

COMPRENDRE

les structures guidantes

Azzedine BOUDRIOUA
 Laboratoire de Physique
 des Lasers, CNRS (UMR7538),
 Institut Galilée
 Université Paris 13,
 93430 Villetaneuse, France
boudrioua@univ-paris13.fr

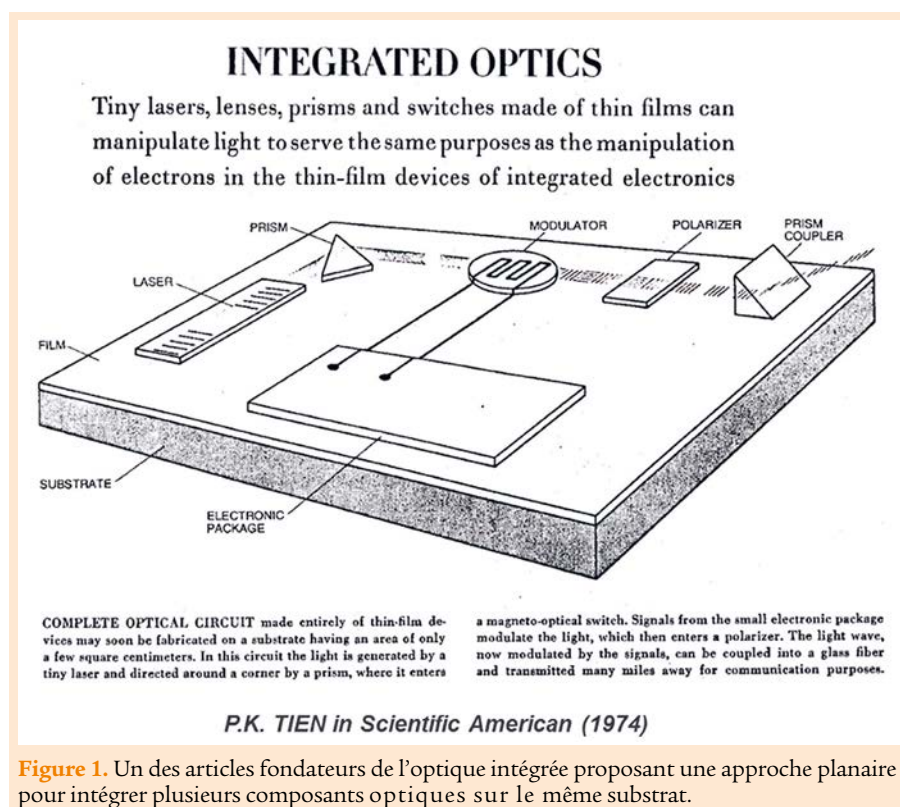
L'optique ou ce qu'il convient d'appeler la photonique vit une période de transition majeure. De nouveaux concepts et de nouvelles structures ont permis récemment des approches originales pour manipuler la lumière à des échelles plus petites que sa longueur d'onde caractéristique, suscitant des espoirs réels de voir ces technologies photoniques sur le devant de la scène dans les décennies à venir.

À l'instar de la microélectronique, le développement de la photonique a nécessité des étapes que l'on peut classer en trois phases : la micro-optique, l'optique intégrée et la nano-photonique. Ce développement fulgurant est la suite d'un grand effort de recherche et de développement dans le domaine de l'optique guidée, ayant conduit à l'amélioration des performances des fibres optiques et à l'essor des réseaux de télécommunications optiques – qui font figure de locomotive des technologies photoniques. Les recherches et développements en optique guidée ont rendu disponibles des composants optiques intégrés de tout genre à des coûts faibles. De ce fait, d'autres applications dans des domaines divers et variés ont vu le jour.

