

軸方向パルス放電による He フリー短パルス CO<sub>2</sub> レーザーの開発宇野 和行<sup>A</sup>, 大川 亮<sup>A</sup>, 渡會 翔平<sup>B</sup>, 児玉 康司<sup>A,B</sup>He-free short-pulse CO<sub>2</sub> laser pumped by longitudinal pulsed dischargeK. Uno<sup>A</sup>, R. Okawa<sup>A</sup>, S. Watarai<sup>B</sup>, and Y. Kodama<sup>A,B</sup>

We have developed a CO<sub>2</sub> laser that emits a short pulse with a tail at a high repetition rate without using helium gas, a pre-ionization system and a fast gas flow system by utilizing longitudinal pulsed discharge. The discharge tube was made of an alumina ceramic tube with an inner diameter of 8 mm and a length of 80 cm. The discharge starting voltage was about 27 kV at a risetime of about 220 ns. The CO<sub>2</sub> laser produced a short laser pulse with a tail. At a CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixing ratio of 1:2, the laser energy was 32.5 mJ and 13.1 mJ at repetition rates of 300 Hz and 500 Hz, respectively. For comparison, at a CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He mixing ratio of 1:1:5, the laser energy was 37.0 mJ and 35.2 mJ at repetition rates of 300 Hz and 1 kHz, respectively.

Keywords: MIR laser, CO<sub>2</sub> laser, short pulse, He free, longitudinal pulsed discharge

## 1 はじめに

産業や医療で多く使用されているレーザーの一つである CO<sub>2</sub> レーザーは、中赤外の波長 9.2 μm – 11.4 μm (主な波長 9.6 μm や 10.6 μm) において、CW 発振[1-3]やパルス幅 10 ns から 1 ms のパルス発振[3-18]が可能な貴重な波長選択・パルス形状選択・高エネルギー出力あるいは高平均出力が可能なレーザーである。放電管の構造や放電の種類、発振の方式により、DC-CO<sub>2</sub> レーザー[1]や RF-CO<sub>2</sub> レーザー[3], TEA-CO<sub>2</sub> レーザー[6-10], Q スイッチ CO<sub>2</sub> レーザー[11,12]など様々な CO<sub>2</sub> レーザーが開発されている。様々な CO<sub>2</sub> レーザーが、研究段階の分野も含めると、ガラスやポリマー樹脂、複合材料など様々な材料の加工や EUV, 加速器, 歯科治療, 皮膚治療, センシングなどの幅広い分野で利用されている。

CO<sub>2</sub> レーザーの媒質ガスには、一般的に CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>, He の混合ガスが用いられる。レーザー上準位 (001) (2349 cm<sup>-1</sup>) への励起は、CO<sub>2</sub> の電子衝突だけでなく、N<sub>2</sub> による共鳴励起でも行われる。電子励起による励起状態の N<sub>2</sub> (2331 cm<sup>-1</sup>) と基底状態の CO<sub>2</sub> (000) との振動エネルギーの交換により、CO<sub>2</sub> がレーザー上準位に励起され

る[18-21]。N<sub>2</sub> は発振効率の向上に寄与するが、長い寿命により短パルス発振においてはパルスステール生成の要因となる。He には、放電の均一化や CO<sub>2</sub> の下準位 ((100) と (020), (010)) の緩和の効果がある[20,21]。しかし、He は貴重なガスであり生産が限られており、現在は世界情勢により入手が困難となっている。そこで、He を使用しない CO<sub>2</sub> レーザーの開発は重要である。

これまでに TEA-CO<sub>2</sub> レーザーで用いられている横方向放電励起方式 (TE, transversal excitation) において He フリー CO<sub>2</sub> レーザーの開発がいくつか報告されている[7-9]。例えば、He の代わりに H<sub>2</sub> を添加した研究では、放電長 73 cm, 放電体積 438 cm<sup>3</sup> の放電空間と混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub> = 56:14:30, ガス圧 0.7 atm の媒質ガスの TE-CO<sub>2</sub> レーザーは、繰り返し周波数 0.5 Hz において、尖頭パルス幅 38 ns, テール長 462 ns, エネルギー 3.5 J のテール付き短パルスを出力した[7]。超小型の装置開発の研究では、放電長 8 cm, 放電体積 3.6 cm<sup>3</sup> の放電空間と混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> = 1:1 の媒質ガスの TE-CO<sub>2</sub> レーザーは、繰り返し周波数 100 Hz において、エネルギー 35 mJ の短パルスを出力した[8]。放電長 30 cm, 放電体積 105.6 cm<sup>3</sup> の放電空間と混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> =

