

# SILICIUMFOTONICA

## SPELEN MET LICHT OP SILICIUMCHIPS

Het begrip fotonica (*photonics*) is een vlag die vele ladingen dekt. In de brede zin omvat het de wetenschap en technologie voor de manipulatie van licht. Maar meer specifiek wordt fotonica gebruikt voor microscopische systemen waar men licht opsluit in structuren die niet veel groter zijn dan de golflengte. Hier onderscheidt fotonica zich van optica, dat meestal geassocieerd wordt met macroscopische lenssystemen.

© 2008-2009  
Wim Bogaerts

**H**et gebruik van licht is niet weg te denken uit ons dagelijks leven en we vinden het terug in velerlei toepassingen.

Enerzijds gebruiken we de energie die licht overbrengt, zoals bijvoorbeeld bij verlichting, zonnecellen of materiaalbewerking (bijvoorbeeld lasersnijden).

Anderzijds is licht ook essentieel bij informatietoepassingen, zoals glasvezelcommunicatie, dataopslag, beeldschermen en sensoren.

Sinds het begin van dit millennium zien we een zeer snelle evolutie om optische functies te integreren op het oppervlak van een microchip, net zoals we gezien hebben in elektronica: integratie op een chip maakt het mogelijk om complexere functionaliteit te implementeren met lager energieverbruik en een kleinere voetafdruk.

Fotonische chips richten zich voornamelijk op informatietoepassingen. Een lichtgolf kan op vele manieren informatie meedragen, gecodeerd in de intensiteit, polarisatie, frequentie (of golflengte) of de fase van de golf. En omdat licht een duaal golf-deeltjeskarakter heeft, gedraagt het zich ook als een flux van fotonen waarvan de quantumeigenschappen toegepast kunnen worden voor quantumcommunicatie en quantumberekeningen.

In tegenstelling tot elektronische chips bestaan fotonische circuits niet uit transistoren, maar uit optische bouwblokken die instaan voor het transport en filteren van licht, het opwekken van lichtsignalen en de omzetting tussen optische en elektrische signalen. Vóór de opkomst van de fotonische chips werd voor deze verschillende functies een divers assortiment aan materialen ingezet: III-V-halfgeleiders, glasachtige diëlektrica, polymeren of elektro-optische perovskietkristallen. Het is evenwel haast onmogelijk om die allemaal samen te brengen in één enkele chiptechnologie. Momenteel zien we dan ook een grote fragmentatie in de wereld van fotonische geïntegreerde circuits (*photonic integrated circuit* – PIC), terwijl in de elektronica de volledige industrie wordt gedomineerd door siliciumtechnologie.

Silicium kan ook gebruikt worden voor fotonische chips, alhoewel het

op veel vlakken geen ideaal materiaal is. Het is transparant voor infrarood licht, maar niet efficiënt als lichtbron of voor het moduleren van signalen. Desondanks heeft siliciumfotonica (*silicon photonics*) zich gevestigd als een van de populairste technologieën voor fotonische chips, dankzij twee unieke schaalvoordelen [1, 2]. Ten eerste zijn de gebruikte materialen (silicium en siliciumoxide) compatibel met de bestaande fabricage-infrastructuur voor micro-elektronica, wat een brug slaat naar industriële fabricage [3]. Ten tweede laat het materiaal silicium toe om de fotonische bouwblokken sterk te miniaturiseren, waardoor er grotere en complexere circuits kunnen worden ontworpen.

We zien tegenwoordig steeds meer toepassingen voor fotonische chips. De drijvende kracht achter de industriële ontwikkelingen is de behoefte aan grote aantallen snelle glasvezelverbindingen voor telecommunicatienetwerken, datacentra en toegangsnetwerken (bijvoorbeeld *fiber-to-the-home*). Maar de technologie vindt ook steeds meer ingang in andere toepassingen, zoals sensoren [4].

De lage landen spelen sinds decennia een voortrekkersrol in dit vakgebied, bouwend op verschillende materiaal-systemen, en dit zowel voor wetenschappelijk onderzoek als het opzetten van industriële activiteiten en start-ups. In Nederland en Vlaanderen zien we ondertussen tientallen technologische bedrijven met activiteiten die gaan van fundamentele chiptechnologie tot gespecialiseerde sensorsystemen op basis van fotonische chips.

