

# Optische communicatie: binnenkort ook in jouw computer ?

Jürgen van Erps • Vrije Universiteit Brussel

Voor het overbruggen van grote afstanden zijn optische vezels niet meer weg te denken. Meer en meer worden optische verbindingen echter ook voor kortere afstanden aangewend. En omdat elektrische verbindingen stilaan tegen enkele fysische limieten aankijken, onderzoekt men nu of het gebruik van optische componenten ook op chipniveau mogelijk - en aangewezen - is.

De vooruitgang van de laatste decennia in de microprocessortechnologie heeft de vraag naar een grotere interconnectiebandbreedte in elektronische systemen enorm doen toenemen. Het data-verkeer in en tussen de verschillende elektronische systemen groeit immers op exponentiële wijze: de gebruikers van nieuwe toepassingen zoals het internet en lokale computernetwerken (Local Area Networks - LANs) sturen met zijn allen steeds vaker informatie door die veel bandbreedte vereist, zoals audio, video en real-time data. Het wordt stilaan duidelijk dat conventionele elektrische verbindingen moeilijk aan de verwachtingen zullen blijven voldoen en een flessenhals zullen vormen voor de datacommunicatie. Hun bandbreedte wordt immers beperkt door een aantal fysische limieten zoals elektromagnetische verstoring door naburige elektrische verbindingen, vermogendissipatie en ruis. Als we ook in de toekomst over steeds snellere computers wensen te beschikken, zullen er dus nieuwe interconnectietechnologieën moeten gevonden worden. En dat was nu net onze basisdoelstelling: het aantonen van een optische verbindingstechnologie.

Fotonen of lichtdeeltjes zijn - in tegenstelling tot elektronen - ongeladen deeltjes die elkaar van nature uit niet beïnvloeden. Bijgevolg bieden optische interconnecties een aantal potentiële voordelen ten opzichte van hun elektrische tegenhangers. De immuniteit voor elektromagnetische interferentie, een

verlaging van het vermogenverbruik en een grotere totale bandbreedte voor een enkel kanaal hebben ertoe geleid dat voor het overbruggen van grote afstanden - van enkele tot duizenden kilometers - de optische verbindingen de elektrische verbindingen volledig verdrongen hebben.

Omdat lichtdeeltjes elkaar niet beïnvloeden, kunnen verschillende lichtbundels met elk hun eigen informatie via eenzelfde transmissiekanaal verstuurd worden. Dat verklaart de grotere totale bandbreedte van de optische verbindingen. Deze eigenschap en het ontstaan van minuscule lasers, die het vereiste licht opwekken en die heel snel aan- en uitgeschakeld kunnen worden, zorgen ervoor dat optische vezels steeds aantrekkelijker worden om ook kortere afstanden te overbruggen. Zo zijn er binnenkort optische verbindingen te verwachten tussen computers onderling en zelfs tussen elektronische printplaten in de computer zelf (figuur 1). De kernvraag voor het onderzoek naar optische verbindingen is dan ook tot welk interconnectieniveau de technologie van optische telecommunicatie kan doordringen.

## Plaatsgebrek

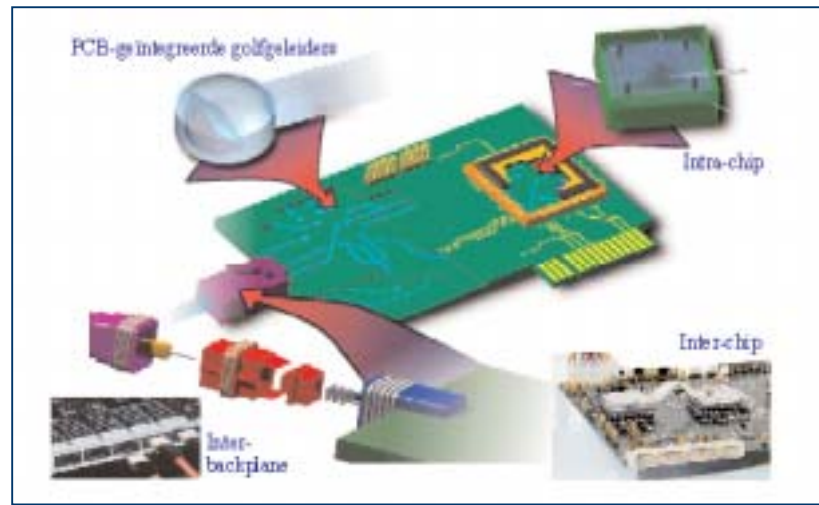
In de meeste gevallen worden optische vezels gebruikt voor het versturen van de optische signalen, waarbij de vezel het licht geleidt van zender naar ontvanger. Optische signalen kunnen zich echter ook gewoon vrij door de ruimte



