokšņa koeficientu (signālā un trokšņa attiecība (SNR)), nodrošinātu pumpēšanas avota efektivitāti (energoefektivitāti), un nodrošinātu pastiprinātāja optisko signāla pastiprinājuma efektivitāti u.t.t. Galvenā ideja ir izpētīt visus jaunākos leģēto šķiedru pastiprinātāju tehniskos risinājumus un izvēlēties vispiemērotāko, lai izstrādātu rentablu pastiprinātāju, kas būtu labāks par uz doto brīdi pieejamajiem esošajiem risinājumiem. Tas ietver arī vispiemērotāko leģēto šķiedru meklēšanu, šķiedru optisko parametru mērījumus, īpašu apvienotāju izstrādi, apvalkā pumpētu pastiprinātāju realizēšanu un leģēto šķiedru pastiprinātāju prototipa testēšanu un veiktspējas novērtēšanu. Paredzētā darbības joma (bet ne tikai) no pielietojumu viedokļa ir viļņgarumdales blīvētās WDM optiskās pārraides sistēmas, metro piekļuves tīkli un pasīvie optiskie tīkli (PON), lai paplašinātu sasniedzamību.

DARBA SATURS

Visu laiku pieaugošais pārraidāmās informācijas apjoms izraisa nepieciešamību palielināt kanālu skaitu viļņgarumdales blīvētajās sakaru sistēmās un līdz ar to paplašinās pārraidē izmantoto viļņa garumu diapazons (izmantoto optisko joslu). Pieaugot kanālu skaitam palielinās arī daudzkanālu optiskā signāla sadalīšanas procesa ienestais vājinājums, it sevišķi optiskās jaudas sadalītāju pielietošanas gadījumā. Līdz ar to, ir nepieciešami risinājumi arvien lielāka uzkrātā signāla vājinājuma kompensēšanai arvien platākā viļņa garumu diapazonā. Tas var tikt sasniegts, savienojot dažādu tipu pastiprinātājus. Šādā veidā ir iespējams apvienot to pozitīvas īpašības un daļēji kompensēt to trūkumus, paplašinot pastiprinājuma spektru un palielinot sasniedzamo pastiprinājumu.

Optiskais pastiprinātājs ir svarīga daļa no šķiedru optikas pārraides sistēmas (ŠOPS). Bez tā signāla pārraide lielos attālumos nebūtu iespējama, bet reģenerācijas iecirkņu garums būtu daudz īsāks. Šajā darbā tiek apskatīti divu veidu optisko pastiprinātāju – EDFA un Ramana pastiprinātāja fizikālie darbības pamati, to izmantošanas iespējas kā atsevišķi, tā arī kopā kā hibrīds risinājums.

Plašā mērogā promocijas darba mērķis ir teorētiski un eksperimentāli izpētīt ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (EDFA) un Ramana efekta šķiedras pastiprinātāja darbību šķiedru optikas pārraides sistēmās (ŠOPS), to priekšrocības un trūkumus, atsevišķi un hibrīdā risinājumā, un novērtēt to izmantošanas iespējas viļņgarumdales blīvētā (WDM) optiskajā sakaru sistēmā.

Darba pirmajā daļā tiek apskatīti ŠOPS ietekmējošie faktori, kurus nepieciešams izanalizēt, lai veiktu izpēti par OŠ pastiprinātājiem un to ietekmējošiem parametriem, tādējādi ņemot vērā pamatfaktoros, kas nepieciešami simulatīvai un eksperimentālai hibrīda pastiprinātāja izstrādāšanai viļņgarumdales blīvētā sistēmā (WDM) sistēmā.

Darba otrajā daļā tiek apskatīti ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātāja (EDFA) fizikālie pamati, gaismas pastiprināšanās fizika ar retzemju metālu (erbija) leģētā šķiedrā un trokšņu rašanās cēloņi kā arī dota uzziņa par EDFA izplatītākajiem pielietojumiem. Tajā skaitā tiek aplūkoti arī Ramana efekta šķiedras pastiprinātāja fizikālie pamati, aprakstīts gaismas pastiprināšanās ar ierosinātās Ramana izkliedes palīdzību mehānisms kā arī Ramana pastiprinātāja trokšņu novērtējums. Nodaļas nobeigumā arī tiek pieminēti izplatītie Ramana pastiprinātāja pielietojumi. Darba trešā daļa ir eksperimentālā daļa. Eksperimentālajā daļā, izmantojot RSoft OptSim vidi, kā arī veicot eksperimentālo darbu laboratorijā (eksperimentālā testēšana, izstrāde un mērījumi), tiek pētīta šķiedru optikas pārraides līnijas laiduma un pastiprinātāja parametru ietekme uz pārraidāmā signāla kvalitāti viļņgarumdales blīvētā (WDM) sistēmā, lai noteiktu maksimālo attālumu, kurā var pārraidīt kvalitatīvu signālu, izmantojot katru no pētāmo pastiprinātāju veidiem kā arī abus pastiprinātājus kopā (izmantojot hibrīdu pastiprinātāju). Darba nobeigumā, balstoties uz teorētiskās informācijas un eksperimentālajā daļā iegūtajiem rezultātiem, tiek izdarīti secinājumi par EDFA un Ramana pastiprinātāju un to hibrīda risinājuma izmantošanas iespējām.

PROMOCIJAS DARBA MĒRĶIS

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

Izstrādāt jaunu hibrīdu platjosla optisko pastiprinātāju, izmantojot dažāda leģējuma optiskās šķiedras un efektīvu apvalka pumpēšanas paņēmieni, lai uzlabotu veiktspēju WDM sakaru sistēmās.

PROMOCIJAS DARBA UZDEVUMI

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

1. Eksperimentāli simulāciju vidē novērtēt EDFA un SOA pastiprinātāju lietojumu maksimālā pārraides attāluma noteikšanai viļņgarumdales blīvētajās WDM sakaru sistēmās izmantojot 100 Gbit/s DP-QPSK modulāciju uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$

robežvērtību (Q faktora līmenis augstāks par 16 dB).

2. Eksperimentāli RTU TI ŠOPS laboratorijā novērtēt dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētās šķiedras pastiprinājuma efektivitāti atkarībā no laiduma garuma jauna inovatīva erbiju jonu leģētās šķiedras pastiprinātāja izstrādei.
3. Eksperimentāli un simulāciju vidē novērtēt WDM sakaru sistēmām ar datu pārraides ātrumu līdz 40 Gbit/s uz viļņa garumu hromatiskās dispersijas (CD) un nelineāro optisko efektu (NOE) ietekmi un kompensācijas metodes maksimālā pārraides attāluma palielināšanai, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$.
4. Izstrādāt hibrīdu Raman-EDFA pastiprinātāju un novērtēt tā veiktspēju 16 kanālu DWDM sakaru sistēmā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nodrošinot uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

Aizstāvamās tēzes:

1. Dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētajās šķiedrās vislielāko signāla pastiprinājumu iegūst pirmajos 3 metros, savukārt, palielinot šķiedras garumu virs 5 metriem tiek nodrošināta pastiprinājuma līmeņa saglabāšana un pārnese uz lielākiem gaismas viļņa garumiem.
2. Izmantojot hibrīdā risinājuma EDFA-Ramana pastiprinātāju WDM sakaru sistēmā iespējams vienlaicīgi nodrošināt optisko nesēju pastiprināšanu visā telekomunikāciju C joslā (1530 – 1565 nm) un mazināt uzkrāto hromatisko dispersiju CD un starpsimbolu interferenci (ISI), nodrošinot maksimālo līnijas pārraides attālumu.

PĒTĪJUMU METODIKA

Promocijas darbā izvirzīto uzdevumu realizācijā un problēmu analīzē izmantoti matemātiski aprēķini, skaitliskās simulācijas, ka arī eksperimentāli mērījumi. Skaitliskās simulācijas tika realizētas Matlab un RSoft OptSim simulācijas programmatūrās, kuru pamatā tiek izmantots nelineārais Šrēdingera vienādojums pielietojot sadale-solis (*angl. Split-Step*) metodi, Furjē transformācija, un arī Monte Karlo metode bitu kļūdu attiecības (BER) novērtēšanai.

Optisko signālu kvalitātes novērtēšanai simulāciju vidē un eksperimentālajās realizācijās tika izmantoti elektriskā un optiskā signāla spektri un jauda, uztvertā elektrisko signālu kvalitāte tika novērtēta izmantojot bitu kļūdu attiecību (BER) un acu diagrammas. Eksperimentālo sistēmu realizācijā atsevišķos gadījumos reālā laika mērījumos uztvertā elektrisko signālu kvalitāte tika novērtēta pēc signāla bitu kļūdu attiecības (BER). Darbā aprakstītie zinātniski pētnieciskie eksperimenti un to rezultāti ir realizēti RTU Telekomunikāciju institūtā (TI), Latvijā.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE UN GALVENIE REZULTĀTI

Promocijas darba jaunieguvumi ir:

1. Novērtēts EDFA un SOA pastiprinātāju lietojums maksimālās pārraides nodrošināšanai viļņgarumdales blīvētājas WDM sistēmās, izmantojot vairākus modulācijas formātus (NRZ, RZ, DP-QPSK), atkarībā no datu pārraides ātruma kanālā nepārsniedzot uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību
2. Novērtēts dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētās šķiedras lietojums jauna inovatīva optiskā

pastiprinātāja izveidē, nosakot pastiprinājuma efektivitāti atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma.

3. Pamatojoties uz mūsdienu šķiedru optisko ātrgaitas sakaru sistēmu prasībām, jeb datu pārraides ātruma kanālā (vismaz 40 Gbit/s uz λ) izvirzītajām prasībām, ko nosaka 3-dB caurlaides josla (elektriskā segmenta un optiskā segmenta daļas), novērtēta hromatiskās dispersijas (CD) un nelineāro optisko efektu (NOE) ietekme atkarībā no datu pārraides attāluma viļņgarumdales blīvētās (WDM) sistēmas risinājumā, nosakot optimālos parametrus jauna hibrīda platjoslas pastiprinātāja izstrādei, priekš lietojuma ātrgaitas ŠOPS, nodrošinot nepieciešamo uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$.
4. Piedāvāts jauns hibrīds Raman-EDFA pastiprinātāja risinājums, kurš apvieno erbija leģētās šķiedras un Ramana efekta pastiprinājuma priekšrocības, vienlaicīgi veicot optiskā signāla pastiprināšanu un hromatiskās dispersijas (CD) kompensāciju atkarībā no līnijas garuma, spējīgs nodrošināt stabilu darbību vismaz 16 kanālu DWDM sakaru sistēmas risinājumā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nepārsniedzot uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

PROMOCIJAS DARBA PRAKTISKĀ VĒRTĪBA:

1. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes (ETF) Telekomunikāciju institūtā (TI) izstrādāts jauns inovatīvs dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētās šķiedras makets spējīgs nodrošināt stabilu pastiprinājumu viļņgarumdales blīvētās (WDM) sistēmas risinājumā C-joslas (1530 – 1565 nm) darbības diapazonā.
2. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes (ETF) Telekomunikāciju institūtā (TI) izstrādāts jauns hibrīds Raman-EDFA pastiprinātāja makets, spējīgs nodrošināt stabilu darbību vismaz 16 kanālu DWDM sakaru sistēmas risinājumā ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, nepārsniedzot uztvertā signāla BER $\geq 1 \times 10^{-9}$ robežvērtību.

Promocijas darba iegūtie rezultāti tika izmantoti:

ERAF projektā “Efektīvu apvalkā pumpētu šķiedru optisko pastiprinātāju izstrāde telekomunikāciju sistēmām” Nr. 1.1.1.1/18/A/068

DARBA APROBĀCIJA UN PUBLIKĀCIJAS

Autora Promocijas darba rezultāti izklāstīti 6 Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (SCOPUS, WoS, IEEE) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos no 6 autoram esošajiem autora darbiem. Darba rezultāti prezentēti 3 konferencēs.

Autora Promocijas darba izstrādes laikā sasniegtie rezultāti prezentēti 3 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

1. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angl. *Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2023 – Proceedings*), prezentējot darbu par tēmu: K. Zakis, S. Spolitis, T. Salgals, L. Gegere, **M. Parfjonovs**, D. Prigunovs, V. Bobrovs, A. Supe, “*Experimental Characterization of Signal Gain Evolution in Cladding-pumped Doped Fiber Amplifier*”, 2023.gada 3.-6.jūlijs.

2. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angl. *Photonics and Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2023 – Proceedings*), prezentējot darbu par tēmu: D. Prigunovs, P. Morevs, **M. Parfjonovs**, T. Salgals, R. Kudojars, V. Bobrovs, “*Performance Analysis of Hybrid Raman-EDFA Amplifier in WDM Transmission Systems*”, 2023.gada 3.-6.jūlijs.
3. Piedalījies starptautiskajā konferencē (angl. *Progress In Electromagnetics Research Symposium - Fall, PIERS - FALL 2017*), prezentējot darbu par tēmu: V. Dilendorfs, **M. Parfjonovs**, A. Alsevska, S. Spolitis, V. Bobrovs, “*Influence of Dispersion Slope Compensation on 40 Gbit/s WDM-PON Transmission System Performance with G.652 and G.655 Optical Fibers*”, 2017.gada 19.-22.novembri.

Autora Promocijas darba rezultāti izklāstīti 6 Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu (SCOPUS, WoS, IEEE) datubāzes iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos.

1. Zaķis, K., Spolitis, S., Salgals, T., Gegere, L., **Parfjonovs, M.**, Prigunovs, D., Bobrovs, V., Supe, A. “*Experimental Characterization of Signal Gain Evolution in Cladding-pumped Doped Fiber Amplifier*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 754-758, DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221551
2. Prigunovs, D., Morevs, P., **Parfjonovs, M.**, Salgals, T., Kudojars, R., Bobrovs, V. “*Performance Analysis of Hybrid Raman-EDFA Amplifier in WDM Transmission Systems*,” 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1787-1791, DOI: 10.1109/PIERS59004.2023.10221537
3. Pavlovs, D., Bobrovs, V., Alsevska, A., **Parfjonovs, M.**, Ivanovs, G. “*Investigation of Power Efficiency Changes in DWDM Systems Replacing Erbium-Doped Amplifiers by Semiconductor Optical Amplifiers*,” Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol.59, no.1, 2022, pp.44-52. DOI:10.2478/lpts-2022-0005
4. Zvirbule, K., Matsenko, S., **Parfjonovs, M.**, Murnieks, R., Aleksejeva, M., Spolitis, S. “*Implementation of Multi-Wavelength Source for DWDM-PON Fiber Optical Transmission Systems*,” Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol.57, no.4, 2020, pp.24-33. DOI:10.2478/lpts-2020-0019
5. Pavlovs, D., Bobrovs, V., **Parfjonovs, M.**, Alsevska, A., Ivanovs, G. Evaluation of Signal Regeneration Impact on the Power Efficiency of Long-Haul DWDM Systems. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, vol.54, no.5, 2017, pp.68-77, DOI: 10.1515/lpts-2017-0035
6. Dilendorfs, V., **Parfjonovs, M.**, Alsevska, A., Spolitis, S., Bobrovs, V. “*Influence of Dispersion Slope Compensation on 40 Gbit/s WDM-PON Transmission System Performance with G.652 and G.655 Optical Fibers*,” 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), Singapore, 2017, pp. 598-604, DOI: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293207

SATURS

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS	12
IEVADS	16
1. ŠĶIEDRU OPTISKO PĀRRAIDES SISTĒMU DATU PĀRRAIDI IETEKMĒJOŠIE FAKTORI	18
1.1. Viļņgarumdales blīvētās (WDM) sakaru sistēmas klasifikācija un darbības principi.	18
1.2. Nelineārie optiskie efekti (NOE) šķiedru optiskajās sakaru sistēmās	22
1.2.1. Optiskie Kerra efekti	23
1.2.2. Fāzes pašmodulācija (SPM)	25
1.2.3. Fāzes krosmulācija (XPM)	26
1.2.4. Četru viļņu mijiedarbe (FWM)	26
1.2.5. Ramana izkliede	27
1.2.6. Spontānā Ramana izkliede	27
1.2.7. Inducētā Ramana izkliede	28
1.3. Šķiedru optiskās pārraides sistēmas uztvertā signāla kvalitātes novērtēšanas kritēriju analīze	29
1.3.1. Bitu kļūdu attiecība (BER)	29
1.3.2. Signāla kvalitātes faktors (Q-faktors)	30
1.3.3. Acu diagrammas analīze	32
1.3.4. Spektrs un darbības josla	33
2. OPTISKIE PASTIPRINĀTĀJI ĀTRGAITAS ŠĶIEDRU OPTISKAJĀS PĀRRAIDES SISTĒMĀS	36
2.1. Erbija jonu leģētās šķiedras pastiprinātāja novērtējums	38
2.1.1. Uzbūve un darbības princips	41
2.1.2. Enerģijas pārvades efektivitāte no pumpējošās gaismas	43
2.1.3. Erbija leģētās šķiedras leģējuma piemaisījuma un garuma ietekme uz pastiprinātās izejas jaudu un tā darbību	50
2.1.4. Erbija leģēto šķiedru tipu raksturojumi	53
2.1.5. Piesātinājuma jauda pastiprinātājā izejā	54
2.1.6. Pastiprinājuma spektra izlīdzināšanas metodes	57
2.1.7. Pastiprinājuma spektra darbības joslas platums	59
2.1.8. Optiskā signāla trokšņu rādītājs	60
2.1.9. Apkopojums par EDFA pastiprinātāja darbību un pielietojumu ātrgaitas ŠOPS sistēmās	61
2.2. Ramana pastiprinātāja pielietojums un novērtējums	63
2.2.1. Sadalītie Ramana pastiprinātāji	66
2.2.2. Pastiprināšana daudzkanālu sistēmās	68
2.3. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju (SOA) pielietojums un novērtējums	69
2.4. Briljuēna optiskā pastiprinātāja pielietojums un novērtējums	73
3. HIBRĪDA PASTIPRINĀTĀJA RISINĀJUMU IZVEIDE UN EKSPERIMENTĀLĀ ANALĪZE	74
3.1. Dispersijas ietekmes novērtējums uz WDM sakaru sistēmas darbību	74

3.2. Četru viļņu mijiedarbes FWM fekta lietojums spektrāli efektīvu ŠOPS risinājumu izveidē	82
3.3. Signāla reģenerācijas ietekmes novērtējums DWDM risinājumiem.....	89
3.4. Jaudas efektivitātes izmaiņas novērtējums DWDM sakaru sistēmas risinājumā atkarībā no lietotā pastiprinātāja veida.....	95
3.5. Jauna inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er ³⁺ /Yb ³⁺ leģēto šķiedru izveide un novērtējums ŠOPS	101
3.6. Hibrīda Ramana-EDFA pastiprinātāja izveide un veiktspējas analīze WDM pārraides sistēmā.....	106
NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI	112
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS.....	116

SAĪSINĀJUMU SARAKSTS

A

APD – Avalanche photo-diode – lavīna fotodiode

ASE – Amplified Spontaneous Emission – pastiprināta spontāna emisija

AWG – Arrayed Waveguide Gratings – viļņvadu masīva režģis

B

BER – Bit Error Rate – bitu kļūdu attiecība

C

CB – Conduction Band – vadītspējas zona

CD – Chromatic Dispersion – hromatiskā dispersija

CD_{SL} – Chromatic Dispersion Slope – hromatiskās dispersijas slīpums

CO – Central Office – centrālais ofiss

CW – Continuous Wave laser – nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avots

CWDM — Coarse Wavelength Division Multiplexing — rupja spektrālā blīvēšana pēc viļņu garuma

D

DCF – Dispersion Compensating Fiber – dispersiju kompensējoša šķiedra

DCM – Dispersion Compensating Module – dispersijas kompensācijas modulis

DEMUX – Demultiplexor - demultipleksors

DP-QPSK – Dualpolarisation Quadraturephase-shift Keying – dualpolarizācijas kvadrātūras fāzes manipulācija

DPSK – Differential Phase Shift Keying – diferenciālā fāzes manipulācija

DRA – Distributed Raman Amplifier – sadalītais Ramana pastiprinātājs

DSCR – Dispersion Slope Compensation Ratio – dispersijas slīpuma kompensācijas koeficients

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīvas viļņgarumdales blīvēšana

DWDM-PON – Dense Wavelength Division Multiplexing – blīvs viļņgarumdales blīvētis PON

E

EBF – Electrical Bessel Filter – elektriskais Beseļa filtrs

EDC – Electronic Dispersion compensation - elektroniskās dispersijas kompensācija

EDFA – Erbium-Doped Fiber Amplifier – erbija leģētas šķiedras pastiprinātājs

ER — Extinction Ratio — augstā un zemā jaudas līmeņa attiecība

ESA – Pumping Absorption in the Excited State - pumpēšanas absorbcija ierosinātā stāvoklī

EYE – Eye Diagram Oscilloscope – acu diagrammu osciloskops

F

FBG – Fiber Bragg Grating – šķiedras Brega režģis

FBG-DCM - Fiber Bragg Grating Dispersion Compensating Module - šķiedras Brega režģa dispersācijas kompensācijas modulis

FEC – Forward error correction – turpvērstā kodu labošana

FOPA – Fiber Optical Parametric Amplifier – uz optiskās šķiedras bāzes izveidotais parametriskais pastiprinātājs

FP-SOA – Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifier – Fabri-Pero pusvadītāju optiskais pastiprinātājs

FTTH – Fiber-To-The-Home – šķiedra līdz mājai
FWM – Four wave Mixing – četru viļņu mijiedarbe

G

GN – Global Gain - globālais pastiprinājums

H

HDWDM - High Density Wavelength Division Multiplexing - augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmām

HNLF – High Non-Linearity Fiber – paaugstinātas nelinearitātes šķiedra

HFD – Hybrid Fiber Design – hibrīda šķiedru dizains

I

IL – Insertion loss – ienestais vājinājums

ISI – Intersymbol interference - starpsimbolu interference

ITU-T – International Telecommunication Union – Telecommunication Sector – Starptautiska Telekomunikāciju Savienība – Telekomunikāciju Sektors.

L

LNL – Length non-linear - nelineārais garums

LPF – Low-pass Filter – elektrisko zemfrekvenču filtrs

LRA – Lumped Raman Amplifier – diskrētais Ramana pastiprinātājs

M

MCF – Multi Core Fiber – daudzkodolu optiskā šķiedra

MSSI - Mid-span Spectral Inversion - vidējā diapazona spektrālā inversija

MQW – Multiple Quantum Well – daudz kvantu bedru struktūra

MQW-SOA - Multiple Quantum Well Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju pastiprinātājs ar daudzkvantu bedru struktūru

MZM – Mach-Zehnder Modulator – Maha-Zendera intensitātes modulatora

MUX – Multiplexor – multipleksors

N

NB-HA – Narrowband Hybrid Amplifier – šaurjoslas optisko signālu pastiprināšanas risinājums

NF – Noise Figure – ienesto trokšņu rādītājs

NOE – Nonlinear Optical Effects – nelineārie optiskie efekti

NSFNET - National Science Foundation Network - Nacionālā Zinātnes fonda tīkls

NRZ – Non-Return-to-Zero – bez atgriešanās pie nulles līnijas

NRZ-OOK - Non-Return-to-Zero On-Off Keying - bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar ieslēgšanas-izslēgšanas manipulāciju

NRZ-DPSK - Non-Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar diferenciālās fāzes manipulāciju

NRZ-QPSK - Non-Return-to-Zero Quadraturephase-shift Keying - bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar kvadratūras fāzes manipulāciju

NZDSF — Non Zero Dispersion Shifted Fiber — šķiedra ar ne-nulles nobīdītu dispersijas punktu

O

OBPF – Optical Band-pass Filter – optiskās joslas filtrs

ODN – Optical Distribution Network – optiskais sadales tīkls

OLT – Optical Line Terminal – optiskais līnijas terminālis

OLT-Tx - Optical Line Terminal Transmitter - optiskās līnijas termināļa raidītājiem

ONT – Optical Network Terminal - optiskā tīkla galiekārta
OOK – On-Off Keying – signāla intensitātes modulācijas formāts
OPM – Optical Phase Modulator - optiskais fāzes modulators
OSA – Optical Spectrum Analyzer – optiskais spektra analizators
OSNR – Optical Signal-Noise Ratio – optiskā signāla-trokšņu attiecība
OŠ – Optical Fiber – optiskā šķiedra

P

PE – Power Efficiency – jaudas efektivitāte
PIN – PIN fotodiode
PM – Phase Modulation – fāzes modulācija
*PM – Power Meter – jaudas mērītājs
PMD – Polarization Mode Dispersion – polarizācijas modu dispersija
PON – Passive Optical Network – pasīvais optiskais tīkls
PP – Parametric Pump – parametriskā pumpēšana
PRBS – Pseudo-Random-Bit-Sequence – pseido-gadījuma bitu secība
PRE DCF – Pre-compensation without DCF CD_{SL} – atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD pirmskompensatoru bez CD_{SL}
PRE DCF_{SL} – Pre-compensation with DCF CD_{SL} - atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD priekškompensatoru ar CD_{SL}
POST DCF – Post-compensation without DCF CD_{SL} – atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD pēckompensatoru bez CD_{SL} kompensācijas
POST DCF_{SL} – Post-compensation with DCF CD_{SL} - atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD pēckompensatoru ar CD_{SL} kompensācijas
SYM DCF – Simetric Compensation without DCF CD_{SL} – izvēlēta šķiedra kopā ar DCF kā CD simetrisko kompensatoru bez CD_{SL}
SYM DCF_{SL} – Simetric Compensation with DCF CD_{SL} – atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD simetrisks kompensators ar CD_{SL}
P2P – Point to Point – punkts uz punktu

Q

QAM - Quadrature-amplitude Modulation – kvadrātiskās amplitūdas modulācija
QoT – Quality of Transmission - pārraides kvalitāte
QPSK - Quadraturephase-shift Keying – kvadrātūras fāzes manipulācija

R

RDS – Relative Dispersion Slope – relatīvais dispersijas slīpums
ROADM – Reconfigurable Optical add-drop Multiplexer – pārkonfigurējams optiskais pievienošanas-nomaiņas multiplekseris
RX – Receiver – uztvērējs
RZ – Return-to-Zero – ar atgriešanos pie nulles līnijas kods

S

SBS – Stimulated Brillouin Scattering – stimulēta Briljuēna izkliede
SDM – Space Division Multiplexing - telpas blīvēšanas tehnoloģijas
SE – Spectral Efficiency – spektrālā efektivitāte
S-LED – Superluminescent light-emitting diode - superluminescences gaismas diode (S-LED)
SMF – Single Mode Fiber – vienmodas optiskā šķiedra
SNR – Signal-Noise Ratio – signāla-trokšņu attiecība

SOA – Semiconductor Optical Amplifier – pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
SPM – Self-Phase Modulation – fāzes pašmodulācija
SRS – Stimulated Raman Scattering – stimulēta Ramana izkliede
SSMF – Standart Single Mode Fiber – standarta vienmodas optiskā šķiedra
STM – Synchronous Transport Module – sinhronas pārraides modulis
SS-WDM – Spectrum Sliced WDM – spektrāli sagriezts WDM
SWB-HA - Seamless and Wideband Hybrid Amplifiers – Platjoslas hibrīda pastiprinātājs

Š

ŠOPS – Fiber Optic Transmission Systems - šķiedru optiskā pārraides sistēma

T

TDM - Time Division Multiplexing - laukdales blīvēšanas tehnoloģija
TW-SOA – Travelling Wave Semiconductor Optical Amplifier – skrejviļņa pusvadītāju optiskais pastiprinātājs
TX – Transmitter – raidītājs

U

UDWDM – Ultra-Dense Wavelength-Division Multiplexing – īpaši blīva viļņgarumdales blīvēšana

V

VB – Valence Band – valentā zona
VOA – Variable Optical Attenuator – mainīgs optiskais vājinātājs

W

WDM – Wavelength Division Multiplexing – viļņgarumdales blīvēšana
WSS – Wavelength Selective Switch – viļņgarumdales selektīvais slēdzis

X

xDFA – Rare Element Doped Fiber Amplifier – retzemju leģētas šķiedras pastiprinātājs
XPM – Cross-Phase Modulation - fāzes krosmulācija

IEVADS

Mūsdienās strauji pieaug pārraidīto datu apjoms. Ericsson analītiķi paredz mobilo datu pieaugumu no 51 EB 2020. gadā līdz 236 EB 2026. gadā, no kuriem 54% sastādīs 5G datu plūsmas [1].

Papildus tam optiskā infrastruktūra ir ļoti plaši izplatīta un ir pieejamas plašas caurlaides joslas, kas atvieglo tās izmantošanu jaunu sistēmu izveidē. Jaunu pasīvi optisko tīklu (PON) standartu izstrādē tiek ietverta līdz pastāvēšana ar vēsturiskajiem standartiem, tādējādi paātrinātā pāreja uz augstāka datu pārraides ātruma tīkliem [2].

Optiskais signāla pastiprinātājs ir neatņemama daļa no mūsdienu šķiedru optiskas pārraides sistēmu (ŠOPS) elementu kopas. Optisko pastiprinātāju pielietojumu klāsts ir plašs – no zemu izmaksu, nelielu attālumu piekļuve tīkliem, līdz reģionālajiem tīkliem ļoti lielu attālumu starpkontinentālajiem zemūdens tīkliem. Pastiprinātāju uzbūvi ietekmē atjaunojies pieprasījums pēc lielākas joslas ietilpības šķiedru optikas pārraides sistēmās. Šobrīd aktīvi turpina norisināties viļņgarumdales (WDM) sistēmu attīstība ar kanāla datu pārraides ātrumu 100 Gbit/s un vairāk. Nepieciešamība apmierināt šo lielu pārraides ātrumu sistēmu prasības pret lielākas ietilpības esošo optiskās šķiedras (OŠ) un optisko viļņu garuma komutācijas iekārtām, pieprasa sarežģītāku modulācijas un demodulācijas formātu izmantošanu, kas spēj kodēt vairākus bitus vienā simbolā un bieži iekļauj diferenciālu vai koherentu detektēšanu. Vispārējā gadījumā, šādi modulācijas formāti palielina sistēmas izturību pret hromatisko dispersiju CD, polarizācijas modu dispersiju (PMD) un filtrēšanas kropļojumiem, bet rada papildus prasības pret optisko pastiprinātāju trokšņu parametriem dēļ to jūtības pret nelineārajiem signāla kropļojumiem un paaugstinātas prasības pret optiskais signāls-troksnis (OSNR) attiecības.

No citas puses, optisko pastiprinātāju īpatnības, tādas, kā pastiprinājuma koeficienta spektrs, tā atkarība no kanālu blīvuma, piesātinājums un dinamiskā impulsa reakcija, kā arī optiskie trokšņi, ko papildus ienes pastiprinātājs, uzliek ierobežojumus pārraides sistēmu attīstībai, uzbūvei un darbībai.

Pēdējās desmitgadēs pastiprinātāju attīstību nosaka četras galvenās tendences. Pastiprinātājam jābūt ar platu optisko pastiprinājuma joslu, lai efektīvi darbotos sistēmās ar lielu kanālu skaitu. Izmantotajai optikai un ātrdarbīgām elektroniskajām komponentēm jānodrošina ātru veikspēju dinamiskajos tīklos. Noteicošās ir arī izmaksu samazināšanas un pastiprinātāju moduļu standartizācijas tendences. Reaģējot eksponenciāli augošu pārraidāmo datu apjomu, tīkli tiek veidoti, izmantojot blīvu viļņgarumdales blīvēšanu (DWDM). Komerciālajā lietošanā esošajos tīklos izmanto līdz 160 kanāliem ar 50 GHz atstatumu C- un L-joslās. Tomēr lielākajā daļā tīklu datu pārraidei izmanto C-joslu. Pirms kāda laika fiksētās punkts-punkts WDM sistēmas bija plaši izplatītas. Tomēr straujš datu apjoma pieaugums izraisīja vispārēju pārorientēšanos uz dinamiskajiem optiskajiem tīkliem. Visi jauni pilsētīklu, reģionālo un tālo sakaru tīklu risinājumi iekļauj uz pārkonfigurējama optiskā pievienošanas-nomainīšanas multiplexera (ROADM) principa balstītas iekārtas dinamiskajai optiskajai komutācijai, un tie jau tiek plaši izmantoti lielo un reģionālo sakaru pakalpojumu sniedzēju tīklos. Tāpēc pastiprinātāju konstrukcijai ir jāapmierina dinamisko optisko sakaru sistēmu ātrdarbības prasības. Savukārt pastiprinātāju cenas ir būtiski samazinājušās 10 gadu laikā. Tas notika dēļ pumpēšanas lāzeru, erbija šķiedras un citu komponentu kā arī darbaspēka cenu mazinājuma. Pastiprinātāju piedāvājuma paplašināšanās tirgū noveda pie pastiprinātāju parametru pseidostandardizēšanas. Ražošanas pieejas un pastiprinātāju uzbūves izmaiņas ir veicinājušas

pāreju uz modulāriem pastiprinātājiem. Turpmākas izmaiņas ražošanas un tirgus paplašināšanās rada nepieciešamību izveidot standartus pastiprinātāju ražošanas jomā [3].

Mūsdienu tīklos biežāk sastopams erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs un Ramana efekta šķiedras pastiprinātājs. Lielu un ļoti lielu attālumu tīklos izmanto hibrīdu risinājumu, kas sastāv gan no EDFA, gan no Ramana pastiprinātājiem.

Kopš tā izstrādes brīža 1987. gadā ar erbiju leģētās šķiedras pastiprinātājs EDFA ir mainījis telekomunikāciju jomu. Šodien EDFA tiek uzskatīta par labi attīstītu tehnoloģiju. Viens no izplatītiem tā pielietojumiem ir ROADM, kur optiskais pastiprinātājs ir svarīga komponente. Iespēja pārraidīt optiskos kanālus, izmantojot ROADM, ļauj operatoriem samazināt izmaksas uz viļņa garumu optiskajā tīklā. Izmantojot Ramana pastiprinātāju, pastiprinājumu var iegūt jebkurā vēlamā joslā, bet pastiprinājuma koeficientam var piešķirt izlīdzinātu formu, ja optiskā pumpēšana tiek veikta vairākos viļņa garumos vienlaikus. Ramana pastiprinātāja spektra elastīgums ir viena no tā galvenajām īpašībām un priekšrocībām [3].

Šajā darbā tiek apskatīts būtiskākais no EDFA un Ramana šķiedras pastiprinātāja darbības principiem, īpatnībām un ierobežojumiem, to lomas šķiedru optikas pārraides sistēmā. Eksperimentālajā daļā, veicot WDM pārraides sistēmas simulāciju, tiek pētīta pastiprinātāju un sistēmas parametru ietekme uz signāla pastiprinājumu, simulējot EDFA un Ramana pastiprinātāju līnijā atsevišķi, pēc tam no hibrīda risinājumu, kas sastāv no EDFA un Ramana pastiprinātāja kopā vienā pārraides līnijas laidumā.

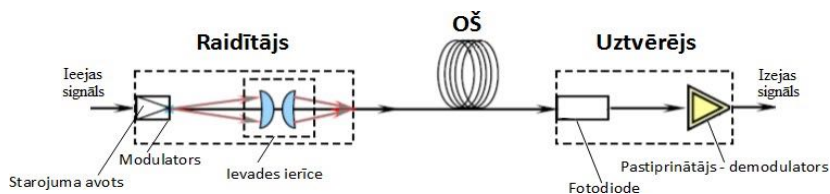
1. ŠĶIEDRU OPTISKO PĀRRAIDES SISTĒMU DATU PĀRRAIDI IETEKMĒJOŠIE FAKTORI

Optiskie signāla pastiprinātāji ir neatņemama sastāvdaļa ŠOPS risinājumos. Visizplatītākie ir ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji EDFA un Ramana šķiedras pastiprinātāji. Ramana šķiedras pastiprinātāji, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra (DCF), ir potenciāls pielietojums nākotnes tālsatiksmes lielas jaudas šķiedru optiskās pārraides sistēmās ŠOPS. Ir pieejami arī hibrīdie Raman erbija šķiedru pastiprinātāji (Raman-EDFA), lai uzlabotu optiskā signāla-troksņa attiecības (OSNR) veiktspēju optiskās pārraides sistēmās. Šajā nodaļā tiks analizēti ŠOPS datu pārraides ietekmējošie faktori un rādītāji, kas nepieciešami, lai pamatotu hibrīda platjoslas optiskā pastiprinātāja eksperimentālās izstrādes laikā analizēt visus iepriekš minētos ietekmējošos faktoros.

1.1. Viļņgarumdales blīvētās (WDM) sakaru sistēmas klasifikācija un darbības principi

Ņemot vērā, ka ir arī citas kabeļu sakaru sistēmas, tad ŠOPS pēc savām īpašībām un iespējām ir pārāka par tām. To būtiski ietekmē faktors, ka optiskai šķiedrai (OŠ) ir mazs vājinājums salīdzinājumā ar citiem materiāliem, kuri tiek izmantoti datu pārraidē, kā arī tas, ka OŠ mazs ienestais vājinājums nodrošina datu pārraidi uz daudz lielākiem attālumiem. Savukārt liela OŠ caurlaides spēja dod iespēju pārraidīt informāciju daudz lielākos ātrumos. OŠ neietekmē blakus esošie modulētie optiskie signāli, kā arī OŠ nav pakļauta vājiem elektromagnētiskiem traucējumiem. Runājot par OŠ materiāla īpašību priekšrocību, tad salīdzinot OŠ ar citām kabeļu sistēmām, OŠ ir mazāki gabarīti ar lielāku kapacitāti un attiecīgi arī svaru, kā arī OŠ ir lielāka ugunsdrošība [4, 5].

Vienkanāla optisko šķiedru pārraides līnijas ir ŠOPS pamata elements. Ja tajās tiek pārraidīts viens optiskais signāls vienā virzienā, tad tā ir simpleksā sistēma, bet ja tiek izmantotas divas OŠ un optiskais signāls tiek pārraidīts savā virzienā katrā šķiedrā, tad tā ir duplexā sistēma. Elementi no kā sastāv vienkāršota simpleksā OŠ pārraides līnija un tā struktūra ir parādīta 1.1. att.



1.1. att. Vienkāršota vienkanāla ŠOPS struktūra [6].

Atbilstoši 1.1. att. parādītajai shēmai, var redzēt, ka vienkanāla OŠ pārraides līnijas sastāv no raidītāja daļas, OŠ un uztvērēja daļas. Raidītāja daļā tiek izmantots starojuma avots, modulators un starojuma ievades ierīce optiskajā šķiedrā. Lāzera diode tiek izmantota kā starojuma avots. Atbilstoši nepieciešamajam informācijas pārraides ātrumam tiek definēta amplitūda, fāze vai polarizācijas stāvoklis un šo funkciju izmaiņu nodrošina modulators. Vienmodas optiskās šķiedras (SMF) pamatā tiek izmantota mūsdienu OŠ līnijā, protams ir arī risinājumi kuros tiek pielietota daudzmodu OŠ. Kā redzams 1.1. att., tad uztvērēja daļa sastāv

no lavīna fotodiodes vai PIN diodes (PIN) un demodulatora. PIN un lavīna fotodiodes atšķirību var analizēt šādi: lavīna fotodiode ir jūtīgāka pret apkārtējās vides izmaiņām un arī vairāk sarežģītāka ierīce nekā PIN, tā var nodrošināt par 10-20 dB lielāku jūtības līmeni [5, 6].

Kā iepriekš minēts, tad nemitīgi pieaugot pieprasījumam pēc datu pārrades apjoma palielināšanas, ir nepieciešams un tiek izmantotas dažādas tehnoloģijas, kuras ir nepieciešamas, palielinot datu pārrades apjomu vienā OŠ līnijā izmantojot lielāku kanālu skaitu.

Pastāv viļņgarumdales blīvēšanas tehnoloģija (WDM), laikdales blīvēšanas tehnoloģija (TDM) un arī telpas blīvēšanas tehnoloģijas (SDM).

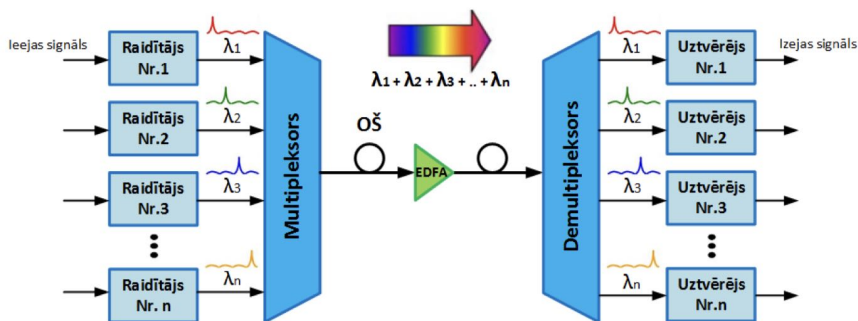
WDM nodrošina vienlaicīgu vairāku kanālu pārraidi caur vienu optisko šķiedru un tas notiek piešķirot katra kanāla esošajai bitu plūsmai savu konkrēto viļņa garumu [8].

TDM pamata ideja ir sadalīt pārraidāmo kanālu bitu plūsmas - piešķirt konkrēta kanāla bitiem attiecīgo laika intervālu un pārraidīt šo vairāku kanālu bitu plūsmas caur ātrdarbīgo līniju. Pateicoties laika apgabalu sadalīšanai uz kanāliem, tiek realizēta vairāku kanālu pārraide caur vienu optisko šķiedru. Tādai tehnoloģijai piemīt pārraides ātruma ierobežošana laika multipleksēšanas un demultipleksēšanas komponentu ātrdarbības dēļ [7].

SDM tehnoloģijas pamatā ir palielināt kanālu skaitu, izmantojot daudzkodolu optiskās šķiedras (MCF). Šīs tehnoloģijas nākotnes izmantošana būs atkarīga no augsti integrētām un izmaksu efektīvām sistēmas komponentēm (slēdžiem, optiskām šķiedrām, optiskiem filtriem un pastiprinātājiem, modas pārveidotājiem u.c.), kuras izmantos šīs tehnoloģijas risinājumā, lai spētu vienlaicīgi apstrādāt vairākas paralēlas datu plūsmas [9].

WDM ir visizplārtākā no visām trim pieminētajām tehnoloģijām. SDM nav līdz galam izpētīta un, pagaidām, nevar aizstāt eksistējošās ŠOPS, kur pielieto vienmodas šķiedras SMF. Savukārt, WDM ļauj sasniegt daudz lielākus pārraides ātrumus, salīdzinot ar TDM tehnoloģiju.

Galvenā WDM sistēmu ideja ir piešķirt katra kanāla piederošai bitu plūsmai savu konkrēto viļņa garumu un tādā veidā realizēt vienlaicīgu vairāku kanālu pārraidi caur vienu OŠ līniju. WDM sistēmas struktūra ir parādīta 1.2. att.



1.2. att. WDM sistēmas struktūra [12].

Optiskie raidītāji ģenerē optiskos signālus ar dažādiem viļņa garumiem, kuri tiek apvienoti ar optiskā multipleksora palīdzību un ievadīti OŠ pārraides līnijā. Lielo pārraides attālumu gadījumos, līnijā tiek iebūvēti viens vai vairāki optiskie pastiprinātāji, lai kompensētu optiskā signāla jaudas zudumus multipleksēšanas un demultipleksēšanas dēļ, kā arī vājinājumu, kas uzkrājas optiskajām signālam izplatoties OŠ. Priekš dispersijas kompensācijas var būt pielietotas dispersijas kompensējošās šķiedras (DCF) vai optiskie šķiedras Bregga režģi (FBG).

Uztverošajā galā optiskais demultipleksors saņem apvienoto optisko signālu, izdala katram konkrētām kanālam piederošo viļņa garumu un novirza šo atdalīto optisko signālu uz attiecīgo uztvērēju [10, 11].

WDM sakaru sistēmām ir raksturīga starpkanālu šķērsrunas ietekme - konkrētā kanālā citu kanālu signāls tiek reprezentēts kā troksnis un tādā veidā rāda pārraides kvalitātes pasliktināšanu. Starpkanālu šķērsrunas ietekmei var būt vairāki cēloņi, visbiežāk tie var parādīties dēļ nekvalitatīvas optisko filtru darbības, kā arī nelineāro optisko efektu NOE ietekmes dēļ. Īpaši pārraides kvalitāti WDM sistēmās ietekmē četru viļņu mijiedarbes (FWM) radītas spektrālās komponentes [10].

WDM sistēmas centrālie elementi ir optiskie multipleksori/demultipleksori, jo tie izpilda spektrālo kanālu apvienošanas/izdalīšanas funkciju telpā - faktiski, veic pasīvu maršrutēšanu pēc viļņa garumiem. Eksistē dažādas optiskās metodes priekš vairāku kanālu apvienošanas vienā OŠ pārraides līnijā, un katram WDM veidam ir lietderīgi pielietot vairāk tam atbilstošu metodi.

Optiskai multipleksēšanai var pielietot kombinētus vai kaskādē izvietotus šaurjoslas filtrus. Filtrēšanai var tikt pielietoti metinātie bikoniski sazarotāji, plāno kārtiņu filtri, šķiedras Bregga difrakcijas režģi, šķidro kristālu filtri. Šādi multipleksori, kas balstās uz kaskādē izvietotiem šaurjoslas filtriem, ienes zudumus, kuru lielums ir tieši proporcionāls kaskāžu skaitam, tādēļ, tie ir labāk piemēroti sistēmām ar nelielu kanālu skaitu. Savukārt, WDM sistēmās ar lielāku kanālu skaitu (daži desmit un vairāk) tiek izmantoti multipleksori uz telpisko dispersijas elementu bāzes, kuri ļauj pie lielā kanālu skaita ienest mazāk zudumus, salīdzinot ar kaskādē slēgtiem filtriem. Visbiežāk tiek izmantoti fāzes difrakcijas režģi integrālajā izpildījumā viļņvadu masīva režģi (AWG), kuru ienestais vājinājums ir ap 5-8 dB, atkarībā no kanālu skaita [11, 13, 14].

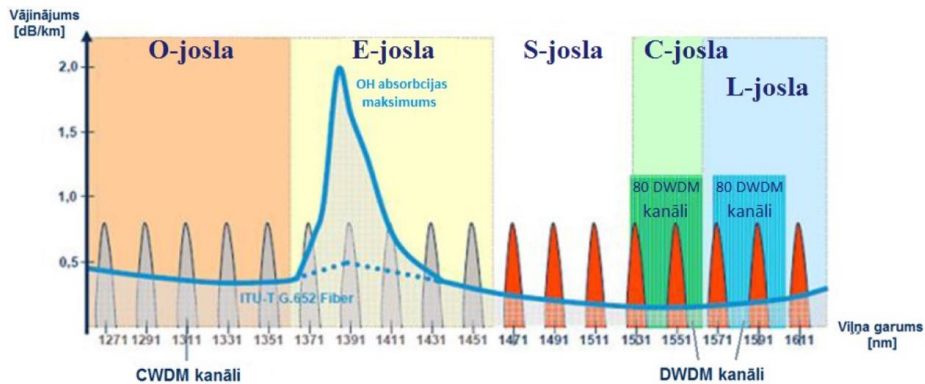
Pirmās WDM sistēmas bija divkanālu WDM sistēmas, kuras apvienoja viļņu garumus 1310 nm un 1550 nm vienā OŠ. Tādas divu viļņu garumu WDM sistēmas ļāva divreiz palielināt pārraides ātrumu vai realizēt vienā OŠ duplexo sistēmu, nemainot esošo aktīvo aprīkojumu un izmantojot vienkāršus divu viļņu garumu multipleksorus/demultipleksorus. 1990. gadu vidū, pateicoties EDFA pastiprinātāju izveidei, sāka attīstīties blīva viļņgarumdales blīvēšanas tehnoloģija (DWDM). Tāda attīstība bija saistīta ar EDFA pastiprinātāja viļņu garuma darbības diapazonu, turklāt pieauga šādu sistēmu ekonomiskā efektivitāte, jo viens pastiprinātājs aizvietoja vairākus desmitus reģeneratoru, kurus, pirms optisko pastiprinātāju izveides, izmantoja atsevišķi katram spektrālajam kanālam [11].

Visi WDM sakaru sistēmas kanālu viļņa garumi ir izvietoti ar noteiktu starpkanālu intervālu. Pēc starpkanālu intervālu lielumiem WDM sakaru sistēmas tiek klasificētas rupjas viļņgarumdales blīvēšanas (CWDM) sakaru sistēmās un blīvas viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmās (DWDM). Šo sakaru sistēmu spektrālais kanālu sadalījums ir parādīts 1.3. att.

CWDM sakaru sistēmas darbojas viļņu garumos no 1271 nm līdz 1611 nm, ieteicamais starpkanālu intervāls ITU-T G694.2 rekomendācijā ir 20 nm (2500 GHz), bet var būt izmantoti arī citi starpkanālu intervāli, kuri nav mazāki par 200 GHz. CWDM sakaru sistēmu kanālu skaits nevar būt lielāks par 18.

DWDM sakaru sistēmas darbojas C- un L-joslas viļņu garuma diapazonos. DWDM sakaru sistēmu kanālu izvietojums ir atkarīgs no dažādiem starpkanālu intervāliem: 12,5, 25, 50 un 100 GHz (ieteicamais kanālu izvietojums ir norādīts ITU-T G694.1 rekomendācijā). Ar 0,8 nm jeb 100 GHz starpkanālu intervālu, katra viļņu garuma diapazonā var būt realizēti 80 kanāli. Parasti

tiek izmantots tikai C- joslas viļņu garuma diapazonos, jo kanālu skaits, kuru var realizēt šajā diapazonā ir pietiekami liels, turklāt, G.652 standarta vienmodu šķiedras vājinājums C-joslas viļņu garuma diapazonā ir mazāks, nekā L- joslas viļņu garuma diapazonā. DWDM sakaru sistēmas ar kanālu intervālu 50 GHz un mazāk tiek sauktas arī par augsta blīvuma viļņgarumdales blīvēšanas sakaru sistēmām (HDWDM) un ļauj multipleksēt ap 128 kanāliem un vairāk [15, 16].



1.3. att. CWDM un DWDM sakaru sistēmu kanālu sadalījums [16].

Pēc starpkanālu intervālu lielumiem, ir redzams, ka ar DWDM ir iespējams realizēt daudz lielāku kanālu skaitu, līdz ar to nodrošināt arī lielāko kopējo pārraides ātrumu vienā OŠ. Tomēr, mazāko starpkanālu intervālu dēļ, DWDM komponentēm ir daudz stingrākas prasības, salīdzinot ar CWDM tehnoloģiju. Tāpēc, kad sistēmā nav nepieciešams ļoti liels kopējais datu pārraides apjoms, biežāk pielieto CWDM tehnoloģiju [10].

WDM sistēmu multipleksēšanas/demultipleksēšanas elementu ienestais vājinājums samazina pārraidāmā optiskā signāla jaudas līmeni. Turklāt optiskās šķiedras vājinājums uzkrājas signālam izplatoties optiskajā šķiedrā un ierobežo pārraides attālumu. Lai būtu iespējams pārraidīt optiskos signālus lielākajos attālos, pastāv trīs dažādi optiskā signāla atjaunošanas veidi:

1R – optiskā signāla pastiprināšana. Šī optiskā signāla atjaunošanas veida pamatā ir optiskās jaudas pievienošana, neietekmējot optiskā signāla formu vai sinhronizāciju. Optiskais pastiprinātājs pievieno fotonus, kuriem ir tāds pats viļņa garums un fāze, kā ienākošajam optiskajam signālam. Pārsvārā tiek pielietoti EDFA optiskie pastiprinātāji. No protokola neatkarīgs atjaunošanas veids.

2R – optiskā signāla pastiprināšana un formas atjaunošana. Atjaunotā signāla forma ir tuva oriģinālai signāla formai. Tomēr netiek atjaunots laika intervāla garums (sinhronizācija). Džitera uzkrāšanās rada sinhronizācijas zaudēšanu un ierobežo kaskādē slēgto 2R reģeneratoru skaitu. No protokola neatkarīgs atjaunošanas veids.

3R – optiskā signāla pastiprināšana, formas atjaunošana un sinhronizācijas atjaunošana.

Papildus pastiprināšanai un formas atjaunošanai, tiek atjaunota arī sākotnējā signāla sinhronizācija (oriģinālais cikla ilgums). Dārgākais un sarežģītākais optiskā signāla atjaunošanas veids. Atkarīgs no izmantotā protokola. 3R reģeneratoru skaits līnija praktiski nav ierobežots [10, 17, 18].

Viens no vienkāršākajiem un lētākajiem variantiem pārraides attāluma palielināšanai un signāla uzkrāta vājinājumā kompensēšanai ir 1R – optiskā pastiprinātāja pielietojums. Pateicoties savam īpašībām lielu popularitāti ieguva EDFA optiskie pastiprinātāji. Pastiprinājuma spektra joslas platumam tradicionālai EDFA (uz silīcija dioksīda bāzes) konfigurācijai ir aptuveni 35 nm, no 1525 līdz 1560 nm, kas atbilst C-joslas viļņu garuma diapazonam. Tāpēc, EDFA pastiprinātāju pielietojums WDM sistēmās vairāk ir attiecināms uz DWDM nevis CWDM sistēmām, jo C-joslā iekļaujas tikai 2-3 CWDM kanāli. EDFA var pastiprināt arī L-joslas DWDM kanālus, izmantojot daudzpakāpju konfigurācijas, speciālos piemaisījumus u.c. metodes. Tā kā EDFA pastiprinātājiem ir raksturīgi pastiprinātās spontānas emisijas rādītāji, to skaits līnijas kaskādes slēgumos bez pilnīgas optiskā signāla atjaunošanas ir ierobežots un parasti nav lielāks par 4-5 kanāliem [5, 19].

1.2. Nelineārie optiskie efekti (NOE) šķiedru optiskajās sakaru sistēmās

Šajā nodaļā ir apskatīts nelineārās optikas jēdziens, galvenie nelineārie optiskie efekti no optisko sakaru tehnikas viedokļa un to nozīme sakaru teknikā. Nodaļā ir analizētas telekomunikācijās pielietotās OŠ un NOE tajās, kā arī to ietekme uz optisko blīvēšanas sistēmu darbību. Nodaļas ietvaros veikts nelineāro efektu duālās dabas apskats.

Nelineārās optikas parādības caurspīdīgā materiālā ir novērojamas tikai relatīvi lielā gaismas intensitātē, un tās kvalitatīvi izmaina pārraidāmo signālu. Nelineārie efekti šķiedru optikā ir līdzīgi nelineāriem efektiem citās fizikālās sistēmās (mehāniskajās un elektroniskajās): tie maina šķiedru īpašības un izraisa parazītisko harmoniku ģenerāciju frekvencēs, kuras ir vienāda ar sistēmas pamatfrekvenču lineāru kombināciju. Šie papildu signāli noved pie neparedzamām zudumu parādībām optiskajos sakaru tīklos. WDM sistēmās ar augstu koherences pakāpi pat mērenas jaudas optiskie signāli var novest pie nelineāriem efektiem. Rezultātā vides optiskās raksturlielnes (polarizācija, laušanas koeficients, absorbcijas koeficients) kļūst par gaismas viļņa elektriskā lauka intensitātes funkcijām, un vides polarizācija kļūst nelineāri atkarīga no lauka intensitātes, bet viļņi ar dažādām frekvencēm un izplatīšanas virzieniem ietekmē cits citu [20].

Parastajās (ne šķiedru) optiskajās vidēs vajadzīgas samērā lielas jaudas, lai novērotu nelineāros efektus (raksturīgā jauda ir 104 – 107 W). Savukārt optiskajā šķiedrā NOE parādās jau pie jaudām no 1 līdz 100 W. Tas ir saistīts ar diviem apstākļiem. Pirmkārt, tā kā gaisma izplatās caur šķiedras iekšpusi jeb serdeni, tad pat pie nelielas gaismas intensitātes tā ir diezgan liela attiecībā pret šķiedras šķērsriezuma laukumu (NOE svarīga tieši intensitāte). Otrkārt, gaisma izplatās bez defokuscēšanas (bez šķērsriezuma laukuma izmaiņas) patvaļīgi lielos attālos. Gaismas izplatīšanos OŠ ietekmē dažādas optiskās parādības. Šīs parādības tiek dalītas divās lielās grupās. Pirmajā apvieno optikas īpašības, kas nav atkarīgas no gaismas intensitātes un pārraidāmo optisko signālu izmaina tikai kvantitatīvi. Svarīgākās no tām ir optiskā signāla rimšana un īso gaismas impulsu izplešanās OŠ dispersijas dēļ, un to sauc par lineāro optiku. Otrā ir nelineārā optika, kas aplūko gaismas izplatīšanos vielā, kuras optiskās īpašības mainās gaismas ietekmē un pēta NOE - optiskās parādības, kuru cēlonis ir nelineārā vides polarizācijas atkarība no gaismas elektriskā lauka intensitātes.

Lai varētu īstenot nelineāros optiskos efektus, caurspīdības apgabalā (kas ir OŠ) nepieciešams gaismas izstarpums ar intensitāti, kas salīdzināms ar atomu iekšējā lauka E_a intensitāti, $E_a = 109 \text{ W/cm}^2$.

