



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

Atskaite

Par Latvijas Universitātes projekta “Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās” Nr. 1.1.1.1/18/A/155 norisi laika posmā no 16.05.2019 līdz 15.08.2019 (1. atskaites posms).

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.

Izpildītāji

- Partneri:
 - LU ASI
 - RTU Telekomunikāciju institūts
 - SIA «AFFOC SOLUTIONS»
- LU ASI komanda šobrīd:
 - Jānis Alnis - proj. vadītājs
 - Aigars Atvars - vad. pētn.
 - Inga Brice – zinātniskā asistente
 - Dina Bērziņa - administratore
 - Arvīds Sedulis fizikas bak. st. 2. gads.

Projekta uzsākšanas dienā 16. maijs, 2019.
WCOMB – W burts no «*Whispering gallery mode*»



Pašlaik 'aktīvās' projekta darbības

1. WCOMB izstrāde, modelēšana, testēšana un optimizēšana

1.1. Dažādu ČGM rezonatoru izstrāde un iegūšana

1.2. WCOMB sistēmas, kur tiek izmantota prizma, izveide, testēšana un optimizēšana

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

1.4. ČGM rezonatoru efektu un WCOMB sistēmas matemātiskā modelēšana

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

2.1. Eksistējošo WCOMB ģeneratoru veidu, risinājumu un realizāciju izpēte šķiedru optiskajās sakaru sistēmās

2.2. Portatīva WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās

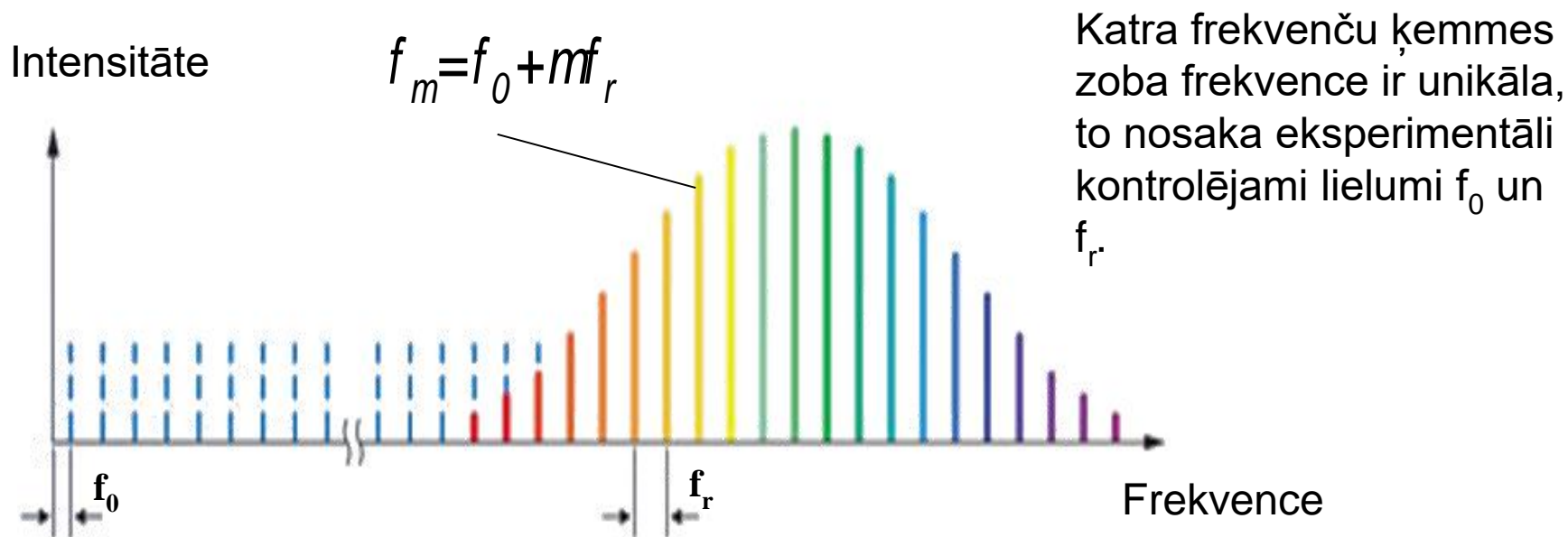
4. Projekta rezultātu izplatīšana

4.2. Intelektuālā īpašuma tiesību pārvaldīšana Tehnoloģiju tiesību - zinātības apraksts

4.3. Datu pārvaldes plāns

4.5. Publicitāte

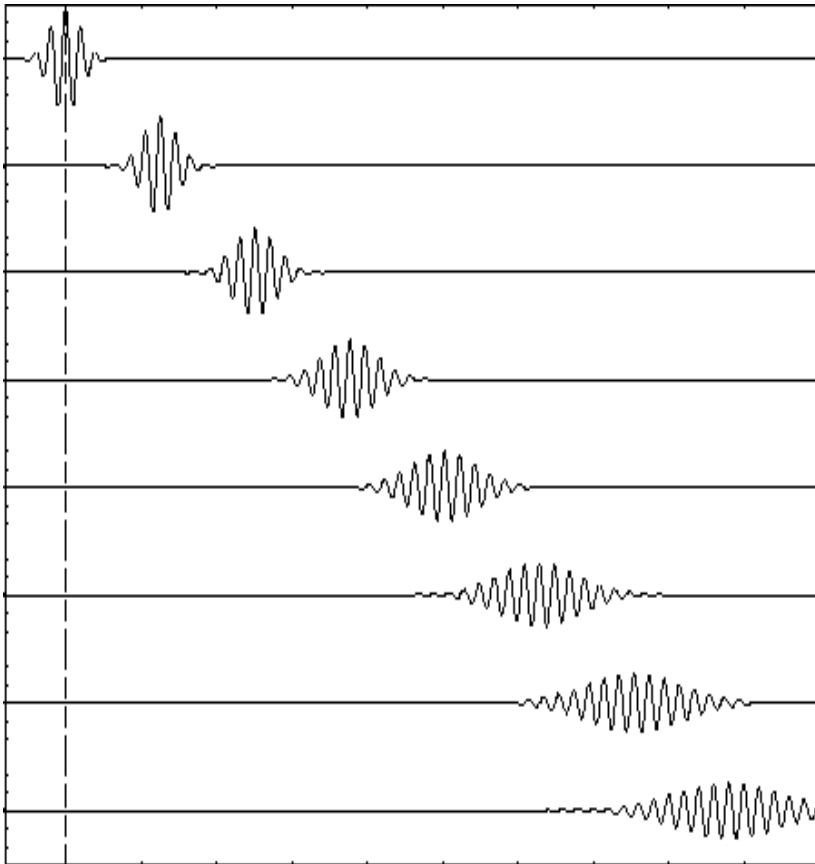
Frekvenču ķemmes struktūra



Svarīgi, lai ģenerētai frekvenču ķemmes zobi būtu vienādā attālumā (f_r nemainītos)!

Kerra efekts

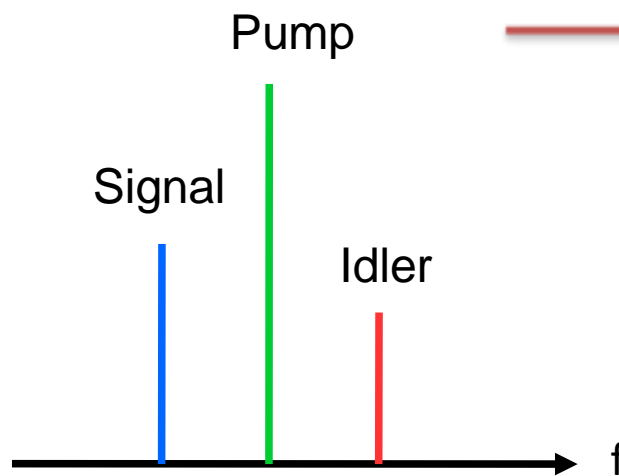
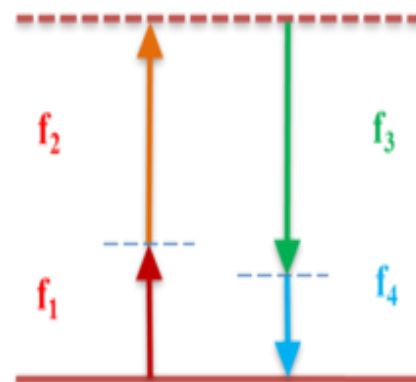
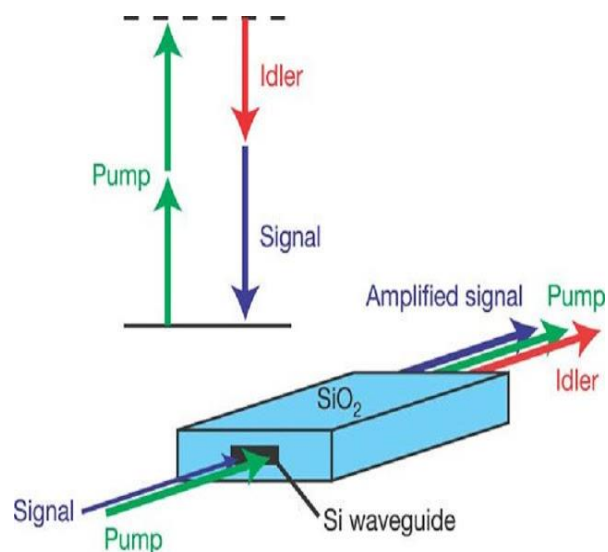
- Kerra efekts ir materiāla laušanas koeficienta izmaiņa, reaģējot uz ārēju elektrisko lauku. Tas ir 3. kārtas nelineārais efekts.



Ar Kerra efektu iespējams kompensēt dispersiju – viļņa ātruma atkarību no tā frekvences –, iegūstot solitonu – viļņu paketi kas saglabā savu formu izplatoties ar konstantu ātrumu materiālā.

