

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika Instituut

Kerttu Maria Peensoo

**OPTILISE KIU DISPERSIOONI KOMPENSEERIMINE
INTERFEROMEETRILISTE MÕÕTMISTE JAOKS**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:
Heli Lukner, PhD
Sandhra-Mirella Valdma, MSc

Kaitsmisele lubatud:

Tartu 2018

Optilise kiu dispersiooni kompenseerimine interferomeetriliste mõõtmiste jaoks

Käesolevas bakalaureuse töös koostati kaks optimeerimisalgoritmi selleks, et leida optimaalne klaasilindrite materjalide ning pikkuste kombinatsioon kompenseerimaks tootja poolt ette antud kiu dispersiooni valitud kiu pikkuse jaoks. Üks algoritmidest põhines kombinatoorikal ning teine oli inspireeritud lõõmutamisest, mis on füüsikaline protsess, mille käigus kuumutatakse kindlat metalli, klaasi või kristalli sulamit üle sulamistemperatuuri ning seejärel jahutatakse aeglaselt kuni ideaalse kristallstruktuuri moodustumiseni.

Osutus, et lõõmutamisest inspireeritud algoritm annab täpsema tulemuse ning kasutab oluliselt vähem arvutusmahtu. Töö edasiarendus seisneb saadud tulemuste rakendamises ekperimendiolukorras.

CERCS: P200 Elektromagnetism, optika, akustika

Märksõnad: optiline kiud, dispersioon, interferomeetria

Compensating the dispersion of an optical fiber for interferometric measurements

In this thesis two optimizing algorithms were written to find the optimal combination of cylindrical glass materials with varying lengths, to compensate the dispersion for a given length of optical fiber. One of the algorithms did this by trying out all possible combinations and the other was based on annealing, which is a physical process in which a certain metal, glass or crystal is heated to above its melting temperature and then cooled slowly until the formation of an ideal crystal lattice.

It was found that the method using annealing gives a better result and uses less computational resources. Future work on this method would be to check the results in a physical experiment.

CERCS: P200 Electromagnetism, optics, acoustics

Keywords: optical fiber, dispersion, interferometry

Sisukord

Sissejuhatus	5
1 Teooria ülevaade	7
1.1 Valguse levimine keskkonnas ja Sellmeieri valem	7
1.2 Täielik sisepeegeldumine	8
1.3 Ühe- ja mitmemoodiline kiud	9
1.4 Kiudude liigitus ehituse järgi	10
1.4.1 Astmelise murdumisnäitajaga kiud	11
1.4.2 Muutuva murdumisnäitajaga kiud	12
1.5 Dispersioon optilistes kiududes	13
1.5.1 Kromaatiline dispersioon	14
1.6 Interferomeetria	15
2 Meetodid	17
2.1 Interferomeetrilised mõõtmised SEA TADPOLE-iga	17
2.2 Dispersiooni tasakaalustamine kombinatoorika meetodil	20
2.3 Lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritm	23
2.4 Dispersiooni tasakaalustamine lõõmutamise meetodil	24
3 Tulemused ja analüüs	26
3.1 Dispersiooni kompenseerimine kvartsklaasiga	27
3.2 Dispersiooni kompenseerimine kuut erinevat klaasitüüpi kombineerides	29
3.3 Järeldused	32
Kokkuvõte	33
Tänuavaldused	35
Kirjandus	36

Sissejuhatus

Ideed valgusega informatsiooni edastada kasutas aastal 1880 ära Alexander Graham Bell oma leiutatud seadmes, mida ta kutsus fotofoniks. Seame tööpõhimõtte seisnes kõne vahendamisel läbi õhu saatjast vastuvõtjasse päikesevalguse abil. 1960. aastal leiutati esimene laser, mida nüüd kasutatakse valgusallikana optilistes kommunikatsioonisüsteemides, sest erinevalt päikesevalgusest hajub laserivalgus palju vähem. [1][2]

Nüüdisaja kommunikatsioonis on õhk asendatud optilise kiuga, mis kaitseb erinevate atmosfääri mõjutuste, näiteks vihma ja udu, eest ning võimaldab valgust efektiivsemalt pikkade vahemaade taha kanda. Lisaks kommunikatsioonile on optilised kiud asendamatud ka mitmetes teistes eluvaldkondades. Meditsiinis kasutatakse neid näiteks endoskoopides, mis võimaldavad vaadata õoneselunditesse. Sõjatööstuses, aga ka igapäeva lennunduses, mõõdetakse optilisest kiust güroskoopide abil ruumilist sihti. [3][4]

Optiliste kiudude kasutamisel on oluline teada, kuidas kiust väljunud valgusimpulss on muutunud võrreldes kiudu siseneva valgusimpulsiga. Selleks uuritakse, kuidas kiududele mõjub kromaatilise dispersioon, mille tõttu on kiust väljumisel erinevate lainepikkusega komponendid viivitatud. Üks võimalus optilise kiu dispersiooni leida, on interferomeetriliste mõõtmiste põhjal. Tekkiv interferentsimuster on kaardunud, kui interferomeetri mõõte- ning võrdlusõla dispersioonid on erinevad. [5] [1]

Käesoleva töö eesmärk on koostada optimeerimisalgoritm, mille väljundiks on tuntud murdumisnäitajaga klaaside kombinatsioon, mille dispersioonikoeffitsiendi väärtus sarnaneb enim astmelise murdumisnäitajaga ühemoodilise optilise kiu 630HP (Thorlabs) omale. Paigutades sellise klaasi kombinatsiooni interferomeetri võrdlusõlale ja uuritava kiu mõõteõlale, saab teostada dispersiooni interferomeetrilisi mõõtmisi.

Töö koosneb kolmest osast: teooria ülevaatest, meetoditest ning tulemusest ja analüüsist. Teooria osa annab ülevaate astmelise ja muutuva murdumisnäitajaga kiududest, kirjeldab, mis põhjustab optilistes kiududes dispersiooni ning teeb ülevaate interferomeetria põhimõtetest. Meetodite peatükk keskendub Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi füüsikalise optika laboris kasutatavale SEA TADPOLE interferomeetri ehitusele ja tööpõhimõttele ning tutvustab

kaht optimeerimisalgoritmi. Esimene neist kasutab ära kombinatoorikat ning teine tugineb füüsikalisele protsessile, mille nimetus inglise keeles on *simulated annealing*. Tulemuste ja analüüsi peatükk võrdleb kahe optimeerimisalgoritmi efektiivsust.

Peatükk 1

Teooria ülevaade

Käesolev peatükk keskendub optilistele kiududele. Esiteks käsitletakse murdumisnäitajat ehk parameetrit, mis iseloomustab läbipaistvaid materjale, ning seejärel kirjeldatakse, kuidas antud parameeter on seotud täieliku sisepeegeldumisega, mille tõttu valgus saab kius levida. Lisaks antakse ülevaade ühe- ja mitmemoodilistest kiududest. Peale seda liigitatakse optilised kiud nende ehituse järgi ning kirjeldatakse valguse levikut nendes kiududes. Lõpetuseks antakse ülevaade valgusimpulsi levimisest kius ning dispersiooniliikidest, mis sellele valgusimpulsile kiu poolt mõjuvad. Samuti käsitletakse interferomeetriat, mis on meetod optilise kiu dispersiooni mõõtmiseks.

1.1 Valguse levimine keskkonnas ja Sellmeieri valem

Valguse langemisel kahe keskkonna piirpinnale osa valgusest murdub ja osa peegeldub. Valguse murdumisel muutub selle kiirus vastavalt optilisele tihedusele. Keskkonna optilist tihedust kirjeldab murdumisnäitaja

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

mis sõltub valguse kiirusest aines v ja vaakumis c . [3]

Läbipaistvate materjalide murdumisnäitaja sõltuvust lainepikkusest saab analüütiliselt kirjeldada Sellmeieri valemiga. Murdumisnäitaja füüsikalist sisu saab kirjeldada atomaarsel tasandil. [3]

Sõltuvalt pealelangeva footoni sagedusest saab aatom sellele reageerida kahel erineval viisil: hajutades valgust või neelates selle. Üldiselt aatom hajutab valgust, suunates selle muid mõjutusi põhjustamata ümber. Kui aga footoni energia vastab ühele aatomi energiatasemele,

aatom ergastub ja footon neelatakse. [3][6]

Järgnevalt vaadeldakse lähemalt, mis juhtub, kui elektromagnetlaine langeb ainele. Väline väli paneb elektronkatte elektronid aatomituuma suhtes valguse omavõnkesagedusel võnkuma. Seega tekivad elektrilised dipoolid, kus vastasmärgiga laengud (elektronid ja aatomituum) on lahku viidud, ehk toimub dielektriline polarisatsioon. Dipooli võnkumine tekitab omakorda sama sagedusega elektromagnetkiirguse, mis on faasis peale langeva valgusega, kui selle valguse sagedus on väiksem omavõnkesagedusest. Vastupidises olukorras on faasivahe π . [6][3]

Dielektriline vastuvõtlikkus (χ) iseloomustab optilise materjali võimet elektriväljas polariseeruda. Vastuvõtlikkuse imaginaarosa kirjeldab neeldumist näiteks resonantsilähedastel sagedustel ning reaalosa võtab lisaks arvesse resonantssagedusest väiksemaid sagedusi. Üleüldine vastuvõtlikkus moodustub nende kahe osa superpositsioonina. Kasutades seost murdmisnäitaja ja vastuvõtlikkuse reaalosa vahel, saab resonantssagedustest eemal vastuvõtlikkust ligikaudu kirjeldada summana, mida nimetatakse ka Sellmeieri valemiks.

$$n^2 \approx 1 + \chi = 1 + \sum_i \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega_0^2} \frac{v_i^2}{v_i^2 - v^2} = 1 + \sum_i \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m \omega_0^2} \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_i^2} \quad (1.2)$$

Summas tähistab λ_i resonantssagedustele v_i vastavaid lainepikkuseid, N aatomite arvu ühe ruumiühiku kohta, e elektronide laengut, ϵ_0 dielektrilist konstanti, m dipooli massi ja $\omega_0 = \sqrt{\frac{\kappa}{m}}$ resonantsi nurksagedust, kus κ on dipooli taastav jõud. [6]

1.2 Täielik sisepeegeldumine

Valguse langemisel optiliselt tihedamast keskkonnast hõrdedama keskkonna piirpinnale võib toimuda täielik sisepeegeldumine. Selleks peab olema täidetud tingimus, kus valguse langemisnurk peab olema suurem või võrdne kriitilise nurgaga, mille saab arvutada Snelli seaduse abil.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (1.3)$$

Snelli seadus ütleb, et esimese keskkonna murdmisnäitaja (n_1) ja langemisnurga (θ_1) siinuse korrutis on võrdne teise keskkonna murdmisnäitaja (n_2) ja murdmisnurga (θ_2) siinuse korrutisega.

