

N₂レーザの出力特性の改善ならびに 小型化に関する一考察

菅谷政宏*, 塩釜 誠**, 平野道夫***, 藤井寛一*, 笈川俊雄*

(昭和56年9月8日受理)

Improvement of the Output Characteristics of the N₂ Laser
and One Consideration on Reduction of the Laser Size
MASAHIRO SUGAYA, MAKOTO SHIOGAMA, MICHIO HIRANO,
KAN-ICHI FUJII and TOSHIO OIKAWA

Abstract— The improvement of the output characteristics of the N₂ laser was successfully achieved by changing the capacitance ratio of the capacitor C₁ connected with anode to the capacitance C₂ connected with the cathode.

The size of the newly designed laser was reduced to about 30% as compared with the ordinal Blumlein type laser by using disk type capacitors made of SrTiO₃.

1. まえがき

Blumlein型N₂レーザはJ. D. Shipmanによって1967年に発表されて以来、今日まで大出力、小型化をめざした多くの研究報告がなされている^(2~7)。著者らは、先に、放電実験における電極照射用に利用する目的から、シート・タイプの誘電体を使用してBlumlein型N₂レーザ装置を試作した。今回はその出力特性を改善する目的から、レーザ発振装置の電極長、電極間隔、コンデンサ容量等、各構成要素とレーザ出力との関係を測定し、これに基づいて効率の良いレーザ装置を設計するための適切な値を求めた。また、誘電体にシートを用いる方式が有する、広い面積を必要とする欠点を改良するため、ディスク形のコンデンサを使用して小型化を試みた。これはインダクタンスを極限まで減少させるために、コンデンサをレーザ・チェンバに内蔵する方式を採用するための予備的検討をも目的としたものである⁽⁹⁾。

ディスク形のコンデンサの誘電体材料としては、従来、チタン酸バリウム(BaTiO₃)が使われてきたが、ごく

最近、高電界下でも容量が低下しないチタン酸ストロンチウム(SrTiO₃)が利用され、その優位性が認められている⁽¹⁰⁾。

本論文ではBaTiO₃コンデンサを使用したレーザ管とSrTiO₃コンデンサのレーザ管との比較を行い考察する。

2. 実験装置ならびに方法

コンデンサ充電用の高電圧電源は、A. C. 100[V]をネオントランス(15kV, 20mA)で昇圧した後、高電圧用シリコン整流素子(SCA-21, 新電元製)で全波整流し、並列コンデンサによって平滑したものをを用いた。

レーザ装置本体の概観をFig. 1に示す。(A)はシート形のコンデンサを使用した前報の改造型なので便宜的にP2型と呼ぶ。また、(B)はディスク形BaTiO₃コンデンサを使用したものであり、これをD1型、SrTiO₃を使用した(C)をD2型と呼ぶことにする。

レーザの発振回数は充電電圧とスパーク・ギャップS.G.によって制御した。P2型レーザではギャップ長を

* 茨城大学工学部電気工学科(日立市中成沢町)