Le concept d'*optique intégrée* a été introduit pour la première fois en 1960 par S.E. Miller du laboratoire Bell (USA) [1-3]. L'approche proposée par Miller consistait à réaliser sur le même substrat des composants passifs et actifs pour la génération et le traitement du signal optique. L'élément de base de ce type de circuit étant le guide d'onde. Comme son nom l'indique, l'optique intégrée se propose de fabriquer et intégrer plusieurs composants optiques individuels sur un substrat plan commun [2,3]. L'objectif étant de fabriquer des circuits optiques intégrés (ou circuits *photoniques* intégrés) pouvant exécuter des fonctions optiques complexes. Les progrès technologiques ont permis l'apparition de dispositifs optiques à faible perte dotés d'une grande stabilité

thermique et environnementale, à un coût relativement bas. Tout cela grâce à une recherche multidisciplinaire impliquant des physiciens, des chimistes, des ingénieurs voire même des biologistes avec l'ambition de fournir des dispositifs photoniques performants construits en considérant la question à l'échelle atomique et moléculaire. De plus, comme ce fut le cas pour le développement de la microélectronique, l'ingénierie des matériaux a mis plusieurs décennies à développer les matériaux appropriés pour produire des composants optoélectroniques fiables.

Le progrès de la photonique est sans aucun doute déterminé par la fabrication et la caractérisation de matériaux optiques pouvant être utilisés pour générer et transmettre de la lumière. Hormis le cas de la fibre optique, on peut distinguer 5 familles de matériaux pour la photonique [4] : les organiques (polymères), les diélectriques, les semi-conducteurs, les verres et ce qui s'est imposé comme photonique sur silicium ou Si/SiO₂. Par exemple, le niobate de lithium (LiNbO₃) est le matériau diélectrique par excellence. Il est utilisé depuis de nombreuses années



1969	S.E Miller (Bell Laboratories) propose le concept de circuit optique intégré.
1970	Les premières études de matériaux et techniques de fabrication de guides d'onde. P.K. Tien développe la technique <i>m</i> -lines. Activités de recherche sur les émetteurs LEDs et LDs. Développement des recherches sur les fibres optiques.
1972	La première conférence <i>Integrated and Guided Wave Optics</i> (IGWO) à Salt Lake City (USA). Le premier circuit optique intégré : analyseur de spectre radiofréquence (RF), proposé par la NASA.
1977	Lancement d'un grand programme de recherche sur l'optique intégrée au Japon.
1984	La première conférence <i>European Conference on Optical Communication</i> .

Tableau 1. Quelques dates clés dans l'histoire de l'optique intégrée.

pour la fabrication de composants optoélectroniques pour le traitement du signal [5]. L'utilisation de ce matériau sous forme de guide d'onde optique a permis dans de nombreux cas de s'affranchir des limitations liées à l'emploi du cristal massif. On obtient de la sorte des performances élevées en optique linéaire et non linéaire, voisines de celles du matériau massif, avec une meilleure efficacité et un haut rendement.

Cette diversité de matériaux est à la fois un inconvénient et un énorme avantage de l'optique par rapport à la microélectronique qui utilise un seul matériau, en l'occurrence le silicium. Un inconvénient car il est nécessaire de développer des approches hybrides afin d'assembler des composants à base de matériaux présentant des propriétés différentes, et un avantage car il est possible de tirer profit d'une multitude de propriétés en même temps. Une autre motivation sous-jacente de l'optique intégrée est la bande passante élevée qui ne pourrait pas être atteinte par la microélectronique [6]. Cela a permis des débits de transmission atteignant les téraoctets par seconde, correspondant à la fenêtre de transmission actuelle du réseau de communications optiques. En raison de cette caractéristique exceptionnelle, le réseau optique passif (PON) utilise des circuits à ondes lumineuses planaires.

Dans cet article, nous reviendrons sur quelques aspects techniques qui ont permis ce développement formidable. Notamment, la caractérisation optique de structures guidantes constitue le premier pas nécessaire pour tout développement technologique, et il fallait inventer et mettre en place les outils adéquats.

