放電スイッチを用いない軸方向放電励起気体レーザー

田中 美憂¹, 丁 正也¹, 宇野 和行², 津山 美穂¹, 中野 人志¹

¹近畿大学 理工学部電気電子工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

²山梨大学 工学部電気電子工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

Development of a Longitudinally Excited Gas Laser without Discharge Switch

Miyu TANAKA¹, Masaya TEI¹, Kazuyuki UNO², Miho TSUYAMA¹, and Hitoshi NAKANO¹

¹Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Science and Engineering, Kindai University,
3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, Osaka 577-8502

²Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering, University of Yamanashi,
4-3-11 Takeda, Kohu, Yamanashi 400-8511

(Received November 1, 2016)

We developed a longitudinally excited CO₂ laser without a discharge switch and installed a fast high-voltage solid state switch that consists of a series of connected MOSFETs to a longitudinally excited CO₂ laser as a spiker for sustaining the discharge. Laser oscillation was successfully achieved at a spiker voltage of 5 kV with a rise time of 40 ns. Several mJ of laser energy were stably obtained.

Key Words: Fast high-voltage switch, Longitudinally excited gas laser

1. はじめに

レーザー加工に用いるレーザー装置は、一般に大型で高価であり、付加価値の高い応用にのみ適用されている。レーザーを中小企業等での部品製作等、幅広い産業分野に普及させるためには、レーザーの低コスト化、操作性の簡便さ、装置の耐環境性向上等の可能性を追求することが必要である。気体レーザーは、その耐環境性の高さ、高出力性等により、古くから加工用レーザーとして広く用いられている。しかしながら、レーザーを安定に高繰り返し使用するには高速ガスフロー、予備電離システム等の追加が必要であり、レーザーのコスト上昇をまねくとともに、装置操作性の低下、メンテナンスの頻度が増加する等、産業応用に適した状況にあるとは言い難い。

筆者らが産業応用に理想的な特長を有するレーザーとして着目したのが軸方向放電励起気体レーザーである¹⁻⁴⁾。軸方向放電励起気体レーザーは、レーザーが出力する方向と同方向に放電を行う励起方式を採用しているレーザーである。通常、数十 cmの誘電体チューブを放電管として用い、放電管の両端に電極を配置し、電極の部分に共振器用ミラーを取り付けた構造となっている⁵⁾。一般的な横方向放電励起気体レーザーに比べ、放電長が長くなるため、軸方向放電励起気体レーザーは低ガス圧下(10 kPa以下)においても高い放電開始電圧(20 kV以上)を維持することが可能となる。また、低ガス圧下では、電子のドリフト速度が大きくなるので、予備電離

を用いずに均一放電を得ることができる。さらに、ストリーマ放電が管内を均一に拡散して進展していくため、高速ガスフローを必要とせずに、高い繰り返し動作が可能となる。つまり、軸方向放電励起レーザーでは、横方向放電励起気体レーザーで必要であった予備電離装置が不要であり、小型で単純、安価な装置構成が可能となる。

軸方向放電励起気体レーザーの電源部では、しかしながら、主にギャップスイッチ等の放電スイッチによって大電流のスイッチングが行われており、レーザー出力の安定性低下、放電による電極の劣化に起因した短寿命化や低繰り返し周波数にしか対応できないといった問題が生じている。電源部への固体スイッチ導入は技術的に可能ではあるが、現状、極端に高価であるため、レーザーの低コスト化には貢献できていない。

本研究では、放電スイッチを用いない軸方向放電励起気体レーザーの実現を目的とした、高速高電圧スパイク電圧を放電管に印加することによって管内の放電インピーダンスを下げ、主放電の発生を促し、外部回路によって放電を維持する単純な装置構成を考案した。レーザー装置全体の低コスト化、安定性・メンテナンス性の向上、さらに汎用性の拡大のため、安価で容易に入手可能なパワー半導体を用いて高速高電圧固体スイッチを作製し、これを高速高電圧スパイク電圧発生源として利用した。

2. 装置の構成

レーザー装置は、Fig. 1 に示すように、高圧直流電

Fig. 1 Schematic illustration of longitudinally excited gas laser coupled with fast high-voltage solid state switch.