** 茨城大学工学部電気工学科学生(現在:東北電力株式会社)

*** 茨城大学工学部電気工学科学生(現在:藤倉電線株式会社)

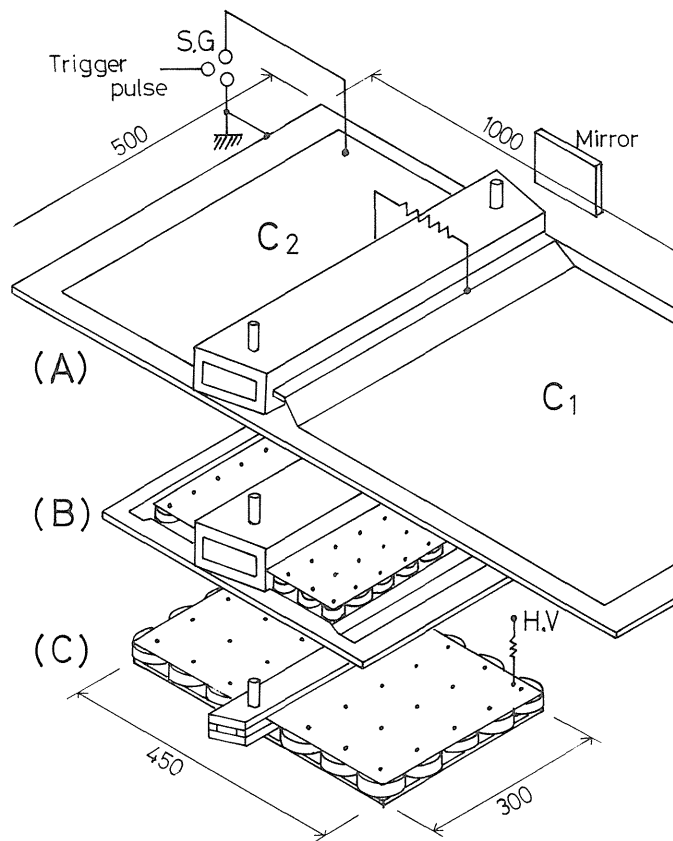


Fig. 1 Schematic drawing of the N_2 laser devices.
 (A) Type P2, (B) Type D1, (C) Type D2,
 C_1 : Capacitor connected to the anode side.
 C_2 : Capacitor connected to the cathode side.
 The initiating spark gap S. G. is connected between the top and bottom of the transmission line.

2〔mm〕に（コンデンサの耐電圧によって制約された）、D1, D2型レーザでは3〔mm〕に設定した。放電のトリガーは第3電極に高電圧パルス（8 kV）を印加して行った。レーザ・チェンバは厚さ15〔mm〕のアクリル板で構成されている。レーザ光透過窓（プリユスタ角ではない）には石英ガラスを使用し、他端には反射用の鏡を置いた。レーザ管の一端からロータリー・ポンプ（150ℓ/min）で連続排気し、減圧弁とリーク・バルブで流量を調節しつつ、 N_2 ガスを他端からガス・フロー方式により供給した。

出力測定は発振光（波長337.1〔nm〕）を蛍光物質を含んだ紙に照射して、可視光に変換し、これを受光素子で受け、その出力波形をシンクロスコープで測定する方式

を用いた。受光素子はP2型レーザおよびD1型レーザの場合には、シリコン・フォト・トランジスタ（TPS605）を使用した。D2型レーザの場合にはレーザ出力が大きくなり素子の出力が飽和状態を示したので、受光素子をフォト・セルに換えて同様の方法により測定を行った。絶対出力の測定についてはDyLux⁽¹¹⁾紙を使用した。

3. 出力特性の改善と小型化

3.1 P2型レーザ装置

3.1.1 構造

Fig. 1(A)に示すように励起用にBlumlein回路を用いている。陽極側および陰極側に、コンデンサ C_1 ,

C₂を有する。コンデンサの極板は上面が銅箔(35[μm]厚), 下面が銅板(2[mm]厚)である。両電極間に誘電体として, マイラー・シート(ポリエチレン・テレフタレート, 100[μm]厚)が2枚サンドイッチ状に挿入されている。陽極は長さ430[mm], 厚さ2[mm]の銅板, 陰極は長さ430[mm]の銅板にピッチ数24[pitch/inch]の金鋸の歯を取り付けてある。

3.1.2 電極間隔とレーザ出力との関係

充電電圧10[kV], 電極長430[mm], C₁ = 22.4[nF], C₂ = 9.7[nF]の一定条件で実験を行った。結果をFig. 2に示す。電極間隔dが12[mm]程度以下の範囲では, レーザ出力はdの増加と共に増加するが, 12[mm]以上では飽和する。8[mm]付近ではN₂圧力の影響も認められた。

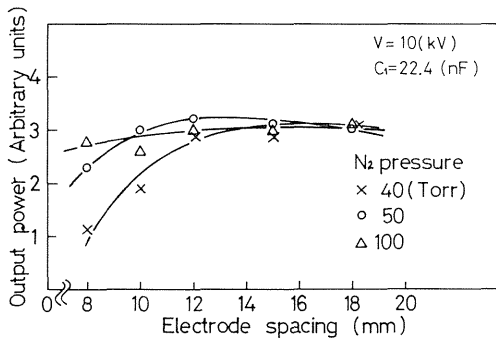


Fig. 2 Laser output power as a function of the electrode spacing.

