レーザーオリジナル

亜音速流 N_2/CO_2 混合型レーザー

土志田 実*・原 照*

(1988年10月15日 受理)

A N_2/CO_2 Subsonic Mixing Laser

Minoru DOSHIDA* and Hiroshi HARA*

(Received October 15, 1988)

The operational properties of a N_2/CO_2 subsonic mixing laser are described. A small signal gain of $1.8m^{-1}$, a saturation intensity of $100W/cm^2$ and a specific power of $9.5J/g$ were obtained under the optimum conditions. Comparison of the results with those of a N_2/CO_2 supersonic mixing laser indicates that a N_2/CO_2 subsonic mixing laser is scalable in size and power more easily than the N_2/CO_2 supersonic mixing laser.

Key Words : CO_2 laser, Mixing laser.

1. はじめに

1964年 Patel によって報告された CO_2 レーザー¹⁾は、励起方式の多様性、高出力化、高効率化が可能であるなどの多くの魅力を備えているため、多数の研究がなされてきた。なかでも放電励起 N_2/CO_2 後混合型レーザーは、 CO_2 ガスに直接放電をかけないため、 CO_2 ガスの過度の温度上昇を防ぐことができ、放電および熱によるレーザー下位準位への励起、 CO_2 分子の解離等の高出力の妨げとなる要因が排除できる。さらにフロータイプであるため、ガスの再利用は困難であるが、レーザー下位準位分子の強制排気等の利点があり、高出力可能なレーザーとし

て期待される²⁾。

Brown はガス流速 $150 m/sec$ の混合型 CO_2 レーザーにおいて小信号利得 $4.3 m^{-1}$ 、レーザー出力 $12 W/cm^3$ を得³⁾、さらに原らはガスを超音速流として小信号利得 $11 m^{-1}$ 、レーザー出力 $3.3 W/cm^3$ を得た⁴⁾。この方式の CO_2 レーザーでは、ガス流を速くするほどガス温度の上昇を抑制できるため小信号利得は大きくなり、通常の放電励起 CO_2 レーザーに比べ 1 桁程大きな値が得られている。しかし、ガス流を速くするためには大型の排気系が必要となり、高出力レーザーの製作上問題が生じてくる。小型の排気系を用いるとガス流は遅くなり、ガス温度の上昇、および共振器内の静圧の上昇を招くため利得は

* 防衛庁第2研究所 (〒153 目黒区中目黒2-2-1)

* Second Research Center, Japan Defense Agency (2-2-1, Nakameguro Neguro, Tokyo 153)

Fig. 1 Schematic of the setup.

低下する²⁾。しかし最大レーザー出力密度は、小信号利得と飽和利得強度の積で表せられ、一般に共振器内の静圧に比例するため⁶⁾、ガス流が遅くなっても静圧が高くなれば出力は回復できることになる。しかしこれは、共振器内を通過するガス流量の減少による出力の低下によって相殺され、またガス温度の上昇も小信号利得にネガティブに働くため、静圧の影響はそのまま出力には現れない。さらに流速を遅くすると、 N_2 ガスと CO_2 ガスの混合にも影響を及ぼすと思われる。そこで、実際にガス流を亜音速流にした時の放電励起 N_2/CO_2 後混合型レーザーの動特性を測定し、以前報告した超音速流混合との比較を行い、排気系を含めた小型高出力レーザーの可能性を明らかにした。

2. 実験装置

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。本装置は放電部、ガス混合部、測定部に大別される。放電部は縦2本、横2本、計4本の放電管（内径12 mm、石英ガラス）を備えており、各々の管内に17cm離れてリング状電極（内径6 mm、真鍮）が正対している。陽極はガスの注入口を兼ね、放電管は水冷される。放電管の下流には同軸平行にガスインジェクター（内径2 mm、真鍮）が設けられ、それを通し CO_2 ガスが注入される。混合ガスは測定部を兼ねたダクトを通り、真空ポンプにより大気中に排出される。排気容量33,000 l/minの真空ポンプを用いたときガス混合部、測定部においてガスは超音速流、3,000 l/minの真空ポンプを用いたとき亜音速流となる。ダクトはガス流に直交して $4 \times 4 \text{ cm}^2$ の断面積を持っている。

Table I Typical fluid dynamical properties of the N_2/CO_2 supersonic and the subsonic mixing laser.

