

/technologie

# Elektronenlithografie

>>aansturing van 13.000 elektronenbundels tegelijkertijd

**Evolutie in de chipindustrie hangt nauw samen met de ontwikkeling van nieuwe productieapparatuur.**

**Optische lithografie loopt tegen fysieke en financiële grenzen aan. Lithografie met elektronen zou de oplossing kunnen bieden. Maar hoe schakel je elke elektronenbundel 2,5 miljard keer per seconde aan en uit?**

Lithografie is de belangrijkste stap in de productie van chips. Hierbij wordt het chippatroon op een schijf silicium (een wafer) afgebeeld. Op de wafer ligt een lichtgevoelige lak die wordt belicht door een waferstepper, een soort super diaprojector. De waferstepper flitst telkens een dia (een masker), dan schuift de wafer iets op en wordt opnieuw geflitst, tot de hele wafer is vol geflitst. Vervolgens wordt de lak ontwikkeld en de wafer geëtsd.

In de computerchipfabricage-industrie is een constante wedloop gaande naar meer en kleiner: kleinere details op een chip geven meer functionaliteit en meer snelheid. Fabrikanten van waferscanners bedenken van alles om die kleinere details nog te kunnen projecteren met licht. Om kleinere details te schrijven, is licht van een kortere golflengte nodig. De volgende generatie waferscanners gaat extreem ultraviolet (EUV) licht gebruiken, dat met 13,5 nm bijna röntgenstraling is. Dit vergt een ingewikkeld en compleet nieuw machineontwerp, met andere materialen en nog duurdere maskers.

## Lithografie met elektronenbundels

Een andere manier om kleinere details te maken is een andere 'lichtbron' te kiezen. MAPPER Lithography gebruikt elektronenbundels om de 'belichting' uit te voeren.

Een elektronenbundel kan kleinere structuren schrijven dan een lichtbundel. Deze techniek werkt zonder maskers, wat een aanzienlijke besparing oplevert. Het patroon wordt door een groot aantal elektronenbundels met behulp van een rasterescan op de wafer geschreven.

Al in de jaren zestig deden onderzoekers experimenten met deze techniek. Belangrijkste hindernis was de snelheid. Toen werkte de elektronenbundel als plotter, die tergend langzaam patroontjes schreef. Om snelheid te maken ontwikkelt MAPPER een apparaat met 13.000 bundels die allemaal tegelijk een deel van het patroon schrijven.

## Blanker en bundel

MAPPER maakt dit grote aantal bundels door één dikke bundel elektronen op een schijf silicium met 13.000 gaatjes te laten vallen. Onder deze schijf bevindt zich een soortgelijke schijf met gaatjes, de blanker, waarmee de bundels aan en uitgeschakeld kunnen worden. De gaatjes in deze schijven zijn tot op de nanometer nauwkeurig geëtsd, zodat er 13.000 bundels uit komen die even groot zijn en daarmee dezelfde intensiteit hebben. Elektrische lenzen buigen de bundels af in één dimensie. Elke bundel kan lijnen van pixels schrijven van twee  $\mu\text{m}$  lang en 3,5 nm breed. De wafer beweegt daar onderdoor, waardoor een strook van twee  $\mu\text{m}$  breed ontstaat. Alle 13.000 bundels samen halen een maximale chipmaat van  $13.000 \times 2 \mu\text{m} = 26 \text{ mm}$ . Dat is een standaard afmeting in de chipindustrie. Een animatie van dit proces staat op [www.mapperlithography.com/technology](http://www.mapperlithography.com/technology).

## Belichten: aquarelleren

Het schrijven van een patroon met elektronen is te vergelijken met aquarelleren. Elk elektron dat op de lak valt, resulteert in een vlek in de lak. De bundel heeft een diameter van 25 nm en kan tot op 3,5 nm nauwkeurig worden gepositioneerd. Alsof je met een grove

