

Jaunu čukstošās galerijasmodu mikrorezonatoru izstrāde
optisko frekvenču standartu un biosensoru
pielietojumiem, un to raksturošana ar femtosekunžu
optisko frekvenču ķemmi

Projekta 10. atskaite par paveikto periodā

01.06.2019.- 31.08.2019.

I. Brice
A. Atvars
R. Viter.
J. Alnis

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

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

ERAF projekts Nr. 1.1.1.1/16/A/259

Par projektu

- **Projekta nosaukums:** Jaunu čukstošās galerijas modu mikrorezonatoru izstrāde optisko frekvenču standartu un biosensoru pielietojumiem, un to raksturošana ar femtosekunžu optisko frekvenču ķemmi.
 - **Projekta numurs:** 1.1.1.1/16/A/259
 - **Projekta mērķis:** jaunu zināšanu-zinātības iegūšana CGM rezonatoru izstrādē, stabilizēšanā un modelēšanā, un rezonatoru izmantošanā biomolekulu detektēšanai, tādējādi atbalstot Latvijas Viedās specializācijas mērķu sasniegšanu, zinātnes un tehnoloģiju cilvēkkapitāla attīstību un jaunu zināšanu radīšanu tautsaimniecības konkurētspējas uzlabošanai.
- **Projekta vadītājs:** J. Alnis
 - **Projekta administratīvais vadītājs:** I. Brice
 - Projektu realizē LU ASI kvantu optikas laboratorija
 - **Plānotie projekta galvenie rezultāti:** 4 publikācijas, 3 zinātību apraksts, 1 licences līgums.
 - Paredzēti 9 konferenču apmeklējumi un 6 zinātniskās vizītes
 - **Projekta īstenošanas laiks:** 01.03.2017. - 29.02.2020.

Darbinieki

- Vadošie pētnieki
 - J. Alnis
 - A. Atvars
 - A. Raminavicius
 - R. Viter
- Zinātniskie asistenti
 - I. Brice
- Laboranti
 - K. Grundšteins
 - K. Draguns



Kvantu optikas laboratorijas kopbilde 2019. gada februāris.

Projekta budžets

Projekta kopējās izmaksas: 648 252,61 EUR, to skaitā ERAF finansējums (85%)
- 551 014,72 EUR.

- Izdevumi MP1 - 33 108.93 EUR
- Izdevumi MP2 - 46 967.37 EUR
- Izdevumi MP3 -
 - pieprasīti 50 218.34 EUR
 - apstiprināti 46 967.37 EUR
- Izdevumi MP4 - 19 164.77 EUR
- Izdevumu MP5 - 38 392.16 EUR
- Izdevumu MP6 - 84 367.70 EUR
- Izdevumi MP7 - 78 512.16 EUR
- Izdevumi MP8 - 34 725.76 EUR
- Izdevumi MP9 - 50 197.04 EUR
- Izdevumi MP10 - 79 500.27 EUR

