



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Eero Varpula

# Optisen profilometrin mittauskyvykkyys- den selvittäminen

## MEMS-pohjaisten piikiekkojen mittaukset

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

27.5.2019

|  |   |
|--|---|
| Tekijä<br>Otsikko<br>Sivumäärä<br>Aika   | Eero Varpula<br>Optisen profirometrin mittauskävykkyyden selvittäminen<br>MEMS pohjaisten piikiekköjen mittaukset<br>46 sivua + 4 liitettä<br>27.5.2019 |
| Tutkinto   | insinööri (AMK)   |
| Tutkinto-ohjelma   | Sähkö- ja automaatiotekniikka   |
| Ammatillinen pääaine   | Automaatiotekniikka   |
| Ohjaajat   | lehtori Markku Inkinen<br>prosessilaadun esimies Kimmo Haring   |
| <p>Työ toteutettiin Murata Electronics Oy:n (MFI) toimeksiantona. Työn tavoitteena oli selvittää MFI:llä käytössä olevan optisen profirometrin mittauskävykkyyden ja vertailla tuloksia muihin käytössä oleviin mittalaitteisiin kuten optiseen reflektometriin, CD-mittariin (Critical Dimensions) ja pyyhkäisyelektronimikroskooppiin. Erityisen kiinnostuneita oltiin laitteen kävykkyydestä mitata HAR-plasmaetsattuja (High Aspect Ratio) kapeita ja syviä piuria.</p> <p>Mittattavat urat muodostettiin piistä valmistetuille testikiekoille hyödyntäen MFI:n anturielementtivalmistuksen MEMS-prosesseja (Micro Electro Mechanical Systems). Testikiekköjen pohjana käytettiin erään jo olemassa olevan tuotteen rajattua valmistuskokonaisuutta. Varsinaiset mittaukset suoritettiin testikiekköjen valmistusvuon eri vaiheissa.</p> <p>Oksidikalvon mittaustuloksista on havaittavissa, että profirometrin ja vertailukohteena olevan reflektometrin välillä on hyvin pieni ero keskenään (0,2–1,2 nm). Urien leveyden mittausta puolestaan osoitti, että profirometrin ja vertailukohteena olevan CD-mittarin välillä esiintyy suuria eroja (n. 20–400 nm). Mittalaitteiden välinen ero on kuitenkin säädettävissä arviolta alle 100 nanometriin, mikäli urien syvyys on ennakkoon tiedossa. Urien syvyyden luotettava ja toistettava mittausta osoittautui erittäin haastavaksi, eikä täysin toimivaa ja luotettavaa mittaushjelmaa kyetty luomaan. Lupaavimmat ja toistettavimmat tulokset saatiin leveydeltään 4 µm:n ja syvyydeltään 55–59 µm:n urista.</p> <p>Urien leveyden lisäksi maskioksidin heijastavuus vaikutti oleellisesti mittaustuloksiin. Jatkokehityskohteena olisi selvittää, pystyttäisiinkö testikiekköjen maskioksidin paksuutta lisäämällä tai maskioksidi kokonaan poistamalla lisäämään mittauksen luotettavuutta ja syvyyttä.</p> <p>Työn tuloksia on tarkoitus hyödyntää plasmaetsauslaitteille suunnitellun HAR-monitorin kehityksessä. Tulevaisuudessa HAR-etsattavat rakenteet yltävät jopa 100 µm:n syvyyteen.</p> |   |
| Avainsanat   | MEMS, anturi, CD, profirometri, reflektometri, SEM  |

|   |  |
|---|--|
| Author<br>Title<br>Number of Pages<br>Date  | Eero Varpula<br>Optical Profilometer's Measurement Capability Analysis:<br>Measurements of MEMS Based Silicon Wafers<br>46 pages + 4 appendices<br>27 May 2019 |
| Degree  | Bachelor of Engineering  |
| Degree Programme  | Electrical and Automation Engineering  |
| Professional Major  | Automation Engineering   |
| Instructors   | Markku Inkinen, Senior Lecturer<br>Kimmo Haring, Manager, Process Quality  |
| <p>The work was commissioned by Murata Electronics Oy (MFI). The goal of the work was to determine the measurement capability of the optical profilometer used by the MFI and to compare the results with other existing measuring devices, such as an optical reflectometer, a CD-meter (Critical Dimensions) and a scanning electron microscope. Of particular interest were the ability to measure narrow and deep HAR-plasma etched (High Aspect Ratio) trenches.</p> <p>The trenches to be measured were formed on silicon test wafers by utilizing the MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sensor element manufacturing processes used by the MFI. The test wafers were based on a limited manufacturing entity of an existing product. The actual measurements were performed at different stages of the test wafers manufacturing flow.</p> <p>From the measurement results of the oxide film, it can be seen that there is a very small difference between the profilometer and the reference reflectometer (0.2-1.3 nm). Measuring the width of the trenches, in turn, showed that there are large differences between the profilometer and the reference CD-meter (about 20-400 nm). However, the difference between the measuring devices can be adjusted approximately to less than 100 nanometers if the depth of the trenches is known in advance. Reliable and repeatable measurement of the depth of the trenches proved to be very challenging, and a fully functional and reliable measurement program could not be created. The most promising and reproducible results were 4 µm in width and 55-59 µm in depth.</p> <p>In addition to the width of the trenches, the reflectance of the mask oxide significantly affected the measurement results. To increase the reliability and depth of the measurement, it is to be studied if increasing the mask oxide thickness or completely removing it would lead to more promising results.</p> <p>The results of this thesis are to be utilized in the development of HAR-monitor designed for plasma etching equipment. In the future, HAR-plasma etched structures will reach up to 100 µm in depth.</p> |  |
| Keywords  | MEMS, sensor, CD, profilometer, SEM  |

## Sisällys

### Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto  | 1  |
| 2     | Murata Electronics Oy   | 2  |
| 3     | MEMS-teknologia anturielementtivalmistuksessa                 | 5  |
| 3.1   | Ohutkalvojen kasvatusmenetelmät ja märkäetsausmenetelmät      | 5  |
| 3.2   | Litografia  | 7  |
| 3.3   | Plasmaetsaus  | 9  |
| 4     | Mittalaitteiden esittely                                      | 12 |
| 4.1   | Ellipsometri  | 12 |
| 4.2   | Optinen CD-mittari  | 14 |
| 4.3   | Pyyhkäisyelektronimikroskooppi                                | 16 |
| 4.4   | Optinen profilometri  | 18 |
| 4.4.1 | Konfokaalimikroskooppi + Valkoisen valon interferometri       | 18 |
| 4.4.2 | Kromaattisen valkoisen valon sensori                          | 20 |
| 4.4.3 | IR-kalvonpaksuussensori                                       | 21 |
| 4.4.4 | Optinen reflektometri   | 22 |
| 4.4.5 | Valkoisen valon interferometri rinnakkaisella valonlähteellä  | 24 |
| 5     | Optisen profilometrin mittauskäytännön selvittäminen          | 25 |
| 5.1   | Lähtötilanne  | 25 |
| 5.2   | Testikiekkojen valmistus                                      | 25 |
| 5.2.1 | Testikiekkovuon mallintaminen valmistuksenohjausjärjestelmään | 25 |
| 5.2.2 | Testikiekkojen prosessointi                                   | 26 |
| 5.3   | Testikiekkojen mittaukset                                     | 29 |
| 5.3.1 | CD-mittaukset   | 29 |
| 5.3.2 | Ohutkalvojen mittaukset                                       | 33 |
| 5.3.3 | Profiilin mittaukset  | 37 |
| 5.3.4 | SEM-mittaukset  | 43 |
| 6     | Yhteenveto  | 44 |

Liitteet

Liite 1. CD-mittaustulokset

Liite 2. Ohutkalvojen mittaustulokset

Liite 3. Leveyden mittaustulokset profilometrillä

Liite 4. Syvyyden mittaustulokset profilometrillä

## Lyhenteet

|          |  |
|----------|--|
| ARDE     | Aspect Ratio Dependent Etching. Aspektisuhteesta riippuvainen etsaus.  |
| ASIC     | Application Specific Integrated Circuit. MEMS-anturissa tehtävänä on muuttaa anturielementin havaitsema liike sähköiseksi signaaliksi. |
| CCD      | Charge-Coupled Device. Valoherkkä kenno.   |
| CD       | Critical Dimension. Viivanleveyden mittauksesta käytetty termi.  |
| CFM (DT) | Confocal Microscope (Dual Technology). Konfokaalimikroskooppi. Yhdistelmäsensori.  |
| CSOI     | Cavity Silicon On Insulator. Piikiekkomateriaali.  |
| CVD      | Chemical Vapor Deposition. Kemiallinen kaasufaasikasvatus.   |
| CWL      | Chromatic White Light. Kromaattisen valkoisen valon sensoria.  |
| DLC      | Diamond Like Carbon. Timantinkaltainen hiili.  |
| DRIE     | Deep Reactive Ion Etching. Syvien piurien etsaukseen käytetty menetelmä.   |
| FRT      | Fries Research & Technology. Optisen profilometrin valmistaja.   |
| FTR      | Film Thickness Reflectometer. Kalvonpaksuussensori.  |
| HAR      | High Aspect Ratio. Korkean aspektisuhteen etsausmenetelmä.   |
| ICP      | Inductively Coupled Plasma. Induktiivisesti kytketty plasma.   |
| IRT      | Infrared Thickness. Infrapunasensori.  |

|        |   |
|--------|---|
| LPCVD  | Low Pressure Chemical Vapor Deposition. Alhaisen paineen kaasufaasikasvatus.                                  |
| MEMS   | Micro Electro Mechanical Systems. Mikroelektromekaaninen järjestelmä.   |
| MES    | Manufacturing Execution System. Valmistuksenohjausjärjestelmä.  |
| MFI    | Murata Electronics Finland. Murata Electronics Oy.  |
| NIR    | Near-Infrared. Lähi-infrapuna.  |
| PECVD  | Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. Plasma avustettu kemiallinen kaasufaasikasvatus.                   |
| PVD    | Physical Vapor Deposition. Fysikaalinen kaasufaasikasvatus.   |
| RIE    | Reactive Ion Etching. Reaktiivinen ionietsaus.  |
| RMSE   | Root-Mean-Square Error. Luku, joka kertoo miten hyvin mitatut arvot sopivat laskettuun malliin.               |
| ROI    | Region of Interest. Kiinnostuksen alue.   |
| SEM    | Scanning Electron Microscope. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi.   |
| SOI    | Silicon on Insulator. Piikiekkomateriaali.  |
| WLI FL | White Light Interferometer with Focused Light. Valkoisen valon interferometri fokusoidulla valolla.           |
| WLI PL | White Light Interferometer with Parallel Light. Valkoisen valon interferometri rinnakkaisella valonlähteellä. |

## 1 Johdanto

Insinööriyön aiheena on optisen profilometrin mittauskävykkyyden selvittäminen. Työn päätavoitteena on selvittää, kuinka kapeita ja syviä etsausuria mittalaitteella pystytään luotettavasti mittaamaan ja vertailemaan mittaustuloksia muihin tuotannossa oleviin mittalaitteisiin, kuten optiseen reflektometriin, CD-mittariin (Critical Dimension) ja pyyhkäiselektronimikroskooppiin (SEM, Scanning Electron Microscope). Mittauskävykkyyden selvittämiseksi oli tarkoitus luoda sopivan mitattavan profiilin omaava testikiekko ja jatkossa testata, sopiiko kyseinen testikiekko eri plasmaetsauslaitteilla esiintyvän vaihtelun monitorointiin.

Työ toteutettiin Murata Electronics Oy:n (MFI) toimeksiantona. Yritys toimii Vantaan Martinlaaksossa, missä valmistetaan paine-, kiihtyvyy-, kallistus- ja kulmanopeusantureita. Antureiden valmistus on jaettu kolmeen erilliseen kokonaisuuteen: anturielementtivalmistukseen, komponenttivalmistukseen ja testaukseen. Tässä insinööriyössä käsiteltävät asiat liittyvät anturielementtivalmistuksen prosesseihin. Anturielementtivalmistuksen prosessit hyödyntävät MEMS-teknologiaa (Micro Electro Mechanical Systems), mikä tarkoittaa, että valmistettavat rakenteet ja niiden tarkkuusvaatimukset ovat mikroskooppisen pieniä.

MFI:llä käytössä olevan HAR-plasmaetsausprosessin (High Aspect Ratio) laadun monitorointiin ei ole toistaiseksi käytössä tehokasta mittaria, eikä optisen profilometrin mittauskävykkyyden rajoja ole vielä selvitetty. Etsausprosessissa tapahtuvat pienet muutokset havaitaan monesti vasta valmiin anturielementin sähköisessä testauksessa. Insinööriyön tarkoituksena oli luoda mittausten menetelmä, jolla saadaan reaaliaikaisempaa ja käyvämpää tietoa HAR-etsausprosessin suorituskyvystä.

Työn teoriaosuudessa käsitellään MEMS-teknologiaa MFI:llä käytössä olevien prosessien näkökulmasta ja esitellään tarkemmin työn kannalta keskeisimpiä prosesseja kuten plasmaetsausta, optista litografiaa ja mittausta.



## 2 Murata Electronics Oy

Murata Electronics Oy on osa japanilaista Murata Manufacturing -konsernia, joka työllistää maailmanlaajuisesti yli 75 000 työntekijää. Suomessa näistä työskentelee noin tuhat henkilöä. Murata on maailman johtava elektroniikkakomponenttien ja ratkaisujen suunnittelija ja valmistaja. [1.]

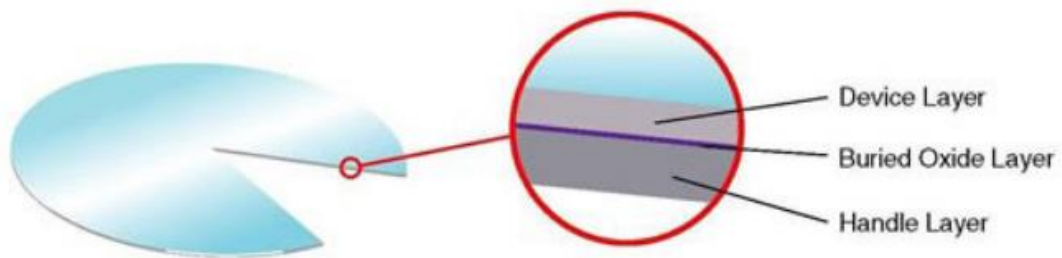
Murata Electronics Oy on erikoistunut inertiaalisten liikesensorien suunnitteluun, kehitykseen ja valmistukseen. Sensorit perustuvat 3D MEMS -teknologiaan ja niiden valmistus tapahtuu uusimman teknologian mukaisissa puhdistiloissa (ISO 4-8). [1.] Puhdistilalla tarkoitetaan kontrolloitua tilaa, missä ympäristö pyritään pitämään mahdollisimman puhtaana. Puhdistilassa kontrolloidaan lämpötilaa, kosteutta ja ilmanpainetta. Mitä pienempi ISO-luokitus on, sitä puhtaampi on tila. [2.]

Yritys on kasvanut perustamisestaan 1991 lähtien yhdeksi autoteollisuuden suurimmista anturien toimittajista. Yritys toimi vuosina 1991–2002 nimellä VTI Hamlin ja vuosina 2002–2012 nimellä VTI Technologies. Vuonna 2012 Murata -konserni hankki yrityksen ja nykyinen nimi otettiin käyttöön. Nykyään yrityksen tärkeimmät markkina-alueet ovat autoteollisuuden, terveysteknologian ja teollisuuden erilaiset anturiratkaisut. [1.]

MFI:n tuotevalikoimaan kuuluu erilaisia paine-, kallistus- ja kiihtyvyyssantureita sekä kulmanopeusantureita eli gyroskooppeja. Antureiden valmistus on jaettu kolmeen erilliseen kokonaisuuteen. Anturielementtivalmistuksessa valmistetaan varsinaiset liikkeen tunnistavat anturielementit. Kokoonpanossa kootaan anturielementit ja ASIC-piirit (Application Specific Integrated Circuit) anturikoteloon sekä lankabondataan komponenttien sähköiset kontaktit toisiinsa. Lopuksi testauksessa sähköisesti testataan ja kalibroidaan valmiit MEMS-anturit.

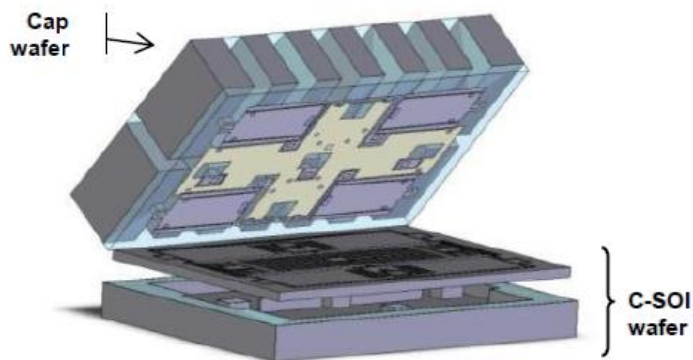
MFI:n uusimmat ja kehittyneimmät anturielementit valmistetaan CSOI-piikiekoille (Cavity Silicon on Insulator), jotka sisältävät sisäänrakennetut kaviteetit eli syvennykset. CSOI-kiekkojen käyttö nopeuttaa valmistusprosessia ja mahdollistaa moniulotteisten elementtirakenteiden valmistuksen. Kuvassa 1 on esitetty SOI-kiekkon rakenne, joka ei sisällä vielä kaviteetteja. SOI-kiekkon pinnalle (Device Layer) valmistetaan elementtien liikkuvat rakenteet ja pohjalle (Handle Layer) kaviteetit, jotka mahdollistavat rakenteiden vapaan

liikkeen. Välissä oleva ohut haudattu oksidikerros (Buried Oxide Layer) toimii eristeenä ja etsausvaiheiden pysäytyskerroksena.



Kuva 1. SOI-kiekon rakenne [3].

Kuvassa 2 on esitetty MFI:n kulmanopeuselementin rakenne. Elementti on valmistettu CSOI-kiekolle ja kansikiekolle (Capping Wafer), jotka ovat liitetty anodisesti bondaamalla yhteen. Kansikiekolle valmistetaan metalliset elektrodit ja sähköiset läpiviennit lasieristeiden väliin. Bondattua kiekkopakettia kutsutaan kootuksi kiekoksi, jolta valmistuu tuhansia yksittäisiä anturielementtejä. Vuositasolla MFI valmistaa yli 60 miljoonaa kapasitiivista anturielementtiä. [1.]



Kuva 2. MFI:n kulmanopeuselementin rakenne [1].

Tässä insinööriyössä tutkitaan CSOI-kiekkojen Device-kerrokseen plasmaetsaamalla muodostettujen kapeiden rakenteiden mittausten menetelmiä ja mahdollisuutta etsausprosessin kyvykkäämpään monitorointiin.

Kuvassa 3 on esitetty valmis MEMS-anturi. Avonaisen anturikotelon vasemmalla puolella on nähtävissä kulmanopeuselementti eli gyroskooppi, keskellä ASIC-piiri ja oikealla puolella kolmeakselinen kiihtyvyyselementti (X, Y, Z).



Kuva 3. Valmis MEMS-anturi [1].

### 3 MEMS-teknologia anturielementtivalmistuksessa

#### 3.1 Ohutkalvojen kasvatusmenetelmät ja märkäetsausmenetelmät

MEMS eli mikroelektromekaaniset systeemit otettiin ensimmäisen kerran terminä käyttöön 1980-luvun lopussa Yhdysvalloissa. Käsitteenä MEMS voi tarkoittaa hieman eri asioita valmistusprosessista riippuen. Valmistusmenetelmät ja laitteistot vaihtelevat myös prosessista riippuen. MFI:n anturielementtivalmistuksen MEMS-prosessi hyödyntää mikroelektronikkateollisuuden mallia ja puolijohdeteknologian valmistusprosesseja. [4, s. 287; 5, s. 2–3; 1.]

MFI:llä valmistettavien anturielementtien substraattina eli pohjamateriaalina käytetään 150 mm:n piikiekoja. Piikiekot soveltuvat valmistustekniikkansa, hintansa ja mekaanisten ominaisuuksiensa puolesta hyvin anturielementtien massatuotantoon. Eräitä tyypillisiä piikiekoille tehtäviä prosesseja ovat erilaiset kalvojen kasvatukset, etsaukset ja litografiset vaiheet. [4, s. 7.]

Taulukossa 1 esitellään anturielementeille kasvatettavia ohutkalvoja ja näiden kasvatusmenetelmiä. Kasvatusmenetelmiä on kahden tyyppisiä, joko kemialliseen reaktioon perustuvia (CVD, Chemical Vapor Deposition) tai fysikaaliseen reaktioon perustuvia (PVD, Physical Vapor Deposition) [6].

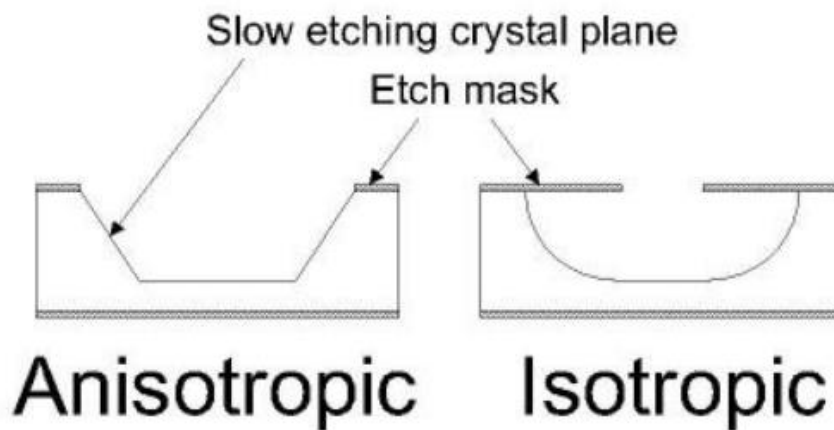
Taulukko 1. MFI:llä käytössä olevia ohutkalvojen kasvatusmenetelmiä [4].

| Kasvatettava kalvo                                      | Menetelmä  | Substraatin prosessilämpötila |
|---|--|-------------------------------|
| Terminen piioksidi                                      | Märkäoksidointi, kemiallinen kaasufaasikasvatus  | 800-1200 C°                   |
| Piioksidi, PECVD  | Plasma avusteinen kemiallinen kaasufaasikasvatus | 100-400 C°                    |
| Piinitridi, LPCVD                                       | Alhaisen paineen kemiallinen kaasufaasikasvatus  | 700-900 C°                    |
| Polypii, LPCVD  | Alhaisen paineen kemiallinen kaasufaasikasvatus  | 500-650 C°                    |
| Diamond Like Carbon, DLC<br>Timantinkaltainen hiili     | Plasma avusteinen kemiallinen kaasufaasikasvatus | 100-400 C°                    |
| Titaani, Ti   | Sputterointi, fysikaalinen kaasufaasikasvatus    | 250-500 C°                    |
| Titaani Volframi, TiW                                   |  |                               |
| Alumiini, Al  |  |                               |
| Alumiini, Al<br>Titaani, Ti<br>Platina, Pt<br>Kulta, Au | Höyrystys, fysikaalinen kaasufaasikasvatus       | 250-350 C°                    |

Tyypillisesti piikiekoille tehtävä mikrotyöstö jaotellaan joko substraattia poistaviin menetelmiin (engl. subtractive tai bulk) tai substraatille tehtäviin lisääviin menetelmiin (engl. additive tai surface). Valmistusprosessin kannalta on myös tärkeä ymmärtää vähintään seuraavien käsitteiden merkitys:

- Selektiivisyys eli valikoivuus on tärkeä ominaisuus etenkin syövytysprosesseissa. Tämä tarkoittaa, että maskikalvon syövytysnopeuden tulee olla pienempi kuin syövytettävän materiaalin.
- Anisotropia tarkoittaa suunnasta riippuvaista. Esimerkiksi yksikiteinen pii syöpyy eri nopeudella eri kidesuuntiin tietyillä kemikaaleilla.
- Isotropia on anisotropian vastakohta ja tarkoittaa suunnasta riippumatonta. Etsauksessa tämä tarkoittaa, että materiaali syöpyy samalla nopeudella joka suuntaan. [5; 7.]

Kuvassa 4 on esitetty anisotrooppisen ja isotrooppisen märkäetsauksen erot. Kuvassa näkyy myös selektiivinen etsausmaski (Etch mask) ja hitaasti syöpyvä kidesuunta (Slow etching crystal plane).



Kuva 4. Anisotrooppisen ja isotrooppisen märkäetsauksen erot [7].

Valmistusprosessin suurimmat haasteet muodostuvat ympäristön epäpuhtauksista eli partikkeleista. Etenkin rakennekiekkojen kapeat urat ja kaviteetit ovat hyvin herkkiä kätkemään partikkeleita sisäänsä. Pahimmassa tapauksessa testauksista läpi mennyt piilevä partikkeli pääsee liikahtamaan elementin sisällä, aiheuttaen valmiin elementin viikaantumisen. Tästä syystä kiekkojen oikeaoppinen käsittely ja prosessien partikkelimäärien säännöllinen seuranta on äärimmäisen tärkeää.

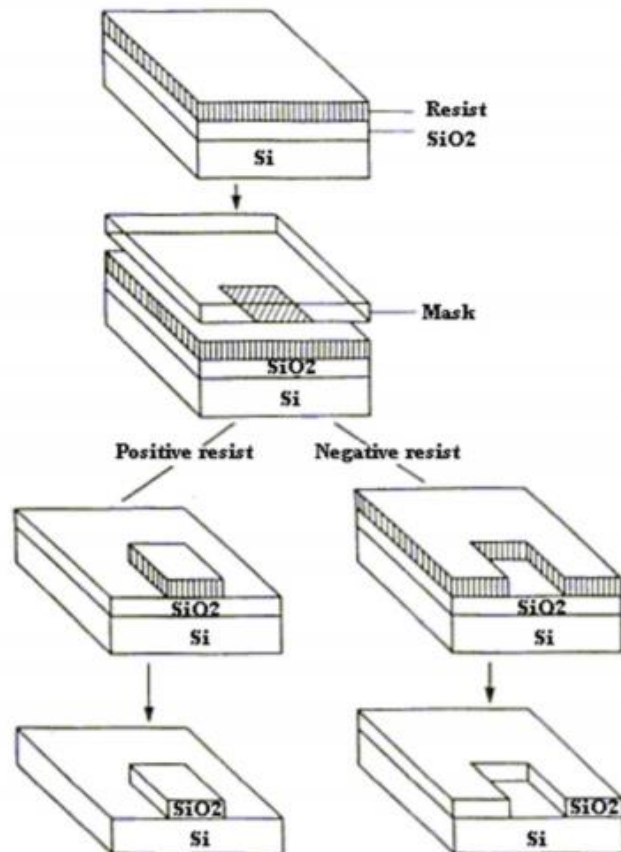
### 3.2 Litografia

Optisella litografialla tai lyhyemmin pelkällä litografialla tarkoitetaan menetelmää, missä haluttu kuviointi siirretään resistimaskin avulla piikiekon pinnalle. Litografia on anturielementtivalmistuksen ydin. Piikiekkojen tulee käydä litografiset vaiheet useita kertoja kerroksittain läpi, jotta halutut moniulotteiset rakenteet saadaan muodostettua.

Aluksi piikiekoille levitetään ohut kerros ultraviolettisäteilylle herkkää orgaanista polymeeriä, jota kutsutaan valoresistiksi tai lyhyemmin resistiksi. Seuraavaksi kromilla kuvioitu läpinäkyvä lasimaski asetetaan resistillä päällystetyn piikiekon päälle. Kuviointi siirretään resistille altistamalla piikiekko ultraviolettivalolle, jonka jälkeen piikiekko kehitetään samantyyppisesti kuin valokuvatkin. Kehitysprosessissa kehite liuottaa resistin valotetun tai valottamattoman alueen pois jättäen kiekolle halutun resistikuvion. [8.]

Käytettävä resisti voi olla joko positiivinen tai negatiivinen. UV-säteily aiheuttaa kemiallisen reaktion resistin valolle altistuneilla alueilla. Positiivinen resisti muuttuu helpommin liukenevaksi, kun taas negatiivinen resisti kovettuu. [8.]

Kuvassa 5 on esitetty litografiaprosessi ja piioksidin syövytys vaiheittain. Kuvassa piin (Si) ja resistin välissä oleva piioksidikalvo ( $\text{SiO}_2$ ) etsataan resistimaskin avulla pois, minkä jälkeen myös resistikalvo poistetaan.



Kuva 5. Litografiaprosessi ja piioksidin syövytys vaiheittain [8].

MFI:llä on käytössä positiivinen resisti eli valotetut alueet liukenevat kehityksessä pois. Resistiiä käytetään aina vain väliaikaisena maskina, koska resistin ominaisuudet eivät kestä esimerkiksi kasvatusprosesseille tyypillisiä korkeita lämpötiloja [9].

