

ČUKSTOŠĀS GALERIJAS MODAS SILĪCIJA DIOKSĪDA MIKROSFĒRAS REZONATORU PIELIETOJUMI BIOSENSOROS UN OPTISKO FREKVENČU ĶEMMĒM



Promocijas darba priekšizstāvēšana

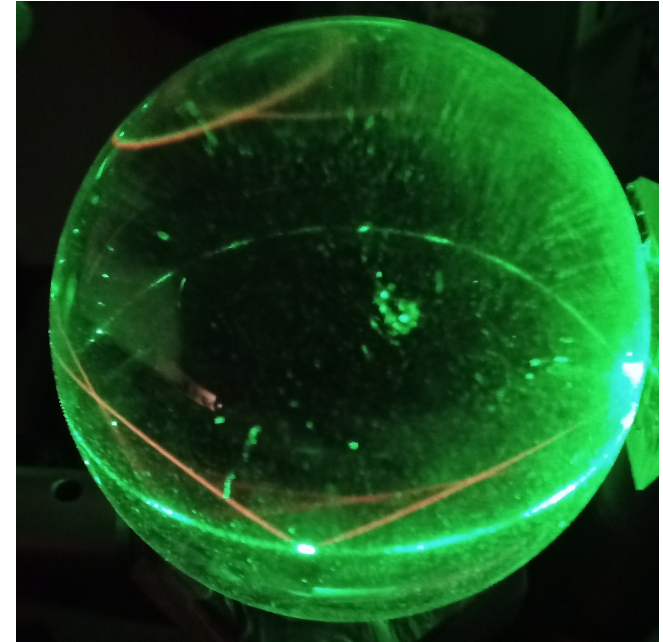
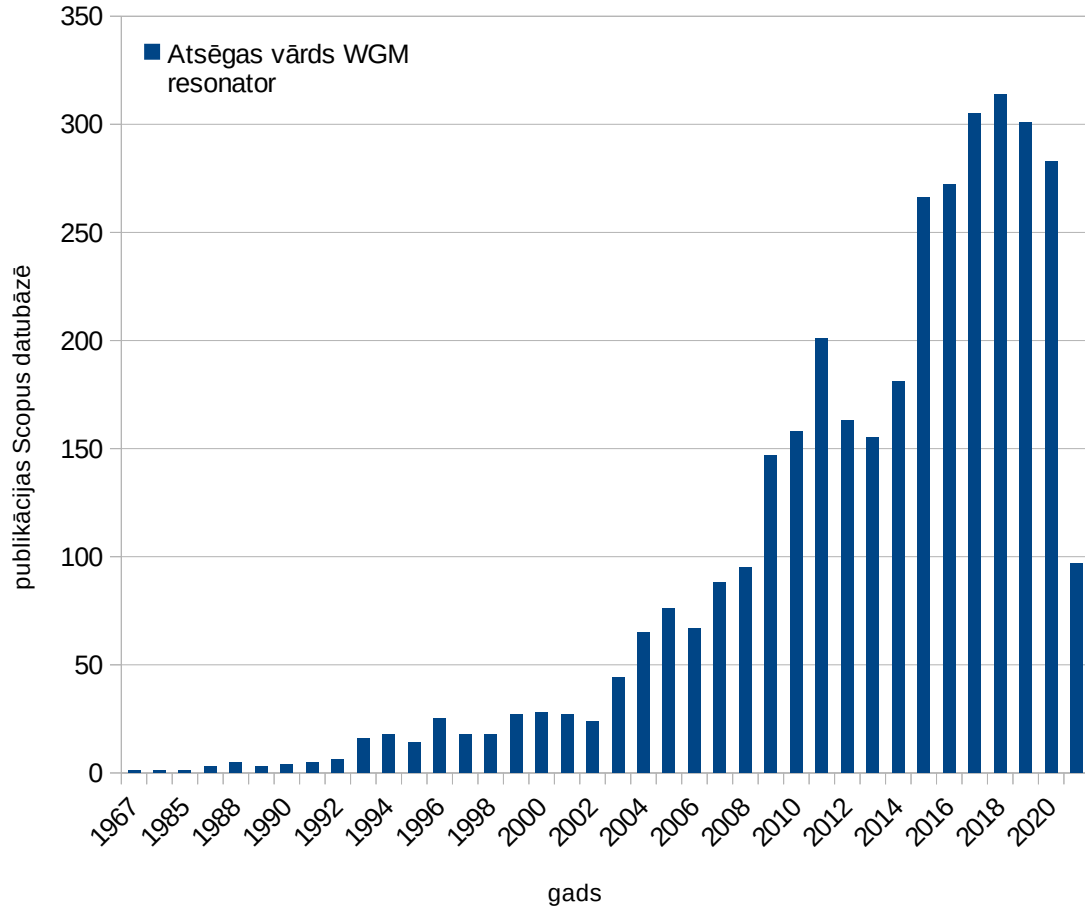
LATVIJAS UNIVERSITĀTE
**ATOMFIZIKAS UN
SPEKTROSKOPIJAS
INSTITŪTS**

Inga Brice
17.06.2021.

Saturs

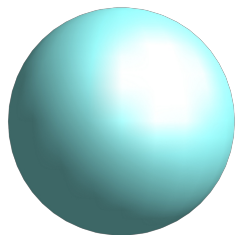
- **Ievads**
 - **Motivācija**
 - **ČGMR ģeometrija**
 - **Gaismas ievadišana ČGMR**
 - **Raksturošana ar labuma (Q) faktoru**
 - **ČGMR pielietojumi**
 - **Tēzes**
- Čukstošās galerijas modu rezonatoru biosensori
- Optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšana mikrosfērās
- Nobeigums

Motivācija



ČGMR ģeometrija

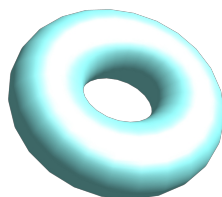
Mikrosfēra



Parametri

R

Mikrotoroīds

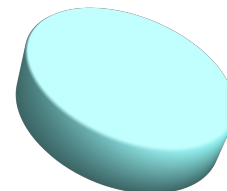


Parametri

R

r

Mikrodisks



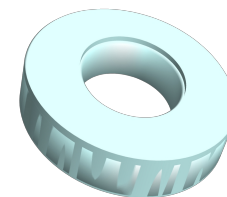
Parametri

R

d

θ

Mikrogredzens

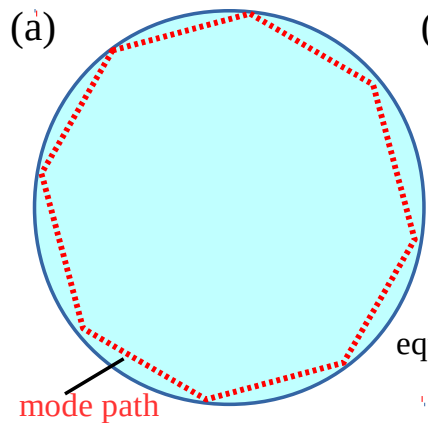


Parametri

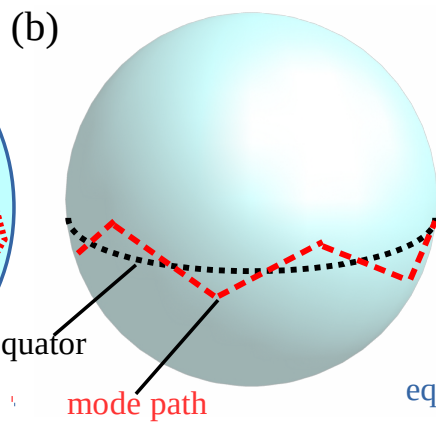
R

d

θ

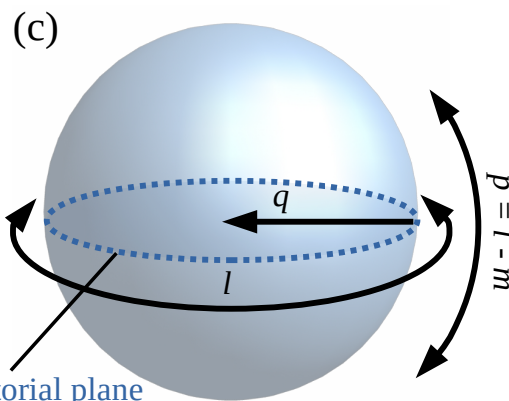


mode path



equator

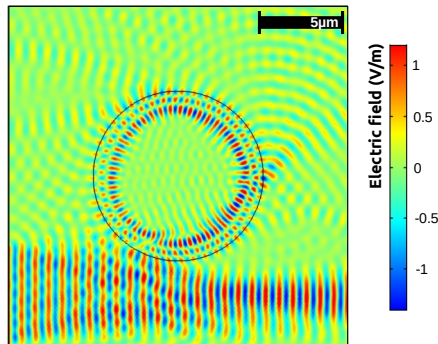
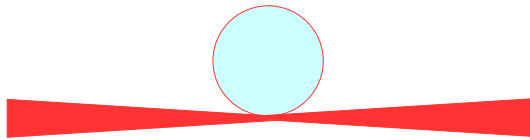
mode path



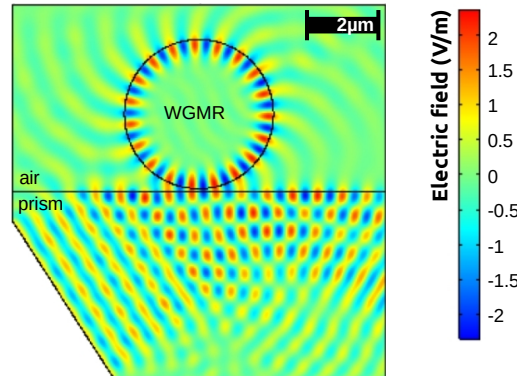
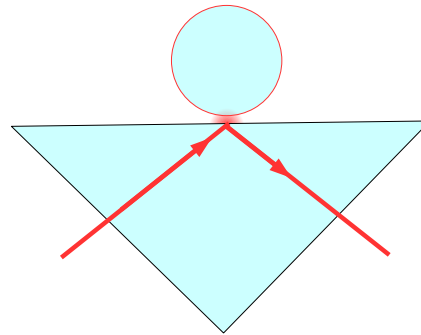
equatorial plane

Gaismas ievadīšana ČGMR

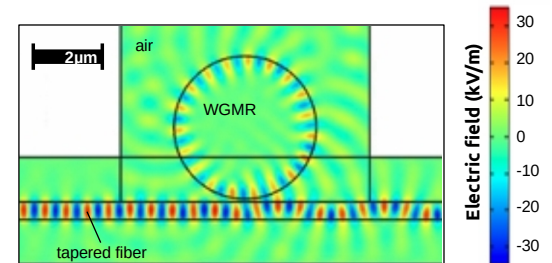
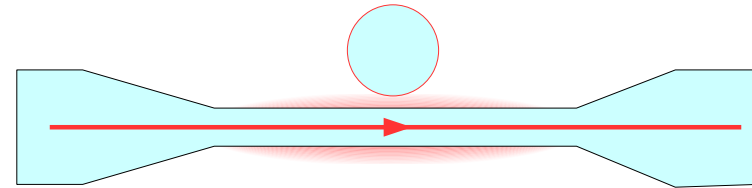
- Brīvtelpas sapārošana
 - Efektivitāte ~10%



- Sapārošanas prizma
 - Efektivitāte ~85%



- Trapecveida šķiedra
 - Efektivitāte ~95%

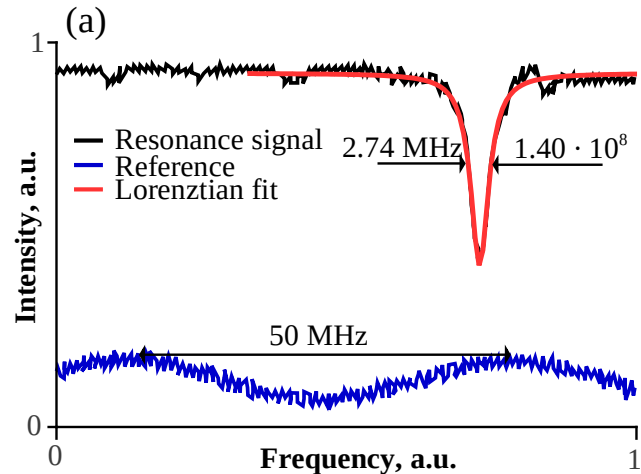


Raksturošana ar labuma (Q) faktoru

$$Q = \frac{f}{\Delta f} = \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$$

- Virsmas izkliedes zudumi
 - Materiāla absorbcijas zudumi
 - Izstarošanas zudumi
- } Iekšējie zudumi

