

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkötekniikan osasto

Petri Kärhä

Ultraviolettialueen puolijohdeilmaisimien kalibrointi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 22.01.1993.

Työn valvoja: apul. prof. Pekka Wallin

Työn ohjaaja: TkT Erkki Ikonen

TKK SÄHKÖTEKNIIKAN
OSASTON KIRJASTO
OTAKAARI 5 A
02150 ESPOO 1993

Alkulause

Tämä työ on tehty Metrologian tutkimusinstituutissa apulaisprofessori Pekka Wallinin johdolla, joka myös aloitti projektin. Haluankin osoittaa kiitokseni Pekka Wallinille tästä mahdollisuudesta suorittaa diplomityö.

Työ liittyy puolijohdeteollisuuden käyttämään optiseen litografiaan. Työ on syntynyt osittain itsenäisenä tutkimuksena, osittain yhteistyössä Suomen puolijohdevalmistajien VTI:n, Micronasin ja Planarin kanssa.

Työhön saamastani teknisestä tuesta haluan kiittää Metrologian tutkimusinstituutin henkilökuntaa, erityisesti TKT Erkki Ikosta. Saamastani puolijohdeteollisuuden prosessilaitteita koskevasta materiaalista kiitän VTI:n Philip O'Learyä, Micronasin Erja Lämsää, Planarin Martti Sonnista ja Osramin Olli Tuloisalaa. Kiitokset myös Säteilyturvakeskuksen Kari Jokelalle Säteilyturvakeskuksen mittalaitteita koskevasta informaatiosta.

Työn aikana saamastani taloudellisesta tuesta haluan osoittaa kiitokseni Metrologian tutkimusinstituutille ja Me Weikkoset -orkesterille, erityisesti Veli-Matti Kunnarille. Suoraa tukea diplomityöhön en ole saanut, mutta järjestyneet sivutienestit ovat osaltaan tehneet tutkimustyön mahdolliseksi.

Espoossa Tammikuun 20. päivänä 1993,



Petri Kärhä

Tekijä: **Petri Kärhä**

Työn nimi: **Ultravioletialueen puolijohdeilmäsimien kalibrointi**

Päivämäärä: **20.01.1993**

Sivumäärä: **52**

Osasto: **Sähkötekniikka**

Professuuri: **Ele-66a Mittaustekniikka**

Työn valvoja: **Apulaisprofessori Pekka Wallin**

Työn ohjaaja: **TkT Erkki Ikonen**

Työssä on tutkittu erilaisia vaihtoehtoja puolijohdeteollisuuden fotolitografiassa käyttämien fotodiodipohjaisten ultravioletisäteilyn detektorien vasteen kalibrointiin, sekä arvioitu kalibrointimenetelmien ja litografiaprosessin tarkkuuksia tietokonesimuloinnein. Erityisesti on tutkittu pyrosähköiseen detektoriin perustuvaa vasteen kalibrointijärjestelmää.

Työssä on kehitetty yksinkertaiset simulointimallit elohopealampuille, käytetyille puolijohdedetektoreille ja tavallisimmille fotolitografiassa käytetyille valotuslaitteille. Simulointimalleja hyväksikäyttäen on tehty C-kieliset tietokoneohjelmat, jotka simuloivat erilaisia optisia mittausjärjestelmiä.

Työssä esitetyin menetelmin on mahdollista päästä parempiin kalibrointitarkkuuksiin, kuin nykyisin käytössä olevilla kaupallisilla kalibrointipalveluilla. Noin 5% mittausepävarmuus voidaan saavuttaa.

Eri epävarmuustekijöiden huomioimatta jättäminen kalibroinnissa, saattaa johtaa jopa 15% mittausepävarmuuteen valotusprosessissa.

Avainsanat: Ultravioletti, fotodiode, Optisen tehon kalibrointi, Elohopealamppu, Simulointi, Fotolitografia

Author: **Petri Kärhä**

Name of the thesis: **Calibration of semiconductor detectors for ultraviolet radiation**

Date: **20.01.1993**

Number of pages: **52**

Faculty: **Department of Electrical engineering**

Professorship: **Ele-66a Measurement Techniques**

Supervisor: **Associate Professor Pekka Wallin**

Instructor: **Dr. Erkki Ikonen**

In this work several possibilities to calibrate the fotodiode-based detectors used to measure irradiation intensity in photolithography have been studied. Their accuracy has been estimated by means of computer simulation, in addition to the accuracy of the lithography processes themselves.

Simple simulation models were developed for Mercury arc lamps, detectors to be calibrated and the most usual steppers and aligners used in photolithography. Using these models, computer programmes have been developed with C-language to simulate various measurement conditions.

With the methods described, it is possible to obtain lower calibration uncertainties than with the present commercial calibration services. Uncertainty down to 5% may be achieved.

Ignoring various sources of uncertainty in the calibration may cause even 15% uncertainties in the fotolithography process.

KEYWORDS: Ultraviolet, fotodiode, Optical power calibration, Mercury arc lamp, Simulation, Photolithography

Symboli- ja lyhenneluettelo

<i>Symboli tai lyhenne</i>	<i>Selitys</i>	<i>Yksikkö</i>
λ	Aallonpituus	nm
λ_0	Kaistanpäästösuodattimen keskiaallonpituus	nm
W	Kaistanpäästösuodattimen puoliarvokaistanleveys	nm
$r(\lambda)$	Ilmaisimen spektraalinen herkkyys	$\frac{\text{mW cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}}{\text{mW cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}}$
$E(\lambda)$	Spektraalinen irradianssi, 1. spektraalinen tehotiheys	$\text{mW cm}^{-2} \text{ nm}^{-1}$
$T_S(\lambda)$	Suodattimen spektraalinen läpäisy	
$T_J(\lambda)$	Säteenjakkajan spektraalinen läpäisy	
$R_J(\lambda)$	Säteenjakkajan spektraalinen heijastus	
G-viiva	Hg-lampun 436 nm spektriviiva	
H-viiva	Hg-lampun 405 nm spektriviiva	
I-viiva	Hg-lampun 365 nm spektriviiva	

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo	1
1. Johdanto.....	2
2. Valotusprosessi	4
2.1. Litografia	4
2.2. Optinen litografia eli fotolitografia	4
2.3. Fotolitografiassa käytettyjen elohopealamppujen ominaisuuksista.....	7
2.4. Fotolitografiassa käytettyjen fotoresistien ominaisuuksista.....	9
3. Optisen absoluuttitehon mittaaminen fotolitografiassa	12
3.1. Säteilytehon mittaamiseen käytetyt puolijohdeilmäsimet.....	12
3.2. Mittausprosessin analysointia	14
3.3. Mittausepävarmuus käytetyissä mittausprosesseissa.....	15
4. Ilmaisimien kalibrointi	18
4.1. Ultravioletialueen irradianssinormaalit.....	18
4.2. Kalibrointimenetelmät.....	19
4.3. Erään detektorivalmistajan kaupallinen kalibrointimenetelmä.....	19
4.4. Kalibrointi irradianssimonokromaattorilla ja xenon-lampulla.....	20
4.5. Kehiteltävä detektoripohjainen kalibrointimenetelmä.....	22
4.5.1. Menetelmä.....	22
4.5.2. Kalibroitavat suureet	23
4.5.3. Tarvittava laitteisto	24
4.5.3.1. Valotuslaite	24
4.5.3.2. Referenssidetektorit.....	25
4.5.3.3. Säteenjakaja	25
4.5.3.4. Suodattimet	26
4.5.4. Järjestelmän tehotasoista.....	27
5. Kalibroinnin virhearvio	29
5.1. Kalibroitavien suureiden vaikutus mittausepävarmuuteen.....	29
5.2. Simulointimenetelmän kuvaus.....	31
5.3. Simuloinnissa käytetyt mallit	32
5.3.1. Elohopealamppu.....	32
5.3.2. Valotuslaitteet	33
5.3.3. Kalibroitavien detektorien vastekäyrät.....	36
5.4. Simuloitavat suureet.....	36
5.5. Simulointituloksia	37
5.5.1. Mittausepävarmuus ideaalisella detektorilla.....	37
5.5.1.1. Spektriviivojen suhteellisten korkeuksien muutoksen vaikutus.....	37
5.5.1.2. Spektriviivojen leveyden vaikutus.....	40
5.5.2. Kalibroinnin epävarmuus epäideaalisella detektorilla.....	41
5.5.2.1. Detektorin puoliarvokaistanleveyden vaikutus mittausepävarmuuteen	41
5.5.2.2. Detektorin keskiaallonpituuden vaikutus mittausepävarmuuteen	43
5.6. Yhteenveto simuloinneista.....	45
6. Johtopäätökset.....	48
7. Pohdinta	49
8. Viiteluettelo ja aiheeseen liittyvää kirjallisuutta.....	50
9. Liite: Esimerkki simulointiohjelmasta (Lohkokaavio).....	52

1. Johdanto

Puolijohdeteollisuudessa tarvitaan tarkkaa ultraviolettisäteilyn tehon mittausta. Piikiekkojen pinnalla olevaa valoherkkää kalvoa valotetaan eräessä prosessin vaiheessa juuri tähän tarkoitukseen kehitetyllä voimakkaalla elohopealampulla. Hyvä kiekkojen laatu edellyttää sekä säteilyvuon profiilin tasaisuutta, että resistin saaman säteilyannoksen tarkkaa hallintaa.

Säteilyvuon tasaisuutta valvotaan mittaamalla säteilyn profiili ja intensiteettitaso tietyin väliajoin. Jotta mittaus olisi tarkka, on mittaukseen käytettävä fotodiodipohjainen mittalaite kalibroitava säännöllisesti.

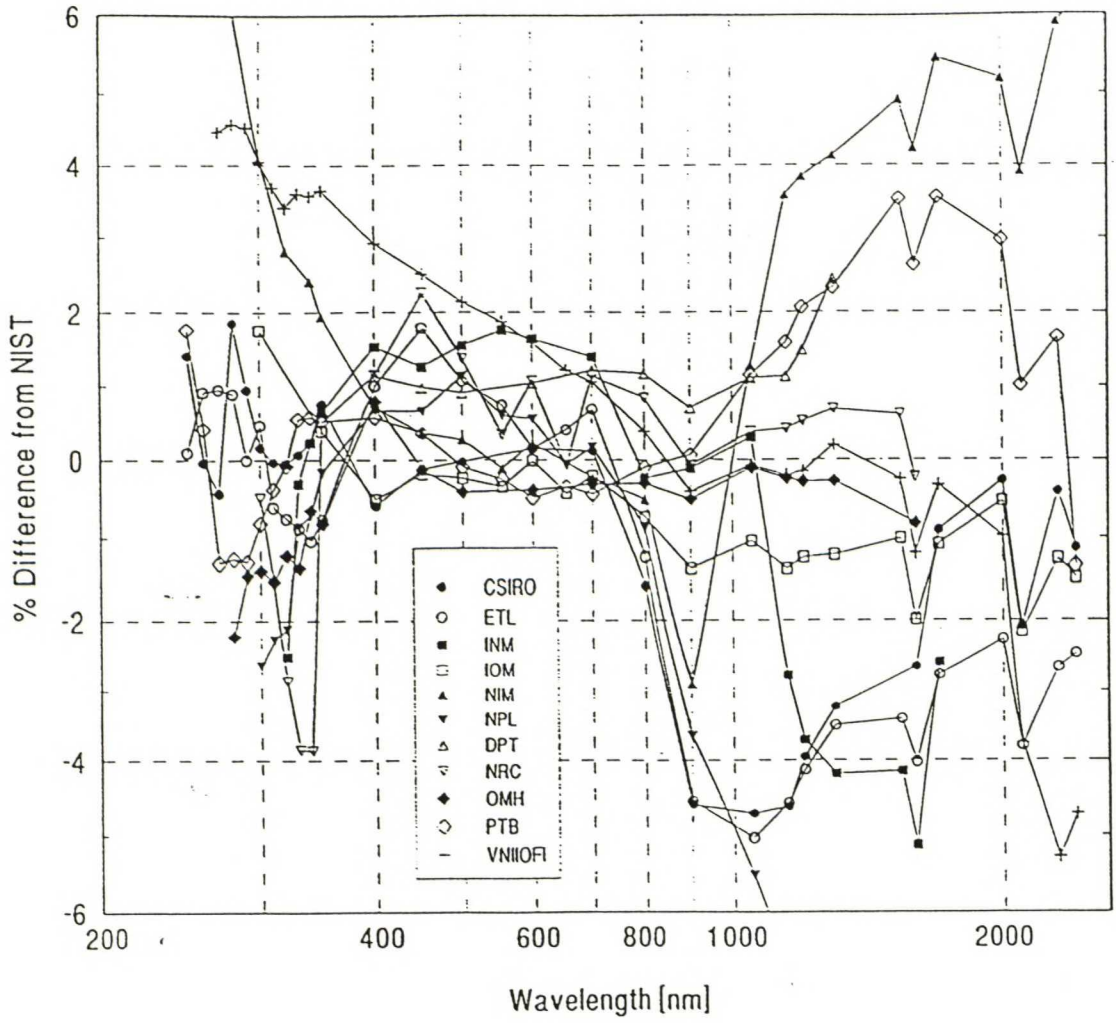
Tätä kalibroitusta ei voi tehdä Suomessa, vaan mittarit on lähetettävä kalibroitavaksi esim. mittarien valmistajalle USA:han, mikä ei suinkaan ole ongelmatonta. Menetelmän aiheuttamia potentiaalisia ongelmia ovat mm.:

1. Korkea hinta (~\$1000)
2. Mittarin mahdollinen vaurioituminen tai kalibroinnin kärsiminen lentorahdissa
3. Kalibroinnin ajallinen kesto, jonka ajan laite on poissa prosessin valvonnasta (~3-4 viikkoa)
4. Kalibroinnin luotettavuus (akreditointi)

Näiden ongelmien takia, saattaisi olla hyödyllistä saada kalibroitupalvelu myös Suomeen. Kalibroinnilla olisi oltava 5-10% tarkkuus, johtuen prosessien ja laatu järjestelmien vaatimuksista.

Tässä diplomityössä pyritään ensisijaisesti selvittämään, miten kalibroitusta tulisi tehdä. Lisäksi pyritään alustavasti suunnittelemaan detektoripohjainen käytännön kalibroitujärjestelmä detektorityypille OAI Model 311 Intensity Profiler. Järjestelmää tulisi pystyä käyttämään myös muiden vastaavanlaisten detektorien kalibroitukseen.

Kun tiedetään miten kalibroitusta tulisi tehdä, voidaan myös arvioida mittalaitevalmistajien tarjoamien kaupallisten kalibroitupalvelujen luotettavuutta. Tähän tuntuisi olevan tarvetta, koska joidenkin valmistajien spesifikaatiot tuntuvat liian hyviltä. Useimmat valmistajat ilmoittavat mittalaitteidensa tarkkuudeksi $\pm 3\%$, vaikka korkeatasoisten kansallisten laboratorioden mittanormaalienkin välillä on raportoitu jopa 6%:n eroja ultraviolettialueella. (Kuva 1).



Kuva 1, Irradianssinormaalien vertailun tuloksia [Walker & al. 1991]

2. Valotusprosessi

2.1. Litografia

Litografialla tarkoitetaan prosessia, jossa kuva halutusta piiristä siirretään piikiekon pinnalla olevaan valoherkkään kalvoon, eli ns. fotoresistiin. Fotoresistin ominaisuudet muuttuvat tällöin niin, että fotoresististä voidaan poistaa, joko litografiaan reagoinut, tai reagoimaton osa. (Ns. negatiivinen tai positiivinen fotoresisti). Jäljelle jäävä fotoresisti toimii tämän jälkeen suojana, kun alla olevaa materiaalia syövytetään, tai siihen istutetaan ioneja.

Perinteinen ja tällä hetkellä yleisin käytössä oleva litografiamenetelmä on optinen litografia, jossa maskissa oleva piirin kuva valotetaan fotoresistiin ultraviolettivalolla.

Pienin saavutettavissa oleva johtimen viivanleveys on suoraan verrannollinen käytetyn säteilyn aallonpituuteen. Viivanleveyksien pieneneminen onkin johtanut siihen, että litografian tutkimus etenee koko ajan kohti pienempiä aallonpituuksia. Nanoteknologia ei ole mahdollista perinteisillä fotolitografiamenetelmillä.

Pienimmät viivanleveydet saavutetaan nykyään mm. ultraviolettilasereihin (KrF laser, $\lambda=248$ nm, tai ArF laser), tai röntgensäteilyyn perustuvilla litografiamenetelmillä. Tavallaan nämä menetelmät voidaan käsittää optisen litografian erikoisalueiksi. Eri litografiamenetelmien rajat eivät ole jyrkkiä, kuten eivät ole ultraviolettisäteilynkään rajat. Röntgenlitografiassa voidaan käyttää mm. synkrotronisäteilyä.

Tutkimusta tehdään myös elektronisuihku- ja ionisuihkulitografian alueilla. Näissä menetelmissä kuva siirretään fotoresistiin pommittamalla resistiä varatuilla hiukkasilla. Tällä hetkellä näillä menetelmillä päästään kaikkein pienimpiin viivanleveyksiin.

Viivanleveyksien pieneneminen johtaa tulevaisuudessa automaattisesti uusien litografiamenetelmien käyttöönottoon. Menetelmät ovat kuitenkin toistaiseksi vielä kalliita, joten ne ovat vasta tutkimusasteella. Optinen litografia tulee olemaan vallalla oleva litografiamenetelmä vielä pitkään.

[Ahmed H. & al (toim.), 1990, litografiaa käsittelevät artikkelit]

2.2. Optinen litografia eli fotolitografia

Tässä kappaleessa käsitellään lähinnä perinteistä fotolitografiaa, jossa fotoresistin valotus tapahtuu elohopealampulla.

