Ecole d'Eté Systèmes Optiques

Optique intégrée

S. Valette

LETI, Commissariat à l'Energie Atomique, BP. 85 X, F-38041 Grenoble cedex, France

I. L'INTERET DE L'OPTIQUE INTEGREE ET L'ENJEU TECHNIQUE DE L'OPTOELECTRONIQUE

L'optique intégrée apparait comme une des technologies les plus prometteuses des dix prochaines années dans le contexte du développement énorme que doit prendre l'optoélectronique. Cela correspond à l'arrivée à maturité de tous les composants indispensables à la réalisation d'une chaine optoélectronique complète et à l'explosion de la demande pour des circuits photoniques miniaturisés et bas coût.

Aux avantages traditionnels bien connus des circuits optiques :

- insensibilité aux bruits électromagnétiques à cause de la très haute fréquence de la lumière,
- sécurité et fiabilité d'acquisition et de transport des informations en environnement sévère,
- possibilité de traitement de l'information en temps réel,
- accroissement du nombre d'informations transportées grâce au multiplexage en longueurs d'ondes,
- possibilité de mesures sans contact,
- possibilité de réalisation de têtes de mesure ou de dispositifs de traitement de l'information ne faisant pas intervenir localement de puissance électrique.

L'optique intégrée ajoute les avantages apportés par la mise en oeuvre des techniques d'intégration :

- miniaturisation des circuits optiques,
- suppression des problèmes traditionnels d'alignement entre composants,
- possibilité de développer des techniques de fabrication compatibles avec les objectifs de faible coût et de production de masse.

Evidemment, tous les avantages que nous venons de citer ne peuvent devenir une réalité que si, dans le même temps, nous pouvons disposer de sources de lumière miniaturisées, efficaces et fiables et des moyens adéquates de transport de l'information lumineuse.

Le développement extraordinaire des diodes laser semiconducteurs et des fibres optiques est bien sûr un des éléments fondamentaux qui fait qu'aujourd'hui l'optique intégrée n'est plus un rêve mais une réalité qui commence à s'implanter dans le monde industriel.

Cependant si le concept d'intégration des circuits optiques est parfaitement cohérent avec le but poursuivi de miniaturisation, production de masse et bas coût, encore faut-il que les technologies mises en oeuvre pour la réalisation des circuits optiques intégrés soient vraiment compatibles avec ce concept.

Cela signifie que les choix technologiques de base doivent être, dès le départ, capable de répondre aux exigences cherchées. Ceci doit bien sûr être vrai dans la réalisation des circuits eux-mêmes mais aussi au niveau de leur intégration dans l'ensemble de la chaine optoélectronique.

Il est en particulier indispensable que les problèmes de connexion, difficiles, avec des éléments comme les fibres optiques monomodes (ou multimodes), les diodes laser, les détecteurs et de manière générale l'ensemble des éléments de traitement électronique du signal, soient appréhendés dès le départ et si possible intégrés aux étapes de fabrication des circuits.

Il convient également de ne pas tomber dans le piège d'une comparaison facile entre l'optique intégrée et la microélectronique par exemple. Si le but final est le même, les obstacles à surmonter sont différents. Les lois physiques mises en jeu dans un circuit optique sont très différentes de celles qui régissent la conception d'un circuit microélectronique.

- Les lois de la diffraction affectent directement les composants planaires et ne permettent pas de les réduire à des tailles comparables à celles des composants électroniques.

- La lumière guidée ne peut pas en général accepter des virages de trop faibles rayons de courbure.
- Les effets physiques qui mettent en jeu la matière et le rayonnement sont faibles et ne sont compensés que par des longueurs d'intégration importantes.

Tout cela fait qu'un circuit optique intégré ne peut être implanté sur une aussi petite taille et avec un nombre aussi grand de composants qu'un circuit microélectronique.

Le rêve d'intégration en optoélectronique est donc différent de celui de la microélectronique et doit être repenser en fonction des contraintes propres de l'optique.
Le choix de la technologie optique intégrée doit tenir compte de toutes ces contraintes spécifiques.
Doit-on suivre la voie ouverte avec succès par la microélectronique et développer une voie monolithique, ou au contraire s'engager vers des voies résolument hybrides moins chargées de rêve mais peut-être plus à même de résoudre l'ensemble des problèmes que posent la réalisation d'un dispositif optoélectronique ?

Quel choix pour l'optoélectronique : hybride ou monolithique ?

La réponse est loin d'être évidente car elle dépend beaucoup de paramètres dont la prévision est difficile.

Un effort important consacré à une technologie peut lui donner un avantage décisif par rapport à des concurrentes peut-être plus adaptées mais moins en vogue.

Un résultat technique nouveau peut toujours bouleverser les données et remettre en question des choix effectués dans un contexte différent. Il est clair, en particulier dans le domaine des communications optiques, que le succès des amplificateurs à fibre dopé à l'erbium remet en cause un certain nombre d'options et conduit à une analyse nouvelle du paysage technique.

Toute prédiction à moyen ou long terme est donc soumise à ces incertitudes et à l'évolution des marchés qui est un élément fondamental pour privilégier telle ou telle approche. Il faut donc être extrémement prudent et ne pas s'enfermer dans une analyse trop hermétique qui ne tiendrait pas compte de tous ces paramètres et de l'évolution naturelle des techniques et des besoins.

Par contre une analyse objective des contraintes et de la spécificité de l'optoélectronique permet de mieux cerner les enjeux et les points difficiles à surmonter. Elle ne permettra pas de donner la conclusion ultime en terme de choix incontournable mais elle permettra de donner les directions à suivre.

Plusieurs remarques générales dans l'état actuel des techniques optoélectroniques doivent être présentes à l'esprit :

- La première est qu'un circuit optoélectronique met en jeu un grand nombre de composants utilisant des principes physiques différents et des véhicules de propagation de l'information, le photon et l'électron également différent. Les contraintes de modélisation et de réalisation sont donc très diverses entre des composants qui vont des éléments passifs classiques comme les guides de lumière, les coupleurs, les miroirs ou les lentilles, aux composants de modulation ou de déflexion, aux sources de lumière, aux éléments de détection et de traitement du signal microélectronique.

- Les problèmes de connexions entre ces différents composants sont donc également très différent et beaucoup plus complexe que ceux rencontrés en microélectronique. Ils doivent en particulier tenir compte des dimensions spécifiques des structures optiques intégrées et des choix, incontournables aujourd'hui, de deux des éléments clefs d'un circuit optoélectronique :

  - la diode laser qui utilise des semiconducteurs à fort indice de réfraction et en général un fort confinement de la lumière,

  - les fibres optiques en silice d'indice de réfraction beaucoup plus faible et dont les profils de modes guidés sont beaucoup plus étendus que ceux des diodes laser.

- L'approche monolithique de l'optoélectronique n'est comparable à celle de la microélectronique que dans le fait qu'elle utilise un substrat commun (par exemple le phosphore d'indium InP) pour la réalisation de tous les composants nécessaires.

L'unité technologique de fabrication de tous ces composants est cependant loin d'être la même que celle existant en microélectronique. Les structures optimum pour la réalisation de guides de lumière, de modulateurs ou de diodes laser sont différentes. L'association sur un même substrat de ces composants optoélectroniques et des composants microélectroniques de commande ou de traitement de l'information réclame l'empilement d'un nombre important d'étapes technologiques et de niveaux de masque qui affecte directement les rendements potentiels.

- De plus, contrairement à un circuit microélectronique, un circuit optique intégré comporte peu de composants actifs et ne nécessite donc absolument pas l'emploi de matériaux semiconducteurs, qui pourraient bien sûr tout faire, mais dont la sensibilité des propriétés optiques aux conditions environnementales et plus particulièrement à la température est un handicap certain.
  Cette grande sensibilité aux paramètres extérieurs est un des points les plus difficiles à surmonter dans l'utilisation des diodes laser comme source de lumière.
  L'emploi d'une cavité externe peut grandement diminuer les effets indésirables que constituent les sauts de modes, les variations de fréquence d'émission ou les instabilités diverses inhérentes à l'utilisation des diodes lasers en association avec les autres composants optoélectroniques et tout particulièrement les circuits optiques intégrés [1, 2].
  C'est sans doute une voie importante pour le dévelopement futur des circuits optoélectroniques industriels.

Quoi qu'il en soit tous ces points montrent que, contrairement à la situation établie en microélectronique, l'approche hybride est un concurrent très fort en optoélectronique, qui, au moins à moyen terme, paraît plus pragmatique pour surmonter l'ensemble des problèmes posés.

II. LES TECHNOLOGIES EN PRESENCE

Elles sont essentiellement au nombre de quatre utilisant quatre substrats différents.

- Le niobate de lithium, $LiNbO_3$, avec des guides d'ondes réalisés soit par diffusion de Titane, soit par échange protonique [3].
- Le verre et les techniques de diffusion d'ions [4].
- Le silicium et les guides à base de silice ou de nitrure de silicium obtenu par dépôt CVD ou hydrolyse à la flamme [5, 6, 7].
- Le phosphore d'indium InP et les techniques d'épitaxie associées à ce semiconducteur [8, 9].

De toute façon, il faut bien voir que seul le dernier candidat peut servir à la réalisation de source de lumière, il est donc, d'une certaine façon, incontournable.

