

Semiconductor technology & processing, Silicon Photonics

Een test-station dat silicium-fotonica-technologieën helpt ontwikkelen

Imec en FormFactor stellen een uniek test-station voor waarmee silicium-fotonica-componenten en -circuits op een semi-automatische manier op wafer-niveau kunnen getest worden.

Intro

De voorbije decennia zijn zowel de rekenkracht van logische chips als de opslagcapaciteit van geheugenchips exponentieel toegenomen. Als gevolg daarvan nam ook de vraag naar bandbreedte voor input/output (I/O) alsmat toe. Vandaag is er een totale bandbreedte van terabyte-per-seconde nodig voor I/O op het niveau van de chip. De technologie van silicium-fotonica (Si-fotonica) belooft die grote hoeveelheid aan bandbreedte te kunnen bieden, vooral voor toepassingen waar een grote afstand moet overbrugd worden tussen verschillende componenten. Met Si-fotonica-technologie kunnen zeer performante optische zender/ontvangers (of transceivers) gemaakt worden, waarin passieve componenten (zoals golfgeleiders en optische filters) zowel als actieve componenten (zoals fotodiodes en modulators) op eenzelfde silicium-wafer kunnen gecombineerd worden.

De economische haalbaarheid van optische interconnects hangt in grote mate af van de kost om optische transceivers te maken. Door Si-fotonica te gebruiken, kunnen we de fabricagekost van optische componenten verkleinen, aangezien we gebruik maken van bestaande infrastructuur voor het maken van CMOS-chips. Maar zoals alle micro-elektronica-producten moeten optische transceivers ook getest worden op fabricagefouten, vooraleer ze met een aanvaardbare kwaliteit verstuurd worden naar de klant.

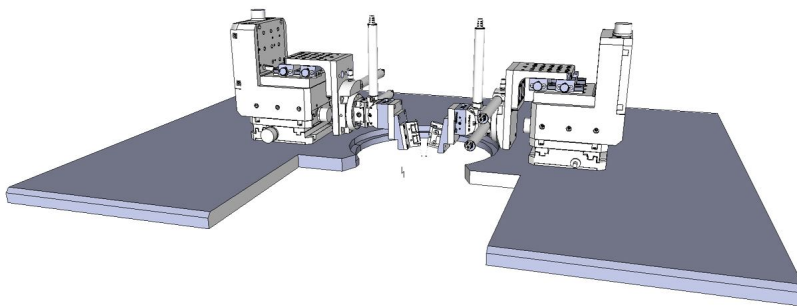
Het testen van de actieve en passieve componenten van geïntegreerde Si-fotonica-circuits draagt in grote mate bij tot de kost van optische links. De fabricage-testen worden typisch al uitgevoerd op het niveau van de wafer om te vermijden dat slechte chips verpakt moeten worden. Het 'verpakken' (of packagen) van chips is immers erg duur. Wanneer Si-fotonica zich nog in de technologie-ontwikkelingsfase bevindt, werden deze testen tot nog toe uitgevoerd met manuele test-stations. Maar nu het volume van optische I/O-chips toeneemt, hebben we (semi-)automatische test-stations op wafer-niveau nodig om de ontwikkeling en productie van optische links te versnellen.

Om een beeld te geven van de nood aan deze (semi-)automatische test-stations, nemen we imecs Si-fotonica-platform als voorbeeld. Dit platform co-integreert een verscheidenheid aan passieve en actieve componenten, en mikt hiermee op de telecom- en datacom-industrie. Naast de ontwikkeling van heel specifieke modules, heeft imec ook een bibliotheek ontwikkeld met standaard-componenten. Maar om voorspelbare, stabiele, betrouwbare en kostenefficiënte componenten te kunnen garanderen, hebben we efficiënte testapparatuur nodig die, op wafer-niveau, nauwkeurige en snelle feedback kan geven aan procesingenieurs, en aan ontwerpers van optische componenten en circuits.

