

Emma Vilenius

**SPEKTRINEN EROTTelukyky
SUPERJATKUMOVALONLÄHTEITÄ
HYÖDYNTÄVISSÄ MENETELMISSÄ**

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Prof. Juha Toivonen
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Emma Vilenius: Spektrinen erottelukyky superjatkumovalonlähteitä hyödyntävissä menetelmissä
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2024

Superjatkumovalonlähteet tuottavat laserin kaltaista valoa, jolla kuitenkin on laaja aallonpituusspektri. Tällaiset valonlähteet ovat erittäin hyödyllisiä normaalien laajakaistaisten lampujen tilalla monissa optiikan sovellutuksissa. Laajakaistaisten valonlähteiden hyödyntäminen vaatii kuitenkin myös keinoja erottaa spektristä haluttu aallonpituuskaista käsittelyä varten. Tämän työn tarkoituksena on esitellä muutamia spektrisen erottelun menetelmiä, joita voidaan käyttää superjatkumosovellutuksissa. Työhön sisältyy myös yksinkertainen kokeellinen osuus.

Ensimmäiseksi työssä käsitellään superjatkumovalonlähteiden teoriaa. Superjatkumoiden luominen perustuu epälineaarisiin ilmiöihin valon ja aineen vuorovaikutuksessa. Luomiseen käytetyt laserpulssit voidaan jaotella kestoltaan femtosekunnin kokoluokkaan tai tätä pidempiin pulsseihin. Alkuperäisen laserpulssin pituus vaikuttaa luodun superjatkumon ominaisuuksiin. Esimerkiksi pitkillä pulsseilla luodut superjatkumot ovat yleensä muodoltaan tasaisia, eli niiden intensiteetti pysyy tasaisena koko aallonpituusalueen yli.

Seuraavaksi työssä esitellään neljä spektrisen erottelun menetelmää. Nämä ovat hilaspektrometria, Fourier-muunnos spektroskopia, Fabry-Pérot -interferometrin hyödyntäminen ja optisten suotimien käyttö. Menetelmistä eniten käsitellään hilan toimintaa, sillä työn kokeellisessa osuudessa käytetään juuri hilaa. Hilan spektrinen erottelukyky perustuu valon diffraktioon komponentin pinnalla.

Fourier-muunnos spektroskopia perustuu valon interferenssiin. Siinä pääkomponenttina on interferometri, josta saatu interferenssisignaali muutetaan spektriksi Fourier-muunnoksen avulla matemaattisesti. Myös Fabry-Pérot -interferometri hyödyntää interferenssiä, mutta sen sovelluskohteet ovat hieman erilaisia, kuin kahden edellisen menetelmän. Lopuksi käsitellään vielä lyhyesti optiset suotimet. Niiden toiminta perustuu yksinkertaisesti siihen, että suodin ei päästä lävitseen tiettyjä aallonpituuksia.

Työn kokeellisessa osuudessa esitellään hilaan perustuva spektrisen erottelun järjestelmä ja työssä käytetty superjatkumolähde. Lisäksi osiossa esitellään spektrimittauksiin käytetyn optisen spektrianalysoijan toimintaperiaate. Mittaustuloksista tutkitaan mm. sitä, miten erottelun aallonpituuskaistan leveys muuttuu mitta-alueen eri aallonpituuksilla.

Avainsanat: spektri, erottelukyky, superjatkumo, hila, interferometri, Fourier-muunnos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen Yliopiston fotonikan laboratorion aiheesta kevätlukukaudella 2024. Kiitokset tuesta työni ohjaajalle Juha Toivoselle, sekä kandidaatintyön seminaarikurssin vastuuhenkilöille Heino Kuuluvaiselle ja Ilkka Kylänpäälle.

Tampereella, 6. toukokuuta 2024

Emma Vilenius

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Superjatkumovalonlähteet	2
2.1	Femtosekuntipulsseilla luodut superjatkumot	3
2.2	Pitkillä pulsseilla luodut superjatkumot	3
2.3	Superjatkumoiden aallonpituusalueet	4
3.	Spektrisen erottelun menetelmät	5
3.1	Hilaspektrometri	5
3.2	Fourier-muunnos spektroskopia	7
3.3	Fabry–Pérot -interferometri	8
3.4	Optiset suotimet	9
4.	Mittausmenetelmät	11
4.1	Optinen spektrianalysointilaite	11
4.2	Koejärjestelyn esittely	12
5.	Mittau tulosten analysointi	14
6.	Yhteenveto	17
	Lähteet	18

1. JOHDANTO

Superjatkumovalonlähteet ovat nykypäivänä tärkeitä työkaluja useissa optiikan sovelluksissa. Näiden laajakaistaisten valonlähteiden hyödyntäminen vaatii kuitenkin keinoja erotella valon spektristä kussakin tilanteessa tarvittavat aallonpituudet. Tässä kandidaattityössä pääasiassa esitellään ja vertaillaan erilaisia spektrisen erottelun menetelmiä, joita voidaan hyödyntää superjatkumovalonlähteiden kanssa.

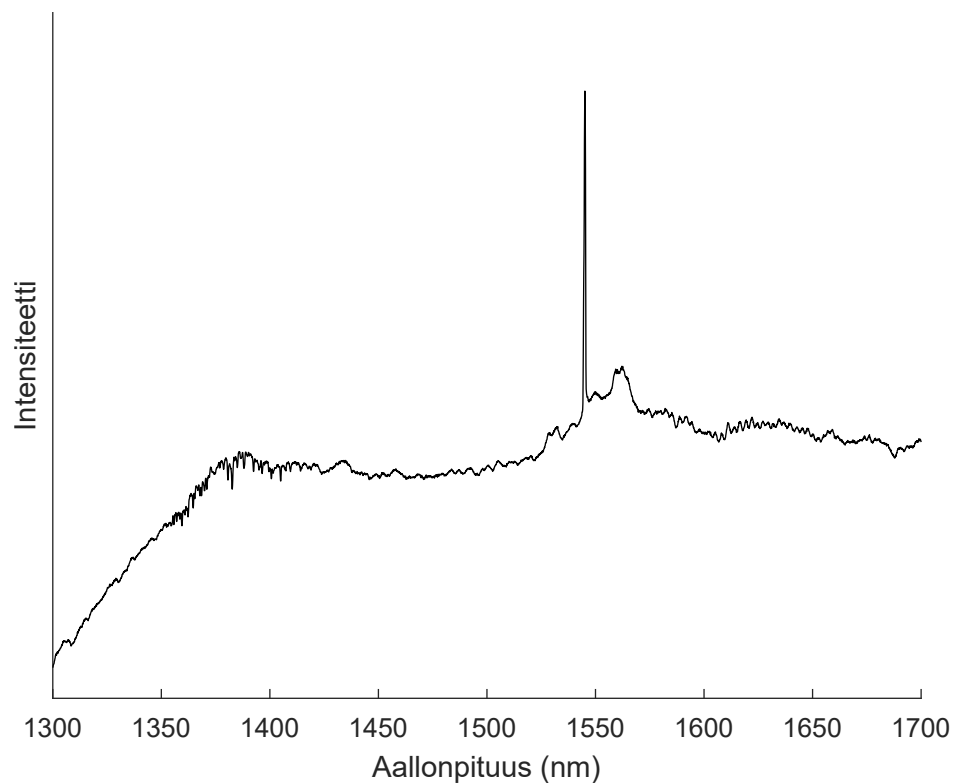
Luvussa 2 esitellään ensin hieman superjatkumovalonlähteiden teoriaa ja ominaisuuksia. Osion tarkoituksena on kertoa erityisesti miten superjatkumot eroavat normaaleista laajakaistaista valonlähteistä. Tämän lisäksi käydään läpi pääasiat erilaisista superjatkumotyypeistä.

Seuraavaksi luvussa 3 esitellään neljä erilaista menetelmää, joita voidaan käyttää spektriseen erotteluun. Nämä menetelmät ovat hilaspektrometria, Fourier-muunnos spektroskopia, Fabry-Pérot -interferometrin hyödyntäminen ja optisten suotimien käyttö. Esittelyn lisäksi vertaillaan pintapuolisesti näiden menetelmien käyttöä ja ominaisuuksia. Luvussa myös esitellään tavallisimpia superjatkumoa hyödyntäviä sovelluskohteita kullekin menetelmälle.