Cependant, il faut bien remarquer que ce semiconducteur III-V n'est bien adapté que pour des domaines spectraux de travail correspondant aux longueurs d'ondes des communications optiques 1,3 ou 1,55 μm. A plus faibles longueurs d'ondes, il faudrait choisir un autre semiconducteur, en particulier l'arseniure de gallium GaAs. Bien que voisines, les technologies InP et AsGa ne sont pas identiques. Une approche monolithique qui voudrait couvrir un domaine spectral étendu devra en fait utiliser au moins 2 substrats différents et 2 filières technologiques différentes. Les approches hybrides apparaissent de ce point de vue beaucoup plus souples et donc plus aptes à s'adapter aux différents champs d'application de l'optique intégrée qui ne sont pas uniquement ceux des communications.

Il apparaît aujourd'hui encore difficile de savoir quelle technologie hybride s'imposera. Il est d'ailleurs possible que la cohabitation s'instaure, chaque application spécifique développant, en fonction des composants nécessaires et de ses contraintes propres, sa propre approche hybride.

Un des éléments déterminants risque d'être à terme l'évolution du marché de l'optoélectronique. Il est clair que si elle s'impose dans des domaines grand public comme les communications optiques ou les mémoires, les aspects coût et aptitude à une production de masse vont devenir prépondérants.

Cela va donc favoriser les filières technologiques capables d'apporter des solutions industrielles à ce niveau, non seulement comme nous l'avons vu pour la réalisation des circuits eux-mêmes, mais aussi, et surtout pour résoudre les problèmes de connexions qui vont peut être jouer le rôle de juge de paix.

De ce point le substrat silicium possède un certain nombre d'atouts qui en font un des plus sérieux candidats dans le développement à court et moyen terme de l'optique intégrée hybride :

- Il présente des qualités mécaniques excellentes. Il est disponible en grande taille (jusqu'à 8 pouces voire plus) avec des qualités de planéité et de poli élevées et à un coût faible.

- Plusieurs filières technologiques complémentaires sont aujourd'hui disponibles sur ce substrat. Elle utilise des matériaux d'excellente qualité optique, par ailleurs très connus en microélectronique, la silice, l'oxynitrure ou le nitrure de silicium.
  Ces matériaux bénéficient au niveau des opérations technologiques de base, dépôt et gravure, de tout le savoir-faire développé en microélectronique et de l'énorme effort de recherche mené dans ce domaine tant du point de vue des procédés mis en jeu que des équipements disponibles.
  Cette synergie est comme nous le verrons un point essentiel à considérer.

- Le silicium offre des possibilités de gravures profondes qui permettent de l'utiliser directement pour positionner les fibres optiques monomodes et de définir des méthodes d'alignement précises avec les entrées et sorties des circuits optiques. Les gravures en "V" obtenues par attaque chimique préférentielle sont bien connues et donnent des sillons précalibrés, d'une grande reproductibilité. Plus récemment le même type d'approche a été démontré avec des gravures en "U" obtenue par voie sèche [10]. Cette dernière méthode directement issue des recherches menées en microélectronique permet de définir un procédé technologique beaucoup plus compatible avec les autres étapes de fabrication du circuit optique. Elle permet également de s'affranchir des contraintes de directions cristallines imposées par l'attaque chimique préférentielle. Cela donne une plus grande liberté dans le positionnement des connexions entre le circuit optique intégré et les fibres de liaison, et permet de diminuer la taille des puces : facteur essentiel au niveau du coût.

- La haute conductivité thermique du silicium est également un élément décisif. Elle autorise l'hybridation directe des composants III-V et en particulier des diodes laser sur le substrat silicium sans dégradation de performances [11, 12].
  L'association de ce type d'hybridation et de procédures d'alignement réalisées comme précédemment au cours des étapes de fabrication des circuits optiques intégrés, permettent d'envisager des méthodes de couplage entre technologie silicium et technologie III-V véritablement industrielles.

- Bien que les technologies sur silicium semblent surtout adaptées à la fabrication des composants actifs, il existe aujourd'hui de nombreuses possibilités de réalisation de composants actifs qui répondent à la plupart des besoins rencontrés.
  Les couches piézoélectriques d'oxide de zinc ZnO sont employées depuis longtemps sur silicium, silice ou nitrure de silicium. Elles permettent le développement de composants acoustooptiques performants [13, 14].
  Le développement récent des polymères organiques bien adapté à une association avec les structures Optiques Intégrées sur Silicium, OIS, permettent aussi de rêver à une nouvelle génération de composants actifs [15, 16].

- Enfin, il ne faut pas oublier que le silicium est le matériau roi de la microélectronique.
  L'intégration potentielle de certains élements du traitement de signal électronique sur le même substrat que les circuits optiques peut jouer un rôle important dans des domaines particuliers (mémoires, capteurs).
  Elle a été déjà démontréer par quelques travaux de laboratoires et ne constitue pas un rêve inacessible [17, 18].

Il faut cependant bien garder à l'esprit que tous les atouts potentiels ou réels que nous venons d'énumérer ne peuvent se concrétiser que si l'ensemble des procédés utilisés dans chaque étape de fabrication sont parfaitement compatibles. Il faut également que la complexité totale du dispositif visé ne conduise pas à des rendements de fabrication trop faibles.

Nous allons maintenant examiner plus en détail cet aspect technologique fondamental.

III. LES TECHNOLOGIES "OPTIQUES INTEGREES SUR SILICIUM - OIS"

Dans tous les cas elle utilise des méthodes de dépôt des couches minces de type CVD (Chemical Vapor Deposition) obtenues par réaction chimique entre gaz réactifs. L'apport d'énergie peut être thermique (LPCVD : low pressure CVD, hydrolyse à la flamme ...) [5, 6, 7] ou à la fois thermique et électrique (PECVD : plasma enhanced CVD) [5].

Ces méthodes sont bien sûr différentes, mais elles profitent toutes de la très grande pureté des gaz qui interviennent dans la fabrication des matériau de base silice ou nitrure de silicium par exemple. Trois filières technologiques différentes, mais comme nous le verrons, complémentaires sont aujourd'hui développées dans le monde.

Les structures générales de ces trois filières appelées commodément OIS1, 2 et 3 [5, 19] (pour Optique Intégrée sur Silicium 1, 2 et 3) sont données figure 1.

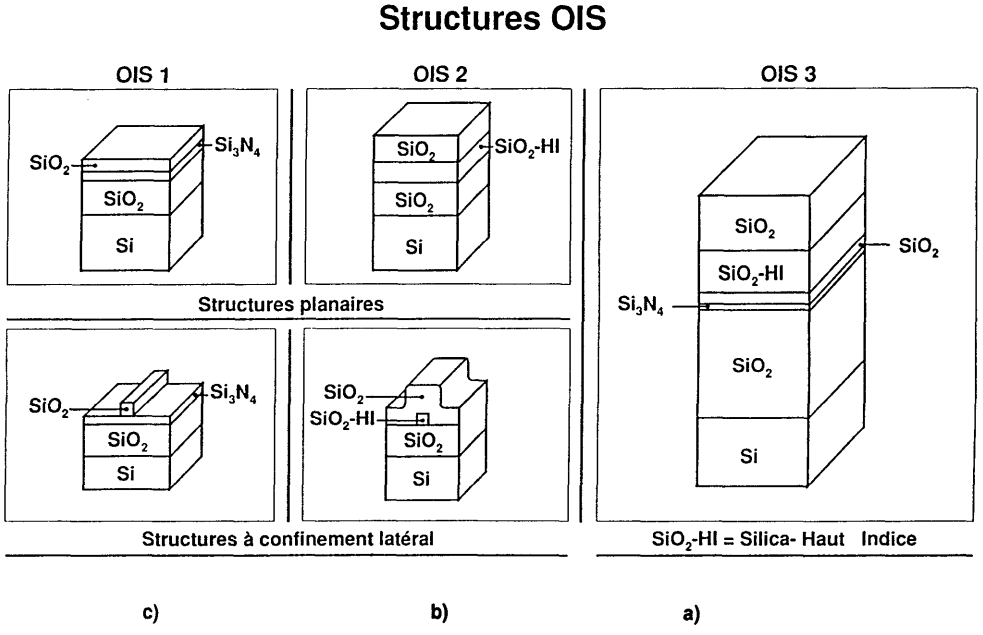

Figure 1

III.1. La filière OIS1 [5, 19, 20]

Elle utilise une structure $Si/SiO_2/Si_3N_4/SiO_2$ (figure 1a) qui présente un très fort indice de réfraction du coeur (2,014 à la longueur d'onde λ_0 de 0,62328 μm) par rapport aux milieux environnants en silice (≃ 1,46 à la même longueur d'onde).

Sauf pour de très faible épaisseur $W_{Si_3N_4}$ du nitrure du silicium, les modes guidés sont donc très fortement confinés.

La conséquence directe de cette forte différente d'indice ΔN est que pour avoir un comportement monomode, l'épaisseur de la couche de nitrure doit rester faible et typiquement inférieure à 0,3 μm.

De plus, une gravure partielle ou complète du coeur pour assurer le confinement latéral conduirait à un très gros problème de reproductibilité et très vite à des largeurs de guide trop faibles pour être réellement utilisables.

La réalisation des microguides fait donc seulement appel à une gravure partielle ou complète du superstrat en silice. On utilise donc une structure de type "rib waveguide" qui a plusieurs avantages :

- Pour une gravure de profondeur donnée, les modifications de l'indice effectif ΔN_{eff} sont beaucoup plus faibles que dans le cas précédent et relaxe les contraintes de largeur des microguides.

- Les modifications ΔN_{eff} ne proviennent que d'une variation de pénétration des ondes évanescentes entre les zones d'épaisseur de silice différente.

