

## 沿面コロナ放電予備電離方式XeClレーザー

春田, 健雄

九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻 : 博士後期課程

鈴木, 昭弘

三菱電機株式会社先端総合技術研究所

前田, 三男

九州大学大学院システム情報科学府電子デバイス工学専攻

<https://doi.org/10.15017/1498365>

---

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 3 (2), pp.251-256, 1998-06-22. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :

## 沿面コロナ放電予備電離方式 XeCl レーザ

春田健雄\*・鈴木昭弘\*\*・前田三男\*\*\*

### XeCl Laser with Surface Corona Preionization Scheme

Kenyu HARUTA, Akihiro SUZUKI and Mitsuo MAEDA

(Received June 22, 1998)

**Abstract :** Surface corona discharge preionization scheme was developed in order to realize a homogeneous main discharge over a large volume. The effect of the configuration of the perforated electrode on the discharge characteristics and laser output energy were investigated. The emission spectra from surface corona discharge are almost same as those from ark discharge by pin electrode, though the emission intensity are an order lower. The preionized electron density by surface corona discharge was measured to be  $9 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$  in He buffer gas and  $4 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$  in Ne buffer gas. The optimum diameter of perforated hole and the optimum percentage of openings were determined to be less than 3mm and 40~50%, respectively, from a point of view of laser beam quality and laser power dependency. The large aperture discharge, 20mm(gap)×42mm(width), was demonstrated and the maximum average power of 110W was obtained by XeCl laser with surface corona discharge preionization scheme.

**Keywords :** Excimer laser, XeCl laser, Corona discharge, Preionization, Preionized electron density, Emission spectra

## 1. 緒 言

エキシマレーザの大出力化を達成するためには、励起エネルギーを蓄積する器として(1)大電力が投入できる安定な放電を形成することと、そこに(2)低損失で大電力を投入するための高効率励起回路が必要である。本報では、(1)の条件を満たすために開発した沿面コロナ放電予備電離方式について報告する。

ピン電極でのアーク放電を用いた従来の紫外線予備電離方式では、主電極間の電界に直交する方向に予備電離電子密度の勾配が生じるため均質な放電としては幅の狭いものしか実現できない。このため、電力密度の限界および光学素子の耐光強度などの点からみて、高出力化を目指した大電力の投入には不適であるといえる。また、エキシマレーザが短パルスレーザであることを考慮すると、いたずらに放電長を長くして電力密度を下げる方法は得策ではない。これらのことから、大電力投入には大断面積放電が唯一の解決策であると言える。このため、主放電幅の拡大を狙いとしてフラッシュボード<sup>1)</sup>や、X線<sup>2)</sup>を予備電離源とするアプローチがなされており、その予備電離特性とレーザ発振特性が報告されている。し

かし、誘電体表面でのコロナ放電を用い、主電極の背後から予備電離する方式に関しては、予備電離部の構造を含めた詳細な特性については報告事例が見られない。

本研究は、沿面コロナ放電予備電離方式において、予備電離電極の各種パラメータに対する予備電離特性を把握すると共に、同方式により大断面積放電を実現することを主眼として行ったものである。

## 2. 沿面コロナ放電予備電離方式

この方式の電極構造は主電極の片方を開孔電極とし、その背後に誘電体を介して開孔電極と相対向するように補助電極を配置したものである<sup>3)</sup>。円筒誘電体の上部はフラットに加工されており、開孔電極が密着する構造となっている。主放電に先立って開孔電極と補助電極の間に電圧を印加し各開孔の内部においてコロナ放電を発生させ、同放電からの紫外光によって主放電空間を予備電離する。この際、誘電体の容量バラスト効果により開孔電極全域に渡って各開孔内部で均一なコロナ放電が形成される。コロナ放電は各開孔のエッジ部からスタートし誘電体表面上を開孔中心に向かって進展していく形で形成される。

同予備電離方式の狙いとする所は以下の点である。

- (1) 主電極背面から予備電離をするため幅の広い大断面積放電が可能になる。
- (2) 予備電離領域が主放電領域と同じであり、主放電の上流でアーク放電を行う従来型予備電離方式に

