

Latvijas Elektrisko un optisko iekārtu ražošanas nozares kompetences centrs

Projekts Nr. 5.1.1.2.i.0/1/22/A/CFLA/002

Pētījums	Nr.	Uz čipa veidots optiskās frekvenču ķemmes 1.16 gaismas avots (CHIP-comb)
Īstenotājs	AS ALFA RPAR un Rīgas Tehniskā universitāte	
Pētījuma periods	01.03.2024.-31.12.2024.	
	Gala nodevums	

[Rīga, Latvija]

[31.12.2024.]

I. Pētījuma rezultātu kopsavilkums

Projektā tika pētīts un ieviests optiskās frekvenču ķemmes (OFC) risinājums, kura pamatā ir toroidāls mikrorezonators, līdz ar to tika veikta progresīvas pieejas izstrāde un jauninājuma ieviešana integrētās fotonikas jomā. Primārais projekta mērķis bija izmantot mikrorezonatoru unikālās īpašības, lai izveidotu stabilu un efektīvu OFC gaismas avotu uz optiskā čipa. Konkrētais projektā paredzētais tehnoloģiskais risinājums sakrīt ar plašākiem pasaules mērogā izvirzītajiem mērķiem, proti, virzīt uz priekšu *miniatūrizētas* integrētas fotonikas sistēmas attīstību plašiem lietojumu scenārijiem, piemēram - telekomunikācijās, meteoroloģijā un kvantu risinājumos.

Šī projekta "*Uz čipa veidots optiskās frekvenču ķemmes gaismas avots (CHIP-comb)*" galvenais mērķis bija izstrādāt energoefektīvu uz optiskā čipa veidotu toroidālo čukstošās galerijas modu (angl. *whispering gallery mode (WGM)*) augsta Q faktora mikrorezonatoru kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam. Tika veikta "mikro-lāzera" optiskā čipa izveide, kura pamatā ir WGM mikrorezonatori, t.i. pārskatājamai OFC ģenerēšanai. Primāri, tika veikta uz čipa veidota toroidāla mikrorezonatora projektēšana un izstrāde. Rezultātā tika izstrādāts izmaksu efektīvs WGM mikrolāzers stabilu un pārskatājamu (*optisko harmoniku*) nepārtrauktu viļņu (angl. *continuous wavelenght (CW)*) ģenerēšanai optiskajā C-joslā (1530–1565 nm), ar potenciālu izmantošanai arī plašākā optiskajā diapazonā.

II. Gala nodevums

1. Ievads

Šis projekts ir vērsts uz čipa veidota optiskās frekvenču ķemmes gaismas avota izveidi, kas ir inovatīvs risinājums. Optiskās frekvenču ķemmes (angl. *optical frequency comb (OFC)*) izveide, izmantojot optisko čipu platformu (*tā saukto fotonisko integrālo shēmu (angl. photonic integrated circuit (PIC)) jeb integrēto optisko fotoniku*), ir nozīmīgs tehnoloģisks sasniegums, kas ietver *miniatūrizāciju*, rentabilitātes paaugstināšanu un uzlabotu veiktspēju. Uz čipa integrētā fotonika nodrošina nākamo tehnoloģisko risinājuma soli fotonikā, sniedzot precīzus un efektīvus frekvences mērījumus kompaktā formā. Šis jauninājums nodrošina inovatīvus risinājumus tādās jomās kā telekomunikācijas, kur tas var ievērojami uzlabot šķiedru optisko sakaru sistēmu pārraides ātrumu kanālā, nodrošinot energoefektīvu un spektrāli efektīvu sistēmas arhitektūru, kā arī vides monitoringā un medicīniskajā diagnostikā, kur fiziskajiem iekārtas izmēriem (mikrometru skalā) ir liela nozīme. Turklāt uz optiskā čipa veidotam OFC gaismas avotam ir potenciāls integrācijai ar citiem fotoniskajiem elementiem, kas paver jaunas iespējas uzlabotā skaitļošanā un signālu apstrādē. Uz optiskā čipa veidotā OFC nodrošinātās iespējas, kā arī to zemās enerģijas prasības, viennozīmīgi izvirza šo inovatīvo tehnoloģijas risinājumu zinātniskās pētniecības un komerciālo lietojumu priekšgalā.

Potenciāli ekonomiski izdevīgākais risinājums OFC ģenerēšanai ir, izmantojot mikrorezonatoru, kas tiek realizēts kā augstas kvalitātes (augsts Q faktors) optiskais rezonators ar Kerra (angl. *John Kerr*) nelinearitāti, pumpēšanai izmantojot vienu nepārtraukta viļņa CW lāzera gaismas avotu. Kad ir izpildīti optimālie nosacījumi, pumpējošā gaismas avota fotoni tiek pārdalīti, izmantojot četru viļņu mijiedarbību (angl. *four-wave mixing (FWM)*) blakus esošajās modās, tādējādi izveidojot tā saukto Kerra OFC. Pumpējošā avota optiskais signāls tiek ievadīts Kerra-

OFC mikrorezonatorā caur patievināto optisko šķiedru, un šīs patievinātās šķiedras izvadā tiek ģenerēta OFC. Turklāt Kerra OFC ir konceptuāli vienkārši un strukturāli izturīgi OFC ģeneratori ar ļoti kompaktu izmēru. Kerra OFC mikrorezonators var sasniegt simtiem nanometru joslas platumu, kas aptver vairākas (piemēram, E -, S-, C- un L-) telekomunikāciju joslas (saskaņā ar ITU-T G. 694.1 rekomendāciju).

Projekta pētniecības kategorija ir klasificējama kā rūpnieciskie pētījumi ar eksperimentālo izstrādi. Atbilstoši projekta laikā tika izstrādāts energoefektīvs uz optiskā čipa veidots WGM toroidālo augsta Q faktora mikrorezonators kā jauns gaismas avots un validēts ātrgaitas šķiedru optiskās sakaru sistēmas infrastruktūrā (sasniedzot TRL6 līmeni). Projekta realizācijas gaitā tika demonstrēts izstrādātais mikrorezonators uz optiskā čipa (mikrolāzers) un ģenerētā OFC kā C-joslas gaismas avots datu pārraidei vienmodas optiskās šķiedras (SMF) sakaru sistēmas risinājumos.

Pētījuma īstenošanā ir ievēroti efektīvas sadarbības nosacījumi saskaņā ar MK noteikumu Nr. 418 86.2. punktu "Pētniecības projekta ietvaros ir efektīva sadarbība Komisijas regulas Nr. 651/2014 2. panta 90. punkta izpratnē ar vismaz vienu pētniecības un zināšanu izplatīšanas organizāciju un pētniecības un zināšanu izplatīšanas organizācija sedz vismaz 10% no kopējām attiecināmajām izmaksām, un tai ir tiesības publicēt sava pētījuma rezultātus".

2. Projekta starpposmi

Ietver: **4 progresu pārskata (PP) atskaites un 1 starpposma nodevumu:**

- **Progresu pārskata (PP) periods 01.03.2023.-31.03.2023.** – “Matemātisks modelis modelēšanas vidē, kas spēj definēt WGM rezonatora uz čipa fiziskos parametrus.”
- **Progresu pārskata (PP) periods 01.04.2024.-30.06.2024.** – “Izstrādāta detalizēta toroidālā mikrorezonatora dizaina specifikācija, iekļaujot optimālās ģeometrijas un materiālus, pamatojoties uz literatūras apskatu.”
- **Progresu pārskata (PP) periods 01.07.2024.-30.09.2024.** – “ (1) Optiskā čipa platformas - sastāv no vairākiem toroidāliem rezonatoriem uz vienas platformas. (2) Noteiktas optimālas metodes savienojuma stāvoklim (mikrorezonators un patievinātā optiskā šķiedra vai cits risinājums).”
- **Progresu pārskata (PP) periods 01.10.2024. – 31.12.2024.** – “ (1) Mērījumu datu kopa izstrādātajam energoefektīvam uz čipa veidotam WGM toroidālā augsta Q faktora mikrorezonatoram kā jaunam gaismas avotam. (2) Sagatavota 1 zinātniskā publikācija, sagatavoti projekta izpētes dati (publikācija tiks indeksēta SCOPUS datubāzē, un tās ir AS ALFA RPAR un RTU kopdarbs).”
- **Progresu pārskata (PP) periods 01.03.2024.-31.08.2024. – Starpposms Nr. 1**

3. Izmantotās metodes

***Sasniedzamais rezultāts:**

1. Matemātiskais modelis matemātiskās modelēšanas vidē, kas spēj definēt WGM mikrorezonatoru fiziskos parametrus;
2. Optisko čipu dizains (uz optiskā čipa veidoti toroidālie rezonatori), tehniskā raksturojuma topoloģija;
3. Izveidotas optisko čipu platformas (uz optiskā čipa veidoti toroidālie rezonatori);
4. Mērījumu datu kopa izgatavotajām uz optiskā čipa mikrorezonatoru platformām un izstrādātajam energoefektīvam uz čipa veidotam WGM toroidālā augsta Q faktora mikrorezonatoram kā jaunam gaismas avotam plašam lietojumu klāstam;
5. Sagatavota un iesniegta vismaz 1 zinātniskā publikācija vai patents, kas ir AS ALFA RPAR un RTU kopdarbs.

***Lietotās metodes:**

1. Veikt visaptverošu esošo mikrorezonatoru konstrukciju un OFC ģenerēšanas metožu pārskatu **(RP)**;
2. Matemātiskā modelēšana (COMSOL, Lumerical, Matlab u.c.) programmatūras vidēs t.i. optisko čipu dizaina izveide **(RP)**;
3. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora optiskās čipa platformas izveide (šī darbība ietver dažādu optisko ķemmes avotu ierīču dizaina izstrādi, kuras ražos AS ALFA RPAR) **(RP)**;
4. Savienojuma stāvokļu (mikrorezonators un patievinātā optiskā šķiedra vai cits savienojuma risinājums) scenāriju novērtējums **(RP)**.
5. Izstrādāt energoefektīvu uz optiskā čipa veidotu toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatoru kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam un veikt eksperimentālos testus un mērījumus **(EI)**;
6. Energoefektīva uz čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora kā jauna gaismas avota izolācija no ārējās vides ietekmes (optiskā čipa iepakojšana) **(EI)**.

4. Rezultāti

1. Matemātisks modelis modelēšanas vidē, kas spēj definēt WGM rezonatora uz čipa fiziskos parametrus **(RP)**;
2. Izstrādāta detalizēta toroidālā mikrorezonatora dizaina specifikācija, iekļaujot optimālās ģeometrijas un materiālus, pamatojoties uz literatūras apskatu **(RP)**;
3. Optiskā čipa platformas - sastāv no vairākiem toroidāliem rezonatoriem uz vienas platformas **(RP)**;
4. Noteiktas optimālas metodes savienojuma stāvoklim (mikrorezonators un patievinātā optiskā šķiedra vai cits risinājums) **(RP)**.
5. Mērījumu datu kopa izstrādātajam energoefektīvam uz čipa veidotam WGM toroidālā augsta Q faktora mikrorezonatoram kā jaunam gaismas avotam **(EI)**;

6. Sagatavota 1 zinātniskā publikācija (publikācija tiks indeksēta SCOPUS datubāzē un tā ir AS ALFA RPAR un RTU kopdarbs) (EI) “*Fabrication of On-chip Based WGM Toroidal Microresonators Using Si Lithography and CO2 Laser Techniques*”, autori: Deniss Zurikovs, Ints Murans, Dilan Enrique Ortiz Blanco, Dmitrijs Prigunovs, Janis Alnis, Toms Salgals, Sergejs Marinins, Mareks Parfjonovs, Ilze Andersone, Vjaceslavs Bobrovs.
Publikācija pieņemta publicēšanai *Photonics and Electromagnetics Research Symposium ar Nr. 241206120355*. SCOPUSā tiks atspoguļota 2025. gadā.

7. Darbības

N r.	Aktivitātes nosaukums	RP vai EI	Part neris	2024.03	2024.04	2024.05	2024.06	2024.07	2024.08	2024.09	2024.10	2024.11	2024.12
1	Toroidālā mikrorezonatora uz optiskā čipa projektēšana un izstrāde	RP	ALFA RPA - RTU	X	X	X	X	X	X	X			
2	Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora kā gaismas avota eksperimentāla izstrāde un validācija	EI	RTU - ALFA RPAR						X	X	X	X	X

Pirmkārt, projekta iznākums un potenciāls **nodrošina jauna virziena, jaunas inovatīvas produktu līnijas izveidi AS ALFA RPAR, kuras pamatā tiek izmantota optisko čipu platforma** (tā saukto fotonisko integrālo shēmu (angl. *photonic integrated circuit* (PIC)) jeb integrēto optisko fotoniku). Daudzsološs rezultāts ir inovatīvu PIC produktu un fotonisko moduļu saime, t.sk. energoefektīvs uz optiskā čipa veidots toroidāls WGM augsta Q faktora mikrorezonators kā jauns gaismas avots plašam lietojumu klāstam, kas ir paplašinājis un ieviesis AS ALFA RPAR jauna veida tehnoloģijas līnijas ražošanu izmantojot jau esošo aprīkojumu un **tuvākajā nākotnē palielinās augsta līmeņa tehnoloģiju eksporta apjomu**.