Il y a donc forcément saturation de l'indice effectif du mode guidé dès que l'épaisseur de silice de recouvrement atteint une valeur supérieure à la pénétration de l'onde évanescente.
Comme la différence de composition entre les deux matériaux rend possible un arrêt très précis des gravures à l'interface SiO_2/Si_3N_4, il est possible de contrôler avec une très bonne précision les variations d'indices effectifs ΔN_{eff} entre une zone recouverte d'une couche de silice d'épaisseur suffisante et une zone non recouverte. Cette situation est illustrée par la figure 2.

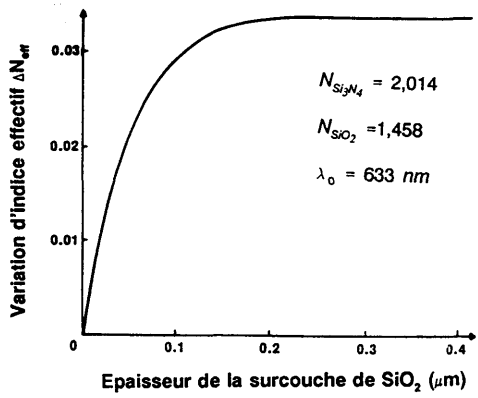

Figure 2

Dans le cas où les variations ΔN_{eff} seraient trop fortes, il est toujours possible de remplacer l'air par un matériau diélectrique d'indice plus proche de celui de la silice. Cette solution a d'ailleurs l'avantage d'assurer une protection complète des structures.

La plupart des composants nécessaires sont realisés à partir de ce principe de base. Du fait de l'excellent contrôle potentiel de ΔN_{eff}, leurs caractéristiques sont très reproductibles.
Cette reproductibilité peut encore être améliorée en choisissant asticieusement l'épaisseur de nitrure de silicium. Cette solution est illustrée figure 3 où nous voyons que pour une épaisseur particulière de nitrure de silicium W_{opt} la dérivée $\frac{\partial \Delta N_{eff}}{\partial W_{Si_3N_4}}$ s'annule pour une polarisation donnée.

Dans ces conditions les valeurs de ΔN_{eff} ne sont ni sensibles à l'épaisseur de silice W_{SiO2} ni à celle du nitrure $W_{Si_3N_4}$. Bien sûr W_{opt} n'est pas identique pour les deux polarisations TE et TM. C'est une caractéristique des guides OIS1 qui sont très sensibles à l'état de polarisation de la lumière. C'est un élément à bien avoir à l'esprit et qui oriente le type d'application de ces structures.

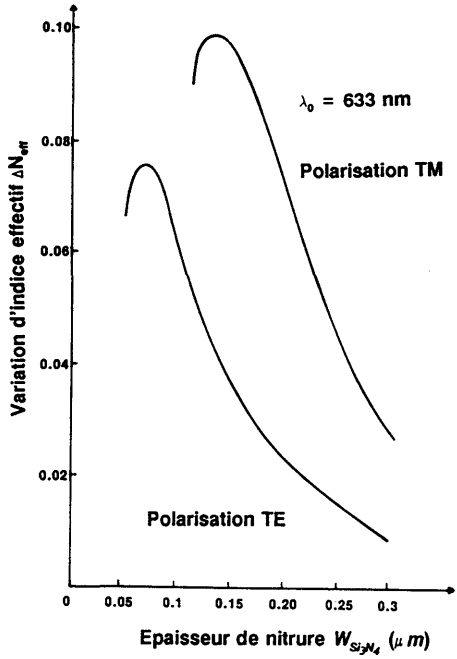

Figure 3

Les pertes des guides planaires sont de l'ordre ou inférieures à 0,1 dB/cm. En guides à confinement latéral, la valeur dépend fortement des largeurs du microguide : elle est de l'ordre de 1 à 1,5 dB/cm pour des largeurs de l'ordre de 2 μm de 0,5 à 0,2 dB/cm pour des largeurs de 4 à 6 μm.

Les valeurs de diffusion planaires (mesurées à 1° hors de l'axe de propagation) sont de l'ordre de - 45 dB. Cependant ce chiffre ne peut être atteint qu'avec un substrat optique en silice thermique. Avec une couche de silice CVD, l'état de surface obtenu est en général insuffisant pour assurer une faible diffusion du fait de l'important écart d'indice entre les deux matériaux.

C'est un point important que nous retrouverons plus tard dans les filières OIS3.

Aujourd'hui la plupart des composants optiques indispensables ont été démontrés sur la filières OIS1 et présentent entre eux une excellente compatibilité de fabrication qui limite le nombre de niveaux de masque dans la fabrication des circuits et assure d'excellents rendements. De plus, les épaisseurs de dépôts et de gravures mises en jeu restent limitées à quelques microns et ne sont pas très différentes des valeurs classiques de la microélectronique. Ceci explique que la filière OIS1 est aujourd'hui industrielle et est à la base du circuit interférométrique intégré utilisé dans les capteurs de déplacement dont nous reparlerons plus loin.

Il est cependant clair que cette filière souffre de deux inconvénients :

- Compatibilité faible avec les structures des fibres monomodes du fait des grandes différences de profil de mode.
- Sensibilité très forte à la polarisation.

La définition d'une nouvelle filière OIS2 capable de surmonter ces deux points s'est donc très vite avérée indispensable.

III.2. La filière OIS2 [5, 6, 7, 21, 22, 23, 24]

La structure utilisée est beaucoup plus classique et très similaire à celle des fibres optiques monomodes tant du point de vue des variations d'indice mises en jeu entre coeur et substrats, que de celui des dimensions géométriques des guides (figure 1b).

L'utilisation du même matériau de base que les fibres optiques, la silice, ne fait que renforcer la ressemblance. Cette filière est donc à l'évidence bien adaptée à la connexion avec des fibres monomodes et les coefficients de couplage entre ces 2 éléments sont proches de 1.

Trois méthodes de fabrication de ces structures sont actuellement bien contrôlées :

- Dépôt PECVD pour les trois couches avec dopage du coeur par du phosphore principalement [5, 21].
- Dépôt LPCVD du coeur sur un substrat obtenu par oxydation thermique haute pression (HIPOX) avec des dopages identiques au précédent [6, 22].
- Hydrolyse à la flamme suivi d'une vitrification à haute température. Les dopages utilisés au niveau du coeur ont été pendant longtemps le titane et semblent s'orienter maintenant vers des matériaux plus classiques comme le germanium [23, 24, 25, 26].

Dans tous les cas, il y a d'abord dépôt des deux premières couches puis gravure du coeur par voie sèche et recouvrement de l'ensemble de la structure.

Il est difficile de dire aujourd'hui quelle est la meilleure méthode, chacune présentant des avantages et des inconvénients plus ou moins marqués suivants les applications ou les composants visés.

Les valeurs de pertes de propagation optiques annoncées sont dans l'ensemble voisines et surtout très faibles : inférieures à 0,1 dB/cm pour des microguides de largeurs supérieures à 4 μm [27].

Les problèmes de mesures deviennent alors bien sûr délicats : il est donc intéressant de noter comme référence les deux résultats récemment publiés :

- 2,6 dB/m chez ATT à λ_0 = 1,55 μm [28]
- 2,8 dB/m au LETI à λ_0 = 0,83 μm [29, 30]

Ces deux chiffres obtenus par la mesure de finesse d'anneaux résonants sont d'une grande précision (meilleure que 0,2 dB/m). Ils intègrent les pertes éventuelle en courbure et les pertes du coupleur associé à l'anneau. Ils montrent que des valeurs proches de 1 dB/m pourraient aujourd'hui être atteintes dans cette filière avec des microguides rectilignes. Encore faudrait-il parvenir à les mesurer ?

La diffusion planaire est également très faible (- 50 à - 55 dB à 1° de l'axe) du fait des faibles variations d'indice mises en jeu (quelques 10^{-3} à quelques 10^{-2}) [31].

En théorie, les indices effectifs des modes guidés devraient être pratiquement identiques pour les deux types de polarisation TE et TM (valeur théorique pour $N_{effTM} - N_{effTM}$ de l'ordre de 10^{-6}).

En pratique, il y a une biréfringence de contrainte qui donne une légère sensibilité à la polarisation et des écarts d'indices effectifs de l'ordre de 10^{-4}. Il semble d'ailleurs que les méthodes de dépôt jouent un rôle important sur ce paramètre. Les résultats observés sont assez différents d'un laboratoire à un autre et dépendent vraisemblablement de la méthode utilisée, des conditions de dépôt, des recuits éventuels [32].

Pour la plupart des composants classiques (coupleurs, diviseurs de faisceaux, miroirs...) aujourd'hui testés dans les différents laboratoires, les caractéristiques mesurées dépendent très peu de l'état de polarisation. Ce point est fondamental pour les applications communications optiques et plus généralement pour l'ensemble des composants s'insérant dans une liaison à fibres monomodes standards.

Notons ainsi que du fait des faibles variations d'indice utilisées dans la filière IOS2, certains composants sont pratiquement irréalisables. C'est le cas des composants dioptiques (lentilles à saut d'indice, lentilles de Fresnel) qui présenteraient des ouvertures trop faibles ou des efficacités de focalisation insuffisantes. Ils seront remplacés par des composants catadioptriques (miroirs plans, curvilignes, de Fresnel...) ; ce qui, bien sûr, conduit à une modification des architectures des circuits optiques intégrés réalisés à partir de cette filière.

Enfin, il faut garder à l'esprit que le faible confinement des modes guidés imposent des épaisseurs de couches beaucoup plus importantes qu'en filière OIS1. Des valeurs de l'ordre de 25 μm pour la structure totale sont utilisées pour les composants fonctionnant à la longueur d'onde de 1,55 μm [27].

