

光励起分子気体レーザー用キャパシ ティブメッシュ反射鏡の研究*

Capacitive-mesh Output Coupler for Optically Pumped Molecular Gas Laser

綱 脇 恵 章¹⁾ 田 中 和 男²⁾ 小 林 正 光³⁾
Yoshiaki TSUNAWAKI Kazuo TANAKA Masamitsu KOBAYASHI

Synopsis

Dual beam modulated far-infrared methyl alcohol gas laser interferometer has been constructed for use in high density tokamak and capacitive-mesh couplers have been developed since mode quality of far-infrared laser is of great importance for low divergence beam properties.

In this study, the properties of the mesh were represented with equivalent circuit as shown by Ulrich. The transmittance obtained in the far infrared region was not sufficiently in agreement with that calculated from the equivalent circuit. It became, however, clear that capacitive-mesh coupler was suited as output mirror for optically pumped far infrared lasers.

1. 緒 言

将来のエネルギー源として囑望される核融合プラズマは、現在トカマク型で約 10^{14}cm^{-3} の電子密度が得られるようになってきている。このプラズマ密度の測定手段の一つとして、プラズマ中を通過する電磁波の位相シフト量を測定する方法が有力なものとして、現在多くの研究がなされている。^{1)~5)}

このとき、使用される電磁波として遠赤外レーザーが用いられ、核融合プラズマの軸上での最大電子密度が、 10^{13} , 10^{14} , 10^{15}cm^{-3} に対しては、それぞれ $337 \mu\text{m}$ HCN レーザー、 $118.8 \mu\text{m}$ CH_3OH レーザー、 $41.7 \mu\text{m}$ CH_3OH レーザーが適していることが知られている。⁶⁾ これらのことを考慮して、我々も、Fig. 1 に示すような2光束変調型光励起遠赤外レーザー干渉計を名古屋大学プラズマ研究所共同研究として大阪大学において設計試作し、双子型光励起遠赤外 CH_3OH レーザーの研究を行ってきた。⁷⁾

今この光励起遠赤外 CH_3OH レーザー光を有効に発振させるためには、 CH_3OH レーザー共振器を構成するカップリング鏡が、 CO_2 励起レーザー光の波長 λ_P に対しては高い反射率をもち、遠赤外光 λ_{FIR} に対しては、適度の透過率と出来る限り低い吸収係数をもつことが必要であり、しかも、直径が数 cm のプラズマを診断するためには、出来る限り広い面からの発振した遠赤外光を取り出すようにすべきであり、また回折広がりを出るだけ小さくする必要がある。これら条件を満たす機構に Fig. 2 に示す

