

Latvijas Elektrisko un optisko iekārtu ražošanas nozares kompetences centrs
Projekts Nr. 5.1.1.2.i.0/1/22/A/CFLA/002

PĒTNIECĪBAS PROJEKTA REZULTĀTI PA CETURKŠNIEM

Pētījums	Nr. 1.16 “Uz čipa veidots optiskās frekvenču ķemmes gaismas avots (CHIP-comb)”
Īstenotājs	AS ALFA RPAR un Rīgas Tehniskā universitāte
Progresā pārskata (PP) periods	01.07.2024.-30.08.2024.

Pētniecības projekta apraksta norādītie sasniedzamie rezultāti PP periodā	
*Sasniedzamais rezultāts: 1. Matemātiskais modelis matemātiskās modelēšanas vidē, kas spēj definēt WGM mikrorezonatoru uz optiskā čipa fiziskos parametrus; 2. Optisko čipu dizains (uz optiskā čipa veidoti toroidālie rezonatori), tehniskā raksturojuma topoloģija; 3. Izstrādātas optisko čipu platformas (uz optiskā čipa veidoti toroidālie rezonatori). *Galvenās darbības: 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); *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); 1.Tab. Projekta īstenošanas grafiksRūpnieciskie pētījumi (RP) – 01.03.2024 – 31.09.2024. Eksperimentālā izstrāde (EI) – 01.08.2024. – 31.12.2024.	

Ievads un galvenās sansiedzamās aktivitātes PP periodā
Projekts ir vērsts uz čipa veidota optiskās frekvenču ķemmes (OFC) gaismas avota izveidi, kas ir inovatīvs risinājums. Optiskās frekvenču ķemmes (angl. <i>optical frequency comb</i> (OFC)) izveide, izmantojot optisko čipu platformu (tā saukto fotonisko integrālo shēmu (angl. <i>photonic integrated circuit</i> (PIC)) jeb integrēto optisko fotoniku). Projektā tiek paredzēts ieviest OFC risinājumu, kura pamatā ir toroidāls mikrozonators, līdz ar to tiek veikta progresīvas pieejas izstrāde un jauninājuma ieviešana integrētās fotonikas jomā. Galvenais mērķis ir izstrādāt energoefektīvu uz optiskā čipa veidotu toroidālo čukstošās galerijas modu (angl. <i>whispering gallery mode</i> (WGM)) augsta Q faktora mikrozonatoru kā jaunu gaismas avotu plašam lietojumu klāstam. Projekta mērķis ir demonstrēt veiksmīgu OFC ģenerēšanu no toroidāla mikrozonatora, tādējādi demonstrējot tā potenciālu kā uz optiskā čipa integrētai fotonikas ierīcei. Plānotie rezultāti ietver visaptverošu ķemmes īpašību analīzi, piemēram, ķemmes brīvā spektra atstatumu (FSR), spektrālo joslas platumu un koherenci, uzsverot šīs pieejas priekšrocības.

PP periodā sasniegtie rezultāti
1. Veikt visaptverošu esošo mikrozonatoru 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 viļņgarumdales blīvēšanas WDM multiplekseris apvieno vairākus lāzerus, lai ģenerētu frekvenču režģi, t.i., lai to izmantotu WDM optiskajiem kanāliem. Mikroskāmas mēroga mikrozonatora 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 mikroskāmā 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. <i>whispering gallery mode</i> (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 mikrozonatora vides stabilitātes dēļ. Mikrozonatori ir mazi – diametrs no mm līdz μm, tāpēc ir iespējama integrācija mikroskāmā, un tas jau ir pierādīts [5, 6]. Tā kā parametriskajam pastiprinājumam piemīt platjoslas raksturs, izmantojot WGM rezonatorus, ir iespējams ģenerēt diskretus ķemmes režģus 500 nm platā diapazonā (~70 THz) aptuveni 1550 nm, nepaļaujoties uz ārēju spektra paplašināšanos [7]. *WGM rezonatoru klasifikācija Mikrozonatorus klasificē galvenokārt pēc ražošanas veida. Ir telpiskie čukstošās galerijas modas režģa (WGMR) rezonatori un integrēti WGMR rezonatori. Telpiskie WGMR ir monolīti mikrozonatori, un tiem ir sfēriska, cilindriska, toroidāla un gredzenveida ģeometrija. Lielapjoma sfēriskie rezonatori bija pirmā tehnoloģija, kas izstrādāta mikromēroga lielapjoma sfērām – silīcija dioksīda mikrosfērām 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 mikrozonatorus no kristāliskiem materiāliem. Šāda veida mikrozonatoriem 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. <i>Complementary metal-oxide-semiconductor</i> (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 gredzena 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 atsauces 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***

