レーザー解説

X線予備電離希ガスハライドレーザー

緑川 克美^{*A}・小原 實^{*}・藤岡 知夫^{*}

(1984年1月17日 受理)

X-ray Preionization of Rare-Gas-Halide Lasers

Katsumi MIDORIKAWA^{*A}, Minoru OBARA, and Tomoo FUJIOKA^{*}

(Received January 17, 1984)

1. はじめに

希ガスハライドエキシマーレーザーの出現以来、紫外域におけるレーザーの応用研究が急速に発展してきた。それに伴って光化学や半導体加工などの分野では、より高性能なエキシマーレーザーの必要性が高まっている。

現在、エキシマーレーザーの研究は基礎的なレーザー過程や反応機構の解明の段階を過ぎて、実用的な装置の開発に向っている。その流れは2つの方向に別れており、一方は将来の慣性核融合用ドライバーを目的とした大強度電子ビーム励起方式で、他方は放電励起高速繰返し方式の開発である。特に後者は、装置が小形で比較的簡便であるが、平均出力が大きいことから多くの産業分野でその開発が望まれている。

放電励起レーザーは、レーザー媒質自体が直接放電負荷となるため、一般的には放電状態とレーザーガスの最適条件を同時に満すことは困難である。ここに放電励起レーザーにとって不

可避な技術的問題が集約されているわけであるが、このような問題を克服すべく様々な努力がなされてきた。

放電励起エキシマーレーザーが比較的急速に開発された背景には、TEA CO₂レーザーやN₂レーザーで蓄積された放電技術が存在する¹⁾。パルスレーザーの放電技術は、主放電回路と予備電離に大別できるが、ここでは、特に希ガスハライドエキシマーレーザーに適したX線予備電離の技術的側面を解説する。

予備電離は高圧力下で均一なアバランシェ放電を得るには不可欠である。予備電離の重要性が初めて認識されるようになったのはTEACO₂レーザーにおいてであるが、スパークにより発生する紫外線が用いられ放電の均一性及びレーザーの性能が著しく向上した²⁻⁴⁾。その後、予備電離源の開発や予備電離電子数密度の測定など予備電離に関する報告は急増した。まず、Seguin等^{5,6)}は紫外線の透過距離及びその生成電子数密度を測定した。また、イオン化ポテンシャルの

* 慶応大学工学部電気工学科 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)

* Department of Electrical Engineering, Keio University (3-14-1 Hiyoshi, Yokohama 223)

A 現住所、理化学研究所 (〒351 埼玉県和光広沢2-1)

A Present Address, The Institute of Physical and Chemical Research (2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351)

低い有機化合物をレーザーガス中に添加することによって電子数密度を約4桁増加させた。一方、DenesとKline^{7,8)}は予備電離の横方向の均一性を制御することによって放電幅を調節できること並びに電界と平行方向の不均一性は主放電に影響しないことを報告している。さらに、Palmer⁹⁾によって初めて予備電離の理論的モデルが提案された。彼の報告によれば、均一な放電を得るために必要な最小予備電離数密度は典型的なTEA CO₂レーザーでは $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ と予測され、この値は測定値とほぼ一致した。Suzuki等¹⁰⁾は予備電離電子数密度を 5×10^9 から 2×10^{10} まで増加させたところレーザーエネルギーは対数的に増加するという予備電離電子数密度と出力の関係を初めて報告した。

紫外線予備電離の研究と平行して、コロナ放電¹¹⁾、エキシマレーザー¹²⁾、放射性同位元素¹³⁾、そしてX線¹⁴⁻¹⁶⁾などが予備電離源として用いられ、その効果が実験的に確められた。X線予備電離は、Sumida等^{14,15)}によって初めて報告されたが、高気圧大体積の予備電離には最も優れた特性を有する。予備電離源としてX線を用いる利点は以下のようなものである。

- 1) 荷電粒子や紫外線に比べて、透過力が大きいので高気圧大体積のレーザー媒質を均一に電離できる。
- 2) レーザー管の外部より照射できるため、レーザー管自体の設計が簡単になるとともにスクリーン電極による電界の不均一性の問題を回避できる。
- 3) スパークによるレーザー媒質の劣化や照射窓の破損などが起らないので、レーザー装置の寿命が著しく改善される。

