大気圧炭酸ガスレーザー

——レーザー発振特性——

大阪大学工学部

山部長兵衛, 中塚正大, 杉川博昭

横山昌弘, 山中千代衛

(昭和46年3月29日受理)

Abstract

Characteristics of TEA CO₂ laser oscillation are reported. The pressure region of laser oscillation was about from 10 torr to 700 torr. Maximum output power was obtained when nitrogen gas is mixed to CO₂ gas with ratio of $P_{N_2} / P_{CO_2} = 1 \sim 1.5$. The peak power of about 5KW per pulse was obtained and it was confirmed that laser output power is proportional to the square of gas pressure. Delay time between discharge current pulse and laser oscillation was measured. Under short delay time condition, it was found that self Q-switching was responsible for the increase of laser output power.

1 はじめに

炭酸ガスレーザー(発振波長10.6 μ m)は, 1) 他のレーザーに比べて平均出力が大きく 2) 効率も20%以上を得ることも可能であり 3) 大気中を伝搬するのにも適しており, 可視光よりも小さな煙霧質による影響が小さい等, 色々の利点をもっている。しかし, 従来の炭酸ガスレーザーでは約10 KWの出力を得るのに約248m(750フィート)の長さが必要である。このことからわかる様に, 装置が非常に大型になる欠点があり, これまでにピーク出力で250 KW 以上は得られていない。

Transversely Excited Atmospheric Pressure CO₂ Laser Characteristics of Laser Oscillation

C. Yamabe, M. Nakatsuka, H. Sugikawa, M. Yokoyama, and C. Yamanaka
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Osaka
Japan

これに対して1970年の初め頃A. J. Beaulieuによってコンパクトで大出力を得る新しい方式が報告された。⁽¹⁾ この新しい方式はTEA (Transversely excited atmospheric pressure) CO_2 レーザーと呼ばれている。単位体積当たりの平均出力は動作圧力の2乗に比例するので、動作圧力を大気圧とし、レーザーの光軸と垂直な方向に同時に多数の電極からパルス放電を行うもので、放電が一様に分布する様に各電極には負荷抵抗が接続されている。この方式で0.5~100 MWのピーク出力が得られている。⁽¹⁾⁽²⁾ 負荷抵抗を用いると電氣的損失となるので、抵抗をはぶいた多数のブラシ電極⁽³⁾あるいは刃形電極を用いて最高130 J, 65 MWの出力が得られている。⁽⁴⁾ また、グリッド電極を用いた放電方式が報告されている。⁽⁵⁾ 一方、低圧での横方向励起における各種特性の実験がR. J. Freiberg等によってなされている。⁽⁶⁾ 更に放電によるガスの加熱及び分解を防ぐために、放電方向と垂直な方向にガスを循環させる方法が考えられている。⁽⁷⁾ このような大気圧炭酸ガスレーザーは小型で、しかも容易に大出力パルスを得ることができるので、プラズマの発生、その加熱及び診断への種々の応用が期待されるようになってきた。ここでは我々の研究室で開発されたTEA ω_2 レーザーに関する発振特性について報告する。⁽⁸⁾⁽⁹⁾

2 実験装置及び方法

第1図は実験装置本体の概略図である。電極数は99個の針電極(鉄)と平板電極(Al)を用い、針電極と平板電極の間隔は10 mmである。相隣る針電極の間隔も10 mmである。各針電極

Block diagram of TEA CO_2 laser

には1 K Ω の抵抗を接続してある。これは前に述べた様に放電を一様に行うためである。レーザー共振器は外部鏡方式で、共振器の断面は、たてが30 mm、横が60 mmで長さが約1 mである。印加電圧の極性は針電極側をマイナスの高圧にした。M₁はガラスに金を蒸着した曲率半径が2.5 mのミラーであり、M₂は

第1図 実験装置概略図

大気圧炭酸ガスレーザー

ガラスに金を蒸着した曲率半径 2.5m の穴あきミラー，又はフラットのシリコンのミラー（反射率 40% ）を用いた。検知器は液体ヘリウム温度に冷却した $\text{Ge}:\text{Cu}$ の検知器と液体窒素温度に冷却した $\text{Ge}:\text{Au}$ の検知器を使用した。使用ガスは CO_2 と N_2 の混合ガスを用いた。第2図は2号機のレーザー本体である。第3図は本実験で用いた電気回路図である。実験に用いたコンデンサーの容量は $0.019\ \mu\text{F}$ であり，印加電圧は $6\sim 26\ \text{KV}$ で，放電のくり返しは $1\sim 10$ 回／秒の範囲である。

