
大出力化学レーザに関する研究

Study on the high power chemical laser

代表研究者	慶応義塾大学工学部教授	藤岡 知夫
	Prof., Faculty of Eng., Keio Univ.	TOMO O FUJIOKA
協同研究者	慶応義塾大学工学部助教授	野口 晃
	Assoc. Prof., Faculty of Eng., Keio Univ.,	Akira NOGUCHI
	慶応義塾大学工学部専任講師	内山 太郎
	Assist. Prof., Faculty of Eng., Keio Univ.,	Taro UCHIYAMA
	慶応義塾大学工学部専任講師	小原 實
	Assist. Prof., Faculty of Eng., Keio Univ.,	MINORU OBARA

1. Initiation method.

Xe flashes, surface spark discharge flashes, and rare gas halide lasers were studied for the ultraviolet radiation sources for the dissociation of F_2 , and CO_2 lasers were studied for the dissociation of SF_6 . X-ray was also studied for the pre-ionization of main discharge in the laser gas, which is very suitable for high pressure and large volume discharge. Preliminary experiments using raregas halide lasers were well succeeded. The surface-spark-discharge flash developed here are shown to be very useful as initiation sources of H_2/F_2 chemical lasers because of its high radiative efficiency in the UV region, no corrosion by HF, good scalability to large volume laser system, and long life.

2. Kinetics and reaction mechanism.

The method for extending the use of sealed HBr laser, up to 900 times, was achieved by Cl_2 activation. The J dependence of 4.2 micron CO_2 pressure broadening was measured.

3. Analysis of chemical lasers.

HF, HCl, HBr and photodissociation iodine chemical lasers were analysed using computer and the characteristics of them were compared each others. A reliable computer simulation code for chemical lasers is established from the comparative studies between the experiments and theoretical calculations. Effects of initiation modes (initiation pulse width, dissociation rate of F_2) to HF laser performances are predicted using the simulation code.

4. Constructions of high power chemical laser systems.

Three types of high power H_2/F_2 chemical laser systems, which are initiated by a Xe flash, surface-spark flash, and E-beam, have been developed. An output HF laser energy of nearly 100 J/pulse (5 μ sec FWHM) with a overall electrical efficiency of 9% is obtained in the Xe-lamp initiated laser system which have about 10 l active volume. In the newly developed photoinitiation type using a surface-spark flash, an HF laser energy of about 10 J/pulse (2 μ sec FWHM) with a overall electrical efficiency of 13% is achieved from about 1 l active volume, with improvements of several problems in conventional Xe flash lamp initiation types. On the other hand, the 600 keV-150 J E-beam initiated laser system demonstrates more than 100 J/pulse (200 μ sec FWHM) of HF laser energy with a intrinsic electrical efficiency of more than 200%.

研究目的

将来のエネルギー問題解決の一助として、レーザを用いた核融合、アイソトープの分離など、新しいエネルギー源開発のためのレーザ研究が重要であることは申すまでもない。

エネルギー源開発のために応用されるレーザは、大きな出力であると同時に、効率が高くなければならない。しかるに、これまで大出力レーザとして研究されて来たガラスレーザは、効率が0.1%と極めて低く、CO₂レーザも短パルスにしたときは、数%の効率しかない。

化学レーザは、化学反応の際放出される莫大なエネルギーを、熱でなくレーザ光のエネルギーとして取り出そうとするものなので、原理的に高出力であり、また極めて高効率である。

本研究は、化学レーザの中でも特に大出力が期待される光点火 HF 化学レーザを中心に、原理的に高出力・高効率である化学レーザを、実際の高出力・高効率レーザとして完成させるため、理学的・工学的に各方面から基礎的研究を積み重ね、大出力レーザのモデルを完成させることを目的としている。

1. 点火法の研究

1-1 Xe フラッシュ・ランプ

光点火 H₂/F₂ レーザの総合電気効率、出力エネルギーを増加するためには F₂ 分子を効率よく解離することが非常に重要である。このため、光点火 H₂/F₂ レーザの光源としては、i) F₂ 分子の解離吸収帯である紫外域 (220~400 nm) での発光効率が高いこと、ii) 光源とレーザ媒質間の光学的結合度が良いこと、iii) 寿命に対する信頼性、F₂、HF の腐食性ガス中における耐久性に優れていることなどの性能が要求される。Xe フラッシュ・ランプは構造や取扱いが簡便であるため、従来から H₂/F₂ レーザの点火源として広く用いられてきた。ここでは i) に述べた紫外域で発光効率の高い Xe ランプを開発するための重要な設計指針とランプの駆動条件、および試作した Xe ランプの主な動作特性について述べる。

Xe ランプのプラズマ温度と電流密度の関係¹⁾、プラズマ抵抗率と電流密度の関係²⁾、発光特性³⁾、

駆動回路の最適化⁴⁾ に関しては古くから多くの研究が行なわれてきた。それらの詳細は各文献にゆずることにして、ここでは設計指針に関する重要事項についてのみ記述する。

まず、Xe ランプの発光がそのプラズマ温度と同温の黒体放射の発光に近似できるとすると⁵⁾、紫外域の発光効率を高くするには高いプラズマ温度にする必要がある。このため、Xe ランプは一般に非常に高い電流密度領域で使用しなくてはならない。Gusinow ら¹⁾ の実験式を用いると、プラズマ温度 T_p は次式で与えられる。

$$T_p = 603(j\sqrt{R})^{0.11} \quad [\text{K}] \quad (1)$$

ここで、 j は電流密度 (A/cm²)、 R はランプの内径 (cm) である。黒体放射を仮定するならば全体のスペクトルに対する紫外域 (250~290 nm) の発光効率はプラズマ温度 T_p にして約 14,000~15,000 K において最大値 10.5% に達する。このときの電流密度は 15~20 KA/cm² である。我々は紫外域で高効率動作する Xe ランプを試作する上で上記の電流密度を一つの目安とした。

次に Xe ランプの寿命に関して述べる。Xe ランプを高電流密度領域で効率的に動作させるためには、Xe ランプの内径を絞り、高い入力エネルギーを短い時間内 (数 μsec) で注入せねばならない。

直線型 Xe ランプの入力エネルギーに対する寿命の変化は、一般的な実験経験式として次式で示される⁶⁾。

$$S = (E_x/E)^a \quad (2)$$

ここで、 S はランプの破壊に至るまでのショット数、 E_x は Xe ランプへの最大入力エネルギー、 a は一般に 9~10 の数値の定数である。また、最大入力エネルギー E_x は次式で与えられる⁷⁾。

$$E_x = A \cdot D \cdot l \cdot \sqrt{T_F} \quad (3)$$

ここで、 A は管の構造によって決まる定数、 D は内径、 T_F はランプの発光時間 (FWHM)、 l は放電長である。(3) 式から Xe ランプの内径を絞り、パルス幅を短くすることは、 E_x を小さくすることになり、(2) 式から、ランプの寿命は指数的に短くなってしまふ。このように Xe ランプを特に紫外域のフラッシュ光源として用いること

は、本質的に寿命が制限されてしまうという困難を有している。

放電時の衝撃波を吸収するような構造を電極部にほどこして、Xe ランプの高耐力化を計る研究⁹⁾も報告されており、試作に際してはこれらの条件も考慮した。ここに述べた寿命ショット回数 S は、主に放電時の衝撃波、放電プラズマによる石英管の摩耗に起因するものであるが、この他に高電圧側の電極とアース間に生じる高電界による絶縁破壊現象も破壊原因となり得るので、Xe ランプの電気的配置にも十分配慮が必要である。

Xe ランプの放電プラズマを含めた駆動回路全体の最適化も高効率化にとって重要である。直線型 Xe ランプの放電アーク・プラズマ抵抗率 $\rho(j)$ は、実験式としていくつか報告されているが^{2), 9), 10)}、代表的なものとしては、

$$\rho(j) = 0.885 j^{-1/2} \quad (4)$$

がよく用いられている。Xe ランプの駆動回路は、この非線形抵抗 $R(j)$ を含む LCR 直列共振回路として等価的に近似できる⁴⁾。この回路方程式は電流に対する非線形微分方程式であり、次式のように与えられる。

$$L \frac{di}{dt} \pm K_0 |i|^{1/2} + \frac{1}{C} \int_0^t i d\tau = V_0 \quad (5)$$

ここで、 L は回路全体のインダクタンス、 C はキャパシタ・バンクの静電容量、 K_0 は、Xe ランプの長さ、内径、ガス圧による定数で、文献 (11) に詳しい記述がある。また、 V_0 はキャパシタ・バンクの充電電圧である。回路方程式の解析を簡単化するために、(5) 式を規格化して次のように記す。

$$\frac{dI}{d\tau} \pm \alpha |I|^{1/2} + \int_0^\tau I d\tau = 1 \quad (6)$$

ここで、 I 、 T 、 α は規格化した変数でそれぞれ次のように示される。

$$I = iV_0^{-1}(L/C)^{1/2}, \quad T = (LC)^{1/2}\tau^{-1}, \\ \alpha = K_0V_0^{-1/2}(L/C)^{-1/4} \quad (7)$$

このような回路を紫外発光にとって最も効率的にするためには、臨界制動条件近くで駆動することが望ましい。この最適条件における α は約 0.8 である。

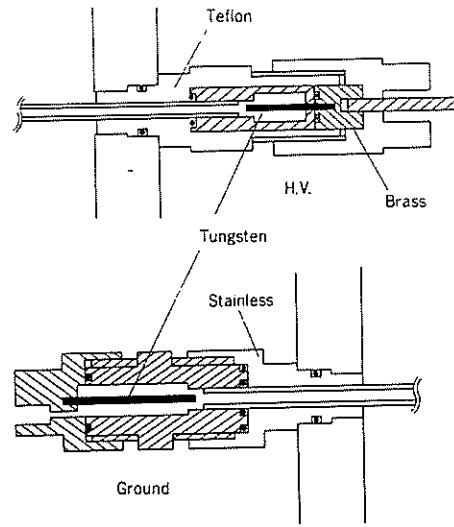


Fig. 1. Structure of the Xe-lamp electrodes.

最後に、以上の観点から、我々が試作した Xe ランプの構造および特性について述べる。石英管は内径 3.5 mm、肉厚 1.5 mm、長さ 600 mm の市販品 (東芝セラミクス, QT3-A) を用いた。我々が採用した電極構造の 1 例を Fig. 1 に示す。高電圧側はテフロン・ソケットでレーザ管フランジ (アース) に対し絶縁を施してある。衝撃波による石英管の損傷を緩和するために、石英管の固

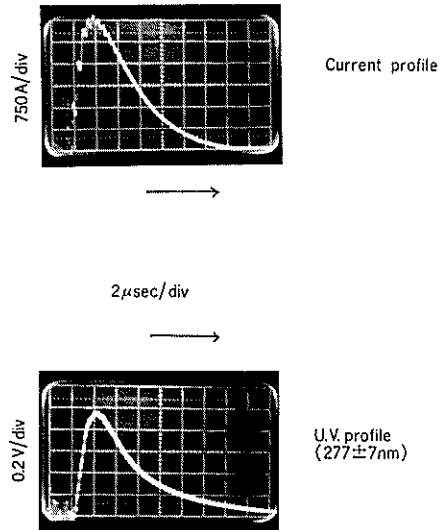


Fig. 2. Typical profiles of discharge current and UV (277 ± 7 nm) of Xe lamp.

