

Van grensvlakfysica tot nanolithografie

Prof.dr. Joost W.M. Frenken

Advanced Research Center for Nanolithography

Science Park 110, Amsterdam

Lezing gegeven op maandag, 18 december 2017 bij de Koninklijke Maatschappij voor Natuurkunde 'Diligentia', te Den Haag

Samenvatting

Computerchips worden voortdurend krachtiger en vinden hun weg naar steeds meer toepassingen. Deze ontwikkeling wordt stevig aangejaagd door innovaties op het terrein van lithografie, een van de sleuteltechnologieën bij de vervaardiging van de chips. In dit artikel wordt de rol beschreven van het nieuwe onderzoekscentrum ARCNL, het Advanced Research Center for Nanolithography, dat fundamenteel onderzoek verricht op terreinen die nu al van belang zijn voor deze technologie of dat in de toekomst kunnen worden. We werpen eerst een uitgebreide blik op de allernieuwste, door ASML ontwikkelde lithografiemethode, waarbij gebruik wordt gemaakt van extreem ultraviolet licht. Het onderzoek van ARCNL wordt geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld waarin de bijzondere optiek onder de loep wordt genomen, die nodig is bij deze korte golflengte.

Inleiding

'Hoeveel engelen passen er op de punt van een naald?' Met deze filosofische vraag hielden sommigen zich in de vijftiende eeuw bezig aan het Byzantijnse hof en ook daarna is deze vraag met enige regelmaat opgedoken. Het lijkt hier om een absurd vraagstuk te gaan. Maar ik wil er vandaag twee varianten aan toevoegen die zó concreet en actueel zijn, dat we meteen bij natuurkunde uitkomen, daarmee volledig binnen het interessegebied van uw maatschappij, maar ook centraal binnen de ontwikkelingen en interesses van onze gehele, moderne maatschappij.

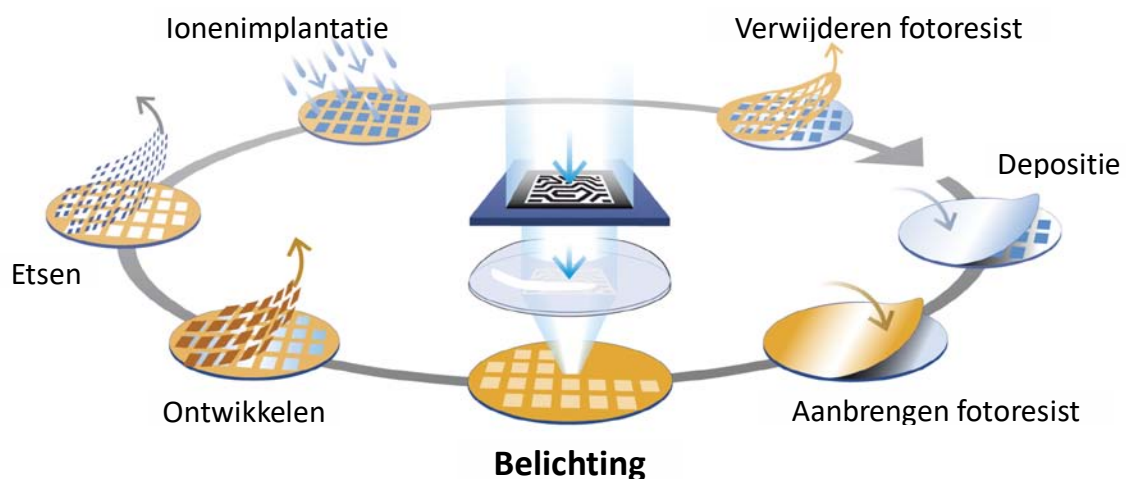
We gaan het kleine opzoeken, de kleinste structuren die we met moderne microscopie zichtbaar kunnen maken, helemaal op de schaal van de afzonderlijke atomen. En we treden binnen in de industriële wereld van de steeds kleiner wordende elektronische componenten, die inmiddels afmetingen hebben van slechts enkele tientallen atoom-afstanden. Fundamenteel onderzoek gericht op toepassingen in de context van de industriële productie van computerchips vormt het werkterrein van ons relatief jonge onderzoekscentrum in Amsterdam, het *Advanced Research Center for Nanolithography*, ARCNL. In mijn betoog geef ik u een voorproefje van ons onderzoek en laat ik u zien hoe dit past bij de technologie die momenteel omarmd wordt door de halfgeleiderindustrie voor het maken van processor- en geheugenchips. Een sleutelrol in deze ontwikkelingen wordt gespeeld door het Nederlandse bedrijf ASML [1], gevestigd in Veldhoven en wereldmarktleider op het gebied van de lithografiemachines waarmee bedrijven zoals Intel en Samsung hun chips produceren.

