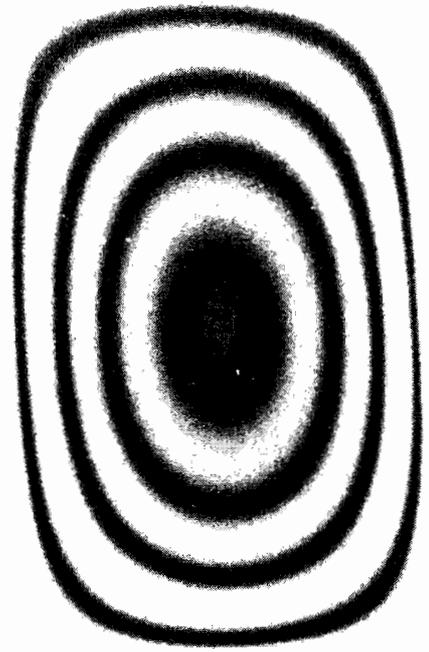


LES LASERS



Marc FERRETTI

TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES: des sources mieux adaptées

DEPUIS l'invention du laser en 1960, l'utilisation de la lumière pour la transmission des informations a fait l'objet de nombreux travaux dans le monde entier. On ne s'est pas seulement préoccupé des lasers oscillants sur différentes fréquences optiques, de l'ultraviolet à l'infrarouge, mais on a aussi étudié des systèmes de modulation, de détection, de commutation, de doublage de fréquence, etc.

La plupart des études ont porté sur le milieu de propagation. Très vite on s'aperçut que l'atmosphère est un milieu très perturbateur pour la propagation des faisceaux lumineux. Sauf dans les cas très spécifiques des liaisons spatiales ou à très courtes distances, la propagation de la lumière doit être protégée et

on est confronté ainsi au problème du guidage de la lumière. Le guidage par fibres diélectriques semble être

aujourd'hui le mode le plus prometteur ; la mise au point dès 1970, de fibres à très faible atténuation (moins de

20 dB/km) a suscité un très grand effort de recherches sur les fibres de verre (en France, particulièrement au C.N.E.T.) et l'on dispose aujourd'hui de fibres dont l'atténuation descend jusqu'à 2 dB/km.

Il est assez paradoxal de constater que les télécommunications optiques initialement imaginées pour des débits d'informations très élevés (supérieurs au gigabit par seconde), trouvent aujourd'hui des applications pour des débits beaucoup plus faibles (quelques mégabits par seconde). C'est parce que l'on trouve aux fibres optiques des avantages par rapport aux fils et câbles coaxiaux classiques : ainsi, le faible encombrement et le faible poids des fibres optiques sont autant d'avantages dans les installations à bord des avions et des navi-

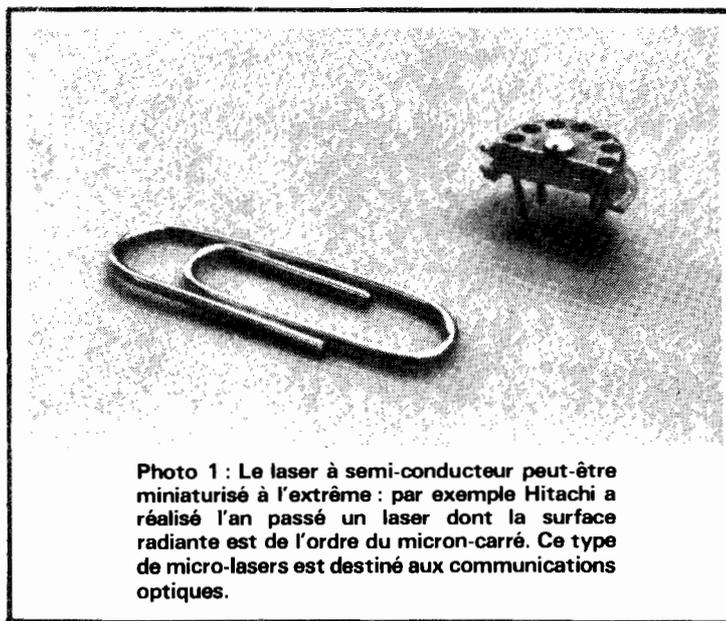


Photo 1 : Le laser à semi-conducteur peut-être miniaturisé à l'extrême : par exemple Hitachi a réalisé l'an passé un laser dont la surface radiante est de l'ordre du micron-carré. Ce type de micro-lasers est destiné aux communications optiques.

