



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Rihards Mūrnieks

ČUKSTOŠAS GALERIJU MODAS REZONATORU IZSTRĀDE UN PIELIETOJUMA NOVĒRTĒJUMS ŠĶIEDRU OPTISKAJĀM SAKARU SISTĒMĀM

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Elektronikas un telekomunikāciju fakultāte

Telekomunikāciju institūts

Rihards Mūrnieks

Doktora studiju programmas “Telekomunikācijas” doktorants

**ČUKSTOŠAS GALERIJU MODAS
REZONATORU IZSTRĀDE UN PIELIETOJUMA
NOVĒRTĒJUMS ŠĶIEDRU OPTISKAJĀM
SAKARU SISTĒMĀM**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.* VJAČESLAVS BOBROVS,

profesors *Dr. sc. ing.* JURĢIS PORIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2023

Mūrnieks R. Čukstošas galeriju modas rezonatoru izstrāde un pielietojuma novērtējums šķiedru optiskajām sakaru sistēmām. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2023. – 48 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “RTU P-08” 2023. gada 30. jūnija lēmumu, protokols Nr. 23.

Promocijas darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda Rīgas Tehniskās universitātes un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšanas stratēģiskās specializācijas jomas granta atbalstu Nr. 8.2.2.0/20/I/008.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Savienības
struktūrfondi un
Kohēzijas fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

<https://doi.org/10.7250/9789934229855>
ISBN 978-9934-22-985-5 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 17. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Elektronikas un telekomunikāciju fakultātē, Āzenes ielā 12, 201. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Vadošais pētnieks *Ph. D.* Oskars Java,
Vidzemes Augstskola, Latvija

Asociētais profesors *Francesco Da Ros*,
Dānijas Tehniskā universitāte, Dānija

APSTIPRINĀJUMS

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

Rihards Mūrnieks (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienotu zinātnisko publikāciju kopa ar kopsavilkumu latviešu un angļu valodā. Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 38 attēli, piecas tabulas, septiņi pielikumi, kopā 81 lappuse, neieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 167 nosaukumi. Promocijas darbs apkopo septiņus no autora 13 zinātniskajiem oriģinālrakstiem. Zinātniskās publikācijas uzrakstītas angļu valodā un indeksētas *Scopus*, *IEEE* vai *WoS* datubāzē, to kopējais apjoms ir 77 lpp.

DOKUMENTS IR PARAKSTĪTS AR DROŠU ELEKTRONISKO PARAKSTU
UN IETVER LAIKA ZĪMOGU

Pateicība

Paldies promocijas darba vadītājiem profesoram Vjačeslavam Bobrovam un profesoram Jurģim Poriņam un RTU ETF Telekomunikāciju institūta Sakaru sistēmu tehnoloģiju izpētes centra vadītājam profesoram Sandim Spolītim par sniegto atbalstu un padomiem promocijas darba izstrādes gaitā!

Strādājot RTU ETF Telekomunikāciju institūtā par pētnieku, man bija iespēja sadarboties ar talantīgiem, profesionāliem un atbalstošiem kolēģiem un studiju biedriem. Paldies visiem par atbalstu, komandas darbu un zināšanām, bez kurām nevarētu tapt šis darbs! Īpaši liels paldies maniem ilggadējiem kolēģiem Tomam Salgalam, Jānim Braunfeldam, Armandam Ostrovskim un Laurai Skladovai!

Paldies visiem profesoriem, docentiem un lektoriem, kas bakalaura, maģistra un doktorantūras studiju laikā sniedza savas zināšanas ilgajās lekcijās, praktiskajos un laboratorijas darbos, kā arī paldies citiem ETF un RTU darbiniekiem, kas vienmēr bija izpalīdzīgi! Paldies arī manam ilggadējam asistentam Rutai Galanskai, kas pavadīja ar mani daudzas stundas universitātē un ārpus tās!

Visbeidzot, vislielākais un kvēlākais paldies manai mīļajai ģimenei – brāļiem, māsām un īpaši, manai mammai, bez kuras sniegtā 24/7 atbalsta, ticības un ziedošanās es nebūtu nonācis līdz šim momentam un darbam!

SATURS

SATURS	5
PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS	7
Tēmas aktualitāte	7
Mērķis, uzdevumi un aizstāvamās tēzes	8
Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti	8
Darba struktūra un apjoms	9
Darba aprobācija un publikācijas	9
IEVADS	12
PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI	14
1. SILĪCIJA REZONATORU IZSTRĀDE, TO PARAMETRU UN DATU PĀRRAIDĒ LIETOJAMU NESEJSIGNĀLU ĢENERĒŠANAS IZVĒRTĒJUMS	14
1.1. Silīcija mikrosfēras izstrādes apraksts	14
1.2. Silīcija mikrostriņa izstrādes apraksts	15
1.3. Optisko frekvenču ķemņu ģenerēšanas novērtējums	17
2. OPTISKO SAKARU SISTĒMU PRASĪBĀM ATBILSTOŠAS OPTISKĀS FREKVENČU ĶEMMES IEGŪŠANAS ANALĪZE SILĪCIJA MIKROSFĒRAS UN MIKROSTIŅU REZONATOROS	21
2.1. Optiskās frekvenču ķemmes iegūšana silīcija mikrosfēras rezonatorā ar 400 GHz <i>FSR</i>	21
2.2. Izklieģošā Kerra solitona optiskās frekvenču ķemmes iegūšana silīcija rezonatorā ar 100 GHz <i>FSR</i>	22
2.3. Optiskās frekvenču ķemmes iegūšana eksperimentāli izveidotajā silīcija mikrostriņa rezonatora ar 90 GHz <i>OFC</i> gaismas avotā	25
3. MIKROSFĒRAS UN MIKROSTIŅU <i>WGMR</i> GAISMAS AVOTOS ĢENERĒTO OPTISKO FREKVENČU ĶEMŅU LIETOJUMA IZVĒRTĒJUMS ĀTRDARBĪGĀS DATU PĀRRAIDES SISTĒMĀS	29
3.1. <i>IM/DD</i> četru kanālu 200 GHz <i>WDM-PON</i> sistēmas izveide ar mikrosfēras <i>OFC</i> gaismas avota lietojumu kā nesējsignālu avotu	29
3.2. <i>IM/DD</i> četru kanālu 400 GHz <i>WDM-PON</i> sistēmas izveide pie dažādu optisko šķiedru pārraides līnijām, kur pamatā ir mikrosfēras <i>OFC</i> gaismas avots	31
3.3. <i>IM/DD</i> astoņu kanālu 100 GHz <i>WDM-PON</i> sistēmas izveide ar mikrosfēras <i>OFC</i> gaismas avota lietojumu kā dažādu līnijas platuma nesējsignālu iegūšanas avotu	34
3.4. Eksperimentālā līdz 100 Gbit/s datu centru starpsavienojuma nodrošināšana, izmantojot mikrostriņa <i>OFC</i> gaismas avotā iegūto optisko frekvenču ķemmi	38
SECINĀJUMI	43
LITERATŪRAS SARAKSTS	44

Lietoto saīsinājumu atšifrējums

<i>ASE</i>	pastiprinātā spontānā emisija	<i>NG-PON2</i>	nākamās paaudzes pasīvais optiskais tīkls 2
<i>AWG-DEMUX</i>	sakārtota viļņvadu režģa demultiplekors	<i>NRZ</i>	bez atgriešanās pie nulles
<i>AWG-MUX</i>	sakārtota viļņvadu režģa multiplekors	<i>NRZ-OOK</i>	bez atgriešanās pie nulles “ieslēgt-izslēgt” modulācija
<i>BER</i>	bitu kļūdu varbūtība	<i>NZ-DSF</i>	ne-nulles dispersijas nobīdīta šķiedra
<i>B2B</i>	bez pārraides vides	<i>OBPF</i>	optiskais joslas filtrs
<i>CD</i>	hromatiskā dispersija	<i>OC</i>	optiskais cirkulators
<i>CFWM</i>	kaskādes četru viļņu mijiedarbe	<i>ODN</i>	optiskais sadales tīkls
<i>CO</i>	centrālais ofiss	<i>OFC</i>	optiskā frekvenču ķemme
<i>CSF</i>	nogriezta viļņa garuma šķiedra	<i>OLT</i>	optiskais līnijas terminālis
<i>CW</i>	nepārtrauks starojums	<i>ONT</i>	optiskais tīkla terminālis
<i>DCI</i>	datu centru starpsavienojums	<i>OSA</i>	optiskais spektra analizators
<i>DKS</i>	izkļiedējošais Kerra solitons	<i>OSNR</i>	optiskā signāla trokšņu attiecība
<i>DSO</i>	ciparu atmiņas osciloskops	<i>PAM</i>	impulsa intensitātes modulācija
<i>DSP</i>	ciparu signālu apstrāde	<i>PC</i>	polarizācijas kontrolieris
<i>EA</i>	elektriskais pastiprinātājs	<i>PD</i>	fotodiode
<i>EAWG</i>	elektrisks patvaļīgas formas signālu ģenerators	<i>PM</i>	jaudas mērītājs
<i>EDFA</i>	erbija leģētās šķiedras pastiprinātājs	<i>PON</i>	pasīvs optiskais tīkls
<i>EQ</i>	izlīdzināšana (adaptīva pēcizlīdzināšana)	<i>PRBS</i>	pseudogadījuma bitu secība
<i>FBT</i>	atgriezeniskās saites koeficienti	<i>PS</i>	jaudas sadalītājs
<i>FFT</i>	turpverstie koeficienti	<i>SBS</i>	inducētā Brilljuēna izkļiede
<i>FSR</i>	brīvais spektrālais diapazons	<i>SD-FEC</i>	mīkstas izlemšanas turpversta kļūdu labošana
<i>FWHM</i>	līnijas platums līmenī viena puse	<i>SMF</i>	vienmodas šķiedra
<i>FWM</i>	četrus viļņu mijiedarbība	<i>TNR</i>	toņa-trokšņa attiecība
<i>HD-FEC</i>	stingras izlemšanas turpverstā kļūdu labošana	<i>TP</i>	patiecināta gala šķiedra
<i>IEEE</i>	elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūts	<i>VOA</i>	pārskanojams optiskais vājinātājs
<i>IM/DD</i>	intensitātes modulācijas ar tiešo uztveršanu	<i>WGM</i>	čukstošā galeriju moda
<i>ITU-T</i>	starptautiskās telesakaru apvienības telekomunikāciju standartu sektors	<i>WDM</i>	viļņgarumdales blīvēšana
<i>LPF</i>	zemfrekvenču filtrs	<i>WDM-PON</i>	viļņgarumdales blīvēts pasīvais optiskais tīkls
<i>MZM</i>	Maha-Cendera modulators		

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJAIS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Pasaule nesēn ir piedzīvojusi pandēmijas radītās dramatiskās izmaiņas mūsu dzīvēs un pakalpojumos, ko mēs lietojam. Telekomunikāciju industrija nav bijis izņēmums, piedzīvojot strauju lēcieni pārraidīto datu apjomā [1], kas saistīti ar jaunajiem pakalpojumiem, kā augstas kvalitātes video straumēšana, video konferences, paplašinātā un virtuālā realitāte, tiešsaistes ofisi utt. Mūsdienu telekomunikāciju industrija rada pieaugošu oglekļa dioksīda (CO₂) izmešu daudzumu no visas pasaules izmešu apjoma, kas ir pieaudzis no 1,4 % 2018. gadā [2] līdz 4 % 2021. gadā [3]. Tā ir nopietna problēma, kas telekomunikāciju inženieriem ir jāatrisina, lai samazinātu izmešu daudzumu un atbalstītu “zaļo domāšanu”.

Līdz ar to telekomunikāciju infrastruktūras īpašniekiem ir jāmeklē jaunus risinājumus un tehnoloģijas tīkla uzlabošanas nolūkos, lai spētu tikt galā ar līdzīgām pasaules mēroga krīzēm nākotnē un apstādinātu pastāvīgi par 1,4 % ik gadu pieaugošo CO₂ izmešu daudzumu no telekomunikāciju industrijas [4]. Metro tīkli, datu centri un pasīvie optiskie tīkli rada lielāko izmešu daļu no visas sakaru industrijas. Divi fundamentāli faktori, lai samazinātu izmešu daudzumu, ir energoefektīva un zemu izmaksu aparatūra šo sistēmu darbības nodrošināšanai [5].

Mūsdienu optiskie sakaru tīkli, lai pārraidītu lielus datu apjomus, izmanto viļņgarumdales blīvēšanas (*WDM*) tehnoloģiju, kur vairāki atsevišķi lāzeru avoti (lāzeru masīvi) tiek izmantoti, lai nodrošinātu *WDM* kanālu darbību. Visbiežāk izmantotie ir lāzeru ar izkliedēto atgriezeniskās saites masīvi [6], tomēr arī citi lāzeru veidi, piemēram, no virsmas izstarojošs lāzers ar vertikālu rezonatoru [7], tiek izmantoti raiduztvērējos ar mazāku pārraides attālumu – līdz 10 km. Šāda *WDM* sistēma, kur lāzeru masīvi tiek izmantoti kā nesējsignālu avoti, prasa lielas izmaksas, jo atsevišķiem lāzeriem nepieciešama sinhronizācija. Papildus tam lāzeru masīvu izstarotie viļņa garumi dreifē vairāku GHz diapazonā uzsilšanas rezultātā, tāpēc ir nepieciešamas atbilstošas sargjoslas, lai izvairītos no blakus kanālu pārklāšanās uzsilšanas rezultātā. Tādējādi efektīvs risinājums būtu viena gaismas avota izmantošana visiem datu kanāliem.

Optiskās frekvenču ķemmes (*OFC*) gaismas avoti, proti, vairāku viļņa garumu nesējsignālu avoti, piedāvā energoefektīvu un zemu izmaksu platformu, lai vienkāršotu optiskos raiduztvērējus, ko plaši lieto mūsdienu sakaru sistēmās, kā arī lai samazinātu enerģijas patēriņu optiskajos sakaru tīklos. *OFC* avoti ģenerē vairākus nesējsignālus ar vienādu spektrālo atstarpi starp līnijām (no dažiem GHz līdz vairākiem simtiem GHz), kas atbilst starptautiskās telesakaru apvienības telekomunikāciju standartu sektora (*ITU-T*) *G.694.1* rekomendācijai [8], lai spētu nodrošināt 2ⁿ kanālus (1. att.). Šo *OFC* gaismas avotu priekšrocību līdz ar to var izmantot *WDM* raidītājā, kur atsevišķu lāzeru masīvu var aizvietot ar vienu optisko frekvenču ķemmi. Tātad tas būtiski vienkāršo optisko sakaru tīklu un izmaiņas ir nepieciešamas tikai raidītāja daļā, kur tiek aizvietots lāzeru masīvs un ievietots papildu sakārtota viļņvadu režģa demultiplexors (*AWG-DEMUX*). Pārējā tīkla daļa, ieskaitot uztvērējus, paliek nemainīga. Tādus pastāvošos pasīvo optisko tīklu (*PON*) standartus kā nākamās paaudzes pasīvais optiskais tīkls (*NG-PON2*), kas

atbilst *ITU-T* rekomendācijai *G.989.2* [9], un tādus standartus kā *Super-PON*, ko attīsta un standartizē elektrotehnikas un elektronikas inženieru institūta (*IEEE*) *P802.4cs* darba grupa [10], var optimizēt, izmantojot silīcija mikrosfēras un mikrostriņa *Kerra-OFC* gaismas avotā ģenerētus nesējsignālus.

Mērķis, uzdevumi un aizstāvamās tēzes

Promocijas darba mērķis – veikt čukstošas galeriju modas rezonatoru optiskās frekvenču ķemmes gaismas avota izstrādi un lietojuma izpēti intensitātes modulācijas optiskajās sakaru sistēmās.

Darba mērķa sasniegšanai definēti vairāki uzdevumi:

1. Izpētīt čukstošas galeriju modas rezonatoru optisko frekvenču ķemmes gaismas avotu darbības principus un iespējas pielāgot rezultējošās ķemmes parametrus lietojumam datu pārraidē optiskajā C joslā (1530–1565 nm).
2. RTU TI SSTIC laboratorijā izstrādāt SiO₂ mikrosfēras un mikrostriņu rezonatorus optiskās frekvenču ķemmes gaismas avota realizēšanai.
3. Matemātiskās skaitļošanas programmatūrā, integrējot eksperimentāli iegūto optisko frekvenču ķemmi, veikt 10 Gbit/s *NRZ-OOK WDM-PON* tīklu veiktspējas novērtējumu ar pielāgojumu kanālu skaitu (viens, četri, astoņi kanāli), atstarpi starp kanāliem (400 GHz, 200 GHz, 100 GHz), kā arī pārraides vienmodas šķiedru (*SSMF*, *CSF*, *NZ-DSF*) garumā līdz 60 km.
4. Eksperimentāli izvērtēt optiskās frekvenču ķemmes gaismas avota spējas nodrošināt 50 Gbaud un 60 Gbaud *NRZ-OOK* datu pārraidi, kā arī 50 Gbaud *PAM-4* datu pārraidi īsa attāluma datu centru starpsavienojumā.

Aizstāvamās tēzes

1. Izstrādātajos silīcija rezonatoros ir iespējams ģenerēt optisko frekvenču ķemmi optiskajā C joslā (1530–1565 nm).
2. Mikrosfēras un mikrostriņu rezonatoros var iegūt optisko sakaru sistēmu prasībām atbilstošu optiskās frekvenču ķemmes nesējsignālu jaudu un *ITU-T G.694.1* rekomendācijā definēto starpkanālu intervālu.
3. Optiskās frekvenču ķemmes gaismas avots ļauj realizēt līdz 10 Gbit/s *NRZ-OOK* un astoņu kanālu *WDM-PON* piekļuves sakaru sistēmu ar kanālu atstarpi no 100 GHz līdz 400 GHz, izmantojot dažādiem *ITU* standartiem atbilstošas *SMF* līnijas no 20 km līdz 60 km garumā, kā arī līdz 100 Gbit/s *PAM-4 DCI* sistēmas.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

1. Izstrādāta četru kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK WDM-PON* pārraides sistēma, kuras pamatā ir skaitliski mikrosfēras rezonatorā iegūtā optisko frekvenču ķemme ar 200 GHz atstarpi.
2. Izstrādāta astoņu kanālu 10 Gbit/s *NRZ-OOK WDM-PON* pārraides sistēma, kuras pamatā ir skaitliski čukstošas galeriju modas rezonatorā iegūtā solitona *OFC*.

3. Izstrādāta četru kanālu 10 Gbit/s NRZ-OOK WDM-PON pārraides sistēma, kuras pamatā ir eksperimentāli mikrosfēras rezonatora OFC gaismas avotā iegūtā optisko frekvenču ķemme ar 393 GHz atstarpi.
4. Eksperimentāli izstrādāts čukstošas galeriju modas mikrostriņa rezonatora OFC gaismas avots, kas nodrošina vismaz septiņus nesējsignālus virs -15 dBm jaudas.
5. Eksperimentāli izstrādāts 2 km garš datu centru starpsavienojuma prototips līdz 100 Gbit/s pārraides ātrumam kanālā, kura pamatā ir mikrostriņa rezonatora OFC gaismas avots.

Promocijas darbā iegūtie rezultāti tika izmantoti:

- 1) ERAF zinātniskās pētniecības projektā “Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās”, 1.1.1.1/18/A/155, 16.05.2019–15.05.2022;
- 2) ERAF zinātniskās pētniecības *PostDoc* projektā “Optisko frekvenču ķemmu izstrāde šķiedru optiskajām sakaru sistēmām”, 1.1.1.2/VIAA/4/20/659, 01.01.2021–30.06.2023;
- 3) ESF RTU un Banku Augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšanas stratēģiskās specializācijas jomas grantā, 8.2.2.0/20/I/008, 01.02.2022–30.09.2023.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sagatavots kā tematiski vienota zinātnisko publikāciju kopa, kas veltīta pētījumiem par čukstošas galeriju modas rezonatoru izstrādi, optisko frekvenču ķemmes gaismas avotu izveidi, kā arī to integrācija šķiedru optiskajā sakaru sistēmās, gan matemātiski modelējot, gan eksperimentāli demonstrējot. Promocijas darbs apkopo sešas oriģinālpublikācijas žurnālos, vienu – zinātniskajā konferencē prezentētu pētījumu (indeksēts *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*).

Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba galvenie rezultāti prezentēti sešos zinātniskajos oriģinālrakstos, vienā starptautiskajā zinātniskajā konferencē (indeksēts *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*), kā arī četrās zinātniskajās konferencēs (nav indeksēti *Scopus*, *IEEE*, *Web of Science*).

Zinātniskās publikācijas žurnālos

1. **R. Mūrnieks**, T. Salgals, J. Alnis, A. Ostrovskis, O. Ozolins, I. Brice, A. Sedulis, K. Draguns, I. Lyashuk, R. Berkis, A. Udalcovs, T. Bi, X. Pang, J. Porins, S. Spolītis, P. Del’Haye, V. Bobrovs. Silica micro-rod resonator-based Kerr frequency comb for high-speed short-reach optical interconnects. *Opt. Express*, 2023, Vol. 31, Iss. 12, 20306.–20320. lpp. DOI: doi.org/10.1364/OE.488436.
2. **R. Mūrnieks**, L. Skladova, J. Braunfelds, I. Lyashuk, A. Supe, E. A. Anashkina, A. V. Andrianov, S. Spolītis, V. Bobrovs. Impact of Kerr Optical Frequency Comb Linewidth on the Performance of NRZ-OOK Modulated Fiber Optical Communication

System. Laser Physics, 2021, Vol. 1, No. 1, 1.–12. lpp. ISSN 1054-660X. e-ISSN 1555-6611.

