

Kalle Paasio

EUV-LITOGRAFIA-PROSESSI

Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Kalle Paasio: EUV-litografia-prosessi
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Kandidaatintyö
Toukokuu 2021

EUV-litografia on integroitujen piirien valmistusprosessin osavaihe. Sen avulla on mahdollista muodostaa edeltävää litografiatekniikkaa tarkempia geometrisiä kuvioita sekä tehdä rahallista optimointia. Tämä työ on kirjallisuusselvitys, joka etsii vastauksia kysymyksiin: Mitä on EUV-tekniikka? Miksi se on relevanttia? Miten uusi järjestelmä toimii? Miten tekniikka eroaa vanhasta tekniikasta? Mitkä ovat uuden tekniikan kriittiset muuttujat ja optimointitekijät? Mikä on EUV-tekniikan tulevaisuuden kehityssuunta? Lisäksi työ esittää käytetystä tekniikasta riippumattomat litografisten menetelmien kannalta oleelliset prosessivaiheet, teorian sekä kaavat.

Työ on toteutettu tutkimalla avoimia sekä yliopiston lisenssin alaisia tiedonlähteitä. Työ käyttää lähteinään myös konferenssiesityksiä sekä valmistajien opetuksellista materiaalia. Tiedonhankinnassa on pyritty käyttämään mahdollisimman uusia informaatiolähteitä. Tämä on tehty, koska alan kehityksen on havaittu olevan nopeaa. Keskenään konfliktissa olevien lähteiden tapauksessa on luotettu ajallisesti uudempaan lähteeseen. Työ on rajattu käsittelemään ainoastaan litografiavaihetta. Tämän takia työ ei keskity integroidun piirin valmistamiseen, vaan ainoastaan kuvioinnin muodostamiseen.

Tutkielma tulee siihen lopputulokseen, että EUV-tekniikka on aikaisempaa tekniikkaa kyvykkäämpi pienten kuvioiden valmistamisessa. EUV-tekniikka on relevanttia, koska vanha tekniikka ei kykene valmistamaan tulevaisuudessa tarvittuja piirejä. Uusi järjestelmä toimii vaihtamalla käytetyn valon aallonpituuden. Tämä johtaa muutoksiin laitteistossa. Suurimmat muutokset havaitaan optiikkapolulla, jossa siirrytään linsseistä peileihin, sekä valolähteessä, joka muuttuu laserista plasmaksi. EUV-prosessi eroaa vanhasta prosessista myös tapahtumaketjulla, jolla aikaansaadaan resistin altistuminen.

EUV-tekniikan kriittisiä muuttujia ovat numeerinen aukko, valolähteen teho, resistin kontrasti sekä z-tekijä. Näitä tekijöitä parantamalla nostetaan samanaikaisesti järjestelmän suoritustehoa, toistettavuutta sekä valmistettujen laitteiden simulaatiomallien paikkansapitävyyttä. Lisäksi kriittistä on piirikohtaisesti valita, käytetäänkö maskinsuojusta. Maskinsuojusta käytetään yleensä lojiikkaelementtien valmistamisessa, mutta muistipiirien valmistuksessa se voidaan jättää pois. EUV-tekniikan seuraava kehitysaskel on siirtyminen korkean numeerisen aukon laitteistoon, jonka ennustetaan tapahtuvan massatuotannon osalta noin ajanjaksolla 2025–2026. EUV-tekniikan nähdään syrjäyttävän aikaisempi valmistusmenetelmä pienten laitteiden muodostamisessa. Kuitenkin nähdään, että suurempia yksityiskohtia on edelleen taloudellisempi valmistaa aikaisemalla tekniikalla. Uusi ja vanha tekniikka tulevat täten toimimaan tulevaisuudessa rinnakkain.

Avainsanat: EUV, fotolitografia, IC, mikroelektroniikka, valmistus.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Valitsin työni aiheen kandidaatintöiden ohjaajien esittämistä ehdotuksista. Tämän jälkeen kirjoitin työn itsenäisesti. Ohjaajan kanssa pidimme alku- ja välitapaamisen ja seminaarin jälkeen korjasimme kirjoitusteknisiä yksityiskohtia. Keskityin tiedonkeräyksessäni suuresti internetistä löytyviin lähteisiin, koska yliopisto tarjoaa Andor-palvelun kautta pääsyn julkaisujen lisäksi myös monen kirjan etäluettavaan versioon. Tiedonhaussa havaitsin, että suurin osa EUV-tekniikan julkaisuista esitetään SPIE.digital library -sivustolla. Tämä sivusto on kuitenkin maksullinen ja yliopistolla ei ole pääsyä näihin julkaisuihin. Tämän takia moni käyttämäni lähde on sen sijaan avoimista lähteistä.

Työn aihe kiinnosti minua työpaikallani tapahtuvan layout/tapeout suunnittelun takia. Tämän takia olisi ollut kiinnostavaa ottaa kantaa uuden tekniikan aiheuttamiin layout-tekniisiin yksityiskohtiin. Näistä layoutin säännöistä ei kuitenkaan löytynyt tarpeeksi informaatiota avoimista lähteistä, jotta olisi ollut järkevää kirjoittaa niistä kokonaista lukua.

Haluan vielä kiittää henkilöitä, jotka suostuivat lukemaan keskeneräisen työni ja osoittamaan epäkohtia ja kirjoitusvirheitä. Kommenttinne auttoivat suuresti sidostamaan kokonaisuutta ja korjaamaan kieliasua.

Tampereella, 16.5.2021

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. OPTINEN LITOGRAFIA JA SEN VAKIINTUNEET PROSESSIVAIHEET	2
2.1 Kiekon puhdistus.....	6
2.2 Kiekon pinnoitus fotoresistillä	7
2.3 Valoaltistus	9
2.4 Lopputulos ja käyttökohteet.....	12
3. EUV-TEKNIikka SYRJÄYTTÄVÄNÄ VALMISTUSMENETELMÄNÄ.....	13
3.1 EUV-tekniikan käyttökohteet	15
3.2 EUV-prosessi ja -laitteisto	17
3.2.1 Valonlähde.....	17
3.2.2 Maski ja valopolku.....	21
3.2.3 Resisti.....	25
3.2.4 Ohjauslaitteisto ja resoluutionparannustekniikat.....	28
3.3 EUV-tekniikan kehityssunnat.....	33
4. YHTEENVETO.....	35
LÄHTEET	37

LYHENTEET JA MERKINNÄT

c	Valon nopeus
CD	Kriittinen dimensio = resoluutio
CO ₂	Hiilidioksidi
DUV	Valo, jonka aallonpituus on 193 nm. Viitattu nimellä "vanha tekniikka". engl. Deep Ultraviolet
E	Fotonin energia
EUV	Valo, jonka aallonpituus on 13,5 nm. Viitattu nimellä "uusi tekniikka". engl. Extreme Ultraviolet
h	Planckin vakio
IC	Integroitu piiri. engl. Integrated circuit
ITRS	Suunnittelu yhteisö. engl. International Technology Roadmap for Semiconductors
k_1	Prosessitekhninen vakio, yksikötön
LER	Viivanleveyden karheus metreinä. engl. Line edge roughness
NA	Numeerinen aukko, yksikötön
OAI	Off-axis illumination -tekniikka
PSM	Vaihesiirtomaski. engl. Phase Shift Mask
R	Resoluutio metreinä
wph	Käsiteltyjen kiekkojen määrä tunnissa. engl. wafers per hour
z-tekijä	Resistin optimointiparametri. engl. z-factor
λ	Aallonpituus metreinä
2D	Kaksiulotteinen

1. JOHDANTO

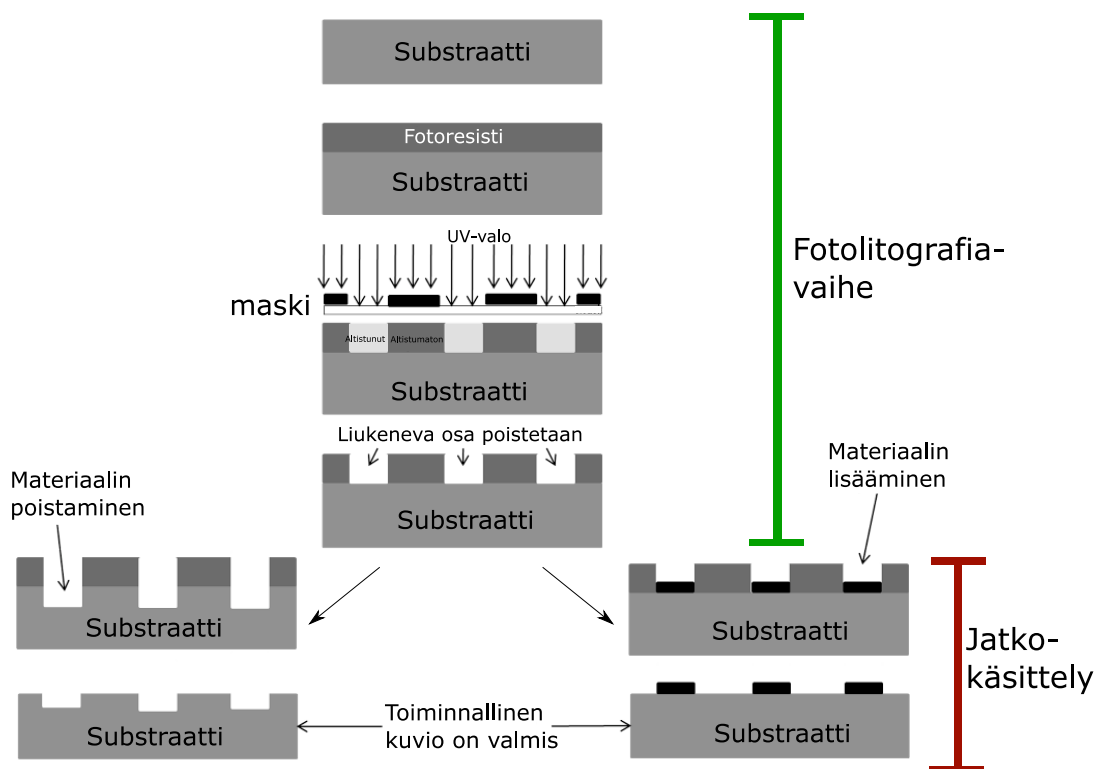
Mikroelektroniikan kehitys on historian saatossa perustunut vahvasti komponenttien koon pienentämiseen. Pienemmät komponentit mahdollistavat sen, että komponentteja mahtuu suurempi määrä yhdelle piirille. Tämä on samaan aikaan sekä taloudellista että suorituskykyä nostavaa. Erityisesti transistorien määrän on ennustettu kaksinkertaistuvan joka toinen vuosi. Ennustus tunnetaan yleisesti Mooren lakina ja sen nähdään toimivan suuntaa antavana ennustuksena laitteiden pienentymiselle. Siinä missä kymmenen vuotta sitten yhdelle prosessorisirulle saatiin mahtumaan biljoona transistoria, saadaan nykyään samalle pinta-alalle rakennettua yli 16 biljoonaa transistoria. Transistorien kutistumista on pitkään ajanut valmistustekniikan inkrementaalinen kehitys, mutta fyysikan lakien asettamien rajojen tullessa vastaan ei aikaisemman prosessin optimoinnilla saavuteta enää tarvittavia lopputuloksia.

Tämä työ käsittelee mikroelektroniikan valmistusmenetelmää, jonka nähdään syrjäyttävän aikaisemmat vakiintuneet menetelmät pienimpien mahdollisten laitteiden valmistuksessa. Työ vastaa kysymyksiin: Mitä on EUV-tekniikka? Miksi se on relevanttia? Miten uusi järjestelmä toimii? Miten tekniikka eroaa vanhasta tekniikasta? Mitkä ovat uuden tekniikan kriittiset muuttujat ja optimointitekijät? Mikä on EUV-tekniikan tulevaisuuden kehityssuunta? Tämä työ on rajattu niin, ettei se käsittele kokonaisen integroidun piirin valmistamista, vaan keskittyy litografiavaiheeseen, eli kuvan muodostamiseen. Työssä käytetyissä lähteissä on luotettu konfliktoivan informaation tilanteissa ajallisesti uusimpaan tietoon.

Työ etenee siten, että lukija tutustutetaan ensin aikaisemmin käytettyyn valmistusprosessiin luvussa 2. Tämän ideana on tuoda ilmi valmistusprosessin perusvaiheet, jotta lukijalle kehitty kattavampi kuva siitä, miten prosessi toimii kokonaisuutena ja mitkä prosessin vaiheet ovat muuttuneet uudessa valmistusmenetelmässä. Näin pyritään siihen, että lukija tuntee prosessin perusvaiheet ja syyn niiden käyttöön ennen uuden tekniikan yksityiskohtiin paneutumista. Tämän jälkeen työ siirtyy uuden EUV-valmistusmenetelmän käsittelemiseen luvussa 3 ja selventää, miten EUV-tekniikka poikkeaa aiikeisemmasta tekniikasta. Kun uuden tekniikan takana olevat keskeiset ideat on käsitelty, siirrytään tarkastelemaan prosessin vaiheita, ja syventymään niiden yksityiskohtiin luvun 3.2 aliluvuissa. Vaiheita käsittelevissä luvuissa tuodaan esille kriittisiä muuttujia sekä kompromisseja, joita muuttujien arvojen sovittaminen aiheuttaa.

2. OPTINEN LITOGRAFIA JA SEN VAKIINTU- NEET PROSESSIVAIHEET

Litografia on valmistusmenetelmä, jolla puolijohdekiekon päälle valmistetaan erilaisia geometrisiä kuvioita. Kuvioista muodostetaan piirielementejä kuten transistoreja, keloja, kondensaattoreja ja niitä yhdistäviä johtoja. Kuvioinnin avulla sekä valmistetaan yksittäiset piirikomponentit että liitetään ne yhdeksi kokonaisuudeksi, jota nimitetään integroiduksi piiriksi (IC). Litografia-askel on siis kokonaisten piirien valmistukseen kuuluva yksittäinen vaihe, jonka lopputuloksena kiekolle muodostuu kuvio. Litografiavaiheen erottamista muista IC-valmistuksen askelista hahmottelee kuva 1. Tämä työ keskittyy ainoastaan fotolitografiavaiheeseen.



Kuva 1. Litografia käsittää kuvanmuodostamisvaiheen. Tämän jälkeiset prosessit, joissa kiekolle lisätään tai siltä poistetaan materiaalia, eivät ole osa fotolitografiaa. Perustuu lähteeseen [1].

Litografiavaiheen lopputuloksena pyritään siihen, että halutut geometriset kuviot on luotu kohdemateriaalin pinnalle virheettömästi. Virheettömyyden käsitteellä viitataan siihen, että kuvannettu geometria on toteutunut piin pinnalle suunnitelman mukaisena. Litogra-

fiassa usein käytettävien kuvion optimointivaiheiden takia virheettömyytenä ei voida suoraan pitää sitä, että lopullinen kuvio vastaa kiekolle heijastettua geometriaa, sillä käytetyt kuvat optimoidaan toimimaan yhdessä käytetyn systeemin kanssa [2].

Litografialla valmistetaan laitteita, joiden kriittinen tekijä on niiden koko. Transistorin koon asema on mikroelektronikassa hyvin tärkeässä osassa, sillä suunnitteluprosessi vaatii usein kompromisseja muun muassa virrankäytön, nopeuden sekä hinnan välillä. Pienentämällä transistorin kokoa voidaan tavanomaisista kompromissitilanteista poiketen saavuttaa parannuksia kaikkiin näihin suunnittelutekijöihin, jolloin muiden suunnitelmien ei tarvitse joustaa.

Kun transistorin kokoa pienennetään, saadaan samalla pienennettyä sekä virrankulutusta että transistorin vaatiman pinta-alan aiheuttamaa hintaa. Pienet transistorit ovat myös suurempia nopeampia, koska niissä esiintyvät parasiittiset kapasitanssit ovat pienempiä. Näiden havaintojen nojassa todetaan, että transistorin koon pienentämisellä on nettopositiivinen vaikutus. Transistorien koon nähdään olevan yksi valmistustekniikan tärkeimmistä parametreista.

