レーザーオリジナル

大容量 X 線予備電離 XeCl レーザーの出力及び放電特性

挾間 寿文*・宮崎 健創*・山田家和勝*・佐藤 卓蔵*

(1987年7月27日 受理)

Output and Discharge Characteristics of an X-Ray Preionized
XeCl Laser with a Large Active VolumeToshifumi HASAMA*, Kenzo MIYAZAKI*, Kawakatsu YAMADA
and Takuzo SATO*

(Received July 27, 1987)

The output and discharge characteristics of an x-ray preionized XeCl laser with a pulse forming line (PFL), a rail-gap switch (RGS) and a pulse transmission line (PTL) in the excitation circuit are described in detail. It is found that the relatively large inductance of the RGS leads to the efficient energy deposition into the discharge plasmas when the RGS is placed between the PFL and the PTL. The laser system with a low output impedance of 0.26Ω has produced the maximum laser energy of 50 J in an 85-ns pulse (FWHM). The highest electrical efficiency obtained is 3.1%. The discharge stability is also discussed, based on the measurements of laser pulse-shape, laser energy and voltage on the laser electrode.

Key Words: X-ray preionized XeCl laser, Pulse forming line, Rail-gap switch, Pulse transmission line.

1. はじめに

希ガスハライドエキシマレーザーは、紫外域で高い利得と広い利得帯域をもつため、短パルス ($\leq \text{ns}$) 紫外レーザー増幅器として使用することにより、極めて高い尖頭値をもつレーザーパルスを得ることができる。このようにして得られた高出力紫外レーザーを、内殻励起による反転分布の形成¹⁾や高次非線形光学過程²⁾に利用することにより、極端紫外領域 (100 nm 以下) でのコヒーレント光発生が可能になっている。一方、大出力ガラスレーザーの第二高調波照射

によって生成されたレーザープラズマからは、軟 X 線領域での誘導放出光が観測されている³⁾。これらの実験結果は、短パルス紫外レーザーの大出力化が極端紫外域から X 線領域でのコヒーレント光発生の有力な励起源となることを示しており、高効率増幅を可能とするエキシマレーザーの開発が重要な研究課題となっている。

希ガスハライドエキシマレーザーは、上準位寿命が数 ns 以下と極めて短い非蓄積型レーザーであり、ガラスレーザーなどの固体レーザーがもつ Q-スイッチ効果は数 ns 以下の極めて短い時間でしか期待することができない。このため、

* 電子技術総合研究所電波電子部レーザー研究室 (〒305 茨城県筑波研究学園都市)

* Laser Section, Radio- and Opto-Electronics Division, (Electrotechnical Laboratory)

エキシマレーザーを増幅器として用いる場合、レーザー媒質の高利得化と大断面積化が大きな増幅出力を得るために必要である。このような要請を満たす大断面積大出力エキシマレーザーの研究は主に、電子ビーム励起によって進められており、KrFレーザーによって10kJの出力が達成されている⁴⁾。これに対し、放電励起装置による大断面積化の研究は、ほとんど行なわれておらず、10cm以上の電極間距離をもつ装置がChampagneら⁵⁾によって開発されているにすぎない。彼らは、この装置によって60JのXeClレーザー出力を得ているが、パルス幅は200 nsとかなり長い。このような長いパルス幅をもつ装置では、効率的な増幅に必要な高い利得を期待することはできない。

筆者らは、極端紫外からX線領域でのコヒーレント光発生の研究を行なうために、放電励起エキシマレーザーによる短パルス紫外レーザー増幅システムの開発を進めている⁶⁻⁸⁾。短パルスレーザーの効率的な増幅を行なうために、増幅システムの最終段増幅器として、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の断面積をもつX線予備電離エキシマレーザーを開発した^{9,10)}。この増幅器をXeClレーザー発振器として使用したとき、85nsのパルス幅で最大出力50 Jを得ることができる。このときの尖頭出力は0.59 GWに達している。また、最大電気効率3.1%が17.6Jの出力で得られている。

本報告では、X線予備電離大容量エキシマレーザーの予備電離特性及び出力特性の詳細な実験について述べるとともに、主スイッチであるレーलगャップスイッチ(RGS)の動作特性について詳述する。また本実験は、負性ガスを含む大容量(≤ 101) 高気圧(≤ 6 気圧) 高電圧($\leq 400 \text{ kV}$)放電であるため、放電現象という観点からも興味深い問題を含んでおり、実験結果に基づいて、特に放電の安定性について議論する。

2. レーザー装置

X線予備電離エキシマレーザー装置の断面図をFig. 1に示す。レーザー装置は、すでに報告

Fig. 1 Cross section of the x-ray preionized excimer laser. Dashed lines show the PTL with 0.26Ω output impedance.