3. S. Spolītis, **R. Mūrnieks**, L. Skladova, T. Salgals, A. V. Andrianov, M. P. Marisova, G. Leuchs, E. A. Anashkina, V. Bobrovs. IM/DD WDM-PON Communication System based on Optical Frequency Comb Generated in Silica Whispering Gallery Mode Resonator. IEEE Access, 2021, Vol. 9, 1.–11. lpp. e-ISSN 2169-3536. DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3076411.
4. J. Braunfelds, **R. Mūrnieks**, T. Salgals, I. Brice, T. Sharashidze, I. Lyashuk, A. Ostrovskis, S. Spolītis, J. Alnis, J. Poriņš, V. Bobrovs. Frequency Comb Generation in WGM Microsphere Based Generators for Telecommunication Applications. Quantum Electronics, 2020, Vol. 50, No. 11, 1043.–1049. lpp. ISSN 1063- 7818. e-ISSN 1468-4799. Pieejams: DOI: doi.org/10.1070/QEL17409.
5. E. A. Anashkina, M. P. Marisova, A. V. Andrianov, R. Akhmedzhanov, **R. Mūrnieks**, M. D. Tokman, L. Skladova, I. V. Oladyshkin, T. Salgals, I. Lyashuk, A. Sorokin, S. Spolītis, G. Leuchs, V. Bobrovs. Microsphere-Based Optical Frequency Comb Generator for 200 GHz Spaced WDM Data Transmission System. Photonics, 2020, Vol. 7, No. 3, 1.–16. lpp. ISSN 2304-6732. DOI: doi.org/10.3390/photonics7030072.
6. K. Zvirbule, S. Matsenko, M. Parjonovs, **R. Mūrnieks**, M. Aleksejeva, S. Spolītis. 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: doi.org/10.2478/lpts-2020-0019.

Zinātniskā konference, kurā prezentēti darba rezultāti (indeksēti Scopus, IEEE, Web of Science)

1. I. Lyashuk, **R. Mūrnieks**, L. Skladova, S. Spolitis, V. Bobrovs. The Comparison of OFC Generation Techniques for WDM Networks. International Conference Laser Optics (ICLO), Krievija, Sanktpēterburga, 20.–24. jūnijs, 2022. IEEE, 1. lpp. DOI: doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9840130.

Zinātniskās konferences, kurās prezentēti darba rezultāti (nav indeksēti Scopus, IEEE, Web of Science)

1. I. Lyashuk, **R. Mūrnieks**, V. Bobrovs. The evaluation of optical frequency comb generators compared to the conventional transceiver types, 63rd International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 14, 2022.
2. **R. Mūrnieks**, I. Lyashuk, T. Salgals, J. Alnis, I. Brice, A. Sedulis, A. Udalcovs, X. Pang, O. Ozolins, S. Spolitis, V. Bobrovs. Micro-rod resonator-based optical frequency comb for datacenter interconnects, 63rd International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 14, 2022.
3. **R. Mūrnieks**. Research on Kerr Optical Frequency Combs for NRZ-OOK Modulated Fiber Optical Communication Systems, First Workshop for ERI on Telecommunication and Networks, March 14–15, 2022.
4. **R. Mūrnieks**, J. Braunfelds, T. Salgals, S. Spolitis, V. Bobrovs, J. Porins. Evaluation of Optical Frequency Comb Generators Based on a Whispering Gallery Mode

Microresonator and Applications in FOTS, 60th International scientific conference of RTU, Riga, Latvia, October 15, 2019.

Promocijas darba izstrādes laikā publicētie darbi (indeksēti *Scopus*, *IEEE*, *Web of Science*), kas ir ārpus promocijas darba tēmas

1. J. Braunfelds, K. Zvirbule, U. Seņkāns, **R. Mūrnieks**, I. Lyashuk, J. Poriņš, S. Spolītis, V. Bobrovs. Application of FWM-Based OFC for DWDM Optical Communication Systems with Embedded FBG Sensor Network, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, no. 2, 2022. ISSN 0868-8257.
2. E. Elsts, A. Supe, S. Spolītis, K. Zaķis, S. Olonkins, A. Udaļcovs, **R. Mūrnieks**, U. Seņkāns, D. Prigunovs, L. Ģēģere, K. Draguns, I. Lukosevics. Fiber Optical Coupler by Comsol Multiphysics Software, *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, vol. 59, no. 5, pp. 3–14, 2022. DOI: doi.org/10.2478/lpts-2022-0036.
3. T. Salgals, J. Alnis, **R. Mūrnieks**, I. Brice, J. Poriņš, A. Andrianov, E. A. Anashkina, S. Spolītis, V. Bobrovs. Demonstration of a Fiber Optical Communication System Employing a Silica Microsphere-Based OFC Source, *Opt. Express*, 2021, vol. 29, no. 7, pp. 10903–10913. DOI: doi.org/10.1364/OE.419546.
4. A. Supe, S. Olonkins, A. Udaļcovs, L. Ģēģere, **R. Mūrnieks**, D. Prigunovs, U. Seņkāns, J. Grūbe, E. Elsts, S. Spolītis, O. Ozoliņš, V. Bobrovs. Cladding-Pumped Erbium/Ytterbium Co-Doped Fiber Amplifier for C-Band Operation in Optical Networks, *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 4, art. no. 1702. DOI: doi.org/10.3390/app11041702.
5. A. Supe, S. Spolītis, E. Elsts, **R. Mūrnieks**, G. Doke, U. Seņkāns, S. Matsenko, J. Grūbe, V. Bobrovs. Recent Developments in Cladding-Pumped Doped Fiber Amplifiers for Telecommunications System, 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2020), proceedings, Itālija, Bari, 19.–23. jūlijs, 2020. DOI: doi.org/10.1109/ICTON51198.2020.9203436.
6. K. Zvirbule, **R. Mūrnieks**, M. Aleksejeva, J. Braunfelds, I. Lyashuk, V. Bobrovs. Integration of FBG Optical Sensor Network in DWDM-PON Transmission System, *Photonics and Electromagnetics Symposium*, proceedings, Ķīna, Xiamen, 17.–20. dec. 2019, pp. 1168–1174. DOI: doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021808.

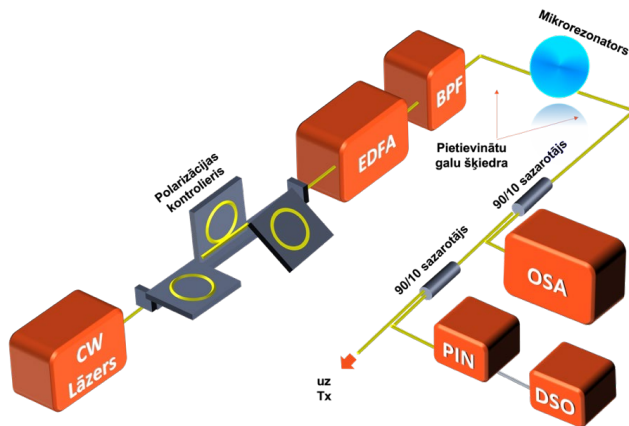
IEVADS

Augstas kvalitātes optiskie rezonatori padara efektīvākus trešās kārtas nelineāros optiskos efektus, ietverot starojumu nelielā čukstošu galeriju modu (*WGM*) rezonatora tilpumā. Tas ļauj iegūt *OFC*, izmantojot četru viļņu mijiedarbību (*FWM*) [11]. *OFC* iegūšana ir demonstrēta ar noteiktas frekvences nepārtraukta starojuma (*CW*) pumpējošā lāzera starojuma ievadi nelineārā *WGM* rezonatorā [12]. Optiskā frekvenču ķemme kā termins plašā nozīmē attiecas uz spektru, kas sastāv no vairākiem nesējsignāliem ar vienādu savstarpēju spektrālo intervālu. Tādu optisko frekvenču ķemmi parasti sauc par Tūringa ķemmi. Pastāv arī solitona ķemme, kad optiskā frekvenču ķemme ir fāzes pieskaņotā stāvoklī [13].

OFC gaismas avoti ir izmantoti tādās tehnoloģijās kā optiskie pulksteņi, radiofrekvences fotoniskie oscilatori, koherentie optiskie sakari, utt. [14]. Lietojot *OFC*, jau ir demonstrēti vairāki datu pārraides eksperimenti, izmantojot integrētos rezonatoros iegūtās optiskās frekvenču ķemmes. Piemēram, izmantojot Si_3N_4 , kopējais datu pārraides ātrums ir parādīts kā 170,8 Gbit/s ar atgriešanos pie nulles ieslēgt-izslēgt modulāciju [15], un sasniegts *WDM* datu pārraides ātrums līdz 50 Tbit/s 75 km attālumā [16]. *OFC* gaismas avoti ir izmantoti arī īsa attāluma bezvadu optiskajos sakaros, kas ir parādīts [17].

Nepietiekami pētīti ir *OFC* gaismas avoti, kuru pamatā ir tādi telpiskie *WGM* rezonatori [18] kā silīcija mikrosfēras un mikrostiņi. Šie *WGM* rezonatori ir samērā vienkārši ražošanā no standarta vienmodas šķiedras (*SMF*), lietojot metināmos aparātus. Papildus tam ir jāparāda datu pārraide, kuras pamatā ir *OFC* gaismas avoti, kas izveidoti lietojot šos telpiskos *WGM* rezonatorus. Viens no perspektīvākajiem lietojumiem ir optiskās šķiedras pārraides sistēmas. Uz *WGM* rezonatora pamata izveidotie *OFC* gaismas avoti ir ievērojami vienkāršāki (sastāv no viena pumpējošā *CW* lāzera un *WGM* rezonatora) un mazāki (rezonatora diametrs parasti ir no μm līdz mm) nekā *OFC* gaismas avoti kā modas pieskaņoti lāzери. *WGM* rezonatori dod iespēju iegūt *OFC*, kas centrētas pie viļņa garuma 1550 nm ar nesējsignālu atstarpī aptuveni desmiti, simti GHz, aptverot vairāk nekā 500 nm (70 THz) [19] vai pat oktāvu joslas platumu [20]. Tas atbilst optiskajām S, C, L un U sakaru joslām [21]. Stabilitātes un jaudas efektivitātes ziņā *WGM* rezonatora *OFC* gaismas avots ir ideāls kandidāts, lai intensitātes modulācijas un tiešās uztveršanas (*IM/DD*) viļņgarumdales blīvētos pasīvos optiskos tīklos (*WDM-PON*) aizstātu parasti izmantoto lāzери masīvu risinājumu [22].

Vispārēja *OFC* gaismas avota shēma, kuras pamatā ir telpisks *WGM* rezonators, redzama 1. attēlā. Šādam *OFC* gaismas avotam ir vairāki principiālie elementi. Pumpējošais gaismas avots ir *CW* lāzera avots, kura starojums, izmantojot polarizācijas kontrolieri (*PC*), tiek sūtīts erbija legētas šķiedras pastiprinātājā (*EDFA*), lai palielinātu pumpējošo jaudu līdz maksimumam. Pastiprinātais pumpējošais starojums tiek ievadīts nelineārā rezonatorā, izmantojot patievinātu šķiedru (*TP*), leņķi pulētu šķiedru vai prizmu. Lai filtrētu *EDFA* troksni, pirms mikrorezonatora tiek izmantots optiskais joslas filtrs (*OBPF*). Pēc tam ģenerētā *OFC* ar tiem pašiem līdzekļiem tiek izvadīta no rezonatora un, izmantojot optisko sadalītāju, nosūtīta un mērīta ar optiskā spektra analizatoru (*OSA*). Papildus tam *OFC* tiek uztverta ar *PIN* fotodiodi (*PD*), lai ar ciparu atmiņas osciloskopu (*DSO*) analizētu frekvenču ķemmi laika diapazonā. *OFC* gaismas avota izejā nesējsignāli tālāk tiek izmantoti raidītājā (*Tx*).



1. att. Tipiska *WGM* rezonatora *OFC* gaismas avota shēma, kur pietievinātu galu šķiedras vietā var izmantot prizmu.

Rezultātā mikrosfēras un mikrostriņu *OFC* gaismas avots ir nepietiekami modelēts, tā parametri nav optimizēti, kā arī tā eksperimentālā realizācija datu pārraidei optiskajā C joslā (1530–1565 nm) ar kanālu skaitu 2^n (piemēram, četri, astoņi, 16 utt. kanāli) un datu pārraides ātrumiem ap 10 Gbit/s nav pietiekami demonstrēta.

PROMOCIJAS DARBA GALVENIE REZULTĀTI

Doktorantūras studiju laikā veikta silīcija mikrorezonatoru, t. i., mikrosfēru un mikrorezonatoru izstrāde, *OFC* gaismas avotu izveide, optisko frekvenču ķemņu ieguve un to nesējsignālu lietošanas izvērtējums gan piekļuves tīklos, gan datu centru starpsavienojumos, lai izvērtētu *WGM* rezonatoros iegūto *OFC* lietojuma iespēju šķiedru optiskajās sakaru sistēmās.

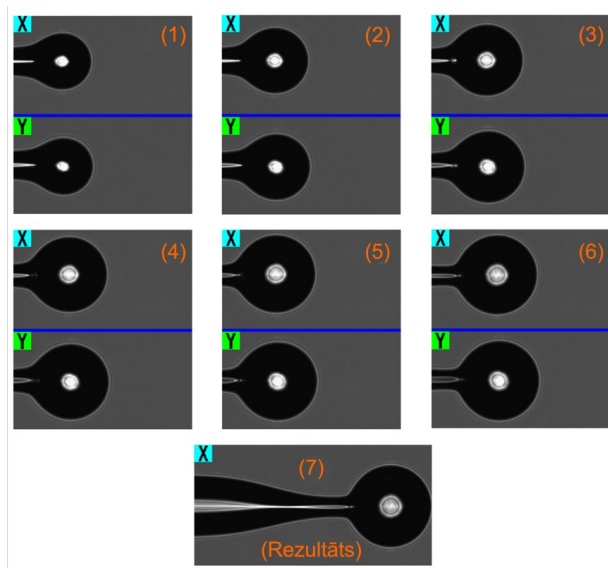
1. SILĪCIJA REZONATORU IZSTRĀDE, TO PARAMETRU UN DATU PĀRRAIDĒ LIETOJAMU NESĒJSIGNĀLU ĢENERĒŠANAS IZVĒRTĒJUMS

Telpiskus *WGM* rezonatorus galvenokārt var iedalīt divās grupās – kristāliskie rezonatori, kas izstrādāti, pulējot kalcija fluorīda (CaF_2) vai magnija fluorīda (MgF_2) cilindrus un nodrošina Q faktoru $\sim 10^9$ – 10^{11} [23], un silīcija rezonatori, kas izstrādāti, kausējot šķiedras galu un izmantojot kādu siltuma avotu, piemēram, CO_2 lāzera vai gāzes liesmu, nodrošinot Q faktoru $\sim 10^6$ – 10^{10} .

1.1. Silīcija mikrosfēras izstrādes apraksts

Tipiski mikrosfēras ar diametru vairāki simti mikrometri ir iespējams izgatavot, kausējot silīcija optiskās šķiedras galu, lietojot tādas tehnoloģijas kā elektriskā lokizlāde, ūdeņraža vai CO_2 lāzera liesma [24, 25]. Viena no vienkāršākajām un atkārtojamības ziņā izdevīgākajām ir mikrosfēru izgatavošana ar metināšanas aparātu. Šajā promocijas darbā ir demonstrēta mikrosfēru izgatavošana ar *Fujikura ARCMaster FSM-100P+* šķiedras metināšanas aparātu, kas ļauj atkārtoti iegūt mikrosfēras ar tādiem vienādiem parametriem kā diametrs un Q faktors. Izgatavošanas process sākas ar attīrīta optiskā šķiedras gala konstantas tuvināšanas pie elektrodiem, tajā pašā laikā rotējot šķiedru ap savu asi, lai mikrosfēra saglabātu maksimāli sfērisku formu un nenoslīdētu uz leju savas masas iespaidā. Sfērisks *WGM* rezonators (mikrosfēra) tiek izveidots virsmas spraiguma spēku ietekmē.

Tomēr, lai iegūtu ideāli atkārtojamus mikrosfēras parametrus, ir nepieciešams atrast optimālus metināšanas parametrus. Mikrosfēras diametru var regulēt, pielāgojot metināmā aparāta pieskaņojumu (angļu val. *adjustment*), t. i., parametru, kas ietekmē mikrosfēras rādiusu, kā arī izvēloties šķiedras diametru, no kura tiek veidots rezonators. Tādu diametru d kā 175 μm un 350 μm mikrosfēras tiek izgatavotas no standarta *SMF* ar 125 μm diametru. Tomēr, lai iegūtu mikrosfēras ar diametru, kas vienāds vai lielāks par 660 μm , ir nepieciešamas šķiedras bez serdeņa ar 200 μm diametru. Eksperimentāli ir noteikts, ka ir nepieciešamas 42 sekundes, lai iegūtu 175 μm mikrosfēras, un 114 sekundes, lai iegūtu 350 μm diametra mikrosfēras. Kā redzams 1.1. attēlā, lokizlādes laikam ejot, mikrosfērai palielinās diametrs un forma arvien vairāk pietuvinās sfērai.



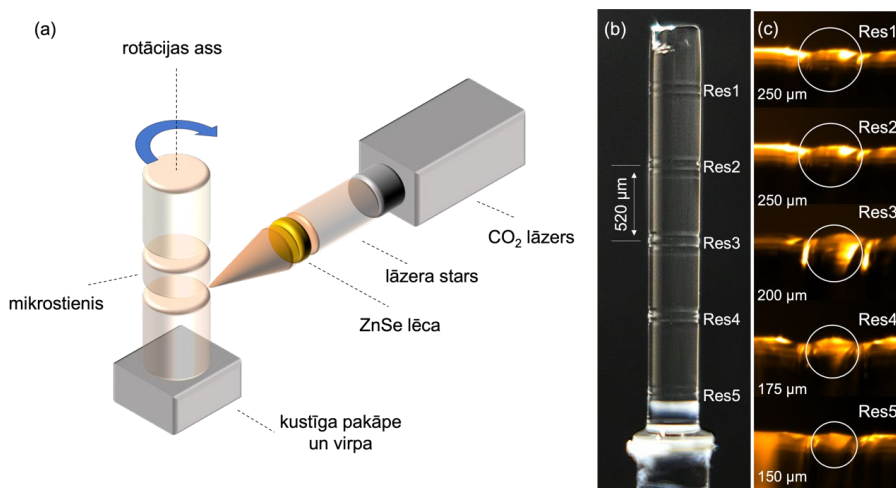
1.1. att. Mikrosfēras formas maiņa un diametra palielināšanās atkarībā no lokizlādes laika.

Diametru izvēle rezultējas dažādās *WDM* sistēmas kanālu atstarpēs, kas definētas *ITU-T G.694.1* rekomendācijā, jo tieši diametrs nosaka atstarpi starp optiskās frekvenču ķemmes līnijām. Proti, mikrosfēras diametrs d ir saistīts ar brīvo spektrālo diapazonu (*FSR*) ar sakarību $FSR = c/(\pi \cdot d \cdot n_{eff})$, kur n_{eff} ir efektīvais laušanas koeficients, c – gaismas ātrums vakuumā. Līdz ar to ir iespējams kontrolēt *FSR*, mainot mikrosfēras diametru d . Tātad, ap 175 μm , 350 μm un 660 μm diametri attiecīgi atbilst 400 GHz, 200 GHz un 100 GHz *FSR*. Metināšanas parametri ir jāpieskaņo katram no iepriekš minētajiem diametriem.

1.2. Silīcija mikrostiņa izstrādes apraksts

Lai izgatavotu mikrostiņa rezonatoru, vispirms ir jāgatavo cilindrisku kvarca stieni. Šī cilindriskā stiņa diametrs tiek izvēlēts, ņemot vērā nepieciešamo atstatumu starp *OFC* nesējsignāliem. Mikrostiņa izgatavošanas sistēma ar CO_2 lāzeru redzama 1.2. attēlā. Cilindriskais kvarca stienis ir piestiprināts pie virpas ar gaisa polsterējumu ar mazāk nekā 100 nm vibrācijām. Šis kvarca stienis rotē perpendikulāri attiecībā pret lāzera staru. CO_2 lāzera stars, kas fokusēts ar cinka selēna (ZnSe) lēcu, krīt uz rotējošu kvarca stieni, un tā rezultātā tiek nogriezts materiāls. Nākamajā solī tiek izveidots rezonators, fokusējot lāzera staru dažādās pozīcijās gar kvarca stiņa asi. Materiāla nogriešanas procesā nepārtraukti rodas putekļi, līdz ar to mikrostiņa izgatavošanas laikā ir nepieciešams nosūkņēšanas mehānisms, lai savāktu putekļus, kas var nosēties uz mikrostiņa un ievērojami samazināt gan tā stabilitāti, gan Q faktoru. Kad ir pabeigts primārais izgatavošanas process, griešanas apgabals tiek apkausēts ar lāzera staru, kas ievērojami uzlabo mikrorezonatora Q faktoru. Izmantojot to pašu izgatavošanas procesu un konfigurāciju – lāzera jauda, izstarojums, ilgums, kvarca stiņa

rotēšanas ātrums, kā arī stara pozicionēšana, ir iespējams atkārtoti izveidot identiskus mikrostriņus. Ar šādu metodi ir iespējams uz viena kvarca stieņa izveidot vairākus mikrostriņus ar vienādiem parametriem samērā īsā laika periodā (ap 5 min). 1.2. (b) attēlā redzami pieci mikrostriņu rezonatori, kas izveidoti uz viena kvarca stieņa ar 700 μm diametru d un 520 μm atstarpi starp rezonatoriem, bet ar dažādiem apliecējas rādiusiem r (1.2. (c) att.) – 250 μm , 250 μm , 200 μm , 175 μm , un 150 μm (atbilstoši no *Res1* līdz *Res5*). Apliecējas rādiuss ļauj pielāgot rezonatora Q faktoru, jo daudz svarīgāks ir nevis mikrostriņa rezonatora virsmas nevienādabīgums, no kura atstarojas gaisma un izkliedējas ārpus rezonatora, kas samazina Q faktoru, bet mikrostriņa apliecējas rādiuss [26]. Apliecēja palīdz saglabāt un fokusēt gaismu rezonatora modas ietvaros.