Een flexibele test-setup

Imec en FormFactor hebben een fotonica-test-station ontwikkeld waarmee op een semi-automatische manier zowel passieve als actieve Si-fotonica-componenten op wafer-niveau (zowel 200mm als 300mm) kunnen getest worden. In een semi-automatisch test-station wordt een wafer manueel geladen, waarna de 'prober' automatisch over de wafer gaat.

Het systeem is opgebouwd rond het Cascade PA300 semi-automatische $\varnothing 300$ mm probe-station van FormFactor, en is uitgerust met een RF-probe manipulator en twee gemotoriseerde fiber-manipulators. Met deze fiber-manipulators kan elke combinatie van optische en elektrische poorten binnen een fotonica-circuit gemeten worden. Voor passieve componenten (zoals vezel-rooster- (of fiber-grating-) koppelaars, golfgeleiders en filters) kan er een optische-transmissie-spectrum opgenomen worden. Voor actieve componenten (zoals fotodiodes en modulators) kunnen er elektrische (bij DC en bij RF-frequenties) en elektro-optische parameters gemeten worden.



Schematische voorstelling van de twee gemotoriseerde fiber-manipulators, die gemonteerd zijn op de 'platen' van FormFactors Cascade PA300 semi-automatisch probe-station.

De ontwikkeling van een test-station voor fotonica-wafers: uitdagingen

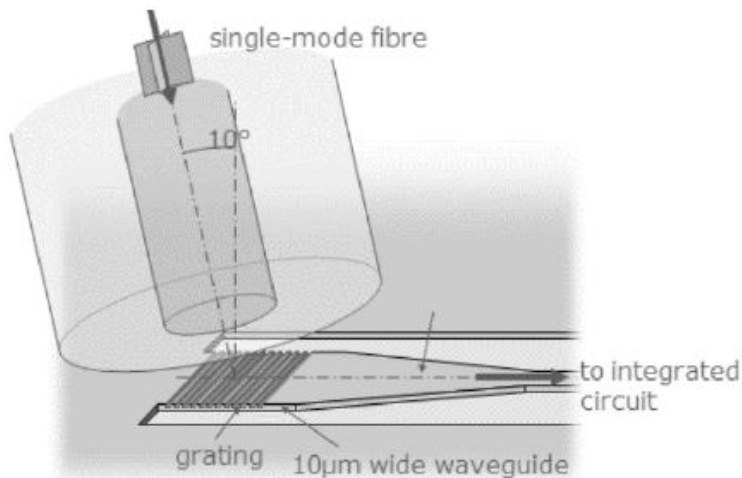
De ontwikkeling van hardware om fotonica op wafer-niveau te testen, is voor de bouwers van testapparatuur een nieuw domein dat zijn eigen uitdagingen heeft.

Om optische testen op wafer-niveau te kunnen doen, hebben we eerst en vooral een methode nodig waarmee het licht, afkomstig van bijvoorbeeld een 'single-mode' optische vezel, efficiënt kan gekoppeld worden met de optische circuits op de wafer. Vaak worden hiervoor fiber-grating-koppelaars gebruikt, die een optische koppeling (uit het vlak) mogelijk maken tussen de golfgeleider op de wafer en de single-mode-vezel. Om de variabiliteit van de koppeling zo klein mogelijk te houden, is er vóór elke meting een nauwkeurige en robuuste stap nodig om de vezel met de fiber-grating-koppelaar te aligneren. Daarnaast is ook de topografie van de houder (of 'chuck') belangrijk, die de wafer vasthoudt tijdens het testen. Elke oneffenheid kan namelijk de metingen beïnvloeden.

Tenslotte vormen ook het kunnen omgaan met ongewenste fluctuaties en het bekomen van kwalitatieve, consistente datasets van wafer tot wafer (of van lot tot lot) een belangrijke uitdaging. De data kan gemakkelijk beïnvloed worden door een verandering van polarisatie van het inkomend licht (veroorzaakt door de beweging van de optische vezel), of door een verandering in insertieverlies (of signaalvermogen) bij de connectoren van de optische vezel. Daarom is het zeer belangrijk om de herhaalbaarheid van de meetresultaten op korte termijn en de reproduceerbaarheid ervan op lange termijn te kunnen monitoren en te kunnen garanderen.