Kriitiline nurk θ_k on valguse langemisnurk, mille korral valgus optiliselt hõredamasse keskkonda ei sisene, vaid levib edasi mööda kahe keskkonna vahelist piirpinda. Selleks, et optilises materjalis saaks toimuda täielik sisepeegeldumine peab kehtima seos $\theta_2 \geq 90^\circ$. Seega

avalduub kriitiline nurk järgmiselt. [3]

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (1.4)$$

Optilistes kiududes on valguse levik võimalik täieliku sisepeegeldumise tõttu. Enim levinud optiline kiud koosneb südamikust, kus levib enamik valgusest, kattedkihist ja kaitsekihist. Kattedkihi murdumisnäitaja (n_k) on südamiku omast (n_s) madalam ning seetõttu levib valgus täieliku sisepeegeldumise teel kiu ühest otsast teise. [5]

Numbriline ava (NA) kirjeldab kiu otsale langeva valguse nurka optilise peatelje suhtes ehk sisenemisnurka (θ_a), millest suurema nurga all täielikku sisepeegeldust ei teki. Numbrilise ava saab kirja panna kriitilise nurga (θ_c) abil. [6]

$$NA = \sin(\theta_a) = n_s \sqrt{1 - \cos^2(\theta_c)} = n_s \sqrt{1 - \cos^2\left(\frac{n_k}{n_s}\right)} = \sqrt{n_s^2 - n_k^2} \quad (1.5)$$

Kui täielikku sisepeegeldumist ei teki, levib osa valgusest optilise kiu südamikust kattedkihti ning sealt omakorda kiust välja. Seetõttu on oluline valgusallika paika panemisel kiu suhtes arvestada antud kiu numbrilise avaga.

1.3 Ühe- ja mitmemoodiline kiud

Optilises kius levivaid laineid kutsutakse moodilaineteks. Matemaatiliselt on need lained, mille lainevektori kiuga ristisuunaline komponent rahuldab tingimust $k = \frac{\pi}{a}m$, kus a on kiu südamiku läbimõõt ja $m = 1, 2, \dots$ on positiivne täisarv. Kiirteoptikas kirjeldab see valguskiirt, mis on peale kahekordset peegeldumist kius algse kiirega paralleelne. [6]

Moodid jagunevad levivateks ja kiirgivateks. Esimese korral levib valgus peamiselt kiu südamikust ning kattedkihis sumbub kiiresti. Leviku moodidele vastab levikonstant $\beta = n \frac{2\pi}{\lambda}$ vahemikus $n_k^2 < \beta^2/k^2 < n_s^2$, kus $k = 2\pi/\lambda$ on lainearv. Kiirgivatele moodidele vastab levikonstandi väärtus vahemikus $0 < \beta^2/k^2 < n_k^2$. [1]

Enamik kiude, mis tänapäeval toodetakse, on nii-öelda nõrgalt juhitud kiud (*weakly guiding fibers*), mis tähendab, et südamiku ja kattedkihi murdumisnäitajate väärtused on väga sarnased:

$$\Delta = \frac{n_s - n_k}{n_s} \ll 1. \quad (1.6)$$

Sellise kiu levikumode kutsutakse lineaarselt polariseeritud (LP) moodideks, sest moodis levib

elektromagnetväli on lineaarselt polariseeritud. Eksperimentaalselt on võimalik erinevaid LP moode eristada nende intensiivsusaotuse järgi. [7]

$$I_{lm} = I_0 J_l^2 \left(r \sqrt{n_s^2 k^2 - \beta^2} \right) \cos^2(l\phi) \quad r \leq a$$

$$I_{lm} = I_0 \left(\frac{J_l \left(a \sqrt{n_s^2 k^2 - \beta^2} \right)}{K_l \left(a \sqrt{\beta^2 - n_k^2 k^2} \right)} \right)^2 K_l^2 \left(r \sqrt{\beta^2 - n_k^2 k^2} \right) \cos^2(l\phi) \quad r \geq a \quad (1.7)$$

Intensiivsusaotuse indeksid l ja m tähistavad vastavalt intensiivsuse väärtuse varieeruvust asimuutnurgast ϕ ning radiaalkoordinaadist r sõltuvalt. Tähtedega J ja K on tähistatud vastavalt esimest tüüpi l järku Besseli funktsiooni ja teist tüüpi l järku modifitseeritud Besseli funktsiooni. [6]

Ühemoodilisele optilisele kiule vastab lineaarselt polariseeritud mood LP_{01} ehk peamood (joonis 1.1), milles leviva elektromagnetvälja intensiivsusaotus sarnaneb Gaussi jaotusele. Mitmemoodilistes kiududes levib valgus lisaks peamoodile ka kõrgemat järku moodides (joonis 1.2). Alljärgnevatel joonistel tähistavad x ja y valguse levimissuunaga ristisuunalisi komponente ning z kirjeldab valguse intensiivsust. [7]

Optilist kiudu nimetatakse ühemoodiliseks, kui $V < 2,405$, ning mitmemoodiliseks, kui $V \geq 2,405$. Parameeter V avaldub järgmiselt:

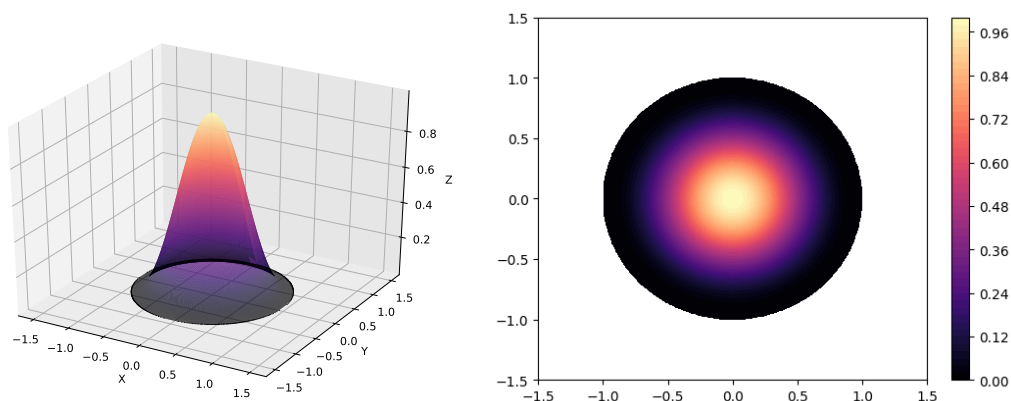
$$V = ka \sqrt{n_s^2 - n_k^2} = ka NA = \frac{2\pi}{\lambda} a NA, \quad (1.8)$$

kus $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ on lainearv vaakumis, λ on kiudu läbiva valguse lainepikkus vaakumis, a on kiu diameeter ning n_s on südamikü ja n_k on kattedihi murdumisnäitaja. [6]

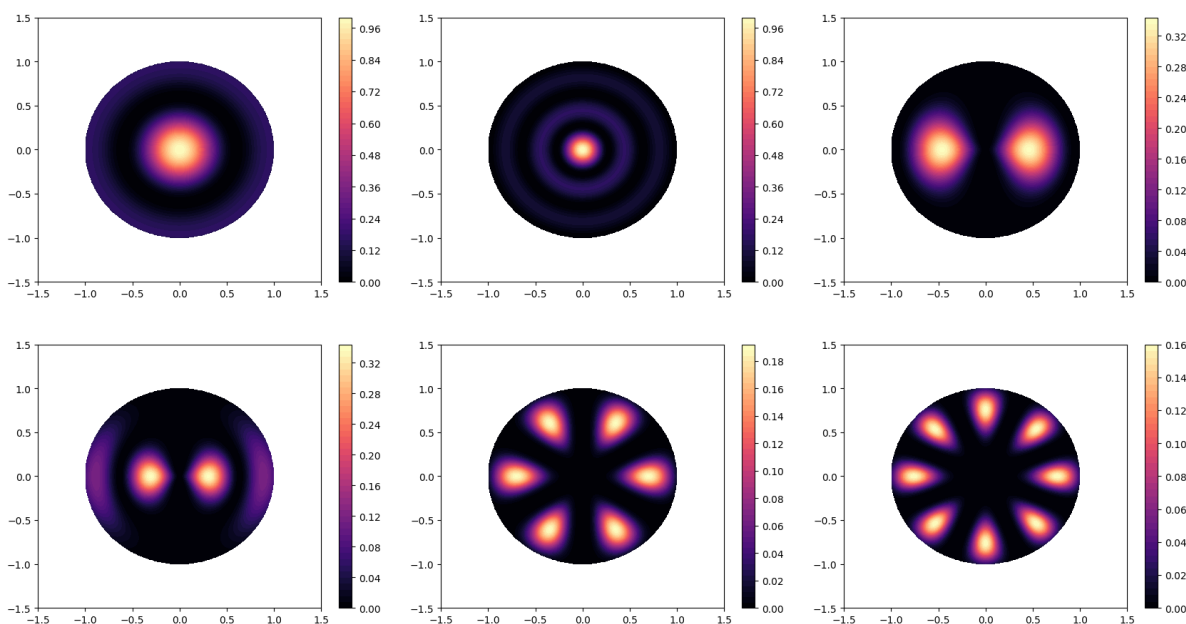
Valemist järeldub, et parameeter V sõltub lainearvu kaudu lainepikkusest. Sellest järeldub, et optilised kiud on ühe- ning mitmemoodilised mingis kindlas lainepikkuste vahemikus. Lainepikkuse, millele vastab parameetri V väärtus 2,405, jaoks on inglise keeles termin *cutoff wavelength*. Sellest lainepikkusest alates esineb lisaks peamoodile ka teine, kõrgemat järku mood. [8]

1.4 Kiudude liigitus ehituse järgi

Käesolev peatükk annab ülevaate kahest levinumast kiu tüübist: astmelise ja muutuva murdumisnäitajaga kiududest.



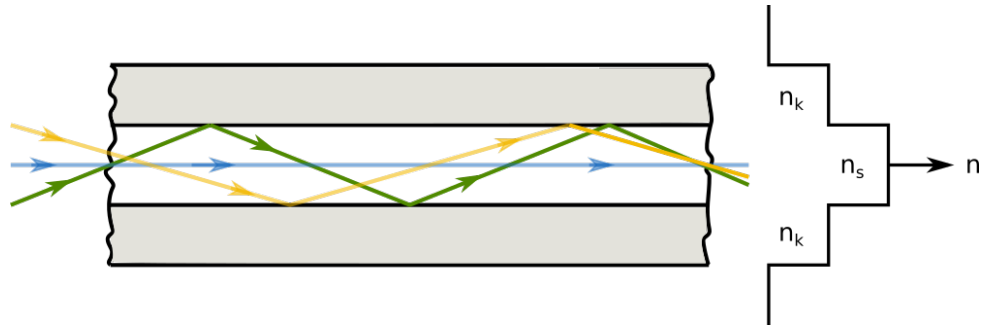
Joonis 1.1: Vasakul on näha LP_{01} moodi ehk peamoodi intensiivsusprofiil ruumiliselt. Paremalt on kujutatud selle läbilõige xy -tasandis. Mõlema graafiku väärtused on normeeritud ühele.



Joonis 1.2: Ülal vasakul on kujutatud LP_{02} , keskel LP_{03} ning paremal LP_{11} moodi intensiivsusprofili läbilõige. All vasakul on esitatud LP_{12} , keskel LP_{31} ning paremal LP_{41} moodi intensiivsusjaotus.

1.4.1 Astmelise murdumisnäitajaga kiud

Valguse levikut astmelise murdumisnäitajaga mitmemoodilises kius saab kirjeldada kiirteoptikale tuginedes. Kuna kiu südamikus on murdumisnäitaja konstantse väärtusega, siis valguskiir levib selles sirgjooneliselt kuni kattekihi ja südamiku piirpinnani ja peegeldub sealt, jäädes endiselt südamikku (joonis 1.3). Kiu ulatuses antud protsess kordub. Valguskiir, mis langeb optilisele peateljele, väljub kiust varem, võrreldes kiirega, mis siseneb kiudu nurga all – olenevalt valguse sisenemisnurgast erineb selle levikuaeg kius. [5]



Joonis 1.3: Astmelise kiu nimi tuleneb tema murdumisnäitaja profiilist.