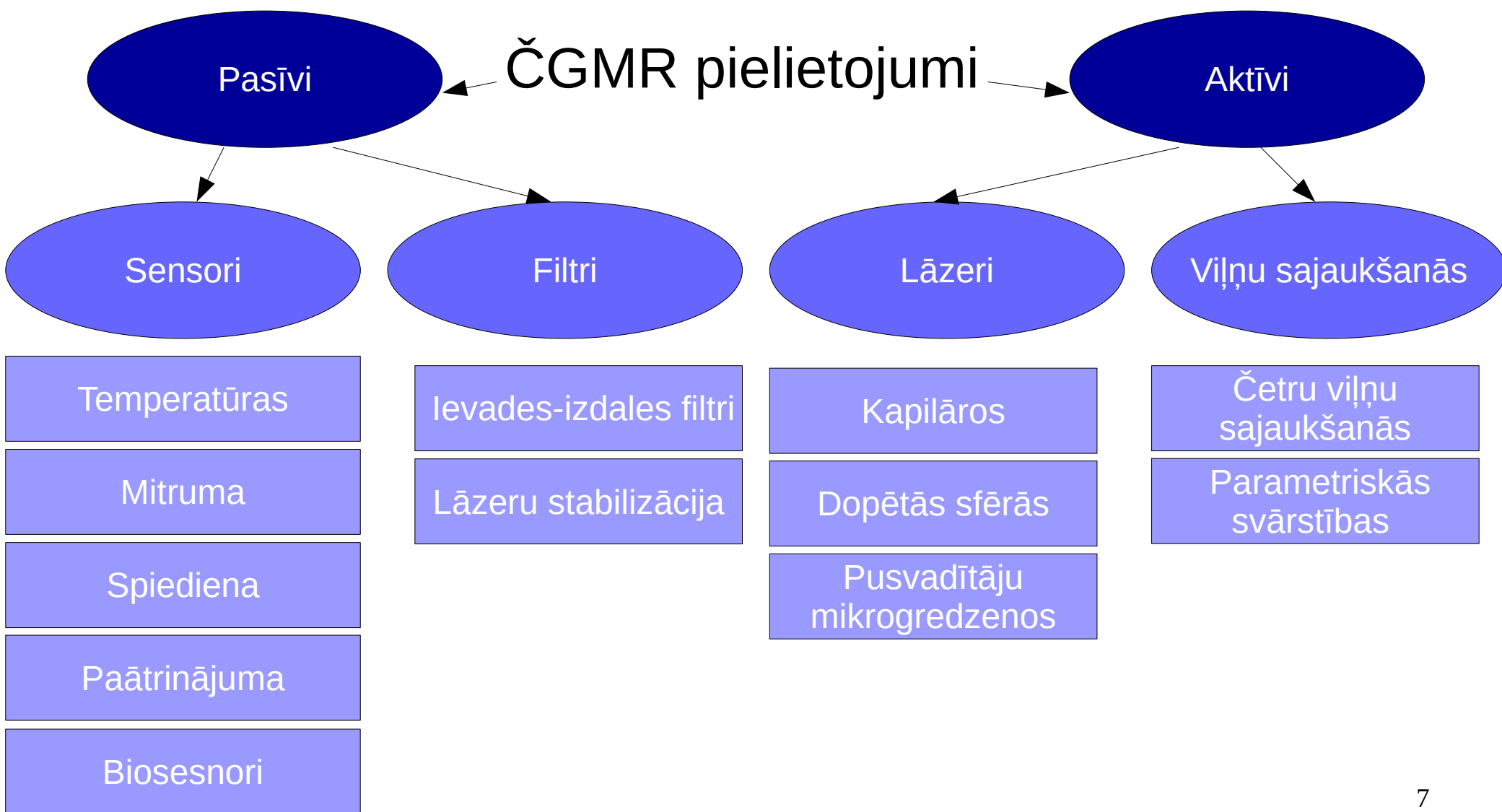
- Sapārošanas zudumi
- } Ārējie zudumi



$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{intr}} + \frac{1}{Q_{extr}}$$

$$K = \frac{Q_{intr}}{Q_{extr}}$$

Sapārošanas parametrs



ČGMR pielietojumi

Pasīvi

Aktīvi

Sensori

Filtri

Lāzeri

Viļņu sajaukšanās

Temperatūras

Ievades-izdales filtri

Kapilāros

Četru viļņu
sajaukšanās

Mitruma

Lāzeru stabilizācija

Dopētās sfērās

Parametriskās
svārstības

Spiediena

Pusvadītāju
mikrogredzenos

Paātrinājuma

Biosensori

Tēzes

- ČGMR virsmas pārklāšana ar funkcionējošo slāni samazina Q faktoru, jo slānis galvenokārt palielina virsmas izkliedes zudumus.
- ČGMR/Au-NPs/GOx struktūrā Au NPs paplašināja virsmas viļņa gaistošo lauku ar LSP rezonanšu palīdzību un palielināja ČGMR glikozes sensora jutīgumu.
- ČGMR/ZnO/BLV/BSA struktūrā ZnO nanoslāņu virsma ir vislabāk piemērota pārklājumam uz ČGMR, un tās optimālais biezums ir 10 - 20 nm un Q faktors $5 \cdot 10^6$.
- Mikrosfēras izmērs nosaka attālumu starp ģenerētajām WComb līnijām, kas ļauj pielāgot tās pielietojumam WDM ITU-T G.694.1 datu pārraides tīklam. Piemērots mikrosfēras diametrs, lai attālums starp WComb līnijām būtu atbilstošs, bija 166 μm , kas ģenerēja 400 GHz (1 FSR) un 800 GHz (2 FSR) WComb.
- WComb ilgtermiņa stabilitāti ietekmē temperatūra, kas var mainīt gan sapārošanas apstākļus, gan lāzera polarizāciju.

Saturs

- Ievads
- **Čukstošās galerijas modu rezoantu biosensori**
 - Biosensori
 - Testēšanas iekārta
 - Glikozes sensora modelis
 - Glikozes sensora modeļa testēšana
 - Toksīna sensora modelis
 - ZnO pārklājumi
 - Toksīna sensora modeļa testēšana
 - Ieteikumi turpmākajiem pētījumiem
- Optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšana mikrosfērās
- Nobeigums

Čukstošās galerijas modu rezonatoru biosensori

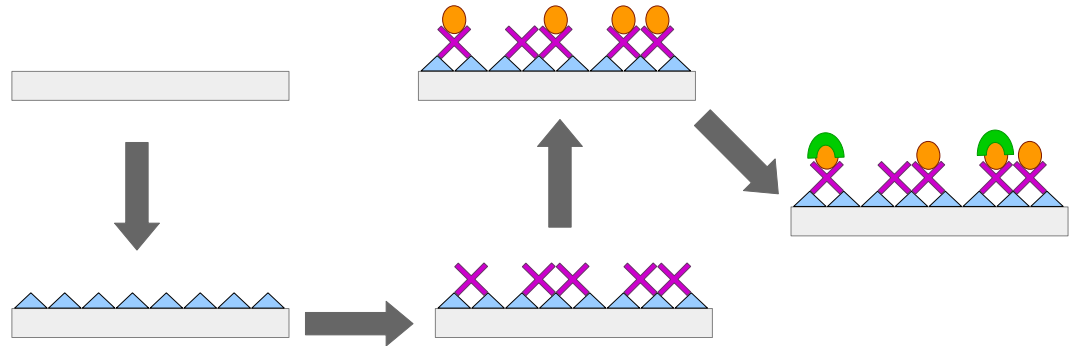
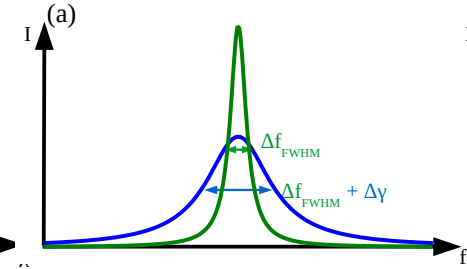
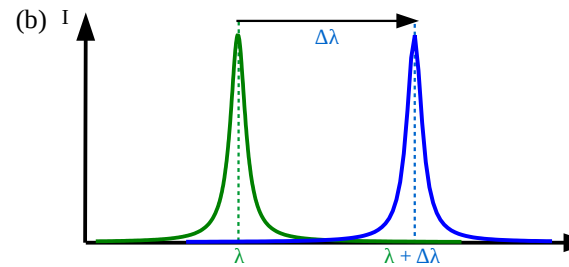
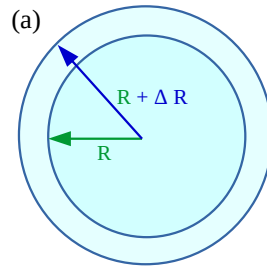
- Prasības

- Jūtīgums
- Stabilitāte
- Selektivitāte

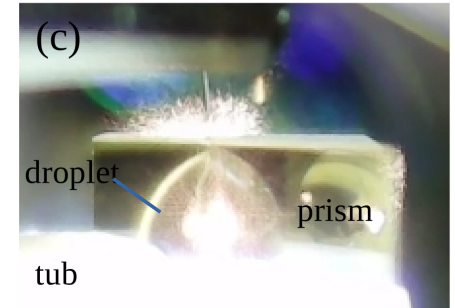
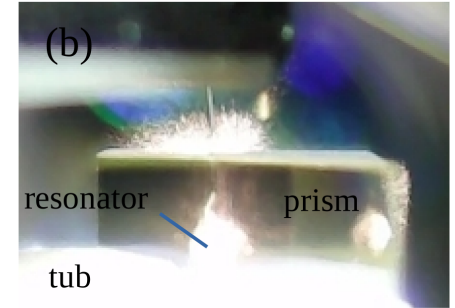
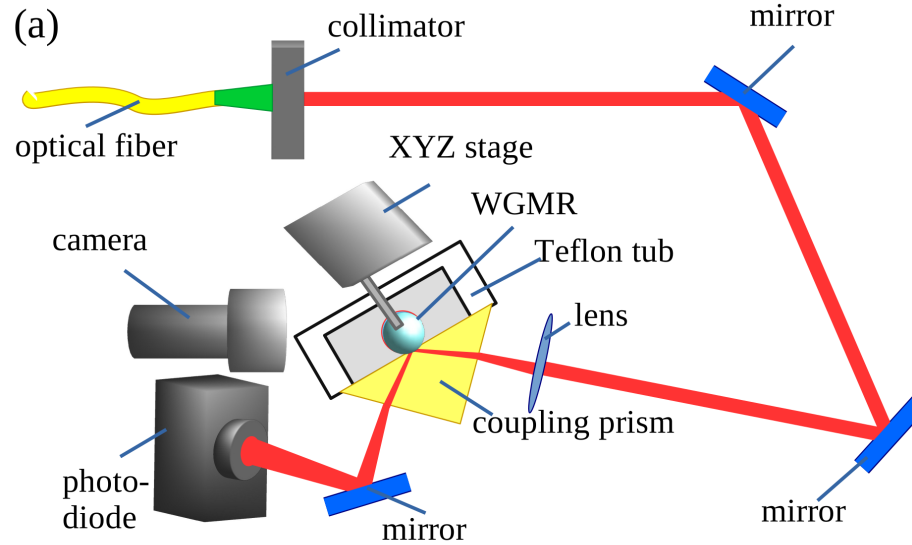
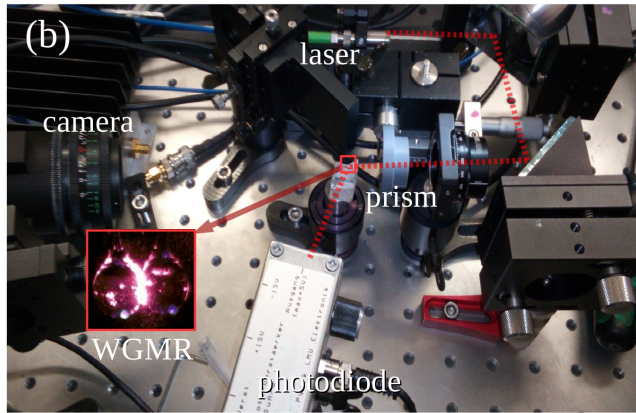
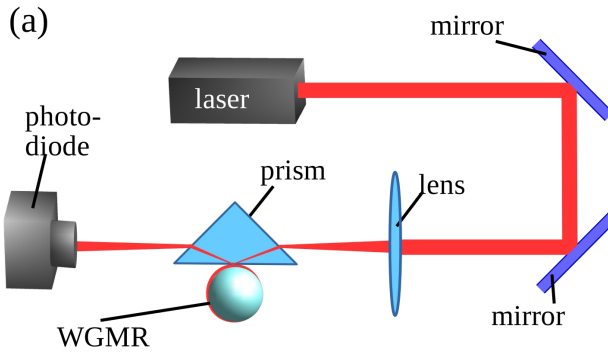
- Jutības mehānismi