されている装置^{9,10)}と本質的に同じであり、10段マルクス電源パルス整形線路(PFL)、レーलगャップスイッチ(RGS)、パルス伝送線路(PTL)、レーザー放電管及びX線発生装置により構成されている。

PFLの容量、特性インピーダンス及び電気パルス往復時間は、それぞれ52nF, 0.87Ω , 90 nsである。PTLは、PFLインピーダンスの低いインピーダンス化を図るとともにレーザー放電管の取り付けを容易にしている。ここで、PFLの特性インピーダンスは以前報告した値^{9,10)}と異なっている。これは特性インピーダンスの正確な値を求めるために、PFLの中間電極の厚みを考慮した結果である。PTLの特性インピーダンスに関しても同様の考慮を行なった。

今回の実験では、PTLによってインピーダンス変換することの効果調べるために、PTLの入力端インピーダンス Z_{in} を $Z_{in} = 0.87 \Omega$ から出力端インピーダンス $Z_{out} = 0.48 \Omega$ へ変換した場合と、 $Z_{in} = 0.87 \Omega$ から $Z_{out} = 0.26 \Omega$ へ変換した場合について実験を行なった。PTLのパルス伝送時間は45nsである。

主スイッチであるRGSの両端及び上方3ヶ所には窓が取り付けられており、レーザートリガーによるスイッチが可能である。レーザー電極は幅17cm、長さ120 cmの高電圧電極と厚さ1 mmのアース側平面電極で構成されており、電極

間隔は10cmである。放電管と高電圧電極は塩化ビニール板で絶縁されている。

予備電離用X線発生装置は、冷陰極電子ビームとタンタル箔のターゲット電極によって構成されている。今回の実験で使用した電子ビームの最大加速電圧と最大電流はそれぞれ180 kV, 6.8 kAであり、この時の電圧パルス幅(FWHM)は1.0 μ sであった。この電子ビーム条件のとき、X線量は140 mRであった。また、この時のX線パルス持続時間は1.3 μ sであり、X線強度のピークはX線照射後、約0.3 μ sであった。レーザー共振器は、合成石英のレーザー管窓と誘電体多層膜蒸着した平面全反射鏡によって構成した。共振器長は2 mである。

PFL充電電圧及びレーザー電極電圧は、硫酸銅溶液を使った高電圧分圧器によって測定した。分圧器の分圧比は、45 kVに充電したPFL充電電圧を基準にしてTektronix P6015高電圧プローブによって校正した。レーザー出力は大出力用カロリメータ(日本高周波LDC-120 A)で測定した。レーザーパルス波形はパイラナー光電管(浜松ホトニクスR1193U-02)で観測した。

3. レールギャップスイッチの動作特性

放電励起エキシマレーザーの効率的な発振のためには、励起回路と放電プラズマとを結合する回路素子のインダクタンスをできるだけ小さくし、立ち上がりの速い放電電流を実現する必要がある。このような低インダクタンス結合は、結合回路素子を用いない、いわゆる自動予備電離容量移行型エキシマレーザーで実現されており、かなり高い電気効率を達成している^{7,8)}。しかし、レーザー出力の大出力化を目的として水などを誘電体媒質とした低インピーダンスPFLを使用する場合、一般に結合回路素子としてレールギャップスイッチ(RGS)を用いる。RGSは、それ自体低インダクタンススイッチであるが、多チャンネルアークによってスイッチすることができれば、極めて低インダクタンスの結合回路素子となる。しかし、特別な工夫を行な

Fig. 2 Temporal behaviors of voltages on the laser electrode with a fast rise (a) and a slow rise (b).

