

De uitdagingen

Vorig jaar zomer verscheepte ASML vanuit Veldhoven de eerste testversies van een nieuwe generatie halfgeleider-productiesystemen op basis van Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL). Deze systemen kunnen nog fijnere lijnen (32 nanometer en kleiner) printen en dus veel goedkopere, snellere en kleinere chips vervaardigen. Mikroniek schetst in vogelvlucht de uitdagingen waarvoor de engineers van ASML en partners zich gesteld zien bij de ontwikkeling en het productierijp maken van EUVL-systemen.

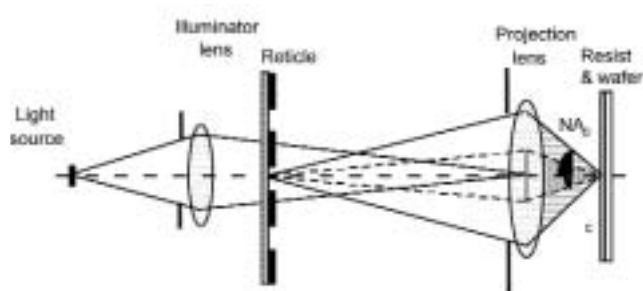
Lithografie is slechts één van de plusminus tien processtapen bij de productie van integrated circuits (IC's, oftewel chips). Het productieproces begint met het zagen en polijsten van wafers. In een herhaald uit te voeren cyclus wordt een wafer gedoped en op het oppervlak van materiaal en fotoresist voorzien, dan belicht en vervolgens ontwikkeld, gebakken en geëtsd en er worden ionen geïmplaneerd, waarna de resterende fotoresist wordt verwijderd. Tot slot worden de individuele chips van een wafer gescheiden en verpakt.

De belichting, of lithografie, is de kritische stap voor de resolutie, dat wil zeggen de kleinste laterale afmetingen (lijnbreedtes) die kunnen worden gerealiseerd; zie Afbeelding 1.



Afbeelding 1. Typische opbouw van een IC, kleinste lijnbreedtes liggen hier in de orde van 200 nm.

Bij de belichting wordt een masker (reticle) met een bepaald (lijnen)patroon met een verkleining van een factor vier afgebeeld op de wafer, en dit wordt herhaald voor elke IC die uit de wafer kan worden gehaald; zie Afbeelding 2.



Afbeelding 2. Schematische weergave van de belichting van een wafer via een reticle.

De resolutie wordt gegeven door de formule:

$$R = k1 * \lambda / NA$$

waarin:

R = resolutie [nm]

$k1$ = procesfactor [-]

λ = golflengte van het licht [nm]

NA = numerieke apertuur van de lens [-]

van EUVL

met:

$$NA = n * \sin(\varphi/2)$$

en:

n = brekingsindex van projectielens [-]

φ = openingshoek [rad]

De technologieroadmap van de lithografie in het algemeen en ASML in het bijzonder wordt permanent gedictieerd door 'krimp'. Voor het fabriceren van chips die sneller, goedkoper en/of kleiner zijn of meer functionaliteit op hetzelfde oppervlak bieden, moeten de minimale afmetingen van elementaire structuren kleiner worden door de lijnen smaller te maken en dichter op elkaar te zetten. Oftewel, de resolutie op basis van bovenstaande formule moet worden verbeterd, lees R moet kleiner. Dat is mogelijk door de procesfactor en/of de golflengte te verkleinen en/of de numerieke apertuur te vergroten door de openingshoek en/of de brekingsindex te vergroten.

