

TARTU ÜLIKOOLI
LOODUS-JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND
Füüsika instituut

Kaisa Katre Lepmets

Halltoonlitograafia rakendamine värvainega dopeeritud
Fabry-Pérot tüüpi optiliste resonatorite valmistamiseks

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Materjaliteadus

Juhendajad:
Siim Pikker, PhD
Tauno Kahro, MSc

Tartu 2025

Halltoonlitograafia rakendamine värvainega dopeeritud Fabry-Pérot tüüpi optiliste resonatorite valmistamiseks

Fabry-Pérot (FP) optilisi resonatoreid kasutatakse paljudes erinevates rakendusvaldkondades: kaamerate filtritena, sensoorikas, spektroskoopias, fotoonikas ja ka tugevseotud seisundite uurimiseks. Siin töös valmistati FP resonatorid ja värvainega dopeeritud FP resonatorid halltoonlitograafia meetodil, varieerides halltoonide väärtusi, doose ja defookusi. Uuriti objektide parameetreid, et teada saada, kas halltoonlitograafiat kasutades on võimalik valmistada värvainega dopeeritud FP resonatoreid ja kas neil on tugevseotud seisundite omadused/nähtused.

Märksõnad: Fabry-Pérot resonatorid, halltoonlitograafia, nanostruktuuride valmistamine.

CERCS kood ja nimetus: P200 Elektromagnetism, optika, akustika; P260 Tahke aine: elektrooniline struktuur, elektrilised, magneetilised ja optilised omadused, ülijuhtivus, magnetresonants, spektroskoopia; T150 Materjalitehnoloogia; T151 Optilised materjalid

Applying grayscale-lithography to produce dye-doped Fabry-Pérot type optical resonators

Fabry-Pérot (FP) optical resonators are used in various application areas: as camera filters, in sensors, spectroscopy, photonics, and for studying strongly coupled states. In this study, FP resonators and dye-doped FP resonators were fabricated using grayscale lithography, varying grayscale values, doses, and defocus. Object parameters were investigated to determine if grayscale lithography can be used for preparing dye-doped FP resonators and whether they exhibit properties or phenomena related to strongly coupled states.

Keywords: Fabry-Pérot resonators, grayscale lithography, fabricating nanostructures.

CERCS codes and names: P200 Electromagnetism, optics, acoustics; P260 Condensed matter: electronic structure, electrical, magnetic and optical properties, supraconductors, magnetic resonance, relaxation, spectroscopy; T150 Material technology; T151 Optical materials

Sisukord

Kasutatud lühendite loetelu	5
1. Sissejuhatus	6
2. Teooria.....	8
2.1 Fabry-Pérot resonaator	8
2.2 Fotolitograafia ja halltoonlitograafia	9
2.3 Resonaatori dopeerimine värvainega	10
3. Eksperimentaalne osa	12
3.1 Al peeglite elektronkiir-aurustamine	12
3.2 Objektide valmistamine halltoonlitograafiaga.....	13
3.2.1 Halltoonide disain	13
3.2.2 Fotoresistiga katmine	14
3.2.3 Fotoresisti dopeerimine värvainega ja selle kasutamine	15
3.2.4 Fotoresisti UV-kiiritamine ja ilmutamine	16
4. Objektide karakteriseerimine	17
4.1 Pinnakvaliteedi uurimine	17
4.2 FP resonatorite kihipaksuste mõõtmised	17
4.3 Optilised mõõtmised	17
5. Tulemused.....	18
5.1 Al kihipaksus	18
5.2 Doositesti kalibreerimise resonatorite analüüs	18
5.2.1 OM ja elektronmikroskoobi pildid.....	18
5.2.2 Kihipaksuste hindamine profilomeetriga	24
5.2.3 Resonaatorite läbilaskvusspektrid.....	25
5.3 Värvainega dopeeritud fotoresist	27
5.3.1 Ellipsomeetriline analüüs	27
5.3.2 Neeldumine	28
5.3.3 Kiirgus ja ergastus.....	30
5.4 Värvainega dopeeritud resonatorite analüüs	30
5.4.1 Dopeeritud fotoresistiga FP resonatorite OM tulemused.....	31
5.4.2 Läbilaskvus-ja peegeldumisspektrid	31
5.5 Värvainega dopeerimata ja dopeeritud resonatorite profilomeetria.....	32
6. Kokkuvõte	34

7. Summary.....	35
8. Kasutatud kirjandus	36
Lisad	39
Lisa 1. Halltoonides disain, inverteerimine ning tulemused fotoresistis	39
Lisa 2. Kasutatud masinate pildid.....	40
Lisa 3. Lisa T mõõtmised.....	42
Lisa 4. Dopeeritud resonatorite profilomeetria	43
Lisa 5. Ergastuse graafik	44
Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	45

Kasutatud lühendite loetelu

FP – Fabry-Pérot

RGB – halltoon punane-roheline-sinine (ingl. k. *red-green-blue*) skaalas

R6G – Rodamiin 6G

EBE – elektronkiir aurustamine (ingl. k. *electron beam evaporation*)

OM – optiline mikroskoop

T – läbilaskvus

1. Sissejuhatus

Seebimullide, õlilaikude ja näiteks mõningate liblikatiibade värvused on õhukeste kilede põhjustatud valguse interferentsi tulemus [1,2]. Interferentsipõhiste värvide teket põhjustab kile paksus ja selle murdumisnäitaja, mis tekitavad konstruktiivset või destruktivist interferencesi teatud lainepikkustel. Kasutades seda põhimõtet, saame valmistada interferenceselemente nii suurtele pindadele kui ka mikro- ja nanostruktuuridega miniatuursetele seadmetele – need omakorda võivad pakkuda suurt kasu erinevates rakendustes. [3]

Hiljuti on näiteks värvitrükkirakendustes saanud palju tähelepanu õhukeste, metallkilede baasil loodud interferencesivärvid. Kasutades halltoon (ingl. k. *grayscale lithography*) foto- ja elektronkiirlitograafia meetodeid ning poolläbipaistvate peeglitena töötavaid õhukesi metallikihte koos eralduskihtidega, on võimalik trükkida kõrge eraldusvõimega mikroskoopilisi pikseleid ja nendest koostada värvipilte. Seda on eelnevalt demonstreeritud näiteks töös Yang *et al.*, 2017 [4]. Nad kasutasid Fabry-Pérot optilisi resonatoreid, mille valmistasid halltoonlitograafiaga, et uurida uusi võimalusi trükkimises, kuid sellel meetodil on ka palju muid potentsiaalseid kasutusalasid – kaamerate filtritena [5,6], sensorikas [7,8], spektroskoopias [6] ja näiteks laserite ehitusel [9]. Fabry-Pérot resonatorid on olulised uued tööriistad ka fotoonika tööstusmaastikul [10] ja sensoritena mitteinvasiivses spektroskoopias molekulide kontsentratsioonide uurimisel [11].

Bakalaureusetöö eesmärk oli uurida, kas on võimalik kasutada maskivaba halltoon fotolitograafiat värvainega tugevasti dopeeritud Fabry-Pérot tüüpi resonatorite valmistamiseks. Selliseid resonatoreid oleks võimalik kasutada optiliste tugevseotud süsteemide uurimisel. See aitaks antud valdkonnas oluliselt vähendada katseobjektide valmistamiseks kuluvat aega ja leiaks tõenäoliselt rakendust ka tööstuses.

Kuigi halltoon fotolitograafia on suhteliselt levinud litograafia meetod [12,13] ja seda kasutatakse ka Fabry-Pérot tüüpi resonatorite valmistamiseks [14], ei ole meie teada seda meetodit kasutatud, et valmistada Fabry-Pérot tüüpi resonatoritel põhinevate optiliste tugevseotud süsteemide uurimisobjekte [15,16]. Ilmselt ei ole seda kasutatud, kuna on oht, et värvainega dopeerimine rikub ära halltoonlitograafias kasutatava fotopolümeeri omadused. Siinse töö aluseks on aga hüpotees, et kui värvaine on fotopolümeeri lahuses lahustuv, ei reageeri ja ei neela oluliselt valgust fotolitograafias kasutatava valgusallika lainepikkusel, siis võiks olla võimalik valmistada kümneid, sadu ja lausa tuhandeid tugevseotud süsteemide katseobjekte ühel alusel oluliselt väiksema ajaga.

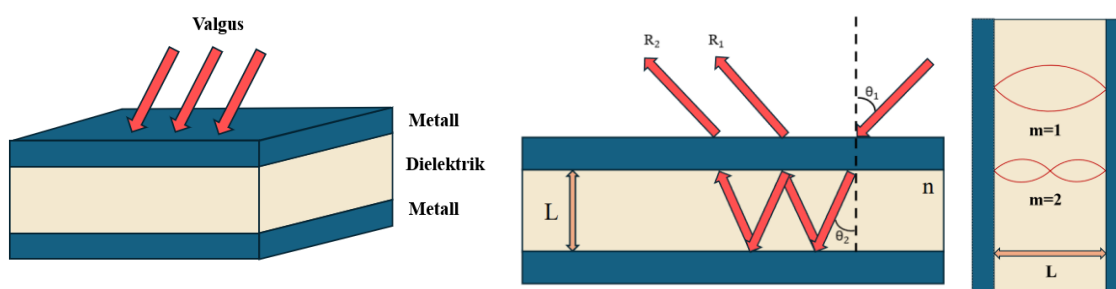
Bakalaureusetöö ülesehitus on järgmine: peale esimese peatüki sissejuhatust antakse teises peatükis teoreetiline ülevaade Fabry-Pérot resonaatoritest ja halltoonlitograafiast, mida nende valmistamiseks kasutati. Kolmandas peatükis on kirjeldatud läbi viidud katsetusi halltoonlitograafia abil Fabry-Pérot optiliste resonaatorite valmistamiseks ning resonaatorite värvainega dopeerimist. Seejärel räägitakse neljandas peatükis resonaatorite uurimisest erinevate meetoditega nende omaduste kirjeldamiseks ja edasiste arenduste jaoks ning viiendas peatükis on tulemuste analüüsimine ja tähenduslik arutelu.

2. Teooria

Käesolevas peatükis kirjeldatakse lõputöö üldiseid teoreetilisi aluseid, mille põhiline eesmärk on anda ülevaade töös kasutatud mõistetest ja meetoditest. Selgitatakse, mis on Fabry-Pérot resonator ja halltoonlitograafia ning kuidas värvainega dopeerimine litograafiaprotsessi mõjutab.

2.1 Fabry-Pérot resonator

Fabry-Pérot (edaspidi FP) resonator (ehk interferomeeter) on tasapinnaline optiline õõs (ingl. k. *cavity*), mis koosneb kahest poolläbipaistvast peeglist, mis asetsevad teineteise kohal suhteliselt lühikesel (meie rakendustes mõne lainepikkuse) kaugusel. Selline resonator töötab interferentsi ja resonantsi põhimõtete alusel (vt joonis 1) ning laseb valgust läbi ainult siis, kui valguslained konstruktiivselt interfereeruvad, mis juhtub teatud resonantsi tingimusel.



Joonis 1. Fabry-Pérot resonatori ehitust selgitav skeem [17].

Täpsemalt öeldes koosneb FP interferomeeter kahest poolläbipaistvast peeglist, mis on üksteise suhtes paralleelselt paigutatud. Nende peeglite vahel on dielektriku kiht, mis moodustab koos peeglitega optilise õõnsuse, kus valguslained saavad edasi-tagasi peegelduda. Kui valguskiir siseneb õõnde, peegeldub see peeglite vahel mitu korda. Peegeldunud lained interfereeruvad omavahel kas konstruktiivselt või destruktiivselt. Konstruktiivne interferents toimub siis, kui peegeldunud lained tugevdavad üksteist, luues teatud lainepikkustel tugeva intensiivsusega seisulaine moode (maksimume). Destruktiivne interferents viib teisel lainepikkustel elektromagnetvälja intensiivsuse vähenemiseni, moodide kustutamiseni ja miinimumide tekkeni. Joonisel 1 tähistabki L peeglite vahekaugust, n dielektriku murdumisnäitajat, m resonantsmoodi numbrit, θ valguse langemisnurka ja R valguse kiiri.

Resonantsi tingimuseks on juhul, kui valgus siseneb resonatorisse täisnurga all, faasierinevus täisarv korda 2π edasi-tagasi teekonna jaoks õõnsuse sees, vt valem 1:

$$2nL \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi m \Rightarrow 2nL = m\lambda \quad (1)$$

kus n on murdumisnäitaja (õõnsusesisesel materjalil), L on õõnsuse paksus ehk peeglite vahekaugus, λ on valguse lainepikkus (vaakumis) ja m on resonantsmoodi number (täisarv). Juhul, kui valgus siseneb resonaatorisse nurga alt, muutub tingimus (valem 2):

$$2nL\cos\theta = m\lambda \quad (2)$$

kus θ on valguse sisenemisnurk.

Dielektriku kihi paksus (peeglite vaheline kaugus) määrab, millised valguse lainepikkused resonantsiks sobivad. Ainult kindlad lainepikkused, mis rahuldavad konstruktiivse interferentsi tingimust (pool lainepikkust korrutatuna täisarvuga) lastakse selle kaudu läbi. Eksisteerivad kindlad resonantslainepikkused, ehk seisulained, mis sõltuvad resonaatori paksusest ja murdumisnäitajast. Muud resonaatorile langevad lainepikkused peamiselt peegelduvad. Peeglite vahel paikneva dielektrilise kile paksust reguleerides saab selektiivselt läbi lasta konkreetseid lainepikkusi.

Füüsika instituudis pakuvad FP tüüpi resonaatorid huvi aine ja valguse vastasmõju uurimisel ja seda eriti just tugeva vastasmõju korral, kus tekivad uued hübriidsed seisundid – nn polaritonid, mida uurib kaasprofessor Siim Pikker. Lisaks sellele on miniatuursete selektiivse läbilaskvusega FP resonaatorite vastu huvi üles näidanud arvutusliku kuva kaasprofessori Vijayakumar Anandi uurimisrühm (ERA CHIPR Chair), kuna need võivad kasulikuks osutada uudeste kuvasüsteemide loomisel.

2.2 Fotolitograafia ja halltoonlitograafia

Klassikaline UV valgusel baseeruv fotolitograafia on mustrite ülekandmise meetod jooniselt (disainilt) alusel olevale kiirgustundlikule polümeerile (fotoresistile). Sõltuvalt resisti tüübist (positiivne või negatiivne) muutub see UV-valguse toimel ilmutuslahuses lahustuvaks või mittelahustuvaks. Ilmutamise tulemusel tekib fotoresistist kujutis, mis koosneb pinnal aladest, kus fotoresist on alles, või eemaldatud – seda meetodit kutsutakse binaarseks litograafiaks. Kiiritamise allika järgi tehakse vahet lisaks veelioon- ja elektronkiirlitograafial. Käesolevas töös vaadeldakse fotolitograafiat (kiirgusallikas: UV-LED, lainepikkusega 390 nm).

Kaasaegsetes fotolitograafia seadmetes (maskivaba fotolitograafia, kasutatud ka käesolevas töös), pole vajadust optilistele füüsilistele fotomaskidele, vaid digitaalne kujutis kantakse alusel olevale resistile üle mikropeeglite abil (ingl. k. *digital micromirror device*, DMD). Peeglid (sajad või tuhanded) on suurusjärgus 3–5 μm , mida adresseeritakse eraldi, vastavalt digitaalse joonise pikslitele. Näiteks piksel 1 korral jõuab UV-LED valgus mikropeegli abil resistini, piksel 0 korral mitte. Selliselt on võimalik digitaalne joonis resistile üle kanda nõ pikslite kaupa. [18–20]

Halltoonlitograafia on litograafia meetod, mida kasutatakse 2,5D mikro- ja nanostruktuuride loomiseks, kus on vajalik varieeruv (foto-või elektronkiirlitograafia)resisti paksus. Selle meetodi abil saab valmistada astmelise või sujuva kõrgusprofiiliga struktuure, mis on olulised näiteks optilistes elementides või mikrofluidikas. [21]

Litograafiamaski kujutis esitatakse halltoonides: must värv tähistab kiiritamata ala, erinevad halltoonid osalist kiiritamist ja valge toon maksimaalset kiiritamist. Tänu osalisele (foto)resisti kiiritamisele saadaksegi erinevad paksusastmed, mis aga ei pruugi jaotuda lineaarselt. Inverteerimine tähendab joonisel olevate värvide ümberpööramist (must valgeks ja vastupidi). Vt lisadest nr 9.1 jooniselist selgitust.

