

“大功率 TEA CO₂ 激光器”专题文章导读

李殿军

中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

激光,是20世纪科学史上最重大的发明之一。激光的发明,影响了人类生活的方方面面,小到纳米技术,大到宇宙空间研究,简单为教学演示,复杂至生命科学探索,几乎所有的科学进步都直接或间接地得益于激光技术的发展。一言以蔽之,激光作为新的应用工具发展速度之快在科学技术史上十分罕见,究其原因在于其提供了一种全新的技术手段和途径,或者使以前可为的复杂难题变得简单,或者使以前不可为的事件变成现实,由此促进了科学技术的不断创新与持续进步。这些创新与进步反过来又“泵浦”激光在新的更高技术层次上获得突破。有理由相信,随着激光技术朝着极限方向的不断发展,在不久的将来有可能创造出我们暂时还无法预见的崭新未来。

时至今日,激光器的种类数以千计,在各自的应用领域中发挥着不可替代的重要作用。然而,到目前为止,还没有任何一种激光器能够同时具备像 CO₂ 激光器那样多的技术特点,这些技术特点决定了 CO₂ 激光器比其它种类的激光器更容易适应各种应用场合的实际要求,因而意味着目前还没有哪一种激光器可以将其取而代之。这些技术特点如下:1. CO₂ 激光器输出波段位于大气窗口,适合远距离传输;2. CO₂ 激光器既可以连续运转,又可以脉冲输出;3. 除了化学激光器,CO₂ 激光器获得了迄今为止最高的功率输出水平;4. CO₂ 激光器运转的电效率是所有已知激光器中最高者之一;5. 电子束激励的 CO₂ 激光器输出的脉冲能量超过 2 000 J,其它只有电子束激励的 HF 化学激光器和闪光灯激励的 Nd 玻璃激光器才能与其比拟;6. 高压 CO₂ 激光器获得的激光脉冲宽度 < 0.1 ns,这是任何气体激光器都无法实现的,只有固体激光器才能产生更短的脉冲宽度;7. 测得封闭型 CO₂ 激光器的频率稳定度达到 10⁻¹³ 左右;8. CO₂ 激光器是能够直接使用 Q 开关的少数几种气体激光器之一,不另加放大级就可以达到几百兆瓦的峰值输出功率;9. CO₂ 激光器进行激光倍频时能够产生 4~6 μm 波段的中波红外激光输出;10. CO₂ 激光器可以采用放电、光泵、气动、化学、电子束和核技术激励,是可以采用的激励技术类型最多的激光器;11. CO₂ 激光器的线宽比较窄,是在正常情况下倾向于运转在一个波长的少数几个激光器之一;12. CO₂ 激光器在低气压条件下能够实现 9~11 μm 波段内八十余条不同强度的激光谱线的可调谐输出,而在高压(一般 > 5 个大气压)条件下,还可以实现 8~12 μm 波段内的连续可调谐输出。

本专题论文以大功率脉冲 TEACO₂ 激光器为主。该激光器目前的热点应用领域包括激光推进、激光空间探测、激光照明、激光大气监测、激光雷达和军事光电对抗等。鉴于激光应用的实质问题是激光与物质的相互作用的事实,本专题还包括一篇专门研究实验室用探索与研究激光与物质相互作用实验的小型多功能 CO₂ 激光器的论文介绍。

《大功率脉冲 TEA CO₂ 激光器配气比对输出的影响》一文介绍了在满足 500 Hz 高重复频率脉冲放电条件下,激光器的工作气压和配气比例对激光输出和转换效率的影响,得出配气比例对于输出的影响因子大于工作气压的结论,并且给出了最佳的实验数据。

《大功率 TEA CO₂ 激光系统的电磁兼容设计》一文阐述了高压脉冲放电产生电磁干扰的原因和来源,分析并提出了减小和屏蔽电磁干扰的采取措施,有效地解决了大功率激光器脉冲放电的电磁兼容性问题。