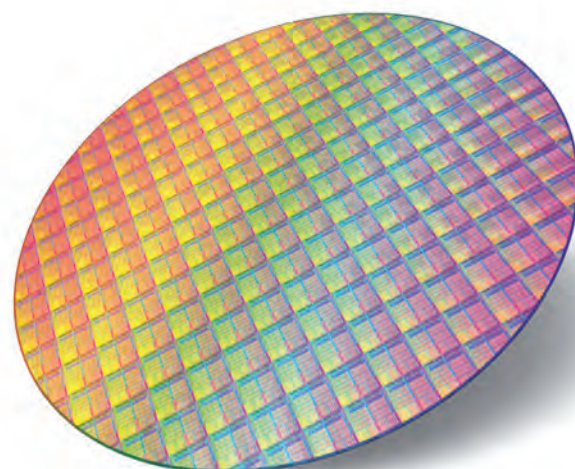


kwast een precieze tekening maakt. Dat lukt door de kwast steeds heel even aan te zetten, dan iets op te schuiven en opnieuw heel even aan te zetten. Alleen de som van een aantal belichtingen geeft voldoende dosis in de lak om boven de drempel uit te komen waarbij de lak gaat oplossen bij het ontwikkelen. Op die manier is het mogelijk om het plaatje in de fotolak op de wafer met een nauwkeurigheid beter dan 3,5 nm te positioneren.

## >>een elektronenbundel kan kleinere structuren schrijven dan een lichtbundel

### **Pattern Streamer**

De elektronenbundels staan permanent aan, maar kunnen worden onderbroken door optisch aangestuurde schakelaars op de blanker. Elke bundel kan apart aan of uitgezet worden. Door op het juiste moment de bundel aan en uit te zetten, ontstaat een patroon. De schakelaars worden bediend met lichtpulsjes. Die komen via een glasvezel van de pattern streamer, een computer die realtime alle elektronenbundels bestuurt. Het masker dat op de wafer wordt geprojecteerd, ligt in de pattern streamer opgeslagen als een bitmap van 1,2 Gigabyte per strook van 2  $\mu\text{m}$ . Deze oorspronkelijke bitmap wordt voor elke chip opnieuw gecorrigeerd. Bijvoorbeeld voor een kleine verschuiving of rotatie van de wafer op de stage.



Maar de machine zelf heeft ook afwijkingen. Bundels kunnen bijvoorbeeld een beetje scheef staan. In dat geval rekent de pattern streamer uit waar de scheve bundels de wafer raken en welke data uit de oorspronkelijke bitmap op die plek ligt. Hij verplaatst delen van de oorspronkelijke bitmap, zo ontstaat een nieuwe bitmap. Dat proces heet resampling, een zwaar rekenproces met veel data: zo'n 2,5 Gbit per seconde per strook. Door de zeer korte tijd tussen het meten van de afwijkingen en de belichting van de gecorrigeerde bitmap, is het noodzakelijk deze berekeningen realtime uit te voeren.

### Redundantie

Alle materiaal- en proceseigenschappen zijn straks bekend. Die zijn al verwerkt bij het aanmaken van het masker, nog voordat de data naar de pattern streamer gaat. De streamer verwerkt alleen realtime correcties voor machineafhankelijke aspecten zoals temperatuur en bundelafwijkingen. Met het gebruik van 13.000 bundels is de aanname dat er altijd een paar defect zijn. Daarom is het aantal bundels 2% hoger. De machine kan zelf achterhalen welke defect zijn. Dat er defecte bundels zullen zijn is gecombineerd met een andere belangrijke ontwerpkeuze: in twee stappen wordt ongeveer de helft van de 13.000 bundels aangestuurd. In de tweede stap wordt de wafer een klein stukje verschoven ten opzichte van de eerste stap zodat defecte bundels uit de eerste stap worden vermeden bij de 'belichting'. Een bijkomend voordeel is dat daarmee de omvang van de pattern streamer halveert. Dit levert een forse besparing op.

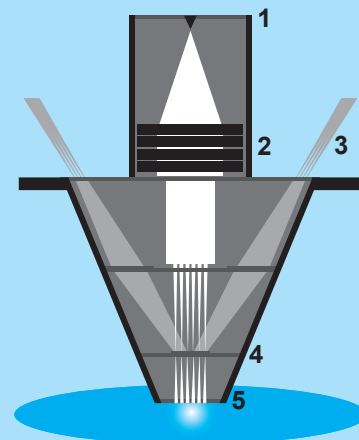
### Rekenkracht

De resampling geschiedt met behulp van programmeerbare logica (FPGA's), maar die kunnen een snelheid van 2,5 Gigabit per seconde niet aan. Daarom is het datapad per elektronenbundel in twintig stukken opgedeeld, die ieder op 125 MHz draaien. Eén FPGA kan vijf elektronenbundels aansturen. Er is dus een enorme hoeveelheid elektronica nodig om 13.000 bundels te besturen - zelfs in twee stappen. De pattern streamer is zo groot als twee dossierkasten, mede daarom wordt de machine in stappen ontwikkeld.

