

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

ČUKSTOŠO MODU GALERIJAS MIKROREZONATORU TEMPERATŪRAS SENSORS

BAKALaura DARBS

Autors: **Roberts Berķis**

Studenta apliecības Nr.: rb16050

Darba vadītājs:

Dr. Phys. Jānis Alnis.

Darbs izstrādāts LU Atomfizikas un Spektroskopijas institūtā.

RĪGA 2019

Anotācija

Čukstošo galerijas modu (ČGM) rezonatori ir sfēriskas formas objekti, kas ir taisīti no optiski caurspīdīgiem materiāliem un ir spējīgi uzturēt optiski cirkulējošu vilni iekšā sfērā, izmantojot pilnīgu iekšējo atstarošanos. Ja ir monohromātisks gaismas avots ar konstantu intensitāti, tad vilnis, kas kustās pa lodes perimetru, sāk konstruktīvi interferēt. Šajā gadījumā rodas rezonanse, ko sauc par čukstošo galeriju modu (ČGM), pēc analogijas no akustikas. Darbā tiek aplūkots koncepts, ka ČGM rezonatorus varētu izmantot kā temperatūras sensorus. Izmantojot dažāda lieluma rezonatorus un mainot temperatūru, tiek testēta sistēma un rezonanses. Darbā tiek veidota praktiska sistēma ar kuras palīdzību varētu mērīt gan optiskā labuma Q faktorus, gan termiskās izplešanās parametrus, izmantojot ČGM rezonatorus un temperatūras izmaiņas.

Abstract

The whispering gallery modes (WGM) resonators are based on spherical objects, which are made from optically transparent materials, and are capable of maintaining circulating optical waves, inside the sphere, using total internal reflection. If there is a monochromatic light source which supplies the sphere with a constant intensity, the wave moving along the perimeter of sphere starts constructively interfere. In this case the resonance happens, which is called whispering gallery mode (WGM). The current work is being done in direction of the possibility of using WGM resonators as temperature sensors. Different diameter spheres and varying temperature is used to test the resonances and calibrate equipment. Also making a practical system for optical quality Q factor and thermal expansion parameters, using WGM resonators and temperature change.

SATURS

| | |
|---|----|
| APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS | 4 |
| IEVADS | 5 |
| 1.TEORĒTISKĀ DAĻA | 6 |
| 1.1. Čukstošās galerijas modas | 6 |
| 1.1.1. ČGM rezonanses pamatnosacījumi | 7 |
| 1.1.2. ČGM detalizēts apraksts | 8 |
| 1.1.3. ČGM detektēšanas mehānismi | 9 |
| 1.2. ČGM rezonatora labums Q | 10 |
| 1.3. ČGM sasaiste ar gaismu | 11 |
| 1.4. ČGM rezonatoru pagatavošana | 13 |
| 1.5. Temperatūras detektēšana | 14 |
| 2.EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA | 15 |
| 2.1. Izmantotie ČGM mikrorezonatori | 15 |
| 2.1.1. No lodīšu spīdēšanas intensitātes atkarīgas rezonanses iegūšana | 16 |
| 2.2. Eksperimenta iekārta | 16 |
| 2.3. Eksperimentu apraksti | 19 |
| 3.REZULTĀTI | 22 |
| 3.1. Rezonatoru sildīšana | 21 |
| 3.2. Bangs laboratories' rezoantorū karsēšana ar vidējo diametru 82 μ m | 25 |
| 3.3. Datu apstrāde | 29 |
| SECINĀJUMI | 33 |
| PATEICĪBAS | 34 |
| ATSAUCES | 35 |
| PIELIKUMS | 37 |

APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS

λ – viļņa garums

d – biezums

FWHM – *full width half maximum* – pilnais platums pie pus intensitātes

n - radiālā moda

Q - Labuma factors

N – gaismas laušanas indekss

FSR – Free spectral range – brīvais spektrālais apgabals

m – azimutālais indekss

f – frekvence

ε – emisijas koeficients

E – enerģija

I – intensitāte

R – rādiuss

EM – elektromagnētiskie viļņi

T - temperatūra

IEVADS

Pēdējos gados arvien vairāk gan uzmanība, gan resursi tiek veltīti, lai pētītu gaismas un dažādu garumu viļņu mijiedarbību ar objektiem. Galvenais iemesls ir tas, ka viļņu garumi ir ļoti mazi un pat nelielas izmaiņas objekta parametros, kas mijiedarbojas ar gaismu, izraisa izteiktas un labi izmērāmas parādības. Viena no vissaktīvāk pētītajām lietām, kurā labi var novērot gaismas-objekta mijiedarbību ir Čukstošo galeriju modas (ČGM) optiskie rezonatori [1].

Optiskie rezonatori ir iekārtas, kurās ir iespējams 'ieslodzīt' gaismu. Vienkāršākais dizains Fabrī-Pero rezonators, kuru veido divi spoguļi, starp kuriem nepārtraukti atstarotos gaisma, tādējādi cirkulējot apkārt rezonatorā. ČGM darbības princips ir līdzīgs, tikai atstarošanās notiek no liektās rezonatora virsmas pilnīgās iekšējās atstarošanās dēļ. Ja rezonators nav perfekts un tajā ir kaut kādi piemaisījumi vai nepilnības, kas iedarbosies ar cirkulējošo gaismu, rodas zudumi. Vienā brīdī rezonanse izzudīs, tādēļ viens no svarīgākajiem lielumiem optiskajos rezonatoros ir labuma (Q) faktors, kas parāda cik reizes gaisma ir spējusi cirkulēt iekšā rezonatorā.

Bakalaura darba rezultāti prezentēti LU 77. starptautiski zinātniskajā konferencē un Developments in Optics and Communications 2019 (DOC RIGA).

Mērķis:

Pētīt ČGM mikrorezonatoru praktisko pielietojumu nosakot temperatūru.

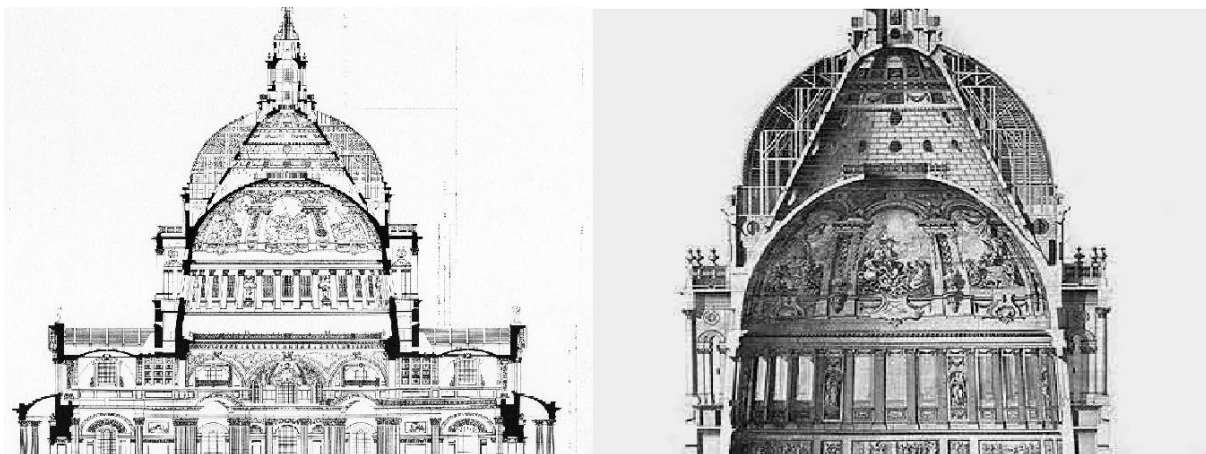
Darba uzdevumi:

1. Izveidot laboratorijas iekārtu un datorprogrammu, ar kuras palīdzību laboratorijas apstākļos varētu mērīt industriāli nopērkamos ČGM mikrorezonatorus.
2. Salīdzināt industriāli nopērkamos ČGM mikrorezonatorus ar laboratorijā taisītajiem.
3. Izveidot darbojošos prototipu, ar kura palīdzību varētu mērīt temperatūru.

1. TEORĒTISKĀ DAĻA

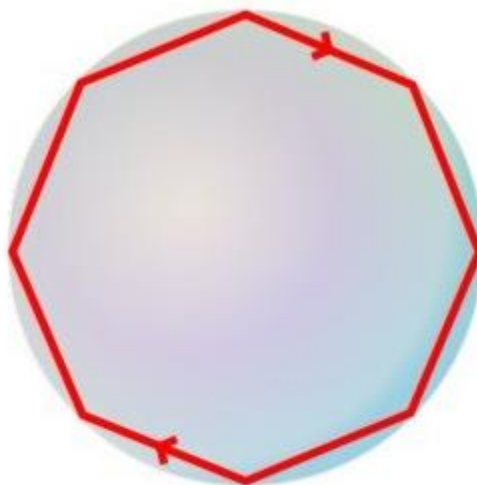
1.1. Čukstošās galerijas modas

Čukstošo modu galeriju definīcija ir vairāk kā 100 gadus veca. To pirmo reizi pētīja Džons Villiams Strutts (Lords Relejs). Viņš pētīja fenomenu Sv.Paula Katedrālē Londonā. Tā bija 32m augsta un 32m plata kupolveidīga galerija. (skatīt attēlu 1.1 un 1.1.2).



1.1.att. Sv.Paula Katedrāle, kur izpaužas čukstošās galerijas akustiskais efekts.

Katedrāle bija slavena ar to, ka čuksti gar tās sienām bija sadzirdami jebkurā citā tās punktā, tādēļ to nosauca par čukstošo galeriju.



1.1.2.att. Kupolā 'iesprostotais' čuksts.

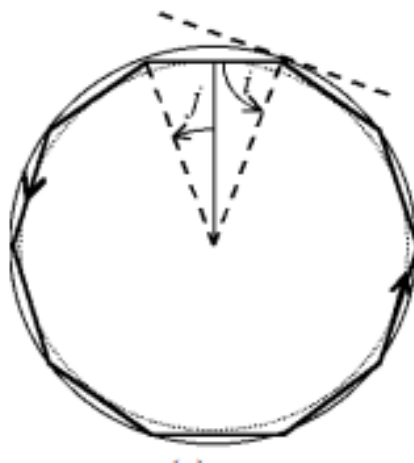
Lords Relejs izpētīja šo fenomenu un izskaidroja to ar skaņas viļņa pārfokusēšanos efektu, no izliektas virsmas. 1910-1912 tika publicēts raksts 'Čukstošās galerijas problēma' [2-3]. Rakstā tika minēts, ka līdzīgas īpašības varētu piemist arī elektromagnētiskajiem viļņiem.

Bet tikai ap 1980. gadu sāka aktīvi pētīt čukstošās galerijas modas optikā, jo bija nepieciešams attīstīt lāzeru tehnoloģijas un mikrorazošanu.

1.1.1. ČGM rezonanses pamatnosacījumi

Parasti čukstošo galeriju modu terminu piedēvē elektromagnētiskas virsmas oscilācijai optiskā dobumā. ČGM spēj darboties ne tikai sfēriskā objektā, bet arī cilindriskā, sferodiālā, vai trodiālas formas dialektriskā rezonatorā.

Sfēras ČGM gadījumā izmanto vienkāršu ģeometrisku konceptu (skatīt attēlu 1.1.1.).



1.1.1. att. Katedrālē ‘iesprostota’ čuksta gājiens

Dialektriska sfēra ar laušanas indeksu N un rādiusu $a \gg \lambda$ ievietota vakuumā. Gaisma pārvietojas sfēras iekšpusē un atsitas pret virsmu, saskares leņķī i . Ja leņķis i ir lielāks par kritisko leņķi i_c

$$i_c > \arcsin\left(\frac{1}{N}\right), \quad (1)$$

tad notiek pilnīga iekšēja atstarošānās. Sfēriskās simetrijas dēļ, nākamie sadursmes leņķi būs tādi paši, un gaisma tiek ieslodzīta sfēras iekšienē. Ja gaismas vilnis trāpa virsmai pa pieskari, tad

$$i \approx \frac{\pi}{2}. \quad (2)$$

Sfērā iesprostotā gaisma izplatās tuvu virsmai un veic optisko distanci aptuveni $2\pi RN$ vienā pilnā apriņķojumā. Ja pa perimetru p_0 ietilpst vesels skaits gaimas viļņa garumu λ , tad var sagaidīt konstruktīvu interferenci [4]. No tā izejot, iegūst, ka rezonanses nosacījumi ir

$$2\pi RN \approx l\lambda, \quad (3)$$

kur l ir skaits viļņiem, kas ietilpst pa perimetru.

