装置と技術

自動予備電離方式小型エキシマーレーザー装置 I.

←ダンピングコンデンサーをレーザー管外に置いた試作←

島内 みどり・及川 研一

東京学芸大学理科学部物理学教室
小金井市貫井北町 4-1-1 (〒184)

(1984年6月19日受理)

Compact Excimer Lasers of Automatic Preionization Type. I
—Trials for Configurations with Dumping Condensers Outside
the Laser Tube—

Midori SHIMAUCHI and Ken-ichi OIKAWA

Department of Physics, Tokyo Gakuai University,
4-1-1 Nukui Kita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184

(Received June 19, 1984)

1. はじめに

研究室で比較的容易に試作できるエキシマーレーザー装置は放電励起方式である。この方法ではエキシマーを発振させるには必ず予備電離を必要とし、これにはコロナ放電、ラダー放電、並列スパークギャップ放電¹⁾ また X線を照射する²⁾ など種々の方式がある。コロナ放電方式は主電極近くに細いワイヤー等コロナ放電を起し易い電極を配置しただけで、自動的に予備電離が行なわれ、両面プリント基板を放電管両翼のコンデンサーとした場合によく用いられてきた。しかし基板は耐圧が低いので、高電圧に耐えるセラミックコンデンサーを用いた場合には、この方法では発振に十分な予備電離を得るのは困難である。そこでラダー放電がよく用いられてきたが、この方法では沿面放電による不純物発生可能性がある。これをさけるには並列スパークギャップ放電があるが、いずれの場合も予備電離のために主放電とは別の電源を必要とする。更に二つのパルス放電の時間差を制御する

ためにトリガー回路とスパークギャップが二つずつ必要である。1979年 Kearsley, Andrew, Webb 等³⁾は唯一つのスパークギャップおよび電源を用いて、主放電と予備電離が自動的に制御される回路を考案した。また主放電回路のインダクタンスを減らすためにダンピングコンデンサー (Fig. 1 の C_2) の系列を放電管内部におき、XeCl レーザー (308 nm) で 0.5 J/パルスという高出力を得た。但しこの時用いたレーザー管の長さは 180 cm、コンデンサー (Fig. 1 の C_1) の充電電圧は 38 kV である。また大阪大学レーザー核融合研究センターでは電極の励起長約 95 cm, 30 kV, 2.5 気圧における KrF レーザー (248 nm) で 0.3 J を得ている⁴⁾。最近エキシマーレーザーの工業的利用の道が開かれ、非常に多くの便利な市販品が製造されるようになった。その多くが上記の自動予備電離方式を採用しているが、いずれも主放電用コンデンサー C_2 を放電部に内蔵している。エキシマーレーザー用気体中には微量ではあるが、 F_2 , Cl_2 等の強い活性ガスを混入しているので、長期間にわたる使用で

は、少くともセラミックコンデンサーの塗料は相当に侵蝕される。

一方われわれはエキシマーレーザー連続光中の吸収線を高分解能分光器で調べ、極微量であると思われる不純物原子または分子の相当高い励起項からの吸収線が存在して、エキシマーレーザーの効率を下げていることを見出した⁵⁻⁷⁾。またこれらの吸収線はエキシマー連続光を分光学的光源として使用する場合には問題になる。そこでわれわれはなるべく不純物源をさけるため、コンデンサーを放電管の外側に置いたレーザー装置を試作、KrF および XeCl レーザーの出力特性を調べた。まず C_2 コンデンサー系列の配置場所を放電管の左右両側にした1号装置をつくり、その経験を基に改良を加え、 C_2 系列を放電管下部においた2号装置を作った。筆者の知る限りではこれらのコンデンサーを放電管外部に置いた場合の報告はない。特に予備電離電極間の間隔およびその電極構造と出力との関係等について調べた報告はない。われわれは1号および2号装置についてこれらの点を詳細に研究したので、その結果を報告する。またこれらの装置については未だ改良を考え、種々の試みをしている段階であるが、これまでの過程において失敗し、改造した経験についても報告し、読者の参考に供したい。

2. 装置の概要

電気回路を Fig. 1 に示す。これは容量移行型と呼ばれ、抵抗 (R) またはインダクタンス (L) を通して直流充電された C_1 の電荷をギャップスイッチ (GS) を閉じることにより C_2 へ移動させる。その際、紙面に垂直方向に並んだ左右二列の予備電離ギャップ P で火花放電

Fig. 1. Electric circuit of an excimer laser of the auto-preionization type.

