レーザー技術ノート

放電励起エキシマーレーザー装置

前 田 三 男*

(1983年 3 月 8 日 受理)

Discharge-Pumped Excimer Laser Systems

Mitsuo MAEDA*

(Received March 8, 1983)

1. まえがき

これまでに ArF (193nm), KrF (249nm), XeF (352, 486nm), KrCl (222nm), XeCl (308nm) および XeBr (282nm) の6種の希ガス・ハライド系エキシマーレーザーが, UV予備電離横形放電によってパルス発振している(括弧内は概略の発振波長)。その最大出力はパルス当り13.8J (170MW)¹⁾, 平均パワーは200W (繰り返し1kHzで)²⁾に達しており, また, パルス出力0.1~1.5Jで平均パワー最大50W, 繰り返し最大500Hz程度のもので, 市販品として入手できるようになってきた。近紫外部でこのような速い繰り返しのできる高出力レーザーには, 従来N₂レーザーとYAGレーザーの3・4倍波しか, 実用的なものがなかった。効率や出力で, それらを大きく上回る性能を持つエキシマーレーザーの出現は, 短波長域での応用に新しい領域を開拓した。たとえば, レーザー化学, 同位体分離, 半導体製造, 微細加工, リモートセンシング等の分野で注目すべき成果

が挙がりつつあるし, 各種レーザーの励起源としても有用である。そのあるものは基礎研究の段階を越えて, 産業的基盤を持つ応用にまで発展してゆくことが期待される。そのためには, より高性能のエキシマーレーザーの開発が, 今後ますます重要性を持つてくるものと思われる。

こういった状況のもとで, この一・二年エキシマーレーザーのユーザーが急増し, またレーザー自体を研究室レベルで試作するところもふえているので, ここでは放電励起エキシマーレーザーの技術的側面を解説した。エキシマーレーザーにはこれまでも多くの優れた解説があるので^{3~8)}, その原理や動作機構に関しては大幅に省略し, 装置設計上参考になると思われる文献を数多く紹介するように努め, 設計法について概説した。また, 研究室のレベルで比較的試作の容易なレーザーの実例を示した。

2. レーザー放電管と予備電離

エキシマーレーザーの励起法には, (1)電子ビーム励起, (2)電子ビーム制御放電, (3)UV又は

*九州大学工学部電気工学科 (〒812 福岡市東区箱崎)

*Department of Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University (Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812)

X線予備電離横形放電, (4)縦形放電⁹⁾, (5)高周波・マイクロ波放電¹⁰⁻¹²⁾ 等がある。(1), (2)のような電子ビーム (REB) を使用する方式は, scalabilityに富み, 効率が良いので, 慣性核融合など超大型システムを目標にした開発が進められているが, 性格から見て汎用のレーザーではない。UVおよびX線予備電離放電は, いわゆる自己持続放電(self-sustained discharge)であり, その点で電子ビーム制御放電と本質的な相違がある。X線予備電離は¹³⁻¹⁵⁾, 放電管の外部から大きな体積にわたって一様な電離が可能であるが, 実用的にUV予備電離の簡便さに対抗できない, また, (5)のような導波形構造を持った長パルス(最長300 ns)レーザーは, 準cwの動作を行なう点で興味深い, が, まだ実用を云々する段階にはない。したがって今のところ, UV予備電離横形放電励起を最も実用的な方式と考え, 以下それに限って話を進める。

エキシマーレーザーにおける放電励起の技術は, 本来TEA CO₂およびN₂レーザーのそれを受け継いだものであったが, しだいに独自の道を歩みつつある。エキシマーレーザー放電管に要求される性能として重要な点は, (1)2~5気圧のガス圧に耐えられること, (2)適当な予備電離がなされること, (3)ハロゲンガスとの反応や放電プラズマとの相互作用により, 不純物を生成しにくい材料や構造であること, (4)コンデンサーとの結合時のインダクタンスが小さいこと等があげられる。

有効な放電体積は, 最も高出力のKrFやXe-Clの場合, 単位体積当りの出力を1.5~3 J/ℓ (最大5 J/ℓまである^{15,16)}) として見積ることができる。たとえば, 最大出力200 mJのレーザーで放電長を60 cm, 電極間を2.5 cmにとると, 放電の横幅は4.3~8.6 mmとなる。出力がジュール級になると, 大きなビーム断面積が必要になるため, CO₂レーザーの場合と同様に均一電界電極¹⁷⁾が使われている。しかし, 横幅がこのような5 mm前後しかない場合には, かならずしも均一形でなくても良い。

一般にエキシマーレーザーでは放電インピーダンスがCO₂レーザー等にくらべてかなり小さく(0.3 Ω以下のことが多い), 回路側のそれを下まわっていることが多い。ことに単位体積当りに大きなエネルギー注入を行なうと, ガスの電離が進んで下がりやすく, 放電管のインピーダンスはなるべく高く設計した方が効率が上がる^{18,19)}。その意味で, 一様放電さえ得られるなら, 電極間隔は広い方が良い²⁰⁾。普通0.5 J以下の装置では2~4 cmに選ばれている。また全ガス圧も5~6気圧程度までは高い方が望ましい。これも同様に, 回路側とのインピーダンス整合が関係している¹⁸⁾。それを越えると, 緩衝ガスとの三体衝突による脱励起により, かえって効率が低下する。

一様なグロー放電を得るには, 予備電離が不可欠である。Fig. 1に予備電離と主放電の間の遅延時間 t_d と, レーザー出力の関係を示す²¹⁾。 t_d の最適値は0.1~1 μsのあたりにあり, したがって数100 nsのジッターは許される。予備電離効果が10 μs以上にわたって保たれる点は, 次のように理解されている²²⁾。まずVUV光でガ