Projekta beigās tika sasniegts tehnoloģijas gatavības līmenis **TRL6 (tehnoloģijas demonstrācija mākslīgi radītā vidē)**, kas ir nepietiekams, lai masveidā sāktu ražot inovatīvu optiskā čipa platformu (integrētās fotonikas saime) t.i. uz čipa veidotu WGM toroidālo augsta Q faktora mikrorezonatoru. Tāpēc pēc projekta pabeigšanas viena līdz divu gadu laikā plānojam attīstīt projekta laikā izstrādāto tehnoloģijas risinājumu līdz **TRL9 (sekmīga sistēmas ekspluatācija)** un otrajā līdz ceturtajā gadā ieviest to ražošanā AS ALFA RPAR. Izmantojot izveidoto jauno inovatīvo produktu līniju (optisko čipu platformu) piektajā gadā plānots sasniegt atbilstošu apgrozījumu.

Otrkārt, OFC gaismas avotiem, kuru pamatā ir integrētā fotonika, ir ievērojams komercializācijas potenciāls dažādās nozarēs to unikālo īpašību un lietojumu dēļ. OFC, kas optiskajā frekvenču diapazonā ģenerē virkni vienādi izvietotu spektrālo līniju (optiskās harmonikas), ir komercializācijas potenciāls dažādās jomās, piemēram:

1. **Telekomunikācijas.** OFC gaismas avotus var izmantot telekomunikācijās liela ātruma datu pārraidei. Spēja ģenerēt daudzus cieši izvietotus viļņu garumus ļauj veikt blīvu viļņgarumdales multipleksēšanu (angl. *dense wavelength division multiplexing* (DWDM)), nodrošinot vairāku datu plūsmu vienlaicīgu pārraidi caru vienu optisko šķiedru.

2. **Datu centri un optiskie starpsavienojumi.** Datu centros, kur liela ātruma datu komunikācija ir ļoti svarīga, datu pārraides efektivitātes uzlabošanai var izmantot optiskās ķemmes. Tās piedāvā lielāku joslas platumu palielinātu datu kapacitātes priekšrocības.
3. **Biomedicīnas lietojumi.** Piemēram, optiskās koherences tomogrāfijā (angl. *optical coherence tomography* (OCT)) OFC atrod pielietojumu biomedicīnas attēlveidošanā. Augsta izšķirtspēja un precīza frekvences kontrole padara tos piemērotus attēlveidošanas metodēm, kurām nepieciešama precīza dziļuma profilēšana, piemēram, oftalmoloģijā tīklenes attēlveidošanai.
4. **Materiālu raksturojums:** OFC ir vērtīgi materiālu raksturošanā, izmantojot tādas metodes kā spektroskopija. Spēja ģenerēt platjoslas spektru ar precīzi kontrolētām frekvencēm uzlabo spēju identificēt un analizēt dažādus materiālus
5. **Frekvences ķemmes sensori.** OFC var izmantot gāzes noteikšanas sensoru risinājumos. Izmaiņas gāzu absorbcijas spektros var noteikt ar augstu jutību, ļaujot izstrādāt kompaktus un ļoti jutīgus gāzes sensorus.
6. **Metroloģija un kalibrēšana.** OFC avoti kalpo kā lieliski instrumenti metroloģijas un kalibrēšanas lietojumos, piemēram, atomu pulksteņiem. Tie nodrošina stabilu un precīzu frekvences atsauci, kas ir būtiska, lai nodrošinātu dažādās jomās un ražošanas procesos izmantoto mērinstrumentu precizitāti.
7. **Kvantu informācijas apstrāde un kvantu komunikācija.** Jaunajā kvantu informācijas apstrādes jomā optiskajām ķemmēm var būt nozīme kvantu stāvokļu radīšanā un to manipulēšanā. Tie var veicināt kvantu sakaru sistēmu attīstību.

Ražošanas uzņēmumiem OFC avota iekļaušana produktu sarakstā tieši atvērs jaunus tirgus iespējas un palielinās ienākumus, jo tam ir daudz pielietojumu dažādās nozarēs, t.sk. iepriekš minētajās nozarēs.

8. Kopsavilkums

1. Veikt visaptverošu esošo mikrorezonatoru konstrukciju un OFC ģenerēšanas metožu pārskatu (RP).

**Vispārējs čukstošās galerijas modu (WGM) rezonatoru novērtējums.*

Optiskās frekvenču ķemmes (OFC) ģeneratori tiek izmantoti dažādos lietojumos, tostarp optiskajos pulksteņos, RF fotoniskos oscilatoros ar rekordaugstu spektrālo tīrību, zemas fāzes trokšņa mikroviļņu sakaros, kā arī optiskajos sakaros, t.i., telekomunikāciju sistēmās. Var redzēt, ka kopš ieviešanas, optiskās frekvences ķemmes OFC spēlē nozīmīgu lomu daudzos atklājumos un lietojumos. Lielāka uzmanība tiek pievērsta optiskajiem sakariem. Parastais viļgarumdales blīvēšanas WDM multiplekseris apvieno vairākus lāzerus, lai ģenerētu frekvenču režģi, t.i., lai to izmantotu WDM optiskajiem kanāliem. Mikroshēmas mēroga mikrorezonatora ķemme rada visu režģi ar vienādi izvietotām optiskām harmonikām, kas nepieciešamas kanālu uzturēšanai. Parastie optiskie ķemmes ģeneratori ir balstīti uz femtosekundes lāzeriem, tāpēc frekvenču ķemmes ģeneratoru integrēšana mikroshēmā ir problemātiska. Tomēr tika parādīts, ka Kerra frekvences ķemme OFC var tikt ģenerēta mijiedarbojoties ar zināmas frekvences nepārtraukto viļņu sūkņa lāzeru un ar čukstošās galerijas modu (angl. *whispering gallery mode* (WGM) rezonatoru. Šeit

frekvenču ķemmes ģenerēšana balstās uz četru viļņu sajaukšanas (*FWM*) procesu, kas notiek rezonatorā [1-4].

WGM rezonators kā Kerr ķemmes avots ir ievērojami vienkāršāks un mazāks nekā parasto ķemmes ģeneratoru avoti, kuru pamatā ir femtosekundes lāzeri, un demonstrē izcilu frekvences stabilitāti mikrorezonatora vides stabilitātes dēļ. Mikrorezonatori ir mazi – diametrs no mm līdz μm , tāpēc ir iespējama integrācija mikroshēmā, un tas jau ir pierādīts [5, 6]. Tā kā parametriskajam pastiprinājumam piemīt platjoslas raksturs, izmantojot WGM rezonatorus, ir iespējams ģenerēt diskrētus ķemmes režīmus 500 nm platā diapazonā (~ 70 THz) aptuveni 1550 nm, nepaļaujoties uz ārēju spektra paplašināšanos [7].

***WGM rezonatoru klasifikācija**

Mikrorezonatorus klasificē galvenokārt pēc ražošanas veida. Ir telpiskie čukstošās galerijas modas režīma (WGMR) rezonatori un integrēti WGMR rezonatori. Telpiskie WGMR ir monolīti mikrorezonatori, un tiem ir sfēriska, cilindriska, toroidāla un gredzenveida ģeometrija. Lielapjoma sfēriskie rezonatori bija pirmā tehnoloģija, kas izstrādāta mikromēroga lielapjoma sfērām – silīcija dioksīda mikrosfēras ar ļoti augstiem Q koeficientiem (līdz 10^{10}) tika izgatavotas, izmantojot silīcija dioksīda optiskās šķiedras gala kausēšanas metodi. Lai izgatavotu sfēras ar simtiem mikronu diametru, tika izmantotas dažādas metodes, piemēram, elektriskā loka sildīšana, udeņraža liesma vai lāzera atkārtota plūsma (piemēram, ar CO₂ lāzeru). Rezonatori ar augstu Q koeficientu tika iegūti arī ar litogrāfisku pieeju papildus kausēšanai ar CO₂ lāzeru, izmantojot atkārtotu plūsmu. Pavisam nesen līdzīgs Q koeficients tika sasniegts, izmantojot lāzera apstrādes tehniku, kur mikrostieņi tiek definēti ar CO₂ lāzeru, veidojot un pulējot silīcija stieni. Tomēr šīs metodes nevar izmantot, lai ražotu mikrorezonatorus no kristāliskiem materiāliem. Šāda veida mikrorezonatoriem ir jāizmanto slīpēšanas un pulēšanas metodes [8].

No otras puses, integrētie WGMR tiek ražoti, pamatojoties uz SOI (*silīcija uz izolatora*) tehnoloģijas, jo SOI ir ļoti augsta Kerr nelinearitāte, kas ir galvenā sastāvdaļa optisko frekvenču ķemmes ģenerēšanai.

Ar komplementāru metāls-oksīds-pusvadītājs (*angl. Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)*) saderīgas platformas, ko izmanto rezonatoru ražošanā, ietver silīcija nitrīdu (Si₃N₄) [8].

Telpiskās čukstošās galerijas režīma rezonatori:

- Mikrosfēras rezonatori;
- Mikrorezonatori, kas izmanto litogrāfisko pieeju papildus kausēšanai ar CO₂ lāzeru;
- Mikrorezonatori, izmantojot lāzera apstrādes metodes;
- Pulēti mikrorezonatori – kristāliskie rezonatori:
- Kalcija fluorīda (CaF₂) rezonatori;
- Magnija fluorīda (MgF₂) rezonatori;

Integrēti čukstu galerijas režīma rezonatori:

- Silīcijs uz izolatora:
 - Silīcija nitrīds (Si₃N₄ mikrorezonatori);
 - Silīcija oksinitrīdi (SiO_xN_x);
 - Hydex stikla mikrorezonatori.

****Realizācija pēc WGM rezonatora ieviešanas veida frekvences ķemmes ģeneratoram***

*****Gredzenveida WGM rezonatori frekvenču ķemmes ģeneratoram***

Uz WGM rezonatoru balstīta frekvences ķemmes ģeneratora realizāciju var panākt, izmantojot optiskos savienotājus, lai izveidotu gredzena rezonatoru OFC ģenerēšanai. Šādu gredzenu rezonatoru realizācija veikta [9, 10]. Eksperimentā augsta Q rezonators sastāv no 2 m polarizāciju uzturošas (PM) šķiedras [9]. Šajā demonstrācijā rezonatorā tiek izmantota zema savienojuma attiecība (5%), lai panāktu darbību kritiskās savienojuma tuvumā. Rezonators sastāv no noskaņojama savienotāja ar diviem tā šķiedru galiem, kas savienoti kopā, veidojot šķiedras gredzenu. Savienojuma attiecību kontrolē divu pulētu optisko šķiedru šķērsvirziena atdalīšana, kas uzstādīta saskarē. Attiecīgais brīvais spektrālais diapazons (FSR) ir 100 MHz. Sūknis vispirms tiek pārraidīts caur fāzes modulatoru (modulēts pie 20 MHz) un pēc tam caur pusvadītāju optisko pastiprinātāju, lai palielinātu izejas jaudu līdz 15 mW. Kritiskā savienošana notiek pie savienojuma attiecības 1.3% ar rezonanses līnijas platumu 420 kHz, kas nozīmēja, ka šķiedras rezonators sasniedz raksturīgo $Q = 9.2 \times 10^8$. Lai maksimāli palielinātu izejas jaudas savienojuma attiecību par 5,6%, kur noslogotais dobums Q tiek samazināts līdz 1.7×10^8 . Pie 50% savienojuma, dobums Q ne tikai pasliktinās, salīdzinot ar darbību kritiskā savienojumā, bet arī lielākā daļa ieejas jaudas apiet rezonatoru un kļūst nelietojams. Bieži vien rezonatora garums tiek palielināts par vairāk nekā 1 kārtu, lai kompensētu Q degradāciju, kas savukārt rada sistēmas nestabilitāti vairāku svārstību režīmu un paaugstinātas jutības pret vides traucējumiem dēļ [9].

Vēl viena frekvenču ķemmes ģeneratora realizācija, izmantojot savienotājus, ir balstīta uz optoelektronisko oscilatoru (OEO). Frekvences ķemmes ģeneratora sadaļa (*pamatojoties uz optiskās atgriezeniskās saites cilpu*) ir ievietota OEO cilpā. OEO tiek izmantots, lai ģenerētu atsaucē mikroviļņu avotu, kas nosaka ģenerēto ķemmes līniju frekvences atstatumu. Tādējādi OEO svārstību laikā vienlaikus var ģenerēt platjoslas optiskās frekvences ķemmi un zemas fāzes trokšņa mikroviļņu signālu [10].

