

金蒸気レーザーの増幅特性の測定

Gain measurement of a gold vapor laser

黒田和男*・神谷三郎*・千原正男*・志村 努*・小倉馨夫*

Kazuo KURODA, Saburo KAMIYA, Masao CHIHARA, Tsutomu SHIMURA and Iwao OGURA

1. はじめに

金レーザーは中性金原子の $6p^2P_{3/2}$ から $6s^2D_{3/2}$ への 627.8 nm の遷移を用いたパルス発振レーザーであり、銅レーザーに代表されるセルフターミネイト型の中性金属蒸気レーザーに属する高出力高ゲインの可視レーザーである。¹⁻³⁾ 金レーザーは、画像の輝度増幅、⁴⁾ 色素レーザーの励起光源などに応用されている。また最近ではヘマトポリフィリン誘導体の励起光源としてガンの治療に利用され注目を集めている。

画像輝度増幅の大画面カラー表示への応用では、3原色それぞれに対応するレーザーが必要になる。緑の波長域には 510.6 nm に発振線を持つ銅レーザーがあり、これについては多くの実験例が報告されている。^{5,6)} 赤色レーザーを金属蒸気レーザーの中から探す、平均出力や増幅利得の点で金レーザーが最適である。われわれは画像輝度増幅用の金レーザーを試作し、その増幅率と飽和強度を測定した。

2. 金レーザー装置

レーザー管の設計条件を列挙すると、(1)金レーザーは $0.1\sim 1\text{ Torr}$ の金の蒸気を活性媒質とするため $1550\sim 1750^\circ\text{C}$ の温度範囲で動作する、(2)レーザー発振は 15 kV 程度のパルス放電で励起される、(3)レーザー管は真空密封される、となる。すなわち、レーザー管は高温断熱された高電圧放電管である。動作部を高温に保ち、一方高圧絶縁部および真空シール部は温度が上がりすぎないように冷却の必要がある。また、窓の汚染を防ぐためそのまわりも冷却をする。

金レーザー装置の構造を Fig.1 に示す。レーザー管は長さ 88 cm 、内径 20 mm の高純度アルミナ製放電管、セラミックス・ファイバーの断熱材、パイレックス管、ステンレス製の外管からなる。本装置では外部ヒーターは使わず、放電から発生する熱を利用して放電管を加熱する。

熱の散逸は、温度の4乗則で増大する熱放射が高温において支配的になり、高融点金属を用いた真空輻射シー

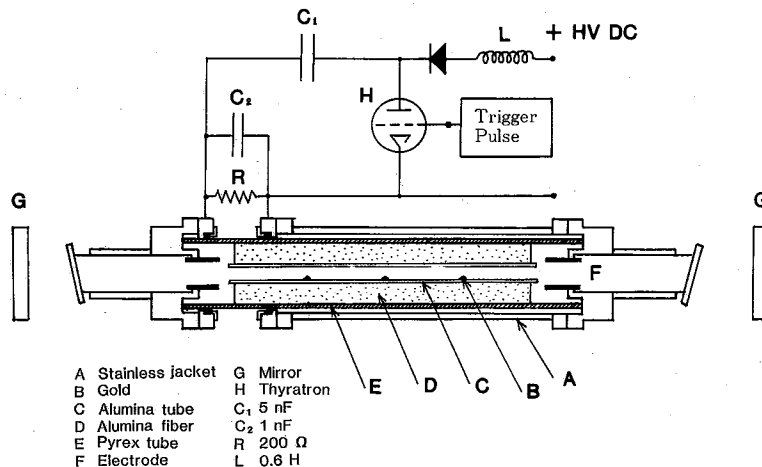


Fig.1 Schematic diagram of a gold vapor laser.