Halltoonide korral pannakse mikropeeglid kiirelt sisse-välja lülituma (sõltuvalt halltooni väärtusest), mis võimaldab nüüd osaliselt resisti kiiritada. Peale ilmutamist luuaksegi astmeline resisti kõrgusprofiil [12,13,22,23]. Peale resisti ilmutamist on võimalik seda edasi töödelda kas söövitamise või metaliseerimise abil.

2.3 Resonaatori dopeerimine värvainega

FP resonaatoreid kasutatakse tihti füüsikas ja keemias, uurimaks valguse ja aine vastasmõju efekte nn tugevsidestatud süsteemides (ingl. k. *strongly coupled systems*). Nendes süsteemides sidestatakse aine ergastused (nt. eksitoniid, foononiid) nendega samal energial/sagedusel/lainepikkusel resonantsis olevate valgusväljadega, mille käigus aine ergastused segunevad (hübriidiseeruvad) valgusega ning tekivad uut tüüpi ergastused ehk nn polaritoniid. Polaritoniidel on hulgaliselt potentsiaalseid rakendusi ja nad on tänapäeval väga suure teadusliku huvi all. [9,15]

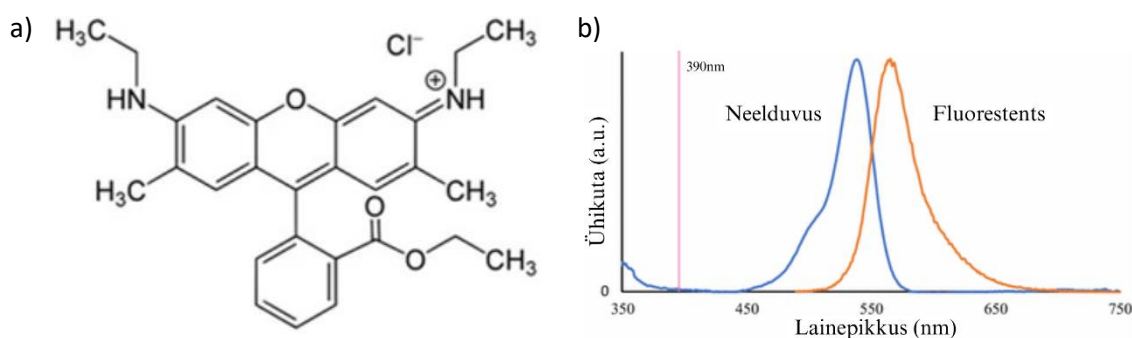
FP resonaatori värvainega dopeerimisel tekivad valguse ja aine ergastuste (värvaine molekulaarsed eksitoniid) omavahelise tugeva interaktsiooni käigus uued hübriidseisundiid, nn polaritoniid. Polaritoniidel võivad säilida nii aine kui ka elektromagnetlainete omadused ja nad on segu vastavatest osakestest/ergastustest. Hübriidseisund tekib siis, kui energiavahetuse kiirus valguse ja aine vahel (elektromagnetvälja poolt aine ergastamine) on suurem kui süsteemi muud valguse ja keskkonna interaktsioonidest põhjustatud energia kaod – seda nimetatakse tugevseotud seisundiiks. [16,24,25]

Värvaine tekitab tugevseotud seisundi, kui piisaval hulgal värvimolekule neelavad valgust ja moodustavad eksitone – elektron-auk paare, mis saavad omakorda valgusega seostuda. FP õõnsus hoiab endas footoneid (valgust), mis juhul kui nende energia ühtib eksitonide energiaga (värvaine neeldumisspektri maksimumiga), segunevad ja tekitavad tugevseotud seisundi. Selles süsteemis vahendatakse energiat eksitoni ja footoni vahel

kiiremini kui üheski kaoprotsessis ja selle käigus tekivad polaritonid. [26,27] Saavutamaks piisava tugevusega interaktsiooni kasutatakse resonatoris tavaliselt polümeere, mida on väga suurel hulgal tugevasti neelava värvainega dopeeritud (tavaliselt ca 10–22 massiprotsenti). [28]

Selle bakalaureustöö üheks eesmärgiks on uurida, kas selliseid tugevasti dopeeritud resonatorsüsteeme saab valmistada kasutades halltoon fotolitograafiat. Et minimeerida värvainete negatiivset mõju litograafia protsessil on vaja, et oleks täidetud mõningad tingimused. Esiteks peab valitud värvaine võimalikult vähe mõjutama fotoresisti füüsikalisi omadusi, nt märgumist ja viskoossust, et välistada ebaühtlase dopeeritud fotoresistikihiga klaasaluse katmine. Teiseks peab värvaine võimalikult hästi fotoresistist lahustuma ning samas resistiga mitte reageerima, kuna muidu jäävad resistikihti suured värvaine tüki, mis rikuvad objektid. Reageerimise puhul võib värvaine kaotada oma optilised omadused või fotoresist kiiritamise ja ilmutamise protsessis mitte-ennustatavalt käituda. Kolmandaks ei tohiks värvaine oluliselt neelata litograafiaprotsessis kasutatavat UV valgust (siin kasutusel lainepikkus 390 nm). Seda sellepärast, et muidu neelab värvaine suurel hulgal kiirgust, mis ei jõuaks fotopolümeerini või hakkaks see UV kiiritamise protsessi ajal väga intensiivselt luminesseeruma, mis võib häirida fotopolümerisatsiooni protsessi.

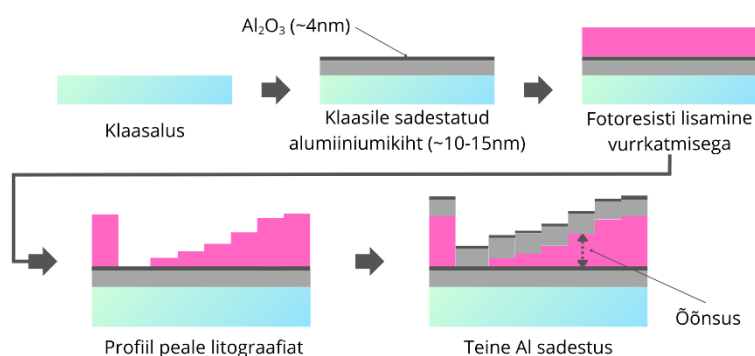
Neid nõudeid arvesse võttes ja arvestades ka sellega, millised värvained meil olemas olid, läbis valikuprotsessi Rodamiin 6G (edaspidi R6G), mille omadusi kirjeldavad joonis 2 a ja b. Ei olnud leitavaid allikaid R6G lahustumise kohta töös kasutatavas fotoresistis, nii et viidi läbi katsetused fotoresisti R6G-ga dopeerimisega ja vurrkatmisega. Neeldumisspektrist on näha, et 390 nm juures, mis on litograafiaseadme UV kiiritamise lainepikkus, neelab R6G üsna vähe valgust, mis sobib antud eksperimendiks.



Joonis 2. (a) R6G keemiline struktuur. (b) R6G neeldumis- ja fluorestsentspektrid metaanis [29].

3. Eksperimentaalne osa

Joonisel 3 on antud ülevaade eksperimentaalse osa protsessist, mida järgnevalt täpsemini lahti seletatakse. Lõpptulemusena on klaasalusel erineva paksusega FP resonaatorid, peegliteks alumiiniumi kihid ja nende vahel erineva kõrgusprofiiliga positiivne fotoresist.



Joonis 3. Skemaatiline vaade FP resonaatorite valmistamisest halltoon fotolitograafia meetodil.

3.1 Al peeglite elektronkiir-aurustamine

20×20 mm² klaasubstraadile (BK7) sadestati elektronkiir-aurustamise (ingl. k. *electron beam evaporation*, edaspidi EBE) meetodil 10–15 nm paksune alumiiniumikiht. EBE korral termiliselt emiteerunud elektronid kiirendatakse kõrgvaakumis ning suunatakse elektronkiirena magnetvälja toimele tiiglis olevale lähteainele (antud juhul Al graanulitele). Selle tagajärjel materjal aurustub ning seejärel sadeneb alusele (st klaasile), moodustades ühtlase kile (kileks nimetame siin õhukest ainekihti).

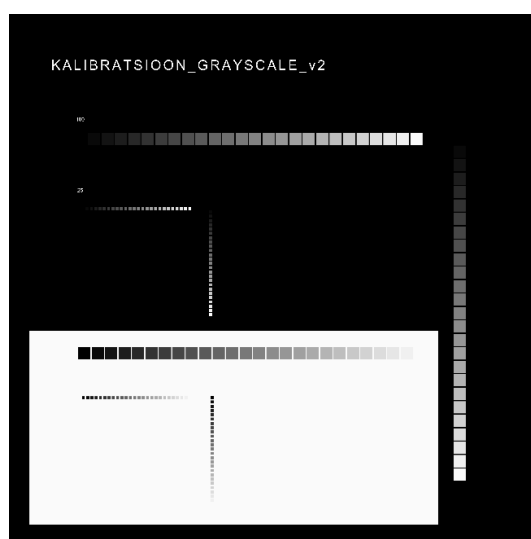
Pegelmaterjaliks valiti alumiinium, kuna see on odav ja teda on rikkalikult. Tuleb mainida, et alati peale Al sadestamist tekib sellele ka ca 2–3 nm paksune Al₂O₃, mis vähendab mõningal määral peegli “ideaalsust”. Samas pärsib oksiidikiht edasist oksüdeerumist. Mõõtmistele see käesolevas töös mõju ei avaldanud. [30,31]

Lisas 2 olevatel joonisel 31 on näha kasutatud EBE seadet (VS-17) ja seal kasutatavat objektihooidjat. Metalliseerimise ja kihipaksuste määramise profilomeetria ja ellipsomeetria meetoditel viidi läbi dr. Aarne Kasikovi juhendamisel.

3.2 Objektide valmistamine halltoonlitograafiaga

3.2.1 Halltoonide disain

Kasutati doositesti disaini, millel olid halltoonide (edaspidi RGB) väärtused 0...250ni (masina ja kasutatud fotoresisti korral on toonid 250 ja 255 võrdväärised), sammuga 10, kokku 26 ruutu. Ruudukesed olid suurusega 100×100 pikslit ning 25×25 pikslit, nii horisontaalselt kui ka vertikaalselt tumedal pinnal ja samamoodi ka heledal pinnal (ja ühele pikslile vastab üks μm). Tumedal värvil asuvaid resonatoreid on töös edaspidi nimetatud kui “tavalisel alal” asuvaid. Valge värviga asuvaid on aga nimetatud kui “inverteeritud alal” olevaid. Vertikaalsed read olid selle jaoks, et kontrollida, kas litograafiaseade töötab x ja y telgedes ühtlaselt, vt joonis 4.



Joonis 4. Resonaatorite valmistamise digitaalne disain.

Disaini tegemiseks kasutati 3ds Max programmi. Lihtsamaid disaine saab teha ka nt vabavaralise programmiga Gimp või mõne muu sarnase fototöötlusprogrammiga.

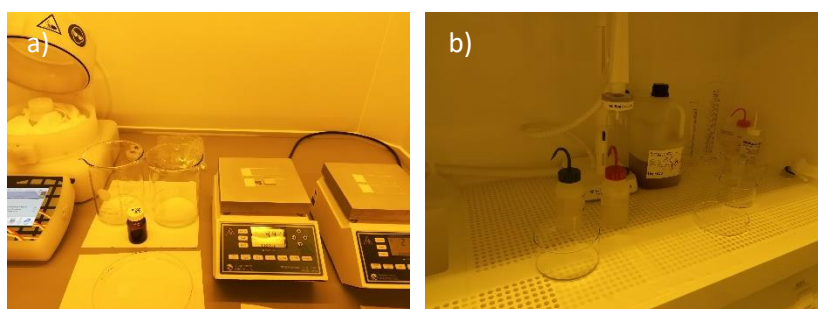
See kujundus paigutati sobivasse maatriksisse, 3×3 ruudustikku, kus igas reas varieeriti valguse doosi (100, 120 ja 140 mJ/cm^2) ja igas veerus fookustasandi parameetrit, nn defookust (0, 3 ja 6), et teha konkreetset doosil nõu peenhäälestamist (ingl. k. *fine-tuning*). Doosi muutmine on vajalik selleks, et leida optimaalne valguse hulk, mille korral on fotoresist lõpuni valgustatud (mis vastab joonisel 4 oleva disaini valgele värvile, RGB 250-le, mis omakorda tähistab fotoresistivaba ala).

Peale litograafia protsessi saime samale objektile 9 kujunduse varianti, igal erinev kombinatsioon doosist ja defookusest.

3.2.2 Fotoresistiga katmine

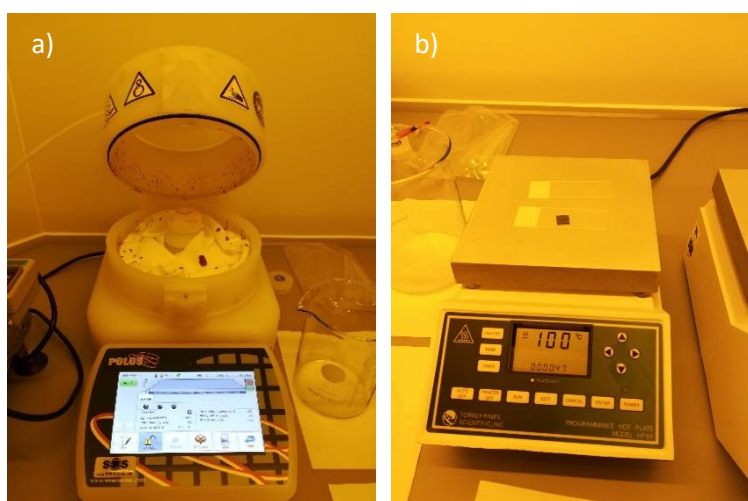
Klaas/Al alused kaeti ISO5 puhasruumis fotoresistiga (fotoaktiivne polümeer). See on vajalik selleks, et vähendada objektide saastumist tolmuosakestega (oluline kui valmistada μm suurusjärgus detaile millele järgneb metaliseerimise protseduur). Lisaks tagab puhasruumi spetsiaalne filtreeritud valgus tahtmatu fotoresisti valgustamise. Tuleb mainida, et metaliseerimise protsess viidi läbi väljaspool puhasruumi. Seetõttu polnud enam saastumist tolmuosakestega sel hetkel võimalik välistada.

Objektid puhastati atsetooni, isopropanooli ja deioniseeritud veega ning kuivatati lämmastikuga (99.999%, Linde Gas) enne fotoresistiga katmist vurrkatturiga, vt joonist 5.



Joonis 5. (a) Objektide kuivatamine/kuumutamine enne vurrkatmist. (b) Objektide pesemisala puhasruumis.

Järgnes positiivse fotoresisti AR-P 3510T (kombinatsioon novolacist ja naftokinoodiasiidist; Allresist) pealekandmine klaas/Al alustele vurrkatmise meetodil (4000 RPM, 60 sek, lõpp-paksus ca $2.5 \mu\text{m}$), vt joonis 6 a. Peale fotoresistiga katmist kuumutati objekti 100°C juures 1 min, mis on vajalik adhesiooni parendamiseks alusega, ka allesjäänud lahusti eemaldamiseks, vt joonis 6 b.



Joonis 6. (a) Objekt vurrkatturis peale fotoresistiga katmist. (b) Objekti kuumutamine pliidiil 100°C juures peale vurrkatmist.

