

Het Dossier  
**FOTONICA**

Schakelen  
met licht

*Duitse kerncentrales Osama-proof  
Wonderchip met hersens  
Hoogbouw na 11 september*

# De Ingenieur

Officieel orgaan van KIVI en NIRIA

**TECHNOLOGIETIJDSCRIFT**

Het Ontwerp

Elektronische  
contrabas



## De lichtcomputer



*Amerikaanse  
droomtechniek*



14 DECEMBER 2001 • NUMMER 22-23  
fl 9,90 / Bfr 185 • € 4,50



# De ziel van een nieuwe machine

## Licht gaat elektronen in transistoren vervangen

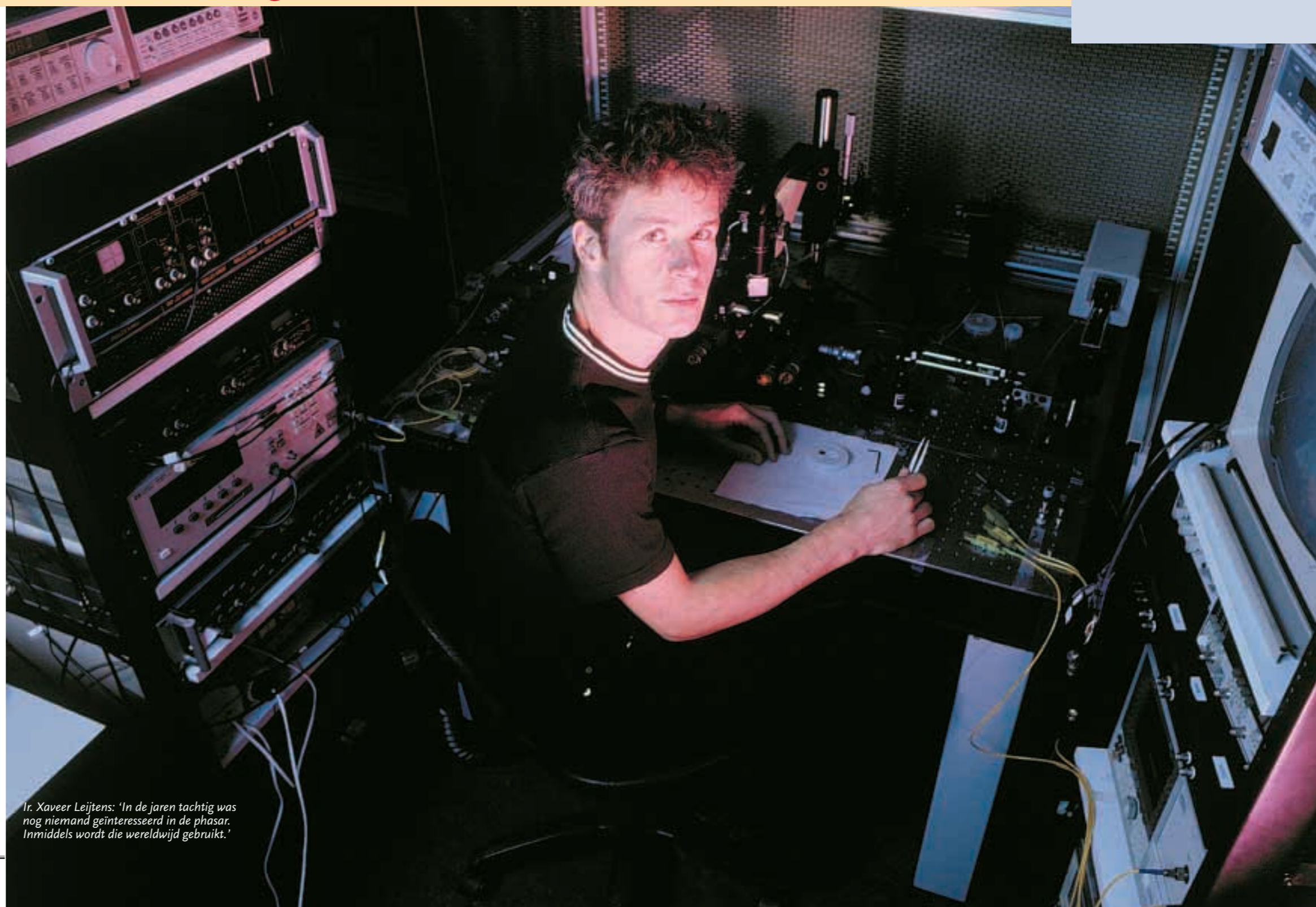
*Het versturen van data in netwerken en het schakelen in transistoren stuit op fundamentele grenzen. Het nog sneller rondpompen van steeds meer elektronen kost enorm veel weerstand. Wie er in slaagt een lichtpuls stil te zetten in een fotonisch kristal, legt de basis voor een schakeltechniek, waarmee een rekentuing is te bouwen, dat een miljoen maal krachtiger is dan de snelste elektronische chip. Licht: de ziel van een nieuwe machine.*

**'DIT IS ER EEN', ZEGT IR. XAVEER LEIJTENS, 'EEN optische chip.'** Op zichzelf lijkt het plaatje halfgeleidermateriaal van 1 cm<sup>2</sup> met daarop een handvol schakelementen niets bijzonders, maar op de chip die Leijtens laat zien, doet rondschijnend licht al het werk in plaats van elektronen. Leijtens werkt voor een onderzoeksgroep van de TU Delft die samen met een aantal wetenschappers van de TU Eindhoven de onderzoeksgroep Opto-Electronic Devices vormen. Binnenkort vestigt het researchteam zich in zijn geheel in de lichtstad.

Leijtens laat ook de voorganger van de chip zien: een forse schoenendoos vol optische elementen. Samen vormden die een *crossconnect*, een kruiswissel, een onderdeel dat twee glasvezelnetwerken met elkaar verbindt. Een verre opvolger van deze chip zou wel eens de optische computer kunnen zijn: een razendsnelle machine die zijn gegevens alleen nog maar in optische vorm verwerkt. Niet alle wetenschappers geloven erin maar ontgenezeggelijk rukt het licht op in de informatietechnologie.