《大功率 TEA CO₂ 激光器的脉冲激励电源》一文描述了针对大功率激光器研制的脉冲放电激励电源系统。该电源的脉冲放电时间约为 200 ns,瞬间的峰值功率高达 1 000 MW,放电的重复频率可以在数百赫兹内任意设定。

《小型多功能 CO₂ 激光器》一文主要描述为满足实验室开展激光与物质相互作用研究而专门研制的多功能激光器系统。该激光器输出波长 9~11 μm;连续输出功率为 8 W;脉冲输出峰值功率达数千瓦;脉冲宽度百纳秒至亚毫秒;重复频率为 1~10 kHz。

《大功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔的设计与实验》一文比较了稳定腔激光输出与非稳腔激光输出各自的特点,在此基础上给出了望远镜虚共焦腔的设计过程并通过试验研究了非稳腔的输出特性,结果表明非稳腔结构极大地提高了激光器输出的光束质量。

《TEA CO₂ 激光器均匀场电极的设计》一文介绍了在 TEA CO₂ 激光器中应用的能够实现宽尺度大面积均匀场辉光放电的电极工程设计问题。实验结果表明:所设计的宽尺度的电极能够满足激光器的实用要求。

《大功率 TEA CO₂ 激光器旋转火花开关电极的烧蚀实验》一文介绍了 TEA CO₂ 激光器脉冲放电的调节与采用控制单元技术对旋转火花开关系统的控制。该系统工作在整个放电回路条件最为恶劣和苛刻的环节中,是关系到激光器能否实现大面积均匀辉光放电的核心关键技术之一。实际应用结果显示:旋转火花开关系统不仅完全满足激光器的技术要求,而且稳定脉冲放电工作寿命达到了 10⁷ 次。

大功率脉冲 TEA CO₂ 激光器配气比对输出的影响

杨贵龙, 邵春雷, 孟范江, 郭汝海, 李殿军, 郭劲, 郭立红
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对大功率脉冲 TEA CO₂激光器的放电腔在不同工作气压和不同配气比例条件下对激光器输出能量和电光转换效率均有较大影响,研究了充气压力从 30 kPa 到 60 kPa,配气比例由 CO₂:N₂ = 1:1 到 CO₂:N₂ = 1:4 变化条件下,放电腔工作气压和配气比例对激光器输出能量和转换效率的影响。实验结果显示:当 CO₂:N₂ 的配气比例为 1:3 时,激光器输出的电光转换效率存在最佳点。在最佳配气比例 CO₂:N₂:He = 3:9:28,总气压为 40 kPa 和注入激励电能保持不变的情况下,激光器单脉冲放电时的输出能量为 24.6 J,电光转换效率达 16.4%。在高频连续放电实验中,激光器的最高放电频率可达 500 Hz 并且连续稳定运行。实验数据表明,选择合适的放电腔工作气压和配气比例可以改变激光器的输出能量,提高激光器的电光转换效率。

关键词:TEA CO₂激光器;配气比例;电光转换效率

中图分类号:TN248.22 文献标识码:A

Influence of gas mixture ratios on laser outputs of high power pulsed TEA CO₂ laser

YANG Gui-long, SHAO Chun-lei, MENG Fan-jiang, GUO Ru-hai, LI Dian-jun, GUO Jin, GUO Li-hong

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: With the aim to improve the output powers and electro-optical conversion efficiencies of a high power pulsed TEA CO₂ laser, the influence of different gas pressures and different gas mixture ratios in high power pulsed TEA CO₂ laser on the output powers and electro-optical conversion efficiencies is researched in gas pressures from 30 kPa to 60 kPa and gas mixture ratios from CO₂: N₂ = 1:1 to CO₂: N₂ = 1:4. The experimental results show that the best value for laser output electro-optical conversion efficiency can be obtained when the gas mixture ratio of CO₂ to N₂ is 3. The output energy for the single pulse discharges can achieve 24.6 J and the electro-optical conversion efficiency is 16.4% when the gas ratio of CO₂:N₂:He equals 3:9:28 and a total gas pressure is 40 kPa under the condition of same injection exciting electric energy. In an experiment of high repetition rate and continuous discharge, the laser can operate continuously and steadily at maximum frequency of 500 Hz. These data reported here prove that choosing properly the work gas pressures and gas mixture ratios can optimize the output powers and electro-optical conversion efficiencies of high power pulsed TEA CO₂ lasers.