*昭和55年1月14日原稿受理

1), 2), 3) 大阪産業大学教養部

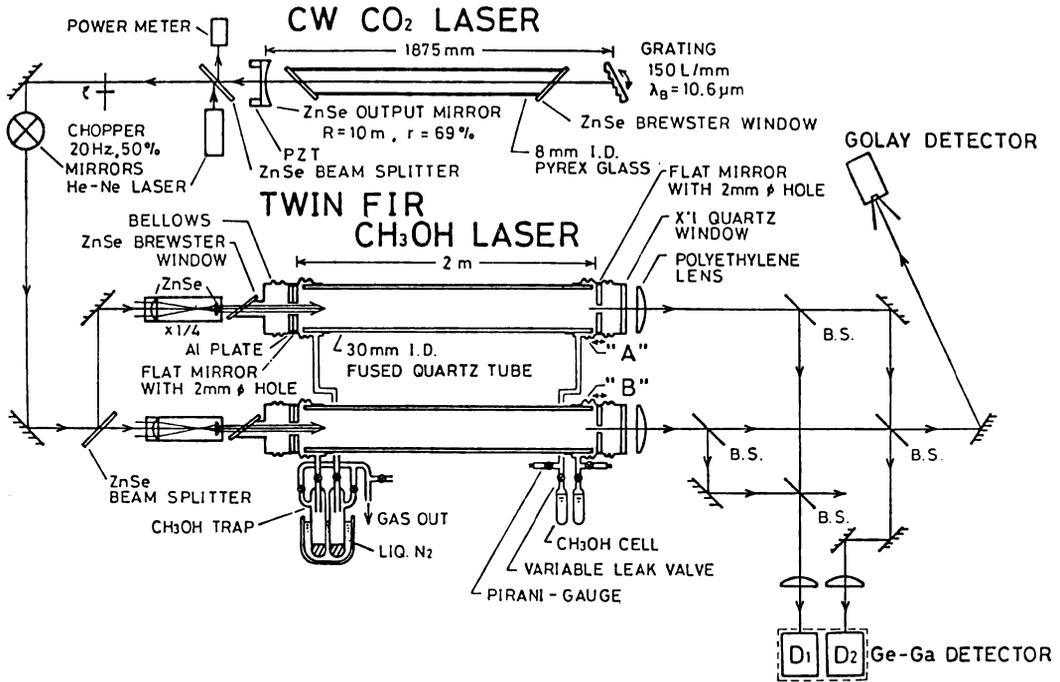


Fig. 1 2光束変調型遠赤外CH₃OHレーザー干渉計

ようなキャパシティブメッシュを遠赤外レーザー取り出し側のカップリング鏡として用いる方法が考

えられる。このようにキャパシティブメッシュを使用することは、次のような利点があげられよう。

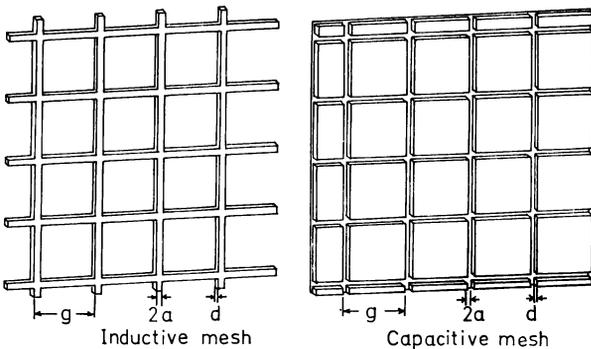


Fig.2 金属メッシュ

- 1) 機構が比較的簡単
- 2) ファブリーペローエタロンと異なり基盤の厚みをそれ程厳密に調整する必要はない。
- 3) メッシュの格子定数 g を任意に選ぶことにより、適度の透過率を λ_{FIR} に対して得ることができ、しかもそれよりも短い波長の λ_P に対して十分高い反射率を得ることができる。

- 4) メッシュの基盤に水晶を用いることにより、出力側から洩れ出る λ_P を吸収し、特別なフィルターを用いなくてもよい。

本研究においては、上記特徴を有するキャパシティブメッシュを試作し、遠赤外領域での透過率特性を調べ、CH₃OH遠赤外レーザー共振器に応用し、その問題点を調べた。

2. 金属メッシュの特性

2.1 マクスウェルの式から考えた透過率・反射率⁸⁾

誘電率および透磁率が夫々 ϵ , μ の場を E_x , H_y の電場および磁場ベクトルをもった平面電磁波が Z 方向に進むとき、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial Z} &= -\mu j\omega H_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial Z} &= -\epsilon j\omega E_x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

と表わされる。(1)を解けばA, Bを定数として

$$\left. \begin{aligned} E_x &= Ae^{j\omega t - \gamma_0 z} + Be^{j\omega t + \gamma_0 z} \\ H_y &= \frac{1}{Z_0} (Ae^{j\omega t - \gamma_0 z} - Be^{j\omega t + \gamma_0 z}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

但し $Z_0 = \sqrt{\mu/\epsilon}$ $\gamma_0 = j\omega\sqrt{\epsilon\mu}$

となる。Fig. 3 のような異なった誘電体の境界面では、I の領域において、

$$\left. \begin{aligned} E_{x1} &= E_i e^{-jk_1 z} + E_r e^{jk_1 z} \\ H_{y1} &= (1/Z_1) [E_i e^{-jk_1 z} - E_r e^{jk_1 z}] \\ K_1 &= \omega\sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \quad Z_1 = \sqrt{\mu_1/\epsilon_1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

