



Projekta zinātnisko rezultātu pārskats

Atskaites periods Nr. 7.
(16.11.2020. - 15.02.2021.)

Projekts: Nr. 1.1.1.1/18/A/155 “Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās”.

Projekta realizētāji: Latvijas Universitāte (vadošais partneris), Rīgas Tehniskā universitāte, SIA “AFFOC Solutions”.

Projekta vispārējais mērķis: Veikt pētniecību, kas veicina Latvijas viedās specializācijas stratēģijas mērķu sasniegšanu, cilvēkkapitāla attīstību zinātnē un tehnoloģijās un jaunu zināšanu radīšanu, lai uzlabotu konkurētspēju tautsaimniecībā.

Projekta mērķis ir: iegūt jaunas zināšanas par čukstošo galeriju modu rezonatoru optiskajām frekvenču ķemmēm (WCOMBs) un izstrādāt, konstruēt un testēt ķemmes ģenerators prototipu telekomunikāciju pielietojumiem.

Projekta darbības un paveiktais dotajā atskaites periodā

Darbība 1. WCOMB izstrāde, modelēšana, testēšana un optimizēšana

Darbība 1.1. Dažādu ČGM rezonatoru izstrāde un iegūšana

Rezonatoru izgatavošanas metodikas uzlabošanā tika strādāts pie metodikas, kā iegūt rezonatorus ar atkārtojumu vēlamu diametru, jo telekomunikāciju WCOMB ar frekvenci 400 GHz nepieciešams izgatavot mikrosfēras ar diametru 170 μm. Mikrosfēru diametru mēra mikroskopā. Tika secināts, ka vislabāko atkārtojamību dod metode ar elektrisko lokizlādi, ko lieto šķiedru sametināšanai. Izveidots un izmēģināts stends rezonatoru lodīšu kausēšanai šķiedras galā ar CO₂ lāzeri, kas, atšķirībā no liesmas kausēšanas metodes, nenopūš lodīti uz sāniem. Ar CO₂ lāzeri svaigi izgatavotām lodītēm izmērīts optiskais Q faktors ap 2E8.

Darbība 1.3. WCOMB sistēmas, kur tiek izmantota izstieptā šķiedra, izveide, testēšana un optimizēšana

Šajā pārskata periodā iemācījāmies, kā ātri un atkārtojami iegūt frekvenču ķemmes ģenerāciju no kvarca (SiO₂) mikrolodītēm. Prototipā XYZ galdiņš tika samainīts pret ļoti smalku 3D mikropozicionieri, kas ļauj bez histerēzes un “luftes” nopozicionēt mikrosfēras pieskaršanās vietu dažus mikronus tievajai optiskajai šķiedrai.

Ar izveidoto prototipu izdevās iegūt pietiekami stabilas ķemmes, lai atstājot pa nakti ieslēgtas, strādātu līdz rītam bez cilvēku iejaukšanās, kas ir ļoti svarīgi telekomunikāciju pielietojumiem. Nākamais solis bija veiksmīga prototipa pārvešana no LU ASI Jelgavas ielā uz RTU Ķīpsalā, un prototips nonāca galā darba kārtībā. RTU Ķīpsalā uz kvarca mikrosfēras rezonatora tika iegūtas frekvenču ķemmes ar attālumu starp līnijām 400 GHz (kas atbilst telekomunikāciju

standartam). Pirmo reizi izdevās nodemonstrēt, ka ir iespējams uz šādas ķemmes līnijas uzmodulēt telekomunikāciju datus - notiek publikāciju gatavošana un konferenču ziņojumi.

LU ASI tika strādāts pie sašaurinātās šķiedras izstiepšanas metodikas, lai izstiepjot saglabātos laba transmisija. Ūdeņraža liesmas vietā tievās šķiedras stiepšanai pielāgota propāna-gaisa liesma - deggāze, kas ir daudz pieejamāka. Tika secināts, ka gāzes liesmai jābūt nevis punktveida bet pietiekami platai, lai tievā šķiedra stieptos pietiekami lēzeni, lai gaisma no šķiedras kodola (*core*) neizietu šķiedras apvalkā (*cladding*).