Fig. 1 Output energy as a function of delay time between UV preionization and main discharge. UV preionization energy is 8 J. After R. C. Sze⁵⁾

ス中のたぶん不純物分子に起った電離によって発生した電子は、すぐにハロゲン分子と解離附着 (dissociative attachment) を起こし、寿命の長いハロゲン陰イオンが生じる。この陰イオンが放電の際、電子を再放出する。スパーク予備電離の場合、生成される電子密度は 10^{10} cm^{-3} オーダーとされている²¹⁾。予備電離電子が少ない場合 (10^8 cm^{-3} 以下) には、その密度とともにレーザーの出力 (特にパルス幅) が増加してゆく傾向が見られるが^{21~24)}、予備電離に要するエネルギーは通常数 J で十分であり、不必要なエネルギー注入はガス劣化をうながす。

予備電離放電にはコロナとスパークとがある。前者では主電極近傍に細いワイヤー等コロナ放電の起こりやすい電極を配置しただけで、自動的に予備電離が行なわれる^{25~27)}。この方式でも、0.5Jの出力が得られた例はあるものの²⁷⁾、一般には「二重放電形」とも呼ばれるスパーク予備電離法が確実である。その給電方式には Fig. 2 のような(a)直列と(b)並列式とがある。前者は切れ目のある電極にそって直列に沿面放電を起させるもので、回路接続は簡単であるが、導入部近くの絶縁に注意が必要である。数mmφのテフロン管の外側に、ギャップ長2mm以下の筒型電極を並べる方式が多い。一方並列式は配線がわずらわしいが、沿面放電がないので、信頼性の高い方法である。(詳細は5節参照)

いずれにしても、予備電離光の透過率を良くするために、主電極に近く、しかも均一なガス照

射ができる位置に配置することが大切である。大型装置では、カソード側主電極をメッシュにし、その内部に予備電離用電極を設けるのは合理的である。このような方式で最大 $7 \times 7 \text{ cm}^2$ までの断面積で、均一放電が得られている¹⁾。主電極の幅が狭い時には、その側面に予備電離用ギャップを配置する。

予備電離が適当であっても、目で観察するとアーク状の不均一な放電が重畳していることが多い。放電の電流・電圧の時間変化を測ってみると、このアークは放電の終り頃に起っていることがわかる。このようなアークはレーザー発振に支障はないものの、効率を下げるだけでなく、ガスの劣化をまねく。アークの少ない放電を得ることは、レーザーの性能を向上させるキーポイントである。

3. ガス系統と劣化

この種のレーザーはガスの交換により、Table I に示したように、真空紫外から赤外に至る広い波長で使用できる。希ガス・ハライド系エキシマーレーザーでは、一般にハロゲンドナーと希ガスをHe緩衝ガス中で混合したものを使う。ハロゲンドナーの分圧は数Torrにすぎないが、非常に反応性が強いために、ガス劣化に関する諸問題は主としてここから生じる。フッ素系で

Table I. Comparison of output energy of various gas mixtures with a discharge pumped TE laser.

System (Wavelength)	Gas mixture	Output energy (a)	(b)
F ₂ (157nm)	F ₂ /He	12mJ(1W)	
ArF(193nm)	F ₂ /Ar/He	200mJ(11W)	160mJ
KrCl(222nm)	HCl/Kr/He	25mJ(2.5W)	160mJ
KrF(249nm)	F ₂ /Kr/He	250mJ(20W)	380mJ
XeBr(282nm)	HBr/Xe/He		100mJ
XeCl(308nm)	HCl/Xe/He(Ne)	160mJ(12W)	400mJ
N ₂ (337nm)	N ₂	7mJ(0.4W)	
XeF(350nm)	NF ₃ (F ₂)/Xe/He	90mJ(8W)	160mJ
N ₂ ⁺ (428nm)	N ₂ /He	2mJ(0.1W)	
CO ₂ (10600nm)	CO ₂ /N ₂ /He	1 J(30W)	

(a) Catalogue of LUMONICS, (b) R.C.Sze⁵⁾

Fig. 2 Feeding to UV preionizer. (a) Series-gap type and (b) parallel-gap type.

は F_2 (ただし, XeF では NF_3 が多少良いとされている)⁴⁰⁾, 塩素系と臭素系では HCl と HBr が使われる。 Cl_2 や Br_2 は吸収のために使用できないのに対し, 逆にフッ素系では HF は不適当である。 F_2 や HCl は大変腐食性が強く, 有毒であるので, 危険防止のため, 5~10%に He で希釈したガスが使われている。純粋の F_2 ガスの使用は避けた方がよい。

圧力調整器は必ず専用のものを使う。フッ素用のバルブ類はモネルが最上とされるが, 高価で機械的にもろいので, むしろステンレス製が使いやすい。高濃度のハロゲンガスにふれる部分のバルブは, ある程度消耗品と考えた方がよい。配管にはステンレス鋼, 銅, 場所によってはテフロン管などの有機材も使える。使用後のハロゲンガスは少量であれば, 真空ポンプの前で数ℓのソーダライム等で吸着後, 室外へ排气する。多量の場合にはアルカリ水溶液シャワーをくぐらせ, 中和した方がよい。

