

高单脉冲能量重复频率 TEA CO₂ 激光器

卢 宏 程祖海 左都罗 朱海红 余文峰

(华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室激光科学与技术研究部, 湖北 武汉 430074)

摘要 为了满足激光推进、光电对抗等应用领域的需要,研制了一台高单脉冲能量高重复频率新型 TEA CO₂ 激光器。采用紫外(UV)预电离双路 Ernst 石墨电极串并联放电结构、超薄水冷不变形镜折叠腔、双回路直冷式封闭循环流动系统和高压大电流快脉冲开关电源等技术,解决了高功率高压电容充电、高气压大体积均匀辉光放电、高气压高速均匀流场、激光谐振腔和高脉冲能量、高重复频率脉冲激光输出等技术难题。成功研制了一台最大脉冲激光能量 92 J,重复频率 35 Hz,激光输出发散角 1.4 mrad,脉冲能量稳定性 0.8%,平均功率大于 3000 W 的脉冲激光器。

关键词 激光技术; TEA CO₂ 激光器; 高脉冲能量; 稳定性

中图分类号 TN248.2⁺2 **文献标识码** A

TEA CO₂ Laser with High Single Pulse Energy and Repetition

Lu Hong Cheng Zuhai Zuo Duluo Zhu Haihong Yu Wenfeng

(Division of Laser Science and Technology, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Institution of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract A novel TEA CO₂ laser with high single pulse power and high repetitive frequency was developed to fulfill the need of laser propulsion and the optoelectric countermeasures. The technique problems such as quick charging of high voltage capacitor, uniform discharge in high pressure large aperture zone, uniform flow of high pressure gas, and laser resonator, high energy pulse output and high repetition pulse output, were solved by applications of ultraviolet (UV) preionization, two-circuit series and parallel discharge structure of graphite Ernst electrode, folded resonator that embodies super-thin water-cooled non-deforming mirror, closed circle direct cooling system of double loop and high-voltage high-current switch power supply. The highest pulse energy is 92 J, pulse repetition is 35 Hz, the divergence angle of output laser is 1.4 mrad, the stability of pulse energy is 0.8%, and the average output power is more than 3000 W.

Key words laser technique; TEA CO₂ laser; high pulse energy; stability

1 引 言

重复频率高能脉冲 TEA CO₂ 激光器具有光束质量好、大气透过率高、大气击穿阈值低、电光转换效率高、运行成本低等特点,在激光加工、激光化学、激光等离子体物理、激光推进及激光武器等领域都有广泛的应用前景。国际上,俄罗斯、美国、德国等国家都先后开展了重复频率高能脉冲 CO₂ 激光器的研究,性能指标达到重复频率数百赫兹以上,单脉冲能量数百焦耳,平均功率为数十千瓦至数百千瓦的水平^[1~3]。国内已研究成功重复频率数百赫兹,单脉冲能量 30~40 J,平均功率 10 kW 级的高功率 TEA CO₂ 激光器^[4,5]。华中科技大学研制的 TEA CO₂ 激光器,单脉冲能量最高达 115 J^[6]。在

激光推进、光电对抗等应用领域中,在要求高重复频率的同时还要求高单脉冲能量。如在激光推进应用中,激光等离子体产生的冲击波速度在影响推进器获得冲量的因素中占主导地位,而冲击波的速度取决于入射的激光能量,入射能量增加,将引起冲击波速度增加^[7~9]。

获得高单脉冲能量高重复频率 TEA CO₂ 激光器需要解决大体积均匀辉光放电、高破坏阈值谐振腔和大流量工作气体循环冷却等关键问题。提高激光器脉冲输出能量最直接有效方法是增大放电区体积,主要方案是增加放电长度^[10]或增大放电间距^[11]。增加放电长度比增大放电间距实现大体积均匀辉光放电更切实可靠,同时,采用分段电极方式

基金项目: 国家 973 计划资助课题。

作者简介: 卢 宏(1965—),男,河北人,副教授,博士,主要从事高功率气体激光器及应用等方面的研究。

E-mail: luhong@mail.hust.edu.cn

提高辉光放电稳定性,放电电路共用一个球隙保证各段放电电极同步,由于放电间距小,可采用预电离强度大的火花预电离方式;谐振腔输出窗口选用美国 II-VI 公司的 ZnSe 镜片,内表面不镀膜以减小光学损伤,反射镜采用破坏阈值高的超薄水冷不变形铜镜^[12]。所以,在光学谐振腔破坏阈值允许条件下,采用延长放电距离方案合理可行,较长光学谐振腔也利于获得优良光束质量激光输出。对于延长放电长度带来的激光器体积增大问题,可优化多电极对排列方式,采用串并联空间组合排列和双通道折叠光学谐振腔来减小体积。