平成10年6月22日 受付

\* 電子デバイス工学専攻博士後期課程

\*\* 三菱電機株式会社先端総合技術研究所

\*\*\* 電子デバイス工学専攻

比較して高繰返し発振が容易になる。

- (3) 予備電離にアーク放電を用いないためレーザガスの長寿命化が期待できる。

### 3. 予備電離特性

予備電離特性を把握するために、予備電離部からの発光スペクトルの観測およびこれによって生成する予備電離電子密度の計測を行った。実験装置を Fig. 1 に示す。実際のレーザ装置と等価な電極構造を SUS316 製チャンバ内に設置した。開孔電極及び補助電極はニッケル製であり、開孔電極の開孔径は 2 mm、開孔率は 48% である。また開孔部領域のサイズは 26mm×210mm とした。誘電体は厚さ 2 mm とし、誘電率の効果を観測する目的で  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (比誘電率=9)、 $\text{TiO}_2$  (比誘電率=90)、 $\text{SrTiO}_3$  (比誘電率=470) の 3 種を用いた。さらに比較対象として、従来のピン電極アーク放電予備電離方式に対する測定も行った。ピンの材質は SUS316、ピン間のギャップ長は 0.5mm とし、20mm ピッチで 11 組のピン対を配列した。

予備電離駆動回路は、充電用コンデンサ (3 nF) の電荷をサイラトロンスイッチにより直接予備電離部に移行させる構成とした。

発光スペクトルの観測においては、チャンバの観測窓に導光路を直結し、予備電離部の光を同導光路内に設置した焦点距離 400mm のレンズを用いて分光部へ導く構造とした。光学材料としては、 $\text{MgF}_2$  を用いるとともに、導光部および分光部はターボ分子ポンプにより  $1.3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$  の真空度に維持した。分光は凹面の回析格子 (45mm×45mm) を用いて、115nm から 315nm の領域に渡って行った。受光部には真空紫外用近接型高感度マルチチャンネル光検出器 (浜松フォトニクス、VUV 用 P-IMD) を使い、 $\Delta\lambda=20\text{nm}$  の領域を一度に観測できるシステムとした。

予備電離電子密度の測定は、バイアス電極を上記チャ

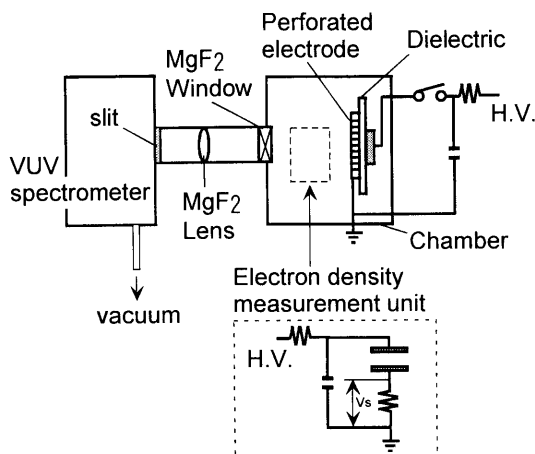


Fig. 1 Experimental apparatus.

ンバ内に設置することで行った。バイアス電極は電界の均一性を確保するためチャン型構造とした。バイアス電極の有効面積は 20mm×200mm であり、ギャップ長は 15mm である。また予備電離部からバイアス電極の中心部までの距離は 40mm とした。バイアス電極印加電圧は、電子増圧が発生しない条件を設定し、 $E/P=0.44\text{kV}/\text{cm}\cdot\text{atm}$  とした。予備電離電子密度は、バイアス電極間の均一電界を仮定して次式から求めた。