Astmelise murdumisnäitajaga kiu moodide arv oleneb selle südamiku diameetrist. Ühemoodilise kiu korral on diameeter vahemikus $5 - 9\mu\text{m}$ ning kattekihi läbimõõt on $125\mu\text{m}$. Kiu südamiku murdumisnäitaja kogu diameetri ulatuses konstantne ning suurem kui kattekihi oma (joonis 1.3). [5]

Ligikaudselt on astmelise murdumisnäitajaga kiu, mis on mingis vahemikus ühemoodiline, moodide arv

$$N = \frac{V^2}{2} = \frac{(kaNA)^2}{2}, \quad (1.9)$$

kus V on optilise kiude iseloomustav füüsikaline parameeter (valem 1.8). [5]

Astmelise murdumisnäitajaga mitmemoodilise kiu südamiku diameeter on suurem ($50 - 970\mu\text{m}$) ning kattekihi paksus on enamasti $20\mu\text{m}$. Selle moodide arv avaldub järgmiselt. [3][5]

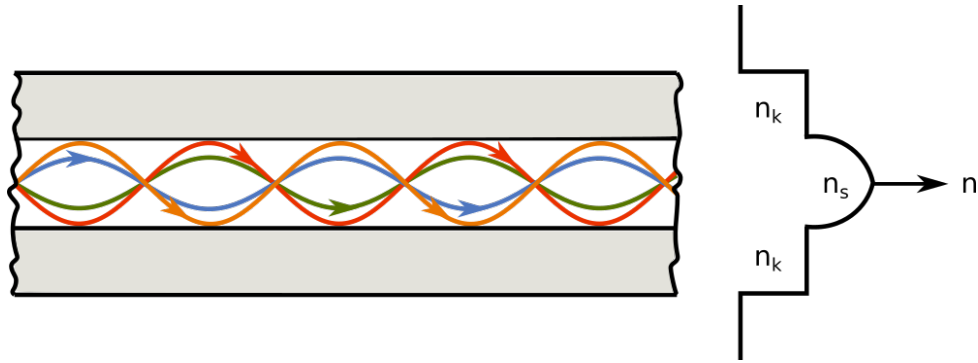
$$N = \frac{V^2}{4} = \frac{(kaNA)^2}{4} \quad (1.10)$$

1.4.2 Muutuva murdumisnäitajaga kiud

Erinevalt astmelise murdumisnäitajaga kiust pole käesolevas peatükis kirjeldatud kiu murdumisnäitaja selle südamiku lõikes konstantne, vaid muutub sujuvalt. Murdumisnäitaja väärtus on kõige suurem kiu keskmes ning kõige väiksem kattekihi ja südamiku piiril ($r = a$), kus see on võrdne kattekihi murdumisnäitaja väärtusega. [9]

$$n(r) = \begin{cases} n_s \sqrt{1 - 2\Delta \frac{r}{a}} & r < a \\ n_k = n_s \sqrt{1 - 2\Delta} & r \geq a \end{cases} \quad (1.11)$$

Kirjeldatud murdumisnäitaja profiili tõttu on optilise peateljega erinevate nurkade all sisenedud valguskiired üksteise suhtes vähem viivitatud kui astmelise murdumisnäitajaga kiu korral, sest mida lähemal on kiir kiu keskmale seda aeglasemalt see levib. [3]



Joonis 1.4: Muutuva murdumisnäitajaga optilise kiu suurim murdumisnäitaja väärtus on kiu keskmes.

Jooniselt 1.4 on näha, et valguskiir ei levi otse nagu astmelise murdumisnäitajaga kiu puhul, vaid kaardub. Selle mõistmiseks võib ette kujutada, et kiu südamik koosneb lõpmata paljudest õhukestest kihtidest, millel kõigil on erinev murdumisnäitaja väärtus. Südamikus levib valguskiir iga kujutletava kihi piirpinnal, moodustades kaare. Kriitlisest nurgast suurema nurga all toimub täielik sisepeegeldumine ning valguskiir levib samal viisil tagasi. [6]

Muutuva murdumisnäitajaga kiu kattekihi läbimõõt on $125\mu\text{m}$ ning südamiku oma vahemikus $20 - 90\mu\text{m}$. Kius levivate moodide arvu saab sarnaselt mitmemoodilise astmelise murdumisnäitajaga kiule ligikaudu leida valemist

$$N = \frac{V^2}{4} = \frac{(kaNA)^2}{4}, \quad (1.12)$$

kus V parameeter avaldub valemi (1.8) järgi. [5][3]

1.5 Dispersioon optilistes kiududes

Optiliste materjalide, näiteks erinevate klaaside ning optiliste kiudude, murdumisnäitaja sõltub materjalilis leviva valguse lainepikkusest. Kui tahta optilisi materjale teabe edastamise eesmärgil kasutada, tuleb arvestada dispersiooniga kaasnevate mõjutustega. Kuna ükski valgusallikas ei saa genereerida valgust, mis oleks nii-öelda täielikult monokromaatiline, siis valgusimpulsi, millel on mingi spektraalne laius, erinevate lainepikkustega komponendid levivad erinevatel kiirustel. See omakorda põhjustab valgusimpulsi ajalise lainemise. [8]

Dispersiooni optilistes kiududes võib jaotada neljaks: modaalne, polarisatsiooni-, mittelineaarne ja kromaatiline dispersioon. Esimesena mainitu esineb mitmemoodilistes optilistes kiududes, kus erinevates moodides on valgusimpulsi liikumise kiirus ehk rühmakiirus erinev. Kiust väljuva pulsi ajaline pikkus on seetõttu $\sigma_\tau = \frac{1}{2}(l/v_{\min} - l/v_{\max})$, kus l on

kiu pikkus ning v_{\min} on erinevatele moodidele vastavatest rühmakiirustest kõige väiksem ning v_{\max} kõige suurem. Polariseerimisdispersioon on põhjustatud väikestest defektidest, mis on tootmisel tekkinud, näiteks kiu läbilõike elliptilisusest või väiksest murdumisnäitaja varieeruvusest sõltuvalt kiu pikkusest. Kui optilise kiu südamikus leviva valguse intensiivsus on piisavalt kõrge, siis ühest hetkest muutub murdumisnäitaja intensiivsusest sõltuvaks ning esinevad mittelineaarsed efektid ning nendest tingitud mittelineaarne dispersioon. Kromaatilise dispersiooni nähtusega tutvume lähemalt järgnevas alapeatükis. [6]

1.5.1 Kromaatiline dispersioon

Käesoleva töö ekperiment vaatlleb kiudu ühemoodilises piirkonnas lihtsustamaks dispersiooniarvutusi. Kõige suuremat mõju avaldab ühemoodilistele optilistele kiududele kromaatiline dispersioon, mis koosneb kahest osast: materjali ja lainejuhi dispersioonist. [6]

Materjali dispersiooni nähtus põhineb murdumisnäitaja sõltuvusel lainepikkusest ning ei ole eriomane optilistele kiududele, vaid esineb ka näiteks erinevates klaasides. See ei sõltu ka optilise materjali geometriast. Valgusimpulss koosneb mitmest spektraalkomponendist, mis kõik levivad optilises materjalis erinevate kiirustega. Valgusimpulsi laienemist ajas kirjeldab dispersioonikoefitsient,

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}, \quad (1.13)$$

mille ühik on ps/(nm · km), milles ps tähistab valgusimpulsi ajaliskestvust, nm valguse lainepikkuse suurusjärku ning km optilise kiu pikkust. [6]

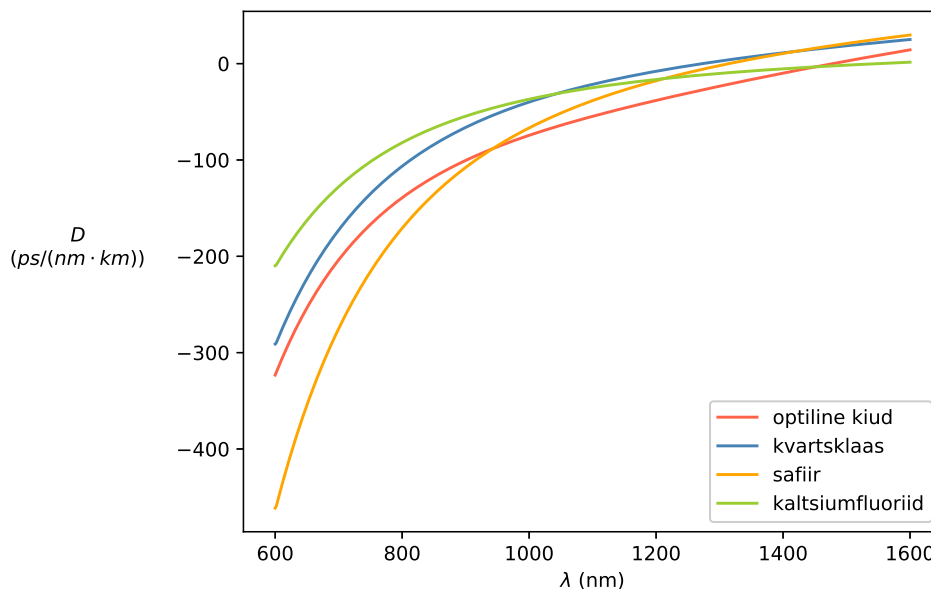
Lainejuhi dispersioon on geometriast sõltuv ja seega omane vaid optilistele kiududele. Seda põhjustab valgusenergia osaline levimine kattekihis. Lainepikkuse suurenedes ulatub kius leviva valgusimpulsi väli järjest enam ka kattekihti, kus on võrreldes kiu südamikuga erinev murdumisnäitaja väärtus. Viimase tõttu on ka faasikiirus ehk valgusimpulsi ühe punkti liikumise kiirus südamikus ja kattekihis erinev ning seetõttu muutub kokkuvõttes valgusimpulsi kuiterviku liikumise kiirus ehk rühmakiirus. Lainejuhi dispersioonile vastav dispersioonikoefitsient avaldub järgmiselt:

$$D_l(\lambda) = -\frac{1}{2\pi c} V^2 \frac{d^2 \beta}{dV^2}, \quad (1.14)$$

kus $\beta = n \frac{2\pi}{\lambda}$ on levikonstant ning mille ühik on samuti ps/(nm · km). [6][8]

Lainejuhi ja materjali dispersioon summeerub andes kromaatilise dispersiooni ($D(\lambda)$). Klaasides ja kiududes esineb normaalse ning anomaalse dispersiooni piirkond, mis on määratud kromaatilise dispersiooni koefitsiendi väärtusega. Normaalse dispersiooni korral ($D(\lambda) < 0$) levivad lühema lainepikkusega komponendid pikema aja jooksul kui pikema lainepikkusega

komponendid. Anomaalse dispersiooni ($D(\lambda) > 0$) korral levivad pikema lainepikkusega komponendid pikema aja jooksul võrreldes lühema lainepikkusega komponentidega. Seda piirkonda iseloomustab tugev valguse neeldumine.

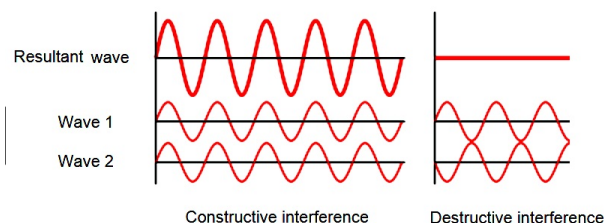


Joonis 1.5: Sinise, oranži ja rohelse joonega on kujutatud klaaside ning punasega astmelise murdumisnäitajaga ühemoodilise optilise kiu dispersioonikoefitsiendi väärtused.