放電励起エキシマレーザーの開発の進展に伴ない高気圧大体積装置や高速繰返し動作におけるX線予備電離の利点が広く認識されるようになった^{17,18)}。

また、X線は予備電離自体の研究にも非常に有用である。これは、X線源が主放電部とは独立に動作するので、主放電部の条件を変えずに予備電離状態を制御できるためである。従って、

X線を用いることにより均一な放電を得るに必要な予備電離電子数密度やその空間分布の相違による出力の変化などが容易に測定できる。¹⁹⁻²²⁾

本稿では、このような特徴を有するX線予備電離を希ガスハライドエキシマレーザーに用いる際に有用と思われる技術並びにその予備電離特性とレーザー出力の関係などを紹介する。

2. X線による電離

X線は真空中で電界により高速度に加速された電子が物体に衝突するときに発生する。加速された電子がターゲット(陽極)に衝突すると原子によって減速され、その運動エネルギーの一部を制動輻射という形で放出する。この際に放出されるX線のスペクトルは連続であり、最大エネルギーは管電圧を V_t とすると V_t eVである。X線のスペクトルは、ターゲット物質やその形状にも依存するが、平均エネルギーは約 $V_t/2$ eVで与えられる。X線管から単位時間に放射されるX線の全エネルギー ϵ は、実験的に次のように表わされる¹⁹⁾。

$$\epsilon = 1 \times 10^{-9} i_t V_t^2 Z \text{ [J]} \quad (1)$$

ここで V_t [kV]は管電圧、 i_t [A]は管電流であり、 Z はターゲット物質の原子番号である。従ってX線の発生効率 η は

$$\eta = \frac{\epsilon}{i_t V_t} = 1 \times 10^{-9} V_t Z$$

で与えられる。(2)式から、発生効率を上げるためには、ターゲット物質にタングステンやタンタルなど原子番号の大きな物質を用いる必要があることがわかる。一般に、X線の発生効率は低く、例えば、管電圧100 kVでタングステン($Z=74$)をターゲットに用いた場合約0.7%である。

パルスX線で十分な予備電離を行うには、0.1～1 kA程度の電流が必要であるが、通常の熱陰極ではこのような大電流を得ることは困難である。このため繰返しが遅い場合には冷陰極を用いるが、数百Hz以上の高速繰返しになると

Fig. 1 Electrode systems of x-ray flash tubes; (a) conical anode and ring cathode, (b) hot cathode type, (c) forward x-ray type.

陰極上にホットスポットが生じ電子放出が不均一になる。このため、最近開発されているKHz級の装置では熱陰極型が多いようである²³⁻²⁶⁾。典型的なX線管の電極構成をFig. 1に示す。管電圧100 kV以下で比較的低い電圧では、電子ビームに対して60~80°方向にX線のピークが現われる。加速電圧によってX線の発生効率のよい電極構成は異なる²⁴⁾。

X線と物質の相互作用の基本は、X線の光量子と核外電子との相互作用である。X線は物質中を伝播するとき、散乱と吸収という二つの異なる過程で減衰する。X線のエネルギーが1 MeV以下では、その主な相互作用はコンプトン効果と光電効果である。前者は、X線光量子が電子と衝突し、この電子を原子外に跳び出させ、光量子自体は運動の向きを変える現象である。この際、入射光量子のエネルギーが電子に運動エネルギーの形で与えられ、衝突後の光量子エネルギーは減少する。従って、散乱された光量子の波長 λ_2 は入射光量子の波長 λ_1 より大きくなり、その変化は次式によって与えられる。

$$\Delta\lambda(A) = \lambda_2 - \lambda_1 = 0.0243(1 - \cos\phi) \quad (3)$$

ここで ϕ は光量子の散乱角である。

光電効果は、原子や分子が光量子を吸収して電子を追出す現象である。光量子のエネルギー $h\nu$ がイオン化エネルギー W より大きい場合、その差は光電子の運動エネルギーになり、これ

Table I The energy(W-value) to produce an electron-ion pair.

