

Ontwerpgereedschappen voor geïntegreerde optische schakelingen

Reni M. de Ridder, Hugo J. Hoekstra, Frank Wijnands,
(Universiteit Twente, postbus 217, 7500 AE Enschede);
Xaveer Leijtens, Meint K. Smit en Cor van Dam
(Technische Universiteit Delft, Mekelweg 4, 2628 CD Delft)

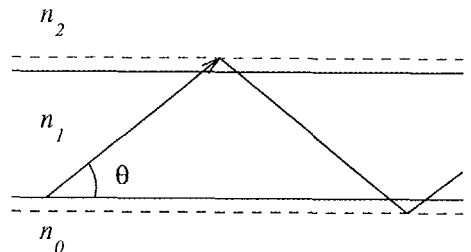
1. Inleiding

De geïntegreerde optica is een relatief jong vakgebied. De gereedschappen die een ontwerper op dit terrein ter beschikking staan zijn dan ook minder ver ontwikkeld dan die voor de micro-elektronica. Tevens zijn dergelijke hulpmiddelen nauwelijks commercieel verkrijgbaar. In het verleden hebben de verschillende onderzoeksgroepen die op dit terrein werkzaam zijn dan ook hun eigen ontwerpgereedschappen moeten ontwikkelen. Dit heeft geleid tot een grote variëteit aan onderling weinig compatibele computerprogramma's, die niet voor alle onderzoekers even gemakkelijk toegankelijk zijn. Van groot praktisch belang is de onderlinge koppeling van ontwerpgegevens, simulatiemodellen en patronen van de voor vervaardiging benodigde fotolithografische maskers. Om deze redenen is in het Innovatief Onderzoeksprogramma "Electro-Optics" een samenwerkingsproject geïnitieerd van groepen aan de Technische Universiteit Delft, de Universiteit Twente en PTT Research. Het doel van dit project is het mogelijk maken van een uitwisseling van ontwerpgereedschappen tussen Nederlandse onderzoeksgroepen door te kiezen voor een gestandaardiseerde omgeving: veel bestaande en nieuw te ontwikkelen gereedschappen zullen worden opgezet als modules die gekoppeld kunnen worden aan een commercieel verkrijgbaar microgolf ontwerpsysteem (MDS van Hewlett-Packard). Hiermee wordt het mogelijk een bibliotheek te ontwikkelen van standaard-

componenten. Het belang van zo'n opzet is in de micro-elektronica reeds lang bewezen.

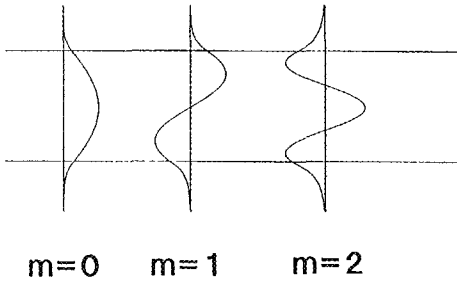
2. Optische golfgeleiders

In de geïntegreerde optica gaat het om het manipuleren van lichtgolven, meestal in planaire structuren van dielektrische golfgeleiders. De eenvoudigste optische golfgeleider bestaat uit een transparante film met brekingsindex n_1 , opgesloten tussen twee transparante lagen met een lagere brekingsindex ($n_0, n_2 < n_1$). We kunnen ons een 'lichtstraal' voorstellen die tussen de grensvlakken van de film en de omgevende lagen reflecteert (zie figuur 1). De lichtstraal zal enigszins in de onder- en bovenliggende lagen doordringen en bij reflectie een faseverschuiving ondergaan. De lichtbundel zal zich alleen over langere afstand kunnen voortplanten indien deze constructief met zichzelf interfereert, zodat het totale veldpatroon overeenkomt met dat van een "opgevouwen" vlakke golf. Bij



Figuur 1
Propagatie van een lichtstraal door een vlakke golfgeleider

een gegeven dikte van de transparante film is dit slechts mogelijk voor een aantal discrete waarden van de propagatiehoek θ (zie figuur 1). Dit definieert de modus m waarin het licht zich door de film voortplant, waarbij $m=0$ correspondeert met de kleinste hoek θ . Met iedere modus correspondeert een propagatieconstante β en een modale veldverdeling van het licht. Naast de discrete geleide modi kan een continuum van stralingsmodi worden onderscheiden. Een willekeurige veldverdeling kan worden ontbonden in de modale componenten (geleide modi en eventueel stralingsmodi).