Une équation qui résume toute la problématique du guidage planaire

Les guides d'onde optiques sont des structures planaires à trois couches permettant le confinement et la propagation de la lumière dans une direction bien déterminée à l'intérieur de la couche centrale. Le confinement de l'onde optique s'effectue par des réflexions totales successives sur les deux interfaces guide-substrat et guide-superstrat, et la propagation est assurée par un phénomène de résonance dû aux interférences qui se produisent à l'intérieur du guide entre deux ondes dont l'une subit deux réflexions totales successives. Pour comprendre ce phénomène, il est possible de se référer à la propagation de la lumière dans une lame à faces parallèles telle que décrite à la figure 2.

Pour que la lumière ne s'autodétruisse pas à l'intérieur du guide, il faut qu'elle subisse des interférences constructives. Pour cela, il faut que le déphasage total après deux réflexions successives soit un multiple de 2π . En réalité toute cette information est contenue dans ce que l'on

appelle l'équation de dispersion de modes guidés qui résume à elle seule toute la problématique de l'optique intégrée. Elle représente la condition à satisfaire pour qu'il y ait confinement et propagation de la lumière dans la couche guidante. Elle exprime la condition de résonance selon laquelle la phase de l'onde en A et H est la même à m fois 2π près [7,8]. Cette équation se présente sous la forme suivante pour des guides d'onde simples :

$$2kd\sqrt{(n^2N_m^2)} = \Phi_{(n,na)} + \Phi_{(n,ns)} + 2m\pi$$

$$N_m = n \sin \theta_m$$

$$\Phi_{(n,nj)} = \arctg \left[\left(\frac{n}{nj} \right)^{2\rho} \left(\frac{(N_m^2 - n_j^2)^{1/2}}{(n^2 - N_m^2)} \right) \right]$$

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{en polarisation TE} \\ 1 & \text{en polarisation TM} \end{cases}$$

D'une part, d'après cette relation tout se passe comme si l'onde se propageait dans un milieu d'indice $n \sin \theta$ appelé indice effectif, N_m . D'autre part, l'expression impose des valeurs discrètes de θ qui correspondent aux diverses valeurs de m . Ces valeurs déterminent la suite des modes guidés de la structure. Les solutions du problème sont illustrées sur le diagramme en figure 3.

Une question de couplage et découplage de la lumière incidente

La caractérisation optique des guides d'onde est principalement basée sur l'excitation des modes guidés de la structure à étudier. Pour cela, il est nécessaire de coupler et découpler la lumière de la structure guidante. Cela présente un intérêt majeur, non seulement pour déterminer les propriétés

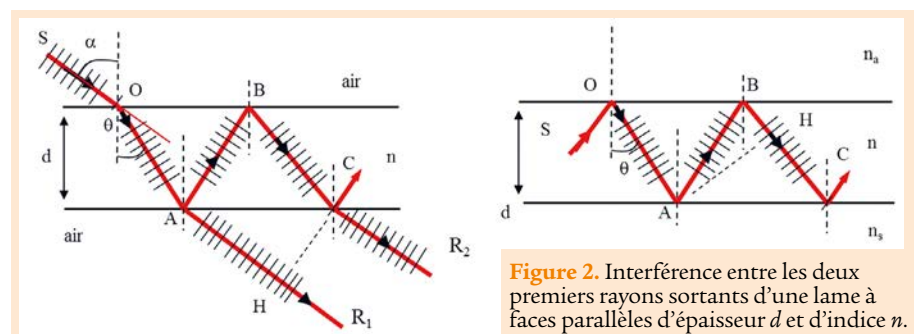


Figure 2. Interférence entre les deux premiers rayons sortants d'une lame à faces parallèles d'épaisseur d et d'indice n .

