レーザー技術ノート

高信頼・小形放電励起KrFレーザー

岸 本 俊 夫*・藤 原 閱 夫*
加 藤 義 章*・山 中 千 代 衛*

(1981年10月27日 受理)

High-reliability, Compact KrF Discharge Laser

Toshio KISHIMOTO, Etsuo FUJIWARA,
Yoshiaki KATO and Chiyoe YAMANAKA

(Received October 27, 1981)

1. はじめに

希ガス・ハライド・エキシマーレーザーは紫外域で高出力化が可能であるため、フォトリソスや分光、あるいは慣性核融合やウラン同位体分離等への応用と多岐にわたって利用されている。

その励起方式は電子ビーム励起と放電励起とに分けられる。後者は大出力化がかなり困難であるが、繰り返し動作が容易であり、装置が小形で比較的安価に製作できるという長所をもつ。また放電回路は、パルス整形^{1)~3)} LC反転（またはBlumlein）型^{4)~6)} および transfer capacitor 型^{7)~9)} に大別される。

我々は高電圧スパークギャップのトリガー用レーザーとして用いるため、出力100mJ以上が得られ、かつ信頼性が高いことを放電励起KrFレーザー設計の目標とした。

そこで放電回路としてピークレーザー強度が高く、構造の簡単なtransfer capacitor型を用いた。また予備電離回路としてはトリガー回路

を必要としない自動予備電離方式^{7)~9)}を採用した。これは予備電離、主放電の双方にトリガー回路を設けることは、装置の複雑化、大形化につながるためである。

試作・試験を行なった結果この方式のエキシマーレーザーは製作が簡単でかつ動作の安定性が優れていることがわかった。また動作特性を回路の面から検討し、出力及びジッターに対する支配要因が明らかになった。本報告では試作した装置の構造・性能について述べ、さらに出力向上のための提案を行なう。

2. 装 置

2.1 電気回路

Fig. 1 に電気回路を示す。Fig. 1(a)は実際の回路を表わし、Fig. 1(b)は主電極間電圧が立ち上がる時の等価回路を表わしている。 C_1 は充電用キャパシター、 C_2 はレーザーハウス内部キャパシター、 L および R はそれぞれスタートギャップ、予備電離ギャップを含めた回路に潜在するインダクタンスおよび抵抗である。

* 大阪大学レーザー核融合研究センター（〒565 吹田市山田丘）

Institute of Laser Engineering, Osaka University (Yamadaoka, Suita, Osaka 565)

Fig. 1(a) Electrical circuit of the KrF laser with automatic preionization.

(b) Equivalent circuit in charging phase.

直流高圧電源により C_1 に充電されたエネルギーはスタートギャップが閉じると予備電離ギャップを通して内部キャパシター C_2 に移される。 C_2 に蓄えられるエネルギー増加にともなって主電極間電圧が立ち上がり、レーザーガス混合比・圧力等で決まる電圧で放電を開始する。と同時に C_1 よりも回路インダクタンスの小さな C_2 のエネルギーが主放電として放出される。予備電離動作は C_1 から C_2 へのパルス充電時に働き、予備電離トリガー回路および予備電離専用のキャパシターを必要としない。

2.2 内部電極

Fig. 2 に内部電極本体の概形を示す。中央に主電極、その両側に予備電離ギャップと C_2 を配

Fig. 2 Schematic of discharge-type excimer laser with automatic preionization.

して、これら全体が円筒形のレーザーハウス内に置かれている。

主電極形状は上（充電）側が平板（巾140mm×長さ1107mm×厚さ10mm）、下（アース）側が $\phi 20\text{mm}$ の円柱の棒から削り出し、Chang 形 (compact profile) による均一電界電極形状¹⁰⁾ としている。主電極材料は上側がアルミニウム、下側が加工の容易な真鍮を用いている。電極間隔は25mm、励起長は約95cmである。

