

自動予備電離方式を用いた小型繰返し
He,Ne/Ar/XeClエキシマレーザの試作研究

(課題番号 59850063)

昭和60年度科学研究費補助金(試験研究(1))

研究成果報告書

昭和61年3月

研究代表者

後藤俊夫

(名古屋大学工学部)

はしがき

本報告書は試験研究(1)「自動予備電離方式を用いた小型繰返しHe/Ar/XeClエキシマレーザの試作研究」に関して、昭和59年度から60年度までの2年間に得られた研究成果をまとめたものである。本研究では、いろいろな混合希釈ガスを用いたXeClエキシマレーザの特性を系統的に調べ、自動予備電離方式や電極構造などの改良を重ねることによって、最適化された小型で安定なXeClエキシマレーザ装置を試作することができた。

研究組織

研究代表者 後藤俊夫 (名古屋大学工学部助教授)
研究分担者 山部長兵衛 (名古屋大学工学部助教授)
" 後藤達美 (東芝生産技術研究所主任研究員)
" 佐藤三郎 (東芝生産技術研究所研究員)

研究経費

| | |
|--------|---------|
| 昭和59年度 | 2,000千円 |
| 昭和60年度 | 1,100千円 |
| 計 | 3,100千円 |

研究発表

(1) 学会誌等

- (i) M. Hiramatsu, T. Goto, S. Hattori and C. Yamabe
"Improved performance of discharge-pumped XeCl laser using Ar/He diluent" Jpn. J. Appl. Phys., Vol.23, No.9, September 1984.
- (ii) M. Hiramatsu and T. Goto
"Efficient and low-pressure operation of a discharge-pumped XeCl laser using Ne/Ar diluent" Phys. Lett., Vol.112A, No.8, November 1985.
- (iii) M. Hiramatsu and T. Goto
"Compact and reliable discharge-pumped XeCl laser with automatic preionization" Rev. Sci. Instrum., Vol.57, No.4, April 1986.
- (iv) M. Hiramatsu, H. Furuhashi and T. Goto
"Determination of electron density in a discharge-pumped XeCl laser using Stark broadening of $H\beta$ line" to be published.

(2) 口頭発表

- (i) 平松、後藤、服部、山部
「放電励起XeClレーザーにおける回路パラメータの寿命に対する影響」
応用物理学会連合講演会 昭和59年10月
- (ii) 平松、後藤、服部、山部
「Ar/Ne混合希釈による放電励起XeClレーザーの出力特性」
電気学会東海支部連合大会 昭和59年11月
- (iii) 平松、後藤
「Ne/Ar混合希釈による放電励起XeClレーザー」
応用物理学会連合講演会 昭和60年 4月

(iv) 平松、稲葉、後藤

「小型の自動予備電離放電励起Ne/Ar希釈XeClレーザー」

応用物理学会連合講演会 昭和60年11月

(v) 平松、後藤

「小型で安定な自動予備電離放電励起XeClレーザー」

電気学会プラズマ研究会 昭和61年 3月

(vi) 平松、古橋、後藤

「シュタルク法を用いた自動予備電離XeClレーザー放電中の電子密度測定」

電気学会プラズマ研究会 昭和61年 3月

研究成果

1. 研究の目的と概要

希ガスハロゲンエキシマレーザーは紫外領域で大きなパルスレーザー出力が得られ、材料プロセス、同位体分離、周波数可変レーザーなどの光源として利用されつつある。その中で放電励起XeClエキシマレーザー(308nm)は他のエキシマレーザーより安定で寿命が長く、実用的な紫外励起光源として注目されてきた。

従来このXeClエキシマレーザーの実用化研究は単一ガス希釈のものに限られていたが、^{1, 2, 3)} 研究代表者は56, 57年度に文部省科学研究費(一般研究C)の助成を受けて、自動予備電離方式を用いた放電励起XeClレーザーの研究を行い、He/Ar混合希釈ガスXeClレーザーは、⁴⁾ He, NeまたはAr単一希釈ガスXeClレーザーより次の点で優れていることを見出した。

出力 : HeまたはAr単一ガス希釈の場合より大きい。

最適圧力: 約2気圧で、Ne希釈の場合より低く、扱い易い。

寿命 : Ar希釈の場合より長く、He希釈の場合に近い。

即ち、低圧力、比較的高出力で長寿命、使用ガスが安価という特徴を備えている。このように混合希釈ガスを用いると、実用的見地からも有用なレーザー装置を製作することができる可能性がある。

本試験研究は、上記の研究成果を基に計画されたものであり、その目的は、He/Ar混合希釈を含むいろいろな混合希釈ガスXeClエキシマレーザーの特性を系統的に調べ、電極構造、材料、その他の装置的改良を重ねることによって、小型で安定な混合希釈XeClエキシマレーザー装置を試作することであった。この目的を達成するために、次の順序で研究を行ってきた。(i)ガラス製のレーザー管を用いて、He/Ar/XeClエキシマレーザーの動作特性を詳細に調べた。(ii)更に、Ne/Ar混合希釈ガスを用いたXeClエキシマレーザーの出力特性を調べ、最適な混合ガス、圧力条件を見出した。(iii)次いでレーザー装置の材料及び構造を大幅に改良し、スパークギャップスイッチとレーザーヘッドが一体となった小型で扱い易い装置を設計製作した。そして自動予備電離方式、回路パラメータ等を変化させてレーザー装置の動作特性を調べ、最適設計条件を決定した。(iv)以上の結果を基に、小型で安定な混合希釈XeClエキシマレーザー装置を試作した。これらの成果は2, 3, 4節で詳しく説明する。

本研究により、実験室レベルでは十分使用可能な混合希釈XeClエキシマレーザ装置を試作することができ、当初の計画を達成することができた。

2. Ar/He混合希釈ガスを用いた放電励起XeClレーザの動作特性⁵⁾

ここでは一般研究(C)でその出力特性の概要が調べられたAr/He/XeClレーザの動作特性を詳細に研究した。以下その結果について述べる。

2.1 実験装置

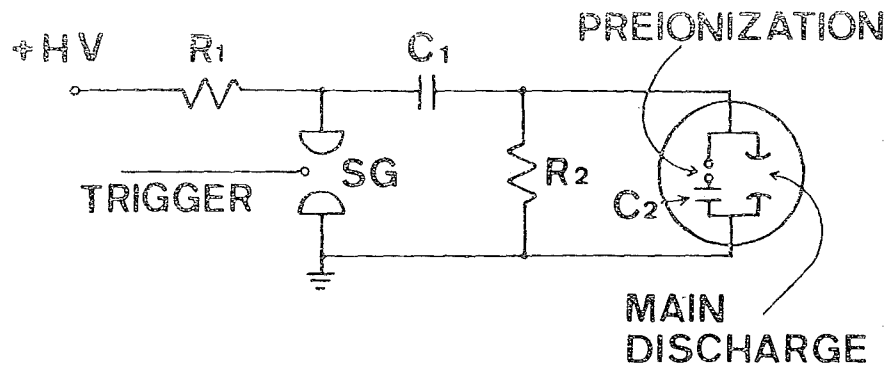
第1図(a)は用いた自動予備電離型横型放電励起XeClレーザ⁶⁾の励起回路の概略図である。外部回路はスパークギャップスイッチ、コンデンサ及び抵抗から成る。外部コンデンサバンクC₁は容量10nFのコンデンサ7個から成り(全容量70nF)、20kVまで充電される。内部コンデンサバンクC₂は容量1.7nFのドアノブ型セラミックコンデンサ16個から成っている(全容量27.2nF)。

第1図(b)は、内径15.3cm、長さ50cmのバイレックスレーザ管の断面を示している。アルミ電極は幅1cm、長さ40cm、電極間隔は0.9cmである。内部コンデンサバンクを構成する16個のセラミックコンデンサは直接アノードプレートに接続されている。アノードプレートとカソードプレートは4本のアクリル棒で支えられている。各セラミックコンデンサの上端に取り付けられたアルミニウムピンとカソードプレートに取り付けられたピンの間隔は2mmで、この小さなギャップは予備電離のために用いられる。外部回路素子は低インダクタンス銅ストリップラインで接続されている。スパークギャップスイッチはN₂ガスを封入し、トリガー回路で発生させた高圧パルスを加えることによって、高速で導通状態に入るようになっている。

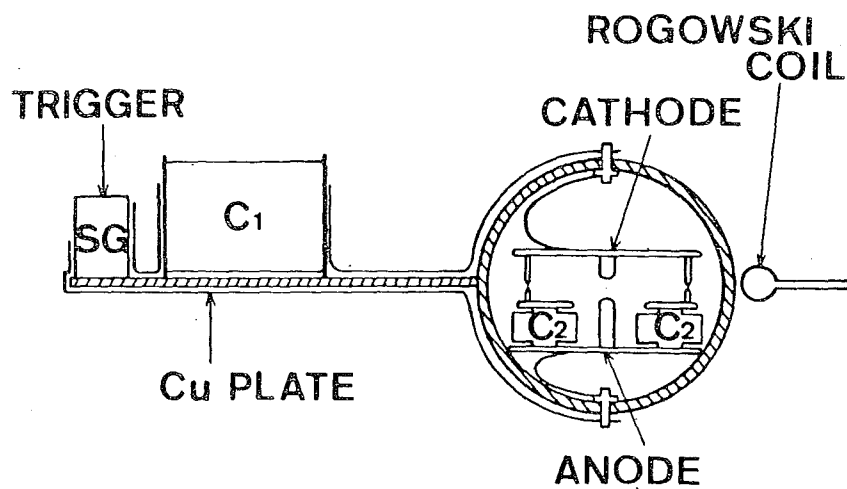
光学系は60cmだけ隔てて置かれた反射率100%の誘電体反射鏡とレーザ管の石英ガラス窓から構成されている。この光学系はHe-Neレーザを用いて調整され、更に発振後レーザ出力が最大になるまで再調整された。

ガス供給系はAr、He、Xe、HClなどのボンベと、それらのガスを減圧し混合する部分から成っている。この系を用いて任意の全圧力及び混合比でガスを混合し、レーザ管に供給する。

よく知られているように、希ガスハライドエキシマレーザの場合は、最初に十分なパッ



(a)



(b)

第1図 自動予備電離型放電励起XeClレーザー装置の概略図。

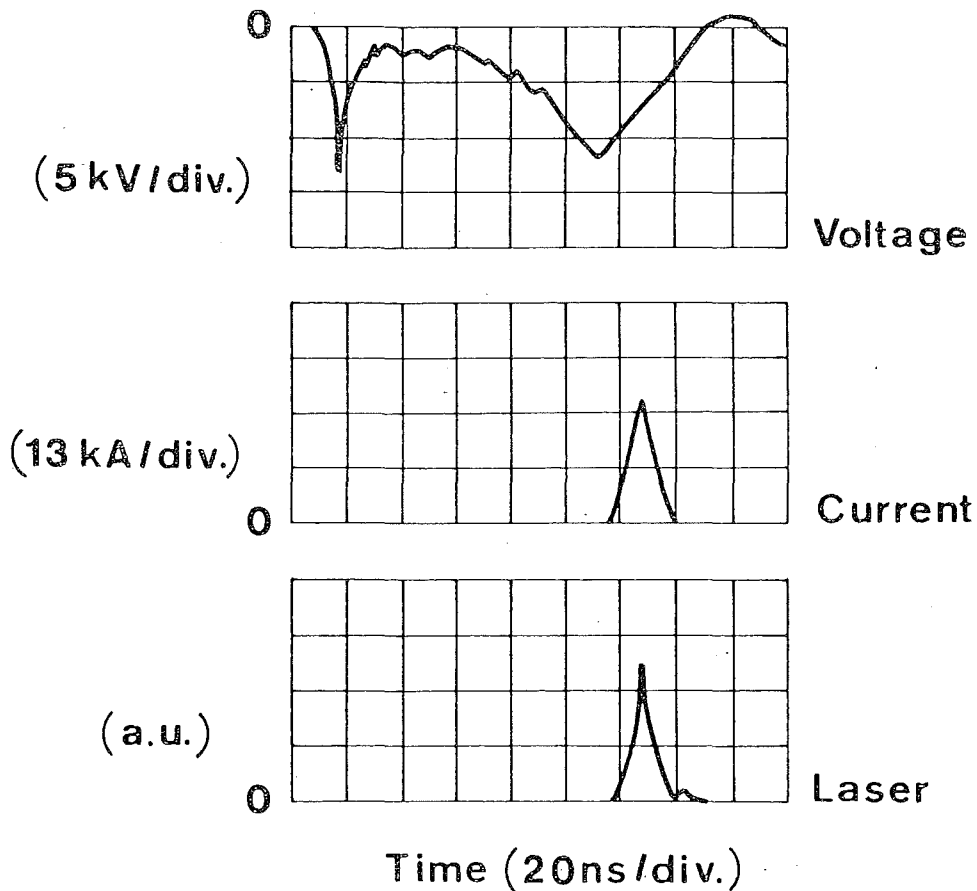
(a)レーザー励起回路 $R_1=1M\Omega$ 、 $R_2=2K\Omega$ 、 $C_1=70nF$ 、 $C_2=1.7\times 16=27.2nF$ 、

SG:スパークギャップ。(b)レーザー管の断面図。

シベーションを行わないと、レーザー発振が得られなかったり、短時間でレーザー出力が低下したりする。それゆえここでも最初にHClを少し多めに混合させてパッシベーションを行い、レーザー出力が安定した後で測定を行った。

2.2 動作特性の測定結果及び考察

第2図は自動予備電離He/XeClレーザーの電圧、電流及びレーザーパルスの代表的な波形を示している。全圧力は1.5気圧、混合比はHe 98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%である。放電電極間の電圧はCuSO₄電圧分割器で、放電電流は主放電から13cmだけ離れた位置に置かれたロゴスキーコイルで測定された。レーザーパルスはバイブラナ光電管を使って観測された。第2図から予備電離開始後約95 nsで電極間の電圧は絶縁破壊値に達して急激に零に落ち、この領域で電流が流れて、レーザーパルスが得られることがわかる。He/XeClレーザーパルスの半値幅は約8 nsで、Heの代わりにAr又はAr/Heが希釈ガスとして用いられても、レーザーパルス波形に大きな変化はなかった。この系において、レーザーパル



第2図 自動予備電離型He/XeClレーザーの電圧、電流、レーザーパルスの波形。

全圧力は1.5気圧、混合比はHe 98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%、コンデンサC₁の充電電圧は14.4kVである。

