

Referāts

**Čukstošās galerijas modas mikrorezonatoru
izgatavošana, darbības principi un sensori**

LU ASI studentu mācību apraksts, 2019.



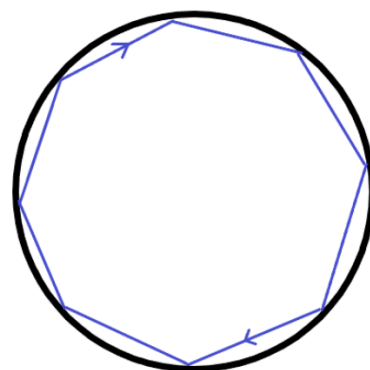
Ievads

Čukstošās galerijas modas mikrorezonatoru pētniecība pēdējos 15 gados ir strauji kļuvusi par aktīvu optikas izpētes lauku. To nelielais izmērs un tādas optiskās īpašības kā spēja no monohromatiska elektromagnētiskā viļņa ierosināt daudzas simetriskas modas, rada īpašu interesi par ČGM (*publikācijās angļiski – WGM*) mikrorezonatoru izmantošanas iespējām frekvenču ķemmu izstrādē, to pielietojumam dažādos sensoros. Šādas frekvenču ķemmes spētu tiešā veidā veikt frekvences mērījumus ar ļoti augstu precizitāti. Šos mikrorezonatorus iespējams izmantot mazu daļiņu klātbūtnes detektēšanai, kā arī, lai ar augstu jutību noteiktu izmaiņas apkārtējā vidē. Jaunākās publikācijas par šo tēmu pieejamas: <https://www.nature.com/subjects/microresonators>

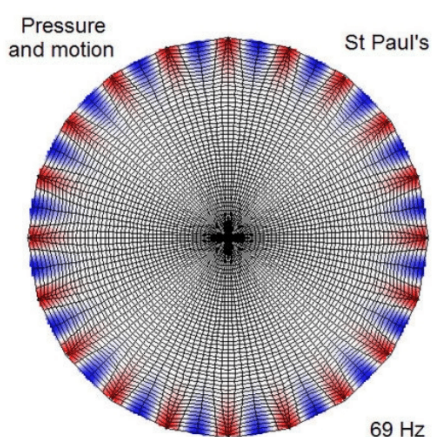
Referātā izmantotā informācija apkopota no vairākām starptautiskajām publikācijām, kā arī ASI Kvantu laboratorijas publicētajiem materiāliem un prezentācijām, plakātiem. Referāts pabeigts 2019. gada vasarā. Sarakstījis LU FMOF 1. kursa students Pauls Reinis.

ČGM un mikrorezonatoru darbības principi

ČGM mikrorezonatori savu nosaukumu aizguvuši no 19. un 20. gs. mijā Džona Strata (zināms arī kā barons Relejs) veiktajiem atklājumiem Sv. Pāvila katedrālē Londonā. Viņš izskaidroja, kā gar baznīcas kupola sienām izteiktie čuksti atstarojas no tām un ir dzirdami it visur pie kupola sienas. Cilvēka balss radīto akustisko viļņu trajektorijas kupolā attēlojas kā hordas, jo vilnis, atstarojoties no ieliektas virsmas, turpina kustību pa citu riņķa hordu, līdz atkal atstarojas. Tā rezultātā skaņas viļņa trajektorija telpā ir daudzstūris, kas tiecas uz riņķveida formu (skatīt 1. attēlu). Tā kā gaismai piemīt viļņa daba, līdzīgus principus var novērot optiskos procesos.



1. attēls – Shematiski attēlota ČGM viļņu trajektorija [Pauls R.]



2. attēls – Simulācija par akustiska viļņa izplatīšanos gar sienām Sv. Pāvila katedrālēs kupolā, kur zilās un sarkanās krāsas ilustrē augstāku un zemāku spiedienu. [1]

Čukstošās

galerijas modas rezonatori tiek veidoti no apaļas formas optiski caurspīdīga materiāla un uztur tās iekšienē ielaistu un cirkulējošu gaismas vilni, izmantojot pilnās iekšējās atstarošanās efektu. Modas trajektoriju rezonatorā var iedomāties kā vienādmalu daudzstūri, ko ierobežo tā virsma. Rezonatora ģeometrijas simetriskās prasības ir vienkārši apmierināt, jo nepieciešama vai nu sfēriskā simetrija, piemēram, mikrosfēra, mikroburbulis, vai arī cilindriskā simetrija – mikrodisks, mikroredzens, mikrotoroīds (vairāk par rezonatoru veidiem skatīt nākamajā lpp.).

