Classification
 Physics Abstracts
 2.632

CONSTRUCTION ET PERFORMANCES D'UN LASER CHIMIQUE HF CONTINU AMORCÉ PAR UNE DÉCHARGE MICRO-ONDE

Y. CONTURIE, J. M. GAGNÉ et L. BERTRAND

Laboratoire d'Optique et de Spectroscopie, Département de Génie Physique, Ecole polytechnique,
 Campus de l'Université de Montréal, C. P. 6079, Succursale A, Montréal, Québec, Canada H3C 3A7

(Reçu le 8 décembre 1975, accepté le 12 janvier 1976)

Résumé. — On décrit la construction d'un laser chimique HF continu, basé sur la réaction exothermique $F + H_2 \rightarrow HF_{(v,j)} + H$. Les atomes de fluor sont produits à partir d'une décharge micro-onde dans le mélange $SF_6 + He$.

Les dimensions transversales de la chambre de réaction sont 50 mm de long et 6 mm de haut. L'axe de la cavité optique est normal aux directions d'écoulement de chacun des gaz réagissants, celles-ci faisant entre elles un angle de 72° .

La puissance du laser, fonctionnant avec une cavité optique non sélective, est 16 W. L'efficacité chimique correspondante est 3 % et l'efficacité électrique 0,7 %. Le rayonnement se compose de 14 raies correspondant aux transitions $P_v(j)$ de vibration-rotation de la molécule HF : $v, j - 1 \rightarrow v - 1, j$ ($v = 1, 2, 3$).

Lorsqu'une cavité optique sélective est utilisée, le laser peut fonctionner successivement sur 12 raies correspondant aux transitions $P_1(j)$ et $P_2(j)$. Le gain non saturé de plusieurs transitions $P_2(j)$ est environ $0,11 \text{ cm}^{-1}$.

Abstract. — In this paper we present the design and discuss the performances of a continuous HF chemical laser, based on the exothermic reaction $F + H_2 \rightarrow HF_{(v,j)} + H$. Fluorine atoms are produced in a $SF_6 + He$ mixture by means of a microwave discharge apparatus.

The dimensions of the laser chamber are 50 mm in length and 6 mm high. The F and H_2 streams form an angle of 72° , the optical axis being perpendicular to them.

The multiline laser power is 16 W with chemical and electrical efficiencies of 3 % and 0.7 % respectively. The output spectrum consists of 14 lines corresponding to vibration-rotation $P_v(j)$ transitions of the HF molecule : $v, j - 1 \rightarrow v - 1, j$ ($v = 1, 2, 3$).

Under single-line operation, lasing action is observed on 12 lines successively, corresponding to $P_1(j)$ and $P_2(j)$ transitions. The unsaturated gain for several $P_2(j)$ transitions is approximately $0,11 \text{ cm}^{-1}$.

1. Introduction. — L'idée d'utiliser l'énergie fournie par certaines réactions chimiques exothermiques pour réaliser des lasers moléculaires a été proposée il y a une dizaine d'années [1]. Depuis la première réalisation pratique [2], de nombreux lasers basés sur cette idée ont été construits [3], accompagnés de progrès de la théorie [4]. Celui décrit dans cet article est un laser chimique HF continu [5, 6].

Les molécules HF sont produites dans des états vibrationnels excités ($v \leq 3$) par la réaction

L'émission laser a lieu sur les transitions de vibration-rotation $v, j - 1 \rightarrow v - 1, j$ de la molécule HF, notées $P_v(j)$. Le laser construit dans le laboratoire est une version modifiée du modèle de Stephens et Coll. [7]

dit à *écoulement transversal*. La technique micro-onde développée par Bosisio *et coll.* [8] a été utilisée pour produire les atomes de fluor à partir d'une décharge dans le mélange $\text{SF}_6 + \text{He}$. L'utilisation de micro-ondes pour générer un plasma présente plusieurs avantages [8] :

— Le taux de dissociation produit est élevé : l'efficacité chimique du laser (3 %, voir § 3.2) implique un bon rendement pour la production d'atomes F.