### GLAS

Optische vezels, van glas of plastic, zijn vrijwel transparant voor het infrarode licht met een golflengte van rond de 1550 nm. De golflengten van licht bepalen de kleur (zie kader 'Kabbelende velden'). In de vezel buigt het licht mee met de bochten die de vezel maakt. De wanden van de vezel zijn reflecterend en kaat-



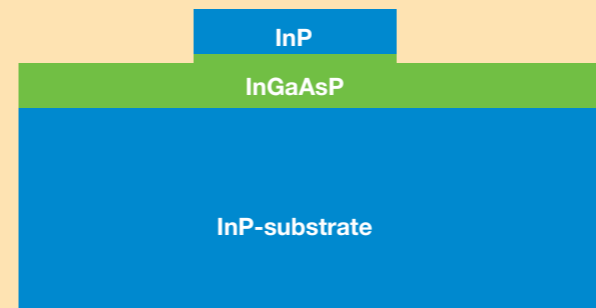
*Ir. Xaveer Leijtens: 'In de jaren tachtig was nog niemand geïnteresseerd in de phasar. Inmiddels wordt die wereldwijd gebruikt.'*

Licht blijft gevangen in golfgeleiders en glasvezels, omdat het medium een hogere brekingsindex heeft dan de buitenwereld. Als het licht maar vlak genoeg

langs het grensvlak scheert, wordt het weerkaatst en komt het niet naar buiten. Hetzelfde zie je als je langs een ruit kijkt: de ruit spiegelt dan, terwijl als je er recht voor

staat, hij het licht doorlaat. Het basismateriaal van de chip is een laagje van extreem zuiver indiumgalliumarsenicumfosfide. Dat is een halfgeleider met als

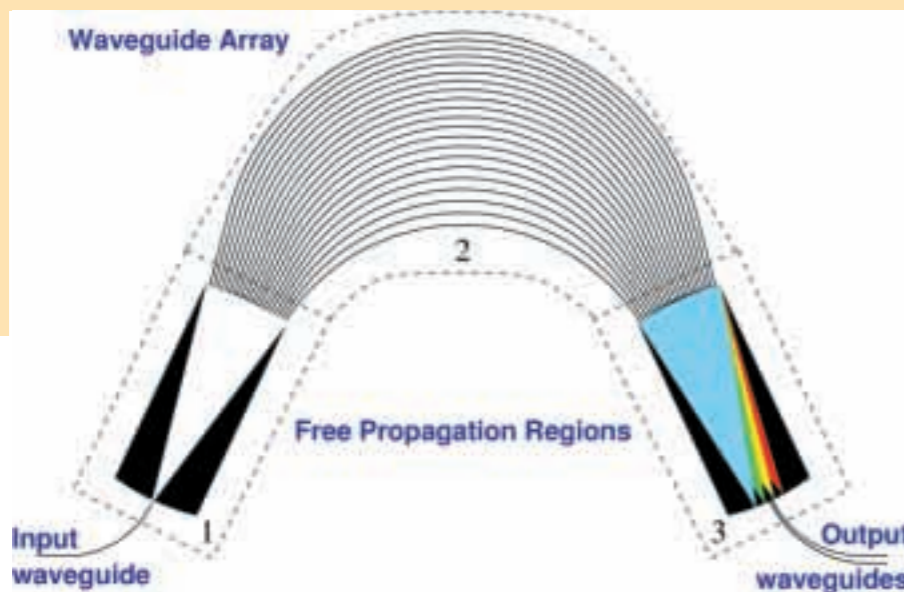
ingrediënten de metalen indium en gallium plus arsenicum en fosfor. Het laagje 'ingaasp', zoals de Delftse onderzoeker ir. Xaveer Leijtens zegt (naar de chemische formule InGaAsP), is ook transparant voor het gebruikte infrarode licht. Het laagje is 0,6  $\mu$  dik en ligt op een ondergrond van indiumfosfide, InP, dat een lagere brekingsindex heeft (zie afbeelding 7). Door die lagere brekingsindex wordt licht dat onderin de InGaAsP-laag dreigt te ontsnap-



Afbeelding 7: het laagje 'ingaasp' ligt op een ondergrond van indiumfosfide.

pen, teruggespiegeld. Boven de chip zit niets dan lucht, met een brekingsindex van één, zodat

het licht ook in die richting niet weg kan. De golfgeleider wordt gevormd



Afbeelding 2: de phasar. Met de phased array is het mogelijk licht in verschillende golflengten te splitsen.

sen vrijwel al het licht dat wil ontsnappen terug: de vezel werkt als een buis voor licht. En door die buizen kunnen grote hoeveelheden data: 10 Gb/s is inmiddels de standaardnelheid. Dat is duizend lijvige romans of twee speelfilms van twee uur. In laboratoria werken ze aan systemen met 40 Gb/s tot de extreme capaciteit van Tb/s, dat is dus een biljoen enen en nullen per seconde.

Elektrische stroompulsen in elektrische signaalgeleiders kunnen daar niet tegenop. Koperdraden hebben bij dit soort hoeveelheden te veel stroomverlies en te veel ruis. Een in de jaren negentig opgekomen methode is lichtpulsen met verschillende golflengten te versturen.

In de glasvezel wordt een reeks van golflengten gebruikt voor afzonderlijke signalen, die gezamenlijk door de vezel lopen. Dit proces heet Wavelength Division Multiplexing (WDM). Leijtens: 'Ook WDM wordt op steeds lagere takken in de netwerken geïnstalleerd.' In de smalle golflengteband van zo'n

30 nm infraroodlicht passen met de huidige techniek zo'n veertig kanalen, zodat de capaciteit van de vezel met diezelfde factor wordt vermenigvuldigd.

Voor WDM zijn wel golflengte-vaste lichtbronnen nodig, liefst lasers, en methoden om de verschillende kanalen op één vezel te zetten. Daarnaast moet apparatuur de kanalen na aankomst weer scheiden. Die componenten zijn peperduur. 'Een beetje geschikte laser kost tienduizenden guldens', aldus Leijtens. Bovendien zijn ze

groot, en combinaties van verschillende losse onderdelen zijn gevoelig voor storingen. Allemaal redenen waarom de race voor optische chips in volle gang is. Eenmaal in massaproductie zouden die goedkoper zijn, minder ruimte innemen, minder onderhoud vergen en uiteindelijk nog complexere

combinaties van apparatuur mogelijk maken.

Bij de optische crossconnect (zie afbeelding 1) bijvoorbeeld loopt het signaal van het ene naar het andere spoor en vice versa, waarbij de voortplantingsrichting altijd dezelfde is. Die is in staat twee ringleidingen van glasvezels, waaruit optische netwerken bestaan, met elkaar te verbinden. Er zijn twee ingangen en twee uitgangen. Per golflengtekanaal kan met elektronische aansturing worden bepaald of het licht doorgaat op dezelfde ring of overstapt op de naburige vezelring.

## GOLFGELEIDER

Leijtens somt de moeilijkheden op van de onderdelen die nodig zijn voor de optische chip. Die chip is doorzichtig, zodat licht er in alle kanten op schiet. Het eerste probleem is een manier om het licht in vaste banen te leiden: als het ware het stroomdraadje van de optische signaalverwerking. Licht verspreidt zich sferisch, zoals kringen in het water, maar de bedoeling is dat het licht zich lineair voortplant. Daarvoor is de 'optische golfgeleider' ontwikkeld, die het licht in een route dwingt door de optische eigenschappen van verschillende materialen van de chip slim te combineren (zie kader 'Paadjes voor licht').

Als het licht de gewenste banen volgt, doemt het volgende probleem op: de splitsing in verschillende kleuren ofwel golflengten. Elke specifieke kleur is namelijk een kanaal waardoor een signaal kan. De Delftse wetenschappers gebruiken voor dit opsplitsen een vinding die de onderzoeksleider, prof.dr.ir. Meint Smit, in de jaren tachtig al introduceerde: de phasar (zie afbeelding 2), acroniem van *phased array*, gefaseerde rij. 'Er is toen geprobeerd de vinding te octrooieren', zegt Leijtens, 'maar niemand was er in geïnteresseerd. Inmiddels wordt het wereldwijd gebruikt.'