Litografisen prosessin kyvykkyyttä mitataan prosessin resoluutiolla R , joka kuvaa sitä, kuinka pieniä laitteita kyseisellä prosessilla pystytään valmistamaan. Resoluutioon viitataan tämän takia myös kriittisen dimension kokona (CD), joka kertoo pienimmän mahdollisen kuvannettavan yksityiskohdan lyhyimmän sivun pituuden. Teoreettiselle resoluutiolle esitettiin ensimmäistä kertaa kaava vuonna 1873, jolloin Ernst Abbe johti resoluution diffraktiorajoitteisen kaavan, joka on muokattu valmistustekniikkaan soveltuvaan muotoon

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

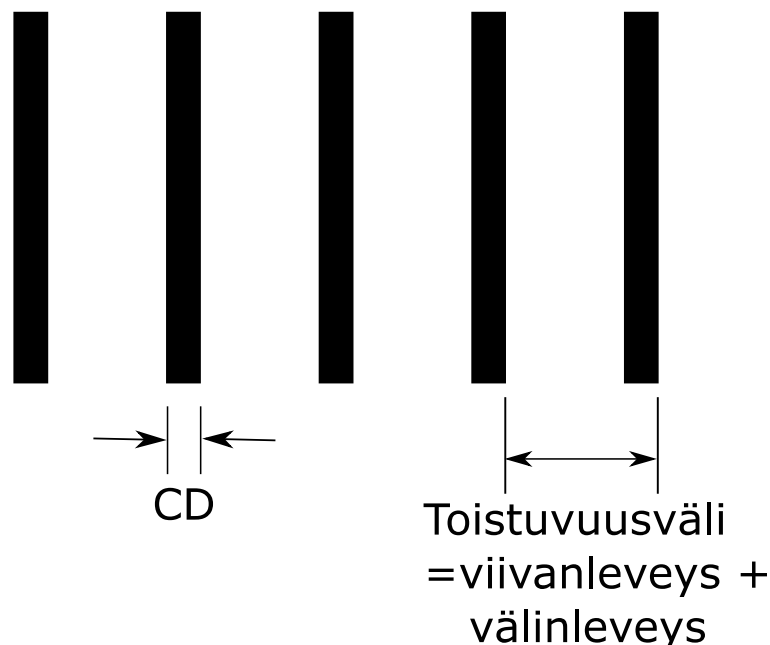
jossa λ on käytetyn valon aallonpituus, NA numeerinen aukko ja k_1 prosessitekniinen vakio, jonka arvoon voidaan vaikuttaa resistikemian sekä optisen polun ominaisuuksien avulla [3] [4]. Minimiarvo vakiolle k_1 on 0,25 [5]. Maksimaalinen reaalisesti saavutettava numeerisen aukon arvo on 1,4 [6].

Kaava (1) ennustaa sen, että valon aallonpituus ei ole ainoa tekijä, joka määrittää prosessin kyvykkyuden luoda pieniä kuvioita. Optimaalisessa tapauksessa k_1 ja NA mahdollistavat 5,6 kertaa aallonpituutta pienemmän kuvion muodostamisen. Simulaatioiden avulla on osoitettu, että superresoluutiota käyttävillä linsseillä voidaan saavuttaa rajoitteista huolimatta jopa 10 kertaa aallonpituutta pienempi kuvio [7]. Tämä arvo saavute-

taan käyttämällä hyödyksi valon lähikenttää, jolloin diffraktioraja voidaan rikkoa. Optisessa litografiassa ei kuitenkaan pystytä usein käyttämään kuvantamista superresoluution avulla.

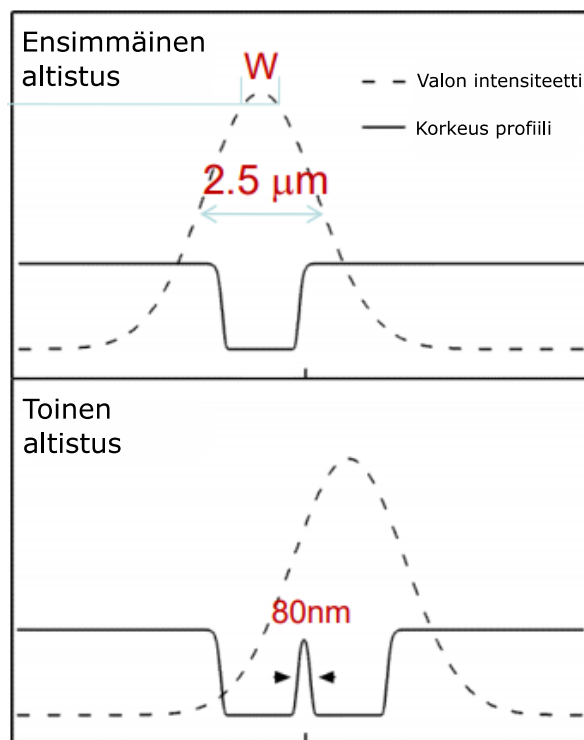
On huomion arvoista, että kaavan (1) esittämä suhde on prosessivaiheiden optimoinnin keskipisteessä ja että kaavassa esiintyvien suureiden suhde resoluutioon on syy mo-
neen valintaan litografisen prosessin vaiheiden kehityksessä sekä syy siihen, miksi valmistustekniikka on siirtymässä kohti EUV-prosessia. Kun kaavaan (1) viitataan tulevaisuudessa, tarkoitetaan resoluution paranemisella sitä, että suureen R arvo laskee. Tämä tarkoittaa transistorin koon pienenemistä, eli kyvykkyyden nousua.

Teoreettisen resoluution kaavan osoittamaa kriittisen dimension kokoa kutsutaan myös viivanleveydeksi. Litografiassa käytetään usein kuitenkin toistuvia kuvioita ja viivanleveyden arvo ei yksin riitä määrittämään prosessin tarkkuutta toistuvan kuvion toteuttamiseen. Sen sijaan toistuvia kuvioita mitataan suureilla toistuvuusväli ja puoliväli (engl. pitch, half-pitch). Toistuvuusväli kuvaa toistuvan kuvion yhden jakson pituutta ja puoliväli tästä laskettua puolikasta. Näistä suureista puoliväli on vakiintuneemmin käytössä sen takia, että sen arvot ovat lähempänä kriittisen dimension saavuttamia arvoja, ja niitä on sen takia helpompi verrata keskenään. [3] Kriittisen dimension ja toistuvuusvälin määrittelmää havainnollistaa kuva 2. EUV-tekniikalla saavutetaan 2021-luvulla puolivälin arvo 14 nm [8].



Kuva 2. Kriittisen dimension (CD) ja toistuvuusvälin määrittelmä.

Se, että kriittinen dimensio ja kuvion toistuvuus eroavat toisistaan, johtuu siitä, että altistus voidaan tehdä useaan kertaan (engl. multiple patterning). Tällöin saavutetaan tarkempi kriittisen dimension arvo, mutta etäisyys kahden viivan välillä kasvaa. Litografiassa on hyvin yleistä käyttää monta altistusta silloin kun pyritään valmistamaan tarkimpia mahdollisia laitteita [9]. Kuva 3 havainnollistaa, miten $2.5\ \mu\text{m}$ valokeilalla voidaan aikaansaada kahden altistuksen avulla kriittinen dimensio, jonka koko on $80\ \text{nm}$. Kyseisen tekniikan ongelma on, että toistuvuusvälin pituus on edelleen yli $2.5\ \mu\text{m}$. Tällöin pienien laitteiden muodostamisesta huolimatta ei voida nostaa integraatiotiheyttä, eli sitä, kuinka lähelle toisiaan laitteita voidaan muodostaa. Tämän takia prosessin kyvykkyyttä ei voida määrittää ainoastaan kriittisen dimension koolla.



Kuva 3. $80\ \text{nm}$ kriittisen dimension muodostus kahdella altistuksella käyttäen $2.5\ \mu\text{m}$ valokeilaa saa aikaan suuren tarkkuuden, mutta integraatiotiheys jää pieneksi. Perustuu lähteeseen [10].

Integroitujen piirien valmistuksessa on monta erilaista tapaa saavuttaa kuviointituloksia. Kuvioiden tarkkuus sekä tekniikka, jolla kuviointi toteutetaan, on muokkautunut teknologian kehittyessä, mutta peruseriaatteet ovat pysyneet samana. Seuraavat kappaleet kuvaavat järjestyksessä alusta loppuun ne fotolitografisen prosessin askeleet, jotka ovat kehittyvän tekniikan mukana pysyneet samoina perustavanlaatuisina prosessivaiheina. Vaiheiden tarkastelu aloitetaan tilanteesta, jossa piikiekot on valmistettu etukäteen ja ne saapuvat juuri tuotantolinjalle. Kuvioinnin muodostusprosessi koostuu kokonaisuudessaan puhdistuksesta, resistipinnoituksesta sekä altistuksesta.

2.1 Kiekon puhdistus

Piikiekon saapuessa valmistuslinjalle on sen pintaan voinut tarttua epäpuhtauksia kuljetuksen sekä ilmassa leijuvien epäpuhtauksien takia. Nämä epäpuhtaudet voivat aiheuttaa kiekon pinnalla kemiallisia reaktioita ja vaikeuttaa valon etenemistä optisella polulla. Epäpuhtausyhdisteet luovat piikiekon pinnalle myös epätasaisuutta sekä huonontavat tartuntapintaa seuraavissa vaiheissa käytettäville aineille. Tämän takia valmistusprosessin ensimmäinen vaihe on kiekon puhdistus.

Epäpuhtauksien määrä halutaan minimoida myös logistisissa vaiheissa sekä varastoinnin ajaksi, jotta vältetään tilanteelta, jossa kiekoon pääsee epäpuhtauksia vielä puhdistusvaiheen jälkeen. On huomattava, että myös prosessissa käytettyjä työkoneita täytyy puhdistaa aktiivisesti, jotta niihin jääneet epäpuhtaudet eivät pääsisi kiekon pinnalle koneen käydessä. Fotolitografisen prosessin vaiheet suoritetaan näiden syiden takia puhdistilassa, jossa ilmassa olevien epäpuhtauksien määrä on tiukasti hallittua.

Kiekon puhdistus suoritetaan ensimmäisen askeleen lisäksi myös aina ennen kiekon syöttämistä seuraavaan prosessointilaitteistoon, ja tämän takia joka neljäs kiekolle linjastolla tehtävä vaihe voi olla kiekon puhdistusoperaatio. Kiekon puhdistuksen tehtävä on poistaa kemikaali- ja materiaali jäämät kiekon pinnalta vahingoittamatta tai muokkaamatta kiekon pinnalla olevia rakenteita. Pääasiallisesti kiekon pinnalta puhdistettavat epäpuhtaudet ovat orgaanisia yhdisteitä, metalleja sekä ioneja. [11]

Kiekon puhdistusmenetelmät luokitellaan märkä- sekä kuivapuhdistukseen sen mukaan, käytetäänkö puhdistamiseen liuottimia [12]. Märkäpuhdistuksessa puhdistus perustuu orgaanisten aineiden oksidoimiseen ja liuottamiseen sekä kompleksien muodostamiseen metalli-ionien kanssa. Märkäpuhdistuksessa käytetään yleensä happoa tai emästä sekoitettuna veteen, jonka lisäksi nesteeseen saatetaan ultraääntä, jonka luoma kaviatioilmiö auttaa irrottamaan likaa kiekolta. [11]

Kuivapuhdistus puolestaan perustuu kiekon pommittamiseen energisillä yhdisteillä, kuten otsonilla ja aerosoleilla. Myös lasereita käytetään kuivapuhdistuksessa. Kuivapuhdistus ei ole yhtä tehokasta kuin märkäpuhdistus ja saattaa aiheuttaa pinnalle karheutta. Tämän takia puhdistukseen yleisimmin käytetty metodi on märkäpuhdistus sen tehokkuuden takia. Kuivapuhdistusta käytetään silti tilanteissa, joissa pinnan karheuttaminen ei ole haitallista, sillä toisin kuin märkäpuhdistuksessa, kuivapuhdistuksessa ei käytetä kemikaaleja, jotka on hävitettävä käytön jälkeen. [12] Laaja kemikaalien käyttö märkäpuhdistuksessa johtaa sekä ympäristöllisiin että taloudellisiin kuluihin, ja tämän takia varsinkin isoja kiekkoja on taloudellista puhdistaa sen sijaan kuivapuhdistuksella. Tulevaisuuden kehityssuunnaksi nähdään, että märkäpuhdistukseen käytettäisiin aikaisempaa

pienempi määrä kemikaaleja ympäristövaikutusten minimoimiseksi, jonka jälkeen kiekolle jääneet epäpuhtaudet puhdistettaisiin kuivapuhdistuksella [12].

2.2 Kiekon pinnoitus fotoresistillä

Litografisen prosessin tavoitteena on luoda geometrisiä kuvioita, joiden avulla voidaan IC-valmistuksen seuraavissa vaiheissa muokata muodostuvien materiaalikerrosten muotoa. Jotta kuviointi piikiegon pinnalle onnistuu, tarvitaan jokin aine, joka voi toimia geometrinen kuvioiden pohjarakenteena. Tämän perustan kuviogeometrialle muodostaa fotolitografiassa aine, jota kutsutaan fotoresistiksi.

Fotoresisti on valoon reagoivaa ainetta, joka kovettuu tai muuttuu liukenevaksi altistuesaan fotonille, jolla on tarpeeksi energiaa. Resistin liukenemisominaisuudet riippuvat käytetyn resistin tyypistä. Positiivisessa resistissä valon osuminen resistiin aiheuttaa sen, että altistuskohta muuttuu liukenevaksi. Negatiivisessa resistissä puolestaan altistus johtaa siihen, että resisti kovettuu. Kun osa fotoresististä on saatettu liukenevaksi ja osa kovettuneeksi voidaan seuraavassa prosessivaiheessa kiekkoa käsitellä liuottimella, jolloin kiekolta saadaan poistettua liukeneva osa resistiä. Tällöin kiegon pinnalle muodostuu kuvio jäljelle jääneestä resistimateriaalista.

Resistin muodostama kuvio ei vielä omaa haluttuja sähköisiä ominaisuuksia, vaan sitä käytetään geometrisena esteenä, jonka avulla luodaan metallisia pinnoitteita tai doupataan piitä transistorien muodostamiseksi. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä muiden materiaalikerrosten muodostamista, sillä litografiaprosessi käsittää ainoastaan kuvion muodostamisen. On kuitenkin huomattavaa, että IC-valmistuksen muut vaiheet, kuten etsaus, eli hapolla resistin muodostaman kuvioinnin syövyttäminen kiekkoon, aiheuttavat resistimateriaalille vaatimuksia. Yksi näistä vaatimuksista on se, että resistimateriaali pystyy vastustamaan etsausvaiheessa tapahtuvaa syöpymistä, sillä jos resistissä oleva geometria syöpyy pois, syntyy kuviointiin virheitä. Resistin syöpyminen korostuu ohutta resistikerrosta käyttäessä.

Fotoresistin päällystysprosessi alkaa vaiheesta, jossa spincoat-tekniikkaa käyttämällä annostellaan nestemäistä resistiliuosta pyörivälle kiekolle. Kiegon pyörittäminen takaa resistin tasaisen jakautumisen kiegon pinnalle sekä vaikuttaa kehittyvän resistikerroksen paksuuteen. Seuraavaksi kiekko siirtyy osavaiheeseen, jota kutsutaan pehmeäksi lämmitysasteeksi. Kiegon päällä oleva nestemäinen resisti sisältää paljon liuotinainetta, joka ei osallistu kuvanmuodostusprosessiin. Pehmeän lämmitysasteen ideana on poistaa resististä liuotinaineet, jotka voisivat imeä itseensä altistuksesta tulevaa energiaa ja täten estää resistin funktionaalaisia osia saamasta tarvitsemaansa aktivaatioenergiaa. Lisäksi

lämmitysaste tekee resististä kiinteän, jolloin se kykenee säilyttämään siihen muodostuneen kuvion. Pehmeässä lämmitysasteessa kiekkoa haudutetaan 80–150 °C lämpötilassa noin minuutin verran, jolloin ylimääräinen liuotain haihtuu pois kiekon pinnalta jättäen kiekon pinnalle tasaisen kerroksen kuivaa resistiä [13].

Resistin tärkeimmät ominaisuudet tulevat ilmi seuraavassa vaiheessa, jossa kuvantaminen resistille aloitetaan. Seuraavaa vaihetta kutsutaan altistusvaiheeksi ja sen ominaisuuksia käsitellään omassa kappaleessaan. Altistusvaiheessa valo ja resisti reagoivat keskenään muodostaen kuvioita. Resistin kannalta tärkein asia, joka tapahtuu altistuksen aikana, on resistin liukoisuusominaisuuksien muuttuminen.

Liukeneminen on kuvanmuodostuksen kannalta resistin tärkein tehtävä, sillä liukenemisen tuloksena resisti muodostaa geometriset kuviot piin pinnalle toteuttaen siten kuviointiprosessin halutun lopputuloksen. Resistin voidaan nähdä matemaattisena funktiona, jolle syötetään 2-ulotteinen (2D) valoannos ja joka tuottaa lopputulokseksi 2D alueita, joilla resistin liukoisuusominaisuudet ovat muuttuneet [3]. Tämän funktionaalisen määrittelyn nojassa resistin kemialliset ominaisuudet optimoidaan valoon reagoiminen ja liukoisuuden hallittu muuttuminen mielessä pitäen.

Jotta resisti voi muuttaa olomuotoaan on sen saatava altistuksesta tarpeeksi suuri energia. Tätä valon resistille tuottamaa energiaa mitataan sen pinta-ala jakaumana käyttäen yksiköitä mJ/cm^2 suureessa, jota kutsutaan resistin herkkyudeksi. Mitä herkempi resisti on valolle, sitä pienemmän energian se vaatii pinta-alaa kohden, jotta altistus tapahtuu.