Viimeiseksi käsitellään työn kokeellinen osuus, jonka kautta perehdytään tarkemmin hilan käyttöön spektrisen erottelun menetelmänä. Luvussa 4 esitellään käytetty koejärjestely, sekä lyhyesti työssä käytetyn optisen spektrianalysaattorin toimintaperiaate. Kokeellisen työn mittaustuloksia käsitellään luvussa 5, jossa käsitellään tarkemmin miten muutokset koejärjestelyssä vaikuttivat saatuun aallonpituuskaistaan. Mittaustulosten perusteella arvioidaan myös, miten erotellun aallonpituuskaistan leveys muuttui eri aallonpituuksilla.

2. SUPERJATKUMOVALONLÄHTEET

Superjatkumovalo tarkoittaa laserin kaltaista valoa, jolla on kuitenkin laaja aallonpituusspektri. Tavallinen laserpulssi voidaan muuntaa superjatkumoksi epälineaarisen optiikan menetelmillä. Epälineaarinen optiikka taas pohjautuu ilmiöön, jossa jonkin aineen polarisaatio ei reagoi lineaarisesti sähkökenttään. Tällöin aineen ja valon vuorovaikutus saa aikaan valon spektrin laajentumisen. [1] Koska superjatkumon luomiseen käytetään laserpulssia, tämä pumppulaser on yleensä myös näkyvässä lopullisessa superjatkumospektrissä intensiteettiäkin. Esimerkki tällaisesta intensiteettiäkin on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Pumppulaserin aiheuttama intensiteettiäkin superjatkumospektrissä

Laajan spektrin omaavia valonlähteitä käytetään mielellään mm. kaasuaabsorptiospektroskopiassa, jossa kaasujen ominaisuuksia tutkitaan kaasuun absorboituneiden valon aallonpituuksien perusteella. Jokainen kaasu absorboi valoa yksilöllisesti, joten laajan aallonpituusspektrin avulla pystytään esimerkiksi tunnistamaan näytteestä useita kaasuja samanaikaisesti. Normaalien laajakaistaisten valonlähteiden tapauksessa valon kaa-

sussa kulkemaa vuorovaikutusmatkaa kuitenkin rajoittaa valon hajautuminen eri suuntiin. Lisäksi mittauksen signaali-kohinasuhde on helposti huono, ellei tuloksia keskiarvoteta pitkältä aikaväliltä. [2]

Superjatkumovalonlähteillä on laserin kaltaiset ominaisuudet esim. avaruudellisen koherenssein ja spektrisen kirkkauden suhteen, eli valoallot suuntautuvat yhteen suuntaan ja valon kirkkaus yhtä aallonpituusyksikköä kohden on suuri. Lisäksi niiden spektri voi olla jopa laajempi, kuin monien muiden valonlähteiden. [2] Nykyään pyritään siis kehittämään superjatkumosovellutuksia, joilla päästäisiin eroon normaalien valonlähteiden aiheuttamista haasteista. Superjatkumoillakin on tietenkin rajoituksensa, kuten se että ne ovat luonnostaan vakaita vain noin femtosekunnin mittaisina pulsseina [1].

Useiden kaasujen tunnistamisen lisäksi, laajakaistaista superjatkumovalonlähdettä voidaan käyttää myös kaasun eri ominaisuuksien analysointiin yhdellä mittauksella. Näin voidaan mitata esimerkiksi tietyn kaasun konsentraatiota ja lämpötilaa yhtäaikaan. [3]

2.1 Femtosekuntipulsseilla luodut superjatkumot

Kuten edellisessä osiossa on mainittu, femtosekuntipulsseilla luodut superjatkumot ovat luonnostaan vakaita [1]. Tämä tarkoittaa, että jokaisesta pulssista muodostuva superjatkumospektri on erittäin samanlainen muiden saman laserin pulssien superjatkumospektreihin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että näitä erittäin lyhyitä laserpulsseja voidaan tuottaa moodilukitusti, jolloin kaikki pulssit ovat toistensa kopioita. Tällaiset superjatkumot ovat hyödyllisiä sovellutuksissa, joissa pyritään tarkkoihin mittauksiin lyhyellä aikavälillä, eli spektrin keskiarvottaminen ei ole mahdollista [4].

Usein femtosekuntipulsseilla luodun superjatkumon spektrissä valon intensiteetti kuitenkin vaihtelee voimakkaasti eri aallonpituuksilla, eli spektri on muodoltaan epätasainen [4]. Toinen haaste femtosekuntipulssien hyödyntämisessä on, että superjatkumon tuottaminen femtosekuntipulsseilla vaatii yleensä melko suuren ja vaikeasti käsiteltävän järjestelmän.

2.2 Pitkillä pulsseilla luodut superjatkumot

Superjatkumoiden luomiseen käytettävät pitkät pulssit tarkoittavat pikosekuntien tai nanosekuntien mittaisia laserpulsseja. Näitä laserpulsseja tuotetaan yleensä diodilaserilla, jossa sähkövirran avulla tuotetaan mahdollisimman lyhyt laserpulssi. Tällä menetelmällä jokainen pulssi on hieman erilainen, mikä johtaa myös eri pulssien välillä vaihtelevaan superjatkumospektriin [4]. Lisäksi yksittäisen superjatkumon spektri voi olla kohinaisempi, kuin femtosekuntipulsseja käytettäessä. Tällä menetelmällä tuotettua superjatkumoa käytettäessä tuloksia voidaan siis joutua keskiarvottamaan jollakin aikavälillä, jotta spektristä saadaan vakaampi [4].

Pitkillä pulsseilla luotu keskiarvotettu spektri pysyy kuitenkin yleensä intensiteetiltään taiseimpana koko aallonpituusalueensa läpi kuin femtosekuntipulssilla luotu spektri [4]. Superjatkumon tuottaminen pitkillä pulsseilla onnistuu myös useimmiten pienemmällä järjestelmällä kuin femtosekuntipulssien tapauksessa. Niinpä tällaiset superjatkumot voivatkin olla kätevämpiä tietyissä sovellutuksissa.

2.3 Superjatkumoiden aallonpituusalueet

Superjatkumovalon aallonpituusaluetta rajoittavat erityisesti sen luomisessa käytetyn optisen kuidun materiaalin ominaisuudet. Perinteisillä piidioksidipohjaisilla optisilla kuiduilla pystytään tuottamaan superjatkumoa näkyvän valon ja lähi infrapunan alueelle, tarkemmin sanottuna noin 400 -2400 nm:n aallonpituusvälille [5]. Tämän aallonpituusvälin ulkopuolella piidioksidikuitu muuttuu läpinäkymättömäksi [1]. Useimmat kaupalliset huippuluokan superjatkumolähteet perustuvat kuitenkin piidioksidilasien käyttöön, sillä se on yleisin optisten kuitujen materiaali ja siten myös yhteensopiva olennaisen teknologian kanssa [4], [5].

Jos superjatkumovalonlähteen spektrin halutaan ulottuvan keski-infrapuna-alueelle, on siis käytettävä muita kuitumateriaaleja. Tähän voidaan käyttää pehmeistä laseista valmistettuja kuituja, kuten fluoridi- tai kalkogenidikuituja, jotka ovat läpinäkyviä keski-infrapuna-alueella. Pehmeät lasit ovat kuitenkin yleensä kalliita, nimensä mukaisesti hauraita tai sisältävät helposti epäpuhtauksia. [4]. Tästä huolimatta keski-infrapunaan ylettyviä superjatkumolähteitä on tullut saataville [5].

Tämän työn kokeellisessa osiossa, luvussa 4, käytetyn superjatkumovalonlähteen täysi spektri ulottui näkyvän valon rajalta keski-infrapuna-alueelle. Tämä saatiin aikaan käyttämällä noin 1550 nm pumppulaseria, jonka spektriä laajennettiin ensin neljä metriä pitkällä piidioksidikuidulla 800 - 2400 nm:n aallonpituusvälille. Tämän jälkeen spektriä laajennettiin vielä seitsemän metriä pitkällä useista fluoridiyhdisteistä koostuvalla kuidulla noin 3500 nm:n aallonpituuteen asti. [6]

3. SPEKTRISEN EROTTELUN MENETELMÄT

Spektrinen erottelu tarkoittaa sitä, että laajasta aallonpituusspektristä poimitaan haluttu kapeampi aallonpituuskaista. Vaikka halutaankin käyttää laajakaistaisia valonlähteitä, tiedon käsittely on helpompaa, kun spektristä erotetaan vain tietty osa käsiteltäväksi kerrallaan. Tässä luvussa esitellään erilaisia menetelmiä, joita voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. On hyvä huomioida, että jonkin komponentin tai laitteen spektrinen erotuskyky taas tarkoittaa instrumentin kykyä erottaa pieniä muutoksia säteilyn aallonpituudessa. Mitä parempi spektrinen erotuskyky laitteella on, sitä kapeamman aallonpituuskaistan se pystyy teoriassa erottamaan valonlähteen laajasta spektristä.