R' , R or L : charging resistors, GS: spark gap switch, P: preionizer gap, A, C: main electrodes, C_1 : storage capacitor, C_2 : dumping capacitors consisting of many door-knob shaped capacitors.

Dashed circle represents a cross-sectional view of the laser chamber usually used.

がおこり、その紫外光によって予備電離が行なわれる。こうしてレーザー媒質の予備電離が充分に行なわれ、 C_2 に電荷が充分蓄えられた時点で、AC 間の主放電が自爆的に起る。 C_1 は1個のものでプラスチックケース入りのコンデンサー (Maxwell 社31153型) を使用した。 C_{1A} ($0.3 \mu\text{F}$, 耐圧 35 kV) と C_{1B} ($0.2 \mu\text{F}$, 耐圧 40 kV) の二つを用意し、それぞれを使用した場合の出力を比較してみた。やや前者がまさっているが、大差はなく、主に C_{1A} を用いて実験した。 C_2 には内部インダクタンスの小さい SrTiO_3 セラミックコンデンサー (TDK 製, UHV-5, 1.7 nF , 耐圧 35 kV) を 42 個用意した。各々は電極間隔 22 mm, 直径 48 mm の円筒状のものである。電源には主として 0~30 kV DC, 30 mA (パルス電子技術製) を用いたが、22 kV, 30 mA のネオントランスを用いて自作した電源でも 25 kV DC まで使えた。スパークギャップ (GS) には EG & G 社の GP-14B 型を用い、トリガー回路には自動車用の CDI 回路と Ignition Coil を用いた。繰返しは電源によって制限され 1-3 Hz で実験した。

一般には、二列のコンデンサー C_2 の列は主電極に直結され、Fig. 1 に点線の円で示した円筒形のレーザー管の内部におかれている。したがってレーザー管の容積は大きくなり (例えば文献 4) によれば 18 l), 多量のガスが必要とする。今回われわれは1号装置 (SAS I), 2号装置 (SAS II) とともに C_2 を管外におき、全管長は数十 cm の小形にしたので、内容積はともに 1.8 l である。絶縁部は厚さ約 50 mm のアクリル板から掘り抜きで成形し、上下の主電極板にはアルミ板を用いた。接着剤をさけ、また改造のためにとりはずしが容易にできるように真空用ゴムパッキング* を用い、アルミ板をアクリル壁にねじどめにした。窓には 4 mm 厚の CaF_2 板を用いた。

3. 実験および測定法

KrF および XeCl レーザーについて実験を行なったが、種々のガスは通路と放電管中で直接混合させ、リザーバーは用いていない。用いたガスの純度は He が 99.9999%, Kr が 99.99%, Xe と HCl は 99.9% である。 F_2 は >99% であるが混入する直前に必ず液体窒素のトラップを通して純化を行なった。この純化は KrF レーザースペクトル中の HF 分子の吸収を抑え、ガスの寿命を長くするのに有効である。レーザー共振器の一方には、凹面半径 4 m のガラス面に Al を蒸着、殆んど 100% の鏡にしたものを、他方のレーザー光取出し口には透明な

* バイトン製を用いる方が良いといわれている。しかし高価なのでニトリルゴム製を使用しているが、1年半を経た今日でも使用可能である。

石英平板 (厚さ 2 mm) を使用した。100% 反射鏡の代りに誘電体薄膜 (米国 ACTON 社製), 248 または 308 nm 用を使用して見たが, KrF または XeCl レーザーの出力は殆んど変りはなかった。1号装置は主として KrF レーザーについて, 2号装置は主として XeCl レーザーについて, ガス混合比, 充電電圧, ガス全圧力および予備電離電極の本数, 間隔の変化に対して, 出力, レーザーパルスおよび電圧パルスの波形を調べた。出力グラフの各点は Gentec のジュールメーター (ED-200) で 5~9 パルスの出力を測定した平均値を示してある。レーザーパルスはバイプラナー管 (浜松ホトニクス社製, R1193U-02) の出力をオシロスコープ (Sony-Tektronix 485 型) で観測, ポラロイドフィルム (612) で記録した。電圧波形はレーザー主電極間に並列に高抵抗を置き, これの適当な分圧をとって上記のオシロに入れ, 観測した。