Licht koppelen in optische circuits

Het team maakte gebruik van single-mode fibers en fiber-grating-koppelaars om licht van het uiteinde van de optische fiber (de 'pigtail') te koppelen met de circuits op de wafer. De single-mode fibers worden bijna loodrecht op het wafer-oppervlak geplaatst, boven een fiber-grating-koppelaar op de wafer. Op deze manier wordt het licht gecollecteerd en in de golfgeleider op de wafer geleid. Maar wanneer de fiber niet goed gealigneerd is ten opzichte van de fiber-grating-koppelaar, kan er al bijkomend insertieverlies optreden tijdens de optische metingen. Daarom werd er een routine ontwikkeld voor het automatisch en nauwkeurig aligneren van de fiber. Tijdens deze routine wordt gezocht naar het optimaal doorgestuurde optische vermogen tijdens een scan-beweging van de fiber langsheen een vooraf gedefinieerd traject. De voorgestelde routine leidt tot een stabiele fiber-alignering met een variabiliteit kleiner dan 0.07dB (+/- 3 σ) voor een gemeten optisch insertieverlies tussen fiber en wafer. Het is belangrijk om deze aligneerstap vóór elke meting uit te voeren.



Schematische voorstelling van een single-mode fiber die boven een fiber-grating-koppelaar is geplaatst. De fiber bevindt zich in een hoek van 10° ten opzichte van de verticale. Het licht wordt geleid in een golfgeleider van 10µm breed, die zich op de wafer bevindt.

Impact van de topografie van de wafer-houder

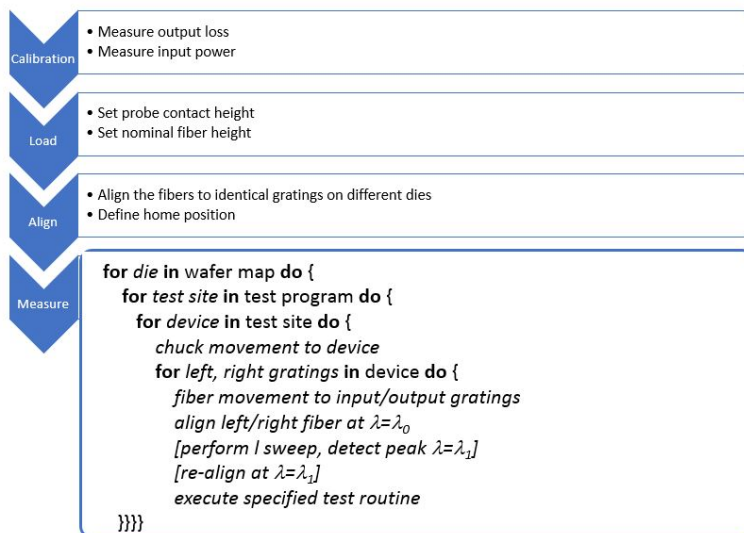
Het team keek ook naar de impact van de topografie van de houder op de optische metingen. Zo zal elke oneffenheid in deze houder (bijvoorbeeld, een verschillende hoogte tussen de randen en het centrum van de houder) de afstand tussen de tip van de fiber en de wafer beïnvloeden. Dit kan op zijn beurt een bijkomend insertieverlies veroorzaken. In een reeks experimenten stelde het team vast dat dit insertieverlies ongeveer 0,05dB/mm kan variëren met de afstand tot de fiber, voor het ontwerp van de referentie grating-koppelaar.

Daarom moet de topografie van de houder vóór het gebruik van de meet-setup zorgvuldig geëvalueerd worden. Een alternatieve oplossing bestaat erin om sensoren te integreren die de hoogte van de fiber-tip boven de wafer kunnen meten. Daarnaast werd er ook een compensatie voor de topografie van de houder geïmplementeerd, gebaseerd op software. Hiermee kan de spreiding van het insertie-verlies over de wafer gereduceerd worden.