Key words: CO₂ laser; gas ratio; electro-optical conversion efficiency

1 引言

高功率高重复频率 TEA CO₂激光器在军事、激光推进^[1~3]、工业加工和科研等很多领域具有广泛的应用。近年来,激光推进领域中的理论和实践需要,对 TEA CO₂激光器的深入研究提出了更高的要求,由此推动了 TEA CO₂激光器在输出功率、输出能量、稳定性、运转寿命以及光束质量等技术指标上的进一步提高^[4]。

TEA CO₂激光器输出激光能量及转换效率与放电腔气体的配比及其气压密切相关。为得到较大的激光输出,通常的办法是增加泵浦能量,但更好的办法是提高激光器的电光转换效率^[5],因为增加泵浦能量不仅增大设备体积,同时也容易导致激光器弧光放电的发生。在大功率脉冲输出的 TEA CO₂激光器研究中,一般报道的激光器电光转换效率都在 10% 左右。解决电光转换效率问题,除了调整放电电路的参数匹配和选择合适的谐振腔外,使用最佳的配气比例也是影响效率的关键因素之一^[6,7]。通常脉冲 TEA CO₂激光器的主要工作气体为 CO₂、N₂、He 以及辅助气体 CO、

Xe、H₂等^[8]。本文实验研究了 CO₂、N₂、He 这 3 种气体在不同工作气压和配气比例条件下对脉冲 TEA CO₂激光器输出能量和电光转换效率的影响,并对实验结果进行了理论分析。

2 脉冲 TEA CO₂激光器实验装置

实验采用的脉冲 TEA CO₂激光器包括电源及谐振源、显示控制系统、气体循环冷却及放电系统、高重复频率开关及触发系统和配气系统;激光器有效气体容积为 1.5 m³,放电体积为 2 L,放电区气体流速为 100 m/s,放电电极两侧为单排紫外预电离针,光学谐振腔为平凹稳定谐振腔,腔长为 2 m,反射镜为 $R = 18$ m 的镀金铜镜,输出镜为 $T = 50%$ 的 ZnSe 透反镜。配气系统包括真空系统和充气系统,真空系统包括真空泵、真空计、真空管道及真空隔离阀门;充气系统包括压力传感器、充气管道、三路充气阀门;三路阀门分别连接高纯 CO₂、高纯 N₂ 和高纯 He 3 种气体;3 种气体纯度要求达到 99.999%,并确保充气管路无泄露(激光器实验装置框图见图 1)。