4. 自作エキシマーレーザー1号装置 (SAS I)

4.1 放電部の構造とその変遷

Fig. 2 に SAS I の回路および放電管の断面図*を示す。右側の図の実線は現状を示し, 左側の図は予備電離

電極の形状の変遷を示す。最初は左側の図の実線で示すように, C_2 の上側の電極に直結する棒 B (真鍮製) と上部の主電極から下ろしたピンとは直角に対向させ, 数 mm の間隔をもつ予備電離ギャップとした。棒 B には真空用の O リングをはめてある。この場合に動作させたところ, B と下側の電極の最も壁 (W) に近い部分 A' との間に放電が起り, 主放電は全く起らなかった。そこで主電極 A および C を夫々電極板 (10 mm のアルミ板) に熔接したところ, 今度は B と A との間の放電が起り, やはり主放電は起らなかった。この時 AB 間の距離は AC 間のその約 1.2 倍であった。次は B の先端をできる丈電極 C に近づけて AB 間の放電を AC 間にもっていくことを考え, 点線で示した様な予備電離電極を作った。この B の延長部はビニール製熱圧縮チューブで覆ったので, 一応 AC 間の放電は実現できたが, B' 部の絶縁が破れ易く不安定な放電となった。そこで B の先端を右側の図のようにアクリル板で覆い, B の金属棒に 3 mmφ のねじを入れて上下両電極を垂直に対向させた。この時の AP と AC の距離の比は 1.25 倍に過ぎない。すなわち二つの予備電離電極によってつくられる電界はなるべく閉じて局在していることが安定な放電にとって重要であると考えられる。B の先端を覆うためにつけられたアクリル板 W'

Fig. 2. Cross-sectional view of the first home-made automatically preionized excimer laser with external dumping capacitors (SAS I).

- (a) Present structure except for the capacitors shown by dashed lines. The left side of the laser chamber has a structure similar to that of the right side.
W, W': acrylic walls, B: brass bars connecting the dumping capacitors C_2 's to preionizer electrodes, A, C: aluminum electrodes, P: preionizer gaps,
(b) Tried shapes and positions of the preionizer before the present structure was achieved.

* 外寸はmm単位で 100(W)×70(H)×620(L), 壁Wの厚みは20である。電極は長さ 520, 巾10で, 電極間隔は22である。(放電容積は約 $6(W) \times 22(H) \times 550(L) = 72.6 \text{ cm}^3$).

はBと下の電極との間の絶縁を保つためにエポキシ系接着剤を用いて接着しなければならず、接着剤をさけるといふ当初の方針は坐折した。またアクリルを加工した面は亀裂を生じ易いが、エポキシ系接着剤は殆んどあらゆる場合に有効な補修剤となり、何度か補修を重ねたSAS I は完成後1年半を経過した今日でもまだ充分使える。

4.2 電気回路と出力

Fig. 2 に点線で示した上側のコンデンサー C_2 の列は、Fig. 3(a) に示すように、下段の C_2 の列と交互に並べてある。当初、出来る限り多量の C_2 を用いて出力を稼ぐ目的で、このような二段の配列を行なった。しかし実験の結果は予想に反し、Fig. 4 に示す如く、KrFレーザーの場合、下一段のみの方が上下二段の場合の約2倍の出力が得られた。また電圧パルスの立上り時間(a)は前者では50 nsであるが、後者では80~100 nsとおくれる。レーザー光の立上る時刻(d)および立上り時間(e)も前者では150, 15 nsに対し、後者では230, 30 nsといずれもおくれる。((a), (d), (e)はFig. 5参照。Fig. 5の左端はトリガーパルスの始まりである*)。その原因はFig. 2において示されるように上段と下段のコンデンサーの充電および放電における回路の長さの違いによる充放電の位相の乱れにあると考えられる。即ち、充電の際には上段の回路はFig. 2のabcd(abcd部は厚さ0.2 mmの巾広い銅板から成る)の長さ丈短いのに対し、放電においては同じ長さだけ長くなるためである。そこで

Fig. 3. Side view of SAS I.