### 3.3 Plasmaetsaus

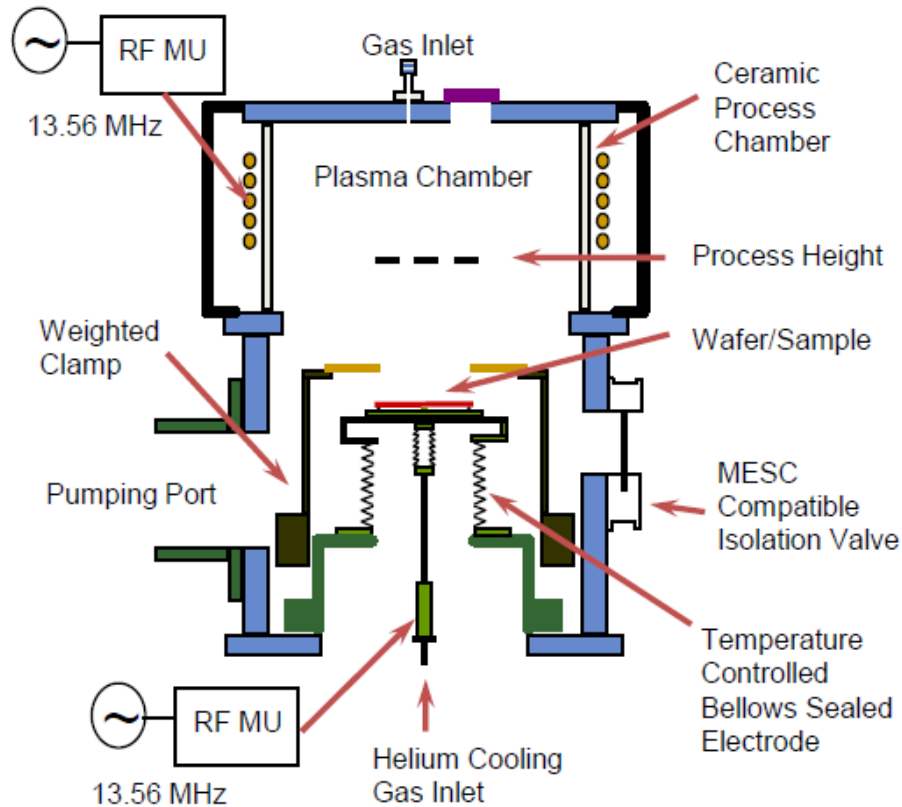
Plasmaetsaus kuuluu kuivaetsausmenetelmiin. ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching) on yksi tyypillisimmistä MEMS-teollisuudessa käytetyistä plasmaetsaustekniikoista. Tyypilliseen ICP-RIE -kammioon kuuluu seuraavanlaisia komponentteja ja toimintoja:

- kaasujen ohjauksjärjestelmä prosessikaasujen syöttämiseen
- mekaaninen pumppu reaktiokaasujen poistamiseksi
- turbopumppu korkean vakuumin muodostamiseksi
- induktiivisesti kytketty plasmalähde (ICP) voimakkaan RF-kentän ja plasman muodostamiseksi
- kapasitiivisesti kytketty plasmalähde plasmassa olevien ionien ja radikaalien ohjaamiseksi substraatin pintaan
- elektrostaattinen chuck tai mekaaniset pinnit piikiekon paikallaan pitämiseksi
- heliumjäähdytysjärjestelmä piikiekon takapinnan jäähdyttämiseksi
- optinen spektrometri etsauksen pysäytyskerrosten tunnistamiseksi.

RIE on yhdistelmä kemiallista ja fysikaalista etsausta. Prosessissa induktiivisesti kytketty plasmalähde muodostaa voimakkaan RF-kentän (13,56 MHz), joka sytyttää plasman kaasuseoksessa. Plasmassa syntynyt korkea radikaali- ja ionitiheys ohjataan kapasitiivisesti kytketyn plasmalähteen avulla substraatin pintaan. Radikaalit reagoivat substraatin pinnalla hajottaen pinnan atomeja. Tätä kutsutaan etsauksen kemialliseksi reaktioksi. Etsauksen fysikaalinen reaktio muodostuu ionien pommituksesta. Reaktiossa ionit ohjataan riittävän suurella kineettisellä energialla substraatin pintaan, jossa ne hajottavat pinnan kemiallisia sidoksia. Muodostuneet reaktiokaasut pumpataan lopuksi kammiosta pois.

Eri kaasuseosten avulla pystytään etsaamaan erilaisia materiaaleja. Etsauksen kemiallisen reaktion ollessa isotrooppista ja fysikaalisen reaktion anisotrooppista pystytään etsausprofiilia säätämään. Profiilia säädettäessä ja kontrolloitaessa on useiden prosessiparametrien yhteisvaikutus otettava huomioon. Säädettäviä parametreja ovat mm. RF-tehot, paine, lämpötila ja kaasuvirtaukset. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki ICP-RIE-kammion rakenteesta. [7; 10; 11.]



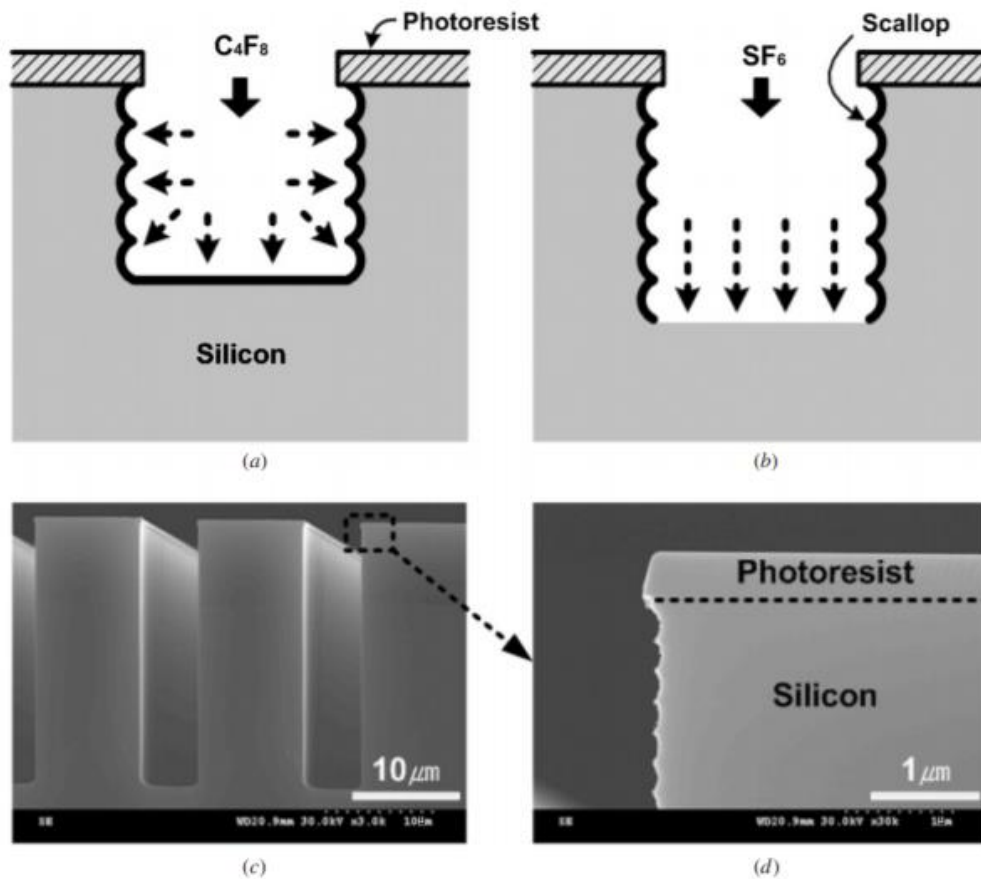


Kuva 6. ICP-RIE-kammion rakenne ja komponentit [11].

DRIE (Deep Reactive Ion Etching) on RIE-prosessin modifikaatio syvien piurien etsaamiseen. Menetelmä hyödyntää niin sanottua Bosch-prosessia, joka on saanut nimensä alkuperäisen patentin omistavan Robert Bosch -yrityksen mukaan. Prosessissa hyödynnetään vuorotellen vaihtelevia passiointi- ja etsaussyklejä:

- standardi isotrooppinen plasmaetsaus rikkiheksafluoridin ( $\text{SF}_6$ ) avulla
- kemiallisesti inertin teflonin kaltaisen passiointikerroksen kasvatus oktafluorisyklobutaanin ( $\text{C}_4\text{F}_8$ ) avulla.

Passiointivaiheen tarkoituksena on luoda suojakerros piikiekon pinnalle. Etsausurien pohjalle kasvanut suojakerros puhkeaa etsauksen pystysuoran ionipommituksen vaikutuksesta ja altistaa sen isotrooppiselle kemialliselle etsaukselle. Kemiallinen etsaus muodostaa säteeltään nanometriä luokkaa olevia kaarevia uria (scallop) sykleittäin. Syklejä toistetaan lukuisia kertoja halutun etsaussyvyyden saavuttamiseksi. Kuvassa 7 on esitetty syklisen etsausprosessin toimintaperiaate. [12; 13.]



Kuva 7. Syväetsauksen toimintaperiaate (Bosch-prosessi) [13].

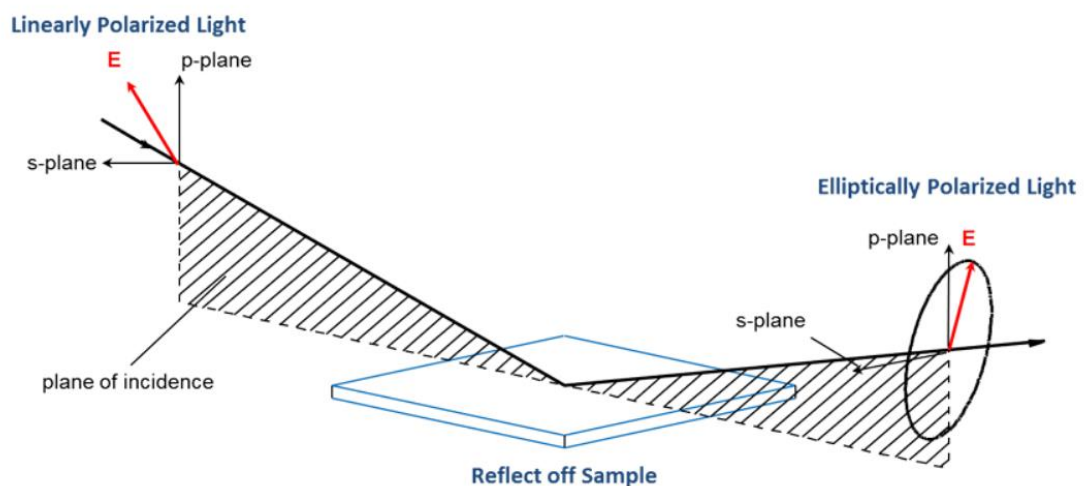
Menetelmän avulla pystytään etsaamaan hyvin kapeita ja syviä, korkean aspektisuhteen uria. Tämä tarkoittaa, että uran syvyys voi olla jopa kymmeniä kertoja suurempi kuin sen leveys. Mikäli kiekkoilla on kuitenkin erilevyisiä ja erimuotoisia kuvioita, etsautuvat nämä tyypillisesti eri nopeuksilla, muodostaen eri syvyisiä uria. Tätä kutsutaan ARDE-ilmiöksi (Aspect Ratio Dependent Etching). Nykyaikaisissa etsauslaitteissa ilmiötä pystytään kuitenkin pienentämään tai jopa kokonaan ehkäisemään esimerkiksi passivointivaiheen syklejä kontrolloimalla. [14.]

## 4 Mittalaitteiden esittely

### 4.1 Ellipsometri

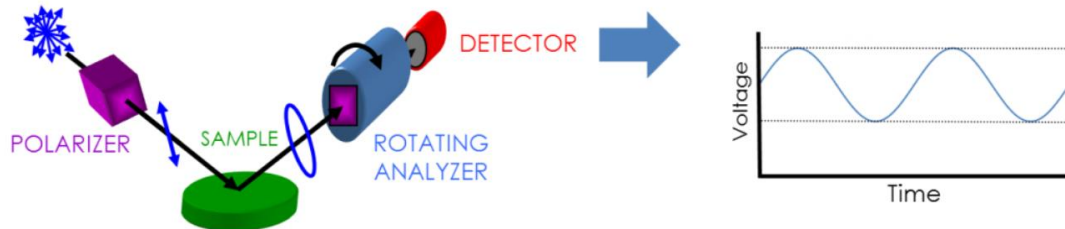
Ellipsometrin toimintaperiaate perustuu näytteen pinnasta heijastuvan valon mittaamiseen. Sillä voidaan mitata mm. päällekkäisten kalvojen paksuutta, rajapintoja, taitekerroimia  $[n(\lambda)]$ , absorptiokertoimia  $[k(\lambda)]$ , koostumusta, kiderakennetta ja pinnankarheutta. Ellipsometrillä päästään reilusti alle nanometrin tarkkuuteen, riippuen mitattavasta kalvosta. [15.]

Mittauksessa hyödynnetään ellipsin muotoisesti polarisoitunutta valoa, josta myös laitteen nimitys tulee. Toimintaperiaate perustuu näytteen pinnassa tapahtuvan polarisaation muutoksen mittaamiseen. Polarisaation muutos ilmenee amplitudisuhteen muutoksena,  $\Psi$ , ja vaihe-erona,  $\Delta$ . Mitattu vaste riippuu mitatun näytteen optisista ominaisuuksista ja paksuudesta. Kuvassa 8 on esitetty ellipsometrin mittausperiaate. Kuvassa lineaarisesti polarisoitu valo kohdistetaan näytteen pintaan halutussa kulmassa, josta valo heijastuu ellipsin muotoisesti polarisoituneena kohti tunnistinta. Polarisaation muutos lasketaan sähkökentän,  $E$ , muutoksesta s- ja p-tasoissa. [16.]



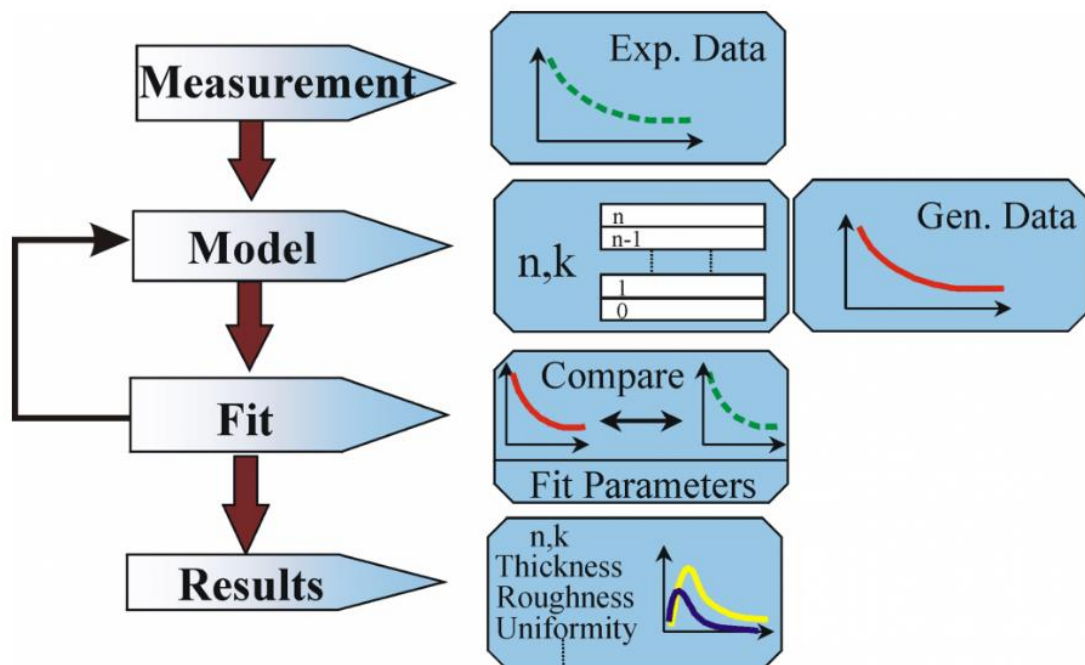
Kuva 8. Ellipsometrin mittausperiaate [16].

Tyypillinen ellipsometri koostuu valonlähteestä, polarisaattorista, pyörivästä analysaattorista ja ilmaisimesta, joka muuntaa valon sähköiseksi signaaliksi heijastuneen polarisaation määrittämiseksi. Kuvassa 9 on esitetty tyypillisen ellipsometrin kokoonpano.



Kuva 9. Tyypillisen ellipsometrin kokoonpano [16].

Materiaalin ominaisuuksien määrittelemiseksi on tehtävä data-analyysi ”ellipsometri-  
sestä”-datasta. Mittaustuloksia verrataan ja sovitetaan näytteen ominaisuuksia kuvaavaan malliin regressioanalyysin avulla. RMSE-luku (Root-Mean-Square Error) kuvaa kuinka hyvin näytteestä muodostettu malli ja mitatut arvot sopivat toisiinsa. Mitä pienempi luku on, sitä luotettavampi on tulos. Kuvassa 10 on esitetty data-analyysin vuokaavio. [15; 16.]



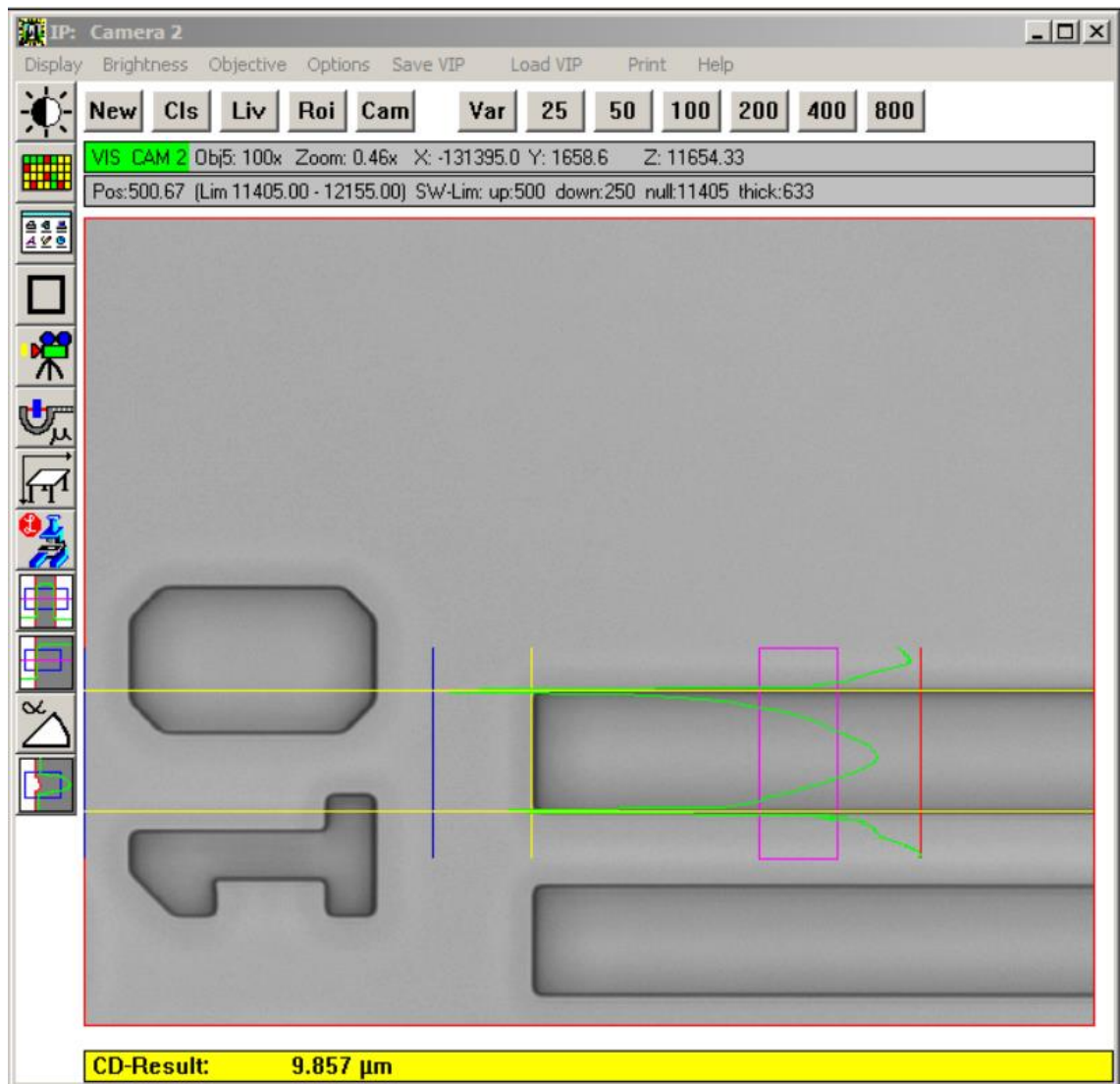
Kuva 10. Vuokaavio ellipsometrimittauksen data-analyysistä [16].

MFI:n ohutkalvojen mittalaite (REFLECT\_02) yhdistää spektroskooppisen ellipsometri-mittauksen ja polarisoidun spektroskooppisen reflektometrimittauksen, joka itsenäisesti mittaa kalvonpaksuuden ja taitekertoimen. Yhdistelmällä saadaan mittauksesta huomattavasti herkempi. Ellipsometrimittaus tapahtuu 70°:n kulmassa ja reflektometrimittaus tyypillisesti pystysuorassa kulmassa. Optisen reflektometrimittauksen toimintaperiaate esitetään tarkemmin luvussa 4.4.4. [15.]

## 4.2 Optinen CD-mittari

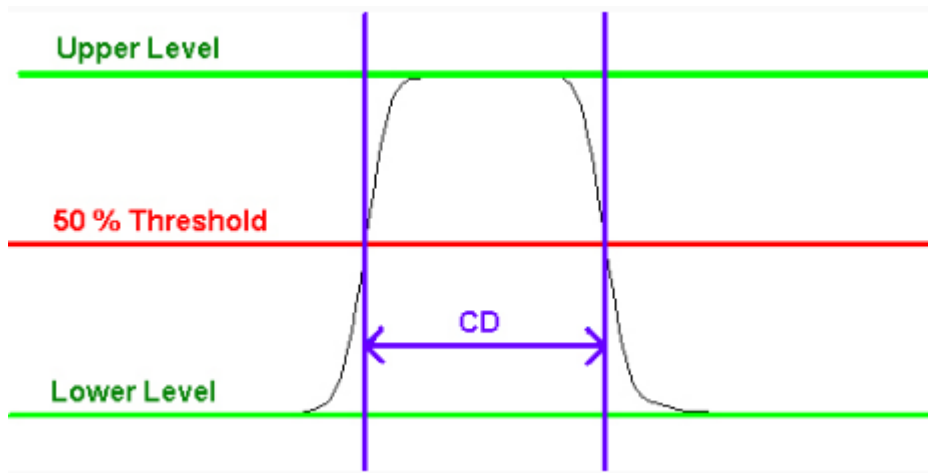
Optinen viivanleveyden mittaus eli CD-mittaus (Critical Dimensions) on yksi tuotannon tärkeimmistä ja käytetyimmistä mittauksista. Kiekkoja mitataan useissa eri valmistusvaiheissa, jotta varmistetaan, että kussakin kerroksessa valmistetut rakenteet ovat viivanleveydeltään vaaditun toleranssin sisällä. Se on kontaktiton, riittävän tarkka ja nopea mittausmenetelmä massatuotannon tarpeisiin. Kapeimmat laitteella mitatut rakenteet ovat muutamia satoja nanometrejä.

Viivanleveys määritetään CCD-kameran (Charge-Coupled Device) taltioimasta intensiteetti-profiilista. Kuvassa 11 on esitetty CD-mittauksen toimintaperiaate. Kuvassa näkyvää violettiä suorakulmiota kutsutaan kiinnostuksen alueeksi (ROI, Region Of Interest), joka määrittelee halutun mitattavan rakenteen. Vihreä viiva kuvaa intensiteetti-profiilia, punainen viiva intensiteetin maksimiarvoa ja sininen viiva minimiarvoa. Keltainen viiva kuvaa 20 %:n intensiteettiarvoa, josta kriittinen mitta pikseleiden perusteella lasketaan. [17.]



Kuva 11. CD-mittauksen toimintaperiaate.

Laitteen ohjelmisto käsittelee intensiteettiprofiilin ja suodattaa siitä automaattisesti häiritsevät tekijät, kuten tilastollisen fotonimelun ja optisten diffraktiovaikutusten aiheuttamat muodonmuutokset. Huomiota herättää, että reunaprofiili ei ole pystysuora, vaan kalteva. Tämä voi johtua optisesta vaikutuksesta tai linjan muodon epätäydellisyydestä. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki mitatusta intensiteettiprofiilista. Kynnysarvolla (threshold) määritellään, mistä kohtaa intensiteettiprofiilia kriittinen mitta lasketaan. Käytettävä kynnysarvo riippuu mm. mitattavan rakenteen materiaalista ja valon tehosta. [17.]



Kuva 12. Esimerkki CD-mittauksen intensiteettiprofiilista [17].

#### 4.3 Pyyhkäisyelektronimikroskooppi

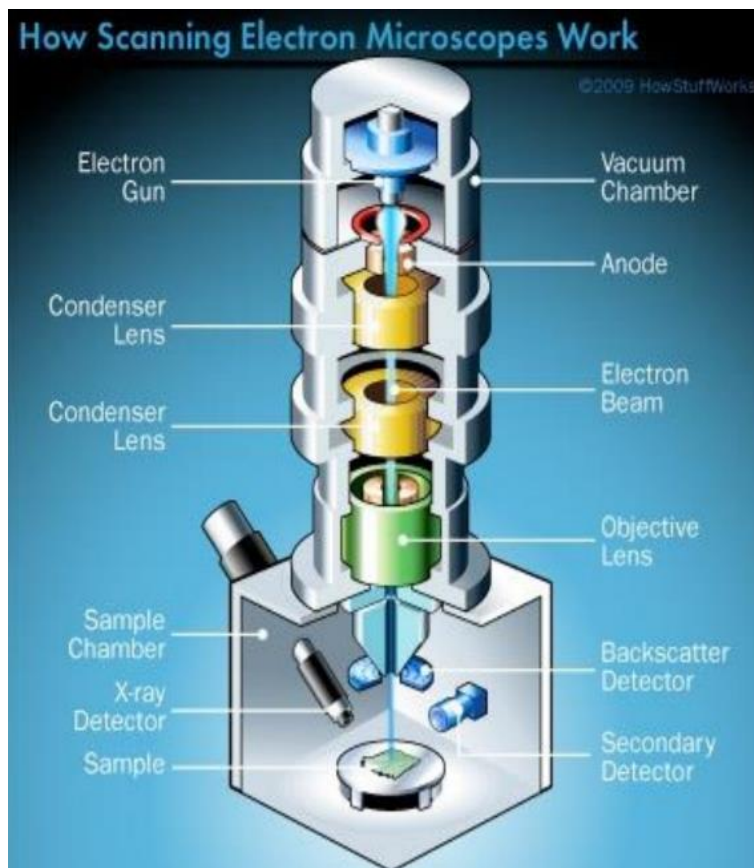
Pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM, Scanning Electron Microscope) pystytään tutki-  
maan erilaisten näytteiden pintoja ja poikkileikkauksia suurella tarkkuudella. Mittausme-  
netelmän haastavin vaihe on tarkkuutta ja huolellisuutta vaativa näytteen valmistelu. Esi-  
merkiksi poikkileikkauksen tutkimiseksi, on näyte saatava siististi halki juuri oikeasta koh-  
dasta. Tämä on myös mittausmenetelmän huono puoli, sillä näyte joudutaan tuhoamaan  
sen tutkimista varten. Uusimmilla SEM-laitteilla päästään jopa alle nanometrin tarkkuu-  
teen. [18.]

Pyyhkäisyelektronimikroskoopin toimintaperiaate muistuttaa optista mikroskooppia sillä  
erolla, että valonlähde on korvattu elektronitykillä ja linssit on korvattu magneeteilla. SEM  
muodostaa näytteestä kuvan skannaamalla sen rasterikuvion mukaisesti kohdistetun  
elektronisuihkun avulla. Elektronisuihkun kohdistus tapahtuu magneettikäämien avulla.  
Yleisin SEM-mittaustila on elektronisuihkun virittämien atomien sekundäärielektronien  
havaitseminen. Skannaamalla näyte ja keräämällä sekundäärielektronit tunnistimen  
avulla, muodostetaan kuva, joka näyttää pinnan topografian. Atomien ja elektronien vuo-  
rovaikutus muodostaa myös muuntyyppisiä signaaleja, joita voidaan havaita erilaisilla  
tunnistimilla, kuten röntgensäteilyn ja takaisin heijastuneiden elektronien tunnistimilla.  
[18.]



Kuvassa 13 on esitetty havainnekuva pyyhkäiselektronimikroskoopista, johon kuuluu

- elektronitykki (electron gun)
- vakuukammio (vacuum chamber)
- anodi (anode)
- elektronisuihku (electron beam)
- lauhdutinlinssi (condenser lens)
- objektiivilinssi (objective lens)
- näytekammio (sample chamber)
- takaisin heijastuneiden elektronien tunnistin (backscatter detector)
- röntgensäteilyn tunnistin (X-ray detector)
- sekundäärielektronien tunnistin (secondary detector)
- näyte (sample).



Kuva 13. Esimerkki SEM-laitteen rakenteesta [18].



