

# Blumlein型N<sub>2</sub>レーザ装置の試作

菅谷 政宏\*, 菅谷 英二\*\*, 細貝 俊朗\*\*\*

藤井 寛一\*, 笈川 俊雄\*

(昭和54年9月8日受理)

## Fabrication of N<sub>2</sub> Laser with Blumlein Circuit.

MASAHIRO SUGAYA, EIJI SUGAYA, TOSHIRO HOSOGAI,  
KAN-ICHI FUJII and TOSHIO OIKAWA

**Abstract:** – A pulsed N<sub>2</sub> laser has been fabricated to obtain a powerful UV light source for studies on UV light irradiation effects on gaseous discharge. The fabrication procedures of the simple UV TEA laser and the preliminary performance of the laser are presented. The excitation of the N<sub>2</sub> is accomplished with a low-impedance flat-plate Blumlein pulse generator. When the electrode separation was set at 12 mm, insulation thickness at 100 $\mu$ m, charging voltage at 10 kV and N<sub>2</sub> filling pressure at 50 Torr, laser action in the UV(337.1 nm) was observed. The relative output power was measured as functions of the N<sub>2</sub> pressure and the supplied voltage. The pulse repetition rate was also obtained as a function of the supplied voltage.

## 1. 緒 言

電極にインパルス電圧を印加したときの放電現象は直流, 交流に比べて複雑である。一般に確率統計的な要素を持った放電時間遅れを伴う。放電時間遅れやそのばらつきは紫外線を照射すると減少することが知られている。これは照射により電極から光電子が放出され, 初期電子数が増加するためであると考えられている。これまでの実験では紫外線源として水銀灯が主に使用されてきたが, 近年, 種々な高出力レーザが開発されて溶接, 加工, エレクトロニクス関係等に應用され, また, 強力な紫外線供給源として, 放電, 高分子物性等の分野で有望視されている。

・著者らは電極照射用の強力紫外線源としてN<sub>2</sub>レーザ装置を試作した。N<sub>2</sub>レーザは波長337.1(nm)の紫外線

をパルス発振するレーザである。そのパルス幅はナノ秒単位で, 光のエネルギーが狭い時間に集中しているのもパルスのピーク出力は非常に強く, MW級の大出力のものも最近つくられている。<sup>1), 2)</sup> N<sub>2</sub>レーザは色素レーザのポンピングによく用いられている他, 放電のトリガ用光源<sup>3), 4)</sup>としても研究されている。

本研究ではBlumlein型のN<sub>2</sub>レーザを試作し基礎特性を調べた。

## 2. N<sub>2</sub> レーザ

### 2.1 N<sub>2</sub>レーザの発振原理

ある原子の基底状態をE<sub>0</sub>, 励起状態をE<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub>, ……………, (E<sub>1</sub> < E<sub>2</sub> < E<sub>3</sub> ……………)として, E<sub>2</sub> - E<sub>1</sub> = h $\nu$ で定まる周波数 $\nu$ の光波と一つの活性原子との相互作用を考える。その原子がE<sub>2</sub>レベルにある場合には, 作用し

\* 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: 日立製作所水戸工場 (勝田市)

\*\*\* 茨城大学工学部電気工学科学生, 現在: 日立エンジニアリング株式会社 (日立市)

た光子群とまったく同じ光子, つまりエネルギー  $h\nu$  で同一方向に進行する光子を一つ放出して下の  $E_1$  レベルに遷移する確率がある。いいかえれば, その原子が  $E_2$  レベルから  $E_1$  レベルに遷移して, エネルギーと進行の向きがまったく同一の光子数が  $n$  から  $n+1$  へと変化する。これを誘導放出という。逆にその原子がはじめ  $E_1$  レベルにあると, 上の  $E_2$  レベルに遷移して光子の数が  $n$  から  $n-1$  へと変化する。つまり光子吸収の起る確率が存在する。普通の熱平衡状態では,  $E_2$  の状態にある原子数は  $E_1$  の状態にある原子数より少ないので放出より吸収の方が起る。放出を起させるためには  $E_2$  状態にある原子数の方が多い反転分布の状態をつくり出してやる必要がある。そのためには他からエネルギーを供給してやらねばならない。ガスレーザの場合には放電によりポンピングを行なう。反転分布状態にあるレーザ物質中で誘導放出が起こると, 方向, 振動数, 位相, 偏光特性とも同じ光波が連鎖反応を生じて増幅されていく。レーザ物質の両端に鏡を向いあわせた共振器を置き, 光が往復するさいの損失を増幅作用がうまわれるようにするとレーザ発振が起きる。そして一方の鏡を, 発振光を少し透過させるようにつくって, 外部にレーザ光を取り出す。これが一般的なレーザである。<sup>5)</sup>