1.1.2. ČGM detalizēts apraksts

Detalizētāk ČGM apskata kā augsta leņķiskā momenta elektromagnētiskas modas. Lorenca – Mie teorija [5, 6, 7] dod analītisku atrisinājumu sfērā izkliedētajam elektromagnētiskam viļnim. Izmantojot šo teoriju var aprēķināt izkliedēto starojumu. Klasiskās elektrodinamikas ietvaros izmanto Hansena metodi [7], kur vektoriāliem atrisinājumiem Helmholtza vienādojumā ir leņķiskā atkarība no vektoriālajām sfēriskajām harmonikām, kuras var uzrakstīt kā:

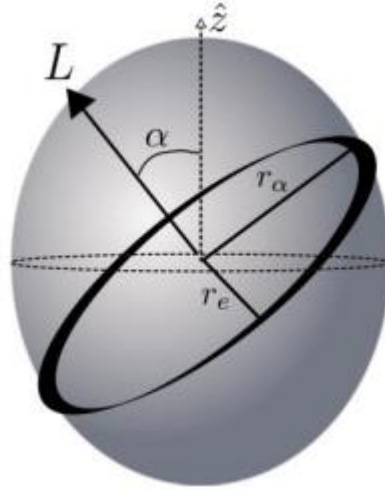
$$\begin{cases} \overline{X}_m^l = \nabla Y_l^m \times \frac{\vec{r}}{\sqrt{l(l+1)}} \\ \overline{Y}_m^l = \nabla Y_l^m \frac{r}{\sqrt{l(l+1)}} \\ \overline{Z}_m^l = Y_l^m \hat{r} \end{cases} \quad (4)$$

Pārveidojot vienādojumu tā, ka katras ČMG laukums $\{\overline{E}_{lm}^P(\vec{r}), \overline{B}_{lm}^P(\vec{r})\}$ ir numurēts komplekts P, l, m . P ir oscilāciju polarizācija. l ir modu numurs, kas ir pakāpes indikators sfēriskajām harmonijām Y_l^m , kas vienlaikus apraksta leņķiskā lauka sadalījumu. m ir azimutālais modas numurs. Tam var būt vērtības $2l+1$ no $-l$ līdz $+l$. Abu polarizētāju laukus var ievietot vienādojumā (4) un uzrakstīt kā:

$$\begin{cases} \overline{E}_{lm}^{TE}(\vec{r}) = E_0 \frac{f_l(r)}{k_0 r} \overline{X}_l^m(\theta, \varphi) \\ \overline{B}_{lm}^{TE}(\vec{r}) = \frac{E_0}{ic} \left(\frac{f_l'(r)}{k_0^2 r} \overline{Y}_l^m(\theta, \varphi) + \sqrt{l(l+1)} \frac{f_l(r)}{k_0^2 r^2} \overline{Z}_l^m(\theta, \varphi) \right) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \overline{E}_{lm}^{TM}(\vec{r}) = \frac{E_0}{N^2} \left(\frac{f_l'(r)}{k_0^2 r} \overline{Y}_l^m(\theta, \varphi) + \sqrt{l(l+1)} \frac{f_l(r)}{k_0^2 r^2} \overline{Z}_l^m(\theta, \varphi) \right) \\ \overline{B}_{lm}^{TM}(\vec{r}) = -\frac{iE_0}{c} \frac{f_l(r)}{k_0 r} \overline{X}_l^m(\theta, \varphi) \end{cases} \quad (6)$$

Atrisinot vienādojumu gareniskam sferioīdam (skatīt attēlu 1.1.2) ar perimetru $p_0 = 2\pi R$ un ideālas sfēras gadījumā perimetrs tiek pārmainīts uz :



1.1.2. att. Sferoīds, kur $r_e = \bar{r} \left(\frac{\pi}{2} \right)$, $r_\alpha = \bar{r} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)$.

$$p = p_0 \left(1 + \frac{\Delta p}{p_0} \right) \approx 2\pi a \left[1 + \frac{e}{6} (1 - 3\cos^2 \alpha) \right] \quad (7)$$

Iegūst vienādojumu:

$$Nx_{l,m,n}^P \approx Nx_{l,n}^P \times \left[1 + \frac{e}{3} \left(1 - 3 \frac{l-|m|}{l} \right) \right] \quad (8)$$

Izmantojot vienādojumu (8) ir iespējams iegūt sfēriskas ČGM rezonanses frekvences izmaiņas atkarībā no sfēras formas [8,9]:

$$\frac{\Delta v_{n,l,m}}{v_{n,l}^0} = -\frac{e}{6} \left(1 - 3 \left(\frac{|m|}{l+\frac{1}{2}} \right)^2 \right), \quad (8)$$

kur $v_{n,l}^0$ ir rezonanses frekvence no (n,l) modas, kas asociēta ar polarizāciju P ideālā sfērā.

1.1.3. ČGM detektēšanas mehānismi

Pamatprincips ČGM rezonanses sensoros ir monitorēt dažādas optisko īpašību izmaiņas ČGM sistēmas ietvaros. No teorētiskā viedokļa izmaiņas optiskajās īpašībās var izraisīt temperatūra, spiediens, vides izmaiņas, piemēram, ja sistēma tiek ievietota vidē, kurā ir cits ķīmiskais sastāvs.

Galvenais nosacījums ir frekvences nobīde, kas rodas kad laušanas indekss modām mainās. Tas ir parādīts [4]

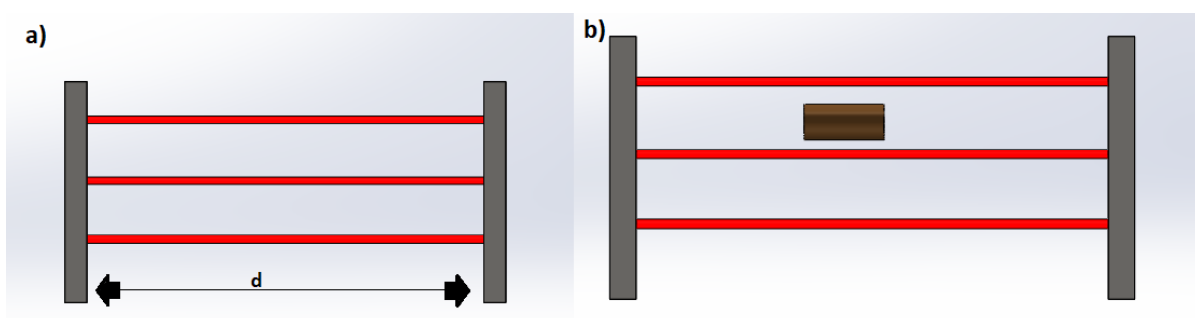
$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta n_h}{n_h} F + \frac{\Delta n_r}{n_r} (1 - F) + \frac{\Delta R}{R} \quad (9)$$

Ar F tiek apzīmēta ČGM jūtības funkcija, kas parāda cik liela daļa no gaismas rezonatorā, cirkulē virsmas viļņi. n_h apzīmē apkārtējās vides laušanas koeficientu, n_r rezonatora materiāla laušanas koeficientu.

1.2. ČGM rezonatora labums Q .

Optisko rezonātoru pamatā ir gaismas mijiedarbība ar vielu. Vienkāršākais piemērs

(sk.attēlu 1.2)



1.2. att. Gaisma kas rezonē starp diviem spoguļiem. a) perfekta rezonanse, b) starp spoguļiem ir sīka daļiņa, kas bojā rezonansi.

Ir Fabri-Pero rezonators, kurā ir divi spoguļi paralēli attālumā d viens no otra. Ja starp šiem spoguļiem iespīdina gaismu un tā vislaik atsitas no vienas spoguļa uz otra (skatīt attēlu 1.2 a), cirkulējot apkārt, tā sāk rezonēt. Ja starp spoguļiem nav ‘perfekts’ tukšums, respektīvi ir kāda viela, vai kaut kas, kas traucē gaismas cirkulēšanu, (skatīt attēlu 1.2 b), gaismas kopējais ciklu skaits var tikt ierobežots. Elementārākais veids kā spriest par šāda veida sistēmām ir [11]:

$$\text{Gaismas veiktais apriņķojums} \approx \text{Kvalitātes } Q \text{ faktors} \quad (10)$$

Izvēršot vienādojumu (10) tālāk var iegūt.:

$$\text{Kvalitātes faktors: } Q = 2\pi * \frac{\text{Noglabāta enerģija}}{\text{Enerģijas zudums ciklā}} \quad (11)$$

Pārejot uz ČGM kvalitātes faktoru, vispirms ņem imagināro daļu no viļņa skaitļa eīgvērtības, kas tiek asociēta ar rezonansi (n,l,P) un nosaka izmaiņas kuras rodas virsmas ieņemot ne-plakanu formu, tādēļ pilnīga iekšējā atstarošanās neeksistē un rodas viļņa starojumuno dielektriskās sfēras. Tādēļ tiek nodefinēts starojuma kvalitātes (Q) faktors [10].

$$Q_{rad} = \frac{Re(k_{0,n,l})}{Im(k_{0,n,l})} \quad (12)$$

Izmantojot WKB aproksimāciju Rikati-Bazeļa radiālajam atrisinājumam, iegūst vienādojumu:

$$Q_{rad} \approx x e^{[2vg(\frac{x}{v})]} \quad (13)$$

Pārveidojot vienādojumu (13) iegūst:

$$Q_{rad} \approx \frac{l}{N} e^{[2lg(\frac{1}{N})]} \times e^{[-2\sqrt{N^2-1}\frac{Nx-l}{N}]} \quad (14)$$

Vienādojumā (14) ir iegūta atkarība no radiālās pakāpes n un polarizācijas P . Vienādojums parāda ka Q_{rad} samazinās ja n palielinās. Lielu l vērtību gadījumā Q_{rad} faktors palielinās milzonīgi, kas nozīmē to, ka pat ja iekšējā atstarošanās nav pilnīga, tā būs gandrīz pilnīga pie ārējiem koeficientiem.

Lielākās limitācijas ČGM Q faktoram ir saistītas ar dažādu materiālu absorbciju un rayleigh scattering. Pieņemot, ka eksistē pavājinājums β , Q_{mat} var aproksimēt:

$$Q_{mat} \approx \frac{4.3 \times 10^3}{\beta} \frac{2\pi N}{\lambda} \quad (15)$$

Silīcija stikla gadījumā, kur ir iespējams sarēķināt ka $Q_{mat} \approx 10^{11}$. Tomēr eksperimentos [12, 13, 14] ir novērots ka Q faktors silīcija mikrosfērām ir daudz zemāks, aptuveni 10^8 - 10^9 . Kā arī ir jāņem vērā zuduma faktori, kas rodas sfēru ražošanas laikā.

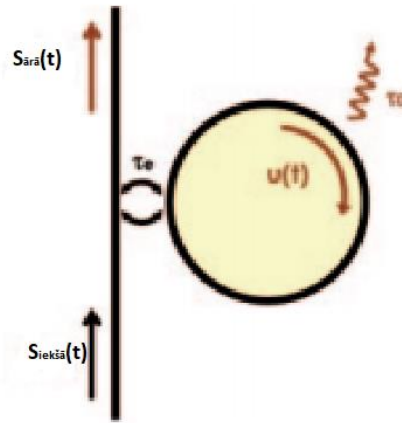
Pēdējais lielais kopējā Q faktora ietekmējošais lielums ir $Q_{s.s}$, kas ir gaismas izkliedes zudums, virsmas nehomogenitātes dēļ. Vienādojums kurš diezgan precīzi apraksta šo parādību [15].

$$Q_{s.s} = \frac{K_{TE}}{K_{TE}+1} \frac{3\lambda^3 a}{8N\pi^2 B^2 \sigma^2} \quad (16)$$

Vienādojumā (16) σ apraksta nehomogenitātes, B apraksta korekcijas garumu nehomogenitātēm un K_{TE} ir attiecība starp pilnībā izkliedēto jaudu un izkliedēto jaudu, kas tiek izkliedēta noteiktā leņķī pie noteiktiem nosacījumiem.

1.3. ČGM sasaiste ar gaismu

Kā iepriekš minēts, ČGM ir augsta līmeņa rezonatori, un galvenie pielietojumi ir efektīva savienošana ar gaismas avotiem no ārpusē. Shematiski to var attēlot kā attēlā 1.3.

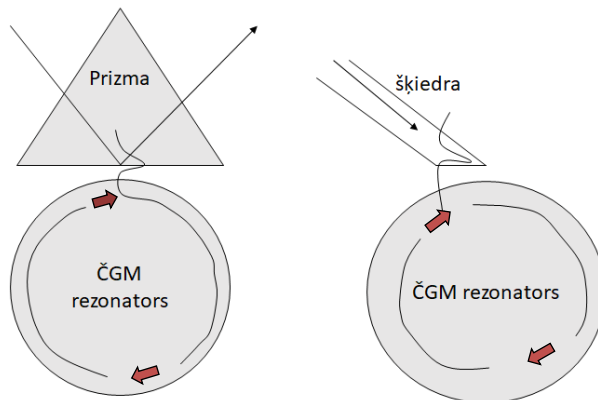


1.3.att. ČGM rezonators sasaistīts ar gaismu.

Ieejas signāls $S_{iekša}(t)$ ir savienots ar rezonatora modu ar manāmu stiprumu kuram raksturīgs dzīves laiks τ_e . Gaisma, kas tiek iesprostota rezonatorā var no tā tikt laukā ar absorbcijas vai starojuma procesu palīdzību, ko var apzīmēt ar τ_0 un atpakaļ uz savienojuma lauku $S_{ārā}$, kas ir savienojuma līnijā. Fotona raksturīgais mūžs τ_0 ir saistīts ar kvalitātes Q faktoru. Izmantojot šo konceptu ir iespējams iegūt vienādojumu [16], kurš parāda intensitātes pārnesi no ārējā lauka uz rezonatoru:

$$T(\delta) = \frac{\left(\frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_0}\right)^2 + 4\pi^2\delta^2}{\left(\frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_0}\right)^2 + 4\pi^2\delta^2} \quad (17)$$

Vadoties pēc 17. vienādojuma var izsecināt, ka τ_0 un τ_e vērtības nosaka rezonatoru savienošanu [16] ar ievades avotu. Optimālais sasaistes parametrs ir, kad fotonu dzīves laiks rezonatorā vienāds ar ievades stiprumu.



