

LU ASI Kvantu Optikas laboratorijas atskaite par 2020. gadu.

Jānis Alnis

- 1) LZP projekts: ČGMR sensori
- 2) ERAF: mikrorezonatoru ķemmes
- 3) Jaunais ERAF: ERA Chair

2021.02.18.

Video ekskursija pa laboratoriju

(faktiski 3 laboratoriju telpas, kas ir labi, lai viens otram netraucē)

https://www.youtube.com/watch?v=NgLNk1lx4_s



Grupas vadība: COVID laikā LU ASI kvantu optikas laboratorijai notiek iknedēļas piektdienas sapulces MS Teams.

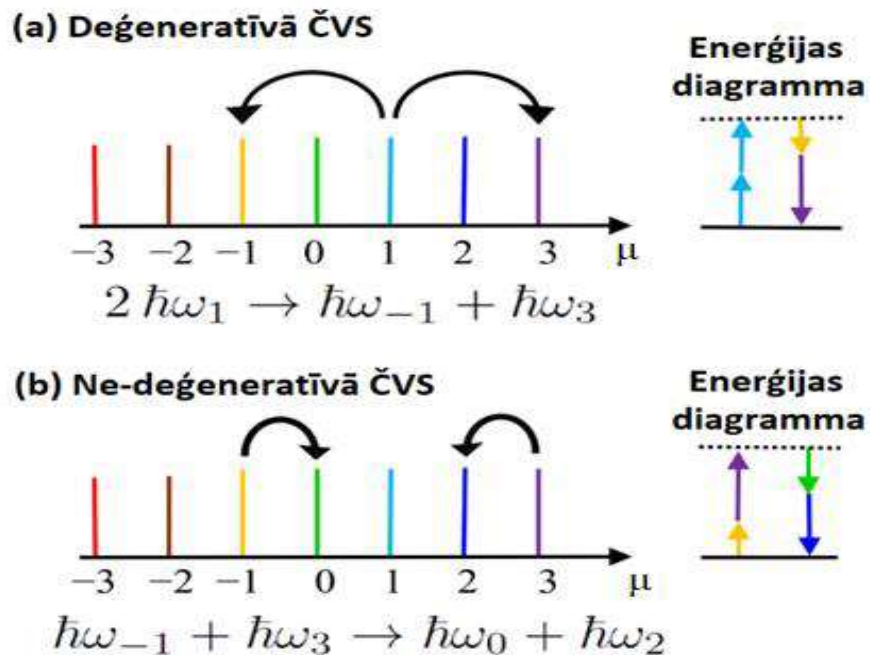
ERAF: Mikrorezonatoru ķemmes telekomunikāciju pielietojumiem

Modelēšana: A. Atvars, R. Veilande, K. Dragūns, A. Ciniņš

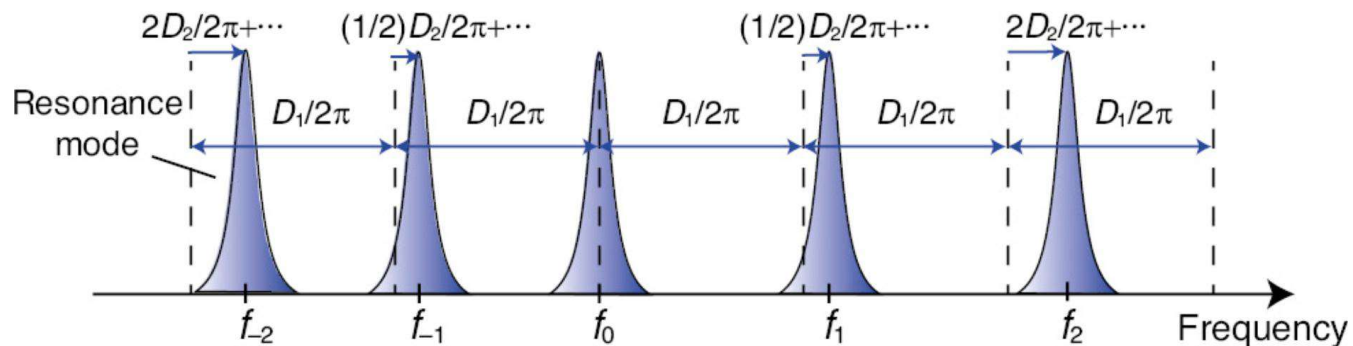
- Ir izkristalizējies, ka nepieciešams modelēt nevis jebkādas Kerra ķemmes, bet konkrēti tādas ķemmes, kuru spektrā attālums starp ķemmes līnijām atbilst telekomunikāciju *Dense Wavelength Multiplexing* (DWM) standartam FSR = 100 GHz, 200 GHz, 400 GHz.
- Tiek rēķināta ČGMR dispersijas līkne, kas sastāv no **SiO₂ materiāla dispersijas un ČGMR rezonatora ģeometriskās dispersijas** (lodīte ar dažādiem diametriem, mikrorstieņi ar dažādiem noapaļojuma rādiusiem, plānas kārtiņas mikroriņķu rezonatori ar slīpu malu uz čipa).
- Dispersijas līknei jābūt pēc iespējas nemainīgai no viļņa garuma λ , lai varētu ģenerēties **plata** Kerra solitonu ķemme.
- Kerra solitonu ķemmes aprēķini notiek risinot Lugiato - Lefevera vienādojumu ar programmas paketi Python vidē PyLLE.
- Mācamies no Elenas Anashkinas grupas Niznij Novgorodā, ar kuriem sapazināties, jo viņiem ir līdzīga pētījumu tematika kā mums un šī iepazīšanās bija ļoti veiksmīga, tagad mums top kopīgi raksti.

Četru viļņu samaisīšanās (ČVS) nelineārais optiskais process

Four Wave mixing (FWM)



Dispersijas izraisīta izskaņošnās starp ČVS un ČGMR frekvencēm

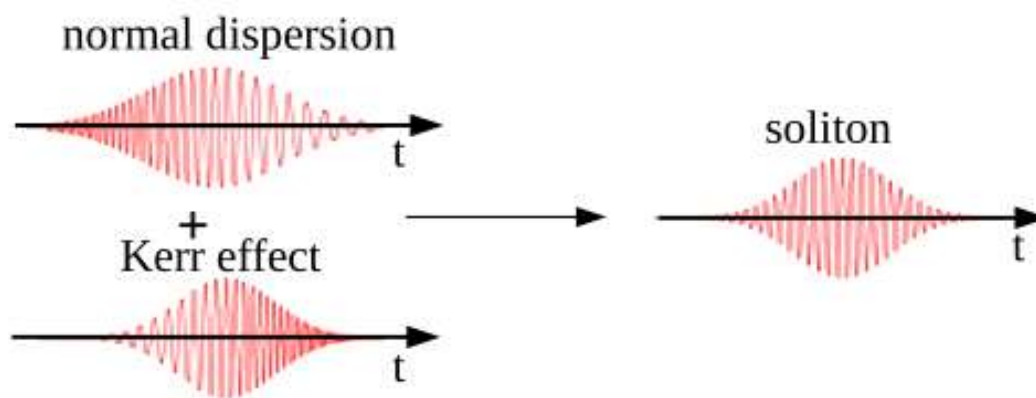
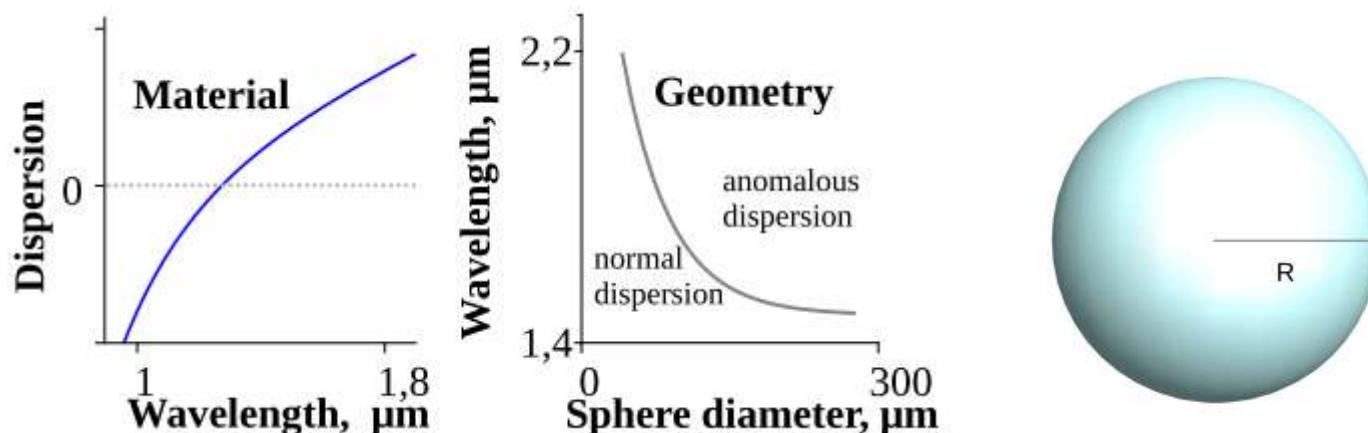


[S. Fujii, T. Tanabe, (2020) Dispersion engineering and measurement of whispering gallery mode microresonator for Kerr frequency comb generation, Nanophotonics 9, 1087–1104]

Materiāla un ģeometriskā dispersija atkarībā no mikrosfēras diametra

Solitonu režīmā Kerra efekts kompensē dispersiju. Tādā gadījumā dispersija rezonatorā ir 0, un solitona impulsa garums nemainās cirkulējot rezonatorā.