このようにレーザ発振の条件は反転分布の状態をつくることにある。そしてできるだけわずかなエネルギーでポンピングするために, 原子のライフタイムが問題になる。

$N_2$  レーザの場合は,  $N_2$  ガスを長さ 1~2 [m], 内径 7~10 [mm] の放電管に入れ 1~数 10 [Torr] の圧力で, 幅 1 [ $\mu$ s] 程度, ピーク電流数 10 [A], ピーク電圧数 10 [kV], くり返し 50~150 [c/s] 程度のパルスを使って励起を行ない, 適当な反射面を持つ共振器を使えば, 赤外領域では  $N_2$  分子の第 1 正帯 (First positive band) に属する線が, 紫外領域では第 2 正帯 (Second positive band) の線がいずれも多数発振する。<sup>6)~10)</sup> このうち特に紫外領域で発振するものは, 発振波長が短くなると自然放出の確率が大きくなり, ライフタイムも短くなるので励起を非常にはやくかつ有効に行なうために, 放電回路には特別な工夫が必要になってくる。Fig. 1 に  $N_2$  分子のエネルギー準位図を示す。 $N_2$  の第 1 正帯は  $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$  なる遷移で発振波長は 0-0 バンドで 1048 [nm] 付近である。この  $B^3\Pi_g$  レベルでは 5~8 [ $\mu$ s] とライフタイムが長い。一方, いま目的としている波長 337.1 [nm] の紫外線は第 2 正帯  $C^3\Pi_u$

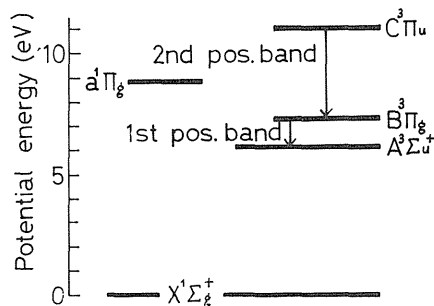


Fig. 1 Potential energy diagram for nitrogen molecule on the first and second positive bands.

$\rightarrow B^3\Pi_g$  なる遷移による発振である。ここで問題となるのは  $C^3\Pi_u$  レベルのライフタイムが 40 [ns] と非常に短いことである。つまり下のレベルに比し, 上のレベルのライフタイムが極端に短いため反転分布状態が非常につくりにくい。このために励起には立上りの速い大電流のパルスが必要になるが, ポンピングの方が追いつかず, パルス発振にならざるを得ない。

## 2.2 Blumlein 型レーザの特徴

$N_2$  レーザの励起方法には大きく分けて, レーザ軸と同方向に放電して励起する縦励起型と, レーザ軸と直角方向へ励起する横励起型がある。前者の代表的なものとして同軸伝送線型のものがあるが, 前節で述べたように高い電界が必要なことから横励起型が一般的になった。これは Crossed field 型, または, Transversely Excited Atmospheric Laser の頭文字をとって T.E.A. レーザと呼ばれている。T.E.A. レーザの初期の代表的な構造を Fig. 2 に示す。<sup>11)</sup> これは高い

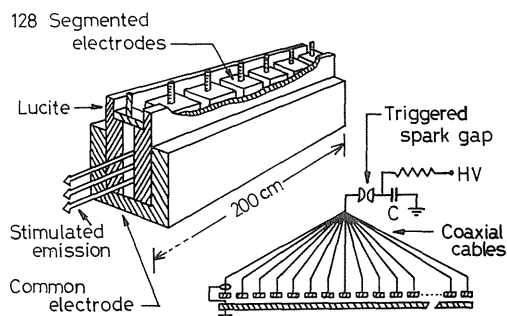


Fig. 2 Crossed field laser with segmented electrodes.