— L'absence d'électrodes internes supprime une source de contamination du plasma. En outre, le tube à décharge est simple et peu coûteux.

— Le facteur de sécurité est élevé car le générateur micro-ondes ne comporte pas de source de haute tension.

— L'adaptation à l'impédance de la décharge est réalisable de façon satisfaisante.

Pour obtenir un fonctionnement continu, il est nécessaire d'assurer un écoulement rapide des gaz. En effet (i) les molécules HF doivent rester dans le milieu amplificateur moins que le temps nécessaire à leur relaxation (quelques microsecondes à 1 torr) [4] ; (ii) les molécules HF qui ont perdu leur énergie à la suite de l'émission stimulée d'un photon doivent être évacuées rapidement. Sinon, elles absorberaient le rayonnement qui se propage dans la cavité.

La production d'atomes de fluor, la mise en œuvre de la réaction chimique et le problème de l'écoulement des gaz font l'objet d'une première partie intitulée *Construction du laser*. Dans une deuxième partie sont présentés les résultats expérimentaux.

2. Construction du laser. — Le système, comprenant le laser et les instruments de mesure associés, est présenté sur la figure 1. Il peut être décomposé ainsi :

a) un appareillage micro-onde permettant de produire des atomes de fluor à partir d'une décharge électrique dans le mélange $\text{SF}_6 + \text{He}$;

b) un système de pompage assurant un écoulement rapide des gaz ;

c) une chambre de réaction (C) où les atomes de fluor rencontrent les molécules d'hydrogène ;

FIG. 1. — Schéma d'ensemble du laser. (C) Chambre de réaction, (P) calorimètre « Scientech », (W) wattmètre, (1) structure lente, (2) tube plasma, (3) cage de Faraday, (4) débitmètre, (5) régulateur de pression et jauge, (6) cylindre à gaz.

d) un résonateur optique (M_1, M_2) ;

e) un ensemble d'instruments de mesure, pour le contrôle et l'analyse du système.

La suite de ce paragraphe donne des précisions sur les parties a, b et c. Les caractéristiques des parties d et e seront données dans le paragraphe consacré aux résultats expérimentaux.

2.1 APPAREILLAGE MICRO-ONDE. — L'énergie micro-onde (2,45 GHz, 0 à 2,5 kW) générée de façon continue par un magnétron (Gerling Moore, modèle 4074) est transmise par l'intermédiaire de guides d'ondes à une structure lente (slow wave structure) analogue à celle décrite par Bosisio *et coll.* [8]. Cette structure est couplée à un tube en quartz dans lequel circule le mélange gazeux $\text{SF}_6 + \text{He}$. L'énergie absorbée par le mélange provoque la dissociation de la molécule SF_6 soit par action directe soit par transfert d'excitation à partir de l'hélium.

Le couplage entre la ligne de transmission (guides d'ondes + structure lente) et la charge (tube plasma) est ajusté d'une part à l'aide d'accordeurs faits de vis en cuivre et d'autre part en variant l'angle entre la structure lente et le tube en quartz [5]. Des wattmètres permettent de contrôler les puissances incidente transmise et réfléchie. Le livre cité en référence [9] peut aider à la compréhension de cette technologie micro-onde. Une partie des radiations micro-ondes est perdue et diverge dans tout l'espace ; une cage de Faraday, construite autour de l'enceinte en plexiglas contenant la structure lente et le tube plasma, constitue un barrage efficace.

2.2 SYSTÈME DE POMPAGE. — Il est constitué d'une pompe rotative pour vide primaire (Alcatel 2100) et d'une pompe Roots (Alcatel MAV 1000).

La pompe rotative sert à établir le vide préliminaire (quelques torrs) nécessaire au fonctionnement de la pompe Roots ; celle-ci a pour principale qualité de pouvoir pomper des flux de gaz élevés. A 3,5 torrs, pression totale dans la chambre de réaction quand le laser fonctionne, le débit du système est de 160 l/s. Les débits et les pressions des gaz sont contrôlés à l'aide respectivement de débitmètres Matheson 700 PBV et de jauges de Pirani.

