

## **Lasers en optique intégrée**

E. Lallier

*Thomson-CSF, Laboratoire Central de Recherches, Domaine de Corbeville,  
91404 Orsay cedex, France*

### **1. INTRODUCTION**

L'étude des lasers guides d'ondes plans monomodes est actuellement un sujet en plein développement. De façon similaire aux fibres dopées aux terres rares, la faible dimension de la région guidée permet d'obtenir un gain important avec de faibles puissances de pompage. Comparativement aux fibres, la géométrie planaire offre potentiellement un certain nombre d'avantages: un plus haut degré d'intégration et l'accès aux propriétés caractéristiques de certains cristaux comme, par exemple, la possibilité de modulation ou de conversion de fréquence lorsque la matrice hôte est un cristal non-linéaire. Un grand nombre de matériaux et de techniques de fabrication font actuellement l'objet d'étude et nous allons passer en revue les récents progrès accomplis dans ce domaine. Après un bref historique nous aborderons successivement le cas des cristaux non-linéaires, des cristaux lasers usuels et des matrices vitreuses.

### **2. HISTORIQUE**

L'étude des lasers guides d'ondes dopés aux terres rares n'est pas à proprement parler très récente puisque le premier laser de ce type fut rapporté en 1972 par J.P. Van der Ziel et ses collaborateurs [1]. Ce laser était fabriqué à partir d'un substrat de YAG ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) sur lequel une couche guidante Ho:YAG était réalisée par épitaxie liquide. Plus tard, vers les années 1977-1980, les recherches s'orientèrent vers la possibilité de réaliser des lasers guidés à partir de matériaux stochiométriques dopés au Néodyme [2]. On cherchait alors à réaliser des lasers compacts et fiables pompés par des diodes électroluminescentes ou des diodes lasers vers  $0,8 \mu\text{m}$  et pouvant émettre vers  $1,32 \mu\text{m}$ , une région à faibles pertes et à minimum de dispersion pour les systèmes à fibres optiques. Avec la disponibilité, au début des années 1980, de diodes lasers AlGaAs monomodes transverses, fiables, bon marché et émettant quelques dizaines de milliwatts, les données changèrent considérablement. D'une part il fut rapidement établi que la puissance de ces diodes était suffisante pour pomper longitudinalement des lasers miniatures tel que Nd:YAG sans recourir à la géométrie guidée, un constat aujourd'hui d'autant plus valable que la puissance de ces diodes n'a cessé d'augmenter [3]. D'autre part, il fut aussi démontré que lorsque ces diodes étaient utilisées pour pomper des fibres dopées aux terres rares, des gains particulièrement importants pouvaient être obtenus. Les progrès impressionnants accomplis par la suite avec les

amplificateurs et les lasers à fibres, notamment avec l'amplificateur à fibre dopée Erbium, ont clairement signifié que l'intérêt pour les composants actifs guidés se portait sur cette géométrie. Cependant, en mettant à jour les avantages de la configuration optique guidée monomode, le succès des composants à fibres a aussi permis de relancer les recherches sur les lasers guides d'ondes à géométrie planaire.

### 3. LASERS GUIDES D'ONDES LINBO<sub>3</sub>

La configuration plane offre un certain nombre d'avantages comparé aux fibres. D'une façon générale, les guides dont les dimensions transverses sont de l'ordre de quelques microns pour assurer un fonctionnement monomode sont fabriqués à partir de substrats plans par des techniques classiques de microélectronique (photolithographie, dépôts, attaque, ...). Cette technique de fabrication permet de définir de façon précise des circuits optiques complexes (coupleurs, multiplexeurs, ...) et de fabriquer simultanément plusieurs composants [4].

Le substrat peut être un cristal non-linéaire comme LiNbO<sub>3</sub>. On peut dans ce cas commander les circuits optiques par effet électro-optique avec de faibles tensions appliquées au voisinage des guides. Cette propriété a d'ailleurs largement été exploitée depuis la fabrication des premiers guides d'ondes sur ce matériau, il y a plus de vingt ans, et de nombreuses fonctions optiques telles que la modulation ou la commutation ont été étudiées et sont aujourd'hui développées commercialement [5,6,7]. Les propriétés non-linéaires de LiNbO<sub>3</sub> permettent aussi de réaliser des opérations de conversion de fréquences optiques, tel que le doublage de fréquence. Le fort confinement de l'énergie lumineuse au sein des guides d'ondes permet là encore d'obtenir des interactions efficaces à partir de faibles puissances, notamment grâce aux techniques de quasi-accord de phase récemment développées sur ce matériau [8].