res ; en outre, s'ajoute le fait que les fibres optiques sont insensibles au brouillage électromagnétique. D'autres applications paraissent intéressantes : liaisons entre ordinateurs, télémesures...

DE NOMBREUSES SOURCES, POUR LES COMMUNICATIONS OPTIQUES

Au moins quatre films offrent déjà sur le marché commercial, des systèmes complets de communication optique : il s'agit de Metrologic Instruments Inc., American Laser Systems Inc., International Lasers Systems Inc. et Data Optics Corp. Une douzaine d'autres firmes industrielles commercialisent des sous-ensembles pour des liaisons par laser.

Aux Etats-Unis, les Bell Telephone Laboratories ont évalué que si seulement 10 % des abonnés au téléphone envisageaient de souscrire un abonnement au système de visiophone (téléphone + télévision) « Picturephone », il faudrait accroître d'un facteur 20 la capacité des liaisons par visiophonie ! C'est pourquoi, aux Bell Telephone Laboratories, les recherches sur les communications optiques sont poursuivies « fiévreusement » selon l'expression de J.S. Cook, chef des recherches sur les systèmes optiques chez Bell.

En France, de semblables recherches sont menées au C.N.E.T., chez Thomson-CSF, et aux Laboratoires de Marcoussis.

Plusieurs types de lasers peuvent être utilisés pour les communications optiques.

Pour les communications « non guidées », s'effectuant directement à travers l'atmosphère, plusieurs expériences ont été menées avec des lasers à anhydride carbonique. Ainsi, aux laboratoires de recherches Siemens, un laser à CO₂ dont le faisceau est modulé par un modulateur en arsénium de gallium, sert dans un système de commu-

nications atmosphériques d'une portée de 5 km. Aux U.S.A., le laboratoire de recherches Hughes a réalisé pour l'Army Electronics Command un semblable communicateur optique, avec un modulateur en tellure de cadmium ; la portée de ce système est d'environ 8 km.

Deux autres systèmes de communications à grande capacité ont été développés respectivement par Lockheed Aircraft Corp et par Mc Donnell Douglas Corps., à partir de lasers à grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme (lasers YAG) ; le faisceau émis dans la proche infrarouge subit un doublement de fréquence puis il est modulé au moyen d'un cristal de tantalate de lithium.

Metrologic dispose d'un système de communications à laser à hélium-néon pouvant être modulé par des signaux analogues et digitaux ; il peut être utilisé pour la transmission d'informations sur de courtes distances ; la faible puissance du faisceau (quelques milliwatts) limite la portée utile de l'ensemble.

Des systèmes de communications par fibres optiques sont déjà opérationnels. Par exemple l'U.S. Naval Air Systems remplace 1 450 m de fils, dans un avion militaire type A7 par 250 m de fibres optiques ; par ailleurs, l'U.S. Naval Electronics Center a installé un système de communications par fibres à bord de l'un des navires de la

sixième flotte : chaque câble de communication contient 300 fibres de 62,5 microns d'épaisseur.

Gain de masse et de volume, insensibilité au brouillage, immunité aux radiations nucléaires : tels sont les avantages militaires essentiels offerts par les communications optiques. C'est pour tirer parti de ces avantages que la Royal Aircraft Establishment, en Grande-Bretagne, a demandé à Marconi-Elliott de lui fournir un ensemble complet de communications ; de même, Boeing envisage d'installer des interconnexions optiques, conçues à partir de diodes électroluminescentes, pour la transmission de données aux missiles.