Pour les mêmes raisons, les profondeurs de gravure mises en jeu sont également importantes (quelques microns pour les microguides, 15 à 25 μm pour les miroirs).
Ces valeurs rendent la filière OIS2 plus délicate à maîtriser technologiquement que la filière OIS1 et entraînent la mise au point de procédés technologiques spécifiques à l'optique intégrée.

Nous voyons donc que les deux filières présentées offrent des avantages et des inconvénients propres. Les besoins de connexions des circuits optiques intégrés à la fois avec des composants à fort confinement de lumière (diodes laser) et à très faible confinement (fibres optiques) ainsi que les besoins spécifiques de certaines applications, conduisent à penser que la structure optique intégrée idéale serait offerte par une association des deux structures précédentes.

C'est la raison d'être de la filière OIS3.

III.3. La filière OIS3

La figure 1c montre qu'il s'agit simplement d'une superposition des deux structures précédentes. Sans composants de couplage particulier, les deux guides peuvent pratiquement être considérés comme isolés l'un de l'autre dans la mesure où les vitesses de propagation dans chacune des structures sont très différentes.

L'intérêt de la filière OIS3 est alors de mettre en jeu des composants de couplage particulier permettant à volonté d'échanger la lumière entre les 2 guides.

Les premières expériences realisées en 1984 [33] ont utilisées une intéraction par réseaux en mode planaire et des échanges de plus de 80 % d'énergie ont été mesurés. Plus récemment, l'utilisation de transitions dite adiabatiques a ouvert un horizon extrêmement prometteurs pour réaliser cette fonction sur des guides à confinement latéral [34, 35, 36]. De plus la sensibilité du guide OIS1 à l'état de polarisation permet la réalisation de séparateur de mode TE et TM, fonction extrémement délicate à réaliser en filière OIS2 et pourtant extrèmement importante [34].

L'exploitation des possibilités de la filière OIS3 ne fait aujourd'hui que commencer ; la gamme de composants réalisables permet de prévoir un essor important de cette structure si les besoins en circuits optiques intégrés complexes se confirment. Nous donnerons par la suite quelques exemples d'application précis où seule une approche de type OIS3 peut résoudre le problème posé.

IV. LES DOMAINES D'APPLICATION

Quatre grands domaines d'applications peuvent aujourd'hui profiter du développement des techniques optoélectroniques et plus particulièrement de l'optique intégrée. Ce sont :

- le traitement de signal optique [37, 38],
- les capteurs [39],
- les mémoires [40],
- les communications optiques [41, 42].

Les avantages attendus dans chacun de ces domaines ne sont pas identiques et dépendant notament des marchés visés. La fiabilité et la miniaturisation seront des paramètres fondamentaux dans les applications spatiales (traitement de signal, capteurs) alors que le faible coût sera vital dans le domaine des mémoires. En tout état de cause tous ces critères se rejoignent plus ou moins dans la mesure où fiabilité et miniaturisation, liés aux techniques de fabrication, sont indissociables de faible coût potentiel dès que le nombre de pièces processées devient important.

IV.1. Le traitement de signal optique [37, 38]

Les apports de l'optique dans ce domaine sont connus depuis fort longtemps. Ils reposent sur le fait que les lois de diffraction de l'optique permettent d'obtenir certaines fonctions mathématiques comme la transformée de Fourier où les fonctions de corrélation dont l'importance n'est plus à démontrer.

L'analyseur de spectre optique est le chef de file de tous les dispositifs de ce type : ce n'est pas forcément le plus facile à réaliser.

IV.1.1. Principe de fonctionnement

Cet élément a pour but d'analyser en fréquence un signal électrique haute fréquence. Sa réalisation en optique permet d'obtenir la réponse en temps réel, ce qui revêt une importance capitale pour les applications où le temps de réaction doit être le plus rapide possible. C'est bien sûr le cas pour les applications militaires (contre mesure) mais aussi civil (contrôle de fabrication, arrêt d'urgence de machine...).

Le principe général du dispositif est de convertir le signal électrique reçu en un signal optique représentatif de ce dernier puis d'utiliser les lois de l'optique pour obtenir l'information fréquentielle dans le plan focal d'une lentille de transformation de Fourier.

Les variations de fréquence du signal à analyser se traduisent par des variations de position du point focal qu'il est facile de mesurer par des barrettes de photodétecteurs associées ou non à des dispositifs à transfert de charge.

La meilleure solution pour convertir un signal électrique en signal optique est d'utiliser l'interaction acoustooptique soit en ondes acoustiques de volume soit en ondes acoustiques de surface. Le confinement planaire de ces dernières les rend bien adaptées à une utilisation en optique guidée.

Le principe physique mis en jeu est le suivant :

L'onde acoustique générée par un transducteur piézoélectrique sur lequel est appliqué le signal à analyser, produit en se propageant, un réseau de phase dont le pas p est directement lié à la fréquence du signal électrique f et à la vitesse v_a des ondes acoustiques dans le milieu considéré

$$p = \frac{v_a}{f}$$

Le réseau optique formé diffracte alors la lumière suivant les angles directement lié à la valeur de p et donc de f.

En régime de Bragg, l'angle de diffraction θ est égal à :

$$\theta = \frac{\lambda_0}{N_{eff}\, p}$$

avec λ_0 longueur d'onde de la lumière dans le vide, N_{eff} indice effectif du mode guidé considéré.

Dans le plan focal d'une lentille de transformée de Fourier de focale F, la position du point de focalisation sera

$$X_f \simeq \frac{\lambda_0 f F}{N_{eff} V_a}$$

proportionnelle à la fréquence f.

Si l'ouverture du faisceau optique est D, la taille de ce point sera

$$\Delta x \simeq \frac{\lambda_0 F}{N_{eff} D}$$

ce qui conduit à une résolution fréquentielle δf égale à

$$\delta f \sim \frac{V_a}{D}$$

en pratique la résolution fréquentielle est souvent limitée par le pas d'analyse e de la barrette de photodétecteur et la résolution est alors :

$$\delta f \sim \frac{N_{eff} V_a}{\lambda_0 F} e$$

Deux problèmes se posent pour réaliser un analyseur de spectre :

a) générer l'interaction acoustooptique [14, 43, 44, 45],
b) réaliser le circuit optique avec en particulier une lentille de transformation de Fourier performante [37, 38, 46].

IV.1.2. L'interaction acoustooptique

La première idée qu'il vient à l'esprit est d'utiliser un matériau piézoélectrique comme matériau de base. C'est pour cela que les premiers dispositifs analyseurs de spectre réalisés le furent sur niobate de lithium [47, 48].

Dans le cas des circuits OIS, la chance réside dans la possibilité de déposer de l'oxyde de zinc ZnO capable de conserver une structure orientée et donc la plupart des propriétés physiques du matériau cristallin.

Cette faculté rare dépend bien sûr des conditions de dépôt (atmosphère, température...) et des substrats utilisés. Silicium, silice ou nitrure de silicium sont de ce point de vue connus pour autoriser la fabrication de couche mince de ZnO de bonne qualité [13].

Deux paramètres physiques sont alors fondamentaux :

a) Le coefficient électromécanique k^2 [37, 43, 44, 49, 50] qui détermine l'aptitude du matériau piézoélectrique à convertir un signal électrique en signal acoustique. Ce paramètre est fondamental car pour un transducteur piézoélectrique donné, il donne la bande passante fréquentielle Δf accessible pour une fréquence centrale de fonctionnement f_0 donnée

$$\frac{\Delta f}{f_0} \sim k$$

Il est clair que plus la bande passante sera élevée plus le dispositif sera performant.

L'oxyde de zinc présente dans sa version cristalline d'excellent coefficient k^2. Ceux ci se retrouvent dans la couche mince déposée par pulvérisation si la désorientation moyenne de l'axe "c" dans la structure polycristalline est faible et n'excède pas en pratique 2 à 3 degrés.
Sur silicium ou silice des valeurs de désorientation inférieures à 1° ont été obtenues, assurant ainsi un fonctionnement pratiquement parfait du matériau piézoélectrique [13, 37, 38].

b) Les pertes de propagation de l'onde acoustique [5, 14, 31, 37, 38]
Elles jouent un rôle fondamental car elles vont limiter la distance d'interaction entre l'onde optique et l'onde acoustique.
Comme ces pertes augmentent rapidement avec la fréquence acoustique, elles vont très vite conduire à une limitation en bande passante et/ou en résolution.
Sur des couches déposées, la valeur des pertes acoustiques dépend du substrat utilisé car les ondes pénètrent dans celui-ci (ondes évanescentes équivalentes à celles rencontrées en optique) mais surtout de la qualité de l'oxyde de zinc.
Bien qu'il y ait controverse sur ce point, il ne semble pas que la valeur des pertes soit directement liée à la désorientation cristalline mais plutôt à l'état de surface du dépôt et à la taille des polycristaux. Ainsi des couches d'oxyde de zinc à fort coefficient k^2 peuvent présenter malgré tout de fortes atténuations acoustiques.

IV.1.3. Le circuit optique d'analyse de spectre [31, 37, 38, 46, 47, 48]

Comme la taille des détecteurs est la plupart du temps l'élément limitatif du point de vue résolution, il est clair qu'il y a tout intérêt à travailler avec des focales de lentilles de transformée de Fourier les plus grandes possibles.

Cela ne va pas dans le sens de la miniaturisation et c'est pourquoi la mise en oeuvre d'un circuit replié permet de gagner beaucoup, à taille sensiblement égale, du point de vue résolution [37, 38].

C'est ce qui a été réalisé dans le circuit représenté figure 4 qui a été optimisé pour obtenir à la fois une grande bande passante et une faible résolution.

