

微細ガラスマーキングの為の短パルス CO₂ レーザーに関する研究

山梨大学大学院 医学工学総合研究部
助教 宇野和行
(平成 21 年一般研究開発助成 AF-2009213)

キーワード：軸方向放電励起方式、CO₂ レーザー、ガラスマーキング

1. 研究の目的と背景

微細ガラスマーキングは、フラットディスプレイパネルや太陽電池、スマートフォン、タブレット型情報端末などの普及や、従来からの生活分野や光学研究分野の需要などに伴い、ガラス基板製造工程からエンドユーザーの使用までのトレーサビリティや品質管理などを容易に確保するために、非常に重要である。ガラスは CO₂ レーザーの発振波長帯 9.2 – 11.4 μm に高い吸収係数を持ち、CO₂ レーザーはレーザーの中でも電気-光変換効率が非常に高い。従って、CO₂ レーザーでは、低入力・低出力エネルギーによる効果的な省エネガラスマーキングが可能となる。レーザーガラスマーキングでは、レーザーパルス幅による熱影響により、ガラス表面にクラックが生じる場合がある。ガラスマーキングを可能とする CO₂ レーザーは、TEA-CO₂ レーザーや Q スイッチ CO₂ レーザーのような 100 – 200 ns の尖頭パルスと数 μs のパルスステールをもつ短パルス CO₂ レーザーである¹⁻⁴⁾。しかし、TEA-CO₂ レーザーや Q スイッチ CO₂ レーザーは、装置が複雑で大型、高コストとなるため、ユーザーフレンドリな装置を目的とした産業装置（中小企業における工程毎のマーキングや研究室レベルでの光学サンプルの品質管理マーキングなど）に組み込むことは難しい。そこで、本研究では、シンプル・ポータブル・低コスト・メンテナンスフリーの装置による短パルス CO₂ レーザーを実現する可能性をもつ軸方向放電励起方式による短パルス CO₂ レーザーの開発を行った。

2. 軸方向放電励起方式

軸方向放電励起方式では、励起放電とレーザー光軸が同じ方向であり、電極間隔が広く小さな放電断面積をもつ。軸方向放電励起 CO₂ レーザーでは、長さ 30 – 60 cm 程度、内径 1 – 2 cm 程度のセラミックチューブが放電管に用いられる⁵⁻⁹⁾。長い放電長は、10 kPa 以下の低ガス圧でも 20 kV 以上の高い絶縁破壊電圧を与える。低ガス圧放電のため、電子の平均自由行程が長く、均一放電が容易に得られる。加えて、放電長が長く放電断面積が小さいため、放電後に残留電荷が生じていても、電子なだれと光電離が組み合わされた微小なスパーク放電が放電空間を均一に拡散して進展するため（拡散ストリーマ放電）、均一放電が得られる。従って、軸方向放電励起方式では、紫外線や X 線のような予備電離装置や高速ガスフローファンを用いなくても、均一な放電が形成できる。さらに、本方式は、予備電離やガスフローの装置性能に依存しないために可能な高繰り返し動作や

ハードシール可能なシンプルな放電管構造による完全ガス封じ切り動作、長い共振器長と小さい円形開口による高品質のビームモードを容易に与えることができる。結果として、軸方向放電励起気体レーザーは、シンプル（少ない部品点数）・ポータブル（小型 He-Ne レーザーサイズ）・低コスト（材料費 30 万円/台程度）・メンテナンスフリーの装置で高い性能を有する。

レーザーパルスに着目すると、軸方向放電における大きな放電インピーダンスは長い放電の形成時間を引き起こすため、軸方向放電励起 CO₂ レーザーでは長パルス発振（文献 5 ではパルス幅 3 ms）の要因となっていた⁵⁻⁶⁾。これまでの我々の軸方向放電励起 CO₂ レーザーの研究では、エキシマレーザーで用いられる高速放電回路である容量移行型回路により、TEA-CO₂ レーザーや Q スイッチ CO₂ レーザーのようなパルス幅 100 ns の尖頭パルスをもつ短パルス発振を可能とした⁷⁾。

本研究では、著者が開発した軸方向放電励起気体レーザーに適したダイレクトドライブ回路による軸方向放電励起 CO₂ レーザーの発振特性とパルスステールの要因となる主放電後の低電流（後続電流）の除去のためのシャント抵抗の効果について調査した。また、パルスステールフリー発振を実現するために、媒質ガスにピュア CO₂ ガスを用いた実験も行った。