3.1 Hilaspektrometri

Hila on valoa hajottava komponentti, joka voi olla joko heijastava tai läpäisevä. Heijastushilassa on heijastavalla pinnalla samansuuntaisia toisistaan yhtä etäällä olevia uurteita. Läpäisyhilassa taas on samalla tavoin sijoiteltuja rakoja. Hilan rakojen tai urien välimatkaa kutsutaan hilavakioksi, ja se vaikuttaa hilan käyttöön merkittävästi. Sama hila ei esimerkiksi toimi kaikilla aallonpituuksilla yhtä hyvin, vaan aallonpituuden tulisi olla samaa kokoluokkaa hilavakion kanssa. [7]

Yksi aallonpituus muodostaa hilan vaikutuksesta useita diffraktiomaksimeja kulmiin, joissa kyseinen aallonpituus interferoi vahvistavasti. Diffraktiomaksimeja merkitään kertaluvuilla $n = 0, 1, 2, \dots$ kirkkaimmasta maksimista aloittaen. Tietyn maksimin diffraktiokulma α_d riippuu maksimin kertaluvusta, hilan hilavakiosta d , valon aallonpituudesta λ ja valon tulokulmasta α_i . Tämä riippuvuus on esitetty hilayhtälössä alla. [7]

$$n\lambda = d(\sin(\alpha_i) + \sin(\alpha_d)) \quad (3.1)$$

Hilayhtälöstä nähdään, miten hila jakaa siihen osuvan valon osiin. Eri aallonpituuksilla on saman kertaluvun diffraktiomaksimissa ja samalla tulokulmalla eri diffraktiokulmat.

Hilayhtälöstä voidaan huomata myös, että aallonpituuden toisen kertaluvun diffraktiomaksimi voi olla samassa diffraktiokulmassa kuin kaksinkertaista aallonpituutta olevan valon ensimmäisen kertaluvun diffraktiomaksimi. Tämä ominaisuus voi olla hyödyllinen esimerkiksi sovellutuksissa, joissa tarvitaan tietyn aallonpituuden diffraktiota, mutta suurempi tai

pienempi aallonpituus tuottaa helpommin havaittavan diffraktiomaksimin.

Hilan tuottamaan resoluutioon vaikuttaa erityisesti sen erotuskyky. Hilan erotuskyky tarkoittaa sen kykyä erottaa kaksi aallonpituutta toisistaan avaruudellisesti eri diffraktiokulmiin. Aallonpituudet ovat erotettavissa kun yhden aallonpituuden maksimi on samassa kulmassa kuin toisen aallonpituuden minimi. [8] Hilan teoreettinen erotuskyky R on tutkitavan diffraktiomaksimin n ja hilaan tulevan valon alueelle osuvien urien lukumäärän N tulo. [7] Se voidaan kuitenkin määrittellä myös aallonpituuden avulla. Tällöin

$$R = \lambda/\Delta\lambda = nN, \quad (3.2)$$

missä $\Delta\lambda$ on pienin aallonpituusero, jolla kaksi aallonpituutta, λ ja $\lambda + \Delta\lambda$, voidaan vielä erottaa toisistaan. [8]

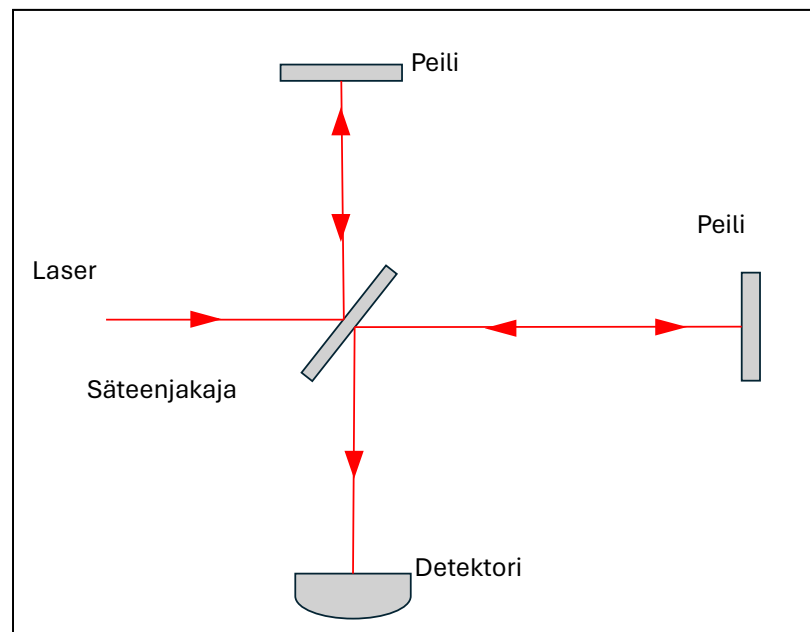
Todellinen resoluutio järjestelmälle, jossa hilaä käytetään, on yleensä paljon pienempi, kuin erotuskyky. Resoluutio riippuu erotuskyvyn lisäksi myös esim. kaikkien komponenttien optisesta laadusta ja komponenttien kohdennuksen tarkkuudesta. [7] Tämän lisäksi varsinkin kompakteissa järjestelmissä kannattaa ottaa huomioon hilan dispersio. Dispersio kuvaa sitä, kuinka paljon valon diffraktiokulma muuttuu, kun aallonpituus muuttuu. Se on valon aallonpituuden derivaatta tulokulman suhteen, tai diffraktiokulman derivaatta aallonpituuden suhteen. [9]

Jahromi ym. [10] ovat käyttäneet 2020 tehdyssä tutkimuksessaan skannaavaa hilaspektrometriä kaasuja havaitsevan sensorin rakenteessa. Sensorin toiminta perustuu absorptiospektroskopiaan, joka onkin yleinen sovelluskohde hilaan pohjautuville spektrisen erottelun järjestelmille. Sensorissa on käytetty valonlähteenä superjatkumovalonlähdettä, joka toimii keski-infrapuna-alueella 2 - 4 μm :n aallonpituusvälillä. Tässä tutkimuksessa puolet valosta on ohjattu tutkittavan kaasun läpi ja puolet detektorille vertailua varten. Tutkitavan kaasun läpäisevä valo on jaettu aallonpituuskaistoihin kääntyvään telineeseen asetetun hilan avulla. Hilaä kääntämällä voidaan siis tässä tapauksessa säätää valon tulokulmaa, ja siten tutkittavaksi saatavaa aallonpituusaluetta. Hilalta saatua aallonpituuskaistaa verrataan lopuksi alkuperäisestä valosta erotettuun vertailuspektriin.

Jahromi ym. [10] arvioivat lopulta koejärjestelyn resoluutioksi aaltolukuvälinä ilmaistuna noin 2.5 cm^{-1} . Resoluutio on tässä tutkimuksessa riittävä haluttuun tulokseen pääsemiseen. Jollakin toisella järjestelmällä saatettaisiin pystyä saavuttamaan parempi resoluutio, mutta se ei ole tuloksen kannalta välttämätöntä, joten hila on muiden ominaisuuksiensa puolesta paras valinta. Hilaan perustuva järjestelmä on mm. nopea, sillä aallonpituuskaistan erottelu spektristä ei vaadi monimutkaisia matemaattisia prosesseja tai muuta hidasta käsittelyä [11]. Hilaspektrometrit ovat myös suosittuja niiden helppokäyttöisyyden ja alhaisen hinnan vuoksi [10].