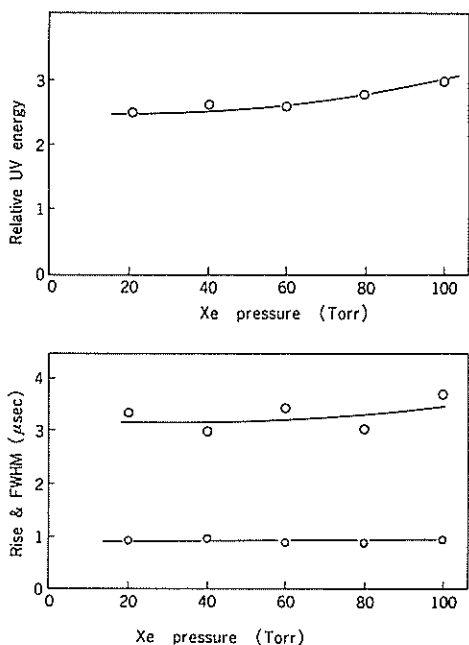


Fig. 3. Dependence of Xe fill pressure on the relative UV energy (a), and the rise-time and pulse width (FWHM) of UV profile (b).

定は O-リングを介して比較的機械的自由度をもたせており、また、電極構造としては高圧およびアース側の両方に衝撃波吸収用の空洞を設けた。Fig. 2 はロゴスキー・コイルおよび光電管を用いて測定した典型的な放電電流波形と紫外 (277 ± 7.5 nm) 発光波形である。電流密度は最大で約 40 kA/cm² で、このときのプラズマ温度 T_p は約 20,000 K で紫外発光に十分な温度が得られている。Fig. 3 に Xe ガス圧力に対する Xe ランプの紫外域の相対発光エネルギー、パルス幅、立ち上りの変化を示している。Fig. 3 から発光エネルギー、パルス幅、立ち上りは、ほとんど Xe ガス圧力に依存しないことがわかる。内径の小さい Xe ランプを大電流密度で用いると、Xe 原子特有のラインよりもむしろ石英管内壁から放電により Ablation で生じたガスによる発光で全発光特性が支配される¹²⁾。いわゆる、“Ablation lamp”として動作しているといつてよい。この結果から、管内に生じる衝撃波をできるだけ弱くするため、Xe ガス圧力は通常 10 Torr 程度の低圧力で

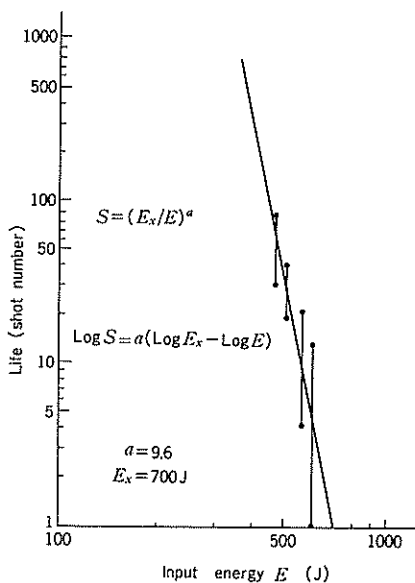


Fig. 4. Variation of service life as a function of input energy to the Xe lamp.

用いた。Fig. 4 は、試作した Xe ランプの入力エネルギーに対する寿命ショット回数の変化を示している。通常市販されている石英管は、製作上、寸法 (肉厚)、局部的な歪みなどにバラツキがあり、Fig. 4 中の測定値に、ある程度のバラツキを与える原因となる。Fig. 4 に太線で示した直線の傾きと切片から (2) 式中の指数 a と最大入力エネルギー E_x が求められる。求められた値は $a = 9.6$ 、 $E_x = 700$ J であった。実験では、通常入力エネルギー 400 J で用いたが、このときの寿命ショット回数は約 100~200 ショットで実験室規模の装置としての寿命は満足された。

Xe フラッシュ・ランプは、これまでに述べてきた様に点光源としては比較的簡便に利用できるが、i) 本質的に破壊現象を伴う、ii) 光学的な結合度を高くするために反射器を必要とする、iii) F_2 、HF 中では石英管表面が腐食される、等の問題があり実用的な光源としての信頼性に欠けると思われる。次節には、これらの問題を解決する新しい点光源について述べる。

2. レーザの諸反応に関する研究

2-1 SF₆ 分子の解離度および再結合反応

SF₆ をフッ素ドナーとする HF レーザでは効

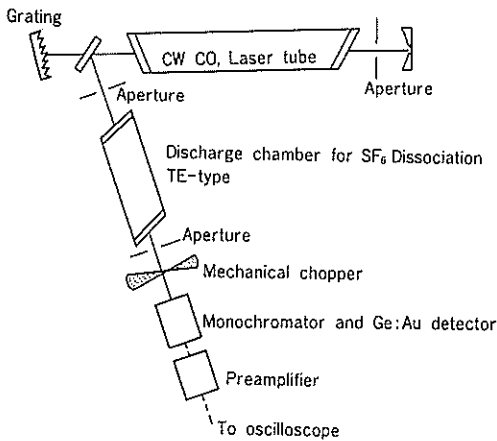


Fig. 5. Experimental setup for observing electrical decomposition and recombination of SF_6 .

率の評価およびポンピング反応の理解のために、実時間でフッ素生成過程を研究することは興味深くかつ重要である。

ここでは、 CO_2 レーザの $10.6 \mu\text{m}$ P (20) 線の SF_6 放電中における透過特性を測定することにより、放電中の SF_6 の解離および再結合過程の基礎的知見を得ることを試みた。 SF_6 の放電中に生ずると思われる反応は非常に複雑であり、大電流放電中ではイオンを含む高エネルギー反応が起こりうる。しかし、ここでは次の仮定を置いて考察する。1) CO_2 レーザ P (20) 線の吸収は SF_6 ガスのみによる。2) 吸収係数は温度変化に対して無関係である。

実験装置の略図を Fig. 5 に示す。グレーティングを用いて $(00^\circ 1) \rightarrow (10^\circ 0)$ 遷移の P (20) 線を発振させ、その CO_2 ビームは 10 cm の TE 放電管を通り検出器に至る。吸収の飽和の生じないレーザー光強度で実験した。放電管は横方向 (TE タイプ) ピン抵抗型電極を持っている。カソードは 20 ピン 2 列の電極で、おのおの 100Ω のバラスト抵抗が付いている。一方、アノードはアルミニウム・プレートで、電極間隔は 14.5 mm である。放電は 24 kV に充電した 20 nF のキャパシタをトリガ付ギャップ・スイッチにより始動した。 CO_2 レーザ・ビーム検出系の制限から、0.5~1.4 Torr の SF_6 圧力で実験を行なった。

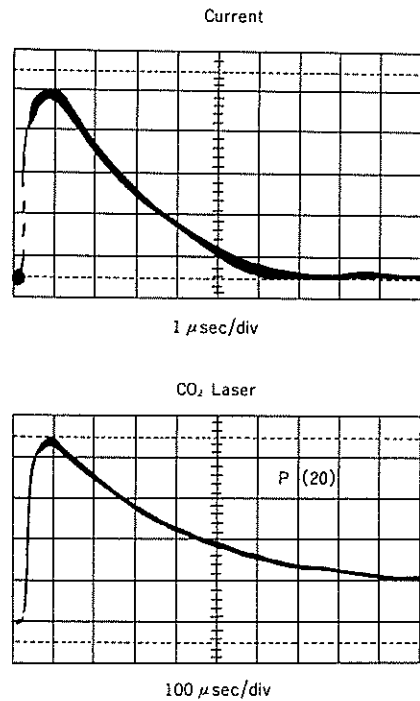


Fig. 6. Typical trace of P(20) line of CO_2 laser transmitted through the SF_6 chamber during a pulsed discharge. Horizontal: $100 \mu\text{sec/div.}$, vertical: transmitted CO_2 laser intensity. (with a 20-nF and 24-kV discharge in a 0.57-Torr SF_6)

放電中の CO_2 レーザの透過強度の立上りは約 $20 \mu\text{sec}$ であり、放電電流は $5 \mu\text{sec}$ 位持続しているため、放電電流が停止しても SF_6 の濃度の減少は続いている (Fig. 6)。 CO_2 レーザの透過強度の増加は、およそフッ素原子生成数の増加を示す。測定圧力域で、放電前の透過強度と放電中の最大透過強度を比較することにより SF_6 の解離度を算定した (Fig. 7)。Fig. 7 から明らかのように、90% 以上の解離が生じている。ここで、 CO_2 レーザの P (20) 線の SF_6 ガス中における吸収係数 $\alpha = 0.47 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ を用いた¹³⁾。解離度は 15~30 kV で電圧とともに、わずかに増加する。 SF_6 ガス圧力に対して放電エネルギーが大きいので、実際に動作している HF・ケミカル・レーザの放電状態とは異なると思われる。

SF_6 放電中に生ずる主な解離反応は以下の反応であると考えられる^{14), 15)}。

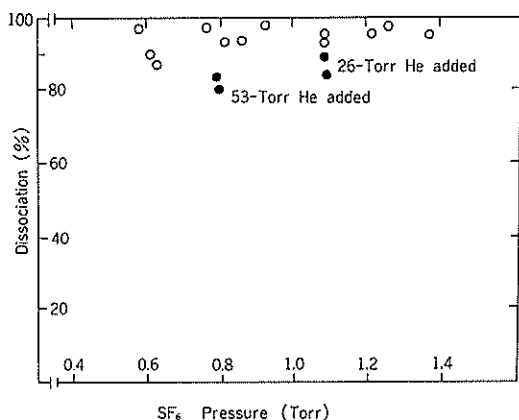
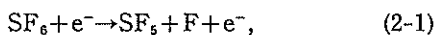
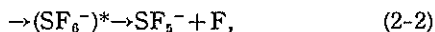


Fig. 7. Plot of percent SF₆ dissociation as a function of SF₆ pressure. ○: pure SF₆, ●: with He.



$$\Delta H = 71.4 \sim 75.9 \text{ kcal mol}^{-1},$$



さらに, SF₄, SF₃ へと解離が進む過程もあろうが, (2-1)~(2-3) に比較して少ないであろう。

続いて, 次の再結合反応が生じうる。

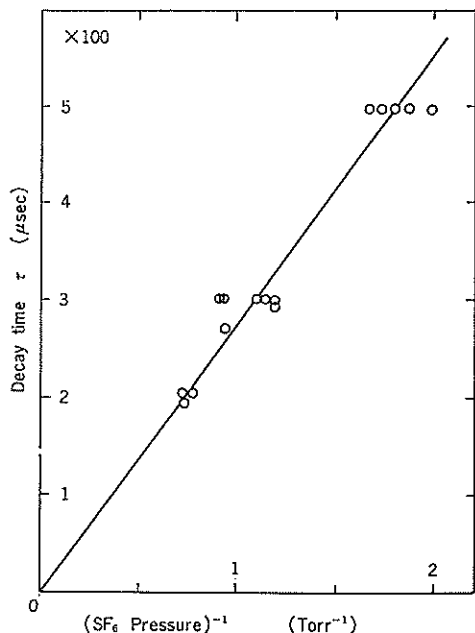


Fig. 8. Decay time versus (SF₆ pressure)⁻¹.