Pour la plupart des systèmes de communication, que ce soit par fibres ou à travers l'atmosphère, la meilleure source cohérente paraît être le laser à semi-conducteur. Il est en effet compact et son rendement est relativement élevé ; il en existe de trois types : lasers à simple hétérostructure, à double hétérostructure et à grande cavité optique. Les lasers à double hétérostructure peuvent fonctionner en régime continu car le courant minimal à partir duquel on observe l'effet laser est relativement bas (2 000 A/cm², voire moins de 1 000 A/cm²). Les lasers à simple hétérostructure sont encore caractérisés par des courants de seuil élevés et ne

peuvent ainsi pas travailler en régime continu.

Le laser à grande cavité optique constitue un compromis entre les deux types précédents : il s'agit d'un laser à double hétérostructure modifié, contenant une couche épaisse d'arsénium de gallium GaAs de type n, adjacente à une couche de GaAs de type p. La couche de type n possède un indice optique voisin de celui de la couche de type p ; cette propriété permet à la radiation émise dans la couche de type p de se propager dans la cavité optique formée par la couche de type n.

Chacun de ces lasers peut être utilisé pour les communications optiques : pour les liaisons atmosphériques à longue portée, le laser à simple hétérostructure constitue un bon choix bien que le laser à grande cavité optique offre la possibilité d'une plus grande capacité de transmission d'informations. Pour les communications par fibres, le laser à double hétérostructure est le meilleur choix ; on a également envisagé d'utiliser des lasers YAG pour ce cas d'application.

Néanmoins, ce n'est pas entre le laser en semi-conducteur et le laser YAG que la compétition pour les communications optiques se joue, mais c'est entre le laser en semi-conducteur et la diode électroluminescente. Celle-ci est bon marché, peut émettre un faisceau optique (non cohé-

**TABLEAU 1
LASERS EN SEMICONDUCTEURS**

	Simple hétérostructure	Double hétérostructure	Grande cavité optique
Courant minimal (A/cm ²)	8 000	2 000	2 000
Puissance maximale (watts)	24 à 80	0,5	1,5
Fonctionnement continu à la température ambiante ?	non	oui	oui
Disponibilité commerciale ?	oui	non	oui, mais en fonctionnement pulsé

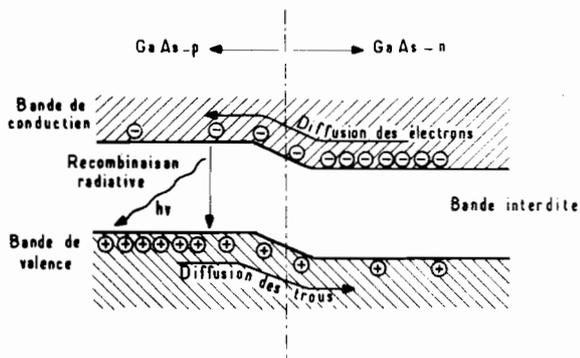


Fig. 1. - Une diode électroluminescente polarisée en direct : près de la jonction, il se forme un excès de trous et d'électrons par rapport à l'équilibre ; cet excès donne naissance à des recombinaisons radiatives et une émission de lumière.

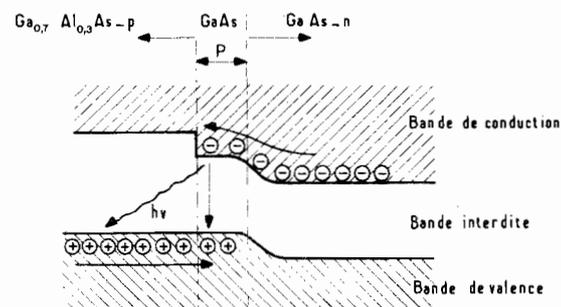


Fig. 2. - Simple hétérojonction. Les électrons injectés depuis le GaAs-n sont confinés en GaAs-p, à cause de la discontinuité de la bande de conduction. Il en résulte que l'épaisseur du volume actif est celle de la couche en GaAs-p, alors que pour une homojonction elle est déterminée par la longueur de diffusion des électrons.