3.2 Fourier-muunnos spektroskopia

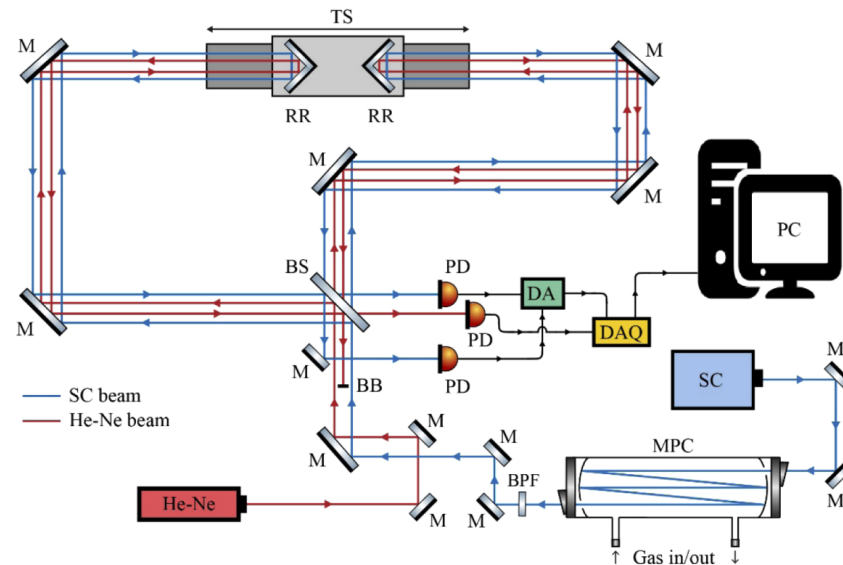
Fourier-muunnos spektrometri hyödyntää toiminnassaan interferometriä. Yleensä käytetään Michelsonin interferometriä, joka voi yksinkertaisimmillaan koostua vain yhdestä säteenjakajasta ja kahdesta peilistä. [12] Tällainen on esitetty kuvassa 3.1. Interferometrin säteenjakaja jakaa siihen tulevan valon kahteen osaan, sillä osa valosta heijastuu säteenjakajasta ja osa läpäisee sen. Nämä osat ohjataan kahteen eri peiliin. Peileistä heijastuvat valonsäteet saapuvat taas takaisin säteenjakajalle ja yhdistyvät, jolloin eri peileistä tulevien valonsäteiden interferenssi voidaan mitata ohjaamalla valo detektorille. Jos säteiden kulkemien matkojen ero valonlähteeltä detektorille on aallonpituuden moninkerta, valonsäteet vahvistavat toisiaan, eli niiden interferenssi on konstruktivista. Peilien etäisyyksiä voidaan muuttaa siten, että detektorille saadaan vaihteleva interferenssisignaali. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että toinen peili pidetään paikallaan ja toinen liikkuu. Interferometristä saadun interferenssisignaalin muuttamiseen analysoitavaksi spektriksi vaaditaan matemaattista Fourier-muunnosta. Fourier muunnos tehdään tietokoneella digitaalisessa muodossa ja lopputuloksena saadaan normaali intensiteetti-taajuus-kuvaaja. [12]



Kuva 3.1. Yksinkertaisen Michelsonin interferometrin perusrakenne.

Yleinen käyttökohde Fourier-muunnos spektroskopiaalle on kaasujen tunnistaminen absorptiospektroskopiolla. Useissa tällaisissa tutkimusjärjestelyissä [2], [11], [13] pääasiallisen superjatkumovalonlähteen lisäksi on käytetty Helium-Neon-laseria tutkimusjärjestelyn kalibrointiin. Tämän laserin valo kulkee muutoin saman reitin kuin tutkimukseen käytettävä valo, mutta ohittaa tutkittavan kaasun. Koska tämän laserin valolle ei tapahdu absorptiota ja laserin aallonpituus on tiedossa, jakautuneiden säteiden matkaero saadaan selville sen interferenssistä. Tällainen tutkimusjärjestely on esitetty kuvassa 3.2 [11]. Täs-

sä järjestelyssä on erikoisuutena myös interferometrijärjestelmä, jossa molemmat peilit liikkuvat yhdessä. Tämä tuplaa peilin siirtämisellä aikaansaadun matkaeron, jolloin mitausjärjestelystä tulee kompaktimpi. [11]



Kuva 3.2. Fourier-muunnos spektroskooppi, jossa punaisella Helium-Neon laser ja sinisellä superjatkumolaser. MPC: kammio kaasulle, M: peili, BS: säteenjakaja, RR: suunnan vaihtava peili, TS: liikealue, BB: säteen esto, BPF: kaistasuodin, PD: detektor, DA: differentiaalivahvistin, DAQ: tiedonkeruukortti, PC: tietokone [11]

Jahromi ym. vertaavat eräässä tutkimuksessaan [11] edellisessä luvussa esiteltyä hiilaa hyödyntävää sensoria [10] Fourier-muunnos spektroskopiaan pohjautuvaan sensoriin. Fourier-muunnos spektrometrillä pystytään tutkimuksen mukaan saamaan resoluutioksi 0.033 cm^{-1} . Tämä on selvästi parempi, kuin aiemman tutkimuksen hilaspektrometrin tuottama resoluutio. Korkean resoluution saavuttaminen vaatii kuitenkin pitkän mittausajan verrattuna hilaspektrometriin.[11]

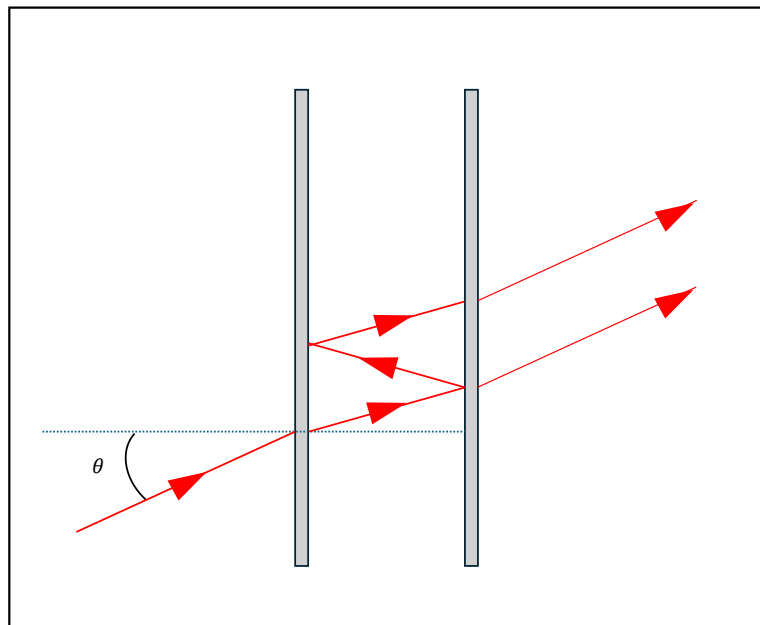
3.3 Fabry–Pérot -interferometri

Fabry-Pérot -interferometri koostuu kahdesta vastakkaisesta osittain heijastavasta pinnasta. Valo tulee interferometriin toisen pinnan lävitse jossakin tulokulmassa θ . Interferometrin sisällä valo heijastuu edestakaisin pintojen välissä, ja aina valon heijastuessa osa siitä läpäisee pinnan ja poistuu interferetristä. Valon tulosuuntaa vastakkaisella puolella nämä läpi päässeet valonsäteet voidaan ohjata detektorille, jossa läpi päässyt valo saadaan interferetristä suoraan spektriiksi. [14] Interferometrin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3.3.

Fabry-Pérot -interferometrin pintojen välimatkaa muuttamalla voidaan muuttaa sitä, mikä aallonpituus interferometrin läpäisevästä valosta interferoi vahvistavasti [15]. Interferometri toimii tällöin eräänlaisena säädettävänä suotimena, joka päästää lävitseen vain

tietyä aallonpituuden. Interferenssimaksimin aallonpituus riippuu interferometrin pintojen etäisyydestä, sillä se määrää valonsäteiden kulkeman matkan eron [14].

Fabry-Pérot -interferometriä käytetään hilaan ja Fourier-muunnos spektroskopiaan verrattuna hieman erilaisiin sovelluksiin, kuten hyperspektrikuvantamiseen [16] ja hyperspekt-risiin sensoreihin [17]. Hyperspektrikuvantaminen tarkoittaa että, jokainen kuvan pikseli on mitattu laajalla aallonpituusskaalalla. Pikselit sisältävät tällöin ei-visuaalista informaatiota, joka voi kertoa esimerkiksi kohteen pintamateriaalista. [16] Hyperspektrinen sensori mittaa kohteen lähettämää tai sirottamaa valoa useilla spektrikomponenteilla hyvin samaan tapaan kuin kuvantamisessakin [17]. Käytännössä kummassakin menetelmässä interferometrin avulla pyyhkäistään halutun spektrialueen ylitse tallentaen tieto jokaiselta aallonpituuskaistalta, jolloin kohteesta saadaan tietoa useilla aallonpituuksilla.