Matter	W-value (eV)
He	46.0
Ne	36.8
Ar	26.4
Kr	24.1
Xe	21.9
Air	33.7
CO ₂	32.9

を T_e で表わせば

$$T_e = h\nu - W \quad (4)$$

となる。跳び出した光電子のエネルギーが W より大きいと、さらにそれらは原子や分子と衝突し、その運動エネルギーが W 以下になるまで電離を繰返す。種々の原子及び分子のイオン化エネルギーをTable Iに示す。例えば、照射線量が10 mRの場合空气中に生成されるイオン対は $2.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ である。このとき空氣に吸収されるX線のエネルギーはわずか $1.2 \times 10^{-10} \text{ J cm}^{-3}$ でしかない。X線のパルス幅を100 nsecとすると、イオン対の生成速度は $2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ S}^{-1}$ となる。一方、ハロゲンドナーの電子付着系数を $\sim 10^{-9} \text{ cm}^{-3} \text{ S}^{-1}$ とし、その密度を $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とすると、予備電離電子数は $2.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ となる。したがってX線の発生効率及びレーザーガスによる吸収は非常に小さいが、 $\sim 10^{-9} \text{ J cm}^{-3}$ 程度のエネルギー密度で十分な予備電離電子数密度が得られる。X線の発生効率を0.1%、レーザー体積を 10^3 cm^3 、照射効率を1%としても原理的には、予備電離に必要なX線管の蓄積エネルギーは、わずか0.1 Jにしかならない。

3. 電子数密度の測定

予備電離源の性能を評価するには、それによって生成される電子数密度を測定する必要がある。

Tabl II Performance and operating parameters of the x-ray generator.

Dose per pulse at 30 cm	34 [mR]
X-ray pulse width (FWHM)	400 [ns]
Operating voltage	100 [kV]
Pressure	1×10^{-3} [torr]

Fig. 2 Schematic drawing of experimental setup for electron density measurement.

る。そこで、紫外線とX線の両者について電離箱を用いて生成電子数密度の測定を行った。この実験に用いられたX線管のダイオードは、Fig. 1 (a)に示されるような円錐形のタングステン陽極とリング型陰極で構成される。駆動電源は全容量4 nF、開放電圧120 kVの2段マルクス発生器である。X線管から60cmの位置における線量は約34 mRで、パルス幅は400 nsecである。X線管の性能及び実験装置の概略をそれぞれ Table II, Fig. 2 に示す²⁸⁾。

生成電子数密度は電離箱にX線及び紫外線を照射したときにピックアップ抵抗 r の両端に現われる電圧 V_r を測定することにより次式を用いて計算される。

$$n_e = \frac{V_r}{e V_d A} \quad (5)$$

ここで e は電子の電荷、 V_d は文献31より得られた電子のドリフト速度、 A は電極面積である。

Fig. 3 に各希ガスの圧力に対する電子数密度の変化を示す。管電圧は100 kVである。原子番号が大きくなるにつれて質量吸収係数が大きくなるので、生成電子数密度は増加する。この傾向は特に、実際の希ガスハイドレーザで重

Fig. 3 Produced electron density in various gases.

Fig. 4 Produced electron density against Kr concentration for various pressure of He. The x-ray tube voltage was 100kV.

要である。すなわち、XeClレーザーやKrFレーザーガス中に含まれるXeやKrの割合は高々数%であるが、Fig. 4に示されるように、それらの濃度により生成電子数密度は大きく変化する。例えば、純He 1気圧中に生成される電子数密度は $6.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ であるが、Krを4%加えると $6.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ と1桁増加する。また、生成電子数は圧力に比例して増加する。以上のような結果から、X線の特性そのものが高圧力動作の希ガスハイドレーザーの予備電離に非常に適していることが理解されよう。