Enim levinud optilistel materjalidel on sarnane dispersioonikoefitsiendi väärtus. Graafikul 1.5 on näha, et kõigil vaadeldavatel klaasidel ning optilisel kiul esineb piirkonnas 600 – 1400nm normaalne dispersioon.

1.6 Interferomeetria

Interferents on kahe või enama koherentse laine superpositsioon, mille tulemuseks on laine, mida kirjeldab funktsioon, mis on algsete lainefunktsioonide summa. [10]



Joonis 1.6: Täielikult konstruktiivne ja destruktivne interferents.

Joonisel 1.6 on kujutatud kaht nähtust. Vasakul pool on näha täielikult konstruktiivne

interferents, mille korral algsetele lainetele vastab faasivahe $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$. Paremal pool on esitatud joonis nähtusest, mida nimetatakse täielikult destruktiivseks intererentsiks ning mille korral faasivahe on $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots$. Interferentsipildiks kutsutakse mustrit, millel vahelduvad heledad ja tumedad ribad (samapaksuse interferents) või rõngad (samakalde interferents), mille kesksed alad on vastavalt täielikult konstruktiiivse ja täielikult destruktiiivse interferentsi asukohad. [3]

Interferomeetriliste mõõtmiste tegemiseks interferentsimustri põhjal juhitakse valguskiir kahte erinevasse optilise skeemi osasse, mida nimetatakse mõõte- ja võrdlusõlaks ning mille optiline käiguvahe avaldub järgnevalt:

$$\Delta = \frac{\delta}{k} = \sum_{i=1}^{N_{\text{mõõte}}} (n_{\text{mõõte}_i} l_{\text{mõõte}_i}) - \sum_{i=1}^{N_{\text{võrdlus}}} (n_{\text{võrdlus}_i} l_{\text{võrdlus}_i}), \quad (1.15)$$

kus δ on faasivahe ja $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ lainevektor. $N_{\text{mõõte}}$ on mõõteõlal olevate erinevate murdumisnäitajatega keskkondade arv ning $n_{\text{mõõte}_i}$ ja $l_{\text{mõõte}_i}$ on nendele objektidele vastavad murdumisnäitaja ja pikkuse väärtused. Analoogiselt on tähistatud võrdlusõla osad. [11]

Stabiilse interferentsipildi tekkeks ja mõõtmiseks on oluline, et kahelt interferomeetri õlalt tulev valgus ei oleks faasis ning et nende faasivahe oleks konstantne. See tingimus on täidetud, kui kasutatakse üht valgusallikat, mille kiire jagamisel on võimalik mõlemale õlale suunata sama sagedusega valgus. [3][11]

Seadet, millega uuritakse optiliste teepikkuste erinevusest põhjustatud interferentsimustrit, nimetatakse optiliseks interferomeetriks. Interferentsimustri saamiseks jagatakse valgusallikast tulev valgus kaheks või rohkemaks osaks ning seejärel liidetakse taas. Interferomeetrid võib tööpõhimõtte alusel jaotada kahte gruppi: lainefrondi ning amplituudi jagamisel põhinevad seaded. Esimeses tekitatakse tasalainest pilu abil silindriline laine, mis seejärel interfereerub näiteks teisest pilu abil tekitatud silindrilise lainega (Young'i kahe pilu katse) või peegeldunud osaga samast lainefrondist (Lloyd'i peegel). Teise seadme korral jagatakse valgus kiirejagaja abil kaheks, mille tulemusena mõlema osa amplituud väheneb võrreldes algsega (Mach-Zenderi interferomeeter). Nähtust, mille korral tekib interferentsimuster, kasutades kaht paralleelset kiirejagajat mitme kiire tekitamiseks, nimetatakse mitmekiireliseks interferentsiks (Fabry-Perot' interferomeeter). [3][12]

Peatükk 2

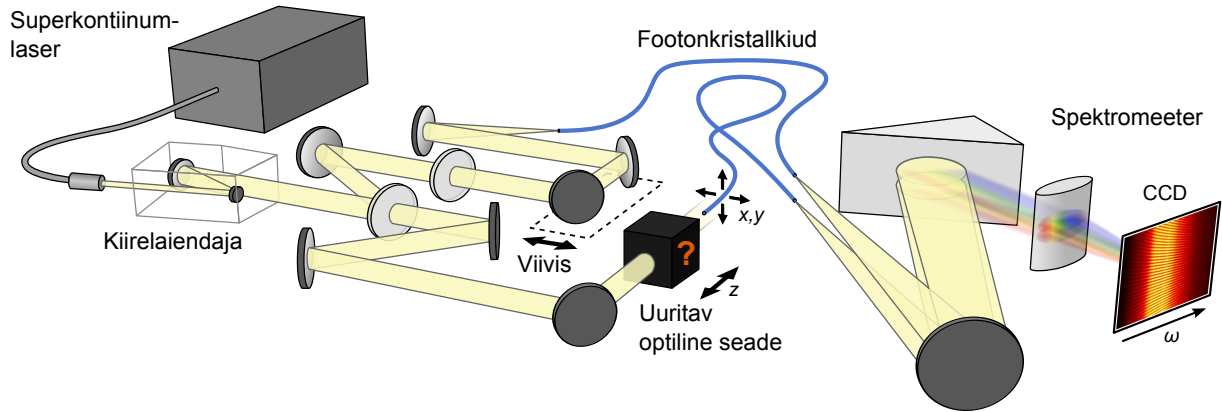
Meetodid

Tartu Ülikooli füüsikalise optika laboris mõõdetakse optiliste kiudude dispersiooni SEA TADPOLE (*Spatial Encoded Arrangement for Temporal Analysis by Dispersing a Pair of Light E-fields*) interferomeetriga. Dispersiooni interferomeetrist mõõtmist eelistatakse näiteks lennuaja tehnikale ning faasimuutusel põhinevale tehnikale selle kõrge resolutsiooni tõttu. Kõrge resolutsioon võimaldab mõõta dispersiooni optilistel kiududel, mis on lühemad kui 5 m. Interferomeetrilise mõõtmise eelduseks on loetav interferentsipilt. [13]

Käesoleva töö eesmärk on välja töötada arvutusalgortm, millega on võimalik leida optimaalne klaassilindrite materjalide ning pikkuste kombinatsioon kompenseerimaks tootja poolt ette antud kiu dispersiooni valitud kiu pikkuse jaoks. Käesolevas peatükis tutvustatakse SEA TADPOLE interferomeetri tööpõhimõtet ning erinevaid meetodeid, mida kasutatakse dispersiooni optimeerimiseks.

2.1 Interferomeetrilised mõõtmised SEA TADPOLE-iga

SEA TADPOLE on nähtavas ja lähi-infrapunases spektri piirkonnas töötav interferomeetriline seade, mille abil on võimalik määrata katsekeha põhjustatud spektraalset faasi nanomeetri suurusjärgus spektraalse lahutusega. Interferomeetri mõõteõlale asetatakse uuritav objekt ning võrdlusõla optilist teepikkust muudetakse, asetades sinna tuntud murdumisnäitajatega klaasid ning varieerides viivisliini pikkust nii, et tekib interferentsimuster. Koherentsele valgusimpulsile, mis suunatakse nii võrdlus- kui ka mõõteõlga, mõjub kromaatileine dispersioon, mis sõltub lainepikkusest. Kuna mõõte- ning võrdlusõlal asetsevate objektide dispersioon on erinev, on interferentsimuster kõverdunud sõltuvalt vaadeldava lainepikkuse dispersioonikoefitsientide erinevusest.



Joonis 2.1: Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi füüsikalise optika labori SEA TADPOLE-i interferomeetri ehituses kasutatakse dispergeeriva elemendina prisma. [14]

Jooniselt 2.1 on näha, et interferomeetris juhitakse võrdlus- ja mõõteõla valgusimpulsid kahte ühemoodilisse footonkristallkiudu, mis on sama pikkusega ning mille väljundotsad käituvad kui spektromeetri sisendavad. Ühesuguste optiliste kiudude kasutamisel võib interferentsipilti analüüsidest spektromeetri kiudude mõju arvestamata jätta. Need kiud on ühemoodilised, et tekiks ühekordne interferentsimuster. Kui spektromeetri kiu moodi suurus on väiksem kui mõõteõlast kiule fokuseeritud valgustäpp, siis on võimalik valgustäppi skaneerida risti valguse levimise (z -telje) suunaga ehk xy -tasandis.

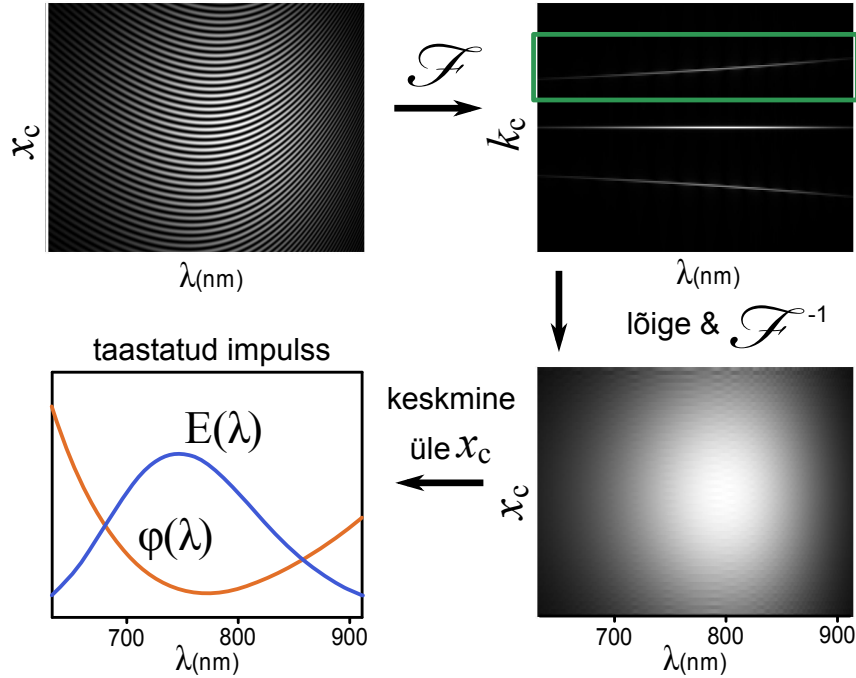
Mõlema spektromeetri kiu väljundotsa kaugus süsteemi optilisest peateljest on d (tavaliselt väiksem kui 1 mm). Kiud asuvad fookuskaugusel f kollimaatorist, kuhu valgus suunatakse selleks, et saada paralleelne kiirtekimp. Kuna interferomeetri kiudude väljundotsad on optilisest peateljest eemal, ristuvad kollimeeritud valgusvihud nurga all $\theta = \frac{d}{f}$. Spektraalse informatsiooni saamiseks kasutatakse skeemis dispergeeriva elemendina prisma või difraktsioonivõret. Valgusvihkude ristumispunkti on paigutatud CCD kaamera, mille maatriksensorile koondatakse valgus silindrilise läätse abil lainepikkuste kaupa. CCD kaamera väljastab interferentsipildi, mille iga pikslirida on keskmistatud üle mingi lainepikkuste vahemiku kaamera lahutusvõime lõpliku suuruse tõttu. [15][14]

Tekkinud (horisontaalsete ribadega) interferentsipildi intensiivsusaotust $S(\omega, x_c)$ kirjeldab järgmine funktsioon:

$$S(\omega, x_c) = |E_{\text{võrdlus}}(\omega)|^2 + |E_{\text{mõõte}}(\omega)|^2 + 2|E_{\text{võrdlus}}(\omega)||E_{\text{mõõte}}(\omega)| \cos\left(\frac{\omega}{c}x_c \sin\theta + \varphi_{\text{võrdlus}}(\omega) - \varphi_{\text{mõõte}}(\omega)\right), \quad (2.1)$$

kus θ on nurk, mille all ristuvad spektromeetris kollimeeritud valgusvihud. Valguse sagedust tähistav ω on vektor, mille komponentide arv on võrdne CCD kaamerast saadud pildi laiusele vastava pikslite arvuga ja mis on interferentsimustrit iseloomustav spektraalkomponent.

