

**LES**

**LASERS**

# LES LASERS A GAZ

**B** IEN que les ingénieurs de télécommunications soient parvenus à transmettre des dizaines de milliers de conversations téléphoniques sur un câble coaxial unique, on n'en continue pas moins, dans les laboratoires universitaires comme industriels, à étudier la mise au point de moyens de communications encore plus puissants.

L'idée d'utiliser l'atmosphère libre comme canal optique de transmission des faisceaux laser semble séduisante : sa directivité élevée, son aptitude à protéger le secret des communications et sa grande largeur de bande font du rayon laser un moyen de transmission intéressant.

A Munich, une liaison expérimentale de 5,4 km de longueur, permet aux spécialistes du laboratoire de recherches de Siemens, d'étudier les avantages et les possibilités qu'offre un tel système.

Le laser utilisé est un laser à gaz carbonique (laser à  $\text{CO}_2$ ), qui émet des rayons infrarouges à une longueur d'onde de 10,6 micromètres. La puissance du faisceau laser est égale à 5 W.

A l'origine, il était prévu d'employer un autre laser à gaz : le laser à hélium-néon. Cependant, les mesures réalisées à Munich ont démontré que le rayon infrarouge du laser à  $\text{CO}_2$  est considérablement moins sensible aux

influences atmosphériques que n'est la raie visible du laser à hélium-néon. La longueur d'onde du laser à  $\text{CO}_2$  tombe en effet dans un domaine spectral où l'atmosphère possède ce qu'il est convenu d'appeler une « fenêtre optique ».

Néanmoins, le rayon du laser à  $\text{CO}_2$  est encore exposé à des influences perturbatrices : absorption par la vapeur d'eau dans l'air humide, dispersion de la lumière par les gouttes d'eau ou les particules de poussière, etc. Cependant, la brume épaisse, la pluie fine, le brouillard et la neige ne rendent pas impossible la transmission du faisceau émis par le laser à  $\text{CO}_2$ .

Les communications par laser à travers l'atmosphère pourraient servir pour les liaisons Terre-

satellites, mais également pour les liaisons à courte distance, entre buildings élevés, dans les grandes villes.

## LE LASER DE JAVAN

Une solution élégante pour réaliser le montage de lasers à gaz a été proposée dès 1959 par Javan : on place dans une cavité un mélange de néon et d'hélium. Un montage satisfaisant (Fig. 1) est obtenu avec une pression partielle de 1 mm de mercure d'hélium et de 0,1 mm de mercure de néon. Grâce à un circuit HF auxiliaire, on excite une décharge dans ce mélange : les électrons accélérés par la décharge, excitent les atomes d'hélium et les portent sur un niveau situé à 19,81 électrons-volts (eV) au-dessus du niveau fondamental. Or, le niveau supé-

rieur du néon est juste 0,04 eV en dessous du niveau excité de l'hélium (Fig. 2). Au cours des chocs, il y a transfert d'énergie entre les atomes d'hélium (qui retournent à leur état fondamental) et les atomes de néon qui montent sur le niveau 19,77 eV, très proche du niveau excité de l'hélium.

On peuple ainsi les niveaux supérieurs du néon, en passant par l'intermédiaire d'un autre niveau, appartenant à un autre gaz.

Dès que l'inversion de population est suffisante, l'effet laser se manifeste.

C'est en 1960 que, se basant sur ces principes, A. Javan, W.R. Bennett et D.R. Herriott, des Bell Telephone Laboratories, firent fonctionner le premier laser à gaz, sur plusieurs raies infrarouges du néon, à une longueur d'onde voisine de 1,15  $\mu\text{m}$ . Le laser était constitué par un tube de 1 m de long rempli d'un mélange d'hélium et de néon ; le tube était fermé par deux miroirs plans à haut pouvoir de réflexion et présentant une légère transmission. Ces deux miroirs étaient constitués par un dépôt de treize couches diélectriques d'indices alternativement élevé et faible sur un support en silice fondue. L'excitation du gaz était effectuée par

