

# Nieuwe meetmethode ontdekt en begrijpt elektromigratie in chips veel sneller

Imec ontwikkelde een nieuwe methode om elektromigratie – een van de belangrijkste betrouwbaarheidsproblemen in chips – sneller en beter te kunnen meten dan met de standaardmethode, én dit op een niet-destructieve manier.

In het kader van haar doctoraatsonderzoek ontwikkelde Sofie Beyne samen met imec-collega's een nieuwe meetmethode om elektromigratie op te sporen in de interconnectiemodule (of back-end-of-line, BEOL) van chips. Het is de perfecte aanvulling op de standaardmethode – volgens de Wet van Black – en het biedt ook nieuwe mogelijkheden om meer inzicht te krijgen in elektromigratie.

## **Elektromigratie, een probleem dat steeds groter wordt**

Elektromigratie in de BEOL van chips vindt plaats in de metalen (koper)baantjes. Door hoge stroomdichtheden in die baantjes gaan de koperatomen bewegen en ontstaan er leegtes of – net het tegenovergestelde – ophopingen. Daardoor doen de koperbanen hun werk niet meer (o.a. door kortsluitingen) en kan de chip zelfs falen.

Het fenomeen is al meer dan 100 jaar gekend. De eerste commerciële chips werkten al na 3 weken niet meer, ten gevolge van elektromigratie. Gelukkig gaan chips vandaag veel langer mee, niet omdat elektromigratie niet meer plaatsvindt, maar omdat in het ontwerp van het circuit de effecten van elektromigratie kunnen omzeild worden. Toch steken er soms nog elektromigratie-problemen de kop op: zo bv. begin jaren '90 toen een raketlancering op Cape Canaveral moest onderbroken worden doordat de boordcomputer het niet meer bleek te doen. Na verder onderzoek bleek het om elektromigratie te gaan.

***Elektromigratie is immers meer dan ooit relevant. Doordat steeds fijnere metalen baantjes gebruikt worden, met hogere stroomdichtheden tot gevolg, is er meer kans voor elektromigratie. Ook het gebruik van nieuwe materialen maakt het belangrijk om het fenomeen in detail te bestuderen en te begrijpen alvorens een nieuw materiaal te gebruiken in commerciële chips.***

De standaard-betrouwbaarheidstest voor elektromigratie bestaat erin om het circuit aan een heel hoge temperatuur ( $> 150^{\circ}\text{C}$ ) en stroomdichtheid ( $j > 1\text{MA}/\text{cm}^2$ ) te onderwerpen. Hierdoor zal elektromigratie versneld optreden. Vervolgens wordt de Wet van Black gebruikt om hieruit de verwachte levensduur van de chip te extrapoleren.

Deze 'versnelde' testen hebben verschillende nadelen. Een ervan is dat er mogelijk andere processen optreden dan bij een normale temperatuur en stroomdichtheid en de voorspellingen dus niet betrouwbaar zijn. Ook vragen de testen veel tijd en zijn ze destructief. Er kunnen dus nadien geen andere testen meer gedaan worden op dezelfde chip (zoals bv. elektrische testen).

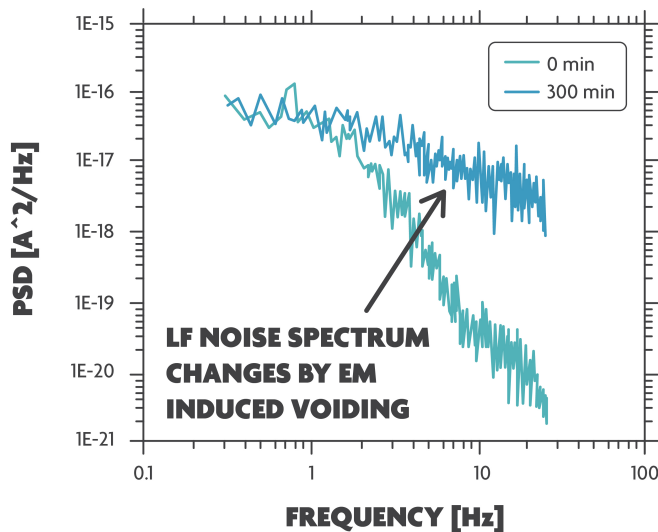
Zeker met het gebruik van nieuwe materialen – o.a. Kobalt – kunnen de standaardtesten maanden duren omdat zeer hoge temperaturen en stroomdichtheden nodig zijn vooraleer elektromigratie optreedt.