Lai gan stikls lielā mērā ir lineārs materiāls, ŠOPS nelineārie efekti jāņem vērā divu iemeslu dēļ. Pirmkārt, šķiedras ģeometrija koncentrē optisko jaudu vienmodas šķiedras centrā, tādējādi radot augstu enerģijas blīvumu, kas sekmē NOE. Otrkārt, šķiedru optiskajās sistēmās signāli tiek raidīti daudzu kilometru attālumā, bet NOE ietekme aug, palielinoties distancei. Nelineāro efektu lielums nav lineāri atkarīgs no šķiedras garuma, jo vājinājuma dēļ stara optiskā jauda samazinās, tāpēc NOE ir atkarīgi no tā sauktā efektīvā garuma, skatīt vienādojumu 1.1. [20, 21].

$$l_{eff} = \frac{1-e^{-\chi l}}{\chi} = \frac{1-e^{-0.23\alpha l}}{0.23\alpha} l, \quad (1.1.)$$

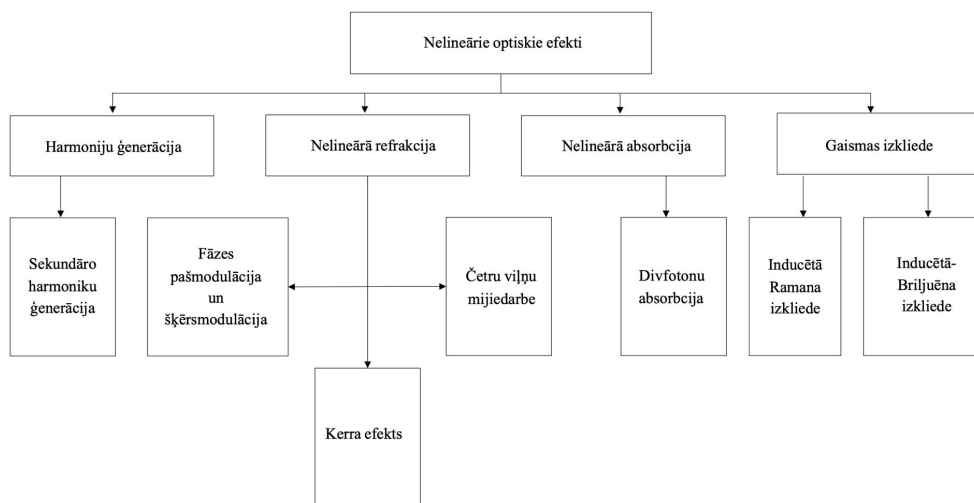
kur l – šķiedras kopējais garums,

χ – absorbcijas koeficients;

α – lineārais vājinājums, dB.

NOE noteicošais faktors ir vides polarizācija (neņemot vērā telpisko dispersiju un pieņemot, ka visi viļņi izplatās tikai vienā dimensijā) [28].

NOE pētīšana un pielietošana praksē kļuva iespējama pēc superīsu lielas jaudas impulsu rubīna lāzeru izgatavošanas 1965. gad ā. 1.4. attēlā parādīts to NOE shematisks iedalījums, kas ir svarīgi OŠ gadījumā.



1.4. att. NOE shematisks iedalījums no ŠOPS viedokļa.

1.2.1. Optiskie Kerra efekti

NOE OŠ ir svarīgs pētījumu objekts no diviem aspektiem – no vienas puses, izmantojot NOE, ir iespējas radīt tādas optiskās ierīces kā optiskos pastiprinātājus, multiplexorus, demultiplexorus, šķiedru lāzerus, komutatorus, īso impulsu ģeneratorus, kuras plaši izmanto ŠOPS, bet, no otras puses, tie ierobežo ŠOPS pārraides attālumu un ātrumu. Piemēram, inducēto Briljuēna izkliedi (SBS) var izmantot kanālu ievades/izvades režīma realizācijai. Līdz ar to, fāzes krosmodulāciju (XPM) un četru viļņu mijiedarbi (FWM) pielieto viļņu pārveidotājos derīgā signāla pārnesšanai no viena nesošā viļņa garuma uz otro, bet Ramana izkliedi un Briljuēna izkliedi pielieto viļņu lāzeros un pastiprinātājos [23].

NOE OŠ plaši izmanto signālu pārslēgšanai no viena optiskā kanāla citā, dažu loģisko operāciju reģenerācijas izpildei, t.i., signālu formas un signālu laika formas laika stāvokļa reģenerācija, kā arī gaismas impulsu dinamiskai glabāšanai.

OŠ raksturo attiecīgi nelineāri lielumi, no kuriem svarīgākie ir šķērsriezuma efektīvais laukums A_{eff} , nelineārais garums LNL . Laušanas koeficientu n un α zudumus var pierakstīt šādā formā [20]:

$$n = n_0 + \delta n = n_0 + n_2 I, \quad (1.2.)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \delta \alpha = \alpha_0 + \beta I, \quad (1.3.)$$

kur n_0 – lineārais laušanas koeficients,

n_2 – ir nelineārais laušanas koeficients;

α_0 – lineārie zudumi;

β - nelineārais koeficients, kas ir atbildīgs par divfotonu absorbciju;

I – gaismas plūsmas intensitāte.

Lielāko daļu nelineāro efektu šķiedrā rodas no nelineārās refrakcijas, jo pie augstām intensitātēm to nosaka laušanas koeficienta atkarība no intensitātes:

$$n = n_0 + n_2 I = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{eff}}, \quad (1.4.)$$

kur P – izstarotā maksimālā jauda,

A_{eff} – šķērsriezuma efektīvais laukums, kas ir parametrs, kas nosaka OŠ raksturojušu šķērsriezumu telpas apgabalu, kurā notiek nelineāra mijiedarbība.

Laušanas koeficienta n_2 nelineārā daļa raksturo tikai OŠ īpašības. Šī lieluma tiešā mērīšanas metode OŠ vēl nav labi izstrādāta. OŠ kodols šķērsriezumā nav viendabīgs pēc sava sastāva un fizikālajiem raksturlielumiem, un vispārīgā gadījumā nelineārais laušanas koeficients ir atšķirīgs dažādos kodola apgabalos. Vispārīgā gadījumā A_{eff} definē kā [20]:

$$A_{eff} = \frac{n(n-1)x^2 \left[\int I * dA \right]^2}{\int I^2 * dA}, \quad (1.5.)$$

OŠ šķērsriezuma efektīvais laukums izteikts caur intensitāti un dA - integrēšana pa OŠ šķērsriezuma laukumu, jo A_{eff} ir atkarīgs no tādiem šķiedras parametriem kā serdes rādiuss, serdes laušanas koeficients un serdes - apvalka laušanas koeficientu starpība. NOE ir liela loma daudzkanālu ŠOPS. Lai palielinātu ŠOPS caurlaides spēju un izmantotu OŠ caurlaides joslu, tika radītas optiskās blīvēšanas sistēmas. Kā pirmās radās laika multipleksēšanas TDM sistēmas. Tomēr, pieaugot prasībām pret pārraides ātrumiem un apjomu, modulācijas un multipleksēšanas aparātūra kļuva sarežģītāka, līdz ar to ierobežojot šīs tehnoloģijas pielietojumu. Turpmāko caurlaides joslas palielināšanos nodrošināja alternatīva pieeja – multipleksēšana pēc viļņu garuma WDM. WDM gadījumā pārraides darbības princips ir līdzīgs

kā multipleksēšanā ar kanālu frekvenčdali, bet tikai tā ir realizēta optiskajā pārraides vidē. Sākotnēji WDM sistēmās izmantoja no diviem līdz četriem kanāliem, bet, parādoties jaunai tehnoloģijai, DWDM (dense WDM) kopējais datu pārraides ātrums pieauga līdz 1 Tbit/s, kur, izveidojot attālumu starp kanāliem dažus nanometrus [24]. Īstenojot daudzkanālu sakarus šķiedrā, šie NOE var radīt parazitisku mijiedarbi starp kanāliem, piemēram, enerģijas pārnese no viena kanāla uz otru frekvenčdales gadījumā. Lai izvairītos no NOE negatīvās ietekmes, signāla vidējai jaudai jābūt pietiekoši mazai - ap 1mW [15, 25]. Inducēto gaismas izkļiežu efektivitāte ir atkarīga no šķiedras profila.

Pēdējos gados notiek pāreja uz pilnīgi optiskām signālu apstrādes metodēm, kas ļauj izveidot principiāli jaunus informācijas tīklus ar sadalītu informācijas apstrādi [15]. ŠOPS plašu pielietojumu ir ieguvuši optiskie pastiprinātāji. WDM sistēmās tiek pielietoti četri optisko pastiprinātāju veidi - pusvadītāju optiskie pastiprinātāji, leģētās šķiedras pastiprinātāji, Ramana pastiprinātāji un Briljuēna pastiprinātāji.

Ramana pastiprinātāji, kuru darbības pamatā ir Ramana inducētās izkļiedes princips (SRS), ir jauna tehnoloģija. Tajos tiek izmantota ierosinošā un informatīvā optiskā signāla savstarpēja iedarbība, kur, samazinoties ierosinošajai jaudai, attiecīgi palielinās optiskā signāla jauda. Krītošā gaisma kalpo par ierosinātāju, lai ģenerētu Stoksa vilni. Frekvences nobīde starp ierosināšanas un Stoksa viļņiem ir atkarīga no optisko fononu enerģijas.

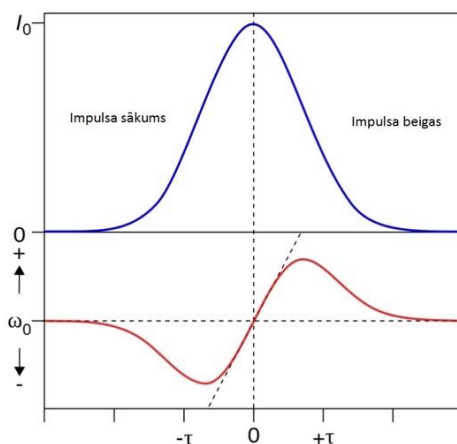
Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir to zemās izmaksas, salīdzinot ar erbija pastiprinātājiem, un salīdzinoši mazs trokšņu faktors, kā arī plašā pastiprinājuma josla. Ramana pastiprinātāju trūkums ir spontānā starojuma trokšņa ģenerēšana. Trokšnis rada haotisku impulsa frekvences modulāciju, kura, savukārt dispersijas dēļ rada haotisku solitonu nobīdi laikā. Šis efekts ierobežo šķiedras informācijas caurlaides spēju līdz 15 (Tbit/s)·km [26].

Izšķir vairākus Ramana pastiprinātāju veidus: sadalītie pastiprinātāji (to darbības princips ļauj tos izmantot kā signāla pastiprinātājus liela garuma šķiedrās, līdz ar to uzlabojot signāla trokšņa faktoru) un lokālie pastiprinātāji (tie darbojas nelielos attālos).

Briljuēna pastiprinātāju darbības principa pamatā ir Briljuēna inducētās izkļiedes SBS efekts. Atšķirībā no SRS, Briljuēna inducētās izkļiedes gadījumā Stoksa nobīde ir aptuveni 10 THz. Nepārtrauktās ierosināšanas vai ierosināšanas gadījumā ar pietiekoši gariem impulsiem (ne mazākiem, kā 1 μm) SBS slietnis var būt tikai 1 mW [27]. Diemžēl mūsdienās Briljuēna pastiprinātājus praktiski neizmanto galvenokārt tādēļ, ka tiem ir šaurs pastiprināšanas spektrs.

1.2.2. Fāzes pašmodulācija (SPM)

Kerra efekta dēļ laušanas koeficients sastāv no divām daļām. Viena no daļām mainās atkarībā no intensitātes. Dēļ šīs komponentes rodas nelineāra fāzes nobīde, kas savukārt simetriski paplašina signālu. Eksistē 2 gadījumi: normālās dispersijas gadījums un anomālās dispersijas gadījums. Dispersija tiek saukta par normālo, kad laušanas koeficients pieaug palielinoties frekvencei, savukārt anomālās dispersijas gadījumā laušanas koeficients samazinās, pieaugot frekvencei. Normālās dispersijas gadījumā, tā kā frekvence impulsa aizmugurē ir lielāka, bet priekšā ir mazāka, tad fāzes ātrums aizmugurē ir mazāks (n lielāks) un priekšā ir lielāks (n mazāks). Tas noved pie impulsa paplašināšanās (defokusēšanās laikā), skatīt 1.5.att. [29, 28, 29]



1.5. att. Impulsa intensitātes atkarība no laika un frekvences (modulācijas) atkarība no laika [28].

Nelineārās fāzes nobīdes izteiksme ir:

$$2\pi\bar{n}_2\varphi_{NL} = \gamma P_{in}L_{eff} = (A_{eff}\lambda)P_{in}L_{eff}, \quad (1.6.)$$

kur φ_{NL} - ir nelineāra fāzes nobīde,

\bar{n}_2 - nelineāra jaudas atkarīga laušanas koeficienta komponente;

λ - signāla viļņa garums, μm ;

A_{eff} - šķiedras efektīvais laukums, μm^2 ;

P_{in} - signāla jauda, W ;

un L_{eff} - efektīvais garums km [28].

1.2.3. Fāzes krosmodulācija (XPM)

Fāzes krosmodulācijas gadījumā nelineāra fāzes nobīde ir atkarīga no citu, blakus esošo kanālu jaudas. Nelineārās fāzes nobīdes izteiksme tiek papildināta ar vēl vienu locekli:

$$\varphi_{NLj} = \gamma L_{eff} (P_j + 2 \sum_{m \neq j} P_m), \quad (1.7.)$$

kur P_m - citu kanālu jauda.

“2” pirms summas zīmes nozīmē 2 reizes lielāku ietekmi nekā pašmodulācijas gadījumā. Kaut arī visi kanāli ietekmē viens otru, vislielākā ietekme ir blakus esošiem kanāliem. Ietekme starp diviem tālu viens no otra atrodamiem kanāliem ir pietiekami maza, lai to varētu neievērot. [28, 30, 31].

1.2.4. Četru viļņu mijiedarbe (FWM)

Izplatoties līnijā vairākiem kanāliem, šie kanāli sāk mijiedarboties un ģenerēt jaunas frekvenču komponentes. Lai četru viļņu mijiedarbe būtu iespējama, ir jābūt fāzes sakrītībai. Gadījumā, kad ir 3 kanāli, rodas ceturrtā frekvenču komponente: [28]

$$\omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3 = \omega_4, \quad (1.8.)$$

Visplašāk izplatīts ir gadījums, kad $\omega_1 = \omega_2$ un $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$.

Jo ω_1 un ω_2 sakrīšana fāzē ir viegli sasniedzama. Tas padara šo gadījumu par visbiežāk sastopamo un līdz ar to arī viskaitīgāko. Izteiksmi 1.8. var interpretēt arī šādi: viela absorbē pirmās un otrās frekvences fotonu un ģenerē trešās un ceturtās frekvences fotonu. Četru viļņu mijiedarbe ir izteikta visstiprāk nulles dispersijas apgabalā [28].

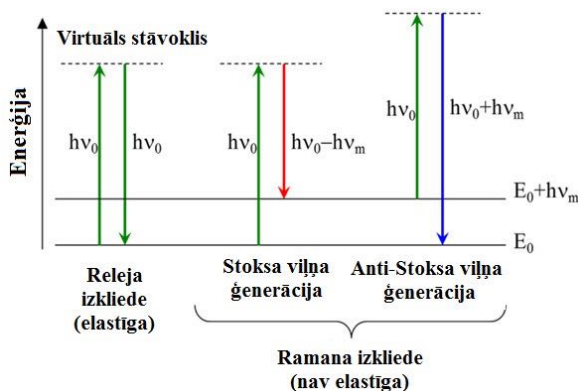
1.2.5. Ramana izkliede

Ramana izkliede ir novērojama optiskajā šķiedrā pie lielām gaismas intensitātēm. Atšķirībā no Releja izkļedes, Ramana izkliede nav elastīga. Tā kā Ramana izkliede ir nelineārs efekts, un tā dēļ rodas jaunas frekvenču komponentes. Ramana izkliede var būt spontānā vai inducētā. Inducēto jeb stimulēto Ramana izkliedi pielieto pārskatāmajos Ramana lāzeros un Ramana pastiprinātājos. Ramana pastiprinātāji ir plaši pielietoti šķiedru optikas pārraides sistēmās ar WDM [32, 33, 34].

1.2.6. Spontānā Ramana izkliede

Spontānā Ramana izkliede ir parādība, kad signālam izplatoties vielā, daļa no tā enerģijas pāriet uz zemākām vai augstākām frekvenču komponentēm. Šī pārpumpētā enerģija ir neliela un sastāda mazāk nekā 10^{-6} no kopējās pumpējošā signāla enerģijas. Frekvenču starpību starp augstākām un zemākām komponentēm nosaka molekulu svārstības režīmi. Spontānā Ramana izkliede ir iespējama daudzās vielās, to skaitā arī optiskajā šķiedrā [35, 36].

Spontāno Ramana izkliedi izskaidro kvantu mehānika. Ramana un Releja izkliedi var redzēt 1.6. attēlā.

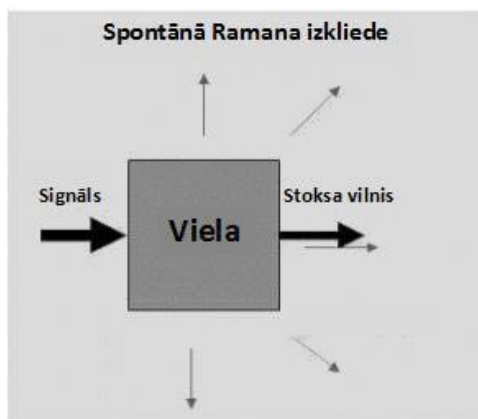


1.6. att. Ramana un Releja izkliede [37].

No attēla 1.6. ir redzams, ka sākotnējais fotons ar enerģiju $h\nu_0$ tiek absorbēts un molekula tiek polarizēta, pārejot uz virtuālo stāvokli. No virtuāla stāvokļa molekula pāriet iepriekšējā stāvoklī vai stāvoklī ar augstāku enerģiju nekā no sākuma. Ja molekula pāriet sākotnējā stāvoklī, tad tā ir Releja izkliede un šī izkliede ir elastīga, jo fotons izkļedes dēļ maina izplatīšanas virzienu, bet nemaina frekvenci. Savukārt, ja molekula pāriet ierosinātā stāvoklī, tad ģenerētam

gaismas kvantam ir mazāka enerģija $h\nu_1$ un daļā no enerģijas ir patērēta uz molekulas ierosināšanu, t.i. uz optiskā fonona ģenerāciju.

Ģenerēta fotona frekvence ir vienāda ar frekvenču starpību starp sākotnējo fotonu un fononu $\omega_1 = \omega_0 - \omega_m$, iegūto vilni sauc par Stoksa vilni. Šo procesu sauc arī par sarkano nobīdi, jo fotona enerģija tiek pārnesta tuvāk infrasarkanajam diapazonam. Var būt arī pretējs gadījums, ja molekula atrodas ierosinātā stāvoklī, tā var absorbēt fotonu ar enerģiju $h\nu_0$, pāriet virtuālā stāvoklī un pēc tam ģenerēt jaunu fotonu ar lielāku enerģiju nekā sākumā. Šādā gadījumā jauna fotona frekvence ir $\omega_2 = \omega_0 + \omega_m$ un iegūto vilni sauc par anti-Stoksa vilni. Šo procesu sauc arī par zilo nobīdi, jo fotona enerģija tiek nobīdīta tuvāk ultravioletam diapazonam. Anti-Stoksa viļņi ir retāk novērojami, jo anti-Stoksa viļņa rašanai ir nepieciešams, lai vielā jau eksistētu fononi ar noteiktu enerģiju un impulsu. Tāpēc anti-Stoksa viļņa rašanās procesi parasti netiek ievēroti. Kaut arī pie lielām temperatūrām anti-Stoksa viļņu skaits tuvojas Stoksa viļņu skaitam, pie normālām šķiedras darba temperatūrām Stoksa viļņu skaits ir daudz lielāks un pie absolūtās nulles temperatūras anti-Stoksa viļņi pilnībā izzūd [28, 30, 35, 36, 38].

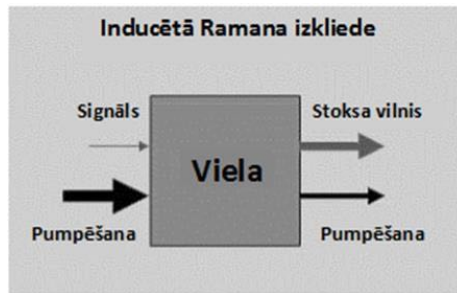


1.7. att. Spontānā Ramana izkliede [38].

Kaut arī spontānā izkliede ir novērojama daudzās vidēs, tās efekts optiskajā šķiedrā ir neliels un var tikt neievērots. Spontānā izkliede ir redzama 1.7. attēlā. Spontānas izkļiedes gadījumā vielā ir tikai pumpēšanas avots, kura enerģija tiek pārveidota Stoksa vilnī. Izkliede notiek visos virzienos [28, 30, 36].

1.2.7. Inducētā Ramana izkliede

Inducētā Ramana izkliede (SRS) notiek tad, kad materiālā papildus pumpējošām staram, ir ievadīti Stoksa fotoni. Tad Ramana efekta dēļ Stoksa fotonu ģenerācijas ātrums pieaug. Jo vairāk ir Stoksa fotonu vielā un jo lielāka ir pumpējošā stara enerģija, jo ātrāk tiek ģenerēti jauni Stoksa fotoni. Inducētas Ramana izkļiedes gadījumā lielākā daļa no pumpējošā stara enerģijas ir izmantota Stoksa viļņu ģenerācijai. Inducēto Ramana izkļiedi izmanto Ramana lāzeros un Ramana pastiprinātājos, kuros Stoksa fotoni ir lietderīgais signāls, kas tiek pastiprināts uz pumpējošā stara rēķina. Inducētā Ramana izkliede ir parādīta 1.8. attēlā [28, 38].



1.8. att. Inducētā Ramana izkliede [38].

1.3. Šķiedru optiskās pārraides sistēmas uztvertā signāla kvalitātes novērtēšanas kritēriju analīze

Kā šķiedru optisko pārraides sistēmu simulācijām, kurām nepieciešams īstenot detalizētus optiskās pārraides sistēmas modeļus un komponentes, tā arī reālām šķiedru optiskajām pārraides sistēmām ir nepieciešams izmantot precīzas to veiktspējas analīzes un novērtēšanas metodes. Ciparu pārraides sistēmās visbiežāk sistēmas veiktspējas raksturošanai tiek izmantota bitu kļūdu attiecība BER (angl. *bit error ratio*), signāla kvalitātes (Q) faktors [39] un acu diagrammas, kas sniedz kvantitatīvus uztvertā signāla kvalitātes līmeņa vērtējumus [40, 41]. *WDM-PON* pārraides sistēmām *OptSim* simulācijas programmā ir izvēlēts BER sliekšnis $BER < 1 \cdot 10^{-9}$ [42,43].

1.3.1. Bitu kļūdu attiecība (BER)

Bitu kļūdu attiecība var tikt definēta kā attiecība starp uztverto kļūdaino bitu skaitu un kopējo pārraidīto bitu skaitu, skatīt formulu 1.11. un 1.12.

$$BER = \frac{E}{n}, \quad (1.9.)$$

$$n = TR, \quad (1.10.)$$

- kur BER — bitu kļūdu attiecība;
 E — kļūdaini uztverto bitu skaits;
 n — pārraidīto bitu skaits;
 T — laiks, kurā pārraidīti n biti (sekundēs);
 R — datu pārraides ātrums (biti/sekundē).

BER mērījumi bieži tiek veikti kā gala kvalitātes pieņemšanas tests jaunizbūvētam šķiedru optikas pārraides sistēmām. BER ir noderīgs testējot eksistējošas pārraides sistēmas. Tipiskas BER sliekšņa vērtības ir robežās no 10^{-9} līdz 10^{-13} [41, 44]. Šīs sliekšņa vērtības mainās atkarībā no organizācijas, pakalpojumu sniedzēja vai pārraides sistēmas. Piemēram, ITU-T standartos G.957 un G.984.2 ir definēts, ka *PON* sistēmās tiek izmantota sliekšņa vērtība $BER < 10^{-10}$ [45, 46], savukārt citos avotos [41] un [42] ir minēts, ka tiek izmantots $BER < 10^{-9}$, jo optisko

uztvērēju jūtība bieži vien tiek definēta pie šāda BER. Maģistrālajām *CWDM* sistēmām un *DWDM* sistēmām tiek pielietots BER $< 10^{-12}$ sliekšnis [45, 51].

Ņemot vērā iepriekšminēto, promocijas darba autors ir noteicis, ka pētāmo pasīvo optisko sistēmu BER, neizmantojot turpvrēsto kļūdu labošanu (FEC), nedrīkst pārsniegt 10^{-9} lielumu. Piemēram, BER 10^{-9} nozīmē, ka viens kļūdainais bits ir saņemts uz katru pārraidīto 1 gigabitu informācijas (Gbit) [44]. Svarīgi ir novērtēt, cik ilgi jāveic BER tests, lai nodrošinātu to, ka sistēmas darbība nepārsniedz noteikto BER sliekšni. Testam jābūt veiktam tā, lai tiktu pārraidīti pietiekami daudz bitu un tādejādi iegūtie rezultāti būtu statistiski jēgpilni [44]. Ideālā gadījumā tests tiek veikts neierobežotā laikā, pārraidot neierobežotu daudzumu bitu, kā rezultātā ir iespējams iegūt kanāla patieso BER vērtību. Tomēr praksē tiek izmantoti BER testi, kuri, pielietojot statistiku, nodrošina mērījuma precizitāti 95 vai 99 %.

Lai sasniegtu šādu ticamības pakāpi BER testu ir nepieciešams veikt kamēr tiek saņemtas 100 bitu kļūdas. BER testam ar ticamības intervālu 99 % un divciparu precizitāti, nepieciešamais laiks, lai pārbaudītu optisko pārraides sistēmu ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s, pieņemot, ka BER $< 10^{-12}$, ir aptuveni 3 stundas un 30 minūtes. Savukārt, lai pārlicinātos, ka 10 Gbit/s pārraides sistēmas BER $< 10^{-9}$ pietiek ar 13 sekundēm [44].

Lai samazinātu simulācijas laiku, *OptSim* programmatūras vidē netiek realizēta tieša kļūdu skaitīšana, jo BER novērtēšana ir sarežģīts uzdevums šādu simulācijas programmu vidē dēļ lielā pārraidāmo bitu skaita un atvēlētā datora centrālā procesora (*CPU*) laika [39]. Viena no analītiskām metodēm kā *OptSim* vidē var tikt aprēķināta uztvertā signāla BER vērtība ir izmantojot Q faktoru, kas, savukārt tiek aprēķināts no uztvertā ciparu signāla vidējās un standartnovirzes vērtības, pārraidot loģisko “1” vai “0” plūsmu [39].

1.3.2. Signāla kvalitātes faktors (Q-faktors)

Uztvertā signāla kvalitātes faktors (Q — faktors) ir vēl viens sistēmas darbības kvalitātes novērtēšanas parametrs, kas var tikt lietots, kā alternatīva BER testēšanai. Q faktors ir definēts kā attiecība starp vidējo fotodiodes strāvu starp uztvertā “1” bita stāvokli un “0” bita stāvokli, dalītu ar standarta novirzes summu no abu stāvokļu trokšņu strāvas summas (skat. 1.11. vienādojumu) [41, 42, 44]:

$$Q = \frac{|I_1 - I_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{|V_1 - V_0|}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (1.11.)$$

kur Q – kvalitātes faktors;

I_1 — vidējā fotodiodes strāva “augstam” 1 bitu stāvoklim, A;

I_0 — vidējā fotodiodes strāva “zemam” 0 bitu stāvoklim, A;

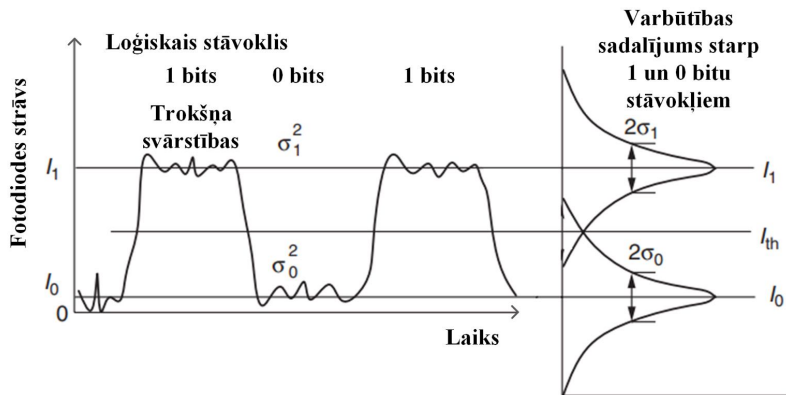
V_1 — vidējais fotodiodes spriegums uz fotodiodes slodzes pretestību bitu stāvoklim 1, V;

V_0 — vidējais fotodiodes spriegums uz fotodiodes slodzes pretestību bitu stāvoklim 0, V;

σ_1 — fotodiodes trokšņa strāvas standarta deviācija “augstam” 1 bitu stāvoklim, A;

σ_0 — fotodiodes trokšņa strāvas standarta deviācija “zemam” 0 bitu stāvoklim, A.

Fotodiodes strāvas līmenis fluktuē no viena uztvertā bita uz nākamo uztverto bitu ap vidējo vērtību I_1 , kas atbilst loģiskajam “1” bita stāvoklim (augsts signāla līmenis), un ap I_0 , kas atbilst loģiskajam “0” bita stāvoklim (zems signāla līmenis). Šīs fluktuācijas var tikt modelētas kā varbūtības sadalījuma līkne abiem iepriekšminētajiem līmeņiem, kur katram līmenim ir vidējā vērtība un standartdeviācija (σ), skatīt 1.9. attēlu.



1.9. att. Uztvertais signāls (kopā ar troksni) un tā varbūtības sadalījums [44].

Lēmējshēma salīdzina uztverto bitu līmeni ar sliekšņa līmeni (I_{th}) un tiek pieņemts lēmums - vai ir uztverts "1" vai "0". Ja signāla līmenis ir mazāks par sliekšņa vērtību, tad lēmējshēma pieņem, ka ir uztverts "0" un otrādi. Iegūstot Q faktoru ir iespējams aprēķināt uztvertā signāla BER vērtību, skatīt izteiksmes 1.12. un 1.13. [41, 44]

$$BER = \frac{1}{2_{erfc}} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right), \quad (1.12.)$$

$$BER = \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{Q^2}{2} \right), \quad (1.13.)$$

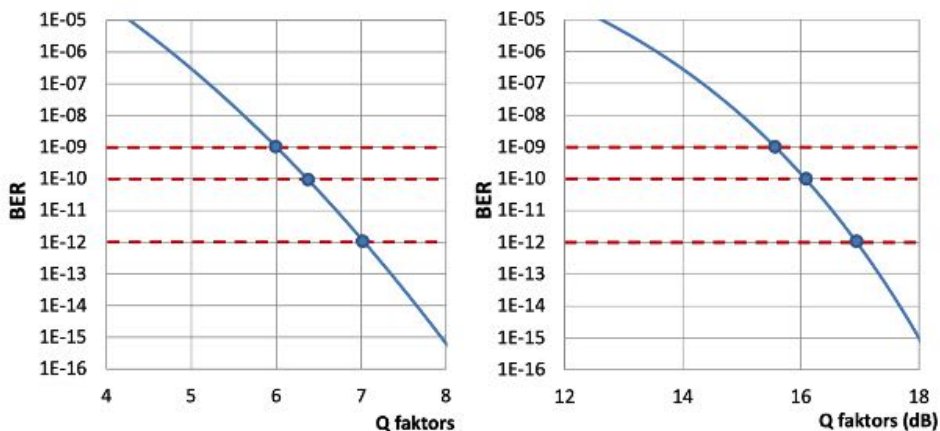
Jāņem vērā, ka 1.12. vienādojumu var pielietot, ja $Q > 3$ (pieņemot, ka uztvertajam signālam ir Gausa sadalījums). Zinot uztvertā signāla BER vērtību ir iespējams aprēķināt Q faktoru pielietojot sekojošu formulu:

$$Q = \sqrt{-2\ln(BER)} - \left[\frac{2.307 + 0.2706\sqrt{-2\ln(BER)}}{1 + \sqrt{-2\ln(BER)}(0.9923 + 0.0448\sqrt{-2\ln(BER)})} \right], \quad (1.14.)$$

Savukārt, zinot lineāra Q faktora vērtību, ir iespējams aprēķināt logaritmiska Q faktora vērtību (dB):

$$Q_{dB} = 20 \log(Q), \quad (1.15.)$$

Balstoties uz šiem vienādojumiem tiek noteiktas Q faktora un tā attiecīgās BER vērtības, kuras ir attēlotas 1.1. tabulā. Savukārt Q faktora un BER vērtību lielumu korelācijas diagrammas ir redzamas 1.10. attēlā.



1.10. att. Lineārais un logaritmiskais Q-faktors atkarībā no uztvertā signāla BER vērtības.

1.1. tabula

BER un Q faktora vērtību savstarpējā saistība [44]

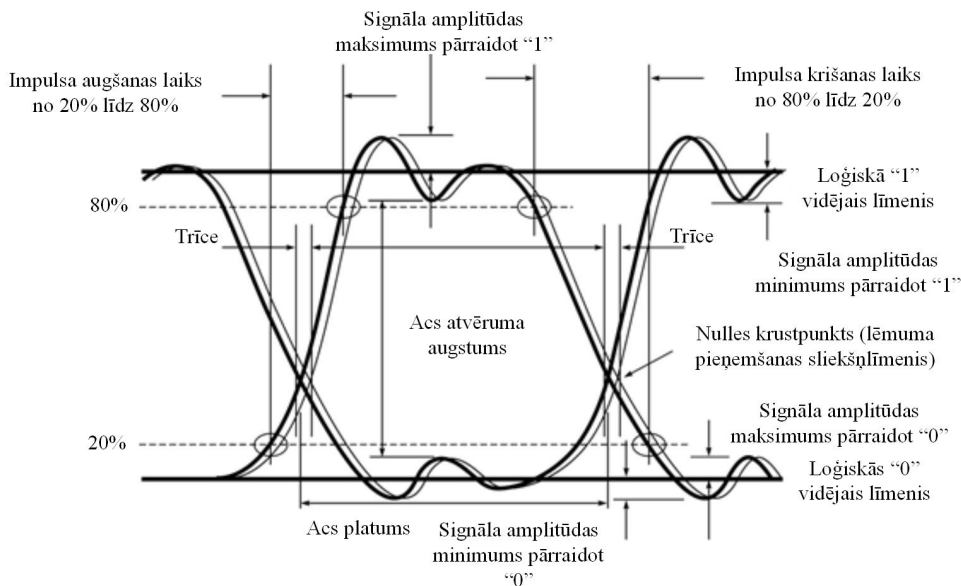
Q faktors	Q faktors (dB)	BER
6.00	15.57	10 ⁻⁹
6.37	16.08	10 ⁻¹⁰
6.71	16.53	10 ⁻¹¹
7.04	16.95	10 ⁻¹²
7.35	17.32	10 ⁻¹³
7.65	17.68	10 ⁻¹⁴
7.94	18.00	10 ⁻¹⁵
8.22	18.30	10 ⁻¹⁶

1.3.3. Acu diagrammas analīze

Izmantojot acu diagrammas ir iespējams iegūt ātru un pietiekami labu uztvertā ciparu signāla kvalitātes novērtējumu. Acu diagramma ataino mērāmā diskrētā signāla vairāku bitu periodu, kuri ir uzlikti viens virs otra, summāro ainu. Respektīvi, acu diagramma rodas daudzkreiz pārklājoties, vienam virs otra, bitiem [41]. Galvenie uztvertā ciparu signāla parametri, ko attēlo acs diagramma ir parādīti 1.11. attēlā.

Signāla parametri, kuri ir iegūstami no acu diagrammas, var tikt iedalīti divās grupās: ar amplitūdu saistīti parametri un ar laiku saistīti parametri. Kā amplitūdas parametrus var minēt [40]: vidējā jauda, loģiskā “1” un “0” līmeņi, acs amplitūda un atvērums augstums, loģisko “1” un “0” līmeņu svārstības un augstā un zemā jaudas līmeņa attiecību *ER* (angl. *extinction ratio*), kas raksturo optiskā signāla modulācijas dziļumu.

Kā ar laiku saistītus parametrus, kuri ir nosakāmi uzmantojot acs diagrammu, var minēt: impulsa periodu jeb vienības intervālu *UI* (angl. *unit interval*), impulsa augšanas un krišanas laiku, trīci (angl. *jitter*), horizontālu acs atvērums jeb platumu, ko nav ietekmējusi signāla trīce [40].



1.11. att. Uztvertā ciparu signāla acu diagramma un tās galvenie parametri [41].

1.3.4. Spektrs un darbības josla

Lai izprastu WDM-PON sistēmu darbību, ir nepieciešams apskatīt tām pieejamo frekvenču spektru, kuru varam iedalīt vairākās joslās. Pašlaik šķiedru optikā informācijas pārraidei lieto gaismas viļņa garumus no 660 nm līdz 1600 nm. Vienmodas optiskajās šķiedrās tiek izmantota caurlaides josla no 1260 līdz 1675 nm (atbilst ITU-T G.694.2 rekomendācijā minētajām O, E, S, C, L, U joslām). Kopumā vienmodas optiskajās šķiedru pārraides sistēmās var tikt izmantota 58.95 THz jeb 415 nm caurlaides josla. WDM sistēmās, izmantojamais frekvenču spektrs tiek iedalīts sešās joslās. Šīs Starptautiskās Telekomunikāciju savienības (ITU) rekomendētās joslas ir apkopotas zemāk esošajā 1.2. tabulā [44, 47].

1.2. tabula

ITU-T G.694.2 rekomendācijā definētās WDM frekvenču joslas [48, 49]

Joslas apzīmējums	Joslas tips	Izmantojamais gaismas viļņa garuma diapazons (nm)
O	Oriģināla (<i>Original</i>)	1260 - 1360
E	Paplašināta (<i>Extended</i>)	1360 - 1460
S	Īsu viļņa garumu (<i>Short wavelengths</i>)	1460 - 1530
C	Standarta (EDFA logs) (<i>Conventional</i>)	1530 - 1565
L	Garu viļņa garumu (paplašināts EDFA logs) (<i>Long wavelengths</i>)	1565 - 1625
U	Ultra garu viļņa garumu (<i>Ultra long wavelengths</i>)	1625 - 1675

Oriģinālā josla - O (angl. *original*) ir josla, kura sākotnēji pirmā tika izmantota vienmodas šķiedru optikas pārraides sistēmās. Šī josla mūsdienās tiek bieži izmantota, jo tajā izmantotajai

optiskajai pārraides tehnikai ir salīdzinoši zemas izmaksas. Tomēr, jāņem vērā, ka šajā viļņa garuma joslā vienmodas optiskajai šķiedrai ir lielāks vājinājums nekā standarta (C) joslā, kas ierobežo maksimālo nodrošināmo pārraides attālumu bez optiskā signāla pastiprināšanas [48, 49].

Paplašinātai joslai - E (angl. *extended*) hidroksilgrupas OH⁻ klātbūtnes dēļ optiskajā vienmodas šķiedrā ir palielināts vājinājums. Šī problēma ir daļēji pārvarēta izveidojot jaunu „pilna spektra” optisko vienmodas šķiedru, kas atbilst standartam ITU-T G.652C un ITU-T G.652D [50]. Šādu vienmodas optisko šķiedru izmanto 18 kanālu sistēmu ar rupjo spektrālo blīvēšanu pēc viļņu garuma (CWDM) realizācijā.

Īsu viļņu garumu josla - S (angl. *short wavelengths*) nepieciešamības gadījumā var tikt izmantota, lai paplašinātu standarta jeb C joslas kanālu piešķirumu, ja tiek realizēta sistēma ar blīvu multipleksēšanu pēc viļņu garuma (DWDM) un lielu kanālu skaitu. Šī josla var tikt izmantota, lai realizētu optiskās kontroles kanālu OSC (angl. *optical supervisory channel*), kā arī lai pārraidītu tīkla vadības un uzraudzības informāciju [48, 49].

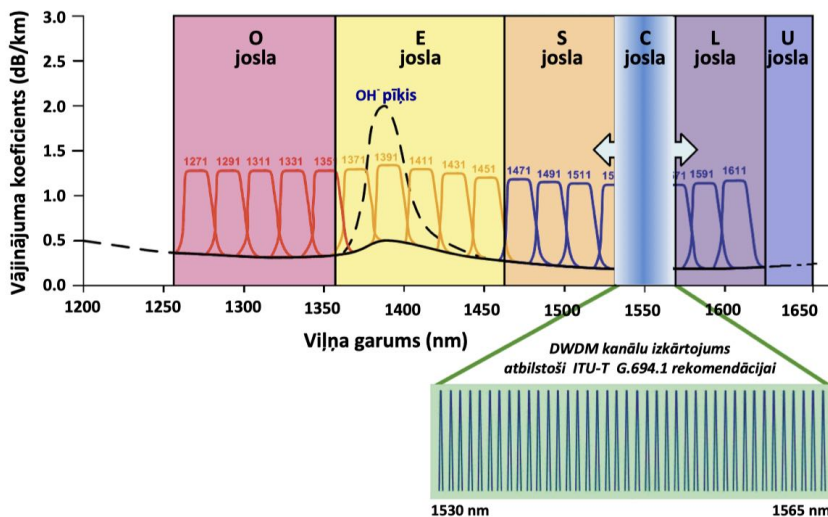
Standarta joslu – C (angl. *conventional*) visbiežāk izmanto šķiedru optikas pārraides sistēmās ar blīvu multipleksēšanu pēc viļņu garuma (DWDM), kā arī visos standarta šķiedru optikas pārraides sistēmu raidītāja un uztvērēja blokos. Arī optiskā signāla pastiprinātāji ar erbija Er⁺ leģēto šķiedru – EDFA (angl. *erbium-doped fiber amplifier*) darbojas šajā joslā. Lai paplašinātu DWDM sistēmas kanālu piešķirumu, nepieciešamības gadījumā var tikt izmantotas arī blakus esošās S un L viļņa garuma joslas [48, 49].

Garu viļņa garumu josla – L (angl. *long wavelengths*) ir paredzēta, lai paplašinātu standarta C joslas kanālu piešķirumu, paplašinātas DWDM sistēmas gadījumā.

Ultra garu viļņa garumu josla – U (angl. *ultra long wavelengths*) nepieciešamības gadījumā paplašina L-joslu. Šī josla ir paredzēta izmantošanai tīkla pārraudzības, testēšanas un uzturēšanas vajadzībām, piemēram, lai nepārtrauktu vai neiejauktos darbojošās sistēmas darbībā, izmantojot šo viļņa garumu joslu var tikt uzņemtas optiskās līnijas reflektogrammas, izmantojot optisko laika impulsu reflektometru OTDR (angl. *optical time domain reflectometer*) [44, 48, 49, 51].

Šīs joslas varam grafiski attēlot spektrā, kur papildus ir attēlots sistēmas ar rupjo spektrālo blīvēšanu pēc viļņu garuma CWDM (angl. *coarse wavelength division multiplexing*) kanālu izvietojums, kā arī sistēmas ar blīvu multipleksēšanu pēc viļņu garuma DWDM (angl. *dense wavelength division multiplexing*) kanālu izvietojums (skatīt 1.12. att.) [48, 49, 52].

WDM sakaru sistēmas varam iedalīt trīs lielās grupās. Pirmā grupa ir rupjā spektrālā blīvēšana pēc viļņu garuma CWDM. Pēc ITU standartu organizācijas izveidotā frekvenču plāna (ITU-T G.694.2 rekomendācija), starpkanālu intervāls ir 20 nm (atbilst 2.5 THz frekvenču starpkanālu intervālam), un šie kanāli ir izvietoti viļņu garuma joslā no 1271 līdz 1611 nm. Šāds kanālu intervāls atvēlētajā frekvenču joslā ļauj izvietot 18 kanālus, pie nosacījuma, ka tiek izmantota „pilna spektra” optiskā šķiedra, kurā ir likvidēts hidroksilgrupas OH⁻ izraisīts vājinājuma pīķis. Izmantotais pārraides ātrums kanālā šādās CDWM šķiedru optikas pārraides sistēmās tipiski ir līdz 2.5 Gbit/s [44, 49].



1.12. att. CWDM sistēmas kanālu izvietojums spektrā atbilstoši ITU-T G.694.2 rekomendācijai [52].

Otrā grupa ir blīva multipleksēšana pēc viļņu garuma - DWDM (angl. *dense wavelength division multiplexing*). Pēc ITU-T standarta G.694.1, šādas sistēmas frekvenču plāns ir bāzēts uz centrālās frekvences 193.1 THz (atbilst 1552.5 nm viļņu garumam), un nodrošina starpkanālu intervālu no 25 GHz līdz 100 GHz vai 200 GHz.

Frekvenču starpkanālu intervāls 100 GHz atbilst 0.8 nm viļņa garuma intervālam. DWDM sistēmās pārraides ātrums kanālā parasti ir virs 2.5 Gbit/s [48].

Trešā grupa ir augsta blīvuma spektrālā blīvēšana pēc viļņu garuma HDWDM (angl. *high density wavelength division multiplexing*), kas pārsvarā tiek izmantota tikai maģistrālajās optiskajās pārraides sistēmās. Šī grupa ir ietverta ITU-T G.694.1 rekomendācijā. Starpkanālu intervāls šajā gadījumā ir mazāks par 25 GHz (atbilst 0.2 nm viļņa garuma starpkanālu intervālam) un pārraides ātrums ir vismaz 10 Gbit/s kanālā [42, 44].

Minimālajam starpkanālu intervālam ir tieša ietekme uz šķiedru optikas pārraides sistēmas veiktspēju. Jo starpkanālu intervāls ir mazāks (optiskās pārraides sistēmas kanāli spektrā ir izvietoti tuvāk viens otram), jo ir nepieciešams izmantot stabilākus lāzerus ar šaurāku izstarotās gaismas spektrālo platumu, kā arī citus šķiedru optikas pārraides līnijā ietilpstošos aktīvos un pasīvos elementus, kuru parametriem ir jābūt stabiliem, maksimāli neatkarīgiem no temperatūras un ārējās vides iedarbības. Pārāk maza starpkanālu intervāla rezultātā starp pārraides sistēmas kanāliem var rasties šķērsruna, kas kropļo pārraidāmo signālu un ietekmē tā kvalitāti.

Ļoti svarīgs aspekts ātrdarbīgās WDM šķiedru optikas pārraides sistēmās ir uzkrātās hromatiskās dispersijas kompensācija. Dispersija ir optiskā signāla spektrālo vai modu sastāvdaļu izkliede laikā. Neizmantojot hromatiskās dispersijas kompensāciju, maksimāli sasniedzamais pārraides attālums ir stipri ierobežots. Savukārt, izmantojot dispersijas kompensāciju (dispersijas kompensējošu šķiedru vai šķiedras Bregga režģi) ir iespējams palielināt šo pārraides attālumu un uzlabot sistēmas veiktspēju. Līdz ar to, autors uzskata, ka svarīga šī darba sastāvdaļa ir hromatiskās dispersijas kompensācijas metožu izpēte viļņgarumdales blīvētās PON sistēmās [53, 54, 55, 56, 57].

2. OPTISKIE PASTIPRINĀTĀJI ĀTRGAITAS ŠĶIEDRU OPTISKAJĀS PĀRRAIDES SISTĒMĀS

Optiskie pastiprinātāji tiek klasificēti pēc pastiprināšanas procesa rakstura [47]:

1. pastiprinātāji, kur pastiprinājums tiek iegūts izmantojot materiāla lineārās īpašības (pusvadītāju optiskie pastiprinātāji (SOA) un pastiprinātāji uz retzemju elementiem leģētu šķiedru bāzes (xDFA));

2. pastiprinātāji, kuru darbības princips ir balstīts uz materiāla nelineārajām īpašībām (Ramana optiskie pastiprinātāji, Briljuēna optiskie pastiprinātāji un parametriskie pastiprinātāji (FOPA)).

Otrs princips pēc kura tiek klasificēti optiskie pastiprinātāji ir pastiprinājuma vide:

1. pastiprinātāji, kuros tiek izmantots pusvadītāju materiāls (SOA),

2. pastiprinātāji, kas ir izveidoti uz optisko šķiedru bāzes.

Tālāk šajā nodaļā katrs no augstāk pieminētajiem optisko pastiprinātāju tipiem tiks apskatīts detalizētāk, un tiks analizētas to galvenās priekšrocības un trūkumi.

Vissvarīgākie optisko pastiprinātāju raksturojošie parametri ir radītais pastiprinājums, pastiprinājuma joslas platums, pastiprinājuma piesātinājums, polarizācijas jutība un pastiprinātāja radītie trokšņi.

Radītais pastiprinājums optiskajiem pastiprinātājiem tiek noteikts kā izejas signāla jaudas attiecība pret tā paša signāla jaudu pastiprinātāja ieejā. Pastiprinātāji dažreiz arī tiek raksturoti ar pastiprinājuma efektivitāti, kas apzīmē pastiprinājumu kā funkciju no pumpējošā starojuma jaudas. Šī lieluma mērvienība ir dB/mW [58].

Pastiprinātāja radītā pastiprinājuma joslas platums ir attiecināms uz viļņa garumu vai frekvenču diapazonu, kurā pastiprinātāja darbība ir efektīva, proti, kur tas spēj nodrošināt pārraidāmā signāla jaudas pieaugumu. Šis lielums it sevišķi ir būtisks WDM sakaru sistēmās, jo tiek ierobežots pārraides sistēmas kanālu skaits, kas tiks pastiprināti [47].

Pastiprinājuma piesātinājuma punkts optiskajam pastiprinātājam ir sasniedzamās izejas jaudas vērtības maksimums, proti, kad optiskā signāla jauda pastiprinātāja izejā vairs nepalielinās, palielinoties signāla jaudai pastiprinātāja ieejā. Kad ieejas jauda tiek palielināta virs piesātinājuma vērtības, visi nesēji pastiprinājuma vidē jau ir piesātinājuma stāvoklī un vēl lielāka gaismas enerģijas pārnese nav iespējama. Piesātinājuma jauda ir definēta kā izejas jauda, pie kuras ir 3 dB samazinājums signāla pastiprinājumā, salīdzinot ar maksimālo iespējamo pastiprinājumu [47].

Polarizācijas jutība tiek attiecināta uz pastiprinājuma atkarību no signāla polarizācijas. Šī jutība tiek mērīta dB un izpaužas kā pastiprinājuma starpība starp TE un TM modu polarizētiem signāliem [47].

Optisko signālu pastiprinātājos dominējošais trokšņu avots ir pastiprinātā spontānā emisija (no angļu val. amplified spontaneous emission — ASE) kas parādās pastiprinājuma vidē [59]. Pastiprinātāju radīto trokšņu daudzums ir atkarīgs no dažādiem faktoriem, visbūtiskākie no kuriem ir pastiprinājuma vides materiāla parametri (piemēram, enerģētiskā līmeņa spontānais dzīves laiks), pastiprinājuma spektrs, trokšņu joslas platums, pastiprinātāja piesātinājuma un populācijas inversijas parametrs. Pastiprinātāja radīto trokšņu problēma visvairāk izpaužas sistēmās, kur daudzi pastiprinātāji ir saslēgti kaskadē, piemēram, maģistrālajās optiskajās līnijās. Katrs pastiprinātājs šajā kaskādē pastiprina ne tikai pārraidāmo signālu, bet arī iepriekšējā pastiprinātāja radītos trokšņus un klāt vēl pievieno savu ASE trokšņu daļu [50].

Pastiprinātāja radīto ASE trokšņu daudzuma novērtēšanai parasti tiek izmantots ienesto trokšņu radītājs (no ang. val. — noise figure — NF). Šis lielums raksturo optiskā signāla-trokšņu attiecības (no ang. val. — optical signal-to-noise ratio OSNR) izmaiņu, signālam izejot caur pastiprinātāju [47, 60].

Pusvadītāju optiskie pastiprinātāji ir ekonomiski izdevīgs optisko signālu pastiprināšanas risinājums, ko salīdzinoši vienkārši var ievietot jau esošā WDM sakaru sistēmā. Tas spēj nodrošināt pastiprinājumu līdz 30 dB plašā frekvenču diapazonā, un atkarībā no izmantotā pusvadītāju materiāla parametriem var tikt pielietots jebkurā no viļņu garumiem, kas mūsdienās tiek izmantoti optisko signālu pārraidē. Tomēr pusvadītāju pastiprinātājiem ir ļoti daudz būtisku trūkumu, kuri var ievērojami ietekmēt pārraides sistēmas darbību. Visbūtiskākais no tiem ir milzīgais radīto ASE trokšņu daudzums, kura galvenais cēlonis ir īss enerģētiskā līmeņa spontānais dzīveslaiks pusvadītāju materiālos. Tipiska ienesto trokšņu radītāja vērtība SOA pastiprinātājiem ir no 7 līdz 12 dB. ASE trokšņus var samazināt, strādājot tuvu pastiprinātāja piesātinājuma režīmam, tādā veidā pēc iespējas vairāk nesēji tiks izmantoti signāla pastiprināšanai, nevis spontānās emisijas radīšanai, bet tad parādās pastiprinājuma šķērsmodulācijas problēma. Papildus tam vēl rodas problēmas ar polarizācijas jutību un nelineāro efektu ietekmi.

Leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji mūsdienās ir vispopulārākais optisko signālu pastiprināšanas risinājums. Galvenokārt tiek izmantoti tieši EDFA optiskie pastiprinātāji, jo erbija jonu enerģētiskie līmeņi ir ideāli piemēroti optisko signālu pastiprināšanai šķiedras minimālā vājinājuma diapazonā. EDFA ļauj panākt diezgan lielu pastiprinājumu, kas noteiktos apstākļos var sasniegt pat 54 dB, bet tipisks EDFA pastiprinājums ir ap 30 dB. EDFA rada daudz mazāku ASE trokšņu daudzumu, salīdzinot ar SOA. Parasti ienesto trokšņu radītāja vērtība ir ap 5–6 dB, bet ir EDFA pastiprinātāji, kuriem, strādājot tuvu piesātinājuma punktam, šī vērtība ir ap 3 dB. Par EDFA būtiskāko trūkumu var nosaukt izteiktu pastiprinājuma frekvenču atkarību un salīdzinoši šauru pastiprinājuma spektru. Papildus tam EDFA pastiprinājuma spektrs ir nelīdzens, un tā forma ir stipri atkarīga no populācijas inversijas līmeņa. Jo lielāks ir populācijas inversijas līmenis, jo mazāk ASE trokšņu radīs pastiprinātājs, bet, no otras puses, jo nevienmērīgāks kļūst pastiprinājuma spektrs.

Ramana optiskie pastiprinātāji šobrīd ir vispopulārākais optisko signālu pastiprināšanas risinājums, būvējot jaunus maģistrālos optiskos tīklus, kuru garums sasniedz vairākus simtus vai pat dažus tūkstošus kilometru. Šāda tipa optiskie pastiprinātāji, pateicoties koherentam SRS procesa raksturam, rada ļoti maz trokšņu un spēj nodrošināt pastiprinājumu plašā frekvenču joslā. Vēl viena būtiska Ramana pastiprinātāju priekšrocība ir iespēja mainīt pastiprinājuma spektru, variējot ar pumpējošo starojumu viļņu garumiem un jaudu. Gadījumos, kad Ramana pastiprinātājos tiek izmantoti vairāki pumpējošo starojumu avoti, ir iespējams iegūt daudz plataku un līdzēnāku pastiprinājuma spektru salīdzinājumā ar pastiprinātājiem ar vienu pumpējošo starojumu. Nosakot pumpējošo starojumu parametrus ir nepieciešams ņemt vērā, ka enerģijas pāreja notiks ne tikai no pumpējošiem starojumiem uz pastiprināmo signālu, bet arī starp pumpējošajiem starojumiem. Ramana pastiprinātājiem ir zema pastiprināšanas efektivitāte, salīdzinot ar citiem optisko pastiprinātāju tipiem, tātad, lai iegūtu konkrētu pastiprinājuma vērtību, tiem būs nepieciešams daudz jaudīgāks pumpējošā starojuma avots nekā, piemēram, EDFA gadījumā. Tas rada nepieciešamību pēc jaudīgiem pumpējošā starojuma avotiem, kuru optiskā jauda ir tuvu (vai pārsniedz) 1 W. Citi kvalitāti degradējošie

faktori, kas iespaido Ramana pastiprinātāju darbību, ir Releja izkliedes radītie trokšņi un pastiprinājuma polarizācijas jutība.

Briljuēna optiskie pastiprinātāji spēj nodrošināt ļoti lielu pastiprinājuma efektivitāti un ar to palīdzību var iegūt signāla pastiprinājumu līdz pat 30 dB. Tomēr to pastiprinājuma spektrs ir pārāk šaurs un nobīde starp pumpējošā starojuma un pastiprināmā starojuma frekvencēm ir tikai ap 10–11 GHz, kas ir pārāk maza mūsdienīgām ātrdarbīgām sistēmām. Šī iemesla dēļ Brilljuēna optiskie pastiprinātāji netiek plaši pielietoti optisko signālu pastiprināšanā.