Kuva 3.3. Fabry-Pérot -interferometrin toimintaperiaate, θ : valon tulokulma

3.4 Optiset suotimet

Yksinkertaisena spektrisen erottelun ratkaisuna voidaan käyttää optisia suotimia. Suotimet ovat komponentteja, jotka päästävät lävitseen vain tiettyjä valon aallonpituuksia. Yleisiä suodintyyppejä ovat mm. absorptioon perustuvat suotimet ja interferenssiin perustuvat suotimet. [18]

Absorptioon perustuvissa suotimissa ei-toivotut aallonpituudet absorboituvat suotimen materiaaleihin. Interferenssisuotimien toiminta taas perustuu ohuisiin pinnoitteisiin, jotka saavat vain halutut aallonpituudet interferoimaan vahvistavasti. [18] Interferenssisuotimet voivat toimia jopa miltei samalla periaatteella, kuin edellisessä luvussa käsitelty Fabry-Pérot interferometri, jolloin suodin koostuisi jostakin kahden peilin väliin asetetusta mate-

riaalista [15].

Suotimia voidaan luokitella myös yli- ja alipäästösuotimiin, sekä kaistasuotimiin. Ylipäästösuoitimet päästävät lävitseen vain tietyn aallonpituusrajan ylittäviä valon aallonpituuksia. Alipäästösuoitimet päinvastoin päästävät lävitseen vain tietyn raja-arvon alapuolella olevia aallonpituuksia. Kaistasuoitimet ovat tavallaan näiden kahden yhdistelmiä, sillä ne päästävät lävitseen tietyn aallonpituuskaistan. Suotimesta riippuen aallonpituuskaistan leveys voi vaihdella. [18] Kaistasuoitimen voisi muodostaa myös kahdella peräkkäisellä suotimella, joista toinen olisi yli- ja toinen alipäästösuoodin.

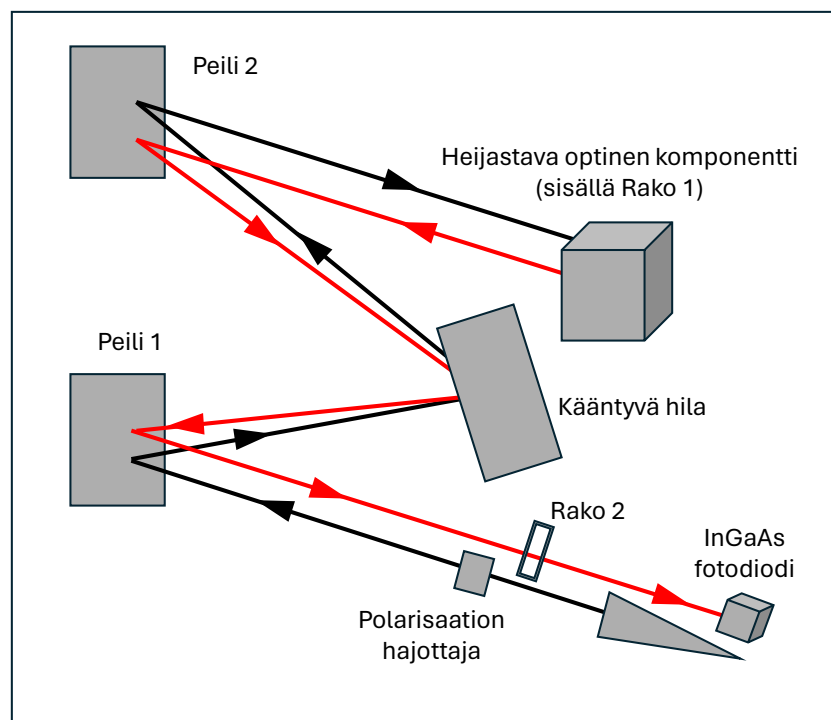
Optisten suotimien käyttöä rajoittaa niiden muuttumattomuus. On olemassa joitakin säädettäviä suotimia, mutta suurimmassa osassa tapauksia suotimilla valittua aallonpituuskaistaa ei voi muuttaa vaihtamatta suodinta kokonaan toisenlaiseen [18]. Ne voivat kuitenkin olla hyödyllisiä esimerkiksi poistamaan jotain tietyillä aallonpituuksilla esiintyviä häiriötekijöitä käsiteltävästä spektristä. Tämän lisäksi suotimilla voisi esimerkiksi suojella herkkiä komponentteja, jos käytössä oleva spektri sisältää komponenteille vahingollisia aallonpituuksia vaikkapa tietyn aallonpituusalueen suuren intensiteetin vuoksi.

4. MITTAUSMENETELMÄT

4.1 Optinen spektrianalysaattori

Käytännön mittauksissa käytettiin optista spektrianalysaattoria, eli OSA:ta, koejärjestelystä saadun spektrin mittaamiseen. Tähän käytetyt analysaattorit olivat Yokogawan mallit AQ6374 ja AQ6377, jotka toimivat 350 - 1750 nm:n ja 1900 - 5500 nm:n aallonpituusalueilla. Tutkittava valo tuotiin koejärjestelystä OSA:lle kohdentamalla se linssillä optiseen kuituun, joka yhdistettiin analysaattoriin.

Yksinkertaisesti ajateltuna OSA:n toiminta perustuu kahteen pääkomponenttiin: monokromaattoriin ja detektoriin. Monokromaattori toimii kapeakaistaisen optisen suotimen tavoin ja päästää lävitseen vain kapean aallonpituuskaistan analysaattoriin tulevasta valosta. Monokromaattori pystyy kuitenkin pyyhkäisemään laitteen aallonpituusvälin ylitse, jolloin saadaan mitattua valon spektri. [19]

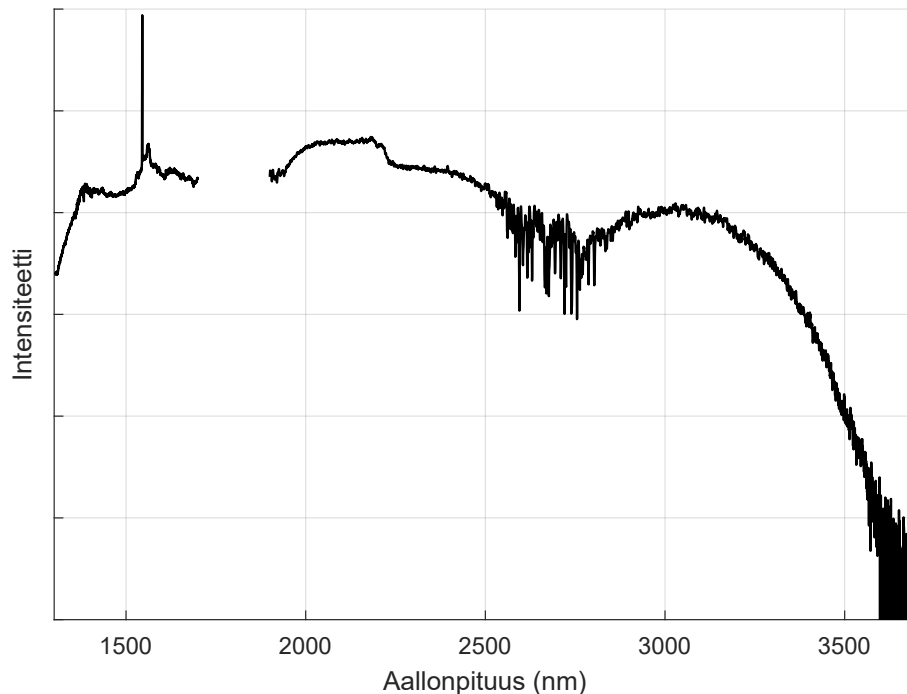


Kuva 4.1. Optisen spektrianalysaattorin monokromaattorin toimintaperiaate, kuva perustuu lähteeseen [20].

Monokromaattorin rakenne on esitetty kuvassa 4.1 [20]. Monokromaattorin toiminta perustuu diffraktioon. Tutkittava valo ohjataan peilin kautta hilalle ja toisen peilin kautta heijastavaan komponenttiin, josta valo kulkee taas saman reitin peilien ja hilan kautta takaisin ja päätyy lopulta detektorille. Rakenteessa käytetty heijastava optinen komponentti kääntää valoa siten, että diffraktiosta saatu aallonpituuskaista pysyy samana riippumatta siitä, kumpaan suuntaan valo kulkee monokromaattorissa. Detektorille saatua aallonpituuskaistaa voidaan kuitenkin muuttaa hilan asentoa vaihtamalla, mikä mahdollistaa pyyhkäisyn tietyn aallonpituusalueen yli ja siten valon spektrin mittaamisen. [20]

4.2 Koejärjestelyn esittely

Työssä käytettiin valonlähteenä pitkillä pulseilla luotua keski-infrapunaan ylettyvää superjatkumoa, jonka pumppulaserin aallonpituus oli noin 1550 nm. Ennen diffraktiomittauksia mitattiin käytetyn superjatkumovalon normaali spektri. Spektrimittaus täytyi suorittaa kahdella eri optisella spektrianalysaattorilla, sillä yhden OSA:n toiminta-alue ei kattanut koko spektrialuetta. 1300-1700 nm:n aallonpituusalueella laserin voimakkuutta ei nostettu aivan huippuunsa, jotta OSA:lle ei varmasti aiheutuisi vahinkoa. Tällä aallonpituusalueella spektri nimittäin sisältää pumppulaserista aiheutuvan intensiteettiipiikin. Mitatusta datasta pystyi kuitenkin pienemmälläkin teholla näkemään spektrin muodon erittäin hyvin. Nämä spektrimittaukset on esitetty kuvassa 4.2.