* 東京大学生産技術研究所 第1部

ルドが効果的であるが、この方式ではシールド部分を放電部とは別に真空シールドしなくてはならず以下のような困難が生じる。アルミナの線膨張係数は $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ であり、放電管には動作時に 1 m あたり 1.4 cm の熱膨張が生じる。このため放電管の真空シールド部分は可動にしなければならず構造が複雑になる。レーザーの動作温度はアルミナの軟化点温度 (1800~2000°C) に近く機械的強度は低下しているから、アルミナ放電管に大きな応力がかかると変形・破壊が起こる。また、この構造ではシールド金属板が放電管のすぐ外側にくるので、放電管が絶縁破壊してシールド板に放電する事故が起こる可能性がある。特に高温ではアルミナの電気伝導度が高くなるので、この危険性が大きい。すなわち、真空輻射シールド方式では熱的、電氣的に過大な負荷が放電管にかかることになり、長寿命化は期待できない。

本装置では、アルミナを主成分とするセラミックス・ファイバーを断熱材として用いた。アルミナ放電管の回りに断熱材を巻きつけ、これをパイレックス管に収め、その側面において真空シールドした。放電管の内部に断熱材が入るから、セラミックス・ファイバーは有機バインダーを含まないもの (東芝モノフラックス、マックスファイバーク) を用いた。充填嵩密度は約 0.5g/cm^3 であった。この構造ではアルミナ放電管は断熱材に支えられているだけなので、熱膨張による変形・破壊や絶縁破壊の心配はなくなる。たとえアルミナ放電管にクラックが入ってもレーザー動作に支障なく、レーザー管の寿命を延ばすことができる。セラミックス・ファイバーの断熱性については次節で議論する。

電極には円筒状のモリブデンを用い、電子放出量を増やすため小さな突起を多数つけたモリブデン箔を内部に巻いた。約 2 g の金を放電管の中央と端から 20 cm のところ 3 箇所位置いた。

レーザー共振器は、曲率半径 8 m で反射率がほぼ 100% の多層蒸着膜凹面鏡と熔融石英の平板からなる。

放電回路は 5 nF の主コンデンサーと 1 nF のピーキングコンデンサーからなり、サイラロンで高速スイッチングし、立ち上がりの鋭い放電パルスを発生する。ステンレス外管は放電電流のリターンパスとして放電部のインダクタンスを下げる役割を果たす。主コンデンサーには、高圧 DC 電源から LC 共振回路を通して充電する。

放電電圧とサイラトロンのアノード電圧を電圧プローブでモニターした。放電電流の測定にはロゴスキー・コイル (Physics International, PIM-220-1.5-10 B) を用いた。レーザー管の温度は放電を止め放射温度計で測定した。アルミナの放射率は 0.2 とした。放電時には温度測定はできないが、放電管の熱膨張を観測し温度を推定

することができる。

バッファーガスには Ne を用い、電極、アルミナ放電管、断熱材から放電によってたたきだされる不純物分子を取り除くためフロータイプとした。圧力と流量はレーザー管の入口と出口に取り付けた流量可変バルブで調節した。流量は入口と出口の圧力差から求めた。本実験では、圧力を 15~30 Torr、流量を 4~8 Torr·l/s の間で変えて動作させたが、この範囲では最終的なレーザー出力は動作条件にほとんど依存しなかった。

放電開始直後は放電部分のインピーダンスが高く電流は大部分バイパス抵抗を流れてしまう。放電部分の温度が上昇するとアーク状の放電に変わり立ち上がり時間が早くなり放電電流が増大しはじめる。このとき放電はひも状に絞られ不安定な状態になる。さらに温度が上昇し金の蒸気が出はじめると放電は拡がって一様になり安定化する。金の蒸気圧が 0.1 Torr 程度に達すると 627.8 nm の赤色レーザー線が発振する。発振開始まで約 1 時間を要する。

Ne 圧力 20 Torr、流量 5 Torr·l/s、繰り返し周波数 4 kHz、入力パワー 4.5 kW のとき 1.4 W の平均出力がえられた。終了時のレーザー管温度は 1730°C であった。放電電流、電圧波形を Fig. 2, 3 に示す。充電電圧は 20 kV であるが、13 kV でブレイクダウンを起こしている。電流の立ち上がりは約 120 ns である。レーザー上準位の寿命は基底準位への遷移が閉じこめられた状態で約 400 ns であり、電流の立ち上がり時間はこれに比十分短くなっている。電流ピーク値は 800 A である。Fig. 4 にレーザー光波形を示す。半値幅は約 30 ns である。

