

# LES LASERS

## LES CIRCUITS INTEGRES OPTIQUES

L'INVENTION du transistor en 1947, a profondément bouleversé les industries liées à l'électronique : celles de l'informatique, de l'automatique, des télécommunications en particulier. L'introduction des circuits intégrés, rassemblant dans un faible volume de matériau semiconducteur, des milliers de transistors a permis de créer des systèmes plus compacts, plus rapides, plus fiables et moins chers.

Une évolution très similaire

(fig. 1) s'est produite en optique : après la mise au point du laser, voici une quinzaine d'années, la découverte de dispositifs opto-électroniques (diodes électroluminescentes, diodes laser) et leur développement ont permis d'envisager la réalisation, à court terme, de systèmes de télécommunications optiques. A plus long terme, il est possible de concevoir un ensemble complet de transport d'informations utilisant des fibres optiques et dans lequel les dif-

férentes fonctions (émission, modulation, multiplexage, démultiplexage, amplification, réception) seront remplies par des circuits intégrés optiques (fig. 2).

### UNE OPTIQUE À GUIDES

Harold Osterberg est le « père de l'optique intégrée ». En collaboration avec L. W.

Smith, il utilisa dès 1964 un faisceau optique non-cohérent pour transmettre des images à la surface d'une feuille de verre.

Les travaux de recherches relatifs à l'« optique intégrée » ne débutèrent réellement qu'en 1968, dans quelques laboratoires très spécialisés : les Bell Laboratoriés, d'University of Washington, la California Institute of Technology et chez I.B.M. Une douzaine de chercheurs au total, s'intéressaient alors à cette

de communication, à chaque mode de propagation correspondra un canal de transmission ; pour exciter un mode particulier, il suffira d'introduire un faisceau laser dans le prisme coupleur suivant l'angle d'incidence convenable.

Dans une couche mince, d'un micron d'épaisseur, la lumière se réfléchit environ mille fois sur une distance de propagation d'un centimètre. Si les surfaces de réflexion ne sont pas parfaitement lisses et homogènes, des dissipations d'énergie lumineuse, par diffusion, se produiront à chaque réflexion totale. Si l'on désire que les pertes caractérisant le guide soient inférieures au décibel par centimètre, il est nécessaire qu'en chaque point de réflexion, les pertes soient elles-mêmes inférieures à 0,01 % ; le niveau de pertes exigé est dix fois plus faible que celui mesuré avec les meilleurs miroirs utilisés dans la technologie des lasers. Pratiquement, pour que la propagation soit bonne, le guide devrait posséder un niveau de perfection technologique qui s'avère encore aujourd'hui difficile à atteindre.

**DES COMPOSANTS OPTIQUES INTÉGRÉS : PRISMES, LENTILLES...**

Les bases d'un circuit optique intégré sont maintenant établies : la lumière se propagera, suivant certains modes dans des guides ; grâce à l'onde évanescente, des couplages sont possibles entre guides d'ondes. La vitesse de propagation dépend de l'épaisseur du guide : elle est d'autant plus grande que le guide est petit.

Un guide de petite épaisseur peut être connecté à un guide d'épaisseur plus grande par un guide intermédiaire d'épaisseur croissant de manière continue entre les

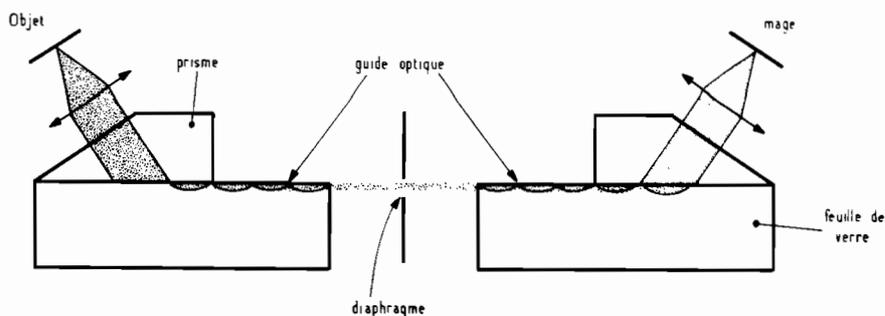


Fig. 3. - Le montage expérimental d'Harold Osterberg pour transmettre une image optique à la surface d'une feuille de verre.