De afgelopen jaren heeft ASML in zijn permanente jacht op 'krimp' een combinatie van maatregelen genomen:

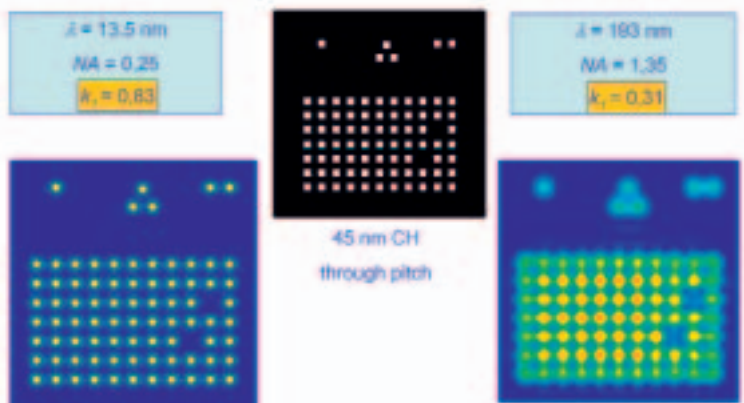
- λ verlagen (tot aan de huidige 193 nm van een ArF-laser);
- NA vergroten door grotere lenzen (grotere φ) toe te passen en door immersie (een waterlaagje op de projectielens aanbrengen om de effectieve n te vergroten); inmiddels is al een NA van 1,35 gerealiseerd;
- $k1$ verkleinen met behulp van complexere afbeeldingsoptiek, betere fotoresistprocessen en hogere kwaliteit maskers (de praktische limiet ligt nu op 0,28).

De culminatie van al deze technologische hoogstandjes is ASML's huidige state-of-the-art lithografiemachine, de Twinscan XT:1900i, die een resolutie van 40 nm kan realiseren en een NA van 1,35 kent. Een optie die ASML voor de korte termijn soelaas kan bieden is het toepassen van 'double patterning', een techniek waarbij de combinatie van deels overlappende patronen tot nog kleinere details leidt, uitgedrukt in een verdere verlaging van de $k1$ (complexere belichting). Maar hoe ambitieus en technologisch complex deze opties ook zijn, ze leveren relatief kleine verbeteringen van de resolutie op.

Forse stap

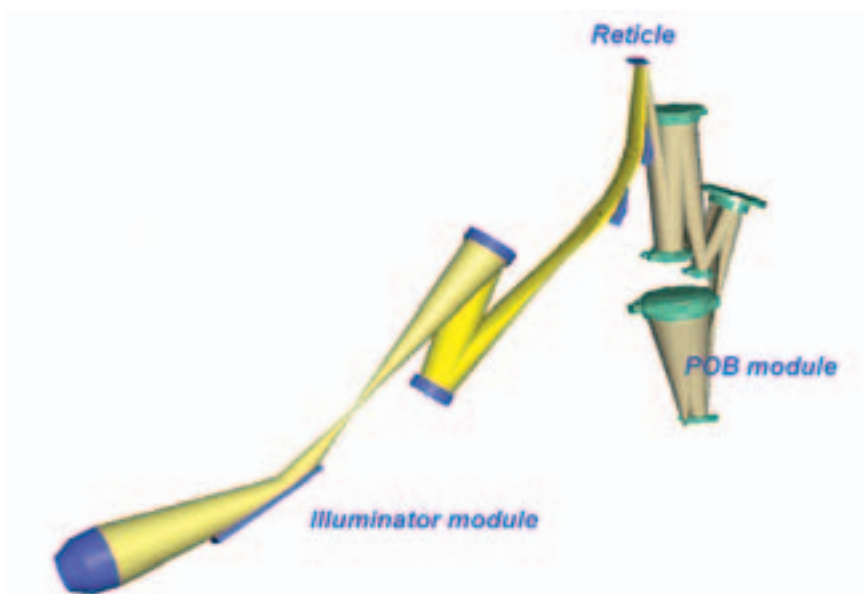
Met de introductie van Extreme Ultraviolet Lithography zet ASML echter een hele forse stap. De betreffende EUV-golflengte bedraagt 13,5 nm, oftewel (komende van 193 nm) een verlaging van λ met een factor van ruim 14. Zelfs

bij relaxatie van de eisen voor NA en $k1$ kan dus een veel betere resolutie worden bereikt. Zo kan de procesfactor $k1$ veel hoger zijn, oftewel een naar verhouding 'simpele' belichting. Zie Afbeelding 3 voor een vergelijking (verkregen uit berekeningen) van de resolutie van patronen die bij de twee golflengtes haalbaar is.