- (a) Dumping capacitors are set in two stages.
 (b) Dumping capacitors in the upper stage were removed and the electrode of each is connected to the next electrode of the capacitor in the lower stage.
 This state is hereafter called "two pins," because two gap pins are connected to each capacitor.

* SAS I では、 C_2 が下1段の場合に Fig. 5 の記号に従って測定値を ns 単位で示すと、b-a: 40, b: 90, c: 90~100, f: 50 である。

Fig. 4. KrF laser energy versus number of shot pulse in the two cases; $\circ$ represents the case where damping capacitors of both upper and lower stages were used, while $\bullet$ represents the case where the 20 damping capacitors of the upper stage were removed and each capacitor has two pins. Gap widths were kept 4 mm for both cases.

Fig. 5. Schematic laser and voltage pulses showing times a, b, c, d, e, and f. (A) laser pulse, (B) voltage pulse.

以後すべて下一段で実験を行なった。しかし上段のコンデンサーをとりはずしたあとの電極を利用してみるため、これと隣りの下側のコンデンサー付き電極を銅板でつないだ (Fig. 3(b) 参照。この状態を今後 "2 pin" と称する。) その結果出力は約2倍にふえ (Fig. 6 参照)、ガスの寿命も長くなった。したがって以後の実験はすべてこの状態で行なっている。この時予備電離ギャップPはすべてが毎回放電していることが確認された。

Fig. 6. XeCl laser energy versus charging voltage in the two cases where each of the preionizer electrodes consists of one pin (○) and two pins (●). The laser medium ($\text{Xe}/\text{HCl}/\text{He}=0.2/5/94.8$, total pressure 1000 Torr) was the same for all data.

4.3 予備電離電極間隔と出力

下側の予備電離電極は固定し、上側の電極のつけ根のねじを用いてこの電極を上下して電極間隔を変化させ、出力の測定を行なった。その結果は Fig. 7 に示すように間隔を 3.5mm から 5mm へとひろげていくと、明らかに出力は低下する。2.5mm まで間隔をせばめると出力は落ちているが、この時の実験条件は他の三つと異なる。

Fig. 7. KrF laser energy versus preionizer gap distance. The preionizer electrodes used for the 2.5mm gap were screw nuts made of steel, while those used for other three gap widths were made of aluminum and conically sharpened. The charging voltage was fixed at 25 kV.

っている。即ち 3.5~5mm の実験においては、上側の電極は 3mmφ のアルミ製で先端は円錐状にとがらしてある。しかし 3.3mm 以下の間隔にする場合には短かすぎるので、代りに鉄製のいもねじを使用した。したがって形状が異なり、かつ主電極と材質が異なるので、これらが原因となり出力が落ちる可能性がある。またこれらの実験を行なうには、その都度放電管をあけ、40本の電極の高さを変え、それらの高さを揃えるという面倒な作業が必要である。しかも一度空気にさらした放電管は、時間をかけてハロゲンガスによる不動態化 (passivation) を行なわなければ前と同じ状態にもどらない。したがって正確な測定を行うことはむずかしいが、この場合の最適値は 2.5mm と 3.5mm の間にあると思われる。最適値はレーザー媒質とその圧力とも大きく影響されると考えられるが、次の 4.4 に述べる理由で、今回はこれらの影響については特に調べなかった。しかし後述する 5.3 において SAS II の結果と合わせれば、多少の推論ができるであろう。

4.4 出力の圧力依存性

Fig. 8 に出力の圧力依存性を測定した二つの例を示す。○印は 1000 Torr において $\text{F}_2/\text{Kr}/\text{He}=0.9/1.2/87.1$ の混合気体を He でうすめて高圧にしていた場合、×印は逆に 1300 Torr で上記の比率をもつガスを次第に減圧していった場合の測定値である。Fig. 8 に示

Fig. 8. KrF laser energy versus pressure: ○ represents the case where the amount of $\text{Kr}+\text{F}_2$ was established at 1000 Torr, and kept constant while He alone was added to obtain the mixture at the measured total pressures. × shows the case where the mixing ratio were kept constant, i.e. $\text{Kr}/\text{F}_2/\text{He}=12/0.9/87.1$. The charging voltage and gap widths were kept at 25 kV and 5.0 mm, respectively.