3.1.3 電極長とレーザ出力との関係

放電電極長 l とレーザ出力の関係をFig. 3に示す。V = 10[kV], C₁ = 22.4[nF], d = 12[mm]一定の

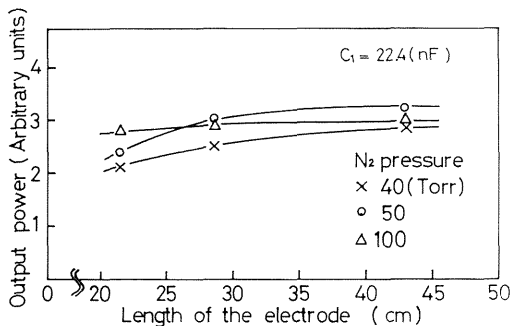


Fig. 3 Laser output power as a function of length of the electrode.

条件で実験を行った。C₁の容量を一定に保つために l の変化に応じてコンデンサ極板の幅を変えた。 l が20[cm]では, いく分出力が低下しているが, 30[cm]以上では, ほぼ平坦な特性を示した。極端に短くはなく, ある程度の長さがあれば, 一定容量に対しては出力は変わらないことがわかる。

3.1.4 陽極側コンデンサ容量とレーザ出力との関係

V = 10[kV], d = 12[mm], l = 430[mm]におけるコンデンサC₁の容量とレーザ出力との関係をFig. 4に示す。容量に比例してレーザ出力が増加するものと予測していたが, これに反して出力特性には飽和が認められた。

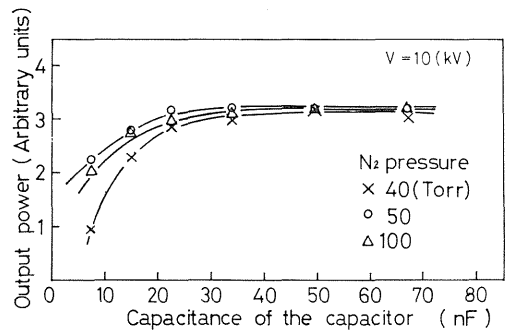


Fig. 4 Laser output power as a function of capacitance of the capacitor.

3.1.5 実験結果の検討

電極間隔 d とレーザ出力との関係で d が狭い場合に出力が小さいのは, 電極間で励起されるN₂ガスの分子数が少ないためと推測される。このことは, 例えば d = 8[mm]の場合にN₂ガスの圧力順にレーザ出力が大きくなっていることから判断できる。静電界としては, d の増加と共にその強度が減少するにもかかわらず, d が12[mm]以上の領域で出力が低下しないのは, 今回実験を行った d の範囲では, 最大電極間隔の場合においてもなお十分な電界が与えられて, 励起に必要な電子エネルギーが維持されていたことによると考えられる。また, 逆に考えると18[mm]以下で, レーザ出力が大きくないのは電子エネルギーが有効に利用されていないことによるとも解釈できる。

電極長 l が長くなっても出力が増加しないのは, C₁の容量が一定の条件のもとで実験されたため, 単位長あたりの注入エネルギーとしてはかえって減少しているためであろう。

陽極側コンデンサC₁の容量を増加した場合, C₁が

30〔nF〕以上でレーザ出力が飽和したのは、充電電圧が一定であるので $\frac{1}{2}CV^2$ なる注入エネルギーの増加としては顕著とはならず、コンデンサ極板の幅が電極から遠ざかる方向に長くなり、インダクタンス成分が増加することによる悪影響と相殺し、出力の増加が見られなかったと考えられる。また、レーザ出力の増加を図るためには電極全長にわたって均一なグロー放電が得られることが望ましいが、コンデンサ容量が増加するとアーク放電が数ヶ所に見られ、放電が不均一になった。これは、ごく短い放電時間内にグロー放電状態だけでは多くの電荷量運び得ないで、アーク放電に転ずるものと推測される。アーク放電は N_2 分子の上位レーザ準位の励起には寄与せず、エネルギーの浪費に終わってしまう。