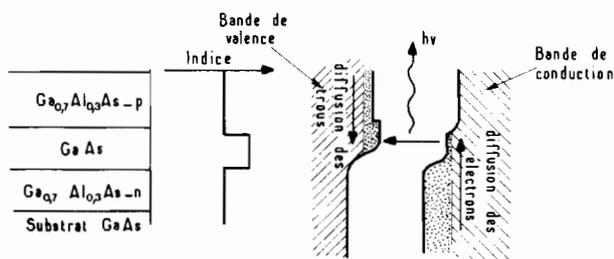


Fig. 3. - Laser à double hétérostructure.

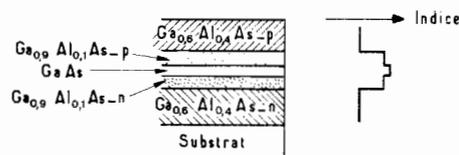


Fig. 4. - Lasers à confinements séparés.

rent continu dont la puissance atteint 100 mW ; son courant de seuil est d'environ 100 A/cm².

La firme American Laser Corp emploie des diodes électroluminescentes dans son système de transmission optique dénommé « 732 » ; elles travaillent, à 35 MHz, avec des fibres optiques dont la longueur est de 30 m au plus. Cette même firme utilise des lasers en semi-conducteur dans un système atmosphérique de communication, le modèle « 736 » dont la portée est de 8 km.

VENONS-EN AUX SOURCES EN SEMI-CONDUCTEUR

Pour expliquer de nombreux phénomènes de conduction électronique dans les semi-conducteurs, on a introduit la « théorie des bandes » : un électron se trouve normalement dans la bande de valence, mais s'il reçoit de l'énergie supérieure à un certain seuil d'énergie, l'électron

sautera dans la bande de conduction ; la bande interdite sépare la bande de valence de la bande de conduction. Un électron ne peut pas se trouver dans la bande interdite.

On peut très bien imaginer un électron enfermé dans le carcan du maillage cristallin formant le solide : il se trouve dans la bande de valence. Si on fournit de l'énergie au solide (en le chauffant par exemple), l'électron reçoit en partie cette énergie et va avoir tendance à la restituer, sous forme mécanique par exemple. Si l'énergie apportée est suffisamment grande, et est supérieure à la largeur de la bande interdite, l'électron brisera son carcan et ira se perdre dans le nuage électronique qui se déplace librement à travers le cristal. L'électron sera dès lors dans la bande de conduction.

Mais en sautant ainsi d'une bande à l'autre, l'électron laissera un « vide » dans le maillage cristallin : c'est un « trou » de la bande de valence. L'électron transporte

une charge négative : le trou sera donc positif par manque d'une charge négative.

Lors de son déplacement libre dans le cristal, au sein du nuage électronique, notre électron peut éventuellement rencontrer un tel état libre de la bande de valence. L'électron va dès lors « tomber dans le trou » ; la transition par laquelle un électron redescend de la bande de conduction à la bande de valence est appelée « recombinaison d'une paire électron-trou ». Cette recombinaison peut s'effectuer éventuellement avec émission d'un photon et l'on parle de recombinaison radiative. Cette émission peut être spontanée ou stimulée par un événement extérieur.

Considérons donc une jonction p-n (fig. 1) réalisée dans un seul matériau (c'est une homojonction) et polarisons-la dans le sens direct. Les trous qui sont majoritaires dans la région p diffusent vers la région n, de même un courant d'électrons diffuse de la partie n vers la partie p. Au

voisinage de la jonction, on trouve ainsi simultanément des électrons et des trous en excès par rapport à l'équilibre ; leur recombinaison sera radiative ; on observe dès lors l'émission de rayonnement dans une diode électroluminescente.