Lithografie en nanolithografie

Het woord 'lithografie' is ontleend aan de steendruktechniek die aan het eind van de achttiende eeuw in Beieren werd ontwikkeld door Alois Senefelder en die veelvuldig gebruikt is voor het vervaardigen en reproduceren van afbeeldingen, tekst en bladmuziek [2]. Een essentieel element in deze techniek is het aanbrenge op een vlakke steen van de afbeelding, waarna de rest van de steen beschermd wordt door een speciale laag, bijvoorbeeld van Arabische gom. Als er vervolgens drukinkt wordt aangebracht op de steen, komt deze

uitsluitend terecht op de afbeelding en niet op de vlakken waar de gom zit. De steen kan dan worden gebruikt om de afbeelding direct op papier te drukken.

In de belangrijkste processtep bij de vervaardiging van computerchips worden ook patronen aangebracht in een bescherm laag. In plaats van een steen wordt een grote plak bewerkt van het materiaal silicium, waarin tegelijkertijd een groot aantal identieke chips worden vervaardigd (zie Figuur 1). Bij deze *foto*-lithografie, wordt licht gebruikt om de gewenste patronen te projecteren in een dunne laag van een lichtgevoelig materiaal, waarbij dit materiaal onder invloed van het licht chemisch verandert. In een vervolgstap wordt dan ofwel het belichte gedeelte of juist het onbelichte gedeelte van deze dunne laag weggespoeld, waarna een serie aanvullende stappen volgt om op die plaatsen waar de laag ontbreekt iets aan de structuur of eigenschappen te veranderen. Dat kan bijvoorbeeld door er een ander materiaal op te deponeren, of door juist een gecontroleerde hoeveelheid materiaal te verwijderen, of door gericht verontreinigingen in de vorm van ionen in het silicium te schieten. Telkens als een complete cyclus van dit type doorlopen is, is daarmee één niveau gedefinieerd in de complexe, driedimensionale structuur van de computerchip in wording. Een van de belangrijkste soorten componenten die in de chips voorkomen, is de transistor. Deze kan worden beschouwd als een elektronische schakelaar die in twee standen kan staan: de binaire 0 en 1, waarmee computers al hun rekenwerk doen.



Figuur 1. Schema van de fotolithografie-cyclus, die in de richting van de klok wordt doorlopen. De centrale stap is die waarbij de lichtgevoelige fotoresist-laag op de siliciumplak wordt belicht met een patroon. In het vervolg van de cyclus wordt dit patroon overgenomen in het oppervlak, ofwel in de structuur of in de samenstelling, waarna de siliciumplak wordt voorbereid voor de volgende lithografie-cyclus. Schema afkomstig van ASML.

Minder is meer

Het was al in de jaren zestig van de vorige eeuw, dat een inspirerende trend werd herkend in de groei van de complexiteit van de geïntegreerde schakelingen, waarnaar ik voor het gemak zal blijven verwijzen met het woord 'computerchips'. Gordon Moore, medeoprichter van het bedrijf Fairchild en later een van de oprichters van Intel, liet in 1965 zien dat het aantal transistoren in zo'n chip jaarlijks met een vaste factor leek toe te nemen [3]. Vanaf het begin van de jaren 70 ligt het tempo op ongeveer een verdubbeling per twee jaar. Dit lijkt op het eerste gezicht een bescheiden ontwikkeling, maar op deze manier doorlopen de chips een exponentiële groei in compactheid, snelheid en opslagcapaciteit, die analoog is aan de

legende over de uitvinder van het schaakspel. Deze mocht van de Perzische koning voor zichzelf een beloning bedenken en koos ervoor om op een schaakbord op het eerste vakje één graankorrel te krijgen, op het tweede vakje twee, en op elk volgend vakje telkens tweemaal zoveel; het schijnbaar bescheiden loon oversteeg de volledige graanoogst!

De exponentiële groei van het aantal transistoren in computerchips ligt ten grondslag aan een stormachtige technologische ontwikkeling die onze maatschappij ingrijpend heeft veranderd, te beginnen met de introductie van grote computers vanaf de jaren 50, personal computers vanaf de jaren 70 en 80, en de steeds verdergaande integratie vanaf de jaren 90 van intelligentie in auto's, huishoudelijke apparaten, geneeskundige toepassingen, smartphones, tablets, slimme horloges, et cetera. Op dit terrein is het einde nog lang niet in zicht.