3. セラミックス・ファイバーの断熱効果

セラミックス・ファイバーの熱伝導率 k の温度依存性は

$$k = k_0 + k_g T^{\frac{1}{2}} + k_r T^3, \quad (1)$$

と表される。ここで T は絶対温度である。 k_0 はファイバーの熱伝導率で、非常に小さい。第 2 項は気体 (本装置では Ne) の熱伝導率で、高温では $T^{\frac{1}{2}}$ に比例する。Ne に対しては $k_g = 0.0036 \text{W/mK}^{\frac{3}{2}}$ である。第 3 項は光の輻射による熱伝導であり、係数 k_r はステファン・ボルツマン定数をセラミックス・ファイバー中の光の吸収率で割ったものに比例するから、嵩密度が高いほど k_r は小さくなる。^{7,8)} われわれの用いたセラミックス・ファイバーでは、嵩密度 0.5g/cm^3 のとき、 $k_0 = 0.05 \text{W/mK}$ 、 $k_r = 2.4 \times 10^{-10} \text{W/mK}^4$ であった。

単位長さ当たり Q の発熱量の熱源を中心に置きその周りを円筒状の断熱層で覆った場合、定常状態では断熱層の外壁、内壁の温度 T_1, T_2 は

研究速報

$$\frac{Q}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} = k_0(T_2 - T_1) + \frac{2}{3} a_g(T_2^{3/2} - T_1^{3/2}) + \frac{1}{4} k_r(T_2^4 - T_1^4), \quad (2)$$

を満足する。ただし、 $2r_1$ 、 $2r_2$ は断熱層の外径および内径であり、本装置では $r_1=45\text{mm}$ 、 $r_2=10\text{mm}$ である。 k_0 の温度依存性と、両端からの熱の散逸の効果は無視した。 $T_1=400\text{K}$ 、 $T_2=1900\text{K}$ のとき $Q=4.3\text{kW/m}$ となり、この程度の入力パワーで動作温度状態が得られる。このとき(2)式の各項の寄与は1:2.4:10.4となり、輻射による熱伝導が主であることがわかる。

断熱材を通しての熱伝導のほかに端面からの輻射による熱の散逸がある。内径 $2r$ 、長さ L の円筒を考え、端から z の所の幅 dz のリング状部分からの輻射のうち端面から外へ出ていくパワー dU を求めると、放射率を1と仮定して

$$dU = \pi r \sigma T^4(z) f\left(\frac{z}{r}\right) dz, \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{x^2 + 2}{(x^2 + 4)^{1/2}} x, \quad (4)$$

と表される。ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数、 $T(z)$ は z の位置での内壁の温度である。関数 $f(x)$ は、 $f(0)=1$ で、 x が増えると単調に減少する。詳しい解析は熱伝導方程式を解かねばならないが、大体の目安として dU/dz が Q と同オーダーになるところまで端の効果が及ぶと考えられる。本レーザー装置の場合、 $T=1900\text{K}$ 、 $r=1\text{cm}$ として、 $dU/dz \sim 4\text{kW/m}$ から z を求めると、およそ $z=10\text{cm}$ が得られる。この部分は温度が上がらずレーザー発振に寄与しない。

