

Allar Saviauk

Vahakiinnityksen vaikutus piikiekon muotoon kiillotusprosessissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinöörityö
20.4.2011

ALKULAUSE

Tämän insinöörityö on tehty Okmetic Oyj:lle. Haluan kiittää kaikkia projektissa mukana olleita, etenkin insinöörityöni ohjaajia prosessi-insinööri Henri Nordlundia Okmeticista sekä yliopettaja Jyrki Kullaata Metropolia Ammattikorkeakoulusta. Erityiset kiitokset myös prosessipäällikkö Antti Tammiselle vahvasta tuesta koko projektin ajan.

Helsingissä 20.4.2011

Allar Saviuk

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Allar Saviak Vahakiinnityksen vaikutus piikiekon muotoon kiillotusprosessissa 60 sivua + 6 liitettä 20.4.2011
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	prosessi-insinööri Henri Nordlund yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tässä insinööriyössä on tutkittu, kuinka vahakiinnitys vaikuttaa piikiekkojen muotoon kiillotusprosessissa. Aluksi on tutustuttu piikiekon mekaanisiin ominaisuuksiin, jonka jälkeen on kuvailtu yksipuolisesti kiillotetun piikiekon valmistusprosessi. Vahan levityksen vaiheet on käsitelty yksityiskohtaisesti spinnauksen teoriaan osittain nojautuen.</p> <p>Piikiekkojen tasomaisuuden mittaamista varten on suunniteltu ja rakennettu Newton-interferometri. Optisella mittalaitteella voidaan piikiekon tasomaisuus mitata tarkasti käyttäen hyväksi valon interferenssiä. Newton-interferometrin toiminta- ja mittauseriaate on esitelty yksityiskohtaisesti.</p> <p>Tasomaisuuteen vaikuttavat mahdolliset parametrit on kartoitettu. Piikiekkojen tasomaisuuden kannalta tärkeiksi nähtyjä parametreja on tutkittu viiden eri kokeen avulla. Kokeista on tehty tarkat koesuunnitelmat käyttäen hyväksi MODDE-ohjelmistoa.</p> <p>Viidessä kokeessa on tutkittu usean eri vahakiinnitysparametrin vaikutusta piikiekon muotoon. Tutkittavina muuttujina on käytetty spinnerin pyörimisnopeutta, vahan määrää, piikiekon painamista voimalla kiillotusalustaa vasten, vakuumpiirässiä, sekä lämpötiloja vahakiinnityksessä. Lisäksi on kokeiltu kahta eri vahaa, joilla on eri viskositeetit.</p> <p>On havaittu, että suurin vaikutus piikiekon tasomaisuuteen on spinnauksen pyöritysnopeudella. Tasomaisuuden on havaittu paranevan spinnauksen pyöritysnopeuden ollessa korkea. Myös tasomaisuuden keskihajonnan on todettu pienenevän huomattavasti korkeilla pyöritysnopeuksilla. Lämpötilagradienttien on havaittu heikentävän piikiekon tasomaisuutta vahakiinnityksessä.</p>	
Avainsanat	piikiekko, spinnaus, kiinnitysvaha, tasomaisuuden mittaaminen, Newtonin renkaat, Newton-interferometri, kiillotusprosessi

Author	Allar Saviak
Title	Effect of Wax Mounting on Silicon Wafer Flatness in Polishing Process
Number of Pages	60 pages + 6 appendices
Date	20 May 2011
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Henri Nordlund, Process Engineer Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The effect of wax mounting on the flatness of the silicon wafer in a polishing process is studied in the experimental part of this thesis. In the theoretical part of the thesis the mechanical properties of silicon wafers are summarized and the manufacturing process of silicon wafers is presented. In addition, the theory of wax spin coating is described in detail.</p> <p>In order to measure the flatness of a silicon wafer, mounted on a polishing carrier, a Newton Interferometer was designed and built. Using this optical measuring device, the flatness of the silicon wafer could be measured based on the interference of light. The theory behind the interferometer is described in detail. It is also described how a flat surface can actually be measured from an interferogram.</p> <p>A number of parameters that could potentially have an effect on the silicon wafer flatness in the wax mounting are determined. Parameters that are thought to be critical, in terms of the wafer flatness, are tested in five separate experiments. Each experiment is designed and carried out based on DOE principles. The MODDE software is used to design the experiments.</p> <p>In these five experiments variables such as the spinner rotation speed, wax amount, bonding arm pressure, vacuum press, and the temperatures on the silicon wafer flatness are studied after mounting the wafers on a carrier. Also two mounting waxes with different viscosities are tested.</p> <p>The spinner rotation speed is found to be the most important parameter on the silicon wafer flatness. With a high rotation speed the flatness of the silicon wafer is found to be the most substantial. The standard deviation of the wafer flatness is also significantly smaller with high rotation rates. It is also found that the temperature gradients in the wax mounting have a negative effect on the flatness.</p>	
Keywords	silicon wafer, spin coating, mounting wax, flatness measurement, Newton's rings, Newton Interferometer, polishing process

Sisällys

Lyhenteitä, käsitteitä ja suomennoksia	7
1 Johdanto	1
2 Piikiekkojen valmistus	2
2.1 Pii ja sen mekaaniset ominaisuudet	2
2.2 Yksipuolisesti kiillotetun piikiekon valmistusprosessi	4
3 Vahakiinnitys kiillotusprosessissa	5
3.1 Vahakiinnityksen vaiheet	5
3.2 Spinnauksen teoriaa	11
3.3 Piikiekon muotoon vaikuttavat parametrit vahakiinnityksessä	12
3.4 Tasomaisuustermit	14
4 Newton-interferometri	16
4.1 Mittausmenetelmän valinta	16
4.2 Fysikaalinen toimintaperiaate	16
4.3 Newton-interferometrin suunnittelu ja rakentaminen	22
4.3.1 Interferometrin pääkomponentit	22
4.3.2 Monokromaattinen valolähde	24
4.3.3 Runko, diffuuseri ja säteenjakaja	25
4.3.4 Referenssitaso	27
4.3.5 Referenssitason pidin	27
4.3.6 Kamera	29
4.4 Interferogrammien käsittely ohjelmallisesti	29
5 Vahakiinnityksen parametrien vaikutus piikiekon tasomaisuuteen	33
5.1 Koekiekot	33
5.2 Koe 1: Vaikuttavien parametrien löytäminen	34
5.2.1 Kokeen 1 tutkittavat parametrit ja koesuunnitelma	34
5.2.2 Kokeen 1 koejärjestely	35
5.2.3 Kokeen 1 tulokset	36
5.3 Koe 2: Parametrien optimointi	43
5.3.1 Kokeen 2 koejärjestely	43
5.3.2 Kokeen 2 tulokset	43

5.4	Koe 3: Lämpötilat vahakiinnityksessä	46
5.4.1	Lämpötilojen oletettu vaikutus	46
5.4.2	Lämpötilagradienttien mittaaminen	47
5.4.3	Lämpötilamittausten tulokset	51
5.5	Koe 4: Kiinnitysvarren paine	52
5.5.1	Kokeen 4 koejärjestely	52
5.5.2	Paineen ja loppuspinnauksen vaikutus tasomaisuuteen	52
5.6	Koe 5: Kiinnitysvahojen vertailu	54
5.6.1	Kokeen 5 koejärjestely	54
5.6.2	Kokeen 5 tulokset	55
6	Yhteenveto	56
	Lähteet	59

Liitteet

Liite 1. Optical Flat Holder

Liite 2. Newton-interferometrin päämitat

Liite 3. Experiment Data Sheet 1

Liite 4. Experiment Data Sheet 2

Liite 5. Experiment Data Sheet 3

Liite 6. Experiment Data Sheet 4

Lyhenteitä, käsitteitä ja suomennoksia

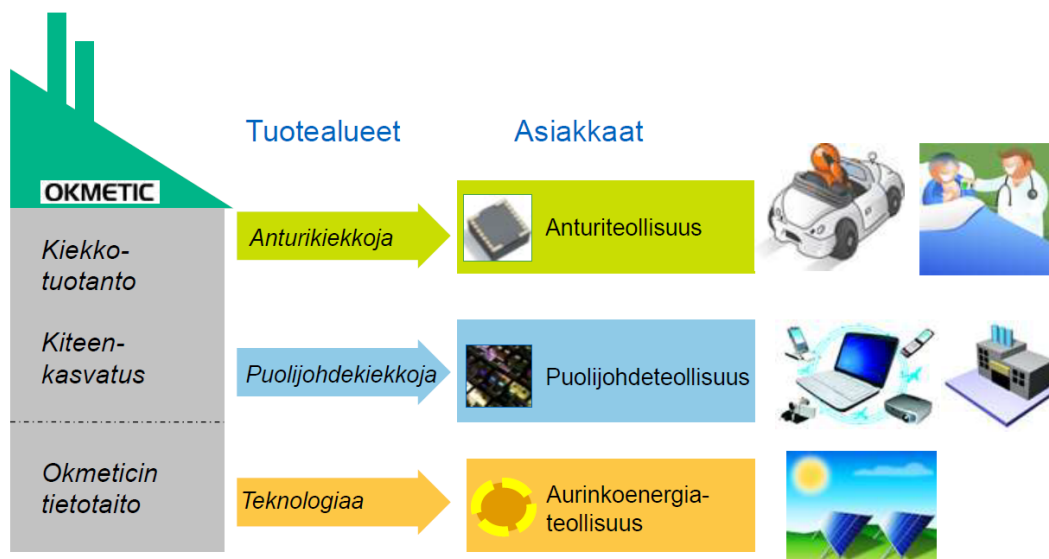
Carrier	Keraaminen kiillotusalusta
DOE	Koesuunnitelma (Design of Experiments)
DSP	Kaksipuolisesti kiillotettu (Double Side Polished)
FF	Kidesuunnan tunnistustason kohdistin (Flat Finder)
Flat	Kidesuunnan ilmoittava tunnistustaso piikiekon reunalla
HBH	Jälkilämmitin (Hot Bake Heater)
HBT	Jälkilämmittimen lämmitysaika (Hot Bake Time)
Interferogrammi	Interferometrin tuottama interferenssikuva
OPD	Optisen reitin pituuksien ero (Optical Path Difference)
PBH	Esilämmitin (Pre Bake Heater)
ROC	Kaarevuussäde (Radius of Curvature)
Silicon Wafer	Piikieppo
Spinneri	Laite joka levittää nesteen ohueksi ja tasaiseksi kerrokseksi pyörittämällä kappaletta suurella nopeudella
SSP	Yksipuolisesti kiillotettu (Single Side Polished)
TIR	Kertoo korkeimman huipun ja matalimman laakson välisen etäisyyden eron (Total Indicator Reading)
TTV	Paksuuden vaihtelu (Total Thickness Variation)
v_2	Nopea jälkispinnausnopeus
WA	Vahaa syöttävän suuttimen aukioloaika (Wax Amount)

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä käsitellään vahakiinnityksen vaikutusta piikiekon tasomaisuuteen kiillotusprosessissa. Piikiekoja käytetään yleisesti anturi- ja puolijohdeteollisuudessa. Koska rakenteet piikiekolla voivat olla erittäin pieniä, asettaa se suuret vaatimukset muun muassa kiekon pinnan tasomaisuudelle. Työn tavoitteena on tutkia, kuinka suuri vaikutus vahakiinnityksellä on piikiekon muotoon, ennen kun sitä kiillotetaan, ja voidaan parametreja optimoimalla päästä parempiin tasomaisuuksiin.

Koska valmista mittausmenetelmää ei ollut, tasomaisuuden mittaamista varten suunnitellaan ja rakennetaan Newton-interferometri. Newton-interferometrillä voidaan koko piikiekon pinnan muoto mitata tarkasti sekä silmämääräisesti että tarkoitukseen tehtyjä ohjelmistoja käyttäen.

Insinööriyö on tehty Okmetic Oyj:lle, joka on yksi maailman johtavista anturikiekkojen valmistajista. Okmetic valmistaa asiakaskohtaisesti räätälöityjä piikiekoja, joista asiakkaat valmistavat puolijohde- ja anturikomponentteja eri sovelluksiin. Tyypillisiä sovelluksia ovat esimerkiksi anturit henkilöautoissa, kiihtyvyyssanturit puhelimissa, tai vaikkapa CMOS-kenno digikamerassa. Okmetic myös myy teknologiaosaamistaan etenkin aurinkokennoteollisuuteen. (kuvio 1.)



Kuvio 1. Okmetic Oyj:n liiketoimintakaavio [15, s. 5].

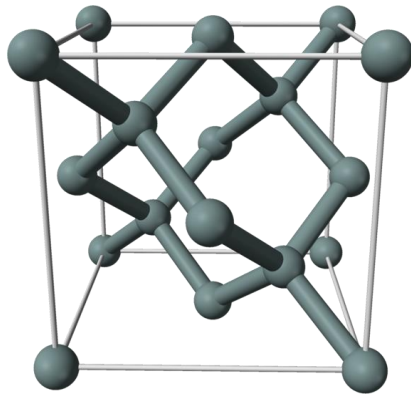
2 Piikiekkojen valmistus

2.1 Pii ja sen mekaaniset ominaisuudet

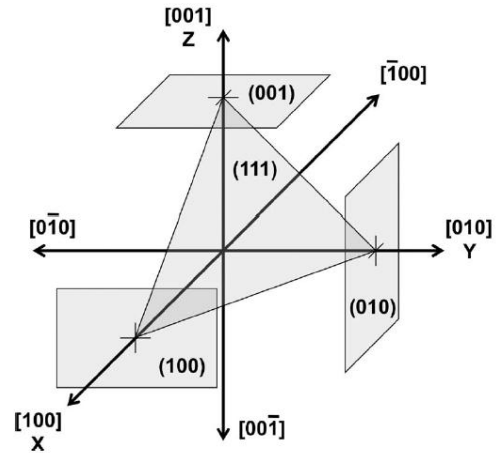
Pii (Si) on puolimetalli ja neljästoista alkuaine jaksollisessa järjestelmässä. Yksikiteinen pii on mekaanisilta ominaisuuksiltaan erittäin stabiili, mikä tekee piikiekosta hyvin muotonsa pitävän. Hyvien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi piillä on myös stabiilit sähköiset ominaisuudet, minkä ansiosta materiaali sopii erinomaisesti anturi- ja puolijohdeteollisuuteen. Puolijohdeteollisuudessa piikiekkoa käytetään yleensä substraattina, eli alustana, jonka päälle puolijohdekomponentit rakennetaan. Koska anturi- ja puolijohdekomponenttien osat voivat olla jopa kokoluokkaa 30–50 nm, täytyy piikiekon pinnan pysyä hyvin tarkkamittaisena [6, s. 1712].

Piikiekon hyvät mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet perustuvat muun muassa sen kiderakenteeseen. Yksikiteisellä piillä on timanttirakenne (kuvio 2). Piikiekossa kiteen asento, eli kideorientaatio voidaan valita haluttujen ominaisuuksien mukaan.

Piikiekoille ilmoitetaan tyypillisesti kolme eri kidetasoa, ja ne nimetään käyttäen Millerin indeksejä. Kolme yleisintä kidetasoa ovat (100), (110) ja (111). Kidetasot on tapana ilmaista suluissa ja kidesuunnat hakasuluissa. Piikiekon kidetasojen nimeäminen selviää kuvioista 2 ja 3. Kuvioon 2 voidaan kuvitella kolme x, y ja z-akseleita vastaan kohtisuorassa olevaa tasoa, kuten kuviossa 3. Jos tietty kidetaso kulkee vain x-akselia vastaan kohtisuoraan olevan tason suuntaisesti, on sen kidetaso (100). Jos kidetaso on yhdensuuntainen y-akselia vastaan kohtisuoraan olevan tason kanssa, on sen kidetaso kuvion 3 mukaisesti (010). Vastaavasti kidetasoa, joka kulkee kaikkien kolmen tason kautta, nimetään (111). Jotta valmiista piikiekosta voitaisiin helposti tunnistaa siinä oleva kideorientaatio, on siihen tehty tunnistustaso (flat) poistamalla kiekosta segmentti. Tunnistustaso on tyypillisesti yhdensuuntainen tason (110) kanssa.



Kuvio 2. Timanttirakenne [16].



Kuvio 3. Piikiekon kidetasot [8, s. 230].

Yksikiteinen pii on terästä hauraampaa materiaalia, mutta sen myötölujuus vedettäessä on yli kolme kertaa terästä suurempi, noin 6,9 GPa [7, s. 421]. Kiderakenteen johdosta piikiekon lujuusarvot vaihtelevat suunnasta riippuen. Taulukossa 1 on yksikiteisen [100]-suuntaisen piikiekon mekaanisia ominaisuuksia verrattu lasiin ja teräkseen.

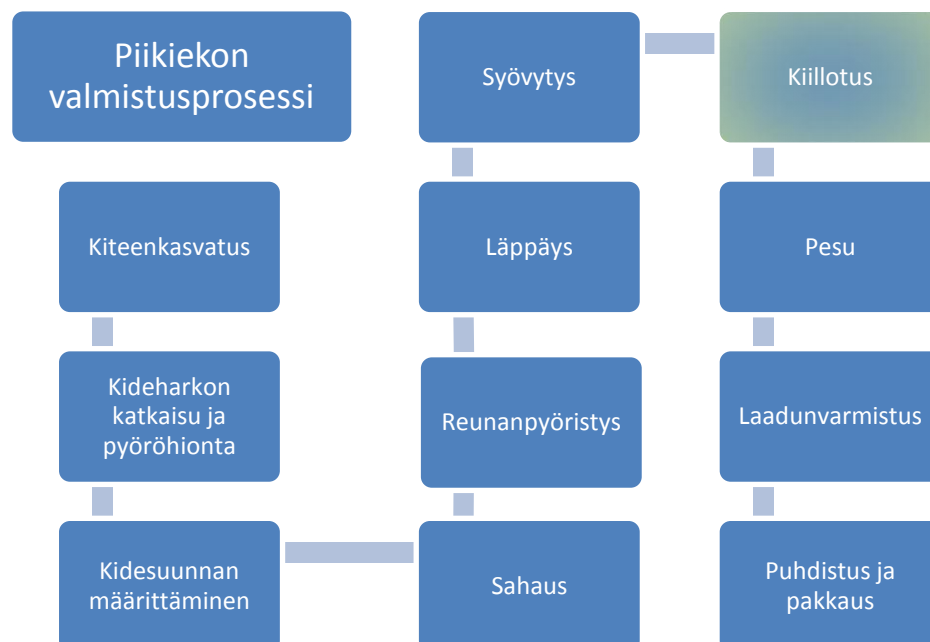
Taulukko 1. Piikiekon (pintataso (100)) ominaisuuksia verrattuna lasiin ja teräkseen.

	Si (100) [8, s. 237]	Lasi, N-FK5, Schott [14, s. 10]	Teräs
Tiheys, ρ	2329 kg/m ³	2450 kg/m ³	7800 kg/m ³
Kimmokerroin, E	$E_x=196$ GPa $E_y=196$ GPa $E_z=130$ GPa	62 GPa	205 GPa
Liukkerroin, G	$G_{yz}=79,6$ GPa $G_{zx}=79,6$ GPa $G_{xy}=50,9$ GPa	25 GPa	80 GPa
Poissonin luku, ν	$\nu_{yz}=0,36$ $\nu_{zx}=0,28$ $\nu_{xy}=0,064$	0,232	0,3
Lämpölaajenemiskerroin, α	$2,6 \cdot 10^{-6}$ m/°C	$9,2 \cdot 10^{-6}$ m/°C	$12 \cdot 10^{-6}$ m/°C

2.2 Yksipuolisesti kiillotetun piikiekon valmistusprosessi

Piikiekoja valmistetaan useisiin eri tarkoituksiin ja näin niiden ominaisuudet, kuten halkaisija, kiillotettujen pintojen lukumäärä ja kiekon paksuus voivat vaihdella. Okmeti-
cissa valmistettujen piikiekkojen halkaisija on 100–200 mm, ja paksuus vaihtelee välillä
300 µm–1300 µm. Tässä kappaleessa on kuvailtu 150 mm:n yksipuolisesti kiillotetun
(SSP) piikiekon valmistusprosessi.

Piikiekon valmistus lähtee kiteenkasvatuksesta. Erikoisvalmisteisissa uuneissa polypii eli monikiteinen pii sulatetaan kvartsiupokkaassa. Tämän jälkeen noin 5 mm:n paksuinen siemenkiteen tanko upotetaan piisulaan. Siemenkiteen viileään pintaan tarttuu piato-
meja. Siemenkiteessä on jo valmiina haluttu kideorientaatio ja sen ympärille kasvaa yksikiteistä piitä. Kideharkkoa kasvatetaan siemenkidettä ja kvartsiupokasta pyörittä-
mällä, ja samalla siemenkidettä ylöspäin vetämällä. Piisulan lämpötilaa ja siemenkiteen
vetonopeutta säätämällä saadaan toivottu kideharkon halkaisija. Tyypillisen kideharkon
halkaisija on 150 mm ja pituus noin 1800 mm. Edellä kuvattua kiteenkasvatustem-
telmää kutsutaan Czochralski-menetelmäksi. (kuvio 4.)



Kuvio 4. Yksipuolisesti kiillotetun piikiekon tyypillinen valmistusprosessi.

Kiteenkasvatuksen jälkeen kideharkon halkaisija vaihtelee jonkin verran. Harkot hiotaan haluttuun halkaisijaan ja niihin työstetään tunnistustaso. Seuraavaksi kideharkoista sahataan ohuita kiekkoja joko lanka- tai sisäkehäsahalla (ID saw). Koska sahattujen kiekkojen reunat ovat terävät ja kestävät vain vähän mekaanista rasitusta, on kiekkojen reunat pyöristettävä.

Reunapyöristyksen jälkeen piikiekot läpätään. Läppäyksen aikana sahauksesta tulleita piikiekon muoto- ja pintavirheitä tasataan ja kiekkoista saadaan tasomaisempia. Tämän jälkeen läppäyksestä tulleita pintavirheitä tasataan happo- tai emässiövytyksellä, jonka jälkeen piikiekot ovat valmiita kiillotettavaksi.

Kiillotusta varten kiekot kiinnitetään ensin vahan avulla keraamiselle kiillotusalustalle (carrier). Vahakiinnitys on kuvailtu yksityiskohtaisemmin luvussa 3. Kiillotusalustat siirtyvät sitten kiillotuslinjan läpi, jossa piikiekkojen etupinta kiillotetaan kemiallis-mekaanisesti kiillotuskankaalla päällystettyä pyörivää tasoa vasten prässäämällä. Piikiekot kulkevat useiden eri kiillotusvaiheiden kautta, joissa prässäyksen paine, kiillotusnesteiden ominaisuudet ja kiillotuskangas vaihtelevat kussakin kiillotusvaiheessa. Kiillotuksen jälkeen automaattinen järjestelmä irrottaa kiekot kiillotusalustastaan mekaanisesti lastalla työntämällä.

Kiillotetut kiekot puhdistetaan ensin kiinnitysvahasta pesemällä, minkä jälkeen varmistetaan, että ne täyttävät niille asetetut geometriset ja sähköiset vaatimukset. Lopuksi valmiit piikiekot puhdistetaan huolellisesti ja pakataan hermeettisesti ennen asiakkaalle lähettämistä. Nämä viimeiset työvaiheet suoritetaan erittäin puhtaassa puhdistilassa (ISO lk. 3).

3 Vahakiinnitys kiillotusprosessissa

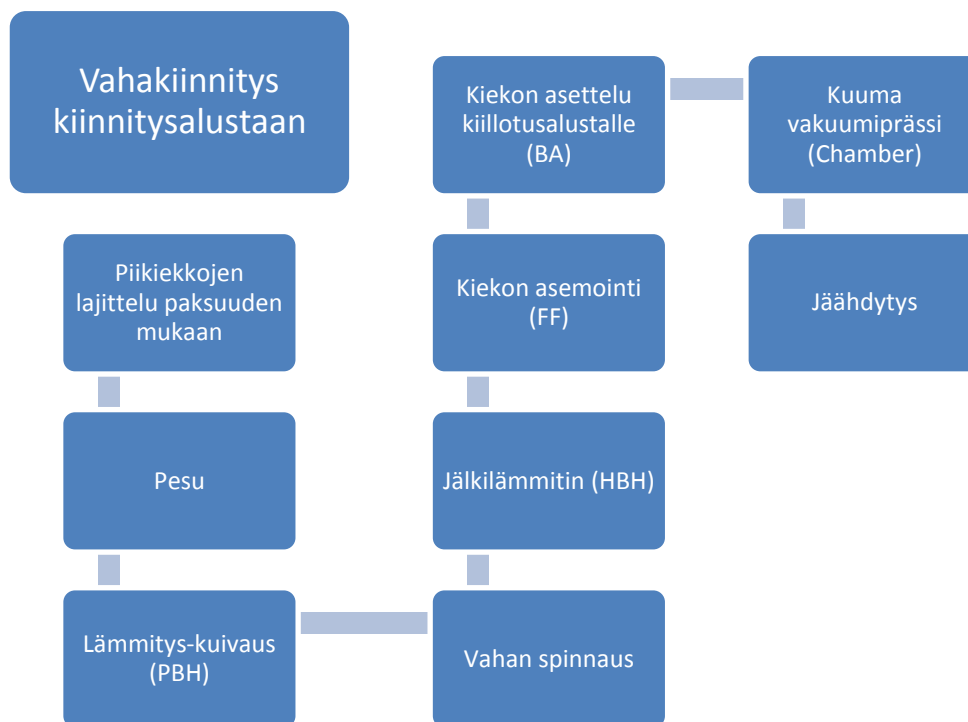
3.1 Vahakiinnityksen vaiheet

Jotta piikiekon etupinta voitaisiin kiillottaa, tulee kiekko ensin kiinnittää kiillotusalustalle. Keraaminen alumiinioksidista valmistettu kiillotusalusta on noin 20 mm:n paksuinen ja halkaisijaltaan noin 600 mm. Kiillotusalustojen täytyy olla hyvin tasomaisia, jotta

niissä olevat virheet eivät kopioituisi piikiekkoihin. Alustojen pinnan poikkeama tasosta on luokkaa 1 μm , joten yhden piikiekon matkalla alustan tasomaisuus on reilusti alle tämän. Yhteen kiillotusalustaan kiinnitetään yleensä kahdeksan 150 mm:n piikiekkoa.