$$n_e = i / (q \cdot V_d \cdot S) \quad (1)$$

ここで  $n_e$ : 電子密度,  $q$ : 電子電荷,  $V_d$ : 電子のドリフト速度,  $S$ : バイアス電極面積である。

### 3.1 発光スペクトル

高気圧パルスレーザ (主に TEACO<sub>2</sub> レーザ) の予備電離機構に関して、分光データに基づく報告が数報あり<sup>4)~8)</sup>、いずれもその機構を解明するにはいたっていないが、120nm 付近の波長の光が寄与しており、レーザガス中の不純物の光解離が電子供給源である可能性が共通して指摘されている。そこで本実験においても、120ないし 130nm 領域の発光スペクトルに着目して観測を行った。結果を Fig. 2 に示す。沿面コロナ放電予備電離方式とピン電極アーク放電予備電離方式について 115nm から 135nm における発光スペクトルを比較するとともに、放電部のガスを He, 0.1Mpa から Ne, 0.1Mpa に変えた時の発光スペクトル強度の変化もプロットした。着目した波長領域では、沿面コロナ放電においてアーク放電にない特異なスペクトルは観測されなかった。一方スペクトル強度について見ると、ピン電極アーク放電予備電離方式においては He の場合と Ne の場合でさほど大きなスペクトル強度の変化は観測されないが、沿面コロナ放電予備電離方式においては He を Ne に変えるとスペク

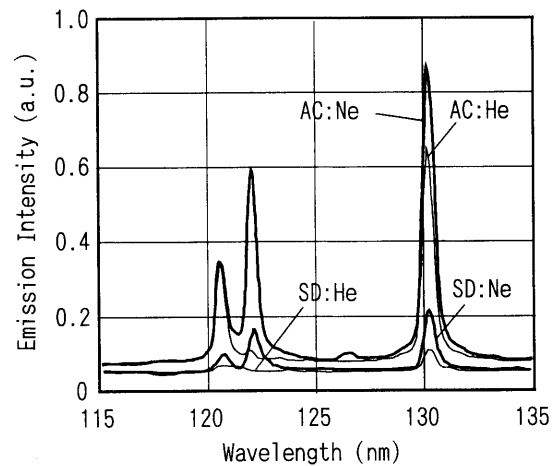


Fig. 2 Emission spectra from preionizer, AC: ark discharge, SD: surface corona discharge.

トル強度が大きく増加している。これは、各開孔内部でのコロナ放電の伸びに依存するものと考えられる。コロナ放電は開孔の円周端から中心部に向いて伸びて行くが、本実験において、He 中では開孔の円周部分のみが光っているのに対し、Ne 中では開孔の中心近傍までコロナが伸展し、開孔内全域で発光する様子が観測されており、これによって発光強度が増加しているものと考えられる。122nm の発光スペクトルはいずれの予備電離方式でも、He 中においては観測されなくなるが、その理由は解明できていない。

放電部のガスとして Ne, 0.1Mpa を用いた時の沿面コロナ放電予備電離方式における発光強度と予備電離電流との相関を Fig. 3 にプロットした。誘電体を介した高周波放電においては、ほぼ純抵抗の直線的なギャップ電圧-放電電流特性が実験的に確認されており<sup>9)</sup>、また本実験で変化させた印加電圧範囲内においては、同印加電圧と放電開始電圧の間にはほぼ比例関係が成り立つことが実験的に確認されているため、投入電力とピーク電流との間には(2)式の関係が成立する。

$$W_d \propto f \cdot C_a \cdot I_p^2 \quad (2)$$

ここで  $W_d$  は投入電力、 $f$  は電源周波数であり印加電圧の立ち上がり速度  $dV/dt$  に比例する成分、 $C_a$  は誘電体の容量、 $I_p$  はピーク電流である。発光強度は投入電力に比例すると仮定すれば、(2)式に従って発光強度と電流の2乗とは比例することが期待される。実際、図より明らかなように発光強度と予備電離電流の2乗との間には良い直線性が観測されている。同様の結果は He 中においても観測された。また(2)式に従えば、予備電離光の強度を高める手段として誘電体の誘電率を増す他に、予備電離部への印加電圧の立ち上がり速度を急峻にすることも有効であることが示唆される。

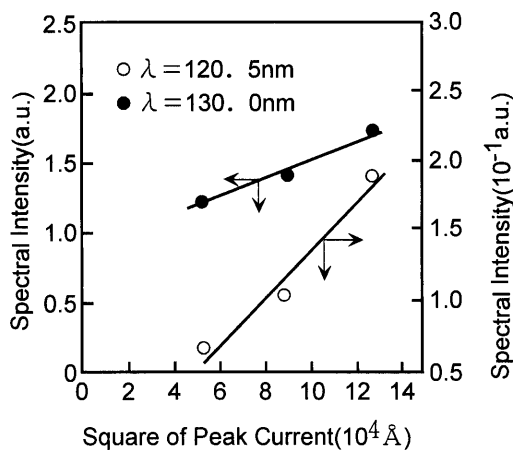


Fig. 3 Dependence of spectral intensity on discharge current.