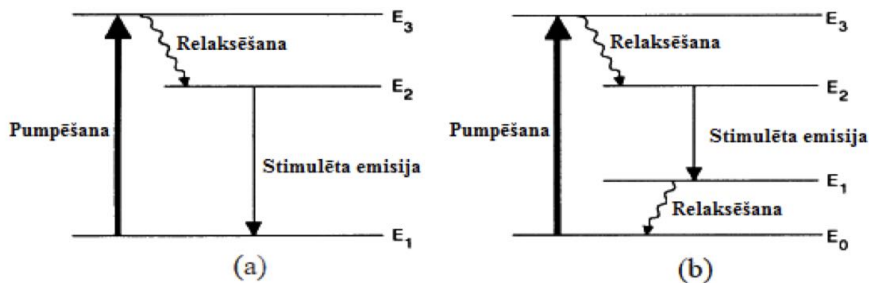
2.1. Erbija jonu leģētās šķiedras pastiprinātāja novērtējums

Vieni no visplašāk pielietotajiem optiskajiem pastiprinātājiem ir leģēto šķiedru optiskie pastiprinātāji. Šāda tipa pastiprinātājos silīcija dioksīda šķiedra ražošanas procesā ir leģēta ar retzemju elementiem, lai izveidotu divu, trīs vai četru līmeņu sistēmu, kura spēj nodrošināt efektīvu pumpēšanu. Šādos pastiprinātājos var izmantot 14 retzemju ķīmiskos elementus ar atomu numuriem no 58 līdz 71. Tādu retzemju elementu joni kā erbijs, holmijs, neodīms, samārijs, tūlijs un itērijs varētu tikt izmantoti, lai izgatavotu leģēto šķiedru pastiprinātājus, kas darbojas viļņa garuma diapazonā no redzamās gaismas līdz pat infrasarkanajam starojumam [61]. Pastiprinātāja pastiprinājuma joslas viļņa garumu diapazonu galvenokārt nosaka tieši izmantotais retzemju elements, kas tiek izmantots pastiprinājuma vidē. Visbiežāk izmantotais retzemju elements ir erbijs, jo ar erbiju leģētās šķiedras optiskie pastiprinātāji (EDFA) darbojas C viļņa garuma diapazonā (1530–1565 nm), kur ir novērojams silīcija dioksīda šķiedru vājinājuma līknes minimums [61]. Eksistē arī EDFA optiskie pastiprinātāji, kuri ir veidoti, lai strādātu L optiskajā joslā (1565–1625 nm) [62]. Tos mēdz saukt par «nobīdīta pastiprinājuma» EDFA, un šāda pastiprinājuma spektra nobīde tiek panākta ar fluorīda un citu elementu izmantošanu šķiedras izgatavošanas procesā [62].

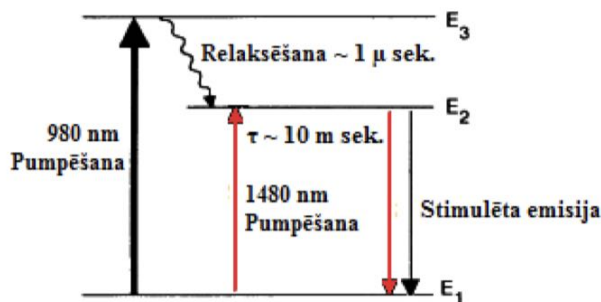
Atkarībā no leģētā materiāla enerģijas līmeņiem papildus tradicionālajai divlīmeņu sistēmai pumpēšanas shēmas var tikt sadalītas trīs un četru līmeņu shēmās. To vienkāršots attēlojums ir parādīts 2.1. att. Abos gadījumos leģēti retzemju elementi absorbē fotonus, un pāriet uz augstāko enerģijas līmeni (3. līmeni), un tad ātri pāriet jeb relaksējas uz zemāku ierosinātās enerģijas līmeni (2. līmeni). Šis līmenis ir kvazistacionārs un tiek izmantots, lai pastiprinātu optisko signālu caur stimulētās emisijas procesu [54]. Galvenā atšķirība starp trīs un četru līmeņu sistēmām ir papildus enerģētiskais līmenis, kas tiek ieņemts jau pēc stimulētās emisijas procesa. Trīs līmeņu sistēmas gadījumā jons atgriežas zemākajā līmenī, no kura tas tika ierosināts, bet četru līmeņu sistēmas gadījumā tas nonāk 1. enerģijas līmenī, kas arī ir ierosinātais stāvoklis, no kura tas tālāk relaksēsies jau uz sākotnējo pamata līmeni (nullto līmeni). Vēl tiek pielietotas arī divlīmeņu sistēmas, kur vispār nenotiek relaksācijas procesi [63].

EDFA optiskajos pastiprinātājos tiek izmantota trīs un divu līmeņu pumpēšanas shēmas. Vairākas pārejas var tikt izmantotas pumpēšanas nolūkiem. EDFA izmanto optisko pumpēšanu. Efektīva pumpēšana var tikt panākta ar pumpēšanas starojumu, kura viļņa garums ir tuvu 980 nm vai 1480 nm [61]. Abi šie viļņu garumi atbilst ierosināto jonu enerģijas līmeņiem, un tos labi absorbē ar erbiju leģētā optiskā šķiedra. Kā ir redzams att. 2.2, trīs līmeņu modelis varētu tikt izmantots, lai aprakstītu populācijas sadalījumu pa enerģētiskajiem līmeņiem pie 980 nm pumpējošā starojuma, bet 1480 nm pumpēšanas starojuma gadījumā parasti tiek izmantots divlīmeņu modelis.

Ar 980 nm pumpējošo starojumu ir iespējams panākt augstāku populācijas inversijas līmeni, kas savukārt ļauj iegūt mazāku ASE trokšņu daudzumu. Tātad no trokšņu viedokļa labāk ir izmantot 980 nm pumpējošo starojumu. Savukārt pastiprinātāja kvantu efektivitāte ir lielāka pie 1480 nm pumpēšanas, jo enerģijas līmeņu starpība starp pumpējošo un pastiprināmo starojumu ir mazāka. Tātad ar 1480 nm pumpējošo starojumu var iegūt lielāku pastiprinājuma koeficientu [64]. Tipiska ienesto trokšņu rādītāja vērtība EDFA pastiprinātājiem ir ap 5–6 dB, bet reāli var tikt sasniegta arī 3 dB vērtība [61]. Ir svarīgi atzīmēt, ka EDFA troksnis ir proporcionāls iegūstamajam pastiprinājumam.



2.1. att. Trīs līmeņu (a) un četru līmeņu (b) pumpēšanas sistēmu shematisks attēlojums [61].

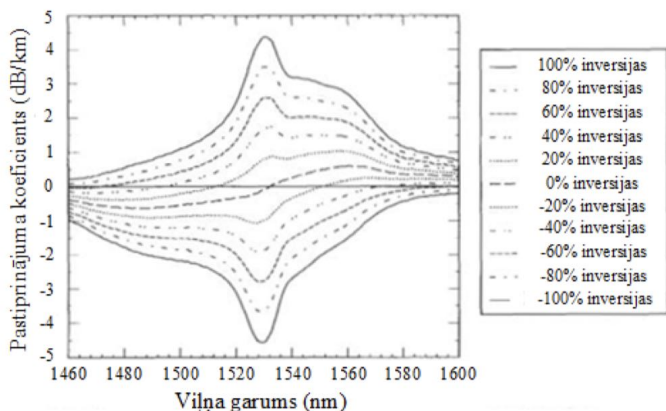


2.2. att. Optisko signālu pastiprināšanas modelis EDFA pastiprinātājos ar 980 nm pumpēšanu (melns) un 1480 nm pumpēšanu (sarkans) [61].

EDFA radītā pastiprinājuma spektrālā forma ir stipri atkarīga no sasniegtās populācijas inversijas pakāpes. EDFA, kur ar erbiju leģētai šķiedrai ir alumīnija un germānija piemaisījumi, radītā pastiprinājuma spektra formas izmaiņa atkarībā no populācijas inversijas līmeņa ir parādīta att. 2.3.

Kā ir redzams att. 2.3, EDFA radītā pastiprinājuma spektra forma ir stipri atkarīga no iegūtā populācijas inversijas līmeņa, pie tam, ja zemākā enerģētiskā līmeņa populācija būs lielāka par augstākā līmeņa populāciju, tad EDFA absorbēs pārraidāmā signāla fotonus, lai ierosinātu elektronus uz augstāko enerģētisko līmeni, nevis radīs pastiprinājumu. Sākot ar 60 % inversijas līmeni, palielinoties augstākā enerģētiskā līmeņa populācijai, pastiprinājums kļūst arvien nevienmērīgāks. Nevienmērīgs pastiprinājums ir nevēlams daudzkanālu WDM sistēmās, it īpaši sistēmās ar vairākiem kaskādē saslēgtiem EDFA līnijas pastiprinātājiem, jo tas izraisa

dažādu kanālu signālu jaudas līmeņu atšķirību, kas savukārt izraisīs signāla kvalitātes degradāciju kanālos ar zemāko pastiprinājuma līmeni [65].



2.3. att. Pastiprinājuma spektrs pie dažādiem populācijas inversijas līmeņiem ar erbiju leģētai šķiedrai ar alumīnija un germānija piemaisījumiem [63].

Tipisks EDFA radītais pastiprinājums ir ap 30 dB, bet var tikt sasniegts arī 54 dB pastiprinājums [66]. Jo vairāk kanālu tiek pārraidīti optiskajā šķiedrā, jo lielāka ir nepieciešamā ierosmes enerģija. EDFA pastiprinātājos tiek izmantotas dažādas pumpēšanas shēmas:

- Ar tieši vērsto pumpēšanu — pie mazas ieejas signāla jaudas un liela pastiprinājuma spēj nodrošināt zemāku trokšņu līmeni.

- Ar pretēji vērsto pumpēšanu — nepieciešama mazāka pumpējošā starojuma jauda nekā tieši vērsta pumpēšanas gadījumā, lai sasniegtu pastiprinātāja piesātinājumu.

- Abpusēja pumpēšana — spēj nodrošināt visvienmērīgāko augstākā enerģētiskā līmeņa populācijas sadalījumu pa leģētās šķiedras garumu. Labāki rezultāti ir sasniedzami pie 980 nm tieši vērsta un 1480 nm pretēji vērsta pumpējošā starojuma, jo pretējā virzienā 1480 nm pumpēšanai ir augstāka efektivitāte, savukārt 980 nm pumpēšanu tiešā virzienā ienes mazāk trokšņus. Līdz ar to tiek iegūts lielāks pastiprinājums pie mazāka radīto trokšņu daudzuma nekā gadījumā, kad pumpējošie starojumi tiktu saslēgti otrādi [61].

EDFA radīto trokšņu galvenais cēlonis ir pastiprināta spontānā emisija. Daži ierosinātie Erbija joni pāriet uz zemāko stāvokli (veic spontānu emisiju), pirms satiekas ar ienākošā signāla fotoniem. Tādējādi, tiek izstarots fotons ar nejaušu fāzi un virzienu. Rezultātā fotoni tiek spontāni izstaroti dažādos virzienos, kur daļa no tiem tiks izstarota arī virzienā, kas sakrīt ar šķiedras skaitlisko apertūru un attiecīgi turpina tālāk izplatīties pa šķiedru. Šie spontāni ģenerētie fotoni var sadurties arī ar citiem leģētajiem joniem un tādējādi tie tiek pastiprināti ar stimulētās emisijas palīdzību.

Spontāni veidotie fotoni, izplatoties EDFA aktīvajā zonā, tiek pastiprināti, kā rezultātā tiek radīti sekundārie fotoni ar tādu pašu viļņa garumu, fāzi, polarizāciju un izplatīšanās virzienu. Pastiprinātājs izstaro ASE gan tiešā, gan pretējā virzienā. Tikai tiešā virziena ASE ir saistīta ar sistēmas veiktspēju, jo troksnis nonāk līdz uztvērējam kopā ar signālu. Tomēr arī pretējā virziena ASE noved pie pastiprinātāja veiktspējas pasliktināšanās, jo ASE pazemina inversijas līmeni un līdz ar to samazina EDFA pastiprinājumu [61].

ASE rodas viļņa garumu diapazonā, kas atbilst EDFA pastiprinājuma spektram. Lielākā daļa ASE jaudas tiek sadalīta pa dažādiem viļņu garumiem, un tos var izfiltrēt. WDM sistēmās optisko filtru izmantošana ļauj izfiltrēt lielāko ASE trokšņu daļu, tomēr to nav iespējams izfiltrēt pie viļņa garumiem, kas sakrīt ar izmantoto optisko filtru caurlaides joslu.

Pastiprinātās spontānās emisijas jauda ar pastiprinājuma koeficientu ir saistīta ar sekojošo izteiksmi [17]:

$$ASE = hv \cdot \frac{n_{sp}}{\eta} (G - 1), \quad (2.1.)$$

kur h — Planka konstante, kas ir vienāda ar $6.6252 \times 10^{-34} \text{ W}\cdot\text{s}^2$;

ν — frekvence (Hz), kas atbilst viļņu garumiem λ diapazonā 1525–1565 nm;

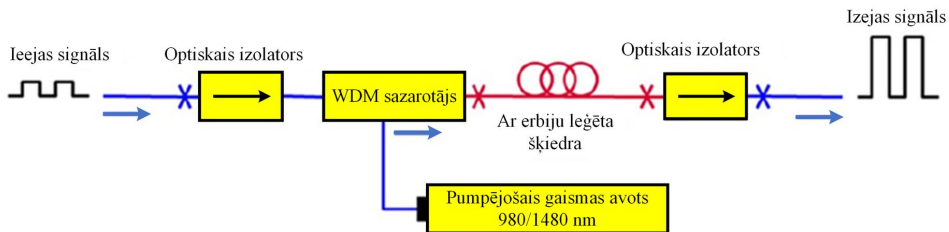
n_{sp} — spontānās emisijas koeficients;

η ir kvantu efektivitāte [17].

Papildus ASE, EDFA pastiprinās jebkuru troksni, kas ir pastiprināmā signāla joslā.

2.1.1. Uzbūve un darbības princips

EDFA pastiprinātāja darbības princips ir līdzīgs lāzera darbības principam un balstās uz gaismas pastiprināšanas parādības stimulētās emisijas dēļ. Gaismas pastiprinājuma iespēju šķiedrās, kuras ir leģētas ar erbija joniem, nosaka šī retzemju elementa enerģijas līmeņu shēma, kura tiks apskatīta 2.2.1. apakšnodaļā. EDFA pastiprinātāji neatzīst un nepārveido optisko signālu, bet vienkārši palielina to jaudu uzreiz visā darbības diapazonā no 1525 līdz 1560 nm. Tāpēc, atšķirībā no reģeneratoriem, tie praktiski nav atkarīgi no bitu pārraides ātruma un protokola, un spēj pastiprināt optisko signālu jebkurā formātā [67]. Vienkāršots EDFA modulis ir parādīts 2.4. attēlā.



2.4. att. Vienkāršots EDFA modulis [68].

Vājināts ieejas informācijas signāls tiek apvienots ar pumpējošā gaismas avota staru. Pumpējošā avota staram jābūt ar noteiktu viļņa garumu, kuru nosaka erbija jonu absorbcijas spektrs, lai varētu iegūt erbija jonu ierosināšanu. Šī sajauktā gaisma tiek izplatīta neliela garuma šķiedrā, kura ir leģēta ar konkrētu erbija jonu (Er^{3+}) daudzumu. Pumpējošā gaismas avota starojums ierosina erbija jonus, un kad informācijas signāla fotoni saduras ar ierosinātiem erbija joniem, erbija joni atdod savu enerģiju papildus fotonu veidā, kuriem ir tāds pats viļņa garums un tieši tāda pašā fāzē un virzienā kā informācijas signāla fotoniem, un atgriežas savā zemākajā enerģētiskajā līmenī. Tādā veidā izejā tiek iegūts pastiprināts informācijas signāls, kura optiskā jauda var būt pat 1000 reizes lielāka, salīdzinot ar signālu pirms pastiprinātāja [69].

Apskatīsim vienkāršotu EDFA moduli pa sastāvdaļām:

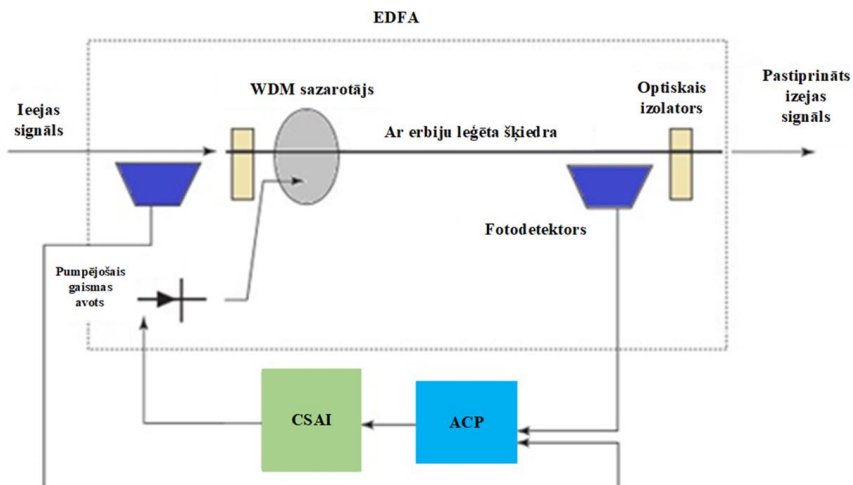
Optiskais izolators – laiž optiskos signālus tikai vienā virzienā. Tas nelaiž atstaroto gaismu, pusvadītāju pumpējošā gaismas avota staru pretējā līnijas virzienā. Tas arī novērš nevēlamo svārstību un pastiprinātās spontānās emisijas trokšņa izplatīšanos pretējā līnijas virzienā, kas ir ļoti būtiski, kad līnijā ir vairāki pastiprinātāji [19].

Pumpējošais gaismas avots – nepieciešams erbija jonu ierosināšanai, kura tiek veikta pie viļņa garuma, kas atbilst vienai no erbija jonu absorbcijas joslām. Maksimālā efektivitāte tiek sasniegta ar pumpējošo pusvadītāju lāzera diodi pie viļņu garumiem 980 nm un 1480 nm [70].

WDM sazarotājs (angļu val. *WDM coupler*) - ir nepieciešams lai apvienotu (sajauktu) pumpējošo kanālu ar viļņa garumu 980/1480 nm un informācijas signālu, kuru ir nepieciešams pastiprināt [68].

Ar erbiju leģēta šķiedra (EDF) – optiskā pastiprinātāja pamatelements, kurā notiek ieejas informācijas signāla pastiprināšana. Šīs šķiedras posms ir dažus desmitus metrus garš un tiek pakļauts spēcīgam nepārtrauktam pumpējošā pusvadītāju lāzera izstarojumam priekš pastāvīgas erbija jonu ierosinātā stāvokļa uzturēšanas [71].

Lai kontrolētu EDFA pastiprinājumu, var būt izmantotas pumpēšanas lāzera jaudas līmeņa kontrolēšanas saites, kuras ir parādītas 2.5. attēlā.

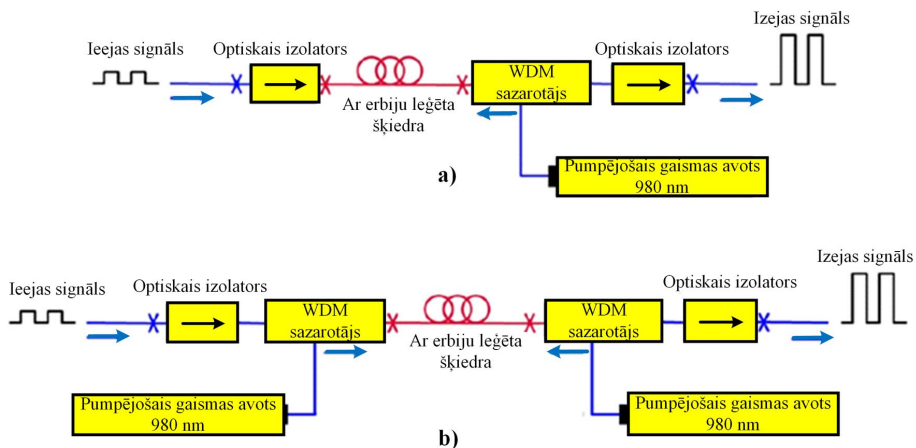


1.5.att. Pumpēšanas lāzera jaudas līmeņa kontrolēšanas saites [72].

Atgriezeniskās saites gadījumā, izejas signāla jaudas līmenis tiek nomērīts ar fotodetektora palīdzību (piemēram, p-i-n fotodiode). Fotodetektora analogais izejas spriegums tiek pārveidots ciparu signālā, izmantojot analogciparu pārveidotāju (ACP), un padots uz ciparu signālu apstrādes ierīci (CSAI), kura pēc algoritma regulē pumpēšanas gaismas avota jaudu, kontrolējot to ieejas strāvu. Dažās situācijās var būt izmantota tiešā saite (angļu val. – *feedforward control*), kad ciparu signālu apstrādes ierīce uzrauga ieejas signāla jaudas līmeni pirms EDFA, lai uzturētu kopējā EDFA pastiprinājuma pārbaudi. Gadījumos, kad EDFA ieejā ir novērojams ļoti zems ieejas signāla līmenis, var rasties nepieciešamība pēc izejas signāla jaudas samazināšanas, lai izvairītos no pārmērīgas ASE trokšņa radīšanas EDF šķiedrā [72].

Vienkāršotajā EDFA pastiprinātāja moduļa shēmā 2.4.attēlā, ir parādīts variants, kad informācijas signāls un pumpējošā gaismas avota starojums izplatās vienā un tajā pašā virzienā.

Eksistē varianti, kad pumpējošā gaismas avota starojums izplatās pretējā virzienā (parādīts 2.6.attēlā (a)), kā arī pumpējošā gaismas avota starojums izplatās abos virzienos (parādīts 2.6.attēlā (b)).



1.6. att. Citi vienkāršoti EDFA moduļa varianti [70].

Katram pumpēšanas variantam ir raksturīgas savas īpašības:

Pumpēšana tiešā virzienā – spēj nodrošināt zemāku trokšņu līmeni situācijās, kad ir neliels ieejas signāla līmenis un nepieciešams maksimālais pastiprinājums.

Pumpēšana pretējā virzienā – ir nepieciešama mazāka pumpējošā lāzera jauda, lai sasniegtu pēc iespējas lielākas jaudas izejas signālu - pastiprinātāja piesātinājumu, nekā tiešā virziena pumpēšanas gadījumā.

Divvirzienu pumpēšana – dod iespēju palielināt kopējo pumpējošo jaudu, kā arī efektīvi izmantot katra pumpēšanas gaismas avota viļņa garuma stiprākās puses. Ar divvirzienu pumpēšanu ir iespējams panākt vienmērīgāko augstākā enerģētiskā līmeņa populācijas sadalījumu gar visu EDF šķiedras garumu. Vairākumā priekšroka tiek dota 980 nm pumpēšanai tiešā virzienā un 1480 nm pumpēšanai pretējā virzienā. Tas ir izskaidrojams ar to, ka pretēji vērstai 1480 nm pumpēšanai ir raksturīga augstāka kvantu efektivitāte, bet lielāks trokšņa līmenis. Savukārt, 980 nm pumpēšanai tiešā virzienā ir raksturīgs mazāks trokšņa līmenis, kuru praktiski ir iespējams samazināt līdz pat kvantu fluktuāciju līmenim. Līdz ar to, pie tādas kombinācijas var tikt panākts lielāks pastiprinājums un mazāks radīto trokšņu daudzums, salīdzinot ar gadījumu, kad pumpējošo avotu starojumi izplatās otrādi [70, 73, 74].

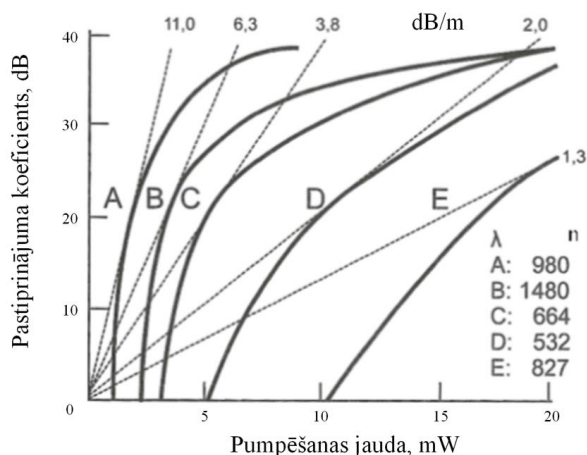
Gadījumā ja pumpēšana notiek tikai viena virzienā, ir iespējams panākt pastiprinājumu ap 17 dB. Savukārt, ja tiek izmantota divvirzienu pumpēšana, ir iespējams panākt pastiprinājumu līdz pat 30 dB [7]. Bet pastiprinājums var būt arī lielāks, jo viss ir atkarīgs no konkrētā risinājuma un nosacījumiem. Piemēram, pielietojot saliktu EDFA konfigurāciju, laboratorijā tika sasniegts 54 dB pastiprinājums ar 3.1 dB trokšņu rādītāju [66].

2.1.2. Enerģijas pārvades efektivitāte no pumpējošās gaismas

Priekš pastiprinātajos parasti izmanto pumpēšanu viļņa garumā $\lambda_p = 980$ nm, jo tas nodrošina lielāku pastiprinājuma efektivitāti, nekā pumpēšana viļņa garumā $\lambda_p = 1480$ nm. Tai ir mazāka sliekšņa jauda un tā ļauj sasniegt minimālo trokšņa koeficientu (~ 3 dB). Būstos

bieži izmanto pumpēšanu viļņa garumā $\lambda_p = 1480$ nm, jo tai piemīt maksimālā enerģētiskā efektivitāte. Lai gan tādi jēdzieni kā pastiprinājuma efektivitāte, trokšņu koeficients, pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte ir vispārēji pieņemti, tos nepieciešams paskaidrot sīkāk.

2.7. att. parādīti vislabākie rezultāti, kas ir iegūti, pētot pastiprinājuma efektivitāti sekojošos pumpēšanas viļņu garumos: 532 nm, 664 nm, 820 nm, 980 nm un 1480 nm. Pastiprinājuma efektivitāti mēra mērvienībās dB/mW, un tā tiek definēta kā leņķa tangenss, ko veido pastiprinājuma koeficienta atkarības no pumpēšanas jaudas grafika no koordinātu sākumpunkta vērsta pieskare pret horizontālo asi. Agrākos darbos pastiprinājuma efektivitāte tika definēta kā maksimālā pastiprinājuma koeficienta attiecība pret maksimālo pumpēšanas jaudu. Bet, kā ir redzams no 2.4. att., šī attiecība ir mazāka nekā slīpuma leņķa tangenss, jo pastiprinājuma līkne piesātinās. Tāpēc biežāk pastiprinājuma efektivitāti noteic pēc slīpuma leņķa tangensu [75].



2.7. att. Pastiprinājuma koeficienta atkarība no pumpēšanas ieejas jaudas [76].

Kā ir redzams no 2.7. att., liela pastiprinājuma koeficienta vērtība var tikt sasniegta ar EDFA pumpēšanu jebkurā viļņa garumā, kas atbilst erbija šķiedras absorbcijas apgabalam. Bet vismazākā pumpēšanas jauda ir nepieciešama viļņu garumiem 664 nm, 980 nm un 1480 nm, kuros pumpēšanas absorbcija ierosinātā stāvoklī (ESA) ir maza. Maksimālā pastiprinājuma efektivitāte ~ 11 dB/mW tiek sasniegta pie $\lambda_p = 980$ nm [77, 78].

Spontāna emisija, kas rodas pastiprinātāja ieejā, izplatoties visā aktīvās šķiedras garumā, tiek vairāk pastiprinātā, nekā emisija, kas rodas pastiprinātāja nākamajos posmos. Tāpēc galveno ieguldījumu rezultējošajā spontānā emisijā veic emisija, kas rodas šķiedras sākumposmā ar garumu l/g . Spontānās emisijas jaudu pieņemts izteikt caur trokšņu koeficientu:

$$P_{sp} \approx (FG - 1)h\nu\Delta\nu, \quad (2.2.)$$

kur $\Delta\nu$ – frekvenču josla, kurā tiek mērīta spontānās emisijas jauda. [75]

Pieņēmumā, ka inversija it nemainīga visā šķiedras garumā, trokšņu koeficients ir [75]:

$$F = 2n_{sp} + \frac{G - 1}{G} + \frac{1}{G}, \quad (2.3.)$$

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - \frac{\sigma_a}{\sigma_e} N_1}, \quad (2.4.)$$

Ja $G \gg 1$, iegūst, ka:

$$F = \frac{2N_2}{N_2 - \frac{\sigma_a}{\sigma_e} N_1}, \quad (2.5.)$$

Pumpēšana viļņa garumā $\lambda_p = 980$ nm ļauj gandrīz pilnībā invertēt stāvokļus 1 un 2 ($N_2 \rightarrow N$, $N_1 \rightarrow 0$). Šajā gadījumā tiek sasniegta minimālā vērtība $F \approx 2$ (3 dB).

Tāpēc pumpēšana viļņa garumā $\lambda_p = 980$ nm tiek pielietota tajos gadījumos, kad ir nepieciešams sasniegt pastiprinājumu ar minimālu SNR.

Signāla pastiprināšanai līnijas ieejā un lineāro pastiprinātāju kaskāžu izejā izmanto optiskos jaudas pastiprinātāji jeb būsterus. To kvalitāti raksturo pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte (PCE) un izejas signāla jauda P_{iz} . Liela enerģētiskā efektivitāte ļauj pumpēšanai izmantot mazāk jaudīgus un lētākus starojuma avotus. Tas ir būtiski, jo ievērojama optiskā pastiprinātāja vērtības daļa pienākas uz pumpēšanas avotu.

Pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte ir vienāda ar signāla jaudas pieauguma attiecību pret pumpēšanas jaudu [77, 78]:

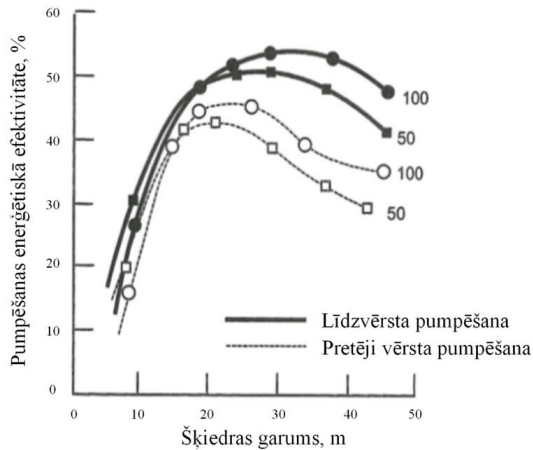
$$PCE = \frac{P_{iz} - P_{ie}}{P_p} \approx \frac{P_{iz}}{P_p} \quad (2.6.)$$

Lai nodrošinātu augstu enerģētisko efektivitāti, nepieciešams, lai praktiski visi pumpēšanas fotoni atdotu savu enerģiju signāla fotoniem. Pastiprināšanas rezultātā radušos signāla fotonu skaita m_s attiecību pret absorbēto pumpēšanas fotonu skaitu m_p sauc par pumpēšanas kvantu efektivitāti: $QCE = \frac{m_s}{m_p}$. Izteiksmē (2.6.) ievietojot $P_{iz} = \frac{m_s hc}{\lambda_s}$ un $P_p = \frac{m_p hc}{\lambda_p}$, PCE iespējams izteikt ar QCE:

$$PCE = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} QCE \quad (2.7.)$$

No vienādojuma 2.7. ir redzams, ka pie tādas pašas QCE vērtības PCE ir jo lielāka, jo lielāks ir pumpēšanas viļņa garums. QCE maksimālā vērtība pie pumpēšana viļņa garuma $\lambda_p = 980$ nm un $\lambda_p = 1480$ nm ir aptuveni vienāda (~80%). Tāpēc maksimālās enerģētiskās efektivitātes sasniegšanas nolūkā piemērotāks pumpēšanas viļņa garums ir $\lambda_p = 1480$ nm, nevis $\lambda_p = 980$ nm, kuram ir maksimālā pastiprināšanas efektivitāte. Maksimālā enerģētiskā efektivitāte, ko var sasniegt ar $\lambda_p = 1480$ nm, ir ap 86%, bet ar $\lambda_p = 980$ nm – ap 55%. Pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte ir atkarīga no pumpēšanas virziena, un tās maksimālā vērtība tiek sasniegta ar pumpēšanu pretējā virzienā, 2.8. att. [77, 78].

Standarta erbija pastiprināju pumpēšana tiek veikta ar vienmodas lāzera diodes un WDM sazarotāja palīdzību. Šādu pastiprinātāju maksimālā ieejas jauda ir ar dažiem simtiem mW. To ierobežo tas fakts, ka vienmodas diodes starojuma ievadīšanai ir nepieciešamas salīdzinoši mazjaudīgas vienmodas lāzera diodes.



2.8. att. Pumpēšanas enerģētiskās efektivitātes atkarība no šķiedras garuma un pumpēšanas virziena [76].

Pastiprinātājiem, kuru ieejas jauda ir vairāk par 1 W, tika izstrādātas īpašas dubultapvalka šķiedras (*Double Clad Fiber*). Tās vienmodas iekšējais apvalks ir leģēts ne tikai ar erbija joniem, bet arī ar iterbija joniem, un ir ar diametru $\sim 100 \mu\text{m}$, iekšējā leģētajā apvalkā tiek ievadīts starojums no jaudīgas lāzera diodes ar viļņa garumu $\lambda \approx 975 \text{ nm}$, kas vairakkārt atstarojas no tā sienām, un to absorbē iterbija joni. Iterbija joni savstarpējās korelācijas ceļā nodod absorbēto enerģiju erbija joniem, izraisot to pāreju no sākuma stāvokļa 1 ierosinātā stāvoklī 3. No ierosinātā stāvokļa 3 erbija joni relaksē uz stāvokli 2, kā rezultātā notiek lāzera stāvokļu 1 un 2 inversija [79]. Iterbija jonu pāreju viļņu garumi, kas atbilst augstākiem ierosinātiem stāvokļiem, atrodas ultravioletajā diapazonā. Tāpēc iterbija jonu koncentrācija, ko var ievadīt šķiedrā bez luminiscences dzēšanas efekta parādīšanās, par kārtu pārsniedz maksimāli pieļaujamo erbija jonu koncentrāciju, kas arī nodrošina efektīvu pumpēšanas jaudas absorbciju. Šādā veidā tiek veikta pumpēšana vienmodas šķiedrā, izmantojot jaudīgākas un būtiski lētākas daudzmodu lāzerdiodes. Turklāt, emisijas jauda palielinās gandrīz 1000 reizi. [80].

Pumpēšanas sliekšņa jauda tiek atrasta pie nosacījuma, ka pastiprinājuma rādītājs ir $g > 0$ dB vai, kā to var redzēt no (2.5.), ka $N_2\sigma_e - N_1\sigma_a > 0$, kur σ_e un σ_a ir izkliedes šķērsgrizumi signāla starojumam. Tā kā šie šķērsgrizumi ir atkarīgi no signāla viļņa garuma, tad arī pumpēšanas sliekšņa jauda ir atkarīga no signāla viļņa garuma. Novērtējumam pieņemsim, ka $\sigma_e = \sigma_a$, kas izpildās pie $\lambda_s = 1535 \text{ nm}$. Tad pumpēšanas sliekšņa jaudu noteic no nosacījuma, ka $N_1 = N_2$, vai, tā kā $N_1 + N_2 = N$, ka $n_2 = \frac{N_2}{N} = \frac{1}{2}$.

Pumpēšana ar $\lambda_p = 1480 \text{ nm}$. Veicot sliekšņa jaudas aprēķinu var neievērot apdzīvotības izmaiņas signāla un pastiprinātas spontānās emisijas ietekmē, jo pastiprinājums vēl ir mazs. Bez piesātinājuma efekta stāvokļu 1 un 2 apdzīvotību noteic bilance starp pumpēšanu un spontāno emisiju. Optiskā pumpēšana izraisa jonu pāreju no stāvokļa 1 uz stāvokli 2 ar ātrumu N_1W_a . Atpakaļ uz stāvokli 1 joni pāriet ar ātrumu N_2W_c . Stacionārā režīmā izpildās nosacījums:

$$N_1W_a = \frac{N_2}{\tau_{sp}} + N_2W_e \quad (2.8.)$$

Ar stimulēto pāreju varbūtību vienādojuma 2.8. palīdzību relatīvo apdzīvotību ($n_1 = \frac{N_1}{N}$ un $n_2 = \frac{N_2}{N}$) atkarība no pumpēšanas jaudas pieņem sekojošu formu:

$$n_1 = \frac{\eta_p P_p + P_0}{P_p(1 + \eta_p) + P_0} \quad (2.9.)$$

$$n_2 = \frac{P_p}{P_p(1 + \eta_p) + P_0} \quad (2.10.)$$

kur - $\eta_p = \frac{\sigma_e}{\sigma_a}$ (pie $\lambda_p = 1480$ nm $\eta_p = \frac{1}{3}$);

$$P_0 = \frac{h\nu_p \pi R^2}{\Gamma_p \sigma_a \tau_{sp}}$$

No vienādojuma 2.9. ir redzams, ka sliekšņa nosacījums $n_2 = \frac{1}{2}$ izpildās, ja $P_p = P_{sl} = \frac{P_0}{1 - \eta_p}$. No šā iegūst pumpēšanas sliekšņa jaudas izteiksmi:

$$P_{sl} = \frac{h\nu_p \pi R^2}{\Gamma_p \sigma_a \tau_{sp}(1 - \eta_p)} \quad (2.11.)$$

Kā redzams no vienādojuma 2.11., $P_{sl} \rightarrow \infty$, ja $n_p \rightarrow 1$ ($\lambda_p \approx 1535$ nm). Ja $\lambda_p > 1535$ nm, sliekšņa nosacījums $n_2 = \frac{1}{2}$ netiek iegūts ne ar jebkādu pumpēšanas jaudu, tāpēc ka $\eta_p > 1$.

Pumpēšana ar $\lambda_p = 980$ nm. Optiskā pumpēšana ierosina jonu pāreju no stāvokļa 1 uz stāvokli 3 ar ātrumu $N_1 W_a$, no kura tie relaksē uz stāvokli 2 aptuveni 1 ms laikā. No stāvokļa 2 tie spontāni pāriet atpakaļ stāvoklī 1 ar ātrumu $\frac{N_2}{\tau_{sp}}$. Stacionārajā režīmā izpildās nosacījums

$$N_1 W_a = \frac{N_2}{\tau_{sp}} \quad (2.12.)$$

Stimulētās pārejas no 3 uz 1 netika ņemti vērā, jo jonu dzīves laiks stāvoklī 3 ir īss, tāpēc $N_3 \ll N$ un $N_1 + N_2 \approx N$. Ar (1.4) palīdzību iegūst, ka:

$$n_1 = \frac{P_{sl}}{P_p + P_{sl}} \quad (2.13.)$$

$$n_2 = \frac{P_p}{P_p + P_{sl}} \quad (2.14.)$$

kur $P_{sl} = \frac{h\nu_p \pi R^2}{\Gamma_p \sigma_a \tau_{sp}}$ – pumpēšanas sliekšņa jauda pie $\lambda_p = 980$ nm

Netastbilā stāvokļa 2 apdzīvotības atkarība no pumpēšanas jaudas ir attēlota 2.7. att. No tā ir redzams, ka n_2 palielinās jo straujāk, jo mazāka ir pumpēšanas sliekšņa jauda P_p . Tāpēc n_2 atkarības no P_p raksturlieknes priekšpastiprinātājiem ($P_p = 0.3$ un 0.8 mW) paceļas augstāk, nekā būstieriem ($P_p = 1.2$ un 3.2 mW). Palielinoties pumpēšanas jaudai, n_2 tiecas uz savu robežvērtību, kas ir vienāda ar 1 $\lambda_p = 980$ nm gadījumā un ar 0.75 $\lambda_p = 1480$ nm gadījumā.

Turklāt trokšņu koeficients $F \approx 2n_{sp} = \frac{2n_2}{n_2 - n_1}$ pie $\eta_s = 1$ ($\lambda_s = 1535$ nm) tiecas uz 2 (jeb 3 dB) pie $\lambda_p = 980$ nm un uz 3 (jeb 5 dB) pie $\lambda_p = 1480$ nm.

EDFA pastiprinātājs sastāv no divām aktīvām sastāvdaļām: aktīvās šķiedras, kura ir leģēta ar erbija joniem, un pumpējošā gaismas avota, kura starojums ierosina erbija jonus. Pumpēšanai tiek izmantotas pusvadītāju lāzera diodes. 2.1.tabulā ir parādītas pumpējošo avotu pastiprināšanas efektivitātes vērtības, kuru nosaka maksimālā attiecība starp pastiprinājuma koeficienta vērtības un pumpējošā avota jaudas, dažam erbija absorbcijas joslām, pie vienādiem EDF šķiedras garumiem [19].

2.1.tabula

Pumpējošo avotu pastiprināšanas efektivitātes [19]

Pumpējošā avota viļņa garums, [nm]	Maksimālā pastiprināšanas efektivitāte, [dB/mW]
532	2.0
664	3.8
827	1.3
980	11
1480	6.3

Redzamā gaismas diapazona pumpējošie gaismas avoti uz cietvielu un gāzes lāzeru pamata tika izmantoti sākotnējā EDFA pētījumu posmā, kamēr netika izstrādāti nepieciešamie pusvadītāju gaismas avoti. Kā redzams maksimālā pastiprinājuma efektivitāte tiek sasniegta pie viļņu garumiem 980 un 1480 nm. Jāatzīmē, ka šis fakts deva spēcīgu impulsu lielas jaudas pusvadītāju tehnoloģiju attīstībai. Ja pirmajos signāla pastiprināšanas eksperimentos tika izmantoti pumpējošie pusvadītāju lāzери ar maksimālo jaudu 20-30 mW, tad uz šodienu tiek izstrādāti pumpējošie pusvadītāju lāzери ar jaudu, kura ir dažu simtu mW liela. Liela pumpēšanas jauda ir nepieciešama, lai nodrošinātu augstu pastiprināšanas koeficientu vienlaikus lielam informācijas kanālu skaitam DWDM sistēmās [19, 71].

Viena no tīklu projektēšanas problēmām ir EDFA pastiprinātāja pumpējošā avota viļņa garuma izvēle - 980 vai 1480 nm. Paša sākumā ir grūti noteikt, kam tiks dota lielāka priekšroka – augstam pastiprinājumam vai zemam trokšņa līmenim. Kā arī nākas meklēt kompromisu, ievērojot sistēmas izmaksas un katra viļņa garuma priekšrocības un trūkumus. 2.2. tabulā ir parādīts šo divu viļņu garumu parametru salīdzinājums [71, 81].

Pēc salīdzinājuma ir redzams, ka vairāk priekšrocību no trokšņa viedokļa ir pusvadītāju lāzeram ar viļņa garumu 980 nm, jo ar to ir iespējams panākt augstāku populācijas inversijas līmeni, kas ļauj iegūt mazāku ASE trokšņu daudzumu. Šis pumpējošā starojuma viļņa garums ir labāk piemērots daudzkanālu sistēmām un var būt izmantots priekšpastiprinātājos. 980 nm viļņa garuma starojuma trūkums ir samērā šaurs viļņa garuma joslas platums, kurā notiek erbija jonu absorbēšana, tāpēc ir nepieciešama precīza lāzera viļņa garuma kontrole. Tomēr, 1480 nm lāzери izstaro platākajā erbija jonu absorbēšanas joslā un tiem nav nepieciešama precīza viļņa garuma kontrole, tāpēc tie ir drošāki izmantošanas ziņā. Pielietojot 1480 nm lāzери, ir iespējams iegūt jaudīgākus pastiprinātājus ar zemākam izmaksām, un pateicoties lielākai kvantu efektivitātei (mazāka enerģijas līmeņu starpība starp pumpējošo un pastiprināmo starojumu),

iegūt lielāku pastiprinājuma koeficientu, pie optimālā EDF šķiedras garuma. Šīs starojuma viļņa garums ir labāk piemērots ŠOPS, kurās ir nepieciešams iegūt pēc iespējas lielāko signāla pastiprinājumu [67, 73, 81].

2.2. tabula

Pumpējošā avota viļņu garumu salīdzinājums [5, 71]

Parametri	Viļņa garums, nm	
	1480	980
Gaismas avots (lāzerdioide)	InGaAsP/InP	InGaAs ar super režģi
Pastiprināšanas efektivitāte*, dB/mW	6.3	11
Troksņu rādītājs, dB	~ 5.5	3 - 4.5
Izejas piesātinājuma jauda**, dBm	+20	+5
Pumpēšanas viļņa garumu diapazons, nm	20 (1470 – 1490)	šaurš, 2 (979-981)
Stara sašķelšana	grūta	viegla
Izejas jauda, mW	50-200	10-20

* Pie vienādiem EDF šķiedras garumiem;
** Atkarīgs no pumpēšanas jaudas.

Pieaugot temperatūrai, 1480 nm pumpēšanas gadījumā, piesātinājuma izejas signāla jauda palielinās ātrāk nekā 980 nm pumpēšanai. 980 nm pumpēšanas priekšrocība ir tāda, ka tā ir gandrīz nejutīga pret apkārtējās vides temperatūras izmaiņām, salīdzinot ar 1480 nm pumpēšanu, kurai ir novērojama izteiktāka pastiprinājuma atkarība no temperatūras, kas vēl vairāk izpaužas pie maziem ieejas signāla jaudas līmeņiem [82].

Daudzkanālu sistēmās pumpēšanas lāzera jauda teorētiski vienmērīgi „sadalās” starp visiem kanāliem - jo vairāk kanālu sistēmā, jo jaudīgāks pumpēšanas lāzers ir nepieciešams. Tādēļ, sistēmās ar blīvo kanālu izvietojumu un lielo kanālu skaitu tiek pielietoti jaudīgāki pumpējošie lāzери vai pumpējošie lāzери kaskādēs. Vairākos pastiprinātajos tiek izmantota divvirzienu pumpēšana, kas ļauj palielināt kopējo pumpējošo jaudu un efektīvi izmantot katra lāzera viļņa garuma stiprākās puses [83].

Viens no EDFA pielietojuma veidiem ir jaudas pastiprinātāji, kuri pastiprina optiska signāla jaudu pašā līnijas sākumā. Izejas optiskā signāla jauda nosaka attālumu līdz nākamajam pastiprinātājam, tāpēc ir svarīgi tādi EDFA jaudas pastiprinātāju parametri kā signāla jauda pastiprinātāja izejā un enerģijas pārvades efektivitāte no ierosinošā avota uz signālu (PCE). PCE tiek noteikta sekojoši [84]:

$$PCE = \frac{P_{izejas} - P_{ieejas}}{P_{pumpēs}}, \quad (2.15.)$$

kur - P_{izejas} – izejas optiskā signāla jauda, W;

P_{ieejas} – ieejas optiskā signāla jauda, W;

$P_{pumpēs}$ – pumpējošā avota jauda, W.

Lai būtu augsta PCE, ir nepieciešams lai praktiski visi pumpējošā starojuma fotoni nodotu savu enerģiju optiskā signāla fotoniem. Enerģijas pārvades efektivitāte no ierosinošā avota uz signālu EDFA gadījumā ir lielāka par 50% [70, 85].

Attiecību starp signāla fotonu skaitu, kuri parādījās signāla pastiprināšanas procesā, un pumpēšanas avota fotonu skaitu, kuri tika patērēti pastiprināšanai, vislabāk raksturo pumpēšanas kvantu efektivitāte (QCE). Tā kā izejas starojuma fotona enerģija ir mazāka par pumpēšanas fotona enerģiju, enerģētiskā efektivitāte ir zemāka nekā kvantu efektivitāte, un ir atkarīga no attiecības starp pumpējošā starojuma viļņa garumu (λ_p) un signāla viļņa garumu (λ_s) [85]:

$$PCE = \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \cdot QCE, \quad (2.16.)$$

No vienādojuma 2.16. izriet, ka priekš maksimālas enerģijas pārvades efektivitātes perspektīvāk izmantot pumpēšanas avotu ar 1480 nm viļņa garumu, nevis ar 980 nm viļņa garumu. Bet no citas puses, ir jāņem vērā, ka 980 nm pumpēšana nodrošina mazāku pastiprinātās spontānas emisijas trokšņa vērtību.

Lielāka enerģijas pārvades efektivitāte ļauj izmantot pumpēšanas avotus ar mazāku jaudu, kas ļauj samazināt pastiprinātāja kopējo cenu. Šis parametrs ir īpaši svarīgs priekš WDM sistēmām, kur nepieciešams vienlaicīgi pastiprināt lielu kanālu skaitu ar lielu kopējo jaudu [85].

2.1.3. Erbija leģētās šķiedras leģējuma piemaisījuma un garuma ietekme uz pastiprinātās izejas jaudu un tā darbību

EDFA pastiprinātāju pamata elements un pastiprināšanas vide ir EDF - šķiedra ar erbija jonu piemaisījumiem. Tādas šķiedras izgatavo, izmantojot tādas pašas metodes kā parastai optiskajai šķiedrai priekš datu pārraides, pievienojot starpposma operāciju - neizkausētā serdeņa impregnēšanu ar erbija sāļu šķīdumiem vai leģēšanu ar erbija joniem no gāzes fāzes tieši serdeņa nogulsnešanās procesā. EDF parametrus padara līdzīgus ar parametriem šķiedrām, ko izmanto informācijas pārraidei, lai samazinātu zudumus savienojumos [70].

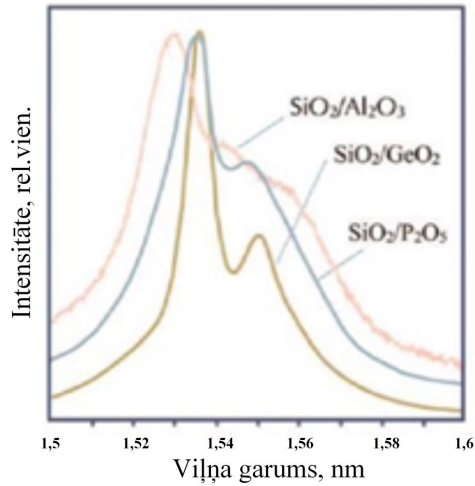
Ir svarīgi pareizi izvēlēties leģējošos piemaisījumus, kas formē EDF serdeni, kā arī ir svarīga erbija jonu koncentrācijas un pašas EDF šķiedras garuma piemeklēšana.

Dažādi piemaisījumi silīcija šķiedrā var izmainīt erbija jonu Štarka enerģijas līmeņu sadalīšanas raksturu, kas noved pie erbija jonu absorbcijas un emisijas spektru izmaiņām. Erbija jonu izstarojuma spektri dažādiem bieži izmantotajiem silīcija dioksīda šķiedras piemaisījumiem ir parādīti 2.9.attēlā. Plašākais izstarojuma spektrs (tas nozīmē arī - plašākais pastiprinājuma spektrs), kas ir aptuveni 35-40 nm (pēc puses no augstuma), tiek sasniegts izmantojot alumīnija piemaisījumus, tāpēc šis elements ir kļuvis par vienu no izplatītākajam serdeņa materiāla sastāvdaļām EDF šķiedrā. Kopā ar alumīnija piemaisījumiem bieži izmanto arī germāniju [19, 85].

Erbija jonu koncentrācija EDF šķiedras serdenī faktiski nosaka EDF šķiedras garumu, ko izmanto pastiprinātājos pie dotajiem informācijas signālu un pumpējošo avotu jaudas līmeņiem.

Augšējo erbija jonu koncentrācijas robežu nosaka nelineārās luminiscences dzēšanas parādīšanās. Šī parādība ir saistīta ar to, ka pie augstas aktīvo jonu koncentrācijas ir iespējama erbija jonu kopu izveidošana, kas sastāv no diviem vai vairākiem erbija joniem. Kad šie joni ir ierosinātā stāvoklī, notiek enerģiju apmaiņas, un kā rezultātā viens no joniem pāriet uz vēl

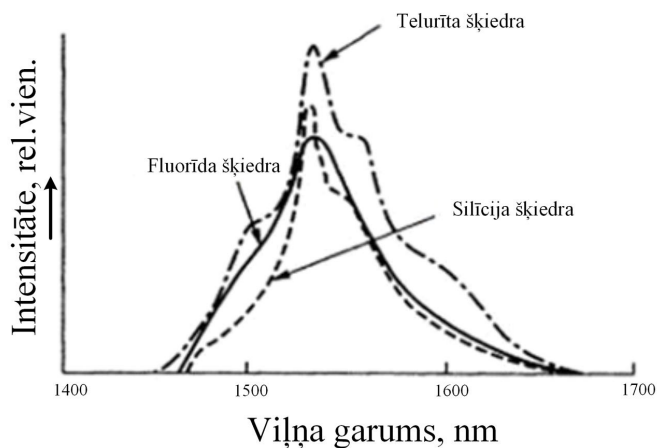
augstāko enerģētisko līmeni, bet otrs, neko neizstarojot, pāriet uz līdzsvara stāvokli. Tādējādi, daļa no erbija joniem absorbē pastiprinātā signāla izstarojumu, un samazinās pastiprinātāja efektivitāte.



2.9. att. Erbija jonu izstarojuma spektri silīcija šķiedrā ar dažādiem piemaisījumiem [85].

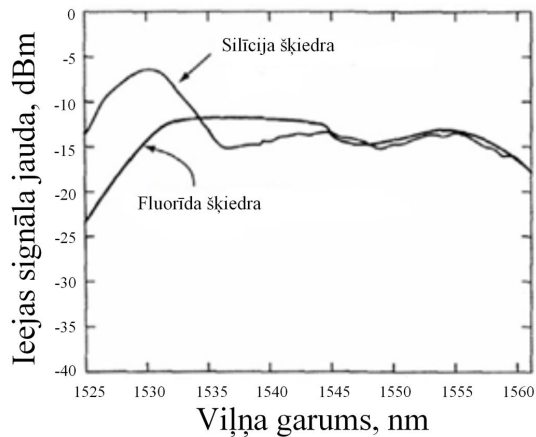
Zemākā erbija jonu koncentrācijas robeža tiek noteikta sakarā ar to, ka pastiprinātāju ražošanā ir neērti izmantot ļoti garas šķiedras, kā arī garas šķiedras palielina pastiprinātāju cenu. Praksē, erbija jonu koncentrācija ir ap 10^{18} - 10^{19} cm^{-3} , kas nodrošina EDF garumu no metriem līdz dažiem desmit metriem [70].

Visizplatītākie ir EDFA pastiprinātāji ar silīcija dioksīda šķiedru, jo EDFA tehnoloģija uz tās bāzes tika atzīta agrāk. Bet ir veikti vairāki pētījumi un var būt izmantotas arī citas šķiedras, piemēram, fluorīda šķiedras vai telurīta šķiedras [5, 86]. Erbija jonu izstarojuma spektru salīdzinājums dažāda veida šķiedrām ir parādīts 2.10. attēlā.



2.10. att. Erbija jonu izstarojuma spektru salīdzinājums dažāda veida šķiedrām [4].

Fluorīda šķiedra ir ļoti līdzīga silīcija dioksīda šķiedrai, tai ir tāds pats pastiprinājuma joslas platums (1525-1560 nm) un galvenie raksturlielumi. Atšķirībā ir novērojamā tikai pastiprinājuma līknes vienmērīgumā. Galvenā priekšrocība EDFA pastiprinātājiem ar fluorīda šķiedru ir tāda, ka to izejas raksturlielne 1540 nm viļņu garuma diapazonā ir daudz gludāka nekā silīcija dioksīda šķiedrai, to var redzēt 2.11. attēlā. Tomēr, pastāv viens trūkums – fluorīda šķiedrai ir lielāks trokšņa līmenis, jo tiek izmantots tikai 1480 nm pumpējošais starojums, nevis 980 nm, kā ir iespējams EDFA pastiprinātajos ar silīcija dioksīda šķiedru. Izmantot 980 nm pumpējošo starojumu EDFA pastiprinātajos ar fluorīda šķiedru ir neefektīvi, jo notiek ierosinātā stāvokļa absorbēšana. Līdz ar to, pirms pielietot EDFA pastiprinātajos šāda veida šķiedras, ir jāizvirza galvenie sistēmas mērķi - gludākā izejas raksturlielne vai mazāks trokšņa līmenis [5].

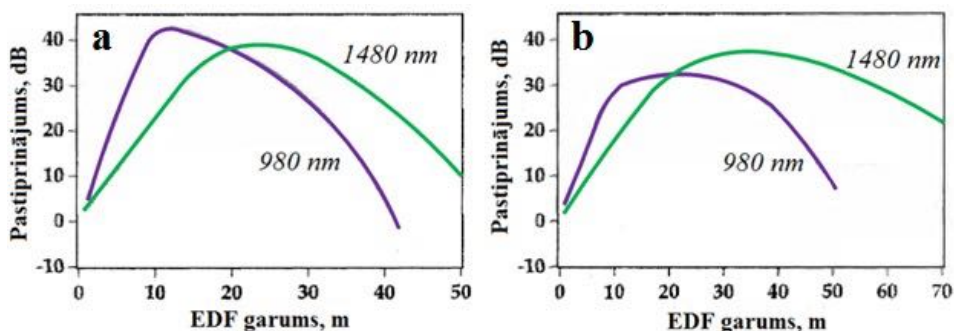


2.11. att. EDFA pastiprinātāja izejas raksturlielne ar silīcija un fluorīda šķiedru [5].