1.2. att. (a) Mikrostriņu izstrāde uz kvarca stieņa, lietojot CO_2 lāzeri, kur tiek izmantota virpa, lai rotētu kvarca stieni, un kustīga pakāpe, lai bīdītu kvarca stieni; (b) mikroskopā uzņemts attēls ar pieciem izveidotajiem mikrostriņiem uz viena stieņa ar 700 μm diametru un 520 μm atstarpi starp tiem; (c) atsevišķu mikrostriņu *Res1–Res5* uzņemtie attēli, kur baltais aplis norāda uz dažādiem izliekuma rādiusiem r .

Res2 mikrostriņa *WGM* rezonators (*Res2*, $d = 700 \mu\text{m}$ un $r = 250 \mu\text{m}$) ir izmantots 2.3. apakšnodaļā, lai iegūtu Kerra *OFC* ar nesējsignālu atstarpi aptuveni $\sim 90 \text{ GHz}$ (89 GHz). Šis mikrostriņa *WGM* rezonators ir izvēlēts, jo rezonatora diametra $d = 700 \mu\text{m}$ un izliekuma rādiusa $r = 250 \mu\text{m}$ kombinācija nodrošina augstāko izmērīto Q faktoru $2,6 \times 10^7$, salīdzinot piecus izveidotos mikrostriņa *WGM* rezonatorus. Izmērītais Q faktors ir zemāks, salīdzinot ar [27], salīdzināms ar mikrosfērām ($\sim 10^7–10^9$), bet augstāks nekā integrētajiem rezonatoriem ($\sim 10^5–10^6$) [28]. Otrais rezonators ir izvēlēts arī tāpēc, jo eksperimentālos novērojumos citos mikrostriņa rezonatoros iegūtās *OFC* ievērojami ietekmēja inducētās Briljuēna izkliedes (SBS) troksnis.

1.3. Optisko frekvenču ķemmu ģenerēšanas novērtējums

OFC tiek iegūta no nelineāra kaskādes četru viļņu mijiedarbes (*CFWM*) optiskā efekta, ko nodrošina Kerra nelinearitātes process optiskajos materiālos [12]. Tāpēc Kerra *OFC* var ražot jebkurā rezonatorā, kas izgatavots no optiska materiāla ar Kerra nelinearitāti. *OFC* iegūšana ir eksperimentāli demonstrēta kristāliskos [29], kā arī šķiedru gredzena rezonatoros [30]. Skaitliski optisko frekvenču ķemmes iegūšana mikrosfērās tiek simulēta, pamatojoties uz *Lugiato-Lefever* vienādojumu, izmantojot dalīta soļa Furjē metodi [31].

Ja pumpējošā starojuma jauda pārsniedz parametriskā pastiprinājuma sliekšņa jaudu augsta Q faktora *WGM* rezonatoros, pirmie *OFC* nesējsignāli parādās Stoksa un anti-Stoksa frekvencēs ar *FSR* daudzkārtņu atstatumu ap pumpējošo frekvenci. Turpmāka pumpējošās jaudas palielināšana ierosina *CFWM*, kas rada augstākas kārtas nesējsignālus, izveidojot primāro *OFC*. Sākotnēji nesējsignālu atstatums Δ tiek reproducēts starp jaunizveidotajiem nesējsignāliem, jo *CFWM* nodrošina enerģijas saglabāšanās likuma izpildi. Nākamajā solī sekundārie nesējsignāli veido apakšķemmes ar jaunu rezonanses atstarpi δ , kas atšķirīgs no primārajiem nesējsignāliem, kas kopumā atšķiras no Δ . Visbeidzot apakšķemmes pārklājas un izveido *OFC* spektru, kur atstatums starp diviem secīgiem *OFC* nesējsignāliem sakrīt ar *WGM* rezonatora *FSR* [19].

Atstatums starp *OFC* nesējsignāliem parasti ir vienāds ar *WGM* rezonatoru *FSR* [32]. *WGM* rezonatora *FSR* vai viļņa garuma diapazonu starp divām rezonansēm var novērtēt, izmantojot 1.1. vienādojumu, kur a ir rezonatora galvenais rādiuss, n_0 – laušanas koeficients pie pumpējošā starojuma frekvences [33].

$$FSR_{WGM} = \frac{c}{2\pi a n_0} \quad (1.1.)$$

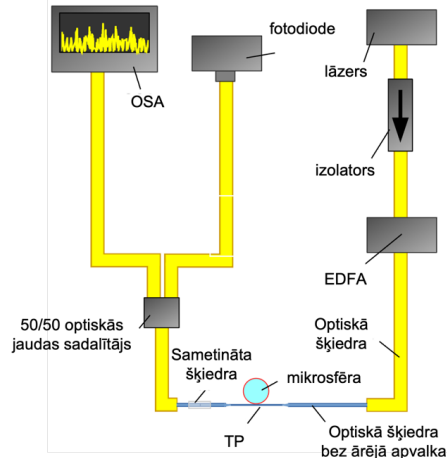
OFC nesējsignālu atstatumu nelielā diapazonā var regulēt divos veidos – mainot pumpēšanas starojuma ievades nosacījums vai mainot starojuma frekvenci [34], citiem vārdiem sakot, nobīdot pumpēšanas frekvenci attiecībā pret rezonatora rezonanses modas frekvenci. Mainot pumpēšanas starojuma ievades nosacījumus, tiek mainīta atstarpe starp rezonatoru un *TP*, kas līdz ar to maina atstatumu starp *OFC* nesējsignāliem un Q faktoru (palielinot atstarpi, Q faktors palielinās). Q faktors ir rezonanses asuma (nesējsignāla līnijas platuma) mērs attiecībā pret tās centrālo frekvenci, kur λ_{res} ir rezonanses viļņa garums un pilns platums līmenī viena puse (*FWHM*) raksturo rezonanses līnijas platumu [35].

$$Q_{factor} = \frac{\lambda_{res}}{FWHM} \quad (1.2.)$$

Turpmāk šajā apakšnodaļā apskatītie eksperimenti, iegūtie rezultāti un aprakstītās metodes ir perspektīvas telekomunikāciju lietojumiem, piemēram, daudzviļņu gaismas avotu optiskajām pārraides sistēmām. *OFC* gaismas avotu uzbūves pamatā ir augstas kvalitātes *WGM* rezonators. Tā augstais Q faktors ir vismaz 2×10^7 , ko nosaka gluda virsma, zemi iekšējie zudumi un starojuma ievade/izvade no rezonatora [35]. *OFC* gaismas avotā (1.3. att.) starojums tiek ievadīts *WGM* rezonatorā caur *TP*.

Lai realizētu *OFC* gaismas avotu (1.3. att.), tika izgatavota SiO_2 mikrosfēra, kā arī *TP*. Jāmin fakts, ka starojuma ievade rezonatorā ar *TP* ir populārs paņēmieni, jo nodrošina augstu

starojuma ievades efektivitāti un *TP* ir samērā viegli izveidot, salīdzinot ar leņķī nopulētām šķiedrām vai plakaniem viļņvadiem. Turklāt *TP* var vienkārši integrēt, salīdzinot, piemēram, ar prizmu, ko arī bieži izmanto starojuma ievadei *WGM* rezonatoros.

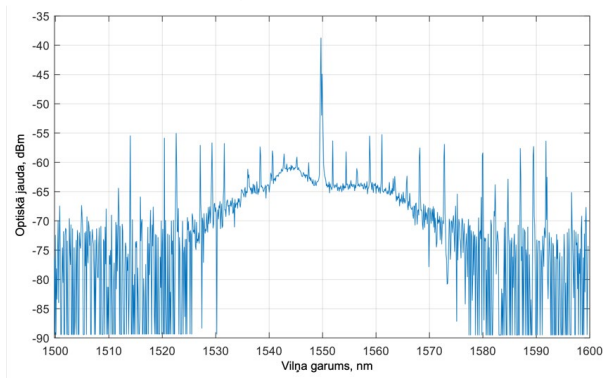


1.3. att. *OFC* gaismas avots, kura pamatā ir SiO_2 mikrosfēra un patievinātu galu šķiedra.

OFC gaismas avotā, kas redzams 1.3. attēlā, pārraides daļā optiskā signāla ģenerēšanai tiek izmantots 40 mW vienmodas optiskais lāzers ar centrālo viļņa garumu 1550 nm (*Thorlabs SFL1550S*) skenēšanas režīmā. Lai ģenerētu *OFC*, lāzera frekvenci ir jāpieskaņo pie *WGM* ātrāk par rezonatora uzsilšanas laiku [36]. Kerra efekts faktiski momentāni izveido *OFC*. Šeit lāzera strāva tiek virzīta pa trīsstūrveida formu ar atkārtotās ātrumu aptuveni 1 kHz ar lāzera frekvences novirzi 2 GHz.

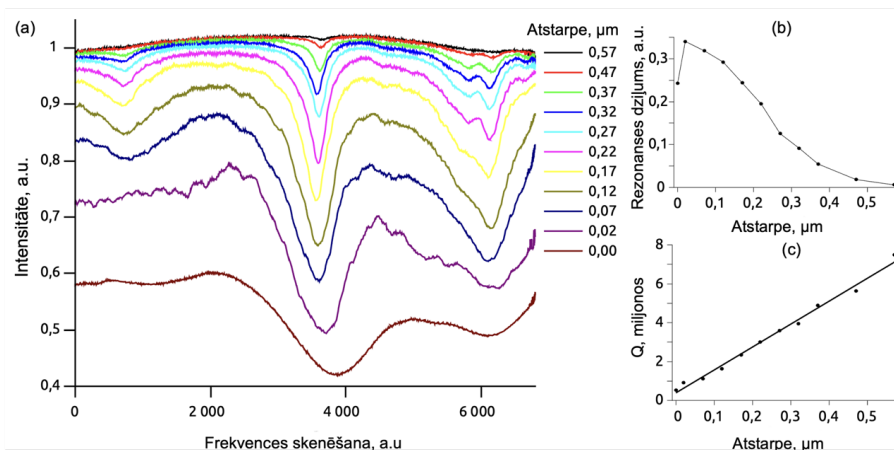
Lāzera izeja ir savienota ar optisko izolatoru lāzera aizsardzībai pret atstarotiem signāliem. Optiskā izolatora izeja ir savienota ar *EDFA*, lai pastiprinātu optiskā signāla jaudu. *EDFA* izejas jauda ir fiksēta 20 dBm līmenī. Tad pastiprinātais starojums tiek ievadīts *SMF28* vienmodas optiskajā šķiedrā (900 μm aizsargapvalks), kas tika izmantota *TP* izgatavošanai, un ievada optisko starojumu mikrosfēras rezonatorā. Tā pati *TP* izvada *OFC* no mikrorezonatora. Pēc tam *Y* tipa optiskais jaudas sadalītājs (*PS*) ar attiecību 50/50 tiek izmantots uztvērējā daļā, lai nodrošinātu paralēlu *OFC* mērīšanu. Viens no *PS* portiem ir savienots ar augstas izšķirtspējas *OSA* (0,01 nm), otrais ports – ar *InGaAs* fotodetektoru ar viļņa garuma joslu 800–1800 nm. Fotodetektors uztver *OFC* signālu un nosūta to signāla osciloskopam, lai uzraudzītu mikrosfēras rezonanses modu. Lai iegūtu *OFC*, svarīgi ir kontrolēt atstarpi starp *TP* un mikrosfēru (skaidrots, izmantojot eksperimentālos rezultātus, kas redzami 1.5. attēlā). Gaisa plūsmas, kas parādās ap plānu *TP* un mikrosfēru, izkustina šos divus elementus. Atstarpe starp tiem mainās, kas savukārt maina mikrosfērā ievadītā starojuma jaudu, izraisot *OFC* spektra svārstības. Tādējādi rodas nepieciešamība izveidot izolācijas kasti, kurā ievietot *TP* kopā ar rezonatoru, lai ierobežotu gaisa plūsmas un kontrolētu mitruma līmeni. Tāda veida kaste palīdz arī aizsargāt elementus no putekļiem, kas maina rezonatora *Q* faktoru, jo, nosēžoties uz rezonatora virsmas, putekļu daļiņas rada starojuma zudumus.

OFC gaismas avots, kura pamatā ir *TP* un SiO_2 mikrosfēra, ļauj eksperimentāli iegūt *OFC*, kas redzama 1.4. attēlā. Kā redzams no optiskā spektra, *OFC* nesējsignālu atstatums ir 2 nm vai 257 GHz, kas ir salīdzināms ar tiem pētījumiem, kas parādīti [21, 31, 34]. Šajā eksperimentā rezultāts ir iegūts, skenējot pumpējošā lāzera frekvenci, un nomērīts ar *OSA*. *OFC* spektrā var redzēt dažu nesējsignālu neesamību, ko var izskaidrot ne tikai ar lāzera skenēšanu, bet arī ar modu sajaukšanās efektu, jo mikrosfēras rezonatoram ir plašs modu spektrs. Kad divas telpiskās rezonanses modas sakrīt pie viena viļņa garuma, *OFC* nesējsignālu intensitāte samazinās, jo jauda tiek pārnesta uz citu modu saimi [37]. Tātad pēc rezultātiem ir iespējams iegūt optisko frekvenču ķemmi optisko sakaru lietojumiem, tomēr nepieciešama konkrētā *OFC* gaismas avota parametru un uzbūves optimizācija, lai panāktu laikā stabilu *OFC* spektru [36], kas ir parādīts nākamajās promocijas darba nodaļās.



1.4. att. Optiskā frekvenču ķemme, kas iegūta *OFC* gaismas avotā (1.3. att.).

Kā minēts iepriekš, mainot gaismas ievades nosacījumus, t. i., atstarpi starp *TP* un rezonatoru, mainās rezonatora Q faktors. Q faktors nosaka, cik ilgi pumpējošais starojums cirkulē rezonatorā, un, samazinot savienojuma zudumus (palielinot atstarpi), ir iespējams palielināt Q faktoru [14]. Lielāks Q faktors savukārt nodrošina šaurāku nesējsignālu *FWHM* iegūšanu. Tātad var teikt, ka, palielinot atstarpi starp *TP* un rezonatoru, nesējsignālu *FWHM* kļūst šaurāks, kā redzams 1.5. (a) attēlā. Q faktora pieaugums parādīts 1.5. (c) attēlā. Starojuma ievades nosacījumus rezonatorā var iedalīt trīs atšķirīgos režīmos [38]. Pirmajā režīmā šķiedra atrodas tālu ($0,57 \mu\text{m}$) no mikrosfēras. Rezonatorā ievadītā jauda ir pārāk maza (neskatoties uz zemajiem savienojuma zudumiem), lai pārvarētu absorbcijas radītos iekšējos zudumus, kas redzami pēc rezonanses intensitātes, piemēram (1.8. (a) att.), ja atstarpe ir $0,47 \mu\text{m}$, rezonanses dziļums ir $\sim 0,025$ a. u. (1.8. (b) att.), Q faktors ir $\sim 6 \times 10^6$ (1.8. (c) att.). Otrajā režīmā starojuma jauda rezonatorā ir liela, taču ir ievērojami savienojuma zudumi, tāpēc Q faktors ir mazs. Piemēram, ja atstarpe ir $0,00 \mu\text{m}$, tad Q faktors ir $\sim 5 \times 10^5$, rezonanses dziļums ir $\sim 0,25$ a. u. Optimālajā režīmā ir līdzsvars starp rezonatorā ievadīto jaudu un savienojuma zudumiem. Ņemot vērā minētos faktus, var secināt, ka optimālā atstarpe starp *TP* un mikrosfēru ir $0,12 \mu\text{m}$ vai $0,17 \mu\text{m}$.



1.5. att. Starojuma ievades nosacījumi ir atkarīgi no atstarpes starp patievinātu galu šķiedru un rezonatoru: (a) *WGM* rezonanses pārraides spektri, ja atstarpe tiek lēnām samazināta; (b) rezonanses krituma izmaiņas; (c) Q faktora izmaiņas.

Kopsavilkums

Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka silīcija mikrosfēras rezonatoros kā mikrosfērās un mikrostiņos var ģenerēt *OFC* optiskajā *C* joslā (1530–1565 nm), ja uz to bāzes ir izveidots *OFC* gaismas avots. Lai panāktu vēlamas *OFC* ģenerēšanu, nepieciešams pielāgot tādus parametrus kā pumpēšanas jauda un viļņa garums, kas sakrīt ar rezonatora modu vienā no rezonatoru modu saimēm. Lai iegūtu *OFC* optiskajā *C* joslā (1530–1565 nm), nepieciešams pumpēt rezonatoru ap 1550 nm viļņa garumu. Lai pielāgotu *OFC* nesējsignālu līnijas platumu konkrētam lietojumam, piemēram, *WDM-PON* sistēmām, nepieciešams pielāgot atstarpi starp *TP* un rezonatoru. Proti, palielinot atstarpi starp *TP* un rezonatoru, nesējsignālu līnijas platumš kļūst šaurāks (pieaug Q faktors, bet samazinās nesējsignāla jauda). Optimālā atstarpe starp *TP* un rezonatoru ir 0,12 μm vai 0,17 μm, ņemot vērā kombināciju no Q faktora un nesējsignālu jaudu. Visbeidzot, atstarpi jeb *FSR* starp *OFC* nesējsignāliem var pielāgot, izvēloties atbilstošu rezonatora diametru – 175 μm, 350 μm un 660 μm diametri attiecīgi atbilst 400 GHz, 200 GHz un 100 GHz *FSR*.

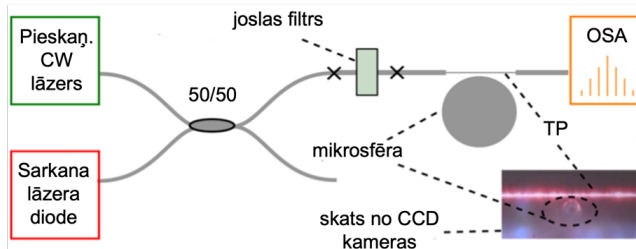
Mikrosfēras izstrādātas ar *Fujikura ARCMaster FSM-100P+* šķiedras metināšanas aparātu. Eksperimentāli ir noteikts, ka ir nepieciešamas 42 sekundes, lai iegūtu 175 μm mikrosfēras, un 114 sekundes, lai iegūtu 350 μm diametra mikrosfēras no standarta *SMF* ar 125 μm diametru. Pieci mikrostiņa rezonatori ir izveidoti samērā īsā laika periodā (ap 5 min) ar CO_2 lāzera palīdzību uz viena silīcija stieņa ar 700 μm diametru, ar dažādiem aplicējas rādiusiem 250 μm, 250 μm, 200 μm, 175 μm, un 150 μm un 520 μm atstarpi starp rezonatoriem. Visaugstākais Q faktors $2,6 \times 10^7$ iegūts otrajā mikrostiņa rezonatorā, kas ir salīdzināms ar mikrosfērām ($\sim 10^7$ – 10^9), bet augstāks nekā integrētajiem rezonatoriem ($\sim 10^5$ – 10^6).

Originālpublicācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – **promocijas darba 1., 4. un 5. pielikumā.**

2. OPTISKO SAKARU SISTĒMU PRASĪBĀM ATBILSTOŠAS OPTISKĀS FREKVENČU ĶEMMES IEGŪŠANAS ANALĪZE SILĪCIJA MIKROSFĒRAS UN MIKROSTIEŅU REZONATOROS

2.1. Optiskās frekvenču ķemmes iegūšana silīcija mikrosfēras rezonatorā ar 400 GHz FSR

Eksperimentāla OFC gaismas avota, kura pamatā ir silīcija mikrosfēras rezonators, vienkāršotā shēma redzama 2.1. attēlā. Eksperimenta vajadzībām ir izstrādāta mikrosfēra ar $FSR = 400$ GHz ($D = 168$ μm), izmantojot metināmo aparātu, kā redzams 1.1. attēlā, kā arī no SMF-28e šķiedras ir izveidota 5 cm gara TP šķiedra.

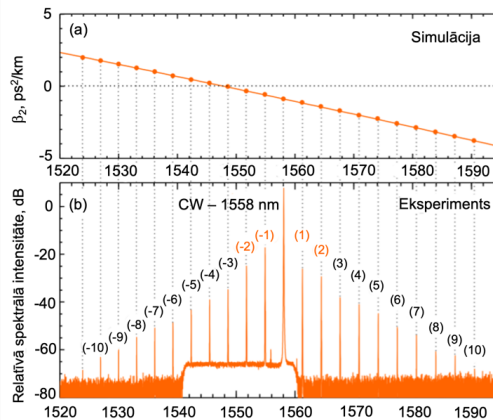


2.1. att. Vienkāršota eksperimentālā OFC gaismas avota shēma.

WGM rezonators ir pievienots precīzai trīs asu pozicionēšanas pakāpei (Thorlabs MAX312D), kas nodrošina rupju manuālu pozicionēšanu, kā arī precīzu WGM rezonatora un TP relatīvās pozīcijas regulēšanu, izmantojot iebūvētos pjezomotorus. Rupja rezonatora pozicionēšana tiek veikta manuāli, izmantojot divas CCD kameras, savukārt precīza pozīcijas regulēšana tiek veikta, kontrolējot pjezomotorus ar pielikto spriegumu. Skats no vienas CCD kameras redzams 2.1. attēlā. Kā pumpēšanas avots ir izmantots pieskaņojams CW starojuma lāzers (Pure Photonics, PPCL550-180-60, izejas jauda 18 dBm, darbība optiskajā C joslā, pieskaņošanas diapazons 60 nm) ar līnijas platumu 10 kHz. CW starojums tiek izfiltrēts ar 1550 ± 10 nm OBPF, lai noņemtu CW pumpējošā lāzera fona troksni pirms starojuma ievades rezonatorā, izmantojot TP. No mikrosfēras izvadītie izejas signāli tiek uzņemti ar OSA (Yokogawa AQ6370D, 0,6–1,7 μm). Mikrosfēras rezonanses modas nomērītais spektrālais platumu $\delta f = 6,5$ MHz. Lāzera centrālā frekvence ir $f_0 \sim 192,6$ THz, līdz ar to aprēķinātais $Q = f_0/\delta f = 3 \times 10^7$.