著者連絡先 kuno@yamanashi.ac.jp

A 山梨大学 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)

University of Yamanashi (4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511)

B 精電舎電子工業 (〒116-0013 東京都荒川区西日暮里 2-2-17)

Seidensha Electronics (2-2-17 Nishinippori, Arakawa-ku, Tokyo 116-0013)

250:550, ガス圧 0.78 atm の媒質ガスの TE-CO<sub>2</sub> レーザーは, 繰り返し周波数 1 Hz において, 尖頭パルス幅 30 ns, テール長 900 ns, エネルギー 605 mJ のテール付き短パルスを出力した[9]. つまり, TE-CO<sub>2</sub> レーザーの He フリー発振では, 高エネルギーの短パルス発振が実現しているが, 高繰り返し周波数動作は実現していない.

そこで, 我々は, 本研究において, 軸方向放電と高速パルス放電を組み合わせた軸方向放電励起方式 (LE, longitudinal excitation) による He フリー短パルス CO<sub>2</sub> レーザーの開発を試みた. 軸方向放電励起方式は, 放電方向とレーザーの出力方向が同じ方式である. 軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーでは, 長さ 30 cm – 100 cm, 内径 1 cm – 2 cm の誘電体チューブとその両端に電極を設置したものが放電管として用いられる[13-17]. 広い電極間隔により, 低ガス圧 (10 kPa 以下) において高い放電開始電圧 (20 kV 以上) の維持が可能である. 長い放電長と小さな放電断面積により, 電子雪崩と光電離の組み合わせた微小なスパーク放電が放電管内を拡散して進展する. 従って, 低ガス圧の拡散ストリーマ放電により, 予備電離や高速ガスフローを用いなくても, 均一放電が形成されると考えられる. 先行研究では, 予備電離を用いない放電管と CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>, He による媒質ガスにおいて, 媒質ガス (混合比とガス圧) や励起回路 (印加電圧の立ち上がり時間), 共振器 (共振器長と開口) の調整により, パルス幅 100 ns – 400 ns のテールフリー短パルスの生成と制御, 尖頭パルス幅 100 ns – 400 ns, テール長 20 μs – 200 μs, 尖頭パルスに対するテールのエネルギー比 1:10 – 1:200 のテール付き短パルスの生成と制御, パルス幅 10 μs – 100 μs の長パルスの生成と制御, ドーナツビームとフラットトップビーム, ガウシアンビームの生成が実現した[13-16]. また, 最近では, 予備電離を用いない放電管と CO<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>, He による媒質ガスにおいて, 繰り返し周波数 1 kHz でテール付き短パルスの出力が実現した[17]. これは, 軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーでは, 予備電離を用いなくても, 高繰り返し周波数動作においても, 均一放電が形成されていることを示唆すると考えられる. そこで, 軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーでは, 放電の均一化に寄与する He がなくても, 高繰り返し周波数動作が可能であると考えられる.

本研究の目的は, 均一放電が得られやすい軸方向放電励起方式による He フリー短パルス

CO<sub>2</sub> レーザーの開発である.

## 2 実験装置

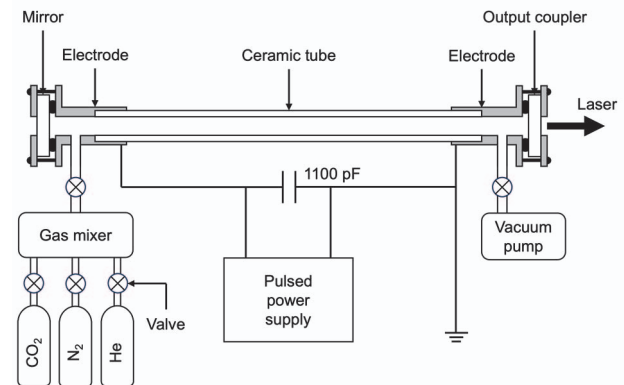
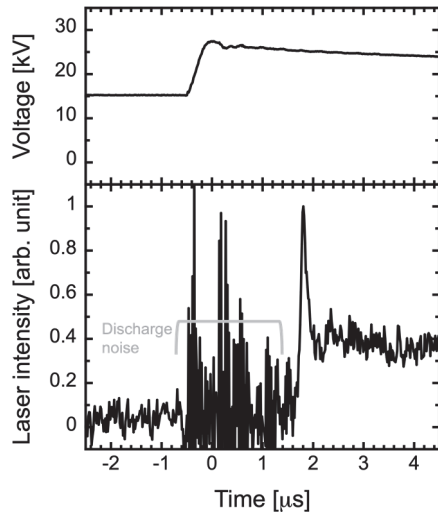