Telurīta šķiedra dod iespēju palielināt pastiprināšanas joslas platumu līdz pat 90 nm. Strādājot ar telurīta šķiedrām ir jāņem vērā to, ka tās ir ļoti pakļautas termiskiem bojājumiem pie lielām optisko jaudu intensitātēm, kā arī stikla īpašību dēļ nav iespējama pumpēšana pie 980 nm starojuma [87]. Tomēr, eksperimentējot ar EDFA pastiprinātājiem uz telurīta šķiedras bāzes, NTT laboratorijas speciālisti (Japāna), izmantojot speciālu ekvalaizeru, izveidoja pastiprinātāju ar relatīvi plakanu pastiprinājuma līkni viļņu garuma diapazonā no 1561 nm līdz 1611 nm. Tāds pastiprinātājs nodrošināja pastiprinājumu ap 25 dB, un trokšņu rādītāju mazāku par 6 dB. Vēlāk, pamatojoties uz šo eksperimentālo prototipu, NTT izveidoja EDFA pastiprinātāju uz telurīta šķiedras bāzes ar plakano pastiprinājumu viļņu garuma diapazonā 1570 - 1617 nm [88].

Papildus dažādu piemaisījumu pielietošanai EDF šķiedrā, pastiprinātāja darbību ietekmē arī izvēlētais EDF šķiedras garums. EDF šķiedra ir pastiprinātāja aktīva vide, gar kuras garumu notiek pumpējošā starojuma absorbcija un informācijas signāla pastiprinājums. Tā kā EDF šķiedrai ir noteikta erbija jonu koncentrācija, pastiprinājums uz vienas EDF šķiedras garuma vienības ir ierobežots. Priekš maksimāla pastiprinājuma, ir nepieciešams lai pēc iespējas vairāk erbija jonu atrastos ierosinātā stāvoklī. Savukārt, EDF šķiedras garums pie kura ir panākts maksimālais pastiprinājums ir vienlaikus atkarīgs no erbija jonu koncentrācijas, pumpēšanas lāzera jaudas, viļņa garuma un ieejas signāla jaudas, viļņa garuma. Ja izvēlētais EDF šķiedras garums ir lielāks par EDF šķiedras garumu, pie kura ir maksimālais pastiprinājums, tad

tālākajos šķiedras apgabalos būs novērojama signāla absorbcija, bet ja izvēlētais garums būs mazāks, tad pumpējošā avota starojums netiks izmantots pilnībā. Tā kā EDFA pastiprinājumam ir viļņa garuma atkarība, EDF šķiedras garuma izvēle ir arī atkarīga no ieejas signāla viļņa garuma: jo lielāks ir pastiprinājuma signāla viļņa garums attiecībā pret EDFA pastiprinājuma spektra maksimumu, jo lielāka ir nepieciešama augstāka enerģētiskā līmeņa populācija lai sasniegtu nepieciešamo pastiprinājumu, kas varētu tikt panākta pagarinot pastiprinājuma vidi (EDF šķiedru) un piemeklējot nepieciešamo populācijas inversijas līmeni [19, 73]. Pastiprinājuma atkarība no EDF šķiedras garuma pie 980 nm un 1480 nm pumpējošiem starojumiem ir parādīta 2.12.attēlā.



2.12. att. Pastiprinājuma atkarība no EDF šķiedras garuma pie (a) 1530 nm un (b) 1550 nm ieejas signāla viļņa garuma (ieejas signāla jauda: -40 dBm; pumpēšanas lāzera jauda: 40 mW) [73].

Pastiprinātājos, kas paredzēti darbībai daudzkanālu sistēmās ar WDM tehnoloģiju, ir svarīgs pastiprinājuma spektra vienmērīgums visā EDFA viļņu garuma darbības diapazonā. Pie noteiktam pumpēšanas lāzera konfigurācijām, var piemeklēt tādu EDF šķiedras garumu, kas nodrošinās nepieciešamo populācijas inversijas līmeni priekš relatīvi vienmērīga pastiprinājuma visā EDFA viļņu garuma darbības diapazonā [19].

2.1.4. Erbija leģēto šķiedru tipu raksturojumi

Prasības pret erbija šķiedru parametriem ir atkarīgas no optiskā pastiprinātāja darbības režīma. Priekšpastiprinātājs un pastiprinātājs ar attālināto optisko pumpēšanu (ROPA) parasti darbojas piesātinātā režīmā. Signāla jauda tajos ir maza, tāpēc ka tos izmanto vāju signālu pastiprināšanai. Spontānās emisijas jauda tajos arī ir maza, jo maza trokšņu koeficienta iegūšanai ir nepieciešams, lai pastiprinātāji neatrastos pašpiesātinājuma režīmā. Jaudas pastiprinātājs (kā būsters) darbojas dziļa piesātinājuma režīmā ko rada signāla jauda. Spontānās emisijas ietekme šajā gadījumā ir neliela, jo pastiprinātāja dziļa piesātinājuma gadījumā tā pastiprinājuma koeficients krasi samazinās. Viena no pamata prasībām šādiem pastiprinātājiem ir augsta pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte (PCE). Līnijas pastiprinātājs ieņem vietu starp šiem diviem pastiprinātāju tipiem: tajā nedrīkst ignorēt signāla jaudu un pastiprinātu spontāno emisiju, un tajā pašā laikā ir nepieciešama augsta PCE. Galveno optiskajos pastiprinātājos izmantojamo erbija šķiedru tipu parametri ir aprakstīti tabulā 2.3. [78].

1. tipa šķiedra tiek izmantota pastiprinātāju ar attālināto pumpēšanu (ROPA) priekšpastiprinātāju pirmajā kaskādē. Šķiedru ražo ar mazu modas lauka diametru (ar mazu

serdeņa rādiusu un ar lielu skaitlisko apertūru), kas rezultātā dod lielāku gaismas intensitāti un augstāku pastiprinājuma efektivitāti. Lielas šķiedras skaitliskās apertūras dēļ palielinās zudumi, ko izraisa Releja izkliede, un samazinās pumpēšanas enerģētiskā efektivitāte. Bet dotajā gadījumā tas nav tik būtiski, jo šo šķiedru izmanto vāju signālu pastiprināšanai. Turklāt, zudumu ietekme tiek samazināta pateicoties erbija jonu koncentrācijas palielināšanai, jo šādā veidā optimālais šķiedras garums samazinās.

2. tipa šķiedrai ir jāpiemīt gan lielai pastiprināšanas efektivitātei, gan augstai pumpēšanas enerģētiskajai efektivitātei. Šīs šķiedras modas lauka diametrs ir lielāks, bet erbija jonu koncentrācija ir mazāka, nekā 1. tipa šķiedrai. Attiecīgi, tās pastiprināšanas efektivitāte ir augstāka, bet enerģētiskā efektivitāte ir zemāka, nekā 1. tipa šķiedrai.

3. un 4. tipa šķiedras modas lauka diametrs ir lielāks, nekā 2. tipa šķiedrai. Modas lauka diametram palielinoties, samazinās pumpēšanas efektivitāte un, respektīvi, samazinās nelineāro efektu, kas ierobežo enerģētisko efektivitāti jaudīgos būsteros, izpausme. Piemēram, tādu efektu, kā pumpēšanas absorbcija, ko absorbē erbija joni ierosinātā stāvoklī (ESA).

2.3. tabula

Pastiprinātajos izmantojamo erbija šķiedru tipi [78]

Šķiedras tips	1	2	3	4	5
Absorbcijas maksimums, dB/m: $\lambda = 1530$ nm	3.0 – 6.0	2.0 – 5.0	2.0 – 5.0	2.0 – 5.0	8.0 – 14.0
$\lambda = 980$ nm	2.5 – 6.0	1.4 – 4.5	1.4 – 4.5	1.4 – 4.5	5.6 – 14.0
Skaitliskā apertūra	≥ 0.33	0.29±0.03	0.23±0.03	0.17±0.03	0.29±0.04
Nogriešanas viļņa garums, nm	800 – 950	800 – 950	800 – 950	800 – 950	800 – 950
Serdeņa rādiuss, μ m	≤ 1.1	1.0 – 1.4	1.3 – 1.8	1.6 – 2.6	0.9 – 1.5
Modas lauka diametrs, μ m	≤ 4.0	3.6 – 5.2	4.9 – 6.3	6.0 – 9.0	3.6 – 5.2
Vājinājums $\lambda = 1530$ nm, dB/km	≤ 30	≤ 8	≤ 8	≤ 4	15
Kvantu efektivitāte:	71%	78%	80%	80%	65%
Pumpēšana 100 mW ar 980 nm	44%	56%	64%	74%	45%
Pumpēšana 500 mW ar 980 nm	79%	83%	82%	78%	65%
Pumpēšana 100 mW ar 1480 nm					
Pielietojumi	Priekšpastiprinātājs ar attālināto optisko pumpēšanu	Priekšpastiprinātājs, līnijas pastiprinātāja 1.kaskāde	Būsters, līnijas pastiprinātāja 2.kaskāde	Jaudīgs būsters	Spontānās emisijas avots

2.1.5. Piesātinājuma jauda pastiprinātajā izejā

EDFA pastiprinājuma novērtēšanai izmanto pastiprinājuma koeficientu G , kurš parāda attiecību starp optiskā signāla jaudām EDFA ieejā un izejā, ievērojot EDFA ienesto ASE troksni [89]:

$$G = \frac{P_{izejas}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{ieejas}(\lambda_c)}, \quad (2.17.)$$

kur - $P_{izejas}(\lambda_c)$ – izejas optiskā signāla jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma, W;

$P_{izejas}(\lambda_c)$ – izejas optiskā signāla jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma, W;

$P_{ieejas}(\lambda_c)$ - ieejas optiskā signāla jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma, W;

$P_{ASE}(\lambda_c)$ - pastiprinātās spontānās emisijas jauda pie noteikta λ_c viļņa garuma, W.

Tomēr vairumā gadījumu, signālu jaudas ir pietiekami lielas, un ASE trokšņa ietekme uz G aprēķināšanu ir niecīga, tāpēc to neievēro. Parasti pastiprinājums ir izteikts dB formā [89]:

$$G = 10 \cdot \lg \left(\frac{P_{izejas}(\lambda_c) - P_{ASE}(\lambda_c)}{P_{ieejas}(\lambda_c)} \right), \quad (2.18.)$$

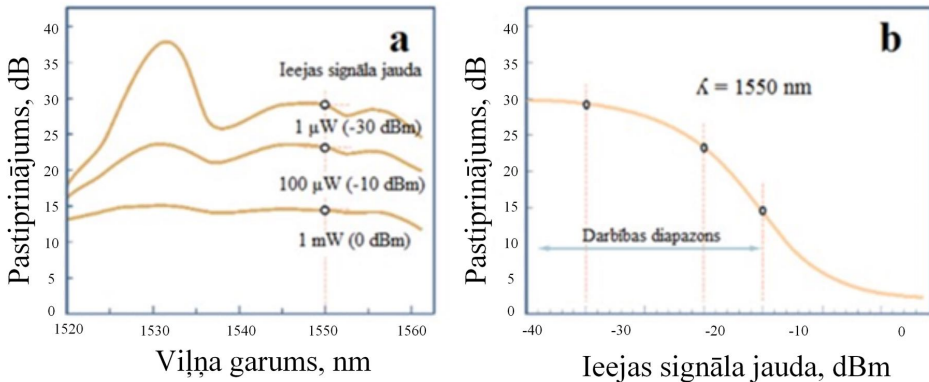
Laboratorijā ir sasniegtas pastiprinājuma vērtības ap 50-54 dB [66, 89]. Sērijas EDFA pastiprinātājos, pastiprināšanas vērtības vāja ieejas signāla gadījumā var būt ap 30 dB [19, 85].

EDFA pastiprinājums ir atkarīgs no signāla viļņa garuma un ieejas signāla jaudas. Pastiprinājuma atkarību no signāla viļņa garuma nosaka vienlaikus vairāki parametri - erbija jonu enerģētisko līmeņu formas, erbija jonu koncentrācija EDF šķiedrā, EDF šķiedras garums, pumpēšanas lāzera viļņa garums un jauda, populācijas inversijas līmenis. Tādēļ pastiprinājuma spektram ir raksturīga sarežģīta forma [19, 73].

Spektrālā pastiprinājuma atkarība EDF šķiedrā ar alumīnija, germānija piemaisījumiem dažādiem populācijas inversijas līmeņiem ir parādīta 2.11. attēlā. Pastiprinājuma spektra līknes forma ir stipri atkarīga no iegūtā populācijas inversijas līmeņa, kas savukārt ir atkarīgs no pumpēšanas lāzera viļņa garuma, jaudas un citiem parametriem. Apakšējā līkne ir novērojama, kad nav pumpēšanas lāzera starojuma (2. enerģētiskā līmeņa populācija ir 0 %). Ja 1. enerģētiskā līmeņa populācija ir lielāka par 2. enerģētiskā līmeņa populāciju, notiek "negatīvs pastiprinājums" jeb absorbcija visā EDFA darba spektra diapazonā. Palielinoties populācijas inversijas līmenim absorbcija samazinās, un sākot ar ~ 50% populācijas inversijas līmeni notiek gaismas pastiprināšana. Palielinoties populācijas inversijas līmenim, pastiprinājuma nevienmērīgums kļūst arvien izteiktāks [19, 85].

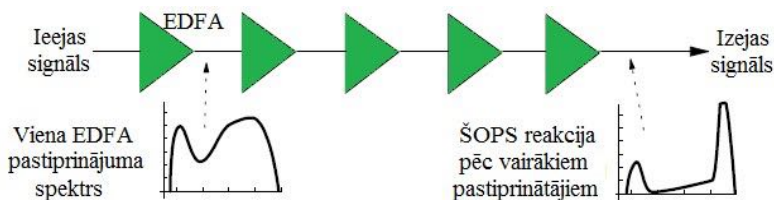
Tipiskā pastiprinājuma atkarība no viļņa garuma pie dažādām ieejas signāla jaudas vērtībām ir parādīta 2.13. attēlā (a). Pastiprinājuma atkarība no ieejas signāla jaudas pie fiksēta viļņa garuma (1550 nm) ir parādīta 2.13. attēlā (b). Palielinoties derīgā ieejas signāla jaudai, samazinās

2. enerģētiskā līmeņa populācijas vērtība, un līdz ar to samazinās pastiprinājuma vērtība.



2.13. att. EDFA pastiprinājuma atkarības no ieejas signāla jaudas [90].

WDM sistēmās ir vairāki kanāli ar dažādiem viļņu garumiem. Ja WDM sistēmas pārraides līnija ir ļoti gara, tur tiek pielietoti daudzi pastiprinātāji (piemēram, 2-3 tūkstoši kilometru gara līnija ar 80, vai vairāk pastiprinātājiem). Tāda gadījumā nevienmērīgā pastiprinājuma dēļ dažādu kanālu signāla līmeņu starpība var sasniegt pat 100 dB [91]. ŠOPS reakcija pēc vairākiem EDFA pastiprinātājiem ir parādīta 2.14. attēlā.



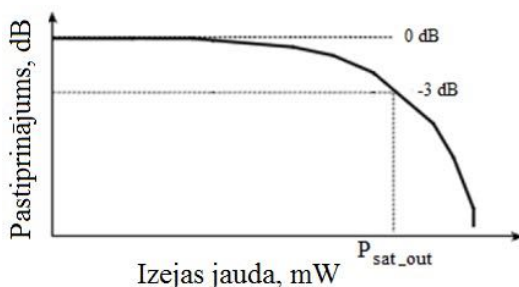
2.14. att. ŠOPS reakcija pēc vairākiem EDFA pastiprinātājiem [91].

Kanālu signāla jaudas līmeņu atšķirības var negatīvi ietekmēt sistēmas darbību. Gadījumos, kad EDFA pastiprinātāju skaits nav tik liels, katram kanālam var būt dažādas optiskā signāla trokšņa attiecības (OSNR) un daži no tiem var neatbilst sistēmas prasībām. WDM sistēmās ir nepieciešams, lai būtu vienāds signāla pastiprinājums katram spektrālajam kanālam, tāpēc EDFA pastiprinājuma spektram jābūt pēc iespējas vairāk līdzenam [90].

Pastiprinājuma maksimums ir novērojams ap 1535 nm, bet relatīvi plakans pastiprinājuma spektrs ir diapazonā no 1540 nm līdz 1560 nm. Šīs 20 nm joslas platums var būt piemērots DWDM sakaru sistēmām. Lielam DWDM kanālu skaitam (piemēram, 64 kanāli ar 50 GHz starpkanālu intervālu) 20 nm josla ir par mazu un kanāli tiek pārraidīti viļņa garumos, kur EDFA pastiprinājuma spektrs nav relatīvi plakans. Turklāt, 1540-1560 nm joslas pastiprinājums ir tikai relatīvi plakans, bet ne ideāls, un daudzu pastiprinātāju gadījumā kopējais pastiprinājuma nevienmērīgums var ietekmēt sekmīgo sistēmas darbību. Līdz ar to, rodas nepieciešamība pēc pastiprinājuma izlīdzināšanas. Lai izlīdzinātu EDFA pastiprinājuma spektru var tikt pielietotas dažādas metodes, kuras tiks apskatītas nākamajā apakšnodaļā [19, 91].

Pastiprinājuma koeficients ir stipri atkarīgs no ieejas signāla jaudas. Līdz noteiktam (mazam) ieejas signāla jaudas līmenim pastiprinājums ir praktiski pastāvīgs. Tomēr, palielinoties ieejas signāla jaudai, pastiprinājums sāk eksponenciāli krist. To izskaidro pavairošanas koeficienta samazināšana daļiņu deficīta dēļ, kuras ir spējīgas ģenerēt sekundārus fotonus pieaugot ieejas signāla jaudai. Savukārt, pastiprinājuma piesātinājuma punkts ir sasniedzamās izejas jaudas vērtības maksimums, kad palielinoties optiskā signāla jaudai pastiprinātāja ieejā, signāla jauda pastiprinātāja izejā vairs nepieaug. Pie lielas ieejas optiskā signāla jaudas (virs piesātinājuma vērtības), visi nesēji pastiprinājuma vidē ir piesātinājuma stāvoklī, līdz ar to nav iespējama vēl lielāka gaismas enerģijas pārnese [67, 74].

Lai novērtētu EDFA piesātinājuma efektu bieži izmanto piesātinājuma jaudas vērtību pastiprinātāja izejā ($P_{\text{sat_out}}$), pie kuras pastiprinājums ir divreiz (uz 3 dB) mazāks nekā maksimāli iespējamais pastiprinājums, to var redzēt 2.15. attēlā [67].



2.15. att. Piesātinājuma jauda pastiprinātāja izejā [67].

EDFA pastiprinātāji bieži strādā tuvu piesātinājuma punktam, tāpēc kā tāda veidā var būt panāktas mazākas ASE trokšņa vērtības, jo pēc iespējas vairāk nesēji tiek izmantoti tieši signāla pastiprināšanai, nevis spontānās emisijas radīšanai [92].

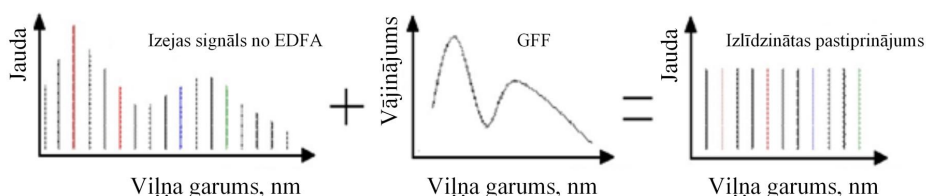
2.1.6. Pastiprinājuma spektra izlīdzināšanas metodes

EDFA pastiprinājuma spektra līdzenums ir ļoti svarīgs WDM sakaru sistēmās. Pastiprinājuma nevienmērīgums mazas jaudas ieejas signālam var pārsniegt 10 dB vienas spektrālās joslas robežās. Praktiski, pastiprinājuma nelīdzenums tiek samazināts, palielinot kopējo optiskā signāla jaudu. Tomēr, ejot cauri vairākiem pastiprinātājiem garajā līnijā, kopējais pastiprinājuma nevienmērīgums var izraisīt informācijas zudumus kanālos ar mazāko pastiprinājumu. Tādējādi, par aktuālo tiek uzskatīts pastiprinājuma spektra izlīdzinājums [70].

Lai izlīdzinātu pastiprinājuma spektru pielieto dažādas metodes, atkarībā no konkrēta gadījumā:

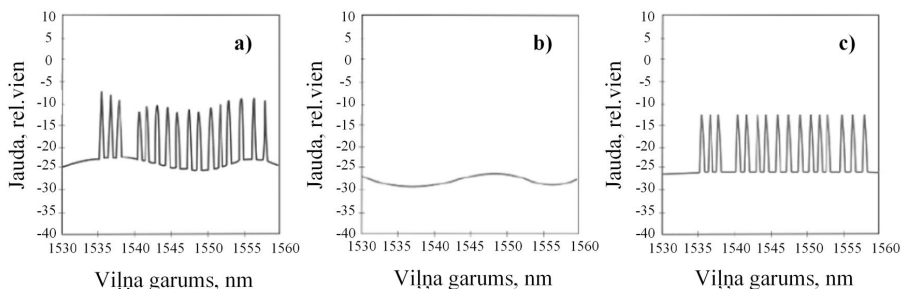
Temperatūras kontrole. Pie 77°K temperatūras var būt iegūts vairāk līdzens pastiprinājuma spektrs, bet tāda metode nav praktiska [91].

Pastiprinājuma izlīdzināšanas filtra pielietojums (GFF). GFF var būt novietots EDFA izejā pēc optiskā izolatora. Pastiprinātājam ar GFF vienmēr jānodrošina fiksēto pastiprinājumu. GFF vājinājuma spektram jābūt tādā, lai kopā ar EDFA pastiprinājuma spektru tie veidotu plakānu pastiprinātā signāla spektru, to var redzēt 2.16. attēlā. Pielietojot tādu filtru var iegūt pastiprinājuma koeficienta nevienmērīgumu tikai ap 0.1 – 0.2 dB [67, 69].



2.16. att. GFF pielietojums priekš EDFA pastiprinājuma spektra izlīdzināšanas [69].

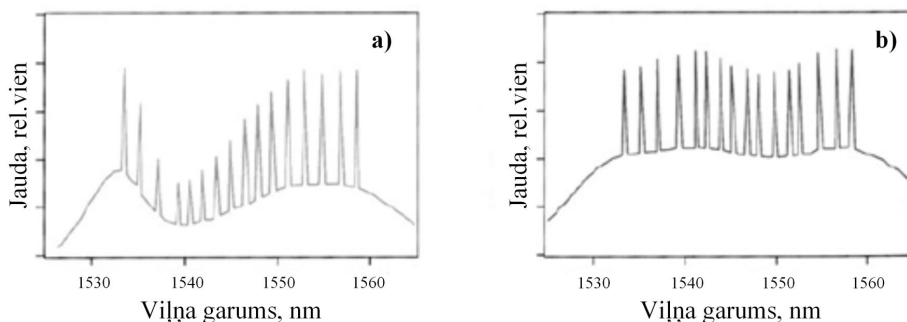
Kā filtru var izmantot arī Brega režģi, kura pārvades spektrs ir EDF pastiprinājuma spektra spoguļattēls, to var redzēt 2.17. attēlā.



2.17. att. EDFA pastiprinājuma spektra fragments pirms (a) un pēc (c) Brega režģa, kuram ir pārvades spektrs (b) kā EDFA pastiprinājuma spektra spoguļattēls [19].

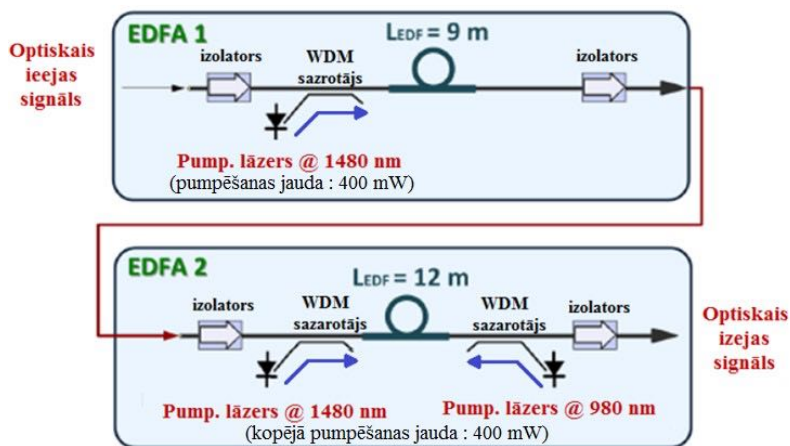
Selektīvā WDM kanālu vājināšana. Metode ir balstīta uz apzinātas kanāla ieejas signāla jaudas vājināšanas priekš izejas signālu pastiprinājumu izlīdzināšanas un vairāk saskaņotām dažādu kanālu OSNR vērtībām. Tādā gadījumā ir jāņem vērā, ka enerģija citos kanālos arī tiek pārdalīta. Kā rezultātā, sistēmas optimizācija kļūst ļoti sarežģīta. Papildus sarežģījumi rodas, kad atšķiras pievienoto vai likvidēto kanālu bitu pārraides ātrumi. Piemēram, OSNR attiecībai STM-64 (10 Gbit/s) jābūt par 6 dB lielākai nekā STM-16 (2.5 Gbit/s). Tāda situācijā papildus jauda ir jāpievieno STM-64 kanālam [93].

Citu piemaisījumu ieviešana EDF šķiedrā. Papildus erbija joniem, EDF šķiedras serdenī var ieviest citus leģējošus elementus, piemēram, iterbiju. Var arī ieviest dažādus papildus leģējošus elementus virknē gar visu pastiprinātāja šķiedras garumu. Vēl viena pieceja ir izmantot šķiedras uz cita elementa bāzes, piemēram, fluorīda vai telurīta šķiedras [19, 86]. Ar erbiju leģēto silīcija dioksīda un fluorīda šķiedras pastiprinājuma spektri ir parādīti 2.18. attēlā.



2.18. att. Pastiprinājuma spektri ar erbiju leģētai silīcija dioksīda šķiedrai (a) un ar erbiju leģētaifluorīda šķiedrai (b) [19].

Daudzpakāpju EDFA pielietošana. Var būt izmantoti daudzpakāpju EDFA ar dažādiem piemaisījumiem EDF šķiedrā, kā arī dažādiem pumpējošā avota starojuma virzieniem un viļņa garumiem [91, 94]. Vienu no tādiem piemēriem var redzēt 2.19. attēlā. Šādā veidā tiek realizēta pastiprinājuma spektra izlīdzināšana viļņu garuma diapazonā no 1545.32 līdz 1558.98 nm.



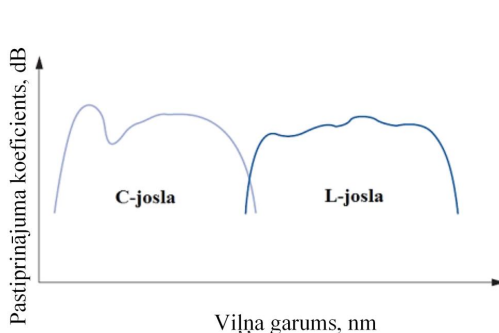
2.19. att. Daudzpakāpju EDFA shēma pastiprinājuma līknes izlīdzināšanai [94]

2.1.7. Pastiprinājuma spektra darbības joslas platums

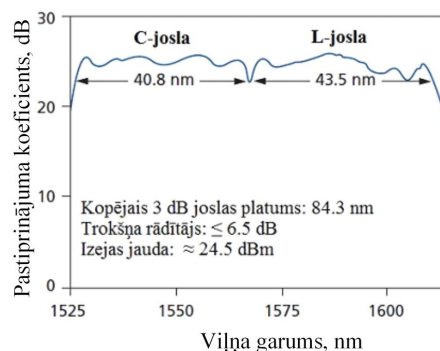
Pastiprinājuma spektra joslas platums nosaka viļņu garuma diapazonu, kurā pastiprinājuma vērtība nav zemāka par noteiktu robežvērtību. Parasti šī robežvērtība ir -3 dB no maksimālā pastiprinājuma koeficienta vērtības [19]. Priekš WDM sakaru sistēmām šis parametrs ir īpaši svarīgs, jo ietekmē iespējamo datu pārraides kanālu skaitu un līdz ar to kopējo OŠ informācijas ietilpību. Pastiprināšanas joslas platumu nosaka erbija jonu emisijas spektrs optiskās šķiedras serdeņa materiālā. Noteicošā optiskās šķiedras serdeņa materiālā ietekme uz emisijas spektru saistīta ar to, ka erbija joni tiek aplenkoti ar šī materiāla molekulām un apkārtējo molekulu iedarbības rezultātā erbija jonu enerģētiskie līmeņi tiek sadalīti apakšlīmeņos. Iespējamās optiskās pārējās starp katra enerģētiskā līmeņa apakšlīmeņiem nosaka emisijas spektra līknes formas sarežģītību un joslas platumu [70, 73].

Plašākais erbija jonu izstarojuma spektrs ir silīcija šķiedrai ar alumīnija piemaisījumiem. Pastiprinājuma spektra joslas platums tradicionālai EDFA konfigurācijai (uz silīcija šķiedras bāzes ar alumīnija piemaisījumiem), kas darbojas C-joslas viļņu garuma diapazonā, ir ap 35 nm.

EDFA tiek pielietoti arī L-joslā (1565-1625 nm). Piemēram, *Alcatel*, izstrādāja daudzpakāpju EDFA, kas darbojās 1570-1610 nm un nodrošina vidējo pastiprināšanas koeficienta vērtību 33.4 dB ar novirzi ne vairāk par 1 dB visā pastiprinājuma joslā [95]. Pastiprinājumu L-joslā var panākt pielietojot arī garāku EDF šķiedru. L-joslas pastiprinātajiem ir raksturīgs vienmērīgāks pastiprinājuma spektrs, salīdzinot ar C-joslas, to var redzēt 2.20. attēlā.



2.20. att. Pastiprinājuma spektra formas C- un L-joslas pastiprinātājam [96].



2.21. att. Ultra-platas joslas EDFA pastiprinātāja parametri [96].

L-joslas pastiprinātāja aktīvajā vidē nav pilnīgas populācijas inversijas, jo lai iegūtu pastiprinājumu L-joslā ir nepieciešams 20-40% mazāks populācijas inversijas līmenis nekā C-joslā. C-joslas optiskiem signāliem tāds pastiprinātājs darbojās kā absorbētājs. Tādēļ, pirms pastiprināšanas optiskie signāli tiek sadalīti pēc C un L joslām, un katrai joslai izmanto savu pastiprinātāju [85, 96]. Pielietojot C- un L- joslas pastiprinātāju var iegūt divreiz lielāko pastiprinājuma joslas platumu. Ultra-platas joslas EDFA pastiprinātāja parametru piemērs ir parādīts 2.21. attēlā.

EDFA pastiprinātāji spēj strādāt arī S-joslā (1480 -1530 nm). Viena no problēmām šajā joslā ir spēcīga signāla absorbcija, kura var būt atrisināta, izmantojot jaudīgākus pumpēšanas

avotus, salīdzinot ar tradicionālajiem C-joslas pastiprinātājiem. Vēl viena nopietna problēma ir saistīta ar spēcīgu konkurenci starp signāla pastiprinājumu S-joslā un spontāno emisiju C-joslā, tāpēc vairākos S-joslas EDFA risinājumos tiek pielietoti speciālie filtri un papildus komponentes ASE samazināšanai [19, 97, 98].

2.1.8. Optiskā signāla trokšņu rādītājs

Galvenais EDFA trokšņa avots ir pastiprinātā spontānā emisija (ASE). ASE troksnis var ievērojami ietekmēt signāla kvalitāti. Tādēļ, papildus pastiprinājuma koeficientam, viens no svarīgākajiem EDFA parametriem ir trokšņu rādītājs (NF), kas nosaka EDFA kvalitāti un raksturo optiskā signāla OSNR pasliktinājumu tam izejot caur EDFA. To var noteikt sekojoši [73]:

$$NF = 10 \cdot \lg \left(\frac{OSNR_{ieeja}}{OSNR_{izeja}} \right), \quad (2.19.)$$

kur - $OSNR_{ieeja}$ – attiecība starp signālu un troksni pie EDFA ieejas;
 $OSNR_{izeja}$ – attiecība starp signālu un troksni pie EDFA izejas.

Ideālā EDFA pastiprinātāja NF vērtība ir 3 dB, bet tipiskiem komerciāli pieejamiem EDFA pastiprinātājiem tā ir ap 5-7 dB liela [92].

Trokšņu rādītāja sakarība ar ASE jaudu un pastiprinājuma koeficientu ir sekojoša [70]:

$$NF = \frac{1}{G} \left(1 + \frac{ASE}{hv} \right), \quad (2.20.)$$

kur h – Planka konstante, kas vienāda ar $6.6252 \cdot 10^{-34}$, $W \cdot s^2$;
 v – frekvence [Hz], kas atbilst viļņa garumam diapazonā no 1525 līdz 1565 nm;
 G – pastiprinājuma koeficients;
 ASE – pastiprinātās spontānas emisijas jauda, W/Hz.

Pēc (2.20.) formulas izriet, ka minimālā NF vērtība var būt panākta pie $n_{sp}/\eta = 1$ vai pie $G = 1$ un ir vienāda ar 1 jeb 0 dB. Tas nozīmē, ka pastiprinātājs ienes minimālo troksni, kas ir vienāds ar troksni ideālajam pastiprinātājam. Ievērojot to, ka eksistē divi polarizācijas virzieni (divas modas), praksē NF ir uzreiz jāpalielina par 2 jeb 3 dB [99].

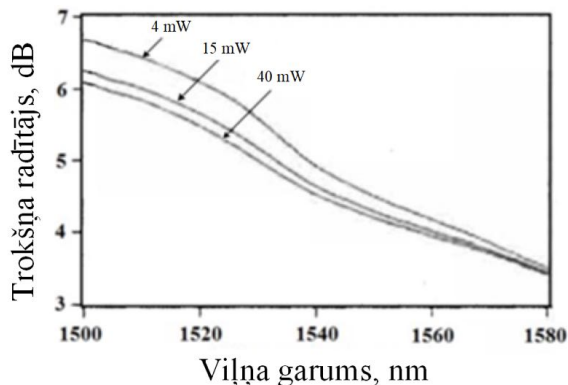
Trokšņu rādītājs var būt izteikts arī ar spontānas emisijas koeficienta (n_{sp}) palīdzību [17]:

$$NF = 2 \cdot n_{sp}, \quad (2.21.)$$

Savukārt, spontānas emisijas koeficients atkarīgs no erbijas jonu enerģētisko līmeņu (N_1 un N_2) relatīvām populācijām un var būt izteikts [17]:

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}, \quad (2.22.)$$

Erbija jonu enerģētisko līmeņu (N_1 un N_2) relatīvas populācijas mainās gar visu EDF šķiedras garumu, un ir atkarīgas no pumpēšanas lāzera un ieejas signāla jaudas. Rezultātā trokšņu rādītājs ir atkarīgs gan no populācijas inversijas līmeņa (kas, savukārt, ir atkarīgs no EDF šķiedras erbija jonu koncentrācijas un garuma, pumpēšanas lāzera viļņa garuma un jaudas), gan ieejas signāla jaudas un viļņa garuma tāpat kā pastiprinājums [17]. Trokšņu rādītāja atkarība no ieejas signāla viļņa garuma, pie dažādam pumpēšanas lāzera jaudām ir parādīta 2.22. attēlā.



2.22. att. Trokšņu rādītāja atkarība no ieejas signāla viļņa garuma, pie dažādām pumpēšanas lāzera jaudām (ieejas signāla jauda : -40 dBm; EDF garums: 14 m; pumpējošā starojuma viļņa garums: 1480 nm) [73].

2.1.9. Apkopojums par EDFA pastiprinātāja darbību un pielietojumu ātrgaitas ŠOPS sistēmās

Saistībā ar arvien lielāko pieprasījumu pēc datu pārraides apjoma palielināšanas, tiek izmantotas tehnoloģijas, kas ļauj palielināt datu pārraides apjomu, izmantojot lielāku kanālu skaitu vienā OŠ līnijā. Eksistē vairākas šādas tehnoloģijas, no kurām visstraujāk attīstās un visvairāk izmantota ir WDM. Galvenā WDM sistēmu ideja ir piešķirt katra kanāla piederošai bitu plūsmai savu konkrēto viļņa garumu un tādā veidā realizēt vienlaicīgu vairāku kanālu pārraidi pa vienu OŠ līniju. Pirmajās WDM sistēmās kanālu skaits bija ierobežots ar dārgo optisko reģeneratoru pielietošanu vājinājuma kompensēšanai, kur pastāvēja nepieciešamība pēc visu pārraidāmo kanālu signālu demultipleksēšanas, detektēšanas, apstrādes un reģenerēšanas. Tieši EDFA pastiprinātāju parādīšanās ļāva attīstīties WDM sistēmām ar lielāku kanālu skaitu un to blīvāko kanālu izvietojumu, jo tie ļāva vienlaicīgi pastiprināt vairāku kanālu signālus bez nepieciešamības tos pārveidot elektriskajā apgabalā.

EDFA pastiprinātāja darbības princips balstās uz stimulētās emisijas izraisīšanas EDF šķiedrā ar noteikto sasniegto populācijas inversijas līmeni. EDFA pastiprinātāji neatzīst un nepārveido optisko signālu, bet vienkārši palielina to jaudu uzreiz visā darbības diapazonā no 1525 līdz 1560 nm. Tāpēc, atšķirībā no reģeneratoriem, tie praktiski nav atkarīgi no bitu pārraides ātruma un protokola, un spēj pastiprināt optisko signālu jebkurā formātā. Populācijas inversijas sasniegšanai pastiprinājuma vidē tiek izmantoti optiskie pumpējošie avoti ar noteiktu izejas starojuma centrālo viļņa garumu, kuru nosaka erbija jonu īpašības – 980 nm un 1480 nm.

980 nm pumpēšanai ir raksturīgs trīs enerģētisko līmeņu modelis, bet 1480 nm pumpēšanai - divu enerģētisko līmeņu modelis.

Kad EDFA ieejā nav signāla vai tas jauda nav pietiekama lai pilnībā izmantotu augstāko populācijas inversijas līmeni, daļa no erbija jonu elektroniem var spontāni pāriet uz zemāko enerģētisko līmeni izstarojot fotonus ar nejaušo fāzi un virzienu. Šo procesu sauc par spontānu emisiju, kuras spektrs atbilst EDFA pastiprinājuma spektram. Savukārt, spontānas emisijas fotoni var rādīt sekundāros fotonus un notiek spontānās emisijas pastiprināšana (ASE). Šāda ASE ir galvenais EDFA pastiprinātāja rādīto trokšņa avots.

EDFA pastiprinātāji pēc pielietojuma veida tiek klasificēti trīs grupās: jaudas pastiprinātāji, līnijas pastiprinātāji un priekšpastiprinātāji. Katram pielietojuma veidam ir raksturīgas savas prasības, pēc kurām tiek piemeklēti pastiprinātāja parametri. Eksistē EDFA pastiprinātāji ar tradicionālo pumpēšanu, kur pumpējošais starojuma avots atrodas viena modulī ar pastiprinājuma vidi, un ar attālināto pumpēšanu, kad pumpējošā starojuma avots ir novietots vairāku kilometru tālu no paša pastiprinātāja. Tiek izmantoti arī EDFA pastiprinātāju veidi, kuros tiek realizēti vairāki pastiprinājuma posmi - daudzpakāpju EDFA.

Vissvarīgākie EDFA pastiprinātāju raksturojošie parametri ir pastiprinājuma koeficients, pastiprinājuma spektra vienmērīgums, pastiprinājuma joslas platums, trokšņu rādītājs, ka arī pastiprinātāja piesātinājums un enerģijas pārvades efektivitāte no ierosinošā avota uz signālu.

Pastiprinājuma koeficientu raksturo attiecību starp optiskā signāla jaudām EDFA ieejā un izejā. Tipiskā EDFA rādīta pastiprinājuma vērtības ir ap 30 dB, bet laboratorijas apstākļos tika arī iegūts 54 dB liels pastiprinājums.

EDFA pastiprinājuma spektram piemīt stipra viļņa garuma atkarība, un pastiprinājuma spektra slīpums ir tiešā veidā atkarīgs no sasniegtā populācijas inversijas līmeņa. Sistēmās ar vairākiem pastiprinājuma iecirkņiem ir ļoti svarīgi samazināt pastiprinājuma slīpumu līdz minimumam, jo pretējā gadījumā augsta pastiprinājuma atšķirība var izraisīt starpkanālu šķērsrunu un stipri pasliktināt signālu kvalitāti kanālos ar mazāku jaudu uztvērējā ieejā. Tādējādi, parādās nepieciešamība pēc EDFA rādīta pastiprinājuma spektra izlīdzināšanas.

EDFA pastiprinājuma spektra izlīdzināšanai pielieto dažādas metodes: temperatūras kontrole, pastiprinājumu izlīdzinošo filtru pielietošana, selektīvā WDM kanālu vājināšana, citu piemaisījumu izmantošana EDF šķiedra, kā arī daudzpakāpju EDFA pielietošana.

Pastiprinājuma spektra joslas platums tradicionālai EDFA konfigurācijai (uz silīcija šķiedras bāzes ar alumīnija piemaisījumiem) ir ap 35 nm (1530-1565 nm). Priekš WDM sakaru sistēmām šis parametrs ir īpaši svarīgs, jo ietekmē iespējamo datu pārraides kanālu skaitu un līdz ar to kopējo OŠ informācijas ietilpību. Eksistē arī tādi EDFA, kuri spēj pastiprināt signālu L- un S- optiskajās joslās.

Viens no svarīgākajiem EDFA parametriem ir trokšņu rādītājs, kas nosaka EDFA kvalitāti un raksturo optiskā signāla OSNR pasliktinājumu tam izejot caur EDFA. Galvenais EDFA trokšņa avots ir ASE. Ideālā EDFA pastiprinātāja NF vērtība ir 3 dB, bet tipiskiem komerciāli pieejamiem EDFA pastiprinātājiem tā ir ap 5-7 dB liela.

Raksturojot konkrēta EDFA realizāciju ir būtiski noteikt apskatītā pastiprinātāja piesātinājuma jaudu. Par piesātinājuma jaudu tiek uzskatīta tāda jaudas vērtība pastiprinātāja izejā, pie kuras pastiprinājums ir divreiz mazāks nekā maksimāli iespējamais pastiprinājums. Savukārt, pastiprinājuma piesātinājuma punkts ir sasniedzamās izejas jaudas vērtības maksimums, kad palielinoties optiskā signāla jaudai pastiprinātāja ieejā, signāla jauda pastiprinātāja izejā vairs nepieaug. Pie lielas ieejas optiskā signāla jaudas (virs piesātinājuma

vērtības), visi nesēji pastiprinājuma vidē ir piesātinājuma stāvoklī, līdz ar to nav iespējama vēl lielāka gaismas enerģijas pārnese. EDFA pastiprinātāji bieži strādā tuvu piesātinājuma punktam, tāpēc ka tāda veidā var būt panāktas mazākas ASE trokšņa vērtības, jo pēc iespējas vairāk nesēji tiek izmantoti tieši signāla pastiprināšanai, nevis spontānās emisijas radīšanai.

Vēl viens svarīgs EDFA raksturojošais parametrs ir enerģijas pārvades efektivitāte, kura nosaka to enerģijas daļu, kas pāriet no pumpējošā starojuma uz pastiprināmo signālu, proti tas raksturo to pumpējošā starojuma enerģijas daļu, kas tiek patērēta pastiprinājuma rādīšanai.

Enerģijas pārvades efektivitāte no ierosinošā avota uz signālu EDFA gadījumā ir lielāka par 50%.

2.2. Ramana pastiprinātāja pielietojums un novērtējums

Viens no Ramana efekta pielietojumiem ir Ramana optiskais pastiprinātājs. Eksistē diskrētie un sadalītie Ramana pastiprinātāji. Diskrētie pastiprinātāji ir atsevišķs modulis, kas veic pastiprināšanu kādā līnijas posma beigās. Sadalītiem pastiprinātājiem pastiprināšana notiek nevis atsevišķā modulī ar uztītu šķiedru, bet pašā līnijā. Pumpējošo avotu sadalītos pastiprinātājos izvieto vai nu līnijas posma beigās, vai līnijas sākumā, vai arī abos galos. Parasti ir lietots sadalītais Ramana pastiprinātājs ar pumpējošo avotu līnijas posma beigās, t.i. signāla izplatīšanās un pumpēšana notiek pretējos virzienos. Šī risinājuma priekšrocības ir uzsvērtas zemāk [32, 100].

Kad optiskais starojums tiek izkliedēts kādā optiski caurspīdīgā vidē, lielākā šī izkliedētā starojuma daļa saglabā savu sākotnējo frekvenci. To sauc par Releja izkliedi, bet daļai no izkliedētā starojuma frekvence ir atšķirīga no sākotnējās frekvences [101]. Šāds process ir novērojams trīs iemeslu dēļ:

- Daļa no krītošo fononu enerģijas var tikt absorbēta, lai izraisītu molekulu vibrācijas, kas savukārt radīs akustiskos fononus. Tas izraisa izkliedēto starojumu, kura frekvenču nobīde ir salīdzinoši maza. Šādu procesu sauc par Briljuēna izkliedi.

- Daļa no krītošo fononu enerģijas tiek atdota molekulai, izraisot molekulu vibrācijas. Enerģijas pāreja molekulu vibrācijas stāvokļa ierosināšanai izraisa izkliedētā starojuma enerģijas samazinājumu. Tātad arī šī starojuma frekvence būs mazāka. Iegūtās spektrālās komponentes tiek sauktas par Ramana-Stoksa komponentēm.

- Ja fotons nezaudē enerģiju pēc mijiedarbes ar molekulu, kas jau ir vibrācijas režīmā, šī molekula var relaksēties uz vienu no zemākajiem enerģētiskajiem līmeņiem un tādā veidā zaudēt enerģiju. Šādā gadījumā fotons iegūst šīs molekulas zaudēto enerģiju. Tas noved pie fotona enerģijas un frekvences palielinājuma. Iegūtās spektrālās komponentes tiek sauktas par Ramana anti-Stoksa komponentēm [101].

Tā kā varbūtība tam, ka molekula atradīsies vibrācijas stāvoklī ir mazāka, Stoksa emisijas intensitāte ir daudz lielāka par anti-Stoksa emisiju. Frekvenču nobīdes Stoksa un anti-Stoksa komponentēm ir vienādas, un tās ir atkarīgas no vides, kurā notiek izkļiedes process [42,101].

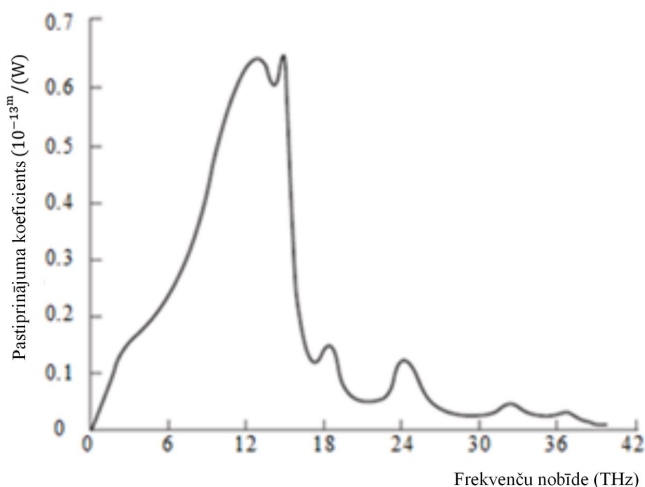
Kad jaudīgs optiskais starojums izplatās pa optisko šķiedru, ir novērojama Ramana izkliedētā gaisma optiskās šķiedras izejā. To izskaidro tāda parādība kā spontānā Ramana izkļiede. Šī izkliedētā starojuma jauda ir ļoti maza, salīdzinot ar kopējā starojuma jaudu. Ja papildus šim jaudīgajam starojumam (pumpējošajam starojumam) optiskajā šķiedrā izplatās arī vājš optiskais starojums (pastiprināmais signāls), kura frekvence ir frekvenču joslā, kur ir novērojama spontānā Ramana izkļiede, tad šis process tiks attiecināts jau uz stimulēto Ramana

izkliedi. Šajā gadījumā jaudīgs pumpējošais starojums un vājš signāls Ramana izkļiedes rezultātā tiek koherenti apvienoti vienā sistēmā, kur līdzīgi stimulētās emisijas parādībai vājš optiskais signāls izraisa jaunu fotonu radīšanu ar tādu pašu frekvenci. Tātad stimulētās Ramana izkļiedes (SRS) rezultātā optiskais signāls tiks koherenti pastiprināts [101, 62].

Tieši šī parādība tiek izmantota Ramana pastiprinātājos. Ramana pastiprinātāji ir viena no pirmajām plaši izmantotajām ierīcēm, kas ir bāzēta uz optisko šķiedru nelinearitāti [62].

Pastiprinājuma spektra maksimums ir nobīdīts attiecībā pret pumpējošo starojumu par 13,2 THz, kā tas ir parādīts att. 2.23. Šis lielums ir raksturīgs tieši šķiedrām, kas izgatavotas no silīcija dioksīda un ir vienāds visā optisko šķiedru caurspīdības viļņa garumu diapazonā, no 0,3 līdz 2 μm [102].

Efektīva pastiprināšana, izmantojot Ramana pastiprinātājus, var tikt panākta tikai tad, ja pumpējošā starojuma vērtība pārsniedz Ramana sliekšņa vērtību. Ramana sliekšņa vērtība ir vienāda ar nepieciešamo pumpējošā starojuma jaudu viļņvada ieejā, lai ierosinātā Stoksa viļņa jauda būtu vienāda ar pumpējošo jaudu viļņvada izejā [103], proti tā ir nepieciešamā jauda, lai izraisītu efektīvu enerģijas pāreju uz Stoksa vilni.



2.23. att. Ramana pastiprinājuma koeficienta vienmodu SiO₂ šķiedrā spektrālā atkarība no frekvenču nobīdes starp pumpējošo avotu un signālu [102].

Eksistē gan diskrēti (no ang. val — lumped Raman amplifier — LRA), gan sadalīti (no ang. val. — distributed Raman amplifier — DRA) Ramana pastiprinātāji. Diskrēto Ramana pastiprinātāju gadījumā kā pastiprinājuma vide tiek izmantota 1 vai 2 kilometrus gara dispersiju kompensējošā šķiedra (no ang. val. — dispersion compensating fiber — DCF), vai paaugstinātas nelinearitātes šķiedra (no ang. val. high non-linearity fiber — HNLF), lai samazinātu nepieciešamo signāla intensitātes līmeni SRS izraisīšanai. Šādu šķiedru efektīvie šķērsgriezuma laukumi ir mazāki par standarta vienmodas šķiedras efektīvo šķērsgriezuma laukumu, kas būtiski samazina nepieciešamās optiskās jaudas līmeni nelineāro efektu ierosināšanai, jo gaismas intensitāte šķiedrā ir augstāka. Izgatavojot HNLF šķiedras parasti pielieto arī speciālus piemaisījumus, piemēram, šķiedras serdenis tiek leģēts ar Germānija joniem, lai palielinātu šķiedras nelinearitātes koeficientu [104, 105]. Sadalītie Ramana

pastiprinātāji ir optiskie pastiprinātāji, kuros kā pastiprinājuma vide tiek pielietota tā pati šķiedra, kura ir izmantota signālu pārraidei.

Pastiprinājuma efektivitāte Ramana pastiprinātājiem pie zemiem ieejas signāla jaudas līmeņiem ir mazāka, un tā pieaug, palielinoties signāla jaudai. Tas ir tādēļ, ka stimulētā Ramana izkliede ir koherents enerģijas pārejas process. Līdz ar to salīdzinoši jaudīgs signāls tiks pastiprināts efektīvāk nekā troksnis, kura jaudas līmenis ir daudz zemāks [101]. Šāda koherentā pastiprināšana var novest pie signāla — trokšņa attiecības uzlabošanās pastiprinātāja izejā un pie negatīvām ienesto trokšņu rādītāja vērtībām, kas norāda uz to, ka signāls tiek pastiprināts efektīvāk nekā troksnis, un tā jaudas pieaugums ir lielāks [106]. Tomēr šāda Ramana pastiprinājuma nodrošināšanai zemu ieejas signālu jaudas līmeņu gadījumā rodas nepieciešamība pēc jaudīgiem pumpējošā starojuma avotiem, kuru optiskā starojuma jauda ir tuvu (vai pārsniedz) 1W [101, 103].

Ramana pastiprinātājos, tāpat kā EDFA gadījumā, var tikt izmantotas tieši, pretēji un abpusēji vērsta pumpēšanas shēmas. Ramana izkliedes fenomens ir ārkārtīgi ātrs process, kas norisinās dažu femto sekunžu laikā. Šāda ātrdarbība var sekmēt pumpējošā starojuma jaudas fluktuāciju pārnēsī uz pastiprināmo signālu. Lai izvairītos no šādas nevēlamas ietekmes, var izmantot pretēji vērstu pumpējošo starojumu. Pretēji vērsta pumpējošā starojuma gadījumā pārraidāmais signāls un jaudīgs pumpējošais starojums izplatās pretējos virzienos. Tātad mijiedarbība starp katru konkrēto pārraidāmo bitu un katru pumpējošā starojuma fluktuāciju ir daudz īsāka nekā tieši vērsta pumpējošā starojuma gadījumā. Arī visi blakusesošie biti mijiedarbojas ar šo pumpējošā starojuma izmaiņu, tātad pumpējošā starojuma fluktuāciju radītās pastiprinājuma izmaiņas izlīdzinās [102].

Pateicoties labākai pastiprināšanas efektivitātei pie augstākiem signāla intensitātes līmeņiem, tieši vērsta pumpēšana spēj nodrošināt lielāku optiskā signāla trokšņu attiecību un zemākas ienesto trokšņu rādītāja vērtības, jo lielākā daļa no Ramana pastiprinājuma ir koncentrēta pie pastiprinājuma vides ieejas, kur signāla līmenis ir vislielākais. Tomēr iepriekš aprakstīto pumpējošā starojuma radīto pastiprinājuma fluktuāciju dēļ, parasti tiek izmantota pretēji vērsta pumpēšana [102].

Viens no galvenajiem Ramana pastiprinātāju veiktspējas ierobežojošajiem faktoriem ir dubultā Releja izkliede, kuras dēļ maza gaismas daļa vienmēr tiek izkliedēta atpakaļvirzienā. Parasti gaismas daļa, kura tiek izkliedēta pretēji optiskā signāla izplatīšanās virzienam, ir niecīga, tomēr sistēmās ar Ramana pastiprinātājiem tā var tikt pastiprināta. Atpakaļ vērsta starojums dubultās Releja izkliedes rezultātā parādīsies arī tiešajā virzienā, un no pastiprināmā signāla puses tas tiek interpretēts kā troksnis. Šīs Releja izkliedes radītais troksnis tiek pastiprināts kopā ar signālu un rezultātā var būtiski iespaidot sistēmas darbību [42]. Diskrēto pastiprinātāju gadījumā, kur šķiedras garums sasniedz vien dažus kilometrus, Releja izkliedes ietekme ir lielāka, jo Germānija (vai cita retzemju elementa) koncentrācija, ar kuru ir legēts HNLF šķiedras serdenis, ir vismaz 10 reizes lielāka nekā standarta vienmodas šķiedrām, un līdz ar to lielāka optiskā starojuma daļa tiek izkliedēta atpakaļvirzienā [102].

Vēl viens faktors, kas var būtiski iespaidot Ramana pastiprinātāju darbību, ir pastiprinājuma atkarība no pastiprināmā signāla polarizācijas. Vislielākā pastiprinājuma samazināšanās parādās, kad pumpējošais starojums un pastiprināmais starojums ir ortogonāli polarizēti [107]. Šīs problēmas risināšanai mēdz izmantot divus ortogonāli polarizētus pumpējošos lāzerus.

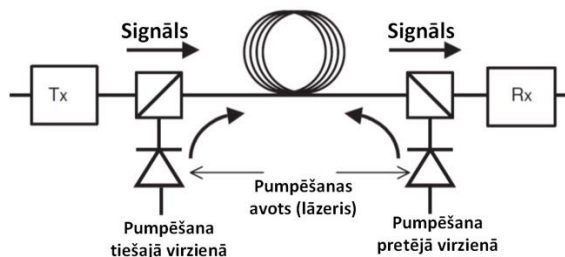
Ramana pastiprinātāji var pastiprināt jebkuru no gaismas viļņa garumiem, kas tiek izmantoti signālu pārraidē, attiecīgi izvēloties pumpējošā starojuma viļņa garumu. Ramana

pastiprinājuma spektru var izmainīt, mainot pumpējošo starojumu jaudas un viļņa garumus. Līdz ar to, izvēloties vairākus pumpēšanas avotus, var ievērojami paplašināt pastiprinājuma spektru. Bet šādos gadījumos Ramana izkliedes inducētā enerģijas pāreja tiek novērota ne tikai starp pumpējošo starojumu un signālu, bet arī starp pumpējošajiem starojumiem, kas savukārt būtiski iespaido pastiprinājuma spektru. Šī iemesla dēļ konfigurējot Ramana pastiprinātājus ar vairākiem pumpējošajiem starojumiem jau sākotnēji ir jāizvēlas pumpējošo starojumu jaudas tā, lai pastiprinātāja izejā iegūtu līdzenu pastiprinājuma spektru [101].

Gan sadalīto, gan diskrēto Ramana pastiprinātāju gadījumos galvenais trūkums ir nepieciešamība pēc dārgiem jaudīgiem pumpēšanas avotiem, jo Ramana pastiprinātājiem ir zema pastiprināšanas efektivitāte. Jaudīgus pumpējošā starojuma avotus ir daudz sarežģītāk izgatavot un atdzēsēt, tāpēc tie ir ļoti dārgi, salīdzinot ar EDFA izmantotajiem pumpējošajiem lāzeriem [108].