- Rezonances frekvence
- Rezonances līnijas platums

- Virsmas funkcionalizācija



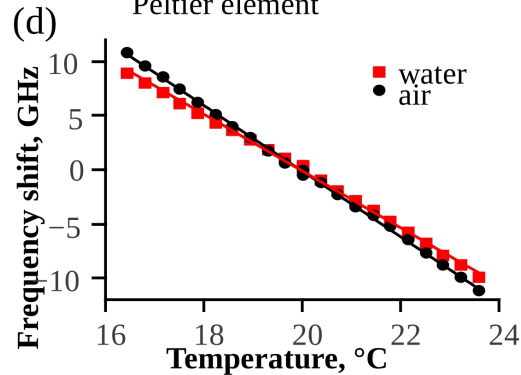
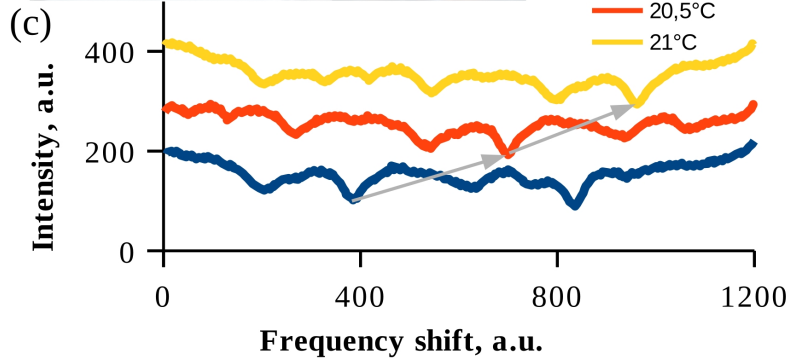
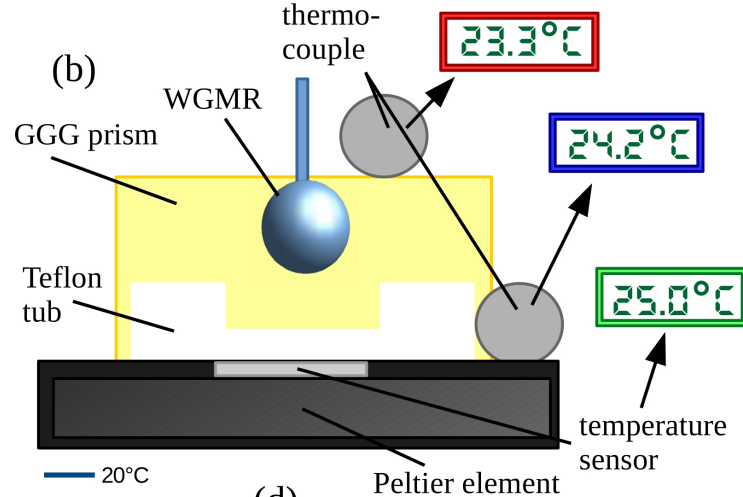
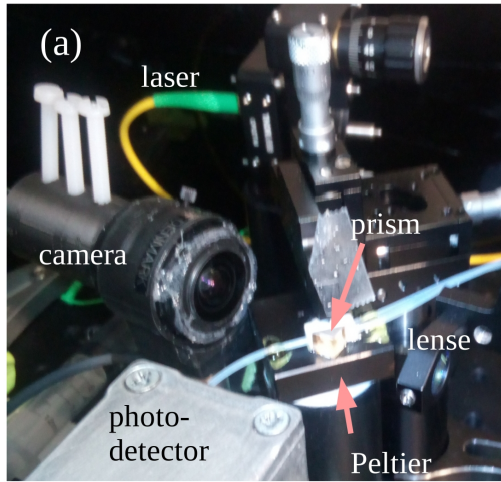
Testēšanas iekārtas



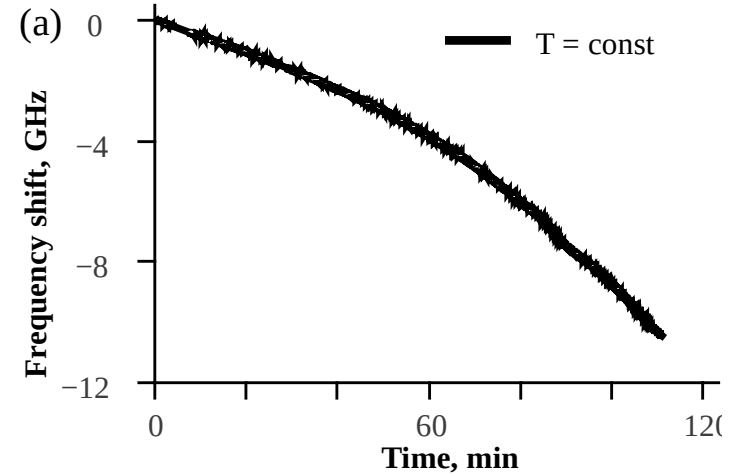
Iekārta sensora atbildes reakcijas testēšanai – šķidrums pilienā

Iekārta raksturošanai - gaisā

Testa iekārtas problēmas



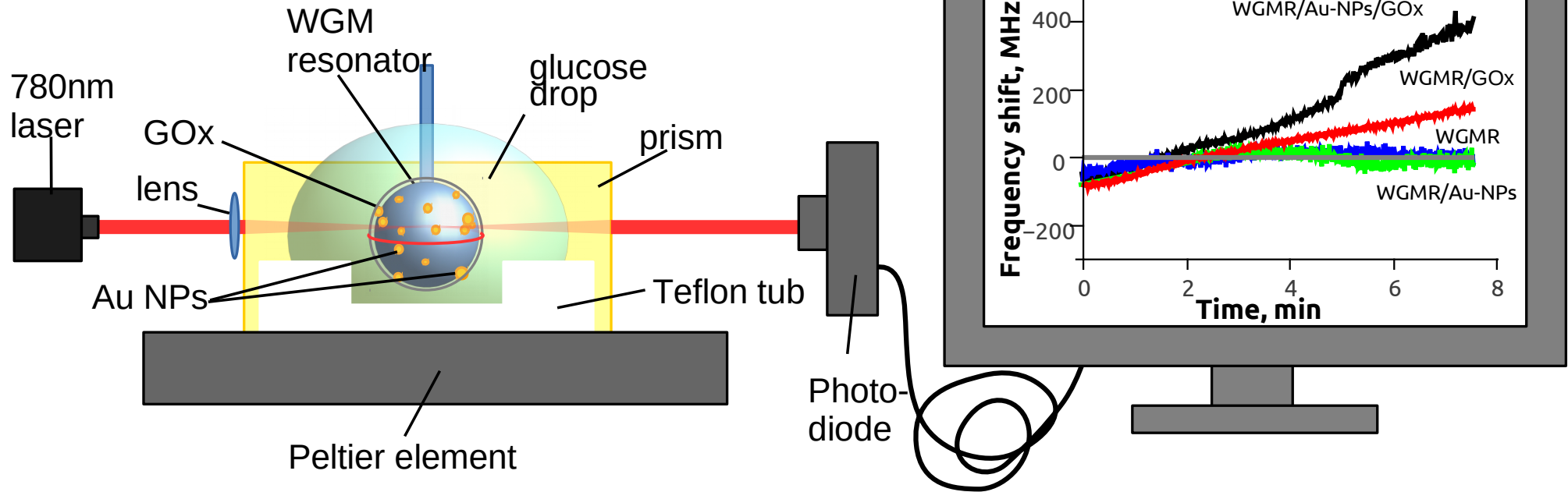
Glikozes koncentrācijas izmaiņas, iztvaikojot pilienam



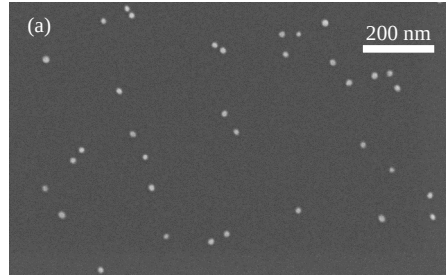
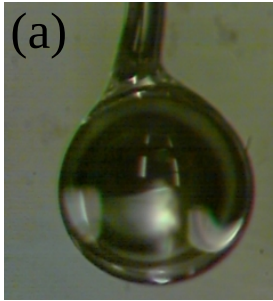
Temperatūras jutība

Glikozes sensora modelis

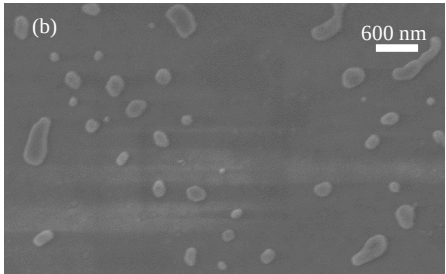
silica WGM microsphere + Au NPs + GOx



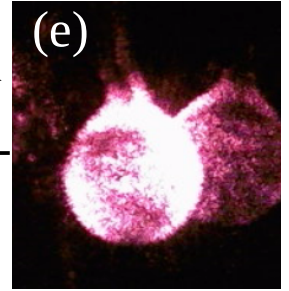
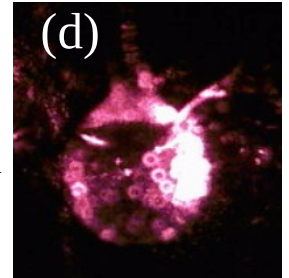
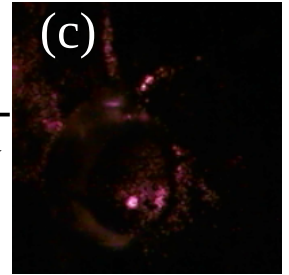
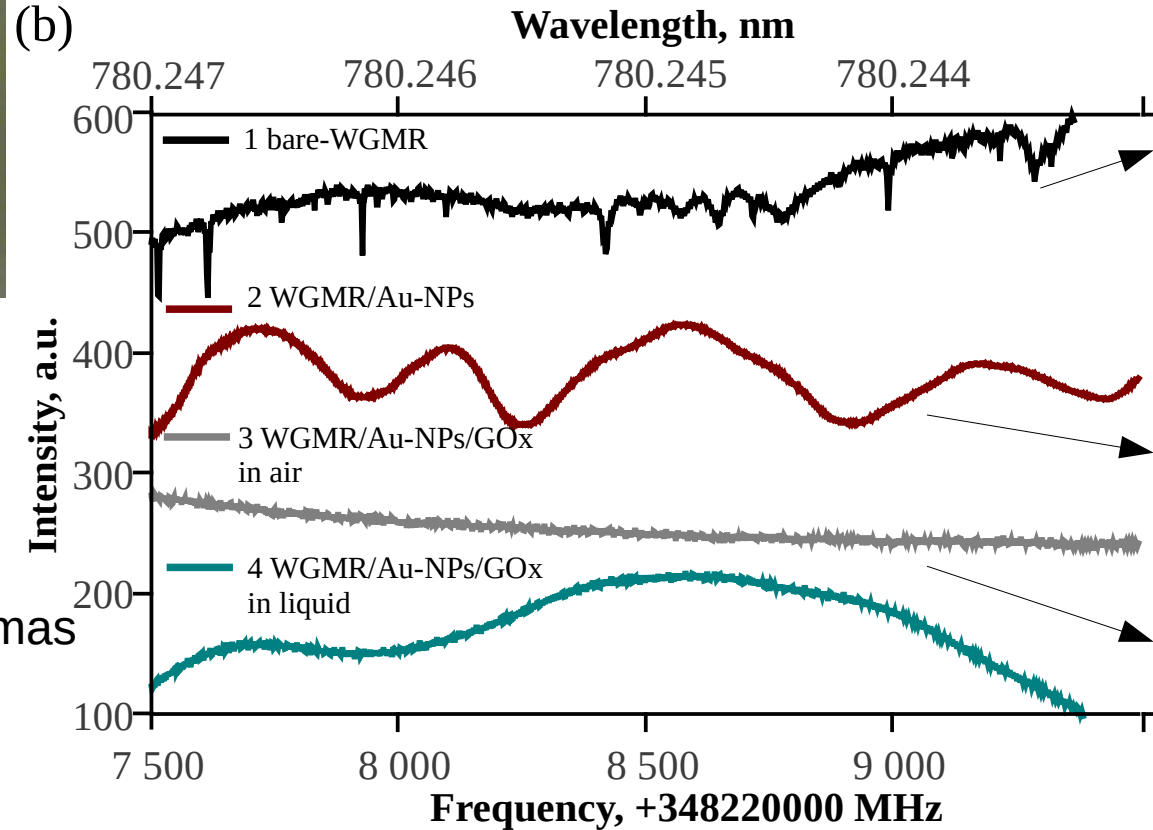
Glikozes sensora modelis