図1 軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーの構成図

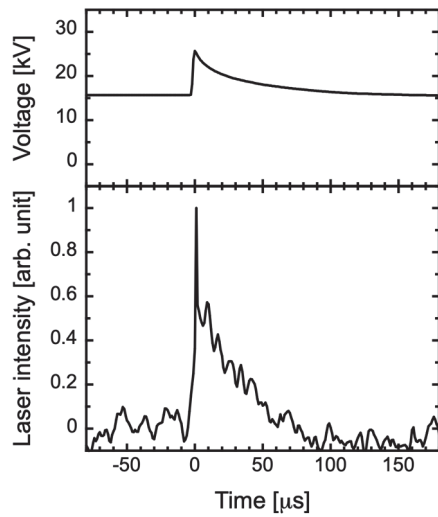
図1は, 軸方向放電励起 CO<sub>2</sub> レーザーの構成図を示す. 放電管は, 長さ 80 cm, 内径 8 mm, 外径 12 mm のアルミナセラミックス管とその両端の電極で構成された. 放電管には, 予備電離装置や高速ガスフロー装置, 冷却装置は用いられなかった. 共振器は, 反射率 85% の平面 ZnSe 出力鏡と曲率 20 m の金コート全反射鏡で構成された. 共振器長は 89 cm であった. 媒質ガスは, 混合器と流量調節バルブによって調整された. 実験では, He フリーの CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> の混合ガス (混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> = 1:0.5 または 1:1, 1:2, 1:3) と比較のための CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He の混合ガス (混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:2 または 1:1:4, 1:1:5, 1:1:6) が使用された. 高速高電圧パルス電源 (精電舎電子工業) は, 電圧約 27 kV, 立ち上がり時間約 200 ns のパルス電圧を放電管に印加した. このとき, 放電管への入力エネルギーは 722 mJ であった. レーザーエネルギーはエネルギーメータ (Gentec, QE25HR-H-MB-D0) またはパワーメータ (Gentec, UP55N-100H-H9-D0) で測定され, レーザーパルスはフォトンドラッグ (Hamamatsu Photonics, B749) とオシロスコープ (Tektronix, MS044) で測定され, 放電電圧は高電圧プローブ (Tektronix, P6015A) とオシロスコープで測定された.

## 3 結果

図2と図3は, 混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> = 1:2, ガス圧 2.0 kPa, 繰り返し周波数 300 Hz におけるレーザーパルス波形と放電電圧波形, ビームプロファイルを示す. 放電電圧は, 立ち上がり時間 288 ns で最大電圧 27.8 kV に達した. 主放電は 27.8 kV から 14.6 kV の電圧降下で生じ, 立ち下がり



(a) 尖頭パルス部分の拡大図



(b) 全体図

図2 混合比  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$ , ガス圧 2.0 kPa, 繰り返し周波数 300 Hz におけるレーザーパルス波形と放電電圧波形

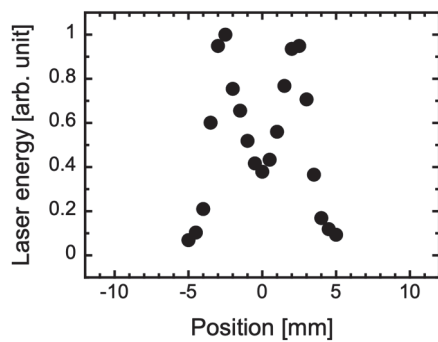


図3 混合比  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$ , ガス圧 2.0 kPa, 繰り返し周波数 300 Hz におけるビームプロファイル

時間は 131  $\mu\text{s}$  であった. 放電開始 1.66  $\mu\text{s}$  後にレーザーパルスが立ち上がった. 図 2 (a) の時間  $-0.5 \mu\text{s}$  から  $1.5 \mu\text{s}$  までの信号は放電ノイズである. レーザーパルスは, 尖頭パルスとパルステールからなるテール付き短パルスであった. レーザーエネルギーは 32.5 mJ, 尖頭パルス幅は 191 ns, テール長は 71.5  $\mu\text{s}$ , 尖頭パルスに対するテールのエネルギー比は 1:99 であった. 軸方向放電励起  $\text{CO}_2$  レーザーでは, 媒質ガスや印加電圧の調整により, レーザーパルス形状が制御可能である[13-15]. He フリーの媒質ガスにおいて, パルステールを持たないテールフリー短パルスの出力が今後の課題である. 間隔 1 mm のスリットによるビームプロファイルの計測では, ビームプロファイルはドーナツ形状であり, ビーム径は 9.0 mm であった.