Skenējot pumpējošā lāzera frekvenci (lineāra modulāciju) ap 1558 nm, eksperimentāli tiek iegūta OFC. Iestatītā lāzera jauda – 16 dBm (pirms 50/50 sadalītāja; 2.1. att.). Rezultātā pie mazas absolūtās dispersijas vērtības ir iegūta OFC ar nesējsignālu intervālu 393 GHz, pumpējot WGM rezonatoru ar tādu frekvenci, kur ir neliela anomālā dispersija (2.2 att). FSR 393 GHz aptuveni atbilst $n \times 100$ GHz, kur $n = 4$, kas atbilst ITU-T G.694.1 rekomendācijā noteiktajām WDM sistēmu starpkanālu intervāla vērtībām.

Izstrādātā silīcija *WGM* rezonatora aprēķināta, izmantojot metodi, kas detalizēti aprakstīta iepriekšējos darbos [39]. Dispersiju nosaka diskretā punktu kopā (2.2. (a) attēlā atzīmēts ar punktiem un atbilst rezonatora raksturīgo modu frekvencēm). Lai nodrošinātu vieglāku uztveri, šie punkti ir savienoti ar līniju. Salīdzinot eksperimentāli iegūtās *OFC* nesējsignālu frekvences ar aprēķinātajām raksturīgām frekvencēm, var redzēt, ka visus iegūtus nesējsignālus var interpretēt kā fundamentālās šķērsvirzienā elektriskas modas (2.2. (a, b) att.; vertikālās punktētās līnijas norāda aprēķināto modu frekvences un atbilstošos *OFC* nesējsignālus).



2.2. att. (a) Silīcija *WGM* rezonatora aprēķinātā fundamentālo šķērsvirzienā elektriskas modas saimes dispersija (punkti norāda rezonatoram raksturīgo modu frekvences); (b) eksperimentāli iegūtās *OFC* spektrs. Vertikālās punktētās līnijas norāda sakarību starp rezonatoram raksturīgām modu frekvencēm un *OFC* nesējsignāliem. Jaudas pjeledestāls 1540–1560 nm ir radies joslas filtra (pirms *TP*) dēļ.

Tādējādi eksperimentāli ir iegūta stabila *OFC*, nodrošinot *OFC* gaismas avotu, kas optiskajā *C* joslā un ārpus tās sastāv no vairāk nekā 20 nesējsignāliem vienas fundamentālo modu saimes ietvaros. Turpmākajai datu pārraides analīzei ir izvēlēti tikai četri *OFC* nesējsignāli ar visaugstāko jaudu, proti, (-2), (-1), (1) un (2). Šo nesējsignālu toņa-trokšņa attiecība (*TNR*) vērtības ir attiecīgi aptuveni 41 dB, 49 dB, 46 dB un 43 dB, pumpējošā starojuma nesējsignāla *TNR* – aptuveni 73 dB.

2.2. Izklidējošā Kerra solitona optiskās frekvenču ķemmes iegūšana silīcija rezonatorā ar 100 GHz *FSR*

Šeit *OFC* ir skaitliski simulētas, lietojot izklidējošā Kerra solitona (*DKS*) ķemmes veidošanās režīmu silīcija rezonatorā. Lai iegūtu vēlamu *FSR* (šajā gadījumā 100 GHz) un vienlaikus kontrolētu parametrus tā, lai dispersija būtu anomāla optisko datu pārraides viļņa garuma diapazonā, ir iespējams izmantot dažādu ģeometriju rezonatorus, piemēram, toroīdus, diskus un sferoīdus [37]. 2.3. (a) attēlā redzama vienkāršota *OFC* gaismas avota shēma, kurā tiek izmantots aksiāli simetrisks silīcija *WGM* rezonators, kurā starojums tiek ievadīts ar *TP*.

Starojuma lauka dinamiku, kas cirkulē rezonatora iekšpusē, var aprakstīt ar vispārināto *Lugiato-Lefever* vienādojumu, kas nav atkarīgs no rezonatora ģeometrijas. Šeit ir lietota bezdimensiju forma, kas ņem vērā Ramana reakciju, anomālo dispersiju un kubisko dispersiju (standarta normalizācija, [37]).

$$\frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = \left(-1 - i\Delta + \frac{i}{2} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} + \frac{b_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} \right) \cdot E(t, \tau) + i \left(\int R(s) |E(t, \tau - s)|^2 \right) E(t, \tau) + S, \quad (2.1.)$$

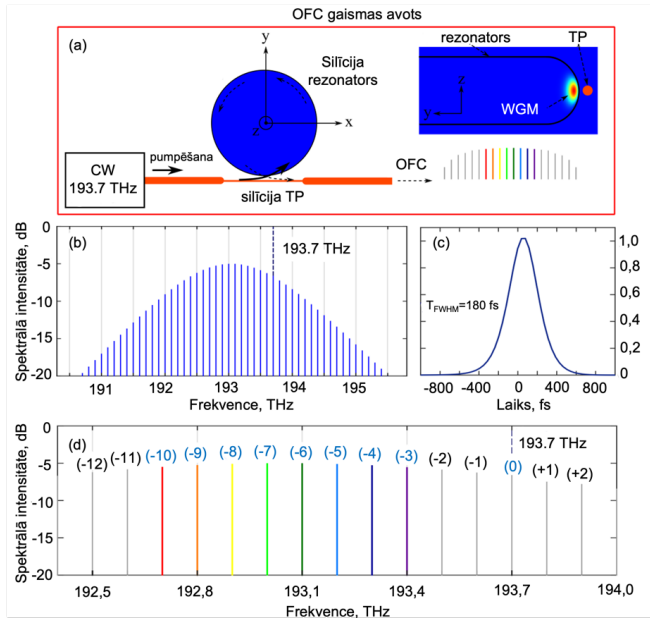
kur $E(t, \tau)$ – bezdimensijas lauks rezonatorā; τ un t – attiecīgi normalizētais ātrais un lēnais laiks; b_3 – bezdimensiju koeficients, kas raksturo kubisko dispersiju (šeit $b_3 = 0,01$); Δ – bezdimensiju nobīde no rezonanses modas, kas ir vistuvāk pumpēšanas frekvencei (šeit $\Delta = 60$); S – *CW* pumpēšanas starojuma lauks, kas tiek ievadīts *WGM* rezonatorā (šeit $|S|^2 = 65$); $R(t)$ – silīcija stiklam raksturīgā Ramana reakcijas funkcijas forma [40].

$$R(t) = (1 - f_R)\delta(t) + f_R(\tau_1^{-2} + \tau_2^{-2})\tau_1 \exp(-t/\tau_2) \sin(t/\tau_1), \quad (2.2.)$$

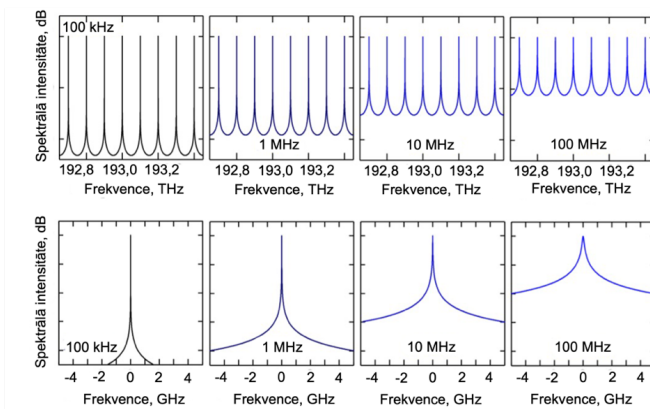
kur $\delta(t)$ – Diraka delta funkcija; $f_R = 0,18$ – Ramana daļa pret nelineāro reakciju; $\tau_1 = 12,2$ fs un $\tau_2 = 32$ fs.

OFC skaitliskās simulācijas rezultāti *DKS* režīmā pie rezonatora pumpēšanas frekvences 193,7 THz (1547,71 nm) redzami 2.3. attēlā. Lai modulētu *DKS* optisko frekvenču ķemmi 2.1. vienādojuma ietvaros, ņemot vērā 2.2. vienādojumu, tiek izmantots *Matlab* kods, kura darbība balstās dalīta soļa Furjē metodē. Autori pētījumā [41] ir analizējuši Ramana reakcijas ietekmi uz *DKS* (ja nav kubiskās dispersijas). Pētījumā ir atrasti tādi nobīdes parametri, pie kuriem pastāvošs fundamentālais solitons ir stabils. Parādīts, ka Ramana nelinearitātes ietekme izraisa *DKS* spektra asimetriju attiecībā pret pumpējošā starojuma frekvenci un spektra nobīdi tuvāk garākiem viļņu garumiem, kas arī saskan ar rezultātiem, kas parādīti [42]. Šajā gadījumā nobīdītā solitona augšdaļa ir salīdzināmi plakana pie lielām nobīdes vērtībām Δ . Tāpēc Δ un S parametru izvēli diktē rezultāti, kas parādīti [41] avotā. Kodā iestatītais rezonatora modu *FSR* ir 100 GHz (sakrīt ar mikrosfēras diametru ap 660 μm) atbilstoši *ITU-T* starpkanālu intervālam.

Pumpējošā starojuma frekvence ir izvēlēta tā, lai *WDM* sistēmām vispiemērotākajiem nesējsignāliem (ap 193,1 THz) būtu maksimālā jauda. *OFC* nesējsignālu relatīvā spektrālā intensitāte redzama 2.3. (b) attēlā, savukārt 2.3. (c) attēlā redzams iegūtā *DKS* impulsa intensitātes sadalījums laika apgabalā ar *FWHM* ilgumu $T_{FWHM} = 180$ fs. Pietuvinātais spektrs netālu no solitona pīka daļas redzams 2.3. (d) attēlā. Nesējsignāls, kas atrodas pie pumpēšanas frekvences, ir apzīmēts ar (0). Var redzēt, ka (−6) un (−7) nesējsignāliem, kas atrodas pie frekvencēm attiecīgi atbilstoši 193,1 THz un 193 THz, ir maksimālā relatīvā intensitāte. Astoņi nesējsignāli (−3), (−4) līdz (−9), (−10), kuru jaudas starpība nepārsniedz 0,5 dB, var izmantot astoņu kanālu *WDM-PON* sistēmai turpmākai datu pārraidei. Pētījumam ir skaitliski simulētas *OFC* ar tādām nesējsignālu *FWHM* vērtībām kā 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz, kur optiskie nesējsignāli katrā gadījumā ir izvietoti ar 100 GHz intervālu jeb *FSR*, kas atbilst *ITU-T G.694.1* rekomendācijai. *OFC* ar dažādām nesējsignālu līnijas platuma vērtībām, kas vēlāk ir integrētas simulācijas modelī, redzami 2.4. attēlā.



2.3. att. (a) Vienkāršota *OFC* gaismas avota shēma. Attēlā pa labi parādīta noteiktas rezonatora malas realizācija. Simulētā *OFC* *DKS* režīmā: (b) optiskais spektrs; (c) atbilstošais jaudas sadalījums laika apgabalā; (d) pietuvinātais *OFC* spektrs tā augšdaļā.



2.4. att. *OFC* nesējsignālu spektri, ko izmanto astoņu kanālu 100 GHz starpkanālu intervāla *WDM-PON* sistēmas simulācijās ar dažādām nesējsignālu līnijas platuma vērtībām (augšējā rinda), kā arī pietuvināti centrālie nesējsignāli (apakšējā rinda).

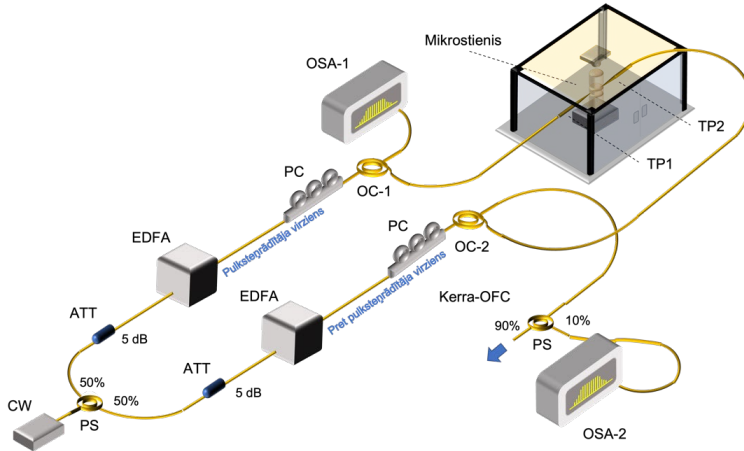
2.3. Optiskās frekvenču ķemmes iegūšana eksperimentāli izveidotajā silīcija mikrostriņa rezonatora ar FSR 90 GHz OFC gaismas avotā

Eksperimentālā shēma, kas redzama 2.5. attēlā, ir izmantota OFC iegūšanai mikrostriņa gaismas avotā. TP, kas izveidota no ne-nulles dispersijas nobīdītas šķiedras (NZ-DSF), līdzīgi iepriekš veiktajiem pētījumiem [43], un silīcija mikrostrienis ir ieslēgti kastē, lai pasargātu tos no putekļiem. Kastes iekšpusē mitrums tiek turēts zem 20 % līmeņa ar silīcija gēla desikanta palīdzību. Papildus tam gan pumpēšanas avots, gan kaste ir novietoti uz vibrāciju izolējoša galda, lai minimizētu ārējo zemfrekvenču vibrāciju ietekmi.

Mikrostriņa OFC gaismas avots sastāv no CW lāzera (*Agilent 81989A*) ar centrālo frekvenci $\lambda = 1555,46$ nm, līnijas platumu 100 kHz, optisko izejas jaudu +6 dBm un relatīvo intensitātes troksni -145 dB/Hz. PS ar attiecību 50/50 sadala pumpējošā lāzera starojumu divās vienādās daļās – pulksteņrādītāja virzienā un pret pulksteņrādītāja virzienu. Šīs divas starojuma daļas pumpē mikrostriņi pie viļņa garuma $\lambda = 1555,46$ nm no abām pusēm. Pirmkārt, gaisma katrā pumpēšanas daļā tiek nosūtīta, izmantojot 5 dB fiksētu optisko vājinātāju (lai nodrošinātu atbilstošu pastiprinātāja optisko ieejas jaudu), un pēc tam nosūtīta uz EDFA (pretēji pulksteņrādītāja virzienam – *Keopsys PS-CUS -BT-C*, pulksteņrādītāja virzienā – *Spectra RED5018*) ar fiksētu izejas jaudu (līdz +23 dBm). Pēc tam pastiprinātie optiskie signāli iziet cauri PC, kas novietoti pirms optiskajiem cirkulatoriem (OC), lai optimizētu starojuma ievades efektivitāti. OC tiek izmantots, lai novērstu atpakaļejošu gaismas izkliedes ietekmi, kas var izraisīt CW lāzera nestabilitāti un pazeminātu EDFA pastiprināšanas efektivitāti. Gaisma pulksteņrādītāja virzienā un pretēji pulksteņrādītāja virzienam tiek ievadīta TP šķiedrā, izmantojot 1. optisko cirkulatoru (OC1) un 2. optisko cirkulatoru (OC2). Optiskās frekvenču ķemmes gaismas signāls caur OC1 atgriešanās portu tiek nosūtīta uz OSA (*Anritsu MS9740A*, izšķirtspēja – 0,03 nm), lai uzraudzītu un mērītu ģenerēto OFC nesējsignālu jaudu. Pulksteņrādītāja virzienā un pretēji pulksteņrādītāja virzienam ievadītais starojums, kas tiek ievadīts mikrostriņī no abām pusēm, nodrošina nepieciešamo cirkulācijas intensitātes sasniegšanu, lai panāktu OFC ģenerēšanu. Kad starojums tiek ievadīts tikai vienā virzienā, daļa no optiskās jaudas tiek pārvērsta siltumā, līdz ar to ir nepieciešama starojuma ievade otrā virzienā, lai kompensētu optiskās jaudas zudumus. Paaugstināta OFC iegūšanas stabilitāte iegūta, pumpējot mikrostrieni no divām pusēm, sadalot viena lāzera starojumu divos virzienos. Katrā virzienā EDFA pastiprina optisko jaudu līdz fiksētam līmenim +23 dBm. Viens pumpējošā lāzera starojums divos virzienos iepriekš ir izmantots [44]. Visbeidzot, optiskais cirkulators OC2 atdala ģenerēto OFC. Optiskais sadalītājs ar attiecību 10/90 uztver izejas OFC spektru, izmantojot OSA-2 (*Advantest Q8384*, izšķirtspēja – 0,01 nm).

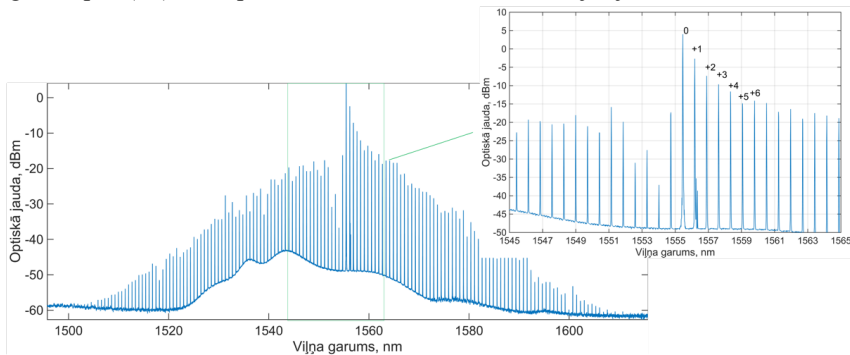
Ģenerētā OFC redzama 2.6. attēlā kopā ar pietuvinātu centrālo frekvenču ķemmes daļu ap pumpējošo viļņa garuma, kas atbilst (0) nesējsignālam. OFC gaismas avota ģenerētie optiskie nesējsignāli ir attēloti kā (0): $\lambda = 1555,46$ nm, (+1): $\lambda = 1556,18$ nm, (+2): $\lambda = 1556$, nm, (+3): $\lambda = 1557,62$ nm, (+4): $\lambda = 1558,34$ nm, (+5): $\lambda = 1559,06$ nm un (+6): $\lambda = 1559,78$ nm (2.6. att.), un tie ir turpmāk izvēlēti, lai demonstrētu 50 Gbaud un 60 Gbaud bez atgriešanās pie nulles “ieslēgt-izslēgt” modulācijas (NRZ-OOK) un 50 Gbaud impulsa intensitātes modulācijas (PAM-4) signālu pārraidi, izmantojot 2 km SMF līniju (3.4. apakšnodaļa). Šie nesējsignāli ir izvēlēti

datu pārraides eksperimentiem, jo tie nodrošina maksimālās jaudas līmeņus virs -15 dBm (attiecīgi 4 dBm, $-2,7$ dBm, $-7,3$ dBm, $-9,6$ dBm, $-11,6$ dBm, $-14,8$ dBm un $-14,1$ dBm), salīdzinot ar citiem. Attālums starp nesējsignāliem ir 89 GHz ($\sim 0,72$ nm). Šo nesējsignālu *TNR* ir attiecīgi 52,9 dB, 46,5 dB, 41,8 dB, 39,4 dB, 36,8 dB, 34,2 dB un 35,1 dB.



2.5. att. Eksperimentālā shēma, kas ilustrē uz silīcija mikrostriņa bāzes izveidoto OFC gaismas avotu šķiedru optiskajām pārraides sistēmām.

Kā redzams 2.6. attēla, optiskajiem nesējsignāliem pēc (+6) ir līdzīga veiktspēja, tomēr eksperimenta laikā varēja novērot, ka šie nesējsignāli nav pietiekami stabili, lai uz tiem varētu modulēt datus. Papildus tam EDFA, kas redzams 3.15. attēlā, nav spējīgs pastiprināt nesējsignālus pēc (+6), jo tie nenodrošina pietiekamu ieejas jaudu, pat (+5) nesējsignāls ir tuvu pastiprinātas spontānas emisijas (ASE) trokšņa līmenim. Risinājums, kas ļautu izmantot nesējsignālus pēc (+6), ir kā pirmo lietot EDFA ar zemāku ieejas jaudas līmeni.



2.6. att. Silīcija mikrostriņa OFC gaismas avota izejas spektrs ar 89 GHz ($\sim 0,72$ nm) atstarpi starp ķemmes nesējsignāliem, kas ģenerēts Res2 mikrostriņa rezonatorā ar $d = 700$ μm , $r = 250$ μm un Q faktoru $2,6 \times 10^7$.

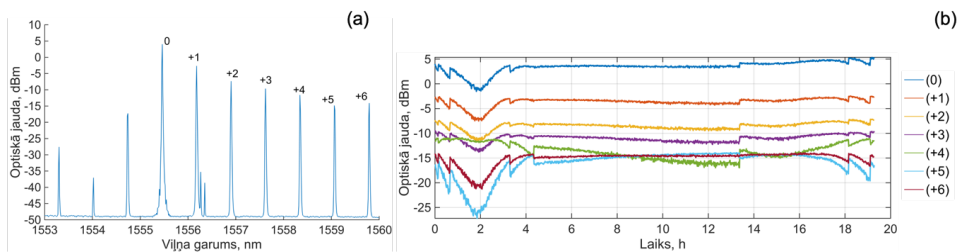
Salīdzinot ar [45], iegūtā OFC ir asimetriska – redzams iekritums spektrā pie īsākiem viļņa garumiem attiecībā pret pumpēto modu. Tas ir izskaidrojams ar modu šķērsošanos, proti, pie

viena viļņa garuma eksistē divas modas ar pretēju polarizāciju, jauda tiek sadalīta starp šīm divām modām, un lielākā jaudas daļa aiziet uz pretējas polarizācijas modu. Demonstrētā *OFC* ir iegūta Tūringa stāvoklī, ievadot mikrostenī pumpējošo starojumu ar 250 mW optisko jaudu caur patievinātu galu šķiedru, kas pieskaras mikrostenim. Lielāko eksperimenta daļu trokšņa veiktspēja ir tuva *EDFA ASE* troksnim, izņemot optisko nesējsignālu (+1), kur troksnis nāk no *SBS*. *OFC* ir iegūta otrajā mikrostenī (1.2. att.) ar pumpējošās jaudas konversijas efektivitāti ap 20 % (250 mW rezonatora ieejā, *OFC* ir ap 50 mW optiskās jaudas visā joslas platumā). Šis rezultāts ir tuvs [12], kur autori ir sasnieguši līdzīgu konversijas efektivitāti, bet ar mazāku ieejas jaudu 75 μm toroīda rezonatorā. Salīdzinājumam – lielākā daļa solitona *OFC* ir iegūtas integrētajos rezonatoros ar konversijas efektivitāti ap dažiem procentiem [46].

