

Université des Sciences et Technologies de Lille

THESE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université
en Sciences Pour l'Ingénieur
Spécialité Électronique

Bob BELLINI

Étude théorique et expérimentale de guides optiques
à base de polymères pour la réalisation de
commutateurs électro-optiques

présentée et soutenue publiquement le 10 novembre 2000

Pr. Eugène CONSTANT

Pr. Didier DECOSTER

Dr. Jean-Pierre VILCOT

Dr. Suzanne LAVAL

Pr. Joseph ZYSS

M. Jean CHAZELAS

M. Joël JACQUET

M. François MURGADELLA

Pr. Peter Van DAELE

Président (U.S.T.L.)

Directeur de thèse (U.S.T.L.)

Co-directeur de thèse (I.E.M.N.)

Rapporteur (Paris XI - I.E.F.)

Rapporteur (ENS Cachan - LPQM)

Examineur (Thomson-CSF Detexis)

Examineur (Opto+)

Examineur (D.G.A.)

Examineur (University of Gent)

RÉSUMÉ

Les commutateurs optiques sont des composants fondamentaux dans la majorité des systèmes photoniques pour la transmission de données. Différents dispositifs intégrés ont été réalisés en matériaux semi-conducteurs, nous avons choisi la voie des polymères en espérant améliorer les pertes d'insertion.

Cette rédaction présente les aspects théoriques de conception de guides optiques et d'interconnexions ...bre/guide et laser/...bre, puis le développement d'une technologie compatible à celle utilisée pour la fabrication III-V et adaptée aux polymères.

Le point clef, parallèlement à la définition de structures de commutation adéquates aux matériaux organiques disponibles, est l'amélioration des interconnexions optiques, c'est-à-dire le couplage avec la ...bre ou entre guides. Nous avons alors développé un concept de structure photonique qui s'étend naturellement aux transitions optiques ...bre/composant et à l'hybridation. Les réalisations (guides, taper, coupleur 3 dB) montrent l'intérêt de telles structures pour les éléments passifs mais aussi pour des composants actifs. Ce type de dispositif fait l'objet d'un brevet déposé avec Thomson-CSF Detexis.

Theoretical and experimental study of polymer optical waveguides for electro-optical switching

SUMMARY

In a major part of photonic integrated circuits, optical switches are key-components. While different devices have been produced with III-V compounds, we have studied polymers and we guess they may be helpful, especially to decrease insertion losses.

We present the theoretical design of optical waveguides, ...bre/waveguide and laser/...bre interconnections. Then we establish a technological process issued from III-V technology and suitable for polymers.

Focusing on optical coupling as a main limiting factor, we present a concept of photonic structures that naturally includes optical transitions and hybridisation. Producing different devices (waveguides, tapers, couplers), we demonstrate that this structure is promising for passive as well as active components. A patent is deposited in association with Thomson-CSF Detexis.

Présentation

L'optique guidée en couches minces est apparue à la fin des années 1960, comme transposition de la propagation en hyperfréquences vers des longueurs d'onde de l'ordre du micron. En particulier le concept « d'optique intégrée » a été proposé par J.E. Miller en 1969. Elle est dès ses origines associée aux télécommunications mais concerne également d'autres champs d'application, comme les capteurs, les ordinateurs optiques..., car elle présente des qualités essentielles :

- Rapidité et grande bande passante de transmission de données
- Propriétés de (non-)cohérence pour des systèmes à interférences ou des faisceaux multiples sans interaction
- Peu de sensibilité aux perturbations extérieures
- Faibles pertes de propagation, tout au moins dans les fibres

A propos de ce dernier point, le problème de la transparence des fibres a été traité de manière impressionnante au cours des vingt-cinq dernières années : les pertes par absorption ont été divisées par 10^4 . Ainsi, avec les meilleurs matériaux, un bloc de 10 km n'absorbe pas plus de lumière qu'une vitre ordinaire d'une épaisseur de 1,5 cm. Le taux d'atténuation des fibres en silice est de $0,2 \text{ dB.km}^{-1}$; avec les verres fluorés on peut gagner 1 à 2 ordres de grandeurs : on espère alors pouvoir transmettre un signal optique à travers le Pacifique sans relais amplificateur.