Ainsi, l'utilisation combinée des propriétés électro-optiques et non-linéaires de LiNbO<sub>3</sub> avec le gain des ions terres rares offre la possibilité de réaliser des composants lasers sophistiqués intégrés de façon monolithique. Il s'agit non seulement de l'intégration de fonctions intra-cavité permettant de contrôler le fonctionnement du laser (modulation, conversion de fréquence), mais aussi de fonctions intégrées extra-cavité pour le traitement du signal (modulation, multiplexage, ...). Une version amplifiée ou sans pertes d'insertion des composants optiques intégrés déjà développés serait aussi souhaitable.

L'oscillation laser a d'abord été obtenue à 1,08  $\mu\text{m}$  à partir de substrats de Nd:LiNbO<sub>3</sub>. Le guide d'onde monomode était réalisé par échange protonique et la cavité laser simplement constituée par deux miroirs diélectriques déposés sur les extrémités polies du guide. Avec un pompage à 0,81  $\mu\text{m}$ , le seuil d'oscillation était obtenu avec une puissance de pompage couplée dans la cavité de 1,5 mW [9]. Une version optimisée de ce laser a permis d'obtenir un seuil de 1,5 mW associé à un rendement de 50 %, soit environ 50 mW pour 100 mW de pompage, une puissance compatible avec les diodes AlGaAs monomodes actuelles [10]. L'intégration d'un modulateur de phase électro-optique à ondes progressives a permis de faire fonctionner le laser en régime de modes-bloqués (figure 1). Avec une puissance de pompage continu d'environ 50 mW et un signal hyperfréquence de 10 V, le laser émettait un train continu d'impulsions de 7 ps et 250 mW crête à un taux de répétition de 6 Ghz [11]. Par la suite, l'intégration d'un coupleur directif permettant la modulation des pertes intra-cavité a permis d'obtenir un fonctionnement en mode déclenché (figure 2). Des impulsions de 300 ps et d'environ 400 W crête ont pu être mesurées, à la limite du seuil de dommage optique du matériau (quelques GW/cm<sup>2</sup>). Cette source fut ensuite doublée en fréquence avec 15 % de rendement de conversion à l'aide d'un guide d'onde LiNbO<sub>3</sub> dont les domaines ferroélectriques étaient périodiquement inversés afin de réaliser un quasi-accord de phase [12]. Si la fonction de doublage de fréquence était réalisée avec un composant distinct dans cette expérience, il est possible en principe de l'intégrer dans la cavité laser et d'obtenir un rendement de conversion plus important. Ce type de composants pourrait aussi permettre la réalisation d'oscillateurs paramétriques miniatures.