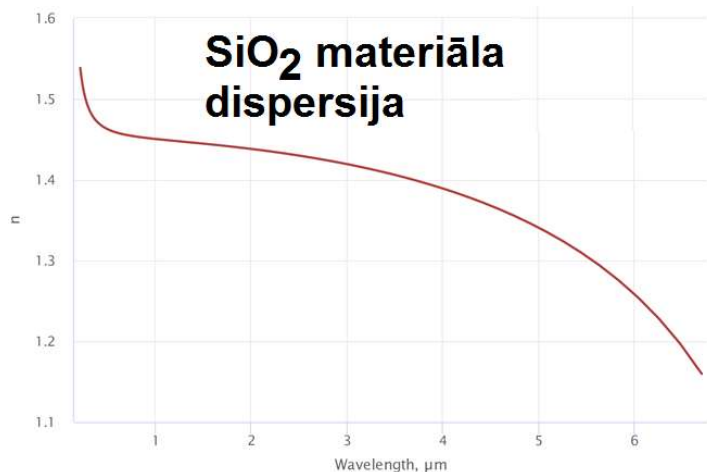
Solitonu režīmā ķemmēm ir vislabākā amplitūdas stabilitāte, tāpēc cenšas iegūt šādu režīmu.



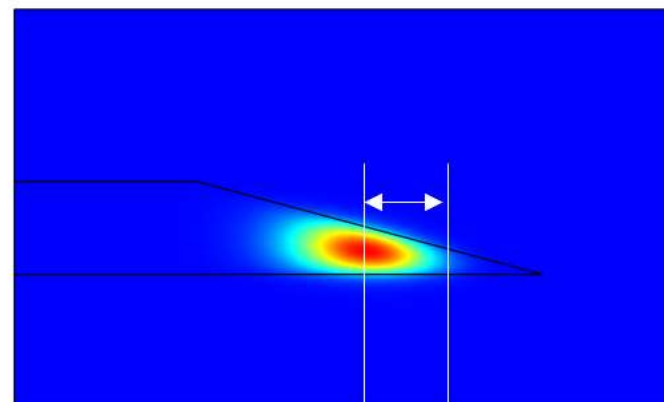
Materiāla dispersijas kompensēšana ar ģeometrisku dispersiju ķīļveida malas rezonatorā

ČGMR rezonances: $2\pi Rn = m\lambda$

Mainās gan R gan n , un ir nepieciešams lai reizināiums ir const.



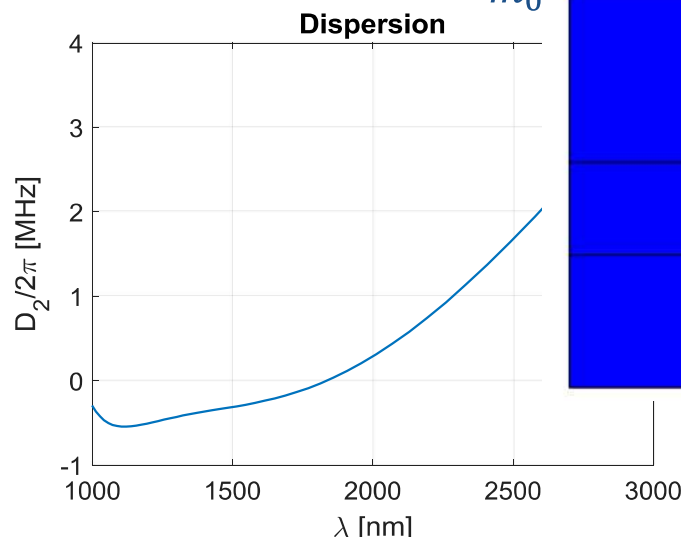
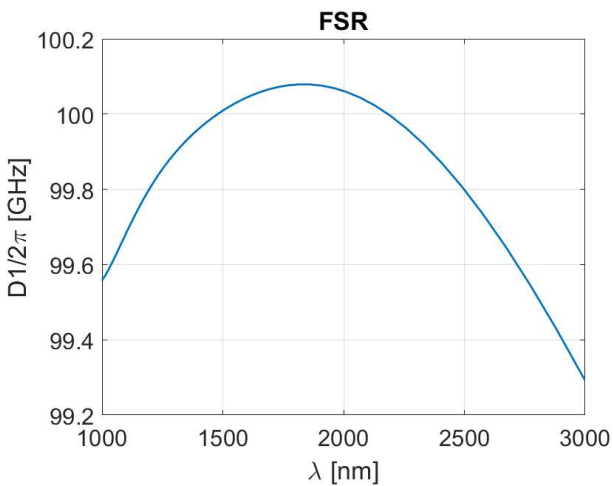
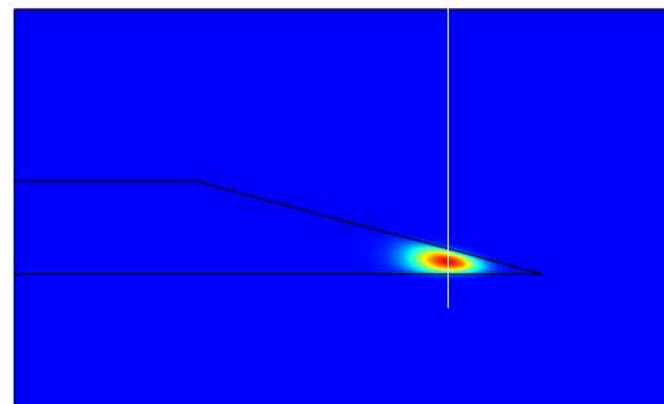
alpha=15, freq1=1.0816E14 Effective mode



$$FSR = D_1 = \left. \frac{\partial \omega}{\partial m} \right|_{m_0}$$

$$Dispersija D_2 = \left. \frac{\partial^2 \omega}{\partial m^2} \right|_{m_0}$$

alpha=15, freq1=3E14 Effective mode index

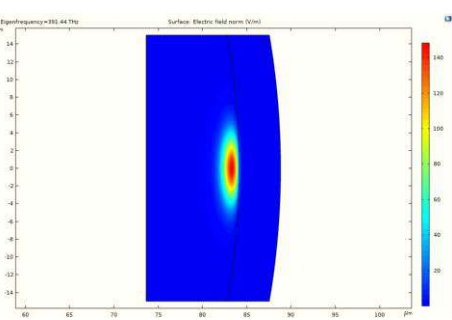


Dispersijas aprēķini dažādas formas mikrorezonatoriem

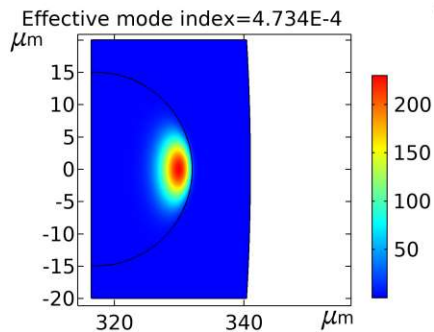
K. Dragūns, *Comsol Multisim*

Vai būtu iespējams kompensēt materiāla dispersiju ar ģeometrisko dispersiju telekom 1550 nm apgabalā, lai tā būtu tuvu nullei?

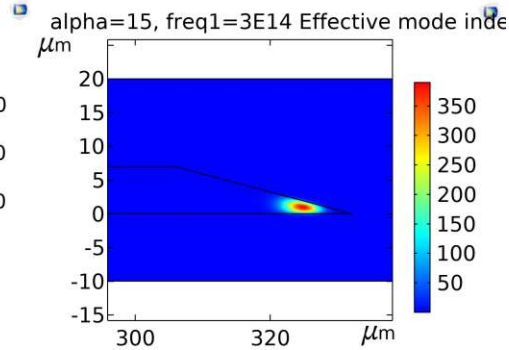
Mikrosfēra
parametrs:
rādiuss R



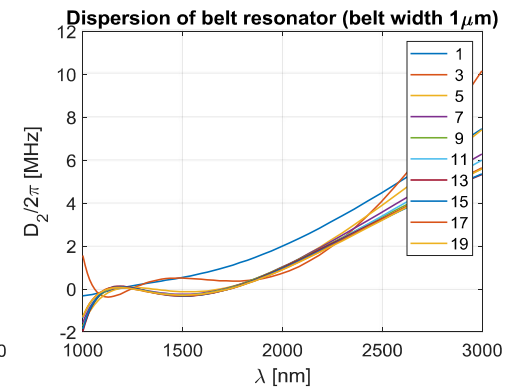
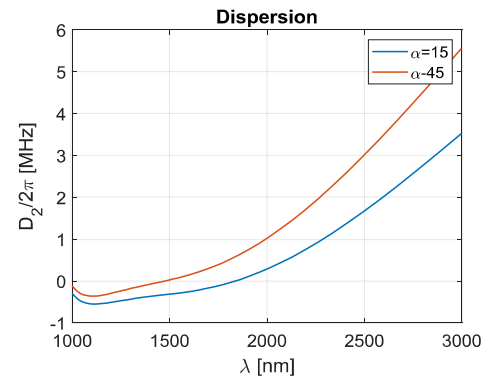
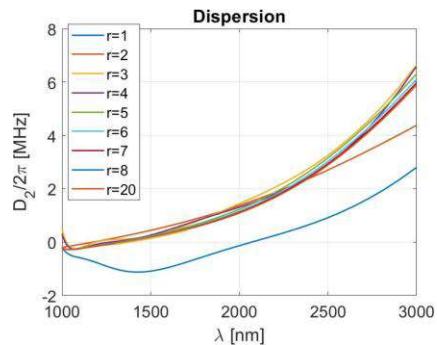
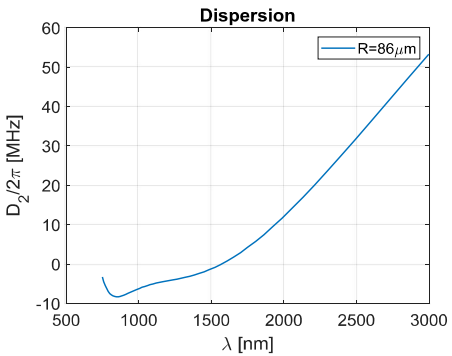
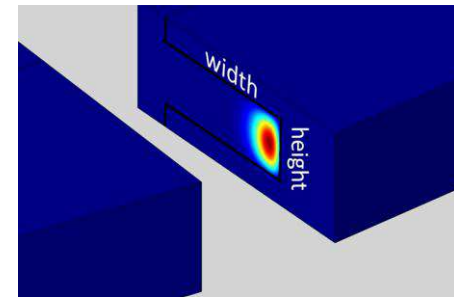
Mikrostieņa rez.
rādiuss R ,
noapaļošanas r