Certaines jonctions ne sont pas « recombinantes ». Néanmoins on peut les utiliser dans des systèmes radiatifs : on utilise des « hétérojonctions » constituées de matériaux différents, pour injecter des porteurs de charges (électrons et trous) dans une région où la recombinaison est possible. Cette possibilité est remplie avec les couples formés d'arséniure de gallium (GaAs) et d'arséniure de gallium-aluminium (AlGaAs).

La différence de largeur de bande interdite de ces deux matériaux donne naissance à une discontinuité (fig. 2) de la bande de conduction à l'interface du couple GaAs/AlGaAs ; cette discontinuité agit comme barrière de potentiel et prévient la diffu-

sion des électrons au-delà de l'interface. Le volume actif est alors confiné à la couche intermédiaire.

La double hétérojonction associe l'effet du confinement des paires électron-trou injectées, à un confinement de l'onde émise par la différence des indices de réfraction entre les couches de GaAs et de GaAlAs (fig. 3).

Des structures encore plus élaborées ont été proposées, dans lesquelles les fonctions de confinement des porteurs de charge électronique et de confinement de l'onde électromagnétique sont séparées (fig. 4).

La différence entre une diode électro-luminescente et une diode laser réside dans la manière dont la lumière émise dans la zone active est utilisée. Pour une diode électro-luminescente, le rayonnement est émis perpendiculairement à la zone active ; une diode laser comporte toujours, en plus de la zone active, une cavité optique constituée par deux faces clivées perpendiculaires au plan de la zone active (fig. 5).

Les premiers lasers à semi-conducteurs à jonction p-n ont été réalisés en 1962 par diffusion de zinc dans du GaAs du type n ; pour ces diodes à homojonction, de très forts courants étaient indispensa-

bles : les densités minimales de courant étaient de l'ordre de 100 kA/cm² à la température ambiante ; malgré leur faible surface (0,0003 cm²), elles ne pouvaient fonctionner en continu à l'ambiante. En améliorant la qualité des matériaux et la technique de mise en œuvre, le seuil de densité de courant a été abaissé à 30 kA/cm². L'emploi d'une simple hétérojonction a permis de ramener à 10 kA/cm² la densité de seuil ; avec les doubles hétérojonctions, il a été possible d'abaisser encore (moins de 1 000 A/cm²) le seuil de la densité de courant : une diode laser à double hétérostructure peut ainsi fonctionner en continu à la température ambiante.

Pour réduire la surface active des diodes laser, et faciliter le fonctionnement continu, on a proposé diverses structures « ruban » (fig. 6, 7) permettant de réduire la résistance thermique de la diode.

DES DIODES ELECTRO LUMINESCENTES POUR LES FIBRES OPTIQUES

Les diodes réalisées actuellement ont une structure plane ; cette dernière techno-

logie utilise très médiocrement le rayonnement émis. On s'est donc attaché à accroître le rendement d'émission des diodes électro-luminescentes et permettre leur emploi dans les télécommunications optiques.

Ainsi, W. N. Carr a fabriqué voici dix ans, une diode en GaAs surmontée d'une calotte sphérique.

Plus récemment, C.A. Burrus a conçu une géométrie de diode spécialement adaptée aux communications par fibres (fig. 8).

Les diodes électro-luminescentes sont des émetteurs de lumière non-cohérente : ils émettent dès lors sur de nombreux modes spatiaux. Il convient dans ces conditions de les associer à des fibres multimodes. Le couplage diode-fibre est relativement aisé avec la diode de Burrus (fig. 8) dont la zone émissive est plaquée contre la face d'entrée de la fibre optique.

Les diodes utilisant comme matériau de base de l'arséniure de gallium-aluminium, émettent, selon la teneur en aluminium de ce composé ternaire, dans la plage de longueurs d'onde comprises entre 0,75 et 0,90 μ . Cette plage correspond justement à une zone de faible absorption de la lumière dans les fibres ; les fibres en silice présentent

aussi de faibles taux d'absorption dans la proche infrarouge, au voisinage de 1 à 1,1 μ : ainsi les diodes émettant dans cette dernière région peuvent également être utilisées ; c'est le cas en particulier des diodes en arséniure de gallium-indium qui émettent à la longueur d'onde de 1,05 μ .