Kā redzams 2.6. attēlā, *OFC* ir vismaz 20 dB atšķirība starp atsevišķu nesējsignālu optisko jaudu. Iemesls lielām jaudas svārstībām ir Tūringa stāvoklis, kam raksturīga nesējsignālu jaudas samazināšanās līdz ar lielāku spektrālo attālumu no pumpētās modas viļņa garuma. Lai nodrošinātu līdzīgu bitu kļūdu varbūtības (*BER*) veiktspēju pie visiem nesējsignāliem *WDM* lietojumos, ir svarīgi iegūt *OFC* ar līdzenu apliecību, jo jaudas atšķirības prasa papildu risinājumus. Viens no iespējamiem risinājumiem ir *OFC* iegūšana solitona formā, kas nodrošina līdzenu spektru. Neskatoties uz uzlaboto *TNR* un solitonu nesējsignālu stabilitāti, solitona ķemmes iegūšanai ir nepieciešams stabilizēt rezonatora cirkulējošo optisko jaudu, ko parasti paveic ar papildu lāzeru. Tomēr papildu lāzers komplicē *OFC* gaismas avota shēmu. Cits risinājums jaudas svārstībām ir katra nesējsignāla pastiprināšana līdz fiksētam jaudas līmenim, kā arī pārraides līnijā var izmantot viļņa garuma selektīvu slēdzi, lai izlīdzinātu *OFC* pirms datu modulācijas.

Optiskā signāla trokšņu attiecība (*OSNR*) ir būtisks aspekts augstas kvalitātes *WDM* datu pārraides nodrošināšanai. Minimālajai attiecībai jābūt vismaz 20 dB [47]. *OFC* piemīt ilgtermiņa stabilitātes problēma – *OFC* nesējsignālu jaudas līmenis svārstās, kas izraisa *OSNR* un pārraidītā signāla kvalitātes svārstības. *OFC* nesējsignālu ilgtermiņa stabilitāte (2.7. att.), kas iegūta no otrā ~90 GHz (89 GHz) mikrosteņa (*Res-2*) ir izmērīta, *TP* pieskaroties mikrostenim, kas tā ir visa eksperimenta laikā.

Eksperimentāli novērots, ka otrajā mikrostenī iegūtie optiskie nesējsignāli no (0) līdz (+6) ir salīdzinoši stabili 20 stundas un tiem ir atšķirīga veiktspēja, jo rezonatorā vienlaikus izplatās vairākas telpiskās modas. Stabilitātes līknēs 0–4 stundai 14. stundā un 18. stundā ir novērojamas svārstības, ko nepieciešams izskaidrot. Pirmais notikums saistās ar temperatūras izmaiņām, kas ietekmē *OFC* jaudu. Temperatūra aizsargkastē netiek aktīvi stabilizēta, tāpēc aizsargkastes iekšpusē tā ir mainīga attiecībā pret apkārtējās laboratorijas vides temperatūru – dienas laikā ap $23,0 \pm 1^\circ\text{C}$. Nakts laikā istabas temperatūra tiek samazināta par 6 grādiem, kas arī izskaidro pirmās svārstības 0–4 stundai. Pēkšņie lēcieni 14. stundā un 18. stundā saistās ar mehāniskām nobīdēm starp mikrosteni un patievināta gala šķiedru. Mehāniskā nobīde liek modai cirkulēt mikrosteņa iekšpusē citā ģeometriskā pozīcijā, kas rezultējas jaudas lēcienos.



2.7. att. Izmērītā mikrostiņa OFC gaismas avota nesējsignālu no (0) līdz (+6) veiktspēja: (a) iegūtā OFC otrajā mikrostiņa rezonatorā ($D = 700 \mu\text{m}$, $r = 250 \mu\text{m}$, $FSR \sim 90 \text{ GHz}$), kur sānu pīķi pie (+1) nesējsignāla rodas no SBS; augstākā sānu pīķa amplitūda ir par 32,3 dB zemāka nekā pats nesējsignāls; (b) uztvertā nesējsignāla jaudas stabilitāte 20 stundu periodā.

Neskatoties uz šīm jaudas svārstībām, ja ārējā vide ir stabila vai tiek kontrolēta, OFC nesējsignālu jauda ir stabila, ko var novērot laika periodos no 4. līdz 14. stundām, no 14. līdz 18. stundai, kā arī no 18. līdz 20. stundai. Tādējādi var teikt, ka īstermiņā var iegūt stabilu ķemmi, stabilizējot temperatūru un izslēdzot ārējās vides ietekmi. Jāmin fakts, ka (+4) nesējsignāla jaudas svārstību tendence (zaļā līkne) principiāli atšķiras no pārējām. Iemesls ir SBS efekts, kas izraisa jaudas svārstības. Otrajā mērījumu stundā pastiprinās SBS pīķi pie (+1) nesējsignāla, ņemot jaudu no pārējiem nesējsignāliem. Papildus tam šajā momentā pastiprinās arī (+4) nesējsignāls. Tas pats notiek zaļajai līnijai starp 14. un 20. stundu. Pretēji procesi norisinās starp 4. un 14. stundu, kur SBS pīķi un (+4) nesējsignāls atdod jaudu pārējiem nesējsignāliem, kas līdz ar to tiek pastiprināti. Visbeidzot, mērījumi tika apstādināti 20. stundā, jo mikrostiēnis uzkarst un SBS efekts sāk ietekmēt dažus nesējsignālus. Relatīvi stabili nesējsignālu jaudas periodi, kad apkārtējā vide ir stabila, otrajā mikrostiēnī (1.3. att.) ļauj secināt, ka iegūtās OFC nesējsignālus ir iespējams tālāk izmantot datu pārraidē.

Kopsavilkums

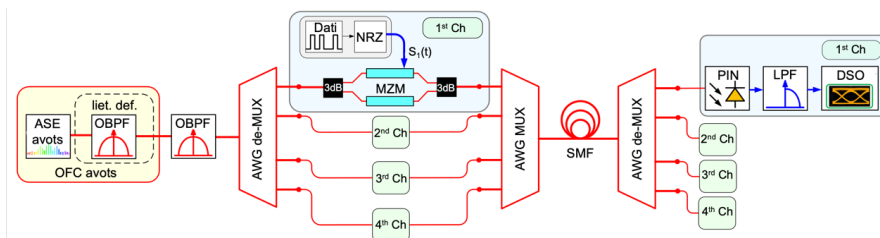
Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka OFC gaismas avotā, kura pamatā ir mikrosfēras vai mikrostiņa rezonators, var iegūt OFC ar nesējsignāliem atbilstoši optisko sakaru sistēmu prasībām kā jauda un ITU-T G.694.1 rekomendācijā definētajam starpkanālu intervālam. Proti, izstrādātajā mikrosfēras rezonatorā ($d = 168 \mu\text{m}$), pumpējot to pie 1558 nm un aptuveni 16 dBm ievadīto optisko jaudu, iegūta OFC ar $FSR = 393 \text{ GHz}$ (aptuveni atbilst $n \times 100 \text{ GHz}$, kur $n = 4$), kur datu pārraidei izvēlēto nesējsignālu jauda ir ap -20 dBm . Mikrosfēras rezonatorā ($d = \sim 660 \mu\text{m}$) pie pumpēšanas frekvences 193,7 THz skaitliski iegūta solitona OFC ar $FSR = 100 \text{ GHz}$, kur datu pārraidei izvēlēto nesējsignālu jauda ir ap -5 dBm un jaudas svārstībās līdz 0,5 dB (pirms datu modulācijas jauda izlīdzināta līdz 0 dBm). Mikrostiņa rezonatorā, to pumpējot divos virzienos pie 1555,46 nm, iegūta OFC ar $FSR = 90 \text{ GHz}$, kur datu pārraidei izvēlēto nesējsignālu jauda ir virs -15 dBm ar relatīvu stabilitāti 20 stundu periodā, ja apkārtējā vide ir stabila.

Oriģinālpublikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – **promocijas darba 1., 3. un 4. pielikumā.**

3. MIKROSFĒRAS UN MIKROSTIENŅU *WGMR* GAISMAS AVOTOS ĢENERĒTO OPTISKO FREKVENČU ĶEMMJU LIETOJUMA IZVĒRTĒJUMS ĀTRDARBĪGĀS DATU PĀRRAIDES SISTĒMĀS

3.1. *IM/DD* četru kanālu 200 GHz *WDM-PON* sistēmas izveide ar mikrosfēras *OFC* gaismas avota lietojumu kā nesējsignālu avotu

WDM-PON pārraides sistēmas simulācijas modelis ar četriem kanāliem un starpkanālu intervālu 200 GHz redzams 3.1. attēlā.

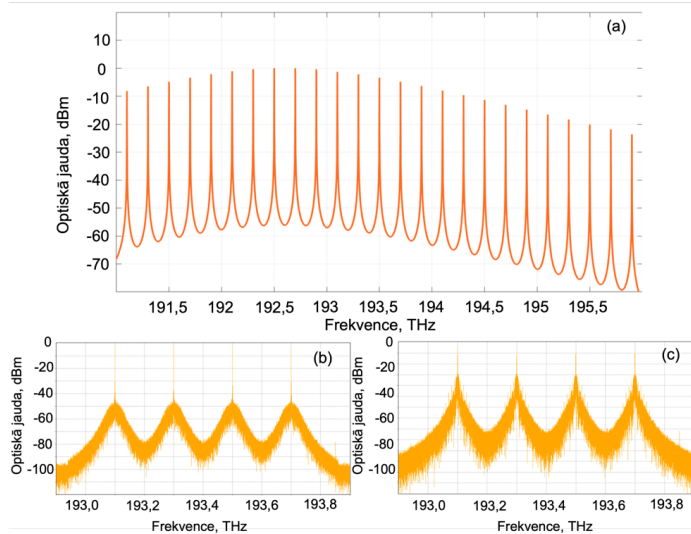


3.1. att. *IM/DD* *WDM-PON* sistēmas simulācijas modelis ar četriem kanāliem un starpkanālu intervālu 200 GHz, kura pamatā ir *OFC* gaismas avots uz silīcija mikrosfēras bāzes.

ASE optiskā gaismas avota izeja ar augstu izejas jaudu līdz 23 dBm un spektra jaudas blīvumu -6 dBm/nm diapazonā 1528–1630 nm ir savienota ar lietotāja definētu *OBPF*, kurā ir augšupielādēts iepriekš silīcija dioksīda mikrosfērā iegūtais *OFC* spektrs. Pēc tam *OFC* tiek filtrēta ar otru *OBPF*, kura 3 dB joslas platums ir 750 GHz, lai izfiltrētu četrus optiskos nesējsignālus turpmākam lietojumam raidītājos. Šie četri *OFC* gaismas avota nesējsignāli tiek atdalīti viens no otra, izmantojot *AWG-DEMUX*, kas atbilst *WDM-PON* arhitektūrai. Katra *AWG-DEMUX* kanāla 3 dB joslas platums ir 87,3 GHz, starpkanālu intervāls – 200 GHz. Optiskā signāla spektrs lietotāja definētā *OBPF* izejā, iegūtais četru nesējsignālu optiskais nesējsignāls pēc otrā *OBPF* un modulētie optiskie nesējsignāli ar 10 Gbit/s datu kanālā pie pārraides bez vides (*B2B*) attiecīgi redzami 3.2. (a), (b) un (c) attēlā.

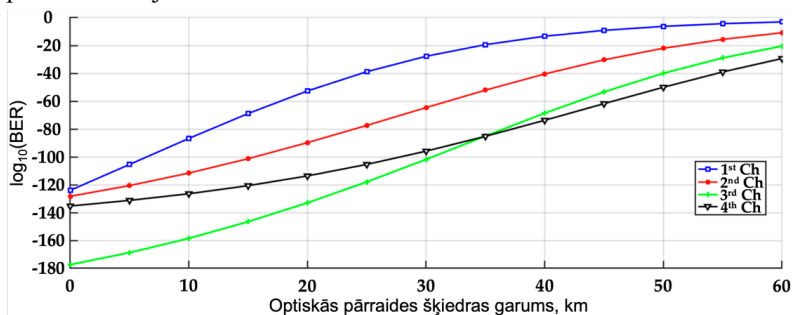
Atdalītie *OFC* nesējsignāli tiek ievadīti Maha-Cendera modulatorā (*MZM*). Elektrisko datu signālus $S(t)$, kas tiek modulēti ar *MZM*, nodrošina pseidogadījuma bitu secības (*PRBS*) ģenerators, izmantojot bez atgriešanās pie nulles (*NRZ*) draiveri, kas ģenerē elektriskos *NRZ* signālus ar bitu pārraides ātrumu 10 Gbit/s. Katram *MZM* 3 dB joslas platums ir 12 GHz un maksimālā un minimālā līmeņa atšķirību 20 dB [48]. Katra raidītāja (*Tx*) optiskie signāli tiek apvienoti, izmantojot sakārtota viļņvadu režģa multiplexoru (*AWG-MUX*), un pārraidīti pa 20 km līdz 60 km garu *ITU-T G.652 SMF* līniju ar 0,02 dB/km vājinājumu un 16 ps/nm/km dispersijas koeficientiem pie 1550 nm viļņa garuma. Šis pārraides attālums ir izvēlēts saskaņā ar *NG-PON2 (ITU-T G.989.2)* standartu. Pēc pārraides optiskie signāli tiek atdalīti ar *AWG-DEMUX* un nosūtīti uz konkrētajiem uztvērējiem (*Rx*). *Rx* sastāv no *PIN* fotodetektora, kur 3 dB joslas platums ir 12 GHz, jutība ir -18 dBm pie *BER* 10^{-12} un optiskās jaudas konversijas

koeficienta $0,65 A/W$. Pēc tam uztvertais elektriskais signāls tiek filtrēts ar zemfrekvenču filtru (*LPF*), kam ir $7,5 \text{ GHz}$ 3 dB elektriskās joslas platums. Elektrisko signālu iegūtie *BER* rezultāti attiecībā pret *SMF* līnijas garumu līdz 60 km *NRZ-OOK* modulētai četru kanālu *IM/DD WDM-PON* pārraides sistēmai ar 200 GHz starpkanālu intervālu redzami 3.3. attēlā.



3.2. att. Optiskie spektri: (a) pēc lietotāja definēta *OBPF* ar integrētu *OFC* gaismas avota izejas spektru; (b) četri optiskie nesējsignāli no *OFC* gaismas avota pēc otrā *OBPF*; (c) modulēti optiskie nesējsignāli pēc *B2B* pārraides.

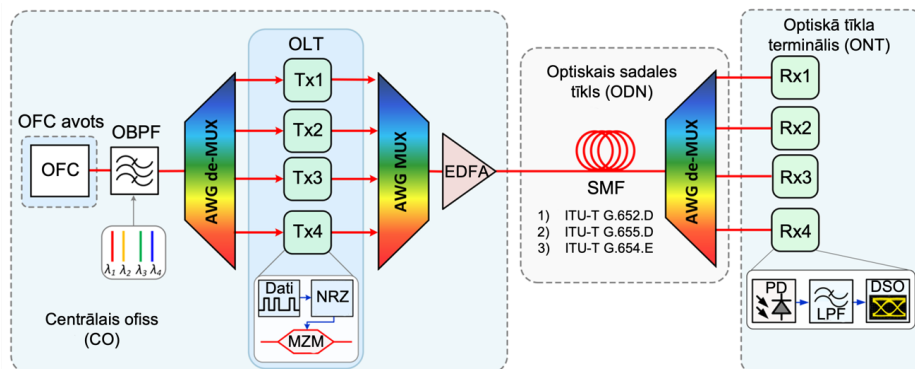
BER veiktspējas ziņā vissliktākais ir 1. kanāls ($193,1 \text{ THz}$). Visaugstākā sistēmas veiktspēja pēc *BER* ir 4. kanālam ($193,7 \text{ THz}$), kur saņemtā signāla *BER* pēc 60 km *SMF* līnijas pārraides ir $4,5 \times 10^{-30}$. Pēc 60 km pārraides pēc *BER* vissliktākajam 1. kanālam saņemtā signāla *BER* ir $9,1 \times 10^{-4}$. Tādējādi var secināt, ka *OFC* gaismas avota nesējsignāli ar 200 GHz atstarpi spēj *IM/DD WDM-PON* pārraides sistēmā nodrošināt 10 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētu signāla pārraidi optiskā savienojuma attālumiem 40 km un 60 km .



3.3. att. 10 Gbit/s *NRZ-OOK* modulētas četru kanālu 200 GHz *WDM-PON* sistēmas katra kanāla *BER* izmaiņas atkarībā no pārraides līnijas garuma, lietojot uz mikrosfēras bāzes izveidotā *OFC* gaismas avota nesējsignālus.

3.2. *IM/DD* četru kanālu 400 GHz *WDM-PON* sistēmas izveide pie dažādu optisko šķiedru pārraides līnijām, kur pamatā ir mikrosfēras *OFC* gaismas avots

Lai analizētu *WDM-PON* pārraides sistēmas veiktspēju, kur pamatā ir *OFC* gaismas avots, izstrādāts simulācijas modelis *VPIphotonics* simulācijas vidē. Tipisks *IM/DD WDM-PON* sistēmas modelis ar četriem kanāliem un 393 GHz kanālu atstarpi redzams 3.4. attēlā. Pirmā daļa ir *OFC* gaismas avots, kura optiskie parametri balstīti eksperimentālajā *OFC* gaismas avotā. *OFC* gaismas avotā iegūtie nesējsignāli ir izmantoti katram datu pārraides kanālam. Simulācijas modeli eksperimentālā ķemme tiek integrēta caur *OBPF* ar 3 dB joslas platumu 1720 GHz, kas izfiltrē spektrālo diapazonu ar četriem izvēlētajiem *OFC* nesējsignāliem ar salīdzināmu optisko jaudu, kas 2.2. attēlā apzīmēti ar cipariem -2, -1, 1, un 2. Atbilstošās frekvences ir 193,207 THz, 192,814 THz, 192,028 THz un 191,635 THz.



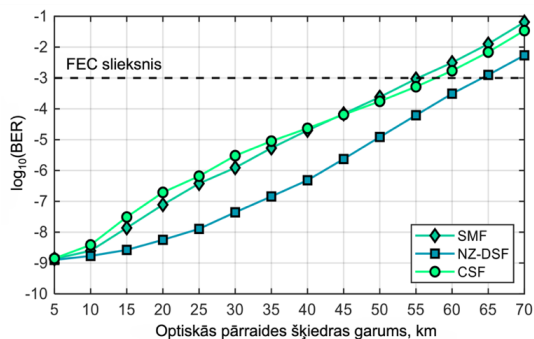
3.4. att. *OFC* gaismas avota veiktspējas un uztvertā signāla kvalitātes novērtēšanas *WDM-PON* pārraides sistēmas simulācijas modelis ar četriem kanāliem un starpkanālu intervālu 393 GHz.

Otrā shēmas daļa ir optiskais līnijas terminālis (OLT), kur ir izvietots raidītāju (*Tx*) masīvs. Vispirms *AWG-DEMUX* ar kanālu atstarpi 400 GHz un viena kanāla 3 dB joslas platumu 75 GHz atdala katru no četriem nesējsignāliem. Katrs no nesējsignāliem tiek nosūtīts uz savu konkrēto raidītāju, kur *MZM* modulators ar 3 dB joslas platumu 12 GHz un maksimālo un minimālo jaudas starpību 20 dB uzliek 10 Gbit/s datu signālus uz katru nesējsignālu. Pārraides ātrums 10 Gbit/s atbilst 10 Gbit/s simetriskajam pasīvajam optiskajam tīklu standartam un atļauj izmantot 10 GHz raiduztvērēju. Loģiskais datu signāls ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu tiek iegūts no *PRBS* ģenerators un pārveidots *NRZ* elektriskajā līnijas signālā. Abas darbības reprezentē “Dati” bloks (3.4. att.). Pēc modulācijas ar *MZM*, optiskie signāli tiek apvienoti ar *AWG-MUX*, kam ir tādi paši parametri kā *AWG-DEMUX*. Kopējais signāls tiek izlaists caur *EDFA* pastiprinātāju ar 20 dB pastiprinājumu, lai kompensētu multipleksoru un demultipleksoru vienību un *MZM* modulatora vājinājumu, un kompensētu vājinājumu, kas radīsies pārraides laikā, tādējādi palielinot sistēmas jaudas budžetu.

Trešā shēmas daļa ir optiskais sadales tīkls (*ODN*), pa kuru tiek pārraidīti iepriekš pastiprinātie datu kanālu signāli. Simulācijas laikā secīgi tiek mainītas pārraides šķiedras (visplašāk industrijā lietotās standarta *SMF* [49], *NZ-DSF* [50] un nogriezta viļņa garuma šķiedra (*CSF*) [51]), lai izpētītu *OFC* gaismas avota nesējsignālu veiktspēju dažādos pārraides apstākļos. Pārraides līnijas garums tiek mainīts no 0 km (*B2B* gadījumā) līdz 70 km, kas atbilst un ir lielāks par *NG-PON2* definēto *ITU-T G.989.2* rekomendācijā [9]. Izvēlētās optiskās šķiedras ir *Corning* visplašāk ražotās un lietotās optisko sakaru industrijā. Pirmā šķiedra ir standarta *SMF* atbilstoši *ITU-T G.652.D* rekomendācijai, otrā šķiedra ir *NZ-DSF* atbilstoši *ITU-T G.655.D* rekomendācijai, trešā veida optiskā šķiedra ir *CSF* atbilstoši *ITU-T G.654.E* rekomendācijai. Pēc pārraides katrs datu kanāls tiek demultipleksēts ar tādu pašu *AWG-DEMUX* filtru kā centrālajā ofisā (*CO*) un nosūtīts uz konkrēto uztvērēju (*Rx*) optiskajā līnijas terminālī.