In dit artikel richten we ons specifiek op de technologie van siliciumfotonica. We bekijken eerst de basisprincipes van optische golfgeleiders op een optische chip en de kernfuncties, die we daarna samenbrengen tot een complex circuit. Tot slot werpen we een blik op de verscheidene toepassingen voor fotonische chips en hoe de toekomst van dit vakgebied eruitziet.

### **Optische golfgeleiders op een chip**

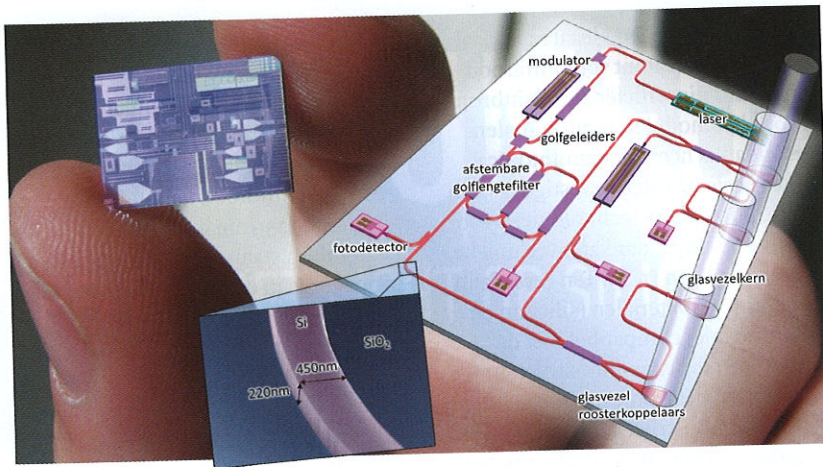
Licht bestaat uit elektromagnetische golven met golflengtes tussen 380 nm

en 700 nm voor het zichtbare bereik. Licht met langere golflengtes noemen we infrarood licht. Dit kennen we vooral van nachtzichtcamera's, maar ook de meeste glasvezelverbindingen gebruiken infrarood licht met golflengtes tussen 1250 nm en 1650 nm.

Lichtgolven staan erom bekend dat ze propageren in een rechte lijn, waarbij we de stralen van richting kunnen veranderen met behulp van lenzen (lichtbreking of refractie) en spiegels (weerkaatsing of reflectie). Maar om licht langs een arbitrair pad te sturen, gebruiken we een optische golfgeleider, zoals een glasvezel. Glasvezels bestaan uit een dunne kern uit glas met een diameter van circa 10  $\mu\text{m}$ , omgeven door een mantel van een lichtjes verschillend glas, waarvan de brekingsindex  $n$  iets lager is dan die van de kern. Het verschil in brekingsindex zorgt ervoor dat de lichtgolven in de kern telkens opnieuw intern gereflecteerd worden, zodat ze niet kunnen ontsnappen.

Dit kunnen we ook doen op een chip: gebruikmakend van materialen met verschillende brekingsindex kunnen we golfgeleiderbaantjes definiëren. Bij de keuze van materialen is het uiteraard belangrijk dat de absorptieverliezen zo laag mogelijk zijn, maar ook het contrast in de brekingsindex bepaalt het gedrag van de golfgeleiders. Hoe hoger het contrast tussen de golfgeleiderkern en de omliggende mantel, hoe beter het licht wordt opgesloten. Een glasvezel met een laag brekingsindexcontrast ( $\Delta n \sim 0,01$ ) heeft een kern van circa 10  $\mu\text{m}$  diameter. Als men echter halfgeleidermaterialen gebruikt (zoals silicium of andere halfgeleiders zoals Ge, GaAs, InP) met een brekingsindex van  $n = 2,8 - 3,5$ , dan kan, in combinatie met glasachtige diëlektrica ( $n = 1,4 - 1,5$ ) een extreem hoog brekingsindexcontrast verkregen worden, waardoor men de afmetingen van een silicium golfgeleiderkern kan reduceren tot circa 500 nm. Zulke hoogcontrastgolfgeleiders kunnen bovendien gebogen worden met een straal van slechts enkele micrometers.

Schaling wordt bepaald door de keuze van materialen met een sterk brekingsindexcontrast en de mogelijkheid om met voldoende fijne resolutie de



Figuur 1. Een fotonische siliciumchip bevat een combinatie van passieve en actieve optische functieblokken die verbonden zijn met microscopische golfgeluiders.

golfgeluiders te definiëren. Immers, een neveneffect van het hoge brekingsindexcontrast is dat de golfgeluiders ook extreem gevoelig worden voor kleine afwijkingen in de gefabriceerde geometrie. Dit is een extra motivatie voor het gebruik van de geavanceerde fabricagetechnologieën voor geavanceerde micro-elektronica.