Verantwoordelijk voor de 'Wet van Moore' is de gestage verkleining van de transistoren. Om die tweejaarlijkse verdubbeling van hun aantal mogelijk te maken, zonder het oppervlak van de chips te veranderen, moeten de lengte en breedte van een transistor elke vier jaar worden gehalveerd. Dit vereist een steeds grotere wetenschappelijke en technologische inspanning. Inmiddels speelt de 'Wet van Moore' allang niet meer de rol van een waargenomen trend, maar fungeert deze als routekaart voor de techniek, waaraan alle betrokken partijen in de halfgeleiderindustrie zich proberen te houden.

Fijnschilderen met een brede kwast... en met een fijn penseel

Van doorslaggevende invloed op de resolutie waarmee de kleinste details met fotolithografie kunnen worden 'geschreven', is de kleur, ofwel de golflengte van het gebruikte licht. In zekere zin kan deze golflengte beschouwd worden als de breedte van een denkbeeldig penseel waarmee het patroon van het origineel, het zogenaamde 'masker', door het licht wordt 'overgeschilderd' in de lichtgevoelige laag op de siliciumplak. Hoe langer de golflengte, des te grover de kwast en des te groter worden noodgedwongen alle elementen die je langs deze weg kunt fabriceren. Ondanks deze fysische beperking, is de halfgeleiderindustrie erin geslaagd om met het licht uit argonfluoride lasers, met een golflengte van 193 nm, routinematig structuren te creëren in moderne chips met een fenomenale detailscherpte van wel 14 nm. Om dit sterke staaltje mogelijk te maken, wordt op slimme wijze gebruik gemaakt van het feit dat er voor een afdoende chemische omzetting van de lichtgevoelige laag een welbepaalde, minimale dosis licht nodig is. Zelfs in de 'onscherpe' afbeeldingen die met 193 nm licht kunnen worden gemaakt, worden de posities waarbij deze drempeldosis gehaald wordt, voldoende nauwkeurig gedefinieerd, d.w.z. met een precisie van 14 nm of beter. De complexe structuren vereisen dan wel dat dit proces voor elke laag in de halfgeleiderstructuur meerdere keren wordt herhaald om daarmee de details niet alleen voldoende scherp te krijgen, maar ook voldoende dicht bij elkaar. Voor het vervaardigen van de driedimensionale architectuur van moderne chips zijn veel lagen nodig, waardoor het totale aantal lithografiecycleli voor een chip tegenwoordig al vele tientallen is. Hoe compacter de chips worden, des te meer lithografiecycleli er nodig zijn. Een nieuwe doorbraak in de technologie is daarom onontkoombaar.

Al twee decennia zijn er inmiddels geïnvesteerd in de voorbereiding van een ingrijpende verandering in de golflengte van het licht dat voor fotolithografie wordt gebruikt. Gangbaar is momenteel nog de reeds genoemde, relatief lange golflengte van 193 nm, die door argonfluoridelasers wordt geleverd. Het nieuwe licht heeft een veel kortere golflengte van 13.5 nm en mag beschouwd worden als een fijn penseel, waarmee kleine details probleemloos in één stap kunnen worden aangebracht. De overstap van 193 nm naar 13.5 nm is verre van eenvoudig. Dit extreem ultraviolette (EUV) licht is extreem moeilijk op te

wekken; het komt niet uit een eenvoudige lamp of laser. Het is bovendien zeer 'kwetsbaar'; het wordt al door enkele millimeters lucht tegengehouden.

EUV lithografie: nieuwlichterij

De methode waarmee de nieuwste generatie lithografiemachines het EUV licht opwekt, maakt gebruik van een plasma van tin. In de speciaal hiervoor ontwikkelde apparatuur spuit een stroom van tientallen-duizenden druppeltjes vloeibaar tin per seconde door een vacuümketel, elk druppeltje dunner dan een mensenhaar. Deze druppeltjes worden door een krachtige infraroodlaser stuk voor stuk met een gericht schot opgewarmd tot ongekende temperaturen van honderdduizenden graden Celsius. Kortstondig verkeert het tin dan in een plasmatoestand, waarbij elk atoom een groot aantal van zijn elektronen kwijt is. In het mengsel van hooggeladen tinionen en elektronen, vinden allerlei gebeurtenissen plaats, waarbij licht vrijkomt. Elektronen verbinden zich bijvoorbeeld weer met de ionen of elektronen tuimelen binnen de ionen van hogere naar lagere energieniveaus. Omdat het plasma zo heet is, gaat het hier vooral om gebeurtenissen met energierijk licht, d.w.z. licht met een korte golflengte. De voorkeursgolflengte van dit licht is bij de gebruikte omstandigheden 13.5 nm.