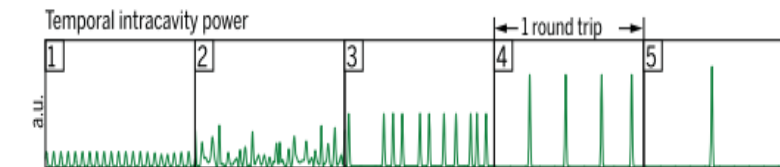
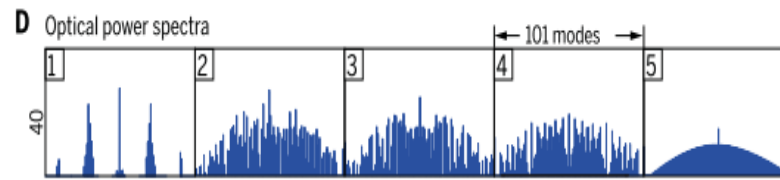
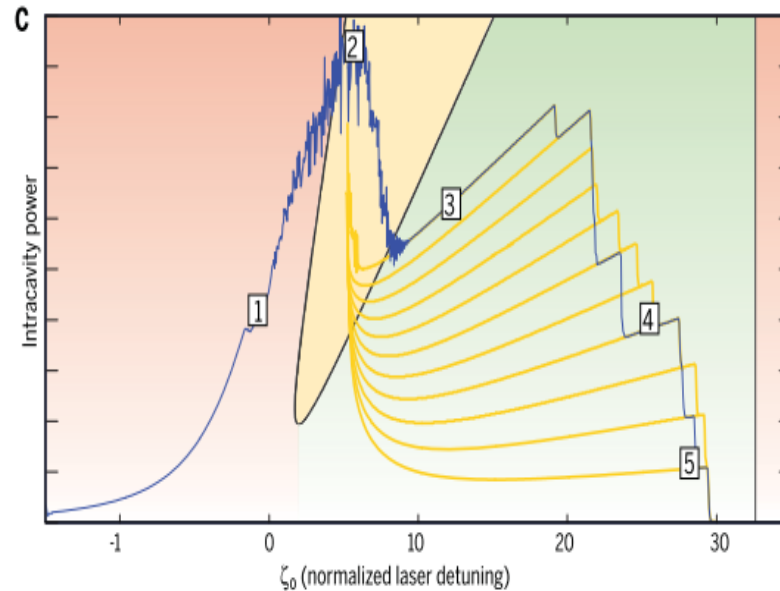
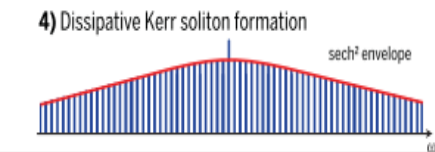
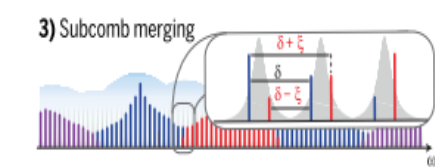
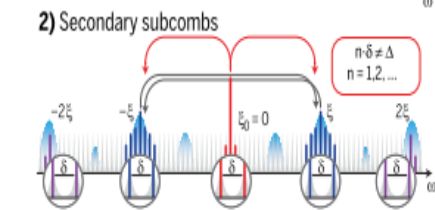
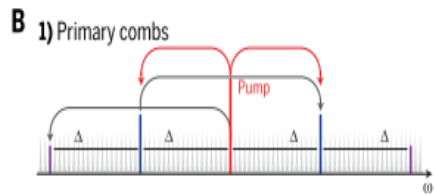
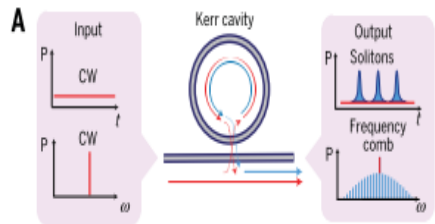
Four Wave Mixing (FWM)

- FWM – **četrus viļņu sajaukšanās** ir nelineārs efekts vidē, kurā no 2 vai 3 viļņiem tiek ģenerēti 2 vai 1 jauni viļņi
- Frekvenču ķemmes ģenerācijai izmanto deģenerētu FWM – $2f_p = f_s + f_i$

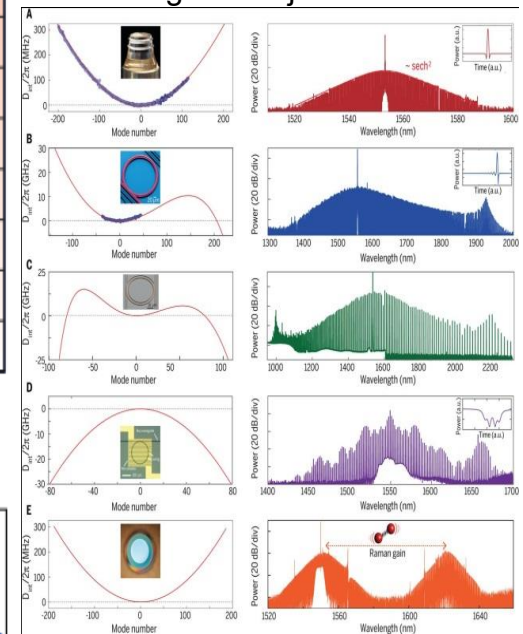


Attālums starp signāliem ir ekvidistants

Kā rodas Kerra frekvenču ķemme mikrorezonatorā

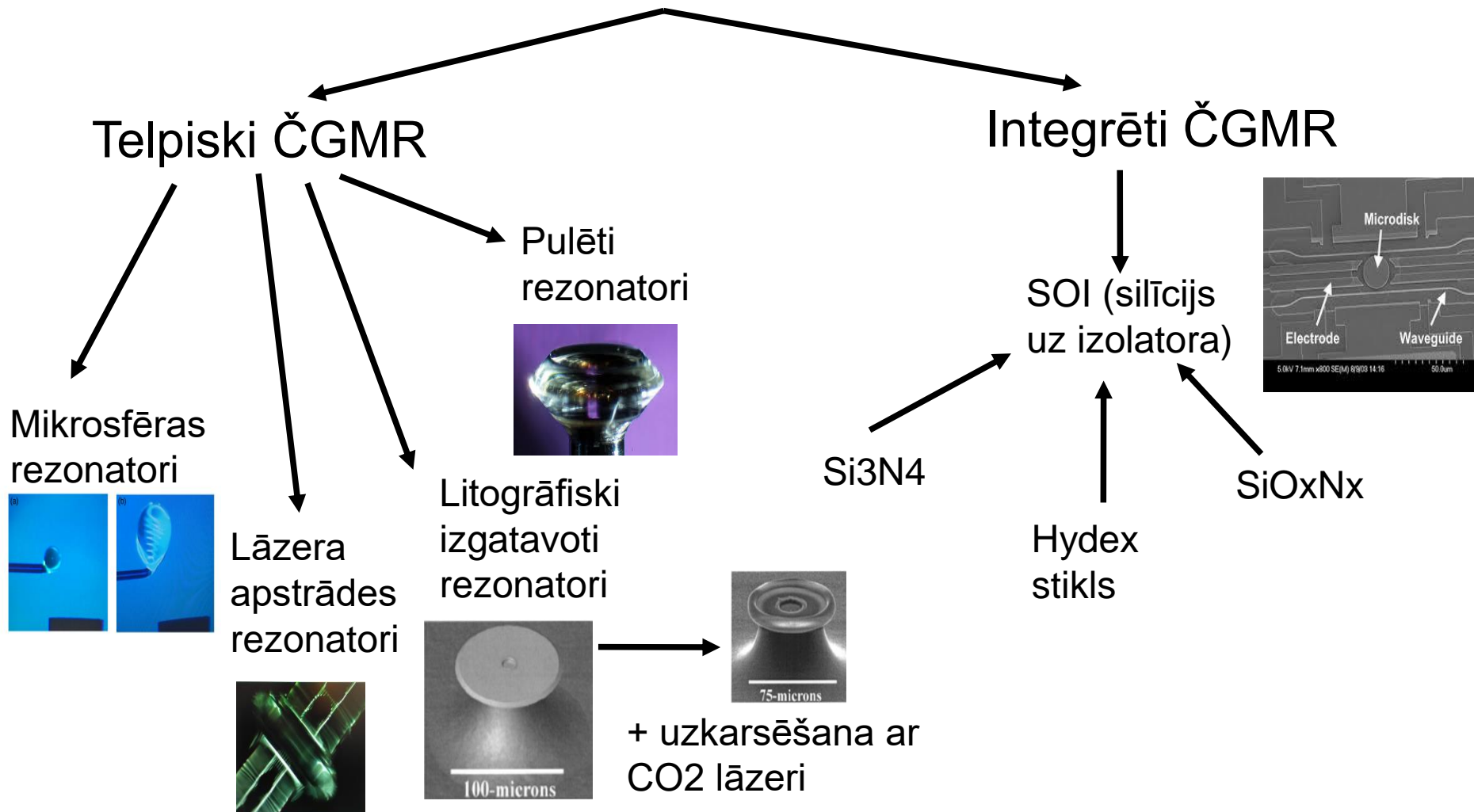


- 1 – modulācijas nestabilitāte
- 2 – dzeltenā līkne, izelpas solitons
- 3-5 – zaļā līkne, stabila solitonu ģenerācija

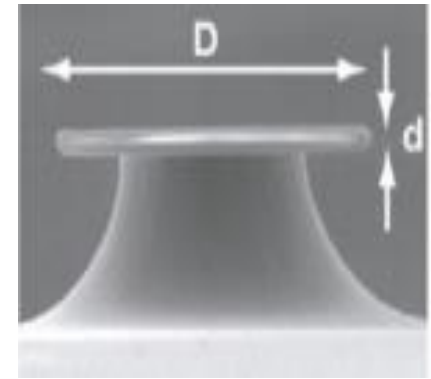


Ķemmes forma atkarīga no dispersijas un Ramana efekta ietekmi uz disperģēto Kerra solitonu.