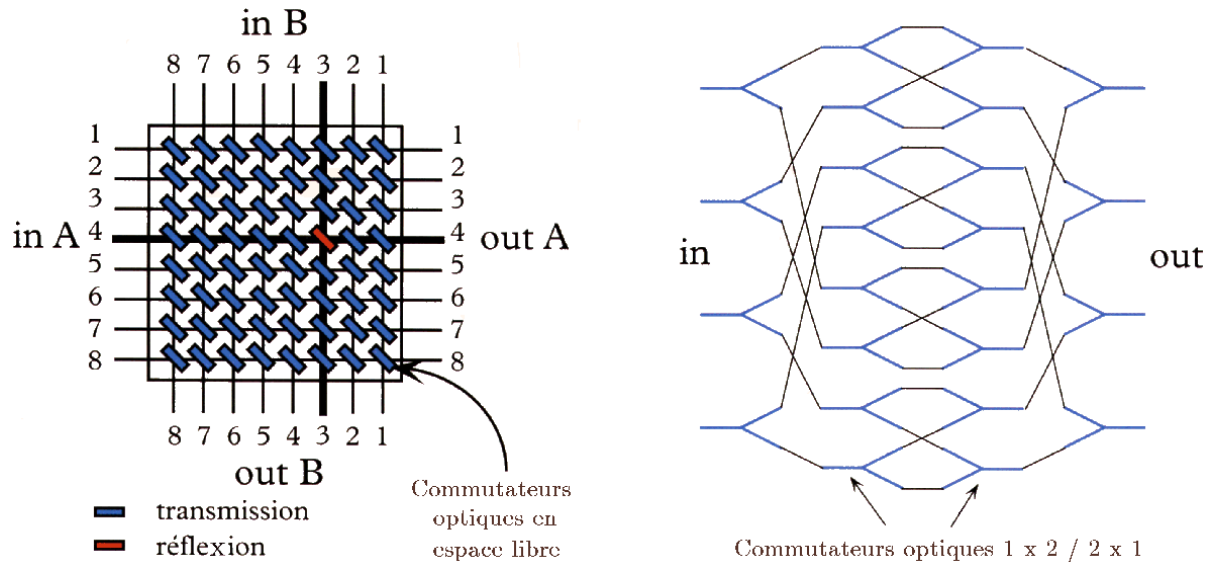
Les fibres ne sont qu'un élément latéral de l'optique intégrée, qui a cependant stimulé le développement des circuits intégrés opto-électroniques (O.E.I.C. dans la langue de Miller) puisque l'on a réussi à faire coïncider le minimum de dispersion des fibres en silice avec les longueurs d'onde correspondant aux valeurs de bande interdite des composés III-V de la micro-électronique (vers $1,3 \mu\text{m}$). L'arrivée des fibres optiques en polymères (P.O.F.) permet une extension vers la gamme visible. Certains polymères sont justement transparents aussi bien à $0,6 \mu\text{m}$ qu'à $1,5 \mu\text{m}$, mais ce n'est pas la motivation la plus souvent invoquée pour leur utilisation en photonique.

Il est surtout remarquable que les matériaux organiques peuvent avoir des coefficients électro-optiques non-linéaires beaucoup plus élevés que ceux des cristaux inorganiques. Ajoutons à cela la grande diversité des synthèses organiques, et l'on peut penser avoir sous la main des matériaux performants, à fonctionnalités multiples. De plus vient se greffer aux polymères l'idée de matériaux à faible coût de revient, et de grande souplesse d'utilisation (on les étale au pinceau, dirait-on).

Les matériaux organiques ne sont pas qu'une alternative aux composés semi-conducteurs. Ils peuvent fournir des composants passifs (multiplexeurs, démultiplexeurs, ...ltres), actifs (modulateurs, commutateurs), mais peuvent aussi s'intégrer aux puces III-V. D'où le tiraillement entre une technologie dédiée aux polymères (pour des structures homogènes) et des procédés de fabrication issus de la micro-électronique (solution hybride). L'ambiguïté, entre un développement potentiel énorme, qui justifie les études depuis une vingtaine d'années, et une mise en œuvre délicate, est d'ailleurs une constante que l'on retrouvera souvent. Une question subsidiaire émerge quand on se demande si les polymères ont à jouer à terme une fonction active à part entière ou ne peuvent se démarquer de la voie de l'hybridation. Toujours est-il qu'ils apportent une grande liberté de conception de circuit optique et qu'il serait dommage de ne pas étudier différentes nouvelles structures.

Ce travail est tourné vers la commutation optique sur polymères. Cette fonction, déjà réalisée sur InP, est bien sûr de première importance dans les systèmes où l'optique vient se mêler aux hyperfréquences. Un exemple caractéristique en est l'antenne réseau large bande à balayage électronique commandé optiquement. Ce type d'application a motivé la recherche à l'I.E.M.N. sur les commutateurs optiques en polymères et en semi-conducteurs.

Les antennes à balayage électronique sont constituées d'un réseau d'éléments rayonnants alimentés par des signaux dont la phase est réglable. On contrôle ainsi le diagramme de rayonnement de l'antenne en jouant sur les phases de chaque nœud du réseau. L'optique intervient pour générer « facilement » des retards temporels de grande dynamique : le signal lumineux est adressé à des ...bres de longueurs variables par l'intermédiaire de matrices de commutation recon...gurables, ce qui permet de générer des retards de l'ordre de la microseconde avec une résolution de l'ordre de la nanoseconde. L'exemple typique d'une matrice de commutation est donné ci-dessous. Le schéma de gauche est celui d'une matrice utilisant la commutation en espace libre, comme on peut l'obtenir avec des micro-systèmes, alors que celui de droite représente une matrice plus traditionnelle de l'optique intégrée, pour polymères ou InP (on voit que l'architecture est plus complexe, et donne de l'importance aux questions de diaphonie et de pertes).



L'élément de base est le commutateur optique, les paramètres critiques sont la vitesse de commutation, les pertes, ainsi que la taille des composants.

Avec des matériaux organiques, on espère améliorer non pas tant les performances de commutation que les pertes d'insertion. En effet, de par leur différence de nature et de structure, les puces en semi-conducteurs et les fibres optiques ont des modes optiques standards très différents, ce qui ne permet pas un transfert d'énergie satisfaisant. Avec les polymères, les indices, les épaisseurs, la permittivité concourent à un bon couplage avec la fibre et à une adéquation des célérités optiques et hyperfréquences.