Kalibratie en meetrecept

Vooraleer met een meting te starten, moet er een optische kalibratiestap worden uitgevoerd. Tijdens deze stap worden de optische verliezen in alle componenten van de setup (zoals optische splitsers, polarisatie-controller en fiber-connectoren) over het ganse golflengtebereik van de laserbronnen gekarakteriseerd. Het opgenomen 'verlies-spectrum' wordt dan gebruikt als referentie voor alle volgende meetdata. Tijdens deze kalibratiestap wordt ook het optisch vermogen bij de tip van de 'pigtail' gemeten. De gekliefde fibers kunnen immers vervuild geraken aan de tip, waardoor het bundelprofiel of het optische vermogen bij de tip kan veranderen.

Na het laden van de wafer, het optisch kalibreren en het aligneren van de fiber, kan het testprogramma worden uitgevoerd. Dit testprogramma verschilt van product tot product, afhankelijk van de fotonica-componenten die in het ontwerp geïntegreerd zijn. Om het testen te vergemakkelijken, heeft imec een bibliotheek van test-routines ontwikkeld, waaronder metingen van het verlies, van de detector, van de modulator en van de verstrooiingsparameter (S).

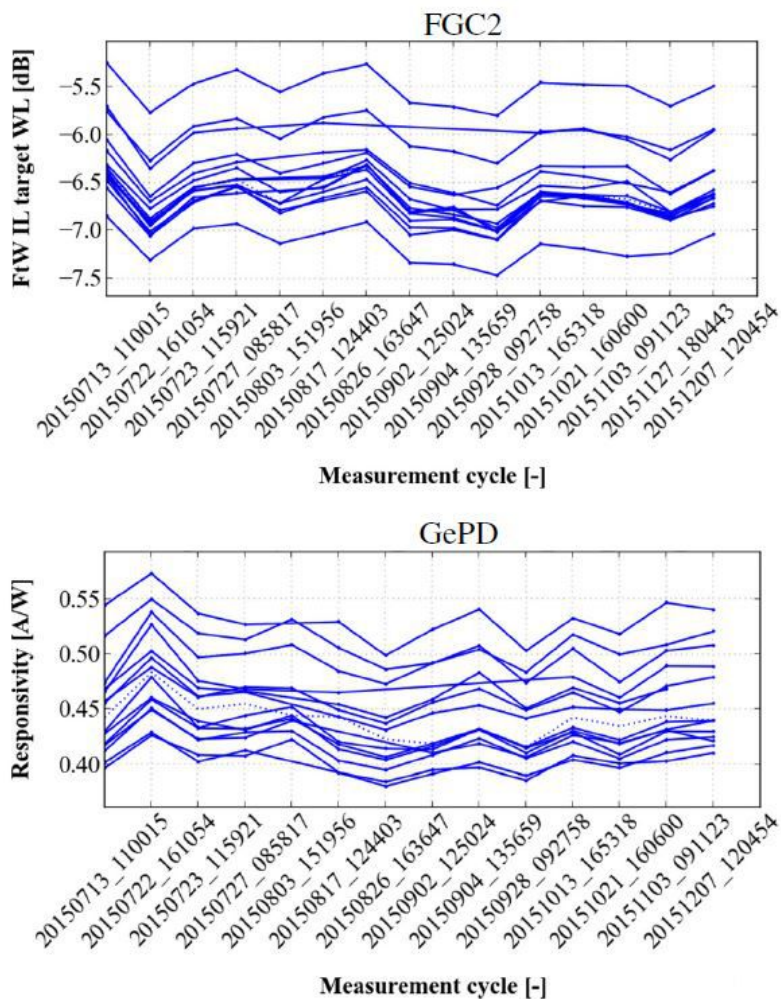


Optische en elektro-optische meetprocedure

Reproduceerbaarheid van de meetresultaten

Om consistentie tussen de verschillende datasets te garanderen, heeft het team de herhaalbaarheid van de meetdata op korte termijn en de reproduceerbaarheid op lange termijn gemonitord. Daarvoor werd een referentie-wafer gebruikt. Op deze wafer waren 14 chips geselecteerd, die elk twee verschillende fiber-grating-koppelaars (voor transverse elektrische en transverse magnetische polarisatie van het invallend licht) en een fotodetector bevatten. Deze 14 chips vormen een statistisch geldige vertegenwoordiging van de ganse wafer. Ze zijn uniform verspreid over de wafer, en bevinden zich zowel op de rand als in het centrum. De parameters van deze chips (nl. het insertieverlies tussen fiber en wafer, en de responsiviteit van de detector) werden met regelmatige tijdsintervallen gemeten. De herhaalbaarheid/reproduceerbaarheid wordt dan gedefinieerd als de standaardafwijking van deze datapunten voor een gegeven chip.