Dans certaines diodes, on observe simultanément une émission spontanée et une émission stimulée : ces diodes présentent une radiance relativement élevée et la largeur spectrale de leur faisceau est sensiblement plus faible que celle des diodes électro-luminescentes. Des diodes électro-luminescentes en arséniure de gallium, travaillant dans ce mode intermédiaire entre la diode incohérente et le laser, ont été étudiées en 1970 par L.N. Kurbatov ; celui-ci appela ce type de composants, des diodes superluminescentes (fig. 9). D'autres diodes superluminescentes ont été réalisées au cours de ces dernières années, dans des structures relativement sophistiquées (double hétérostructure). Le faisceau émis est incohérent, comme celui d'une diode électroluminescente, il présente une polarisation optique ; de faibles largeurs spectrales ont été obtenues (20 angströms).

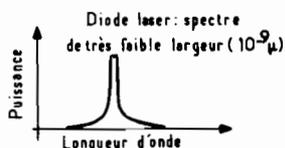
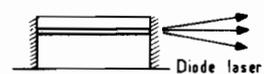
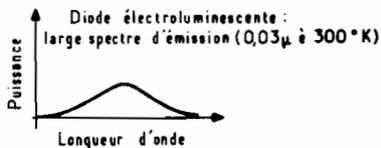
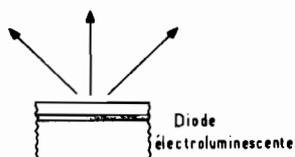
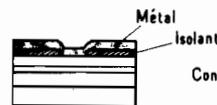


Fig. 5. - Diodes émettrices de lumière.



Métal
Isolant
Contact masqué par un diélectrique



Méso découpée par attaque chimique



Diffusion p
Ruban obtenu par diffusion de zinc dans une couche de type n



Implantation de protons à 300 keV pour rendre isolant le GaAs en dehors du ruban

Fig. 6. - Structures de ruban.

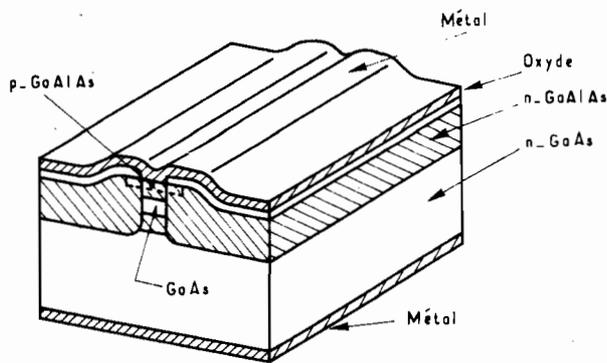


Fig. 7. - Pour réduire le courant traversant une diode laser, Hitachi Ltd a développé une technologie dans laquelle la zone émissive est réduite à la dimension d'un filament : épaisseur : 0,5 micron, largeur : 0,5 à 2 microns, longueur : 400 microns.

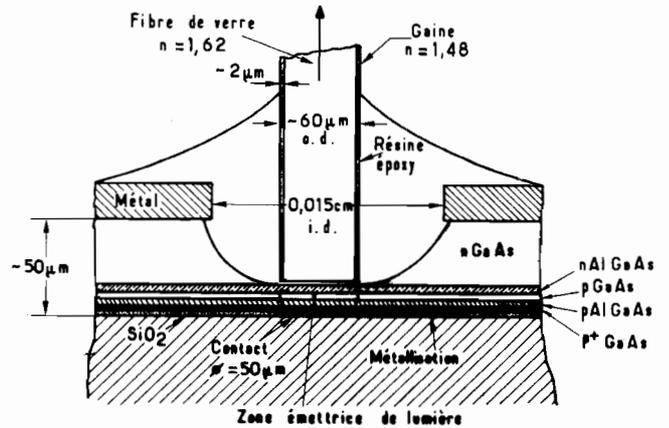


Fig. 8. - La diode électroluminescente de Burrus et son couplage à une fibre optique.