ČGM veidošanos mikrorezonatoros var vienkāršoti aprakstīt ar vienādojumu:

$$2\pi Rn = \lambda N$$

kur R – rezonatora rādiuss, N – vesels skaitlis, λ – viļņa garums, n – laušanas koeficients.

Svarīgs mikrorezonatoru raksturojošs parametrs ir Q – quality faktors. To var skaitliski aprēķināt, zinot rezonanto viļņa garumu un **atbilstošā viļņa pusplatumu**:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

kur λ – rezonantā viļņa garums, $\Delta\lambda$ – **viļņa pusplatums**. Q faktors ir bezdimensionāls lielums. Tas kvantitatīvi raksturo mikrorezonatora efektivitāti. Jo lielāks Q faktors, jo vairāk gaismas tajā tiek uzturēts, kā arī palielinās fotonu pastāvēšanas laiks mikrorezonatorā (cavity photon lifetime). Mikrorezonatoru Q faktors ir atkarīgs no rezonatora simetrijas īpašībām, formas,

defektiem, putekļiem uz tā virsmas, izgatavošanas materiāla, kā arī būtiska ietekme uz rezonatora darbību ir arī gaisa mitrumam – ūdens molekulas var difundēt materiālā un ietekmēt laušanas koeficientu n . Palielinoties mikrorezonatoru Q faktoram, pieaug arī to jutība kā sensoriem, reaģējot uz temperatūras izmaiņām, kā arī dažādu daļiņu klātbūtni (skatīt sadaļu *Mikrorezonatoru sensori.*).

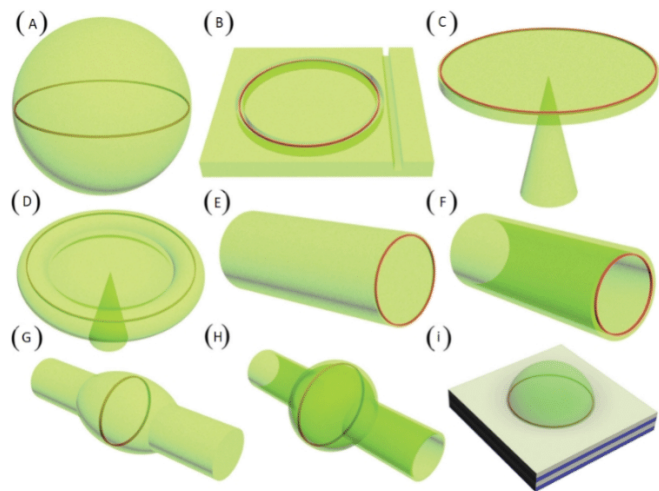
Rezonatoru veidi un iegūšana

Pastāv dažādu formu mikrorezonatori. Būtiski rezonatorus raksturojoši parametri ir to rādiuss, veids kā tiek ievadīta gaisma, Q faktors, to materiāls, izgatavošanas sarežģītība. Dažādās rezonatoru formas paver iespējas plašākam to pielietojumam.

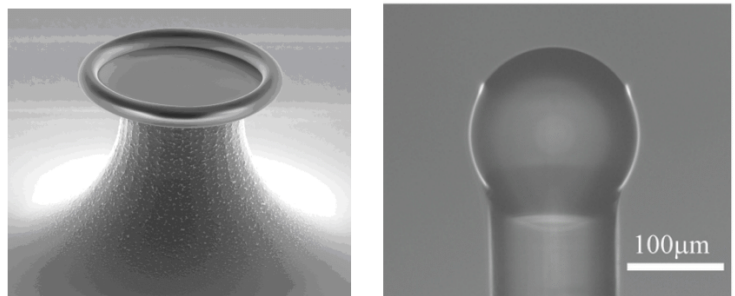
Svarīgākais kritērijs izvēloties rezonatora materiālu ir caurspīdīgums, lai tas neapsorbētu gaismu vajadzīgajā frekvenču diapazonā. Galvenokārt rezonatorus izgatavo no stikla šķiedras, taču tiek pētīti arī kristāliska materiāla - CaF_2 , MgF_2 u.c. – rezonatori. Dažādu sensoru izgatavošanai izmanto arī polimērus, kā piemēram, PDMS. Izgatavotajiem rezonatoriem iespējams uzklāt arī kādas citas vielas kārtiņu, lai uzlabotu tā īpašības.