Le développement et l'intégration des matériaux optiquement non linéaires étant largement étudiés au Laboratoire de Photonique Quantique et Moléculaire, le problème du couplage avec la fibre, et plus généralement la question des interconnexions, occupent une grande part des motivations de ce travail. Les réponses déjà présentées sont souvent plus complexes, donc plus délicates à réaliser que ce que je pourrai vous présenter. Je l'avais dans un premier temps délaissée, l'optique multimode est d'un certain intérêt pour l'appréhension d'un grand bord du problème. De plus, elle peut être fertile quand il s'agit des composants; mais concernant l'efficacité, voyez le compromis en diaphonie comme remplaçant celui du couplage. Il n'est pas encore aride de s'intéresser à ces aspects multimodes dont la performance dépend des qualités électro-optiques des matériaux.

Dans cette introduction, nous avons donné quelques indications allusives aux travaux que nous avons menés, ou à ses prolongements possibles. La rédaction de thèse reprend, pavée de bonnes intentions, ces éléments en les organisant de la façon suivante :

Chapitre 1 Données du problème, description des méthodes numériques pour l'analyse et la simulation de structures photoniques

Chapitre 2 Report du Chapitre 1 dans le cadre des polymères

Chapitre 3 Construction des méthodes technologiques; fabrication de guides enterrés; caractérisation

Chapitre 4 Hybridation avec le silicium; nouvelle structure de guide.

Table des matières

Présentation	1
1 OPTIQUE INTEGREE	7
1.1 Généralités de l'optique guidée	8
1.1.1 Guides plans	9
1.1.2 Prémices à l'analyse modale numérique	13
1.1.3 Analyse des Modes Couplés	15
1.2 Méthode des faisceaux propagés	17
1.2.1 Présentation.	17
1.2.2 Quelques aspects de l'implémentation	17
1.3 Analyse modale 2D	19
1.3.1 Par propagation: B.P.M. 3D	19
1.3.2 Eléments ...nis	21
1.4 Optimisation: exemple de l'algorithme génétique	23
1.5 Interactions lumière-matériau	27
1.5.1 Pertes optiques	27
1.5.2 Effets électro-optiques	30
1.6 Commutateurs	32
1.6.1 Principes	32
1.6.2 Différentes structures de commutateurs	33
1.6.3 Performances	38
1.7 Conclusion	39
2 POLYMERES	41
2.1 Matériaux organiques en optoélectronique	41
2.1.1 Polymères	42
2.1.2 Colorants	44
2.1.3 Place des polymères conducteurs	45
2.1.4 Systèmes polymères-chromophores	46
2.1.5 Apparition de $\hat{A}^{(2)}$: orientation	47
2.1.6 Exemple de conception de colorants et polymères	48

2.2	Polymères utilisés	50
2.3	Guides optiques : présentation	52
2.3.1	Guide enterré	52
2.3.2	Guide en rainure	53
2.3.3	Guide par plots	56
2.4	Conception de guides	58
2.5	Couplage avec la fibre	61
2.5.1	Couplage direct : utilisation d'un taper ou adaptateur de mode	61
2.5.2	Apport des polymères pour le couplage laser-fibre	64
2.6	Conclusion sur les polymères optiques	66
3	GUIDES EN POLYMERES	69
3.1	Etapes technologiques	69
3.1.1	Dépôt du polymère en couche mince	69
3.1.2	Choix du masque de gravure	73
3.1.3	Gravure du polymère	77
3.1.4	Préparation des faces d'injection	79
3.2	Procédé de fabrication	80
3.2.1	Masque de silice	82
3.2.2	Masque d'or	83
3.3	Méthodes de caractérisation	85
3.3.1	Lignes noires	85
3.3.2	Mesure de la diffusion	89
3.3.3	Mesure fibre à fibre	89
3.3.4	Champ proche en sortie du guide	90
3.4	Résultats de mesure	91
3.4.1	Guides enterrés	91
3.4.2	Guides en film souple	94
3.5	Conclusion	95
4	GUIDE TRIANGULAIRE	97
4.1	Gravure du silicium	98
4.1.1	Voie sèche vs. voie humide	98
4.1.2	Mode opératoire pour une gravure en V	100
4.2	Guide en V	103
4.2.1	Confinement	103
4.2.2	Milieu de propagation	103
4.2.3	Faces d'injection : découpage à la scie	105
4.2.4	Guides droits	105
4.3	Avantages	112

4.3.1	Couplage avec la ...bre	112
4.3.2	Taper	112
4.4	Dispositif actif utilisant des polymères à basse T_g	115
4.5	Commutateurs	116
4.5.1	Principes	116
4.5.2	Fonctionnement en coupleur 3 dB	120
4.6	Conclusion	121
	Récapitulation et conclusion	123
	ANNEXE A: INDICES OPTIQUES	125
	ANNEXE B: FORMATION DES PLOTS	127

Récapitulation et conclusion

Sé Ip̄r̄tā, anw lavnir
Raymond Queneau, Bâtons, chīres et lettres

L'étude théorique et expérimentale présentée dans cette rédaction a consisté à évaluer les capacités des polymères en ce qui concerne la commutation optique. C'est à l'I.E.M.N. la première étude de matériaux organiques pour l'optique intégrée et l'électro-optique.