Täysin automatisoitu vahakiinnitysprosessi lähtee liikkeelle piikiekkojen lajittelusta. Kiekkot on ensin asetettu kasetteihin, joista robotit hakevat, mittaavat ja lajittelevat ne paksuuden mukaiseen järjestykseen. Lajittelu takaa sen, että yhdellä kiillotusalustalla piikiekkojen paksuus vaihtelee mahdollisimman vähän. Eripaksuiset piikiekkot aiheuttaisivat tasomaisuusvirheitä kiillotuksessa.

Seuraavaksi piikiekon takapinta puhdistetaan ruiskuttamalla siihen puhdasta vettä. Suurin osa vedestä saadaan pois spinnaamalla, eli pyörittämällä kiekkoa suurella pyörimisnopeudella. Tämän jälkeen kiekko asetetaan kuumalle levylle (PBH), jossa loputkin vedestä haihtuu pois. Vahakiinnityksen vaiheet on esitelty kuviossa 5.

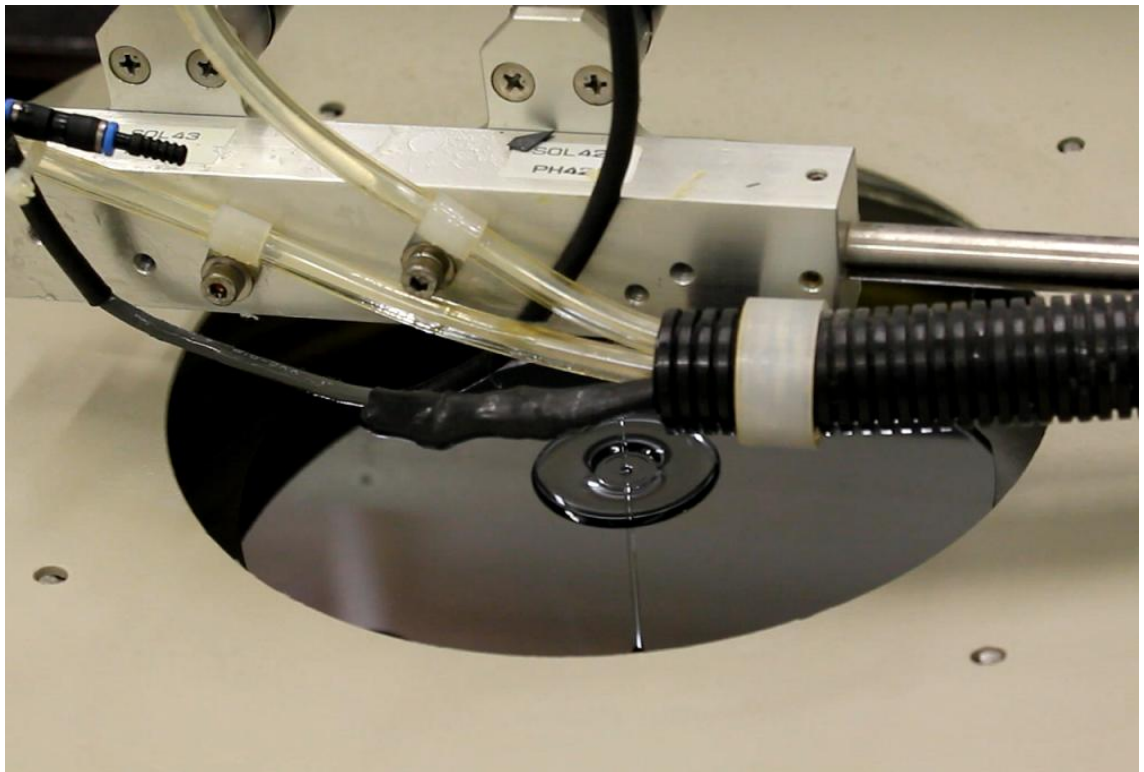


Kuvio 5. Vahakiinnityksen vaiheet ennen piikiekkojen kiillotusta.

Kuiva piikiekkot siirretään seuraavaksi vahaspinnerille. Kiekkon takapinnan keskikohtaan lasketaan tietty määrä vahaa, ja se levitetään tasaiseksi ja ohueksi kerrokseksi pyörit-

tämällä kiekkoa (kappale 3.2)(kuvio 6). Sekä puhdistus- että vaha- asemalla kiekkoa pidetään paikallaan pyöreällä alustalla vakuumin avulla. Vahakerroksen ominaisuuksia voidaan säätää muun muassa pyörimisnopeutta, pyörimisaikaa sekä vahan määrää muuttamalla. Vahaspinnerin toiminta voidaan esittää kuvion 8 avulla. Kyseessä on dynaaminen spinnaus, jossa vaha levitetään aluksi pienemmällä pyörimisnopeudella v_1 . Sitten kiekko kiihdytetään pyörimisnopeuteen v_2 , jolloin ylimääräinen vaha saadaan poistettua ja saavutetaan haluttu vahan kerrospaksuus. (kuvio 7.)

Pyörimisnopeus on ilmoitettu prosentteina maksimista. Suurin mahdollinen spinnausnopeus on 6000 rpm. 30 %:n spinnausnopeus vastaa siis noin 1800 rpm:n pyörimisnopeutta.



Kuvio 6. Suutin syöttää vahaa piikiekon taustapinnalle juuri ennen spinnausta.



Kuvio 7. Ohueksi kerrokseksi spinnattu vaha. Hidas pyörimisnopeus jättää kiekon reunoille kuvassa näkyvän paksumman vahareunuksen.

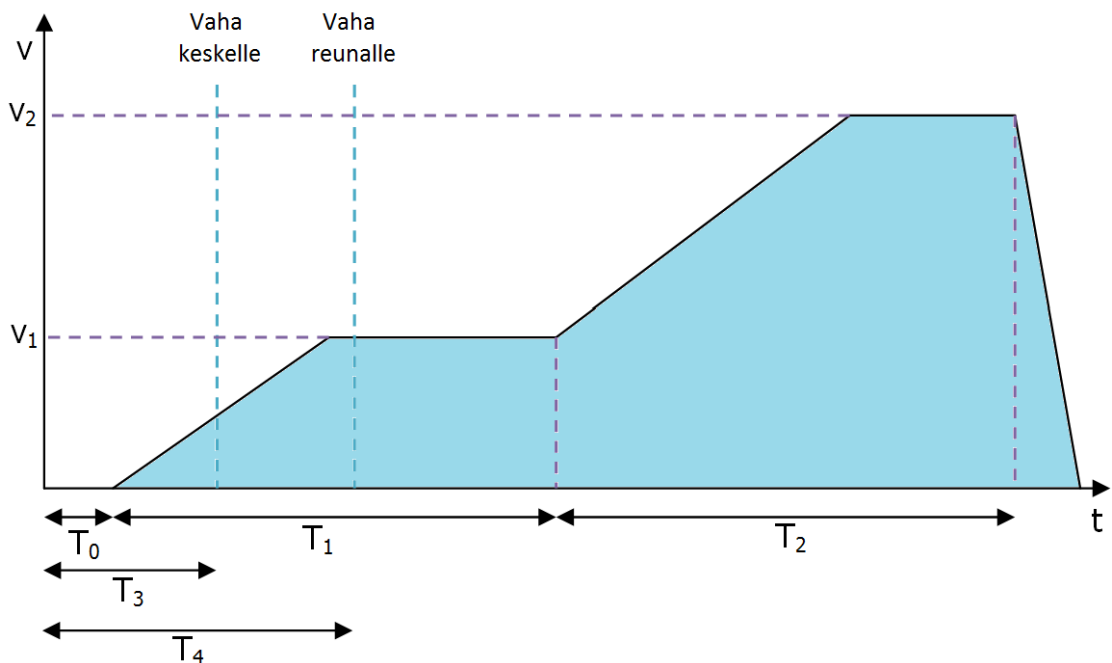
Vahaa voidaan syöttää kiekolle kahden suuttimen kautta. Toinen suuttimista laittaa vahaa kiekon keskelle, ja toinen ulompi suutin lähemmäksi kiekon reunaa. Ulompaa suutinta käytetään vain, kun kiillotusalustalle kiinnitetään isompia 200 mm:n kiekkoja. Vahan määrää säädetään WA-parametrin (Wax Amount) avulla. WA on aika, jolloin vahaa syöttävä suutin pidetään auki. Tässä työssä käytetty oletusarvo WA:n keskisuuttimelle on 1,35 s ja ulomalle 0,01 s. Käytännössä 0,01 s tarkoittaa että parametri ei ole käytössä.

Taulukossa 2 on esitelty vahaspinnauksen parametrit sekä niiden oletusarvot. Koska T_0 , sekä T_3 ovat kumpikin poissa käytöstä, alkaa vahaa tulla kiekon keskelle 1,35 s:n ajan heti kun työkierron käynnistyy. Koska v_1 on asetettu 0 %:iin, alkaa kiekko pyöriä 30 %:n nopeudella kahden sekunnin kuluttua työkierron alusta. Nopea jälkispinnaus kestää kolme sekuntia, minkä jälkeen vahan levitys kiekon taustapinnalle on valmis. Vaha alkaa jähmettyä, kun siinä olevat liuottimet alkavat haihtua ja kun vahan lämpötila on riittävän matala. Spinnauksen työkierto selviää kuviosta 8.

Taulukko 2. Vahaspinnerin parametrit ja niiden oletusarvot.

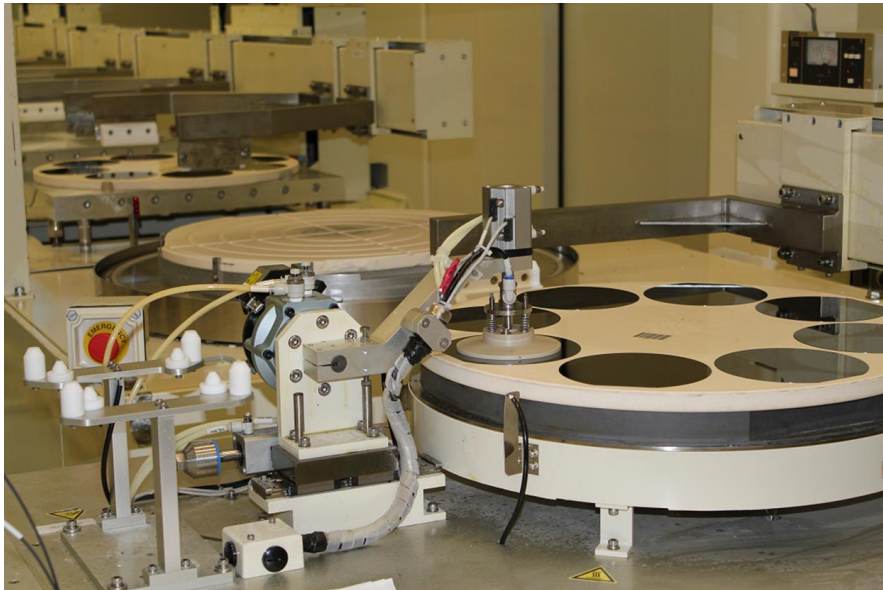
Tunnus	Arvo	Kuvaus
v_1	0 %	Hidas alkuspinnausnopeus
v_2	30 %	Nopea jälkispinnausnopeus
T_0	0,01 s	Alkuviive
T_1	2 s	Alkuspinnauksen kesto
T_2	3 s	Jälkispinnauksen kesto
T_3	0,01 s	Vahan levitysajankohta keskelle
T_4	1 s	Vahan levitysajankohta reunalle

Seuraavaksi kiekko siirretään kuumalle levyille, jossa se lämmitetään ennen kiekon painamista kiillotusalustalle. Automaation ohjelmoinnin vuoksi kiekon lämpötilaa on helppointa säätää muuttamalla aikaa jonka kiekko viettää kuumalla HBH:lla. Oletusarvo lämmitysjälle HBT on 11 s.



Kuvio 8. Vahaspinnauksen työkierto ja käytetyt parametrit.

Ennen kiinnittämistä kiillotusalustalle kiekko asemoidaan siten, että tunnistustaso on aina pois päin kiillotusalustan keskipisteestä. Oikein asemoitu piikiekko painetaan tämän jälkeen pneumaattisen kiinnitysvarren (BA) avulla pestylle ja 100 °C:n lämpötilaan kuumennetulle kiillotusalustalle (kuvio 9). Kiekko pysyy kiinnitysvarren päässä olevassa muovisessa laipassa vakuumin avulla. Kun alipaine poistetaan ja kiinnitysvarra lähdetään nostamaan, on piikiekkon ja laipan välillä 200 Pa:n ylipaine. Tämä vähentää kiinnitysvarren mahdollisuutta vetää kiinnitettyä piikiekkoa mukanaan.



Kuvio 9. Kiinnitysvarsi kiinnittää viimeistä kiekkoa kiillotusalustalle.

Kun kiillotusalustalle on kiinnitetty kaikki kahdeksan piikiekkoa, se siirtyy vakuumpressin (chamber) alle (kuvio 10). Piikiekkojen päälle painetaan paperilla päällystetty noin kiillotusalustan läpimittainen keraamilevy. Samalla kun piikiekkoja prässätään kiillotusalustaa vasten, kehitetään kuvun alla olevaan tilaan alipaine. Tämän tarkoitus on poistaa vahakerroksesta mahdolliset kaasukuplat. Vakuumpressin jälkeen kiillotusalusta kulkee jäähdytyslinjan kautta kiillotuskoneisiin.



Kuvio 10. Vakuumpressi painaa piikiekot tasaisesti kiillotusalustaa vasten.

3.2 Spinnauksen teoriaa

Tässä kappaleessa on käsitelty yksityiskohtaisemmin spinnausvaihetta. Paikallaan olevan kiekon keskelle lasketaan ensin tietty määrä vahaa WA. Kiinnitysvaha on hartsia, johon on lisätty liuottimia. Kiekkoa pyöritetään suurella nopeudella v_2 , jolloin vaha levittyy ohueksi kerrokseksi kiekon päälle. Samalla vahasta haihtuu liuottimia, jolloin vahan yläpinnan viskositeetti kasvaa. Liuotinvapaa kerros kasvaa, kun liuotinta sisältävä alue pienenee, kunnes kerrokset ovat yhtä paksuja. Tällöin liuotin vapaan kerroksen osuus kiekolla olevasta vahakerroksesta on kasvanut riittävästi, ja lisääntyneen viskositeetin johdosta vahan virtaus kiekolla laskee jyrkästi. Tästä lähtien vahakerroksen oheneminen johtuu vain jäljelle jääneiden liuottimien haihtumisesta. Kun vahan virtaus on pysähtynyt, ja kaikki liuotin on haihtunut, on vahakerros saavuttanut stabiilin tilan ja sen lopullisen kerrospaksuuden [2, s. 138, 139]. Vahan profiililla ennen spinnauksia ja nesteen kosketuskulmalla on hyvin vähäinen merkitys lopputulokseen [6, s. 1714, 1715]; [1, s. 877, 878].

Vahan kerrospaksuutta sekä sen muotoa voidaan säätää usealla eri parametrilla. Suurin vaikutus kerrospaksuuteen on spinnerin pyörimisnopeudella v_2 . Yleisesti voidaan olettaa, että vahan kerrospaksuus h on kääntäen verrannollinen pyörimisnopeuden neliöjuureen. Tämä voi kuitenkin hieman vaihdella riippuen nesteen osalajien konsentraatioista. Paksuilla nesteillä v_2 :n potenssi voi hieman kasvaa [2, s. 139]. Pyörimisnopeutta ei voida kasvattaa rajattomasti, sillä jossain vaiheessa vahan virtaus kiekolla muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Tällöin vahaan syntyy paksuusvaihteluita, jotka näkyvät juomuina vahapinnassa [6, s. 1712].

$$h \sim v_2^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Myös vahan höyrynpaine vaikuttaa vahan kerrospaksuuteen ja sen levittymiseen. Mitä suurempi on liuottimen höyrynpaine, sitä helpommin liuottimet haihtuvat, ja sitä paksumpi vahakerros muodostuu. Nesteen pinnan profiili oletetaan kaarevaksi, jolloin sillä on tietty säde. Suuri höyrynpaine on kääntäen verrannollinen muodostuneen nestepinnan säteeseen. Mitä suurempi höyrynpaine, sitä pienempi säde ja sitä enemmän nestepinta poikkeaa tasosta. Höyrynpaine vaihtelee liuottimien välillä yleensä 0,1 - 100 mmHg. Ilman suhteellisella kosteudella ei juuri ole vaikutusta vahan levittymiseen.

miseen [6, s. 1715]. Koska haihtumisella on suuri merkitys vahapinnan muodostumiselle, on myös ympärillä olevan ilmavirtauksen merkitys suuri; nopea ilmavirtaus kiihdyttää kiinteän vahapinnan muodostumista [6, s. 877].

Kiekolle syötetyn vahan määrä WA vaikuttaa nestepinnan kaarevuuteen. Mitä enemmän vahaa, sitä suurempi on nestepinnan säde ja sitä tasomaisempi pinnasta saadaan. Vaikka spinnauksen alkuvaiheessa suurella vahamäärällä kerrospaksuus onkin hetkellisesti suurempi, vahan määrällä ei ole vaikutusta vahakerroksen lopulliseen paksuuteen. Vahaa täytyy olla kuitenkin sen verran, että se riittää peittämään koko kiekon tasaisesti. Suuri WA saa kuitenkin vahan levittymään nopeammin koko piikiekon alalle. Jos spinnaukseen kuluva aika saadaan lyhyeksi, liuotinta ehtii spinnauksen aikana haihtua vähemmän. [6, s. 1715.]

Myös vahan viskositeetilla on vaikutusta lopulliseen kerrospaksuuteen. Mitä pienempi viskositeetti, sitä ohuempi kerrospaksuus voidaan saavuttaa. Viskositeetilla on myös vaikutusta syntyneen nestepinnan kaarevuuteen. Vaha, jolla on pieni viskositeetti, muodostaa tasaisemman kerroksen piikiekolle. [6, s. 1715, 1716.]

3.3 Piikiekon muotoon vaikuttavat parametrit vahakiinnityksessä

Vahakiinnityksessä on useita parametreja, joilla uskottiin olevan jonkinlainen vaikutus piikiekkojen tasomaisuuteen kiinnityksen jälkeen. Mahdolliset vaikuttavat parametrit on ensin kartoitettu ja niistä on poimittu vaihtoehdot, joilla uskottiin olevan suurin vaikutus tasomaisuuteen. Myös kokeiden ja mittausten toteutettavuus on vaikuttanut kokeisiin päätyvien parametrien valintaan. Seuraavilla parametreilla uskottiin olevan vaikutusta piikiekon tasomaisuuteen (tässä työssä tutkitut parametrit lihavoituna):

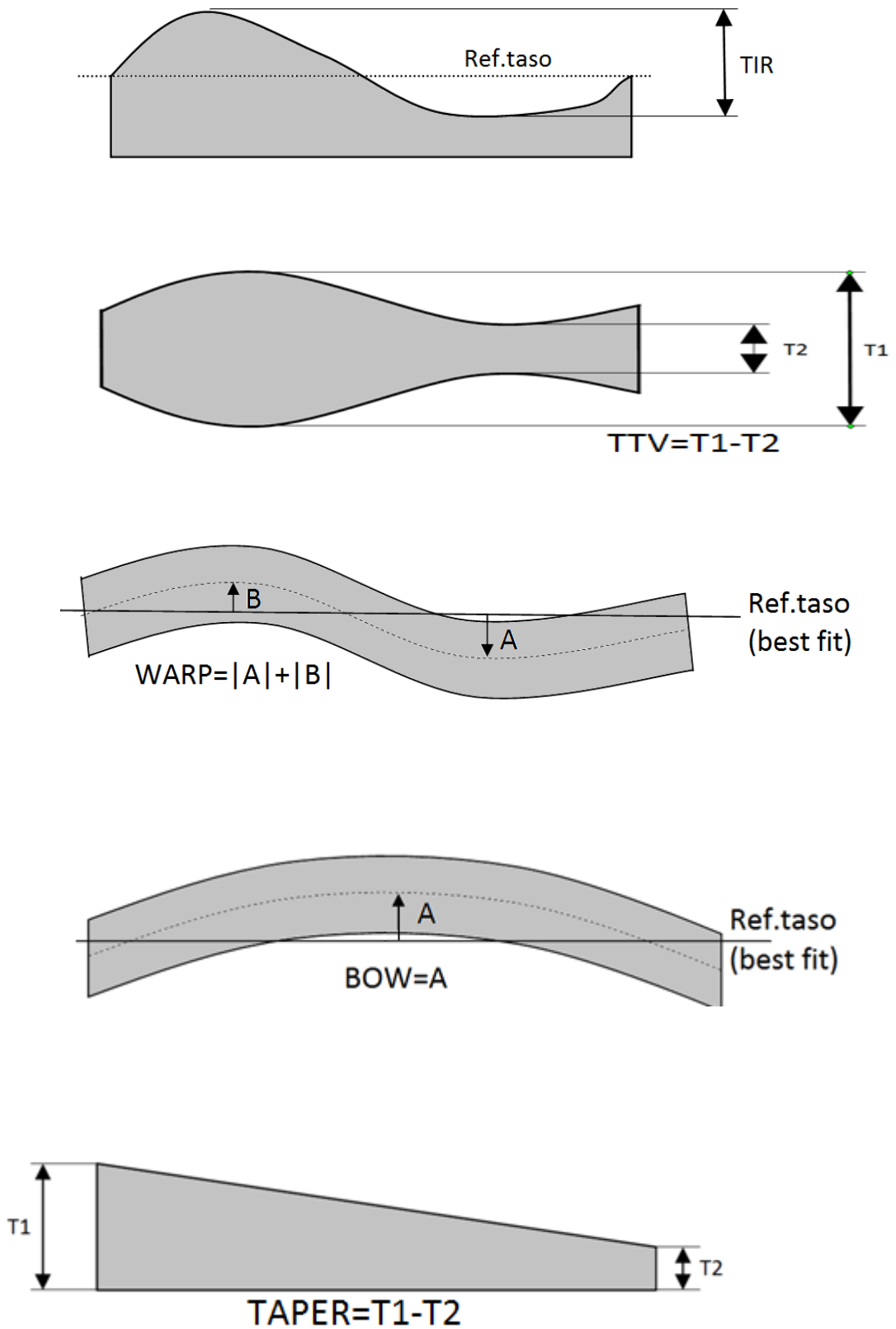
- **Spinnerin pyörimisnopeus**
 - Vaikuttaa vahakerroksen paksuuteen sekä vahan levittymiseen. Paksumman vahakerroksen uskottiin heikentävän tasomaisuuden arvoja.
- **Spinnerin pyörimisaika**
 - Vaikuttaa vahakerroksen paksuuteen sekä liuottimien haihtumiseen.
- Vahan liuottimien haihtuminen
 - Spinnauksessa kiekon kehänopeus on reunoilla suurempi kuin keskellä. Siksi liuottimet haihtuvat reunalta keskustaa enemmän ja vahan viskositeetti reunoja kohti kasvaa. Tämän gradientin seurauksena vahan lujuus on suurin piikiekon keskellä, ja pienin reunoilla. [4, s. 1901.]
- Vahan suuttimen sijainti
 - Jos vaha syötetään sivuun kiekon keskikohdasta, voi vahakerros kiekolla olla epäsäännöllinen ja aiheuttaa näin kiilamaisuutta.
- **Vahan määrä**
 - Vaikuttaa mahdollisesti vahakerroksen profiiliin.
- **Vahan viskositeetti**
 - Vaikuttaa kerrospaksuuteen, levittymiseen, sekä tarvittavan vahan määrään.
- **Kiinnitysvarren voima**
 - Voi vaikuttaa suoraan piikiekon muotoon, sillä kiinnitysvarren laipan läpimitta on piikiekon läpimittaa pienempi. Lisäksi laipassa on uria ja keskireikä.
- **Vakuumpressi**
 - Prässin voima sekä vakuumin voimakkuus voivat vaikuttaa piikiekon muotoon. Myös piikiekon reunan yli vuotanut vaha tarttuu prässilevyn paperiin ja likaa kiekkojen etupinnan. Kiekot voivat kiillottua vahan kohdalla vähemmän ja aiheuttaa reunan kohoamista.
- Kiinnityslaippojen vakuumi
 - Spinnauksen ja kiekon kiinnittämisen aikana kiekkoa pidetään paikallaan alipaineen avulla. Jos alipaine on liian suuri, se voi aiheuttaa muodonmuutoksia piikiekkoon ja vaha levittyy kiekolle epätasaisena.
- **Lämpötilat**
 - Huuhtelun jälkeisellä kuivauksella, vahan spinnauksen jälkeisellä lämmittämislä sekä kiillotuslustojen lämpötiloilla voi olla vaikutusta siihen, kuinka tasaisesti ja kuinka ohueksi kerrokseksi vaha levittyy.

- Jäähtyminen
 - Täydet kiillotusalustat siirtyvät vakuumpressin jälkeen jäähdytyslinjalle. Keraamisella kiillotusalustalla, vahalla sekä piikiekolla on kaikilla eri lämpölaajenemiskerroin. Jos vaha kiillotusalustan ja piikiekon välissä kutistuu piikiekkoa enemmän, se voi aiheuttaa muodonmuutoksia. Muodonmuutokset olisivat myös riippuvaisia piikiekon suunnista, sillä kiekon kimmokerroin on riippuvainen kiteen suunnasta (kappale 2.1).
- Relaksoituminen
 - Vahakiinnitys voi aiheuttaa piikiekkoon sisäisiä jännityksiä. Jännitykset laukeavat ja voivat aiheuttaa muodonmuutoksia, kun kiekko kiillotuksen jälkeen irrotetaan kiillotusalustasta.

