

文章编号: 0258-7025(2006)08-1009-04

100 J 侧面滑闪预电离 TE CO₂ 激光器

柯常军, 谭荣清, 郑义军, 张阔海, 吴 谨, 万重怡, 刘世明, 石海霞

(中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘要 提出了一种新型侧面滑闪放电技术,为 TE CO₂ 激光器均匀放电提供高效、均匀的紫外预电离。采用这种技术,成功实现5.5 cm电极间距的高气压 CO₂ 均匀放电,放电截面达27.5 cm²。放电体积为5.5 cm×5 cm×90 cm的单元模块采用 V(CO₂):V(N₂):V(He)=1:1:4的混合气体在60 kPa的气压下,获得了53 J的激光脉冲输出,激光比输出能量达3.46×10⁻⁴ J/(L·Pa)。采用简单的谐振腔,利用两个相同的单元模块串联实现了103 J的激光输出。实验表明双模块器件存在很强的激光脉冲能量增强效应,双模块串联输出的激光能量比单模块激光能量的两倍还大15%。

关键词 激光技术;滑闪放电;紫外预电离;TE CO₂ 激光器

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

100 J TE CO₂ Laser with Side-Sliding Discharge Preionization

KE Chang-jun, TAN Rong-qing, ZHENG Yi-jun, ZHANG Kuo-hai,

WU Jin, WAN Chong-yi, LIU Shi-ming, SHI Hai-xia

(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The development of a new side-sliding discharge scheme can provide efficient uniform ultraviolet (UV) preionization for transverse excitation (TE) CO₂ laser. The use of the scheme has resulted in the successful generation of CO₂ laser discharges between electrodes separated by 5.5 cm, total cross section is 27.5 cm². The laser is modular in construction, under the condition of V(CO₂):V(N₂):V(He)=1:1:4 mixtures and 60 kPa gas pressure, a modular with active discharge volume 5.5 cm×5 cm×90 cm has yielded output energy of 53 J, the specific output energy ratio is 3.46×10⁻⁴ J/(L·Pa). When a pair of discharge modulars are employed in series in a simple oscillator configuration, output energy of 103 J is yielded. An effect of laser energy enhancement occurs in dual-modular, the output energy of dual-modular is 15% higher than twifold energy of single modular.

Key words laser technique; sliding discharge; ultraviolet preionization; TE CO₂ laser

1 引言

高能量高平均功率的脉冲 CO₂ 激光器,特别是紫外预电离的 TEA CO₂ 激光器在激光加工、激光清洗和光电对抗等领域都有广泛的应用。这种激光器在 20 世纪 70 年代获得空前的发展^[1~4]。近年来由于激光推进研究在国际范围内的兴起,脉冲 CO₂ 激光器重新受到重视。国外目前高能量高平均功率的脉冲 CO₂ 激光器均采用电子束维持放电,如美国白沙靶场 10 kW 的 PLVTS 脉冲 CO₂ 激光器^[2],德

国 DLR 的 15 kW 脉冲 CO₂ 激光器^[3]和俄罗斯的 100 kW 开放流动型脉冲 CO₂ 激光器^[4],此类激光器在体积和应用上受到一定的限制。中国科学院电子学研究所长期致力于高平均功率高重复率 TEA CO₂ 激光器的研究工作,并于 2003 年研制成功平均功率为 12 kW (重复频率 400 Hz, 脉冲能量 30 J) 紫外预电离的 TEA CO₂ 激光器^[5]。

通过提高激光脉冲能量可以进一步提高激光器的功率输出水平,TEA CO₂ 激光器的能量输出能力很大程度上依赖于气体介质的预电离程度,即依赖

收稿日期:2005-12-16;收到修改稿日期:2006-02-27

基金项目:中国科学院知识创新工程领域前沿项目(D5067)资助课题。

作者简介:柯常军(1973—),男,湖北黄石人,中国科学院电子学研究所副研究员,博士,主要从事高功率激光技术及应用方面的研究。E-mail:ke6757@sina.com.cn