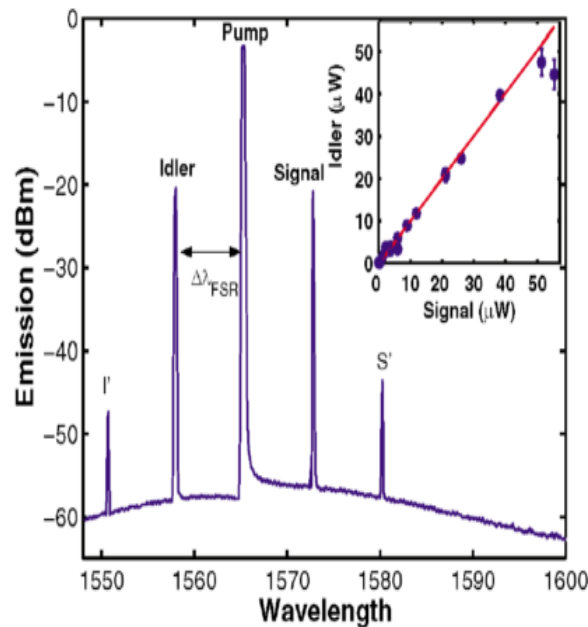
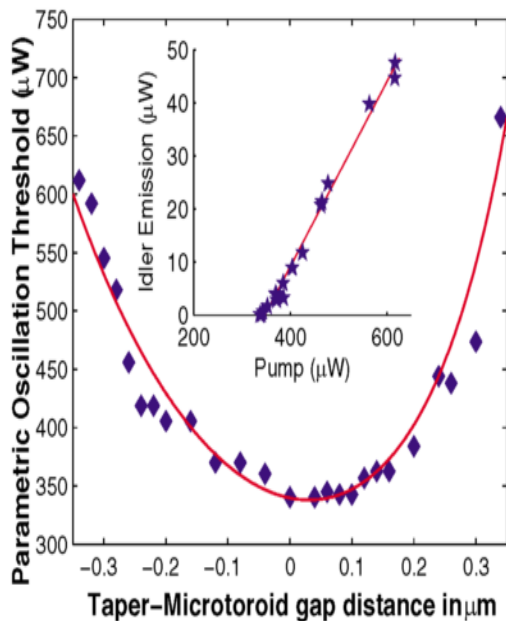
Mikrorezoantu izgatavošanas tehnoloģijas saderīgas ar WCOMB



Ceļš uz WCOMB



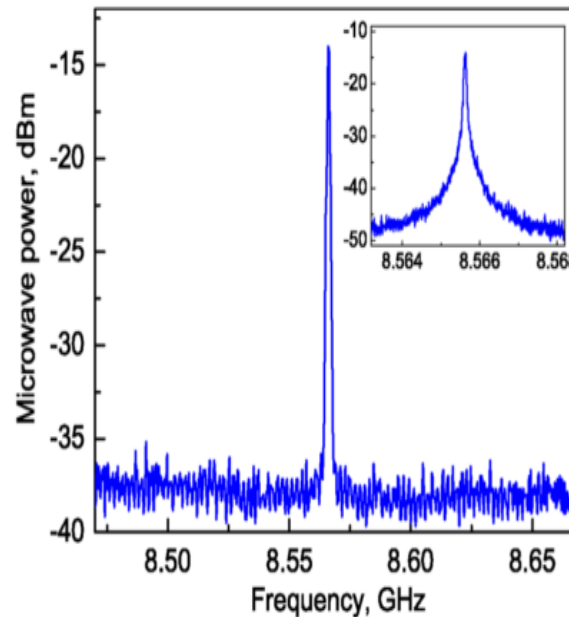
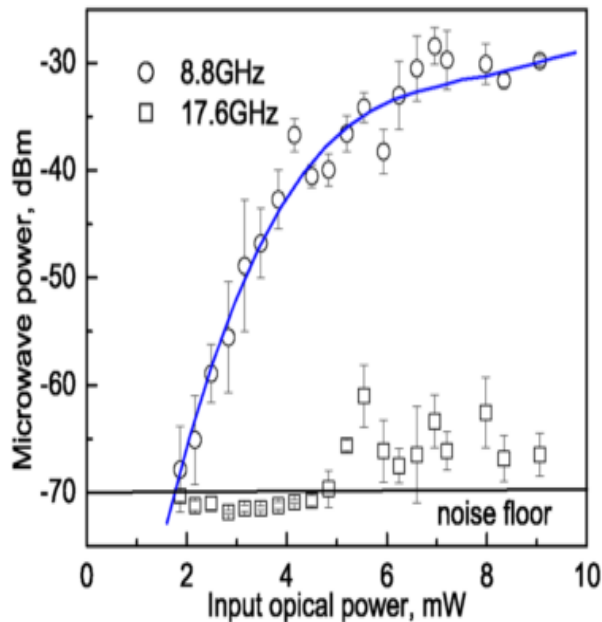
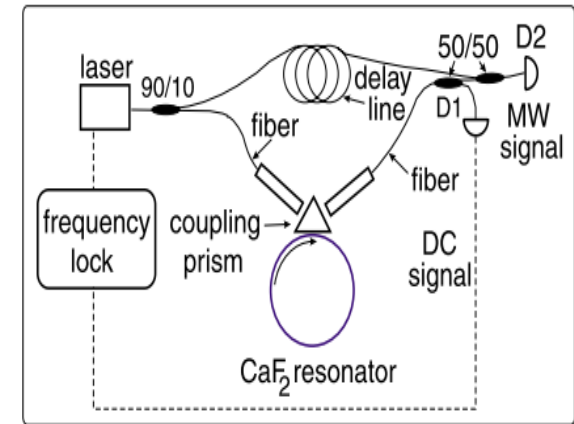
- 2004. g. Kippenberg, Sillane, Vahala
 - SiO_2 mikrotoroīds $Q \sim 10^8$, $D = 67 \mu\text{m}$, $d = 3,9 \mu\text{m}$, $\lambda = 1565 \text{ nm}$



Pie augstākām jaudām virs sliekšņa priekš **signal** un **idler** ģenerācijas parādās I' un S' .

Ceļš uz WCOMB

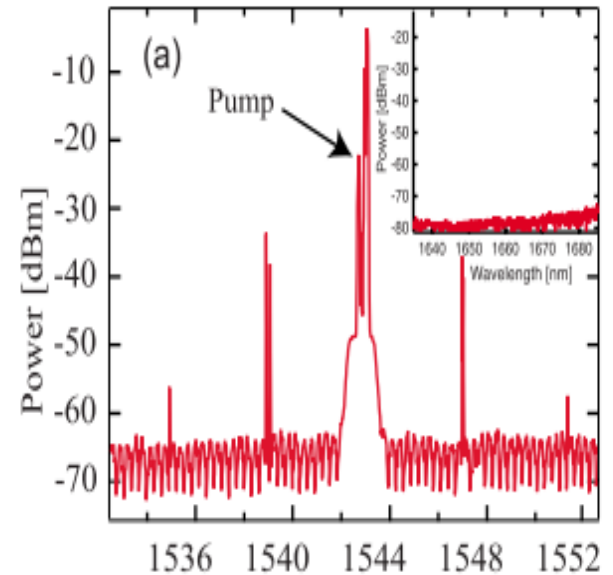
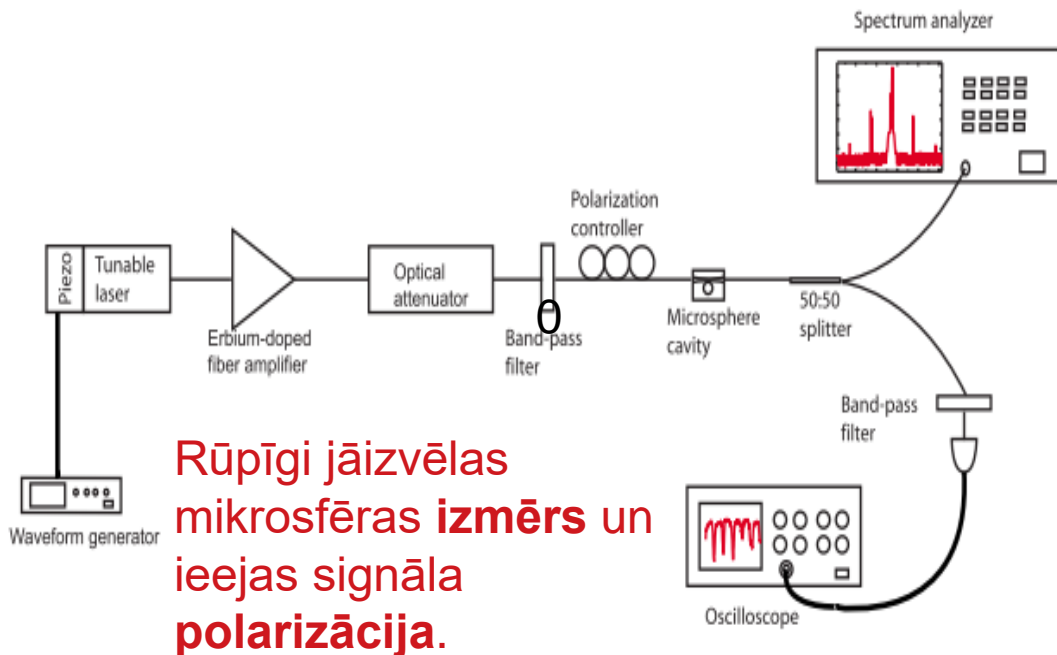
- 2004. g. Savchenkov, Maleki
 - CaF_2 $Q \sim 10^9$



Nelinearitātes CaF_2 ir mazākas nekā kausētam SiO_2 , taču augstā Q dēļ ar to pietiek, lai novērotu sānu joslu ģenerāciju.