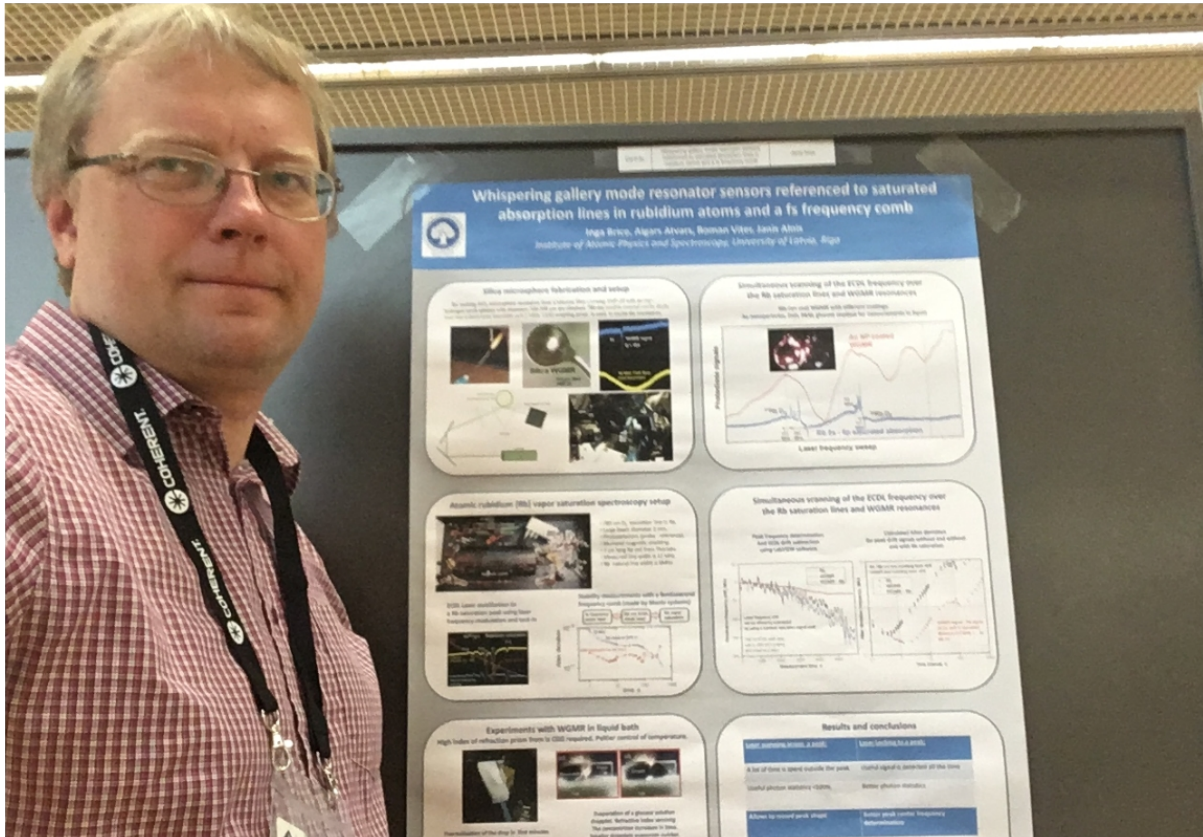
Iepirkumi

- Comsol datorprogrammas iepirkums (izpildīts).
- Materiālu iegādes iepirkums 1 (izpildīts).
- Instrumentu nomas iepirkums (izpildīts).
- Materiālu iegādes iepirkums 2 (procesā):
 - bioķīmisko materiālu iegāde 2 (procesā)
 - Saņemti biomateriāli, notiek apmaksā
 - dažādi materiāli izpētes stendu izveidei (optika, mehānika, elektronika, materiāli u.tml.) 2 (izpildīts)

Konferenes



J. Alnis konference CLEO Europe Minhenē



Microresonator Kerr comb platforms

Silicon Nitride (Columbia, Purdue, EPFL, UCLA, NIST)

Hydex (INRS, Melbourne)

Fused Silica (NIST, Caltech)

CaF₂, MgF₂ (JPL, OEwaves, ROC, EPFL)

Silica Disks (Caltech, NIST)

Silicon (Columbia)

Diamond (Harvard)

AlN (Yale)

AlGaAs (DTU)

GaP (IBM Zurich)

LiNbO₃ (Harvard)

Bulk silica / sapphire (CSEM, MPO)

Razzari et al., Nature Phot., 41 (2010)
Levy et al., Nature Phot., 37 (2010)
Savchenkov et al., PRL, 93902 (2008)
Jung et al., Opt.Lett., 2810 (2013)
Hausmann et al., Nature Phot., 369 (2014)
Li et al., PRL, 233901 (2012)
Pu et al., Optica (2015)
Ewelina Obrzud, Nat. Photon. (2017)
Wilson et al. arXiv (2018)
Y. He arXiv (2019)

Power (20 dBm/div)
Wavelength (nm)
Ultrahigh resolution (> 100 GHz)
Large Optical Solitons

Konferenes

I. Brice piedalījās konferencē "Nanomaterials for biosensors and biomedical applications" Jūrmalā 02.07.19.-04.07.19.



Konferencē tika prezentēts stenda referāts "WGMR coated with Au NPs to enhance the sensitivity"