Interferentsipilt tekib ühes teljes (x_c), mille ulatus on võrdne kaamerapildi kõrgusele vastava pikslite arvuga. $|E_{\text{võrdlus}}(\omega)|$ ja $|E_{\text{mõõte}}(\omega)|$ ning $\varphi_{\text{võrdlus}}(\omega)$ ja $\varphi_{\text{mõõte}}(\omega)$ on vastavalt võrdlus- ja mõõteõla elektriväljade moodulid ning faasid sõltuvalt sagedusest. [15]



Joonis 2.2: Interferentsipildist saame numbriliselt arvutada spektraalse faasi. [14]

Selleks, et interferentsipildist saada spektraalne faas (joonis 2.2), tuleb läbida kolm etappi. Esmalt võetakse interferentsipilti kirjeldavast intensiivsusaotuse funktsioonist $S(\omega, x_c)$ ühedimensionaalne Fourier' pöörde koordinaadi x_c järgi.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}\{S(\omega, x)\} = & \delta(k) \left(|E_{\text{võrdlus}}(\omega)|^2 + |E_{\text{mõõte}}(\omega)|^2 \right) + \\ & \delta\left(k + \frac{\omega}{c} \sin \theta\right) E_{\text{võrdlus}}^*(\omega) E_{\text{mõõte}}(\omega) + \\ & \delta\left(k - \frac{\omega}{c} \sin \theta\right) E_{\text{võrdlus}}(\omega) E_{\text{mõõte}}^*(\omega), \end{aligned} \quad (2.2)$$

kus δ on Diraci deltafunktsioon, mis võrdub nulliga kui funktsiooni argument on nullist erinev ning lõpmatusega kui argument on null.

Sirgete joontega interferentsimustrist Fourier' pöörde võttes saab sagedusesituse, kus on kolm täppi. Keskmine kujutab endast aliskomponenti, milles sisaldub teave interferentsipildi keskmise heleduse kohta. Kaks ülejäänud täppi kirjeldavad interferentsimustri sagedust. Kuna mõõte- ja võrdlusõla dispersiooni erinevus pole kõikidel lainepikkustel sama, on interferentsimuster kõverdunud, mistõttu on Fourier' pöördest saadud sagedusesituses kolme täpi asemel kolm horisontaalset riba. Keskmine neist on aliskomponent, mis on Fourier' ruumi

koordinaadi k nullpunktis. Kaks külgriba asuvad vastavalt punktides $(k \pm \frac{\omega}{c} \sin \theta)$ ning neis mõlemas sisaldub informatsioon mõõteõla kompleksvälja kohta. [15]

Teiseks tuleb spektraalse faasi saamiseks võtta Fourier' pöördteisendus numbriliselt ühest külgriba komponendist, mis on eelnevalt nihutatud sagedusruumi koordinaadi k nullpunkti. Mõlemad külgriba komponendid sisaldavad endas infot mõõte- ja võrdlusõla faasivahe ehk spektraalse faasi kohta.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^{-1} \{ \delta(k) E_{\text{võrdlus}}(k, \omega) E_{\text{mõõte}}^*(k, \omega) \} = \\ \mathcal{F}^{-1} \{ \delta(k) E_{0\text{võrdlus}}(\omega) E_{0\text{mõõte}}(\omega) \exp[i\Delta\varphi(k)] \} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Keskmistades Fourier' pöördteisendusest saadud intesiivsusaotuse üle vertikaaltelje (x_c) saab leida spektraalse faasi $\Delta\varphi$, mis sisaldab endas informatsiooni mõõte- ja võrdlusõla murdumisnäitajate ning pikkuste kohta, mis on tähistatud vastavalt $n_{\text{mõõte}}$ ja $n_{\text{võrdlus}}$ ning $L_{\text{mõõte}}$ ja $L_{\text{võrdlus}}$.

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(n_{\text{mõõte}}, n_{\text{võrdlus}}, L_{\text{mõõte}}, L_{\text{võrdlus}}, \omega) = \\ \varphi_{\text{mõõte}}(n_{\text{mõõte}}, n_{\text{võrdlus}}, L_{\text{mõõte}}, L_{\text{võrdlus}}, \omega) - \varphi_{\text{võrdlus}}(n_{\text{võrdlus}}, L_{\text{võrdlus}}, \omega) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Tartu Ülikooli füüsikalise optika labori SEA TADPOLE-i seadme üheks väljundiks on spektraalne faas, mille saamiseks on juba eelnimetatud operatsioonid sooritatud.

Võrdlusõla faasi saab arvutada, teades sellel asuvate klaaside pikkuseid ning murdumisnäitajaid.

$$\varphi_{\text{võrdlus}} = kL_{\text{võrdlus}} = \frac{\omega n_{\text{võrdlus}}}{c} L_{\text{võrdlus}} \quad (2.5)$$

Mõõteõla faasi saab avaldada lainearvust,

$$\varphi_{\text{mõõte}}(n_{\text{mõõte}}, L_{\text{mõõte}}, \omega) = kL_{\text{mõõte}}, \quad (2.6)$$

millest omakorda saab arvutada mõõteõlal asuva uuritava objekti dispersiooni.

$$D_{\text{mõõte}} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\partial^2}{\partial \omega^2} \left(\frac{\varphi(n_{\text{mõõte}}, L_{\text{mõõte}}, \omega)}{L_{\text{mõõte}}} \right) \quad (2.7)$$

2.2 Dispersiooni tasakaalustamine kombinatoorika meetodil

Antud optimiseerimismeetod töötati välja selleks, et leida, millise klaasikombinatsiooni korral on selle dispersioon teatud lainepikkusel võimalikult sarnane teatud pikkusega optilise kiu omale samal lainepikkusel.

Kirjutatud algoritm põhineb kombinatoorikal: valitud klaasidest koostatakse erinevaid kombinatsioone, mille puhul on kordused lubatud ning kombinatsiooni pikkus on määratud programmi sisendis. Kuna antud programm on väga arvutusmahukas, otsitakse sobivaid klaaside pikkuseid 20mm sammuga.

Koostatud programmi sisendiks on:

- uuritava optilise kiu kromaatilise dispersiooni koefitsient lainepikkuse kohta ($D_{\lambda_{kiud}}$) tootja infolehelts,
- klaaside Sellmeieri valemi koefitsiendid, mida kasutades on võimalik arvutada murdumisnäitaja ning sealt omakorda materjali dispersiooni koefitsient lainepikkuse kohta ($D_{\lambda_{klaas}}$),
- optilise kiu pikkus l_{kiud} ,
- lainepikkus, mille järgi optimeeritakse λ ,
- klaaside kombinatsiooni maksimaalne pikkus $l_{k_{max}}$.

Peale võimalike klaaside kombinatsioonide leidmist, võrreldakse nende dispersioonikoefitsientide väärtust ühel kindal lainepikkusel optilise kiu omaga. See kombinatsioon, mille korral koefitsiendi väärtus on kõige lähedasem kiu dispersioonikoefitsiendi väärtusele, on koodi väljundiks.

Programmi töö näitlikustamiseks võib oletada, et vaatluse all on optiline kiud, kaks erinevat klaasitüüpi (A ja B) ning maksimaalseks lubatud klaasikombinatsiooni pikkuseks on antud $l_{k_{max}} = 60\text{mm}$. Kuna programm otsib klaaside pikkuseid 20mm kaupa, on iga võimaliku kombinatsiooni pikkus $60\text{mm}/20\text{mm} = 3$.

$$(AAA), (AAB), (ABB), (BBB) \quad (2.8)$$

Kui algoritmi väljundiks on kombinatsiooni (ABB), on optilise kiu dispersioonikoefitsiendi väärtus kõige sarnasem klaaside kombinatsiooni, $1 \cdot 20\text{mm} = 20\text{mm}$ pikkusega klaas A ja $2 \cdot 20\text{mm} = 40\text{mm}$ pikkusega klaas B , dispersioonikoefitsiendi väärtusele.

Võimalike kombinatsioonide, kus on kordused lubatud, arv N avaldub järgmisest valemist:

$$N = \binom{l_{k_{max}} + n_{klaas} - 1}{l_{k_{max}}} = \frac{(l_{k_{max}} + n_{klaas} - 1)!}{l_{k_{max}}! (n_{klaas} - 1)!}, \quad (2.9)$$

kus n_{klaas} on erinevate klaasitüüpide arv. Antud avaldist analüüsides on näha, et valides suurema $l_{k_{max}}$ või n_{klaas} väärtuse, suureneb kombinatsioonide arv kiiresti ning seega on ka vaja suuremat

arvutusvõimsust. [16]

Eeltoodud näite põhjal leitakse kombinatsioonide arv järgmiselt:

$$N = \binom{3+2-1}{3} = \frac{(3+2-1)!}{3!(2-1)!} = \frac{4!}{3!} = 4. \quad (2.10)$$

Algoritmi väljundiks on see klaaside kombinatsioon, mille korral dispersioonikoefitsendi väärtus sarnaneb võrreldes teiste kombinatsioonidega enim optilise kiu dispersioonikoefitsendi väärtusega.

$$\arg \min_{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}} \left[\overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}} - D_{\lambda_{\text{kiud}}} \cdot l_{\text{kiud}}} \right], \quad (2.11)$$

kus erinevate kombinatsioonide arv on $\left\| \overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}} \right\| = N$. Vektori $\overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}}$ iga liige on sisendiks antud lainepikkusest λ sõltuv dispersioonikoefitsiendi väärtus, mis on saadud kombinatsioonis esinevate klaaside dispersioonikoefitsientide liitmisel. $D_{\lambda_{\text{kiud}}}$ ja $D_{\lambda_{\text{klaas}}}$ on vastavalt optilise kiu ja valitud klaasi dispersioonikoefitsiendi väärtus mingil lainepikkusel λ . Klaasi dispersioonikoefitsient on korrutatud arvuga 20, sest arvutusvõimekuse piiratuse tõttu otsib programm parimat kombinatsiooni sammuga 20mm. Funktsioon argmin oma argumendiga $\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}$ näitab, et kandilistes sulgudes olev tehe sooritatakse iga erineva klaasi kombinatsiooniga ning väljundiks valitakse see kombinatsioon, mille korral sulgudes oleva tehte väärtus on minimaalne.

Näite põhjal oleks vastav arvutus järgmine:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}} \arg \min \left[\overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{klaas}}=3} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}} - D_{\lambda_{\text{kiud}}} \cdot 3} \right] &= 20 \left(D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} \right), \text{ kus} \\ \overrightarrow{\sum_{i=1}^{l_{\text{kiud}}=3} 20 \cdot D_{\lambda_{\text{klaas}_i}}} &= 20 \begin{pmatrix} D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} \\ D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} \\ D_{\lambda_{\text{klaas}_A}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} \\ D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} + D_{\lambda_{\text{klaas}_B}} \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

kus $D_{\lambda_{\text{klaas}_A}}$ on klaasile A ning $D_{\lambda_{\text{klaas}_B}}$ on klaasile B vastav dispersioonikoefitsiendi väärtus.