	SUPERSONIC MIXING	SUBSONIC MIXING
VELOCITY	$\sim 500 \text{ m/sec}$	$\sim 40 \text{ m/sec}$
GAS TEMPERATURE	$\sim 250 \text{ K}$	$\sim 380 \text{ K}$
STATIC PRESSURE	$\sim 2 \text{ Torr}$	$\sim 20 \text{ Torr}$
TRANSIT TIME	$2 \times 10^{-4} \text{ sec}$	$1 \times 10^{-3} \text{ sec}$
RELAXATION TIME (001)→(030)	$5 \times 10^{-3} \text{ sec}$	$4 \times 10^{-4} \text{ sec}$
RELAXATION TIME (010)→(000)	$5 \times 10^{-3} \text{ sec}$	$2 \times 10^{-5} \text{ sec}$

3. 実験結果と考察

レーザー動特性を示す前に、亜音速流混合における流体力学特性についての測定結果を示す。比較のため同一の装置での超音速流混合における特性も合わせて、Table I に示した。表値は実験条件における典型的な値である。亜音速流混合のガス流速は、超音速流の場合の約1/10の40 m/sec、そのためガス温度は100 K以上高く利得測定部（ CO_2 ガスインジェクターの下流4 cm）で380 K程度、同静圧は約10倍の20 Torrであった。また放電は測定条件内で安定なグロー放電を示し、 E/N の値は超音速流混合の場合およそ $4 \times 10^{-16} \text{ Vcm}^2$ 、亜音速流混合の場合およそ $1.5 \times 10^{-16} \text{ Vcm}^2$ であった。

上記の値より算出される CO_2 ガスインジェクターから測定地点（下流4 cm）までの通過時間、 CO_2 レーザー上位準位（001）の CO_2 分子同士との衝突による（030）準位への緩和時間、および、 CO_2 レーザー下位準位（100）準位から基底準位（000）に緩和するときボトルネックと

Fig. 2 Small-signal gain for several N_2 gas flow rates as a function of CO_2 gas flow rate. The gain was measured at 4 cm downstream from the CO_2 gas injector exist at the center of the CO_2 gas injector exist at the center of the cavity.

なる (010) 準位から (000) 準位への He 分子との衝突による緩和時間は、それぞれ表に示した値となる⁶⁾。超音速流混合の場合には、衝突緩和時間は通過時間よりも長くなり CO_2 分子、He 分子の緩和に与える影響は小さくなるが、超音速流の場合には衝突緩和時間は通過時間よりも短くなるため、 CO_2 や He 分子等のレーザー上位準位、および下位準位の緩和に与える影響は、超音速流混合型レーザーに比べ顕著に現れてくるものと予想される。

Fig. 2 に、 N_2 ガス流量をパラメータとして、 CO_2 ガス流量を変化させたときの小信号利得の特性を示す。He ガス流量は 20 l/min、放電電流は放電管 1 本当り 40 mA である。 CO_2 ガス流量がある程度以上多くなると、Table I に示したように、 CO_2 分子同士の衝突によるレーザー上位準位の緩和が促進され、利得は小さくなってきてしまう。また N_2 ガス流量に対しても、利得はピークを持った特性を示しているが、この要

Fig. 3 Small-signal gain for several N_2 gas flow rates as a function of the He gas flow rate. The dashed curve shows the small-signal gain of a conventional premixing CO_2 laser with the gas flow rate $N_2 : CO_2 = 20 : 5$ l/min.