*****Kristāliski mikrosfēras WGM rezonatori frekvenču ķemmes ģeneratoram***

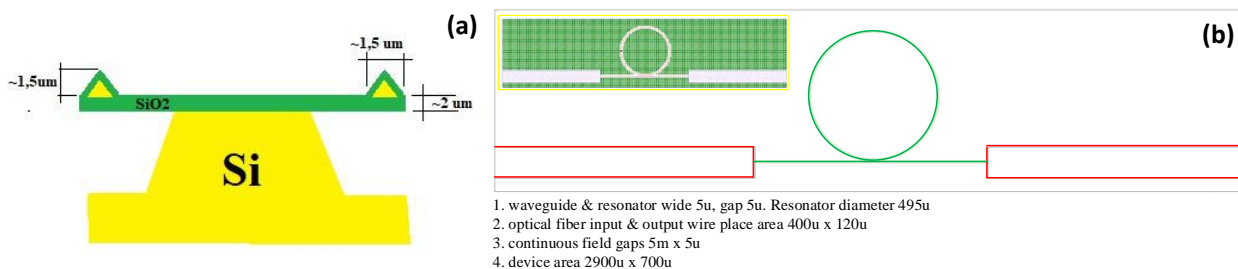
Frekvences ķemmes ģeneratoru realizācijā, kas ietver mikrosfēras vai mikrodobuma mikrorezonatorus, dielektriskie mikrorezonatori ir veidoti kā cilindrs, sfēra vai toroīds, kuru izmēri svārstās no dažiem desmitiem mikrometru līdz dažiem milimetriem. Tā kā lielapjoma materiāliem ir mazi zudumi un rezonatoriem ir gludas virsmas, ir iespējams ierobežot gaismu šajās mikrosfērās (kristāliskajos) mikrorezonatoros uz dažām mikrosekundēm, kas ir pietiekami, lai radītu frekvenču ķemmes. Brīvais spektrālais diapazons FSR svārstās no dažiem gigaherci (GHz) līdz dažiem teraherci (THz) atkarībā no rezonatora galvenā rādiusa un to augstajiem iekšējās kvalitātes faktoriem, kas var sasniegt $Q=1 \times 10^{10}$. Tipiskā WGM ķemmes ģeneratora shēma sastāv no nepārtraukta viļņa (CW) lāzera, polarizācijas kontrollera, pēc kura gaisma tiek savienota ar nelineāru dielektrisku dobumu, izmantojot prizmas, konusveida vai leņķi pulētas šķiedras. Pēc tam gaisma (frekvences ķemme) no nelineārā dobuma ar tiem pašiem līdzekļiem tiek savienota un mērīta ar optiskā spektra analizatoru (OSA) vai izmantota tālāk datu pārraidei [11]. Šim vispārinātajam modelim atbilstošās shēmas tiek izmantotas mikrorezonatoru sūknēšanai, lai ģenerētu frekvenču ķemmes [11, 12, 13]. Tāpat tiek izmantota stabilizācija ar Pound-Drever-Hall

(PDH) metodi, lai stabilizētu frekvenču ķemmes atkārtotās ātrumu, tādējādi stabilizējot mikroviļņu signālu, kas rodas pēc fotodiodes. Piemēram, divi jau zināmi eksperimenti parāda, kā MgF_2 mikrorezonators tiek sūknēts caur kopējās iekšējās atstarošanas prizmu, izmantojot parastās Fabri-Perot lāzerdiodes [12, 14].

Vēl viens eksperiments, kas balstīts uz publicēto informāciju, tika veikts ar WGM mikrosfēras rezonatora jauno struktūru uz bezkodola šķiedras (NCF) gala. Pats rezonators tiek ražots, sapludinot vienmoda šķiedras (SMF) ar NCF sekciju, un pēc tam ar UV līmi uzlīmējot mikrosfēru NCF loka galā. Šeit frekvenču ķemmes ģenerators sastāv no platjoslas gaismas avota (BBS), no kura gaisma nonāk cirkulācijas sūkņa ieejas portā, pārējie divi cirkulācijas sūkņa porti ir savienoti ar šķiedru savienoto WGM mikrosfēru un OSA. Gaisma ar mikrosfēru tiek savienota un izvadīta, izmantojot tikai vienu šķiedras galu [15]. Balstoties uz mūsu pieredzi un izstrādāto paņēmieni izmantojot adiabātiski patievinātu šķiedru [16] konusveida šķiedras metode ļauj precīzi noregulēt savienojuma apstākļus, kas nav iespējams uz mikroshēmām balstītiem rezonatoriem ar integrētiem viļņvadiem. Ņemot vērā šos mikro-rezonatoru priekšrocību aspektus, mēs esam izvēlējušies tos OFC ģenerēšanai optiskās sakaru sistēmās.

2. Matemātiskā modelēšana (COMSOL, Lumerical, Matlab u.c.) programmatūras vidēs t.i. optisko čipu dizaina izveide (RP).

Atbilstoši definētajam uzdevumam tiek veikts darbs pie toroidāla mikrorezonatora uz optiskā čipa dizaina detalizētas izstrādes, ņemot vērā tādus faktorus kā ģeometrija, materiāla īpašības un savienošanas mehānismus. Izmantot matemātiskās modelēšanas rīkus, tiek optimizēta mikrorezonatoru dizains efektīvai Kerra OFC ģenerēšanai. Projekta laikā tiek izskatīta iespēja arī ieviest plakanu Si_3N_4 gredzena rezonatoru, kura pamatā ir uz optiskā čipa Kerra OFC sistēma **1. attēlā** parādīta rezonatora uz optiskā čipa dizaina detalizēta iestrādne. Atbilstoši izstrādāti divi modeļi matemātiskās modelēšanas vidē toroidālam un Si_3N_4 gredzena mikrorezonatoriem.



1. att. Dizains matemātiskās modelēšanas vidē **(a)** uz optiskā čipa veidotam toroidālam WGM augsta Q faktora mikrorezonatoram un **(b)** uz optiskā čipa veidotam plakanam Si_3N_4 gredzena rezonatoram.

Kerra OFC nesēju FSR zem 100 GHz ir piemērots WDM sakaru sistēmā, atbilstoši ITU-T starpkanālu intervāla nosacījumiem. Priekšrocības, ko sniedz vairāku spektrālo līniju vienlaicīga ģenerēšana vienā šķiedrā, var izmantot WDM arhitektūrā. Piemēram, nākotnes piektās paaudzes 5G un sestās paaudzes 6G mobilo sakaru risinājumos var gūt ievērojamu labumu no milimetruviļņu radio caur šķiedru (angl. radio over fiber (RoF)) hibrīdā risinājuma ieviešanas.

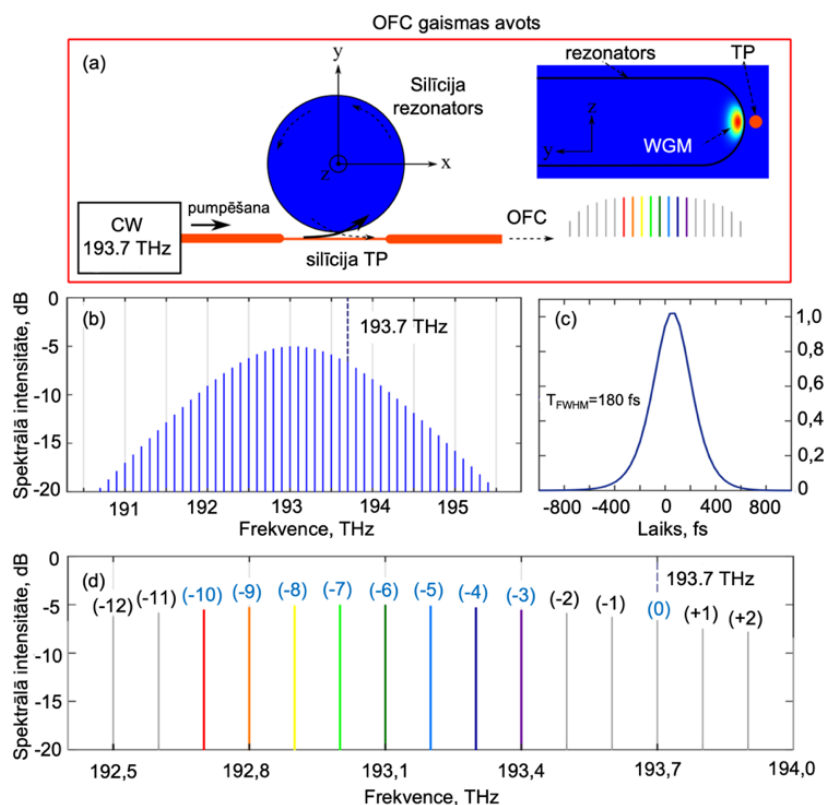
Atbilstoši matemātiskās modelēšanas vidē tika izveidoti optimāli **(a)** toroidāla un **(b)** Si_3N_4

gredzena mikrorezonatoriem ģeometriskie parametri, kurus plānots izmantot kā optisko čipu dizains optisko čipu platformām (*tehnoloģijas risinājums*). Atbilstoši ir noteiktas vairācījas pie sekojošiem parametriem abu veidu mikrorezonatoriem čipu platformām:

- Viļņa garums (O/C-joslā t.i. vid. $\lambda=1310\text{nm}/\lambda=1550\text{nm}$);
- FSR (400/200/100/50 GHz atbilstoši ITU-T G 695.1 rec.);
- Pielīdzināšanas spraugas tips (priekš SiN rezonatoriem, straight/bent);
- Pielīdzināšanas distance bus waveguide-to-ring (priekš SiN rezonatoriem, 4/5/6 μm);
- V-groove (struktūra priekš šķiedras pasīvas pielīdzināšanas, ir/nav);
- Si riņķis virs mikrotoroīda (ir/nav).

Matemātiskās skaitļošanas programmatūrā, tika veikti integrētu WGM rezonatoru OFC gaismas avotu parametru definēšana un iegūto matemātiskā modeļa rezultātu, tajā skaitā WGM rezonatoru un skaitlisko simulāciju, to parametru un frekvenču ķemmes analīze, pie definētiem parametriem: Rezonatora tips, Q -faktors, Rādiuss (mm), FSR (GHz), Pumpēšanas viļņa garums (nm), Pumpēšanas jauda (dBm), Ķemmes platums (nm), Ķemmes atstatums (GHz).

Kerra OFC ir skaitliski simulētas, lietojot izkļiedējošā Kerra solitona (DKS) ķemmes veidošanās režīmu mikrorezonatoros. Kā viens no variantiem tika izvērtēts **2. attēlā** redzamo vienkāršotu OFC gaismas avotu shēma, kurā tiek izmantots aksiāli simetrisks silīcija WGM rezonators, kurā starojums tiek ievadīts ar adiabātiski patievinātu vienmodas optisko šķiedru (SMF).



2. att. Optiskās starojuma lauka dinamika, kas cirkulē rezonatora iekšpusē, var aprakstīt ar vispārināto Lugiato-Lefever vienādojumu, kas nav atkarīgs no rezonatora ģeometrijas, kura tiek izmantota matemātiskajā modelēšanā. Matemātiskajā modelēšanā tika lietota bezdimensiju forma, kas ņem vērā Ramana reakciju, anomālo dispersiju un kubisko dispersiju.

3. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora optiskās čipa platformas izveide (šī darbība ietver dažādu optisko ķemmes avotu ierīču dizaina izstrādi, kuras ražos AS ALFA RPAR) (RP).

Atbilstoši definētajām uzdevumam tika veikts darbs pie toroidālā mikrorezonatora dizaina specifikācijas, tajā skaitā izpētīta optimālā ģeometrija un materiālu bāzes. Darbs tika veikts pamatojoties uz izpētīto literatūras avotu datu bāzēm un pieejamo informāciju toriodālo mikrorezonatoru. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora optiskās čipa platformas pirmās testa versijas izveide iekļauj dizaina specifikāciju nosakot optimālās ģeometrijas un materiālu pielietojumu.

****Fotomasku izstrāde un ražošana dažāda veida optisko rezonatoru ražošanai.***

Saskaņā ar izstrādātajām optisko rezonatoru topoloģijām tika izstrādāti un izgatavoti darba šabloni. Multiplikācija tiek veikta tā, lai uz vienas struktūras būtu vairāki dažādi rezonatori (atkarībā no to izmēra).