したがって, CO₂ レーザの P (20) 線の透過強度の減衰は再結合による SF₆ の再生成のためであろう。Fig. 8 に減衰時間 τ と SF₆ 圧力の逆数とのプロットを示す。Fig. 8 の実線は

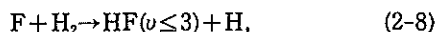
$$P\tau = (280 \pm 40) \mu \text{ sec} \cdot \text{Torr}$$

の直線である。95% の解離度を想定すると, 解離に供された SF₆ 圧力に対して減衰時間は (2-7) 式で書ける。

$$P\tau = (270 \pm 40) \mu \text{ sec} \cdot \text{Torr} \quad (2-7)$$

これはおよそ (2-4) の反応の時定数であろう。ヘリウム・ガスは SF₆ 分子の効果的な振動緩和剤 (Pτ = 41 μsec·Torr) であるが, SF₆ 中に多量の He ガスを加えても透過強度の時間的変化にはほとんど影響を与えなかった。さらに, (2-5), (2-6) の再結合反応は 3 体衝突過程と考えられるので, (2-4) の速度に比較して非常に遅い。

SF₆ と H₂ の混合ガスに放電を印加すると, P (20) 線の透過強度の減衰時間は非常に大きくなる。これは, HF ポンピング反応



$$\Delta H = -31.7 \text{ kcal mol}^{-1},$$

によるフッ素原子の捕獲のために (2-4) の反応で SF₆ の再生が困難になるためであろう。

2-2 HF レーザの回転緩和反応

パルス HF ケミカル・レーザは多くの振動・回転スペクトルを発振線とする。振動準位の CASCADE と回転準位の J スイッチが HF レーザでは観測される¹⁶⁾。これらのプロセスの中で, 回転緩和反応が重要な役割を演ずることが明らかになっている。Peterson ら¹⁷⁾と Hinchin ら^{18), 19)} は別個に, HF ガス中での回転緩和反応の速度定数を測定した。Peterson らはレーザ励起/レーザ・プローブ法を用いた。しかし, その方法には励起した準位に関する測定しかできない欠点があった。Hinchin は 2 つの HF レーザによる二重共鳴法を用いた。HF(ν=1) の J=3 準位から J=4, 5, 6, 7 への回転エネルギー・移乗の速度定数は 10⁷ sec⁻¹·Torr⁻¹ のオーダーであることが明らかになり, その速度定数は回転準位間のエネルギー差

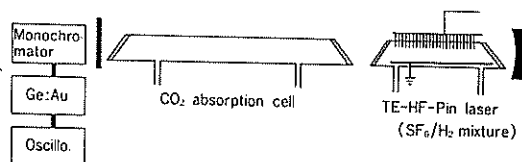


Fig. 9. Schematic of experimental setup.

に依存することも明らかになった。

ところで、 CO_2 分子の $(00^0 0) \rightarrow (10^0 1)$ の結合帯の吸収線は $2.7 \mu\text{m}$ 帯 HF レーザの発振線と一致するものがある。一般に、HF レーザは多波長発振するので、 CO_2 ガスセルを HF レーザ共振器の中に入れて、ある特定の発振線 $P(J)$ はその吸収損失のために発振を停止する。その発振停止の影響が隣りの発振線 $P(J \pm 1)$ に現れる。その時間的振舞は J 準位と $J \pm 1$ 準位の間の回転エネルギー移乗に強く依存する。

そこで我々は SF_6/H_2 レーザガス中での回転緩和過程の定量的な情報を得るために、レーザガスの圧力の関数として $P(J \pm 1)$ 線の時間的振舞を観測した。

実験装置の概略を Fig. 9 に示す。30 cm の HF ピン・レーザは 2 列の 57 ビンのカソードとプラスのアノードから成る。 $\text{SF}_6/\text{H}_2 (=4/1)$ は両端から導入し、中央部から排気される。レーザの点火は、27 kV に充電した 20 nF のキャパシタ・バンクを放電することにより行なった。共振器内の CO_2 吸収セルはパイレックス・ガラス管 (1 m) で NaCl ブリュースタ窓を付けている。レーザ共振器は曲率半径 8 m の全反射鏡とシリコン平板出力取出鏡で構成されている。レーザスペクトル検出は 25 cm の分光器と Ge: Au 検出器で行なった。

別の実験で、1 atm の CO_2 を含む 1 m の長さのセルを使って HF レーザの個々の発振線の吸収率を測定した。HF レーザの発振線は、 $P_{1-0}(3-9)$ 、 $P_{2-1}(3-9)$ 、 $P_{3-2}(2-5)$ であった。このうち、 $P_{2-1}(4, 5)$ と $P_{1-0}(5-8)$ は完全に吸収され、 $P_{3-2}(2)$ 、 $P_{2-1}(3)$ 、 $P_{1-0}(9)$ は少々吸収され、その他の発振線の吸収は検知できなかった。

1 atm の CO_2 を封入した吸収セルを HF レーザ共振器内に挿入して、HF レーザ発振線の強度

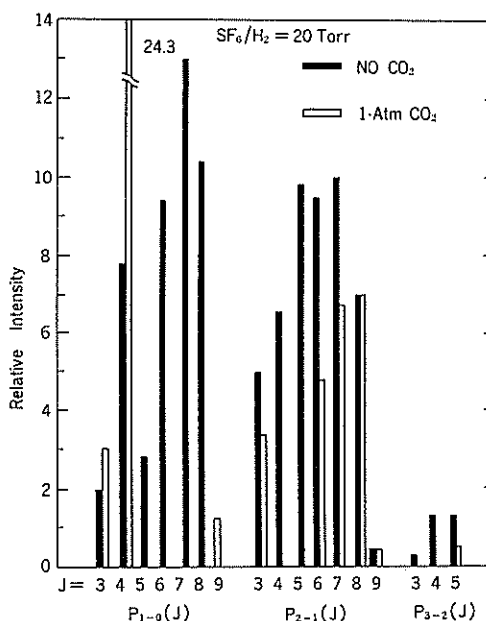


Fig. 10. Relative intensity of P-branch lines in the pulsed HF laser for the SF_6/H_2 pressure of 20 Torr.

変化を測定した。このとき、20 Torr での HF レーザ発振線のうち $P_{1-0}(5-8)$ 、 $P_{2-1}(4, 5)$ 、 $P_{3-2}(3, 4)$ は発振が停止した。 CO_2 ガスを排気すると、 $P_{1-0}(3-8)$ 、 $P_{2-1}(3-9)$ 、 $P_{3-2}(3-5)$ の発振線が検出された。 CO_2 吸収セルを用いると、 $P_{1-0}(4)$ の発振強度は 3 倍に増加し、 $P_{1-0}(9)$ が新しく発振した (Fig. 10)。

1 Torr 以下の低圧力 SF_6/H_2 での HF レーザ

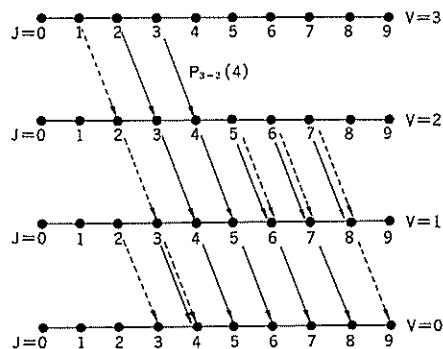


Fig. 11. Sequence of transition for the HF laser at the pressure of less than 1 Torr. ---: with intracavity CO_2 absorber, —: without CO_2 absorber.

の遷移の時間順序を Fig. 11 に示す。低圧力の HF レーザで、共振器内に CO_2 ガス吸収セルを挿入して、発振線の数に変化しても全出力エネルギーは不変であった。これは、レーザ発振の時間内では V-R/T 緩和はほとんど起こらないことを意味する。Fisk と Hays は比較的高圧力 (~24 Torr) の HF レーザで、我々と同様の結果を得たと報じている。

我々の以前の HF レーザの時間分解分光研究¹⁶⁾によると、カスケード遷移の時間遅れの順序は、 $P_{2-1}(J) \rightarrow P_{1-0}(J+1)$, $P_{3-2}(J-1) \rightarrow P_{2-1}(J)$ である。比較的高圧力 (~20 Torr) でさえも、回転緩

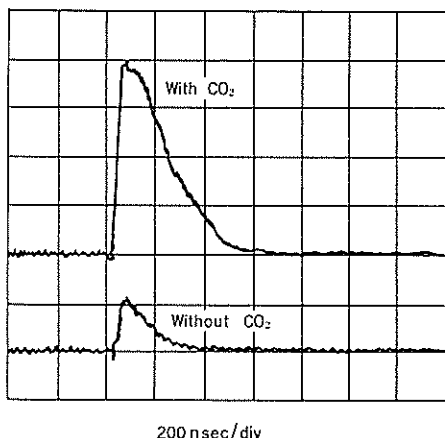


Fig. 12 (a) Time history of $P_{1-0}(4)$ line at 13 Torr of SF_6/H_2 mixture.

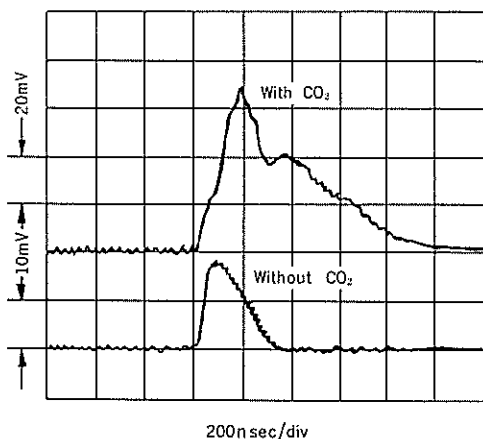


Fig. 12 (b) Time history of $P_{1-0}(4)$ line at 2 Torr of SF_6/H_2 mixture.