3.2.3 Fotoresisti dopeerimine värvainega ja selle kasutamine

Fotoresist dopeeriti kolmel erineval kontsentratsioonil värvainega Rodamiin 6G, keemilise valemiga $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$. Alustastati väikese koguse värvaine katsetustega, et kontrollida, kuidas R6G fotoresistis käitub ja seda mõjutab. Esimesse viaali kaaluti 1,0 mg R6G 0,6 ml fotoresisti kohta, teise vastavalt 2,9 mg 0,6 ml ja kolmandasse 5,1 mg 0,8 ml kohta. Dopeerimise etapp teostati puhasruumis ning jäeti magnetsegama (24 h).

Värvaine R6G kontsentratsioon fotoresistis on arvatud (R6G molaarmass $M(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 479,02 \text{ g/mol}$) kasutades seost $n = m/M$:

$$1) n(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 0,001 \text{ g}/479,02 \text{ g/mol} = 2,0876 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

$$2) n(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 0,0029 \text{ g}/479,02 \text{ g/mol} = 6,0540 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

$$3) n(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 0,0051 \text{ g}/479,02 \text{ g/mol} = 10,6467 \times 10^{-6} \text{ mol}$$

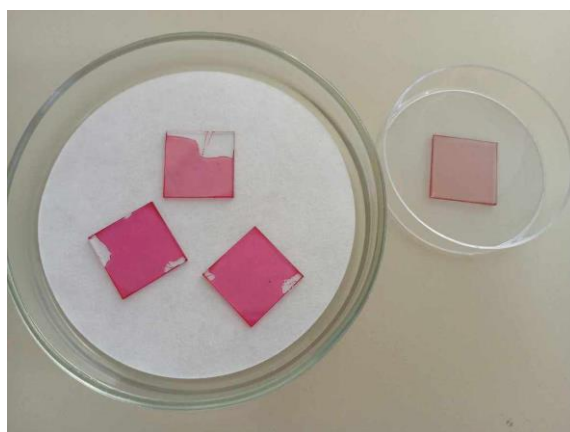
ning seejärel kontsentratsioon on leitud seosest: $C = n/V$:

$$1) C(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 2,0876 \times 10^{-6} \text{ mol}/0,0006 \text{ l} = 3,48 \text{ mM}$$

$$2) C(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 6,0540 \times 10^{-6} \text{ mol}/0,0006 \text{ l} = 10,09 \text{ mM}$$

$$3) C(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl) = 10,6467 \times 10^{-6} \text{ mol}/0,0008 \text{ l} = 13,31 \text{ mM}$$

Erineva värvaine kontsentratsiooniga dopeeritud fotoresisti lahused kanti vurrkatmise meetodil klaas/Al alustele (sarnaselt dopeerimata fotoresistiga, vt eestpoolt). Objektid on näha joonisel 7.



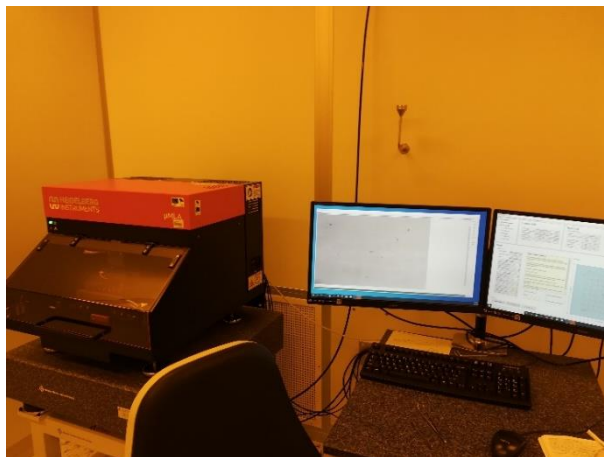
Joonis 7. Kolm dopeeritud fotoresistiga objekti ja nende kõrval dopeerimata fotoresistiga referentsobjekt.

Värvainega dopeeritud fotoresistiga katmine ei olnud klaas/Al alustel ühtlane. See võis olla tingitud sellest, et selle märgumine/voolavus alusele oli mõnevõrra erinev puhtast fotoresistist ja vaja oluks võtta lihtsalt suurem kogus lahust.

Lisaks kaeti eelnevalt kirjeldatud meetodikal kolm lisa klaas/Al alust samade dopeeritud fotoresisti segudega, millest valmistati FP resonatorid.

3.2.4 Fotoresisti UV-kiiritamine ja ilmutamine

Kui klaas/Al alused olid kaetud nii fotoresisti kui värvainega dopeeritud fotoresistiga, teostati järgmise sammuna UV-valgusega (lainepikkusega 390 nm) kiiritamine (halltoonlitograafia režiimis) kasutades selleks seadet μ MLA (Tabletop Maskless Aligner, Heidelberg Instruments). Seade on näidatud joonisel 8.



Joonis 8. Fotolitograafia seade (Tabletop Maskless Aligner) ISO5 puhasruumis.

Peale kiiritamist ilmutati objektid tetrametüülammooniumhüdrosiidiga (TMAH, Allresist) 60 sekundi jooksul, seejärel järgnes ilmuti väljaloputamine deioniseeritud veega ning kuivatamine lämmastikuga.

Eksperimentaalse osa lõppetapiks oli viimase alumiiniumkihi (peegli) elektronkiiraurustamine. Protsess oli sama, mis esimeselgi korral (vt peatükk 3.1).

Kokku valmistati üks dopeerimata ja kolm erineva kontsentratsiooni värvainega (R6G) dopeeritud fotoresistiga Fabry-Perot resonatorit ja neile vastavad referentsobjektid erinevate meetoditega karakteriseerimiseks.

4. Objektide karakteriseerimine

Objektidele tehti pinnakvaliteedi uurimist, fotoresisti ja resonatorite paksuste mõõtmisi ning optilisi mõõtmisi.

4.1 Pinnakvaliteedi uurimine

Igast erineva doosi ja defookusega resonatorite jadast tehti optilise mikroskoobi (edaspidi OM) Nikon Eclipse LV150 abil pilt (vt. lisa 2 joonis 30) suurendusega 50×.

Lisaks tehti pinnakvaliteedi uurimiseks kõikidest doosi-defookuse variantidest doositesti objektile pilti ka elektronmikroskoobiga (Tescan Vega II SBU).

4.2 FP resonatorite kihipaksuste mõõtmised

Kihipaksuseid mõõdeti aatomjõumikroskoopia (Veeco Dimension Edge) (ingl. k. *atomic force microscopy*, AFM), ellipsomeetria (Semilab GES5E) ja profilomeetriaga (teraviku raadius 12.5 µm) (Dektak XT), vt lisast 2 joonised 27, 28.

Profilomeeter, kiirem meetod, sobis 100×100 µm suuruste ning AFM 25×25 µm resonatorite kõrgusprofiilide hindamiseks. Alumiiniumkihi paksuse hindamiseks AFMga kasutati koos teiste sadestamistega valmistatud referentsobjekti. Ellipsomeeriat kasutati, et võrdlevalt hinnata kihipaksuseid.

4.3 Optilised mõõtmised

Mikroskoobi Olympus BX51-ga fiibriga ühendatud spektromeetri Ocean Optics 2000+ ja isearendatud Fouriertasandi spektromeetriga (baseerub Andor Kymera 193i spektrograafil ja Andor ZYLA-5.5-USB3-S ZL41 kaameral) abil mõõdeti ära igast ruudust läbi tuleva valguse spekter, välja arvatud mõningate tumedamate ruutude ehk paksemate õõnsuste omad, mis olulist informatsiooni ei sisaldanud, kuna nende paksus ja läbilaskvusspekter on väga sarnane tervele, st kiiritamata ja ilmutamata fotoresisti kihile. Mõõdeti ära ka mikroskoobi lambi spekter (ilma takistusteta). Teades mõlemaid spektreid, sai pärast arvutada õõnsuste läbilaskvusspekter (täpsemalt tulemuste peatükis ja lisa 2 joonisel 29). Mõõtmised teostati pimedas. Mikroskoobile olid spektromeetri jaoks juurdeehitused teinud BSc Elizaveta Dmitrijeva ning kaasprofessorid Valter Kiisk ja Siim Pikker.

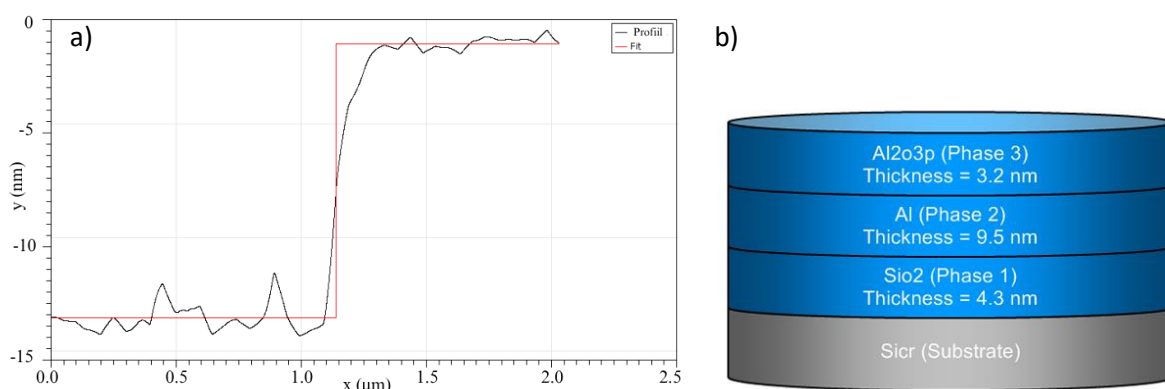
Kolme R6G värvainega dopeeritud objekti ja võrdluseks valmistatud puhta fotoresistiga objekti uuriti ka spektrofotomeetril neeldumise ja spektrofluorimeetril nii kiirguse kui ka ergastuse mõõtmiseks. Neeldumisspektri mõõtmiseks kasutati Jasco V-570 spektrofotomeetrit. Ergastuse ja kiirguse mõõtmiseks ja võrdlemiseks kasutati Horiba Jobin-Yvon Fluoromax-4P spektrofluorimeetrit.

5. Tulemused

Selles peatükis analüüsitakse nii doositesti kui ka dopeerimata ja dopeeritud fotoresistiga FP resonatoreid. Mõõtmisi viidi läbi igal objekti valmistamise etapil (alumiiniumi paksus, dopeerimata ja dopeeritud resisti paksused, pinna morfoloogia, resonaatorite paksused ja optilised omadused).

5.1 Al kihipaksus

Joonisel 9 a on ära toodud AFM mõõtmise profiil. Selle järgi oli Al kile paksuseks 12 nm. Al_2O_3 paksust ei ole võimalik AFM järgi eristada, selle jaoks kasutati ellipsomeetriat. Joonisel 9 b on näidatud ellipsomeetria tulemused Al kihist Si alusel. Selgelt eristuvad SiO_2 , Al ja Al_2O_3 kihid.



Joonis 9. (a) Doositesti objekti alumise Al kihi paksuse mõõtmine AFM-ga. (b) Ellipsomeetria mõõdetud Al ja Al_2O_3 -kiht Si alusel.

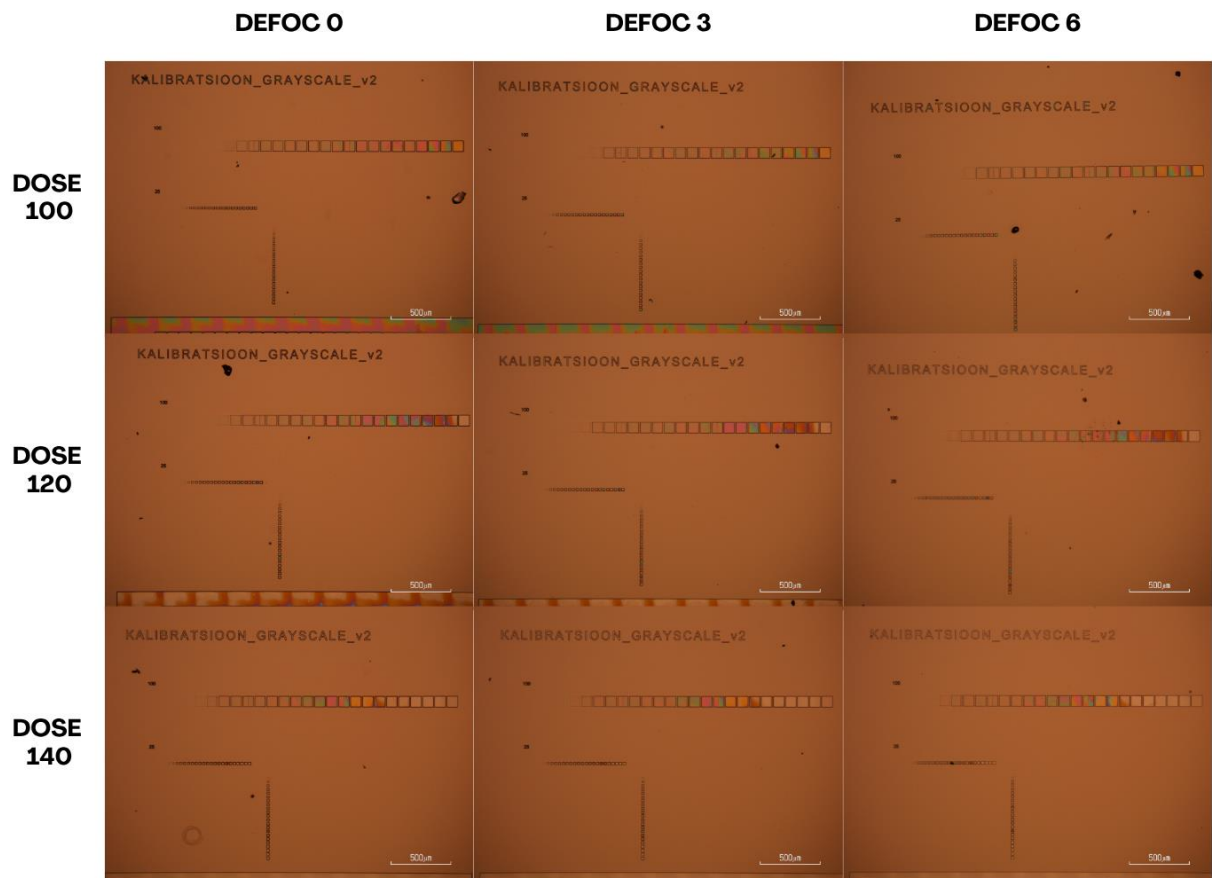
Ellipsomeetria tulemus Al-kihi paksuseks koos oksiidiga oli $9,5+3,2=12,7$ nm. See on mõnevõrra rohkem kui AFM abil mõõdetu, kuid siiski piisavalt hea kokkulangevusega (erinevus vaid 0,7 nm).