Afbeelding 3. Dankzij de stap naar EUV (het berekende patroon links) kunnen met een naar verhouding 'simpele' belichting (grote $k1$) en een kleinere numerieke apertuur NA toch patronen met een hoge resolutie worden gerealiseerd.

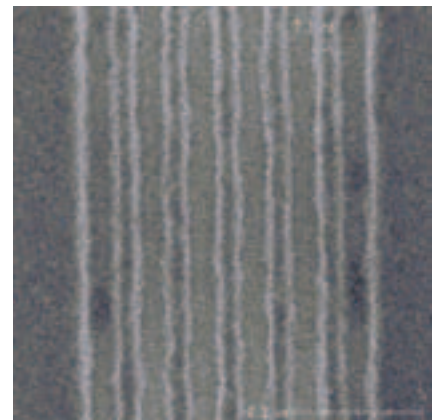
De ontwikkeling van EUVL kent al een lange geschiedenis, die ruim twintig jaar geleden begon met publicaties van Amerikaanse laboratoria en eerste systemen in de jaren negentig van onder meer Sandia. Midden jaren negentig begon ASML met fundamenteel onderzoek op een aantal deelaspecten van EUVL (lichtbronnen, optiek, systeemontwerp). Op het hoogtepunt waren zo'n 250 researchers, engineers en projectmanagers bij ASML en ontwikkelpartners Carl Zeiss SMT, Philips Applied Technologies, TNO Industrie en Techniek, Philips Research, Philips Extreme Technologies GmbH, Media Lario en een groot aantal andere toeleveranciers betrokken bij het omvangrijke project. Er moesten dan ook wel wat technologische barrières worden geslecht, zoals het werken in vacuüm (lucht absorbeert licht/straling van deze kleine golflengte), het ontwerpen van een optisch systeem dat geheel uit spiegels bestaat (gewone bolle lenzen absorberen te veel EUV), en het creëren van een perfecte lichtbron; zie ook Afbeeldingen 4 en 5. In januari 2006 leverde een alpha demo tool de eerste ongekend hoogwaardige afbeeldingen, zo meldde ASML; zie Afbeelding 6.



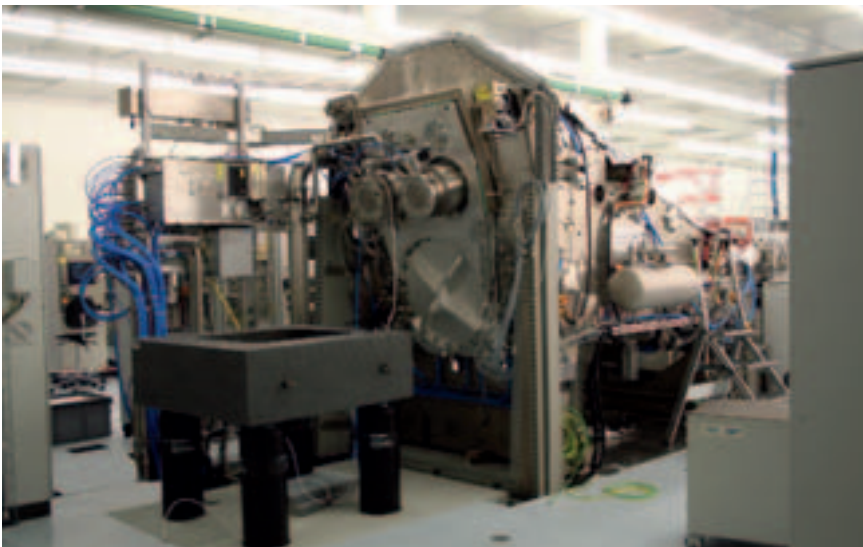
Afbeelding 4. Schematische weergave van de EUV-optiek die volledig bestaat uit spiegels (POB staat voor Projection Optics Box).