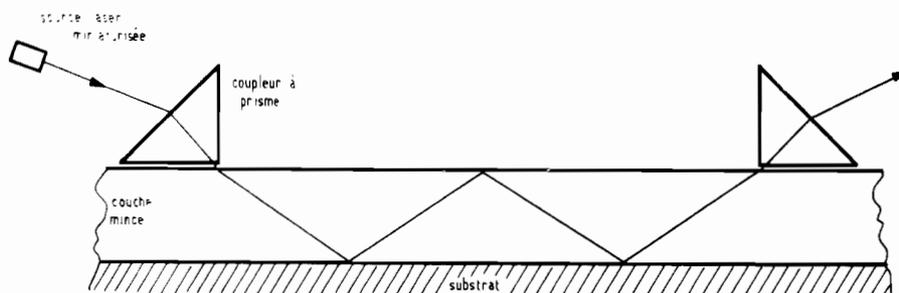


Fig. 4. - Un faisceau laser est introduit dans la couche mince diélectrique au moyen d'un prisme ; l'indice de réfraction de cette couche est supérieur à celui du substrat ce qui permet la propagation de la lumière par une succession de réflexions totales.

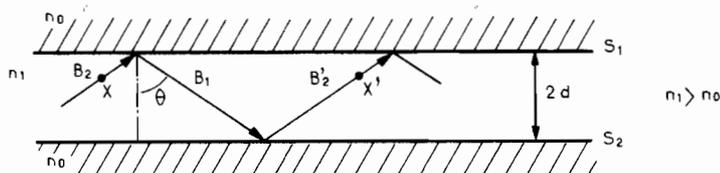
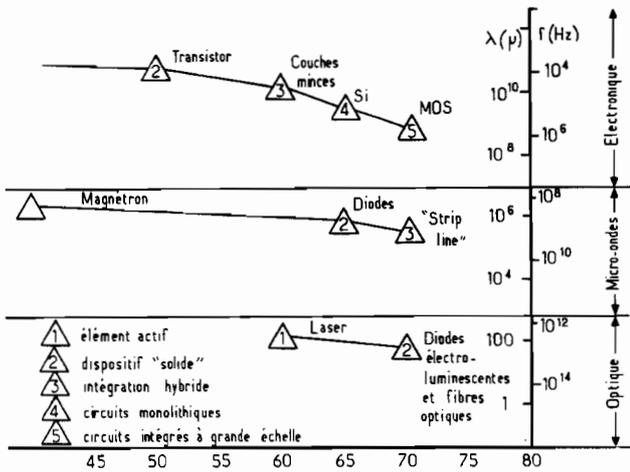
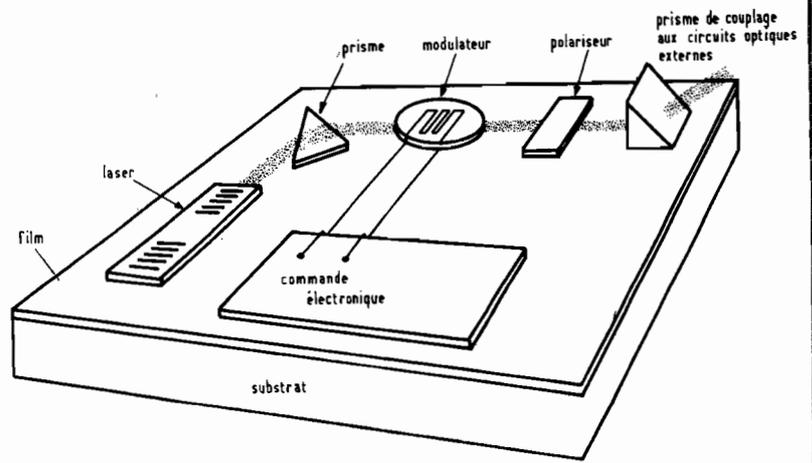


Fig. 5. - Guide d'onde formé par une couche d'indice supérieur aux indices des matériaux voisins. La propagation n'est possible que si deux points quelconques  $x$  et  $x'$  de la trajectoire, séparés par deux réflexions totales successives, sont en phase ou déphasés d'un multiple de  $360^\circ$ .