した平均出力は、1250 Torr が最高で 1300 Torr では却って下っている。これは 1300 Torr では leak が起り、圧力が下がったためで、1000 から 1250 Torr にかけての出力増加傾向は更につづく筈である。

この SAS I 装置の最大の欠陥は耐気圧構造の弱さにあり、その主因は電極板をアクリル壁Wにとめる構造にある。これより前、アクリルに直接ねじを切るとアクリルが割れることを経験したので、今回は真鍮製円筒 (8 mmφ, 高さ 8 mm) の中心にねじを切り、この円筒をアクリルに埋めこんで接着した。しかし内部を高圧にするとこの円筒はねじと共に押し上げられ、接着力の不足が示された。そこで厚さ 0.5mm, 巾 9mm の細長い金属板に上記の円筒をハンダ付けにし、細長い板をねじ穴の左右でアクリルにねじ止めにした (Fig. 9)。この板が薄すぎたため、ねじの位置で多少盛上るようになり、結局主として 1200 Torr 以下の実験を行っている。その後この板を 2mm 厚にして試みた場合には少くも 2 気圧までは充分使えることが示された。

そこで耐圧構造の改良、および出力の向上をめざして 2 号装置をつくった。

Fig. 9. A method of fastening a nut to the acrylic wall. After trials it was found that this method is effective to avoid cracking the acrylic. a: acrylic, b: brass cylinder with a hole for a screw, c: brass plate to which b is soldered.

5. 自作エキシマーレーザー 2 号装置 (SAS II)

5.1 放電部の構造

Fig. 10 に 2 号装置に放電部の断面図*を示す。C₂ を放電管の下側におくことにより、コンデンサーの電極と予備電離用ギャップ P との間の接続金具 B (真鍮製) を

* 外寸はmm単位で、140(W)×90(H)×600(L)、電極は長さ520、巾10、電極間隔は20である。(放電容積は約 6(W)×20(H)×460(L)=60.72 cm³)。

1 個ものとしことができ、更に、主放電回路の長さは SAS I に比べ 4 cm 短かく、24 cm となった。また予備電離電極の数をふやして予備電離の一様化をはかる目的で、B の上部を約 8mm の間隔で並ぶピン状の 3 本とした。これら下側の電極は B と同じくすべて 3 mmφ の真鍮製、ギャップ P の上側の極はすべて 3 mmφ のアルミ製で、先端を円錐状にしてある。セラミックコンデンサーは図の左側では 10 個、右側は 11 個で、右側 2 個の中間に左側の 1 個を配置した。これらのコンデンサーおよび C₁ も SAS I のそれらと同じである。斜線で示した主電極部はそれぞれアルミ製の 1 個もので、電極の長さは 520mm, 巾 10mm, 電極間隔は 20mm である。点を散らした部分 (W, W', W'') はアクリル製で、W・W' はエポキシ系接着剤とねじで密着してある。W および W' とアルミ電極の間では、アルミ側の溝にひも状の真空用ガスケットを入れ、ねじで押えている。ねじどめに関する 1 号装置での失敗に鑑み、最初は端線で示したように W に 10mm のつばをつけ、このつばの部分に通したねじを下からナットでしめた。しかし今度はつばの根元に亀裂が生じた。そこで厚さ 10mm の板 (W'') を W の外部にねじと接着剤で密着し、更に W'' と W のつばの部分をつなぐように金属板をねじどめにし、結局つばはねじ部にのみ残る形となった。一方、下側電極と W' の間の

Fig. 10. Cross-sectional view of the second home-made automatically preionized excimer laser with external dumping capacitors.