3.4 Tasomaisuustermit

Piikiekon tasomaisuus voidaan ilmoittaa monella eri tavalla. TIR (Total Indicator Reading) kertoo korkeimman huipun ja matalimman laakson välisen etäisyyden. TTV (Total Thickness Variation) on piikiekon paksuimman ja ohuimman kohdan välinen erotus.

Kiekon käyryys (WARP) on kiekon keskiviivan poikkeama referenssitasosta. Taipuma (BOW) on keskipisteen suurin poikkeama referenssitasosta. Lisäksi voidaan mitata kiihlamaisuutta (Taper), joka on tunnistustason puoleisen reunan paksuuden T1, ja vastakkaisen reunan paksuuden T2 erotus. Tasomaisuusvirheet on esitelty kuviossa 11.



Kuvio 11. Tasomaisuustermit

4 Newton-interferometri

4.1 Mittausmenetelmän valinta

Vahakiinnityksen kokeita varten ei ollut valmista mittalaitetta, jolla piikiekon tasomaisuus olisi voitu selvittää kiekon ollessa kiinnitettynä kiillotusalustaan. Suurin osa mekaanisista mittauslaitteista ei ole tarpeeksi tarkkoja tasomaisuuden mittaamiseen, sillä tarkoitus on päästä tutkimaan alle mikrometrin suuruisia muutoksia piikiekon pinnalla. Lisäksi se, että kiekko on kiinnitetty noin 20 kg:n painoiseen, halkaisijaltaan lähes 600 mm ja paksuudeltaan noin 20 mm olevaan kiillotusalustaan, tuo lisää haasteita mittaukseen. Tästä syystä myöskään kapasitiivisia mittausmenetelmiä ei voitu käyttää. Mekaanisilla ja kapasitiivisilla mittausmenetelmillä saataisiin kerralla mitattua vain yksi piste piikiekon pinnalta. Jotta pinnan muoto selviäisi, täytyisi mittauspisteitä olla useita. Tällöin koko pinnan luotettavasta mittauksesta tulee hidasta.

Useita eri mittausmenetelmiä tutkittiin ja lopulta päädyttiin optiseen mittaukseen. Vaikka optinen mittaus on yleensä kallis ratkaisu, voivat sen tietyt sovellukset olla suhteellisen halpoja ja yksinkertaisia. Newton-interferometri osoittautui varmaksi ja yksinkertaiseksi vaihtoehdoksi piikiekon tasomaisuuden mittaamiseen. Newton-interferometrillä piikiekon pintaa verrataan referenssitason, ja mikäli kiekon pinta poikkeaa tasosta, se nähdään interferenssikuviossa, eli interferogrammissa. Tällä menetelmällä koko piikiekon pinta ja siinä olevat mahdolliset virheet nähdään yhdellä silmäyksellä.

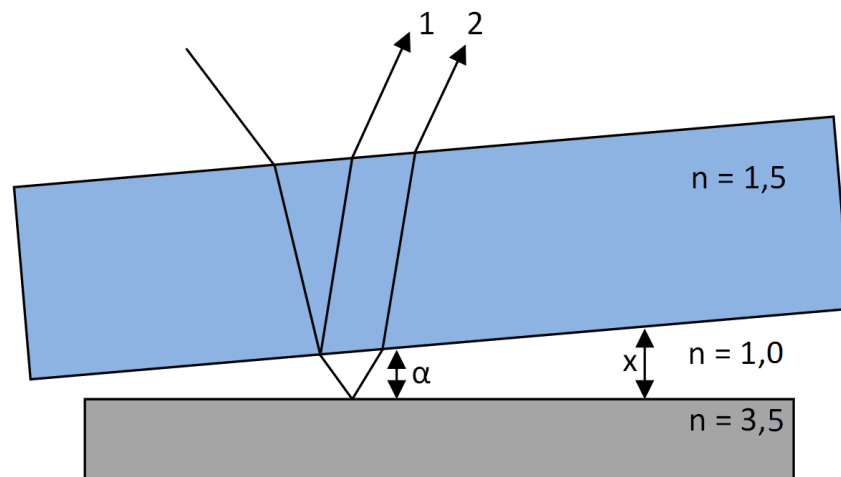
4.2 Fysikaalinen toimintaperiaate

Newton-interferometrin toimintaperiaate perustuu valon interferenssi-ilmiöön. Kun yhdistetään kaksi eri vaiheessa olevaa harmonista valoaltoa, joilla on keskenään sama taajuus, saadaan tulokseksi harmoninen valoalto jonka amplitudi riippuu vaihe-erosta δ . Jos vaihe-ero on $0, 2\pi$, tai sen monikerta m , valoallot vahvistavat toisiaan ja syntyneen harmonisen valoallon intensiteetti on maksimissaan. Jos vaihe-ero on π tai sen pariton monikerta, kaksi valoaltoa ovat keskenään vastakkaisissa vaiheissa ja ne kumoavat toisensa. Tällöin syntyy intensiteetin minimi.

Kuvitellaan kaksi ideaalista optista tasoa vastakkain. Kun tasot on asennettu toistensa päälle, ei käytännössä etäisyys x kahden tason välillä ole koskaan täysin nolla, sillä pintoja on mahdoton puhdistaa kaikista partikkeleista. Kuvitellaan kahden tason väliin hyvin pieni kulma α . Tasot ovat yhdestä reunasta lähempänä toisiaan kuin vastakkaiselta reunalta. Lisäksi kahden tason suuntaisesti piirretyt janat voidaan kuvitella leikkaavan toisensa jossakin pisteessä O (kuvio 13). [9, s. 4.]

Nämä kaksi optista tasoa, joiden välillä on kulma α , sekä pieni ilmarako x , valaistaan kohtisuoraan monokromaattisella valolla. Toisin kuin valkoinen valo, monokromaattinen valo sisältää vain yhtä aallonpituutta λ (kuvio 17). Interferenssin aiheuttava valonsäteen kulku on esitelty kuviossa 12.

Kun valonsäde tulee lasi-ilma-rajapintaan, osa siitä heijastuu päällimmäisen tason alapinnasta (säde 1). Loput valonsäteestä jatkaa matkaansa ilmarakoon, jonka paksuus kyseisessä kohdassa on x . Kun valo heijastuu rajapinnasta, jossa taitekerroin muuttuu pienemmäksi (lasista ilmaan), ei vaihesiirtoa synny. Vaihesiirtoa ei myöskään synny valon taittuessa. Kun valo heijastuu pinnasta, jonka taitekerroin on suurempi (ilmasta lasiin, tai ilmasta piikiekkoon), syntyy π :n suuruinen vaihesiirto. Koska ilmarakoon jatkanut valonsäde on heijastunut tiheämmästä materiaalista (suurempi taitekerroin n), sen vaihe on muuttunut π :n verran. Tästä syystä säteen 1 ja 2 välillä on nyt π :n suuruinen vaihe-ero.



Kuvio 12. Interferenssi-ilmiön aiheuttavan valonsäteen kulku. Ylempi sininen osa on optinen referenssitaso ja alempana oleva harmaa osa on mitattava piikiekkko. Lasin ja piikiekon välissä on ilmarako. Kuvassa kulma α on reilusti liioiteltu ja selkeyden vuoksi interferenssi-ilmiön kannalta merkityksettömistä pinnoista heijastuneet valonsäteet jotka eivät aiheuta interferenssi-ilmiötä, on jätetty pois.

Mikäli α on hyvin pieni, ja tasoja valaistaan kohtisuoraan, voidaan yksinkertaistaen olettaa, että säde 2 on kulkenut kaksi kertaa ilmaraon paksuuden x verran pidemmän matkan kuin säde 1. Ylimääräistä matkaa, jonka säde 2 on kulkenut kutsutaan OPD:ksi (Optical Path Difference). Koska kulma α on hyvin pieni ja valaistuskulma on kohtisuoraan tasoja vastaan, ovat säteet 1 ja 2 hyvin lähekkäin toisiaan ja voivat täten interferoida keskenään. Mikäli OPD on valoallon λ tai sen monikerran suuruinen, syntyy kyseiseen kohtaan interferenssin minimi, koska heijastuksessa syntyy π :n suuruinen vaihe-ero. Säteet 1 ja 2 ovat silloin täysin vastakkaisessa vaiheessa ja kumoavat toisensa. Minimi näkyy interferenssikuvassa mustana viivana, sillä se seuraa reittiä, jossa tasojen välinen etäisyys pysyy vakiona. Seuraava musta viiva syntyy, kun OPD on yhden aallonpituuden pidempi. Kaavassa 2 on esitelty ehto mustan interferenssiviivan syntymiselle. Interferogrammeissa näkyviä kahden vastakkaisen tason avulla saatuja renkaita ja juovia kutsutaan yleisesti myös Newtonin renkaiksi. [9, s. 1–10.]

$$2\alpha x = m\lambda \quad (2)$$

missä

α = tasojen välinen kulma (rad)

x = tasojen välinen etäisyys

m = monikerta (0, 1, 2...)

λ = käytetty valon aallonpituus

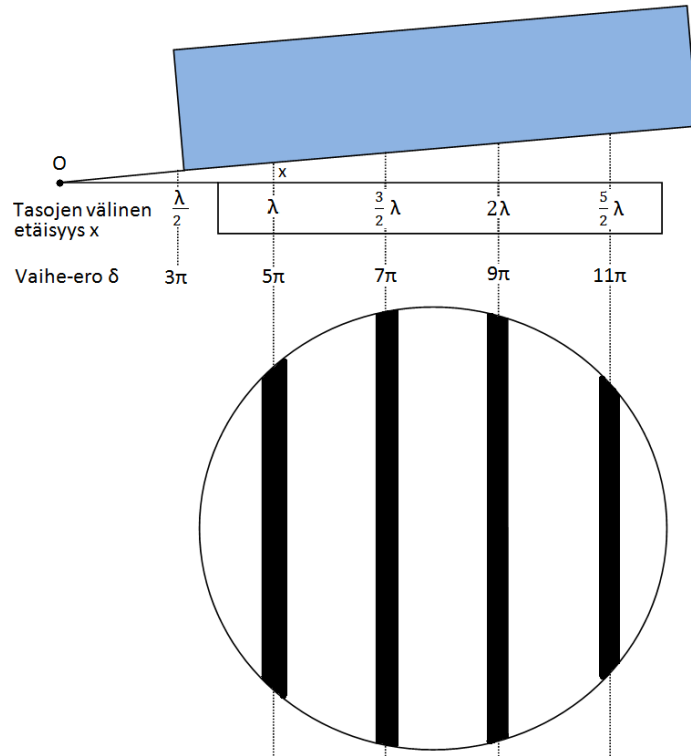
Kaavasta 2 nähdään, että, kun tasojen välinen etäisyys x on nolla, syntyy kyseiseen kohtaan intensiteetin minimi. Kuviossa 13 on esitelty periaate tummien interferenssi-juovien esiintymiselle. Interferenssikuvioon syntyy maksimi, eli säteet 1 ja 2 ovat samassa vaiheessa ja vahvistavat toisiaan, kun OPD on valoallon puolikkaan pariton monikerta. Tällöin interferogrammissa nähdään kirkas viiva. Kaavasta 3 saadaan ehto kirkkaan maksimiviivan syntymiselle. [9, s. 3.]

$$2\alpha x + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad (3)$$

Jos systeemi sisältää kaksi tarkkaa tasoa, niiden väliin syntyy tasavälein tummia ja kirkkaita interferenssijuovia. Kahden vierekkäisen kirkkaan tai kahden vierekkäisen mustan viivan välinen etäisyys d voidaan laskea kaavasta 4. [9, s. 3.]

$$d = \frac{\lambda}{2\alpha} \quad (4)$$

Kaavasta 4 voidaan päätellä, että, kun tasojen välinen kulma α kasvaa, viivojen väli d pienenee. Mitä suurempi on tasojen välinen kulma, eli mitä nopeammin tasojen välinen etäisyys x muuttuu, sitä enemmän interferenssi viivoja tulee näkyviin.



Kuvio 13. Kahden tumman vierekkäisen interferenssijuovan vaihe-ero on 2π . Kahden vierekkäisen mustan, tai kahden vierekkäisen kirkkaan juovan välisellä matkalla tasojen välinen etäisyys on muuttunut puoli valoaaltoa. [9, s. 4]

Mikäli yksi tai molemmat tasoista poikkeavat ideaalisesta tasosta, myös interferenssi viivat poikkeavat suorasta linjasta. Jos tasojen välillä on koveruutta tai kupertuutta, viivat alkavat kaartua. Kaarien keskipiste on kohdassa O, jossa tasojen voidaan kuvitella leikkaavan toisensa. Mikäli tasojen pinta on toisiinsa nähden hyvin epäsäännöllinen, on myös interferenssikuvio epäsäännöllinen.

Mikäli toisena tasona käytetään tarkkaa referenssitasoja, jonka tasomaisuus tunnetaan, voidaan toisen tason pinta mitata. Interferenssi viivat seuraavat aina linjaa, jossa kahden tason etäisyys on vakio. Interferogrammi voidaan siis ajatella mitattavan tason

korkeuskartaksi. Interferenssiiviivat seuraavat pinnan muotoja ja viivojen tiheyden muutoksista voidaan päätellä mitattavan tason pinnassa olevien poikkeamien suuruutta. *Pelkästään interferenssikuvaa katsomalla voidaan nopeasti päätellä pinnanmuotojen vaihtelun suuruus, kun tiedetään, että kahden vierekkäisen mustan, tai kahden vierekkäisen kirkkaan viivan välillä tasojen välinen etäisyys on muuttunut puoli valoaaltoa.*

Jos interferenssiiviivat ovat suhteellisen säännölliset eikä tason muodossa näy äkillisiä hyppäyksiä tai kohtuuttoman suuria poikkeamia, voidaan mitattavan pinnan suurin poikkeama ideaalisesta tasosta laskea kaavasta 5 [9, s. 13]. SI-yksiköitä käyttäessä saadaan poikkeaman arvo metreinä.

$$P_{max} = \left(\frac{k}{d}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (5)$$

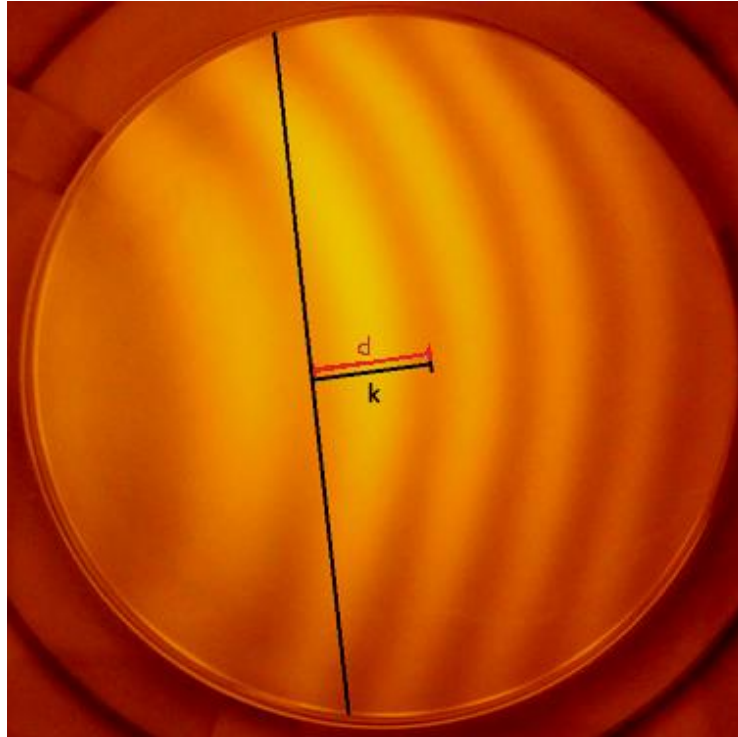
missä

k = interferenssiiviivan poikkeama suorasta (m)

d = kahden vierekkäisen mustan, tai kahden kirkkaan viivan välinen etäisyys (m)

λ = mittauksessa käytetty aallonpituus (m)

Kuviossa 14 on esimerkki suurimman poikkeaman määrittämisestä. Koska kahden vierekkäisen mustan viivan etäisyys d sattuu olemaan yhtä suuri kuin viivan poikkeama k , tulee näiden suhteeksi yksi. Tällöin suurin poikkeama kaavaan 5 nojautuen on puoli valoaaltoa. Tässä tapauksessa käytetty aallonpituus on 589 nm, joten suurin poikkeama on noin 0,3 μm . Tällä menetelmällä voidaan helposti mitata poikkeamia, jotka voivat olla alle kymmenesosan valoaallosta. Referenssitason tarkkuus voi kuitenkin tulla rajoittavaksi tekijäksi.



Kuvio 14. Esimerkki kahden optisen tason välisestä suurimman poikkeaman määrittämisestä.

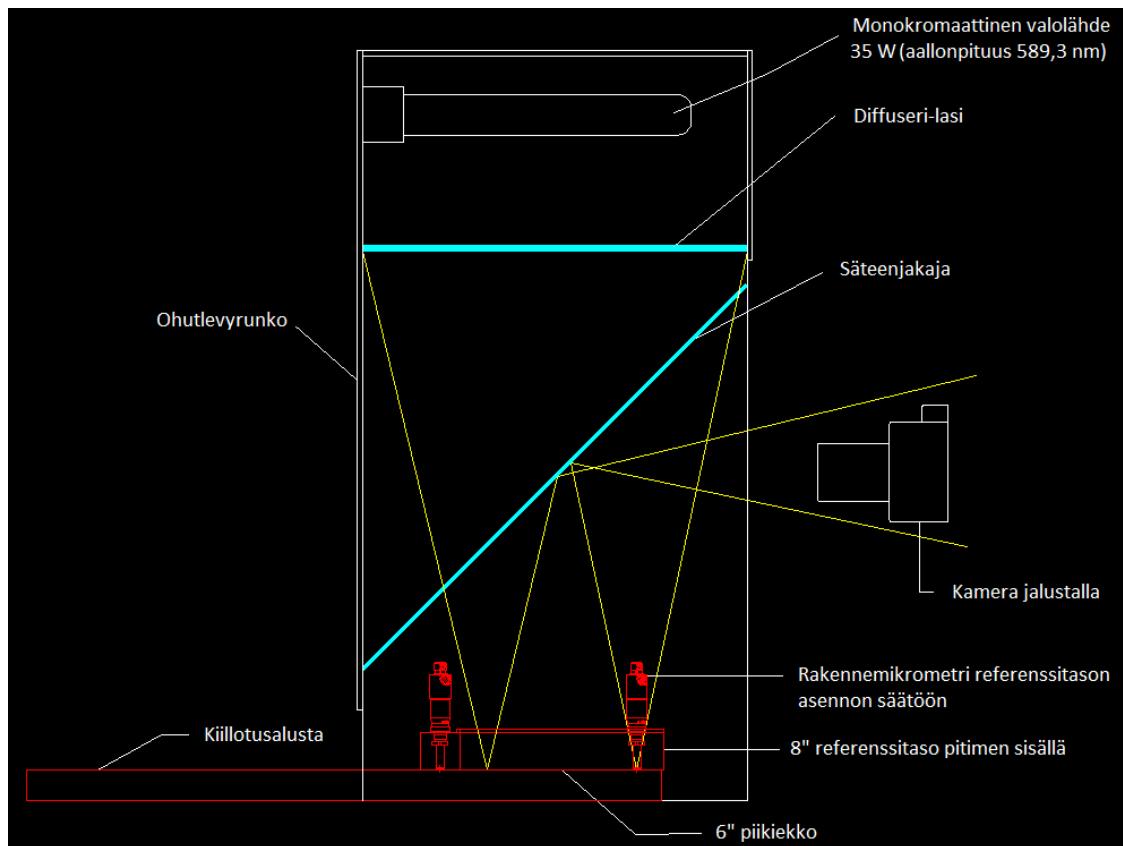
Interferogrammista nähdään pinnan muodot, mutta poikkeamien suuntaa ei suoraan voida nähdä. Kaareva interferenssiiviiva kertoo vain, että pinta on kaareva, mutta ei kerro, onko se kupera vai kovera. Tämä voidaan kuitenkin selvittää siinä vaiheessa, kun mittauksia tehdään. Referenssitaso voidaan painaa kevyesti, jolloin kahden tason välinen etäisyys x siinä kohdassa tulee pienemmäksi. Mikäli kaarevat interferenssiiviivat liikkuvat tällöin suuntaan, josta tasoa painetaan, on pinta kupera. Vastaavasti jos viivat liikkuvat pois päin, on kaareva pinta kovera. Jos mitattava taso on hyvin kaareva ja interferenssikuvio muodostaa kokonaisia renkaita, voidaan tasoa painaa keskeltä. Mikäli renkaat suurenevat ja liikkuvat pois päin keskustasta, on pinta kupera. Vastaavasti koveralla pinnalla renkaat tulevat lähemmäksi keskustaa. [9, s. 7.]

Newton-interferometri ei sovellu sellaisten tasojen mittaukseen, joissa tasomaisuus mitattavassa pinnassa vaihtelee rajusti (enemmän kuin muutamia valoaaltoja). Viivojen tiheys voi paikoin kasvaa niin tiheäksi, että niitä ei voida enää erottaa toisistaan tai ne katoavat kokonaan näkyvistä. Mikäli interferenssikuvio on hyvin epäsäännöllinen, on tasoa hyvin vaikea mitata kuvasta. Tällöin voidaan käyttää ohjelmistoja, jotka osaavat tulkita interferogrammeja ja muodostaa niiden avulla pintakarttoja (kappale 4.4). Interferometrillä ei myöskään voida mitata mattapintoja.

4.3 Newton-interferometrin suunnittelu ja rakentaminen

4.3.1 Interferometrin pääkomponentit

Newton-interferometrin kaksi pääkomponenttia ovat monokromaattinen valolähde sekä referenssitaso. Interferenssi-ilmiön voisi saada aikaan jo näillä kahdella komponentilla, mutta tulosten tarkkuuden parantamiseksi ja käyttömukavuuden lisäämiseksi päätettiin rakentaa Newton-interferometriin perustuva koelaitteisto (kuviot 15 ja 16). Koelaitteisto koostuu rungosta, valolähteestä, diffuuserilasista, säteenjakajasta, referenssitasosta sekä referenssitason pitimestä.



Kuvio 15. Rakennetun Newton-interferometrin toimintaperiaate.

Monokromaattinen valolähde on asennettu diffuuserilasin taakse. Diffuuseri hajauttaa lampun valon tasaiseksi. Valon aaltorintama kulkee sitten alas 45°:n kulmaan asennetun säteenjakajan läpi laitteen pohjalle, jossa referenssitaso on asennettu kiillotusalustalle kiinnitetyn piikiekon päälle. Referenssitaso on asennettu pitimen sisään, ja sen asentoa voidaan säätää kolmella tarkalla mikrometriruuvilla. Syntynyt interferenssikuvio

heijastetaan vinossa olevan säteenjakajan avulla laitteiston sivulle, josta kuvaa tarkkailaan. Säteenjakajan avulla interferenssikuviota voidaan tarkastella kohtisuoraan piikiekkoa vastaan ja silti saada tasainen kohtisuora valaistus koko kiekon alalle.

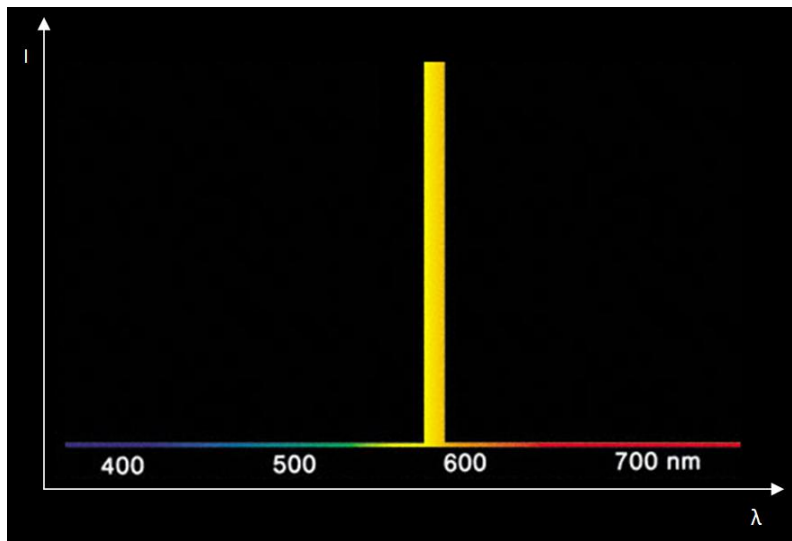


Kuvio 16. Newton-interferometri käytössä puhdashuoneen pimeäkopissa.

Laitteiston toimintaperiaate selviää kuvioista 15. Kuvioon on piirretty keltaiset valonsäteet havainnollistamaan valon kulkua. Kuvaa on yksinkertaistettu jättämällä valon taittuminen lasissa huomiotta. Kuvaa on piirretty vain ne äärimmäiset säteet, jotka päätyvät havaittajalle. Kuvaa täytyy tarkkailla näiden kahden äärimmäisen valonsäteiden välistä, jotta piikiekolla näkyisi ainoastaan diffuuserilasia ja siten piikiekko olisi tasaisesti valaistu. Mitä kauempaa interferenssikuviota tarkkaillaan, sitä pienempi alue diffuuserilasista näkyy ja sitä tasaisempi on valaistus. Kauempana laitteesta valonsäteet ovat myös kollimoituneet paremmin, eli valonsäteet ovat yhdensuuntaisemmat. Tämä parantaa tulosten tarkkuutta [9, s. 10].