La première ramification de notre travail (Chapitre 1) comportait les calculs numériques pour :

- les analyses modales à une et deux dimensions, et donc les recouvrements et perturbations (en particulier lors de l'introduction de l'effet électro-optique);
- la propagation de faisceaux (B.P.M.) en deux et trois dimensions;
- l'optimisation de structures par algorithme génétique.

Nous avons essentiellement consacré le deuxième chapitre à une étude a priori des polymères, appliquée à l'optique intégrée. En utilisant la première partie, nous avons pu dimensionner l'exemple typique du guide polymère : le guide enterré, mais aussi concevoir un nouvel adaptateur de modes entre fibre optique et guide, et étudier une transition entre une puce III-V et une fibre.

Le passage en salle blanche pour la fabrication de guides enterrés (Chapitre 3) a été le plus délicat et laborieux palier, puisqu'il a fallu régler chaque étape aux exigences de l'optique et des polymères : d'une part, étant donné le développement des composants (de l'ordre du millimètre), il faut un taux de défaut assez faible (il en faut peu pour annuler une série de guides); d'autre part les polymères ne s'inscrivent pas vraiment dans la logique de la technologie III-V, ce qui pose des problèmes de compatibilité de procédé. La caractérisation optique des guides enterrés a confirmé que le point le plus critique était toujours le couplage avec la fibre. Nous avons proposé au Chapitre 2 une solution qui utilisait des guides couplés et un rétrécissement du cœur. Dans un esprit différent, nous avons développé (Chapitre 4) une nouvelle transition optique qui permet de contrôler la taille d'un faisceau de manière précise, peu coûteuse technologiquement et grandement reproductible. Le dispositif fait l'objet d'un brevet, déposé avec

Thomson-Detexis. Il est fondé sur les gravures préférentielles du silicium cristallin. Nous avons étudié une possibilité de commutation optique avec ces structures polymères/Si.

Dans cette rédaction de thèse, nous avons fait apparaître un certain nombre d'essais et d'expériences, qu'elles soient numériques ou technologiques. Leur point d'accumulation (la partie passive des composants ou les interconnexions) se retrouve dans chaque chapitre.

Du point de vue de la technologie des polymères, nous avons fait apparaître deux pôles :

- la ligne pure et incorruptible qui consiste à synthétiser les polymères adéquats par leurs indices, épaisseurs, et fonctionnalités pour l'application visée, sans autre concession que de disposer des (gros) moyens de mise en œuvre (collaboration, mieux : fusion des chimistes, technologues, physiciens);
- la ligne moins aristocratique qui consiste à rechercher une solution qui s'applique à une plus grande variété de polymères et de substrats. C'est entre autre la voie de l'hybridation.

Nous ne pouvons pas cacher que nous avons été tentés par la première démarche, c'est ce qui justifie en partie le Chapitre 3. L'incursion dans la deuxième voie est d'autant plus intéressante qu'avec des dispositifs comme ceux du Chapitre 4, toute l'optique intégrée tient en une couche de polymère : c'est le substrat qui donne la forme du guide.

Les prolongements concernent l'optimisation des géométries et des procédés de fabrication des guides triangulaires (gravure plasma, découpage à la scie) pour tirer le meilleur de ces structures. Les perspectives sont, nous l'espérons, plus grandes qu'une étude académique.

Bibliographie

- [1] <http://www.univ-lille1.fr/»eudil/vinman/index.html>.
- [2] <http://www.polymerphotonics.com/paper.htm>.
- [3] <http://wtm.ite.pwr.wroc.pl/»jad/EMMA-EMSi/Pages/page20.html>.
- [4] Tunable polymers will deliver low-cost switches. *Opto&Laser Europe*, page 28, Oct. 1996.
- [5] Shinji Aramaki, Yuko Okamoto, and Tetsuo Murayama. Cross-linked poled polymer : poling and thermal stability. *Japanese Journal of Applied Physics*, 33, p 5759, 1994.
- [6] Roel Baets and Paul E. Lagasse. Loss calculation and design of arbitrary curved integrated-optics. *Journal of Optical Soc. Am.*, 73, p 177, 1983.
- [7] Allen J. Bard, editor. *Encyclopedia of electrochemistry of the elements*. Marcel Dekker, 1982.
- [8] Thomas Bäck. *Evolutionary algorithms in theory and practice*. Oxford University Press, 1996.
- [9] Bob Bellini, Jean-François Larchanché, Joseph Harari, Jean-Pierre Vilcot, and Didier Decoster. Which method for a quick and precise modal analysis? Application to coupled polymer waveguides. In *Photonics, devices, and systems*, volume 4016, page 66. *Proceedings of S.P.I.E.*, 2000.
- [10] Laurence Bes, Bernard Boutevin, Alain Rousseau, Régis Mercier, Bob Bellini, Didier Decoster, Jean-François Larchanché, and Jean-Pierre Vilcot. Synthesis and characterisations of crosslinked oligoimide. *Synthetic Metals*, 115, p 251, 2000.
- [11] N. Bouadma, J. Liang, R. Levenson, S. Grosmaire, P. Boulet, and S. Sainson. Integration of a laser diode with a polymer-based waveguide for photonic integrated circuits. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 6(10), p 1188, 1994.
- [12] S. Brassel et al and J. Zyss. Multipolar molecules and multipolar fields: probing and controlling the tensorial nature of nonlinear molecular media. *Journal of Optical Society of America B*, 15(1), p 257, 1998.