Mikrosfēras rezonatori ir vienkāršākie 3D ČGM rezonatori. Šādus rezonatorus ir viegli izgatavot. Mikrosfēras diametrs parasti ir vien desmit līdz simts mikrometru, atkarībā no izvēlētajā optiskās stikla šķiedras. ASI šobrīd tiek veikti pētījumi, kā arī ir izstrādāta metode tieši lodveida formas rezonatoru iegūšanai. Mikrošķiedras gals tiek kausēts ūdeņražā liesmā un šķidrā stikla virsmas spraiguma spēku dēļ izveidojas mikrosfēra. Vēl pastāv iespējas kausēt optisko šķiedru arī ar lāzera palīdzību. Dažās laboratorijās mikrosfēras tiek iegūtas, kausējot optisko šķiedru ar arkveida elektriskā lauka izlādēm.

Būtisks trūkums, izgatavojot mikrosfēras, kausējot optisko šķiedru liesmā, ir rezonatoru atkārtamība. Nav iespējams nodrošināt, ka rezonatoriem būs vienādas formas, kā arī izmēri. Neatkarīgi no izgatavošanas metodes, lielu ietekmi uz rezonatoru darbību atstāj putekļi un mazas daļiņas, kas var pieķerties kausēšanas kā arī uzglabāšanas laikā. Lai to novērstu, LU ASI optisko šķiedru pirms kausēšanas tīra ar etanolu, kā arī izmanto ultraskaņas tīrītāju.

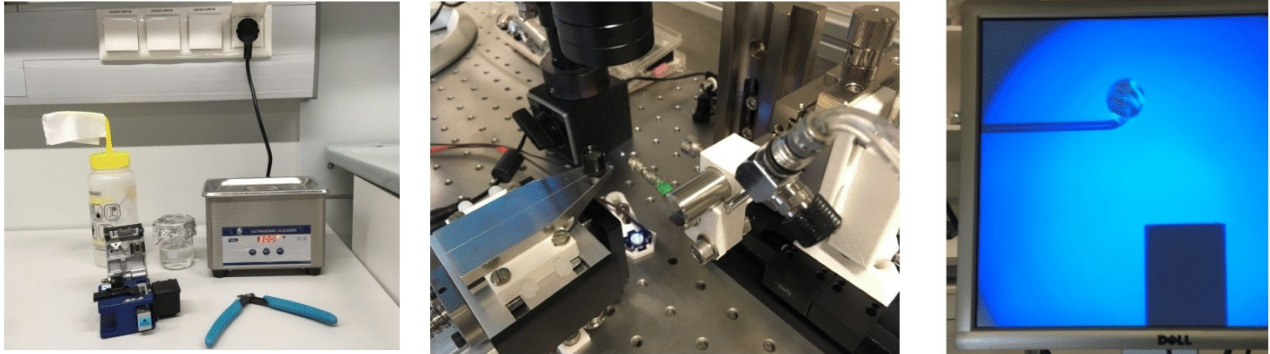


3. attēls – Dažādu formu mikrorezonatori: a) mikrosfēra b) riņķveida c) mikrodisk d) mikrotoroīds e) optiskā šķiedra f) mikrokapilārs g) pudeļveida h) mikroburbuļa i) hemisfēra. Galvenā gaisma veiktā trajektorija ilustrēta ar sarkanu līniju. [2]



4. attēls – (a) SEM mikroskopa attēls toroīda formas mikrorezonatoram [3] (b) Sfēriskas formas rezonators mikroskopā [4]

Izgatavotos rezonatorus uzglabā noslēgtās ampulās, lai mazinātu saskarsmi ar putekļiem, kā arī gaisa mitruma ietekmi.