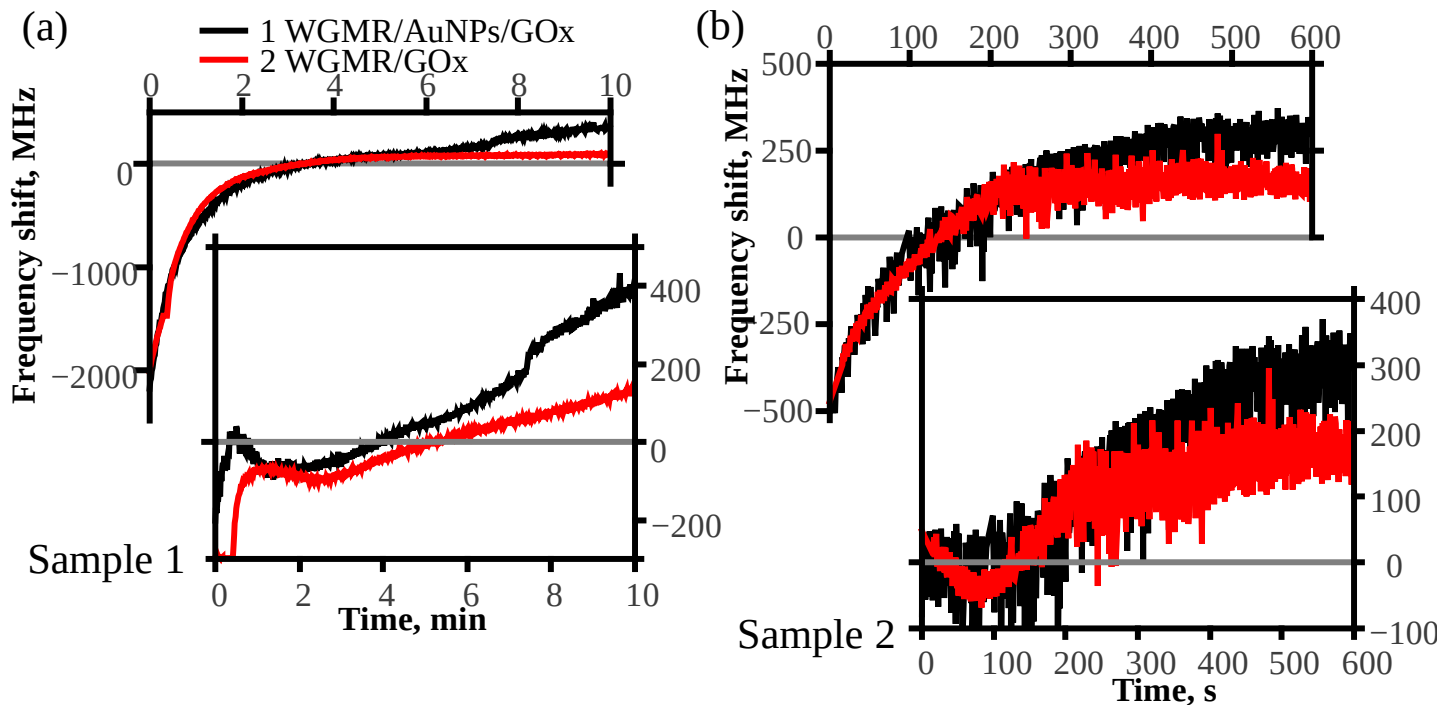
Au NPs uz plakanas Si virsmas



Au NPs uz liektas ĆGMR virsmas

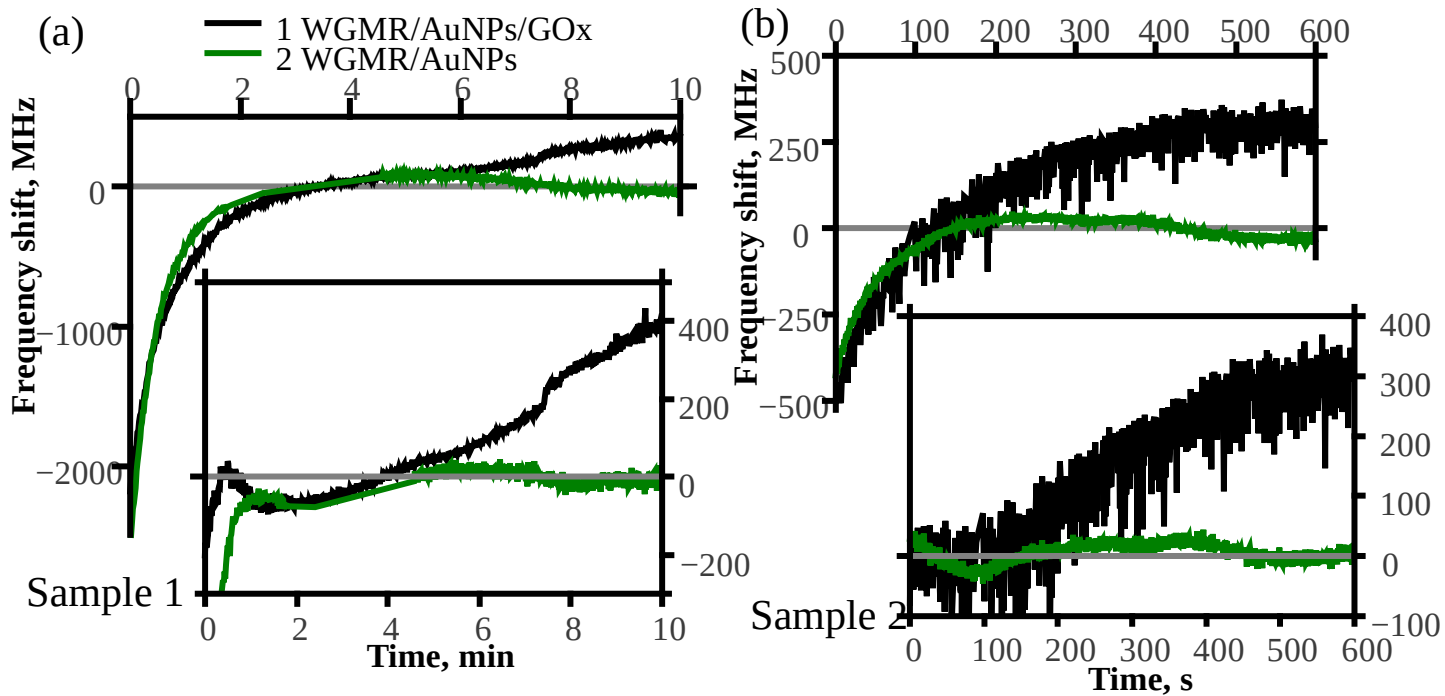


Glikozes sensora modeļa testēšana



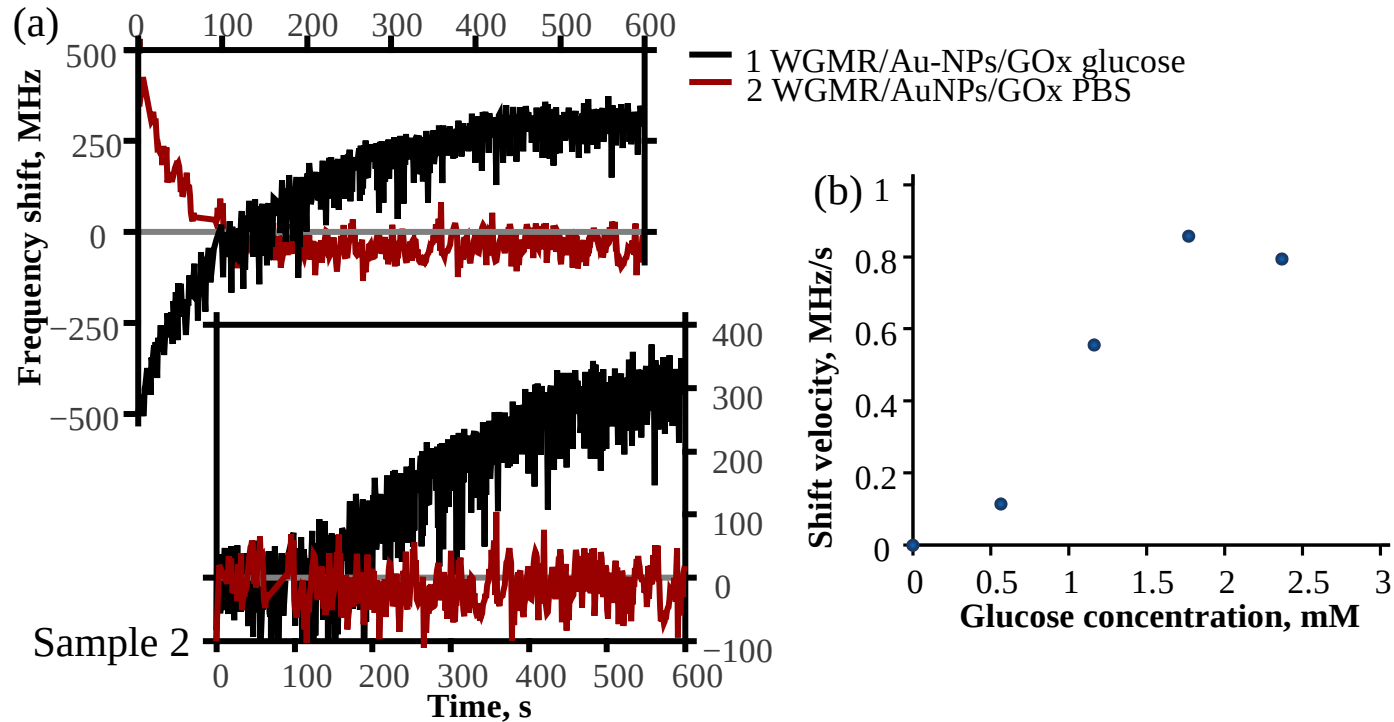
Jutīguma palielināšana, izmantojot Au NPs