3. 実験装置

図 1 は、ダイレクトドライブ回路をもつ軸方向放電励起 CO₂ レーザー装置を示す。ダイレクトドライブ回路は、充電容量とスパークギャップで構成される。軸方向放電励起方式では、放電長が長く放電インピーダンスが大きいために、放電を維持するためのバッファ容量を用いなくても放電を十分に維持することができる。バッファ容量を用いないダイレクトドライブ回路により、放電の高速化やエネルギー損失の低減（高効率化）、低容量化、回路のコンパクト化が可能となる。

サイリスタをもつパルス電源から 600 V が生成され、4.7 – 19.7 μF 程度の一次容量 C₁ をもつイグニッションコイルにより昇圧される。イグニッションコイルのインダクタンスが大きいため、不足制動により、逆極性の高電圧パルスも生成される。高電圧パルスは、ダイオードによりマイナス成分とプラス成分に分けられる。マイナス成分の高電圧パルスは、700 – 1300 pF 程度の二次容量 C₂ に充電される。プラス成分の高電圧パルスは、微小容量によりタイミングを遅らせ、スパークギャップのトリガとして用いる。二次容量に高電圧が充電され、スパークギャ

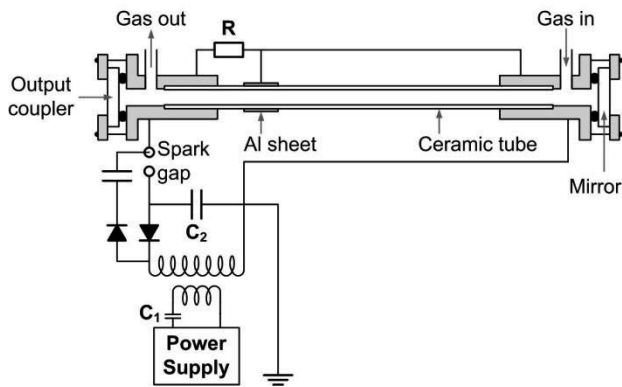


図1 ダイレクトドライブ回路をもつ軸方向放電励起短パルスCO₂レーザー装置

ップが点火すると、放電管に直接高電圧が印加される。放電空間が絶縁破壊電圧に達すると、放電管内で高速放電が生じる。

加えて、100–10 MΩの抵抗Rが、放電管と並列に設置される。低抵抗（シャント抵抗）の場合、主放電電流の後の低電流（後続電流）が、放電管内を流れず、抵抗を通ることとなる。これにより、放電電流の立下りを高速化し、レーザーパルスのパルスステールを減少させることができる。

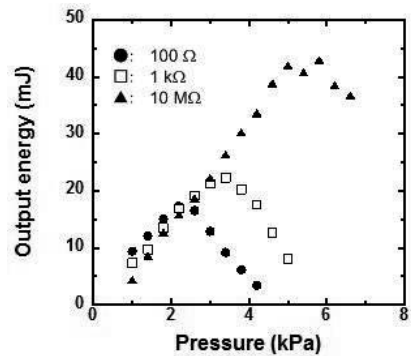
放電管は、内径13 mm、外径17 mm、長さ45 cmのアルミナセラミックスとその両端の金属電極で構成される。放電管には、予備電離の為に部分的に金属シートが巻かれている。金属シートが放電管の内壁表面にコロナ放電を生じさせ、放電空間が予備電離された後に、金属電極間で主放電が起きる。共振器は反射率80%のZnSe出力鏡と曲率20 mの全反射AuコートSi鏡で構成され、共振器長は54 cmである。

4. 実験結果

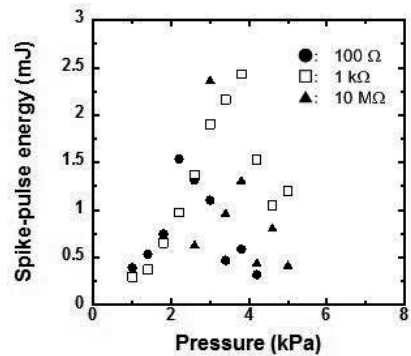
CO₂レーザーでは、一般的に、CO₂とN₂、Heの混合ガスが媒質ガスとして使用される。N₂ガスの効果は、N₂の上準位からCO₂のレーザー上準位へのエネルギー移乗による、出力・効率の向上である。しかし、N₂の上準位の寿命が長い為、N₂ガスはパルスステールの原因となる。Heガスの効果は、CO₂の下準位の熱的緩和を促進させることによる利得の向上と放電の均一化の促進である。本研究では、ダイレクトドライブ回路による短パルス発振を目的とした混合ガス（CO₂:N₂:He=1:1:2）を用いた実験とパルスステールフリー発振を目的としたピュアCO₂ガスを用いた実験を行った。加えて、混合ガスの実験では、シャント抵抗の効果の検証を行った。