Over een periode van vijf maanden werd een reproduceerbaarheid van beter dan 0.8dB (ffl3 σ) voor het insertieverlies verkregen, en een reproduceerbaarheid van 0,09A/W in responsiviteit van de fotodetector. Uit een analyse van de meetdata konden drie belangrijke bronnen van variabiliteit afgeleid worden: (1) een drift in de settings van de elektronische polarisatiecontroller, (2) verliezen ten gevolge van de optische setup, te wijten aan het ontkoppelen en koppelen van fibers, en (3) contaminatie van – of zelfs schade aan – de ‘pigtail’. Deze resultaten tonen aan hoe belangrijk het is om regelmatig kalibraties uit te voeren, en te corrigeren waar nodig.



Typische grafiek voor het bepalen van de reproduceerbaarheid van de meet-resultaten. De efficiëntie van de fiber-grating-koppeling en de responsiviteit van de fotodetector werden voor een bepaalde wafer gedurende vijf maanden gemeten, voor 14 chip-locaties.

Van semi-automatische optische tester naar volautomatische configuratie

Het elektro-/optisch testsysteem zoals hierboven voorgesteld, werd in imecs optisch test-lab geïnstalleerd, en wordt momenteel routinematig gebruikt voor het testen op wafer-niveau van Si-fotonica-componenten. Dit test-station is gebouwd rond het Cascade PA300 semi-automatisch $\varnothing 300\text{mm}$ probe-station van FormFactor, en maakt gebruik van de elektro-/optische setup en van de positionerings- en alignerings-oplossingen die door imec werden ontwikkeld.

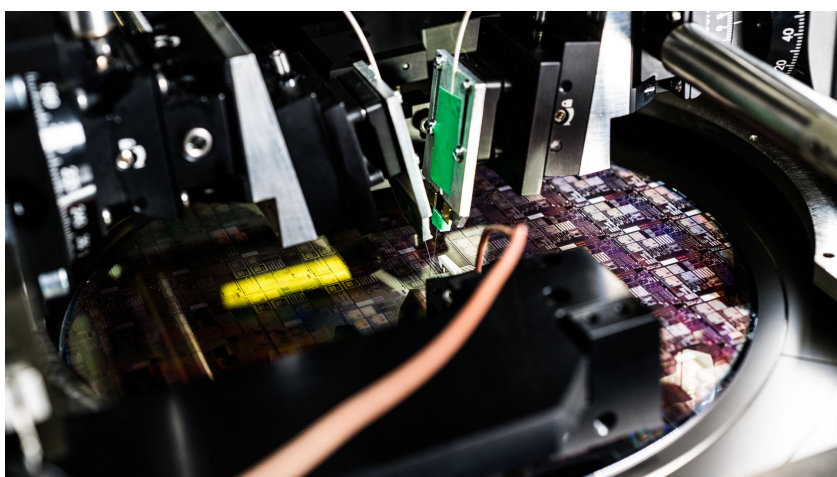


Foto van het semi-automatische Si-fotonica test-station.

Naar de toekomst toe heeft imec FormFactors Cascade CM300xi geselecteerd als probe-platform van de volgende generatie voor de ontwikkeling en fabricage van Si-fotonica-componenten. Dit nieuwe wafer-probe-station beschikt over een automatische positionering voor fibers, over een optisch aligneer-systeem dat piëzo-gebaseerd is, en over een automatische lader voor wafers, wat leidt tot een volautomatische configuratie.