和が凍結された状態でカスケード遷移が観測された。

Fig. 11 からわかるように、 $P_{3-2}(3, 4)$, $P_{2-1}(4, 5)$, $P_{1-0}(5-8)$ の発振は CO_2 ガスの吸収により停止している。この場合、 $P_{2-1}(6, 7)$ のレーザ遷移による励起と、 $P_{1-0}(7, 8)$ の遷移の失活により HF ($v=1, J=6, 7$) の粒子数が蓄積すると考えられる。

$P_{1-0}(4)$ 線の時間的振舞を SF_6/H_2 圧力の関数として Fig. 12 に示す。圧力 13 Torr では、 CO_2 吸収セルを挿入すると $P_{1-0}(4)$ の出力は 4 倍増加する (Fig. 12 (a))。圧力 2 Torr では、出力は増加し、レーザパルスは長い尾を引くようになる (Fig. 12 (b))。圧力 0.2 Torr では、レーザパルスは双峰を示す (Fig. 12 (c))。この結果は、 $J=6, 7$ 準位から $J=3$ 準位への回転エネルギー移乗によって説明できる。圧力 13 Torr では $J=6, 7$ から $J=3$ へ急速に回転エネルギー移乗が起こり、 $P_{1-0}(4)$ 遷移の出力は、パルス幅の変化なく、増大する。0.25 Torr の低圧力では、双峰性を示すが、最初のピークは通常のカスケード発振の出力で、第 2 のピークは $J=6, 7$ から $J=3$ 準位への回転エネルギー移乗によって誘導されたものである。このパルス間の遅延時間と圧力の関係から、その回転エネルギー移乗時間は $(0.7 \pm 0.2) \times 10^{-7} \text{ Torr} \cdot \text{sec} = P\tau$ と求まる。これは HF レーザガス (SF_6/H_2) 中での測定値であるため他の研究者の測定結果と比較できない。参考のために、HF ガス中で測定した Hinchey ら^{18), 19)}の値を示

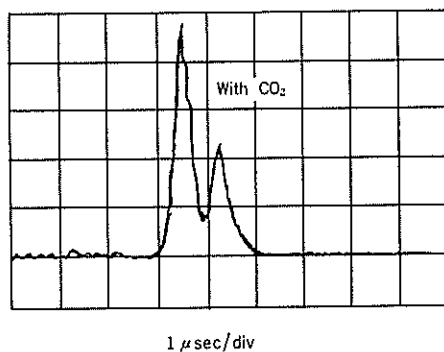


Fig. 12 (c) Time history of $P_{1-0}(4)$ line at 0.25 Torr of SF_6/H_2 mixture.

すと $(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-7} \text{ Torr} \cdot \text{sec}$ ($J=6$ から $J=3$ への移乗, $v=1$) であった。我々の測定した値と同じオーダーである。

3. 計算機による理論解析

紙面の都合で省略する。詳細は、学会誌論文としてすでに発表してある(発表論文 13,14,18,22)。

4. 大型光点火 H_2/F_2 レーザの試作

光点火化学レーザーは、 H_2/Cl_2 , H_2/F_2 , D_2/F_2 系の連鎖反応を利用したものである。化学レーザーの最初の発振は Kasper と Pimentel により 1965 年に報告された²¹⁾が、これは光点火方式の HCl レーザであった。 HCl レーザは発振波長 (3.5~4.0 μm) が大気伝搬の良い大気窓になるため利用価値が高く注目されているが、 H_2/Cl_2 系連鎖反応に吸熱反応を含むため高い出力エネルギーと効率が期待できない。この理由から現在の光点火化学レーザーの研究も他の点火方式(電気放電、電子ビーム点火)と同様、高出力、高効率が期待できる HF レーザに関するものが主流をしめている。光点火 H_2/F_2 レーザは簡単な装置で、パルス幅は比較的長い、高出力エネルギー、高効率を達成することが可能である。現在までに、Xe フラッシュ光点火方式で総合電気効率 33%、出力エネルギー 292 J (22.8 J/atm) が報告されている²²⁾。また、このレーザは F_2 の解離が反応点火となるが、 F_2 の紫外光の吸収率が比較的小さいため大体積のレーザ媒質を均一に点火でき、大口径の発振器および増幅器の試作も可能である。²³⁾

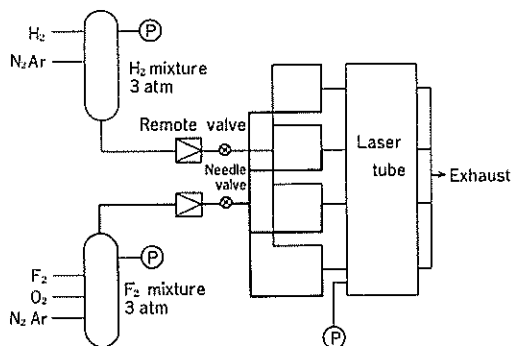


Fig. 13. Schematic diagram of the mixing system.

本章では、i) H_2/F_2 ガスの混合方式の確立、ii) Xe フラッシュランプ点火 H_2/F_2 レーザの基礎特性、iii) 大口径、大出力光点火 H_2/F_2 レーザの動作特性、iv) 誘電体表面放電光点火 H_2/F_2 レーザについて報告し、大出力、高効率化に重要ないくつかのパラメータについて詳細に検討した。

4-1 H_2/F_2 ガスの混合方式の確立

Fig. 13 は H_2/F_2 混合システムの構成図である。配管系には銅およびステンレス・スチールのパイプを用いた。 F_2 および H_2 は別個に希釈ガス (N_2) であらかじめ混合希釈する。 F_2/N_2 混合ガスには暗反応抑止剤として微量の O_2 を添加する。本実験の混合システムは、 H_2 と F_2 の暗反応を最小にし、かつ H_2 と F_2 の反応によるガス温度上昇をおさえるために N_2 で混合希釈した H_2 および F_2 をレーザ管に入る直前で混合する方式を用いた。3 気圧の H_2/N_2 , および $\text{F}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ 混合ガスは 2 つの電磁バルブを同時に開くことによって真空に排気されたレーザ管に導かれる。両者の混合ガスはレーザ管の手前 5 cm の位置で混合されながらレーザ管に流れ込む。ガス系の真空度は $3 \times 10^{-2} \text{ Torr}$ である。電磁バルブの直後には流量を調節するためのニードル・バルブを設置している。実験の前にレーザ管および混合系は希釈された F_2 で十分に不動態化 (Passivation) した。

使用したガスは、 F_2 (Air Product 社製、純度

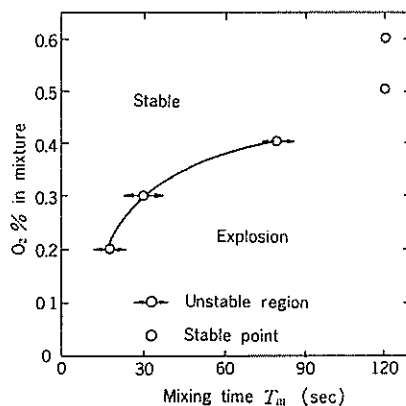


Fig. 14. H_2/F_2 explosion limit as a function of mixing time and CO_2 concentration.

≥98%), H₂ (≥99.995%), O₂ (≥99.99%) であり, F₂ は使用前に主な不純物である HF を NuF ペレット・トラップで除去して用いた。

我々の実験装置では Fig. 13 に示した流量調整用のニードル・バルブにより充填時間 T_m を変化させることが可能である。充填時間とは 2 個の電磁バルブを同時に開いてから真空に排気されたレーザ管が所定の圧力の混合ガス (F₂/H₂/N₂/O₂) で満たされるまでの所要時間である。我々はこの充填時間が混合ガスの安定性やレーザ出力に及ぼす影響について調べた。ここでいう“混合ガスの安定性”とは混合時の有無を意味する。

Fig. 14 は混合時のガスの安定性が充填時間 T_m と暗反応抑止剤としての O₂ 濃度に依存していることを示している。F₂/H₂/N₂/O₂=10/4/85.7/0.3 の混合ガスをレーザ管に 500 Torr 導入する場合, 充填時間 30 秒以上を要する比較的ゆっくりした混合では混合時に爆発を生じる。これに対し 30 秒以下の速い混合では爆発することなしに安定な混合が可能となることが明らかになった。Fig. 14 から, 充填時間 T_m を長くするにつれて, 爆発を生じさせないためにはより多くの O₂ の添加が必要となることがわかる。この原因としては, 短い充填時間 T_m ではレーザ管内の圧力の時間変化が速いため F₂/H₂ 混合ガスの第 2 爆発圧力限界²⁴⁾を速く通過して安定圧力領域に至るため比較的少ない O₂ 濃度でも爆発に至らないと考えられる。我々の実験条件では, 0.5% 以上の O₂ 濃度では 120 秒の長い充填時間 T_m でも爆発することなく混合できた。後述するように O₂ を必要以上添加するとレーザ出力エネルギーの減少をまねくので可能な限り O₂ 濃度を低くするのが望ましい。それ故, ある O₂ 濃度に対して混合時の爆発を避けるために適当な充填時間 T_m の設置が必要である。我々の実験範囲 ($T_m \leq 120$ 秒) において, レーザ出力に与える充填時間の影響はほとんどなかった。このことから共振器内におけるガスの混合が充填時間に依らず常に均一になっていることがわかる。

Fig. 15 は O₂ の濃度を増加させた場合のレーザ出力エネルギーの変化である。O₂ 濃度の増加

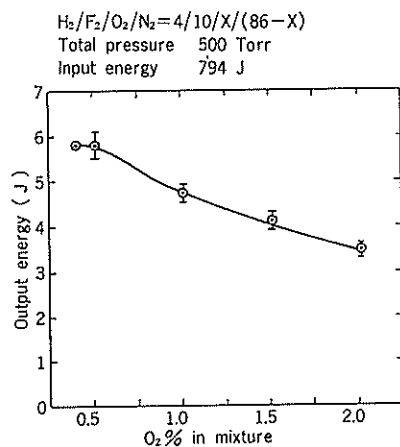


Fig. 15. Variation of HF laser energy with O₂ concentration.

に従ってレーザ出力が減少してゆくのは O₂ が励起連鎖反応を減速するためである。理想的には H₂ と F₂ の連鎖反応の発熱エネルギーがすべてレーザに寄与することが望ましいが, 実際は励起過程と振動緩和過程が競合するので化学反応エネルギーが全てレーザエネルギーに変換されることはない。特に, O₂ を添加した場合は暗反応を抑止²⁵⁾すると同時に励起連鎖反応の速度も遅くする。また, 過度の O₂ 添加は H₂O 分子を生成する。この H₂O がレーザ管壁に吸着すると F 原子との反応により HF (ν) を生成しやすくなるため混合ガスが化学的に不安定になりレーザ出力にバラツキを生じる原因にもなる。

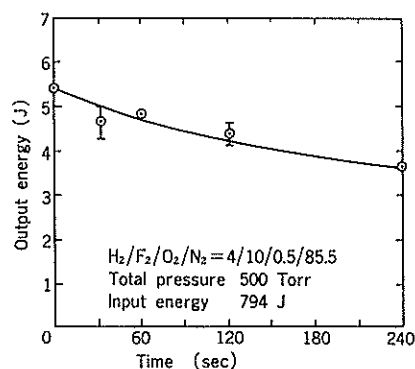


Fig. 16. Variation of HF laser energy with time after the mixing.