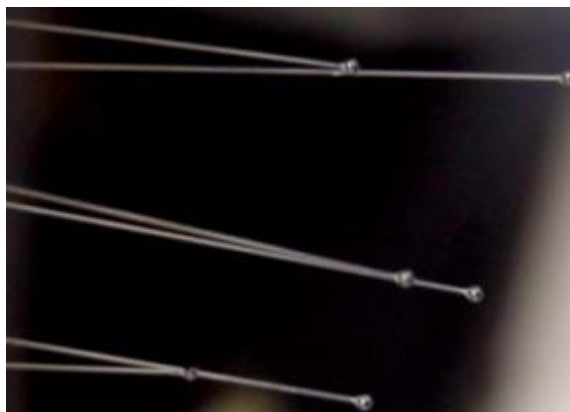
1.3.1.att.

ČGM rezonatoru gaismas sasaistes veidi a) prizmas sasaistes veids izmantojot pilnīgo iekšējo atstarošanu. b) optiskās šķiedras sasaistes veids.

Visas metodes balstās uz enerģijas apmaiņu starp ČGM un novadītajām modām, vai iekšējās atstarošanās viļņiem. Prizmas paņēmieni ir līdz šim vecākais veids kā savienot gaismu ar ČGM [18]. Pavisam nesen ir parādījušies veidi kur izmanto trapecveida stikla šķiedru, lai savienotu augsta Q-faktora ČGM rezonatorus ar gaismu.

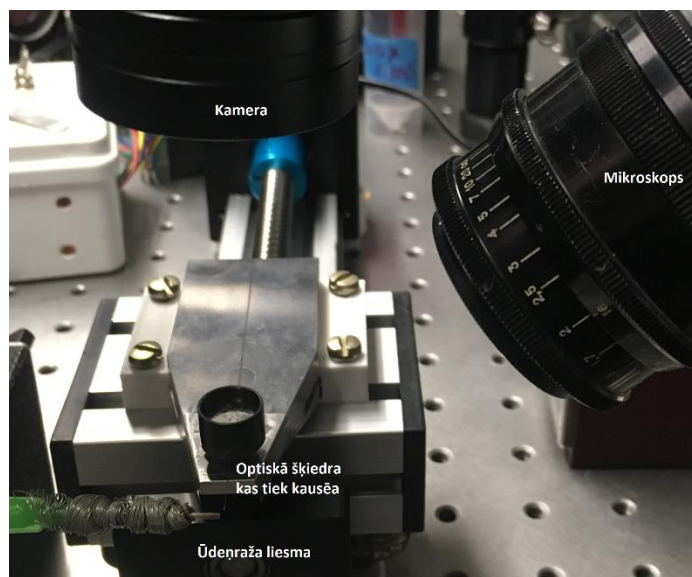
1.4. ČGM rezonatoru pagatavošana

Laboratorijas apstākļos tiek izmantotas divas metodes ČGM mikrorezonatoru pagatavošanā. Tiešā kontaktā liesmas kausēšana, izmantojot ūdeņraža-skābekļa liesmu, un CO₂ lāzera kausēšana [19].



1.4.att. Izkausēta optiskā šķiedra, kuras galā ir izveidojies sferoīds.

Abos paņēmienos sākummateriāls ir telekomunikāciju optiskā šķiedra SMF-28a no kvarca materiāla, kuras gals tiek karsētas līdz tas dabiski, spraiguma spēka ietekmē, izveido sferoīdam līdzīgu formu (skat.attēlu 1.4.). Laboratorijas iekārta optiskās šķiedras kausēšanai LU ASI parādīta attēlā 1.4.2.



1.4.2att. Laboratorijas iekārta kvarca stikla (SiO₂) šķiedras kausēšanai LU ASI laboratorijā.

Ar ūdeņraža liesmu tiek kausēts stiklašķiedras gals, kas mehāniski izmantojot elektromotorus un datorprogrammu tiek bīdīts uz liesmu ar konkrētu soli. Tad rezonators tiek nolausts, aptuveni 4 cm no tā gala un ievietots glabāšanas tvertnē.

1.5. Temperatūras detektēšana

ČGM rezonatoru dizains galvenokārt balstās uz laušanas koeficienta un ČGM rezonatora termisko ieplešanos. Materiālos ar lielāku termo-optisko un termālās izplešanās koeficientiem dN/dT un $R^{-1}dR/dT$, šie parametri rezultējas lielākās frekvences nobīdēs df , kas tālāk veicina precīzākus temperatūras nolasījumus. Kvarcam (SiO₂) termālās izplešanās koeficients ir par vairākām kārtām mazāks kā termo-optiskais koeficients [4], kas rezultējas ka termo-optiskais koeficients būt vadošais cenšoties pielāgot ČGM rezonatoru temperatūras mērījumiem. Mikrorezonatoriem, kas izgatavoti no polimēriem, koeficienti atšķiras, termiskā izplešanās ir lielāka kā termo-optiskās izmaiņas.

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

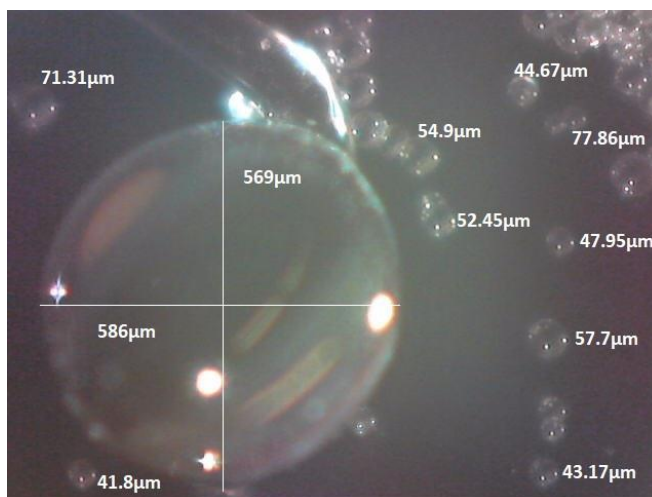
2.1. Izmantotie ČGM mikrorezonatori

Darbā tika izmantoti atšķirīgu dizaina un lieluma ČGM mikrorezonatori. Sākuma mērījumi tika veikti ar paštaisītiem rezonatoriem, kuriem bija sfēriskas formas gals, kurš ir savienots ar stiklašķiedras kabeli, kuram ir fiksēts diametrs $125\mu\text{m}$. (skatīt attēlu 2.1.1) Šie rezonatori ir daudz izturīgāki pret temperatūras izmaiņām, un ar tiem ir iespējams pētīt temperatūras līdz pat $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ lielam karstumam, taču tie ir daudz dārgāki kā industriāli nopērkamie polimēru lodīšu rezonatori.



2.1.1 att. ASI laboratorijā paštaisītais rezonators no SMF-28a telekomunikāciju šķiedras.

Tālākos eksperimentos tika izmantotas komerciāli nopērkamas ‘Bang Laboratories’ polimetilakrilāta sfēriskas lodītes ar vidējo diametru $83\mu\text{m}$, (skatīt attēlu 2.1.2) Šo rezonatoru izmaksas ir salīdzinoši lētas, taču par cik tie ir polimēri, tad tie kūst jau pie 150°C grādu karstuma, kas nozīmē ka ir ierobežots temperatūras diapazons, kurā var veikt mērījumus.



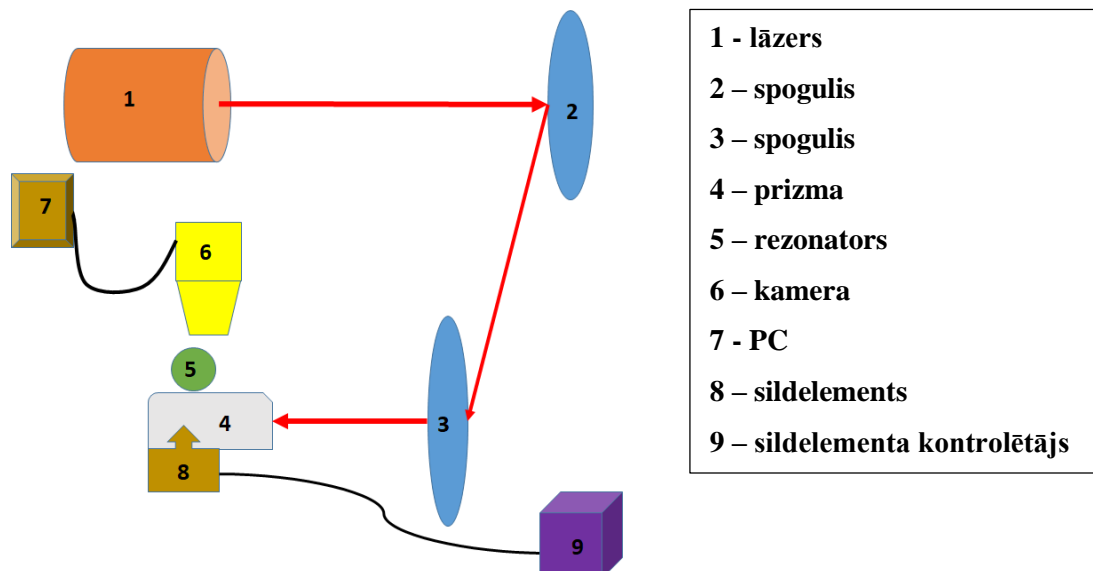
2.1.2 att. Sakausēta šķiedras gala rezonators kopā ar ‘Bangs Laboratories’ sfēriskās lodītēm ar vidējo diametru 83 μm.

2.1.1. No lodīšu spīdēšanas intensitātes atkarīgas rezonanses iegūšana

Rezonanses iegūšanai izmantojot intensitātes mērīšanas paņēmieni eksperimentā bija nepieciešams panākt temperatūras izmaiņas laikā kā arī specifisku gaismas cirkulāciju rezonatorā, ko panāca ar sasaistes prizmu. Praktiski to panāca izmantojot 3D printera (EATON 5S 750) sildelementu, kuru manuāli iestatot uz vienu fiksētu temperatūru, varēja mainīt visas sistēmas temperatūru.

2.2. Eksperimenta iekārta

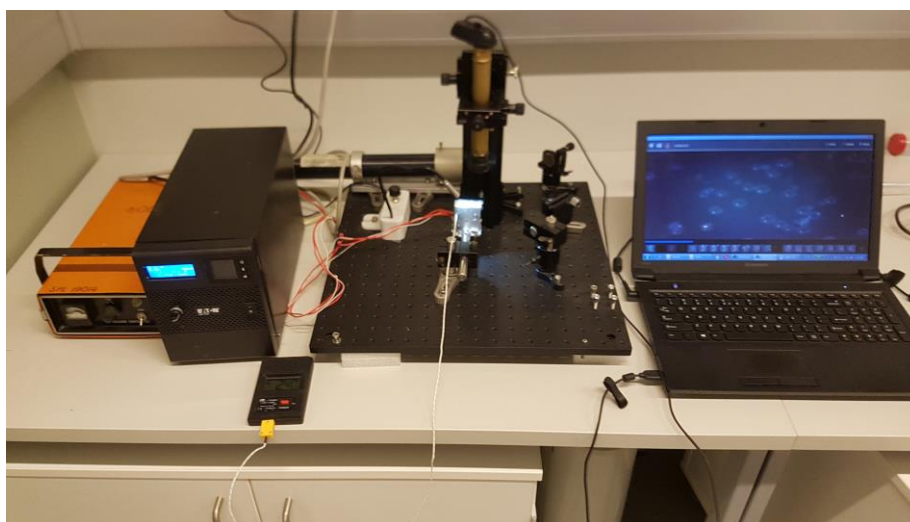
Darbā tika izmantots monoromātisks hēlija – neona lāzers ($\lambda=633\text{nm}$, jauda $\approx 3\text{mW}$) Lazera stars tika redirektēts uz prizmu izmantojot 2 firmas ‘Thorlabs’ kontrolējumus spoguļus. Prizmā stars tiek sašķelts, tādēļ viens no sašķeltajiem stariem spīd 90° lenķī no ieejas stara un otrs iziet cauri prizmai. Apgaismotā laukumiņa diametrs 5 mm. Rezonatoros gaisma nonāk apmaiņas ceļā kā aprakstīts teorijas aprakstā. Gaismas ievades sasaistes stiprumu šajā sistēmā nav iespējams optimizēt.



Attēls 2.2.1. Eksperimenta shēma.

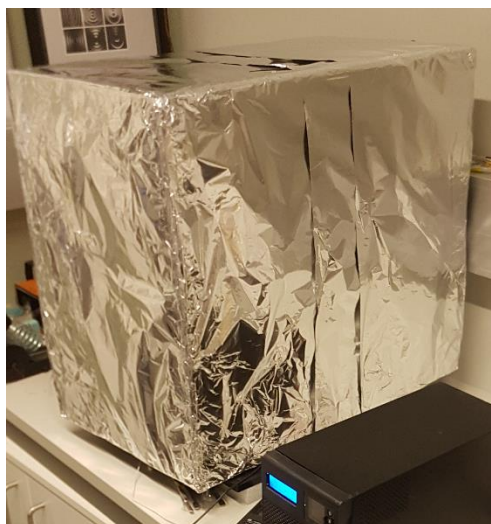
Tālāk visa sistēma tiek sildīta un monitorēta ar ‘Logitech’ kameru.

Eksperimentālo iekārtu sākotnēji izveidoja Dr.Hab.Phys.Uldis Bērziņš un Dr.Phys.Jānis Alnis, taču to vajadzēja uzlabot, galvenokārt atrodot vietu, kur ir maksimāli maz vibrācijas no ārējās vides, kas spētu negatīvi ietekmēt mērījumus.