Kombinatoorikal põhinev algoritm on üleval GitHubis. [17]

2.3 Lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritm

Lõõmutamine on füüsikaline protsess, mille käigus kuumutatakse kindlat metalli, klaasi või kristalli sulamit üle sulamistemperatuuri ning seejärel jahutatakse aeglaselt kuni ideaalse kristallstruktuuri moodustumiseni. Sel viisil on sulamist võimalik kõrvaldada defekte. [18][19]

Antud protsessist tuletatud algoritmi (ingl k *simulated annealing*) saab kasutada erinevate optimeerimisprobleemide lahendamiseks. Algoritm võrdleb igal iteratsioonil käesolevat ja uut lahendit. Enamikul juhtudel valitakse see, mis annab optimeerimisprobleemile täpsema lahendi. Selleks, et vältida lokaalsesse miinimumi sattumist aktsepteeritakse vahel ka lahend, mis ei ole parem võrreldes käesolevaga. [19]

Tõenäosus, millega aktsepteeritakse algoritmis täpsem lahend, on inspireeritud statistilisest termodünaamikast tuntud suurusega $P(E_\alpha)$, mis ütleb, et tõenäosus leida mikroosakest olekus α on määratud Boltzmanni jaotusega (ka Boltzmann-Gibbsi jaotus):

$$P(E_\alpha) = \frac{N_\alpha}{N} = \frac{\exp\left(-\frac{E_\alpha T}{k_B}\right)}{\sum_i \exp\left(-\frac{E_i T}{k_B}\right)}, \quad (2.13)$$

kus N_α oleku α osakeste arv, mis sõltub oleku energiast E_α , temperatuurist T ja Boltzmanni konstandist k_B , ning N on kogu osakeste arv, mis sõltub vastavalt kõikide võimalike energiaväärtuste, mida antud süsteem saab omandada, summast $\sum_i E_i$, temperatuurist T ja Boltzmanni konstandist k_B . [19]

Tõenäosus leida osakest oleku β asemel olekust α avaldub järgmiselt:

$$\frac{P(E_\alpha)}{P(E_\beta)} = \exp\left(\frac{E_\beta - E_\alpha}{k_B T}\right), \quad (2.14)$$

kus väärtust $\exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right)$ kutsutakse Boltzmanni faktoriks [20]. Lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritm on Boltzmanni konstant ära jäetud, sest see on arvutuste käigus konstantne ning ei oma seetõttu käsitletava algoritmi seisukohalt tähtsust. Seega tõenäosus P aktsepteerida uus olek avaldub järgmiselt:

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right), \quad (2.15)$$

kus $\Delta E = E(x + \Delta x) - E(x)$ on käesoleva $x + \Delta x$ ning eelneva oleku x energiatega vahe. [19]

Kõrgete temperatuuriväärtuste korral on kõikide olekute tõenäosus sarnane ning süsteem liigub kiirelt soojusliku tasakaalu poole, otsides suurte sammudega optimeeritava funktsiooni

miinimumi. Nulltemperatuurile lähenedes muutub tõenäosusväärtus järjest tundlikumaks erinevatele energiaväärtustele ning otsitakse väiksemate sammudega juba leitud piirkonna juurest paremat miinimumi. Kui temperatuur on null kraadi, vastab süsteemile vähim võimalik energiaväärtus. [19]

Algselt antakse algoritmile sisendiks suvaline algolek $x(0)$ ja mingi kõrge temperatuuri väärtus T . Seejärel muudetakse algolekut juhuslikult $x = x(0) + \Delta x$ ja kui muutus energias $\Delta E = E(x + \Delta x) - E(x)$ on väiksem kui null, jäetakse alles uus olek, ning vastupidisel juhul valitakse uus olek tõenäosusega P . Eelkirjeldatud protsessi korratakse määratud arv kordi, mille järel antakse temperatuurile uus väärtus $T = T - \Delta T$ ning kogu protsessi, alates eelmise oleku juhuslikust muutmisest, korratakse uuesti kuni temperatuuri väärtus jõuab nullini. [19]

Käesolevas töös kasutatakse algoritmi, mille jaoks tuleb määrata minimeeritav funktsioon (*energy function*) ja funktsioon (*move function*), mis väljastab uue oleku, ning mille väljundiks on süsteemi minimaalne võimalik energiaväärtus ja sellele vastav olek. [21]

2.4 Dispersiooni tasakaalustamine lõõmutamise meetodil

Eelnevas alapeatükis kirjeldatud meetodit saab rakendada ka käesoleva töö optimeerimisprobleemi jaoks. Selleks on koostatud algoritm, mille abil on võimalik leida klaasikombinatsioon, mille dispersioonikoefitsiendi väärtus on võimalikult sarnane kindla pikkusega optilise kiu omale.

Koostatud programmi sisendiks on:

- uuritava optilise kiu dispersioonikoefitsient lainepikkuse kohta ($D_{\lambda_{\text{kiud}}}$) tootja infolehel,
- optilise kiu pikkus (l_{kiud}),
- klaaside Sellmeieri valemi koefitsiendid, mida kasutades on võimalik arvutada murdumisnäitaja ning sealt omakorda dispersioonikoefitsient lainepikkuse kohta ($D_{\lambda_{\text{klaas}}}$),
- ühe klaasi maksimaalne võimalik pikkus (700 nm),
- uuritav lainepikkuse vahemik $[\lambda_1, \lambda_2]$.

Optimeerimisalgoritmi kasutamiseks on vaja määrata algolek, funktsioon, mis genereerib juhuslikult järgmise oleku, ning funktsioon, mille miinimumi otsitakse. Antud tööülesande jaoks valiti minimeeritav funktsioon järgmiselt:

$$\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \left| D_{\lambda_{\text{kiud}}} \cdot l_{\text{kiud}} \cdot 10^2 - \left(\sum_{i=1}^n D_{\lambda_{\text{klaas}_i}} \cdot l_{\text{klaas}_i} \right) \cdot 10^2 \right|. \quad (2.16)$$

Selle funktsiooni abil saab leida n erineva klaasi hulgast kombinatsiooni, mille dispersioon ($D_{\lambda_{\text{klaas}}}$) on võimalikult sarnane kindla pikkusega (l_{kiud}) kiu dispersioonile ($D_{\lambda_{\text{kiud}}}$) vahemikus $\lambda_1 - \lambda_2$. Käesolevas töös kasutatud klassi nimega *Annealing* [21] eripära on töövõimekuse langus ühest väiksemate minimeeritava funktsiooni väärtuste korral. Selliste väärtuste vältimiseks on tehte mõlemad liikmed korrutatud arvuga sada.

Uus olek saadakse, valides n klaasi hulgast juhuslikult ühe klaasi, mille uus pikkus valitakse juhuslikult järgmisest vahemikust: $[l_{\text{klaas}} - 1 \text{ mm}, l_{\text{klaas}} + 1 \text{ mm}]$, kus l_{klaas} on valitud klaasi pikkus. Olukorras, kus uus pikkus on väiksem kui 0 mm või suurem kui 700 mm, ei võeta saadud pikkust vastu ning valitakse juhuslikult uus pikkus vahemikus $[0, 700]$. Juhusliku numברי generaatorina kasutatakse käesolevas töös funktsiooni *randint* Pythoni teegist *random*.

Algolekuks on vektor \vec{l}_{klaas} , mille pikkus on võrdne klaaside arvuga n ning mille liikmeteks on valitud klaaside pikkused. Pikkused võib määrata ise või lasta seda teha juhuslike numbrite pseudogeneraatoril.

Algoritmi väljundiks on kõigile n klaasile vastavad pikkused. Sellise pikkustega klaaside järjestamisel saadakse kombinatsiooni, mille dispersioonikoefitsiendi väärtus on võimalikult sarnane valitud pikkusega optilise kiu koefitsiendi omale. Siinkohal tuleb ära märkida, et väljundis võib mõne klaasi pikkuseks olla märgitud ka 0 mm.

Lõõmutamisest inspireeritud algoritm on üleval GitHubis. [22][21]

Peatükk 3

Tulemused ja analüüs

Tartu Ülikooli füüsikalise optika laboris uuritakse astmelise murdumisnäitajaga optilise kiu 630HP (Thorlabs), mille pikkus on 419mm ning mis on vahemikus 600 – 770nm ühemoodiline [23], kromaatilist dispersiooni. Selleks kasutatakse valgelasert (Fianium SC400 410 – 2400nm) ning SEA TADPOLE interferomeetrit, mille mõõteõlal on optiline kiud ning võrdlusõlal kvartsklaas pikkusega 424mm. Mõlema õla valgusimpulsside omavahelisel interfereerumisel tekib interferentsimuster, mille mustri lainelikus iseloomustab lainepikkusest sõltuva spektraalse faasi erinevusi. Selle faasijoonte (ehk faasi lainepikkusesõltuvuse) kõverus väljendab dispersiooni. Väga suurele dispersioonide erinevusele vastab tugevalt kaardunud faasijoonte muster. Selle tõttu vähenevad nii faasi ja dispersiooni arvutamise täpsus, kui ka jälgitav spektri ulatus.

Käesolevas töös koostati kaks algoritmi selleks, et optimiseerida mõõte- ja võrdlusõla dispersiooni erinevust. Üks algoritmidest põhineb kombinatoorikal ning teine on inspireeritud lõõmutamisest. Mõlema programmi algtingimuste täpsustamisel lähtuti füüsikalise optika laboris läbiviidavast eksperimendist. Algoritmi ülesandeks on leida sisendiks antud klaaside hulgast selline kombinatsioon, mille dispersioon on kõige sarnasem optilise kiu dispersioonile. Kui algoritmi väljundiks saadud klaasikombinatsioon annab väiksema dispersioonierinevuse interferomeetri mõõte- ja võrdlusõla vahel, kui praegu kasutuses olev kvartsklaas pikkusega (424mm), saab tõsta kiu dispersiooni määramise täpsust ning arvutada seda laiemas spektri piirkonnas.

Kokku valiti kuus erinevat klaasitüüpi, mis anti optimiseerimisalgoritmidele sisendiks ning mille hulgast otsiti eelkirjeldatud omadustega kombinatsiooni.

- kvartsklaas [24]
- safiir [26]
- Schott klaas BK7 [25]
- kaltsiumfluoriid (CaF_2) [27]

- magneesiumfluoriid (MgF_2) [28]

- tsinkseleniid ($ZnSe$) [29]

Lisaks nendele klaasidele tuli mõlemale algoritmile sisendiks anda uuritava kiu pikkus ning dispersioonikoefitsendi väärtus lainepikkuse kohta. Uuritavaks kiuks valiti astmelise murdumisnäitajaga ühemoodiline kiud (630 HP) pikkusega 419 mm. Kuna uuritav kiud on ühemoodiline vahemikus 600 – 770 nm, valiti kombinatoorika meetodil lainepikkuseks, millele vastavat dispersioonikoefitsenti optimeerida, 685 nm. Lõõmutamise algoritm võimaldas korraga vaadelda kogu uuritavat lainepikkuste vahemikku 600 – 770 nm.

Käesolev töö võrdleb algoritmide, mis on loodud dispersiooni paremaks kompenseerimiseks interferomeetritelisel mõõtmisel, efektiivsust simulatsioonide näitel, kuid ei analüüsi füüsilise optika laboris läbiviidavatest dispersiooni mõõtmistest saadud interferentsipilte ning nende põhjal tehtud arvutusi.

3.1 Dispersiooni kompenseerimine kvartsklaasiga

Esiteks uurime, milline on optimaalse pikkusega kvartsklaas 419 mm pikkuse kiu dispersiooni kompenseerimiseks.