Het licht dat via een golfgeleider binnenkomt, mag in de phasar eerst uitwaaiëren in een driehoekige golfgeleider (1). Aan het eind van de driehoek gaan de lichtgolven een groot aantal golfgeleiders (2) in, die allemaal een iets verschillende lengte hebben. Een lichtgolffront dat bestaat uit verschillende

kleuren licht, dat de golfgeleiders op hetzelfde moment ingaat, komt aan het einde niet helemaal synchroon tevoorschijn. Langs de kortste golfgeleider verschijnt de golf iets eerder, langs de langere golfgeleiders duurt dat wat langer. Het golffront is wat gedraaid.

Het draaieffect pakt voor de verschillende kleuren licht verschillend uit: het golffront voor bijvoorbeeld het rode licht verdraait minder dan die van het blauwe licht. Dat betekent dat rood onder een andere hoek zichtbaar is. Het is gefocust op een punt dat iets meer naar rechts ligt dan het focuspunt van het blauwe: op die manier is het licht in zijn afzonderlijke kleuren gescheiden. In de phasar-uitgang (3) zijn op vier van die punten vier golfgeleiders aangesloten, die het golflengte-gescheiden licht afzonderlijk vervoeren. In omgekeerde richting gebruikt kan de phasar ook dienen om licht van verschillende golflengten samen te voegen.

## SCHAKELN

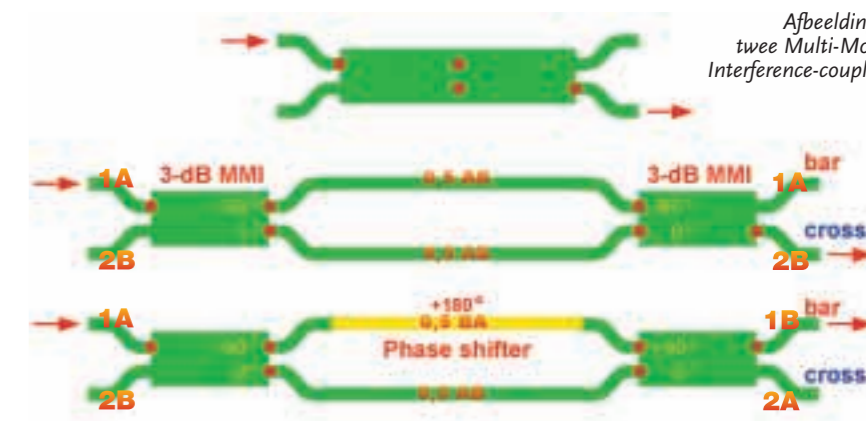
Na de splitsing in kleuren is het licht schakelen de volgende stap. Daarvoor begonnen de Delftenaren met een overbekend optisch effect: interferentie. Bekend was hoe licht dat uit een smalle golfgeleider losgelaten wordt in een brede rechthoekige geleider, uitwaaiert. De lichtgolven in zo'n Multi-Mode-Interference-koppelaar (MMI-coupler) kaatsen tegen de wanden en versterken en verzwakken volgens een stilstaand patroon het interferentiepatroon (zie afbeelding 3 en 4). Dit is te vergelijken met staande golfpatronen op het strand als een bij vloed gevormd meertje tijdens eb in zee leegloopt via een mini-monding. Met de juiste afmetingen kan een MMI-coupler licht van twee golfgeleiders met elkaar combineren en de optelsom van beide signalen verdelen over twee golfgeleiders.

De schakelaar voor licht bestaat uit twee van zulke MMI-couplers (zie afbeelding 5). Het licht van de twee kanalen A en B wordt via de ingangen 1 en 2 in een coupler gelaten. Die voegt ze samen tot een combinatie AB van beide signalen. Het uitgangssignaal AB loopt door twee golfgeleiders naar een tweede MMI-coupler. Daar wordt de combinatie door interferentie weer gesplitst in een signaal A voor uitgang 1 en een signaal B voor uitgang 2. Schakelen doen we echter pas



door een simpel dijke van indiumfosfide dat met conventionele opstechnieken voor halfgeleiders op de chip is aangebracht. Het dijke is 0,2  $\mu$  hoog en 2  $\mu$  breed. Dat is vijftig maal smaller dan een menselijke haar. Ook het dijke heeft een lagere brekingsindex dan het InGaAsP, dus naar boven kan het licht niet ontsnappen. Zijdellings wordt het licht opgesloten doordat het dijke altijd nog een hogere index heeft dan de lucht ernaast. Zijdellings

'ziet' het licht daarom een gemiddeld lagere brekingsindex. Het infraroodlicht ziet de gemiddelde brekingsindex van het 0,6  $\mu$  dikke laagje en de lucht erboven, omdat het geen details kan onderscheiden die kleiner zijn dan de eigen golflengte van ongeveer 1,5  $\mu$ . Hierdoor ontstaat aan de zijkanten een soort virtuele spiegelwand. Het licht verspreidt zich niet in de breedte. Het licht volgt het dijke keurig langs niet al te scherpe bochten.



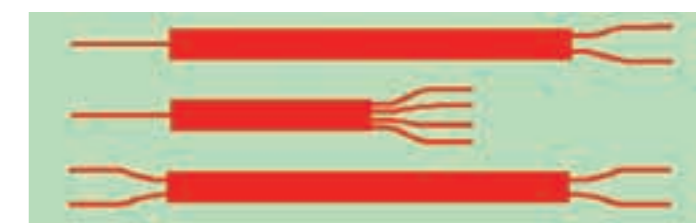
Afbeelding 5: twee Multi-Mode-Interference-couplers.

als we signaal A desgewenst over uitgang 2 kunnen sturen en signaal B over uitgang 1.

Daartoe zijn de golfgeleiders tussen de twee couplers voorzien van elektroden. Wanneer we over de bovenste golfgeleider een elektrische spanning aanbrengen, verandert de brekingsindex een beetje. In die golfgeleider heeft het licht een iets hogere snelheid dan in de andere geleider. Die verschuiving is zo in te stellen dat de lichtgolven in de bovenste golfgeleider een halve golflengte achterlopen bij die in de onderste. Bij de recombinatie in de volgende coupler heeft de interferentie nu het effect dat het signaal dat binnenkwam in ingang 1, doorgestuurd wordt naar uitgang 2. Andersom gaat het licht van ingang 2 door naar uitgang 1. Het licht van dit specifieke kanaal wordt nu kruislings doorgeschakeld. De crossconnect kan zo per kanaal licht op de andere ring zetten of op dezelfde ring houden.

## ZENDERCHIPS

Na het sturen, splitsen en schakelen moeten we het licht ook nog opwekken. Daarvoor bestaan zenderchips, laat Leijtens zien, die elektrische signalen omzetten in licht. De Delfts-



Afbeelding 3 en 4: het versterken en verzwakken van het interferentiepatroon.