2.3 CHAMBRE DE RÉACTION (Fig. 2 et 3). — Elle a été réalisée à partir d'un bloc d'aluminium. Le canal principal, dans la direction d'écoulement du fluor, a pour dimensions 6,4 mm de haut, 5 cm de large et 7,5 cm de long. L'autre canal, dans la direction de l'axe optique, a pour section 6,4 mm × 5 cm. Ses extrémités permettent le positionnement de fenêtres CaF_2 à l'angle de Brewster.

Deux ouvertures rectangulaires (6,4 mm × 5 cm) ont été pratiquées à environ 13 mm de l'entrée du canal principal, dans une direction perpendiculaire à celui-ci. Elles ont pour but de recevoir les injecteurs d'hydrogène. Chaque injecteur comporte 48 trous de diamètre

FIG. 2. — Chambre de réaction. Perspective.

FIG. 3. — Chambre de réaction. Sections planes.

$\varnothing = 220 \mu$, en ligne, régulièrement espacés sur une longueur de 5 cm. Les injecteurs sont légèrement inclinés (18°) par rapport à la direction du flux d'atomes F. Le nombre et le diamètre des trous, ainsi que l'angle d'inclinaison, ont été déterminés expérimentalement. La puissance laser servant de critère, cette géométrie est celle qui permet de réaliser le mélange des réactifs avec la meilleure efficacité.

Au niveau de chacune des fenêtres de Brewster, une série de 8 trous ($\varnothing = 1,5 \text{ mm}$), espacés de 6 mm, permet d'introduire de l'hélium sous forme de jets. Cette purge a pour but d'éviter l'accumulation de molécule HF à l'état fondamental dans des zones de la chambre éloignées de la direction principale de pompage. Les molécules HF ($v = 0$) absorberaient le rayonnement engendré au niveau de la flamme par émission stimulée sur les transitions $P_1(j)$. En l'absence de purge, les transitions $P_1(j)$ ne donnent pas lieu à effet laser.

La chambre, par ailleurs refroidie à l'aide d'une circulation d'eau, est reliée au tube plasma par une pièce en cuivre, ovoïde, l'une de ses extrémités étant un cercle ($\varnothing = 13 \text{ mm}$) et l'autre une fente ($5 \text{ cm} \times 4,7 \text{ mm}$). A l'autre extrémité du canal principal de la chambre, une pièce en cuivre, ovoïde ($\varnothing = 5 \text{ cm}$), relie la fente de sortie et la connexion

conduisant à la pompe Roots, l'entrée de celle-ci étant commandée par une valve ($\varnothing_{\text{int}} = 15 \text{ cm}$).

3. Résultats expérimentaux. — 3.1 PUISSANCE. —

La puissance de sortie maximale du laser, $P = 16 \text{ W}$ continu, mesurée à l'aide d'un calorimètre Scientech (modèle 3600), est obtenue dans les conditions suivantes :

— La puissance micro-onde à la sortie du générateur est

$$P_{\text{totale}} = 2,5 \text{ kW}.$$

La puissance effective fournie au plasma est

$$P_{\text{eff}} = 2,3 \text{ kW}.$$

P_{eff} est définie ainsi :

$$P_{\text{eff}} = P_{\text{totale}} - (P_{\text{réfléchi}} + P_{\text{transmise}})$$

(il n'est pas tenu compte de la puissance micro-onde dissipée dans tout l'espace).