これらの実験の結果から、陽極コンデンサ C_1 の容量45〔nF〕、電極長400〔mm〕、電極間隔12〔mm〕が最適値となった。

3.2 D1型レーザ装置

3.2.1 構造

装置の概観をFig. 1(B)に示す。P2型と比較して本体がおよそ $\frac{1}{2}$ に小型化された。小型化にあたって、重要な部分であるコンデンサは高電圧用円板形磁器コンデンサ(CK 431, TDK製)を用いた。チタン酸バリウム($BaTiO_3$)が主原料である磁器を誘電体としたコンデンサである。形状は直径34〔mm〕、厚さ13〔mm〕の円板形で、直径1〔mm〕のリード線が両端についている。容量は1.5〔nF〕、定格電圧D.C.27〔kV〕、耐電圧D.C.40〔kV〕、 $\tan \delta$ は1.0〔%〕以下である。陽極側コンデンサ容量 C_1 は基礎実験のデータより、45〔nF〕とし、30個並列に銅板上に取付けた。陰極側コンデンサ C_2 は15〔nF〕とした。陽極には長さ400〔mm〕、厚さ5〔mm〕の銅板を用いた。P2型より厚くしたのは、局部放電を起りにくくするためと、その部分が損傷して電界が集中しやすくなるのを防ぐためである。陰極は厚さ2〔mm〕の銅板に金鋸の歯を取付けた。鋸歯のピッチは24〔Pitch/inch〕である。もっと歯の細かいピッチ数32も使用してみたが、24ピッチの方が良好なグロー放電状態が得られた。

3.2.2 電源電圧と出力との関係

電源電圧とパルスくり返し周波数の関係をFig. 5に示す。電圧の増加とともに発振回数が増したが、P2型より少なく10〔Pulses/sec〕が最大であった。

Fig. 6に電源電圧とレーザ出力との関係を示す。 N_2

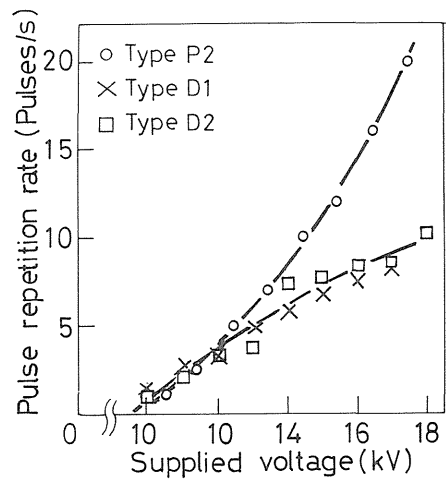


Fig. 5 Pulse repetition rate as a function of supplied voltage.

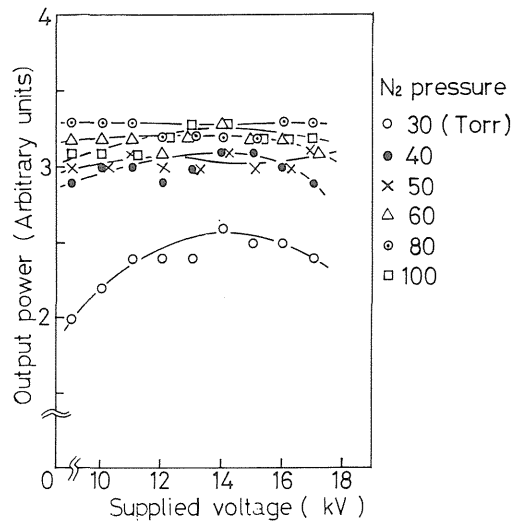


Fig. 6 Laser output power as a function of supplied voltage.