電界を得て、しかも出力を増加させるために多数の分割電極を配したものである。C にチャージされた電荷がトリガギャップを経て各電極を通して放電するわけであるが、伝送回路の同軸ケーブルの長さが少しずつ長くなっていて一端から放電を開始して次々と隣の電極へ移動して、他端から増幅された誘導放出光を得られるように考えられたものである。<sup>11)</sup> 28 個の電極を用いて 200 (kW) のピーク出力を得たという報告がある。ただこの形にも欠点があって、横励起にしたために高電界が得られやすいが、伝送回路にどうしてもインダクタンス分がはいるために励起パルスの立上りをある程度以上急峻にできないことである。また、ケーブル長さをうまく調節して放電間隔を一定に保つ技術がむずかしい。そこで考えられたのが、途中の伝送線をなくするためにコンデンサの極板をそのまま放電電極に直に接続する方法である。これが Blumlein 型と呼ばれるもので、Fig.3 にその構造

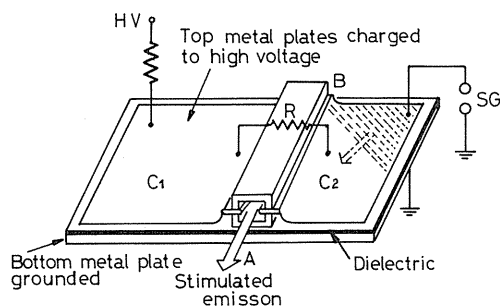


Fig. 3 Schematic drawing of the  $N_2$  laser with Blumlein circuit.

を示す。この型は構造が簡単で効率が比較的良好なことから  $N_2$  レーザ用ばかりでなく、ライフタイムの短い準状態で反転分布を作る装置として、広く応用されている。<sup>12)</sup>

動作原理は、HV 端子より直流高電圧を印加してコンデンサ  $C_1$  に充電する。高抵抗  $R$  (またはダイオード) を通して  $C_2$  にも充電される。トリガギャップ SG を放電させると  $C_2$  の電荷は SG を通して大地に流れ、 $C_2$  上の電位は斜線のごとく矢印の方向に向かって 0 電位になってゆく。<sup>13)</sup> そして放電は最初に 0 電位になった B 端より A 端に向かって進み、誘導放出光は A 端に向かって放出される。このように放出光が効率よく一方へ進むように、 $C_2$  の形状は三角形、放物形等いろいろと工夫されている。<sup>1), 14), 16)</sup>

Blumlein 型の特徴は構造上から放電回路の  $L$  が減少して、急峻な立上りのパルスが得られることと、 $C_1, C_2$  を同電位に充電することにより、コンデンサの電圧を電極間の絶縁破壊電圧以上に高く充電できることである。<sup>13)</sup> つまりそれだけエネルギーを蓄えることができる。SG を調節することにより、コンデンサに使用している誘導体の絶縁破壊電圧まで充電電圧を上げることができる。SG をトリガーさせることにより充放電をくり返し、レーザー発振する。

### 3. 設計および製作

#### 3.1 充電用電源

$N_2$  レーザの充電電圧としては 5~20 (kV) 程度が普通<sup>1), 15)</sup> のようである。われわれは入手しやすい高電圧発生装置として、市販のネオントランス (15 kV, 20 mA) を採用した。整流装置は高電圧用シリコン整流素子 (20 kV, 20 mA) を 2 個直列にしたものでブリッジを構成して、充電時間が短くなるように全波整流とした。概要を Fig.4 に示す。単巻変圧器 SD で電圧を調整してネオン

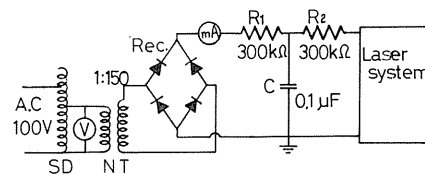


Fig. 4 A diagram of the power supply.