Valotuslaitteistolla saavutettava tarkin resoluutio (pienin viivan väli tai leveys) määräytyy kaavasta [Mack C.A., 1988]

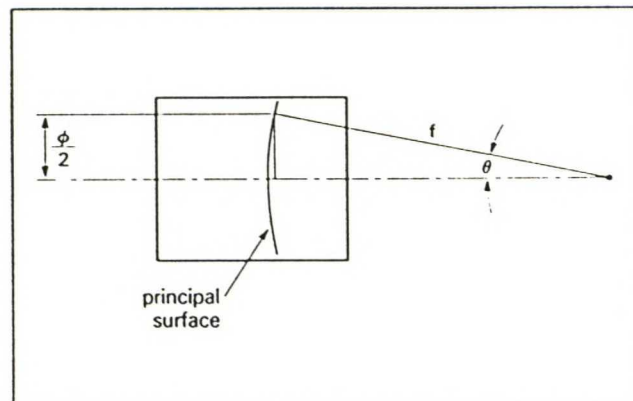
$$R = \frac{k \lambda}{N_A} \quad (1)$$

missä k on prosessista riippuva parametri tavallisesti välillä 0.6 - 1.0, λ on käytetyn valon aallonpituus ja N_A on valotuslaitteen linssisysteemin numeerinen aperttuuri.

Numeerinen aperttuuri linssisysteemille määritellään kaavalla

$$N_A = \sin \theta = \frac{\phi}{2f} \quad (2)$$

missä ϕ on valotettavan alueen halkaisija, θ on kulma, josta valo kerätään ja f on lampun etäisyys linssisysteemin päätasosta. (Kuva 2).



Kuva 2, Numeerisen aperttuurin N_A määritelmä [Melles Griot]

Numeerinen aperttuuri siis kuvaa sitä, kuinka suuresta kulmasta valo kerätään valotettavalle alueelle.

Viivanleveyttä voidaan pienentää suurentamalla valotuslaitteen numeerista aperttuuria, tai pienentämällä aallonpituutta.

Elohopealampuihin perustuvia valotuslaitteistoja on kahta eri lajia - ns. "optiset stepperit" ja "optiset alignerit". (Engl., optical stepper ja optical aligner).

Aligner-tyyppisessä laitteistossa koko kiekko valaistetaan kerralla. Valotettava alue on siis suhteellisen suuri. Elohopealampun spektri voidaan joskus käyttää näissä laitteissa lähes kokonaan. Yleensä

elohopealamppu, lampun heijastin ja valotuslaitteen optiikka rajaavat kaistan kuitenkin siten, että elohopealampun spektristä käytetään vain kolmea viivaa, ns. G-viivaa (436 nm), H-viivaa (405 nm) ja I-viivaa (365 nm). Laitteiden etuna on nopea valottuminen, ja yhden viivan käytön mahdollisesti aiheuttaman interferenssiongelman pieneneminen, mutta saavutettava resoluutio ei ole paras mahdollinen.

Stepper-tyyppisissä laitteissa kiekko valotetaan useassa vaiheessa. Kerrallaan valaistava alue on pieni, ja aluetta askelletaan pitkin kiekon pintaa, kunnes koko kiekko on valottunut. Tällöin voidaan piirin maski tehdä suurempaan mittakaavaan, jolloin tarkkuus paranee. Valotuksessa maskissa olevan kuvan koko siirretään resistille esim. suhteessa 10:1 tai 5:1.

Stepper-tyyppisissä valottimissa voidaan valotus suorittaa laajalla kaistalla, kuten aligner-tyyppisissä valottimissakin, mutta tarkimmissa valottimissa elohopealampun spektriä suodatetaan siten, että vain yhtä spektriviivaa käytetään. Tällöin saavutetaan pienempi resoluutio. Käytettävät viivat ovat yleensä G-viiva tai I-viiva, joista siis I-viivalla saavutetaan paras resoluutio kaavan 1 mukaan.

Elohopealampuilla voidaan tehdä myös valottimia, jotka valottavat UV-C alueella (215 nm - 250 nm). Ongelmana näillä aallonpituuksilla on mm. ilman suuri absorptio. Syvän ultravioletin alueella toimivissa valottimissa valotus tapahtuukin tyhjiössä. Suomessa ei tällaisia laitteita ole käytössä, joten niihin ei tämän työn puitteissa enempää puututa.

Prosesseissa käytetyn optisen säteilyn tehotaso on suuri. Yleensä käytettyjen elohopealamppujen teho on luokkaa 100 W - 1000 W. Kiekolle siirtyvä absoluuttisäteilyteho on tällöin luokkaa kymmeniä mW cm^{-2} . Erikoissovelluksissa voidaan käyttää vielä tehokkaampia lamppeja, mikäli esim. kerrallaan valotettava alue on suuri. Käytössä on mm. elohopea-xenon lamppeja jopa viiteen kilowattiin asti.

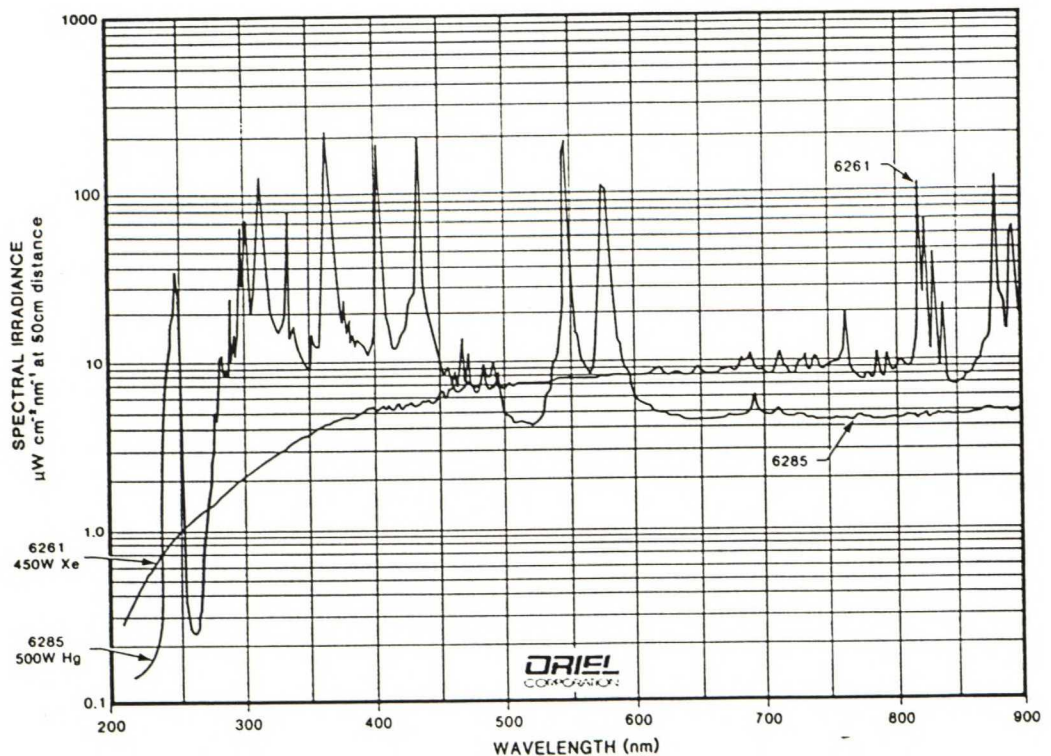
Kiekon halkaisija on tavallisesti kolmesta kuuteen tuumaan (7.62 cm - 15.24 cm). Tällä alueella säteilyn on oltava tasaista.

Valotuksen aikana on kontrolloitava kiekolle siirtyvää säteilyenergiaa. Säteilyn teho mitataan ennen valotusta ja tuloksesta lasketaan valotusaika. Tämä valotusaika vaihtelee, sillä elohopealampun teho heikkenee lampun vanhetessa. Teho heikkenee kuukaudessa noin puoleen, minkä jälkeen lamppu vaihdetaan uuteen.

Valotus on kriittinen osa komponenttien valmistusprosessia. Liian suuri tai pieni säteilyenergia huonontaa piirien saantoa. Siirryttäessä pienempiin viivanleveyksiin on säteilyenergia hallittava vielä entistä paremmin.

2.3. Fotolitografiassa käytettyjen elohopealamppujen ominaisuuksista

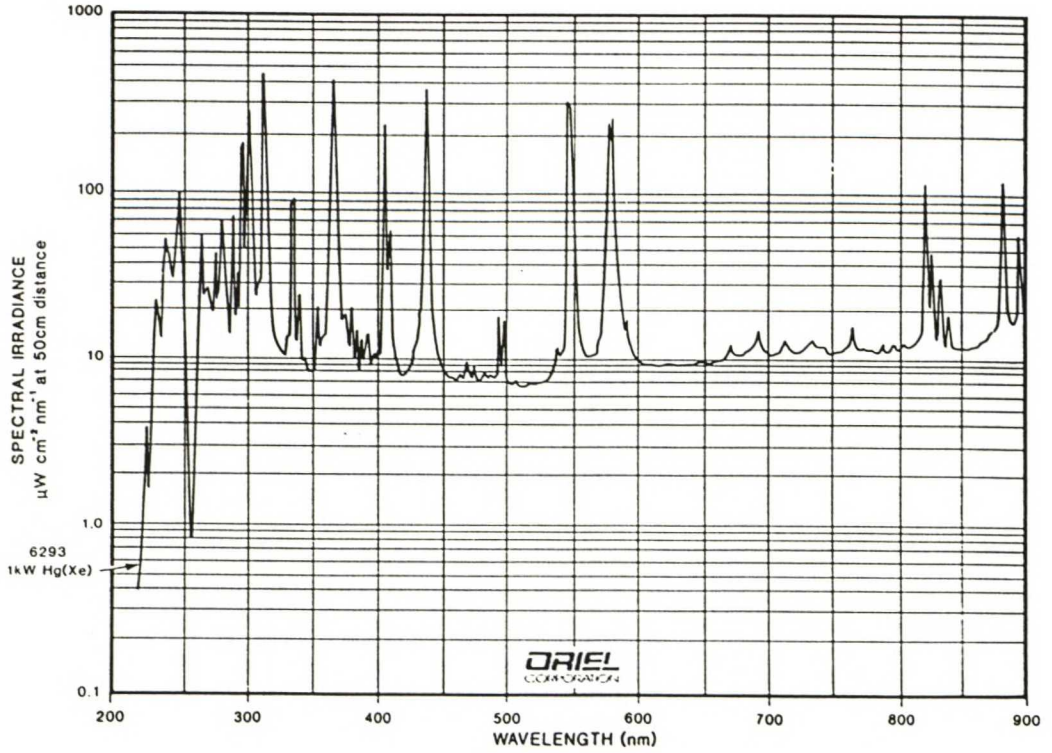
Lähes kaikissa valotuslaitteistoissa käytetään korkeapaineisia elohopea purkauslamppuja, jotka ovat voimakkaimpia ultraviolettisäteilyn säteilijöitä. Kuvassa 3 on elohopealampun tyypillinen spektri.



Kuva 3, Elohopealampun ja xenon-lampun tyypilliset spektrit. (Oriel 450W xenon- ja 500W elohopealamppu)

Kuvassa 3 näkyy myös tyypillinen xenon-lampun spektri. Xenon-lamput ovat voimakkaimpia ultraviolettialueen säteilijöitä, joilla on jatkuva spektri viivaspektrin sijaan.

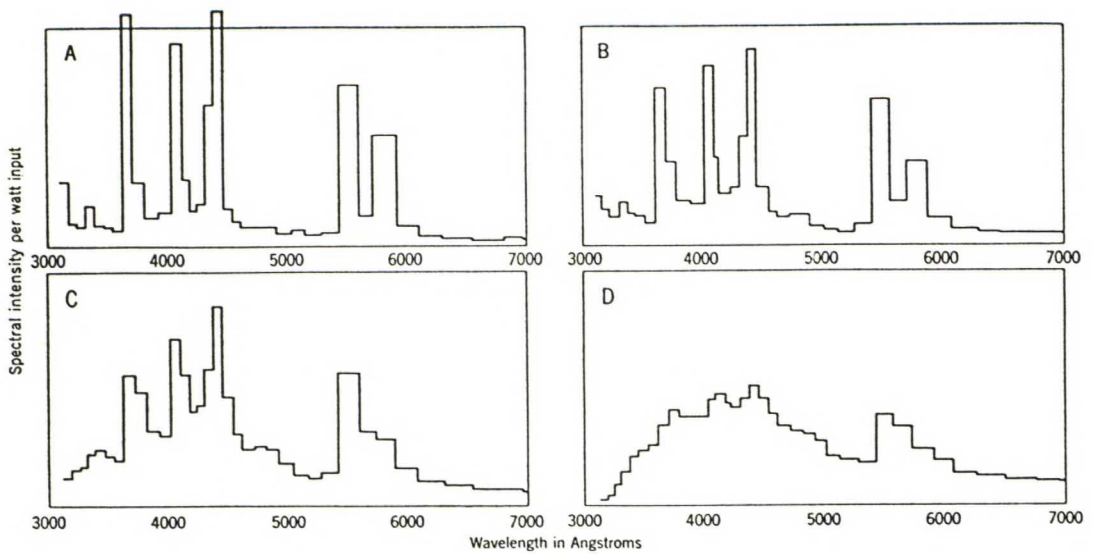
Eräissä valotusprosesseissa käytetään myös elohopea-xenon -lamppuja, joiden spektri on kombinaatio elohopean ja xenonin spektreistä, sisältäen xenon-lampun jatkuvan spektrin ja elohopealampun korkeat spektriviivat. Kuvassa 4 on tyypillinen elohopea-xenon -lampun spektri.



Kuva 4, Elohopea-xenon -lampun tyypillinen spektri. (Oriel 1000W elohopea-xenon -lamppu)

Elohopealampun intensiteetti on lampun sisällä vallitsevan paineen funktio, mistä syystä valotussysteemeissä käytetään korkeapaineisia (~230 atm) elohopealamppuja. Suuri paine aiheuttaa elohopealampun spektriin myös spektriviivojen levenemistä, sekä pienen taustan viivaspektrin lisäksi.

Tyypillisiä elohopealampun spektrejä lampun sisällä vallitsevan paineen funktiona on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5, Elohopealamppujen spektrejä lampun sisällä vallitsevan paineen funktiona. a) 31 atm b) 75 atm c) 165 atm d) 285 atm [Noel, 1941]

Lamppujen spektrin muoto vaihtelee riippuen mm. lampun tehosta, valmistajasta, yksilöstä ja mahdollisesti lampun käyttöiästä. Yksi tämän työn tavoitteista on selvittää näiden vaihteluiden vaikutus mittaustuloksiin.

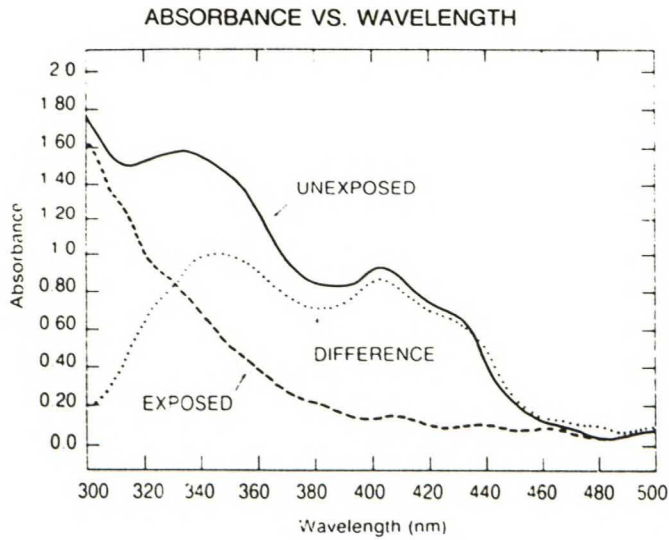
2.4. Fotolitografiassa käytettyjen fotoresistien ominaisuuksista

Fotoresistit ovat valoherkkiä aineita, joista tehdään piikiekon pinnalle suojakalvoja. Heijastamalla halutun piirin kuva kalvolle, muuttuvat valottuneen alueen ominaisuudet siten, että resististä voidaan syövyttää pois haluttu osa.

Fotoresistin valottuminen on riippuvainen käytetyn valon aallonpituudesta. Fotoresistit ovat harvoin herkkiä yhdelle ainoalle aallonpituudelle, mutta valotusteho mitataan tavallisesti vain yhdestä spektriviivasta, vaikka valotus tapahtuukin useammalla viivalla. Prosessiin saattaa tällöin aiheutua virhettä, mikäli elohopealamppun spektri vaihtelee mittalaitteen kaistan ulkopuolella.

Myös kaistan sisällä tapahtuva muutos saattaa aiheuttaa virhettä, koska detektorin vaste ei ole tasainen.

Kuvassa 6 ja taulukossa 1 on esitetty erään yleisesti käytössä olevan resistin (Shipley, Microposit S1800 series photoresist) ominaisuuksia.



Kuva 6, Fotoresistin spektraalinen absorbanssi [Shipley]

Taulukko 1, Tarvittava valotusenergia [Shipley]

EXPOSURE REQUIREMENTS VS. WAVELENGTH				
Wavelength in Air (λ)	Index of Refraction for S1800 (n)	Wavelength in S1800 ($\lambda_R = \lambda/n$)	Number of Quarter Wavelengths in $1.00 (\pm 0.01) \mu\text{m}$ of S1800	Relative Exposure Energy Threshold
436 nm	1.68	260 nm	15.4 (± 0.2)	1.47 E_t
405* nm	1.69	240 nm	16.7 (± 0.2)	1.00 E_t
365 nm	1.71	213 nm	18.7 (± 0.2)	1.07 E_t

* determined using a 400 nm OAI probe

Kyseinen fotoresisti on tarkoitettu valotettavaksi valolla jonka aallonpituus on välillä 350...450 nm.