## De auteur

Jürgen van Erps promoveerde als burgerlijk elektrotechnisch ingenieur (afstudeerrichting fotonica) in 2003 aan de Vrije Universiteit Brussel. De titel van zijn proefschrift was "Micro-optical components for reconfigurable optical interconnections", met prof. dr. ir. H. Thienpont als promotor. Momenteel werkt Jürgen Van Erps aan een doctoraat in de toegepaste wetenschappen (toegepaste natuurkunde en fotonica) met als onderzoeksthema: "Ontwerp, fabricage en demonstratie van micro-optische componenten voor golfgeleider gebaseerde optische interconnecties".

Email: [Jurgen.Van.Erps@vub.ac.be](mailto:Jurgen.Van.Erps@vub.ac.be)



Figuur 1. Optische verbindingen worden meer en meer verkozen boven elektrische verbindingen voor steeds kortere afstanden. Illustratie van mogelijke toekomstige toepassingen van optische interconnecties in computers.

voortplanten, zonder geleiding. Men spreekt dan van vrije-ruimte optische verbindingen. Die vrije-ruimte kan gewoon uitlucht bestaan, maar ook uit een ander materiaal zoals glas of plastic.

Naarmate de te overbruggen afstanden kleiner worden, is er echter geen plaats meer om optische vezels te gebruiken en zal men moeten overstappen op een micro-optische component om het licht te geleiden van zender naar ontvanger. Zo'n component moet heel klein zijn omdat de interconnectieafstanden tussen of zelfs binnen eenzelfde chip slechts enkele millimeters tot enkele centimeters bedragen.

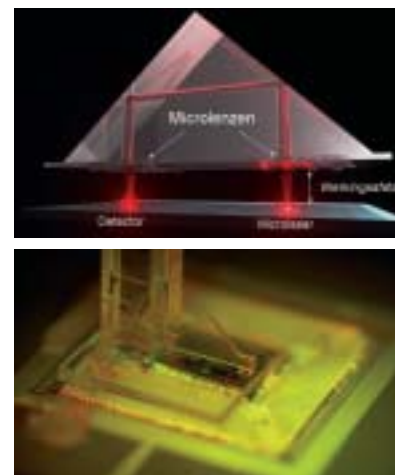
Reeds enkele jaren spitst een deel van het onderzoek van het Departement Toegepaste Natuurkunde en Fotonica op de Vrije Universiteit Brussel zich toe op het ontwerp, de karakterisatie en de implementatie van een plastic micro-optische component voor vrijruimte optische verbindingen tussen verschillende computerchips of zelfs binnenin eenzelfde computerchip (figuur 2).

De grootste uitdaging is een praktisch fabriceerbare (en tegen lage kost in massa reproduceerbare) component te maken die binnen een beperkte opper-

vlakte - enkele tientallen vierkante millimeter - een voldoende aantal optische verbindingen kan verwezenlijken en dit met een voldoende hoge communicatiebandbreedte, bijvoorbeeld 2000 kanalen aan 2,5 Gbit/s hetgeen een totale bandbreedte van 5 Tbit/s oplevert. Dermate hoge totale bandbreedtes kan je met elektrische verbindingen nooit halen.