Konferenes

I. Brice piedalījās konferencē " SPIE Optics + Photonics" San Diego 10.08.19.-14.08.19.



Konferencē bija vairāk nekā 70 sesijas, kurās prezentēja ap 3300 dalībnieku



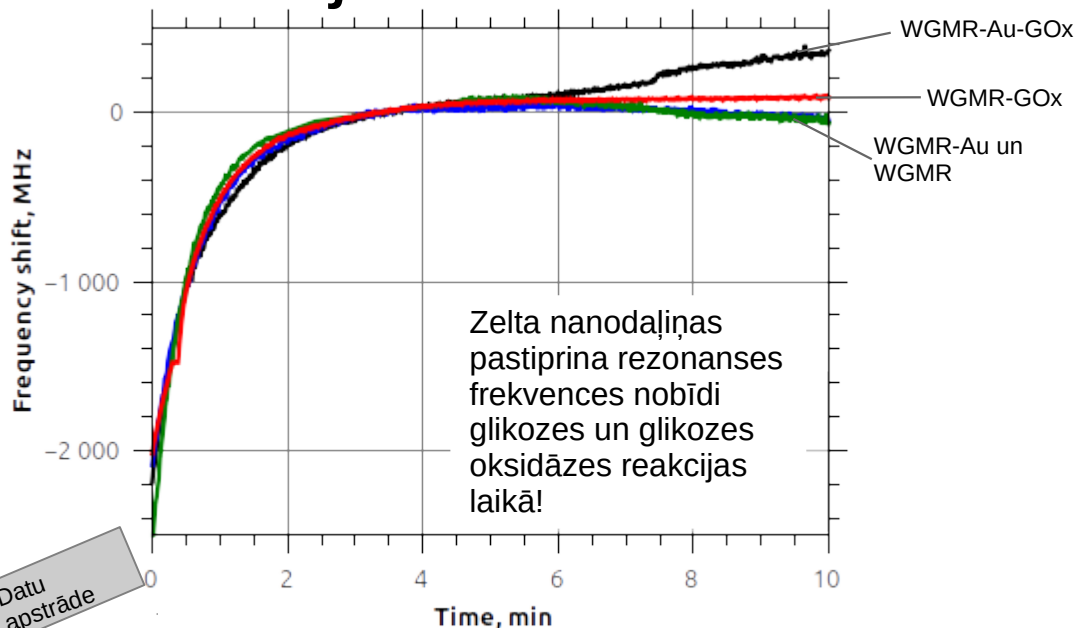
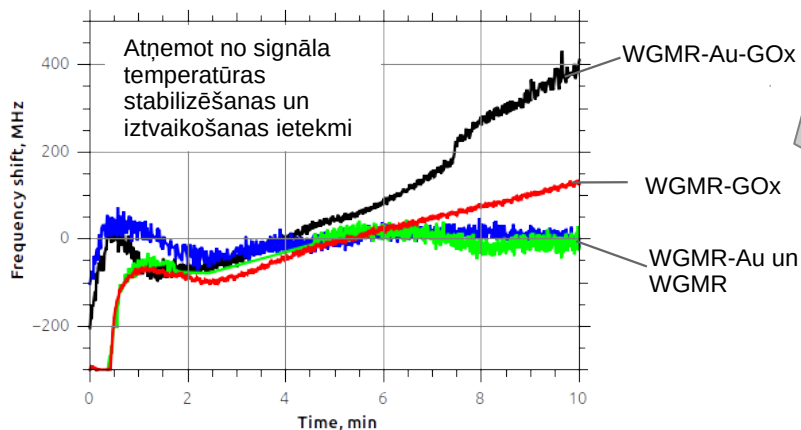
Konferencē tika prezentēts stenda referāts "Whispering gallery mode resonators coated with Au nanoparticles"

Glikozes sensors

Kontroles mērījumi

- ✓ Palielinot šķidruma piliena izmēru;
- ✓ izvēloties stabilizēšanas;
- temperatūru zemāku nekā telpā
- ✓ samazinot mērījumu laiku

ir izdevies samazināt iztvaikošanas ietekmi uz rezultātiem.



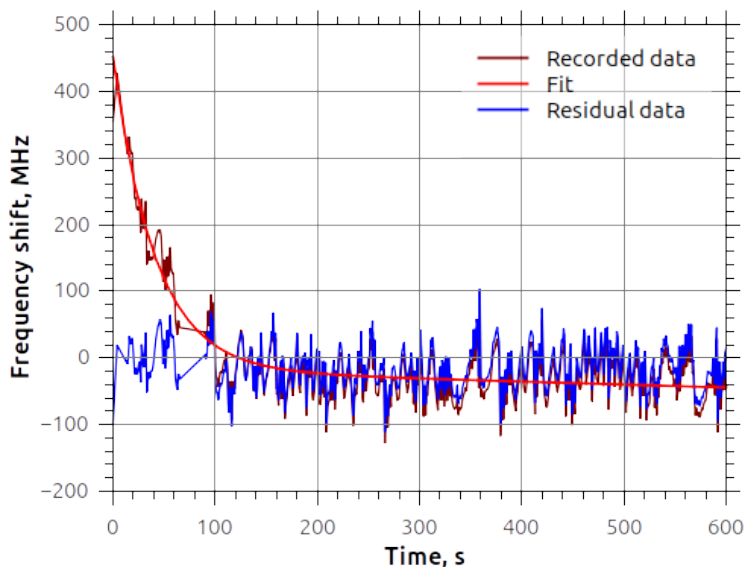
Bez glikozes oksidāzes rezonanses signāla nobīde ir 0, savukārt, ar glikozes oksidāzi gadījumā ar Au nanodaļiņām nobīde ir lielāka nekā bez nanodaļiņām.

Šie rezultāti prezentēti konferencēs un iesniegti publicēšanai SPIE Proceedings

Glikozes sensors

Glikozes koncentrācija

Kontroles mērījums WGMR-Au-Gox PBS pilienā bez glikozes parāda, ka rezonanses nobīde ir 0. Līdz ar to var apgalvot, ka nobīde ir glikozes-glikozes oksidāzes reakcijas rezultāts.