Atstrādāta metode, kā pie U-veida stiprinājuma pielīmēt dažus mikronus tievo izstiepto sašaurināto optisko šķiedru (*tapered fiber*) un pie šī paša stiprinājuma pēc tam pielīmēt mikrosfēras rezonatoru ieregulētu optimālai saskarsmei ar šķiedru. Tas ļāva noņemt rezonatoru ar tievo šķiedru no motorizētā galdiņa un ievietot kompaktā kastītē, kas aizsargā no putekļiem un gaisa mitruma. Tas ir solis uz kompakto komercializētu mikrorezonatora frekvenču ķemmes moduli ar šķiedras ievadu un izvadu. Dažu mēnešu laikā rezonanses tomēr degradējās, neskatoties uz kastītē ievietoto silikagela gaisa sausinātāju un oglek adsorbentu gaistošām organiskām vielām. Diemžēl pielīmēšanas metode nav piemērota WCOMB ģenerācijai, jo nav iespējams pamainīt pieskaršanās vietu un tiek domāts par kompakto mikropozicionieru izmantošanu.

Darbība 1.4. ČGM rezonatoru efektu un WCOMB sistēmas matemātiskā modelēšana

Tika apgūta mikrorezonatora dispersijas modelēšana ar *COMSOL Multiphysics*, kas sastāv no materiāla dispersijas un no rezonatora ģeometriskās dispersijas. Ģeometriskā dispersija atkarīga no SiO₂ rezonatora diametra, maliņas liekuma rādiusa virpotiem rezonatoriem, SiO₂ kārtiņas biezuma čipu rezonatora. Lai efektīgi veidotos plata spektra ķemme, ir nepieciešams pēc iespējas optimizēt ģeometriju, lai minimizētu dispersiju.

Tālāk šo dispersiju ievada *Python* programmā *pyLLE*, kas rēķina nelineāro *Lugiato-Lefevera* vienādojumu, kura atrisinājums var būt gan nestabilas ķemmes veidošanās, gan solitonu ķemmes ar labu stabilitāti.

Eksperimentos RTU ģenerētajā WCOMB ar ātru fotodetektoru un oscilogrāfu tika novērotas amplitūdas nestabilitātes ar frekvenci daži desmiti MHz. Telekomunikāciju datu pārraidei pēc iespējas jāsamazina šādas amplitūdas fluktuācijas. Šo periodisko amplitūdas nestabilitāti palīdzēja izprast literatūras studijas un *Comsol* modelēšana. Ķemmju ģenerēšanas laikā rezonatoru pumpē ar apmēram 0.1 W jaudu, bet mikrolodītes rezonatorā cirkulē daudz lielāka gaismas jauda ar kārtu 100 W, un gaismas spiediens pavisam nedaudz izpleš rezonatoru. Tajā brīdī rezonators izskaņojas no rezonanses ar pumpējošā lāzera starojumu un cirkulējošā jauda rezonatorā krīt. Process periodiski atkārtojas, un novērojama ķemmes līnijas amplitūdas modulācija, kas eksperimentāli bija ap 27 MHz 170 μm diametra mikrosfērai. *Comsol* vidē izveidotā simulācija lodītes mehānisko rezonansu frekvenču noteikšanai izdeva vērtību 27 MHz, kas sakrīta ar eksperimentāli novēroto.

Darbība 2. Portatīva WCOMB izstrāde, izveide un testēšana pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās

Darbība 2.3. Uz WCOMB bāzes veidotas optisko sakaru sistēmas matemātiskā modelēšana

VPI Photonics VPItransmissionMaker simulācijas programmatūras vidē ir izstrādāts matemātiskais modelis. Tajā ir iespējams integrēt WCOMB daudzviļņa gaismas avota elementu ar laboratorijas apstākļos eksperimentāli nomērītām parametru raksturlīknēm un novērtēt sistēmas darbību pie tipiskiem metro-piekļuves optiskā tīkla attālumiem ar datu pārraides ātrumu līdz 10 Gbit/s kanālā, pielietojot optiskā signāla impulsa amplitūdas modulācijas formātus.