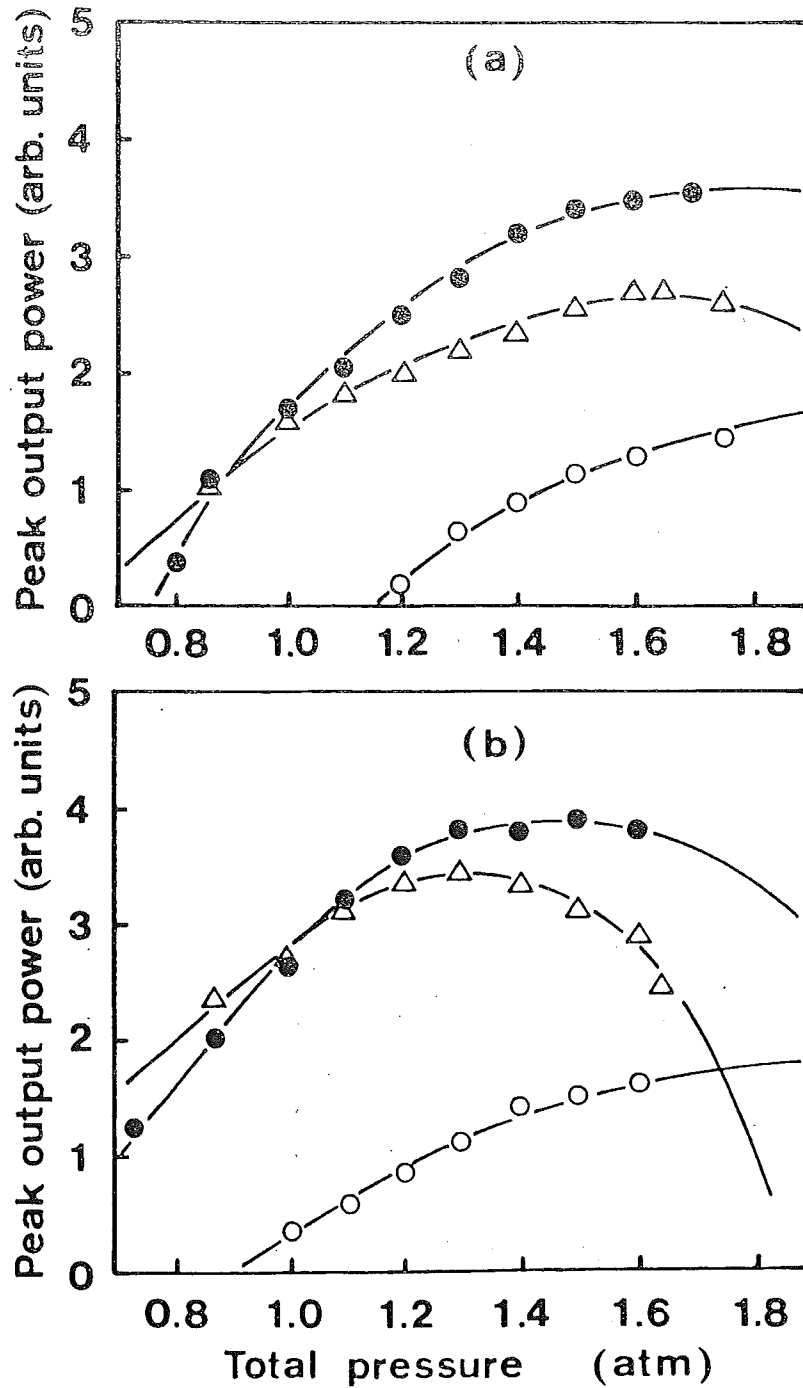
スのショット毎の再現性は非常に良く、1000ショット以上にわたって同一の波形が得られた。

第3図(a)及び(b)は、3種類の混合ガスAr/He/Xe/HCl、Ar/Xe/HCl、He/Xe/HClにおけるXeClレーザーピーク出力の全圧力依存性を示している。外部コンデンサバンクC₁の充電電圧は14.4kVである。第3図(a)では、希釈ガス(Ar/He、Ar又はHe)、Xe、HClの混合比は98.5%：1.3%：0.2%で、He希釈の場合の最適混合比になっている。測定した圧力範囲では、Ar/He希釈とAr希釈のレーザーピーク出力は1.6気圧程度で飽和するが、He希釈のそれは圧力と共に増加する。0.9~1.8気圧の範囲では、Ar/He希釈レーザーが最も大きな出力を示す。一方第3図(b)では、希釈ガス、Xe、HClの混合比は95.9%：3.8%：0.3%で、Ar希釈の場合の最適混合比に成っている。第3図(a)と比べて、XeとHClの混合比はいくらか大きく、レーザー発振のための全圧力のしきい値は低い。レーザーピーク出力は1.3~1.5気圧で飽和する。Ar希釈の場合、1.3気圧以上の領域でレーザーピーク出力が減少するのは、放電中にアークが生じ、レーザー発振が不安定になることによるとと思われる。

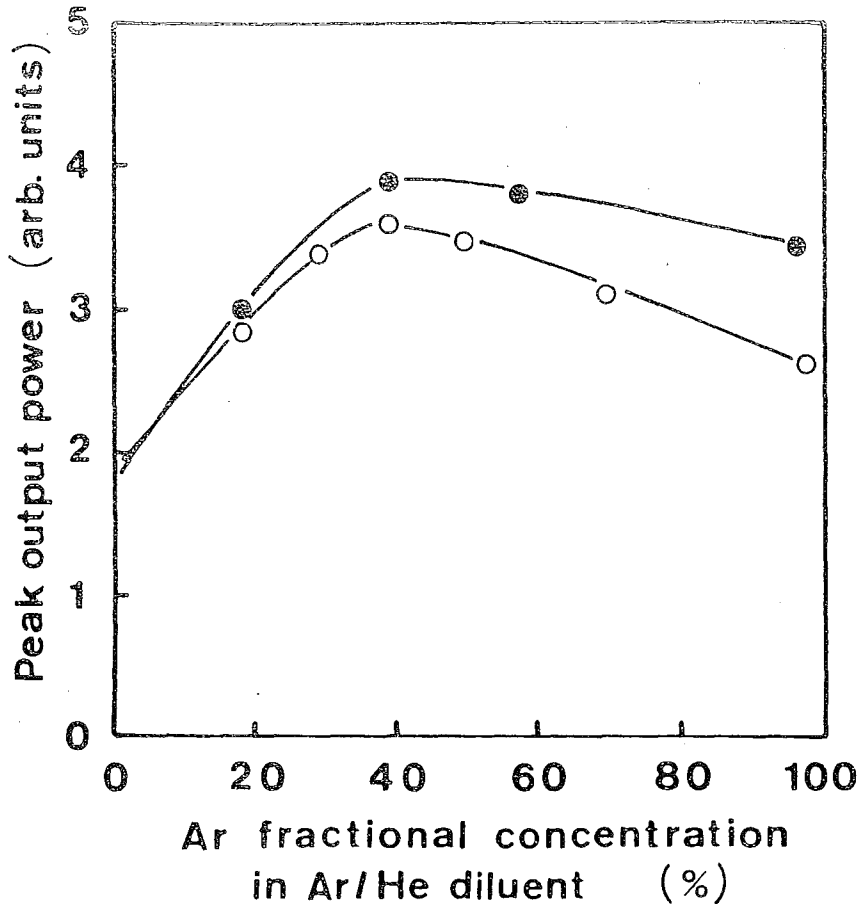
第4図はレーザーピーク出力をAr/He希釈中のAr混合比の関数として示したものである。結果(a)はAr/He 95.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%において、結果(b)はAr/He 98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%において得られた。Arの混合比はAr/He希釈ガスの圧力を一定に保った状態に変化させた。第4図中の白丸と黒丸は最適の全圧力におけるレーザーピーク出力を示している。結果(a)と(b)のいずれの場合もレーザーピーク出力はAr 40%において最大となった。Ar/He/XeClレーザーの場合、最適全圧力は1.5気圧、最適混合比はAr 39.0%、He 56.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%であった。この条件下で、レーザーピーク出力は数百kWであった。

Ar希釈の場合He希釈の場合より大きなレーザーピーク出力がえられるのは、主にArに対する弾性衝突損失が小さいことによる。³⁾

Ar/He希釈の場合単一ガス希釈の場合よりレーザーピーク出力が増加するのは、主として次の2つの理由によると考えられる。(1)第5図は $E/N=6 \times 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ におけるAr、He、Ar/He放電中の電子エネルギー分布関数 $f(\epsilon)$ を示している。これらの関数はボルツマン方程式を数値的に解くことによって得られた。ただし ϵ はeVで表した電子エネルギー、 E はV/cmで表した電界強度、 N は cm^{-3} で表した原子密度である。XeとHClの影響は含まれていないが、これらのガスを少量加えても単に高エネルギーの電子の数がいくら

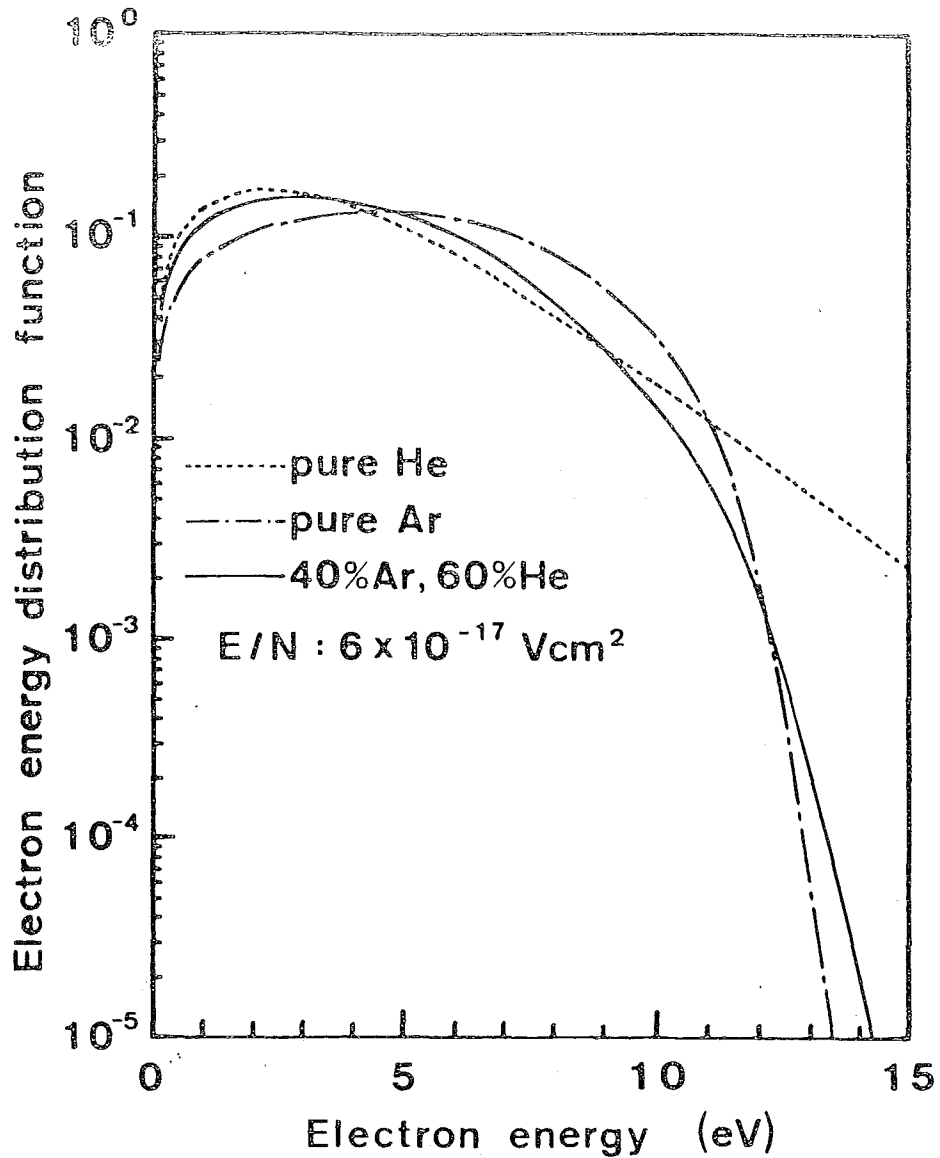


第3図 Ar/He、Ar、He希釈におけるXeCl 308nm レーザピーク出力の全圧力依存性。
 (a)ただし●はAr 39.4%、He 59.1%、Xe 1.3%、HCl 0.2%、△はAr98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%、○はHe 98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%における結果である。(b)●はAr 39.0%、He 56.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%、△はAr 95.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%、○はHe 95.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%における結果である。外部コンデンサバンクC₁の充電電圧は14.4kVである。



第4図 Ar/He希釈におけるXeCl 308nm レーザピーク出力のAr混合比依存性。
 ただし、●はAr/He 95.5%、Xe 3.8%、HCl 0.3%、○はAr/He 98.5%、
 Xe 1.3%、HCl 0.2%における結果である。