— Les débits des gaz en millimoles/seconde (mM/s) sont : dans la décharge,

$$\text{He} = 11 \text{ mM/s} \quad \text{et} \quad \text{SF}_6 = 0,7 \text{ mM/s};$$

dans la chambre de réaction,

$$\text{H}_2 = 16 \text{ mM/s} \quad \text{et} \quad \text{He (purge)} = 1,7 \text{ mM/s}.$$

— La cavité optique, non sélective, est constituée de deux miroirs ayant des rayons de courbure de 10 m et séparés de 43 cm. L'un (M_1) a un revêtement en or, l'autre (M_2) est en germanium avec un revêtement diélectrique dont la transmittance est 17 % dans la région spectrale de $2,5 \mu$ à $3,2 \mu$.

L'oscillation a lieu préférentiellement sur le mode TEM_{10} . L'oscillation sur le mode TEM_{00} est obtenue en plaçant un diaphragme à iris dans la cavité optique, la puissance de sortie diminuant de moitié.

La figure 4 montre comment la puissance de sortie P_{laser} varie en fonction de la puissance micro-onde P_{eff} . Le changement de pente vers $P_{\text{eff}} = 1,4 \text{ kW}$ indique un accroissement moindre du taux de dissociation de SF_6 pour les puissances élevées [10].

FIG. 4. — Puissance de sortie du laser en fonction de la puissance micro-onde P_{eff} fournie au plasma.

3.2 EFFICACITÉ CHIMIQUE ET ÉLECTRIQUE. — L'efficacité chimique ζ_{ch} est définie comme le rapport entre l'énergie extraite du laser et l'énergie chimique théoriquement disponible, c'est-à-dire celle que dégagerait la réaction exothermique si tous les produits réagissaient. Compte tenu des débits cités plus haut, la réaction est limitée par le nombre d'atomes de fluor et non par le nombre de molécules d'hydrogène.

Une molécule SF_6 peut fournir six atomes F. La réaction entre F et H_2 dégage 31,6 kcal/mole soit $31,6 \times 4,18$ kJ/mole. Donc, à partir d'une millimole de SF_6 , l'énergie disponible est :

$$6 \cdot 10^{-3} \times (31,6 \times 4,18) \text{ kJ} \simeq 800 \text{ J}.$$

Ainsi,

$$\zeta_{ch} = \frac{\text{Puissance laser (W)}}{800[(\text{mM})_{SF_6}/s]}$$

$\simeq 3 \%$ dans le cas présent

$$(P_{\text{laser}} = 16 \text{ W} ; SF_6 = 0,7 \text{ mM/s}).$$

L'efficacité électrique ζ_{e1} est définie comme le rapport entre l'énergie extraite du laser et l'énergie électrique fournie au plasma :

$$\zeta_{e1} = \frac{16 \text{ W}}{2,3 \text{ kW}} \simeq 0,7 \%.$$

3.3 ANALYSE SPECTRALE. — Afin de prolonger la durée de vie du tube à décharge en quartz, la puissance micro-onde couramment utilisée est inférieure au maximum de 2,5 kW. Pour l'analyse spectrale de l'émission laser présentée ici, la puissance de fonctionnement du générateur est $P_{\text{totale}} = 1,8 \text{ kW}$ à laquelle il correspond une puissance effective $P_{\text{eff}} = 1,65 \text{ kW}$. Les débits des gaz sont ceux donnés plus haut. Cependant l'observation des transitions $P_2(j > 7)$ et $P_3(j)$ requiert des débits particuliers.

Le montage employé est celui de la figure 1. Deux lentilles L_1 et L_2 ($\varnothing = 20 \text{ mm}$, $f = 50 \text{ mm}$) en CaF_2 permettent d'adapter les dimensions géométriques du faisceau à celles d'un monochromateur (Spex modèle 1670, réseau de 300 traits/mm, blazé à $8\,600 \text{ \AA}$ au 3^e ordre), équipé de fentes de 0,25 mm. Le détecteur utilisé est une cellule PbS refroidie à l'azote liquide. Les transitions observées et leurs intensités relatives sont présentées dans le tableau I et la figure 5a.