2.2.1. Sadalītie Ramana pastiprinātāji

Atšķirībā no diskrētiem pastiprinātājiem, sadalīto pastiprinātāju pielietojumā zudumi tiek kompensēti signālam izplatoties līnijā. Tas, salīdzinājumā ar diskrētiem pastiprinātājiem, ierobežo kopējo vājinājumu līnijā, ko signāls iegūst izplatoties vairāku desmitu kilometru lielos attālumos, tādējādi uzlabojot signāla un trokšņa attiecību. Pie tam nav nepieciešama atsevišķa šķiedra līnijas posma beigās, jo pastiprināšanās vide ir pati līnija. Shematiski sadalīts pastiprinātājs ar pumpēšanu abos virzienos ir parādīts attēlā 2.24.

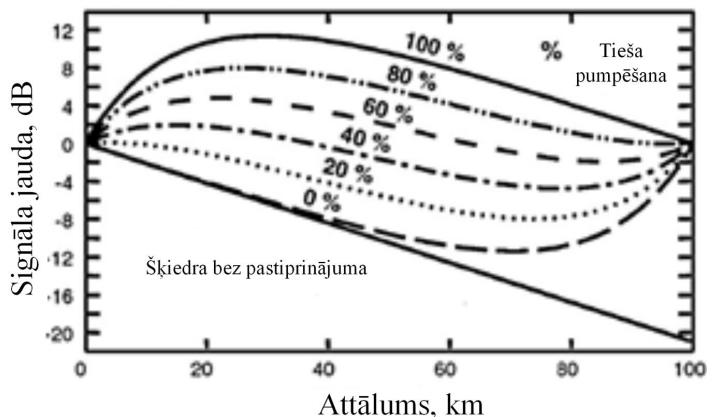


2.24. att. Sadalīts Ramana pastiprinātājs ar pumpēšanu abos virzienos [32].

Diskrēta Ramana pastiprinātāja gadījumā, shēma ir līdzīga 2.25. attēlā uzzīmētai. Tikai pumpēšanas avoti un savienotāji tiek aizstāti ar diskrētu moduli, iekš kura ir uzfīta optiskā šķiedra [28, 32].

Sadalītos pastiprinātājos pumpēšana var notikt tiešā virzienā, pretējā virzienā vai abos virzienos. Ja pumpēšana notiek abos virzienos, pumpējošo avotu jauda un līdz ar to arī iegūtais signāla pastiprinājums var būt dažāds katrā no virzieniem [28, 32].

Attēlā 2.25 ir parādīts kā mainās signāla jauda, signālam izplatoties līnijā, atkarībā no tā, cik lielu pastiprinājumu dod pumpēšana tiešā virzienā attiecībā pret pretējo virzienu. Kopējais līnijas garums ir 100 km. Ar taisno līniju ir signāla jauda pasīvā līnijā, t.i. izplatoties šķiedrā bez pastiprinājuma. Optiskā signāla un trokšņa attiecība OSNR ir vislielākā, ja pumpēšana ir tiešā virzienā. Tas ir izskaidrojams ar to, ka troksnis, kas parādās pumpēšanas avota ieejā, izplatās kopā ar signālu visā šķiedra garumā un ir stipri novājināts zudumu dēļ. Savukārt, ja pumpēšana notiek pretējā virzienā, tad troksnis uzklājās signālam, izplatoties tikai līnijas daļā.

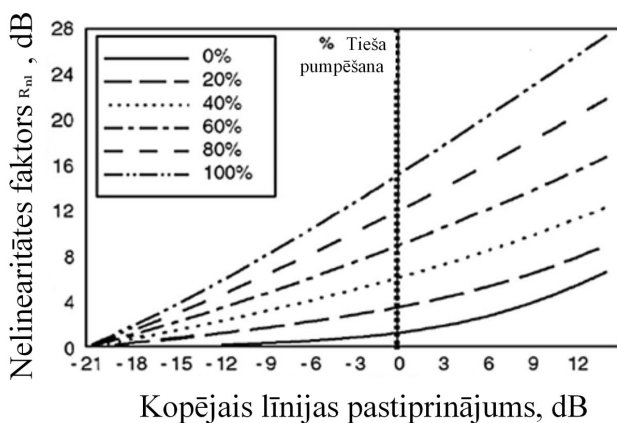


2.25. att. Signāla jauda līnijā [32].

No attēla 2.25. ir redzams, ka signāla līmenis līnijas sākumā pieaug jo vairāk, jo lielākā pumpēšanas daļā ir pielikta tiešā virzienā. Liels signāla līmenis noved pie nelineāriem efektiem, tāpēc kaut arī tiešai pumpēšanai ir lielāka signāla un trokšņa attiecība, priekšroka, būvējot optiskās pārraides sistēmas, ir dota pumpēšanai pretējā virzienā [32, 36, 38, 109]. Gadījumā, ja pielietota tiešā pumpēšana, ir novērojami nelineārie efekti, kas ietekmē sistēmas darbību un ir atkarīgi no pieliktās jaudas. Viens no nelineāriem efektiem ir fāzes nobīde φ_{NL} , kas rodas fāzes pašmodulācijas SPM dēļ. Fāzes nobīdes aprakstam ir izveidota sekojošā fāžu attiecība R_{NL} [28, 32]:

$$R_{NL} = \frac{\varphi_{NL} \text{ ar izslēgtu pumpēšanu}}{\varphi_{NL} \text{ ar ieslēgtu pumpēšanu}}, \quad (2.23.)$$

Koeficienta R_{NL} atkarība no kopējā līnijas pastiprinājuma 100 km garai līnijai ir parādīta attēlā 2.26. Dažādas līknes norāda, cik liela pumpēšanas daļa no kopējā pastiprinājuma ir pielikta tiešā virzienā un variē no 0 līdz 100% [28, 32].



2.26. att. R_{NL} atkarība no kopējā līnijas pastiprinājuma 100 km garai līnijai [32].

Attēlā 2.26. vertikālā līnija ir pie 0 dB kopējā līnijas pastiprinājuma. Tas nozīmē, ka signāls līnijā tiek pastiprināts kamēr tas pilnībā neatjauno sākotnējo jaudu, t.i. jaudu ar kuru tas tika ievadīts 100 km garas līnijas sākumā. No 2.26. attēla ir redzams arī tas, ka vismazākais nelinearitātes faktors ir pie pumpēšanas tikai signāla izplatīšanās pretējā virzienā. Atšķirība starp pumpēšanu tikai tiešā virzienā un tikai pretējā virzienā pie 0 dB kopējā līnijas pastiprinājuma sastāda apmēram 10 dB [32].

Sadalīto pastiprinātāju gadījumā par pastiprināšanās vidi kalpo pati līnija, tādēļ sadalītiem pastiprinātājiem šķiedras garums ir lielāks par 40 km. Diskrētiem pastiprinātājiem šķiedras garums ir līdz 5 km [110].

2.2.2. Pastiprināšana daudzkanālu sistēmās

Daudzkanālu sistēmās ir nepieciešams pastiprināt vairākus kanālus vienlaicīgi visai plašā spektrā. Atkarībā no kanālu skaita, mūsdienu WDM sistēmās kanāli ir izvietoti 70–80 un vairāk nanometru platā diapazonā. Pie tam pastiprinājumam ir jābūt vienmērīgam visiem kanāliem. Pastiprinājumu tik plašā spektrā var nodrošināt Ramana pastiprinātāji [28].

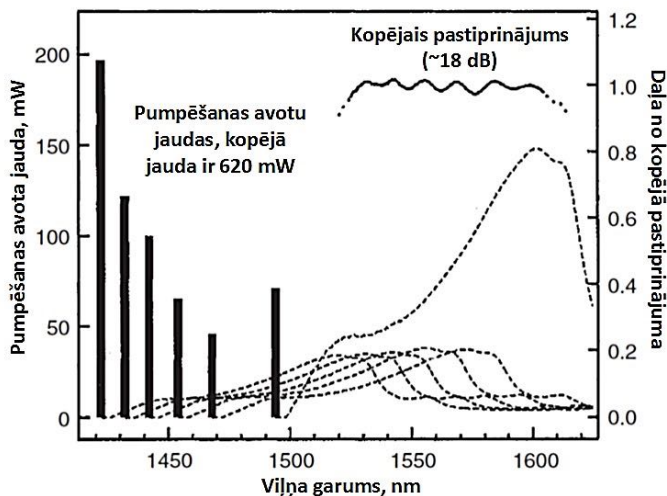
Daudzkanālu sistēmās izmanto kombinētos pastiprinātājus, kas sastāv no EDFA diskretā moduļa un sadalītā Ramana pastiprinātāja, kuram pumpēšanas avota vilnis izplatās pretēji signāla izplatīšanās virzienam. Ir iespējams iegūt pastiprinājumu 80 un vairāk nanometru plašā spektrā, izmantojot tikai Ramana pastiprinātājus, šādā gadījumā var izmantot visu līniju kā pastiprināšanas vidi, sadalot to posmos ar garumu lielāku par 40 km līdz pat 100 km, vai arī posmos, kas sastāv no dispersijas kompensējošās šķiedras ar garumu lielāku par 5 km. DCF šķiedrām ir lielāka pastiprinājuma efektivitāte, diskrētos pastiprinātājos tās vienlaikus kalpo par aktīvo vielu un kompensē hromatisko dispersiju. Kaut arī Ramana pastiprinājumam ir plats spektrs, tas ir nelīdzens un nepietiekami plats daudzu kanālu pastiprināšanai. Daudzkanālu sistēmās var izmantot Ramana pastiprināšanas īpašību, ka pastiprināšana ir iespējama pie jebkuras frekvences, ja izmanto pumpēšanas avotu ar atbilstošu frekvences nobīdi. Ievadot vairākus pumpēšanas avotus ar dažādiem viļņa garumiem, panāk pastiprinājuma spektru pārklāšanos. Šī pārklāšanās izveido apmēram gludu pastiprinājumu plašā diapazonā [32, 111, 112].

Katram pumpēšanas avotam ir nepieciešams izvēlēties viļņa garumu un jaudu, lai visi kanāli būtu apmēram vienlīdzīgi pastiprināti. Attēlā 2.27. ir parādīts daudzkanālu pastiprināšanas piemērs, kurā ir iegūts 18 dB liels pastiprinājums 80 nm platā frekvenču joslā. Pumpējošie avoti atrodas 1420–1500 nm diapazonā un pastiprina zemākas frekvences. Iegūtā summārā pastiprinājuma līkne ir tuva taisnei visā daudzkanālu sistēmas darba joslā. Pumpējošo avotu jaudas ir dažādas un ir diapazonā no 40 līdz 200 mW. Lielāka jauda ir vajadzīga pumpējošiem viļņiem, kuri atrodas pie mazākiem viļņu garumiem, jo daļa no enerģijas tiek pārpumpēta augstāko kāršu Stoksa komponentēs. Attēlā 2.27. vislielākā jauda ir pumpējošam vilnim ar mazāku viļņa garumu, bet šīs vilnis nedod vislielāko pastiprinājumu, jo tikai daļa no tā enerģijas ir izmantota pirmās kārtas Stoksa komponentei, pārējā enerģija pastiprina citas komponentes, kas atrodas pie augstākiem viļņa garumiem [29, 32, 113, 114].

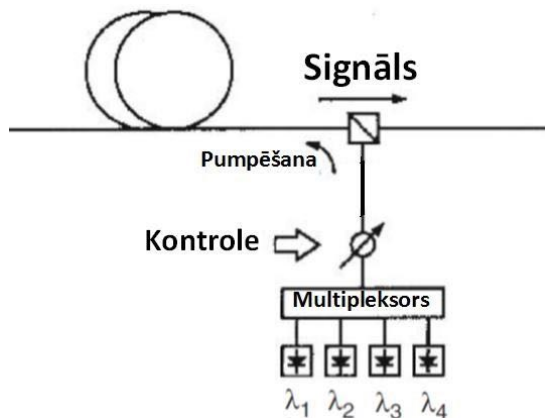
Lai iegūtu vienmērīgu pastiprināšanas spektru, ir jāpiemeklē pumpējošo avotu viļņa garumiem un to jaudas. Pilnībā teorētiski to izdarīt nav iespējams, jo Ramana izkliede ir nelineārs process un katrs no pumpēšanas avotiem ietekmēs citu avotu darbību. Tāpēc viens no risinājumiem ir pielietot skaitļošanas resursus, kas pēc algoritma piemeklēs optimālas

pumpēšanas avotu jaudas. Šāds risinājums ir redzams 2.28. attēlā. Attēlā ir parādīti 4 pumpēšanas avoti ar dažādiem viļņa garumiem, kas tiek multipleksēti un to jauda kontrolēta [28, 32].

Ramana pastiprināšana ir atkarīga no pumpējošā viļņa un signāla polarizācijas. Ja polarizācijas ir pretējas, tad pastiprināšana ir minimāla. Signālam izplatoties optiskajā šķiedrā, tā polarizācija mainās un ir gadījuma rakstura. Tāpēc nav jēgas lietot polarizētu gaismu pumpējošām vilnīm un pumpējošie viļņi pastiprinātājos ir nepolarizēti [32, 33, 34].



2.27. att. Daudzkanālu Ramana pastiprinātāja spektrs [32].

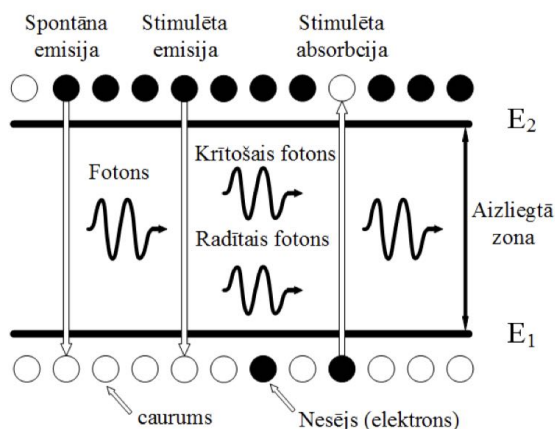


2.28. att. Daudzkanālu Ramana pastiprinātājs ar pastiprinājuma kontroli [28].

2.3. Pusvadītāju optisko pastiprinātāju (SOA) pielietojums un novērtējums

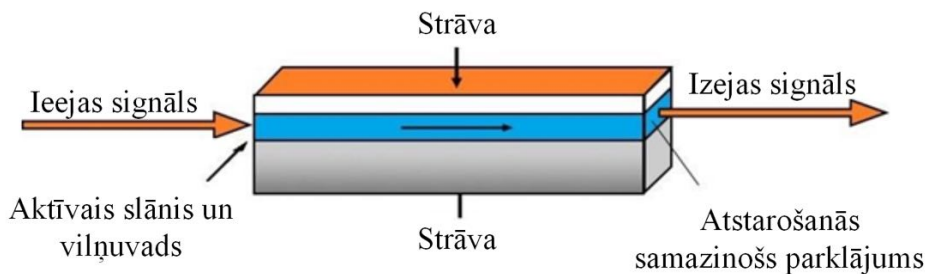
Pusvadītāju optiskais pastiprinātājs ir opto-elektriskā ierīce, kura pie noteiktiem darba apstākļiem var pastiprināt gaismu, kas izplatās caur to. Šajā ierīcē tiek izmantota stimulētās emisijas parādība optiskā signāla pastiprinājuma nodrošināšanai. Pumpēšanas strāva ir ārējā

enerģijas plūsma, kas nodrošina populācijas inversijas sasniegšanu. Šīs strāvas nesēji ieņem stāvokli aktīvā slāņa vadītspējas zonā (CB), atstājot “caurumus” valentajā zonā (VB) [115]. Pusvadītāju materiālos ir iespējami trīs pārejas mehānismi: spontāna emisija, stimulēta emisija un stimulēta absorbcija. Visi trīs mehānismi ir shematiski parādīti att. 2.29. Stimulētās absorbcijas rezultātā pie zema populācijas inversijas līmeņa krītošais fotons var ierosināt elektrona pāreju no valentās zonas uz vadāmības zonu, proti ienākošais signāls tiks novājināts vai pilnībā absorbēts. Bet, ja pumpējošā strāva ir pietiekama, lai sasniegtu lielāku nesēju populāciju vadāmības zonā nekā valentajā zonā, tad stimulētās emisijas varbūtība ir lielāka par stimulētas absorbcijas varbūtību, un aktīvajā slānī notiks ienākošā signāla pastiprināšana. Enerģijas līmeņa spontānais dzīves laiks pusvadītāju pastiprinātājiem ir robežās no dažām nanosekundēm līdz pat dažiem simtiem pikosekunžu [115]. Tādēļ vienmēr pastāv varbūtība, ka elektrons vadāmības zonā ierosinātā stāvokļa dzīveslaika garumā tā arī nenonāks saskarsmē ar pastiprināmā signāla fotonu, un, līdz ar to, spontānās emisijas rezultātā radīs fotonu ar nejašu izplatīšanās virzienu, viļņa garumu un fāzi. Šī iemesla dēļ signālā parādās liels pastiprinātāja radīto trokšņu daudzums. Šis aditīvais troksnis ir pastiprināšanas procesa nevēlama sastāvdaļa, bet no tā parādīšanās nevar pilnībā izvairīties [42]. Šie spontāni ģenerētie fotoni ne tikai rada troksni plašā frekvenču diapazonā, bet arī samazina populācijas inversijas līmeni, kas negatīvi ietekmē arī sasniedzamo pastiprinājuma līmeni. Spontānā emisija ir tiešas pastiprinājuma procesa sekas, tādējādi izveidot beztrokšņu pusvadītāju pastiprinātājus nav iespējams.



2.29. att. Spontānie un stimulētie procesi divlīmeņu sistēmā [115].

Šīs ierīces aktīvais slānis nodrošina ieejas signāla pastiprināšanu. SOA ieejā signāls tiek padots uz pastiprināšanas vidi caur fokusejošo plakni, kura ir nepieciešama tādēļ, ka optiskā starojuma diametrs, kas izplatās pa vienmodu optisko šķiedru, sasniedz $9.3 \mu\text{m}$, bet aktīva slāņa biezums ir dažas μm desmitdaļas [115]. Lai ierobežotu pastiprināmā signāla vilni aktīvajā slānī, tiek izmantots planārais viļņvads. Šādas ierobežošanas efektivitāte ir noteikta ar gaismas ierobežošanas faktoru, kura lielums tipiski ir zem 0.5 [115]. Tātad liela daļa no pastiprināmā signāla pāries apvākā, kura vājinājums ir daudz lielāks. Šī iemesla dēļ pastiprinātāja ienestie zudumi var sasniegt pat 10 dB robežu [115]. Pusvadītāju pastiprinātāja vienkāršota struktūra ir parādīta att. 2.30.

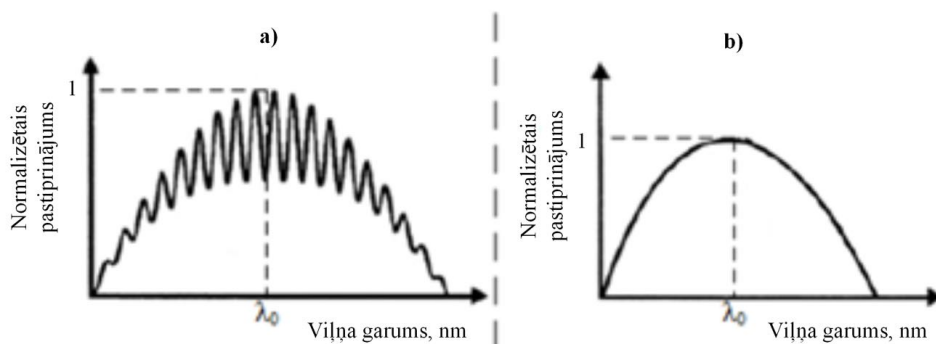


2.30. att. Schematiska pusvadītāju pastiprinātāja struktūra [115].

Vēl viens svarīgs pusvadītāju materiāla parametrs ir brīvo nesēju koncentrācija. Šis lielums nosaka pastiprinātāja spēju absorbēt pumpējošo strāvu, un līdz ar to tas būtiski ietekmē arī citu svarīgu parametru — materiāla pastiprinājuma koeficientu. Šis koeficients norāda uz pusvadītāju materiāla spēju pastiprināt signālu, kas izplatās caur to. Pusvadītāju pastiprinātājiem ir raksturīgs arī tāds parametrs, kā joslas paplašināšanas faktors, kurš atspoguļo pastiprinātāja radītos signāla fāzes kropļojumus, kuri saistīti ar pumpējošās strāvas fluktuācijām un pastiprinātāja dinamiku. Joslas paplašināšanas faktors ir atkarīgs no pastiprināmā signāla viļņa garuma, tāpēc SOA vienmēr ienes pastiprināmā signāla fāzes kropļojumus [115,116].

Pusvadītāju pastiprinātāji galvenokārt tiek klasificēti divos tipos: Fabri-Pero (FP-SOA) un skrejviļņa pastiprinātāji (no ang. val. — travelling wave — TW-SOA). Skrejviļņa pusvadītāju pastiprinātāji ir pastiprinātāji, kur atstarošanās ir niecīga aptuvenā signāla enerģijas daļa, kas tiek atstarota tam izplatoties caur TW-SOA ir 0,01 %. Var tikt izmantoti arī dažādi atstarošanas samazinoši apvalki, lai iegūtu pusvadītāju pastiprinātājus ar atstarošanās koeficientu mazāku par 10⁻⁵. TW-SOA ir mazāk jūtīgs pret pumpējošās strāvas fluktuācijām, temperatūras izmaiņām un pastiprināmā signāla polarizāciju nekā FP-SOA [115].

Fabri-Pero pusvadītāju pastiprinātāji ir pastiprinātāji, kuriem atstarojumi no ieejas un izejas galu plaknēm sasniedz aptuveni 30 % no pastiprināmā signāla enerģijas. Šāda atstarošanās var notikt vairākas reizes, kamēr signāls iziet caur optisko pastiprinātāju. Šī daudzkārtējā atstarošanās var izraisīt rezonansi pastiprinājuma vidē, kas iespaidos iegūto pastiprinājuma spektru un radīs tā periodiskas fluktuācijas. Šī parādība nav pieņemama WDM sakaru sistēmās, tāpēc šo atstarošanas ir nepieciešams maksimāli samazināt [115]. FP-SOA un TW-SOA pastiprinājuma spektru shematiskais attēlojums ir atspoguļots att. 2.31.



2.31. att. FP-SOA (a) un TW-SOA (b) pastiprinājuma spektru shematiskais attēlojums [115].

Eksistē arī trešais pusvadītāju pastiprinātāju tips: pusvadītāju pastiprinātāji ar daudzkvantu bedru struktūru (no ang. val — multiple quantum well — MQW). MQW pusvadītāju pastiprinātāju aktīvais slānis sastāv no vairāku plānu aktīvo slāņu masīva, kuri viens no otra ir atdalīti ar plāniem neaktīviem slāņiem. Šiem pastiprinātājiem ir plataka pastiprinājuma josla un lielāks pastiprinājuma piesātinājums, bet tiem ir viens būtisks trūkums: MQW-SOA ir liela polarizācijas jutība [115].

Pusvadītāju pastiprinātājiem ir raksturīgs liels ienesto ASE trokšņu daudzums. Tipiskās ienesto trokšņu rādītāja vērtības ir ap 7–12 dB, un tipiskais pastiprinājuma maksimums sasniedz 20–30 dB [115, 117, 118].

Pastiprinājuma spektrs pusvadītāju pastiprinātājiem ir ļoti plats, un parasti –3 dB līmeņa joslas platums ir ap 40–50 nm. MQW pusvadītāju pastiprinātāju gadījumos tas var sasniegt pat 60 nm [42, 115, 118]. SOA pastiprinājumam ir atkarība no ieejas signāla polarizācijas stāvokļa. Pastiprinājuma starpība ortogonāli polarizētiem signālam ir atšķirīga katrai konkrētai ierīcei, un ir atkarīga no viļņvada struktūras, kā arī no atstarošanas samazinošā apvalka un pastiprinājuma vides struktūras un to īpašībām (piemēram no rekombinācijas laika un caurumu populācijas nelīdzsvarotības faktora). Paņēmienu pusvadītāju pastiprinātāju izstrādāšanai ar polarizācijas neatkarīgu pastiprinājuma spektru galvenokārt ir saistīti ar noteikta šķērsriezuma aktīvā slāņa izveidošanu un aktīvā slāņa struktūras sablīvēšanu. Pastiprinātājiem ar polarizācijas neatkarīgu pastiprinājuma spektru zudumi, kuru cēlonis ir polarizācijas jutība, nepārsniedz 2 dB [115].

Papildus augstai polarizācijas jutībai, lieliem ienestajiem zudumiem un milzīgam ienesto ASE trokšņu daudzumam, pusvadītāju optiskajos pastiprinātājos vēl ir citi pastiprināmā signāla degradējošie faktori:

- Pastiprinājuma šķērsmodulācija (no ang. val. — cross gain modulation XGM) var izraisīt neprognozējamu dažādu kanālu nevienmērīgu pastiprināšanu (īsā enerģijas līmeņa spontānā dzīves laika dēļ SOA pastiprinājuma dinamika daudzkanālu WDM sistēmās ir ātrāka nekā EDFA optisko pastiprinātāju gadījumā). WDM sakaru sistēmās vairāku kanālu impulsu plūsmas tiek pastiprinātas vienlaikus. Impulss, kas pieder vienam kanālam, var iztukšot augstāka enerģijas līmeņa populāciju, kas rezultātā dos mazāku pastiprinājumu citu kanālu impulsiem. Šo procesu sauc par pastiprinājuma šķērsmodulāciju [42, 119];

- Pastiprinātāja ienestie signāla fāzes kropļojumi jeb nevienmērīga fāzes pārvades funkcija visā pastiprināmajā frekvenču diapazonā. Tas var radīt nelīdzvērtīgas aiztures dažādām spektrālajām komponentēm, tādā veidā kropļojot pastiprināmo signālu laika apgabalā [115];

- Nelineāro efektu izpausme: SOA nelineārās īpašības var radīt signāla spektrālo kropļošanu un var izraisīt starpkanālu šķērstraucējumu parādīšanos. Pusvadītāju pastiprinātāji ir izteikti nelineāras ierīces. Pastiprināšanas procesā var parādīties signāla kropļojumi, kas ir raksturīgi signāliem nelineāro efektu ietekmē [42, 115, 119].

Apkopojot visu augstāk minēto var secināt, ka SOA galvenā priekšrocība ir līdzens pastiprinājuma spektrs platā viļņa garuma diapazonā. Galvenie pusvadītāju pastiprinātāju trūkumi ir liels radīto ASE trokšņu daudzums, nelineāro efektu izpausme pusvadītāju materiālā, pastiprināmā signāla fāzes kropļojumi, pastiprinājuma polarizācijas atkarība un pastiprinājuma nepietiekamā stabilitāte.

Lai pastiprinātu optisko signālu, SOA tiek izmantota stimulētā emisija. Lai sasniegtu populācijas inversiju, kad elektronu skaits vadāmības zonā kļūst lielāks par elektronu skaitu valentā zonā, tiek izmantota ārēja pumpēšanās strāva. Pavisam SOA var notikt 3 procesi: stimulētā emisija, stimulētā absorbcija un spontānā emisija [115, 120, 121].

Spontānā emisija ir trokšņu cēlonis SOA, tā notiek tad, kad elektrons no vadāmības zonas pāriet valentā zonā, ģenerējot fotonu ar nejaušu fāzes vērtību, izplatīšanās virzienu un viļņa garumu. Atšķirībā no stimulētās emisijas, spontānai emisijai nav vajadzīgs ārējais signāls [115]. Kad ārējais signāls izplatās aktīvā vielā, tas var tikt daļēji absorbēts. Absorbēcijas rezultātā elektrons no valentās zonas pāriet vadāmības zonā, absorbējot krītošā signāla fotonu. Tāpēc, lai absorbēcijas process būtu mazāks nekā stimulētās emisijas process un signāls tiktu pastiprināts, ir nepieciešama populācijas inversija, proti, elektronu skaitam vadāmības zonā ir jābūt lielākam nekā valentā zonā [115, 120, 121].

Stimulētās emisijas gadījumā elektrons no vadāmības zonas pāriet valentā zonā, pastiprinot signālu. Ģenerētais fotons ir ar tādu pašu viļņa garumu, fāzi un izplatīšanas virzienu, kā ieejas signāla fotoni [115, 120, 121].

SOA priekšrocības ir liels pastiprinājums (~30 dB), vienkārša konstrukcija un plats pastiprinājuma spektrs. Spektra platums parasti ir no 40 nm līdz 50 nm, bet eksistē arī SOA pastiprinātāji ar 60 nm un vairāk platāku spektru. No trūkumiem var minēt lielu ASE troksni, lielus ienestos zudumus (~10 dB), polarizācijas jutīgumu un signāla spektra kropļojumus.

2.4. Briljuēna optiskā pastiprinātāja pielietojums un novērtējums

Tāpat kā Ramana izkliede, Briljuēna izkliede reprezentē fotona ar noteiktu enerģijas līmeni pārveidošanu fotonā ar zemāku enerģijas līmeni. Enerģija, kas tiek izkļiedēta šajā procesā, rada fononu. Galvenā atšķirība starp stimulēto Ramana izkliedi (SRS) un stimulēto Briljuēna izkliedi SBS ir tā, ka SBS gadījumā enerģijas pārejā tiek izmantoti akustiskie fononi, kuri reprezentē silīcija dioksīda molekulu vibrācijas fāzē, bet SRS gadījumā tiek izmantoti optiskie fononi, kuri reprezentē molekulu vibrācijas ar nesaskaņotām fāzēm [42]. Tāpat kā SRS gadījumā, SBS izkļiedētās gaismas intensitāte eksponenciāli palielinās pēc tam, kad krītošās gaismas intensitāte pārsniedz noteiktu vērtību — Briljuēna sliekšņa vērtību. SBS un SRS pēc savas būtības ir līdzīgi procesi, bet tiem ir sekojošas atšķirības:

- SBS parādās tikai pretējā virzienā, bet SRS var izpausties gan tiešajā, gan pretējā virzienā.
- Izkļiedētajai gaismai SBS gadījumā frekvenču nobīde ir tikai ap 10–11 GHz. Šī frekvenču nobīde tiek definēta kā Briljuēna nobīde.
- Briljuēna pastiprinājuma spektrs ir ārkārtīgi šaurs un aizņem frekvenču joslu šaurāku par 100 MHz [62].

Briljuēna pastiprinātāju radītais pastiprinājums var tikt izmantots vāju optisko signālu pastiprināšanai, kuru frekvence ir nobīdīta attiecībā pret pumpējošā starojuma frekvenci par lielumu, kas ir vienāds ar Briljuēna nobīdi. Lai pumpētu Briljuēna pastiprinātājus, ir pielietojami pusvadītāju lāzeri, jo to izstarojuma frekvenču josla ir daudz šaurāka par Briljuēna pastiprinājuma joslu. Briljuēna pastiprinātāji spēj nodrošināt 30 dB pastiprinājumu pie pumpējošā starojuma jaudas mazākas par 10 mW, kas ir milzīgs ieguvums, salīdzinot ar citiem optisko pastiprinātāju tipiem. Briljuēna pastiprinājuma spektrs ir šaurāks par 100 MHz, pie tam pumpējošā un pastiprināmā signāla frekvenču starpībai jāatbilst Briljuēna nobīdei ar precizitāti līdz 10 MHz. Šī iemesla dēļ Briljuēna optiskie pastiprinātāji netiek izmantoti šķiedru optikas pārraides sistēmās optisko signālu pastiprināšanai. Tie var tikt izmantoti citiem nolūkiem, piemēram, lai uzlabotu uztvērēja jutību, selektīvi pastiprinot noteiktas frekvences signālu pirms detektēšanas, vai arī kā pārskāņojami šaurjoslas optiskie filtri kanālu izvēlei blīvā daudzkanālu sistēmā ar dažu desmitu megabitu sekundē pārraides ātrumu kanālā [42, 62].

3. HIBRĪDA PASTIPRINĀTĀJA RISINĀJUMU IZVEIDE UN EKSPERIMENTĀLĀ ANALĪZE

Atbilstoši izvirzītajam promocijas darba mērķim, izvirzītajām tēzēm un definētiem darba uzdevumiem, šajā nodaļā tiks aprakstīti un ilustratīvi parādīti promocijas darba eksperimentālās daļas rezultāti un secīgi to apraksti.

Dažādu tipu optisko pastiprinātāju kaskādes slēgumus uzskata par pastiprinātāju kombinēto risinājumu (hibrīdais pastiprinātājs). Lai iegūtu lielāku pastiprinājumu pie mazāka ienesto trokšņa daudzumu un paplašinātu pastiprinājuma spektru, tiek veidoti kombinētie risinājumi. Iegūtā risinājuma pastiprinājumā tiek summēta izmantoto optisko pastiprinātāju radītie pastiprinājumi [62, 122, 123].

Kombinētie risinājumi, kurus pielieto, lai pastiprinātu optisko signālu klasificē divās pamatgrupās:

- Platjoslas kombinētie risinājumi (no ang. val. — seamless and wideband hybrid amplifiers — SWB-HA), kur dažādu tipu optiskie pastiprinātāji tiek izmantoti, lai iegūtu pēc iespējas platāku pastiprinājuma spektru kombinācijā ar zemāku ienesto trokšņu daudzumu;
- Šaurjoslas kombinētie risinājumi (no ang. val. — narrow band hybrid amplifier — NB-HA), kur dažādi optisko pastiprinātāju tipi tiek izmantoti, lai iegūtu lielāku pastiprinājumu pie lielākas optiskā signāla-trokšņu attiecības.

Platjoslas kombinēto risinājumu gadījumā tipiskais pastiprinājuma spektrs ir ap 80 nm, savukārt šaurjoslas kombinēto risinājumu gadījumā tipiskais pastiprinājuma spektrs ir robežās no 30-40 nm. Šaurjoslas risinājumi parasti tiek pielietoti "C" vai "L" viļņa garuma joslās, bet platjoslas risinājumu gadījumā var tikt izmantotas arī abas šīs joslas paralēli, tādējādi veidojot divjoslu pastiprinātāju [62].

Galvenokārt kombinētie optisko signālu pastiprināšanas risinājumi tiek saistīti ar Ramana-EDFA pastiprinājumu kaskādi, tomēr atsevišķos gadījumos ir novērtēts arī Ramana-SOA potenciāls.

Lai izpildītu promocijas darbā definēto mērķi un pierādītu izvirzītās tēzes, šajā nodaļā ir aprakstīti veiktie eksperimenti, kas veikti atbilstoši iepriekš aprakstītajiem ŠOPS ietekmējošajiem faktoriem un analizētiem optisko pastiprinātāju veidiem.

Balstoties uz to, ka par EDFA-SOA kopēju izmantošanu informācija nav pārāk izplatīta un tas ir skaidrojams ar to, ka EDFA pastiprinājuma spektram ir raksturīga noteikta viļņa garuma atkarība savukārt SOA ir raksturīgs liels ienesto ASE trokšņu daudzums. Līdz ar to izstrādājot kombinēto optisko pastiprinātāju modeli eksperimentāli pamatā tika apskatīts Ramana-EDFA vai Ramana-SOA kombinēto risinājumu iegūtie eksperimentālie rezultāti.

3.1. Dispersijas ietekmes novērtējums uz WDM sakaru sistēmas darbību

Viens no visizplatītākajiem ŠOPS destruktīvajiem efektiem ir hromatiskā dispersija CD, kas ierobežo šo pārraides sistēmu veiktspēju [8]. CD izraisa būtisku negatīvu ietekmi, kas ietekmē signālu, kas izplatās optiskajā šķiedrā, ko sauc arī par otrās kārtas dispersiju. Viļņgarumdales blīvētajai WDM optisko šķiedru pārraides sistēmai ar līdz 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā vau uz viļņa garumu pietiek veikt tikai CD kompensāciju, izmantojot vienu dispersijas kompensācijas moduli (DCM).

Multipleksējot un vienlaikus pārraidot vairākus dažādu viļņu garumu optiskos signālus, ir iespējams nodrošināt efektīvāku optiskās šķiedras izmantošanu. Bitu pārraides ātruma un optiskās šķiedras garuma palielināšanās, kopā vai atsevišķi, būtiski ietekmē pārraides sistēmas efektivitāti. CD kompensācija vienkanāla sistēmai ir mazāk sarežģīta nekā vairāku kanālu DWDM sistēmai. Problēma ar DWDM sistēmu ir tāda, ka CD vērtība katram kanālam mainās atkarībā no centrālā viļņa garuma un tāpēc var nebūt iespējams vienādi kompensēt CD visai WDM sistēmai. Lai šo problēmu risinātu, eksperimentālajā daļā tiek ieviests papildu kompensācijas posms – hromatiskās dispersijas slīpuma (CD_{SL}) kompensācija. Šajā eksperimentālajā daļā tiek ņemts vērā, ka dispersijas slīpuma kompensācija, kas pazīstama arī kā trešās kārtas dispersija, ietekmē ŠOPS veikspēju [124].

Eksperimentālajā pētījumā CD_{SL} kompensācijas ietekme uz ŠOPS tika pētīta, izmantojot divus vizizplatītākos “ieslēgt-izslēgt” manipulācija (OOK) signāla līniju kodus – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods NRZ un ar atgriešanos pie nulles līnijas kods RZ. Lielākā atšķirība starp NRZ un RZ līnijas kodu signāliem, jeb lietotās signāla modulācijas gadījumos, ir izmantotās optiskās joslas platums. Proti, NRZ līnijas koda signāls 1 bita attēlojumam aizņem visu bitu intervālu, bet RZ līnijas kods signāls aizņem tikai daļu no bitu intervāla, kas ir atkarīgs no darba cikla, tāpēc NRZ līnijas koda signāla joslas platums ir aptuveni uz pusi mazāks, salīdzinot ar RZ līnijas kodu [125].

Šajā apakšsadaļā eksperimentāli tika pētīta ŠOPS atkarība no CD_{SL} kompensācijas, izmantojot divas dažādas optiskās šķiedras: standarta vienmodas optiskā šķiedra SMF, atbilstošu ITU-T G.652 rekomendācijai, un šķiedra ar nobīdītu nenulles dispersiju (NZDSF), atbilstošu ITU-T G.655 rekomendācijai. Aabas šīs šķiedras ir plaši izplatītas WDM skaru sistēmas risinājumos, konkrētāk, tika pētīta CD_{SL} kompensācijas ietekme, lai saprastu kā tās kompensācija ietekmē 16 kanālu WDM pārraides sistēmas darbību ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanāla, izmantojot divus augstāk minētos līniju kodus un optiskās šķiedras veidus.

Ir vairākas metodes kā kompensēt CD_{SL} . Viena no CD_{SL} kompensācijas metodēm tiek saukta par hibrīda šķiedru dizainu (HFD). HFD nozīmē sadalīt šķiedru vairākos laidumos, kur katrs laidums sastāv no divām šķiedrām. Otrs CD_{SL} kompensācijas risinājums nodrošina CD kompensāciju katram WDM kanālam atsevišķi uztvērēja daļā pēc kanālu demultipleksēšanas. Šajā metodē katru kanālu pēc WDM sadalītāja var uzskatīt par atsevišķu pārraides līniju, tāpēc ir nepieciešama tikai CD kompensācija [126]. No izmaksu un izmantošanas viedokļa šī nav visizdevīgākā metode optisko pārraides līniju uzturētājiem. Trešo metodi sauc par vidējā diapazona spektrālo inversiju (MSSI), un, kā teikts nosaukumā, šajā metodē impulsa spektrs tiek apgriezts šķiedras laiduma vidū. Ceturtā un pēdējā metode ir arī vizizplatītākā metode, kurā CD_{SL} kompensācija tiek panākta, izmantojot dispersijas kompensācijas moduli DCM. DCM modulis, var sastāvēt arī no dispersijas kompensējošās šķiedras (DCF) vai šķiedras Bregga režģa (FBG), atbilstoši FBG-DCM. Atšķirība ir tāda, ka, lai sasniegtu CD_{SL} kompensāciju, ŠOPS ir jāievieto papildu DCM vienība. Vairumā gadījumu pārraides līnija sastāv no OŠ un divām DCM vienībām – viena CD kompensācijai, bet otra CD_{SL} kompensācijai.

Parametrs, ko sauc par relatīvo dispersijas slīpumu (RDS), tiek izmantots, lai aprēķinātu CD_{SL} attiecību pret CD pie 1550 nm viļņa garuma. RD un DCF var aprēķināt, izmantojot (3.1.) un (3.2.) vienādojumus. Izkliedes kompensācijas līmeni var redzēt pēc dispersijas slīpuma kompensācijas koeficienta (DSCR), kas sniedz norādi par to, cik labi dispersija tiek kompensēta. DSCR koeficientu var aprēķināt, izmantojot (3.3.) vienādojumu. Vislabākā kompensācija tiks sasniegta, ja šķiedras RDS ir vienāds ar DCM RDS. Ja DSCR ir vienāds ar

100%, tiks sasniegta vislabākā kompensācija. Taču, ja DSCR ir mazāks par 100%, tad DWDM kanālu CD vērtības tiks kompensētas nevienmērīgi un pieļaujama CD līmenis var tikt pārsniegts [126].

$$RDS_f = \frac{S_f}{CD_f}, \quad (3.1.)$$

$$RDS_{DCF} = \frac{S_{DCF}}{CD_{DCF}}, \quad (3.2.)$$

$$DSCR = \frac{RDS_{DCF}}{RDS_f} \times 100, \quad (3.3.)$$

kur - RDS_f un RDS_{DCF} ir relatīvais dispersijas slīpums pie 1550 nm;

S_f un S_{DCF} ir SMF un DCF hromatiskās dispersijas slīpums pie 1550 nm, ps/nm²;

CD_f un CD_{DCF} ir SMF un DCF hromatiskā dispersija pie 1550 nm, ps/nm;

DSCR ir dispersijas slīpuma kompensācijas koeficients, %.

Viļņgarumdales blīvētais sakaru sistēmas (WDM) eksperimentālajai realizācijai tika izmantota *RSoft*, *OptSim* simulāciju programmatūra. Šajā etapā visiem eksperimentālajiem un simulācijas modeļiem pārraides ātrums tika iestatīts uz 40 Gbit/s katram kanālam. Raidītājs tika izveidots no 5 galvenajiem elementiem - datu avota, RZ vai NRZ līnijas koda, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota (CW), Maha-Zendera instensitātes modulatora (MZM) un optiskā joslas filtra (OBPF). Kanālu centrālās frekvences, sākot no 1. līdz 16. kanālam, tika noteiktas no 192.4 THz līdz 193.9 THz. Darbības kanālu frekvences tika izvēlētas saskaņā ar ITU-T G.694.1 rekomendācijām. Uztvērējs visiem kanāliem tika izveidots, izmantojot 3 elementus – optisko joslas filtru (OBPF, otrās kārtas optisko Besela filtru), PIN fotodiode un ceturtās kārtas elektrisko zemfrekvenču filtru (LPF). ŠOPS pārraides līnija tika veidota no SMF (G.652) vai NZDSF (G.655) optiskajās šķiedras laiduma, DCF CD un FBG CD_{SL} kompensācijai. ŠOPS pārraides līniju sadalītājs un kombinētājs kopā ar raidītāju un uztvērēju optiskajiem filtriem veidoja masīva viļņvada režģa (AWG) multiplexeru un demultiplexeru. Galveno komponentu parametru vērtības uzskaitītas 3.1. tabulā, savukārt izveidotais simulācijas modelis 16 kanālu WDM sistēmai parādīts 3.1. att.

ŠOPS pārraides līnijas garums tika izvēlēts 50 km gan RZ, gan NRZ līniju kodiem, izmantojot SMF. Attiecīgi tika pievienoti DCM un pastiprinātāji, lai kompensētu uzkrātās CD dispersijas vērtības, kā arī šķiedru ienesto vājinājumu (IL) optiskās līnijas laiduma posmā. Lai kompensētu DCF ievietošanas zudumus, tika izmantoti papildu pastiprinātāji, kuru pastiprinājums tika iestatīts tāds pats kā DCF šķiedru laiduma ievietošanas zudumu vērtības. Lai noteiktu kanālu veiktspēju, BER tika definēts mazāks kā 10⁻¹². Eksperimentā, 16 kanālu WDM sistēmai tika piemērota tikai CD kompensācija, izmantojot DCF.

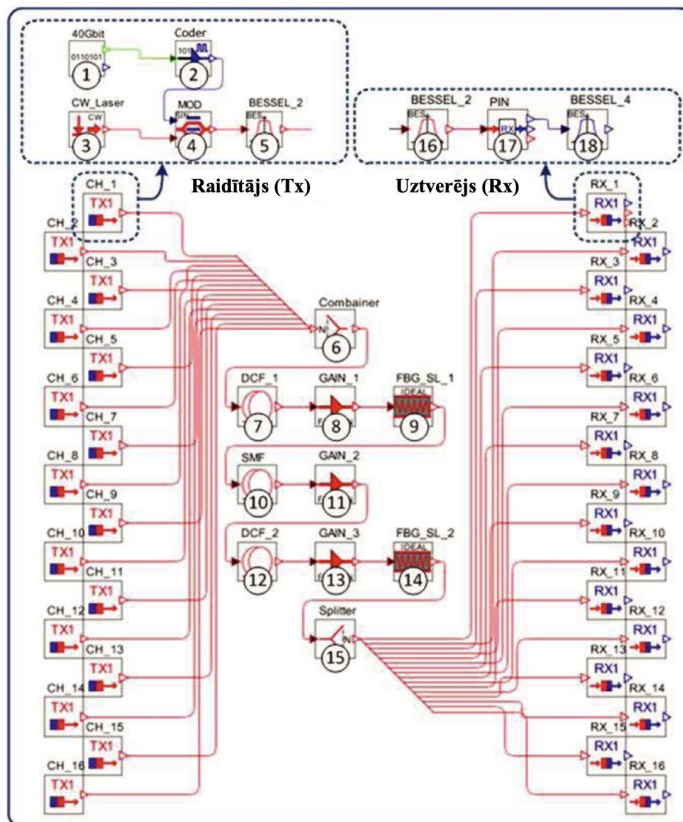
DCM atrašanās vieta tika mainīta ŠOPS ar mērķi noskaidrot, kā DCM atrašanās vieta mainīs atsevišķu kanālu veiktspēju 16 kanālu WDM sistēmā. Sākotnēji eksperimentālā simulācija tika veikta 16 kanālu sistēmai ar RZ līnijas koda formātu, izmantojot DCF pirms, pēc un simetriskai CD kompensācijai. Simulatīvā eksperimenta turpinājumā RZ līnijas kods tika nomainīts uz NRZ līnijas kodu un tika atkārtotas CD kompensācijas simulācijas. Pēc tam SMF tika aizstāts ar NZDSF un simulācijas tika atkārtotas vēlreiz. Pēc visām CD kompensācijas simulācijām tika

pievienots papildus šķiedras Brega režģis FBG priekš CD_{SL} kompensācijas. CD SL kompensācijas apjoms tika aprēķināts, pamatojoties uz (3.1.), (3.2.) un (3.3.) vienādojumiem.

Vispirms tika noteikts 16 kanālu WDM sistēmas ar datu pārraides ātrumu kanālā 40 Gbit/s pārraides līnijas garums bez CD un CD_{SL} kompensācijas. Izmantojot RZ līnijas kodu maksimālais pārraides līnijas garums bija 3.0 km ar SMF (uzkrātā CD vērtība bija 48.0 ps/nm), bet ar NZDSF pārraides līnijas garums bija 6.9 km (uzkrātā CD vērtība bija 27.6 ps/nm). Sliktākais rezultāts tika fiksēts 11 kanālā (193.4 THz), kur attiecīgi BER vērtības ar SMF bija 4.7×10^{-13} un BER vērtība ar NZDSF bija 9.6×10^{-13} , attiecīgi noteiktais BER sliekšnis ($BER < 10^{-12}$) netika pārsniegts.

Maksimālais iegūtais pārraides līnijas garums, izmantojot NRZ līnijas kodu kopā ar SMF bija tikai 2.4 km (uzkrātā CD vērtība 38.4 ps/nm), bet ar NZDSF šis garums sasniedza 10.2 km (uzkrātā CD vērtība bija 40.8 ps/nm). Sliktākā kanālu veiktspēja SMF un NZDSF tika novērota vairākos definētos kanālos. Izmantojot SMF šķiedru, sliktākais rezultāts tika novērots 13.kanālā, kur BER bija 1.5×10^{-13} , bet NZDSF tika novērots 12.kanālā, kur BER bija 7.0×10^{-13} .

Kopējā uzkrātā CD vērtība bija 800 ps/nm 16 kanālu WDM sistēmais ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s kanālā izmantojot 50.0 km SMF. CD kompensācijai tika izmantots DCF, bet CD_{SL} kompensēšanai ŠOPS tika pievienots papildus šķiedras Brega režģis FBG.



3.1. attēls: 16 kanālu WDM sakaru sistēmas ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā simulācijas modelis ar simetrisku CD un CD SL kompensāciju.

Pamatparametru vērtības 16 kanālu WDM sakaru sistēmai ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā simulācijas modeļa komponentēm [127]

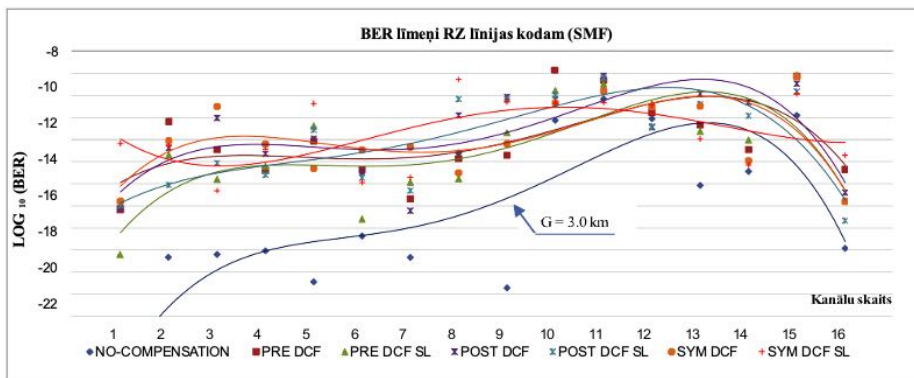
Nr.	Komponentes	Pamatparametri	Nr.	Komponentes	Pamatparametri
1	Datu avots	Datu pārraides ātrums: 40 Gbit/s	9, 14	FBG	Dispersijas slīpuma kompensācija SMF: -1.2 ps/nm ² NZDSF: -2.5 ps/nm ²
2	Kodētājs (RZ or NRZ)	RZ darba cikls: 0.5 NRZ šķērsošanas vieta: 50%	10	SMF šķiedra	Garums: 50 km Zudumi: 0.2 dB/km Dispersija: 16 ps/(nm·km) Apvalka efektīvā zona: 85 μm ²
3	CW lāzers	Izejas jauda: 4 dBm FWHM līnijas platums: 10 MHz Kanālu centrālās frekvences: 1-16 ch: 192.4 THz - 193.9 THz Attālums starp kanāliem: 100 GHz		NZDSF šķiedra	Garums: 50 km Zudumi: 0.2 dB/km Dispersija: 4 ps/(nm·km) Apvalka efektīvā zona: 72 μm ²
4	Maha-Zendera intensitātes modulators	Pārmērīgie zudumi: 3 dB Izžūšanas koeficients: 20 dB	11	SMF zudumu kompensējošs pastiprinātājs	Pastiprinājums: 10 dB
5	Optiskais Bessel filtrs	Polu skaits: 2 -3dB josla platums: 160 GHz	15	Optiskais sadalītājs	Vājinājums: -3 dB
6	Optiskais apvienotājs	Vājinājums: -3 dB	16	Optiskais Bessel filtrs	Polu skaits: 2 -3dB josla platums: 50 GHz
7, 12	DCF šķiedra	Garums: 10 km un 2.5 km Zudumi: 0.55 dB/km Dispersija: -80 ps/(nm·km) Apvalka efektīvā zona: 20 μm ²	17	Uztvērējs	PIN fotodiode: Jūtība: -17.9 dBm Kļūdas varbūtība: 10 ⁻⁹
8, 13	DCF ievietošanas zudumu kompensējošais optiskais pastiprinātājs	Pastiprinājums SMF: 2.75 dB NZDSF: 0.7 dB	18	Elektriskais Bessel filtrs	Polu skaits: 4 -3dB joslas platums: 32 GHz

Jāpiemin, ka CD kompensācija tika veikta WDM sistēmā ar RZ līnijas kodu, savukārt DCM vienība tika ievietota WDM sistēmā priekškompensācijai, pēckompensācijai un simetriskai kompensācijai. Pēc tam CD_{SL} kompensācija tika veikta tādā pašā veidā, tad RZ līnijas kods tika pārslēgts uz NRZ līnijas kodu un CD kopā ar CD_{SL} kompensāciju tika izpildīts, kā minēts iepriekš. Kopumā tika izpētītas 14 dažādas eksperimentālas simulāciju kombinācijas abiem līniju kodu formātiem ar SMF šķiedru un vēl 14 eksperimentālas simulācijas, kad SMF tika aizstāts ar NZDSF. Visas BER vērtības 16 kanālu WDM sakaru sistēmai ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā ar RZ un NRZ līniju kodiem, izmantojot gan SMF, gan NZDSF vizuāli parādīts 3.2., 3.3., 3.4. un 3.5. attēlos. Apzīmējumi grafikos ir sekojoši:

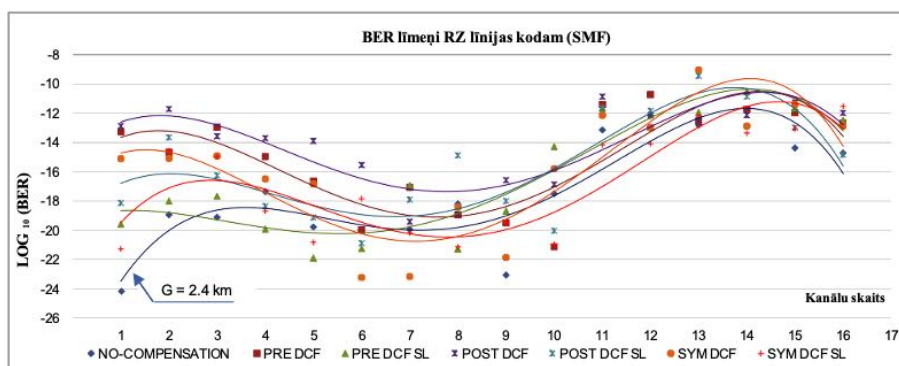
- “PRE DCF” — izvēlēta šķiedra kopā ar DCF kā CD priekškompensatoru bez CD_{SL} kompensācijas;
- “PRE DCF_{SL}” — atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD priekškompensatoru ar CD_{SL} kompensāciju,
- “POST DCF” — atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD pēckompensatoru bez CD_{SL} kompensācijas,
- “POST DCF_{SL}” — izvēlēta šķiedra kopā ar DCF kā CD pēckompensatoru ar CD_{SL} kompensāciju,
- “SYM DCF” — izvēlēta šķiedra kopā ar DCF kā CD simetrisko kompensatoru bez CD_{SL} kompensācijas,
- “SYM DCF_{SL}” — atlasīta šķiedra kopā ar DCF kā CD simetrisks kompensators ar CD_{SL} kompensāciju.

Izpētot eksperimentu rezultātus, tika secināts, ka sliktāko kanālu veiktspēju, izmantojot īpašu modulācijas formātu un šķiedru veidu, kad 16 kanālu WDM sistēmai kompensācija netiek

piemērota, un salīdzinot to ar to pašu kanāla veiktspēju pēc kompensācijas piemērošanas, ir iespējams saprast, ka DCM un tā atrašanās vieta ietekmē kanālu veiktspēju. Pievienojot papildu DCM, CD_{SL} kompensācijai, bija iespējams noteikt, kā šī kompensācija uzlabo 16 kanālu WDM sistēmas veiktspēju pat pēc CD kompensācijas.



3.2. att. BER vērtību rezultāti 16 kanālu WDM sakaru sistēmai ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, L = 50 km, RZ līnijas kods, SMF, ar CD un CD_{SL} kompensāciju.



3.3. att. BER vērtību rezultāti 16 kanālu WDM sakaru sistēmai ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, L = 50 km, NRZ līnijas kods, SMF, ar CD un CD_{SL} kompensāciju.

Izmantojot SMF, RZ līnijas kodu un CD kompensāciju, kā arī izmantojot DCF pirms un pēc simetriskās kompensācijas, 11.kanāla BER līmeņi ir sekojoši:

1. Ar DCF pirmskompensāciju BER sasniedz 3.2×10^{-11} ;
2. Ar DCF pēckompensāciju BER sasniedz 5.9×10^{-11} ;
3. Ar DCF simetrisko kompensāciju BER sasniedz 2.4×10^{-12} .

Pēc CD_{SL} kompensācijas pielietošanas iepriekš aprakstītajam risinājumam, kura rezultāti 11.kanālā attiecīgi uzlabojās sekojoši:

1. BER sasniedz 1.0×10^{-11} ;
2. BER sasniedz 3.8×10^{-11} ;
3. BER sasniedz 2.3×10^{-13} .

CD un CD_{SL} kompensācija nodrošināja labāku BER rezultātu atbilstoši eksperimentā uzstādītajai BER robežai.