トランス NT で昇圧し、ダイオードで整流する。抵抗  $R_1$ ,  $R_2$  は整流器の保護のための抵抗であり、またコンデンサ C と共に平滑回路を構成していて、レーザー本体のコンデンサへの負担を軽減している。抵抗は容量の大きいものがなかったので水抵抗を作って用いた。

#### 3.2 レーザ・システム

##### 3.2.1 放電電極

電極間の電界  $E$  と  $N_2$  ガス圧  $P$  との関係が  $E/P \approx 200$  [V/cm·Torr] で最高効率が得られたという多くの報告<sup>1)</sup> を基礎にして設計した。気圧は一般に用いられている低気圧域 (20~150 Torr) とし、充電電圧は電源装置

とコンデンサの誘電体材料とのかねあいで10[kV]として、先に述べた  $E/P$  の値を満足するように電極間隔  $d=12$  [mm] (気圧  $P=41.7$  Torr) を決めた。陽極は厚さ2[mm]の銅板を使用し、縦430[mm]、横45[mm]の大きさにし、角および縁の部分を丸く削った後、2000番のエミリー紙で仕上げを行なった。陰極は陽極と同じ銅板に金鋸の歯をとりつけた。これは電極間、つまりレーザチャンネル中で一様に放電するようにするためである。どちらの電極にこのような細工をほどこしても放電しやすくなるが、陽極側の場合はアーク放電をおこしやすく、陰極側の方が良い結果が得られる。陰極に針やカミソリの刃を用いた例もある<sup>2), 16)</sup>。チェンバーに固定するさい、電極間隔を正確に保つことも大切である。また、予備放電を行なってみてアーク放電の生じやすい箇所にはシリコンゴム系の接着剤を塗ることにより、ある程度防ぐことができる。

### 3.2.2 コンデンサ

コンデンサは銅板の電極の間に誘電体をはさんでつくる。誘電体としてはポリエチレン<sup>14), 15)</sup>、アセテート<sup>12)</sup>、カプトン<sup>1)</sup>、サーモプラスチック<sup>15)</sup>、マイラー<sup>16), 17)</sup>等のシートが用いられている。われわれは厚さ100[μm]のマイラー(ポリエチレン・テレフタレート)シートを用いた。主な特性は比誘電率3.1、絶縁破壊電圧5[kV](0.025mm厚)、融点260[°C]である。

コンデンサの容量  $C$  [F] は

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{d_0} \quad (1)$$

$\epsilon_0$ : 真空の誘電率,  $\epsilon_s$ : 比誘電率

$S$ : 極板の面積[m<sup>2</sup>]  $d_0$ : 極板間の距離[m]

で表わされる。よって容量を大きくするには  $\epsilon_s$  の大きい材料を使い、極板面積を広くすればよいことになる。 $d_0$  を小さくしてもよいが、絶縁耐力の点で制限される。コンデンサの接地側極板には厚さ2[mm]の銅板を、高電圧側には厚さ35[μm]の銅箔を用いた。接地側に厚い銅板を使用したのは、コンデンサが歪んで変形することのないようにするためであり、さらにその下に厚さ5[mm]のベーク板を敷き、厚さ9[mm]の合板の台の上に固定した。また、高電圧側の極板に銅箔を使用したのは、薄いことと適当な重量があるので誘電体シートによく密着するからである。シートを極板にはりつける時は、空気の層が間にできないように刷毛等で押しつけるようにした。大きな隙間ができると誘電率が異なるため

に電界が集中して破壊しやすい。極板と放電電極の接合はマイラーシートが熱で損傷しないように低温ハンダ(100°C)を用いた。電極との接合部分で銅箔がマイラーシートから離れるので、極板としての有効面積は実際の銅箔の面積より小さくなる。

陽極側、陰極側各コンデンサの容量  $C_1, C_2$  は

$$C_1 \text{ の有効面積 } S_1 = 0.44^m \times 0.51^m = 0.2244 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$C_2 \text{ の有効面積 } S_2 = 0.44^m \times 0.22^m = 0.0968 \text{ (m}^2\text{)}$$

(1)式を用いて

$$C_1 = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times 3.1 \times 0.2244}{100 \times 10^{-6}} \\ = 6.16 \times 10^{-8} = 6.16 \text{ (nF)}$$