#### 4.4 Optinen profilometri

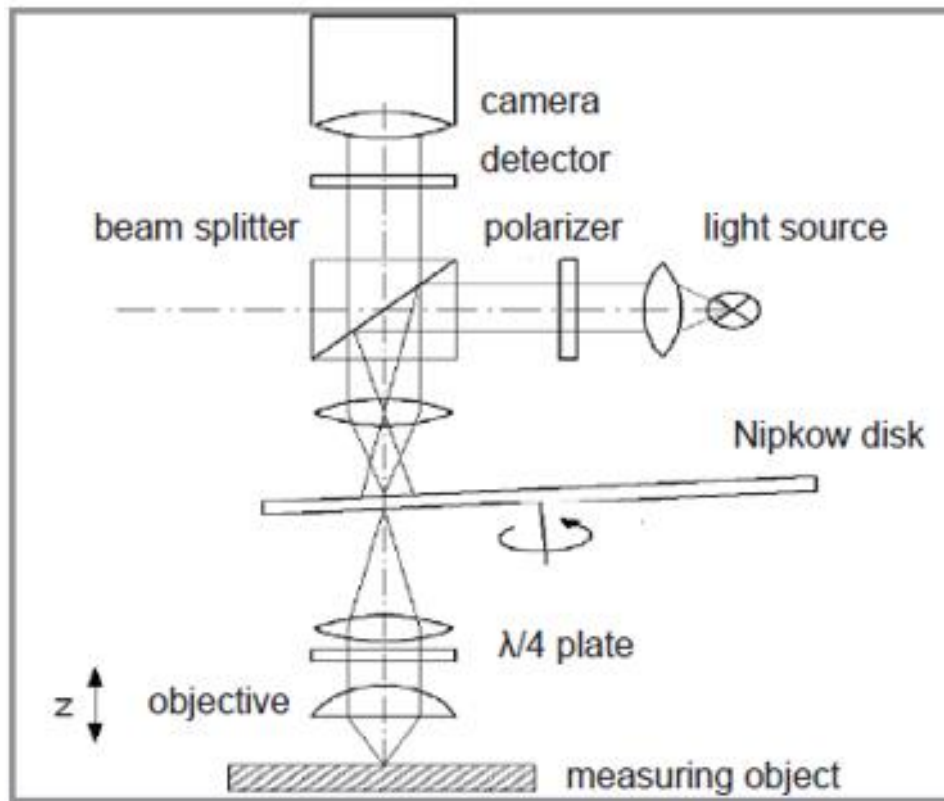
MFI:llä käytössä oleva FRT:n (Fries Research & Technology) valmistama optinen profilometri on mittalaite, joka sisältää viisi erilaista sensoria. Seuraavissa alaluvuissa esitellään lyhyesti kunkin sensorin toimintaperiaate.

##### 4.4.1 Konfokaalimikroskooppi + Valkoisen valon interferometri

CFM (DT) -sensori sisältää konfokaalimikroskoopin (CFM, Confocal Microscope (Dual Technology)) ja valkoisen valon interferometrin (WLI FL, White Light Interferometer with Focused Light), joilla mitataan näytteen 3D-topografiaa, rakennetta ja pinnankarheutta. Sensorin pystysuuntainen resoluutio on parhaimmillaan 0,1 nm ja sivusuuntainen resoluutio 0,25 µm, riippuen käytettävästä objektiivista. Konfokaali sisältää 50x- ja 100x-objektiivit ja interferometri 10x-, 20x- ja 50x-objektiivit.

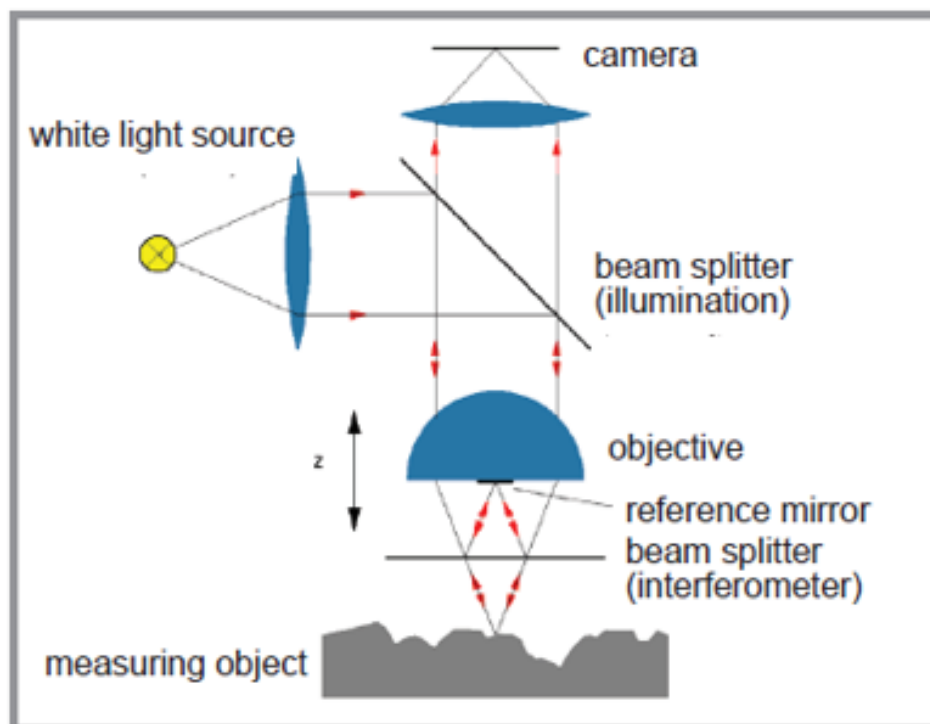
Kuvassa 14 on esitetty konfokaalimikroskoopin mittausperiaate. LED-valo fokusoidaan näytteen pintaan, josta se heijastuu takaisin tunnistimelle. Kun näyte on fokuksessa valonsäteen ja tunnistimen kanssa, maksimisignaali saavutetaan. Jos näyte ei ole fokuksessa, sen valaistus ja tunnistimen kuva ovat hämärtyneet, mikä johtaa alhaiseen ulostulosignaaliin. Tarkka korkeusarvo saavutetaan liikuttamalla polttopistettä vähitellen Z-suunnassa.

Isomman pinta-alan topografian kuvantamiseksi on jokainen erillinen pikseli saatava mitattua. Tämä saavutetaan asettamalla noin 250 000 spiraalikuviassa olevaa pientä reikää sisältävä Nipkowin levy lähelle tunnistimen tasoa. Nipkowin levyn pyörimisnopeus synkronoidaan kameran integrointijakson kanssa, mikä mahdollistaa kunkin pikselin itsenäisen valotuksen ja mittauksen. [19.]



Kuva 14. Konfokaalimikroskoopin toimintaperiaate [19].

Kuvassa 15 on esitetty valkoisen valon interferometrimittauksen toimintaperiaate. Mittauksessa kamera tallentaa interferenssikuvioita, jotka muodostuvat näytteen pinnasta ja referenssipelistä heijastuvien valonsäteiden superpositiosta. Topografian mittaamiseksi objektiivia liikutetaan pienin askelin Z-suunnassa. Interferenssikuvio tallennetaan jokaisessa pisteessä, jonka jälkeen kuvat pinotaan yhteen 3D-topografian laske-  
miseksi. Pikselin häiriösignaalilla on maksimimodulaatio, kun pikseliin tulevan valon optisen reitin pituus on täsmälleen sama referenssin ja näytteen osalta. [19.]

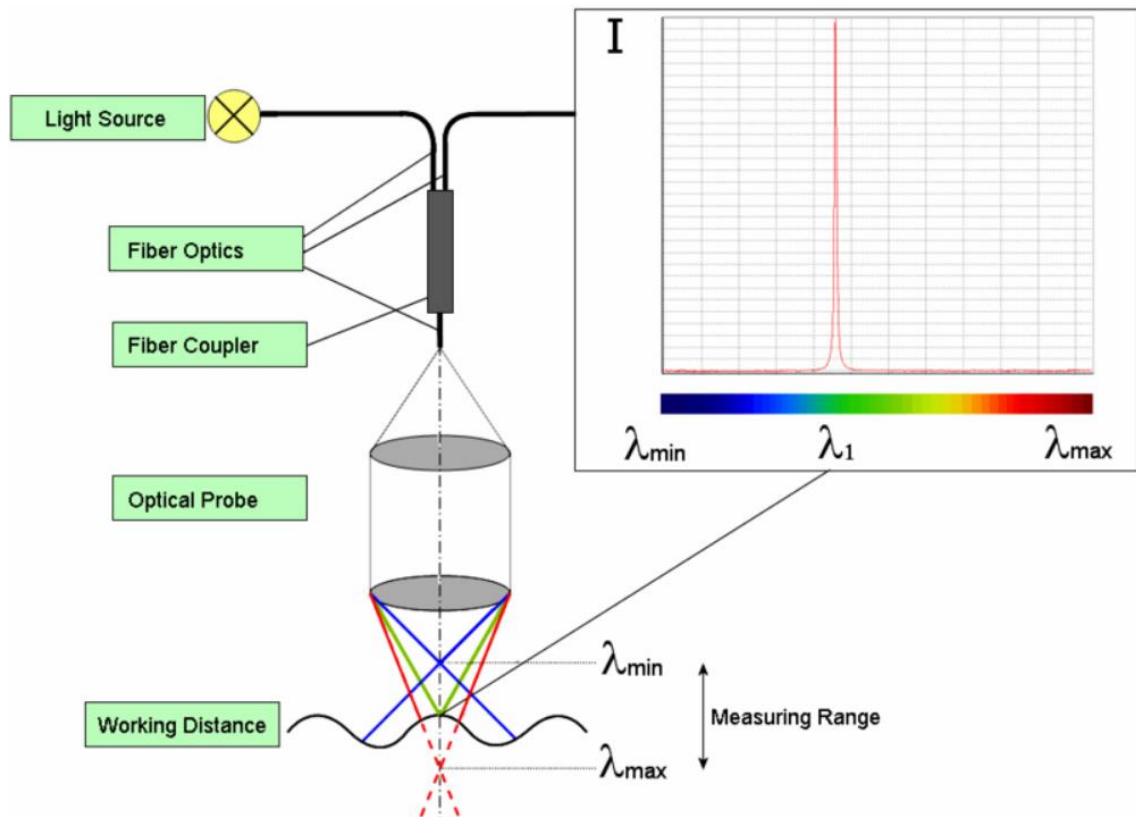


Kuva 15. Valkoisen valon interferometrimittauksen toimintaperiaate [19].

#### 4.4.2 Kromaattisen valkoisen valon sensori

CWL-sensorilla (Chromatic White Light) mitataan näytteen topografiaa, profiilia tai pinnan karheutta. Sensorin pystysuuntainen resoluutio on 6 nm ja sivuttainen resoluutio 2  $\mu\text{m}$ .

Kromaattisen valkoisen valon sensori toimii konfokaalimittauksen periaatteella eli näytteen tulee olla fokuksessa valonsäteen kanssa. Valkoinen valo kohdistetaan näytteen pintaan optisen anturin avulla, joka muodostaa kromaattisen aberraation (väriaberratio). Tämä tarkoittaa, että valo taittuu eri tavalla aallonpituudesta riippuen. Heijastunut valo saavuttaa maksimi-intensiteetin aallonpituudella, jolla näytteen pinta on fokuksessa. Tämän huipun paikka määrittää etäisyyden näytteen pintaan. Kuvassa 16 on esitetty CWL-sensorin toimintaperiaate. [20; 21.]

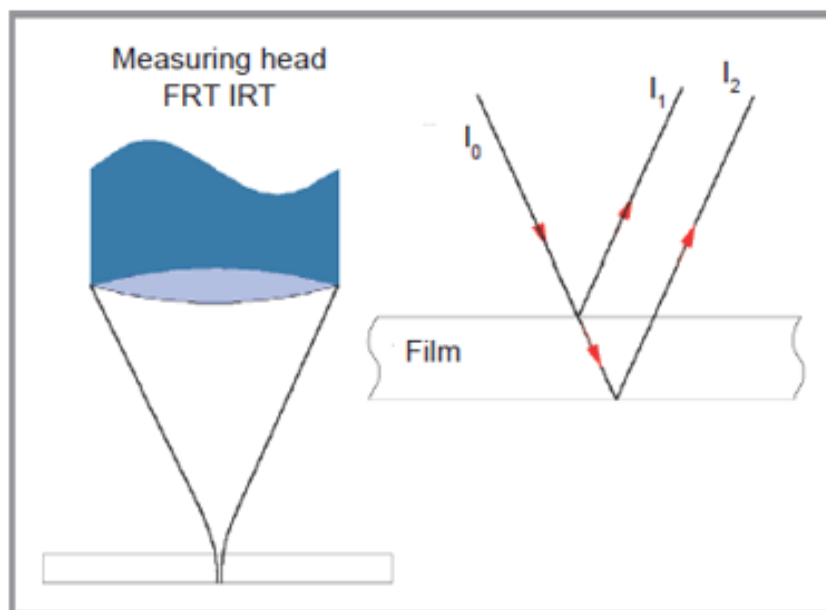


Kuva 16. CWL-sensorin toimintaperiaate [21].

#### 4.4.3 IR-kalvonpaksuussensori

IRT-sensori (Infrared Thickness) on interferometrinen kalvonpaksuusanturi, jossa on IR-valonlähde. Sillä voidaan mitata materiaaleja, jotka ovat läpinäkyviä lähi-infrapuna-alueella (NIR, Near-Infrared). Kalvonpaksuuden mitta-alue on 18–3000  $\mu\text{m}$  ( $n=1$ ) riippuen mitattavan materiaalin taitekertoimesta ja resoluutio 105 nm. Sensorilla mitataan tyypillisesti piin paksuutta.

Kuvassa 17 on esitetty IRT-sensorin toimintaperiaate. Kalvonpaksuutta mitattaessa IR-valo fokusoidaan näytteen pintaan. Kohdistettu valo heijastuu osittain jokaisessa läpinäkyvän kalvon rajapinnassa. Kalvonpaksuus määritellään heijastuneen interferenssi-signaalin ja mitattavan materiaalin taitekertoimen avulla. [22.]

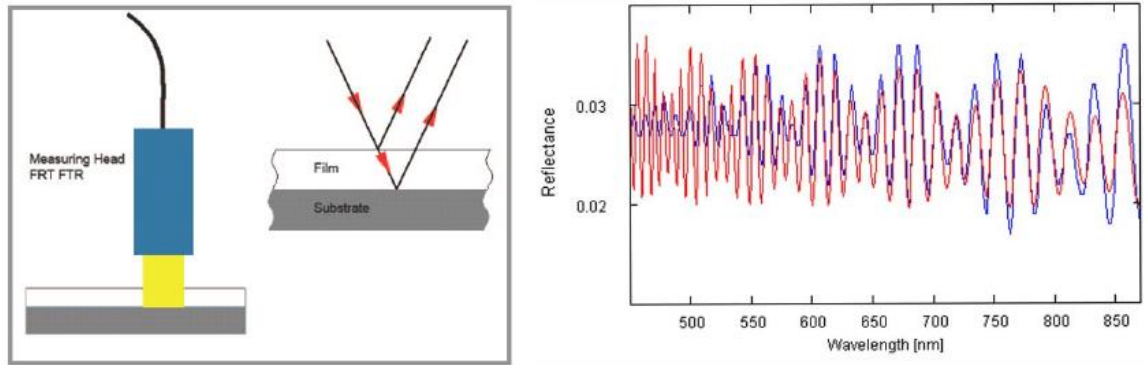


Kuva 17. IR-kalvonpaksuussensorin toimintaperiaate [22].

#### 4.4.4 Optinen reflektometri

FTR-sensori (Film Thickness Reflectometer) on spektroskooppinen reflektometri ohutkalvojen paksuuden mittaamiseen. Kalvonpaksuuden mittausalue on 20 nm–130  $\mu\text{m}$  ( $n=1$ ) ja resoluutio minimissään nanometrinen luokkaa. Sensori toimii spektrialueella 350–1075 nm.

Optisen reflektometrin toimintaperiaate perustuu päällekkäisiin valonsäteisiin, jotka heijastuvat ohutkalvojen rajapinnoista. Kalvonpaksuus määritellään arvioimalla päällekkäisten valonsäteiden spektrin interferenssikuviota. Tätä mitattua heijastusspektriä verrataan laskettuun malliin, jossa tuntematon paksuus vaihtelee järjestelmällisesti, kunnes molemmat spektrit vastaavat. Kuvassa 18 on esitetty optisen reflektometrin toimintaperiaate ja esimerkki mittaussignaalista. [23.]

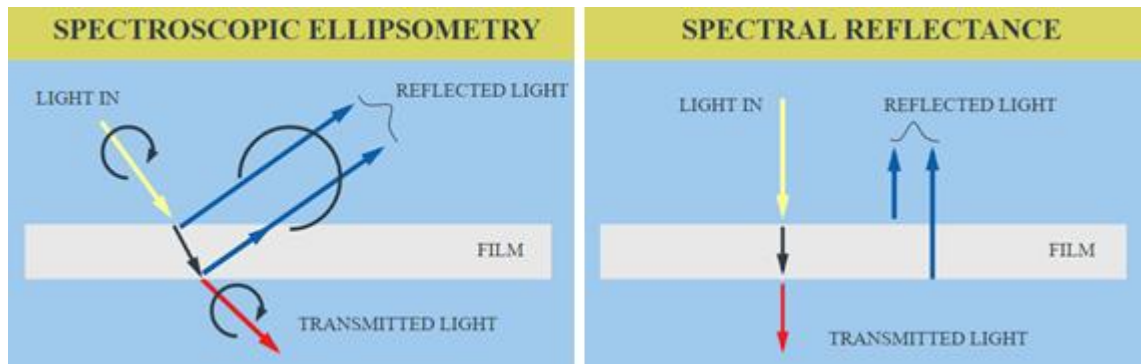


Kuva 18. Optisen reflektometrin toimintaperiaate ja esimerkki mittaussignaalista [23].

Reflektometri- ja ellipsometrimittaus ovat hyvin samankaltaisia. Oleelliset erot näiden välillä ovat seuraavat:

- Reflektometri mittaa tyypillisesti pystysuorassa kulmassa ja ellipsometri alhaisessa kohdistuskulmassa.
- Reflektometri mittaa pelkkää intensiteetin (heijastuksen) muutosta ja ellipsometri myös polarisaation muutosta.
- Ellipsometri on tarkempi hyvin ohuilla kalvoilla (<5 nm) ja on myös kalliimpi laite monimutkaisemman mittaustekniikkansa vuoksi. [24.]

Kuvassa 19 on esitetty havainnekuva eroista.

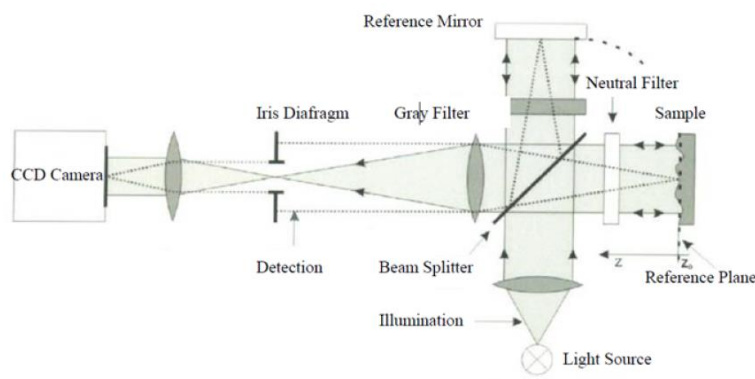


Kuva 19. Ellipsometri- ja reflektometrimittauksen erot [24].

#### 4.4.5 Valkoisen valon interferometri rinnakkaisella valonlähteellä

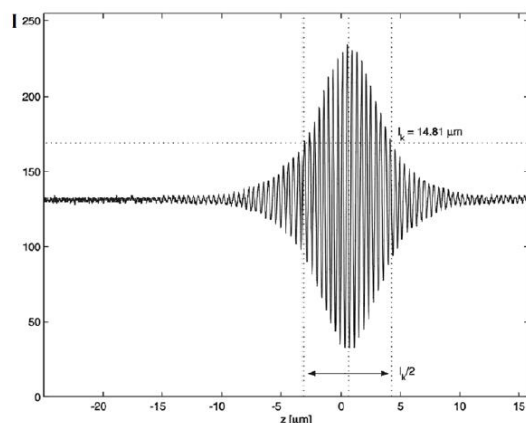
WLI PL -sensorilla (White Light Interferometer with Parallel Light) mitataan isojen pinta-alojen topografiaa (1,451 mm x 1,450 mm). Sensorin sivuttainen resoluutio on 1  $\mu\text{m}$  ja pystysuuntainen resoluutio 30 nm.

Kuvassa 20 on esitetty WLI PL -sensorin rakenne. Sensori toimii samalla mittausperiaatteella kuin WLI FL -sensori. Eroina ovat ainoastaan erilainen optinen kokoonpano ja erilaiset valonlähteet (Focused Light & Parallel Light). WLI PL -sensori sisältää referenssi-peiiliä vastakkain olevan LED-valonlähteen. [25.]



Kuva 20. WLI PL -sensorin rakenne [25].

Kuvassa 21 on esitetty yksittäisen pikselin intensiteettiprofiili Z-suunnan funktiona. Näytteen korkeusprofiili määritetään maksimikontrastin paikan perusteella.



Kuva 21. Esimerkki WLI FL/PL -sensorin mittaussignaalista [25].

## 5 Optisen profilometrin mittauskyvykkyyden selvittäminen

### 5.1 Lähtötilanne

Optinen profilometri on suhteellisen uusi laite yrityksessä, eikä laitteelle ole toistaiseksi otettu kuin muutamia mittauksia tuotanto- ja monitorikäyttöön. Laite on hankittu yritykseen silmällä pitäen tuotekehityksen entistä vaativampia mittaustarpeita. Monipuolisuutensa johdosta laite kykenee useisiin erilaisiin mittauksiin. Laitteen eri sensoreiden kyvykkyyttä ja suorituskykyä ei ole vielä kunnolla kartoitettu.

Toistaiseksi piin plasmaetsauksessa monitoroidaan etsauskammiokohtaisesti

- partikkelimäärää, mitattuna puhtailta piikiekoilta.
- etsausnopeutta, mitattuna piikiekolle kasvatetun maskioksidin kulumasta.
- syvien (400–500  $\mu\text{m}$ ) ja leveiden (35–70  $\mu\text{m}$ ) etsausurien profiilia mitattuna kuvioiduilta testikiekoilta.

Käytössä olevien monitorien korrelaatio kriittisiin HAR-etsattaviin rakenteisiin on kuitenkin heikko, koska ne eivät kerro riittävästi tietoa prosessissa tapahtuvasta vaihtelusta. Kapeimmat HAR-etsattavat rakenteet ovat alle kaksi mikrometriä leveitä ja syvyydet ylittävät jopa 100  $\mu\text{m}$ :n saakka.

Tavoitteena oli selvittää, kuinka kapeita ja syviä etsausuria optisella profilometrillä pystytään luotettavasti mittaamaan ja vertailla tuloksia muihin käytössä oleviin mittalaitteisiin.

### 5.2 Testikiekkojen valmistus

#### 5.2.1 Testikiekkovuon mallintaminen valmistuksenohjausjärjestelmään

Ensimmäisenä toimenpiteenä oli määritellä valmistettavien testikiekkojen rakenne. Tässä käytettiin hyväksi jo olemassa olevien tuotteiden prosessimoduuleja ja laitekoh- taisia reseptejä. Testikiekkojen rakenteelliseksi pohjaksi päätettiin ottaa erään tuotan-



nossa olevan kulmanopeuselementin rajattu valmistuskokonaisuus eli moduuli. Taulukossa 2 on esitetty MES-järjestelmään (Manufacturing Execution System) mallinnetut työvaiheet ja näiden kuvaukset. Jokainen työvaihe sisältää useampia MES-järjestelmän ohjaamia operaatioita, kuten laitteiden latauksia, reseptien valintoja, laitteiden purkuja ja visuaalisia tarkastuksia. Taulukossa 2 on esitetty myös työvaiheiden välissä suoritettavat mittaukset.

Taulukko 2. MES-järjestelmään mallinnetun testikiekkovuon rakenne.

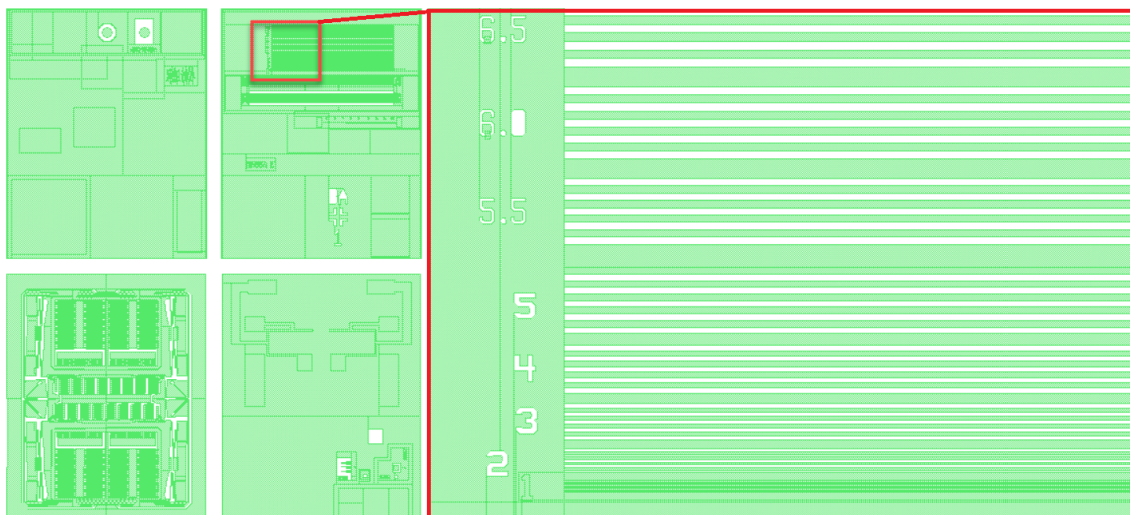
| Työvaihe                        | Kuvaus  |
|---------------------------------|---|
| START_LOT.GENERIC               | Piikiekkomateriaalin ja määrän valinta          |
| CODE.LASER.1                    | Kiekkojen laserkoodaus tunnistamista varten     |
| CLEAN.SC1.SPRAY.EQSEL.1         | Standardi pesu SC1                              |
| OXIDIZE.THERMAL.WET_HAR.EQSEL   | 1200nm termisen maskioksidikalvon kasvatus      |
| PRIME.EQSEL.1                   | HDMS-käsittely adheesion parantamiseksi         |
| RESIST.OIR907.BAKE.EQSEL.1      | Kiekkojen resistointi ja paisto, OIR907, 115 °C |
| EXPOSE.MASSA.CLEAN_EQSEL.1      | Kuvion valotus resistille                       |
| DEVELOP.AZ726.TRACK.EQSEL.1     | Kuvion kehitys, AZ726                           |
| Mittauksia                      | CD-mittaus, resistin- ja oksidinpaksuusmittaus  |
| ETCH.DRY.SI_OXIDE_THERMAL.1     | Oksidin plasmaetsaus resistimaskilla            |
| STRIP.PLASMA.EQSEL.1            | Resistimaskin plasmastrippaus                   |
| STRIP.PIRANHA_SC1.SPRAY.EQSEL.1 | Resistin poiston varmentava pesu piranha+SC1    |
| Mittauksia                      | CD-mittaus, oksidinpaksuusmittaus               |
| ETCH.DRY.DRIE.HAR.ID.EQSEL.1    | Kiekkojen HAR-plasmaetsaus oksidimaskilla       |
| Mittauksia                      | CD-mittaus, topografian mittaus, SEM-mittaus    |

## 5.2.2 Testikiekkojen prosessointi

Testikiekkojen lähtömateriaalina käytettiin 675 µm:n paksuisia toiselta puolelta kiillotettuja piikiekkokoja. Testikiekkojen kuviointi ja etsattavat urat muodostettiin kiekkojen kiillotetulle puolelle, joka toimi myös mitattavana puolena (1-puoli). Kiekot prosessoitiin MES-järjestelmään mallinnettujen reseptien ja ohjeistuksien mukaisesti. Osa työvaiheista suoritettiin tuotannon operaattoreiden toimesta muun materiaalivirran mukana. Hoidin itse kaikki kriittisimmät työvaiheet, kuten mittauksiin liittyvät vaiheet ja uusien reseptien muokkaukset ja testaukset. Testikiekkokoja valmistettiin 12 kappaletta.