本文基于这些技术方案优化组合,成功研制了一台单脉冲能量 92 J,重复频率 35 Hz,激光输出散角 1.4 mrad,脉冲能量稳定性 0.8%,平均功率大于 3000 W 的脉冲 TEA CO₂ 激光器。

2 系统结构

紫外预电离 TEA CO₂ 激光器系统由放电室、激光谐振腔、高压脉冲电源、控制系统、冷却风机、气源系统等几部分组成,激光器外形尺寸 2.8 m ×

1.6 m × 1.2 m (长 × 宽 × 高)。

激光头结构如图 1 所示,主放电电极采用四组 Ernst 电极对单元组成,形成双通道,电极材料采用导热率高、耐轰击性能好的高纯石墨,单电极对放电激活体积为 50 mm × 50 mm × 800 mm,总放电体积约 8 L;每对电极两侧共布置 55 对预电离针,每根火花针连接一个 1000 pF 高压陶瓷电容,阴阳两极相对的火花针间隔为 8 mm;对应每段放电区设置一横流风机,风轮直径 150 mm,风机电机转速 2900 r/min,采用磁力耦合驱动横流风机使工作气体在放电区高速循环流动,主放电区风速约 20 m/s,在脉冲重复频率为 35 Hz 时,清扫率为 3.5,保证在两个激光脉冲之间,放电区工作气体置换 3.5 次;为兼顾稳定性和模体积,采用平凹稳定谐振腔,由一面输出窗、两面角反射镜、一面后反射镜组成,输出窗口采用美国 II-VI 公司的 ZnSe 镜片,为提高破坏阈值,内表面不镀膜,反射镜均采用本课题组发明的超薄多层不变形水冷铜镜,在放电室内设置内光桥,谐振腔所有镜片固定在光桥上,以提高激光器光束质量和单脉冲能量稳定性。

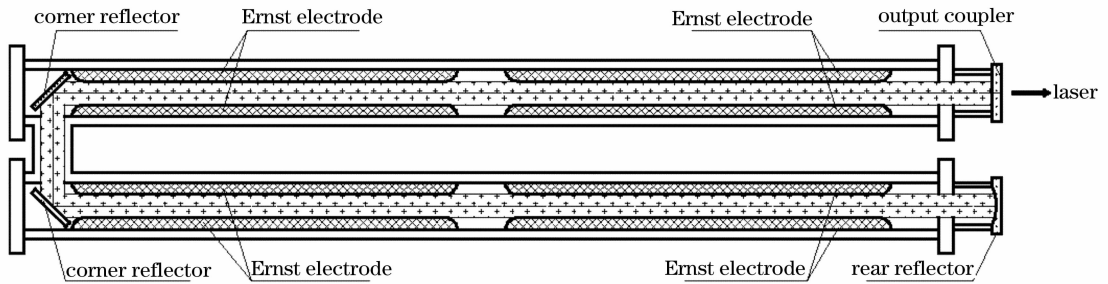


图 1 激光头结构示意图

Fig. 1 Schematic of pulse laser head

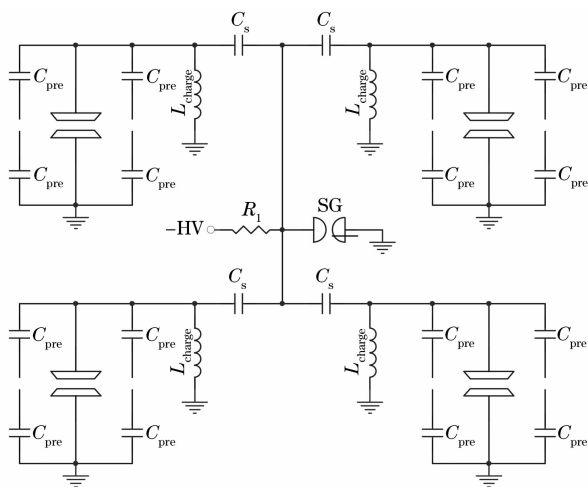


图 2 激光器放电电路示意图

Fig. 2 Diagram of laser discharge

图 2 给出了激光器的放电电路示意图。其中 C_s 为储能电容,电容值为 $0.25 \mu\text{F}$, C_{pre} 为预电离电容,为放电电极单侧预电离电容的总和,约 27.5 nF , L_{charge} 为充电电感,约 $100 \mu\text{H}$, R_1 为充电电源与放电电路之间的隔离电阻,约 $1 \text{ k}\Omega$;充电电源采用具有恒流源特性的开关模式高压 (HV) 电容充电电源,保证隔离电阻 R_1 消耗少量电功率。为保证放电同步,4 个放电区共用 1 个球隙 SG,一旦球隙 SG 被触发击穿,4 个放电区阳极可同时获得脉冲高压信号。