## KABELLENDE VELDEN

Licht is één van de meest fundamentele natuurkundige verschijnselen. Zichtbaar licht speelt een grote rol in de menselijke waarneming, maar ook veel onzichtbare soorten straling zijn eigenlijk hetzelfde fenomeen. Radiogolven, microgolven, infrarood licht, ultraviolet licht, röntgen- en gammastraling zijn eigenlijk allemaal licht: een zich voortplantende trilling in het elektromagnetisch veld. Het elektrische veld en het magnetische veld hebben in elk punt in de ruimte een richting en een sterkte. De Maxwell-vergelijkingen beschrijven hoe de beide velden met elkaar samenhangen. De Britse natuurkundige James Clerk Maxwell (1831-1879) stelde ze in de negentiende eeuw op en hij bracht daarmee de waarnemingen van eerdere experimenten met de vergelijkingen onder één noemer. Maxwell poneerde dat een verandering in het elektrische veld een magnetisch veld veroorzaakt,

en een verandering in het magnetische veld een elektrisch veld. Een voortdurend veranderend elektrisch veld heeft zo een continu veranderend magnetisch veld tot gevolg, dat weer een veranderend elektrisch veld oproept. De richtingen van beide velden staan hierbij loodrecht op elkaar. Uit de Maxwell-vergelijkingen volgt verder dat de trilling zich als een golf voortplant in de ruimte, ongeveer zoals een golf in het water. Deze elektro-magnetische golf is licht. De voortplantingsrichting is de derde mogelijke richting loodrecht op beide trillende velden. De snelheid is de beroemde lichtsnelheid: 299 792 500 m/s. Hoe groter de trilsnelheid of frequentie, hoe kleiner de afstand tussen twee naburige golftoppen. Dit is de golflengte van het licht. Zichtbaar licht is licht met een golflengte tussen 400 nm en 800 nm. Infrarood licht, micro- en radiogolven hebben langere

golflengten; ultraviolet licht, röntgenstraling en gammastraling kortere. De felheid van het licht, ofwel de intensiteit, hangt af van de hoogte van de golven: de maximale uitslag van het elektromagnetische veld. De theorie van Maxwell geldt voor licht in vacuüm, maar in aangepaste vorm gaat hij ook op binnen transparante stoffen als glas of halfgeleidermaterialen, alleen is de lichtsnelheid daar lager. De factor waarmee de lichtsnelheid afneemt, is de brekingsindex. Bij de overgang tussen twee materialen met verschillende brekingsindices 'breekt' het licht: het verandert van richting. Dit is bijvoorbeeld te zien aan de schijnbare knik in een stok die in het water steekt. Ook kaatst bij een dergelijke overgang een deel van of al het licht. Dit verschijnsel wordt aangewend in glasvezels, golfgeleiders en veel andere optische componenten.

Eindhovense groep werkt hiervoor aan batterijen minieme lasers die pulsen van verschillende golflengten uit kunnen zenden.

Een speciaal halfgeleidermateriaal, de Semiconductor Optical Amplifier, wekt onder invloed van een elektrische spanning licht op. Een deel van dit licht wordt tussen twee spiegeloppervlakken aan de uiteinden van het kanaal heen en weer gekaatst en onderweg steeds versterkt. Door één van de spiegels kan wat licht weglekken voor gebruik in het netwerk. Dit is het principe van een laser.

De toevoeging van de Delftse groep is het gebruik van een phasar in een kanaal waarin het licht heen en weer wordt gekaatst. Die selecteert de gewenste golflengte precies. 'Dit is nog experimenteel', waarschuwt Leijtens, terwijl hij de zenderchip laat zien. 'Dingen die hier op lijken beginnen net op de markt te komen. Nu worden voor dit soort dingen nog losse componenten gebruikt.'

Ontvangers maken, nadat de golflengten met een phasar van elkaar gescheiden zijn, gebruik van fotodiodes als detectoren. Die zetten de lichtpulsen om in elektrische pulsen. Met elementen als zenders, versterkers, ontvangers, schakelaars en phasars zijn vrijwel alle mogelijke bewerkingen te doen die nodig zijn in glasvezelnetwerken.

### ARGO

Enkele Delftse onderzoekers zijn een bedrijfje begonnen, dat binnenkort een optische chip op de markt wil brengen. Bij Threefivephotonics in Delft werkt een aantal wetenschappers die bij de Delftse onderzoeksgroep zijn gepromoveerd. Argo heet de chip, die over enkele maanden moet uitkomen. 'We willen nog niet in de krant hebben wat de chip precies doet', zegt bedrijfsleider Wouter Deelman, die wel kwijt wil dat de chip is bedoeld voor optische netwerken en minstens duizenden gulden per stuk zal gaan kosten.

Onlangs haalde Threefivephotonics, een van de weinige optische *start-ups* in Nederland, ruim vijftien miljoen gulden beginkapitaal binnen, waarmee het bedrijf cleanrooms wil

gaan bouwen. 'We zijn nu nog bezig met prototypes maken', zegt Deelman. Wereldwijd zijn er inmiddels veel meer van dergelijke *start-ups* opgebloeid in deze miljardenmarkt: jonge bedrijven die aan universiteiten gedane opto-elektronische vindingen willen gaan exploiteren.

### OPTISCHE TRANSISTOR

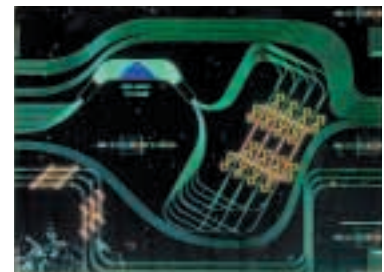
Een groot voordeel van volledig optische chips is het omzeilen van de elektronische fase in de signaalverwerking. In de huidige netwerken is voor bewerking en verzending meestal een omzetting van een optisch in een elektronisch signaal noodzakelijk. Om het signaal vervolgens weer via de glasvezel te versturen moet de elektronische vorm opnieuw worden vertaald in een optische. Deze optisch-elektronisch-optische overstap vereist de nodige apparatuur, kost veel geld en beperkt de verwerkingssnelheid.

Maar chips als die van de groep Opto-Electrical Devices of Threefivephotonics worden altijd nog elektronisch aangestuurd. De datapakketjes waaruit al het netwerkverkeer bestaat, inclusief het internetverkeer, bevatten informatie over hun uiteindelijke bestemming in de vorm van de *header*, een soort adressticker, gecodeerd in lichtpulsen die aan de werkelijke inhoud van de hoeveelheid data voorafgaat. Een pakketje geeft aan bij welk internetadres het uiteindelijk wil uitkomen en waar het vandaan komt.

Routers, die de data de goede kant op willen sturen, moeten dus eerst de header decoderen om het pakketje door te zenden. Tot nog toe gebeurt dat elektronisch, wat de datasnelheid beperkt.

### FLIP-FLOPS

Een andere heilige graal van de optische netwerkwereld is daarom optische routing, waarbij niet alleen de elektronische



Een optische chip omzeilt de elektronische fase in de signaalverwerking.