4. 増幅率の測定

画像増幅において、レーザーの増幅率と飽和強度は最も基本的なパラメータである。これらのパラメータは入力光強度に対して出力光強度をプロットしたグラフから求まる。本実験では、二つの二重ピンホールで増幅媒質を二つの部分に分け、一方には共振器を組みレーザー発振させ、それをもう一方の部分に導入し増幅器として働かせた。金レーザーは管径が大きくまた増幅率も大きいのでこのような測定法が可能である。Fig.5に測定系を示す。二重ピンホール板 PH_1 、 PH_2 は発振部に径5mm、増幅部に6mmのピンホールを10mm間隔で並べたものでレーザー管内の光路を二つに分ける。増幅媒質は物理的に二つの部分に分けられるわけではないが、共振器を付けた状態では PH_1 の発振部ピンホールと PH_2 の増幅部ピンホールを通る、あるいはその逆の組み合わせの斜めに発振する光は十分弱く二つの光路間には相互作用はないと考えられる。レンズ L ($f=1.6\text{m}$)によって増幅部におけるビームの径は4mmに抑えられる。透過率可

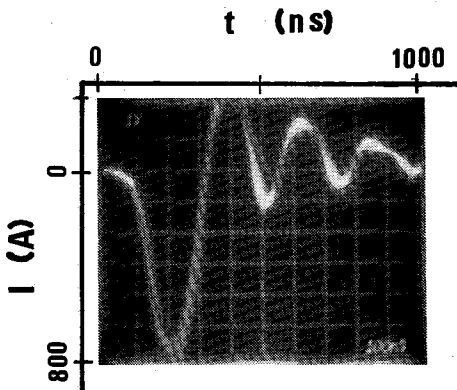


Fig. 2 Discharge current.

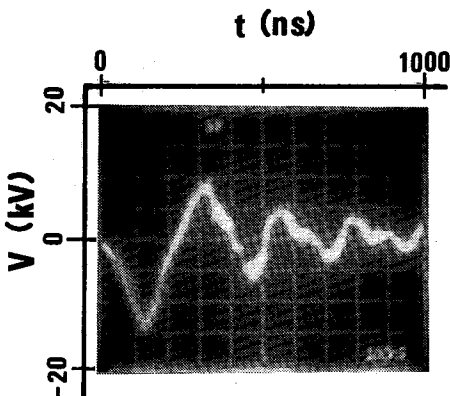


Fig. 3 Discharge voltage. Scans in Fig.2 and 3 are triggered by common trigger signal.

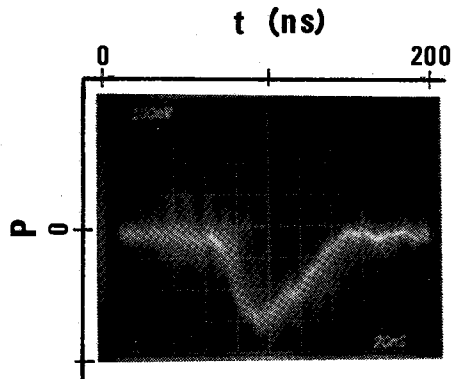


Fig. 4 Pulse shape of laser power (arbitrary unit)

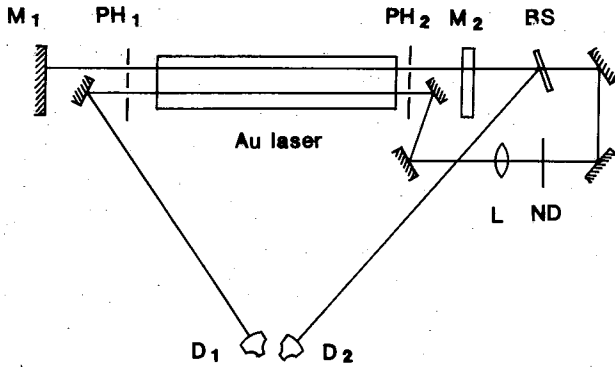


Fig.5 Measuring system of the amplification gain of a gold vapor laser. M₁: high reflectance mirror, M₂: fused quartz plate, PH₁: pinholes, BS: beam splitter, ND: neutral density filter, L: lens, D₁, D₂: detectors.