De fabricage van een golfgelieder is afgebeeld in figuur 2. Het startpunt is een siliciumplak (*wafel*) waarop een dunne laag glas ligt (2 - 3  $\mu\text{m}$  dik), met daárop een nog dunnere laag silicium (200-300 nm dik) waarin we de golfgeliederkern zullen definiëren. Die toplaag sluit het licht in verticale richting op en de glasl laag vormt een buffer met het onderliggende siliciumsubstraat. Op dit materiaal wordt een lichtgevoelige lak (*photoresist*) aangebracht waarin een patroon wordt geprojecteerd. De belichte delen worden met een selectief oplosmiddel verwijderd, waardoor de onbelichte patronen nu als een masker over het silicium liggen. Met een selectief etsproces wordt enkel het blootgestelde silicium lokaal verwijderd, waardoor de golfgeliederpatronen in het silicium overblijven. Bij verdere processtappen worden doteringselementen geïmplant, germaniumlagen aangebracht en metaalbaantjes gedefinieerd, telkens gebruikmakend van een nieuw lithografisch patroon. Hiermee worden actieve functies zoals modulators en fotodetectoren geïmplementeerd. Silicium is transparant voor infrarood

licht met golflengtes groter dan 1,1  $\mu\text{m}$ , geschikt voor glasvezelcommunicatie. Voor andere golflengtegebieden moeten we op zoek naar materialen die transparant zijn, maar toch een groot brekingsindexverschil kunnen opleveren. Voor kortere golflengtes in het nabije infrarood of zichtbaar gebied wordt veelal siliciumnitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) gebruikt.

### Optische functies

De golfgeluiders zorgen voor de verbindingen tussen de functionele bouwblokken op de fotonische chip. Lichtsignalen kunnen verdeeld worden door middel van vermogensplitsers of koppelstructuren. Als meerdere koppelers met elkaar verbonden worden via golfgeluiders met verschillende lengte, dan kunnen de lichtgolven langs de verschillende paden constructief of destructief interfereren, afhankelijk van het faseverschil tussen de golven. Het resultaat is dat het vermogen aan de uitgang afhankelijk wordt van de golflengte. Dit effect wordt gebruikt om golflengtefilters te ontwerpen om één of meerdere banden uit het spectrum te filteren [5]. Dergelijke filters kunnen nog verbeterd worden door golfgeluiders in een ringvormige lus te leggen, waardoor er een resonantie kan ontstaan wanneer de golflengte van het licht precies een geheel aantal keer in de ring past [6].

Omdat dergelijke filters gebaseerd zijn op faseverschillen, zijn ze ook gevoelig

aan kleine afwijkingen in de fabricage. Daarom worden ze veelal voorzien van een afstembaar element. Dit neemt traditioneel de vorm aan van een kleine elektrische weerstand, waarmee lokaal de temperatuur opgevoerd kan worden. Deze methode is eenvoudig te fabriceren, maar omdat er een permanent energieverbruik aan gekoppeld is, wordt er momenteel veel onderzoek uitgevoerd naar alternatieve afstemtechnieken, gebaseerd op piezo-elektrische materialen, vloeibare kristallen of micro-elektromechanische elementen (MEMS).

Een belangrijke optische functie is de koppeling tussen de optische chip en een glasvezel. Voor siliciumfotonica is dat niet vanzelfsprekend, want de golfgeluiders van silicium en van glas verschillen meerdere grootteordes in afmeting. Een oplossing is het gebruik van diffractieroosters die het licht uit een verticale vezel niet alleen horizontaal ombuigen, maar ook focuseren in een compacte golfgelieder [7]. Die verticale koppeltechniek is bijzonder effectief in een materiaalsysteem met hoog indexcontrast en maakt het ook mogelijk om de chips optisch te testen alvorens ze verder verpakt worden.