5. attēls – (a) Optiskās šķiedras notīrīšana; šķiedras griezējs, etanols, ultraskaņas tīrītājs. (b) Optiskās šķiedras kausēšana; pievads ar H_2 , ūdeņraža liesma, zilās gaismas diode, mikroskops. (c) Ekrānā redzama mikrosfēra kausēšanas procesā un H_2 liesmas caurulīte pietuvinājumā. [ASI 2019; Foto – Pauls Reinis]

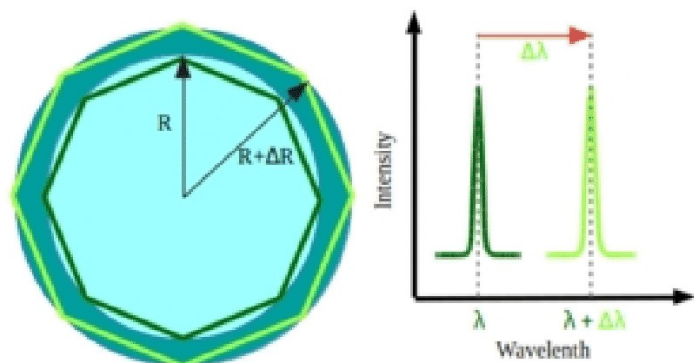
2D Riņķveida mikrorezonatorus (skatīt 3. attēls (b)) iespējams pievienot mikroshēmām. Kaut gan šāda veida rezonatoriem ir mazāks Q faktors, toties ar litogrāfijas metodi iespējams tiem izveidot gan rezonatora formu, gan arī gaismas sapārošanai vajadzīgo posmu. Biofotonikas jomā tiem ir augsta jutība detektēt daļiņu slāni, ja tads nonāk uz rezonatora virsmas. Šādas formas rezonatoru izpēte turpinās un jau 2011. gadā, izmantojot Si_3N_4 , iegūti riņķveida mikrorezonatori ar relatīvi augstu Q faktoru – 10^7 . [5]

Kapilāra, pudeļveida un burbuļa formas (3. attēls (f), (g) un (h)) rezonatorus pētījumos izmanto šķidrumu un optisko parādību novērošanai. Kapilāra formas rezonatora iekšienē var plūst šķidrums, izmaiņas šķidrumā rada laušanas koeficienta izmaiņu, var novērot spektra nobīdi.

Līdzās iepriekš minētajiem no optiskās šķiedras un citiem cieti no cietā materiāla izgatavotiem mikrorezonatoriem veikti pētījumi arī šķidra agregātstāvokļa paraugiem. Vairākās publikācijās, kā arī LU ASI ir veikti mērījumi, izmantojot glicerīna pilienus (skatīt nākamo lpp.)

Mikrorezonatoru sensori

Tā kā ČGM rezonatora rezonanses frekvence ir atkarīga gan no tā izmēra R , gan refrakcijas koeficienta n , tad nelielas izmēra izmaiņas ΔR vai refrakcijas koeficienta izmaiņas Δn rada ievērojamu rezonanses frekvences modas nobīdi $\Delta\lambda$ (skatīt 6. ttēlu). Šī augstā jutība paver iespēju ČGM



6. attēls – shematiski ilustrēta rezonatora rādiusa izmaiņa (piemēram, temperatūras ietekmē vai arī piesaistoties molekulu slānim) un tai sekojošā rezonanses frekvences modas nobīde. [6]

rezonatorus izmantot dažādiem pielietojumiem, gan kā filtrus, gan kā lāzeru rezonatorus, kā arī sensorus.

Modas nobīdi ārēju apstākļu ietekmē kvantitatīvi apraksta vienkāršots modelis:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta n}{n} \quad (3)$$

kur R – rezonatora rādiuss, ΔR – rādiusa izmaiņa, n – laušanas koeficients, Δn – laušanas koeficienta izmaiņa. Izmantojot vienkāršotu modeli un pieņemot, ka rezonatoram, piemēram pieķeras daļiņu slānis, taču gaismas laušanas koeficients būtiski neizmainās, iegūst:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{t}{R} \quad (4)$$

kur šajā gadījumā t – pievienojušos daļiņu slāņa biezums. Tālāk pārveidojot iegūst, ka minimālais slāņa biezums, kura pievienošanās varētu novērot, ir atkarīgs no rezonatora Q faktora:

$$t_{min} \sim \frac{R}{Q} \quad (5)$$

ASI lielākoties tiek izmantoti sfēriski mikrorezonatori ar Q faktoru aptuveni 10^6 , kā arī rādiusu 0.25 mm.