Optisessa litografiassa käytetään usein kemiallisesti vahvistettuja resistejä niiden herkkyyden takia. Ne eroavat tavallisesta resististä siten, että fotonin osuessa resistiin altistunut resisti ei reagoi välittömästi muuttaen liukoisuusominaisuuksiaan, vaan resistiin muodostuu latentti kuva. Latentti kuva muodostuu resistin pinnalle happoina, jotka eivät ole liukenevassa tilassa ja joita ei voida vielä erottaa muusta resististä. Kuviointi on siis aloitettu, mutta itse kuvio ei ole vielä fyysisesti muodostunut. Kemiallisesti vahvistetuissa resisteissä liukoisuuden kasvaminen tapahtuu vasta seuraavassa prosessivaiheessa, jossa resistin lämpötilaa nostetaan. Tuolloin latentin kuvan muodostavat hapot toimivat katalyyteinä lämmön aiheuttamille reaktioille ja luovat lopullisen liukoisuuskuvion. Kemiallisesti vahvistettu resisti perustuu happomolekyylin toimintaan katalyyttinä, jolloin yksi valolla altistettu molekyyli pystyy katalysoimaan 10–100 yhdisteen hajoamisen ennen kulumistaan. Tällöin yhden altistuksella aktivoituneen hapon vaikutus moninkertaistuu eli vahvistuu. Kemiallisesti vahvistetulla resistillä on tavanomaisessa litografiassa saavutettu 5–10 kertaa korkeampi herkkyys kuin resistimateriaaleilla, jotka eivät ole kemiallisesti vahvistettuja. [3]

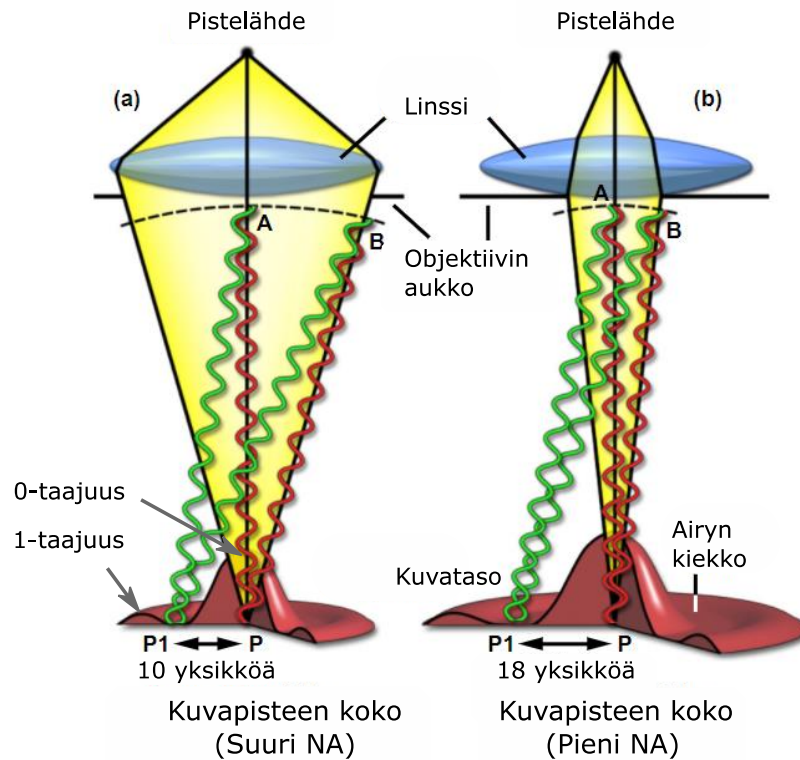
2.3 Valoaltistus

Fotolitografinen kuviointi perustuu nimensä mukaan fotoneihin, joiden 2-ulottuvuuksinen energijakauma luo resistille altistuskuvan. Jotta fotoneilla voidaan muodostaa kuva, on fotonit saatava osumaan resistille kuvan vaatimiin paikkoihin. Kuvan muodostamisen tehtävän hoitaa maski. Maski on tavanomaisessa fotolitografiassa kalvomainen valoa läpäisevä levy, johon on muodostettu kuvioita valoa läpäisemättömällä aineella. Kun valo kulkee maskin läpi, saadaan maskin geometriset kuviot muunnettua maskin läpäisevien fotonien intensiteetin jakaumaksi. On kuitenkin huomattava, että fotonit ovat hiukkasolemuksensa lisäksi myös aaltoja, ja tämän takia kuvan heijastamisessa on otettava huomioon myös diffraktio- ja interferenssi-ilmiöt.

Maskeja käytetään kolmessa eri optisen litografian kuvantamismenetelmässä. Intuitiivisimmassa lähestymistavassa maski laitetaan suoraan kiinni kohteeseen, johon kuva aiotaan altistaa. Tämä kuitenkin koituu vahingolliseksi maskille, sillä fyysinen kontakti saa helposti aikaan vaurioita sekä epäpuhtauksia maskin pinnalle. Toinen tapa on pitää maskia hyvin lähellä pintaa, mutta silti irti pinnasta. Kahdessa yllä esitettyssä menetelmässä maski on yhtä suuri kuin sillä tehtävä kuva. Nämä menetelmät ovat tarkkoja, mutta eivät sovellu hyvin massavalmistukseen. Kolmannessa menetelmässä käytetään maskeja, jotka kattavat vai osan kiekosta. Maskeja ei myöskään tuoda suoraan kiekolle, vaan niissä oleva kuva heijastetaan kohta kerrallaan kiekon pinnalle tekniikassa, jota nimitetään projektiolitografiaksi. Maski sijaitsee tällöin kaukana kiekon pinnasta. Projektiolitografia on massavalmistuksen kannalta tärkein maskinkäyttöperiaate siksi, että sekä vanha että uusi prosessi käyttävät tätä menetelmää. Projektiolitografiassa optisella polulla pätevät samat lait ja rajoitukset kuin mikroskoopeissa ja kameroissa, jotka ovat myös diffraktiorajoitteisia järjestelmiä. Projektio-optiikkaan liitetään usein väliaineeksi vettä, jolloin puhutaan immersiolitografiasta [14]. Vettä käytetään väliaineena ilman sijaan siksi, että vesi taittaa valoa laajemmalle alueelle, suurentaen kaavassa (1) esiintyvää numeerisen aukon arvoa. Veden käyttö väliaineena on vakiintunut lähestymistapa tarkempaa resoluutiota vaativissa olosuhteissa [3]. Sen avulla saavutetaan DUV-tekniikassa numeerisen aukon arvo 1,35 [15].

Kaikissa projisoivissa järjestelmissä sisään tuleva valo kulkee tietyn optiikkapolun läpi ennen kiekolle saapumista. Optisella polulla tapahtuvan valon diffraktioilmiön avulla voidaan selittää kaavan (1) ulkomuoto [4]. Kaava perustuu valon taittuessa muodostuvaan interferenssikuvioon, Airyn kiekkoon, jota havainnollistaa kuva 4. Kuvan interferenssimaksimeja tarkastellaan usein Fourier-muunnoksen avulla käyttäen paikkataajuuksia. Tällöin havaitaan, että kuvan keskellä oleva maksimi esittää nollataajuutta ja reunoille muodostuva levymaksimi on valon ensimmäinen toistuvuutta kuvaava komponentti, eli

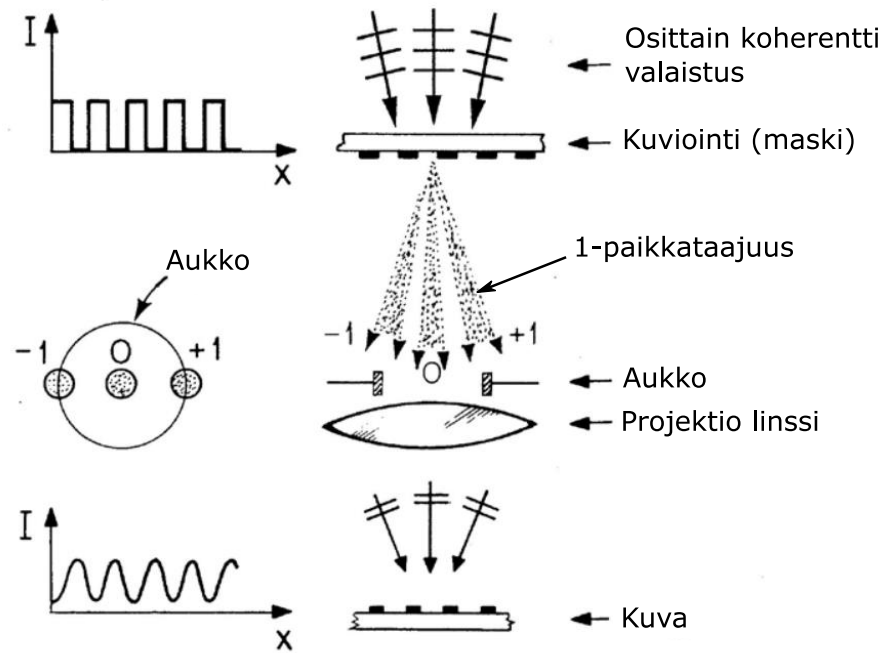
ensimmäisen paikkataajuuden komponentti [10] [9]. Kuvassa esiintyvä objektiivin aukko on suoraan verrannollinen numeerisen aukon NA-arvoon.



Kuva 4. Resoluution kaavan (1) määrittävä valon diffraktiokuvio. Suurempi numeerinen aukko luo pienemmän kuvapisteen. Perustuu lähteeseen [4].

Kuvan nojalla havaitaan, että pistemäisen valolähteen avulla kuvannettaessa minimietäisyys valokeilan valoisan ja pimeän osuuden välillä on noin puoli käytetyn valon aallonpituutta. Kaava (1) perustuu tähän diffraktiorajoitteeseen, mutta siinä otetaan huomioon resoluutiota parantavien menetelmien vaikutus.

Optisessa järjestelmässä voidaan valita linssien tukemat paikkataajuuksien arvot sekä rajataajuus, jota tarkempaa kuviota linssillä ei kyetä valmistamaan. Tavanomaisesti optisissa järjestelmissä valitaan diffraktiomaksimit -1, 0 ja 1, sillä näiden avulla kuva on mahdollista muodostaa jo pienen informaatiomäärän avulla [10] [9]. Valinnalla tarkoitetaan, että tietyllä valon taajuudella ja numeerisella aukolla ainakin ensimmäisen diffraktiomaksimin pitää päätyä kiekon pinnalle. Jos ensimmäinen maksimi ei päädy kiekolle, niin kiekolla ei havaita ollenkaan kuviota, vaan ainoastaan nollataajuus, eli tasainen kuviottoman valon komponentti. Valinta on myös intuitiivinen, sillä sisään tuleva valo sisältää luonnostaan kaikkia paikkataajuuksia. Rajoitus -1, 0 ja 1 taajuuksille saavutetaan, kun valo kulkee numeerisen aukon määrittävän objektiivin aukon läpi. Haastavammassa tekniikoissa on myös mahdollista poistaa nollataajuus kokonaan [9]. Diffraktiomaksimien kaappausta havainnollistaa kuva 5.



Kuva 5. Optiikkapolun linssit sovitetaan päästämään läpi ainakin ensimmäisen kertaluvun diffraktiomaksimit. Perustuu lähteeseen [10].

Kuvaa tarkastelemalla havaitaan, että valinta rajoittaa käytetyt paikkataajuudet ensimmäiseen kertalukuun poistaa informaatiota. Tämä johtaa siihen, että linssijärjestelmä toimii alipäästösuotimen kaltaisesti [9]. Tämä havaitaan kiekolle päätyvässä valossa terävien kulmien pyöristymisenä kuvan 5 vasemman reunan intensiteettikuvaajista. Jos optisella järjestelmällä halutaan kaapata enemmän diffraktiomaksimeja, joudutaan joko suurentamaan linssiä tai pienentämään aallonpituutta. Oikeassa järjestelmässä linssien suurentaminen luo suuria kuluja ja valmistusongelmia. Myös järjestelmän käyttämää aallonpituutta pidetään vakiona, koska sen muuttaminen vaatisi järjestelmän uudelleen soveltamista sekä uuden valolähteen kehittämistä. Tämän takia on hyväksyttävä se, että optinen polku ei voi tuottaa pienille kohteille tarkkareunaista valoa.

Kuvanmuodostusprosessissa kriittistä on resistin, valon määrän ja maskin yhtäaikainen toiminta. Kun maskia suunnitellaan, on otettava huomioon, käytetäänkö positiivista vai negatiivista resistiä. Resistivalinta kertoo, kuuluuko maskissa suunnitellun piirteen kohdalle muodostaa valoa läpipäästävä vai valoa imevä kerros. On myös valittava valoannos niin, että se on riittävä, jotta käytetyn resistin aktivaatioenergia ylittyy. Tavanomainen litografiaprosessi on vakiintunut käyttämään aallonpituuden arvoa 193 nm, josta on tullut litografian perustyökalu vuosien saatossa [14] [16] [17]. Tätä aallonpituutta käyttävien fotonien energia on matalampi kuin uudessa tekniikassa, mutta fotoneja on ollut taloudellista tuottaa suuri määrä kompensoimaan pienempää yksittäisen fotonin energiaa.

Kiekolle on altistusvaiheen lopputuloksena muodostettu kuva, joka sijaitsee resistikerroksen pinnalla. Viimeisessä osavaiheessa kiekko kuumennetaan käytetyn resistin vaatimaan lämpötilaan prosessivaiheessa, jota kutsutaan kovaksi lämmitysasteeksi. Kovan lämmitysasteen tehtävänä on parantaa muodostettujen resistirakenteiden fyysistä vakautta ja muodon säilytysominaisuuksia. Kova lämmitysaste parantaa myös resistin lämmön sekä kemikaalien kestoa, joita tarvitaan IC-valmistuksen tulevilla vaiheilla [18]. Kova lämmitysaste on yleisesti käytetyille kemiallisesti vahvistetuille resisteillemme pakollinen vaihe, sillä kemiallisesti vahvistetun resistin kemiallinen toiminta on suunniteltu niin, että resistin liukenevuuden muuttuminen tapahtuu vasta lämpötilan noustessa [3].

2.4 Lopputulos ja käyttökohteet

Integroiduissa piireissä on usein monia kymmeniä kerroksia erilaisia kuvioiteja, jotka kaikki toteutetaan fotolitografian avulla. Jokaisella prosessikerroksella saadaan valmistettua yksi kerros kuvioitua fotoresistiä. Jokaista materiaalikerrosta varten luodaan tämän takia oma maski. Joskus yhden kuvioinnin luomiseen joudutaan käyttämään useita maskeja silloin, kun halutaan muodostaa tarkempia yksityiskohtia monikuviointimenetelmillä, joita havainnollistettiin aikaisemmin kuvassa 3 [10].

Usein ensimmäinen fotolitografialla tehty kuvio toimii ohjurina douppausprosessille, jossa kiekkoon tuodaan epäpuhtausatomeja ioni-implantaatio-prosessia käyttäen. Tällöin muodostuvat piirin aktiiviset laitteet, eli transistorit ja diodit. Tämän jälkeen litografiaprosessi toistetaan toisille kerroksille, kuten transistorien hiloille, jotka muodostetaan kristalloituneesta piistä ensimmäisessä iteraatiossa luotujen douppattujen alueiden päälle. Litografista prosessia käytetään ohjaamaan IC-valmistuksessa käytettävien muiden materiaalien sijoittumista lopullisille paikoilleen. Kiekolle valmistetaan kerros kerrallaan materiaalirakenteita litografian ohjaamiin paikkoihin, kunnes piiri on valmis.

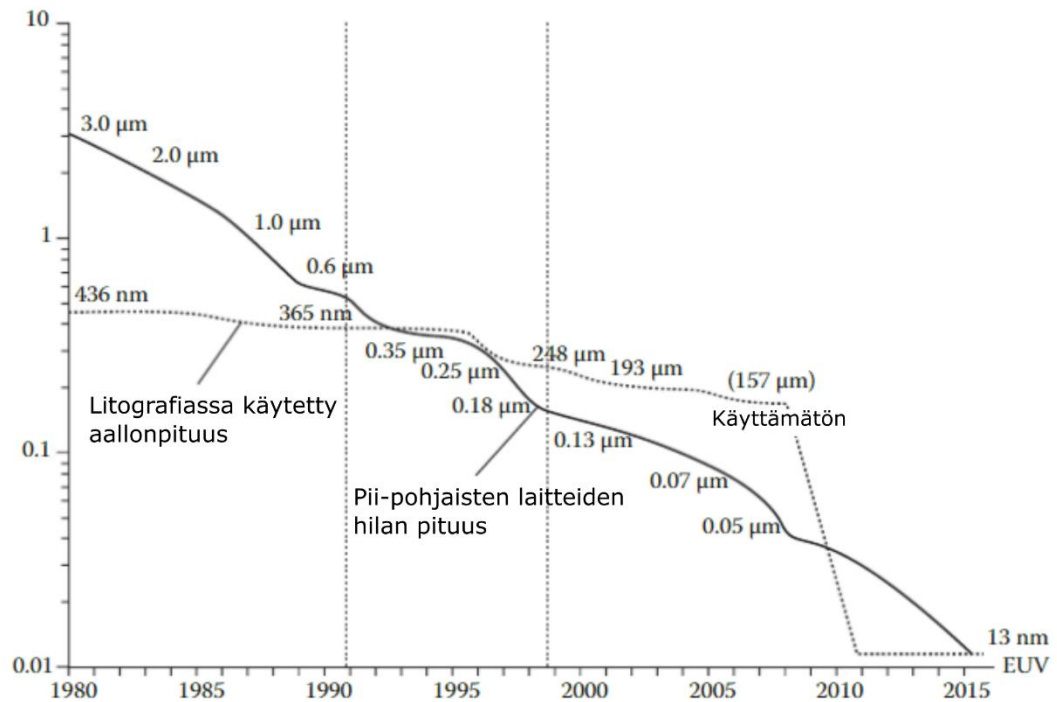
3. EUV-TEKNIikka SYRJÄYTTÄVÄNÄ VALMISTUSMENETELMÄNÄ

Teknologiayritysten vaatiessa suurempaa integraatiotiheyttä laitteilleen kävi jo 1980-luvulla ilmi, että fotolitografiaprosessin resoluution parantamiseksi on alettava tarkastelemaan aiemmin mainitun teoreettisen resoluution kaavan (1) nojassa keinoja, joilla litografisen prosessin resoluutiota voidaan saada paremmaksi [19]. Aiemmissä prosesseissa käytetty valon aallonpituus oli pitkään vakiintunut arvoon 193 nm ja tätä pienempien aallonpituuksien tekniikkaa ei ollut saatu käytännössä kannattavaksi toteuttaa.