媒質 II の領域において

$$\left. \begin{aligned} E_{x2} &= E_t e^{-jk_2 z} \\ H_{y2} &= (1/Z_2) E_t e^{-jk_2 z} \\ K_2 &= \omega\sqrt{\mu_2 \epsilon_2}, \quad Z_2 = \sqrt{\mu_2/\epsilon_2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

境界条件として

$$\left. \begin{aligned} E_{x1} |_{z=0} &= E_{x2} |_{z=0} \\ H_{y1} |_{z=0} &= H_{y2} |_{z=0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

を用いると

$$\left. \begin{aligned} E_i + E_r &= E_t \\ (1/Z_1)(E_i - E_r) &= (1/Z_2)E_t \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

電圧反射率 (又は振幅反射率) を Γ , 電圧透過率 (又は振幅透過率) を τ とおくと(6)より

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ \tau &= \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \\ \Gamma + \tau &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

が得られる。エネルギー反射率 (R), エネルギー透過率 (T) としては

$$\left. \begin{aligned} R &= |\Gamma|^2 = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right|^2 \\ T &= |\tau|^2 = \left| \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \right|^2 \\ |\Gamma|^2 + |\tau|^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

空間に金属メッシュがある場合、メッシュの反射率 $\Gamma(\omega)$, 透過率 $\tau(\omega)$ は、(i) 厚さが無視できる程

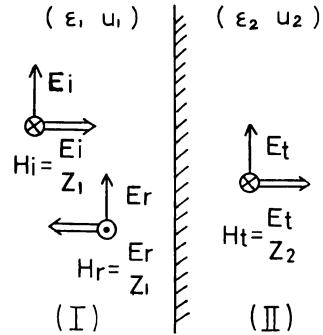


Fig. 3 異なる媒体面での電磁波の反射と透過

うすい, (ii) 電気伝導度が無限大であるという条件のもとで求めると, (7), (8) と同様な関係式が求まる。

2.2 等価回路の立場から考えた透過率・反射率⁹⁾

2.1節で述べたことは伝送線モデルを使って表現することができる。

Fig.4 のように, インピーダンス, キャパシタンスが連続的に分布した伝送線を考える。電圧および電流の x 方向への変化はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV}{dx} &= -ZI = -j\omega LI \\ \frac{dI}{dx} &= -YV = -j\omega CV \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

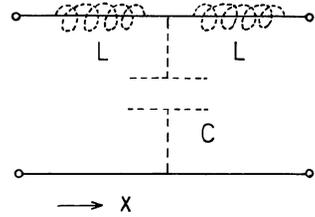


Fig.4 L, Cが連続的に分布する伝送線

(1)と(9)より

$$V \leftrightarrow E_x \quad I \leftrightarrow H_y \quad L \leftrightarrow \mu \quad C \leftrightarrow \epsilon$$

と対応させることができる。(9)を解けば

$$\left. \begin{aligned} V &= Ae^{j\omega t - \gamma_0 x} - Be^{j\omega t + \gamma_0 x} \\ I &= (1/Z_0)(Ae^{j\omega t - \gamma_0 x} - Be^{j\omega t + \gamma_0 x}) \\ \text{但し } Z_0 &= \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad \gamma_0 = j\omega\sqrt{LC} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

二つの異なったインピーダンス Z_1, Z_2 を持った伝送線が接続されている場合, その接続点における反射率, 透過率は(7)を求めたと同様にして

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ \tau &= \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \\ R &= |\Gamma|^2, \quad T = |\tau|^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

と表わされる。

誘電体の内部に厚さを無視できるようなメッシュがある場合 (Fig. 5 (a)) その透過回路は Fig. 5 (b) のように表わされ, その反射率, 透過率は(12)のようになる。但し, Z はメッシュのインピーダンス, Z' はFig. 5 (c) のように考えた場合の 3-3'点からの右のインピーダンスを表わす。