于放电空间在放电发展起始阶段的电子浓度分布情况,最常见的两种预电离方案是自由火花预电离和电晕预电离,对于高气压脉冲气体激光器,自由火花预电离比电晕预电离更有效。在自由火花预电离时,产生预电离放电的火花针极易烧蚀,在多次放电后,还容易产生污染物,降低气体的使用寿命。采用滑闪放电为激光器提供预电离,可以提供比自由火花预电离更高效的预电离,同时还可以在在一定程度上避免自由火花预电离的缺点。滑闪放电是当高压脉冲加在两电极间时,沿绝缘介质表面形成的一种放电形式。滑闪放电产生的等离子体温度高达 6×10^4 K,近年来常被用于产生强烈的紫外和极紫外光源,可以用作脉冲气体激光器的预电离源。滑闪放电是一种更适用于 TEA CO₂ 激光器的预电离方式。日本的 Tatsuo 等^[6]比较了自由火花和表面滑闪放电形成的火花在 CO₂ 激光混合气体中产生电子的情况。实验结果表明,在电子产出率方面表面滑闪放电显得更有效,电子产出率是自由火花的 3 倍。Richardson 等^[7]采用二维平面多通道滑闪放电为放电空间提供预电离,且滑闪表面位于网状电极下面,紫外光透过网孔来电离主放电空间内的的气体分子,由一个公共电容控制全部预电离所消耗的能量,容易引起预电离的不均匀。

本文提出一种新型侧面多通道表面滑闪放电结构,通过在实心均匀场电极两侧产生表面多通道滑闪放电为放电空间提供均匀的初始电子。采用这种预电离技术,利用放电体积 $5.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 90 \text{ cm}$ 的两个相同单元模块简单地串联起来,实现了 100 J 量级的激光能量输出。

2 实验装置

侧面滑闪预电离 TE CO₂ 激光器激光头模块结构如图 1 所示,主放电电极由线性扩展的 Ernst 电极 A 和经验平面电极 B 组成,阳极 A 的基底宽度为 120 mm,材料为硬铝。不锈钢阴极 B 由中间平面和边侧曲面光滑连接而成,基底宽度为 65 mm,主放电电极 A 和 B 的间距为 55 mm,放电长度为 900 mm,整个放电体积为 $55 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 。阴极两侧各放置一块厚为 2 mm,与阴极长度相同的环氧绝缘板 E,环氧绝缘板 E 一侧与阴极侧面紧密接触,其上表面比阴极表面略低。环氧绝缘板 E 另一侧表面均匀分布有 49 个窄镍片 D,镍片 D 与阴极侧面的距离为 10 mm,每个窄镍片 D 分别与 350 pF 的高压

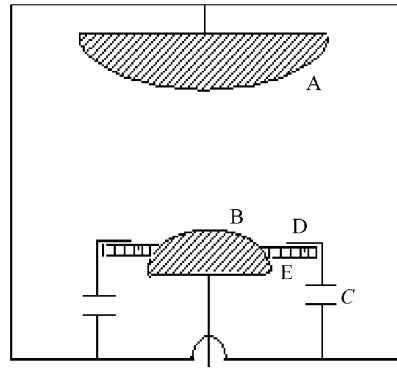


图 1 激光头模块结构示意图

Fig. 1 Schematic of laser head modular

陶瓷电容 C 相连然后与阳极 A 相连。这种表面滑闪放电结构的各通道放电由分别独立的耦合电容控制,可以产生更加均匀的预电离。同时,与阴极两侧紧贴的滑闪表面可以看作是风道的延续,当激光器以重复频率运转时,可以使放电区有更高的风速,有利于提高激光器的重复频率和激光平均输出功率。当高压脉冲在阴极形成时,镍片与阴极通过环氧绝缘板 E 表面形成均匀的多通道滑闪放电,对主放电空间中的气体分子进行充分有效的初始电离,可以大大提高激光器的注入能量密度。激光谐振腔采用全内腔结构,全反镜为曲率半径为 6 m 的镀金凹铜镜,输出耦合镜为未镀膜的硒化锌平行平面镜,腔长为 1.5 m。激光器模块的放电回路为两级 Marx 发生器,每一级的电容为 $0.3 \mu\text{F}$,最高充电电压为 40 kV。