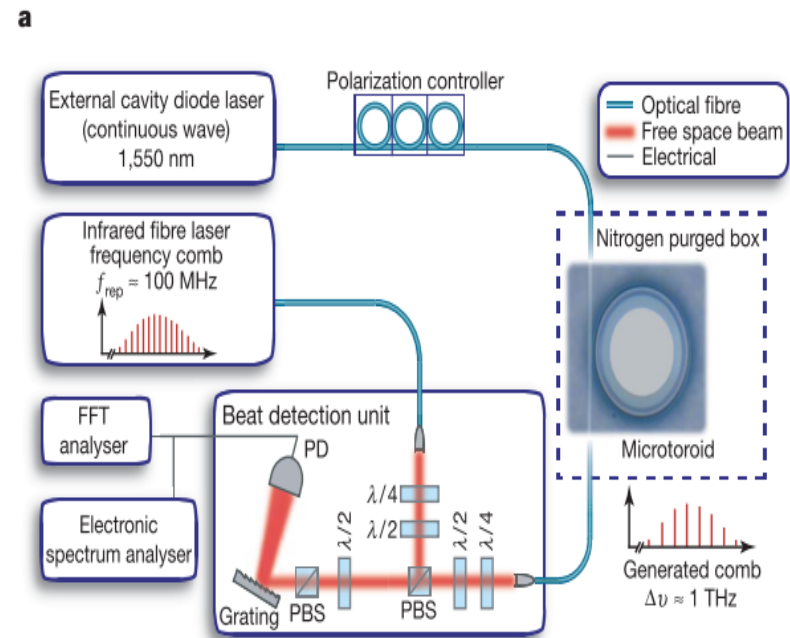
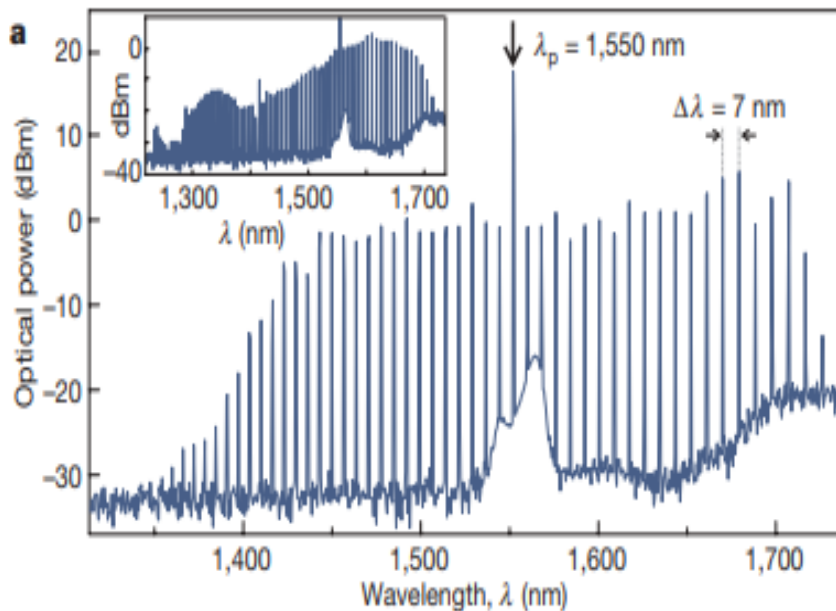
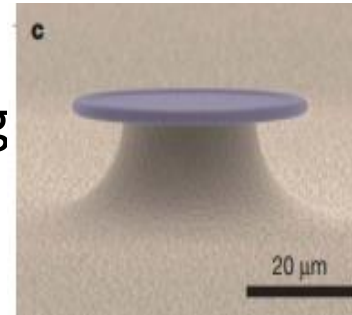
Ceļš uz WCOMB

- 2007. g. Agha
 - SiO_2 mikrosfēras $Q \sim 10^7$, $D = 150 \mu\text{m}$, $\lambda = 1543 \text{ nm}$



Pirmais platjoslas WCOMB

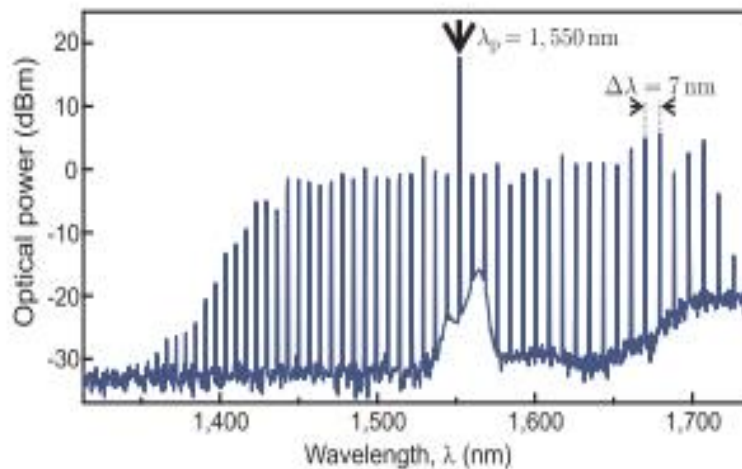
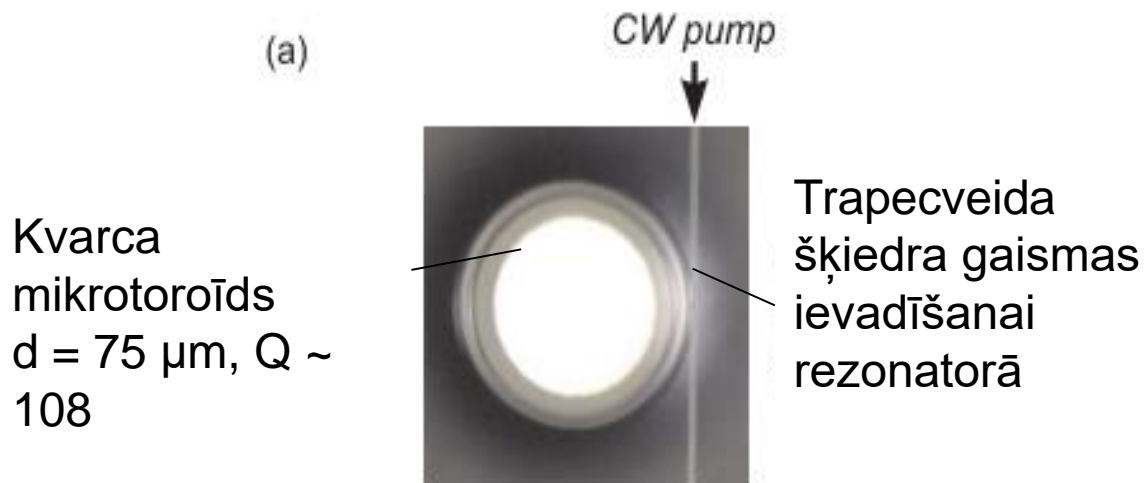
- 2007. g. Del'Haye, Schliesser, Holzwarth, Kippenberg
 - SiO₂ mikrotoroīds $Q \sim 10^8$, $D = 75 \mu\text{m}$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$



Del'Haye, P., Schliesser, A., Arcizet, O., Wilken, T., Holzwarth, R., & Kippenberg, T. J. (2007). Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator. *Nature*, 450(December), 1–4. <https://doi.org/10.1038/nature06401>

WCOMB literatūrā

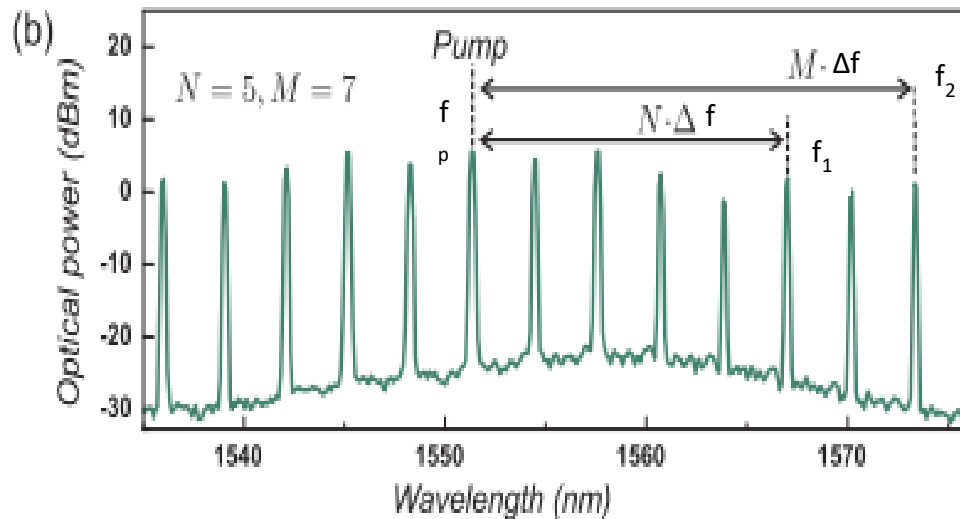
1550 nm lāzers ar
jaudu 60mW



ķemmi līdzīgs
spektrs, kas
sastāv no
vairākām
emisijas līnijām,
attālums starp
tām ir aptuveni
7 nm

Schlie, A. (2009). Cavity
Optomechanics and
Optical Frequency Comb
Generation with Silica
Whispering-Gallery-Mode
Microresonators.

Ķemmes zobu vienādā attāluma pārbaudes metode



Schlie, A. (2009). Cavity Optomechanics and Optical Frequency Comb Generation with Silica Whispering-Gallery-Mode Microresonators.

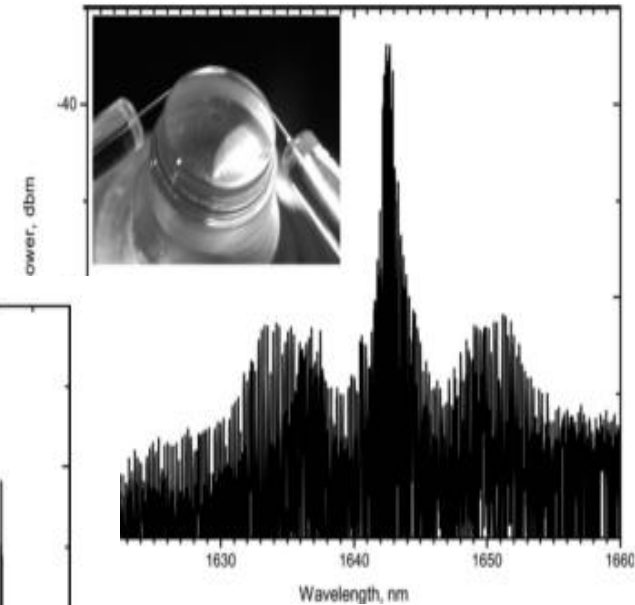
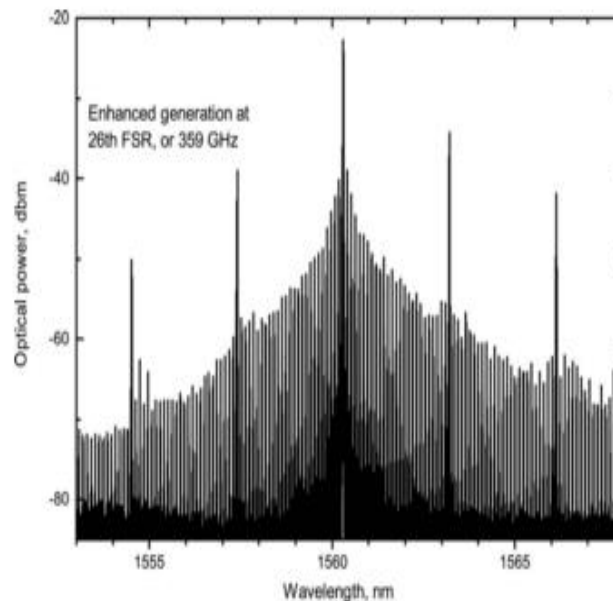
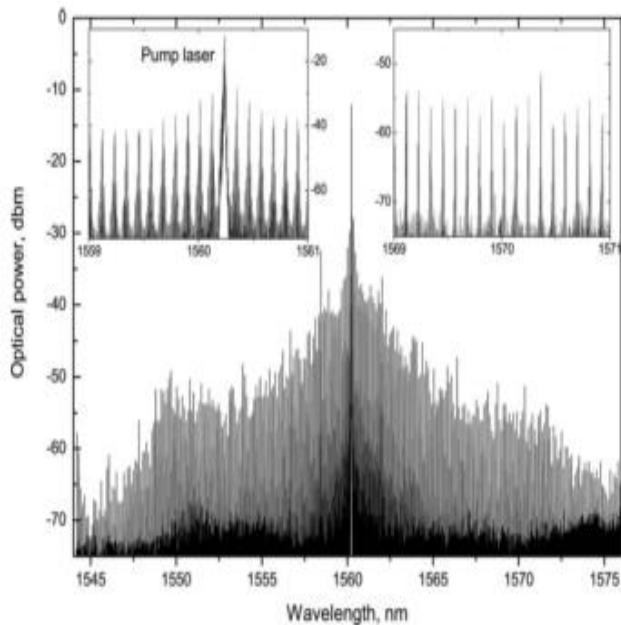
Pārbaudei izvēlas vismaz 3 dažādus zobus; paraugā izvēlēts lāzera frekvenču ķemmes zobs, kas atbilst pumpējošā lāzera frekvencei f_p un 5. zobs pa labi no tā f_1 , 7. zobs pa labi f_2