の圧力が40~100〔Torr〕では、ほとんど平坦な特性を示したが、30〔Torr〕では山形の特性を示した。レーザ出力は80〔Torr〕、10〔kV〕の場合に最大であったが、P2型に比べて3.1〔%〕増加しただけであった。

3.2.3 N_2 圧力と出力との関係

特性をFig. 7に示す。 N_2 圧力の増加とともにレーザ出力が増したが、80〔Torr〕以上ではかえって減少し

た。電源電圧の影響はわずかであった。

3.2.4 実験結果の検討

発振回数がP2型より少なかったのは、スパーク・ギャップ長の設定値の違いによるものである。

レーザ出力の増加が達成できなかったのは、コンデンサのリード線によるインダクタンス成分の影響と考えられる。製作当初において、リード線をきわめて短くしたところ、よく発振するようになった経緯がある。

N₂圧力とともにレーザ出力が増加したのは、励起されるN₂分子の密度が増えたためであり、また、その後減少しているのは、グロー放電に適する圧力範囲を越えるためと、ガスの流速が増してガス濃度が不均一になるためである。

3.3 D2型レーザ装置

3.3.1 構造

装置の写真をFig. 8に示す。D2型はD1型に用いたのと同様のディスク・タイプ・コンデンサを使用しているが、誘電体材料として、チタン酸ストロンチウム

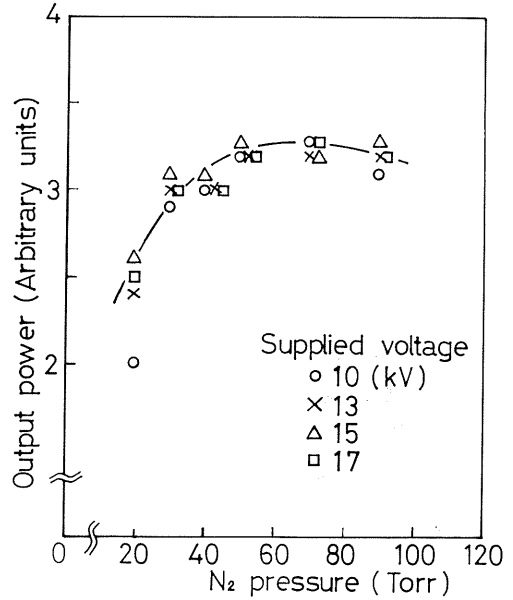


Fig. 7 N₂ pressure dependence of the laser output power.

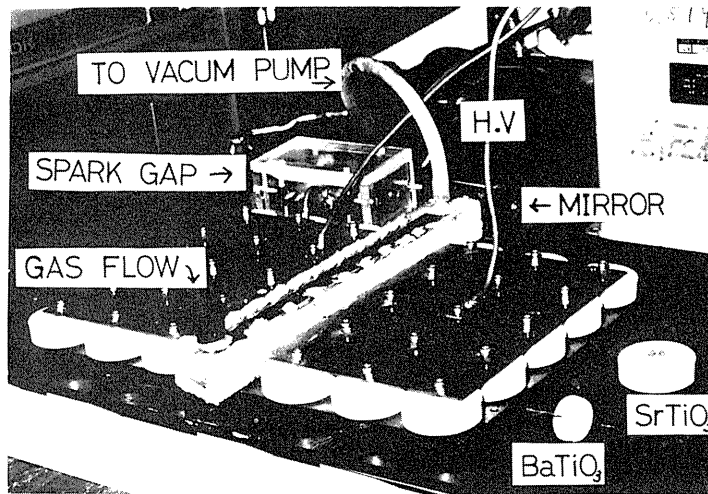


Fig. 8 A view of the small N₂ laser.

(SrTiO₃)が使われている(UHV-3, TDK製)。コンデンサは高電界下では容量が低下する特性があるが⁽¹²⁾, 特にD1型に使用したコンデンサ(BaTiO₃)は容量変化率が大きく、15[kV]の電圧を印加すると実質容量が約40[%]も低下する⁽¹⁰⁾。そのため、蓄えられるエネル

ギーが少なく、小型化はできたがレーザ出力の増加につながらなかった。SrTiO₃コンデンサはその欠点を補って、レーザ装置用コンデンサとして新しく開発されたもので、実質容量の低下は数パーセント以下である。端子もリード線ではなく、径15[mm]の端子になって