Afbeelding 5. EUV-belichting stelt extreme eisen aan de gebruikte spiegels. Deze spiegel van 480 mm breed moet binnen 0,20 nm vlak zijn. Dat komt overeen met een aardoppervlak dat een hoogtevariatie van minder dan 5 mm (!) kent.



Afbeelding 6. Eerste resultaten van de EUV alpha demo tool, de lijnbreedte (ofwel half pitch, waarbij de pitch de hart-hart-afstand tussen naastliggende lijnen is) bedraagt 40 nm.



Afbeelding 7. Installatie van ASML's EUVL alfa demo tool bij IMEC. (Foto: IMEC)

Technologische risico's

Een mijlpaal was vorig jaar zomer de verscheping door ASML van twee alfa demo tools naar IMEC en Albany NanoTech, New York (VS); zie Afbeelding 7. IMEC in Leuven (B) is Europa's grootste onafhankelijke onderzoekscentrum in nano-elektronica en vanwege de

onderzoeksdeelname van de grootste chipfabrikanten, machinebouwers en materiaalleveranciers een uitgelezen testsite voor EUVL. Want de uitdaging voor ASML is nu om de technologische risico's uit EUV-lithografie te halen en de (vacuüm)infrastructuur en het proces (maskers, fotesist, enzovoort) verder te ontwikkelen.



Afbeelding 8. Reticle handling.

(a) Robotarm met reticle in een frame.

(b) Gekwalificeerd voor operatie in vacuüm.

Zo wordt EUV door bijna alles geabsorbeerd, reden waarom de optiek reflectief is (inclusief het reticle) en in vacuüm wordt geplaatst. De toegepaste EUV-spiegels kunnen een reflectiviteit van maximaal 0,7 hebben, zodat bij toepassing van 10 spiegels de belichtingsopbrengst slechts 2,8% is. Als de reflectiviteit door oxidatie en vervuiling minder dan die 0,7 wordt, dan neemt de uiteindelijke belichtingsopbrengst navenant af. Om de EUV-absorptie binnen de 10% te houden, moet het vacuüm beter dan 10^{-3} mbar zijn. Met het oog op de kwaliteit van de belichting dient voorts het reticle uiterst vlak te zijn en tegen vervuiling te worden beschermd. Dat stelt hoge eisen aan de reticle handling; zie Afbeelding 8.

Toekomst

Een resolutie van 40 nm is dus inmiddels op de alpha demo tool gedemonstreerd, maar op allerlei fronten moet nog veel werk worden verzet om te komen tot een industriële EUVL-machine:

- Serieproductie van EUV-bronnen.
- Compleet ontwerp van het vacuümsysteem.
- Engineering van de waferstages en overige mechanische onderdelen van de machine.
- Fabricage van de optica (vlakke spiegels!) voor nog lagere resolutie.
- Enzovoort.

Voor 2009 wordt er begonnen met het vershippen van de eerste zogeheten ‘pre-productie’ machines.

Volgens de huidige inzichten van ASML belooft EUVL de chipfabrikanten lagere kosten en meer toekomstperspectief dan de ‘incrementele’ technologiestappen zoals hierboven geschetst. Vanwege de grote sprong in λ konden namelijk in eerste instantie de eisen aan $k1$ en NA worden gelaaxeerd. Door in de komende jaren die eisen weer op te voeren kunnen nieuwe generaties EUVL-machines worden ontworpen met een nog betere resolutie. Zo kan met EUVL de ‘krimp’ nog vele jaren doorgaan.

Verantwoording

Dit artikel is gebaseerd op de voordracht “Latest Advances in EUV Lithography” door Erik Loopstra, program system engineer bij ASML, op 14 september 2006 bij de Physikalisch-Technische Bundesanstalt, het Duitse metrologie-instituut gevestigd in Braunschweig en Berlijn. Met dank aan Rob Munnig Schmidt, voorheen ASML en nu hoogleraar Mechatronic Design in Delft, en aan ASML voor de toestemming voor publicatie.

Informatie

www.asml.com
www.imec.be
www.albanynanotech.org