

Bennie Mols

Kijkduinstraat 121-2

1055 XW Amsterdam

bmols@orange.nl

Studiegroep Wiskunde met de Industrie

Chips schrijven met een beamer

Momenteel worden computerchips gemaakt door licht via een masker op de chip te laten vallen – een soort diaprojectie. ASML onderzoekt een nieuwe, maskerloze techniek, die net als een beamer werkt. Het traditionele, continue masker moet daarvoor worden vertaald naar een discreet grid van pixels. De daarvoor benodigde rekentijd is gigantisch. De uitdaging voor wiskundigen is om het aantal rekenstappen flink te reduceren.

Het Veldhovense bedrijf ASML is een wereldleider in lithografietechnieken voor de halfgeleiderindustrie. Lithografiemachines schrijven met ultraviolet licht structuren op een siliciumschijf, de wafer. De golflengte van dit licht is in de loop van de jaren afgenomen van 365 nanometer naar 193 nanometer (een nanometer is een miljoenste millimeter), en de structuren zijn gekrompen tot 45 nanometer. Hoe kleiner de structuren die de machine op een wafer kan afbeelden hoe meer transistoren per vierkante millimeter geplaatst kunnen worden en hoe krachtiger de computerchip wordt. Een enkele wafer bestaat uit een herhaald patroon van dezelfde computerchips. Bijna alle grote chipfabrikanten zoals IBM, Motorola en Samsung gebruiken ASML-machines.

Tot nu toe werkten lithografiemachines volgens het principe van een diaprojector. In de lithografie heet die 'dia' een masker. Het masker bevat het patroon dat op de wafer wordt geprint. Het bepaalt waar op de chip wel en waar niet een lijntje wordt geprint. ASML onderzoekt nu of maskerloze lithografie een interessante optie is. Het idee is om van het principe van een diaprojector over te stappen op het principe van een

'beamer'. De beamer gebruikt geen masker meer, maar creëert meteen een lichtpatroon dat direct op de siliciumwafer wordt afgebeeld. "In feite willen we het conventionele masker nabootsen via een systeem met miljoenen microscopische spiegeltjes", vertelt Wouter Mulckhuysen van ASML. "Neem een chip van 1 bij 1 centimeter, waarop je lijnen wilt schrijven van 45 nanometer breed. Stel dat je daarvoor pixels van twintig nanometer gebruikt. Dan heb je daarvoor 250 miljard pixels nodig. En elk pixel komt overeen met een spiegelstand. De vraag is vervolgens wat de juiste stand is van elk spiegeltje zodat we het gewenste patroon kunnen printen."

"Ons probleem zit vooral in het voortraject van het aansturen van de spiegels", legt projectleider Gosse de Vries van ASML verder uit. "Klanten die de lithografiemachine gebruiken, leveren een masker aan dat bestaat uit een heleboel veelhoeken. Dat is een continu patroon. Maar dat continue patroon moeten we samplen om er een discreet patroon van te maken. We zoeken een vertaling van het continue domein van veelhoeken naar een discreet patroon van pixels die een bepaalde grijswaarde hebben."

Kunnen de pixels niet ofwel wit ofwel zwart

zijn – ofwel er is een lijntje, ofwel er is geen lijntje? Nee, dat kan in het algemeen niet. Een overgang van een lijn naar een tussenruimte kan immers midden in een pixel vallen. De pixel krijgt dan een grijswaarde tussen wit en zwart in, afhankelijk van hoeveel van de lijn binnen het pixel valt. En omdat een chippatroon uit heel veel overgangen van een lijn naar een tussenruimte bestaat, hebben de meeste pixels een grijswaarde die tussen zwart en wit in ligt. De Vries: "Ons rekenprobleem zit nu in het met grote nauwkeurigheid berekenen van die grijswaarden."