YOUR EXPERT IN
**PHOTONIC
INTEGRATION**

SUPPLY
**HIGH HARMONICS
GENERATION SOURCES
AND BEAMLINES**

INTEGRATED DRIVING
BEAM **ALIGNMENT**
SYSTEM AND **XUV**
DIAGNOSTICS DEVICES



LASER
PHOTOMETRY
RADIOMETRY
COLORIMETRY
SPECTROSCOPY



INTEGRATOR
PARTNER



SALES@ARDOP.COM
+33 1 69 64 36 09

www.ardop.com

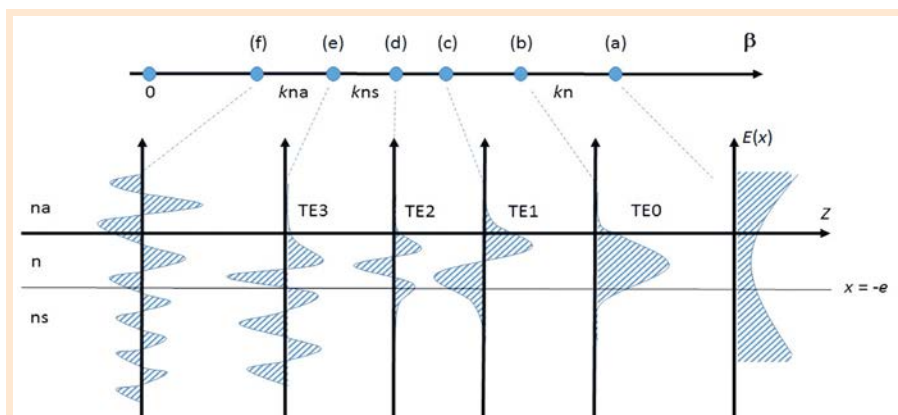


Figure 3. Distribution du champ électrique des modes dans une structure guidante. (a) représente une solution physique impossible car, $k^2 n^2 - \beta^2 < 0$ dans les trois milieux. De plus, l'augmentation sans limite du champ implique une énergie infinie. (b), (c) et (d) donnent la distribution du champ électrique des modes guidés bien confinés (TE0). (e) représente un mode de substrat. L'énergie est bien confinée à l'interface (n,na) mais elle varie sinusoidalement dans le substrat. (f) montre la distribution du champ électrique d'un mode d'air. $k^2 n^2 - \beta^2 > 0$ dans les trois milieux. C'est une solution oscillatoire dans les trois milieux (extension libre hors du guide).

physiques du guide d'onde, mais aussi pour l'utilisation pratique de ce composant dans les circuits optiques intégrés.

D'une manière générale, on peut distinguer deux types de techniques de couplage : le couplage transversal et le couplage longitudinal. Le premier utilise soit le couplage par la tranche, soit celui par biseau. Dans le cas d'un couplage par la tranche, la lumière est focalisée sur une section droite du guide d'onde (figure 4) en utilisant une lentille avec une ouverture numérique adaptée ou une fibre optique. La mise en œuvre de cette technique simple et l'efficacité du couplage η dépendent surtout de la qualité optique de la tranche et de l'adaptation des ouvertures numériques, et donc des caractéristiques de la structure guidante [9].

La technique du biseau, rapportée pour la première fois par Tien *et al.* [10] en 1970 est basée sur la notion d'épaisseur de coupure. Elle consiste à amincir l'extrémité du guide d'onde (figure 5) par un biseau sur une distance de 10 à 100 fois la longueur d'onde λ utilisée. Aussi, la lumière peut être progressivement couplée ou découplée à travers le biseau dès que l'épaisseur du guide d'onde atteint l'épaisseur de coupure du mode considéré. En d'autres termes, le biseau provoque une variation de l'angle de réflexion de la lumière autour de l'angle critique.