Le miroir diélectrique (M_2) a ensuite été remplacé par un réseau (G) de 300 traits/mm, blazé à $2,8 \mu$ au 1^{er} ordre (PTR Optics, modèle ML 501). La sélection des longueurs d'onde est faite par rotation du réseau. Le monochromateur n'est donc pas employé. Le faisceau de sortie, correspondant à l'ordre zéro de réflexion spéculaire, est reçu directement sur un calorimètre (Scientech, modèle 3600). Les transitions observées et leurs intensités relatives sont présentées dans le tableau I et la figure 5b.

TABLEAU I

Transitions laser observées

TRANSITIONS	J	$\lambda(\mu)$	CAVITÉ NON-SÉLECTIVE	CAVITÉ SÉLECTIVE
$P_1(J)$	2	2,578		•
	3	2,608	•	•
	4	2,639	•	•
	5	2,673	•	•
	6	2,707	•	•
	7	2,744	•	
$P_2(J)$	2	2,696		•
	3	2,727	•	•
	4	2,760	•	•
	5	2,795	•	•
	6	2,831	•	•
	7	2,870	•	•
	8	2,910	•	•
	9	2,953	•	
$P_3(J)$	4	2,889	•	
	5	2,926	•

FIG. 5. — Spectroscopie du faisceau laser. Intensités relatives des raies ($P_{\text{eff}} = 1,65 \text{ kW}$).

Les résultats appellent quelques commentaires :

(i) Les transitions $P_2(j)$ sont les plus intenses, que le laser fonctionne avec une cavité sélective ou non sélective. L'explication est double. D'une part la réaction chimique produit surtout des molécules HF dans l'état $v = 2$. D'autre part, dans un laser continu comme celui-ci, des molécules HF dans l'état $v = 0$ sont toujours présentes dans la chambre, malgré la purge d'hélium. Elles constituent un milieu absorbant pour les transitions $P_1(j)$.

(ii) La transition $P_1(5)$ est anormalement faible. Elle correspond à une bande d'absorption de la vapeur d'eau. L'espace entre les fenêtres de la chambre et les réflecteurs de la cavité constitue un milieu absorbant pour cette transition ; l'effet est cependant moins marqué lorsque la cavité sélective est utilisée.

(iii) Seule la cavité non sélective permet l'observation des transitions $P_3(j)$, qui ne peuvent fonctionner que si les transitions de la bande $2 \rightarrow 1$ ont lieu simultanément. Le niveau inférieur ($v = 2, j$) d'une transition $P_3(j)$ correspond au niveau supérieur de la transition $P_2(j + 1)$ et une inversion de population suffisante pour engendrer un effet laser ne peut être obtenue que si le niveau inférieur de la transition $P_3(j)$ est dépeuplé suffisamment rapidement par la transition $P_2(j + 1)$ associée.

(iv) Les transitions $3 \rightarrow 2$ mises à part, le nombre de transitions observées est le même dans les deux cas. Cependant il y a un décalage ($\Delta j = -1$) entre celles observées respectivement avec la cavité sélective et la cavité non sélective.

3.4 MESURES DE GAIN NON SATURÉ. — Les coefficients de gain non saturé, $g_0(v, j)$, pour les différentes transitions $P_v(j)$ du laser ont été mesurées par la technique dite de l'oscillation au seuil. Deux lames de fluorine (CaF_2) sont placées, dans la cavité sélective, sur l'axe optique du laser selon des angles supplémentaires. Le facteur de transmission de ces lames est diminué en augmentant l'angle d'incidence du faisceau laser, jusqu'à ce que le seuil d'oscillation de la transition considérée soit atteint.

Le réseau G qui constitue l'un des réflecteurs de la cavité optique permet de sélectionner une transition. Le coefficient g_0 qui lui correspond est déterminé à partir de la relation

$$R_1 R_G \tau^2 \cdot \exp(2 g_0 L) = 1. \quad (1)$$

R_1 et R_G sont les réflectances du miroir M_1 et du réseau G, respectivement ; τ est la transmittance de l'atténuateur constitué des deux lames de fluorine ; $\exp(2 g_0 L)$ est le gain pour la transition considérée, au cours d'un aller-retour à travers le milieu amplificateur de longueur L .