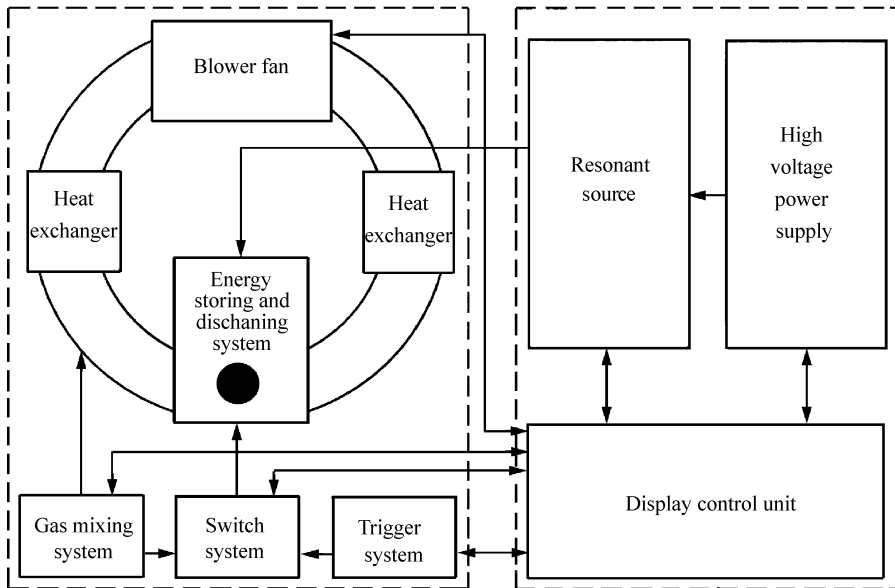


图 1 激光器实验装置框图

Fig. 1 Frame scheme of laser experimental setup

3 实验过程及结果

激光器工作之前,先将储气罐抽真空,同时打开充气的3个阀门,抽真空充气管道,当真空度达到0 Pa时,关闭真空隔离阀门,关闭真空泵;充气时首先充入N₂,达到要求压力后关闭N₂阀门,再充入CO₂,达到要求压力后关闭CO₂阀门,再充入He,达到要求压力后关闭He阀门;此时开动腔内循环风机,对混合气体实施搅动,使之混合更加均匀,气体循环1 min后可正式开始工作;每一次配气实验均按此步骤重新完成一次,以保证实验数据的准确性。

本实验重点研究CO₂和N₂的取值比例,He只做相应调整,共分4部分完成:(1)CO₂:N₂=1:1,总气压为30~60 kPa,测试单脉冲输出能量,取3次加压平均值,计算出转换效率。(2)CO₂:N₂=1:2,总气压为30~60 kPa,测试单脉冲输出能量,取3次加压平均值,计算出转换效率。(3)CO₂:N₂=1:3,总气压为30~60 kPa,测试单脉冲输出能量,取3次加压平均值,计算出转换效率。(4)CO₂:N₂=1:4,总气压为30~60 kPa,测试单脉冲输出能量,取3次加压平均值,计算出转换效率。

3.1 CO₂:N₂=1:1

实验采用单脉冲放电形式。表1为保持CO₂:N₂=1:1比例不变时,不同气压值条件下测

表1 CO₂:N₂=1:1时的实验数据对比

Tab.1 Comparison of experimental data for CO₂:N₂=1:1

CO ₂ /kPa	N ₂ /kPa	He/kPa	Total gas pressure/kPa	Energy/J	Efficiency/%
2	2	26	30	16.8	11.2
3	3	24	30	17.6	11.7
4	4	22	30	18.8	12.5
5	5	30	40	19.6	13.1
6	6	28	40	20.0	13.3
6	6	38	50	20.0	13.3
7	7	36	50	20.4	13.6
7	7	46	60	20.3	13.5
8	8	44	60	20.8	13.9
9	9	42	60	21.0	14.0

得的激光器单脉冲输出能量平均值以及相应的电光转换效率值。

表1示出,随着CO₂和N₂气压的增加,激光器输出的能量同时增加,电光转换效率也得到提高。实验经验表明,继续增加气压将导致激光器无法高重复频率放电,CO₂和N₂的含量不能无限增加,因此,此数据值做到CO₂分压为9 kPa为止。

3.2 CO₂:N₂=1:2

实验仍采用单脉冲放电形式。表2为保持CO₂:N₂=1:2比例不变时不同气压值条件下测得的激光器单脉冲输出能量平均值以及相应的电光转换效率值。

表2 CO₂:N₂=1:2时的实验数据对比

Tab.2 Comparison of experimental data for CO₂:N₂=1:2

CO ₂ /kPa	N ₂ /kPa	He/kPa	Total gas pressure/kPa	Energy/J	Efficiency/%
2	4	24	30	20.6	13.7
3	6	21	30	21.5	14.3
4	8	18	30	22.7	15.1
4	8	28	40	22.7	15.1
5	10	25	40	22.6	15.1
5	10	35	50	22.4	14.9
6	12	32	50	22.4	14.9
6	12	42	60	22.4	14.9