Resistin spektraalinen absorbanssi kuvaa resistin valottumista eri aallonpituuksilla. Valottuneen ja valottumattoman resistin absorbanssien välisen eron on oltava mahdollisimman suuri. Kun valottuneen resistin absorbanssi pienenee, niin valotus pääsee tunkeutumaan syvemmälle resistiin, ja resisti valottuu koko paksuudeltaan.

Taulukossa 1 esiintyvä kynnyksenergia tarkoittaa sitä minimienergiaa, joka tarvitaan, jotta kiekolta kehityksessä saadaan poistettua valottunut resisti täydellisesti laajoilta tasaisilta alueilta. Mikäli valotusenergia on suurempi kuin tämä kynnyksenergia alkavat fotoresistillä suojatuksi tarkoitettut alueet kaventua. Käytännössä nämä alueet tehdään maskiin suuremmiksi, ja resisti ylivalotetaan oikean koon saavuttamiseksi. Prosessi on tällöin helpompi hallita.

Taulukosta 1 nähdään tarvittavan kynnyksenergian riippuvuus käytetyn valon aallonpituudesta. Resisti valottuu lähes yhtä tehokkaasti H- tai I-viivoista, G-viivalla tarvitaan hieman suurempi energia.

Simulointeja varten mallinnetaan fotoresistin valottumisherkkyys yksinkertaistuksen vuoksi siten, että valottumisherkkyys on vakio kaistalla 340...460 nm. Tämän kaistan ulkopuolella tapahtuvaa valottumista ei oteta huomioon.

3. Optisen absoluuttitehon mittaus fotolitografiassa

3.1. Säteilytehon mittaukseen käytetyt puolijohdeilmaisimet

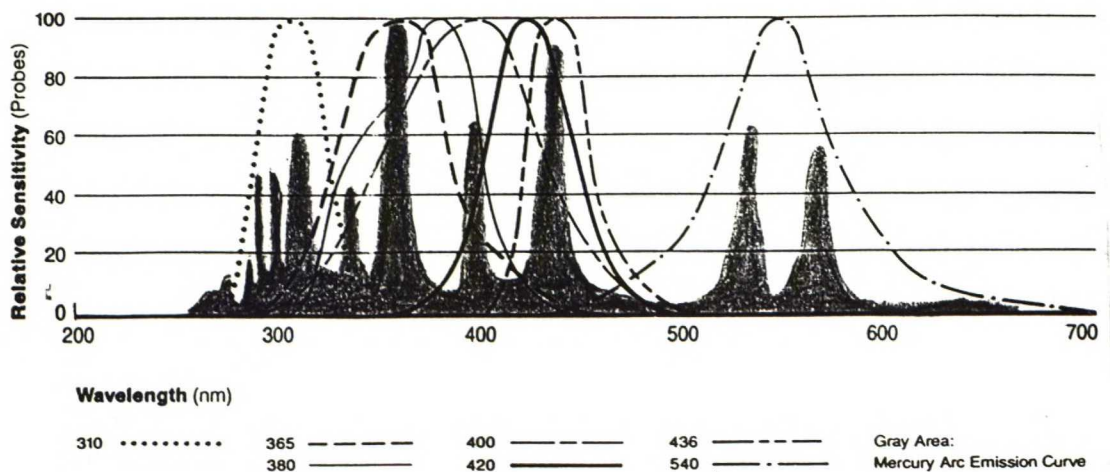
Tässä työssä lähestytään kalibrointia pyrkimällä löytämään kalibroitiratkaisu mittalaitteelle OAI Model 311 Intensity Profiler, koska tämä on yleisin käytössä oleva mittalaitetyyppi. Muiden valmistajien vastaavat mittalaitteet eivät juurikaan eroa toisistaan, joten kehitettävää kalibrointilaitteistoa voidaan käyttää muidenkin valmistajien laitteiden kalibrointiin. Esimerkkimittalaitteen tärkeimmät ominaisuudet on listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2, Esimerkkimittalaitteen tärkeimmät ominaisuudet

Mittausalue	0...40.0 mW/cm ²
Resoluutio	±(0.1 mW/cm ² + 1 dgt)
Tarkkuus	±3% (NIST-jäljitettävä)
Painotuskäyrät	310, 365, 380, 400, 420, 426, 540 nm
Syvä UV painotuskäyrät	220, 253.7, 260, 310 nm

Huomattavaa on, että ko. mittalaite käsittelee suhteellisen suuria tehoja. Kalibrointilaitteistossa käytettävän säteilylähteen on oltava teholtaan samaa suuruusluokkaa, kuin itse prosessissa käytettävä elohopealamppu optiikkoineen. Mittalaitteen resoluutio on 0.1 mW cm⁻². Mikäli halutaan että resoluutiosta aiheutuva mittausepävarmuus on esim. alle prosentti, on kalibroitavan tehon oltava yli 10 mW cm⁻². Prosessissa olevasta lampusta (optiikkoineen) saadaan tyypillisesti 3-6 mW cm⁻² lampun iästä riippuen. (250W:n elohopealamppu, mittapäässä kaistanpäästösuodatin 310 nm:lle).

Detektorien vaste on painotettu siten, että mittari painottaa yhtä, tai useampaa elohopealamppun spektriviivaa. (Kuva 7). Painotus on tehty kombinaatiolla värjättyjä lasisuodattimia.



Kuva 7, OAI Model 311 mittapäiden painotuskäyrät

Myös syvän ultravioletin alueelle on saatavissa erikoismittapäitä, jotka on painotettu 220, 253.7, 260 tai 310 nm aallonpituudelle.

Kalibroinnin kannalta nämä vastekäyrät ovat riittämättömät. Niiden muotoa ei nimittäin ole spesifioitu esitteessä. Tällöin ei voi tarkasti tietää mitä mitataan. Vastekäyrät ovat valmistajan standardien mukaisia. Näiden standardien mukaisten detektorien tyypilliset vasteet saa pyytämällä. Tätä työtä kirjoitettaessa niitä ei kuitenkaan vielä ole saatavilla.

Mittarin mittapää on piikiekon kokoinen ja muotoinen. Mittapäessä on yhdeksän detektoria, joista jokaisen antama arvo voidaan lukea erikseen. Näin saadaan mitattua tehotason jakauma piikiekon alueella, ja se voidaan säätää mahdollisimman tasaiseksi.

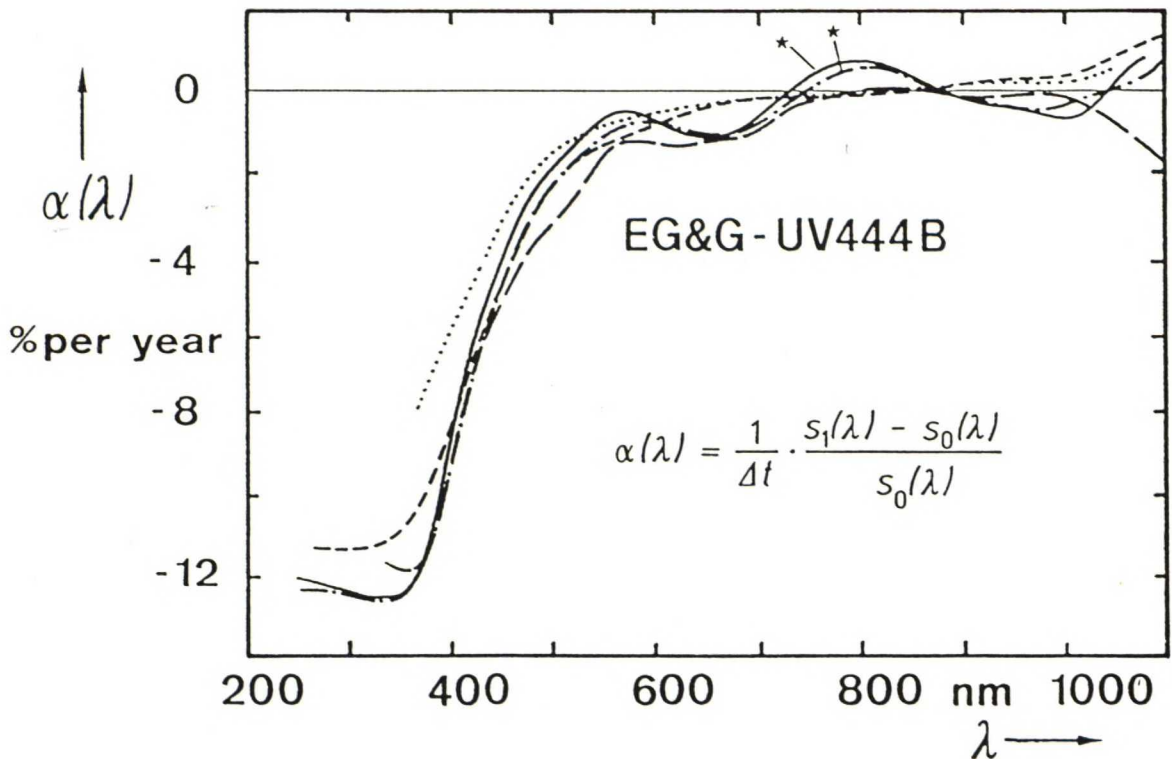
Mittapään eri detektorien vasteiden keskinäinen tasaisuus hallitaan. Detektorit peitetään siten, että vain yksi kerrallaan mittaa samassa kohdassa säteilyvuota. Näin saadaan yksittäiset detektorit kalibroitua suhteessa toisiinsa.

Säteilyn absoluuttista tasoa ei kuitenkaan pystytä mittaamaan yhtä helposti, mikä saattaa aiheuttaa hankaluuksia. Mittarin ryömiminen, tai mittarin korvaaminen toisella saattaa aiheuttaa asteikon siirtymisen. Mittarit on tämän takia kalibroitava säännöllisesti.

Markkinoilla on myös laitteita, joiden mittapään muodostaa vain yksi detektori (esim. Karl Suess, tai OAI Model 206). Näillä mitattaessa säteilyn tasaisuus varmistetaan mittaamalla useassa kohdassa säteilyvuota.

Detektori perustuu fotodiodiin. Fotodiodit eivät aina ole parhaita mahdollisia komponentteja ultraviolettisäteilyn mittaamiseen, koska ultraviolettisäteily muuttaa joidenkin fotodiodien ominaisuuksia. Detektoreiden vaste saattaa myös käyttämättömänä ryömiä muutamassa vuodessa jopa kymmeniä prosentteja.

Fotodiodista muuttuu vasteen lisäksi myös vasteen aallonpituusriippuvuuden muoto. Kuvassa 8 on esitetty erään fotodiodin spektraalisen vasteen muuttuminen ikääntymisen johdosta.



Kuva 8, Ikääntymisen vaikutus EG&G-UV 444 B fotodiodin spektraaliseen vasteeseen [Stock, 1986]

Fotodiodin spektraalisten ominaisuuksien muuttuminen näkyy fotodiodista valmistetun säteilydetektorin ominaisuuksissa mm. vastekäyrän keskiaallonpituuden siirtymisenä.

3.2. Mittausprosessin analysointia

Mittarin mittaama säteilytehotiheys (mW/cm^2) on

$$P_1 = \int r_1(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

missä $r_1(\lambda)$ on mittarin spektraalinen herkkyys ja $E(\lambda)$ on valotuslaitteesta ulostulevan säteilyn irradianssi kiekon tasossa.

Mittarin mittaama teho on siis elohopealampun säteilyteho painotettuna detektorin spektraalisella herkkyydellä. Mittarin spektraalisen herkkyyden ominaisuuksia ovat

1. Mittauskaistan keskiaallonpituus, λ_0
2. Mittauskaistan puoliarvokaistanleveys, W
3. Painotuskäyrän muoto
4. Vaste keskiaallonpituudella, r_0

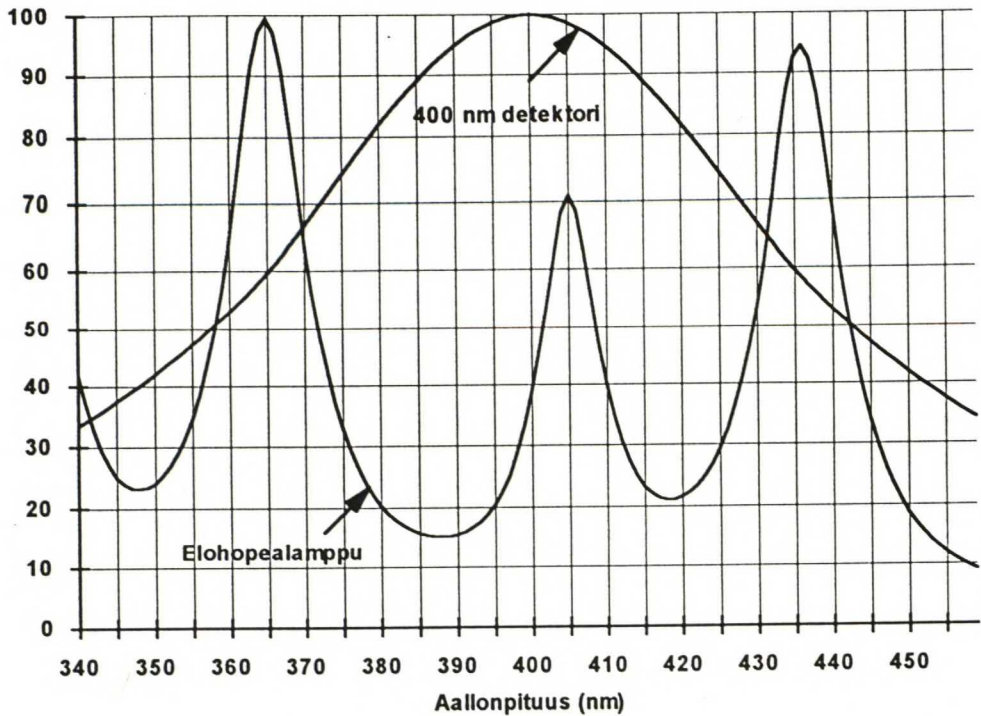
Kaikki vaikuttavat mittaustulokseen, mutta vain r_0 :n arvoon voidaan vaikuttaa. Käytännössä kalibrointi tehdäänkin juuri määrittämällä tämä korjauskerroin [OAI:n kalibrointimenetelmä].

Elohopealampun spektraalinen tehotiheys ei ole jatkuva, vaan spektri muodostuu emissioviivoista (kuva 3). Mielenkiintoista on, miten tämä epäjatkuvuus vaikuttaa mittausprosessin tarkkuuteen, mikäli mittalaite kalibroidaan erilaisella säteilylähteellä, kuin millä varsinainen kiekkovalmistusprosessiin liittyvä tehomittaus suoritetaan. Tätä tullaan myöhemmin simuloimaan.

Tämän tyyppisessä mittauksessa olisi ideaalista, jos mittarin spektraalinen herkkyys vastaisi käytetyn fotoresistin valottumisherkkyyttä. Tällöin mittaus kuvaisi suoraan lopputulosta. Koska näin ei kuitenkaan aina ole, niin virhearvioinnit kannattaa tehdä siten, että arvioidaan virhettä lopputuloksessa, eli fotoresistin valottumisessa ja sitä kautta virhettä tavoitelluissa viivanleveyksissä.

3.3. Mittausepävarmuus käytetyissä mittausprosesseissa

Valotuslaitteesta tulee tyypillisesti ulos elohopealampun spektrin osa, joka käsittää G-, H- ja I-viivat. Kaikki vaikuttavat resistin valottumiseen, mutta yleensä mittaukseen käytetty detektori on painotettu niin, että vain yhden spektriviivan teho mitataan. (kuva 9)



Kuva 9, Elohopealampun G-, H- ja I-viivat ja H-viivaan painotetun mittapään vaste. Kuva piirretty myöhemmin esiteltävällä simulointiohjelmalla

Muutkin spektriviivat vaikuttavat mittaustulokseen, mutteivät läheskään niin paljon kuin viiva, johon detektori on painotettu.

Koska mittalaite ei painota säteilyn spektraalista tehotiheyttä samalla tavalla, kuin valotettava resisti, aiheutuu mittaukseen mittausrvirhettä. Mikäli valottimen spektri ei vaihtele, tämä virhe voidaan ottaa huomioon. Prosessissa on nimittäin joka tapauksessa tehtävä koesarjoja, joissa määritellään mm. millä mitatulla säteilyenergialla saavutetaan paras laatu. Tällöin otetaan automaattisesti huomioon resistin valottumisherkkyiden ja detektorin painotuksen välinen ero.

Mikäli valottimen spektri kuitenkin jostain syystä muuttuu, aiheutuu tästä mittausrvirhe, jonka vaikutus resistin absorboimaan säteilytehoon ja sitä kautta resistin valottumiseen on

$$\Delta P = \int [r_1(\lambda) - r_r(\lambda)] \Delta E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

missä $r_1(\lambda)$ on detektorin normalisoitu vaste, $r_r(\lambda)$ on fotoresistin normalisoitu valottumisherkkyys ja $\Delta E(\lambda)$ valotuslaitteen irradianssin muutos.

Valottimen ulostulospektri saattaa muuttua mm. elohopealampun vaihdon yhteydessä, tai lampun ikääntyessä.

Elohopealampun spektri voi vaihdella ainakin kahdella tavalla.

1. Elohopealampun spektriviivojen suhteelliset korkeudet muuttuvat.

2. Elohopealampun spektriviivojen leveys muuttuu.

Spektriviivojen suhteellisten korkeuksien muutos ei käytännössä aiheuta mittausepävarmuutta kapeakaistaisilla valottimilla, joissa säteily sisältää vain yhden spektriviivan, mutta laajakaistaisissa valotuslaitteissa se voi aiheuttaa huomattavan suuren epävarmuuden.