5.2 Doositesti kalibreerimise resonaatorite analüüs

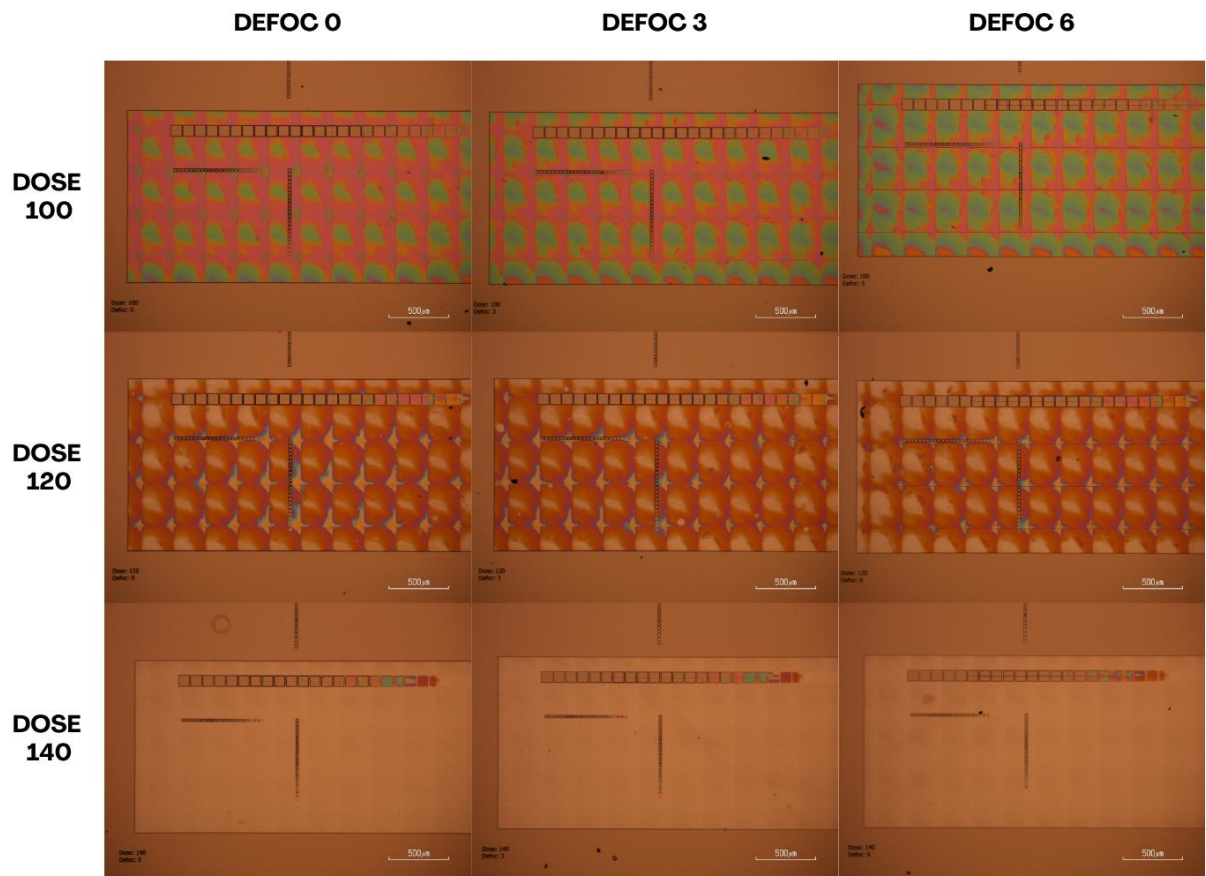
Järgnevalt analüüsitakse doositesti jaoks valmistatud dopeerimata resonatoreid, täpsemalt nendest tehtud pilte, profiilomeetrilisi mõõtmisi ja optilisi läbilaskvusspektreid ja nende korrelatsioone. Doositest on vajalik selleks, et leida optimaalne valguse doos, mille korral valgustatakse fotoresisti täielikult (vastab disaini RGB toonile 250).

5.2.1 OM ja elektronmikroskoobi pildid

Järgnevatel joonistel 10 ja 11 on näha OM piltide tabelid resonaatoritest vastavatel doosidel ja defookustel viiekümne kordse suurendusega koos skaalaga $500\mu\text{m}$.



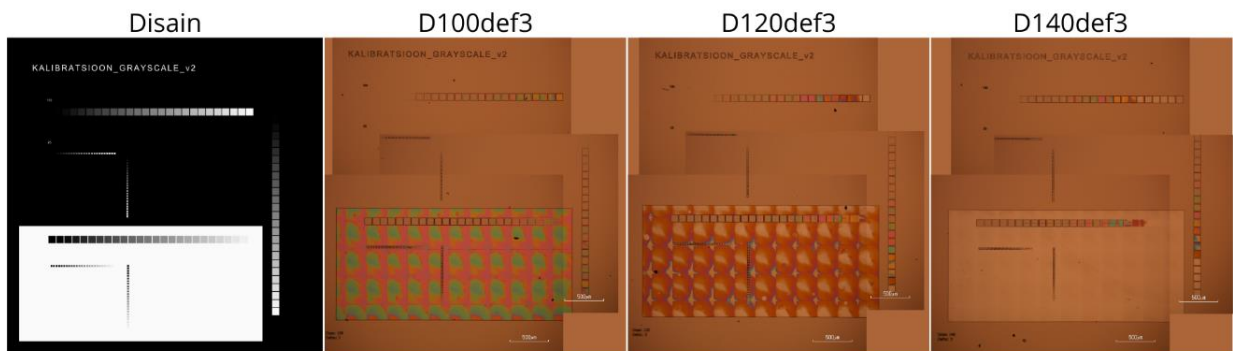
Joonis 10. OM pildid erinevatel doosidel ja defookustel ainult alal, kus resonaatorid on kile sisse õõnestatud. Piltidel näha interferentsist tingitud erinevaid värve erineva paksusega resonaatoritel. Skaala 500µm.



Joonis 11. OM pildid erinevatel doosidel ja defookustel ainult inverteeritud alal (ala, kus resonator moodustab samba ja ümbritsetud alalt on resist eemaldada üritatud), pildidel on näha interferentsist tingitud erinevaid värve erineva paksusega resonatoritel ning piirkondades, kus doos on olnud liiga väike, et kogu resist eemaldada. Skaala 500 μ m.

On näha järkjärgulist muutust värvides doosi väärtustega kõrgemale minnes ja ka erinevust samal doosil erineva defookuse juures. Kõrgematel doosidel on suurima heledusega ruudud täienisti läbi fotoresisti tulnud ehk selle kihi paksus on null ja valgus tuleb ainult läbi kahe alumiiniumikihi. Kõikidel doosidel, aga eriti madalamatel, on tumedad ruudud pea eristamatud tavapinnast ehk valgus ei suutnud eemaldada või eemaldas minimaalselt fotoresisti pinda.

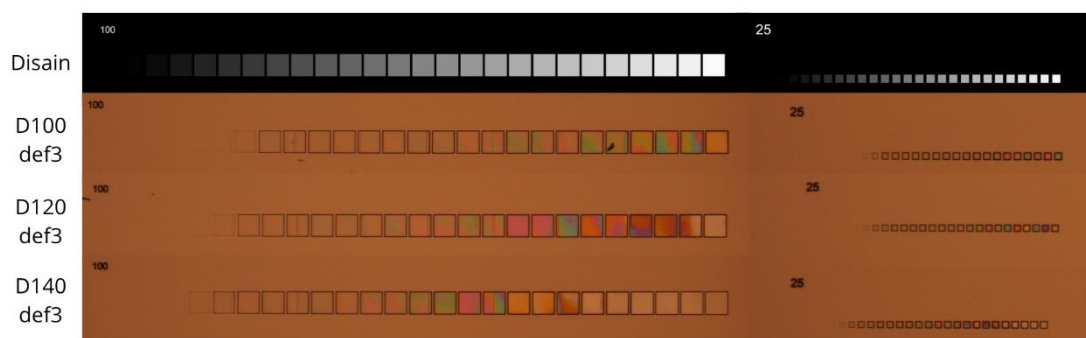
Paremaks visualiseerimiseks on joonisel 12 toodud ära algse disainifaili ja tekkinud kujutiste võrdlus kõigil kolmel doosil defookuse 3 juures.



Joonis 12. Disain ja sellele vastavad FP resonatorid erinevate doosiväärtustega aladest (mikroskoobi komposiitpildid).

Seega on optimaalne kasutada doosi 140 mJ/cm^2 ja valisiti meelevaldselt defookus 3, kuna see tulemust oluliselt ei mõjutanud.

Joonisel 13 on ka suurendatud võrdlus mõningate õõnestatud resonatoritega ala 100×100 ja 25×25 resonatorite ning algse disaini vahel. Välja on toodud resonatorite rida kõikidel erinevatel doosidel – 100, 120 ja 140 mJ/cm^2 – kõigil sama defookusega 3.



Joonis 13. Suurendatud võrdlus disaini ja sellele vastavate resonatorite vahel. Suurematel resonatoritel esineb paksuse ebahütlus ja sellest tingitud erinevaid värve ühe ruudu siseselt. Väiksemad resonatorid on ruudu siseselt ühtlasema värviga ja seega ka paksusega. Numbrid 100 ja 25 tähistavad vastavate ruutude mõõtusi μm -tes.

On välja toodud ka üks OM pilt, joonis 14, kus on näha inverteeritud (resonaatorid on sambad, vt eespoolt peatükk 2.2) alal nii 25×25 kui ka $100 \times 100 \mu\text{m}$ suurusega ruudud, kusjuures ühe 25×25 ruudu peal on tehtud ka skaneeriva elektronmikroskoobiga mõõtmine, mis näitab, et tegelikult on sellel alal ruudu külje pikkus vaid $22,07 \mu\text{m}$. Samuti on joonisel 14 näha ruutudel (resonaatoritel) jooni – need süvikud on tingitud litograafiaseadme mikropeeglite ruudustikust. Iga joon on peeglimatriksi nihkumise vaheline piir. Kuna peeglimatriksi nägemisala on väiksem kui disain, siis jaotab programm disaini tükkeks ja objekt kiiritatakse osadena, liikudes objektialusega ja objektiga järjest edasi uuele substraadi piirkonnale. See aga tekitab objektile õmblusdefekti (ingl. k. *stitching*). On aga näha, et 100×100 ruudukestel on neid jooni

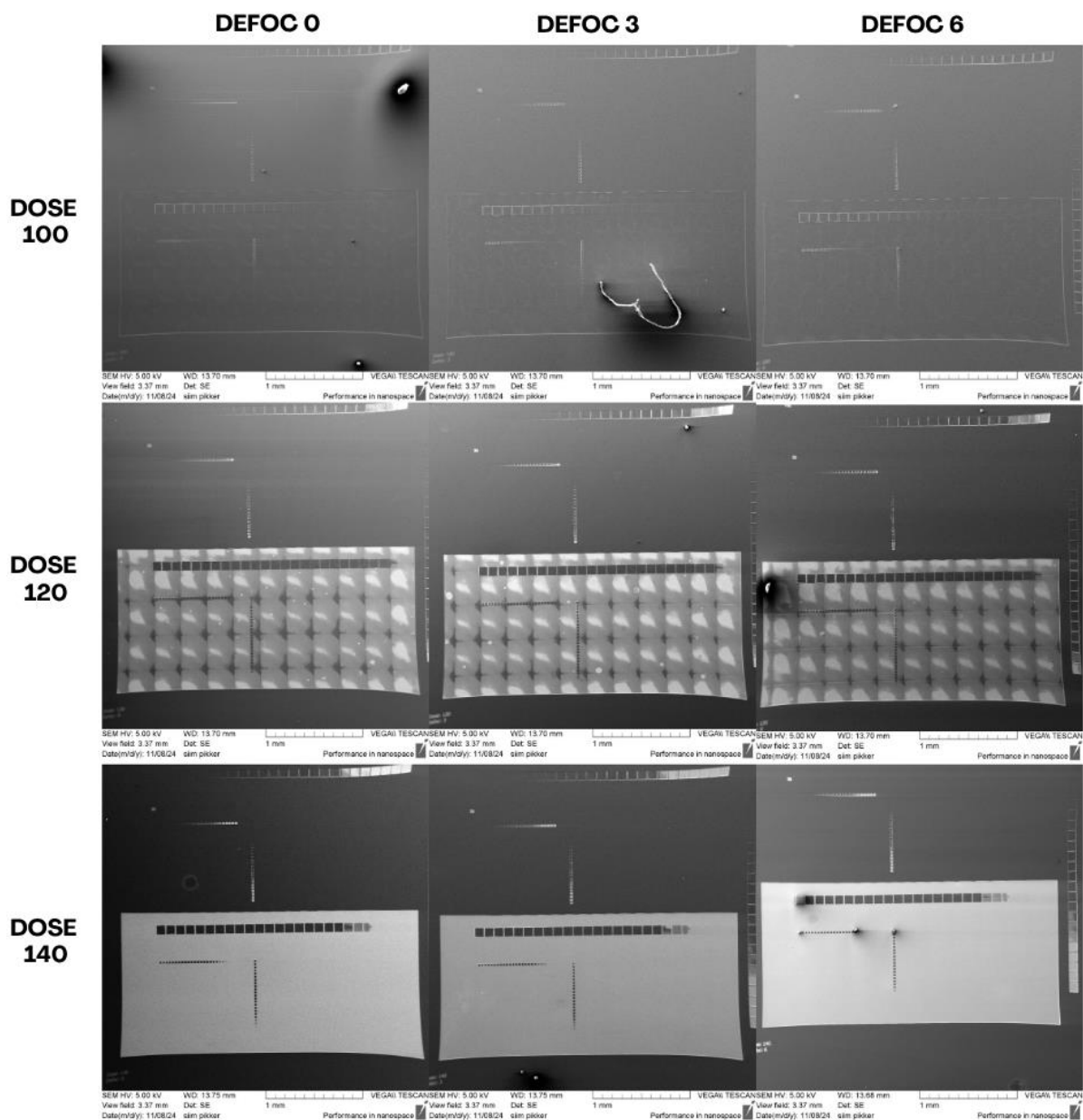
palju rohkem, kuna suuremal alal on suurem tõenäosus, et peeglite piir sinna satub. Seega on edaspidi optilisteks mõõtmisteks enamasti kasutatud väiksemaid $25 \times 25 \mu\text{m}$ ruute, kuna neil esines vähem defekte. Nn kokkuõmbluseid on võimalik optimeerida (vähendada), kasutades lisafunktsioone (näiteks *N-over*, st teha mitu kattuvat säritust). Käesolevas töös seda funktsiooni veel ei jõutud kasutada, kuna litograafia seade oli viimased 4 kuud remondis ja optimeerimine võetakse käsile edaspidises tegevuses ja selle töö baasil kirjutatava artikli jaoks vajalike objektide valmistamisel.



Joonis 14. Doos 140 mJ/cm^2 defookus 6 25×25 ruudud mõõtmisega.

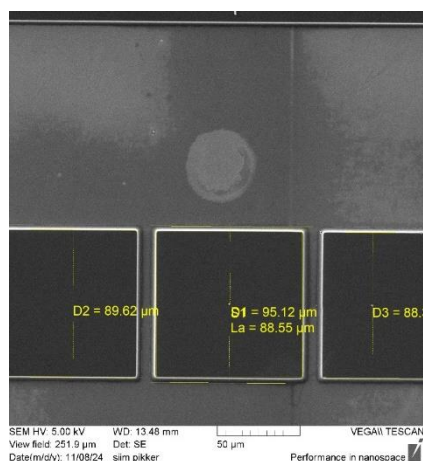
Tänu lisamõõtmistele on teada, et enamasti on iga ruut väiksem kui ta disaini järgi olema peaks. Selle tõsiasja põhjus avastati hiljem – nimelt tuleneb see disaini jaoks kasutatud programmi pildiformaadi salvestamise eripäradest (mis nüüdseks on tegelikult ka lahendatud).

Joonisel 15 on samamoodi toodud välja skaneeriva elektronmikroskoobiga tehtud pildid resonatoritest vastavatel doosidel ja defookustel. Piltidelt on hästi näha inverteeritud ala läbisöömist fotoresistist doosi tõstmisel.



Joonis 15. Elektronmikroskoobi pildid erinevatel doosidel ja defookustel.