第2図 2号機レーザー本体

Electric circuit diagram of TEA laser

第3図 電気回路図

3 実験結果

印加電圧が $6.6 \sim 22.2 \text{ K V}$ に対する全放電電流は約 $200 \sim 1200 \text{ (A)}$ で放電電流の半値幅は $1 \sim 1.5 \text{ } \mu\text{S}$ であった。放電電流を1極当りに換算すると約 $2 \sim 12 \text{ (A)}$ である。また放電電流の圧力依存性は圧力が高くなるに従って放電電流は減少の傾向にある。印加電圧が高くなると放電電流が飽和する傾向がみられた。これらの関係を第4図、第5図に示す。

第4図 放電電流と圧力の関係

現在までの所、レーザー発振は約 $10 \sim 700 \text{ torr}$ の圧力範囲で得られている。第6図、第7図は各々 15 torr と 100 torr のときの放電写真である。低圧の時には、プラズマは比較的グロー状となっていてひろがっているが、圧力が高くなるに従ってアーク状となりプラズマは不安定となる。

第5図 放電電流と印加電圧の関係

大気圧炭酸ガスレーザー

第 6 図 放電状態図
(15 torr)

第 7 図 放電状態図
(100 torr)

第 8 図 レーザー発振波形
(680 torr, $0.2 \mu\text{S}$, $10\text{V}/\text{div}$)

圧力が 680 torr の時の
レーザー発振波形を第 8
図に示す。発振波形の半
値幅は $70 \sim 500\text{ns}$ で
TRG 出力計で
約 $5\text{KW}/\text{pulse}$ を得た。

第9図 炭酸ガスの圧力と出力との関係

第10図 混合ガス圧力と出力との関係

第9図は各印加電圧をパラメータにした時の炭酸ガスの圧力とレーザー出力の関係図であるが、出力はほぼ圧力の2乗の曲線になっているのがわかる。更に窒素ガスを混合し、炭酸ガスの圧力をパラメータにしたときの出力特性をとったのが第10図である。炭酸ガスの圧力が50 torrぐらいいまは全圧力が増加するに従って出力も増加の傾向にあるが、炭酸ガスの圧力が約100 torr 以上になると、全圧力が増えても出力はほぼ一定の値になっている。これは圧力が高くなることにより、放電状態がアーク状に近くなり、プラズマの温度の上昇や、プラズマによる光路の屈折などのためであると思われる。窒素ガスの代りに空気を用いると発振領域が狭くなった。

第11図 混合比とレーザー出力の関係

第12図 混合比とレーザーエネルギーの関係

次に窒素ガスと炭酸ガスの圧力比と出力及びエネルギーの関係を第11図と第12図に示す。この2つの図からエネルギーが最大になる点の方が出力が最大になる点よりも圧力比が小さい方にある。これは、窒素の圧力を増していくと出力のピーク値は大きくなり、発振時間幅が狭くなることを意味している。

次に電極数、電極の配置及び圧力を変化した場合について報告すると、まず発振可能な最小電極数は35個であった。これを実際放電している長さに換算すると約20cmである。また同じ電極数でも配置により出力が異なった。即ち針電極と針電極の間隔が短い方が長い方に比べてレーザー出力が大きかった。これらの関係を第13図、第14図、第15図に示す。

第13図 電極数とレーザー出力の関係

第14図 電極数が35個のときのレーザー
発振波形，上は放電電流波形。
上：2 V/diV，下：1 V/diV
2 μsec

第15図 印加電圧と圧力を
パラメーターとし
た時の，電極数と
レーザー出力の
関係

大気圧炭酸ガスレーザー

放電電流波形と発振波形の位置関係は、ほぼ第16図(a),(b),(c)の型があり、(a)と(b)の型は印加電圧が15~22.2 KVで12~30 torrの領域で多く、(c)は6.6~15 KVで12~50 torrの範囲と17.4~22.2 KVで40~60 torrの範囲で多くみられた。

(a)

(b)

第16図 レーザー発振の放電電流からの時間おくれの関係図。
(a)は20 torr, 17.4KV, 上: 電流波形 20V/div
下: レーザー出力 1V/div, 1 μS。(b)は30 torr,
15KV 他のレンジは(a)と同じ。

(c) 40 torr, 20.1 KV, 上: 電流波形 20V/div, 下: レーザー出力波形 1V/div, 1 μ S.