Onhandelbaar licht: lachspiegels en spekkoeke

EUV licht gaat vrijwel nergens doorheen; licht van 13.5 nm wordt door de meeste materialen en zelfs door lucht extreem efficiënt geabsorbeerd. Daarom worden EUV-lithografiemachines onder vacuüm gehouden. Traditionele lenzen zijn uiteraard uit den boze. Want zelfs één lens zou het overgrote deel van het erop invallende EUV licht vrijwel helemaal tegenhouden. Toch zijn lenzen van cruciaal belang om een scherpe afbeelding van het gewenste patroon te projecteren op de siliciumplak. De lenzen voor EUV licht hebben daarom allemaal de vorm van kromme spiegels; denk aan een scheerspiegel. Maar zelfs spiegels blijken een groot deel van het EUV licht op te slokken. De reden daarvoor is dat het voor reflectie nodig is dat het licht tot een zekere diepte binnendringt in het materiaal van de spiegel. Zelfs op dat korte traject, naar binnen en naar buiten, gaat het merendeel van EUV licht verloren. De oplossing voor dit probleem is gevonden in een bijzondere nanostructuur in de vorm van een soort 'spekkoeke' waarmee de spiegels worden gecoat: een groot aantal ultradunne laagjes van afwisselend molybdeen en silicium. Elke overgang tussen deze materialen fungeert als een zwakke spiegel en alle zwakke reflecties tellen bij elkaar op om in een voorgeprogrammeerde richting een krachtige totaalreflectie op te leveren, tot wel meer dan 70% van het op de spiegel invallende EUV licht. Voor zo'n goede reflectie is een pakket van typisch honderd molybdeen- en siliciumlaagjes nodig, elk met een zeer nauwkeurige dikte van slechts enkele nanometers, ultravlak en ultraglad.

ARCNL – het Advanced Research Center for Nanolithography

Met de EUV technologie, opereert de halfgeleiderindustrie niet alleen op het scherpst van de snede van wat technisch uitvoerbaar is, maar ook aan de grenzen van onze kennis en ons begrip binnen een aantal fundamenteel wetenschappelijke onderzoeksterreinen. Het gaat dan bijvoorbeeld over de wisselwerking van licht en materie, zoals die optreedt bij de verwarming van de tindruppeltjes, over de vloeistofdynamica wanneer zo'n druppeltje van vorm verandert en uiteenvalt, om de samenstelling en evolutie van het tinplasma en al de plasmaprocessen waarbij licht vrijkomt, om de grensvlakfysica en -chemie, die bepalend zijn voor de scherpste van de overgangen tussen silicium en molybdeen in de multilaagspiegels die het licht moeten reflecteren en om de lichtgeïnduceerde, chemische processen die

plaatsvinden in de lichtgevoelige laag waarmee de siliciumplakken bedekt zijn, waarin de computerchips worden geproduceerd. Zelfs de wrijving die optreedt tussen een siliciumplak en de tafel waarop de plak tijdens de belichtingsstap ligt, is van belang. Op elk van deze terreinen is in de industrie een indrukwekkende inspanning te zien om nieuwe technische hoogstandjes mogelijk te maken en, waar nodig, en passant de daarvoor benodigde, fundamentele kennis uit te breiden. Al vanaf het begin worden hier universiteiten en andere onderzoeksinstituten bij betrokken, zodat de nieuwe uitvindingen en patenten gepaard gaan met een stroom aan wetenschappelijke publicaties.

In 2013 kwam ASML met het plan om een deel van het uitbestede onderzoek te concentreren in een publiek-private samenwerking in de vorm van een zelfstandig onderzoekscentrum. Dit heeft op 1 januari 2014 geleid tot de start van het Advanced Research Center for Nanolithography, ofwel ARCNL [4]. ARCNL is een samenwerking van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, NWO, de Universiteit van Amsterdam, UvA, de Vrije Universiteit Amsterdam, VU, en ASML. Het is gevestigd op het Amsterdam Science Park en is gestart vanuit het daar al aanwezige NWO-instituut AMOLF. Inmiddels werken er zo'n 80 mensen en beschikt het centrum over eigen, tijdelijke laboratorium- en kantoorgebouwen. ARCNL groeit nog verder naar circa 100 mensen en zal in 2018 naar een nieuw gebouw verhuizen dat momenteel naast AMOLF verrijst.