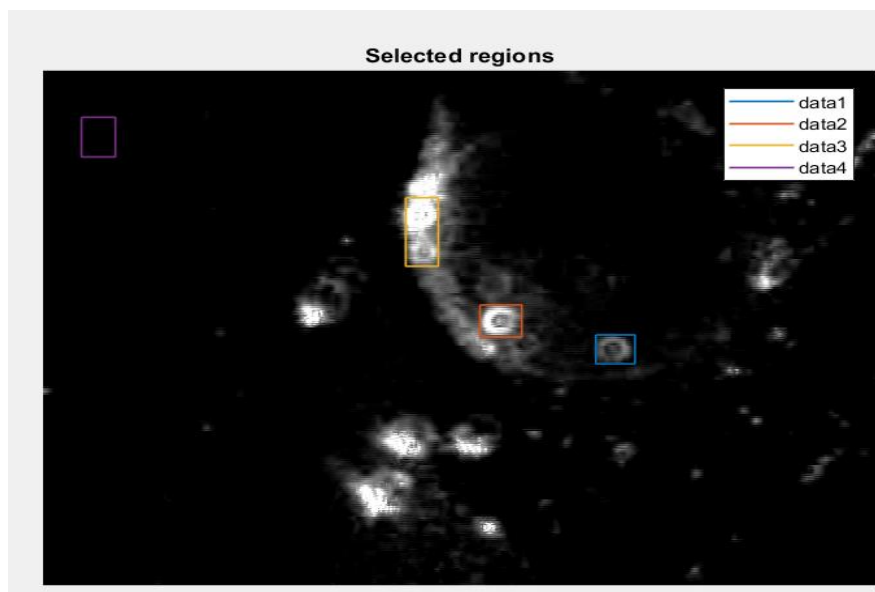
Attēls 2.2.2. Laboratorijas sistēma.

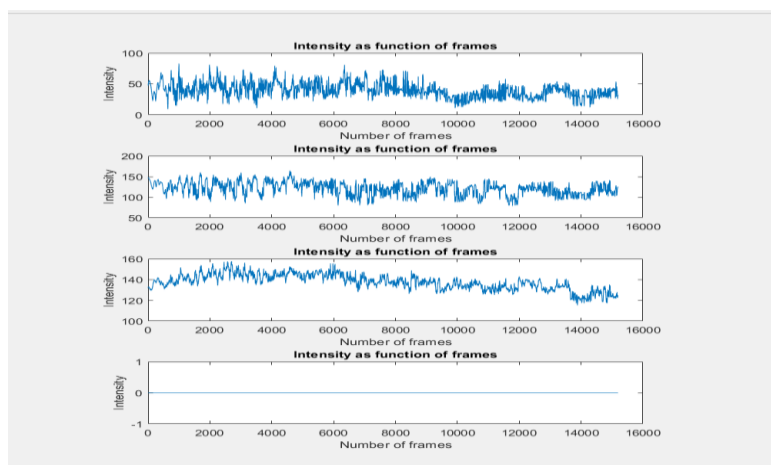
Tālāk bija nepieciešams izveidot kastei līdzīgu pārsegu, kas nelaistu sistēmā iekšā gaismu no apkārtējās vides (skatīt.attēlu 2.2.3). un noņemt dažādas gaisa plūsmas, kas rodas gaisa cirkulācijas dēļ.



Attēls 2.2.3. Sistēmas pārsegs gaismas un vēja plūsmas izolācijai.

Pēc tam tika izveidots MATLAB kods (skatīt 1.pielikumu) ar kura palīdzību var veikt intensitātes analīzes vadoties pēc laika. Intensitātes izšķirtspēja kodā tika fiksēta pie 15 kadri/minūtē kameras izšķirtspējas dēļ. Analīzēm tika izvēlēts kvadrātveidīgs atzīmēšanas veids, jo rezonatoriem, kas tika izmantoti eksperimentos nebijas izteikta viena forma (skatīt attēlu 2.2.4),



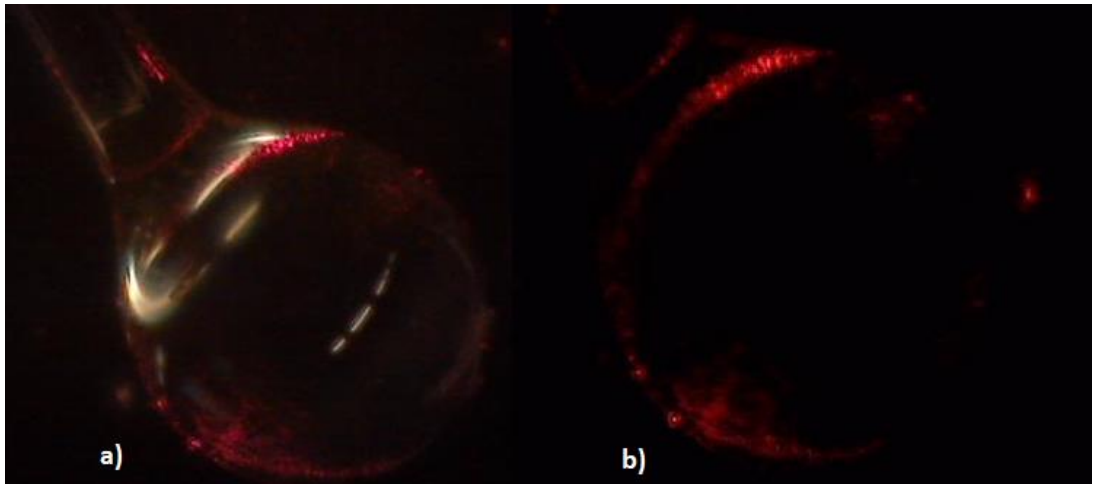


Attēls 2.2.4. Paraugs ar MATLAB pašrakstītās programmas datu ieguvei, attēlā redzams kvadrātais izvēles laukums datu ielasei un iegūtā vidējā intensitāte kvadrātā, atkarībā no laika, jeb ‘number of frames’.

lai gan ir iespējamas arī citas metodes ČGM mikrorezoantoru intensitātes monitorēšanai [24], piemēram uz viena rezonatora atzīmēt vairākus gredzenus, atsevišķu modu izdalīšanai, tomēr šīs metodes ir ļoti laikietilpīgas un sarežģītas.

2.3. Eksperimentu apraksti

Eksperimenta sākumā tika kalibrēts lāzers un panākts, ka kamerā var ieraudzīt pēc iespējas labāku, tuvu ekvatoriālo spīdējumu rezonatoros. Dažādu procesu rezultātā, piemēram, tas, ka rezonatoriem nebija perfekta sfēriska forma un to kvalitātes (Q) faktors bija mazāks kā teorētiskais, to spīdējums atšķīrās no ekvatoriālā (skatīt attēlu 2.3.1).



Attēls 2.3.1. Rezonatora spīdējums a) spīdinot nedaudz gaismu, lai var redzēt rezonatora kontūras b) reālais neekvatoriālais spīdējums tumsā.

Temperatūras mērījumiem tika vairākkārtīgi manuāli izmērīti un fiksēti sistēmas uzsilšanas un atdzišanas laiki, lai piedzītu vienādojumus, kur atkarīgi no sildelementa temperatūras var zināt sistēmas temperatūru. Termopāra ‘Lutrom’ TM-902C gals tika likts maksimāli tuvu rezonatoriem sistēmā. Apstrādājot datus (skatīt pielikumu 2) tika iegūti sekojošie sistēmas uzsilšanas vienādojumu:

- 1) Eaton 5SC 750 sildelementa (Nozzle) temperatūra 175⁰C

$$Y = 3E-05x^5 - 0.0023x^4 + 0.0679x^3 - 1.1142x^2 + 11.074x + 26.596$$

- 2) Eaton 5SC 750 sildelementa (Nozzle) temperatūra 150⁰C

$$Y = -8E-05x^5 + 0.0034x^4 - 0.0431x^3 - 0.0656x^2 + 6.0386x + 20.535$$

- 3) Sistēmas temperatūras atdzišanas vienādojums no 125⁰C

$$Y = -0.001x^5 + 0.0282x^4 - 0.2869x^3 + 1.0162x^2 + 2.8119x + 25.899$$

- 4) Eaton 5SC 750 sildelementa (Nozzle) temperatūra 110⁰C

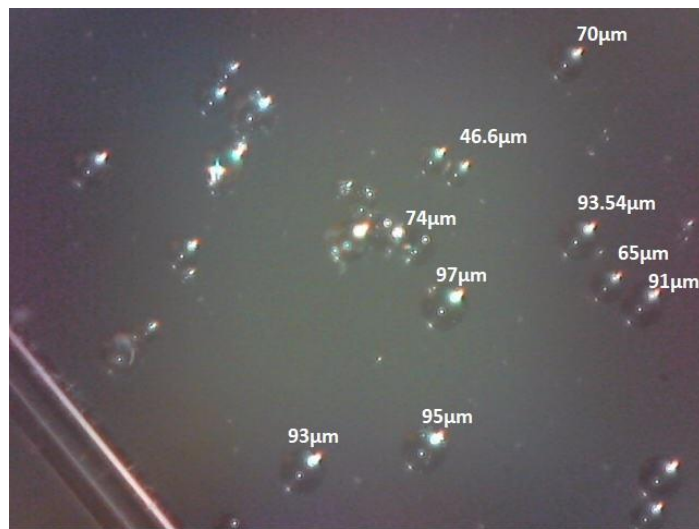
$$Y = -0.0003x^5 + 0.008x^4 - 0.0662x^3 + 0.0853x^2 + 2.4077x + 36.948$$

- 5) Sistēmas atdzišana no 70⁰C temperatūras uz laboratorijas temperatūru.

$$Y = 0.00005x^5 - 0.0011x^4 + 0.0173x^3 - 0.0297x^2 - 3.0757x + 70.032$$

Vienādojumos Y uzsilšanas funkciju un x apzīmē laiku minūtēs. Kā arī laboratorijas telpā vidējā temperatūra bija 21°C .

Lai kvalitatīvi iegūtu izmērus rezonatoriem par etalonu tika pieņemta stikla šķiedra, kurai bija fiksēts diametrs $125\ \mu\text{m}$. Paštaisīto rezonatoru gadījumā tā jau bija daļa no rezonatoru, 'Bangs laboratories' rezonatoru gadījumā uz prizmas tika uzlikta stiklašķiedra kā etalons (skatīt attēlu 2.3.2). Vadoties pēc tā izmantojot GIMP 2.0 programmu attēla pikseļi tika pielāgoti reālajam izmēram.

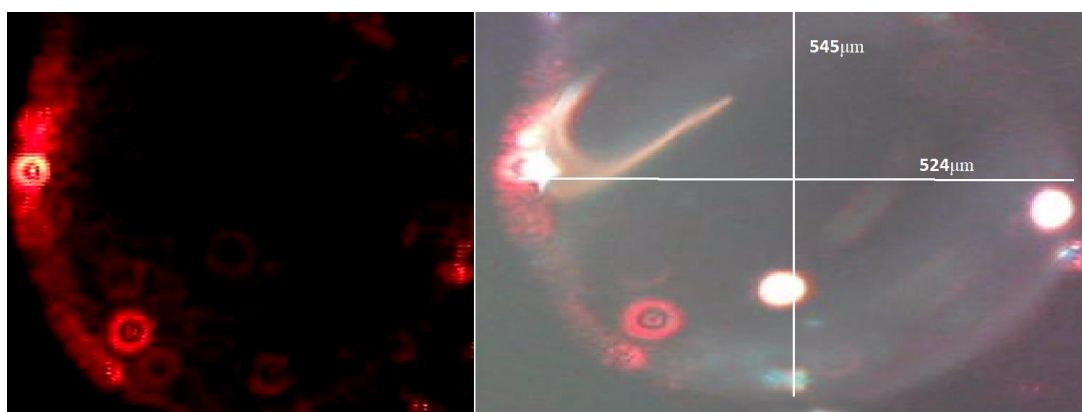


Attēls 2.3.2. 'Bangs Laboratories' rezonatori kuru izmēri noteikti pēc stikla šķiedras kuras diamters ir $125\ \mu\text{m}$.