予備電離は内部キャパシター C_2 の各々上部に取付けられたピン状ギャップ間の放電により得られる。ギャップ間隔5mm、左右各20個あり、支柱部で60mm、その他で50mmの間隔をおいて配列されている。また予備電離ギャップは主電極中央線より55mm離して、上下方向は主電極間の中央になるように配列されている。これらは各キャパシターに1個ずつ取付けられていることから、極めて均一な予備電離が実現できる。さらにこの方式は構造が簡単で、スパークボードを使用した場合のような寿命の問題も生じない。

内部キャパシター C_2 には内部インダクタンスの小さいセラミック・キャパシター 2nF 30kV DC BaTiO₃ (ニチコン) と 1.3 nF 40kV DC SrTiO₃ (TDK) を各20個交互に並べて使用し、容量の合計は66nFである。2種類のセラミックキャパシターを使用したのは手持ちのキャパシターを活用したためであるが、高電圧でも容量変化の少ないSrTiO₃の方がより適していると思われる。 C_2 はレーザーガス中で使用するためF₂による侵蝕が懸念されたが、2ヶ月以上使用した現在まで支障は生じていない。

上部電極を支える支柱は長さ55mmのナイロンロッドで、内部電極の四隅のものが $\phi 20\text{mm}$ で4本、内部キャパシターの間のものが $\phi 12\text{mm}$ で8本使用し、放電時のガス膨張を考慮した強度をもたせている。

2.3 レーザーハウス

レーザーハウス形状は円筒形で内径170mm、外径190mm、長さ1300mmである。材質はFRPでフッ素ガスに対する耐蝕性をもたせる意味で内

側に1mm厚のテフロンの内張りを施してある。内容積は電極組込み状態で18ℓ，外部に接続されているリザーブタンク1ℓとあわせて19ℓのレーザーガスを使用する。

レーザー窓として合成石英を使用し，窓表面には MgF_2 を蒸着して耐蝕性をもたせてある。また充電用キャパシター C_1 (Maxwell社プラスチックケースオイルキャパシター50kV) およびスタートギャップ (EG-G社 Type GP-14B) をレーザーハウス上部に乗せ巾広い銅板で配線を行ない，回路のインダクタンスを極力小さくしている。

3. 結 果

3.1 性 能

製作した装置により以下のような性能を得た。すべて F_2 0.15%， Kr 1.2%， He 98.65%，全圧2.5気圧，充電電圧は最高出力を除いて27kVである。共振器長は約160 cmであり，共振器は特に明記した場合を除いて，曲率半径5 mの凹面全反射鏡と平面の合成石英板（無コート）により構成されている。

最高出力は C_1 の30kV充電時に300mJ，27kV充電時に290mJである。

レーザー効率に関しては，内部キャパシター C_2 に蓄積されたエネルギーに対して1.0%，充電用キャパシター C_1 も含めた総合効率は0.37%である。

レーザーパルス幅はFig. 3に示すように約25 nsである。

ポラロイドフィルムによるバーンパターンは出力ミラーの所で縦25mm，横8mmの縦長の長方形をしている。

主電極間電圧波形とレーザーパルス波形をFig. 3に示す。スタートギャップが閉じると予備電離ギャップ間に高電圧が発生し，予備電離ギャップが短絡する。これが20ns付近の鋭い電圧変化に現われている。その後主電極間電圧は再び立ち上がり155nsで放電を開始し電圧が急速に低下する。と同時にレーザー光が出力されていることがわかる。

Fig. 3 Temporal histories of the charging voltage of capacitor C_2 (upper trace) and the KrF laser (lower trace).

スタートギャップトリガー信号立ち上がり部とレーザー出力パルス間の遅延時間のジッターは6 ns以下である。これはスタートギャップのジッターではなく，主に主電極間電圧の立ち上がり放電開始電圧29.5kVに達するまでに130 nsと長い時間を要するために生じたジッターである。ガス全圧を1.5気圧にすることにより放電開始電圧を23kVと低くした場合にはジッターも4 nsと小さくなる。