同様に  $C_2 = 2.66 \times 10^{-8} = 2.66 \text{ (nF)}$

銅箔に充電およびトリガー用の線を直接ハンダづけすると板面が歪むので銅板の薄片に接続して箔の上に置いた。

### 3.2.3 レーザ・チェンバー

チェンバーの材料はアクリルを用いた<sup>11), 17)</sup>。アクリルは紫外線により劣化する欠点はあるが被照射時間が短いので、それほど問題にならないと思われる。構造は厚さ15[mm]の材料を用いて内部断面が高さ30[mm]、横40[mm]、長さ500[mm]とした。両側端の窓は石英ガラス(透過率93%)を使用した。なお両側端はレーザ光線がガラスで内側に反射して効率がおちないように斜めにして「ハ」の字形に向かい合うようにした。組み立てる際の接着剤はエポキシ系の接着剤よりもシリコンゴム系のやわらかい接着剤の方が気密性が保てる。電極との接合部は特に厚く接着剤を盛った。チェンバーの上板の両にはじにはガスの inlet, outlet を設ける。

### 3.2.4 スパークギャップ

スパークギャップは20φの黄銅電極を用いた。電極間隙を一定にして、コンデンサが設定された電圧に達すると放電が起るセルフ・トリガ方式にしたが、放電回数が多くなると電極表面に汚れが生じ、それが原因で放電電圧が上昇してパルス発生ひん度が不規則になったり、しばしばコンデンサが破壊した。2点ギャップでは放電回数の制御がむずかしく、コンデンサにもストレスがかかるので、それを改良して3点ギャップにした。第3電極に外部からパルスをおくりトリガすることにより発振パルス数の制御が容易になった。

### 3.2.5 反射鏡

紫外線用のN<sub>2</sub>レーザはパルス発振のため、共振器を用

いない。また、一般に紫外レーザは利得が大きいので鏡を用いないが、反対方向にも光が放出されるので反射鏡を用いると15〔%〕程度出力が増加する。<sup>15), 18)</sup>特に筆者らの場合は、始めから鏡を用いることにして放出光の方向性を考慮しないで設計した。鏡は石英ガラスにアルミニウムを蒸着して作成した。

### 3.3 排気系

全体の構成は flow type とした。排気系統は、 $N_2$  ガスポンベ——減圧弁——リーク・バルブ——レーザ・チャンバー——水銀マノメータ——リーク・ポート——ロータリー・ポンプとなっている。ガス圧の調整は減圧弁とリーク・バルブで行なった。ガス圧は水銀マノメータで測定した。ロータリー・ポンプの排気能力は150〔 $l/min$ 〕である。

装置全体の写真を Fig.5 に示す。

## 4. 試作結果および検討

### 4.1 基礎特性測定法

基礎特性はレーザ光を可視光に変換してそれを電氣的

に検出して測定した。光を電氣的に変換する素子としては、 $Od_s$ 、フォト・トランジスター、太陽電池、光電管等があるが、いずれも紫外領域では著しく感度が低下している。そこで、レーザ光を蛍光物質を含んでいる紙に照射して、励起されたために発光する青白い光を太陽電池で検出して、シンクロスコープで測定した。

### 4.2 発振波長

発振波長はモノクロメーターを用いて測定した。発振強度は波長337.1〔nm〕で最大だった。

### 4.3 発振回数と電源電圧

発振回数と電源電圧の関係を Fig.6 に示す。 $N_2$  レーザの発振回数はレーザチャンネル中の放電回数であり、スパークギャップの放電回数によって決まる。従って充電回路定数、コンデンサ容量、スパークギャップ間隙、トリガパルス等に左右され、 $N_2$  ガス圧にはあまり依存しない。チャンネル中の圧力によって放電電圧は多少変動はするが外部の影響の方が強い。外部トリガ電圧を調整することにより発振回数を一定に保つことや任意のパルス数を得ることができた。