Cette technique peut être très utile notamment dans le cas des films à haut indice tels que le GaAs, où il est difficile de trouver un prisme de très haut indice qui soit également transparent pour la lumière utilisée [11]. Toutefois,

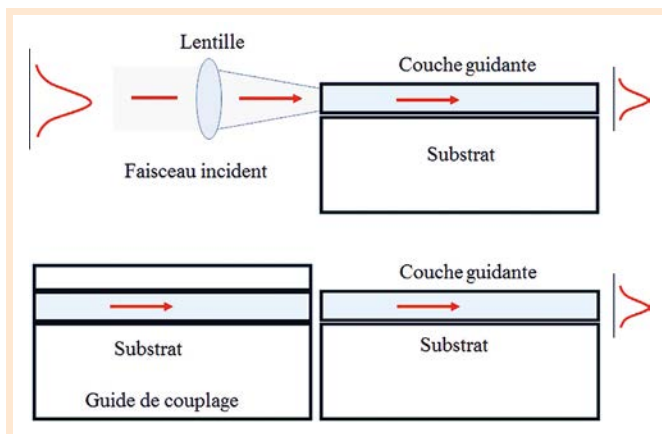


Figure 4. Couplage par la tranche du guide.

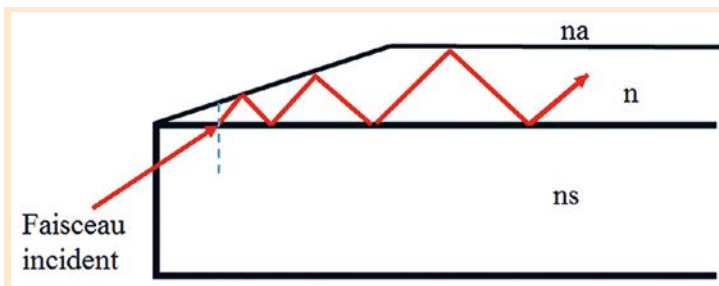


Figure 5. Couplage par biseau.

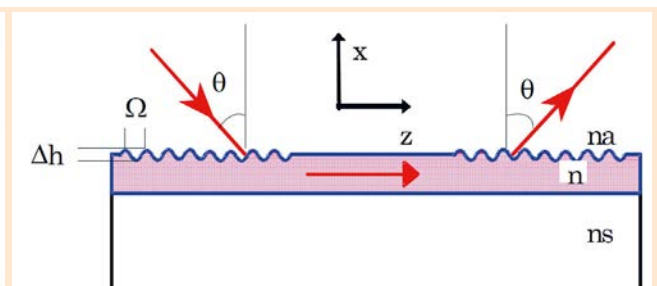


Figure 6. Couplage par réseau.

elle est relativement difficile à mettre en œuvre et nécessite la destruction du guide d'onde.

Le second type de technique de couplage concerne principalement le couplage par réseau et par prisme. La première technique, développée par Dakss *et al.* [12] et étudiée également par Tien *et al.* [10], consiste à graver un réseau sur la surface du guide d'onde (figure 6). La diffraction du faisceau incident par ce réseau, donne naissance à des composantes diffractées de l'onde électromagnétique qui peuvent être couplées à des modes guidés.

Si une onde de vecteur d'onde k_0 est incidente dans le milieu extérieur, sa diffraction par le réseau de pas Ω (en général, on utilise la notation d pour la période) introduit une composante de période $2\pi/\Omega$ à la composante du vecteur d'onde parallèle à la surface. On peut donc coupler à un mode guidé d'ordre m les composantes qui vérifient la condition de l'accord de phase; c'est-à-dire :

$$\beta = kN_m$$

$$N = n_0 \sin \theta + \gamma \frac{\lambda}{\Omega}$$

On rappelle que $N_m = n \sin \theta_m$.

γ : entier qui définit l'ordre diffracté ($0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$).

λ : longueur d'onde dans le milieu.

Pour une structure donnée, la condition de couplage n'est optimale que pour une valeur très sélective de l'angle d'incidence θ solution

de l'équation d'accord de phase précédente. L'efficacité de couplage dépend surtout du pas du réseau Ω et de Δh , profondeur du réseau. Expérimentalement, des coefficients de couplage de l'ordre de 75 % ont été obtenus [13]. On arrive aujourd'hui à 99,9 %.

L'autre technique se base sur l'utilisation d'un prisme adapté, souvent à haut indice de réfraction (tel que le rutile, TiO_2) afin de réaliser un accord de phase entre la composante horizontale du vecteur d'onde de l'onde incidente et du mode guidé à exciter (figure 7).