Testikiekkojen valmistuksen ensimmäisenä vaiheena oli sopivan mitattavan kuvioinnin valitseminen testikiekoille. Tätä varten oli ensiksi löydettävä tarkoitukseen sopiva kuviointi litografian valotusmaskien joukosta ja luotava tämän pohjalta testikiekoille uusi va-

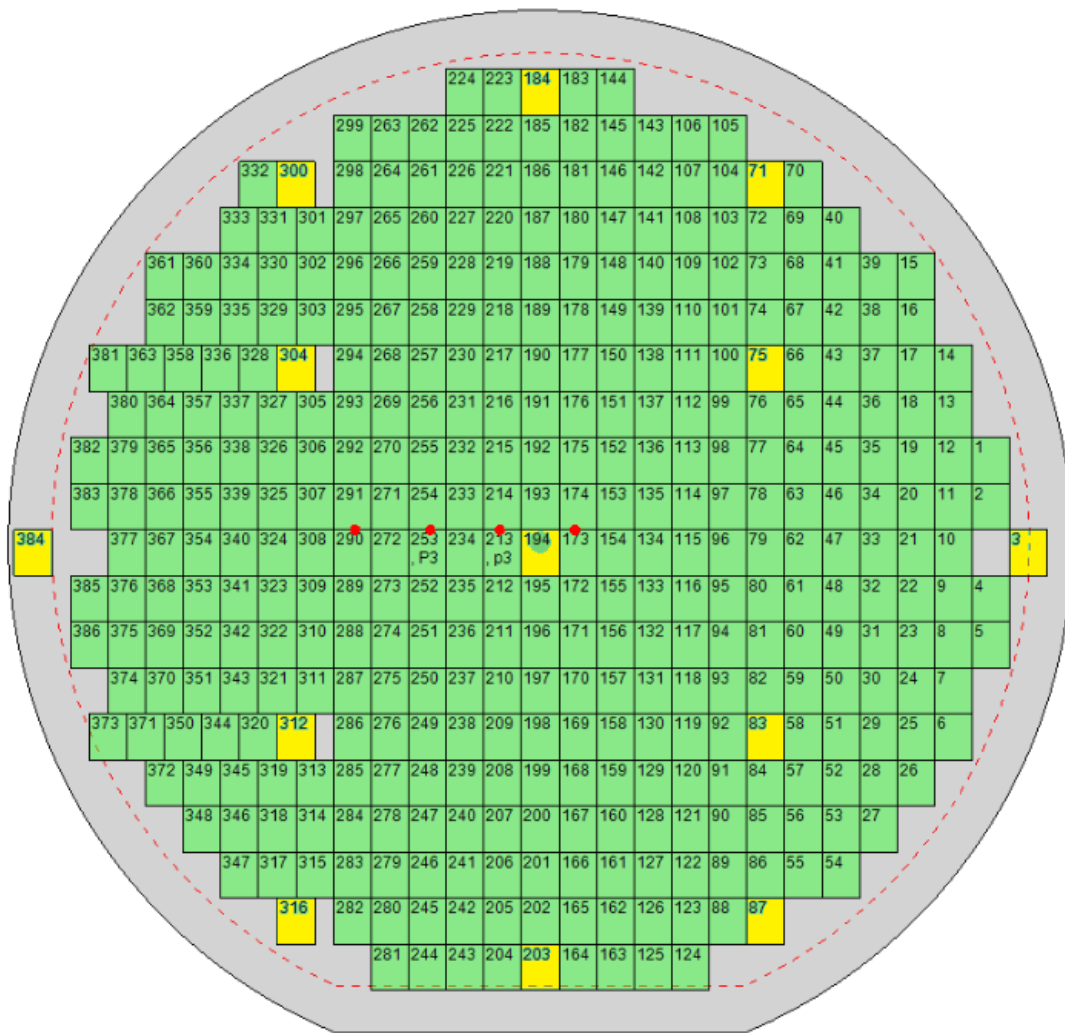
lotusohjelma. Kuvassa 22 on esitetty valotusohjelman pohjana oleva kuviointi, joka sisältää 1–10 µm levyisiä mitattavia uria (punainen alue). Kuvio sisältää neljä elementtiä, joista kolme on niin sanottuja kohdistuselementtejä, joita hyödynnetään mittauksissa ja eri kerrosten kohdistuksissa. Kuvio, jota valotuksessa kutsutaan shotiksi, on kooltaan 5,3 mm x 6,5 mm.



Kuva 22. Testikiekoille valotettava kuvio (2 x 2 elementin shotti).

Kuvassa 23 on esitetty varsinaisen valotusohjelman valotuskartta, joka sisältää 386 valotettavaa shottia. Valotettavat shotit ovat levitetty tasaisesti kiekon ympäri, jotta kiekko vastaisi etsauskuormaltaan tyypillistä HAR-etsattavaa kuviointia. Kartassa keltaisella merkityt shotit ovat mittapisteitä. Kiekon vasemmalla puolella olevia mittapisteiden linjassa olevia shotteja on siirretty yhden elementin verran vasemmalle, koska mitattavat urat sijaitsevat shotin oikeassa yläkulmassa. Siirron ansiosta mittapisteet ovat kiekon molemmin puolin symmetrisesti yhtä kaukana kiekon keskipisteestä. Lisäksi vasemman- ja oikeanpuoleisinta mittapistettä on siirretty lähemmäs kiekon reunoja, jotta reuna-alueiden läheisyydessä mahdollisesti ilmenevät etsausprofiilin muutokset saadaan mitattua.

Testikiekkojen valotus suoritettiin stepper-valottimella, joka valottaa kiekot edellä esitellyn rakenteen mukaisesti shotti kerrallaan.



Kuva 23. Testikiekon valotuskartta.

Testikiekkojen litografiakuviointin jälkeen suoritettiin mittauksia, jonka jälkeen kiekkojen maskioksidi etsattiin. Taulukossa 3 on esitetty oksidin etsauksessa käytetyt laitteet, reseptit, sekä etsausajat. Kiekkoja 1–3 kokeiltiin testimielessä etsata uudemmalla laitteella (PERIE\_02) reseptillä (Mask\_oxide), joka ei varsinaisesti ole tähän tarkoitettu, eikä täten ollut täysin yhteensopiva kyseiseen vaiheeseen. Mittausten kannalta kiekkoista tuli kuitenkin mielenkiintoisia vertailukohteita.

Taulukko 3. Testikiekkojen oksidin etsaus.

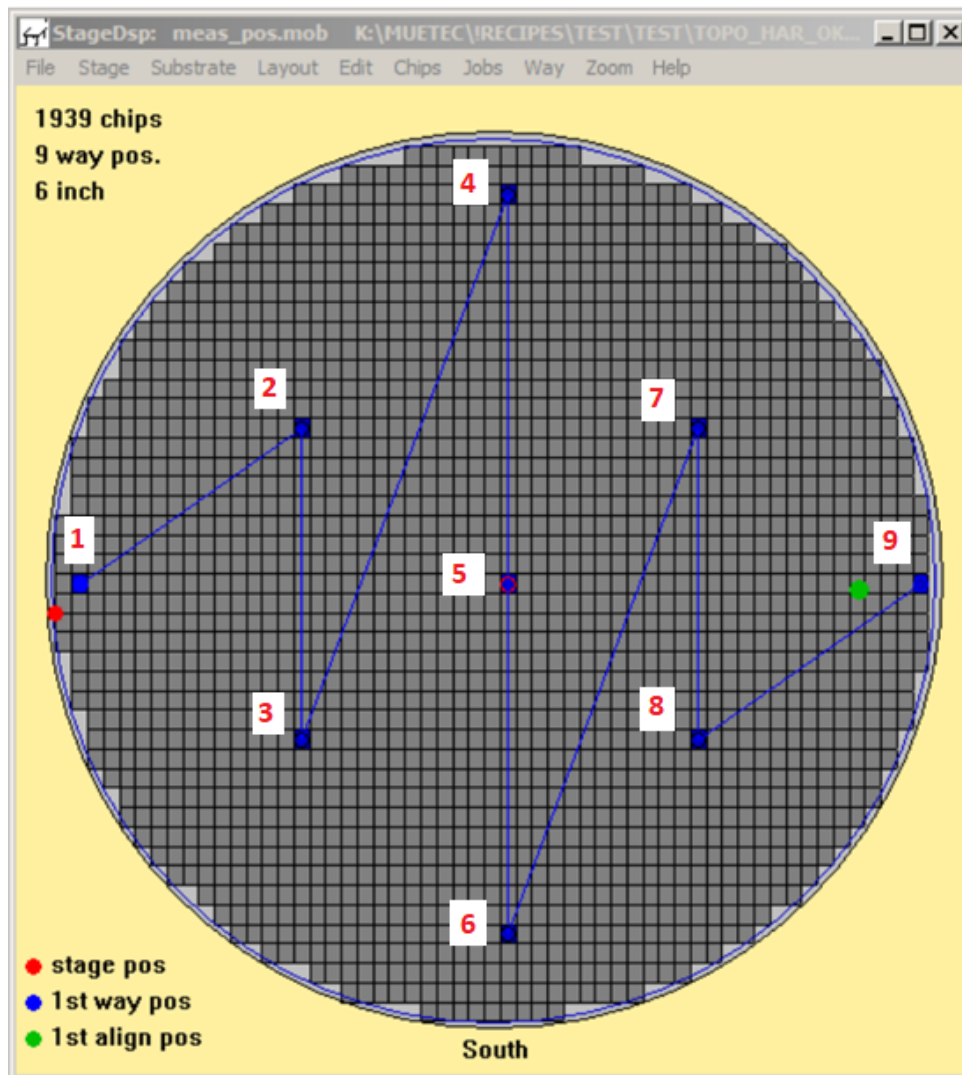
| Resepti                        | Kiekko | Kammio                  | Endpoint + ylietsaus (s) | Kommentit  |
|--------------------------------|--------|-------------------------|--------------------------|--|
| Mask_oxide                     | 1      | PERIE_02B               | 115,6                    | Ok   |
| Mask_oxide/<br>Mask_oxide_both | 2      | PERIE_02B/<br>PERIE_01A | 245,9                    | PERIE_02B liian korkea heliumvirtaus prosessin alussa, PERIE_01A uusinta ok. |
| Mask_oxide                     | 3      | PERIE_02A               | 140,0                    | Endpointtia ei löytynyt, max. aika.  |
| Mask_oxide_both                | 4      | PERIE_01B               | 248,4                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 5      | PERIE_01A               | 245,7                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 6      | PERIE_01B               | 248,5                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 7      | PERIE_01A               | 246,2                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 8      | PERIE_01B               | 249,0                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 9      | PERIE_01A               | 247,0                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 10     | PERIE_01B               | 249,3                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 11     | PERIE_01A               | 247,0                    | Ok   |
| Mask_oxide_both                | 12     | PERIE_01B               | 249,4                    | Ok   |

Maskioksidin etsauksen ja resistin poiston jälkeen suoritettiin seuraavat mittaukset. Tämän jälkeen testikiekoille muodostettiin eri syvyisiä piiuria plasmaetsaamalla kiekkoja DRIE-kammiossa (DRIE\_04A). Erisyvyiset urat muodostettiin kontrolloimalla DRIE-prosessin etsaussyklejä. Käytännössä lisäämällä tai vähentämällä etsaussyklejä (loop) pysytettiin etsaussyvyyttä säätämään. Yksi etsaussykli eli looppi sisältää etsausvaiheen ja polymeerin kasvatus vaiheen. Etsausresepti muokattiin jo olemassa olevan HAR-etsausreseptin pohjalta (Jones).

### 5.3 Testikiekkojen mittaukset

#### 5.3.1 CD-mittaukset

Viivanleveyden mittaukset suoritettiin yhdeksästä mittapisteestä kuvassa 24 esitellyn kartan mukaisesti. Kussakin mittapisteessä mitattiin neljän eri uran viivanleveys (2, 4, 6 & 10 µm).



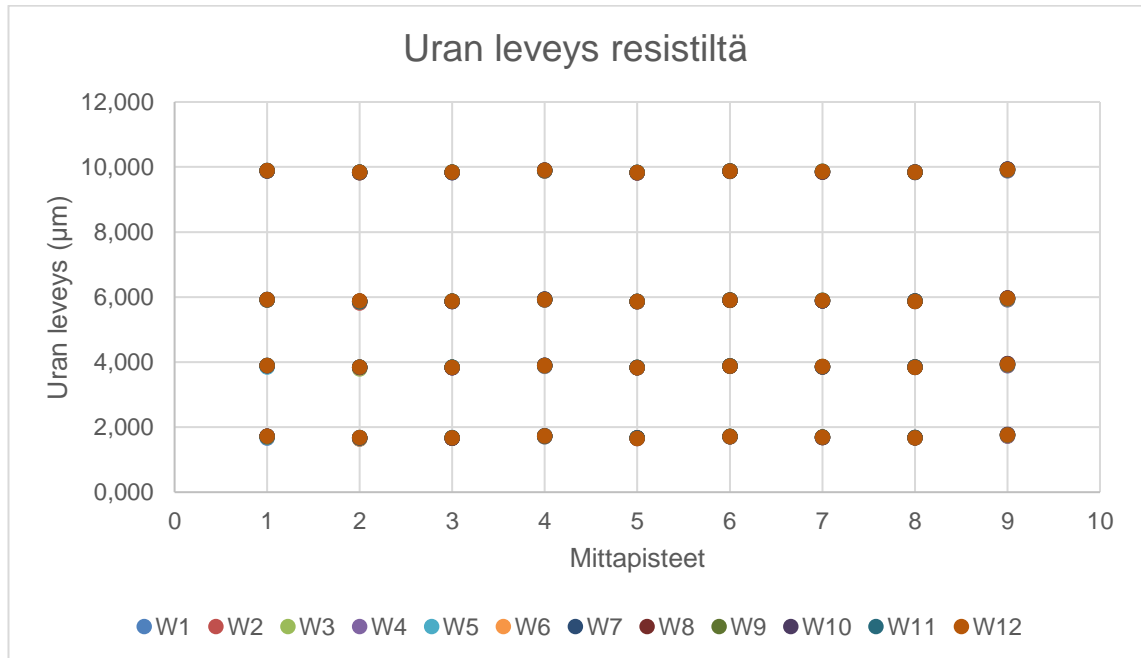
Kuva 24. CD-mittauksen mittapisteet.

Ensimmäinen CD-mittaus suoritettiin testikiekkojen litografiakuviointin jälkeen resistin päältä. Kuvassa 25 on esitetty CD-tulokset resistiltä. Tuloksista on havaittavissa, että kiekkojen välinen hajonta on hyvin pientä. Esimerkkinä on laskettu mittapisteessä 5 mitattujen 2  $\mu\text{m}$  urien keskihajonta:

$$s_{MesP.5.1} = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n}} = 8 \text{ nm}$$

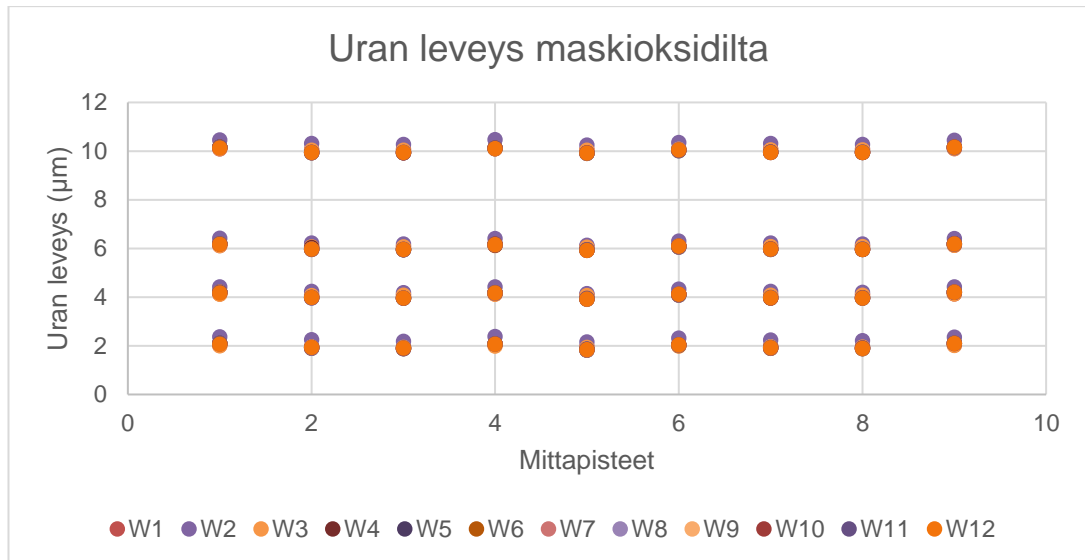
$s$  on otoksen keskihajonta  
 $x$  on havainnon lukuarvo  
 $\bar{x}$  on havaintojen keskiarvo  
 $n$  on havaintojen lukumäärä.

Lisäksi on havaittavissa, että mennessä kaikkein kapeimpaan viivanleveyteen on litografiproessin vaikeampaa päästä kohdeleveyteen.



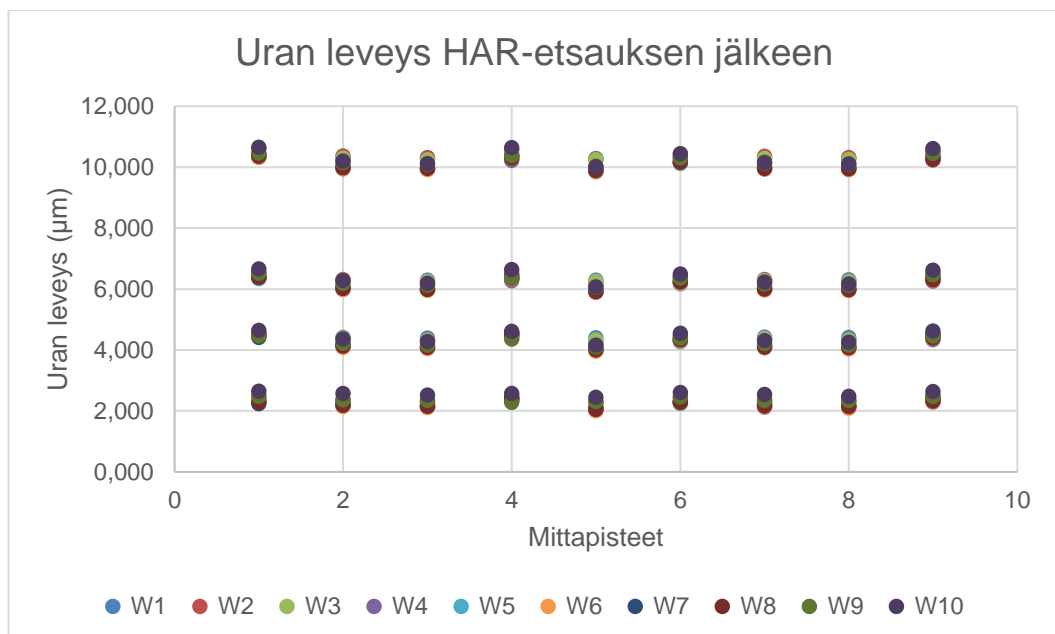
Kuva 25. CD-tulokset resistiltä.

Toinen CD-mittaus suoritettiin samoista mittapisteistä oksidin etsauksen ja resistin poiston jälkeen. Kuvassa 26 on esitetty CD-tulokset oksidilta. Tuloksista on havaittavissa, että kiekon 2 urat ovat noin 200–300 nm muita leveämmät, keskeytyneen etsauksen johdosta ja kiekkoilla 1 ja 3 on puolestaan noin 100 nm kapeampia uria kiekkoihin 4–12 verrattuna eri etsausohjelman johdosta. Lisäksi on havaittavissa, että urat ovat noin 200 nm kapeampia kiekkojen keskellä kuin reuna-alueilla. Urien välien keskihajonta on myös noussut (esim. MesP5.1; 8 nm → 90 nm).



Kuva 26. CD-tulokset oksidilta.

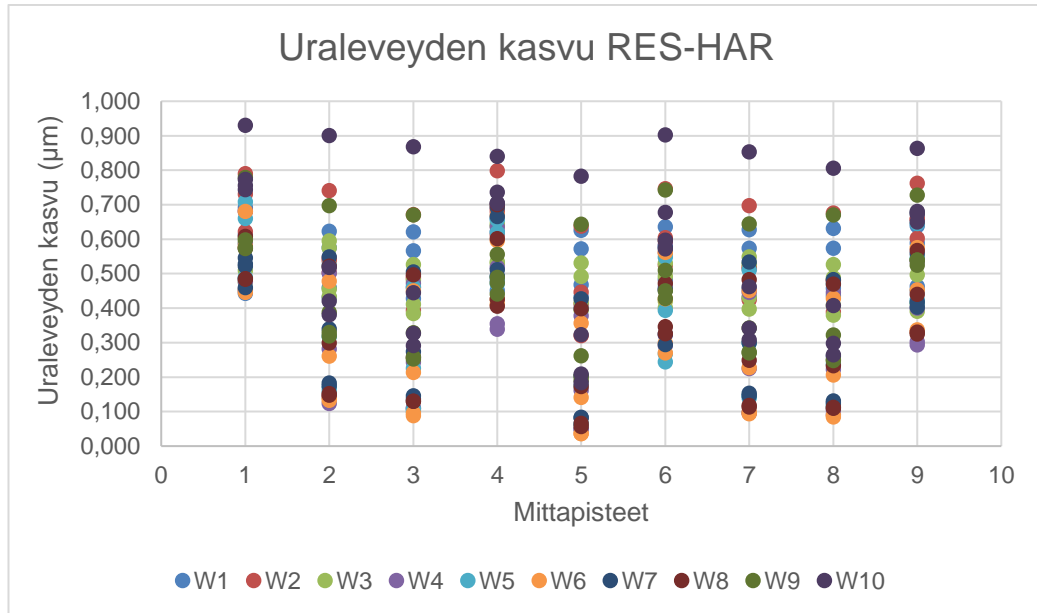
Viimeinen CD-mittaus suoritettiin samoista mittapisteistä testikiekkojen HAR-etsauksen jälkeen. Kiekkojen keskihajonnassa on havaittavissa kasvua eripituisten etsausreseptien vuoksi (esim. MesP5.1; 90 nm → 141 nm).



Kuva 27. CD-tulokset HAR-etsauksen jälkeen.

Kuvassa 28 on esitetty, miten uraleveydet ovat kasvaneet resistimittauksen ja HAR-mittauksen välillä. Esimerkiksi kiekolla 3 ensimmäisessä mittapisteessä 6 µm:n uran leveys on kasvanut seuraavasti:

$$MesP1.3_{HAR} - MesP1.3_{RES} = 475 \text{ nm}$$



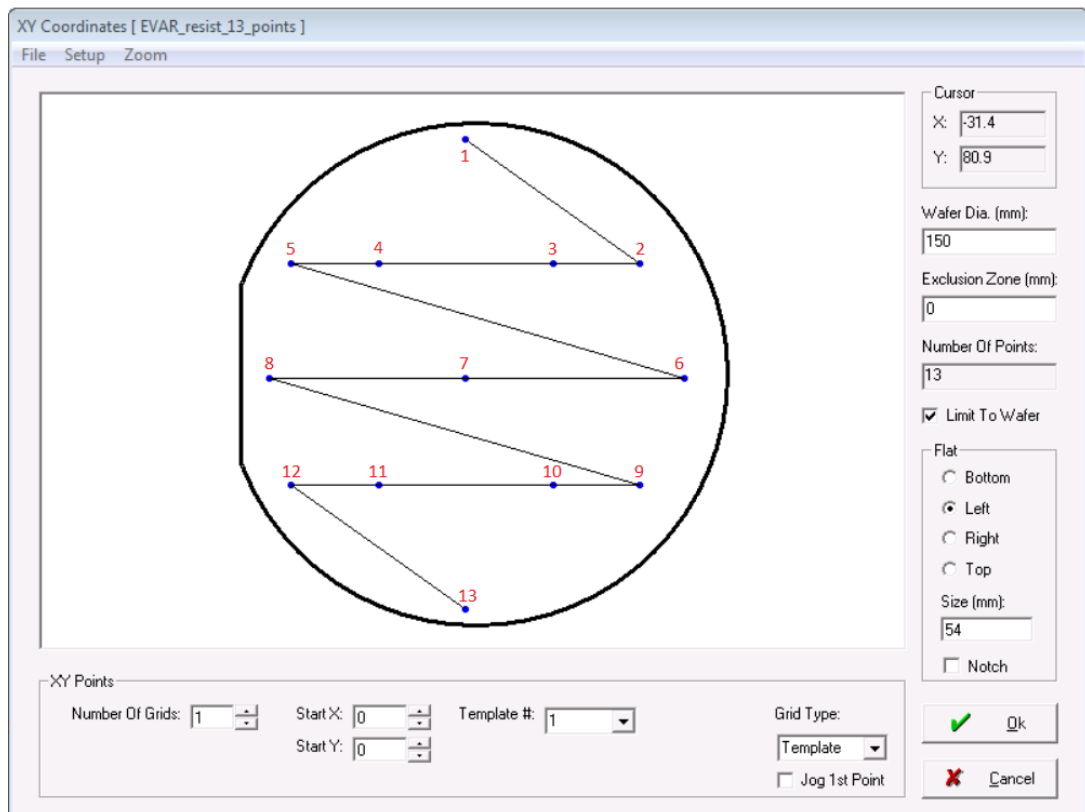
Kuva 28. Uraleveyden kasvu resistimittauksen ja HAR-mittauksen välillä.

Tarkemmat CD-mittau tulokset löytyvät liitteestä 1.

### 5.3.2 Ohutkalvojen mittaukset

Resistin ja oksidin paksuusmittaukset suoritettiin 13 mittapisteestä kuvassa 29 esitellyn XY-kartan mukaisesti (REFLECT\_02). Mittapisteet sijaitsevat valotuskartassa esitelyjen mitattavien shottien sisällä. Tarkempi kohdistus on tehty keskelle oikeassa alakulmassa olevaa elementtiä, koska kyseinen elementti ei sisällä mittausta häiritseviä kuvioita. Kiekkon tasanne eli flat on kuvassa vasemmalla.

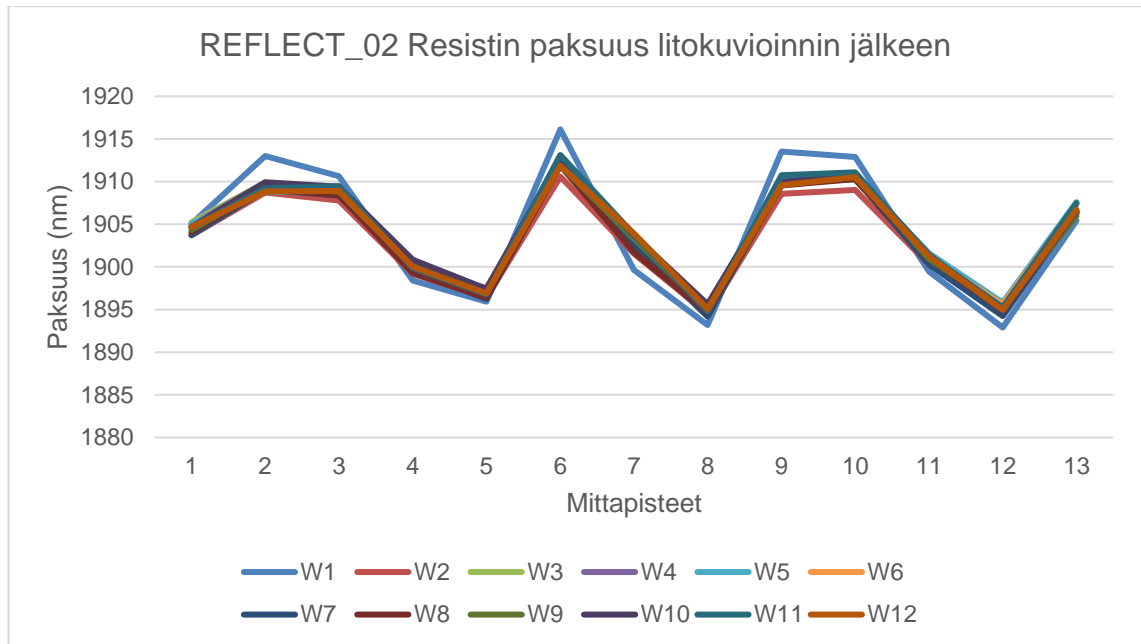




Kuva 29. Ohutkalvojen 13 pisteen mittauskartta (REFLECT\_02).

Ensimmäinen ohutkalvojen mittaus suoritettiin optisella reflektometrillä testikiekkojen litografiakuvioidin jälkeen. Mittausohjelmalla mitattiin testikiekkojen oksidin ja resistin paksuus. Mittauksen tarkoituksena oli lähinnä opetella mittausohjelman tekemistä REFLECT\_02-laitteella sekä varmistaa, että kalvonpaksuudet ovat prosessitoleranssien sisällä jatko-prosessointia varten.

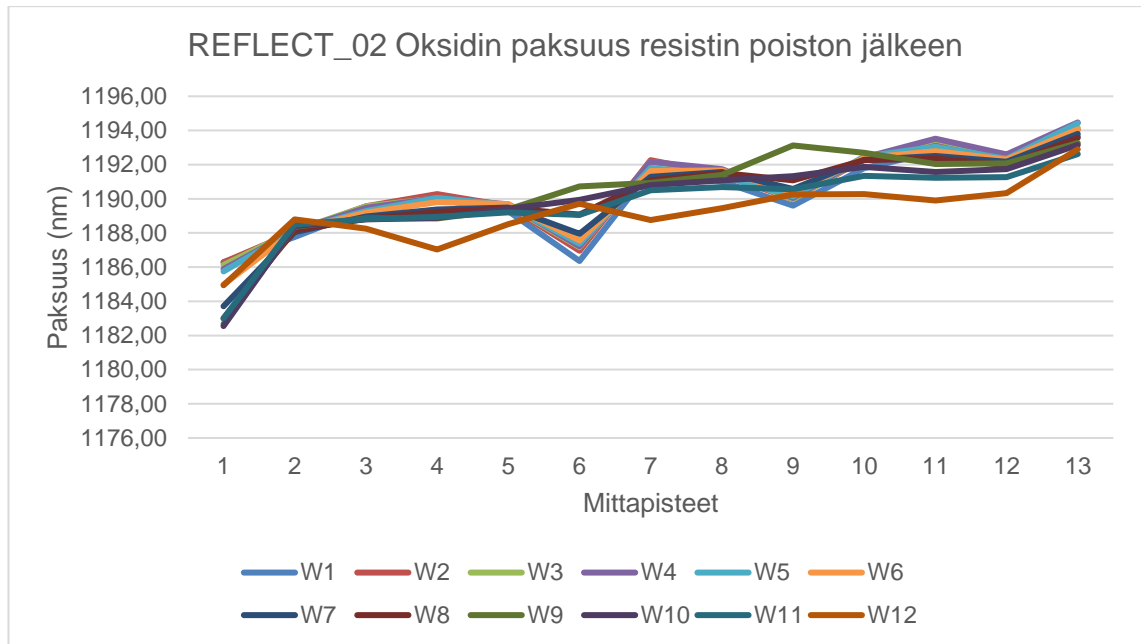
Kuvassa 30 on esitetty testikiekkojen (W1–12) resistin paksuus mittapisteittäin. Tuloksista on havaittavissa, että resistin paksuus on noin 20 nm ohuempaa flatillä verrattuna flatin vastakkaiseen pätyyn. Lisäksi kiekon 1 paksuudessa on hieman muita kiekkoja suurempaa vaihtelua. Kaikkien kiekkojen mittapisteet ovat kuitenkin hyvin lähellä 1900 nm:n kohdepaksuutta. Samalla mittausohjelmalla mitattiin myös alla olevan oksidikalvon paksuus.