W, W': acrylic walls, B: brass bars connecting the dumping capacitors C₂'s to preionizer electrode, A, C: aluminium electrodes, P: preionizer gaps.

Fig. 11. Decay of the laser energy versus the number of shot pulses to compare the two cases of 3 pins and 1 pin preioniser electrodes.

(a) The absolute energies of the KrF laser at 100% for 3 pins and 1 pin were 43.4 and 27.2 mJ, respectively. Gap width: 3.5 mm, charging voltage: 26 kV, laser medium: 1400 Torr of $F_2/Kr/He=0.29/5.72/93.99$.

(b) Absolute energy of the XeCl laser at 100% for 3 pins and 1 pin were 41.7 and 35.2 mJ, respectively. The laser medium was 1500 Torr of $F_2/Kr/He=0.2/5.0/94.8$. Charging voltage: 30 kV.

Fig. 12. (a) KrF laser energy versus preionizer gap width. Each preionizer electrode has 3 pins. In the cases where charging voltage exceeds 20 kV, the power decreases as the gap width increases from 2.5 to 6.5 mm. The laser medium was 1400 Torr of $F_2/Kr/He=0.29/5.72/93.99$.

(b) XeCl laser energy versus preionizer gap distance: ● and ○ show the values measured in the cases where each preionizer electrode has three pins, and ▲ and △ show the cases for one pin. For each case the laser power was measured at two charging voltages, 20 and 30 kV. It is shown that the maximum power is obtained for a gap of 2.5 mm. The laser medium was 1500 Torr of $HCl/Xe/He=0.2/5.0/94.8$.

ねじどめは Fig. 9 に示した方式を用いたところ、これまでに実験した 1500 Torr まで安泰である。

5.2 予備電離電極の数と出力

Fig. 11(a) に KrF レーザーの、Fig. 11(b) に XeCl レーザーの場合について測定した予備電離電極 1 本と 3 本の場合の shot パルス数に対する出力の減衰の様子を示した。縦軸は最初の 5 パルスの平均を 100% として相対強度を表わしている。100% における絶対値は KrF では 1 本で 27.2 mJ, 3 本で 43.4 mJ, XeCl では 1 本で 35.2 mJ, 3 本で 41.7 mJ である。いずれの場合にも 3 本の方が 20~40% 高い出力を出し、減衰がおそくなっている。しかし SAS I における 1 本と 2 本の場合の差程著しくない。予備電離放電をよく観測すると、SAS I の場合の 2 本は必ず 2 本が放電しているが、SAS II で 3 本にした場合は 3 本とも火花を出す確率は小さい。大体 3 本のうちの 2 本のみが発光することが多く、しかもどの 2 本になるかはパルス毎に異なる。この問題については今後更に検討する。

5.3 予備電離電極の間隔と出力

Fig. 12(a) に KrF レーザーの場合に電極間隔を 2.5~6.5mm の間で、充電電圧を 17.4~29 kV の間で変えた場合の出力の変化を示してある。20 kV 以上では電極間隔の増加は明らかに出力を下げており、2.5mm で出力の最高値を示している。Fig. 12(b) に XeCl レーザーの場合に、電極間隔を 1~3.25mm の間で変化させたときの出力の変化を充電電圧 20 kV と 30 kV について示した。主として電極 3 本の場合を○および●印で示してあるが、2.5mm と 3.5mm の△および▲印は 1 本の場合である。これらの結果から最適値は、いずれの場合にも 2.5mm にあると結論できる。これらの実験では KrF レーザーは全圧 1400 Torr で、XeCl レーザーは全圧 1500 Torr で行なった。4.3 で述べた SAS I に関する全圧 1000 Torr の場合のこの種の実験では、2.5~3.5mm の間に最適値があると結論された (Fig. 7 参照)。Fig. 12 (a) および (b) では予備電離電極間隔の最適値の電圧依存性を調べようとしたが、この依存性はあまり明らかではない。しかし間隔 1 mm の場合、電圧をあげると放電が非常に不安定になるので、Fig. 13(a) の測定は 20kV で行なった。それでもこの図に示すように出力誤差が大きく、少なくともここで使用した圧力範囲で 1 mm のギャップ間隔は使えない。今回最適ギャップ間隔の圧力依存性は特に調べなかったが、SAS I の場合と比較すれば、間隔の最適値は圧力が高くなる程狭い方へ移動すると思われる。これは理論的にも予想されることであるが、