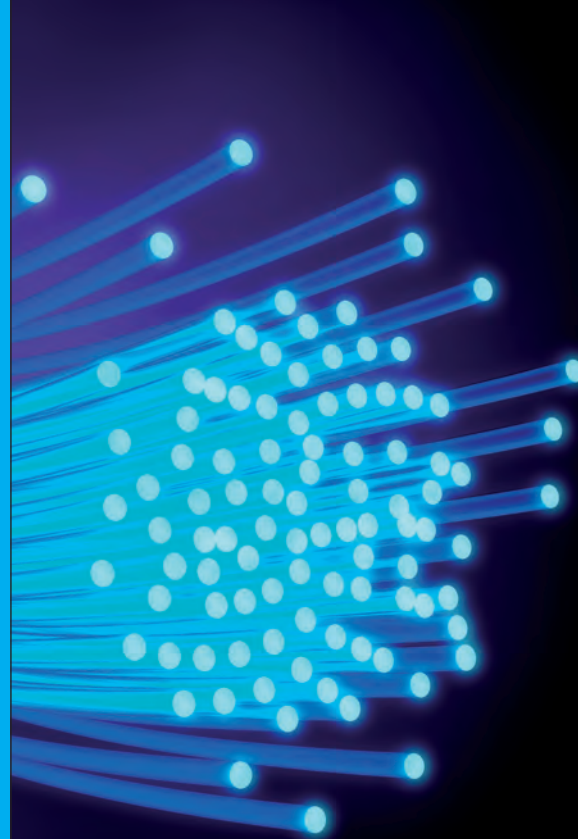
Eén FPGA kan vijf elektronenbundels aansturen. Er passen twaalf FPGA's op een bord.

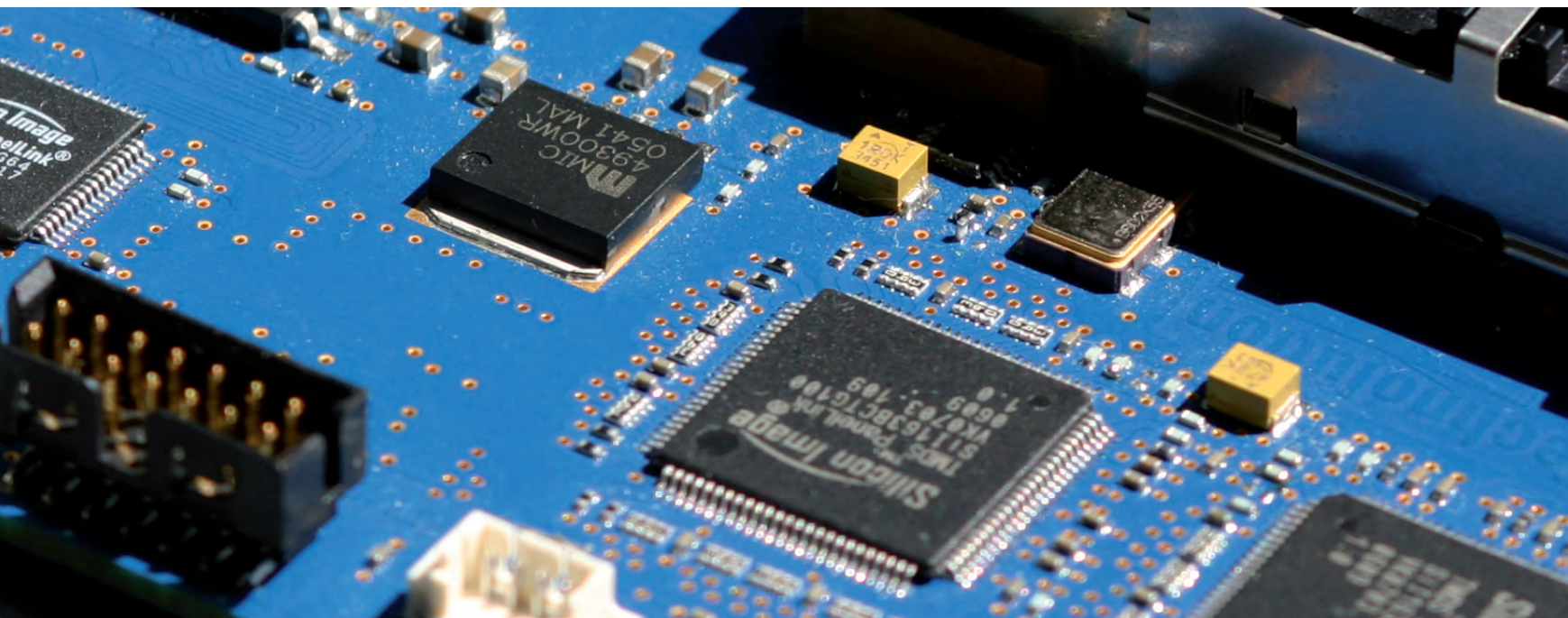
Twaalf van die borden gaan in één rek. Daar komen nog vier andere borden bij met harddisks en een computer om het geheel aan te sturen. De maskers van de te produceren chip staan opgeslagen op de harddisks en afhankelijk van de stap wordt een specifiek masker naar het RAM-geheugen overgezet.