****Optisko rezonatoru radīšanai nepieciešamo tehnoloģisko paņēmieni izpēte un izstrāde.***

2.1. Cietas fotomaskas izveides procesa izstrāde silīcija un biezu SiO₂ slāņu kodināšanas procesiem

Silīcija dziļai kodināšanai un biezu SiO₂ slāņu kodināšanai nepieciešams izmantot cieto fotomasku. Ņemot vērā SiN rezonatora pretestības sildītāja alumīnija vadu izmantošanu, alumīnijs tika izvēlēts kā cietā maska. Šim nolūkam ir izstrādāts alumīnija pārklājuma magnetrona izsmidzināšanas režīms. Kā maska tika izmantoti Al slāņi ar biezumu 0,4 μm, 0,7 μm un 1 μm (1 μm, ņemot vērā vienlaicīgu maskas un nesildošā elementa Al vadu izmantošanu SiN rezonatora plakanajā dizainā). Šķidrums kodināšanas eksperiments (kodinātājs, kas satur HF:NH₄:H₂O=17:90:21) 5 mikronus biežai SiO₂ pārklājumu (kodināšanas ātrums 170 nm/min.) parādīja, ka Al maska ar biezumu 0,4-0,7 mikroni neuztur šo režīmu, savukārt maska ar 1 mikronu biežumu sniedz apmierinošus sākotnējos rezultātus.



3. att. SiO₂ kodināšanas paraugs 5 μm biezs (šķidrums tralēšana) ar Al masku 1 μm biežumā.
Maska noņemta.



4. att. Al maska 0,4 μm noņemta no SiO₂ 5 μm.



5. att. Al maska 0,4 μm pēc kodināšanas SiO₂ 5 μm.

Al maskas kodināšanas selektivitātes novērtējums ICP-RIE kodināšanā uz silīciju uzrāda apmierinošu rezultātu (apmēram vairāk nekā 1/50) Iegūtie rezultāti tiks izmantoti optisko rezonatoru ražošanas tehnoloģiskajā procesā.

2.2. Ar CVD metodi iegūto silīcija dioksīda biezo slāņu izstrāde un izpēte.

Biezu SiO₂ CVD slāņu ražošanai tika izmantota slāņu pārklāšanas metode LPCVD procesā. SiN rezonatora projektēšanā izvēlētais SiO₂ slānis ar biezumu 5 mikroni tika panākts ar slāņa kārtu. Pa slāņiem cikliska (5 cikli) 1 mikronu biezu slāņu uzklāšana, kam seko termiskā atkausēšana pēc katra slāņa. Izstrādāts LPCVD SiO₂ nogulsnešanas process, izmantojot tetraetoksisilānu (TEOS). Si(OC₂H₅)₄ → SiO₂ + organiskie blakusprodukti.

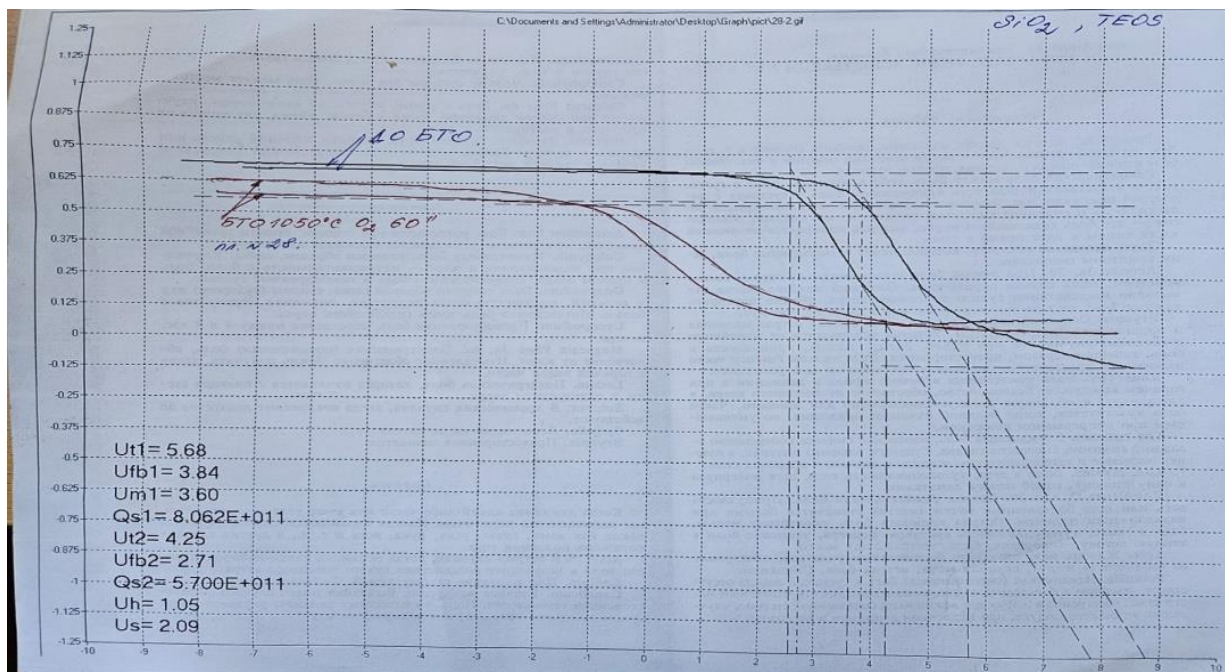
Procesa režīmi:

- T = 745 °C;;
- TEOS patēriņš - 5 l/st;
- kameras spiediens 0,3 mm Hg.

Iegūtā slāņa parametri:

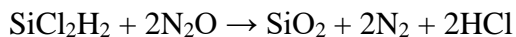
- pārklājuma biezums 1 mikrons;
- laušanas koeficients diapazonā 1,41-1,44;
- šķidrums kodināšanas ātrums ir aptuveni 0,20 μm/min.

Optisko īpašību ziņā CVD SiO₂ slānis ir zemāks par termisko oksīdu. Tāpēc ātrā termiskā atkausēšana tika pārbaudīta pie T = 1050 °C (60 sekundes skābeklī). Iegūtie paraugi pirms un pēc atkausēšanas tika novērtēti pēc to uzlādes stāvokļa, izmantojot CV raksturlielumus.



6. att. Eksperimentālie rezultāti (kapacitāte (C) atkarībā no sprieguma (V)).

Tādējādi, pamatojoties uz raksturlielumiem, mēs varam secināt, ka RTA samazina lādiņa līmeni SiO₂ slānī. Pamatojoties uz silīcija nitrīda pārklājuma RTA rezultātiem, var pieņemt, ka CVD oksīda slāņu RTA noārda arī ūdeņraža saites (veidojas TEOS sadalīšanās laikā), kas iespējams uzlabo oksidācijas optiskās īpašības. Lai vēl vairāk uzlabotu biezo SiO₂ slāņu caurspīdīgumu, tika pētīts SiO₂ pārklājuma iegūšanas process no dihlorsilāna:



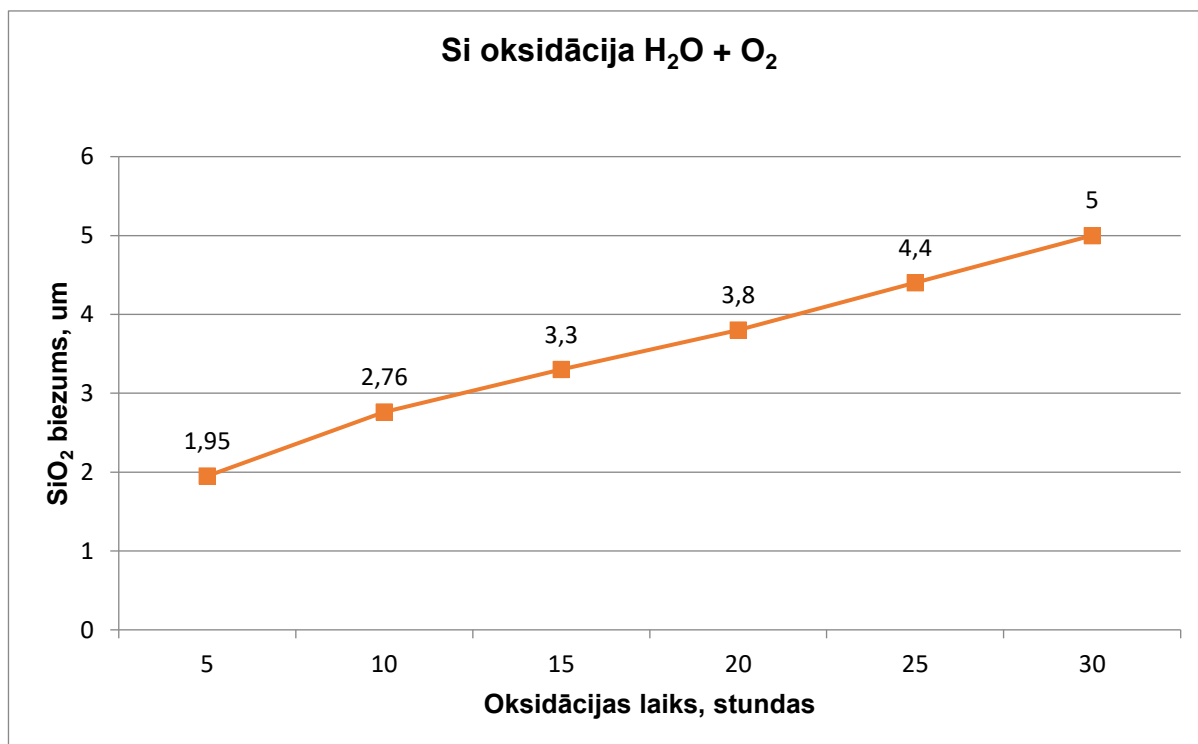
2.3 Silīcija dioksīda biezu slāņu izstrāde un izpēte, kas iegūta silīcija termiskā oksidēšanā

Lai izgatavotu optisko dobumu, mēs izmantojām iegādātās monosilīcija plāksnītes, ar termiski audzētu silīcija dioksīda slāni 5 μm biežumā (*University Wafer*). Tajā pašā laikā tika pētīts jautājums par biezu SiO₂ slāņu iegūšanu uz mūsu pašu monosilīcija plāksnēm. Silīcija mitrā termiskā oksidācijas process skābeklī tika veikts pie T=1200°C vairākos ciklos.

Viena cikla režīms:

- gāzes padeve režīmā O₂ sausais – O₂ mitrais – O₂ sausais;
- gāzes patēriņš pa posmiem 250 l/st. – 150 l/st. – 250 l/st.;
- procesa laiks 1 stunda – 5 stundas – 1,5 stundas.

Apmēram 5 μm SiO₂ slāņa biežums tiek sasniegts oksidācijas procesā aptuveni 30 stundu laikā. Pārklājuma laušanas koeficients diapazonā 1,41 – 1,44. Termiskā oksīda augšanas ātrums ir parādīts 7. attēlā.



7.att. Termiskā oksīda pārklājuma biežuma augšanas ātrums.

SiO₂ pārklājuma biezums tika mērīts, izmantojot lodveida sekcijas metodi. Lai iegūtu kontrasta robežu, uz pētāmā parauga virsmas tika uzklāts apmēram 100 nm biezs volframa pārklājums (ar magnetrona izsmidzināšanas metodi).

2.4 Tehnoloģijas izstrāde pretestības slāņu ražošanai, kas paredzēts izmantošanai SiN rezonatora sildelementā.

Pretestības mikrosildītāju izveide metožu analīzes rezultātā kā pretestības slānis tika izvēlēts slānis, kas iegūts ar metāla silicīda sakausējumu, kas tika iegūts ar katoda izsmidzināšanu uz pārklājumu.

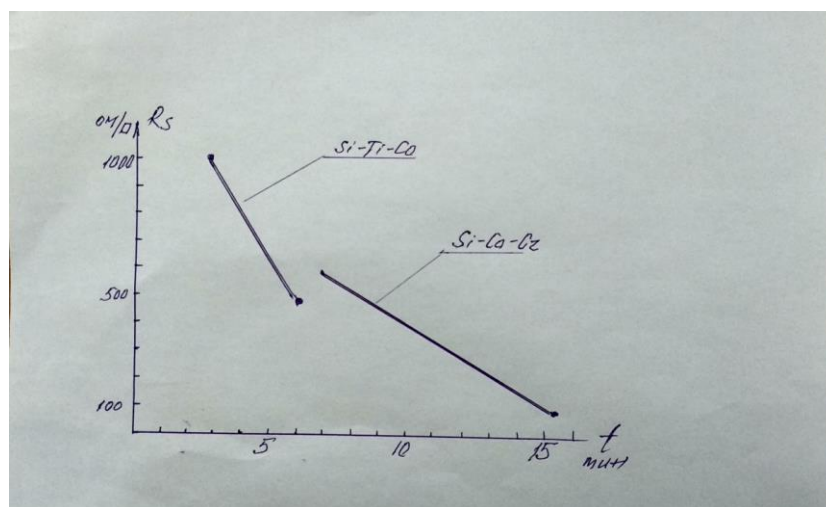
Izsmidzināšana tika veikta uz vakuuma katoda izsmidzināšanas iekārtas ar tiešu izsmidzinātā slāņa virsmas pretestības kontroli. Izsmidzināšanas procesā kā mērķi tika izmantoti divu veidu silicīdu sakausējumi:

- lielāka pretestība (Rs 400 -1000 Ohm/kv.) sastāvs Si-Ti-Co (67:23:10);
- zemas pretestības (Rs 50 - 300 Ohm/kv.) sastāvs Si-Co-Cr (28:60:12).