Fig. 13. Decay of the XeCl laser energy versus the number of shot pulses for various gap widths. The absolute power at 100% was (a) 11.5, (b) 22.0, (c) 21.3 and (d) 32.2 mJ/pulse. Charging voltage: 20 kV for (a), (b) and (c), and 30 kV for (d). The laser medium was 1500 Torr of $F_2/Kr/He=0.2/5.0/94.8$.

今後耐圧構造を改良した装置により、実験で確かめたい。

Fig. 13(a), (b), (c), (d) には間隔を 1, 2, 2.5 および 3.25 mm にした場合の shot パルス数による相対強度の変化を示した。一般に XeCl レーザーの減衰は非常におそく、今回用いた装置の様な小容積 (1.8 l) で閉じこめた場合でも、50% まで下るには 4000 発をこえる。Fig. 13 の各図を比較すると、ギャップ間隔が増す程、減衰が速くなる。しかし 1mm の時は放電が不安定であり、2.5mm は減衰からみても最も良い傾向を示している。

5.4 出力の圧力依存性

Fig. 14(a) に KrF レーザーの場合の圧力依存性を電

Fig. 14. (a) Pressure dependences of the KrF laser energy for various charging voltages. The laser medium was $F_2/Kr/He=0.36/7.14/92.5$ at 1400 Torr, and F_2/Kr and F_2+Kr were kept constant at all pressure. Gap width: 4 mm. (b) XeCl laser energy versus pressure. The laser medium was $F_2/Kr/He=0.2/5.0/94.8$ at all pressures. Charging voltage: 30 kV. Gap width: 3.25 mm.

圧をパラメーターとして表わした。圧力を 1400 Torr までで止めたのは、 F_2 を入れた時アクリルの加工面が特に高圧に対して弱いためである。いずれも全圧力の増加と共に出力は増加し、充電電圧 26 kV 以上でその傾向は著しい。Fig. 14(b) は XeCl レーザーの場合の圧力依存性の一例であるが、全圧力の増加と共に出力の増加率も上昇している。したがって全圧力を 3 気圧位まで上げ、レーザー媒質の混合比の最適値を選べば、1500 Torr における出力の 2 倍を得ることは可能であると予想される。

6. 考察とまとめ

先づ 1 号装置 (SAS I) の試作により、ダンピングコンデンサーをレーザー管の外に置いて問題なくレーザー発振させ得ることが示された。そこで 2 号装置 (SAS II) を作る時には 1 号装置より遙かに高い出力が得られると期待できる改良を加えた筈であるが、結果は最高出力において高々 40% 程度の向上しか達せられなかった。この程度の出力の向上は SAS I の構造のままでも、耐気圧、電極の形状等に関する細部の改良で達成できると思われる。SAS I の方が II よりも製造工程は簡単であり、堅牢化も容易であろう。唯、SAS II の構造において経験した利点は、放電によってできる粉末が大部分下の電極とアクリル壁の間の空間に落ちこみ、トラップされるので、アルミ電極で XeCl を発振させても窓の汚れの少ない点である。今回実験した二つの装置が共に明らかに示したことは、1 個の C_2 コンデンサーに対して 2~3 個の予備電離電極を付ける方が出力は 10~100% 増し、ガスの寿命がのびるということである。また予備電離電極の間隔の最適値は、これまで屢々用いられてきた数 mm よりも短い、2~3 mm にあり、この最適化により少なくとも 30~40% の出力の増加が得られ、ガスの寿命ものびることが示された。