Figuur 2
Modusprofiel voor verschillende geleide modi

In figuur 2 zien we de modale veldverdeling van het optische veld voor drie modi, corresponderend met $m=0, 1, 2$. Voor de fundamentele modus $m=0$ heeft het modusprofiel de vorm van een cosinus, met exponentiële staarten in de opsluitende lagen. De getoonde modi zijn zogenaamde geleide modi die in principe verliesvrij door de film propageren.

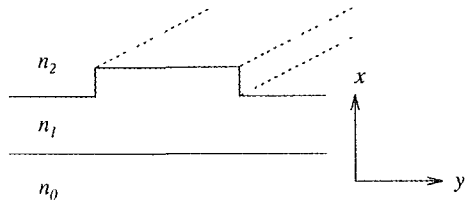
We kunnen aan een modus een effectieve brekingsindex N toekennen

$$N = n_1 \cos \theta$$

Voor de modi geldt dat deze geleid zijn als de effectieve index groter is dan de indices van de opsluitende lagen. Als deze effectieve index N kleiner wordt dan die van de opsluitende lagen, dan zal de modus niet

langer geleid zijn, maar energie naar de buitenste lagen afstralen.

De golfgeleidende film, zoals tot nu toe geschetst, zal het licht slechts in verticale richting opsluiten. Een van de mogelijkheden om het licht ook in horizontale richting op te sluiten is een stap te etsen in de middelste laag (zie figuur 3). Door de verander-



Figuur 3
Driedimensionale golfgeleiderstructuur

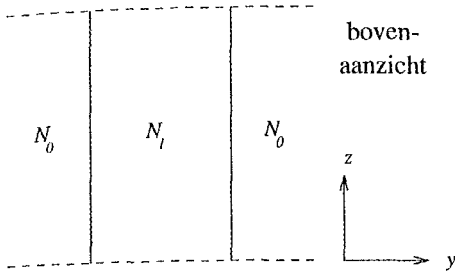
de dikte van die laag, zal de effectieve index van de golfgeleider modus ter plaatse veranderen en het hoogst zijn, daar waar de laag het dikst is.

Er zijn diverse methoden ontwikkeld om van deze samengestelde structuur de propagatieconstanten en modusprofielen te berekenen. In beginsel zijn deze gebaseerd op het oplossen van de wetten van Maxwell onder de gegeven randvoorwaarden. Voorbeelden zijn de 'method-of-lines', de eindige elementen methode en de domein-integraal methode. Naast deze nagenoeg exacte methoden, waarvan de laatste door PTT research wordt geïmplementeerd, is een aantal benaderende methoden ontwikkeld, waarvan er één, de effectieve-indexmethode, zeer brede toepassing heeft gekregen. Van deze laatste methode maakt ook de (2-dimensionale) bundel-propagatiemethode gebruik. Beide methoden zullen hieronder kort worden toegelicht.

2.1 De effectieve-indexmethode

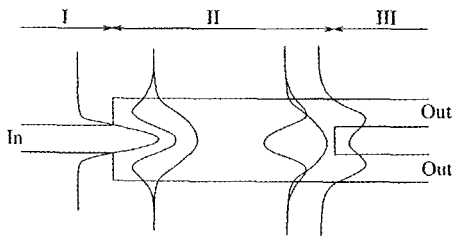
Figuur 3 en 4 laten de golfgeleider zien in voor- en bovenaanzicht. De structuur is in drie gebieden met constante laagdikten te verdelen. Per gebied kunnen we nu de ef-

fectieve index N berekenen, zoals hiervoor werd beschreven. Vervolgens is de structuur van figuur 4 wederom te beschouwen