- [13] William K. Burns, Marta McWright Howerton, and R.P. Moeller. Performance and modeling of proton exchanged LiTaO₃ branching modulators. *Journal of Lightwave Technology*, 10(10), p 1403, 1992.
- [14] Elias Burstein and Claude Weisbuch. *Connected electrons and photons: New physics and applications*. New-York Plenum, 1995.
- [15] Ian Cayrefourcq. *Conception et fabrication de matrices de commutation optique en vue de la réalisation de modules de synthèse de retards temporels*. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1998.
- [16] Ian Cayrefourcq, Michel Schaller, Jean-Pierre Vilcot, Joseph Harari, Jean-Philippe Gouy, and Didier Decoster. Low-power consumption 1x4 "Cascade Switch" for microwave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 18(4), p 27, 1998.
- [17] Antao Chen, Vadim Chuyanov, Felix Ignacio Marti-Carrera, Sean Garner, William H. Steier, Jinghong Chen, Shajing Sun, and Larry R. Dalton. Vertically tapered polymer waveguide mode size transformer for improved fiber coupling. *Optical Engineering*, 39(6), p 1507, 2000.
- [18] Antao Chen, Vadim Chuyanov, Hua Zhang, Sean Garner, Sang-Shin Lee, William H. Steier, Jinghong Chen, Fang Wang, Jingsong Zhu, Mingqian Zhu, Younsoo Ra, Shane S.H. Mao, Aaron W. Harper, Larry R. Dalton, and Harold R. Fetterman. DC-biased electro-optic polymer waveguide modulators with low half-wave voltage and high thermal stability. *Optical Engineering*, 38(12), p 2000, December 1999.
- [19] Datong Chen, Harold R. Fetterman, Antao Chen, William H. Steier, Larry R. Dalton, Wenshen Wang, and Yongqiang Shi. Demonstration of 110 GHz electro-optic polymer modulators. *Applied Physics Letters*, 70(25), p 3335, 1997.
- [20] J.C. Chen and S. Jungling. Computation of higher-order waveguide modes by imaginary-distance beam propagation method. *Optical and Quantum Electronics*, 26, p 199, 1994.
- [21] Ray T. Chen. Polymer-based passive and active guided-wave devices and their application. In *Integrated Optics and Optoelectronics*, volume CR 45. Critical Reviews of Optical Science and Technology, 1993.
- [22] Philippe G. Ciarlet. *Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation*. Paris, 1990.
- [23] P. Coudray, J. Chisham, A. Malek-Tabrizi, C.-Y. Li, M.P. Andrews, N. Peyghambarian, and S.I. Najafi. Ultraviolet light imprinted sol-gel silica glass waveguide devices on silicon. *Optics Communications*, 128, p 19, July 1996.

- [24] J.M.G. Cowie. *Polymers: chemistry & physics of modern materials*. Blackie Academic & professional, 1991.
- [25] Ariela Donval. *Conception et réalisation de composants électro-optiques polymères insensibles à la polarisation*. Thèse de doctorat, Université de Paris XI, 1999.
- [26] Ariela Donval, Eric Toussaere, Stéphane Brassel et, and Joseph Zyss. Comparative assessment of electrical, photoassisted and all optical in-plane poling of polymer based electrooptic modulators. *Optical Materials*, 12(2-3), p 215, 1999.
- [27] Fumihiro Ebisawa, Mitsutoshi Hoshino, and Ken Sukegawa. Self-holding photochromic polymer Mach-Zehnder optical switch. *Applied Physics Letters*, 65, p 2919, 1994.
- [28] Louay Eldada, Karl Beeson, Deepti Pant, Robert Blomquist, Lawrence W. Shacklette, and Michael J. McFarland. Polymeric components for all-optical networks. In *Optoelectronic Integrated Circuits IV*, volume 3950, page 78. *Proceedings of S.P.I.E.*, 2000.
- [29] Louay Eldada and Lawrence W. Shacklette. Advances in polymer integrated optics. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6(1), p 54, Jan.-Feb. 2000.
- [30] W.J. English and F.J. Young. An E-vector variational formulation of the Maxwell equations for cylindrical waveguide problems. *I.E.E.E. Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-19, p 40, Jan. 1971.
- [31] Regis S. Fan and R. Brian Hooker. Hybrid optical switch using passive polymer waveguides and semiconductor optical amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, 18(4), p 800, 2000.
- [32] U. Fischer, B. Schüppert, and K. Petermann. Optical waveguides switches in silicon based on Ge-indium-doped waveguides. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 6(8), p 978, 1994.
- [33] H. Franke, G. Knabke, and R. Reuter. Design and fabrication of low-loss polymer waveguide components for on-chip optical interconnection. In *Proceedings of SPIE*, 1986.
- [34] H. Franke, D. Wagner, T. Kleckers, R. Reuter, H.V. Rohitkumar, and B.A. Blech. Measuring humidity with planar polyimide lightguides. *Applied Optics*, 32(16), p 2927, 1993.
- [35] Jacob M. Hammer. *Integrated optics*, volume 7 of *Topics in Applied Physics*, chapter Modulation and switching of light in dielectric waveguides. Springer-Verlag, 1979.
- [36] Takeshi Harada, Kenji Gamo, and Susumu Namba. Dry etching of Nb and fabrication of Nb variable-thickness bridges. *Japanese Journal of Applied Physics*, 20(1), p 259, Jan. 1981.