わなければ、多チャンネルアークスイッチは非常に困難である。

筆者らの開発した装置もまた、励起回路中にRGSを使用している。しかし、RGSがPFLとPTLの結合素子として使われているため、RGSのインダクタンス L_R とレーザー出力の関係は、レーザー電極との結合素子として使用した場合と大きく異なっている。Fig. 2はPTLの先端部で測定したレーザー電極電圧波形を示している。このときの放電条件は、PFL充電電圧 $V_{PFL} = 154$ kV, $HCl/Xe/Ne = 2/20/2478$ Torrである。図に示した波形において、 L_R の情報は、レーザー電極電圧が上昇し放電が開始するまでの部分に含まれている。このときの電圧はレーザー電極による反射電圧波と入射電圧波の重ね合わせであり、しかも、入射電圧波はPTLのインピーダンス変換によってPTLの入力端電圧に比べて $\sqrt{Z_{out}/Z_{in}}$ 倍だけ減少している。また、放電開始後のレーザー電極電圧は、レーザー電極間電圧及び放電電流 I_a とレーザー電極回りのインダクタンス L_a によって発生する $L_a \cdot (dI_a/dt)$ 電圧との重ね合わせになっていることに注意する必要がある。

上記放電条件のもとでは、図に示した二通りの波形のみが存在する。特に、電圧の立ち上がり部分は、図に示した二つの波形が極めて再現性よく観測される。この結果は、 L_R の変化に対応しており、二通りの L_R のみが存在することを示している。

この L_R の変化はRGSスイッチ時のアークチ

Fig. 3 Temporal shapes of laser pulses observed at voltages on the laser electrode with a fast rise (a) and a slow rise (b).

チャンネル数の変化に対応しているものと考えられる。PFLの充電時間が $0.8 \mu\text{s}$ とかなり長いことを考慮すれば、 L_R の変化に対応するアークチャンネルの本数は1本或いは2本であると考えることができる。図に示した二通りの電圧波形は、放電初期においてランダムに現われるが、放電回数の増加とともに次第に(b)の波形が支配的となる。

Fig. 3 (a)(b)はFig. 2の(a)(b)のそれぞれの波形が得られる放電条件で観測されたレーザーパルス波形を示している。これらのパルス波形の再現性は非常によく、パルス幅 τ (FWHM)は 85ns と 95ns である。また、(a)(b)のパルス波形に対するレーザーエネルギーを E_a 、 E_b とすれば $E_a/E_b \approx 0.9$ である。この比率は、 HCl 分圧の変化や全圧力の変化、放電回数の増加に伴うレーザー出力の低下などの放電条件の変化にかかわらずほぼ一定である。これらの実験結果は、 L_R の大きい方がより大きなレーザーエネルギーとより広いパルス幅を与えることを示している。

以上の結果は定性的には次のように考えることができる。PFLに蓄えられた電気エネルギーは、RGSの自爆後、PTLを電圧波となって進行する。このとき、 L_R のために電圧波はFig. 2に示したようなゆるやかな立ち上がりをもつ。このため、電圧波は、レーザー電極に到着後直ちに放電破壊を引き起こすことができず、

Fig. 4 Temporal behaviors of PFL voltages observed at voltages on the laser electrode with a fast rise (a) and a slow rise (b).

PTLの先端部で反射する。このとき、レーザー電極には進行波の2倍の電圧が印加される。この反射波がRGSに到着すると、 L_R の存在のために反射波とPFLへの進行波に分割される。PFLに進行する電圧波は L_R の増加とともに減少するため、 L_R の大きい方がより大きなエネルギーをPTLの中に蓄えることができる。この結果、より大きな L_R でRGSがスイッチするならば、発振が可能な時間内により大きなエネルギーを放電プラズマ中へ注入することが可能となる。