**Micro-optische componenten**

Het ontwerp van de micro-optische component is de afgelopen jaren geëvo-



Figuur 2. Boven: Het concept van een micro-optische component voor het realiseren van optische verbindingen tussen verschillende delen binnen eenzelfde chip. Onder: Foto van een gerealiseerde micro-optische component voor vrije-ruimte optische verbindingen geplaatst boven een standaard CMOS computerchip.

lueerd tot een combinatie van een matrix van microlenzen met een 3D glazen prisma erboven. De totale component staat boven een optoelektronische chip, die naast standaard CMOS elektrische circuits ook opto-elektronische componenten bevat zoals microlasers en lichtgevoelige detectoren. Het proces verloopt als volgt (zie figuur 2 boven). De microlasers van de optoelektronische chip zenden hun lichtbundels divergerend (lees: kegelvormig) uit. Dit licht moet zich evenwel zo evenwijdig mogelijk voortplanten opdat een zekere afstand kan worden overbrugd. Hiervoor zorgen de microlenzen. Een enkele microlens meet 150 micrometer in diameter, wat iets meer is dan de dikte van een menselijk haar. De matrix van microlenzen is zo minutieus geplaatst dat de lenzen juist passen boven de corresponderende microlasers of, aan de ontvangtzijde, microdetectoren. Ieder stel microlenzen vormt in combinatie met het prisma een enkel optisch kanaal. De functie van het prisma is de loodrecht uitgestraalde lichtbundels twee maal 90 graden om te buigen. Via een microlens wordt ten slotte de aankomende evenwijdige laserbundel gefocust tot een klein puntje en geprojecteerd op de microdetector (10 micrometer in diameter).

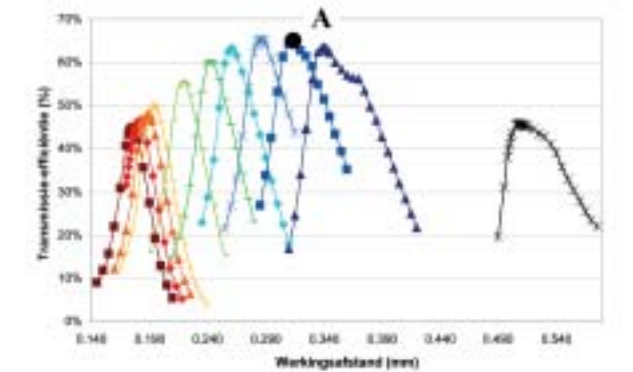
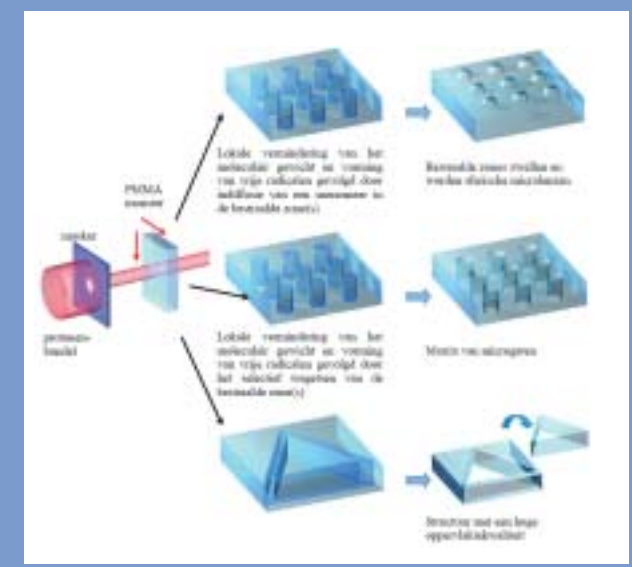
**Ontwerp en simulaties**

Via simulaties gaan we de efficiëntie na van onze optische verbinding. De voornaamste karakteristieke parameters van de micro-optische component zijn de afmetingen van het prisma, de diameter en de brandpuntsafstand van de microlenzen alsook de werkingsafstand tussen de microlasers en de microlenzen. We bepalen deze parameters met de theorie van de Gaussische lichtbundel voortplanting. We stellen hierbij voorop dat de lichtstralen een weglengte van 8 mm hebben doorheen het systeem. Vervolgens verifiëren we de eerste orde benadering van het ontwerp door een optische simulatie van de component.