De bovengenoemde functies worden meestal 'passieve' functies genoemd, omdat er geen elektrische signalen aan te pas komen (met uitzondering van het eventueel afstemmen van een filter). Daartegenover staan 'actieve' optische functies, waarvan de belangrijkste zijn: modulatie, detectie en versterking. In een modulator wordt een hoogfrequent elektrisch signaal (bijvoorbeeld een microgolfsignaal zoals gebruikt wordt voor wifi- of 5G-communicatie) op een optische drager gecodeerd. Dit vereist een mechanisme om snel de brekingsindex van een golfgelieder te veranderen onder invloed van een elektrische spanning. Omdat silicium geen intrinsieke elektro-optische eigenschappen heeft, nemen we hier toevlucht tot een kunstgreep. Door lokaal het silicium te doteren wordt in de kern van de golfgelieder een p-n-junctie aangebracht. Een spanning over deze diode beïnvloedt de dichtheid van de ladingdragers (elektronen en gaten) en dit wijzigt het optisch gedrag van

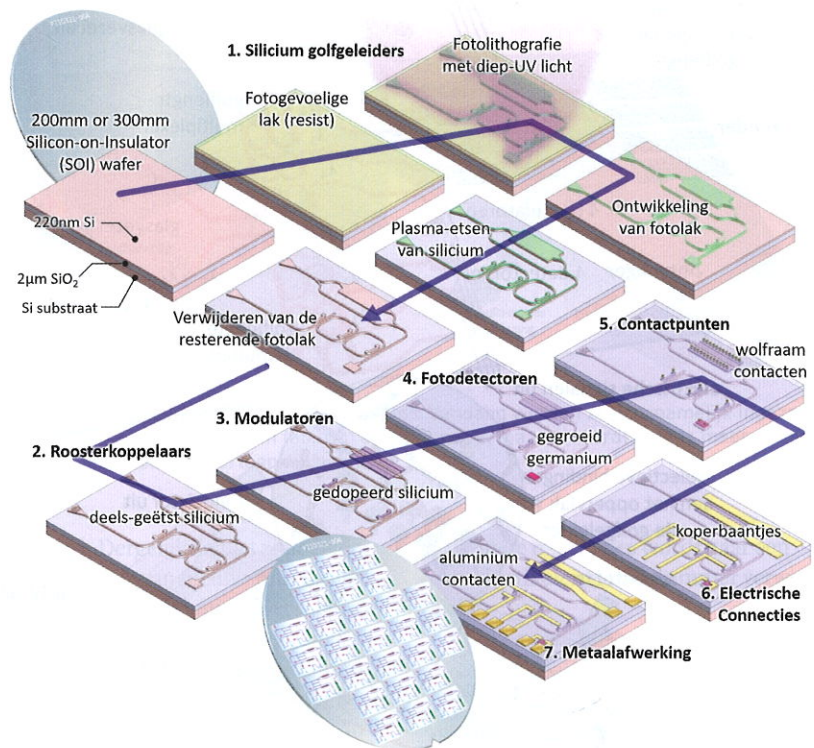
de golfgeleider. Dit effect is voldoende om signalen van 50 Gbps of meer te moduleren [8].

Fotodetectoren zijn een tweede belangrijke actieve functie [9]. Silicium is een zeer goed materiaal voor fotodetectoren (het wordt gebruikt in vrijwel alle camerasensoren), maar enkel in het nabije infrarood en zichtbare gebied. Voor telecomgolflengtes wordt daarom lokaal een laagje germanium (Ge) aangebracht op het silicium, waarmee dan een fotodiode kan worden gemaakt. Lichtbronnen zijn de moeilijkste component om te integreren op een siliciumchip. Voor bronnen zoals lichtemitterende diodes (leds) of lasers zijn halfgeleiders uit de III-V-groep het geschiktst [10]. Hun kristalroosters passen echter niet op dat van silicium, waardoor defecten ontstaan die de efficiëntie van de lichtbron negatief beïnvloeden. Alhoewel er veelbelovend onderzoek gaande is, is het momenteel nog niet mogelijk om deze III-V-halfgeleiders rechtstreeks te laten groeien op silicium. Een alternatieve aanpak is daarom 'heterogene integratie' waarbij de actieve lagen van III-V-materiaal lokaal op het silicium worden geplakt, gebruikmakend van lijm of rechtstreeks met vanderwaalskrachten.