Aprēķin koeficientu
 $\epsilon = (f_2 - f_1)/(M - N) - (f_1 - f_p)/N$
Kuram jābūt vienādam iespējami tuvu 0, ja zobi ir ekvidistanti

Šiem aprēķiniem var izvēlēties jebkurus 3 ķemmes zobus

Platjoslas WCOMB

- 2009. g. Grudinin, Maleki
 - CaF_2 $Q \sim 10^9$, $D = 5$ mm, $\lambda = 1560$ nm

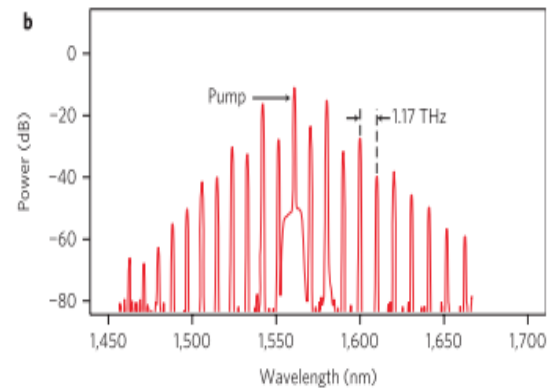
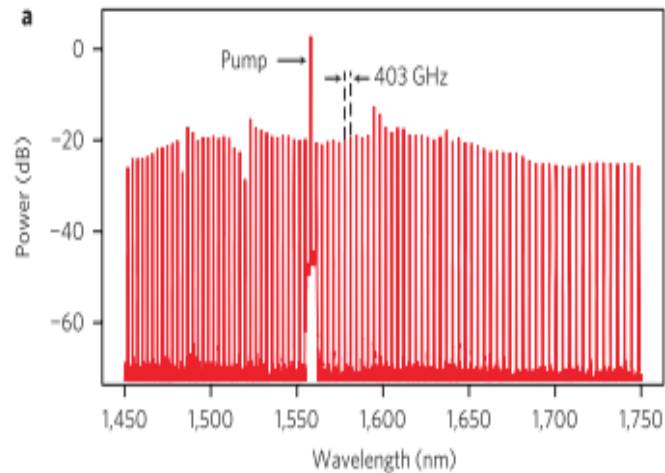
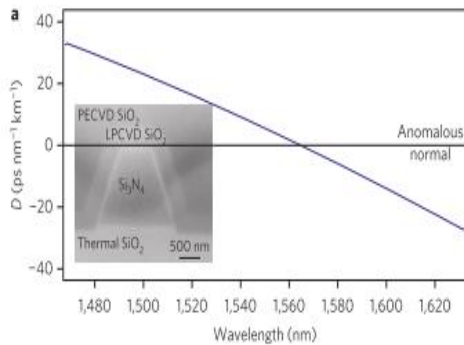
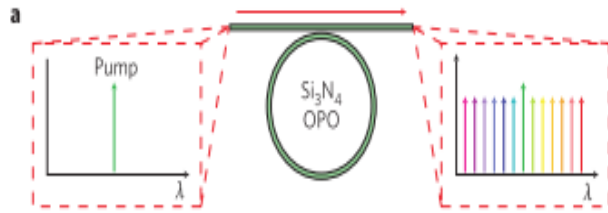
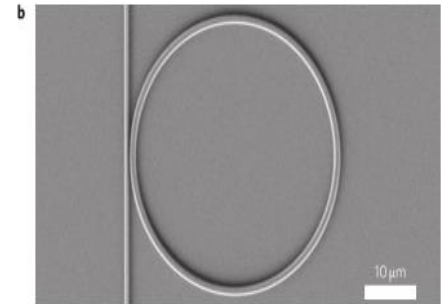


Mainot jaudu un sapārošanas apstākļus, iespējams ģenerēt dažādas frekvenču ķemmes, attālums starp zobiem saistīts ar FSR

Integrēts WCOMB

- 2009. g. Levy

- Si_3N_4 mikroredzens, $Q \sim 10^5$, $D = 58 \mu\text{m}$, $\lambda = 1550, 1560 \text{ nm}$



Levy, J. S., Gondarenko, A., Foster, M. A., Turner-foster, A. C., Gaeta, A. L., & Lipson, M. (2009). CMOS-compatible multiple-wavelength oscillator for on-chip optical interconnects. *Nature Photonics*, 4(December), 37–40.

<https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2009.259>

RTU darba uzdevums projektā

nevajag katram kanālam atsevišķu lāzeri, pietiek ar vienu, kas ierosina ķemmi

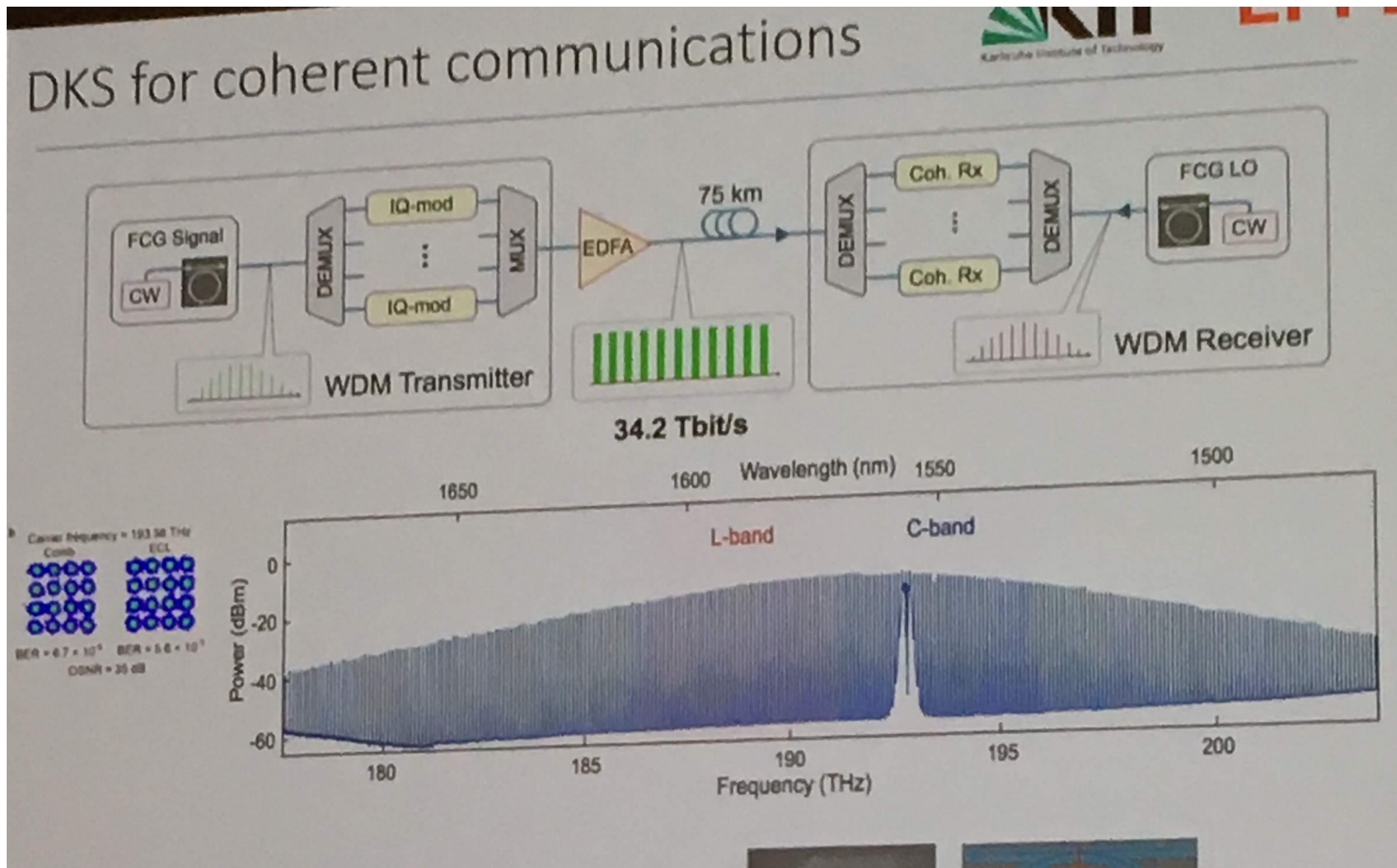
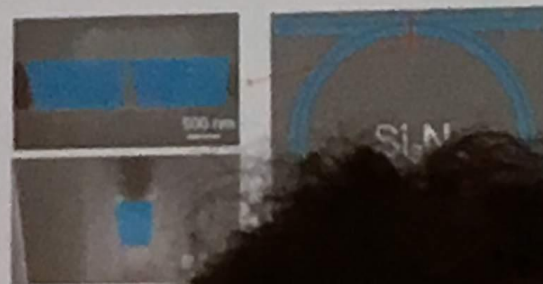
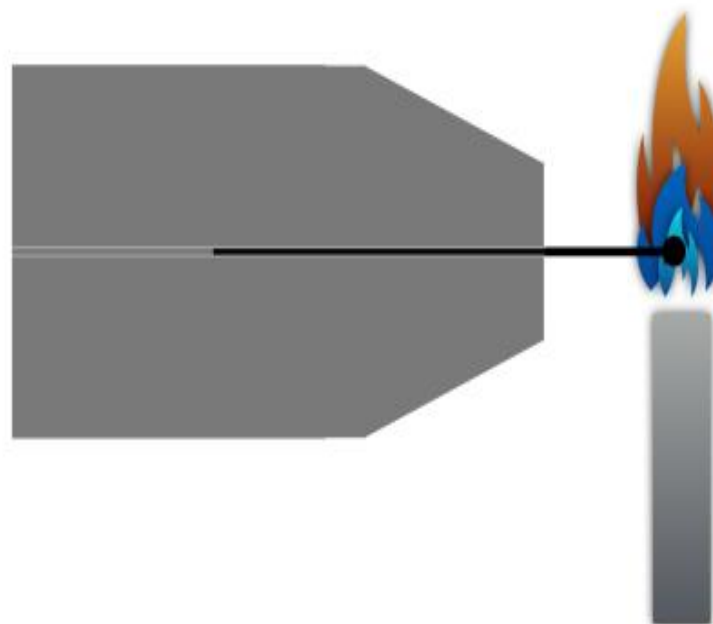
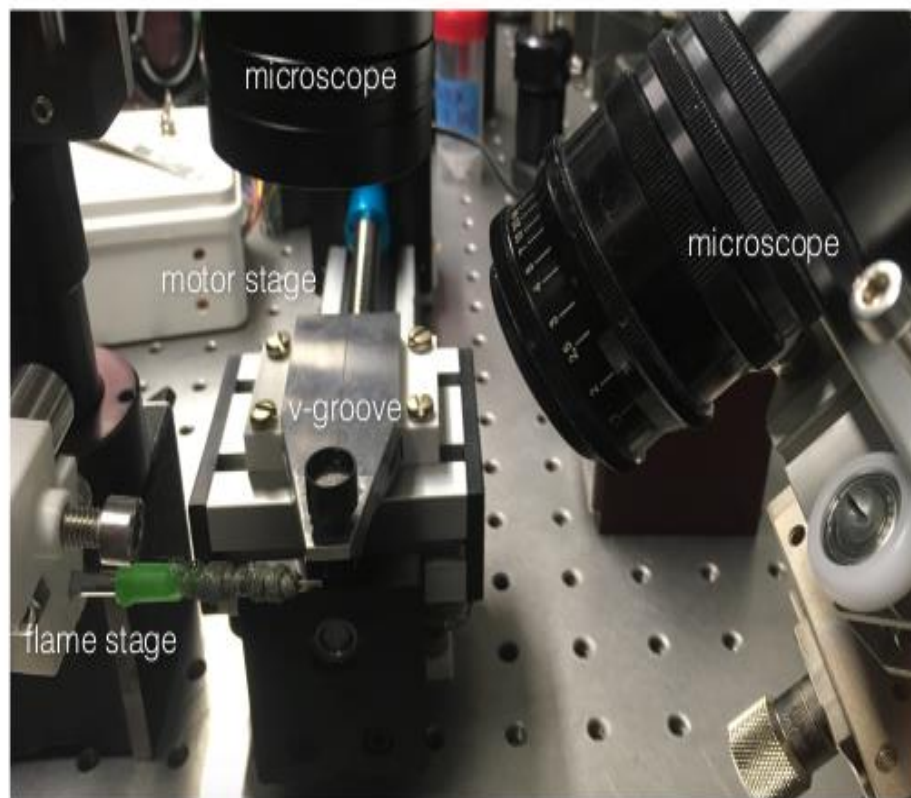