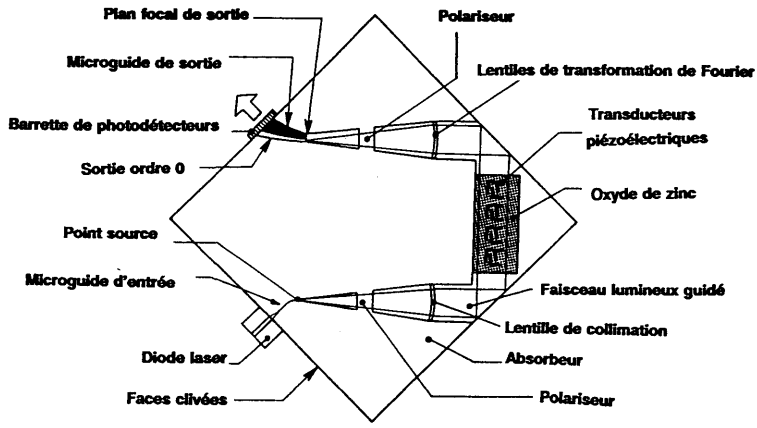

Figure 4

IV.1.4. Les performances et les perspectives d'avenir

Les circuits analyseur de spectre optiques souffrent d'un défaut congénital : la faible dynamique de mesure limitée par deux facteurs :

a) La nécessité de travailler à faible puissance électrique de commande pour obtenir une relation linéaire entre intensité lumineuse diffractée et puissance électrique (en pratique l'intensité diffractée ne doit pas dépasser 10 % de l'intensité lumineuse présente dans l'ordre central).

b) Le bruit optique plus élevé dans les systèmes optiques intégrés planaires que dans les systèmes utilisant l'optique traditionnelle.

Dans le meilleur des cas une dynamique de mesure de l'ordre de 25 dB optique semble aujourd'hui accessible ; ce qui n'est pas suffisant dans les applications de contre-mesure.

La meilleure solution pour surmonter ce problème est l'utilisation d'architecture interférométrique, un peu plus complexe, mais qui ont l'avantage de s'affranchir en partie des problèmes de bruit optique parasite [51].

De ce point de vue, les corréleurs à intégration spatiale offrent des performances intéressantes car ils travaillent inrinsèquement dans une configuration interférométrique [37].

Aujourd'hui, les progrès réalisés au niveau des technologies et des composants de base permettraient d'obtenir des dispositifs de traitement de signaux performants et qui de part l'intégration répondraient parfaitement aux besoins de miniaturisation ou de faible poids que demandent en particulier les applications militaires et spatiales.

IV.2. Les capteurs optiques [39]

C'est sans doute le domaine dans lequel la liberté d'action est la plus grande.

Il n'est ni soumis à des standards incontournables, comme dans le domaine des mémoires ni à des décisions politiques et stratégiques comme dans celui des communications.

Cela explique sans doute que les premiers dispositifs fabriqués industriellement l'aient été dans ce secteur d'activité.

Deux applications semblent aujourd'hui pouvoir profiter des avantages de l'optique intégrée :

- La métrologie dimensionnelle qui a traditionnellement été un secteur clef de l'optique du fait des possibilités offertes par la mesure sans contact et surtout l'utilisation d'un étalon de mesure, la longueur d'onde optique, très précis et facile à mettre en oeuvre en interférométrie.

- La gyrométrie dans laquelle l'optique intégrée apporte compacité, fiabilité et potentiellement faible coût dans un domaine où l'optique s'implante de plus en plus. L'inconnue réside ici dans la gamme de performances que pourraient atteindre les dispositifs optiques intégrés. Pour cela les valeurs de pertes de propagation annoncées n'ont pas seulement un aspect anecdotique.

Alors que pour la plupart des applications des atténuations de 0,1 dB/cm sont plus que suffisantes compte tenu des dimensions des circuits et des distances de propagation, des gains apparemment faibles sur ce paramètre peuvent jouer un rôle important en gyrométrie en offrant aux dispositifs intégrés une nouvelle part de marché.

Bien sûr d'autres types d'application semblent à terme profiter des développements de l'optique intégrée. Si le développement des capteurs à fibres monomodes se concrétisent, la mise en oeuvre d'un traitement optique intégré s'impose d'elle-même et peut même, comme dans le cas du gyromètre à fibre, devenir quasiment incontournable.

La mesure de paramètre physique comme l'indice de réfraction parait aussi bien convenir à une approche de ce type avec des retombées potentielles importantes dans les domaines du biomédical ou de l'agro-alimentaire.

Nous pourrions énumérer longuement les possibilités futures de l'optique intégrée dans ce domaine. Il est certain que le développement industriel des premiers produits va avoir un effet d'avalanche de plus en plus marqué et que les situations vont sans doute beaucoup évolué dans les années à venir.

IV.2.1. Les capteurs de déplacement et de vibrations [5, 31, 52]

Plusieurs laboratoires ont étudiés ce type de dispositif dans des versions différentes utilisant soit des circuits planaires soit des circuits mettant en jeu des microguides.

Tous les systèmes présentés jusqu'ici sont des capteurs interférométriques qui utilisent un comptage de franges d'interférence entre une onde de référence et l'onde réfléchie par l'objet dont il faut mesurer le déplacement.

C'est donc un principe extrémement simple qui se heurte à deux difficultés principales :

1) Il faut, en même temps que la mesure de la valeur absolue du déplacement, avoir l'information sur son sens. Pour cela deux principales méthodes :
   - un hétérodynage optique qui avec un traitement de signal approprié permet une différentiation de la mesure suivant le sens de déplacement (écart fréquentiel Δf négatif ou positif par rapport à la fréquence d'hétérodynage)
   - l'utilisation de 2 systèmes d'interférence déphasés par exemple de $\pi/2$.

   C'est le système le plus simple du point de vue du circuit optique qui peut rester entièrement passif. Il a été mis en oeuvre en particulier au LETI et il est toujours utilisé dans le capteur de déplacement qui est industriellement commercialisé. Il réunit en fait deux interféromètres de Michelson dont les bras de référence sont déphasés de $\pi/2$ grâce à un déphaseur passif (figure 5).
   D'autres systèmes équivalents utilisant des déphaseurs actifs ou passifs ont été également publiés mais sont encore des composants de laboratoires.

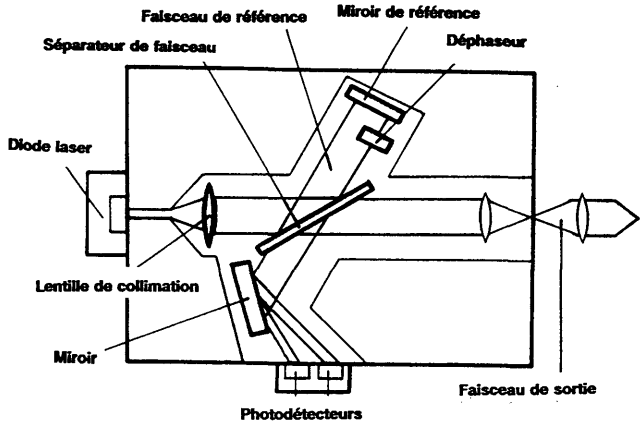

Figure 5

2) Il faut surtout stabiliser la longueur d'onde de la diode laser source afin de profiter réellement de l'étalon de longueur désiré.
Le problème est difficile car des questions de coût ne permettent pas de choisir des diodes laser trop sophistiquées mieux adaptées au problème posé.
Les diodes Fabry-Perot classiques souffrent en particulier des problèmes de sauts de mode qui deviennent ici cruciaux. De plus, il ne faut pas oublier que le laser fonctionne en association avec un circuit optique et que, sans l'utilisation d'un isolateur (coûteux et encombrant à la longueur d'onde de 0,8 μm), les problèmes de retour de lumière dans la cavité laser sont à prendre en compte [53, 54, 55, 56].

Heureusement la présence de la cavité externe semble jouer un rôle bénéfique si les paramètres du couple laser-circuit optique sont maintenus extrémement stables. Un verrouillage du mode d'émission est alors observé et assure une excellente stabilité fréquentielle. Cela implique cependant une excellente stabilisation en courant et en température du module mais aussi un soin particulier dans le montage.

Les performances actuelles assurent une stabilisation de longueur d'onde $\Delta\lambda/\lambda$ de l'ordre de 10^{-6}, soit une précision de 0,1 μm sur 10 cm. Les résolutions accessibles sont meilleures que 0,1 μm et dépendent surtout du traitement électronique utilisé dans le comptage des franges [39].

Ces valeurs peuvent pour des applications particulières être améliorées. Une stabilisation par asservissement sur une raie d'absorption d'un gaz (par exemple le rhubidium à 780 nm) permet d'atteindre une très grande stabilité fréquentielle et évite la calibration [57, 58]. Enfin, les progrès des sources lumineuses à semiconducteur tant en puissance qu'en fiabilité et l'arrivée sur le marché des diodes laser visibles devraient faire progresser beaucoup ce mariage de la métrologie dimensionnelle et de l'optique intégrée.

IV.2.2. La Gyrométrie

Les solutions optiques pour réaliser des gyromètres performants ont été étudiées depuis plusieurs années.
Elle repose sur la réalisation d'une cavité, résonante ou non, dans laquelle les interférences entre les ondes lumineuses se propageant dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens opposé fournissent l'information rotation angulaire cherchée. Le milieu de propagation peut être actif (gyromètre laser) ou passif (gyromètre à fibre) [59, 60, 61, 62, 63].