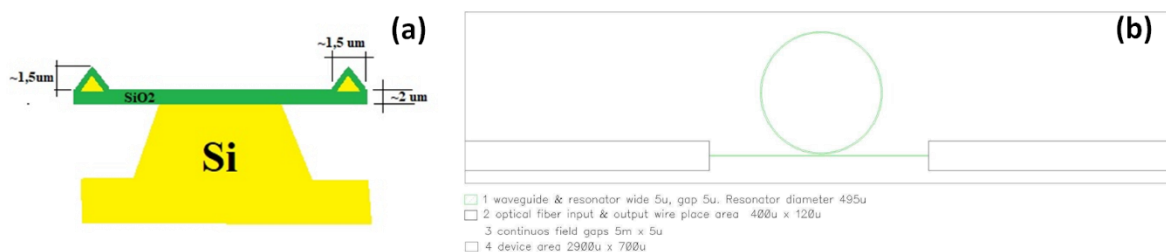
Frekvences ķemmes ģeneratoru realizācijā, kas ietver mikrosfēras vai mikrodobuma mikrorezonatorus, dielektriskie mikrorezonatori ir veidoti kā cilindrs, sfēra vai toroīds, kuru izmēri svārstās no dažiem desmitiem mikrometru līdz dažiem milimetriem. Tā kā lielapjoma materiāliem ir mazi zudumi un rezonatoriem 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 kontrolera, 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 sūkņēšanai, 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 MgF₂ mikrorezonators tiek sūkņēts 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 mikrosfērām 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.

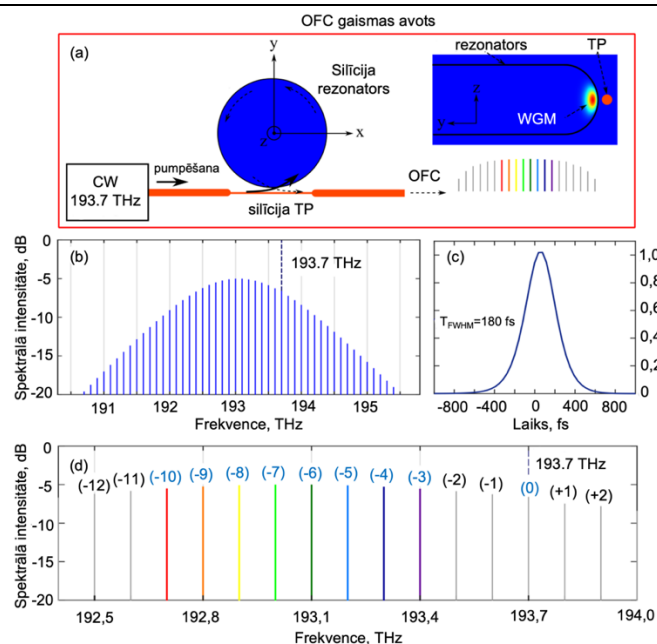
Kerra OFC nesēju FSR zem 100 GHz ir piemērots WDM sakaru sistēmā, atbilstoši ITU-T starpkanālu intervāla nosacījumiem. Priekšrocības, ko sniedz vairāku spektrālo līniju vienlaicīga ģenerēšana vienā šķiedrā, var izmantot WDM arhitektūrā. Piemēram, nākotnes piektās paaudzes 5G un sestās paaudzes 6G mobilo sakaru risinājumos var gūt ievērojamu labumu no milimetru-viļņu 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 vairācības 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 mikrotoroida (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 izklaidējošā 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 LugiatoLefever vienādojumu, kas nav atkarīgs no rezonatora ģeometrijas, kura tiek izmantota matemātiskajā modelēšanās. Matemātiskajā modelēšanās tika lietota bezdimensiju forma, kas ņem vērā Ramana reakciju, anomālo dispersiju un kubisko dispersiju.

- Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrozona 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 mikrozona dizaina specifikācijas, tajā skaitā izpētīta optimālā ģeometrija un materiālu bāzes. Darbs tika veikts pamatojoties uz izpētīto literatūras avotu datu bāzēm un pieejamo informāciju toriodālo mikrozona. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrozona 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 SiO slāņu kodināšanas procesiem.

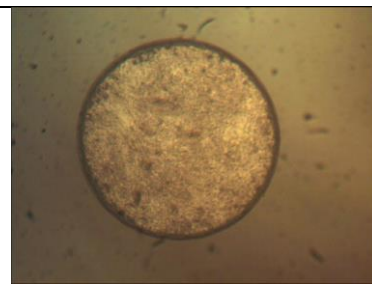
Silīcija dziļai kodināšanai un biezu SiO₂ slāņu kodināšanai nepieciešams izmantot cieto fotomasku. Ņemot vērā SiN rezonatora pretestības sildītāja alumīnija vadu izmantošanu, alumīnijs tika izvēlēts kā cietā maska. Šim nolūkam ir izstrādāts alumīnija plēves magnetrona izsmidzināšanas režīms. Kā maska 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 plēvei (kodināšanas ātrums 170 nm/min.) parādīja, ka Al maska ar biezumu 0,4-0,7 mikroni neuztur šo režīmu, un maska ar 1 mikronu biezumu sniedz apmierinošus sākotnējos rezultātus.



3. att. SiO₂ kodināšanas paraugs 5 μm biezs (šķidruma 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 biežumu 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).
 $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{organiskie blakusprodukti}$

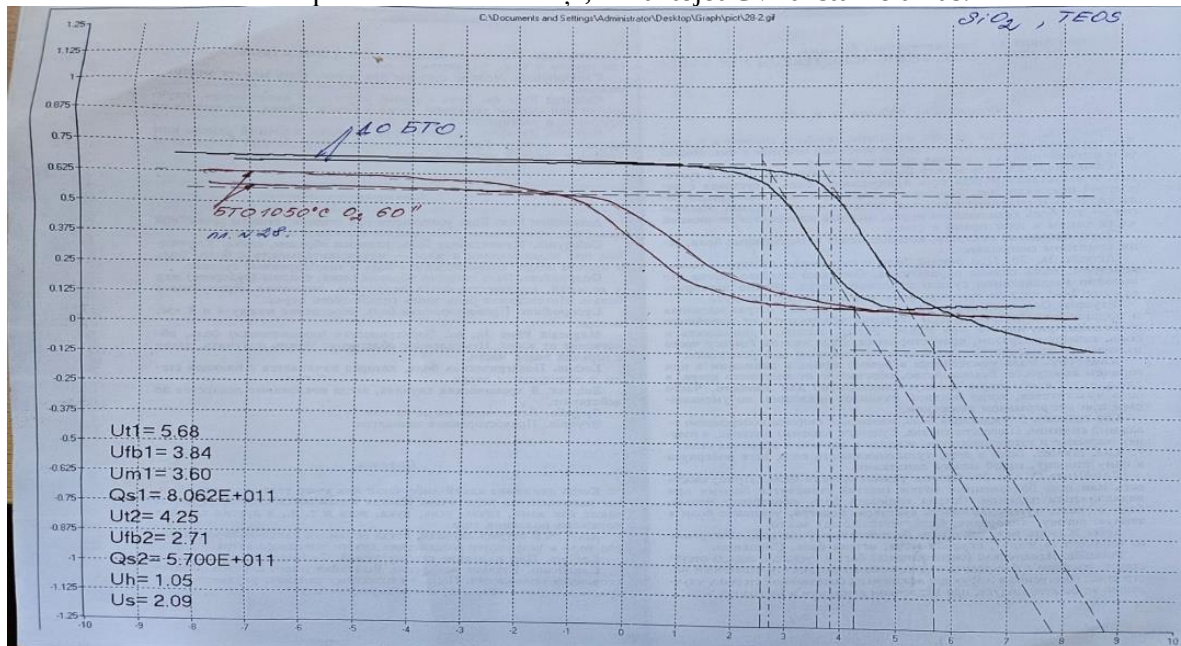
Procesa režīmi:

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

Iegūtā slāņa parametri:

- plēves biežums 1 mikrons
- laušanas koeficients diapazonā 1,41-1,44
- šķidruma kodināšanas ātrums ir aptuveni 0,20 μm/min.