Resoluutio-ongelmaan koitettiin kehittää ratkaisua 157 nm aallonpituuden tekniikkaan siirtymisellä, käyttäen valonlähteenä fosforipohjaisia lasereita (F_2) [20]. Aallonpituuden pienentämisellä olisi teoreettisen resoluution kaavan (1) mukaan resoluutiota parantava vaikutus, eli se sallisi pienempien yksityiskohtien valmistamisen kiekon pinnalle. Ongelmaksi koitui, että linssien valonläpäisy heikkeni huomattavasti tällä aallonpituudella, ja tavanomaisien piioksidilinssien valonläpäisy ei ollut enää riittävän suuri [20]. Optisen järjestelmän linssien materiaali vaihdettiin tämän takia kalsiumfluoridiksi (CaF_2), koska materiaalin valonläpäisykerroin oli suurempi. Linssien vaihtaminen ei kuitenkaan ratkaissut ongelmaa täydellisesti, sillä myös CaF_2 -linssillä oli havaittavissa valon absorptiota, joka kuumensi sekä linssijä että maskia [20]. Linssien kuumentuessa niiden taitekertoimen arvo ei pysynyt vakiona. Uusissa kalsiumfluoridimaskeissa havaittiin myös olevan 36 kertaa suurempi lämpölaajenemiskerroin kuin aiemmin käytetyillä piioksidimaskeilla, joka johti siihen, että maskilla esiintyneet kuviot eivät päätyneet oikeisiin sijainteihin kohdekiekolla [20]. Kehitysyrietykset 157 nm aallonpituudella toivat selväksi, että aiemmin käytetyssä taittaviin linssihin perustuvassa tekniikassa aallonpituuden pienennys ei ollut enää käypä ratkaisu.

Historiallisesti fotolitografian kehitysaskeleita on tehty myös valmistusteknisen vakion k_1 pienentämisen avulla. Vakion k_1 arvoa saatiin laskettua vaihtamalla valaisu tapa Off-axis Illumination -tekniikkaan sekä muokkaamalla maskeja resoluutiota parantavilla optimoinneilla kuten vaihesiirtomaskeilla. Resoluution parantamisen haasteeksi muodostui ongelma siitä, miten k_1 arvoa voitaisiin edelleen pienentää. [20] Lopulta tultiin tilanteeseen, jossa k_1 :n arvoa oli optimoitu niin paljon, että suurempi optimointi ei olisi enää kuluystävällistä. Lähestyttiin pistettä, jossa ei olisi enää rahallisesti kannattavaa pyrkiä pienentämään k_1 :n arvoa, vaan tulisi löytää jokin toinen keino parantaa resoluutiota. Oli siis tultu pisteeseen, missä sekä aallonpituus että k_1 arvo olivat kehityksen loppupäässä. Litogra-

fiassa käytetyn valon aallonpituuden kehitystä esitetään kuvassa 6, josta havaitaan uuden EUV-prosessin radikaali muutos käytettyyn aallonpituuden arvoon. Prosessivakion k_1 vaikutus nähdään laitteen hilan pienentymisenä myös ajalla, jolloin aallonpituus pysyy vakiona.



Kuva 6. Litografiassa käytetyn valon aallonpituuden sekä laitteiden kriittisen dimensioiden historiallinen kehitys vuoteen 2015 asti. Perustuu lähteeseen [17, p. 161].

EUV-litografia, eli englanniksi ”Extreme Ultraviolet Lithography”, saa nimensä prosessissa käytettyjen fotonien aallonpituudesta. EUV-tekniikassa fotonien aallonpituus on vakiintunut arvoon 13,5 nm, joka on huomasti pienempi aikaisempaan DUV-tekniikkaan verrattuna, jossa yleinen aallonpituus oli 193 nm. Aallonpituuden pienentyessä fotonin energia kasvaa Plankin kvanttihypoteesin mukaan seuraten kaavaa

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

missä h on plankin vakio ja c valon nopeus. Kun siirrytään 193 nm valoa käyttävästä tekniikasta EUV-tekniikkaan, nousee yksittäisen fotonin energia arvosta 6 eV arvoon 93 eV [14]. Fotonin energian kasvu on suuri syy siihen, miksi EUV-tekniikkaan siirtyminen tuottaa haasteita. EUV-fotoni absorboituu korkean energiansa takia materiaaliin niin herkästi, että jopa ilma riittää absorboimaan suuren osan siihen osuvasta valosta. [20] [21]

DUV-tekniikassa aikaisemmin käytetty taittava optiikka on vaihdettu EUV-prosessissa heijastavaan optiikkaan, koska korkeaenergiset fotonit eivät voi kulkea linssin läpi absorboitumatta sen materiaaleihin [20]. Samasta syystä aiemmassa tekniikassa käytettyä immersiolitografiaa, jossa valo kulkee veden läpi, ei voida enää käyttää EUV-tekniikassa. Tämä rajoittaa kaavassa (1) esiintyvän numeerisen aukon arvon olemaan maksimissaan 1, eli ilman taitekertoimen arvo.

3.1 EUV-tekniikan käyttökohteet

EUV-tekniikkaa käytetään toteuttamaan piirejä, joiden resoluutio on tarkempi kuin normaalilla litografialla on mahdollista tai taloudellista saavuttaa. Litografisen tekniikan hyvyysarvona toimii se, miten pieniä yksityiskohtia sillä pystytään toteuttamaan ja kuinka suuri määrä kiekkoja sillä pystytään valmistamaan aikayksikössä eli suoritusteho (engl. throughput).

Kun tarkastellaan sitä, miten pieniä transistoreja tekniikalla pystytään valmistamaan, voidaan tarkistella kaavassa (1) esitettyä resoluution arvoa. Tätä teknistä lukua ei kuitenkaan pidetä teknologian mittaavana hyvyysarvona alan markkinoinnin takia.

Prosessien kyvykkyyden luokitteluun ja keskenään vertailemiseen käytetään asteikkoa, jota kutsutaan teknologianoodiksi (engl. technology node). Noodilla viitattiin litografian alkuaikoina, vuosina 1960–1990, pienimpään transistorin hilaan, joka teknologialla oli mahdollista valmistaa. Enää noodilla ei ole sovittua tarkoitusta, vaikka historiassa sitä on yrittänyt määrittää muun muassa ITRS-yhteisö (engl. International Technology Roadmap for Semiconductors). Standardoinnin puuttuminen on johtanut siihen, että valmistajat voivat itse määrittää käyttämänsä noodin numeerisen arvon. Tämän takia eri valmistajien saman noodin prosessit eivät markkinoinnin takia enää vastaa toisiaan. [22]

EUV-tekniikkaa käytetään siirryttäessä 15 nm tai sitä pienempiin noodeihin, sillä tällöin DUV-prosessi ei ole enää taloudellinen [23]. EUV on siis käyttökelpoisinta pienillä viivanleveyksillä, sillä suurempia rakenteita toteuttaessa pystytään edelleen käyttämään vaikiintuneempaa ja täten halvempaa DUV-tekniikkaa. EUV:n valmistustekninen ongelma on se, että sen avulla tuotetuille transistoreille on vaikea luoda tarkkoja simulaatiomalleja [17]. Tämä johtaa siihen, että EUV soveltuu paremmin digitaalisiin piireihin kuin tarkkuutta ja simulaatiomalleja vaativaan analogiatekniikkaan. EUV-tekniikan saanto on myös suuresti riippuvainen siitä, käytetäänkö prosessissa maskinsuojuksia (engl. pellicle), jotka estävät maskien ennenaikaisen vikaantumisen [24]. Ilman maskinsuojusta häi-

riöiden määrä kasvaa liian suureksi, jotta EUV:ta olisi taloudellista käyttää logiikkaelementtien ja muiden vaativien piirien valmistamiseen. Kun maskinsuojuksia käytetään, on EUV-tekniikalla mahdollista toteuttaa myös haastavia piirejä, kuten matkapuhelimissa käytettyjä siruja. Tiettyjä toistuvia ja redundantteja piirejä, kuten DRAM-muistia voidaan valmistaa EUV-tekniikalla myös ilman maskinsuojuksia. [24] [25]

Eräs EUV-tekniikan tärkeä käyttökohde on altistusprosessissa käytettävien maskien lukumäärän vähentäminen [26]. Maskeilla on tietty kriittinen etäisyys, jota lähemmäs maskin kuviointit eivät voi tulla toisiaan. Tämä johtuu siitä, että myös maskit valmistetaan litografisten menetelmien avulla, joilla on tietty resoluution arvo. Joskus on tarpeen luoda kuviointia, joka on tarkempaa kuin maskin kyvykkyys. Tällöin kuvio jaetaan usealle maskille ja kuviointi tehdään useaan kertaan. Kuvan jakamisesta syntyy kuluja maskien tuottamisesta ja ylläpidosta. On huomattavaa, että jokainen ylimääräinen maski vaatii myös ylimääräisen valoaltistuksen. EUV-tekniikan osana kyetään valmistamaan maskeja, joiden kriittiset dimensiot ovat edeltäjiensä pienempiä [26]. Tämä mahdollistaa sen, että maskeja tarvitaan numeerisesti pienempi määrä. EUV-tekniikka säästää näin rahaa maskien lukumäärässä sekä kasvattaa prosessin suoritustehoa pienentämällä vaadittujen altistusvaiheiden määrää.

Vaikka EUV-tekniikkaa tutkitaan jopa 1 nm noodin tarkkuuksilla, ei EUV-tekniikan nähdä olevan vielä kypsää näillä tarkkuuksilla valmistamiseen [27]. Tämä johtuu aikaisemmin mainitusta prosessin toisesta tärkeästä hyvyysarvosta: suoritustehosta. Valmistusprosessissa suoritusteho määräytyy yksittäisten prosessivaiheiden nopeudesta sekä käytetyn piikiekon koosta. Suuremmalla kiekolla voidaan tuottaa enemmän piirejä, mutta usein kiekon kokoa pidetään vakiona. Tuolloin yksittäisten vaiheiden nopeus määrittää prosessin suoritustehon. Mitä suuremmalla nopeudella piirejä voidaan valmistaa, sitä kannattavammaksi valmistus tulee. Valmistusnopeus on ollut EUV-prosessille haasteellinen sen valopolulla tapahtuvien energiahäviöiden takia sekä siksi, ettei käytetyistä valolähteistä ole saatu tarvittavasti valotehoa [26]. Virstanpylväänä massavalmistukseen siirtymiselle pidetään suoritustehon arvoa 100 kiekkoa tunnissa (wph, engl. wafers per hour) [26] [28].

Yllä esitettyihin ongelmiin on vuosien saatossa löydetty ratkaisuja ja vuonna 2020 Samsung aloitti ensimmäisenä maailmassa EUV-litografiaan perustuvan massavalmistujärjestelmän Koreassa [29]. Valmistusmetodi perustuu 7 nm teknologiaan ja vaikka sen tarkkuus ei ole alalla saavutetuista tarkkuuksista suurin, on Samsungin lanseeraama teknologia ensimmäinen, joka pystyy saavuttamaan EUV-prosessilla tuotantonopeuksia, jotka ovat verrannollisia aikaisempien kehittyneiden prosessien nopeuksiin. Nyt 2021-

luvulla EUV-tekniikan suoritusteho on jo 170 wph [8]. Luku on kuitenkin edelleen pieni, kun sitä verrataan DUV-tekniikan saavuttamaan suoritustehon arvoon 300 wph [8].

On ennustettu, että 7 nm teknologia on viimeisiä noodeja, jotka tavanomaisella 193 nm valoa käyttävillä tekniikoilla saavutetaan ja että tämän jälkeen EUV-tekniikka syrjäyttää aikaisemman tekniikan [27]. Syrjäyttäminen johtuu suureksi osaksi DUV-tekniikan nopeammin kasvavista kuluista EUV:hen verrattuna. Kulut johtuvat käytettyjen resoluutionparannusmenetelmien määrästä sekä kasvavasta tarpeesta käyttää useampaa maskia yhtä kuviointia varten [26].

3.2 EUV-prosessi ja -laitteisto

EUV-prosessi koostuu samoista geometrian muodostuksen perusvaiheista kuin aikaisemmin käsitelty DUV-teknologia. Se noudattaa edelleen myös samoja kaavoja, jotka on käsitelty aikaisemmin tässä työssä. Vaikka perusvaiheet prosessien välillä ovat samat, on monta parametria ja lähestymistapaa täytynyt sovittaa toimimaan EUV-tekniikan kanssa. Suurimmat muutokset havaitaan valonlähteen sekä optiikkapolun toimintaperiaatteissa, joiden on molempien täytynyt muuttua teknologiassa käytettyjen fotonien korkean energian vuoksi.

Seuraavaksi tarkastellaan EUV-prosessin vaiheita yksi kerrallaan. Tarkastelussa pyritään selvittämään looginen syy muutoksille, tuomaan esille kriittisiä muuttujia sekä kuvaamaan EUV-prosessin toiminta.

3.2.1 Valonlähde

EUV-tekniikassa käytetään valoa, jonka aallonpituus 13,5 nm. Syitä siihen, miksi tekniikan aallonpituudeksi valittiin juuri 13,5 nm on monia. Kuten kappaleen 3 historiaosuudessa esitettiin, EUV-alueeseen siirtyminen johtui siitä, ettei taittavan optiikan käyttämistä ollut mahdollista jatkaa alhaisilla aallonpituuksilla. Tämä johtui taittavan optiikan valoa absorboivasta luonteesta. Piti siis siirtyä käyttämään heijastavaa optiikkaa. Koska muutos vaihtoi koko optiikkapolun toimintaperiaatetta, oli mahdollista harkita uudelleen käytetyn valon aallonpituus.

Aallonpituudeksi olisi voitu valita röntgensäteily, mutta valinnan ongelma on röntgenfotonien jopa EUV:ta korkeampi energia. Tämän takia niiden absorptio materiaaleihin on EUV:ta suurempi ja vielä vuonna 2005 ei ollut tiedossa yhtäkään materiaalia, joka pys-

tyisi edes heijastamaan valoa näillä aallonpituuksilla. Röntgenvalon käytön mahdollistamiseksi olisi myös siirryttävä läheisyyskuvointiin perustuvaan litografiaan, jossa valo kohdistetaan suoraan kiekolle maskilta, joka on lähellä kiekkoa. [30] Tämä tarkoittaisi, että aikaisempia projektiolitografian linssijärjestelmiä ja niihin kehittyneitä tekniikoita ei voitaisi käyttää enää hyväksi.

EUV-aallonpituuksien alueella (11–14 nm) on edelleen mahdollista tuottaa heijastavia pinnoitteita, ja täten voidaan käyttää hyväksi aikaisempaa ja pidempään kehitettyä projektiolitografiaa. Heijastavien pinnoitteiden toimivuus juuri 13,5 nm aallonpituuden ympäristössä ohjasi aallonpituuden valintaprosessia kohti tätä aallonpituutta [20] [21]. Muutoksessa tavoiteltiin mahdollisimman pientä aallonpituuden arvoa, koska sen avulla voidaan käyttää pienempää numeerisen aukon arvoa saavuttamaan sama resoluutio. [30] Pieni numeerisen aukon arvo puolestaan mahdollistaa fyysisesti pienemmät peilit, joiden valmistaminen on helpompaa ja halvempaa. EUV-aallonpituudet valittiin siis käyttöön siksi, että ne mahdollistavat suurimman parannuksen teoreettiseen resoluution kaavaan (1) muuttamatta käytettyä litografian kuviointimenetelmää projektiokuvioinnista läheisyyskuvointiin.

EUV-valoa tuotetaan radikaalisti erilaisella tavalla kuin aikaisemmissa fotolitografian valonlähteissä. Tämä johtuu siitä, että EUV-valon pieni aallonpituus tekee siitä niin korkeaaenergistä, ettei sitä voida tuottaa tavanomaisesti käytetyillä lasereilla, koska EUV-valo absorboituisi laserpoluissa käytettyihin materiaaleihin [20]. Aikaisemmassa valon tuottamisen tekniikassa käytettiin argonfluoridi-laseria (ArF), joka ohjattiin suoraan laitteiston valopolulle. Siirryttäessä EUV-tekniikkaan käytetään edelleen laseria, mutta sen funktio on hyvin erilainen. Laseria käytetään prosessissa, jota kutsutaan laser-tuotetuksi plasmaksi (engl. Laser-Produced Plasma) [28] [31].