放電管の材料としては, ファイバーエポキシ成型材 (FRP), アクリル (Lucite, Lexan), 塩化ビニール (PVC), フッ素樹脂 (テフロン), バイレックスガラス, セラミックスなどが使用されている。有機材の中ではテフロンが最上とされるが²⁹⁾, 高価なので, テフロンコートをしたエポキシが市販品では多い。特にプラズマ (予備電離を含めて) に近い部分はテフロンを使った方が, ガスの劣化が少ない。 CO_2 や N_2 レーザーに多用されているアクリル材は, 加工性が良く便利であるが, F_2 ガスにさらすと加工時にはいったストレスのため, ひびが入りやすい。むしろ粘性がある塩化ビニールの方が, F_2 に対しては耐久性がある。工夫すれば安価な肉厚塩ビ管も使えるであろう²⁷⁾。

電極材は加工性を考えて, アルミニウムや真ちゅうのことが多いが, できればステンレス鋼の方がよい。Tennantは $XeCl$ に対しては, ニッケルを最上としている²⁹⁾。

窓材には, フッ素系の場合, CaF_2 や MgF_2 が良い。ただ, 結晶によっては使用中に色中心が生じることがある。熔融石英は曇るので, 長期

の使用には耐えない。塩素系では石英が使える。一般に短波長になるほど窓材の質や劣化はクリチカルになってゆく。

Oリングシールは, バイトン系のものならフッ素にも使える。シリコングリースは反応するので使ってはいけない。

新しくガスをシステムに導入する際には, ハロゲンに対するpassivationが重要である。これは数Torrのハロゲンを一気圧以上の He とともにつめ, 一日2・3回の入れ換えを行ないながら, 数日にわたり容器表面がハロゲンと化学的に平衡になるようにすることである。Passivationが不完全な間は, ガス交換後短時間にレーザー出力が低下する。ガス交換後2~3時間放置しても出力の著しい低下がなくなれば, 一応passivationは終わったと見てよい。同様のpassivationがハロゲンガスの種類を変える場合, レーザーを長期間使わなかったり, 管内に空気を入れた後にも必要となるが, 比較的短期間で済むことが多い。

ガスの劣化機構については, まだ系統的な研究が少ない。フッ素系ガスに関し, 劣化ガスの $IR \cdot UV$ 吸収から, NO_x , CO_2 , SiF_4 , CF_4 , NF_x , ClO_2 , F_2CO , FNO_x などの気体が同定されている^{30,31)}。また, KrF や ArF レーザーの発振線中に, O_2 , HF , C などの吸収が認められる^{8,32)}。これらの気体以外に, 固相の不純物も当然存在する。不純物生成によるレーザー出力の低下は, (1)反応によるハロゲンガスの減少と, (2)不純物による光の吸収の二面から起こると考えられる。上記の諸ガスのうち, KrF や XeF の波長で吸収を示すのは, NO_2 と ClO_2 ぐらいであるが, 予備電離はおそらく130 nm以下の短波長光で行なわれていることを考えると, その他の分子も間接的な影響はありうる。また, プラズマ中では各種の遊離基や分子イオン等が生成していると思われるので, さらに事情は複雑である。ハロゲンガス以外に, 特に O や C が劣化に寄与していることは注目される。

フッ素系のものにくらべ, $XeCl$ は劣化の少ないエキシマーとして知られ, 高速繰り返しに

は最も有力なレーザーである。筆者の経験でも、同一条件でKrFより約1桁ガス寿命が長い。これは、HClの反応性がF₂より小さいことにもよるが、 $H_2 + Cl_2$ (および他の塩化物) $\rightarrow 2HCl$ といった形で自動的にHClの生成補充が行なわれている点をあげられる³¹⁾。H₂ガスを1 Torr程度混入しておく、この種の反応を促進して、ガス寿命を延ばせる³³⁾。また、XeBrはかなり不安定なレーザーであるが、これはBr₂の生成によるもので、同様に $H_2 + Br_2 \rightarrow 2HBr$ の反応を外部促進させると、寿命が著しく延びる³⁴⁾。ただXeClでは、フッ素系よりダストが生じやすく、窓内面のよごれがはやい。このダストは、AlCl₃、FeCl₃等の金属化合物と考えられる^{29,30)}。CCl₄やSiCl₄ (液体) は発振のきまたげにはならないが³⁵⁾、同じく窓をよごす。

緩衝ガスには一般にHeを使う。XeClの場合には、Neにするとかなり出力が増大することが知られている⁴⁹⁾。エキシマーを形成する希ガスとしては、XeやKrのような高価なガスを使うので、高速繰り返し運転時にも、常時ガスを使い捨てにはできないために、上述の劣化の問題が重要性を持つてくる。30ℓ程度のガス量を持つ市販品の場合、ガス交換後数10Hzの運転での寿命は、XeClで $2 \sim 6 \times 10^6$ ショット、KrFで $3 \sim 10 \times 10^5$ ショット程度である。さらに長期的な運転には、たとえばFig. 3に示したような不純物トラップとハロゲンの補給を循環系統内で行なう方式が研究されており^{28,36,37)}、将来工業的な大型装置での劣化の問題は技術的に克服

Fig. 3 An example of gas cleanup system for excimer lasers^{28,36,37)}.