3 实验结果

对激光器的单脉冲能量、光束质量、脉冲时间波形等参量进行了测试。结果证实,采用多对放电区串接方式实现重复频率高能脉冲 TEA CO₂ 激光器

方案是可行的。

3.1 脉冲能量

采用美国 Scientech 公司的大口径量热计对激光器的脉冲能量进行了测试。

图 3 是直接测量获得的脉冲能量随注入能量的变化。随着充电电压即注入能量增加,激光器单脉冲输出能量增加,平均能量转换效率在 11% 左右,最高达 12%。在 42 kV 充电电压时,单脉冲能量达 92 J。

当充电电压为 38 kV 时,多次测试激光器单脉冲运行时的脉冲能量,得到的测试结果如表 1 所示。由表 1 可以看到:在充电电压为 38 kV 时,激光输出的单脉冲能量在 75~76.2J 之间,平均值为 75.7J,涨

落为 0.8%。

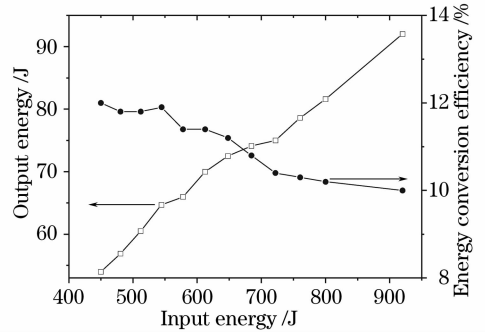


图 3 脉冲能量、转换效率与注入能量关系
Fig. 3 Relation between input energy, conversion efficiency and output energy

表 1 脉冲能量重复性实验

Table 1 Repetitive test of pulse energy

Energy / J	Serial number								Average value
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	75	75	75.8	76.1	76.6	75.6	76.2	75	75.7

设定激光器重复频率为 35 Hz,激光器在此重复频率连续工作,主放电区未出现弧光放电,双路多段 Ernst 石墨电极串并联放电均匀稳定,激光器系统运行正常,表明激光器重复频率可达 35 Hz 以上。

3.2 光束质量

采用在距激光器输出窗口不同距离的位置用热敏纸记录光斑、比较不同位置光斑大小获得光束发散角的方法评价激光器的光束质量。从图 4 可以看出激光束空间分布非常均匀。

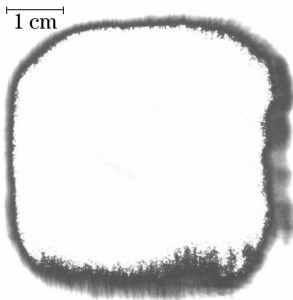


图 4 热敏纸记录烧蚀光斑图样

Fig. 4 A burn mark on a thermo sensitive paper

设距窗口 L_1 位置光斑尺寸为 d_1 ,距窗口 L_2

位置光斑尺寸为 d_2 ,则光束发散角为

$$\theta = (d_2 - d_1) / (L_2 - L_1), \quad (1)$$

图 5 为激光束发散角测量图。

对于方光斑输出 TEA CO₂ 脉冲激光光束,在水平方向和竖直方向有不同发散角,分别用 θ_x 和 θ_y 表示,光束总发散角用两个发散角均方根平均值表示为

$$\theta = \sqrt{(\theta_x^2 + \theta_y^2) / 2}. \quad (2)$$

将充电电压设定在 38 kV,测试距激光器窗口 1.45 m 和 4.35 m 处光斑在水平方向和竖直方向的光斑大小,如表 2 所示。根据(1)式和(2)式,得到激光器水平方向光束发散角 $\theta_x = 1.5$ mrad,竖直方向 $\theta_y = 1.3$ mrad,总发散角 $\theta = 1.4$ mrad。