Voor kleine oplages

Maskerloze lithografie zal de op maskers gebaseerde lithografie echter niet gaan vervangen, omdat de traditionele methode in dezelfde tijd meer chips kan printen. Toch biedt de beamermethode in een aantal gevallen belangrijke voordelen ten opzichte van de diaprojectiemethode. Ten eerste worden hoge maskerkosten bij kleine oplages vermeden. De maskerkosten zijn met het verkleinen van de af te beelden structuren exponentieel gestegen. Waar een maskerset voor negentig nanometer nog een half miljoen euro kostte, kost een maskerset nu, voor 45 nanometer, al bijna vier miljoen euro. Door de maskerkosten uit te sparen, kan een producent veel goedkoper kleine series, of zelfs unieke chips maken. Ten tweede kan de fabrikant veel goedkoper prototypen maken en tests draaien tijdens het ontwikkelen van de chip.

Omdat de klant direct over moet kunnen stappen van het testen met een maskerloos lithografiesysteem naar het produceren met een conventioneel maskergebaseerd lithografiesysteem, moet het maskerloze systeem het conventionele systeem imiteren met alle onvolkomenheden die in het maskersysteem zitten. Die onvolkomenheden ontstaan door optische afwijkingen. De kleine golflengte van het gebruikte uv-licht is niet verwaarloosbaar ten opzichte van de patronen in het masker. Daardoor wordt licht door het masker verstrooid: het komt niet alleen terecht op een plek waar dat volgens het masker zou moeten, maar ook een beetje daarbuiten. Het ontwerp van het masker wordt daarvoor gecorrigeerd. Maar dat betekent ook dat het ontwerp van het maskerloze patroon diezelfde correctie moet meenemen.

De studiegroep van wiskundigen ging uit van een stukje chip met afmetingen van 150 bij 50 micrometer. Het patroon dat in zo'n stukje moet worden belicht, bevat typisch zo'n zes miljoen veelhoeken, met elk gemiddeld twintig hoekpunten. Dat patroon moet nu worden afgebeeld op een grid met pixels die elk een grootte van twintig bij twintig nanometer hebben. Om voor de hele chip te berekenen hoe het continue patroon moet worden gesampled tot een discreet patroon, blijven nu 10^{17} rekenoperaties nodig te zijn.

"En we hebben maar een uur voor de berekeningen", zegt Mulckhuysen. "Dat lukt een gewone computer met een pentiumchip niet. Onze vraag aan de wiskundigen was dan ook om het aantal rekenoperaties bij het samplen significant terug te brengen."

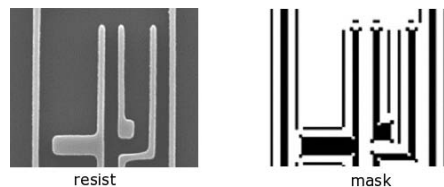
Fourierwereld

Wat het masker met het licht doet, valt wiskundig gezien handig te analyseren in de wereld van frequenties, in plaats van in de 'gewone' wereld van plaats en tijd. Om een signaal in de 'gewone' wereld om te zetten in de frequentiewereld, is een wiskundige truc nodig die Fouriertransformatie heet. "Licht dat door het masker wordt vervormd, heeft een bepaalde frequentie-inhoud. De projectielens verwijdert de hoge frequenties uit deze Fourierwereld", vertelt Eric Cator van de Technische Universiteit Delft. "Wat je dan overhoudt, kun je vanuit de frequentiewereld weer terugtransformeren naar de gewone wereld. In principe is het probleem goed gedefinieerd en oplosbaar, alleen kost het veel rekentijd. Je moet een discrete Fouriertransformatie op een raster met 10^{13} rasterpunten gaan doen."

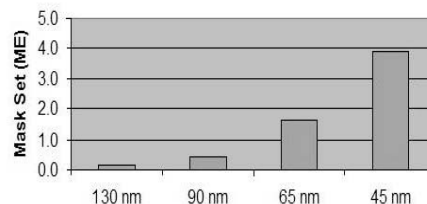
Het idee van de wiskundigen was nu om de scherpe hoeken in al die veelhoeken een

beetje af te vlakken. Want juist die scherpe hoeken corresponderen met de hoge frequenties, die je toch niet kan afbeelden, maar wel voor meer rekenwerk zorgen. Cator: "Als je eerst de hoeken afvlakt, en daarna de Fouriertransformatie uitvoert, dan heb je in principe een minder fijn grid nodig om toch de juiste precisie te halen. En inderdaad: dat principe werkt. Maar er zit een adder onder het gras. Want nu heb je het probleem verschoven naar het afvlakken van de hoeken. Dat werd onze nieuwe bottleneck."