以上の考察は、Fig. 4に示したPFL電圧波形によって確かめることができる。Fig. 4 (a)(b)の波形には、(1)(a)では、RGSの自爆後、PFL電圧が(b)に比べて早く減少していること、(2)(a)の波形には、(b)の波形に現われていない小さな山が現われていること、の二つの顕著な違いが認められる。第一点は、PFLからPTLへ進む電圧波の立ち上がりが速く、結果的に、PFLに蓄えられたエネルギーがより速くPTLへ伝送されたことを示しており、第二点は、PTLへ進行した電圧波がより多くPFLに再び戻ってきたことを示している。これらは、いずれも(a)の場合の L_R が(b)の場合に比べて小さいことを示している。

4. 出力及び放電特性

エキシマレーザーの出力エネルギーは、予備電離条件、HCl分圧、全圧力、PFL充電電圧など多くの放電条件に依存しており、レーザーの高効率化、大出力化のためには、これらのパラメーターのレーザー出力依存性を調べる必要がある。一方、放電プラズマへの効率的なエネルギー注入や高い内部効率を達成するためには、安定かつ一様なグロー放電を達成、維持しなければならない。Taylor¹¹⁾は放電状態の直接的な観測を行なうことによって、放電の安定性と一様性について詳細に論じている。しかし、パルス波形の詳細な観測を行なうことによってもある程度放電の状態を推測することは可能である。以下の報告では、出力特性の放電パラメーター依存性だけでなく、パルス波形、出力エネルギー、レーザー電極電圧波形などの観測結果に基づいて、放電の安定性についても議論がされている。

4.1 予備電離依存性

予備電離条件の変化に伴うレーザー出力の変化を調べるため、電子ビーム加速電圧の立ち上がりから放電開始までの時間（遅延時間） t_d を関数としてレーザー出力を測定した。測定は、HCl/Xe/Ne=2/20/2478 TorrとHCl/Xe/Ne=10/20/2470 Torrのレーザーガスについて行なった。PFL充電電圧は $V_{PFL}=154$ kVであった。測定結果をFig. 5とFig. 6に示す。レーザーエネルギーはHCl分圧 $P_{HCl}=2$ Torrの場合、 $E_L=10.3$ J、 $P_{HCl}=10$ Torrでは $E_L=4.8$ Jで規格化されている。また、図中には矢印で示した遅延時間で観測したパルス波形を示している。

$P_{HCl}=2$ Torrの場合、 $t_d=0.2\sim 1.8$ μ sの間ほぼ一定の出力が得られている。X線照射時間、すなわち予備電離時間は1.3 μ sであるから、予備電離終了後約0.5 μ sの間は、予備電離状態の変化に対して放電状態が変化しないことを示している。このような放電状態であれば、Fig. 5中aの遅延時間で観測したレーザーパルス波

Fig. 5 Laser output as a function of delay time between preionization and laser discharge for a gas mixture of HCl/Xe/Ne=2/20/2478 Torr. Temporal shapes of laser pulses observed at the delay time of a, b and c are also shown in the figure.

Fig. 6 Laser output as a function delay time between preionization and laser discharge for a gas mixture of HCl/Xe/Ne=10/20/2470 Torr. Temporal shape of a laser pulse observed at the delay time indicated by an arrow is also shown in the figure.

形のようにパルス波形は二つの山をもち、その高さの比はほとんど変化しない。しかし図中bの遅延時間では第二パルスの高さは第一パルスの高さに比べ相対的に低くなっており、レーザー出力の減少は主に、第二パルスに含まれるレーザーエネルギーの減少によるものと考えられる。また、cで示した時間以上の遅延時間では第二パルスは消失し、第一パルスのパルス幅も減少する。

X線パルスの持続時間が1.3 μ sであることを

考慮すれば、 $t_d = 0.2 \sim 1.8 \mu\text{s}$ に渡る安定な出力は、この時間範囲において最低限必要とされる以上の予備電離状態が形成されていることを示すとともに、予備電離状態に起因する放電の不安定性が生じていないことを示している。また、図に示したパルス波形の変化は、放電の不安定性が予備電離状態に大きく依存しており、放電開始直後から放電の進行にともなって増大していくことを示している。