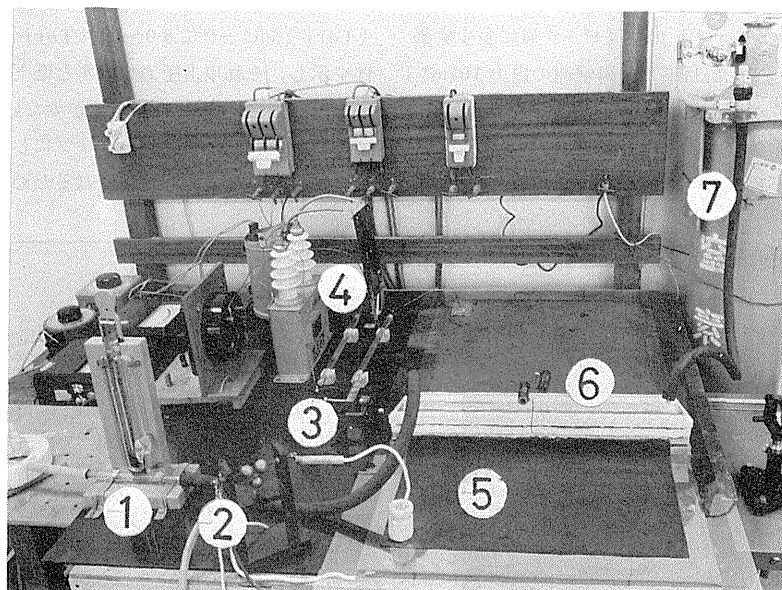


Fig. 5 Experimental setup of the  $N_2$  laser.

- (1) Manometer (2) Spark-gap (3) Mirror (4) Power supply  
(5) Condenser (6) Laser chamber (7)  $N_2$  gas bomb

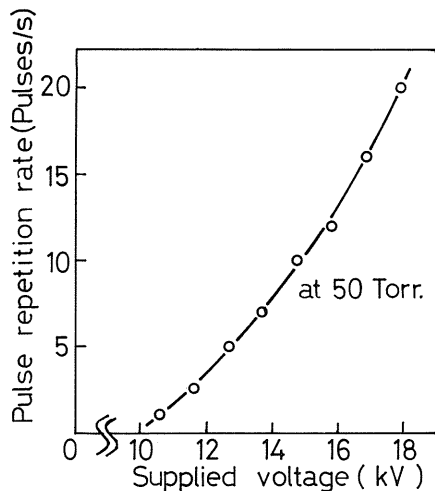


Fig. 6 Pulse repetition rate as a function of supplied voltage.

#### 4.4 相対出力と電源電圧の関係

N<sub>2</sub>レーザの出力の正確な測定はレーザ光がパルス性であるため非常にむずかしい。カロリメータで測定したり、鉄イオンにレーザ光を照射し、それによりイオン価が変ることから比色分析による化学的な測定が可能だが、一般には相対的な出力測定が行なわれている。

太陽電池による出力波形をFig.7に、相対出力と電源電圧の関係をFig.8に示す。出力はピーク値に多少変動があるので平均をとった。目盛は太陽電池の出力50[mV]を1とした。N<sub>2</sub>ガスの圧力は20~140[Torr]まで10[Torr]間隔で測定したが傾向の似ているデータは割愛した。出力は14[kV]付近をピークに山形または平坦な特性を示した。スパークギャップは一定としたので、電源電圧を変化させた場合は充電電圧が変化して、

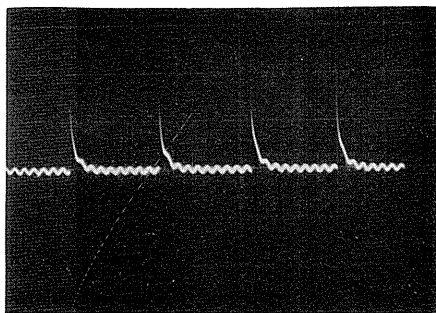


Fig. 7 Waveform of laser output at 337.1 nm. Horizontal scale: time (100ms/div); and vertical scale: power (100mV/div)

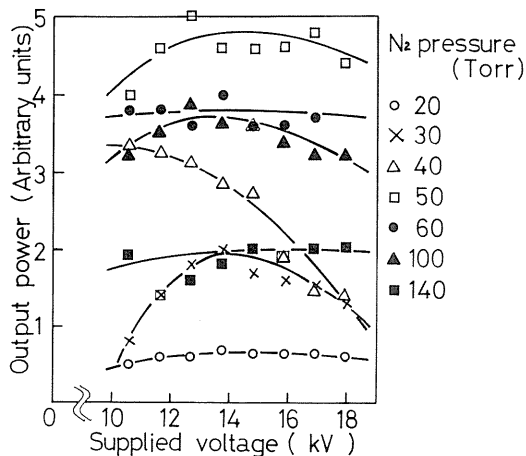


Fig. 8 Laser output power as a function of supplied voltage.