*Een groot voordeel van volledig optische chips is het omzeilen van de elektronische fase in de signaalverwerking*

## Kooien voor licht

Eli Yablonovitch, destijds werkzaam bij Bell Communications, en Sajeew John, Princeton University, bedachten in 1987 vrijwel gelijktijdig het fotonisch kristal. Zij waren geïnspireerd door halfgeleiderkristallen die in de elektronica gebruikt worden. Volgens de quantummechanica zijn de elektronen binnenin de halfgeleidermaterialen eigenlijk ook golven. De golflengte van de elektronen is vergelijkbaar met de afstanden tussen de atomen van het halfgeleiderkristal, die in een vast rooster hun eigen plaatsen hebben. De overeenkomst tussen de golflengte van de

elektronen met de roosterafstanden heeft een merkwaardig effect: elektronen met een bepaalde golflengte kunnen zich in het rooster niet voortbewegen. Zo'n bewegingsverbod heet in de halfgeleidernatuurkunde een **bandgap**, omdat het verbod vaak geldt voor een hele band van elektrongolflengten. De bijzondere elektronische eigenschappen van halfgeleiders hangen voor een groot deel van de bandgap af. Yablonovitch kwam op het idee dat er ook voor lichtgolven misschien materialen te bedenken waren met een bandgap: fotonische kristallen. Het eerste probleem daarbij was dat de golf-

lengte van licht (honderden nanometers) veel groter is dan de afstanden tussen de atomen in een kristalrooster (hoogstens enkele nanometers). Een fotonisch kristal zou een ordening op een veel grotere schaal moeten hebben dan een echt kristal. Yablonovitch besloot het idee eerst te testen met radiogolven met een golflengte van ongeveer 1 cm. In een stuk materiaal met een hoge brekingsindex voor deze golven boorde hij een 'kristalrooster' met tussen de gaten afstanden van ongeveer 1 cm. Hij kreeg gelijk: de radiogolven drongen niet in het kristal door, en het stuk plastic was het eerste fotonische kristal.

Het principe van een fotonisch kristal is in één richting gemakkelijk uit te leggen: een stapeling van laagjes van materiaal met een wisselende brekingsindex kan al als een simpel fotonische kristal werken. Zo'n opstelling staat bekend als een diëlektrische spiegel: *the poor man's photonic crystal*. Binnenkomende golven reflecteren gedeeltelijk bij elke overgang in brekingsindex. Als de laagjes een kwart van de golflengte dik zijn, pakt het reflecteren van alle overgangen zo uit, dat de teruggekaatste lichtgolven bij elkaar worden

opgeteld. Er is positieve interferentie: de teruggekaatste golven versterken elkaar; er vindt vrijwel volledige reflectie plaats. Ook bij een licht afwijkende golflengte heeft de interferentie nog effect, met het gevolg dat de spiegel voor een bepaalde band aan golflengten volledig reflecterend is (in tegenstelling tot metalen spiegels die een groot deel van het invallende licht absorberen.) Zo'n volledig teruggekaatste band aan golflengten heet een **stopband**. Fotonisch-kristal-onderzoekers gaan pas op het puntje van hun stoel zitten als het reflecteren in meer richtingen gebeurt en als de stop-banden

voor die verschillende richtingen combineren tot een **bandgap**: een bepaalde band aan golflengten die het kristal niet binnenkomen, uit welke richting ze ook komen. Quasi-tweedimensionale fotonische kristallen doen dat al in het platte vlak. De jacht is nu geopend op het driedimensionale fotonische kristal: de ware kooi voor licht (zie ook het kader 'Parelmoeren honingraat').

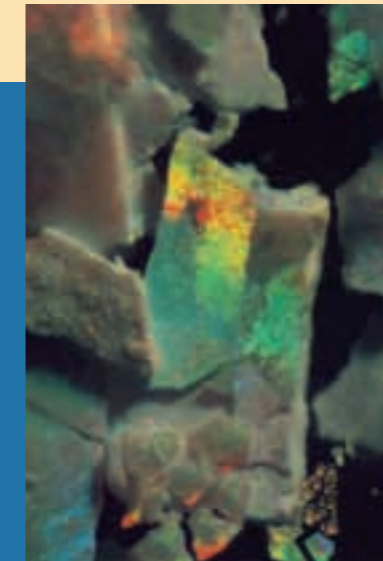
## PARELMOEREN HONINGRAAT

Dr. Willem Vos en collega's van het Van der Waals-Zeemaninstituut in Amsterdam kregen een paar jaar geleden het idee een kunstmatig kristal te maken dat behoorlijk leek op de heilige graal van hun vakgebied: het fotonische kristal. Dat is een kunstmatig kristal met roosterafstanden in de orde van grootte van zichtbaar licht. Het effect is dat het kristal licht van een bepaalde golflengte-band uit alle richtingen reflecteert. Veel onderzoekers hadden het geprobeerd om er een te maken met de etstechnieken en de materialen die de chipindustrie ook gebruikt. Maar Vos gooide latexbolletjes in een wateroplossing en centrifugeerde het geheel tot de bolletjes

strak op elkaar stonden, als sinaasappels in een fruitkist. Zo vormden ze een rooster dat op zich al bijzondere optische eigenschappen heeft: licht van bepaalde golflengten en in bepaalde richtingen wordt door het kristalrooster gereflecteerd. Vos laat een glaasje met een wittige oplossing zien, dat inderdaad zachte groene en rode flikkeringen geeft. Maar de brekingsindex van latex is te laag voor een echte fotonische bandgap: reflectie van licht uit alle richtingen. De ingenieuze stap was om de gestapelde plasticbolletjes in te drogen en de holtes ertussen te vullen met titaniumoxide (titania) dat een hoge brekingsindex heeft. Vervolgens verbrandde Vos de

latexbolletjes, zodat er een soort honingraatachtige structuur van titania en lucht overbleef: een inverse opaal. De natuurlijke halfedelsteen opaal ontleent namelijk zijn paarlemoerachtige groene en rode schitteringen aan een stapeling van siliciumoxide-bolletjes. De inverse opaal is in zekere zin het omgekeerde: een stapeling van bolvormige gaatjes in een rooster

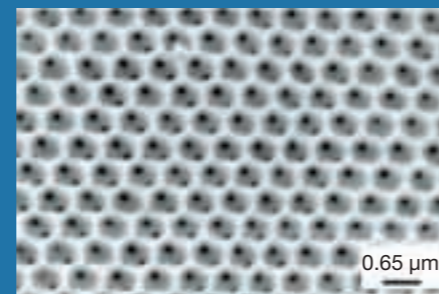
van titaniumoxide. Het hoge contrast tussen de brekingsindex van titania (ongeveer 2,7) en lucht veroorzaakt stopbanden die een brede band aan licht tegenhouden. De combinatie van alle stopbanden voor alle richtingen levert echter nog net geen bandgap op. Bij metingen met een lichtbron in het kristal bleek het kristal voor