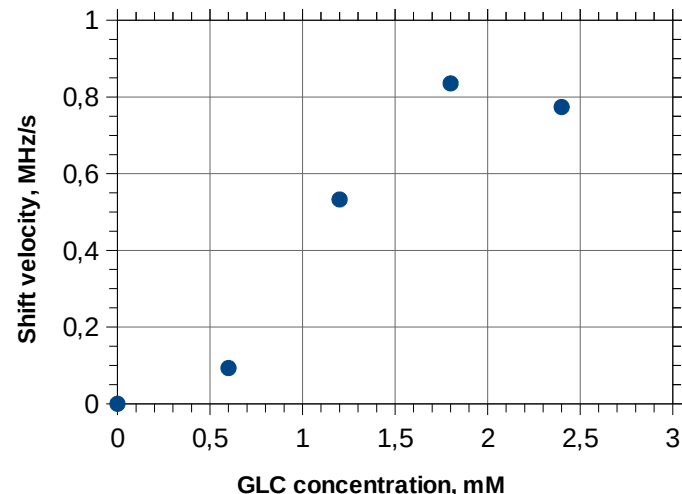
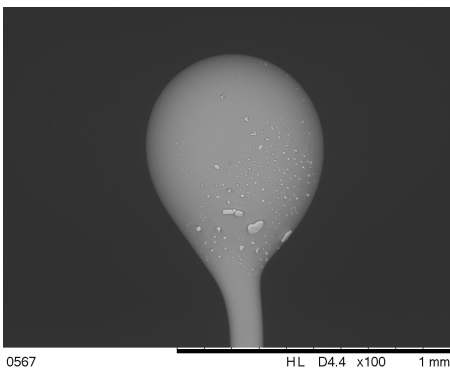
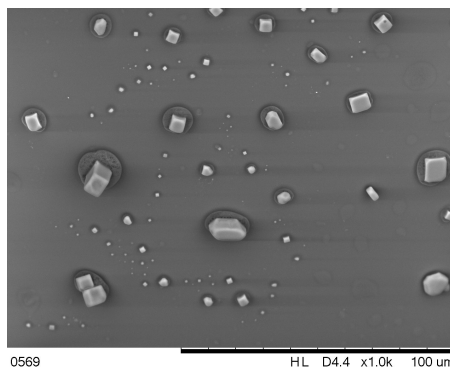
Dati tiek apstrādāti izmantojot funkciju:

$$y_0 + A \cdot \exp(-x/t) + B \cdot x$$

Temperatūras
ietekme

Iztvaikošana
un sensora
reakcija

WGMR-Au-Gox SEM bildes.



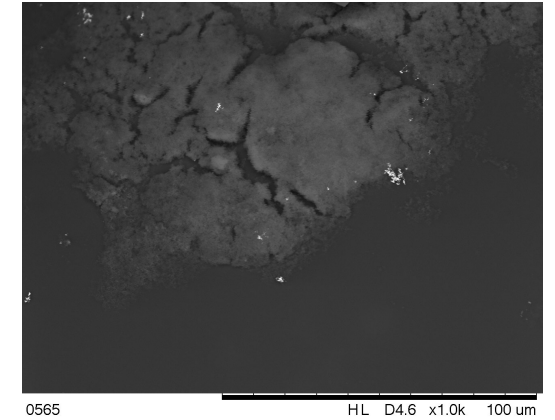
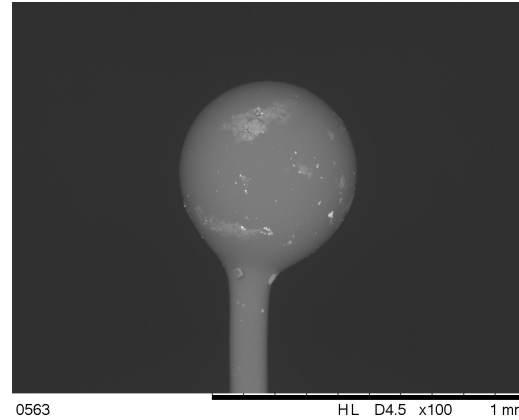
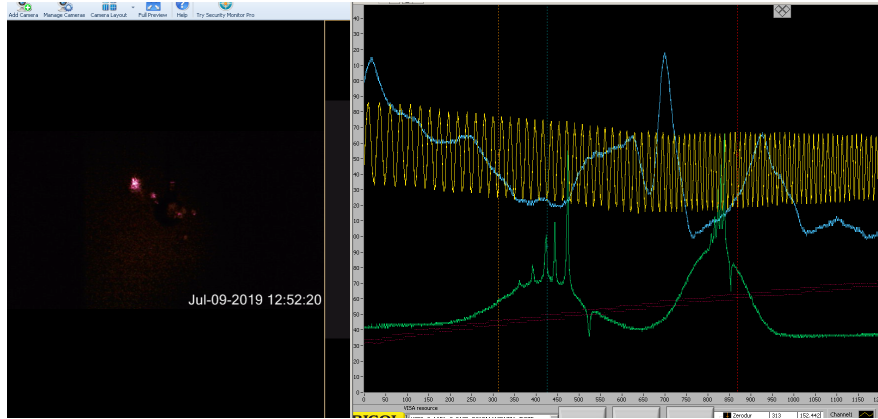
Rezonanses signāla nobīdes ātrums (MHz/s) parāda, ka palielinot koncentrāciju, ātrums pieaug.

Sadarbībā ar A.