次に、 H_2 と F_2 の暗反応のレーザ動作への影響について述べる。Fig. 16 は混合終了後の放置時間増加につれてレーザ出力が減少することを示している。横軸は混合が終了してから点火するまでの放置時間である。Fig. 16 から 240 秒後にレーザ出力は混合直後より約 30% 低下することが明らかになった。これは H_2 と F_2 の暗反応 (dark reaction) が徐々に進むことにより基底準位の $HF(v=0)$ 分子が生成されるためである。生成された $HF(v=0)$ は $v=0\sim 1$ 振動準位間の逆転分布の形成を妨げるほか、 $HF(v)$ を速い V-R/T 緩和過程で失活する。暗反応の進行度はレーザ管や配管系の内壁の化学的状態およびレーザ管内の真空度に影響されるので、充分に不動態化し、かつショット毎に常に一定の真空度に排気することがレーザ出力のバラツキを小さくするためには必要である。

暗反応の進行度を実際のレーザ装置を用いて定量的に測定することは、混合装置の評価をする上で重要である。そこで、我々は F_2 の紫外光吸収測定法、 H_2/F_2 混合ガスの暗反応進行度を F_2 濃度の減少度測定から求めた。Fig. 17 は測定装置

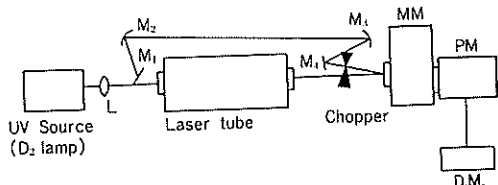


Fig. 17. Schematic diagram of the measurement of H_2/F_2 dark reaction rates.

Table 1. Comparison of H_2/F_2 dark reaction rates. Measurements of prereaction

worker	mixing ratio	pressure (torr)	method	rate
S.N. Suchard	$H_2:F_2:N_2$ 1:1:60	100	UV absorp.	10%
D.B. Nichol	$H_2:F_2:N_2$ 1:1:10~20	100~700	UV absorp. HF probe	0.5%/min.
D.B. Nichol	$H_2:F_2:O_2:N_2$ 1.25:7.5:0.5:90.75	~760	—	(-5%/min) (Eout)
Keio Univ.	$H_2:F_2:O_2:N_2$ 4:10:0.5:85.5	~500	UV absorp.	0.05%/min (-7.5%/min) (Eout)

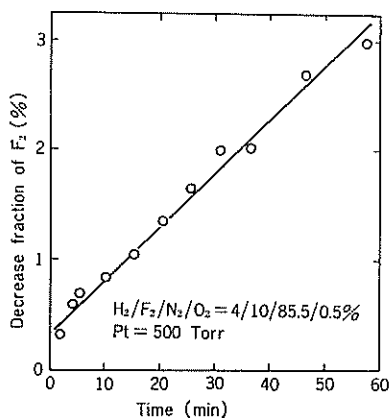


Fig. 18. Decrease fraction of F_2 with time after the mixing without explosion.

の概要である。紫外光のプロブ光源としては安定な重水素放電管を用いた。このときプロブ光によって F_2 が解離しないように入射側でプロブ光強度を十分弱めてある。Fig. 18 はその測定結果を示している。混合後の放置時間とともに F_2 濃度が減少してゆくことがわかる。グラフから、 $H_2/F_2/N_2/O_2=4/10/85.5/0.5$ (%) の混合ガス (500 Torr) において、初期の F_2 濃度を基準とすると、 $(5.3 \pm 0.3) \times 10^{-2} \%$ /min の割合で F_2 濃度が減少してゆくことが明らかにされた。我々の測定した暗反応による F_2 の減少度に対し、Nichols らの測定値は $5 \times 10^{-1} \%$ /min²⁶⁾、また Sachard らは混合終了時に 10%²⁷⁾ の F_2 が反応すると報告している。Table 1 にはそれらの比較が示してある。このことから我々の混合システムは暗反応進行度が非常に小さく、優れたものと言える。これはレーザ管内壁にテフロン・コーテ

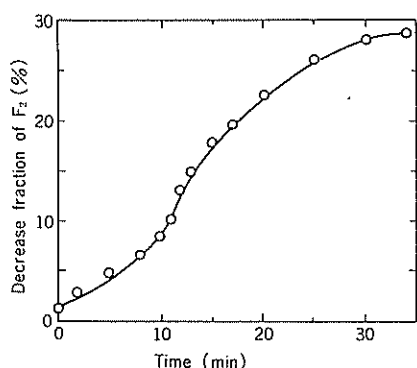


Fig. 19. Decrease fraction of F₂ with time after the mixing with explosion.

ィングをほどこしてあることや、レーザ管直前において N₂ で希釈した F₂ と H₂ を混合しているためと考えられる。Fig. 16 では4分後にレーザ出力エネルギーが30%低下しているが、上記の測定結果から減少した F₂ がすべて H₂ と反応したとすると生成された HF 分子はレーザ混合ガス全圧の約 $4.2 \times 10^{-2}\%$ となる。

Fig. 19 は同様の測定方法で混合中に自爆した混合ガスの未反応 F₂ 濃度の経時変化を示している。これから、上記と同じ混合ガス比において、初期濃度の $1.5 \pm 0.2\%$ が自爆により反応したことが明らかになった。これはレーザ混合ガス全圧に対して 0.3% の HF が生成されたことに相当する。混合中に一度自爆したガスではレーザ出力は著しく低下し、自爆しない場合の約 1/50 程度に減少する。

4-2 Xe フラッシュランプ点火 H₂/F₂ レーザの基礎特性

紙面の都合で省略する。詳細は学会誌に発表済みであるので(発表論文 22), そちらを参照されたい。

4-3 誘電体表面放電点火 H₂/F₂ レーザ

紙面の都合で省略する。詳細は論文として発表してあるので(発表論文 11), そちらを参照されたい。

4-4 大口径・大出力光点火 H₂/F₂ レーザの試作

光点火方式の H₂/F₂ レーザでは、H₂/F₂ 混合ガスの励起連鎖反応が紫外光による F₂ 分子の解離反応により点火される。F₂ 分子は 220~400

nmの広い紫外域の光を吸収し F 原子に解離するが、その解離吸収係数は吸収の最大値 ($\lambda=284$ nm) においても $3.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ ⁴³⁾ であり比較的小さい。また、電気放電点火方式とは異なりレーザ媒質は点火源の直接的な負荷とならず独立に反応点火が行なえる。このため、光点火方式 H₂/F₂ レーザでは大体積を一樣に点火できるという特長があり、大口径の発振器および増幅器²⁷⁾の試作も可能である。

一方、H₂/F₂ 系 HF レーザは一般に小信号利得が他のレーザに比べて非常に高いことで知られており⁴⁴⁾、光点火方式の場合でも小信号利得が最も大きいブランチで $10 \sim 20\% \text{ cm}^{-1}$ 程度はあると考えられる。このような高い利得を有するレーザではレーザ光軸以外で寄生発振を生ずる可能性が非常に高くなる⁴⁵⁾。特に口径の大きいレーザ装置では径方向の光路長が増加するため、レーザ管壁の条件(形状、2.7 μm 帯での表面反射率)によっては寄生発振のしきい値がレーザ共振器の発振しきい値より低くなることさえ考えられる。レーザ管内壁の材質や形状は、H₂/F₂ ガスの安定性や点火光源とレーザ媒質の光学的結合度にも大きな影響を与えるので、どのような管壁にするかは光点火 H₂/F₂ レーザの高出力、高効率化にとって重要である。しかしながら、レーザ管壁がレーザ出力に与える影響について詳細な報告は今までにまだない。

大容量のレーザ媒質全体からビーム質の良いレーザ光を得るためにはどのような光学共振器を用いるべきかはレーザ光のビーム制御の上から重要と思われる。これに対する解答としては不安定共振器(Unstable resonator)の使用が有効である⁴⁶⁾。不安定共振器はレーザ体積全体に損失の少ない低次モードを形成することができるので寄生発振の防止にも効果がある。しかしながら、これらの共振器を用いた光点火 H₂/F₂ レーザの諸特性についても今だに多くの実験的研究の余地を残していると思われる。

我々は口径($\phi 130$ nm)の光点火 H₂/F₂ レーザ装置を試作し、レーザの高出力、高効率化を計るとともに、今までに報告されていない、レー

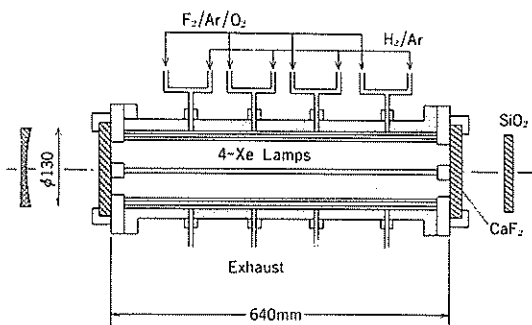


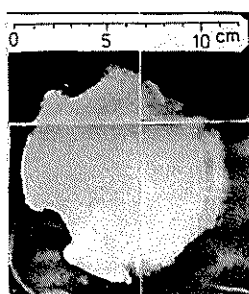
Fig. 20. Schematic diagram of the large aperture photoinitiated H_2/F_2 laser.

が管壁がレーザ出力に与える影響，不安定共振器の出力特性などを明らかにし，寄生発振の防止に対する検討を行なった。

4-4-1 実験装置

Fig. 20 に実験装置の概略図を示す。レーザ管本体およびガス混合システムは 4-1, 2 で示したものと同一である。レーザ窓は直径 150 mm，厚み 15 mm の CaF_2 を用いている。レーザ管両端には Xe フラッシュランプと CaF_2 窓を装着できる様に複雑に加工したフランジ部がある。Xe フラッシュランプの高電圧側のフランジはレーザ管と電気的絶縁をとるためにテフロン製を用い，接地側はアルミニウムを用いた。レーザビーム取り出し可能な最大径は約 130 mm であるが，Xe フラッシュの装着部が突起している箇所では約 100 mm になる。Xe フラッシュランプは対称の位置に計 4 本装着し，各々独立したキャパシタバンク ($0.625 \mu F$) により，充電電圧 20~39 kV の範囲で駆動する。

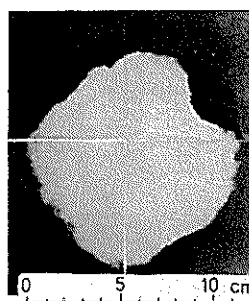
レーザ共振器は曲率半径 7.2 m，直径 36 cm の Al 蒸着凹面全反射鏡，および取り出し鏡として平板の SiO_2 (透過率 T: 97%) を用いた。不安定共振器の実験の際は，口径の大きい共振器が用意できないため，フランジ部の最大取り出し径を 60 mm に絞り，有効径 48 mm の CuBe 凹面全反射鏡を用いた。使用した不安定共振器の曲率半径，直径，M 値，取り出し率を Table 1 に示す。出力エネルギーの測定は Sciencetech model 364, Gentek ED-500 を用いて行なった。レーザのビームパターンはポラロイドフィルムを用いて測定



(a)



Initiated with 4 flash tubes



(b)

$H_2/F_2/O_2/Ar =$
2/10/1.5/86.5%
Pt = 500 Torr
V = 36 kV
 SiO_2 coupler

Fig. 21. Burning patterns of the large aperture HF laser beam measured with a Polaroid film.