$$t = \frac{R}{Q} = \frac{0.25 \cdot 10^{-3}}{10^6} = 2.5 \cdot 10^{-10} m \quad (6)$$

Šie vienkāršotie vienādojumi kvantitatīvi ilustrē mikrorezonatoru augsto jutību un norāda, ka, jo lielāks Q faktors, jo labākas ir rezonatora sensoriem nepieciešamās īpašības. Kā arī ar mikrorezonatoru tipa sensoriem ir teju momentāni novērojamas izmaiņas apkārtējā vidē (izmainoties koeficientam n vai rādiusam R , uzreiz var novērot modas nobīdi).

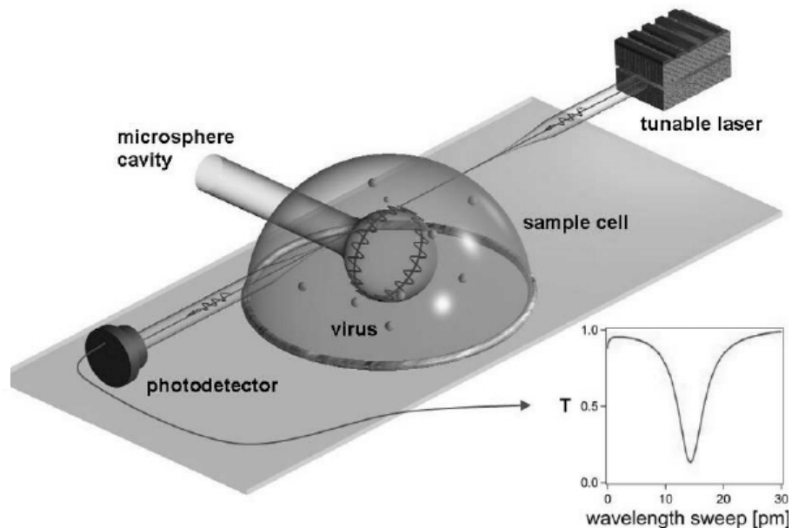
Mikrorezonatoru temperatūras sensoriem rezonanses modas nobīde notiek termiskās izplešanās vai arī laušanas koeficienta izmaiņas dēļ. Tā kā optikā izmantotajiem materiāliem raksturīgais termiskās izplešanās koeficients ir ar kārtu 10^{-6} [1/K], lai novērotu lielāku rezonanses modas nobīdi, vairākos pētījumos izmantots *polydimethylsiloxane* jeb PDMS. Arī no šī materiāla var izgatavot ČGM rezonatoru, taču tā termiskās izplešanās koeficients ir $9 \cdot 10^{-4}$ [1/K].

ČGM rezonatoru īpašības var mainīties arī gaisa mitruma ietekmē. Jau iepriekš apskatīts, ka no silikāta izgatavotajos rezonatoros var difundēt ūdens molekulas no apkārtējās vides, tas mazina rezonatora Q faktoru, ietekmē arī rezonanses modu. Taču praktiski pētījumiem par gaisa mitrumu var izmantot pilienvēda rezonatorus, kā, piemēram, glicerīna (hidroskopiska viela) pilienu, kam pievienots Rhodamine 6G kā krāsviela. Glicerīna piliens piesaista gaisā esošās ūdens molekulas, tā rezultātā var novērot modas nobīdi.

Mikrorezonatoru rezonantās modas nobīdi var novērot arī, ja rezonatora virsmai pieķeras kādas daļiņas. Daļiņas var gan palielināt rādiusu, tam ir atšķirīgs arī laušanas koeficients, kas ietekmē reģistrēto spektru. Daļiņu klātbūtnes noteikšana ar tik augstu jutību

plašu pielietojumu var atrast bioloģijas nozarēs. ČGM rezonatoru veidotu biosensoru izveide ir viens no visaktīvāk pētītajiem tematiem ČGM rezonatoru pielietojumam.