3. REZULTĀTI

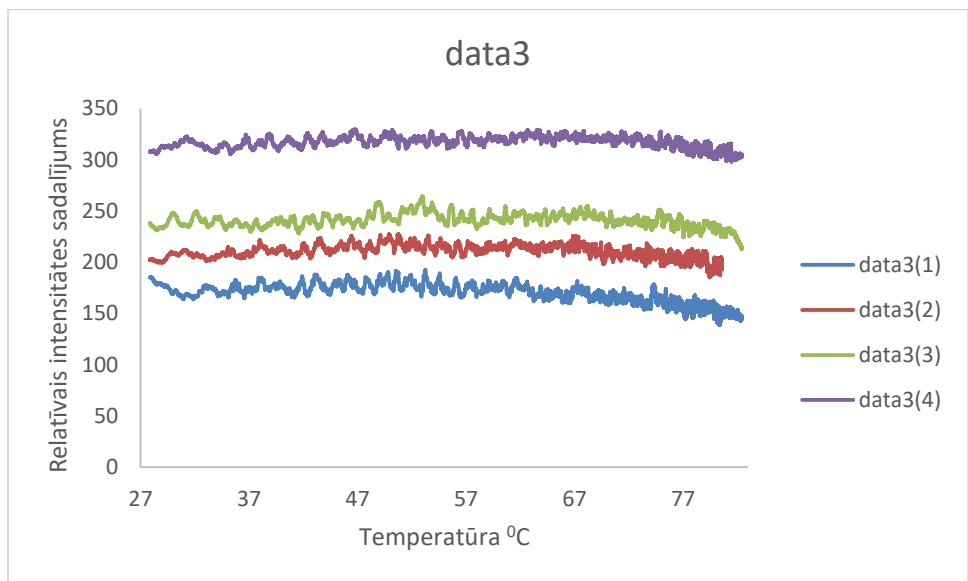
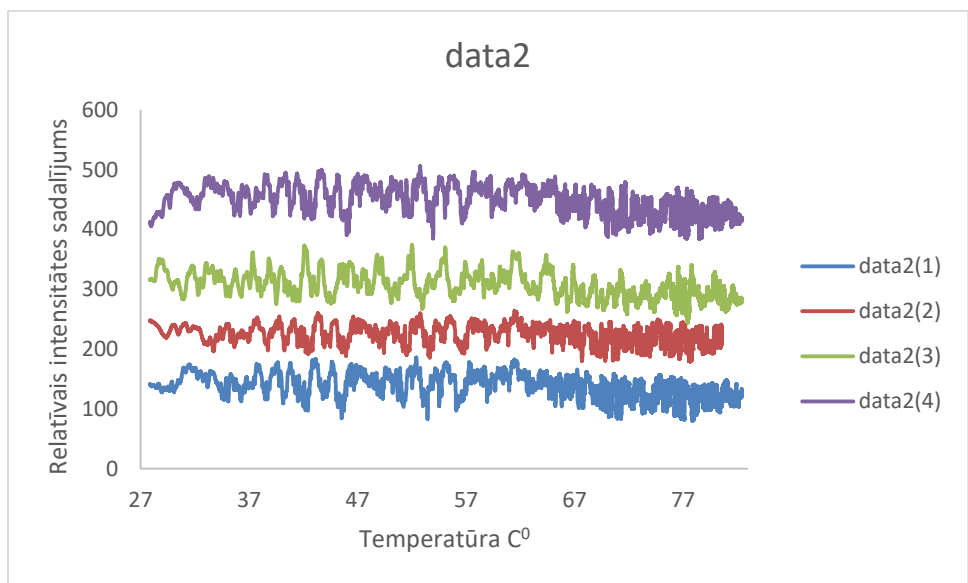
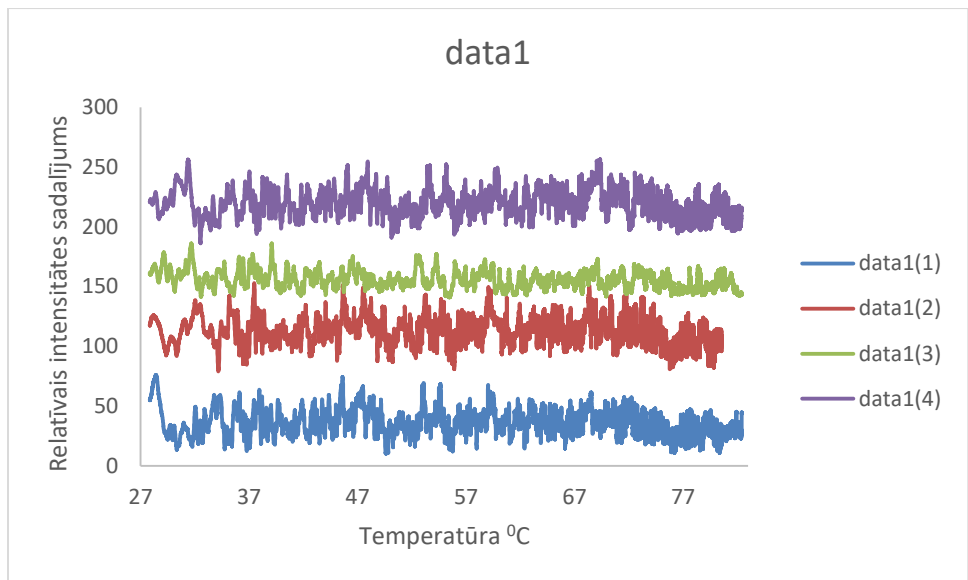
3.1. Rezonatoru sildīšana

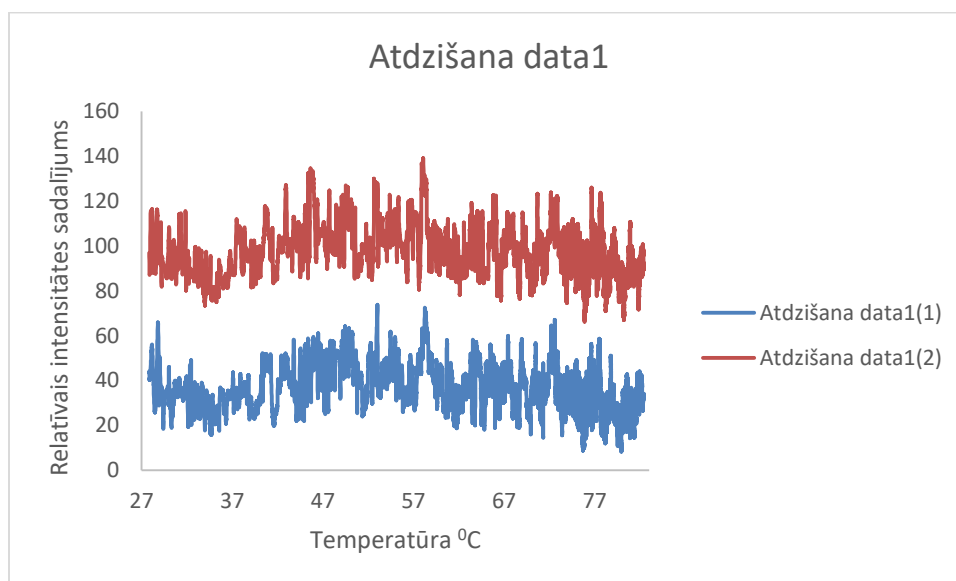
Izmantojot LU ASI laboratorijā taisītos rezonatorus sākotnēji tika meklēts un pārbaudīts vai izmantojot 633nm lāzeri, mainoties temperatūrām ir iespējams novērot rezonanses. Ar Logitech kameru tika ierakstīti aptuveni 20 min gari video materiāli kuros rezonatori tika karsēti no 30⁰C līdz 70⁰C. Par cik rezonatoriem nav perfekts ekvatoriāls spīdējums, tad tika izvēlētas atsevišķās modas, jo ņemot vidējo intensitāti rezonatorā modas viena otru vidējā intensitātes sadalījumā, tādējādi liedzot kvalitatīvi noteikt temperatūras izmaiņas (skatīt attēlu 3.1.1).



Attēls 3.1.1. LU ASI laboratorijas apstākļos taisītais rezonators, ar horizontālo diametru 542µm un vertikālo 545µm. Pa labi rezonatoru spīdējums pilnīgā tumsā, pa kreisi rezonators, kurš tiek apgaismots ar parasto gaismu un lāzeri, lai var redzēt rezonatora kontūras un spīdēšanas centrus.

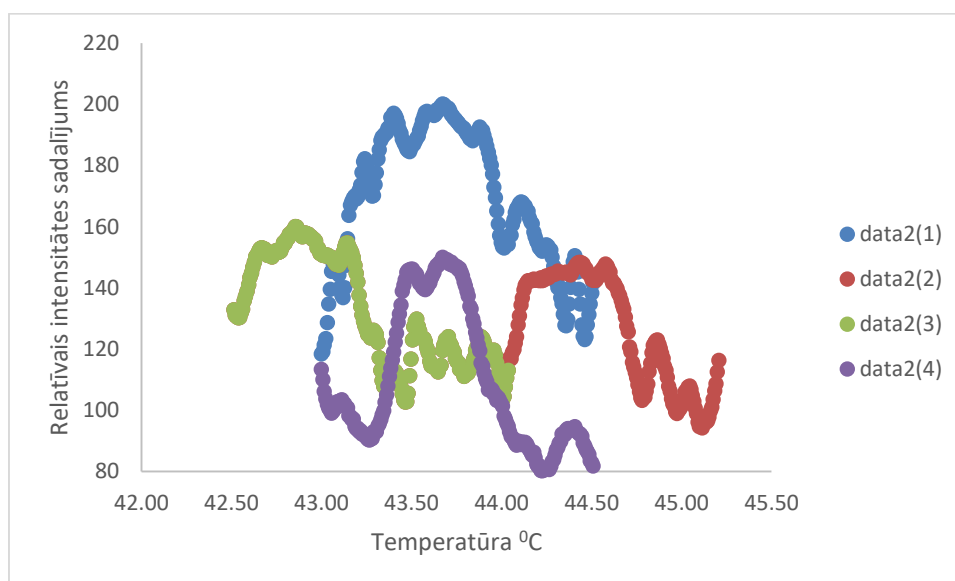
Par cik rezonators nav perfekts un tā iekšpusē veidojās izkliedes spīdēšanas centri, tad tālākai datu analīzei tika izvēlēti atsevišķi modu un centru gabali, kas tika atzīmēti un veikta intensitātes aplūkošana pēc laika (skatīt attēlu 2.2.4). Tālāk apstrādājot datus un izmantojot sistēmas uzsildīšanas vienādojumu pie 175⁰C liela sildelementa karstuma tika iegūti rezultāti, kas parāda spīdēšanas intensitātes atkarību no temperatūras (skatīt attēlu 3.1.2).

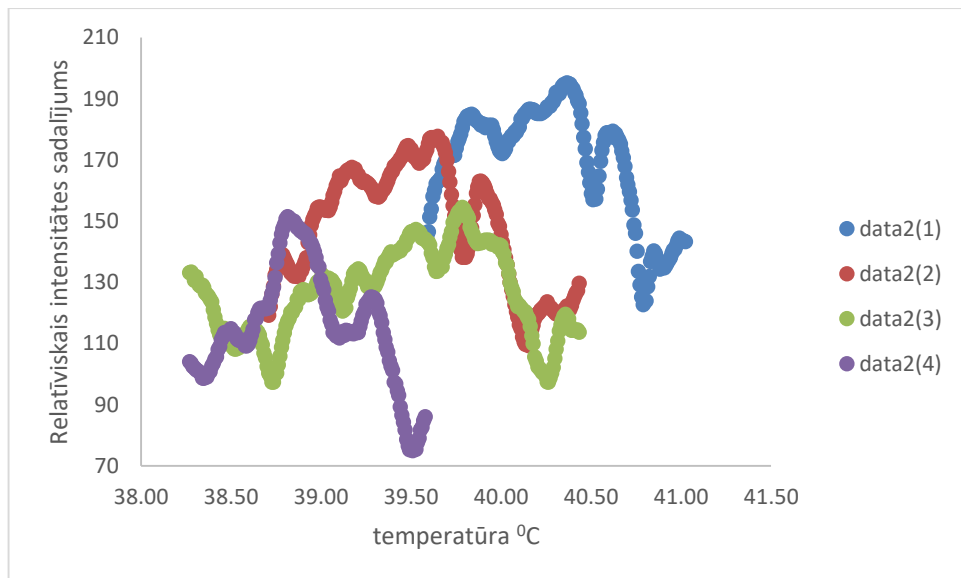




Attēls 3.1.2 LU ASI laboratorijas apstākļos taisītais rezonators, kuram ir izvēlētas dažādas modas un 4 reizes pēc kārtas sildītas no 28^oC līdz 81^oC, kur data1, data2, data3 ir izvēlētie kvadrāti un (1), (2), (3), (4) ir mērījumi un atdzišana ir atdzišana no 70^oC līdz 40^oC.

Virspusēji apskatot grafikus var redzēt, ka mainoties temperatūrai ir novērojama rezonanse, lai gan pirmajā grafikā lielās modas apzīmēšanas dēļ un izteiktās intensitātes, rezonanse ir salīdzinoši maza. Apskatot grafikus ar data1 un data2 var ļoti spilgti redzēt intensitātes izmaiņas, kā arī var novērot korelāciju starp dažādiem mērījumiem, kas norāda uz mērījumu atkārtojamību. Tālāk ir iespējams analizēt intensitātes pīķus kuriem ir visizteiktākā kolerācija un iegūt pietuvinātu intensitātes atkarību no temperatūras (skatīt attēlu 3.1.3).





Attēls 3.1.3 LU ASI laboratorijas taisīto rezonatoru pietuvinās intensitātes sadalījums pēc temperatūras.

Analizējot pietuvinātos grafikus var redzēt, ka vidēji ik pa 2 °C ir pamanāms intensitātes pīķis. Tomēr grafikā tie ir nobīdīti viens no otra, kas varētu liecināt par nelielām sistemātiskām kļūdām mērot temperatūru, piemēram video materiāls ir uzņemts ar pāris sekunžu nobīdi.