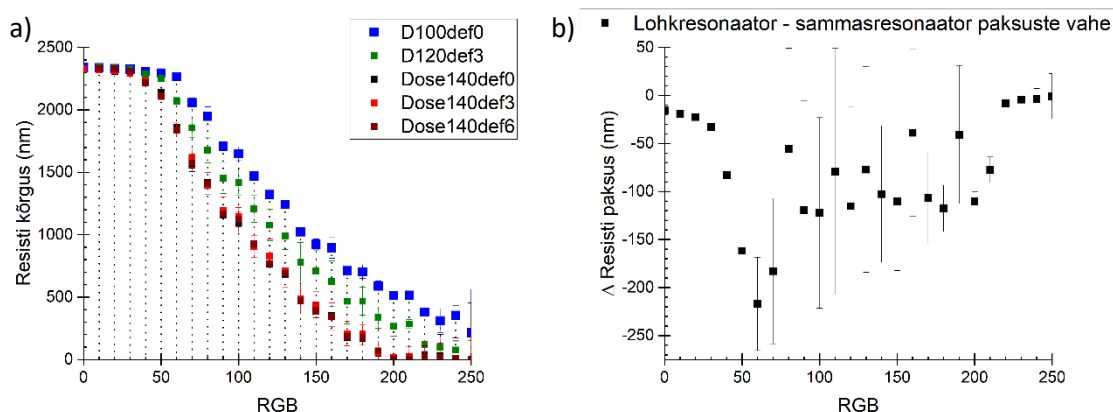
Lisaks on välja toodud veel üks mõõtmisega pilt, joonis 16, kus on mikroskoobi programmiga ära mõõdetud mõne $100 \times 100 \mu\text{m}$ resonaatori läbimõõdud. Lisatud mõõtmistega on näha, et doosil 120 mJ/cm^2 ja defookusel 3 on nende ruutude läbimõõt invertteeritud alal keskmiselt $91 \mu\text{m}$.



Joonis 16. Elektronmikroskoobi mõõtudega pilt doos 120 mJ/cm² defookus 3 juures.

5.2.2 Kihipaksuste hindamine profilomeetriga

Profilomeetria tulemustest on näha (joonis 17 a), et doos 140 mJ/cm² vastab optimaalsele valguse hulga, ehk halltoon 250 juures on fotoresistikihi paksus 0 nm. Doos 100 mJ/cm² korral on selgelt näha, et fotoresist on aladoseeritud ehk fotoresistikihi paksus halltooni väärtuse 250 korral on mõned sajad nanomeetrid (tulemused langevad kokku OM piltidelt nähtuga, vt eest). Joonisel 17 b on toodud invertteerimata ala lohkude ja invertteeritud ala sammaste kõrguste erinevused vastavatel halltoonide väärtustel. On näha, et pea kõik invertteeritud ala resonatorid on paksemad, kui tavalise ala omad. Näiteks halltooni väärtuse 90 (selle väärtuse sambaga on tehtud ka optilisi mõõtmisi, vt hiljem) juures on sammaste erinevus ca 130 nm. Sellise erinevuse põhjus(ed) on hetkel veel uurimisel/selgitamisel.

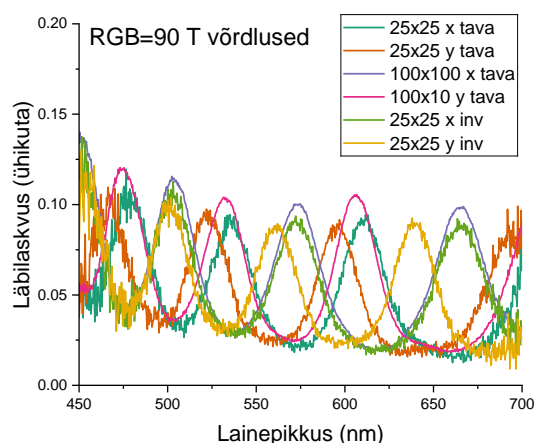


Joonis 17. (a) Profilomeetriga mõõdetud doositesti resonatorite kõrgusprofiilid tavalisel alal. (b) Profilomeetriga mõõdetud (Doos 140 mJ/cm², defookus 3) resonatorite invertteerimata ja invertteeritud alade kõrgusprofiilide erinevused vastavate halltoonide väärtuste juures.

5.2.3 Resonaatorite läbilaskvusspektrid

Resonaatorite läbilaskvusspektrite saamiseks peab ruutudest läbi tulnud valguse spektri intensiivsuse läbi jagama mikroskoobil kasutatud lambi spektri intensiivsustega. Selle abil saab läbilaskvuse y-teljele ja lainepikkused x-teljele. Kui läbilaskvus oleks 1, siis oleks tegemist täieliku läbilaskvusega.

Näiteks on joonisel 18 välja toodud läbilaskvuse graafikud ruudule RGB väärtusega 90 tavalises alas. Profilomeetria andmed näitavad, et sellele vastab paksus ca 1200 nm. Vastava inverteeritud ala resonatori paksus erinevuse järgi (vt joonis 17 b) on ca 100 nm paksem, ehk 1300 nm. Välja on toodud graafikud nii 25×25 kui ka 100×100 μm (tavalises alas) resonatorite puhul, x- ja y-telgedes.

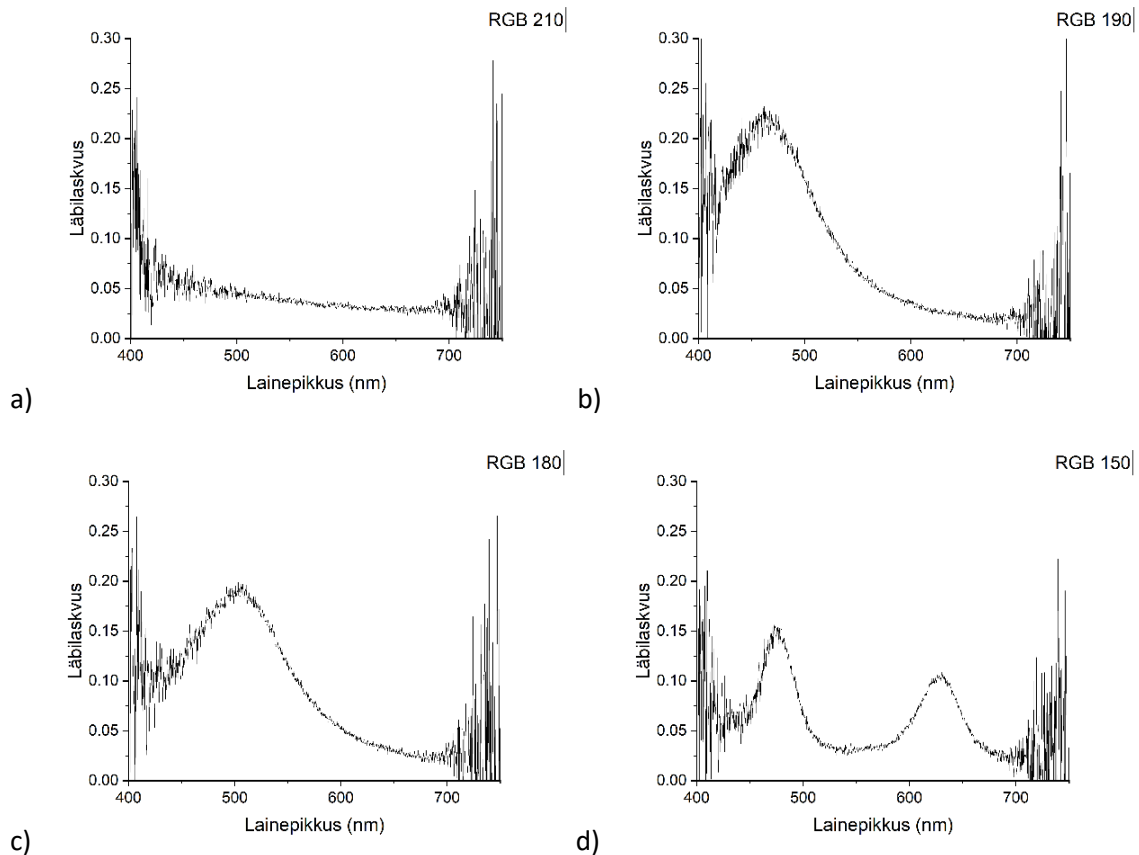


Joonis 18. Läbilaskvus RGB 90 väärtusega ruudul doosi 140 mJ/cm² defookus 3 juures.

Hoolimata sellest, et RGB väärtus oli kõigil resonatoritel sama (st inverteerimata ja inverteeritudel, x- ja y teljel) ja seega peaks kõigil olema võrdne paksus ja läbilaskvusomadused, ei ole see nii. Isegi x- ja y-telje resonatoritel ei ole sama T. Põhjuseks võib olla vurrkatmisest tekkinud fotoresisti paksuse erinevus. Protsessi oleks seega vaja edasi optimeerida/uurida.

Jooniselt 19 on näha, et mida paksemaks fotoresisti kate läheb (väiksem halltooni väärtus), seda rohkem on ka resonantsipiike. Kõige õhemasse resonatorisse nr 22 (RGB=210) ei ole mahtunud ühtegi resonantse moodi nähtava valguse vahemiku poollainepikkust. Resonaatoris nr 20 (RGB=190) on näha ainult üks piik lainepikkusel ca 460 nm, mis näitab, et vaadeldavas nähtava valguse piirkonnas mahub sinna ainult üks resonantne mood, mis suure tõenäosusega vastab ca 460 nm valguse poollainepikkusega seisulainele. Sellele eelnevas ruudus nr 19 (RGB=180) on paksus veidi suurem ja näeme ka et piik on nihkunud paremale – suurema lainepikkuse poole. Ruutu nr 16 (RGB=150) mahub juba kaks piiki. Paksemasse kihti

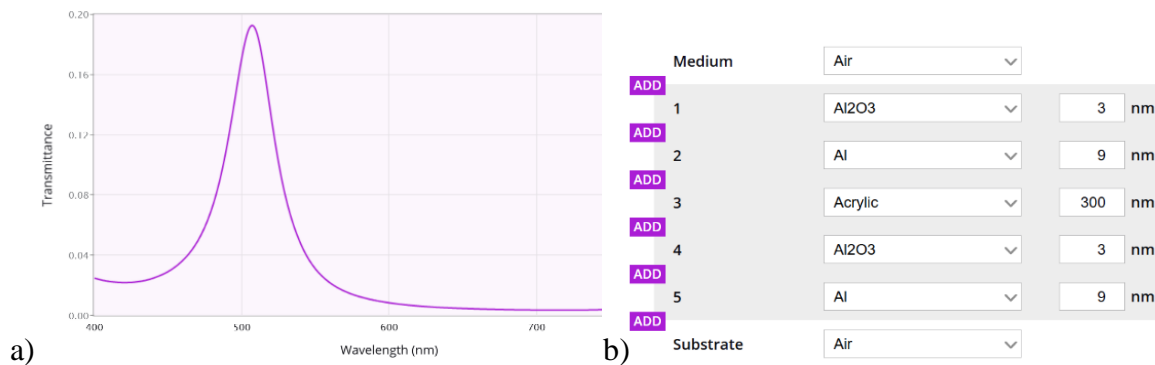
mahub erinevaid moode rohkem (poollaine-ja täislainepikkuseid jne) ning erinevate resonantside arv kasvab, kuni mõningates paksemates resonaatorites on piikide arv mõõdetud piirkonnas juba nt 7.



Joonis 19. Doos 140 mJ/cm^2 defookus 3 inverteeritud ala läbilaskvusspektrid vastava RGBga (a) 210, (b) 190, (c) 180 ja (d) 150.

Profilomeetristest mõõtmistest on teada, et nende resonaatorite paksused on RGB 210, 190, 180 ja 150 jaoks vastavalt ca 104, 115, 330 ja 560 nm.

Teades kõiki neid parameetreid, sai läbi viia võrdluse Filmetrics Spectral Reflectance kalkulaatoriga [32], mille abil saab koostada läbilaskvusspektreid, mis vastavad kindlatele kihtide paksustele. Lähendades teoreetilise graafiku mõõdetud väärtustega, saab veelgi täpsema hinnangu kihtide paksustele. Tuleb lisada, et arvutustes kasutati akrüüli, sest selle parameetrid on sarnased kasutatud fotoresistiga. Näiteks on siin joonisel 20 toodud üks selline lähendus RGB 180-le vastava resonaatoriga. Simulatsioonid vastavad mõõdetud tulemustele. On teada, et resonator RGB 180 (paksusega 330nm) vastab moodile $m=2$ ja resonatori 190 (paksusega 115nm) vastab moodile $m=1$.



Joonis 20. Filmetrics kalkulaatori hinnang RGB=180 (inverteeritud ala) resonatorile, x-teljel lainepikkus (nm) ja y-teljel läbilaskvus. (a) Saadud T graafik. (b) Sisestatud parameetrid (*air* – õhk, *acrylic* – akrüül).

On näha, et selleks et saada graafik vastavusse eespool joonisel 19 c tooduga, peab dielektriku kihi paksuseks panema mitte 330, vaid 300 nm. Üheks selgituseks on, et peab arvestama akrüüli ja töös kasutatud fotoresisti täpse murdumisnäitaja erinevust. Lisandub veel ka veamäär aurustumise ja katmise vigadest ning see, et mudelis on arvestusest välja jäetud alusklaas. Võib aga öelda, et tehtud mõõtmiste hinnangud on tegelikkusele väga lähedased.

Resonantside piigid olid arvutustes kitsamad seetõttu, et programm eeldab väga häid peegleid, st ideaalselt siledat alumiiniumi ja ülipuhta laus-alumiiniumi (ingl. k. *bulk aluminium*) komplekset murdumisnäitajat, kuid alumiiniumikihid pole absoluutselt siledad ega ole teada ka täpne aurustatud kile kompleksne murdumisnäitaja ning see nanokile omab defekte, mis tekitavad resonatori kadusid. Seetõttu on ka graafiku piigid rohkem laialimääritud.

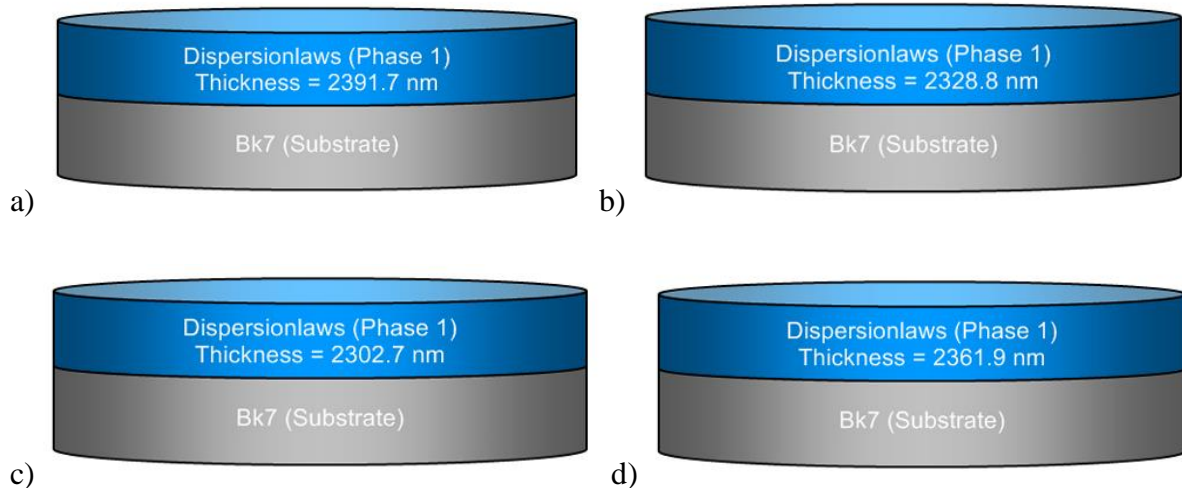
Lisa läbilaskvuse mõõtmisi vt lisa 3.

5.3 Värvainega dopeeritud fotoresist

Siinses peatükis on näidatud värvainega dopeeritud fotoresisti testobjektide uuringud.

5.3.1 Ellipsomeetriline analüüs

Joonisel 21 on ellipsomeetria tulemused vurrkatmisel saadud dopeeritud ja dopeerimata fotoresisti kihi võrdlemiseks.