### Van bouwblokken naar circuits

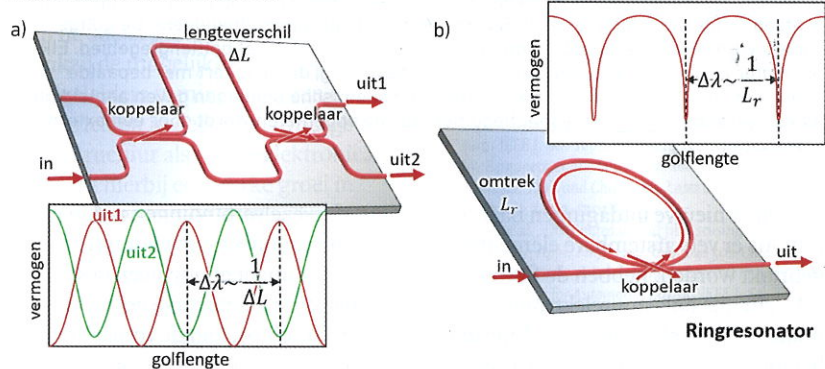
De voorbije twee decennia hebben ons voorzien van een uitgebreide gereedschapskist met functionele bouwblokken. En net zoals bij elektronica komt de kracht van fotonische chips uit de mogelijkheid om de bouwblokken aaneen te schakelen tot complexere circuits. Siliciumfotonica is de eerste technologie die het mogelijk maakt om optische circuits op te schalen naar vele duizenden bouwblokken. Hiervoor moeten ook de ontwerpstechnieken meeschalen, zodat men grotere circuits op een abstracte, maar toch accurate wijze kan modelleren [11]. Ook op dit vlak spelen Vlaanderen en Nederland een voortrekkersrol – verschillende bedrijven en onderzoeksgroepen hebben ontwerpstechnieken en software ontwikkeld die ondertussen wereldwijd hun ingang gevonden hebben.

Als fotonische circuits opschalen

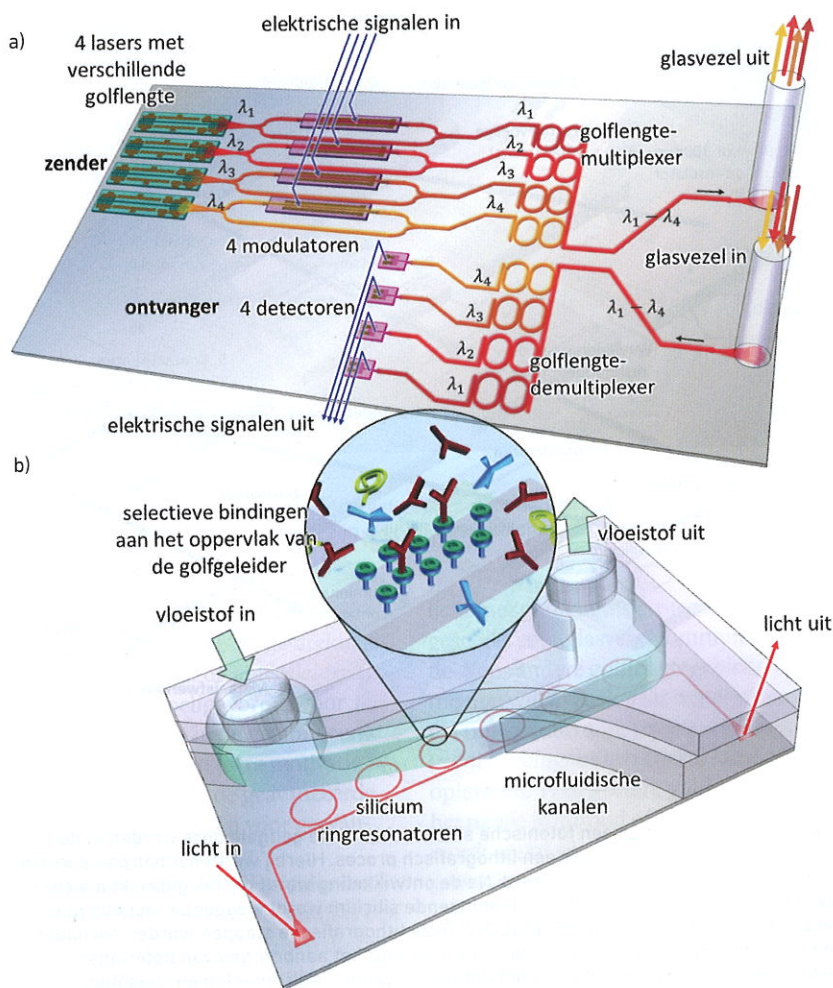


Figuur 2. Fabricage van een fotonische siliciumchip. 1. De golfgeleiders worden in de siliciumlaag gedefinieerd met een lithografisch proces. Hierbij wordt het patroon eerst in een lichtgevoelige lak geprojecteerd. Na de ontwikkeling wordt die lak gebruikt als een beschermend masker terwijl het blootliggende silicium wordt weggeëtsd met een plasma. Tot slot wordt de lak verwijderd. 2-7. Deze lithografische stappen worden herhaald om verschillende patronen te etsen, maar ook voor het aanbrengen van doteringen, lokaal groeien van germanium of het definiëren van metaalcontacten en -baantjes.