Figuur 4
Bovenaanzicht van de golfgeleiderstructuur

als een geleidende film met brekingsindex N_1 tussen twee opsluitlagen met index N_0 , maar dan 90 graden gedraaid. Van deze structuur is de effectieve index te berekenen en daaruit volgen dan weer de propagatieconstante en het modusprofiel. Een toepassing van de effectieve-indexmethode op een samengestelde golfgeleider is te zien in figuur 5. Deze figuur laat de amplitude van het veld zien in een smalle (monomodale) toevoerende golfgeleider (I). Bij de overgang van de smalle naar de brede (multimodale) golfgeleider (II) wordt de koppelcoëfficiënt tussen de verschillende modi bepaald door berekening van de overlapintegraal. In dit geval worden alleen de geleide even modi ($m = 0, 2$) in de brede golfgeleider geëxciteerd. Aangezien deze



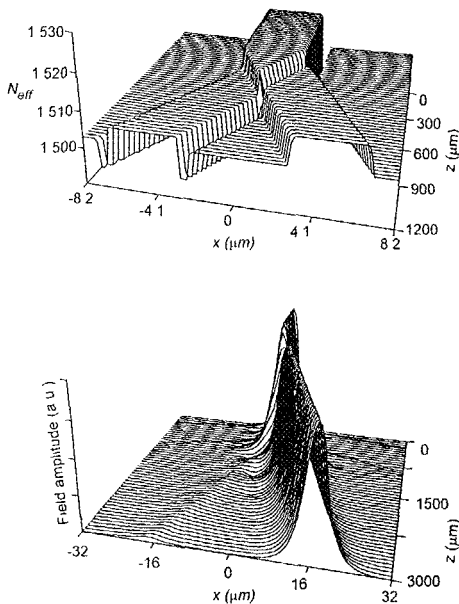
Figuur 5
Modale amplitudeverdeling in een 3-dB splitser.

modi een verschillende propagatiesnelheid hebben, zullen deze na een zekere afstand juist in tegenfase zijn. Op deze plaats zijn de smalle uitgangsgolfgeleiders (III) geplaatst en overlapt het totale veldprofiel aan de uitgang van de brede golfgeleider precies de fundamentele modus van de smalle uitgangsgolfgeleiders. Op deze manier is een 3-dB splitser te maken.

Problemen met de effectieve-indexmethode treden op als de structuur verandert in de propagatierichting (z), zoals bijvoorbeeld het geval is voor taps toelopende golfgeleiders. Dan is de effectieve-indexmethode niet zonder meer geschikt, en zal bijvoorbeeld de bundel-propagatiemethode moeten worden gebruikt.

2.2 De bundel-propagatiemethode

Van de bundel-propagatiemethode bestaan enige varianten. Wellicht fysisch het meest inzichtelijk is de variant gebaseerd op Fouriertransformaties (FT-BPM) [1]. Door een Fouriertransformatie in het plaatsdomein uit te voeren van de amplitude van een golf wordt deze ontbonden in een verzameling vlakke golven (te beschrijven als ruimtelijke frequenties) met elk een eigen propagatierichting en (complexe) amplitude. In de FT-BPM berekent men de amplitude van elk van de samenstellende vlakke golven na een korte propagatiestap door een homogeen medium met een geschikt gekozen gemiddelde brekingsindex. Daarna transformeert men weer terug naar de oorspronkelijke fysische ruimte. Hier wordt de werkelijke ruimtelijke verdeling van de brekingsindex (de golfgeleidende structuur) in rekening gebracht door afhankelijk van de plaatselijke brekingsindex de fase van de golf aan te passen. Aan het begin van de structuur wordt een initiële veldverdeling aangelegd (het startveld). De hele procedure wordt net zolang herhaald totdat, al propagerende, het einde van de structuur is bereikt. In figuur 6 is als voorbeeld de berekening te zien van de voortplanting van een lichtgolf door een asymmetrische Y-junctie die functioneert als polarisatiesplitser [2].