- [37] Hideki Hayashi and Kunio Tada. GaAs traveling-wave directional coupler optical modulator/switch. *Applied Physics Letters*, 57(3), p 227, 1990.
- [38] S. Helfert and R. Pregla. New developments of a beam propagation algorithm based on the method of line. *Opt. Quantum Electron.*, 25, p 943, 1993.
- [39] Hugo J.W.M. Hoekstra. On beam propagation methods for modelling in integrated optics. *Opt. Quantum Electron.*, 29, p 157, 1997.
- [40] Wol-Yon Hwang, Min-Cheol Oh, Hyang-Mok Lee, Heuk Park, and Jang-Joo Kim. Polymeric 2x2 electrooptic switch consisting of asymmetric Y junctions and Mach-Zehnder interferometer. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 9(6), p 761, June 1997.
- [41] Ryoji Inaba, Miwa Kato, Masaku Sagawa, and Haruo Akahoshi. Two-dimensional mode size transformation by Φ n-controlled polymer waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 16(4), p 620, 1998.
- [42] Guanghai Jin. Nouvelles techniques de modélisation optique. Application à quelques composants d'optique intégrée. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1997.
- [43] Luc Joannes. Etude et réalisation de circuits optiques avec micromiroirs intégrés, sur matériaux diélectriques. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1994.
- [44] W.L. Kath and G.A. Kriegsmann. Optical tunneling: radiation losses in bent fibre-optic waveguides. *I.M.A. Journal of Applied Mathematics*, 41, p 85, 1988.
- [45] Chang-Min Kim and Young-Joon Im. Switching operations of three-waveguide optical switches. *I.E.E.E. Journal of selected topics in quantum electronics*, 6(1), p 170, 2000.
- [46] Herwig Kogelnik. Integrated optics, volume 7 of Topics in Applied Physics, chapter Theory of dielectric waveguides. Springer-Verlag, 1979.
- [47] Gijs Krijnen. All-optical switching in non-linear integrated optic devices. Thèse de doctorat, Université de Twente, 1992.
- [48] Jean-François Larchanché, Bob Bellini, Jean-Pierre Vilcot, and Didier Decoster. Technological process for a large variety of polymers. *I.E.E.E. Lasers and Electro-Optics Society*, 2000.
- [49] Isabelle Ledoux, Régine Pinsard-Levenson, and Joseph Zyss. Matériaux organiques pour les réseaux de communications optiques : de la molécule aux composants. *L'écho des Recherches*, 162, p 35, 1995.
- [50] Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin. Polarisation-insensitive digital optical switch using an electro-optic polymer rib waveguide. *Electronics Letters*, 33(4), p 314, Feb. 1997.

- [51] Juerg Leuthold, Pierre A. Besse, Juerg Eckner, Emil Gamper, Marcus Dul k, and Hans Mel chior. All-optical space switches with gain and principally ideal extinction ratios. *I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics*, 34(4), p 622, 1998.
- [52] Syh-Ming Lian, Ker-Ming Chen, Rong-Jer Lee, Jing-Pin Pan, and Aina Hung. Dry etching of Nb and fabrication of Nb variable-thickness bridges. *Journal of Applied Polymer Science*, 58(9), p 1577, 1995.
- [53] Y.L. Liu, E.K. Liu, S.L. Zhang, G.Z. Li, and J.S. Luo. Silicon 1x2 digital optical switch using plasma dispersion. *Electronics Letters*, 30(2), p 130, 1994.
- [54] N. Mabaya, P.E. Lagasse, and P. Vandembul eke. Finite element analysis of optical waveguides. *I.E.E.E. Trans. Microwave Theory Tech.*, 600, p 29, 1981.
- [55] Vincent Magnin. Contribution à la modélisation et à l'optimisation de composants optoélectroniques. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1998.
- [56] Vincent Magnin, Ian Cayrefourcq, and Bob Bellini. Conception et optimisation de dispositifs microtechnologiques à l'aide d'un algorithme génétique. In Cinquième journée nationale du réseau doctoral en microtechnologies, 1998.
- [57] Mistuhiro Makihara, Makoto Sato, Fusao Shimokawa, and Yasuhide Nishida. Micro-mechanical optical switches based on thermocapillary integrated in waveguide substrate. *Journal of Lightwave Technology*, 17(1), p 14, 1999.
- [58] Franck Mallecot. Etude des phénomènes de propagation dans des structures de guidage à base de GaAs, GaAlAs, GaInAs. Application à la réalisation de photoconducteurs intégrés monolithiquement à un guide optique. Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 1988.
- [59] Enrique A.J. Marcatili. Dielectric rectangular waveguide and directional coupler for integrated optics. *Bell Syst. Tech. J.*, 48(9), p 2071, Sept. 1969.
- [60] Cornel Marxer and Nicolaas F. de Rooij. Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single-mode ...bers based on plasma-etched silicon mirror and electrostatic actuation. *Journal of Lightwave Technology*, 17(1), p 2, 1999.
- [61] M. Mashayekhi, T. Touam, W.J. Wang, E. Berolo, and S. Iraj Najafi. Semiconductor device to optical ...ber coupling using low-loss glass taper waveguide. *Optical Engineering*, 36(12), p 3476, 1997.
- [62] G. Müller, B. Stegmüller, H. Westermeier, and G. Wenger. Tapered InP/InGaAsP waveguide structure for efficient ...ber-chip coupling. *Electronics Letters*, 27(20), p 1836, 1991.