ビーム広がり角は，曲率半径5 mの全反射鏡の場合縦方向9.3mrad，横方向1.3mradである。また平面全反射鏡の場合は縦7.3mrad，横0.8 mradと幾分改善される。さらに平面全反射鏡を使用すると同時に共振器内に2個の ϕ 6 mmパーチャーを入れると，出力エネルギーは1/6に減少するが縦横方向共に0.5mradと非常に良くなる。また不安定共振器で予備試験を行なったところ，出力，指向性共に良い結果が得られている。

なお以上の性能は非常に再現性が良く，例えばレーザーパルス波形は10ショット程度では完全に一致する。また出力エネルギーはガス混合後1時間を経過しても約80%にしか減少しない。

3.2 ガス混合比

Fig. 4にガス圧力一定の場合における出力エ

Fig. 4 Plots of output laser energy against various gas mixtures at a total pressure of 2.5 atm.

エネルギーのガス混合比依存性を示す。+印は測定点であり、等出力エネルギー曲線は隣接測定値間を比例分割して求めた。

Fig. 4 によると0.15%F₂、1.2%Kr 付近に最適値があることがわかる。またレーザー出力はKr 混合比にはあまり依存しないのに対してF₂には非常に強く依存することがわかる。ガス混合比に対する依存性は単位体積当りの励起強度、ガス圧力あるいは励起長が異なる場合には装置により幾分異なってくると考えられる。

3.3 放電開始電圧

Fig. 5 に出力エネルギーの放電開始電圧に対する依存性を示す。○印はガス全圧を一定として充電電圧を変化させることによって放電開始電圧を変えた場合の測定値で、それに対し×印は充電電圧を一定としガス全圧を変化させることによって放電開始電圧を変えた場合の測定値である。前者の場合は充電電圧が高い程主電極間電圧の立ち上がりが速くなり高い主電極間電圧まで達して放電を開始する。これはストリーマーにより電極が閉じるまで有限の時間を要するため電圧の立ち上がりが速い程高い電圧に達するからである。反対に充電電圧が低い場合は主電極間電圧の立ち上がりは遅くなり、低い電

Fig. 5 Laser output energy vs. breakdown voltage for a constant total pressure (○), and for a constant charging voltage (×). The gas mixing ratio is F₂: Kr: He=0.15: 1.2: 98.65%.

圧で放電を開始する。

Fig. 5 によれば○印と×印は同一曲線上に乗っていることがわかる。これは一定混合比においては出力エネルギーが放電開始電圧のみに依存することを示している。したがってさらに高い放電開始電圧ではより高い出力エネルギーが期待できる。

4. 電気回路の検討

出力エネルギーを向上させるため放電開始電圧を高くするには、主電極間隔を大きくすること、ガス全圧を高くすること等が考えられるが、ここでは電気回路の方向から考えてみる。

主電極間電圧が印加されてから放電が始まるまでには有限な時間がかかるのでこの間により高い電圧を達成するには、電圧の立ち上がりを速くする必要がある。また低ジッター化を図るためにもそれは重要なことである。

Fig. 1(b)に示すように主電極間電圧立ち上がり時の等価回路はLCR 直列回路で表わされる。C₁、C₂両端の電圧をそれぞれV₁、V₂とすれば、主電極間電圧はV₂に等しく、初期条件としてC₁への充電電圧V₁=V₁₀またV₂=0、i=0と

すれば

$$\frac{V_2}{V_{10}} = -\frac{1}{1+C_2/C_1} \left(1 - e^{-\frac{R}{2L}t} \left(\cos \frac{t}{\tau} + \frac{R}{2L} \tau \sin \frac{t}{\tau} \right) \right)$$

$$\tau = \left[\frac{1}{L} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) - \frac{R^2}{4L^2} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

で与えられる。

観測した主電極間電圧波形から実際に回路の L および R を概算すると、 $L \sim 100\text{nH}$ 、 $R \sim 0.3\Omega$ であった。 L および R は時間的に変化している。

上式から R 、 C_1 、 C_2 が一定の場合、 L が小さい程電圧の立ち上がりが速いことがわかる。また同様に他のパラメーターを一定とした場合、 C_1 が大きい程電圧の立ち上がりが速い。したがって装置設計に際しては、回路のインダクタンスを小さくし、できるだけ容量の大きな充電用キャパシターを使用することが望ましい。しかし C_1 の値はある程度以上ではほとんど電圧の立ち上がりに影響しなくなる。