Ceturtnā shēmas daļa ir optiskais līnijas terminālis (*ONT*), kur atrodas uztvērēji. Katrs uztvērējs sastāv no *PIN* fotodetektora ar 3 dB joslas platumu 12 GHz, jutību -18 dBm atbilstošu $BER = 10^{-12}$ un optiskās jaudas konversijas koeficientu 0,65 A/W. Pēc *PIN* tiek izmantots četru polu *LPF* ar 3 dB joslas platumu 7,5 GHz, lai nofiltrētu troksni, kas radies signālu pārraides un apstrādes laikā. Tad tiek izmantots elektriskais signāla analizators, lai nomērītu signāla formu, acu diagrammu un novērtētu signāla kvalitāti pēc *BER*.

Lai novērtētu sistēmas veiktspēju, 3.5. un 3.6. attēlā parādītas *BER* raksturlīknes atkarībā no optiskās pārraides līnijas garuma un uztvertās jaudas līmeņa. *BER* vērtības nolāsītas sliktākajam datu kanālam, kas 2.2. attēlā atzīmēts kā nesējsignāls (2) jeb tas ir 4. kanāls, kuram ir viszemākais jaudas līmenis, salīdzinot ar pārējiem kanāliem. *WDM-PON* sistēmas novērtējumam ir izmantots stingras izlemšanas turpverstas kļūdu labošanas (*HD-FEC*) sliekšnis 1×10^{-3} [52]. Izmantojot izvēlētos pārraides šķiedras tipus *SMF*, *NZ-DSF* un *CSF*, *BER* vērtība samazinās līdz ar pieaugošu attālumu (3.5. att.).

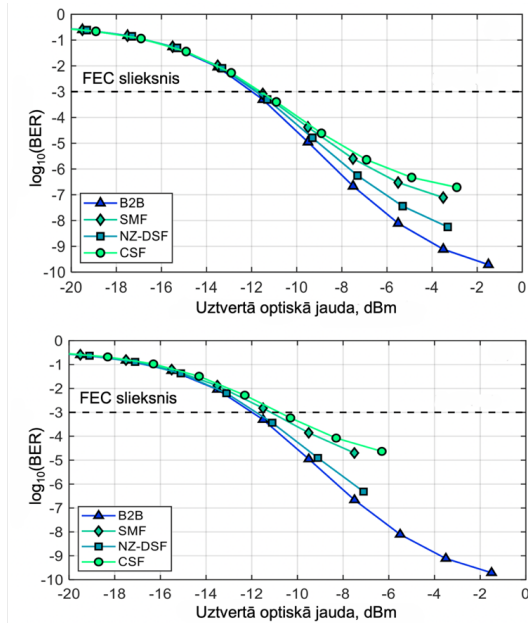


3.5. att. *BER* vērtības izmaiņas raksturlīkne 10 Gbit/s *NRZ-OOK WDM-PON* pārraides sistēmai ar lietotu *OFC* gaismas avotu atkarībā no *SMF*, *NZ-DSF* un *CSF* pārraides šķiedru garuma.

Maksimālais sasniedzamais pārraides attālums, kur *BER* vērtība ir zem *HD-FEC* sliekšņa, ir 64 km, 57,5 km un 55 km, ja attiecīgi izmantota *NZ-DSF*, *CSF* un *SMF* pārraides šķiedra. Kā redzams 3.5. attēlā, ar visiem izvēlētajiem šķiedras tiem var sasniegt 20 km pārraides

attālumu, kas ir tipiska *PON* tīklu sasniedzamība, kā arī 40 km attālumu. Novērtējot signāla kvalitāti, var secināt, ka ir iespējama datu pārraide 40 km *SMF*, *NZ-DSF* un *CSF* pārraides attālumā un uztvertā signāla *BER* vērtības pirms *FEC* ir 2×10^{-5} , $4,8 \times 10^{-7}$ un 1×10^{-5} , ja attiecīgi *ODN* tīkla daļā ir izmantotas *SMF*, *NZ-DSF* un *CSF* pārraides šķiedras. Savukārt *NG-PON2* maksimālo attālumu 60 km var sasniegt, ja ir izmantota tikai *NZ-DSF* optiskā šķiedra. Šāda veida rezultāti ir skaidrojami galvenokārt ar hromatiskās dispersijas (*CD*) koeficientu atšķirību un nelielām vājinājuma koeficienta atšķirībām. Nepieciešams izmantot *CD* kompensāciju, lai sasniegtu lielākus pārraides attālumus, proti, samazinātu *BER* vērtību.

Objektīvai veikspējas novērtēšanai 3.6. (a) un (b). attēlā attiecīgi parādītas *BER* vērtības izmaiņas atkarībā no uztvertās jaudas līmeņa, ja pārraides attālums ir 20 km un 40 km. *BER* raksturlīknes nav parādītas 60 km attālumam, jo *SMF* un *CSF* sasniegtās *BER* vērtības ir zem *HD-FEC* sliekšņa. Kā redzams 3.6 (a) un (b) attēlā, salīdzinoši vissliktāko veikspēju parāda *CSF* optiskā šķiedra, jo tai ir vislielākais *CD* koeficients (23 ps/nm/km), līdz ar to arī lielākais dispersijas radītais jaudas sods. Labākā sistēmas veikspēja ir sasniegta ar *NZ-DSF* optisko šķiedru, jo tai ir vismazākais *CD* koeficients (4 ps/nm/km), kā arī jāņem vērā, ka vājinājuma atšķirības rada niecīgu ietekmi uz kopējo veikspējas atšķirību.



3.6. att. *BER* vērtības izmaiņas raksturlīkne 10 Gbit/s *NRZ-OOK WDM-PON* pārraides sistēmai atkarībā no uztvertās jaudas līmeņa pie *B2B* pārraides, kā arī: (a) 20 km pārraides attālumā; (b) 40 km pārraides attālumā.

Simulācijā novērtējot iegūtos rezultātus (*BER* raksturlīknes atkarībā no pārraides attāluma visiem trīs izvēlētajiem pārraides šķiedru tipiem), var secināt, ka demonstrētais *OFC* gaismas avots, kas veidots uz silīcija mikrosfēras bāzes un nodrošina nesējsignālus ar 393 GHz atstarpi, ir spējīgs nodrošināt *BER* vērtības zem *HD-FEC* sliekšņa 40 km pārraides attālumā 10 Gbit/s

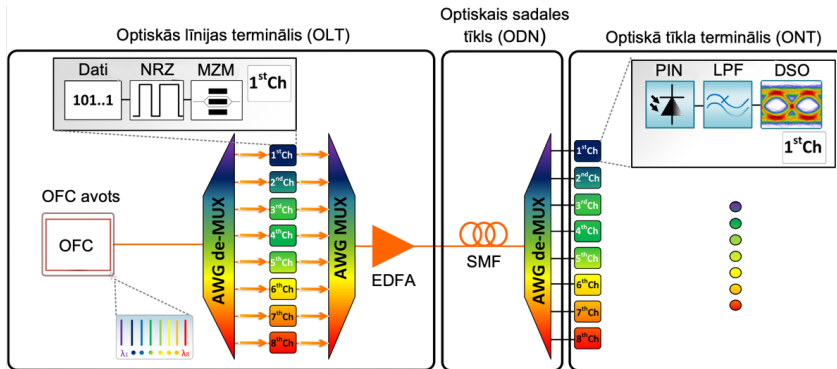
NRZ-OOK modulētā četru kanālu IM/DD WDM-PON sistēmā, lietojot gan SMF, gan NZ-DSF, gan CSF optisko pārraides šķiedru.

3.3. IM/DD astoņu kanālu 100 GHz WDM-PON sistēmas izveide ar mikrosfēras OFC gaismas avota lietojumu kā dažādu līnijas platuma nesējsignālu iegūšanas avotu

Dažādiem optisko sakaru tīklu lietojumiem ir atšķirīgas prasības attiecība uz OFC nesējsignālu FWHM. Šaurš līnijas platums ir svarīgs koherentai pārraidei [53], piemēram, OFC ar līnijas platumu 14,8 Hz tiek izmantots pārraidei ar vairāku līmeņu kvadrātūras impulsa amplitūdas modulācijas formātu. Savukārt IM/DD sakaru sistēmās ir iespējams sasniegt BER vērtības zem HD-FEC sliekšņa 1×10^{-3} , izmantojot lielāku nesējsignālu FWHM, kā arī līnijas platuma atšķirības starp vienas OFC nesējsignāliem var netikt ņemtas vērā. Līdz ar to tālāk ir demonstrēta NRZ-OOK astoņu kanālu WDM-PON sistēmas veiktspēja ar 100 GHz starpkanālu intervālu (atbilst ITU-T G.694.1 rekomendācijai) atkarībā no dažādiem OFC nesējsignālu līniju platumiem – 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz. Dažādie OFC nesējsignālu līnijas platumi – 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz – rada atšķirīgu optisko impulsu izplešanos pārraides šķiedras CD dēļ. Lai vispārinātu šo pētījumu, OFC gaismas avots ir prezentēts kā melnā kaste, kur kā rezonatoru var lietot gan mikrosfēru, gan mikrostieni, kā arī citas arhitektūras OFC gaismas avotus. Lietoto OFC nesējsignālu centrālās frekvences (192,7–193,4 THz) un to atstatums 100 GHz sakrīt ar Super-PON standarta kanālu centrālajām frekvencēm (FSR kopa 1) optiskajā C joslā (192 THz – 193,5 THz). Turklāt WDM-PON pārraides attālums 50 km sakrīt ar Super-PON definēto tīkla sasniedzamību [10].

Lai novērtētu iegūtās OFC ar dažādiem līnijas platumiem (2.2 apakšnodaļa, 2.4. att.) spēju nodrošināt datu pārraidi optiskajā sakaru sistēmā, simulācijas vidē VPI Photonics Design Suite “Transmission Maker” ir izveidots NRZ-OOK astoņu kanālu WDM-PON sistēmas modelis (3.7. att.) ar integrētu OFC gaismas avotu. No OFC gaismas avota izejas spektra ar AWG-DEMUX ar 3 dB joslas platumu 75 GHz ir atdalīti astoņi nesējsignāli, katrs no tiem ir nosūtīts uz savu raidītāju. PRBS ar bitu secības garumu $2^{15} - 1$ un pārraides ātrumu 10 Gbit/s tiek iekodēts NRZ formātā un modulēts nesējsignāla amplitūdā ar MZM (joslas platums 12 GHz, maksimālās un minimālās jaudas starpība 20 dB). Pēc modulācijas datu kanāli tiek apvienoti ar AWG-MUX ar 3 dB joslas platumu 75 GHz un pastiprināti ar EDFA par 5 dB. Svarīgi piebilst, ka EDFA izmantošana rezultēsies augstākā BER vērtībā tikai mazāka OSNR dēļ (pastiprinātais samazina OSNR par 4 dB), nevis signāla spektrālās paplašināšanās dēļ.

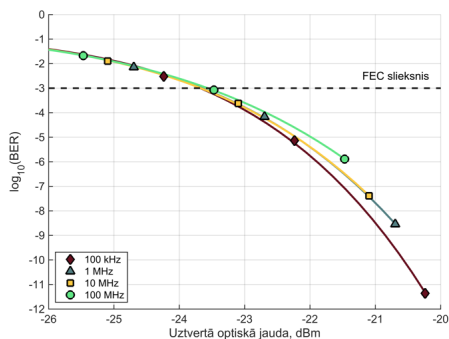
Pēc optiskā signāla apvienošanas tas tiek pārraidīts caur ODN pa standarta SMF šķiedru ($\alpha = 0,2$ dB/km, $D = 17$ ps/nm/km pie 1550 nm). Pētījuma laikā pārraides šķiedras garums tiek mainīts no 20 km līdz 50 km, kur maksimālais attālums atbilst Super-PON. Pārraidot optisko signālu, katrs kanāls tiek novadīts uz uztvērējiem ar AWG-DEMUX (3 dB joslas platums 75 GHz) palīdzību. Katrs uztvērējs sastāv no PIN fotodetektora (3 dB joslas platums 12 GHz, jutība –18 dBm ar $BER = 10^{-10}$, optiskās jaudas konversijas koeficientu 0,65 A/W), LPF ar 3 dB joslas platumu 8 GHz, kas nofiltrē troksni, kā arī no DSO, kas uzņem acu diagrammu, analītiski nomēra BER vērtību ar Q faktora un komplementārās kļūdas funkcijas “erfc” palīdzību.



3.7. att. NRZ-OOK modulētas WDM-PON datu pārraides sistēmas simulācijas modelis ar astoņiem kanāliem un 100 GHz atstarpi, kur ir izmantots OFC gaismas avots.

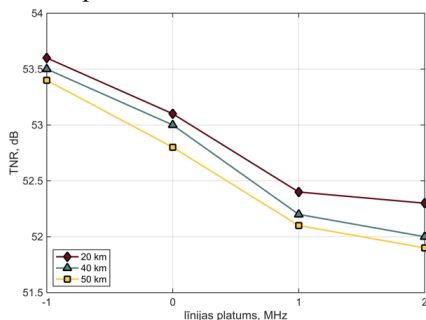
Lai novērtētu astoņu kanālu 50 km garu WDM-PON ar 100 GHz atstarpi veiktspēju, lietojot OFC gaismas avota nesējsignālus ar dažādiem līnijas platumiem, vispirms tiek izmantotas BER korelācijas diagrammas, kur rezultāti ir parādīti ar līdzenu OFC apliecēju, kas redzams 3.10. attēlā. OFC nesējsignālu jaudas var izlīdzināt ar spektrālo filtru. Papildus tam ir parādītas TNR un BER korelācijas diagrammas attiecībā pret OFC līniju platumu 20 km, 40 km (atbilstoši NG-PON2) un 50 km (atbilstoši Super-PON) pārraides attālumā. Visbeidzot acu diagrammas 50 km datu pārraidē ar OFC līnijas platumiem – 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz. Visi rezultāti uzrādīti sliktākajam kanālam pēc BER vērtības, kas šajā gadījumā ir 2. kanāls ar 192,8 THz centrālo frekvenci, kas redzams 2.3. attēlā kā (–) kanāls. Uztvertā signāla BER vērtības 3.8. attēlā ir nolasītas atkarībā no vidējās uztvertās jaudas pie minētajiem OFC nesējsignālu līnijas platumiem. Korelācijas diagrammas ir uzņemtas, izmantojot pārskatāmu optiskā vājinātāju (VOA) pirms PIN fotodetektora.

Dispersijas efekti ietekmē 100 MHz signālu visvairāk, tāpēc tas rezultējās mazākā uztvertajā jaudā, līdz ar to zemākās BER vērtībās. BER vērtības 50 km pārraides attālumā un ar līdzenu OFC apliecēju mainās no $1,3 \times 10^{-6}$ līdz $4,8 \times 10^{-1}$ pie 100 MHz optiskā nesējsignāla. Salīdzinoši labāko veiktspēju uzrāda 100 kHz optiskais nesējsignāls, kur BER vērtības 50 km pārraides attālumā mainās no $4,4 \times 10^{-12}$ līdz $4,7 \times 10^{-1}$. Kā redzams 3.8. attēlā, uztvērēja jutība (definēta pie HD-FEC sliekšņa 1×10^{-3}) sliktākajam kanālam ir attiecīgi –23,9 dBm; –23,8 dBm; –23,7 dBm un –23,6 dBm pie 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz, 100 MHz līnijas platumu vērtībām. Jaudas sods, lai sasniegtu definēto HD-FEC sliekšni (1×10^{-3}), salīdzinot ar 100 kHz, ir 0,1 dB; 0,2 dB un 0,3 dB pie attiecīgi 1 MHz, 10 MHz, 100 MHz. Šādas jaudas soda atšķirības var neņemt vērā.



3.8. att. NRZ-OOK modulēta 10 Gbit/s signāla BER vērtības izmaiņas atkarībā no uztvertās signāla jaudas pie līnijas platuma 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz un pārraides attāluma 50 km, lietojot OFC ar izlīdzinātiem pēc jaudas nesējsignāliem.

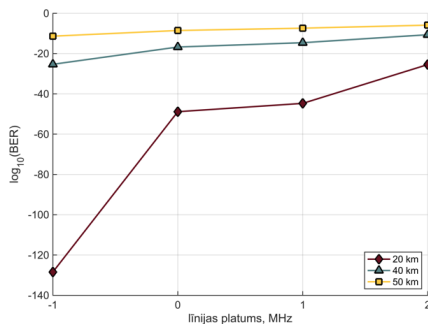
Viens no svarīgākajiem optiskās frekvenču ķemmes parametriem ir nesējsignālu *TNR*, kas tiek samazināts datu pārraides laikā, bet, lai nodrošinātu *BER* vērtības, kas ir zemākas par *HD-FEC* sliekšni, *TNR* vērtībai pirms *PIN* jābūt pietiekamai (10 Gbit/s NRZ-OOK signālam tāda vērtība atbilst 10 dB [54]). 3.9. attēlā redzama *TNR* veikspēja pie pētāmajiem nesējsignālu līnijas platumiem, kas ļauj novērtēt OFC līniju *TNR* vērtības ietekmi uz datu pārradi, jo pie lielāka līnijas platuma *TNR* vērtība samazinās. Proti, pie 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz attiecīgās optisko nesējsignālu *TNR* vērtības ir 116,1 dB, 96,1 dB, 76,1 dB, un 56,1 dB. Kā redzams 3.11. attēlā, pie 100 kHz līnijas platuma *TNR* vērtības ir visaugstākās – 53,6 dB, 53,5 dB un 54,3 dB, savukārt pie 100 MHz viszemākās – 52,3 dB, 52 un 51,9 dB, kas attiecīgi uzrādītas 20 km, 40 km un 50 km pārraides attālumam.



3.9. att. *TNR* vērtības izmaiņas pirms *PIN* fotodetektora atkarībā no nesējsignālu līnijas platuma vērtībām 20 km, 40 km un 50 km pārraides attālumā.

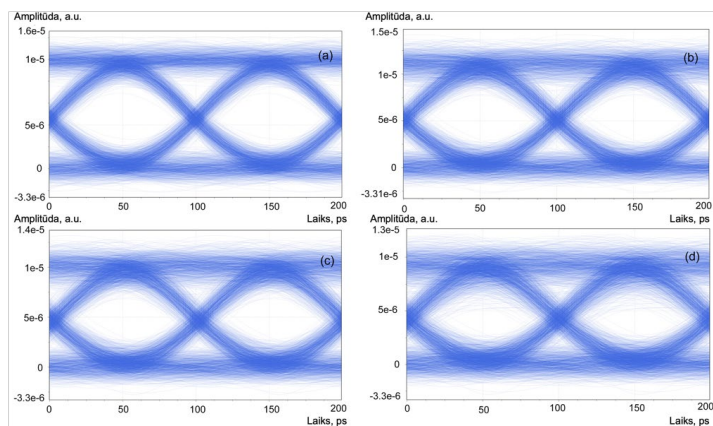
TNR vērtības tiešā veidā ietekmē uztvertā signāla *BER* vērtības. 3.10. attēlā redzamas signāla *BER* vērtības izmaiņas atkarībā no līnijas platuma 20 km, 40 km un 50 km pārraides attālumā. Kā redzams 3.10. attēlā, *BER* vērtības sakrīt līdz ar *TNR* vērtības samazināšanos (3.9. att.). Viszemākās *BER* vērtības nodrošina 100 kHz līnijas platumu, kur *BER* 20 km pārraides attālumā ir $3,5 \times 10^{-129}$, kas atbilst bezkļūdu pārraidei, $4,8 \times 10^{-26}$ un $4,4 \times 10^{-12}$ attiecīgi 40 km un 50 km pārraides attālumā. Visaugstākās *BER* vērtības ir sasniegtas pie

100 MHz līnijas platuma, kur BER ir $3,4 \times 10^{-26}$, $2,3 \times 10^{-11}$ un $1,3 \times 10^{-6}$ attiecīgi 20 km, 40 km un 50 km pārraides attālumā.



3.10. att. BER vērtību izmaiņas atkarībā no optisko nesējsignālu līnijas platuma 20 km, 40 km un 50 km pārraides attālumā.

3.11. attēlā redzama 2. kanāla saņemtā signāla kvalitāte pēc 50 km garas ODN pārraides visām pētītajām nesējsignālu līnijas platuma vērtībām. Kā parādīts 3.11. attēlā, BER vērtības ir zem noteiktā $HD-FEC$ sliekšņa, kur BER vērtību diapazons starp visiem uztvertā signāla kanāliem ir $4,4 \times 10^{-12} - 2,7 \times 10^{-12}$, $2,9 \times 10^{-9} - 4,3 \times 10^{-11}$, $4,1 \times 10^{-8} - 3,2 \times 10^{-11}$ un $1,3 \times 10^{-6} - 1,2 \times 10^{-6}$ (pirmā vērtība atbilst kanālam ar viszemāko BER veikspēju, savukārt otrā vērtība atbilst kanālam ar visaugstāko BER veikspēju).



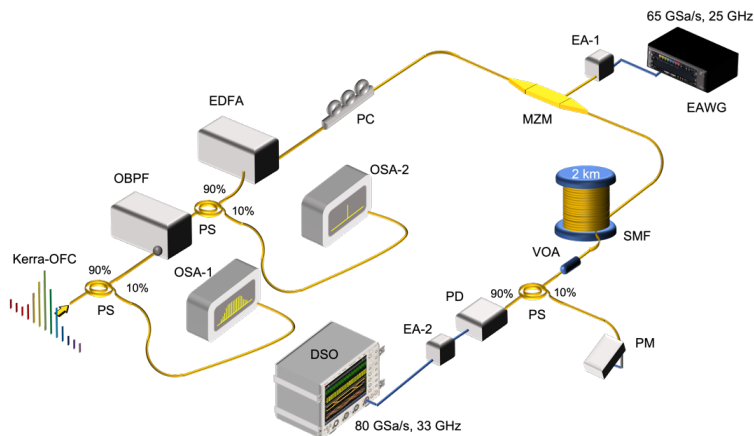
3.11. att. Saņemtā signāla acu diagrammas pēc 50 km attāluma pārraides pa astoņu kanālu, 100 GHz atstatuma $WDM-PON$ sistēmu, kas darbojas ar datu pārraides ātrumu 10 Gbit/s, izmantojot standarta SMF pētītajam 2. kanālam ar nesējsignāla līnijas platuma vērtībām: (a) 100 kHz; (b) 1 MHz; (c) 10 MHz; (d) 100 MHz.