荷電粒子や紫外線に比べて、X線が予備電離源として優れている点は、その透過力の大きさにある。スパークにより発生する紫外線は、装置が非常に簡単で小型のレーザーには適するが、1気圧のHeやAr中での透過距離はせいぜい数cmである⁶⁾。このため、大体積高気圧の装置では、そのエネルギーの大部分は、予備電離源と主放電電極の間に存在するレーザー媒質に吸収されてしまう。KlineとDenes⁸⁾が報告しているように、たとえ電界と平行方向の予備電離の均一性は不必要で、主放電電極表面付近のみの均一性が要求されるとしても、紫外線の透過力の弱さはそれだけスパークで消費されるエネルギーを増加させ、その結果レーザー媒質の劣化を促進する³⁴⁾。

Fig. 5に紫外線とX線を用いた場合の距離に対する規格化された生成電子数密度の変化を示す。測定は、5組の分割電極をもつ電離箱を用いて行なわれた。各電極は幅2cm、長さ15cmで3cm間隔に並べられた。位置ゼロの点は、X線管から60cm、スパーク電極から7cmの距離にあり、X線は厚さ1cmのアクリル窓を通して電離箱内に導かれた。紫外線は、20kVに充電された容量8nFのコンデンザーに直列に接続された6個のピンスパークにより発生された。紫外線の吸収長はガス中に含まれる不純物に大きく影響されるが、今回用いた希ガスの純度は99.99%以上である。本実験に使用したX線管はポイントターゲットであるため、吸収以外に距離による減衰も含まれている。角拡がりによる照射

Fig. 5 Variation of electron density in He-buffered mixture with Kr (3%) produced by UV and x-ray.

Fig. 6 Absorption coefficient of x-ray photons for various rare gases. The gas pressure is 1 atm at 300 K.

Fig. 7 Variation of electron density against shot number in He-buffered mixture with Kr (3%) at 3 atm.

効率の低下は、ダイオードの形状をFig. 1 (c) のようなものにし、発生源とレーザー管を接近させることにより改善できる。Fig. 6 に1気圧の希ガスの真の吸収係数を示す。

その強力な透過力による予備電離の均一性に加えて、X線が予備電源として優れている点は、レーザー媒質を全く汚染しないことである。これは、X線源がレーザー管の外部に設置できるためであり、その結果レーザー媒質の寿命は著しく改善される。このため、最近の高速繰返し装置は、ほとんどX線予備電離を採用している。Fig. 7 に紫外線とX線によるショット数に対する予備電離電子数密度の変化を示す。紫外線を用いた場合、電子数密度が減少しているのはスパークにより発生した不純物による吸収が原因である。特に、エキシマーレーザーでは不純物によるレーザー光の吸収や不純物とハロゲンドナーの反応などがレーザー媒質の寿命を短くする。今回紫外線源に用いたピンスパークは沿面スパークに比べれば、レーザー媒質の劣化は少ないが³⁶⁾、X線の場合はほとんど電子数密度の減少は認められなかった。これに対して、ピンスパークではわずか5ショットで生成電子数密度は半減した。

Fig. 8 Schematic drawing of x-ray preionized KrF laser system.

4. 予備電離と KrF レーザー出力の関係²¹⁾

X線を用いることにより予備電離電子数密度やその空間分布をレーザーパラメーターとは独立に制御できる。このようなX線の特徴を活用して、予備電離のレーザー出力に与える影響を実験的に調べた。実験装置の概略をFig. 8 に示す。光軸方向の予備電離の均一性を改善するためにレーザー管から30cmの位置にX線管を2本並列に設置した。X線管は各々開放出力200kV全容量2.7nFの4段マルクス回路で駆動された。電柱はリング型陰極と円錐形タングステン陽極を用いた。管電圧160kVのときレーザー管の位置における線量は60mRであった。レーザー管はアクリル製で長さ85cmのChang型電極が4cmの間隔で設置された。主放電電源には容量35nF、電圧パルス幅65nsecの水パルス整形線路(PFL)を用いた。このPFLは出力電圧200kV、全容量60nFの4段マルクス回路によってパルス充電された。レーザー共振器は誘電体膜全反射鏡と出力取出し用CaF₂平板で構成された。レーザーエネルギーはGen-Tec ED-500ジュールメーターで測定し、レーザー波形はパイプナ光電管で検知しTektronix 7844オシロスコープで観測した。