Tipisks metālu-silicīdu sakausējumu katoda izsmidzināšanas veids:

- mērķa diametrs - 180 mm;
- maksimālais vakuums – 10⁻⁶ mm Hg;
- darba vakuums 2÷3·10⁻³ mm Hg;
- vidēja - Ar tīrība 99.999;
- katoda strāva - 60 A;
- loka strāva - 10A;
- mērķa spriegums 1600 V;
- mērķa strāva - 150mA;
- pamatnes temperatūra - 250°C.

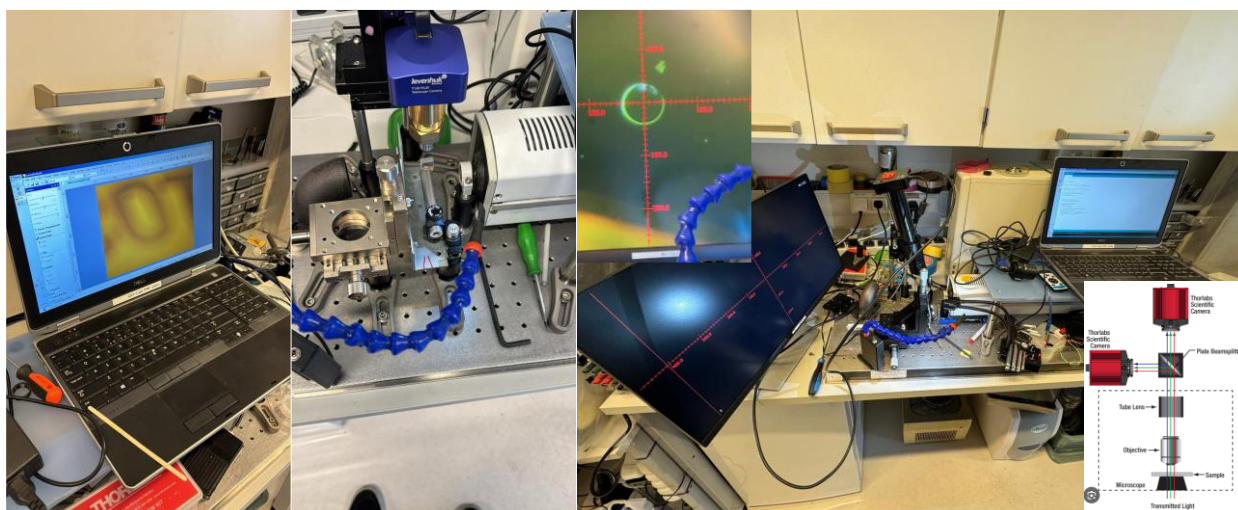
Novērojums: Izsmidzināšanas laiks mainījās atkarībā no izsmidzinātās pretestības un pārklājuma virsmas pretestības.



8.att. Virsmas pretestības atkarība no smidzināšanas laika.

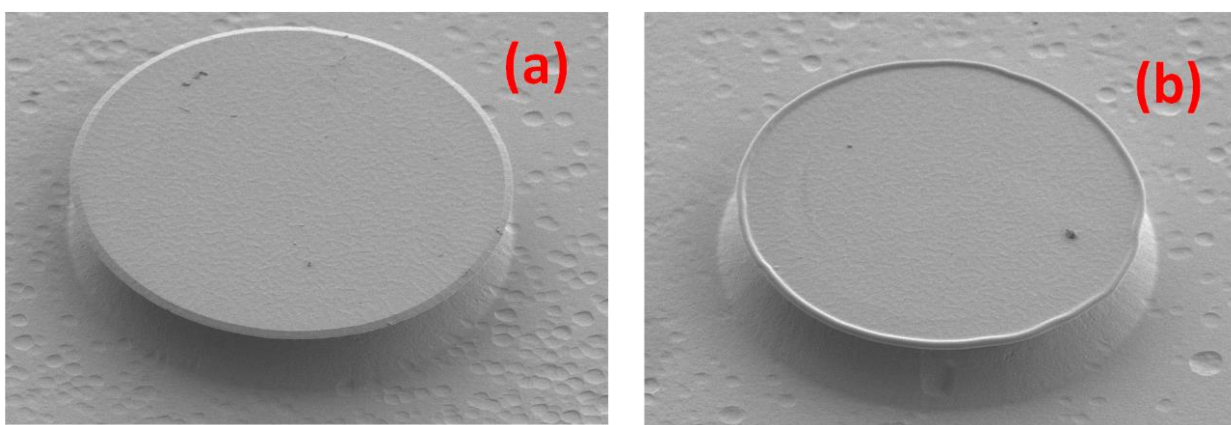
SiN rezonatora dizains paredz izmantot pretestības pārklājumu ar Rs 50–200 omi/kv. Pretestības slāņa pārklājuma pretestības specifiskās vērtības tika noteiktas, pamatojoties uz SiN rezonatoru, kas veidojas no rezonanses noregulēšanas rezultātiem.

Tomēr toroidālais rezonators (tā malas) uz SOI platformas var būt pārāk plāns priekš 1550 nm rezonanses viļņa garuma, līdz ar to bija nepieciešams veikt toroidālā rezonatora uz SOI platformas pēcapkausēšanu ar CO₂ lāzeru. SOI platformas pēcapkausēšanas stends ar CO₂ lāzeru (skat. **9. att.**).



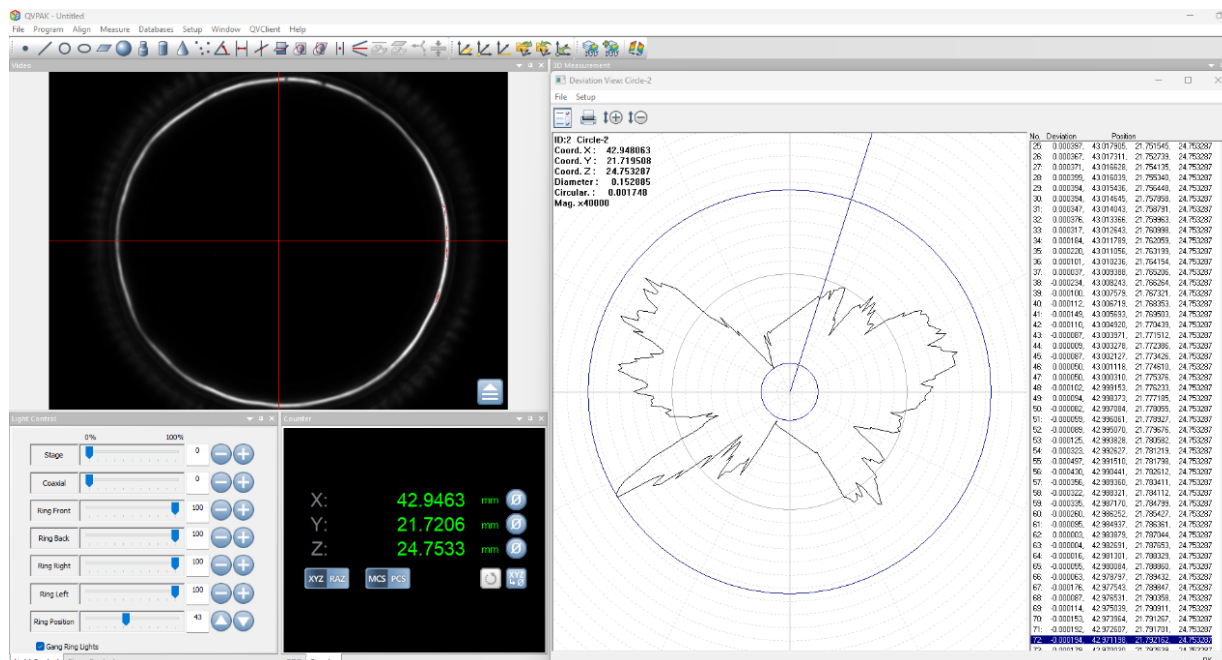
9.att. Izveidotais toroidālā rezonatora uz SOI platformas stends pēc apkausēšanas ar CO₂ lāzeru.

Pamatojoties uz pašreizējiem novērojumiem - lāzera apertūra bija 200 μm, ekspozīcijas laiks aptuveni 1 sekunde, jauda 35–45 W. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora vizuāls salīdzinājums pirms (a) un (b) pēc apkausēšanas ar CO₂ lāzeri (skat. **10.att.**). Pēc apkausēšanas ir novērojamas toroidālā rezonatora apmales izveidojums, kurš ir nepieciešams priekš čukstošās galersijas modas (WGM) režīma gaismas cirkulācijas, kas rezultējoši sniedz optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšanas nodrošinājumu. Atbilstoši izvēlētajai SOI platformas materiālam paredzētā OFC ķemmes ģenerēšanas norisinās pie rezonatora ar Q faktoru $\geq 1 \times 10^6$.



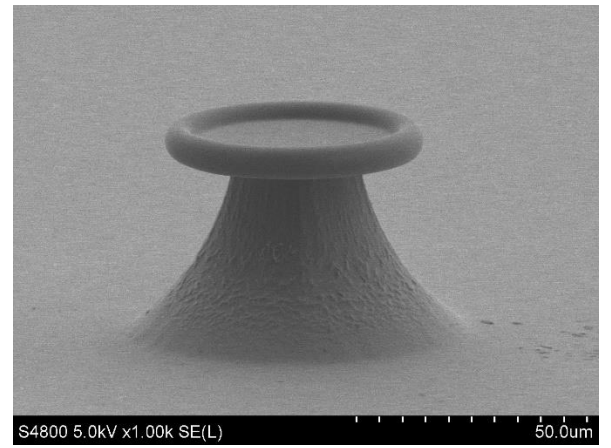
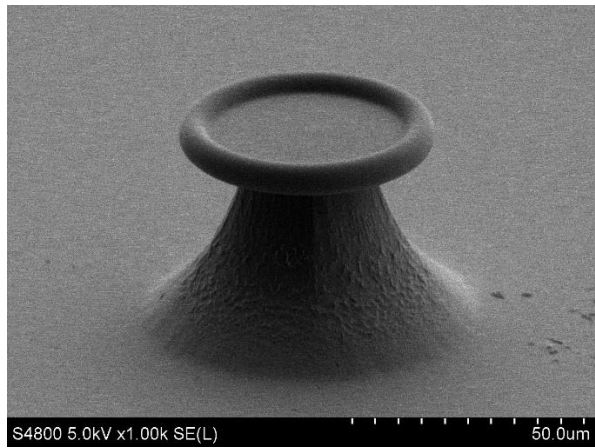
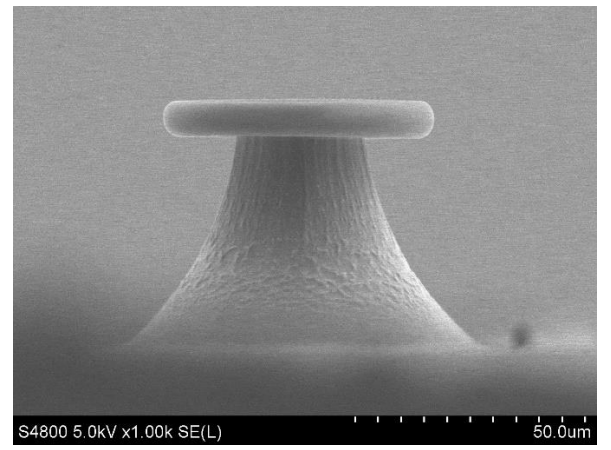
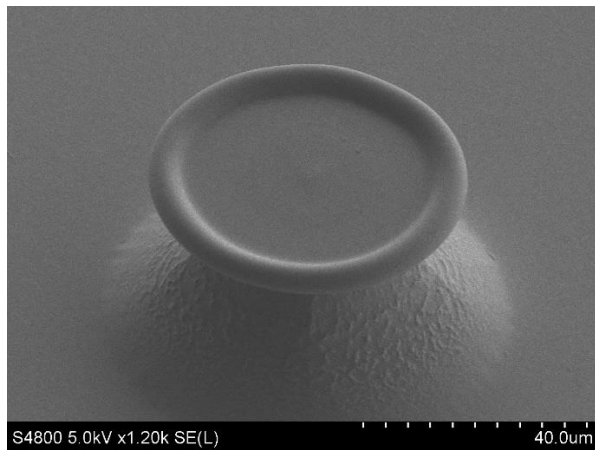
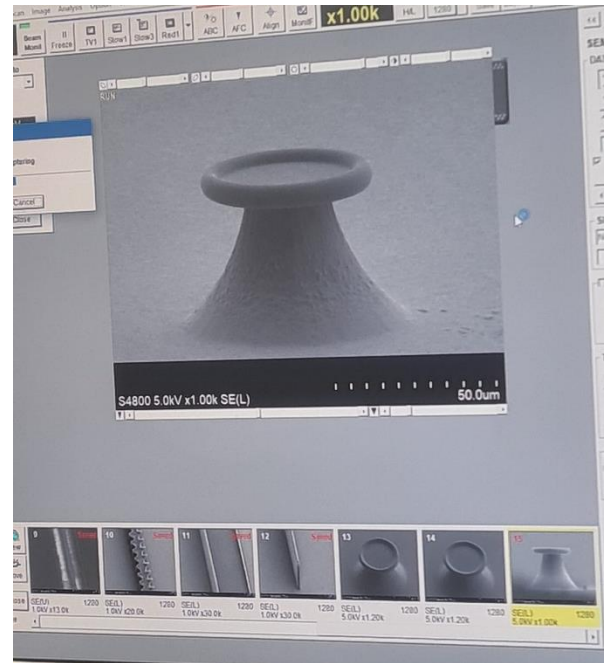
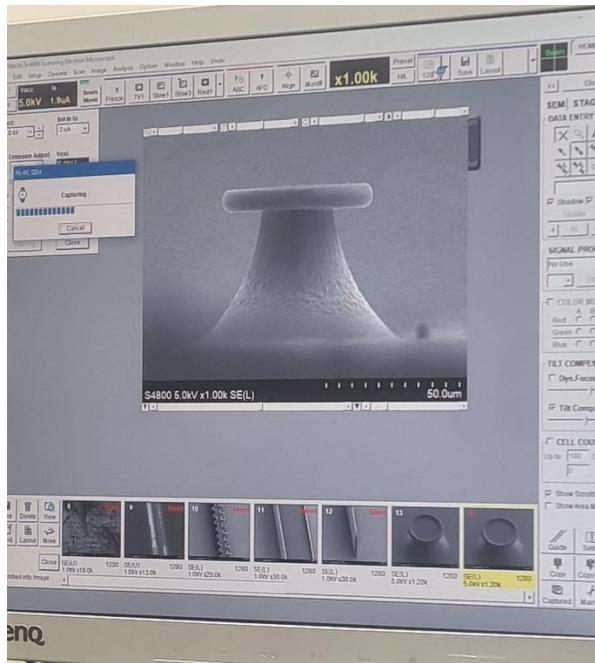
10. att. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora vizuāls salīdzinājums pirms (a) un pēc (b) apkausēšanas ar CO₂ lāzeri.