### 3.2 予備電離電子密度

ピン電極アーク放電予備電離方式と沿面コロナ放電予備電離方式においてそれぞれ測定された予備電離電子密度のピーク値を Fig. 4 に示す。沿面コロナ放電予備電離方式の誘電体には  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を使い、放電部ガスとして He, 0.303Mpa を用いた場合と Ne, 0.303Mpa を用いた場合とを比較した。先述の発光強度の結果から予測されるように沿面コロナ放電予備電離方式においてはピン電極アーク放電予備電離方式の場合に比較して1桁以上低い予備電離電子密度となっている。R. S. Taylor<sup>10)</sup> によれば、Ne バッファ0.454Mpa の XeCl レーザにおいて均一な主放電を形成し、レーザ発振を得るための予備電離電子密度の閾値は、 $10^5$  から  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  であり、また K. Midorikawa ら<sup>2)</sup> は He バッファ0.303Mpa の XeCl レーザで  $6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、Ne バッファ0.505Mpa の場合で  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  の予備電離電子密度が必要であると報告している。Fig. 4 に示した実験結果では、沿面コロナ放電予備電離方式で He ガスを用いた場合でおよそ  $9 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  で予備電離電子密度が得られている。但し、HCl を含む実際のレーザガス中では、HCl による電子の解離付着を考慮する必要がある。予備電離時の平均的 E/N 値、 $10^{-17} \text{ Vcm}^2$  における HCl の解離付着係数は M. M. Turner ら<sup>11)</sup> によると  $2.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$  である。後述する実験での代表的 HCl 濃度  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  と先に報告した電子密度の測定結果が  $9 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$  に基づいて 50ns (予備電離電子密度がピーク値に達するまでの時間) のオーダで解離付着によって減少する電子密度を概算すると  $10^6 \text{ cm}^{-3}$  となり生成する電子密度の約 1 割程度にとどまる

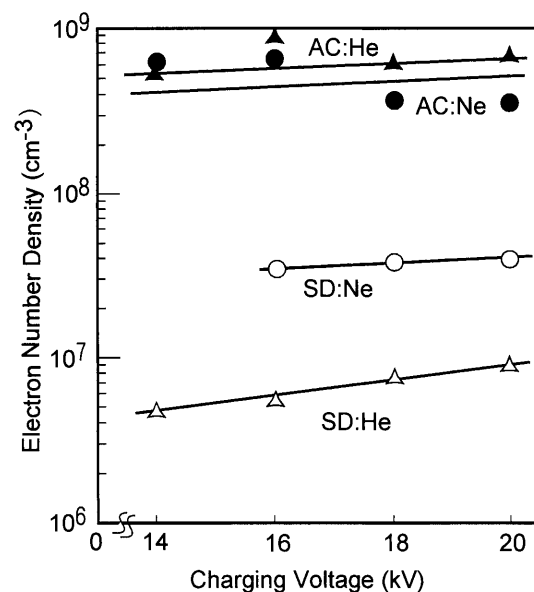


Fig. 4 Preionized electron density vs. charging voltage, AC: ark discharge, SD: surface corona discharge.