因としては N_2 ガス流量の増加により放電維持電圧が高くなり、(N_2 ガス流量が 10 l/min, 30 l/min, 50 l/min のとき、放電維持電圧はそれぞれ約 1.5 kV, 3.5 kV, 5.5 kV)、その結果としてガス温度の上昇が生じるためと思われる⁷⁾。

Fig. 3 に、 N_2 ガス流量をパラメータとして、He ガス流量を変化させたときの小信号利得の特性を示す。測定はダクトの中心をプローブレーザーが通るようにして行った。 CO_2 ガス流量は 15 l/min、放電電流は放電管 1 本当り 40 mA である。 N_2 ガス流量が少ないときは放電維持電圧が低くガス温度上昇が抑えられるため、He ガスを混合しなくても利得は生じる。しかし、 N_2 ガス流量の増加にともないガス温度が上昇し CO_2 レーザー下位準位の緩和が鈍るため利得は小さくなり、 N_2 ガス流量が 20 l/min 以上では、He ガスを混合しないと利得は生じなくなる。Table I に示したように超音速流混合の場合、レーザーガスのインジェクターの出口から利得

測定点までの通過時間よりも、He分子によるCO₂(010)準位の衝突緩和時間が短くなるため、HeガスはCO₂レーザー下位準位の緩和を促進させる働きを持つ。これゆえ、同図に現れるようにHeガスの混入とともに利得が生じるようになり、ガスの増量とともに小信号利得の値は増加する。しかし、ある程度以上Heガス流量を多くすると、飽和から減少の傾向を示すようになる。Heガス流量の増加によるガス温度上昇はないため、小信号利得の減少する要因としては、N₂分子の励起効率の低下、およびHeガスによるN₂ガスとCO₂ガスの混合に与える悪影響、すなわちエネルギー移乗効率の低下などが考えられる⁸⁾。

図中に示した破線は、同一の装置で予混合型にしたときの最適条件での結果である。N₂ガス流量は20 l/min、CO₂ガス流量は5 l/min、放電電流は放電管1本当り40 mAである。厳密な比較はできないが、CO₂ガスへの直接放電によりレーザー下位準位への電子衝突振動励起や熱的励起などを招いてしまうため、小信号利得は後混合型に比べ1/3以下の値しか得られなかった。

小信号利得 α_0 と飽和利得強度 I_s は、レーザーの発振スペクトル線幅が分子同士の衝突によって支配されるとき、次式によって関係づけられる。

$$\ln\left(\frac{I_{out}}{I_0}\right) = \alpha_0 L - \frac{I_{out} - I_0}{I_s} \quad (1)$$

これにより、プローブレーザーの入射光強度 I_0 を変化させたときのレーザー媒質通過後の出力光強度 I_{out} を測定し、 $(I_{out} - I_0) - \ln(I_{out}/I_0)$ のグラフの勾配より飽和利得強度 I_s が求まる⁹⁾。

また連続発振ガスレーザーの場合、レーザー出力 P と飽和利得強度 I_s には、以下の関係式が成立する¹⁰⁾。

$$P = \frac{t_1 I_s A [2 \alpha_0 L + \ln \{1 - (a_1 + a_2) - t_1\}]}{2 \{ (1 - a_1 - t_1)^2 + a_1 + t_1 \}} \quad (2)$$

ここで、 A レーザービーム断面積

a_1, a_2 : 部分反射鏡, 全反射鏡の共振

Fig. 4 Saturation intensity as a function of He gas flow rate. The curve [A] was obtained from equation [1] and [B] was from [2]. The gas flow rate was CO₂: N₂ = 15 : 30 l/min and the discharge current was 40 mA/tube.