Glikozes sensora modeļa testēšana



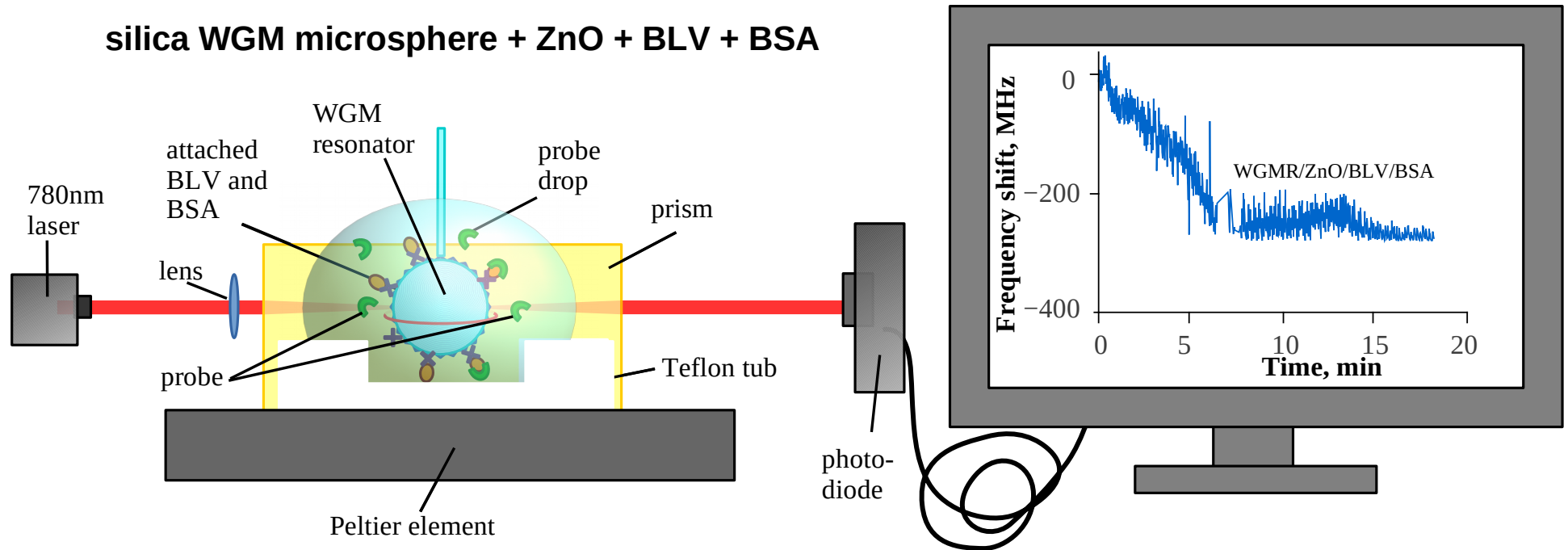
Glikozes - GOx reakcijas pārbaude

Glikozes sensora modeļa testēšana



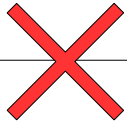
Glikozes koncentrācijas ietekme

Toksīna sensora modelis



BLV – antigēns govju leukēmijas vīruss
BSA – liellopu seruma albumīns

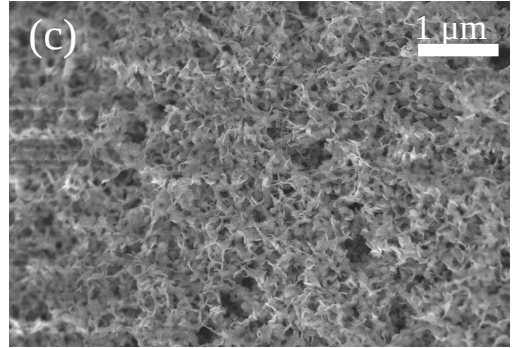
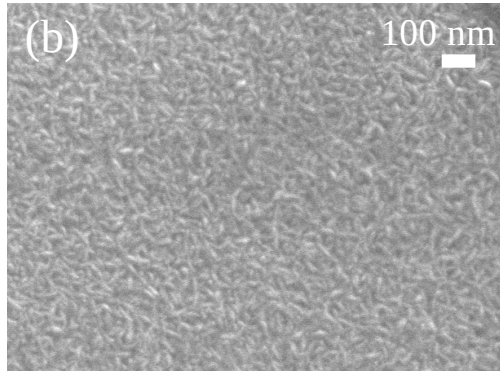
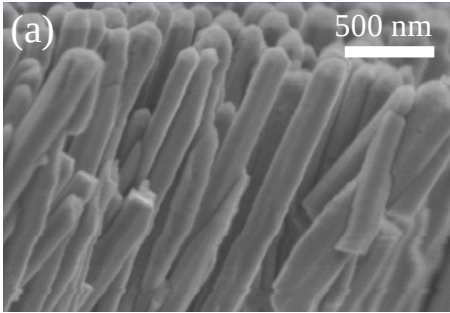
nanovadi



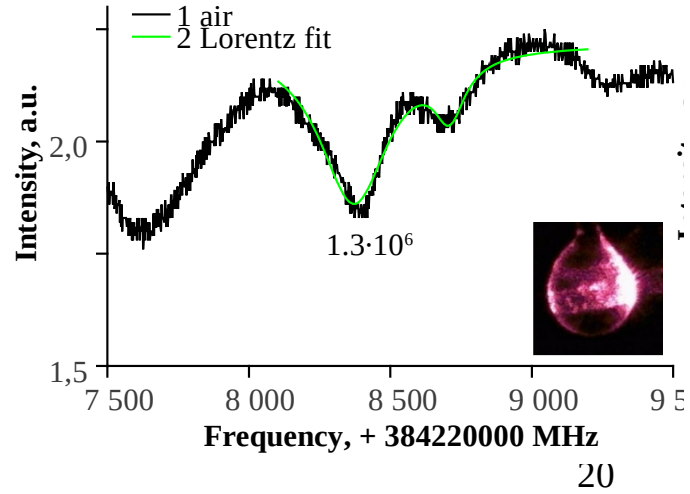
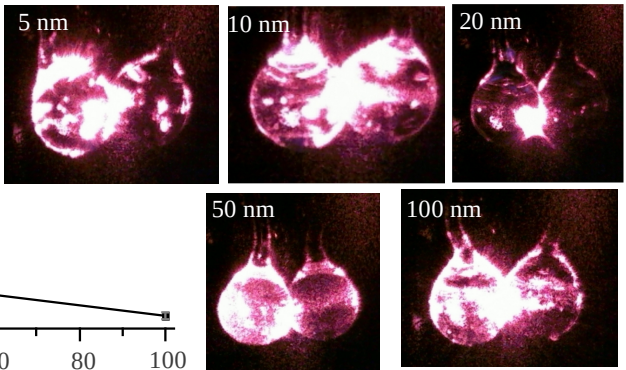
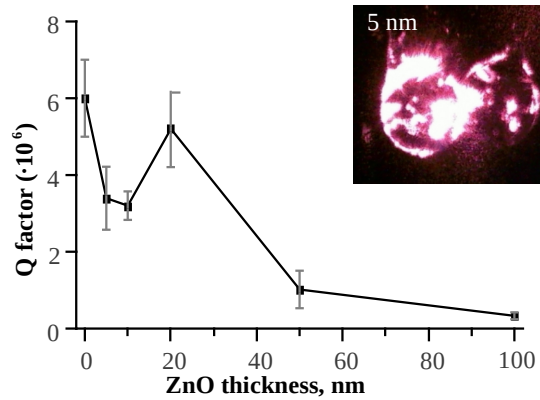
ZnO pārklājumi

nanokristāli

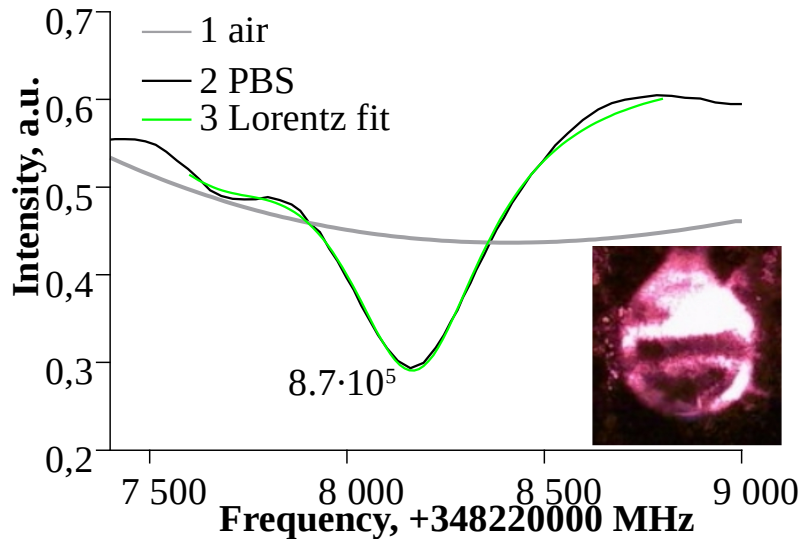
ALD nanoslānis



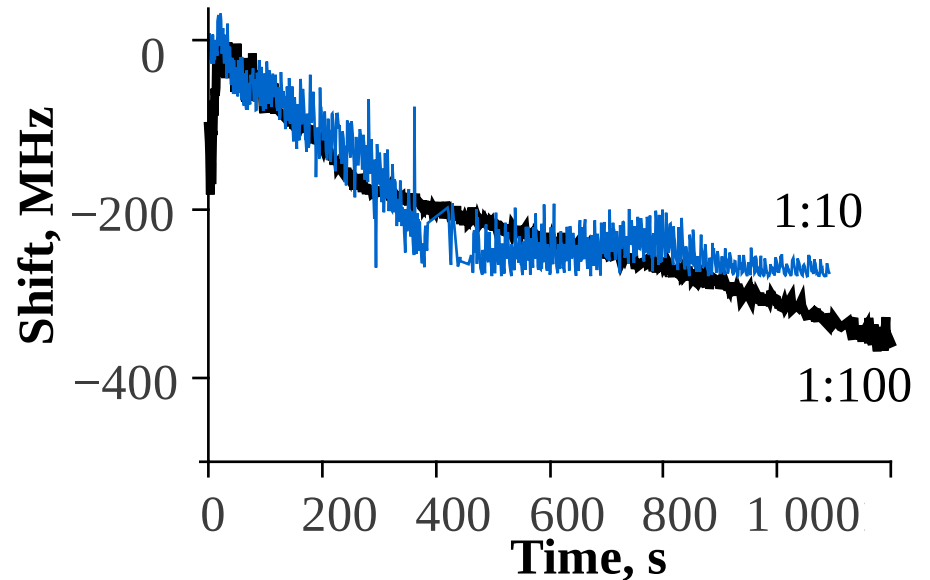
Virsmā pārāk raupja, lai iegūtu ČGM rezonanses



Toksīna sensora modeļa testēšana



Q faktors salīdzināms ar glikozes sensora modeli, taču izmantojamo paraugu daudzums zems.



Reģistrēta sensora atbildes reakcija, taču netika veikti dažādi kontroles mērījumi.

Ieteikums turpmākajiem pētījumiem

- Iespējams uzlabot ZnO nanokristālu slāņa kvalitāti vai izmantot ZnO nanoslāņus
- Toksīna sensoram jāveic kontroles mērījumi
- Pāriet uz čipa izgatavotu ČGMR kopā ar mikrofluidikas tehnoloģijām

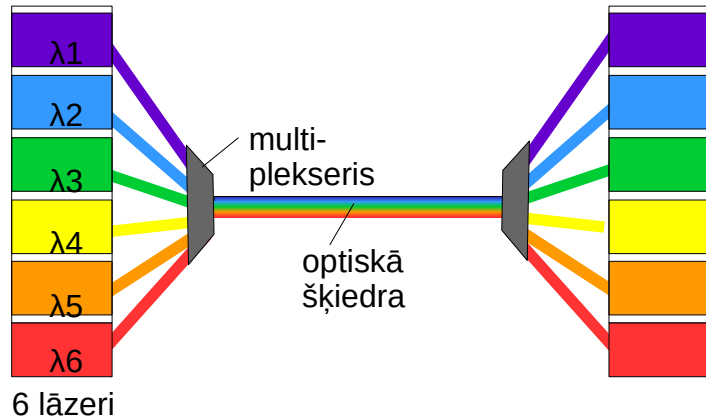
Jāpeivieno bilde ar čipeim

Saturs

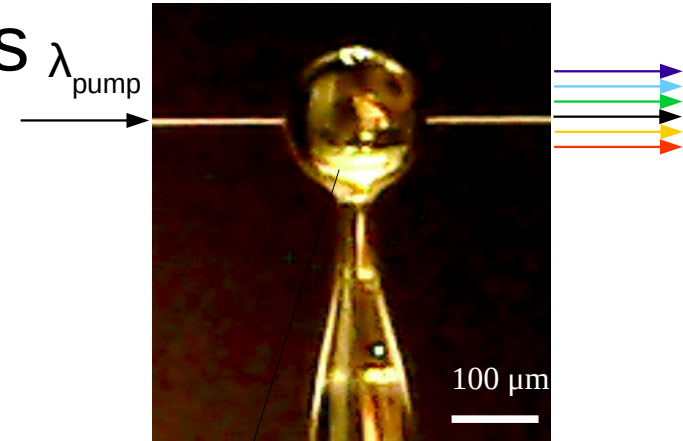
- Ievads
- Čukstošās galerijas modu rezonatoru biosensori
- **Optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšana mikrosfērās**
 - **Pielietojums viļņgarumdales multipleksēšanā**
 - **Nelineārie procesi ČGMR mikrosfērā**
 - **Iekārta WComb ģenerēšanai**
 - **Ierosinātās WComb**
 - **Pumpējošā lāzera skenēšana pāri 32 C-joslas kanāliem**
 - **Cirkulējošā jauda**
 - **WComb stabilitāte**
 - **Ieteikums turpmākajiem pētījumiem**
- Nobeigums

Optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšana mikrosfērās

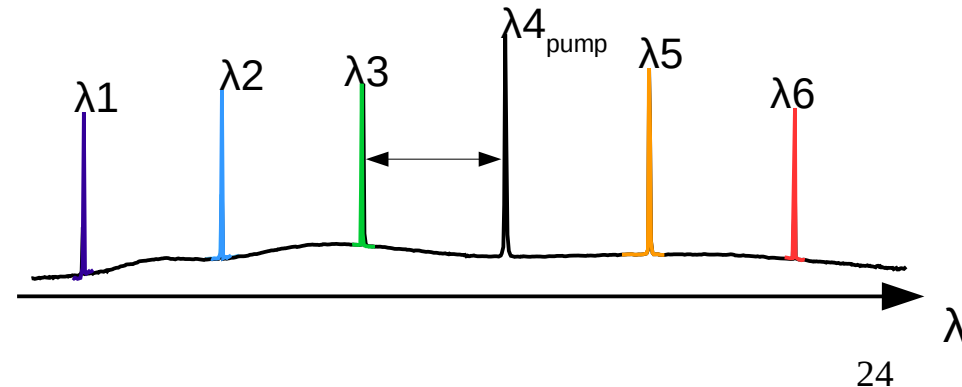
- Lai ģenerētu optisko frekvenču ķemmi ČGMR (WComb) nepieciešami nelineāri procesi
 - Četru viļņu sajaukšanās
 - Kerra efekts
- Pielietojums viļņgarumdales multipleksēšanai telekomunikāciju datu pārraidei



c-josla

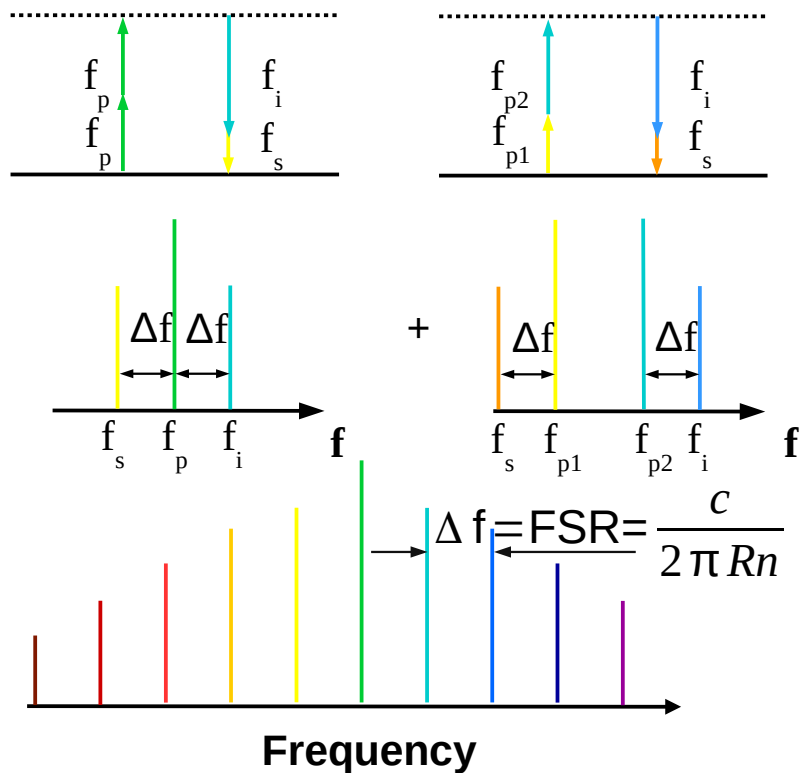


Silīcija dioksīda mikrosfēra

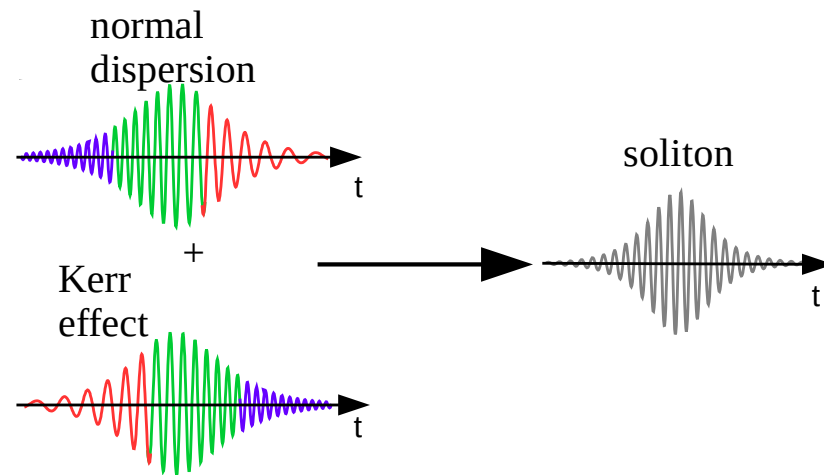


Nelineārie procesi ČGMR mikrosfērās

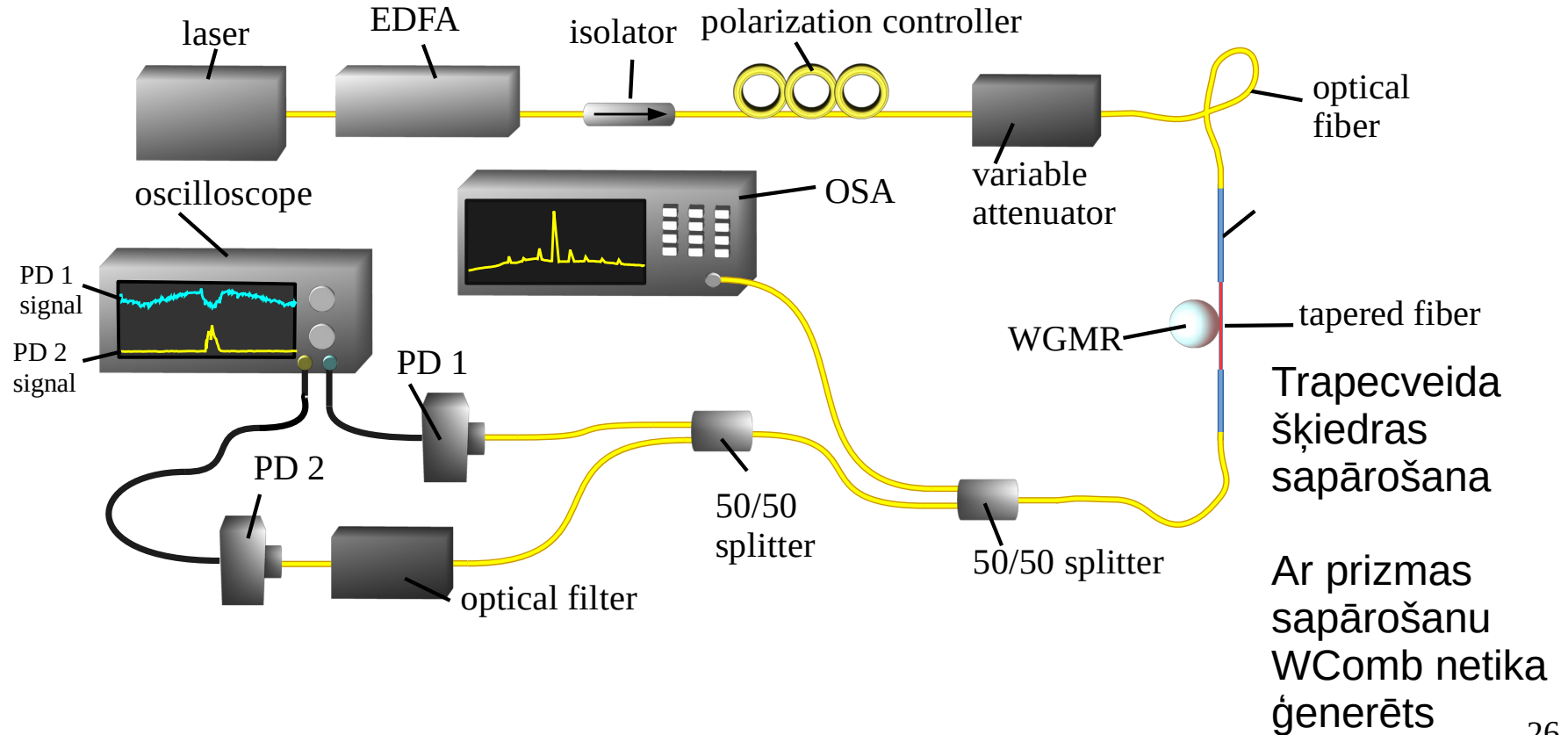
Četru viļņu sajaukšanās



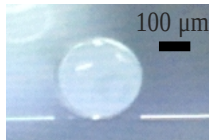
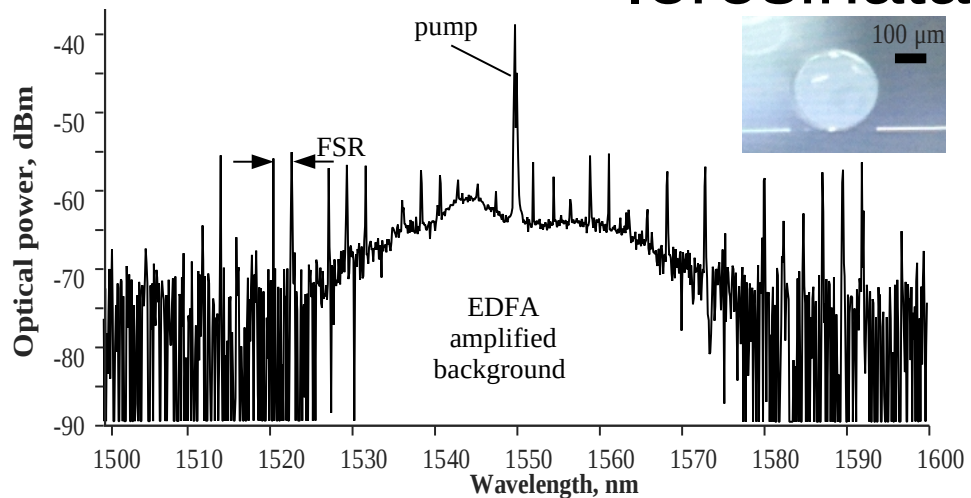
Kerra efekts



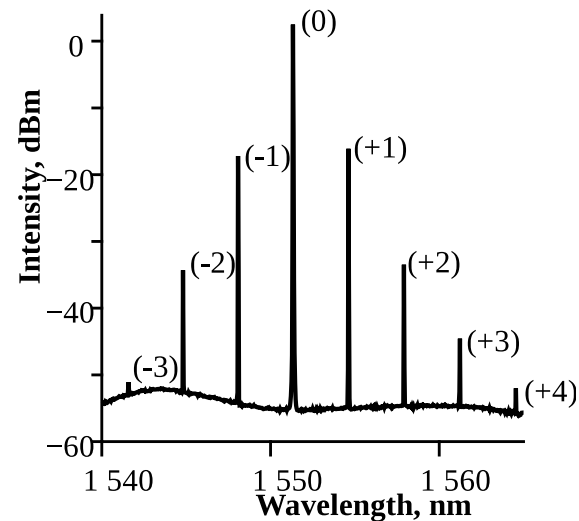
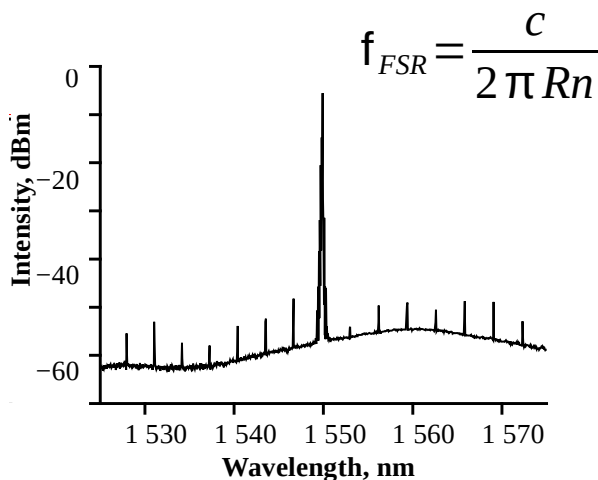
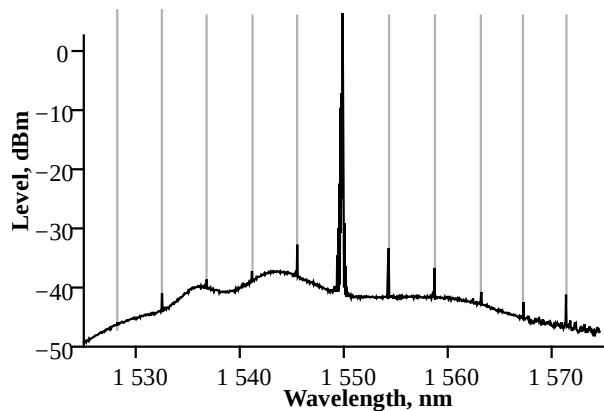
Iekārta WComb ģenerēšanai