ARCNL richt zich op de fundamentele fysica en chemie die van belang zijn in de lithografie en heeft daarbij een grote nadruk op lithografie met EUV licht. Een belangrijke component daarvan is gewijd aan de bijzondere lichtbron, waarbij ARCNL het hart daarvan, met de tindruppeltjes, heeft nagebouwd, voorzien van een breed scala aan camera's en meetapparatuur. ARCNL beschikt over een indrukwekkend machinepark aan bijzondere lasers, die deels ook in eigen huis worden ontwikkeld. Niet alleen worden de lasers gebruikt om te experimenteren met het opwarmen van tindruppeltjes, maar ook om in een sterk niet-lineair proces dat bekend staat als High Harmonic Generation (HHG), EUV licht direct te genereren vanuit infrarood licht. Qua efficiëntie haalt deze opwekking van EUV licht het niet bij het proces met de tindruppeltjes, maar het HHG-licht vertoont een bijzondere eigenschap, coherentie, die we anders vooral kennen van laserlicht. Dat maakt het bij uitstek geschikt voor het maken van zeer nauwkeurige afbeeldingen, zonder tussenkomst van lenzen. De lenswerking wordt volledig overgenomen door de computer, die uit de schijnbaar compleet vervloeiende, onscherpe transmissie- of reflectiebeelden haarscherp kan terugrekenen wat de driedimensionale vorm is van het object waarmee dat licht in contact is gekomen. Omdat veel van de processen die in de lithografietechnologie een rol spelen, plaatsvinden aan oppervlakken van materialen, aan grensvlakken tussen materialen en in dunne laagjes, beschikt ARCNL ook over een scala aan gevoelige meetinstrumenten van oppervlakte-eigenschappen, zoals de atomaire structuur en samenstelling van de buitenste atoomlagen van een materiaal. Daarnaast wordt bij ARCNL onderzoek gedaan naar de oorsprong van wrijving en naar mogelijkheden om wrijving te beïnvloeden.

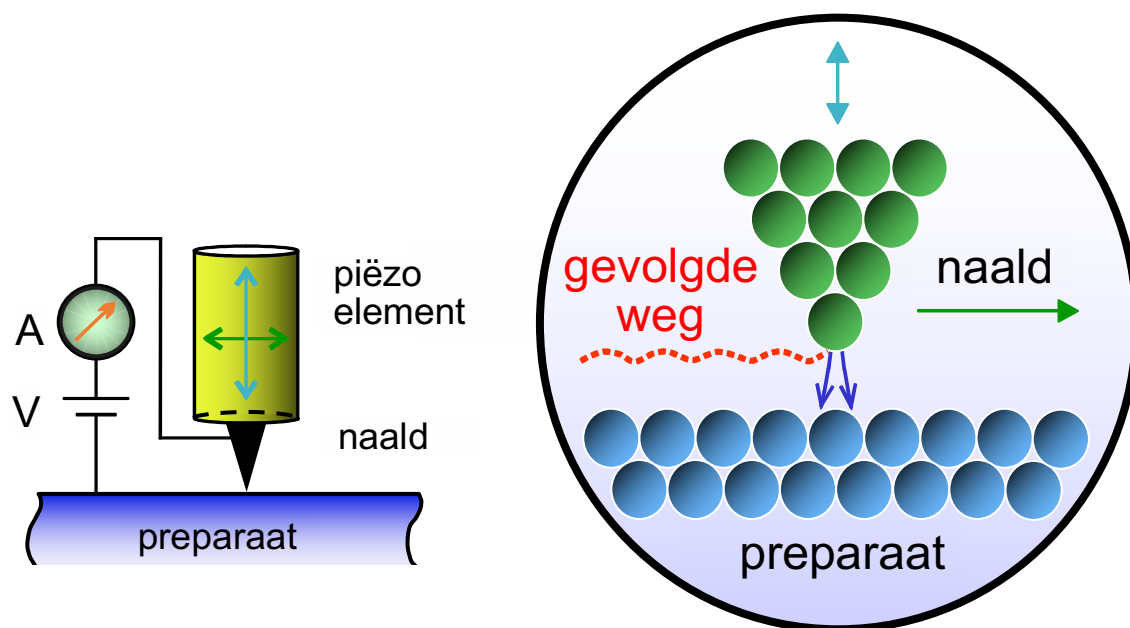
Als typerend voorbeeld van ARCNL-onderzoek, nemen we hierna de vorming onder de loep van de optische multilaag-coatings, waarmee een groot deel van de EUV-optiek bedekt is. Bij dit deel van ons onderzoek maken we gebruik van een bijzondere vorm van microscopie.

STM – Scanning tunneling microscopy

Vanwege de extreem korte golflengte van het EUV licht zijn de eisen die gesteld worden aan de optische multilaag-coatings uitzonderlijk streng. Zo moeten de molybdeen- en siliciumlaagjes worden gefabriceerd met diktes die zelfs nauwkeuriger zijn dan de diameter van één siliciumatoom. Om het grensvlak tussen silicium en molybdeen te laten fungeren als

een efficiënte spiegel voor EUV licht, moet het vlak zijn op de atoomschaal. Bovendien moet de overgang van het ene naar het andere materiaal zo abrupt mogelijk zijn. De thermodynamica van dunne laagjes is ons in deze opzichten helaas niet welgevallig. De natuurlijke neiging van de gebruikte materialen is niet om als vlakke laagjes op elkaar te gaan liggen en een abrupte overgang is ook moeilijk te bewerkstelligen omdat de twee materialen graag een chemische verbinding aangaan met elkaar, molybdeensilicide.