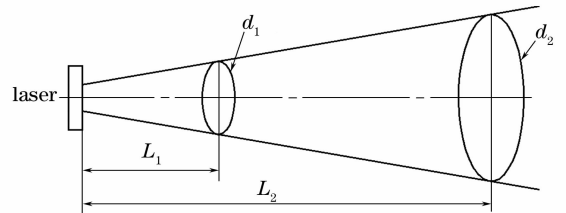


图 5 激光束发散角测量

Fig. 5 Measurement of divergence angle of laser beam

表 2 光斑尺寸实验数据

Table 2 Experimental data of facular size

Distance to output mirror /m							
	1.45			4.35			
Facular size	Level /mm	53.5	53.0	54.0	58.0	58.5	58.0
		53.5			58.2		
	Vertical /mm	48.5	48.0	48.0	52.0	51.5	51.0
		48.2			51.5		

3.3 脉冲时间波形

采用日本滨松公司 B749 型光子牵引探测器测试光束中心激光功率随时间变化规律,得到激光器输出脉冲的时间波形。图 6 是充电电压 40 kV 时激光脉冲波形。由图 6 可以看到,脉冲时间波形由增益开关效应形成的尖峰和 N_2 分子共振能量转移形成拖尾组成。尖峰半峰全宽约 200 ns,包括尖峰和拖尾的 10% 峰全宽约为 4 μ s。多次测量激光脉冲时间波形,并不随充电电压改变。

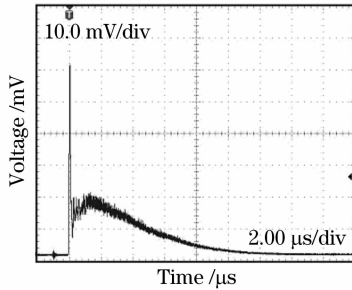


图 6 激光脉冲波形

Fig. 6 Laser pulse shape

4 结 论

在激光器谐振腔破坏阈值许可条件下,采用增加放电长度的方法,可以实现大体积均匀辉光放电,获得重复频率高能脉冲激光输出;与相同体积大间距放电结构相比,增加放电长度实现大体积均匀辉光放电切实可靠,能获得高能脉冲激光输出。较长光学谐振腔有利于改善光束质量;此外,这种结构易于改善横向气体流动系统,有利于提高脉冲重复频率,获得高重复频率激光输出。

参 考 文 献

1 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

2 Anatoly V. Rodin, Valery G. Naumov, Anaroly F. Nastoyashchii *et al.*. High energy pulse-repetitive CO₂ laser for lightcraft experiments [C]. *AIP Conf.*, 2003, **664**: 612~619

3 Leik N. Myrabo. Brief history of the lightcraft technology demonstrator (LTD) project [C]. *AIP Conf.*, 2003, **664**: 49~60

4 Chongyi Wan, Yanning Yu, Yan Lu *et al.*. Rotating spark gap switched discharge TEA CO₂ laser with average power up to 12 kW [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 426~432

5 Li Dianjun, Yan Guilong. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO₂ laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 807~810

李殿军,杨贵龙. TEA CO₂ 激光器主放电延迟时间对效率的影响 [J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 807~810

6 Duluo Zuo, Hong Lu, Zuhai Cheng. Studies on a 100-joule-class UV-preionized TEA CO₂ laser [C]. *SPIE*, 2005, **5777**: 442~445

7 Zheng Yijun, Gong Ping, Tan Rongqing *et al.*. Experimental study of coupling coefficients for air breathing mode laser propulsion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **32**(7): 889~893

郑义军,龚平,谭荣清等. 大气模式激光推进耦合系数的实验研究 [J]. *中国激光*, 2007, **32**(7): 889~893

8 Yijun Zheng, Rongqing Tan, Donglei Wang *et al.*. Coupling coefficient for TEA CO₂ laser propulsion with variable pulse repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 99~100

9 Wen Ming, Hong Yanji, Wang Jun *et al.*. Effects of laser pulse waveform on lightcraft performance [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1038~1042

文明,洪延姬,王军等. 激光脉冲波形对推力器性能的影响 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1038~1042

10 Ye Lihua, Li Xiangyin, He Anzhi. Effect of synchronization trigger on output characteristic of multiple-electrode-pair laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 716~719

叶莉华,李相银,贺安之. 同步触发对多电极对激光器输出特性的影响 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 716~719

11 Martin C. Richardson, Kurt Leopold, A. J. Alcock. Large aperture CO₂ laser discharges [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(9): 934~939

12 Zhu Haihong, Cheng Zuhai, Yu Liangying *et al.*. Structure optimization design of water-cooled copper mirror with micro-channel [J]. *Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2007, **35**(4): 72~74

朱海红,程祖海,余亮英等. 超薄微通道水冷铜镜的结构优化设计 [J]. *华中科技大学学报*, 2007, **35**(4): 72~74