### Mach-Zehnder Interferometer



Figuur 3. Eenvoudige circuits voor golflengtefilters. a) De Mach-Zehnder interferometer splitst het licht op in twee paden van verschillende lengte, waardoor er aan de uitgang constructieve of destructieve interferentie optreedt, afhankelijk van de golflengte. b) In een ringresonator wordt licht in een lus gestuurd, waardoor er een resonantie optreedt die telkens een geheel aantal golflengtes in de ring past. Dergelijke filters kunnen gekoppeld worden om welbepaalde golflengtebanden uit het spectrum te filteren.



Figuur 4. Twee toepassingen van fotonische siliciumchips. a) Een zender/ontvanger (*transceiver*) op basis van golflengtemultiplexing (WDM). Vier signalen worden elk op verschillende golflengtes gemoduleerd en die worden samengevoegd in één uitgaande glasvezel. De golflengtes in de inkomende glasvezel worden opgesplitst en uitgelezen in afzonderlijke fotodetectoren. b) Biosensoren met silicium golfgeleiders. De golfgeleiders vormen ringresonatoren met een scherpe respons in het golflengtegebied. Elke resonator is voorzien van een chemisch selectieve laag, die reageert met bepaalde moleculen in de microfluidische kanaaltjes. Die chemische bindingen geven aanleiding tot een verandering in de resonantiegolflengte, die opgemeten wordt door een externe spectrometer.

komen er nieuwe uitdagingen naar boven. Als er vele afstembare elementen gebruikt worden, hebben de fotonische circuits ook stuurlektronica nodig. Alhoewel sommige technieken het toelaten om zowel de elektronica als de fotonica op dezelfde chip te combineren, gaat dit meestal gepaard met compromissen die de prestaties negatief beïnvloeden (bijvoorbeeld door optische verliezen). Daarom gebruikt men meestal aparte chips, maar die moeten dan wel samengebracht worden. Bovendien hebben de meeste optische chips ook nog één of meer-

dere glasvezelverbindingen nodig en soms ook connectoren voor microgolf-signalen. Omdat er nog geen gestandaardiseerde assemblage bestaat voor fotonische chips, kan de verpakking zwaar doorwegen in de totale kosten van het systeem.

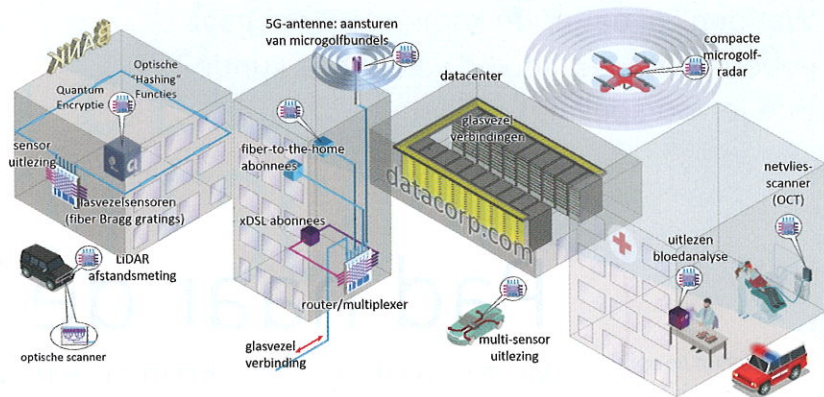
### Toepassingen van siliciumfotonica

Vandaag is de belangrijkste toepassing van fotonische chips te vinden in de wereld van glasvezelcommunicatie. Zowel lange-afstandsnetwerken als verbindingen in datacentra maken gebruik