Een rek is goed voor 720 kanalen. Om de helft van 13.000 bundels per stap aan te sturen, zijn in totaal elf rekken nodig. De pattern streamer heeft hiermee meer dan het strikt noodzakelijk benodigde aantal kanalen van 6500 beschikbaar. De mapping tussen kanalen en bundels is flexibel. Door de juiste toewijzing van de bundels aan de kanalen, is het mogelijk om ook als er kanalen van de pattern streamer of fibers van de verbinding defect zijn, toch nog een volledige belichting te maken in twee stappen.



1. Elektronenbron
2. Lens
3. Glasvezels
4. Blanker
5. Wafer





### Demo-machines

Er staan al twee demo-machines in het veld. Met 110 kanalen zijn deze in staat om kleine testpatronen te schrijven en groot genoeg om aan te tonen dat een reeks losse bundels één samenhangend patroon kan schrijven (beam stitching). De één staat in een research lab in Grenoble, de ander in een productiecleanroom van TSMC. Vooral die tweede genereert veel PR, daar is een producent bezig om de mogelijkheden van elektronenlithografie voor zijn processen te ontwikkelen.

## >>een machine die de grenzen van optische lithografie overschrijdt

### Schaalgrootte

Snelheid is essentieel bij de productie van IC's. Eén van de belangrijkste kenmerken is de doorvoersnelheid van machines: hoeveel wafers worden verwerkt in een uur? Momenteel werkt MAPPER aan een machine die tien wafers per uur kan belichten, de Matrix 10.1. Om de kosten die nu gemaakt moeten worden te beperken, wordt nu eerst een 1 wafer per uur machine, de Matrix 1.1, gemaakt. Hierin is het datapad (de pattern streamer en de blanker) tot 1300 bundels beperkt. Door elke wafer 20 keer met deze machine te belichten, ontstaat een 1 wafer per uur machine.

Uiteindelijk zal de Matrix 10.10 bestaan uit tien Matrix 10.1 machines naast elkaar, die samen honderd wafers per uur belichten. Met alle randapparatuur erbij is dat nog steeds kleiner dan een EUV-machine.

### Systeemopbouw

De elf rekken van de pattern streamer voor de Matrix 10.1 zijn samen ongeveer even groot als de rest van de e-beam machine. Met tien machines heb je dus ook tien pattern streamers. Ze komen in de serviceruimte onder of boven de clean room, waar een minder strenge stofklasse heerst. Een dikke bundel met 7800 glasvezels gaat door de vloer naar de machine.

De overige elektronica om de machine te besturen moet er wel zo dichtbij mogelijk staan; die meten en regelen en in die signalen zouden vertragingen optreden door te grote afstanden. Voor de pattern streamer maakt de afstand niet uit, omdat alle pattern streamer-signalen dezelfde vertraging hebben. Daarvoor corrigeert de centrale aansturing van de machine. Die geeft de waferstage en de pattern streamer een opdracht. Met als centrale 'kapstok' een nauwkeurige klok, waaraan alle acties worden gekoppeld: jij begint zo laat en jij begint tien milliseconden later.

### Getrapte ontwikkeling

Door de getrapte ontwikkeling wordt het risico gespreid. Een hele machine met deze onderdelen zou ook veel te duur zijn. De dure FPGA's en geheugens zijn nu nodig om deze snelheden te halen. Maar de ontwikkelaars kijken al vooruit naar de prijserosie en stijging in prestaties die als ijzeren wetten in de chipindustrie gelden. Tegen de tijd dat MAPPER de Matrix 10.10 gaat maken, zijn er vast en zeker andere FPGA's die meer kunnen en minder kosten. En voor de uitontwikkelde machine valt zelfs te denken aan ASICs: op maat gemaakte chips. Zo komt er in stappen een machine beschikbaar die de grenzen van optische lithografie overschrijdt door middel van deze innovatieve technologie.