LA DIODE LASER POUR LES FIBRES MONOMODES

Les lasers en semi-conducteur sont exceptionnellement bien adaptés pour les transmissions par fibres optiques : ils sont compacts, leur rendement est élevé, et ils peuvent être pompés et modulés simplement et directement par le courant injecté. Parmi toutes les technologies étudiées pour ces lasers, seule celle relative à la double hétérostructure obtenue par épitaxie en phase liquide paraît

être la plus prometteuse. Ces lasers émettent leur faisceau cohérent dans la plage de longueurs d'onde comprise entre 0,75 et 0,9 μ , où les pertes dans les fibres sont faibles (fig. 10).

L'un des problèmes posés par les lasers à injection réside dans l'obtention d'un mode unique de fonctionnement : les structures de ruban.

Le couplage de lasers en semi-conducteur aux fibres ne pose pas de problèmes fondamentaux, en particulier dans le cas des fibres multimodes. Le couplage à des fibres monomodes est cependant moins aisé car la section

droite d'un faisceau monomode est elliptique, alors que la fibre possède un cœur circulaire : un transformateur de mode (lentille cylindrique par exemple) est donc nécessaire pour que l'efficacité du couplage soit satisfaisante.

La durée des recombinaisons radiatives des porteurs de charges dans le GaAs et dans l'AlGaAs est très faible : de l'ordre de la nanoseconde dans l'arséniure de gallium et quelques nanosecondes dans l'arséniure de gallium-aluminium ; l'émission stimulée réduit cette durée. Les lasers à injection peuvent ainsi être directement modulés à

grande vitesse par le courant injecté.

LE LASER YAG ET LES COMMUNICATIONS PAR FIBRES

Le laser YAG peut être utilisé pour les transmissions par fibres optiques : il émet sur la longueur d'onde de 1 064 μ , correspondant à l'une des régions de faible perte de fibres en silice ; en outre, il est relativement aisé d'obtenir un faisceau monochrome et monomode avec un laser YAG ; enfin le pompage de lasers YAG par des diodes

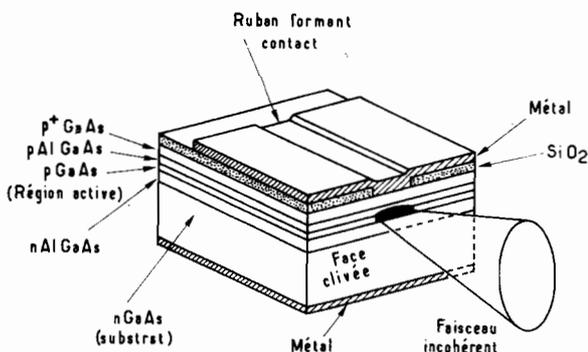


Fig. 9. - Diode superluminescente réalisée par Burrus.

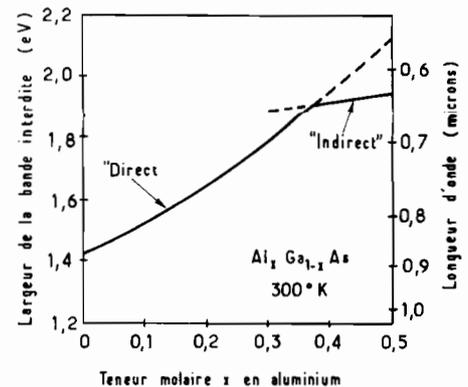


Fig. 10. - Une diode laser émet entre 0,75 et 0,90 micron selon la teneur en aluminium du composé ternaire d'arséniure de gallium-aluminium.