Figuur 6
M-berekening golfvoortplanting ($l = 1,55$ mm, TM-polarisatie) in een asymmetrische Y-junctie a) verdeling effectieve brekingsindex, b) veldamplitude

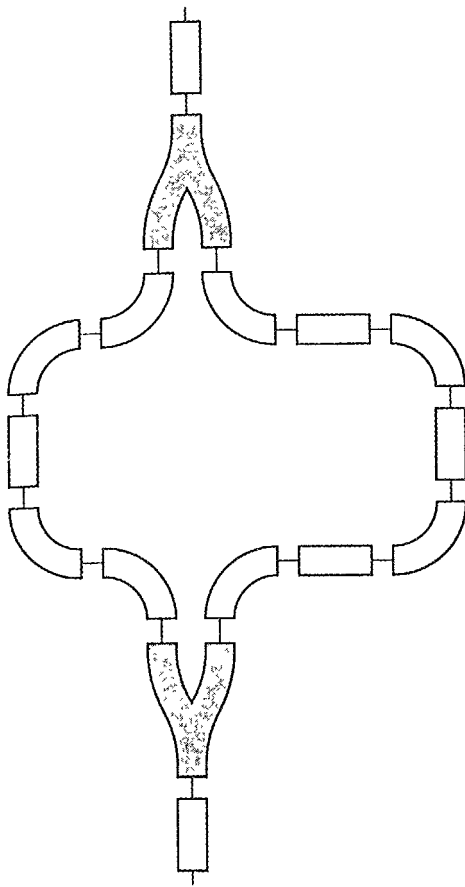
De methode is een benadering. Er wordt een gemiddelde propagatierichting aangenomen en het veld wordt in de richting loodrecht daarop (transversaal) gediscrèteerd. Omdat de Fouriertransformatie dan ook discreet moet zijn (beperkt aantal ruimtelijke frequenties), kunnen abrupte veranderingen in het veld (bijv. veroorzaakt door sprongen in de verdeling van de brekingsindex), die leiden tot hoge ruimtelijke frequenties, niet goed beschreven worden. De benaderingen leiden tot beperking in de toegestane propagatierichtingen (eis van paraxialiteit) en het toegestane contrast van de brekingsindices in de structuur. Bij andere bundel-propagatiealgoritmen (bijv. gebaseerd op eindige differenties [3]; FD-BPM) is de argumentatie anders, doch zij leidt eveneens tot beperkingen in de klassen van zinvol te berekenen problemen. De paraxialiteitseis varieert van enkele tot (in bijzondere gevallen) enkele tientallen

graden [4]. De discretisatie in transversale richting is altijd (veel) kleiner dan een golf-lengte terwijl die in de propagatierichting kan variëren tussen enkele tienden en enkele tientallen golflengten. Het toegestane indexcontrast is enkele procenten voor de FT-BPM en nagenoeg onbeperkt voor de FD-BPM

De bundel-propagatiemethoden kunnen zowel op twee- als op driedimensionale structuren worden toegepast. Als de aard van het probleem dat toelaat is het uit oogpunt van doelmatigheid aan te bevelen een driedimensionaal probleem te reduceren tot een tweedimensionaal geval door toepassing van de boven beschreven effectieve-indexmethode. Dit is ook gebeurd in het voorbeeld van figuur 6, waar de verdeling van effectieve brekingsindices, veroorzaakt door de lokale (monomodale) lagenstructuur, gegeven is.