Optimālā ģeometrija: Toroidālo rezonatoru uz SOI platformas pēc apkausēšanas ar CO2 lāzeri, ģeometrijai jābūt viendabīgai, lai sasniegtu WGM režīmu. Iegūtais vizuālais ģeometrijas piemērs, skat. **11.att.**



11.att. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora ģeometrijas viendabīgums.

Aktivitātes darbības laikā tika veikta AS ALFA RPAR ražoto uz optiskā čipa veidotu toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatoru apkausēšana ar CO2 lāzeri. Pie dažādas toroidālo rezonatoru izmēru variācijas (no~50 μm līdz ~2000 μm). Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora eksperimentāli analizētas ģeometrijas mērījumus skat 12. attēlā pēc apkausēšanas ar CO₂ lāzeru.



12. att. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora eksperimentāli analizētas ģeometrijas mērījumi pēc apklausēšanas ar CO₂ lāzeru.

4. Savienojuma stāvokļu (mikrorezonators un patievinātā optiskā šķiedra vai cits savienojuma risinājums) scenāriju novērtējums (RP).

Šīs aktivitātes ietvaros projekta komanda strādā pie energoefektīva uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora kā jauna gaismas avota plašam lietojumu klāstam eksperimentālas izstrādes laboratorijas vidē un tā pielāgošanas izmantošanai šķiedru optisko sakaru sistēmas risinājumā kā gaismas avotam, kam seko tā daudzpusīgā veiktspējas novērtēšana.

Laboratorijas apstākļos izstrādāto paraugu testēšana Q faktora noteikšanai un optiskās frekvenču ķemmes ierosināšanā (skat. 13. att.)



13.att. Izstrādāto paraugu testēšana Q faktora noteikšanai un optiskās frekvenču ķemmes ierosināšana.

Energoefektīvs uz optiskā čipa veidots toroidālais WGM augsta Q faktora mikrorezonatora prototips ir balstīts uz adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras savienojuma tehnoloģijas. Adiabatiski pietievinātā vienmodas optiskā šķiedra ir alternatīvs risinājums optiskās gaismas ievadei izmantojot dažādu veidu prizmas balstītas tehnoloģijas risinājumus. Atbilstoši tiek nodrošinātas sekojošas priekšrocības: (1) augsta savienojuma efektivitāte $\sim 80\%$, (2) adiabatiski patievinātās optiskās šķiedras savienojuma vietā ar toroidālo mikrorezonatoru tiek nodrošināts stabils savienojums mazos izmēros, t.i. patievinātā šķiedra kontakta vietā ar mikrorezonatoru ir aptuveni $\sim 10 \mu\text{m}$ diametrā, tāpēc projektētais prototips ir mazāka izmēra, nekā citu savienojumu metožu risinājumos.

Lai veiktu uz optiskā čipa veidota toroidāla WGM augsta Q faktora mikrorezonatora kā jaunam gaismas avotam plašam lietojumu klāstam darbības novērtējumu, tiek izmantota adiabatiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra. Pirmkārt, tiek sagatavota adiabatiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra optiskās gaismas ievadīšanai toroidālā mikrorezonatorā. Adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras sagatavei tiek izmantota šķiedra ar nobīdīto dispersiju pie nulles punkta (NZ-DSF) slēgaukla, kas atbilst ITU-T G.655 standartam, aprīkota ar ferila mehānisko savienotāju. Adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras izgatavošanas procesā sagatave tika izveidota no divām nesaistītām NZ-DSF standartam atbilstošām slēgauklām. Abu slēgauklu šķiedru gali tika nogriezti, izmantojot šķiedru šķēlēju, notīrīti un sametināti kopā ar komerciālu lokizlādes metināšanas aparātu (Sumitomo, T-71C), nodrošinot zemas ienestos zudumus savienojuma vietā $\leq 0,01 \text{ dB}$. Rezultātā tika iegūta šķiedru optiskā slēgaukla ar mehāniskiem ferila savienotājiem abos savienojuma galos, kurai vidusdaļā ir noņemts apvalks un

pārklājums 3,8 cm apgabalā. Atbilstoši izveidotās slēgtauklas vidusdaļa paredzēta tālākai termiskai apstrādei.

Var izmantot vairākus paņēmienus, lai izveidotu adiabatiski patievinātu vienmodas optisko šķiedru: (1) izmantojot termisko karsēšanu, piemēram, keramikas caurules mikrosildītāju(-us), kas sastāv no karstumizturīgas stieples [17]; (2) mikro degļi, ko darbina propāna-butāna (30% propāna un 70% butāna) gāzes plūsmas [18] vai tīrs ūdeņradis (H_2) [19], nodrošinot augstas temperatūras (≥ 1900 °C) liesmu.

Izveidotās sagataves adiabatiskā patievinājuma vietas izveidei tika izmantots otrais paņēmiens, atbilstoši šķiedras sagatave tika nostiprināta V-veida turētājos, kuri atrodas uz 50 mm kompaktām, motorizētām taisna virziena kustības stiepšanas blokiem ar līdzstrāvas servomotora izpildmehānismiem (Thorlabs MTS50-Z8). Šķiedras vilkšana patievinājuma nodrošinājumam no abiem galiem tika veikta ar nemainīgu ātrumu 100 $\mu\text{m/s}$.

Sagataves adiabatiskā patievinājuma vietas izveidei tika izmantots mikro deglis ar pastāvīgu ūdeņraža plūsmu 50 ml/min no ūdeņraža ģeneratora. Mikro deglis tika novietots starp 50 mm kompaktiem, motorizētiem taisna virziena kustības stiepšanas blokiem ar līdzstrāvas servomotora izpildmehānismiem. Tīrai ūdeņraža iegūšanai tika izmantots ūdeņraža ģenerators, kas ar elektrolīzi sadala ūdeni ūdeņradī un skābeklī. Ūdeņraža maksimālas veiktspējas nodrošinājumam tika izmantots kālija hidroksīda (KOH) elektrolīts.

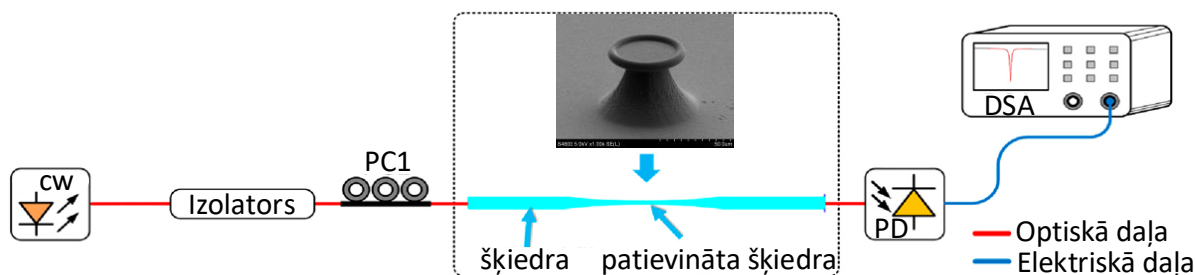
Ūdeņraža liesmai tika izmantots mikro deglis, kas sastāv no 9 cilindriskām nerūsējošā tērauda caurulēm ar 0,9 mm iekšējo diametru, ļaujot radīt zemu un plašu liesmu ~ 10 mm. Šķiedras novietojums attiecībā pret liesmu ir kritisks parametrs. Tāpēc mikrodegļa nerūsējošā tērauda caurules pozīcija tika pielāgota šķiedras viduspunktam. Lai saglabātu pārraides transmisiju, sagataves šķiedra ir jāvelk adiabatiski, nepārsniedzot norobežojuma leņķi. Izmantojot ~ 7 mm platu ūdeņraža liesmu, tiek izgatavots šķiedras sagataves adiabatisks konusa patievinājums vidusdaļā, ar kopējo pārraides transmisiju, kas pārsniedz $\sim 95\%$.

Ūdeņraža liesmas degšanas temperatūra izkusa un lēnām mīkstināja šķiedru attīrītās šķiedras sekcijā konusveida un 18 mm garas biežākas daļas rezultātā. Svarīgi pieminēt, ka, ja šķiedru gali ir slīpi (0,1 mrad) V-veida šķiedru turētāju vietā uz 50 mm kompaktiem, motorizētiem taisna virziena kustības stiepšanas blokiem ar līdzstrāvas servomotora izpildmehānismiem, tad, kad liesmas platums ir 1 mm, adiabatiskā konusa patievinājuma izkusušajā vietā veidojas 5 μm izliekums. Leņķis, kas pārsniedz 0,08 mrad, vairs nav labs, jo pieļaujamais adiabatiskais leņķis ir no 0,02 līdz 0,05 mrad.

V-veida šķiedru turētāju stiprinājums uz vienas optiskās ass tiek regulēts zem mikroskopa. Trīs asu X, Y un Z mikropozicioniera posmi ar iebūvēto pjezo kontrolleri tika izmantoti, lai izlīdzinātu uz optiskā čipa veidotu toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatoru ar adiabatiski patievināto vienmodas optisko šķiedru vietā, kas ir nedaudz biežāka par konusveida vidukli, lai panāktu kritisko savienojumu un samazinātu savienojuma ienestos zudumus. Sānu un augšskata mikroskopa kameras tika izmantotas, lai uzraudzītu toroidālā rezonatora un konusveida šķiedras pozīcijas, atbilstoši, lai kontrolētu toroidālā mikrorezonatora pieskāriena punktu ar nedaudz biežāku konusveida šķiedru.

Adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras pārraides transmisijas novērtējuma shēma (sk. 14. attēlu) sastāv no InGaAs manuāli regulējama pastiprinājuma fotodetektora (PD) $\lambda = 800\text{--}1700$ nm (Thorlabs PDA20CS2), kas savienots ar digitālo signālu analizatoru (DSA), ko izmanto, lai reģistrētu uztverto elektrisko signālu laikā un uzraudzītu pārraides spektrus no adiabatiski

patievinātās vienmodas optiskās šķiedras. Pārskāņojams šaurjoslas lāzers (Thorlabs SFL1550P), ar viļņa garumu $\lambda = 1550$ nm, līnijas platumu t.i. pilns platums līdz pusei maksimālā (FWHM, Full width at half maximum) 50 kHz un 10 dBm izejas optisko jaudu ir pievienots caur polarizācijas kontrolieri (PC1) un tiek izmantots pārraides spektru mērījumiem. Signāla atstarojumu novēršanai tiek izmantots augstas klases optiskais izolators starp lāzera avotu un polarizācijas kontrolieri. Pārraides spektrs tika reģistrēts laika intervālā adiabatiskās vienmodas optiskās šķiedras stiepšanas/sašaurināšanas procesa laikā, lai noteiktu precīzu vienmodas režīma darbības stāvokli.