できるものと思われる。

4. 回路方式

エキシマーレーザーは媒質中にエネルギーを蓄える能力に乏しいため、大きな励起パワーが要求される。たとえば効率を1%とすれば、10 MWの出力を得るには10 GWの電気入力が必要である。また、一様放電の持続時間は普通100 ns程度であって、これ以上長い放電電流を流しても、励起には有効に利用されない。

第一近似として、主放電回路をFig. 4 (a) のようなLCR直列回路と見なそう。Cは充電コンデンサー、Lは回路の全インダクタンス、R₀は電源側損失抵抗、R_Lは放電管の等価抵抗である。R_Lは一般に0.3Ω以下の低い値をとるので、 $R = R_0 + R_L = 2\sqrt{L/C}$ という整合条件は満たされにくく、多くの装置は多少振動気味に動作しているが、整合条件に近づけるにはLをできるだけ小さくする必要がある。その時の電流の立上りは $\tau \approx 2L/R = \sqrt{LC}$ 、最大電流は $i_m \approx RCV/L = \sqrt{C/L} \cdot V$ となる。したがって τ を小さく、

Fig. 4 Circuit configuration of discharge-pumped excimer lasers. (a) First approximation of discharge circuit, (b) LC-inversion circuit, and (c) capacitor transfer circuit.

i_m を大きくする観点からも、 L は小さい程良いこと、 C を大きくするより V を大きくした方が有利なことがわかる。

E/N 値は大きいほど、緩衝ガスへの弾性衝突による損失が減少し、励起効率が高まる。ただ、放電中の E/N 値はかならずしも充電電圧とともに増加しないことに注意しよう。

種々のエキシマーレーザに使用されている回路は、Fig. 4 (b), (c)の二つの基本型に分類できる。ここで (b)をLC反転 (LC-inversion) 型、(c)を容量移行 (Capacitor transfer) 型と呼ぶことにする。

4.1 LC反転型

この方式の基本型はFig. 4 (b)で、 C_1 , C_2 を矢印の方向にDC充電後、スイッチSを閉じると、 $(2\pi\sqrt{L_1C_1})^{-1}$ なる周波数でリングングが生じ、放電管に高電圧を発生させる。この型の特長は容量移行型にくらべ、(1)装置がコンパクトに構成できること、(2)電荷移動に伴う損失がないため、本質的に高効率であること、があげられる。しかし、大型化は困難で、最大出力は0.5J以下に限られる。

代表的な試作例をTable IIにまとめた。この回路の詳細な動作特性の実測と解析がLASLでなされている^{21,42)}。それによれば、 $C_1=19\text{nF}$, $C_2=24\text{nF}$, $V=25\text{kV}$ の装置で、Fig. 5に示し

たように、スイッチ後約70nsで電圧は最大23kVに達し、主放電が開始する。放電電流は約30nsの立上りで、最大28kAに達する。インダクタンスは、 $L_1=47\text{nH}$, $L_2=17\text{nH}$ と推定されている。原理的には反転によって、2Vに近い電圧が発生するはずであるが、最大電圧はむしろ放電管の自爆電圧で定まる。電流の立上りを決めているのは L_2 で、 C_1 , C_2 の残留インダクタンスを含め、主放電回路のインダクタンスをできるだけ

Fig. 5. Temporal behaviors of a KrF laser with LC-inversion circuit. After R. C. Sze and T. R. Loree²¹⁾.

Table II. Performances of various LC-inversion excimer lasers.

C_1, C_2, V	Active volume (LXHXW)	Output (Pulse width)	Reference, Features
10, 20nF, 25kV	60X2X0.5cm ³	KrF 130mJ, XeF 65mJ, ArF 60mJ, XeCl 110mJ	38)39) First LC-inversion system
20, 32nF, 40kV	100X2.5X1.5cm ³	KrF 300mJ(70ns), XeF 180mJ(40ns)	40) Typical LC-inversion system
20, 36nF, 40kV	80X(3-4.5)cm ²	KrF 450mJ(40ns)	20) 750mJ by additional amp.
38, 38nF, 40kV	72X2.4X0.5cm ³	KrF 280mJ(500mJ at 59kV charge)	26) Corona PI, Coaxial cables
46nF total, 30kV	60X2X1cm ³	KrF 230mJ, XeF 110mJ, ArF 130mJ	25) Corona PI
41, 67nF 50kV	80X4X0.8cm ³	KrF 600mJ	41) Pulse charge, Rail gap
7.8, 18.8nF 42kV	76X2X.5cm ³	XeCl(Ne buf.) 400mJ(1.7%efficiency)	16) Flat Blumlein type, High eff.

小さく設計することが重要である。

C_1 , C_2 には通常1個当り0.5~3 nFの容量を持つ, 'doorknob' 型磁器コンデンサーを複数個放電電極にそって並べる。スイッチSにはトリガースパークギャップや, 水素サイラトロンが使われる。前者は安価で, 自作も可能であるが, トリガージッターが大きい。スイッチは放電電圧の立上りに影響するだけでなく, 高速繰り返し動作時には, 入力容量や寿命を左右する重要な素子である。なお, スwitchが完全なら $C_1 = C_2$ が最適と考えられるが, 実験的に最適点を求めると $C_1 < C_2$ になるのが普通である。

C_1 , C_2 はDC充電が普通であるが, パルス充電を行なった例もある⁴¹⁾。その際, スwitchのインダクタンスを小さくするため, 自爆式のレーलगャップを用い, KrFで0.6Jを得ている。

一方, C_1 , C_2 としてマイラーシートやプリント配線用のエポキシ板による平板伝送線を使うと, いわゆるBlumlein回路となる。この方式では非常に速い立上りの放電(10ns以下)が容易に得られるが, 絶縁耐力において信頼性に欠けること, 大型化がさらに困難なことのために, N₂レーザーにおける程の有用性はない。しかし, 1.7%という高い効率で0.4J (XeCl)の出力が得られたという報告もある¹⁶⁾。特性インピーダンスが低いのも高効率の原因になっている。また我々は, 放電長を26cmに小型化した装置で, パルス幅2 nsの短パルス発振を得た⁴³⁾。