La puissance micro-onde utilisée est $P_{\text{eff}} = 1,65$ kW et les débits des gaz sont ceux indiqués plus haut. La température, mesurée dans la chambre de réaction à l'aide d'un thermocouple Chromel-Alumel, est 390 ± 10 K (température de translation). L'élargissement Doppler correspondant, $\Delta\nu_D$, est compris entre 325 MHz pour $P_2(9)$, $\lambda = 2,953$ μ et 370 MHz pour $P_1(2)$, $\lambda = 2,578$ μ . Les gains mesurés pour les transitions $P_2(j)$ sont indiqués sur la figure 6.

FIG. 6. — Gain non saturé g_0 pour diverses transitions $P_2(j)$. La courbe en traits pleins est la courbe théorique obtenue à partir de l'éq. (2), avec $N_2/N_1 = 0,83$ ($T_{\text{vib}} = 30\,000$ K) et $T_R = 390$ K.

Si les hypothèses suivantes sont faites :

(i) équilibre rotationnel à la température T_R à l'intérieur de chaque niveau vibrationnel,

(ii) relaxations suffisamment rapides des niveaux rotationnels pour qu'il y ait équilibre entre la température de translation mesurée (390 K) et la température T_R ,

(iii) milieu amplificateur de gain uniforme,

(iv) élargissement Doppler des transitions, il est possible de comparer les résultats expérimentaux avec ceux obtenus à partir de la formule théorique simplifiée utilisée par Chester et Hess [11] :

$$g_0(v, j, T_R, n_v) = \text{Cte } v j \cdot T_R^{-3/2} \cdot F_{v-1,j}^{v,j-1} \cdot E(v, j, T_R, n_v) \quad (2)$$

où :

$$\bullet E(v, j, T_R, n_v) = n_v B_v \cdot \exp \left[- \frac{hc}{kT_R} j(j-1) B_v \right] - B_{v-1} \cdot \exp \left[- \frac{hc}{kT_R} j(j+1) B_{v-1} \right].$$

• $F_{v-1,j}^{v,j-1}$ est le facteur d'interaction vibration/rotation, qui est approximativement égal à

$$F_{v-1,j}^{v,j-1} = 1 + 5 \times 10^{-2} j + 8 \times 10^{-4} j^2.$$

$$\bullet \text{Cte} = (2 M_0 \pi^3 / k^3)^{1/2} \frac{c |m_{10}|^2 N_{v-1}}{3 \varepsilon_0}.$$

Par ailleurs,

$n_v = N_v/N_{v-1}$ est le rapport des populations,

$B_v = B_e - \alpha_e(v + \frac{1}{2})$ (B_e , α_e : constantes spectroscopiques de HF),

h et k sont les constantes de Planck et de Boltzmann, m_{10} est la partie vibrationnelle de l'élément de matrice du moment dipolaire électrique, pour une transition $1 \rightarrow 0$ d'un oscillateur anharmonique sans rotation,

M_0 est la masse moléculaire de HF,

ε_0 est la permittivité du vide.

Quand la courbe théorique obtenue à partir de l'éq. (2) est ajustée aux valeurs expérimentales de gain, un bon accord est obtenu en prenant un rapport $N_2/N_1 = 0,83$, ce qui correspond à une température vibrationnelle de 30 000 K. T_R est supposée égale à 390 K. Le seuil indiqué sur la figure 6 est déterminé par les valeurs j_{min} et j_{max} pour lesquelles les transitions $P_2(j)$ *lasent*. Il indique le gain minimum requis pour compenser les pertes de la cavité optique.

Les mesures faites sur les transitions $P_1(j)$ indiquent des coefficients de gain inférieurs à ceux des transitions $P_2(j)$. Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	$g_0, 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$
$P_1(3)$	$3,7 \pm 0,1$
$P_1(4)$	$4,9 \pm 0,4$
$P_1(5)$	$3,3 \pm 0,4$

Il est plus difficile dans ce cas d'accorder les résultats et la théorie, bien que les ordres de grandeur soient conformes.