Laser-tuotettu plasma perustuu atomien virittymiseen korkeille energiatasoille. Kun viritystila purkautuu, emittoi atomi fotonikvantin, jonka aallonpituus vastaa viritystilän purkautumisen vapauttamaa energiaa. Hyppyjä eri energiatasoilta tapahtuu paljon, kun virittyneiden atomien määrä saadaan suureksi. Tämän takia prosessissa luodaan atomeista hetkellisesti plasmaa, jossa kaikki atomit ovat korkeassa viritystilassa. Plasmaa luodaan tina-atomeista käyttäen avuksi tehokasta CO₂-laseria. [31] Prosessin kulkua havainnollistaa kuva 7. Prosessissa energia muuntuu laserin valotehosta tinan lämpöenergiaksi, joka virittää tinan elektroneja, jotka vapauttavat korkeampienergisää valokvantteja viritystilän purkautuessa. Lämpö toimii siis energianvälittäjänä pien- ja suurenergisten valokvanttien välillä.

havaittiin, että tuotetun 13,5 nm valon osuus, joka syntyy aikaisemmin huomiotta jätetystä viritystilalta viritystilalle siirtymisestä, on yllättäen jopa suurempi kuin perustilaan palatessa vapautuva valo. [34] Tinan sopivuus EUV-tekniikkaan selittyy siis sillä, että sen viritystilojen purkautumisessa vapautuvat energiat ovat fokuoituneet käytetyn EUV-aallonpituuden ympärille. Tällöin vapautuvasta valosta voidaan käyttää hyödyksi suurempi osuus.

Valo kerätään parabolisen peilin avulla ja ohjataan laitteiston optiikapolulle. Kerätty valo keskitetään hetkelliseen kohdennuspisteeseen (IF, engl. Intermediate focus). Systemin tuottaman valotehon määrä mitataan tästä kohdennuspisteessä eli keräysyksikön ulostulosta. Valoteho vaikuttaa siihen, kuinka monta kiekkoa voidaan altistaa tietyssä ajassa, eli suoritustehoon. EUV-valonlähteiltä vaaditaan ainakin 50 W valotehoa kokeellisissa järjestelmissä, mutta massatuotantoon pyrkiviltä laitteilta toivotaan 250 W tehoa, jotta systemin suoritusteho saadaan riittävän suureksi [28]. Heikon järjestelmän valotehon puutetta voidaan myös kompensoida resistillä, jonka aktivaatioenergia on normaalia pienempi [13]. 2020-luvulla on tultu tilanteeseen, jossa osalla valmistajista on jo käytössään 250 W EUV-valonlähteitä ja 500 W valonlähteiden toiminta on todennettu testeillä [35].

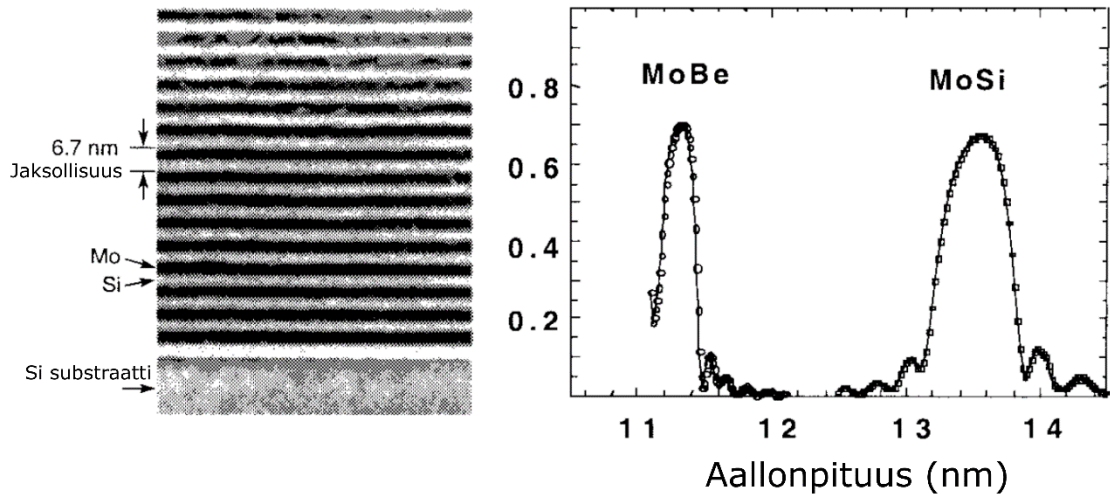
EUV-valonlähteen teho-ongelma on noussut siitä, että kohdennuspisteessä tapahtuvan tehon mittauksen jälkeen valo kulkee optisen polun läpi, joka koostuu useasta heijastusvaiheesta. Valonkerääjän tuottamasta valotehosta ainoastaan alle 1 % päätyy valopolun jälkeen kiekon pinnalle [28].

EUV-valonlähteyksikössä esiintyy myös toinen valotehohon liittyvä ongelma. Ongelma syntyy siitä, että valopolulle pääsee valoa, jonka aallonpituus ei ole suunnitellun mukainen 13,5 nm. Tämä valo aiheuttaa optiikapolulle päästessään sekä peilien lämpenemistä että peilien monikerrospinnoitteen heikentymistä ajan myötä [31]. Optiikapolulle kuulumatonta valoa syntyy monesta tinaplasman energiahypystä sekä CO₂-laserista optiikapolulle vuotavasta valosta. Optiikapolulle kuulumaton CO₂-laserin tuottama valo poistetaan käyttäen apuna infrapunafiltteriä ja lähellä haluttua 13,5 nm aallonpituutta olevat fotonit poistetaan spektrinpuhtausfiltterin avulla [32]. Näistä kahdesta infrapunafiltteri vastaa suuremmasta energian poistamisesta ja on sen takia yleensä vesijäähdytetty. CO₂-laserilta lähtevästä 20 kW tehosta jopa 10 % voi saapua infrapunafiltterille, jossa sen teho ohjataan pois valopolulta heijastamalla tai absorboimalla kyseiset fotonit. Infrapunafiltterille saapuvasta valosta pystytään poistamaan jopa 99,7 %, jolloin sitä seuraavan spektrinpuhtausfiltterin ei tarvitse kestää CO₂-laserin aiheuttamaa lämpötehoa [32]. Spektrinpuhtausfiltterin tehtävä on pienentää valonlähteen tuottama EUV-spektri sopimaan optiikapolulla käytettyjen peilien heijastuskaistalle. Hyväksyttävänä kaistana pidetään 13,3–13,7 nm kaistaa [36].

3.2.2 Maski ja valopolku

EUV-valopolku eroaa aikaisemmin käytetystä valopolusta tavalla, jolla valoa ohjataan. Koska EUV absorboituisi tavanomaisiin linsseihin, käytetään optiikkapolulla hyväksi pinnoituksia, jotka voivat kääntää valon etenemissuunnan, absorboimatta suurta osaa niille tulevista fotoneista. Pinnoitusten toimintaperiaate perustuu Bragg-interferenssiin ja niitä nimitetään tämän takia Bragg-heijastimiksi (engl. Bragg reflector) [28]. Heijastusominaisuudet saadaan aikaan monikerrospinnoitteella, joissa muodostetaan vuorottelevia kerroksia molybdeenistä ja piistä muodostaen MoSi-rakenne. Kerrosten paksuus yhdessä käytettyjen materiaalien kanssa on valittu niin, että interferenssi tapahtuu kerrosten välissä [17]. Pinnoitteen valmistus on kriittinen tekijä optiikkapolun toiminnalle, sillä valon eteneminen perustuu pinnoitteen ominaisuuksiin. Monikerrospinnoitetta käytetään jokaisessa optiikkapolun valoa ohjaavassa vaiheessa.

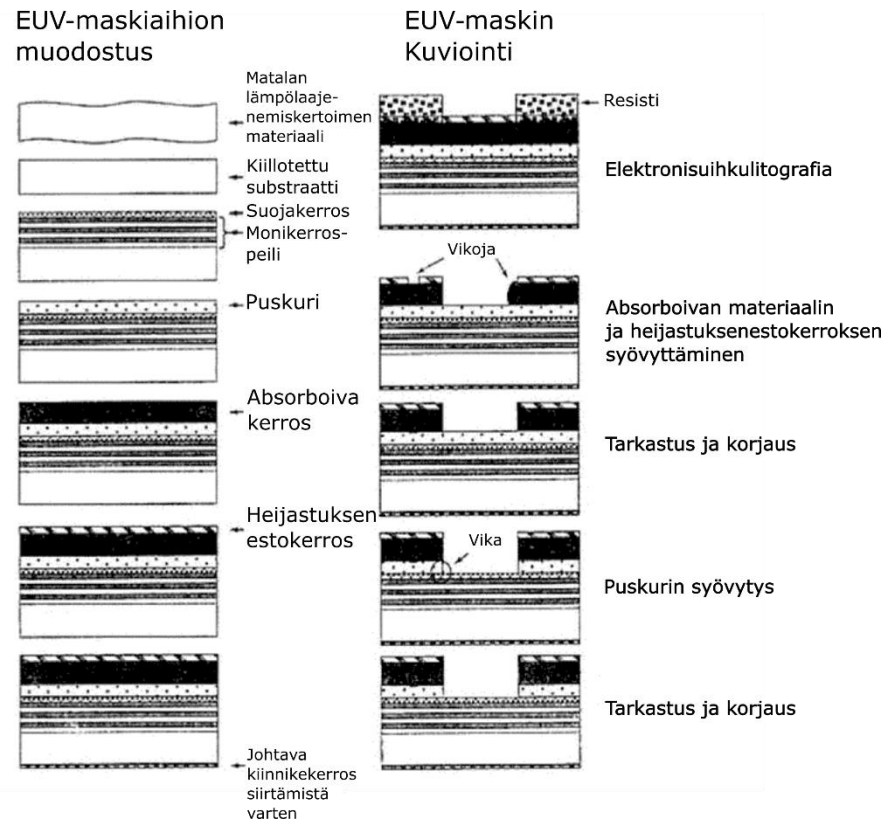
Optisella polulla käytettyjen peilien hyvyyttä mitataan niiden heijastavuuden arvolla, joka kuvaa sitä, kuinka suuri osa peilille tulevasta valosta saadaan heijastettua pois peilin pinnalta, jolloin se voi jatkaa kulkuaan seuraavaan prosessivaiheeseen. Valo, jota ei saada heijastettua, absorboituu peiliin nostaten sen lämpötilaa ja heikentäen peilin elinikää [31]. Lämpötilan nousu aiheuttaa peilissä lämpölaajenemista ja muokkaa linssin muotoa, jolloin osa valosta ei pääse haluttuun kohteeseen ja valoteho alenee. Tämän takia absorboituvan valon osuus halutaan minimoida. Monikerrosrakenteilla muodostetut peilit eivät yleensä pysty heijastamaan kuin 70 % niihin osuvasta valosta [19] [20] [28]. Monikerrosrakenteet on optimoitu heijastamaan prosessissa käytettyä 13,5 nm valoa ja sen takia niiden kaistanleveys on hyvin pieni. Pieni kaista toimii samalla suodattimena, joka poistaa optiikkapolulta sinne kuulumatonta valoa. Peilien toteuttama suodatus nostaa kuitenkin absorption takia niiden lämpötilaa, eikä ole yleisesti haluttua. Kuvassa 8 esitetään poikkileikkaus peileissä käytetystä monikerrospinnoituksesta sekä sen heijastavuus aallonpituuden funktiona. Kuvassa esiintyy myös MoBe-monikerrospinnoitteen heijastavuus funktio, josta käy ilmi monikerrostekniikan aiheuttama selektiivisyys.



Kuva 8. Poikkileikkaus piisubstraatin päälle muodostetusta monikerrospeilirakenteesta (vasen) sekä heijastetun valon osuus aallonpituuden funktiona kahdelle eri peilimateriaalille (oikea). Perustuu lähteeseen [20].

Monikerrospinnoitetta käytetään myös EUV-tekniikan heijastavissa maskeissa. Maskin tehtävä on ottaa sisään tasainen valoannos ja muodostaa ulosheijastuvaan valoannokseen haluttu kuviointi. Maski saavuttaa tämän asettamalla saapuvan valon tielle joko valoa heijastava tai absorboiva kerros. Maskeja, jotka perustuvat kahteen elementtiin kutsutaan binäärimaskeiksi [19]. Vaativammassa maskitekniikoissa käytetään avuksi myös maskin syvyyttä sekä vaihtetta muuttavia pinnoitteita [9]. Kehittyneitä maskitekniikoita käsitellään resoluutionparannustekniikoiden yhteydessä.

Maskin kuviointi luodaan käyttämällä elektronisuihkulitografiaa (engl. e-beam lithography). Prosessi alkaa aihion muodostuksella, jonka päälle kuviot myöhemmin muodostetaan. Kuvanmuodostuksessa käytetään läheisyyskuviointia. Tämän lisäksi resistin altistaa valon sijasta elektronisuihku. Aihio valmistetaan usein eri tehtaassa kuin missä maskin kuviointi tapahtuu. Aihion pohjamateriaalina käytetään materiaalia, jonka lämpölaajeneminen on mahdollisimman pientä kuvion epämuodostumisen estämiseksi. Sopivana materiaalina pidetään lasia, johon on sekoitettu titaanioksidia (TiO_2). Näin saavutetaan lämpölaajenemiskertoimen arvo, joka on alueella ± 10 ppb/K. [19] Valoa absorboivan kerroksen muodostamiseen voidaan käyttää monta erilaista materiaalia, mutta lupaavia materiaaleja ovat tantaalipohjaiset materiaalit, kuten tantaalinitriitti (TaN) [19] [25]. Maskin heijastavana elementtinä käytetään muuallakin optiikkapolulla käytettyjä monikerrospeilejä. Maskin valmistamisprosessia hahmottelee kuva 9.



Kuva 9. EUV-maskin valmistusprosessi. Perustuu lähteeseen [37].

Peilielementeistä poiketen, maskin käsittelyssä käytetään syövyttäviä aineita sekä lämpöä aiheuttavaa elektronialtistusta. Tämän takia maskin valmistuksessa on kiinnitettävä enemmän huomiota siihen, ettei monikerrospeilintekniikkaan synny vaurioita. Vaurioita voi syntyä happojen käytöstä, minkä takia peilielementti suojataan puskerikerroksen avulla hapoilta vaiheessa, jossa absorptiokerros kuvannetaan ja syövytetään. Lämpeneminen on myös haitallista monikerrospeileille. Kerroksien sisältämien molybdeenin ja piin lämmetessä yli 150 °C lämpötilaan alkavat alkuaineet muodostamaan yhdisteitä keskenään. Tämä pienentää efektivisten heijastinkerrosten korkeutta siirtäen peilin heijastuskaistaa pienemmille aallonpituuksille. Maskin kuumetessa liikaa tai liian pitkän ajan siirtyy maskin heijastama aallonpituusjakauma pois optiikkapolulla käytetyn aallonpituuden rajoista. Maskin lämpötilan nousu on tämän takia estettävä, jotta sen elinikä ei pienene. [19]

Monikerrospeilintekniikan kolmas ongelma on se, että sen päällimmäinen kerros oksidoiduu helposti jopa tavallisessa käytössä. Tämän takia kerroksia suojaamaan asetetaan usein kerros ruteniumia (Ru) [25]. Nämä materiaalit estävät ylimmän kerroksen oksidoitumisen samalla säilyttäen peilin heijastavan ominaisuuden [19].

EUV-litografiassa maskin koko on yleensä 4 kertaa suurempi kuin kuva, joka sillä heijastetaan kiekolle [5] [20]. Tämä helpottaa maskien huoltoa ja valmistusta. Suuremmalla

maskilla valon tuoma energia levittyy myös laajemmalle alueelle, jolloin maskin lämpeneminen ei tuota ongelmaa.