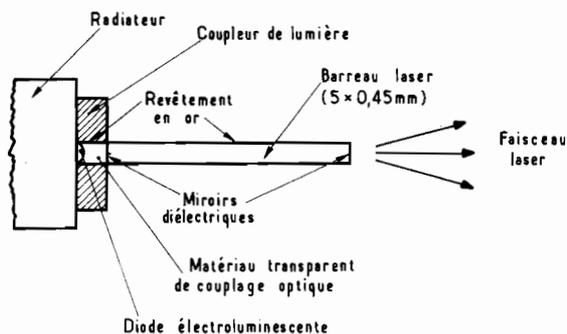


Fig. 11. - Le pompage en bout d'un laser Yag par une diode électroluminescente.

électro-luminescentes permettrait de réaliser des installations à longue durée de vie.

L'une des bandes principales de pompage du laser YAG se situe autour de la largeur d'onde $0,81 \mu$, de sorte qu'on peut pomper ce type de laser avec des diodes en phosphore-arséniure de gallium, ou en arséniure de gallium-aluminium. Dans un montage réalisé en 1971 par F.W. Ostermayer, 64 diodes en GaAsP montées dans une cavité semi-elliptique, et alimentées avec une puissance de 30 W, permettaient de produire un faisceau de laser YAG dont la puissance était

de 1,4 mW. Plus récemment, en 1973 N.P. Barnes obtint 52 mW dans un faisceau de laser YAG refroidi à 269 °K ($-4 \text{ }^\circ\text{C}$) et pompé par une matrice de diodes en AlGaAs.

Il est possible de pomper un laser YAG avec une seule diode électroluminescente, placée sur l'une des faces extrêmes du laser. L'essai a été mené par R.B. Chesler en 1973 avec un barreau de grenat d'yttrium aluminium long de 5 mm et large de 0,45 mm (fig. 11). Par ailleurs, J. Stone est parvenu à fabriquer des lasers à partir de fibres optiques en silice fondue, dont le cœur a été dopé avec du néodyme. Le diamètre du cœur

(quelques dizaines de microns) et la puissance minimale absorbée (1 à 2 mW) sont compatibles avec les caractéristiques des diodes électroluminescentes.

Les lasers YAG ne peuvent pas être directement modulés : il faudra donc leur adjoindre un modulateur optique externe.

Marc FERRETTI

A lire pour en savoir davantage

« Télécommunications optiques » par E. Spitz - Revue Technique Thomson-CSF, vol. 6, n° 14 (déc. 1974).

« Sources de lumière à semi-conducteur » par B. de Crémoux - Revue Technique Thomson-CSF, vol. 6, n° 4 (déc. 1974).

« Research toward optical-fiber transmission systems » par S.E. Miller, E. A.J. Marcetili et Tingye Li - Proceedings of the I.E.E.E., vol. 61, n° 12 (déc. 1973).

« The outlook in communications » par Forrest M. Mims - Laser Focus (sept. 1974).

TABLEAU 2
SOURCES POUR TÉLÉCOMMUNICATIONS
PAR FIBRES OPTIQUES

	Sources incohérentes		Sources cohérentes	
	Diode électroluminescente	Diode superluminescente	Laser en semiconducteur	Laser YAG
Matériau	double hétérostructure en AlGaAs	double hétérostructure en AlGaAs	double hétérostructure en AlGaAs	grenat d'yttrium aluminium dopé au néodyme
Pompage	courant continu	courant continu	courant continu	diodes électroluminescentes
Puissance d'alimentation	0,2 - 0,5 W	3 - 5 W	0,2 - 0,5 W	1 - 2 W
Puissance optique émise	5 mW	50 mW	de 10 mW (monomode) à 50 mW (multimode)	de 2 mW (monomode) à 5 mW (multimode)
Longueur d'onde du faisceau émis (micron)	0,75 - 0,9	0,75 - 0,9	0,75 - 0,9	1,06
Largeur spectrale (angströms)	350	50	moins de 20	moins d'1
Modulation	directe	directe	directe	par modulateur externe
Largeur de bande de la modulation	quelques centaines de MHz	quelques centaines de MHz	quelques GHz	égale à celle du modulateur