した。

4-4-2 出力エネルギーとビーム・パターン

Fig. 21 は取り出し鏡直後に感光前のポラロイドフィルムを置いて測定した大口径レーザビームの近視野像 (Near field Pattern) である。用いた共振器は Q 値が非常に低く，レーザ媒質の小信号利得が非常に高いので，このような条件下のレーザビームは共振器により決まるモードと増幅された光軸方向の自然放射光 (Amplified Spontaneous Emission) モードの混在した形で取り出される。一般に A. S. E は小信号利得が 5~10% cm^{-1} になると観測される⁴⁵⁾。我々の実験では，取り出し鏡を除くと出力エネルギーは取り出し鏡のある場合に比べて 10% 程度減少するが，この場合はビームエネルギーのほとんどが A. S. E モードと取り出されていると考えられる。Fig. 21 (a), (b) は SiO_2 の取り出し鏡を用いた場合で，(a) は全反射鏡を光軸からわずかにずらしたものの，(b) は共振器として光軸を合せたものであ

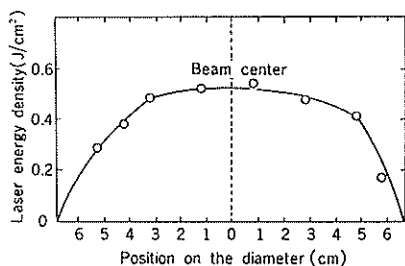


Fig. 22. Energy density distribution of HF laser beam against a position on the diameter.

る。Fig. 2-1 (a) で左上, 左下の陰はフラッシュランプ装着ソケットによるものである。右上と右下に陰がみえないのは全反射鏡が光軸からずれているためにその周辺のエネルギーを取り出していないことを示している。これからレーザー管内の管壁近くまで一様に点火が行なわれていることがわかる。しかし, (b) ではレーザー管の管壁近い部分のエネルギーの取り出しが十分に行なわれていないものと考えられる。

レーザービームの直径方向の強度分布をさらに明らかにするために直径 2.5 mm のピンホールとエネルギーメータを直径方向に走査してエネルギー密度分布を測定した。その結果を Fig. 22 に示す。これから, エネルギー密度が一定な範囲は中心から直径 7~8 cm であることがわかる。これ

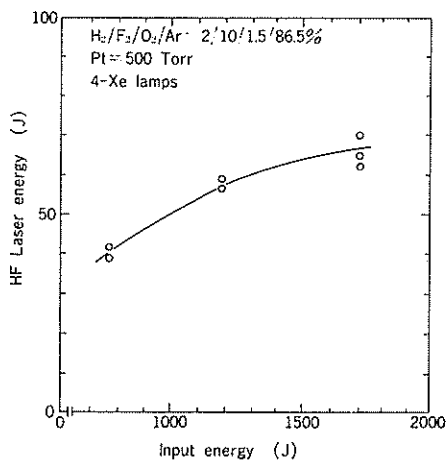


Fig. 23 Variation of HF laser energy as a function of input energy.

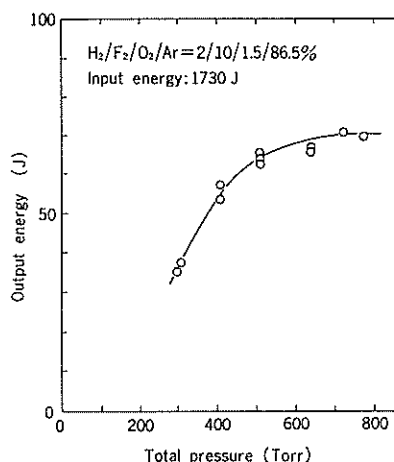


Fig. 24. Variation of HF laser energy as a function of total gas pressure.

は, 全反射鏡に曲率半径 (7.2 m) の小さいものを用いているためレーザー管全体からエネルギーを取り出す様なモードが形成されないためと考えられる。

Fig. 23 は Xe フラッシュランプへの入力エネルギーに対するレーザー出力エネルギーを示している。Xe ランプは 4 本用い, 全圧は 500 Torr, 混合比は $H_2/F_2/O_2/Ar=2/10/1.5/86.5\%$ である。

また, Fig. 24 は混合比を $H_2/F_2/O_2/Ar=2/10/1.5/86.5\%$ に一定にして, 全圧を変化した場合のレーザー出力エネルギーである。Xe ランプは 4 本用い, 全入力エネルギーは 1730 J である。全圧 700 Torr, 入力 1730 J において最大レーザー出力エネルギー 70 J (パルス幅 4 μ sec FWHM) が得られた。エネルギーメータ (Scientech 346) の受光有効径は 100 mm なので出力レーザー光全部を受光できない。Figs. 23, 24, で示したレーザー出力エネルギーは, エネルギーメータで測定したレーザービーム中心部 (ϕ 100 mm) の出力エネルギー値を Fig. 22 で求めた横方向のエネルギー密度分布特性で用いて較正したものである。グラフには示していないが, 現在曲率半径の大きい全反射鏡や, 不安定共振器を用いてレーザー活性媒質全体から均一にレーザー光を取り出すようにすることによりこの装置で 100 J 程度のレーザー出力エネルギーは容易に得ることができた。

Table 2.

		Maximum Value
(1)	Output Energy (J)	70
(2)	Specific Energy (J/l)	12
(3)	Output Power (Mw)	18*
(4)	Output Intensity (kw/cm ²)	180
(5)	Electrical Efficiency (%)	5.7**
(6)	Chemical Efficiency (%)	4.9

Gas content ratio: H₂/F₂/O₂/Ar=2/10/1.5/86.5%

Total pressure: 500 Torr

Input energy: 1730 J (36 kV)

Resonator scheme: Al(concave)total reflector + SiO₂ flat coupler

* FWHM=3.8 μsec

** Input energy=720 J (24 kV)

Table 2 に出力エネルギー，単位体積当たりの出力エネルギー (Specific energy)，効率などの最高値をまとめた。ここで，特性レーザ出力はエネルギーメータで受光したレーザビーム断面積のみについて計算してある。これから，大口径 H₂/F₂ レーザの試作によりその出力エネルギーと電気効率は 4-2 で述べた装置に比べ大幅に向上させることができた。

4-4-3 レーザ管壁がレーザ出力に与える影響

レーザ管壁によるレーザ出力の影響を明らかにするために，我々は Fig. 25 に示す 2 種のアルミニウム板をレーザ管に内装して，レーザ出力エ

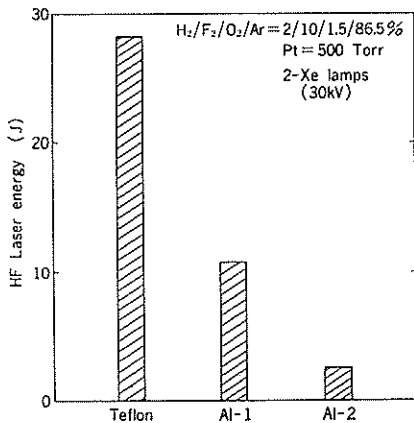


Fig. 25. Effect of wall materials (Teflon, Al) to HF laser energy.

ネルギーや出力波形を測定した。Fig. 25 中の Al-1 は光沢のある Al 薄板の表面を紙やすりで適当にやすりがけし拡散的反射面としたもので，また，Al-2 はやすりがけしない光沢のあるものを示している。Fig. 25 ではテフロン，Al-1，Al-2 の各々の管壁を用いた場合のレーザ出力エネルギーを示している。この場合，Al-1，Al-2 は使用前に F₂ ガスで十分に不動態化を施してある。

Fig. 25 では，Al-1，Al-2 内壁にすることによってレーザ出力エネルギーがテフロン内壁に比べ大幅に減少していることがわかる。これは赤外 (2.7 μm) 域で反射率の高い⁴⁷⁾アルミニウム内壁を用いたためにレーザ管内部で寄生発振が生じレーザ共振器モードに出力エネルギーが取り出せなくなったためと考えられる。

Fig. 26 は Fig. 25 の各々の内壁を用いた場合にレーザ光軸上で観測した出力波形である。Fig.

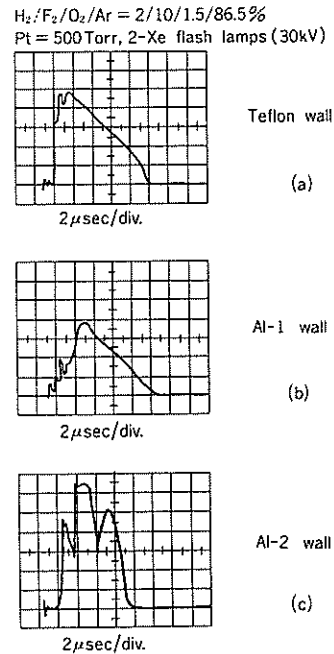


Fig. 26. Typical emission profiles measured just behind a coupling mirror when using different wall materials such as (a) Teflon, (b) Al-1, and Al-2.

A SiO₂ flat plate was used as a coupling mirror.

26 (a) は通常の共振器モードのレーザ発振波形である。これに対し, Fig. 26 (b), (c) では (a) とは全く異なった波形が得られた。(b) は (a) に比べ波形の立ち上がりが遅く, 立ち上がり時間域ではレーザ共振器モードと異なった寄生発振モードが生じていると考えられる。また (c) では3ヶ所にピークをもつ波形が得られた。ここでは, その理由は明らかでないが, これらのピークは各々異なったP 枝遷移によるものと考えられ (b) の場合とは異なった寄生発振がレーザ管内に生じていることが予測される。

我々は電気放電型 HF パルスレーザを光源に用いて, $2.12 \mu\text{m}$ 帯における各種管壁材料 (Teflon, Al など) の反射率を入射角を変えて ($10^\circ \sim 80^\circ$) 測定した⁴⁷⁾。その結果を用いて, 想定したいくつかの寄生発振モードの発振閾値を計算した。Fig. 27 に, ここで想定した (a), (b), (c) の3種の寄生発振モードについてその各々の発振閾値が管壁反射率に対し, どの様に変化するかを示した。文献 47 の結果に基づいて考慮した Teflon, Al-1, Al-2 の反射率の範囲を横軸に併記し

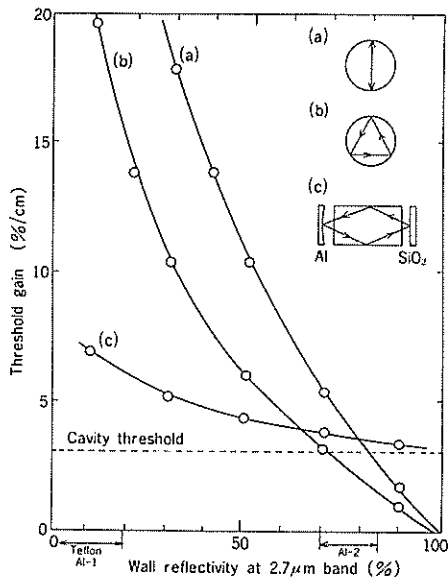


Fig. 27. Oscillation thresholds of various parasitic modes supported by the reflection of wall or resonator mirror, as a function of wall reflectivity at $2.7 \mu\text{m}$ band. A SiO_2 coupler was used.