パルス数が増えるだけで出力にはあまり影響がないと予測していたが、これは充電速度が変化したことと、トリガパルス数を一定にしていたことの相互関係でスパークギャップの放電電圧が変動してレーザ・チャンネル中の励起電圧に影響したものと思われる。

#### 4.5 相対出力とN<sub>2</sub>気圧の関係

相対出力とN<sub>2</sub>圧力の関係をFig.9に示す。出力は50[Torr]をピークに60~90[Torr]でフラットな特性を示し、それ以上圧力を増すと低下した。低気圧域での出力が小さいのはN<sub>2</sub>分子数が少ないためで、高気圧域で低下するのは、フロー・タイプにしているために圧力を上げるとガスの流速が速くなるためと思われる。ガス

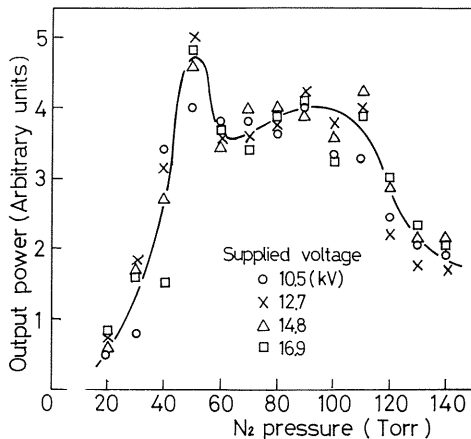


Fig. 9 Laser output power as a function of N<sub>2</sub> pressure.

の inlet 付近で流速のために、放電によるグローが流されるのが観察された。

#### 4.6 レーザ・システムについて

ガス放電電極については、陰極に金鋸の歯をつけたことにより均一なグロー放電が得られた。しかし、鋸歯が電極より短かったために 2 枚接合したが、その部分に電界が集中してアーク放電に移行するのが観察された。チャンパーに組みこんでから補修するのはむずかしいので、あらかじめ角などは十分に丸めて電界が集中しないようにし、シリコンゴム系接着剤で被覆するとよい。但し、広い範囲にわたって被覆するとその境界でアーク放電を起こしやすい。もう少し鋸歯のピッチの細かいもので、バンド・ソウのように長い物を使用するとよいと思う。今回、陽極には 2 (mm) の銅板を使用した<sup>16)</sup>が、薄いために一度アーク放電を起こすとその部分が損傷して度々アークになるようになった。5~10 (mm) の厚い銅板を用いて電極端を半円状に加工すると良い結果が得られると思う。レーザ発振中、同じ条件にもかかわらず出力パルス値に変動がみられたのは、チャンネル中の放電がそのつど一様でなかったため、安定した発振出力を得るためにはレーザ・チャンネル中を均一に放電させることが非常に大事で、電極の形状や組み立て方に注意が必要である。

コンデンサについては、最初のコンデンサは予定していた 100 ( $\mu$ m) のマイラーシートが入手できず、薄く幅のせまいものを重ね合わせて使用したが、あまり厚いシートよりは薄いシートを重ね合わせた方が極板によく密着した。また、シート同士は一度充電すると静電気力により非常によく密着していた。破壊した際も 1 枚だけ交換すればよく楽であった。幅の広いシートよりは安価であり実用上もあまりさしつかえないようである。100 ( $\mu$ m) のシートに交換してからは絶縁耐力もよくなり破壊することも少なくなった。マイラーシートと極板の間の空気の層を完全に除くことはできず、その微小なすき間でコロナ放電をした形跡がシート上に見うけられた。これらは使用中の経年劣化による出力低下につながり、このタイプの欠点にもなっている。上から強い力をかけておくか、グリス等を薄く塗ってもよいと言われている。うまく極板とシートを密着させるために真空中で極板を組み立てて出力を上げた例や、シートは使わずに  $BaTiO_3$  のセラミック・ディスクを使用して小型化をはかり、シートタイプが場所をとる欠点も同時に改良した報告<sup>21)</sup>もあ