この他, 水コンデンサーや⁴⁴⁾, 同軸ケーブル²⁶⁾でBlumlein回路を構成した例もある。

4.2 容量移行型

この方式の基本回路はFig.4 (c)で, DC充電された C_1 の電荷を, スwitchSを閉じることにより C_2 へ移動させ, 主放電を自爆的に起こさせる。つまり, C_2 のパルス充電方式と見なすこともできる。 C_2 はdumping capacitorとか peaking capacitorとか呼ばれている。

代表的な試作例をTable IIIにまとめた。 C_2 としては, 回路インダクタンス L_2 をできるだけ小さくするために, 前述の磁器コンデンサーを用いたものが多い。それに対し, L_1 の方は制限がゆるいので, C_1 としてかなり大型のコンデンサーが使えるために, 装置の大型化がはかりやすい点がこの型の特長である。その際, Fig. 6 (a)のように, 磁器キャパシター C_2 を放電管の中に配置するのは, L_2 を小さくするのに有効だけでなく, 各磁器コンデンサーに小ギャップを設け, 電荷移行時に生じるアークで予備電離を行なうことができる^{46,54)}。その結果, 予備電離が自動的にかかるので, 合理的な方法である。

大型化をはかるには C_1 の容量をふやすより, 充電電圧を高めた方がよい。しかし, 50kV以上のDC充電やスイッチングは困難が多いので, それ以上はマルクス回路(Marx-bank generator)が広く使われている。これは並列にDC

Table III. Performances of various excimer lasers with capacitor transfer circuit.

C_1, C_2, V	Active volume (LXHXW)	Output (Pulse width)	Reference, Features
(10J)	100X1.2cm ²	XeF 7 mJ(10ns)	45) First capacitor transfer sytem
200,55nF,50kV	160X6X1cm ³	XeCl 500mJ(30ns)	46) Automatic PI
60,28nF, 50kV	55X2.5X1.6cm ³	KrF 500mJ,ArF 280mJ,XeF 250mJ	27) Corona PI
55,33nF, 30kV	77X2X0.76cm ³	KrF 270mJ(single shot)200W/1kHz	2) Cables, High average power
40nF(2-M)*14nF,30kV	120X2X0.6cm ³	KrF 380mJ, ArF(160mJ),XeCl(Ne)400mJ	5)47-49) Cables,Marx-bank
81nF(3-M),35nF,40kV	92X4X1cm ³	KrF 0.9J, XeCl(Ne)0.66J	18)19) Marx-bank
220nF(3-M),178nF,42kV	70X5X5cm ³	XeCl(Ne) 2.6J	50) Large aperture tube, Rail gap
(200nF) PFL 100kV	60X2.4X2.5cm ³	KrF 0.88J	51) First water-PFL, Surface gap
220nF(4-M)PFL 40kV	92X4X2.3cm ³	XeCl(Ne) 2.6J	52)53) Marx-bank, Double water-PFL
80 or 200nF(2-M) PFL (1.7kJ)	82X7X7cm ³	XeCl(Ne) 13.8J, (He) 9.3J KrF 5J(60ns)	1) Largest output, large aperture Double water-PFL, rail gap

*2-M means 2-stage Marx-bank generator. Capacitance and voltage are values per stage.

Fig. 6 (a) Capacitor transfer circuit with auto-matrical preionization scheme, (b) single water-PFL circuit with surface gap, and (c) scalable double water-PFL circuit with rail gap and Marx-bank circuit.

充電した n 個のコンデンサーを、 n 個のギャップスイッチで瞬時に直列につなぎかえ、その n 倍の電圧を発生させる装置である。3 段のマルクス回路（各段当り 220 nF, 42 kV 充電）で、 $C_2 = 178$ nF の磁器コンデンサーをドライブし、最大 2.6 J (XeCl) の出力が得られている⁵⁰⁾。我々は、このタイプのレーザーの詳細な解析を行っている^{18,19)}。

C_2 として同軸ケーブルや^{2,47-49)}、平板マイラーコンデンサー⁵¹⁾を用いたものもある。こういった分布定数型の波形整形回路 (pulse forming line, PFL) をもつタイプの中で、水を絶縁体とする平板 PFL は最も scalability に富み、water line 型とも呼ばれている。この方式の原型は Tayler らによって開発されたもので、Fig.

6 (b) のようなものである⁵¹⁾。放電管と PFL の間のギャップは、多チャンネルの自爆型沿面放電を行なう surface gap⁵⁶⁾ で、PFL の充電電圧を高め、その蓄積エネルギーを増加させるためのもので、大型装置には不可欠のものとなっている。その後 Fig. 6 (c) のように、(1) C_1 のマルクス回路化、(2) PFL の二重化、(3) レールギャップの採用などの改良がほどこされて、大型化へ向った^{57,58)}。渡辺らは最近、この方式により 7×7 cm の大断面積で一様な放電を得て、XeCl で最大 13.6 J の発振を得た¹⁾。この種の大型装置では、Ne を緩衝ガスとする XeCl レーザーが KrF より出力が大きく、空間的にも時間的にも均一性の良い放電が得られている。このように、高圧回路の大容量化と同時に、大体積における一様放電の技術が高出力を得るためには重要である。