Spektriviivojen leveys aiheuttaa mittausepävarmuutta kaiken tyyppisissä laitteistoissa.

Tulemme myöhemmin simuloimaan, miten suuren mittausepävarmuuden elohopealampun ominaisuuksien muuttuminen aiheuttaa.

4. Ilmaisimien kalibrointi

4.1. Ultraviolettialueen irradianssinormaalit

Optisen tehon primäärinormaalit perustuvat yleensä mustan kappaleen säteilyyn. Mustan kappaleen säteily noudattaa ns. Planckin lakia,

$$L(\lambda) = \frac{\left(\frac{2hc^2}{\lambda^5}\right)}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (5)$$

missä $L(\lambda)$ on spektraalinen radianssi [$\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$], h on Planckin vakio = 6.6262×10^{-34} J sec, c on valon nopeus = 2.9979×10^8 m/sec, λ on aallonpituus metreinä, k on Boltzmannin vakio = 1.3806×10^{-23} J/K ja T on mustan kappaleen lämpötila kelvineinä [Wyatt C.L., 1978]. (Huom, Luonnollisempi yksikkö radianssille olisi esim. [$\text{mW cm}^{-2} \text{nm}^{-1} \text{sr}^{-1}$]).

Irradianssi saadaan radianssista integroimalla lähteen pinta-alan ja detektorin peittämän avaruuskulman yli.

Siirtonormaaleina voidaan käyttää mm. halogeenilamppuja, joiden kalibrointi jäljitetään mustan kappaleen säteilyyn.

Kehittynyt ilmaisinteknologia on johtanut siihen, että primäärinormaalina voidaan pitää myös absoluuttiradiometriä. Suomen optisen tehon perusmittanormaali on juuri tällainen [Varpula T. & al, 1989].

Puolijohdteollisuuden käyttämien detektorien kalibrointi suoraan primäärinormaalien avulla on mahdotonta, koska tehotasot ovat aivan eri suuruusluokkaa. Lisäksi primäärinormaalit antavat varsin vähän säteilyä ultraviolettialueella. Todennäköisesti kalibroittavat detektorit eivät reagoisi mustan kappaleen säteilijöihin, halogeenilamppuihin, tai absoluuttiradiometrissä käytettyyn laseriin ollenkaan.

Ainoalta kalibrointiin sopivalta lähteeltä tuntuu suuritehoinen elohopea-lamppu tai xenon-lamppu. Ne eivät kuitenkaan ole kovin stabiileja, mikä aiheuttaa omat ongelmansa.

4.2. Kalibrointimenetelmät

Kalibrointi voidaan tehdä monella tavalla. Se, millä tavalla mittari tulee kalibroida, riippuu mm. tarkkuusvaatimuksista ja siitä, mitä mittarilta halutaan.

Mikäli mittaussprosessi halutaan hallita täydellisesti, on detektorista mitattava kaikki edellä mainitut spektraalisen vasteen ominaisuudet (λ_0 , W , r_0 ja muoto), sekä detektorin lineaarisuus. Lisäksi on tunnettava käytetyn kalibrointilampun spektri ja prosessissa käytettävän valotuslaitteen spektri. Tällöin ollaan riippumattomampia laitetoimittajista. Mikäli jokin järjestelmän komponenteista korvataan toisen tyyppisellä vastaavalla osalla, tarvitsee tietää vain uuden komponentin spektraaliset ominaisuudet. Tämän jälkeen voidaan laskea prosessille uudet mittausravot, eikä niitä tarvitse määrittää kokeellisesti.

Mikäli taas järjestelmään ei olla tekemässä muutoksia, saattaa riittää pelkkä mittalaitteen näyttämän kiinnittäminen standardiin. Tämän tekeminen on huomattavasti halvempaa, kuin täydellinen kalibrointi. Menetelmä on myös käytännöllisin.

4.3. Erään detektorivalmistajan kaupallinen kalibrointimenetelmä

OAI kalibroi valmistamansa detektorit vertaamalla niitä detektoriin, jonka vaste on tunnettu. Käytetty detektori on thermopile-tyyppinen optisen tehon mittari, jonka spektraalinen vaste on suhteellisen tasainen ultravioletista infrapunaan.

Detektori kalibroidaan NIST-jäljitettävästi kalibroidulla voltti-ohmi -mittarilla, joka siis toimii perusmittanormaalina, ja stabiililla jännitelähteellä. Jännitelähteellä lämmitetään mittalaitteessa olevaa vastusta, ja mittalaitteen näyttämää verrataan virrasta ja resistanssista laskettuun sähkötehoon. Huomattavaa on, että kalibroinnissa ei käytetä optista säteilyä ollenkaan. Mittalaitteen oletetaan muuttavan lämpötehoksi 98% optiseta tehosta, mutta tätä suhdetta ei kalibroida.

Thermopile-tehomittarin vaste painotetaan vastaamaan kalibroitavan detektorin vastetta käyttämällä samoja lasisuodattimia kuin kalibroitavissa detektoreissa. Suodattimien läpäisy on mitattu erikseen.

Koska fotodiodin vaste ei ole spektraalisesti tasainen kuten thermopile-tyyppisellä mittalaitteella, ei samalla

suodatinkombinaatiolla saada aikaan täysin samanlaisia vasteita, ainakaan kovin leveällä aallonpituusalueella.

Kalibroinnissa käytettävää valonlähdettä ei ole spesifioitu. Suuresta tehotasosta voidaan päätellä, että kalibrointiin käytetään voimakasta elohopealamppua, jonka kaista on rajoitettu käsittämään yhden tai useamman elohopealampan spektriviivan.

Tämän kalibrointimenetelmän tarkkuutta tullaan myöhemmin simuloimaan, sekä olettaen että kalibrointilampussa käytetään yhtä spektriviivaa, että olettaen valotuslaitteen olevan samanlainen kuin varsinaisessa prosessilaitteistossa oleva valotuslaite.

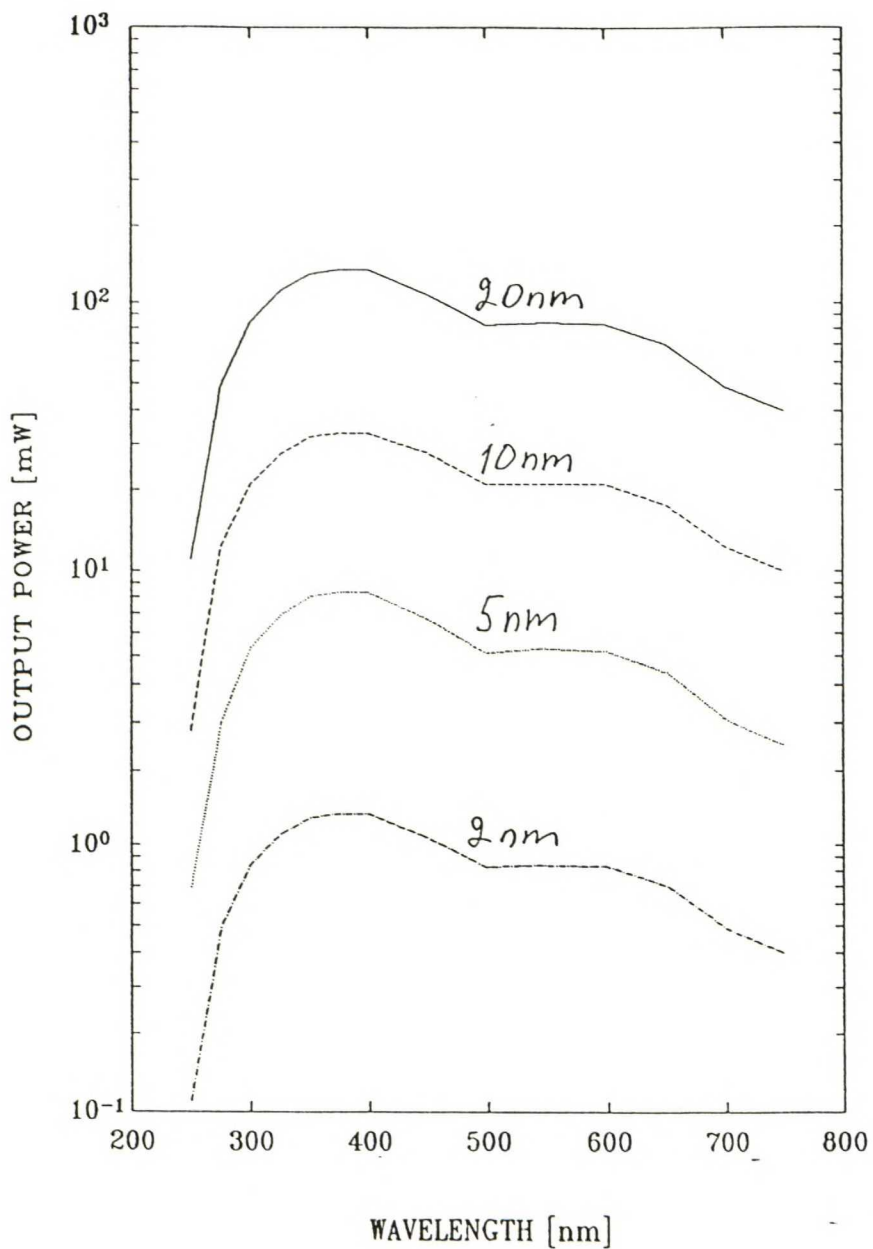
[OAI:n kalibrointimenetelmä]

4.4. Kalibrointi irradianssimonokromaattorilla ja xenon-lampulla

Kalibroitavan detektorin vastekäyrästä voi määrittää kaikki parametrit käyttäen irradianssimonokromaattoria ja xenon-lamppua. Xenon-lamppu soveltuu melko hyvin ultraviolettialueen kalibrointeihin, koska sillä on ultraviolettialueella suhteellisen voimakas jatkuva spektri. (Kuva 3)

Irradianssimonokromaattorilla voidaan erottaa xenon-lampun säteilystä kapea aallonpituusalue ja mitata tällä kaistalla keskimäärin oleva säteily referenssidetektorilla. Referenssidetektorin näyttämää voidaan verrata kalibroitavan detektorin näyttämään, ja aallonpituusaluetta muuttamalla saadaan määriteltyä kalibroitavan detektorin koko vastekäyrä.

Säteilyturvakeskuksella on käytössään Orielin spektrometri ja irradianssimonokromaattori, jota voidaan käyttää 1 kW xenon-lampulla. Kuvassa 10 on esitetty tämän irradianssimonokromaattorin laskettu ulostuloteho kaistanleveyyden ja keskiaallonpituuden funktiona.



Kuva 10, Irradianssimonokromaattorin laskettu ulostuloteho 1 kW xenon lampulla [Jokela, 1992]

Mittausten mukaan todellinen teho on noin puolet tästä lasketusta arvosta.

Mikäli tämä teho voidaan keskittää 1 cm^2 alueelle havaitaan, että 10 nm kaistalla saavutetaan haluttu 10 mW cm^{-2} tehotaso, jolla detektorien ominaisuuksia voidaan mitata. Mikäli monokromaattorin läpäisseele spektrille arvioidaan muoto, voidaan aallonpituusvasteen mittauksen resoluutiota parantaa matemaattisesti.

Todennäköisesti absoluuttista kalibrointia ei voida suorittaa riittäväällä tarkkuudella tällä menetelmällä, mutta sillä voidaan määrittellä detektorin vastekäyrän muoto ja parantaa siten kehiteltävällä detektoripohjaisella kalibrointimenetelmällä saavutettavaa tarkkuutta. Menetelmä tuntuisi sopivan erinomaisesti detektorin vastekäyrän muotoparametrien λ_0 ja W mittaukseen.

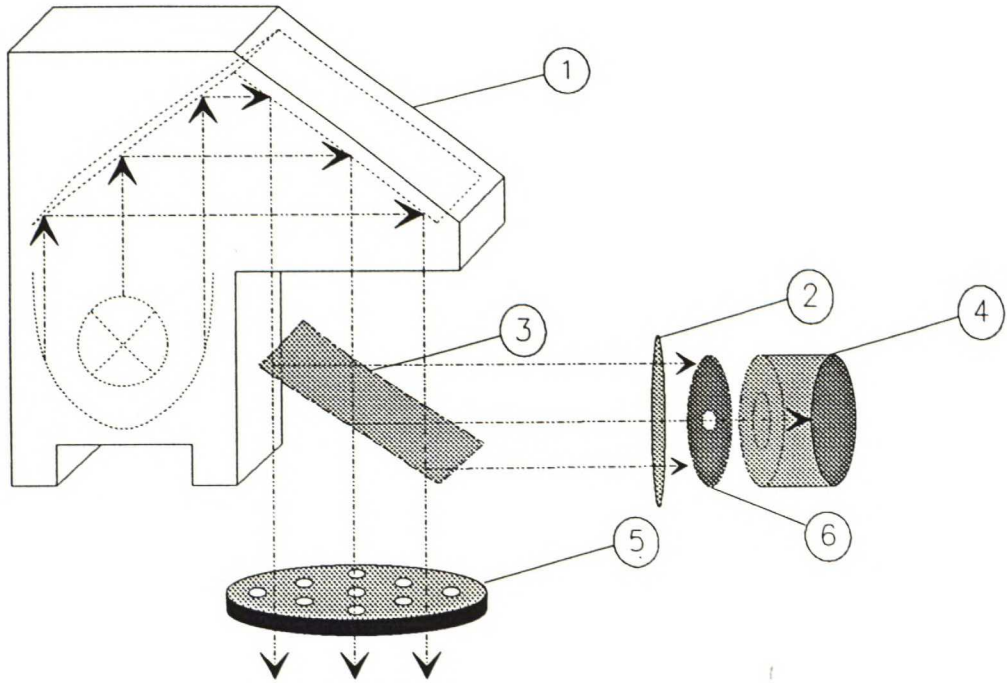
Ainoana kalibrointimenetelmänä vastekäyrän tarkka mittaminen ei ole käytännöllinen, koska tällöin käytännön mittauksissa tarvittaisiin monimutkaista matematiikkaa. Kalibrointi on tehtävä siten, että kalibroidun mittalaitteen mittaamia säteilyarvoja voidaan käyttää sellaisenaan prosessin ohjaamiseen.

4.5. Kehiteltävä detektoripohjainen kalibrointimenetelmä

4.5.1. Menetelmä

Koska yleensä käytettyjä säteilynormaaleja ei voi alhaisen tehotasonsa vuoksi tässä sovelluksessa käyttää, pyritään kehittelemään pyrosähköiseen anturiin ja suuri-intensiteettiseen elohopealamppuun perustuva kalibrointijärjestelmä.

Kalibrointiin soveltuva mittausjärjestelmä on esitetty kuvassa 11. Järjestelmässä on valonlähteenä suuri-intensiteettinen elohopealamppu (1). Lampun teho kerätään optiikalla ja keskitetään tasaisesti alueelle, joka peittää vähintään yhden detektorin kalibroittavasta mittapäästä ja pyroelektrisen detektorin sisäänmenoaukon.



Kuva 11, Detektoripohjainen kalibrointijärjestelmä

Valonlähteen säteily jaetaan säteenjakajalla (3) kahteen osaan. Toinen säde ohjataan kalibroitavalle mittapäälle (5) siten, että se peittää yhden detektorin.

Toinen säde taas menee pyroelektrisen mittapään (4), tarkkuusaperttuurin (6) ja kaistanpäästösuodattimen (2) muodostamaan "referenssimittapähän". Suodatin, tai suodatinkombinaatio voidaan valmistaa siten, että se vastaa mahdollisimman tarkkaan kalibroitavan detektorin- valmistajan spesifioimaa mittalaitteen spektraalista standardivastetta.

Järjestelmän heikkoutena on, että se ei ota huomioon komponenttien spektraalisia ominaisuuksia, erityisesti käytetyn lampun spektriä. Tästä syystä kalibroitu mittari on tarkka ainoastaan kalibroinnissa käytetyllä lampulla. Kalibrointi tulisi tästä syystä suorittaa puolijohdevalmistajan omalla lampulla. Toisaalta tämä on etu, sillä mikäli näin voidaan tehdä, alenee kalibrointijärjestelmän hinta.

4.5.2. Kalibroitavat suureet

Jotta detektorit ylipäätään voi kalibroida, on tiedettävä mitä niillä halutaan mitata. On siis joko saatava tarkempaa tietoa detektorien valmistajien painotuskäyriä koskevista standardeista, tai spesifioitava itse haluttu painotuskäyrä.

Painotuskäyrän muodolle voidaan määrittellä jokin funktio, esim. Gaussin tai Lorentzin jakauma, sovitettu polynomi tai numeerinen funktio.

Voidaan myös määrittellä detektorille normalisoitu päästökaista, jolla detektorin vaste on 1 ja päästökaistan ulkopuolella 0. Teoria tällaiselle kalibroinnille on esitetty viitteessä [Wyatt, 1978] sivuilla 119-125.

Täysin eksaktissa mittauksessa painotuskäyrä on tunnettava tarkasti. Kaupallisissa kalibrointijärjestelmissä tiedetään kuitenkin vain vastekäyrän haluttu muoto, ja mittari säädetään näyttämään kalibrointilampulla samaa tehoa kuin halutun vastekäyrän omaava referenssidetektor. On kuitenkin huomattava, että mittaustulos on tällöin täysin oikea vain käytetyllä kalibrointilampulla.

Tällaisessa kalibroinnissa kaikki vastekäyrän muodossa olevat epätarkkuudet otetaan huomioon korjaamalla mittarin vastetta keskiaallonpituudella, r_0 .

4.5.3. Tarvittava laitteisto

4.5.3.1. Valotuslaite

Kaikkein paras kalibrointitarkkuus saavutetaan, mikäli kalibrointi voidaan tehdä puolijohdevalmistajan prosessissa käytettävällä lampulla. Tällöin kalibrointilampun spektri on varmasti sama. Voi kuitenkin olla, ettei tämä ole mahdollista. Laitteet sijaitsevat puhdastiloissa, minne ei mielellään päästetä ulkopuolisia.