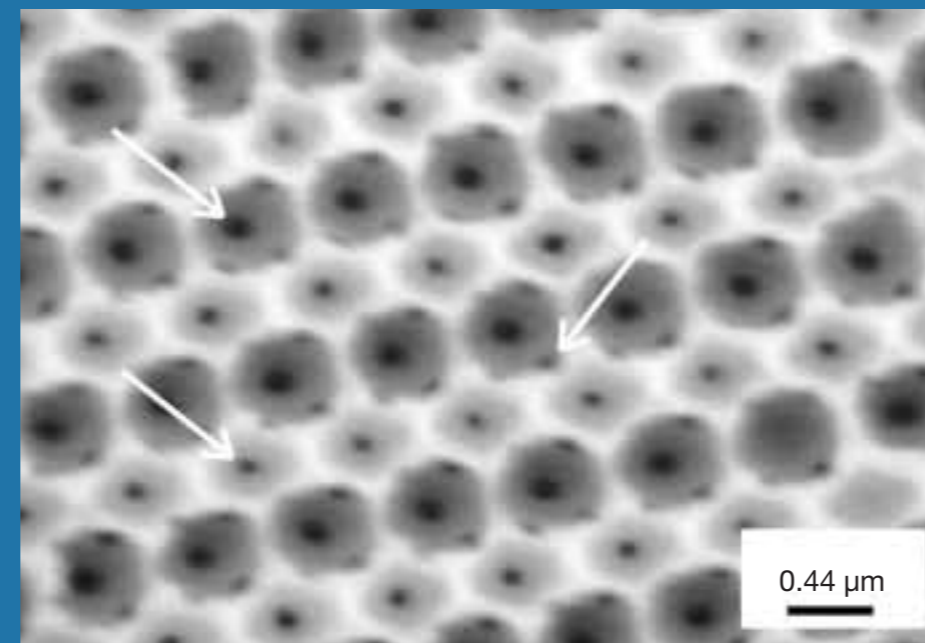
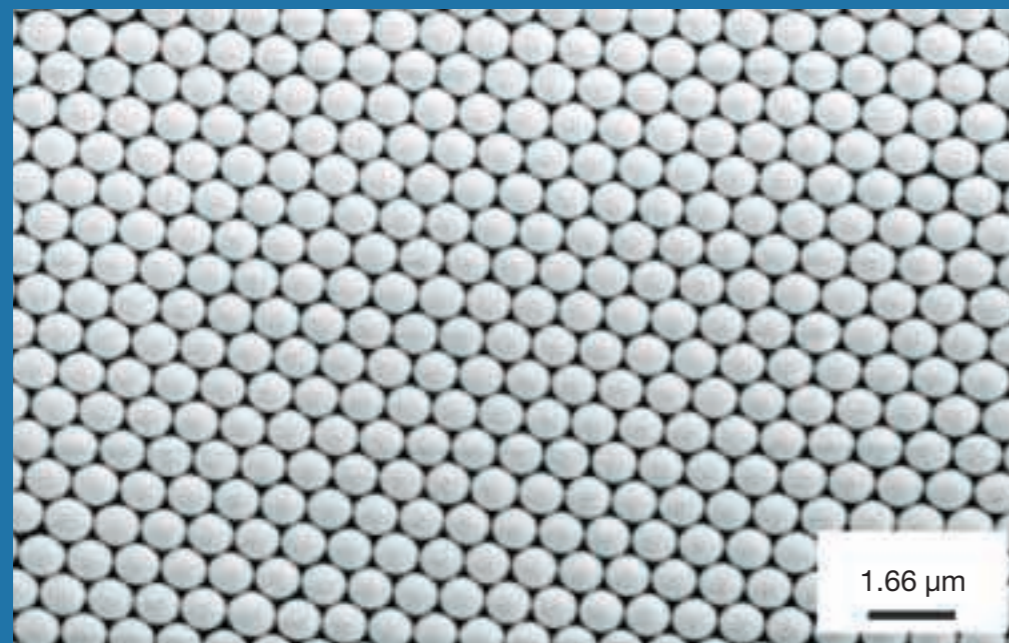
Een optische foto van een zogenoemd inverse opaal of kristal met luchtkamertjes in titania. De gekleurde gebieden zijn optische Bragg diffracties.

licht in bepaalde richtingen vrijwel ondoorzichtig, een beetje als een uit een suikerbiet gesneden lampion. En ook ziet de inverse opaal er letterlijk schitterend uit, met fel rode en groene weerkaatsingen die aan paarlemoer doen denken, maar veel en veel sterker zijn.

Een elektronenmicroscopieopname van een inverse opaal.



Een elektronenmicroscopieopname van een opaal, in dit geval de moederstructuur die wordt gebruikt om inverse opalen te maken. De kleine bolletjes zijn colloïdale deeltjes die spontaan een kristal vormen in een vloeistofoplossing en die vervolgens werden.



Een inverse opaal: de pijltjes wijzen naar 'raampjes', dat wil zeggen openingen die naburige luchtkamertjes verbinden en die het resultaat zijn van direct contact tussen de kamertjes in het opaal.

fase van de dataverzending wordt overgeslagen maar ook de elektronische decodering door de header. Promovendus Harm Dorren van het interuniversitair onderzoeksinstituut Cobra, waarin ook de Opto-Electrical Devices Group uit Delft/Eindhoven deelneemt, heeft met zijn onderzoeksgroep een experimentele versie van een optische router ontwikkeld, die pakketjes twee kanten op kan sturen, afhankelijk van hun header. Daarvoor gebruiken ze een schakelaar die licht met licht kan aansturen, een soort optische transistor, en een reeks optische flip-flops: een schakeling die een lichtpuls even kan onthouden.

Maar voor een beetje optimist smeekt deze bescheiden vorm van signaalverwerking van zo'n optische schakeling om meer: zou het niet mogelijk zijn om signalen optisch te bewerken zoals computers dat doen? Optisch optellen, aftrekken, geheugenopslag en conditionele beslissingen, zoals die in de processor van iedere pc miljoenen keren per seconde plaatsvinden, in combinatie met de enorme dataverwerkende capaciteit van optische vezels. Een supersnelle optische computer, kortom?

### FUNDAMENTELE GRENZEN

'Een volledig optische computer, ik denk niet dat die er zal komen', zegt prof.dr. Alfred Driessen van de groep Light Wave Devices Group van het elektronica- en fotonica-onderzoeksinstituut Mesaplast aan de Universiteit Twente. Driessens' groep houdt zich bezig met het onderzoek aan golfgeleiders in de materialen siliciumoxide, siliciumnitride en mengsels tussen die twee: siliciumoxide-nitride ofwel SiON. 'Om de optische computer is een paar jaar geleden behoorlijk wat te doen geweest', zegt Driessen, 'maar uiteindelijk zijn de beloften nog niet waargemaakt.'

De sterkte van optische technieken zit hem, aldus Driessen, veel meer in het datatransport. In glasvezelnetwerken, maar uiteindelijk ook tussen en binnen computeronderdelen. 'Moderne computers schakelen inmiddels met snelheden boven de miljard keer per seconde. Dan gaan stroomgeleiders, stroomdraden bijvoorbeeld, zelf elektromagnetische straling uitzenden: hoe hoger de trilsnelheid hoe sneller. Dat levert verliezen op en overspraak: signalen lekken van het ene kanaal naar het andere.' Het opvoeren van de kloksnelheid en miniaturisatie in elektronica stuit tegen fundamentele grenzen.