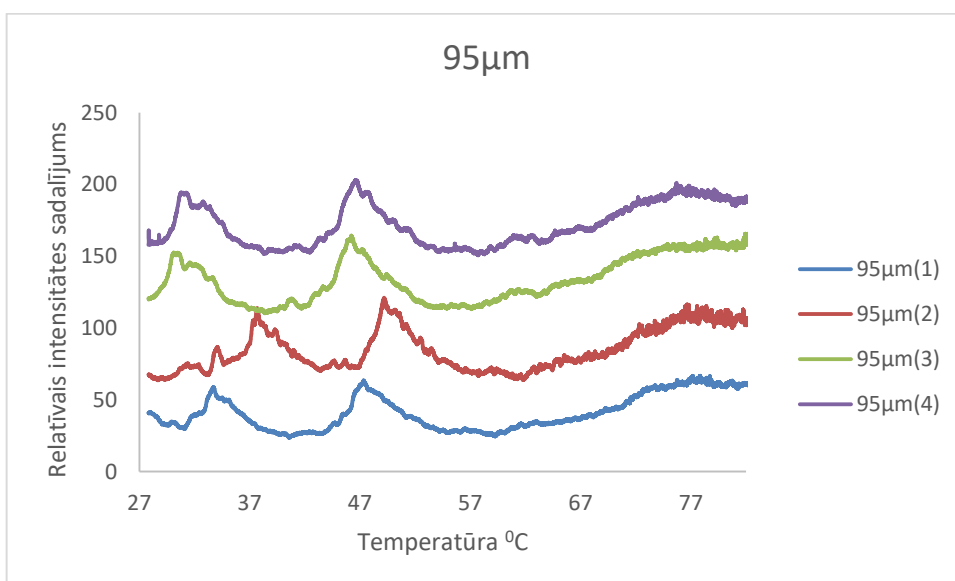
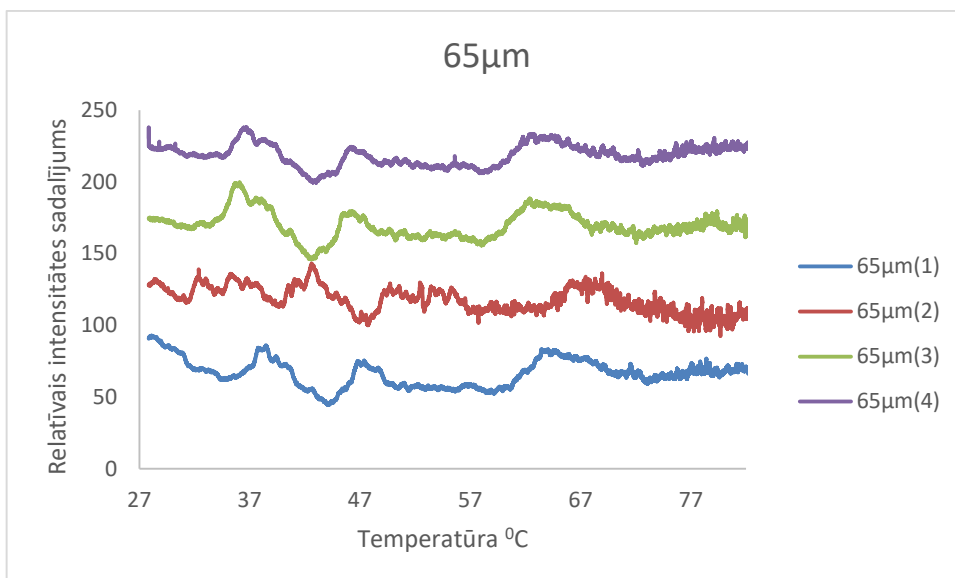
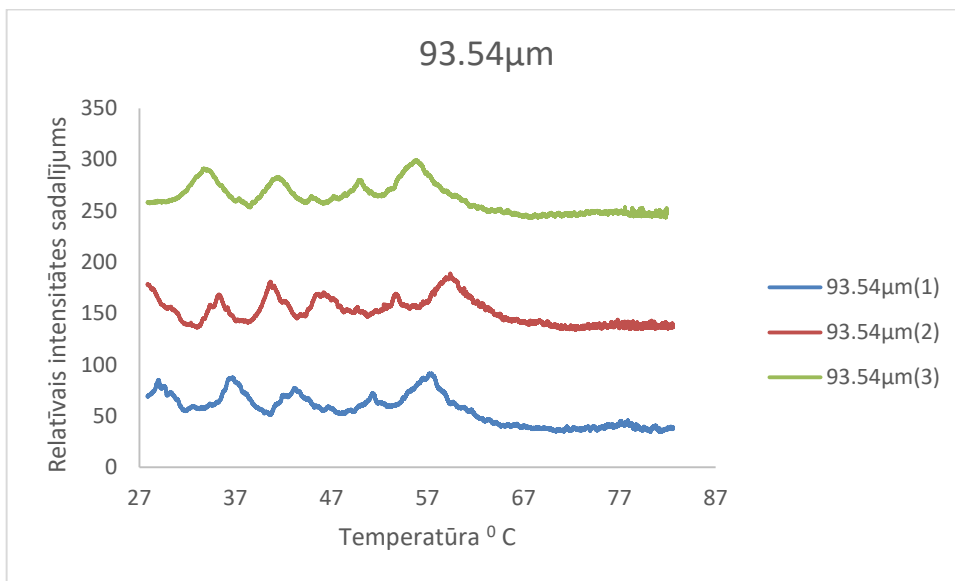
Šie dati parāda to, ka paštaisītos rezonatorus var izmantot temperatūras detektēšanā, bet tomēr būtu nepieciešams veikt detalizētākas analīzes saistībā ar to kādā veidā no prizmas tiek iespīdināta gaisma rezonatorā un kā dažādas modas interferē viena ar otru. Kā arī lielajos rezonatoros intensitātes izmaiņas temperatūras dēļ no

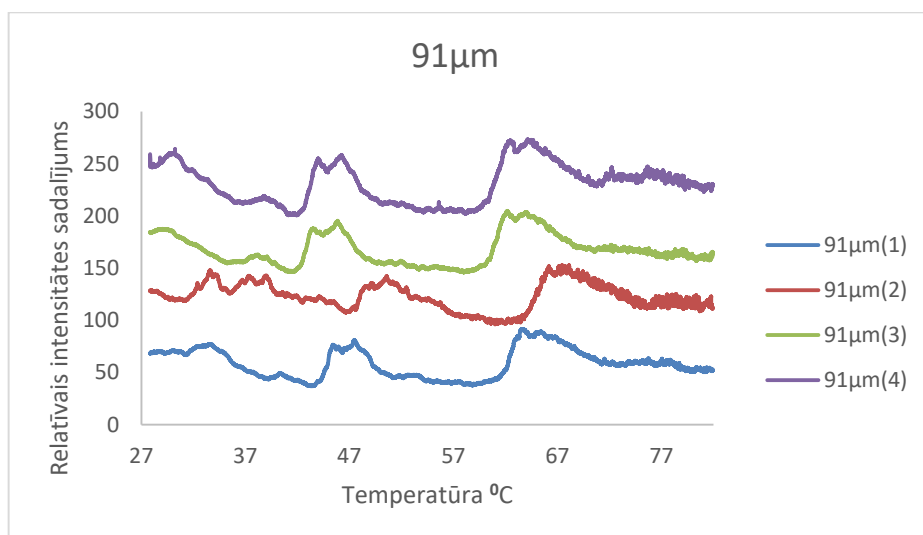
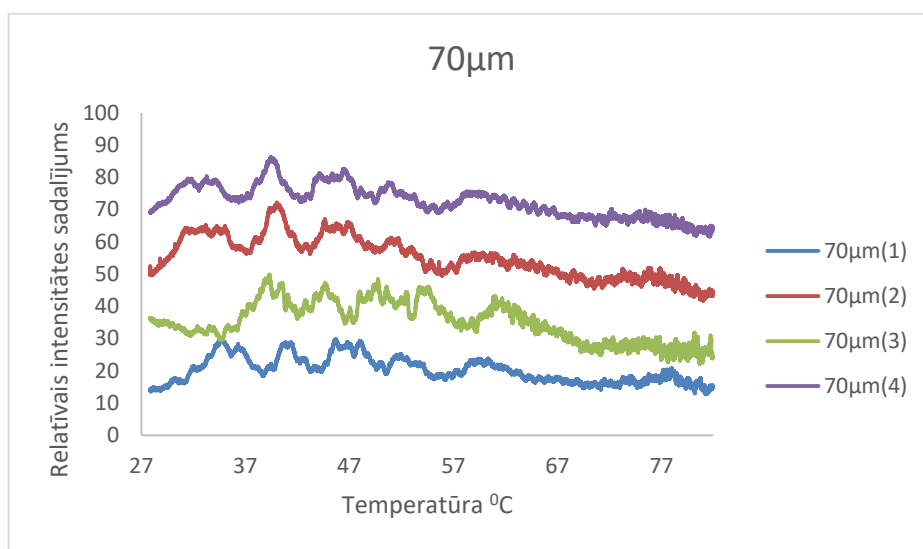
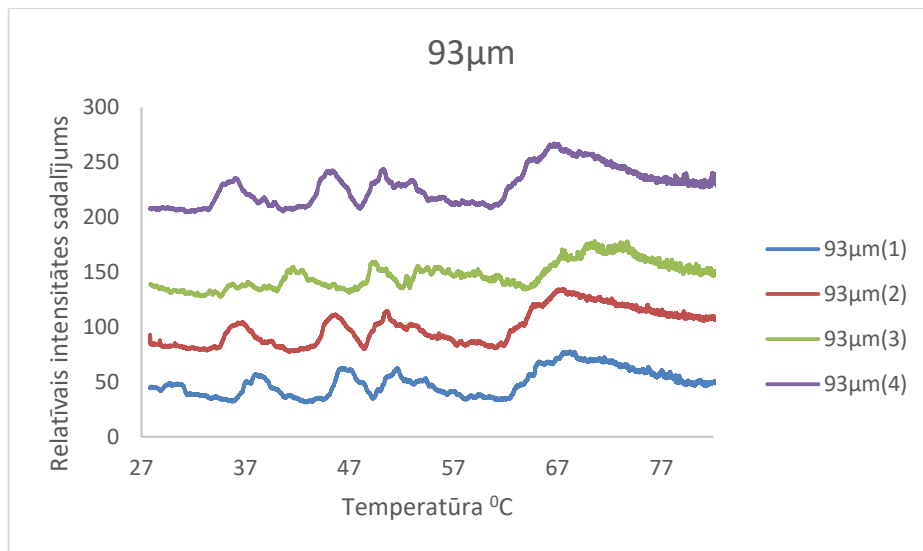
tiek ļoti ātri (skatīt 3. grafiku attēlā 3.1.1), limitējošais faktors šajā sistēmā bija Logitech kamera, kurai ir noteikti kadri sekundē.

Šo iemeslu dēļ lieli paštaisītie rezonatori pagaidām nav piemēroti reālam temperatūras sensoram, bet ir ļoti daudzsoļa lieta ko pētīt tālāk.

3.2. ‘Bangs laboratories’ rezonatoru karsēšana ar vidējo diametru 82µm

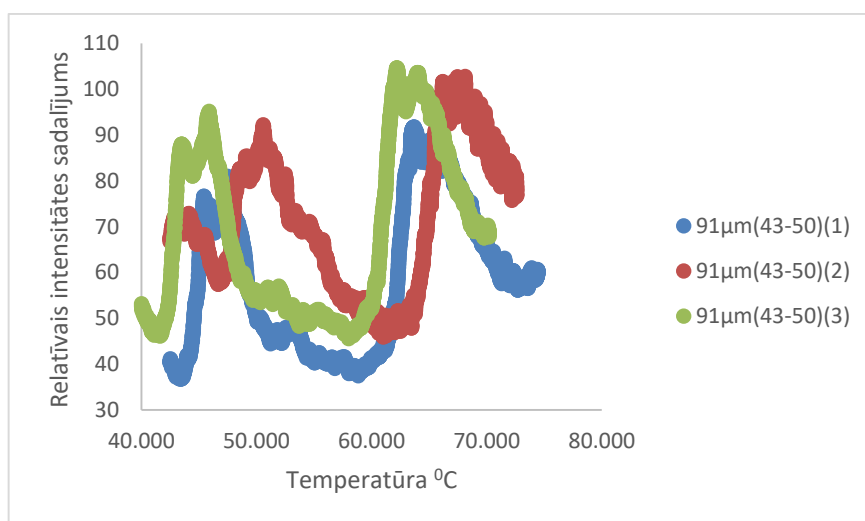
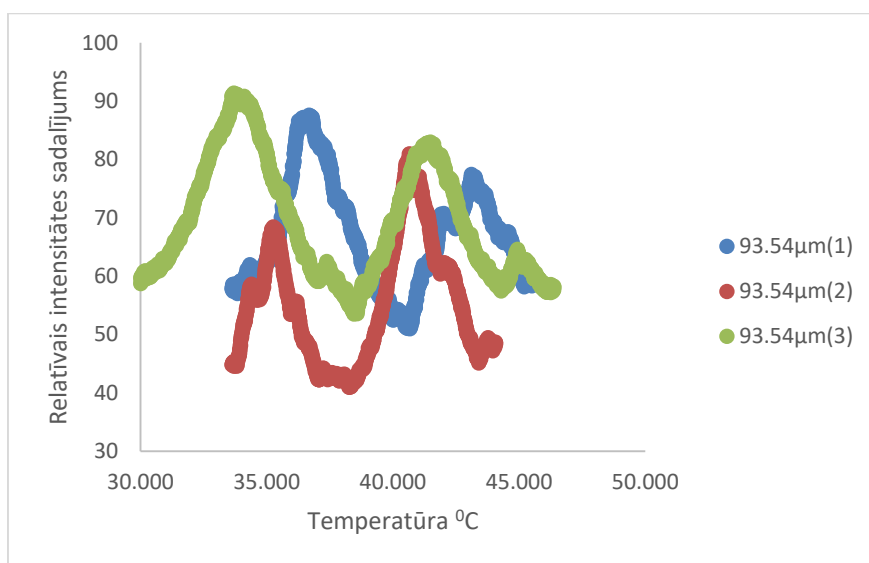
Optimālie rezonatori priekš temperatūras sensoriem izmantojot darbā aprakstīto sistēmu ir ‘Bangs laboratories’ lodīšu veida rezonatori ar vidējo diametru 82µm (skatīt attēlu 2.3.2). Tālāk visas attēlā nomērītās bumbiņas tika karsētas ar sildelementa temperatūru 175°C, ierakstīts video fails un dati apstrādāti ar MATLAB programmu.