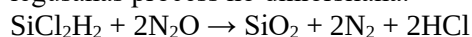
Optisko īpašību ziņā CVD SiO₂ slānis ir zemāks par termisko oksīdu. Tāpēc ātrā termiskā atkausēšana tika pārbaudīta pie T = 1050 °C 60 sekundes skābeklī. Iegūtie paraugi pirms un pēc atkausēšanas tika novērtēti pēc to uzlādes stāvokļa, izmantojot CV raksturlielumus.



6. att. Eksperimentālie rezultāti.

Tādējādi, pamatojoties uz raksturlielumiem, mēs varam secināt, ka RTA samazina lādiņa līmeni SiO₂ slānī. Pamatojoties uz silīcija nitrīda plēvju RTA rezultātiem, var pieņemt, ka CVD oksīda slāņu RTA

iznīcina arī ūdeņraža saites (veidojas TEOS sadalīšanās laikā). kas, iespējams, uzlabo oksidācijas optiskās īpašības. Lai vēl vairāk uzlabotu biezo SiO₂ slāņu caurspīdīgumu, tiek pētīts SiO₂ plēvju iegūšanas process no dihlorsilāna:



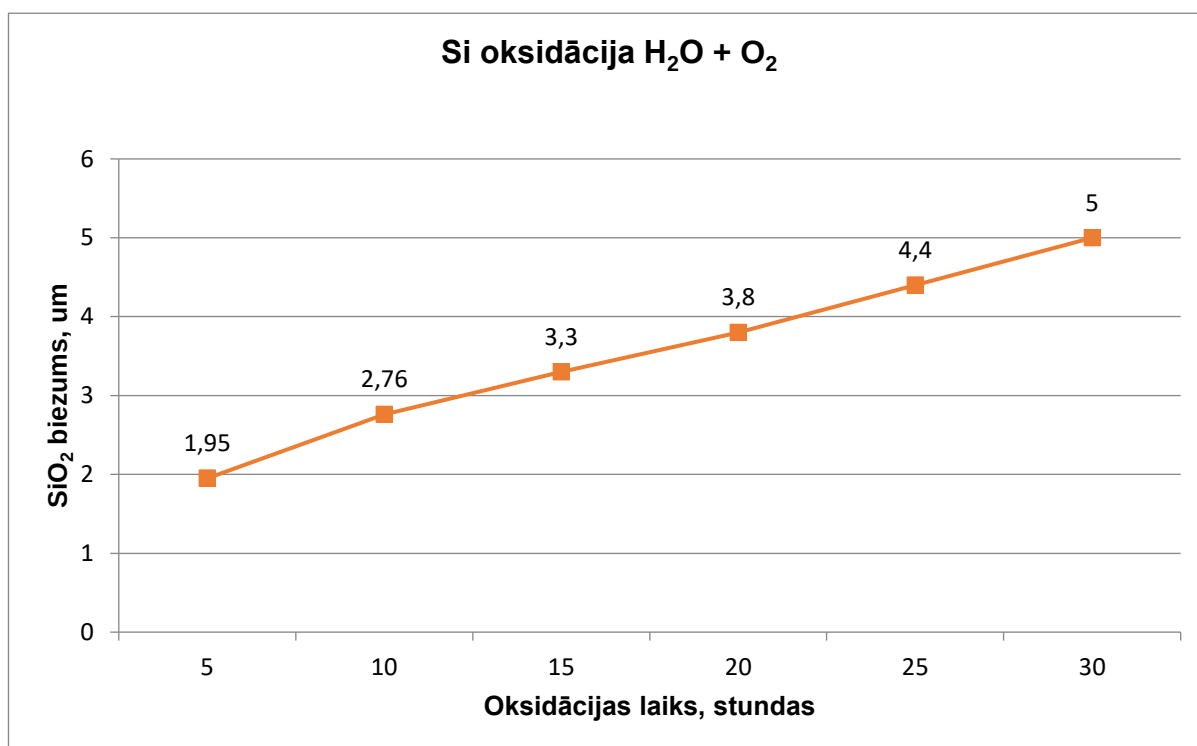
2.3 Silīcija dioksīda biezu slāņu izstrāde un izpēte, kas iegūta silīcija termiskā oksidēšanā