器損失

t_1 : 部分反射鏡の透過率

すなわちレーザー出力 P 、小信号利得 α_0 の測定により、飽和利得強度 I_s の算出ができる¹¹⁾。

上記の2方法による飽和利得強度の測定結果をFig. 4に示す。前者の方法を[A]⁹⁾、後者を[B]¹¹⁾とし、Heガス流量を変化させたときの特性を示した。N₂ガス流量は30 l/min、CO₂ガス流量は15 l/min、放電電流は放電管1本当り40 mAである。[B]において部分反射鏡の共振器損失は無視し、また全反射鏡の共振器損失は典型的な値として1.5%~3.0%と仮定し、飽和利得強度 I_s を算出した。 I_s は両者ともHeガス流量が約20 l/minのときにピークを持った特性をしており、その値はおよそ100 W/cm²と見積られた。

Fig. 5に、N₂ガス流量をパラメータとして、Heガス流量を変化させたときのレーザー出力の特性を示す。共振器は内部鏡方式で、全反射鏡

Fig. 5 Output power for several N_2 gas flow rates as a function of the He gas flow rate.

Fig. 6 Output power and the electric efficiency as a function of discharge current.

には曲率半径 1 m の金蒸着鏡、部分反射鏡には反射率 95% の平面鏡を用いた。活性媒質長は 4 cm である。また CO_2 ガス流量は 15 l/min、放電

Table II Operational properties of the N_2/CO_2 supersonic and the subsonic mixing laser.

	SUPERSONIC MIXING	SUBSONIC MIXING
SMALL SIGNAL GAIN	6.0 m^{-1}	1.8 m^{-1}
SATURATION INTENSITY	$\sim 50 \text{ W/cm}^2$	$\sim 100 \text{ W/cm}^2$
OUTPUT POWER	90 W	14 W
ELECTRIC EFFICIENCY	10.2 %	2.1 %
SPECIFIC POWER	1.81 W/cm^3	0.29 W/cm^3
SPECIFIC ENERGY	13.1 J/g	9.5 J/g

電流は放電管 1 本当り 40 mA である。(2)式によるとレーザー出力は、ほぼ飽和利得強度 I_s 、小信号利得 α_0 に比例する。これゆえ小信号利得の特性と同様に、 N_2 ガス流量が少ない時には He ガスを混合しなくても出力は得られた。 N_2 ガス流量、He ガス流量を増加させることによりレーザー出力は大きくなるが、ある程度以上多くなると Fig. 3 で述べた要因により、レーザー出力は減少してきてしまう。

Fig. 6 に、放電電流を変化させたときのレーザー出力の特性を示す。電流値は放電管 1 本当りの値であり、 N_2 、 CO_2 、He ガスの流量は、それぞれ 30 l/min、25 l/min、15 l/min である。放電電流を高くすると、入力電力が大きくなり、その結果ガス温度が上昇してしまうため（放電電流が 30 mA のとき、入力電力 460 W、ガス温度 370 K、50 mA のとき 670 W、405 K、70 mA のとき 840 W、435 K）、レーザー出力に線形的な増加は見られずピークをもつ特性を示した¹²⁾。本実験での最大出力としては、放電電流が 50 mA のとき、14.2 W を得た。また電気効率、30 mA のとき 2.6 %、50 mA のときは 2.1 % であった。

Fig. 7 Small-signal gain as a function of the distance perpendicular to the laser gas flow from the center of the cavity. The gain was measured at 4 cm, 10 cm and 16 cm downstream from the CO_2 gas injector exit.

4. レーザー動特性の比較

以上述べてきた亜音速流 N_2/CO_2 混合型レーザーの動特性を、超音速流混合の特性とあわせて Table II に示す。飽和利得強度、レーザー出力は、それぞれの混合における最高値であり、電気効率、単位体積当りのレーザー出力、レーザーガスの単位質量当りの出力エネルギーは最高レーザー出力時の値である。

一般に小信号利得は静圧に反比例し、ガス温度の上昇もネガティブに効いてくるため、Table I に示されるような特性を持つ亜音速流混合の場合、超音速流混合より当然小信号利得は小さくなる。逆に、飽和利得強度はほぼ静圧の 2 乗に比例し、流速には反比例するため、超音速流より亜音速流混合の方が大きくなって来る²⁾。