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= \frac{Z' - Z_P}{Z' + Z_P} \\ \tau &= \frac{2Z'}{Z' + Z_P} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

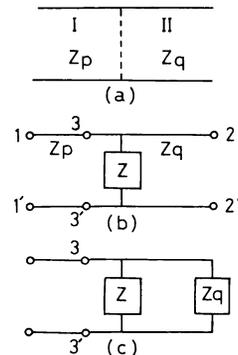


Fig.5 誘電体内に十分に薄いメッシュが存在するときの等価回路

2.3 メッシュの透過率・反射率

インピーダンスが1であるような空間内にメッシュが存在するとき、 $g \ll \lambda$ の波長領域での、厚さが無視できるようなインダクティブメッシュの等価回路は、Fig. 6(a)のように表わせる。さらに $g \approx \lambda$ 付近も考慮に入れその厚さが無視できないようなとき、Fig. 6(b)のような等価回路で表現できる。¹⁰⁾ その振幅反射率，振幅透過率は(13)より

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_1 &= \frac{-1}{1+2Z} \\ \tau_1 &= \frac{2Z}{1+2Z} \\ Z &= \frac{R}{2} + j \frac{Z_0}{2(\frac{1}{\omega c} - \omega L)} \\ Z_0 &= \sqrt{L/c} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

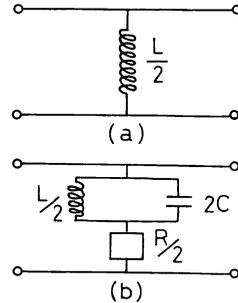


Fig. 6 インダクティブメッシュの等価回路

インダクティブメッシュとコンプリメンタリーな特性を示すキャパシティブメッシュにおいては、Fig. 7(a), (b)に示されるように、それぞれ厚さが無視できる場合と無視できない場合の等価回路が表現される。その振幅反射率，振幅透過率は

$$\left. \begin{aligned} \Gamma_c &= \frac{2Z}{1+2Z} \\ \tau_c &= \frac{-1}{1+2Z} \\ Z &= \frac{R}{2} + j \frac{1}{2} (\omega L - \frac{1}{\omega c}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

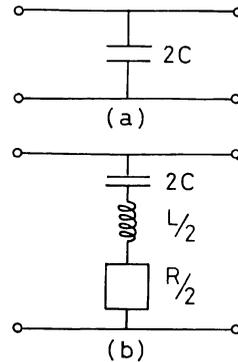


Fig. 7 キャパシティブメッシュの等価回路

として表わされ、(13)と比較すると $\Gamma_1 = \tau_c$ 、 $\Gamma_c = \tau_1$ であることがわかる。

さらに Ulrich¹⁰⁾は、実験的にそれらの等価回路と実際のメッシュ定数(g , a)とを関連づけ次のような関係式を得ている。

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{1}{1+Z_0^2 \Omega^2} \\ T &= \frac{Z_0^2 \Omega^2}{1+Z_0^2 \Omega^2} \\ Z_0 &= 1/2 \ell n \operatorname{cosec}(a\pi/g) \\ \Omega &= \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega \\ \omega_0 &= 1 - 0.27(a/g) \\ \omega &= g/\lambda \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

3. 結果および考察

キャパシティブメッシュは直径40mm，厚さ1.5mm，Z-cut水晶板上にAl蒸着を施したものをを用いた。蒸着膜厚は干渉顕微鏡観察より3000Å以上と考えられる。但し，メッシュ定数 g ， $2a$ はTable 1に示すとおりである。Fig. 8は，No. 2のキャパシティブメッシュに，6328Å He-Neレーザーを照射し，その後方 $L=1442\text{mm}$ の位置で観測した回折像をトレースした図である。等間隔に並ぶ回折像点が g の周期