- [63] Ingrid Moerman, Peter van Dael e, and Piet M. Demeester. A review on fabrication technologies for the monolithic integration of tapers with III-V semiconductor devices. *I.E.E.E. Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 3(6), p 1308, Dec. 1997.
- [64] R. Moosburger, G. Fishbeck, C. Kostrzewa, and K. Petermann. Digital optical switch based on 'oversized' polymer rib waveguides. *Electronics Letters*, 32(6), p 544, March 1996.
- [65] A. Neyer, T. Knoche, and L. Müller. Fabrication of low-loss polymer waveguides using injection moulding technology. *Electronics Letters*, 29(4), p 399, 1993.
- [66] Hiroshi Nishihara, Masamitsu Haruna, and Toshiaki Suhara. *Optical integrated circuits*. McGraw-Hill Optical and Electro-optical Engineering Series, 1985.
- [67] Daniel Ortega, J.M. Aldariz, John M. Arnold, and J. Stewart Aitchison. Analysis of "quasi-modes" in periodic segmented waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 17(2), p 369, 1999.
- [68] F. Pain, R. Coquil le, B. Vinouze, N. Wol ffer, and P. Gravey. Comparison of twisted and parallel nematic liquid crystal polarisation controllers. Application to a 4 x 4 free space optical switch at 1,5 μ m. *Optics Communications*, 139, p 199, 1997.
- [69] G. Pandraud and O. Parriaux. Zero dispersion in step index slab waveguides. *Journal of Lightwave Technology*, 17(11), p 2336, 1999.
- [70] Achille Pattavina, Mario Martinelli, Guido Maier, and Pierpaolo Boffi. Techniques and technologies towards all-optical switching. *Optical Networks Magazine*, 1(2), p 75, April 2000.
- [71] Kurt E. Petersen. Silicon as a mechanical material. *Proceedings of I.E.E.E.*, 70(5), p 58, May 1982.
- [72] D.P. Prakash, D.C. Scott, H.R. Fetterman, M. Matloubian, Q. Du, and W. Wang. Integration of polyimide waveguides with traveling-wave phototransistors. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 9(6), p 800, June 1997.
- [73] Reinhold Pregl a, Wolf von Reden, Hugo J.W.M. Hoekstra, and Hovik V. Baghdasaryan. *Photonics devices for telecommunications, chapter Beam propagation methods*. Springer-Verlag, 1999.
- [74] B.M. Azizur Rahman and J. Brian Davies. Finite element analysis of optical and microwave waveguide problems. *I.E.E.E. Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-32(1), p 20, 1984.
- [75] Jean-Manuel Raimundo. *Ingénierie moléculaire de chromophores conjugués pour l'optoélectronique*. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 1999.

- [76] Rainer Reuter, Hilmar Franke, and Claudius Feger. Evaluating polyimides as light-guide materials. *Applied Optics*, 27(21), p 4565, 1988.
- [77] Philippe Robert. Photonics devices for telecommunications, chapter Comparison of experimental results. Springer-Verlag, 1999.
- [78] Th. Schwander, S. Fischer, A. Krämer, M. Laich, K. Luksic, G. Spatschek, and M. Warth. Simple and low-loss fibre-to-chip coupling by integrated field-matching waveguide in InP. *Electronics Letters*, 29(4), p 326, 1993.
- [79] Ravi Selvaraj, How T. Lin, and John F. McDonald. Integrated optical waveguides in polyimide for wafer scale integration. *Journal of Lightwave Technology*, 6(6), p 1034, 1988.
- [80] Y. Shani, C.H. Henry, R.C. Kistler, K.J. Orlowsky, and D.A. Ackerman. Efficient coupling of a semiconductor laser to an optical fiber by means of a tapered waveguide on silicon. *Applied Physics Letters*, 55(23), p 2389, 1989.
- [81] N. Shaw, P.J. Williams, and J. Buus. Optoelectronic integrated circuit (OEIC) waveguide coupler for spot size expansion and improved fibre coupling efficiency. *Electronics Letters*, 31(14), p 1143, 1995.
- [82] Atsushi Shishido, Osamu Tsutsumi, Akihiko Kanazawa, Takeshi Shiono, Tomiki Ikeda, and Naoto Tamai. Rapid optical switching by means of photoinduced change in refractive index of azobenzene liquid crystals detected by reflection-mode analysis. *Journal of American Chemical Society*, 119, p 7791, 1997.
- [83] U. Siebel, R. Hauffe, and K. Petermann. Crosstalk-enhanced polymer digital optical switch based on a W-shape. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 12(1), p 40, 2000.
- [84] M. Sigelle and R. Hierle. Determination of the electrooptic coefficients of 3-methyl 4-nitropyridine 1-oxide by an interferometric phase-modulation technique. *Journal of Applied Physics*, 52(6), p 4199, 1981.
- [85] K.D. Singer, T.C. Kowalczyk, H.D. Nguyen, A.J. Beuhler, and D.A. Wargowski. Cross-linked polyimides for integrated optics. In *Optoelectronic Integrated Circuits*, volume 3006. Proceedings of S.P.I.E., 1997.
- [86] Lucas B. Soldano and Erik C.M. Pennings. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications. *Journal of Lightwave Technology*, 13(4), p 615, 1995.
- [87] Alan G. Solheim, François Hébert, and David J. Roulston. Self-aligned V-groove etched devices. *Solid-state Electronics*, 32(3), p 235, 1989.