Mikäli kalibrointi voidaan tehdä prosessilampulla, olisi hyvä jos valotuslaitteesta ulos tulevan valon voisi keskittää pienemmälle alueelle. Valotuslaitteessa kerrallaan valotettava alue on niin suuri, että mittalaitteen resoluutio alkaa häiritä mittausta. Valotuslaitteen alla oleva tila on kuitenkin niin pieni, ettei siihen juurikaan mahdu valon keskittämiseen vaadittavaa optiikkaa.

Mikäli prosessien lamppuja ei voi käyttää, on kalibrointiin käytettävä mahdollisimman samankaltaista valotuslaitetta. Käytettävän elohopealampun on oltava samanlainen, saman tehoinen ja samalta valmistajalta kuin prosessissa käytetty lamppu. Lisäksi valotuslaitteen spektri on suodatettava samanlaiseksi kuin prosessilaitteistossa. Tarvitaan siis suodattimia, joilla jäljitellään erilaisia käytössä olevia valottimia.

4.5.3.2. Referenssidetektor

Järjestelmään valittavalta referenssimittalaitteelta vaaditaan suuri tarkkuus ja tunnettu aallonpituusvaste. Parhaiten kyseeseen tuleva mittalaite on siten pyrosähköinen detektor, jolla on tasainen aallonpituusvaste laajalla aallonpituuskaistalla. Tässä suhteessa hyvältä valinnalta vaikuttaa Laser Precisionin RS-5900 tehomittari varustettuna RSP-590 pyrosähköisellä mittapäällä. Kyseistä mittalaitetta käytetään optisen säteilyn siirtonormaalina monissa muissakin kalibrointilaboratorioissa.

Myös thermopile-tyyppinen detektor tulee kyseeseen, mutta sen herkkyys ei ole aivan yhtä hyvä kuin pyrosähköisen detektorin.

Näkyvän valon alueella vastaavaan kalibrointijärjestelmään voi käyttää myös neljään piidetektoriin perustuvaa fotoniloukkutyypistä QED 200 anturia. Kyseisen anturin spektraalinen vaste ei kuitenkaan ole ultraviolettialueella kyllin hyvin tunnettu, jotta sitä tässä voisi käyttää. [Zalewski & al, 1983]

Käytettävä mittalaite kalibroidaan Metrologian tutkimusinstituutin absoluuttiradiometrillä [Varpula & al, 1989], joka toimii primäärinormaalina.

4.5.3.3. Säteenjakaja

Tavallisesti tämän tyyppisissä kalibroinneissa ei mitata säteilyn tasoa kalibroinnin aikana. Säteilyteho mitataan ennen kalibrointia ja kalibroinnin jälkeen. Kalibroinnin aikana detektorille siirtynyt teho interpoloidaan näiden kahden tehon keskiarvona.

Tätä samaa menetelmää voitaisiin periaatteessa hyödyntää tässäkin järjestelmässä, mutta tarkkuus paranee jos tehot mitataan samanaikaisesti. Suuri-intensiteettiset elohopealamput eivät nimittäin ole stabiileja, vaan niiden ulostulotehossa esiintyy fluktuointia ja ryömintää.

Tästä syystä säteily jaetaan säteenjakajalla kahteen osaan, jotta voidaan mitata säteilytehoa myös kalibroinnin aikana.

Säteenjakajan jakosuhte on optimoitava varsin tarkkaan. Käytössä olevien elohopealamppujen teho on saatava mahdollisimman tehokkaasti kalibroitalle detektorille, jottei detektorin resoluutio huononna kalibrointitarkkuutta. Pyrosähköiset detektorit kykenevät mittaamaan huomattavasti pienempiä tehotasoja. Sopiva jakosuhte voisi olla noin 90/10.

Säteenjakaajan jakosuhteen tulisi olla mahdollisimman tasainen kalibroitilampun ulostulospektrin alueella. Ultraviolettialueella tasaisen säteenjakajan löytäminen ei kuitenkaan tunnu olevan helppoa. Kyseeseen saattaa tulla myös säteenjakaja, jonka jakosuhte ei ole tasainen, mutta joka tunnetaan tarkasti. Tämä vaikeuttaa järjestelmän matemaattista hallintaa, ja huonontaa tarkkuutta mutta lienee mahdollinen.

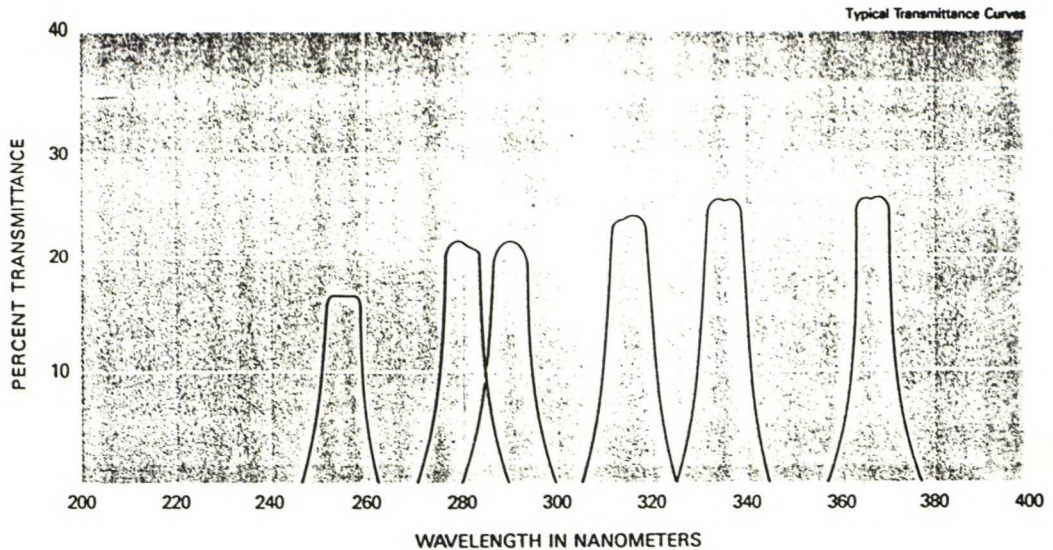
4.5.3.4. Suodattimet

Suodattimien tehtävä järjestelmässä on yhdessä käytetyn pyrosähköisen detektorin kanssa muodostaa referenssidetektorin, jonka vaste on mahdollisimman tarkkaan sama kuin kalibroituvalle detektorille spesifioitu vaste. Kalibroitavan detektorin näyttämää verrataan referenssidetektorin näyttämään, mistä voidaan laskea korjauskerroin.

Järjestelmään on kullekin kalibroituvalle detektorille löydettävä suodatinkombinaatio, jonka vaste mahdollisimman tarkkaan vastaa standardivastetta. Suodatinkombinaatioita, joilla vastekäyrät on tehty, voi yrittää kysyä detektorien valmistajilta.

Mikäli detektorien valmistajat eivät suostu paljastamaan suodatinkombinaatioitaan, mikä on varsin todennäköistä, voi vastekäyrien tarkka muodostaminen olla hankalaa. Referenssidetektorin ja standardivasteen mahdolliset erot voidaan kuitenkin ottaa huomioon matemaattisesti. Tällöin vaaditaan enemmän mitattua tietoa käytettävien valotuslaitteiden spektreistä.

Elohopealampun spektrille löytyy tähän tarkoitukseen melko sopivia kaistanpäästösuodattimia, jotka päästävät lävitseen kerrallaan yhden elohopealampun spektriviivan. (Valmistaja esim. Melles Griot). Kuvassa 12 on Melles-Griotin valmistamien suodattimien läpäisy aallonpituuden funktiona (UV mercury line filter set). Koska ko. suodatinsarja käsittää vain ultraviolettialueen suodattimet, joutuu sarjaa täydentämään näkyvän valon alueella.



Kuva 12, Melles Griotin UV mercury line filter set

Kyseisten suodattimien suodatusta ei ole spesifioitu koko infrapuna-alueella, joten saattaa olla tarpeellista lisätä järjestelmään vielä infrapuna-suodatin.

Kyseiset Melles-Griotin interferenssisuodattimet eivät ole tähän tarkoitukseen aivan ideaalisia. Kapeasta päästökaistasta johtuen suodattimien läpäisy päästökaistalla on alle 30%. Järjestelmään käytettyjen suodatinten ei tarvitse olla kapeita, eikä jyrkkiä. Värjätyt lasisuodattimet saattaisivat tulla paremmin kyseeseen.

4.5.4. Järjestelmän tehotasoista

Järjestelmän toiminnalle ja tarkkuudelle on olennaista, että systeemin komponenttien tehoalueet vastaavat toisiaan. Tästä syystä kannattaa tehoja tarkastella erikseen.

Jotta kalibroittavan mittapään resoluutio ei aiheuttaisi suurempaa kuin 1% virheen, on mittapähän tulevan säteilyn tehotiheyden oltava siis vähintään 10 mW cm^{-2} .

Säteenjakaaja jakaa säteen kahteen osaan, mutta ei juurikaan absorboi. Jos säteenjakaajan jakosuhte on $T/R = 90/10$, niin jakajaan on tultava tehotiheys 11 mW cm^{-2} . Mikäli kalibrointi tehdään prosessilaitteistossa, on laitteistosta tultava tämän verran tehoa, jotta detektorin resoluutiosta aiheutuva kalibrointiepävarmuus on alle 1%. Mikäli tehoa on vähemmän aiheutuu kalibrointiin valmistusprosessin oman mittaasepävarmuuden suuruinen kalibrointiepävarmuus.

Mikäli kalibrointia ei voi tehdä prosessilaitteistossa, joudutaan valotuslaitteen ulostulospektriä muokkaamaan kaistanpäästösuodattimella siten, että spektri muistuttaa prosessissa käytettävän valotuslaitteen spektriä. Kaistanpäästösuodatin vaimentaa säteilyä noin 50%, joten suodattimelle on tultava noin 22 mW cm⁻².

Valonlähteen ulostulossa on siis säteilyn tehotiheyden oltava 22 mW cm⁻². Vertailun vuoksi mainittakoon että auringon spektrinen tehotiheys välillä 300...400 nm on noin 0.1 mW cm⁻² nm⁻¹.

Suodattimien ja pyrosähköisen mittapään muodostama referenssimittapää mittaa noin 0.11 mW cm⁻² suuruista tehotiheyttä.

5. Kalibroinnin virhearvio

5.1. Kalibroittavien suureiden vaikutus mittausepävarmuuteen

Kuvan 11 mukaisessa mittausjärjestelmässä pyrosähköisen anturin mittaama säteilyteho (mW) on

$$P_2 = \int A_2 r_2(\lambda) R_J(\lambda) T_S(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

missä A_2 on rajoittavan tarkkuusaperttuurin pinta-ala, $r_2(\lambda)$ pyrosähköisen mittarin spektraalinen herkkyys, $R_J(\lambda)$ säteenjakajan heijastus, $T_S(\lambda)$ suotimen läpäisy ja $E(\lambda)$ on valonlähteen spektraalinen tehotiheys.

Mittausjärjestelmä perustuu pyrosähköisen anturin luotettavaan kalibrointiin, joka sisältää myös $r_2(\lambda)$:n ja anturin lineaarisuuden mittauksen. Pyrosähköinen mittalaite voidaan kalibroida 543.5 nm:n aallonpituudella ja 0.1 mW:n tehotasolla MTI:n kryogeenisellä radiometrillä, jolla määritetään optista tehoa vastaava sähköteho. Riittävä luotettavuus saavutetaan ehkä myös jäljittämällä kalibrointi johonkin toiseen kryogeenisellä radiometrillä kalibroituun tarkkaan tehomittariin.

Kalibroittavan anturin mittaama tehotiheys (mW/cm^2) on

$$p_1 = \int r_1(\lambda) T_J(\lambda) E(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

missä $r_1(\lambda)$ on kalibroittavan anturin spektraalinen herkkyys ja $T_J(\lambda)$ säteenjakajan läpäisy. Anturin kalibrointi saadaan vertaamalla tehotiheyttä p_1 tehoon P_2 . Mitattuun tehotiheyteen on tehtävä korjaus

$$\frac{P_2/A_2}{P_2} = \frac{\int r_2(\lambda) R_J(\lambda) T_S(\lambda) E(\lambda) d\lambda}{\int r_1(\lambda) T_J(\lambda) E(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

Korjauksen suuruuden arvioimiseksi voidaan olettaa, että säteenjakajan jakosuhte ja pyrosähköisen anturin vaste ovat vakioita mitattavalla kaistalla. Pyrosähköisen anturin suhteellinen vaste on likimain yksi. Hajoitetaan lisäksi $T_S(\lambda)$ ja $r_1(\lambda)$ osiin, siten että erotetaan vastekäyrien huippuarvot ja muotofunktiot.

$$T_S(\lambda) = T_{S,0} t'_s(\lambda - \lambda_{0,S}) \quad (9)$$

$$r_1(\lambda) = r_{1,0} r'_1(\lambda - \lambda_{0,1}) \quad (10)$$

Saadaan

$$\frac{P_2/A_2}{P_2} = \frac{R_J T_{S,0}}{T_J} \cdot \frac{1}{r_{1,0}} \cdot \frac{\int t'_S(\lambda - \lambda_{0,s}) E(\lambda) d\lambda}{\int r'_1(\lambda - \lambda_{0,1}) E(\lambda) d\lambda} \quad (11)$$

Korjauksen ensimmäinen tekijä tulee säteenjakajan jakosuhteesta ja siitä, että referenssidetektorin muodostamiseen käytetty kaistanpäästösuodatin vaimentaa myös läpimenevää säteilyä. Nämä termit voidaan mitata suhteellisen helposti.

Keskimmäinen tekijä $1/r_{1,0}$ on varsinainen korjauskertoimen, jolla kalibroidun detektorin näyttämää on korjattava.

Korjauksen viimeinen tekijä (jäljelle jäävät integraalilausekkeet) kuvaa sitä, miten tarkasti referenssidetektorin vastaa kalibroitavaa detektoria. Mikäli detektorien spektraaliset vasteet ovat identtiset, menee tämä tekijä ykköseksi. Tätä jäännösvirhettä voidaan havainnollistaa esim. seuraavasti

$$\Delta = \frac{\int t'_S(\lambda, \lambda_{0,s}, W_s, \text{muoto}_s) E(\lambda) d\lambda}{\int r'_1(\lambda, \lambda_{0,1}, W_1, \text{muoto}_1) E(\lambda) d\lambda} \quad (12)$$

$$E(\lambda) = \sum_i E_i e_i(\lambda, \lambda_{0,i}, W_i, \text{muoto}_i) \quad (13)$$

Jäännösvirheeseen vaikuttaa siis painotuskäyrien leveyksien (W), keskiaallonpituuksien (λ_0) ja muotojen erot, sekä elohopealampun spektriviivojen leveyksien (W_i) ja keskinäisten korkeuksien (E_i) vaihtelut.

Jäännösvirheen käsittelyyn on kolme vaihtoehtoa:

1. Jätetään se huomioimatta ja oletetaan siitä aiheutuvan virheen sisältyvän korjauskertoimeen. Tällöin mittausasteikko pysyy paikallaan, mutta ainoastaan yhdellä elohopealampulla, koska spektraalista informaatiota ei mitata. Tällöin kalibrointi olisi paras tehdä puolijohdevalmistajan prosessissa käytettävällä

lampulla, tai ainakin lampujen spektraalisten vasteiden olisi vastattava toisiaan suhteellisen tarkasti.

2. Mitataan kaikki jäännösvirheeseen liittyvät parametrit, mukaan lukien kalibrointilampun ja prosessissa käytettävän valottimen spektrit, ja otetaan ne huomioon. Tällöin detektori hallitaan ja matemaattisesti voidaan laskea parametrit erilaisille laitteistokonfiguraatioille.
3. Mitataan kalibroitavan detektorin spektraalinen vaste ja käytettävien valonlähteiden spektrit, mutta toimitaan muuten kuten kohdassa 1. Mitattua vastekäyrää ja spektrejä voi käyttää hyväksi mittausepävarmuuden arvioinnissa.

Jäännösvirheen vaikutusta mittaustarkkuuteen simuloidaan jatkossa.

5.2. Simulointimenetelmän kuvaus

Arvioimme seuraavaksi kalibrointiin vaikuttavien suureiden vaikutusta lopputulokseen C-kielisillä simulointiohjelmilla.

Elohopealampun spektri voidaan mallintaa Lorentzin jakaumalla

$$E(\lambda) = \sum_i \frac{E_i}{1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_{0,i}}{W_i/2} \right)^2} \quad (14)$$

missä E_i on spektriviivan korkeus, $\lambda_{0,i}$ on spektriviivan keskikohdan aallonpituus ja W_i on spektriviivan puoliarvokaistanleveys.

Vastaavanlaista mallia voi käyttää myös järjestelmässä oleville suodattimille ja kalibroitavan detektorin vasteelle.

Todellisuudessa nämä suureet tuskin vastaavat täysin Lorentzin jakaumaa. Toinen mahdollisuus on Gaussin jakauma

$$R(\lambda) = e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (15)$$

missä σ on jakauman keskihajonta.

Koska simuloinnilla halutaan vain selvittää suuruusluokkia, on Lorentzin jakauma kenties hieman paremmin tarkoitukseen sopiva, kuin Gaussin jakauma, koska virheet tulevat paremmin esiin.

Optinen järjestelmä simuloidaan kertomalla järjestelmän komponenttien mallit keskenään ja integroimalla numeerisesti yli halutun mittauskaistan.