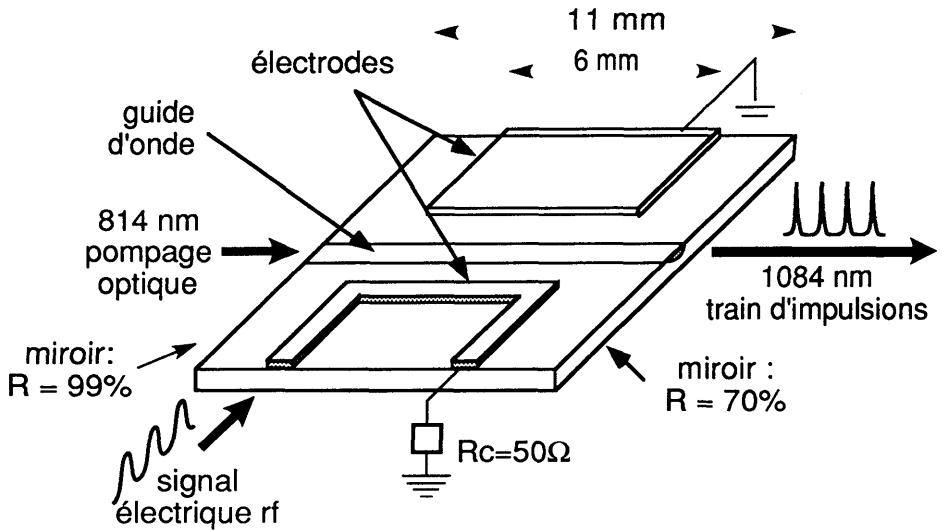


Figure 1 : Schéma d'un laser guide d'onde Nd:LiNbO<sub>3</sub> à modes-bloqués intégrant un modulateur de phase à ondes progressives (d'après la référence [11]).

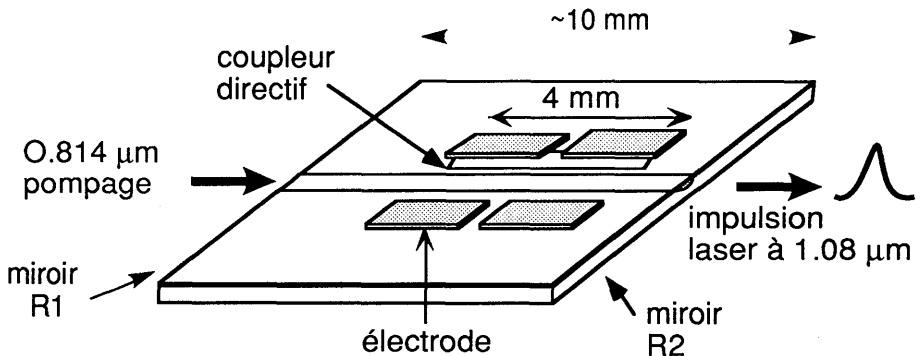


Figure 2 : Schéma d'un laser guide d'onde Nd:LiNbO<sub>3</sub> déclenché intégrant un modulateur d'amplitude intracavité (d'après la référence [12]).

Le succès des amplificateurs à fibres dopées Erbium a sans doute laissé entrevoir la possibilité de reproduire ces composants en configuration planaire. Les résultats encourageants obtenus à ce jour avec LiNbO<sub>3</sub> dopé Erbium montrent aussi certaines des limitations liées à la géométrie planaire. La longueur d'un guide (quelques centimètres) est plus de cent fois inférieure à celle d'un amplificateur à fibre typique. Cette faible dimension est imposée par la taille disponible des substrats et suppose l'utilisation de dopages en ions erbium beaucoup plus importants que dans le cas des fibres. Malheureusement le dopage disponible est limité, soit par la méthode de dopage, soit, et c'est en général le cas pour la transition à 1,5  $\mu\text{m}$  de l'erbium, par des problèmes de transferts d'énergie entre ions excités voisins conduisant à une diminution de l'efficacité [13]. De ce fait, le gain maximum mesuré vers 1,5  $\mu\text{m}$  est actuellement de l'ordre de 7 dB pour un guide de 5 cm alors qu'il est possible

d'obtenir des gains de 50 dB avec les fibres [14]. Cette valeur est malgré tout suffisante pour compenser les pertes d'insertion d'un grand nombre de composants optiques intégrés et devrait permettre de réaliser des composants lasers intégrant un nombre relativement important de fonctions. L'intégration devrait être en particulier facilitée par la possibilité de doper le substrat en couche mince. Cela a simplement été réalisé en diffusant une couche métallique de terre rare préalablement déposée par évaporation. Cette technique est intéressante à plusieurs égards. Elle permet tout d'abord l'utilisation de substrats non dopés de grandes dimensions et d'excellente qualité optique, la croissance de cristaux dopés équivalents étant plus délicate et plus longue, donc plus coûteuse. Toutefois, l'intérêt principal réside dans le fait qu'il devient possible d'intégrer des fonctions actives et passives du point de vue de l'amplification simplement en utilisant des techniques de photolithographie. Le premier laser Er:LiNbO<sub>3</sub> rapporté émettant à 1,53  $\mu\text{m}$  fut fabriqué suivant cette méthode [15]. D'autres lasers ont depuis été réalisés émettant à différentes longueurs d'ondes entre 1,53 et 1,6  $\mu\text{m}$ . Le pompage est effectué à 1,48  $\mu\text{m}$  et les seuils d'oscillations sont de l'ordre d'une dizaine de milliwatts, compatibles avec les diodes lasers développées pour les amplificateurs à fibre. Très récemment, un laser à modes-bloqués a été réalisé par intégration d'un modulateur de phase [16]. Ce composant était monté en boîtier avec fibres amorfes et pompé par une diode laser fibrée émettant à 1,48  $\mu\text{m}$ . Des impulsions de 4 ps ont pu être mesurées lorsque le composant fonctionnait à 3.8 GHz, la troisième harmonique de la fréquence aller-retour dans la cavité. Des résultats préliminaires concernant un laser accordable avec une plage d'accord de 16 nm ont aussi été rapportés [17]. L'élément clé est l'intégration d'un double filtre acousto-optique accordable permettant la conversion des ondes polarisées TE en ondes polarisées TM et réciproquement, sans introduire de glissement de fréquence sur un aller-retour dans la cavité (figure 3).