Om meer te weten te komen over deze grensvlakken, zijn we zelfs al vóór de start van ARCNL, bij de Universiteit Leiden begonnen met zeer gedetailleerde waarnemingen aan de depositie van molybdeen op silicium en silicium op molybdeen. Het meetinstrument dat hiervoor is gebruikt, is een zogenaamde Scanning Tunneling Microscoop (STM), ofwel Rastertunnelmicroscoop (Figuur 2). In de volgende alinea wordt eerst het werkingsprincipe van dit instrument uitgelegd. Daarna worden de waarnemingen kort besproken voor de depositie van molybdeen op silicium.



Figuur 2. Principe van de scanning tunneling microscoop. Een scherpe naald wordt lijn-voor-lijn over het oppervlak van een preparaat bewogen, met behulp van een piëzo-element. De naald raakt het preparaat bijna (zie uitvergroting rechts). Op zo'n kleine afstand kan er al een elektrische stroom oversteken, de z.g. 'tunnelstroom'. Deze hangt sterk van de afstand af en kan daarom gebruikt worden om die afstand nauwkeurig te meten of juist constant te houden. In dat laatste geval wordt de naald gedwongen een 'hobbelpad' te volgen dat een replica vormt van de atomaire contour van het preparaat.

In een STM wordt het oppervlak van een materiaal afgetast met een vlijmscherpe, metalen naald. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het kwantummechanische verschijnsel 'tunneling'. Het is voor de elektronen in de naald namelijk mogelijk om over te springen ('tunnelen') van de allerlaatste atomen van de naald naar de dichtstbijzijnde atomen van het af te tasten materiaaloppervlak en *vice versa*, zelfs als naald en oppervlak zich nog op een relatief 'grote' afstand van elkaar bevinden van bijvoorbeeld drie atoomafstanden. Deze mogelijkheid zorgt ervoor dat als we een elektrische spanning aanleggen tussen naald en preparaat, er al een zwakke elektrische stroom gaat lopen voordat de naald het oppervlak echt raakt. Deze tunnelstroom is zeer gevoelig voor de precieze naald-oppervlak afstand. In de STM wordt de

hoogte van de naald voortdurend bijgestuurd, om de stroom en dus de afstand op een vaste waarde te houden. Terwijl dit meet- en regelmechanisme actief is, laten we de naald het oppervlak lijn voor lijn aftasten. De scherpe naald volgt dan contouren die precies laten zien waar de oppervlakteatomen zich bevinden. In de bij ons onderzoek gebruikte STMs, worden deze waarnemingen uitgevoerd onder ultrahoog vacuüm, waarin we de gebruikte materialen, zoals silicium en molybdeen, langdurig schoon kunnen houden, compleet vrij van oxides of andere verontreinigingen. Verder hebben Dr. Marcel Rost en Dr. Vincent Fokkema bij de Universiteit Leiden voor onze experimenten een speciale STM-uitvoering ontwikkeld, waarmee het mogelijk is om afbeeldingen van oppervlakken te maken, terwijl er materialen atoom-voor-atoom op worden gedeponeerd – technologisch gezien een echt hoogstandje. Bij de start van ARCNL is dit bijzondere apparaat verhuisd van de Universiteit Leiden naar ARCNL (Figuur 3).