ことがわかる。従って実際のレーザガス中でも、おおよそ  $8 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$  程度の電子密度が得られることとなり、上記の報告にある必要条件を満足している。

放電部のガス種に対する依存性は先述の発光スペクトル強度特性と良い相関を見せており、ピン電極アーク放電予備電離方式では He と Ne でほとんど予備電離電子密度の差がないのに対し、沿面コロナ放電予備電離方式では He ガスを Ne ガ스에 置換することで、予備電離電子密度が  $4 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$  にまで増加している。このことから、沿面コロナ放電予備電離方式においては、レーザガスのバッファとして Ne を用いることが放電特性の改善に大きな効果を奏することがわかる。

予備電離電子密度のピーク電流に対する依存性を観測するために、誘電体を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  から  $\text{TiO}_2$ 、さらには  $\text{SrTiO}_3$  に変えた場合の予備電離電子密度を測定した。Fig. 5 にその結果をプロットする。誘電率が増加することによるピーク電流値の増加を横軸に、その時の予備電離電子密度の測定値を縦軸にプロットした。図より明らかなように、予備電離電子密度はピーク電流値の増加に対してほぼ直線的に増加している。

#### 4. 主放電特性

$\text{Xe}/\text{HCl}/\text{He}=1\%/0.15\%/0.303\text{Mpa}$  のレーザガス組成を用いて主放電特性を観測した。沿面コロナ放電予備電離方式 XeCl レーザの代表的なバーンパターンと同パターンの中心部を通過する線上での強度分布を Fig. 6 に示す。強度分布は  $25\mu\text{m} \times 1024$  素子のイメージセンサを用いて計測した。従来のピン電極アーク放電予備電離方式では、電界に直交する方向に予備電離電子密度の傾斜が生じるため、その標準的なバーンパターンがおおよそ  $20\text{mm} \times 5 \sim 10\text{mm}$  程の矩形である<sup>12)</sup> のに対し、本実験機では、ほぼ正方形の放電幅の広いパターンが得られている。また放電幅方向のビーム強度分布も、横方向から予備電離するピン電極アーク放電予備電離方式に比べ、フ

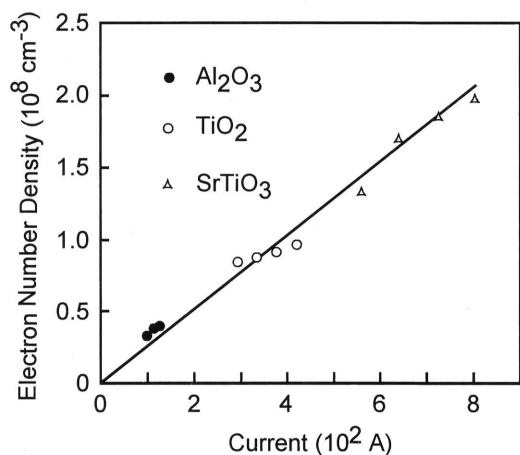


Fig. 5 Preionized electron density vs. discharge current.

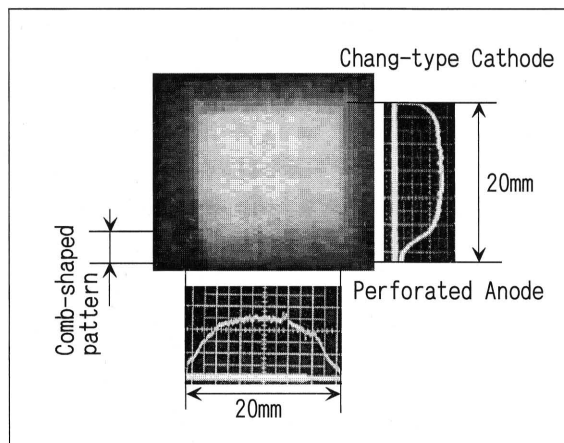


Fig. 6 Laser beam pattern.

ラットな登頂部をもつトップハットに近い分布を示している。一方、電界方向のビーム強度分布においては開孔電極近傍においてビーム強度分布が急速に減少することがわかる。これは、開孔部に対応する位置には主放電が形成されないため、電極全体にわたって観測すると開孔部近傍で主放電がくし状に抜けている様子が見られる。しかし、開孔電極から対極側に離れるにしたがって、開孔部周辺で形成された放電は開孔部の抜けを補う様に重なり合い均一な主放電を形成する。このくし状放電部の長さの開孔電極開孔径に対する依存性を Fig. 7 にプロットした。この際、各開孔径において開孔率は48%になるように統一した。さらに、図中には開孔電極を陰極にした場合と陽極にした場合との差異をプロットするとともに、その際のレーザ出力の相対値も示した。くし状放電部の長さは、開孔陽極の場合よりも開孔陰極の方が長い。これは Taylor ら<sup>10)</sup> の論文にも指摘されているように、主電極間印加電圧による予備電離電子のドリフトの結果として陰極付近の電子密度が低くなる影響が開孔