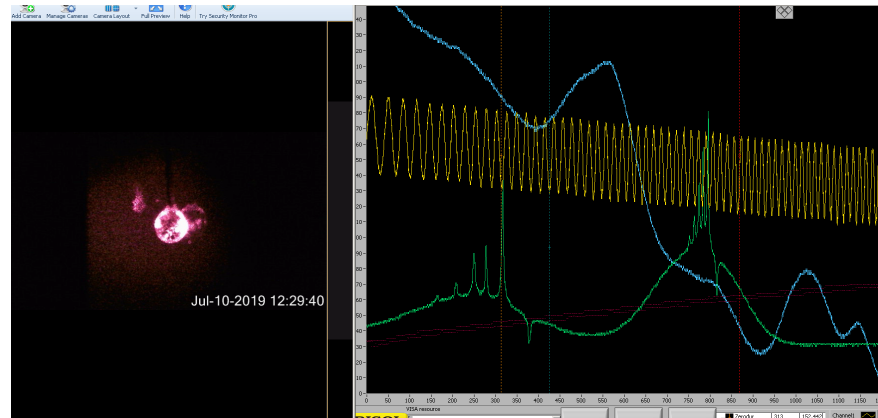
Raminavicius par rezultātiem tiek gatavots zinātniskais raksts.

Rezonatori pārklāti ar ZnO

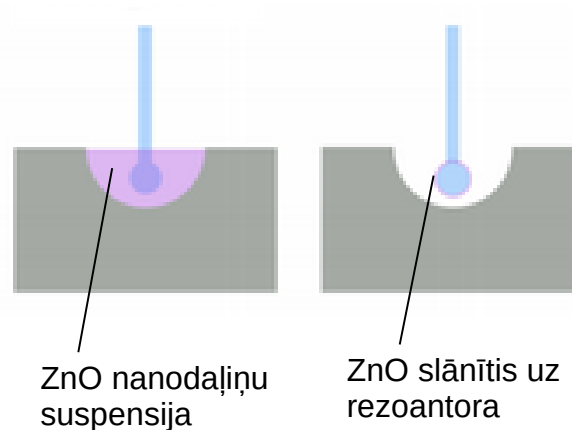
Pirms ZnO uzklāšanas $Q = 3 \cdot 10^6$



Pēc ZnO uzklāšanas $Q = 1 \cdot 10^6$



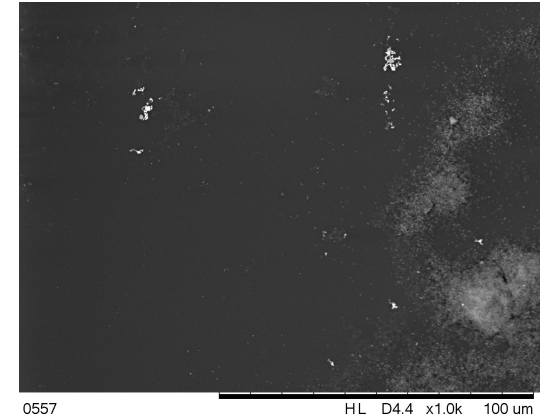
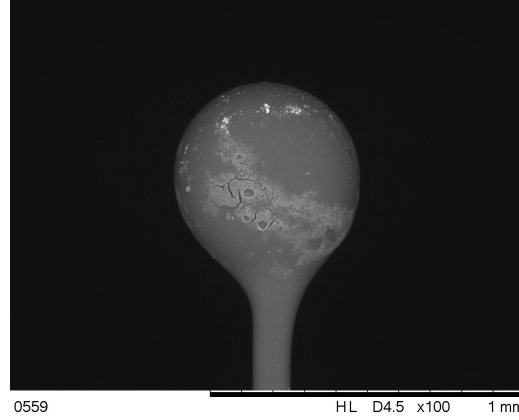
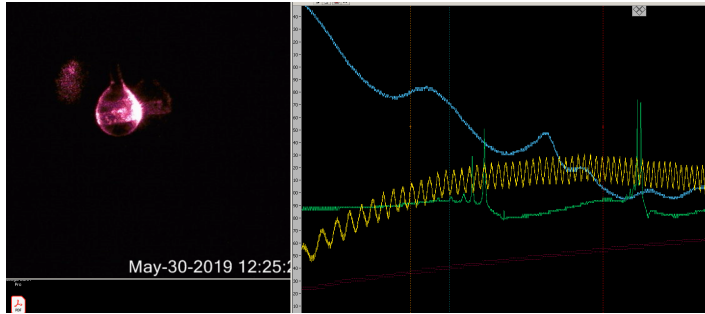
WGMR-ZnO SEM bildes.



lemērķšanas metode :
✓ aizņem mazāk laika
✓ Ir lētāka
✓ nepieciešama vienkāršāka iekārta