14. att. Adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras un uz optiskā čipa veidota toroidālā WGM augsta Q faktora mikrorezonatori raksturošanai izmantotā eksperimentālā iekārta.

5. Izstrādāt energoefektīvu uz optiskā čipa veidotu toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatoru kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam un veikt eksperimentālos testus un mērījumus (EI).

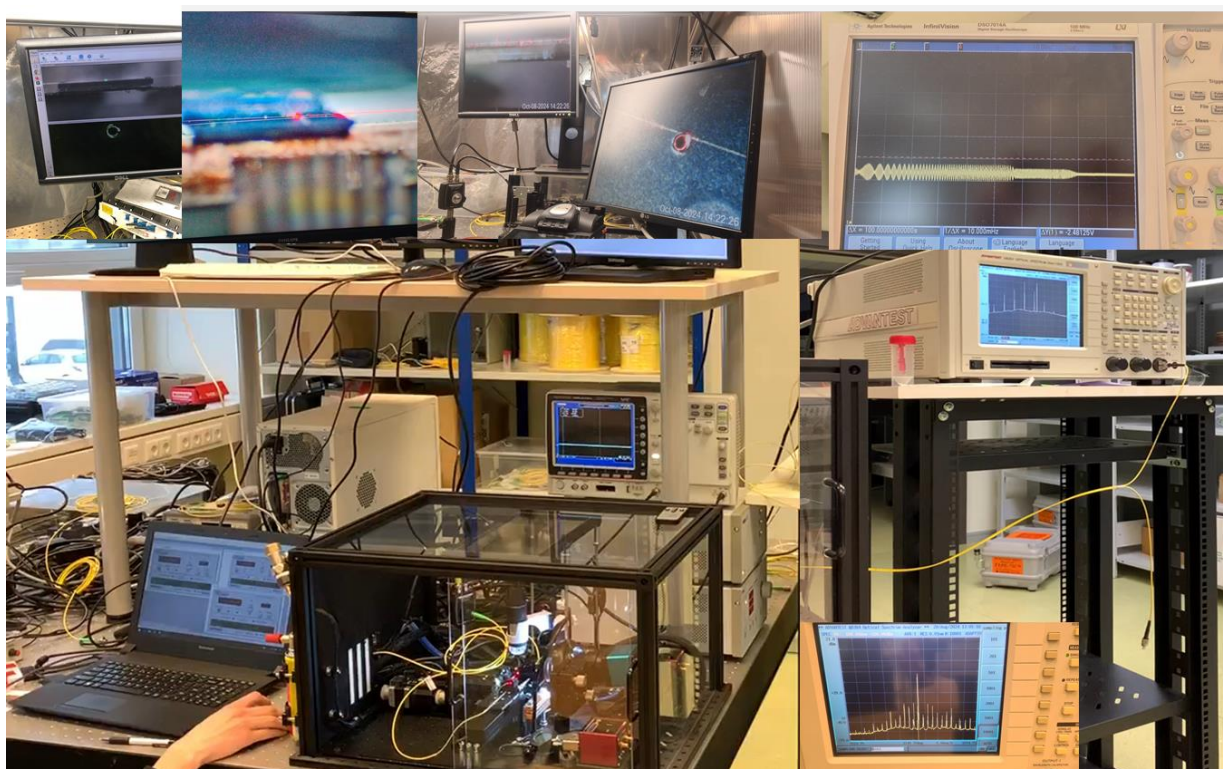
***Eksperimentālie testi, mērījumui un validācija laboratorijas apstākļos.**

Šajā apakšnodaļā tiek parādīta izstrādātā prototipa t.i. energoefektīva uz optiskā čipa veidota toroidālā WGM augsta Q faktora mikrorezonatori kā jauns gaismas avots plašam lietojumu klāstam galvenie uzbūves un veiktspējas novērtējuma rezultāti. Kā OFC ķemmes pumpēšanas avots tiek izmantots pārskāņojams pusvadītāju lāzera CW gaismas avots pie viļņu garumiem C joslas reģionā (1530–1570 nm). Uz optiskā čipa veidota toroidālā WGM augsta Q faktora mikrorezonatori gaismas avota prototipa veiktspēja un iegūtie rezultāti ir iegūti, izmantojot pārskāņojamu CW gaismas avotu ar izejas optisko signālu pie viļņa garuma ~1550 nm.

Kā OFC ķemmes pumpēšanas avots tiek izmantots CW gaismas avots ar līnijas platumu aptuveni 100 kHz un +6 dBm optisko izejas jaudu. Optisko gaismu, kas nāk no pumpējošā avota pastiprina līdz +23 dBm ar erbija leģētu šķiedru optisko pastiprinātāju (EDFA). Pastiprinātā signāla polarizācijas stāvoklis tiek regulēts, izmantojot polarizācijas kontrolieri (PC), pirms signāls tiek savienots ar toroidālu rezonatoru uz optiskā čipa caur adiabatiski patievinātu vienmodas optisko šķiedru. EDFA izejā tiek izmantots papildus izolators, lai novērstu atpakaļ izkliedētas gaismas iekļūšanu CW lāzera izejas portā, destabilizējot tā centrālo frekvenci, tādējādi ietekmējot ķemmes stabilitāti. Uz optiskā čipa veidota toroidālā WGM augsta Q faktora mikrorezonatori un adiabatiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra ir ievietoti atsevišķā kastē putekļu un gaisa plūsmas novēršanai, nodrošinot vēl lielāku stabilitāti iegūtajam OFC. X, Y un Z mikropozicionieri izmanto, lai ar optisko čipu ar toroidālo mikrorezonatoru pieskartos adiabatiski patievinātās optiskās šķiedras vietā, kas ir nedaudz biezāka par konusveida vidukli. Atbilstoši tas maina un nodrošina tādus savienojuma apstākļus kā jauda

savienojuma vietā (savienotā jauda – jauda kas nodrošina cirkularitātes intensitāti mikrorezonatorā) un rezonansu Q koeficientu. Optiskā čipa ar toridālo mikrorezonatoru un adiabatiski patievinātas optiskās šķiedras pozīcijas stāvokļi tiek fiksēti ar tūlumaīnas kamerām sānskatā un skatā no augšas līdz brīdim, kad tiek novērota OFC nesēja ģenerēšana.

Eksperimentālās iestatīšanas temperatūra netiek aktīvi stabilizēta, savukārt mitrums vāka kastē tiek samazināts, izmantojot silikagela desikantu. OFC veiktspējas mērīšanai tiek izmantots optiskā spektra analizators (OSA) ar 0,01 nm izšķirtspēju. Kā redzams 15. attēlā, izstrādātais prototips tika testēts un validēts RTU IPET laboratorijā (**atbilstoši TRL5**). Izstrādātais prototips ir testēts laboratorijas vidē un tā darbība 12 (un vairāk) stundu laikā ir stabila.



15. att. Izstrādātā prototipa testēšana un validācija laboratorijas vidē (*uz optiskā čipa veidota toroidāla WGM augsta Q faktora mikrorezonatora kā jauna gaismas avota plašam lietojumu klāstam*).

****Eksperimentālie testi, mērījumi un validācija lauk apstākļos.***

RTU zinātniskā laboratorija ir tieši savienota ar RTU [augstas veiktspējas skaitļošanas](#) (HPC) datu centru caur iekšējo optisko šķiedru infrastruktūru. Izstrādātā prototipa lietojums OFC ģenerēšanai tika validēts īsa attāluma šķiedru optikas sakaru sistēmas risinājumā, tās darbības atbalstam.

Līdz ar to pirmais solis ir panākt vienošanos no optiskā tīkla infrastruktūras operatora, kurš vēlas koplietot savu infrastruktūru CHIP-comb projekta labā. Apsverot dažādas iespējas, tika konstatēts, ka Rīgas Tehniskās universitātes (RTU) Informācijas tehnoloģiju katedra (IT katedra) ir viens no Latvijas akadēmiskā pamattīkla pārvaldošajiem dalībniekiem.

Šis tīkls tiek veidots, lai izveidotu datu transporta infrastruktūru starp dažādām augstskolām un zinātniski pētnieciskajām institūcijām, lai nodrošinātu tām piekļuvi RTU [augstas veiktspējas skaitļošanas centram](#) HPC, kas atrodas Ķīpsalā, Rīgā un tādējādi kopīgus skaitļošanas resursus

[20]. Šim akadēmiskajam datu centram ir arī labi izveidota optiskā kabeļa infrastruktūra, kas savieno to ar citām šī tīkla pusēm (ieskaitot saites ar lielākajiem telekomunikāciju operatoriem, piemēram, “Latvijas Valsts radio un televīzijas centrs (LVRTC)”, LMT, TET, Telia).

Fotonikas, elektronikas un elektronisko sakaru institūts (RTU IPET) atrodas Datorzinātnes, informācijas tehnoloģijas un enerģētikas fakultātē (DITEF). Starp augstas veiktspējas skaitļošanas centra telpām un DITEF ēku jau ir izveidota komerciāla optiskās šķiedras kabeļa līnija, kas veido cilpu apkārt Ķīpsalas pilsētiņai un nodrošina telekomunikāciju pakalpojumus galalietotājiem (skat. 16. att.).



16. att. RTU DITEF un augstas veiktspējas skaitļošanas centra atrašanās vieta RTU Ķīpsalas pilsētiņā, Latvijā [21].

Iespēja pieslēgties izvietotajām komerciālo telekomunikāciju optisko kabeļu līnijām tieši no RTU IPET zinātniskās laboratorijas telpām būtiski paplašina testēšanai pieejamo iekārtu klāstu, jo daļai no tām ir ierobežotas lauka testēšanas iespējas, piem. tie ir trausli transportēšanai, temperatūras izmaiņām, mitrumam utt. Piemēram, augstfrekvences digitālā atmiņas osciloskopa (DSO), optiskā spektra analizatoru (OSA), pārskanojamu lāzeru utt. izmantošana ir ierobežota tikai iekštelpās un nav paredzēts lauka videi. Visu šo ierīču pieejamība ievērojami vienkāršo un paplašina energoefektīva uz optiskā čipa veidota toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatora kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam testēšanas iespējas un scenāriju.

Veikto testu galvenais mērķis ir apstiprināt uz optiskā čipa veidota toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatora prototipu kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam, ko izmanto telekomunikāciju pielietojumam tuvu realitātei (**atbilstoši TRL6 “tehnoloģijas demonstrācija mākslīgi radītā vidē”**). Tāpēc testēšana attiecas uz izstrādātā energoefektīva uz optiskā čipa veidota toroidālo WGM augsta Q faktora mikrorezonatora kā C joslas gaismas avota validāciju, kur jaunizveidotie nesēji tiek pārraidīti caur komerciālo optisko šķiedru infrastruktūru, izmantojot standarta ITU -T G.652 telekomunikāciju šķiedru. Saskaņā ar iegūtajiem rezultātiem tika secināts, ka optiskās jaudas budžets (OB) pēc pārraides pilnībā atbilst telekomunikāciju šķiedru optisko sakaru sistēmu definētajām prasībām.

**Par iegūtajiem rezultātiem projekta laikā (sagatavoti projekta izpētes dati) ir sagatavota un iesniegta 1 zinātniskā publikācija.*

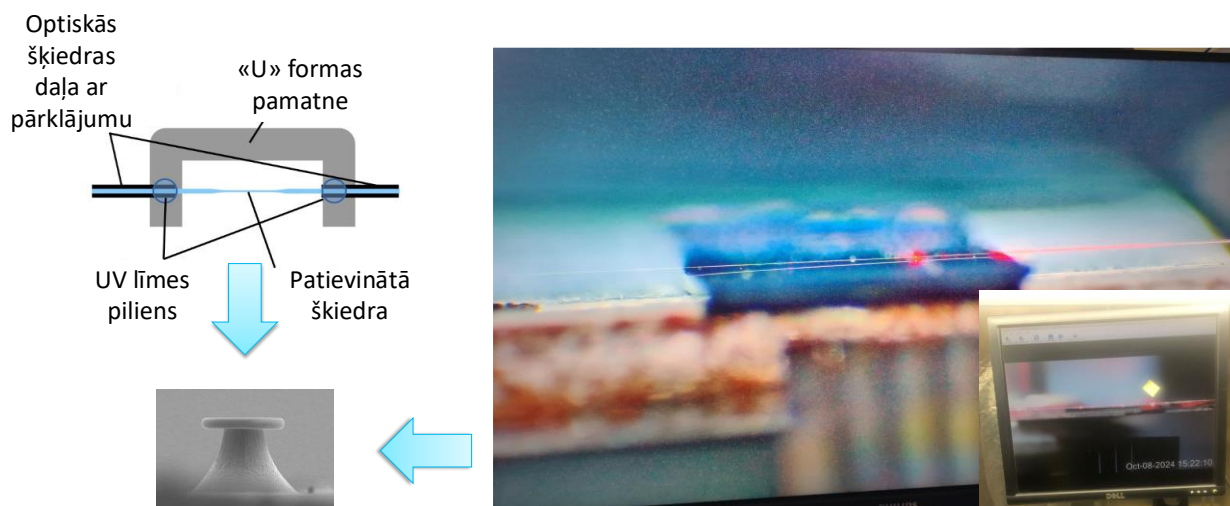
Publikācija pieņemta publicēšanai *Photonics and Electromagnetics Research Symposium ar Nr. 241206120355* (publikācija tiks indeksēta SCOPUS datubāzē, un tā ir AS ALFA RPAR un RTU kopdarbs).