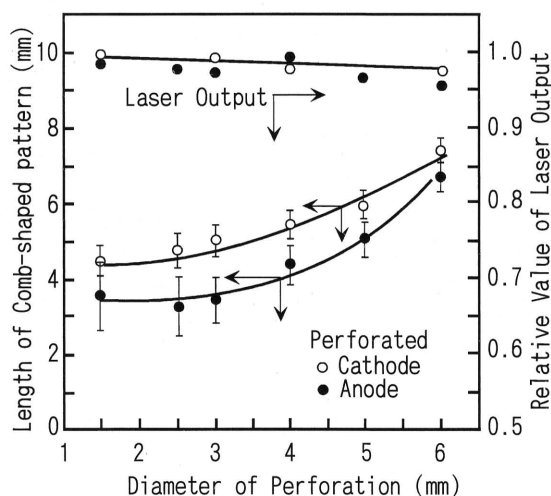


Fig. 7 Length of comb-shaped pattern vs. diameter of perforation.

部が存在することによる影響にさらに重畳されたためと考えられる。しかし、レーザ出力の観点からは、開孔陰極の場合も開孔陽極の場合も大きな差は見られず、また、くし状放電部の長さが開孔径の拡大とともに長くなっても大きな出力低下は引き起こさないことがわかる。ビーム品質の観点からは開孔電極を陽極とし、開孔径は3mm以下が望ましいことが本結果より示唆される。

Fig. 8は、開孔陽極の開孔部幅を10mmから45mmの間で変化させた場合の主放電強度分布の変化(半値全幅)を示したものである。この際、対極には幅10cmのチャン型電極を用いたギャップ長は20mmとした。主放電の幅は予備電離領域にほぼ1対1に対応しており、主電極形状を変えることなく、予備電離幅制御により主放電幅を制御可能であることを実証するとともに、20mmギャップに対して、半値全幅42mmの幅広の放電を達成することに成功した。

5. レーザ発振特性

主放電ギャップ長20mm、有効放電長600mmの沿面コロナ放電予備電離方式 XeCl レーザについて、その発振特性を観測した。励起回数は容量移行型回路であり、コンデンサ比は  $C1/C2=46nF/38nF$  である。共振器には、取り出し鏡として石英ウインドウ(反射率4%)、全反射鏡として石英基板の多層膜コーティングを用い、共振器長は1mとした。Xe濃度依存性としては、1~1.5%の濃度においてピークとなり、さらに高濃度の領域においては放電の不安定性により出力の低下が見られた。同様に HCl 濃度の最適値として0.15~2.0%が得られた。開孔陰極と開孔陽極の特性の比較を Fig. 9 に示した。図からわかるように最適 Xe 濃度ではほぼ同じ出力特性を示すが、放電が不安定となる高濃度領域では開孔陰極の方がレーザ出力低下の割合が少ない。その要因として開孔

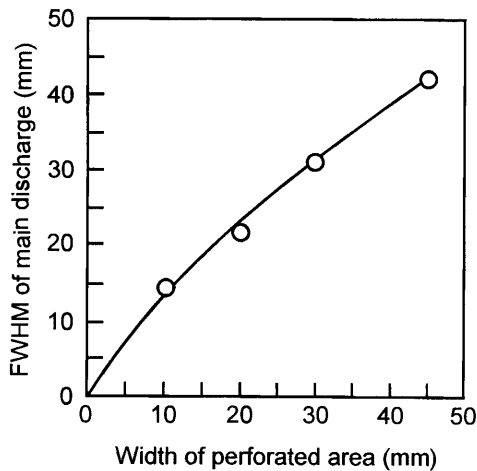


Fig. 8 Full width half maximum of main discharge vs. width of perforated area.