Izmantojot SMF, NRZ līnijas kodu un CD kompensāciju, kā arī izmantojot DCF pirms un pēc simetriskās kompensācijas, 13.kanāla BER līmeņi ir sekojoši:

1. Ar DCF pirmskompensāciju BER sasniedz 2.8×10^{-13} ;
2. Ar DCF pēckompensāciju BER sasniedz 3.3×10^{-13} ;
3. Ar DCF simetrisko kompensāciju BER sasniedz 1.1×10^{-13} .

Pēc CD_{SL} kompensācijas pielietošanas iepriekš aprakstītajam risinājumam, rezultāti 13.kanālā attiecīgi palielināja kanāla BER līmeņi sekojoši:

1. BER sasniedz 1.1×10^{-12} ;
2. BER sasniedz 3.5×10^{-10} ;
3. BER sasniedz 8.1×10^{-15} .

Eksperimenta otrajā posmā tika izmantota NZDSF, RZ līnijas kods un CD kompensāciju, kā arī izmantojot DCF pirms un pēc simetriskās kompensācijas, 11.kanāla BER līmeņi ir sekojoši:

1. Ar DCF pirmskompensāciju BER sasniedz 4.7×10^{-13} ;
2. Ar DCF pēckompensāciju BER sasniedz 4.2×10^{-15} ;
3. Ar DCF simetrisko kompensāciju BER sasniedz 6.4×10^{-15} .

Pēc CD_{SL} kompensācijas pielietošanas iepriekš aprakstītajam risinājuma, kura rezultāti 11.kanālā attiecīgi izmainījās sekojoši:

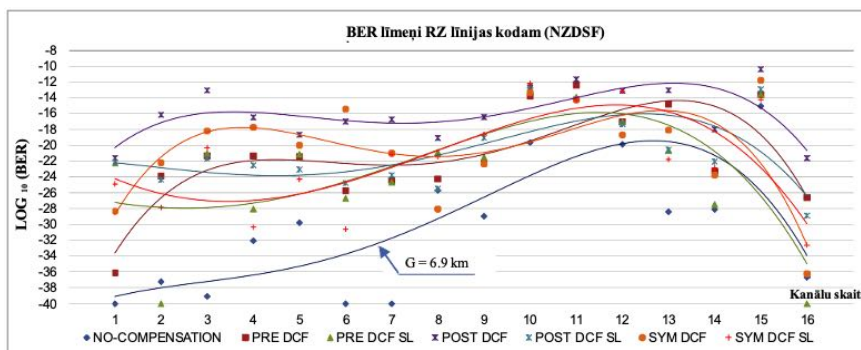
1. BER sasniedz 1.5×10^{-14} ;
2. BER sasniedz 7.8×10^{-15} ;
3. BER sasniedz 5.8×10^{-15} .

Izmantojot NZDSF, NRZ līnijas kodu un CD kompensāciju, kā arī izmantojot DCF pirms un pēc simetriskās kompensācijas, 12.kanāla BER līmeņi ir sekojoši:

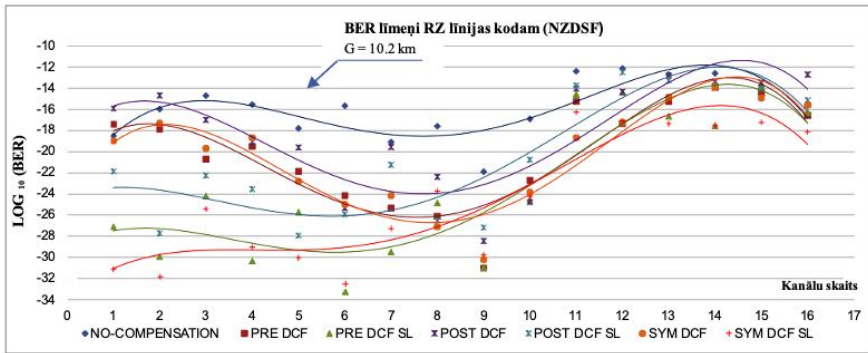
1. Ar DCF pirmskompensāciju BER sasniedz 4.2×10^{-18} ;
2. Ar DCF pēckompensāciju BER sasniedz 4.6×10^{-15} ;
3. Ar DCF simetrisko kompensāciju BER sasniedz 5.7×10^{-18} .

Pēc CD_{SL} kompensācijas pielietošanas iepriekš aprakstītajam risinājumam, kura rezultāti 12.kanālā attiecīgi izmainījās sekojoši:

1. BER sasniedz 3.9×10^{-15} ;
2. BER sasniedz 3.0×10^{-13} ;
3. BER sasniedz 7.2×10^{-18} .



3.4. att. BER vērtību rezultāti 16 kanālu WDM sakaru sistēmā ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, $L = 50$ km, RZ līnijas kods, NZDSF, ar CD un CD_{SL} kompensāciju.



3.5. att. BER vērtību rezultāti 16 kanālu WDM sakaru sistēmai ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, $L = 50$ km, NRZ kodēta, NZDSF, ar CD un CD SL kompensāciju.

Izvērtējot informāciju, par iegūtajiem rezultātiem visos kanālos, var secināt sekojošo. Ja RZ līnijas kods tika izmantots kopā ar SMF šķiedru, CD_{SL} kompensācija kopā ar CD kompensāciju kopumā šāds risinājums uzlabo BER līmeni visos kanālos. BER līmeņa uzlabojums ir vairāk izteikts kanālos no Nr. 1. līdz Nr. 9. Tomēr, kad tika izmantots NRZ līnijas kods, pirms un pēc CD kompensācijas kopā ar CD_{SL} kompensāciju, BER līmeņa uzlabošanās tika novērota tieši kanālos no Nr. 1 līdz 8. Simetriskā CD SL kompensācija palielināja BER līmeni kanālos no 5. līdz 8. Kad RZ līnijas kods tika izmantots kopā ar NZDSF, CD_{SL} kompensācija vairumā gadījumu uzlaboja kanālu veiktspēju. Pirms un simetriskā CD_{SL} kompensācija uzlaboja BER līmeni kanālos no Nr. 1 līdz Nr. 7 un no Nr. 12 līdz Nr. 16. Pēc CD_{SL} kompensācija uzlaboja BER līmeni visos kanālos. Līdzīga situācija tika novērota, izmantojot NRZ līnijas kodu. Pilnīgs uzlabojums tika panākts ar kompensāciju pirms CD_{SL}. Pēc CD_{SL} kompensācija kopā ar CD kompensāciju uzlaboja BER līmeni kanālos no Nr. 1 līdz Nr. 8 un no Nr. 14 līdz Nr. 16, bet simetriskajai CD_{SL} kompensācijai no Nr. 1 līdz Nr. 8 un no Nr. 11 līdz Nr.16.

CD_{SL} kompensācijai ir lielāka ietekme uz eksperimentā realizēto WDM pārraides sistēmu sānu kanāliem, nevis centrālajiem kanāliem. Centrālā kanāla BER līmeņa izmaiņas var izskaidrot ar NOE ietekmi. Šķērsfāzu modulācija XPM ir primārais efekts, kas samazina WDM sistēmas veiktspēju. Turklāt pilnīgas CD kompensācijas dēļ ir jāņem vērā arī četru viļņu mijiedarbes FWM ietekme [10].

Ar šo eksperimentu ir pierādīts, ka ir iespējams pagarināt pārraides līnijas garumu līdz 50 km 16 kanālu WDM sistēmai ar bitu pārraides ātrumu 40 Gbit/s, izmantojot gan SMF, gan NZDSF ar RZ un NRZ līnijas kodiem, ja tiek piemērota CD kompensācija, tāpat arī tas, ka papildu CD_{SL} kompensācija var palielināt šādas WDM pārraides sistēmas veiktspēju.

No rezultātiem, kas iegūti, izmantojot izstrādātos simulācijas modeļus, redzams, ka CD_{SL} kompensācijai ir lielāka pozitīva ietekme uz ŠOPS veiktspēju, kur tiek izmantota šķiedra ar zemāku CD koeficientu. Šajā gadījumā tā bija NZDSF. Salīdzinot rezultātus gan RZ, gan NRZ kodiem, var secināt, ka ar NZDSF, CD_{SL} kompensācijai ir lielāka ietekme uz NRZ līnijas kodu, uzlabojot kanālu BER līmeni. Savukārt SMF, CD_{SL} kompensācijai ir lielāks BER līmeņa uzlabojums, ja tika izmantots RZ līnijas kods.

Augstāko veiktspējas uzlabojumu 40 Gbit/s 16 kanālu WDM sistēmā var sasniegt, ja CD_{SL} kompensācija tiek piemērota kopā ar CD kompensāciju. No iegūtajiem rezultātiem secināms, ka izmantojot DCF CD kompensācijai un FBG CD_{SL} kompensācijai un izvietojot tos

simetriskajai kompensācijai, tiks nodrošināta 16 kanālu 40 Gbit/s WDM pārraides sistēmas augstākā veiktspēja.

3.2. Četru viļņu mijiedarbes FWM fekta lietojums spektrāli efektīvu ŠOPS risinājumu izveidē

Augstas spektrālās efektivitātes DWDM risinājumos tiek pielietotas, lai palielinātu strauji augošo pieprasījumu pēc interneta trafika, kurš ik gadu pieaug gala lietotājiem izmantojot multivides lietojumprogrammas, video straumēšanu, failu koplietošanu u.c. [25]. Blīvs viļņgarumdales blīvēts pasīvais optiskais tīkls (DWDM-PON) ir savietojams ar šķiedru uz mājām (FTTH) arhitektūru, nodrošinot augstu datu pārraides ātrumu gala lietotājiem. DWDM risinājuma tehnoloģija tiek izmantota datu pārraidei lielos attālumos; tomēr DWDM signāli tiek pakļauti nelineāriem optiskiem efektiem NOE. Datu pārraides procesā optiskās šķiedras nelinearitātes dēļ var parādīties traucējumi, izkropļojumi, pārmērīga optisko signālu vājināšanās, kas izraisa ŠOPS veiktspējas pasliktināšanos [128]. Dažādi efekti, piemēram SPM, XPM un FWM notiek Kerra nelinearitātes dēļ [129, 130]. FWM ir efekts, kad divi vai vairāki dažādi signāli ar dažādām frekvencēm izplatās blakus viens otram, un šī efekta dēļ tiek ģenerētas jaunas optiskās harmonikas. Turklāt esošie kanāli ir pakļauti jaudas zudumam un signāla traucējumiem. FWM efektu var izmantot, lai ģenerētu vairākus datu nesējus. FWM efekts ir nelabvēlīgs DWDM-PON pārraides sistēmām, taču mūsdienās tiek pētīti risinājumi šī efekta lietderīgai lietošanai.

Šajā apakš sadaļā eksperimentāli tika pētīts FWM optiskā efekta pielietošana, lai izveidotu līdz pat 16 kanālu DWDM-PON sistēmu. FWM daudzviļņu gaismas avots ir balstīts uz diviem nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotiem CW un HNLF. Šajā eksperimentālajā daļā tika izstrādāts spektrāli efektīvs gaismas avota risinājums un analizēti iestatījumi 16 kanālu DWDM-PON sistēmai, kur tika noteikta gan nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW optimālā pumpēšanas jauda, gan HNLF šķiedras laiduma garums. Saņemto signālu veiktspēja tika analizēta bitu kļūdu attiecības BER izteiksmē, kur tika pieņemts, ka BER sliekšnis konkrētajam sistēmas risinājumam ir $\leq 10^{-10}$.

Četru viļņu mijiedarbe FWM var notikt ŠOPS kā starpmodulācijas parādība, kurā ceturtais viļņa garums rodas trīs viļņu garumu mijiedarbības dēļ. Ja ir trīs viļņu garumi λ_i , λ_j un λ_k , kas ir sajaukti, tad tas noved pie ceturta viļņa garuma izveidošanās, kā to var redzēt pēc 3.4. formulas zemāk [131]:

$$\lambda_{ijk} = \lambda_{ijk} \pm \lambda_i \pm \lambda_j \pm \lambda_k, \quad (3.4.)$$

kur λ_{ijk} – var darboties kā sākotnējā signāla traucējošs signāls.

Sliktākā šo viļņu garumu kombinācija pasliktina sistēmas veiktspēju [5]. Trīs viļņi ar viļņa garumu λ_i , λ_j un λ_k ($i, j \neq k$) mijiedarbojas, veidojot viļņu ar viļņa garumu [132]:

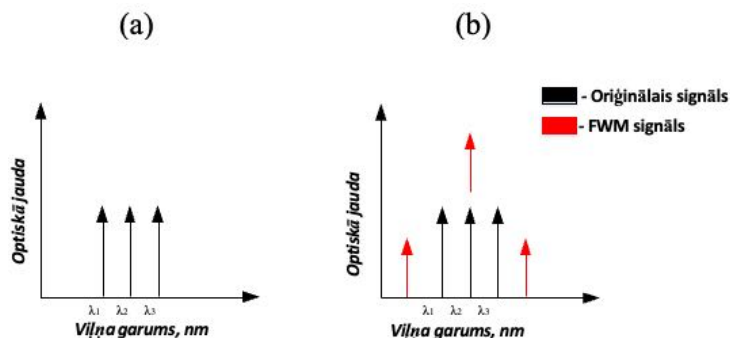
$$\lambda_{ijk} = \lambda_i + \lambda_j - \lambda_k, (i, j \neq k), \quad (3.5.)$$

kur λ_{ijk} – ģenerētā FWM signāla viļņa garums.

Ar vienādojumu 3.6. var aprakstīt, cik daudz jaunu kanālu varētu būt sistēmā “N” viļņa garuma kanāliem, kas kopīgi izplatās caur šķiedru. FWM efekta radīto jauno viļņu garumu (optisko harmoniku) skaitu var izteikt ar vienādojumu [133]:

$$M = \frac{N^2}{2(N - 1)}, \quad (3.6.)$$

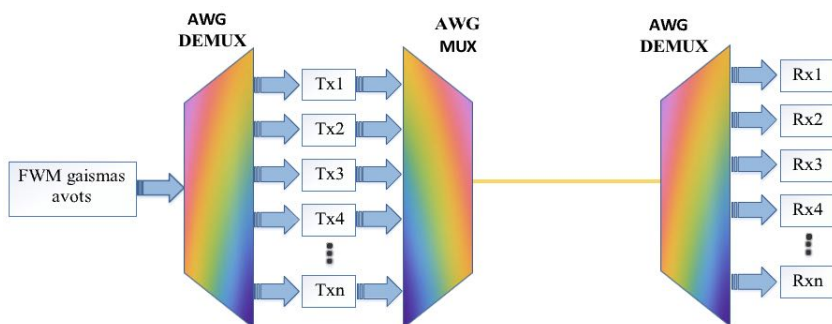
3.6. att. parādīts optiskā signāla spektrs pirms un pēc pārraides caur optisko šķiedru ar FWM ietekmi. FWM signāla jaudu ietekmē tādi faktori kā pārraides šķiedras izkliede, kanāla ieejas jauda un spektrālā atstarpe starp nesējiem vai kanāliem.



3.6.att. Optiskā signāla spektrs (a) bez FWM un (b) ar FWM efekta veidošanos [131].

DWDM-PON var izmantot kā vairāku kanālu optiskās šķiedras pārraides sistēmu, lai vienlaikus varētu apkalpot pēc iespējas vairāk klientu un iegūtu lielāku jaudu un bitu pārraides ātrumu [133, 134].

Saskaņā ar ITU-T G.694.1 rekomendācijām optiskajām C- un L-joslām DWDM-PON kanālu atstatuma intervāli ir 100, 50, 25 vai 12.5 GHz, un centrālā kanāla frekvence atbilstoši ITU-T G.694.1. rekomendācijai ir 193,1 THz [48]. Šajā eksperimentālajā sadaļā tiks izpētīta DWDM-PON pārraides sistēma ar starpkanālu intervālu 50 GHz. Šīs sistēmas risinājums izmanto FWM vairāku viļņu gaismas avotu, lai nodrošinātu papildu informācijas pārraidi uz vairākiem datu kanāliem. 3.7. att. parādīta daudzkanālu DWDM-PON pārraides sistēmas arhitektūra.



3.7.att. Daudzkanālu DWDM-PON pārraides sistēmas arhitektūra ar FWM daudzviļņu garuma avotu [135].

Kā redzams 3.7. att., eksperimentāli simulētajā pārraides sistēmā tiek izmantots viens viļņvadu masīva režģa AWG multiplekseris modulētu optisko nesēju apvienošanai un ievadei šķiedrā un divi demultiplekseri, lai filtrētu un atdalītu nesējus, ko ģenerē FWM daudzviļņu gaismas avots (raidītāja pusē) un saņemto DWDM signālu atdalīšana katram raidītājam pēc viļņa garuma uztvērēja pusē.

Šajā sadaļā tiek pētīta FWM optiskā efekta izmantošana, lai izveidotu daudzviļņu gaismas avotu un darbinātu līdz 16 kanālu DWDM-PON sakaru sistēmu. *RSoft, OptSim* simulāciju programmatūras vidē tika izstrādāts eksperimentāls simulācijas modelis ar FWM daudzviļņu gaismas avotu DWDM-PON pārraides sistēmai. Pumpēšanas lāzera jauda, kā parādīts 3.9. att., tika mainīta diapazonā no +15 dBm līdz +30 dBm. Tika pētīti arī dažādi HNLF šķiedru laiduma garumi līdz 2 km garumā. FWM procesa rezultātā tika ģenerēta ceturta frekvence. Lai efektīvi FWM efekta ietekmi HNLF šķiedrā, tika noteikti šādi HNLF parametri: efektīvais laukums $11,6 \mu\text{m}^2$, nulles dispersijas viļņa garums 1552,32 nm un nelineārais koeficients $11,50 (W \times 1)^{-11}$. Šajā pētījumā izmantotās centrālās frekvences nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotiem CW bija 193.1 THz (1552,524 nm) un 193.15 THz (1552,123 nm), vājinājuma koeficients ģenerēšanai līdz 16 nesējiem HNLF šķiedrā bija 0,8 dB/ng. [136]. DWDM-PON sistēmās izmantotie viļņvadu masīva režģa AWG multipleksera un demultipleksera parametri bija šādi: starpkanālu intervāls 50 GHz, optiskās 3-dB joslas platums bija 16.5 GHz un viļņvadu masīva režģa AWG multipleksera un demultipleksera zemākā kanāla centrālā frekvence tika mainīta atkarībā no izmantoto kanālu skaita: 4 kanāliem – 193.05 THz, 8 kanāliem – 192.95 THz, 16 kanāliem – 192.75 THz. 3.2. tabulā parādīti optimālie parametri gan nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotam CW gan HNLF, kas attiecīgi tiek izmantotas 4, 8 un 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmās. Nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW pumpēšanas optimālā jauda un HNLF laiduma garums tika noteikts eksperimentāli, izmantojot simulācijas modeli. Šie parametri tika atrasti, novērtējot optisko spektru (skat. 3.8. att.) uz pirmā viļņvadu masīva režģa AWG un demultipleksera izejas, ņemot vērā ģenerēto nesēju zemāko jaudas variāciju, kas nepārsniedza 3 dB diapazonu.

3.2. tabula.

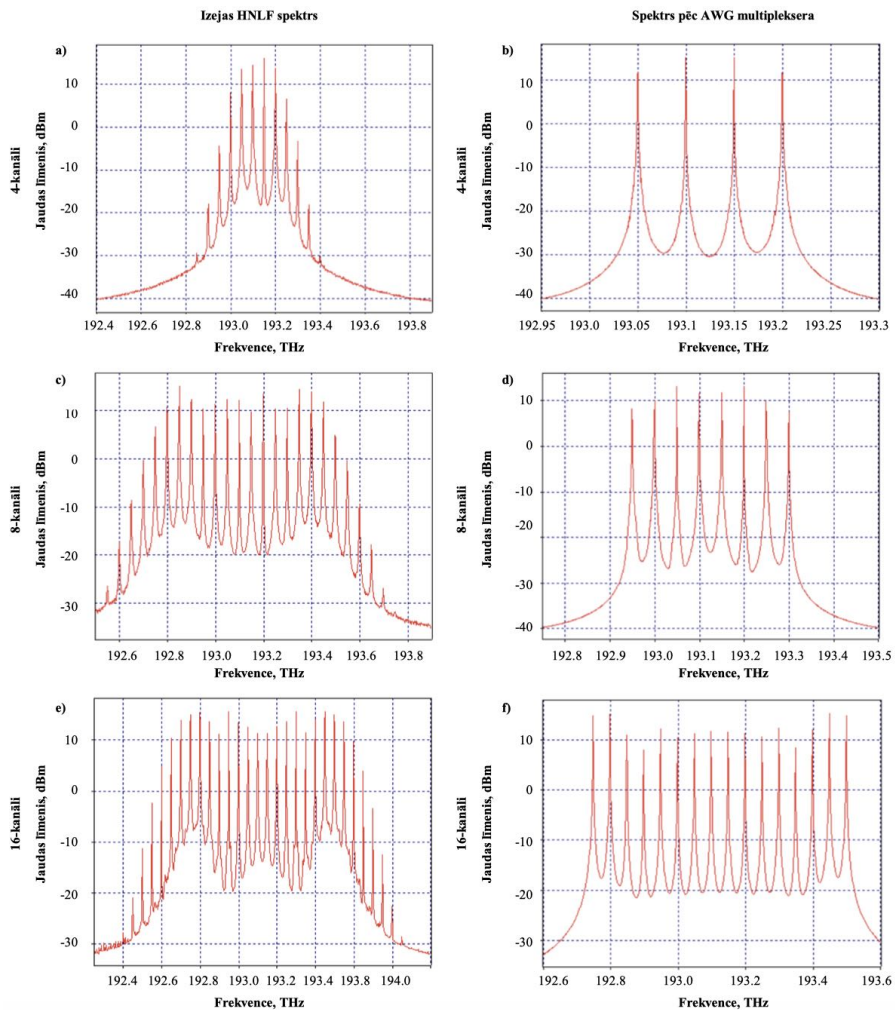
Optimālie FWM daudzviļņu gaismas avota parametri vairāku nesēju ģenerēšanai

Nesēju skaits (kanāli)	Nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW pumpēšanas jauda, dBm	HNLF garums, km
4	20.0	0.90
8	24.1	1.39
16	26.3	1.05

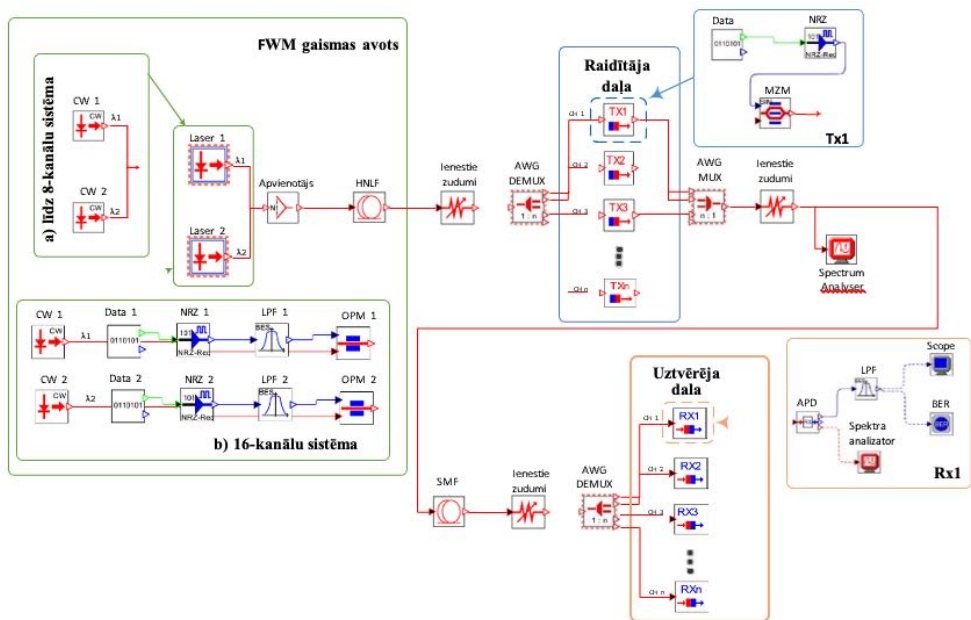
3.8.att. parādīti FWM vairāku viļņu garumu avota izejas spektri izejā pēc HNLF un pēc viļņvadu masīva režģa AWG multipleksera modulētajiem optiskajiem signāliem DWDM sakaru sistēmas risinājumā atkarībā no kanālu skaita. Atbilstoši pēc FWM daudzviļņu gaismas avota lietojuma pirms: 4 kanālu (a), 8 kanālu (c), 16 kanālu (e) un pēc optisko nesēju modulācijas DWDM sakaru sistēmas: 4 kanālu (b), 8 kanālu (d), 16 kanālu (f) risinājumā pēc viļņvadu masīva režģa AWG multipleksera. Optiskā spektra diagrammas tika izmantotas, lai noteiktu centrālos viļņa garumus ģenerētajiem optiskajiem nesējiem (optiskajām harmonikām) un, lai noteiktu katra nesēja stabilitāti laikā un optiskās jaudas līmeni konkrētajam nesējam.

DWDM-PON pārraides sistēmā tika pielietotas dažas modifikācijas FWM daudzviļņu gaismas avotam 16 nesēju ģenerēšanas gadījumā, lai iegūtu vienmērīgu ģenerēto nesēju

stabilitāti un jaudas vērtības katram paredzētajam sakarus sistēmas optiskajam kanālam. Kad jaunģenerēto nesēju skaits palielinās, nesēju var īpaši modulēt, lai samazinātu SBS nelabvēlīgo ietekmi. FWM nesēju skaita palielināšanās palielina nelineāro Kera efektu, kā arī stimulēto Briļjuēna izkliedi SBS [138]. SBS gadījumā enerģija tiek pumpēta no viena gaismas viļņa uz otru ar lielāku viļņa garumu. SBS ierobežo maksimālo ievadīto jaudu (amplitūdas manipulācijas palielina spektra platumu, kā arī SBS sliekšni), kas ir iemesls, kāpēc var ierobežot jaudīgāku lāzera izmantošanu. Lai samazinātu SBS efektu, tiek izmantoti pasīvie optiskie komponenti ar zemu vājinājumu [139, 17]. Divas papildu sastāvdaļas – optiskie fāzes modulatori (OPM) tiek izmantoti 16 kanālu sistēmas daudzviļņu gaismas avotu shēmā (sk. 3.9. att. (b) 16 kanālu sistēma), lai palielinātu SBS sliekšni un samazinātu SBS ietekmi. Katrs no nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotiem CW tiek modulēts ar datu pārraides ātrumu 100 Mbit/s (NRZ līnijas kodam, izmantojot 2.8 GHz 3-dB joslas platuma zemfrekvences filtru (LPF)) [140].



3.8.att. Optiskie spektri FWM daudzviļņu gaismas avota HNLF izejā (a, c, e) un pēc viļņvadu masīva režģa AWG multipleksiera (b, d, f) pārraides pusē līdz 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmas risinājumā.



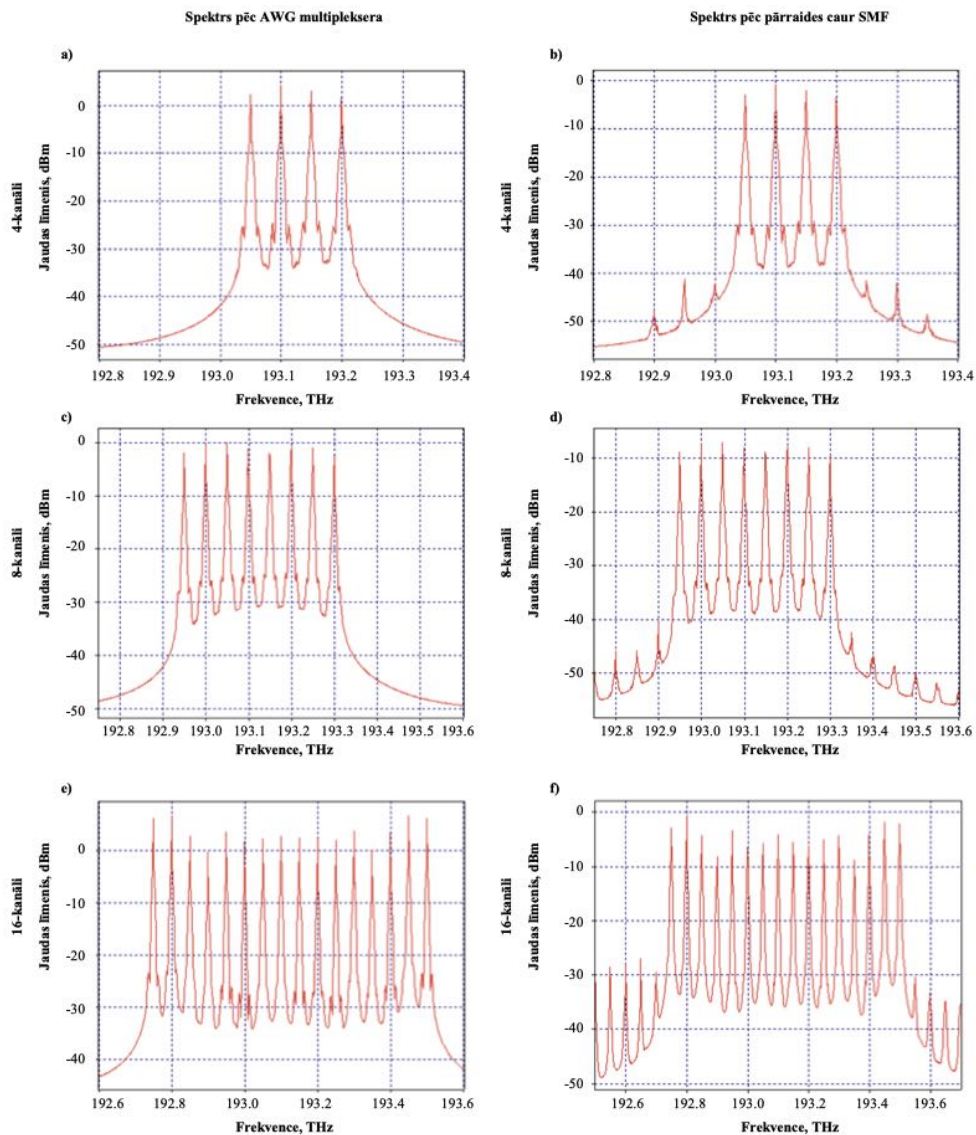
3.9.att. Eksperimentālais simulācijas modelis (a) 4 un 8 kanālu un (b) 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmai ar FWM vairāku viļņu gaismas avotu.

Eksperimentāli tika konfigurēta FWM daudzviļņu gaismas avoti, kura parametri mainījās atkarībā no sistēmā izmantoto kanālu skaita. 3.9. att. parādīts (a) līdz 8 kanālu (ieskaitot 4 kanālu) un (b) 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmas eksperimentālais simulācijas modelis ar definētu FWM daudzviļņu garuma avotu.

Papildus viļņvadu masīva režģa AWG multipleksa un demultipleksa tika pievienots optiskais elements (optiskais vājinātājs), kas simulēja optisko vājinājumu, atbilstošu viļņvadu masīva režģa AWG multipleksa un demultipleksa pieejamajam risinājumam. Datu pārraides kanāli ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, jeb katrs raidītājs Rx sastāv no datu avota, NRZ līnijas koda un Maha-Zendera intensitātes modulatora MZM. Pētījuma laikā datu pārraides kanālu skaits svārstījās no 4 līdz 16 kanāliem. Kā optiskā tīkla segmenta daļa tika izmantota SMF, atbilstoša ITU-T G.652. standartam. Šķiedras garums bija 20 km, vājinājuma koeficients bija 0,2 dB/km un dispersijas koeficients bija 16 ps/nm/km pie 1550 nm viļņa garuma. DWDM-PON sistēmas uztvērējs tika veidots no lavīna fotodiodes (APD) ar jutību -24 dBm pie uztvertā signāla kļūdas varbūtības 10^{-9} . Pēc APD uztvērēja tika izmantots zemfrekvenču elektriskais filtrs LPF ar 3-dB joslas platumu 7.5 GHz, lai samazinātu uztvertā signāla troksni. Uztvertā signāla novērtēšanai tika izmantota BER kļūdu skaitīšana.

Veicot simulāciju, tika izmantoti visi iepriekš definētie sistēmas komponentu un elementu parametri, bet optimālie parametri, piemēram, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW jauda un HNLF garums, tika definēti eksperimentālās simulācijas laikā. Rezultāti tika analizēti pēc iegūtā optiskā signāla spektra HNLF šķiedras izejā, un pēc signāla optiskā spektra pēc viļņvadu masīva režģa AWG multipleksa, kā arī optiskā spektra pēc pārraides caur SMF (kur SMF laiduma garums bija 20 km). Pārraidītā signāla kvalitāte tika novērtēta DWDM-PON pārraides sistēmas sliktākajam kanālam, pamatojoties uz acu diagrammu un BER rezultātiem (kur $BER \leq 10^{-10}$). Sliktākais kanāls, kurš eksperimentā tika fiksēts ir 4 kanālu un 16 kanālu

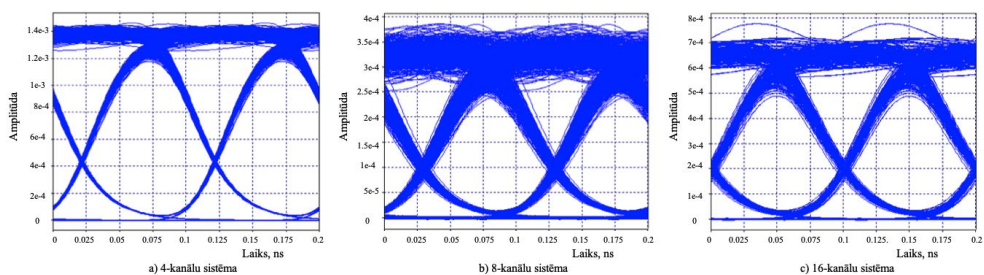
DWDM sistēmai, bija ceturtais kanāls, bet 8 kanālu sistēmas risinājumā tas bija pirmais kanāls. Izmantojot 3.2. tabulā definētos optimālos parametrus, tika iegūti dažādi optiskie spektri līdz 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmas risinājumā pirms un pēc pārraides caur SMF (skat. 3.10. att.).



3.10.att. DWDM-PON pārraides sistēmas izvades spektrs ar FWM daudzviļņu gaismas avotu – (a) 4 kanālu, (c) 8 kanālu, (e) 16 kanālu pēc AWG mūltipleksera un (b) 4 kanālu, (d) 8 kanālu, (f) 16 kanālu pēc 20 km garas SMF pārraides līnijas.

Salīdzinot optiskos spektrus pie HNLF un viļņvadu masīva režģa AWG mūltipleksera izejas, var secināt, ka kanālu izejas līmeņi pēc viļņvadu masīva režģa AWG mūltipleksera un demūltipleksera ir vienmērīgi sadalīti (skatīt 3.8. att.). Savukārt 3.10. attēlā (b, c, e) atkarībā no

kanālu skaita redzams, ka šajā gadījumā viļņvadu masīva režģa AWG demultiplekseris atdalīja 4, 8 un 16 kanālus centrālajās frekvencēs no 192.75 līdz 193.5 THz ar starpkanālu intervālu 50 GHz. Vidējā aprēķinātā kanāla maksimālā izejas jauda 4 kanāliem bija 3.3 dBm. Lielākā atšķirība starp aprēķināto vidējo kanāla maksimālo jaudu un izmēritajiem kanāla jaudas līmeņiem bija ceturtajā kanālā, kas bija 0.5 dBm. Tomēr 8 kanālu sistēmā kanāla vidējā maksimālā jauda bija 0,7 dBm, kur starpība starp slīktāko kanālu bija 1,3 dBm (pirmajam kanālam). 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmā kanāla vidējā maksimālā jauda bija 2.8 dBm, un starpība starp aprēķināto vidējo kanāla maksimālo jaudu un izmērīto kanāla maksimālo jaudu bija 2.9 dBm (ceturtajam kanālam).). Iegūtās vērtības ir pieņemamas, jo tās ietilpst 3 dBm diapazonā. 3.10. att. parādīts spektrs DWDM-PON pārraides sistēmai ar (a) 4 kanālu, (c) 8 kanālu, (e) 16 kanālu pēc AWG multipleksora, (b) 4 kanālu, (d) 8 kanālu kanāls, f) 16 kanālu aiz pārraides līnijas daļas. 3.11. att. parādītas uztvertā signāla acu diagrammas (a) 4 kanālu, (b) 8 kanālu un (c) 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmā ar FWM daudzviļņu gaismas avotu.



3.11.att. DWDM-PON pārraides sistēmas acu diagrammas ar FWM daudzviļņu gaismas avotu (a) 4 kanālu, (b) 8 kanālu un (c) 16 kanālu.

Kā var redzēt 3.11. att., acu diagrammas kvalitāte pasliktinās palielinātas dispersijas un nelineāro efektu (piemēram, FWM, SBS) dēļ, kad FWM daudzviļņu gaismas avotam tiek ģenerēts lielāks kanālu skaits no 4 kanāliem līdz 16 kanāliem.

3.3. tabulā parādītas uztvertā signāla BER vērtības līdz 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmai, kur slīktākais fiksētais kanāls no 4 un 16 kanālu sistēmas risinājumā ir ceturtais kanāls, bet 8 kanālu sistēmas risinājumā – pirmais kanāls. Tomēr tiek uzskatīts, ka pārraides līnijas darbosies kvalitatīvi ar zemiem zudumiem, jo “acs” atvērums visos gadījumos ir atvērts un BER ir zem sliekšņa 1×10^{-10} . Saskaņā ar ITU-T G.984.2 rekomendāciju saistībā ar ieteicamo BER vērtību optiskās šķiedras pārraides sistēmām ar bitu pārraides ātrumu 10 Gbit/s kanālā, BER jābūt mazākam par 10^{-10} [46].

3.3.tabula

BER vērtība līdz 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmā

	4 kanālu sistēma	8 kanālu sistēma	16 kanālu sistēma
BER vērtība sistēmas kanālam ar slīktāko veiktspēju (20 km garai SMF šķiedrai)	1×10^{-40}	2.5×10^{-23}	6.5×10^{-14}

Eksperimentālajā pētījumā tika izpētīts līdz 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēma ar FWM daudzviļņu garuma avotu. FWM efekts tika izmantots, lai ģenerētu vairāku nesēju

(vairāku viļņu garuma) optiskos nesējus 4, 8 un 16 kanālu DWDM-PON pārraides sistēmai. Pirmais solis bija atrast optimālo nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW pumpēšanas lāzera jaudu un HNLF šķiedras garumu FWM nesēja ģenerēšanai, ko varētu tālāk izmantot datu modulēšanai un modulēto optisko signālu pārsūtīšanai. Pētījuma rezultātā tika konstatēts, ka DWDM-PON pārraides sistēmai ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu, pārraides kanālā izmantojot 50 GHz starpkanālu intervālu, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW pumpēšanas jaudas līmenis abiem gaismas avotiem 4 kanālu sistēmas gadījumā bija +20 dBm, pie HNLF 0.9 km laidumā. Lai palielinātu DWDM-PON sakaru sistēmas kanālu skaitu no 4 kanāliem līdz 8 un 16 kanāliem un attiecīgi ģenerētu vairāk nesēju, bija nepieciešams palielināt pumpēšanas nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW jaudu. Tādējādi 8 kanālu sistēmai nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW jauda sasniedza 24.1 dBm pumpējošā avota izejas jaudas līmeni, bet HNLF garums sasniedza 1.39 km. Savukārt 16 kanālu sistēmai tas bija attiecīgi 26.3 dBm un 1.05 km. SBS sliekšnis ir jāņem vērā, lai palielinātu FWM ģenerēto nesēju skaitu DWDM-PON sistēmai ar 8 līdz 16 kanāliem, pretējā gadījumā nesēja izejas jauda ir nevienmērīga, un rezultātā nevar izveidot 16 kanālu sistēmu. BER vērtības un acu diagrammas tika novērtētas DWDM-PON sistēmas sliktākajam kanālam. Analizējot uztverto signālu pēc 20 km laiduma caur SMF, tika novērots, ka 4 kanālu DWDM sistēmā vissliktākā kanāla BER vērtība bija 1×10^{-40} , savukārt 8 kanālu sistēmā vissliktākā kanāla BER vērtība bija $2,5 \times 10^{-23}$, bet 16 kanālu sistēmā vissliktākās veiktspējas kanāla BER vērtība bija 6.5×10^{-14} .

3.3. Signāla reģenerācijas ietekmes novērtējums DWDM risinājumiem

Šim pētījumam sistēmas jaudas patēriņa novērtējums tika veikts divos posmos. Sākotnēji tika noteikta saistība starp BER līmeni un starpkanālu intervālu uz fiksētu šķiedras garumu, izmantojot *RSoft*, *OptSim* simulācijas programmatūru, lai definētu pārraides attālumu un tās saistību atkarībā no lietotā starpkanālu intervāla katram aplūkojamajam sistēmas uzstādījumam [141, 142]. Centrālā kanāla viļņa garuma piešķiršana tika balstīta uz ITU-T G.694.1 rekomendāciju. Šajā rekomendācijā ir norādīta arī nominālā centrālās frekvences precizitāte, kas ir vienāda ar 6.25 GHz, atbilstoši īpaši blīva viņgarumdales blīvēšana (UDWDM). Tāpēc starpkanālu intervāls šajā eksperimentālajā daļā tika palielināts par 6.25 GHz intervālu katrā simulācijas solī, lai atrastu frekvenču plānu, kurā BER līmenis kļūst zemāks par 1×10^{-3} sliekšņa vērtību. Aprēķina kodā pārsūtīto datu apjoms tiek definēts kā mainīgais lielums, kas bija nepieciešams, lai aprēķinātu nepieciešamo WDM komponentu skaitu, kā arī aprēķināto pārraides sasniedzamību un izvēlēto pārraides attālumu nosaka kopējo sistēmas jaudas patēriņu. Atbilstoši izvēlētajiem parametriem, enerģijas patēriņš kļuva par pārraidīto datu funkciju. Aprēķinu iestatīšana ļāva novērtēt jaudas efektivitāti, dalot enerģijas patēriņu ar pārraidīto datu daudzumu [143, 144].

Aprēķinu nolūkos pārraides attālums tika noteikts 2960 km, kas ir salīdzināms ar Nacionālā Zinātnes fonda tīkla (NSFNET) garāko mezglu – Amerikas Savienotās Valsts tīklu, kas tiek izmantots daudzos zinātniskajos pētījumos [145, 146].

Atbilstoši šiem pētījumiem, šajā eksperimentā tika pieņemts, ka kopējo WDM sistēmas enerģijas patēriņu var aprēķināt, izmantojot vienādojumu (3.7.):

$$P_{\text{WDM}} = P_{\text{ROADM}} + P_{\text{TRANS}} + P_{\text{WDMTERM}} + P_{\text{OLA}} + P_{3R}, \quad (3.7.)$$

kur P_{WDM} - kopējais WDM sistēmas jaudas patēriņš, W;

P_{ROADM} – optiski pārkonfigurējama pievienošanas multiplexora enerģijas patēriņš, W;

P_{TRANS} – transpondera jaudas patēriņš, W;

$P_{WDMTERM}$ – WDM termināļa jaudas patēriņš, W;

P_{OLA} – optiskā līnijas pastiprinātāja jaudas patēriņš, W;

P_{3R} – 3R (atkārtota pastiprināšana, pārveidošana, atkārtota laika noteikšana) reģeneratora patēriņš, W.

Pamatojoties uz attiecīgiem pētījumiem [144, 145, 147], transponderu un 3R reģeneratoru jaudas patēriņa vērtības atkarībā no modulācijas: bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar ieslēgšanas-izslēgšanas manipulāciju (NRZ-OOK), bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar diferenciālās fāzes manipulāciju (NRZ-DPSK), bez atgriešanās pie nulles līnijas kods ar kvadrātūras fāzes manipulāciju (NRZ-QPSK) ir apkopotas 3.4. tabulā.

3.4. tabula

Transponderu un 3R enerģijas patēriņš, W

Pārraides ātrums (Gbit/s)	Modulācijas formāts	Patērētājs	Jauda (W)
10	NRZ-OOK	TP/3R	34.0 (Typ.)
40	NRZ-DPSK	TP/3R	85 (Max)
100	DP-QPSK	TP/3R	139 (Typ.)

Atbilstoši, tika ņemts vērā, ka iekārta normālos darbības apstākļos nepatērē definēto maksimālo jaudu. Tāpēc aprēķiniem nominālais jaudas patēriņš tika pieņemts 75 % robežās no noteiktās maksimālās vērtības.

Aprēķiniem izmantoto pārkonfigurējamo optisko pievienošanas nomainīgas multiplexeri ROADM un WDM termināļu jaudas patēriņš ir parādīts 3.5. tabulā [143, 145, 147].

Optiskās līnijas pastiprinātāja barošanas blokiem nepieciešama 110 W jauda darbības nodrošinājumam [143, 144, 145].

Lai novērtētu jaudas efektivitāti un reģenerācijas ietekmi dažādos spektrālās efektivitātes stāvokļos, tika noteiktas dažādas kanālu atstatuma vērtības, pamatojoties uz ITU-T G.694.1 rekomendāciju.

3.5. tabula

ROADM un WDM termināļa enerģijas patēriņš, W

Iekārta	Jaudas patēriņš	
	40 kanālu realizācija	80 kanālu realizācija
WDM terminālis	230 (W)	240 (W)
ROAD multiplexseris	450 (W)	600 (W)

Ekspierimentālajā pētījumā enerģijas patēriņa vērtības katrai aplūkotajai sistēmas realizācijai tika novērtētas, izmantojot dažādus starpkanālu intervālus, pamatojoties uz to, ka kanāliem šķērsrunas traucējumi ir unikāli katram signāla veidam, kas darbojas vienā frekvenču diapazonā. Tā kā šī eksperimenta mērķis ir novērtēt reģenerācijas ietekmi uz jaudas efektivitāti un kopējo enerģijas patēriņu, tad attiecīgi nav vērtīgi analizēt dažādas sistēmas, izmantojot vienādu kanālu sadalījumu. Eksperimenta analīzei paredzētā zemākā frekvenču intervālu

robeža tika izvēlēta, balstoties uz augstāko spektrālo efektivitāti, ko iespējams sasniegt, nodrošinot definēto BER prasību izpildi. Augšējā robeža tika iegūta no apstākļiem, kad pārraides apjomi sasniedza maksimumu, kas nozīmēja, ka turpmāka frekvences robežas palielināšana novestu tikai pie spektrālās efektivitātes samazināšanās lietderīgi pozitīvi neietekmējot enerģijas patēriņu. Tā kā šajā pētījumā aplūkotas dažādas spektrālās efektivitātes dažādos frekvenču intervālos, pārraides sasniedzamība kļuva atkarīga no starpkanālu intervāla. Saistība starp frekvenču intervālu jeb starpkanālu intervālu, spektrālo efektivitāti (SE) un pārraides sasniedzamību ir apkopota 3.6. tabulā.

3.6. tabula

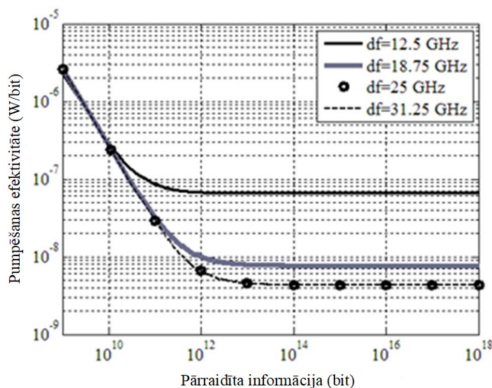
Spektrālā efektivitāte un sistēmas sasniedzamība ar dažādām kanālu atstatuma vērtībām

Kanālu atstatums (GHz)	SE (bit/Hz)	Sasniegtais attālums (km)
10 Gbit/s NRZ-OOK		
12.50	0.80	160
18.75	0.53	1680
25.00	0.40	5700
31.25	0.32	8720
40 Gbit/s NRZ-DPSK		
50.00	0.80	160
56.25	0.71	240
62.50	0.64	560
75.00	0.53	960
87.50	0.46	1440
100.00	0.40	2080
112.50	0.36	2080
100 Gbit/s DP-QPSK		
31.25	3.20	160
37.50	2.67	400
43.75	2.29	1040
50.00	2.00	1360

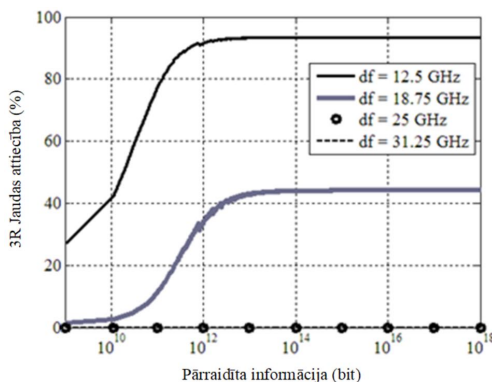
Definējot sistēmas pārraides sasniedzamību un WDM elementu jaudas patēriņu, tika novērtēta 3R reģeneratoru jaudas efektivitāte un jaudas attiecība. Rezultāti ir parādīti 3.12.–3.17. att.

3.12. un 3.13. att. parādītas aplūkojamo parametru līknes NRZ-OOK sistēmas konfigurācijai ar 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā, no kurām var novērot, ka kopējai pārraidītajai datu plūsmai sasniedzot apmēram 1013 bitus, jaudas efektivitāte un 3R patērētās jaudas attiecība stabilizējas, kas ļauj veikt pieņemumu, ka sistēmas funkcionēšanas laikā parametri būtiski nemainīsies un iegūtās vērtības var izmantot sistēmas novērtēšanai un salīdzināšanai. Neskatoties uz vienādu jaudas efektivitāti, darbība ar starpkanālu intervāla vērtībām, kas lielākas par 25 GHz, aplūkotajā sistēmā ir nepraktiska spektrālās efektivitātes ziņā. Signāla sasniedzamība šādos gadījumos kļūst lielāka par pārraides diapazonu un signāla reģenerācija nav nepieciešama, līdz ar to jaudas efektivitāte šajā gadījumā sasniedz minimālo vērtību – 4.30 nW/bit. 12.5 GHz un 18.75 GHz starpkanālu intervālu gadījumos jaudas

efektivitātes vērtības ir attiecīgi 7.7 un 65.5 nW/bit, kas ir salīdzinoši straujš enerģijas patēriņa pieaugums, jo attiecīgi viena bita pārraidei nepieciešamā enerģija ir vairāk nekā 15 reizes lielāka nekā izmantojot 25 GHz starpkanāla intervāla diapazonu. Līdz ar to var secināt, ka, ja nepieciešamības gadījumā būtu jāpaaugstina spektrālā efektivitāte, par iespējami labākiem risinājumiem no jaudas patēriņa viedokļa būtu jāuzskata citi signālu veidi, jo, kā redzams no 3.13. att., eksperimentā izmantojot 12.5 GHz un 18.75 GHz starpkanālu intervālu, starp kanāliem pie datu pārraides ātruma 10 Gbit/s kanālā signāla atjaunošanai nepieciešami 93.43 % un attiecīgi 44.15 % no kopējās patērētās jaudas.

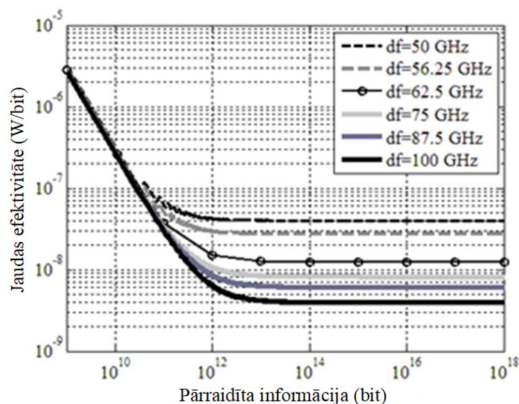


3.12. att. 10 Gbit/s NRZ-OOK jaudas efektivitātes līkne.

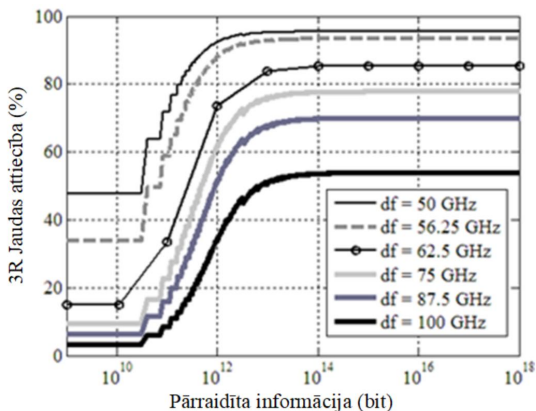


3.13. att. 10 Gbit/s NRZ-OOK 3R reģeneratoru jaudas attiecības līkne.

Otrs aplūkojamais pārraides signāla veids eksperimentālajā daļā ir NRZ-DPSK pie datu pārraides ātruma 40 Gbit/s kanālā. Attēlos 3.14. un 3.15. un 3.7. tabulā parādītas aplūkotā starpkanālu intervāla vērtības. Tā kā šajā gadījumā pārraides ātrums ir definēts 40 Gbit/s kanālā, signāla spektrs bija ievērojami plašāks, salīdzinot ar NRZ-OOK pie datu pārraides ātruma 10 Gbit/s kanālā spektru. Rezultāti uzrādīja plašākas starpkanāla intervāla nepieciešamību, lai sasniegtu tādu pašu pārraides kvalitāti (QoT). Attiecīgi balstoties uz šiem rezultātiem, sistēmas tika novērtētas, izmantojot 50–100GHz starpkanālu intervālu. Kopumā tika analizēti seši starpkanālu intervāli. Iegūtie rezultāti uzskaitīti 3.7. tabulā.



3.14. att. 40 Gbit/s NRZ-DPSK jaudas efektivitātes līkne.



3.15. att. 40 Gbit/s NRZ-DPSK 3R reģeneratoru jaudas attiecību līkne.

3.7. tabula

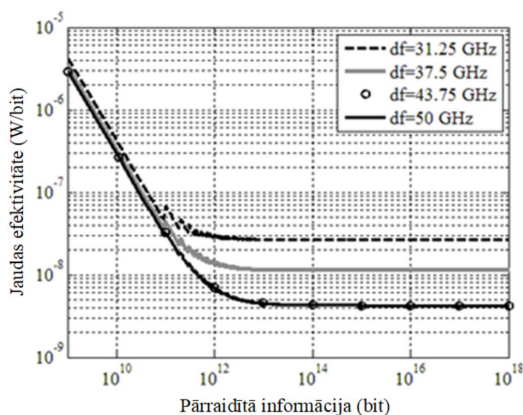
Jaudas attiecību vērtības PE un 3Rs, kas darbojas dažādās frekvences slotos

Kanālu atstatums (GHz)	Jaudas efektivitāte (nW/bit)	Jaudas attiecība pie 3Rs (%)
50.00	40.07	95.46
56.25	27.32	93.34
62.50	12.44	85.38
75.00	8.19	77.80
87.50	6.07	70.03
100.00	3.94	53.88

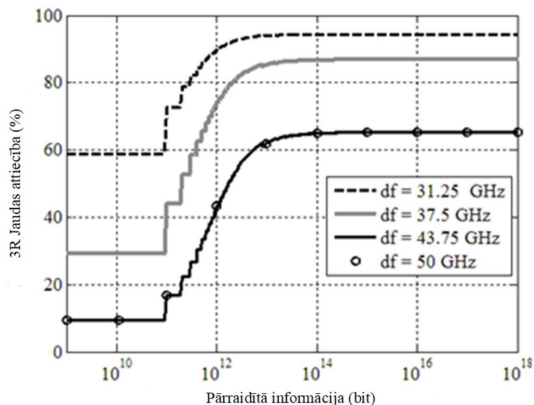
Uz plašāka signāla spektra pamata, palielinot starpkanālu intervālu, jaudas efektivitāte mainījās vienmērīgāk nekā gadījumā pie datu pārraides ātruma 10 Gbit/s. Līdz ar to starpkanālu intervāla palielināšanai par 12.5 GHz nebija tik būtiskas ietekmes uz sistēmas energoefektivitāti. Šajā gadījumā 3Rs jaudas attiecībai bija lielāka ietekme uz kopējo enerģijas patēriņu (vairāk nekā 50% katrai aplūkotajai konfigurācijai), salīdzinot ar NRZ-OOK, jo šī signāla veida pārraides sasniedzamība bija īsāka. Tomēr, ja NRZ-DPSK pie datu pārraides ātruma 40 Gbit/s darbojas ar 100.0 GHz starpkanālu intervāla, tā jaudas efektivitātes vērtība ir

3.94 nW/bit, kad labākais scenārijs NRZ-OOK pie 10 Gbit/s datu pārraides ātruma bija attiecīgi 4.3 nW/bit, kas darbojas ar 25.0 GHz starpkanālu intervālu. Tas nozīmē, ka viena bita pārraidei NRZ-OOK patērē $\approx 8.37\%$ vairāk jaudas nekā NRZ-DPSK ar tādu pašu spektrālo efektivitāti.

Līdzīga situācija veidojas, kad starpkanālu traucējumi ir vizitteiktākie, darbojoties attiecīgi ar 12.5 un 50.0 GHz starpkanālu intervālu. Neskatoties uz to, ka 3Rs jaudas attiecība OOK un DPSK ir 93.43% un attiecīgi 95.46%, jaudas efektivitāte pie 40 Gbit/s datu pārraides ātruma sistēmas realizācijas ir 40.07 nW/bit pret attiecīgi 65.5 nW/bit pie 10 Gbit/s gadījumā, kas nodrošina $\approx 63\%$ atšķirību nepieciešamajam jaudas lielumam viena bita pārraidei. DP-QPSK pie datu pārraides ātruma 100 Gbit/s rezultāti ir apkopoti 3.16. un 3.17. attēlos.