**Projekta pētniecības kategorija ir klasificējama kā rūpnieciskie pētījumi ar eksperimentālo izstrādi. Atbilstoši projekta laikā tika izstrādāts energoefektīvs uz optiskā čipa veidots WGM toroidāls augsta Q faktora mikrorezonators kā jauns gaismas avots un validēts ātrgaitas šķiedru optiskās sakaru sistēmu infrastruktūrā (sasniedzot TRL6 līmeni).*

6. Energoefektīva uz čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora kā jauna gaismas avota izolācija no ārējās vides ietekmes (optiskā čipa iepakošana) (EI).

* *Optiskā čipa iepakošana*

Zināmākais veids, kā savienot gaismu ar čukstošās galerijas režīma rezonatoriem (WGMR), ir adiabatiski patievinātas vienmodas optiskās šķiedras izmantošana. Ir pierādīta 98% savienojuma efektivitāte [22]. Adiabatiski patievināta vienmodas optiskā šķiedra ir vienmodas optiskā šķiedra, kas ir izstiepta un līdz ar to vidū ievērojami sašaurināta. Ražošanas process ir diezgan delikāts, jo šķiedra tiek tievināta, tās tievinājuma vidū, kur diametrs ir mazāks par 10 μm. Šīs plānās šķiedras ir ļoti trauslas, un tām ir nepieciešama rūpīga apstrāde un iepakšanas paņēmieni. Lai izveidotu pārnēsājamu ierīci (prototipu), adiabatiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra ir jānostiprina, lai nodrošinātu izturību. Lai to panāktu, labs risinājums ir uzlīmēt plāno apgabalu uz “U” formas metāla vai akrila pamatnes. Līmes punktus, piemēram, UV līmi, ir svarīgi uzklāt kā pilienus no iepriekš minētā, jo, tos smērējot, var viegli pārplīst patievinājuma vieta šķiedrai. Lai risinājums būtu izturīgāks, līmes pilieni jāuzklāj uz šķiedras daļas, kas joprojām ir pārklāta ar pārklājumu. Adiabatiski patievinātās vienmodas optiskās šķiedras patievinājuma vietai jāsakrīt ar toroidālā rezonatora uz optiskā čipa savienojamības vietas pozīciju. “U” veida pamatne ar adiabatiski patievināto vienmodas optisko šķiedru un uz čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorezonatora savienojuma shēma parādīta 17. attēlā.



17. att. “U” formas pamatne, kas pielīmēta uz adiabatiski patievinātas vienmodas optiskās šķiedras nodrošinot savienojumu ar toroidālo rezonatoru un optiskā čipa.

*** Prototipa ārējās vides aizsardzība**

Adiabātiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra un uz čipa veidoti WGM toroidāli augsta Q faktora mikrorezonatori noārdās no putekļiem. Ilgtspējīgai sistēmai ir nepieciešama ārējā kaste, kas nosegs "U" formas pamatni ar adiabātiski patievināto šķiedru un toroidālu rezonatoru uz čipa. Vairākas pieejas ir piemērotas, lai papildus samazinātu putekļu daudzumu iekšpusē, izmantojot filtrus. (1) Pirmkārt, iekšā esošo gaisu var cirkulēt caur filtru. Šajā gadījumā iekapsulēšanas kastītei jābūt hermētiskai. (2) Otrkārt, gaisu var izvadīt no ārpusē caur filtru, kas rada spiedienu kastes iekšpusē. Spiediens izpūš putekļus no kastes caur katru spraugu un novērš netīrā gaisa noplūdi iekšpusē. Kastītei nav jābūt hermētiskai. Gan pirmo, gan otro iespēju var izmantot kopā un var papildināt viena otru. Vēl viena iespēja ir izsūkt gaisu, radot kastē vakuumu. Samazinot kastē spiedienu līdz 1 mbar (99,9% vakuums), tajā paliek mazāk putekļu daļiņu. Spiediena samazināšanai nepieciešama stikla vai metāla kaste. Plastmasas detaļas var desorbēt gāzes, palielinot spiedienu līdz 20 mbar.

***Prototipa aizsardzība pret mitruma efektu**

Adiabātiski patievinātā vienmodas optiskā šķiedra un uz čipa veidoti WGM toroidāli augsta Q faktora mikrorezonatori noārdās mitruma ietekmē. Desikanti var ievērojami palēnināt noārdīšanos.

Silīcija gēls ir žāvēšanas līdzeklis. Tas tiek ražots no silīcija dioksīda un satur nelielas daļiņas, kas spēj absorbēt lielu daudzumu ūdens. Silīcija gēls ir bezkrāsains. Ērtākai lietošanai silīcija gēlu ķīmiski apstrādā ar indikatoriem, kas maina krāsu, adsorbējot mitrumu. Zilais silīcija gēls ir toksisks. Tas ir pārklāts ar kobalta hlorīdu – mitruma indikatoru, kas ir tumši zils, kad ir sauss, un rozā, kad tas ir piesātināts ar ūdeni. Oranžais gēls ir mazāk toksisks. Tas ir apstrādāts ar metilvioleto. Sausā stāvoklī oranžais silīcija gēls ir oranžs, bet pēc piesātināšanās ar ūdeni tas kļūst zaļš. Vēl viens oranža silīcija gēla indikators ir dzelzs amonija sulfāts. Tas nav toksisks, un tā krāsa mainās no tumši oranžas, kad tas ir sauss, līdz bezkrāsainam, kad tas ir piesātināts. Kad silīcija gēls ir piesātināts, bezkrāsaino, zilo un oranžo gēlu var atjaunot, izkarsējot to, lai izžāvētu mitrumu. Lai reģenerētu žāvēšanas līdzekli, tas ir jāuzsilda aptuveni līdz 80 °C. Paaugstinoties apkārtējās vides temperatūrai, silīcija gēla žāvēšanas efektivitāte samazinās. Tas padara silīcija gēlu nedaudz problemātisku izmantošanai kā žāvēšanas līdzekli siltā laikā, piemēram, vasaras mēnešos.

Zeolīts ir materiāls ar ļoti sīkām porām, ko sauc arī par molekulāro sietu. Tas absorbē ūdeni un spēj nožāvēt gaisu līdz ļoti zēmam mitruma līmenim. Adsorbcijas process ir atgriezenisks. Tomēr temperatūra, kas nepieciešama žāvēšanas līdzekļa reģenerācijai un uzkrātā ūdens atbrīvošanai ir līdz pat 550 °C.

Fosfora pentoksīds (P₄O₁₀) ir balts amorfs pulveris. Tas ir ļoti higroskopisks, tādēļ to var izmantot kā spēcīgu žāvēšanas un dehidrēšanas līdzekli. Tas spēj samazināt relatīvo mitrumu (RH) līdz 0,5%. Kad tas piesātinās ar mitrumu, fosfora pentoksīda pulveris kļūst slapjš. Reakcija ir vienvirziena. Fosfora pentoksīds ir ļoti kodīgs gan metāliem, gan cilvēka audiem. Tas var izraisīt ķīmiskus apdegumus.

***Prototipa temperatūras stabilitāte.**

WGMR ir ļoti jutīgi pret temperatūras izmaiņām. Tāpēc ir nepieciešama temperatūras stabilizācija vai termoapvalks, lai samazinātu vides ietekmi. Lai tieši stabilizētu WGMR temperatūru, var izmantot Peltjē elementu.

9. Literatūras saraksts

1. A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, V. S. Ilchenko, I. Solomatine, D. Seidel and L. Maleki. "Optical combs with a crystalline whispering gallery mode resonator" *Physical Review Letters*, Sept., 2008.
2. A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, L. Maleki. "On Frequency Combs in Monolithic Resonators" *Nanophotonics*, vol. 5, iss. 2, June 17, 2016.
3. A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, W. Liang, V. S. Ilchenko, D. Seidel and L. Maleki. "Whispering Gallery Mode Oscillators and Optical Comb Generators", 2009 Proceedings of the 7th Symposium, Frequency Standards and Metrology, 2009, pp. 539-558.
4. G. Lin, S. Diallo and Y. K. Chembo, "Optical Kerr frequency combs: Towards versatile spectral ranges and applications," *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Budapest, 2015, pp. 1-4.
5. W. Liang, A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, V. S. Ilchenko, D. Seidel and L. Maleki. "Generation of near-infrared frequency combs from a MgF₂ whispering gallery mode resonator" *Optics Letters*, vol. 36, no. 12, June 15, 2011.
6. W. Liang, A. B. Matsko, A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko, D. Seidel and L. Maleki. "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.
7. P. Del'Haye, A. Schliesser, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth and T. J. Kippenberg. "Optical Frequency Comb generation from a monolithic microresonator" *Nature letters*, vol. 450, Dec. 20, 2007.
8. A. Pasquazi, M. Peccianti, L. Razzari, D. J. Moss, S. Coen, M. Erkintalo, Y. K. Chembo, T. Hansson, S. Wabnitz, P. Del'Haye, X. Xue, A. M. Weiner, R. Morandotti. "Microcombs. A novel generation of optical sources" *Physics Reports*, vol. 729, January, 2018.
9. W. Loh, S. Yegnanarayanan, F. O'Donnell and P. W. Juodawlkis. "Ultra-narrow linewidth Brillouin laser with nanokelvin temperature self-referencing" *Optica*, vol. 6, no. 2, February, 2019.
10. G. K. M. Hasanuzzaman, S. Iezekiel. "Self-oscillating optical comb generator based on optoelectronic oscillator", 2017 Proc. SPIE 10103, Terahertz, RF, Millimeter and Submillimeter-Wave Technology and Applications, X, February, 2017.
11. Y. K. Chembo, N. Yu. "Modal expansion approach to optical-frequency-comb generation with monolithic whispering-gallery-mode-resonators" *Physical Review A*, vol. 82, no. 3, Sept. 7, 2010.
12. W. Liang, A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko, D. Eliyahu, A. B. Matsko, L. Maleki. "Stabilized C-Band Kerr Frequency Comb" *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, June, 2017.
13. A. Kubota, R. Suzuki, S. Fuji and T. Tanabe. "Third-Harmonic Generation with Kerr Frequency Comb in Silica Rod Microcavity", 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, 2017, pp. 1.

14. N. G. Pavlov, G. Lihachev, S. Koptyaev, A. S. Voloshin, A. D. Ostapchenko, A.S. Gorodnitskiy and M. L. Gorodetsky. "Kerr Soliton Combs in Crystalline Microresonators Pumped by Regular Multifrequency Diode Lasers", 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Girona, 2017, pp. 1-3.
15. J. Liu, W. P. Chen, D. N. Wang, B. Xu and Z. W. Wang. "A Whispering-Gallery-Mode Microsphere Resonator on a No-Core Fiber Tip" IEEE Photonics Technology Letters, vol. 30, no. 6, March 15, 2018.
16. T. Salgals, J. Alnis, R. Murnieks, I. Brice, J. Porins, A. V. Andrianov, E. A. Anashkina, S. Spolitis, and V. Bobrovs, "Demonstration of a fiber optical communication system employing a silica microsphere-based OFC source," Opt. Express 29, 10903-10913 (2021)
17. Yu, J.; Lewis, E.; Farrell, G.; Wang, P. Compound Glass Microsphere Resonator Devices. *Micromachines* **2018**, *9*, 356
18. Andrianov, A.V.; Anashkina, E.A. Single-mode silica microsphere Raman laser tunable in the U-band and beyond. *Results Phys.* **2020**, *17*, 103084.
19. Svela, A.; Silver, J.; Del Bino, L.; Zhang, S.; Woodley, M.T.M.; Vanner, M.R.; Del'Haye, P. Coherent suppression of backscattering in optical microresonators. *Light Sci. Appl.* **2020**, *9*, 204.
20. High performance computing center; Online: <https://www.rtu.lv/en/hpc-center>
21. RTU Ķīpsala campus map; Online: <https://www.rtu.lv/en/university/rtu-kipsala-campus>
22. Pongruengkiat, W., Pechprasarn, S., 2017. Whispering-Gallery Mode Resonators for Detecting Cancer. *Sensors* 17, 2095. (2017)