BER vērtības, kas iegūtas pēc 50 km standarta SMF šķiedras pārraides garuma, ir krietni zem $HD-FEC$ sliekšņa. Tāpēc ir iespējams izmantot OFC ar līnijas platuma vērtībām 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz, lai nodrošinātu datu pārraidi $NG-PON2$ un jaunajos $Super-PON$ optiskajos tīklos.

3.4. Eksperimentālā līdz 100 Gbit/s datu centru starpsavienojuma nodrošināšana, izmantojot mikrostieņa OFC gaismas avotā iegūto optisko frekvenču ķemmi

Lai apmierinātu pieaugošo joslas platumu pieprasījumu, datu centru starpsavienojumiem (*DCI*) ir jāpiedāvā augstāka veikspēja un caurlaides spēja, vienlaikus uzlabojot spektrālo efektivitāti un samazinot enerģijas patēriņu [55]. *IM-DD* joprojām ir daudzsološs *DCI* risinājums, pateicoties zemaiztūrei, augstajai uzticamībai un saprātīgām izmaksām [56].

Eksperimentālā līdz 100 Gbit/s/λ datu centra starpsavienojuma shēma redzama 3.12. attēlā. Uz mikrostieņa bāzes izveidotā OFC gaismas avota nesējsignāli no (0) līdz (+6) tiek izmantoti, lai demonstrētu 50 Gbaud un 60 Gbaud *NRZ-OOK* un 50 Gbaud *PAM-4* modulētu signālu pārraidītu 2 km garā *SMF* līnijā. Iegūtie OFC nesējsignāli vispirms tiek nosūtīti uz *OBPF* (*Santec OTF-350*), kam joslas platums 3 dB līmenī ir 35 GHz, lai vienlaikus atdalītu vienu nesējsignālu. *PS* ar attiecību 10/90 pirms un pēc *OBPF* ir izmantoti *OSA-1* un *OSA-2*, lai attiecīgi uztveru OFC spektru un vienu filtrēto OFC nesējsignālu. Tad *EDFA* (*Amonics AEDFA-CL-18-B-FA*) ar fiksētu optisko izejas jaudu 23,5 dBm pastiprina iepriekš izfiltrētos optiskos nesējsignālus, pirms tie tiek nosūtīti uz *MZM* (*Photline MX-LN40*), kam joslas platums 3 dB līmenī ir 40 GHz, maksimālās un minimālās jaudas starpība – 20 dB, kā arī ienestais vājinājums 9 dB. *PC* ir novietots pirms *MZM*, lai samazinātu polarizācijas atkarīgu vājinājumu. Šajā shēmas punktā (pirms *MZM*) izmērītā optiskā nesējsignāla jauda ir ap 5 dBm, lai nodrošinātu optimālu optisko jaudu datu modulācijai.

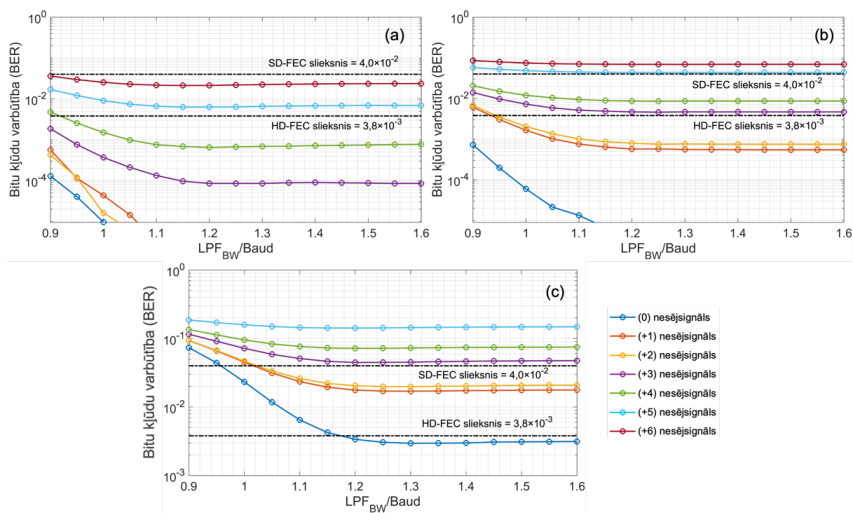


3.12. att. Eksperimentāla ātrdarbīga optiskā starpsavienojuma līdz 100 Gbit/s/λ shēma, kuras pamatā ir izveidotais mikrostieņa OFC gaismas avots.

Ātrgaitas *NRZ-OOK* un *PAM-4* signāli vispirms tiek ģenerēti ciparu formātā, izmantojot *PRBS* ar garumu $2^{15} - 1$. Signālam tiek palielināts nolašu skaits, un tas tiek filtrēts, izmantojot paceltā kosinusa filtru ar sānu malu nogriešanas koeficientu 1. Šī vērtība ir izvēlēta, jo ar mazāku sānu malu nogriešanas koeficientu šeit nestrādā takts atjaunošana atsevišķu nesējsignālu stabilitātes svārstību dēļ. Pēc tam iegūtais signāls tiek ielādēts elektriskā patvaļīgās

formas signālu ģeneratorā (*EAWG*, *Keysight M9502A*, 25 GHz). Papildus tam ir lietota turpvērstā frekvences apgabala izlīdzināšana līdz 30 GHz joslas platumam, lai kompensētu amplitūdas-frekvences traucējumus un ierobežoto 65 GSa/s *EAWG* joslas platumu. Ņemot vērā šos aprīkojuma ierobežojumus (65 GSa/s *AWG* ir tikai 25 GHz joslas platumam), ir izvēlēts maksimālais simbolu pārraides ātrums 50 Gbaud un 60 Gbaud. Papildus tam tiek pieņemts, ka, ja ir iespējams 60 Gbaud simbolu ātrums ar šo *OFC*, tad tas nodrošina veikspējas pielāides 40 Gbaud, kas ir plašāk lietots pie 100 GHz kanālu atstarpes. Ģenerētais izejas elektriskais signāls tiek pastiprināts ar elektrisko pastiprinātāju (*EA-1*, 38 GHz, 29 dB pastiprinājums) un ievadīts *MZM*. Pēc tam modulētais optiskais signāls tiek pārraidīts 2 km garā *SMF* līnijā, kas vēl iziet caur *VOA*. Lai kontrolētu uztvērēja optisko jaudu, tiek izmantoti *PS* ar attiecību 10/90 un jaudas mērītājs (*PM*). Lieljaudas 50 GHz joslas platumā *InGaAs PIN* fotodetektors (*Lab Buddy*, *DSC10H-39*) ar +4 dBm jutību pie *BER* 10^{-12} un optiskās jaudas konversijas koeficientu 0,5 A/W veic saņemtā optiskā signāla pārveidošanu elektriskajā. *EA-2* (25 GHz, 16 dB pastiprinājums) pastiprina elektrisko signālu, un, visbeidzot, *DSO* (*Keysight DSAZ334A*, 80 GSa/s, 33 GHz) nolasa signālu turpmākai ciparu signāla apstrādei (*DSP*).

Uztvertais un nolasītais signāls tiek apstrādāts, izmantojot *DSP* rutīnu, kas sastāv no *LPF* ar normalizētu joslas platumu 1,2, kas nodrošina optimālo *BER* veikspēju (3.13. att.), takts atjaunošanu, pēcizlīdzināšanu un *BER* skaitītāju. *LPF* ekvalizācija un paceltā kosinusa filtrs ir lietots ar mērķi optimizēt sasniegto pārraidīto signālu veikspēju.



3.13. att. *BER* salīdzinājumā ar normalizētu LPF_{BW}/Baud attiecību *IM/DD* īsa attāluma optiskajai *DCI* sistēmai ar lietotu *OFC* gaismas avotu. Pēc *BER* veikspējas vissliktākais optiskais nesējsignāls (+6) nodrošina pārraidi ar normalizētu LPF_{BW} joslas platumā vērtību 1,2 *NRZ-OOK* modulētiem signāliem pie: (a) 50 Gbaud/λ; (b) 60 Gbaud/λ; (c) 50 Gbaud/λ *PAM-4* modulētiem signāliem.

Papildus iepriekš minētajām *DSP* funkcijām ir izmantota arī adaptīva izlīdzināšana (*EQ*), lai uzlabotu uztvertā signāla kvalitāti, proti, kompensētu starpsimbolu interferenci un elektrisko

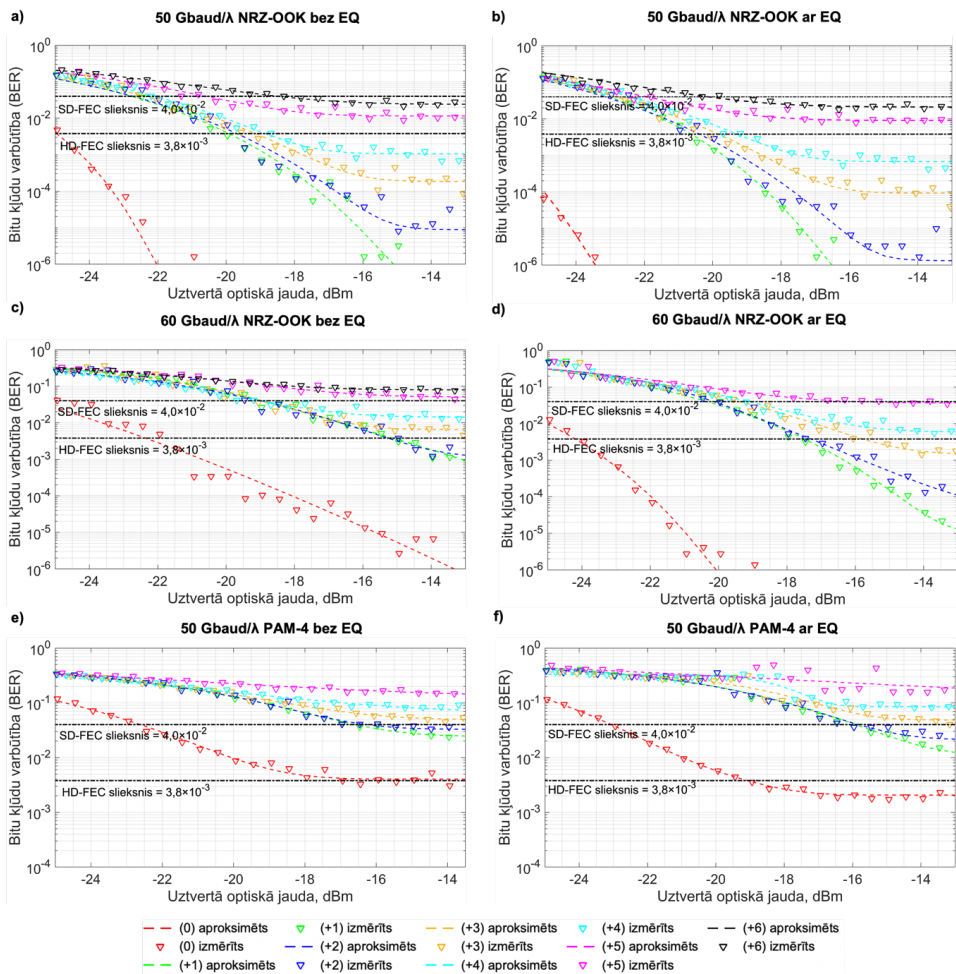
komponenšu ierobežoto joslas platumu. *EQ* tiek veikta ar atgriezeniskās saites lēmuma algoritmu ar 15 turpvērstiem koeficientiem (*FFT*) un septiņiem atgriezeniskās saites koeficientiem (*FBT*) 50 Gbaud un 60 Gbaud *NRZ-OOK* pārraidei. Tomēr 50 Gbaud *PAM-4* pārraidei izmantoto *FFT* un *FBT* skaits katram optiskā nesējsignāla kanālam ir atšķirīgs – (0, +4, +5 – 55 *FFT* un 15 *FBT*; +1 – 85 *FFT* un 55 *FBT*; +2 – 23 *FFT* un 16 *FBT*; +3 – 10 *FFT* un 11 *FBT*). Izvēlētais koeficientu skaits maksimāli uzlabo *BER* veikspēju. Kopumā *BER* skaitīšanai tiek izmantoti 1,2 miljoni bitu.

Uztverto *NRZ-OOK* un *PAM-4* signālu kvalitātes analīzē tiek izmantotas divas *BER* sliekšņa vērtības – *HD-FEC* ar 7 % kontroles bitiem, *BER* sliekšni $3,8 \times 10^{-3}$ un mīksta izlemšanas turpvērstā kļūdu labošana (*SD-FEC*) ar 20 % kontroles bitiem, *BER* sliekšni $4,0 \times 10^{-2}$. Datu pārraide tiek uzskatīta par veiksmīgu, ja uztvertā signāla *BER* vērtība ir zem šīm sliekšņa vērtībām. Iegūtie 50 Gbaud un 60 Gbaud *NRZ-OOK* datu pārraides rezultāti pēc 2 km pārraides pa *SMF* līniju gan bez, gan ar *EQ* redzami 3.14. (a–d) attēlā, 50 Gbaud *PAM-4* pārraides rezultāti – 3.14. (e–f) attēlā.

3.14. attēlā redzamas dažādas *BER* līkņu tendences katram optiskajam nesējsignālam, kaut gan pirms datu modulācijas optisko nesējsignālu jaudas tiek pastiprinātas ar *EDFA* līdz vienai fiksētai jaudai. Tas izskaidrojams ar faktu, ka katram nesējsignālam ir atšķirīgas *OSNR* vērtības, kas summējas no divām *ASE* trokšņu ģenerējošām komponentēm – *EDFA OFC* gaismas avotā un *EDFA* datu pārraides shēmā. Līdz ar to ievērojami palielinās trokšņa līmenis, kas rada samazinātas nesējsignālu *OSNR* vērtības. Sekojoši palielinās uztvertā signāla *BER* vērtības.

Kā redzams 3.14. (a) attēlā, bez *EQ* 50 Gbaud *NRZ-OOK* signāla pārraide ir iespējama *OFC* gaismas avota nesējsignāliem no (0) pie $\lambda = 1555,46$ nm līdz (+6) pie $\lambda = 1559,78$ nm. Sliktākais datu kanāls (pamatojoties uz *BER* vērtību) ir ar nesējsignālu (+6), kur 20 % *SD-FEC BER* sliekšnis tiek sasniegts pie –18 dBm uztvertās optiskās jaudas. Vislabāko veikspēju parāda optiskais nesējsignāls (0) – *CW* pumpēšanas starojuma avots, kam ir augstākā gaismas avota izejas optiskā jauda +4 dBm un augstākā *TNR* vērtība 52,8 dB. 50 Gbaud *NRZ-OOK* signāla pārraide, kas ir zem 7 % *HD-FEC* sliekšņa $3,8 \times 10^{-3}$, ir iespējama bez *EQ OFC* gaismas avota nesējsignāliem (0) pie $\lambda = 1555,46$ nm līdz (+4) pie $\lambda = 1558,34$ nm. Kā redzams 3.14. (b) attēlā, *EQ* nedaudz uzlabo *BER* veikspēju, salīdzinot ar iepriekšējo gadījumu bez *EQ*, un nodrošina 50 Gbaud *NRZ-OOK* signāla pārraidi, izmantojot nesējsignālus no (0) pie $\lambda = 1555,46$ nm līdz (+6) pie $\lambda = 1559,78$ nm zem 20 % *SD-FEC* robežas.

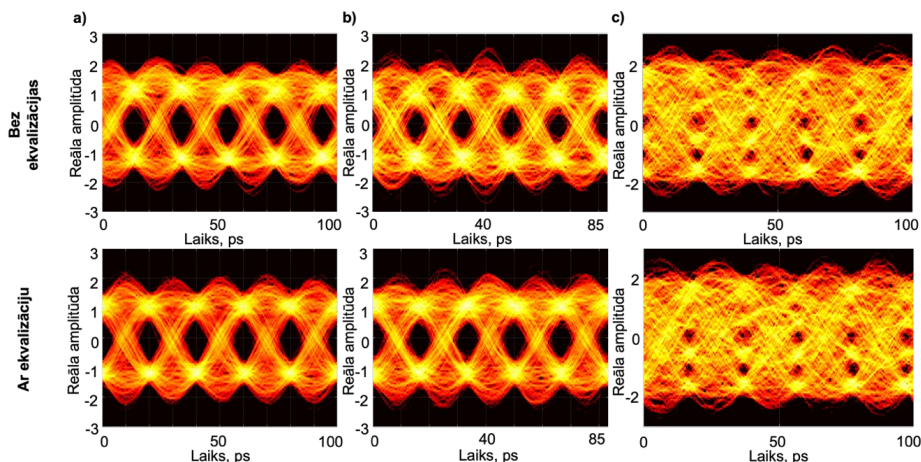
Kā redzams 3.14. (c) attēlā, bez *EQ* 60 Gbaud *NRZ-OOK* signāla pārraide ir iespējama, izmantojot nesējsignālus no (0) pie $\lambda = 1555,46$ nm līdz (+4) pie $\lambda = 1558,34$ nm ar *BER* veikspēju zem 20 % *SD-FEC* sliekšņa. Sliktākais datu kanāls (pamatojoties uz *BER* vērtību) ir ar nesējsignālu (+4), kur 20 % *SD-FEC BER* sliekšnis tiek sasniegts pie –18 dBm uztvertās optiskās jaudas. Tāpat kā iepriekšējā gadījumā, arī pie 60 Gbaud *NRZ-OOK* kvalitatīvāko datu pārraidi uzrāda pumpēšanas starojuma nesējsignāls ar numuru (0). Rezultāti (3.14. (d) att.) parāda, ka *EQ* būtiski uzlabo *BER* veikspēju, nodrošinot 60 Gbaud *NRZ-OOK* signāla pārraidi ar nesējsignāliem no (0) līdz (+5).



3.14. att. BER korelācijas diagrammas atkarībā no uztvertās optiskās jaudas *IM/DD* īsa attāluma optiskajai *DCI* sistēmai, lietojot *OFC* gaismas avotu ar *NRZ-OOK* pie 50 Gbaud/λ: (a) bez *EQ*, (b) ar *EQ*; pie 60 Gbaud/λ: (c) bez *EQ*, (d) ar *EQ*. Ar *PAM-4* pie 50 Gbaud/λ: (e) bez *EQ*, (f) ar *EQ*. *EQ* (b) un (d) attēliem izmanto 15 *FFT* un 7 *FBT*. *EQ* (f) attēlam izmanto 55 *FFT* un 15 *FBT* 0, +4; +5 nesējsignālu gadījumā; 85 *FFT* un 55 *FBT* +1 gadījumā; 23 *FFT* un 16 *FBT* +2 un 10 *FFT* un 11 *FBT* +3 gadījumos.

Bez *EQ* 50 Gbaud/λ *PAM-4* signāla pārraidi var realizēt, izmantojot (0) nesējsignālu, kas pie -17 dBm uztvertās optiskās jaudas nodrošina signāla BER vērtību zem 7% *HD-FEC* sliekšņa (3.14. (e) att.). Nesējsignāliem (+1) un (+2) BER vērtības zem 20% *SD-FEC* sliekšņa tiek nodrošinātas pie -16 dBm uztvertās optiskās jaudas. Pārējiem nesējsignāliem uztvertā signāla BER vērtības paliek virs definētā 20% *SD-FEC* sliekšņa. *EQ* uzlabo veiktspēju, ļaujot pārraidīt 50 Gbaud *PAM-4* signālu ar (0) līdz (+2) nesējsignāliem. *EQ* gadījumā optiskajam nesējsignālam (0) BER vērtība ir zem 7% *HD-FEC* sliekšņa $3,8 \times 10^{-3}$ pie -19 dBm uztvertās

optiskās jaudas (3.14. (f) att.). Tomēr optiskajiem nesējsignāliem no (+1) līdz (+2) minimālā BER vērtība tiek sasniegta zem 20 % *SD-FEC* robežas $4,0 \times 10^{-2}$ pie -16 dBm uztvertās optiskās jaudas. Saņemtās acu diagrammas 50 Gbaud un 60 Gbaud *NRZ-OOK* un 50 Gbaud *PAM-4* signāliem pēc 2 km pārraides pa *SMF* ir parādītas (+1) nesējsignālam (3.15. att.).



3.15. att. Saņemtās signāla acu diagrammas ar un bez *EQ* nesējsignālam ar numuru (+1), kas uzņemtas ar uztverto optisko jaudu $-12,5$ dBm: (a) 50 Gbaud/ λ *NRZ-OOK* gadījumā; (b) 60 Gbaud/ λ *NRZ-OOK* gadījumā; c) 50 Gbaud/ λ *PAM-4* gadījumā.