Table 1 試作したキャパシティブ
メッシュの定数

No.	mesh const.	
	2a	g
1	13 μm	76 μm
2	17 μm	76 μm
3	21 μm	76 μm

によるものであり、 x 、 y 方向の濃淡の繰り返し
が $2a$ によるものである。それらの間隔は、理論
的に求まる(10)で表わされる回折像強度の周期とよ
く一致する。

$$I(x) = \left[\frac{\sin \frac{\pi g}{\lambda L} (2N+1)x}{\sin \left(\frac{\pi g}{\lambda L} x \right)} \right]^2 \frac{2\pi a}{\lambda L} x \left[\frac{\sin \frac{2\pi a}{\lambda L} x}{\frac{2\pi a}{\lambda L} x} \right]^2 \quad (10)$$

他の2つのキャパシティブメッシュについても同
様な回折像が得られた。以上のことからこれら試
作されたキャパシティブメッシュは Table 1 のメ
ッシュ定数を正確に満たしていることがわかる。

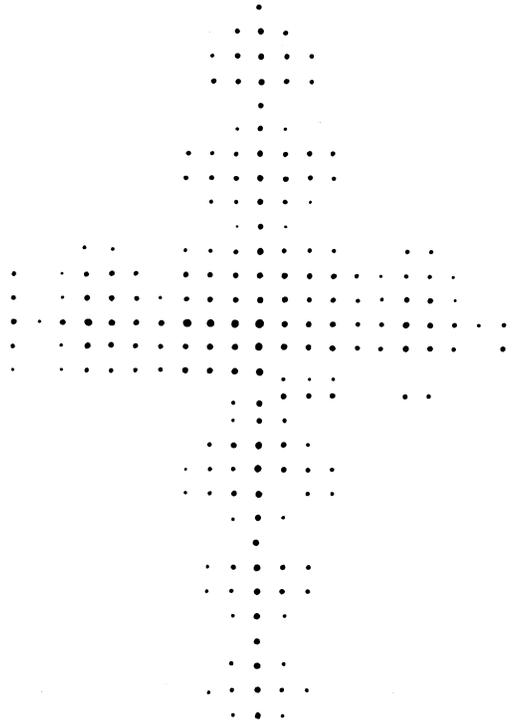


Fig. 8 No.2のキャパシティブメッシュの回折像

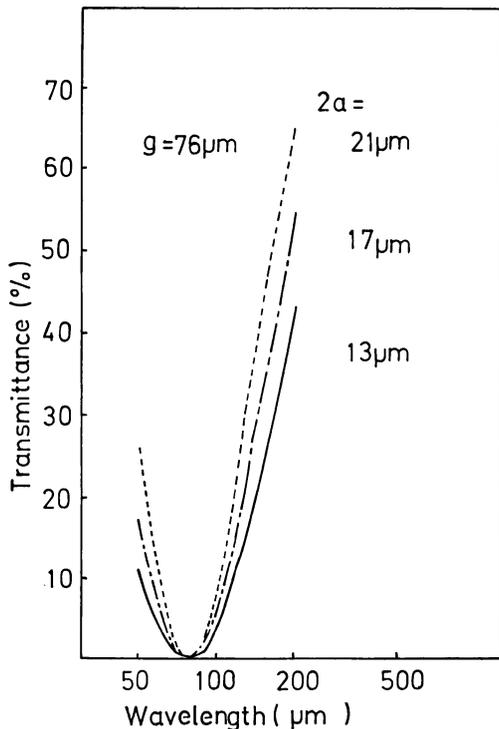


Fig. 9 等価回路より求まるキャパシティブ
メッシュの透過率

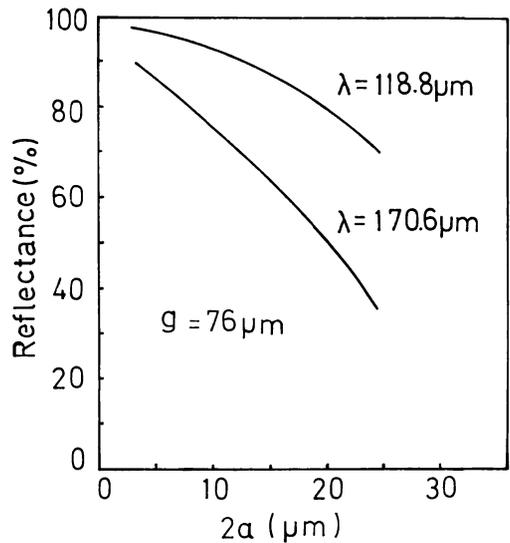


Fig. 10 等価回路より求めるキャパシティブ
メッシュの反射率の $2a$ 依存性

Fig. 9 は、(10)を用いて求めた吸収のないとき
のキャパシティブメッシュの透過率を示す。い
ずれの場合においても、そのカットオフ周波数