4. Conclusion. — Le laser décrit est un laser chimique HF continu basé sur la réaction exothermique $F + H_2 \rightarrow HF_{(v)} + H$. Les deux principales difficultés sont les suivantes :

- (i) produire en grande quantité des atomes de fluor ;
- (ii) assurer un écoulement rapide des gaz réagissants, condition impérative pour obtenir un fonctionnement continu, compte tenu des vitesses caractérisant la réaction chimique et les processus de relaxation qui la suivent [4].

Les solutions adoptées ont été respectivement :

- (i) une décharge micro-onde (2,45 GHz, 2,5 kW) dans le mélange $SF_6 + He$, l'énergie micro-onde étant fournie au plasma par l'intermédiaire d'une *structure lente* (slow wave structure) ;
- (ii) un système de pompage dont le débit est 160 l/s à 3,5 torr.

Les performances obtenues (voir résumé en début

d'article), déjà encourageantes en regard de celles d'autres lasers chimiques HF continus de dimensions comparables [12, 13] (*), peuvent être améliorées :

- (i) en rendant plus efficace le couplage micro-ondes — plasma,
- (ii) en réduisant certaines pertes (réaction du fluor sur le tube à décharge en quartz, pertes par absorption dans la cavité optique, ...).

Ce type de laser peut être un instrument utile pour des applications à la physique moléculaire [7], à la séparation des isotopes [14], ainsi qu'aux communications.

Remerciements. — Nous voulons remercier MM. Y. Lemire et P. A. Dion pour leur assistance technique. Ce travail a été partiellement financé par le Service de Recherche de la Défense du Canada, le Ministère de l'Éducation du Québec et le Conseil National de la recherche du Canada.

(*) Proch, D., Pummer, H., Kompa, K. L. and Wanner, J., communication privée.

Bibliographie

- [1] *Appl. Opt. Supplement on Chemical Lasers* (1965).
- [2] KASPER, J. V. V. and PIMENTEL, G. C., *Phys. Rev. Lett.* **14** (1965) 352.
- [3] KOMPA, K. L., *Chemical Lasers* (Springer-Verlag) 1973.
- [4] EMANUEL, G., COHEN, N. and JACOBS, T. A., *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **13** (1973) 1365.
- [5] GAGNÉ, J. M., MAH, S. Q. and CONTURIE, Y., *Appl. Opt.* **13** (1974) 2835.
- [6] GAGNÉ, J. M., BERTRAND, L., CONTURIE, Y., MAH, S. Q. and MONCHALIN, J. P., *J. Opt. Soc. Am.* **65** (1975) 876.
- [7] STEPHENS, R. R. and COOL, T. A., *Rev. Sci. Instrum.* **42** (1970) 1489.
- [8] BOSISIO, R. G., WEISSFLOCH, C. F. and WERTHEIMER, M. R., *J. Microwave Power* **7** (1972) 325.
- [9] THOMAS, H. E., *Handbook of Microwave Techniques and Equipment* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.) 1972.
- BEVENSEE, R. M., *Electromagnetic Slow Wave Systems* (Wiley) 1964.
- [10] BERTRAND, L., GAGNÉ, J. M., MONGEAU, B., LAPOINTE, B. and CONTURIE, Y. (à paraître *J. Appl. Phys.*).
- [11] CHESTER, A. N. and HESS, L. D., *IEEE J. Quantum Electron.* **QE 8** (1972) 1.
- [12] GLAZE, J. A. and LINFORD G. J., *Rev. Sci. Instrum.* **44** (1973) 600.
- [13] HINCEN, J. J., *J. Appl. Phys.* **45** (1974) 1818.
- [14] MAYER, S. W., KWOK, M. A., GROSS, R. W. F. and SPENCER, D. J., *Appl. Phys. Lett.* **17** (1970) 516.