予備電離電子数密度は、ハロゲンドナーを含まない希ガスのみの混合ガスを封入した電離箱を用いて測定した値から、ハロゲンドナーによる電子付着を考慮して計算により求めた。実際のレーザーガスによる真の予備電離電子数密度は次式で与えられる。

$$n_e = \frac{S}{\beta n_h} \{ 1 - \exp(-\beta n_h t) \} \quad (6)$$

ここで S はハロゲンドナーを含まないときの電子生成速度で、 n_h はハロゲンドナー密度、 β はハロゲンドナーの電子付着係数である。電子付着過程にくらべて電子-イオンの再結合及び拡散は非常に遅く無視できる。

予備電離電子数密度に対する KrF レーザーエネルギー及びパルス幅の関係を Fig. 9 に示す。電子数密度は X 線管の前に置かれた銅板の厚みを変えることにより制御した。レーザーガス圧は 2.5 気圧 ($F_2 = 0.1\%$, $Kr = 5\%$) で希釈ガスとして He を用いた。

Fig. 9 に示されるように予備電離電子数の増加に対してレーザーエネルギーは対数的に増加した。この結果は次式のように表わされる。

$$E_L = a \log n_e + b \quad (7)$$

ここで、 E_L はレーザーエネルギーであり、 n_e は予備電離電子数密度、 a 及び b は定数である。一方、レーザーパルス幅も同様な傾向を示した。主放電の入力エネルギーを一定として予備電離電子数密度を減少させると、実際には放電幅自体も減少する傾向がある。このような放電領域及びレーザー出力の変化にもかかわらず、レーザー管の外部で測定されるマクロな電流及び電圧波形にはほとんど変化が認められなかった。

Fig. 9 Effect of preionization electron density on KrF laser energy and pulse width (FWHM).

Fig. 10 Effect of preionization electron density on KrF laser energy. Preionization distribution was varied by masking the x-ray with a thick Pb plate.

Fig. 10に電界と平行方向に予備電離領域を変化させたときの KrF レーザーエネルギーを示す。X線はレーザー管の前に置かれた厚さ 2 mm の鉛板によって遮蔽された。この鉛板により 100 KeV の X線は約 6 桁減衰される。X線管電圧は 160 kV であった。鉛板を陰極方向に移動させ予備電離領域を減少させるにしたがってレーザーエネルギーは減少し、全領域が遮蔽された場合、発振は得られなかった。また、出力の強度分布をポラロイドフィルム上のバーンパターンで観測したところ、予備電離された領域に比べて遮蔽された領域の出力が弱いのが確認された。主放電のパルス幅を 100 nsec としても、その間に電子の移動する距離はせいぜい数ミリである。このため、予備電離の均一性が主放電の電流密度分布に大きく影響するものと考えられる。特に希ガスハイドロレーザーのような電氣的負性気体を含むガス中の短パルス高密度励起では予備電離のミクロな均一性が必要である。

Fig. 11 Schematic drawing of XeCl laser discharge head; (a) with UV preionizer and (b) with x-ray preionizer.

5. XeCl レーザーに必要な予備電離電子数密度³⁸⁾

XeCl レーザーに必要な予備電離電子数密度を測定するとともに、X線と紫外線の特性を比較するために、Fig. 11に示されるようなレーザー装置を製作した。紫外線は2本のテフロン管上に設置された真ちゅう電柱の沿面スパークアレイによって発生された。各スパークアレイは、充電電圧25kV、容量52nFのコンデンサーに接続されている。スパーク電極のギャップは1mmでスパーク数は50であり、主放電電極の上方2cmの位置に取り付けられた。

X線管は、開放出力200kV全容量3.75nFの同軸型4段マルクス回路により駆動された。陰極は、長さ60cmのアルミニウム棒上に固定された厚さ25 μ mの2枚のチタン箔を用い、陽極には厚さ13 μ mのタンタル箔を使用した。このタンタル箔の厚さは、X線の透過と電子制止距離を考慮してX線の前分散が最大になるように決定される^{30,31)}。前方に散乱されたX線は厚さ0.5mmのアルミニウム窓を通してレーザー管に照射される。このアルミニウム窓は真空のダイオード部と高圧のレーザー管を隔離する。

主放電は、2重平行平板型水パルス整形線路を自爆型レールギャップでスイッチすることにより駆動される。放電体積は、高さ3cm、幅3cm、長さ50cm (0.45 l) である。PFL の特

Fig. 12 Variation of electron number density produced by UV preionizer in He at 3 atm.