Il est clair que l'optique intégrée peut apporter une souplesse de fabrication dans le cas des gyromètres passifs dans le mesure où elle minimise les problèmes de connexions avec les fibres qui jouent un rôle important sur la qualité finale du dispositif. Encore faut-il que les performances accessibles ne soient pas trop loin des performances désirées dans un certain nombre d'applications. Le paramètre fondamental est ici la valeur des pertes de propagation optiques.

Les mesures récemment obtenues sur des anneaux résonants (< 3 dB/m) [28, 29] sont certes encore loin des valeurs observées sur fibres optiques mais permettent d'envisager des applications bas de gamme-bas coût intéressantes.

Bien qu'aucune réalisation concrète n'ait encore été publiée, c'est un domaine qui progresse rapidement et qui suscite un intérêt croissant.

IV.3. Les communications optiques [41, 42]

C'est sans aucun doute le grand terrain d'essai de l'optique intégrée en particulier si le développement des réseaux locaux monomodes se confirme.

Si le marché des modulateurs de lumière est encore très réduit, celui des composants passifs insérables dans des liaisons optiques monomodes est en net progrès et plusieurs compagnies dans le monde vendent de tels composants soit sur substrat verre soit sur substrat silicium.

Il s'agit tout particulièrement de diviseurs de faisceaux lumineux (1 vers 8 ou 1 vers 16), de coupleurs bidirectionnels et de duplexeur de longueurs d'ondes travaillant en émission et réception sur les deux fenêtres actuelles de 1,3 et 1,5 μm [64].

Ce sont des composants fibrés qui permettent la réalisation en vrai grandeur de système de communications large bande et qui, à l'heure actuelle joue le rôle de pionniers pour les composants de demain.

Les performances annoncées par les différents fabricants sont voisines et ne permettent pas de révéler clairement une technologie plutôt qu'une autre. Il faut cependant garder à l'esprit que ce sont des composants très simples qui ne demandent pas de haut niveau de compatibilité technologiques ni dans leur fabrication ni dans leur association avec les autres composants optoélectroniques. De plus les prix de ventes, relativement élevés aujourd'hui, ne sont pas du tout représentatifs des coûts réels de fabrication et des possibilités offertes par chaque technologie dans ce domaine.

La lutte commerciale est donc engagée mais reste très ouverte. Il n'en reste pas moins que, à terme, la compatibilité technologique au niveau de l'ensemble des étapes de fabrication et de montage sera un point déterminant.

L'évolution des besoins en composants dans ce domaine particulier sera aussi un élément clef qui dépendra de l'évolution des architectures systèmes et des progrès techniques réalisés. Il est donc difficile de conclure mais l'évaluation des possibilités offertes par chaque technologie et de leur capacité à répondre à des besoins toujours plus ambitieux est sans doute un bon moyen d'essayer de prévoir l'avenir.

Au-delà des possibilités offertes par l'hybridation des composants III-V, possible sur substrat silicium [65, 66, 67], nous pouvons examiner certaines possibilités technologiques offertes sur ce substrat qui peuvent ouvrir des portes nouvelles et orienter le choix final.

C'est par exemple le cas de l'utilisation des structures de type OIS3 qui donnent des possibilités extrèmement intéressantes pour réaliser des composants de plus grande complexité comme les récepteurs à diversité de polarisation ou de phase.
La mise en oeuvre des transitions adiabatiques agrandit considérablement les champs d'application des circuits optiques intégrés dans un domaine où la nécesité de travailler avec des structures à faible confinement optique limite la panoplie des composants réalisables.

Dans le même contexte les possibilités de gravure anisotrope des structures OIS2 autorisent la réalisation de circuits planaires catadioptriques. Ceux ci surmontent le handicap des guides d'ondes à faibles variations d'indice dans lesquelles la réalisation de lentilles planaires performantes est très difficile [5, 31].

Dans le domaine du multiplexage en longueurs d'ondes par exemple, les dispositifs à microguides de lumière ne permettent pas de dépasser raisonnablement 4 canaux. Ils nécessitent la mise en cascade de composants élementaires qui augmente rapidement la taille des circuits et diminue leurs performances en terme de pertes de transmission.

L'utilisation de miroirs de type "Fresnel" blazés permet d'envisager des multiplexeurs à 16 canaux voire plus, présentant des performances honorables et un encombrement acceptable [21, 68].

L'inconnue principale réside dans la difficulté d'appréhender réellement l'évolution future de ce domaine d'application de l'optique intégrée sans doute le plus porteur mais pour lequel le véritable marché est à venir.

Il n'est d'ailleurs pas exclu que l'amplification optique dans les circuits optiques intégrés et les modifications qu'elles pourraient amener dans les architectures systèmes soient à terme déterminant dans ce développement. Quelques publications récentes utilisant un dopage terre rare dans des guides d'ondes en silice donnent des résultats très encourageants ; ils doivent être pris en considération quand on connaît l'impact qu'ont eus les amplificateurs à fibres ces dernières années [69, 70].

Enfin l'évolution des techniques de modulation de la lumière reste encore aujourd'hui un point qui n'est pas complètement éclairci. Aura-t-on besoin de modulateurs extérieurs ? Seront-ils réalisés en technique hybride ? L'utilisation de cavités externes a fort coefficient de surtension va-t-elle complètement résoudre les problèmes liés à la modulation directe de la source ? Autant de points sur lesquels il est toujours possible d'essayer de faire une analyse objective, mais dont l'évolution dépend également d'inconnues techniques ou économiques qui peuvent bouleverser les pronostics.

L'utilisation des polymères organiques et les possibilités qu'ils offrent du point de vue des performances accessibles et de leur compatibilité avec les structures OIS peuvent être à court terme un élément déterminant dans le choix technologique final [15, 16].

IV.4. Mémoires optiques [40]

C'est à première vue un des domaines les plus porteurs de l'optique intégrée dans la mesure où les systèmes actuels et surtout les systèmes inscriptibles magnétooptiques souffrent de deux défauts principaux :

- Une complexité d'alignement et de montage des composants optiques classiques plus grande que pour les têtes de lecture des disques "compact". Elle pénalise l'approche classique du point de vue coût dans un domaine très concurrentiel.

- Un poids et un encombrement qui augmente l'inertie du système et limite les temps d'accès à l'information et par voie de conséquence les types d'applications potentiels.

C'est bien sur un domaine qui progresse vite et ou les idées nouvelles faisonnent.

Les problèmes d'inertie peuvent en partie être résolus par des têtes déportées et l'utilisation de miroirs de renvoi. Il n'en reste pas moins que l'emploi d'un circuit optique intégré réunissant toutes les fonctions essentielles constitue un rêve pour tous les fabricants.

Certes, pour être parfaite une solution intégrée devrait incorporée la lentille de focalisation sur le disque optique. Des expériences intéressantes ont été réalisées à l'Université d'Osaka avec des lentilles de conversion "optique planaire-optique tridimensionnelle" à réseaux [71, 72]. Elles montrent, au-delà de la difficulté de faire des réseaux de qualité et de pas variables voisins de 0,3 μm, que ce type de lentille présente encore des qualités optiques insuffisantes par rapport à l'approche ce type d'application. Sera-t-il possible d'atteindre un jour les performances voulues ! Cela paraît aujourd'hui difficile bien qu'il faille compter avec une amélioration constante des technologies de réseaux submicroniques, en particulier sur les structures OIS.

En attendant des solutions mixtes associant à la fois des éléments optiques intégrés pour le traitement de l'information et des éléments optiques classiques pour la fonction d'imagerie paraissent déjà très séduisantes et pourraient simplifier les problèmes rencontrés.

Une autre approche permise par la miniaturisation des circuits intégrés et qui est en cours d'étude au LETI, consiste à se rapprocher des solutions de lecture-écriture classique des disques magnétiques et d'utiliser un patin volant à quelques centaines de nanomètres de la surface du disque [40].

Cette approche nécessite des circuits optiques intégrés de très faible taille (3 x 4 mm typiquement) qui peuvent être collés sur le patin (figure 6). Elle évite l'utilisation d'un système d'autofocalisation indispensable avec une lecture par projection. En contre-partie la lecture-écriture par proximité ne permet plus une liberté aussi gande du point de vue de la structure des disques optiques (la couche active doit rester très proche de la surface) et pose de manière plus aigüe le problème de l'état de surface du disque. Elle semble ne pouvoir s'appliquer qu'à des disques inamovibles qui ne constituent pas l'enjeu technique le plus important.

La réalisation de ce type de dispositif dont les premiers tests sont plus qu'encourageants, montre cependant de manière indiscutable les apports de l'optique intégrée dans un domaine qui devrait se développer énormément au cours des prochaines années.

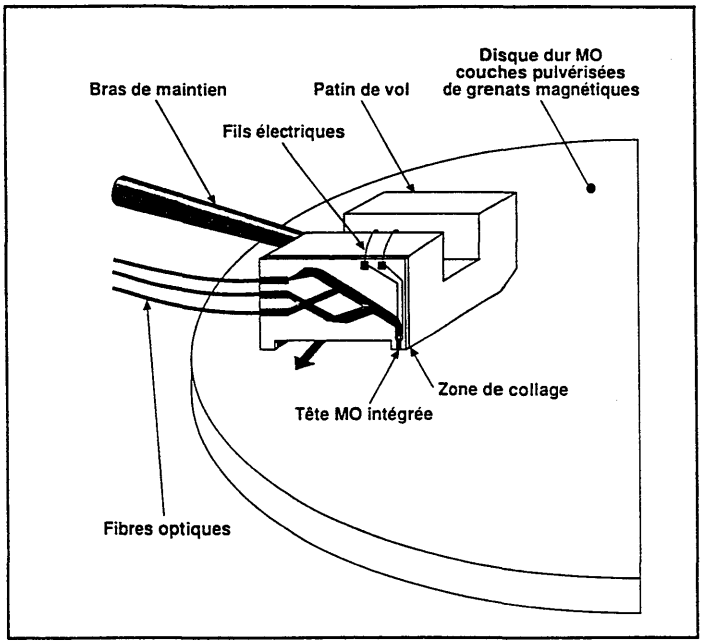

Figure 6

V. CONCLUSION

L'optique intégrée a atteint un degré de maturité qui permet aujourd'hui de répondre aux besoins de nombreux domaines d'application.