Le guide est placé à une distance g de la base du prisme. Le faisceau incident sur la base du prisme est alors totalement réfléchi et pour certains angles d'incidence dits angles synchrones, l'énergie est transférée par effet « tunnel optique » (par analogie à l'effet tunnel d'une particule en mécanique quantique) aux modes guidés à exciter [14] (figure 8). En réalité, l'excitation des modes guidés s'effectue par l'intermédiaire des ondes évanescentes créées dans la couche mince du gap d'air entre le prisme et le guide. Aussi, pour exciter n'importe quel mode guidé de la structure, il suffit de choisir l'angle d'incidence approprié. L'efficacité du couplage, dans ce cas, dépend des trois paramètres suivants :

- l'épaisseur du gap d'air ;
- le profil d'intensité de l'onde incidente ;

- la section du faisceau incident à la base du prisme.

Les deux derniers paramètres sont généralement définis par le type de laser et le montage optique utilisé. En revanche le premier paramètre dépend de la pression exercée et donc de la présence du prisme de couplage.

Le couplage par prisme est un moyen commode pour exciter les modes guidés des structures planes. C'est une méthode qui, si elle est utilisée avec efficacité, détermine de façon simple les caractéristiques de la couche guidante à partir de la mesure des angles synchrones qui correspondent aux positions angulaires des modes guidés. Les avantages de cette technique peuvent être résumés selon les points suivants :

- c'est une méthode sélective car il suffit de changer l'angle d'incidence pour pouvoir sélectionner le mode à exciter ;
- elle est facile à mettre en œuvre ;
- le couplage est basé sur le phénomène de la réflexion totale (RT) et donc les pertes par transmission sont négligeables ;
- elle est efficace. En effet, des efficacités de couplage de 80 % ont été observées.

Cette technique est à la base de ce que l'on appelle la spectroscopie des lignes noires (*m-lines*) [4,15] qui permet la détermination de deux paramètres essentiels : le profil d'indice et l'épaisseur de la couche guidante.

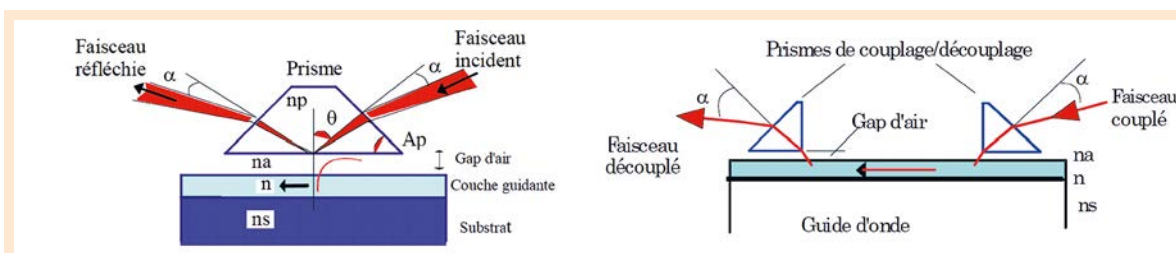


Figure 7. Couplage par prisme. (a) à gauche : Prisme symétrique. (b) à droite : Prisme droit