van glasvezelkabels, waar men ook steeds meer data door pompt. Fotonische chips vinden we aan de ingang en uitgang van die vezels. Hierbij nemen ze niet enkel de modulatie en demodulatie van signalen voor hun rekening, maar kunnen ze ook verschillende signalen bundelen (multiplexen) door ze elk op een verschillende golflengte van licht te moduleren. Deze techniek heet *wavelength division multiplexing* (WDM) en kan vergeleken worden met radiostations die elk hun signaal op een andere frequentie uitzenden. Het multiplexen gebeurt door middel van golflengtefilters op de fotonische chips. Diezelfde filters kunnen ook nuttig zijn voor andere toepassingen, zoals spectroscopie, waarbij men het spectrum van een lichtsignaal opmeet om materialen te analyseren. Ze kunnen de basis vormen voor sensoren. Neem bijvoorbeeld glasvezelsensoren (*fiber Bragg grating sensors* – FBG) die specifieke golflengtes weerkaatsen en waarbij die golflengtes verschuiven onder invloed van vervorming of temperatuur [12]. Dergelijke sensoren worden veelvuldig ingebouwd in gebouwen, bruggen, windmolens of vliegtuigen. Compacte optische chips kunnen de kosten en prestaties significant verbeteren. De chips kunnen zelf ook dienst doen als sensor: silicium golfgeleiders zijn extreem gevoelig voor kleine verschillen in geometrie, samenstelling of temperatuur. Door de golfgeleiders te voorzien van een gevoelige laag die zich selectief bindt aan bepaalde moleculen, kan men heel nauwkeurig concentraties opmeten, bijvoorbeeld van gassen of biomoleculen.

De eigenschappen van licht maken ook contactloze sensortoepassingen mogelijk. Lidar is een techniek waarbij lichtstralen worden gebruikt voor afstandsmetingen (zoals radar). Optische chips voor toepassingen in zelfrijdende auto's zijn dan ook in volle ontwikkeling [13]. Ook voor biomedische toepassingen kunnen ze ingezet worden, zoals voor de diagnose van huidaandoeningen of inspectie van het netvlies [14]. Fotonische chips hebben zich de voorbije jaren ook gepositioneerd als een platform voor quantumberekenin-

gen. Als men de continue lichtstroom afzwakt tot individuele fotonen, krijgt de interferentie tussen fotonen in de golfgeleiders een quantumkarakter en kan men quantumberekeningen uitvoeren. Een fotonische quantumbit (of qubit) beschrijft de mogelijke superposities tussen twee toestanden van een foton: het foton kan horizontaal of verticaal gepolariseerd zijn (of een superpositie van beide), of het foton bevindt zich in een van twee golfgeleiders (of een superpositie van beide). Lineaire quantumoperaties (zoals de veelgebruikte CNOT-poort) kunnen eenvoudig worden geïmplementeerd door fotonen te interfereren [15]. Fotonen behouden hun coherentie voor een zeer lange tijd (veel langer dan qubits gebaseerd op supergeleiders of ionen) en worden daarom ook beschouwd als een veelbelovend platform voor het bouwen van een quantumcomputer [16,17] of voor quantumcommunicatie. De moeilijkheid is dat fotonen slechts zwak interageren met elkaar, waardoor niet-lineaire quantumbewerkingen moeilijk zijn, en bovendien is het bijna onmogelijk om fotonen op een vaste locatie op te sluiten. Quantumoptische chips vereisen ook meestal speciale fotodetectoren die individuele fotonen kunnen detecteren (single-photon detectors) en deze moeten tot cryogene temperaturen gekoeld worden. Fotonische chips uit silicium kunnen gefabriceerd worden met dezelfde technieken die ook gebruikt worden voor micro-elektronica. Deze uiterst geavanceerde fabs maken het mogelijk om dergelijke chips in grote oplages te fabriceren [3]. En net zoals bij elektronica kan men hierbij gebruikmaken van commerciële en semi-commerciële aanbieders, zodat men ook fablessen nieuwe chips kan ontwikkelen [18]. In tegenstelling tot elektronische chips zijn de meeste fotonische chips vandaag nog relatief eenvoudig en ontworpen voor een welbepaalde taak of een specifiek toepassingsgebied. Elke nieuwe ontwikkeling vereist daarbij het ontwerp en de fabricage van een nieuwe chip. Toch zien we vandaag een evolutie van afstembare circuits naar multifunctionele circuits tot zelfs fotonische circuits die inzetbaar zijn voor vele toepassingen.