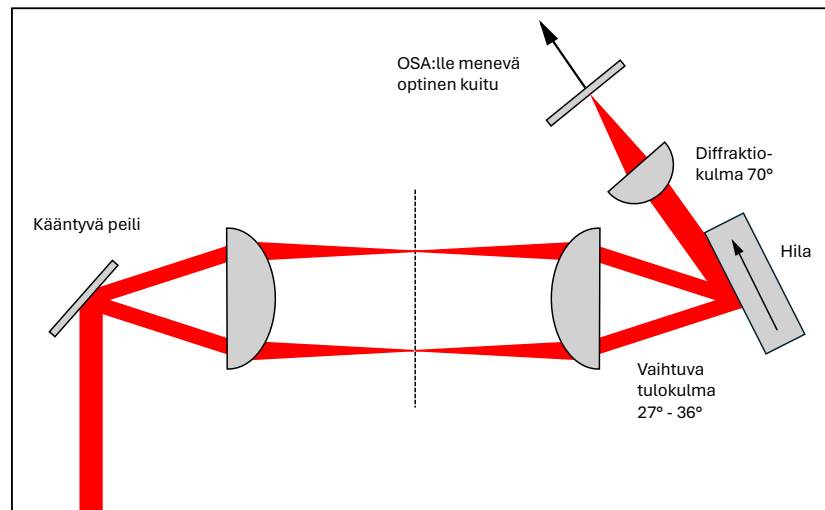


Kuva 4.2. Käytetyn superjatkumolaserin spektri 1300-3700 nm:n aallonpituusalueella. Spektri on mitattu kahdella eri OSA:lla.

Tässä 1300-1700 nm:n aallonpituuksilla tehdyille mittaukselle on annettu kerroin, joka korottaa sen intensiteetiltään oikealle tasolle suhteessa muuhun spektriin. Noin 2700 nm:n

aallonpituudella spektrissä voidaan nähdä ilmassa olevaan vesihöyryyn absorboituneesta valosta aiheutunut intensiteetin lasku. Pumpplaserin aiheuttama intensiteettihiikki näkyy kuvassa noin 1550 nm:n aallonpituudella.

Rakennettu koejärjestely koostui kolmesta kuperasta linssistä, hilasta ja kääntyvästä peilistä, jonka avulla voitiin muuttaa hilalle tulevan valon tulokulmaa. Peili oli Thorlabsin yhden akselin ympäri kääntyvä järjestelmä suuren halkaisijan valonsäteille. Valo ohjattiin koejärjestelyn viimeisellä linssillä optiseen kuituun, joka yhdistettiin OSA:han. Koejärjestely on esitetty kuvassa 4.3.



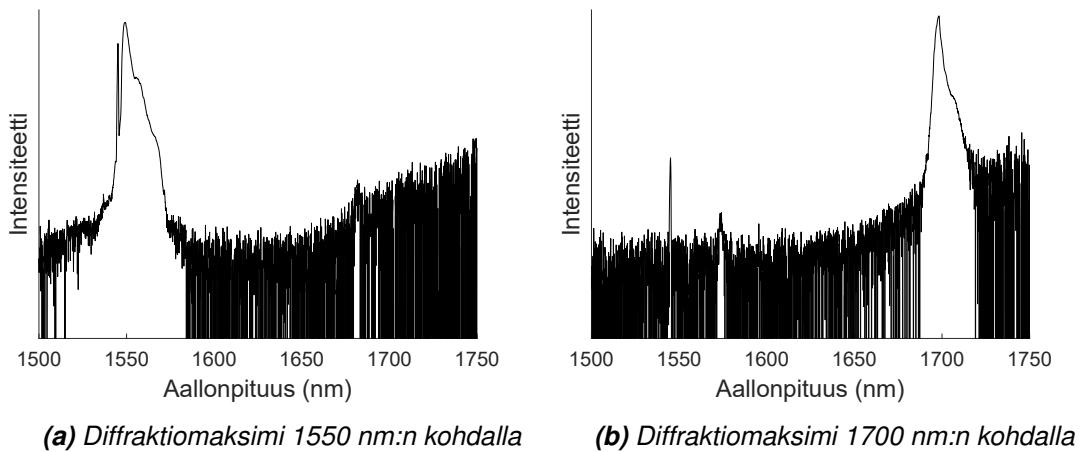
Kuva 4.3. Lopullinen koejärjestely

Haluttu diffraktiokulma ja sen vaatimat valon eri tulokulmat määritettiin ennen mittausjärjestelyn kokoamista hyödyntämällä hilayhtälöä (3.1). Peilin keskiasento ilman ohjauksen ohjauksen asettettiin vastaamaan mitattavan alueen keskimäistä aallonpituutta. Peilin ohjauksen määrittäminen laskemalla tarvittava kääntymiskulma kumpaankin suuntaan keskiasennosta ja vertaamalla tätä peilin ohjauksen tietoihin valmistajan verkkosivuilla. Kokoamisvaiheessa kulmien määrittäminen tehtiin kulmaviivaimen avulla, mikä oli hyvin epätarkkaa. Saavutetuissa kulmissa voi siis olla huomattavia eroja laskennallisiin verrattuna. Lisäksi linssien asettelu tehtiin silmämääräisesti ja arvioimalla asettelun hyvyyttä ainoastaan jatkuvilla spektrimittauksilla.

Diffraktiomaksimien mittaukset suoritettiin pääasiassa metaanin absorptioalueella, eli 3100-3400 nm:n aallonpituusvälillä. Tämän lisäksi mittauksia tehtiin 1550-1700 nm:n aallonpituusalueella, sillä tämän aallonpituusalueen toisen kertaluvun maksimit ovat samassa kulmassa pidempien mitattujen aallonpituuksien ensimmäisten diffraktiomaksimien kanssa. Diffraktiomaksimit olivat selkeämmin näkyvissä lyhyempien aallonpituuksien alueella, mikä auttoi tutkimusjärjestelyn komponenttien kohdistamisessa. Mittauksissa pyrittiin ensin saamaan lyhyempien aallonpituuksien maksimit mahdollisimman voimakkaiksi, minkä jälkeen samalla koejärjestelyllä mitattiin metaanin absorptioalueen diffraktiota.

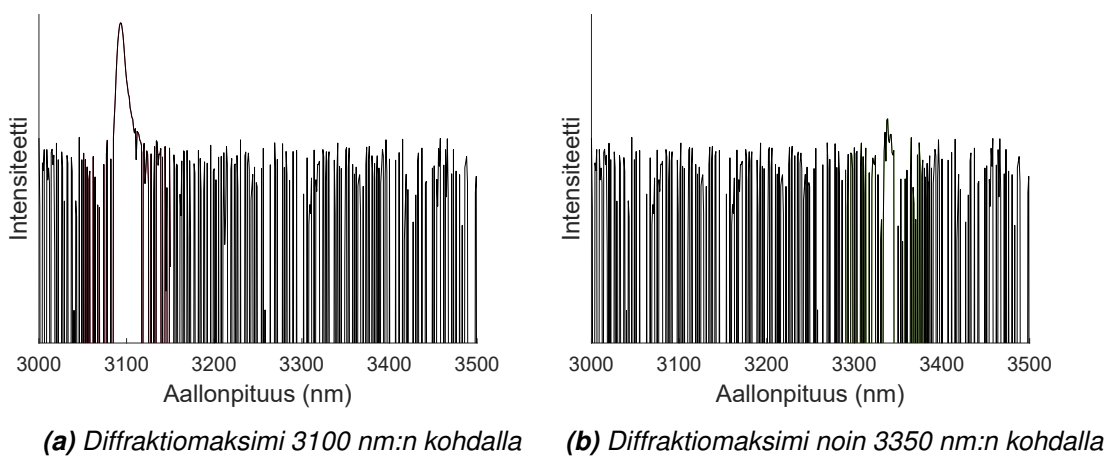
5. MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Kuten on mainittu luvussa 4, diffraktiomaksimeja mitattiin ensin 1550-1700 nm:n aallonpituusalueella. Tämän alueen ääripäistä saadut diffraktiomaksimit on esitetty kuvassa 5.1. Kuten kuvasta nähdään, diffraktiomaksimien intensiteetin suhde kohinan tasoon oli tällä alueella erittäin hyvä.