Fig. 6 に示した $P_{\text{HCl}} = 10 \text{ Torr}$ の場合もまた、 $t_d = 0.2 \sim 1.7 \mu\text{s}$ の広い時間範囲に渡って一定の出力が得られており、このような高い HCl 分圧でも、予備電離状態に起因する不安定性が生じないことを示している。この一定なレーザー出力は、予備電離終了後約 $0.4 \mu\text{s}$ の間維持されており、 $P_{\text{HCl}} = 2 \text{ Torr}$ の場合と大きく変わっていない。今回の実験で用いた電子ビーム加速電圧と発生 X 線量は以前の報告⁹⁾で X 線強度分布の計算のために用いた加速電圧及び X 線量と同じである。この X 線強度分布の計算結果を上記実験に適用すると、X 線によって生成した全電子数密度は $6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ と見積もることができる。しかし、生成した電子は、HCl の大きな電子付着係数のために、X 線照射終了後指数関数的に減少する。この減少の速さは HCl の数密度に比例するため、 $P_{\text{HCl}} = 10 \text{ Torr}$ では、 $P_{\text{HCl}} = 2 \text{ Torr}$ に比べて約 5 倍の速さで電子数は減少する。それゆえ、 $P_{\text{HCl}} = 2 \text{ Torr}$ と $P_{\text{HCl}} = 10 \text{ Torr}$ に対するレーザー出力の遅延時間依存性が大きく変化しないという実験結果は、電子の HCl 解離付着によって生成した Cl^- が予備電離電子の供給源となっていることを示しているように思われる。

4.2 HCl 分圧依存性

Fig. 7 に、 $P_{\text{HCl}} = 1 \text{ Torr}$ から 10 Torr まで変化させたときのレーザー出力を示している。このとき、Xe 分圧 $P_{\text{Xe}} = 20 \text{ Torr}$ 、Ne 希釈の全ガス圧 $P_t = 2500 \text{ Torr}$ である。また、Fig. 8 には、Fig. 7 に示した HCl 分圧で観測したレーザーパルス波形を示している。それぞれの HCl 分圧に対するパルス波形の縦軸は同じスケールではな

Fig. 7 Laser energy as a function of HCl pressure. The laser was operated at $V_{\text{PFL}} = 154 \text{ kV}$ and a gas mixture of $P_t = 2500 \text{ Torr}$ with 20-Torr Xe in Ne diluent.

Fig. 8 Temporal shapes of laser pulses observed at HCl pressures from $P_{\text{HCl}} = 1 \text{ Torr}$ to $P_{\text{HCl}} = 10 \text{ Torr}$. The scales of longitudinal axes are different for respective pulse-shapes.

い。

Fig. 7 のレーザーエネルギーは $P_{\text{HCl}} = 2 \text{ Torr}$ から 5 Torr の間であまり大きく変化していない。これに対して、パルス波形は顕著な変化を示しており、HCl 分圧の増加とともに第一パルスのパルス幅は $\tau = 100 \text{ ns}$ から $\tau = 55 \text{ ns}$ へ、またパルス持続時間 t_c も、 $t_c = 250 \text{ ns}$ から $t_c = 130 \text{ ns}$ へと次第に小さくなっている。さらに、 $P_{\text{HCl}} = 2.6 \text{ Torr}$ まで観測された第二パルスは $P_{\text{HCl}} =$

3.3 Torr 以上では現われなくなっている。PTLの電気パルス往復時間が90 nsであること及び第3節のレールギャップスイッチに関する考察から、この第二パルスは放電電流の反転に対応するものと考えられる。これらのパルスの形は、全圧力変化に対して余り大きく変化しない。このことは、パルス波形がHClの絶対圧に強く依存していることを示している。Fig. 7とFig. 8から、 $P_{\text{HCl}} = 4$ Torrのとき、レーザーエネルギー、尖頭値ともに最大値を示している。このため、以下の実験ではすべて HCl/Xe=4/20 Torrで行なった。また希釈ガスはNeとした。

4.3 全ガス圧依存性

エキシマレーザーの出力は、安定な放電が維持されている限り、主に放電プラズマへの実効的な注入エネルギー量に依存している。実効的な注入エネルギーは、放電電圧、放電電流及び発振しきい値以上のエネルギー注入が可能な放電時間の関数であり、これらのパラメーターを大きくすることによってレーザー出力の増加を期待することができる。放電電圧はレーザーガスの全圧力と電極間距離に、放電電流は励起回路の充電電圧と特性インピーダンスに深く関係している。特に、全圧力の増加による放電電圧の増加と特性インピーダンスの減少による放電電流の増加は、電気効率の改善に大きく寄与する。