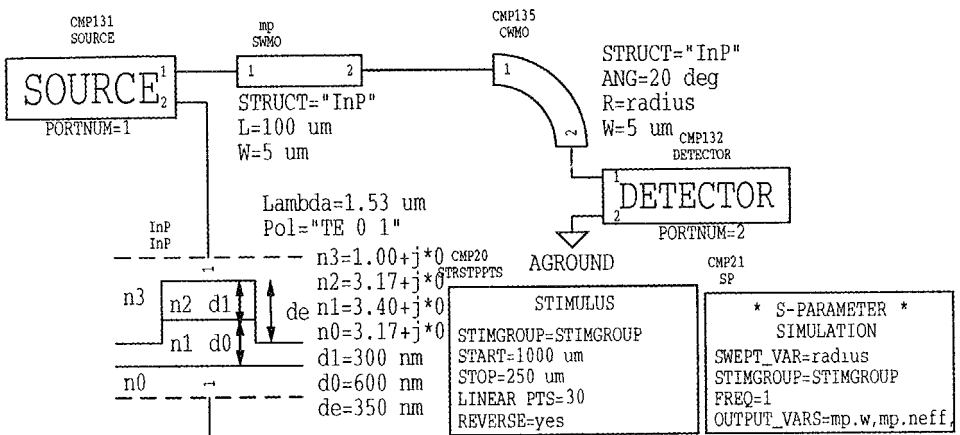
3. Integratie van gereedschappen

Zoals gesteld in de inleiding, is ervoor gekozen een bestaand ontwerpsysteem voor microgolfschakelingen toe te passen als integratieplatform voor de modelleringsgereedschappen die door de verschillende projectdeelnemers worden ontwikkeld [5]. Aan iedere klasse van elementen waaruit een geïntegreerde optische schakeling kan worden opgebouwd, kan een eigen simulatiemodule worden toegewezen. De onderlinge koppeling tussen de elementen vindt plaats via een zogenaamde scattermatrix (een matrix die een soort gegeneraliseerde transmissie- en reflectiecoëfficiënten, de S-parameters, bevat van alle optische 'poorten' waarmee het element beschreven kan worden). Deze koppeling maakt de toepassing van een zeer heterogene collectie van simulatoren mogelijk, waardoor ieder element met de daarvoor meest geschikte simulator kan worden geanalyseerd en een complexe schakeling snel ontworpen en gesimuleerd kan worden. Een voorbeeld is gegeven in figuur 7 die een Mach-Zehnder interferometer met ongelijke armen voorstelt. Een dergelijk circuit kan worden toegepast als golflengte-



Figuur 7
Opbouw van een Mach-Zehnder interferometer met ongelijke armen uit geparameteriseerde basiselementen

filter. Dit vereenvoudigde model is opgebouwd uit een drietal basiselementen: recht kanaal, bocht en symmetrische Y-junctie. Elk element is geparameteriseerd: van een recht kanaal kunnen o.a. lengte en breedte worden ingesteld, een bocht zal o.a. met radius en hoek worden beschreven, terwijl voor een Y-junctie de splitsingshoek een belangrijke parameter is. Dit circuit is tevens een voorbeeld van een geval waar het koppelen van verschillende simulatoren van groot belang is. Rechte kanalen en bochten kunnen goed en efficiënt geanalyseerd worden met de EIM. Een conventionele Y-junctie, waarin een geleidelijke overgang van één naar twee kanaalgolfgeleiders optreedt, kan goed met de BPM worden doorgerekend, maar niet zonder meer met de EIM. Dit geldt overigens niet voor de bijzondere vorm van figuur 5. Voor de BPM zijn grote bocht-hoeken weer een probleem. Door het circuit op te splitsen in elk deelelement met de meest geschikte simulator door te rekenen, kan dit probleem worden opgelost.