性インピーダンスは0.8 Ω 、パルス幅80nsecで2段マルクス回路により約100kVにパルス充電される。充電時間は約500nsecである。共振器はアルミニウム全反射鏡とCaF₂平板出力鏡で構成された。

まず、X線の均一性を測定するために、ラドカラーフィルムを用いて電子ビームの一様性を確認した。さらに分解能約2cmの平行平板型電離箱を用いて得られた電子数密度のレーザー光軸方向のバラつきは $\pm 10\%$ 以下であった。

Fig. 12にスクリーン陰極の裏から沿面スパークにより予備電離を行った時の生成電子数密度とショット数の関係を示す。使用したガスはHeで圧力は3気圧である。電子数密度は、主放電電極に低電圧を印加し、ピックアップ抵抗の両端の電圧を測定することにより求めた。Fig. 12に示されるように生成電子数密度は20ショットで約1/3に減少した。これは、沿面スパークにより発生した不純物が紫外線を吸収するためである。これに対して、X線の場合このような減衰は全く見られなかったが、電子数密度の絶対値は沿面スパークより3桁小さかった。

予備電離法や放電体積によって主放電電極の形状は異なる。主放電幅を広くとるときには、一般には電極の裏側から予備電離を行なうが、紫外線などを用いる場合は、スクリーン電極

Fig. 13 XeCl laser energy against preionization electron density for a perforated cathode and a flat-aluminum cathode.

Fig. 15 Preionization electron density dependence of XeCl laser peak power and pulse width.

Fig. 14 Measured electron density against charging voltage for Ne-buffered mixture with Xe (0.65 %) at 5 atm and for He-buffered mixture with Xe (0.65 %) at 3 atm.

を使用しなければならない³³⁾。これは、予備電離が不均一になるばかりでなく、電極自体が電界を乱すことになる。予備電離の効果を正確に調べるには、このようなスクリーン電極の影響を排除しなければならない。そこで、Fig. 11(b)に示されるように、鉛製のコリメートマスクをもったアルミニウム平板電極の裏側からX線により予備電離する方法を用いた。このマスクに

より予備電離領域の幅は3 cmに制限された。

Fig. 13に平板電極とスクリーン電極を用いた場合の予備電離電子数密度に対するXeClレーザーエネルギーの変化を示す。レーザーガスの全圧力は3気圧でXeが0.65%，HClが0.13%含まれる。希釈ガスはHeである。HClを除いた混合ガス中にX線により生成された電子数密度をFig. 14に示す。HClを加えた時の真の予備電離数密度は(6)式を用いて計算した。Fig. 13に示されるようにレーザーエネルギーは陰極構造と予備電離電子数密度に依存する。 $2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 以下の比較的低い予備電離レベルでは、アルミニウム平板を用いた方がレーザーエネルギーは大きい。これは、スクリーン陰極による予備電離及び電界の不均一性に起因するものと考えられる。X線の強度を増すと、スクリーン陰極の場合X線の拡がりによって放電領域が広がるとともに電界の乱れが電子数の増加によって補なわれるため出力エネルギーが増加すると考えられる。これに対して、アルミニウム平板電極の場合は、予備電離領域が限定されているうえに、電界の均一性が補償されているので、出力エネルギーは電子密度 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 付近で飽和する。このとき発振に必要な最小予備電離電子数密度は、 $6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ であった。スクリーン電極を用いて得られた最大出力は、X線で0.97 J、

Fig. 16 Time histories of XeCl laser and discharge current for various preionization electron density and buffer gases; (a) Ne-buffered mixture at 5 atm with preionization level of $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, (b) Ne-buffered mixture at 5 atm with $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, (c) He-buffered mixture at 3 atm with $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, (d) He-buffered mixture with $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$. Vertical: 20 kA/div. Horizontal: 20 nsec/div.