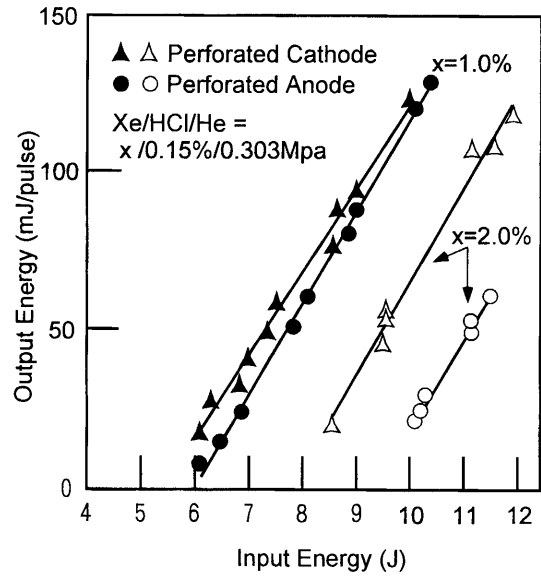


Fig. 9 Characteristics of laser oscillation.

陰極の場合は予備電離源として沿面コロナ放電からの紫外光による光電離に加え、堀井ら<sup>8)</sup>が指摘したようなコロナ放電部自身からの電子の引き出しが期待できる可能性が考えられるが、現段階では明確ではない。また発振効率が1.3%と低いが、これは放電断面積を拡大した一方でこれに対応した十分な放電電力が投入されていないため単位体積当たりの励起密度が低くその結果発振の閾値が高くなったためである。さらに、同実験装置を用いて開孔陽極の開孔率に対する出力依存性を測定した。結果を Fig. 10 に示す。レーザ出力は KrF の場合<sup>9)</sup> よりもかなりゆるやかな依存性を示しているが、最適値は KrF の場合と同様に40~50%にあることがわかる。

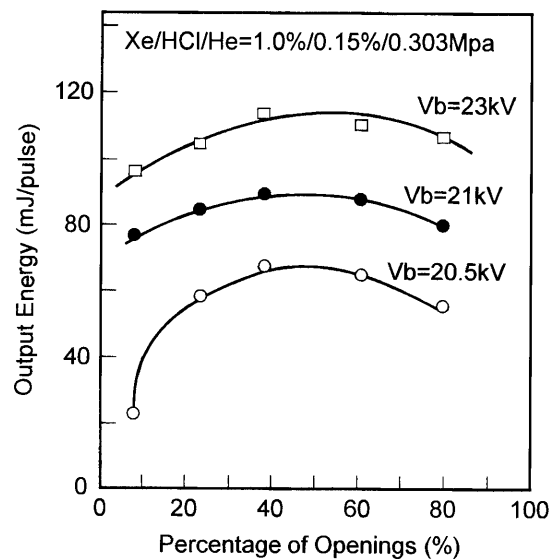


Fig. 10 Dependence of output energy on percentage of openings of perforated electrode.

上記の実験結果を踏まえ、さらに高出力化することを試みた。ギャップ長は26mmとし有効放電長は1mとした。C1, C2コンデンサの容量は、それぞれ96nFと86nFである。開孔径2mm, 開孔率を48%の開孔電極を陽極として用いた。単パルスの発振特性をFig. 11に示す。取り出し鏡の最適反射率は10%であり、最高単パルス出力として30Jの入力に対し392mJが得られた。しかし、発振効率は1.3%と低い値に留まっており改善がなされていない。これはレーザーのパルス幅が先述の実験機では20nsであったのに対し、本実験機ではコンデンサ容量の増加に伴い半値全幅で40nsに伸びたため主放電の安定性を確保する観点からXe濃度を0.4%までに低減せざるを得なかったためである。これらの結果から、放電幅を拡大した効果を十分に発揮させるためには従来の容量移行型では限界があり、これに代わる新規な高効率励起回路の開発が必要であることが結論される。例えば、W. H. Longら<sup>13)</sup>が提案しているスパイカ・サステナ回路などの組み合わせが効果的であると考えられる。単パルス発振実験に続き同レーザーの繰り返し発振を行い、300ppsで110Wの平均出力を達成した。この際、放電部におけるレーザーガス流速の(放電幅)×(繰り返し周波数)積に対する比として定義されるCR値は3.5であった。従来のピン電極アーク放電予備電離方式の場合は予備電離用のピン電極が主放電電極の上流に配置されそこでのアーク放電残さがガス流によって主放電部に運ばれるためCR値が5~6であることを考えると、電極背面から予備電離を行う沿面コロナ放電方式は繰り返し発振にも適した方式であると考えられる。