表2示出,随着CO₂和N₂气压的增加,激光器输出的能量同时增加,电光转换效率也得到提高,CO₂和N₂的气压和增加到12 kPa以后,激光器输出能量基本不增加,因此,此数据值做到CO₂分压为6 kPa为止。

3.3 CO₂:N₂=1:3

实验仍采用单脉冲放电形式。表3为保持CO₂:N₂=1:3比例不变时不同气压值条件下测得的激光器单脉冲输出能量平均值以及相应的电光转换效率值。

表3示出,当CO₂和N₂气压增加到12 kPa时,激光器输出的能量最大,电光转换效率也达到最高值。CO₂和N₂的气压和在12 kPa以后,激光器输出能量有下降趋势,说明CO₂和N₂的气压增

高到一定值后已与实验条件不相匹配,因此,此数据值做到 CO_2 分压为 6 kPa 为止。

表 3 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$ 时的实验数据对比

Tab. 3 Comparison of experimental data for $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$

CO_2/kPa	N_2/kPa	He/kPa	Total gas pressure/kPa	Energy/J	Efficiency/%
2	6	22	30	22.6	15.1
2	6	32	40	23.0	15.3
3	9	18	30	24.5	16.3
3	9	28	40	24.6	16.4
4	12	24	40	24.2	16.1
4	12	34	50	24.2	16.1
5	15	30	50	22.3	14.9
5	15	40	60	22.1	14.7
6	18	36	60	20.0	13.3

3.4 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:4$

实验仍采用单脉冲放电形式。表 4 为保持 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:4$ 比例不变时,不同气压条件下测得的激光器单脉冲输出能量平均值以及相应的电光转换效率值。

从表 4 中看出,当 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:4$ 时,激光器输出的单脉冲能量普遍比 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:3$ 的小,并且随着 CO_2 和 N_2 气压继续增高,激光器输出能量也出现递减趋势,说明此配比已不是最佳配气比例,因此,此数据值做到 CO_2 分压为 5 kPa 为止。

表 4 $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:4$ 时的实验数据对比

Table 4 Comparison of experimental data for $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:4$

CO_2/kPa	N_2/kPa	He/kPa	Total gas pressure/kPa	Energy/J	Efficiency/%
2	8	20	30	23.0	15.3
2	8	30	40	23.0	15.3
3	12	25	40	23.3	15.5
3	12	35	50	23.2	15.5
4	16	30	50	22.4	14.9
4	16	40	60	22.3	14.9
5	20	35	60	20.6	13.7

通过以上 4 组不同配气比例实验,测得每组不同气压下激光输出能量,并计算出转换效率,结

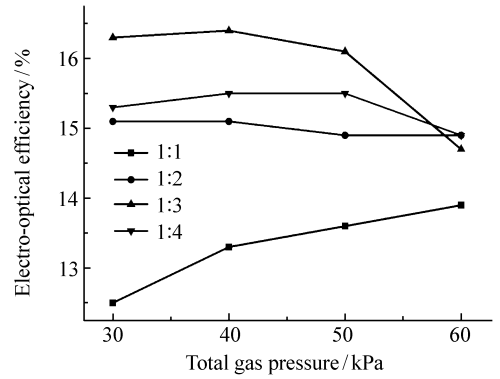


图 2 气体比例和电光转换效率的关系

Fig. 2 Relations between gas ratios and electro-optical efficiencies

果如图 2 所示。从图 2 看出, $\text{CO}_2:\text{N}_2$ 配气比例为 1:1 时,能量随气压增加而提高,但效率普遍较低,气压继续增高将不利于高重复频率稳定放电;配气比例为 1:2 时,气压增加能量变化不大;配气比例为 1:4 时,激光效率又有所降低;只有配气比例为 1:3 时,激光器输出能量和电光转换效率最高。在此配比和最佳总气压为 40 kPa 下进行了 500 Hz 连续运转放电试验,激光器可稳定运行 1 min。