7. attēls – Hārvardas Universitātes biofotonikas nodaļas eksperimentāla shēma vīrusa klātbūtnes noteikšanai. *Influenza A* vīrusa daļiņām, kuru masa vien $5 \cdot 10^{-16}$ g un izmēri nepārsniedz 50 nm, pieskaroties mikrorezonatoram, uzreiz var novērot modas nobīdi, kā parādīts grafikā attēla labajā malā. [7]

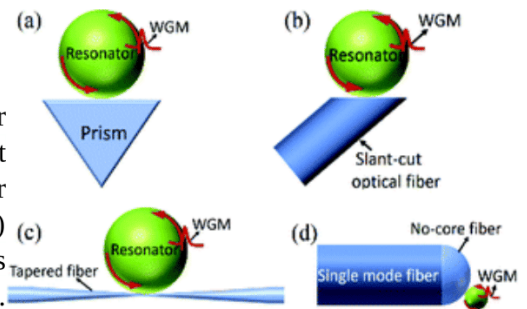


Līdzās jau iepriekš minētajiem, ir izstrādāti arī uz ČGM rezonatoriem balstītu viļņa garuma noteikšanas sensoru prototipi. Tiek izmantotas vairākas mikrosfēras ar dažādiem diametriem. Pie atšķirīgiem viļņu garumiem dažām no mikrosfērām var novērot rezonansi, citām nē. Salīdzinot iegūtos rezultātus ar **atskaites/kalibrācijas** datiem, var noteikt viļņa garumu. Publikācijā norādīts, ka, veicot mērījumus ar viļņa garumiem 635 – 637 nm, tie noteikti ar precizitāti līdz 0.01 nm. [8]

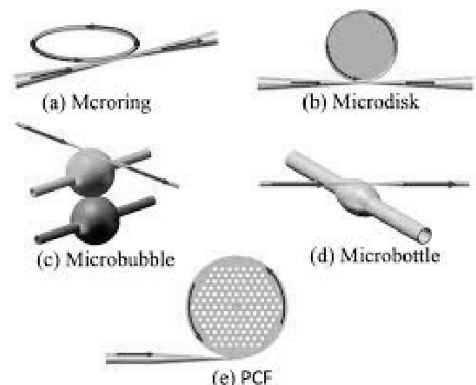
ČGM eksperimentāli mērījumi

Lai praktiski pielietotu mikrorezonatorus, ir nepieciešams efektīvs veids kā gaismas staru ievadīt rezonatorā. Viens no veidiem, kā sapārot gaismu, ir izmantot prizmu ar lielu laušanas koeficientu (8. attēls (a) un 11. attēls). Gaismas stars nonāk prizmā un pilnīgas iekšējās atstarošanās dēļ atstarojas no prizmas virsmas. Tomēr gaismas elektromagnētiskais lauks nedaudz izspiežas ārpus prizmas un var pārklāties ar gaismas lauku, kas izspiežas ārpus rezonatora (skatīt 10. attēlu).

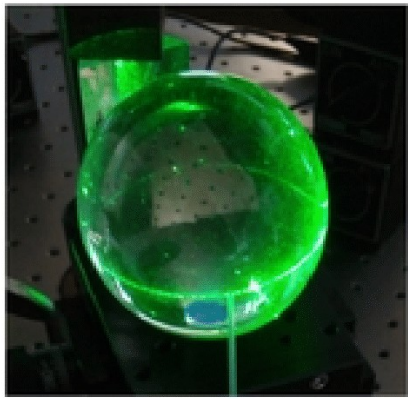
Pastāv arī iespējas ievadīt gaismu rezonatorā, izmantojot optisko šķiedru (8. attēls (b) un (c)). **Kā arī pašu optisko šķiedru var izmantot kā rezonatoru (d).** Vienkāršāk ir gaismu sapārot pilienvēda rezonatoriem – nav nepieciešamas prizmas vai optiskā šķiedra.