Asās malas
rādiuss R ,
leņķis α ,
biezums h



Fotonu josta
rādiuss R ,
augstums h ,
platums w



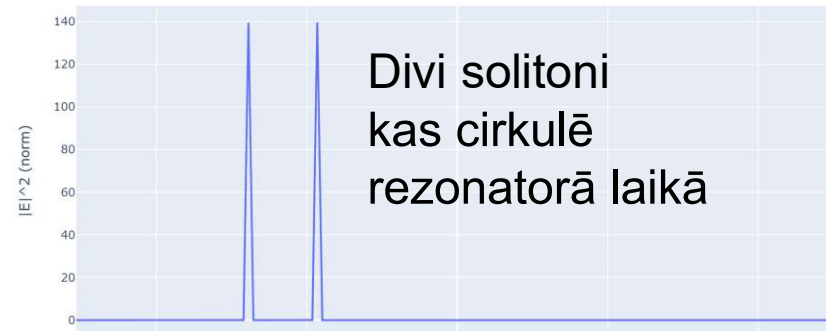
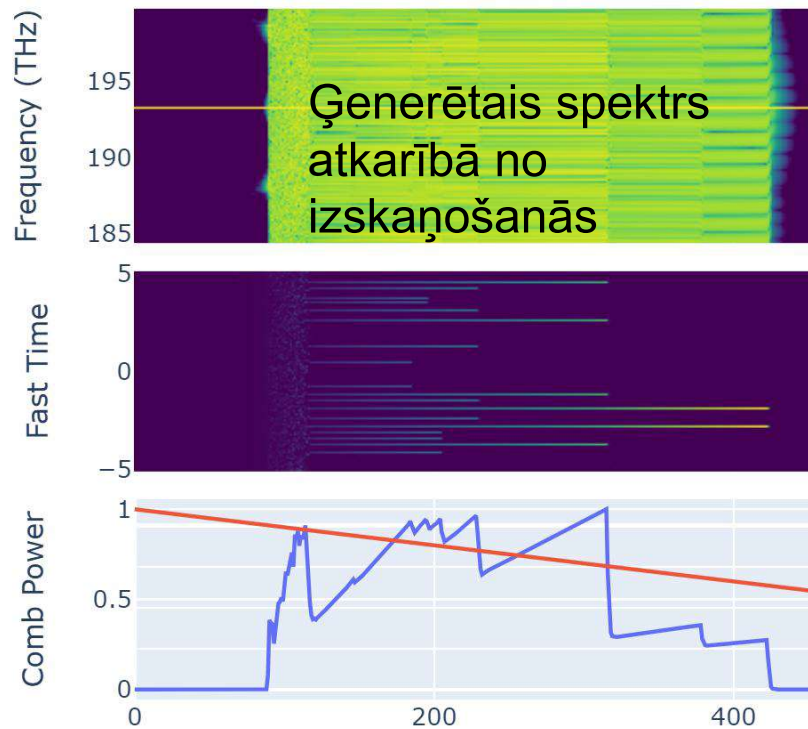
Kerra ķemmes modelēšana

■ Lugiato-Lefevēra vienādojums

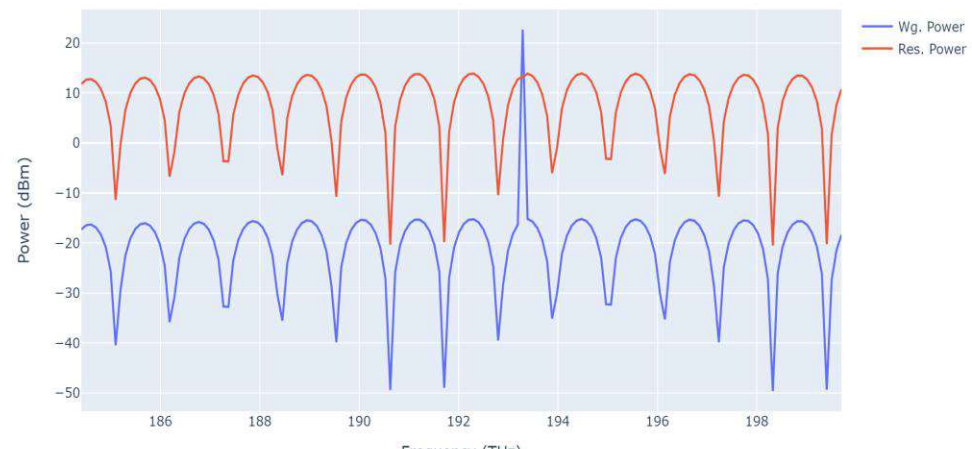
$$t_R \frac{\partial E(t, \tau)}{\partial t} = - \left(\frac{\alpha'}{2} - i\delta_0 \right) E + i \cdot \text{FT}^{-1} [-t_R D_{int}(\omega) \cdot \text{FT} [E(t, \tau)]] + \gamma |E|^2 E + \sqrt{\theta} E_{in}$$

✓ Brīvā koda progamatūra pyLLE

[Moille, G., Li, Q., Lu, X., & Srinivasan, K. (2019). PyLLE: A fast and user friendly lugiato-lefever equation solver. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 124(124012). <https://doi.org/10.6028/jres.124.012>]



Vāg garāku simulācijas laiku, lai iegūtu detalizētāku spektru



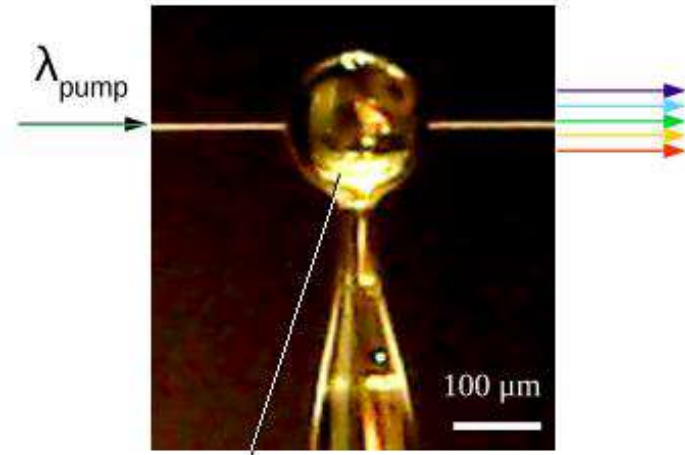
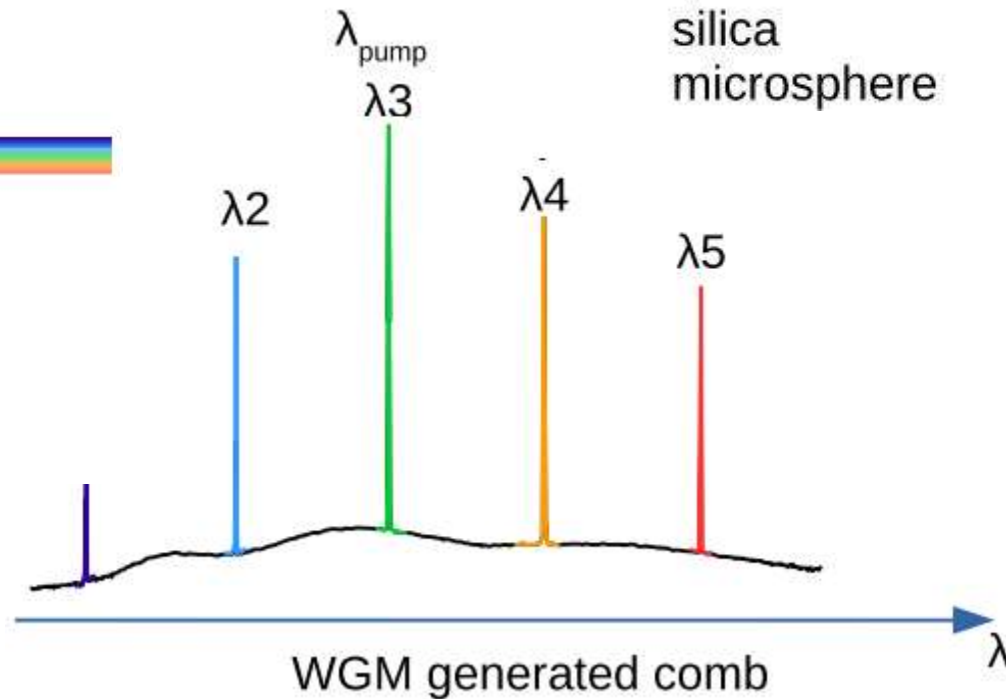
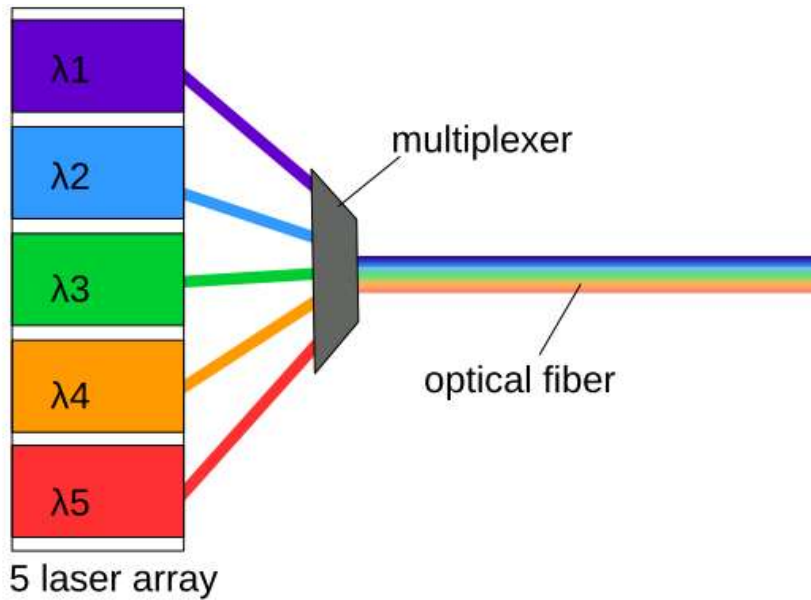
Izskanošanās, lai pārietu no modulācijas nestabilitātes solitonu režīmā

Eksperimenti

Vīzija: telekomunikācijās aizvietot daudzus lāzerus ar vienu frekvenču ķemmi.