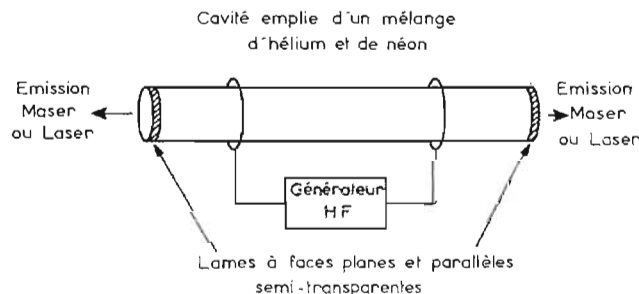


Fig. 1

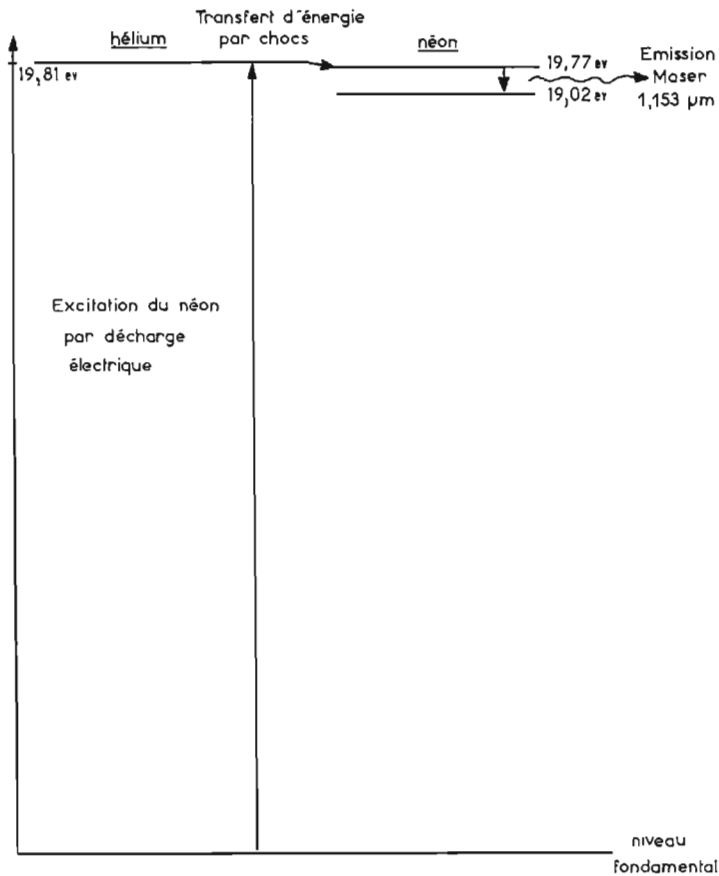


Fig. 2

Photo n° 1 : Sur une liaison expérimentale de 5,4 km de long, établie à Munich, les spécialistes du laboratoire de recherches de Siemens étudient l'utilisation de l'atmosphère libre en tant que canal optique de transmission de faisceaux laser. Les terminaux sont constitués par des « télescopes de Cassegrain », derrière lesquels se trouve aménagé soit un émetteur laser, soit un détecteur de lumière laser.



un générateur de 27 MHz, d'une puissance de 50 W.

Il y a d'autres raies qui sont utilisables : certaines donnent un fonctionnement dans le rouge (0,6328  $\mu\text{m}$ ), d'autres dans le rouge lointain (3,39  $\mu\text{m}$ ). Le pompage utilise alors un autre niveau de l'hélium. Le mélange d'hélium et de néon a donné une émission sur une trentaine de raies, comprises entre 0,6  $\mu\text{m}$  et 60  $\mu\text{m}$ .

### DE 0,1161 A 337 $\mu\text{m}$

Le domaine couvert par les lasers à gaz s'étend depuis la raie 0,1161  $\mu\text{m}$  de l'hydrogène moléculaire, jusqu'à la transition 337  $\mu\text{m}$  qui correspond à la longueur d'onde d'une vibration-rotation de la molécule  $\text{CH}_3\text{CN}$ . Cette longueur d'onde se situe dans le domaine submillimétrique, où l'on commence à trouver des sources d'hyperfréquences.