4・1 混合ガス（CO₂:N₂:He=1:1:2）

本節では、混合ガス（CO₂:N₂:He=1:1:2）及び一次容量19.7 μF、二次容量1300 pFによる実験結果について示す。図2は、レーザー出力エネルギーのガス圧と抵抗に依存する特性を示す。抵抗10 MΩ、ガス圧5.8 kPaにおいて、最大出力エネルギー43.0 mJが得られる。最適ガス圧よりも低ガス圧では、励起ガス密度が低いため、出力エネルギーは低下する。最適ガス圧よりも高ガ

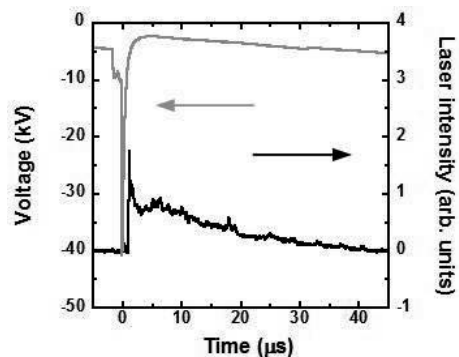


(a) 出力エネルギー

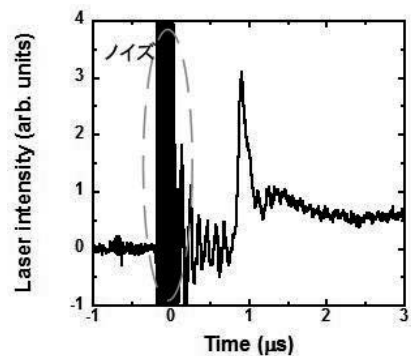


(b) 尖頭パルスエネルギー

図2 レーザー出力のガス圧・抵抗特性



(a) レーザーパルス全体図



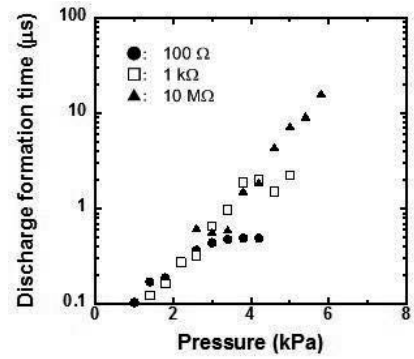
(b) 尖頭パルス拡大図

図3 レーザーパルス波形と放電電圧波形
抵抗は10 MΩ、混合ガス圧は3.0 kPaである。

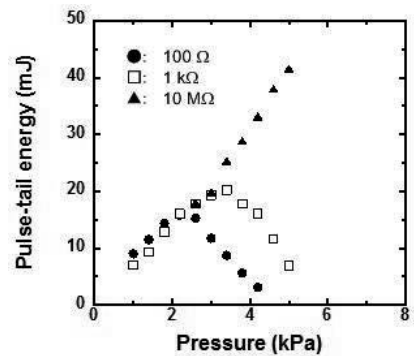
ス圧では、励起ガス密度は増加するが放電インピーダンスも増加し放電電流が低下するため、出力エネルギーは低下する。本装置でも、TEA-CO₂ レーザーやQ スイッチ CO₂ レーザーのように、尖頭パルスとパルステールをもつ短パルス発振が生じる。図3は、抵抗10 M Ω 、ガス圧3.0 kPaにおけるレーザーパルス波形と放電電圧を示す。放電開始電圧は-40.8 kVであり、放電形成時間（放電電圧の立下り時間）は572 nsである。本実験と同一放電管と同一抵抗、同一ガスを用いた容量移行型回路における放電形成時間は32.8 μ sであり、本励起回路で高速放電を実現した⁷⁾。このような高速放電では、放電開始から徐々に利得が増加し、ゲインQ スイッチによりレーザー発振を行う。このため、本条件では、放電開始から1.2 μ s遅れて、レーザーパルスが立ち上がる。このとき、主放電は終息し後続の低電流が流れているだけであるから、尖頭パルスが生じる。本条件では、尖頭パルスのパルス幅は125 nsであり、尖頭パルス部分のエネルギーは2.4 mJである。本実験と同一放電管と同一抵抗、同一ガスを用いた容量移行型回路における尖頭パルスエネルギーは1 mJであり、本励起回路で高尖頭パルスを得られることを示した。尖頭パルス部分のエネルギーもガス圧に依存し、3-4 kPaのガス圧で最大となる（図1）。尖頭パルスの形成後は、低い後続電流と寿命の長いN₂の上準位からエネルギー移乗によりパルステールが生じる。本条件では、パルステール長は34.9 μ sであり、レーザーパルス全体の出力エネルギーは22.3 mJである。