*Optische routing is een andere heilige graal van de optische wereld*

# DE TOEKOMST: BEVROREN LICHT

De Deense natuurkundige dr. Lene Vestergaard Hau en de Amerikaan dr. Ron Walsworth van de Amerikaanse universiteit Harvard schrikten begin dit jaar de natuurkundige wereld op door aan te kondigen dat hun onderzoeksgroepen licht hadden stilgezet. Al eerder had Hau voor opschudding gezorgd door lichtpulsen af te remmen tot wandeltempo. 'Licht krijgt in die situatie iets menselijks', zei ze bij die gelegenheid. In een verre toekomst zou de afgeremde lichtpuls eventueel bruikbaar zijn in optische computers als geheugenelement of voor het schakelen van licht. In vacuüm plant licht zich voort met een snelheid van bijna 300 000 km/s (zie ook het kader 'Kabbelende velden'). Die snelheid is weliswaar lager in transparante materialen – tot 125 000 km/s in diamant – maar er zijn nogal wat kunstgrepen nodig voor de vele miljoenvoudige malen vertraging die nodig is om licht af te remmen tot wandeltempo. De onderzoeksgroep van Hau deed de proeven in een immense laborato-

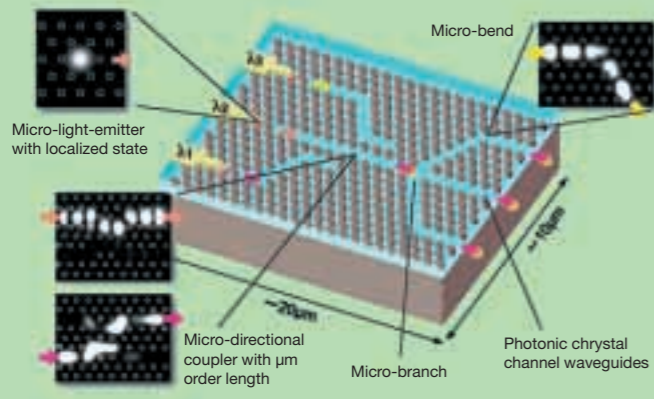
riumopstelling onder hoog vacuüm, waarin ze een miniem sigaarvormig wolkje van tien miljard natriumatomen inving in een enorm magneetveld. Met nog meer kunstgrepen koelden de onderzoekers het wolkje af tot een temperatuur van 50 miljardsten van een graad boven het absolute nulpunt van  $-273,15$  °C, de laagst mogelijke temperatuur. Door deze diepvriesbehandeling ging het zwevende wolkje gasatomen over in een uitzonderlijke toestand: het Bose-Einstein-Condensaat (BEC). Deze toestand, die in zekere zin uit te leggen is als het samensmelten van alle natriumatomen tot één groot collectief atoom, werd begin vorige eeuw voorspeld en in 1995 echt gemaakt door de Amerikaanse onderzoekers Eric Cornell en Carl Wieman. Zij deelden dit jaar de Nobelprijs voor natuurkunde met een andere BEC-pionier. Door het sigaarvormige wolkje van 0,1 bij 0,05 mm met een speciale koppellingslaser van de zijkant te beschijnen wordt het doorzichtig. Zo kan de puls die even later in de lengte door het wolkje schiet er door-

heen. Wel wordt die daarbij afgeremd. De koppellingslaser veroorzaakt namelijk een extreme snelle variatie van de brekingsindex rond één, afhankelijk van de golflengte van het doorgaande licht. De lichtpuls is te ontleden in een verzameling van lichtgolven met verschillende golflengten, die door de bijzondere behandeling met de koppel-laser allemaal een andere snelheid hebben in het BEC. Elke afzonderlijke component van de puls wordt nauwelijks afgeremd door het BEC, maar het resultaat van de uitzonderlijke brekingsindex-slingering geeft een uitzonderlijk resultaat: de vorm van de puls verandert op zo'n manier dat het uitpakt als een extreme vertraging. Het effect is een beetje te vergelijken met een langzaam rijdende file op een snelweg. Terwijl de auto's redelijk snel door rijden, beweegt de file als geheel tergend langzaam. Net zoals de componenten van de lichtpuls veel sneller zijn dan de pulsvorm zelf, zijn de auto's sneller dan de trage file.

Hau wist de snelheid van de puls terug te brengen tot 60 km/h, later tot minder dan 2 km/h. Toen Hau de koppel-laser uitzette op het moment dat de puls in het BEC zat, verdween de puls zelfs, maar kwam weer tevoorschijn bij het aanzetten van de koppel-laser. Het 'superatoom' van het BEC had onthouden hoe de puls eruit zag op het moment dat de koppel-laser uitging en kon het flitsje bij aanschakelen weer reconstrueren. Tot een volle milliseconde lang bleef de vorm van de puls goed in het BEC. Hau denkt dat het BEC is te gebruiken in een 1-bit-geheugencel voor een optische computer of voor een *delay line*, die data even in de wacht kan zetten tot een lokaal capaciteitsprobleem is verholpen. Ook is het BEC toe te passen als een optische schakelaar, die licht schakelt met licht. Hau zelf heeft al plannen gelanceerd om de techniek te miniaturiseren en zo bruikbaar te maken. In oktober berichtte het wetenschappelijk tijdschrift *Nature* dat het Duitse natuurkundigen gelukt was om een BEC op een chip zetten.

## Photonic Crystal Circuit

T. Baba (YNU), IEICE 81 (1998) 1067  
J. Yonekura, T. Baba, et al. (YNU) IEEE JLT 17 (1999) 1500



Afbeelding 6: tweedimensionale fotonische kristallen zien er onder een elektronen-microscop uit als een stel siliciumpaaltes.

bestaan. 'Ik geloof er niet zo in', zegt hij. De elementen op de Delftse chips moeten bepaalde afmetingen hebben die samenhangen met de golflengte van het licht. Miniaturiseren stuit op die fundamentele beperking.

### BEVROREN LICHT

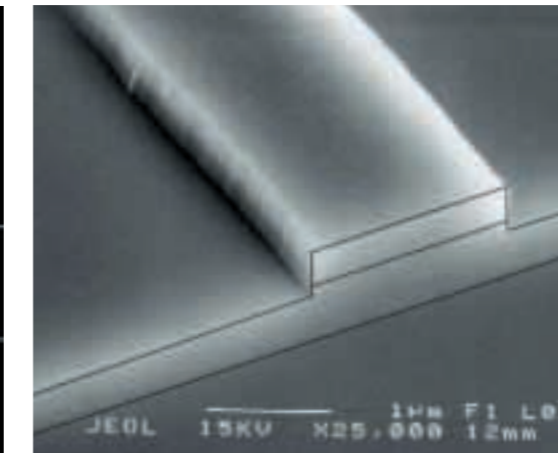
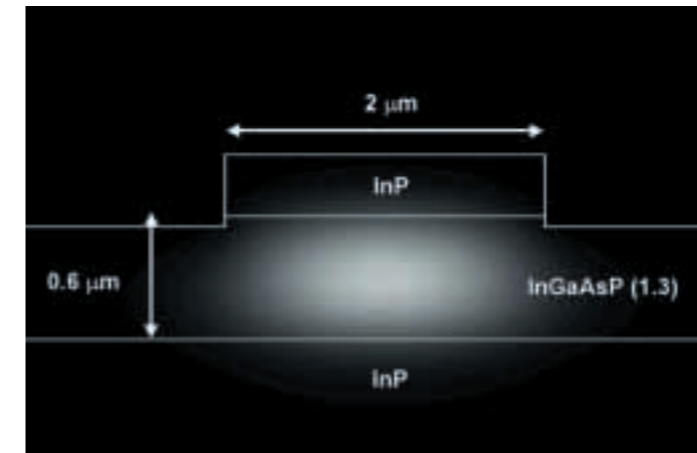
Voor het schakelen met licht moeten we het licht tijdelijk kunnen stilzetten, invangen, net als stroom in een condensator. Die ultieme technologie is pas haalbaar door licht perfect op te sluiten in een volmaakt reflecterend kristal. Fotonische kristallen zijn bijzondere materialen die licht van bepaalde golflengten in alle richtingen volledig reflecteren. Dat houdt ook in dat licht binnenin het kristal er ook niet uit kan, maar rond blijft schieten als een opgesloten stuijterbal. Door op een selectieve manier gaten in een fotonisch kristal te maken kan het licht bovendien langs vooraf bepaalde banen worden geleid.