おり、インダクタンス成分を抑えている。形状は直径60〔mm〕、厚さ19〔mm〕の円板で、定格耐電圧20〔kV〕、容量4〔nF〕、 $\tan \delta$ は0.1〔%〕以下である。レーザ・チェンバの容積をP2型およびD1型の約 $\frac{1}{6}$ (37 cm³)に設計した。そして、装置全体ではP2型に比して床面積で27〔%〕になっている。陽極側、陰極側ともコンデンサ容量は60〔nF〕で各15個並列に取付けてある。両極とも同容量にしたのは、適当な容量比 C_1 対 C_2 を求める実験をするためである。インダクタンス成分を少なくするために、コンデンサを取付ける板と放電電極は1枚の銅板になっている。厚さは2〔mm〕で、電極長は265〔mm〕である。陰極側の電極はD1型と同じピッチの鋸歯を取付けてある。電源、排気系はD1型と同じである。

3.3.2 コンデンサ容量比とレーザ出力との関係

効率の良い装置にするために、陽極側コンデンサ C_1 、陰極側コンデンサ C_2 の適切な容量比を求めた。 $C_1=60$ 〔nF〕一定に保ち、 C_2 の容量を変えて実験をした。結果をFig. 9に示す。 C_1 に比して C_2 を少なくした方が出力が大きいく。 $C_2=40$ 〔nF〕にした場合は、それ程レーザ出力が増加しなかったが、20〔nF〕では2倍以上のレーザ出力が得られた。 C_1 対 C_2 の容量比を3対1以下に選ぶと良いことがわかった。

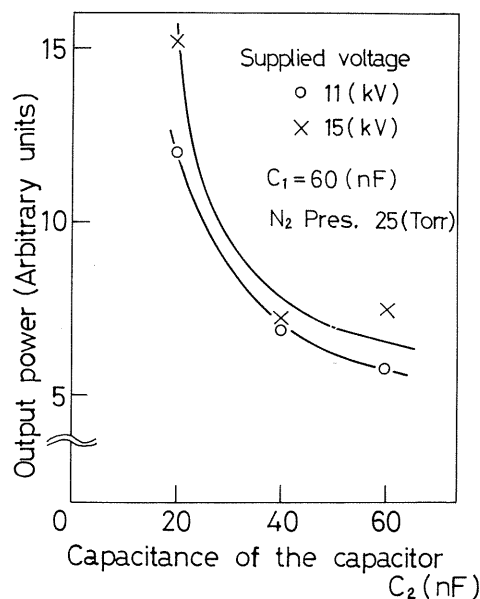


Fig. 9 Laser output power as a function of the capacitance of the capacitor C_2 .

3.3.3 電源電圧とレーザ出力との関係

電源電圧とレーザ出力との関係をFig. 10に示す。

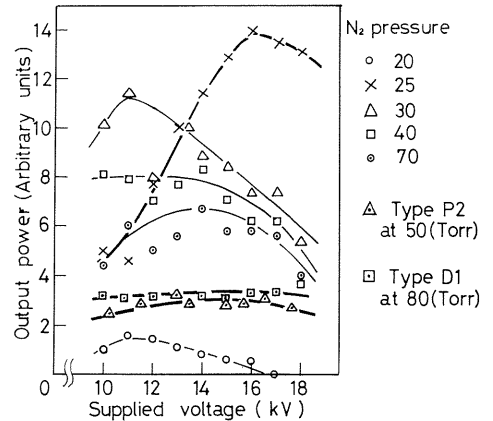


Fig. 10 Laser output power as a function of supplied voltage.

P2型、D1型の最大レーザ出力時の特性も併せて示した。パルス数は最高値で10〔Pulses/sec〕であった。この場合もD1型と同様にスパーク・ギャップ長を3〔mm〕(放電電圧10〔kV〕)に設定しているため、電源の制約をうけて、くり返し周波数は低い。出力は25〔Torr〕、16〔kV〕の場合に最大であった。P2型に比して約4倍に増加している。他の N_2 圧力では出力のピークが11〔kV〕付近になっていて、電源電圧を高くすると、すぐレーザ出力が下降した。これはP2型、D1型レーザと異なった傾向である。