5.3. Simuloinnissa käytetyt mallit

5.3.1. Elohopealamppu

Elohopealampun tärkeimmät spektriviivat tutkittavalla alueella on listattu taulukkoon 3. Tiedot on saatu yhdistelemällä kuvasta joka löytyy OAI 311 -tehomittarin esitteestä, sekä Osramin elohopealamppujen esitteistä.

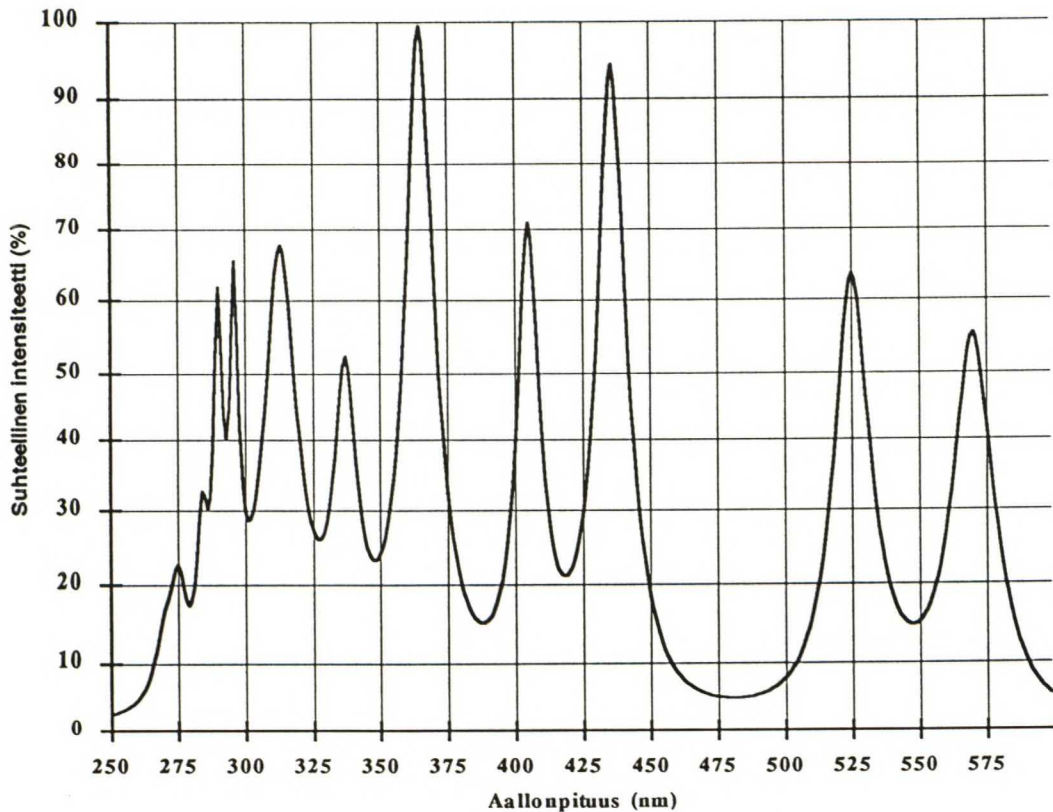
Taulukko 3, Simuloinnissa käytetyn elohopealampun malli

NRO	Keskiaallonpituus λ_0 [nm]	Leveys W [nm]	Suhteellinen amplitudi [%]
1	270	10	9
2	275	7	13
3	284	5	20
4	290	4	48
5	296	4	50
6	313	15	66
7	337	10	43
8 (I-viiva)	365	13	100
9 (H-viiva)	405	10	67
10 (G-viiva)	436	13	96
11	525	16	64
12	570	18	56

Tarkoituksena on simuloida mm. lampun spektriviivojen leveyden ja suhteellisten amplitudien vaikutusta. Koska lamppujen toleransseista ei ole eksaktia tietoa arvioidaan, että elohopealampun yksittäisen spektriviivan korkeus voi vaihdella $\pm 20\%$ ja viivojen leveydet $\pm 30\%$.

Tämä arvio sisältää lamppujen yksilölliset erot, valmistajien väliset erot, sekä eri tehoisten lamppujen välillä olevat erot.

Tämän mallin mukaisen elohopealampun spektri on kuvassa 13. Spektri on skaalattu tekijällä 0.9478, jotta 360 nm spektriviivan korkeudeksi saatiin 100%. Kuva on huomattavan lähellä todellisten elohopealamppujen spektrejä.



Kuva 13, Simuloitu elohopealampun spektri

5.3.2. Valotuslaitteet

Elohopealampun malli käsittää pelkän elohopealampun ilman optiikkaa. Tyypillinen fotolitografiaprosessissa käytettävä laajakaistainen valotuslaite mallinnetaan siten, että lampun mallin perään laitetaan kaistanpäästösuodatin, jonka päästökaista on 340 ... 460 nm. Tällöin valotuslaitteen spektri muodostuu oleellisesti G-, H- ja I-viivoista.

Tutkimme miten kalibrointi onnistuu monokromaattisella valolla, joka on muodostettu suodattamalla elohopealampun spektriä siten, että vain detektorin painotuskäyrän keskellä olevaa elohopealampun viivaa käytetään. Tähän käytetään kapeampia suodattimien malleja.

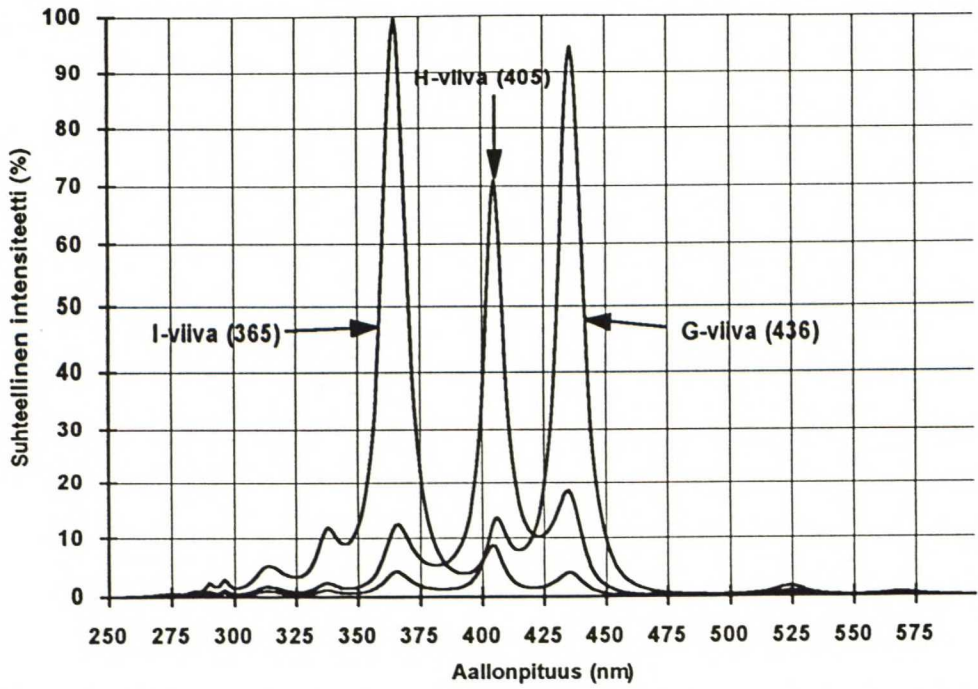
Taulukkoon 4 on listattu painotukseen käytettävät suodatinmallit.

Taulukko 4, Valotuslaitteiden vasteen simulointiin käytettyjen suodatinten mallit

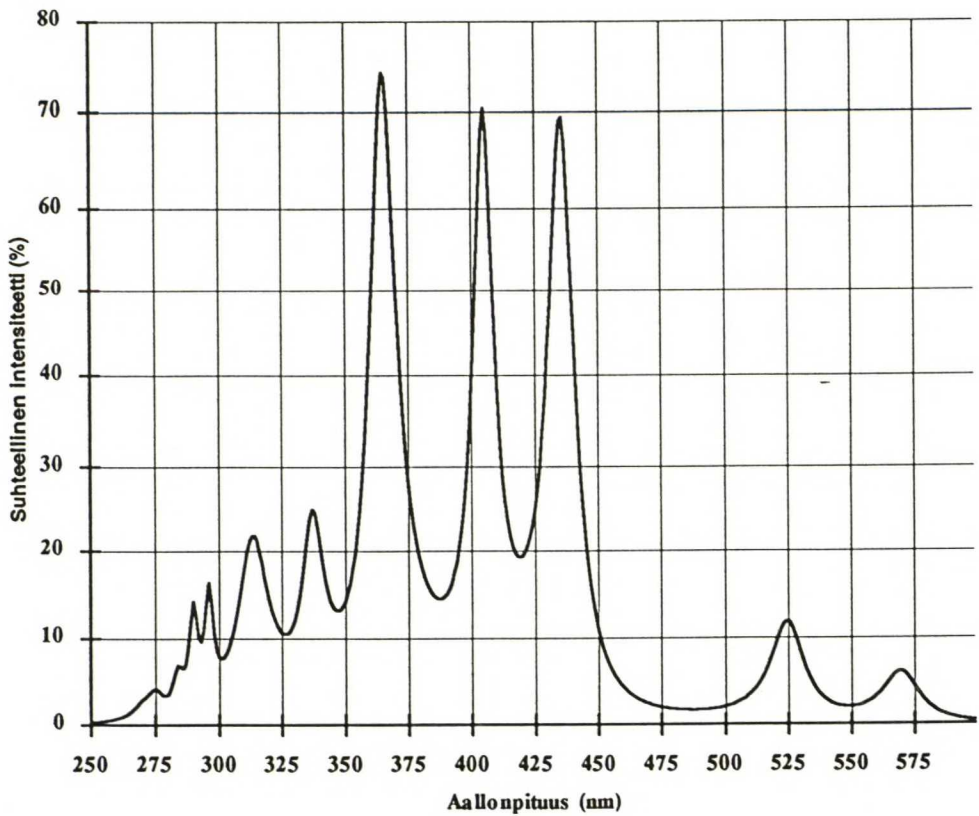
Valotuslaite	Keskiaallonpituus λ_0 [nm]	Puoliarvokaistanleveys W [nm]
G-viivaan painotettu kapeakaistainen valotin	436	30
H-viivaan painotettu kapeakaistainen valotin	405	30
I-viivaan painotettu kapeakaistainen valotin	365	30
Laajakaistainen G-, H- ja I-viivat käsittävä valotin	400	120

Kuvassa 14 on esitetty näillä malleilla simuloitujen kapeakaistaisten valotuslaitteiden ulostulospektrit taulukon 3 mukaisella elohopealampun mallilla.

Laajakaistaisen valotuslaitteen spektri on piirretty kuvaan 15. Tämä malli kuvaa tyypillistä valotusprosessissa käytettävää valotinta.



Kuva 14, Simuloidut kapeakaistaisten valottimien ulostulospektrit.



Kuva 15, Simuloitu laajakaistaisen valotuslaitteen spektri

5.3.3. Kalibroittavien detektorien vastekäyrät

Simulointeja ei suoriteta kaikilla saatavilla olevilla detektoreilla, vaan ainoastaan tärkeimmillä, eli niillä joita käytetään G, H ja I-viivojen mittaukseen. Tärkeimpien vasteiden simuloinnissa käytettävät arvot on listattu taulukkoon 5.

Taulukko 5, Tutkittavien detektorien simulointimallit

No.	Aallonpituus λ_0 [nm]	Puoliarvokaistanleveys W [nm]
1	365	60
2	400	85
3	436	33

Koska vastekäyrille ei ole annettu toleransseja, arvioimme ne simuloinneissa seuraavasti:

- Kaistanleveys W: $\pm 10\%$
- Keskiaallonpituus λ_0 : ± 10 nm

Oletukset lienevät melko realistisia, johtuen suodattimien toleransseista yleensä ja fotodiodien ominaisuuksista.

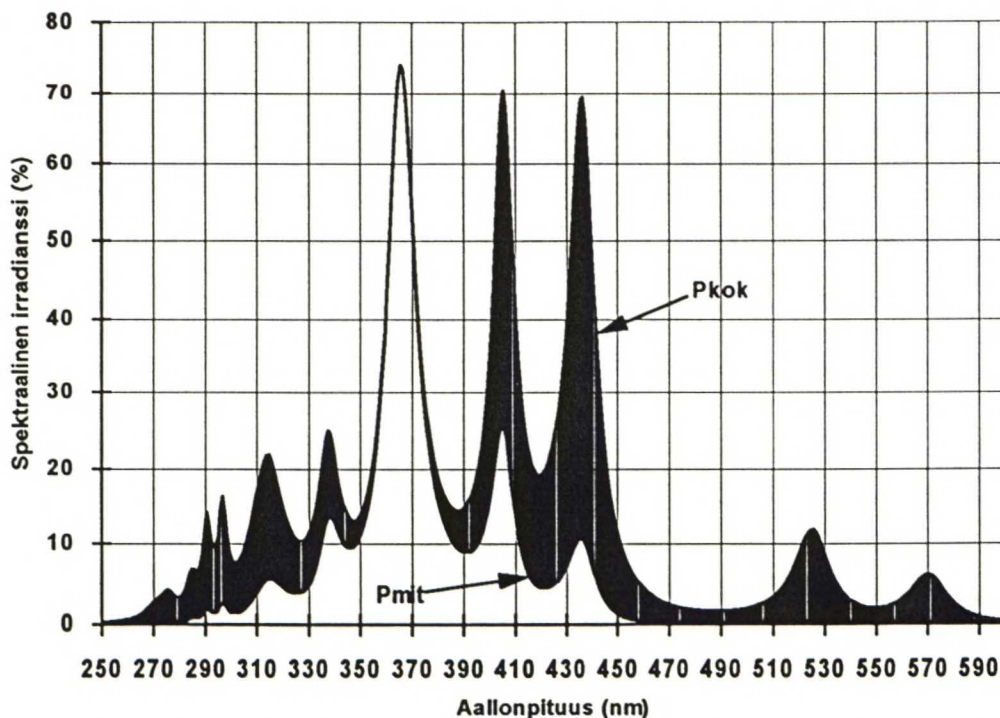
5.4. Simuloitavat suureet

Simulointien tarkoituksena on selvittää, miten tehon mittaus vastaa resistin valottumista erilaisissa mittaustilanteissa. Lähtökohtana on kaava 11, josta siis simuloidaan jäännösvirheen vaikutusta.

Simuloinneissa oletetaan, että prosessista on kokeellista tietoa, jonka pohjalta voidaan laskea valotusaika käytettävällä detektorilla mitatusta tehosta P_{mit} , siten että saadaan aikaan paras lopputulos.

Kokonaisvalotusteho P_{kok} , joka vaikuttaa resistin valottumiseen ei kuitenkaan ole sama kuin mitattu teho P_{mit} . Käytännössä näiden tehojen suhde, P_{kok}/P_{mit} oletetaan vakioksi, ja tämä suhde on otettu huomioon kun laitteistolle on kokeellisesti määritetty käyttöparametrit. Oletus johtaa hyvään lopputulokseen tietyllä laitteistolla. Jos kuitenkin laitteistossa olevien elohopealampun, valotuslaitteen, fotoresistin tai mittaukseen käytetyn detektorin spektraaliset ominaisuudet muuttuvat, eivät kokeellisesti määritetyt parametrit enää johdakaan parhaaseen lopputulokseen.

Simuloitavia suureita havainnollistaa kuva 16. Kuvaan on piirretty laajakaistaisen valotuslaitteen ulostulossa oleva valoteho aallonpituuden funktiona, eli spektraalinen irradianssi, sekä 365 nm viivaan painotetun detektorin tästä säteilystä mittaaman valotehon spektraalinen irradianssi.



Kuva 16, Simuloitavat kokonaisvalotusteho P_{kok} ja mitattu teho P_{mit} . Valotuslaitteena laajakaistainen valotin, detektori painotettu 365 nm aallonpituudelle.

Tummennettu alue kuvaa mitatun tehon ja kokonaisvalotustehon eroa, jonka siis käytännön mittauseroissa oletetaan pysyvän vakiona.

Tässä työssä arvioidaan vain elohopealampun ja detektorien muutosten vaikutuksia mittaustarkkuuksiin. Fotoresistien ja valotuslaitteen muutosten aiheuttamat mittauserovarmuudet jätetään tutkimatta.

5.5. Simulointituloksia

5.5.1. Mittausepävarmuus ideaalisella detektorilla

5.5.1.1. Spektriviivojen suhteellisten korkeuksien muutoksen vaikutus

Tutkimme aluksi mittauksen tarkkuutta laajakaistaisella valotuslaitteella suoritettavassa valotusprosessissa kun oletetaan,

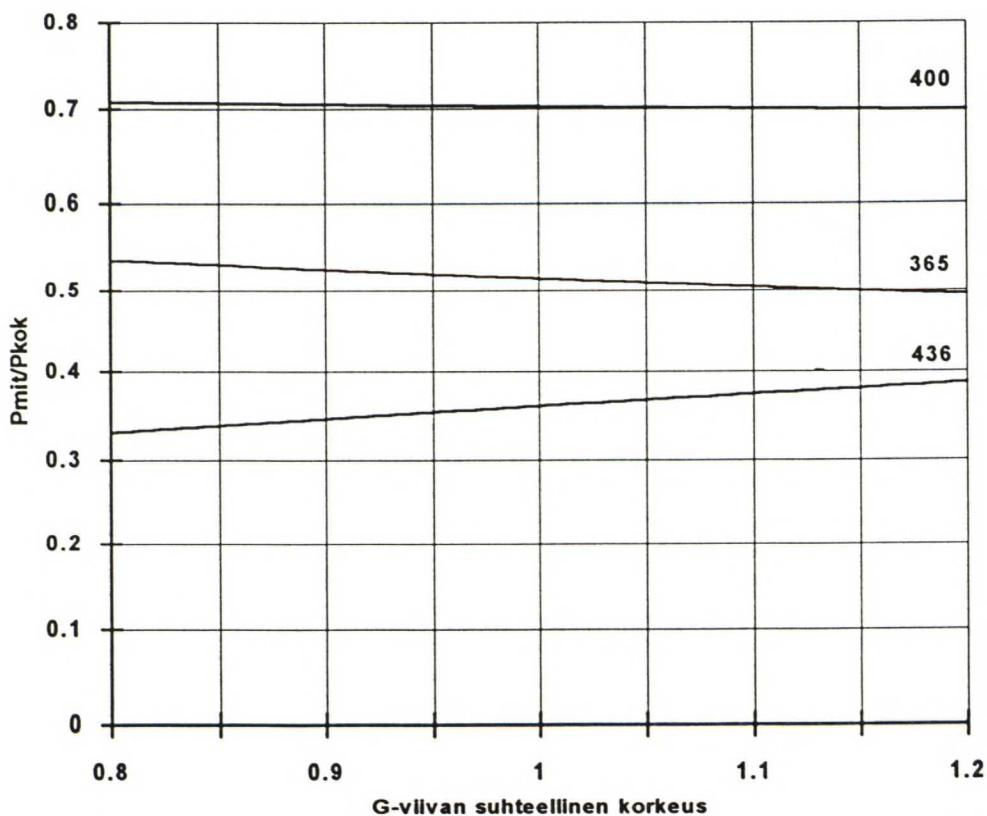
että käytettyjen detektorien vastekäyrät ovat tarkalleen valmistajan antamien standardien mukaisia, ja ne on kalibroitu samanlaisella valotuslaitteella kuin prosessissa käytetään.