Kombinatoorika meetodi tulemus

Selleks, et leida parimat kvartsklaasi pikkust, kombineeriti omavahel õhu ja kvartsklaasi dispersioone. Õhu arvestamine parima kombinatsiooni otsimisel on vajalik, sest see võimaldab kvartsklaasi pikkust varieerida.

Valemi 2.11 alusel saadi programmi väljundiks järgmine kvartsklaasi pikkus:

$$\arg \min_{\sum_{i=1}^{35} 20 \cdot D_{685_{\text{klaas}_i}}} \left[\sum_{i=1}^{35} 20 \cdot D_{685_{\text{klaas}_i}} - D_{685_{\text{kiud}}} \cdot 419 \right] = \quad (3.1)$$

$$20 (24 \cdot D_{685_{\text{kvarts}}} + 11 \cdot D_{685_{\text{õhk}}}) = 480 \cdot D_{685_{\text{kvarts}}} + 220 \cdot D_{685_{\text{õhk}}}.$$

Kombinatoorikal põhineva algoritmi alusel saab uuritava kiu dispersiooni kõige paremini kompenseerida kvartsklaasiga, mille pikkus on 480 mm.

Lõõmutamisest inspireeritud meetodi tulemus

Optimiseerimismeetodi algtingimuseks valiti kvartsklaas pikkusega $l_{\text{kvarts}} = 424$ mm ning

vastavalt ülesande püstitusele täpsustati minimeeritav funktsioon:

$$\sum_{\lambda=600}^{770} |D_{\lambda_{\text{kiud}}} \cdot 419 \cdot 10^2 - (D_{\lambda_{\text{kvarts}}} \cdot l_{\text{kvarts}}) \cdot 10^2|, \quad (3.2)$$

mille aluseks on tehe 2.16. Algtingimusele vastavaks optimeerimisfunktsiooni väljundväärtuseks saadi 220,679.

Järgnevas tabelis on peale viit programmi käivitust saadud tulemused.

	1.	2.	3.	4.	5.	Funktsiooni väärtus
l_{kvarts} (mm)	482	482	482	482	482	49,390

Tabel 3.1: Kõigil viiel korral programmi väljundiks saadud kvartsklaasi pikkusele vastav minimeeritava funktsiooni väärtus on üle nelja korra parem võrreldes algtingimusega.

Lõõmutamisel põhineva optimeerimisprogrammi alusel saab uuritava kiu dispersiooni kõige paremini kompenseerida kvartsklaasiga, mille pikkus on 482 mm.

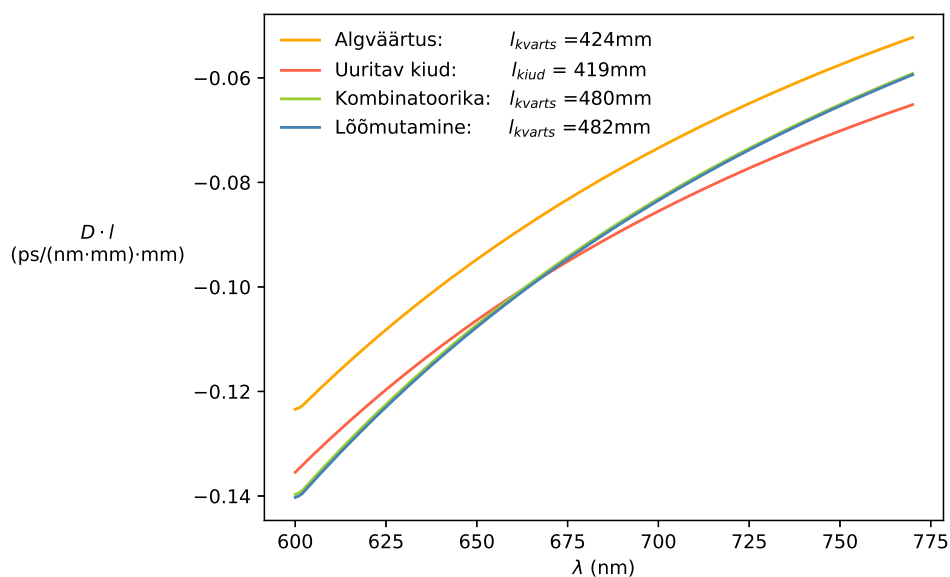
Kahe meetodi võrdlus

Selleks, et võrrelda kahe meetodi tulemusi algväärtuseks antud kvartsklaasi pikkusega, kujutati nendele pikkustele vastavate dispersioonikoefitsendi väärtused graafikul. Samuti võrreldi lõõmutamisest inspireeritud meetodis kasutatava funktsiooni väärtusi erinevate kvartsklaasi pikkuste korral (tabel 3.2). Tulemustest on näha, et optimeeritava funktsiooni väärtused ei muutu lineaarselt, vaid kahanevad kiiremini funktsiooni globaalsest miinimumist eemal ning aeglasemalt sellele lähenedes.

	Kvartsklaasi pikkus	Funktsiooni väärtus
Algväärtus	424 mm	204,215
Kombinatorika	480 mm	49,531
Lõõmutamine	482 mm	49,390

Tabel 3.2: Kombinatorikal põhinev ning lõõmutamisest inspireeritud meetod annavad mõlemad võrdväärselt hea tulemuse.

Lõõmutamisest inspireeritud algoritm annab täpsema tulemuse, võrreldes kombinatorikal põhineva optimeerimiskoodiga. See on põhjustatud asjaolust, et suurt arvutusmahtu nõudvas kombinatorikaprogrammis saab klaaside pikkuseid määrata 20 mm sammuga. Teisalt võimaldab lõõmutamise algoritm pikkuseid määrata 1 mm sammuga.



Joonis 3.1: Kombinatorikal põhinev ning lõõmutamisest inspireeritud meetod annavad mõlemad tulemuseks kvartsklaasi pikkuse, mis on parem võrreldes algväärtuseks antud klaasipikkusega.

3.2 Dispersiooni kompenseerimine kuut erinevat klaasitüüpi kombineerides

Teiseks uuritakse, kas lähteülesande püstituses välja toodud kuue klaasitüübi pikkuse optimeerimisel on võimalik moodustada klaaside kombinatsioon, mis kompenseerib uuritava kiu dispersiooni paremini, kui peatükis 3.1 tulemuseks saadud 482 mm pikkune kvartsklaas.

Kombinatorika meetod

Kuue klaasitüübi optimaalseima pikkuse leidmiseks kombineeriti klaaside ja ka õhu dispersioone ja materjalisilindrite erinevaid pikkusi. Õhu arvestamine parima kombinatsiooni otsimisel on vajalik, sest see võimaldab klaaside pikkuseid varieerida nii, et klaaside kombinatsiooni kogupikkus võib erineda maksimaalsest pikkusest (700 mm).

Valemi 2.11 alusel saadi programmi väljundiks järgmine klaaside kombinatsioon:

$$\arg \min_{\sum_{i=1}^{35} 20 \cdot D_{685_{\text{klaas}_i}}} \left[\sum_{i=1}^{35} 20 \cdot D_{685_{\text{klaas}_i}} - D_{685_{\text{kiud}}} \cdot 419 \right] = \quad (3.3)$$

$$20 \left(3 \cdot D_{685_{\text{kvarts}}} + 8 \cdot D_{685_{\text{õhk}}} + 11 \cdot D_{685_{\text{CaF}_2}} + 6 \cdot D_{685_{\text{safiir}}} + 7 \cdot D_{685_{\text{MgF}_2}} \right) =$$

$$60 \cdot D_{685_{\text{kvarts}}} + 160 \cdot D_{685_{\text{õhk}}} + 220 \cdot D_{685_{\text{CaF}_2}} + 120 \cdot D_{685_{\text{safiir}}} + 140 \cdot D_{685_{\text{MgF}_2}}$$

Kombinatorikal põhineva optimeerimisalgoritmi tulemuse põhjal saab öelda, et uuritava kiu dispersiooni on kõige parem kompenseerida järgnevate klaasidega: kvartsklaas (60 mm), kaltsiumfluoriid (220 mm), safiir (120 mm), magneesiumfluoriid (140 mm).

Lõõmutamisest inspireeritud meetod

Algtingimus valiti sarnaselt peatükis 3.1 toodule: 424 mm kvartsklaasi, kuid antud võrrandis on algtingimus kuuekohaline.

$$\begin{aligned} l_{\text{kvarts}} &= 424 \text{ mm} & l_{\text{BK7}} &= 0 \text{ mm} & l_{\text{safiir}} &= 0 \text{ mm} \\ l_{\text{CaF2}} &= 0 \text{ mm} & l_{\text{MgF2}} &= 0 \text{ mm} & l_{\text{ZnSe}} &= 0 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Vastavalt muudeti ka minimeeritavat funktsiooni:

$$\sum_{\lambda=600}^{770} \left| D_{\lambda_{\text{kiud}}} \cdot 419 \cdot 10^2 - \left(\sum_{i=1}^6 D_{\lambda_{\text{klaas}_i}} \cdot l_{\text{klaas}_i} \right) \cdot 10^2 \right|, \quad (3.5)$$

mis põhineb valemil 2.16. Algeks energiaväärtuseks saadi sarnaselt eelkirjeldatud optimeerimisülesandega $E_0 = 220,679$.

Programm käivitati kümme korda ning iga kord saadi sama vaste (tabel 3.3). See tähendab, et algoritm leidis iga kord üles funktsiooni globaalse miinimumi. Kui lähtetingimusi muuta võib esineda ka olukordi, kus vahepeal jääb algoritm kinni lokaalsesse miinimumi. See on ka põhjuseks, miks tuleb suurema klaaside arvu korral optimeerimiskoodi jooksutada mitu korda.

l_{kvarts} (mm)	l_{BK7} (mm)	l_{safiir} (mm)	l_{CaF2} (mm)	l_{MgF2} (mm)	l_{ZnSe} (mm)	Funktsiooni väärtus
0	0	0	658	0	0	29.998

Tabel 3.3: Programmi väljundiks on miinimum energiaväärtus ning sellele vastavad klaaside pikkused millimeetrites.

Lõõmutamisel põhineva optimeerimisprogrammi alusel saab uuritava kiu dispersiooni kõige paremini kompenseerida kaltsiumfluoriidiga, mille pikkus on 658 mm.

Kahe meetodi võrdlus

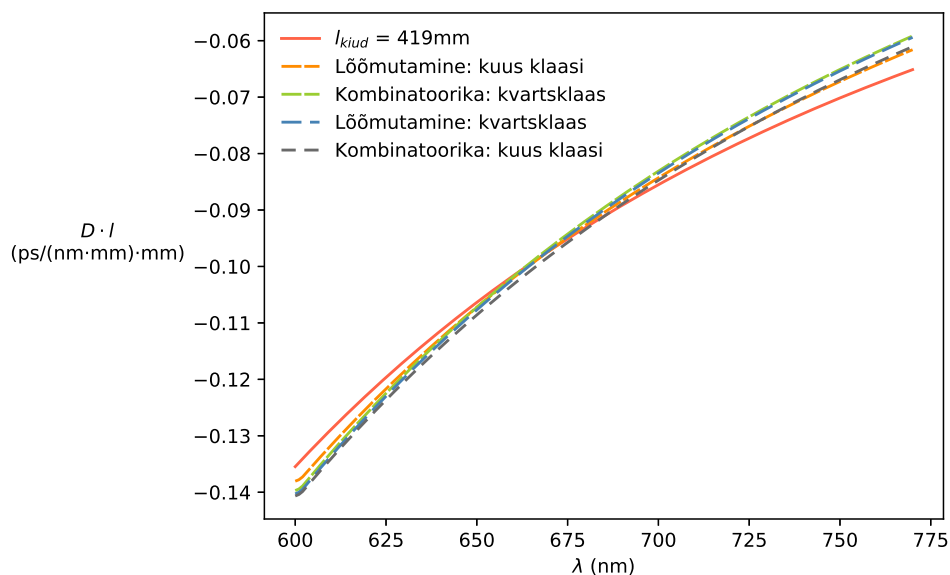
Kombinatorikal põhineva ja lõõmutamisest inspireeritud meetodi tulemusi saab võrrelda, kasutades viimase defineeritud minimeeritavat funktsiooni. Tabelis tuuakse välja ka tulemused, mis saadi vaid kvartsklaasi dispersiooni optimeerides.