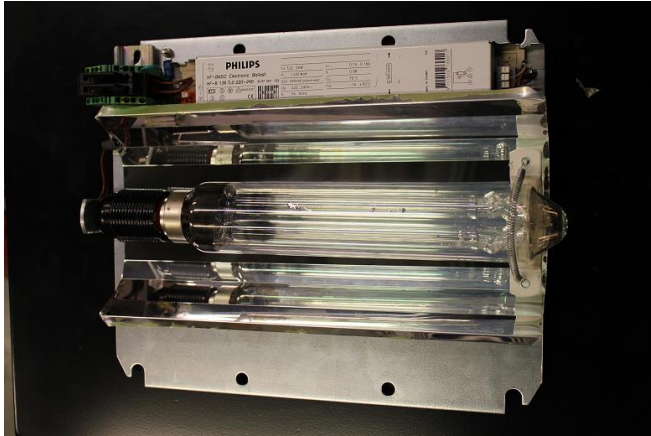
4.3.2 Monokromaattinen valolähde

Jotta interferenssikuvio olisi terävä ja sillä olisi hyvä kontrasti, täytyy valolähteenä käyttää monokromaattista valoa. Valolähteenä käytettiin 35 W:n matalapainenatriumlamppua (OSRAM Sox Plus BY22d). Matalapainenatriumlamppujen valotehokkuus on 174 lm/W, joten kyseisen lampun valoteho on noin 6000 lm [12]. Lamppu säteilee kellertävää monokromaattista valoa aallonpituudella 590 nm (kuvio 17). Tarkkaan ottaen natriumin spektrissä on kaksi piikkiä, joiden aallonpituudet ovat 589,592 nm ja 588,995 nm. Keskiarvo natriumin spektrille on siten 589,294 nm.



Kuvio 17. Valolähteenä käytetyn lampun spektri (OSRAM Sox Plus) [11].

Verkkovirran lisäksi lamppu tarvitsee toimiakseen myös sytyttimen. Oikeita sytyttimiä on vaikea löytää kyseiselle lampulle yksittäisinä, joten tarkoitukseen käytettiin loisteputken sytytintä. Käytetyn sytyttimen malli on Philips HF-BASIC Electronic Ballast. Lamppua voidaan käyttää normaalilla verkkovirralla. Natriumlamppu ja sen tarvitsema elektroniikka yhdistettiin lamppuyksiköksi (kuvio 18). Lamppu on asennettu valokouruun, joka heijastaa pois suuntautuvan valon oikeaan suuntaan. Matalapainenatriumlamppujen hyötysuhde on paljon tavanomaisten lamppujen hyötysuhdetta korkeampi. 35 W:n lamppu ei juuri lämpene, joten jäähdytyksen tarve on hyvin vähäinen. Lamppu ei myöskään aiheuta merkittäviä lämpövirtauksia, jotka haittaisivat mittauksia.



Kuvio 18. Asennusta vaille valmis natriumlamppuyksikkö.

4.3.3 Runko, diffuuseri ja säteenjakaja

Interferometrinen runko on valmistettu ohutlevytyönä. 2,5 mm:n paksuisesta teräslevystä on taivutettu ja hitsattu kotelorakenne, jonka tehtävänä on pitää lamppuyksikköä, diffuuserilasia, sekä säteenjakajaa paikallaan. Jotta rungon syvyyden ei tarvitsisi olla kiillotusalustan mittainen, on takaseinän alareunaan jätetty rako. Tästä raosta kiillotusalusta pääsee laitteen taakse ja näin kotelosta saadaan pienempi. Laseja varten on koteloon hitsattu yhteensä kahdeksan korvaketta, joiden päällä lasit lepäävät vapaasti. Koteloon hitsataan ensin lamppuyksikkö neljällä pultilla. Sen jälkeen diffuuserilasi voidaan asentaa paikalleen. Diffuuserilasin jälkeen asennetaan säteenjakaja 45°:n kulmaan hitsattujen korvakkeiden päälle. Interferometrinen rungon päämitat näkyvät liitteessä 2.

Interferometrinen runko on maalattu mustaksi heijastusten estämiseksi. Rungon sisäpuoleisen takaseinän on oltava mahdollisimman musta, jotta se ei näkyisi interferenssikuvan taustalla ja siten heikennä kuvan kontrastia. Tästä syystä haitalliset heijastukset takaseinästä on minimoitu peittämällä seinä mattamustalla huovalla.

Diffuuserilasinä käytettiin maitomaista 6 mm (3 mm + 3 mm) paksua opaalipinnoitettua lasia. Etäisyys lampusta diffuuserilasiin on alle 200 mm, joten lasin keskellä valo on hieman reunoja kirkkaampi. Koteloin rakenne kuitenkin kasvatti liikaa jos valo viettäisiin kauemmaksi. Jos valoa haluttaisiin tasaisemmaksi, voi diffuuserilasin päälle asentaa toisen mattalasin tai valkoisen pleksin.

Säteenjakaajana käytettiin ensin tavallista 4 mm paksuista kirkasta ikkunalasia. Kirkas lasi heijastaa yhdestä ilma-lasi-rajapinnasta valoa noin 4 %, josta loput 96 % menee siitä läpi. Ikkunalasi aiheutti kuitenkin ongelmia, sillä kun lasi on 45°:n kulmassa, tapahtuu heijastus sekä etu- että takapinnasta. Takapinnasta heijastunut hieman himmeämpi valosäde heijastaa saman kohdan kuvasta kuin etupinnasta heijastunut valonsäde, mutta hieman eri kohtaan aiheuttaen näin haamukuvan. Haamukuvan etäisyys todellisesta kuvasta on suoraan verrannollinen lasin paksuuteen.

Vaikka interferenssikuvio näkyi kokonaisuudessaan hyvin ikkunalasiakin säteenjakajana käyttäen, päätettiin laitteistoa parantaa ja eliminoida haamukuvat. Yksi tapa vähentää haamukuvan näkyvyyttä on käyttää lasia, jossa taustapinnalla olisi heijastuksenestopinnoite. Sellaista lasia, jolla olisi pinnoite vain yhdellä puolella, oli kuitenkin vaikea löytää valmiina. Seuraavaksi kokeiltiin tarkkailulasia, joka toimii kuin puoliläpäisevä peili. Koska tarkkailulasi on kirkasta lasia tummempi, pienempi osa valosta läpäisee sen valaisemaan piikiekkoa ja referenssitäsoa. Tarkkailulasi kuitenkin heijastaa jäljelle jäävästä valosta paljon enemmän kuin 4 %, joten kokonaisuudessaan kuvasta tulee kirkkaampi. Koska heijastus kahden lasikerroksen välissä olevasta pinnoitteesta on paljon lasien heijastusta suurempi, haamukuvien näkyvyys vähenee merkittävästi. Kuviossa 19 näkyvät vertailukuvat, kun säteenjakajana on ensin ikkunalasi ja sitten tarkkailulasi.



Kuvio 19. Yllä interferenssikuvion reuna kirkasta ikkunalasia säteenjakajana käyttäen. Alla säteenjakaja on korvattu tarkkailulasilla jolloin ikävistä haamukuvista on päästy eroon.

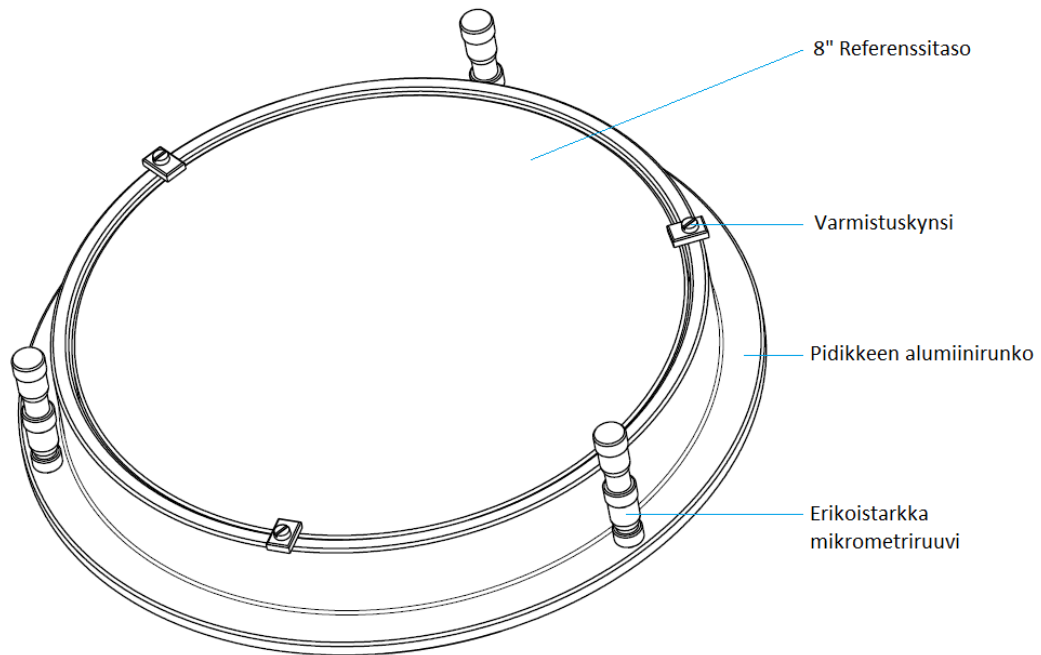
4.3.4 Referenssitaso

Referenssitason läpimitaksi valittiin 8" (203 mm) ja sen paksuus on 1,33" (33,8 mm). Taso on siis riittävän suuri 150 mm:n piikiekkojen mittaamiseen. Taso on valmistettu kvartsista (Fused Silica), jotta sen optiset ominaisuudet ovat hyviä ja lämpölaajenemis-kerroin pieni. Pienen lämpölaajenemiskertoimen ansiosta lasin optiset ominaisuudet pysyvät vakaana, vaikka ympäristön lämpötila muuttuisikin. Interferometri on sijoitettu myös puhdastilaan, jossa lämpötila pidetään vakaana ja näin ollen myös referenssitaso pysyy optisesti toleransseissaan. Puhdastilassa myöskään partikkelimaiset epäpuhtaudet eivät häiritse mittausta.

Vain yksi pinta referenssitasosta on kiillotettu ja muotoiltu tarkaksi. Toinen puoli on ainoastaan kiillotettu kirkkaaksi, jotta interferenssikuvio näkyisi siitä läpi. Tarkan pinnan tarkkuudeksi on ilmoitettu 1/10 valoaaltoa, kun aallonpituutena mittauksessa on käytetty 632,8 nm (HeNe-laser). Tason virhe maksimissaan on siten noin 0,063 μm . Näin ollen mitattavalta tasolta ei voida mitata pienempiä tasomaisuusvaihteluita kuin 0,063 μm .

4.3.5 Referenssitason pidin

Referenssitaso varten on koneistettu 246 mm:n läpimittainen vanne, jonka sisällä on paikka referenssitasolle (liite 1). Referenssitason pinta täytyy saada hyvin lähelle mitattavan piikiekkon pintaa. Koska piikiekkko on kiinnitettynä kiillotusalustaan, ei referenssitason ja sen pitimen alapinnan välille saa jäädä ohuimman mitattavan piikiekkon paksuutta enemmän etäisyyttä. Käytännössä etäisyyden täytyy olla tätäkin pienempi, jotta piikiekkon ja referenssitason pinnan välille voidaan asettaa pieni kulma. Siksi pitimen alareunassa on hyvin ohut yhtenäinen 0,2 mm paksu ja 8 mm leveä rima, jonka varassa referenssitaso lepää. (Kuvio 20.)



Kuvio 20. Referenssitason pitimen kokoonpanokuva.

Pitimen yläreunaan on porattu ja kierteistetty kolme pientä reikää, joihin on kiinnitetty varmistuskynnet. Varmistuskynsien tehtävänä on estää referenssitason putoaminen pitimestään. Varmistuskynnet on valmistettu polykarbonaatista, jotta ne eivät lohkeilisi porattaessa tai kynsiä kiristettäessä. Muoviset kynnet eivät myöskään aiheuta lasiin helposti naarmuja.

Pidin on suunniteltu siten, että referenssitason kohdistuu mahdollisimman vähän jännityksiä. Jännitykset näkyvät helposti tasomaisuusmittauksessa, kun kyseessä on valo-aallon osia. Tästä syystä tasoa ei ole voitu kiinnittää pitimeen liimaamalla. Varmistuskynsien ja referenssitason yläpinnan välillä täytyy olla pieni rako, jotta kynnet eivät pääsisi missään vaiheessa puristamaan lasin pintaa.

Interferenssi-ilmiö on herkkä mitattavan pinnan ja referenssitason väliselle etäisyydelle sekä niiden väliselle kulmalle. Tästä syystä pitimeen on asennettu kierteistettyihin reikiin 120° kulmaan kolme herkkää mikrometriruuvia (Newport DM11-5). Näillä ruuveilla haetaan haluttu interferenssikuvio, ja säädetään toivottu interferenssiivojen lukumäärä.

Mikrometriruuvit ovat differentiaalisia, eli niissä on erikseen karkea- ja hienosäätö. Karkeasäädön liikematka on 5 mm, ja hienosäädön 0,1 mm. Ruuvien herkkyyks on 0,1 μm , joten ne sopivat erinomaisesti referenssitason kulman säätöön. Jokaisen ruuvin kanto-kuorma on 30 N, mikä on riittävästi referenssitason ja sen pitimen kannattelemiseksi. [10.] (Kuvio 21.)



Kuvio 21. Differentiaalimikrometri Newport DM11-5 [10].

4.3.6 Kamera

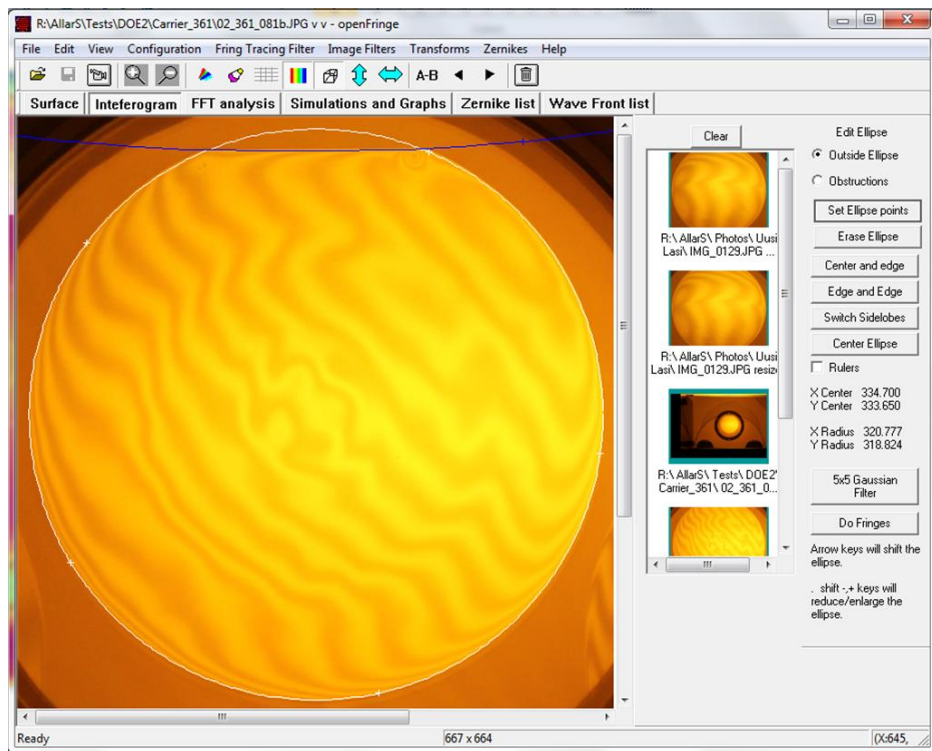
Interferenssikuvien tallennusta ja tulosten analysointia varten hankittiin Canon EOS 550D -järjestelmäkamera. Kamera on varustettu 18 megapikselin CMOS-kennolla, joka on riittävän suuri interferenssikuvioiden analysoimiseen ohjelmallisesti. Käytetty objektiivi on Canon EF-S 18 – 55 mm F 3.5–5.6 kuvanvakaimella. Jotta interferometrasta tulevat valonsäteet olisivat mahdollisimman kollimoituneet, on kuvat interferogrammeista otettu noin 2 m:n päästä interferometristä 55 mm:n polttovälillä. Interferenssikuvat on otettu jalustalta manuaaliasetuksilla. Jotta tärähtelyiltä vältyttäisiin, on kuvat otettu 2 s:n viiveellä objektiivin kuvanvakainta käyttäen. Kamera kykenee tarkentamaan itse suoraan interferenssikuvioon.

4.4 Interferogrammien käsittely ohjelmallisesti

Interferogrammeja voidaan tulkita joko silmämääräisesti, kuvasta mittaamalla, tai käyttämällä tarkoitukseen varta vasten tehtyjä ohjelmistoja. Interferogrammeja tulkitsevat ohjelmistot osaavat laskea kuvasta pinnan korkeusprofiilin ja muodostaa pintakartan. Ohjelmista on hyötyä etenkin silloin, kun mitattava pinta on hyvin epätasainen ja interferogrammien kuvien tulkitseminen on visuaalisesti hankalaa.

Tässä projektissa tutustuttiin kahteen ilmaiseen ohjelmistoon. OpenFringe ja FringeXP ovat harrastepohjalta kirjoitettuja ohjelmistoja, jotka on lähinnä tarkoitettu kaukoputkien optiikkaa valmistaville harrastajille.

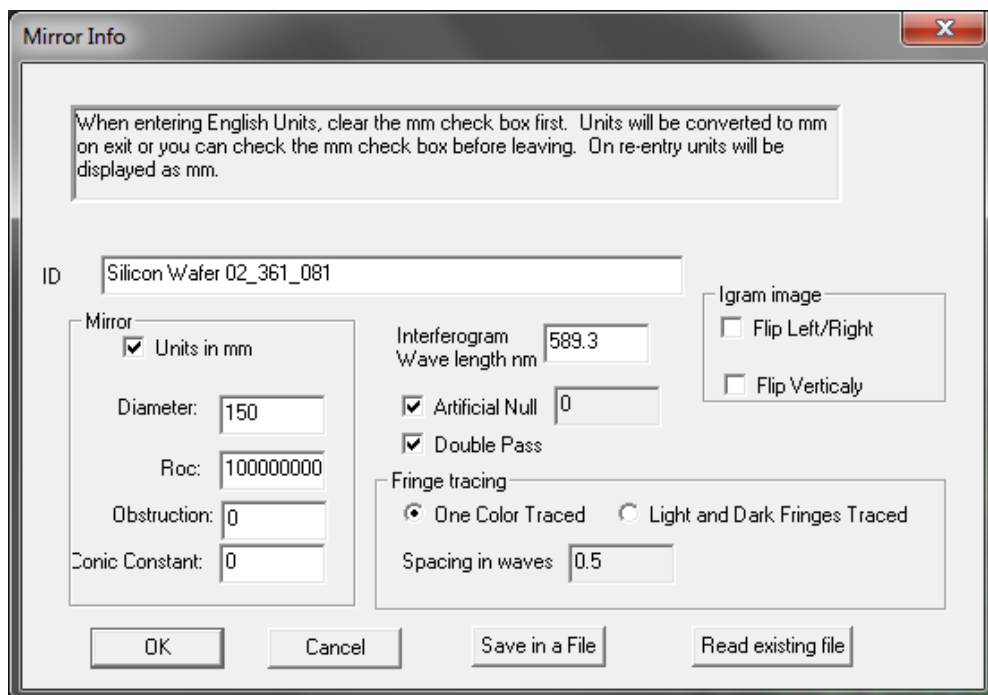
FringeXP:n tulokset perustuvat Zerniken polynomeihin. Näitä polynomeja käytetään usein vastaavissa sovelluksissa, sillä ne muodostuvat samoista termeistä kuin yleisimmät optiset aberraatiot (virheet) [5, s. 29]. Tietyntyyppisen aberraation suuruus voidaan suoraan päätellä siis vastaavan Zerniken polynomin termin suuruudesta. OpenFringe käyttää Zerniken polynomien lisäksi hyväkseen myös FFT:tä (Fast Fourier Transform). FFT-menetelmän avulla ohjelma osaa suoraan laskea kuvasta pinnan muodon, kunhan sille ensin määritetään mitattavan pinnan ääriviivat (kuviokuva 22). Toinen vaihtoehto on jäljittää ohjelmalle jokainen interferenssiiviiva.



Kuvio 22. Ruutukaappaus OpenFringe-ohjelmasta. Kuvassa piikiekon 02_361_081 ääriviivat (valkoinen viiva) sekä pois leikattava tunnistustason alue (tumma viiva) on annettu ohjelmalle. Tästä ohjelma osaa laskea pinnan muodon FFT-analyysin avulla.

Ennen interferogrammien laskentaa täytyy ohjelmalle antaa tiedot mitattavasta pinnasta. Kuviossa 23 näkyy OpenFringe-ohjelmaan syötetyt parametrit. Mitattavan pinnan halkaisijaksi on asetettu 150 mm. Käytetty aallonpituus on 589,3 nm. Kun interfero-

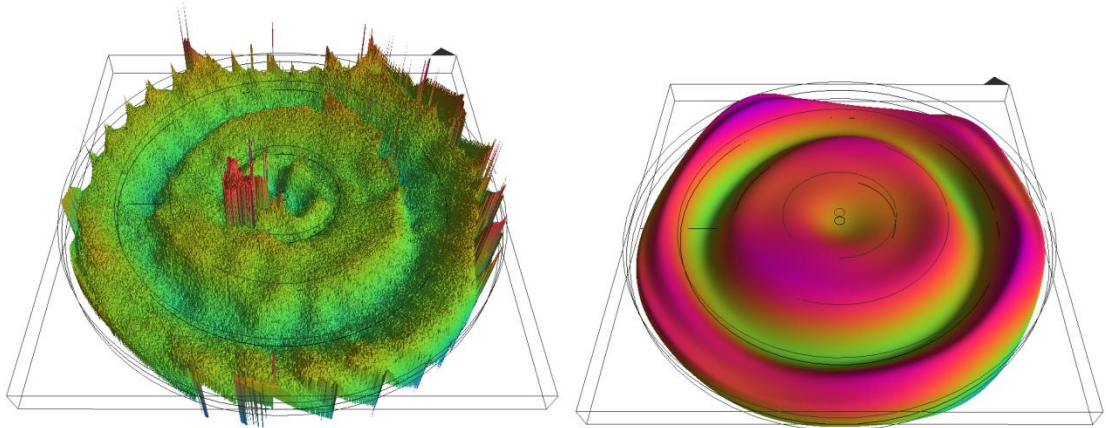
grammista mitataan vain tummia juovia, on viivojen väliksi (spacing in waves) asetettu 0,5 valoaaltoa. Ohjelmalla mitataan yleensä koveria kaukoputkien peilejä, mutta tässä tapauksessa mitattava pinta on taso. Siksi pinnan kaarevuussäteeksi (ROC) on asetettu hyvin suuri luku, joka vastaa käytännössä ääretöntä. Tällöin pinta on 150 mm:n matkalta hyvin lähellä tasoa [3, s. 3]. Mitattavan piikiekon keskellä ei ole mitään peitossa olevaa aluetta, jolloin katve (obstruction) on asetettu nolllaksi. Peilin pinnan muodoksi (conic constant) on valittu nolla. Tämä vastaa pyörähdyssymmetristä pallopintaa. Käytännössä pinnan muodolla ei ole merkitystä, sillä mitattava pinta on hyvin lähellä tasoa.



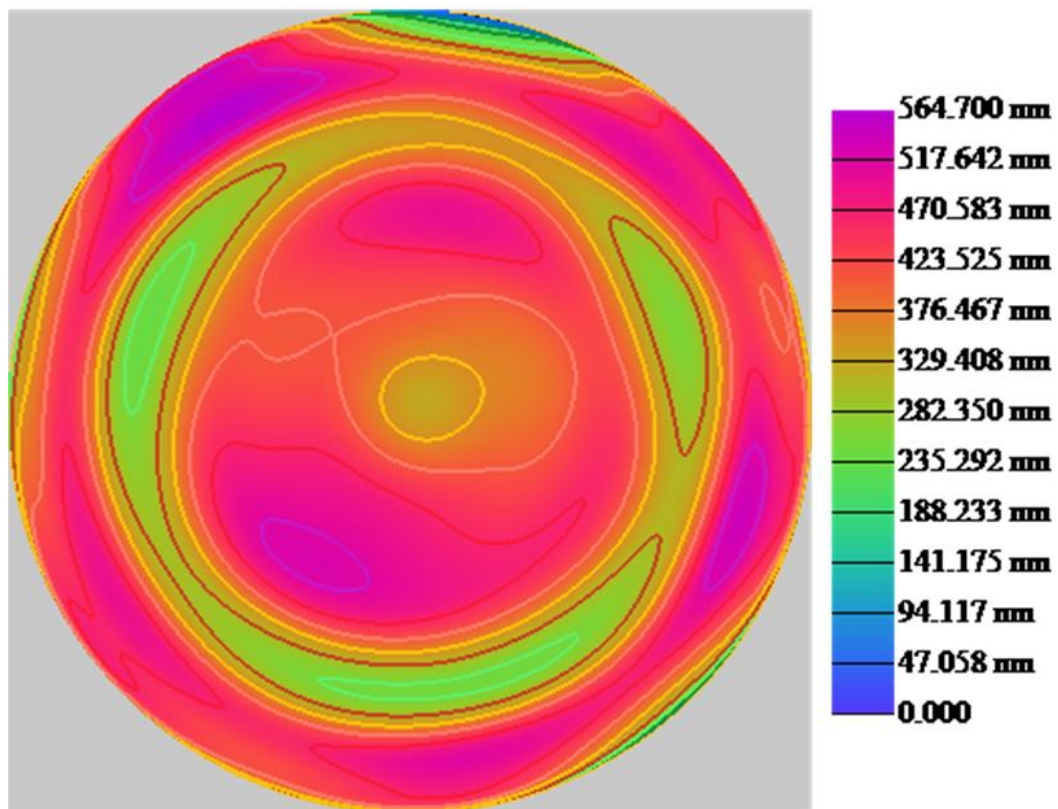
Kuvio 23. OpenFringe-ohjelmaan asetetut alkuparametrit.