## **Het waterval-geluid in chips**

Als een DC-stroom door een metaal wordt gestuurd, ontstaan er kleine stroomschommelingen als gevolg van elektron-scattering. Deze kleine schommelingen in de tijd kunnen gemeten worden, en met Fouriertransformatie omgezet worden naar het frequentiedomein. Zo kan de spectrale vermogensdichtheid (power spectral density, PSD) berekend worden.

In metalen blijkt deze spectrale vermogensdichtheid het  $1/f$ -spectrum te volgen, in het lage frequentiedomein. Waarom dit zo is, is niet gekend. Dit soort  $1/f$ -ruis, ook wel 'roze ruis' genoemd, komt ook in de natuur voor, bv. als het geluid van een waterval. Zowel ruis die het  $1/f$ - als het  $1/f^2$ -spectrum volgt, noemt men lagefrequentie-ruis omdat bij dit soort ruis de lage frequenties sterker doorklinken dan de hoge (in tegenstelling tot witte ruis waar alle frequenties gelijk zijn).

Het meten van de lage-frequentieruis in chips is interessant omdat het plots blijkt te veranderen wanneer een fenomeen als elektromigratie optreedt. En er zijn verschillende voordelen verbonden aan een nieuwe testmethode op basis van deze ruis (in vergelijking met de standaardmethode): de methode is niet-destructief, veel sneller (wat zeker belangrijk is voor nieuwe metalen), en zorgt voor meer inzicht in de aard en het ontstaan van elektromigratie (door 'gewone' temperaturen te gebruiken, is het ook waarschijnlijker dat de fenomenen worden opgemeten die ook onder de echte werkingsomstandigheden van de chips optreden).

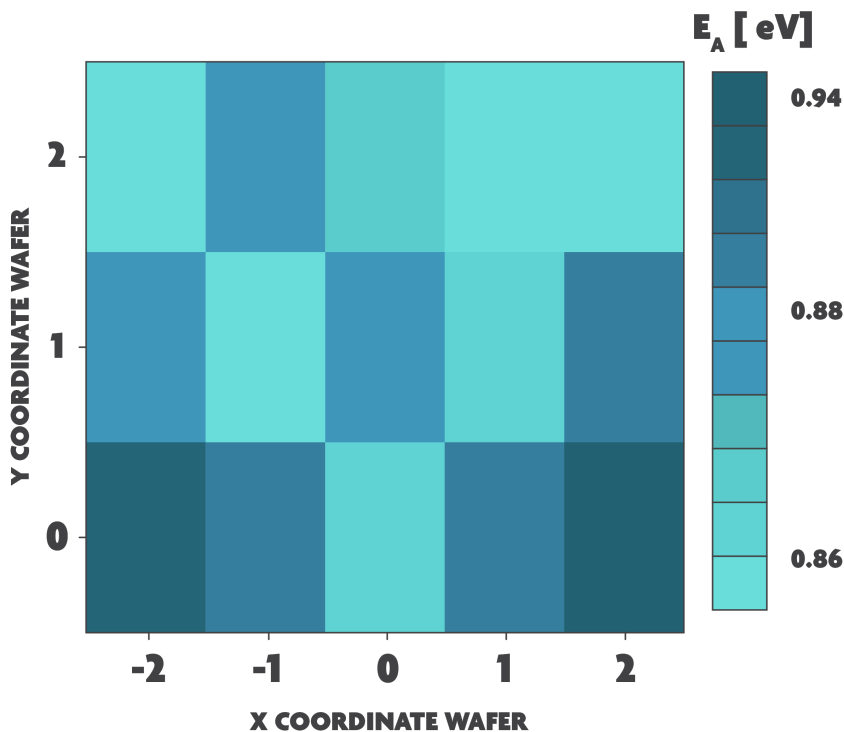


*Bij 300 minuten elektromigratie-stress ziet men een verandering in de lage-frequentie ruis. Dit kan toegeschreven worden aan leegtes die ontstaan in de metaalbaantjes, ten gevolge van elektromigratie.*

## **Nieuwe inzichten dankzij nieuwe meetmethode**

De nieuwe meetmethode voor elektromigratie wordt al gebruikt door imec-onderzoekers. Op die manier leverde het al verrassende inzichten op. Een eerste vaststelling is dat de activatie-energie voor elektromigratie afneemt wanneer fijnere metaalbaantjes gebruikt worden. Dit werd bestudeerd voor koper. Als koperbaantjes fijner worden dan 30nm, zijn er veel polykristallen aanwezig en zal elektromigratie sneller optreden door diffusie aan de randen van deze kristallen (korrelgrensdiffusie of grain boundary diffusion). Bij het opstellen van ontwerpregels veronderstelt men typisch één activatie-energie voor BEOL-interconnecties die bestaan uit hetzelfde materiaal, maar het zou dus beter zijn om uit te gaan van een lagere activatie-energie bij dunnere baantjes.