Pour les applications actuellement envisagées, trois lasers ont été particulièrement développés :

- Le laser à hélium-néon, fonctionnant à 0,6328  $\mu\text{m}$ , à cause de ses propriétés de cohérence temporelle et spatiale ;

- Le laser à argon ionisé à 0,4880  $\mu\text{m}$ , qui est le plus puissant dans le domaine visible ;

- Le laser à gaz carbonique, à 10,6  $\mu\text{m}$ , à cause de son excellent rendement et des puissances importantes qu'il permet d'atteindre.

Ces lasers correspondent aux trois grands types de lasers à gaz : atomiques, ioniques et moléculaires. Le tableau I groupe les principales raies laser avec leurs performances caractéristiques. Ces performances ne correspondent pas aux valeurs les plus élevées

obtenues en laboratoire, mais donnent une idée du fonctionnement de lasers typiques.

Les lasers atomiques donnent une émission provoquée par des transitions électroniques de l'atome neutre ; ce sont les gaz rares qui sont les plus employés. Leur domaine spectral s'étend depuis le rouge jusqu'à l'infrarouge lointain. Ils fournissent, en général une émission continue de quelques milliwatts. Les régimes d'alimentation sont à haute impédance : par exemple, un courant de 50 mA et une tension de 5 kV pour un tube de 1 m de long.

Pour les lasers ioniques, au contraire, on utilise des alimentations à basse impédance (tension de 250 V et courant de 30 A) pour obtenir une puissance de l'ordre du watt sur la raie 0,4880  $\mu\text{m}$  de l'argon ionisé. Environ une vingtaine d'éléments donnent des raies lasers par ionisation : de nombreuses émissions ont été mises en évidence sur des gaz rares ou des vapeurs métalliques une ou plusieurs fois ionisés. Le domaine de tels lasers couvre le spectre visible et le proche ultra-violet (tableau II).

Dans les lasers moléculaires, trois sous-groupes peuvent être distingués :

TABLEAU I. — LES RAIES LASER

Longueur d'onde (micromètre)	Gaz	Puissance (watt)	Durée ( s ) en fonctionnement impulsif
0,2358	Ne <sup>+++</sup>	1	0,1
0,3371	N <sub>2</sub>	100 000	0,01
0,3507	Kr <sup>++</sup>	0,3	
0,4880	Ar <sup>+</sup>	10	
0,4880	Ar <sup>+</sup>	10 <sup>3</sup>	2
0,5313	Xe <sup>+</sup> -Ne	5	20
0,6328	He-Ne	0,1	
1,1523	He-Ne	0,05	
2,0261	Xe	0,02	
3,3912	He-Ne	0,02	
10,59	CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He	100	
10,59	CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He	1 000	100
10,59	CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> -He	10 000	0,05
27,9	H <sub>2</sub> O	10	1
336,7	CH <sub>2</sub> CN	0,005	

TABLEAU II. — LES ÉLÉMENTS QUI FOURNISSENT DES TRANSITIONS LASER IONIQUES

Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Néon
Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon
Germanium	Arsenic	Sélénium	Brome	Krypton
Etain	Antimoine	Tellure	Iode	Xenon

— En impulsions très courtes, à partir des états électroniques de la molécule d'azote, on trouve toute une série de raies vers 0,337 et 0,357  $\mu\text{m}$ . Les puissances de crête peuvent atteindre le mégawatt.

— Beaucoup de raies sont issues de niveaux de vibration-rotation des molécules d'oxyde de carbone (CO), d'eau (H<sub>2</sub>O), etc. Elles s'étendent depuis le proche infrarouge jusqu'aux ondes submillimétriques. Les transitions sont observées dans des décharges en impulsions à fort courant et à tension élevée. On a quelquefois réalisé un fonctionnement continu, mais à très faible puissance.

— Des molécules de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et d'oxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) donnent des transitions laser infrarouges vers 10  $\mu\text{m}$ . Elles sont caractérisées par un rendement élevé, pouvant atteindre 20 %, voire plus.

Le laser à CO<sub>2</sub> est particulièrement remarquable en raison des excellents rendements que l'on peut obtenir. Ainsi, en utilisant un laser azote-dioxyde de carbone (N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>), une décharge excitera au préalable les molécules « adjuvantes » d'azote ; celles-ci céderont ensuite leur énergie aux molécules actives de CO<sub>2</sub> : le rendement théorique de ce processus est de 40 % ; en pratique, les rendements globaux effectivement obtenus, pour un laser N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, atteignent 25 %, ce qui constitue un record pour tous les lasers actuellement connus.