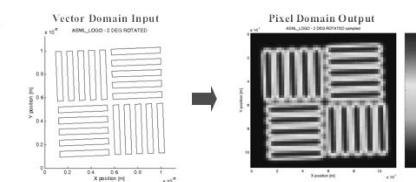
De wiskundigen onderzochten twee manieren om toch tot een snellere oplossing te komen. In de eerste manier werd de berekening voor het afvlakken niet exact uitgerekend, maar numeriek benaderd. Cator: "Onze simulaties laten zien dat je dan een factor vier



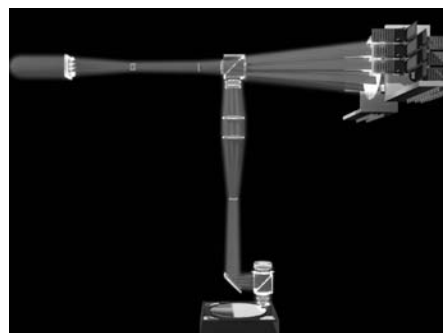
Voorbeeld van een traditioneel masker en de bijbehorende afdruk op een chip



Met een afnemende structuurgrootte op de chip nemen de maskerkosten exponentieel toe.



De input en de output bij de nieuwe methode om structuren op chips te schrijven



Het nieuwe projectiesysteem dat met spiegelatjes het gewenste patroon direct — zonder masker — afbeeldt op de chip

winst kunt behalen, maar dat is eigenlijk veel minder dan ASML nodig heeft."

De tweede manier gebruikt een meer exotische truc. Alle veelhoeken worden benaderd door een collage van aan elkaar geplakte driehoekjes. Cator: "Dat valt vrij snel uit te rekenen. Vervolgens ga je alle wiskundige operaties op die driehoekjes doen. Maar in plaats van dat we elke keer per driehoek een rekensom oplossen, maken we een opzoektabel met de uitkomst van een flink aantal driehoeken. En dan zoeken we voor een willekeurige driehoek de best passende in de tabel op. Met een relatief kleine opzoektabel krijgen we dan toch een hoge nauwkeurigheid. Weliswaar krijgen we zo tien- tot twintigmaal zo veel driehoeken als het oorspronkelijke aantal veelhoeken, maar de berekeningen per driehoek zijn nu een stuk overzichtelijker geworden." Hoeveel sneller deze methode in de praktijk werkt, konden de wiskundigen echter niet bepalen, omdat een week daarvoor te kort was. "Of de methode met de opzoektabel sneller werkt, hangt sterk af van hoe groot de tabel is, hoe snel de computerprocessor is, en hoe groot het computergeheugen is", zegt Wouter Mulckhuysen van ASML. "Maar we denken dat de verbetering niet genoeg is."

Computers parallel schakelen

Toch is ASML niet teleurgesteld door het resultaat. Mulckhuysen: "Wij hebben meegedaan met de studieweek om te kijken of we zelf met onze eigen methode toch niet dingen over het hoofd hadden gezien. We hebben nu eigenlijk de bevestiging gekregen dat dat waarschijnlijk niet het geval is. Onze eigen samplemethode bleek al behoorlijk efficiënt te zijn. Dat vertrouwen in onze eigen aanpak is voor ons de meerwaarde van de studieweek geweest."

Hoe gaat ASML het rekenprobleem dan in de toekomst oplossen? "We gaan niet verder zoeken naar een snellere rekenmethode", zegt projectleider Gosse de Vries. Het komt erop neer dat we voor het sampleprobleem gewoon meer computerkracht gaan inzetten. We gaan computers parallel schakelen, en als we dat met genoeg computers doen, dan lossen die het sampleprobleem toch binnen een uur op. We zochten een alternatief in een slimme rekenmethode, maar als wij die niet kunnen vinden, en de studiegroep ook niet, dan rest ons niets anders dan meer computerkracht. En dankzij de vooruitgang in de lithografie, is dergelijke hardware gelukkig beschikbaar."