レーザー光は電流からある時間の遅れを示し、急峻な立上りをもつピークとそれ後の "すそ" から成っている。するどいピークの形成より考えて、共振器内で self Q-スイッチング作用を生じているものと思われる。簡単な理論から推察して、逆転分布の大きい場合には、放電電流からの遅れ時間は短かく、かつ高いピーク値を示すことが考えられる。それらの関係を第 17 図に示す。遅れ時間は最大 35 μ S であり、印加電圧の低い（逆転分布が少ない）場合に特にこの傾向を生じる。

第 17 図 レーザー発振波形の放電電流からの時間おくれと、レーザー出力との関係。

4 結 論

今回は針電極と平板電極を用いて、レーザー発振特性をしらべてきたが、これらをまとめてみると、次の様になる。

1) 現在の発振圧力領域は約10 torr から700 torr であった。今回は炭酸ガスと窒素ガスのみを用いて行なったが、700 torr 以上でも発振は可能であると思われる。

2) 炭酸ガスに窒素ガスを加えると発振領域は広くなり、レーザー出力も増加し、発振波形の幅も狭くなる。出力が最大になる時の窒素ガスと炭酸ガスの混合比は約1~1.5 であった。

3) 今回行なった実験では、レーザー出力は、圧力の2乗に比例していることが確められた。レーザーの発振波形の半値幅は70~500 ns であり、レーザー出力は1パルス当り約5 KW であった。

4) 放電電流の立上りから発振が起るまでの時間が長くなるとレーザー出力は急激に減少している。発振の遅れ時間の短い所では、Self Q-スイッチングが生じていると思われる。

5) 電極数を変えた時、発振可能最小電極数は35個であった。また、同じ電極数でも、針電極の間隔が短い方が長い方よりも出力が大きかった。

現在はガスの流れる方向とレーザー光軸が同一方向になっているが、2号機では、レーザー光軸と垂直な方向にガスを循環させてガスの加熱をさせて、放電のくりかえしを上げる様に改良しており、又、圧力が高くなると、放電状態が悪くなるので、電極の形及び電極の配置トリガー等を改良して実験を行なっている。

以上述べてきたTEA CO₂ レーザーは小型でしかも比較的容易に発振時間幅の狭い大出力パルスを得ることができるので、気体又は固体ターゲットに集光することにより、高温高密度プラズマをつくるプラズマ発生の研究⁽¹⁰⁾ やトーラスプラズマの加熱及びトコマクプラズマよりの散乱測定からその電流密度分布を求めるプラズマ診断^{(11)~(13)} 等プラズマ物理、核融合プラズマへの応用範囲は将来極めて広くなることと思われる。

参 考 文 献

- 1) A.J. Beaulieu, DREV M-2005/70
- 2) A.J. Beaulieu, Appl. phys. Letters, 16, 504 (June 1970)
- 3) K.A. Laurie and M.M. Hale, IEEE J. Quantum Electronics QE-6, 530 (August, 1970)
- 4) R.Dumanchin, J.C.Farcy, M.Michon and J.Rocca Serra
(to be published)
- 5) A.K. Laflamme, Rev. Sci. Instr. 41, 1578 (Nov. 1970)
- 6) R.J. Freiberg and P.O.Clark, IEEE J. Quantum Electronics QE-6, 105 (Feb. 1970)
- 7) W.B. Tiffany, R.Targ and J.D.Foster, Appl. Phys. Letters, 15, 91 (Aug. 1969)
- 8) 山部, 中塚, 横山, 山中, 応用物理学会 10 a G 2 (1 9 7 0)
- 9) 中塚, 山部, 横山, 山中, 物理学会 4 a Q 8 (1 9 7 0)
- 10) J.M.Dawson, MATT-786, June 1970
- 11) M.Murakami and J.F.Clarke, ORNAL-TM-3128, AUG. 1970
- 12) M.Murakami, J.F.Clarke and G.G.Kelly, ORNAL-TM- 3093
Oct. 1970
- 13) F.W.Perkins, MATT-818, Dec. 1970