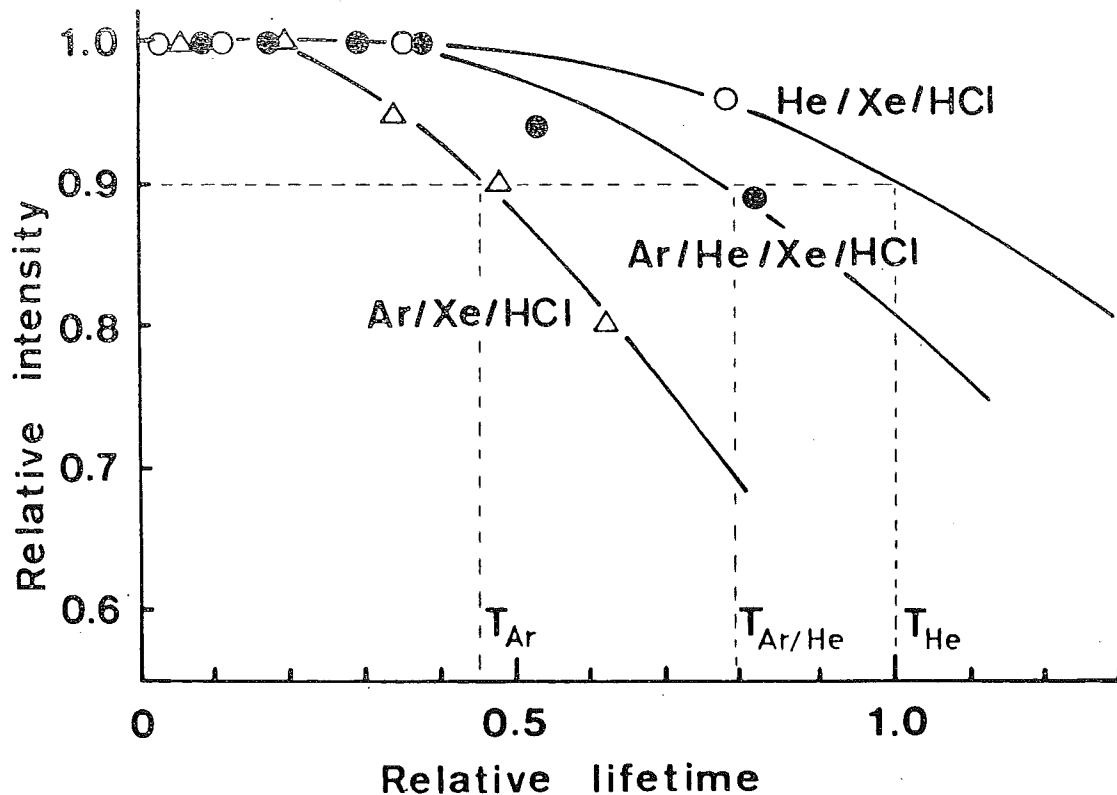
か減少するだけで、3本の曲線の相対的位置は変わらないと思われる。それゆえ15eV以上の領域では、Ar/He/XeClレーザ中の $f(\epsilon)$ はAr/XeClレーザ中のそれよりずっと大きい。一方この2種類のレーザの入力エネルギーは等しく、観測される電流パルスはほとんど同じ形を持っているので、主放電の電流密度はほぼ等しく、従って電子密度は同じ程度の大きさである。以上の考察から、15eV以上の電子の数はAr/He/XeClレーザ中の方が多く、電離過程にとって有利である。XeClエキシマ分子は、主に電離が関与する経路⁷⁾を通して生成されると信じられているから、Ar/He中でより多く作られる。(2)第3図(b)において1.3気圧以上でAr/XeClレーザのピーク出力が減少するのはアークが生じ、



第5図 ボルツマン方程式の数値解析によって得られた $E/N = 6 \times 10^{-17} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ における Ar、He、Ar/He 放電中の電子エネルギー分布関数。

放電の一様性が保たれないことによる。そこで Ar に He を加えるとアークの生成が抑えられ、放電の一様性が良くなる。

第6図は全圧力1.5気圧における Ar/He、Ar、He 希釈の封じ切り XeCl レーザの寿命を比較したものである。ここでは封じ切りレーザの寿命への希釈ガスの効果を比較するために、寿命の相対値だけを調べて図示した。このレーザ装置の場合、 $T_{\text{Ar}}/T_{\text{He}}$ は 0.5 以



第6図 3種類の混合ガスにおける封じ切りXeClレーザの寿命の相対値。ただし●はAr 39.0%、He 56.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%、△はAr 95.9%、Xe 3.8%、HCl 0.3%、○はHe 98.5%、Xe 1.3%、HCl 0.2%における結果である。全圧力は1.5気圧、繰返し周波数は3Hzである。

下、 $T_{Ar/He}/T_{He}$ は0.8である。ただしTは各希釈ガスのもとで、レーザピーク出力が初期値の90%まで減少するショット数を表している。このようにAr/He希釈レーザの寿命はAr希釈レーザの寿命よりかなり長い。

第6図で示されたこの封じ切りレーザの出力低下は電極のスパッタリングによって生じた塩化物が壁に付着し、混合ガス中のCl原子密度を減少させることによると思われる。Arは、Heより激しいスパッタリングを引き起こし、更にAr希釈の場合生じ易いアークがスパッタリングをいっそう増進させる。ArにHeを加えるとスパッタリングを抑え、アークの生成を減らすので、封じ切りAr/He/XeClレーザの寿命は、Ar/XeClレーザのそれよりも長くなる。

封じ切りAr/He/XeClレーザーの寿命(絶対値)はまだあまり長くないが、電極材料を変えること、ガスのゆっくりした漏れを抑えること、数TorrのH₂ガスを加えること⁸⁾などの工夫をすることによって、相当改善することができる。このような研究は引き続き行われ、その結果は4節で述べられる。

3. Ne/Ar混合希釈を用いた放電励起XeClレーザーの出力特性⁹⁾

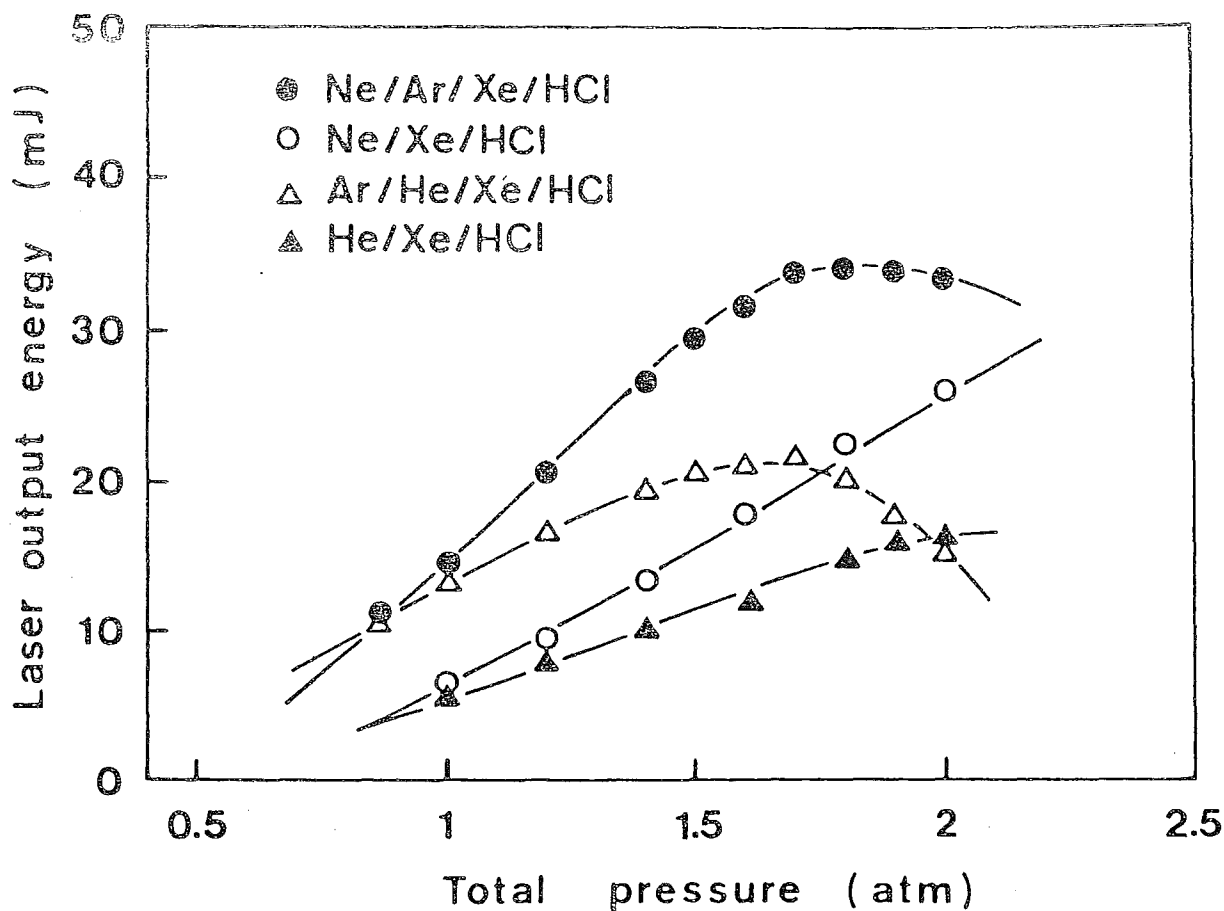
2節の研究で、Ar/He/XeClレーザーの動作特性が詳しく調べられ、2気圧以下の比較的低下圧力領域で大きな出力が得られることが示された。この研究を更に進め、He、Ne、Arを組み合わせたいろいろな混合希釈ガスを用いた時のXeClレーザーの出力特性を系統的に調べた。その結果2気圧以下の領域では、Ne/Ar/XeClレーザーが最も大きな出力を持つことが見い出された。ここではその結果について述べる。

3.1 実験装置

用いられた励起回路は第1図(a)のそれと本質的に同じである。しかし回路素子はいくらか異なったものを用いた。外部コンデンサバンクC₁は容量1.7nFのセラミックコンデンサを14個接続したもので、全容量は23.8nFである。内部コンデンサC₂は容量0.94nFと0.17nFのコンデンサから成り、全容量は22.2nFである。レーザー管は、アルミニウムとアクリルを用いて製作されたものを用いたが、詳細は3節で説明する。

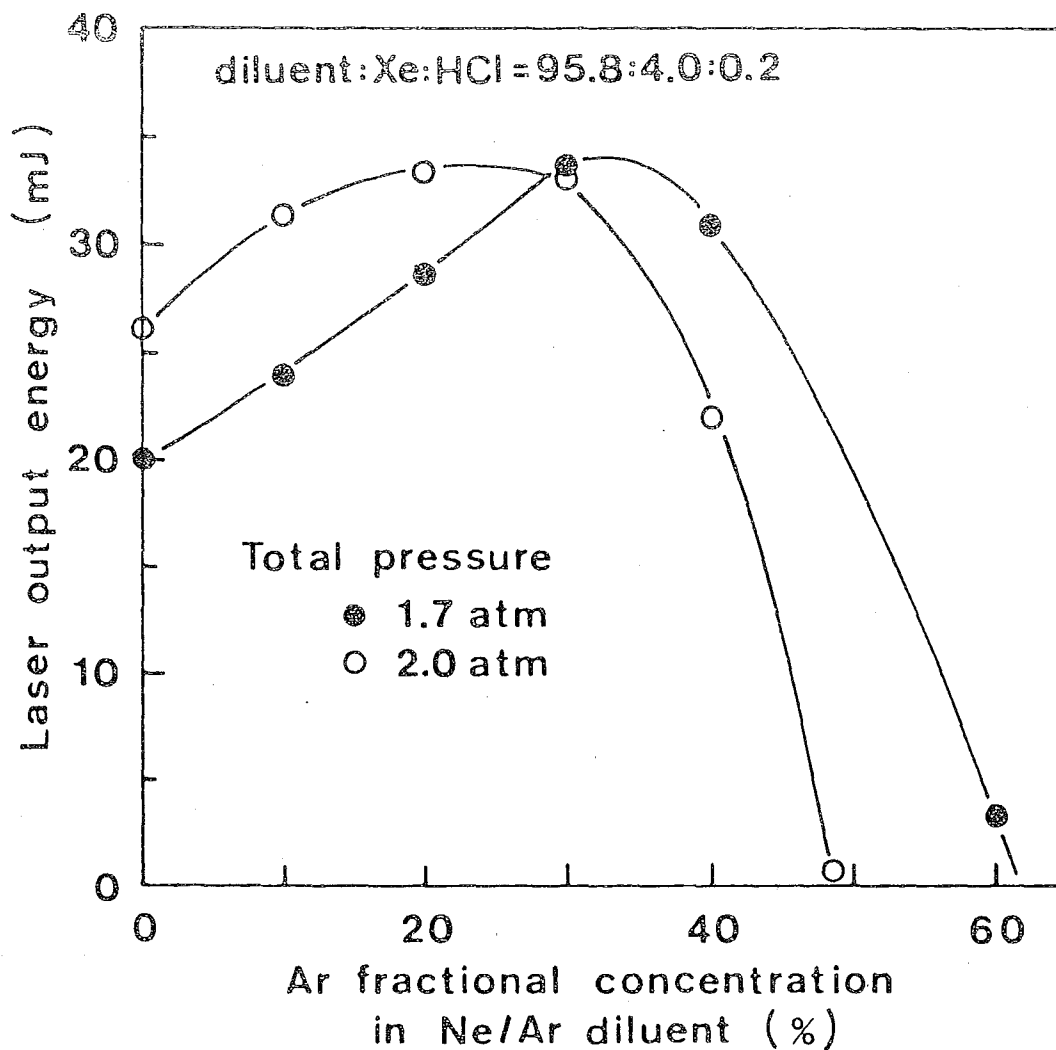
3.2 出力特性の測定結果と考察

第7図は、4種類の混合ガスにおけるXeCl 308nmレーザー出力エネルギーの全圧力依存性を示している。レーザー出力エネルギーはカロリメータ(Scientech 38-0105)を用いて測定された。C₁の充電電圧は20kVである。Ne/Ar希釈とAr/He希釈の場合、レーザー出力エネルギーは1.7気圧前後で飽和するが、Ne及びHeの単一ガス希釈の場合は全圧力と共に増加する。1~2気圧の圧力範囲ではNe/Ar/XeClレーザーの出力エネルギーが最も大きく、1.7気圧では、Ne/XeClレーザーのその約2倍に達する。1.7気圧以上の領域でNe/Ar及びAr/He希釈レーザーの出力が減少するのは、アークの生成により放電の様性が悪くなるからであると思われる。なおレーザーパルスの半値幅はいずれの希釈ガスの場合でも約8nsであった。



第7図 4種類の混合希釈ガスにおけるXeCl 308nm レーザ出力エネルギーの全圧力依存性。ただし、●はNe 65.8%、Ar 30.0%、Xe 4.0%、HCl 0.2%、△はAr 30.0%、He 66.3%、Xe 3.5%、HCl 0.2%、○はNe 95.8%、Xe 4.0%、HCl 0.2%、▲はHe 96.3%、Xe 3.5%、HCl 0.2%における結果である。外部コンデンサバンクC₁の充電電圧は20kVである。