てある。Fig. 27 からレーザ管壁を Teflon, Al-1, Al-2 と変えてゆくと各々の寄生発振閾値が減少して行くことがわかる。特に Fig. 27 中の (a) (b) で示した光軸に対し垂直方向の寄生発振ではその閾値が反射率の増加に伴い急減する。これらの閾値と共振器モードの閾値 (Fig. 27 中の点線) を比較すると発振閾値の競合状態がよくわかる。Teflon 管壁では共振器閾値は寄生発振閾値に比べて十分低い, Al-2 ではそれらが競合している。また寄生発振閾値が共振器閾値を下回ることすら生じ得る。寄生発振にはいくつかのタイプが考えられるが⁴⁸⁾, ここで特に取り扱っているのは, Fig. 8 に検討したようなレーザ管壁やその他の表面で反射されて形成される光軸以外で生じるレーザ発振 (Specular parasitics), 共振器による Feed Back を必要とせず増幅されてきた自然放

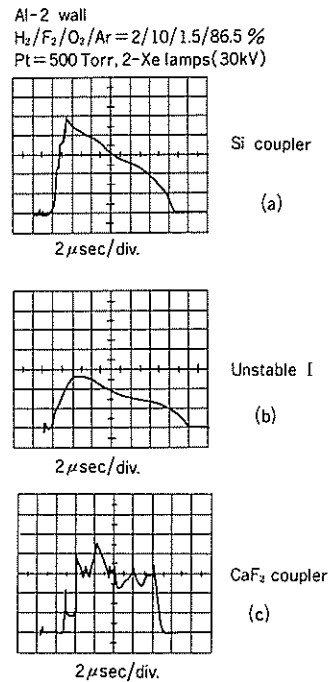


Fig. 28. Typical emission profiles measured just behind a coupling mirror when using different resonator configurations such as (a) Al (concave, $R=7.2 \text{ m}$) + Si flate, (b) Unstable resonator I, and (c) Al (concave, $R=7.2 \text{ m}$) + CaF_2 flate. An Al-2 wall was employed.

出光 (A. S. E) などである。この他に拡散的に反射により生じる局在性のない寄生発振 (diffuse parasitics) などとも考えられる。

Fig. 28 (a), (b), (c) は内壁に Al-2 を用いた場合のレーザ出力波形を取り出し鏡を変えて測定したものである。実験装置で述べたようにここではフランジ部の最大取り出し径を 60 mm に絞って実験を行なった。ここで用いた不安定共振器は Table 3 中の Unstable I に示した共振器構成を用いた。この場合の M 値 (Magnification number) は 1.92 で、実効透過率は 62% となる。Fig. 28 (c) に示した共振器の発振閾値の最も高い CaF_2 取り出し鏡を用いた場合は Fig. 27 (c) と同様にいくつかのピークを含む波形となり共振器モードの波形と異なったものとなる。一方、Si を用いて、共振器の発振閾値を低くすることにより寄生発振の影響を少なくすることができるため Fig. 29 (a) のような共振器モードの波形が得られた。

また、不安定共振器では Fig. 28 (b) に示すと

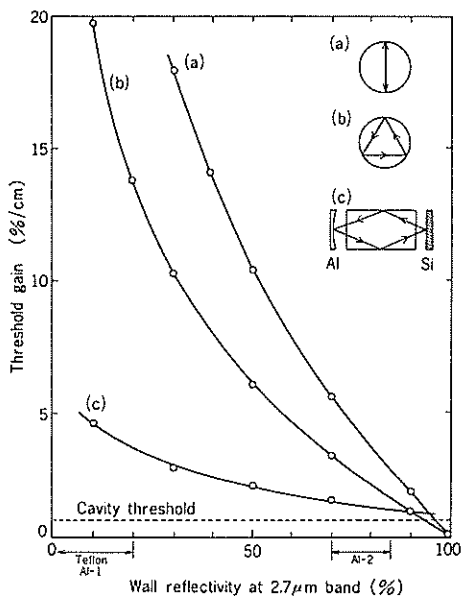


Fig. 29. Oscillation thresholds of various parasitic modes supported by the reflection of wall or resonator mirror, as function of wall reflectivity at $2.7 \mu\text{m}$ band. A Si coupler was used.

おり (a) と同じ立ち上りとパルス幅を有する共振器モードの波形が得られた。(c) では寄生発振のためレーザ出力エネルギーはかなり低下するが、(a) と (b) ではほぼ同じ出力エネルギーが得られた。このことは次に示す Fig. 29 の発振閾値の競合関係からも十分説明できる。

Fig. 29 は Si 取り出し鏡を用いたときの Fig. 27 と同様の図である。この場合は、取り出し鏡の反射率が増加したため、共振器モードの発振閾値が下がり、そのため Al-2 の管壁を用いたときの管壁の反射率近傍において寄生発振 (a) の閾値との競合状態がなくなる。

4-4-4 不安定共振器の出力特性

Table 2 は用いた不安定共振器の構成を示している。凹、凸の両反射鏡はどれも CuBe 製である。

Table 3 は共振器の違いによるレーザ出力エネルギーを示している。安定共振器の取り出し鏡は平板の Si, CaF_2 を用いている。このときのガス混合比は $\text{H}_2/\text{F}_2/\text{O}_2/\text{Ar}=2/10/1.0/87\%$ 、全圧は 500 Torr であり、Xe フラッシュランプは 4 本用い 36 kV で駆動した。出力エネルギーは取り出し鏡の直後で測定した。2 種の不安定共振器を用いたときのレーザ出力エネルギーは Si 取り出し鏡とほぼ同程度であった。

ここで用いた、安定共振器のフレネル数 $N (= a^2/\lambda L)$, a は鏡の半径, λ は波長, L は共振器長) を計算すると直径 50 mm で約 200, また、直径 130 mm の大口径では 1,400 という非常に大きな

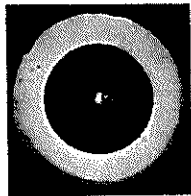
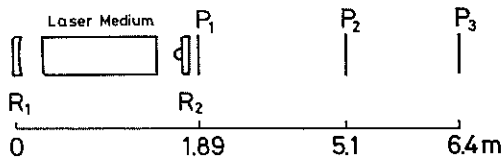
Table 3.

	Unstable I	Unstable II
Concave Mirror		
Diam. (mm)	50	50
Radi. (m)	7.5	5.0
Convex Mirror		
Diam. (mm)	26	10
Radi. (m)	3.9	1.0
Cavity Length (m)	1.8	2.0
Magnification	1.9	5.0
Effective (%)	62	82
Transmittance		

値になる。このように、フレネル数の大きい共振器では多くの横モードを含むレーザー光になるため一般に出力光ビームの波面での位相のコヒーレンスが非常に悪くなる⁴⁹⁾。このため、取り出し鏡の鏡面において空間的なビーム強度が一様であっても、伝搬性が悪く、回折限界以上の広がり角をもつため遠視野 (far field) におけるビーム強度は非常に弱くなる。さらに、我々の実験条件のよ

Table 4.

Resonator Scheme	Effective (%) Transmittance	HF Laser (J) Energy
(a) CuBe-Si(Flat)	54	9.8
(b) CuBe-CaF ₂ (Flat)	95	8.6
(c) Unstable I	62	9.7
(d) Unstable II	82	9.2



P₁

Unstable resonator

R₁ (凹): ϕ 50mm
R=7.5m

R₂ (凸): ϕ 26mm
R=3.9m

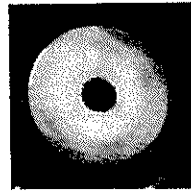
L: 1.8m

M: 1.92

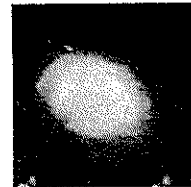
H₂/F₂/O₂/Ar
= 2/10/1/87 %

P₁=500 Torr

4 Xe lamps
(36kV)



P₂



P₃

Fig. 30. Characteristics of propagating HF laser beam using unstable resonator configuration I.

うに、A. S. E も含まれていると考えられる場合は一層位相コヒーレンスはそこなわれてしまうであろう。これに対し、不安定共振器では原理的に取り出し鏡からの出力光ビームの位相がそろっているため、たとえ近視野の空間的強度分布が一様でなくても、かなりビーム伝搬特性が向上する。また、安定共振器に比べてレーザー媒質全体から一様にエネルギーを取り出すことができるので寄生発振の防止にも有効である。我々の行った簡単な伝搬特性についての実験では、近視野における安定共振器 Table 4 (a) と不安定共振器 (Table 4 (c)) の出力エネルギーは同程度であるが、4.3 m 伝搬した後の各々のレーザー出力エネルギーを近視野と同一の受光面積で測定すると安定共振器の出力エネルギーは 65% も減少してしまう。一方、不安定共振器では 27% の減少であった。

Fig. 30 は、Table 4 (c) の不安定共振器を用いたときの伝搬距離に対するレーザービームのパターンの変化である。伝搬するに従って円環形のビームの中心部がなくなり、遠視野において原理的にはビーム中心部に強度の最大値をもち、周囲に干渉した強度分布をもつビームとして伝搬する。Fig. 30 の P₂ ではビームの外側近くに干渉じまが観測できる。しかしながら、P₃ ではあまり干渉がみられない。これは、ポラロイドフィルムの感度が強度に対し直線性に乏しいことも一因である。また、この他にも理想的な不安定共振器条件からずれる原因として考慮すべきこととしては、

- i) 利得が高いため不安定共振器の出力ビームに A. S. E を含む可能性があり、位相のコヒーレンスをみだす原因となりうる。
- ii) 共振器中のレーザー窓による反射は、不安定共振モード以外の方向に A. S. E を生じる原因になる。
- iii) フランジ部で取り出しを 60 mm に絞っているため、不安定共振器のモード体積の外側に利得の高い活性媒質があり、この領域で寄生発振を生じ不安定共振器モードの位相のコヒーレンスに悪影響を与える原因に

なりうる。

などの3点が挙げられる。i) は不安定共振器内のレーザ強度が十分に高ければある程度 A. S. E. を抑制できる⁵⁰⁾。また, ii), iii) については口径の大きい不安定共振器を内部鏡として用いることによって, 一層伝搬特性の優れたレーザ出力が得られると考えられる。

最後に, 得られた結果からビーム質の改善と寄生発振の防止についてまとめることにする。

大口径かつ大体積のレーザ媒質からレーザ光を取り出す場合, 安定共振器を用いるとフレネル数が大きくなり ($N > 100$) 本質的に多モード発振になってしまう。我々の実験結果では不安定共振器を用いることによりかなりビーム質を改善できた。また, A. S. E. も含めて寄生発振を抑制することもビーム質の改善につながる。

Teflon 管壁は, H_2/F_2 のガスの安定性, 寄生発振の防止の観点から, この種のレーザには非常に有効であった。しかし, 入射角の大きい場合は $2.7 \mu\text{m}$ 帯での反射係数も大きいので⁴⁸⁾管壁をそのような, A. S. E. が生じる可能性は十分にあるから, 表面をランダムな面にする方がなお良いと考えられる。またレーザ管口径に対しレーザ管の長さを十分長くすることにより, 共振器モードの閾値が下がり, 光軸方向以外の寄生発振が起こりにくくなると考えられる。

最後に結論として我々は大口径光点火 H_2/F_2 レーザ装置を試作し, 出力エネルギーと電気効率を大幅に改善した。また, ここで得られたビーム質, 寄生発振 (管壁の効果), 不安定共振器の出力特性に関する結果は今後の大型システム設計上, 有益かつ重要なものである。

文 献

- 1) M. A. Gusinow: *J. Appl. Phys.*, **44**, 4567 (1973).
- 2) J. H. Goncz: *J. Appl. Phys.*, **36**, 742 (1965).
- 3) J. H. Goncz and P. Bruce Newell: *J. Opt. Soc. Am.*, **56**, 87 (1966).
- 4) J. P. Makiewicz, J. L. Emmett: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-2**, 707 (1966).
- 5) M. A. Gusinow: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11**, 929 (1975).
- 6) P. A. Lovoi: *Soc. Photo-Optical Instrum. Eng. vol. 138, Advances in Laser Technology 2* (1978).