Tässä työssä on käytetty lähinnä OpenFringeä hyväksi tasomaisuuden mittaamiseen, sillä FFT-ominaisuuden avulla mittaukseen tarvittavaa aikaa saatiin lyhennettyä. Ohjelmistoa on käytetty hyväksi etenkin kokeissa, jotka sisältävät hyvin epätasaisia pintoja. Tällöin tulosten tarkasteleminen visuaalisesti on hankalaa ja työlästä.

OpenFringen avulla voidaan muodostaa kuviossa 24 esiintyvät pintakartat. Ohjelmalla voidaan tulostaa myös kaksiulotteinen korkeuskartta (kuvio 25). Toisin kuin kuviossa 24, tämä kartta näyttää pinnan suurimman keskiarvoistamattoman poikkeaman tasosta. Luku vastaa TIR-arvoa.



Kuvio 24. Vasemmalla kuviossa 23 näkyvän kiekon keskiarvoistettu (rms TIR) tasomaisuus FFT-menetelmällä esitettyä. Pinnan rosoisuus johtuu mittauksen kohinasta. Pinnan poikkeama tasosta noin $0,09 \mu\text{m}$. Oikealla saman piikiekon pinnanmuoto Zernike-menetelmällä esitettyä. Tasomaisuus noin $0,07 \mu\text{m}$. Molempien tapausten pinnan laskenta on suoritettu FFT-analyysin avulla.



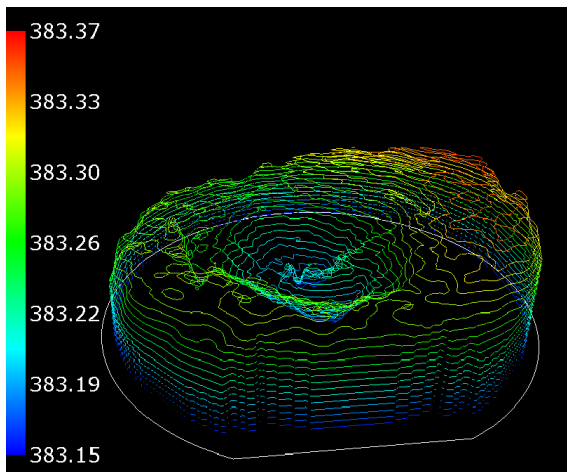
Kuvio 25. Kaksiulotteinen korkeuskartta Zernike-menetelmällä esitettyä. Pinnan suurin poikkeama (TIR) noin $0,6 \mu\text{m}$.

5 Vahakiinnityksen parametrien vaikutus piikiekon tasomaisuuteen

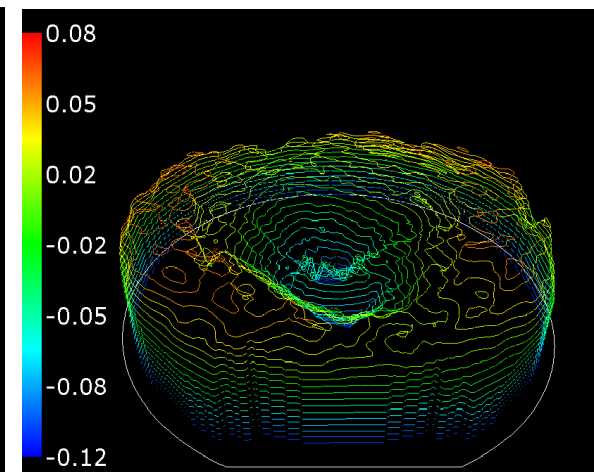
5.1 Koekiekot

Koska Newton- interferometrillä voidaan mitata vain heijastavia pintoja, käytettiin ko- keessa valmiiksi kiillotettuja kiekkoja. Kiekot on kiillotettu molemmilta puolilta (DSP), koska ne ovat SSP-kiekkoja tasomaisempia. Kokeeseen valitut piikiekot olivat hyvin ohuita (380 μm), jotta vahan vaikutus tasomaisuuteen näkyisi mahdollisimman selvästi. Kide-erästä valittiin mahdollisimman tasomaiset kiekot, jotta kiekon oma tasomaisuus- vaihtelu näkyisi mittauksissa mahdollisimman vähän. Kokeeseen hyväksyttiin vain kie- kot, joiden TTV on alle 0,2 μm .

Koska piikiekkojen TTV on maksimissaan 0,2 μm ja interferometrin referenssitason tarkkuus on 0,063 μm , ei vahakerroksen paksuusvaihteluita voida mitata tarkemmin kuin noin 0,3 μm :n tarkkuudella. Ennen varsinaisia kokeita on kaikki kokeissa käytetyt piikiekot mitattu kapasitiivisesti ADE WaferCheck 7200 -mittauslaitteistolla. Tällöin kie- kot, joiden TTV:ksi on mitattu yli 0,2 μm saatiin karsittua pois. Samalla luotiin jokaiselle koekiekolle pintakartat. Tällöin piikiekon kiinnityksestä riippumaton muoto ja paksuus- vaihtelu saatiin selville. Kuvioissa 26 ja 27 on esimerkki yhdestä mitatusta piikiekosta.



Kuvio 26. Koekiekon 002 paksuus (μm).



Kuvio 27. Koekiekon tasomaisuus TTV (μm).

Jokaisen koekiekon taustapinnalle tehtiin myös pieni lasermerkintä tunnistettavuuden parantamiseksi. Tunniste on juokseva numerointi, lähtien kiekosta 001. Lasermerkintä löytyy tunnistustason oikeasta kulmasta, jos katsellaan kiekon taustapintaa. Kokeissa

jokaiselle kuvatulle kiekolle annettiin tunnisteeksi tietty tiedostonimi. Tunniste on muotoa *aa_bbb_cccd*, jossa *aa* vastaa koenumeroa, *bbb* kiillotusalustan numeroa, *ccc* piikiekon tunnisteiden numeroa, sekä *d* samasta koekiekosta otetun kuvan järjestyskirjainta (*a, b, c...*).

Ennen kokeiden alkua piikiekot on pesty huolellisesti ja niitä on säilytetty vahakiinnityksen ympäristöä puhtaammassa puhdistilassa (ISO lk. 3). Koekiekkoihin ei myöskään ole koskettu käsin missään vaiheessa, vaan siirtäminen on aina tapahtunut alipainepinsettien avulla. Samoja koekiekoja käytettiin eri kokeissa ja ne puhdistettiin huolellisesti kokeiden välissä.

5.2 Koe 1: Vaikuttavien parametrien löytäminen

5.2.1 Kokeen 1 tutkittavat parametrit ja koesuunnitelma

Ensimmäisen kokeen tarkoituksena oli tutkia vahakiinnityksen parametreja ja nähdä, onko parametrien muutoksilla nähtävissä minkäänlaista vaikutusta piikiekon tasomaisuuteen. Kokeeseen valittiin neljä parametria, joiden vaikutusta tutkittiin. Tutkitut parametrit ovat loppuspinnausnopeus v_2 , vahan määrä WA, jälkilämmitysaika HBT, sekä vakuumpressi Chamber. Koe suunniteltiin MODDE 6.0 -ohjelmistolla, jolla tehtiin koesuunnitelma (DOE). Kokeen 1 koesuunnitelma löytyy liitteestä 3.

Tässä kokeessa tehtiin parametrien seulonta (Parameter Screening), jolloin parametrien vaikutus saadaan selvitettyä, mutta prosessia ei voida tällä näytemäärällä vielä optimoida. Tavoitteena on löytää tärkeät parametrit ja tehdä niistä myöhemmin tarkempi optimointi.

Parametreille v_2 , WA sekä HBT valittiin kaksi ääriarvopistettä, sekä niiden väliltä yksi keskipiste. Loppuspinnausnopeuden v_2 arvot kokeessa ovat 7 %, 45 % ja 83 %. Mitatut arvot vahan määrälle WA ovat 0,5 s, 1,0 s, sekä 1,5 s. Jälkilämmitysaikojiksi HBT valittiin 0,1 s, 15 s, sekä 30 s. Lisäksi oltiin epävarmoja vakuumpressin vaikutuksesta piikiekon tasomaisuuteen. Vaikutusta tutkittiin päästämällä puolet mitatuista kiekkoista vakuumpressin kautta, ja puolet otettiin vastaavasti mitattavaksi ennen kuin kiillotusalustat menivät prässiin.

Kokeen keskipisteistä on tehty useita toistomittauksia. Myös ensimmäisestä parametri-kombinaatiosta on tehty toistomittaus kokeen päätteeksi. Jotta systemaattiset virheet voitaisiin minimoida, olisi kokeet parasta tehdä täysin satunnaisessa järjestyksessä. Koejärjestystä on kuitenkin muutettu siten, että lämpötila kasvaa kokeen edetessä. Tämä on nopeuttanut kokeiden tekemistä, kun lämpölevyjen jäähtymistä ei ole tarvinnut odottaa pitkiä aikoja.

5.2.2 Kokeen 1 koejärjestely

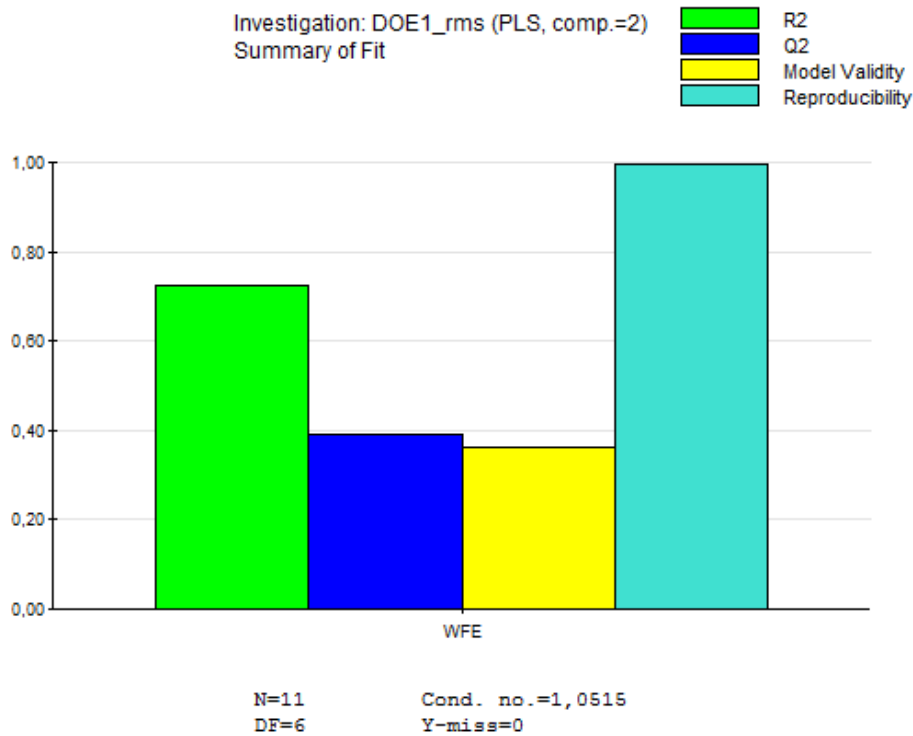
Puhtaat koekiekot syötettiin ensin paksuusmittaukseen, jossa kiekot järjesteltiin paksuudenmukaiseen järjestykseen. Sitten vakuumpressin paperi vaihdettiin, jotta mitattaviin piikiekkoihin ei tarttuisi vahaa edellisestä vahakiinnityksestä. Vahaa pursuaa oletusparametreilla ulos kiekon ja kiillotusalustan välistä ja tarttuu vakuumpressin paperiin. Ennen kokeiden alkua paineistettu vaha-astia tyhjennettiin oletusvahasta WAX 1 ja tilalle laitettiin vahaa WAX 2 (kappale 5.8.1).

Kokeet tehtiin koesuunnitelman mukaisessa järjestyksessä (liite 3). Yhdelle kiillotusalustalle kiinnitettiin aina kahdeksan piikiekkoa. Piikiekot yhdellä kiillotusalustalla kiinnitettiin aina samoilla parametreilla. Kun kiillotusalusta saatiin täyteen, vaihdettiin parametrit ja kiinnitettiin kiekot kyseiselle alustalle uusilla parametreilla. Yhdelle parametrikombinaatiolle saatiin siten kahdeksan toistomittausta. Jotta tasomaisuuden mitaus onnistuisi referenssitasolla, on mittausvaiheessa kiillotusalustalta kuitenkin poistettu joka toinen kiekko. Muuten referenssitason pidin koskisi viereisiin kiekkoihin. Tällöin jokaista parametrikombinaatiota kohti saatiin lopuksi neljä toistomittausta.

Mikäli kiillotusalustan oli tarkoitus mennä vakuumpressin läpi, kerättiin vielä lämmin kiillotusalusta mitattavaksi pressin jälkeiseltä jäähdytyslinjalta. Kiillotusalustat, joiden ei ollut tarkoitus mennä vakuumpressiin, nostettiin mitattavaksi kiinnitysvarren alta. Kokeet saatiin päätökseen, kun kaikki 88 piikiekkoa halutuilla parametreilla saatiin kiinnitettyä ja kiillotusalustat kerättyä jäähtymään. Ennen tasomaisuusmittauksia kiillotusalustojen annettiin jäähtyä kunnolla puhdistilan lämpötilaan.

5.2.3 Kokeen 1 tulokset

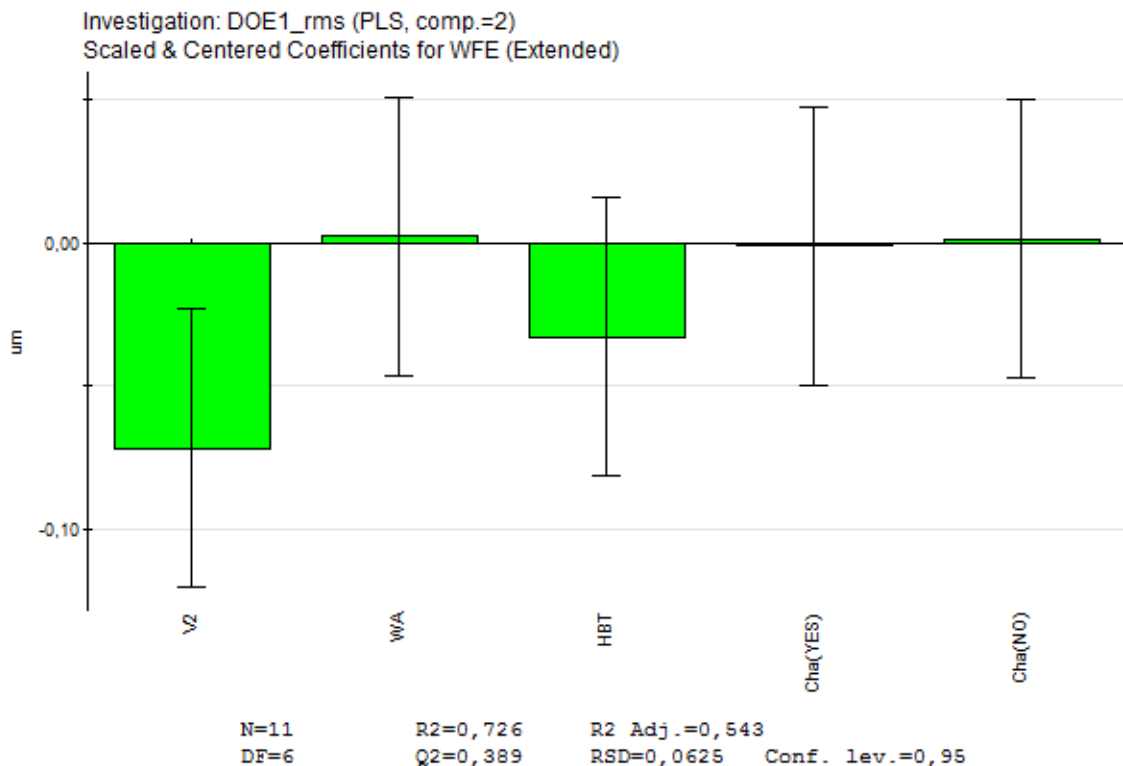
Kaikki tämän kokeen mittaukset tehtiin OpenFringe-ohjelmistolla käyttäen FFT-menetelmää. Tuloksia analysoitiin MODDE-ohjelmistolla. Mitattavaksi arvoksi valittiin keskiarvoistettu (rms TIR) tasomaisuus, sillä se tuotti parhaan mallin parametrien välillä. Mallin kelpoisuutta arvioitiin sovituskuvaajan (Summary of Fit) avulla (kuvio 28).



Kuvio 28. Mallin sovituskuvaaja.

Kuviosta 28 nähdään, että termi R2 on melko kohtuullinen, noin 73 %. Termi kertoo, kuinka hyvin laskettu malli sopii mitattuun dataan. Sen sijaan termi Q2 on vain 40 %. Q2 ilmaisee sen, miten hyvin mitattu data osaa ennustaa uutta dataa. Mallin pätevyys (Model Validity) on noin 37 %. Tämän arvon tulee olla yli 25 %, jotta mallin sovituksessa ei tapahdu kohtuutonta vajaavaisuutta. Toistettavuus (Reproducibility) on 100 %. Tämä on kuitenkin harhaan johtava arvo, sillä mallissa käytettiin kullekin parametrille vain yhtä arvoa, joka oli neljän kiekon tasomaisuuden keskiarvo. Todellisuudessa toistettavuus on heikompi, noin 66 %. Mallin kelpoisuus ei siis ole erityisen hyvä, mutta sen oletettiin olevan riittävä löytämään tasomaisuuteen vaikuttavat parametrit ja niiden kehityssuunnat.

Kuviosta 29 nähdään parametrit, joilla on mallin mukaan eniten vaikutusta tasomaisuuteen. Suurin vaikutus on loppuspinnausnopeudella v_2 ja toiseksi suurin jälkilämmittinajalla HBT. Vaikutus on luotettava, kun varmuusrajat (pystyviivat) eivät ylitä nollaraajaa. Kolmanneksi suurin vaikutus on vahan määrällä WA, mutta vaikutus on huomattavasti vähäisempi kuin v_2 :lla ja HBT:lla. Vakuumiprässillä ei mallin mukaan juuri näytä olevan vaikutusta piikiekon tasomaisuuteen.



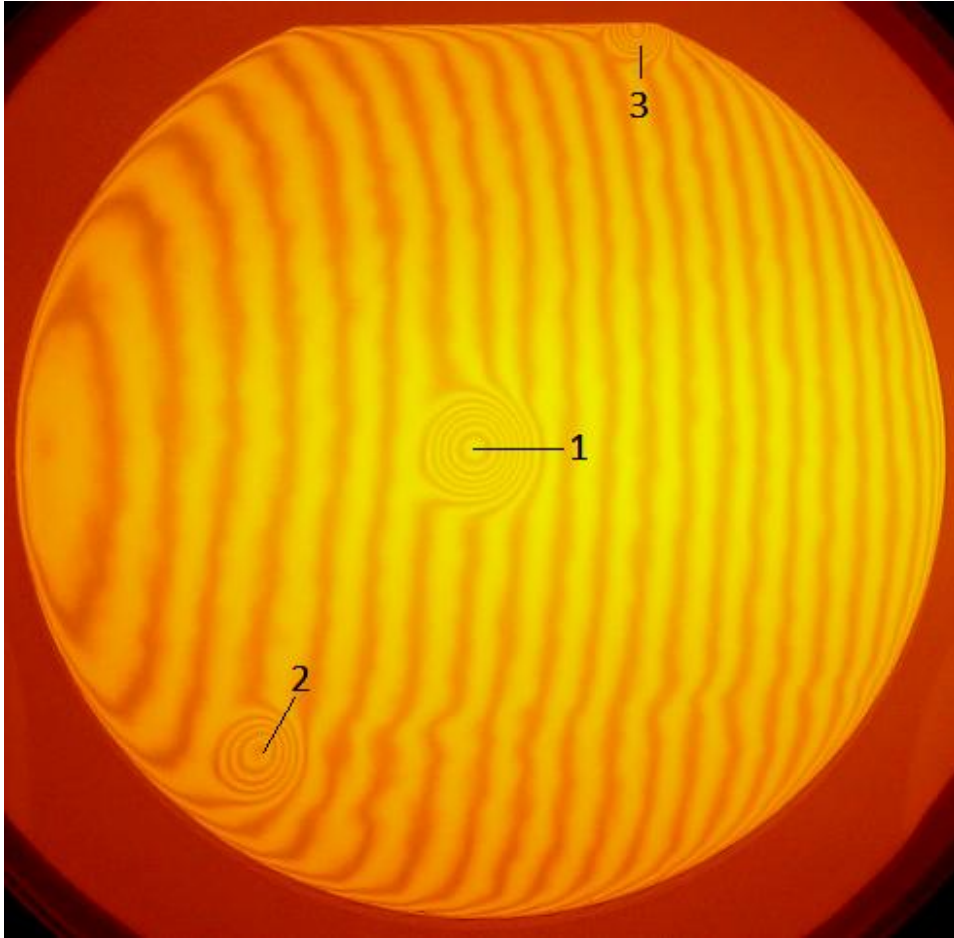
Kuvio 29. Kokeen 1 vaikutuskertoimet.

Todellisuudessa vakuumiprässillä on kuitenkin hyvin suuri merkitys. Koska mallissa käytettiin vasteena keskiarvoistettua tasomaisuutta, eivät pienet lokaalit epätasaisuudet näy tuloksissa. Interferenssikuvista nähdään, että kiinnityksen jälkeen piikiekon keskelle syntyy painauma. Lisäksi vahakerrokseen voi syntyä suuria kaasukuplia, jotka näkyvät tasomaisuudessa. Vakuumiprässi poistaa kyseiset epätasaisuudet.

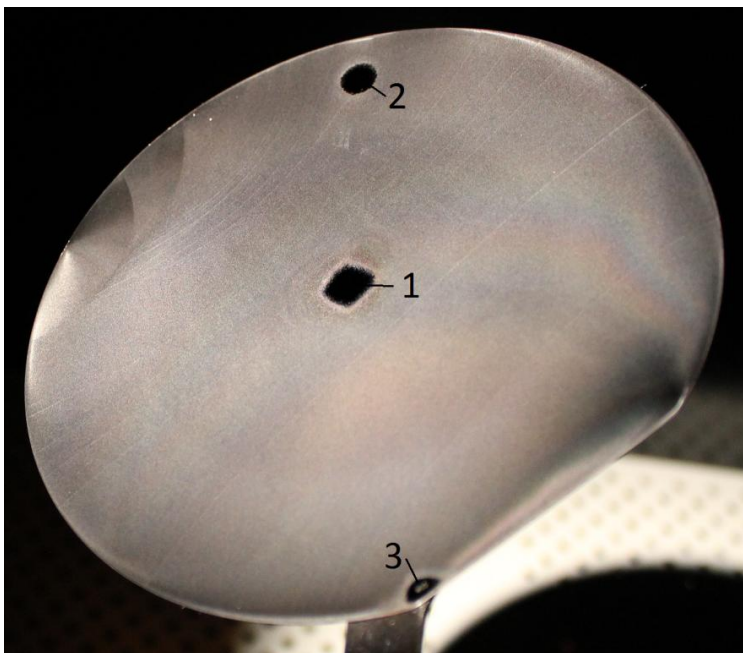
Kuviossa 30 nähdään melko tasomainen piikiekko, jossa on kuitenkin pieniä paikallisia epätasaisuuksia. Keskellä nähdään noin 1,5 μm :n syvyinen painauma (1, kuviossa 30).

Lisäksi piikiekon ja kiillotusalustan väliin saattoi jäädä ilmakuplia. Kuviossa 30 oleva ilmakupla (2) aiheuttaa piikiekkoon noin $0,9 \mu\text{m}$:n kuopan. Nämä ilmiöt toistuivat kaikissa piikiekoissa, joita ei ollut puristettu vakuumpressillä.

Lisäksi havaittiin, että kaikissa mitatuissa piikiekoissa näkyi virhettä lasermerkinnän alueella (3). Vaha ei tartu hyvin lasermerkinnän kohdalle ja aiheuttaa kiekon pinnalle noin $1 \mu\text{m}$:n suuruisen painauman. Kun kiekko kiinnitettiin kiillotusalustaan lasermerkintä ylöspäin, ei virhettä havaittu lainkaan. Tällöin on syytä olettaa, että lasermerkintä ei juuri vaikuta piikiekon itsensä muotoon. Laser aiheuttaa pienen kohouman laserin jäljen reunoille, jolloin kiekon ja kiillotusalustan väliin jää pieni ilmarako. Tällöin piikieko ei tartu merkinnän ympäriltä kiillotusalustaan. Mikäli kiekko kiillotettaisiin lasermerkintä kiillotusalustaa vasten, tulisi lasermerkinnän kohdalle kiillotuksen jälkeen kiekon etupinnalle kohouman tilalle painauma. Kuviosta 31 nähdään kiekon takapinnalla oleva vahapinta juuri kiekon irrotuksen jälkeen kiillotusalustasta. Kuviossa 30 näkyneet epätasaiset kohdat näkyvät myös selvästi kiekon vahapinnassa, sillä niistä kohdista puuttuu vaha kokonaan.