Fig. 9に、 $V_{\text{PFL}} = 154$ kVのときの $Z_{\text{out}} = 0.48 \Omega$ と $Z_{\text{out}} = 0.26 \Omega$ に対するレーザーエネルギーの全圧力依存性を示す。レーザーエネルギーは全圧力の増加とともに増加しており、2.25倍の圧力上昇に対して70~80%の出力上昇を示している。このことは、電気効率もまた1.7~1.8倍に改善されたことを意味している。一方、PTL出力端でのインピーダンスの減少もレーザーエネルギーの増加に寄与しており、 $P_t = 4500$ Torrを除いて、13%以上の出力増加となっている。この出力端インピーダンスの減少は、PTL平均では 0.67Ω から 0.56Ω への減少にすぎず、PTLの平均インピーダンスをさらに

Fig. 9 Laser energy as a function of total pressure for $Z_{\text{out}} = 0.26 \Omega$ and $Z_{\text{out}} = 0.48 \Omega$. The laser was operated at $V_{\text{PFL}} = 154$ kV and a gas mixture with 4-Torr HCl and 20-Torr Xe in Ne diluent.

Fig. 10 Temporal behaviors of voltages on the laser electrode for $Z_{\text{out}} = 0.26 \Omega$ and 0.48Ω under the discharge conditions of $P_t = 4500$ Torr and $V_{\text{PFL}} = 154$ kV.

小さくすることによって、より大きな出力が期待できる。しかしながら、PTLの出力端インピーダンスのみをさらに下げると、放電破壊電圧の低下による安定な放電の達成、維持を困難にする可能性がある。

Fig. 10には、 $P_t = 4500$ Torrのときの $Z_{\text{out}} = 0.48 \Omega$ と $Z_{\text{out}} = 0.26 \Omega$ に対する電極電圧波形を示している。レーザー電極間に印加される最

大電圧 $V_{\max}$ は、PFLのインピーダンス変換のために、 $V_{\max}=V_{\text{PFL}}\sqrt{Z_{\text{out}}/Z_{\text{in}}}$ となる。従って、 $V_{\text{PFL}}=154\text{ kV}$ のとき、 $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$ では $V_{\max}=114\text{ kV}$ 、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ では $V_{\max}=84\text{ kV}$ である。Fig. 9に示した電圧波形は、放電破壊電圧 V_B が $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$ のとき $V_B=110\text{ kV}$ 、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ のとき $V_B=102\text{ kV}$ であることを示している。 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ のときの放電破壊電圧は、最大到達電極電圧を 20 kV 近く上回っている。これは、 $V_{\max}=84\text{ kV}$ まででは放電破壊することができず、そのためPFLが伝送回路としてだけでなく、一つの水コンデンサーとしてPFLによって充電されていることを示している。このとき、PFLに蓄えられたエネルギーが無損失ですべてPFLへ移行したとすれば、PFLの最大充電電圧は 120 kV 程度になる。

また、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ の場合、放電破壊するまでかなり長い時間を要しており、 $P_t=4500\text{ Torr}$ での破壊電圧としては限界に近いことを示している。従って、 $P_t=4000\text{ Torr}$ 以上でのレーザーエネルギーの飽和は、この低い放電破壊電圧による放電の不均一性或いは不安定性が原因の一つとして考えられる。 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ と $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$ に対する $P_t=4500\text{ Torr}$ のときの放電破壊時の E/N は、それぞれ $E/N=6.4\times 10^{-17}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ と $E/N=7.2\times 10^{-17}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ である。これらの値は、以前筆者らが開発した自動予備電離型XeClレーザー¹⁰⁾の $P_t=6\text{ 気圧}$ に対する放電破壊時の $E/N=1.0\times 10^{-16}\text{ V}\cdot\text{cm}^2$ に比べかなり低い値になっている。これらの値は、放電体積や励起方式或いは放電条件の違いというよりもむしろ予備電離状態の違いに起因しているものと考えられる。従って、予備電離状態の一層の改善によって、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ の時の $P_t=4000\text{ Torr}$ 以上の圧力に対して、出力の向上が期待できるだけでなく、さらに低い E/N 値によっても均一で安定な放電を達成できる可能性がある。

4.4 PFL充電電圧依存性

PFL充電電圧の増加は、放電電流の増加に

Fig. 11 Laser energy as a function of PFL voltage for $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ and $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$. The laser was operated at a gas mixture of $\text{HCl}/\text{Xe}/\text{Ne}=4/20/4476\text{ Torr}$.