Wavelength Division Multiplexing

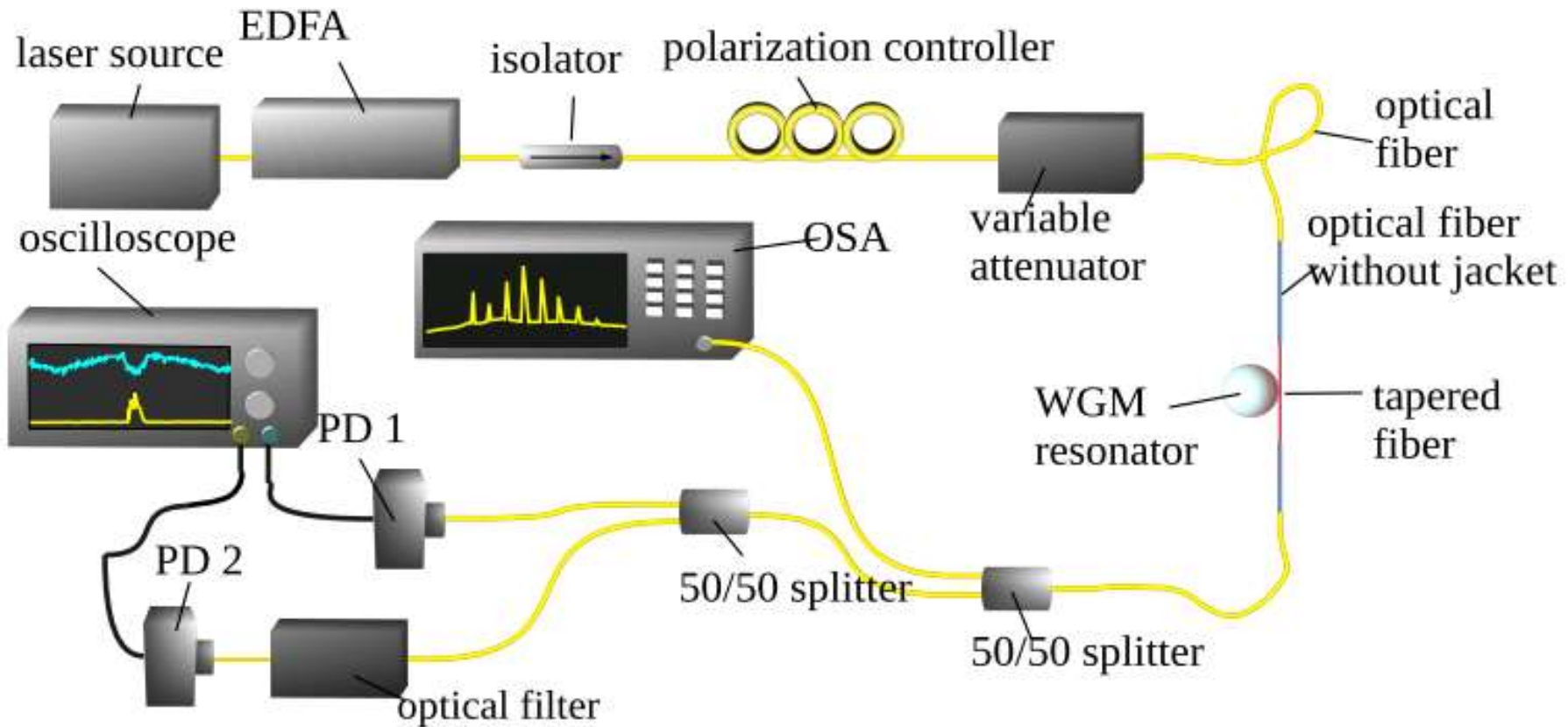
Replace laser array with frequency comb generated inside WGM resonator.



Iekārta mikrosfēras ķemmes ģenerēšanai, izveidota ERAF projekta ietvaros sadarbībā LU ASI ar RTU Telekomunikāciju institūtu.

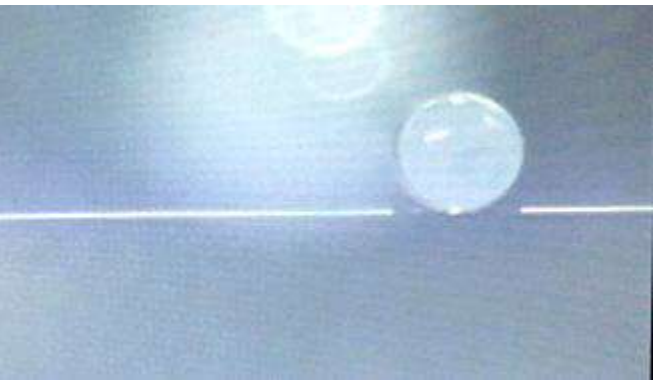
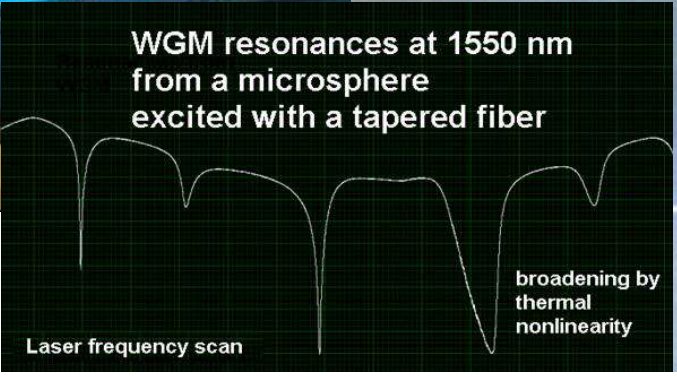
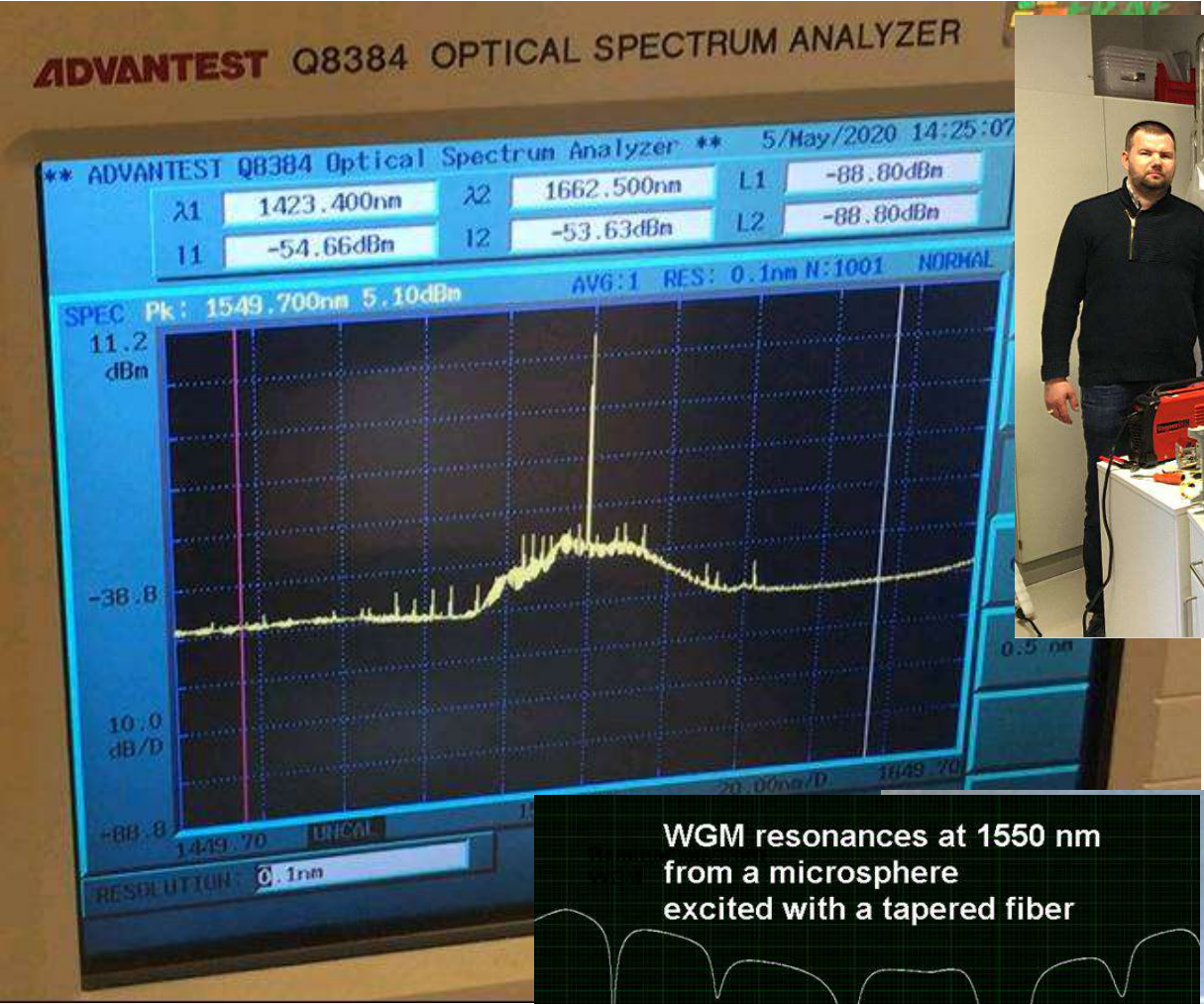
A tunable 1550 nm laser was amplified and coupled inside the silica microsphere resonator.