Foto no Prof. T. Kippenberga (EPFL) prezentācijas CLEO Minhenē 2019.06.

Marin et al. TJK & Koos *Nature* (2017)

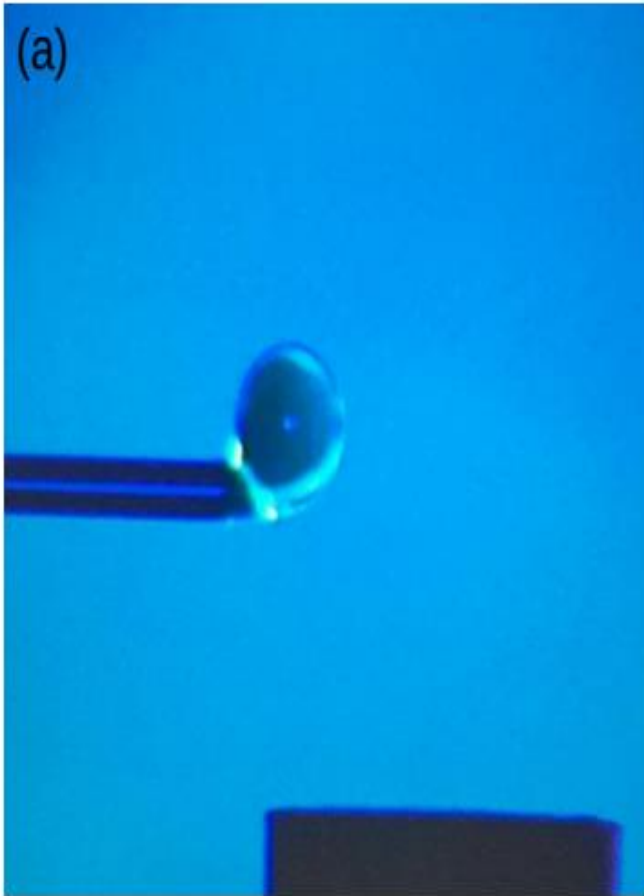


SiO₂ mikrosfēras ČGMR izgatavošana LU ASI



Rezonatori tiek izgatavoti no *Corning* SMF-28 telekomunikāciju šķiedras (diametrs 125 μ m), kausējot to udeņraža liesmā. Šķiedras padeve ir automatizēta.

Šķiedras padeves ātruma ietekme

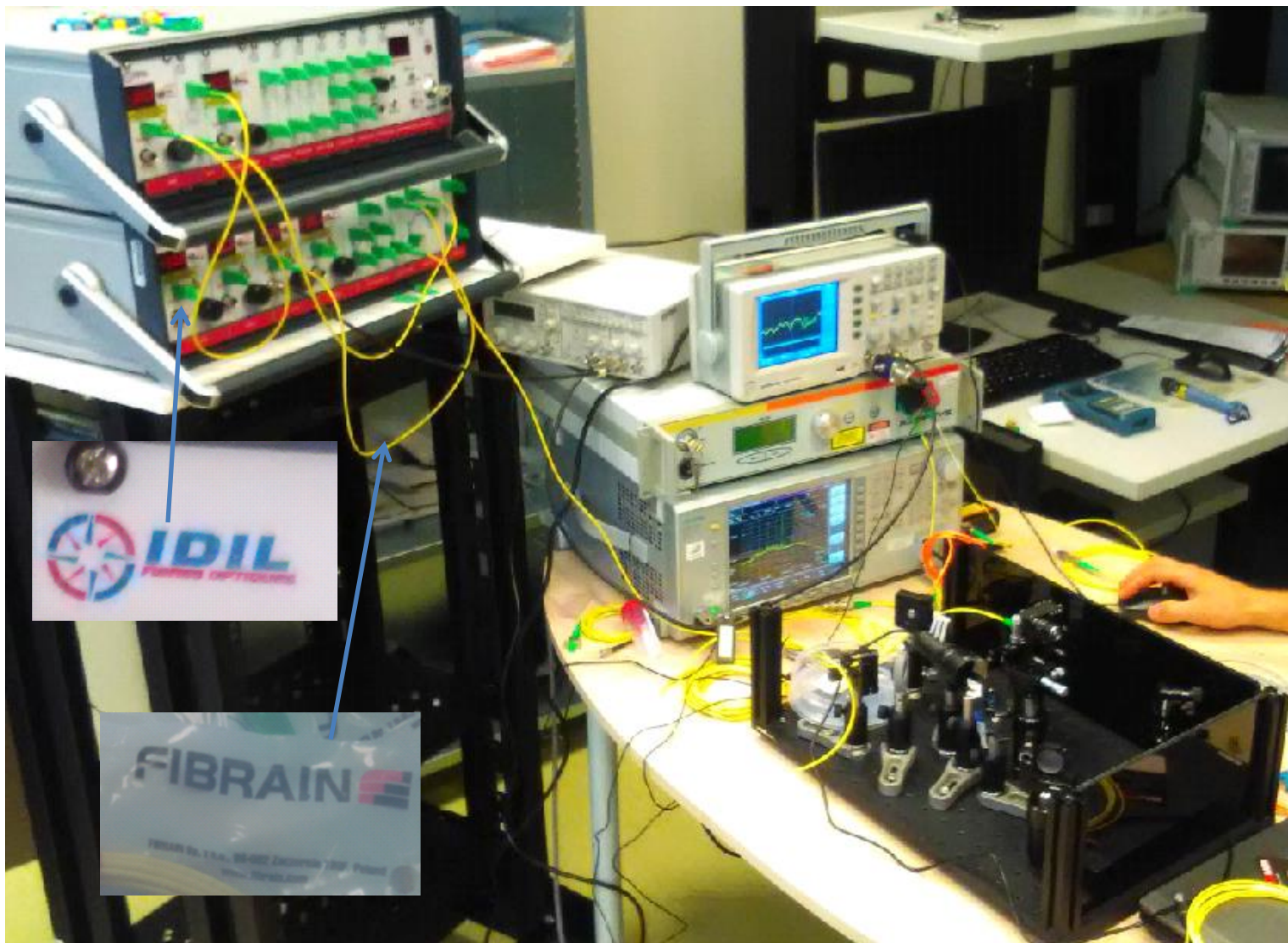


Ja šķiedra tiek padota lēni, rezonators ir mazāks (0.3-0.4 mm), simetriskāks, savukārt, ja ātrums ir lielāks, iespējams izgatavot lielākus (0.4-0.8 mm) rezonatorus, taču rezonators ir vairāk eliptisks un šķidras serde nesakūst ar apvalku.