Kuva 30. REFLECT\_02 Resistin paksuus litokuvioinnin jälkeen.

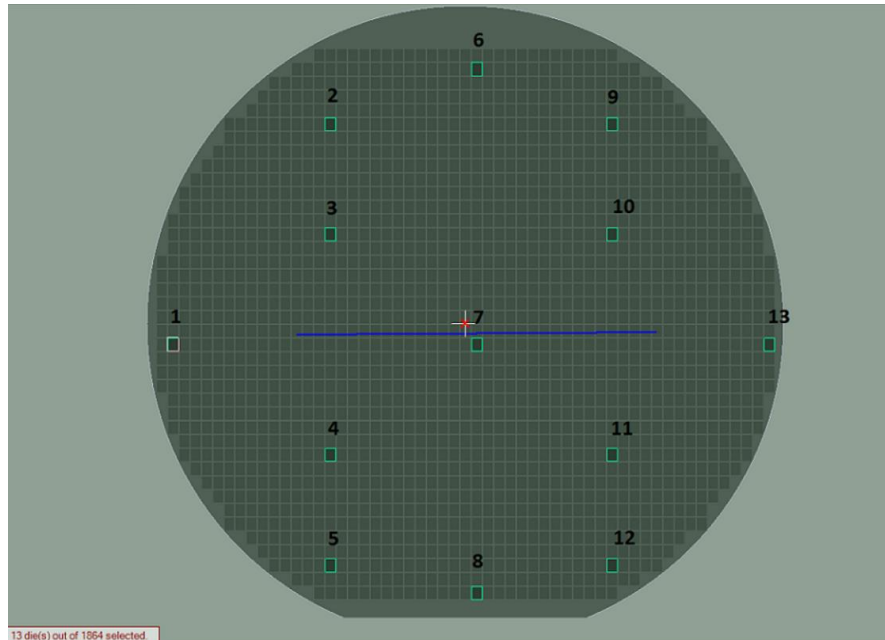
Seuraavat ohutkalvojen mittaukset suoritettiin oksidilta resistin poiston jälkeen. Mittaukset suoritettiin reflektometrillä 13 mittapistestä edellä esitetyn mittauskartan mukaisesti. Kuvassa 31 on esitetty oksidin paksuudet resistin poiston jälkeen. Tuloksista on havaittavissa, että kiekkojen vasemmalla puolella (flat alhaalla) oksidin paksuus on noin 10 nm ohuempaa kuin oikealla puolella. Kiekot ovat kuitenkin keskimäärin lähellä 1200 nm:n kohdepaksuutta. Esimerkkinä on laskettu kiekon 6 keskipaksuus:

$$\bar{x}_{W6} = \frac{MesP1 + \dots + MesP13}{n} = 1190,35 \text{ nm}$$



Kuva 31. REFLECT\_02 Oksidin paksuus resistin poiston jälkeen.

Oksidin paksuudet mitattiin myös optisen profilometrin FTR-sensorilla kuvassa 32 esitellyn mittauskartan mukaisesti. Mittapisteeet vastaavat optisen reflektometrin mittapisteeitä.



Kuva 32. Optisen profilometrin 13 pisteen mittauskartta.

Taulukossa 4 on esitetty mittalaitteiden välinen ero. REFLECT\_02 mittauksen tuloksista on vähennetty TOPO\_01 mittauksen tulokset. Taulukosta on havaittavissa, että FTR-sensorilla mitatut oksidin paksuudet ovat kiekko kohtaisesti keskimäärin noin 0,70 nm ohuempia kuin reflektometrillä mitatut paksuudet.

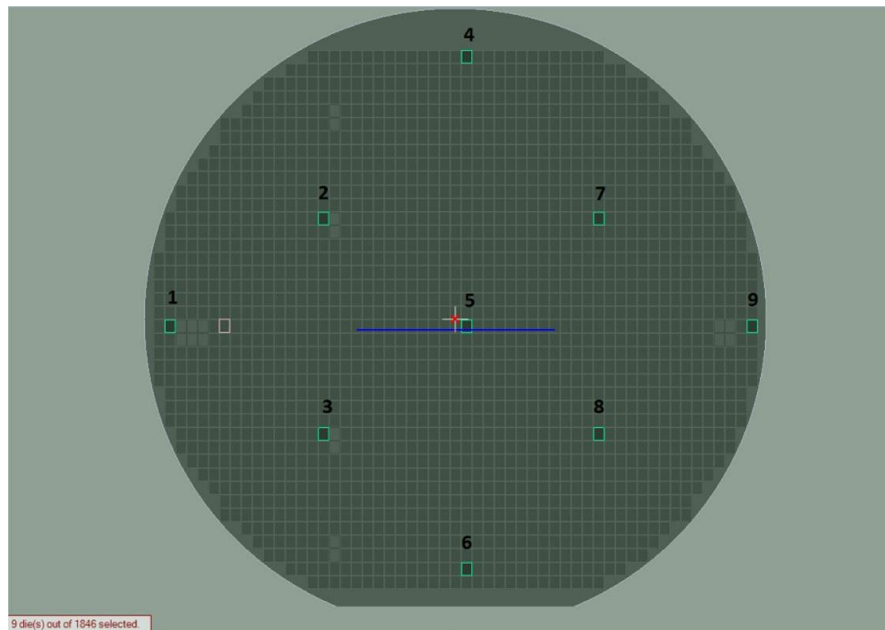
Taulukko 4. REFLECT\_02:n ja FTR-sensorin välinen ero oksidin paksuudessa.

| REFLECT_02 vs. TOPO_01 (nm) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MesP.                       | W1   | W2   | W3   | W4   | W5   | W6   | W7   | W8   | W9   | W10  | W11  | W12  | AVG  | STDV |
| 1                           | 0,49 | 0,48 | 0,53 | 0,59 | 0,35 | 0,68 | 0,51 | 0,40 | 0,47 | 0,45 | 0,60 | 0,54 | 0,51 | 0,09 |
| 2                           | 0,97 | 1,06 | 1,04 | 0,94 | 1,06 | 0,84 | 1,05 | 0,95 | 0,87 | 1,01 | 0,89 | 1,09 | 0,98 | 0,08 |
| 3                           | 0,80 | 0,87 | 0,77 | 0,77 | 0,79 | 0,68 | 0,76 | 0,73 | 0,86 | 0,89 | 0,91 | 0,75 | 0,80 | 0,07 |
| 4                           | 0,28 | 0,38 | 0,33 | 0,35 | 0,26 | 0,61 | 0,28 | 0,32 | 0,25 | 0,38 | 0,44 | 0,33 | 0,35 | 0,10 |
| 5                           | 0,18 | 0,38 | 0,32 | 0,47 | 0,33 | 0,39 | 0,48 | 0,36 | 0,28 | 0,41 | 0,41 | 0,21 | 0,35 | 0,09 |
| 6                           | 1,15 | 1,25 | 1,26 | 1,22 | 1,28 | 1,16 | 1,05 | 1,27 | 1,12 | 1,13 | 1,25 | 1,21 | 1,20 | 0,07 |
| 7                           | 0,69 | 0,76 | 0,77 | 0,77 | 0,62 | 0,72 | 0,78 | 0,79 | 0,54 | 0,70 | 0,70 | 0,56 | 0,70 | 0,09 |
| 8                           | 0,50 | 0,43 | 0,30 | 0,43 | 0,52 | 0,56 | 0,46 | 0,41 | 0,30 | 0,28 | 0,39 | 0,45 | 0,42 | 0,09 |
| 9                           | 1,11 | 1,07 | 1,08 | 1,15 | 0,95 | 1,16 | 1,17 | 1,09 | 1,12 | 1,02 | 1,16 | 1,15 | 1,10 | 0,07 |
| 10                          | 0,99 | 0,84 | 1,00 | 0,82 | 1,07 | 0,89 | 0,88 | 0,97 | 0,90 | 0,96 | 0,75 | 0,88 | 0,91 | 0,09 |
| 11                          | 0,44 | 0,38 | 0,56 | 0,62 | 0,54 | 0,59 | 0,41 | 0,75 | 0,43 | 0,57 | 0,44 | 0,51 | 0,52 | 0,11 |
| 12                          | 0,51 | 0,42 | 0,45 | 0,40 | 0,43 | 0,40 | 0,47 | 0,58 | 0,57 | 0,54 | 0,56 | 0,63 | 0,50 | 0,08 |
| 13                          | 0,75 | 0,85 | 0,66 | 0,77 | 0,92 | 0,76 | 0,90 | 0,77 | 0,87 | 0,85 | 0,72 | 0,80 | 0,80 | 0,08 |
| AVG                         | 0,68 | 0,71 | 0,70 | 0,72 | 0,70 | 0,73 | 0,71 | 0,72 | 0,66 | 0,71 | 0,71 | 0,70 |      |      |
| STDV                        | 0,31 | 0,31 | 0,32 | 0,28 | 0,33 | 0,24 | 0,29 | 0,30 | 0,31 | 0,29 | 0,28 | 0,31 |      |      |

Tarkemmat ohutkalvojen mittaustulokset löytyvät liitteestä 2.

### 5.3.3 Profiilin mittaukset

Kiekkojen HAR-etsauksen jälkeen oli selvitettävä, mikä sensori soveltuu parhaiten urien syvyyden ja leveyden mittaukseen. Leveyden mittaukseen tarkimmaksi sensoriksi osoitettiin CFM 100x -sensori, jonka sivusuuntainen resoluutio oli sensoreista paras (0,25 µm). Leveyden mittaukset suoritettiin CD-mittausta vastaavista mittapisteistä kuvassa 33 esitellyn kartan mukaisesti.



Kuva 33. Optisen profilometrin yhdeksän pisteen mittauskartta.

Taulukossa 5 on esitetty CD-mittauksen ja CFM 100x -sensorin välinen ero urien leveydessä. CD-mittauksen tuloksista on vähennetty CFM 100x -sensorin tulokset. Tuloksista on havaittavissa, että kiekkoakohtaisesti tuloksissa esiintyy suurta hajontaa (69–210 nm). Tulosten välisessä keskimääräisessä poikkeamassa on myös havaittavissa vaihtelua. Esimerkkinä on laskettu kiekon 1 keskimääräinen poikkeama tulosten välillä:

$$\bar{x}_{W1} = \frac{|MesP1.1| + \dots + |MesP9.4|}{n} = 81 \text{ nm}$$

$|MesPx|$  on havainnon itseisarvo  
 $\bar{x}$  on havaintojen itseisarvojen keskiarvo  
 $n$  on havaintojen lukumäärä.

Taulukko 5. CD-mittauksen ja CFM 100x -sensorin välinen ero urien leveydessä (µm).

| MesP.   | W1     | W2     | W3     | W4     | W5     | W6     | W7     | W8     | W9     | W10    | STDV  | AVG.ABS |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|
| 1.1     | -0,094 | -0,132 | -0,084 | -0,110 | 0,035  | -0,056 | -0,103 | -0,171 | -0,173 | 0,075  | 0,077 | 0,103   |
| 1.2     | 0,154  | -0,120 | 0,122  | -0,073 | 0,161  | -0,020 | 0,055  | -0,054 | -0,468 | 0,121  | 0,180 | 0,135   |
| 1.3     | 0,134  | -0,308 | 0,076  | -0,179 | 0,190  | -0,200 | 0,047  | -0,116 | -0,238 | 0,151  | 0,174 | 0,164   |
| 1.4     | -0,029 | -0,023 | 0,085  | -0,099 | 0,090  | -0,111 | 0,003  | -0,150 | -0,212 | 0,145  | 0,109 | 0,095   |
| 2.1     | -0,077 | -0,191 | -0,224 | -0,281 | -0,155 | -0,216 | -0,122 | -0,165 | -0,304 | -0,300 | 0,073 | 0,204   |
| 2.2     | 0,016  | -0,219 | 0,007  | -0,118 | -0,005 | -0,093 | -0,012 | -0,148 | -0,391 | -0,526 | 0,173 | 0,154   |
| 2.3     | 0,106  | -0,139 | 0,021  | -0,141 | -0,012 | -0,081 | -0,045 | -0,141 | -0,189 | -0,430 | 0,138 | 0,131   |
| 2.4     | 0,027  | -0,096 | -0,071 | -0,041 | -0,008 | -0,113 | -0,062 | -0,065 | -0,111 | -0,357 | 0,098 | 0,095   |
| 3.1     | -0,185 | -0,249 | -0,160 | -0,269 | -0,262 | -0,221 | -0,216 | -0,184 | -0,284 | -0,257 | 0,040 | 0,229   |
| 3.2     | 0,074  | -0,248 | -0,043 | -0,050 | -0,143 | -0,106 | -0,092 | -0,162 | -0,237 | -0,371 | 0,119 | 0,153   |
| 3.3     | -0,034 | -0,159 | -0,170 | 0,202  | -0,075 | -0,002 | -0,072 | -0,131 | -0,131 | -0,317 | 0,128 | 0,129   |
| 3.4     | -0,008 | -0,095 | -0,075 | -0,014 | -0,093 | -0,052 | -0,116 | -0,087 | 0,044  | -0,242 | 0,073 | 0,083   |
| 4.1     | -0,111 | -0,115 | -0,024 | -0,145 | -0,099 | -0,158 | 0,003  | -0,140 | -0,349 | 0,026  | 0,100 | 0,117   |
| 4.2     | 0,087  | -0,038 | 0,105  | -0,127 | 0,011  | 0,004  | 0,156  | -0,019 | -0,417 | 0,040  | 0,153 | 0,100   |
| 4.3     | 0,095  | -0,060 | -0,076 | -0,215 | -0,039 | -0,183 | 0,126  | -0,030 | -0,310 | 0,239  | 0,158 | 0,137   |
| 4.4     | 0,088  | -0,054 | -0,004 | -0,117 | -0,092 | -0,119 | 0,090  | -0,108 | -0,217 | 0,218  | 0,123 | 0,111   |
| 5.1     | -0,153 | -0,279 | -0,177 | -0,345 | -0,285 | -0,308 | -0,278 | -0,318 | -0,233 | -0,393 | 0,069 | 0,277   |
| 5.2     | 0,075  | -0,141 | -0,058 | 0,000  | -0,120 | -0,110 | -0,104 | -0,002 | -0,292 | -0,376 | 0,129 | 0,128   |
| 5.3     | -0,064 | -0,102 | -0,026 | -0,064 | -0,073 | -0,023 | -0,065 | -0,127 | -0,146 | -0,200 | 0,053 | 0,089   |
| 5.4     | 0,034  | -0,055 | -0,134 | 0,027  | -0,075 | -0,006 | 0,023  | 0,020  | 0,008  | -0,182 | 0,071 | 0,056   |
| 6.1     | -0,134 | -0,249 | -0,139 | -0,233 | -0,290 | -0,163 | -0,107 | -0,138 | -0,141 | -0,163 | 0,057 | 0,176   |
| 6.2     | 0,059  | -0,124 | -0,029 | -0,185 | -0,296 | -0,081 | 0,060  | -0,114 | -0,207 | -0,222 | 0,113 | 0,138   |
| 6.3     | 0,158  | -0,243 | -0,102 | -0,129 | -0,225 | -0,100 | -0,091 | -0,103 | -0,008 | -0,246 | 0,115 | 0,141   |
| 6.4     | 0,044  | -0,166 | -0,092 | -0,159 | -0,388 | -0,119 | -0,119 | -0,198 | -0,081 | -0,231 | 0,107 | 0,160   |
| 7.1     | -0,107 | -0,095 | -0,159 | -0,268 | -0,144 | -0,224 | -0,165 | -0,191 | -0,358 | -0,314 | 0,083 | 0,203   |
| 7.2     | -0,022 | -0,156 | -0,101 | -0,078 | 0,010  | -0,049 | -0,081 | -0,043 | -0,272 | -0,581 | 0,166 | 0,139   |
| 7.3     | 0,119  | -0,278 | 0,000  | -0,124 | -0,088 | -0,026 | -0,045 | -0,043 | -0,243 | -0,467 | 0,159 | 0,143   |
| 7.4     | -0,013 | -0,024 | -0,089 | 0,049  | -0,039 | -0,014 | 0,031  | -0,026 | -0,104 | -0,354 | 0,108 | 0,074   |
| 8.1     | -0,164 | -0,102 | -0,284 | -0,249 | -0,233 | -0,307 | -0,209 | -0,212 | -0,256 | -0,379 | 0,073 | 0,240   |
| 8.2     | 0,061  | -0,149 | -0,061 | -0,156 | -0,089 | -0,133 | -0,101 | -0,069 | -0,319 | -0,379 | 0,121 | 0,152   |
| 8.3     | -0,075 | -0,240 | -0,037 | -0,062 | -0,131 | -0,076 | -0,082 | -0,050 | -0,131 | -0,300 | 0,082 | 0,118   |
| 8.4     | -0,010 | -0,058 | -0,110 | 0,017  | -0,086 | -0,022 | -0,084 | -0,058 | 0,033  | -0,102 | 0,048 | 0,058   |
| 9.1     | -0,039 | -0,132 | -0,141 | -0,228 | -0,081 | -0,170 | -0,082 | -0,205 | -0,350 | -0,020 | 0,094 | 0,145   |
| 9.2     | 0,106  | -0,078 | 0,034  | -0,052 | 0,085  | -0,161 | -0,029 | -0,133 | -0,469 | -0,199 | 0,159 | 0,135   |
| 9.3     | 0,141  | -0,126 | -0,036 | -0,134 | -0,095 | -0,102 | -0,122 | -0,160 | -0,266 | -0,219 | 0,104 | 0,140   |
| 9.4     | 0,018  | -0,098 | -0,149 | 0,008  | -0,131 | -0,174 | -0,097 | -0,129 | -0,139 | -0,196 | 0,067 | 0,114   |
| STDV    | 0,095  | 0,077  | 0,089  | 0,108  | 0,125  | 0,080  | 0,092  | 0,069  | 0,129  | 0,210  |       |         |
| AVG.ABS | 0,081  | 0,143  | 0,092  | 0,132  | 0,123  | 0,114  | 0,092  | 0,117  | 0,226  | 0,259  |       |         |

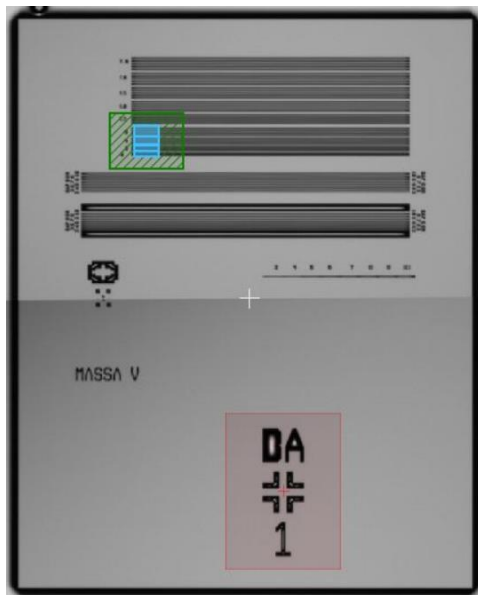
Urien reunaprofiilien muodon vaihtelu vaikuttaa oleellisesti mittaustarkkuuteen. Mittausohjelmaan tulee säätää kuinka se tunnistaa reunaprofiilin ja kuinka leveä se on. Jos tässä esiintyy vaihtelua, vaikuttaa se oleellisesti mittaustarkkuuteen. Kuvassa 34 ylempanä on esitetty hyvin mittausohjelman säätöjen kanssa korreloiva intensiteettiprofiili, josta leveys lasketaan (W1; MesP6.4; poikkeama -44 nm). Alempana on esitetty heikommien säätöjen kanssa korreloiva intensiteettiprofiili (W3; MesP2.1; poikkeama -224 nm).



Kuva 34. Esimerkki leveyden mittauksen intensiteettiprofiileista. Leveys lasketaan sinisten palkkien välisestä etäisyydestä.

Leveyden mittausohjelma säädettiin testikiekon 1 perusteella, jolla oli pienin keskimääräinen poikkeama CD-mittauksen tuloksiin verrattuna (81 nm). Liitteessä 3 on esitetty tarkemmin leveyden mittauksien tuloksia ja intensiteettiprofiileja.

Urien syvyyden mittaamiseen soveltuvimmaksi sensoriksi valikoitui WLI FL 50x, jolla oli paras syvyysuuntainen resoluutio (0,1 nm). Urien syvyyttä elementeiltä mitattiin kuvassa 35 esiteltyjen mitta-alueiden mukaisesti. Kukin mitta-alue sisälsi viisi yhtä leveää uraa joilta syvyyttä mitattiin. Mitattavien urien leveydet olivat 2, 3, 4 ja 5  $\mu\text{m}$ .



Kuva 35. Urien syvyyden mitta-alueet elementillä.

Lupaavimmat mittaustulokset saatiin 4  $\mu\text{m}$  urista testikiekolta 10. Taulukossa 6 on esitetty mittaustulokset kiekolta 10, mittapisteistä 1–4 ja 6–9. Keskimmäisen mittapisteen mittaaminen ei kyseisellä ohjelmalla onnistunut, koska mittapisteen intensiteettiprofiili oli muihin pisteisiin nähden poikkeava.

Taulukko 6. Urien syvyydet mittapisteittäin kiekolta 10 (uraleveys 4  $\mu\text{m}$ ).

| WAFER | MesPoint | Mean Depth [ $\mu\text{m}$ ] | Depth Standard Deviation [ $\mu\text{m}$ ] | Quality [%] |
|-------|----------|------------------------------|--|-------------|
| 10    | 1        | 59,313                       | 0,0174                                     | 99,98       |
| 10    | 2        | 56,052                       | 0,0905                                     | 99,98       |
| 10    | 3        | 55,519                       | 0,2876                                     | 99,96       |
| 10    | 4        | 59,183                       | 0,0135                                     | 99,98       |
| 10    | 5        | NaN                          | NaN  | 99,96       |
| 10    | 6        | 57,323                       | 0,0372                                     | 99,98       |
| 10    | 7        | 55,921                       | 0,1397                                     | 99,96       |
| 10    | 8        | 55,634                       | 0,2169                                     | 99,98       |
| 10    | 9        | 58,958                       | 0,0665                                     | 99,98       |

Mittapisteissä itsessään esiintyy jo melko paljon hajontaa. Sama mittaus toistettiin kuitenkin viidesti, jotta saatiin selville, kuinka toistettava mittaus on. Taulukossa 7 on esitetty testikiekon 10 mittaustulokset viiden peräkkäisen mittauksen jälkeen.

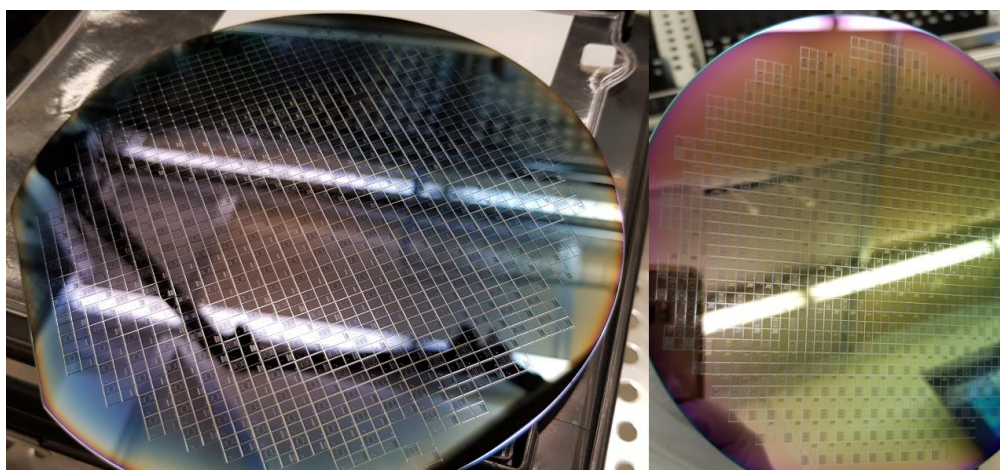


Taulukko 7. Urien syvyydet testikiekolta 10 viiden perättäisen mittauksen jälkeen ( $\mu\text{m}$ ).

| MesPoint | 1st Mes | 2nd Mes | 3rd Mes | 4th Mes | 5th Mes | STDV  |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1        | 59,313  | 59,311  | 59,320  | 59,400  | 59,213  | 0,059 |
| 2        | 56,052  | 55,649  | 56,030  | 56,178  | 56,236  | 0,205 |
| 3        | 55,519  | 55,550  | 55,544  | 55,416  | 55,478  | 0,050 |
| 4        | 59,183  | 59,226  | 59,214  | 59,171  | 59,275  | 0,037 |
| 5        | NaN     | NaN     | NaN     | NaN     | NaN     | NaN   |
| 6        | 57,323  | 57,494  | 57,305  | 57,431  | 57,267  | 0,085 |
| 7        | 55,921  | 55,992  | 55,833  | 55,965  | 55,898  | 0,055 |
| 8        | 55,634  | 55,708  | 55,647  | 55,549  | 55,811  | 0,087 |
| 9        | 58,958  | 59,163  | 59,402  | 59,279  | 59,245  | 0,147 |

Tuloksista on havaittavissa, että kyseinen mittausohjelma pystyi mittaamaan  $4 \mu\text{m}$  levyisiä uria kiekolta 10 melko toistettavasti, mittapisteiden keskihajonnan ollessa välillä 37–205 nm. Liitteessä 4 on esitetty tarkemmin urien syvyyden mittaustuloksia.

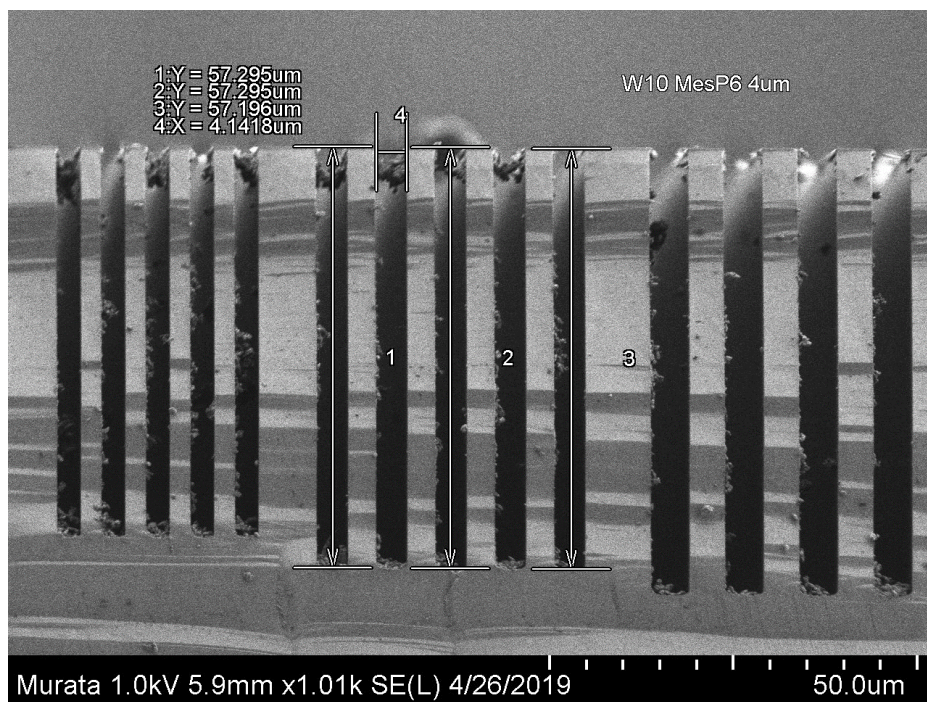
Urien syvyyden mittauksessa luotettavien ja toistettavien mittausten tekeminen osoittautui erittäin haastavaksi. Syvyyden luotettavaan mittaukseen vaikutti oleellisesti urien leveyden lisäksi maskioksidin epätasainen kuluminen etsauksessa. Voimakkaat sävyerot maskioksidissa hankaloittivat mittausta. Eri mittapisteissä samoilla sensorin asetuksilla tuli usein hyvin erilaisia tuloksia. Etenkin syvempään etsatuilla kiekkoilla (W9–12) maskioksidi muuttui kiekon keskeltä huomattavasti voimakkaammin heijastavaksi, mikä aiheutti mittavirheitä kiekon keskipistettä lähellä olevissa mittapisteissä 2, 3, 5, 7 ja 8. Kuvassa 36 on esitetty esimerkki etsatuista testikiekoista.



Kuva 36. Esimerkki etsatuista testikiekoista.

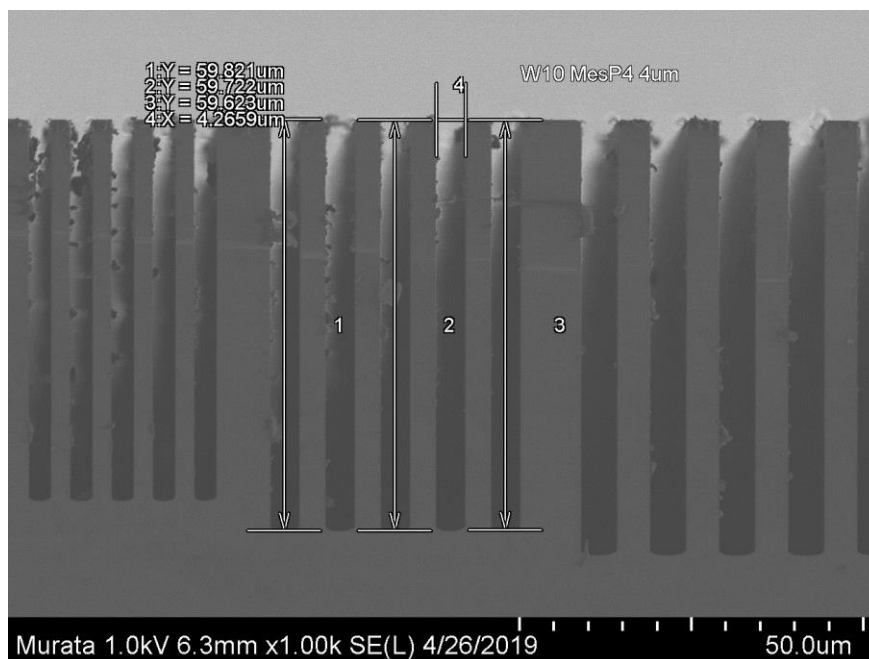
#### 5.3.4 SEM-mittaukset

SEM-mittaukset suoritettiin kiekolta 10 muiden mittausten jälkeen, koska mittausta varten oli kiekko tuhottava. Kuvassa 37 on esitetty mittapisteestä 6 mitattuja urien syvyyksiä. Vastaavat urien syvyydet olivat profilometrillä mitattuna 57,267– 57,494  $\mu\text{m}$ .