Fig. 17 Effect of preionization electron density on XeCl laser energy and pulse width (FWHM) for Ne-buffered mixture at 5 atm.

紫外線の場合は予備電離電子数密度が3桁大きいにもかかわらず0.95 Jであった。

一方、パルス幅 (FWHM) 及びピークパワーの予備電離電子数に対する変化はFig. 15に示されるか、それぞれ出力エネルギーとほとんど同様な傾向を示した。このような出力の変化にもかかわらず、測定された主放電の電流電圧波形

は、 6×10^5 から $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ の範囲でほとんど変化がなかった。X線予備電離によるXeCl レーザー及び電流波形をFig. 16に示す。

Fig. 17に Ne を希釈ガスとして用いたときの予備電離電子数密度に対するXeCl レーザーエネルギー及びパルス幅の変化を示す。全圧力は5気圧 (Xe = 0.65 %, HCl = 0.09 %) である。発振に必要な最小予備電離数密度は $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ であった。出力エネルギー及びパルス幅とも、 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 付近までは予備電離電子数密度の増加に対して急激な増加を示すが、それ以上の密度においては増加率は減少する。アルミニウム平板電極を用いて得られた最大出力は 1.45 J で、このときの予備電離電子数密度は $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ であった。ポラロイドフィルム上のパターンによる観測では、レーザーの横幅は2.5 cmであった。同様な条件でスクリーン電極を用いた場合、X線で 1.95 J、紫外線で 1.7 J の出力が得られた。それぞれレーザーの幅は 3.5 cm, 3 cmであった。このときのX線による予備電離電子数密度は $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ で紫外線に比べて3桁小さい。

6. 結論

X線予備電離希ガスハライドレーザーにおける予備電離電子数密度及びその空間分布並びに主放電電極形状の相異とレーザー出力の関係を中心にX線予備電離の特徴を解説したが、結論としてまとめると、次のようになる。

- 1) X線予備電離は紫外線スパークなどに比べて不純物の発生がなくレーザーガスの寿命が著しく長くなる。
- 2) レーザーのビーム質を均一にするためには活性体積全体を均一に予備電離できるX線が優れている。
- 3) 予備電離領域が制限されない場合、出力エネルギーは予備電離電子数の増加に対して対数的に増加する。これは、主に放電幅が広がり起因するもので、電極形状にも依存すると思われる。
- 4) 予備電離領域が限定され、その領域内で電

界が均一であれば、予備電離電子数密度 $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ で出力は飽和する。

- 5) このとき発振に必要な最小予備電離数密度はガス圧や混合比に多少依存するが、He希釈で3気圧の場合 $6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、Neで5気圧のとき $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ であった。

X線は、その透過力の大きさから希ガスハライドレーザーのような高圧力レーザーに適しており、特に大体積を均一に予備電離できる点においては他の追従を許さない。さらに、予備電離源がレーザー管の外部に設置できるため、レーザー管や電極の設計が非常に容易になるとともに電子ビームで問題となるような窓材の制限もほとんどない。半導体加工や光化学においてエキシマーレーザーの果す役割は今後ますます増大するものと思われるが、そのような分野において必要とされる平均出力の増加やガスの長寿命化並びにビーム質の均一化にはX線予備電離が解決策を与えてくれるだろう。