Priekšizpētes eksperiments ar mikrorezonatoriem RTU

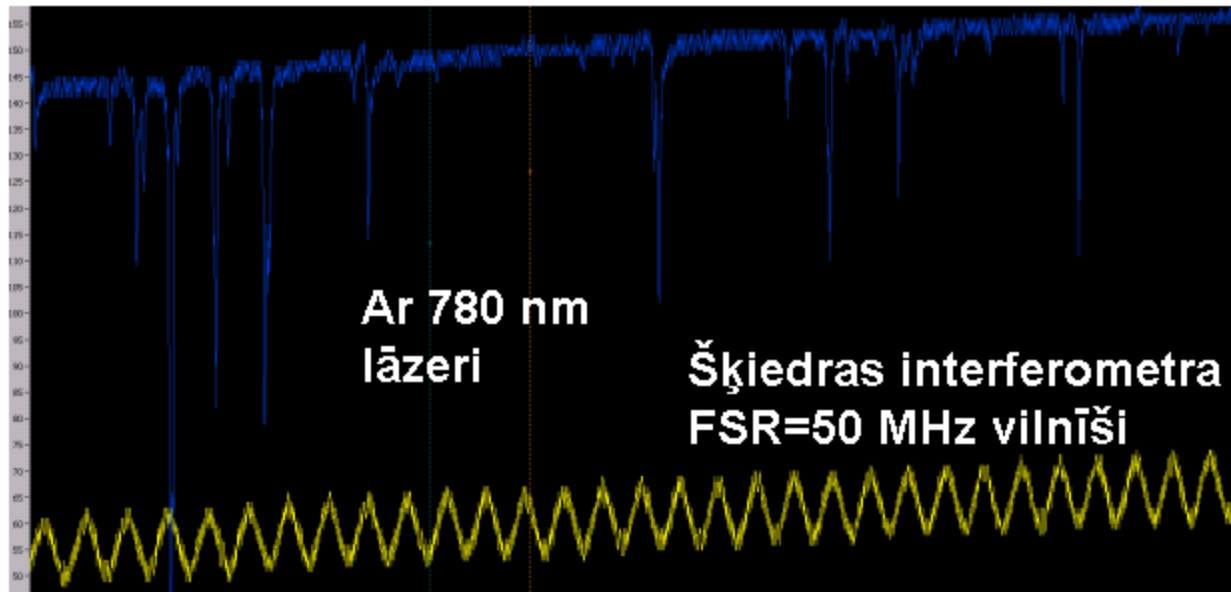
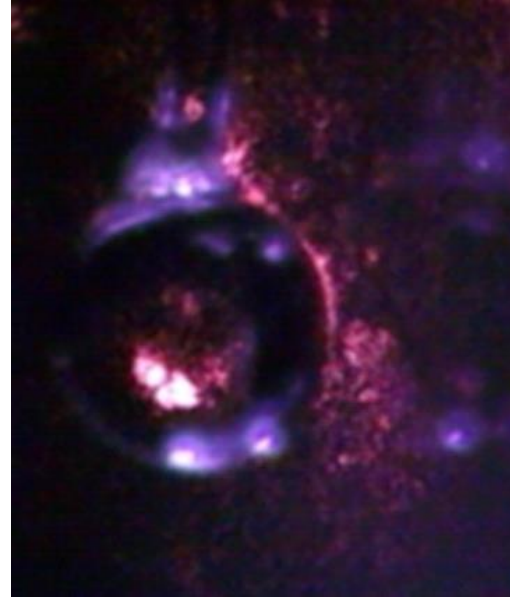
1.55 μm DFB lāzers 2 mW, 40 dB izolators

200 mW Keyopsis EDFA pastiprinātājs



Priekšizpēte. SiO₂ lodītes WGM mikrorezonators no SMF-28 šķiedras

Gaismas ievade caur prizmu, līdz rezonatoram nonāk ap 50% jaudas



Priekšizpētē novērojām termiskās piesaistes efektu un intensitātes nestabilitātes.

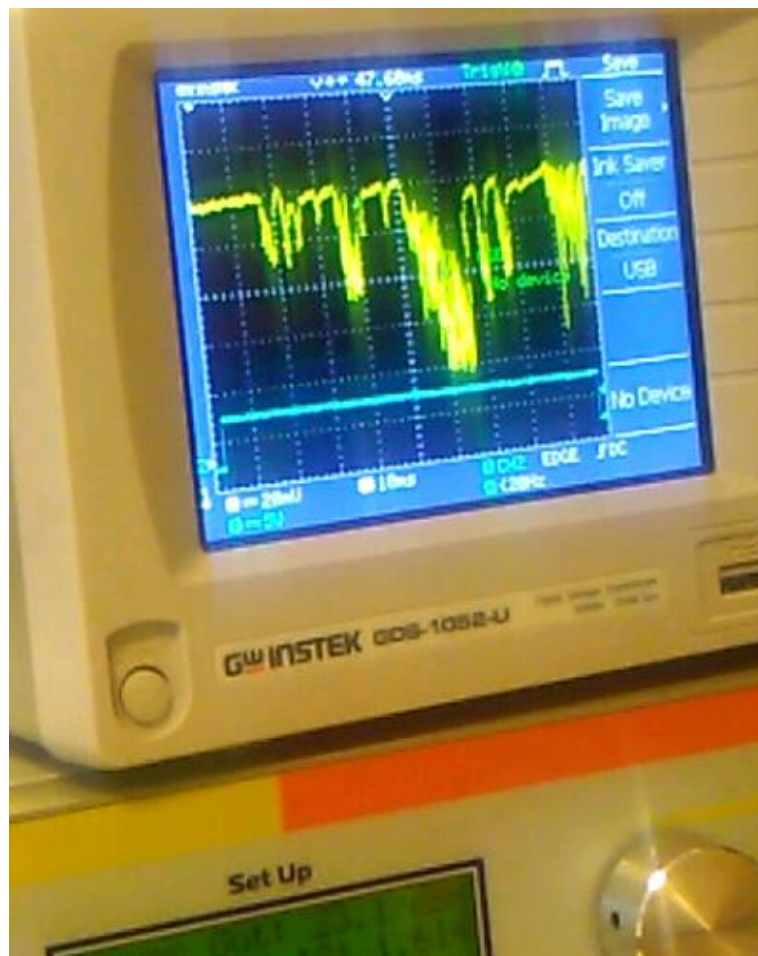
Spektrā ķemmi neizdevās novērot. **Iemesli: nepietiekama jauda un WGMR jāizgatavo no dispersijas kompensētas šķiedras**

Mēs novērojām nestabilitātes efektu, kad rezonators gandrīz pieskārs prizmai, jo tad ir optimālais Q maksimālajai cirkulējošai jaudai.

<https://youtu.be/CKLLDIKLG9c>

Uzņemtie video:

https://youtu.be/DTMWW_8Rjik



SiO₂ mikrodisku izgatavošanas tehnoloģija uz Si pamatnes

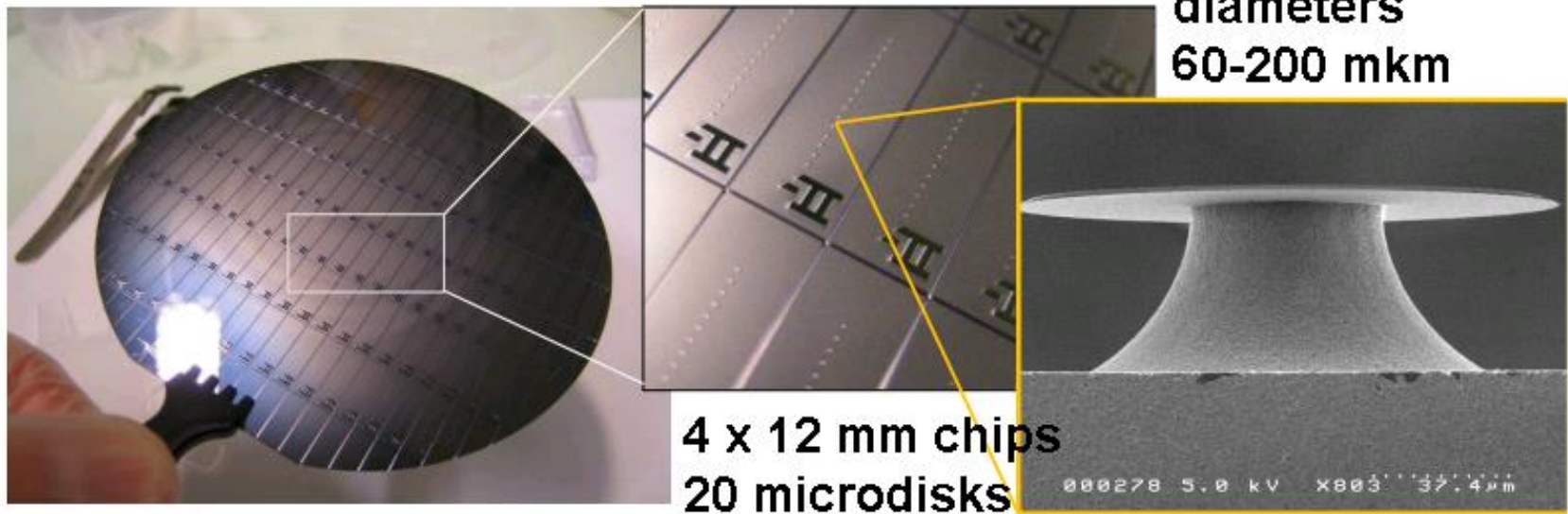
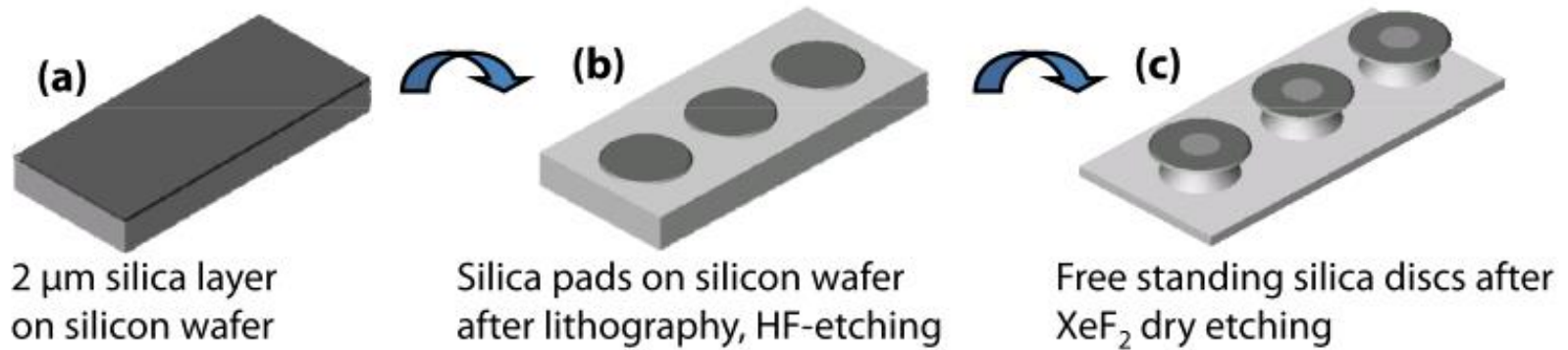


Figure 2.3.: The sample preparation at a glance. (a) Starting point of the process is a commercial 4" silicon wafer with a 2 μm oxide layer (e.g., from Silicon Valley Microelectronics). (b) The positive structures are defined using standard photolithographic methods; the excess SiO₂ is removed with a hydrofluoric acid wet etch.