る。コンデンサの絶縁破壊の原因としては、すき間の他に銅箔のキズや微小なゴミ等も考えられ、レーザの製作および実験には周囲をきれいにしておくことが望ましい。外側に出ているマイラーシート上で高電圧側銅箔の縁からの沿面放電によるコロナが観察された。放電に至るのを防ぐためと損失を防ぐためにシートを極板より 5 (cm) 以上長くした方がよい。

レーザ・チャンパーについては、内部で沿面放電が起らない大きさであり、フロータイプであるので、ある程度の真空中に耐える構造であればよい。本装置では、1 (Torr) までひくことができた。電極との接合部は空気が入りやすいのでシリコンゴム系の接着剤を十分に盛った方がよい。

スパークギャップはセルフトリガー方式にするより、3 点ギャップを用いて外部から発振パルスを制御した方がよい。

ミラーについては、著者らの場合はレーザ光の放出方向を考慮しないで設計したので、ミラーの使用により明らかな出力増加がみられた。

## 5. ま と め

$N_2$  レーザ装置を試作し、改良を重ね、パルス数を増加させ、また、レーザチャンネル中の放電をより均一な状態に保つことができた。そして、電源電圧 18 (kV)、励起電圧 10 (kV) において発振パルス数 20 (pulse/s)、 $N_2$  ガス圧 50 (Torr) において最大出力となる波長 337.1 (nm) の紫外線レーザを発振させた。

本研究にあたり、ご指導いただきました東京工業大学理学部応用物理教室芥川忠正氏、本学工学部電気工学科竹内学助教授に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) B. Godard, IEEE J. Quant. Elec., Vol. QE-10, (1974), 147
- 2) J. I. Levatter and S. Lin, Appl. Phys. Lett., Vol. 25, No. 12, (1974), 703
- 3) E. E. Bergman, Appl. Phys. Lett., Vol. 28, No. 2, (1976), 84
- 4) 福岡他, 電気学会全国大会, (昭 49), 110
- 5) 松平, レーザーの基礎と実験, 共立出版, (昭 47)
- 6) 稲葉他, レーザーハンドブック, 朝倉書店

- (昭48), 126
- 7) L. E. S. Mathias and J. T. Parker, Appl. Phys. Lett., Vol. 3, No 7, (1963), 16
- 8) A. W. Ali, A. C. Kolb and A. D. Anderson, Appl. Opt., Vol. 6, No 12, (1967), 2115
- 9) T. H. Parks, et al., Appl. Phys. Lett., Vol. 13, No 4, (1968), 142
- 10) R. Bleekrode, IEEE J. Quan. Elec., Vol. QE-5, No 2, (1969), 57
- 11) D. A. Leonard, Appl. Phys. Lett., Vol. 7, No 1, (1965), 4
- 12) J. G. Small and R. Ashari, The Rev. Sci. Instrum., Vol. 43, (1972), 8
- 13) A. J. Schwab and F. W. Hollinger, IEEE J. Quan. Elec., Vol. QE-12, No 3, (1976) 183
- 14) I. N. knyazer, et al., IEEE J. Quan. Elec., Vol. QE-11, No 10, (1975), 805
- 15) E. E. Bergman, Appl. Phys. Lett., Vol. 8, No 2, (1976), 84
- 16) C. P. Wang, Rev. Sci. Instrum., Vol. 47, No 1, (1976), 92
- 17) J. Itani, K. Kagawa and Y. Kimura, Appl. Phys. Lett., Vol. 27, No 9, (1975), 503
- 18) M. Feldman, et al., Appl. Opt., Vol. 17, No 15, (1978), 774
- 19) C. A. Parker, Proc. Roy. Soc., A220, (1953), 104
- 20) C. G. Hatchard and C. A. Parker, Proc. Roy. Soc., A235, (1956), 518
- 21) C. L. Sam, Appl. Phys. Lett., Vol. 29, No 8, (1976), 505