De onderzoeksgroep van fysicus prof.dr. Albert Polman van het instituut Amolf in Amsterdam en René de Ridder, die bij Driessen aan de UT onderzoek doet, hebben tweedimensionale fotonisch kristallen gemaakt. De Amsterdamse 2D-kristallen zien er onder een elektronenmicroscop uit als een woud van paaltjes van silicium (zie afbeelding 6). In Twente lijken ze meer op een geminiaturiseerde zeef. Beide kristallen zijn gefabriceerd met de etsmethoden van de chip-industrie.

De afstand tussen de paaltjes of gaten is ongeveer even groot als de golflengte van het licht dat niet in het kristal kan doordringen. Door langs een laantje paaltjes uit te sparen is een pad te maken voor licht, vergelijkbaar met de golfgeleiders. Zo'n pad kan ook een rechte hoek maken met een veel scherpere draaihoek dan in de conventionele golfgeleiders mogelijk is.

Strikt genomen zijn de kristallen niet tweedimensionaal, omdat ze ook een minimumhoogte hebben, bovendien is het voor licht nog altijd mogelijk om in de hoogte of in de diepte te verdwijnen. Daarom worden zulke kristallen 'quasi-tweedimensionaal' genoemd.

Onderzoekers hopen dat zulke kristallen de miniaturisatie vergroten, zodat hiermee ook de optische schakelaars zijn te maken die het werkpaard van de optische computer zullen vormen. Leijtens laat een aantal ontwerpen van optische componenten in quasi-2D-kristallen zien, bedacht door Japanse onderzoekers, maar nog niet uitgevoerd.



Golfgeleider in indiumfosfide. Hiermee wordt het licht in vaste banen gedwongen.

### BANDGAP

Nog futuristischer is het gebruik van driedimensionale fotonische kristallen voor optische computers. 'Een 3D-fotonische bandgap bestaat nog niet', zegt dr. Willem Vos, natuurkundige aan de Universiteit van Amsterdam. 'Er is een aantal claims op dat gebied gelegd, waar ik mijn twijfels bij heb.' Vos is lid van de onderzoeksgroep Waves in Complex Media van de natuurkundige Ad Lagendijk en werkt aan fotonische kristallen, een vakgebied met veel concurrentie. Zij verrasten de natuurkundige wereld in 1998 met een zeer ingenieus bijna-fotonisch kristal (zie kader 'Parelmoeren honingraat').

'Als je een materiaal met een echte bandgap hebt', zegt Vos, 'reflecteert het licht van bepaalde golflengten in alle en niet alleen in bepaalde richtingen. Het zal er vermoedelijk wat metaalachtig uitzien. Maar je weet dat pas zeker als je er een lichtbron in plaatst en kunt bewijzen dat de bron niet kan uitzenden terwijl het licht niet wordt geabsorbeerd.' Het licht blijft rondkaatsen en is als het ware ingevangen. Elke keer dat de bron probeert te vervallen onder het spontaan uitzenden van een foton, wordt het licht weggeïnterfereerd door het rooster.

'Heb je eenmaal die fotonische bandgap, dan kun je licht door hoepels laten springen', legt Vos uit. In een lege plaats in het rooster kun je licht opsluiten, zodat je een soort geheugencel krijgt. Ook zou je gemakkelijk licht met licht kunnen schakelen. Plannen voor een optische computer laten dan niet lang op zich wachten.

Vos en collega's hebben net een wetenschappelijk artikel geschreven over de mogelijkheid om fotonische kristallen, als ze eenmaal bestaan, te gebruiken als schakelement of

geheugencel. 'Je kunt licht erin opsluiten en schakelen, razendsnel, en na een korte tijd met een druk op de knop er weer uit laten.' Hoe lang die tijd is? 'Vraag liever hoe kort: voor een snelle computer heb je een aansturing nodig van picoseconden, miljoenste van een miljoenste van een seconde.' Alleen met zulke responstijden in combinatie met de grote bandbreedtes voor licht kun je de huidige Gigahertz-processoren overklassen.

Hoe het idee precies werkt, gaat hij de verslaggever niet wijsmaken. Voor je het weet weigert de wetenschappelijke pers het artikel. 'De precieze details houd ik nog even onder de pet. We zijn er al verder mee, maar tot nu toe is het alleen maar een idee.' ●

*'Heb je eenmaal die fotonische bandgap dan kun je licht door hoepels laten springen'*

*Voor het schakelen van licht moeten we het licht tijdelijk kunnen stilzetten*

De TU-onderzoeker ziet meer in toepassing van licht voor datacommunicatie en zeer gespecialiseerde niches in de elektronica: het in- en uitvoeren van data naar en van supersnelle supergeleidende computers bijvoorbeeld, waar zijn onderzoeksgroep mee bezig is.

Ook Leijtens is sceptisch over volledig optische computers, die uit extreem veel zeer kleine optische schakelaars zal moeten

### INTERNETBRONNEN

- [www.threefivephotonics.com/](http://www.threefivephotonics.com/)
- [www.science.uva.nl/research/scm/dutch/eggen/ingenieur.htm](http://www.science.uva.nl/research/scm/dutch/eggen/ingenieur.htm)
- [www.science.uva.nl/research/scm/sprk/pbs.htm](http://www.science.uva.nl/research/scm/sprk/pbs.htm)
- Site van de onderzoeksgroep Waves in Complex Media van Ad Lagendijk.
- [www.el.utwente.nl/tdm/ldg/research/pc\\_dev/pc\\_dev.htm](http://www.el.utwente.nl/tdm/ldg/research/pc_dev/pc_dev.htm)
- [www.ee.ucla.edu/labs/photon/homepage.html](http://www.ee.ucla.edu/labs/photon/homepage.html)
- Site van Eli Yablonovitch.
- [www.neci.nj.nec.com/homepages/vlasov/photonic.html](http://www.neci.nj.nec.com/homepages/vlasov/photonic.html)
- The Ultimate Collection of Photonic Band Gap Research Links.
- [www.amolf.nl/research/opto\\_electronic\\_materials/index.html](http://www.amolf.nl/research/opto_electronic_materials/index.html)
- Site van het instituut Amolf.

**Het Dossier**  
**FOTONICA**  
Schakelen met licht