パルステール部分のエネルギーが、加工において、加工対象に熱影響を与えるため、パルステールの除去が重要となる。パルステールの原因の1つが、主放電後に流れる低電流である。後続電流の除去のためのシャント抵抗の効果が図4に示される。図4 (a) より、放電管に並列に低抵抗を接続することにより、放電形成時間が短くなることが明らかである。しかし、3.0 kPa以下の低ガス圧では、シャント抵抗の効果が小さく、放電形成時間は抵抗値に依存していない。一方、3.0 kPa以上の高ガス圧では、シャント抵抗の効果が大きく、放電形成時間が大幅に短くなっている。シャント抵抗による放電形成時間の減少が、パルステール部分のエネルギーの減少を引き起こしていることが図4 (b) から明らかである。また、パルステール部分のエネルギーの減少に伴い、レーザーパルス全体の出力エネルギーも図1 (a) に示されるように減少している。しかし、パルステール長は、抵抗値に依存していない（シャント抵抗の影響を受けていない）ことが、図4 (c) に示されている。図4 (d) は、ガス圧5.0 kPaにおける、抵抗10 M Ω と1 k Ω のレーザーパルス波形である。低抵抗の使用により、パルステール部分のエネルギーが減少していることが明らかである。

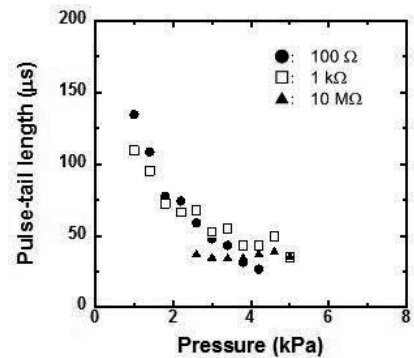
本研究と合わせて行った高尖頭パルスエネルギー・高出力エネルギーを得るための調査では、本研究と同一の放電管（内径13 mm、長さ45 cm）に反射率85%の出力鏡を用いて、一次容量16.4 μ F、二次容量1300 pF、抵抗10 M Ω のダイレクトドライブ回路でガス圧3.0 kPaにおいて、最大尖頭パルスエネルギー7.9 mJが観測されている。このとき、出力エネルギー38.0 mJ、尖頭パ



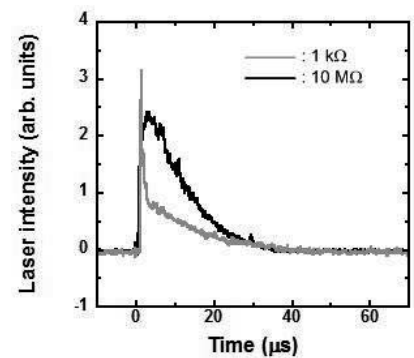
(a) 放電形成時間



(b) パルステールエネルギー



(c) パルステール長



(d) 5.0 kPaにおけるレーザーパルスの比較

図4 シャント抵抗の効果

ルス幅 83 ns, パルスステール長 45.2 μ s である。また, 最大出力エネルギーは, 長さ 60 cm の放電管 (同一内径の 13 mm) と反射率 85% の出力鏡を用いて, 一次容量 19.7 μ F, 二次容量 1300 pF, 抵抗 10 M Ω のダイレクトドライブ回路でガス圧 4.2 kPa において, 最大出力エネルギー 87.8 mJ が観測されている。このとき, 尖頭パルスエネルギーは 1.0 mJ, 尖頭パルス幅 136 ns, パルスステール長 126 μ s である。