Tällöin prosessiin aiheuttaa mittausepävarmuutta elohopealampun ominaisuuksien muuttuminen.

Kuvaan 17 on piirretty eri detektoreilla mitatun tehon P_{mit} suhde kokonaistehoon P_{kok} kaistalla 340...460 nm, kun elohopealampun spektrin 436 nm G-viivan korkeus muuttuu $\pm 20\%$. Kuvaajien päällä oleva numero ilmaisee, mille aallonpituudelle painotetusta detektorista on kysymys.

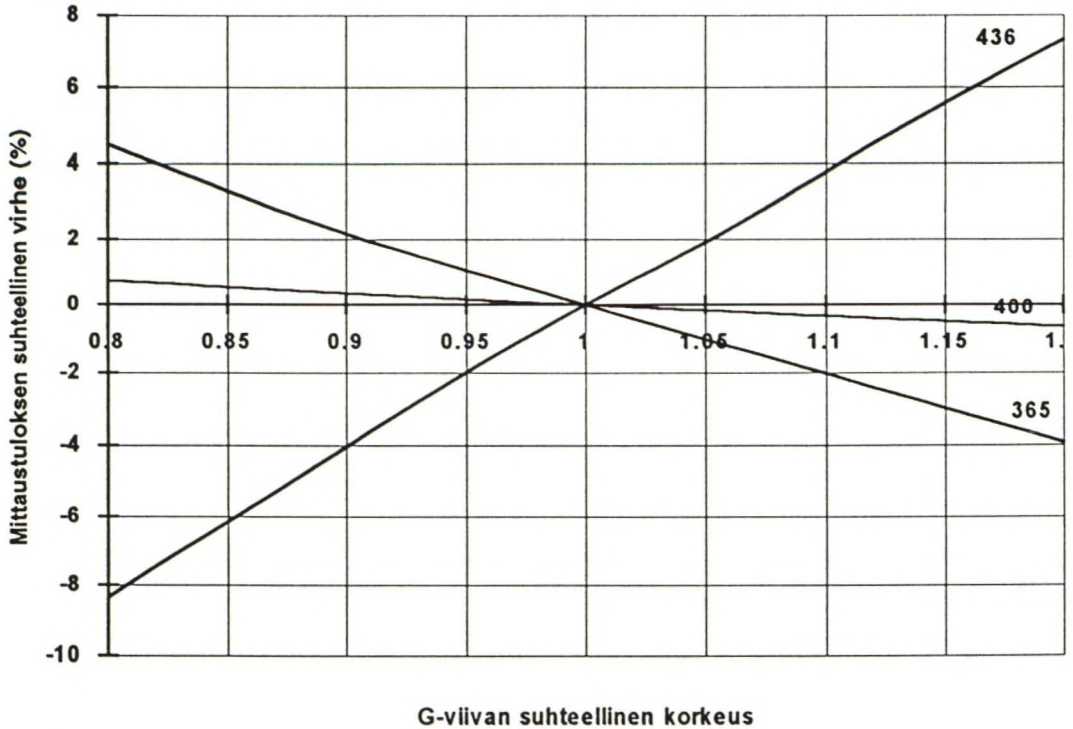
Detektorit on oletettu ideaalisiksi ja täydellisesti kalibroiduiksi, joten simulointi kuvaa tilannetta pelkässä mittausprosessissa. Simuloinnista nähdään, että yksikään detektor ei mittaa koko valottavaa tehoa, vaan noin 50% tästä.

Kuvaajista nähdään myös, että mitatun tehon suhde kokonaistehoon ei pysy vakiona, kun elohopealampun spektri muuttuu.



Kuva 17, Tutkittavien detektorien mitatun tehon suhde kokonaistehoon kaistalla 340...460 nm, kun 436 nm G-viivan suhteellinen korkeus muuttuu $\pm 20\%$

Detektori on kalibroitu tietynlaisella lampulla, joten kalibrointiin nähden muunlaisilla lampuilla tulee mittausrvirhettä. Kuvaan 18 on piirretty mittaukseen tuleva virhe G-viivan korkeuden funktiona, kun oletetaan, että detektori on kalibroitu lampulla, jossa G-viivan korkeus on sama kuin taulukon 3 mukaisessa lampun perusmallissa (G-viivan suhteellinen korkeus = 1).



Kuva 18, Detektorin mittaaman kokonaistehon suhteellinen virhe kaistalla 340...460 nm, kun 436 nm G-viivan suhteellinen korkeus muuttuu $\pm 20\%$

Mittausteknisesti ei oikeastaan voi puhua virheestä, sillä mittari mittaa aivan oikein sitä tehoa, mihin se on suunniteltu. Lopputulokseen eli resistin valottumiseen tulee kuitenkin virhettä, koska prosessiparametrit on määritelty kokeellisesti tietyllä kombinaatiolla.

Mittaukseen tuleva virhe vaihtelee riippuen siitä, millä detektorilla mitaus suoritetaan, mille on selvät syyt:

- H-viivaan painotettu 400 nm detektori mittaa kohtalaisen hyvin myös G- ja I-viivoja, mistä syystä virhe on pienin.
- Muuttuvaan G-viivaan painotetun 436 nm detektorin tapauksessa, muuttuu kahden spektriviivan suhteellinen korkeus, joten virhe on suurin.

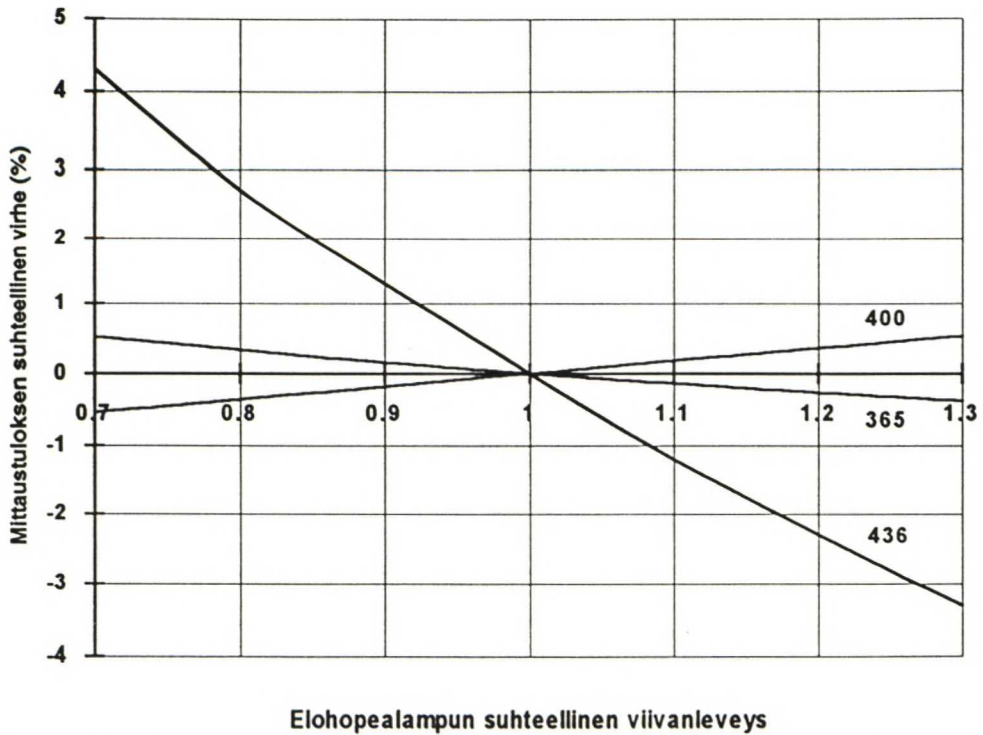
On kuitenkin huomattava, että nämä virheet kuvaavat mittausten epätarkkuutta vain tässä tietyssä tapauksessa. Todellisissa elohopealampuissa spektriviivat voivat muuttua muillakin tavoilla, jolloin mittausepävarmuudet eri detektoreilla ovat toisenlaiset. Tämän simuloinnin perusteella ei siis voida tehdä johtopäätöksiä, että joku detektori olisi parempi kuin joku toinen.

Johtopäätöksenä voi kuitenkin arvioida, että elohopealampun spektriviivojen suhteellisten korkeuksien muutokset saattavat aiheuttaa näillä mittausmenetelmillä noin $\pm 5\%$ mittausepävarmuuden, vaikka detektori olisi kalibroitu kuinka hyvin.

5.5.1.2. Spektriviivojen leveyden vaikutus

Simuloidaan seuraavaksi samalla tavalla, millaisen mittausepävarmuuden aiheuttaa elohopealampun spektrin leviäminen, kun oletetaan, että detektorit on kalibroitu lampulla, joka on taulukon 3 mukaisen lampun perussimulointimallin mukainen (Spektriviivojen suhteellinen leveys = 1).

Spektriviivojen leveys on lampun sisällä vallitsevan paineen funktio ja vaihtelee mm. eri tehoisilla lampuilla. Oletamme, että spektriviivojen leveys voi vaihdella $\pm 30\%$. Syntyvä mittausepävarmuus on piirretty kuvaan 19.



Kuva 19, Detektorien mittaaman kokonaistehon suhteellinen virhe kaistalla 340...460 nm, kun elohopealampun suhteellinen viivanleveys muuttuu $\pm 30\%$

Havaitaan että 436 nm viivaan painotettu detektor on epätarkempi kuin muut, mikä johtuu detektorin kapeammasta kaistasta. (Taulukko 5). Valottavasta tehosta suurin osa on tämän detektorin kaistan ulkopuolella.

Spektrin leviämisen aiheuttaman mittausepävarmuuden voidaan simuloinnin perusteella olettaa olevan $\pm 0.5\%$ H- ja I-viivaan painotetuilla detektoreilla ja $\pm 3\%$ G-viivaan painotetulla detektorilla.

5.5.2. Kalibroinnin epävarmuus epäideaalisella detektorilla

5.5.2.1. Detektorin puoliarvokaistanleveyden vaikutus mittausepävarmuuteen

Edellisissä simuloinneissa oletimme detektorin ideaaliseksi, eli detektorin spektraalinen vastekäyrä oli tarkalleen halutun muotoinen. Käytännössä näin ei useimmiten ole. Painotukseen käytetyillä suodattimilla on jotkut toleranssit, jotka vaikuttavat vastekäyrän muotoon. Lisäksi piipohjaisen detektorin spektraalinen vaste voi vaihdella mm. fotodiodin ikääntymisen johdosta. (Kts. kuva 8).

Vertaileva kalibrointi ei ota tätä huomioon, vaan vastekäyrä oletetaan ideaaliseksi. Vain detektorin vastetta keskiaallonpituudella

muutetaan. Tällöin mittari on kalibroitu näyttämään oikein kalibrintilampulla.

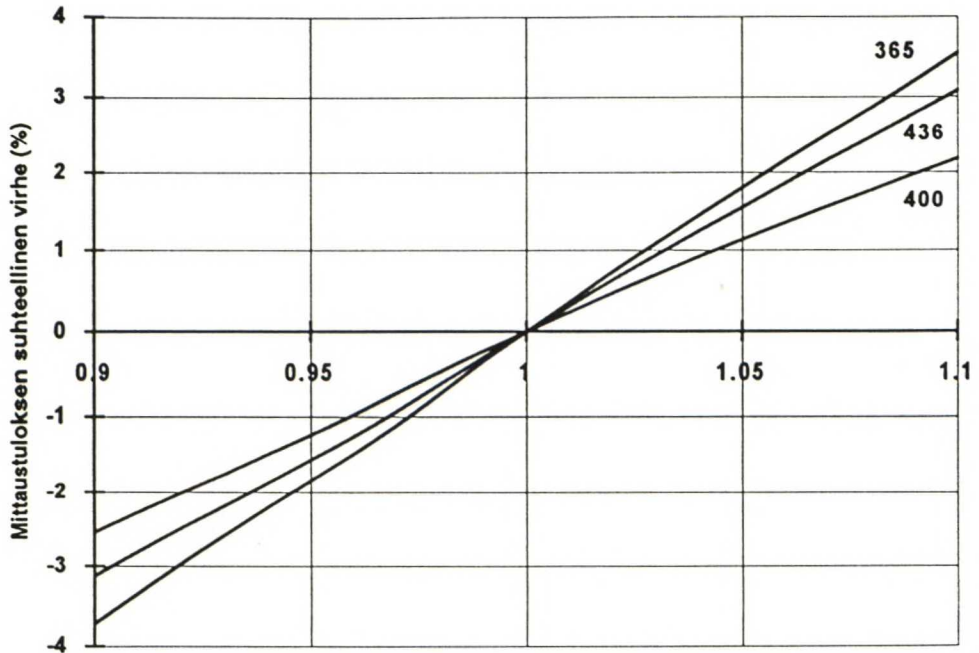
Simuloimme seuraavaksi, mikä vaikutus detektorin epäideaalisuudella on mittausepävarmuuteen, kun prosessissa käytettävä lamppu on erilainen, kuin kalibroinnissa käytetään.

Mikäli halutaan vain säätää detektorin vastetta painotuskäyrän keskiaallonpituudella, voi kalibroinnin tehdä yhdellä elohopealampun spektriviivalla. Kaikki muut viivat suodatetaan pois. Tätä tilannetta voi simuloida käyttämällä detektorin kalibrintiin kapeakaistaisten valottimien malleja. Aikaisemmin esitetystä kaupallisesta kalibrintijärjestelmästä ei ole spesifioitu käytettyä valonlähdettä, joten on mahdollista, että kalibrintiin käytetään yhtä spektriviivaa.

Kun tällä lailla kalibroidulla detektorilla mitataan fotolitografiaprosessissa käytettävän laajakaistaisen valottimen tehoa, ei saatu tulos enää vastaa kokonaisvalotustehoa samalla tavalla, kuin kapeakaistaisella valottimella. Mikäli verrataan kapeakaistaisella valottimella kalibroittujen detektorien näyttämiä tehoja laajakaistaisella valotuslaitteella, näyttävät mittarit eri tehoa, mikäli detektorien vastekäyrät eroavat toisistaan.

Kuvaan 20 on simuloitu seuraavanlaista tilannetta:

1. Detektori on kalibroitu käyttäen kapeakaistaista valonlähdettä, jonka viiva osuu painotuskäyrän keskelle. 400 nm detektorilla kalibrinti tehdään lähinnä keskikohtaa olevalla 405 nm spektriviivalla. Kalibrinti on tehty vertaamalla detektorin mittaamaa tehoa, ideaalisen detektorin samalla valotuslaitteella mittaamaan tehoon ja laskemalla tehon suhteena korjauskerroin.
2. Näin kalibroidulla mittalaitteella mitataan säteilyteho laajakaistaisesta valottimesta, ja korjataan mitattua tulosta kalibroinnissa määritetyllä korjauskertoimella. Sama teho mitataan ideaalisella detektorilla ja lasketaan kalibroidun detektorin mittaaman tehon virhe suhteessa ideaalisen detektorin mittaamaan tehoon.
3. Simulointi on toistettu kun kalibroittavan detektorin kaistanleveys muuttuu -10%...+10% yhden prosentin välein.