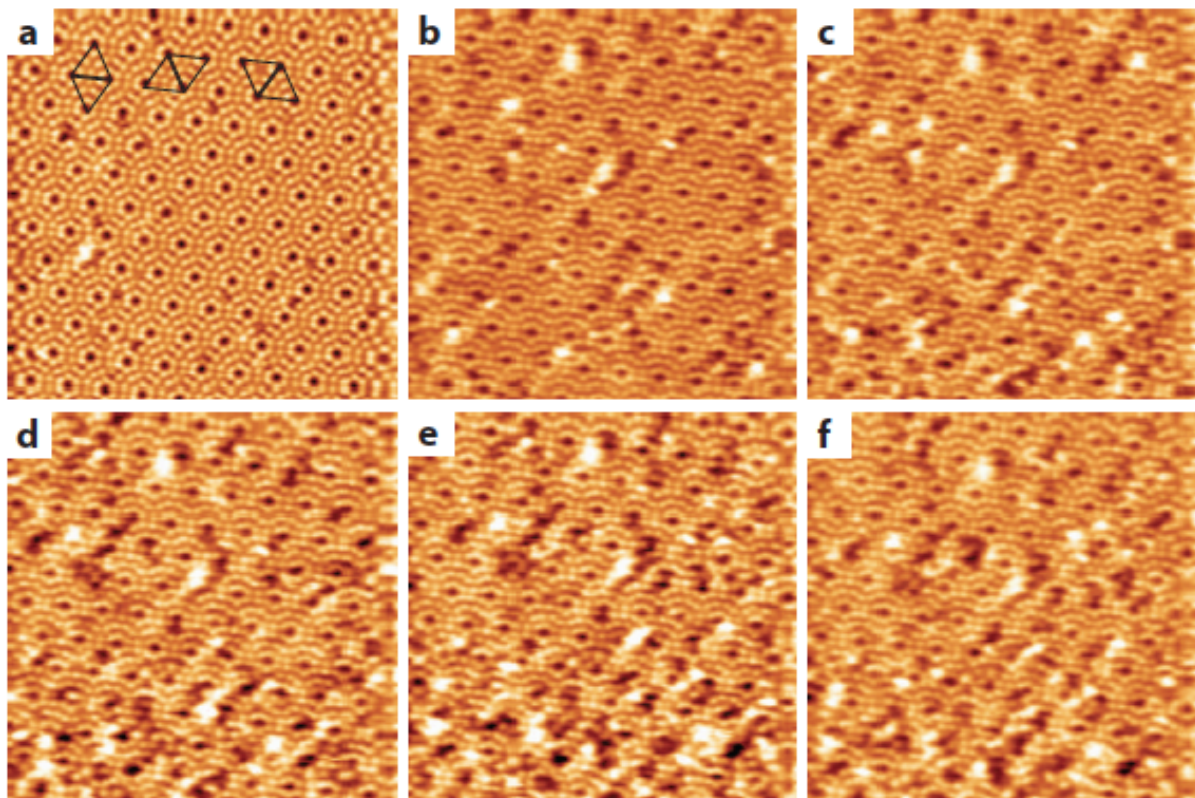


Figuur 3. Scanning tunneling microscoop bij ARCNL. Deze meetopstelling werd ontwikkeld bij de Universiteit Leiden door Dr. Marcel Rost en Dr. Vincent Fokkema en is speciaal bedoeld voor het afbeelden van atomaire oppervlakteprocessen, zoals aangroei en erosie. Preparaat en microscoop bevinden zich tijdens voorbereiding en waarneming in ultrahoog vacuüm. Aan het werk onder de microscoop is Dr. Amir Saedi, voormalig postdoctoraal onderzoeker bij ARCNL. Foto: Merlijn Doomernik (www.doomernik.com)

Grensvlakfysica voor nanolithografie

Figuur 4 laat een selectie zien van zes STM-opnames van telkens hetzelfde stukje van het oppervlak van silicium. Het afgebeelde gedeelte is zeer klein, namelijk slechts $28.5 \times 28.5 \text{ nm}^2$ (vierkante nanometer). Elk van de afzonderlijke ‘stipjes’ in plaatje (a) van Figuur 4 is één siliciumatoom. Het patroon dat ze vormen is regelmatig; de atomen staan keurig in het gelid. De opname in plaatje (b) is korte tijd later tot stand gekomen. In de tussentijd is er een uiterst kleine hoeveelheid molybdeen op het oppervlak geland. Daartoe werd op enige afstand van het siliciumoppervlak een stukje molybdeen zo sterk verhit, dat het smolt en er spontaan molybdeenatomen van verdampten; een klein deel daarvan vertrok precies in de richting van het silicium.

Het aantal gearriveerde molybdeenatomen in plaatjes (b – f) van Figuur 4 is veel kleiner dan één atoomlaag. Daardoor kunnen we heel goed zien wat het effect is van de aankomst van de allereerste molybdeenatomen op het silicium. Dat effect is verrassend groot. Terwijl het onbedekte oppervlak op atomaire schaal vlak is, resulteert het aanbod van de molybdeenatomen niet alleen in groepjes atomen bovenop het oppervlak – de lichtgekleurde vlekjes – maar ook in uitgravingen in het oppervlak met een diepte van precies één atoomlaag – de donkere gebiedjes. Deze liggen telkens in de buurt van de lichtgekleurde vlekjes. We zijn getuige van een vorm van ‘turfsteken’, op de allerkleinste schaal. De ontbrekende siliciumatomen hebben het oppervlak niet verlaten, maar hebben hun weg gevonden naar de atoomclusters bovenop het oppervlak, waar ze samen met het molybdeen een mengsel vormen, het reeds genoemde molybdeensilicide. Het is waarschijnlijk de gunstige vormingsenergie van het silicide, die de drijvende kracht vormt voor de atomaire volksverhuizing. Helaas moeten we constateren dat de silicideclusters het oppervlak niet uniform bedekken, hetgeen bijdraagt aan de ruwheid van de spiegels.