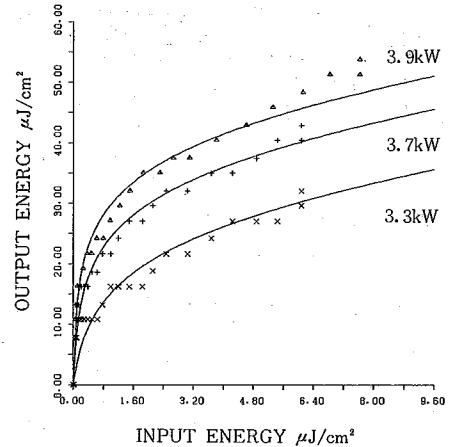


Fig.6 Experimental results of amplification characteristics (marks). Parameter is input power. Solid curves are theoretical results calculated from eq. (5).

変のフィルター ND により入射光強度をかえる。増幅光強度はバイプラナー光電管 D₁ (浜松フォトニクス R 617) で測定した。入力光強度は半透鏡 BS からのビームを D₂ でモニターし、ND フィルターの透過率とその他の光学素子による損失を求めて算出した。

入力パワーがそれぞれ 3.3, 3.7, 3.9 kW のときの測定結果を Fig. 6 に示す。

パルスレーザーの増幅特性は Frantz-Nodvik の式で近似される。⁹⁻¹¹⁾

$$E_0 = E_s \ln [e^{gL} (e^{E_i/E_s} - 1) + 1] \quad (5)$$

ただし、 E_i は入力光強度、 E_0 は出力光強度、 E_s は飽和強度で、それぞれ 1 パルス当たりの値を表す。 g は増幅利得係数、 L は増幅媒質長である。測定結果を上式にあてはめ、 g と E_s を求めた。その結果、飽和強度は $7.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、増幅利得係数はそれぞれ、 $0.064, 0.087, 0.099 \text{ cm}^{-1}$ の値をとることがわかった。Frantz-Nodvik の解析によると、反転分布密度 N_0 は

$$N_0 = \frac{2gE_s}{h\nu} \quad (6)$$

と表される。ここで $h\nu$ は光子のエネルギーである。測定結果を代入すると反転分布密度は $3 \sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ となる。

5. ま と め

画像輝度増幅への応用を目的に金蒸気レーザーを試作し、その増幅特性を測定した。平均出力は同規模の銅蒸気レーザーと比べ 30% 程度であるが、増幅利得係数は $0.5 \sim 0.1 \text{ cm}^{-1}$ と銅蒸気レーザーにほぼ匹敵する。われわれの試作した金蒸気レーザーが赤色スペクトルの画像輝

度増幅に應用できることが確かめられた。今後の課題は青色スペクトルにおける輝度増幅レーザーの開発にある。

この研究は本所より昭和 59 年度選定研究費の援助を受けた。
(1985 年 5 月 7 日受理)

参 考 文 献

- 1) W. T. Walter, IEEE J. Quantum Electron. QE-4, 355 (1968)
- 2) T. S. Fahlen, IEEE J. Quantum Electron. QE-12, 200 (1976)
- 3) S. V. Markova and V. M. Cherezov, Sov. J. Quantum Electron. 7, 339 (1977)
- 4) M. A. Kazaryan, G. G. Petrash and K. I. Zemskov, Opt. Comm. 33, 209 (1980)
- 5) P. Rabinowitz and R. Chimenti, J. Opt. Soc. Amer. 60, 1577 (1970)
- 6) K. I. Zmskov, A. A. Isaev, M. A. Kazaryan and G. G. Petrash, Sov. J. Quantum Electron. 4, 5 (1974)
- 7) S. Rosseland, "Astrophysik auf Atom-Theoretischer Grundlage", Springer, Berlin (1931), p. 41
- 8) R. Viskanta and R. J. Grosh, J. Heat Transfer, 84, 63 (1962)
- 9) L. M. Frantz and J. S. Nodvik, J. Appl. Phys. 34, 2346 (1963)
- 10) K. Kuroda, H. Takahashi, M. Chihara, and I. Ogura, J. Appl. Phys. 52, 87 (1981)
- 11) K. Kuroda, M. Takeda, M. Chihara, and I. Ogura, J. Appl. Phys. 54, 1677 (1983)