Lai izgatavotu optisko dobumu, mēs izmantojam iegādātās monosilīcija vafeles ar (100) orientāciju, ar termiski audzētu silīcija dioksīda slāni 5 μm biezumā (University Wafer). Tajā pašā laikā tika pētīts jautājums par biezu SiO₂ slāņu iegūšanu uz mūsu pašu monosilīcija plāksnēm. Silīcija mitrās termiskās 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 biezums tiek sasniegts oksidācijas procesā aptuveni 30 stundu laikā. Plēves laušanas koeficients diapazonā 1,41 – 1,44. Termiskā oksīda augšanas ātrums ir parādīts 6. attēlā.



6.att. Termiskā oksīda augšanas ātrums.

SiO₂ plēvju biezums tika mērīts, izmantojot lodveida sekcijas metodi. Lai iegūtu kontrasta robežu, uz pētāmā parauga virsmas tika uzklāta apmēram 100 nm bieza volframa plēve (magnetrona izsmidzināšanas metode).

2.4 Tehnoloģijas izstrāde pretestības slāņu ražošanai izmantošanai SiN rezonatora sildelementā.

Pretestības mikrosildītāju izveides metožu analīzes rezultātā kā pretestības slānis tika izvēlēts slānis, kas iegūts ar metāla silicīda sakausējuma mērķa katoda izsmidzināšanu.

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:

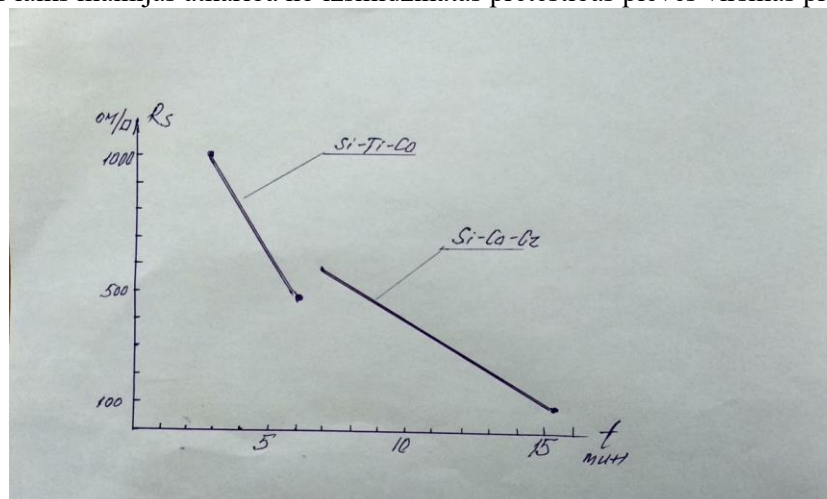
- lielāka pretestība (Rs 400 -1000 Ohm/kv.) sastāvs Si-Ti-Co (67:23:10)
- zemas pretestības (Rs 50 - 300 Ohm/kv.) sastāvs Si-Co-Cr (28:60:12).