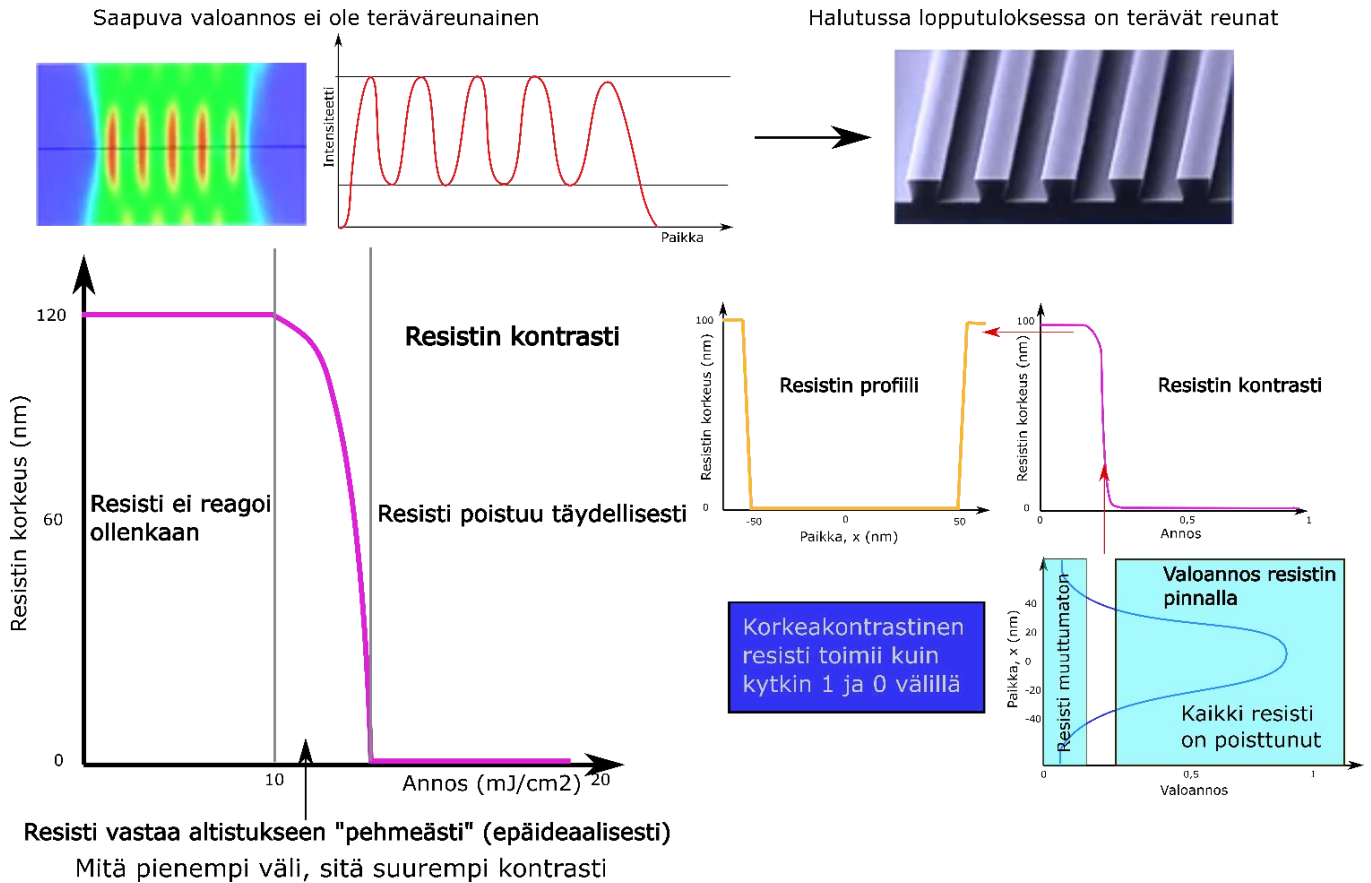
Valopolun kriittinen ominaisuus on se, että sen avulla valotehoa voidaan siirtää paikasta toiseen. Tämän takia on kriittistä, että käytetyt peilit ohjaavat valoa ainoastaan haluttuun kohteeseen, eikä valoa heijastu pois järjestelmästä. Tämä saavutetaan vaatimalla peileiltä äärimmäistä tasaisuutta sekä virheettömyyttä. Voidaan osoittaa, että jo 1 nm epätasaisuus monikerrospinnoitteessa voi johtaa 20 % menetykseen kiekolle saapuvan valon intensiteetissä [17]. Pinnan epätasaisuudet vaikuttavat myös aaltorintamavirheeseen (engl. wavefront error), jonka suuruus on riippuvainen aallonpituudesta. Koska EUV-tekniikassa käytetään 14 kertaa pienempää aallonpituutta kuin edeltävässä tekniikassa, on pinnoitusten epätasaisuudella myös 14 kertaa aikaisempaa suurempi vaikutus optiikkapolun tuottaman aaltorintaman virheeseen [14]. Tämän takia EUV-tekniikassa peilien pinta kiillotetaan tasaisuuteen, joka vastaa neliölliseltä keskiarvoltaan selvästi alle yhden pinta-atomin halkaisijaa [38]. Vuonna 2018 käytettyjen peilien pinnan karheus on noin 50 pm [39]. Tämä on selvästi alle piiatomin halkaisijan, joka on noin 200 pm.

Luvussa EUV-tekniikan käyttökohteet mainittiin optiikkapolulla vaihtoehtoisesti käytettävän maskinsuojuksen (engl. pellicle) tärkeys. Maskinsuojus on komponentti, joka suojaa maskia ennenaikaiselta vahingoittumiselta sekä pienentää puhdistuksen tarvetta. Se sijaitsee maskin päällä eli on osa valopolkua. Aikaisemmassa DUV-tekniikassa maskinsuojus on ollut helppo valmistaa, sillä moni materiaali on DUV-valoa läpäisevää. Kuten tiedämme, tämä ei ole enää totta EUV-tekniikassa. EUV-tekniikan heijastavan optiikan takia maskinsuojus läpäistään myös kaksi kertaa useammin kuin DUV-tekniikassa eli sekä sisään mennessä että ulos tullessa. Maskinsuojuksen käyttäminen EUV-tekniikassa vähentää tämän takia valotehoa huomattavasti johtaen suorituskyvyn alenemiseen. Maskinsuojus, jonka läpäisykerroin EUV-aallonpituudella on alle 90 %, voi pudottaa koko järjestelmän suoritustehoa 11–20 % [25]. Syy siihen, miksi maskinsuojus on kuitenkin tärkeä osa kokonaisuutta, on maskien vahingoittumisesta aiheutuva saannon laskeminen [24]. Jos maskinsuojusta ei käytetä maskille, jolla kuvannetaan yksittäinen piiri, voi yksikin häiriö maskissa johtaa siihen, että 100 % sillä tuotetuista piireistä on virheellisiä [25]. Maskinsuojuksen käyttö on siis kompromissi suoritustehon sekä virheellisten piirien minimoinnin kesken.

3.2.3 Resisti

EUV-resisti toimii eri tavalla kuin aikaisemmin käytetty resisti johtuen siitä, että EUV-fotoneilla on yli 14 kertaa suurempi energia kuin DUV-fotoneilla. Kun resistiin osuvan fotonin energia oli vielä pieni, aiheutti yksi fotoni resistiin osuessaan sen, että yksi elektroni poistui resistissä olevan valoa sitovan kromoforimolekyylin sitovalta orbitaalilta. Kun näin tapahtuu, kromoforimolekyyli hajoaa ja tuottaa happomolekyylin, jonka avulla latentti kuva muodostuu [40]. Resisti altistuu tällöin siis ainoastaan kohdasta, johon fotoni kohdistuu. EUV-resistiä tarkastellessa havaitaan, että EUV-fotonilla on tarpeeksi energiaa ionisoida kokonaisia resistimolekyylejä. EUV-fotonin osuessa resistiin synnyttää se ensin niin kutsutun fotoelektronin, joka on korkeaenerginen elektroni. Tämä elektroni törmää rakenteessa oleviin toisiin elektroneihin ja aiheuttaa sekundaaristen matalaenergistien elektronien irtoamisen. Nämä sekundaariset elektronit johtavat lopulta happomolekyylien muodostumiseen. Yksi EUV-fotoni aiheuttaa usein noin 2–3 sekundaarista elektronia. [40] Sekundaariset elektronit eivät synny tiettyyn haluttuun paikkaan, koska elektronien törmäykset ovat sattumanvaraisia. Tämä aiheuttaa EUV-tekniikassa kuvan sumentumista [41].

EUV-tekniikalla valmistettävien laitteiden pienten kokoluokkien takia resistiltä vaaditaan edellistä enemmän apua kuvan muodostamisprosessissa. Resistille saapuva valoannos on aina pehmeäreunainen optiikkapolulla tapahtuvan paikkataajuuksien alipäästösuodattumisen takia [9]. Yksi resistin tärkeimmistä tehtävistä on toimia yhdessä maskin tarjoaman valoannoksen kanssa ja korjata reunojen pehmeys, jotta kuviot saadaan esitettyä teräväreunaisina [42]. Tämä saavutetaan resistin ominaisuudella, jota kutsutaan resistin kontrastiksi. Resistin kontrasti kertoo, miten resisti muuttaa liukenemisominaisuuksiaan siihen osuvan valon takia. Tarkemmin, resistin kontrasti kuvaa liukenemisen jälkeisen resistikerroksen korkeuden muutoksen äkillisyyttä. Resistin yhteistoimintaa valopolun kanssa sekä resistin tehtävän kriittistä tekijää, kontrastia, havainnollistaa kuva 10, josta käy ilmi kiekolle saapuva valoannos sekä haluttu lopputulos. Lopputulos saavutetaan resistin kontrastin avulla. Ideaalisella resistillä kaikki resisti muuttuisi liukenevaksi vasta tietyn kynnsarvon ylittyessä, mutta todellisuudessa osa resististä liukenee jo ennen kynnsarvoa.



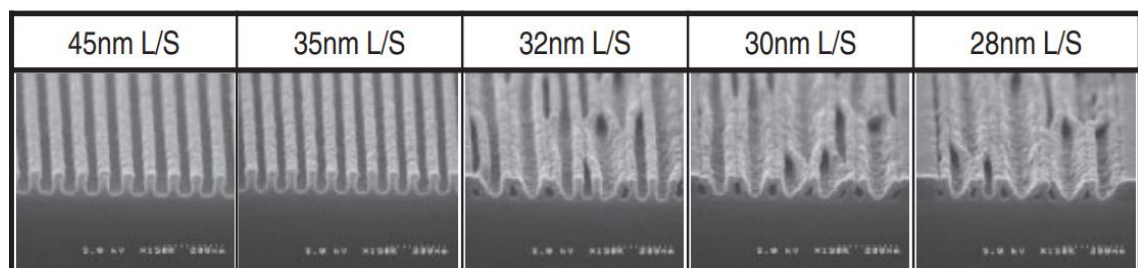
Kuva 10. Resistin kontrasti (vas.) toimii funktiona, joka muuntaa pehmeäreunaisesta valoannoksesta teräväreunaisen kuvioinnin (oik.). Perustuu lähteeseen [42].

Toinen haaste, joka EUV-resistejä koettelee, on DUV-tekniikassakin esiintyvä viivan reunan karheus (LER, engl. Line Edge Roughness) sekä viivanleveyden karheus (LWR, engl. Line Width Roughness). Tämä ilmiö johtuu resistin kemiallisen kehittymisen epätasaisuudesta. Keskellä viivaa resistin kehittyminen on tasaista, mutta viivan reunalla havaitaan liukenevuuden äkillisen muutoksen takia epäideaalisuuksia. Epäideaalisuudet johtuvat happomolekyylien sijainneista, niiden konsentraatiosta sekä yksittäisten molekyylien kontrastiominaisuuksien vaihtelusta. Reunalle tuleva valoannos muuttaa osan reunalla olevista molekyyleistä liukenevaan muotoon, mutta jättää osan muuttumattomiksi. Tämä aiheuttaa reunalle epätasaisuutta, joka on riippuvainen puoliiksi liunneen välialueen leveyteen. [41] Reunan epätasaisuus on EUV-tekniikassa entistä suurempaa, koska korkeaenergiset fotonit aiheuttavat raekohinaa, joka esiintyy vahvimmin kuvion reunalla [14]. Viivan epätasaisuutta voidaan pienentää nostamalla reunalla olevien liukenevuuden määrittävien kemikaalien konsentraatiogradienttia [41]. Viivan karheus näkyy muodostettujen laitteiden ominaisuuksien vaihteluna ja tämän takia LER-arvon pienentäminen on tärkeää toistettavuuden sekä simulaatiomallien oikeellisuuden näkökulmasta. LER-arvo voi olla hyvässäkin tapauksessa jopa 20 % kriittisen dimension koosta.

16 nm kriittisen dimension reunan karheudeksi on pystytty saavuttamaan 3,3 nm käyttäen kemiallisesti vahvistettua EUV-resistiä [43].

Kolmas haaste EUV-resisteille on kompromissi, joka syntyy resistin kemiallisia ominaisuuksia sovittaessa. Kompromissi syntyy resoluution, LER-arvon sekä resistin herkkyyden välille ja sitä pidetään resistisuunnittelun keskeisenä kompromissina [14]. Yhden parametrin parantamisen havaitaan heikentävän molempia muita parametreja. Parametreja voidaan muokata käyttämällä erilaisia materiaaleja sekä vaihtamalla esiintyvien aineiden konsentraatioita. Kemiallisesti vahvistetussa resistissä korostuu valoon reagoivien happojen ominaisuuksien optimointi [9] [41]. Kemiallisesti vahvistettujen resistien pohjamateriaalina on toiminut erilaisia polymeerejä, mutta kehitystyötä on tehty myös lasipohjaisten pohjamateriaalien suuntaan [41]. Materiaalien valintaa helpottamaan on kehitetty hyvyysarvo, joka perustuu resoluutio-LER-herkkyys-kompromissin tekemiseen. Hyvyysarvoa kutsutaan z-tekijäksi (engl. z-factor), ja sen laskemisessa huomioidaan kaikki kompromissin osatekijät [8]. Z-tekijän avulla voidaan löytää materiaali, joka täyttää samaan aikaan kaikki vaaditut optimointitehtävät, ja omaa täten suurimman potentiaalin. Markkinoiden johtavan resistin z-tekijän arvo on 2020-luvulla $0,7 \cdot 10^{-6} mJ nm^3$ ja se on puoliintunut vuoden 2018 arvosta [44].

Neljäs haaste resisteille on niiden kerrospaksuus. Liian korkea kerrospaksuus johtaa siihen, että havaitaan kuvionromahtamisilmiötä, jota havainnollistaa kuva 11. Kerrosten romahtaminen johtuu kapilaari-ilmion aiheuttamista voimista, joiden vaikutus on suurin resistissä olevan liuottimen haihtuessa [14]. Romahtamisilmiö voidaan minimoida ohentamalla resistin paksuutta, mutta tällöin törmätään toiseen ongelmaan. Ohuempi kerros resistiä tarkoittaa sitä, että resistin on kyettävä vastustamaan etsauksessa käytettäviä happoja entistä tehokkaammin [41]. Ongelmaksi koituu myös se, että osa resistiin tulevasta valosta ei pysähdy resistiin, vaan jatkaa matkaansa sen läpi. Lämpäisevien fotonien määrä kasvaa resistin ohentuessa. Tämä tarkoittaa sitä, että resistin alla kiekolla sijaitsevat piirit saavat kokea suuremman annoksen säteilyä, mikä herättää luotettavuushuolia niiden toiminnassa [17].



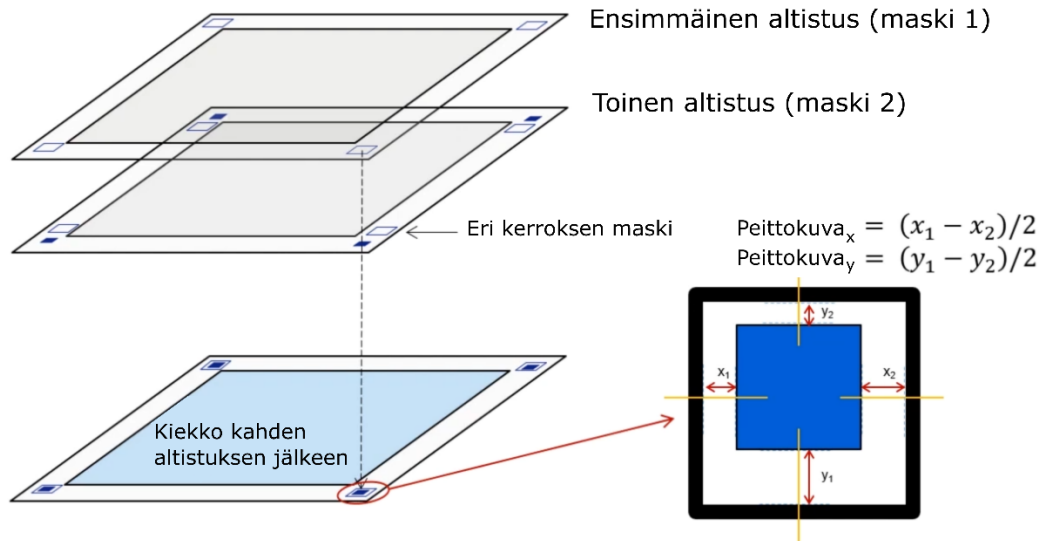
Kuva 11. Kuvionromahtamisilmiö pahentuu kuviointiheyden kasvaessa. L/S viittaa kuvioinnissa käytettyyn viivan (engl. line) ja välin (engl. space) 1:1 suhteeseen [41].

Kuvionromahdusilmiö on tärkeä siksi, että vaikka optiikan avulla pystytään tekemään tarkkoja kuvioita, ei niitä voida realisoida, jos resisti ei pidä muotoaan. Resistikerroksen ohentamisella havaitaan kuvionromahduksen estämisen lisäksi olevan muitakin hyödyllisiä ominaisuuksia. Kun resisti on ohutta se absorboi valoa tasaisemmin syvyys suunnassa. Tämän lisäksi fotoelektronien törmäyksistä johtuvaa havainnoidun valokeilan suurenemista (engl. forward scattering) ei ehdi tapahtua yhtä paljon ohuessa resistissä, mikä pitää resistin läpäisevän valokeilan yhtenäisenä [17]. Kuvionromahdusilmiö on suuri syy siihen, miksi on määritetty, että noodin pienentyessä resistikerroksen paksuutta ohennetaan [41]. EUV-resistin kerrospaksuus vaihtelee nanometreistä mikrometreihin.