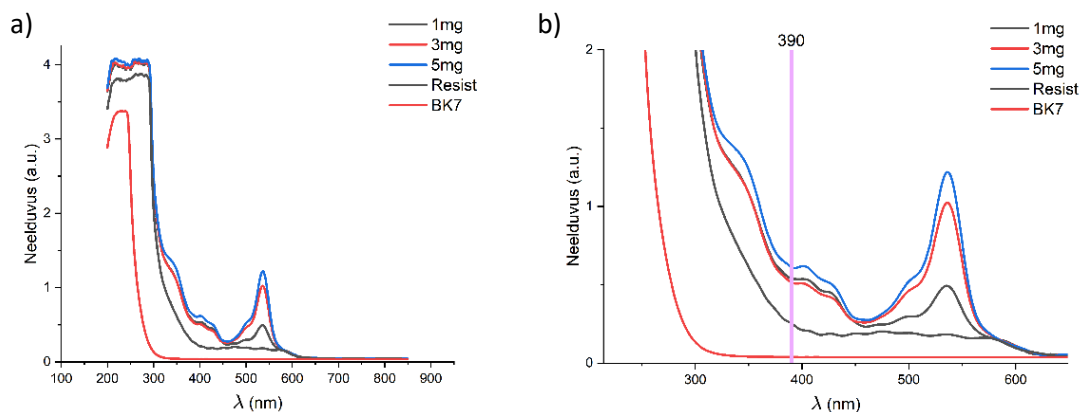
Joonis 21. Ellipsomeetria mõõtmistulemused klaasalusel olevast fotoresistist. Dopeerimata fotoresist (a), erineva kontsentratsiooniga värvainega dopeeritud fotoresistist, vastavalt: C=3,48 mM (b) C=10,09 mM (c) ja C=13,31 mM (d).

On näha, et kõikide kihtide paksused on ca 2,3 μm ja ei ole märgata mingit trendi värvaine kontsentratsiooni suurenemisel. Seega saab öelda, et värvainega dopeerimine ei omanud olulist mõju vurrkaetud fotoresisti kihi paksusele. Need kihi paksuste erinevused on ilmselt tingitud juhuslikust vurrkatmisega saadavast kihi paksuse kõikumisest. Protsessi saaks optimeerida, kui kasutada automaatpipetti. Ellipsomeetria tulemustest on näha ka seda, et fotoresist ja värvaine on korralikult segunenud (ehk ei ole näha erinevaid kihte mudeldatud tulemustes).

Erinevus objektide kihtide vahel on maksimaalselt 89 nm. Nähtav valgus on vahemikus umbes 400–750 nm. Seega selline paksuse juhuslik kõikumine võib valmistatavate resonatorite omadusi ka tõsiselt mõjutada.

5.3.2 Neeldumine

Neelduvust mõõdeti üle lainepikkuste 850–200 nm, riba laiusega 1 nm. Analüüsidest neeldumisspektreid nähti, et lainepikkustel alla 300 nm tõusis neelduvus nii puhtal klaasil kui ka kõikidel teistel objektidel järsus tõusujoones väga suureks. Peale 610 nm polnud aga ühelgi objektidel praktiliselt üldse neelduvust. Olulised neeldumise protsessid toimuvad vahemikus 300–610 nm, nagu näha jooniselt 22.



Joonis 22. (a) Kolme erineva kontsentratsiooniga värvainega dopeeritud fotoresisti kihi, puhta fotoresisti kihi ja puhta klaasi neeldumisgraafikud, x-teljel lainepikkus (nm). (b) Neeldumisgraafikud vahemikus 300–600 nm koos määrkega 390 nm juures, x-teljel lainepikkus (nm).

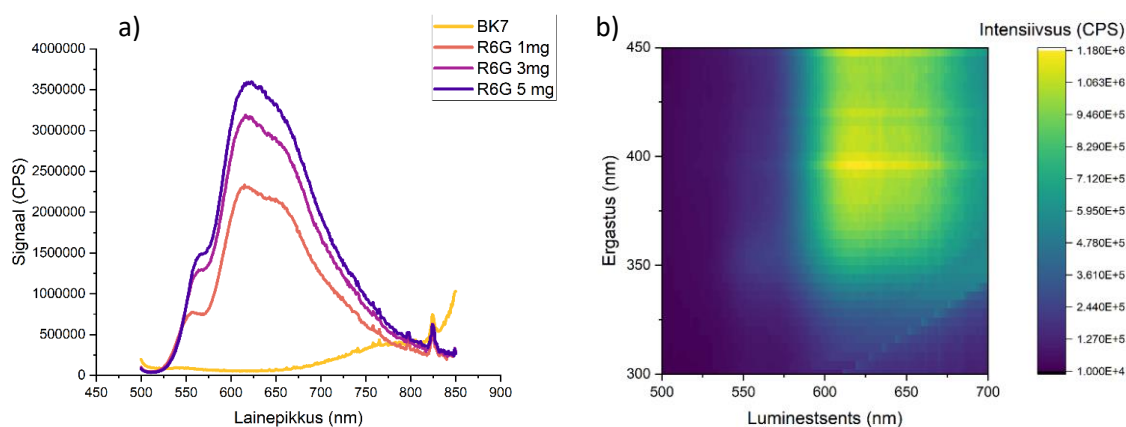
Vahemikus 300–610 nm ei ole puhtal klaasil BK7 peaaegu üldse neelduvust, seega saab öelda, et pea kogu neelduvus tuleneb fotoresisti kihist ja dopeerivast R6G värvainest. Puhtal resistil on interferentsimustri alas, ca 400–550 nm, neelduvuses näha väikeseid lainetusi. Seejärel on olenevalt R6G sisaldusest neeldumispikiid kindlatel lainepikkustel (nt suur neelduvus 540 nm juures, mida sai ka eeldada puhta R6G neeldumisspektri järgi, vt joonis 2 b) vastavalt kontsentratsiooni suurenemisele ka üha suuremad. Nt 1 mg R6G puhul (kontsentratsioon 3,48 mM) on neelduvus 0,5, samas kui 2,9 mg puhul (graafikul 3 mg, kontsentratsioon 10,09 mM) on neelduvus juba 1,0 ja 5,1 mg puhul (graafikul 5 mg, kontsentratsioon 13,31 mM) on neelduvus 1,3.

Neelduvus saab olla üle 1 kuna tegemist on ühikuta suurusega (ingl. k. *arbitrary units*), mille saame valemist $A = -\log_{10}(T)$, kus T on läbilaskvus ja piisavalt väikese läbilaskvuse korral lähebki A üle 1.

Samuti on joonisel 22 b ära toodud lainepikkus 390 nm, mis on fotolitograafiaseadme poolt kasutatava UV valguse lainepikkus. Oli lootus, et sellel lainepikkusel värvaine R6G valgust ei neela. Siiski on näha, et näiteks 1 ja 3 mg puhul neelas see samapalju ja 5 mg puhul mõnevõrra rohkem valgust. See võib mõjutada fotolitograafia protsessi, kuna fotoresisti kiiritades neelab selles olev värvaine valgust ja algab juba luminesents, mis mõjutab ümbritsevat fotoresisti ning kiiritusprotsess on värvaine neeldumise ja võimalik et luminesentsi tõttu häiritud. Peamiselt võib värvaine liiga palju valgust ise ära neelata, mis põhjustab selle, et valgus ei jõua enam fotoresistini ja kiiritusprotsess toimub vähem intensiivsemalt kui arvestatud.

5.3.3 Kiirgus ja ergastus

Joonisel 23 a on toodud kõigi nelja objekti fluorestsentsmõõtmised. Kiirguse jaoks mõõdeti signaali kui loendusi sekundis (ingl. k. *counts per second*) olles eelnevalt ergastanud objekti 490 nm juures. Vahemikus 500 – 800 nm on näha fluorestsentskiirgust. Puhta klaasi puhul on minimaalne fluorestsents, samas kui kõikide R6G-ga dopeeritud objektide puhul on kiirguse piik 625 nm juures. Teine kõrgem koht, kuigi veidi laiem piik, on 660 nm juures ning üks väike piik on ka veel 555 nm juures, mis ongi R6G põhjustatud kiirgus. Mida tugevamalt dopeeritud objekt seda suurem kiirgus. Saab oodata kõige suuremat kiirgust vahemikus 600 – 675 nm. Tuleb tähele panna, et sellistel kõrgetel kontsentratsioonidel ja antud fotoresistis on R6G fluorestsents kiirguse spekter teise kuju ja maksimumi asukohaga kui näiteks metanoolis (vt joonist 2 b). Joonisel 23 b on ära toodud saadud tulemused koos intensiivsuse CPS tulemustega, vt ka lisa 5.



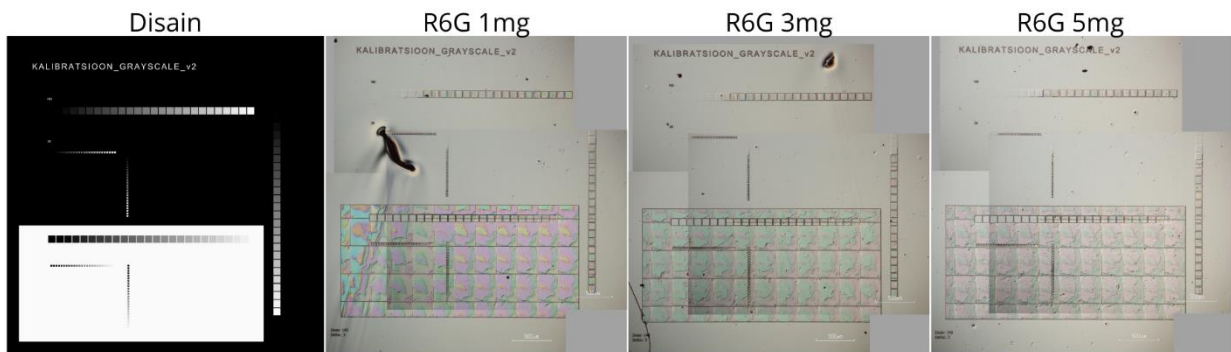
Joonis 23. (a) Puhta klaasi ja kolme erineva kontsentratsiooniga värvainega dopeeritud fotoresisti kihi kiirguse mõõtmise graafik 490 nm juures ergastatuna. (b) Luminestsents vs ergastus vs intensiivsus 1mg R6G-ga katseobjektiga.

5.4 Värvainega dopeeritud resonatorite analüüs

Järgnevalt analüüsitakse värvainega dopeeritud resonatoreid, mis olid valmistatud eelnevate doositesti ja dopeerimise testobjektide katsete teadmiste tulemusena. Kuna eelnevalt oli doositesti objekti puhul olnud optimaalseks doos 140 mJ/cm^2 defookusega 3 ja sealsed resonatorid olid ka mõõdetud, vaadeldi ka edaspidi kõikide dopeeritud objektide puhul enamasti neid doos-defookus alasid.

5.4.1 Dopeeritud fotoresistiga FP resonatorite OM tulemused

Joonisel 24 on näha pildid dopeeritud resonatoritega objektidest doos 140 mJ/cm² defookus 3 aladel. On näha, et eelnevalt optimaalseks arvatud alal ei ole fotoresist täielikult eemaldunud. Seega oleks dopeeritud objektide puhul pidanud doosi tõstma, et fotoresist täielikult eemaldada. Samuti on 1 mg värvainet sisaldava objekti puhul näha suurt defekti, mis mõjutab ka mõningaid resonatoreid.



Joonis 24. Disain ja sellele vastavad pildid värvainega dopeeritud FP resonatoritest doos 140 mJ/cm² def 3 alal.

5.4.2 Läbilaskvus-ja peegeldumisspektrid

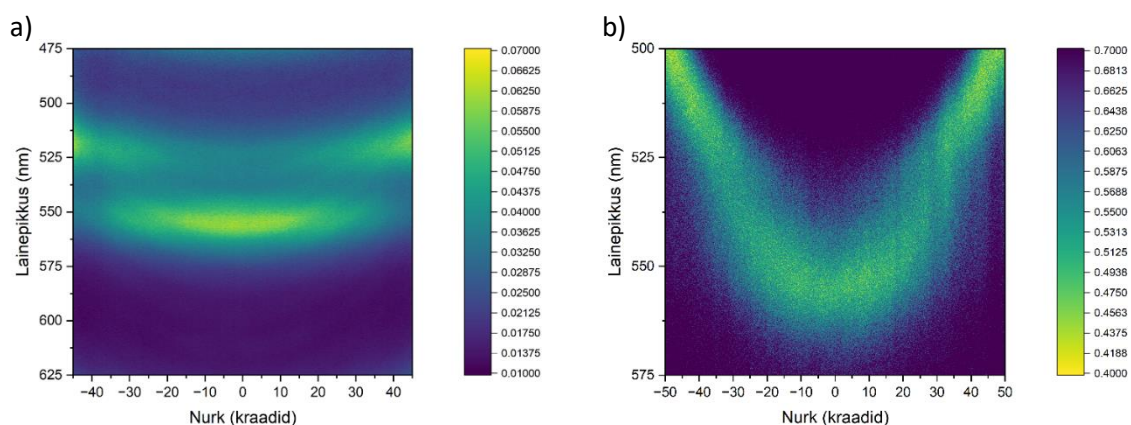
Et hinnata valmistatud resonatorite kasutatavust tugevseotud süsteemide rakendustes, siis viidi läbi polaritoonika proovide puhul standardsed nurgast sõltuva neeldumis- ja peegeldumissektrite mõõtmised. Selleks kasutati isehitatud ja mikroskoobiga ühendatud Fourier tasandi ehk tagumise fokaaltasandi spektromeetrit.[15] Mõõdeti 3 mg värvainega dopeeritud objekti resonatorite läbilaskvusi ja peegeldumisi sõltuvalt valguse objektile langemise nurgast, mis tühjade resonatorite puhul omavad parabooli kuju (nn dispersiooni kõverad). Mõõtmised olid teostatud 100× suurendusega objektiviga, mille apertuurarv (NA) oli 0,9, mis määrab maksimaalse mõõdetavaks langemisnurgaks 64 kraadi. Läbilaskvuse mõõtmise korral tuleb arvestada mikroskoobi aluslaua all paikneva kondensoriga, mille NA on 0,8, kuna sellisel juhul langeb valgus objektile alt ülesse. See tähendab, et valgus langeb objektile maksimaalselt ca 53 kraadise nurga all. Kõige rohkem tugevseotud seisundeid või nendeks potentsiaali (Rabi lõhenemist) leiti 140 mJ/cm² doosil, defookus ei teinud vahet. Joonisel 25 on toodud ühe sellise resonatori (RGB 220) mõõtmised sõltuvalt nurgast.

On näha paraboolse moodi dispersiooni kõvera lõhenemist läbipaistvusspektris, kuid see on põhjustatud värvaine neeldumisest. Et tegu oleks kindla tugevseotud seisundile viitava efektiga peab lõhenemine olema nähtav ka peegeldus- ja neeldumisspektris. Kuna mõõdetud peegeldusspekter selgelt lõhenenud ei ole siis tugevseotud seisundit antud kontsentratsioonil ei

saavutatud. Samas viitab parabooli kõverdus ja selle ebahühtlane kuju 530 – 540 nm piirkonnas sellele, et saavutati tugevseotud seisundile lähedane olukord. Kuna Rabi lõhenemine on ruutjuurses sõltuvuses molekulide arvust

$$\Omega_R = \sqrt{\frac{N}{V}} \frac{e}{\sqrt{\epsilon_0 m}} \propto \sqrt{N} \quad (3)$$

kus kus Ω_R on Rabi lõhenemine, N on molekulide arv, V on ruumala, ϵ_0 on dielektriline läbitavus, m on mass, e on elektroni laeng, siis on võimalik, et tugevseotud seisund ei ole saavutatud värvaine väikse kontsentratsiooni tõttu. Uurides kirjandust, sai teada, et peaks kontsentratsiooni veel ca 10× suurendama, et saavutada tugevseotud seisund ja näha selgeid polariton tasemeid ning Rabi lõhenemist. [15,16,28]

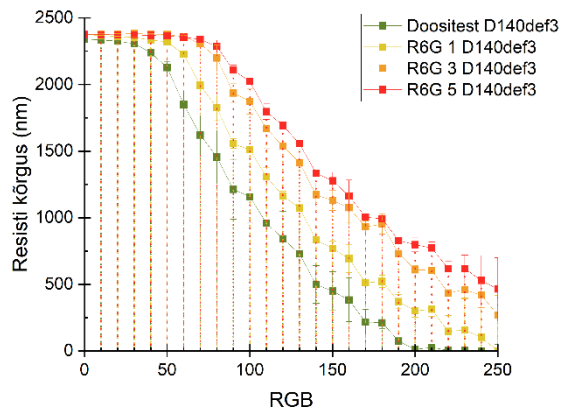


Joonis 25. Nurgast sõltuvus 3 mg dopeeritud doos 140 def 3 RGB 220 resonaatoril. (a) Läbilaskvus. (b) Peegelduvus.