Kuva 5.1. Diffraktiomaksimit 1550-1700 nm:n mittausalueen ääripäissä

Kuvassa 5.2 taas on esitetty parhaat diffraktiomaksimit, jotka onnistuttiin mittaamaan 3100-3400 nm:n aallonpituusalueelta.

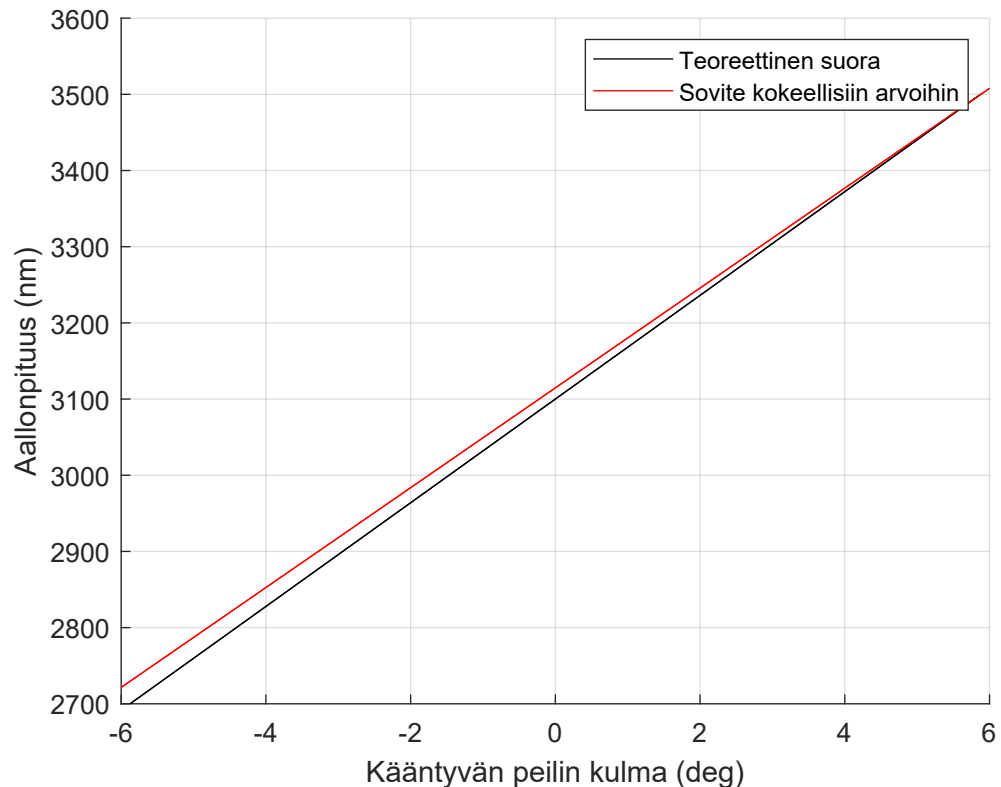


Kuva 5.2. Diffraktiomaksimit 3100-3400 nm:n mittausalueen ääripäissä

Kohinan vaikutus on näissä mittauksissa selkeästi suurempi, ja aallonpituusalueen pi-

demmillä aallonpituuksilla diffraktiomaksimin intensiteetti vähenee huomattavasti. Diffraktiomaksimit jäävät tällöin helposti epäselviksi ja 3400 nm:n aallonpituudella olevaa diffraktiomaksimia ei tällä mittausjärjestelyllä onnistuttu saamaan näkyviin.

Mittausdatasta analysoitiin mm. sitä, miten diffraktiomaksimin paikka aallonpituusakselilla muuttui, kun valon tulokulmaa hilalle muutettiin kääntyvän peilin avulla. Kuvassa 5.3 on esitetty mustalla hilayhtälön (3.1) avulla piirretty laskennallinen suora diffraktiomaksimin aallonpituudesta peilin kulman funktiona. Tässä peilin kulma 0° tarkoittaa asentoa, jossa peili oli, kun sille ei annettu lainkaan ohjaavaa jännitettä. Kunkin maksimin mittaamiseen käytettyä peilin kulmaa ei merkitty erikseen ylös mittausvaiheessa. Tehdyistä muistiinpanoista oli kuitenkin mahdollista arvioida kokeellisia arvoja, joiden pohjalta kuvaan 5.3 on piirretty myös kokeellinen sovitesuora punaisella. Tässä ei kuitenkaan ole suurtakaan eroa laskennalliseen suoraan verrattuna.

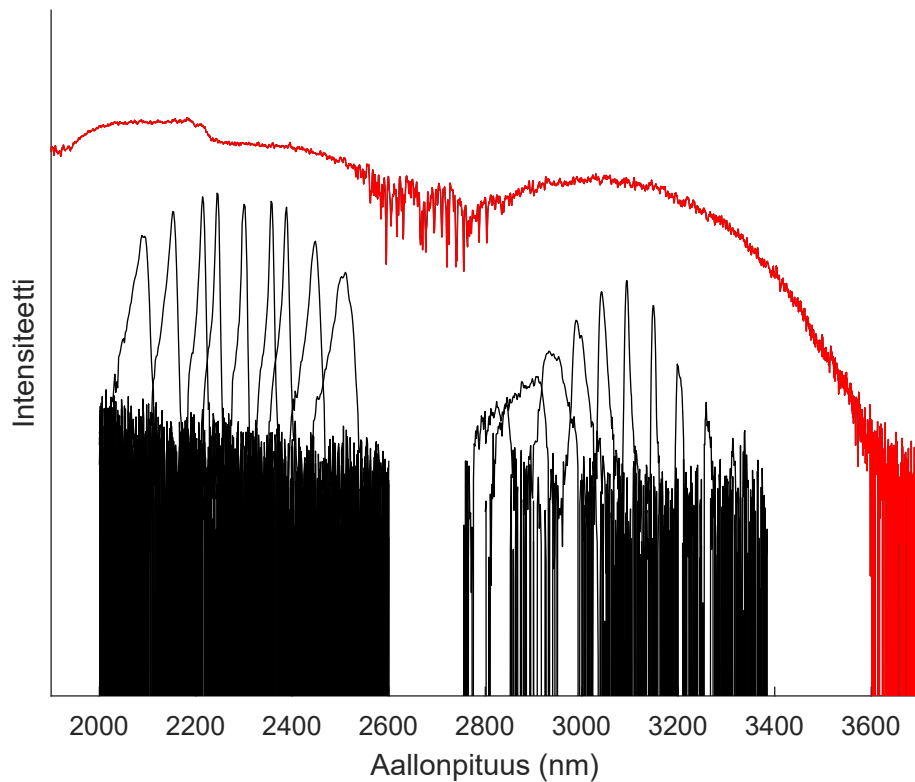


Kuva 5.3. Diffraktiomaksimin paikka aallonpituusakselilla peilin kulman funktiona

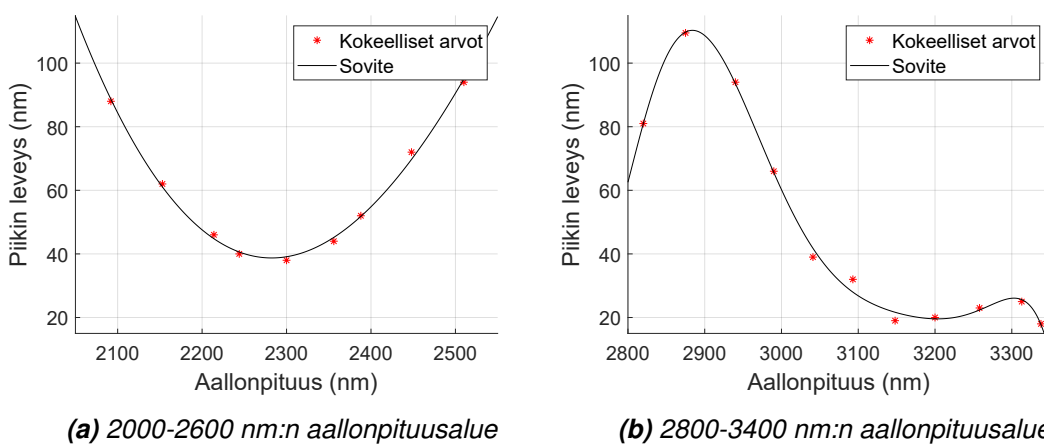
Toinen analyysikohde oli diffraktiomaksimin leveyden muutos aallonpituuden muuttuessa. Kuvassa 5.4 on esitetty käytetyn superjatkumovalonlähteen spektri punaisella ja kaksi sarjaa diffraktiomaksimeja 2000-2600 nm:n ja 2800-3400 nm:n aallonpituusväleillä. Tämän datan pohjalta arvioitiin diffraktiomaksimien leveyden muutosta eri aallonpituuksilla. Diffraktiomaksimien leveydet ja paikat mitattiin katsomalla kuvaajalta, mistä saattoi aiheutua virhettä. Nämä tulokset ja niihin sovitetut käyrät on esitetty kuvassa 5.5.