3.2.4 Ohjauslaitteisto ja resoluutionparannustekniikat

EUV-tekniikassa yhden maskin kuvio toistetaan kiekolle noin 100 kertaa, jolloin luodaan vierekkäin monia piirejä yhdelle kiekolle. Tämä prosessi vaatii samanaikaisesti tarkkuutta ja nopeutta. EUV-tekniikassa käytetään askella ja skannaa -tekniikkaa, jossa samanaikaisesti liikutetaan sekä maskia että kiekkoa valoannoksen samaan aikaan tullessa systeemin läpi ja altistaen kiekon. Vaihetta kutsutaan skanneriksi ja se on valopolun viimeinen vaihe. Yhden valoannoksen aikana skannataan maski reunasta toiseen yhden kerran, jonka jälkeen valoannos loppuu ja maski palautetaan alkuasentoonsa. Seuraavalla altistuksella skannaus toistetaan kiekolla olevaan viereiseen tilaan. [5]

Koska nanometriskaalalla mikään materiaali ei ole tasainen, ja koska kuviointi tulee kohdistaa eri kerrosten välillä, toteutetaan skannerissa piikiekon ominaisuuksien ja asennon mittaus ennen kiekon altistamista. Mittauksen avulla saadaan tietoa siitä, millainen kohdekappale on ja miten siihen on optimaalista luoda kuvioita. Mittausvaiheessa tarkastellaan myös kohdistusmerkkejä, joiden avulla saadaan tietoa prosessin kulusta ja siitä, miten kerrokset on onnistuttu kasaamaan toistensa päälle. [5] On olemassa monia erilaisia kohdistusmerkkejä, mutta yksinkertaisin kohdistusmerkki on piirittömään kohtaan, eli altistuksen reunalle, luotu neliö neliön sisässä -kuvio, joka esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Kohdistamismerkkien avulla parannetaan prosessin kyvykkyyttä sekä kerätään tietoa toteutuneesta kuvioinnista seuraavia altistuksia varten. Perustuu lähteeseen [5].

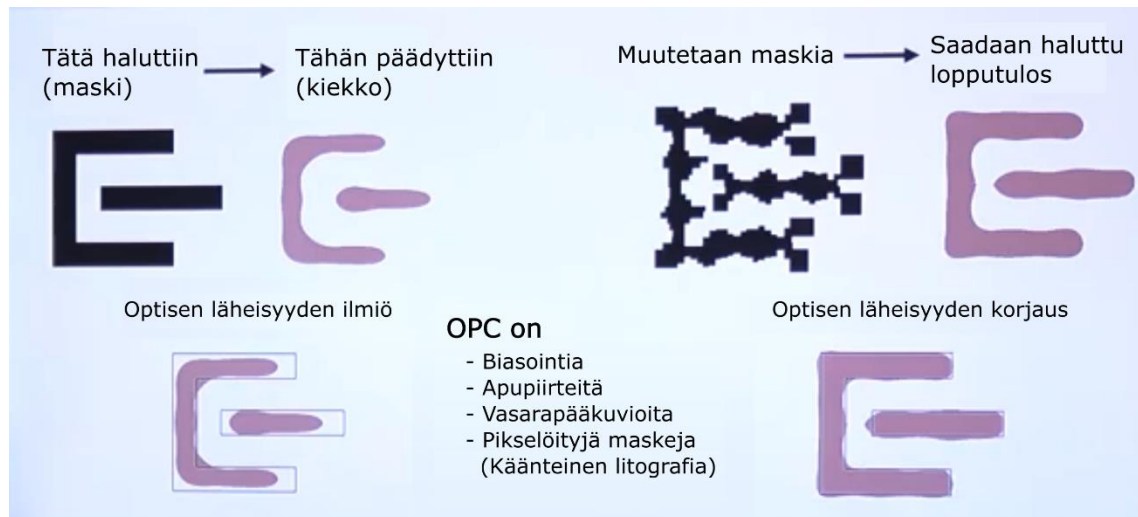
Skannerin ohjauslaitteistossa kerätään jatkuvasti tietoa kiekon tilasta sekä itse järjestelmän komponenteista. Kohdistusinformaation lisäksi skannerissa seurataan linssin, maskin sekä kiekon lämpenemistä ja optisten sekä fyysisten ominaisuuksien muutoksia. Tämän lisäksi otetaan huomioon optiikkapolun ja maskien systemaattiset viat sekä kiekon käsittelyvaiheista johtuvat kohdistamismerkkien vääristymiset. Näistä kaikista systemaattisista sekä mitatuista tiloista muodostetaan kiekolle korjausvektorit, joita käytetään takaisinkytkennässä poistamaan systemaattisten sekä hitaasti muuttuvien vikojen vaikutuksia. [5] Ohjauslaitteiston tehtävä on pitää prosessi mahdollisimman toistettavana ja poistaa estettävissä olevia virheitä.

Seuraavaksi siirrytään resoluutionparannustekniikoihin, joiden avulla voidaan madaltaa kaavassa (1) esiintyvän prosessimuuttujan k_1 arvoa. Yleisesti käytettyjä resoluutionparannustekniikoita on kolme, ja ne käydään läpi ekonomisesti halvimmasta aloittaen.

Optisen läheisyyden korjaukseksi nimetty tekniikka pyrkii muokkaamaan maskille tehtävää kuvaa siten, että lopputuloksena saadaan aikaan suunnitellun mukaisempi kuva kiekolle. Optisen läheisyyden korjauksella muutetaan siis maskille tehtävää geometriaa, joka tarkoittaa, että tekniikan käyttämisen hinta on ainoastaan laskennalliseen tehoon sekä mallintamiseen vaadittava kulu. Tekniikkaa voidaan siis soveltaa lisäämättä itse prosessiin yhtäkään vaihetta.

Syy sille, miksi litografisissa systeemeissä syntyy optisen läheisyyden aiheuttamia efektejä, johtuu siitä, että litografiset systeemit ovat usein diffraktiorajoitteisia. Tämä tarkoittaa

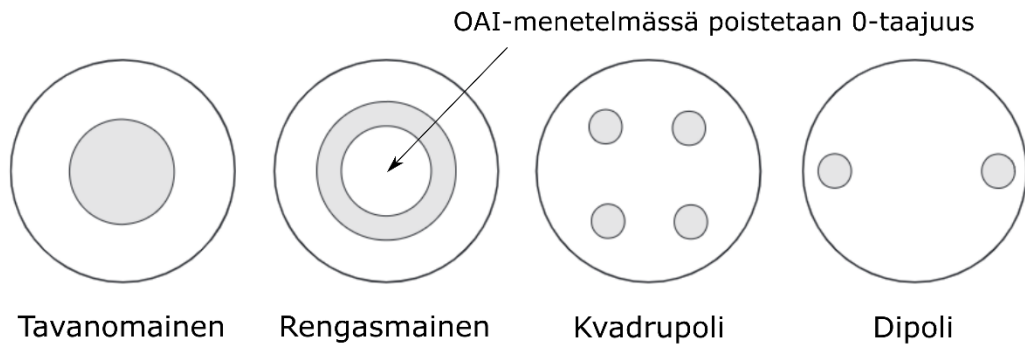
taa sitä, että niiden tuottama resoluutio on jo yhtälön (1) osoittamalla teoreettisen resoluution rajalla. Tämä aiheuttaa sen, että spatiaalinen informaatio alipäästösuodattuu, jolloin terävien kulmien vaatima tieto poistuu järjestelmästä. [9] Tieto terävistä kulmista voidaan tuottaa muuttamalla maskin kuviointia optisen läheisyyden korjausmenetelmien (OPC) avulla, joiden vaikutusta esittää kuva 13.



Kuva 13. Optisen läheisyyden korjausmenetelmän vaikutus maskigeometriaan. Perustuu lähteeseen [2].

Toinen yleisesti käytetty resoluutionparannustekniikka on off-axis illumination -tekniikka (OAI), jossa muokataan maskia valaisevan valon ominaisuuksia. Tekniikka saa nimensä siitä, että valosta poistetaan kohtisuorassa maskin kanssa olevat valon komponentit, joita kutsutaan on-axis-komponenteiksi. Tämä saavutetaan käyttämällä valonlähteen muokkaamiseen peilimatriisia, jotka voidaan ohjelmiston avulla asettaa asentoon, joka luo halutun valaisukuvion [38]. Koska laitteisto voidaan ohjelmoida toimimaan automaattisesti, luo OAI-tekniikan käyttäminen kuluja pääosaksi suunnittelussa.

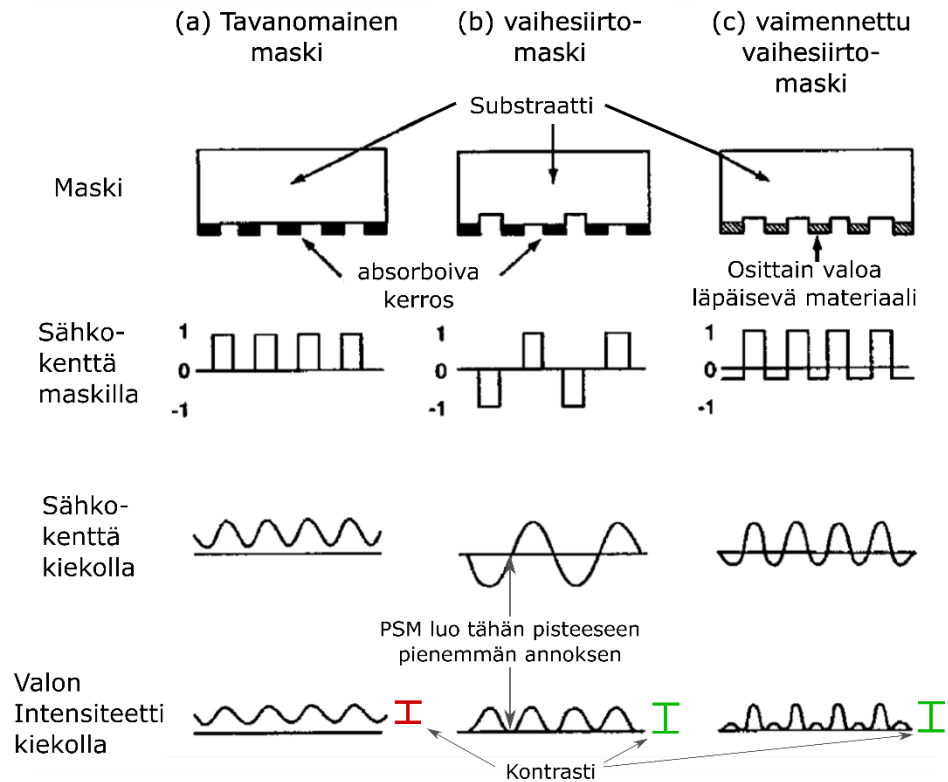
OAI-menetelmää tarkastellessa käytetään maskille saapuvan valon Fourier-muunnosta paikkatasossa (eng. spatial frequency). Kuva 14 havainnollistaa paikkataajuuksien amplitudeja erilaisissa OAI-menetelmissä. Näissä menetelmissä nollataajuuden taajuuskomponentti poistetaan valaisevasta säteestä. Menetelmän avulla voidaan parantaa resoluutiota, mutta sen suuri etu on siinä, että se parantaa optisen järjestelmän epäherkkyttä tarkennusvirheille [9]. Tämä on suuri etu, sillä tarkennusvirheet ovat yleisiä ja niiden vaikutus on kuvion tuhoutuminen. OAI-menetelmässä tehdään oletus siitä, että järjestelmässä ei koskaan saavuteta täydellistä tarkennusta, ja siihen varaudutaan. OAI-menetelmän heikkous on se, että se toimii optimaalisesti vain sovitetuille toistuvuusvälin arvoille [9].



Kuva 14. OAI-menetelmässä yleisesti käytössä olevat valaisumenetelmät sekä tavanomainen on-axis kuvio. Kuva esittää valon amplitudin jakautumista eri paikkataajuuksille, kun se mitataan objektiivin aukolta. Ulompi ympyrä esittää linssin rajataajuutta. Perustuu lähteeseen [3].

Kolmas ja viimeinen yleisesti käytetty resoluutionparannustekniikka on vaihesiirtomaski (PSM). Vaihesiirtomaski-tekniikassa muodostetaan maskin pinnalle valoa viivästyttävä elementti, jolla pyritään luomaan kahden kuvion välille 180° vaihesiirto [9]. PSM-menetelmä vaatii fyysisiä muutoksia maskiin, eikä ole automaattinen. Tämän takia PSM-tekniikka on menetelmistä kallein implementoida.

Kun PSM-maskin avulla muodostetaan 180° vaihesiirto, saadaan kahden vierekkäisen valokeilan superposition keskipisteeseen luotua aikaisempaa tummempaa kohta [9]. Tämä kasvattaa optista kontrastia, eli eroa valon korkean ja matalan intensiteettitason välillä. Valon vaiheen muokkauksen vaikutusta kiekolla näkyvään valokeilan intensiteettiin hahmottelee kuva 15. Kuvassa esiintyy myös PSM-tekniikan johdannainen vaimennettu vaihesiirtomaski -menetelmä (engl. attenuating phase-shifting mask).



Kuva 15. PSM-tekniikka perustuu valon vaiheen kääntämiseen niin, että kuvannettavissa matalan intensiteetin pisteissä pystytään laskemaan intensiteetin tasoa. Tämä nostaa optista kontrastia. Perustuu lähteeseen [45].

Kuten OAI-tekniikassa vaihesiirtomaski poistaa nollannen taajuuskomponentin heijastusta valosta. Tämä johtuu siitä, että nollannen asteen valo heijastuu kohteeseen sekä 0° että 180° vaihesiirretystä osasta maskia, jolloin se interferoi destruktiivisesti itsensä kanssa. PSM-tekniikassa saavutetaan myös OAI-tekniikassa havaittu epäherkkyyden kasvaminen tarkennusvirheitä kohtaan. Toisin kuin OAI-tekniikassa, PSM-tekniikka säilyttää tarkkuutensa kaikille eri toistuvuusvälin arvoille. PSM-tekniikan ongelma on se, että se vaikeuttaa layout-prosessia ja estää tiettyjen rakenteiden muodostamista. Tämä johtuu siitä, että muodostettujen rakenteiden on sovittava yhteen niin, että vedetyn viivan eri puolilla on aina eri vaiheen omaava osa maskia. Tämä estää muun muassa T-risteyksien muodostamisen. [9]

3.3 EUV-tekniikan kehityssunnat

Vuoden 2021 helmikuussa pidettiin konferenssi nimeltä SPIE2021, jossa esitettiin EUV-tekniikan tämänhetkistä tilannetta ja tehtiin arvioita tulevaisuuden tärkeistä kehityskoh-teista ja uusista laitteistoista [8] [44]. Tässä kappaleessa tutustumme siihen, minkälai-selta EUV-tekniikan tulevaisuus näyttää alan asiantuntijoiden mukaan.

EUV-tekniikan suurin valmistaja ASML toimittaa tällä hetkellä koneita, joiden numeerisen aukon arvo on 0,33. Näillä koneilla tuotetaan 7 nm noodin laitteita vauhdilla 170 wph. Systemejä, joiden optiikka käyttää 0,33 NA linssettä kutsutaan matalan numeerisen au-kon systeemeiksi. Tämä johtuu siitä, että DUV-tekniikalla on aikaisemmin saavutettu suurempia jopa 1,35 NA-arvoja immersiolitografian avulla [15]. EUV-tekniikan seuraava suurimpana harppauksena nähdään siirtyminen korkean numeerisen aukon lait-teistoon. Näissä laitteissa NA-arvo nousee arvoon 0,55. Tällöin saavutetaan kaavan (1) ennustuksen mukaan parempi resoluutio. Tämän lisäksi 0,55 NA laitteistolle ennuste-taan 15 % lyhyempää prosessiaikaa, 15 % pienempiä rahallisia kustannuksia sekä 20 % vähempää fyysistä tilantarvetta tehtaassa. Korkean NA-tekniikan ensimmäisen testilait-teiston oletetaan valmistuvan 2022-luvun loppupuolella, ja sille ennustetaan suorituste-hoksi 185 wph. Vastaavan massatuotantolaitteen kehityksen oletetaan siirtyvän markki-noille vasta 2025/2026-luvulla. Tuolloin sitä käytetään oletusten mukaan 3 nm tai 1,5 nm noodin laitteiden valmistamiseen. [8]

Konferenssiesitysten mukaan resisteissä esiintyvän resoluutio-LER-herkkyys-kompro-missin takia on alettu tutkimaan vaihtoehtoisia EUV-resistejä, jotka aikaisemmasta poi-keten eivät enää olisi kemiallisesti vahvistettuja [8] [44]. Näin on saatu parannettua re-sistin z-arvoa ja voidaan olettaa, että tämä johtaa tulevaisuudessa myös kemiallisesti vahvistamattomien resistien laajempaan käyttöön.

Resistiteknologiassa käytetään edelleen liuotinpohjaista märkäresistiä. On osoitettu, että resisti voidaan pinnoittaa kiekolle myös ilman liuotinta, käyttäen apuna kaasufaasipin-noitusta tekniikassa, jota kutsutaan kuivaresistiksi. Tässä tekniikassa resistikerroksen korkeutta voidaan ohjata tarkemmin, joka antaa mahdollisuuden optimoida korkeus so-pivaksi muiden resistin ominaisuuksien kanssa. Tällöin voidaan parantaa z-arvoa sekä saantoa. Kuivaresisti ohittaa myös märkäresistin kokeman viskositeetin, kemiallisen va-kauden sekä varastointiajan ongelmat, koska se ei ole nestepohjainen eikä tarvitse lisä-aineita toimiakseen. Kuivaresistissä havaitaan myös paljon vähemmän kuvioinninromah-tamisilmiötä, mikä johtuu siitä, että prosessissa ei synny kapilaarivoimia nesteiden takia.