は寄与するものの、放電電圧の増加はあまり期待できない。従って、放電プラズマへの注入エネルギーは、充電電圧の一次にほぼ比例することになる。このため、レーザー出力は充電電圧に比例して増加し、電気効率は充電電圧に反比例して減少することが考えられる。Fig. 11に、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ と $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$ に対するレーザーエネルギーと電気効率のPFL充電電圧依存性を示している。レーザーエネルギーは、 $V_{\text{PFL}}=148\text{ kV}$ を除いて、 $Z_{\text{out}}=0.26\ \Omega$ の方が15%程度増加しており、全圧力依存性の場合と同じ傾向を示している。この実験で得られた最大のレーザーエネルギーは、 $V_{\text{PFL}}=400\text{ kV}$ のとき $E_L=50\text{ J}$ である。このときのパルス幅は $\tau=85\text{ ns}$ であり、尖頭値は 0.59 GW に達する。また、最大電気効率は $V_{\text{PFL}}=148\text{ kV}$ で3.1%が得られている。このときのレーザーエネルギーは $E_L=17.6\text{ J}$ である。

Fig. 12に、 $Z_{\text{out}}=0.48\ \Omega$ のとき、それぞれのPFL充電電圧で得られたパルス波形を示す。パルス波形の縦軸のスケールは、それぞれのパ

Fig.12 Temporal shapes of laser pulses observed at $V_{PFL}=148, 228, 300$ and 400 kV for a gas mixture of $HCl/Xe/Ne=4/20/4476$ Torr. The scales of longitudinal axes are different for respective pulse-shapes.

ルス波形に対して異なっている。 $V_{PFL}=400$ kVを除いて、パルス幅は充電電圧の増加とともに増加しており、発振しきい値以上のエネルギー注入時間が増加していることを示している。しかし、 $V_{PFL}=228$ kV から $V_{PFL}=300$ kV でのパルス幅の増加は、 $V_{PFL}=148$ kV から $V_{PFL}=228$ kV での増加に比べて小さくなっている。さらに、 $V_{PFL}=400$ kV ではパルス幅自体が減少しており、放電電流の増加が安定な放電の持続時間を制限しているものと思われる。

5. まとめ

短パルス紫外レーザー増幅システムの最終段増幅器として、PFL, RGS, PTL を励起回路にもつX線予備電離放電励起型エキシマレーザーを開発し、その装置特性、予備電離特性、出力特性及び放電特性について調べた。装置特性では、RGSをレーザー電極と励起回路の結合回路素子としてではなく、PFLとPTLの結合回路素子として使用する場合、RGSのインダクタンスはある程度大きくする必要があることが見出された。また、インピーダンス変換されたPTLの効果を調べるために、 $Z_{PFL}=0.87\Omega$ から $Z_{out}=0.26\Omega$ と $Z_{out}=0.48\Omega$ へ変換されたPTLを用いて、レーザーエネルギーの全圧力依存性及びPFL充電電圧依存性を調べた。その結果、 $Z_{out}=0.26\Omega$ の方が $Z_{out}=0.48\Omega$ に比べて、いずれの依存性に対しても13~15%

の出力増加が得られた。しかし、低電圧 (≤ 154 kV) 高気圧 (≥ 4000 Torr) 放電ではレーザー出力の増加率は低く、出力インピーダンスの低下による放電破壊電圧の低下が、放電の不安定性を引き起こしたものと考えられた。