Generating the Comb



2020.g. maijā LU ASI ieguvām pirmo frekvenču ķemmi no SiO₂ mikrolodītes.

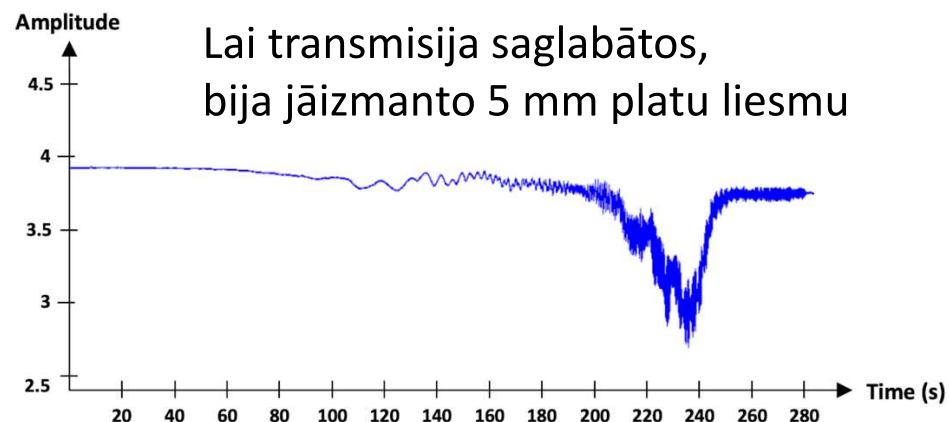
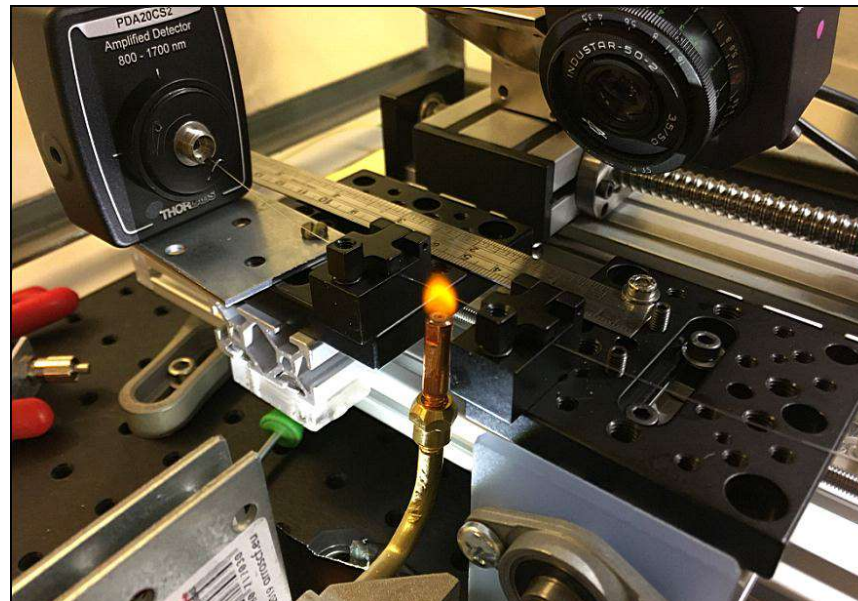
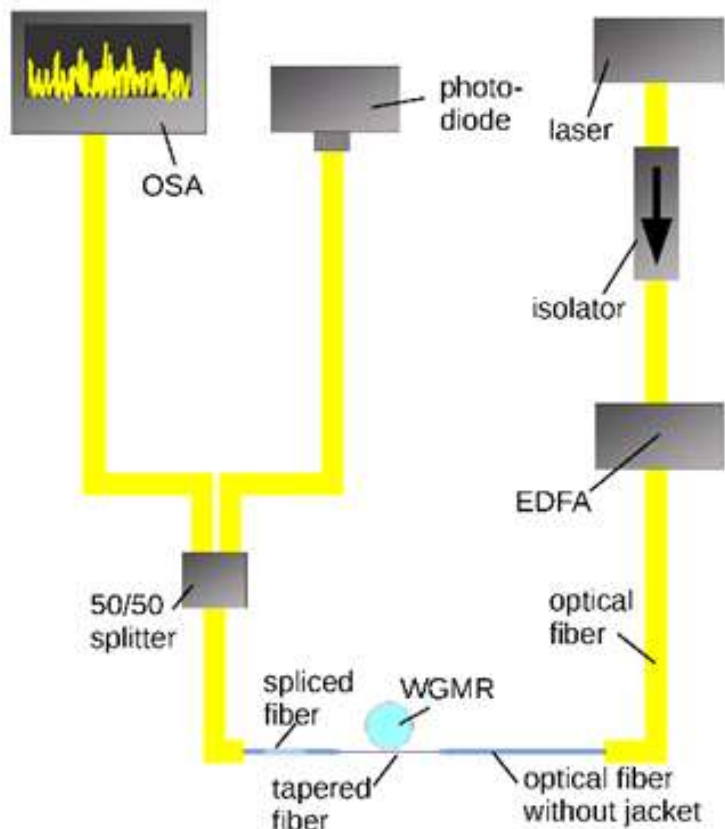
Ķemme bija samērā vāja un nestabila laikā.
Tagad esam sapratuši kā iegūt stiprākas un stabilākas ķemmes.



$$Q \approx 3 \times 10^7$$

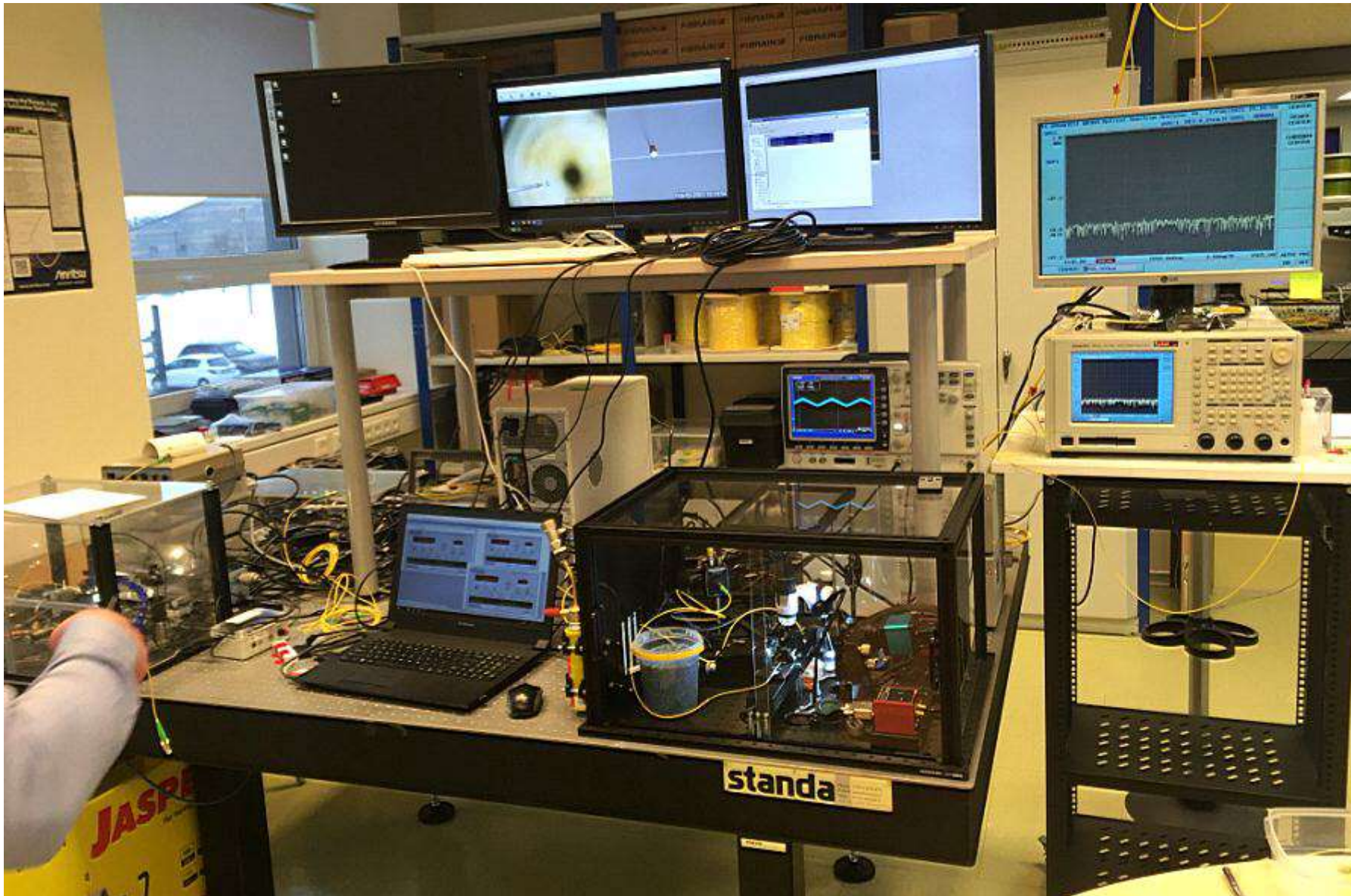
WCOMB sistēmas, kur tiek izmantota izstieptā šķiedra, izveide, testēšana un optimizēšana

2 cm garš telekom šķiedras gabals tiek izstiepts uz ūdeņraža liesmas un diametrs samazinās no 125 mkm uz dažiem mkm. Tad gaisma izplatās pa šādas tievās šķiedras virsmu un var tikt efektīvi ievadīta ČGM rezonatorā



WCOMB setups RTU 2021.01.