Maksimin leveyteen vaikutti todennäköisesti valonsäteiden muodon vääristyminen peilin asennon muuttuessa. Maksimit olivat yleensä leveämpiä mitattavan aallonpituusalueen

reunoilla. Kuvan 5.5b ensimmäisen ja viimeisen datapisteen mittaamisessa on voinut tulla virhettä, sillä mittaus näyttäisi muiden pisteiden osalta noudattavan paraabelin kaltaista käyrää, kuten kuvassa 5.5a. Kuvan 5.5b kahta pisintä aallonpituutta vastaavien diffraktiomaksimien intensiteetit olivat myös hyvin alhaiset, joten niiden muoto on todennäköisesti osittain hävinnyt mittauksessa kohinan sekaan. Pienimmällä aallonpituudella taas ilman vesihöyryn aiheuttama valon absorptio ehkä laskee diffraktoituneen valon intensiteettiä ja saattaa hieman muuttaa diffraktiomaksimin muotoa.



Kuva 5.4. Superjatkumospektri kuvassa punaisella ja mustalla useita diffraktiomaksimeja kahdella eri aallonpituusvälillä



Kuva 5.5. Diffraktiomaksimin leveys aallonpituuden funktiona kahdella eri aallonpituusvälillä

6. YHTEENVETO

Työssä esiteltiin superjatkumovalonlähteiden teoriaa ja erilaisia spektrisen erottelun menetelmiä. Näiden menetelmien sovelluskohteita esiteltiin myös lyhyesti kunkin menetelmän kohdalla.

Superjatkumovalonlähteet voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden luomiseen käytetyn laserpulssin perusteella. Nämä ovat femtosekuntipulsseilla ja pitkillä pulsseilla tuotetut superjatkumot. Kummallakin tyypillä on omat vahvuutensa. Stabiileja femtosekuntipulsseja voidaan hyödyntää esim. sovellutuksissa, jotka vaativat tarkkoja mittauksia lyhyillä aikaväleillä. Pitkät pulssit taas sopivat paremmin sovellutuksiin, joissa spektrin keskiarvottaminen on mahdollista, mutta vaaditaan tasaisen muotoista spektriä.

Työssä käsitellyt neljä spektrisen erottelun menetelmää olivat hilaspektrometria, Fouriermuunnos spektroskopia, Fabry-Pérot -interferometrin käyttö ja optisten suotimien käyttö. Hilan avulla pystytään erottelemaan tiettyjä aallonpituuskaistoja diffraktiota hyödyntäen. Se on melko pieni ja suhteellisen helppokäyttöinen optinen komponentti. Fouriermuunnos spektroskopiassa taas hyödynnetään interferometriä, josta saatu interferenssisignaali muutetaan spektriksi Fourier-muunnoksella. Sekä hilaa että Fourier-muunnos spektroskopiaa hyödynnetään mm. kaasuabsorptiospektroskopiassa.

Muita menetelmiä käsiteltiin hieman lyhyemmin. Fabry-Pérot -interferometri koostuu kahdesta osittain heijastavasta pinnasta. Tätä komponenttia hyödynnetään absorptiospektroskopian sijaan esimerkiksi hyperspektrikuvantamisessa. Viimeisenä menetelmänä käsiteltiin optiset suotimet, jotka ovat yksinkertaisin spektrisen erottelun menetelmä.

Lopuksi työn kokeellisessa osiossa tutustuttiin lähemmin hilan käyttöön spektrisessä erottelussa käytännön mittausten avulla. Työssä käytettiin pitkillä pulsseilla tuotettua superjatkumovalonlähdettä, jonka spektri ulottui keski-infrapunaan. Mittaustuloksista tutkittiin mm. miten diffraktiomaksimin leveys muuttui mitatun aallonpituusvälin eri aallonpituuksilla.

LÄHTEET

- [1] A. Aalto, "Advanced Optical Techniques for Gas Sensing Using Supercontinuum Sources," tohtorinväitöskirja, 2020.
- [2] R. Krebbers, N. Liu, K. Jahromi et al., "Mid-infrared supercontinuum-based Fourier transform spectroscopy for plasma analysis," *Scientific reports*, vol. 12, nro 1, s. 9642, 2022.
- [3] A. Saleh, P. Ryczkowski, G. Genty ja J. Toivonen, "Supercontinuum lidar for industrial process analysis," *Optics Express*, vol. 29, nro 25, s. 42 082–42 089, 2021.
- [4] A. Aalto, "Kirkkaat laajakaistaiset valonlähteet ja niiden käyttö kaviteettitehosteisesa absorptiospektroskopiassa," tutkielma, 2011.
- [5] T. Sylvestre, E. Genier, A. Ghosh et al., "Recent Advances in Supercontinuum Generation in Specialty Fiber," 2021.
- [6] C. Amiot, "Novel supercontinuum sensing and imaging techniques in the infrared," tohtorinväitöskirja, Université Bourgogne Franche-Comté; Tampereen teknillinen yliopisto, 2018.
- [7] *Understanding and selecting diffraction gratings*, Acal BFi, 2014. url: https://www.acalbf.com/sites/default/files/2021-09/Acal_BFi_Diffraction_Gratings_Guide_%28EN%29.pdf.
- [8] *Introduction to Diffraction Grating*, Thorlabs, 2007. url: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/802.pdf>.
- [9] T. Erdogan, "Angular Dispersion," 2018.
- [10] K. E. Jahromi, M. Nematollahi, Q. Pan et al., "Sensitive multi-species trace gas sensor based on a high repetition rate mid-infrared supercontinuum source," *Optics Express*, vol. 28, nro 18, s. 26 091–26 101, 2020.
- [11] K. E. Jahromi, M. Nematollahi, R. Krebbers, M. A. Abbas, A. Khodabakhsh ja F. J. Harren, "Fourier transform and grating-based spectroscopy with a mid-infrared supercontinuum source for trace gas detection in fruit quality monitoring," *Optics Express*, vol. 29, nro 8, s. 12 381–12 397, 2021.
- [12] A. Dutta, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy," teoksessa *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*. Elsevier, 2017, luku 4, s. 73–93.
- [13] M. Abbas, K. Jahromi, M. Nematollahi et al., "Fourier transform spectrometer based on high-repetition-rate mid-infrared supercontinuum sources for trace gas detection," *Optics Express*, vol. 29, nro 14, s. 22 315–22 330, 2021.
- [14] M. Vaughan, *The Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications*. Routledge, 2017.

- [15] D. W. Ball, *Field guide to spectroscopy*. Spie Press Bellingham, Washington, 2006, vol. 8.
- [16] T. Kääriäinen ja T. Dönsberg, "Active hyperspectral imager using a tunable supercontinuum light source based on a MEMS Fabry–Perot interferometer," *Optics Letters*, vol. 46, nro 22, s. 5533–5536, 2021.
- [17] A. Saleh, M. Mekhregin, T. Dönsberg, T. Kääriäinen, G. Genoud ja J. Toivonen, "Mid-infrared hyperspectral sensor based on MEMS Fabry-Pérot interferometer for stand-off sensing applications," *Scientific Reports*, vol. 12, nro 1, s. 19 392, 2022.
- [18] I. Sivarajah, "What Are Optical Filters Used For?," 2022.
- [19] *OSA Specifications Explained*, Yokogawa, 2017. url: https://info.eu.tmi.yokogawa.com/acton/ct/19192/s-0060-1709/Bct/1-009b/1-009b:729/ct15_0/1?sid=TV2%3AIOmMEcoLj.
- [20] T. Mori, G. Ishihara, T. Kaneko ja A. Horiguchi, "AQ6375 Optical Spectrum Analyzer for Long Wavelength Band," *YOKOGAWA TECHNICAL REPORT ENGLISH EDITION*, vol. 45, s. 17–20, 2008.