Detektorin suhteellinen kaistanleveys

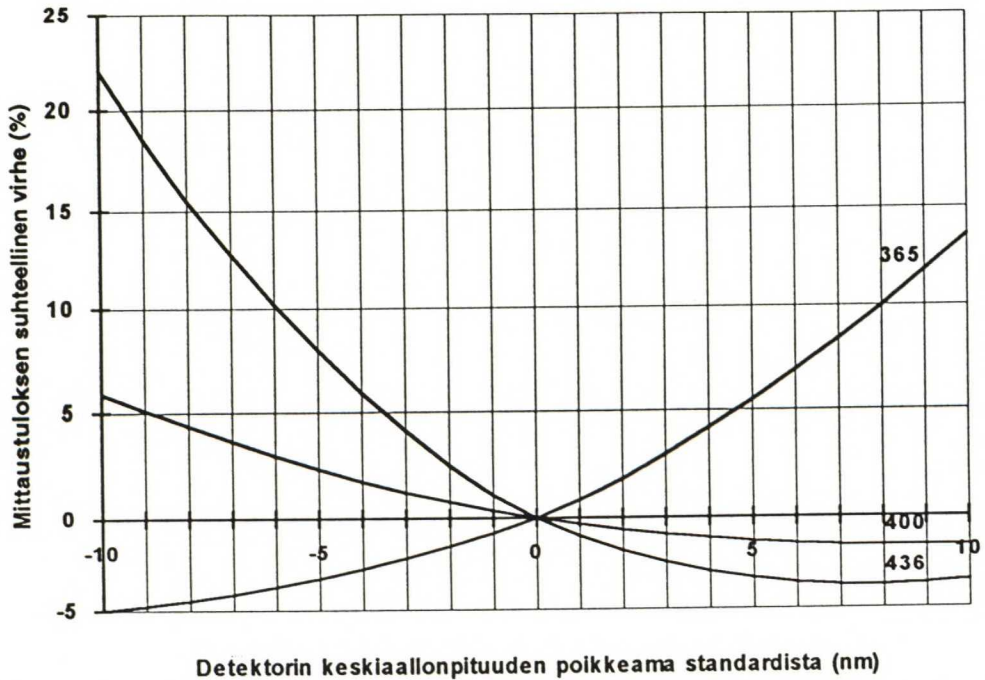
Kuva 20, Kapeakaistaisella valottimella kalibroituja detektorien mittaaman tehon suhteellinen virhe kaistalla 340...460 nm, kun detektorin kaistanleveys vaihtelee $\pm 10\%$. Virhe on laskettu suhteessa ideaalisen detektorin mittaamaan tehoon.

Detektorin spektraalinen vaste saattaa muuttua ajan kuluessa, kun detektoria käytetään ultravioletisäteilyn mittauksessa, joten tällainen mittausvirhe saattaa tulla prosessiin vähitellen. Prosessilaitteistolle kokeillut arvot eivät siten ehkä johdakaan parhaaseen lopputulokseen prosessilaitteiston ikääntyessä.

Detektorin vastekäyrän kaistanleveyden vaihtelu saattaa siis aiheuttaa noin $\pm 3\%$ mittausepävarmuuden.

5.5.2.2. Detektorin keskiaallonpituuden vaikutus mittausepävarmuuteen

Simuloidaan seuraavaksi vastaavalla tavalla virhettä, joka syntyy kun detektorin vastekäyrän keskiaallonpituus muuttuu. Simulointitulokset on piirretty kuvaan 21. Tässä simuloinnissa on myös verrattu kapeakaistaisella valottimella kalibroituja detektorien mittaamaa tehoa laajakaistaisella valottimella ideaalisen detektorin mittaamaan tehoon, ja laskettu kalibroidun detektorin mittaman tehon virhe.



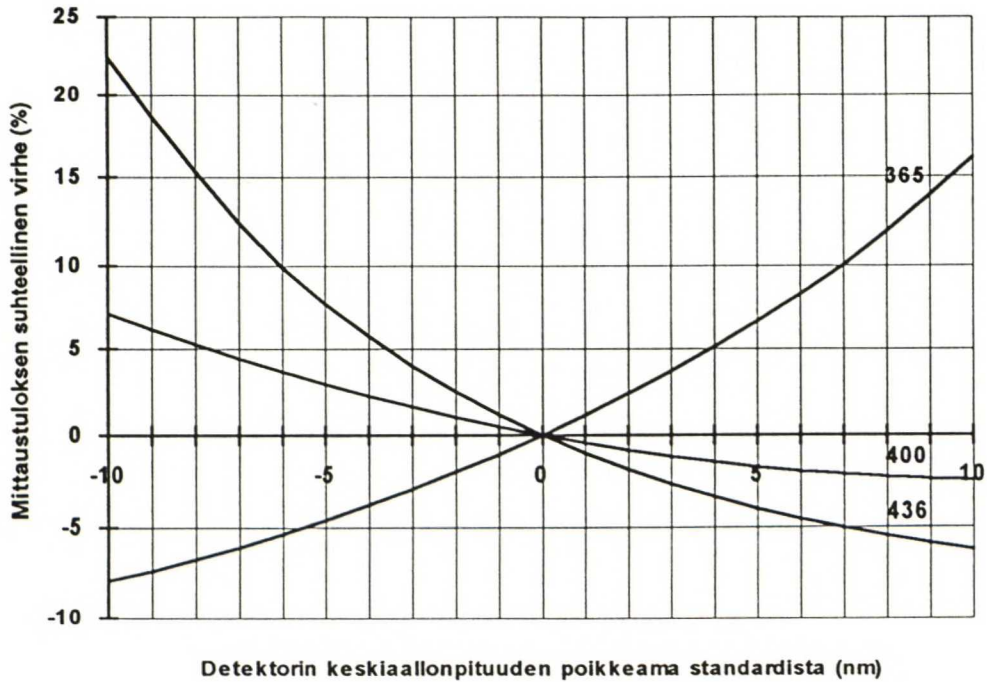
Kuva 21, Kapeakaistaisella valottimella kalibroittujen detektorien mittaaman tehon suhteellinen virhe kaistalla 340...460 nm, kun detektorin keskiaallonpituus vaihtelee ± 10 nm. Virhe on laskettu suhteessa ideaalisen detektorin mittaamaan tehoon.

Detektorin keskiaallonpituuden muutos näyttäisi olevan vakavampaa, kuin kaistanleveyden muutos ja aiheuttaa helposti $\pm 5\%$, suhteellisen helposti jopa $\pm 10\%$ mittausrvirheen. 436 nanometriin painotettu detektorit näyttäisi olevan herkempi tämän tyyppiselle virheelle, kuin muut tutkittavat detektorit. Tällä detektorilla mittausrvirhe saattaa nousta jopa yli 15 prosenttiin.

Huomattavaa on myös, että jos detektorin perustana olevan fotodiodin spektraaliset ominaisuudet muuttuvat, niin tämän tyyppinen muutos on kaikkein todennäköisin.

Tähän simulointiin käytetyn tietokoneohjelman lohkokaaavio on liitteenä.

Jotta nähtäisiin käytetyn jakauman vaikutus simulointituloksiin, tehtiin tämä simulointi myös siten, että simulointimalleissa korvattiin kaikkien käytettyjen komponenttien malleissa Lorentzin jakauma kaavan (15) mukaisella Gaussin jakaumalla. Simulointitulokset on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22, Kapeakaistaisella valottimella kalibroittujen detektorien mittaaman tehon suhteellinen virhe kaistalla 340...460 nm, kun detektorin keskiaallonpituus vaihtelee ± 10 nm. Virhe on laskettu suhteessa ideaalisen detektorin mittaamaan tehoon. Simuloinnissa on käytetty kaikkien komponenttien malleille Gaussin jakaumaa.

Simuloinnista nähdään, että tulokset ovat Gaussin jakaumalla laskettuna hieman erilaisia, kuin Lorentzin jakaumalla, mutta virheet, jotka tästä aiheutuvat ovat pieniä. Simulointien tarkkuus ei siis juurikaan riipu komponenttien mallintamiseen käytetystä jakaumasta.

5.6. Yhteenvedo simuloinneista

Simuloinneissa on tutkittu useita eri asioita mittausprosesseista ja kalibrointimenetelmistä. Näitä tuloksia yhdistelemällä voi karkeasti arvioida mittausepävarmuuden erilaisissa tilanteissa.

Taulukossa 6 on esitetty elohopealampun spektrin vaihtelun vaikutus mittausepävarmuuteen. Tämä epävarmuus säilyy jossain määrin riippumatta siitä, miten detektorin kalibrointi tehdään. Simuloinnit kuvaavat mittausepävarmuutta itse mittausprosessissa.

Taulukko 6, Elohopealampun parametrien vaikutus mittausepävarmuuteen.

Epävarmuustekijä ja arvioitu vaihteluväli	Epävarmuus
Spektriviivojen suhteellinen korkeus (Arvioitu vaihteluväli yhdelle viivalle $\pm 20\%$)	$\pm 5\%$
Spektriviivojen leveys (Arvioitu vaihteluväli $\pm 30\%$, kaikki viivat levenevät samassa suhteessa)	$\pm 0.5\% \dots \pm 3\%$ riippuen detektorista

Simuloinneissa ei eritelty, mistä elohopealampun spektrin muutokset johtuvat, mikä rajoittaa arvioinnin tarkkuutta. Oletettuihin toleransseihin on oletettu sisältyvän eri lamppuyksilöiden, eri valmistajien, eri ikäisten ja eri tehoisten lamppujen väliset erot, joten laskettuja mittausepävarmuuksia voidaan pitää maksimiarvoina. Esimerkiksi saman lampputyypin eri yksilöiden välisten erojen vaikutus mittausepävarmuuteen on todennäköisesti huomattavasti pienempi, kuin esitetyt arvot.

Jotta virhearvio voitaisiin jakaa kaikkien osatekijöidensä kesken, tarvittaisiin mitattua tietoa elohopealamppujen spektreistä.

Mikäli detektorien kalibroinnissa ei oteta huomioon prosessissa käytettävää valotuslaitetta, aiheuttavat detektorien vastekäyrien poikkeamat standardista mittaasepävarmuuden, jonka suuruutta on arvioitu taulukossa 7.

Taulukko 7, Detektorin parametrien vaikutus kalibrointiepävarmuuteen

Epävarmuustekijä ja arvioitu vaihteluväli	Epävarmuus
Kaistanleveys (Arvioitu vaihteluväli $\pm 10\%$)	$\pm 3\%$
Keskiaallonpituus (Arvioitu vaihteluväli ± 10 nm)	$-5\% \dots +15\%$

Simuloinneissa oletettiin, että detektorin kalibroitiin säteilyllä, joka käsitti vain yhden elohopealampun spektriviivan, jonka mittaamiseen detektorin on painotettu ja varsinainen prosessimittaus suoritettiin laajakaistaisella valotuslaitteella.

Mikäli detektorit on kalibroitu jonkin muun tyyppisellä valotuslaitteella, joka kuitenkin eroaa prosessissa käytettävästä valotuslaitteesta, voi näitä mittausepävarmuuksia pitää maksimiarvoina.

Keskiaallonpituuden vaihtelu vaikuttaa 436 nanometriin painotetun detektorin mittausepävarmuuteen enemmän kuin muiden detektorien mittausepävarmuuteen. Myös muut simuloinnit osoittavat, että tämä detektorit on herkempi virheiden vaikutuksille.

Arvot ovat toisaalta vain suuntaa antavia, koska detektorien vastekäyrien toleransseista ei ole saatavilla mitattua tietoa. Arvot lienevät kuitenkin melko lähellä todellisia ottaen huomioon tutkimukset fotodiodien stabiilisuudesta. [Stock, 1986]

6. Johtopäätökset

Työssä esitettyä kalibrointijärjestelmää voidaan käyttää useimpien fotolitografiassa käytettyjen puolijohdedetektorien kalibrointiin.

Simuloinnit kuitenkin osoittavat, että kalibrointi ei johda toivottuun lopputulokseen, mikäli kalibrointiin käytetty lamppu ei ole identtinen prosessissa käytetyn lampun kanssa. Yleisesti annettu kalibrointiepävarmuus $\pm 3\%$ kuvaa vain itse kalibrointimenetelmän epävarmuutta, eikä tällaisella kalibrointimenetelmällä kalibroidun detektorin mittaustarkkuutta valotusprosessissa.

Puolijohdedetektoreilla mitattaessa tulee lopputulokseen, eli resistin valottumiseen nähden kalibrointiepävarmuuden $\pm 3\%$ lisäksi maksimissaan noin $\pm 5\%$ mittausepävarmuus, mikäli kalibrointilamppu eroaa prosessilampusta. Tämä mittausepävarmuus säilyy, vaikka detektorin kalibroisi kyseisellä lampulla miten hyvin.

Mikäli kalibrointiin pyritään vain määrittämällä detektorin vaste keskiaallonpituudella, mihin päästään esim. käyttämällä valotuslaitteena yhtä elohopealampun spektriviivaa, aiheutetaan tällä lopulliseen mittaustulokseen maksimissaan jopa 15% ylimääräinen mittausepävarmuus, koska menetelmä ei ota huomioon detektorin vastekäyrän spektraalisten ominaisuuksien toleransseja ja muutoksia.

Paras kalibrointijärjestelmä saadaan, mikäli siinä voidaan käyttää prosessilaitteiston omaa valotuslaitetta. Tällöin myös kalibrointijärjestelmän hinta laskee olennaisesti. Muutoin kalibrointilamppuja on oltava useita, jotta lamppu voidaan vaihtaa samanlaiseksi, kuin mitä kalibroitavalla detektorilla halutaan mitata. Tällöin on myös oltava suodattimia, joilla valotuslaitteen ulostulospektri saadaan vastaamaan prosessissa käytettyjä valottimia.

Erittäin huolellisella suunnittelulla on mahdollista toteuttaa kalibrointijärjestelmä, jota käyttäen mittausepävarmuus prosessissa saadaan noin 5%:iin.

7. Pohdinta

Työssä on tutkittu kalibrointia vain teoreettiselta pohjalta, joten monia asioita on vielä arvioiden varassa. Työn aikana on herännyt monia ajatuksia mahdollisista jatkotutkimuksista ja projekteista.

Mittausepävarmuuksien tarkentamiseksi tarvittaisiin mitattua tietoa elohopealampuista. Lamppuja voisi mitata Säteilyturvakeskuksen spektrometrillä, jotta saadaan tietää lamppujen ulostulospektrin vaihtelut eri tehoisten lamppujen, eri valmistajien lamppujen, eri ikäisten lamppujen ja lamppuyksilöiden välillä. Tätä tietoa voitaisiin käyttää sekä kalibroitijärjestelmien, että puolijohdevalmistajien mittausprosessien tarkkuuksien arvioinnissa.

Samanlaista mitattua tietoa tarvittaisiin myös käytetyistä detektoreista. Fotodiodien ja painotukseen käytettyjen suodattimien ominaisuudet saattavat muuttua ajan mukana. Lisäksi niillä on uutenakin jonkin suuruiset toleranssit. Irradianssimonokromaattorilla ja xenon-lampulla voitaisiin määrittää kaikkien Suomessa olevien mittalaitteiden vastekäyrien muodot ja verrata niitä toisiinsa sekä valmistajien standardeihin.

Nopean varmistuksen mittausepävarmuuksiin saisi vertaamalla Suomessa olevien mittalaitteiden näyttämiä toisiinsa eri prosessilaitteistoissa. Olisi mielenkiintoista nähdä näyttääkö esim. vanha ja uusi mittalaite samaa lukemaa eri valotuslaitteissa.

Esitelty kalibroitijärjestelmä kannattaisi myös rakentaa Suomeen. Kalibroitijärjestelmä palvelisi puolijohdeteollisuutta suoraan, mutta myös projektin aikana syntyvälle fotolitografian tietotaidolle luulisi olevan käyttöä. Kalibroinnin epävarmuus ei kuvaa millään lailla itse mittausprosessin epävarmuutta, ellei kalibroitimenetelmää tunneta ja hallita kunnolla.

8. Viiteluettelo ja aiheeseen liittyvää kirjallisuutta

Ahmed H. & al (Toim.), Microelctronic engineering, Vol. 11, No. 1-4, Elsevier, Amsterdam, Oxford, Tokyo, New York, 1990

Boivin L.P., Calibration of incandescent lamps for spectral irradiance by means of absolute radiometers, Applied Optics, Vol. 19, No. 16, 1980, ss. 2771-2780

Boivin L.P., Gaertner A.A., Realization of a spectral irradiance scale in the near infrared at the national research council of Canada, Applied Optics, Vol. 31, No. 28, 1992, ss. 6082-6095

Bruening Robert J., Spectral irradiance scales based on filtered absolute silicon photodetectors, Applied Optics, Vol. 26, No. 6, 1987, ss. 1051-1057

Carreras C., Corrons A., Absolute spectroradiometric and photometric scales based on an electrically calibrated pyroelectric radiometer, Applied Optics, Vol. 20, No. 7, 1981, ss. 1174-1177

Corredera Pedro, Corrons Antonio, Pons Alicia, Campos Joaquin, Absolute spectral irradiance scale in the 700-2400 nm spectral range, Applied Optics, Vol. 29, No. 24, 1990, ss. 3530-3534

Jokela Kari, Säteilyturvakeskuksen irradianssiminokromaattoria ja xenon-lamppua koskeva muistio, 1992, ei julkaistu

Mack C.A., Understanding focus effects in sub-micrometer optical lithography, Optical Engineering, Vol. 27, No. 12, 1988, s. 1093

Melles Griot, Optics guide 5

Noel E. B., Illum. Eng., vol. 36, 1941, s. 243

OAI:n kalibrointimenetelmän kuvaus, ja kalibrointitodistus

OAI model 311 tehomittarin tekniset esitteet

ORIEL, Tuoteluettelo Vol. II, Light sources, monochromators, detection systems, 459 s.

Shipley, Fotoresistin "MICROPOSIT S1800 SERIES PHOTORESIST" tekniset esitteet

Stock Klaus D., Temporal stability of silicon photodiodes, Proceedings of 12th international symposium of the technical committee on photon-detectors, Varna, Bulgaria, 1986, ss.129-135

Varpula Timo, Seppä Heikki, Saari Juha-Matti, Optical power calibrator based on a stabilized green He-Ne laser and a cryogenic absolute radiometer, IEEE transactions on instrumentation and measurement, Vol. 38, No.2, 1989, ss. 558-564

Walker J., Saunders R.D., Jackson J., Mielenz K., Results of a CCPR intercomparison of spectral irradiance measurements by national laboratories, Journal of research of the National institute of standards and technology, Vol. 96, No. 6, 1991, ss. 647-668

Wyatt C.L., Radiometric calibration: Theory and methods, Academic Press, New York, San Fransisco, London, 1978, ss. 119-125

Zalewski E.F. & Duda C.R., Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency, Applied Optics Vol. 22 September 1983, ss. 2867-2873

9. Liite: Esimerkki simulointiohjelmasta (Lohkokaavio)