Võrreldes tabelis 3.4 toodud lõõmutamisest inspireeritud meetodi minimeeritava funktsiooni tulemusi ja graafikut 3.2, on näha, et erinevate klaasitüüpide kasutamine võimaldab mõlema

meetodiga saada veelgi paremaid tulemusi. Lisaks saame võrrelda kahe koostatud algoritmi efektiivsust omavahel, sest mõlema korral on täidetud kaks tingimust: ühegi üksiku klaasi pikkus ei ole pikem kui 700mm ja saadud klaasikombinatsioonide kogupikkused ei ületa samuti seda pikkust. Siit tuleb välja ka kahe meetodi erinevus: kombinatoorika algoritmi arvutusaja muudab pikemaks see, kui klaasisortide arv ning etteantud kogupikkus on suur. Seega kohandasime käesoleva võrdluse tarvis kombinatoorika algoritmi jaoks pikkuse piirangu lähtuvalt lõõmutamisest inspireeritud programmi väljundist.

	l_{kvarts} (mm)	l_{BK7} (mm)	l_{safiir} (mm)	l_{CaF2} (mm)	l_{MgF2} (mm)	l_{ZnSe} (mm)	Funktsiooni väärtus
Kombinatoorika: kuus klaasi	60	0	120	220	140	0	42,211
Lõõmutamine: kuus klaasi	0	0	0	658	0	0	29,998
Kombinatoorika: kvartsklaas	480	0	0	0	0	0	49,531
Lõõmutamine: kvartsklaas	482	0	0	0	0	0	49,390

Tabel 3.4: Kõige paremini kompenseerib uuritava optilise kiu dispersiooni 658 mm pikkune kaltsiumfloriid.



Joonis 3.2: Ka graafikult on näha, et kogu vaadeldava piirkonna (600 – 770 nm) ulatuses annab lõõmutamisest inspireeritud algoritm kõige paremal tulemusel.

3.3 Järeldused

Eelnevas kahes peatükis esitleti kombinatoorika ning lõõmutamise ideel põhinevate algoritmide tulemusi. Nendest kahest algoritmist andis täpsema tulemuse lõõmutamisest inspireeritud programm. See võib olla tingitud sellest, et kombinatoorikal põhineval algoritmil on võimalik täpsustada vaid üks lainepikkus, mille jaoks dispersiooni kompenseerida. Lisaks põhjustab ebatäpsust asjaolu, et personaalarvuti arvutusvõimekuse piiratuse tõttu on kombinatoorika meetodis võimalik klaaside pikkuseid muuta 20mm sammuga, samal ajal, kui lõõmutamisest inspireeritud meetodil saab sammu pikkuseks võtta 1mm. Seetõttu on ka viimane meetod kasutajasõbralikum, sest kombinatoorikal põhinevas algoritmis tuleb minimaalne võimalik samm, mille korral kombinatsioonide arv liiga suureks ei lähe, kiu pikkuse muutmisel uuesti välja arvutada, kuid lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritmil saab kasutada 1mm sammu ka optilise kiu teistsuguse pikkuse korral. Seega on lõõmutamisest inspireeritud algoritm efektiivsem kui kombinatoorikal põhinev algoritm.

Optilise kiu dispersiooni kompenseerimine interferomeetriliste mõõtmiste jaoks

Kerttu Maria Peensoo

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli koostada optimeerimisalgoritm, mis leiab tuntud murdumisnäitajatega klaaside hulgast kombinatsiooni, mille kromaatileine dispersioon on võimalikult sarnane algoritmi sisendiks antud kiu omale. Kiu dispersiooni täpne kompenseerimine võimaldab täpsemini määrata mõõteobjekti dispersiooni võrdlusobjekti suhtes ning laiendada spektri piirkonda, milles kiu dispersioon on mõõdetav. Analüüs on läbi viidud astmelise murdumisnäitajaga kiu 630HP (Thorlabs) näitel.

Antud töös koostati ülevaade erinevatest optilistest kiududest ning kirjeldati valguse levikut neis kiududes. Lisaks selgitati dispersiooni mõju kius levivale valgusimpulsile ning kirjeldati SEA TADPOLE interferomeetri töö põhimõtet. Samuti anti ülevaade sellest, kuidas interferentsimustrist on võimalik tuletada uuritava kiu spektraalne faas, ning tutvustati kaht töö jaoks koostatud optimeerimisalgoritmi, millest üks põhineb statistikast tuntud mõistel kombinatoorika ning teine füüsikalisel protsessil nimega lõõmutamine;

Käesolevas töös:

- koostati programmeerimiskeeles Python optimeerimiskood, mille abil kombineeriti ühikpikkusega kvartsklaasi ja õhu disperisoonid ning kuue erineva klaasisordi ja õhu disperisoonid selleks, et kompenseerida katsekeha (optilise kiu) dispersiooni määratud lainepikkusel.
- koostati kood lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritmi rakendamiseks selleks, et lahendada ülalkirjeldatud lähteülesannet spektri piirkonnas 600 – 770 nm;
- analüüsiti kahe koostatud programmi tulemusi ning osutus, et lõõmutamisest inspireeritud algoritm annab täpsema tulemuse kui kombinatoorikat rakendav programm. Esimene võimaldab valida lainepikkuste vahemiku, millele vastavat dispersioonikoeffitsiendi väärtust optimeeritakse, kuid teise puhul saab valida vaid ühe lainepikkuse. Samuti nõuab esimene palju väiksemat arvutusmahtu, mistõttu on võimalik sobivaid klaaside pikkusi otsida väiksema sammuga. Seega on lõõmutamisest inspireeritud algoritm efektiivsem;
- võrreldi kahe algoritmi tööd ning leiti, et lõõmutamisest inspireeritud optimeerimisalgoritm võimaldab arvutuslikult efektiivsemalt leida laias spektri vahemikus optimaalne klaassilindrite kombinatsioon. Analüüs näitas, et spetsiifiline, madala dispersiooniga klaas (kaltsiumfluoriid) võimaldab kiu dispersiooni

kompenseerida paremini kui kvartsklaas.

Antud töö eesmärk oli koostada optimeerimisalgoritm selleks, et lihtsustada optilise kiu dispersiooni interferomeetrilisi mõõtmisi. Töö otsekohene edasiarendus seisneb tulemuste rakendamises eksperimendiolukorras.

Tänuavaldused

Soovin tänada oma juhendajaid, Heli Lukneri ja Sandhra-Mirella Valdmad, kes olid kannatlikud ja abivalmid ning kes andsid mulle võimaluse teha bakalaureusetöö Tartu Ülikooli füüsikalise optika laboris.

Kerttu Maria Peensoo

Kirjandus

- [1] Träger, F. *Handbook of Lasers and Optics*. Springer, 2 edition, 2012.
- [2] Ghatak, A. ja Thyagarajan, K. *Introduction to Fiber Optics*. Cambridge University Press, 1998.
- [3] Hecht, E. *Optics*. Addison Wesley, 4 edition, 2002.
- [4] Lee, B. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology*, 9:57–79, 2003.
- [5] Al-Azzawi, A. *Fibre Optics: Principles and Advanced Practices*. CRC Press, 2 edition, 2017.
- [6] Teich, M. C. ja Saleh, B. E. A. *Fundamentals of Photonics*. Wiley-Interscience, 2 edition, 2007.
- [7] Buck, J. A. *Fundamentals of Optical Fibers*. John Wiley and Sons, 2 edition, 2009.
- [8] Mitschke, F. *Fiber Optics: Physics and Technology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [9] Yu, F. T. S. ja Khoo, I. C. *Principles of Optical Engineering*. John Wiley and Sons, 1990.
- [10] Halliday, D. ja Resnick R. ja Walker, J. *Fundamentals of Physics*, volume 2. John Wiley and Sons, Inc, 8 edition, 2008.
- [11] Hariharan, P. *Basics of Interferometry*. Elsevier Inc, 2 edition, 2007.
- [12] Pedrotti, F. L. ja Pedrotti, L. S. ja Pedrotti, L. M. *Introduction to Optics*. Pearson Education, 3 edition, 2007.
- [13] Cohen, L. G. Comparison of single-mode fiber dispersion measurement techniques. *Journal of Lightwave Technology*, (5), 1985.
- [14] Valdmann, A. Laia spektriga airy valgusimpulsid ja nende eksperimentaalne registreerimine. *Tartu Ülikool*, 2013. (09.05.2018).

- [15] Bowlan, P. ja Gabolde, P. ja Coughlan, M. A. ja Trebino, R. ja Levis, R. J. Measuring the spatiotemporal electric field of ultrashort pulses with high spatial and spectral resolution. *OSA Publishing*, 25, 2008.
- [16] Vilenkin, N. *Kombinatorika*. Valgus, 1975.
- [17] kerttumariap. Kombinatorikal põhinev algoritm. <https://github.com/kerttumariap/l-put-/blob/master/kombinatorika.py>. 01.06.2018.
- [18] Du, K-L. ja Swamy, M. N. S. *Search and Optimization by Metaheuristics*. BirkHäuser, 2016.
- [19] Glover, F. W. ja Kochenberger, G. A. *Handbook of Metaheuristics*. Springer, 2003.
- [20] Kittel, C. ja Kroemer, H. *Thermal Physics*. W. H. Freeman, 2 edition, 1980.
- [21] emanuele. python-simulated-annealing. <https://github.com/emanuele/python-simulated-annealing>. 13.05.2018.
- [22] kerttumariap. Lõõmutamisest inspireeritud algoritm. https://github.com/kerttumariap/l-put-/blob/master/simulated_annealing.py. 01.06.2018.
- [23] Thorlabs. 630hp - single mode optical fiber. <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=630HP>. 16.05.2018.
- [24] Refractive index database. Optical constants of fused silica (fused quartz). https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson. 31.05.2018.
- [25] Refractive index database. Optical constants of bk7. <https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=BK7&page=SCHOTT>. 31.05.2018.
- [26] Refractive index database. Optical constants of crystals. <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=crystals&page=sapphire>. 31.05.2018.
- [27] Refractive index database. Optical constants of caf2 (calcium fluoride). <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=CaF2&page=Malitson>. 31.05.2018.
- [28] Refractive index database. Optical constants of mgf2 (magnesium fluoride). <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=MgF2&page=Dodge-o>. 31.05.2018.
- [29] Refractive index database. Optical constants of znse (zinc selenide). <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=ZnSe&page=Connolly>. 31.05.2018.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kerttu Maria Peensoo,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Optilise kiu dispersiooni kompenseerimine interferomeetriliste mõõtmiste jaoks,

mille juhendajad on Heli Lukner, PhD ja Sandhra-Mirella Valdma, MSc,

- (a) reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - (b) üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
 3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartu, 1. juuni 2018. a.