Figuur 4. STM opnamen van een siliciumoppervlak in toenemende stadia van bedekking met molybdeen. Getoond wordt telkens hetzelfde gebiedje van $28.5 \text{ nm} \times 28.5 \text{ nm}$. In plaatje (a) zijn de goed geordende siliciumatomen afzonderlijk zichtbaar (elke donkere plek wordt door zes atomen omringd). In plaatjes (b – f) zijn er achtereenvolgens 0.3, 0.6, 0.9, 1.2 en 1.5 molybdeenatomen per nm^2 op het oppervlak gedeponeerd. De plaatjes zijn afkomstig uit het proefschrift van Dr. Vincent Fokkema [5]; het zijn momentopnames uit een van de filmpjes die samen met het proefschrift gedownload kunnen worden van <http://hdl.handle.net/1887/18057>.

Op basis van de inzichten die we langs deze weg verkrijgen, vormen we ons een steeds gedetailleerder beeld van de verschijnselen die bepalend zijn voor de prestaties van cruciale componenten in de geavanceerde lithografieapparatuur. Daarnaast krijgen we zo ook steeds meer begrip van degradatieprocessen die de levensduur van deze componenten beperken.

Die kennis vormt een bron van inspiratie om samen met de industriële onderzoekers op zoek te gaan naar verbeteringen van de bestaande technologie en na te denken over compleet nieuwe technologie.

Samenvatting

In dit artikel is een kort overzicht gegeven van de modernste lithografietechnologie om computerchips te fabriceren en is de totstandkoming beschreven van het Advanced Research Center for Nanolithography, ARCNL. Het hier beschreven STM-experiment is vooral bedoeld als illustratie van de directe verbinding tussen fundamenteel onderzoek en praktische toepassing die we bij alle thema's opzoeken in dit nieuwe onderzoekscentrum.

Terwijl de Byzantijnen fantaseerden over engelen op naaldpunten, worden in de Scanning Tunneling Microscoop naalden gebruikt waarvan het uiterste puntje gevormd wordt door één atoom. Het vereist engelengeduld om de naaldjes zo scherp te krijgen, maar de beloning is er dan ook naar: we kunnen routinematig, op de schaal van afzonderlijke atomen volgen, welke processen betrokken zijn bij de vorming van gewenste en ongewenste nanostructuren. Deze structuren zijn inmiddels van essentieel belang zijn in de geavanceerde apparatuur voor de productie van computerchips. Met de voortschrijdende miniaturisering, zijn de transistoren in deze chips ondertussen zo klein geworden, dat we deze met recht kunnen bestempelen als onze digitale 'engelen'. Op de vraag hoeveel er daarvan in één chip passen, geeft de halgeleiderindustrie voorsnog elk jaar een steeds indrukwekkender antwoord, waarmee we de wet van Moore nog een flinke tijd overeind zullen houden.

Dankwoord

Veel dank ben ik verschuldigd aan het groeiende leger van enthousiaste werknemers van ARCNL, waarover ik hier met gepaste trots kon schrijven. Het bestaan van ons onderzoekscentrum wordt mogelijk gemaakt door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek, NWO, de twee Amsterdamse universiteiten, UvA en VU, en de chipmachinefabrikant ASML, met additionele steun van de Gemeente Amsterdam en de Provincie Noord-Holland. Een bijzonder extra woord van dank gaat uit naar ASML voor de inspiratie die het bedrijf voortdurend levert voor de onderwerpen van het fundamentele onderzoek van ARCNL. Tenslotte vermeld ik hier graag nogmaals Dr. Marcel Rost en Dr. Vincent Fokkema, die bij de Universiteit Leiden de basis hebben gelegd voor de ontwikkeling van de hier beschreven STM-opstelling en de eerste experimenten met dit bijzondere apparaat.

Referenties en links

- [1] <http://www.asml.com>
- [2] <https://nl.wikipedia.org/wiki/Lithografie>
- [3] G.E. Moore, Gordon, *Electronics Magazine*. **38** (1965) 114–117.
- [4] <https://www.nwo.nl/actueel/nieuws/2013/advanced-research-centre-for-nanolithography-start-op-1-januari-2014.html>
- [5] V. Fokkema, *Real-time scanning tunneling microscopy studies of thin film deposition and ion erosion*, Proefschrift, Universiteit Leiden, 2011. Dit proefschrift is samen met de erbij horende STM-filmpjes online te vinden op: <https://openaccess.leidenuniv.nl/handle/1887/18057>