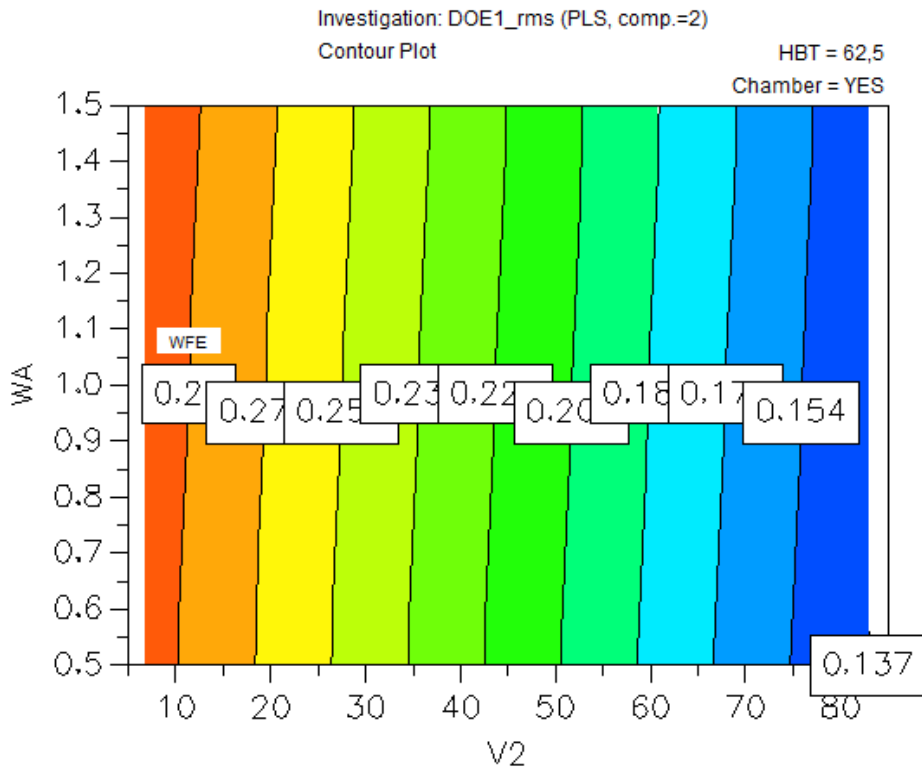


Kuvio 30. Piikiekon 01_414_001 interferogrammi, kun kiekko ei ole käynyt vakuumpressissä.



Kuvio 31. Kuviossa 30 näkyvän kiekon vahapinta heti kiillotusalustasta irrotuksen jälkeen.

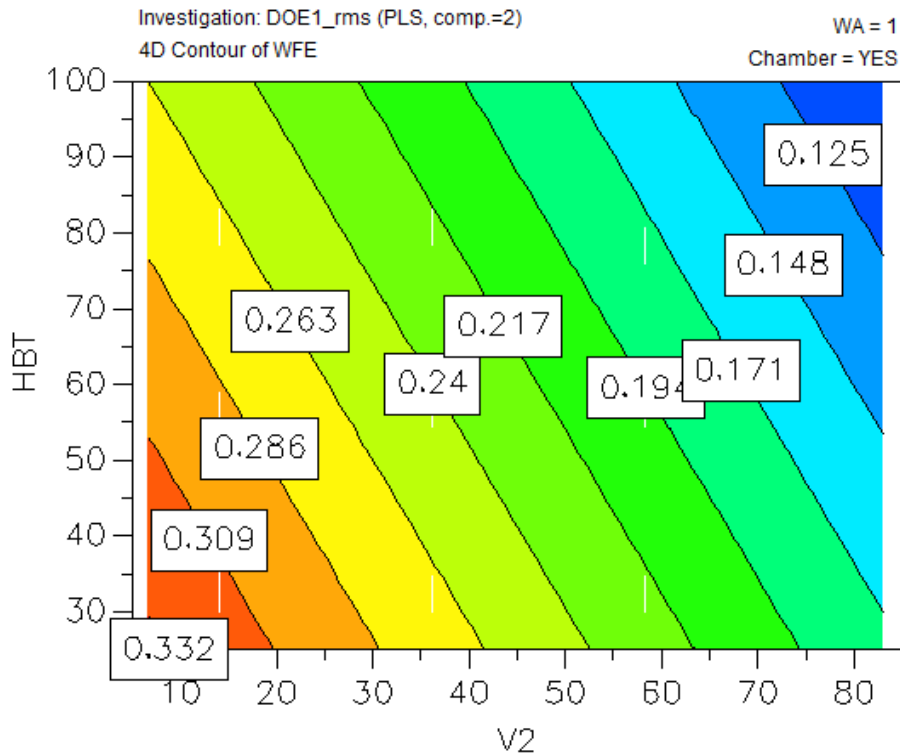
Kuviosta 32 nähdään, kuinka loppuspinnausnopeus v_2 ja vahan määrä WA vaikuttavat piikiekon tasomaisuuteen. Tasomaisuus on ilmoitettu keskiarvoistettuna tasomaisuutena. Vahan määrällä ei näytä olevan suurta merkitystä lopputulokseen, mutta loppuspinnausnopeudella sen sijaan on. Havainnot tukevat kappaleessa 3.2 esitettyä teoriaa. Tulosten mukaan korkealla 80 %:n pyörimisnopeudella voidaan saavuttaa 50 % parempi tasomaisuus kuin hitaalla 10 %:n pyörimisnopeudella.



Kuvio 32. Loppuspinnausnopeuden ja vahan määrän vaikutus piikiekon tasomaisuuteen.

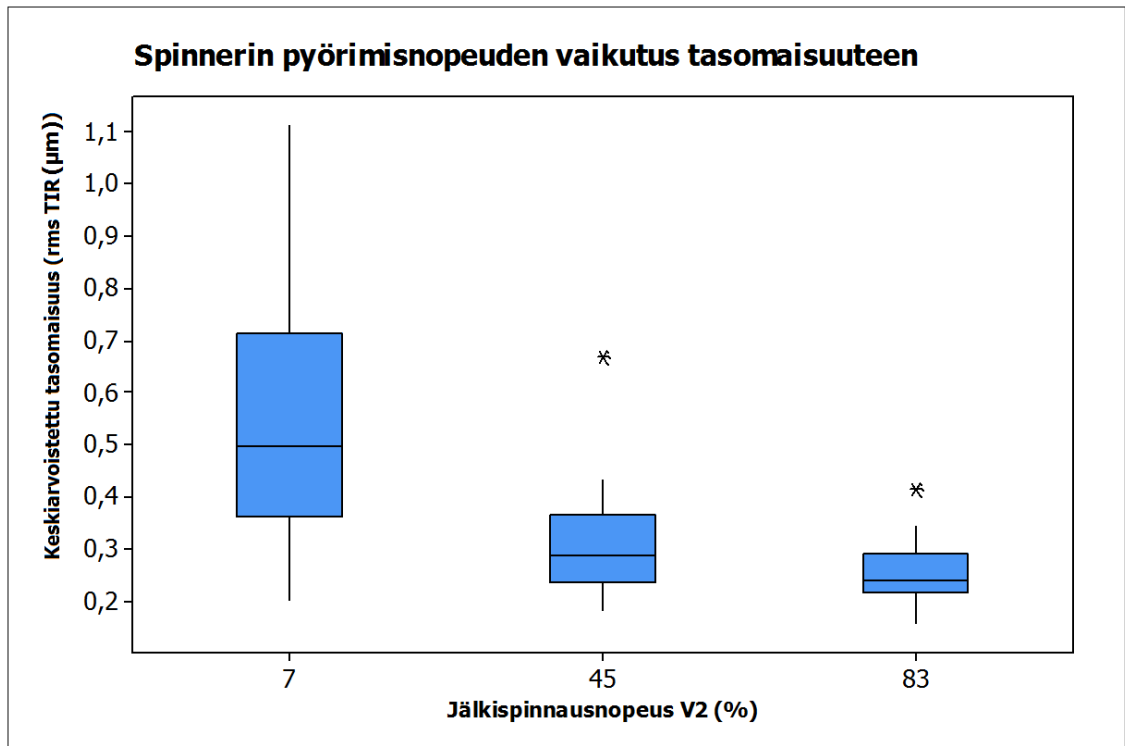
Kuviossa 33 on esitetty v_2 :n ja HBT:n yhteisvaikutus piikiekon tasomaisuuteen. Tulosten mukaan parhaimpiin tasomaisuuksiin päästään korkeilla pyörimisnopeuksilla ja korkeilla HBT-arvoilla. Vasteena on keskiarvoistettu tasomaisuus.

Kuviossa 29 varmuusraja HBT:lle sekä WA:lle ylittää nollatason. Tällöin kyseisten parametrien vaikutusta tasomaisuuteen ei voida pitää kovinkaan luotettavana. Siksi MODDEsta saatujen tulosten perusteella voidaan olettaa melko varmasti vain se, että tasomaisuus paranee, kun loppuspinnausnopeus v_2 kasvaa.



Kuvio 33. Loppuspinnausnopeuden ja jälkilämmitinajan vaikutus piikiekon tasomaisuuteen.

Tuloksia tulkittiin myös tilastollisesti Minitab-ohjelmiston avulla. Kuviossa 34 on esitetty piikiekon tasomaisuus v_2 :n funktiona. Kuviossa sinisen laatikon yläreuna osoittaa, että 75 % mitattujen piikiekköjen tasomaisuuden keskiarvoistetusta poikkeamasta osuu tälle alueelle tai sen alle. Laatikon keskellä kulkeva viiva puolestaan kertoo rajan, jossa 50 % kiekkoista saavuttaa enintään kyseisen poikkeaman. Laatikon alareuna osoittaa, että 25 % piikiekköjen tasomaisuuden poikkeamasta osuu kyseisen rajan kohdalle tai sen alle.



Kuvio 34. Loppuspinnausnopeuden vaikutus piikiekon tasomaisuuteen.

Laatikon päistä lähtevät viivat ulottuvat kohti tasomaisuuden minimi- ja maksimiarvoja. Viivojen korkeus on 1,5 kertaa laatikon korkeus 50 %:n rajasta mitattuna. Mikäli mitattu arvo osuu viivan ala- tai yläpuolelle, se on määritetty poikkeavaksi tulokseksi (kuvassa tähti). On syytä olettaa, että muutamat poikkeavat tulokset voivat johtua mittausvirheistä ynnä muista satunnaisista ilmiöistä. Poikkeavia mittausrvoja ei ole sisällytetty lopullisiin tuloksiin.

Kuviosta 34 nähdään, että kun spinnerin pyörimisnopeutta v_2 kasvatetaan 7 %:sta 83 %:iin, piikiekon pinnan keskiarvoistettu poikkeama tasosta paranee keskimäärin noin 50 %. Lisäksi havaitaan, että laatikkojen korkeus pienenee merkittävästi v_2 :n kasvaessa. Piikiekkojen tasomaisuuden hajonta pienenee jopa 80 %, kun 7 %:n jälkispinnausnopeudesta siirrytään 83 %:n pyörimisnopeuteen.

5.3 Koe 2: Parametrien optimointi

5.3.1 Kokeen 2 koejärjestely

Tässä kokeessa on vahakiinnityksen parametrit pyritty optimoimaan kokeessa 1 saatu-
jen tulosten perusteella. Koe on suunniteltu MODDEn optimointityökalulla. Kokeessa
käytetyt parametrit ovat v_2 , WA, sekä HBT. Kaikki koekiekot on vakuumpiirrässätty, sillä
sen tiedettiin vaikuttavan tasomaisuuteen myönteisesti.

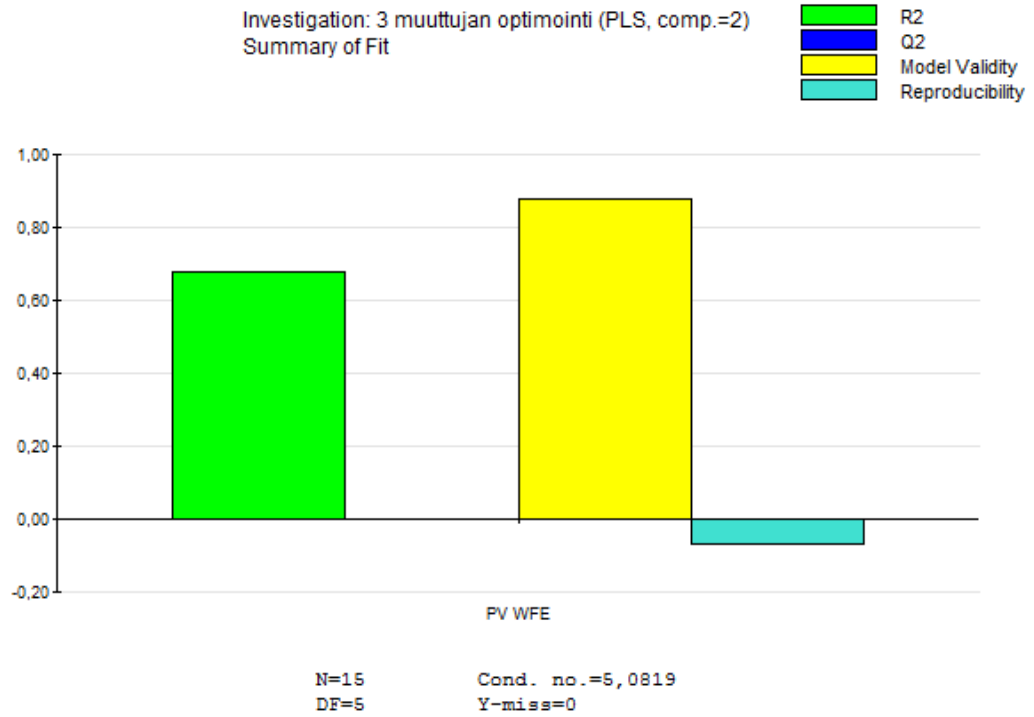
Optimointia varten v_2 :n arvoiksi valittiin 33,3 %, 58,15 %, sekä 83 %. WA vaihtui välil-
lä 0,5 s, 1,0 s, ja 1,5 s. HBT:n arvoina kokeessa olivat 0,1 s, 10,05 s, sekä 20 s. Opti-
mointiin käytettiin yhteensä 16 kiillotusalusaa. Tällöin myös parametrikombinaatioiden
määräksi saatiin 16. Piikiekoja mitattiin yhteensä 64 kappaletta. Erona kokeeseen 1 on
se, että spinneriin lisättiin hidas 16,7 %:n alkupyöritys T1 kahden sekunnin ajaksi. Hi-
taammalla alkuspinnausnopeudella oli tavoitteena saavuttaa parempi vahan levittymi-
nen spinnauksen alkuvaiheessa. Yksityiskohtaisempi koejärjestely löytyy liitteestä 4.

5.3.2 Kokeen 2 tulokset

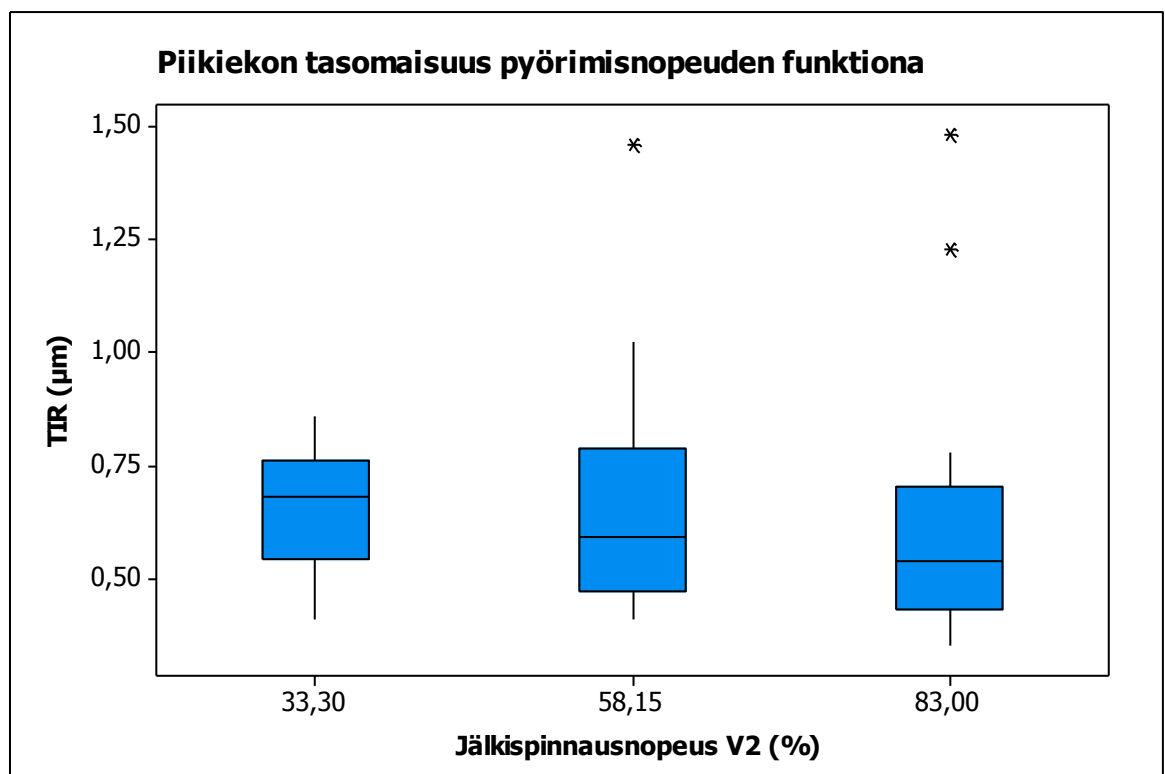
Piikiekoista mitattiin TIR, ja keskiarvoistettu pinnan poikkeama tasosta käyttäen hyväk-
si Newton-interferometriä, sekä OpenFringe-ohjelmistoa. Saadut tasomaisuusarvot
syötettiin MODDE-ohjelmistoon ja prosessi pyrittiin optimoimaan MODDEn työkaluja
käyttäen.

Vastoin odotuksia mallista saatiin kuitenkin hyvin huono. Kuviosta 35 nähdään, että
mallin kertoimet ovat liian pienet. Lisäksi mallista puuttuu Q2-kerroin kokonaan. Saatu-
jen tulosten pohjalta ei mallia voitu optimoida eikä MODDEn antamiin tuloksiin voitu
luottaa.

Kuviossa 36 nähdään piikiekon tasomaisuus jälkispinnausnopeuden funktiona. Tuloksis-
sa ei havaittu lainkaan korrelaatiota spinnausnopeuden ja tasomaisuuden välillä. Selvää
korrelaatiota tasomaisuuteen ei havaittu myöskään vahan määrällä WA eikä jälkilämmi-
tysajalla HBT.



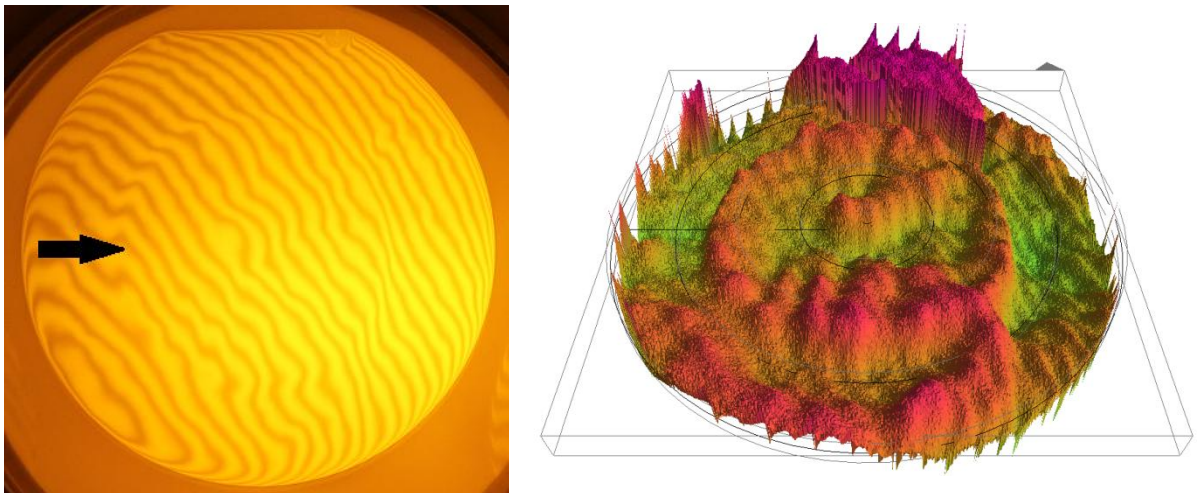
Kuvio 35. Kokeen 2 mallin kelpoisuuskertoimet.



Kuvio 36. Piikiekon TIR jälkispinnausnopeuden funktiona.

Tulosten pohjalta pääteltiin, että suurin osa vahan levittämisestä ja sen lopullisen kerrospaksuuden saavuttamisesta tapahtuu ensimmäisen kahden sekunnin aikana spinnauksen aloituksesta. Koska spinnauksen alkuun on lisätty kahden sekunnin ja 16,7 %:n alkuspinnauksenopeus, on tässä kokeessa mitattu tosiasiaa tämän pyörimisnopeuden antamia tasomaisuuden arvoja. Tasomaisuusarvot vaihtelevat paljon. Myös kokeessa 1 havaittiin hitailla pyörimisnopeuksilla heikkoa tasomaisuutta ja suurta tasomaisuusvaihtelua.

Interferenssikuvissa havaittiin myös satunnaisesti kiekon keskelle syntyvä pyöreä jälki (kuvio 37). Kuvio yhdistettiin kokonsa puolesta spinnerin pitimeen. Pyöreä jälki oli näkyvissä 63 %:ssa mitatuista kiekkoista. Jäljen havaittiin olevan riippumaton kokeessa muutetuista parametreista, sillä samoilla muuttujien arvoilla jälki oli välillä näkyvissä ja toisinaan taas ei. Jäljen aiheuttaja täytyi siis olla jokin ulkoinen tekijä, jota ei vielä tässä kokeessa tunnettu.



Kuvio 37. Spinnerin pitimen aiheuttama jälki kiekolla 02_334_096c. Vasemmalla kiekon interferogrammi ja oikealla OpenFringen FFT-analyysin tuottama pintakartta samasta kiekosta.

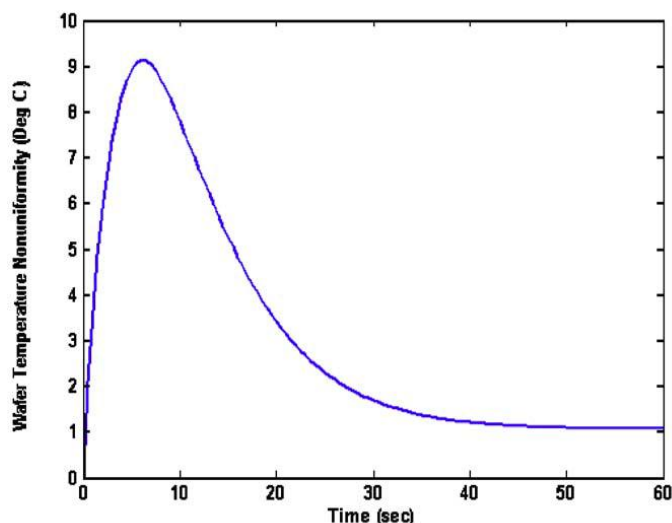
5.4 Koe 3: Lämpötilat vahakiinnityksessä

5.4.1 Lämpötilojen oletettu vaikutus

Vahakiinnitys koostuu eri vaiheista, joissa käytetään hyväksi melko korkeita lämpötiloja (70 °C–100 °C). Lämpötilavaihtelut voivat heikentää piikiekon tasomaisuutta. Kun lämpötila kasvaa, lisääntyy myös liuottimen haihtuminen. Jos piikiekossa on lämpötilagradientteja, höyrystyy liuotin lämpimimmistä kohdista enemmän aiheuttaen niihin suuremman kerrospaksuuden.

Piikiekot lämmitetään kuumalla levyllä. Lämpölevyn ja piikiekon välille jätetään usein hyvin pieni ilmarako, jolloin piikiekko ei koskaan koske itse levyyn. Näin estetään haitalliset kontaminaatiot piikiekossa [13].

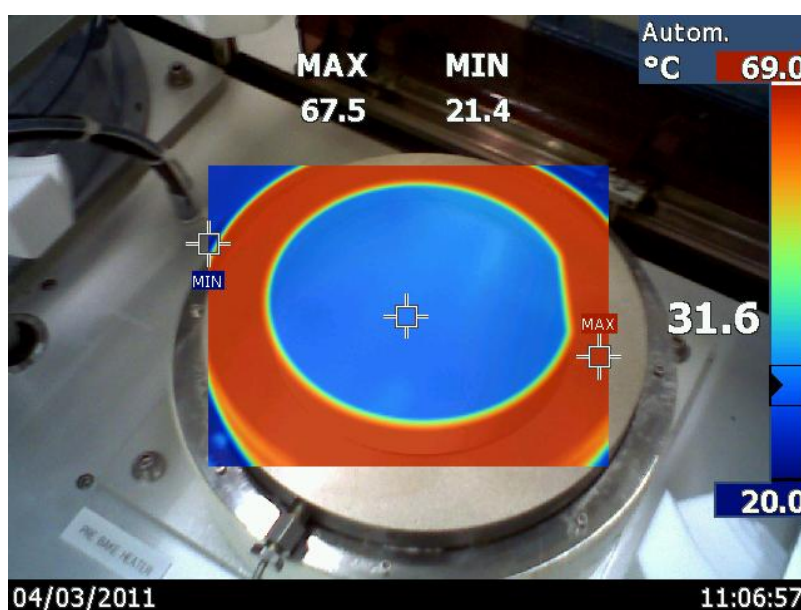
Piikiekon ja lämpölevyn etäisyys voi vaihdella johtuen laitteiston rakenteesta tai piikiekon muodosta. Jos piikiekossa on käyryyttä (warp), ilmavälin paksuus vaihtelee. Koska ilma on hyvä eriste, aiheuttaa ilmavälin paksuuden muutos myös muutoksia lämpötiloihin ja sitä kautta vahan kerrospaksuuteen. Kuviossa 38 on esitetty erään 8” piikiekon suurin lämpötilavaihtelu kiekon yli ajan funktiona, kun kiekon keskikohta on lähempänä lämpölevyä kuin kiekon reunan alue. Kuvioista nähdään, että lämpötilaerot kiekolla taasoittuvat ajan funktiona, mutta eivät koskaan saavuta samaa lämpötilaa.



Kuvio 38. Erään 8” piikiekon suurin lämpötilaero ajan funktiona kun alapinnan etäisyys lämpötasolle on 127 µm ja reunan etäisyys tasolle 178 µm [17, s. 885].