D'autres terres rares ont été diffusés dans LiNbO<sub>3</sub> et des lasers efficaces réalisés avec l'ion Nd<sup>3+</sup> à 1,08  $\mu\text{m}$  [18] et très récemment avec l'ion Yb<sup>3+</sup> (1,03  $\mu\text{m}$  et 1,06  $\mu\text{m}$ ) et l'ion Tm<sup>3+</sup> (1,8  $\mu\text{m}$ ) [19]. Enfin la matrice LiTaO<sub>3</sub> a aussi permis l'obtention de lasers dopés au néodyme avec ou sans diffusion du dopant [20,21].

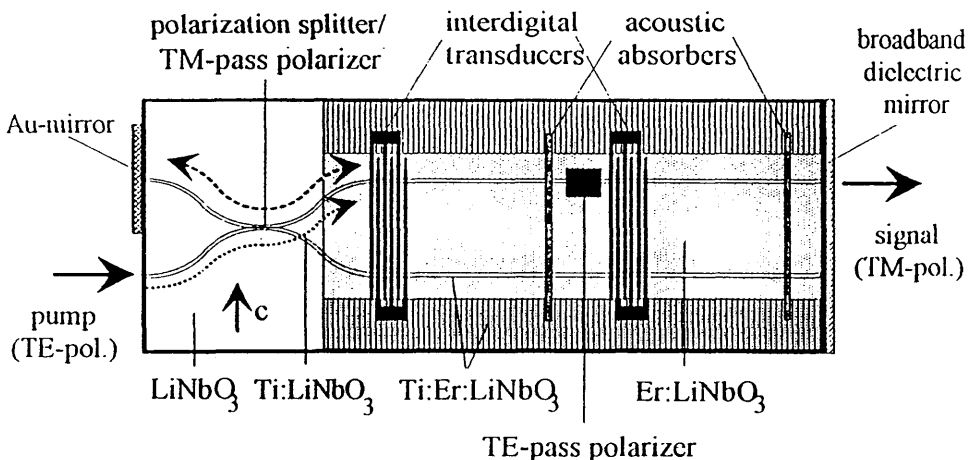


Figure 3 : Schéma d'un laser Er:LiNbO<sub>3</sub> accordable intégrant un double convertisseur acousto-optique TE-TM, des polariseurs croisés et un séparateur de polarisation servant de multiplexeur pour la pompe (d'après la référence [17]).