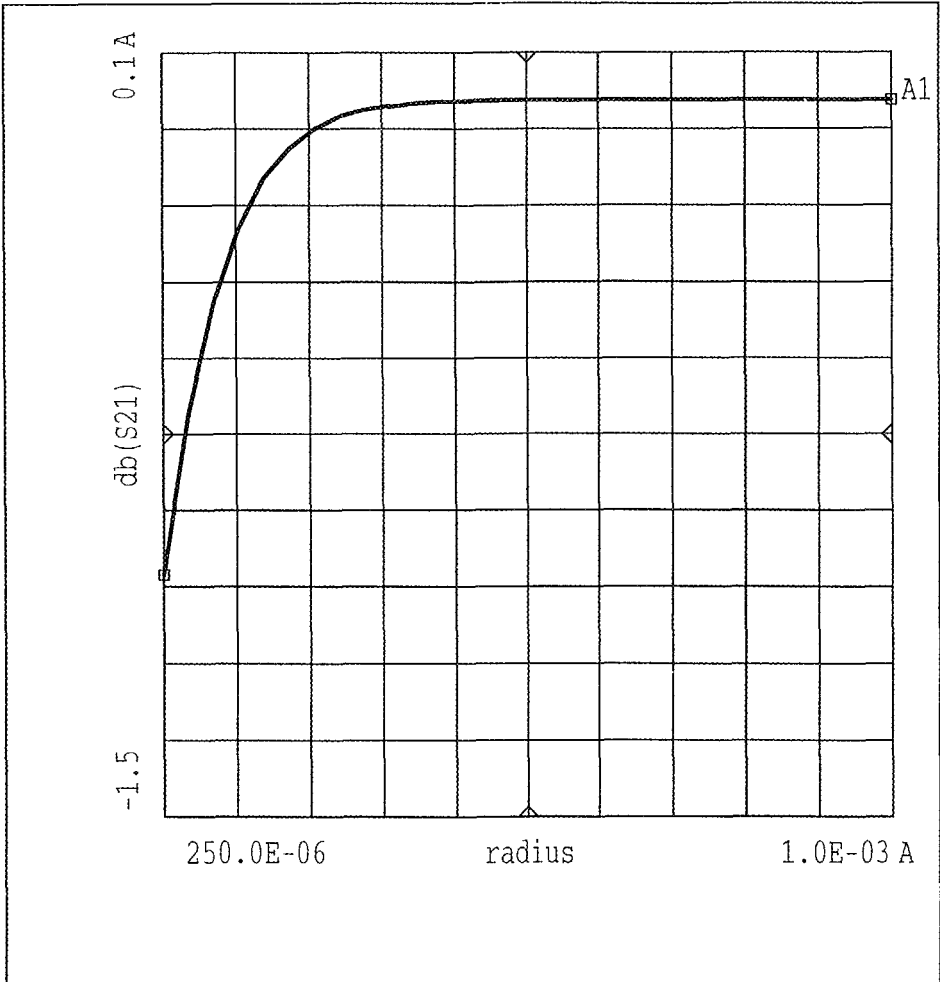


Figuur 8
Symbolische weergave van een optisch circuit

Naast de simulatie is er de mogelijkheid om direct vanaf het symbolisch weergegeven circuit de fotolithografische maskers te genereren. De gevolgde aanpak is fundamenteel verschillend van die van bestaande optische ontwerp pakketten, waarbij het maken van het masker centraal staat, en eventueel een simulatiemogelijkheid is toegevoegd. In onze aanpak staat het symbolische circuitontwerp centraal en kan vanuit dit circuit een simulatie worden

gestart, of een masker worden gegenereerd. Dit kunnen we aan de hand van een voorbeeld illustreren.

Figuur 8 stelt een eenvoudig optisch circuit voor van een gekoppelde rechte golfgeleider en een bocht. De parameters bij de golfgeleider elementen specificeren o.a. de breedte en bochtstraal van de golfgeleiders. De filmdikten, etsdiepte en brekingsindices worden gespecificeerd in een afzonderlijk element. De "source" en "de-



Figuur 9
 Simulatiesresultaat voor de verliezen in het circuit als functie van de bochtstraal



Figuur 10
Automatisch gegenereerde masker-lay-out.

tector" dienen ter afsluiting van het circuit. Desgewenst kunnen (sub)circuits, opgebouwd uit deze basiselementen, worden vervangen door een enkel symbool, dat dan verder net als een basiselement gebruikt kan worden.

Figuur 9 geeft het resultaat van een simulatie waarbij de totale demping van het circuit wordt gegeven als functie van de bochtstraal. Op deze wijze kan het circuit voor de verschillende parameters worden geoptimaliseerd. Vervolgens toont figuur 10 de lay-out van het gegenereerde masker, waarmee het ontwerp uiteindelijk ook gemaakt kan worden.