Een bijkomende route naar snellere metingen is het gebruik van fiber-arrays, in plaats van enkelvoudige fibers. Deze fiber-arrays kunnen beschouwd worden als het optische equivalent van de elektrische probe-kaart. Hiermee kunnen meerdere optische componenten parallel worden gemeten.

Imec onderzoekt het gebruik van assemblages die gemaakt zijn uit Si V-groeven en die tot 16 fibers kunnen bevatten. Maar het optisch kalibreren van een setup met fiber-arrays is relatief complex. Hiervoor zijn specifieke kalibratie-procedures nodig die kunnen compenseren voor de verschillende fouten in het optisch meetsysteem (bijvoorbeeld, afkomstig van de variabiliteit in de fiber-array zelf, van mogelijke vermogen-splitsers on- of off-chip, of van verschillende kanalen die het vermogen meten).



Biografie Jeroen De Coster

Jeroen De Coster behaalde een Master in Electrical Power Engineering (2001) en een Doctoraat in Electrical Engineering (2006) aan de KU Leuven. Zijn doctoraatswerk ging over het ontwerpen, modelleren en karakteriseren van RF-MEMS-systemen. Sinds 2006 werkt hij bij imec in Leuven, waar hij meetapparatuur en -procedures ontwikkelt voor functionele karakterisering, en opbrengst- en betrouwbaarheidstesten uitvoert voor MEMS, silicium-fotonica en geheugenchips.

Biografie Erik Jan Marinissen

Erik Jan Marinissen is Principal Scientist bij imec, waar hij verantwoordelijk is voor 'research on test' en 'design-for-test'. Daarnaast is hij ook Visiting Researcher aan de Technische Universiteit Eindhoven, Nederland. Voordien werkte hij bij NXP Semiconductors en Philips Research Laboratories in Eindhoven. Marinissen heeft een MSc in Computing Science (1990) en een PDEng in Software Technology (1992), beide behaald aan de Technische Universiteit Eindhoven. Hij is (co-)auteur van 280+ journal- en conferentiepapers, en (mede-)uitvinder van 15 toegekende US/EP patentfamilies. Marinissen is ook IEEE Fellow en Golden Core member bij de Computer Society.





Biografie Joris Van Campenhout

Joris Van Campenhout is Directeur van het Optical I/O industrieel affiliatie-programma bij imec, dat zich richt op de ontwikkeling van een schaalbare en 'industriële' optische interconnect-technologie (short reach), gebaseerd op silicium-fotonica. Voor hij in 2010 bij imec begon te werken, was hij postdoctoraal onderzoeker bij IBM's TJ Watson Research Center (VS). In 2007 behaalde hij een doctoraat in Electrical Engineering aan de Universiteit Gent, voor zijn werk op de hybride integratie van elektrisch aangedreven III-V microdisk lasers op Si-fotonica golfgeleider-circuits. Joris is houder van 7 patenten en is (co-)auteur van meer dan 100 papers in het domein van Si geïntegreerde fotonica.

Biografie Bryan C. Bolt

Bryan C. Bolt is Director of Engineering, Systems BU, bij FormFactor, Inc. Sinds 1988 bekleedde hij verschillende functies (engineering en technisch management) in de domeinen van optica en halfgeleiderapparatuur, in bedrijven zoals Etec Systems, Applied Materials, ESI en Novellus Systems. Bryan behaalde een doctoraat in Electrical Engineering aan de University of North Carolina in Charlotte, en is gediplomeerd Professional Mechanical Engineer (P.E.) in de staat Oregon.





Biografie Dan Rishavy

Dan Rishavy is Directeur Market Development voor de systems business unit van FormFactor. Dan behaalde het diploma van Electrical Engineering aan de University of South Florida, en een MBA aan West Texas A&M University. Hij werkt al meer dan 20 jaar in verschillende sub-domeinen van halfgeleider-testing. Tijdens zijn carrière bekleedde Dan verschillende functies in applicaties, product management en marketing, in bedrijven als Hewlett Packard, Agilent, Verigy, Tokyo Electron, Cascade Microtech en FormFactor.