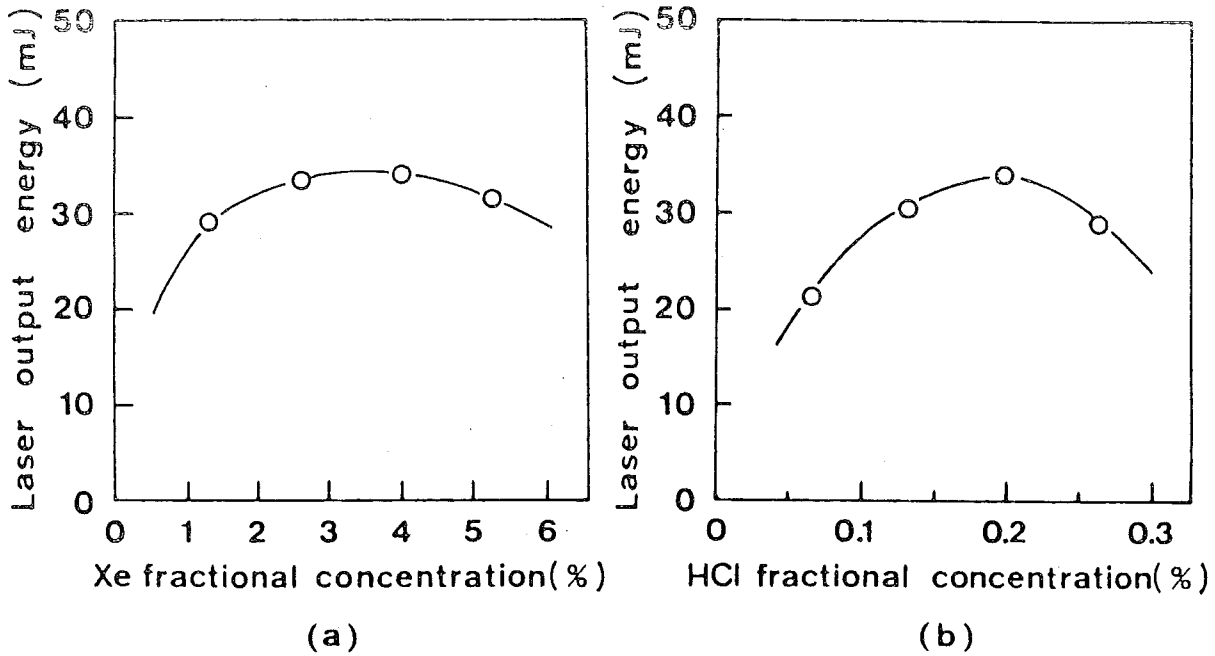
第8図はNe/Ar/XeCl混合ガスを用いた時のXeCl 308nm レーザ出力エネルギーを、Ne/Ar希釈中のAr混合比の関数として示したものである。ただし、C₁の充電電圧は20kVでNe/Ar、Xe、HClの混合比は95.8%：4.0%：0.2%である。●と○はそれぞれ全圧力1.7気圧と2.0気圧において得られた結果を示している。図示されたように、全圧力1.7気圧におけるレーザ出力エネルギーは、Ne/Ar中のAr混合比が30%の場合最



第8図 Ne/Ar希釈におけるXeCl 308nm レーザ出力エネルギーのAr混合比依存性。
 ただし、Ne/Ar 95.8%、Xe 4.0%、HCl 0.2%である。●は全圧力1.7気圧、
 ○は全圧力 2.0気圧における結果である。外部コンデンサバンクC₁の充電電圧は
 20kVである。

大となり、Ne又はAr単一ガス希釈の場合より大きくなる。Ar混合比 40%以上の領域で
 レーザ出力エネルギーが減少するのは、主としてアークができ、放電の一様性が悪くなる
 ことによる。

第9図は、Ne/Ar/Xe/HCl混合ガスにおけるXeClレーザ出力エネルギーのXe混



第9図 Ne/Ar/Xe/HCl混合ガスにおけるXeCl 308nm レーザ出力エネルギーのXe及びHCl混合比依存性。ただし(a)HCl 0.2%、(b)Xe 4.0%である。全圧力は1.7気圧、NeとArの混合比は7:3、外部コンデンサバンクC₁の充電電圧は20kVである。

混合比依存性及びHCl混合比依存性を示している。(a)図ではHCl混合比は、1.2%に、(b)図ではXe混合比は4.0%に保たれている。いずれの場合もC₁の充電電圧は20kVで、全圧力は1.7気圧(Ne:Arは7:3)である。レーザー出力エネルギーはXe混合比のゆるやかな関数で、最大出力エネルギーはXe 3.5%付近で得られる。これに対してHCl混合比が変わるとレーザー出力エネルギーは大きく変化し、最大出力エネルギーはHCl 0.2%付近でえられる。

本実験によって、He、Ne、Arの単一又は混合希釈ガスを用いたとき、2気圧以下の低圧力領域ではNe/Ar/XeClレーザーが最も大きな出力エネルギーを与えることが示された。このように混合希釈ガスレーザーは低圧力動作が可能であり、小型で簡便な装置を作るには非常に有利である。

4. 混合希釈ガスを用いた自動予備電離型放電励起XeClレーザー装置の最適化¹⁰⁾

2節及び3節でそれぞれHe/Ar及びNe/Ar希釈のXeClレーザーの出力特性が詳しく調べられ、それらが2気圧以下の低圧で優れた特性を持つことが明らかにされた。また、最大レーザー出力が得られる混合ガスの最適全圧力及び最適混合比が決定された。しかし実用的に有用なレーザー装置を得るには、ガス圧条件の最適化と共に回路パラメータやレーザーヘッド構造の最適化を計らなければならない。

本節の実験では、低圧力動作のできる小型で効率の良い自動予備電離型放電励起XeClレーザーを得るために、スパークギャップとレーザーヘッドを一体化した装置を考案し、最適ガス圧条件下で、レーザー出力エネルギー及び効率の回路パラメータや自動予備電離方式への依存性、レーザー装置の寿命などを詳細に研究した。ただし混合ガス系としてはNe/Ar/Xe/HClを用い、ガス圧条件をレーザー出力が最大となる、

最適全圧力 1.7気圧～2.0気圧

最適混合比 Ne:Ar:Xe:HCl=65.8%:30.0%:4.0%:0.2%

において測定を行った。以下の結果は全てこのガス圧条件で得られたものである。

4.1 レーザー装置

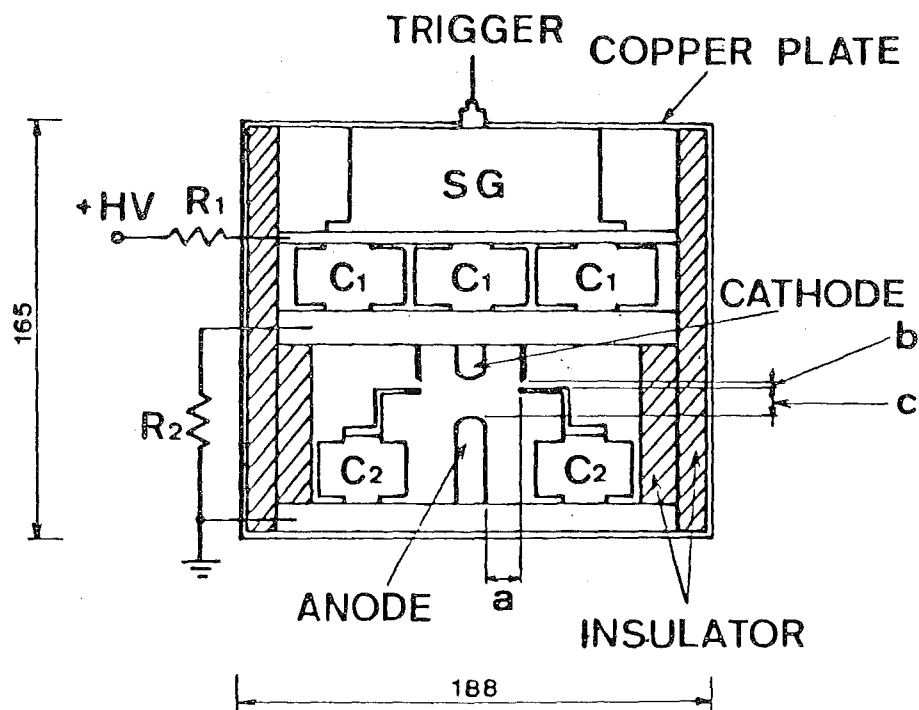
第10図はスパークギャップとレーザーヘッドを一体化した改良型のレーザー装置の断面を示している。なお励起回路は第1図(a)のそれと同じである。レーザー管はアルミニウム板とアクリル製側壁で作られていて、容積は3000cm³である。主放電電極はステンレス製で、幅1.5cm、長さ40cm、電極間隔は1.25cmである。内部コンデンサバンクC₂は容量0.94nFのセラミックコンデンサ20個から成り、主放電電極をはさんで2列に分けてアノード側に取り付けられている。2mmの予備電離ギャップは、C₂の各コンデンサ上部に取り付けられたステンレスピンとカソードプレートに取り付けられたステンレスピンとの間に形成されている。この予備電離用ギャップの最適化については後で述べる。主コンデンサバンクC₁は1.7nFのセラミックコンデンサから成り、最大25個まで並列に接続できるようになっている(最大容量42.5nF)。主コンデンサC₁は、アクリルの側壁で絶縁されたカソードプレートの上に取り付けられ、さらにその上にスパークギャップが直接取り付けられている。またスパークギャップ上部と接地されているアノードとは銅板を用いて接続されている。このような構造にすることによって、装置が極めて小型になると共に、回路インダクタンスが、非常に低く抑えられる。

レーザ管の両端の窓は厚さ 9.5mmの石英ガラスから成り、光軸に対して垂直に置かれている。共振器はこの垂直窓の一つと、反射側の窓の外に置かれた反射率 100%の誘電体反射鏡から成り、共振器長は 60cmである。

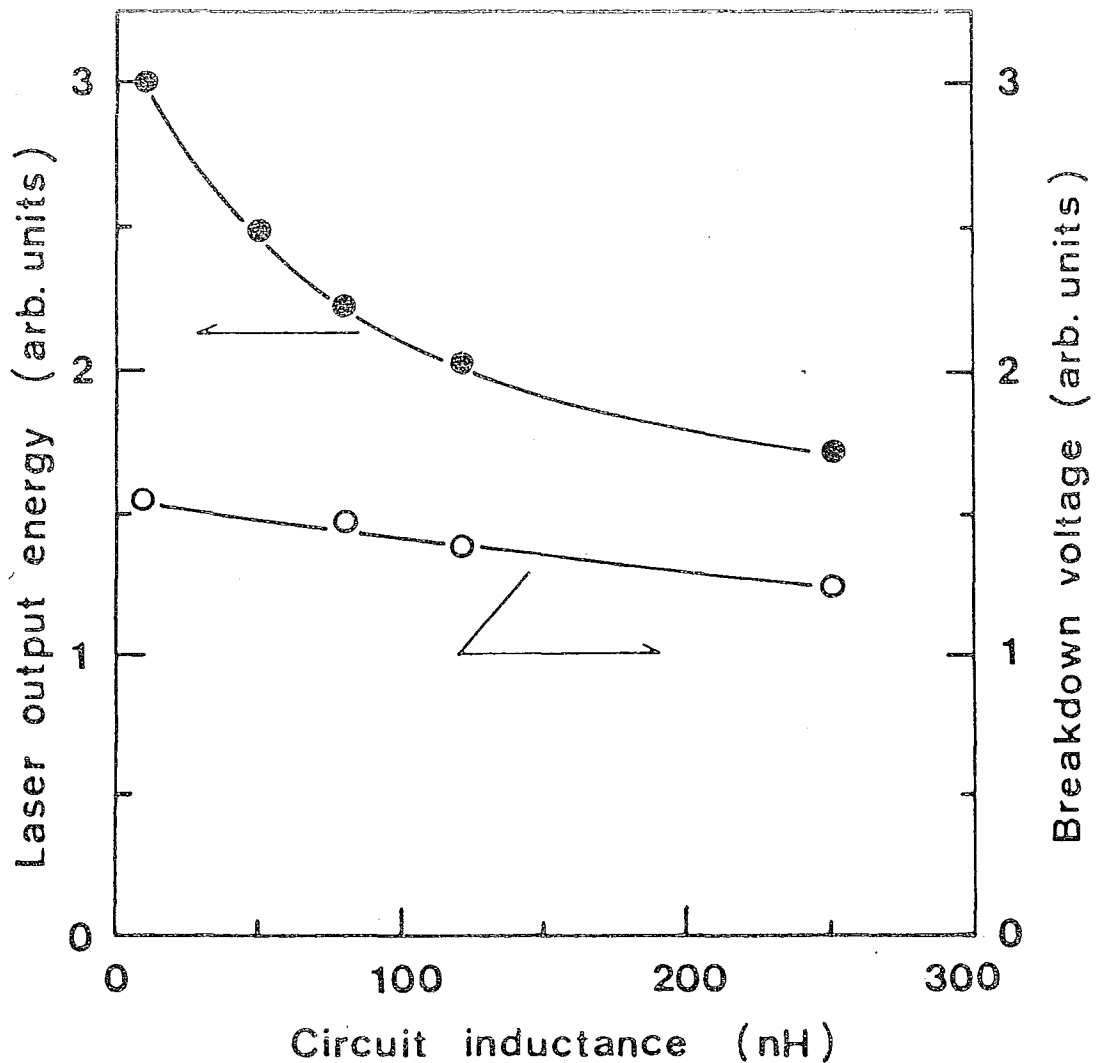
レーザ出力エネルギーの測定はレーザパワーメータ (Sciencetech 38-0105) を用いて、レーザパルス波形の観測はバイブリナ光電管を用いて行われた。

4.2 回路パラメータ及び予備電離方式の最適化

できる限り大きなレーザ出力エネルギーを得るには、どのような回路インダクタンスの値を選ぶべきかを知るために、 C_1 から C_2 への充電回路のインダクタンスを変化させて、放電開始電圧及び XeCl 308nmレーザ出力エネルギーを測定した。第11図はその結果を示