[46] Koska kuivaresistitekniikka ratkaisee niin monta ongelmaa, on todennäköistä, että sitä aletaan käyttämään tulevaisuuden EUV-prosesseissa.

Maskinsuojuksien on nähty olevan kriittinen tekijä EUV-prosessin saannon nostamiseen. Syy sille, miksi niitä ei olla vielä käytetty on se, että ne absorboivat liikaa valoa [24]. Alalla on pidetty kannattavuuden virstanpylväänä hetkeä, jolloin maskinsuojuksen EUV-valonläpäisevyys ylittää 90 % arvon [25]. Tämän pisteen jälkeen maskinsuojuksen aiheuttaman saannon nousemisen nähdään tuovan enemmän hyötyä kuin tuottavuuden lasku vie pois. ASML:n tuottamien kaupallisten maskinsuojuksien valonläpäisevyys on tällä hetkellä arvossa 88 %, mutta Imec-yrityksellä kehityksessä olevalla prototyypillä on mitattu jo 97,7 % valonläpäisevyyden arvo [25]. Maskinsuojuksien valonläpäisyn kasvaessa on oletettavaa, että useammat valmistajat siirtyvät käyttämään maskinsuojuksia osana kuluoptimointia.

4. YHTEENVETO

EUV-tekniikka on litografinen valmistusmenetelmä, jolla pyritään valmistamaan aikaisempaa teknologiaa pienempiä yksityiskohtia sekä pienentämään valmistuskuluja. EUV-tekniikka on relevanttia siksi, että sen avulla pystytään tuottamaan tarkempia kuvia kiekolle. Toinen relevanttuitta nostava tekijä on tekniikan hinta. EUV-tekniikan aiheuttamat toistuvat kulut maskeissa sekä resoluutionparannustekniikoissa nousevat hitaammin kuin DUV-tekniikan nopeasti kasvavat kulut. EUV-tekniikka on taloudellisesti tilanteessa, jossa laitteiston hankintahinta on suuri, mutta toistuvat kulut laskevat. EUV-tekniikka on tämän takia otollinen massavalmistukseen sekä kuluoptimointiin yhdessä DUV-laitteiston kanssa käytettynä.

EUV-laitteisto toimii 13,5 nm valolla ja käyttää optisella polullaan heijastavia peilejä linsien sijaan. Peilien heijastavuus aikaansaadaan MoSi-monikerrospinoitteella. Käytetty valo synnytetään tinasta muokkaamalla siitä laserien avulla plasmaa. Optiikkapolulla käytetään peilejä sekä maskioptimointia muokkaamaan valoannosta resoluutionparannustekniikojen avulla. Kiekolle saapuvat fotonit muodostavat resistille kuvan aiheuttamalla elektronien välisen ketjureaktion.

EUV-tekniikka eroaa aikaisemmasta tekniikasta kaikilla yllä mainituilla osa-alueilla, paitsi resoluutionparannusmenetelmillä. Eroavaisuudet johtuvat käytettyjen fotonien energiasta, joka on korkeampi EUV-fotoneilla. Tekniikkojen eroavaisuudet on esitetty kootusti taulukossa 1.

Taulukko 1. EUV- ja DUV-tekniikoiden eroavaisuudet.

	DUV	EUV
Valon aallonpituus	193 nm	13,5 nm
Järjestelmän numeerinen aukko	1,35	0,33
Ennustettu pienin noodi	7 nm	< 1 nm
Suoritusteho	300 wph	170 wph
Optiikkapolku	Taittava linssi	Heijastava peili
Valonlähde	Laser	Laser-tuotettu plasma
Resistin aktivointi	Fotonin osuapisteessä yksi altistus	Osumapisteestä hajaantuva ketjureaktio, joka altistaa monta happoa
Resistin toimintaperiaate	Kemiallisesti vahvistettu	Vahvistamaton
Optiikkapolun väliaine	ilma/vesi	tyhjiö

EUV-tekniikan kriittisiä muuttujia ja tekniikoita käsiteltiin kussakin alaluvussa. Tärkeimmiksi muuttujiksi voidaan nostaa numeerinen aukko, valolähteen teho, resistin kontrasti sekä z-tekijä. Numeerinen aukko ja valolähteen teho nostavat järjestelmän suoritus-
tehoa. Suorituskehon kasvu puolestaan nostaa sijoituksen rahallista arvoa. Resistin kontrasti ja z-tekijä vaikuttavat syntyneen kuvion laatuun, toistettavuuteen sekä simulaatiomallien paikkansapitävyyteen. EUV-prosessin optimoinnissa on piirikohtaisesti vastattava kysymykseen: käytetäänkö maskinsuojusta. Vastaus riippuu siitä, kuinka herkkä piiri on valmistusvirheille. Herkille piireille tulee käyttää maskinsuojusta.

EUV-tekniikan kehityssuunta on kohti pienempiä viivanleveyksiä, suurempaa prosessitehoa sekä parempaa toistettavuutta. Tärkeimpänä harppauksena nähdään siirtymistä korkean numeerisen aukon laitteistoihin, jonka ennustetaan tapahtuvan välillä 2025–2026. Uusi laitteisto parantaa sekä viivanleveyksiä että prosessitehoa. Toinen konferenssijulkaisuista ennustettava kehityssuunta on resistiteknologian siirtyminen pois kemiallisesti vahvistetuista resisteistä. Tällä pyritään parantamaan toistettavuutta ja parantamaan z-tekijään arvoa.

LÄHTEET

- [1] R. Balma, K. Petsch, T. Kaya, Development of Thin Film Photolithography Process : Patterning Printed Circuit Boards (PCBs) and Copper Electroplating, Central Michigan University, 2011. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/publication/267722815> [Viitattu: 7.4.2021]
- [2] B. Geh, How Photolithography works | Part 4/6 – Imaging Process, Zeiss Group, 25.6.2020. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=VcBl6yhFrDo&list=PLRhTt8ZaQryvF6WvXDJagC2p2waeHQORz&index=9&ab_channel=ZEISSGroup [Viitattu: 22.2.2021]
- [3] C. Mark, Fundamental Principles of Optical Lithography : The Science of Microfabrication, Wiley, USA, 2007, 515p.
- [4] J. Silfies, S. Schwartz, M. Davidson, The Diffraction Barrier in Optical Microscopy, Nikon instruments inc, microscopyU. Saatavissa: <https://www.microscopyu.com/techniques/super-resolution/the-diffraction-barrier-in-optical-microscopy> [Viitattu: 22.2.2021]
- [5] B. Geh, How Photolithography works | Part 2/6 – Photolithography Basics, Zeiss Group, 25.6.2020. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=PsaO-WZv9vH0&t=28s&ab_channel=ZEISSGroup [Viitattu: 26.3.2021]
- [6] R. Rottenfusser, E. Wilson, M. Davidson, Resources: Basic Microscopy: Numerical Aperture and Resolution, Zeiss. Saatavissa: <https://www.zeiss.com/microscopy/int/solutions/reference/basic-microscopy/numerical-aperture-and-resolution.html> [Viitattu: 14.4.2021]
- [7] Z. Shi, V. Kochergin ja F. Wang, 193nm Superlens Imaging Structure for 20nm Lithography Node, Optics Express, OSA Publishing, Vol.17, Iss.14, pp. 11309-11314, 2009. Saatavissa: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-17-14-11309&id=182971> [Viitattu: 25.2.2021]
- [8] J. Scotten, SPIE 2021 – ASML DUV and EUV Updates, Conference review and interview of M. Lercel of ASML, 17.3.2021. Saatavissa: <https://semiwiki.com/events/297142-spie-2021-asml-duv-and-euv-updates/> [Viitattu: 21.3.2021]
- [9] C. Mack, CHE 323 Chemical Processes for Micro- and Nanofabrication (course), University of Texas, Lectures recorded in the Fall of 2013 in Austin, Texas, 2013. Saatavissa: <http://www.lithoguru.com/scientist/CHE323/course.html> [Viitattu 21.3.2021]
- [10] Q. Minghao, ECE 695Q Lecture 07: Optical Lithography – Lithography System (course), Purdue University, Electrical and Computer Engineering, West Lafayette, Indiana, USA, 2016. Saatavissa: <https://nanohub.org/resources/24286> [Viitattu: 21.3.2021]
- [11] B. Bera, Silicon Wafer Cleaning: A Fundamental and Critical Step in Semiconductor Fabrication Process, International Journal of Applied Nanotechnology,

- Journals Pub, Vol.5, Iss.1, 2019, pp.8-13. Saatavissa: <https://www.static-contents.youth4work.com/y4w/fc469004-19c4-4401-81ce-90d5c073564d.pdf> [Viitattu: 25.2.2021]
- [12] University Wafer (Silicon wafer sales site), Why is it Important to Clean Silicon Wafer Surfaces? Saatavissa: <https://www.universitywafer.com/how-to-clean-silicon-wafers.html> [Viitattu: 28.2.2021]
- [13] J. Rantala et al., New Resist and Underlayer Approaches toward EUV Lithography, International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2018, Monterey, CA, USA, Proc. SPIE 10809, 108090X, 2018. Saatavissa: <https://doi.org/10.1117/12.2503107> [Viitattu: 22.3.2021]
- [14] B. Wu, A. Kumar, Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuit—A review, Applied Physics Reviews, Rev.1, 011104, 2014. Saatavissa: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4863412> [Viitattu: 12.3.2021]
- [15] G. Bordonaro, DUV Photolithography and Materials, Encyclopedia of Nanotechnology, Springer, Dordrecht, pp.857-873, 2016. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9780-1_370 [Viitattu: 7.4.2021]
- [16] R. Courtland, Leading Chipmakers Eye EUV Lithography to Save Moore's Law, IEEE spectrum online, Originally appears in print issue as "The Molten Tin Solution" in IEEE spectrum, Vol.53, Iss.11, pp.28-41, 2016. Saatavissa: <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/leading-chipmakers-eye-euv-lithography-to-save-moores-law> [Viitattu: 7.2.2021]
- [17] A. Balasinski, Semiconductors: Integrated Circuit Design for Manufacturability, CRC Press, 2018, 219p.
- [18] MicroChemicals, Hardbake of Photoresist Structures, 2013. Saatavissa: https://www.microchemicals.com/technical_information/hardbake_photoresist.pdf [Viitattu: 12.3.2021]
- [19] V. Bakshi, EUV Lithography, first edition, SPIE Press, 2009, 702p.
- [20] R. Stulen, D. Sweeney, Extreme Ultraviolet Lithography, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.35, No.5, pp.694–699, 1999.
- [21] C. Wagner, N. Harned, EUV lithography. Lithography gets extreme, Nature Photonics, Vol.4, Iss.1, pp.24-26, 2010. Saatavilla: <https://www.nature.com/articles/nphoton.2009.251> [Viitattu: 24.3.2021]
- [22] WikiChip, Technology Node. Saatavissa: https://en.wikichip.org/wiki/technology_node [Viitattu: 18.2.2021]
- [23] S. Sivakumar, Sam Sivakumar of Intel talks about Lithography and Patterning: Part 1, nanolearning, 2012. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=bhEDQzNQ-c&t=1145s&ab_channel=nanolearning [Viitattu: 16.3.2021]
- [24] M. Phillips, EUV Extendibility at 0.33 and 0.55NA (Conference Presentation), International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2019, Monterey, CA, USA, Proc. SPIE 11147, 1114702, 17.10.2019. Saatavissa: <https://doi.org/10.1117/12.2548654> [Viitattu: 12.3.2021]

- [25] M. Lapedus, EUV Pellicles Finally Ready, SemiconductorEngineering, 22.3.2021. Saatavissa: <https://semiengineering.com/euv-pellicles-finally-ready/> [Viitattu 25.3.2021]
- [26] S. Sivakumar, Sam Sivakumar of Intel talks about Lithography and Patterning: Part 2, nanolearning, 2012. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=WHZ3glvsX_0&ab_channel=nanolearning [Viitattu: 16.3.2021]
- [27] M. Lapedus, E. Sperling, Making Chips At 3nm And Beyond, Semiconductor Engineering, 2020. Saatavissa: <https://semiengineering.com/making-chips-at-3nm-and-beyond/> [Viitattu: 16 3 2021]
- [28] Cymer, How An EUV Light Source Works, 2018. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=5yTARacBxHI&ab_channel=Cymer [Viitattu 11.3.2021]
- [29] Samsung, Samsung Electronics Begins Mass Production at New EUV Manufacturing Line, Samsung Newsroom, Korea, 2020. Saatavissa: <https://news.samsung.com/global/samsung-electronics-begins-mass-production-at-new-euv-manufacturing-line> [Viitattu: 18.2.2021]
- [30] H. Levinson, Principles of Lithography, Second Edition, SPIE Press, Bellingham, 2005, 438p. Saatavissa: https://spie.org/publications/pm146_121_proximity_xray_lith [Viitattu 3.20.2021].
- [31] F. Torretti et al., Spectral characterization of an industrial EUV light source for nanolithography, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 53, No.5, 2019. Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab56d4> [Viitattu: 12.3.2021]
- [32] Y. Suzuki et al., Free-standing subwavelength grid infrared cut filter of 90mm diameter for LPP EUV light source, Sensors and Actuators A: Physical, Vol.231, pp.59-64, 2015. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.07.006> [Viitattu: 20.3.2021]
- [33] S. Middlebrooks, The Whiteboards Session | 'How do we generate EUV light?' with Scott Middlebrooks, ASML, 2019. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=Gqu0L5oVatk&list=PLq250VfRYkv7TGLqcx_hBAH4UjUmOMYyx&index=12&ab_channel=ASML [Viitattu: 20.3.2021]
- [34] F. Torretti et al., Prominent radiative contributions from multiply-excited states in laser-produced tin plasma for nanolithography, Nature communications, Vol.11, Iss.1, pp.2334, 2020. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15678-y> [Viitattu: 20.3.2021]
- [35] M. Purvis, An Introduction to EUV Sources for Lithography (presentation), ASML, Presented at STROBE – Friday, September 25 at 10:00am, USA, 2020. Saatavissa: https://strobe.colorado.edu/wp-content/uploads/STROBE_ASML-EUV-Sources_Purvis_25-Sept-2020-1.pdf [Viitattu: 14.4.2021]
- [36] R. Chao, Measurement and characterization of EUV mask performance at high-NA, University of California, Berkeley, EECS Department, Publication number: UCB/EECS-2013-56, 2013. Saatavissa: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2013/EECS-2013-56.html> [Viitattu 20.3.2021]

- [37] The Center for X-Ray Optics at Lawrence Berkeley National. Saatavissa: <https://www.cxro.lbl.gov/> [Viitattu: 11.4.2021]
- [38] ASML, Lithography principles. Saatavissa: <https://www.asml.com/en/technology/lithography-principles/> [Viitattu: 26.3.2021]
- [39] S. Migura, Optics for EUV Lithography, ZEISS, 2018 EUVL Workshop (conference), P22, Berkley CA, USA, 13.6.2018. Saatavissa: <https://www.euvlitho.com/2018/P22.pdf> [Viitattu 22.4.2021]
- [40] J. Torok et al., Secondary Electrons in EUV Lithography, Journal of Photopolymer Science and Technology, Vol.26, No.5, pp.625-634, 2013. Saatavissa: <https://doi.org/10.2494/photopolymer.26.625> [Viitattu 29.3.2021]
- [41] I. Toshiro, K. Takahiro, Resist Materials and Processes for Extreme Ultraviolet Lithography, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.52, Num.1R, 2013. Saatavissa: <https://doi.org/10.7567/jjap.52.010002> [Viitattu 28.3.2021]
- [42] B. Geh, How Photolithography works | Part 3/6 – Photoresist, Zeiss Group, 25.6.2020. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=4ch1xFpMers&t=202s&ab_channel=ZEISSGroup [Viitattu: 28.3.2021]
- [43] E. Buitrago et al., Evaluation of EUV resist performance using interference lithography, SPIE Advanced Lithography (conference), San Jose, CA, USA, Proc. SPIE 9422, 94221S, 2015. Saatavissa: <https://doi.org/10.1117/12.2085803> [Viitattu 14.4.2021]
- [44] ASML, High-NA EUV Lithography Exposure Tool For EUV roadmap extension (conference), EUV-FEL Workshop, Japan/Cloud, 22.1.2021. [Online]. Saatavissa: [https://conference-indico.kek.jp/event/125/contributions/2304/attachments/1711/1951/Presentation Jan van Schoot et al.ASML.pdf](https://conference-indico.kek.jp/event/125/contributions/2304/attachments/1711/1951/Presentation%20Jan%20van%20Schoot%20et%20al.ASML.pdf) [Viitattu 14.4.2021]
- [45] C. Pierrat, S. Vaidya, Required optical characteristics of materials for phase-shifting masks, Applied Optics, Vol.34, No.22, pp.4923-4928, 1995. Saatavissa: <https://www.osapublishing.org/ao/fulltext.cfm?uri=ao-34-22-4923&id=46181> [Viitattu 22.3.2021]
- [46] R. Wise, Why New Photoresist Technology Is Critical, SemiconductorEngineering, 18.3.2021. Saatavissa: <https://semiengineering.com/why-new-photoresist-technology-is-critical/> [Viitattu 30.3.2021]