一方 KrF レーザーで得られた最高出力 (SAS I では 1300 Torr, 25 kV で 40 mJ, SAS II では 1400 Torr, 30 kV で 56 mJ) を用いて効率を計算してみたところ、SAS I と II との差は全くないことが示された。 C_1 に $0.3 \mu F$ という大き過ぎる容量を用いたため、効率は 0.04% という低い値となった。このことは次回に改めたい。ビームの拡がりの点でも SAS I と II とは変わりなく、3. で述べた実験条件下では横が 0.5 m rad, 縦が 5.2 m rad である。またレーザーパルスの特性は 4.2 の欄外に示した SAS I の C_2 一段の場合と SAS II の値は殆んど等しい。SAS II では主放電におけるインピーダンスを下げることを主眼として改良を加えたのであるが、その効果が全くあらわれなかったことは、たとえ C_2 をレーザー管に内蔵しても飛躍的な改良は期待できない。すなわち効率の悪い原因が C_2 の位置の問題以外にもあると考えられる。その第一は耐圧構造にある。今日の市販品の多くは 3 気圧を用いているのに、今回の装置ではアクリルの亀裂を恐れるため 2 気圧以下で抑えている。このために出力は 2 倍は違ってくる筈である。敢えてアクリルを用いているのは、透明な材料を用いて放電状態を観測したいという分光屋の切望からである。今日では塩ビの他に FRP といわれる誘電体がよく用いられている。

第二には主電極の形状の吟味と仕上げ精度の向上が必要であろう。第三には窓材および共振器のカプラーに蛍光の出ないものを使いたい。大出力になればなる程蛍光は著しく、レーザーパルスの中は広がり長く尾を引いているのが観測された。今回、窓用には厚さ 4mm の弗化カルシウム板を、カプラーには厚さ 2mm の熔融石英板を用いた。品質を選ばず、価格のみできめていたが、次回には品質を考慮したい。

今回得られた出力でも分光器に入射させるには、スリットの前に細かいメッシュ (300 メッシュ程度) を数枚置かななくては、スリットがいたみ、スペクトルは干渉縞で乱されてしまう。レーザーの同調をとる場合には回折格子を損傷しない程度に弱めなければならない。出力 10 mJ 以下ならば集光しない限り光学部品を損傷することも少ない。生物学的研究、医療用などにもあまり高出力は却って困るであろう。したがって今回の装置のようにダンピングコンデンサーをレーザ管外に配置しても充分実用になると結論できる。

最近の市販品ではガスを循環し、さらにその途中で清浄化を行なっている。今回の装置は閉じ込め方式で、しかも放電管内で直接混合ガスをつくり、リザーバーを用いていない。1 回に閉じこめる 1.8 l のガスでも、XeCl レーザーでは出力が半減するまでに 4000 発以上使えることが示された。ガスを循環させることについては、われわれの技術でも解決できる見込みはある。しかし外国製品で実現しているような 100~1000 Hz に及ぶパルスの高繰返しについては、先ず電源によって制限され、さら

にわれわれにとっては高価すぎるサイラトロンの入手という難関もある。

目下、主放電の際には予備電離ギャップを通らない回路方式で、しかもダンピングコンデンサー C_2 はやはりレーザ管外に配置した装置の試作を進めている。次回にはよりよい装置が得られて報告が出来ると考えている。

謝 辞

本装置の試作にあたり、有益な御教示を頂いた慶応義塾大学理工学部の小原実博士に深謝する。またこの研究に協力された東京学芸大学における卒業研究の学生、佐々木治、有馬貢、関孝嗣の諸氏に感謝する。

本研究の研究費の一部は文部省科学研究費に依っていることを附記し、謝意を表する。

文 献

- 1) 前田三男：レーザー研究 **11**, 38 (1983).
- 2) K. Midorikawa, M. Obara and T. Fujioka: IEEE J. Quantum Electron. **QE-20**, 198 (1984).
- 3) A. J. Kearsley, A. J. Andrew and C. E. Webb: Optics. Comm. **31**, 181 (1979).
- 4) 岸本俊夫, 藤原関夫, 加藤義章, 山中千代衛: レーザー研究 **9**, 682 (1981).
- 5) M. Shimauchi, T. Miura and S. Karasawa: J. Chem. Phys. **71**, 3538 (1979).
- 6) M. Shimauchi: Jpn. J. Appl. Phys. **20**, L473 (1981).
- 7) M. Shimauchi and K. Oikawa: Submitted to Can. J. Phys.