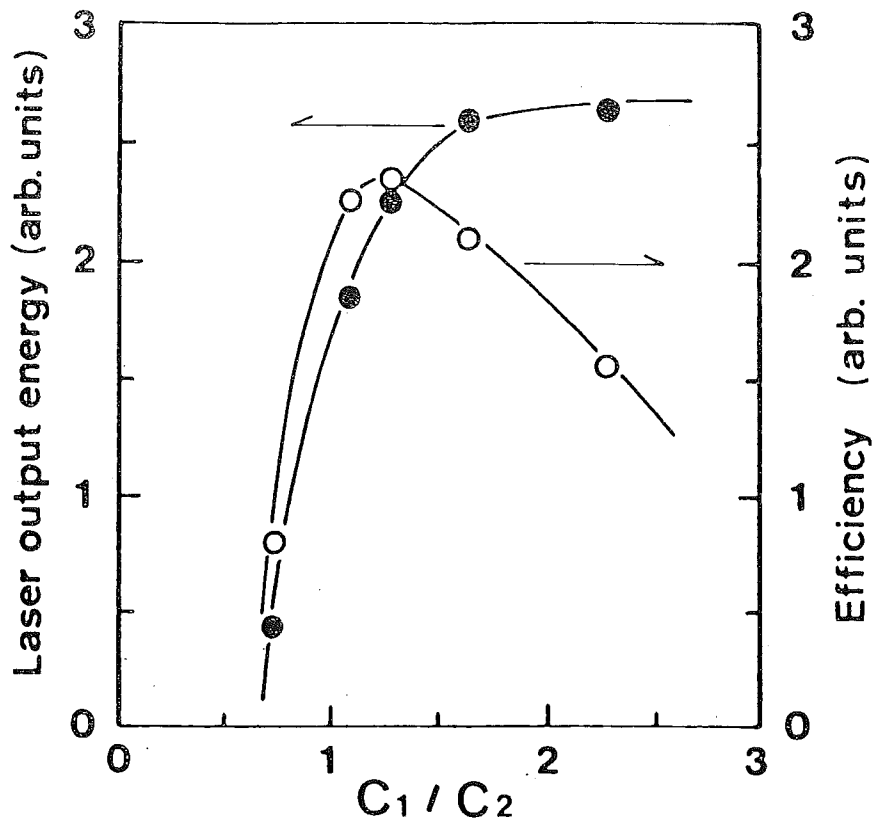
第10図 レーザヘッドとスパークギャップスイッチを一体化した、自動予備電離型放電励起XeClレーザの断面図。ただし $R_1 = 500k\Omega$ 、 $R_2 = 2k\Omega$ 、 $C_1 = 13.6 \sim 42.5nF$ 、 $C_2 = 18.8nF$ 、SG.スパークギャップである。図中の a, b, c は第1表を参照のこと。



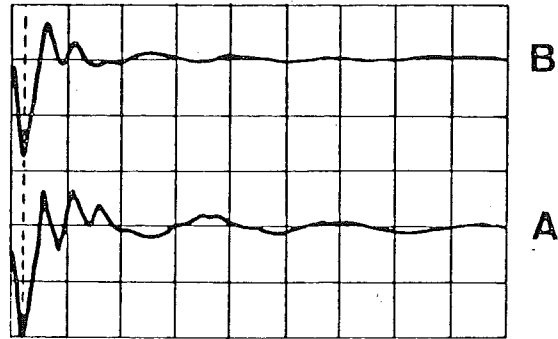
第11図 Ne/Ar/XeClレーザー出力エネルギー及び放電開始電圧の回路インダクタンス依存性。ただし、 C_1 の充電電圧は 20kV、全圧力は 2気圧、 $C_1 = 20.4\text{nF}$ 、 $C_2 = 18.8\text{nF}$ である。

している。レーザー出力エネルギーは実験範囲内では回路インダクタンスの減少と共に増加し、我々の装置で実現できる最小のインダクタンス 10nHの時に最大となる。

実現できる最小のインダクタンスと比較的大きなインダクタンスの場合について、封じ切り動作におけるレーザーの寿命を調べたところ、レーザー出力が初期値の 90%に低下する時のショット数は、前者が後者の 1.5倍程度であった。これは回路インダクタンスが大き



(a)



(b)

第12図 (a) Ne/Ar/XeClレーザーの出力エネルギー及び効率の C_1/C_2 依存性。
 C_1 の充電電圧は 20kV、全圧力は 2気圧である。(b)主放電電圧波形。Aは
 $C_1/C_2 = 2.8$ 、Bは $C_1/C_2 = 1.1$ における結果である。点線は放電開始時
を示し、横軸は 100ns/div.である。

なるほど、アークが生じ易く、放電の一様性が悪くなることによると思われる。

以上の 2つの結果から、回路インダクタンスはできるだけ小さい方が良いことがわかる。この点からみても、第10図のスパークギャップとレーザヘッドを一体化してインダクタンスを減らしたレーザ装置は、第1図(b)のレーザ装置より優れている。

第12図(a)は、 C_2 の容量を 18.8nF に保ち C_1 を変化させた時の、XeCl 308nmレーザ出力エネルギー及び効率の変化を示している。レーザ出力エネルギーは C_1/C_2 の増加と共に増加するが、1.5付近で飽和する。一方効率はレーザ出力が飽和傾向を示すために、 C_1/C_2 が 1.1付近で最大となった後、低下する。

また C_1/C_2 が 2.8 と 1.1 における封じ切り動作のレーザの寿命を調べたところ、レーザ出力エネルギーが初期値の 90%に低下するショット数は、前者が後者の半分程度であった。

第12図(b)は、 C_1/C_2 が 2.8 及び 1.1 における主放電電極間の電圧波形（それぞれA及びB）を示している。AはBに比べて放電開始電圧は大きい、その後の振動の振幅も大きく、振動も長く続く。レーザ発振は、第1の大きな電圧パルスの時しか得られないから、Aの場合は入力エネルギーが無駄に費やされていることになる。従って効率が下がり、またレーザの寿命も短くなると考えられる。

以上の結果から、レーザの高効率、長寿命動作のためには、 C_1/C_2 は 1.1 程度が適当である。

安定で効率の良いXeClレーザを得るには、できるだけ優れた予備電離方式を見い出さなければならない。第10図の装置では予備電離と主放電の間の時間遅れが約 70nsと比較的短く、この時間内に一様で強力な予備電離を行う必要がある。そこで本実験では、第1表に示した 3種類の自動予備電離ギャップの配置方式を試みた。予備電離ギャップの間隔はどの方式でも 2mmであるが、主電極から予備電離ギャップまでの距離はType Iでは 40mmと長く、Type II及びIIIでは 12mmである。予備電離ギャップの総数はType I及びIIでは 20個で、 C_2 の各コンデンサ上に 1つのピンギャップが取り付けられている。一方Type IIIでは C_2 の各コンデンサに 3つのピンギャップが取り付けられているので、ギャップ総数は 60個になり、軸方向のギャップ間隔も 16.7mmとType I及びIIの 40mmに比べてかなり短くなっている。

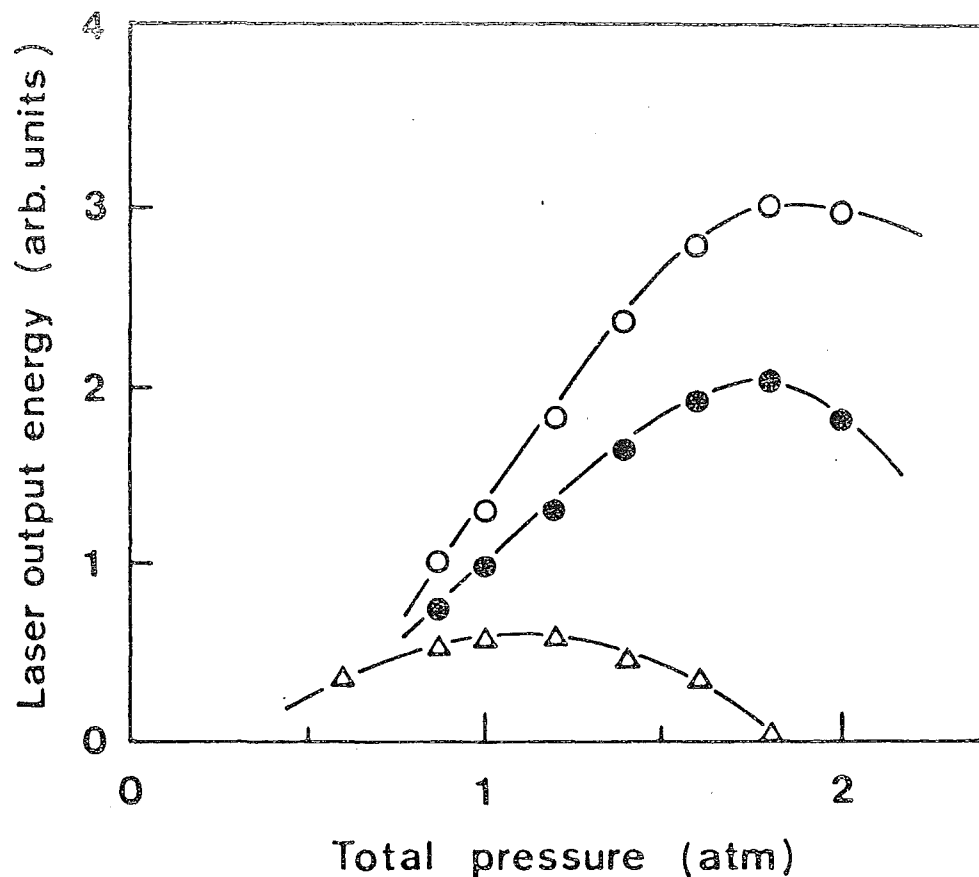
第13図はType I、II、IIIの予備電離ギャップを用いた時のXeCl 308nmレーザ出力エネルギーの全圧力依存性を示している。ただしいずれの場合も C_1 は 20.4nF、 C_2 は18.8nF

第1表 自動予備電離ギャップの配置方式

| | Type I | Type II | Type III |
|------------------------------------|--------|---------|----------|
| a : 電極からの距離 (mm) | 40 | 12 | 12 |
| 2つの予備電離ギャップの 軸方向の間隔 (mm) | 40 | 40 | 16.7 |
| b : 予備電離ギャップの 間隔 (mm) | 2 | 2 | 2 |
| c : アノードの先端から 予備電離ギャップまでの間 (mm) | 6.5 | 6.5 | 10 |
| 予備電離ギャップの総数 | 20 | 20 | 60 |

(ただし a、b、c は第10図参照のこと)

で、充電電圧は 20kV である。Type I では予備電離ギャップが主放電から離れすぎているために、主放電領域の予備電離が不十分で、レーザ出力エネルギーも小さく、1.5気圧以上の圧力領域ではレーザ発振が不安定になる。予備電離用ギャップを Type I よりも主放電に近づけた Type II の場合は、予備電離が強力になり、放電の一様性も改善される。従って高い圧力でも安定な放電が得られるので、レーザ出力エネルギーはかなり増加する。更に予備電離用ギャップの数を 3倍に増やした Type III の場合は、軸方向の放電の一様性がいっそう改善され、1.5気圧以上の圧力領域では最も良い特性を示す。

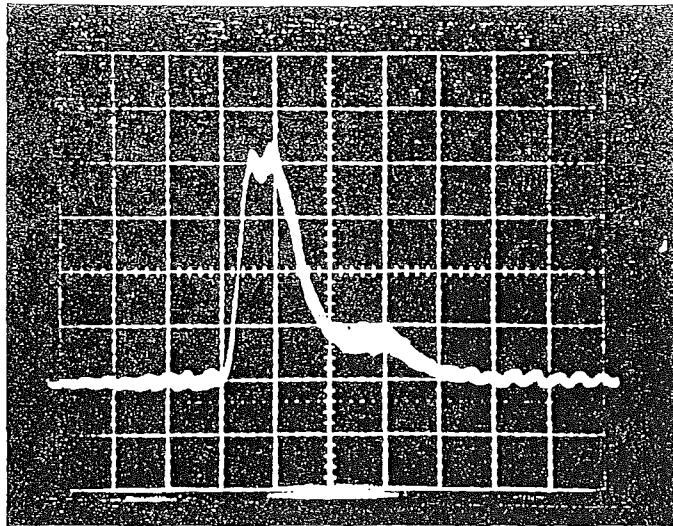


第13図 各種の自動予備電離ピンギャップを用いた時の、Ne/Ar/XeClレーザー出力エネルギーの全圧力依存性。ただし、△は第1表のType I、●はType II、○はType IIIのピンを用いた時の結果である。C₁ = 20.4nF、C₂ = 18.8nF、C₁の充電電圧は 20kVである。

以上の結果から、予備電離用ギャップの総数を更に増し、ギャップと主放電電極の間隔を更に短くするのがよいと考えられるが、レーザー装置が複雑になり絶縁の問題も生じてくるので、本研究では最適な予備電離用ギャップの配置方式としてType IIIを選んだ。

4.3 最適条件下における動作特性

第14図はType IIIの予備電離用ギャップを用いた場合のXeCl 308nmレーザーパルス波形を示している。全圧力は 1.8気圧、C₁の充電電圧は 20kVである。この波形は 3000シヨツ

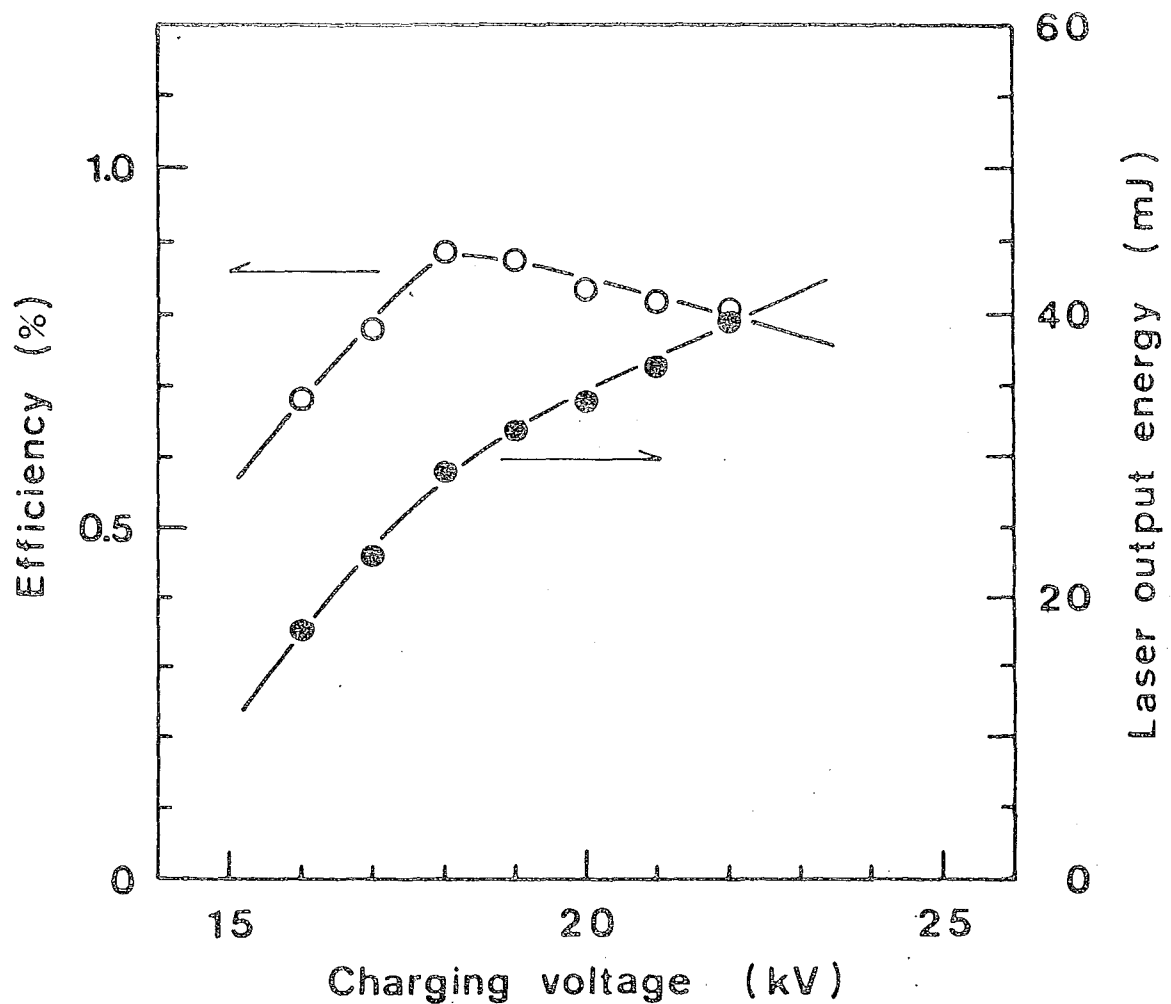


第14図 自動予備電離型放電励起XeClレーザーのレーザーパルス波形。この波形は 3000ショット重ねたものである。ただし、 C_1 の充電電圧は 20kV、全圧力は 1.8気圧、横軸は 10ns/div.である。