図 4 は,  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合ガスにおける繰り返し周波数と混合比に依存するレーザーエネルギーの特性である. 混合比は  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:0.5$  と 1:1, 1:2, 1:3 であり, ガス圧は最適値であった. 本装置では, He フリーの媒質ガスにより, 繰り返し周波数 500 Hz で  $\text{CO}_2$  レーザーの発振が観測された. 本装置における最適な混合比は,  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$  または 1:3 であった. 全ての混合比において, 繰り返し周波数 200 Hz 以下では, 繰り返し周波数が増加してもレーザーエネルギーはほぼ一定であった. 繰り返し周波数 200 Hz 以上では, 繰り返し周波数の増加とともにレーザーエネルギーは低下した. 繰り返し周波数 300 Hz では, レーザーエネルギーは 32.5 mJ であり, 平均出力は 9.7 W であった. 繰り返し周波数 500 Hz では, レーザーエネルギーは 13.1

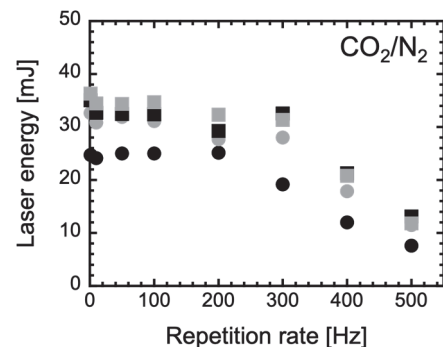


図4  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合ガスにおける繰り返し周波数に依存するレーザーエネルギーの特性

黒色丸は  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:0.5$ , 灰色丸は  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:1$ , 黒色四角は  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:2$ , 灰色四角は  $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$  を示す.

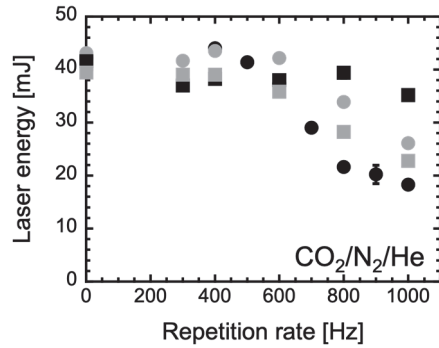


図5 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He 混合ガスにおける繰り返し周波数に依存するレーザーエネルギーの特性

黒色丸は CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:2, 灰色丸は CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:4, 黒色四角は CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:5, 灰色四角は CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:6 を示す。

mJ であり, 平均出力は 6.5 W であった. 本方式では, He フリーの媒質ガスであっても繰り返し周波数 500 Hz において CO<sub>2</sub> レーザーの発振が実現した. 比較のために, 本装置において, He を含む CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He 混合ガスにおける CO<sub>2</sub> レーザーの特性が調査された. 図 5 は, CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/He 混合ガスにおける繰り返し周波数と混合比に依存するレーザーエネルギーの特性である. 混合比は CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:2 と 1:1:4, 1:1:5, 1:1:6 であり, ガス圧は最適値であった. 本装置では, He を含む媒質ガスにより, 繰り返し周波数 1 kHz で CO<sub>2</sub> レーザーの発振が観測された. 装置の性能により, 最大繰り返し周波数は 1 kHz に制限された. 本装置における最適な混合比は, CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> = 1:1:5 であった. 混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:2 と 1:1:4, 1:1:6 において, 繰り返し周波数 600 Hz 以下では, 繰り返し周波数が増加してもレーザーエネルギーはほぼ一定であった. 繰り返し周波数 600 Hz 以上では, 繰り返し周波数の増加とともにレーザーエネルギーは低下した. 混合比 CO<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He = 1:1:5 において, 繰り返し周波数 1 kHz 以下では, 繰り返し周波数が増加してもレーザーエネルギーはほぼ一定であった. 繰り返し周波数 500 Hz では, レーザーエネルギーは 41.4 mJ であり, 平均出力は 20.7 W であった. 繰り返し周波数 1 kHz では, レーザーエネルギーは 35.2 mJ であり, 平均出力は 35.2 W であった. He の添加により, 繰り返し周波数 1 kHz でも高レーザーエネルギーの出力が可能になった. He の効果は, 放電の均一化と下準位の緩和である. つまり, 本方式において, 予備電離装置や冷却装置を付加すれば, He フリーの媒質

ガスであっても 1 kHz の高繰り返し周波数動作の実現の可能性があると考えられる.