### LE LASER He-Ne

Le laser hélium-néon, fonctionnant à 0,6328  $\mu\text{m}$  est le plus connu, le plus utilisé et le plus facile à mettre en œuvre. Inventé voici 12 années, il reste très intéressant, en raison essentiellement d'un prix et d'un encombrement comparativement faibles. Ce laser

a d'ores et déjà franchi le seuil de crédibilité commerciale. A son propos, on parle souvent de « torche-laser », réellement portatif, les dimensions hors tout, alimentation électrique comprise, étant de quelques dizaines de centimètres de longueur, et quelques centimètres de diamètre.

Les dimensions de ce type de laser devraient encore diminuer par l'évolution vers la miniaturisation à l'extrême des composants du laser. Ainsi un chercheur des Bell Telephone Laboratories, Peter Smith (photo n° 2), est parvenu, au début de cette année, à faire fonctionner un laser à hélium-néon dans un tube capillaire de 430  $\mu\text{m}$  de diamètre intérieur ; d'une longueur de 20 cm environ, ce laser miniature génère un faisceau dont la puissance se situe aux environs du milliwatt.

La panoplie des lasers à gaz atomiques se complète actuellement par l'apport de transitions de certaines vapeurs métalliques, tel le cadmium, qui, excité par transfert à partir de l'hélium, fournit une raie laser à 0,4416  $\mu\text{m}$ , avec des puissances atteignant 100 mW (photo n° 4). Une autre

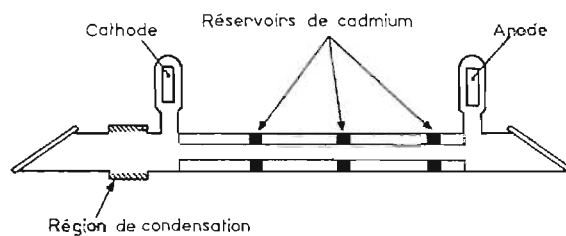


Fig. 3

capable de produire un faisceau ultraviolet (0,3250  $\mu\text{m}$ ) de 2,5 mW, ou encore un faisceau bleu (0,4416  $\mu\text{m}$ ) de 12 mW. Ce laser coûterait, selon W.T. Silfvast, aussi cher qu'un laser à hélium-néon de même puissance.

Dans les lasers He-Cd classiques, la vaporisation du cadmium se fait dans une installation de chauffage annexe ; un circuit de commande est nécessaire pour que la pression de vapeur soit optimale dans le tube laser. Silfvast a éliminé l'installation de chauffage et le circuit de contrôle, et il a utilisé une simple connexion électrique pour vaporiser le cadmium et exciter le laser.

Une autre innovation apportée par Silfvast est la présence de

### LE LASER IONIQUE : DEPUIS 1964

Dans sa description la plus élémentaire, l'atome se compose d'un noyau et d'électrons qui ne peuvent se mouvoir que suivant certaines orbites. Chaque fois qu'un électron change d'orbite, il émet ou absorbe un photon.

Chaque orbite est représentée par un niveau d'énergie ; le niveau d'énergie le plus faible, ou niveau fondamental, correspond, pour chaque électron, à l'orbite la plus stable. Selon la loi, dite de Boltzmann, plus le niveau d'énergie est élevé, moins il y aura de chances que le niveau soit « occupé ».

En fournissant aux électrons une énergie supplémentaire, on modifie la répartition d'équilibre thermodynamique : le système devient alors instable et tend à revenir à son état d'équilibre, en émettant de la lumière.

Si l'on excite fortement un atome, l'un de ses électrons finira par se détacher de l'atome ; tous les autres électrons auront alors leurs orbites modifiées car les forces régissant les interactions entre électrons et le noyau auront été perturbées par l'absence de l'électron éjecté. Par conséquent, les photons émis par les électrons, dans leurs nouvelles orbites, auront des énergies différentes de celles observées avec l'atome non ionisé.

Le spectre de l'atome non ionisé est appelé spectre I ; celui de l'ion : spectre II ; celui de l'atome deux fois ionisé, ayant donc perdu deux électrons : spectre III.