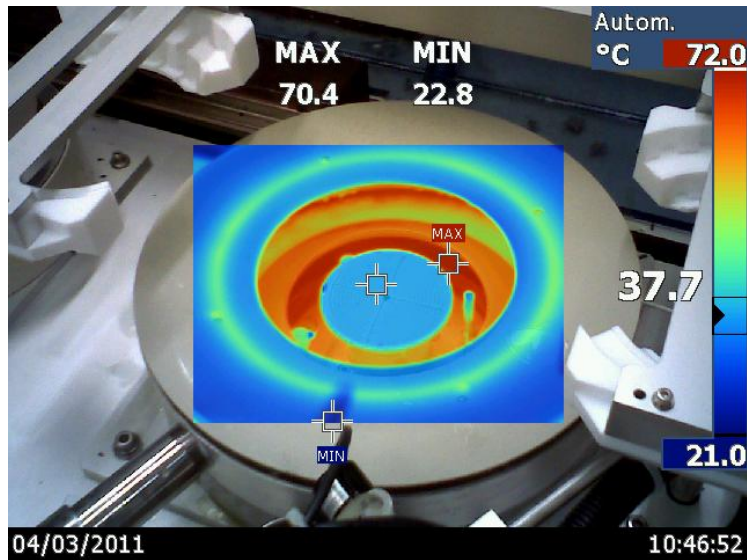
5.4.2 Lämpötilagradienttien mittaus

Vahakiinnityksen lämpötiloja tutkittiin Fluke TI25 -lämpökameralla. Ensin mitattiin juuri ennen spinnausta olevan PB-aseman lämpötilat (kuvio 39). Kuuma levy on asetettu lämpötilaan 70 °C. Vaikka lämpölevy onkin kuuma, ei piikiekon lämpötila nouse keskimäärin kuin noin kymmenen astetta korkeammaksi lämpötilaan 30 °C. Ilmaväli piikiekon ja lämpölevyn välillä on liian suuri (muutama millimetri) eikä lämpölevy kykene lämmittämään kiekkoa tehokkaasti. Lämpötilat piikiekon alueella vaihtelivat muutaman asteen verran. Kiekon lämpötila näyttää hyvin tasaiselta, sillä kuvassa on suuria lämpötilaeroja.



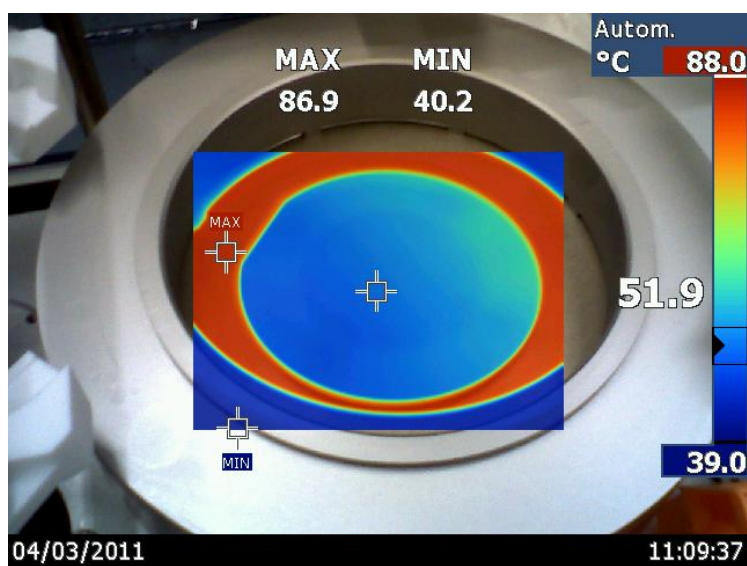
Kuvio 39. PBH-aseman lämpökuvaa.

Esilämmittimen jälkeen kiekko menee spinnerille. Spinnerin reunat on lämmitetty, jotta ylimääräinen vaha saadaan valutettua pois. Kuvio 40 nähdään, että piikiekkoa paikallaan pitävän pitimen lämpötila on noin 38 °C. Kun kiekko asetetaan pitimelle, se lämmittää kiekkoa pitimen alueelta. Koska piikiekko tulee pitimen kohdalta lämpimämmäksi, siihen syntyy myös paksumpi vahakerros. Tämä selittää kokeessa 2 havaitun spinnerin pitimen aiheuttaman jäljen. Jäljen havaittiin olevan näkyvissä vain silloin, kun spinnerin reunoilla oli lämmitys päällä. Lämmitys lämmittää säteilemällä myös spinnerin pidintä. Koska lämmitintä ohjaa termostaatti, se kytkeytyy päälle ainoastaan, kun lämpötila on laskenut riittävän alas. Tästä johtuu se, että jälki oli kiekolla näkyvissä vain tietyissä mittauksissa.



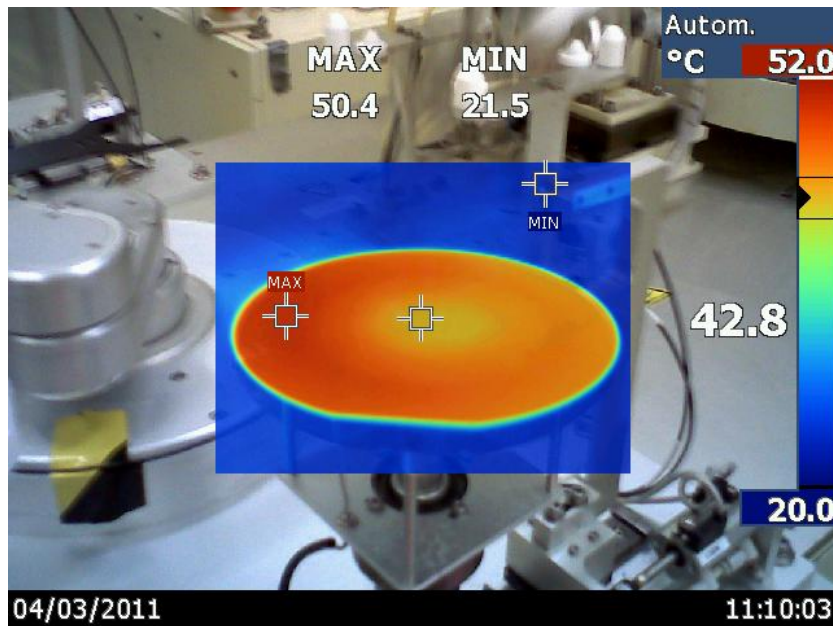
Kuvio 40. Spinnerin lämpökuva.

Spinnerin jälkeen kiekko asetetaan toiselle lämpölevylle, joka on asetettu lämpötilaan 90 °C. Kuvio 41 nähdään, että kiekon lämpötila nousee noin lämpötilaan 50 °C. Lisäksi siinä näkyy lämpötilagradientti; kiekon oikeanpuoleinen reuna on noin kymmenen astetta viileämpi kuin sen vastakkainen reuna. Kiekon keskellä näkyy myös heikko spinnerin pitimen suuruinen ja muotoinen viileämpi alue. Viileämpi alue voi johtua paksummasta vahakerroksesta, jolloin sillä kohdin tapahtuu enemmän haihtumista. Haihtuminen kuluttaa energiaa, jolloin kiekon lämpötila sillä kohdin laskee. Tämä kohonnut vahakerros nähdään myös kuviossa 37.



Kuvio 41. Lämpökuva HBH-asetusta. Keskellä näkyy hento spinnerin pitimen aiheuttama jälki.

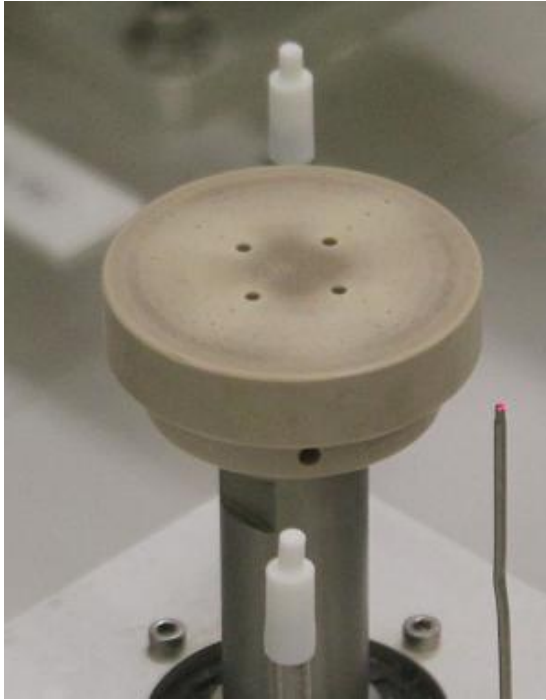
Noin 50 °C:seen lämmitetty kiekko asetetaan seuraavaksi FF:n pitimelle. Kuviosta 42 havaitaan, että pidin viilentää kiekkoa keskeltä. Lämpötilaero on noin kymmenen astetta. FF:n pitimen lämpötila on noin 36 °C. Kiekolla nähdään myös lämpötilagradientti. Kiekon vasen reuna on oikeaa reunaa lämpimämpi. Mikäli sama gradientti on myös vahakerroksen paksuudessa, voi se aiheuttaa kiillotuksen aikana kiekkoon kiilamaisuutta (taper).



Kuvio 42. Tunnistustason kohdistimen pidin viilentää piikiekkoa keskikohdasta.

FF:n pitimen muodolla ja vahan levittymisen välillä huomattiin riippuvuus. Pitimellä näkyy keskikohdassa tumma neliön muotoinen kuvio, sekä reunalla tumma rengas (kuvio 43). Piikiekko ottaa kiinni pitimeen juuri näistä tummista kohdista. Sama kuvio nähdään piikiekon taustapuolen vahapinnassa, kun kiekko irrotetaan kiillotusalustasta (kuvio 44). Kiekon keskellä oleva kuvio näkyy myös interferenssikuvissa. Ilmiö on hyvin voimakas, mikäli kiillotusalusta ei ole käynyt vakuumpiirissä. Tällöin vaha voi puuttua keskikohdasta kokonaan (kuvio 31).

Kiekon asemoinnin jälkeen kiekot painetaan kiillotusalustalle. Kiillotusalustan lämpötila on hyvin tasainen, eikä siinä ole suuria lämpötilagradientteja. Alustan lämpötila on hyvin lähellä sen tavoitearvoa 100 °C.

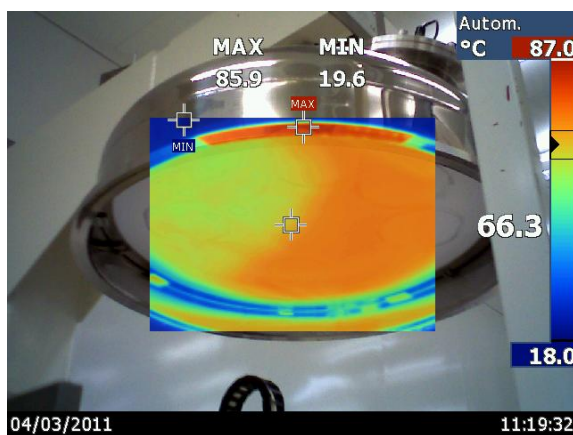


Kuvio 43. FF:n pidin.

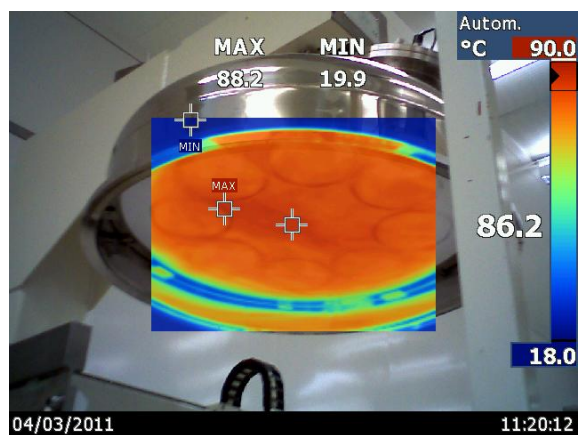


Kuvio 44. FF:n pitimen aiheuttama jälki kiekon taustapinnan vahakerroksessa.

Myös vakuumpressin ylälevy kuvattiin lämpökameralla. Paperilla päällystetyssä levyssä havaittiin selvä lämpötilagradientti. Kiinnitysvartta lähempänä oleva reuna on toista reunaa lämpimämpi (kuvio 45). Prässäyksen jälkeen levyn lämpötila on kohonnut lähes 90 °C:seen ja levyssä on yli kymmenen asteen lämpötilaeroja (kuvio 46). Levy jäähtyy nopeasti noin 20 °C ja saavuttaa lopulta stabiilin tilan.



Kuvio 45. Vakuumpressin lämpökuva stabiilissa tilassa.



Kuvio 46. Vakuumpressin lämpökuva juuri prässäyksen jälkeen.

5.4.3 Lämpötilamittausten tulokset

Kokeessa tutkittiin lämpökameran avulla lämpötilagradientteja vahakiinnityksessä. Lämpötilojen havaittiin olevan tärkeässä asemassa piikiekkojen tasomaisuuden suhteen. Esilämmittimen huomattiin kohottavan kiekon lämpötilaa ainoastaan 10 °C, vaikka lämpölevy oli asetettu lämpötilaan 70 °C. Oletettiin, että esilämmittimestä ei juuri ole hyötyä vahan kiinnittymisen kannalta. Esilämmitin voi jopa heikentää tasomaisuusarvoja aiheuttaen kiekkoon lämpötilagradientteja. Lämpötilagradientit puolestaan aiheuttavat vahaan kerrospaksuusvaihteluita.

Lisäksi havaittiin, että spinnerin pidin lämpenee kun spinnerin reunoilla on lämmitys päällä. Koska pidin on kiekkoa lämpimämpi, se aiheuttaa muutoksen vahan kerrospaksuuteen. Tämä nähdään spinnerin pitimen jälkeen piikiekkon pinnassa. Piikiekkko ja spinnerin pidin tulisi saada mahdollisimman lähelle samaa lämpötilaa.

Jälkilämmitin on asetettu arvoon 90 °C. Tällöin piikiekkon lämpötila nousee arvoon 50 °C. Koska kiekko ei ole aivan yhdensuuntainen lämpölevyn kanssa, se aiheuttaa kiekkoon usean asteen lämpötilagradientin. Lämpötilagradientit voivat aiheuttaa kiillotettuun kiekkoon kiilamaisuutta.

Myös tunnistetason kohdistin (FF) aiheuttaa lämpötilaeroja kiekkoon. Kohdistimen pidin viilentää kiekkoa keskeltä noin 10 °C. Lisäksi pitimessä näkyy neliömäinen jälki, joka nähdään myös kiekon taustapinnalla olevassa vahassa. Kiekon keskellä näkyy myös usein interferenssikuvissa FF:n pitimen suuruinen jälki. Sekä spinnerin että tunnistetason kohdistajan lämpötila tulisi saada mahdollisimman lähelle piikiekkon lämpötilaa.

Kiillotusalustojen lämpötila on melko tasainen, eikä niissä ole suuria lämpötilavaihteluita. Vakuumiprässin ylälevyssä sen sijaan on lämpötilaeroja, mutta ne tasaantuvat melko hyvin prässäyksen aikana eikä sillä uskota olevan havaittavaa vaikutusta piikiekkojen tasomaisuuksiin.

5.5 Koe 4: Kiinnitysvarren paine

5.5.1 Kokeen 4 koejärjestely

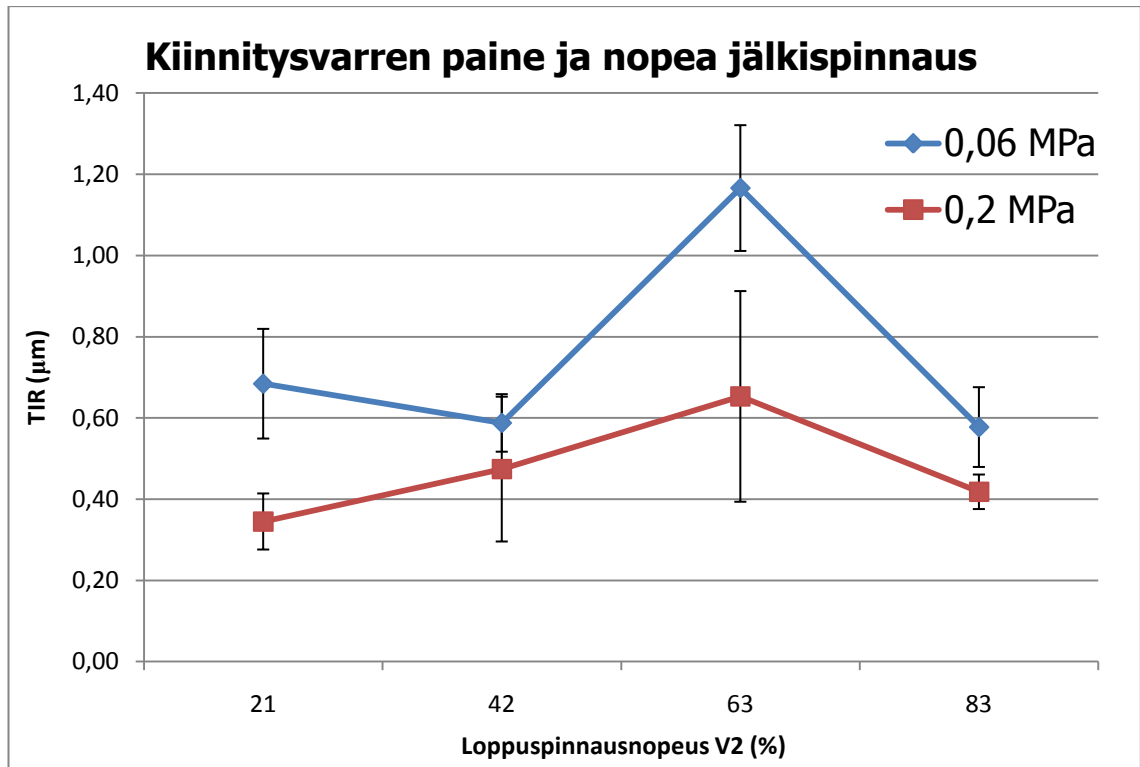
Kokeessa 4 tutkittiin kiinnitysvarren (BA) aiheuttamaa vaikutusta piikiekkon muotoon. BA painaa piikiekkoa kiillotusalustaa vasten PEEK-muovista valmistetulla levyllä (kuvio 9). Levyn läpimitta on piikiekkoa pienempi, jotta kiekko olisi mahdollista asettaa PEEK-alustalle koskien ainoastaan kiekon etupintaa. Koska PEEK-alusta on piikiekkoa pienempi, on syytä olettaa, että sillä on vaikutusta myös piikiekkon tasomaisuuteen.

Kokeessa käytettiin oletuspaineena BA:lle 0,2 MPa. Tämä arvo pidettiin paineen ylärajana. Matalana paineena käytettiin 0,06 MPa. Jotta järjestelmä toimisi kunnolla, ei painetta voida poistaa kokonaan.

BA:n paineen rinnalla tutkittiin myös nopean jälkispinnausnopeuden vaikutusta piikiekkon muotoon. Kokeessa 2 käytetty hidaskahden sekunnin alkuspinnausnopeus poistettiin, ja nopealle jälkispinnausnopeudelle v_2 kokeiltiin arvoja 21 %, 42 %, 63 %, sekä 83 % (liite 5). Kokeiden ajaksi otettiin myös kaikki lämpötilat pois päältä, jolloin tutkittiin päästäänkö spinnerin pitimen aiheuttamasta kuvioista vahapinnassa eroon. Lämpötilaeroja tarkasteltiin lämpökameralla.

5.5.2 Paineen ja loppuspinnauksen vaikutus tasomaisuuteen

Kaikki 36 piikiekkoa mitattiin Newton-interferometrillä ja kuvat analysoitiin ilman ohjelmistoa kappaleessa 4.2 esitetyllä tavalla. Kokeen tulokset näkyvät kuviossa 47. Mittaustulosten perusteella kiekon tasomaisuus on parempi silloin, kun kiinnitysvarsi painaa voimakkaasti piikiekkoa kiillotusalustaa vasten. Tasomaisuus on astetta huonompi pienellä 0,06 MPa:n paineella.

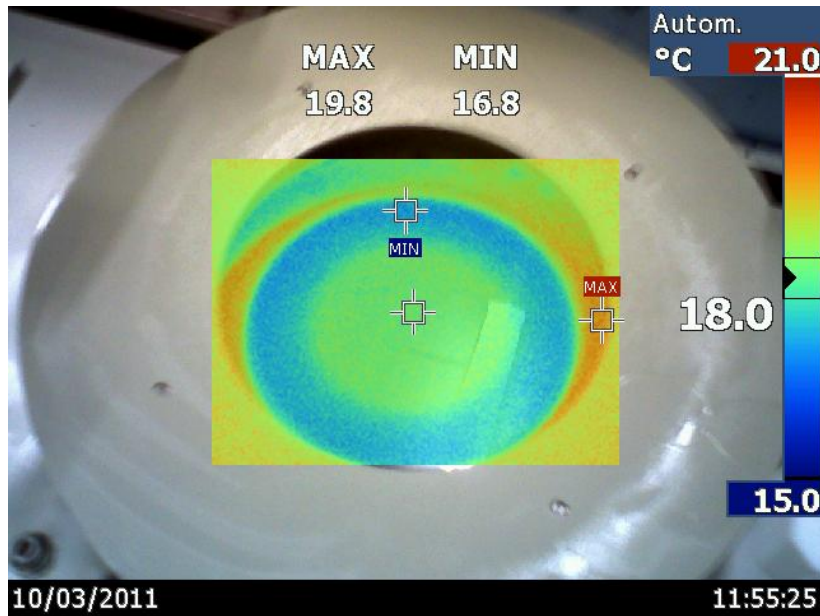


Kuvio 47. Kiinnitysvarren paineen vaikutus tasomaisuuteen.

Kuviosta 47 havaitaan myös, että tasomaisuus heikkenee voimakkaasti jälkispinnausnopeuden arvon ollessa 63 %. On syytä olettaa ilmiön olevan todellinen, sillä se näkyy sekä matalalla että korkealla kiinnitysvarren paineella. Lisäksi kokeet eri pyörimisnopeuksilla on tehty ja mitattu satunnaisessa järjestyksessä. Kyseessä voi olla jonkinlainen siirtymäarvo vahan levittymiselle piikiekolla, jolloin pyörimisnopeuden ollessa 63 % nesteen virtausominaisuudet muuttuvat. On mahdollista, että tasomaisuuden huonoja huippuarvoja on useita, mutta ne eivät näy kun mitattavia pyörimisnopeuksia on vain neljä. Myös huipun leveyttä on vaikea arvioida. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että huipun kokonaisleveyden täytyy olla vähemmän kuin 40 prosenttiyksikköä.

Kokeen tulosten perusteella hyviä tasomaisuuden arvoja saavutettiin sekä matalammalla 21 %:n, että korkealla 83 %:n jälkispinnausnopeudella. Interferogrammeissa ei havaittu selvää PEEK-alustan painauma, vaikka alustan läpimitta onkin piikiekon läpimitä pienempi.

Kun spinnerin lämmityselementit oli kytketty pois päältä, ei kokeessa 3 havaittua spinnerin pitimen aiheuttamaa jälkeä näkynyt yhdessäkään mittauksessa. Nyt spinnerin pidin lämmitti kiekon keskustaa vain kolme astetta (kuvio 48).



Kuvio 48. Piikiekon lämpökuvaa spinnerillä kun lämmitys on kytketty pois päältä.

5.6 Koe 5: Kiinnitysvahojen vertailu

5.6.1 Kokeen 5 koejärjestely

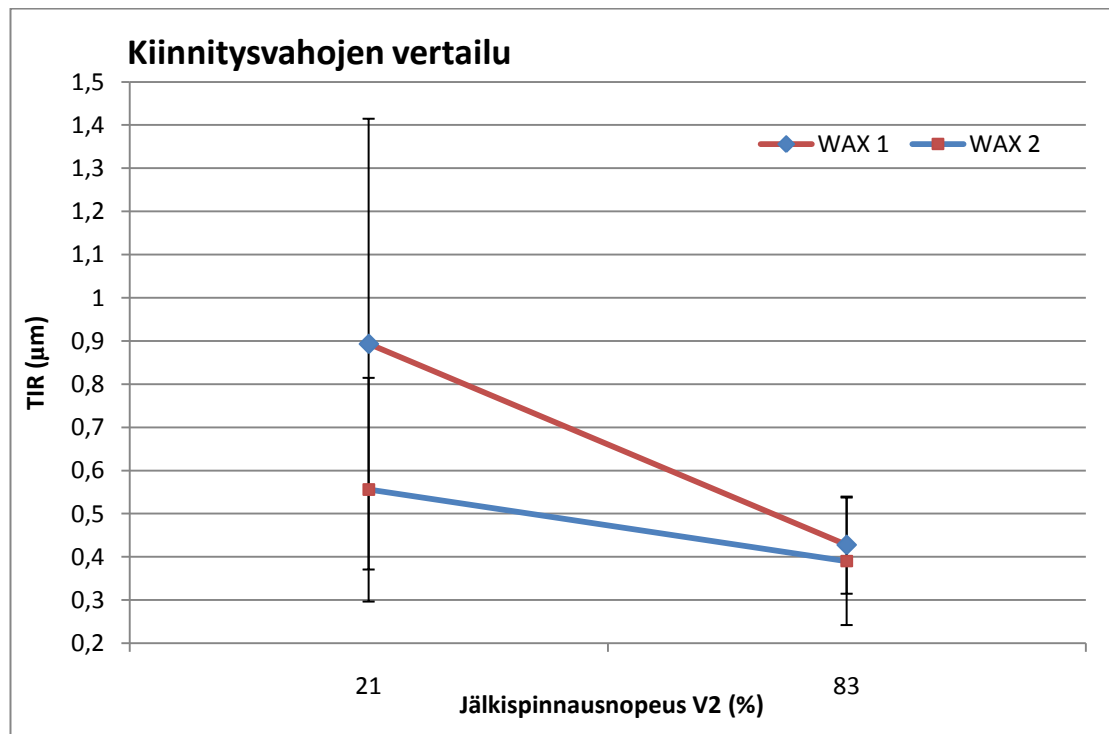
Kokeet 1, 2 ja 4 on tehty kiinnitysvahalla WAX 2, jonka hartsipitoisuus on 20 %. Tässä kokeessa on tutkittu WAX 2:n rinnalla myös vaha WAX 1, jonka hartsipitoisuus on 30 %. WAX 2:n viskositeetti on täten WAX 1:n viskositeettia pienempi. WAX 1:n ja WAX 2:n vaikutusta piikiekon tasomaisuuteen on vertailtu keskenään.