3.3.4 N_2 圧力と出力との関係

Fig. 11に示すようにレーザ出力の N_2 圧力依存性が顕著であり、安定に発振する N_2 圧力が狭い範囲に限定されている。レーザ出力は20~30〔Torr〕で最大値を示す。従来の試作管が40~100〔Torr〕の範囲で安定な発振をしたのに比べ、圧力範囲が目立って狭い。

3.3.5 絶対出力の測定

写真材料の一種である光発色性定着材料Dylux紙⁽ⁱⁱ⁾を用いて絶対出力の測定を試みた。この材料は特定の光 λ_1 (250~380〔nm〕)によって発色(青色)し、他の光 λ_2 (390~500〔nm〕)によって定着できるものである。使用したDylux紙(Dupont社製)の感度は20〔mJ/cm²〕である。レーザ光を石英レンズで集束し、その焦点(30 cm)付近に感光紙を置き、発色が飽和状態に達するまで光を照射した。露光面積、照射したパルス数(2パルス)

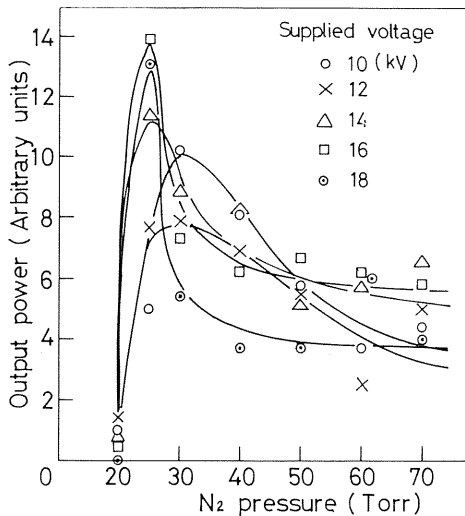


Fig. 11 Laser output power as a function of N₂ pressure.

および露光感度からエネルギーを計算し、それをパルス幅で除して出力に換算した。パルス幅は、これまでに報告された例を参考にして10〔ns〕で計算した。その試算によると出力は12〔kW〕であった。

3.3.6 実験結果の検討

C₁ 対 C₂ の容量比とレーザ出力との関係では、C₂ の値が少ない方がレーザ出力が大きくなることがわかった。C₁ = 60〔nF〕対 C₂ = 60〔nF〕の場合には、60〔nF〕対 20〔nF〕の場合と比較して、グロー放電の色が淡く、電流密度が低いようである。これは C₂ 側がトリガーされて、電荷が大地へ流出する際に、C₂ 側の容量が大きいとスパーク・ギャップにおける一定の放電時間内に電荷が完全に流出できず、励起用主電極間の電位差が十分に高くないか、あるいはその流出時間が長くなるために、C₂ が接地された直後に生ずる主電極間の電位差、すなわち励起パルスの立上り峻度がゆるやかになるためかの、⁽⁵⁾ いずれかの理由によるものと考えられる。

電源電圧が高い場合に、レーザ出力が急に低下しているのは、高電界に対して均一なグロー放電が得られないためと考えられる。放電状態を観察してみると、グロー放電部の色は淡く、強力に発光するアーク放電が発生しているのが認められた。

レーザ出力の圧力依存性において、安定発振域が狭い原因は結局、レーザ・チェンバの容積が小さいためと考

えられる。すなわち、圧力を上げるとガスの流速に顕著な影響を及ぼし、場所的にガス濃度の不均一をきたし、安定したグロー放電が得にくい。そのため発振に適した条件が得られる圧力範囲がせまくなった。また、最大レーザ出力が N₂ 圧力の低い領域で得られるのは、容積が小さいため、少ないガスの流量で適性な圧力を維持できるためで、N₂ ガス流量とレーザ出力との関係を報告した例をみても納得できる。⁽¹⁴⁾

4. 考 察

4.1 出力特性の改善

レーザ出力は、注入される励起エネルギーおよび被励起 N₂ ガスの分子数に比例する。放電電極間に存在するガス分子の総数を増すために、電極長、電極間隔を大きくすると、放電エネルギー密度が低下する。一方、エネルギー供給系を改善しても、大きすぎるエネルギーは有効に発振に寄与しない。効率の良いレーザ発振を実現するためには、グロー放電を、面放電状に厚みをもって発生させられる形状の電極を考えて、電極間隔はあまり広げずに適正なエネルギー密度で動作させることが望ましい。