C'est W.E. Bell qui, en 1964, réalisa le premier laser ionique en envoyant des impulsions de courant dans des mélanges mercure-hélium et mercure-néon. Il obtint deux raies laser visibles provenant du spectre de l'atome de mercure ionisé. Le mercure s'ionise facilement, surtout en présence d'hélium et de néon, ce qui justifie le choix de Bell.

Afin de tenter de mieux comprendre les phénomènes, les Français G. Convert, M. Armand et P. Martinot-Lagarde étudièrent le comportement des raies laser du mercure dans des mélanges mercure-argon. C'est ainsi qu'ils mirent en évidence une raie bleue à 0,488  $\mu\text{m}$ . Ils découvraient, peu après, une série de raies bleues et vertes qu'ils identifièrent à des transitions de l'argon ionisé.

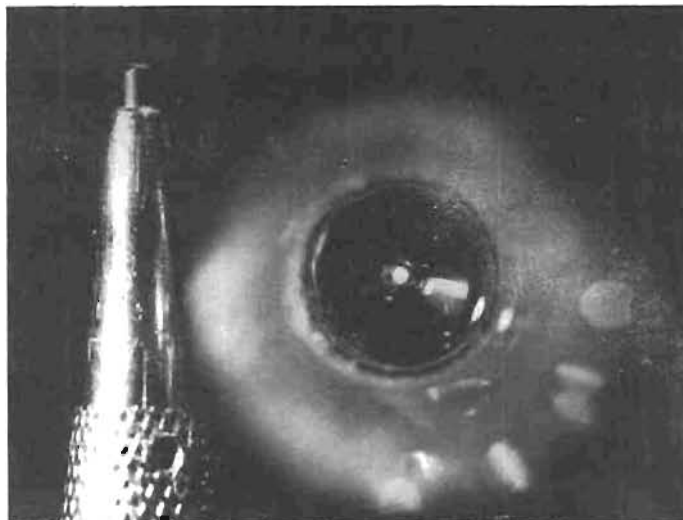


Photo n° 3 : Le point lumineux, au centre, est la tâche formée par le faisceau laser de Peter Smith. Son diamètre est deux fois plus petit que la pointe d'un stylo à bille.

Photo n° 4 : Ce laser à hélium-cadmium est quatre fois plus petit qu'un laser conventionnel (il mesure 375 mm environ). Il produit un faisceau ultraviolet de 2,5 mW.

Photo n° 2 : Peter Smith démontre le bon fonctionnement de son microlaser à hélium-néon.



transition du cadmium donne une raie dans l'ultraviolet, à 0,3250  $\mu\text{m}$ .

W.T. Silfvast, un autre chercheur des Bell Telephone Laboratories a, lui aussi tenté de réduire dans une proportion notable, les dimensions des lasers hélium-cadmium : il est parvenu ainsi à un laser de 375 mm de long,

petits réservoirs de cadmium dans le tube du laser : le métal est ainsi plus aisément distribué dans le gaz subissant l'effet laser.

Silfvast envisage d'appliquer sa technique à d'autres mélanges d'hélium et de vapeur métallique, et en particulier du sélénium (Fig. 3).

On en oublia le mercure, pour étudier l'argon ionisé, dont les raies laser étaient remarquablement intenses. E.I. Gordon, E. Labuda et W.B. Bridges mirent en évidence, toujours en 1964, un régime de décharge continue, où l'effet laser sur les transitions de l'argon était possible. A la même époque, les Français P. Laures, L. Dana et C. Frapard mettaient en évidence des rayonnements visibles des ions du xénon et du krypton, obtenus à partir de collisions atomiques lors de la décharge dans des mélanges gazeux d'hélium-krypton et de néon-xénon.

En été 1964, W.B. Bridges et A.N. Chester obtenaient de nombreuses raies laser sur les gaz rares (sauf l'hélium), sur l'azote, l'oxygène, etc.; toujours sur des niveaux ioniques. Le spectre laser ionique s'étendait alors déjà du proche infrarouge à l'ultraviolet.

Les lasers à gaz ioniques peuvent fonctionner en impulsions ou en continu. Les raies les plus intenses sont celles de l'argon, du silicium, du phosphore, du soufre et du chlore.