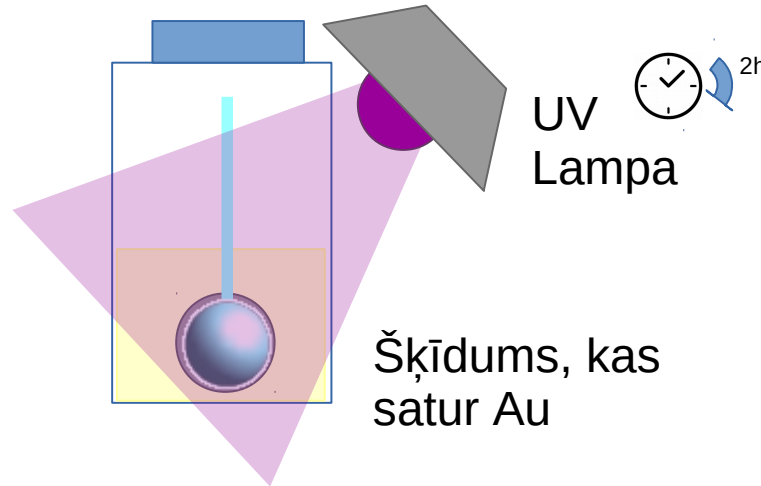
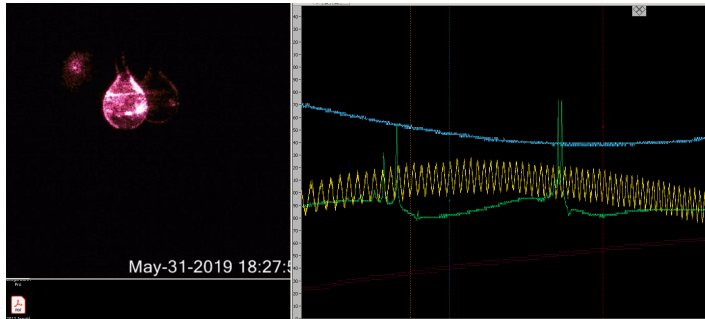
Rezonatori pārklāti ar ZnO un Au

Pārklāts ar ZnO



WGMR-ZnO-Au SEM bildes.

Pārklāts ar ZnO un Au



Rezonatori ir vispirms pārklāti ar ZnO un tad ar Au, lai izveidotu atbilstošu pārklājumu, jo Au nanodaļiņas aglomerējas. Kad ir ZnO slānis, ķīmiskās reakcijas dēļ Au pārklājas vairāk virsmas.

Modelēšana

Sistematizēta un aprakstīta teorija par daudzu viļņu superpozīciju, kuri atšķiras ar parametru

$$\bar{h} = |h|e^{i\phi}, \quad |h| < 1$$

$$U_1 = \sqrt{I_0}$$

$$U_1, \quad U_2 = hU_1, \quad U_3 = hU_2 = h^2U_1, \quad \dots$$

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 + \dots = \\ &= U_1(1 + h + h^2 + h^3 + \dots) = U_1 \sum_{k=0}^{\infty} h^k = \\ &= \frac{U_1}{1 - h} = \frac{\sqrt{I_0}}{1 - |h|e^{i\phi}} \end{aligned}$$

$$I = |U|^2 = \frac{I_0}{|1 - |h|e^{i\phi}|^2} = \frac{I_0}{1 + |h|^2 - 2|h|\cos\phi}$$

$$I = \frac{I_0}{(1 - |h|)^2 + 4|h|\sin^2(\phi/2)}$$

Rezonanses nosacījums:

$$\phi_N = 2\pi m$$

where m is integer number.

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\nu_N = (c/L)|m|$$

$$\delta\nu \approx \frac{c}{\pi L} \frac{1 - |h|}{\sqrt{|h|}}$$

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{|h|}}{1 - |h|}$$

$$I = \frac{I_{max}}{1 + (2\mathcal{F}/\pi)^2 \sin^2(\phi/2)} \quad I_{max} = \frac{I_0}{(1 - |h|)^2}$$

ČGM:

$$|h| = e^{-\pi r n \omega / (Qc)}$$

$$\phi = 2\pi r n \omega / c$$

Sistematizēts un aprakstīts Q faktora izvedums

$$Q = 2\pi \frac{\text{stored energy}}{\text{energy loss per oscillation period}}$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau}$$

$$|h| = e^{-t_1/(2\tau)} = e^{-L/(2\tau c)}$$

$$|h_2| = e^{-T/(2\tau)} = e^{-1/(2\tau\nu)}$$

$$Q = 2\pi \frac{1}{1 - e^{-1/(\tau\nu)}} \quad 1/(\tau\nu) \ll 1$$

$$Q = 2\pi\nu T = \tau\omega$$

$$I(\omega) \sim \frac{1}{\left(\frac{1}{2\tau}\right)^2 + (\omega - \omega_0)^2}$$

$$\delta\omega = \frac{1}{\tau}$$

$$Q = \frac{\omega}{\delta\omega} = \frac{\nu}{\delta\nu}$$

$$dI \sim -I dt.$$

$$\begin{aligned} dI &= -a_1 I dt - a_2 I dt - a_3 I dt - \dots \\ &= -I(a_1 + a_2 + a_3 + \dots) dt \end{aligned}$$

$$I = I_0 e^{-(a_1 + a_2 + a_3 + \dots)t} \quad a_i = \omega / Q_i$$

$$I = I_0 e^{-(1/Q_1 + 1/Q_2 + 1/Q_3 + \dots)\omega t} = I_0 e^{-(1/Q)\omega t}$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_1} + \frac{1}{Q_2} + \frac{1}{Q_3} + \dots$$