そこで C_1 の値を決定するため、 C_1/C_2 の比が主電極間電圧の立ち上がりと C_1 から C_2 に移されるエネルギーの効率にどのように影響するか調べてみる。但し C_2 は一定とする。

Fig. 6 に充電々圧の1倍および1.2倍に主電極間電圧が達するまでの時間を C_1/C_2 の値に対して示す。またFig. 7 に主電極間電圧ピーク値と、キャパシター C_1 から C_2 に移されるエネルギーの効率を C_1/C_2 の値に対して示す。効率に

Fig. 6 Risetime of the charging voltage as a function of C_1/C_2 . $L=100\text{nH}$, $R=0.3\Omega$, and $C_2=66\text{nF}$.

Fig. 7 Efficiency of energy transfer from C_1 to C_2 and the normalized peak voltage of V_2 vs. C_1/C_2 . $L=100\text{nH}$, $R=0.3\Omega$, and $C_2=66\text{nF}$.

ついては、主電極間電圧がピークに達した時、充電々圧と等しくなった時、そして充電々圧の1.2倍に達した時を各々示している。但し、Figs. 6, 7 共に $L=100\text{nH}$ 、 $R=0.3\Omega$ 、 $C_2=66\text{nF}$ とした。

Fig. 6 によれば放電開始電圧が充電々圧とほぼ等しい場合は、 C_1/C_2 の値を3倍以上にしても主電極間電圧の立ち上がりを速くするのにさほど効果がないと言える。

Fig. 7 によれば主電極間電圧のピーク値は C_1/C_2 が大きいところではあまり変化しない。そのため C_1 から C_2 へのエネルギー輸送効率は C_2/C_1 の比で急速に低下する。例えば $|V_2/V_{10}|=1$ の曲線を例にとると、これは充電々圧と等しい電圧で放電が起こった時 C_1 から C_2 に移されるエネルギーの割合を与える。 $C_1/C_2=2$ では C_1 のエネルギーの50%が C_2 に移され、 $C_1/C_2=3$ ではこれが33%に低下することがわかる。

したがってFig. 6およびFig. 7から、 C_1/C_2 は2ないし3が適当であると言える。

5. むすび

予備電離トリガー回路を廃することで高信頼、

小形化を実現することができた。製作後2ヶ月以上になるが、その間一度レーザーハウス内部と内部電極を掃除しただけで、トラブルは皆無である。

さらに高出力化を図るためには、ガス圧、主電極間隔の調整はもとより、充電圧の上昇、回路のインダクタンス減少を達成する必要がある。

参 考 文 献

- 1) S. Watanabe, A. J. Alcock, K. E. Leopold and R. S. Taylor: Appl. Phys. Lett. **38** (1981) 3.
- 2) W. J. Sarjeant, A. J. Alcock and K. E. Leopold: IEEE J. Quantum Electron. **14** (1978) 177.
- 3) J. I. Levatter and R. S. Bradford, Jr.: Appl. Phys. Lett. **33** (1978) 742.
- 4) A. E. Greene and C. A. Brau: IEEE J. Quantum Electron. **14** (1978) 951.
- 5) R. Burnham and N. Djeu: Appl. Phys. Lett. **29** (1976) 707.
- 6) T. S. Fahlen: IEEE J. Quantum Electron. **15** (1979) 311.
- 7) A. J. Kearsley, A. J. Andrews and C. E. Webb: Opt. Comm. **31** (1979) 181.
- 8) A. J. Kearsley, A. J. Andrews, C. E. Webb and S. C. Haydon: Opt. Comm. **20** (1977) 265.
- 9) T. J. McKee, J. Banic, A. Jares and B. P. Stoicheff: IEEE J. Quantum. Electron. **15** (1979) 332.
- 10) T. Y. Chang: Rev. Sci. Instrum. **44** (1973) 405.
- 11) J. I. Levatter and Shao-Chi Lin: J. Appl. Phys. **51** (1980) 210.