Kopsavilkums

Ņemot vērā veiktos pētījumus un iegūtos rezultātus, var secināt, ka mikrosfēras un mikrostiņa *OFC* gaismas avots var aizvietot optiskos nesējsignālus no lāzera masīva *IM/DD WDM-PON* un *DCI* sistēmās. Iegūtās BER vērtības ir zem *HD-FEC* un *SD-FEC* vērtībām. *OFC* gaismas avots ar mikrosfēras rezonatoru ($d = 328,5$ μm) spēj nodrošināt BER vērtību vismaz $9,1 \times 10^{-4}$ četru kanālu 200 GHz *WDM-PON* sistēmā ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu datu kanālā 60 km pārraides līnijā. *OFC* gaismas avots ar mikrosfēras rezonatoru ($d = 168$ μm) var nodrošināt BER vērtību vismaz 2×10^{-5} , $4,8 \times 10^{-7}$ un 1×10^{-5} attiecīgi 40 km garās *SMF*, *NZ-DSF*, *CSF* pārraides šķiedrās četru kanālu 393 GHz *WDM-PON* sistēmā ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu. *OFC* gaismas avots ar mikrosfēras rezonatoru ($d = 660$ μm) un iegūto solitona ķemmi spēj nodrošināt BER vērtību vismaz $2,7 \times 10^{-12}$; $4,3 \times 10^{-11}$; $3,2 \times 10^{-11}$; $1,2 \times 10^{-6}$ pie attiecīgi 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz nesējsignālu līnijas platuma astoņu kanālu 100 GHz *WDM-PON* sistēmā ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu un pārraides līnijas garumu 50 km. Visbeidzot, *OFC* gaismas avots ar mikrostiņa rezonatoru ($d = 700$ μm), izmantojot *EQ*, pie *NRZ-OOK* 50 Gbit/s pārraides var sasniegt BER vērtību nesējsignāliem (0) līdz (+6) zem 20 % *SD-FEC* sliekšņa, kas (+6) kanālam ir sasniegts pie $-19,5$ dBm uztvertās optiskās jaudas. Pie *NRZ-OOK* 60 Gbit/s nesējsignāliem (0) līdz (+5) zem 20 % *SD-FEC* sliekšņa, kas (+5) kanālam ir sasniegts pie -17 dBm uztvertās optiskās jaudas. Pie *PAM-4* 100 Gbit/s nesējsignāliem (0) līdz (+2) zem 20 % *SD-FEC* sliekšņa, kas (+2) kanālam ir sasniegts pie -16 dBm uztvertās optiskās jaudas. Oriģinālpublikācijas par šajā nodaļā aprakstītajiem pētījumiem – **promocijas darba 1., 3., 4. un 6. pielikumā.**

SECINĀJUMI

1. Lai ar šķiedras metināšanas aparātu *Fujikura ARCMaster FSM-100P+* izstrādātu 175 μm un 350 μm diametra mikrosfēras (Q faktors $\sim 10^7$) no 125 μm diametra *SSMF*, nepieciešamas attiecīgi 42 sekundes un 114 sekundes, savukārt, lai ar CO_2 lāzera palīdzību izstrādātu piecus 700 μm diametra mikrostieņus (Q faktors $= 2,6 \times 10^7$) uz viena silīcija stieņa ar 520 μm atstarpi starp rezonatoriem, ir nepieciešamas ap 5 minūtes.
2. Izstrādātajos *WGM* rezonatoros optiskajā C joslā ir iespējams iegūt *OFC*, pumpējot rezonatorus ap 1550 nm viļņa garumu, kur gaismas ievadei rezonatorā optimālā atstarpe starp *TP* un rezonatoru ir 0,12 μm vai 0,17 μm , kā arī rezonatora diametra izvēle ļauj pielāgot atstarpi starp nesējsignāliem.
3. Balstoties iegūtajos eksperimentālajos rezultātos, var secināt, ka *ITU-T G.694.1* rekomendācijā definētajam starpkanālu intervālam atbilstošus *OFC* nesējsignālus var iegūt, pumpējot mikrosfēras rezonatoru ($D = 168 \mu\text{m}$) pie 1558 nm viļņa garumu ar 16 dBm optisko jaudu – iegūta 393 GHz atstarpe, kā arī no divām pusēm pumpējot mikrostieņa rezonatoru ($D = 700 \mu\text{m}$; Q faktors $= 2,6 \times 10^7$) pie 1555,46 nm viļņa garumu – iegūta 90 GHz atstarpe.
4. Balstoties skaitliski iegūtajos rezultātos, var secināt, ka solitona ķemmi var iegūt ar *OFC* nesējsignālu atstarpi 200 GHz, pumpējot mikrosfēras rezonatoru ($D = 328,5 \mu\text{m}$) pie 1552,52 nm viļņa garuma, kā arī ar *OFC* nesējsignālu atstarpi 100 GHz, pumpējot mikrosfēras rezonatoru ($D \sim 660 \mu\text{m}$) pie 1547,71 nm viļņa garuma.
5. *IM/DD WDM-PON* sistēmai ar četriem kanāliem 10 Gbit/s un 200 GHz starpkanālu intervālu uztvertā signāla *BER* vērtība 60 km garā pārraides līnijā ir $9,1 \times 10^{-4}$, lietojot mikrosfēras *OFC* gaismas avotu.
6. *IM/DD WDM-PON* sistēmai ar četriem kanāliem 10 Gbit/s un 393 GHz starpkanālu intervālu uztvertā signāla *BER* vērtība ir 2×10^{-5} , $4,8 \times 10^{-7}$ un 1×10^{-5} attiecīgi 40 km garām *SMF*, *NZ-DSF* un *CSF* šķiedru līnijām, lietojot mikrosfēras *OFC* gaismas avotu.
7. *IM/DD WDM-PON* sistēmai ar astoņiem kanāliem 10 Gbit/s un 100 GHz starpkanālu intervālu uztvertā signāla *BER* vērtība ir $2,7 \times 10^{-12}$; $4,3 \times 10^{-11}$; $3,2 \times 10^{-11}$; un $1,2 \times 10^{-6}$ pie attiecīgi 100 kHz, 1 MHz, 10 MHz un 100 MHz nesējsignālu līnijas platumā 50 km garā pārraides līnijā, lietojot mikrosfēras *OFC* gaismas avotu.
8. *IM/DD WDM DCI* sistēmai sliktākajam *BER* kanālam ir sasniegts 20 % *SD-FEC* sliekšnis pie -19,5 dBm un -17 dBm optiskās jaudas attiecīgi ar *NRZ-OOK* modulāciju pie 50 Gbit/s un 60 Gbit/s, kā arī pie -16 dBm optiskās jaudas ar *PAM-4* modulāciju pie 100 Gbit/s, lietojot mikrostieņa *OFC* gaismas avotu.

Promocijas darba laikā iegūtie un pētījumos attēlotie rezultāti prezentēti sešos zinātniskajos oriģinālrakstos, vienā zinātniskajā konferencē (indeksētas *Scopus*, *IEEE* vai *Web of Science*). Papildus tam pētījumu rezultāti prezentēti četrās zinātniskajās konferencēs (nav indeksēti *Scopus*, *IEEE*, *Web of Science*).

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. T. Bottger, G. Ibrahim, B. Vallis. How the Internet reacted to Covid-19 – A perspective from Facebook’s Edge Network, IMC’20, Oct. 27–29, Virtual Event, USA. DOI: doi.org/10.1145/3419394.3423621.
2. J. Malmodin, and D. Lunden. The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015, MDPI Sustainability, 10, 3027, 2018. DOI: doi.org/10.3390/su10093027.
3. C. Freitag, M. Berners-Lee, K. Widdicks, B. Knowles, G. S. Blair, and A. Friday. The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, Patterns, vol. 2, iss. 9, 100340, Sept. 10, 2021. DOI: doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340.
4. A. Jahid, S. Hossain, K. H. Monju, F. Rahman, and F. Hossain. Techno-Economic and Energy Efficiency Analysis of Optimal Power Supply Solutions for Green Cellular Base Stations, IEEE Access, vol. 8, 2020, pp. 43776–43795. DOI: doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973130.
5. A. S. Raja, S. Lange, M. Karpov, K. Shi, X. Fu, R. Behrendt, D. Cletheroe, A. Lukashchuk, I. Haller, F. Karinou, B. Thomsen, K. Jozwik, J. Liu, P. Costa, T. J. Kippenberg, and H. Ballani. Ultrafast optical circuit switching for data centers using integrated soliton microcombs, Nat. Commun., 12, art. no. 5867, 2021. DOI: doi.org/10.1038/s41467-021-25841-8.
6. Finisar Corporation, Product Specification, 100G 20km eLR4 QSFP28 Optical Transceiver Module (WDM-20), 2021, pp. 7.
7. Eoptolink Technology Inc., Ltd., Product Specification, 100GBASE-SR10 100m CXP Optical Transceiver Module, 2014, pp. 12.
8. ITU-T, Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid (G.694.1), 2020, pp. 16.
9. 40-Gigabit-Capable Passive Optical Networks 2 (NG-PON2: Physical Media Dependent (PMD) Layer Specification, document ITU-T Rec. G.989.2, International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2019, pp. 1–114.
10. IEEE P802.3cs. Increased-reach Ethernet optical subscriber access (Super-PON) Task Force. Pieejams online: <https://www.iee802.org/3/cs/index.html>.
11. Lin. G., Diallo S., Chembo Y. K. Optical Kerr frequency combs: Towards versatile spectral ranges and applications, 2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Budapest, 2015, pp. 1–4. DOI: doi.org/10.1109/ICTON.2015.7193612.
12. Del’Haye, P. et al. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator, Nature, 450, 1214–1217, 2007. DOI: doi.org/10.1038/nature06401.

13. T. Tanabe, S. Fujii, and R. Suzuki. Review on microresonator frequency combs, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 58, art. no. SJ0801, July 2019. DOI: doi.org/10.7567/1347-4065/ab2aca.
14. Savchenkov A. A., Matsko A. B., Maleki L. On Frequency Combs in Monolithic Resonators, *Nanophotonics*, 5, 363–391 (2016). DOI: doi.org/10.1515/nanoph-2016-0031.
15. Pfeifle J., Lauermaun M., Wegner D., Brasch V., Herr T., Hartinger K., Li J., Hillerkuss D., Schmogrow R., Holtzwarth R., Freude W., Leuthold J., Kippenberg T. J., Koos C. Coherent terabit communications with microresonator Kerr frequency combs, *Nat. Photonics*, 8, 375 (2014). DOI: doi.org/10.1038/nphoton.2014.57.
16. P. Liao, C. Bao, A. Almainan, A. Kordts, M. Karpov, M. H. P. Pfeiffer, L. Zhang, F. Alishahi, Y. Cao, K. Zou, A. Fallahpour, A. N. Willner, M. Tur, T. J. Kippenberg and A. E. Willner. Demonstration of Multiple Kerr-Frequency-Comb Generation Using Different Lines From Another Kerr Comb Located Up To 50 km Away, *J. Light. Technol.*, vol. 37, 579 (2019). DOI: doi.org/10.1109/JLT.2019.2895851.
17. Lucas E., Jost J. D., Kippenberg T. J., Beha K., Lezius M., Holzwarth R. “Soliton-Based Optical Kerr frequency Comb for Low-Noise Microwave Generation”, Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), Besancon, 2017, 9–13 July. DOI: doi.org/10.1109/FCS.2017.8088949.
18. Avino S., Giorgini A., Malara P., Gagliardi G., Natale P. D. Investigating the resonance spectrum of optical frequency combs in fiber-optic cavities, *Opt. Express*, 21, 13785 (2013). DOI: doi.org/10.1364/OE.21.013785.
19. Pfeifle J. Terabit-Rate Transmission Using Optical Frequency Comb Sources, *Karlsruhe Series in Photonics & Communication*, 20, (2017).
20. Levy J. S., Gondarenko A., Foster M. A., Turner-Foster A. C., Gaeta A. L., Lipson M. CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects, *Nat. Photonics*, 4, 37 (2010). DOI: doi.org/10.1038/nphoton.2009.259.
21. Foster M. A., Levy J. S., Kuzucu O., Saha K., Lipson M., Gaeta A. L. Silicon-based monolithic optical frequency comb source, *Opt. Express*, 19, 14233 (2011). DOI: doi.org/10.1364/OE.19.014233.
22. Kurbatska I., Bobrovs V., Alsevska A., Lyashuk I., Gegere L. “Spectral effective solutions for mixed line rate WDM-PON systems”, (2017) *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 2017 pp. 1771–1777. DOI: doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262037.
23. Liopis O., Merrer P. H., Bouchier A., Saleh K., Cibiel G. “High-Q optical resonators: characterization and application to stabilization of lasers and high spectral purity oscillators”, *Proceeding of SPIE*, San Francisco, January 2010, pp. 10. DOI: doi.org/10.1117/12.847164.
24. A. J. Maker, A. M. Armani. Fabrication of silica ultra high quality factor microresonators, *J. Vis. Exp.*, vol. 65, 2012, art. no. 4164. DOI: doi.org/10.3791/4164.

25. J. P. Laine, C. Tapalian, B. Little, H. Haus. Acceleration sensor based on high-Q optical microsphere resonator and pedestal antiresonant reflecting waveguide coupler, *Sens. Actuat. A-Phys.*, vol. 93, 2001, pp. 1–7. DOI: doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00636-7.
26. K. Cogne. “Hybridization of open photonic resonators,” (University of Amsterdam, University of Bordeaux 2020).
27. L. D. Bino, J. M. Silver, M. T. M. Woodley, S. L. Stebbings, X. Zhao, and P. Del’Haye. Microresonator isolators and circulators based on the intrinsic nonreciprocity of the Kerr effect, *Optica*, vol. 5, no. 3, pp. 279–282, March 2018. DOI: doi.org/10.1364/OPTICA.5.000279.
28. Pasquazi, A.; Peccianti, M.; Razzari, L. et al. Micro-combs: A novel generation of optical sources. *Phys. Rep.* 2018, 729, 1–81. DOI: doi.org/10.1016/j.physrep.2017.08.004.
29. Liang W., Matsko A. B., Savchenkov A. A., Ilchenko V. S., Seidel D., Maleki L. “Generation of Kerr Combs in MgF₂ and CaF₂ Microresonators”, 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS) Proceedings, San Francisco, 2011. DOI: doi.org/ 10.1109/FCS.2011.5977756.
30. Anashkina E. A., Sorokin A. A., Marisova M. P., Andrianov A. V. Development and numerical simulation of spherical microresonators based on SiO₂ – GeO₂ germanosilicate glasses for generation of optical frequency combs, *Quantum Electron.*, 49, 371 (2019). DOI: doi.org/10.1070/QEL16963.
31. Song Z., Lei S., Linhao R., Yanjing Z., Bo J., Bowen X., Xinliang Z. Controllable Kerr and Raman-Kerr frequency combs in functionalized microsphere resonators, *Nanophotonics*, 8, 2321 (2019). DOI: doi.org/10.1515/nanoph-2019-0342.
32. Savchenkov A. A., Matsko A. B., Ilchenko V. S., Solomatine I., Seidel D., Maleki L. Tunable Optical Frequency Comb with a Crystalline Whispering Gallery Mode Resonator. *Phys. Rev. Lett.*, 101, 093902 (2008). DOI: doi.org/ 10.1103/PhysRevLett.101.093902.
33. I. S. Grudinin, N. Yu and L. Maleki. Generation of optical frequency combs with a CaF₂ resonator, *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 7, April 1, 2009. DOI: doi.org/10.1364/OL.34.000878.
34. Kippenberg, T. J., et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators, *Science*, 361, eaan8083, 2018. DOI: doi.org/10.1126/science.aan8083.
35. Bogaerts W., De Heyn P., Vaerenbergh T. V., De Vos K., Selvaraja S. K., Claes T., Dumon P., Bienstman P., Van Thorhout D., Baets R. Silicon microring resonators, *Laser Photonics Rev.*, 6, 47 (2012). DOI: doi.org/10.1002/lpor.201100017.
36. Agha I. H., Okawachi Y., Gaeta A. L. Theoretical and experimental investigation of broadband cascaded four-wave mixing in high-Q microspheres, *Opt. Express*, 17, 16209 (2009). DOI: doi.org/10.1364/OE.17.016209.
37. Fuji, S., Tanabe, T. Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation, *Nanophotonics*, 9 (5), 2019-0497 (2020). DOI: doi.org/10.1515/nanoph-2019-0497.

38. Demirtzioglou I., Lacava C., Bottrill K. R. H., Thomson D. J., Reed G. T., Richardson D. J., Petropoulos P. Frequency comb generation in a silicon ring resonator modulator, *Opt. Express*, 26, 790 (2018). DOI: doi.org/10.1364/OE.26.000790.
39. E. A. Anashkina, M. P. Marisova, A. V. Andrianov, R. A. Akhmedzhanov, R. Murnieks, M. D. Tokman, L. Skladova, I. V. Oladyshkin, T. Salgals, I. Lyashuk, A. Sorokin, S. Spolitis, G. Leuchs, and V. Bobrovs, Microsphere-based optical frequency comb generator for 200 GHz spaced WDM data transmission system, *Photonics*, vol. 7, no. 3, Sep. 2020, Art. no. 72. DOI: doi.org/10.3390/photonics7030072.
40. Fülöp, A. Mazur, M. Lorences-Riesgo, A. Helgason, Ó. B. Wang, P. H. Xuan, Y. Leaird, D.E. Qi, M. Andrekson, P.A. Weiner, A.M. Torres-Company, V. High-order coherent communications using mode-locked dark-pulse Kerr combs from microresonators. *Nat. Commun.* 2018, 9, 1598. DOI: doi.org/10.1038/s41467-018-04046-6.
41. Wang, Y. Anderson, M. Coen, S. Murdoch, S. G. Erkintalo, M. Stimulated Raman scattering imposes fundamental limits to the duration and bandwidth of temporal cavity solitons. *Phys. Rev. Lett.* 2018, 120, 053902. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.053902.
42. Milián, C.; Gorbach, A. V.; Taki, M.; Yulin, A. V.; Skryabin, D. V. Solitons and frequency combs in silica microring resonators: Interplay of the Raman and higher-order dispersion effects. *Phys. Rev. A* 2015, 92, 033851. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevA.92.033851.
43. Salgals, T.; Alnis, J.; Ozolins, O.; Andrianov, A.V.; Anashkina, E.A.; Brice, I.; Berkis, R.; Pang, X.; Udalcovs, A.; Porins, J.; Spolitis, S.; Bobrovs, V. Silica Microsphere WGMR-Based Kerr-OFC Light Source and Its Application for High-Speed IM/DD Short-Reach Optical Interconnects. *Appl. Sci.* 2022, 12, 4722. DOI: doi.org/10.3390/app12094722.
44. M. G. Suh, and K. J. Vahala. Soliton microcomb range measurement, *Science*, vol. 359, iss. 6378, pp. 848–887, 2018. DOI: doi.org/10.1126/science.aao1968.
45. D. C. Cole, E. S. Lamb, P. Del’Haye, S. A. Diddams, and S. B. Papp. Soliton crystals in Kerr resonators, *Nat. Photon.*, vol. 11, pp. 671–676, 2017. DOI: doi.org/10.1038/s41566-017-0009-z.
46. X. Xue, P. H. Wang, Y. Xuan, M. Qi, and A. M. Weiner. Microresonator Kerr frequency comb with high conversion efficiency, *Laser Photonics Rev.*, vol. 11, iss. 1, art. no. 1600276, 2017. DOI: doi.org/10.1002/lpor.201600276.
47. A. Udalcovs, T. Salgals, L. Zhang, X. Pang, A. Djupsjöbacka, S. Spolitis, V. Bobrovs, S. Popov, and O. Ozolins. Optical Power Budget of 25+ Gbps IM/DD PON with Digital Signal Post-Equalization, *Appl. Sci.*, 10, 6106 (2020). DOI: doi.org/10.3390/app10176106.
48. IXblue Photonics “MX-LN series 1550 nm band Intensity Modulators,” Technical Specification, 1–6, 2019.

49. Characteristics of a Single-Mode Optical Fibre and Cable, document ITU- T Rec. G.652, International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2016, pp. 1–17.
50. Characteristics of a Non-Zero Dispersion-Shifted Single-Mode Optical Fibre and Cable, document ITU-T Rec. G.655, International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2009, pp. 1–17.
51. Characteristics of a Cut-Off Shifted Single-Mode Optical Fibre and Cable, document ITU- T Rec. G.654, International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2020, pp. 1–16.
52. X. Pang, O. Ozolins, S. Gaiarin, M. I. Olmedo, R. Schatz, U. Westergren, D. Zibar, S. Popov, and G. Jacobsen, Evaluation of high-speed EML-based IM/DD links with PAM modulations and low-complexity equalization, ECOC, Dusseldorf, 2016, pp. 1–3.
53. M. W. Harrington, G. M. Brodrik, T. C. Briles, J. R. Stone, R. H. Streater, S. B. Papp, and D. J. Blumenthal. Kerr Soliton Microcomb Pumped by an Integrated SBS Laser for Ultra-Low Linewidth WDM Sources. Optical Fiber Communication Conference, San Diego, California USA, 8–12 March, 2020. DOI: doi.org/10.1364/OFC.2020.T4G.6.
54. Chan, C. C. K. Optical Performance Monitoring. Advanced Techniques for Next-Generation Photonic Networks. Elsevier: London, UK, 2010.
55. S. T. Ahmad, P. D. Lakshmijayasimha, A. K. Anandarajah, C. Browning, P. M. Anandarajah. Active Demultiplexer-enabled Directly Modulated DMT Transmission Using Optical Frequency Combs for Data Center Interconnects, *J. Light. Technol.* 39 (17), 5468–5473 (2021). DOI: doi.org/10.1109/JLT.2021.3091959.
56. S. Fujii, S. Tanaka, T. Ohtsuka, S. Kogure, K. Wada, J. Kumazaki, S. Tasaka, Y. Hashimoto, Y. Kobayashi, T. Araki, K. Furusawa, N. Sekine, S. Kawanishi, and T. Tanabe, Dissipative Kerr soliton microcombs for FEC-free optical communications over 100 channels, *Opt. Express*, 30 (2), 1351–1364 (2022). DOI: doi.org/10.1364/OE.447712.



Rihards Mūrnieks dzimis 1996. gadā Jūrmalā. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis inženierzinātņu bakalaura grādu elektrozinātnē (2018) un inženierzinātņu maģistra grādu telekomunikācijās (2020; ar izcilību). 2018. gadā sāka strādāt RTU par zinātnisko asistentu. Patlaban ir RTU pētnieks un lektors, 13 zinātnisko publikāciju, kas publicētas vadošajos industrijas zinātniskajos žurnālos un prezentētas konferencēs, līdzautors. Pētniecības darbu veic tādos virzienos kā optiskās frekvenču ķemmes nelineāros mikrorezonatoros, nelineārā optika, optiskie piekļuves tīkli un datu centru starpsavienojumi. Bakalaura studiju laikā bija Elektronikas un telekomunikāciju fakultātes pašpārvaldes biedrs, 2018. gadā iekļauts RTU Zelta fondā, 2022. gadā ieguvis RTU Atzinības rakstu par nozīmīgu personīgo ieguldījumu RTU attīstībā, sveicot RTU 160 gadu jubilejā.