Publikācijas gatavošana par ČGM modelēšanu

Comsol simulācija

Modelling of main effects in whispering gallery

Vispārējā teorija

$$\bar{h} = |\bar{h}|e^{i\phi}, \quad |\bar{h}| < 1$$

$$\delta\nu \approx \frac{c}{\pi L} \frac{1 - |\bar{h}|}{\sqrt{|\bar{h}|}}$$

$$I = \frac{I_0}{(1 - |\bar{h}|)^2 + 4|\bar{h}| \sin^2(\phi/2)}$$

$$|\bar{h}| = e^{-\pi r n \omega / (Qc)}$$

$$\phi = 2\pi r n \omega / c$$

Maksvela vienādojumi

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Plānotā iesniegšana žurnālā:
Physica Scripta vai Journal of Optics B

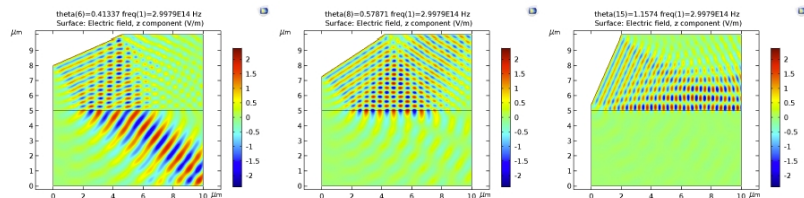


Figure 1. The formation of evanescent field in "prism" type structure.

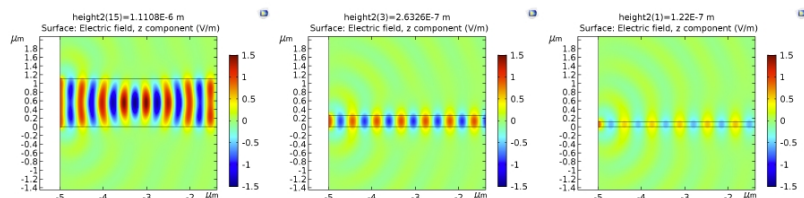


Figure 2. The formation of evanescent field in optical fiber structures

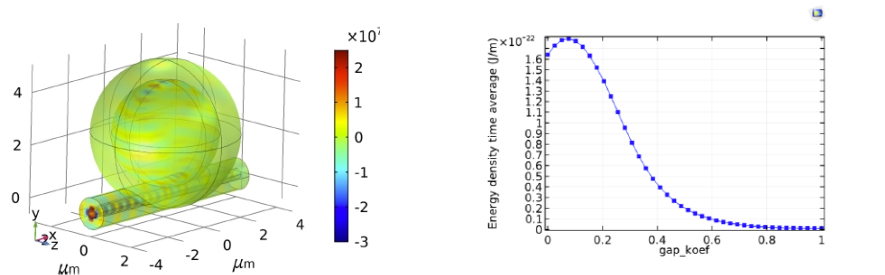
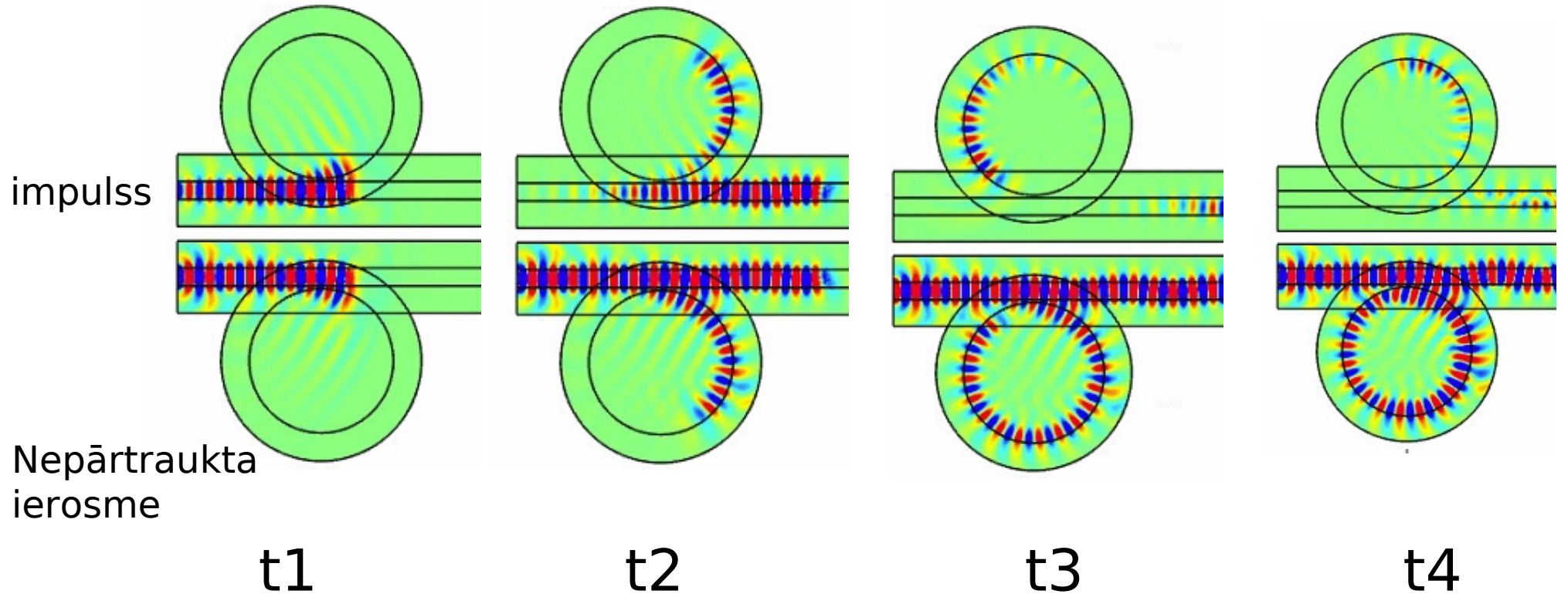