#### 4. AUTRES CRISTAUX LASERS

La croissance par épitaxie est une autre méthode permettant de réaliser un dopage en couche mince et de s'affranchir de l'utilisation de substrats dopés. Elle permet en outre de réaliser simultanément la couche guidante par l'adjonction d'autres dopants. Si la méthode n'est pas nouvelle [1], elle a permis récemment d'obtenir des résultats tout à fait intéressants avec le cristal de YAG. Des couches guidantes de Nd:YAG à très faibles pertes ( $< 0,1$  dB/cm) ont ainsi été obtenues par épitaxie liquide sur un substrat de YAG. Ces faibles pertes associées aux excellentes propriétés spectroscopiques de Nd:YAG ont conduit à des seuils d'oscillation inférieurs au milliwatt alors que le confinement guidé n'était réalisé que dans une seule direction [22]. Ce type de lasers a aussi été pompé transversalement avec une diode laser à ruban large. La configuration guidée permet aussi de diminuer considérablement le seuil d'oscillation des nombreuses transitions lasers du type 3 niveaux ou quasi-3 niveaux des ions terres rares. Ainsi avec un guidage dans une seule dimension, un seuil d'oscillation de 4 mW a été obtenu avec la transition à  $0,946 \mu\text{m}$  de Nd:YAG [23]. Cette valeur est inférieure à celle obtenue avec un laser miniature non guidé. Une réduction supplémentaire devrait être possible avec un confinement bidimensionnel. De même, une réduction d'un facteur 3 du seuil de la transition à  $1,03 \mu\text{m}$  de l'ion  $\text{Yb}^{3+}$  a été mesurée et un seuil inférieur à 100 mW récemment obtenu avec l'ion  $\text{Tm}^{3+}$  à  $2 \mu\text{m}$  [24,25].

La technique de croissance par épitaxie devrait pouvoir être applicable à d'autres matériaux. Un effort de recherche porte actuellement sur l'épitaxie de verres et cristaux fluorés à l'aide de différentes techniques (MBE, PVD, ...) [19]. Ces matériaux sont de bons candidats pour la réalisation de lasers visibles compacts à up-conversion. Une voie ambitieuse consiste à épitaxier certains de ces cristaux sur des substrats semi-conducteurs comme GaAs ou InP afin de pouvoir intégrer la source de pompage et le laser guide d'onde. La méthode par épitaxie n'a pas pour l'instant produit de guides lasers à confinement bidimensionnel. C'est pourtant dans cette configuration que l'on peut profiter au mieux de la géométrie guidée. Une voie possible, qui devrait limiter les pertes optiques ajoutées, est la réalisation de flancs à plus faibles indices par implantation ionique.

L'implantation ionique est une méthode de fabrication de guides d'ondes pouvant s'appliquer à une large gamme de matériaux lasers. Si les pertes optiques des guides couramment obtenus par implantation sont en général plus importantes qu'avec les autres méthodes mentionnées, typiquement supérieures à 1 dB/cm, des exemples de pertes inférieures à 0,2 dB/cm laissent entrevoir des améliorations possibles. L'implantation ionique a permis le fonctionnement laser dans un grand nombre de matrices dopées au néodyme dont YAG,  $\text{LiNbO}_3$ , YAP, GGG et BGO [26]. Des techniques de fabrication de guides bidimensionnels ont été développées pour permettre par exemple l'obtention de seuils d'oscillation d'environ 0,5 mW avec Nd:YAG [27].

Ces faibles valeurs sont encourageantes pour le fonctionnement laser avec pompage par diode de matériaux accordables et à faibles gains. Des guides d'ondes ont par exemple été réalisés sur du saphir et de l'alexandrite mais l'oscillation laser n'a pas encore été obtenue, probablement à cause de pertes à la propagation encore trop importantes. Ces pertes élevées sont en revanche moins importantes lorsqu'il s'agit des transitions 3-niveaux des terres rares. Pour un système à trois niveaux, un certain niveau de pompage est requis pour obtenir la transparence et compenser les pertes par réabsorption du niveau laser inférieur. Ces pertes initiales par réabsorption sont en général bien supérieures aux pertes du guide d'onde et l'intérêt du fort confinement guidé prend tout son sens. Le fonctionnement efficace d'un laser Yb:YAG a ainsi été rapporté avec un laser guide d'onde implanté confiné dans une seule dimension. Avec un pompage par diode à ruban large d'un watt (0,4 W absorbés) le laser émettait 0,3 W. Une telle efficacité est en partie due au faible écart entre la longueur d'onde de pompage ( $0,98 \mu\text{m}$ ) et celle du signal laser ( $1,03 \mu\text{m}$ ).