L'évolution restera encore quelques années de progression modérée car toutes les difficultés de réalisation d'un circuit optoélectronique et en particulier les problèmes de connections entre les différents éléments et la maîtrise de tous les paramètres de fonctionnement ne sont pas complètement aplanis. De plus dans de nombreux cas, les domaines d'application sont encore en gestation. Mais les solutions techniques existent et la pression croissante des marchés dans différents domaines permet de penser que l'optoélectronique intégrée sera une des techniques "reine" de la fin des années 1990.

Bien qu'il soit difficile de prévoir avec précision ce que réserve l'avenir dans des domaines où les aspects systèmes et composants évoluent très vite, il est possible de définir les directions technologiques privilégiées dans la mesure ou les temps de réponse à ce niveau sont beaucoup plus longs.

S'il ne fait aucun doute que l'optique sera amenée à jouer un rôle primordial dans l'évolution des systèmes futurs et ceci dans de nombreux domaines d'application, la porte sera encore ouverte pour ce qui est des technologies qui s'imposeront.

Aujourd'hui, compte tenu de l'évolution des besoins, de l'état des technqiues et des potentialités offertes, les technologies III-V pour les composants actifs d'extrémité et les technologies OIS semblent devoir jouer le rôle primordial. L'avenir confirmera-t-il cette analyse ? Rendez-vous dans 10 ans.

REFERENCES

[1] N.A. OLSSON, C.H. HENRY, R.F. KAZARINOV, H.J. LEE, K.J. ORLOWSKI, B.H. JOHNSON, R.E. SCOTTI, D.A. ACKERMAN and P.J. ANTHONY, "Performance characteristics of a 1.5 μm single frequency semiconductor laser with an external waveguide Bragg reflector", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 24, (february 1988), pp. 143-147.

[2] N.A. OLSSON, C.H. HENRY, R.F. KAZARINOV, H.J. LEE and B.H. JOHNSON, "Relation between chirp and linewidth reduction in external bragg reflector semiconductor laser", App. Phys. Lett., vol. 51, (july 1987), pp. 92-93.

[3] M.N. ARMENISE, "Fabrication technics of $LiNbO_3$ waveguides". IEEE Proceedings, vol. 135, part J, n° 2, p. 85, (avril 1988).

[4] R.V. RAMASWAMY, R. SRIVASTAVA, "Ion exchange glass waveguide : a review", Journal of Lightwave Technology, vol. 6, n° 6, pp. 984-1002 (juin 1988).

[5] S. VALETTE, J.P. JADOT, P. GIDON, S. RENARD, A. FOURNIER, A.M. GROUILLET, H. DENIS, P. PHILIPPE, E. DESGRANGES, "Si based Integrated Optics Technologies", Solid State Technology, pp. 69-75 (february 1989).

[6] B.H. VERBEEK, C.H. HENRY, N.A. OLSSON, K.J. ORLOWSKI, R.F. KAZARINOV, B.H. JOHNSON, "Integrated Four Channel Mach-Zehnder Multi/Demultiplexer Fabricated with Phosphorous Doped SiO_2 waveguides on Si", Journal of Lighwave Technology, vol. 6, n° 6, pp. 1011-1015 (June 1988).

[7] M. KAWACHI, M. YASU, M. KOBAYASHI, "Flame hydrolysis deposition of SiO_2-TiO_2 glass optical waveguide on silicon", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 22, p. 1932 (1983).

[8] A. CARENCO, "Semiconductor waveguides in III-V materials for integrated optics", Proceeding of the Fourth European Conference on Integrated Optics, pp. 1-7, ECIO 87, Glasgow (11-13 may 1987).

[9] J.R. NELSON, N.K. DUTTA, "Review of InGaAsP/InP laser structures and comparison of their performances", in semiconductors and semimetals : edited by W.T. TSANG, Academic Press 1985, Orlando, San Diego, New-York, Londres, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo.

[10] G. GRAND, H. DENIS, S. VALETTE, "New Method for low cost and efficient optical connexion between singlemode fibers", Electron. Lett., 27, pp. 16-17 (janvier 1991).

[11] H. TERUI, Y. YAMADA, M. KAWACHI, M. KOBAYASHI, "Hybrid integration of a laser diode and high silica multimode optical channel waveguide on silicon", Electronics Letters, vol. 21, (18th July 1985), pp. 646-648.

[12] E. FRIEDRICH, "Etude de faisabilité d'interconnexions optiques intégrées entre composants microélectroniques", P.H..D. Thesis, presented at Orsay University on January 9th 1991.

[13] F.S. HICKERNELL, R.L. DAVIES, F.V. RICHARD, "The Acousto-Optic Properties of thin Film Si_3N_4, Ta_2O_5, ZnO and 7059 Glass on oxidized Silicon Substrates", Proceeding of IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 60, (1978).

[14] P. MOTTIER, S. VALETTE, J.P. JADOT, "Broad Bang Bragg Deflector for Optical Waveguides on Silicon Substrates", Optics and Laser Technology, vol. 18, n° 2, pp. 89-92 (april 1986).

[15] R. LYTEL, G.F. LIPSCOMB, M. STILLER, J.I. THACKARA, A.J. TICKNOR, "Organic Integrated Optical Devices in Nonlinear Optical Effects in Organic Polymers", Edited by J. MESSIER, F. KAJZAR, P. PRASAD, D. ULRICH, Academic Publishers Dordrech (Boston, London 1989), NATO Series vol. 162.

[16] G.R. MOHLMANN, "Polymer electro-optic devices", Proceedings of ECOC 90, (Amsterdam, sept. 1990), pp. 833-840.

[17] D.B. ORTROWSKY, R. POIRIER, L.M. REIBER, C. DEVERDUN, "Integrated Optical photodetector", Applied Physic Letters, vol. 22, n° 9, pp. 463-464 (may 1973).

[18] S. VALETTE, J.P. JADOT, P. GIDON, A. KEVORKIAN, "Integrated Optics and Microelectronics : Toward an integration on a single silicon chip", Proceeding SPIE volume 864 : Advanced Optoelectronic Technology, (18-20 novembre 1987 : Cannes - France).

[19] S. VALETTE, "Les composants actifs dans les technologies optiques intégrées sur substrat silicium", Proceedings of OPTO 91, Paris (26-28 Mars 1991).

[20] P. MOTTIER, S. VALETTE, "Integrated Fresnel lens on thermally oxidized Si Substrate", Applied Optics, vol. 20, pp. 1630 (1981).

[21] S. VALETTE, D. GIDON, J.P. JADOT, "New Integrated Optical Multi/Demultiplexer realized on Si Substrate", Proceedings of the Fourth European Conference on Integrated Optics, ECIO 87, p. 145, C.D.W. Wilkinson and J. Lamb editors, Glasgow (may 11-13 1987).

[22] H.J. LEE, C.H. HENRY, K.J. ORLOWSKI, R.F. KAZARINOV, T.Y. KOMETANI, "Refractive-index dispersion of phosphosilicate glass, thermal oxyde and silicon nitride films on silicon", Applied Optics, vol. 27, n° 19, pp. 4104-4109, (october 1988).

[23] N. TAKATO, M. YASU, M. KAWASHI, "Low-loss high silica single mode channel waveguides", Electronics Letters, vol. 22, pp. 321-322 (1986).

[24] M. KAWACHI, M. KOBAYASH, T. MIYASHITA, "Integrated micro-optic components based on silice waveguides", Proceeding of European Conference on Optical Communications, ECOC 87, pp. 53-58, Helsinki (September 1987).

[25] K. IMOTO, "Guided wave multi/demultiplexer with high stopband rejection", Applied Optics, 26, p. 4214 (1987).

[26] T. KOMINATO, Y. OHMORI, H. OKAZAKI and M. YASU, "Very low-loss GeO_2 doped silica waveguides fabricated by flame hydrolysis deposition method, Electron. Lett., vol. 26, (1990), pp. 327-328.

[27] G. GRAND, J.P. JADOT, H. DENIS, S. VALETTE, A. FOURNIER, A.M. GROUILLET, "Low-loss PECVD silica channel waveguides for optical communications", Electron. Lett. vol. 26, n° 25, (December 6th 1990), p. 2135-2137.

[28] R. ADAR et al., "Measurement of very low-loss silica on silicon waveguide with a ring resonator, Appl. Phys. Lett., 58, pp. 444-445, (February 4th 1991).

[29] J. BISMUTH, P. GIDON, F. REVOL, S. VALETTE, "Low losses rings resonators fabricated from silicon based integrated optics technics", Proceedings of 7th Optical Fibre Sensors Conference, OFS 90, Sydney (December 2-6, 1990), p. 105-108.

[30] J. BISMUTH, P. GIDON, F. REVOL, S. VALETTE, "Low losses rings resonators using integrated optics on silicon (IOS) technologies : Electron. Letters, 27, pp. 722-724 (April 991).