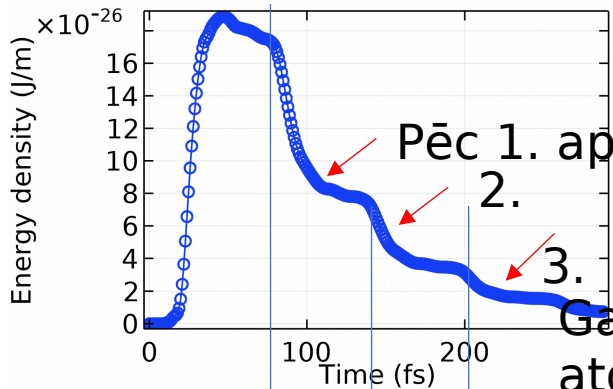
Figure 9. The formation of evanescent field in "prism" type structure.

Signāla izplatīšanās rezonatorā, process laikā, modelēšana



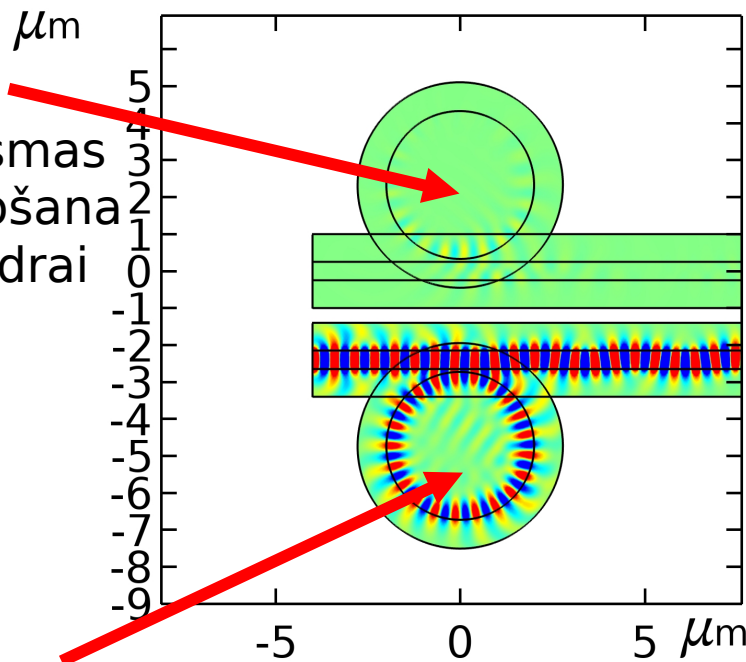
Tiek modelēta gaismas izplatīšanās, no laika atkarīgais modelis

1. ierosme



Pēc 1. apļa

Time=278.2 fs Surface: Electric field, z comp



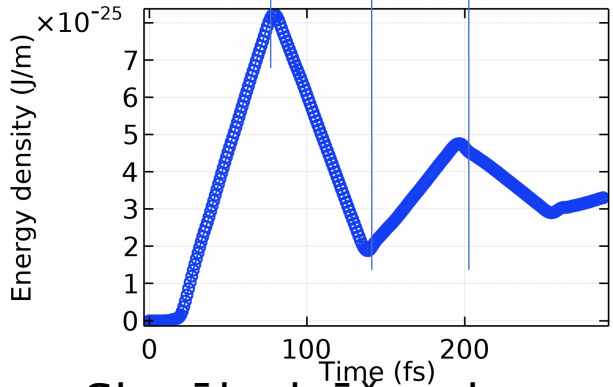
Uz rezonatoru iedarbojas impulss

Uz rezonatoru iedarbojas nepārtraukts starojums

Gaismas atdošana šķiedrai

Signāls, kad frekvence ir tuvu rezonansei

Pēc 2. apļa



Signāls dzēšanas, ja nav rezonanse