- 7) 古川省吾: レーザーハンドブック (朝倉書店), 203 (1973).
- 8) 前田三男, 岡田龍雄, 藤原賢治, 内野 修, 宮副泰: 応用物理, **45**(6), 534 (1976).
- 9) I. V. Demenik, V. E. Mnuskin, B. V. Skvortsov, and V. B. Fedorov: *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **13**(6), 829 (1968).
- 10) A. A. Bakeev and R. E. Rovinskii: *High. Temp.* **8**, 196 (1970).
- 11) I. L. C. Technical Bulletin no. 5.
- 12) R. Goldstein and F. N. Mastrup: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-3**, no. 11, 521 (1967).
- 13) H. Brunet and M. Perez: *Compt. Rend.*, **B267**, 1084 (1968).
- 14) D. Edelson *et al.*: *Industrial and Engineering Chemistry*, **45**, 2094 (1953).
- 15) J. L. Lyman, *Appl. Opt.*, **12**, 2736 (1973).
- 16) M. Obara and T. Fujioka: *Jap. J. Appl. Phys.*, **13**, 675 (1974).
- 17) L. M. Peterson, G. H. Lindquist, and C. B. Arnold: *J. Chem. Phys.*, **61**, 3480 (1974).
- 18) J. J. Hinchin: *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 672 (1975).
- 19) J. J. Hinchin and R. H. Hobbs: *J. Chem. Phys.* **65**, 2732 (1976).
- 20) G. A. Fisk and G. N. Hays: *J. Appl. Phys.*, **47**, 4044 (1976).
- 21) J. V. V. Kasper and G. C. Pimentel: *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 352 (1965).
- 22) D. B. Nichols, R. B. Hall, and J. D. McClure: *J. Appl. Phys.*, **47**, 4026 (1976).
- 23) N. G. Basov, A. S. Bashkin, L. E. Golubev, Yu. I. Kozlov, A. N. Oraevskii, A. K. Piskunov, V. N. Tomashov, V. N. Troshagin, and N. N. Yuryshev: *Sov. J. Quantum Electron.*, **8**(4), 520 (1978).
- 24) R. W. F. Gross and J. F. Bott: *Hand Book of Chemical Lasers* 397 (1976), John Wiley and Sons.
- 25) J. H. Sullivan, R. C. Feber, and J. W. Starner: *J. Chem. Phys.*, **62**, 1714 (1975).
- 26) D. B. Nichols, K. H. Wrolstad and J. D. McClure: *J. Appl. Phys.*, **45**, 5360 (1974).
- 27) S. N. Suchard, R. W. F. Gross, and J. S. Whittier: *Appl. Phys. Lett.*, **19**, 411 (1971).
- 28) N. Cohen and J. F. Bott: *SAMSO-TR-76-82*.
- 29) H. L. Chen, R. L. Taylor, J. Wilson, P. Lewis, and W. Fyfe: *J. Chem. Phys.*, **61**, 306 (1974).
- 30) O. M. Batouskii and V. I. Gur'ev: *Sov. J. Quantum Electron.*, **4**, 801 (1974).
- 31) M. Udagawa, M. Obara and T. Fujioka: *KLL-TR-5*, 1978, Keio University.
- 32) J. P. Markiewicz and J. L. Emmett: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-2**, 707 (1966).
- 33) R. L. Taylor, J. Wilson, H. L. Chen, P. Lewis, R. Sharma, J. Wallance, and W. Fyfe: *AFWL-*

- TR-73-40 (AD-769040).
- 34) R. G. Wenzel, G. P. Arnold, and N. R. Greiner: *Appl. Opt.*, **12**, 2245 (1973).
 - 35) S. N. Suchard, R. L. Kerber, G. Emanuel, and J. S. Whittier: *J. Chem. Phys.*, **57**, 5065 (1972).
 - 36) K. Watanabe, M. Obara, and T. Fujioka: *J. Appl. Phys.*, **51**, 2355 (1980).
 - 37) K. Watanabe, Y. Sato, M. Obara, and T. Fujioka: *Trans. Inst. Electr. Eng. Jpn.*, **100-C**, 95 (1980).
 - 38) I. L. C. Tech. Bull. no. 5.
 - 39) M. Obara, Y. Sakato, C. H. Lee, T. Hashimoto, and T. Fujioka: The Proceedings of the Technical Papers presented at 2nd IEEE International Pulsed Power Conference, 1979, Lubbock, Texas, USA.
 - 40) B. Norris and A. L. S. Smith: *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **10**, 551 (1977).
 - 41) F. B. A. Frungel: High Speed Pulse Technology vols. 1, 2 (New York Academic) vol. 1, p. 113 vol. 2, p. 347 (1965).
 - 42) R. L. Kerber, G. Emanuel, and J. S. Whittier: *Appl. Opt.*, **11**, 1121 (1973).
 - 43) R. K. Steunenber and R. C. Vogel: *J. Amer. Chem. Soc.*, **78**, 901 (1956).
 - 44) S. Marcus and R. J. Carbone: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-8**, 651 (1972).
 - 45) C. R. Jones: *Appl. Phys. Lett.*, **22**, 653 (1973).
 - 46) A. E. Siegman: *Proc. IEEE*, **53**, 277 (1965).
 - 47) KLL Annual Progress Report, 1979(1), p. 82, Keio Laser Laboratory, Keio University.
 - 48) A. N. Chester: *Proc. IEEE*, **61**, 414 (1973).
 - 49) R. W. F. Gross and J. F. Bott: *Hand Book of Chemical Lasers*, p. 111 (1976), John Wiley and Sons.
 - 50) J. M. Hoffman, E. L. Patterson, and R. A. Gerber: *J. Appl. Phys.*, **50**, 3861 (1979).
- 発表論文
- 1) 住田 真, 鏑木雅裕, 小原 實, 藤岡知夫: "X線予備電離 KrF レーザー" レーザー研究, **7** (3), 297-305 (1979).
 - 2) 鈴木俊二, 石橋裕子, 竹内 力, 小原 實, 藤岡知夫: "平行平板型マルクス・ジェネレータ励起 N₂, HF レーザー", レーザー研究, **8** (2), pp. 430-433 (1979).
 - 3) H. Oodate, T. Fujioka: "Extend use of the sealed HBr chemical laser by Cl₂ activation", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14**(4), pp. 227-230 (1978).
 - 4) H. Saito, T. Uchiyama, T. Fujioka: "Pulse propagation in the amplifier of a high-power iodine laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14**, (4), pp. 302-309 (1978).
 - 5) K. Midorikawa, S. Sumida, Y. Sato, M. Obara, T. Fujioka: "Efficient operation of a low-impedance Blumlein discharge initiated HF/DF chemical laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15**, (3), pp. 190-194 (1979).
 - 6) S. Sumida, M. Obara, T. Fujioka: "X-ray preionized high-pressure KrF laser", *Appl. Phys. Lett.*, **33**(11), pp. 913-915 (1978).
 - 7) S. Sumida, M. Obara, T. Fujioka: "Intense 3371 Å laser emission from a fast Blumlein discharge excited N₂/F₂ mixture", *Appl. Phys. Lett.*, **34**, (1), pp. 31-32 (1979).
 - 8) S. Suzuki, Y. Ishibashi, M. Obara, T. Fujioka: "Dependence of laser output on initial photoelectron density in TEA CO₂ laser", *Appl. Phys. Lett.*, **36**, (1), pp. 26-28 (1980).
 - 9) T. Arai, M. Obara, T. Fujioka: "A CW X-ray preionizer for high repetition rate gas lasers", *Appl. Phys. Lett.*, **36**, (4), pp. 235-237 (1980).
 - 10) S. Wakabayashi, T. Arai, T. Fujioka: "A comparative study of a pulsed CO TE laser and a pulsed CS₂/O₂ chemical laser", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, (1), pp. 123-126 (1979).
 - 11) K. Watanabe, Y. Sato, M. Obara, T. Fujioka: "An H₂(D₂)/F₂ chemical laser initiated with a novel teflon surface spark UV flash", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, (11), pp. 2175-2180 (1980).
 - 12) S. Wakabayashi, T. Arai, T. Fujioka: "A high-gain CO chemical laser", *J. Appl. Phys.*, **50**, (10), pp. 6155-6158 (1979).
 - 13) M. Iyoda, M. Udagawa, M. Obara, T. Fujioka: "Numerical analysis of the output performance of a pulsed HBr chemical laser", *J. Appl. Phys.*, **50**, (9), pp. 5615-5623 (1979).
 - 14) K. Watanabe, M. Obara, T. Fujioka: "A surface discharge UV light source", *J. Appl. Phys.*, **51**, (5), pp. 2355-2360 (1980).
 - 15) S. Sumida, M. Obara, T. Fujioka: "Novel neutral atomic fluorine laser lines in a high-pressure mixture of F₂ and He", *J. Appl. Phys.*, **50**, (6), pp. 3884-3887 (1979).
 - 16) T. Arai, M. Obara, T. Fujioka: "Pulsed discharge N₂/SF₆ laser with CW X radiation as a preionization source", *J. Appl. Phys.*, **51**, (7), pp. 3556-3558 (1980).
 - 17) Y. Sato, T. Fujioka: "The pulsed HF chemical laser of the HI/SF₆ system (experimental study)", *Trans. IECE of Japan*, **E-63**, (7), pp. 503-506 (1980).
 - 18) Y. Sato, T. Fujioka: "The pulsed HF chemical laser of the HI/SF₆ system (theoretical study)", *Trans. IECE of Japan*, **E-63**, (7), pp. 507-513 (1980).
 - 19) H. Oodate, T. Fujioka: "Measurements of 4.2 μm CO₂ pressure broadening by using an

- HBr chemical laser", *J. Chem., Phys.*, **68**, (12), pp. 5494-5497 (1978).
- 20) M. Obara, N. Nishida, M. Morimoto, T. Fujioka: "Observation of rotational population transfer effect for an HF chemical laser", *Optics Communication*, **26**, (2), pp. 240-242 (1978).
- 21) 李 柱熙, 高浜 亨, 小原 實, 藤岡知夫: "縦打込み方式電子ビーム点火 SF₆/H₂ レーザの特性", 電気学会論文誌, **100-c**, (9), pp. 298-304 (1980).
- 22) 渡辺一弘, 佐藤行雄, 小原 實, 藤岡知夫: "光点火 H₂/F₂ レーザの動作特性", 電気学会論文誌, **100-c**, (4), pp. 95-102 (1980).