源、充電抵抗およびキャパシタを含む電源回路、両端に電極を取り付けたパイレックスガラス製の放電管で構成されている。放電管には、中間電極A(長さ W : 1.5 cm)が設けられ、高速高電圧固体スイッチが接続されている。

高圧直流電源によってキャパシタ C が充電され、放電管に電圧が印加される。中間電極Aに接続された高速高電圧固体スイッチを動作させることで、中間電極Aと放電管ならびにアース電極との間に形成されるキャパシタの放電が管内の主放電発生を促す。この方式では放電管そのものが高電圧スイッチとして動作するため、電源部のスイッチが不要となる。

本研究においては、比較的高効率発振が可能で産業応用範囲の広い、炭酸ガスレーザー(波長 $10.6\ \mu\text{m}$)の発振を目指した。内径 $13\ \text{mm}$ 、長さ $30\ \text{cm}$ の放電管内にレーザーガス(CO_2 : 7%, N_2 : 14%, He : 79%)を充填した。放電管の端部に波長 $10.6\ \mu\text{m}$ に対して全反射および反射率70%のミラー対を取り付け、光共振器を構成した。

3. 高速高電圧固体スイッチ

Fig. 2 に高速高電圧固体スイッチ回路の詳細を示す。半導体デバイスとしては高耐圧で高速性に優れ、さらに安価で入手しやすいMOSFET(2SK3301)を用いた。MOSFETを高速動作させるためには低出力インピーダンスのゲート回路が有効であるが、本研究ではアバランシェトランジスタスイッチ回路をゲートに接続した。アバランシェトランジスタスイッチ回路から出力されるナノ秒オーダーの高速高電圧パルスがMOSFETの入力容量を急速に充電することによって、ドレイン-ソース間を高速で導通させることができる。

回路の高耐圧化には、MOSFETを直列接続することで対応した。回路のコスト上昇を防ぐため、単一のゲート回路でMOSFETを多段動作させた⁶⁾。

Fig. 2 において、高圧直流電源によってMOSFETに高電圧を印加すると、同時にコンデンサ C_2 - C_5 が充電される。アバランシェトランジスタ回路からのナノ秒オーダー

Fig. 2 Circuit of fast high-voltage solid state switch for use in the longitudinally excited gas laser.

の高速パルスが一段目のMOSFET(T_1)のゲートに入力されると、 T_1 が高速で導通する。 T_1 が導通すると、二段目のMOSFET(T_2)のゲートとソース間に電位差が生じ、 T_2 のゲートに接続されているキャパシタ C_2 の放電が開始され、それがしきい電圧の値を超えると、 T_2 が導通する。 T_3 - T_5 も順に同様に導通していく。

高速高電圧固体スイッチの典型的なスイッチング波形をFig. 3 に示す。5 kVの印加電圧におけるスイッチング速度は10-90%で約40 nsであった。

4. 実験方法

実験においては、充電電圧 E_1 、キャパシタ容量 C 、ガス圧力 P 、中間電極Aとアース電極との距離 a をパラメータとした(Fig. 1 参照)。適当な電圧でキャパシタ C を充電後、高速高電圧固体スイッチを動作させ、放電の有無を調べた。放電が生じた際、感熱紙のバーンパターンによってレーザー発振の有無を確認した。また、パワーメータによってレーザーのエネルギーを測定した。

Fig. 3 Switching waveform of fast high-voltage solid state switch at the charging voltage of 5 kV.