Galda kreisā stūrī atrodas no LU atvestais prototips
un galda labajā stūrī jaunizveidotais RTU prototips.

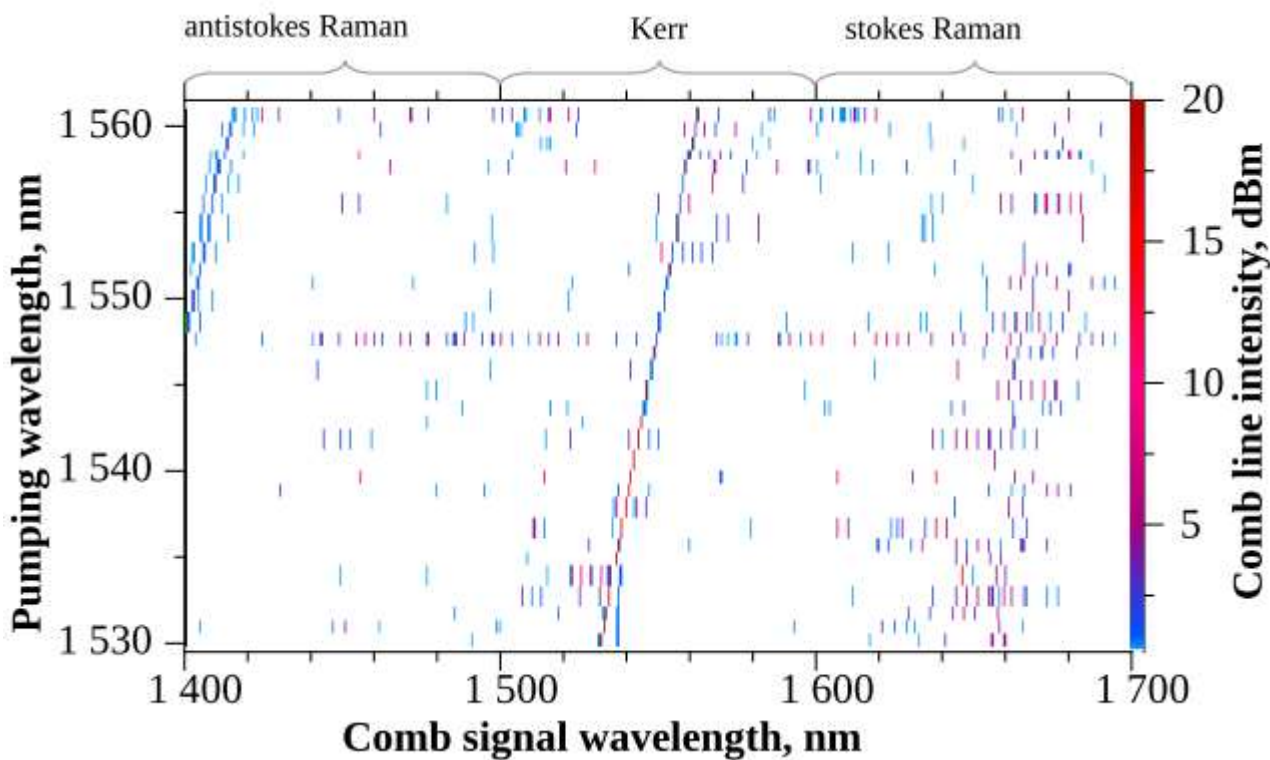
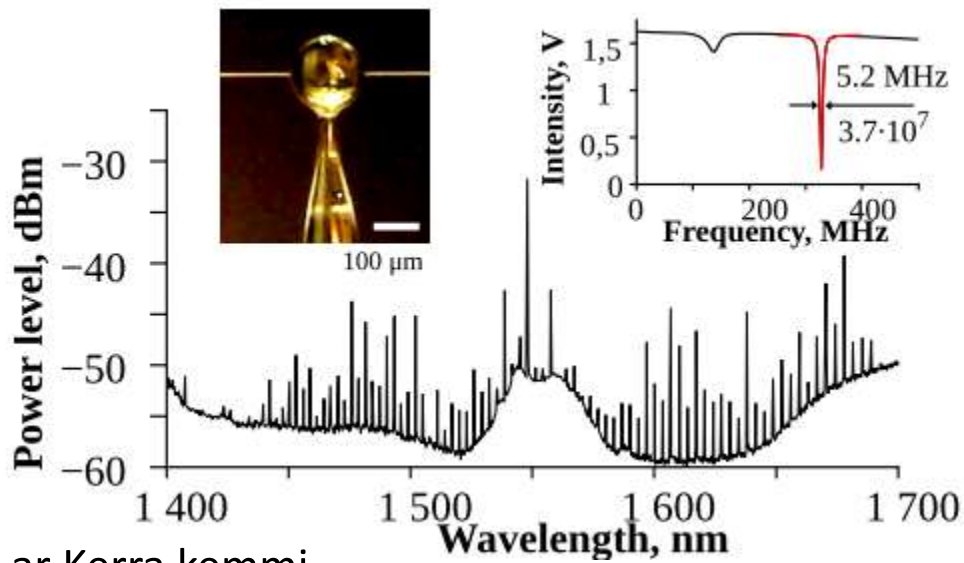


Iegūtās ķemmes no uzkausētās kvarca lodītes

SiO₂ mikrosfēra ar diametru 170 mkm un optisko labumu $Q = 3 \cdot 10^7$.

Aprēķinātais nulles dispersijas viļņa garums 1555 nm. Kerra ķemme veidojas šajā apgabalā.

Ramana ķemme veidojas vienmēr un konkurē ar Kerra ķemmi.



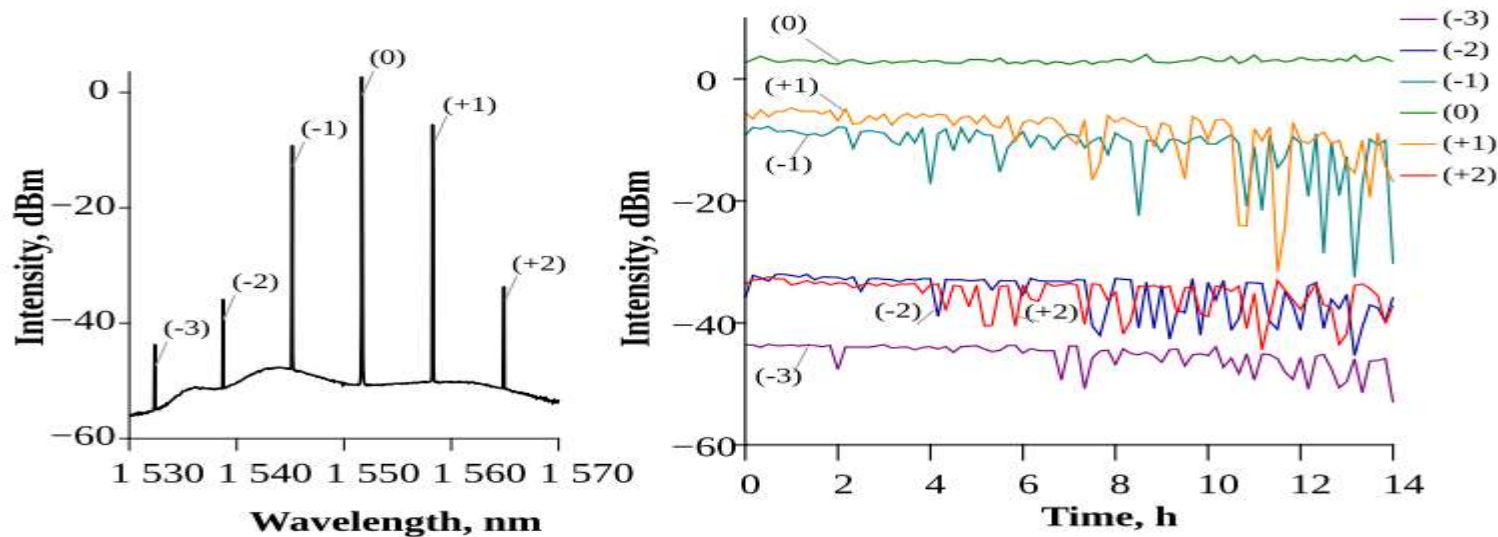
Tuning Pumping Laser

32 different C-Band channels were pumped inside the WGM microsphere.

Tests uz ilglaicīgo stabilitāti

800 GHz Comb Stability

Comb line spacing 2 FSR



Ķemme tika atstāta ieslēgta pa nakti.

Ķemmes zobi kļuva ar laiku nestabilāki pēc amplitūdas.