Profilomeetriselised mõõtmised näitasid, et selle konkreetse resonaatori kõrguseks on 435 nm. See jääb samasse vahemikku, milles tuvastati huvipakkuvad paksused doositesti abil (vt joonis 19). Seega võib järeldada, et kasulike resonaatorite paksused jäävad alla 500 nm ja olenevalt dopeeritava värvaine kontsentratsioonist saab hinnata selleks vajalikku doosi ja halltooni väärtust.

5.5 Värvainega dopeerimata ja dopeeritud resonaatorite profilomeetria

Profilomeetria kõrgusprofiilid dopeeritud ja dopeerimata resonaatorite vahel vastavuses halltoonide väärtustega on näidatud joonisel 26. Mida suurem on värvaine kontsentratsioon, seda suuremaks jääb fotoresisti paksus erinevatel RGB väärtustel. Selle probleemi lahendamiseks peaks protsessi optimeerima nii, et valge ala disainil tegelikkuses kindlasti nullkõrgusele vastaks, mida võiks teha doosi tõstmisega. Siis saaks ka täpsemalt defineerida vastavaid resonaatorite kõrgusprofiile.



Joonis 26. Profilomeetria kõrgusprofiilid dopeerimata ning erinevate R6G kontsentratsioonidega resonatoritel vastavalt halltoonide väärtustele tavalisel alal.

Seega vähendab dopeerimine UV-kiirituse mõju fotoresistile ja R6G-ga resisti dopeerides saadi paksemad resonatorikihid. Erinevate allikate kohaselt on R6G lagunemine otsese fotolüüsiga väga ebaefektiivne ning vajaks väga kõrge energiaga UV valgust (kasutatud masinal mõõdukas UV) [33,34]. Kiiritamisprotsessis kasutatav UV valgus ei suuda seega R6G molekule ära lõhkuda ja värvimolekulid on süsteemis suhteliselt stabiilsed. Esineb nõ valguse varjestatuse efekt – mida läbipaistmatum on fotoresisti kiht (suurem värvaine dopeering) seda raskem on valgusel jõuda järgmisesse kihti seda kiiritama, kuna värvaine neelab footonid ära. See vähendab samuti kiirituse efektiivsust.

6. Kokkuvõte

Bakalaureustöö teoreetilises ülevaates tutvustati Fabry-Pérot resonatoreid, nende ehitust ja rakendust ning seletati halltoonlitograafia meetodit. Kirjeldati ka värvainega dopeerimise mõju süsteemile.

Fabry-Perot tüüpi optiliste resonatorite valmistamiseks kasutati praktilises osas kombinatsiooni erinevatest meetoditest. Klaas kaeti elektronkiirsadestuse meetodil õhukese alumiiniumi kihiga. Seejärel kaeti see puhasruumis fotoresisti kattega, kuhu halltoonlitograafia abil eelnevalt valmistatud kujunduse maatriks sisse ilmutati. Sama protsess viidi läbi värvainega dopeeritud fotoresisti puhul. Veelkord alumiiniumiga katmisel valmisid erinevatel doosidel ja defookustel tehtud resonatorite maatriks.

FP resonatorite (nii värvainega dopeeritud kui ka dopeerimata) karakteriseerimiseks uuriti nende pinnakvaliteeti, resonatorite kihipaksust ning viidi läbi ka optilisi mõõtmisi. Kasutades tagumise fokaaltasandi spektromeetrit prooviti tuvastada tugevseotud seisundeid, kuna see teema on suure teadusliku tähelepanu all oma potentsiaalse rakendusliku tähtsuse tõttu – oodatakse uusi tehnoloogilisi arenguid optikas, kvantmehaanikas, polaritonkeemias ja ka toatemperatuurse Bose-Einsteini kondensatsiooni protsessi uurimises ja kasutuses. Kasutades mõõtmiste tulemusi anti hinnang RGB väärtuse vastavusest resonatorite paksusele.

Meetod valmistada ühekorruga palju värvainega dopeeritud FP resonatoreid kasutades halltoonlitograafiat oli edukas. Mõõdetud spektrites ei olnud selget lõhenemist näha, kuid värvaine kontsentratsiooni suurendamisega on võimalik see probleem tõenäoliselt lahendada. Kuigi meetod vajab veel optimeerimist, jõuti tähtsa tulemuseni – antud meetodiga on võimalik valmistada tugevsidestatud süsteemide uurimisobjekte, saavutada tugevseotud süsteeme ning neid karakteriseerida. Resonatorite valmistamise protsessi optimeerimist jätkatakse.

7. Summary

The theoretical overview of the bachelor's thesis introduced Fabry-Pérot resonators, their structure and applications, and explained the grayscale lithography method. The effect of dye doping on the system was also described.

In the practical part, a combination of different methods was used to fabricate Fabry-Pérot type optical resonators. A thin layer of aluminum was deposited onto glass using electron beam evaporation. This was then coated in a cleanroom with a photoresist layer, into which a pre-designed pattern matrix was developed using grayscale lithography. The same process was carried out using dye-doped photoresist. After coating with aluminum once more, a matrix of resonators made with different doses and defocus settings was created.

To characterize the FP resonators (both dye-doped and undoped) surface quality, layer thickness, and optical measurements were examined. A back focal plane spectrometer was used in an attempt to detect strongly coupled states, as this topic is under significant scientific interest due to its potential practical applications – including expected technological advancements in optics, quantum mechanics, polaritonic chemistry, and in the study and application of room-temperature Bose-Einstein condensation. Based on the measurement results, the correlation between RGB values and resonator thickness was assessed.

The method of fabricating many dye-doped FP resonators at once using grayscale lithography was successful. No clear splitting was observed in the measured spectra, but this issue can likely be resolved by increasing the dye concentration. Although the method still requires optimization, an important result was achieved – it is possible to fabricate objects for studying strongly coupled systems, achieve strong coupling, and characterize these systems using this method. The optimization of the resonator fabrication process will continue.

8. Kasutatud kirjandus

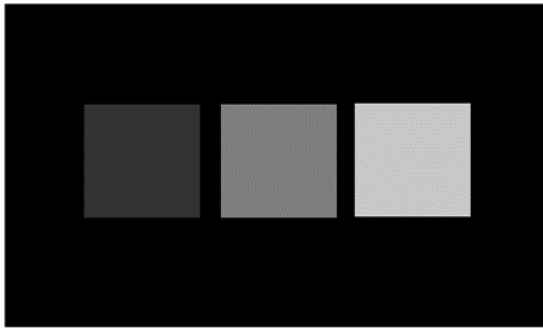
1. Stavenga DG. Thin Film and Multilayer Optics Cause Structural Colors of Many Insects and Birds. *Mater Today Proc.* 2014;1: 109–121. doi:10.1016/j.matpr.2014.09.007
2. van der Kooi CJ, Wilts BD, Leertouwer HL, Staal M, Elzenga JTM, Stavenga DG. Iridescent flowers?: Contribution of surface structures to optical signaling. *New Phytol.* 2014;203: 667–673. doi:10.1111/nph.12808
3. Macleod HA, Macleod HA. *Thin-film optical filters.* 4. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press; 2010.
4. Yang Z, Chen Y, Zhou Y, Wang Y, Dai P, Zhu X, et al. Microscopic Interference Full-Color Printing Using Grayscale-Patterned Fabry–Perot Resonance Cavities. *Adv Opt Mater.* 2017;5: 1700029. doi:10.1002/adom.201700029
5. Zhu J, Wu Z. Wide Color Gamut and Multi-Band Color Filtration With MIM Structure Plasmonic Filters. *Adv Mater Technol.* 2025;10: 2401733. doi:10.1002/admt.202401733
6. Asl AB, Ahmadi H, Rostami A. Dynamically-Tunable Narrowband Color Sensor Compatible with CMOS Technology. *IEEE Sens J.* 2025; 1–1. doi:10.1109/JSEN.2025.3562116
7. Ma Q, Li L, Wei F, Sun J, Yu F, Huang J, et al. High sensitivity sensors based on open cavity in-fiber Fabry–Perot and Mach–Zehnder interferometers. *J Opt Technol.* 2021;88: 37. doi:10.1364/JOT.88.000037
8. Guo X, Jiang C, Ye W, Sun S, Liu C, Huang H. Ultra-high-sensitivity gas pressure sensor based on a cascaded Fabry-Perot interferometer and the Vernier effect. *J Opt Technol.* 2023;90: 46. doi:10.1364/JOT.90.000046
9. Hayat A, Alamgir, Jin Y, Iqbal N, Zhai T, He S. *Lasers Based on Periodic and Quasiperiodic Planar Feedback Cavities: Designs, Principle, and Potential Applications.* *Prog Electromagn Res M.* 2024;126: 37–63. doi:10.2528/PIERM24013106
10. Velha P. *Integrated Fabry–Perot Cavities: A Quantum Leap in Technology.* *Encyclopedia.* 2024;4: 622–629. doi:10.3390/encyclopedia4020039
11. Al Ghamdi A, Dawson B, Jose G, Beige A. Remote Non-Invasive Fabry-Pérot Cavity Spectroscopy for Label-Free Sensing. *Sensors.* 2022;23: 385. doi:10.3390/s23010385
12. Stilson C, Pal R, Coutu RA. Fabrication of 3D surface structures using grayscale lithography. In: Maher MA, Resnick PJ, editors. *San Francisco, California, United States;* 2014. p. 89730E. doi:10.1117/12.2037361

13. Rammohan A, Dwivedi PK, Martinez-Duarte R, Katepalli H, Madou MJ, Sharma A. One-step maskless grayscale lithography for the fabrication of 3-dimensional structures in SU-8. *Sens Actuators B Chem.* 2011;153: 125–134. doi:10.1016/j.snb.2010.10.021
14. Bélot G, Fay A, Sungauer É, Moreau M, Bérard-Bergery S, Gourgon C. 3D structures sidewalls tuning using smart grayscale photolithography mask strategies. 39th European Mask and Lithography Conference (EMLC 2024). SPIE; 2024. pp. 64–73. doi:10.1117/12.3028461
15. Dmitrijeva E. Fabry-Pérot tüüpi resonaatorite valmistamine, karakteriseerimine ja rakendamise tugevseotud süsteemide uurimisel.
16. Faruk MO, Jerop N, Noginov MA. Emission of R6G dye in Fabry–Perot cavities in weak and strong coupling regimes. *J Opt Soc Am B.* 2020;37: 3200. doi:10.1364/JOSAB.403612
17. Wei H, Gu J, Ren F, Zhang L, Xu G, Wang B, et al. Smart Materials for Dynamic Thermal Radiation Regulation. *Small.* 2021;17: 2100446. doi:10.1002/sml.202100446
18. Grayscale Lithography. In: Heidelberg Instruments [Internet]. [cited 19 May 2025]. Available: <https://heidelberg-instruments.com/core-technologies/grayscale-lithography/>
19. Cuiling Gong, Hogan T. CMOS Compatible Fabrication Processes for the Digital Micromirror Device. *IEEE J Electron Devices Soc.* 2014;2: 27–32. doi:10.1109/JEDS.2014.2309129
20. Watson GP, Aksyuk V, Simon ME, Tennant DM, Cirelli RA, Mansfield WM, et al. Spatial light modulator for maskless optical projection lithography. *J Vac Sci Technol B Microelectron Nanometer Struct Process Meas Phenom.* 2006;24: 2852–2856. doi:10.1116/1.2387156
21. Rammohan A, Dwivedi PK, Martinez-Duarte R, Katepalli H, Madou MJ, Sharma A. One-step maskless grayscale lithography for the fabrication of 3-dimensional structures in SU-8. *Sens Actuators B Chem.* 2011;153: 125–134. doi:10.1016/j.snb.2010.10.021
22. Tan NYJ, Zhang X, Neo DWK, Huang R, Liu K, Senthil Kumar A. A review of recent advances in fabrication of optical Fresnel lenses. *J Manuf Process.* 2021;71: 113–133. doi:10.1016/j.jmapro.2021.09.021
23. He R, Wang S, Andrews G, Shi W, Liu Y. Generation of Customizable Micro-wavy Pattern through Grayscale Direct Image Lithography. *Sci Rep.* 2016;6: 21621. doi:10.1038/srep21621
24. Controlling Light-Matter Interaction between Localized Surface Plasmons and Quantum Emitters.

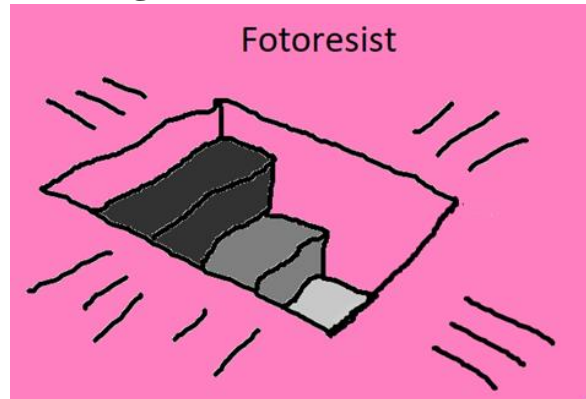
25. Nedumpara RJ, Geetha K, Dann VJ, Vallabhan CPG, Nampoory VPN, Radhakrishnan P. Light amplification in dye doped polymer films. *J Opt Pure Appl Opt.* 2007;9: 174–179. doi:10.1088/1464-4258/9/2/010
26. Schwartz T, Hutchison JA, Genet C, Ebbesen TW. Reversible Switching of Ultrastrong Light-Molecule Coupling. *Phys Rev Lett.* 2011;106: 196405. doi:10.1103/PhysRevLett.106.196405
27. Lidzey DG, Bradley DDC, Skolnick MS, Virgili T, Walker S, Whittaker DM. Strong exciton–photon coupling in an organic semiconductor microcavity. *Nature.* 1998;395: 53–55. doi:10.1038/25692
28. Kautto M. Spectroscopic study of strong coupling between R6G-dye and optical cavities. 2018.
29. Ogunsipe A. Solvent Effects on the Spectral Properties of Rhodamine 6G: Estimation of Ground and Excited State Dipole Moments. *J Solut Chem.* 2018;47: 203–219. doi:10.1007/s10953-017-0706-8
30. Eizner E, Avayu O, Ditcovski R, Ellenbogen T. Aluminum Nanoantenna Complexes for Strong Coupling between Excitons and Localized Surface Plasmons. *Nano Lett.* 2015;15: 6215–6221. doi:10.1021/acs.nanolett.5b02584
31. Kuttruff J, Romanelli M, Pedrueza-Villalmanzo E, Allerbeck J, Fregoni J, Saavedra-Becerril V, et al. Sub-picosecond collapse of molecular polaritons to pure molecular transition in plasmonic photoswitch-nanoantennas. *Nat Commun.* 2023;14: 3875. doi:10.1038/s41467-023-39413-5
32. Spectral Thin Film Reflectance Calculator for Thin-Film Stacks. In: KLA [Internet]. [cited 28 May 2025]. Available: <https://www.kla.com/products/instruments/reflectance-calculator>
33. Mohod AV, Momotko M, Shah NS, Marchel M, Imran M, Kong L, et al. Degradation of Rhodamine dyes by Advanced Oxidation Processes (AOPs) – Focus on cavitation and photocatalysis - A critical review. *Water Resour Ind.* 2023;30: 100220. doi:10.1016/j.wri.2023.100220
34. Majumder S, Chatterjee S, Basnet P, Mukherjee J. Plasmonic photocatalysis of concentrated industrial LASER dye: Rhodamine 6G. *J Mol Liq.* 2022;358: 119138. doi:10.1016/j.molliq.2022.119138

Lisad

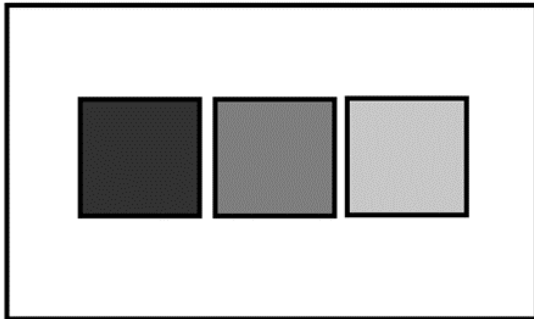
Lisa 1. Halltoonides disain, inverteerimine ning tulemused fotoresistis



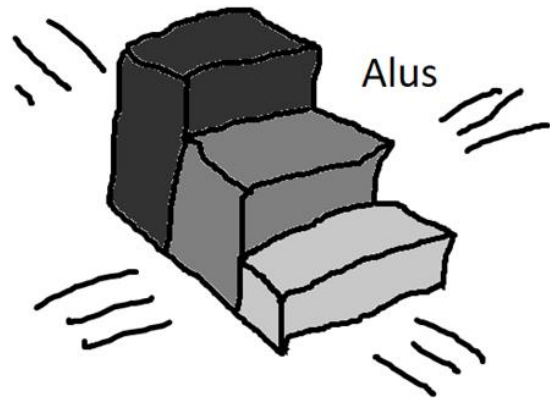
Hallskaalas disain.