10 J 以上の出力を得るには、1 kJ を越えるエネルギーを PFL に蓄え、100 ns 以内に放電せねばならない。幅 a 、長さ b 、厚さ l の平板 PFL に誘電率 ϵ 、絶縁耐力 α の誘電体を満たすとき、蓄えうる最大エネルギーは $E_{\max} = (1/2) \epsilon a b l \alpha^2$ で、整合条件 $Z_0 = 377 l a^{-1} \epsilon^{-\frac{1}{2}} = R$ が満たされた場合には、 $\tau_p = 2 \epsilon^{\frac{1}{2}} b c_0^{-1}$ の幅を持った方形波電流が得られる。もし二重 PFL 構造にすると、 $E_{\max}$ は 2 倍、 Z_0 は半分にすることができる。水は比誘電率が 80 と大きく、 α は電界の不均一性を考慮しても 100 kV/cm ぐらいまで使えるので、エネルギー蓄積能力が優れている。たとえば $a = b = 1$ m, $l = 2$ cm の二重 PFL に 200 kV まで充電ができるとすれば、 $E_{\max} = 1.4$ kJ, $Z_0 = 0.42 \Omega$ および $\tau_p = 60$ ns となり、上述の条件をほぼ満たせる。200 kV の充電を得るには、低インダクタンスのレールギャップが重要な働きをしていることに注意したい。なお、PFL 用の水は 10 M Ω cm 以上の固有抵抗が保たれるように、イオン交換樹脂中を常時ゆっくり循環させておく程度で良い。

5. 小型エキシマレーザー試作の実例

最後に、エキシマレーザーを研究室で安価

に試作しようと計画されている方々に、比較的失敗の少ない、出力100 mJ級のレーザーの実例を示す。初めて作る場合に勧められる回路方式は、ここで紹介するLC反転型か、Fig. 6 (a)に示したような自動予備電離の容量移行型であろう。試作したレーザーは繰り返しやガス寿命の点で市販品のレベルに達しないが、従来の N_2 レーザーより出力が約1けた大きい。我々のところで、過去4年間にわたり多少の改良を加えながら、大気観測用レーザーレーダーとして使ってきたもので⁵⁹⁾、長期の使用に耐えている。

5.1 装置の概要

Fig. 7～9に外観、回路およびレーザー放電管とトリガーギャップの断面図を示す。基本的

Fig. 7 Construction of XeCl laser with LC-inversion circuit.

Fig. 8 Circuit and gas system of XeCl laser.
 $C_1=20\text{ nF}$, $C_2=32\text{ nF}$, $C_3=8\text{ nF}$, $C_4=C_5=1\text{ nF}$, $R_1=R_3=R_4=100\text{ k}\Omega$, and $R_2=R_5=200\text{ k}\Omega$. T: stepup transformer (700 V/30 kV).

にはBurnhumによるオリジナルの装置^{38,39)}や文献21), 42)と類似しているの、合わせて参照されたい。我々のレーザーはXeCl専用で作られたものであるが、放電管材や窓材等3節で述べた点に注意して設計すれば、フッ素系のArF・KrF・XeFでも50～150 mJの出力が期待できる。ただ、ガスの取扱いや寿命の点を考えれば、XeClを使った方がずっと楽である。

レーザー放電管は厚さ2 cmの透明アクリル板をエポキシ系接着材(Araldite standard, いわゆるアクリル用接着材より使いやすい)で合わせ合わせたもので、6 mmφのネジで少なくとも5 cmおきに留めて強度を持たせ、ガス圧3 atm以下で使用している。放電管の断面の決定

(Fig. 9 (a))にあたって重要なことは、所定の場所以外で一切放電が起らないように電極を配置することである。特に内壁での沿面放電、予備電離用電極と主電極間の放電を避けねばならない。沿面放電は、UV照射された面では意外に延びるものである。予備電離はFig. 2 (b)の並列方式を採ったが、これは(a)より絶縁が楽である。主電極の片側にビスの頭を利用したギャップ長3 mm, 45個の小電極を付けた。配線にはケーブルでなく、単線を使っているが、バラスト抵抗なしに一樣な放電をしている。放電管は全長105 cm, 主電極は長さ92 cm, ギャップ長24 cmである。直径20 cmのステンレス丸棒を一応Chang型プロファイルに修正してあるが¹⁷⁾、放電の横幅が5～7 mmと狭いので、丸棒のままでも使えるのではないと思われる。ただし、電極両端はアークが発生しやすいので、必ず適当なカーブで丸めておく。主電極のfeed throughは6 mmφのリングシールされたネジ19本でなされている。窓は直径40 mm, 厚さ10 mmの熔融石英パラレルである。共振器の出力側はこのパラレルの反射を使い、他方は窓の外面に多層膜コートした鏡で、リングの弾力で平行を合わせている。利得がかなり大きいので(5～10% cm^{-1})、このような低い反射率の方が良い。しかし、 N_2 レーザーと違い、共振器は必要である。リングシールはバイトンを使った。

Fig.9 Cross-sectional views of (a) laser discharge tube and (b) triggered spark gap.