3.16. att. 100 Gbit/s DP-QPSK jaudas efektivitātes līkne.



3.17. att. 100 Gbit/s DP-QPSK 3R jaudas attiecības līkne.

Iegūtie rezultāti liecina, ka minimālais starpkanālu intervāls, lai garantētu nepieciešamo BER līmeni, ir 31.25 GHz, kas nodrošina jaudas efektivitātes līmeni, kas vienāds ar 26.50 nW/bit. Pateicoties ļoti efektīvajam modulācijas formātam, spektrālā efektivitāte šajā gadījumā ir četras reizes lielāka salīdzinājumā starp NRZ-OOK ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s un NRZ-DPSK ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s sistēmām, turklāt aplūkotā pārraides sistēma ir 147% un 51% energoefektīva, salīdzinot attiecīgi ar NRZ-DPSK un NRZ-OOK.

Attiecīgi šajos eksperimentos 3R koeficienti ir 65.26%, 86.80% un 94.42%, kas darbojas attiecīgi 43.75, 37.5 un 31.25 GHz starpkanālu intervālos. Pētījumi liecina, ka starpkanāla

intervāla vērtību, kas lielāka par 43.75 GHz, izmantošana konkrētajai sistēmai ir nepamatota un neietekmē sistēmas enerģijas patēriņu. Izmantojot 43.75 GHz starpkanālu intervālus, sistēmas jaudas efektivitātes parametrs ir 4.26 nW/bit, kas nozīmē, ka 40 Gbit/s NRZ-DPSK pārraides sistēma, kas izmanto 100 GHz starpkanālu intervāla diapazonu, labākajā gadījumā var būt par $\approx 8,1\%$ vairāk enerģijas nekā 100 Gbit/s DP-QPSK.

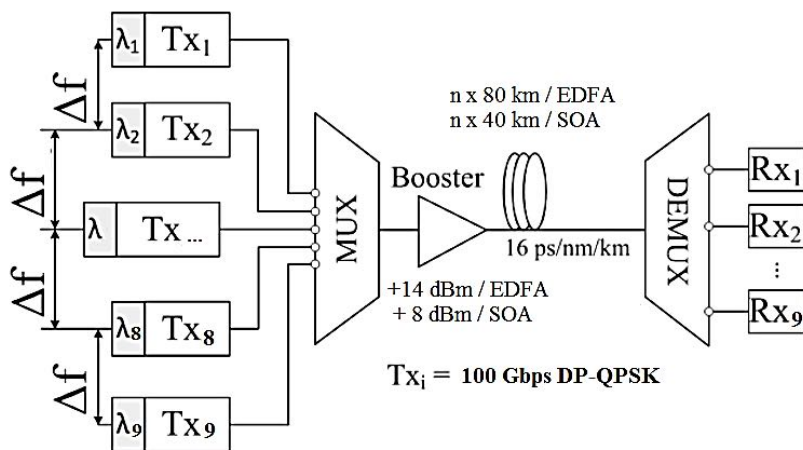
Šajā eksperimentālajā pētījumā tika pētīts trīs visplašāk lietoto signālu modulācijas formātu jaudas efektivitāte DWDM sistēmās. Analītiskais modelis tik izstrādāts ar mērķi, lai signāla noteikšanas kļūdu varbūtības koeficients uztveršanas mezglā 2960 km no punkta uz punktu (P2P) pārraides attālumā būtu zemāks par 1×10^{-3} . Šim nolūkam ar simulācijas palīdzību, izmantojot *RSoft*, *OptSim* programmatūru, tika definēts pārraides sasniedzamība katram definētajam parametram, un, izmantojot iegūtos rezultātus, tika aprēķināts sistēmas jaudas patēriņš un efektivitāte. Tajā skaitā tika pārbaudīta signāla reģenerācijas procesa ietekme uz kopējo sistēmas enerģijas patēriņu katram simulācijas risinājuma iestatījumam. Rezultāti tika parādīti kā pārraidīto datu apjoma funkcijas, kas darbojas pie dažādām starpkanālu intervāla vērtībām, kas ļauj pielāgot rezultātus WDM realizācijās ar dažādām pieejamajām spektra joslām.

Šis pētījums sniedz jaudas efektivitātes vērtības un DWDM iestatījumu salīdzinājumu, kas darbojas pie 10 Gbit/s NRZ-OOK, 40 Gbit/s NRZ-DPSK vai 100 Gbit/s DP-QPSK pārraides signāliem, un ir iespējams fiksēt nepieciešamo jaudas attiecību. Pētījuma ietvaros iegūtie rezultāti minētajiem uzstādījumiem var tikt izmantoti energoefektīvas DWDM sistēmas projektēšanā.

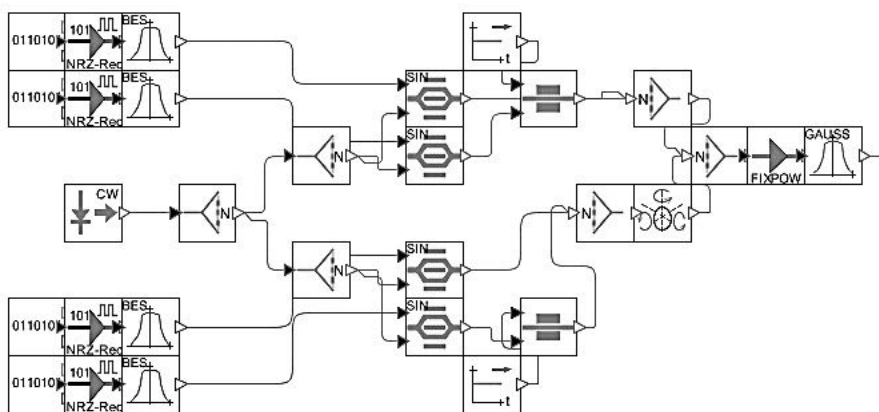
3.4. Jaudas efektivitātes izmaiņas novērtējums DWDM sakaru sistēmas risinājumā atkarībā no lietotā pastiprinātāja veida

Šīs apakšnodaļas eksperimentālās daļas iestatījumu definēšanai un informācijas vākšanas un apstrādes metodoloģija ir līdzīga kā iepriekšējās apakšnodaļas aprakstītajam. Atbilstoši šī pētījuma mērķiem tik mainīti tikai ievades dati un sistēmas parametri. Šajās simulācijās fokuss vairāk tika likts uz parametru definēšanas pamatojumu. Vispirms tika simulēta DWDM pārraides saistība ar EDFA un SOA pastiprinājumiem vairākiem pārraides attālumiem, izmantojot *RSoft*, *OptSim*, WDM komponentu tehniskās datu lapas un jaunāko pētījumu rezultātus attiecībā uz specifiskām SOA parametru definīcijām. Izstrādātajā pārraides sistēmā netika iekļautas turpverstās labošanas kodu (FEC) shēmas. Attiecīgi tāpēc šīs simulācijas galvenais mērķis ir sasniegt uztverējā Q faktora līmeni, kas lielāks par 16 dB, kas atbilda 1×10^{-9} bitu kļūdu attiecībai BER, kas tika mērīta visvairāk degradētajā kanālā – centrālajā kanālā. Sasniedzot nepieciešamos Q līmeņus dažādam šķiedru laidumu skaitam, MATLAB vidē tika izveidots jaudas analītiskais modelis, patēriņa, sistēmas jaudas un jaudas efektivitātes aprēķinam, definējot jaudas patēriņa vērtības no pieejamajām WDM komponentu tehniskajām datu lapām.

Optiskā signāla izplatīšanos DWDM sistēmas vidē risina ar dažādām pastiprināšanas metodēm, modelēšanai tika izveidoti deviņi pārraides kanāli, kas izvietoti (Δf) ar 50 GHz starpkanālu intervālu, un izmantojot DP-QPSK modulāciju ar datu pārraides ātrumu 100 Gbit/s. Vienkāršots sistēmas dizains parādīts 3.18. att., savukārt raidītāja modelis ir parādīts 3.19. att.



3.18. att. Vienkāršota DWDM sistēmas konstrukcija Q faktora novērtēšanai. [150]



3.19. att. 100 Gbit/s DP-QPSK raidītāja modelis.

Šajā eksperimentālajā simulācijā centrālais viļņa garums tika iestatīts uz 193.0 THz standarta 193.1 vietā. Tas tika darīts, lai ņemtu vērā iespējamus papildu traucējumus, piemēram, lielākus zudumus OŠ [150].

Nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avots CW tika sadalīts četros konstantos staros ar jaudas līmeni 0 dBm, kur katru no tiem pārvaldīja 25 Gbit/s pseidogadījuma bitu secības (PRBS) ģeneratori, izmantojot elektrisko impulsu ģenerаторus un amplitūdas modulatorus. 90 ° fāzes modulācija tika veikta diviem modulētiem optiskajiem stariem, kuri pēc fāzes modulācijas tika apvienoti divi signāli ar ortogonālām fāzēm turpmākai polarizācijas modulācijai. Visi četri optiskie signāli tika apvienoti un pārraidīti caur divpusējo optisko Gausa filtru, t.i., 3-dB joslas platums ir vienāds ar 35 GHz.

Kanālu skaits tika noteikts ar nelineāro kroplojumu statistisko aprēķinu [151], kas parādīja, ka XPM ietekme uz konkrētu pārraides kanālu pret četriem nākamajiem kanāliem sasniedza ~ 97% no maksimālā iespējamā. Pēc tam ģenerētie un kombinētie optiskie signāli tiek pastiprināti ar EDFA pastiprinātāja modeli ar fiksētu optisko izejas jaudu 14 dBm un ienestais trokšņu

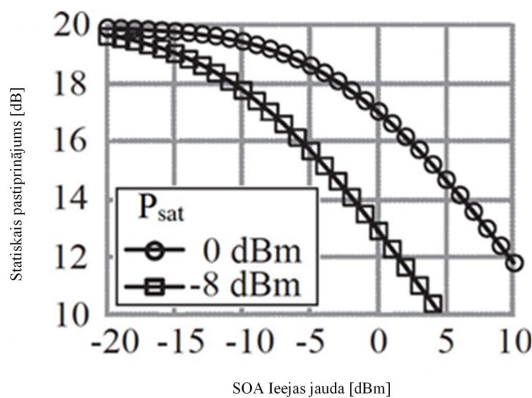
rādītājs $NF = 4.5$, vai ar SOA pastiprinātāja modeli ar 8 dBm signāla pastiprinājumu, ienestais trokšņu rādītājs $NF = 8$ un 14 dBm tipiskā piesātinājuma jaudu (P_{sat}).

Jāpiebilst, ka SOA veikspējai var būt divi režīmi – statistais, pieņemot, ka nav pastiprinājuma svārstību, un dinamiskais. Statisko režīmu var atrast šādi (3.8.) [152]:

$$h(t) = \ln(G_0) - \left[\frac{P_{in}(t)}{P_{sat}} \right] * [e^{h(t)} - 1], \quad (3.8)$$

- kur $h(t)$ - SOA pastiprinājuma eksponente;
- G_0 - SOA mazs signāla pastiprinājums;
- $P_{in}(t)$ - SOA ieejas jauda.

No vienādojuma (3.8.) mēs varam iegūt divus dažādus gadījumus – lineāro, kad $P_{in} \leq P_{sat}$ un nelineāru, kad $P_{in}(t)$ tuvojas SOA piesātinājuma jaudai P_{sat} , kas samazina statistiskā pastiprinājuma līmeni. SOA statistiskā pastiprinājuma eksponenta degradācijas piemēri, ko izraisa nelineāri kropļojumi, ir attēloti 3.20. attēlā, atrisinot SOA pastiprinājuma vienādojumu, izmantojot 4. kārtas Runge Kutta metodi. Tiek uzskatīts, ka divas SOA piesātinājuma spējas ilustrē dažādas ietekmes pakāpes [152].



3.20.att. SOA pastiprinājuma samazinājums, ko izraisa ievades jauda [152].

Savukārt dinamiskajam režīmam tiek pieņemts, ka $P_{in}(t)$ un $h(t)$, svārstās ap to mediānām $P_{in_{av}}$ (3.9.) un h_{av} (3.10.):

$$P_{in}(t) = P_{in_{av}} + \Delta P_{in}(t), \quad (3.9.)$$

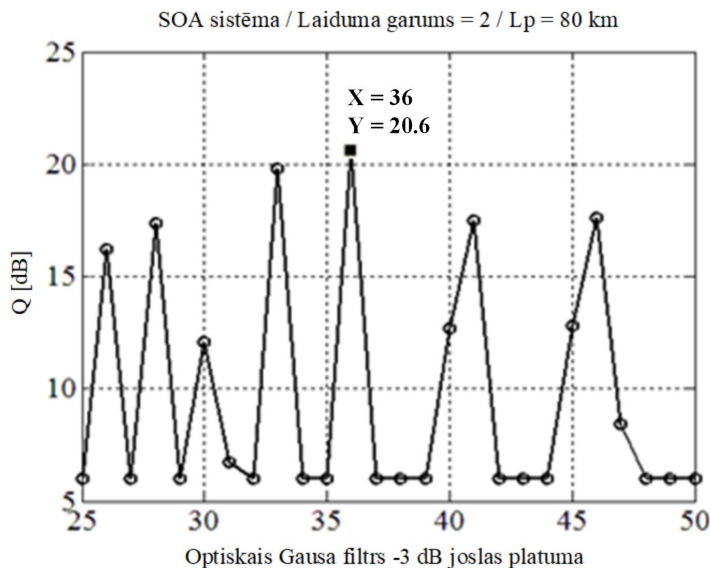
$$h(t) = h_{av} + \Delta h(t), \quad (3.10.)$$

Dinamiskajā režīmā SOA pieaugumu, ņemot vērā dažus tuvinājumus [3.9.], var izteikt šādi (3.11):

$$\left[1 + \tau_c \cdot \frac{d}{dt} \right] \cdot \Delta h(t) = - \left[\frac{\Delta P_{in}(t)}{P_{sat}} \right] \cdot e^{h_{av}}, \quad (3.11.)$$

kur τ_c - attiecas uz nesēja kalpošanas laiku.

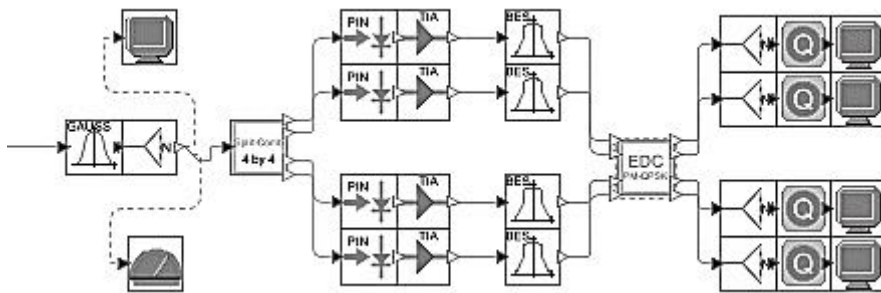
Pēc vienādojuma (3.11.) var secināt, ka dinamiskais SOA pastiprinājums nenotiek lineārajā režīmā ($P_{in}(t) \leq P_{sat}$). Jāpiebilst, ka nelineārā stāvoklī pastiprinājuma svārstības ietekmē signāla svārstības SOA ieejā. Tas norāda uz SOA nelinearitātes jutīgumu pret modulācijas formātiem, izmantojot laikā mainīgas jaudas vērtības [152], un nodrošina signāla modulācijas izvēles pamatojumu šajā pētījumā. Lai attēlotu korelāciju starp ievades un piesātinājuma jaudas attiecību un Q līmeni, var aprēķināt, ka, ja ievades jaudas vērtības tiek definētas 0 dBm un 5 dBm ar 6 dBm piesātinājuma jaudu, Q2 līmenis sasniedz 12 dB un 5 dB, attiecīgi ($\Delta Q2 = 7$ dB). SOA ar lielāku piesātinājuma jaudu ir mazāk pakļauti nelabvēlīgiem nelineāriem kropļojumiem [152]. Iepriekš minētās attiecības tiek padotas uz 40 km optiskās šķiedras laidumu SOA sistēmai, jo darbība ap 14–16 dBm jaudu lielākiem šķiedras laiduma zudumiem var negatīvi ietekmēt optiskās šķiedras spektrālo formu, pastiprināšanas līkni un sistēmas vispārējo veiktspēju. Šajā eksperimentā pastiprinātais signāls tika palaists OŠ (izmantojot 40 km laidumu SOA sistēmām un 80 km EDFA sistēmām), kur ienestais vājinājums $\alpha = 0.2$ dB/km, efektīvais laukums = 80 μm^2 , dispersijas koeficients $D = 16$ ps/nm/km, un Kerra nelineārais koeficients $\gamma = 1.26$ 1/W/km. Vadoties no jaunākajiem pētījumiem, kuros tika novērtēta signāla pārraides kvalitāte, ņemot vērā dažādus SOA parametrus un WDM pārraides sistēmas konfigurācijas [152, 153], uzkrātā izkliede pēc opto-elektriskās pārveides tika kompensēta ar elektroniskās dispersijas kompensācijas (EDC) moduli uztvērēja pusē, nevis optiskās šķiedras dispersijas kompensācijas moduli DCM, kas iekļauts tieši aiz pārraides OŠ. Uztvērēja pusē katrs signāls tika filtrēts no kopējās optiskās plūsmas ar divpusēju Gausa filtru, t.i., 3-dB joslas platums tika rūpīgi noregulēts katram pārraides garumam, lai definētu joslas platuma vērtību, kas nodrošina visaugstāko pārraides kvalitāti. Šāds novērtējuma piemērs SOA sistēmai ar $L_p = 80$ km ir attēlots 3.21. att.



3.21.att. Optiskā Gausa filtra regulēšana.

Turklāt 100 Gbit/s DP-QPSK signāls tika sadalīts četros 25 Gbit/s signālos ar 4 x 4 QPSK sadalītāju, pamatojoties uz to fāzi un polarizāciju, un pēc tam ar PIN fotodiodi pārveidots

elektriskos signālos, izvadīts caur LPF filtru elektroniskās dispersijas kompensāciju EDC un noteikts ar Q faktora novērtējumu. Uztvērēja blokshēma parādīta 3.22. att.



3.22.att. 100 Gbit/s DP-QPSK uztvērēja modelis.

Pārraides garums tika simulēts, izmantojot iterācijas cilpas funkciju un norādot vairākus šķiedru laidumus EDFA un SOA pastiprināšanas sistēmām. Šajā pētījumā tika izmantoti 5 pārraides garumi - 80 km, 160 km, 240 km, 320 km un 640 km, un katram garumam tika atrasta parametru kopa, lai izpildītu Q faktora prasību > 16 dB, izmantojot standarta starpkanālu intervālu $\Delta f = 50$ GHz. Tas pastiprināja pieņēmumu, ka SOA varētu izmantot kā alternatīvas pastiprināšanas ierīces, nevis EDFA, saglabājot to pašu frekvenču tīklu.

Atbilstoši iepriekš aprakstītajam šajā nodaļā un realizētam tika izstrādāts analītiskais modelis, ņemot vērā kanālu granularitāti $\Delta f = 50$ GHz. Izmantotie joslas platumi tika noteikti atsevišķi EDFA, kas bija standarta C-josla (1530–1565 nm) ar 86 kanāliem, un SOA pastiprināšanas sistēmām – 1530–1605 nm, neskaitot viļņa garumu. 1565 nm līdz 1569 nm, jo trūkst pieejamu lāzera avotu pārejas intervālā starp C un L joslām [152], kam kopumā ir 182 pārraides kanāli, ko pastiprina SOA. Šāda sadale nodrošināja ≈ 2.12 reizes lielāku pārraides jaudu (18.2 TBit/s) un par 7% lielāku spektrālo efektivitāti, salīdzinot ar EDFA (attiecīgi SE = 2.10 un 1.96 bit/Hz).

Enerģijas patēriņa līmeņi tika definēti, pamatojoties uz pieejamajām komponentu tehniskajām datu lapām: DP-QPSK raidzuvērējiem = 19 W, SOA jaudas patēriņš = 4 W un EDFA jaudas patēriņš = 30 W. Jaudas efektivitātes vērtības var aprēķināt un salīdzināt pēc vienādojuma 3.12. Iegūto rezultātu salīdzinājumi attēloti 3.23. un 3.24. att.

$$PE_x = \frac{P_x}{BW_x}, \quad (3.12.)$$

$$P_x = N_{ch,x} \cdot P_x + N_{sp} \cdot P_{x_{amp}}, \quad (3.13.)$$

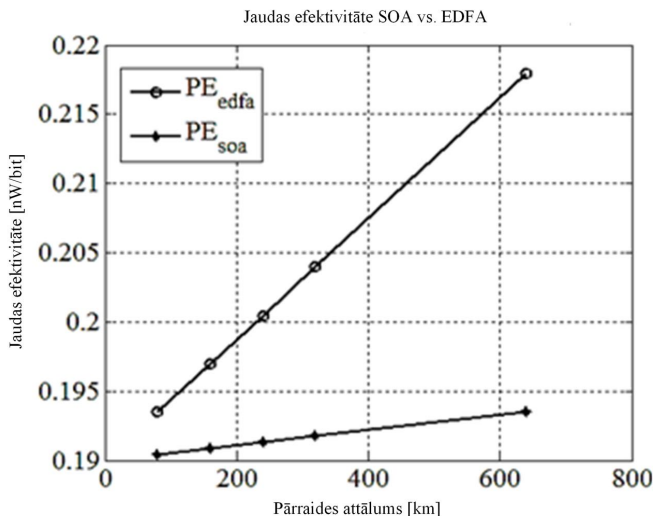
kur - X attiecas uz konkrētu EDFA vai SOA sistēmas parametru;

PE_x – jaudas efektivitāte, [W/Hz];

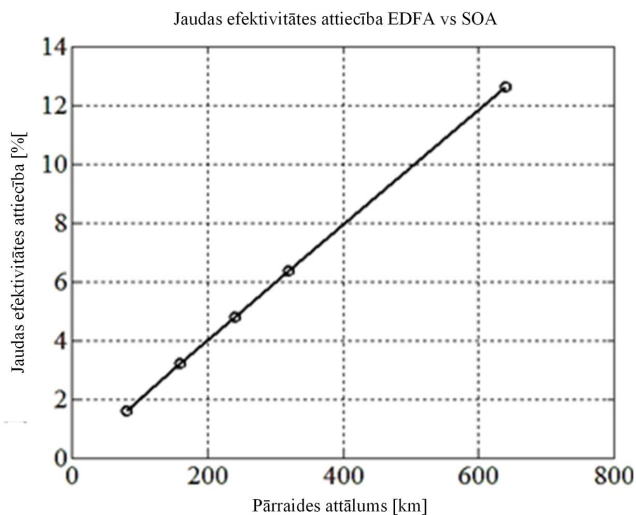
BW_x – izmantotais spektrālais joslas platums, [Hz];

P_x – kopējais enerģijas patēriņš, [W].

Atšķirībā no iepriekšējo pētījumu rezultātiem, kas pieejami publikācijās [149, 148, 155] kopējā jaudas patēriņa aprēķinos netika iekļauts ROADM termināļu jaudas patēriņš, fokusējot uz sistēmas komponentēm, jo bija nepieciešams definēt izlietotās jaudas apjomu un uzsvērt signālu ģenerēšanas un reģenerācijas jaudas vajadzības.



3.23.att. Jaudas efektivitātes līmeņi aplūkotajos pārraides attālos.



3.24.att. Jaudas efektivitātes līmeņu saistība EDFA un SOA.

Šī pētījuma galvenais mērķis bija novērtēt ietekmi uz energoefektivitātes līmeni, aizstājot EDFA ar SOA, ņemot vērā jaunākos atklājumus par SOA. Balstoties uz pētījumiem, kas vērsti uz SOA veiktspējas novērtēšanu kā alternatīvu zemu izmaksu pastiprināšanas komponentu DWDM sistēmām aizstājot EDFA ar SOA un ņemot vērā jaunākos atklājumus par SOA, bija nepieciešams veikt iepriekš veikto eksperimentālo simulāciju, lai atrastu labāko kombinēto risinājumu izstrādi tālākiem pētījumiem. Lai sasniegtu šo mērķi, pašreizējā pētījumā tika

izvērtēts un salīdzināts jaudas efektivitātes līmeņi piedāvātajā aizstāšanas scenārijā, kad EDFA pastiprinātā optiskā savienojuma, kur tiek izmantots 86 kanālus C-josla. Kopējā jauda tika dubultota, tā vietā izmantojot SOA, nodrošinot 182 pārraides kanālus, pateicoties plašākai pastiprināšanas joslai. Abās konfigurācijās tika izmantoti 100 Gbit/s DPQPSK pārraides signāli, kas atdalīti ar 50 GHz kanālu atstarpi.

Pirmajā simulācijas solī tika parādīts, ka, ņemot vērā korelāciju starp nelineārajiem kropļojumiem un pusvadītāju pastiprinātāja ieejas jaudas $P_{in}(t)$ un piesātinājuma jaudas P_{sat} attiecību, bija iespējams pielāgot pārraides parametrus tā, lai Q faktors ir lielāks par 16 dB līdz 640 km garā OŠ līnijā.

Tālāk, pamatojoties uz iegūtajiem rezultātiem un pieejamajiem pārraides sistēmas komponentu parametriem, tika aprēķināti ergoefektivitātes līmeņi. Aprēķināto vērtību salīdzinājums parādīja, ka sistēmai ar SOA pastiprinājumu viena bita pārraidei bija nepieciešams mazāk enerģijas un šī atšķirība kļuva ievērojamāka lielākiem pārraides attālumiem – no 1.6% līdz 12.6%, attiecīgi 80 km un 640 km garām OŠ līnijām. Tas pierāda, ka SOA kopā ar salīdzinoši zemajām komponentu izmaksām varētu sniegt papildu ekoloģiskos un finansiālos ieguvumus.

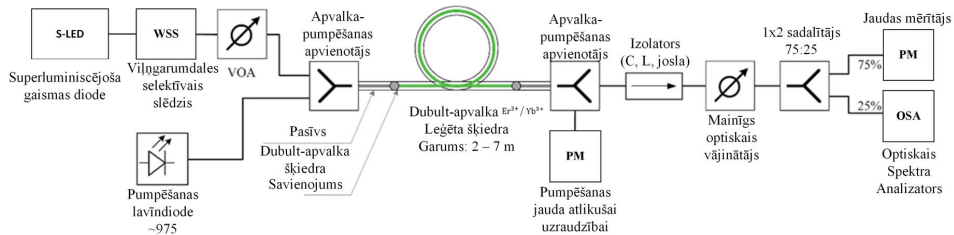
3.5. Jauna inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģēto šķiedru izveide un novērtējums ŠOPS

Šī eksperimenta galvenais mērķis ir izpētīt risinājumu optiskajam pastiprinātājam, kura pamatā tiek izmantota dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētā šķiedra, t.i. salīdzināt optisko nesēju pastiprinājuma izmaiņas atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma (2-7m), izmantotās daudzmodu pumpēšanas avota izejas jaudas (0.6 – 2.0 W) un viļņa garuma (C-josla). Rezultējoši tiek noteikts pastiprinājums “gain”, darbības josla balstoties uz optisko nesēju jaudas stabilitāti.

3.25. att. ir parādīta eksperimentālā shēma, kuru izmanto inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģēto šķiedru pastiprinājuma mērījumiem šajā eksperimentālajā daļā. Eksperimentālā shēma sastāv no dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ leģētas optiskās šķiedras, kas abos galos ir savienota ar dubultapvalka apvienotāju/sadalītāju nodrošinot pumpējošā avota un optisko nesēju ievades/izvades pieslēguma funkcionalitāti. Šķiedras iekšējā ar retzmeju materiāliem leģētais daļa ir zieda formā, lai panāktu gaismas fokusēšanas efektu, kas veicina pārklāšanos starp daudzmodu pumpēšanas avotu un leģētās šķiedras serdeni. Primārais pastiprināšanas procesa virzītājspēks ir retzemju elementu koncentrācija, kas ir ļoti būtiska šādu pastiprinātāju kombinācijai. Šajā risinājumā izmantotās šķiedras kodols ir leģēts ar erbiju un iterbiju un tas tika noteikts kā atomu procentuālā izteiksme, kas attiecīgi ir 0.06 % un 1,21 % [156]. Tā ir Yb³⁺ un Er³⁺ attiecība 20.17, kas parāda, ka Yb³⁺ spēlē vadošo lomu pumpēšanas gaismas absorbēšanā un šīs enerģijas nodošanā Er³⁺ joniem. Atbilstošie absorbcijas un emisijas šķērsgrizumi, kas aprēķināti no absorbcijas mērījumiem, ir parādīti 3.26. attēlā. Šie dati tika ievadīti modelī, lai noteiktu sākotnējo šķiedru garuma diapazonu un pumpēšanas jaudas līmeņus, kas varētu atbalstīt platjoslas pastiprināšanu C-joslā. [157].

Eksperimentālās shēmas ieejas pusē ir lielas jaudas pumpēšanas avots (daudzmodu pumpēšanas avots) ar centrālo viļņa garumu 975 nm un joslas platumu 6 nm, kas tiek uzturēts 30 ° C temperatūrā ar termoelektrisko dzesētāju (ar peltier termokontrolieri uz lāzera diodei atbilstošu platformu), lai novērstu tā izejas viļņa garuma un jaudas svārstības. Ieejas signāls tiek

ģenerēts, filtrējot gaismu, ko rada superluminiscences gaismas diode (S-LED) ar -10 dB maksimālo optisko izejas jaudu un optiskā signāla joslas platumu robežās no 1526 līdz 1630 nm. Viļņgarumdales selektīvais slēdzis (WSS) tiek izmantots, lai filtrētu S-LED un radītu spektru, kas ierobežots ar C joslu, kas savukārt sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37.5 GHz joslas platumu atbilstošu uzstādījumies iespējojamam WSS. Šis optisko nesēju signāls saturošs 48 kanālu interpretāciju tiks izmantots visām turpmākajām izpētēm, un tā jauda tiks regulēta ar mainīgu optisko vājinātāju (VOA).



3.25.att. Eksperimentālā shēma, ko izmanto inovatīva optiskā pastiprinātāja ar dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģēto šķiedru kanāla pastiprinājuma mērījumiem.

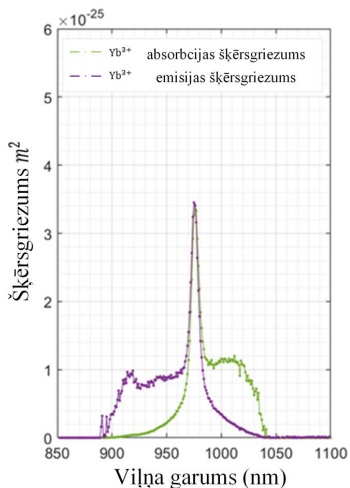
Eksperimentālajā risinājumā dubultapvalka sadalītājs/savienotājs leģētās šķiedras izejas pusē tiek izmantots, lai atdalītu pumpēšanas gaismu no pastiprinātā signāla. Neabsorbētā pumpēšanas gaisma tiek uzraudzīta ar siltuma jaudas sensoru. Tālāk pastiprinātais optiskais signāls ar optisko jaudas sadalītāju (50/50% jaudas dalījums) tiek sadalīts starp fotodiodes bāzētu optiskās jaudas mērītāju (*PM) un optiskā spektra analizatoru (OSA), ko izmanto attiecīgi vidējotā pastiprinājuma “gain” un katra individuālā kanāla pastiprinājuma mērījumiem.

Lai pārbaudītu pastiprinātāju, tika kontrolēti un mainīti šādi trīs parametri konkrētajos diapazonos:

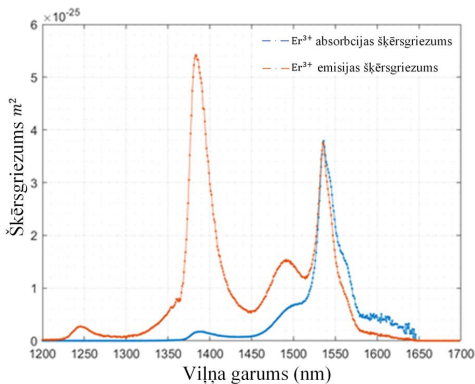
1. $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ dubultapvalka leģētās šķiedras garums no 2 līdz 7 m;
2. Optisko nesēju signāla optiskās jaudas līmenis no -27 līdz -10 dBm (kanālā);
3. 975 nm pumpēšanas avota izejas optiskās jaudas līmenis no 0,6 līdz 2,0 W.

Atbilstoši veiktajam eksperimentam 3.27 att. ir parādīti kanāla pastiprinājuma mērījumi. Katrs diagrammu punkts 3.27. att. ir vidējais pastiprinājums norādītajā kanāla joslas platumā.

Attēlā 3.27. (a) pumpēšanas avots ir iestatīts uz zemāko izejas jaudas līmeni 0,6 W, kas rada ievērojamu maksimālo pieaugumu pie 1536 nm, sasniedzot 34 dB pastiprinājumu izmantojot 2 m garu dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu ar optisko nesēju izejas jaudu -27 dBm. Palielinot dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu, šis maksimums samazinās, un otrais maksimums pie 1544 nm kļūst pamanāmāks, kā arī palielinās pastiprinājums lielākiem viļņu garumiem. Pie 7 m garas dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras sākas trešais maksimums, kas izpaužas pie 1563 nm, bet maksimums pie 1544 nm tiek samazināts. Tas rada relatīvi lineāru pastiprinājumu starp iepriekš minētajiem diviem viļņa garumiem.

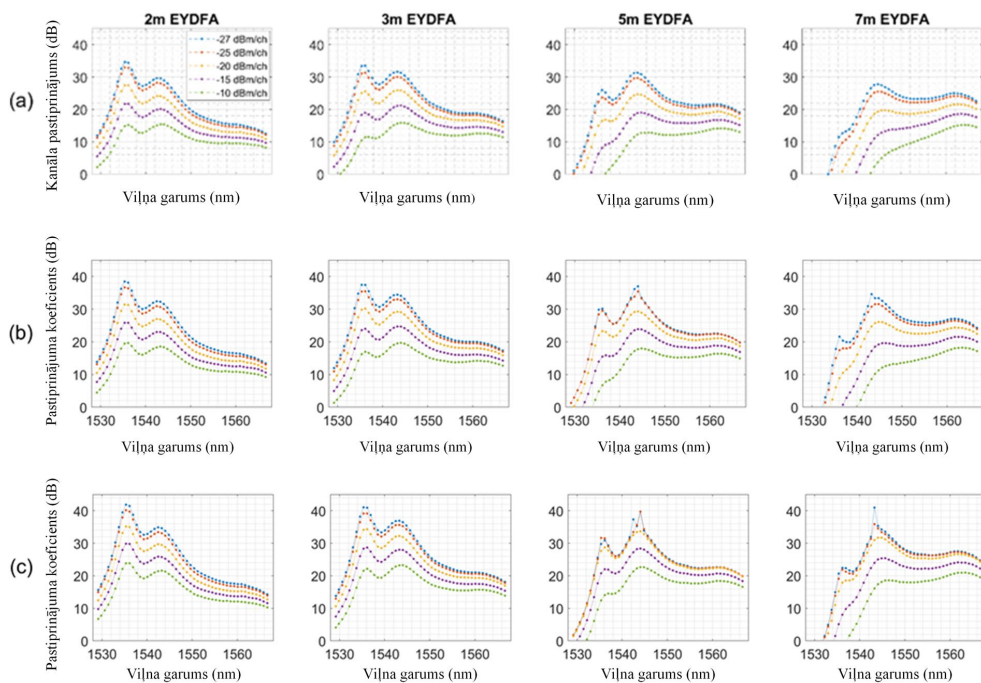


(a)



(b)

3.26. att. Absorbcijas un emisijas šķērsgriezuma spektri, kas aprēķināti no (a) Yb³⁺ un (b) Er³⁺ jonu absorbcijas mērījumiem.



3.27.att. Pastiprinājums atkarībā no dubultapvalka Er³⁺/Yb³⁺ iegētās šķiedras laiduma garuma robežās no 2 m līdz 7 m, pie ieejas nesēju signālu jaudas robežās no -27 līdz -10 dBm, izmantojot 976 nm daudzmodu pumpēšanas avotu ar izejas optisko jaudu, kas iestatīta uz (a) 0,6 W, (b) 1,0 W, c) 2.0

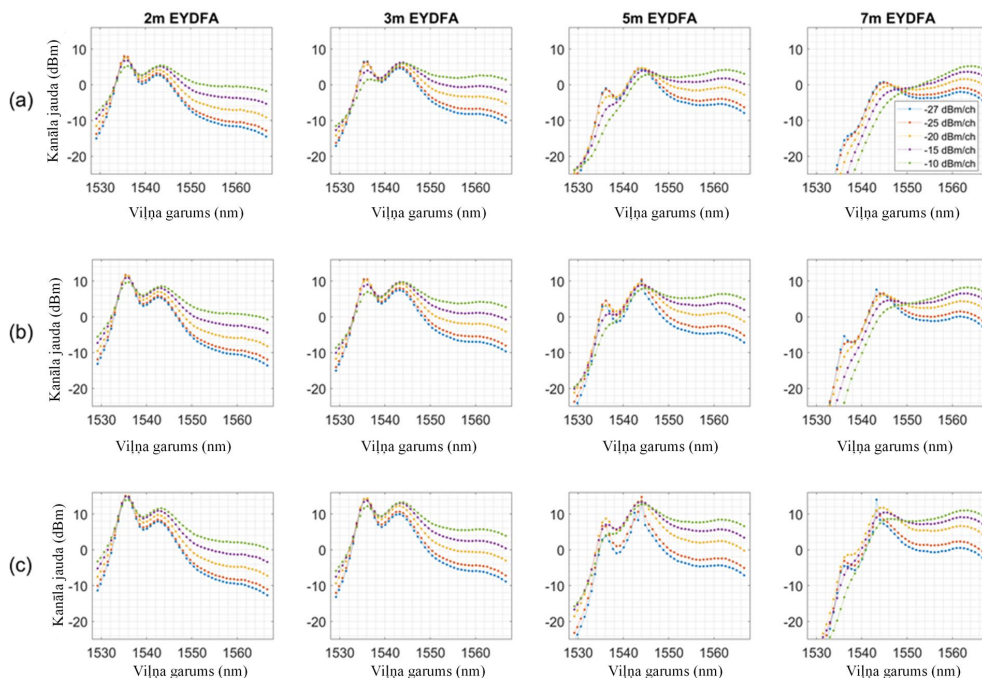
Ja pumpēšanas jauda tiek palielināta no 0,6 W līdz 1,0 W 3.27. att. (b), pastiprinājums tiek palielināts visiem kanāliem, bet maksimālais pastiprinājums kļūst vēl pamanāmāks. Tomēr pie 5 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma ieejas nesēja optiskais signāls – 27 dBm/ch un –25 dBm/ch rada pastiprinājuma profilus, kas būtībā pārklājas, un pastiprinājuma maksimumos pie 1536 un 1544 nm viļņa garumiem, kur ir redzami daži strauji lēcieni. Tas ir parazitiskās lāzerēšanas rezultāts, kas ir pamanāmāks ar mazāku ieejas signāla jaudu. Šis lāzerēšanas ietekmē radītais efekts ir nestabils un var īslaicīgi sasniegt jaudas līmeni, kas pārsniedz 10 dB virs pastiprinātā ieejas signāla. Šī spontānā lāzera noteikšana kļūst pamanāmāka garākiem dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma posmiem maksimālās jaudas un viļņa garuma izmaiņu izteiksmē. Tā kā sniegtie dati ir katra kanāla vidējais pastiprinājums, 3.27. att. parazitiskās lāzerēšanas efekts nav tik redzams, kā tas būtu optiskā spektra analizatorā OSA, tomēr, salīdzinot ar blakus esošajiem kanāliem, tas parādās kā atšķirīgi lēcieni.

Ja pumpēšanas avota jaudu vēl vairāk palielina līdz 2,0 W, īsākiem dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem robežās 2 m un 3 m, kanāla pastiprinājums kopumā turpina palielināties, nelielu uzsvāru uz pastiprinājuma maksimumiem. Tomēr ar 5 m un 7 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumiem pastiprinājuma nostiprināšana kļūst acīmredzama ar ieejas nesēju signāla jaudu robežās no –27 dBm līdz –20 dBm kanālā, kur kanāla pastiprinājums ir gandrīz identisks visā optiskajā spektrā. Pastiprinājuma līknes nevienmērību (lēcius optiskajā spektrā), iespējams, izraisa palielināts parazitiskās lāzerēšanas efekts, kas redzams 3.27. (c) att. diagrammā. Turklāt, iestatot kanāla jaudu vēl zemākā līmenī, tiek panākta intensīvāka parazitiskā lāzerēšana pat īsākiem šķiedru laidumiem. Precīzi faktori, kas ir atbildīgi par lāzēšanas ierosināšanu, nav skaidri, taču, tā kā garāki 5 m laidumi palielina nevēlamo lāzera starojumu, šķiet, ka tas ir saistīts ar šķiedras iekšējo apvalka ģeometriju, kas virza daudzmodu pumpēšanas lāzera uz leģēto serdi.

Var redzēt, ka pirmajos dažos leģētās šķiedras metros tiek sasniegts liels pastiprinājums ap 1536 nm viļņa garumu, bet mazāks pastiprinājuma maksimums pie 1544 nm viļņa garuma. Signālam izplatoties tālāk, 1536 nm viļņa garumā maksimums pakāpeniski tiek absorbēts, daļu no šīs jaudas pārnesot uz viļņu garumiem, kas garāki par 1544 nm. Šī reabsorbēcija galu galā izraisa ievērojamu pastiprinājuma samazināšanos, vienlaikus uzlabojot pastiprinājuma vienmērīgumu starp diviem maksimumiem pie 1544 nm un 1564 nm viļņa garumos. Daļu pastiprinājuma samazinājuma var mazināt ar lielāku pumpēšanas jaudu, bet tikai līdz noteiktam punktam, kurā notiek pastiprinājuma “fiksācija”, kad jebkura papildus pumpēšanas jauda tiek novirzīta nevēlamās parazitārās lāzerēšanas intensitātes palielināšanai, kas ir vizuāli redzama 5 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumā. 3.28. (c) att. abiem gadījumiem, kad ieejas jauda ir iestatīta uz –25 dBm/ch un –27 dbm/ch vienam kanālam, kur kanāli starp diviem pastiprinājuma maksimumiem ir ievērojami vājāki nekā gadījumos ar lielāku ieejas kanāla jaudu. Tas ir pretstatā gadījumam ar 5m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garumu, skat. 3.28. att. (b), kur dažādu mērījumu līnijas pārklājas pie 1539–1546 nm.

Katrā pārbaudītajā ieejas signāla optiskās jaudas līmenī, neatkarīgi no izplatīšanās garuma pastiprinātājā, kopējā izejas jauda paliek gandrīz fiksētā līmenī. Ar garāku dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laidumu jauda mēdz tikt pārdalīta garākiem viļņu garumiem. Tāpat, palielinoties ieejas signāla jaudai, priekšroka tiek dota garāku viļņu garumu pastiprināšanai, kā redzams 3.28. att., kurā parādīts katra kanāla jaudas līmenis. Aplūkojot diagrammu rindu 3.28. att. (a), pagrieziena punktu var redzēt pie 1539 nm viļņa garuma, kas centrēts starp abām

virsotnēm, kur lielāka jauda tiek pakāpeniski sadalīta garākiem viļņu garumiem un īsāka viļņa garuma kanāli tiek arvien vairāk absorbēti, kad tiek palielināts leģētās šķiedras garums, vai tiek palielināta ievades kanāla jauda.



3.28. att. Kanāla jaudas sadalījuma novērtējums atkarībā no dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma robežās no 2 m līdz 7 m, pie ieejas nesēju signālu jaudas robežās no -27 līdz -10 dBm, izmantojot 976 nm daudzmodu pumpēšanas avotu ar izejas optisko jaudu, kas iestatīta uz (a) 0,6 W, (b) 1,0 W, c) 2.0

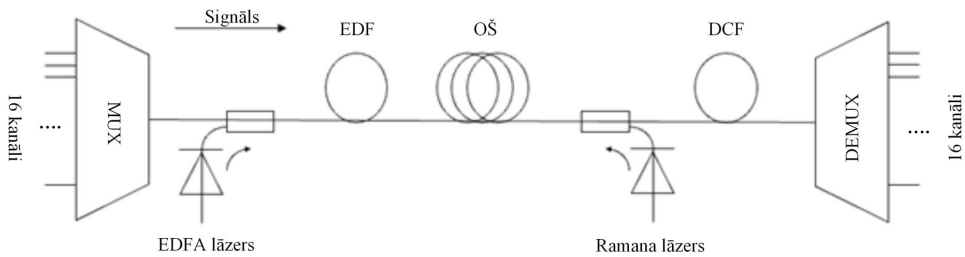
Lielākā daļa no kopējā pastiprinājuma tiek sasniegta pirmajos dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras metros pēc izplatīšanās pastiprinātājā. Ievadītā jauda kanālā un pumpēšanas jaudas kopējā signāla jauda pastiprinātāja izejā paliek efektīva robežās no 2 līdz 7 m dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras laiduma garuma robežās. Dubultapvalka $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ leģētās šķiedras garuma palielināšana izmanto vairāk pumpēšanas gaismas, lai saglabātu sasniegto jaudas līmeni un pārdalītu jaudu uz garākiem viļņu garumiem, savukārt zemāki viļņu garumi pakāpeniski tiek absorbēti, kad pumpēšanas jauda samazinās un nespēj nodrošināt pietiekami daudz enerģijas, lai uzturētu jau sasniegto jaudas līmeni. Zemas ieejas signāla jaudas un lielas pumpēšanas jaudas kombinācija var izraisīt ļoti pamanāmu pastiprinājuma fiksāciju parazītiskās lāzerēšanas efekta rezultātā, kas kļūst intensīvāka proporcionāli leģētās šķiedras garumam. Tas pats lāzers var samazināt tuvējo kanālu sasniedzamo jaudas līmeni. No tā var izvairīties, nodrošinot, ka ieejas signāls ir pietiekami spēcīgs, pārsniedzot lāzera sliekšni.

3.6. Hibrīda Ramana-EDFA pastiprinātāja izveide un veiktspējas analīze WDM pārraides sistēmā

Tiek aplūkoti divi galvenie optisko pastiprinātāju risinājumi: ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji EDFA un Ramana šķiedras pastiprinātāji RFA. Ramana pastiprinātāju RFA, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra DCF, ir potenciāls pielietojums nākotnes optiskās sakaru sistēmās, jo hromatiskās dispersijas CD kompensāciju šķiedru pārraides līnijas daļā var iegūt vienlaicīgi ar labvēlīgo optisko signālu pastiprinājumu. Lai sasniegtu pastiprinātāja optimālāko darbību ir iespējams izveidot hibrīdu Ramans un erbija šķiedru optisko pastiprinātāju (Raman-EDFA) risinājumu, lai uzlabotu optiskā signāla un trokšņa attiecības OSNR, veiktspēju optiskās pārraides sistēmās.

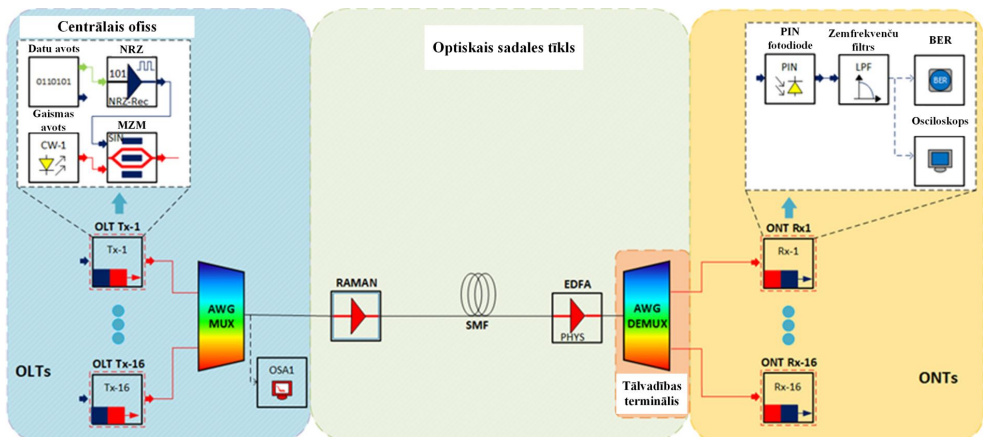
Līdz ar to lai nodrošinātu optimālo arhitektūras risinājumu hibrīda Raman-EDFA pastiprinātājā izveidei tika veikta eksperimentālā matemātiskā modelēšana RSoft OptSim programmatūras vidē.

Izpētes gaitā tika izmantots eksperimentālās shēmas variants ar erbija pastiprinātāju EDFA sākumā un Ramana pastiprinātāju RFA līnijas beigās. Attēlos 3.29. un 3.30. parādīti sistēmas shematiskais attēlojums RSoft OptSim programmatūras vidē.



3.29. att. Hibrīdā risinājuma sistēmas shematiskais attēlojums.

Kā parādīts 3.29. att., WDM pārraides sistēma ir sadalīta trīs daļās: centrālais birojs (CO), optiskais sadales tīkls ODN un optiskā tīkla galiekārta ONT.



3.30. att. 16 kanālu ar 100 GHz starpkanālu intervālu WDM pārraides sistēmas ar Raman-EDFA pastiprinātāja risinājumu simulācijas shēma.

Katrs no 10 Gbit/s raidītājiem optiskās līnijas termināļa OLT raidītājiem Tx, jeb (OLT-Tx) sastāv no datu avota, NRZ-OOK kodētāja, nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avota CW un Maha–Cendera modulatora MZM. CO sastāv no optiskās līnijas termināļa OLT ar sešpadsmit raidītājiem (OLT_Tx), sešpadsmit nepārtraukta viļņa lāzera gaismas avota CW optiskā 16x1 jaudas apvienotāja, kur signāls tiek pārraidīts uz AWG multiplexoru un AWG demultiplexoru ar ienestajiem zudumiem 6 dB. Eksperimentāli optimālā jauda nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotam CW tika noteikta 4 dBm. Centrālās frekvences nepārtrauktā viļņa lāzera gaismas avotam CW tika iestatītas robežās no 193.3 THz līdz 198.4 THz (no 1550.9 nm līdz 1538.9 nm viļņu garumos) ar 100 GHz starpkanālu intervālu. Optiskais sadales tīkls ODN sastāv no Ramana pastiprinātāja, dispersijas kompensējošās šķiedras DCF 6 km garumā ar ienestajiem zudumiem 0.55 dB/km.

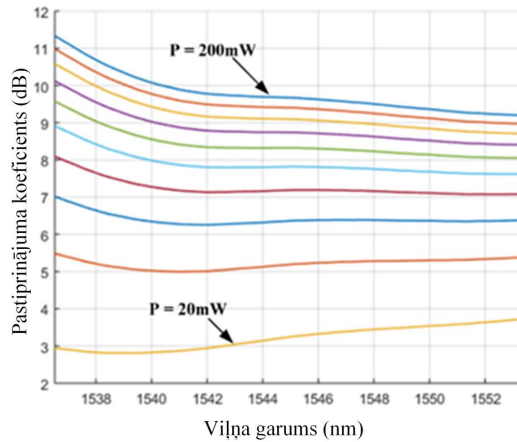
Ramana pastiprinātājs izmanto pumpēšanas jaudu 500 mW (26.98 dBm), kā arī pumpēšanas viļņa garumu 1455.0 nm, t.i. 206 THz pumpēšanas frekvences. Vienmodas optiskā šķiedra SMF atbilstoša ITU-T G.652 rekomendācijai optiskā sadales tīkla segmentā ir ≥ 40 km gara saskaņā ar ITU-T G.989.2 rekomendāciju [160] ar vājinājuma koeficientu 0.2 dB/km un dispersijas koeficientu 16 ps/nm/km . EDFA pastiprinātājs izmanto pumpēšanas avotu ar 980 nm viļņa garumu, t.i. centrālo frekvenci 305.91 THz. EDF šķiedras garums ir līdz 6 m garumā. Katrs ONT uztvērējs Rx, jeb (ONT Rx) sastāv no optiskā uztvērēja, kura pamatā ir PIN fotodiode ar jutības līmeni -20 dBm pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma. Pēc tam uztverto modulēto signālu filtrē ar zemfrekvenču elektrisko filtru LPF (3-dB joslas platums 7.5 GHz). Tiek novērtēta uztvertā signāla kvalitāte, kas novērtēta ar Bitu kļūdu skaitītāju. Saskaņā ar IEEE P802.3CS standartu BER sliekšnis atbilst 1×10^{-9} .

Mērķis ir novērtēt hibrīda Raman-EDFA pastiprinātāja veiktspēju iegūtā globālā pastiprinājuma (GN), trokšņa rādītāja NF un bitu kļūdu BER izteiksmē. Tika analizēti divi dažādus pumpēšanas lāzeru gadījumi, ņemot vērā hibrīda pastiprinātāja konfigurāciju ar diviem posmiem (Raman un EDFA). Šī hibrīda pastiprinātāja konfigurācija sastāv no diviem posmiem, no kuriem pirmais ir Ramana pastiprinātājs, bet otrais ir EDFA pastiprinātājs. Ramana pastiprinātājā tiek izmantota tiešā pumpēšana (no angl. val. - co-propogating), savukārt EDFA pastiprinātājā tiek izmantota pumpēšana pretējā virzienā (no ang. val. - “counter-propogating”).

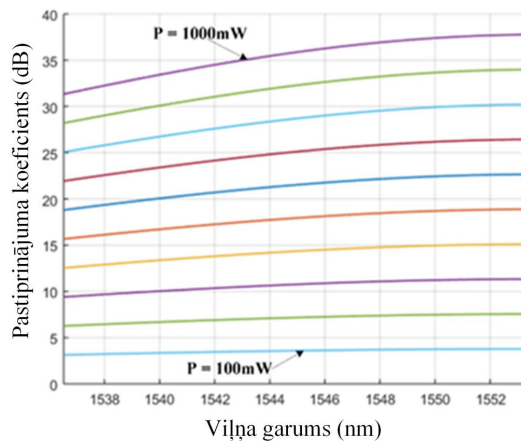
Lai analizētu Ramana pastiprinātāja optisko pastiprinājumu, tika veikti vairāki eksperimenti. Kā redzams 3.31. (a) att., rezultāti atspoguļo stabilitāti visā viļņu garumu diapazonā ar dažām novirzēm. Lai analizētu ieguvuma stabilitāti, tika izmantotas dažādas jaudas. Ramana pastiprinātāja jauda svārstījās no 100 mW (apakšējā līkne) līdz 1000 mW (augšējā līkne). Var novērot, ka pie mazām jaudām optiskais pastiprinājums ir tikai nedaudz atkarīgs no signāla viļņa garuma. Lai gan, palielinot Ramana pastiprinātāja jaudu, var redzēt, ka lielāks viļņa garums rada lielāku pastiprinājumu un arī pie lielākām jaudām pastiprinājuma atkarība no viļņa garuma ir acīmredzamāka.

Kā redzams 3.31. (b) att., EDFA pastiprinātāja pastiprinājums iegūts, veicot vairākus eksperimentus ar mainīgu viļņa garumu un dažādām jaudām (apakšējā līkne atbilst EDFA jaudai 20 mW, augšējā līkne – 200 mW). Tika novērots, ka optiskajam pastiprinājumam ir līdzīga uzvedība pie dažādām jaudām un, jo lielāka ir EDFA pastiprinātāja izeja, jo lielāks ir pastiprinājums. Ir arī novērots, ka signāla viļņa garums zināmā mērā ietekmē pastiprinājumu. Viļņa garuma diapazonā no 1536 nm līdz 1542 nm tiek novērots pastiprinājuma kritums, savukārt diapazonā no 1542 nm līdz 1554 nm pastiprinājuma grafika darbība ir stabilāka un

dažos gadījumos pastiprinājums palielinās līdz ar viļņa garumu, it īpaši, ja EDFA pastiprinātāja jauda ir mazāka par 40mW (skatiet diagrammas pēdējās divas līknes).



(a)



(b)

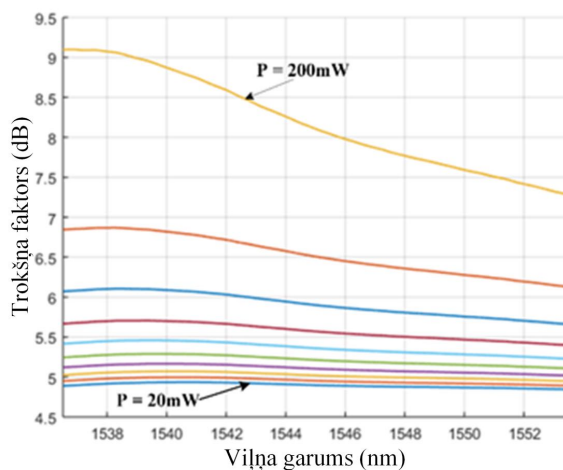
3.31. att. Izmērītais EDFA pastiprinātāja globālais pastiprinājums (a), izvēloties pumpēšanas avota jaudu no 20 mW līdz 200 mW ar 20 mW soli, RAMAN pastiprinātāja trokšņa rādītājs (b), izvēloties pumpēšanas avota jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli.