Kuva 37. Urien syvyydet mittapisteessä 6.

Kuvassa 38 on esitetty urien syvyyksiä mittapisteessä 4. Vastaavat urien syvyydet olivat profilometrillä mitattuna 59,171– 59,275  $\mu\text{m}$ . Kuvan poikkileikkaus on profilometrin mitausalueeseen verrattuna hieman keskemällä.



Kuva 38. Urien syvyydet mittapisteessä 4.

## 6 Yhteenveto

Aihealueen ollessa laaja on työn teoriaosuudessa moni prosessi ja asia esitetty melko yksinkertaistetussa muodossa. Aiheesta kiinnostuneille löytyy kuitenkin runsaasti kirjallisuutta ja verkkojulkaisuja, joihin tutustua. Lähdeaineiston ollessa lähes täysin englanninkielinen oli teoriaosuuden haastavin vaihe löytää monelle alakohtaiselle termille suomenkielinen vastine.

Työn tavoitteena oli selvittää MFI:llä käytössä olevan optisen profilometrin mittauskykyä ja vertailla tuloksia muihin käytössä oleviin mittalaitteisiin. Oksidikalvon paksuuden mittaukset osoittivat, että profilometrin ja vertailukohteena olevan reflektometrin antamissa mittaustuloksissa oli hyvin pieni ero toisiinsa (0,2–1,3 nm). Leveyden mittaukset optisella profilometrillä ja CD-mittarilla osoittivat, että profilometrin antamissa tuloksissa esiintyy suuria eroja CD-mittauksen tuloksiin verrattaessa (n. 20–400 nm). Mikäli mitattavien urien etsausvyvyys on kuitenkin ennakkoon hyvin tiedossa, on laitteiden välinen ero säädetävissä arviolta alle 100 nanometriin.

Kapeiden urien luotettava syvyyden mittaus optisella profilometrillä osoittautui erittäin hankalaksi, eikä täysin luotettavaa ja toimivaa mittausohjelmaa pystytty luomaan. Luotettavimmat tulokset saatiin leveydeltään 4 µm:n ja syvyydeltään noin 55–59 µm:n urista. SEM-mittauksella saatiin varmennettua, että urien syvyydet vastasivat kohtalaisen tarkasti profilometrin tuloksia. Urien leveyden lisäksi maskioksidin heijastavuus vaikutti oleellisesti mittaustuloksiin. Jatkokehityskohteena olisi selvittää, pystyttäisiinkö testikiekkojen maskioksidin paksuutta lisäämällä tai maskioksidi kokonaan poistamalla lisäämään mittauksen luotettavuutta ja syvyyttä.

Työn tuloksia on tarkoitus hyödyntää plasmaetsauslaitteille suunnitellun HAR-monitorin kehityksessä. Tulevaisuudessa HAR-etsattavat rakenteet yltävät jopa 100 µm:n syvyyteen.

## Lähteet

- 1 Murata Electronics Oy Company profile. 2018. Yrityksen sisäinen dokumentti. Murata Electronics Oy.
- 2 SFS-EN ISO 14644-1:2015. Puhdastilat ja puhtaat alueet. 2015. Puhdastilaluokitukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 3 SOI Wafers. 2011. Verkkoaineisto. Bonda Technology Pte Ltd. <<http://www.bondatek.com/advanced-soiwafers.html>>. Luettu 27.1.2019.
- 4 Franssila, Sami. 2004. Introduction to microfabrication. Chichester: Wiley cop.
- 5 Beeby, Stephen; Ensell, Graham; Kraft, Michael & White, Neil. 2004. MEMS mechanical sensors. Boston: Artech house.
- 6 MEMS Thin Film Deposition Processes. 2018. Verkkoaineisto. The MEMS and Nanotechnology Exchange MNX. <<https://www.mems-exchange.org/MEMS/processes/deposition.html>>. Luettu 19.11.2018.
- 7 Etching Processes. 2018. Verkkoaineisto. The MEMS and Nanotechnology Exchange MNX. <<https://www.mems-exchange.org/MEMS/processes/etch.html>>. Luettu 28.11.2018.
- 8 An Introduction to MEMS. 2002. Verkkoaineisto. PRIME Faraday Partnership. <[https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology\\_review/an-introduction-to-mems.pdf](https://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf)>. Luettu 1.12.2018.
- 9 Lithography. 2018. Verkkoaineisto. The MEMS and Nanotechnology Exchange MNX. <<https://www.mems-exchange.org/MEMS/processes/lithography.html>>. Luettu 1.12.2018.
- 10 ICP-RIE. 2016. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/ICP-RIE>>. Päivitetty 7.7.2016. Luettu 6.12.2018.
- 11 Sharifi, Hasan & Gardner, Geoff. 2008. Plasma RIE etching fundamentals and applications. Verkkoaineisto. <[https://www.purdue.edu/discoverypark/birck/files/Plasma\\_RIE\\_Etching\\_Fundamentals\\_and\\_Applications.pdf](https://www.purdue.edu/discoverypark/birck/files/Plasma_RIE_Etching_Fundamentals_and_Applications.pdf)>. Purdue University. Luettu 6.12.2018.
- 12 Deep reactive-ion etching. 2018. Verkkoaineisto. Wikimedia Foundation. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Deep\\_reactive-ion\\_etching#Bosch\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_reactive-ion_etching#Bosch_process)>. Päivitetty 23.4.2018. Luettu 14.12.2018.



- 13 The fabrication of patternable silicon nanotips using deep reactive ion etching. 2008. Verkkoaineisto. Journal of Micromechanics and Microengineering. <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.562.85&rep=rep1&type=pdf>>. Päivitetty 27.5.2008. Luettu 17.12.2018.
- 14 Aspect Ratio Dependent Etching (ARDE). 2010. Verkkoaineisto. Oxford Instruments Plasma Technology. <<https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=2738>>. Päivitetty 26.11.2010. Luettu 17.12.2018.
- 15 FilmTek 2000 PAR-SE 150mm AutoLoader Operations Manual. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. SCI Scientific Computing International.
- 16 Ellipsometry Tutorial. 2019. Verkkoaineisto. J.A. Woollam Co. <<https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial>>. Luettu 13.1.2019.
- 17 CD. 2018. Verkkoaineisto. MueTec GmbH. <<https://www.muetec.com/CD.html>>. Luettu 15.1.2019
- 18 Atteberry, Jonathan. 2009. How Scanning Electron Microscopes Work. Verkkoaineisto. <<https://science.howstuffworks.com/scanning-electron-microscope.htm>>. Luettu 16.1.2019.
- 19 Operating Manual FRT CFM (DT). 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. FRT GmbH.
- 20 Operating Manual FRT CWL Sensor. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. FRT GmbH.
- 21 CHRomatic Confocal Principle for Distance Measurements. 2019. Verkkoaineisto. Precitec Group. <<https://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/how-it-works/>>. Luettu 19.1.2019.
- 22 Operating Manual for FRT IRT. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. FRT GmbH.
- 23 Operating Manual FRT FTR Sensor. 2016. Yrityksen sisäinen dokumentti. FRT GmbH.
- 24 Comparison of Ellipsometry and Spectral Reflectance. 2018. Verkkoaineisto. Filmetrics Inc. <<https://www.filmetrics.com/ellipsometry>>. Luettu 22.1.2019.
- 25 Operating Manual FRT WLI PL. 2015. Yrityksen sisäinen dokumentti. FRT GmbH.

## CD-mittaustulokset

CD-tulokset resistiltä (µm).

| MesP. | W1    | W2    | W3    | W4    | W5    | W6    | W7    | W8    | W9    | W10   | W11   | W12   | STDV  | AVG   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.1   | 1,654 | 1,708 | 1,696 | 1,708 | 1,707 | 1,703 | 1,715 | 1,715 | 1,698 | 1,715 | 1,701 | 1,720 | 0,016 | 1,703 |
| 1.2   | 3,861 | 3,879 | 3,879 | 3,880 | 3,841 | 3,881 | 3,887 | 3,888 | 3,889 | 3,885 | 3,891 | 3,892 | 0,014 | 3,879 |
| 1.3   | 5,901 | 5,910 | 5,911 | 5,911 | 5,911 | 5,906 | 5,917 | 5,918 | 5,914 | 5,917 | 5,919 | 5,922 | 0,006 | 5,913 |
| 1.4   | 9,865 | 9,876 | 9,876 | 9,874 | 9,883 | 9,873 | 9,877 | 9,876 | 9,882 | 9,882 | 9,884 | 9,890 | 0,006 | 9,878 |
| 2.1   | 1,660 | 1,628 | 1,641 | 1,658 | 1,670 | 1,666 | 1,669 | 1,663 | 1,669 | 1,669 | 1,673 | 1,674 | 0,013 | 1,662 |
| 2.2   | 3,830 | 3,826 | 3,782 | 3,821 | 3,837 | 3,826 | 3,838 | 3,833 | 3,831 | 3,836 | 3,839 | 3,840 | 0,015 | 3,828 |
| 2.3   | 5,865 | 5,808 | 5,857 | 5,846 | 5,869 | 5,849 | 5,872 | 5,867 | 5,851 | 5,859 | 5,855 | 5,876 | 0,017 | 5,856 |
| 2.4   | 9,827 | 9,826 | 9,834 | 9,825 | 9,833 | 9,814 | 9,833 | 9,827 | 9,830 | 9,822 | 9,835 | 9,841 | 0,007 | 9,829 |
| 3.1   | 1,654 | 1,660 | 1,664 | 1,659 | 1,667 | 1,659 | 1,659 | 1,659 | 1,666 | 1,655 | 1,673 | 1,666 | 0,005 | 1,662 |
| 3.2   | 3,828 | 3,826 | 3,837 | 3,827 | 3,841 | 3,830 | 3,834 | 3,831 | 3,834 | 3,824 | 3,843 | 3,835 | 0,006 | 3,833 |
| 3.3   | 5,858 | 5,857 | 5,866 | 5,861 | 5,867 | 5,862 | 5,862 | 5,859 | 5,866 | 5,856 | 5,871 | 5,867 | 0,005 | 5,863 |
| 3.4   | 9,821 | 9,824 | 9,834 | 9,826 | 9,836 | 9,830 | 9,827 | 9,823 | 9,836 | 9,826 | 9,841 | 9,836 | 0,006 | 9,830 |
| 4.1   | 1,698 | 1,707 | 1,708 | 1,719 | 1,722 | 1,713 | 1,720 | 1,720 | 1,725 | 1,736 | 1,721 | 1,723 | 0,009 | 1,718 |
| 4.2   | 3,865 | 3,872 | 3,880 | 3,884 | 3,885 | 3,878 | 3,890 | 3,889 | 3,889 | 3,905 | 3,887 | 3,890 | 0,010 | 3,885 |
| 4.3   | 5,904 | 5,907 | 5,914 | 5,920 | 5,920 | 5,912 | 5,924 | 5,924 | 5,929 | 5,935 | 5,921 | 5,924 | 0,009 | 5,920 |
| 4.4   | 9,867 | 9,875 | 9,881 | 9,884 | 9,887 | 9,880 | 9,887 | 9,886 | 9,894 | 9,902 | 9,889 | 9,892 | 0,009 | 9,885 |
| 5.1   | 1,651 | 1,643 | 1,662 | 1,647 | 1,666 | 1,645 | 1,665 | 1,654 | 1,664 | 1,664 | 1,657 | 1,651 | 0,008 | 1,656 |
| 5.2   | 3,823 | 3,818 | 3,830 | 3,818 | 3,835 | 3,819 | 3,833 | 3,825 | 3,836 | 3,831 | 3,825 | 3,826 | 0,006 | 3,827 |
| 5.3   | 5,853 | 5,848 | 5,860 | 5,846 | 5,865 | 5,851 | 5,863 | 5,856 | 5,863 | 5,861 | 5,856 | 5,856 | 0,006 | 5,857 |
| 5.4   | 9,816 | 9,818 | 9,830 | 9,809 | 9,830 | 9,818 | 9,829 | 9,814 | 9,825 | 9,824 | 9,825 | 9,824 | 0,006 | 9,822 |
| 6.1   | 1,700 | 1,705 | 1,701 | 1,703 | 1,702 | 1,695 | 1,707 | 1,706 | 1,716 | 1,705 | 1,707 | 1,702 | 0,005 | 1,704 |
| 6.2   | 3,869 | 3,872 | 3,869 | 3,870 | 3,870 | 3,862 | 3,877 | 3,874 | 3,883 | 3,870 | 3,874 | 3,869 | 0,005 | 3,872 |
| 6.3   | 5,897 | 5,902 | 5,897 | 5,899 | 5,898 | 5,891 | 5,904 | 5,901 | 5,912 | 5,897 | 5,901 | 5,896 | 0,005 | 5,900 |
| 6.4   | 9,861 | 9,873 | 9,867 | 9,869 | 9,868 | 9,861 | 9,867 | 9,866 | 9,881 | 9,867 | 9,871 | 9,867 | 0,005 | 9,868 |
| 7.1   | 1,675 | 1,678 | 1,682 | 1,676 | 1,685 | 1,675 | 1,681 | 1,676 | 1,698 | 1,683 | 1,687 | 1,689 | 0,007 | 1,682 |
| 7.2   | 3,844 | 3,844 | 3,851 | 3,847 | 3,851 | 3,843 | 3,849 | 3,848 | 3,865 | 3,847 | 3,855 | 3,858 | 0,006 | 3,850 |
| 7.3   | 5,878 | 5,878 | 5,883 | 5,879 | 5,885 | 5,875 | 5,882 | 5,879 | 5,897 | 5,881 | 5,889 | 5,890 | 0,006 | 5,883 |
| 7.4   | 9,840 | 9,842 | 9,849 | 9,843 | 9,852 | 9,842 | 9,845 | 9,841 | 9,863 | 9,848 | 9,856 | 9,856 | 0,007 | 9,848 |
| 8.1   | 1,665 | 1,662 | 1,670 | 1,665 | 1,666 | 1,665 | 1,678 | 1,668 | 1,674 | 1,675 | 1,674 | 1,666 | 0,005 | 1,669 |
| 8.2   | 3,837 | 3,830 | 3,841 | 3,832 | 3,833 | 3,831 | 3,848 | 3,838 | 3,839 | 3,843 | 3,840 | 3,835 | 0,005 | 3,837 |
| 8.3   | 5,869 | 5,861 | 5,873 | 5,864 | 5,859 | 5,865 | 5,877 | 5,868 | 5,871 | 5,872 | 5,871 | 5,864 | 0,005 | 5,868 |
| 8.4   | 9,832 | 9,832 | 9,841 | 9,835 | 9,831 | 9,833 | 9,841 | 9,832 | 9,842 | 9,843 | 9,842 | 9,835 | 0,005 | 9,837 |
| 9.1   | 1,712 | 1,726 | 1,747 | 1,767 | 1,754 | 1,754 | 1,751 | 1,768 | 1,752 | 1,777 | 1,754 | 1,759 | 0,017 | 1,752 |
| 9.2   | 3,877 | 3,893 | 3,917 | 3,938 | 3,920 | 3,926 | 3,923 | 3,947 | 3,922 | 3,949 | 3,924 | 3,931 | 0,020 | 3,922 |
| 9.3   | 5,911 | 5,921 | 5,943 | 5,963 | 5,951 | 5,951 | 5,950 | 5,969 | 5,949 | 5,971 | 5,951 | 5,956 | 0,017 | 5,949 |
| 9.4   | 9,875 | 9,885 | 9,908 | 9,925 | 9,914 | 9,915 | 9,910 | 9,926 | 9,912 | 9,933 | 9,918 | 9,918 | 0,016 | 9,912 |

## CD-tulokset maskioksidilta (µm).

| MesP. | W1     | W2     | W3     | W4     | W5     | W6     | W7     | W8     | W9     | W10    | W11    | W12    | STDV  | AVG    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 1.1   | 2,013  | 2,369  | 1,998  | 2,079  | 2,098  | 2,091  | 2,078  | 2,074  | 2,091  | 2,087  | 2,095  | 2,058  | 0,088 | 2,094  |
| 1.2   | 4,129  | 4,425  | 4,119  | 4,203  | 4,214  | 4,201  | 4,195  | 4,190  | 4,208  | 4,198  | 4,201  | 4,175  | 0,072 | 4,205  |
| 1.3   | 6,111  | 6,419  | 6,118  | 6,180  | 6,197  | 6,189  | 6,184  | 6,182  | 6,192  | 6,178  | 6,190  | 6,162  | 0,074 | 6,192  |
| 1.4   | 10,086 | 10,462 | 10,096 | 10,150 | 10,169 | 10,158 | 10,141 | 10,137 | 10,156 | 10,148 | 10,155 | 10,132 | 0,092 | 10,166 |
| 2.1   | 1,974  | 2,243  | 1,945  | 1,897  | 1,923  | 1,915  | 1,931  | 1,908  | 1,948  | 1,932  | 1,939  | 1,937  | 0,088 | 1,958  |
| 2.2   | 4,091  | 4,236  | 4,069  | 3,991  | 3,972  | 3,985  | 3,980  | 3,963  | 3,996  | 3,982  | 3,983  | 3,980  | 0,075 | 4,019  |
| 2.3   | 6,093  | 6,226  | 6,066  | 6,038  | 5,965  | 5,952  | 5,961  | 5,954  | 5,967  | 5,972  | 5,975  | 5,966  | 0,079 | 6,011  |
| 2.4   | 10,063 | 10,308 | 10,039 | 9,927  | 9,938  | 9,929  | 9,942  | 9,930  | 9,945  | 9,941  | 9,944  | 9,944  | 0,106 | 9,988  |
| 3.1   | 1,966  | 2,185  | 1,934  | 1,882  | 1,882  | 1,887  | 1,897  | 1,895  | 1,901  | 1,893  | 1,910  | 1,911  | 0,081 | 1,929  |
| 3.2   | 4,095  | 4,187  | 4,071  | 3,953  | 3,960  | 3,952  | 3,957  | 3,961  | 3,967  | 3,958  | 3,964  | 3,963  | 0,073 | 3,999  |
| 3.3   | 6,087  | 6,176  | 6,065  | 5,949  | 5,950  | 5,953  | 5,958  | 5,959  | 5,960  | 5,953  | 5,959  | 5,959  | 0,071 | 5,994  |
| 3.4   | 10,071 | 10,270 | 10,039 | 9,928  | 9,942  | 9,930  | 9,938  | 9,932  | 9,949  | 9,931  | 9,949  | 9,940  | 0,097 | 9,985  |
| 4.1   | 2,022  | 2,374  | 1,987  | 2,067  | 2,078  | 2,077  | 2,077  | 2,071  | 2,070  | 2,082  | 2,079  | 2,070  | 0,090 | 2,088  |
| 4.2   | 4,133  | 4,419  | 4,113  | 4,150  | 4,179  | 4,167  | 4,182  | 4,162  | 4,181  | 4,187  | 4,181  | 4,163  | 0,074 | 4,185  |
| 4.3   | 6,124  | 6,411  | 6,116  | 6,129  | 6,166  | 6,150  | 6,162  | 6,149  | 6,167  | 6,175  | 6,162  | 6,150  | 0,074 | 6,172  |
| 4.4   | 10,104 | 10,471 | 10,083 | 10,099 | 10,127 | 10,116 | 10,117 | 10,103 | 10,132 | 10,131 | 10,127 | 10,107 | 0,100 | 10,143 |
| 5.1   | 1,971  | 2,151  | 1,939  | 1,819  | 1,847  | 1,822  | 1,859  | 1,833  | 1,868  | 1,852  | 1,868  | 1,837  | 0,090 | 1,889  |
| 5.2   | 4,084  | 4,138  | 4,061  | 3,914  | 3,936  | 3,910  | 3,940  | 3,925  | 3,933  | 3,935  | 3,940  | 3,918  | 0,074 | 3,970  |
| 5.3   | 6,077  | 6,126  | 6,056  | 5,923  | 5,940  | 5,918  | 5,945  | 5,921  | 5,937  | 5,928  | 5,942  | 5,920  | 0,070 | 5,969  |
| 5.4   | 10,061 | 10,250 | 10,033 | 9,899  | 9,923  | 9,901  | 9,930  | 9,910  | 9,912  | 9,928  | 9,923  | 9,918  | 0,099 | 9,966  |
| 6.1   | 2,016  | 2,312  | 1,986  | 2,043  | 2,013  | 2,029  | 2,033  | 2,039  | 2,030  | 2,038  | 2,035  | 2,032  | 0,080 | 2,051  |
| 6.2   | 4,131  | 4,332  | 4,103  | 4,108  | 4,071  | 4,101  | 4,095  | 4,120  | 4,089  | 4,111  | 4,094  | 4,111  | 0,065 | 4,122  |
| 6.3   | 6,130  | 6,306  | 6,103  | 6,090  | 6,049  | 6,074  | 6,066  | 6,095  | 6,067  | 6,086  | 6,069  | 6,093  | 0,065 | 6,102  |
| 6.4   | 10,102 | 10,351 | 10,074 | 10,048 | 10,012 | 10,040 | 10,031 | 10,058 | 10,031 | 10,042 | 10,032 | 10,050 | 0,087 | 10,073 |
| 7.1   | 1,993  | 2,230  | 1,959  | 1,893  | 1,927  | 1,897  | 1,922  | 1,900  | 1,945  | 1,925  | 1,934  | 1,921  | 0,087 | 1,954  |
| 7.2   | 4,108  | 4,231  | 4,083  | 3,962  | 3,981  | 3,962  | 3,977  | 3,967  | 3,999  | 3,974  | 3,988  | 3,974  | 0,079 | 4,017  |
| 7.3   | 6,111  | 6,220  | 6,081  | 5,957  | 5,970  | 5,962  | 5,972  | 5,961  | 5,984  | 5,979  | 5,977  | 5,974  | 0,078 | 6,012  |
| 7.4   | 10,088 | 10,308 | 10,049 | 9,943  | 9,952  | 9,944  | 9,949  | 9,947  | 9,959  | 9,954  | 9,955  | 9,947  | 0,103 | 10,000 |
| 8.1   | 1,976  | 2,205  | 1,943  | 1,879  | 1,888  | 1,886  | 1,901  | 1,889  | 1,899  | 1,907  | 1,901  | 1,894  | 0,087 | 1,931  |
| 8.2   | 4,108  | 4,195  | 4,073  | 3,963  | 3,961  | 3,956  | 3,967  | 3,958  | 3,966  | 3,972  | 3,968  | 3,958  | 0,075 | 4,004  |
| 8.3   | 6,097  | 6,181  | 6,071  | 5,961  | 5,961  | 5,956  | 5,966  | 5,966  | 5,968  | 5,964  | 5,972  | 5,960  | 0,070 | 6,002  |
| 8.4   | 10,083 | 10,276 | 10,045 | 9,945  | 9,948  | 9,937  | 9,946  | 9,951  | 9,951  | 9,950  | 9,958  | 9,950  | 0,095 | 9,995  |
| 9.1   | 2,021  | 2,357  | 2,012  | 2,088  | 2,107  | 2,100  | 2,096  | 2,099  | 2,099  | 2,103  | 2,101  | 2,097  | 0,082 | 2,107  |
| 9.2   | 4,130  | 4,414  | 4,133  | 4,189  | 4,212  | 4,204  | 4,204  | 4,195  | 4,202  | 4,207  | 4,201  | 4,197  | 0,068 | 4,207  |
| 9.3   | 6,129  | 6,410  | 6,130  | 6,173  | 6,199  | 6,182  | 6,183  | 6,181  | 6,188  | 6,197  | 6,188  | 6,187  | 0,068 | 6,196  |
| 9.4   | 10,105 | 10,445 | 10,106 | 10,139 | 10,165 | 10,150 | 10,147 | 10,146 | 10,161 | 10,167 | 10,152 | 10,154 | 0,085 | 10,170 |



CD-tulokset oksidilta HAR-etsauksen jälkeen ( $\mu\text{m}$ ).

| MesP. | W1     | W2     | W3     | W4     | W5     | W6     | W7     | W8     | W9     | W10    | STDV  | AVG    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 1.1   | 2,346  | 2,498  | 2,286  | 2,390  | 2,415  | 2,384  | 2,237  | 2,289  | 2,477  | 2,645  | 0,114 | 2,397  |
| 1.2   | 4,474  | 4,560  | 4,482  | 4,467  | 4,501  | 4,460  | 4,415  | 4,496  | 4,462  | 4,641  | 0,060 | 4,496  |
| 1.3   | 6,344  | 6,532  | 6,386  | 6,361  | 6,400  | 6,360  | 6,377  | 6,404  | 6,512  | 6,661  | 0,097 | 6,434  |
| 1.4   | 10,321 | 10,607 | 10,385 | 10,351 | 10,370 | 10,319 | 10,423 | 10,360 | 10,458 | 10,655 | 0,111 | 10,425 |
| 2.1   | 2,283  | 2,369  | 2,216  | 2,159  | 2,195  | 2,144  | 2,218  | 2,185  | 2,366  | 2,570  | 0,125 | 2,271  |
| 2.2   | 4,406  | 4,371  | 4,377  | 4,102  | 4,155  | 4,087  | 4,178  | 4,132  | 4,219  | 4,354  | 0,119 | 4,238  |
| 2.3   | 6,296  | 6,311  | 6,291  | 5,989  | 6,038  | 5,989  | 6,055  | 6,019  | 6,181  | 6,280  | 0,132 | 6,145  |
| 2.4   | 10,287 | 10,364 | 10,289 | 9,949  | 9,992  | 9,947  | 10,008 | 9,975  | 10,149 | 10,203 | 0,153 | 10,116 |
| 3.1   | 2,275  | 2,331  | 2,190  | 2,131  | 2,128  | 2,109  | 2,164  | 2,156  | 2,336  | 2,523  | 0,125 | 2,234  |
| 3.2   | 4,394  | 4,312  | 4,317  | 4,070  | 4,067  | 4,044  | 4,108  | 4,088  | 4,163  | 4,269  | 0,121 | 4,183  |
| 3.3   | 6,286  | 6,251  | 6,250  | 5,972  | 5,975  | 5,958  | 6,008  | 5,989  | 6,119  | 6,183  | 0,127 | 6,099  |
| 3.4   | 10,282 | 10,315 | 10,245 | 9,936  | 9,937  | 9,918  | 9,964  | 9,953  | 10,094 | 10,118 | 0,149 | 10,076 |
| 4.1   | 2,359  | 2,505  | 2,346  | 2,355  | 2,341  | 2,382  | 2,413  | 2,420  | 2,281  | 2,576  | 0,082 | 2,398  |
| 4.2   | 4,487  | 4,562  | 4,525  | 4,403  | 4,541  | 4,474  | 4,556  | 4,491  | 4,363  | 4,610  | 0,071 | 4,501  |
| 4.3   | 6,355  | 6,520  | 6,444  | 6,275  | 6,411  | 6,337  | 6,436  | 6,350  | 6,370  | 6,639  | 0,099 | 6,414  |
| 4.4   | 10,348 | 10,556 | 10,416 | 10,223 | 10,358 | 10,291 | 10,380 | 10,292 | 10,383 | 10,638 | 0,118 | 10,389 |
| 5.1   | 2,277  | 2,281  | 2,193  | 2,025  | 2,065  | 2,002  | 2,092  | 2,052  | 2,307  | 2,447  | 0,141 | 2,174  |
| 5.2   | 4,395  | 4,229  | 4,322  | 3,980  | 4,010  | 3,960  | 4,036  | 3,998  | 4,098  | 4,154  | 0,145 | 4,118  |
| 5.3   | 6,286  | 6,168  | 6,254  | 5,896  | 5,927  | 5,887  | 5,945  | 5,913  | 6,054  | 6,070  | 0,143 | 6,040  |
| 5.4   | 10,284 | 10,265 | 10,246 | 9,857  | 9,895  | 9,854  | 9,913  | 9,880  | 10,028 | 10,008 | 0,168 | 10,023 |
| 6.1   | 2,336  | 2,451  | 2,231  | 2,287  | 2,250  | 2,257  | 2,283  | 2,302  | 2,459  | 2,607  | 0,115 | 2,346  |
| 6.2   | 4,449  | 4,476  | 4,361  | 4,325  | 4,264  | 4,289  | 4,330  | 4,346  | 4,393  | 4,548  | 0,084 | 4,378  |
| 6.3   | 6,358  | 6,427  | 6,298  | 6,221  | 6,165  | 6,190  | 6,229  | 6,247  | 6,362  | 6,494  | 0,103 | 6,299  |
| 6.4   | 10,344 | 10,434 | 10,288 | 10,161 | 10,112 | 10,131 | 10,161 | 10,192 | 10,309 | 10,439 | 0,116 | 10,257 |
| 7.1   | 2,303  | 2,375  | 2,231  | 2,122  | 2,196  | 2,126  | 2,215  | 2,159  | 2,342  | 2,536  | 0,123 | 2,261  |
| 7.2   | 4,418  | 4,364  | 4,379  | 4,072  | 4,150  | 4,071  | 4,149  | 4,097  | 4,208  | 4,309  | 0,127 | 4,222  |
| 7.3   | 6,309  | 6,302  | 6,280  | 5,976  | 6,032  | 5,974  | 6,035  | 5,997  | 6,167  | 6,223  | 0,134 | 6,130  |
| 7.4   | 10,297 | 10,356 | 10,281 | 9,939  | 9,991  | 9,936  | 9,991  | 9,954  | 10,136 | 10,156 | 0,155 | 10,104 |
| 8.1   | 2,296  | 2,338  | 2,196  | 2,111  | 2,137  | 2,093  | 2,161  | 2,138  | 2,344  | 2,481  | 0,122 | 2,230  |
| 8.2   | 4,411  | 4,311  | 4,329  | 4,054  | 4,071  | 4,037  | 4,109  | 4,071  | 4,161  | 4,251  | 0,128 | 4,181  |
| 8.3   | 6,305  | 6,250  | 6,253  | 5,968  | 5,979  | 5,954  | 6,008  | 5,980  | 6,119  | 6,170  | 0,130 | 6,099  |
| 8.4   | 10,290 | 10,312 | 10,250 | 9,927  | 9,944  | 9,918  | 9,966  | 9,942  | 10,093 | 10,108 | 0,151 | 10,075 |
| 9.1   | 2,351  | 2,488  | 2,289  | 2,302  | 2,399  | 2,330  | 2,428  | 2,335  | 2,480  | 2,640  | 0,103 | 2,404  |
| 9.2   | 4,466  | 4,552  | 4,414  | 4,338  | 4,465  | 4,379  | 4,481  | 4,387  | 4,461  | 4,621  | 0,080 | 4,456  |
| 9.3   | 6,361  | 6,524  | 6,334  | 6,256  | 6,375  | 6,288  | 6,368  | 6,300  | 6,474  | 6,621  | 0,109 | 6,390  |
| 9.4   | 10,338 | 10,542 | 10,321 | 10,228 | 10,329 | 10,246 | 10,313 | 10,251 | 10,451 | 10,614 | 0,124 | 10,363 |