$C_{1\sim 5}$ は2 nF (30kVWV) のチタン酸バリウム系コンデンサー (村田製) をユニットとして使った。 $R_{1\sim 5}$ は小型のソリッド抵抗を数個直列にした。 C_1, C_2, S_1 はインダクタンスを小さくするため、できるだけ放電管の近くに配置する。二つのスイッチ S_1, S_2 はFig.9 (b) のような自製のスパークギャップである。予備放電と主放電の間の遅延は、電子的な遅延回路で行なうと、強度の放電雑音で誤動作しやすく、トラブルの主要原因となる。それで、Fig.8に示したように、 S_2 のスイッチ電圧を S_1 のピンに導き、両者を連動させた。その結果、遅延時間は実測によれば約400 nsに固定される。 S_1 のジッターが大きいと、この時間が大幅に変動し、動作の不安定や発振停止の原因になる。トリガージッターを減少するには、一般にピン側有孔電極とピン電極にかかる電圧は、相手側電極より高い極性にするのが良いとされている。またFig.9 (b) のように、有孔電極の孔の径は比較的大きく ($\sim 6 \text{ mm}\phi$)、しかも先をとがらせた方がよい。ピン電極は市販の自動車用プラグである。乾燥した空気または N_2 ガスをつめ、その圧力を1～3 atmの間で調整して、安定した遅延が得られるようにする。 S_1 は2～3万ショット毎に分解して掃除しなければならないので、

交換の容易な構造にしておく。10万ショットを越えると、ピン電極や有孔電極のエッジが消耗して、電極を取り換えねばならない。電極材はステンレス鋼または真ちゅうである。W合金のエルコナイトも試用したが、著しい寿命の延長は見られなかった。ケースは熱に弱いので、塩化ビニールよりアクリルが良い。

ガスは静的な封じ切り動作である。配管は6 mmφ のステンレス鋼または銅管を使い、ガスの混合はレーザー管の中で行なっている。 HCl は1 l, 1 atmのガラスアンブル入り (高千穂商事) を使っている。これは安全であるが、濃度が100 %なので、微量混入する際誤差が多い。そのため1 lのバラストチェンバーとバルブ B (Fig.8) を使い、圧力を拡大して読んでいる。

5.2 動作特性

Fig.10に $\text{HCl}:\text{Xe}:\text{He}=3.5:15:2280$ において、波長308 nmでXeCl レーザー動作させた時のガス圧(a)と充電電圧(b)に対するレーザー出力エネルギーの変化を示す。電源電圧は少なくとも25 kV 以上ないと十分な性能が発揮できない。(40 kVまで使えるよう設計すれば、300 mJ以上の出力も期待できる。) ^{20,40)} 26 kVでの効率は0.4%、パルス幅は20 ns FWHMであった。

Fig. 10 Output energy of fabricated XeCl laser as a function of (a) total gas pressure (at 26 kV), and (b) charging voltage (at 3 atm).

一方、本機に50 Torrの N_2 ガスをつめ、 N_2 レーザーとして動作させた時の出力は約5 mJ (15 ns)であった。

くり返し動作は5 Hzを標準としているが、10 Hzではかなり出力が低下するので、ガスの循環やかきまぜが必要なのかもしれない。6 Hzの繰り返しで6000ショット後、出力の低下は約40%であった。ガスの全量は3.4 lである。市販のレーザーでは公称 $6 \sim 20 \times 10^5$ ショット/lであるから、かなり差がある。フッ素系で使用すると、経験によれば約1けた劣化が速いので、ガスの容量をもっと大きくしないと、速い繰り返しでは使いにくいのではなかろうか。

長期的なメンテナンスとして問題になるのは、先に述べたトリガーギャップの他に、ダストの生成による窓の汚れがある。XeClの場合、アルミニウム電極は特にダストを出しやすいように思える。そのため、時々窓をはずして、内側をふく必要がある。窓の汚れを考慮すると、長期にわたって安定に取り出し得る出力は、Fig. 10の5～6割ぐらいと見ておいた方がよい。ガス循環系を持った装置では、ダストは容易にフィルターで除けるであろう。また窓の汚れに対し、gas flashingも使われる²⁹⁾。

6. むすび

実用的な紫外線パルスレーザーとして着実な発展を見せている、UV予備電離放電励起希ガスハライドエキシマーレーザーについて、その装置製作技術を中心に解説してきたが、エキシマーレーザーによって紫外部の光子が豊富に、しかも安価に供給できるようになることは、産業的に見ても非常に魅力あることと考えられる。したがって今後は、レーザー装置としての洗練を加えつつ、特に平均パワーにおいてさらに高出力化へ向うものと予想される。1 kW級のエキシマーレーザーは、近い将来に実用的な形で実現できるであろう。

その際、技術的な問題点は、以上の考察でも明らかなように、(1)不純物生成や腐食の問題と、(2)高圧スイッチの耐久性にあるものと思われる。前者に関しては、材料の十分な吟味と、高性能のガスクリーンアップシステムの開発によって、少なくとも工業的な大型装置では恐らく克服できるものと、筆者は楽観している。スイッチの方は大容量化のネックになるので、もっと徹底した開発研究が望まれる。