Tipisks metālu-silicīdu sakausējumu katoda izsmidzināšanas veids:

- mērķa diametrs - 180 mm

- maksimālais vakuums – 10^{-6} mm Hg
- darba vakuums $2 \div 3 \cdot 10^{-3}$ 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

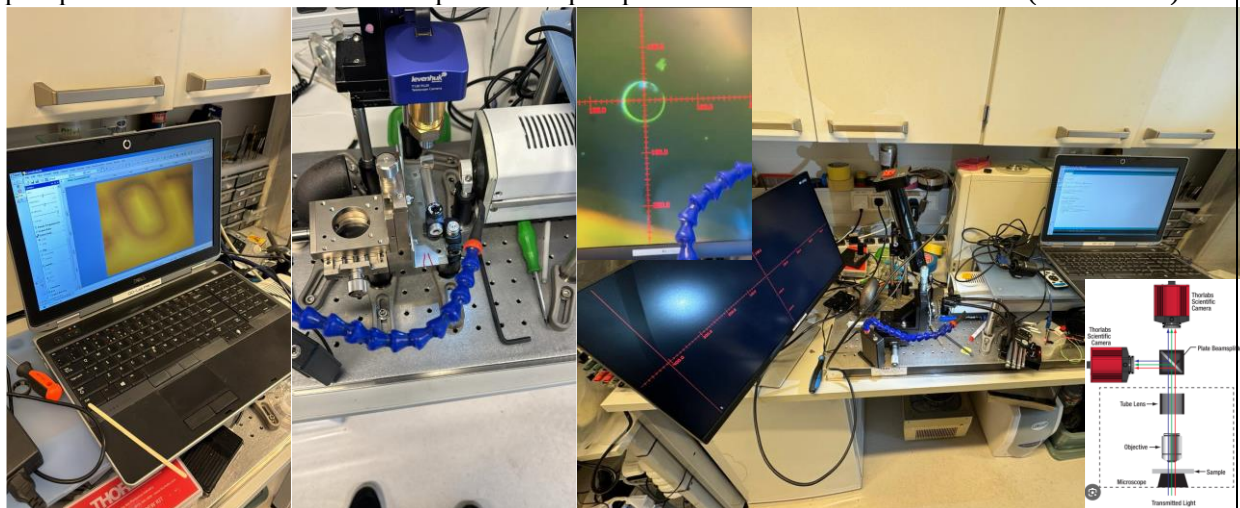
Izsmidzināšanas laiks mainījās atkarībā no izsmidzinātās pretestības plēves virsmas pretestības.



7.att. Virsmas pretestības atkarība no smidzināšanas laika.

SiN rezonatora dizains paredz izmantot pretestības plēvi ar R_s 50–200 omi/kv. Pretestības slāņa virsmas pretestības specifiskās vērtības tiks noteiktas, pamatojoties uz SiN rezonatora rezonanses noregulēšanas rezultātiem.

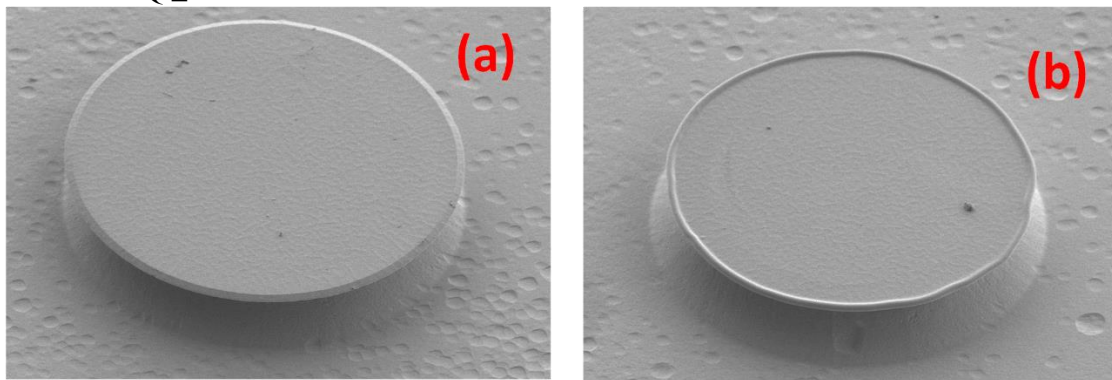
Tomēr toroidālais rezonators (tā malas) uz SOI platformas var būt pārāk plānas priekš 1550 nm rezonanses viļņa garuma, līdz ar to ir nepieciešams veikt toroidālā rezonatora uz SOI platformas pēcapkausēšanu ar CO2 lāzeru. SOI platformas pēcapkausēšanas stends ar CO2 lāzeru (skat. **8. att.**).