为了进一步提高激光器的输出能量,采用两节完全相同的激光头模块通过波纹管串联起来,谐振腔仍然采用简单的平凹全内腔结构,腔镜与单节模块相同,腔长为 3 m。图 2 给出了双模块激光器放电回路的示意图,该回路由两套并联的两级 Marx 高压发生器组成,电容均为 $0.3 \mu\text{F}$,最高充电电压为 40 kV。通过共用开关 ST 保证两套 Marx 高压发生

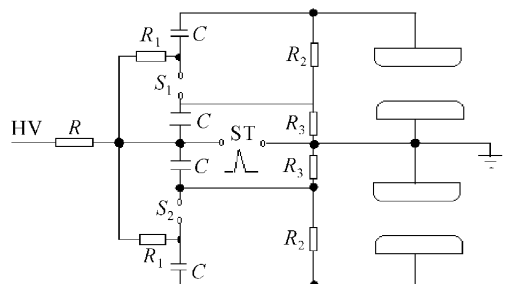


图 2 双模块激光器放电回路

Fig. 2 Diagram of dual-modular laser discharge circuit

器的同步触发。气体体积比为 CO₂:N₂:He=1:1:4, 气压的变化范围为 25~60 kPa。激光器辉光放电照片由 Canon PowerShot A75 数码相机拍摄, 激光脉冲能量用 Scientec 380402 能量计测量, 激光脉冲波形用光子牵引探测器探测, 然后到 Tektronix TDS-220 数字示波器上显示。

3 实验结果

图 3 给出了 5.5 cm 电极间距单激光器模块辉光放电的典型照片, 注入能量密度为 150 J/L。不难看出主放电电极间呈现出非常均匀的辉光放电, 图片左侧阴极上下两排亮线是起预电离作用的两侧滑闪表面放电。采用这种新型的预电离结构, 用 $V(\text{CO}_2):V(\text{N}_2):V(\text{He})=1:1:4$ 的激光混合气体在很宽的气压范围内实现了辉光放电。受储能电容和预电离电容的耐压限制(40 kV), 充电电压为 40 kV 时辉光放电的最高气压为 60 kPa, 最高激光输出能量为 53 J。实验发现在同一气压下, 激光转换效率随注入能量的增大而降低, 原因是激光器增益出现饱和^[8]。图 4 给出了典型的激光脉冲波形, 由一个 100 ns 左右的尖脉冲和几微秒的拖尾组成。

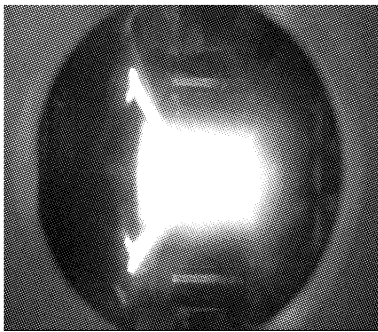


图 3 激光器模块放电照片

Fig. 3 Discharge photograph of laser modular

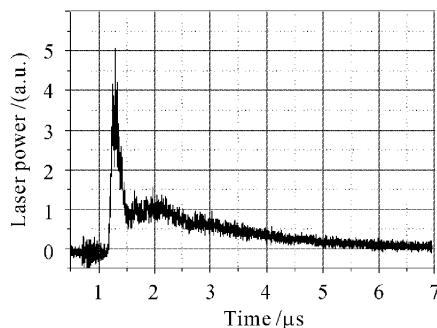


图 4 激光脉冲波形

Fig. 4 Oscilloscope trace of the optical pulse

将两个放电体积为 5.5 cm×5 cm×90 cm 的单元模块串联起来, 可以实现更高能量的激光输出。图 5 给出了单模块和双模块激光器件在不同气压下, 激光输出能量随充电电压的变化情况, 发现在相同气压和充电电压下, 双模块器件存在很强的激光能量增强效应, 双模块串联输出的激光能量比单模块激光能量的两倍还大 15% 左右。例如在气压为 45 kPa, 充电电压为 35 kV 时, 单模块的激光输出为 40 J, 而双模块串联输出的激光能量为 92 J。增益区内光子数密度和谐振腔效率增加是激光脉冲能量增强效应存在的主要原因^[9]。与单模块相比, 双模块串连时谐振腔效率的增加表明未镀膜的硒化锌平行平面镜更适合长腔激光器。在气压为 45 kPa 时, 双模块的最高输出能量为 103 J。图 6 给出了热敏纸上记录的近场光斑, 可以看出激光束空间分布非常均匀, 整个光斑的尺寸为 5.5 cm×5 cm。