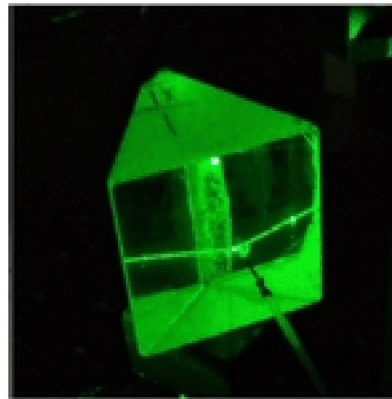
8. attēls – Gaismas sapārošanas metodes ČGM rezonatoriem. [9]



9. attēls – gaismas sapārošana dažādu formu rezonatoriem: (a) mikro-riņķveida (b) mikrodiska (c) mikroburbuļa (d) mikro-pudeļveida (e) Photonic crystal fiber. [9]



10. attēls – Makroskopiska izmēra (6 cm diametrs) stikla lodē, ar prizmas palīdzību tiek ievadīts lāzera stars. [ASI 2017, foto – Inga Brice]

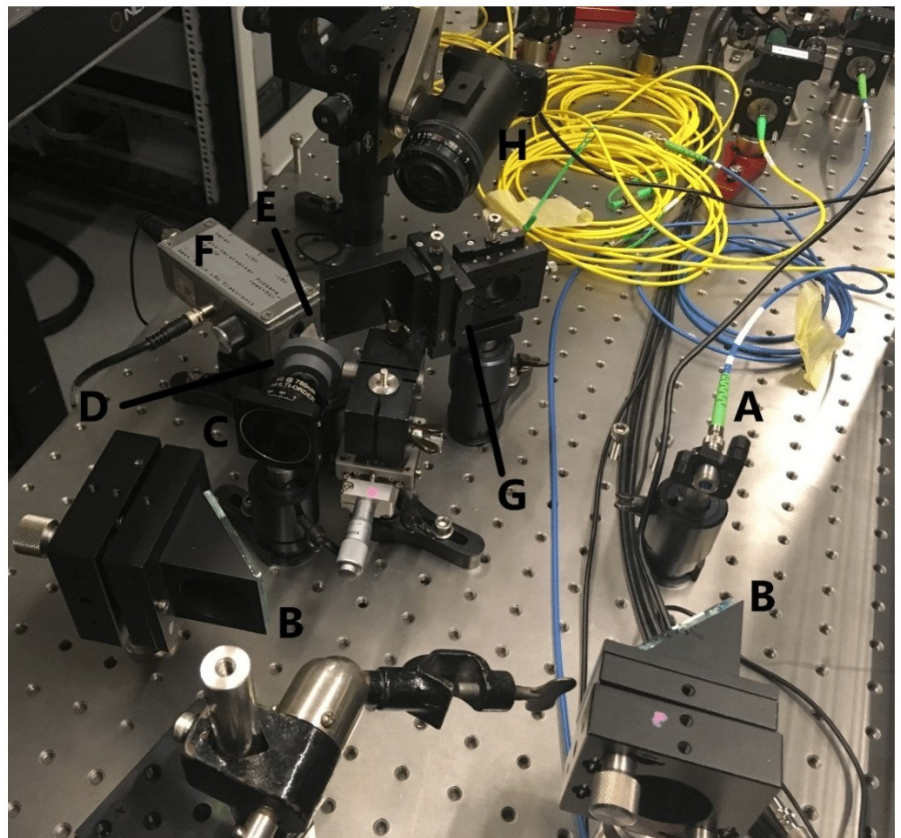


11. attēls – eksperiments atkārtots ar lodīti, kuras diametrs apmēram 1 mm. [ASI 2017, foto – Inga Brice]

Iekārtu shēma ČGM rezonatoru parametru mērīšanai:

- A** – gaismas vads
- B** – spoguļi
- C** – Polarizators
- D** – savācējlēca
- E** – stikla prizma
- F** – detektors
- G** – regulējams statīvs, pie kura piestiprina mikrosfēras rezonatoru
- H** – fotokamera

ASI laboratorijā pa gaismas vadu sistēmā tiek ievadīts gaismas stars ar viļņa garumu 780 nm, ko nodrošina ECDL lāzers. Fotokamera ir pievienota monitoram un ar tās palīdzību var precīzāk pieregulēt rezonatora pozīciju, lai ierosinātu rezonansi.