## 5. LASERS À MATRICES VITREUSES.

Si les lasers guides d'ondes à matrices cristallines offrent certains avantages comparativement aux lasers à fibres, la recherche ne s'est pas focalisée sur ce sujet pour autant et de nombreux groupes s'attachent à développer des composants à base de matrices vitreuses. L'optique intégrée sur substrats vitreux permet d'obtenir des composants passifs compatibles avec les systèmes à fibres, caractérisés par de faibles pertes à la propagation et potentiellement à faibles coûts [28]. L'absence de propriétés non-linéaires ne permet pas un contrôle des fonctions par effet électro-optique mais on sait réaliser des circuits résistifs à proximité des guides pouvant jouer le rôle de déphaseurs ou commander des commutateurs par effet thermo-optique avec des temps de réponse de l'ordre de la milliseconde. Il pourrait donc être intéressant de pouvoir disposer d'une version amplifiée de ces composants.

Deux approches du problème ont été utilisées. Une première consiste à utiliser des substrats de verres dopés pour lesquels une technique de fabrication de guides est déjà élaborée. L'augmentation de l'indice optique à la surface du substrat est réalisée par échange ionique (ions Ag ou  $\text{KNO}_3/\text{CaNO}_3$ ) éventuellement assisté par champ électrique. Les premiers résultats obtenus avec ce type de guides concernaient un laser sur substrat à base de silice dopé au Néodyme émettant à  $1,057 \mu\text{m}$  et caractérisé par un seuil de 30 mW et un rendement de 0,5% [29]. Un montage en cavité externe permettant l'insertion de composants optiques discrets a ensuite été utilisé pour démontrer divers modes de fonctionnement laser (modes-bloqués, déclenché, émission continue accordable et monofréquence) [30]. Un laser monofréquence monolithique intégrant un miroir de Bragg gravé a aussi été rapporté [31]. D'autres substrats comme les verres Phosphates ou le BK7 ont aussi permis la réalisation de lasers au Néodyme et l'émission vers  $1,54 \mu\text{m}$  a par la suite été obtenue avec du BK7 dopé Erbium avec un seuil d'environ 100 mW [32].

Un autre aspect de l'optique intégrée sur verre concerne des guides d'ondes réalisés par dépôt de couches minces de silice sur des substrats de silicium. Les couches de silice peuvent par exemple être obtenues par hydrolyse des composés  $\text{SiCl}_4$  et  $\text{PCl}_3$  dans une flamme d' $\text{H}_2\text{-O}_2$ . L'introduction de phosphore permet d'augmenter l'indice et d'obtenir des variations d'environ 1%. La présence du phosphore facilite aussi le dopage en terres rares en limitant la formation d'agrégats. On obtient par cette méthode des guides d'ondes dont les pertes sont particulièrement faibles (0,01 dB/cm) et il est possible de réaliser sur un substrat de quatre pouces, des structures enroulées longues de plusieurs dizaines de centimètres à l'aide de sections courbes. Cette technologie a été développée depuis quelques années et des composants passifs complexes et performants ont déjà été réalisés. On peut par exemple mentionner un coupleur d'accès en étoile de  $256 \times 256$  ou encore plus récemment une matrice de commutation  $16 \times 16$  [33,34]. Des composants lasers ont aussi été rapportés. Il s'agissait d'abord d'un laser dopé au Néodyme puis d'un laser dopé Erbium émettant vers  $1,5 \mu\text{m}$  [35]. Le dopage en ions Erbium est en pratique limité à environ 0,5 % par les phénomènes de transferts d'énergie déjà mentionnés mais un gain de 24 dB a néanmoins été obtenu avec un guide à structure enroulée d'une longueur de 35 cm [36]. Un amplificateur avec un multiplexeur intégré pour la pompe ( $0,98 \mu\text{m}$ ) et le signal ( $1,53 \mu\text{m}$ ) a aussi été rapporté [37]. Finalement, des composants lasers plus sophistiqués ont été réalisés comme par exemple un laser à cavité en anneau, un laser accordable à deux cavités couplées ou encore un laser monofréquence intégrant un réseau de Bragg photo-inscrit [38,39].