は、 g 値近傍の $\lambda=76\mu\text{m}$ であり、波長と共にその透

過率が大きくなるのが見られる。また $2a$ が大きくなるとそれらの透過率は増大する。Fig.10は、 CH_3OH レーザーの波長 $118.8\mu\text{m}$ と $170.6\mu\text{m}$ に対する吸収のないときの反射率を、 $2a$ の関数として示したものである。従来の研究では、反射率がほぼ 85% のときレーザー発振が認められており²⁾、この計算結果では、波長 $118.8\mu\text{m}$ に対しては全てのメッシュで、波長 $170.6\mu\text{m}$ に対しては No.1 のメッシュのみで発振が期待される。

Fig.11 は、大阪大学大型遠赤外分光器¹⁾ を用いて、試作したキャパシティブメッシュの透過測定した結果を示す。Fig.9 の計算値と大きく異なり、No.1 のメッシュ以外はそのカットオフ特性は余りよくなく、また全てのメッシュについて

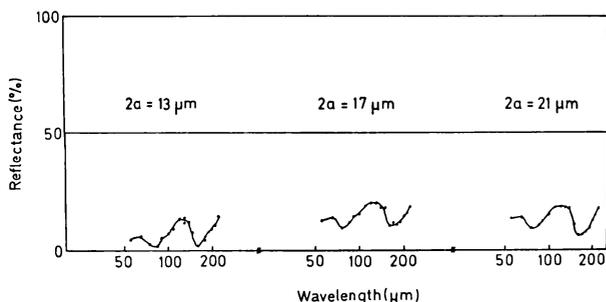


Fig. 11 試作したキャパシティブメッシュの透過率

よくなく、また全てのメッシュについて $150\mu\text{m}$ 付近に幅広い強い吸収が見られる。この吸収バンドは、基盤に用いた水晶板による吸収のみでは説明されず、蒸着に用いた Al 材料内に含まれる不純物による影響も今後調べていく必要がある。また理論から求める電磁波のメッシュへの浸入深さよりも、十分に厚いと考えられる蒸着膜の厚さ (3000\AA) ではまだ不十分で、さらに厚い蒸着膜厚にする

ことにより、そのカットオフ特性がよくなることが期待される。

Fig.12 は、No.3 のキャパシティブメッシュを、Fig.1 の CH_3OH レーザー共振器の出力部に取りつけて、 $118.8\mu\text{m}$ 線を発振させたときの、共振器長に対する出力信号を図示したものである。図に示す