トを重ねたもので、ゆらぎは $\pm 4\%$ 程度であり、レーザーパルス波形の再現性が極めて良いことを示している。レーザーパルスの半値幅は約 12nsである。またレーザーパルスに第2の山が観測され、これが全レーザー出力エネルギーの 15%を占めている。これに対し、Type I、IIの予備電離用ギャップを用いた場合には、レーザーパルス幅は約 8nsと短く、第2の山も観測されなかった。またレーザーパルス波形の再現性もType IIIの場合よりも悪かった。

第15図はXeCl 308nmレーザーの出力エネルギー及び効率の C_1 充電電圧依存性を示している。 C_1 及び C_2 の容量はそれぞれ 20.4nF及び 18.8nF、全圧力は 1.8気圧である。最大レーザー出力エネルギーは 40mJで、 C_1 の充電電圧が 21kVで得られた。レーザービーム形状は縦 1.25cm、横 0.5cmで、放電体積は約 22.5cm³であった。従って最大レーザー出力エネルギーを 1ℓ当りの密度に換算すると、1.8J/ℓとなる。最大効率は 0.9%で、 C_1 の充電電圧が 18kVにおいて得られた。高い圧力で動作するNe希釈の自動予備電離型放電励起XeClレーザーの効率は 2.9%であると報告されているが、我々のレーザーが低圧力動作11)で小型であることを考慮すると、0.9%という効率はかなり良い値であるといえる。

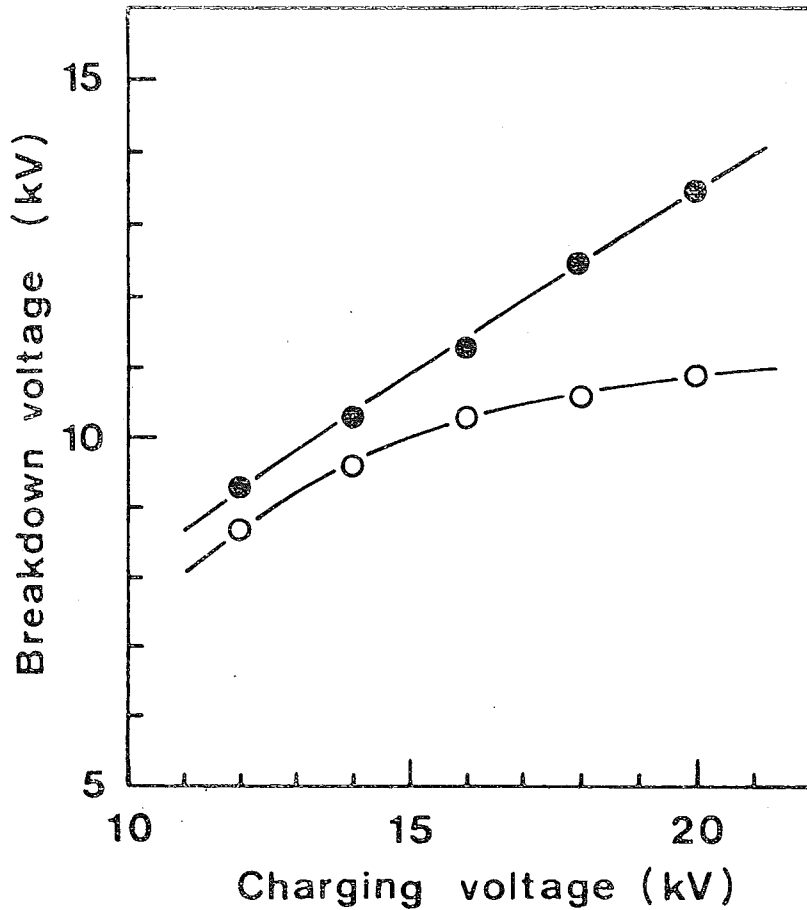
C_1 の充電電圧が 18kV以上になると、効率はゆっくりと低下する傾向を示す。Ne希釈



第15図 Ne/Ar/XeClレーザーの出力エネルギー及び効率の C_1 充電電圧依存性。
ただし、全圧力は1.8気圧である。

の場合にはもっと顕著である¹¹⁾。これは、充電電圧の増加に対して放電開始電圧が飽和する傾向を示すため、 C_1 から C_2 へのエネルギー輸送効率が低下し、放電領域へのエネルギー注入効率が低下することによって考えられる。

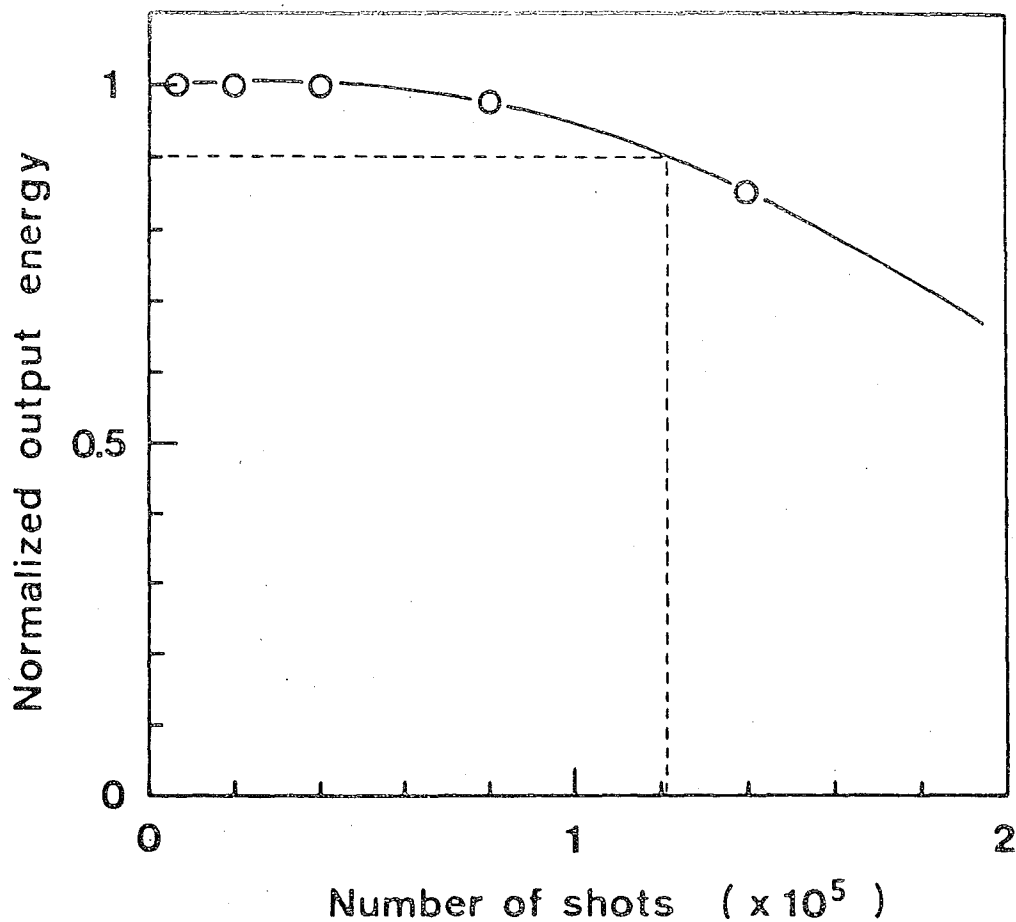
第16図はNe/Ar及びAr希釈におけるXeClレーザーの放電開始電圧の C_1 充電電圧依存性を示している。Ne/Ar希釈の放電開始電圧は全体的にNe希釈のそれより高く、 C_1 の充電電圧が18kV付近までは直線的に増加するのに対し、Ne希釈の場合は16kV付近で飽和している。この結果から、低圧力において、放電領域に効率よくエネルギーを注入する



第16図 XeClレーザーにおける放電開始電圧のC₁充電電圧依存性。ただし、全圧力は2気圧で、●はNe/Ar希釈、○はNe希釈における結果である。

には、Ne希釈よりもNe/Ar希釈を用いる方がより効果的であることがわかる。従って低圧力では、Ne/Ar希釈の方がレーザー出力エネルギーも大きくなる。

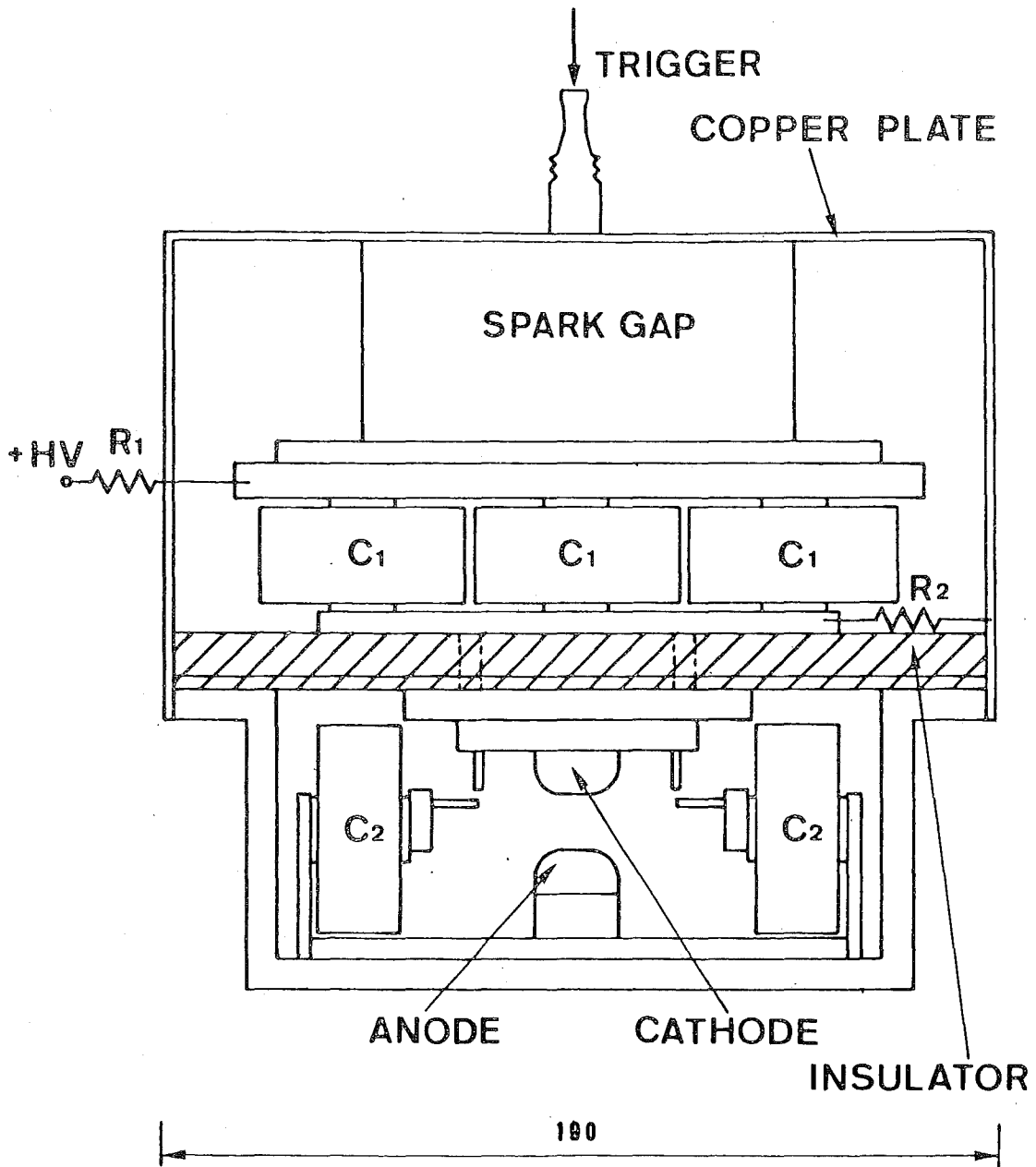
第17図は封じ切りNe/Ar/XeClレーザーの寿命特性を示している。このレーザー装置はガス循環機構を有しておらず、図は1回の封じ切り動作における寿命特性である。今回のレーザー装置ではレーザー出力エネルギーが初期値の90%に低下する時のショット数は 1.2×10^5 程度である。Ne/XeClレーザーの場合の寿命もほぼ同じであった。この値は封じ切りレーザー管の寿命としてはかなり長いといってよい。レーザー出力エネルギー低下の主な原因は、電極のスパッタリング原子と塩素が反応することによる混合ガス中のCl原子密度の減