開発した装置をXeClレーザー発振器として使用することにより、レーザーエネルギー50 J、尖頭値0.59 GWという放電励起エキシマレーザーとしては極めて高い出力が得られた。また、強力なX線によって予備電離を行なった結果、予備電離方式のみによる放電励起エキシマレーザーの電気効率としてはかなり高い3.1%の効率を、17.6 Jの比較的大きなレーザーエネルギーで達成することができた。

さらに、予備電離特性、出力特性に関する詳細な測定により、エキシマレーザー放電に関する以下の推論を示唆する実験結果を得た。

- (1) 予備電離状態に基づく放電の不安定性は、放電の開始とともに始まり、放電の進行とともに増幅される。
- (2) HCl への電子付着によって生成した Cl^- は、予備電離電子の供給源となる。
- (3) 予備電離数密度を大きくすることによって、 $E/N \sim 6.4 \times 10^{-17} V \cdot cm^2$ の極めて低い放電破壊時の E/N 値でグロー放電を得ることができる。
- (4) 放電電流の増加は安定な放電の持続時間を制限する。

今回の実験は、十分な予備電離、安定なグロー放電のために必要とされる以上の E/N 値をもつ放電破壊電圧の印加及び安定な放電を持続するために必要とされる値以下の放電電流密度などを達成すれば、大容量放電に対してもレーザー発振に必要な安定なグロー放電を達成できることを示している。従って、これらの条件を満足させながら、放電プラズマの注入エネルギーの増加を行なえば、より以上の大出力化を進めることができる。XeClレーザーの内部効率を4%程度と見積もるならば、 $V_{PFL}=148$ kVで得られた電気効率から、このときのエネルギー注入効率は75%程度と見積もることができる。

しかし、 $V_{PFL}=400$ kV では、エネルギーの注入効率は25%程度に過ぎない。放電の不安定性を引き起こす放電電流密度を下げるるとともに、エネルギー注入効率を50%以上に上げることができれば、放電励起によっても100 Jを越すレーザー出力が可能となる。これは、放電断面積と電極間距離を2倍以上にすることができれば現在の励起回路によって達成することが可能である。この試みは、大容量グロー放電の可能性という点からも極めて興味深い。

最後に、本研究の遂行にあたり、種々の御協力をいただいた当研究所研究品試作課のみなさんに深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Boyer, H. Egger, T. S. Luk, H. Pummer, and C. K. Rhodes: *J. Opt. Soc. Am.* **B1** (1984) 3.
- 2) A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I.A. McIntyre, K. Boyer, and C.K. Rhodes: *J. Opt. Soc. Am.* **B4** (1987) 595.
- 3) D.L. Matthews, P.L. Hagelstein, M.D. Rosen, M.J. Eckart, N.M. Ceglio, A.U. Hazi, H. Medeck, B.J. MacGowan, J.E. Trebes, B.L. Whitten, E.M. Campbell, C.W. Hatcher, A.M. Hawryluk, R.L. Kauffman, L.D. Pleasance, G. Rambach, J.H. Scofield, G. Stone, and T.A. Weaver: *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 110.
- 4) R. J. Jensen: *Proc. SPIE on Excimer lasers and Optics. Cambridge, Massachusetts, 1986* (SPIE, Washington, 1986) p. 15.
- 5) L.F. Champagne, A.J. Dudas, and B.L. Wexler: *presented at Conference on Lasers and Electro-Optics, Anaheim, California, June 19-22, 1984* (unpublished).
- 6) K. Yamada, K. Miyazaki, T. Hasama, and T. Sato: *Appl. Opt.* **25** (1986) 2482.
- 7) K. Miyazaki, Y. Toda, T. Hasama, and T. Sato: *Rev. Sci. Instrum.* **56** (1985) 201.
- 8) K. Miyazaki, T. Hasama, K. Yamada, T. Fukatsu, T. Eura, and T. Sato: *J. Appl. Phys.* **60** (1986) 2721.
- 9) 挟間, 大内, 宮崎, 山田, 佐藤: レーザー研究 **14** (1986) 108.
- 10) T. Hasama, K. Miyazaki, K. Yamada, K. Ohuchi, and T. Sato: *J. Appl. Phys.* **61** (1987) 4691.
- 11) R.S. Taylor: *Appl. Phys.* **B41** (1986) 1.