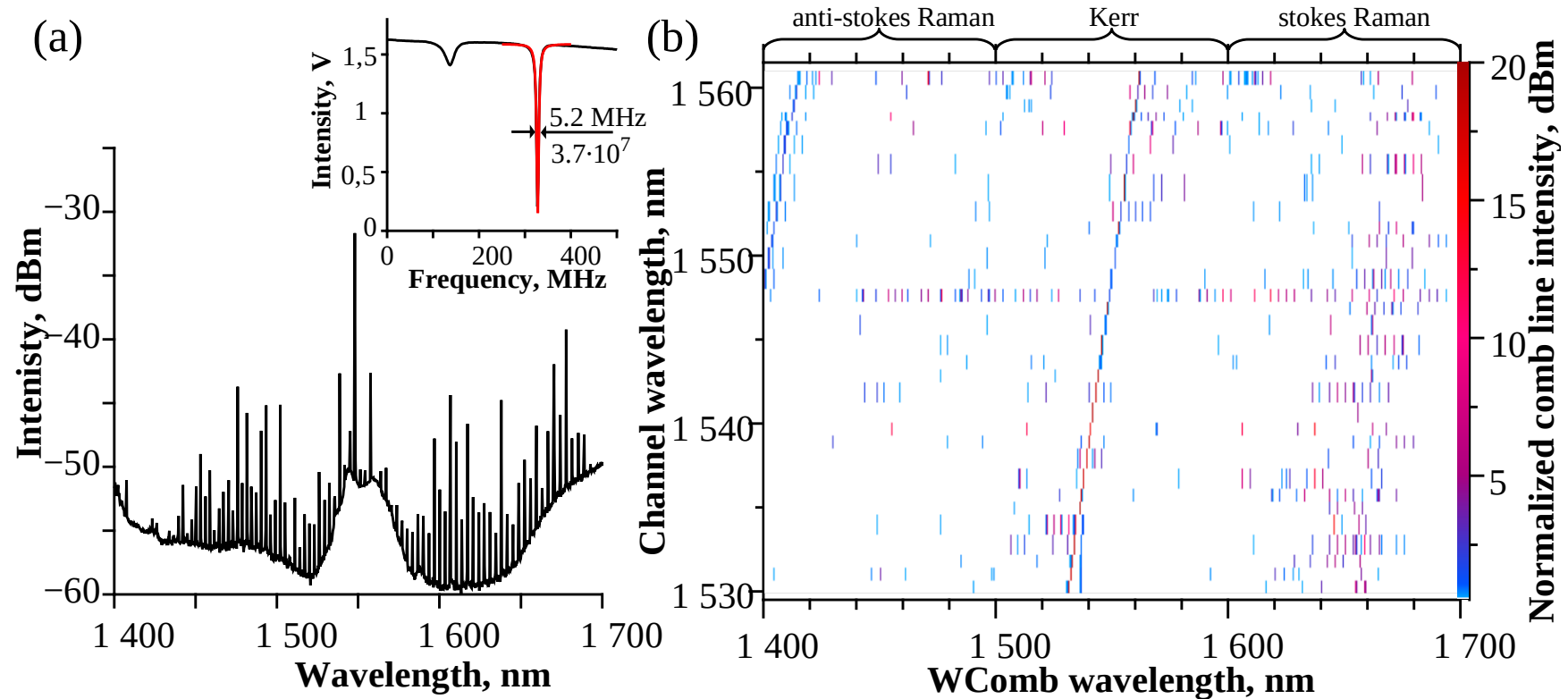
Ierosinātās WComb



d, μm izmērīts	f _{FSR} , GHz izmērīts	f _{FSR} , GHz aprēķināts
270 ± 10	288 ± 15	246 ± 9
120 ± 5	538 ± 12	553 ± 23
166 ± 5	397 ± 10	400 ± 12
170 ± 5	392 ± 5	390 ± 11



Pumpējošā lāzera skenēšana pāri 32 C-joslas kanāliem

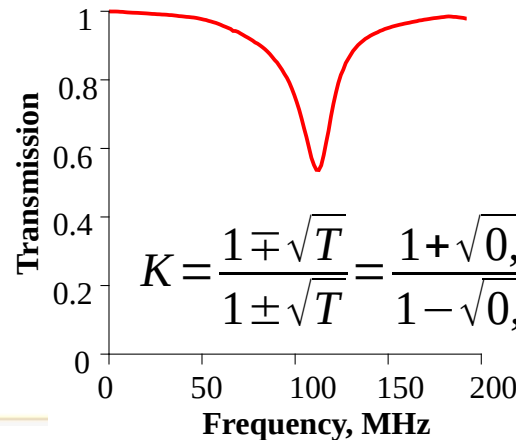
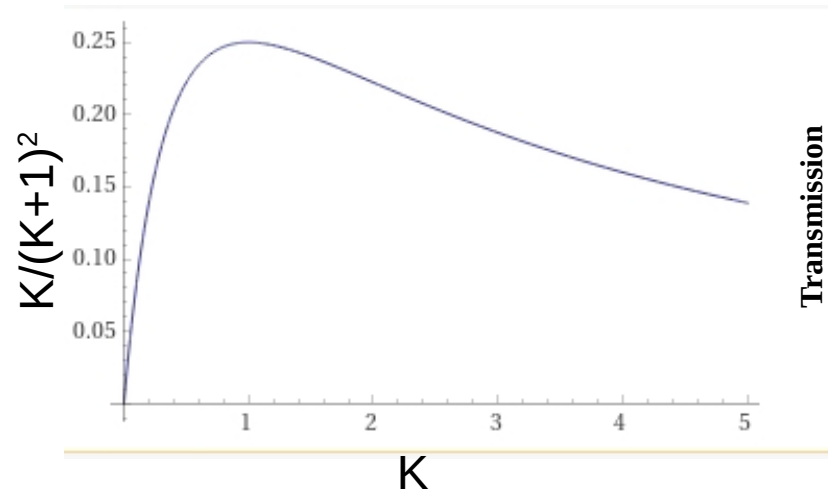


Cirkulējošā jauda

$$P_{\text{circ}} = \frac{\lambda Q_{\text{intr}}}{\pi^2 n R} \frac{K}{(K+1)^2}$$

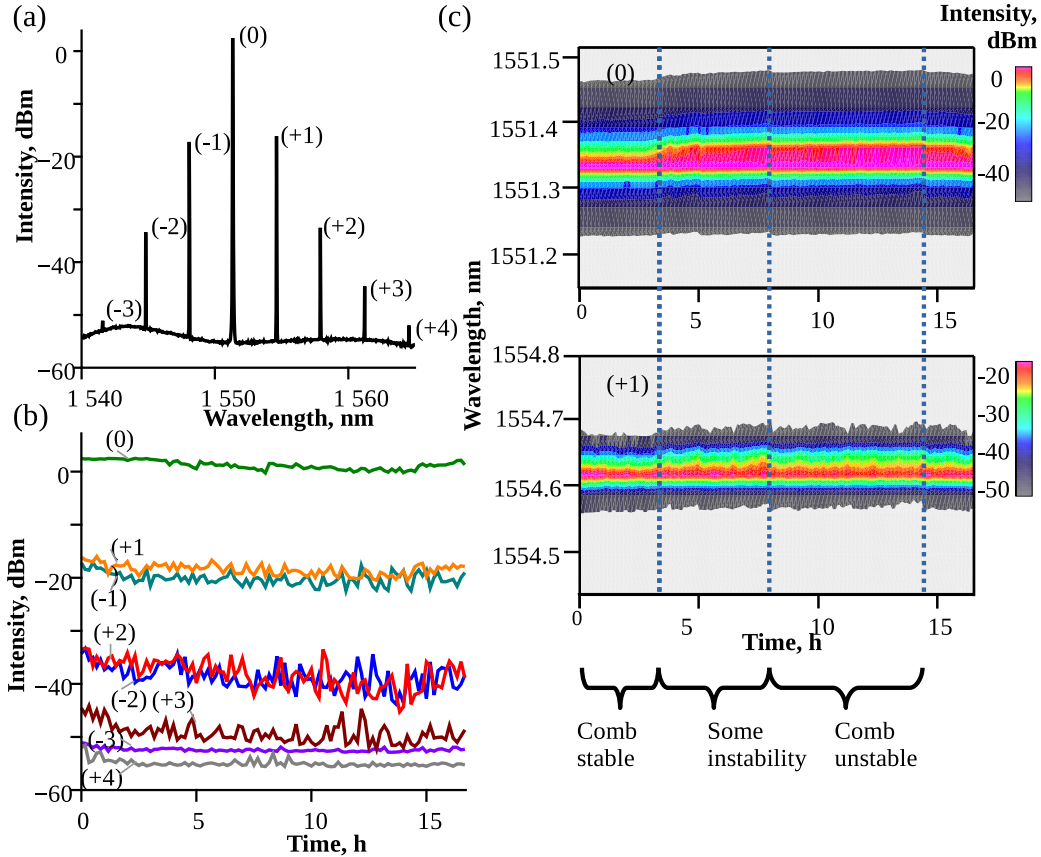
$$I_{\text{circ}} = \frac{P_{\text{circ}}}{A_{\text{eff}}}$$

R, μm	Q·10 ⁷	T	K	Q _{intr} ·10 ⁷	P _{circ} , W	A _{eff} , μm ²	I _{circ} , GW/cm ²
135	2,0	0,17	1,69	5,4	1016	36,15	2,8
60	1,2	0,26	2,05	3,7	1486	18,45	8,0
85	4,6	0,54	3,89	22,0	4671	24,62	19,0
83	3,7	0,14	1,61	9,7	3000	24,14	12,4



Literatūrā pieminēts, lai ģenerētos WComb, jāsasniedz cirkulējošā intensitāte ČGMR ar kārtu GW/cm²

WComb stabilitāte



- Katra ķemmes zoba intensitāte mainās neatkarīgi
- Temperatūra var mainīt:
 - sapārošanas apstākļus
 - ČGM rezonanses frekvenci
 - ČGMR un trapecveida šķiedras pozīciju
 - lāzera polarizāciju, kuru ietekmē pievades šķiedra

Ieteikums turpmākajiem pētījumiem

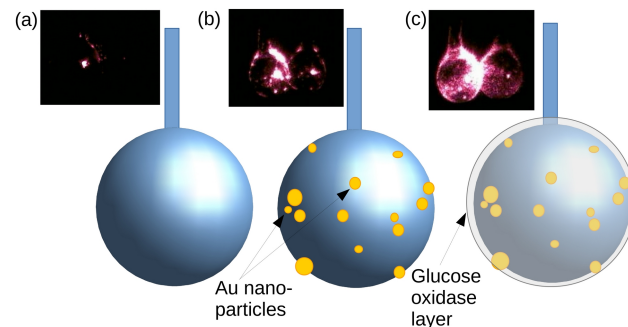
- Izvēlēties citu ČGMR ģeometriju, kurai ir vairākas iespējamās parametru variācijas

Saturs

- Ievads
- Čukstošās galerijas modu rezoantu biosensori
- Optiskās frekvenču ķemmes ģenerēšana mikrosfērās
- **Nobeigums**
 - Galvenie secinājumi
 - Publikācijas
 - Konferences
 - Pateicība

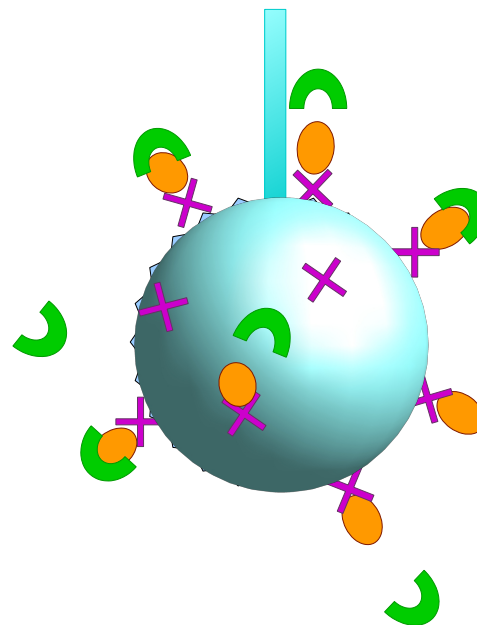
Galvenie secinājumi – glikozes sensors

- ČGMR virsmas funkcionalizācijas katrs slānis samazina Q faktoru, palielinot izkliedes zudumus uz ČGMR mikrosfēras virsmas.
- GOx tika izvēlēts kā selektīvais slānis glikozes sensoram, jo tas oksidē glikozi. Kontroles mērījumi apstiprināja ČGM rezonanses nobīdi tikai tad, kad paraugam bija gan uzklāts GOx slānis, gan testa šķidrums pilienā bija glikoze.
- Au NPs tika tika uzklāts uz ČGMR virsmas, lai paplašinātu virsmas viļņa gaistošo lauku ar LSP rezonansēm un palielinātu ČGMR jutīgumu. Kontroles mērījumi apstiprināja jutīguma pieaugumu paraugiem pārklātiem gan ar Au NP, gan ar GOx, salīdzinot ar paraugiem pārklātiem tikai ar GOx.