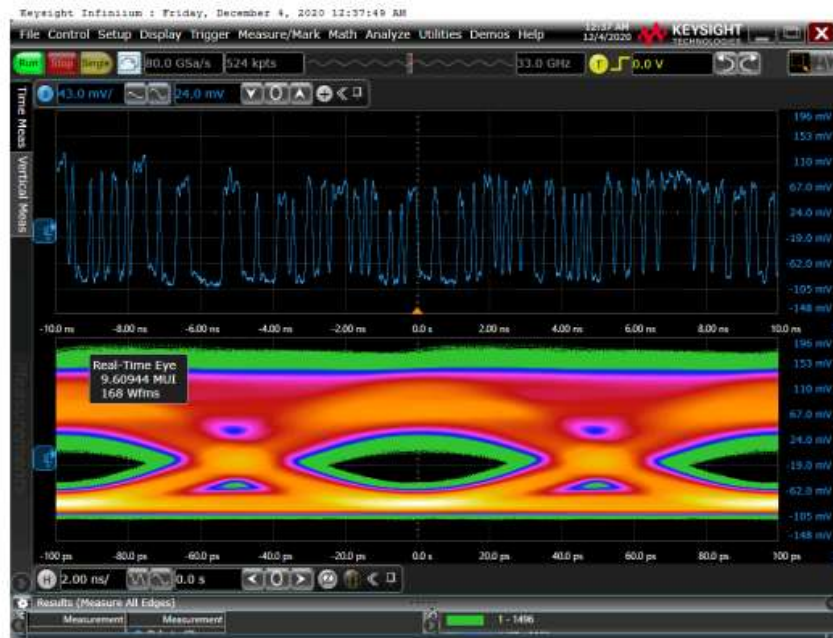
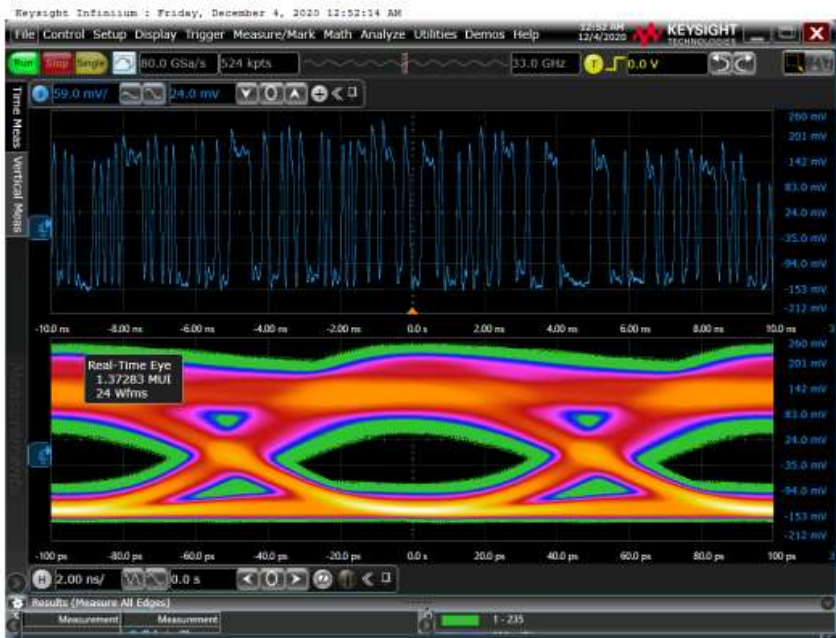
jo nedaudz izmainījās laboratorijas temperatūra,

un termiskās izplešanās dēļ mainījās lodītes pieskaršanās vieta šaurajai šķiedrai,
kā arī polarizācija rotēja ierosmes šķiedrā.

Risinājums nākotnē: termostabilizēt rezonatoru, lietot PM šķiedras.

WDM data transmission

10 Gbit/s data and eye diagram on WDM selected OFC line (+1) before and after 20 km



Binārie dati ar Max-Zender modulatoru: Vieninieks – gaisma, nulle – tumsa.

Ja «acu diagramma» ir vaļā, tad nav bijuši impulsi pa vidu ar nenoteiktu līmeni, un dati pārraidās korekti.

Novērojām ķemmes zoba amplitūdas nestabilitāti ar ~ 35 MHz frekvenci, fotonu spiediena dēļ lodītē, kas ierosina mehānisko rezonansi līdzīgi kā kvarca rezonatoros elektronikā. Šo nestabilitāti bija iespējams minimizēt, regulējot ierosmes polarizāciju ar šķiedras polarizatoru.

Publikācijas iesniegtas 2021. gadā WCOMB projektā.

Publikācija noraidīta žurnālā *Optica*, iesniegta *Optics Express*:

Demonstration of fiber optical communication system employing silica microsphere-based OFC source

TOMS SALGALS, ^{1,2*} JANIS ALNIS, ³ RIHARDS MURNIEKS, ^{1,4} INGA BRICE, ³ JURGIS PORINS, ¹ ALEXEY V. ANDRIANOV, ⁵ ELENA A. ANASHKINA, ⁵ SANDIS SPOLITIS, ^{1,4} AND VJACESLAVS BOBROVS¹

Publikācija iesniegta *IEEE* žurnālā:

IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS

Kerr optical frequency combs with multi-FSR mode spacing in silica microspheres

Elena A. Anashkina, [Vjaceslavs Bobrovs](#), [Toms Salgals](#), [Inga Brice](#), [Janis Alnis](#), and [Alexey V. Andrianov](#)

Publikācija iesniegta *SPIE proceedings* un tiks prezentēta *Photonics West 2021*:

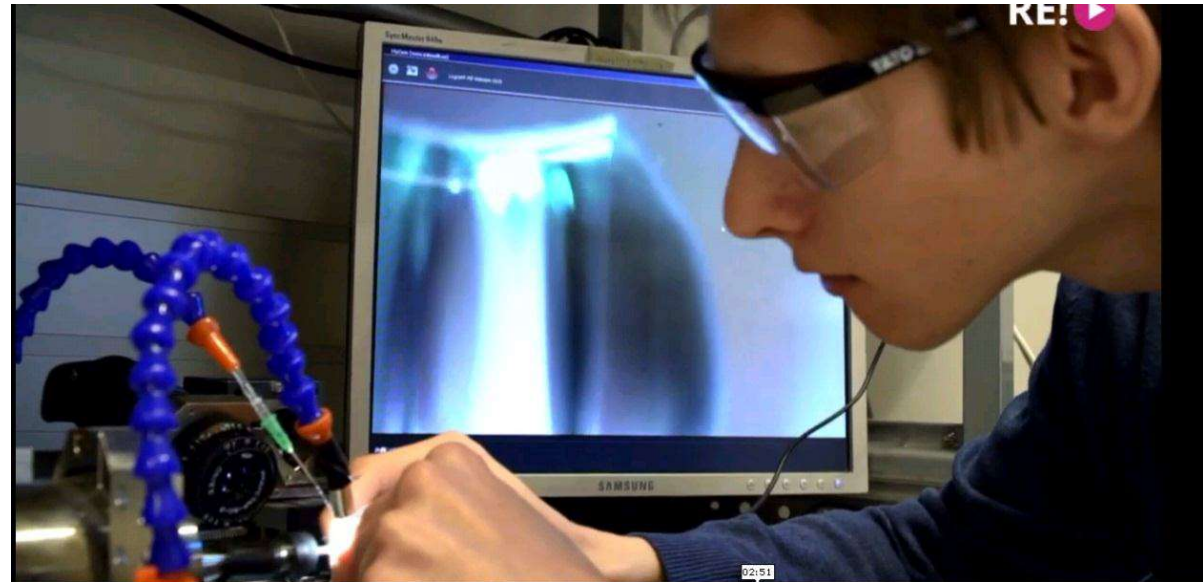
Frequency comb generation in whispering gallery mode silica microsphere resonators

Inga Brice^a, Karlis Grundsteins^a, Toms Salgals^{b, c}, Sandis Spolitis^{b, c}, Arvids Sedulis^a, Vjaceslavs Bobrovs^b, and Janis Alnis^a

ERAF projektā tiek attīstītas mikrorezonatoru izgatavošanas metodes: ar liesmu, pulēšanu uz virpas un CO₂ lāzerkausēšanu.

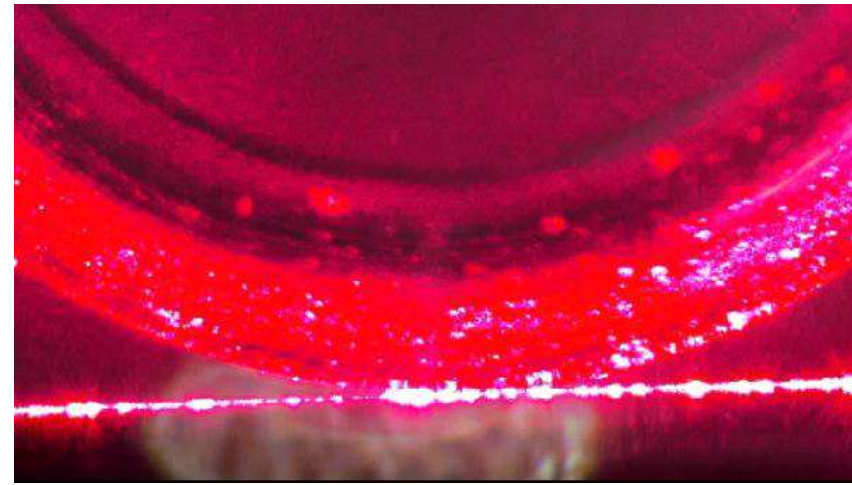
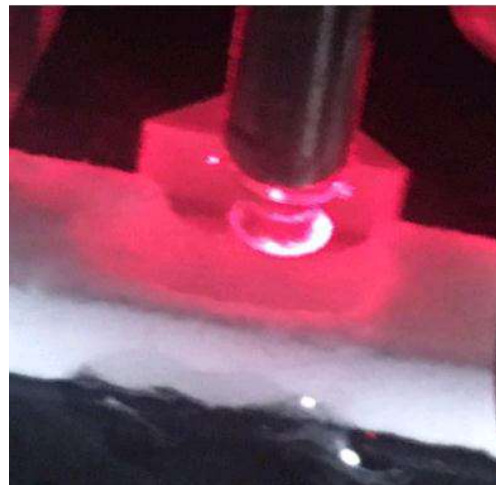
Ar abrazīvo pulēšanas metodi uz precīzas virpas iespējams izveidot precīza diametra rezonatorus no CaF₂, MgF₂, orgstikla, kvarca.

Esam izmēģinājuši nopulēt orgstikla un stikla ČGMR.