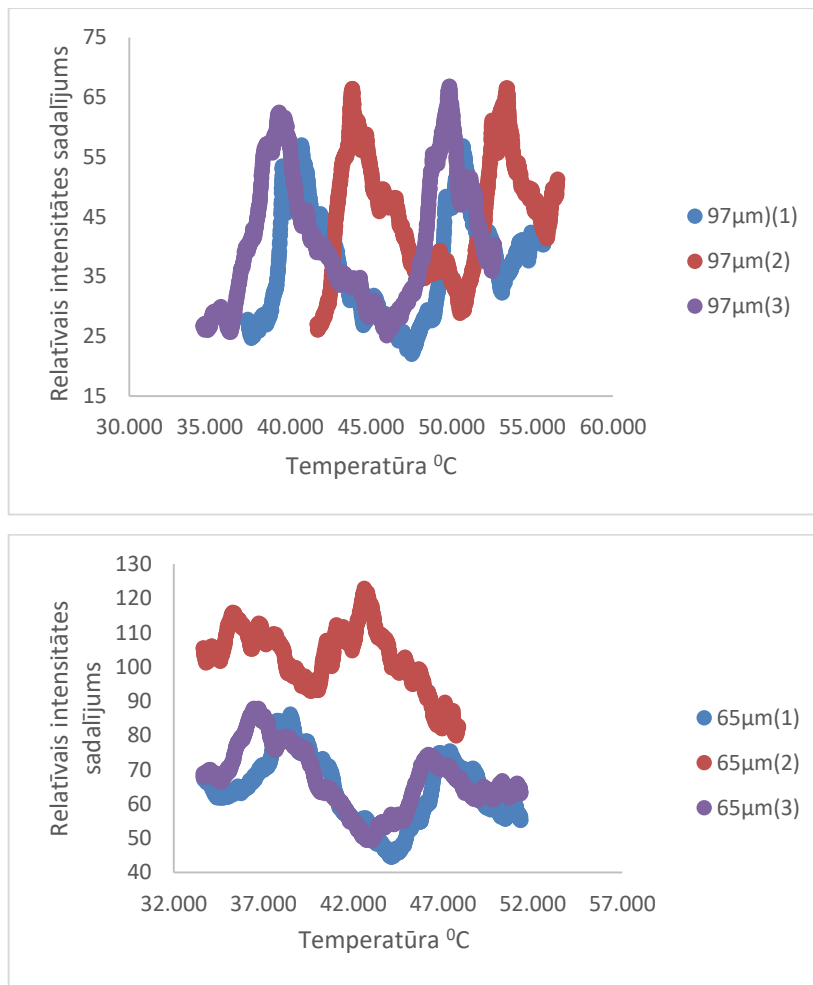




Attēls 3.2.1 'Bangs laboratories' rezonatori, kas 4 reizes pēc kārtas sildītas no 28⁰C līdz 81⁰C, kur lielums µm ir izvēlētie bumbiņu diametrs un (1), (2), (3), (4) sildīšanas reizes.

Pēc iegūtajiem datiem var novērot, ka ir izteiktas intensitātes izmaiņas rezonatoros pie noteiktām temperatūrām kā arī intensitāšu izmaiņas sakrīt, kas liecina par labu eksperimenta atkārtojamību. Rezultātos arī redzams tas, ka intensitātes izmaiņas notiek lēnāk kā paštaisīto rezonatoru gadījumā, kas norāda uz to ka iegūtie dati ir daudz kvalitatīvāki un labāk izmantojami tālākai apstrādei. Tomēr mērījumos var novērot to, ka ir lielākās intensitātes izmaiņas un pēc aptuveni 70°C , grafiks pārtop par taisni, kas norāda uz to ka lodītēs vairs nav novērojamas izteiktas temperatūras izmaiņas, kas nozīmē to ka temperatūra ir jāmaina pietiekoši lielā ātrumā. Tālāk tika paņemti un analizēti pīķi atsevišķiem mērījumiem (skatīt attēlu 3.2.2).





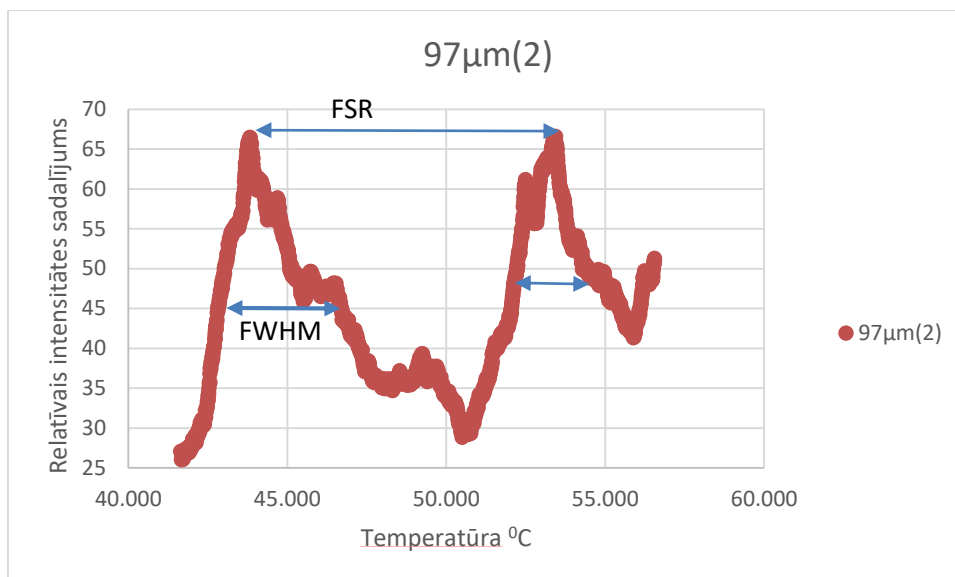
Attēls 3.2.1 'Bangs laboratories' rezonatoru periodiski atkārtojošies intensitātes pīki.

Arī šajos attēlos ir iespējams novērot pīķu nobīdes temperatūrā, kas daļēji saistītas ar cilvēcisko kļūdu veicot video ierakstus un nepilnībām eksperimentālajā iekārtā. Tomēr vislielāko nobīdi varēja veicināt tas, ka veicot atkārtotus mērījumus, sākotnēji polimēru rezonatoros bija iesūcies mitrums, kas pēc pirmā mērījuma iztvaiko [22].

Kā arī var novērot, ka daži pīķi sašķeļas, ko var izskaidrot ar dažādām rezonanses modām iekšā rezonatorā, kas nemainās vienmērīgi.

3.3. Datu apstrāde

Izmantojot divus pīķus līdzīgi kā Fabri-Pero interferometra gadījumā ir iespējams iegūt periodiski atkārtojošos spektrālo attālumu FSR un platumu FWHM (skatīt attēlu 3.3.1).



Attēls 3.3.1 Periodiski atkārtojošos pīķu piemērs, kur tiek atzīmēts FSR = 9 °C un FWHM = 3.6 °C intrvālā (41.5°C -50.5°C).

Tālāk tika aprēķināti vidējie FSR un FWHM lodītēm un sastādīta tabula (skatīt tabulu 3.3.1)

Tabula 3.3.1.

| 97μm | FSR | FWHM | 91μm | FSR | FWHM |
|---------|------|------|------|------|------|
| | 10.2 | 2.3 | | 18.1 | 4.2 |
| | 10.0 | 2.1 | 18.2 | 4.0 | |
| | 9.6 | 2.4 | 17.0 | 4.6 | |
| 93.54μm | FSR | FWHM | 65μm | FSR | FWHM |
| | 7.4 | 2.4 | | 9.7 | 2.2 |
| | 10.0 | 1.6 | | 8.9 | 2.2 |
| | 5.7 | 1.4 | 7.3 | 1.7 | |
| 93μm | FSR | FWHM | 70μm | FSR | FWHM |
| | 9.4 | 2.3 | | 6.0 | 1.5 |
| | 7.9 | 2.0 | | 5.8 | 1.8 |
| | 8.4 | 2.8 | 5.4 | 1.5 | |

Tālāk izmantojot tabulā dotos datus tos var ievietot formulās [24] , kā arī gaismas laušanas koeficients polimetilakriālam pie 633nm ir 1.49 [20]

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{f_{opt}}{\Delta f} \quad (18)$$

$$Finesse = \frac{FSR}{FWHM} = \frac{c}{2\pi Rn} \quad (19)$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -(\alpha + \beta)FWHM \quad (20)$$

Un tiek aprēķināta frekvences izmaiņa, jeb Δf , (skatīt tabulu 3.3.2).

Tabula 3.3.2.

Aprēķinātās frekvences izmaiņas GHz

| $\Delta f_{97\mu\text{m}}(\text{GHz})$ | $\Delta f_{91\mu\text{m}}(\text{GHz})$ | $\Delta f_{93.54\mu\text{m}}(\text{GHz})$ | $\Delta f_{65\mu\text{m}}(\text{GHz})$ | $\Delta f_{93\mu\text{m}}(\text{GHz})$ | $\Delta f_{70\mu\text{m}}(\text{GHz})$ |
|--|--|---|--|--|--|
| 1.5 | 1.6 | 2.2 | 2.2 | 1.7 | 2.1 |
| 1.4 | 1.5 | 1.1 | 2.5 | 1.8 | 2.6 |
| 1.6 | 1.9 | 1.7 | 2.3 | 2.3 | 2.4 |

Izmantojot frekvences izmaiņas var aprēķināt Q – faktoru (skatīt tabulu 3.3.3)

Tabula 3.3.3.

Aprēķinātie Q faktori

| $Q_{97\mu\text{m}}$ | $Q_{91\mu\text{m}}$ | $Q_{93.54\mu\text{m}}$ | $Q_{65\mu\text{m}}$ | $Q_{93\mu\text{m}}$ | $Q_{70\mu\text{m}}$ |
|---------------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 3203.3 | 2911.8 | 2109.0 | 2165.8 | 2844.2 | 2286.2 |
| 3491.9 | 3097.2 | 4287.5 | 1908.1 | 2705.8 | 1844.5 |
| 2888.8 | 2473.1 | 2774.6 | 2090.3 | 2026.1 | 1966.7 |

Q faktors konkrētajām lodītēm svārstās no 10^3 līdz 10^4 [24] un tas ir ļoti atkarīgs no dažādiem ārējiem un iekšējiem (industriāliem) apstākļiem.

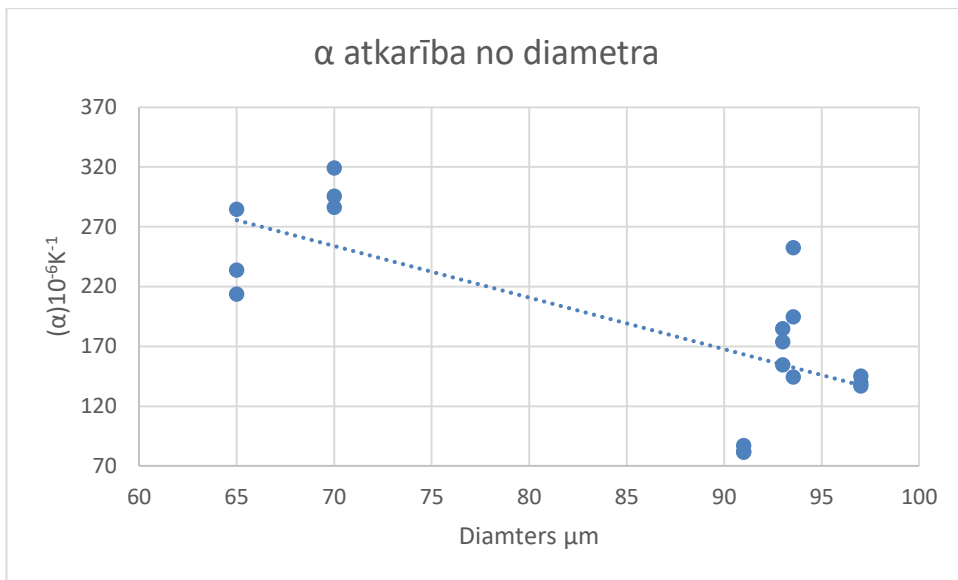
Tālāk tiek noskaidrots kopīgais $(\alpha+\beta)$ koeficientu un salīdzināts ar [21], kur α ir 70-78 (10^{-6}K^{-1}). Par cik optiskais koeficients β mainās atkarībā no viļņa garuma un temperatūras, kā arī salīdzinot ar α ir mazs (aptuveni $2 - 6 \cdot 10^{-6} \frac{dn}{dT} \text{K}^{-1}$)[25], tad to ignorē (skatīt tabulu 3.3.4).

Tabula 3.3.4.

Aprēķinātie $(\alpha+\beta) 10^{-6}$ koeficienti

| $(\alpha)_{97\mu\text{m}}$ | $(\alpha)_{91\mu\text{m}}$ | $(\alpha)_{93.54\mu\text{m}}$ | $(\alpha)_{65\mu\text{m}}$ | $(\alpha)_{93\mu\text{m}}$ | $(\alpha)_{70\mu\text{m}}$ |
|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 136.9 | 82.1 | 194.9 | 213.9 | 154.8 | 286.4 |
| 139.4 | 81.6 | 144.5 | 234.0 | 185.1 | 295.8 |
| 145.2 | 87.3 | 252.7 | 284.8 | 174.1 | 319.4 |

Tālāk rezultāti tiek sakopoti un izveidots (α) atkarībā no lodītes diametra (skatīt attēlu 3.3.2).