参 考 文 献

- 1) O. R. Wood: Pro. IEEE **62** (1974) 355.
- 2) H. J. Seguin and J. Tulip: Appl. Phys. Lett. **20** (1972) 414.
- 3) M. C. Richardson, A. J. Alcock, K. Leopold and P. Burtyn: IEEE J. Quantum Electron. **QE-9** (1973) 236.
- 4) A. J. Alcock, K. Leopold and M. C. Richardson: Appl. Phys. Lett. **23** (1973) 562.
- 5) H. J. Seguin, J. Tulip and D. Mcken: Appl. Phys. Lett. **23** (1973) 527.
- 6) H. J. Seguin, J. Tulip and D. C. Mcken: IEEE J. Quantum Electron. **QE-10** (1974) 311.
- 7) L. J. Denes and L. E. Kline: Appl. Phys. Lett. **30** (1977) 197.
- 8) L. E. Kline and L. J. Denes: J. Appl. Phys. **46** (1975) 1567.
- 9) A. J. Palmer: Appl. Phys. Lett. **25** (138) 1974.
- 10) S. Suzuki, Y. Ishibashi, M. Obara and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 26.
- 11) C. R. Tallman: LASL Tech. Re. LA-UR **79** :1630 (1979).
- 12) R. S. Taylor, A. J. Alcock and K. E. Leopold: Opt. Lett. **5** (1980) 216.
- 13) I. B. Bigio: IEEE J. Quantum Electron. **QE-14** (1978) 75.
- 14) M. Obara, T. Okuno, S. Sumida, R. Ikeda, T. Fujioka and R. Fujimoto: 10th IQEC k2, May 29—June 1, 1978, Atlanta.
- 15) S. Sumida, M. Obara and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 913.
- 16) S. C. Lin and J. I. Levatter: Appl. Phys. Lett. **15** (1979) 505.
- 17) B. L. Wexler and R. L. Burnham: Topical meeting on excimer MB3, Jan. 10–12, 1983, Incline Village, Nevada.
- 18) S. C. Lin, Z. Bao, G. Gong, Y. Huo, J. Shu, S. Tang, Y. Wei and C. Zheng: Appl. Phys. Lett. **18** (1981) 328.
- 19) B. D. Cullity: X-Ray Diffraction (Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1967).
- 20) S. I. Levatter and S. C. Lin: Appl. Phys. **51** (1980) 222.
- 21) S. Sumida, K. Kunitomo, M. Kaburagi, M. Obara and T. Fujioka: J. Appl. Phys. **52** (1981) 2682.
- 22) H. Shields and A. J. Alcock: Opt. Commun. **42** (1982) 128.
- 23) C. R. Tallman and I. J. Bigio: Appl. Phys. Lett. **42** (1983) 149.
- 24) R. Germer: J. Phys. E: Sci. Instrum. **12** (1979) 336.
- 25) S. R. Byron, S. E. Moody, G. J. Mullaney and P. E. Cassaday: CLEO 82 WD-4, Apr. 1416, 1982, Phoenix Arizona.
- 26) R. R. Butcher, S. Swisher, G. F. Erickson, R. Tennant and W. Willis: Topical meeting on excimer laser MB5, Jan. 10–12, 1983, Incline Village, Nevada.
- 27) T. Arai, M. Obara and T. Fujioka: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 235.
- 28) S. Sumida, M. Kaburagi, M. Obara and T. Fujioka: Pro. Int. Con. Laser **79** (1979) 219.
- 29) K. Midorikawa, K. Wakabayashi, K. Nakamura, M. Obara and T. Fujioka: J. Appl. Phys. **53** (1982) 3410.
- 30) J. I. Levatter and Z. Li: Rev. Sci. Instrum. **52** (1981) 1651.
- 31) G. R. White: NBS Report No. 1003.
- 32) J. L. Pack and A. V. Phelps: Phys. Rev. **121** (1961) 798.
- 33) S. Watanabe and A. Endoh: Appl. Phys. Lett. **49** (1982) 799.
- 34) R. Tennant: Laser Focus **17** (1981) 65.
- 35) R. B. Babcock, I. Liberman and W. D. Partlow: IEEE J. Quantum Electron. **QE-12** (1976) 29.
- 36) K. Matsumoto, K. Sueoka and T. Fujioka: Japan J. Appl. Phys. **19** (1980) 1959.
- 37) Q. H. Lon, Q. S. He and S. C. Lin: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 514.
- 38) K. Midorikawa, M. Obara and T. Fujioka: IEEE J. Quantum Electron., Mar. (1984) (to be published).