De simulatie is gebaseerd op de sequentiële radiometrische stralengangmethode. Met deze techniek onderzoekt men hoe een groot aantal individuele optische stralen zich voortplanten doorheen het systeem. De hoofdbedoeling is na te gaan hoeveel van de door de laser uitgezonden optische stralen werkelijk de gewenste detector bereiken. De verhouding van het aantal ontvangen tot het aantal uitgezonden stralen is een maat voor de efficiëntie van de optische verbinding. Bij analyse van de simulatieresultaten (figuur 3), treedt de hoogste efficiëntie (ongeveer 64%, zie punt A op figuur 3) op voor een component die bestaat uit microlenzen met een brandpuntsafstand van 500 micrometer en die op een werkingsafstand van 312 micrometer boven de opto-elektronische chip geplaatst is. Ook de overspraakeigenschappen van de component zijn van groot belang. Door onvolmaaktheden kan het gebeuren dat een (klein) deel van de uitgezonden stralen ongewenst terecht komt op een andere detector. De overspraakeigenschappen hebben we onderzocht met dezelfde radiometrische simulator. De overspraaklichtvlekken blijken echter volledig naast de naburige detectoren te vallen zodat we weinig last hebben van overspraak naar naburige optische kanalen.

**Aanmaak**

Om een prototype van onze micro-optische component te vervaardigen, hebben we een commercieel beschikbaar glazen prisma mechanisch gepositioneerd bovenop een polymeerplaatje dat de matrix van microlenzen bevat. Voor de aanmaak van de microlenzenmatrix gebruiken we de technologie van de "Diepe Lithografie met Protonen" (DLP) [1] en als materiaal poly-MethylMethAcrylaat (PMMA) met hoog moleculair gewicht (zie kaderstuk). Bij het bestralen van dit PMMA met protonen, zullen er in de polymeerketens in hoofdzaak kettingbreuken ontstaan op de



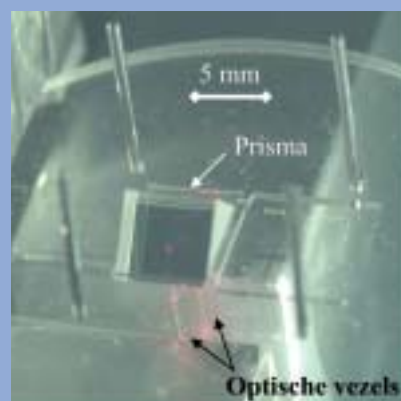
Figuur 3: Simulatieresultaten van de optische transmissie-efficiëntie in functie van de werkingsafstand tussen microlaser en microlens, en dit voor verschillende waarden voor de brandpuntsafstand van de microlenzen.

plek waar de protonenbundel is ingevallen. Het moleculair gewicht van de bestraalde zones daalt hierdoor en er worden vrije radicalen in het polymeermateriaal gevormd. Voor bepaalde solventen vertonen de bestraalde polymeerzones een hogere oplosbaarheid dan de onbestraalde zones en kunnen bijgevolg selectief weggeëst worden. Anderzijds kunnen we deze bestraalde zones ook doen zwellen. Het zwellen gebeurt door het laten indiffunderen van een monomeerdamp die uit kleinere moleculen dan PMMA bestaat. Doordat de diffusiesnelheid van deze kleinere moleculen in de bestraalde zones veel groter is dan in de onbestraalde zones, zullen enkel de bestraalde polymeerzones zwellen. Na diffusie in het PMMA zal het monomeer bindingen aangaan met de vrije radicalen die daar tijdens het bestralen werden gevormd. Het gevolg van de plaatselijke indiffusie van het monomeer is dus een volumetrische expansie van het materiaal met het ontstaan van een sferische microlens tot gevolg.