第17図 封じ切り Ne/Ar/XeCl レーザの寿命特性。ただし、 C_1 の充電電圧は 20kV、全圧力は 2気圧、繰返し周波数は 5Hz である。

少であると思われる。

レーザ出力エネルギーが初期値の 90% まで低下した時点で、新しい混合ガスを封入してやると、出力エネルギーは再び最初の初期値に近い値まで回復する。しかしこのような動作試験を繰り返していくと、徐々に新しい混合ガス封入直後のレーザ出力エネルギーの初期値が低下していく。これは主に塩化物などの反応生成物が徐々に窓に付着し、窓の透過率を低下させることによる。またパルス放電を繰り返していくうちに、予備電離ギャップのピンが消耗して予備電離効率が下がったり、スパークギャップの電極が消耗して動作が不安定になったりする。このような要因によって決まるレーザ装置の寿命は 1 回の封じ切



第18図 試作した自動予備電離方式放電励起XeClレーザの断面図。

り動作の寿命よりずっと長く、混合ガスの入れ替えさえ行えば同一レーザー装置でかなり長時間実験を行うことが可能である。

4.4 試作した改良型自動予備電離放電励起XeClレーザー装置

4.2～4.3において得られた最適設計のためのデータをもとに、最終的に設計・試作したレーザー装置の概略図を第18図に示す。大要は第10図のレーザー装置と同じであるが、回路パラメータ及び予備電離方式は最適化されている。また第10図の装置では上下のアノードプレートとカソードプレートを金属製とし、側壁をアクリル製としたが、第18図の装置では、アノードプレート及び側壁部がステンレス製で、絶縁物はカソードを取り付ける上部のプレートだけに用いられている。このような構造にすることによって、第10図の装置より更にガスの漏れを減らし、機械的強度を大きくしてある。ここで試作した第18図のXeClレーザー装置は色素レーザーの励起用光源として使用する予定である。

4節の研究によって、混合希釈ガスを用いた小型の自動予備電離型放電励起XeClレーザー装置の回路パラメータ及び予備電離方式などの最適化が行われ、比較的効率が高く、小型で安定な改良型レーザー装置が試作された。

5. 本研究のまとめと今後の計画

本研究では、文部省科学研究費試験研究(1)を得て、混合希釈ガスを用いた自動予備電離型放電励起XeClレーザーの研究を行い、次のような成果を得た。

- (i) Ar/He希釈ガスを用いたXeCl 308nmレーザーの出力特性を詳しく調べ、最大レーザー出力を与える最適ガス圧条件を求めた。
- (ii) Ne/Ar希釈ガスを用いたXeCl 308nmレーザーは、2気圧以下の圧力領域で、Ar/He、Ne、Ar希釈を用いた場合より更に大きなレーザー出力エネルギーを与えることを見出し、最適ガス圧条件を求めた。
- (iii) (i)及び(ii)の研究の結果、Ar/He/XeCl及びNe/Ar/XeClレーザーは、2気圧以下の低圧力領域で比較的大きなレーザー出力と長い寿命が得られること、従って小型で簡便なレーザー装置として有望であることが明らかにされた。

(iv) スパークギャップとレーザヘッドを一体化した小型で低インダクタンスの自動予備電離型放電励起XeClレーザ装置を考案し、(i) (ii)で求めた最適ガス圧条件下で、レーザ出力エネルギー及び効率の回路パラメータ依存性や、予備電離ギャップ構造への依存性を詳細に調べ、それらの最適条件を決定した。また最適条件下において、本レーザ装置は安定で比較的長寿命の優れた動作特性を示すことを明らかにした。

(v) 上記(i) ~ (iv) の結果をもとにして、最適化した改良型の小型で安定な混合希釈XeClレーザ装置を設計・試作した。

以上の研究によって当初の計画をほぼ達成し、実用的な混合希釈XeClレーザ装置を試作することができたので、装置自体の改良・試作研究は60年度で終了する。

今後は次の2つの方向に研究を展開していこうと考えている。

(i) 放電励起XeClレーザの装置的研究は現在までにある程度行われてきたが、用いられている混合ガスプラズマの物性的研究は極めて少ない。そこで今後はプラズマ中の各種パラメータを測定し、シミュレーション技法と組み合わせて、励起機構の解明を行っていく予定である。

計画している一連の研究の中で、電子密度測定に関しては既に結果を得ている(2ページの論文発表(1)の(iv)及び口頭発表(2)の(vi))。この研究は当初の試験研究の計画には含まれていないが、初めて放電励起XeClレーザ中の電子密度を直接実験的に求めたものであり、エキシマレーザ分野の研究者にとって有用な結果であると思われるので、(追補)として最後に付け加えておく。

(ii) 本研究で試作したXeClレーザを色素レーザの励起用光源として利用し、レーザ誘起蛍光法などによる材料プロセス用プラズマの基礎的研究を行っていく予定である。

参考文献

- 1) R. C. Sze : J. Appl. Phys. 50 (1979) 4596.
- 2) R. C. Sze : IEEE J. Quantum Electron. QE-15 (1979) 1338.
- 3) T. Mizunami, M. Maeda and Y. Miyazoe : Jpn. J. Appl. Phys. 20 (1981) 1763.
- 4) 平松、西部、後藤、服部、山部 : 電気学会プラズマ研究会資料 EP-83-40 (1983).
- 5) M. Hiramatsu, T. Goto, S. Hattori and C. Yamabe : Jpn. J. Appl. Phys. 23 (1984) 1223.
- 6) A. J. Kearsley, A. J. Andrews and C. E. Webb : Opt. Commun. 31 (1979) 181.
- 7) M. Maeda et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982) 1161.
- 8) T. J. McKee, D. J. James, W. S. Nip and R. W. Weeks : Appl. Phys. Lett. 36 (1980) 943.
- 9) M. Hiramatsu and T. Goto : Phys. Lett. 112A (1985) 385.
- 10) M. Hiramatsu and T. Goto : Rev. Sci. Instrum. 57 (1986) No. 4.
- 11) K. Miyazaki, Y. Toda, T. Hasama and T. Sato : Rev. Sci. Instrum. 56 (1985) 201.

(追補) シュタルク法を用いた自動予備電離型放電励起XeClレーザー放電中の電子^{1, 2)}
密度測定

放電励起XeClエキシマレーザーの装置的研究に比べて、プラズマ物性の研究はまだ十分行われていない。XeClレーザー放電中の電子密度さえ実験的に求めた報告例はない。

本研究で我々はH₂を微量添加し、H_β線のシュタルク幅を測定する方法によって、初めてXeClレーザー放電中の電子密度を実験的に求めた。ここではその方法と結果について述べる。

1. 測定原理及び実験装置

水素バルマー系列のH_β線(486.13nm)は比較的強い線で、波長も可視領域にあり、また大きなシュタルク拡がりを持つので、シュタルク法を用いた電子密度測定に最適である。電子密度が10¹⁵cm⁻³程度の場合、H_β線のシュタルク幅は0.3~0.5nmになる。

単一ガスあるいは混合ガス放電中に微量のH₂を添加した時のH_β線のプロファイルは第1図のように中心付近でくぼみを持つシュタルク拡がり³⁾を示す。Griemによれば電子密度n_eはシュタルク幅Δλ_sと次の関係で結ばれる。

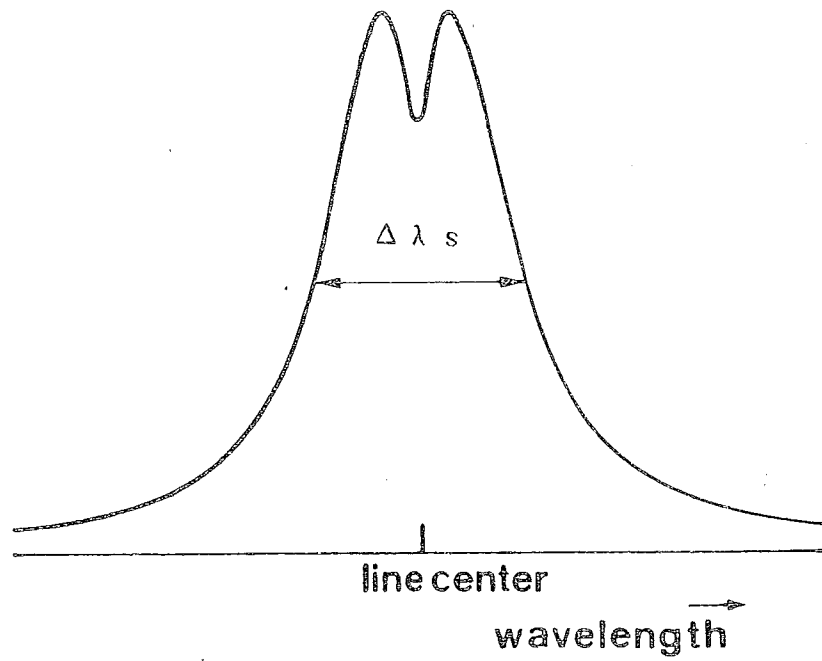
$$n_e = C(n_e, T) \cdot (\Delta\lambda_s)^{3/2} \quad (1)$$

ただし係数C(n_e, T)は電子密度と電子温度の極めてゆるやかな関数である。例えば電子密度が10¹⁵cm⁻³程度で、電子温度が5,000~40,000Kの時にC(n_e, T)の値は3.5×10¹⁴~3.7×10¹⁴であり、その変化の割合は5%以下である。従って今回の実験条件下では、C(n_e, T)の値として3.6×10¹⁴を用い、H_β線のプロファイルを測定してシュタルク幅Δλ_sを決定することにより、直接放電中の電子密度を求めた。

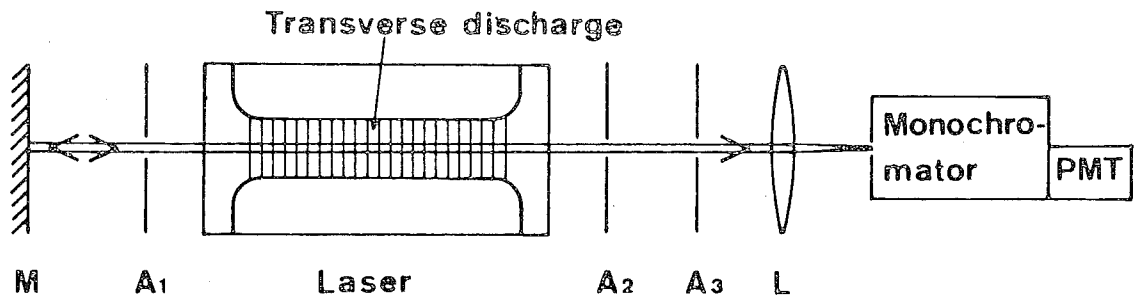
電子密度を測定したXeClレーザー装置は18ページに示した第10図のそれとほとんど同じである。そしてC₁は20.4nFに固定した。

第2図はH_β線のプロファイル測定及び自己吸収を評価するための光学系の配置図を示している。H_β線のプロファイルはエンド方向から測定した。左端の鏡Mは自己吸収の有無を評価する時のみ使用した。分光器の入射及び射出スリットの幅は共に0.08mmであった。

もし自己吸収が著しい場合には、観測されたH_β線のプロファイルはシュタルク拡がり



第1図 シュタルク拡がりを持つH β 線のプロファイル。



第2図 H β 線のプロファイル測定及び自己吸収を評価するための光学系の配置図。

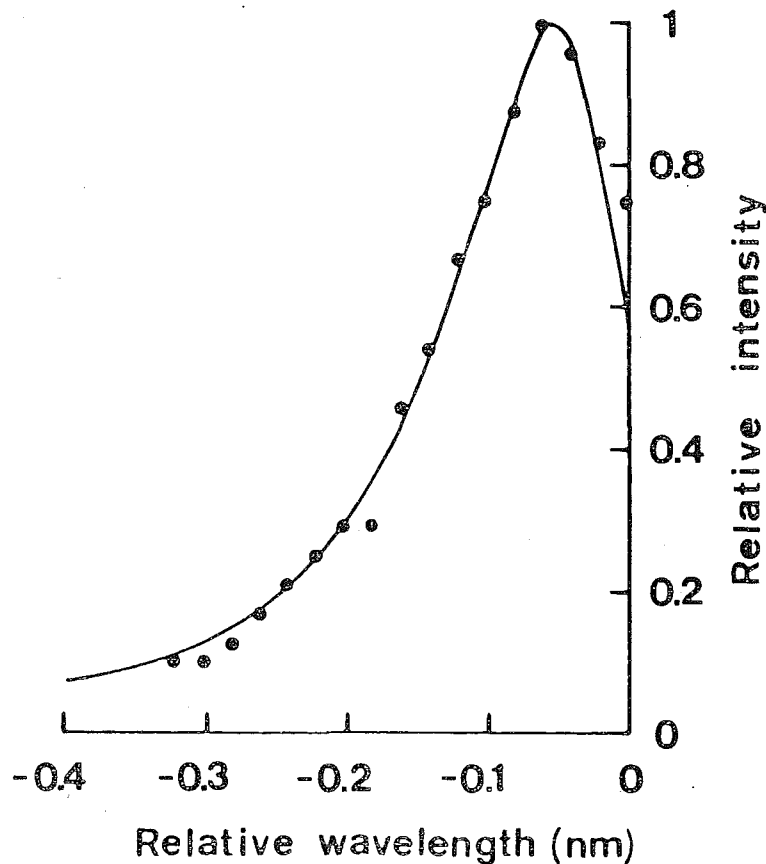
M：鏡、L：レンズ、A₁～A₃：アパーチャ、PMT：光電子増倍管。

によるそれとは異なる。そこで第2図のような配置でH β 線のプロファイル調べたところ、鏡の有無によるH β 線のプロファイルの変化は観測されず、自己吸収の影響は無視できることがわかった。

高気圧パルス放電へのH $_2$ の添加量が多すぎると、パルス放電に影響を与えてプラズマパラメータを変化させる可能性がある。しかしH $_2$ 添加量が封入ガスの全圧力の0.2%以下の領域では、H β 線のシュタルク幅はH $_2$ 添加量に依存しないこと、即ち電子密度は変化しないことを実験によって確かめた。そこで本研究では全てH $_2$ 添加量を全圧力の0.2%にして測定を行った。