5. 実験結果と考察

本方式では、充電電圧10–15 kV、ガス圧2–6 kPaの広い範囲でレーザー発振に成功した。高速高電圧固体スイッチの電圧は、全ての実験において、5 kV一定とした。従来までの軸方向放電励起炭酸ガスレーザーはレーザー発振に20–40 kV程度の電圧を要するが⁵⁾、本方式では比較的低電圧でのレーザー発振が実現された。高速高電圧固体スイッチからのスパイク電圧によって、外部回路の動作時には既に絶縁破壊が生じており、低電圧のレーザー発振が可能であったと思われる。

充電電圧 $E_1 = 10$ kV、ガス圧 $P = 3$ kPaと一定とし、キャパシタ容量 C を570 pFから2700 pFと変化させた場合のレーザーエネルギーの変化をFig. 4に示す。Fig. 4において、横軸は $1/2(CE^2)$ で求められる静電エネルギーで示している。レーザーエネルギーは静電エネルギーに比例して増加していることが判る。本実験範囲で得られた最大エネルギーは9.5 mJであり、エネルギー変換効率は7.1%の大きさとなった。

Fig. 5には充電電圧10 kV、キャパシタ容量 C を700 pF一定とした際の、レーザーエネルギーと炭酸ガスの圧力

Fig. 4 The relation between electric energy and laser energy.

Fig. 5 The relation between gas pressure and laser energy.

Fig. 6 Relation between distance from ground to intermediate electrodes and laser energy.

P との関係を示している。4 kPa辺りの圧力で最大エネルギーが得られていることが判る。本実験条件では、電界傾度の最適値が4 kPa辺りのガス圧において達成されることが判った。

中間電極Aとアース電極との距離 a を変化させると、放電の様相は変化した。Fig. 6に充電電圧10, 12, 14 kVにおけるレーザーエネルギーと中間電極–アース電極間との距離の関係を示す。充電電圧10 kVおよび12 kVにおいては、電極間距離が20 mm以上になると放電が生じなくなったため、放電現象は中間電極とアース電極との間に形成されるキャパシタの大きさに依存していると考えられる。レーザー発振にとって適切なキャパシタの大きさは高速高電圧固体スイッチの電圧や充電電圧の大きさによって変化すると思われるため、最適化は難しいが、概ねアース電極より10–30 mm程度の距離に中間電極を設置するのが望ましいことが分かった。

6. まとめ

軸方向放電励起炭酸ガスレーザーを製作し、中間電極に高速高電圧固体スイッチを接続することによってレーザー発振を実現させた。本方式では、放電管そのものがスイッチとして動作するため、電源部のスイッチは不要であり、レーザーの小型化、低コスト化の推進を可能とする。また、固体スイッチは本質的にメンテナンスフリーであり、ジッタが少なく、高繰り返し動作が可能であり、レーザーの高性能化にも寄与する。放電長、充電電圧、高速高電圧固体スイッチの電圧、立ち上がり時間等、最適化を行う必要があるが、今後検討する。また、本研究ではレーザー媒質として炭酸ガスを用いたが、励起条件や放電条件を整えることで、窒素等、他の軸方向放電励起気体レーザーにおいても本方式は適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) M. Geleer, D. E. Altman, and T. A. Detemple: J. Appl. Phys. **37** (1966) 3639.
- 2) M. A. El-Osealy, T. Ido, K. Nakamura, T. Jitsuno, and S. Horiguchi: Opt. Commun. **194** (2001) 191.
- 3) M. A. M. El-Osealy, T. Jitsuno, K. Nakamura, and S. Horiguchi: Opt. Commun. **205** (2002) 377.
- 4) M. A. M. El-Osealy, T. Jitsuno, K. Nakamura, Y. Uchida, and T. Goto: Opt. Commun. **207** (2002) 255.
- 5) K. Uno, H. Hayashi, T. Akitsu, and T. Jitsuno: J Infrared Milli Terahz Waves. **34** (2013) 217.
- 6) 中野 人志, 岡本 明, 藤本 恭史, 山田 誠: レーザー研究 **36** (2008) 584.