Attēlā 3.32. izmērītais EDFA pastiprinātāja trokšņa rādītājs (a), izvēloties pumpēšanas jaudu no 20 mW līdz 200 mW ar 20 mW soli, Raman pastiprinātāja RFA globālais pastiprinājums (b), izvēloties pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli.

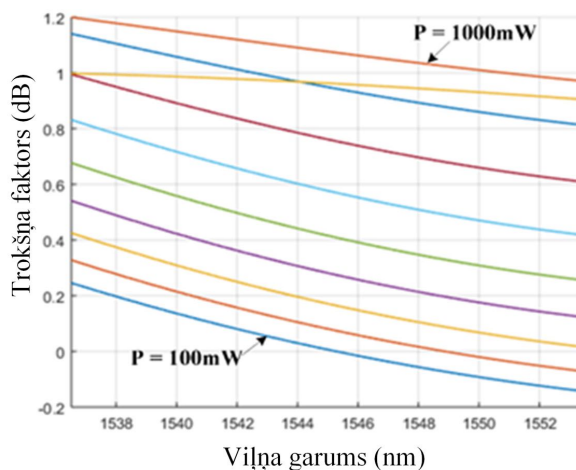
Kā redzams 3.32. (a) att., EDFA pastiprinātāja trokšņu rādītājs kopumā parāda, ka pie zemām jaudām, ti, zem 140 mW, tas ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Pie lielākām jaudas vērtībām, piemēram, 200 mW vai 180 mW, trokšņa rādītājs parāda ievērojamu kritumu, palielinot viļņa garumu. Veicot virkni eksperimentu, tika noskaidrots, ka ir iespējams iegūt zemu trokšņa rādītāju, tas ir, vērtība ir zem 5dB, izmantojot EDFA pastiprinātāju ar jaudu

mazāku par 60mW. Turklāt zemas jaudas trokšņa rādītājs ir tikai nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Savukārt pie lielām jaudām, izmantojot dažādus viļņu garumus, var novērot ievērojamu kritumu.

Kā parādīts 3.32. (b) att., Ramana pastiprinātāja trokšņu rādītājs apraksta eksperimentus, kas veikti ar dažādām jaudas vērtībām (no 100 mW apakšējai līknei līdz 1000 mW augšējai līknei). Novērots, ka trokšņa līmenis ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma – signāla viļņa garuma palielināšana samazina trokšņa līmeni. Dažos gadījumos trokšņu līmenis tiek pazemināts līdz negatīvām vērtībām, īpaši, ja Ramana pastiprinātāja jauda ir zema (mazāk par 200 mW). Interesanta uzvedība tiek novērota pie Ramana pastiprinātāja jaudas, kas vienāda ar 800 mW. Šajā gadījumā trokšņa kritums ir minimāls (mazāk nekā par 20%). Visos citos gadījumos tiek novērots lielāks trokšņa kritums.

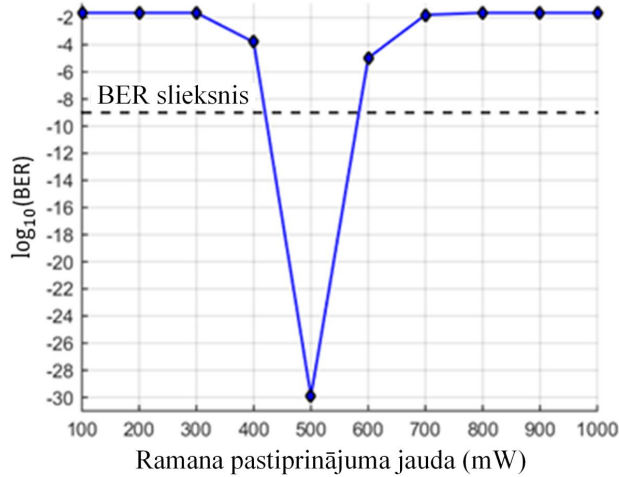


(a)

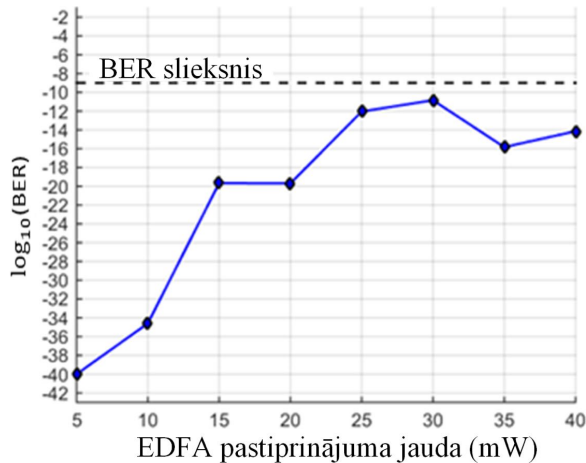


(b)

3.32.att. izmērītais EDFA pastiprinātāja trokšņa rādītājs (a), izvēloties pumpēšanas jaudu no 20 mW līdz 200 mW ar 20 mW soli, RAMAN pastiprinātāja globālais pastiprinājums (b), izvēloties pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli.



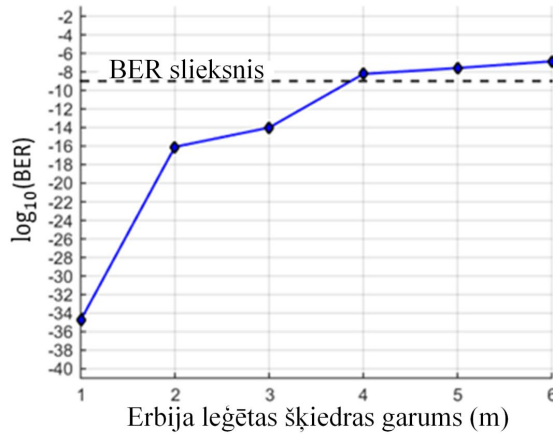
(a)



(b)

3.33. att. BER pret (a) Ramana pastiprinātājapumpēšanas jauda, kas izmērīta piedāvātās WDM sistēmas visliktākajam 8. kanālam, izvēloties pumpēšanas jaudu no 100 mW līdz 1000 mW ar 100 mW soli, BER pret (b) EDFA spumpēšanas jauda mērīta piedāvātās WDM sistēmas slīktākajam 8. kanālam, izvēloties pumpēšanas jaudu no 5 mW līdz 40 mW ar 5 mW soli.

Pēc eksperimentālās simulācijas rezultātiem var uzskatīt, ka maksimālais pārraides attālums (a) Raman pastiprinātāja RFA pumpēšanas jauda (100 līdz 600 mW) un (b) EDFA pastiprinātājs (5 līdz 40 mW) pie BER sliekšņa 1×10^{-9} ir galvenie kritēriji sistēmas novērtējumam. BER sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides, kas pārsniedz 500 mW Ramana diapazonu, un sistēma ir darbināma ar jebkuru EDFA jaudas pumpēšanu no 5 mW līdz 40 mW, jo BER līknes ir zem 1×10^{-9} sliekšņa šajā diapazonā.



3.34. att. BER atkarībā no EDF šķiedras garuma

Tika izstrādāti optisko pastiprinātāju un hibrīdu optisko pastiprinātāju modeļi. Hibrīda EDFA-Raman pastiprinātāja veiktspējas optimizācija ievērojami uzlabojās, ņemot vērā vienmērīgu pastiprinājuma joslas platumu, kā arī lielāku pārraides sistēmas pastiprinājumu. Optimālu hibrīda pastiprinātāju dizains bija ļoti svarīgs, lai iegūtu plašu pastiprinājumu un labāku trokšņu veiktspēju. Parametri, kas optimizēja EDFA veiktspēju trokšņa skaitļa un pastiprinājuma ziņā, ir EDF šķiedras garums, ievades signāla jauda, pumpēšanas jauda un pumpēšanas viļņa garums, savukārt parametri, kas optimizēja Ramana pastiprinātāju, ir SMF šķiedras garums un pumpēšanas jauda. WDM pārraides sistēma Raman pastiprinātāja gadījumā darbojas ar 500 mW pumpēšanas jaudu, un EDFA pastiprinātāja pumpēšanas avota jauda tika ierobežota visā diapazonā no 5 līdz 40 mW. BER sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides vairāk nekā 3.8 m EDF laiduma un ≥ 60 km SMF laiduma.

NOBEIGUMS UN SECINĀJUMI

1. Veicot EDFA un SOA pastiprinātāju novērtējuma pielietojumu maksimālā pārraides attāluma sasniegšanai DWDM sistēmas risinājumos tika izveidots matemātiskais skaitļošanas modelis Matlab programmatūrā, kurš tika salāgots ar Rsoft Optsim simulācijas vidi. Atbilstoši tika izveidota pārraides sistēma, kur sastāvēja no CW lāzera avota, kurš tika sadalīts četros konstantos optiskajos nesējos ar jaudas līmeni 0 dBm, kur katru no tiem pārvaldīja 25 Gbit/s pseidogadījuma bitu secības PRBS ģeneratori, izmantojot elektrisko impulsu ģeneratorus un amplitūdas modulatorus, kur 90° fāzes modulācija tika veikta diviem modulētiem optiskajiem nesējiem, kuri pēc fāzes modulācijas tika apvienoti divi signāli ar ortogonālām fāzēm turpmākai polarizācijas modulācijai. Visi četri optiskie signāli tika apvienoti un pārraidīti caur divpusējo optisko Gausa filtru, t.i., 3-dB joslas platums ir vienāds ar 35 GHz (raidītāja un uztvērēja daļas segmentos). Ģenerētie un kombinētie optiskie signāli tiek pastiprināti ar EDFA pastiprinātāja modeli ar fiksētu optisko izejas jaudu 14 dBm un $NF = 4.5$, vai ar SOA pastiprinātāja modeli ar 8 dBm signāla pastiprinājumu, $NF = 8$ un 14 dBm tipiskā piesātinājuma jaudu (P_{sat}). Pastiprinātais optiskais signāls tika raidīts caur SMF šķiedru atbilstoši ITU-T G.652 rekomendācijai (izmantojot 40 km laidumu SOA sistēmām un 80 km EDFA sistēmām), kur ienestais vājinājums $\alpha = 0.2$ dB/km, efektīvais laukums $= 80 \mu m^2$, dispersijas koeficients $D = 16$ ps/nm/km pie viļņa garuma 1550 nm, un Kerra nelineārais koeficients $\gamma = 1.26$ 1/W/km.

Akumulētā CD šķiedras segmenta daļā tika pilnībā kompensēta ar elektroniskās dispersijas kompensācijas EDC moduli uztvērēja pusē. Pārraides garums tika emulēts izmantojot iterācijas cilpas funkciju un norādot vairākus šķiedru laidumus EDFA un SOA pastiprināšanas sistēmām. Tika izmantoti 5 pārraides garumi - 80 km, 160 km, 240 km, 320 km un 640 km, lai izpildītu Q faktora prasību > 16 dB, izmantojot standarta starpkanālu intervālu $\Delta f = 50$ GHz.

Pēc pārraides 100 Gbit/s DP-QPSK signāls tika sadalīts četros 25 Gbit/s signālos ar 4×4 QPSK sadalītāju, pamatojoties uz fāzi un polarizāciju, un pēc tam ar PIN fotodiode pārveidots elektriskos signālos, izvadīts caur LPF filtru EDC un noteikts ar Q faktora novērtētāju (veikta BER analīze).

Izmantotie pastiprinātāju joslas platumi tika noteikti atsevišķi EDFA, kas bija standarta C-josla (1530–1565 nm) ar 86 kanāliem, un SOA pastiprināšanas sistēmām – 1530–1605 nm, kam kopumā ir 182 pārraides kanāli, ko pastiprina SOA. Šāda sadale nodrošināja ≈ 2.12 reizes lielāku pārraides jaudu (18.2 TBit/s) un par 7% lielāku spektrālo efektivitāti, salīdzinot ar EDFA (attiecīgi $SE = 2.10$ un 1.96 bit/Hz).

Pētījumā tika izvērtēts un salīdzināts jaudas efektivitātes līmeņi piedāvātajā aizstāšanas scenārijā, kad EDFA pastiprinātā optiskā savienojuma, kur tiek izmantots 86 kanālus C-josla. **Kopējā jauda tika dubultota, tā vietā izmantojot SOA, nodrošinot 182 pārraides kanālus, pateicoties plašākai pastiprināšanas joslai.** Enerģijas patēriņa līmeņi tika definēti, pamatojoties uz pieejamajām komponentu tehniskajām datu lapām: DP-QPSK raiduztvērējiem $P_{tx} = 19$ W, SOA $P_{soa_amp} = 4$ W un EDFA jaudas patēriņš $P_{edfa_amp} = 30$ W. Energoefektivitātes līmeņi parāda, ka sistēmai ar SOA pastiprinājumu viena bita pārraidei bija nepieciešams mazāk enerģijas un šī atšķirība kļuva ievērojamāka lielākiem pārraides attālumiem – no 1.6% līdz 12.6%, attiecīgi 80 km un 640 km garām OŠ līnijām. Tas pierāda, ka SOA kopā ar salīdzinoši zemajām komponentu izmaksām varētu sniegt papildu ekoloģiskos un finansiālos ieguvumus. Tika pierādīts, ka, ņemot vērā korelāciju starp nelineārajiem kropļojumiem un pusvadītāju

pastiprinātāja ieejas jaudas $P_{in(t)}$ un piesātinājuma jaudas P_{sat} attiecību, bija iespējams pielāgot pārraides parametrus tā, lai Q faktors ir lielāks par 16 dB 640 km garā OŠ līnijā.

2. Tika izpētīts risinājums inovatīvam optiskajam pastiprinātājam, kura pamatā tiek izmantota dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētā šķiedra, t.i. salīdzināts optisko nesēju pastiprinājuma izmaiņas atkarībā no leģētās šķiedras laiduma garuma (2-7m), kur izmantotās daudzmodu pumpēšanas avota izejas jauda ir (0.6 – 2.0 W) un viļņa garuma (C-josla). Inovatīva pastiprinātāja risinājuma izstrādē izmantotās šķiedras kodols ir leģēts ar erbiju un iterbiju un tas tika noteikts kā atomu procentuālā izteiksme, kas attiecīgi ir 0.06 % un 1.21 %. Tika izmantots lielas jaudas pumpēšanas avots (daudzmodu pumpēšanas avots) ar centrālo viļņa garumu 975 nm un joslas platumu 6 nm, kas tiek uzturēts 30° C temperatūrā ar termoelektrisko dzesētāju, lai novērstu tā izejas viļņa garuma un jaudas svārstības. Ieejas signāls tiek ģenerēts, filtrējot gaismu, ko rada superluminiscences gaismas diode (S-LED) ar –10 dB maksimālo optisko izejas jaudu un optiskā signāla joslas platumu robežās no 1526 līdz 1630 nm. Viļņgaruma selektīvais slēdzis (WSS) tiek izmantots, lai filtrētu S-LED un radītu spektru, kas ierobežots ar C joslu, kas savukārt sastāv no 48 kanāliem ar 100 GHz starpkanālu intervālu un 37.5 GHz joslas platumu atbilstošu uzstādījumiem iespējojamam WSS. Šis optisko nesēju signāls saturošs 48 kanālu interpretāciju emulējot optiskos nesējus (modulēto signālu datu kanālus WDM risinājumā). Eksperimentālajā risinājumā dubultapvalka sadalītājs/apvienotājs leģētās šķiedras izejas pusē tiek izmantots, lai atdalītu pumpēšanas gaismu no pastiprinātā signāla.

Pumpēšanas avots ar zemāko izejas jaudas līmeni 0,6 W, rada ievērojamu maksimālo pieaugumu pie 1536 nm viļņa garuma, sasniedzot 34 dB pastiprinājumu izmantojot 2 m garu dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laidumu ar optisko nesēju ieejas jaudu –27 dBm. Palielinot dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laidumu, šis maksimums samazinās, un otrais maksimums pie 1544 nm viļņa garuma kļūst pamanāmāks, kā arī palielinās pastiprinājums lielākiem viļņu garumiem. Pie 7 m garas dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras sākas trešais maksimums, kas izpaužas pie 1563 nm viļņa garuma, bet maksimums pie 1544 nm tiek samazināts. Tas rada relatīvi lineāru pastiprinājumu starp iepriekš minētajiem diviem viļņa garumiem.

Ja pumpēšanas jauda tiek palielināta no 0,6 W līdz 1,0 W, pastiprinājums tiek palielināts visiem kanāliem, bet maksimālais pastiprinājums kļūst vēl pamanāmāks. Tomēr pie 5 m dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garuma ieejas nesēja optiskais signāls –27 dBm un –25 dBm kanālā rada pastiprinājuma profilus, kas būtībā pārklājas, un pastiprinājuma maksimumos pie 1536 un 1544 nm viļņa garumiem, kur ir redzami daži strauji lēcieni.

Ja pumpēšanas avota jaudu palielina līdz 2,0 W, īsākiem dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garumiem robežās 2 m un 3 m, kanāla pastiprinājums kopumā turpina palielināties, nelielu uzsvāru uz pastiprinājuma maksimumiem. Tomēr ar 5 m un 7 m dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garumiem pastiprinājuma nostiprināšana kļūst acīmredzama ar ieejas nesēju signāla jaudu robežās no –27 dBm līdz –20 dBm kanālā, kur kanāla pastiprinājums ir lineārs visā optiskajā spektrā.

Lielākā daļa no kopējā pastiprinājuma optiskajiem nesējiem tiek sasniegta pirmajos dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras metros pēc izplatīšanās. Ievadītā jauda kanālā un pumpēšanas jaudas kopējā signāla jauda pastiprinātāja izejā paliek efektīva robežās no 2 līdz 7 m dubultapvalka Er^{3+}/Yb^{3+} leģētās šķiedras laiduma garuma robežās.

3. Viļgarumdales blīvētajai WDM optisko šķiedru pārraides sistēmai ar līdz 10 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā pietiek ar CD kompensāciju, izmantojot vienu dispersijas kompensācijas moduli DCM. Problēma ar DWDM sistēmu ir tāda, ka CD vērtība katram kanālam mainās atkarībā no centrālā viļņa garuma un tāpēc nav iespējams vienmērīgi kompensēt CD visai WDM sistēmai. Lai šo problēmu risinātu, eksperimentālajā daļā tiek ieviests papildu kompensācijas posms – hromatiskās dispersijas slīpuma CD_{SL} kompensācija. Šīs problēmas risināšanas ietvaros tiek izmantoti divi visizplatītākie “ieslēgt-izslēgt” manipulācijas OOK signāla līniju kodī – bez atgriešanās pie nulles līnijas kods NRZ un ar atgriešanos pie nulles līnijas kods RZ, kur NRZ kodētais signāls 1 bita attēlojumam aizņem visu bitu intervālu, bet RZ signāls aizņem tikai daļu no bitu intervāla, kas ir atkarīgs no darba cikla, tāpēc NRZ kodētā signāla joslas platums ir aptuveni uz pusi mazāks, salīdzinot ar RZ kodēto signālu.

WDM ŠOPS atkarība no CD_{SL} kompensācijas, izmantojot divas dažādas optiskās šķiedras: standarta vienmodas optiskā šķiedra SMF, atbilstošu ITU-T G.652 rekomendācijai, un šķiedra ar nobīdītu ne nulles dispersiju NZDSF, atbilstošu ITU-T G.655 rekomendācijai. Abas šīs šķiedras ir plaši izplatītas WDM skaru sistēmas risinājumos, konkrētāk, tiek noteikta CD SL kompensācijas ietekme, lai saprastu kā tās kompensācija ietekmē 16 kanālu WDM pārraides sistēmas darbību ar 40 Gbit/s datu pārraides ātrumu kanālā.

Ir vairākas metodes kā kompensēt CD_{SL} . Viena no CD_{SL} kompensācijas metodēm tiek saukta par hibrīda šķiedru dizainu HFD, kas nozīmē sadalīt šķiedru vairākos laidumos, kur katrs laidums sastāv no divām šķiedrām. Otrs CD_{SL} kompensācijas risinājums nodrošina CD kompensāciju katram WDM kanālam atsevišķi uztvērēja daļā pēc kanālu demultipleksēšanas. Šajā metodē katru kanālu pēc WDM sadalītāja var uzskatīt par atsevišķu pārraides līniju, tāpēc ir nepieciešama tikai CD kompensācija. Trešo metodi sauc par vidējā diapazona spektrālo inversiju MSS1, un šajā metodē impulss tiek apgriezts šķiedras laiduma vidū. Ceturtnā un pēdējā metode ir arī visizplatītākā metode, kurā CD_{SL} kompensācija tiek panākta, izmantojot dispersijas kompensācijas moduli DCM. DCM modulis, var sastāvēt arī no dispersijas kompensējošās šķiedras DCF vai šķiedras Bregga režģa FBG, atbilstoši FBG-DCM. Atšķirība ir tāda, ka, lai sasniegtu CD_{SL} kompensāciju, ŠOPS ir jāievieto papildu DCM vienība. Vairumā gadījumu pārraides līnija sastāv no OŠ un divām DCM vienībām – viena CD kompensācijai, bet otra CD_{SL} kompensācijai.

Eksperimentālās realizācijas ietvaros izmantojot *RSoft OptSim* simulāciju programmatūrā izveidoto 16 kanālu DWDM sistēmas modeli ar datu pārraides ātrumu kanālā 40 Gbit/s tika noskaidrots, kā DCM atrašanās vieta mainīs atsevišķu kanālu veiktspēju 16 kanālu WDM sistēmā.

Augstāko veiktspējas uzlabojumu 40 Gbit/s 16 kanālu WDM sistēmā var sasniegt, ja CD_{SL} kompensācija tiek piemērota kopā ar CD kompensāciju. Tika secināts, ka izmantojot DCF CD kompensācijai un FBG CD_{SL} kompensācijai un izvietojot tos simetriskajai kompensācijai, tiks nodrošināta 16 kanālu ar datu pārraides ātrumu 40 Gbit/s kanālā WDM pārraides sistēmas augstākā veiktspēja, nepārsniedzot uztvertā signāla $BER \geq 1 \times 10^{-9}$.

4. Hibrīda Raman-EDFA pastiprinātāja risinājuma izveidē tiek aplūkoti divi galvenie optisko pastiprinātāju risinājumi: ar erbiju leģēti šķiedru pastiprinātāji EDFA un Ramana šķiedras

pastiprinātāji. Ramana pastiprinātāju, kuru pamatā ir dispersijas kompensācijas šķiedra DCF, ir potenciāls pielietojums nākotnes optiskās sakaru sistēmās, jo hromatiskās dispersijas CD kompensāciju šķiedru pārraides līnijas daļā var iegūt vienlaicīgi ar labvēlīgo optisko signālu pastarpinājumu. Raman-EDFA risinājums uzlabo optiskā signāla trokšņa attiecību OSNR un veikspēju optiskās pārraides sistēmās.

Lai novērtētu validētu Raman-EDFA risinājumu, tika izveidota 16 kanālu DWDM pārraides sistēma, kura sadalīta trīs daļās: centrālais birojs CO, optiskais sadales tīkls ODN un optiskā tīkla galiekārta ONT, kura darbojas robežās no 193.3 THz līdz 198.4 THz (no 1550.9 nm līdz 1538.9 nm viļņu garumos) ar 100 GHz starpkanālu intervālu. Optiskais sadales tīkls ODN sastāv no Ramana pastiprinātāja, dispersijas kompensējošās šķiedras DCF 6 km garumā ar ienestajiem zudumiem 0.55 dB/km.

Ramana pastiprinātāja daļa izmanto pumpēšanas jaudu 500 mW (26.98 dBm), kā arī pumpēšanas viļņa garumu 1455.30 nm, t.i. 206 THz. Vienmodas optiskā šķiedra (SMF) atbilstoša ITU-T G.652 rekomendācijai optiskā sadales tīkla segmentā ir ≥ 40 km gara saskaņā ar ITU-T G.989.2 rekomendāciju ar vājinājuma koeficientu 0.2 dB/km un dispersijas koeficientu 16 ps/nm/km . EDFA pastiprinātāja daļa izmanto pumpēšanas avotu ar 980 nm viļņa garumu t.i. 305.91 THz. EDF šķiedras garums ir līdz 6 m garumā. Katrs ONT uztvērējs Rx, jeb ONT Rx sastāv no optiskā uztvērēja, kura pamatā ir PIN fotodiode (PIN) ar jutības līmeni -20 dBm pie 10 Gbit/s bitu pārraides ātruma.

EDFA pastiprinātāja daļas trokšņu rādītājs kopumā parāda, ka pie zemām jaudām, t.i. zem 140 mW, tas ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma. Pie lielākām jaudas vērtībām, piemēram, 200 mW vai 180 mW, trokšņa rādītājs parāda ievērojamu kritumu, palielinot viļņa garumu. Tika noskaidrots, ka ir iespējams iegūt zemu trokšņa rādītāju, vērtība ir zem 5dB, izmantojot EDFA pastiprinātāju ar jaudu mazāku par 60mW. Savukārt pie lielām jaudām, izmantojot dažādus viļņu garumus, var novērot ievērojamu kritumu. Ramana pastiprinātāja daļas trokšņu rādītājs ir nedaudz atkarīgs no viļņa garuma – signāla viļņa garuma palielināšana samazina trokšņa līmeni. Pie Ramana pastiprinātāja jaudas, kas vienāda ar 800 mW trokšņa kritums ir minimāls (mazāk nekā par 20%).

Atbilstoši tika noteikts, ka maksimālais pārraides attālums atkarīgs no (a) Raman pastiprinātāja pumpēšanas jaudas (100 līdz 600 mW) un (b) EDFA pastiprinātāj EDF leģētas šķiedras garuma (5 līdz 40 m) pie BER sliekšņa 1×10^{-9} . BER sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides, kas pārsniedz 500 mW Ramana diapazonu, un sistēma ir darbināma ar jebkuru EDFA jaudas pumpēšanu no 5 mW līdz 40 mW, jo BER līknes ir zem 1×10^{-9} sliekšņa šajā diapazonā.

DWDM pārraides sistēma hibrīda Raman-EDFA pastiprinātāja gadījumā darbojas ar 500 mW pumpēšanas jaudu, un EDFA pastiprinātāja pumpēšanas avota jauda tika izmantota visā diapazonā no 5 līdz 40 mW. **BER sliekšnis 1×10^{-9} ir sasniegts pēc pārraides vairāk nekā 3.8 m EDF laiduma un ≥ 60 km SMF laiduma.**

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] Ericsson, Ericsson Mobility Report - November 2020, Ericsson. (2020) 36.
- [2] C. Knittle, IEEE 50 Gb/s EPON (50G-EPON), Opt. InfoBase Conf. Pap. Part F174- (2020) 2020–2022. <https://doi.org/10.1364/OFC.2020.Th1B.2>.
- [3] E. Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications, Wiley, New York, 1994.
- [4] Hecht, J. Understanding Fiber Optics. Fourth Edition. – NJ: Prentice Hall, 2002. – 780 p. ISBN: 978-0-1302-7828-9.
- [5] Фриман, Р. Мир связи. Волоконно-оптические системы связи. 4-ое, дополнительное издание. – Москва: Техносфера, 2007. – 512 с. ISBN: 978-5-94836-154-3.
- [6] Величанский, В.Л., Егоров, В.К. Волоконно-оптическая линия связи. Лабораторный практикум.– Москва: МИФИ, 2008. – 80 с.
- [7] Horak, R. Webster's New World Telecom Dictionary. – NY: John Wiley & Sons, 2007. – 568p. ISBN: 978-0-4717-7457-0.
- [8] Thyagarajan, K., Ghatak, A. *Fiber Optic Essentials*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. – 86-259 p. ISBN: 978-0-470-09742-7.
- [9] Richardson, D. J., Fini, J. M., Nelson, L. E. Space-division multiplexing in optical fibres // *Nature Photonics*. – Vol.7, 2013, pp. 354-362.
- [10] Chomycz, B. Planning Fiber Optics Networks. – USA: McGraw Hill Professional, 2009. 320 p. ISBN: 978-0-07-164269-9.
- [11] Наний, О.Е. Основы технологии спектрального мультиплексирования каналов передачи (WDM) // *Lightwave russian edition*. – №2, 2004, с. 47.- 52.
- [12] Cisco Systems Inc. *DWDM Networking Primer. ONS 15454 MSTP*. White paper. – October 2003. – 87 p.
- [13] Ramaswami, R., Sivarajan, K., Sasaki, G. *Optical Networks: A Practical Perspective*. Third Edition. – USA: Morgan Kaufmann, 2009. – 928 p. ISBN: 978-1-5586-0-4452.
- [14] Слепов, Н. Оптические мультиплексоры и демультиплексоры систем WDM // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – №8, 2004, с. 42.-47.
- [15] Bobrovs, V., Ivanovs, G. Parameter Evaluation of Dense optical Network // *Electronics and Electrical engineering*. – Vol.68, No.4, 2006, pp. 33. - 54.
- [16] Основные принципы технологии DWDM. https://t8.ru/?page_id=10788
- [17] Agrawal, G.P. *Fiber-Optic Communications Systems*. Third Edition. – NY: John Wiley & Sons, 2002. – 561 p. ISBN: 0-471-22114-7.
- [18] Gumaste, A., Antony, T. *DWDM Network Designs and Engineering Solutions*. – USA: Cisco Press, 2002. – 368 p. ISBN: 978-1-58705-074-9.
- [19] Никоноров, Н.В., Сидоров, А.И. Материалы и технологии волоконной оптики : оптическое волокно для систем передачи информации. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 98 с.
- [20] Agrawal G. P. *Fiber-optic communication systems*. - New York etc: John Wiley & Sons, 1997. -555.p.
- [21] Bass M., Stryland E. van. *Fiber Optic Handbook*. -New York, etc: Mc Graw-Hill. 2002. - 398p.
- [22] Agrawal G. *Nonlinear Fiber Optics (Second Edition)*. New York: New Academic Press. – 1995. - 465 p.
- [23] Ozols A., Porins J., Kristins A. and Ivanovs Ā.. Measurement of Low Repetition Rate Picosecond Laser Pulse Parameters// *Vilnius: Materials Science Forum*, 1999. –Vol.3. - pp.297.–298.
- [24] Keiser G. *Optical Fiber Communications*. – NewYork, etc.: Mc Graw-Hill. 1991. – 461 p.
- [25] Bobrovs V., Porins J., Ivanovs G. Influence of Nonlinear Optical Effects on the NRZ and RZ Modulation Signals in WDM System.// *Kaunas: Electronics and electrical engineering*, 2007. –Vol.4. -No.76. –pp.55.-58.

- [26] Компоненты DWDM систем и их характеристики// Lightwave Russian Edition. 2005.–No.2. - с. 50-56.
- [27] WDM & next generation optical networking. Europe's optical networking conference 25-29 June 2007 Cannes, France.
- [28] Agrawal, G.P. Nonlinear Fiber Optics. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2001. 452-481 p. ISBN 0-12-045143-3.
- [29] Тералинк. Основные сведения о технологии DWDM. <http://www.teralink.ru/?do=printt&id=3>
- [30] Agrawal, G.P. Fiber-Optic Communication Systems. Fourth Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2010. 603 p. ISBN 978-0-470-50511-3.
- [31] Hecht, J. Understanding Fiber Optics. Fifth Edition. – New York: Prentice Hall, 2002. 780 p. ISBN-13: 978-0131174290
- [32] Headley, C., Agrawal, G.P. Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems. Burlington: Elsevier, 2005. 389 p. ISBN 0-12-044506-9.
- [33] Islam, M., N. Raman Amplification for Telecommunications. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2002, 8(3), 548-559. S 1077-260X(02)05901-4.
- [34] Lee, J., H., Chang, Y., M., Han, Y., G., Chung, H. A Detailed Experimental Study on Single-Pump Raman/EDFA Hybrid Amplifiers: Static, Dynamic, and System Performance Comparison. Journal of Lightwave Technology. 2005, 23(11), 3484-3493
- [35] Mohhamed N.I. Raman Amplifiers for Telecommunications. New York: Springer, 2004. 331 p. ISBN 0-387-00751-2.
- [36] Rottwitt, K., Povlsen, H., J. Analyzing the Fundamental Properties of Raman Amplification in Optical Fibers. Journal of Lightwave Technology. 2005, 23(11), 3597-3605
- [37] Оптические усилители на основе эффекта рассеяния <http://mybiblioteka.su/tom2/150908.html>
- [38] Namiki, S., Emori, Y. Ultrabroad-Band Raman Amplifiers Pumped and Gain-Equalized by Wavelength-Division-Multiplexed High-Power Laser Diodes. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics. 2001, 7(1), 3-16. ISSN 1077-260X.
- [39] RSoft Design Group, Inc. OptSim User Guide. – USA: RSoft Design Group, 2010. – pp. 459.
- [40] Azadeh M. Fiber Optic Engineering – USA: Springer, 2009. – pp. 376.
- [41] Freeman R.L. Telecommunication System Engineering. – Geneva: Wiley-Interscience, 2004. – pp. 1024.
- [42] Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. – USA: John Wiley and Sons, 2002. – 561 p.
- [43] ITU-T G.984.1. Series G: Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General characteristics// International Telecommunication Union. – 2008. – pp. 1–43.
- [44] Bob Chomycz. Planning Fiber Optic Networks. – USA: The McGraw-Hill Companies Inc., 2009, 401.p.
- [45] ITU-T G.957. Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy// International Telecommunication Union. – 2006. – pp. 1–38.
- [46] ITU-T G.984.2. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification// International Telecommunication Union. – 2003. – pp. 1–28.
- [47] Thyagarajan K.S., Ghatak A. Fiber Optic Essentials - USA: Wiley-IEEE Press, 2007. - pp. 259.
- [48] ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid// International Telecommunication Union. - 2012. - pp. 1-16.

- [49] ITU-T G.694.2. Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid// International Telecommunication Union. - 2003. - pp. 1-12.
- [50] ITU-T G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable// International Telecommunication Union. - 2009. - pp. 1.-22.
- [51] Maeda Y., Montalti F. ITU-T manual. Optical fibres, cables and systems. - Geneva: International Telecommunication Union, 2009 - pp. 324. pp.
- [52] Mukherjee B. Optical WDM Networks. - USA: Springer, 2006. - pp. 973.
- [53] Faiyaz N.M., Omi A.I., Faisal M. Optimization of apodization profile of chirped fiber Bragg grating for chromatic dispersion compensation: Dispersion compensation using chirped apodized FBG// Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT). - Dhaka, Bangladesh, April 10-12. - 2014. - pp. 1-5.
- [54] Gnanagurunathan G., Rahman F.A. Comparing FBG and DCF as dispersion in the long haul narrowband WDM systems// IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. - Bangalore, India. - 2006. - pp. 1-4.
- [55] Spolitis S., Ivanovs G. Extending the Reach of DWDM-PON Access Network Using Chromatic Dispersion Compensation// Proceedings of IEEE Swedish Communication Technologies Workshop (Swe-CTW 2011). - Stockholm, Sweden, October 19-21. - 2011. - pp. 29-33.
- [56] Spolitis S., Ivanovs G. Investigation of Future Perspectives and Technology of Passive Optical Network// Proceedings of Riga Technical University 52nd International Conference. - Riga, Latvia, October 13-14. - 2011. - pp. 21-21.
- [57] Stepanek L. Chromatic Dispersion In Optical Communications// Electronical technical journal of technology, engineering and logistic in transport. - 2012. - Vol.7, No.2. - pp. 142-151.
- [58] Forestieri E. «Optical Communication Theory and Techniques», Springer Science + Business Media Inc., USA, 2005, 216 p.
- [59] Kaminow I.P., Li T. and Willner A. E. «Optical Fiber Telecommunications: Components and Subsystems», Academic Press, USA, 2008, 945 p.
- [60] Agrawal G.P. «Applications of Nonlinear Fiber Optics», Academic Press, USA, 2001, 473 p.
- [61] Becker P.C., Plsson N.A. and Simpson J.R. «Erbium Doped Fiber Amplifiers», Academic Press, USA, 1999, 481 p.
- [62] Islam M. N. «Raman amplifiers for telecommunications 2», Springer, USA, 2004, 298-463 p.
- [63] Digonnet M.J.F. «Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Second Edition», Marcel Dekker Inc., USA, 2001, 777 p.
- [64] Dutta A. K., Dutta N. K. and Fujiwara M. «WDM technologies active optical components», Academic Press, 2002, 710 p.
- [65] Ismail N., Mahdi M.A., Poopalan P. and Ahmad H. «Characterisation of cascaded EDFA with the inclusion of an interstage optical element», IEEE International Conference on Semiconductor Electronics 1998. Proceedings. ICSE '98, pp. 108.–111., 1998.
- [66] Laming R.I., Zervas M.N., Payne D.N. «Erbium Doped Fiber Amplifier with 54 dB Gain and 3.1 dB Noise Figure», IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, No. 12, 1992, pp. 1345–1347.
- [67] Варава, Н., Никоноров, М., Пронин, С. Оптические усилители EDFA: практическое применение // Первая миля. – №3, 2011, с. 48.-53.
- [68] Rosenkranz, W. EDFA and Measurement Techniques. Theory for practicum Nr.5. – Germany: Kiel University, 2013. – 39 p.
- [69] Finisar Corporation. Introduction to EDFA Technology. White paper. – June 2009. – 6 p.
- [70] Никоноров, Н.В., Шандаров, С.М. Волноводная фотоника. Учебное пособие, курс лекций. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 143 с.

- [71] Лохманов, П. Мощный волоконно-оптический эрбиевый усилитель для для многоканальных DWDM систем. Магистерская диссертация. – Москва: МГТУ МИРЭА, 2014. – 48 с.
- [72] Vacca, J.R. Optical Networking Best Practices Handbook. - Canada: John Wiley & Sons, 2006. – 512 p. ISBN: 0-471-46052-4.
- [73] Becker, P.C., Olsson, N.A., Simpson, J.R. Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology. – USA: Academic Press, 1999. – 460 p. ISBN: 978-0-1208-4590-3.
- [74] Olonkins, S. Parametrisko un kombinēto pastiprinātāju pielietojuma izpēte WDM sakaru sistēmās. Promocijas darbs. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2015. – 149 lpp
- [75] I. P. Kaminow and T. L. Koch, Eds., Optical Fiber Telecommunications IIIA and Optical Fiber Telecommunications IIIB, New York: Academic, 1997.
- [76] В. Н. Листвин, В. Н. Трешиков, DWDM системы, Москва, Техносфера, 2015.
- [77] E. Desurvire, Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications, Wiley, New York, 1994.
- [78] M. Islam. Eds., Raman amplifiers for telecommunications 1, Physical Principles, Springer, New York, 2003.
- [79] V. P. Gapontsev, P. I. Sadovsky, I. E. Samartsev, 1.5 μm erbium glass lasers, Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, CPDP-38, 1999.
- [80] I. P. Kaminow, T. Li and A. E. Willner, Eds., Optical Fiber Telecommunications VA Components and Subsystems and Optical Fiber Telecommunications VB Systems and Networks, New York: Academic, 2008.
- [81] Лазеры накачки. <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/10386>
- [82] Berkdemir, C., Özsoy, S. A Novel Approach for the Temperature Dependence of the Saturated Signal Power in EDFAs // Optical and Quantum Electronics. – Vol.37, No.8, 2005, pp. 789.-797.
- [83] Усиление оптических сигналов. <http://www.prointech.ru/kb/usiliteli-ime diakonvertery/usilenie-opticheskikh-signalov.html>
- [84] Lahiri, R., Anthony, R., Biswas, S. Study of Power Conversion Efficiency of a Novel Hybrid L-Band Erbium Doped Fiber Amplifier // International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). – Vol.44, No.14, 2012. ISBN: 973-93-80867-72-2.
- [85] Курков, А.С. Эрбиевые волоконно-оптические усилители // Lightwave russian edition. – №1, 2003, с. 14.-21.
- [86] Digonnet, M.J.F. Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Second Edition, Revised and Expanded. – NY: CRC Press, 2001. – 798 p. ISBN: 978-0-8247-0458-2
- [87] Luo, Y., Zhang, J., Sun, J., Lu, S., Wand, X. Spectroscopic properties of tungsten-tellurite glasses doped with Er³⁺ ions at different concentrations // Optical Materials. – Vol.28, No.2, 2006, pp. 255.-258.
- [88] Shimizu, M. Non-Silica-Based Fiber Amplifiers Open New Wavelength Regions for WDM // Lightwave. – Vol.16, No.12, 1999, pp. 56.-59.
- [89] Kong, E. Erbium-Doped Fiber Amplifier. Education Kit Manual, Ver. 2.0. – Hong Kong: Amonics Ltd., 2004. – 29 p.
- [90] Убайдуллаев, Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave russian edition. – №1, 2003, с. 22.-28.
- [91] Dutton, H.J.R. Understanding Optical Communications. – NJ: Prentice Hall, 1998. – 760 p. ISBN: 978-0-1302-0-1416.
- [92] Zyskind, J., Srivastava, A. Optically Amplified WDM Networks. First edition. – USA: Academic Press, 2011. – 502 p. ISBN: 978-0-12-084590-3.
- [93] Убайдуллаев, Р. Волоконно-оптические сети. – Москва: Эко-Трендз, 2001. – 267 с. ISBN: 5-88405-011-9.
- [94] Spolitis, S., Bobrovs, V., Berezins, S., Ivanovs, G. Optimal Design of Spectrally Sliced ASE Seeded WDM-PON System. From: 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS 2012): Conference Proceedings, Italy, Rome, 15.-18. october, 2012. Piscataway: IEEE, 2012, pp. 195.-

- 199.
- [95] He, J., Zou, Y., Qiang, Z. An Improved 3-stage L-band Erbium Doped Fiber Amplifier. From: Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition 2010: Conference Proceedings, China, Shanghai, 8.-12. december, 2010. Piscataway: IEEE, 2010, pp. 15.-16. ISBN: 978-1-42447111-9.
- [96] Sun, Y., Srivastava, A.K., Zhou, J., Sulhoff, J.W. Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks // Bell Labs Technical Journal. – Vol.4, No.1, 1999, pp. 187.- 206.
- [97] Lei, D., Yuan-Yuan, J., Jun-Bo, X., Zhen, Z. A Two-Stage S-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on W-type Erbium-Doped Fiber // Chinese Physics Letters. – Vol.27, No. 9, 2010, pp. 094204-1.– 094204-5.
- [98] Yeh, C.H., Lee, C.C., Chi, S. S- plus C-band erbium-doped fiber amplifier in parallel structure // Optics Communications. – Vol.241, No.4-6, 2004, pp. 443.- 447.
- [99] Технические параметры EDFA. http://t8.ru/wp-content/uploads/2012/01/3_LW_2003_01-2.pdf
- [100] Fiber Raman Amplifier. <http://nptel.ac.in/courses/117101054/Mod%28raman%29/slides%28raman%29/5.htm>
- [101] Kenneley P.L., Kaminow I.P., Agrawal G.P. «Nonlinear Fiber Optics. Third Edition», USA: Academic Press, 2001, p. 481.
- [102] Agrawal G.P., Headley C. «Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems», United Kingdom: Elsevier Academic Press, 2005, p. 389.
- [103] Felinskyi G.S., Korotkov P.A. «Raman Threshold and Optical Gain Bandwidth in Silica Fibers», Quantum Electronics & Optoelectronics, Vol. 11, No. 4, 2008, pp. 360–363.
- [104] Takahashi M., Sugizaki R., Hiroishi J., Tadakuma M., Taniguchi Y., Yagi T. «Low-loss and low-dispersion-slope highly nonlinear fibers», Journal of Lightwave Technology, Vol.23, No.11, 2005, pp. 3615.–3624.
- [105] Kuno T., Hirano M., Nakanishi T., Onishi M. «Highly-nonlinear Optical Fibers and Their Applications», SEI technical review, Sumitomo electric Industries, No. 62, 2006. pp. 35–39.
- [106] Zhang T., Zhang X., Zhang G. «Distributed fiber Raman amplifiers with incoherent pumping», Photonics Technology Letters, IEEE , Vol.17, No.6, 2005, pp. 1175.–1177.
- [107] Islam M.N. «Raman amplifiers for telecommunications», IEEE Selected Topics in Journal of Quantum Electronics, Vol.8, No.3, 2002, pp. 548.–559.
- [108] Andre P.S., Pinto A.N., Teixeira A.L.J. et al., «Optical Fibers Research Advances», Nova Science Publishers Inc., 2007, p. 385.
- [109] Theory of Raman Scattering. <http://bwtek.com/raman-theory-of-raman-scattering/>
- [110] Оптические усилители на основе эффекта вынужденного комбинированного рассеивания <http://www.globalinformatics.ru/gloins-221-1.html>
- [111] Berezins, S., Bobrovs, V. EDFA application research in WDM communication systems. – Riga: IT RTU, 2012. – 4p.
- [112] Dignonnet, M., J., F. Rare-Earth Fiber Lasers and Amplifiers. Second Edition. New York: Marcel Dekker, 2002. 795 p. ISBN: 0-8247-0458-4
- [113] Yasin, M., Harun, W.,S., Arof, H. Optical Fiber Communication and Devices. Rijieka: InTech, 2012. 391 p. ISBN 978-953-307-954-7.
- [114] Zyskind, J., Srivastava A. Optically Amplified WDM Networks. London: Elsevier, 2011. 483 p. ISBN: 978-0-12-374965-9
- [115] Connelly M.J. «Semiconductor optical amplifiers», University of Limerick, Ireland, 2004, 177 p. ISBN 978-0-306-48156-7
- [116] Mi Z., Bhattacharya P. «Analysis of the Linewidth-Enhancement Factor of Long-Wavelength Tunnel-Injection Quantum-Dot Lasers», Journal of Quantum Electronics, Vol.43, No.5, 2007, pp. 363.–369.
- [117] Zimmerman D.R., Spiekman L.H. «Amplifiers for the masses: EDFA, EDWA, and SOA amplets for metro and access applications», Journal of Lightwave Technology,

Vol.22, No.1, 2004, pp.63.–70.

- [118] Ismail K., Menon P.S., Bakarman H.A., Bakar A.A.A., Arsad, N. «Performance of 18 channel CWDM system with inline Semiconductor Optical Amplifier», IEEE 3rd International Conference on Photonics (ICP 2012), pp. 215.–219., 1–3 Oct. 2012.
- [119] Vacondio F., Ghazisaeidi A., Bononi A., Rusch L.A. «Low-Complexity Compensation of SOA Nonlinearity for Single-Channel PSK and OOK», Journal of Lightwave Technology, Vol.28, No.3, 2010, pp. 277.–288.
- [120] Полупроводниковый оптический усилитель
<http://www.photonics.su/journal/article/2489>
- [121] Полупроводниковые оптические усилители (ПОУ)
<http://mybiblioteka.su/tom2/150855.html>
- [122] Rahman T., Rafique D., Napoli A., de Man E., Spinnler B., Bohn M., Okonkwo C.M., Koonen A.M.J. and de Waardt H. «Ultralong Haul 1.28-Tb/s PM-16QAM WDM Transmission Employing Hybrid Amplification», Journal of Lightwave Technology, Vol. 33, No. 9, pp.1794.–1804., May 1, 2015.
- [123] Reichmann K.C., Iannone P.P., Zhou X., Frigo N.J., Hemenway B.R. «240-km CWDM Transmission Using Cascaded SOA Raman Hybrid Amplifiers With 70-nm Bandwidth», IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 18, No.2, 2006, pp. 328.–330.
- [124] Ramaswami, R., K. H. Sivarajan, and G. H. Sasaki, Optical Networks, 3rd Edition, 324–325, Burlington, Elsevier, 2010, ISBN: 978-0-12-374092-2.
- [125] Mitschke, F., Fiber Optics, 220–221, Springer, Berlin, Germany, 2009, ISBN: 978-3-642-03702-3
- [126] Ramaswami, R., K. H. Sivarajan, and G. H. Sasaki, Optical Networks, 3rd Edition, 246–248, Burlington, Elsevier, 2010, ISBN: 978-0-12-374092-2.
- [127] Dildendorfs, V., Parfjonovs, M., Alševska, A., Spolitis, S., Bobrovs, V. Influence of Dispersion Slope Compensation on 40 Gbit/s WDM-PON Transmission System Performance with G.652 and G.655 Optical Fibers. No: 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL 2017): Proceedings, Singapurā, Singapore, 19.-22. novembris, 2017. Piscataway: IEEE, 2017, 598.-604.lpp. ISBN 978-1-5386-1212-5. e-ISBN 978-1-5386-1211-8. DOI:10.1109/PIERS-FALL.2017.8293207
- [128] Olonkins, S., Spolitis, S., Lyashuk, I., & Bobrovs, V. (2014). Cost effective WDMAON with multicarrier source based on dual-pump FOPA. In: 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), (pp. 23-28), 6–8 October 2014, St. Petersburg, Russia.
- [129] Gómez, F., Puerto, K., & Guevara, D. (2015). Effect of nonlinear four-wave mixing in optical fibre transmission. In: 2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV), (pp. 1–6), 11–13 November 2015, Tegucigalpa, Honduras.
- [130] Dildendorfs, V., Spolitis, S., & Bobrovs, V. (2017). Effectiveness Evaluation of Dispersion Compensation Methods for Fiber-Optical Transmission Systems. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 3759–3763.
- [131] Selvamani, A., & Sabapathi, T. (2011). Suppression of four wave mixing by optical phase conjugation in DWDM fiber optic link. In: International Conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (pp. 95–99), 1517 December 2011, Sivakasi, India.
- [132] Sugumaran, S., & Arulmozhivarman, P. (2013). Effect of chromatic dispersion on four-wave mixing in WDM systems and its suppression. In: International Conference on Emerging Trends in VLSI, Embedded System, Nano Electronics and Telecommunication System (ICEVENT) (pp. 1–5), 7–9 January 2013, India.
- [133] Cheng, M. C., Tsai, C.T., Chi, Y. C., & Lin, G. R. (2014). Direct QAM-OFDM Encoding of an L-band Master-to-Slave Injection Locked WRC-FPLD Pair for 28 × 20 Gb/s DWDM-PON Transmission. IEEE Journals & Magazines, 32 (17), 15724–15736.

- [134] Kachhatiya, V., & Prince, S. (2016). Wavelength division multiplexing-dense wavelength division multiplexed passive optical network (WDM-DWDM-PON) for long reach terrain connectivity. In: International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP) (p. 1), 6–8 April 2016, Madras, India.
- [135] Spolitis S., Bobrovs, V., Berezins, S., & Ivanovs, G. (2013). Optimal design of spectrally sliced ASE seeded WDMPON system. In: 2012 15th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS) (pp. 1–5), February 2013. Rome, Italy.
- [136] OFS Specialty Photonics Division. (2013). Highly Non-Linear Fiber (HNLF). Product Sheet, Version: 20131210, Denmark, 1, 2013.
- [137] Zvirbule, K., Matsenko, S., Parfjonovs, M., Mūrnieks, R., Aleksejeva, M., Spolitis, S. Implementation of Multi-Wavelength Source for DWDM-PON Fiber Optical Transmission Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2020, Vol. 57, No. 4, 24.–33.lpp. ISSN 0868-8257. DOI:10.2478/lpts-2020-0019
- [138] Cerqueira Arismar, Jr. S., Chavez Boggio, J. M., Hernandez-Figueroa, H. E., Fragnito, H. L., & Knight, J. C. (2008). Highly efficient generation of cascaded four-wave mixing products in a hybrid photonic crystal fiber. In: European Conference on Optical Communications – ECOC (pp. 16–20), 1620 September 2007, Berlin, Germany.
- [139] Kartalopoulos, S. V. (2008). Next generation intelligent optical networks. USA: Springer Science Business Media.
- [140] Dakin, J. P., & Brown, R. G. W. (2018). Handbook of optoelectronics: Enabling technologies (Volume Two). USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [141] Chiani, M., Win, M. Z., & Zanella, A. (2003). Error probability for optimum combining of M-ary PSK signals in the presence of interference and noise. *IEEE Transactions On Communications*, 51(11). doi: 10.1109/TCOMM.2003.819197
- [142] Meghdadi, V. (2008). *BER calculation*. Wireless Communications by Andrea Goldsmith.
- [143] Pavlovs, D., Grinčišins, A., Bobrovs, V., Gavars, P., & Ivanovs, G. (2016). Research of 10 Gbps NRZ-OOK signal spectral and energy efficiency. In *Proc. ELECTRONICS 2016*, 13 – 15 June 2016 (pp. 25–29). Lithuania: Kaunas University of Technology.
- [144] Pavlovs, D., & Bobrovs, V. (2016). Relationship between spectral efficiency and energy efficiency in 10 Gbps NRZ-OOK, 40 Gbps NRZ-DPSK and 100 Gbps DP-QPSK WDM transmission systems. In *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS 2016)*, 8–11 August 2016 (pp.1434–1438). Shanghai, China. doi:10.1109/PIERS.2016.7734673
- [145] Van Heddeghem, W., Idzikowski, F., Vereecken, W., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2012). Power consumption modeling in optical multilayer networks. *Photonics Network Communications*, 24(2), 86–102. doi:10.1007/s11107-011-0370-7
- [146] Verbrugge, S., Colle, D., Demeester, P., Huelsermann, R., & Jaeger, M. (2005). General availability model for multilayer transport networks. In *Proc. 5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks*, 16–19 October 2005. Lacco Ameno, Island of Ischia, Italy. DOI: 10.1109/DRCN.2005.1563848
- [147] Iyer, S., & Singh, S.P. (2016). Spectral and power efficiency investigation in single- and multi-line-rate optical wavelength division multiplexed (WDM) networks. *Photonics Network Communications*. doi:10.1007/s11107-016-0618-3
- [148] Pavlovs, D., Bobrovs, V., Parfjonovs, M., Alševska, A., Ivanovs, G. Evaluation of Signal Regeneration Impact on the Power Efficiency of Long-Haul DWDM Systems. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2017, Vol.54, Iss.5, 68.-77.lpp. e-ISSN 0868-8257. DOI:10.1515/lpts-2017-0035
- [149] Pavlovs, D., Bobrovs, V., Vilcāne, K., & Ivanovs, G. (2019). Investigation of optical signal regeneration impact on power efficiency of single-line-rate and mixedline-rate

- wavelength division multiplexing systems. In: Photonics & Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERSSpring), (pp. 896–901), 17–20 June 2019, Rome, Italy: IEEE. DOI: 10.1109/PIERSSpring46901.2019.9017644
- [150] Agrawal, G.P. (2007). *Nonlinear Fibre Optics*. New York, NY, USA: Academic.
- [151] Velasco, L., Jirattigalachote, A., Ruiz, M., Monti, P., Wosinska, L., & Junyent, G. (2012). Statistical approach for fast impairment-aware provisioning in dynamic all-optical networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 4 (2), 130–141. DOI: 10.1364/JOCN.4.000130
- [152] Bendimerad, D.F., & Frignac, Y. (2017). Numerical Investigation of SOA Nonlinear Impairments for Coherent Transmission Systems Based on SOA Amplification. *Journal of Lightwave Technology*, 35 (24), 5286–5295. DOI: 10.1109/JLT.2017.2772223
- [153] Ghazisaedi, A. (2019). Theory of Coherent WDM Systems Using In-line Semiconductor Optical Amplifiers. *J. Lightwave Technol.*, 37, 4188–4200. DOI: 10.1109/JLT.2019.2921864
- [154] Pavlovs, D., Bobrovs, V., Alševska, A., Parfjonovs, M., Ivanovs, Ģ. Investigation of Power Efficiency Changes in DWDM Systems Replacing Erbium-Doped Amplifiers by Semiconductor Optical Amplifiers. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2022, Vol. 59, No. 1, 44.-52.lpp. e-ISSN 0868-8257. DOI:10.2478/lpts-2022-0005
- [155] Pavlovs, D., Parts, R., Muratbeck, D., & Bobrovs, V. (2017). Comparison of power efficiency and signal regeneration impact in the SLR DWDM transmission systems with different spectral band. In: *Progress in Electromagnetics Research Symposium Fall (PIERS - FALL)*, (pp. 1122–1127), 1922 November 2017. Singapore: IEEE.
- [156] Zakis K, Olonkins S, Udalcovs A, et al. Cladding-Pumped Er/Yb-Co-Doped Fiber Amplifier for Multi-Channel Operation. *Photonics* 2022; 9: 457.
- [157] Supe A, Olonkins S, Udalcovs A, et al. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks. *Appl Sci* 2021; 11: 1702.
- [158] Zaķis, K., Spolītis, S., Salgals, T., Ģēģere, L., Parfjonovs, M., Prigunovs, D., Bobrovs, V., Supe, A. Experimental Characterization of Signal Gain Evolution in Cladding-pumped Doped Fiber Amplifier. *Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, 2023, , 754.-758.lpp. DOI:10.1109/PIERS59004.2023.10221551
- [159] Prigunovs, D., Morevs, P., Parfjonovs, M., Salgals, T., Kudojars, R., Bobrovs, V. Performance Analysis of Hybrid Raman-EDFA Amplifier in WDM Transmission Systems. No: *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Čehija, Prāga, 3.-6. jūlijs, 2023. IEEE Xplore: PIERS, 2023, 1787.-1791.lpp. DOI:10.1109/PIERS59004.2023.10221537
- [160] ITU-T Recommendation G.989.2, “Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks-40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification”, 2012.



Mareks Parfjonovs dzimis 1983. gadā Liepājā. Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Inženierekonomikas un vadības fakultātē ieguvis sociālo zinātņu maģistra grādu ekonomikā (2010). Patlaban ir RTU Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātes Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūta pētnieks.