Uraleveyksien kasvu resistin mittauksen ja HAR-mittauksen välillä (µm).

| MesP. | W1    | W2    | W3    | W4    | W5    | W6    | W7    | W8    | W9    | W10   | AVG   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.1   | 0,692 | 0,790 | 0,590 | 0,682 | 0,708 | 0,681 | 0,522 | 0,574 | 0,779 | 0,930 | 0,695 |
| 1.2   | 0,613 | 0,681 | 0,603 | 0,587 | 0,660 | 0,579 | 0,528 | 0,608 | 0,573 | 0,756 | 0,619 |
| 1.3   | 0,443 | 0,622 | 0,475 | 0,450 | 0,489 | 0,454 | 0,460 | 0,486 | 0,598 | 0,744 | 0,522 |
| 1.4   | 0,456 | 0,731 | 0,509 | 0,477 | 0,487 | 0,446 | 0,546 | 0,484 | 0,576 | 0,773 | 0,549 |
| 2.1   | 0,623 | 0,741 | 0,575 | 0,501 | 0,525 | 0,478 | 0,549 | 0,522 | 0,697 | 0,901 | 0,611 |
| 2.2   | 0,576 | 0,545 | 0,595 | 0,281 | 0,318 | 0,261 | 0,340 | 0,299 | 0,388 | 0,518 | 0,412 |
| 2.3   | 0,431 | 0,503 | 0,434 | 0,143 | 0,169 | 0,140 | 0,183 | 0,152 | 0,330 | 0,421 | 0,291 |
| 2.4   | 0,460 | 0,538 | 0,455 | 0,124 | 0,159 | 0,133 | 0,175 | 0,148 | 0,319 | 0,381 | 0,289 |
| 3.1   | 0,621 | 0,671 | 0,526 | 0,472 | 0,461 | 0,450 | 0,505 | 0,497 | 0,670 | 0,868 | 0,574 |
| 3.2   | 0,566 | 0,486 | 0,480 | 0,243 | 0,226 | 0,214 | 0,274 | 0,257 | 0,329 | 0,445 | 0,352 |
| 3.3   | 0,428 | 0,394 | 0,384 | 0,111 | 0,108 | 0,096 | 0,146 | 0,130 | 0,253 | 0,327 | 0,238 |
| 3.4   | 0,461 | 0,491 | 0,411 | 0,110 | 0,101 | 0,088 | 0,137 | 0,130 | 0,258 | 0,292 | 0,248 |
| 4.1   | 0,661 | 0,798 | 0,638 | 0,636 | 0,619 | 0,669 | 0,693 | 0,700 | 0,556 | 0,840 | 0,681 |
| 4.2   | 0,622 | 0,690 | 0,645 | 0,519 | 0,656 | 0,596 | 0,666 | 0,602 | 0,474 | 0,705 | 0,618 |
| 4.3   | 0,451 | 0,613 | 0,530 | 0,355 | 0,491 | 0,425 | 0,512 | 0,426 | 0,441 | 0,704 | 0,495 |
| 4.4   | 0,481 | 0,681 | 0,535 | 0,339 | 0,471 | 0,411 | 0,493 | 0,406 | 0,489 | 0,736 | 0,504 |
| 5.1   | 0,626 | 0,638 | 0,531 | 0,378 | 0,399 | 0,357 | 0,427 | 0,398 | 0,643 | 0,783 | 0,518 |
| 5.2   | 0,572 | 0,411 | 0,492 | 0,162 | 0,175 | 0,141 | 0,203 | 0,173 | 0,262 | 0,323 | 0,291 |
| 5.3   | 0,433 | 0,320 | 0,394 | 0,050 | 0,062 | 0,036 | 0,082 | 0,057 | 0,191 | 0,209 | 0,183 |
| 5.4   | 0,468 | 0,447 | 0,416 | 0,048 | 0,065 | 0,036 | 0,084 | 0,066 | 0,203 | 0,184 | 0,202 |
| 6.1   | 0,636 | 0,746 | 0,530 | 0,584 | 0,548 | 0,562 | 0,576 | 0,596 | 0,743 | 0,902 | 0,642 |
| 6.2   | 0,580 | 0,604 | 0,492 | 0,455 | 0,394 | 0,427 | 0,453 | 0,472 | 0,510 | 0,678 | 0,507 |
| 6.3   | 0,461 | 0,525 | 0,401 | 0,322 | 0,267 | 0,299 | 0,325 | 0,346 | 0,450 | 0,597 | 0,399 |
| 6.4   | 0,483 | 0,561 | 0,421 | 0,292 | 0,244 | 0,270 | 0,294 | 0,326 | 0,428 | 0,572 | 0,389 |
| 7.1   | 0,628 | 0,697 | 0,549 | 0,446 | 0,511 | 0,451 | 0,534 | 0,483 | 0,644 | 0,853 | 0,580 |
| 7.2   | 0,574 | 0,520 | 0,528 | 0,225 | 0,299 | 0,228 | 0,300 | 0,249 | 0,343 | 0,462 | 0,373 |
| 7.3   | 0,431 | 0,424 | 0,397 | 0,097 | 0,147 | 0,099 | 0,153 | 0,118 | 0,270 | 0,342 | 0,248 |
| 7.4   | 0,457 | 0,514 | 0,432 | 0,096 | 0,139 | 0,094 | 0,146 | 0,113 | 0,273 | 0,308 | 0,257 |
| 8.1   | 0,631 | 0,676 | 0,526 | 0,446 | 0,471 | 0,428 | 0,483 | 0,470 | 0,670 | 0,806 | 0,561 |
| 8.2   | 0,574 | 0,481 | 0,488 | 0,222 | 0,238 | 0,206 | 0,261 | 0,233 | 0,322 | 0,408 | 0,343 |
| 8.3   | 0,436 | 0,389 | 0,380 | 0,104 | 0,120 | 0,089 | 0,131 | 0,112 | 0,248 | 0,298 | 0,231 |
| 8.4   | 0,458 | 0,480 | 0,409 | 0,092 | 0,113 | 0,085 | 0,125 | 0,110 | 0,251 | 0,265 | 0,239 |
| 9.1   | 0,639 | 0,762 | 0,542 | 0,535 | 0,645 | 0,576 | 0,677 | 0,567 | 0,728 | 0,863 | 0,653 |
| 9.2   | 0,589 | 0,659 | 0,497 | 0,400 | 0,545 | 0,453 | 0,558 | 0,440 | 0,539 | 0,672 | 0,535 |
| 9.3   | 0,450 | 0,603 | 0,391 | 0,293 | 0,424 | 0,337 | 0,418 | 0,331 | 0,525 | 0,650 | 0,442 |
| 9.4   | 0,463 | 0,657 | 0,413 | 0,303 | 0,415 | 0,331 | 0,403 | 0,325 | 0,539 | 0,681 | 0,453 |

## Ohutkalvojen mittaustulokset

REFLECT\_02 oksidin ja resistin paksuus mittauksen tulokset litokuvioinnin jälkeen (kiekot 1–6).

| Coordinates |         | Wafer1  |         |        | Wafer2  |         |        | Wafer3  |         |        |
|-------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| X           | Y       | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   |
| (mm)        | (mm)    | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        |
| -3.145      | 70.225  | 1186,91 | 1905,04 | 0,5547 | 1186,65 | 1903,68 | 0,6176 | 1186,46 | 1905,24 | 0,6179 |
| 48.855      | 33.125  | 1188,01 | 1912,99 | 0,5547 | 1188,10 | 1908,73 | 0,6111 | 1188,26 | 1909,90 | 0,6131 |
| 22.855      | 33.125  | 1189,80 | 1910,63 | 0,5547 | 1189,75 | 1907,77 | 0,6054 | 1189,84 | 1908,90 | 0,6034 |
| -29.145     | 33.125  | 1190,52 | 1898,41 | 0,5547 | 1190,71 | 1899,19 | 0,6044 | 1190,49 | 1899,69 | 0,6045 |
| -55.145     | 33.125  | 1189,97 | 1895,93 | 0,5547 | 1190,12 | 1896,37 | 0,6043 | 1190,17 | 1897,26 | 0,6036 |
| 61.855      | -1.325  | 1186,82 | 1916,12 | 0,5547 | 1187,05 | 1910,59 | 0,6079 | 1187,32 | 1912,40 | 0,6048 |
| -3.145      | -1.325  | 1192,46 | 1899,63 | 0,5547 | 1192,45 | 1901,56 | 0,5898 | 1192,56 | 1902,04 | 0,5872 |
| -61.645     | -1.325  | 1191,70 | 1893,19 | 0,5548 | 1191,95 | 1894,48 | 0,5954 | 1192,16 | 1894,92 | 0,5953 |
| 48.855      | -33.125 | 1189,98 | 1913,54 | 0,5548 | 1189,97 | 1908,57 | 0,6010 | 1190,17 | 1910,28 | 0,5980 |
| 22.855      | -33.125 | 1192,36 | 1912,90 | 0,5548 | 1192,53 | 1909,03 | 0,5921 | 1192,54 | 1910,20 | 0,5877 |
| -29.145     | -33.125 | 1193,30 | 1899,45 | 0,5548 | 1193,75 | 1900,29 | 0,5827 | 1193,92 | 1901,47 | 0,5808 |
| -55.145     | -33.125 | 1192,72 | 1892,89 | 0,5548 | 1192,77 | 1895,70 | 0,5906 | 1192,99 | 1895,63 | 0,5843 |
| -3.145      | -70.225 | 1194,72 | 1905,40 | 0,5548 | 1194,34 | 1906,38 | 0,5787 | 1194,59 | 1907,34 | 0,5828 |
|             | AVG     | 1190,71 | 1904,32 |        | 1190,78 | 1903,26 |        | 1190,88 | 1904,25 |        |
|             | STDV    | 2,456   | 8,267   |        | 2,466   | 5,667   |        | 2,516   | 6,096   |        |
| Coordinates |         | Wafer4  |         |        | Wafer5  |         |        | Wafer6  |         |        |
| X           | Y       | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   |
| (mm)        | (mm)    | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        |
| -3.145      | 70.225  | 1186,26 | 1904,93 | 0,6205 | 1186,10 | 1905,06 | 0,6181 | 1185,55 | 1903,91 | 0,5745 |
| 48.855      | 33.125  | 1188,31 | 1909,83 | 0,6088 | 1188,30 | 1908,82 | 0,6117 | 1188,43 | 1909,37 | 0,6065 |
| 22.855      | 33.125  | 1189,83 | 1908,55 | 0,5976 | 1189,69 | 1908,64 | 0,6045 | 1189,60 | 1909,18 | 0,6056 |
| -29.145     | 33.125  | 1190,56 | 1900,19 | 0,6021 | 1190,67 | 1899,92 | 0,6043 | 1190,48 | 1899,89 | 0,5977 |
| -55.145     | 33.125  | 1190,17 | 1896,79 | 0,6028 | 1190,46 | 1897,08 | 0,6035 | 1190,41 | 1897,54 | 0,5991 |
| 61.855      | -1.325  | 1187,38 | 1912,64 | 0,6038 | 1187,49 | 1912,97 | 0,6027 | 1187,78 | 1912,39 | 0,6038 |
| -3.145      | -1.325  | 1192,49 | 1902,25 | 0,5888 | 1192,30 | 1902,63 | 0,5895 | 1192,17 | 1903,09 | 0,5893 |
| -61.645     | -1.325  | 1192,28 | 1895,45 | 0,5970 | 1192,04 | 1895,32 | 0,5876 | 1192,35 | 1894,66 | 0,5919 |
| 48.855      | -33.125 | 1190,25 | 1910,16 | 0,5932 | 1190,35 | 1910,51 | 0,5906 | 1190,58 | 1909,73 | 0,5948 |
| 22.855      | -33.125 | 1192,64 | 1910,91 | 0,5865 | 1192,76 | 1910,58 | 0,5786 | 1192,84 | 1910,56 | 0,5889 |
| -29.145     | -33.125 | 1193,98 | 1900,88 | 0,5780 | 1193,70 | 1901,58 | 0,5805 | 1193,42 | 1901,09 | 0,5803 |
| -55.145     | -33.125 | 1193,21 | 1895,29 | 0,5854 | 1193,04 | 1895,81 | 0,5822 | 1192,96 | 1895,60 | 0,5834 |
| -3.145      | -70.225 | 1194,68 | 1906,42 | 0,5808 | 1194,70 | 1907,61 | 0,5767 | 1194,48 | 1907,38 | 0,5762 |
|             | AVG     | 1190,93 | 1904,18 |        | 1190,89 | 1904,35 |        | 1190,85 | 1904,18 |        |
|             | STDV    | 2,572   | 6,121   |        | 2,533   | 6,043   |        | 2,542   | 6,046   |        |

REFLECT\_02 oksidin ja resistin paksuus mittauksen tulokset litokuvioinnin jälkeen (kiekot 7–12).

| Coordinates |         | Wafer7  |         |        | Wafer8  |         |        | Wafer9  |         |        |
|-------------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| X           | Y       | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   |
| (mm)        | (mm)    | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        |
| -3.145      | 70.225  | 1184,44 | 1903,73 | 0,5984 | 1183,58 | 1904,12 | 0,6290 | 1183,19 | 1904,33 | 0,6262 |
| 48.855      | 33.125  | 1188,27 | 1909,04 | 0,6116 | 1188,40 | 1909,14 | 0,6079 | 1188,57 | 1909,25 | 0,6071 |
| 22.855      | 33.125  | 1189,33 | 1908,38 | 0,6022 | 1189,16 | 1908,38 | 0,6055 | 1189,07 | 1908,82 | 0,6029 |
| -29.145     | 33.125  | 1190,05 | 1899,62 | 0,6020 | 1189,88 | 1899,25 | 0,6055 | 1189,61 | 1900,08 | 0,6047 |
| -55.145     | 33.125  | 1190,23 | 1896,22 | 0,6045 | 1190,17 | 1896,38 | 0,6004 | 1190,17 | 1897,28 | 0,6026 |
| 61.855      | -1.325  | 1188,17 | 1912,03 | 0,6014 | 1189,21 | 1911,88 | 0,5996 | 1190,94 | 1911,93 | 0,5933 |
| -3.145      | -1.325  | 1191,78 | 1902,58 | 0,5885 | 1191,82 | 1901,70 | 0,5638 | 1191,57 | 1903,31 | 0,5915 |
| -61.645     | -1.325  | 1192,27 | 1894,17 | 0,5943 | 1192,18 | 1894,64 | 0,5896 | 1192,07 | 1894,99 | 0,5929 |
| 48.855      | -33.125 | 1190,72 | 1909,93 | 0,5935 | 1191,34 | 1909,53 | 0,5900 | 1193,31 | 1909,62 | 0,5879 |
| 22.855      | -33.125 | 1192,60 | 1910,35 | 0,5870 | 1192,57 | 1910,29 | 0,5879 | 1192,95 | 1910,68 | 0,5856 |
| -29.145     | -33.125 | 1193,29 | 1900,27 | 0,5817 | 1192,97 | 1900,95 | 0,5875 | 1192,61 | 1900,91 | 0,5866 |
| -55.145     | -33.125 | 1192,85 | 1894,24 | 0,5848 | 1192,58 | 1894,96 | 0,5904 | 1192,72 | 1895,23 | 0,5879 |
| -3.145      | -70.225 | 1194,16 | 1906,47 | 0,5795 | 1193,98 | 1906,26 | 0,5807 | 1193,64 | 1905,97 | 0,5747 |
|             |         |         |         |        |         |         |        |         |         |        |
|             | AVG     | 1190,63 | 1903,62 |        | 1190,60 | 1903,65 |        | 1190,80 | 1904,03 |        |
|             | STDV    | 2,653   | 6,301   |        | 2,711   | 6,096   |        | 2,826   | 5,934   |        |
|             |         |         |         |        |         |         |        |         |         |        |
| Coordinates |         | Wafer10 |         |        | Wafer11 |         |        | Wafer12 |         |        |
| X           | Y       | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   | SIO2    | RESIST  | RMSE   |
| (mm)        | (mm)    | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        | (nm)    | (nm)    |        |
| -3.145      | 70.225  | 1183,15 | 1904,67 | 0,6018 | 1183,45 | 1904,63 | 0,6267 | 1185,29 | 1904,67 | 0,6166 |
| 48.855      | 33.125  | 1188,52 | 1909,91 | 0,6118 | 1188,63 | 1909,22 | 0,6105 | 1189,05 | 1908,85 | 0,5711 |
| 22.855      | 33.125  | 1189,01 | 1909,41 | 0,6082 | 1188,92 | 1909,46 | 0,6095 | 1188,48 | 1908,89 | 0,5871 |
| -29.145     | 33.125  | 1189,48 | 1900,85 | 0,6033 | 1189,40 | 1899,85 | 0,6058 | 1187,53 | 1900,00 | 0,6020 |
| -55.145     | 33.125  | 1190,00 | 1897,43 | 0,6073 | 1189,87 | 1896,80 | 0,6051 | 1189,14 | 1896,90 | 0,5953 |
| 61.855      | -1.325  | 1190,08 | 1912,80 | 0,5935 | 1189,18 | 1913,12 | 0,5998 | 1189,89 | 1911,86 | 0,5616 |
| -3.145      | -1.325  | 1191,23 | 1903,69 | 0,5951 | 1190,76 | 1903,79 | 0,5917 | 1189,22 | 1903,92 | 0,5930 |
| -61.645     | -1.325  | 1191,73 | 1895,63 | 0,5940 | 1191,18 | 1894,75 | 0,5926 | 1190,06 | 1895,04 | 0,5906 |
| 48.855      | -33.125 | 1191,49 | 1909,97 | 0,5892 | 1190,67 | 1910,76 | 0,5895 | 1190,53 | 1909,58 | 0,5648 |
| 22.855      | -33.125 | 1192,10 | 1910,84 | 0,5881 | 1191,58 | 1911,08 | 0,5859 | 1190,60 | 1910,54 | 0,5754 |
| -29.145     | -33.125 | 1192,11 | 1901,41 | 0,5875 | 1191,69 | 1901,33 | 0,5858 | 1190,44 | 1901,22 | 0,5833 |
| -55.145     | -33.125 | 1192,32 | 1894,79 | 0,5899 | 1191,87 | 1895,24 | 0,5905 | 1190,89 | 1894,94 | 0,5846 |
| -3.145      | -70.225 | 1193,38 | 1906,53 | 0,5799 | 1192,97 | 1907,49 | 0,5810 | 1193,21 | 1906,69 | 0,5705 |
|             |         |         |         |        |         |         |        |         |         |        |
|             | AVG     | 1190,35 | 1904,46 |        | 1190,01 | 1904,42 |        | 1189,56 | 1904,08 |        |
|             | STDV    | 2,600   | 6,076   |        | 2,364   | 6,356   |        | 1,878   | 5,967   |        |



REFLECT\_02 oksidin paksuus mittauksen tulokset resistin poiston jälkeen (nm).

| MesP. | W1      | RMSE    | W2      | RMSE    | W3      | RMSE    | W4      | RMSE    | W5      | RMSE    | W6      | RMSE    |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1     | 1186,29 | 0,58077 | 1186,28 | 0,59051 | 1186,13 | 0,59105 | 1185,89 | 0,5922  | 1185,75 | 0,58094 | 1184,98 | 0,58279 |
| 2     | 1187,77 | 0,64087 | 1188,06 | 0,63578 | 1188,14 | 0,65673 | 1188,14 | 0,6332  | 1188,16 | 0,65824 | 1188,14 | 0,62407 |
| 3     | 1189,40 | 0,60646 | 1189,57 | 0,6032  | 1189,57 | 0,60585 | 1189,47 | 0,58717 | 1189,29 | 0,62869 | 1189,18 | 0,61587 |
| 4     | 1189,98 | 0,57046 | 1190,28 | 0,55051 | 1190,03 | 0,56118 | 1190,05 | 0,5920  | 1190,06 | 0,5771  | 1189,81 | 0,56385 |
| 5     | 1189,28 | 0,54942 | 1189,58 | 0,54843 | 1189,62 | 0,56318 | 1189,67 | 0,55462 | 1189,63 | 0,57327 | 1189,69 | 0,54609 |
| 6     | 1186,35 | 0,61436 | 1186,95 | 0,60744 | 1187,16 | 0,6180  | 1187,22 | 0,63333 | 1187,38 | 0,61551 | 1187,56 | 0,62633 |
| 7     | 1191,69 | 0,55308 | 1192,26 | 0,5620  | 1192,17 | 0,53491 | 1192,17 | 0,56793 | 1191,82 | 0,55308 | 1191,62 | 0,5417  |
| 8     | 1191,00 | 0,55235 | 1191,43 | 0,52864 | 1191,60 | 0,5330  | 1191,73 | 0,54619 | 1191,32 | 0,53357 | 1191,66 | 0,53965 |
| 9     | 1189,61 | 0,57407 | 1189,97 | 0,56615 | 1189,98 | 0,5617  | 1190,05 | 0,57027 | 1190,15 | 0,56835 | 1190,36 | 0,5749  |
| 10    | 1191,79 | 0,55993 | 1192,34 | 0,55532 | 1192,40 | 0,56289 | 1192,42 | 0,56007 | 1192,47 | 0,5619  | 1192,39 | 0,55042 |
| 11    | 1192,74 | 0,52623 | 1193,28 | 0,51439 | 1193,46 | 0,54411 | 1193,52 | 0,52422 | 1193,04 | 0,52462 | 1192,79 | 0,52316 |
| 12    | 1191,91 | 0,52817 | 1192,32 | 0,51954 | 1192,55 | 0,52434 | 1192,60 | 0,53127 | 1192,33 | 0,52388 | 1192,30 | 0,5229  |
| 13    | 1193,65 | 0,53078 | 1194,05 | 0,53156 | 1194,16 | 0,52343 | 1194,47 | 0,52377 | 1194,42 | 0,57161 | 1194,06 | 0,5270  |
| STDV  | 2,23    |         | 2,31    |         | 2,35    |         | 2,43    |         | 2,35    |         | 2,40    |         |
| AVG   | 1190,11 |         | 1190,49 |         | 1190,54 |         | 1190,57 |         | 1190,45 |         | 1190,35 |         |
|       |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| MesP. | W7      | RMSE    | W8      | RMSE    | W9      | RMSE    | W10     | RMSE    | W11     | RMSE    | W12     | RMSE    |
| 1     | 1183,71 | 0,59588 | 1183,00 | 0,60279 | 1182,67 | 0,58832 | 1182,55 | 0,61638 | 1183,00 | 0,62254 | 1184,94 | 0,6490  |
| 2     | 1188,05 | 0,64141 | 1188,15 | 0,6300  | 1188,37 | 0,65482 | 1188,41 | 0,66476 | 1188,49 | 0,68423 | 1188,79 | 0,65607 |
| 3     | 1188,96 | 0,60386 | 1188,83 | 0,63428 | 1188,86 | 0,63869 | 1188,79 | 0,63128 | 1188,81 | 0,62517 | 1188,25 | 0,62572 |
| 4     | 1189,38 | 0,55951 | 1189,22 | 0,58037 | 1188,85 | 0,58512 | 1188,88 | 0,58461 | 1188,94 | 0,5947  | 1187,03 | 0,58147 |
| 5     | 1189,48 | 0,55455 | 1189,46 | 0,56655 | 1189,38 | 0,57141 | 1189,41 | 0,58057 | 1189,21 | 0,5699  | 1188,51 | 0,56487 |
| 6     | 1187,95 | 0,61279 | 1189,07 | 0,6186  | 1190,72 | 0,62567 | 1189,93 | 0,61406 | 1189,05 | 0,62547 | 1189,71 | 0,63155 |
| 7     | 1191,28 | 0,54937 | 1191,09 | 0,56484 | 1190,94 | 0,56672 | 1190,80 | 0,57377 | 1190,50 | 0,57678 | 1188,76 | 0,56587 |
| 8     | 1191,56 | 0,5350  | 1191,51 | 0,54957 | 1191,40 | 0,5500  | 1191,08 | 0,5611  | 1190,69 | 0,5595  | 1189,45 | 0,56287 |
| 9     | 1190,57 | 0,57879 | 1191,09 | 0,58237 | 1193,12 | 0,5820  | 1191,32 | 0,59576 | 1190,56 | 0,59333 | 1190,25 | 0,58071 |
| 10    | 1192,28 | 0,55046 | 1192,27 | 0,55588 | 1192,70 | 0,57623 | 1191,86 | 0,5650  | 1191,35 | 0,56747 | 1190,28 | 0,57069 |
| 11    | 1192,51 | 0,51635 | 1192,35 | 0,54219 | 1192,03 | 0,54334 | 1191,57 | 0,54412 | 1191,24 | 0,5430  | 1189,91 | 0,55252 |
| 12    | 1192,17 | 0,53642 | 1191,98 | 0,53332 | 1192,07 | 0,54973 | 1191,74 | 0,5600  | 1191,26 | 0,55027 | 1190,33 | 0,5406  |
| 13    | 1193,80 | 0,54474 | 1193,57 | 0,54535 | 1193,27 | 0,54034 | 1193,15 | 0,56794 | 1192,62 | 0,55473 | 1192,90 | 0,54541 |
| STDV  | 2,54    |         | 2,59    |         | 2,74    |         | 2,53    |         | 2,27    |         | 1,81    |         |
| AVG   | 1190,13 |         | 1190,12 |         | 1190,34 |         | 1189,96 |         | 1189,67 |         | 1189,16 |         |

Oksidin paksuudet resistin poiston jälkeen optisen profiometrillä mitattuna (nm).