[31] S. VALETTE, J.P. JADOT, P. GIDON, S. RENARD, G. GRAND, A. FOURNIER, A.M. GROUILLET, P. PHILIPPE, H. DENIS, E. DESGRANGES, L. MULATIER, C. ERBEIA, "Integrated Photonic Circuits on silicon", edited by R.A. Levy, Novel Silicon Based Technology, 173-240, Klüwer Academic Publishers, Nevertheland (1991).

[32] M. KAWACHI, N. TAKATO, K. JINGUSI and M. YASU, "Birefringence control in high-silica single mode channel waveguides in silicon", Proceeding of Conference OFC/IOOC 87, (1987), p. 125.

[33] G. GRAND, "Contribution à l'étude de dispositifs optiques intégrés couplés à des capteurs à fibre optique", PHD thesis, presented at Grenoble University (sept. 24th 1985), pp. 80-96.

[34] Y. SHANI, C.H. HENRY, R.C. KISTLER, R.F. KAZARINOV and K.J. ORLOWSKY, "Integrated optic adiabatic polarization splitter on silicon", Appl. Phys. Lett., 56, (8 january 1990), pp. 120-121.

[35] R. KAZARINOV, "Silicon based materials for integrated optics in NATO advances study institute : novel silicon based technologies", (July 17-19th 1989), Boca Raton (Floride).

[36] Y. SHANI, C.H. HENRY, R.C. KISTLER, K.J. ORLOWSKI and D.A. ACKERMAN, "Efficient coupling of a semiconductor laser to an optical fiber by means of a tapered waveguide on silicon", Appl. Phys. Lett, 55, 4 December 1989, pp. 2389-2391.

[37] S. VALETTE, "Le traitement optique du signal" dans "Méthodes et Techniques de traitement de signal et applications aux mesures physiques", par J. Max, tome II, Masson éditeur (Paris, New-York), pp. 166-231, (1987).

[38] S. VALETTE, J. LIZET, P. MOTTIER, J.P. JADOT, P. GIDON, S. RENARD, (1984), "Integrated optical circuit achieved by planar technology on silicon substrate : application to spectrum analyser", IEEE Proceedings, 113, part H, pp. 325 -1987).

[39] S. VALETTE, S. RENARD, J.P. JADOT, P. GIDON and C. ERBEIA, "Silicon based integrated optics technology for optical sensor applications", Sensors and Actuators, A21-A23 (1990), pp. 1087-1091.

[40] S. RENARD and S. VALETTE, "Integrated reading and writing optical heads : a way to a multigigabyte multi-rigid-disk drive", Invited paper to be presented in Topical Meeting on Optical Data Storage (Colorado Springs, 25-27 February 1991), paper TuC 1.

[41] S. VALETTE, P. GIDON, J.P. JADOT, S. RENARD, "New integrated optics structure on silicon substrate : application to optical communications and optical interconnects", Proceedings SPIE 862, "Optical interconnections", Cannes (November 1987).

[42] M. KAWACHI, M. KOBAYASHI, T. MIYASHITA, "Integrated micro-optic components based on silica waveguides", Proc. on European Conference on Optical Communications : ECOC 87, Helsinki (september 1987), pp. 53-58.

[43] S.K. YAO, R.R. AUGUST, D.D. ANDERSON, "Guided-wave acoustooptic interaction on non piezoelectric substrates", J. Appl. Phys., 49-12, pp. 5228-5730 (1978)

[44] C.S. TSAI, "Guided-wave acoustooptic Bragg modulators for wide-band integrated optics communications and signal processing", IEEE Trans Circuits and System CAS 26, 12, pp. 1072-1098 (1979).

[45] F.S. HICKERNELL, "Zinc-oxyde thin film surface-wave transducers", Proceedings of the IEEE, vol. 64, n° 5, pp. 631-635 (mai 1976) et références citées.

[46] D.B. ANDERSON, "Integrated Optical Spectrum Analyser : an imminent "chip"", IEEE Spectrum, pp. 22-29 (december 1978).

[47] M.K. BARNOSKI, B.U. CHEN, T.R. JOSEPH, J.Y. LEE, O.G. RAMER, "Integrated Optic Spectrum Analyser" IEEE Trans on circuits and systems, CAS 26, p. 1113, (1979).

[48] D. MERGERIAN, E.C. MALARKEY, R.P. PAUTENUS, R.P. BRADLEY, J.C. MARX, G.E. HUTCHINSON, A.L. KELLNER, "An integrated optical radio frequency spectrum analyser", Proceeding of the SPIE, 239, p. 121 (1980).

[49] G.S. KINO, R. WAGERS, "Theory of interdigital couplers on non piezoelectric substrate", J. App. Phys. 44, pp. 1480-1488 (1973).

[50] N. CHUBACHI, "Zn0 films for surface acoustooptic wave on non piezoelectric substrates", Proceedings of the IEEE, 64, n° 5, pp. 772-776 (may 1976).

[51] Acoustooptic signal processing, edité par N.J. BERG et J.N. LEE, Marcel Dekker Inc, New York et Bale.

[52] J. LIZET, P. GIDON, S. VALETTE, "Integrated Displacement Sensor Achieved on Si Substrate", Proceeding of the Fourth Conference on Integrated Optics, ECIO 87, Glasgow (11-13 may 1987), C.D.W. Wilkinson and J. Lamb Editors, p. 206.

[53] B. TROMBORG, J.H. OSMUNDSEN, H. OLESEN, "Stability Analysis of a semiconductor laser in an external cavity", IEEE J. of Quantum Electronics, Q.E.20, pp. 1023-1032, (1984).

[54] C.H. HENRY, R.F. KAZARINOV, "Instability of semiconductor laser due to optical feedback from distant reflector", IEEE Journal of Quantum Electronics, Q.E. 22, pp. 294-301 (1986).

[55] H. OLESEN, J.H. OSMUNDSEN, B. TROMBORG, "Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, Q.E. 22, pp. 762-773 (1986).

[56] J. BINDE, G.D. CORMACK, "Mode selection and stability of a semiconductor laser with weak optical feedback", IEEE Journal of Quantum Electronics, Q.E. 25, pp. 2255-2259 (1989).

[57] S. KOIZUMI, T. SATO, M. SHIMBA, "Frequency stabilisation of semiconductor laser using atomic absorption line under FSK technique", Electron. Lett., 24, pp. 13-14, (7th January, 1988).

[58] H. HORI, Y. KITAYAMA, M. KITANO, T. YABUZAKI, T. OGAWA, "Frequency stabilisation of GaAlAs laser using a Doppler free spectrum of the Cs-D_2 line, IEEE J. Quantum Electronics, Q.E. 19, pp. 169-175 (1983).

[59] D. ANDERSON, "Les gyroscopes optiques", Pour la Science, pp. 16-22, juin 1986.

[60] R.A. BERG, H.C. LEFEVRE, H.J. SHAW, "A overview of fiber optic gyroscope", J. of Lighwave Technology, LT2, pp. 91-107, (1984).

[61] E. UDD, "Fiberoptic versus ring laser gyros : an assessment of the technology", Laser Focus, pp. 64-74 (dec. 1985).

[62] J.J. ROLAND, G.P. AGRAWAL, "Optical Gyroscopes", Optics and laser technology, pp. 239-244, (October 1981).

[63] R.A. SYMS, "Resonant cavity sensor for integrated optics", IEEE, J. of Quantum Electronics, Q.E. 21, pp. 322-328 (1985).

[64] K. WEITCH, J. VATHKE, G. WALF, Duplexer crosstalk requirements for bidirectional optical subscriber loops using optoelectronic integrated circuit proceeding of EFOC-LAN 90, pp. 224-228, (Munich 27-29 june 1990).

[65] C.H. HENRY, G.E. BLONDER, R.F. KAZARINOV, "Glass waveguides on silicon for hybrid optical packaging", J. of lightwave technology, LT 7, pp. 1530-1539 (1989).

[66] S. VALETTE, "Hybrid technologies for optoelectronics", le vide et les couches minces, vol. 44, n° 245, pp. 137-145 (Workshop on Optical coatings and Integrated Optics), (janvier-février 1989).

[67] S. VALETTE, P. GIDON, S. RENARD, J.P. JADOT, "Silicon based Integrated Optics Technology : an attractive hybrid approach for optoelectronics", SPIE Proceeding vol. 1128 : glass for optoelectronics, (24-28 april 1989 : Paris).

[68] G. GRAND, B. CORSELE, J.P. JADOT, E. PARRENS, A. FOURNIER, A.M. GROUILLET, S. VALETTE, "16 Channels Optical Wavelength Multiplexer, Demultiplexer integrated on silicon substrates", Proceeding of EFOC-LAN91, pp. 264-267 (Londres, 19-21 juin 1991).

[69] A. POLMAN, A. LIDGARD, D.G. JACOBSON, P.C. BECKER, K.C. DISTLER, G.E. BLONDER, J.M. POATE, "1.54 μm room-temperature luminescence of MeV Erbium-implanted silica glass", Appl. Phys. Lett. 57(26), pp. 2859-2861, (24 december 1990)

[70] Y. HIBINO, T. KITAGAWA, M. SHIMIZY, ?. HANAWA, A. SUGITA, "Neodymium doped silica optical waveguide laser on silicon substrate", IEEE Photonics technology Letters, vol. 1, n° 1, pp. 349-350, (novembre 1989).

[71] T. SUHARA, H. NISHIHARA, "Integrated Optics Components and devices using periodic structures", IEEE J of Quantum Electronics, Q.E. 22, pp. 845-867, (1986).

[72] S. URA, Y. FURIKAWA, T. SUHARA, H. NISHIHARA, "Linearly focusing grating complex for integrated optics parallel pickup", J. Opt. Soc. Am, vol. 7, pp. 1759-1763 (1990).