12. attēls – eksperimentālu iekārtu izvietojums mērījumiem ar sfēriskiem mikrorezonatoriem. [ASI 2019, foto – Pauls Reinis]

Pirms eksperimentāliem mērījumiem izgatavotajiem mikrorezonatoriem iespējams uzklāt arī kādas vielas pārklājumu, tādējādi galvenokārt izmainot laušanas koeficientu uz rezonatora virsmas. Plaši tiek izmantots ZnO daļiņu slānis, arī ASI tiek veikti eksperimentāli mērījumi ar to, kā arī izstrādāta metode ZnO slāņa uzklāšanai. [6] Tāpat arī tiek lietotas zelta nanodaļiņas. Īpaša nozīme pārklājumam ir

biosensoru izveidē un ČGM rezonatoru pielietojumam bioloģijā, jo rezonatora virsmas īpašības nosaka kādas daļiņas (piemēram, proteīni, vīrusi u.c.) var pievienoties tā virsmai.

Strādājot ar no optiskās šķiedras izgatavotiem rezonatoriem, jābūt īpaši uzmanīgiem. Optiskā šķiedra ir trausla, ir ļoti viegli to pārlaut. Šķiedru ir grūti pamanīt, ja tā ir nokritusi no darba galda virsmas. To ir svarīgi utilizēt (tāpat arī nolietotus rezonatorus), novēršot risku, ka tie var iedurties ādā.

Apkopojums par ČGM pielietojuma iespējām:

- Frekvenču ķemmes, kuru izmēri un izmaksas ir daudzkārt mazākas, iespējas tiešā veidā noteikt EM viļņu frekvenci. Tās varētu integrēt mikročipa izmēros.
- Rezonatori, stabilizatori lāzeros.
- Biosensori, kas spēj noteikt vīrusu, proteīnu, citu daļiņu klātbūtni, ja tās saskaras ar rezonatora virsmu.
- Temperatūras sensori, ko nodrošinātu termiskās izplešanās, kā arī termorefraktīvajām īpašībām pakļautie mikrorezonatori.
- Mazu daļiņu detektēšana. Tām pieķeroties rezonatoram, novērojama modas nobīde. Mikrorezonatoriem ir īpaši augsta jutība, iespējams, ka varētu noteikt pat atsevišķu daļiņu pieķeršanos rezonatora virsmai.
- Mitruma sensors, kam gaisa mitruma ietekmē notiek modas nobīde.

Izmantotā literatūra:

[1] Wright, Oliver B.; 2012; "Gallery of whispers" *Physics World*. 25 (2): 31. DOI:10.1088/2058-7058/25/02/36

[2] S. Yang, Y. Wang, H. D. Sun; 2015; "Advances and Prospects for Whispering Gallery Mode Microcavities" *Advanced Optical Materials*. DOI: 10.1002/adom.201500232

[3] Institut Nanosciences Et Cryogenic; http://inac.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast_visu.php?id_ast=844

[4] M. Chistiakova, A. Armani; 2014; "Photoelastic ultrasound detection using ultra-high-Q silica optical resonators" *Optics Express*; DOI: 10.1364/OE.22.028169

[5] Tien, M.C.; Bauters, J.F.; Heck, M.J.R.; Spencer, D.T.; Blumenthal, D.J.; Bowers, J.E.; 2011; "Ultra-high quality factor planar Si₃N₄ ring resonators on Si substrates" *Opt. Express*, 19, 13551–13556.

[6] I. Brice, A. Pirkina, A. Ubele, K. Grundšteins, A. Atvars, R. Viter, J. Alnis; "Development of Optical WGM Resonators for Biosensors" LU ASI Kvantu optikas laboratorija;

[7] F. Vollmer, S. Arnold, D. Keng; 2008; "Single virus detection from the reactive shift of a whispering-gallery mode" *PNAS*.

[8] A. B. Petermann, A. Varkentin, B. Roth, U. Morgner, M. Meinhardt-Wollweber; 2016; "All-polymer whispering gallery mode sensor system" <http://doi.org/10.1364/OE.24.006052>

[9] Y. Zhang, T. Zhou, B. Han, A. Zhang, Y. Zhao; 2018; "Optical bio-chemical sensors based on whispering gallery mode resonators" *Nanoscale*; DOI: 10.1039/C8NR03709D