## 6. CONCLUSION

Au cours de cet article nous avons tenté de décrire les spécificités et les avantages potentiels des lasers guides d'ondes plans monomodes et brièvement passé en revue l'état de l'art dans ce domaine de recherches. Le lecteur intéressé trouvera dans les références indiquées de plus amples détails sur ces travaux. Les résultats obtenus jusqu'ici sont encourageants et devraient permettre dans un proche avenir la réalisation de composants encore plus sophistiqués. Ce

domaine d'étude a reçu un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique et notamment en France. Une école d'été consacrée à ce sujet a d'ailleurs récemment été organisée et le lecteur trouvera dans les actes correspondant (référence 19) un compte rendu récent et détaillé des différents champs d'investigation.

## Références

- [1] Van der Ziel J.P., Bonner W.A., Kopf L. and Van Uitert L.G., *Physics Letters*, **42 A**, (1972) 105-106
- [2] Nakano J., Kubodera K., Miyazawa S., Kondo S. and Kiozumi H., *J. Appl. Phys.*, **50**, (1979) 546-6548
- [3] Fan T. Y. and Byer R. L., *IEEE J. Quantum. Electron.*, **24**, (1988) 895-912
- [4] Fiber and Integrated Optics, Nato Advanced Study Institute Series, Series B : Physics, **41 Plenum Press**, New York, (1979)
- [5] Syms R. R. A., *Optical and Quantum Electronics*, **20**, (1988) 189-213
- [6] Sohler W., *Thin Solid Films*, **175**, (1989) 191-200
- [7] Papuchon M., Bourbin Y. and Vatoux S., *revue technique Thomson-CSF*, **15**, n° 3, (1983) 621-638
- [8] F. Armani, thèse de doctorat, "Génération de seconde-harmonique par quasi accord de phase dans les guides d'ondes niobate et tantalate de lithium", 19 Juin 1992, Université de Nice
- [9] Lallier É., Pocholle J.P., Papuchon M., Grezes-Besset C., Pelletier É., De Micheli M., Li M. J., He Q. and Ostrowsky D. B., *Electron. Lett.*, **25**, (1989) 1491-1492
- [10] Lallier É., thèse de doctorat, "Lasers guides d'ondes dans le niobate de lithium dopé néodyme", 16 Décembre 1992, Université de Paris-Sud
- [11] Lallier É., Pocholle J.P., Papuchon M., De Micheli M., He Q., Ostrowsky D.B., Grezes-Besset C., and Pelletier É., *Electron. Lett.*, **27**, n° 11, (1991) 936-937
- [12] Lallier É., Papillon D., Pocholle J.P., Papuchon M., De Micheli M. and Ostrowsky D.B., *Electron. Lett.*, **29**, n° 2, (1993) 175-176
- [13] Delevaque É., Georges T., Monerie M., Lamouler P. and Bayon J.F., *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5**, n°1, (1993) 73-75
- [14] Becker P., Brinkmann R., Dinand M., Sohler W., and Suche H., "Erbium-doped integrated optical amplifiers and lasers in lithium niobate", in *Optical Amplifiers And Their Applications*, (OSA Digest Series 1992), pp. 109-112
- [15] Brinkmann R., Sohler W., and Suche H., "Continuous-wave erbium-diffused LiNbO3 waveguide laser", *Electron. Lett.*, **27**, n° 5, (1991) 415-417
- [16] Bosso S., Carmannini C., Corsini R., Suche H., Wessel R., Westenhöfer S. and Sohler W., "Harmonically Modelocked Ti:Er:LiNbO3 Waveguide Laser", in proceedings of ECOC'94, European Conference on Optical Communication, Sept. 25-29, 1994, Firenze, Italy, Vol. 1, pp. 353-356
- [17] Baumann I., Johlen D., Sohler W., Suche H. and Tian F., "Acoustically Tunable Ti:Er:LiNbO3-Waveguide Laser", in proceedings of ECOC'94, European Conference on Optical Communication, Sept. 25-29, 1994, Firenze, Italy, Postdeadline paper, pp. 99-102
- [18] Haruna M. et al., "Efficient laser oscillation in thermally Nd-diffused MgO:LiNbO3 singlemode waveguides", *Electron. Lett.*, **30**, n°5, (1994) 412-413
- [19] voir les actes de l'école de physique des Houches " Guides d'ondes optiques dopés terres rares", 12-23 Juin 1994, Les Houches, France. Contact: Bernard Jacquier, Laboratoire de Physique des Matériaux Luminescents, Université Claude Bernard-Lyon I.
- [20] Sanford N.A., Aust J.A., Malone K.J. and Larson D.R., *Optics Letters*, **17**, n° 22, (1992) 1578-1580
- [21] Nouh S., Baldi P., de Micheli M., Monnom G., Ostrowsky D.B., Lallier É. and Papuchon M., *Electron. Lett.*, **28**, n°25, (1992) 2337-2338
- [22] Chartier I., Ferrand B., Pelenc D., Field S.J., Hanna D.C., Large A.C., Sheperd D.P. and Tropper A.C., *Optic Letters*, **17**, (1992) 810