4 实验结果分析

本实验数据均采用单脉冲放电试验所得。由于激光脉宽较窄,单脉冲放电不受风速等因素限制,不易产生弧光,所以第一组数据激光输出能量随着气压的增加而增加。但在高重复频率放电时,要求每次放电必须是辉光放电,所电离的气体需要高速气流将其及时更换,过高气压容易产生弧光放电。因此,此次实验所采用的参数都考虑了可在高重复频率放电条件下运行。后 3 组数据表明,气体配比的变化对激光器输出能量的影响较大,而气压的变化对激光器输出能量影响不大,由此说明,在满足现有实验条件下气体配比的重要性要远大于气压的变化。最佳的配气比例可实现放电激励电路的阻抗匹配,使高重复频率放电时产生的热尽快传导和交换出去,从而使放电区电流密度均匀,形成辉光放电;最佳的配气比例有利于激光器高重复频率、大能量、长时间运转。因

此,在脉冲 TEA CO₂激光器实验研究过程中,最佳的配气比例和 CO₂的最佳气压是激光器高效率输出和稳定工作的关键。

5 结 论

本文介绍了脉冲 TEA CO₂激光器配气比例的变化对激光器输出能量及电光转换效率影响的实验研究与理论分析结果。在现有激光放电参数及

光学谐振腔条件下,不同的气体比例和不同的气体压力对激光器的输出能量及激光器的电光转换效率有较大影响。改变工作气体比例的实验表明,CO₂:N₂ = 1:3 时的电光转换效率最高。在 CO₂:N₂ = 1:3 的这组比例中,采用 CO₂:N₂:He = 3 kPa:9 kPa:28 kPa 这组配比中,激光器输出的单脉冲能量从 16.8 J 提高到 24.6 J,电光转换效率从 11.2% 提高到 16.4%。在高频连续放电试验中,该激光器能够以 500 Hz 重复频率稳定运行。

参考文献:

- [1] MYRABO L N. Brief history of the lightcraft technology demonstrator(LTD) project [C]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664: 49-60.
- [2] BOHN W L, SCHALL W O. Laser propulsion activities in Germany [C]. *AIP Conf. Proc.*, 2003, 664: 79-94.
- [3] HASSON V. Review of design concepts and diagnostics for 100 kW-class repetitive pulsed CO₂ laser [J]. *SPIE*, 2003, 5120: 717-730.
- [4] 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.
LI D J, YANG G L. Impact of main discharge delay time on optoelectronic conversion efficiency in TEA CO₂ laser [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 807-810. (in Chinese)
- [5] 孙宇, 曲彦臣, 赵卫疆, 等. 小型化高能输出 TEA CO₂激光器的实验研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(9): 835-840.
SUN Y, QU Y CH, ZHAO W J, *et al.*. Research of miniature TEA CO₂ laser with high-level output [J]. *Laser and Infrared*, 2007, 37(9): 835-840. (in Chinese)
- [6] 程成. CO₂激光器五种混合气体压强优化 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(1): 49-52.
CHENG CH. Optimization of five gas admixtures in a CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(1): 49-52. (in Chinese)
- [7] 高桂珍, 文建国, 蔡德芳, 等. TEA CO₂激光器中气体组分对放电状态的影响 [J]. *光学学报*, 1994, 14(6): 574-578.
GAO G ZH, WEN J G, CAI D F, *et al.*. Influence of gas composition on discharge state in CO₂ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(6): 574-578. (in Chinese)
- [8] 卢宏, 程祖海, 左都罗, 等. 高单脉冲能量重复频率 TEA CO₂激光器 [J]. *中国激光*, 2008, 35(s1): 57-60.
LU H, CHENG Z H, ZUO D L, *et al.*. TEA CO₂ laser with high single pulse energy and repetition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, 35(s1): 57-60. (in Chinese)

作者简介:杨贵龙(1966—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事大功率脉冲气体激光器的研究。

E-mail: yanggl@ciomp.ac.cn