#### 4 結論

本研究では, 軸方向パルス放電を用いた CO<sub>2</sub> レーザーにおいて, He フリーの媒質ガスにより, テール付き短パルスの高繰り返し周波数発振が実現した. 予備電離装置を持たない長さ 80 cm, 内径 8 mm の放電管により, 繰り返し周波数 300 Hz でレーザーエネルギー 32.5 mJ, 平均出力 9.7 W, 繰り返し周波数 500 Hz でレーザーエネルギー 13.1 mJ, 平均出力 6.5 W が出力された. He フリー短パルス CO<sub>2</sub> レーザーのさらなる高繰り返し周波数化には, 予備電離や冷却が必要であると考えられる.

#### 謝辞

本研究の一部は, 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果最適展開支援プログラム A-STEP の支援 (AS3015041S) を受けて行われた.

#### 参考文献

- [1] D. H. Lee, H. J. Chung, H. J. Kim, Rev. Sci. Instrum. **71** (2000) 577-578.
- [2] S. J. Park, W. Y. Kim, Opt. Laser Technol. **42** (2010) 269-273.
- [3] J. Choi, Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 064901.
- [4] H. J. Chung, D. H. Lee, J. H. Hong, J. H. Joung, Y. M. Sung, S. J. Park, H. J. Kim, Rev. Sci. Instrum. **73** (2002) 484-485.
- [5] A. I. Karapuzikov, A. N. Malov, I. V. Sherstov, Infrared Phys. Technol. **41** (2000) 77-85.
- [6] M. Kumar, T. Reghu, A. K. Biswas, P. Bhargav, J. S. Pakhare, S. Kumar, A. Verma, V. Mandloi, L. M. Kukreja, Opt. Laser Technol. **64** (2014) 64-71.
- [7] M. V. Ivashchenko, A. I. Karapuzikov, I. V. Sherstov, Quantum Electron. **31** (2001) 965-969.
- [8] A. Kumar, J. P. Nilaya, M. B. S. Prasad, P. Raote, D. J. Biswas, Opt. Laser Technol. **40** (2008) 223-225.
- [9] M. Kumar, A. K. Biswas, T. Biswas, J. Joshi, L. B. Rana, R. K. Yadav, R. Kaul, Opt. Laser Technol. **120** (2019) 105764.
- [10] B. A. Kozlov, A. Y. Payurov, Proc. SPIE **11322** (2019) 113220F.
- [11] R. Shrestha, A. Tibolt, R. Wheeler, R. Galdamez,

- C. Dezelan, J. Bethel, Proc. SPIE **10911** (2019) 109110P.
- [12] Y. Tadokoro, T. Tamamoto, J. Nishimae, Proc. SPIE **11266** (2020) 1126613.
- [13] K. Uno, T. Jitsuno, Proc. SPIE **10811** (2018) 1081111.
- [14] K. Uno, T. Jitsuno, Opt. Laser Technol. **101** (2018) 195-201.
- [15] K. Sakamoto, K. Uno, T. Jitsuno, Proc. SPIE **10898** (2019) 108980U.
- [16] K. Uno, J. Li, H. Goto, T. Jitsuno, Proc. SPIE **10518** (2018) 105181Y.
- [17] K. Uno, K. Yanai, S. Watarai, Y. Kodama, K. Yoneya, Opt. Laser Technol. **152** (2022) 108174.
- [18] C. B. Moore, R. E. Wood, B. L. Hu, J. T. Yardley, J. Chem. Phys. **46** (1967) 4222-4231.
- [19] P. K. Cheo, J. Appl. Phys. **38** (1967) 3563-3568.
- [20] A. A. Offenberger, D. J. Rose, J. Appl. Phys. **41** (1970) 3908-3909.
- [21] I. Kitazima, Opt. Commun. **10** (1974) 141-144.