2. 測定結果及び考察

第3図はNeパルス放電中のシュタルク拡がりを持つH β 線のプロファイルを示している。

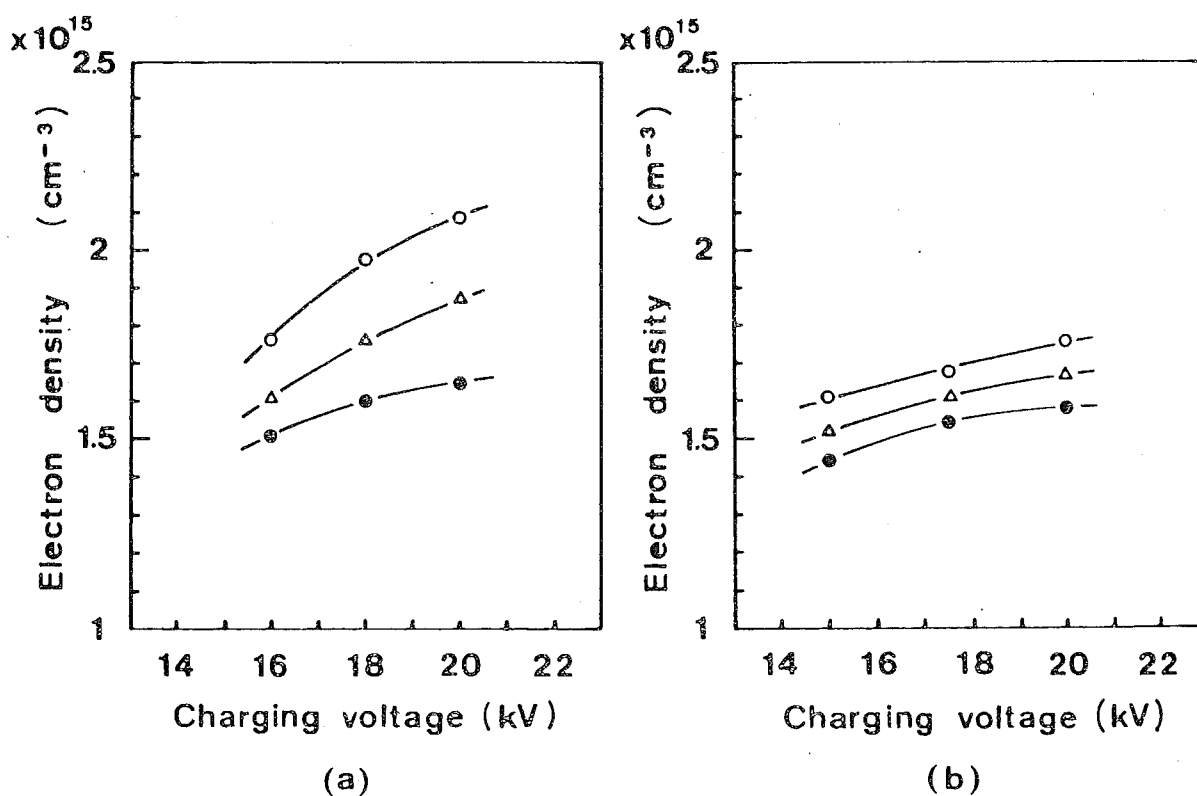


第3図 Neパルス放電中のH β 線のプロファイル。全圧力 1.5気圧、C $_1$ の充電電圧 20kV。実線は $n_e = 1.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の時の理論曲線⁵⁾。

C₁の充電電圧は 20kV、全圧力は 1.5気圧である。第3図からシュタルク幅 $\Delta\lambda_s$ は0.3nmとなり、(1)式から電子密度 n_e は $1.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ となる。実線は $n_e = 1.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ におけるH β 線の理論曲線⁵⁾である。我々の測定したプロファイルと実線は良く一致しており、H β 線の拡がりとしてシュタルク拡がりが支配的であることがわかる。

本実験条件下では、H β 線のドップラー拡がり、衝突による拡がりは、シュタルク拡がりより1桁以上小さいと考えられるので、これらの効果は無視した。

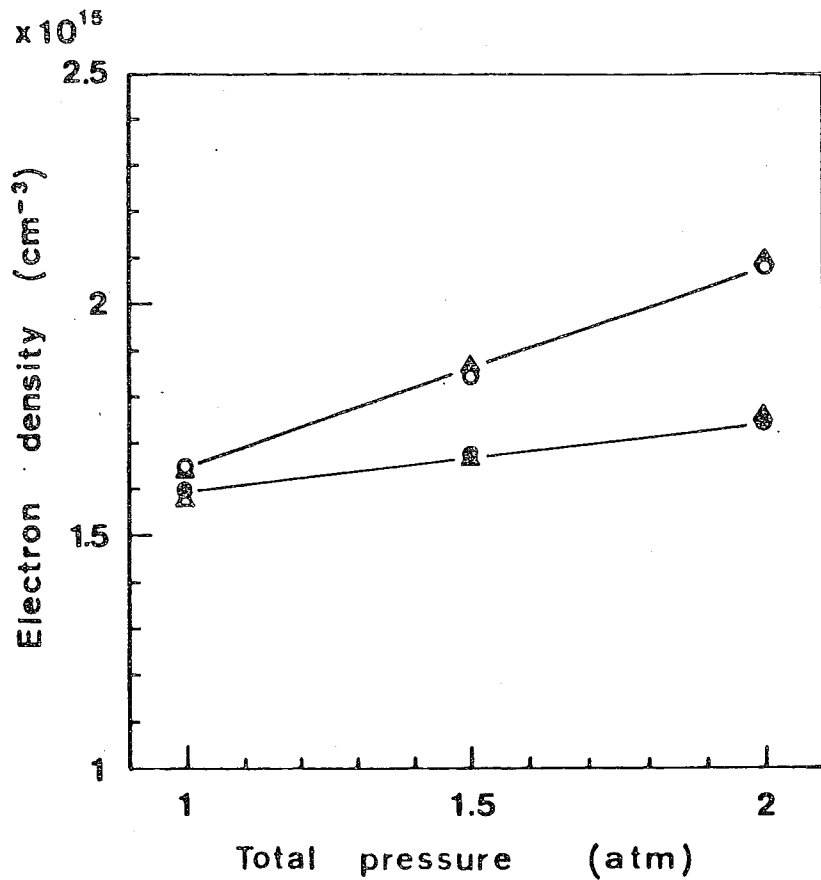
第4図(a)及び(b)はそれぞれNe及びHeパルス放電中の電子密度のC₁充電電圧依存性を示している。全圧力は 1、1.5、2、気圧の3種類である。測定範囲内では、Neパルス放電中の電子密度はC₁充電電圧と共に上昇するのに対して、Heパルス放電中では、その上昇は非常に緩やかである。全圧力 2気圧、充電電圧 20kVにおいて、Ne放電中の $n_e = 3.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、He放電中の $n_e = 1.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ である。第4図(a)、(b)の結果はいくぶん飽



第4図 Ne及びHeパルス放電中の電子密度のC₁充電電圧依存性。(a)Ne、(b)He。○は2気圧、△は1.5気圧、●は1気圧における結果である。

和傾向を示しているが、これは充電電圧の上昇に対して放電開始電圧が飽和傾向にあるためと考えられる。

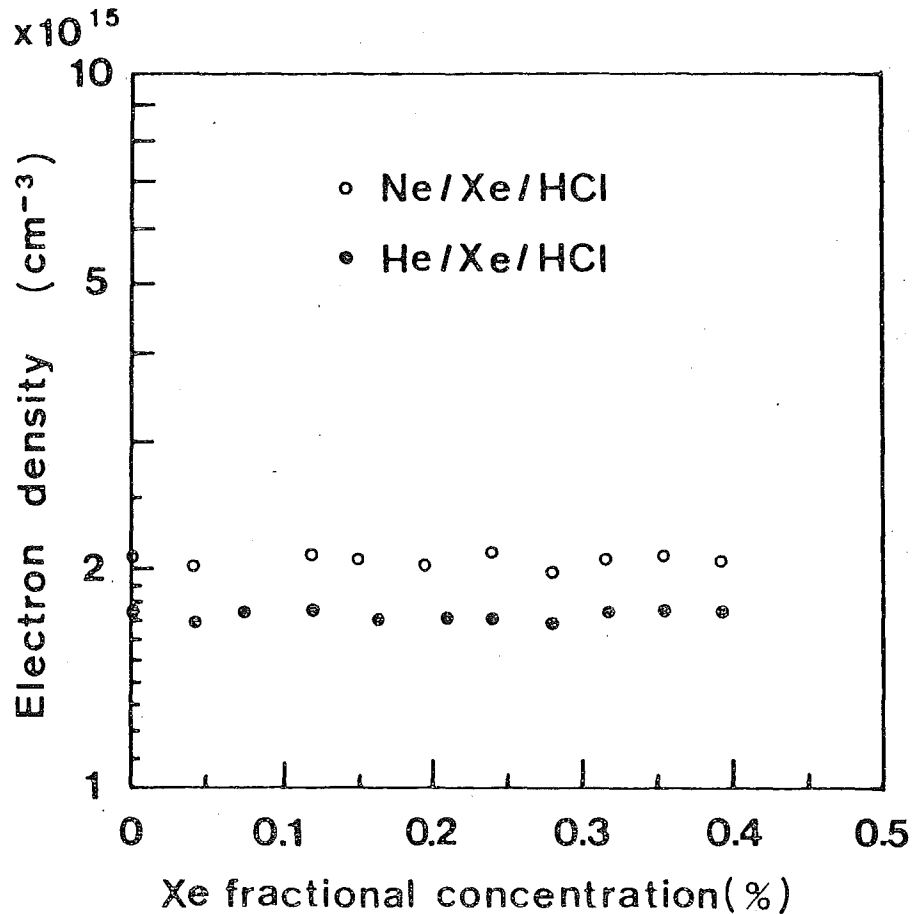
第5図は4種類の混合ガスNe/Xe/HCl、He/Xe/HCl、Ne、Heにおけるパルス放電中の電子密度の全圧力依存性を示している。すべての場合において、C₁充電電圧は20kVである。He/Xe/HCl及びHe放電中の電子密度は全圧力にあまり依存しないのに対して、Ne/Xe/HCl及びNe放電中のそれは圧力と共に上昇している。図から、NeまたはHeパルス放電にXe及びHClを微量加えても電子密度はほとんど変わらないことがわかる。



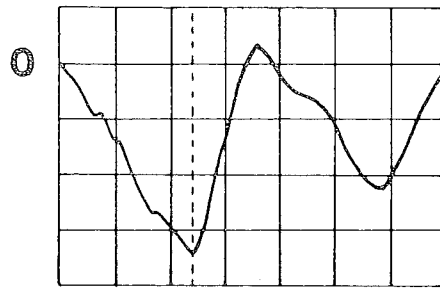
第5図 Ne/Xe/HCl、He/Xe/HCl、Ne及びHeパルス放電中の電子密度の全圧力依存性。○は Ne: Xe: HCl = 99.6: 0.2: 0.2、●は He: Xe: HCl = 99.6: 0.2: 0.2、▲はNe、△はHeにおける結果である。C₁の充電電圧は20kVである。

第6図はNe/Xe/HCl及びHe/Xe/HClにおける放電中の電子密度のXe混合比依存性を示している。C₁の充電電圧は20kV、全圧力は2気圧、HCl混合比は0.2%である。ここではXe混合比を0.4%までしか変化させていないが(Xe 0.2%以上がレーザー発振領域)、これはXeを増した場合、450nmから550nmの間で、Xe₂Cl₃原子エキシマーからの発光と見られる連続光が観測され、H_β線の同定が困難になることによる⁶⁾。測定範囲内では電子密度はXe混合比を増してもほとんど一定である。従って実際のXeClレーザー発振の最適Xe混合比(1~3%)における電子密度もほぼ第6図の値に等しいと考えられる。

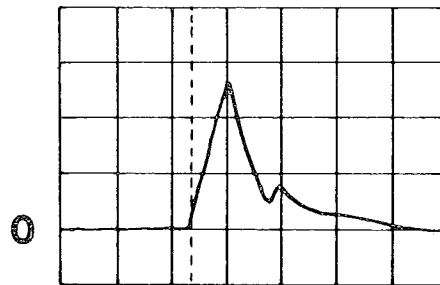
第7図はNe/Xe/HCl放電における主放電電圧、H_β線、XeCl 308nm線のパルス波



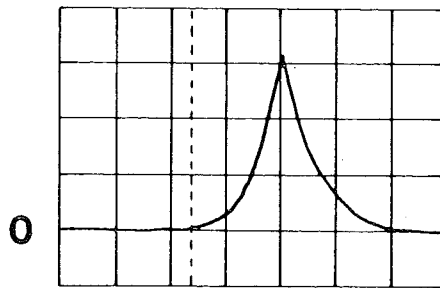
第6図 XeClレーザー放電中のXe混合比依存性。HClは0.2%、全圧力は2気圧、C₁の充電電圧は20kVである。



(a)



(b)



(c)

第7図 Ne/Xe/HClパルス放電における主放電電圧、 $H\beta$ 線、XeCl 308nm線の波形。
 Ne: Xe: HCl = 99.6: 0.2: 0.2、全圧力は2気圧、 C_1 の充電電圧は20kVである。横軸: 20ns/div.

形を示している。混合比は Ne : Xe : HCl = 99.6 : 0.2 : 0.2、全圧力は 2気圧、C₁の充
電電圧は 20kVである。主放電電極間の電圧が上昇して点線で示される放電開始電圧に達
すると、H β 線及び XeCl 308nm線の発光が始まる。そしてH β 線の発光がピークになっ
た後、約20ns遅れて 308nm線がピークに達する。シユタルク幅の測定はH β 線の発光がピ
ークになった時点で行っており、308nmの発光が始まって間もなく、電子密度は 10^{15}cm^{-3}
の桁に達していることがわかる。我々の測定値は Maeda等のシミュレーションの結果とよ
く一致している。

参考文献

- 1) M. Hiramatsu, H. Furuhashi and T. Goto : to be published.
- 2) 平松、古橋、後藤 : 電気学会プラズマ研究会 昭和61年 3月.
- 3) H. R. Griem : Plasma Spectroscopy (McGraw-Hill, New York 1964).
- 4) S. R. Goode and J. P. Deavor : Spectrochim. Acta 39B (1984) 813.
- 5) H. R. Griem, A. C. Kolb and K. Y. Shen : Astrophys. J. 135 (1962) 272.
- 6) C. K. Rhodes, Topics in Applied Physics, Vol. 30, Excimer Lasers, Second
enlarged edition (Springer-Verlag, Berlin, Heiderberg, New York and Tokyo,
1984).
- 7) M. Maeda, A. Takahashi, T. Mizunami and Y. Miyazoe : Jpn. J. Appl. Phys.
21 (1982) 1161.