Figuur 5. Toepassingen voor fotonische chips. Vandaag worden ze voornamelijk ingezet voor optische verbindingen in telecom en datacentra, maar er wordt steeds meer onderzoek gedaan naar sensortoepassingen.

gen [19]. Dergelijke chips zouden de ontwikkeling van nieuwe fotonische functies drastisch kunnen versnellen en fotonica toegankelijk maken voor een groter publiek. Daarbij zouden uiteindelijk fotonische chips een plaats kunnen krijgen in de gereedschapskoffer van de makercommunity, naast programmeerbare elektronica en 3D-printers.

### Conclusie

Fotonische chips zijn de voorbije jaren de kinderschoenen ontgroeid. Alhoewel de technologie weinig bekendheid geniet bij het grote publiek, is ze essentieel voor het functioneren van het wereldwijde glasvezelnetwerk. Siliciumfotonica is binnen dit vakgebied een van de snelst groeiende technologieën, dankzij de mogelijkheid om optische golfgeleiders te miniaturiseren en die te fabriceren in dezelfde fabricage-infrastructuur als micro-elektronica. We zien hierbij een sterke groei in complexiteit van de fotonische circuits, waarbij ook het toepassingsgebied zich snel uitbreidt. De chips zullen in de toekomst steeds explicieter zichtbaar worden in ons dagelijks leven.

### Zie ook

Voor wie meer wenst te weten over de verschillende aspecten van siliciumfotonica, kunnen we verwijzen naar een speciale editie van de *Proceedings of the IEEE* van december 2018 dat volledig gewijd is aan dit onderwerp: <https://proceedingsoftheieee.ieee.org/view-recent-issues/december-2018>.

Ook in de referenties wordt naar een aantal artikelen uit dit nummer verwezen.

### REFERENTIES

- 1 X. Chen et al., The Emergence of Silicon Photonics as a Flexible Technology Platform, *Proc. IEEE* **106-12**, 2101-2116 (2018).
- 2 D. Thomson et al., Roadmap on silicon photonics, *J. Opt.*, **18-7**, 073003 (2016).
- 3 T. Pinguet et al., High-Volume Manufacturing Platform for Silicon Photonics, *Proc. IEEE* **106-12**, 2281-2290 (2018).
- 4 I. Artundo, Photonic Integration: New Applications Are Visible, *Opt. Photonik* **12-3**, 22-25 (2017).
- 5 W. Bogaerts et al., Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **16-1**, 33-44 (2010).
- 6 W. Bogaerts et al., Silicon microring resonators, *Laser Photonics Rev.*, **6-1**, 47-73 (2012).
- 7 D. Vermeulen et al., Optical Interfaces for Silicon Photonic Circuits, *Proc. IEEE* **106-12**, 2270-2280 (2018).
- 8 J. Witzens, High-Speed Silicon Photonics Modulators, *Proc. IEEE* **106-12**, 2158-2182 (2018).
- 9 M. Diels et al., Photodetectors for silicon photonic integrated circuits, *Photodetectors*, 3-20 (2016).
- 10 J. M. Ramirez et al., III-V-on-Silicon Integration: From Hybrid Devices to Heterogeneous Photonic Integrated Circuits, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **26-2** (2020).
- 11 W. Bogaerts et al., Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges, *Laser Photonics Rev.*, **1700237**, 1-29, (2018).
- 12 P. Lu et al., Distributed optical fiber sensing: Review and perspective, *Appl. Phys. Rev.*, **6-4**, 041302 (2019).
- 13 C.-P. Hsu et al., A Review and Perspective on Optical Phased Array for Automotive LiDAR, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **27-1**, 1-16 (2021).
- 14 D. Hillmann, OCT on a chip aims at high-quality retinal imaging, *Light Sci. Appl.*, **10-1**, 21 (2021).
- 15 J. Carolan et al., Universal linear optics, *Science*, **349-6249**, 711-716, (2015).
- 16 S. Slussarenko et al., Photonic quantum information processing: A concise review, *Appl. Phys. Rev.* **6-4**, 041303 (2019).
- 17 F. Flamini et al., Photonic quantum information processing, *Reports Prog. Phys.* **82**, 016001 (2019).
- 18 A. Rahim et al., Open-Access Silicon Photonics: Current Status and Emerging Initiatives, *Proc. IEEE*, **106-12**, 2313-2330 (2018).
- 19 W. Bogaerts et al., Programmable photonic circuits, *Nature*, **586-7828**, 207-216 (2020).