Blumlein 型のレーザ装置における陽極側コンデンサ C₁ と、陰極側コンデンサ C₂ の容量比は 3 対 1 以下に選ぶと出力が増加する。C₂ の下限をいくにするかは、C₂ 素子のインダクタンス成分が顕著に出力に影響を及ぼさない範囲なら良い。

C₂ を少なくすると出力が増加することと同じ理由からトリガー装置も、大電流を短時間に流すことのできる素子を使用すれば、出力の増加が期待できる。

発振回数は安定発振域においては N₂ 圧力による依存性は弱く、充電回路定数、コンデンサ容量、スパークギャップ長、トリガーパルス数によって決まる。

4.2 装置の小型化

レーザ装置の小型化は、ディスク形のコンデンサ (BaTiO₃, SrTiO₃) を使用することにより達成できた。特に SrTiO₃ は高電界においても実質質量の低下が少なく、低インダクタンスで、レーザ出力の増加も期待できる。

レーザ・チェンバの容積については、小さすぎると、N₂ 圧力の変化により流速が顕著に変わり、適当なグロー放電状態を維持することがむずかしくなるため、安定発振域がせまくなる。従って、チェンバの小型化には限度

がある。

5. ま と め

- (1) 出力特性の改善と小型化は、チタン酸ストロンチウム (SrTiO_3) コンデンサを使用することにより達成された。従来の Blumlein 型の P2 型レーザと比較して、装置の大きさは約 3 分の 1 に縮小でき、レーザ出力は約 4 倍になった。レーザ出力は N_2 圧力 25 [Torr]、電源電圧 16 [kV] において最大となり、約 12 [kW] であった。
- (2) 効率の良いレーザ装置を製作するには、 $\frac{1}{2} CV^2$ なるエネルギーが、短時間内に移動できる伝送回路と、電流密度の高いグロー放電を維持できる電極構造を考えると良い。
- (3) レーザ・チェンバ自体の小型化には、レーザ発振の安定性から来る制約のために限度がある。

レーザ出力の測定に際して、資材等を供与されたパイロット万年筆株式会の村田浩氏にお礼申し上げる。また、有益な討論を戴いた本学部電気工学科竹内学助教授、鶴田浩一講師にお礼申し上げたい。

参 考 文 献

- 1) J. D. Shipman, J. Appl. Phys. Lett., 10, (1963) 3.
- 2) B. Godard, IEEE J. Quan. Elec., Vol. QE-10, (1974), 147
- 3) P. B. Stephenson and V. P. McDowell, Rev. Sci. Instrum., Vol. 45, No. 3, (1974), 427.
- 4) J. I. Levatter and S. Lin, Appl. Phys. Lett., Vol. 25, No. 12, (1974), 703.
- 5) A. J. Schwab and F. W. Hollinger, IEEE J. Quen. Elec., Vol. QE-12, No. 3, (1976) 183.
- 6) I. Nagata and Y. Kimura, J. Phys. E, Vol. 6, (1973), 1193.
- 7) C. L. Sam, Appl. Phys. Lett., Vol. 29, No. 8, (1976), 505.
- 8) 菅谷, 菅谷(英), 細貝, 藤井, 笈川, 茨城大学工学部研究集報 Vol. 27, (1979), 97.
- 9) K. Fujii, A. J. Andrews, K. H. Errey, and C. E. Webb, IEEE J. Quan. Elec., Vol. QE-17, No. 8, (1981), 1315.
- 10) K. Matsumoto, et al., Rev. Sci. Instrum. Vol. 50, (1980), 1046.
- 11) 高分子学会編, 「新しい印刷材料」, 産業図書, (1973), 173.
- 12) G. I. Skanavi, et al., Sov. Phys., JETP Vol. 6, (1956), 250.
- 13) C. P. Wang, Rev. Sci. Instrum., Vol. 47, No. 1, (1976), 92.
- 14) M. Feldman, et al., Appl. Opt., Vol. 17, No. 15, (1978), 774.