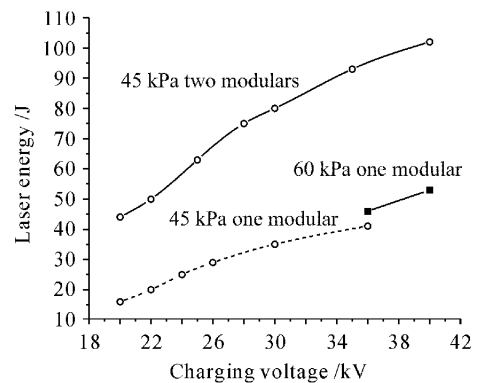


图 5 激光输出能量与充电电压的关系

Fig. 5 Dependence of laser energy versus charging voltage

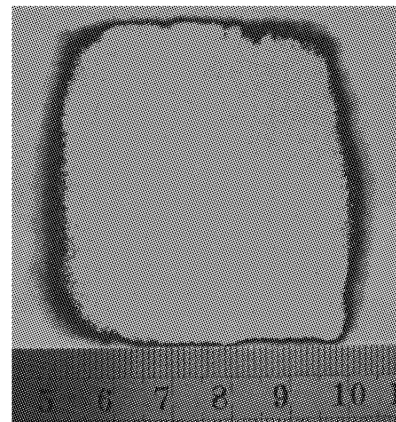


图 6 激光近场烧蚀光斑

Fig. 6 A burn mark on a thermo sensitive paper

4 结论

提出了一种新型多通道表面滑闪放电技术, 通

过在实心均匀场电极两侧产生表面多通道滑闪放电提供初始电子,实验表明采用这种预电离技术可以实现大体积均匀放电,获得更高的单位体积比激光能量输出。

参 考 文 献

- 1 Zheng Yijun, Tan Rongqing, Zhang Kuohai *et al.*. Experiment of laser-propulsion free-flight [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):171~174
郑义军,谭荣清,张阔海等. 激光推进自由飞行实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):171~174
- 2 L. N. Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]. *AIP Conf.*, 2003, **664**:49~60
- 3 M. Jung, W. Mayerhofer, G. Renz *et al.*. High power CO₂ laser at 100 Hz rep-rate [C]. *IEEE 22nd Power Modulator Symposium Conf.*, 1996. 243~246
- 4 A. V. Rodin, V. G. Naumov, A. F. Nastoyashchii *et al.*. High energy pulse-repetitive CO₂ laser for lightcraft experiments [C]. *AIP Conf.*, 2003, **664**:612~619
- 5 Wan Chongyi, Yu Yanning, Lü Yan *et al.*. Rotating spark gap switched discharge TEA CO₂ laser with average power up to 12 kW [C]. *SPIE*, 2005, **5777**:426~432
- 6 O. Tatsuo, M. Katsunori, A. Masanori. A volumetric photo-preionization in a CO₂-laser gas mixture by VUV radiation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1980, **19**(6):1189~1190
- 7 M. C. Richardson, K. Leopold, A. J. Alcock. Large aperture CO₂ laser discharges [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(9):934~939
- 8 E. A. Ballik, B. K. Garside, J. Reid *et al.*. Reduction of the pumping efficiency in CO₂ lasers at high discharge energy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(3):1322~1330
- 9 Li Xiangying, Xu Sannan, Zhang Yongqing *et al.*. Energy enhancement effect in synchronous two-pair electrodes pulse discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(3):229~232
李相银,许三南,张永清等. 双电极对脉冲放电时间间隔 $\tau = 0$ s 时的能量增强效应[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3):229~232