**Fig. 1. - Trois disciplines se partagent le secteur industriel de traitement et de la communication des informations : l'électronique basse-fréquence, les hyperfréquences et l'optique. Chacune de ces disciplines est concernée par une plage bien définie de longueurs d'ondes et de fréquences des signaux. Les évolutions technologiques de ces disciplines se ressemblent.**



**Fig. 2. - Un circuit optique complet comprend une source optique, un jeu de prismes et de miroirs, un modulateur commandé par un boîtier électronique, enfin un prisme de couplage du circuit avec les circuits extérieurs. Tout le circuit pourrait être réalisé en technologie « intégrée ».**

discipline. Rapidement cependant, d'autres chercheurs, d'autres laboratoires consacrèrent davantage d'efforts de recherches à l'optique intégrée et, lorsqu'en janvier 1972 fut organisé le premier symposium consacré aux circuits intégrés optiques quelque 150 chercheurs, venant de 11 pays, participèrent aux conférences données à cette occasion. Aujourd'hui, de nombreux laboratoires universitaires et industriels travaillent sur les circuits optiques intégrés : parmi ceux-ci figurent en France, les laboratoires du Centre National d'Etude des Télécommunications (CNET) et ceux de Thomson-C.S.F.

Le composant de base le plus simple que l'on puisse considérer en optique intégrée est le guide d'onde plan, constitué d'une couche mince d'un diélectrique transparent d'épaisseur mesurable en longueur d'onde optique, déposée sur un substrat d'indice plus faible. La lumière se propage dans cette couche par réflexion totale sur les parois suivant des angles discrets, qui correspondent aux différents modes de propagation

possibles dans ce guide (fig. 4).

Les sources de lumière, pour les guides d'onde plans peuvent être des lasers miniaturisés. Un « coupleur » sert à injecter le faisceau laser dans le film : plaçons par exemple, un prisme (fig. 4) à proximité de la couche mince diélectrique dans laquelle on désire injecter la lumière et envoyons un fin pinceau laser dans le prisme ; tel qu'il est monté, il se produit des réflexions totales dans le prisme, de sorte que la lumière sort du prisme par sa face d'entrée : le faisceau laser n'a donc pas été injecté directement dans la couche mince. Néanmoins, observons de plus près comment se déplace une onde lumineuse : au niveau microscopique, sa trajectoire peut être considérée comme un volume dont les bords ne sont pas bien nets ; les bords de ce volume sont « flous » et l'onde « s'évanouit » dans l'espace qui entoure la trajectoire. On dit pratiquement qu'il y a une « onde évanescente » autour de la trajectoire du faisceau laser ; dans l'espace situé autour du prisme où la réflexion totale se

produit, existe également une onde évanescente ; si l'incidence du faisceau laser pénétrant dans le prisme est convenable, l'onde évanescente, qui baigne aussi la couche mince, va pouvoir s'y propager. Il y a eu, dès lors, un couplage optique entre le prisme et la couche mince.

Le phénomène inverse peut aussi se produire : si une onde lumineuse se propage dans une couche mince, elle est accompagnée d'une onde évanescente sur ses bords ; un prisme situé à proximité de la couche mince pourra capter cette onde évanescente.

La lumière se propage, dans la couche mince, comme dans une fibre optique, par une succession de réflexions totales sur les parois. Considérons une onde se propageant dans un guide d'épaisseur  $2d$  et d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_0$  du matériau voisin (fig. 5) ; la propagation n'est possible que dans la mesure où deux points  $x$  et  $x'$  de la trajectoire en zig-zag, séparés par deux réflexions successives, sont en phase, ou déphasés d'un multiple de 360 degrés ; si ce n'est pas le cas, les ondes s'ajoutent

(mais attention, non au sens arithmétique de l'addition, mais au sens vectoriel), ce qui pratiquement signifie qu'il n'y a plus de propagation. En fait, il n'existe qu'un nombre discret de valeurs d'angles d'incidence - (ou de réflexion, ce qui revient au même) - du faisceau optique sur les surfaces  $S_1$  et  $S_2$  qui bordent un guide, pour lesquelles il y a effectivement propagation de la lumière. A chacun de ces angles correspond une trajectoire, chacune d'elles étant un « mode de propagation ». Chaque mode est caractérisé par une vitesse de propagation de la lumière.

L'onde évanescente, associée à l'onde dans le guide optique, se déplace dans le matériau voisin à la même vitesse que l'onde du guide. La profondeur de pénétration de l'onde évanescente dépend des indices des matériaux et des dimensions du guide d'onde.