Ennen varsinaisia kokeita kiinnitettiin kiekkoja kolmelle kiillotusalustalle oletusvahalla WAX 1 käyttäen taulukossa 2 esitettyjä oletusparametreja. Tällöin saatiin referenssipiste, johon tasomaisuutta verrattiin. Kokeet tehtiin ensin WAX 1:llä, jonka jälkeen vaha vaihdettiin WAX 2:een. Lämpötilat pidettiin varsinaisen kokeen aikana pois päältä.

Koska kokeessa 4 saavutettiin hyvä tasomaisuus sekä 21 %:n että 83 %:n loppuspinnausnopeudella, päätettiin tässä kokeessa keskittyä näihin kahteen nopeuteen. Kustakin nopeudesta tehtiin toistomittaus. Kokeen 5 koesuunnitelma on liitteessä 6.

5.6.2 Kokeen 5 tulokset

Interferogrammit analysoitiin OpenFringe-ohjelmistolla. Kuviosta 49 nähdään, kuinka vahat käyttäytyvät matalalla ja korkealla jälkispinnausnopeudella. Tulosten mukaan parempi tasomaisuus saavutetaan kummallakin vahalla, kun spinnerin pyörimisnopeus on suuri (83 %).



Kuvio 49. Kahden eri kiinnitysvahan ja pyörimisnopeuden vaikutus piikiekon tasomaisuuteen.

Kuviosta 49 nähdään, että WAX 2:lla saavutetaan parempi tasomaisuus, etenkin hitaalla pyörimisnopeudella. Korkealla 83 %:n loppuspinnausnopeudella erot tasomaisuuden suhteen WAX 1:llä ja WAX 2:lla vähenevät. Kuvion mukaan tasomaisuudet WAX 1:n ja WAX 2:n välillä näyttäisivät risteävän korkealla pyörimisnopeudella. Risteämistä on tämän kokeen tulosten perusteella kuitenkin mahdotonta arvioida, sillä tasomaisuuden lineaarisuus spinnausnopeuden funktiona on epätodennäköistä. Todennäköisempää on,

että tulokset vain lähenevät toisiaan. Myös tämän kokeen tulosten mukaan tasomaisuuden hajonta pienenee merkittävästi suurilla pyörimisnopeuksilla.

Ennen varsinaista koetta oletusparametreilla kiinnitettyjen piikiekkojen tasomaisuudeksi (TIR) saatiin $0,61 \pm 0,30 \mu\text{m}$. Kokeessa saatu paras tulos on $0,39 \pm 0,15 \mu\text{m}$. Tämä saavutettiin WAX 2:lla loppuspinnausnopeuden ollessa 83 %. Kokeen 5 tulosten perusteella piikiekkojen tasomaisuutta voitaisiin siis parantaa vahakiinnityksen osalta noin 36 % ja keskihajontaa pienentää 53 %. Mikäli käytetään kuitenkin vahaa WAX 1, TIR-arvo paranee noin 29 % ja keskihajonta 62 %.

Lisäksi havaittiin, että oletusvahalla WAX 1 WA:n on oltava vähintään 1,35 s, jotta se riittää peittämään koko piikiekon. WAX 2:lla pienin mahdollinen WA oli vastaavasti 0,7 s. Vahalla WAX 2 voidaan vahankulutus lähes puolittaa.

6 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin, kuinka vahakiinnitys vaikuttaa piikiekon muotoon kiillotusprosessissa. Piikiekkojen tasomaisuuden mittaamista varten suunniteltiin ja rakennettiin Newton-interferometri. Rakennetun mittalaitteen huomattiin soveltuvan erinomaisesti piikiekkojen tasomaisuuden määrittämiseen ennen kiillotusta.

Vahakiinnityksen parametrien vaikutusta kiillotusalustaan kiinnitettyjen piikiekkojen muotoon tutkittiin viiden eri kokeen avulla. Työssä havaittiin, että suurin vaikutus piikiekon tasomaisuuteen on spinnerin nopealla jälkispinnausnopeudella v_2 . Piikiekkojen tasomaisuus paranee, kun pyörimisnopeutta v_2 kasvatetaan. Tasomaisuutta huomattavasti enemmän paranee tasomaisuuden keskihajonta korkeilla pyörimisnopeuksilla.

Piikiekkojen tasomaisuus (TIR) oletusarvoilla kiinnitetyillä kiekkoilla on $0,61 \pm 0,30 \mu\text{m}$. Keskihajonnan havaittiin olevan oletusparametreilla melko korkea. Kokeissa käytettiin kahta eri vahaa (WAX 1 ja WAX 2). Mikäli käytetään vahaa WAX 1, tasomaisuus (TIR) paranee oletusarvoilla saatuihin tasomaisuuksiin verrattuna noin 30 % kun jälkispinnausnopeus v_2 nostetaan oletusarvosta 30 % arvoon 83 %. Vastaavasti tasomaisuuden keskihajonta paranee tällöin jopa noin 60 %.

Mikäli piikiekkojen kiinnittämiseen käytetään vahaa WAX 2, TIR-arvo paranee oletusparametreilla saatuihin arvoihin nähden vähintään 36 % ja keskihajonta 50 %. Kokeiden tulosten perusteella voidaan todeta, että WAX 2 on vahakiinnityksessä piikiekon tasomaisuuden kannalta parempi kuin WAX 1. Eroavaisuudet tasomaisuuden suhteen kahden vahan välillä kuitenkin vähenevät suurilla jälkispinnausnopeuksilla. Lisäksi havaittiin, että tasomaisuus jälkispinnausnopeudella 60 % tuottaa huonoja tuloksia ja kyseistä v_2 :n arvoa tulisi välttää. Havaittiin myös, että vahapinta on saavuttanut lähes sen lopullisen profiilin kahden sekunnin kuluttua spinnauksen aloituksesta.

Koska WAX 2:n viskositeetti on oletusvahan WAX 1:n viskositeettia pienempi, riittää pienempi vahamäärä peittämään koko piikiekon tasaisesti. Käyttämällä vahaa WAX 2 voidaan vahankulutus, ja näin myös vahan kustannukset lähes puolittaa oletusvahaan nähden. Tuotantomittakaavassa tämä tarkoittaisi huomattavaa kustannussäästöä.

Vahakiinnitysjärjestelmän eri osien välisillä lämpötilaeroilla havaittiin olevan suuri merkitys piikiekkojen tasomaisuuteen. Lämpötilaerojen havaittiin aiheuttavan poikkeamia kiinnitysvahan kerrospaksuuteen ja siten myös kiinnityksen jälkeiseen tasomaisuuteen. Esi- ja jälkilämmitin vahakiinnityksessä todettiin kiinnityksen kannalta tarpeettomaksi. Spinnerin lämmitys saa aikaan piikiekon keskelle paksumman vahakerroksen, joka näkyy kiekon tasomaisuudessa. Lämpötilojen vaikutusta adheesioon ei kuitenkaan tutkittu.

Myös kiinnitysvarren paineen vaikutusta tasomaisuuteen tutkittiin. Havaittiin, että parempi piikiekon tasomaisuus saavutetaan, kun kiekkoa painetaan voimakkaammin kiillotusalustaa vasten. Kiinnitysvarren pyöreä piikiekon läpimittaa pienempi PEEK-alusta ei aiheuta merkittävää virhettä tasomaisuuteen.

Vakuumpressi havaittiin välttämättömäksi. Ilman prässä piikiekon ja kiillotusalustan väliin jää kiekon keskelle 1,5 μm :n kohouma. Kohouman alkuperä ei kokeissa kuitenkaan selvinnyt. Lisäksi vahakerroksessa havaittiin paikoin melko suuria noin 1 μm :n paksuisia kaasukuplia. Nämä kuplat hävisivät vakuumpressäyksessä.

Lasermerkinnän havaittiin aiheuttavan tasomaisuusvirhettä. Laserin jäljen reunat ovat kohonneet. Kun lasermerkintä painetaan kiillotusalustaa vasten, sen reunat estävät piikiekon pintaa koskemasta kiillotusalustaan. Tällöin piikiekon reuna jää lasermerkinnän alueelta koholle noin 1 μm :n verran. Tämä tulee huomioida kiillotuksessa, sillä kiillotuksen jälkeen tulee kiekko tällöin merkinnän kohdalta ohuemmaksi.

Työssä onnistuttiin hyvin kartoittamaan merkittävimmät piikiekon tasomaisuuteen vaikuttavat parametrit sekä parametrien vaikutuksien suuruudet. Lisäksi onnistuttiin määrittämään uudet asetukset, joilla piikiekkojen tasomaisuutta saatiin parannettua. Tämän lisäksi löydettiin myös tasomaisuuteen heikentävästi vaikuttavia ilmiöitä jotka voidaan tuotannossa ottaa jatkossa huomioon.

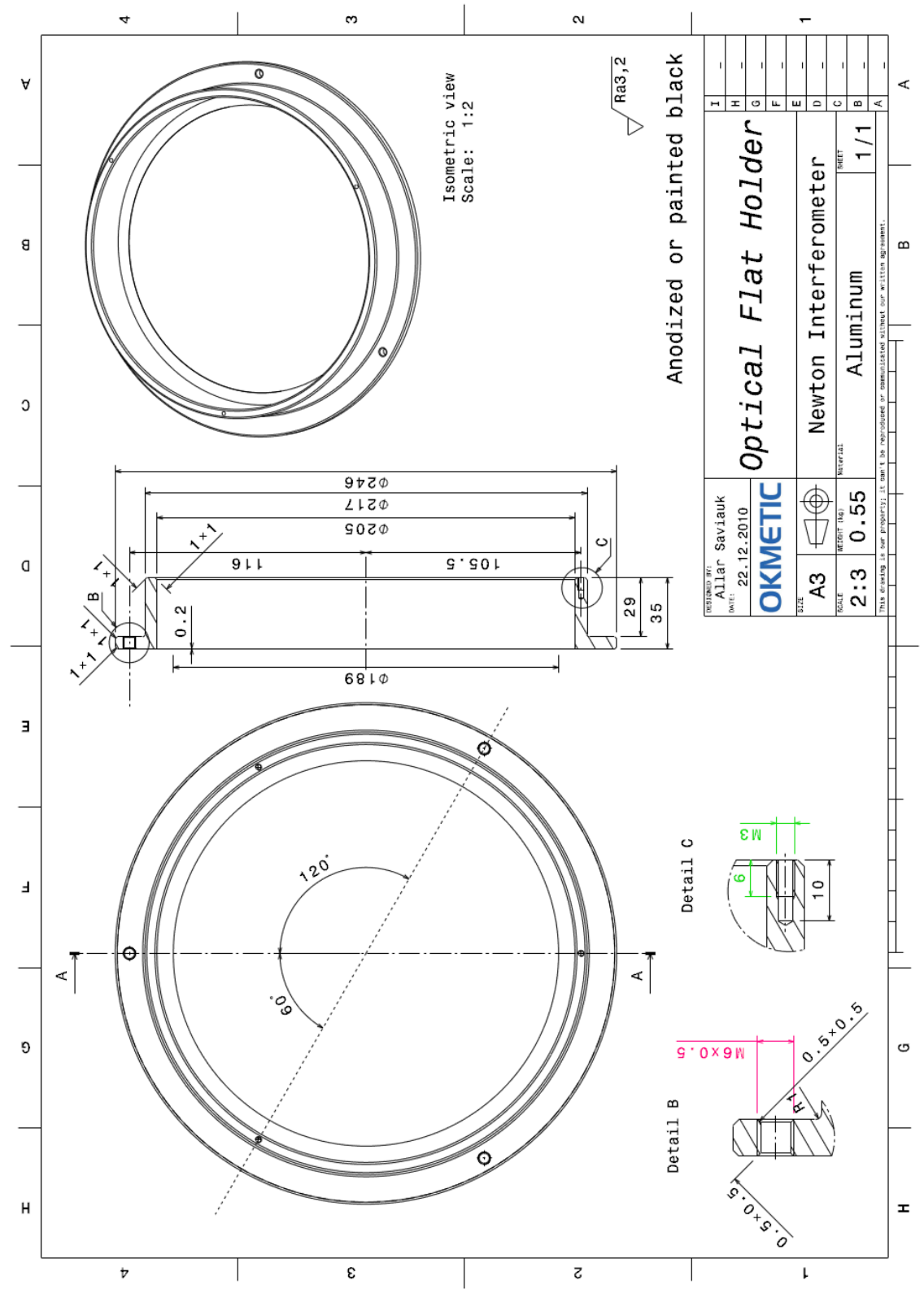
Tässä työssä tutkittiin vain vahakiinnityksen parametrien vaikutusta piikiekon muotoon sen jälkeen, kun piikiekot oli kiinnitetty kiillotusalustaan. Itse kiillotusta ei tässä työssä ole otettu huomioon. Tällöin ei myöskään tiedetä, kuinka hyväksi havaitut parametrit vaikuttavat kiillotuksen jälkeiseen tasomaisuuteen. Ennen kuin uusia parametreja voidaan siirtää tuotantoon, tulee varmistaa lisäkokein, että adheesio on riittävän suuri pitämään piikiekot kiinni kiillotusalustassaan kiillotuksen aikana.

Lähteet

- 1 Dandapat, B. S. et al., Effects of air-flow and evaporation on the development of thin liquid film over a rotating annular disk, *International Journal of Non-Linear Mechanics* 44 (2009), s. 877 - 882.
- 2 Lawrence, C. J. et al., Spin coating of non-Newtonian fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 39 (1991), s. 138 - 139.
- 3 Ruiz, G. et al., Absolute Calibration of a Fizeau Interferometer with a Liquid Plane, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico-UNAM. *XVIII IM-EKO World Congress (2006)*, s. 1-4.
- 4 Chan, H. P. et al., Effect of Spin Coating on the Interfacial Adhesion of Epoxy Adhesive on Silicon Substrate for the Fabrication of Polymer Optical Waveguide, City University of Hong Kong: Optoelectronics Research Center & Department of Electronic Engineering, *Electronic Components and Technology Conference (2004)*, s. 1902.
- 5 Wyant, J. C. et al., Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology. *Applied Optics and Optical Engineering Vol. XI (1992)*, s. 29.
- 6 Jung, J. et al., Development of a new simulation model of spin coating process and its application to optimize the 450 mm wafer coating process. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010), s. 1712 – 1717.
- 7 Petersen , Kurt E., Silicon as a Mechanical Material, *Proceedings of the IEEE Vol. 70 NO. 5 (1982)*, s. 420 - 469.
- 8 Hopcroft, M. A. et al., What is the Young's Modulus of Silicon?. *Journal of Microelectromechanical systems Vol 19 No. 2 (2010)*, s. 229 - 238.
- 9 Malacara, Daniel, *Optical Shop Testing*, third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Inc. 2007.
- 10 Newport, Differential Micrometer DM 11-5 [verkkodokumentti, viitattu 6.4.2011]. Manual Positioning > Manual Actuators > Differential Micrometers, DM Series >DM11-5. Saatavissa: <http://www.newport.com/>.
- 11 OSRAM, Information of Product [verkkodokumentti, viitattu 6.4.2011]. PROFESSIONAL PRODUCTS > Lamps > High Intensity Discharge lamps > Products > SOX > Data sheets > SOX Plus 35 > Further information and pictures available here. Saatavissa: http://www.osram.com/osram_com/.
- 12 OSRAM, Product Overview [verkkodokumentti, viitattu 6.4.2011]. PROFESSIONAL PRODUCTS > Lamps > High Intensity Discharge lamps > Products > SOX. Saatavissa: http://www.osram.com/osram_com/.
- 13 Kim, S. et al., Suspension Mechanics for Particle Contamination Control, *Chemical Engineering Science Vol. 43. No. 5 (1988)*, s. 991 – 1016.

- 14 SCHOTT, *TIE-31: Mechanical and thermal properties of optical glass*, v2 (2004), 10 [verkkodokumentti, viitattu 3.1.2011]. Saatavissa: http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/schott_tie-31_mechanical_and_thermal_properties_of_optical_glass_july_2004_en.pdf
- 15 Seikku, Kai, Toimitusjohtajan katsaus [verkkodokumentti, viitattu 6.4.2011]. Okmetic Oyj, *Yhtiökokous 7.4.2010*. Saatavissa: http://www.okmetic.com/www/page/presentation_materials.
- 16 Shiraishi, Satomi, *Shiraishi's Research* [verkkodokumentti, viitattu 4.4.2011]. Saatavissa: <http://hep.uchicago.edu/~satomis/research/>
- 17 Kuen Ho, W. et al., On control of resist film uniformity in the microlithography process. *Control Engineering Practice* 12 (2004), s. 885.

Optical Flat Holder



Anodized or painted black

Optical Flat Holder

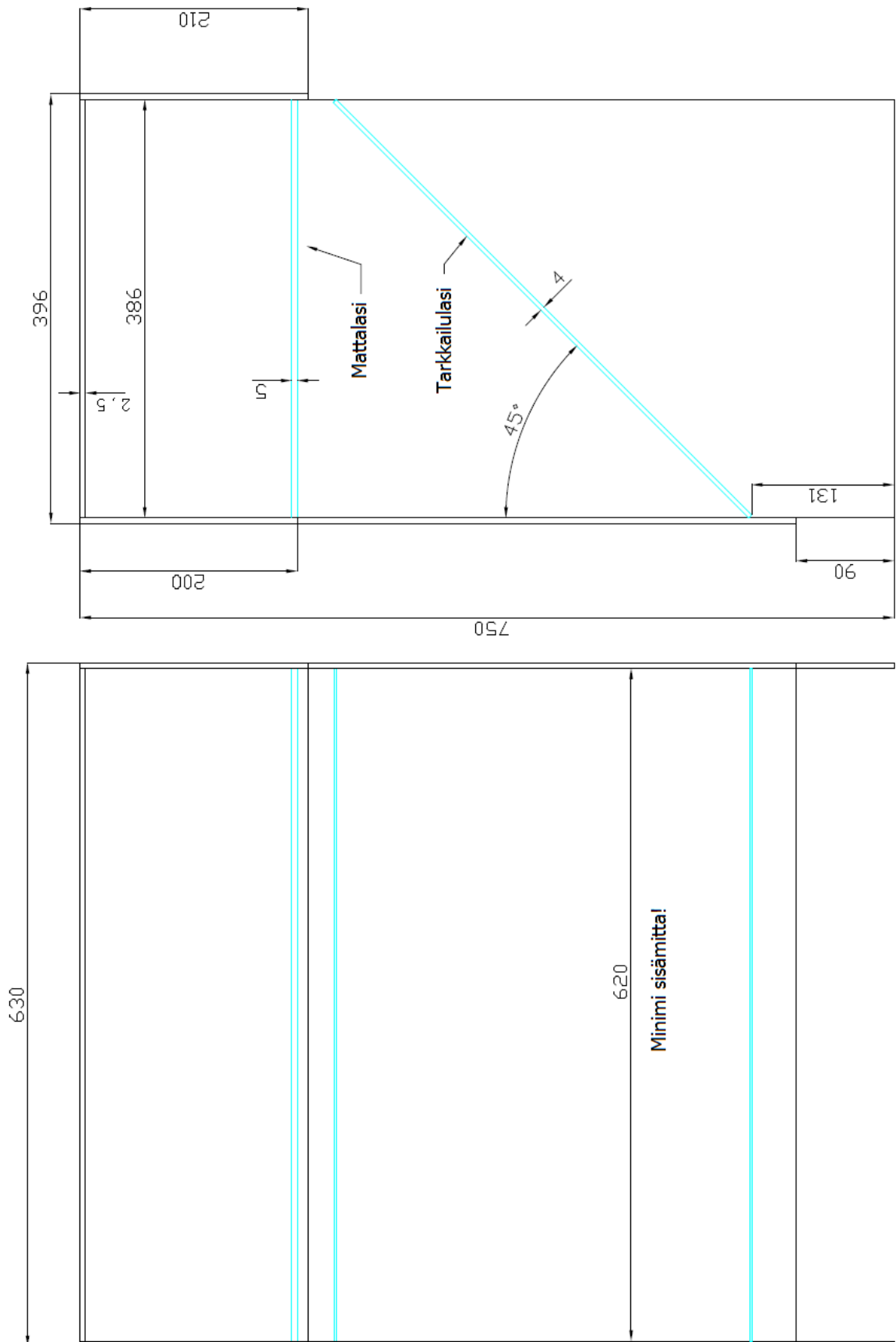
DESIGNED BY:	Alltar Saviauk
DATE:	22.12.2010
OKMETIC	
SIZE:	A3
PROJ. TAG:	NEWFLAT
SCALE:	2:3
SCALE:	0.55

Newton Interferometer	
Aluminum	
SHEET	1/1

This drawing is our property; it can't be reproduced or disseminated without our written agreement.

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

Newton-interferometrin päämitat



Experiment Data Sheet 1

Experiment Name	First Parameter Screening		DONE
Experiment No	DOE1		
Date of Exp	31.1.2011		
Wafer Quantity	96 (48 measured)		

V2	High Speed Velocity
WA	Wax Amount
HBT	Hot Bake Time
Chamber	Is chamber used or not

Exp No	Carrier No	Exp Name	Run Order	V2 (%)	WA (s)	HBT (°C)	Chamber (YES/NO)	Comments
6	408	N3	1	7	1.5	0.1	NO	Reunoilla vahaa, 8. kiekko jäi lämmittimeen
9	376	N1	2	7	0.5	0.1	YES	1. ja 7. kiekko jäi lämmittimeen
3	412	N2	3	83	0.5	0.1	NO	8. kiekko jäi lämmittimeen
1	409	N4	4	83	1.5	0.1	YES	2. ja 7 kiekko jäi lämmittimeen
7	402	N9	5	45	1.0	15	YES	7. kiekko jäi lämmittimeen
10	415	N10	6	45	1.0	15	YES	7. kiekko jäi lämmittimeen
5	422	N11	7	45	1.0	15	NO	7. kiekko jäi lämmittimeen, 8. kiekko 30s
11	372	N6	8	83	0.5	30	YES	1. kiekko jäi lämmittimeen
8	370	N7	9	7	1.5	30	YES	7. kiekko jäi lämmittimeen
2	324	N5	10	7	0.5	30	NO	
4	414	N8	11	83	1.5	30	NO	1. kiekko jäi lämmittimeen, NW
12	427	N12	12	7	1.5	0.1	NO	

Experiment Data Sheet 2

Experiment Name	3 Parameter Optimization	
Experiment No	DOE2	DONE
Date of Exp	22.2.2011	
Wafer Quantity	128 (64 measured)	

V2	High Speed Velocity
WA	Wax Amount
HBT	Hot Bake Time

Exp No	Carrier	Exp Name	Run Order	V2	WA	HBT	Comments
14	375	N14	1	58.15	1	10.05	Teflon-pala likainen
2	402	N2	2	83	0.5	10.05	
15	368	N15	3	58.15	1	10.05	
3	343	N3	4	33.3	1.5	10.05	Spiraalimainen vahakuvio
1	413	N1	5	33.3	0.5	10.05	
10	406	N10	6	58.15	1.5	0.1	
8	416	N8	7	83	1	20	
7	407	N7	8	33.3	1	20	
4	429	N4	9	83	1.5	10.05	Epätasainen vaha
6	365	N6	10	83	1	0.1	
13	378	N13	11	58.15	1	10.05	
5	366	N5	12	33.3	1	0.1	
9	361	N9	13	58.15	0.5	0.1	
11	334	N11	14	58.15	0.5	20	
12	410	N12	15	58.15	1.5	20	
14	411	N16	16	58.15	1	10.05	

Experiment Data Sheet 3

Experiment Name	High Speed Velocity and Bonding Arm Pressure		Done
Experiment No	DOE3		
Date of Exp	10.3.2011		
Wafer Quantity	80 (36 measured)		

V2	High Speed Velocity
BA	Bonding Arm Pressure

Carrier No.	Exp Name	Run Order	V2 (%)	BA (MPa)	Comments
380	N1	1	63	0.2	Juomuja vahapinnassa
405	N3	3	83	0.2	
409	N4	4	42	0.2	
413	N2	6	21	0.2	$T_0=3$ s $T_3=2,3$ s
345	N6	9	63	0.2	Heikompi ympyrä
363	N9	2	63	0.05	$T_0=3,7$ s $T_3=3$ s, heikko tsugin jälki
410	N5	5	21	0.05	$T_0=4,7$ s $T_3=4$ s $T_1=4$ s
408	N8	7	83	0.05	
411	N7	8	42	0.05	

Experiment Data Sheet 4

Experiment Name	Comparison Test	
Experiment No	DOE4	DONE
Date of Exp	18.3.2011	
Wafer Quantity	88 (44 measured)	

V2	High Speed Velocity
Wax	Wax Type

Carrier No.	Run Order	V2	Wax	Comments
427	1	30	WAX 1	HBT ON, vakio parametrit
354	2	30	WAX 1	HBT OFF, vakio parametrit
353	3	30	WAX 1	HBT OFF, vakio parametrit
370	4	83	WAX 1	HBT OFF
402	5	21	WAX 1	HBT OFF
406	6	83	WAX 1	HBT OFF
349	7	21	WAX 1	HBT OFF
345	8	21	WAX 2	HBT OFF
375	9	83	WAX 2	HBT OFF
377	10	21	WAX 2	HBT OFF
409	11	83	WAX 2	HBT OFF