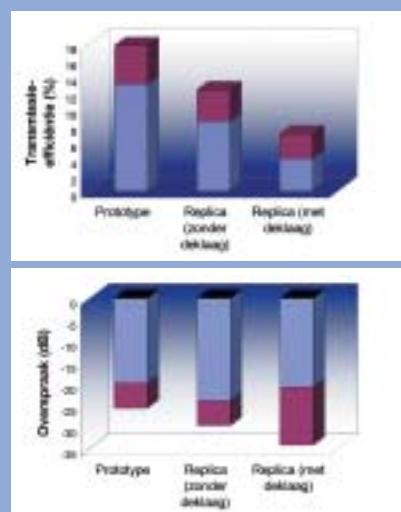
**Diepe lithografie met Protonen:**

DLP is een technologie waarbij een protonenbundel gebruikt wordt om op lithografische wijze structuren in plastics (polymeren) te bestralen. Een extra processtap is nodig om matrices van microlenzen aan te maken of om micro-mechanische structuren met een hoge oppervlaktekwaliteit te bekomen. Bij het aanmaken van een matrix van microlenzen wordt met de protonbundel eerst een matrix van punten bestraald. Het bestraalde materiaal wordt tot zwellen gebracht door indiffusie van een monomeer. Op deze wijze wordt ieder bestraald punt een sferische microlens. Indien de bestraalde puntmatrix echter met een selectief solvent wordt behandeld, wordt het bestraalde materiaal weggeëst en ontstaat een matrix van microgaten. Zo'n matrix van microgaten kan bijvoorbeeld gebruikt worden als 2D optische vezelhouderstructuur. Wanneer met de protonenbundel in het polymeer lijnen worden "geschreven" in plaats van punten, ontstaan na etsen micromechanische of micro-optische componenten. Deze bezitten een zeer hoge oppervlaktekwaliteit aan de geëtsede wanden, die dan als optische spiegel kunnen worden gebruikt.





Figuur 4: Prototypecomponent met mechanisch gealigneerd prisma boven de PMMA plaat met een matrix van microlenzen.



Figuur 5: Maximum- en minimumwaarden van de transmissie-efficiënties (boven) en overspraakeigenschappen (onder) gemeten over de verschillende optische kanalen van gerealiseerde micro-optische componenten. We vergelijken een prototype, een replica en een replica met aangebrachte metallische deklaag op het prisma.

#### Prototype replicatie en karakterisering

De DLP technologie is enkel geschikt voor het fabriceren van prototypes omdat het bestralen met een protonenbundel heel tijdrovend en duur is. Opdat optische verbindingen ooit een waardig alternatief zouden vormen voor de conventionele elektrische verbindingen, moeten we op zoek gaan naar een goedkope manier om onze micro-optische componenten in massavolume te

fabriceren. Er bestaan verschillende technologieën die toelaten om een plastic kopie van een gerealiseerd prototype te maken. Een van deze technieken is "Vacuum Casting".

We hebben met de Vacuum Casting opstelling van het departement Toegepaste Natuurkunde en Fotonica een replica in poly-urethaan gemaakt van het glazen prisma met eronder de matrix van PMMA microlenzen. De keuze van het materiaal voor de replica is van zeer groot belang. De replica moet immers een zo exact mogelijke kopie zijn van het origineel. Zowel de prototypecomponent als haar replica hebben we experimenteel gekarakteriseerd naar optische transmissie-efficiëntie en overspraakeigenschappen. De experimentele opstelling voor het door-meten van de beide componenten wordt getoond in figuur 4.

In deze experimentele meetopstelling worden de microlasers en microdetectoren van de optoelektronische chip nagebootst door optische vezels. Deze vezels sturen het licht in ongeveer eenzelfde kegel uit als de microlasers. Om het lichtvermogen van de component te meten, positioneren we de zend- en ontvangstvezel op de juiste werkingsafstand van de microlens.

Met computergestuurde micrometerecize motoren worden deze optische vezels verplaatst naar de positie waar maximale transmissie-efficiëntie voor het onderzochte optische kanaal optreedt. Na het bepalen van de efficiëntie verplaatsen we de ontvangstvezel naar een horizontaal of verticaal aanliggende microlens. Het gemeten optisch vermogen in dit kanaal is een maat voor de optische overspraak.