8.att. Izveidotais toroidālā rezonatora uz SOI platformas stends pēcapkausēšanu ar CO2 lāzeru.

Pamatojoties uz pašreizējiem novērojumiem, lāzera apertūra 200 μm , eksponēcijas laiks aptuveni 1 sekunde, jauda 35–45 W un vairāki lāzera kadri ir optimālās robežvērtības. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrorazonatora vizuāls salīdzinājums pirms (a) un pēc (b) apkausēšanas ar CO2 lāzeru (skat. **9.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

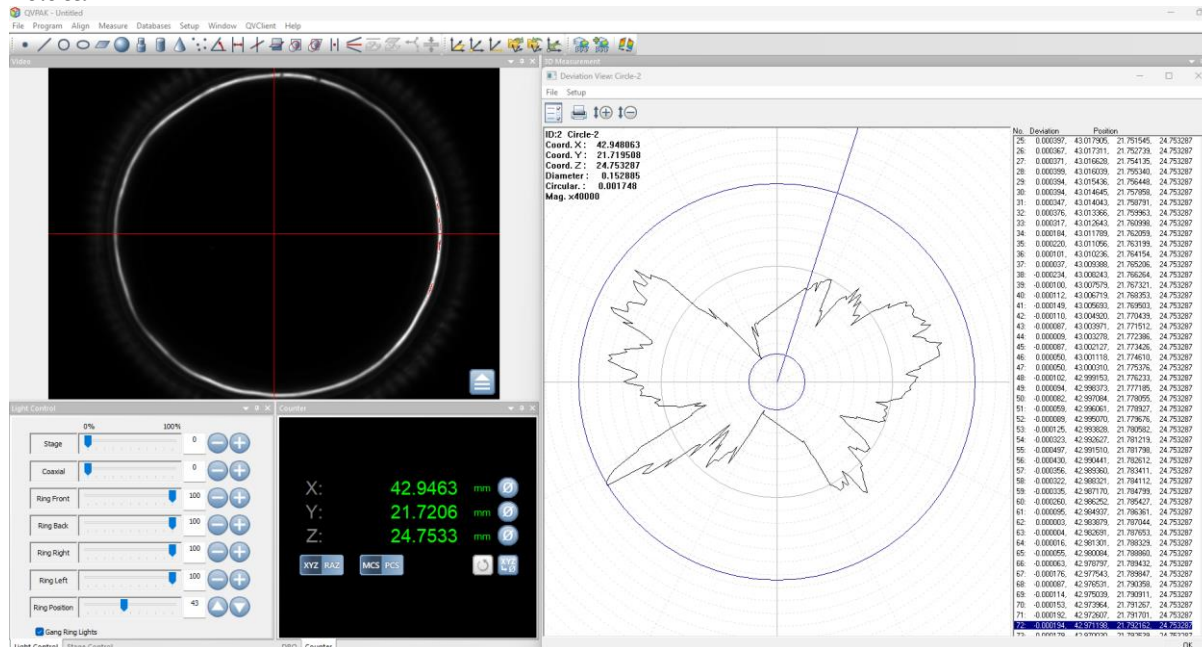
izvēlētajā SOI platformas materiālam paredzētā OFC ķemmes ģenerēšanas norisinās pie rezonatora ar labuma faktoru $Q \geq 1 \times 10^6$.



9. att. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrozona vizuāls salīdzinājums pirms (a) un pēc (b) apkausēšanas ar CO₂ lāzeru.

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

10.att.



9.att. Uz optiskā čipa veidota WGM toroidāla augsta Q faktora mikrozona ģeometrijas viendabīgums.

4. Savienojuma stāvokļu (mikrozona un patiecinātā 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 mikrozona 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 paruaugu testēšana Q faktora noteikšanai un optiskās frekvenču ķemmes ierosināšanā (skat. 11. att.)



10.att. izstrādāto paruagu testēšana Q faktora noteikšanai un optiskās frekvenču ķemmes ierosināšana.

Patlaban aktivitāte ir sākuma/norises stadijā un darbs pie prototipa izstrādes turpinās!

Atsauces:

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 MgF_2 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 MgF_2 and CaF_2 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. "Micro-combs. 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)

Datums: 30.08.2024.