#### A LA RECHERCHE DES GRANDES PUISSANCES

Un grand progrès a été réalisé, dans l'élargissement du domaine des puissances délivrées par les lasers, avec la découverte des lasers moléculaires : en 1961, J.C. Polanyi démontrait la possibilité d'obtenir l'inversion de population entre niveaux vibrationnellement excités de molécules. En 1964, C.K.N. Patel obtint une dizaine de milliwatts continus avec un laser à gaz carbonique aux alentours de 10  $\mu\text{m}$ .

F. Legay et N. Legay-Sommaire ont mis, toujours en 1964, en évidence la possibilité d'obtenir une meilleure inversion de population sur ce gaz, en utilisant de l'azote vibrationnellement excité. Un grand progrès a été effectué lorsque F. Legay et L. Henry, du laboratoire de Spectroscopie moléculaire du professeur Amat, ont construit un laser délivrant une puissance supérieure au watt. Cette réalisation a prouvé qu'il était possible de construire des lasers de grande puissance, et ayant un rendement élevé.

En janvier 1966, un laser de 4,5 m de longueur délivrait, aux laboratoires de la C.G.E. à Marcoussis, une puissance de 280 W, ce qui constituait un record, avec un rendement de 12%. Actuellement, on réalise des lasers  $\text{N}_2\text{-CO}_2$  dont le rendement atteint effectivement 25%, ce qui constitue également un record.

Les pressions auxquelles on opère habituellement dans ces lasers sont voisines de quelques millimètres de mercure. Le moyen que l'on emploie pour augmenter la puissance consiste à accroître la pression, du mélange, augmen-

tation se traduisant par une accélération de la circulation des gaz : avec une vitesse des gaz de l'ordre de 200 m/s et une pression de l'ordre de la dizaine de torrs (\*), on obtient des faisceaux laser de puissance métrique de l'ordre du kilowatt par mètre de longueur.

Les derniers développements conduisent à envisager des pressions et des vitesses d'écoulement encore plus élevées : le laser supersonique, est d'ores et déjà prévu !

Certains chercheurs ont pensé que rien n'empêchait d'utiliser des pressions voisines de l'atmosphère dans les lasers à  $\text{CO}_2$ . Cependant, les problèmes thermiques soulevés sont si ardues à résoudre qu'ils imposaient un fonctionnement par impulsions.

R. Dumanchin, J.C. Farcy, M. Michon et J. Rocca-Serra, aux laboratoires de Marcoussis de la C.G.E., ont réalisé un laser moléculaire pulsé à  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2$  dans lequel le pompage est produit par utilisation de champs électriques élevés : ils ont choisi une configuration à décharge transversale pour permettre l'emploi de tensions relativement peu élevées, inférieures à 100 kV. La structure réalisée a permis de produire une décharge uniformément répartie entre deux électrodes planes et parallèles, écartées de un centi-

mètre. La pression choisie a été de 800 torrs (soit un peu plus forte que la pression atmosphérique : 760 torrs). Un laser mis en œuvre récemment a donné les premiers résultats suivants :

- énergie de sortie : 130 Joules
- durée totale de l'impulsion : 2  $\mu\text{s}$ .

#### LES FAISCEAUX D'ELECTRONS EXCITENT LES GAZ

Une innovation récente semble prometteuse : il s'agit de provoquer, au moyen d'un faisceau d'électrons assez énergétiques (100 à 150 keV), l'ionisation du gaz; ces électrons créent une quantité importante d'électrons secondaires qui sont ensuite accélérés par la décharge. Les deux fonctions de la décharge (ionisation et excitation) sont nettement séparées dans ces lasers moléculaires (Fig. 4).

Dans les laboratoires d'Avco-

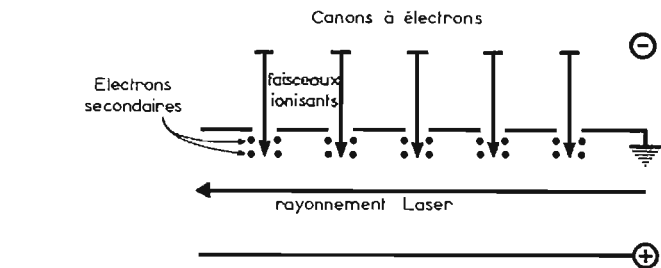


Fig. 4

Everett, des chercheurs ont ainsi obtenu une énergie laser spécifique de 50 joules par litre en excitant un mélange  $\text{N}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2$  à la pression atmosphérique.