エキシマーレーザーの基礎的研究は我国においても盛んであるが、工業的視野での高出力・高性能エキシマーレーザーの開発研究に欠けて

いるので、今後その方面での研究が活発になるように願っている。

参 考 文 献

- 1) S. Watanabe and A. Endo: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 799.
- 2) T. S. Fahlen: IEEE J. Quant. Elec. **QE-16** (1980) 1260.
- 3) C. K. Rhodes, ed.: *Excimer Lasers*, Topics in Appl. Phys. Vol. 30 (Springer-Verlag, 1979).
- 4) M. Rokni, J. A. Magnago, J. H. Jacob and J. C. Hsia: IEEE J. Quant. Elec. **QE-14** (1978) 464.
- 5) R. C. Sze: IEEE J. Quant. Elec. **QE-12** (1979) 1338.
- 6) 渡辺・柏木: 応用物理 **46** (1977) 978.
- 7) 渡辺・柏木: レーザー研究 **6** (1978) 134.
- 8) 島内: レーザー研究 **8** (1978) 875.
- 9) P. Burkhard, T. Gerber and W. Lüthy: Appl. Phys. Lett. **39** (1981) 19.
- 10) A. J. Mendelsohn, R. Normandin, S. E. Harris and J. F. Young: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 603.
- 11) P. J. K. Wisoff, A. J. Mendelsohn, S. E. Harris and J. F. Young: IEEE J. Quant. Elec. **QE-18** (1982) 1839.
- 12) C. P. Christensen and R. W. Waynant: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 794.
- 13) S. Sumida, M. Obara and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 913.
- 14) S. Lin and J. I. Levatter: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 505.
- 15) S. Lin, Z. Bao, G. Gong, Y. Huo, J. Shu, S. Tang, Y. Wei and C. Zheng: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 328.
- 16) J. Chen, S. Fu and M. Liu: Appl. Phys. Lett. **37** (1980) 883.
- 17) T. Y. Chang: Rev. Sci. Instr. **44** (1973) 405.
- 18) 水波・前田・内野・下村・宮副: レーザー研究 **9** (1981) 527.
- 19) M. Maeda, A. Takahashi, T. Mizunami and Y. Miyazoe: Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 1161.
- 20) S. Watanabe, S. Shiratori, T. Sato and H. Kashiwagi: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 141.
- 21) R. C. Sze and T. R. Loree: IEEE J. Quant. Elec. **QE-14** (1978) 944.
- 22) J. Hsia: Appl. Phys. Lett. **30** (1977) 101.
- 23) 住田・鍋木・小原・藤岡: レーザー研究 **7** (1979) 297.
- 24) S. Sumida, K. Kunitomo, M. Kaburagi, M. Obara and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **52** (1981) 2682.
- 25) V. Hasson and H. M. Bergmann: Rev. Sci. Instr. **50** (1979) 1542.
- 26) T. S. Fahlen: IEEE J. Quant. Elec. **QE-15** (1979) 311.
- 27) E. Armandillo, F. Bonanni and G. Grasso: Opt. Comm. **42** (1982) 63.
- 28) D. E. Rothe and R. A. Gibson: Opt. Comm. **22** (1977) 265.
- 29) R. Tennant: Laser Focus, Oct. (1981) 65.
- 30) M. C. Gower, A. J. Kearsley and C. E. Webb: IEEE J. Quant. Elec. **QE-16** (1980) 231.
- 31) J. H. Brannon: IEEE J. Quant. Elec. **QE-18** (1982) 1302.
- 32) M. Shimauchi, T. Miura and S. Karasawa: J. Chem. Phys. **71** (1979) 3538.
- 33) T. J. McKee, D. J. James, W. S. Nip, R. W. Weeks and C. Willis: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 943.
- 34) G. Balog, R. K. Sander and E. Seegmiller: Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 727.
- 35) R. Salimbeni, M. Matera, M. Vannini and R. Burlamacchi: Opt. Comm. **39** (1981) 75.
- 36) P. M. Johnson, N. Keller and R. E. Turner: Appl. Phys. Lett. **32** (1978) 291.
- 37) R. C. Sze and E. Seegmiller: IEEE J. Quant. Elec. **QE-17** (1981) 81.
- 38) R. Burnham and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **29** (1976) 707.
- 39) R. Burnham: Opt. Comm. **24** (1978) 161.
- 40) D. E. Rothe and R. A. Gibson: Opt. Comm. **24** (1977) 265.
- 41) K. Kunitomo, M. Kaburagi, S. Sumida, M. Obara and T. Fujioka: J. Phys. E **15** (1982) 689.
- 42) A. Greene and C. A. Brau: IEEE J. Quant. Elec. **QE-14** (1978) 951.
- 43) T. Mizunami, M. Maeda and Y. Miyazoe: Jpn. J. Appl. Phys. **20** (1981) 1763.
- 44) J. I. Levatter and R. S. Bradford, Jr.: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 742.
- 45) R. Burnham, N. M. Harris and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **28** (1976) 86.
- 46) A. J. Kearsley, A. J. Andrews and C. E. Webb: Opt. Comm. **31** (1979) 181.
- 47) R. C. Sze and P. B. Scott: Rev. Sci. Instr. **49** (1978) 772.
- 48) R. C. Sze and P. B. Scott: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 419.
- 49) R. C. Sze: J. Appl. Phys. **50** (1979) 4596.
- 50) T. Hazama and T. Sato: *Tec. Digest Keio-Riken Symp. on High Eff. Gas Lasers* (May, 1982).
- 51) R. S. Taylor, W. J. Sarjeant, A. J. Alcock and K. E. Leopold: Opt. Comm. **25** (1978) 231.
- 52) M. Maeda, T. Nishitarumizu and Y. Miyazoe: Jpn. J. Appl. Phys. **20** (1981) 129.
- 53) M. Maeda, T. Mizunami, A. Sato, A. Takahashi and Y. Miyazoe: Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 1784.
- 54) T. J. McKee, J. Banic, A. Jares and B. P. Stoicheff: IEEE J. Quant. Elec. **QE-15** (1979) 332.
- 55) O. Uchino, M. Maeda, J. Kohnno, T. Shibata, C. Nagasawa and M. Hirono: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 807.
- 56) W. J. Sarjeant, A. J. Alcock and K. E. Leopold: IEEE J. Quant. Elec. **QE-14** (1978) 177.
- 57) S. Lin and J. I. Levatter: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 505.

58) J. I. Levatter and S. Lin: J. Appl. Phys. **51** (1980) 210.

59) O. Uchino, M. Maeda, T. Shibata, M. Hirono and M. Fujiwara: Appl. Opt. **19** (1980) 4175.