Ten tweede kunnen met deze methode variaties vastgesteld worden tussen verschillende chips op een wafer. Zo zouden wafer maps kunnen gemaakt worden met aanduiding van verwachte levensduur per chip, hetgeen onmogelijk is met de standaardmethode.



Variabiliteit in de activatie-energie (bepaald via het meten van de lagefrequentie-ruis), per chip op een wafer. Dit soort wafer map is onmogelijk met standaardtesten voor elektromigratie.

Een derde onderzoek waarvoor de nieuwe test gebruikt werd, is om de elektromigratie-betrouwbaarheid van Ruthenium-metaal, dat als alternatief bekeken wordt voor de koperbaantjes in de BEOL, te testen. Met de standaardmethode zou de test heel lang duren omdat deze nieuwe materialen een lange levensduur hebben en lange tijd een zeer hoge temperatuur en stroomdichtheid moet aangelegd worden vooraleer faling optreedt. Het bepalen van de activatie-energie met de traditionele testmethodes zou dus bijzonder tijdrovend zijn, maar met de nieuwe test-methode kon de activatie-energie wel snel bepaald worden.

Tenslotte werd ook de invloed van verschillende soorten barrières op elektromigratie bestudeerd. Ruthenium-liners bleken bijvoorbeeld een positief effect te hebben op de elektromigratie-weerstand van koper interconnecties, evenals het toevoegen van Mangaan aan de seedlayer.

## Nieuwe meetmethode klaar voor gebruik

Naast imec-onderzoekers, zijn ook partnerbedrijven en universitaire onderzoeksgroepen geïnteresseerd om ze te gaan gebruiken om meer inzicht te krijgen in elektromigratie, in mogelijke aanpassingen die beter beschermen tegen elektromigratie, in nieuwe materialen enz.

**Voor chipfabrikanten is de methode interessant voor zowel het onderzoek als de productie. In de productie is het de ideale aanvulling op de standaardmethode omdat het nieuwe mogelijkheden biedt, zoals dieper fundamenteel inzicht en voorspellingen van de elektromigratie-weerstand van individuele chips.**

Zo kunnen 'wafer maps' opgemeten worden waarop men de variatie in elektromigratie activatie-energie en defect-concentratie per chip kan zien. De chips met een hogere activatie-energie en/of lagere defectconcentratie, zullen een langere levensduur hebben, en kunnen voor kritische toepassingen gebruikt worden (zoals de ruimtevaart en automotieve).

---

## Een doctoraat op imec? De ideale mix van academisch onderzoek en industriële relevantie

Imec werkt samen met universiteiten om onderzoekers de kans te geven om in een hightech omgeving en state-of-the-art cleanroom onderzoek te doen. Ook de internationale omgeving en het netwerk van partners maakt een doctoraatsonderzoek in deze omgeving uiterst interessant. Sofie Beyne bijvoorbeeld kreeg de kans om twee internships te doen bij partners waardoor ze in korte tijd heel veel ervaring opdeed. Eind 2019 zal ze haar doctoraatsverdediging afleggen en een job starten in de V.S., bij een bedrijf dat ze leerde kennen via het imec-netwerk.

Meer info over doctoraatsonderzoek op imec kan je vinden op deze [website](#).

### **Meer weten?**

Volgende papers kunnen aangevraagd worden via [ons contactformulier](#).

- "1/f noise measurements for faster evaluation of electromigration in advanced microelectronics interconnections", Journal of Applied Physics 2016
- "Study of the enhanced electromigration performance of Cu(Mn) by low-frequency noise measurements and atom probe tomography", Applied Physics Letter 2017
- "Study of electromigration mechanisms in 22nm halfpitch Cu interconnects by 1/f noise measurements", IITC 2017



---

## Over Sofie Beyne

**Sofie Beyne** is doctoraatsstudente bij imec en de KU Leuven, waar ze, als deel van het REMO-team, elektromigratie in nano-interconnecties onderzoekt. In 2015 behaalde ze het diploma 'Master in de ingenieurswetenschappen: materiaalkunde' aan de KU Leuven. Het eerste jaar van die masteropleiding volgde ze aan EPFL in Zwitserland, in het kader van een uitwisselingsprogramma. Haar werk wordt gefinancierd door het fonds voor wetenschappelijk onderzoek in Vlaanderen (FWO).