Se basant sur le même principe, les chercheurs d'I.B.M. ont développé, dans le courant de 1971, le laser émettant sur la plus courte longueur d'onde : 0,1161  $\mu\text{m}$  (donc dans l'ultraviolet lointain).

Le nouveau laser, dont parle la Physical Review Letter du 28 février 1972 sous la signature de R.T. Hodgson et R.W. Dreyfus, représente un progrès considérable vers les courtes longueurs d'onde par rapport au record précédent de 1600 Ångströms réalisé par le même Hodgson en 1970. Ces deux lasers utilisent l'hydrogène comme élément actif, mais alors que précédemment on avait un pompage par décharge

En spectroscopie moléculaire classique, ces raies, comprises entre 1161 et 1240 Ångströms font partie des longueurs d'onde des bandes bien connues de Werner.

Les premières expériences avec ce laser montrent que la puissance de sortie à 0,1161  $\mu\text{m}$  est au moins de 500 W par  $\text{cm}^2$ . Comme les électrons dans le faisceau cèdent seulement une petite partie de leur énergie à l'hydrogène du laser, il devrait être possible d'augmenter la puissance de sortie simplement en allongeant le laser.

Marc FERRETTI

\* Le torr est l'unité de pression qu'emploient les techniciens du vide et qui correspond à 1 mm de mercure ; On a donc :

$$1 \text{ torr} = \frac{1 \text{ atmosphère}}{760}$$

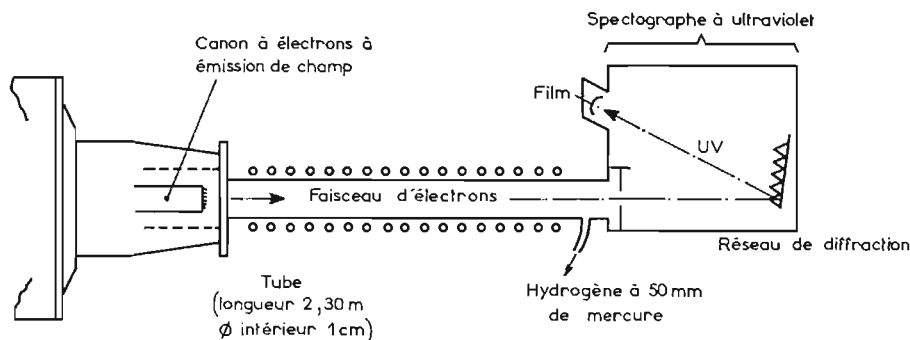


Fig. 5

électrique dans le gaz, le nouveau laser est pompé par un faisceau d'électrons de grande puissance.

Le faisceau d'électrons dont l'énergie est de 400 keV délivre une puissance de 4 milliards de watts au cours d'une impulsion de 3 milliardièmes de seconde. Ce faisceau dont la densité de courant est d'environ 10 000 A par  $\text{cm}^2$ , est obtenu par un canon à électrons à émission de champ et se trouve confiné par un champ magnétique, sur l'axe d'un tube de 1 cm de diamètre intérieur (Fig. 5).

Le tube contient de l'hydrogène sous une pression de 20 à 100 mm de mercure. La collision des électrons avec les molécules d'hydrogène à leur état fondamental excite ces molécules et les porte à des niveaux d'énergie supérieurs. A partir de ces états, l'émission stimulée se produit, sans l'aide de miroirs, lors du retour aux bandes supérieures du niveau fondamental.

#### « B.A. BA EN LASERS » RECTIFICATIF

Une coquille typographique rend peu compréhensible l'exemple numérique donné dans LE HAUT-PARLEUR, en page 43, du n° 1366 (17 août 1972). Il fallait lire :

$h = 6,6252 \times 10^{-34}$  (joule par seconde) pour la valeur de la constante de Planck, et d'autre part :

1 électron-volt = 1,6021  $\times 10^{-19}$  joule.

Le rétablissement des signes exacts, dans les exposants permet de trouver effectivement la valeur de la fréquence :

$$f = 1,125 \times 10^{15} \text{ Hz.}$$