単位体積から取り出せ得る最大レーザー出力は、小信号利得と飽和利得強度の積となるため、利得が低くなったとしても静圧を高くできれば、

レーザー出力が静圧に比例するため、理論的にはレーザー出力を大きくすることができる。今回の実験において得られた最高のレーザー出力は約 14 W であり、単純に比較すると超音速流の場合の 6 分の 1 程であり、小信号利得、飽和利得強度の大きさから比較するとやや小さすぎる。この主要要因としては、Fig. 7 に示したような小信号利得の分布の不均一性が挙げられる。同図の横軸は、プローブレーザーが通過するダクトの中心からの流れに対し鉛直方向への距離である。 N_2 、 CO_2 、 He ガスの流量は、それぞれ 30 l/min, 15 l/min, 5 l/min, 放電電流は、放電管 1 本当り 40 mA であり、 CO_2 ガスインジェクターから下流 4 cm, 10 cm, 16 cm の地点での測定結果である。 N_2 と He の混合ガスが通過する放電管口は、 $-1.7 \sim -0.5$, $0.5 \sim 1.7$ (cm) に、 CO_2 ガスインジェクターは、 $-1.2 \sim -1.0$, $1.0 \sim 1.2$ (cm) に位置する。下流 4 cm での測定では、 CO_2 ガスインジェクター付近で小信号利得は最も大きく、そこから離れるにつれ小さくなる傾向を示している。これより N_2 ガスと CO_2 ガスとの混合が均一に行われていないと考えられる。そのためレーザー出力は小さくなり、その結果電気効率も 2% 台と低くなったものと思われる。下流に行くほどガスの混合は促進されるため、小信号利得分布の不均一性は小さくなり、下流 16 cm ではほぼ一様な値を示すようになる。このように、亜音速流混合の場合、超音速流混合では見られなかった混合に起因すると考えられる小信号利得の不均一性が生じてしまうため、ガスの混合方式を十分考慮しなくてはならない。

亜音速流混合型レーザーにおける単位質量当りの出力エネルギーは、超音速流混合型レーザーに近い値を示している。これは、超音速流混合においてガス速度を速くしレーザー出力を高めることと同様の効果が、亜音速流において静圧を高めることで得られるものと考えられる。

5. まとめ

本研究の亜音速流混合型レーザーの場合、こ

れまでに報告した超音速流混合型レーザーに比べると排気系を含めた装置は小型化できるが、流速の低下、ガスの度の上昇、混合に起因した小信号利得の不均一が生じるため、小信号利得は小さくなった。さらに、共振器内を通過する単位時間当りのレーザー媒質の流量が少なくなるため、レーザー出力も減少した。しかし、超音速流混合に比べ静圧が高くなったことにより飽和利得強度が増大したこと、また超音速流混合よりは小さくなったが、従来の放電励起 cw CO₂レーザーに比べると高い利得が得られたこと、スケーラビリティが高いことなどを考慮すれば、ガス流が数十 m/sec 程の超音速流混合型レーザーにおいても、高出力化は十分に可能であると考えられる。

参考文献

- 1) C. N. Patel : Phys. Rev. **136A** (1964) 1187.
- 2) A. J. Demaris : Proc. IEEE **61** (1973) 731.
- 3) C. O. Brown : Phys. Lett. **17** (1970) 388.
- 4) H. Hara and A. Fujisawa : *Third International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers*, Marseille, Sept. 1980, 8-12.
- 5) M. C. Fowler : J. Appl. Phys. **43** (1972) 3480.
- 6) R. L. Taylor and S. Bitterman : Reviews of Modern Physics **41** (1969) 26.
- 7) C. S. Willet : in "Introduction to Gas Lasers : Population Inversion Mechanisms" (Pergamon Press, 1974) p.284.
- 8) H. Hara and A. Fujisawa : Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 65.
- 9) T. F. Deutsch, F. A. Horrigan and R. I. Rndko : Appl. Phys. Lett. **15** (1969) 88.
- 10) W. W. Rigrod : J. Appl. Phys. **34** (1963) 2602.
- 11) H. Hara : J. Appl. Phys. **48** (1977) 5341.
- 12) P. K. Cheo : in "CO₂ Lasers" (Marcel Dekker, 1971) p.170.