- [23] Hanna D.C., Large A.C., Sheperd D.P., Tropper A.C., Chartier I., Ferrand B. , and Pelenc D., *Appl. Phys. Lett.* , **63** (1), (1993) 7-9
- [24] Pelenc D., Chambaz B., Chartier I., Ferrand B., Hanna D.C., Large A.C., Sheperd D.P. and Tropper A.C., " First laser operation at 1,03  $\mu\text{m}$  of an epitaxially grown Yb:YAG waveguide", European Conference on Integrated Optics, in proceedings of ECIO'93, Neuchâtel, Switzerland, April 18-22, 1993, pp 3-8
- [25] Sheperd D.P. et al., " Epitaxial Tm:YAG waveguide lasers at 2  $\mu\text{m}$  and upconversion fluorescence in the blue and uv regions", Conference on Lasers and Electro-Optics, in proceedings of CLEO/EUROPE'94, August, 1994, Amsterdam, Netherlands, postdeadline paper, pp. 15-17
- [26] Chandler P.J. , Field S.J. , Hanna D.C. , Sheperd D.P. and Townsend P.D. , *Electron. Lett.*, **25**, n°15, (1989) 985-986
- [27] Field S.J., Hanna D.C., Large A.C., Sheperd D.P., Tropper A.C., Chandler P.J., Townsend P.D. and Zhang L., *Electron. Lett.*, **27**, n°25, (1991) 2376-2377
- [28] Ramaswamy R. V. and Srivasta R., *J. Lightwave Technol.*, **6**, n°6, (1988) 984-1002
- [29] Sanford N. A., Malone K. J., and Larson D. R. , *Opt. Lett.* , **15**, n°7, (1990) 366-368
- [30] Sanford N. A., Malone K. J., and Larson D. R., *Opt. Lett.*, **16**, n°14, (1991)1095-1097
- [31] Roman J.E. and Winick K.A., *Appl. Phys. Lett.*, **61**, (1992) 2744
- [32] Feuchter T., Mwarania E.K., Wang J., Reekie L. and Wilkinson J.S., *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **4**, n°6, (1992) 542-544
- [33] Okamoto K. and Kawachi M., " Recent progress in silicon based integrated waveguide devices", in Integrated Photonics Research Technical Digest, 1993 (Optical Society of America, Washington, D.C., 1993), pp. 280-283
- [34] Okuno M., Katoh K., Suzuki S., Ohmori Y. and Himeno H., "Strictly nonblocking 16x16 matrix switch using silica-based planar lightwave circuits", in proceedings of ECOC'94, European Conference on Optical Communication, Sept. 25-29, 1994, Firenze, Italy, Postdeadline paper, pp. 83-86
- [35] Kitagawa T., Hattori K., Shimizu M., Ohmori Y. and Kobayashi M., *Electron. Lett.*, **27**, n° 4, (1991) 334-335
- [36] Kitagawa T., Hattori K., Shuto K., Oguma M., Temmyo J., Suzuki S. and Horiguchi M., ECOC'93, Proceedings of European Conf. Opt. Commun., 1993, ThC12
- [37] Hattori K., Kitagawa T., Oguma M., Ohmori Y. and Horiguchi M., OFC'94, Proceedings of Opt. Fiber Commun., 1994, FB2, pp. 280-281
- [38] Oguma M., Kitagawa T., Hattori K. and Horiguchi M., *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **6**, n° 5, 1994
- [39] Kitagawa T. et al. , *Electron. Lett.* , **30**, n°16, (1994) 1311-1312