C'est grâce à la possibilité de faire propager une onde dans un guide, et grâce à la présence d'une onde évanescente associée à celle-ci, que l'optique intégrée a pu être développée. Dans un système

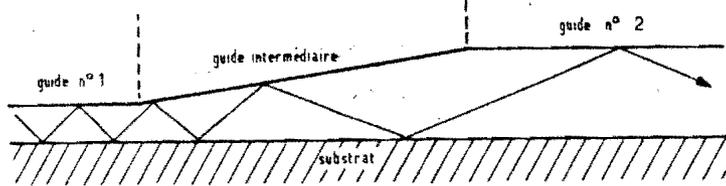
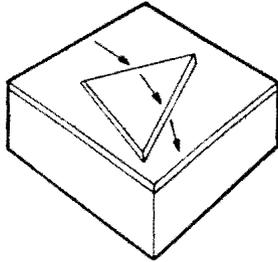
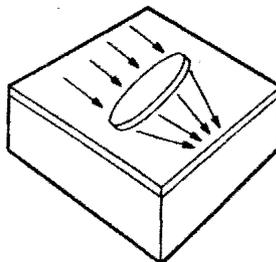


Fig. 6. - Il est possible de mettre bout à bout plusieurs guides d'onde d'épaisseurs différentes à condition de les relier par des guides intermédiaires dont l'épaisseur varie graduellement.



(a) prisme



(b) lentille

Fig. 7. - En faisant varier l'épaisseur d'une couche mince, on parvient à modifier la trajectoire initiale d'un faisceau optique : on reconstitue ainsi des composants optiques traditionnels.

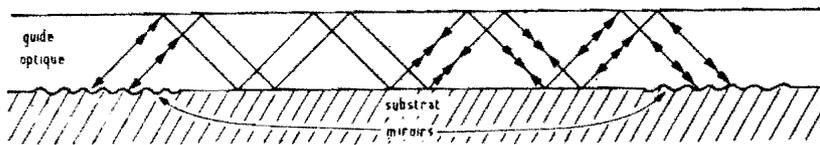


Fig. 8. - Un miroir en technologie intégrée peut être constitué par un réseau de diffraction, formé par exemple par 500 rainures dans le substrat, de 0,1 mm de largeur, et espacées l'une de l'autre par une demi-longueur d'onde. Ici deux miroirs sont placés de part et d'autre d'un guide optique ; si celui-ci renferme certains matériaux actifs luminescents, on pourra, de la sorte, réaliser un laser intégré.

#### PHOTO DE TITRE

Les futurs systèmes de télécommunication par laser contiendront des circuits intégrés optiques dont le rôle sera équivalent à celui des circuits intégrés électroniques des systèmes actuels de télécommunication. Ces circuits optiques seront chargés de réaliser des traitements d'informations optiques, par exemple au moyen de modulateurs électro-optiques en tantale-niobate de lithium. (Cliché R.C.A.).

épaisseurs des deux guides à relier ; la longueur de ce guide intermédiaire doit être relativement grande (plusieurs longueurs d'ondes) pour que le couplage entre les deux guides soit possible (fig. 6).

Dans le guide de grande épaisseur, la lumière va se propager moins vite que dans le guide de faible épaisseur ; or, dans les composants optiques discrets (prismes, lentilles optiques), ce phénomène de variation de vitesse

de propagation n'est observé que lors d'une variation de l'indice du milieu de propagation. Dans un circuit optique intégré, une variation d'épaisseur correspond donc à une variation d'un indice fictif du milieu diélectrique (appelé « indice effectif »). Dans ces conditions, il est possible de reconstituer dans le circuit intégré optique, l'effet de composants optiques classiques tels que prismes ou lentilles (fig. 7) : comme la lumière se propage moins vite à travers un tel composant formé d'une couche plus épaisse que le guide optique qui l'entoure, le faisceau optique subit une réfraction lorsqu'il pénètre ou s'échappe de cette couche épaisse, tout comme dans un composant discret traditionnel.

#### ... ET MIROIRS

De même, au moyen d'artifices spéciaux, il est possible de créer des miroirs au sein de circuits intégrés optiques. Il n'est guère possible d'utiliser un dépôt métallique, comme dans les miroirs conventionnels, car un tel dépôt aurait tendance à absorber la lumière plutôt que de la réfléchir. Par contre, on peut réaliser un réseau de diffraction, formé de rainures parallèles et régulièrement espacées, et qui se comportera comme un miroir (fig. 8).

Les réseaux vont prendre une place de choix dans les circuits intégrés optiques, car ils permettront de réaliser une foule de composants actifs ou passifs. Par exemple, deux réseaux-miroirs placés de part et d'autre d'un guide d'onde forment une cavité optique résonante ; si le matériau du guide est un matériau actif utilisé dans les lasers, l'onde qui se propage entre les deux miroirs sera amplifiée dans le guide. Le circuit réalisé sera lui-même un laser.

Marc FERRETI