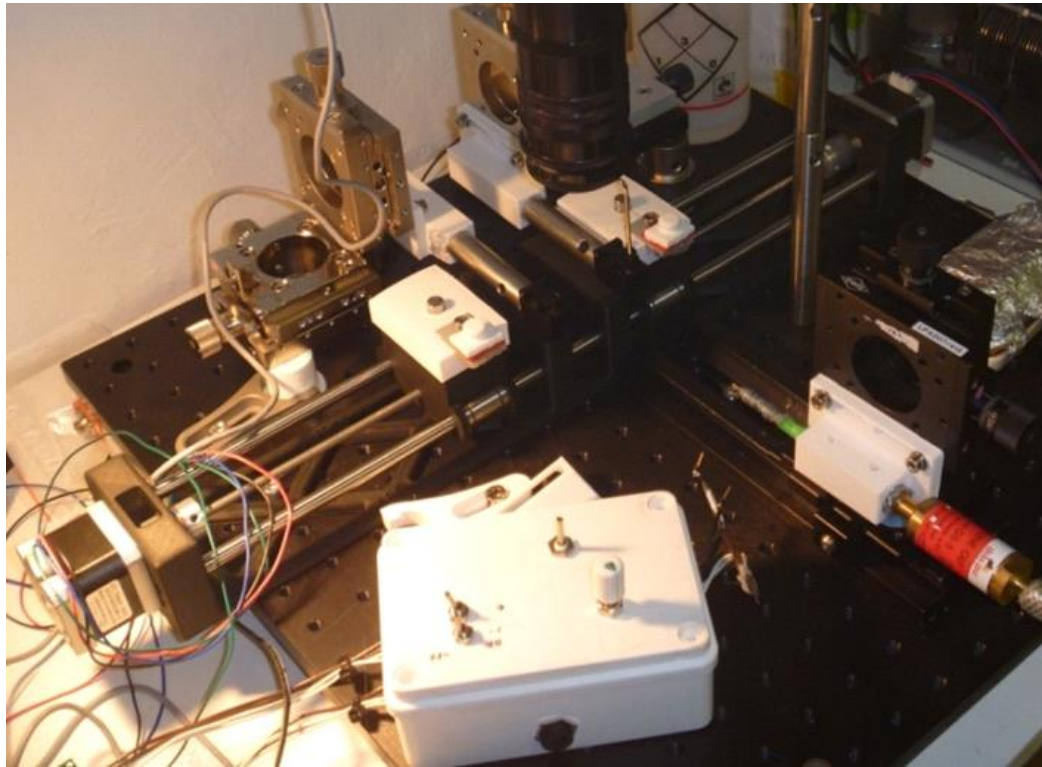
Trapecveida kvaca optiskās šķiedras stiepšanas stends ar liesmu

Foto pirms pārceļšanās Šķūņu 4.

Izdevās izstiept 5 mikronu diametrā un pielīmēt uz U veida skavas

Izdevās ievadīt gaismu mikrorezonatorā

Pēc pārceļšanās nav atjaunots, jo **Jāiepērk komponentes!**



Iepirkums - lāzerdiodes ģere

Thorlabs, Inc. [US] www.thorlabs.com/thorproduct.cfm

[Home](#) / [Lasers](#) / [Laser Diodes by Package & Type](#) / [1550 nm External Cavity Single-Frequency Laser](#)

SFL1550S - 1550 nm, 40 mW, Butterfly External Cavity Laser, SM Fiber,



Price: € 2.525,02

Tehniskā specifikācija un pretendenta finanšu piedāvājums

SIA "AFFOC Solutions" tirgus izpētē iepirkumam

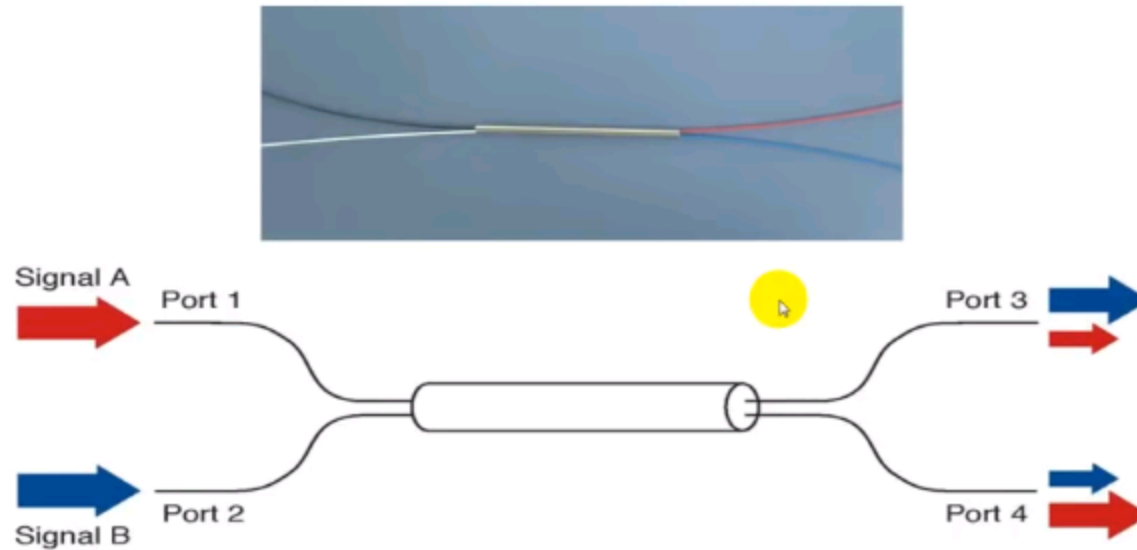
"Iekārtu ģere"

Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģeneratora izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās"

Nr.1.1.1.1/18/A/155

Prece	CPV kods	Tehniskā specifikācija	Skaitis
Lāzers	98390000-3	<u>Thorlabs</u> SFL1550S produkts vai tā ekvivalents. Ģere.	32.5 mēneši

Mēģinām izgatavot cilpas rezonators no šķiedru sadalītāja 95:5 %

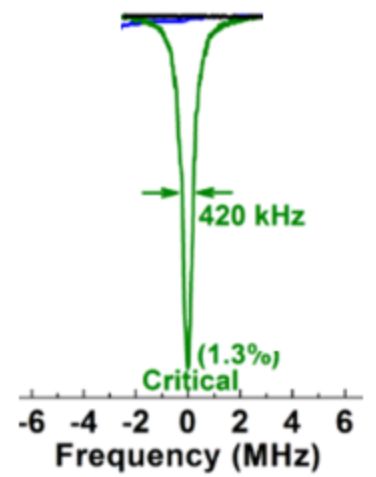
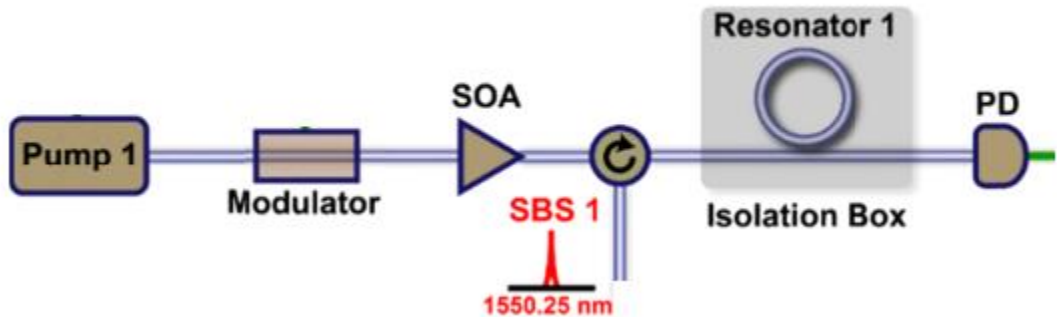


Research Article Vol. 6, No. 2 / February 2019 / Optica 152



Ultra-narrow linewidth Brillouin laser with nanokelvin temperature self-referencing

WILLIAM LOH,*
Massachusetts Instit



Pirmā atskaites posma uzdevumi:

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

- 2.1. Eksistējošo WCOMB ģeneratoru veidu, risinājumu un realizāciju izpēte šķiedru optiskajās sakaru sistēmās;
- 2.2. Portatīva WCOMB kā daudzviļņu gaismas avota izstrāde un izveide pielietojumiem šķiedru optisko sakaru sistēmās.

Atbilstoši 1. atskaites posmā izvirzītajiem uzdevumiem ir veiktas sekojošas darbības:

Pētniecības **uzdevumam 2.1.** paredz izpētīt čukstošās galeriju modas (ČGM) rezonatoru frekvenču ķemmes ģeneratora realizācijas risinājumi telekomunikāciju pielietojumiem, attiecīgi optisko sakaru sistēmām. Atbilstoši pētniecības uzdevumam, projekta 1. atskaites posmā ir veikta starptautisku konferenču rakstu un žurnālu analīze un izpēte (kopumā 10 publikācijas), kas ļāva novērtēt rezonatoru darbības principu, tipus, realizāciju un to pielietojumu dažādos risinājumos (piemēram, šķiedru optiskajās pārraides sistēmās – gaismas avots datu pārraides kanāliem; lāzeru stabilizācijai, u.c.).

Pētniecības **uzdevums 2.2.** paredz portatīva WCOMB izstrādi, kas pielāgots izmantošanai šķiedru optiskās pārraides sistēmās (ŠOPS) kā daudzviļņu gaismas avota risinājums. Atbilstoši pētniecības uzdevumam, projekta 1. atskaites posmā ir veikta WCOMB izstrādei nepieciešamo komponentu un to raksturojošo parametru analīze. Kā arī uzdevuma ietvaros tika analizēti frekvenču ķemmes realizācijas risinājumi vairākās starptautiskās zinātniskās publikācijās.