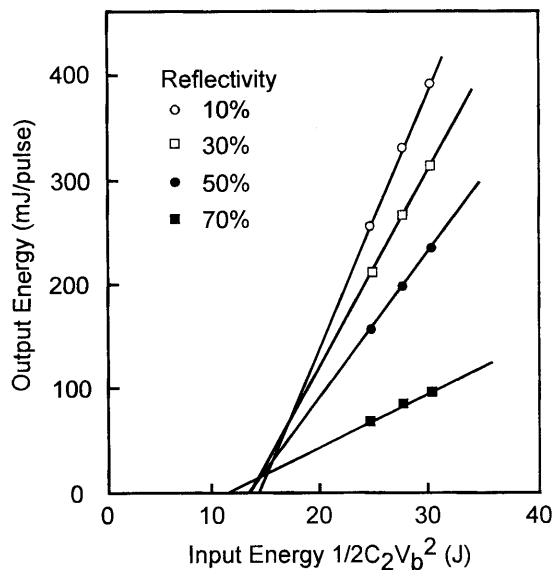


Fig. 11 Laser output energy vs. input energy plot.

## 6. 結 論

- (1) XeCl レーザの放電幅の拡大を狙いとして誘電体を介したコロナ放電を予備電離源とし電極背面側から予備電離を行う放電方式の研究を行った。
- (2) 放電からの発光は、ピン電極でのアーク放電を用いる方式と同じスペクトルパターンを持つが、強度的には1桁低い。
- (3) 予備電離電子密度はHeの中で $9 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ , Ne中で $4 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$ の値が得られ、従来閾値として報告されている $10^6 \text{cm}^{-3}$ の必要条件を満足する。
- (4) 開孔電極の最適値は、開孔径3mm以下、開孔率40~50%である。また、ビーム品質の観点から開孔電極を陽極とすることが望ましい。
- (5) 開孔電極における開孔部の幅で主放電幅を制御することが可能であり、20mmのギャップ長に対し42mmの放電幅を実現した。
- (6) 沿面コロナ放電予備電離方式XeClレーザーを試作し、単パルス出力390mJを得るとともに、繰り返し発振において平均出力110Wを達成した。
- (7) 放電幅の拡大により主放電の大断面積比は達成されたが、従来の容量移行型回路ではこれに十分なエネルギーを投入することが難しく、高効率で大エネルギーを投入可能な励起回路の開発が必要である。

## 参 考 文 献

- 1) R. C. Sze et al., IEEE J. Quantum Electron, **QE-14**, 944-950 (1978).
- 2) K. Midorikawa et al., IEEE J. Quantum Electron, **QE-20**, 198-205 (1984).
- 3) Y. Sato et al., IEEE J. Selected Topics Quantum Electron., **1**, No. 3, 811-824 (1995).
- 4) 横山: TEACO<sub>2</sub> レーザの放電現象, 日本物理学会誌, **29**, 761-1974.
- 5) R. V. Babcock et al., IEEE J. Quantum Electron, **QE-12**, 29-34 (1976).
- 6) D. C. McKen et al., IEEE J. Quantum Electron, **QE-12**, 472 (1976).
- 7) T. Okada et al., Jpn. J. Appl. Phys., **19**, 1189 (1980).
- 8) 堀井: ガスレーザー励起用放電, 放電研究, 38-61 (1986).
- 9) 葛本: 高周波無声放電における炭酸ガスレーザー励起に関する研究, 名古屋大学博士論文 (1991).
- 10) R. S. Taylor, Appl. Phys., **B41**, 1-24 (1986).
- 11) M. M. Turner et al., IEEE Trans. Plasma Sci., **19**, 350 (1991).
- 12) 山越ら: レーザ研究, **25**, No. 10, 707-711 (1997).
- 13) W. H. Long et al., Appl. Phys. Lett, **43**, 735-737 (1983).