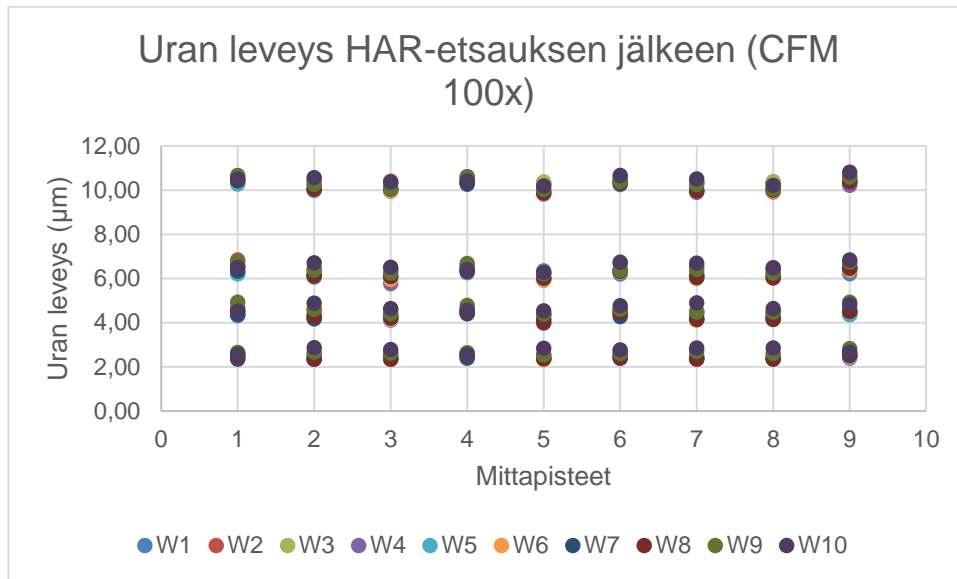
| MesP. | W1     | W2     | W3     | W4     | W5     | W6     | W7     | W8     | W9     | W10    | W11    | W12    |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 1185,8 | 1185,8 | 1185,6 | 1185,3 | 1185,4 | 1184,3 | 1183,2 | 1182,6 | 1182,2 | 1182,1 | 1182,4 | 1184,4 |
| 2     | 1186,8 | 1187,0 | 1187,1 | 1187,2 | 1187,1 | 1187,3 | 1187,0 | 1187,2 | 1187,5 | 1187,4 | 1187,6 | 1187,7 |
| 3     | 1188,6 | 1188,7 | 1188,8 | 1188,7 | 1188,5 | 1188,5 | 1188,2 | 1188,1 | 1188,0 | 1187,9 | 1187,9 | 1187,5 |
| 4     | 1189,7 | 1189,9 | 1189,7 | 1189,7 | 1189,8 | 1189,2 | 1189,1 | 1188,9 | 1188,6 | 1188,5 | 1188,5 | 1186,7 |
| 5     | 1189,1 | 1189,2 | 1189,3 | 1189,2 | 1189,3 | 1189,3 | 1189,0 | 1189,1 | 1189,1 | 1189,0 | 1188,8 | 1188,3 |
| 6     | 1185,2 | 1185,7 | 1185,9 | 1186,0 | 1186,1 | 1186,4 | 1186,9 | 1187,8 | 1189,6 | 1188,8 | 1187,8 | 1188,5 |
| 7     | 1191,0 | 1191,5 | 1191,4 | 1191,4 | 1191,2 | 1190,9 | 1190,5 | 1190,3 | 1190,4 | 1190,1 | 1189,8 | 1188,2 |
| 8     | 1190,5 | 1191,0 | 1191,3 | 1191,3 | 1190,8 | 1191,1 | 1191,1 | 1191,1 | 1191,1 | 1190,8 | 1190,3 | 1189,0 |
| 9     | 1188,5 | 1188,9 | 1188,9 | 1188,9 | 1189,2 | 1189,2 | 1189,4 | 1190,0 | 1192,0 | 1190,3 | 1189,4 | 1189,1 |
| 10    | 1190,8 | 1191,5 | 1191,4 | 1191,6 | 1191,4 | 1191,5 | 1191,4 | 1191,3 | 1191,8 | 1190,9 | 1190,6 | 1189,4 |
| 11    | 1192,3 | 1192,9 | 1192,9 | 1192,9 | 1192,5 | 1192,2 | 1192,1 | 1191,6 | 1191,6 | 1191,0 | 1190,8 | 1189,4 |
| 12    | 1191,4 | 1191,9 | 1192,1 | 1192,2 | 1191,9 | 1191,9 | 1191,7 | 1191,4 | 1191,5 | 1191,2 | 1190,7 | 1189,7 |
| 13    | 1192,9 | 1193,2 | 1193,5 | 1193,7 | 1193,5 | 1193,3 | 1192,9 | 1192,8 | 1192,4 | 1192,3 | 1191,9 | 1192,1 |
| STDV  | 2,3    | 2,4    | 2,5    | 2,5    | 2,4    | 2,5    | 2,6    | 2,5    | 2,7    | 2,5    | 2,3    | 1,7    |
| AVG   | 1189,4 | 1189,8 | 1189,8 | 1189,9 | 1189,7 | 1189,6 | 1189,4 | 1189,4 | 1189,7 | 1189,3 | 1189,0 | 1188,5 |

## Leveyden mittaustulokset profilometrillä

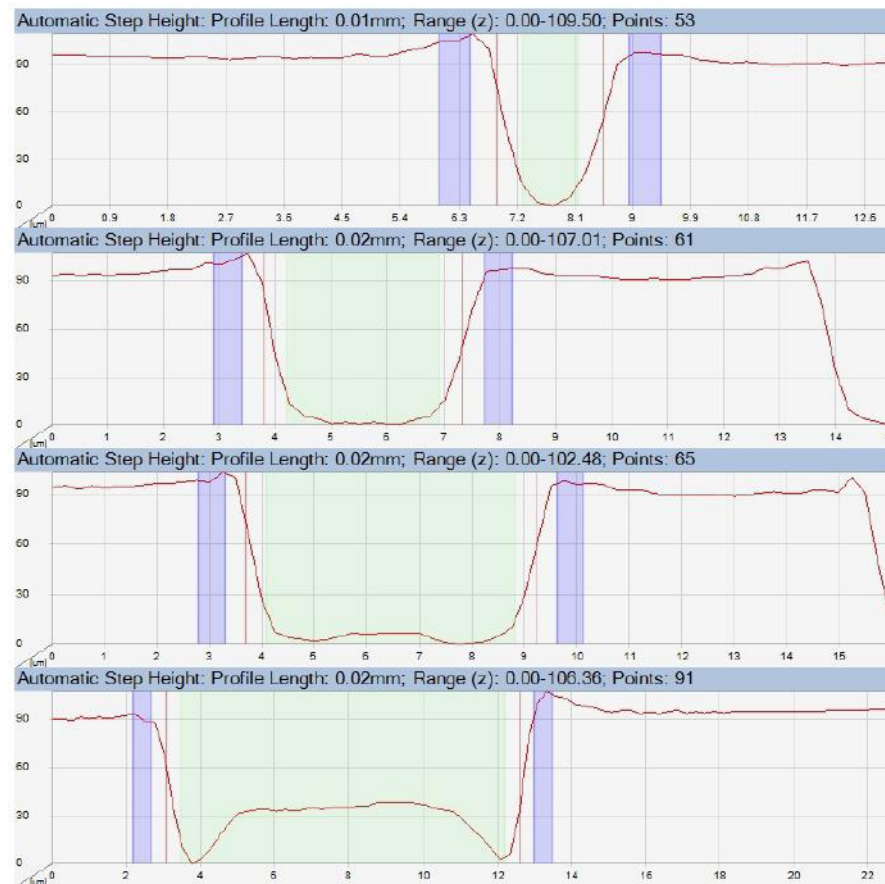
Uran leveydet HAR-etsauksen jälkeen CFM 100x -sensorilla (µm).

| MesP. | W1    | W2    | W3    | W4    | W5    | W6    | W7    | W8    | W9    | W10   | STDV  | AVG    |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 1.1   | 2,44  | 2,63  | 2,37  | 2,50  | 2,38  | 2,44  | 2,34  | 2,46  | 2,65  | 2,57  | 0,103 | 2,478  |
| 1.2   | 4,32  | 4,68  | 4,36  | 4,54  | 4,34  | 4,48  | 4,36  | 4,55  | 4,93  | 4,52  | 0,179 | 4,508  |
| 1.3   | 6,21  | 6,84  | 6,31  | 6,54  | 6,21  | 6,56  | 6,33  | 6,52  | 6,75  | 6,51  | 0,203 | 6,478  |
| 1.4   | 10,35 | 10,63 | 10,30 | 10,45 | 10,28 | 10,43 | 10,42 | 10,51 | 10,67 | 10,51 | 0,123 | 10,455 |
| 2.1   | 2,36  | 2,56  | 2,44  | 2,44  | 2,35  | 2,36  | 2,34  | 2,35  | 2,67  | 2,87  | 0,167 | 2,474  |
| 2.2   | 4,39  | 4,59  | 4,37  | 4,22  | 4,16  | 4,18  | 4,19  | 4,28  | 4,61  | 4,88  | 0,225 | 4,387  |
| 2.3   | 6,19  | 6,45  | 6,27  | 6,13  | 6,05  | 6,07  | 6,10  | 6,16  | 6,37  | 6,71  | 0,197 | 6,250  |
| 2.4   | 10,26 | 10,46 | 10,36 | 9,99  | 10,00 | 10,06 | 10,07 | 10,04 | 10,26 | 10,56 | 0,194 | 10,206 |
| 3.1   | 2,46  | 2,58  | 2,35  | 2,40  | 2,39  | 2,33  | 2,38  | 2,34  | 2,62  | 2,78  | 0,142 | 2,463  |
| 3.2   | 4,32  | 4,56  | 4,36  | 4,12  | 4,21  | 4,15  | 4,20  | 4,25  | 4,40  | 4,64  | 0,164 | 4,321  |
| 3.3   | 6,32  | 6,41  | 6,42  | 5,77  | 6,05  | 5,96  | 6,08  | 6,12  | 6,25  | 6,50  | 0,220 | 6,188  |
| 3.4   | 10,29 | 10,41 | 10,32 | 9,95  | 10,03 | 9,97  | 10,08 | 10,04 | 10,05 | 10,36 | 0,166 | 10,150 |
| 4.1   | 2,47  | 2,62  | 2,37  | 2,50  | 2,44  | 2,54  | 2,41  | 2,56  | 2,63  | 2,55  | 0,082 | 2,509  |
| 4.2   | 4,40  | 4,60  | 4,42  | 4,53  | 4,53  | 4,47  | 4,40  | 4,51  | 4,78  | 4,57  | 0,109 | 4,521  |
| 4.3   | 6,26  | 6,58  | 6,52  | 6,49  | 6,45  | 6,52  | 6,31  | 6,38  | 6,68  | 6,40  | 0,120 | 6,459  |
| 4.4   | 10,26 | 10,61 | 10,42 | 10,34 | 10,45 | 10,41 | 10,29 | 10,40 | 10,60 | 10,42 | 0,109 | 10,420 |
| 5.1   | 2,43  | 2,56  | 2,37  | 2,37  | 2,35  | 2,31  | 2,37  | 2,37  | 2,54  | 2,84  | 0,151 | 2,451  |
| 5.2   | 4,32  | 4,37  | 4,38  | 3,98  | 4,13  | 4,07  | 4,14  | 4,00  | 4,39  | 4,53  | 0,180 | 4,231  |
| 5.3   | 6,35  | 6,27  | 6,28  | 5,96  | 6,00  | 5,91  | 6,01  | 6,04  | 6,20  | 6,27  | 0,152 | 6,129  |
| 5.4   | 10,25 | 10,32 | 10,38 | 9,83  | 9,97  | 9,86  | 9,89  | 9,86  | 10,02 | 10,19 | 0,199 | 10,057 |
| 6.1   | 2,47  | 2,70  | 2,37  | 2,52  | 2,54  | 2,42  | 2,39  | 2,44  | 2,60  | 2,77  | 0,126 | 2,522  |
| 6.2   | 4,39  | 4,60  | 4,39  | 4,51  | 4,56  | 4,37  | 4,27  | 4,46  | 4,60  | 4,77  | 0,138 | 4,492  |
| 6.3   | 6,20  | 6,67  | 6,40  | 6,35  | 6,39  | 6,29  | 6,32  | 6,35  | 6,37  | 6,74  | 0,159 | 6,408  |
| 6.4   | 10,30 | 10,60 | 10,38 | 10,32 | 10,50 | 10,25 | 10,28 | 10,39 | 10,39 | 10,67 | 0,133 | 10,408 |
| 7.1   | 2,41  | 2,47  | 2,39  | 2,39  | 2,34  | 2,35  | 2,38  | 2,35  | 2,70  | 2,85  | 0,163 | 2,463  |
| 7.2   | 4,44  | 4,52  | 4,48  | 4,15  | 4,14  | 4,12  | 4,23  | 4,14  | 4,48  | 4,89  | 0,236 | 4,359  |
| 7.3   | 6,19  | 6,58  | 6,28  | 6,10  | 6,12  | 6,00  | 6,08  | 6,04  | 6,41  | 6,69  | 0,225 | 6,249  |
| 7.4   | 10,31 | 10,38 | 10,37 | 9,89  | 10,03 | 9,95  | 9,96  | 9,98  | 10,24 | 10,51 | 0,212 | 10,162 |
| 8.1   | 2,46  | 2,44  | 2,48  | 2,36  | 2,37  | 2,40  | 2,37  | 2,35  | 2,60  | 2,86  | 0,149 | 2,469  |
| 8.2   | 4,35  | 4,46  | 4,39  | 4,21  | 4,16  | 4,17  | 4,21  | 4,14  | 4,48  | 4,63  | 0,159 | 4,320  |
| 8.3   | 6,38  | 6,49  | 6,29  | 6,03  | 6,11  | 6,03  | 6,09  | 6,03  | 6,25  | 6,47  | 0,174 | 6,217  |
| 8.4   | 10,30 | 10,37 | 10,36 | 9,91  | 10,03 | 9,94  | 10,05 | 10,00 | 10,06 | 10,21 | 0,164 | 10,123 |
| 9.1   | 2,39  | 2,62  | 2,43  | 2,53  | 2,48  | 2,50  | 2,51  | 2,54  | 2,83  | 2,66  | 0,120 | 2,549  |
| 9.2   | 4,36  | 4,63  | 4,38  | 4,39  | 4,38  | 4,54  | 4,51  | 4,52  | 4,93  | 4,82  | 0,186 | 4,546  |
| 9.3   | 6,22  | 6,65  | 6,37  | 6,39  | 6,47  | 6,39  | 6,49  | 6,46  | 6,74  | 6,84  | 0,178 | 6,502  |
| 9.4   | 10,32 | 10,64 | 10,47 | 10,22 | 10,46 | 10,42 | 10,41 | 10,38 | 10,59 | 10,81 | 0,161 | 10,472 |

Kuvaaja urien leveyksistä HAR-etsauksen jälkeen CFM 100x -sensorilla.

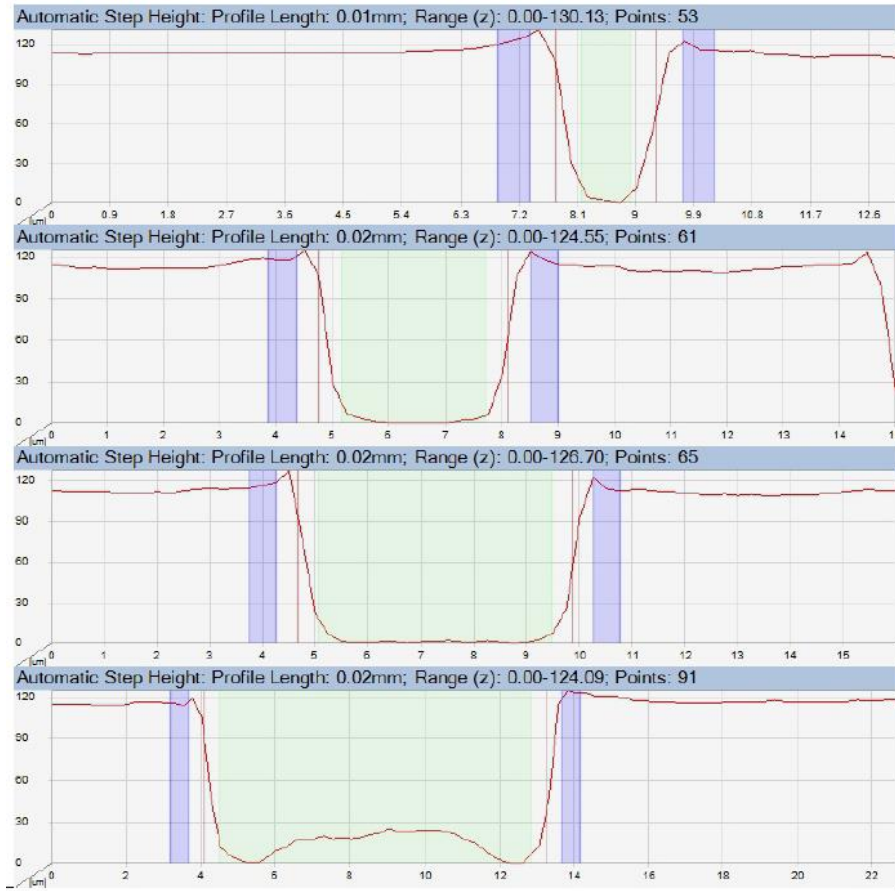


Kiekon 1 mittapisteen 3 leveyden intensiteettiprofiilit.





Kiekon 5 mittapisteen 5 leveyden intensiteettiprofiilit.



## Syvyden mittaustulokset profilometrillä

Kiekon 10 mittaustulokset 4 µm:n urista (x5).

| WAFER | MesPoint | Mean Depth [µm] | Depth Standard Deviation [µm] | Quality [%] |
|-------|----------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| 10    | 1        | 59,313          | 0,0174                        | 99,98       |
| 10    | 2        | 56,052          | 0,0905                        | 99,98       |
| 10    | 3        | 55,519          | 0,2876                        | 99,96       |
| 10    | 4        | 59,183          | 0,0135                        | 99,98       |
| 10    | 5        | NaN             | NaN                           | 99,96       |
| 10    | 6        | 57,323          | 0,0372                        | 99,98       |
| 10    | 7        | 55,921          | 0,1397                        | 99,96       |
| 10    | 8        | 55,634          | 0,2169                        | 99,98       |
| 10    | 9        | 58,958          | 0,0665                        | 99,98       |

| WAFER | MesPoint | Mean Depth [µm] | Depth Standard Deviation [µm] | Quality [%] |
|-------|----------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| 10    | 1        | 59,311          | 0,0262                        | 99,98       |
| 10    | 2        | 55,649          | 0,9676                        | 99,91       |
| 10    | 3        | 55,55           | 0,3887                        | 99,94       |
| 10    | 4        | 59,226          | 0,0247                        | 99,98       |
| 10    | 5        | NaN             | NaN                           | 99,96       |
| 10    | 6        | 57,494          | 0,0179                        | 99,98       |
| 10    | 7        | 55,992          | 0,1665                        | 100         |
| 10    | 8        | 55,708          | 0,1582                        | 99,98       |
| 10    | 9        | 59,163          | 1,0751                        | 99,27       |

| WAFER | MesPoint | Mean Depth [µm] | Depth Standard Deviation [µm] | Quality [%] |
|-------|----------|-----------------|-------------------------------|-------------|
| 10    | 1        | 59,32           | 0,0568                        | 99,98       |
| 10    | 2        | 56,03           | 0,4594                        | 99,95       |
| 10    | 3        | 55,544          | 0,2457                        | 99,93       |
| 10    | 4        | 59,214          | 0,0244                        | 99,98       |
| 10    | 5        | NaN             | NaN                           | 99,98       |
| 10    | 6        | 57,305          | 0,0471                        | 99,98       |
| 10    | 7        | 55,833          | 0,2671                        | 99,95       |
| 10    | 8        | 55,647          | 0,095                         | 99,98       |
| 10    | 9        | 59,402          | 1,2639                        | 99,4        |

| WAFER | MesPoint | Mean Depth<br>[um] | Depth Standard Deviation<br>[um] | Quality<br>[%] |
|-------|----------|--------------------|----------------------------------|----------------|
| 10    | 1        | 59,4               | 0,0343                           | 100            |
| 10    | 2        | 56,178             | 0,2046                           | 99,85          |
| 10    | 3        | 55,416             | 0,385                            | 99,96          |
| 10    | 4        | 59,171             | 0,0052                           | 99,98          |
| 10    | 5        | NaN                | NaN                              | 99,98          |
| 10    | 6        | 57,431             | 0,0617                           | 100            |
| 10    | 7        | 55,965             | 0,1078                           | 99,99          |
| 10    | 8        | 55,549             | 0,1877                           | 99,98          |
| 10    | 9        | 59,279             | 0,0086                           | 100            |

| WAFER | MesPoint | Mean Depth<br>[um] | Depth Standard Deviation<br>[um] | Quality<br>[%] |
|-------|----------|--------------------|----------------------------------|----------------|
| 10    | 1        | 59,213             | 0,0274                           | 99,98          |
| 10    | 2        | 56,236             | 0,2709                           | 99,93          |
| 10    | 3        | 55,478             | 0,2699                           | 99,93          |
| 10    | 4        | 59,275             | 0,0204                           | 99,98          |
| 10    | 5        | NaN                | NaN                              | 99,98          |
| 10    | 6        | 57,267             | 0,0515                           | 99,98          |
| 10    | 7        | 55,898             | 0,1639                           | 100            |
| 10    | 8        | 55,811             | 0,0594                           | 99,98          |
| 10    | 9        | 59,245             | 0,1149                           | 99,98          |

Mittau tuloksia 3 µm:n urista (x5–8).

|    |             |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|----|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--|
| W1 | 100 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | STDV   |        |        |       |  |
| 1  | 21,849      | 22,189 | 21,524 | 22,249 | 21,86  | 0,263  |        |        |       |  |
| 2  | 18,028      | 18,151 | 18,49  | 18,538 | 18,554 | 0,219  |        |        |       |  |
| 3  | 18,22       | 18,165 | 18,488 | 18,471 | 18,525 | 0,150  |        |        |       |  |
| 4  | 22,785      | 22,76  | 22,846 | 22,738 | 19,71  | 1,229  |        |        |       |  |
| 5  | 17,518      | 17,986 | 18,017 | 18,475 | 18,163 | 0,310  |        |        |       |  |
| 6  | 22,831      | 18,863 | 19,968 | 23,208 | 23,432 | 1,876  |        |        |       |  |
| 7  | 18,477      | 20,839 | 21,703 | 18,844 | 18,771 | 1,296  |        |        |       |  |
| 8  | 18,37       | 18,357 | 18,643 | 18,711 | 18,658 | 0,152  |        |        |       |  |
| 9  | 22,843      | 22,568 | 23,153 | 19,808 | 22,958 | 1,244  |        |        |       |  |
| W4 | 110 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | STDV   |        |        |       |  |
| 1  | 23,704      | 24     | 24,453 | 24,388 | 24,219 | 0,274  |        |        |       |  |
| 2  | 19,514      | 19,476 | 19,98  | 19,944 | 19,93  | 0,224  |        |        |       |  |
| 3  | 19,437      | 19,984 | 19,87  | 19,964 | 19,886 | 0,200  |        |        |       |  |
| 4  | 25,457      | 25,462 | 25,432 | 25,521 | 25,104 | 0,148  |        |        |       |  |
| 5  | 18,782      | 19,363 | 19,11  | 19,609 | 19,487 | 0,295  |        |        |       |  |
| 6  | 19,957      | 24,806 | 25,613 | 25,541 | 25,51  | 2,184  |        |        |       |  |
| 7  | 19,497      | 20,361 | 20,146 | 20,161 | 20,231 | 0,301  |        |        |       |  |
| 8  | 19,993      | 19,673 | 20,249 | 20,23  | 19,928 | 0,213  |        |        |       |  |
| 9  | 25,001      | 24,434 | 25,336 | 25,313 | 25,43  | 0,364  |        |        |       |  |
| W5 | 120 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | STDV   |        |        |       |  |
| 1  | 21,454      | 21,361 | 21,431 | 21,603 | 21,363 | 0,040  |        |        |       |  |
| 2  | 20,761      | 20,758 | 20,608 | 20,918 | 20,728 | 0,071  |        |        |       |  |
| 3  | 20,735      | 20,907 | 20,845 | 20,698 | 20,876 | 0,071  |        |        |       |  |
| 4  | 22,581      | 23,13  | 23,761 | 23,015 | 23,028 | 0,482  |        |        |       |  |
| 5  | 20,593      | 20,548 | 20,537 | 20,607 | 20,673 | 0,024  |        |        |       |  |
| 6  | 23,121      | 22,175 | 25,983 | 22,791 | 21,583 | 1,619  |        |        |       |  |
| 7  | 21,125      | 20,982 | 21,293 | 21,181 | 21,263 | 0,127  |        |        |       |  |
| 8  | 20,962      | 20,812 | 20,702 | 21,030 | 20,513 | 0,107  |        |        |       |  |
| 9  | 23,337      | 23,328 | 22,587 | 22,484 | 23,098 | 0,351  |        |        |       |  |
| W6 | 120 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | STDV   |        |        |       |  |
| 1  | 21,144      | 21,265 | 21,365 | 21,706 | 21,499 | 0,090  |        |        |       |  |
| 2  | 20,753      | 20,472 | 20,26  | 20,522 | 20,871 | 0,202  |        |        |       |  |
| 3  | 20,622      | 20,408 | 20,598 | 20,482 | 20,483 | 0,096  |        |        |       |  |
| 4  | 22,726      | 22,534 | 22,516 | 22,987 | 23,068 | 0,095  |        |        |       |  |
| 5  | 20,066      | 20,498 | 20,31  | 20,317 | 20,053 | 0,177  |        |        |       |  |
| 6  | 22,851      | 22,379 | 22,703 | 22,989 | 26,760 | 0,197  |        |        |       |  |
| 7  | 20,949      | 20,522 | 20,811 | 20,407 | 20,668 | 0,178  |        |        |       |  |
| 8  | 20,551      | 20,557 | 20,521 | 20,564 | 20,365 | 0,016  |        |        |       |  |
| 9  | 22,08       | 22,583 | 22,309 | 22,815 | 25,883 | 0,206  |        |        |       |  |
| W7 | 115 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | STDV  |  |
| 1  | 20,637      | 20,683 | 19,984 | 20,532 | 20,405 | 20,558 | 20,35  | 20,293 | 0,212 |  |
| 2  | 19,841      | 19,75  | 20,178 | 19,57  | 19,703 | 19,624 | 19,892 | 19,733 | 0,177 |  |
| 3  | 19,59       | 19,577 | 19,539 | 19,789 | 19,579 | 19,619 | 19,682 | 19,672 | 0,075 |  |
| 4  | 21,977      | 21,33  | 21,268 | 21,314 | 21,712 | 21,23  | 21,421 | 21,498 | 0,240 |  |
| 5  | 19,432      | 19,509 | 19,536 | 19,663 | 19,483 | 19,695 | 19,356 | 19,445 | 0,108 |  |
| 6  | 21,54       | 24,844 | 25,171 | 25,297 | 21,602 | 25,731 | 21,374 | 21,221 | 1,929 |  |
| 7  | 19,726      | 20,035 | 20,036 | 19,774 | 19,944 | 19,808 | 20,229 | 20,055 | 0,160 |  |
| 8  | 19,62       | 19,609 | 19,702 | 19,564 | 19,684 | 19,684 | 19,699 | 19,771 | 0,061 |  |
| 9  | 21,684      | 21,26  | 21,771 | 21,67  | 21,415 | 21,728 | 21,671 | 21,617 | 0,163 |  |
| W8 | 115 looppia |        |        |        |        |        |        |        |       |  |
|    | 1           | 2      | 3      | 4      | 5      | STDV   |        |        |       |  |
| 1  | 20,772      | 20,585 | 20,762 | 20,553 | 20,461 | 0,122  |        |        |       |  |
| 2  | 19,804      | 19,993 | 20,002 | 19,982 | 19,84  | 0,084  |        |        |       |  |
| 3  | 19,882      | 20,231 | 19,9   | 19,967 | 20,061 | 0,128  |        |        |       |  |
| 4  | 21,759      | 24,613 | 24,683 | 24,741 | 24,912 | 1,195  |        |        |       |  |
| 5  | 19,839      | 19,767 | 19,558 | 20,042 | 19,981 | 0,171  |        |        |       |  |
| 6  | 25,738      | 25,486 | 25,635 | 24,779 | 25,332 | 0,337  |        |        |       |  |
| 7  | 20,676      | 19,981 | 20,497 | 20,332 | 20,392 | 0,229  |        |        |       |  |
| 8  | 19,776      | 20,155 | 19,867 | 19,869 | 20,213 | 0,174  |        |        |       |  |
| 9  | 25,161      | 21,717 | 25,659 | 25,344 | 25,692 | 1,512  |        |        |       |  |

Mittaustuloksia 4–5 µm:n urista (x4).

| W9  | 4µm    |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | 1      | 2      | 3      | 4      | STDV   |
| 1   | 49,553 | 49,605 | 49,504 | 49,577 | 0,037  |
| 2   | 48,167 | 47,812 | 47,411 | 47,527 | 0,292  |
| 3   | 47,170 | 47,485 | 47,433 | 47,620 | 0,163  |
| 4   | 51,419 | 51,524 | 51,035 | 51,430 | 0,188  |
| 5   | 46,208 | 46,403 | 45,972 | 45,903 | 0,198  |
| 6   | 47,944 | 51,545 | 49,564 | 36,995 | 5,641  |
| 7   | 48,188 | 47,849 | 47,579 | 48,718 | 0,425  |
| 8   | 47,992 | 47,563 | 47,604 | 48,094 | 0,233  |
| 9   | 51,091 | 51,045 | 51,083 | 51,117 | 0,026  |
|     |        |        |        |        |        |
| W11 | 4µm    |        |        |        |        |
|     | 1      | 2      | 3      | 4      | STDV   |
| 1   | 62,872 | 63,266 | 63,273 | 63,476 | 0,219  |
| 2   | 60,754 | 60,318 | 60,163 | 61,337 | 0,456  |
| 3   | 60,533 | 60,351 | 60,447 | 60,176 | 0,133  |
| 4   | 64,982 | 64,356 | 64,187 | 65,067 | 0,382  |
| 5   | 56,936 | 46,498 | 57,814 | 57,713 | 4,771  |
| 6   | 63,244 | 63,294 | 47,268 | 63,870 | 7,020  |
| 7   | 60,901 | 61,508 | 60,491 | 58,395 | 1,171  |
| 8   | 61,015 | 60,546 | 60,705 | 60,186 | 0,299  |
| 9   | 63,929 | 64,160 | 63,471 | 63,631 | 0,266  |
|     |        |        |        |        |        |
| W12 | 5µm    |        |        |        |        |
|     | 1      | 2      | 3      | 4      | STDV   |
| 1   | 63,438 | 63,452 | 61,279 | 63,041 | 0,895  |
| 2   | 61,555 | 61,629 | 61,427 | 61,429 | 0,086  |
| 3   | 61,267 | 60,956 | 59,854 | 58,893 | 0,940  |
| 4   | 65,440 | 65,641 | 65,818 | 65,685 | 0,136  |
| 5   | 94,683 | 56,410 | 59,648 | 53,107 | 16,743 |
| 6   | 65,050 | 64,305 | 65,232 | 64,350 | 0,412  |
| 7   | 61,657 | 61,230 | 61,010 | 61,949 | 0,365  |
| 8   | 59,472 | 60,395 | 60,480 | 60,027 | 0,397  |
| 9   | 64,786 | 65,169 | 65,139 | 65,015 | 0,151  |