Attēls 3.3.2 Izmērītā termiskās izplešanās koeficienta α atkarība no ČGM rezonatora diametra μm .

Analizējot datus ir iespējams pamanīt, ka termiskais izplešanās koeficients (α) palielinās samazinoties ČGM rezonatoru diametram un lielu rezonatoru gadījumā tiecas uz literatūrā [21] norādīto vērtību.

SECINĀJUMI

Eksperimentos tika izmantoti ČGM mikrorezonatori ar atšķirīgiem izmēriem un tika novērots, ka elementi ir jūtīgi pret temperatūras izmaiņām, rezultējoties periodiskām spīdēšanas intensitātes izmaiņām.

Q faktors bija viens no galvenajiem noteicošajiem faktoriem, kvalitatīvas sistēmas integrēšanai praktiskajās iekārtās. Pēc rezultātu analīzes var secināt, ka jo zemāks Q faktors, jo mazāk modas cirkulē iekšā ČGM rezonatorā, kas atvieglo modu detektēšanu un novērošanu. Tomēr jo lielāks Q faktors, jo lielāka ČGM mikrorezonatora jūtība pret dažādām izmaiņām.

Pēc rezultātu apstrādes var secināt, ka ČGM mikrorezonatori ir piemēroti, lai tos varētu integrēt sistēmās, kas tālāk mērītu, vai kalibrētu temperatūras izmaiņas, tomēr darbojoša prototipa izstrādei ir nepieciešams vēl laiks gan materiālu izpētei, gan detalizētai modu analīzei, kas atkarīga no Q faktora. Kā arī darbojoša prototipa galīgai izstrādei būtu nepieciešams pilnveidot sistēmu, precīzākai datu iegūšanai.

Šajā bakalaura darbā iegūtie rezultāti ir līdzīgi kā literatūrā publicētie [22,23,24], bet literatūra iegūta lielāka precizitāte, jo vienlaicīgi apstrādāti signāli līdz pat 20 ČGM mikrorezonatoru lodītēm.

PATEICĪBAS

Vēlos pateikties darba vadītājam Jānim Alnim par iespēju jau no pirmās dienas patstāvīgi darboties laboratorijā un palīdzēt gan ar dažādām tehniskām problēmām, gan teorētiskām. Kā arī liels paldies Ingai Bricei, Aigaram Atvaram, Uldim Bērziņam, Kristianam Dragunam, Kārlim Grundšteinam un Dainai Dambergai par dažāda veida atbalstu darbojoties kvantu optikas laboratorijās.

Kā arī paldies LZP projektam Nr.lzp-2018/1-0510 “Optiski čukstošās galerijas modu mikrorezonatoru sensori” par finansējumu.

Pateicos savai ģimenei un draugiem gan par morālo gan finansiālo atbalstu.

ATSAUCES

- [1] Lan Yang *Whispering gallery mode microresonators* seminārs Vašingtonas Universitātē (2017).
- [2] Rayleigh L., *Philos. Mag.*, 20 (1910) 1001.
- [3] Rayleigh L., *Scientific Papers*, 5 (1912) 617.
- [4] Matthew R. Foreman, Jon D. Swaim, and Frank Vollmer *Whispering gallery mode sensor* Optical Society of America (2015).
- [5] Van De Hulst H., *Optics of Spherical Particles* (Drukkerij J.F. Duwaer) 1946.
- [6] Born M. and Wolf E., *Principles of Optics* (Pergamon) 1980.
- [7] Kerker, *The Scattering of Light, and other Electro-Magnetic Radiation* (Academic Press) 1969.
- [8] Lissillour F., Messager D., Stephan G. and Feron P, *Opt. Lett.*, 26 (2001) 1051.
- [9] Feron P, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 29 (2004) 279.
- [10] G. C. Righini, Y. Dumeige P. Feron, M. Ferrari *Whispering gallery mode microresonators: Fundamentals and applications* Laser and Photonics reviews (2010).
- [11] [Green, Estill I. *The Story of Q* American Scientist. (1995) 584–594.
- [12] Gorodetsky M., Savchenkov A. and Ilchenko V., *Opt. Lett.*, 21 (1996) 453.
- [13] Weiss D., Sandoghdar V., Hare J., Lefevre-Seguin V., Raimond J.-M. and Haroche S., *Optics Lett.*, 20 (1995) 1835.
- [14] Vernooy D., Ilchenko V., Mabuchi H., Streed E. and Kimble H., *Opt. Lett.*, 23 (1998) 247.
- [15] Gorodetsky M., Pryamikov A. and Ilchenko. *Rayleigh scattering in high-Q microspheres*, *Opt. Soc. Am. B*, 17 (2000) 1051.
- [16] Dumeige Y, Trebaol S, Ghis, a L, Tavernier H. and Feron P, *Determination of coupling regime of high-Q resonators and optical gain of highly selective amplifiers* , Optical Society of America , 25 (2008) 2073.
- [17] Braginsky V., Gorodetsky M. and Ilchenko V., *Phys. Lett. A*, *Quality-factor and nonlinear properties of optical whispering-gallery modes* , 137 (1989) 393.
- [18] Gorodetsky M. L. and Ilchenko V. S Optical Society of America B, *Rayleigh scattering in high-Q microspheres*,16 (1999) 147.
- [19] D.Keng Ph.d Thesis *Whispering Gallery mode bioparticle sensing and transport* Polytechnic Institute of New York University 2009.
- [20] N. Sultanova, S. Kasarova and I. Nikolov. *Dispersion properties of optical polymers*, *Acta Physica Polonica A* 116, 585-587 (2009).
- [21] Li-Hui Wang C. L. Choy Roger S. Porter .*Effects of moisture on the thermal expansion of poly(methylmethacrylate)*) *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition* banner (1983).

- [22] Ann Britt Petermann, Thomas Hildebrandt, Uwe Morgner, Bernhard Wilhelm Roth, and Merve Meinhardt-Wollweber. *Polymer Based Whispering Gallery Mode Humidity Sensor* Sensors(Basel) 2018.
- [23] Ann Britt Petermann, Maher Rezem, Bernhard Roth, Uwe Morgner, Merve Meinhardt-Wollweber. *Surface-immobilized whispering gallery mode resonator spheres for optical sensing* Sensors and Actuators A (2016).
- [24] Ann Britt Petermann, Arthur Varkentin, Bernhard Roth, Uwe Morgner, Merve Meinhardt-Wollweber. *All-polymer whispering gallery mode sensor system* Optical Society of America(2016).
- [25] Zhiyi Zhang, Ping Zhao, Peng Lin, Fengguo Sun. *Thermo-optic coefficients of polymers for optical waveguide applications* Polymer Volume 47, Issue 14, (2006).

PIELIKUMS

1. Pielikums

MATLAB pašrakstītais kods

```
clc;
name='sss.mp4';
folder = fileparts(which(name));
movieFullName = fullfile(folder, name);
videoObject = VideoReader(movieFullName);
NOF = videoObject.NumberOfFrames;
F1=read(videoObject,1);
Flm=F1(:,:,1);
imshow(Flm);
h1 = imrect;
pos = round(wait(h1));
x1 = pos(1); y1 = pos(2); wd1 = pos(3); hg1 = pos(4);
h2 = imrect;
pos = round(wait(h2));
x2 = pos(1); y2 = pos(2); wd2 = pos(3); hg2 = pos(4);
h3 = imrect;
pos = round(wait(h3));
x3 = pos(1); y3 = pos(2); wd3 = pos(3); hg3 = pos(4);
h4 = imrect;
pos = round(wait(h4));
x4 = pos(1); y4 = pos(2); wd4 = pos(3); hg4 = pos(4);
for n = 1 : NOF
    thisFrame=read(videoObject, n);
    roi1 = thisFrame(y1+(0:hg1),x1+(0:wd1));    %1 R, 2 G, 3 B
    roi2 = thisFrame(y2+(0:hg2),x2+(0:wd2));
    roi3 = thisFrame(y3+(0:hg3),x3+(0:wd3));
    roi4 = thisFrame(y4+(0:hg4),x4+(0:wd4));
    Int1(n)=mean2(roi1);
    Int2(n)=mean2(roi2);
    Int3(n)=mean2(roi3);
    Int4(n)=mean2(roi4);
end
subplot(4,2,2);
plot(Int1),title('Intensity as function of frames'),xlabel('Number of
frames'),ylabel('Intensity');
subplot(4,2,4);
plot(Int2),title('Intensity as function of frames'),xlabel('Number of
frames'),ylabel('Intensity');
```

```

subplot(4,2,6);
plot(Int3),title('Intensity as function of frames'),xlabel('Number of
frames'),ylabel('Intensity');
subplot(4,2,8);
plot(Int4),title('Intensity as function of frames'),xlabel('Number of
frames'),ylabel('Intensity');
subplot(1,2,1);
imshow(F1m);
title('Selected regions');
legend('6203056 atdzisana pec fena.avi','15fps');
insertText(F1m,[x1+20 y1-20],'1.','BoxOpacity',0.4,'FontSize',18);
insertText(F1m,[x2+20 y2-20],'2.','BoxOpacity',0.4,'FontSize',18);
insertText(F1m,[x3+20 y3-20],'3.','BoxOpacity',0.4,'FontSize',18);
insertText(F1m,[x4+20 y4-20],'4.','BoxOpacity',0.4,'FontSize',18);

hold on;
axis on;

x1c = [x1, x1+wd1, x1+wd1, x1, x1];
y1c = [y1, y1, y1+hg1, y1+hg1, y1];
x2c = [x2, x2+wd2, x2+wd2, x2, x2];
y2c = [y2, y2, y2+hg2, y2+hg2, y2];
x3c = [x3, x3+wd3, x3+wd3, x3, x3];
y3c = [y3, y3, y3+hg3, y3+hg3, y3];
x4c = [x4, x4+wd4, x4+wd4, x4, x4];
y4c = [y4, y4, y4+hg4, y4+hg4, y4];

plot(x1c, y1c, 'linewidth', 1); % Plots with original units and size.
plot(x2c, y2c, 'linewidth', 1);
plot(x3c, y3c, 'linewidth', 1);
plot(x4c, y4c, 'linewidth', 1);

axis off

shg

save('pqfile.txt','Int1','-ascii')
type('pqfile.txt')

```

2. Pielikums

Daļa no sistēmas temperatūras kalibrācijai izmantotiem dati:

| Nozzle | Laiks(min) | Temperatūra °C | Nozzle | Laiks(min) | Temperatūra °C |
|--------|------------|-------------------|--------|------------|----------------|
| 0 | 0 | 70 | 175 | 0 | 26.8 |
| | 0.5 | 68.5 | | 0.5 | 31.8 |
| | 1 | 67 | | 1 | 36.3 |
| | 1.5 | 65.4 | | 1.5 | 40.8 |
| | 2 | 63.8 | | 2 | 44.9 |
| | 2.5 | 62.5 | | 2.5 | 48.4 |

| | | | | |
|--|------|------|------|------|
| | 3 | 60.9 | 3 | 51.5 |
| | 3.5 | 59.5 | 3.5 | 54.4 |
| | 4 | 58.1 | 4 | 57 |
| | 4.5 | 56.7 | 4.5 | 59.2 |
| | 5 | 55.4 | 5 | 61.2 |
| | 5.5 | 54.3 | 5.5 | 63 |
| | 6 | 53.1 | 6 | 64.8 |
| | 6.5 | 51.7 | 6.5 | 66.4 |
| | 7 | 50.9 | 7 | 67.8 |
| | 7.5 | 49.7 | 7.5 | 69.2 |
| | 8 | 48.8 | 8 | 70.3 |
| | 8.5 | 47.8 | 8.5 | 71.3 |
| | 9 | 46.8 | 9 | 72.3 |
| | 9.5 | 45.9 | 9.5 | 73.3 |
| | 10 | 45.1 | 10 | 74.1 |
| | 10.5 | 44.3 | 10.5 | 74.9 |
| | 11 | 43.6 | 11 | 75.6 |
| | 11.5 | 42.7 | 11.5 | 76.3 |
| | 12 | 42 | 12 | 76.8 |
| | 12.5 | 41.4 | 12.5 | 77.4 |
| | 13 | 40.7 | 13 | 78 |
| | 13.5 | 40.1 | 13.5 | 78.4 |
| | 14 | 39.5 | 14 | 78.9 |
| | 14.5 | 38.9 | 14.5 | 79.2 |
| | 15 | 38.3 | 15 | 79.6 |
| | 15.5 | 37.8 | 15.5 | 80.1 |
| | 16 | 37.3 | 16 | 80.3 |
| | | | 16.5 | 80.7 |
| | | | 17 | 81 |
| | | | 17.5 | 81.3 |
| | | | 18 | 81.5 |

Bakalaura darbs „Čukstošas galerijas modas rezonatoru temperatūras sensors” izstrādāts Latvijas Universitātes **Fizikas, matemātikas un optometrijas** fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: _____ /Roberts Berķis/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Jānis Alnis _____ 29.05.2019.

Recenzents: Dr. Phys. Juris Prikulis

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā 29.05.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: _____

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

_____2019. prot. Nr. _____, vērtējums _____

Komisijas sekretārs: _____