Darbība 2.4. Šķiedru optiskajā sakaru sistēmā integrēta WCOMB testēšana laboratorijā
Laboratorijas vidē ir veikta šķiedru optiskās pārraides sistēmas slēguma shēmas izstrāde ar 10 Gbit/s pārraides ātrumu kanālā, pielietojot NRZ-OOK nesējsignālu modulācijas formātu. Slēguma shēmā ir integrēts eksperimentāli izstrādātais WCOMB avots, ir veikta modeļa elektrisko, opto-elektrisko un optisko komponentu galveno parametru analītiska un eksperimentāla pirmējā salāgošana, turpinās darbs pie datus saturoša pārraidāmā signāla kvalitātes novērtējuma atkarībā no optiskās pārraides līnijas garuma un signāla polarizācijas stāvokļa.

Darbība 4. Projekta rezultātu izplatīšana

Darbība 4.1. Zinātnisko rakstu un konferenču tēžu publicēšana *Web of Science* vai *SCOPUS* (A vai B) datubāzēs iekļautos žurnālos vai rakstu krājumos

Atbilstoši projekta laika grafikam, veikta projekta ietvaros radīto rezultātu izplatīšana (dalība zinātniskās konferencēs un sagatavoti zinātniskie raksti).

- Raksti augstas ietekmes žurnālos ar citēšanas indeksu vismaz 50% no nozares vidējā rādītāja:
 - *OSA Optics Express*. Salgals T., Alnis J., Murnieks R., Brice I., Porins J., Andrianov A.V., Anashkina E.A., Spolitis S., Bobrovs V. *Demonstration of fiber optical communication system employing silica microsphere-based OFC source*, pp. 1-10, *OSA Opt. Express*, 2021 (iesniegts)
 - *IEEE Access*. Spolitis S., Murnieks R., Skladova L., Salgals T., Andrianov A.V., Marisova M.P., Leuchs G., Anashkina E.A., Bobrovs V. *IM/DD WDM-PON communication system based on optical frequency comb generated in silica whispering gallery mode resonator*, pp. 1-11, *IEEE Access*, 2021 (iesniegts)
- Raksti konferenču rakstu krājumos:
 - *SPIE Proceedings*: I.Brice, K.Grundsteins, A.Sedulis, T.Salgals, S.Spolitis, V.Bobrovs, J.Alnis, “*Frequency comb generation in whispering gallery mode silica microsphere resonators*”, pp. 1-9, *SPIE Proc.*, 2021, (iesniegts)
- Dalība konferencēs:
 - 2021.gada 11.-14.janvāris. *Photonics Online meetup conference*, prezentēts elektroniskais posteris: Inga Brice, “*Optical frequency comb generated inside silica microsphere for WDM Data Transmission System*”

- 2021.gada 12.februāris. Latvijas Universitātes 79.starptautiskā zinātniskā konference, sekcija "Atomfizika, optiskās tehnoloģijas un medicīniskā fizika" Zoom vidē:
 1. K.Draguns, "ČGM mikrorezonatora uzpumpēšanas par frekvenču ķemmi modelēšana"
 2. I.Brice, K.Grundsteins, T.Salgals, J.Alnis "Silikas mikrosfēras lodītē ģenerētas optiskā frekvenču ķemme WDM datu pārraides sistēmām"
 3. A.Sedulis "ČGM rezonatoru slīpēšanas parametru ietekme uz mikrorezonatoru ķemmju veidošanos"
 4. R.Veilande, I.Bērons, O.M.Eberliņš „Divi saistītie nelineārie Šrēdingera vienādojumi”.
- Pieteikumi dalībai konferencēs:
 - 2021.gada 6.-11.marts. *Photonics West 2021 Digital Forum*. I.Brice, K.Grundsteins, A.Sedulis, T.Salgals, S.Spolitis, V.Bobrovs, J.Alnis - *Frequency comb generation in whispering gallery mode microsphere resonators*
 - 2021.gada 20.-24.jūnijs. CLEO/Europe-EQEC 2021. K.Draguns, I.Brice, T.Salgals, J.Porins, V.Bobrovs, J.Alnis - *Silica WGM microresonator comb engineering for WDM data transmission*.