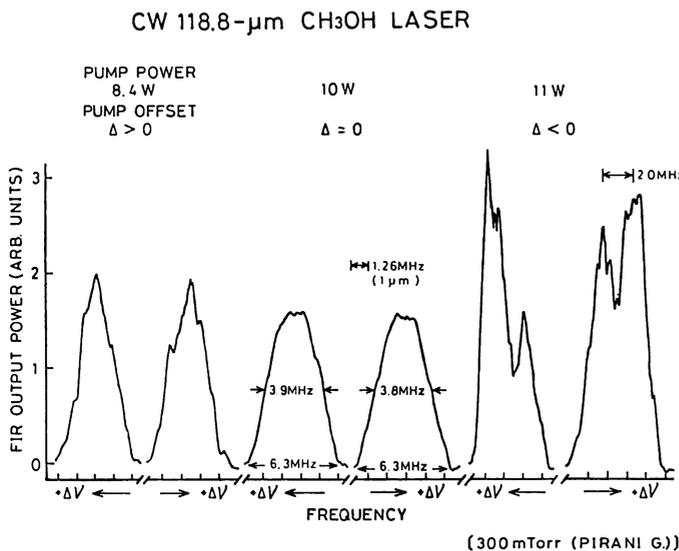


Fig. 12 No.3 のキャパシティブメッシュを用いて得た $118.8\mu\text{m}$ CH_3OH レーザー

ように、約 10W の CO_2 レーザーで励起したとき、ほぼ共鳴励起の場合、約 3.9MHz の半値全幅が得られ、その際の出力は $2\sim 3\text{mW}$ であった。またポンプオフセットが負の場合、非対称ダブルレットが現われた。しかしこのときのダブルレットの強度の大小関係が、理論とは逆になっている。これは恐らく、 EH_{11} モードが、両方の平面鏡の平行度のずれや、励起 CO_2 レーザー光束のパターンの影響のため、なめらかでなく、また Golay 検知器が 30mm の光束の一部を受けていたとも考えられる。これらのことが原因して同調曲線が乱されて観測されたものであろう。なお No.3 のメッシュを用いた場合、 $170.6\mu\text{m}$

の弱いレーザー発振も同時に観測された。他方 No.1 のメッシュを用いた場合、 $118.8\mu\text{m}$ は観測されず、 $170.6\mu\text{m}$ のみが発振、No.2 の場合は、いずれの波長のレーザー光も発振はしなかった。しかし、遠赤外レーザー発振は、励起光である CO_2 レーザーの出力に大きく依存するため、今後さらに、キャパシティブメッシュの最適反射率と共に、 CO_2 レーザー出力についても検討していく必要があると考えられる。

以上、本研究において、キャパシティブメッシュの光学特性と理論との比較を十分検討するには至らなかったが、光励起型遠赤外レーザーのカップリング鏡として、十分に使用できることが明らかになった。しかし、更に効率よく高い出力の遠赤外レーザーを得るには、(i) より大きな出力の CO₂ レーザーを用い、(ii) キャパシティブメッシュの Al 蒸着膜の厚さをコントロールし、(iii) 問題となる遠赤外レーザー光の波長のところでの、キャパシティブメッシュの反射率を測定することにより、その最適条件を見出すことが必要である。従って、今後さらに、この重要なキャパシティブメッシュの最適化を検討していく予定である。

最後に本研究を遂行するにあたり、多大なご助力をいただきました大阪大学工学部 応用物理学教室 山中正宣博士に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) D. V'eron : Opt. Comm. 10 (1974) 95
- 2) S. M. Wolfe, K. J. Button, J. Waldman and D. R. Cohn : Appl. Opt. 15 (1976) 2645
- 3) K. J. Button and S. M. Wolfe : Far Infrared/Submillimeter Waves Technology/Applications, 105 (1977) 72
- 4) S. M. Wolfe and P.A.Pribyl : Bull. Amer. Phys. Soc. 22 (1977) 1193
- 5) K. J. Button : "Infrared and Millimeter Waves" Vol. 2, Academic Press, New York (1979)
- 6) 山中正宣 : 「干渉計測振動除去に関する研究」 日本原子力研究所委託調査報告書 (1980年2月)
- 7) M. Yamanaka, Y. Takeda, S. Tanigawa, A. Nishizawa, N. Noda, M. Takai, M. Shimobayashi, Y. Hayashi, T. Koizumi, K. Nagasaka, S. Okajima, Y. Tsunawaki, A. Nagashima and J. Fujita : IPPJ, Institute of Plasma Physics, Nagoya Univ., 1979
- 8) 吉永 弘他 : 「応用光学概論」 第2章 金原出版
- 9) 熊谷三郎 : 「電気回路交流現象理論」 第15, 16章
- 10) R. Ulrich : Infrared Phys., 7 (1967) 37
- 11) H. Yoshinaga, S. Fujita, S. Minami, A. Mitsuishi, R. A. Oetzen and Y. Yamada : J. Opt. Soc. Amer., 48 (1958) 315