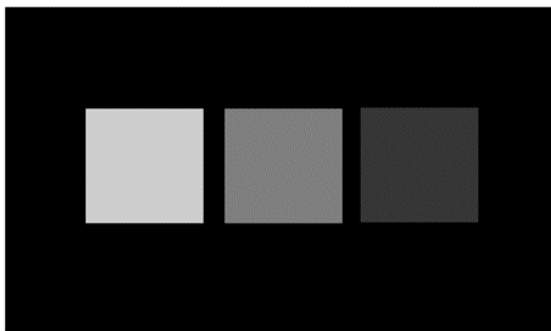
Sellele vastav tulemus peale fotoresisti kiiritamist ja ilmutamist.



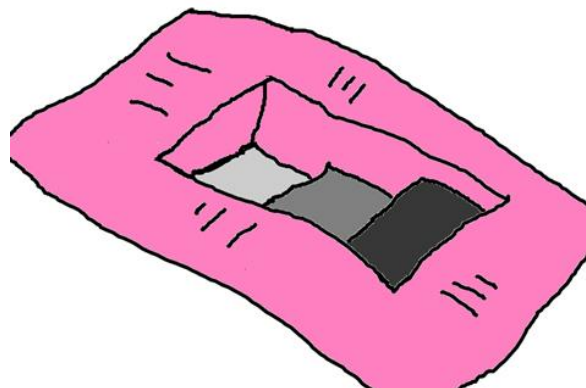
Inverteeritud taustaga disain.



Sellele vastav tulemus.

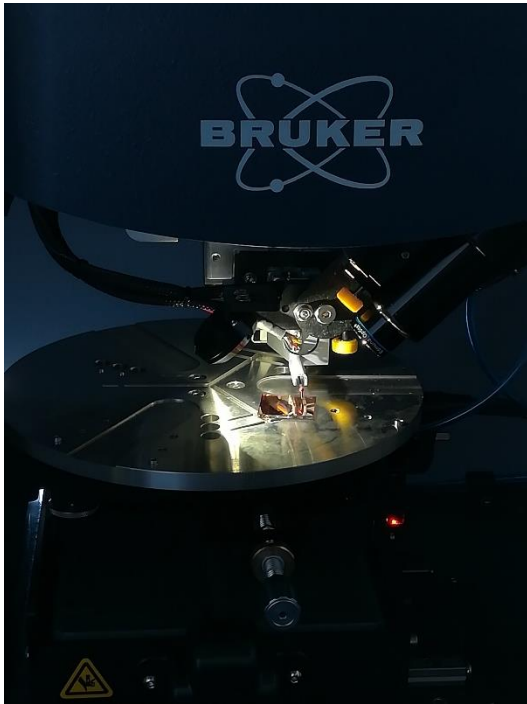


Inverteeritud sisemiste kastidega disain.



Sellele vastav tulemus fotoresistis.

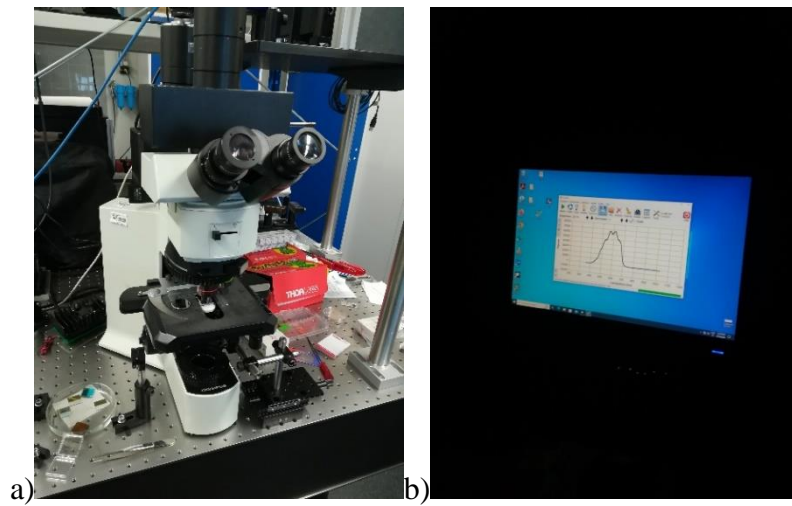
Lisa 2. Kasutatud masinate pildid



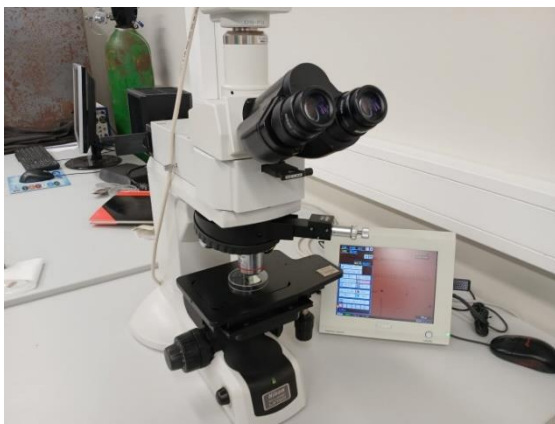
Joonis 27. Profilomeeter Dektak XT



Joonis 28. Ellipsomeeter GES-5E.



Joonis 29. (a) Mõõtmisteks kasutatud mikroskoop spektromeetriga. (b) Mõõdetud tulemus kasutajaliideses.

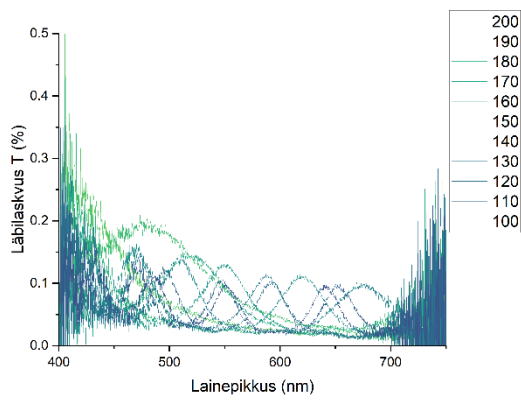


Joonis 30. Pildistamiseks kasutatud mikroskoop Nikon Eclipse LV150.

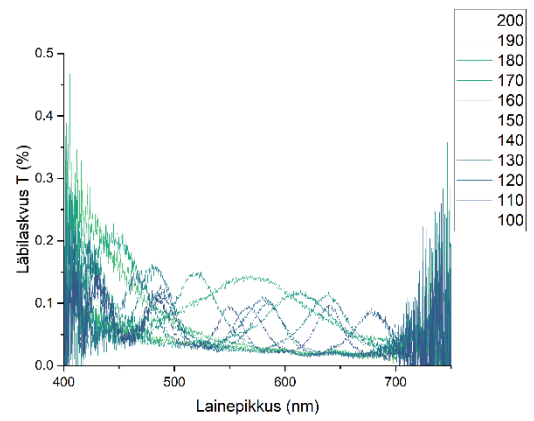


Joonis 31. (a) Elektronkiir-aurustamise seade, VS-17. (b) Seadme ülaosa kuhu kinnitatakse vastava hoidjaga objektid.

Lisa 3. Lisa T mõõtmised

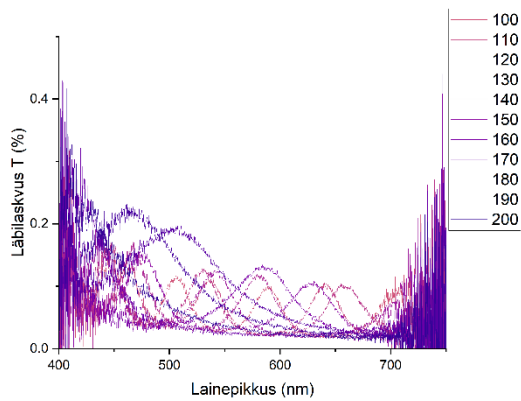


a)

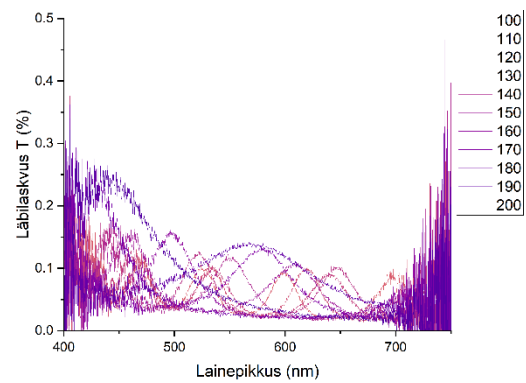


b)

Joonis 32. (a) D140Def3 25x25 x-teljeliste tavalisel alal olevate resonaatorite läbilaskvus. (b) D140Def3 25x25 y-teljeliste tavalisel alal olevate resonaatorite läbilaskvus.



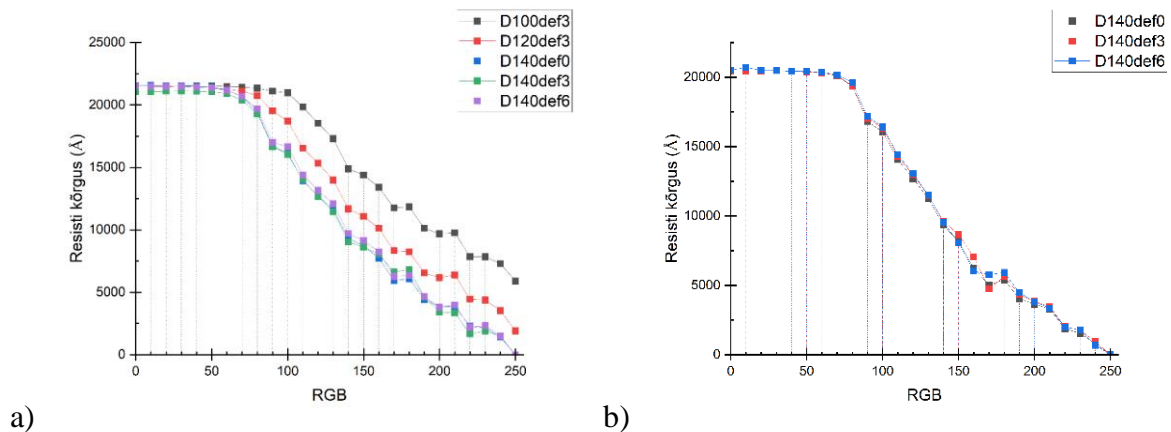
a)



b)

Joonis 33. (a) D140Def3 25x25 x-teljeliste inverteeritud alal olevate resonaatorite läbilaskvus. (b) D140Def3 25x25 y-teljeliste inverteeritud alal olevate resonaatorite läbilaskvus.

Lisa 4. Dopeeritud resonatorite profilomeetria

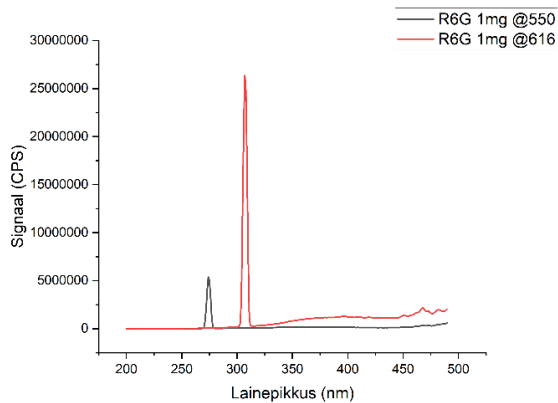


Joonis 34. (a) Profilomeetriga mõõdetud R6G 3 mg resonatorite kõrgusprofiilid tavalisel alal. (b) Profilomeetriga mõõdetud R6G 3 mg resonatorite kõrgusprofiilid inverteeritud alal.

Joonistel 8 a ja 8 b on 3 mg värvaine dopeerimisega resonatorite profilomeetria mõõtmised nii tavalises kui ka inverteeritud alal. On näha, et nagu doositestilgi väheneb ka siin doosi tõstmisel resonatorite paksus. Defookus ei anna mingit püsivat ühtset efekti – peaks jaotuma pidevalt 0 kõige paksemaks, 3 sellest õhemaks ja 6 veel õhemaks, kuid see jaotus on näha vaid mõnel juhul ja enamasti on need jaotumised seosetud.

Vaadates joonist 34 a ja sellele vastavat OM pilti näeme, et RGB-le 250 vastav resonator on tegelikult värviline, ehk selle paksuse väärtus ei ole kindlasti null. Põhjus, miks graafik ja reaalsus kokku ei lange on see, et paksuste arvutamiseks olid resisti pinna koordinaadid ja sealt järk-järgult resonatorite tõttu langenud koordinaadid (tavalisel alal). Kuna aga viimane resonator ei olnud lõpuni söövitatud siis tegelikult ei tea siin päris kihi paksust – seetõttu ka ei saa öelda kui paks viimane resonator oli. Kõik mõõdetud punktid on seega 34 a graafikul veidi madalama kõrguse väärtusega, kui tegelikult. Selle probleemi lahendamiseks peaks protsessi optimeerima nii, et valge ala disainil tegelikkuses kindlasti null-kõrgusele vastaks, nt doosi tõstmisega.

Lisa 5. Ergastuse graafik



Joonis 35. 1mg R6G-ga dopeeritud testobjekti ergastuse mõõtmise graafik.

Joonisel 35 on ära toodud ergastuse mõõtmise graafik. On ära toodud kaks mõõtmist, mõlemad 1mg R6G dopeeringuga, kuid esimesel mõõtmisel ergastasime me objekti 550 nm juures ja siis näeme üpris madalat signaali 275 nm juures, teisel mõõtmisel toimus ergastus 616 nm juures ning näeme palju suuremat signaali 310 nm juures. Energia liikumisel tavalisest olekust ergastatud seisundisse ongi näha signaali kõrgemal energial (madalamal lainepikkusel).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaisa Katre Lepmets ,
(*autori nimi*)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
Halltoonlitograafia rakendamine värvainega dopeeritud Fabry-Pérot tüüpi ,
optiliste resonatorite valmistamiseks

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja(d) on Siim Pikker ja Tauno Kahro ,
(*juhendaja nimi*)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada Tartu Ülikooli digitaalarhiivi kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;

2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kaisa Katre Lepmets

29.05.2024