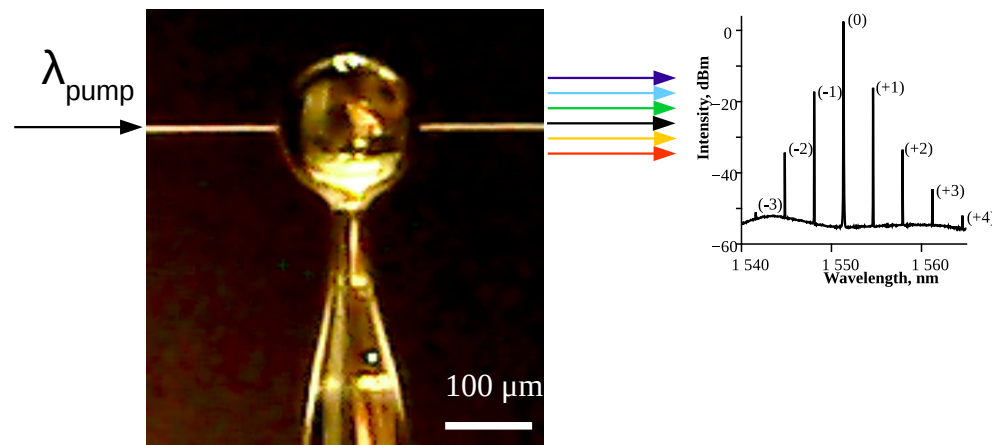
Galvenie secinājumi – toksīna sensors

- Selektivitātei tika izvēlēta antigēna/antivielu BLV reakcija.
- No pārbaudītajām ZnO struktūrām vislabākā kvalitāte bija ALD nanoslānim ar optimālo 10 - 20 nm biezumu. ZnO nanovadu struktūra bija pārāk raupja, lai novērotu ČGM rezonanses, savukārt, tikai 50% ZnO nanokristālu paraugu bija piemēroti turpmākai pārklāšanai.



Galvenie secinājumi – WComb

- Bija iespējams ģenerēt WComb, izmantojot stikla ČGMR mikrosfēru.
- Sfēras rādiuss noteica attālumu starp ķemmes līnijām. Lai FSR pielāgotu WDM tīklam ar 100 vai 50 GHz attālumu starp kanāliem, jāpārbauda lielākas mikrosfēras.
- Temperatūras stabilitāte ietekmē WComb ģenerēšanas ilgtermiņa stabilitāti mikrosfēras rezonatoros.



Publikācijas

[P1] Inga Brice, Karlis Grundsteins, Aigars Atvars, Janis Alnis, and Roman Viter. “Whispering gallery mode resonators coated with Au nanoparticles.” In: Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVI. Ed. by André-Jean Attias and Balaji Panchapakesan. SPIE, 2019, p. 65. doi: 10.1117/12.2528677

Autora ieguldījums 80%.

[P2] Inga Brice, Karlis Grundsteins, Aigars Atvars, Janis Alnis, Roman Viter, and Arunas Ramanavicius. “Whispering gallery mode resonator and glucose oxidase based glucose biosensor.” In: Sensors and Actuators B: Chemical 318 (2020), p. 128004. doi: 10.1016/j.snb.2020.128004

Autora ieguldījums 70%.

[P3] Inga Brice, Roman Viter, Kristians Draguns, Karlis Grundsteins, Aigars Atvars, Janis Alnis, Emerson Coy, and Igor Iatsunskyi. “Whispering gallery mode resonators covered by a ZnO nanolayer.” In: Optik 219 (2020), p. 165296. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165296

Autora ieguldījums 60%.

[P4] Inga Brice, Karlis Grundsteins, Arvids Sedulis, Toms Salgals, Sandis Spolitis, Vjaceslavs Bobrovs, and Janis Alnis. “Frequency comb generation in whispering gallery mode silica microsphere resonators.” In: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIII. Ed. by Andrea M. Armani, Alexis V. Kudryashov, Alan H. Paxton, Vladimir S. Ilchenko, and Julia V. Sheldakova. Vol. 11672. SPIE, 2021, p. 1167213. doi: 10.1117/12.2577148

Autora ieguldījums 70%.

Publikācijas

- [P5] Janis Alnis, Inga Brice, Andra Pirkcina, Alma Ubele, Karlis Grundsteins, Aigars Atvars, and Roman Viter. "Development of optical ČGM resonators for biosensors." In: Biophotonics—Riga 2017. Ed. by Janis Spigulis. Vol. 10592. 105920B. SPIE, 2017, p. 19. doi: 10.1117/12.2297551
- [P6] J. Braunfelds, R. Murnieks, T. Salgals, I. Brice, T. Sharashidze, I. Lyashuk, A. Ostrovskis, S. Spolitis, J. Alnis, J. Porins, and V. Bobrovs. "Frequency comb generation in ČGM microsphere based generators for telecommunication applications." In: Quantum Electronics 50 (2020), p. 1043–1049. doi: 10.1070/QEL17409
- [P7] Toms Salgals, Janis Alnis, Rihards Murnieks, Inga Brice, Jurgis Porins, Alexey Andrianov, Elena Anashkina, Sandis Spolitis, and Vjaceslavs Bobrovs. "Demonstration of fiber optical communication system employing silica microsphere-based OFC source." In: Optics Express 27 (2021), p. 10903. doi: 10.1364/OE.41954
- [P8] Kristians Draguns, Inga Brice, Aigars Atvars, and Jānis Alnis. "Computer modelling of ČGM microresonators with a zinc oxide nanolayer using COMSOL multiphysics software." In: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIII. Ed. by Andrea M. Armani, Alexis V. Kudryashov, Alan H. Paxton, Vladimir S. Ilchenko, and Julia V. Sheldakova. Vol. 11672. March. SPIE, 2021, p. 1167216. doi: 10.1117/12.2578210
- [P9] Roberts Berkis, Janis Alnis, Aigars Atvars, Inga Brice, Kristians Draguns, and Karlis Grundsteins. "Quality Factor Measurements for PMMA WGM Microsphere Resonators Using Fixed Wavelength Laser and Temperature Changes." In: 2019 IEEE 9th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP). IEEE, 2019, 01P05–1–01P05–4. doi: 10.1109/NAP47236.2019.219072.
- [P10] Roberts Berkis, Janis Alnis, Inga Brice, Aigars Atvars, Kristians Draguns, Kārlis Grundšteins, and Pauls Kristaps Reinis. "Mode family analysis for PMMA WGM micro resonators using spot intensity changes." In: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIII. Ed. by Andrea M. Armani, Alexis V. Kudryashov, Alan H. Paxton, Vladimir S. Ilchenko, and Julia V. Sheldakova. Vol. 11672. March. SPIE, 2021, p. 1167217. doi: 10.1117/12.2577025
- [P11] Pauls Kristaps Reinis, Lase Milgrave, Kristians Draguns, Inga Brice, Janis Alnis, and Aigars Atvars. "High-Sensitivity Whispering Gallery Mode Humidity Sensor Based on Glycerol Microdroplet Volumetric Expansion." In: Sensors 21 (2021), p. 1746. doi: 10.3390/s21051746
- [P12] Elena A. Anashkina, Vjaceslavs Bobrovs, Toms Salgals, Inga Brice, Janis Alnis, and Alexey V. Andrianov. "Kerr Optical Frequency Combs With Multi-FSR Mode Spacing in Silica Microspheres." In: IEEE Photonics Technology Letters 33 (2021), pp. 453–456. doi: 10.1109/LPT.2021.3068373.

Konferences

- [C1] 1st International Conference "Biophotonics - Riga 2013", Rīga, Latvija (29.-31. augusts, 2013), plakāts "Towards Skin Fluorescence Diagnostics Using Femtosecond Frequency Comb Laser" I.Brice, I.Ferulova, J.Spigulis, J.Alnis
- [C2] 1st International Conference "Nocturnal Atmosphere, Remote Sensing and Laser Ranging: NOCTURNAL - Riga 2014" Rīga, Latvija (17. oktobris, 2014), plakāts "GNSS More Than a Tool for Navigation" , I. Brice, J. Alnis
- [C3] 11th International Young Scientist conference "Developments in Optics and Communications" Rīga, Latvija (8.-10. aprīlis, 2015), plakāts "GNSS – More Than A Simple Tool For Navigation", Inga Brice, Janis Alnis, p. 26 (2015)
- [C4] Fifth International School and Conference on Photonics "Photonica 2015" Belgrada, Serbija, (24.-28. augusts, 2015), poster presentation "Measurements of Rb hyperfine splitting with a femtosecond optical frequency comb", I. Brice, J. Alnis, J. Rutkis, p. 98 (2015)
- [C5] 12th International Young Scientist conference "Developments in Optics and Communications Riga", Rīga, Latvija (21.-23. marts, 2016), plakāts "Measurements of Rb 5S-5P Transition with a femtosecond optical frequency comb", Inga Brice, Janis Alnis, Jazeps Rutkis, p. 11 (2016)
- [C6] 60th International Conference for Students of Physics and Natural Sciences "Open readings 2017" Viļņa, Lietuva (14.-17. marts, 2017), plakāts "TOWARDS WGM RESONATOR STABILISED ON Rb 5S-5P TRANSITION LINES" Inga Brice, Antons Pribitoks, Janis Alnis, p. 212 (2017)
- [C7] 2nd International Conference "Biophotonics Riga 2017" Rīga, Latvija (27.-29. augusts, 2017), plakāts "Development of Optical WGM Resonators for Biosensors", I. Brice, A. Pirkina, A. Ubele, K. Grundsteins, A. Atvars, R. Vīter, J. Alnis, p. 34 (2017)
- [C8] International conference "Nanomaterials for biosensors and biomedical applications" Jūrmala, Latvija (2.-4. jūlijs, 2019), plakāts "WGMR coated with Au NPs to enhance the sensitivity" I. Brice, K. Grundsteins, A. Atvars, R. Vīter, J. Alnis, p. 62 (2019)
- [C9] 10th Optoelectronics and Photonics Winter School:NLP2019-Nonlinear Photonics, Trenta-Andalo, Itālija (20.-26. janvāris, 2019), plakāts "Temperature scanning the WGMR resonances in air and water" I. Brice, D. Damberga, K. Grundsteins, U. Berzins, A. Atvars, R. Vīter, J. Alnis
- [C10] "SPIE Optics + Photonics 2019" Sandjēgo, ASV (11.-15. augusts, 2019), plakāts "Whispering gallery mode resonators coated with Au nanoparticles", I. Brice K. Grundsteins, A. Atvars, J. Alnis, R. Vīter, Proceedings of SPIE: Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVI. Vol. 110892019 p. 110891T (2019)
- [C11] Third edition of Photonics Online Meet-up "POM2021" ASV - tiešsaites pasākums (11.-14. janvāris, 2021), plakāts "Optical frequency comb generated inside silica microsphere for WDM Data Transmission System" Inga Brice, Karlis Grundsteins, Toms Salgals, Janis Alnis, p. 132 (2021)
- [C12] "SPIE Photonics West 2021" Sanfrancisko, ASV - tiešsaites pasākums (6.-11. marts, 2021), plakāts "Frequency comb generation in whispering gallery mode silica microsphere resonators" Inga Brice, Karlis Grundsteins, Arvids Sedulis, Toms Salgals, Sandis Spolitis, Vjaceslavs Bobrovs, Janis Alnis, Proceedings of SPIE: Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XXIII. Vol. 11672, p. 1167213 (2021)
- [C13] International Conference "Quantum Optics and Photonics 2021" Rīga, Latvija - tiešsaites pasākums (22.-23. aprīlis, 2021), plakāts "Whispering gallery mode silica microsphere resonator applications for biosensing and communications" Inga Brice, Toms Salgals, Vjaceslavs Bobrovs, Roman Vīter, Janis Alnis, p. 35 (2021)

Pateicība

Paldies

- promocijas darba vadītājam Jānim Alnim
- Roman Viter un Arunas Ramanavicius ČGMR biosensoru pētījumi
- LU ASI
- sadarbības partneriem

Promocijas darba pētījumu rezultāti izmantoti zinātniski pētniecisko projektu realizācijai:

ERAF Nr. 1.1.1.1/16/A/259 “Jaunu čukstošās galerijas modu mikrorezonatoru izstrāde optisko frekvenču standartu un biosensoru pielietojumiem, un to raksturošana ar femtosekunžu optisko frekvenču ķemmi”;

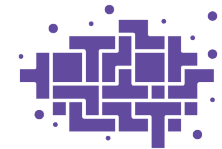
ERAF Nr. 1.1.1.1/18/A/155 “Uz čukstošās galerijas modas mikrorezonatora bāzes veidota optisko frekvenču ķemmes ģenerators izstrāde un tā pielietojumi telekomunikācijās”;

LZP Nr. Lzp-2018/1-0510 “Optiski čukstošās galerijas modu mikrorezonatoru sensori”.

NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA
Eiropas Reģionālās
attīstības fonds



FLPP
FUNDAMENTĀLIE UN
LIETIŠĀJIE PĒTĪJUMU
PROJEKTI

IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Paldies par uzmanību!