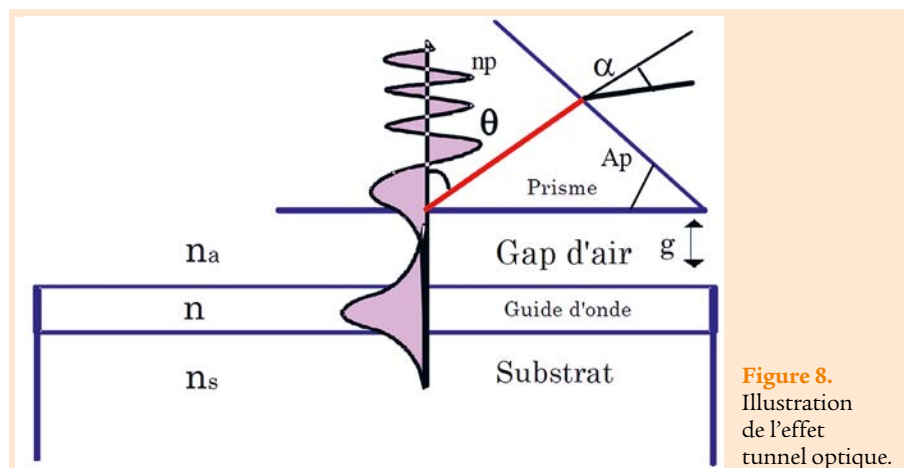


Figure 8.
Illustration
de l'effet
tunnel optique.

Toutefois, le développement des systèmes optiques nécessite la mise au point de composants optiques intégrés capables de véhiculer l'information, d'un point à l'autre, avec fiabilité. Dans ce sens, les pertes optiques dans la structure sont également un paramètre primordial dans la caractérisation complète du guide. Le principe de base de ces mesures consiste à comparer la puissance de la lumière qui se propage dans le guide à celle injectée au départ. Les techniques de mesures développées dépendent, particulièrement, du type de couplage utilisé, et le choix de leur utilisation s'effectue surtout en fonction du guide d'onde considéré, le type de perte en question et l'importance des pertes à mesurer.

En somme, pour une croissance régulière de l'optique intégrée, il

existe une relation étroite entre la disponibilité des techniques de fabrication de structures guidantes et celles nécessaires pour caractériser leurs propriétés optiques. Depuis le début de l'optique intégrée, plusieurs techniques de couplage ont été développées dont certaines continuent à jouer un rôle important dans la détermination des propriétés des structures guidantes. L'optique intégrée qui était une technologie de laboratoire occupe une place de premier choix dans les développements futurs des systèmes de traitement de l'information par voie optique grâce notamment aux efforts déployés pour mettre au point des techniques de couplage efficaces dont les principales ont été décrites dans cet article.

POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] R.G. Hunsperger, *Integrated optic: Theory and technology*, Springer-Verlag, 1985 (2nd edn.)
- [2] E.J. Murphy, *Integrated Optical Circuits and Components, Design and Applications*, Marcel Dekker, New York (1999)
- [3] H. Nishihara, M. Haruma, T. Suhara, *Optical integrated circuits*, Mc.Graw-Hill series (1989)
- [4] A. Boudrioua, *Optique intégrée : théorie et application*, Eds. Hermes Sciences, ISBN 2-7462-1445-8 (2006) Prisme Gap d'air Guide d'onde Substrat n_s - n_p - n - n_p - g - n_p - n - n_p
- [5] P.K. Tien et al., *Appl. Phys. Lett.* **24**, 503 (1974)
- [6] B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of photonics*, Wiley Series in Pure and Applied Optics (1991)
- [7] P. K. Tien, *Rev. Mod. Phys.* **49**, 361 (1977)
- [8] P. K. Tien, R. Ulrich, *J. Opt. Soc. Am.* **60**, 1325 (1970)
- [9] G.Y. Wang, E. Garmire, *Opt. Lett.* **21**, 42 (1996)
- [10] P. K. Tien, R. J. Martin, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 398 (1971)
- [11] D.G. Hall et al., *Appl. Opt.* **19**, 1847 (1980)
- [12] M L. Dakss et al., *Appl. Phys. Lett.* **16**, 523 (1970)
- [13] R. Petit, M. Cadilhac, *J. Optics* **8**, 41 (1977)
- [14] R. Ulrich, *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 1325 (1970)
- [15] R. Ulrich, R. Torge, *Applied Optics*, **12**, 2901 (1973)



**CONNECTEURS
SPÉCIFIQUES**
à faisceau expansé

info@idil.fr

www.idil.fr - 02 96 05 40 20



Environnement sévère
(poussière, eau, huile)



Haute puissance



End cap