- [88] Richard A. Soref and Joseph P. Lorenzo. Silicon guided-wave optics. *Solid state technology*, 31(11), p 95, 1988.
- [89] Stefano Sottini, Daniela Grando, Luca Palchetti, and Emilia Giorgetti. Optical fiber-polymer guide coupling by a tapered graded index glass guide. *I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics*, 31(6), p 1123, 1995.
- [90] H. Stubb, E. Punkka, and J. Paloheimo. Electronic and optical properties of conducting polymer thin films. *Materials science and engineering R, reports*, 10(3), p 85, 1993.
- [91] J. Stulmeijer, A.F. Bakker, I. Moerman, F.H. Groen, and M.K. Smit. InP-based spotsize converter for integration with switching devices. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 11(1), p 81, 1999.
- [92] S.M. Sze. *Semiconductor devices: physics and technology*. John Wiley&Sons, 1985.
- [93] K. Tajima, S. Nakamura, and Y. Ueno. Femtosecond all-optical switching using efficient incoherent nonlinearity with slow relaxation. *Applied Physics Letters*, B48, p 88, 1997.
- [94] C.C. Teng, M.A. Mortazavi, and G.K. Boudoughian. Origin of the poling-induced optical loss in a non linear optical polymeric waveguide. *Applied Physics Letters*, 66(6), p 667, 1995.
- [95] J.I. Thackara, J.C. Chon, G.C. Bjorklund, W. Volksen, and D.M. Burland. Polymeric electro-optic Mach-Zehnder switches. *Materials Science and Engineering B*, 67, p 3874, 1995.
- [96] P.K. Tien, R.J. Martin, and G. Smolinsky. Formation of light-guiding interconnections in an integrated optical circuit by composite tapered-film coupling. *Applied Optics*, 12(8), p 1909, 1973.
- [97] Yasuhide Tsuji, Masanori Koshiba, and Tatsuki Shiraishi. Finite element beam propagation method for three-dimensional optical waveguide structures. *Journal of Lightwave Technology*, 15(9), p 1728, Sept. 1997.
- [98] Thomas A. Tumolillo Jr and Paul R. Ashley. A novel pulse-poling technique for EO polymer waveguide devices using device electrode poling. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 4(2), p 142, 1992.
- [99] Emmanuel Van Tomme, Peter P. Van Daele, Roel G. Baets, and Paul E. Lagasse. Integrated optic devices based on nonlinear optical polymers. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 27(3), p 778, 1991.

- [100] Jean-François Vinchant, A. Goutelle, M. Erman, M. Renaud, L. Thylen, and P. Svenson. Low driving voltage or current digital optical switch on InP for multi-wavelength system application. *Electronics Letters*, 28(12), 1992.
- [101] Jean-François Vinchant, M. Renaud, M. Erman, J.L. Peyre, P. Jarry, and P. Pagnod. InP digital optical switch: key element for guided wave photonic switching. *I.E.E. Proceedings*, 140(5), p 301, 1993.
- [102] Zhuang Wanru, Duan Jining, Zou Zhengzhong, Yang Peisheng, Shi Zhiwen, Sun Furong, and Gao Junhua. Total internal reflection optical switch with injection region isolated by oxygen ion implantation. *Fiber and Integrated Optics*, 15, p 27, 1996.
- [103] Ralph Williams. *Modern GaAs processing methods*. Artech House, 1990.
- [104] Robert K. Winn and Jay H. Harris. Coupling from multimode to single-mode linear waveguides using horn-shaped structures. *I.E.E.E. Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-23(1), p 92, 1975.
- [105] Masahiro Yanagisawa, Yasufumi Yamada, and Morio Kobayashi. Low-loss and large-tolerance fiber coupling of high- Φ silica waveguides by local mode-field conversion. *I.E.E.E. Photonics Technology Letters*, 4(4), p 433, 1993.
- [106] Amon Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics. *I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics*, 9(9), p 919, 1973.
- [107] A. Azzam Yasseen, Joseph N. Mitchell, James F. Klemic, David A. Smith, and Mehran Mehregany. A rotary electrostatic micromotor 1x8 optical switch. *I.E.E.E. Journal of selected topics in Quantum Electronics*, 5(1), p 26, 1999.
- [108] D. Yevick and B. Hermansson. New formulation of the matrix beam propagation method: application to rib waveguides. *I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics*, page 221, 1989.
- [109] Ryoko Yoshimura, Makoto Hikata, Satoru Tomaru, and Saburo Imamura. Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate. *Journal of Lightwave Technology*, 16(6), p 1030, 1998.
- [110] Joseph Zyss. *Molecular non linear optics - materials, physics and devices*. Academic, San Diego, 1994.