Zowel een prototypecomponent, een replica als een replica met aangebrachte spiegellende metallische deklaag op het prisma werden doorgemeten (figuur 5). De vele discrepanties die bestaan tussen de simulaties en de werkelijke experimentele opstelling verklaren dat de gemeten efficiënties lager zijn dan de

theoretisch voorspelde. Zo bootsen de optische vezels niet perfect de microlasers en detectoren na. Bij de prototypecomponent is een bijkomende bron van verlies het optisch vermogen dat weglekt aan de luchtspleet tussen het glazen prisma en het plastic plaatje met de microlenzen. Bij de replica die uit een enkel geheel bestaat, komen deze overgangen niet meer voor zodat men dus intuïtief een hogere efficiëntie zou verwachten. Het replicatieproces verloopt echter nog niet optimaal. Een verdere daling van de transmissie-efficiëntie is het gevolg van krimp, vervormingen en het optreden van vloeilijnen in het materiaal, die bepaalde optische stralen afbuigen in ongewenste richtingen en zorgen voor een grotere overspraak naar andere optische kanalen.

#### Vacuum Casting Replicatie

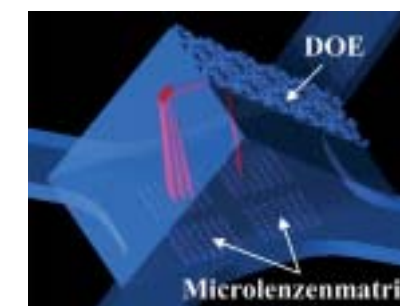
**De component die men wenst te kopiëren, wordt ingebed in een vloeibare uithardende siliconenrubber. Na ontgassing in vacuüm, om luchtballen te verwijderen, wordt de siliconenrubber uitgehard en de ontstane mal opengesneden. De oorspronkelijke component wordt verwijderd, waarna de mal opnieuw wordt dichtgemaakt en in vacuüm wordt gebracht. De holte in de mal - die een exacte kopie is van de oorspronkelijke component - kan nu opgevuld worden met een ander vloeibaar plastic (bijvoorbeeld poly-urethaan). Na het uitharden blijft uiteindelijk een accurate kopie van de oorspronkelijke component over.**

#### Extra functionaliteit

Om optische interconnecties nog aantrekkelijker te maken, willen wij door middel van diffractieve optische elementen (DOEs) extra functionaliteit toevoegen aan de micro-optische component. Een DOE is niets anders dan een wiskundig berekend reliëf dat op de zijkant van het prisma kan geëtst worden en dat bijvoorbeeld een lichtbundelsplitsing kan veroorzaken.

We hebben een lichtbundelsplitsend DOE ontworpen [2] dat in staat is een invallende lichtbundel binnenin de micro-optische component te splitsen in negen nieuwe deelbundels, die elk een andere afzonderlijke microlens aan de ontvangstzijde belichten (figuur 6). Op deze wijze kan een kloksignaal optisch over een chip verdeeld worden. Door dit optisch verdeelprincipe te combineren met de geschikte optoelektronische componenten, hopen wij in de nabije toekomst zelfs herconfigureerbare optische interconnecties te maken. Herconfigureerbare interconnecties zijn interconnecties waarin het datapad dynamisch in de tijd kan worden veranderd; dit wil zeggen dat men door de tijd heen de data naar een andere ontvanger kan sturen. De benodigde componenten in de elektronische chip zijn dan microlasers en detectoren waarvan de golflengte (met andere woorden: de kleur van het uitgezonden licht) kan worden gewijzigd. Wanneer iedere detector enkel gevoelig is voor een bepaalde kleur en de zender de lichtbundel van kleur verandert, dan wordt de datastroom naar een andere detector gestuurd.