De gevolgde aanpak heeft zowel voor- als nadelen. De mogelijkheid tot een hiërarchische en symbolische opbouw van een ontwerp, de aanwezigheid van een goed ontwikkeld grafisch gebruikersinterface en de mogelijkheid om modellen voor het genereren van maskerpatronen direct te koppelen aan de simulatiemodellen, zijn duidelijke voordelen.

Anderzijds levert de koppeling uitsluitend via S-parameters ook een beperking op alleen koppelingen via de voorziene optische poorten worden goed berekend. Niet expliciet gemodelleerde koppelingen tussen elementen (bijv. via stralingsmodi) worden niet opgemerkt.

De aan MDS te koppelen gespecialiseerde optische simulatoren kunnen behalve de S-parameters nog meer gedetailleerde informatie over de golfpropagatie in een component beschikbaar maken. Dit is in het bijzonder van belang bij het ontwikkelen van nieuwe componenttypen, waarbij men als het ware in de component moet kunnen

kijken, bijv. om de oorzaak van verliezen te kunnen achterhalen.

Het geïntegreerde ontwerpsysteem zal vooral zijn waarde kunnen bewijzen als er een bibliotheek wordt opgebouwd van goed geanalyseerde standardelementen. Als nadeel, vooral voor onderwijsinstellingen, moet tenslotte nog de prijs genoemd worden. Het door Hewlett-Packard geleverde MDS-pakket (zonder de optische modules) kost een universiteit voor één gebruiker in de orde van 50 kf.

4. Stand van zaken en toekomstplannen

Het systeem is in ontwikkeling, simulatoren op basis van de EIM en tweedimensionale FT-BPM en FD-BPM zijn beschikbaar. Modellen voor mono- en multimodale rechte kanalen en bochten, stapvormige breedteveranderingen en laterale verplaatsingen (offset), alsmede symmetrische Y-juncties zijn in diverse stadia van ontwikkeling. Op korte termijn zullen ook modellen voor taps in de breedte verlopende golfgeleiders en asymmetrische Y-juncties worden ontwikkeld. Nieuwe simulatoren zijn in ontwikkeling om bepaalde typen componenten (phased-array, koppeling glasvezel aan planaire golfgeleider, TE/TM modeconversie) voldoende efficiënt en nauwkeurig te kunnen modelleren.

Tenslotte zij vermeld dat een Nederlands bedrijf (BBV te Enschede) op basis van kennisoverdracht van de Universiteit Twente o.a. ontwerp-diensten en programmatuur voor geïntegreerde optica aanbiedt.

5. Conclusie

Het samenwerkingsproject heeft geleid tot

een coördinatie van de onderzoeksinspanningen van de partners, door het onderling uitwisselen van componentmodellen en bijbehorende simulatoren en maakt deze ook beschikbaar voor deelnemers in het IOP die niet direct bij de ontwikkeling van de ontwerp-hulpmiddelen betrokken zijn.

Referenties

- 1 L Thylen, "The beam propagation method: An analysis of its applicability", *Opt Quantum Electron*, vol. 15, pp 433-439, 1983
- 2 R.M. de Ridder, A.F.M Sander, A Driessen en J.H.J Fluitman, "An integrated optic adiabatic TE/TM mode splitter on silicon", geaccepteerd voor publicatie in *J. Lightwave Technol*, 1993
- 3 D Yevick en B. Hermansson, "Efficient beam propagation techniques", *J Quantum Electron.*, vol 26, pp 109-112, 1990
- 4 Y Chung en N. Dagli, "An assessment of finite difference beam propagation method", *IEEE J Quantum Electron.*, vol 26, pp 1335-1339, 1990.
- 5 C van Dam, L.C.N de Vreede, M.K Smit, J.L Tauritz en B.H Verbeek, "Optical chip design with a microwave CAD-system", *Proc 10th Eur. Conf. on Circuit Theory and Design*, Sep 2-6, 1991, Copenhagen, Denmark, vol III, pp 1316-1323, 1991'