Diamond abrasives

Prism and taper coupling



Polished Plexiglass WGMR

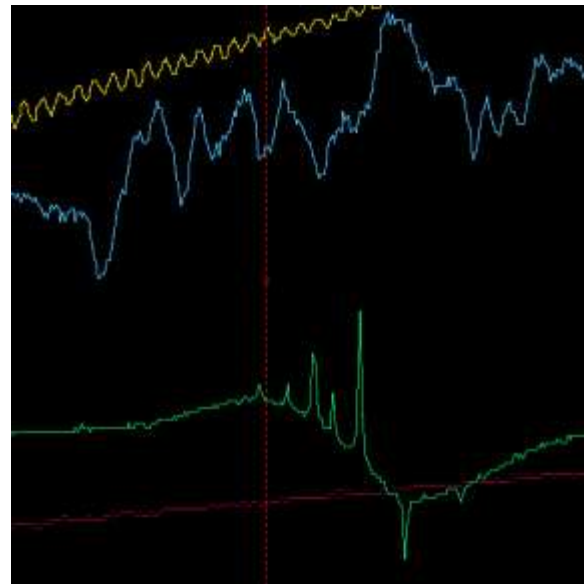
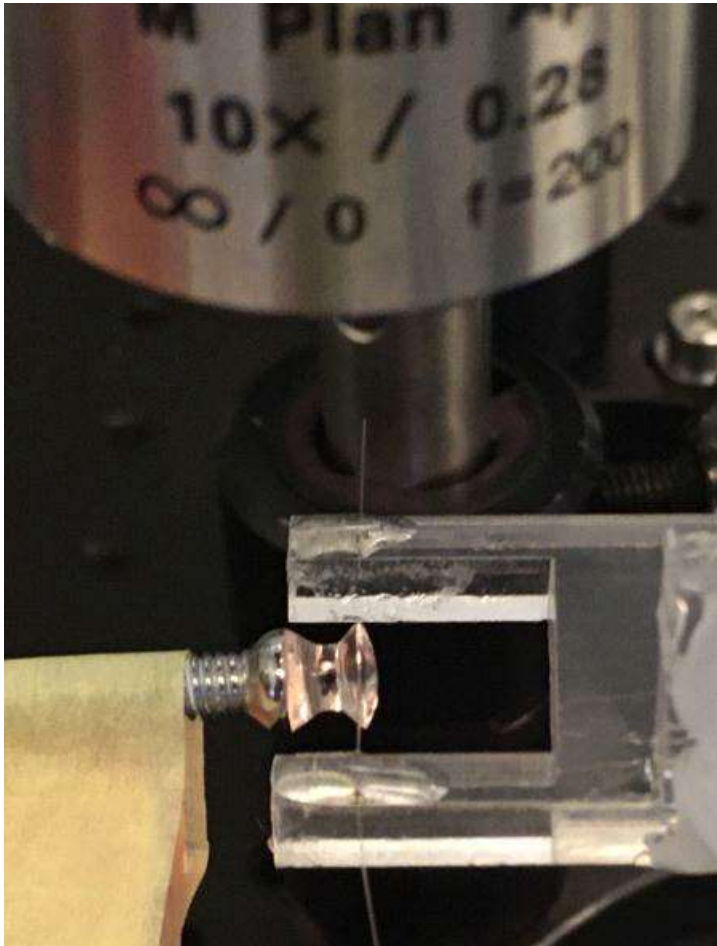
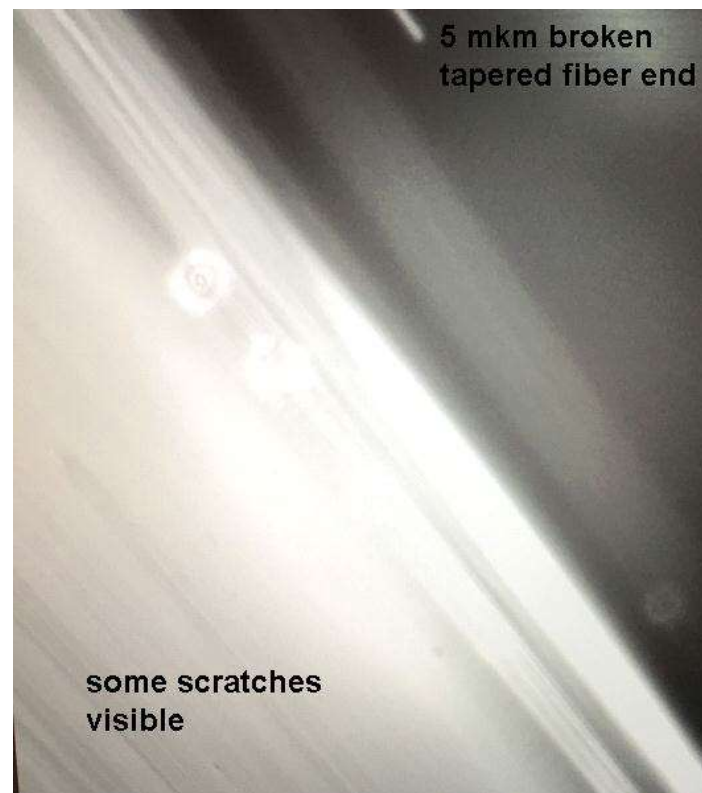
2020,10. LU ASI QO-Lab.

Material: 5 mm PMMA sheet

Diameter ca 5 mm.

Resonances ca 50 MHz FWHM.

Q factor 5E6.

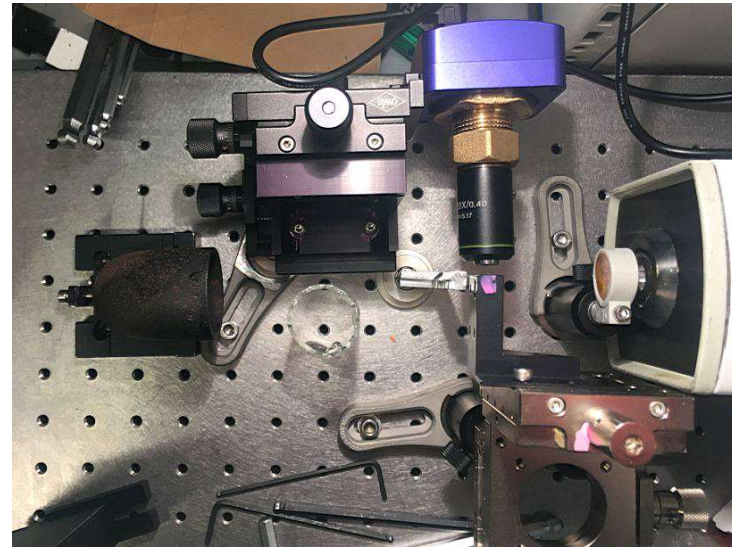
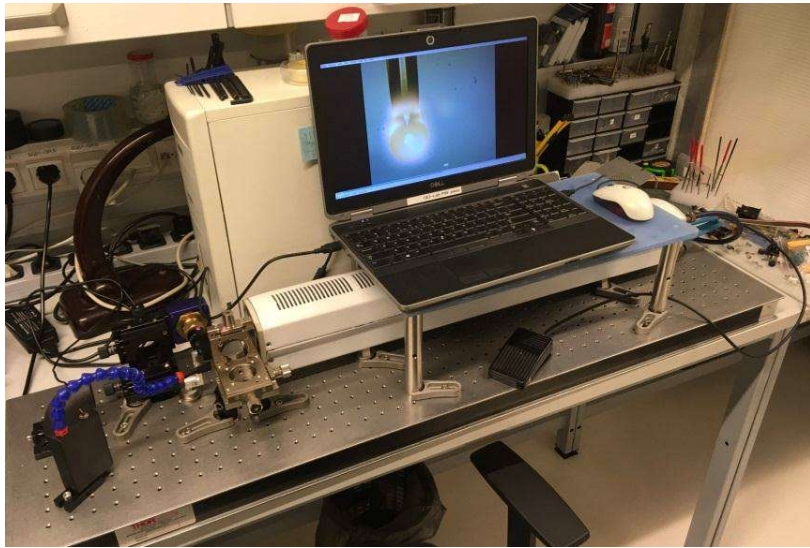


Yellow waves
50 MHz FSR

Blue WGMR

Green Rb satur.

Microspheres and microrods fabricated with a 40W CO₂ laser lathe

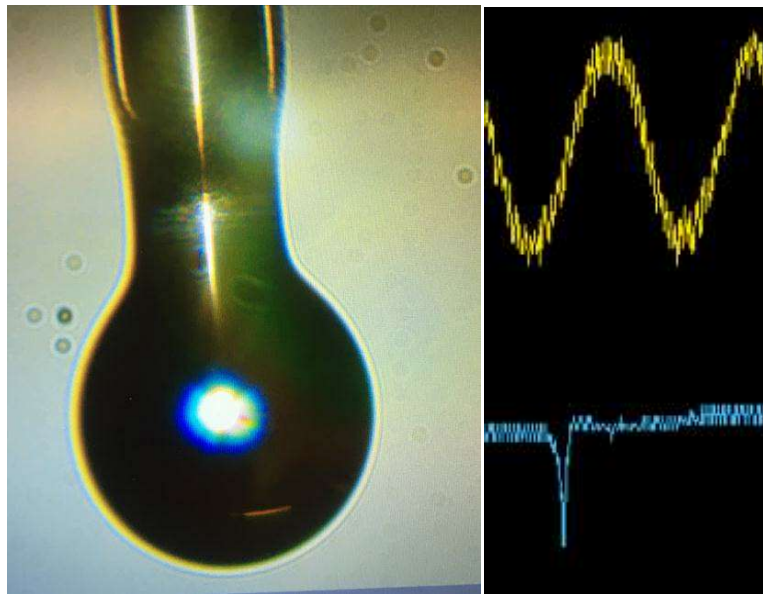


Home-made microscope:
20x objective from Ebay (60 EUR) and Astronomy webcam (150 EUR)

Sphere WGMR FWHM = 2 MHz **Q = 2E8 at 780 nm**

Microrod CO₂ lathe first resonances Q ~ 10⁶.

Evaporated silica dust is a problem



Yellow reference interference fringes from fiber etalon have 50 MHz period.