4・2 ピュア CO₂ ガス

本節では, バッファガスフリーのピュア CO₂ ガス及び一次容量 10.2 μ F, 二次容量 700 pF, 抵抗 10 M Ω による実験結果について示す。図 5 は, ガス圧 2.2 kPa におけるレーザーパルス波形と放電電圧波形を示す。放電開始電圧は -60.8 kV であり, その立下り時間は 1.9 μ s である。放電開始から 0.6 μ s 遅れて, レーザーパルスが立ち上がる。レーザーパルスには, パルスステールがなく, スパイクパルスのみである。このとき, レーザーパルスの半値幅は 93 ns, 出力エネルギーは 0.41 mJ である。

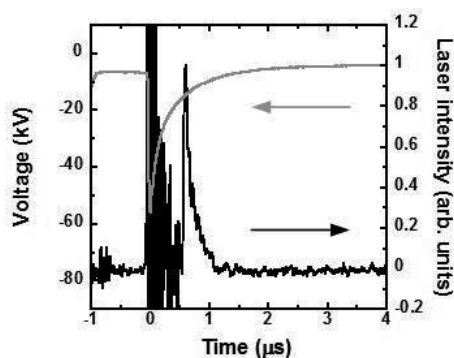


図 5 レーザーパルス波形と放電電圧波形

5. 結論

本研究では, 微細ガラスマーキングの為の短パルス CO₂ レーザーに関する研究を行い, 以下のことを明らかにした。

- ・ダイレクトドライブ回路を用いた軸方向放電励起 CO₂ レーザーにおいて, 放電の高速化とそれによる短パルス発振, 及びその発振特性
- ・残留電流の除去の為のシャント抵抗によるパルスステール部分のエネルギーの低減, 及びシャント抵抗の効果

・バッファガスフリーのピュア CO₂ ガスによるパルスステールフリー発振

以上の成果により, 部品点数の少ない非常に簡便な軸方向放電励起短パルス CO₂ レーザーにおいて, 任意にレーザーパルス波形及び出力エネルギーを調整できるようになった。

著者は, 現在, 本研究で開発した短パルス CO₂ レーザーによるガラスマーキング試験を行っている。熱膨張係数 87 の青板ガラス及び熱膨張係数 100 の白板ガラスにおいて, クラックのないマーキングを実現している。レーザーパルスの条件 (パルス波形やフルエンス) をかえ, マーキングの評価を行っている。本研究と今後の研究展開により, シンプル・低コスト・ポータブル・メンテナンスフリーの短パルス CO₂ レーザーによる省エネ微細ガラスマーキング装置の開発に期待ができる。

謝辞

本研究をご支援いただいた公益財団法人天田財団に感謝申し上げます。また本研究の遂行を支えてくれた山梨大学の秋津哲也教授, 山岡政矢氏, 奥田遼氏, 土橋一磨氏, 林紘之氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) P. Raote, G. Patil, M. B. S. Prasad, J. P. Nilaya, and D. J. Biswas, *Opt. Commun.* **281**, 2213–2217 (2008).
- 2) D. J. Biswas, J. P. Nilaya, and A. Kumar, *Opt. Commun.* **248**, 521–526 (2005).
- 3) T.-J. Wang, J.-Y. Gao, Q.-Y. He, T. Ma, Y. Jiang, and Z.-H. Kang, *J. Appl. Phys.* **98**, 073102 (2005).
- 4) R. Meucci, M. Ciofini, and P.-Y. Wang, *Opt. Commun.* **91**, 444–452 (1992).
- 5) H.-J. Chung, D.-H. Lee, J.-H. Hong, J.-H. Joung, Y.-M. Sung, S.-J. Park, and H.-J. Kim, *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 484–485 (2002).
- 6) M. M. T. Loy and P. A. Roland, *Rev. Sci. Instrum.* **48**, 554–556 (1977).
- 7) K. Uno, K. Nakamura, T. Goto, and T. Jitsuno, *J. IR. mm. THz. Wave.* **30**, 1123–1130 (2009).
- 8) K. Uno, T. Jitsuno, and T. Akitsu, *J. IR. mm. THz. Wave.* **33**, 485–490 (2012).
- 9) K. Uno, T. Akitsu, and T. Jitsuno, *J. Eng. Tech.* **2**, 101–106 (2012).