Bij integratie van het DOE in de micro-optische component, merkten wij bij simulatie echter op dat niet alle optische stralen blijven voldoen aan de voorwaarde voor totale interne reflectie (TIR) aan de zijwand van het prisma [3]. De TIR voorwaarde geeft aan tot welke invalshoeken een lichtbundel volledig wordt weerkaatst bij overgang van een optisch dicht materiaal naar een optisch ijler materiaal. Optische stralen die invallen op de reflecterende prisma-wanden onder een te steile hoek zullen dus niet worden gespiegeld maar ont-



Figuur 6: Micro-optische component met geïntegreerd diffractief optisch element op een zijwand van het prisma. De splitsing van de invallende laserbundel naar 9 laserbundels is eveneens weergegeven.

snappen uit de component. Concreet betekent dit dat wij een metallische spiegellende deklaag op het prisma zullen moeten aanbrengen wanneer wij een DOE wensen toe te voegen. Daarom hebben we op een replica van onze micro-optische component een spiegellend aluminiumlaagje opgedampt. Een nadeel is dat de theorie voorspelt dat het metaal niet voor 100% spiegelt en dus een deel van het licht zal geabsorbeerd worden. De experimenteel opgemeten daling van de efficiëntie is echter groter dan de theoretisch voorspelde waarde. Dit is te wijten aan een niet geoptimaliseerd opdamingsproces waarbij de inclusie van stofdeeltjes onparten speelt. In figuur 5 worden de meetresultaten van een replica van de micro-optische component met en zonder metallische deklaag vergeleken naar efficiëntie en overspraak.

#### Conclusie

Hoewel nog steeds controversieel, worden optische interconnecties steeds aantrekkelijker als alternatief voor het vervangen van elektrische verbindingen tussen verschillende chips en mogelijk zelfs binnenin een en dezelfde chip [4]. Om dit aan te tonen ontwikkelden we een micro-optische component die een

groot aantal optische interconnecties kan verwezenlijken om korte afstanden optisch te overbruggen. Voor het ontwerp en het bepalen van de efficiëntie van de component gebruikten we de stralengangmethode. Een prototype werd vervaardigd door het aanwenden van de unieke eigenschappen van de DLP technologie. Metingen op dit prototype wezen uit dat optische verbindingen op chipniveau mogelijk zijn en dat de replicatie van de component een niet onoverkomelijke degradatie van de transmissie-efficiëntie veroorzaakt, hetgeen een belangrijke stap is naar een goedkope massareplicatie van de micro-optische component.

Daarnaast onderzochten we hoe de component verder kon worden uitgebreid met diffractieve optische functionaliteit, om het gebruik van optische interconnecties nog aantrekkelijker te maken. Indien we er in de toekomst ook nog in slagen om ervoor te zorgen dat de micro-optische component makkelijk kan worden gepositioneerd boven optoelektronische chips en deze samen in één behuizing kunnen worden gegoten, dan worden optische interconnecties een praktisch en industrieel haalbare oplossing voor de datacommunicatie flessenhals die de elektrische verbindingen weldra zullen ontmoeten.

#### Dankwoord

De auteur dankt zijn promotor prof. dr. ir. H. Thienpont (departement Toegepaste Natuurkunde en Fotonica, Vrije Universiteit Brussel) en de begeleiders ir. ing. M. Vervaeke en ir. ing. L. Desmet voor de wetenschappelijke ondersteuning. Hij dankt eveneens de hele "PMMA"-werkgroep binnen het departement voor de aangename, gedreven samenwerking. ♦

#### Referenties

- [1] "Deep Lithography with Protons: a generic fabrication technology for refractive micro-optical components and modules". B. Volckaerts, H. Ottevaere, P. Vyneck, C. Debaes, P. Tuttleers, A. Hermanne, I. Verentennicoff, H. Thienpont, Asian J. Phys., Vol. 10 (2), 2001
- [2] "Wave-optical components for reconfigurable short-distance optical interconnects" L. Desmet, R. Buczynski, W. Grabowski, J. Van Erps, M. Vervaeke, H. Thienpont, Proc. SPIE Vol. 5182, SPIE Annual Meeting, San Diego, CA, USA, 2003
- [3] "Investigation on metal reflection coatings of free-space optical interconnect components with integrated fan-out DOEs". J. Van Erps, L. Desmet, M. Vervaeke, E. Stijns, H. Thienpont, Proc. Symp. IEEE/LEOS Benelux Chapter 2003, Twente, The Netherlands
- [4] Special issue on optical interconnects, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 9 (2), 2003.