

高功率 TEA CO₂ 激光器 9R 波段输出谱线

邵明振,薛向尧,张文豹,王光,马亚坤,张晨

(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: 为分析 CO₂ 激光 9R 波段输出谱线特性,满足激光与物质相互作用的需求,首先利用镀膜选支技术使高功率 TEA CO₂ 激光器只输出 9R 波段的激光。然后,通过单脉冲放电试验,利用 CO₂ 激光谱线分析仪分析 9R 波段 CO₂ 激光谱线的波长和谱线数量,并利用能量计分析每支谱线在单脉冲能量中所占的比例。通过改变输出镜的透过率、全反射镜的曲率半径以及工作气体的比例,分析 CO₂ 激光 9R 波段输出谱线在波长、数量以及能量比例方面的变化。试验结果表明,CO₂ 激光在 9R 波段同时输出了多条相邻较近的谱线,并且这些谱线随激光器输出镜透过率、全反射镜曲率半径和气体比例的变化而变化。

关键词: 激光谱线; TEA CO₂ 激光器; 镀膜; 9R 波段

中图分类号: TN248.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0706001

Laser spectrum in 9R band of high power TEA CO₂ laser

Shao Mingzhen, Xue Xiangyao, Zhang Wenbao, Wang Guang, Ma Yakun, Zhang Chen

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

Abstract: In order to study characteristics of CO₂ laser spectrum in 9R band and satisfy the need of laser interaction with matter, technology of coating for selecting wavelength was used firstly to make laser in 9R band output lonely from TEA CO₂ laser. Then through single pulse discharge experiment, wavelength of CO₂ laser and quantity of laser spectrum was analyzed by CO₂ laser spectrum analyzer. Energy meter was used to measure the proportion of each laser spectrum in the single pulse energy. The changes about wavelength, quantity and energy proportion of CO₂ laser spectrum in 9R band were studied by changing transmittance of output mirror, curvature radius of total reflector and proportion of working gases. Experiment results show that several adjacent CO₂ laser spectrums in 9R band have been output meanwhile, and these spectrums can be changed with the change of transmittance of output mirror, curvature radius of total reflector and proportion of working gases.

Key words: laser spectrum; TEA CO₂ laser; coating; 9R band

收稿日期: 2018-02-11; 修订日期: 2018-03-09

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(061X20C060)

作者简介: 邵明振(1985-),男,助理研究员,博士,主要从事高功率激光器方面的研究。Email: smz2050@163.com

0 引言

基于高平均功率、高重复频率和高峰值功率等特点,TEA CO₂ 激光器被广泛应用在激光加工、激光雷达、激光推进、激光大气传输、激光化学以及激光与物质相互作用等领域^[1-11]。TEA CO₂ 激光器采用脉冲重复频率工作方式,其工作介质通常为 CO₂、N₂ 和 He。三种气体按一定的比例混合在放电腔中,CO₂ 为主要工作气体,N₂ 和 He 为辅助气体,其中 N₂ 的主要作用是通过共振转移来激发基态的 CO₂ 分子,从而提高上能级的粒子数。He 的主要作用是提高下能级的弛豫速率以避免 CO₂ 激光器的“瓶颈效应”^[12]。

CO₂ 激光在 9~11 μm 波段具有上百条谱线,其中增益较强的为 10P(中心波长 10.6 μm)谱线和 9P(中心波长 9.6 μm)谱线。10.6 μm 谱线对应振动能级 00⁰1 向振动能级 10⁰0 的跃迁,9.6 μm 谱线对应振动能级 00⁰1 向振动能级 02⁰0 的跃迁。虽然两者共用一个上能级,但相比之下,10.6 μm 谱线的跃迁几率大,在模式竞争中优先起振而抑制其他谱线的增益,因此,若不作特殊处理,CO₂ 激光器通常输出的都是 10.6 μm 波长的激光。

随着 CO₂ 激光技术的发展和应用领域的拓宽,对其他波段 CO₂ 激光的需求越来越受重视,尤其在激光与物质相互作用领域中对 9R(中心波长为 9.3 μm)波段激光的需求。由上述可知,CO₂ 激光器优先输出 10.6 μm 激光,若想得到 9R 波段的激光,则需要采用波长选支技术,例如注入锁定、法布里-珀罗耦合腔、光栅调谐以及镀膜选支等。对于高功率 CO₂ 激光来说,通常采用镀膜选支技术来获得 9R 波段的激光^[13-14]。

在 9R 波段,CO₂ 激光的多条输出谱线之间具有非常接近的跃迁几率,在相同的工作条件下,这些谱线在光学谐振腔内可能同时参与谐振,且在模式竞争中不分彼此继而同时输出。但是这些谱线并不稳定,往往会随着激光器结构参数和工作参数的改变而改变。文中以一台采用“平-凹”稳定谐振腔的高功率 TEA CO₂ 激光器为研究对象,通过单脉冲放电试验来分析输出的 9R 波段的激光光谱,包括谱线波长、谱线数量以及每支谱线在单脉冲能量中所占的比例。并通过改变激光器的结构参数和工作参数,包括全反射镜曲率半径、气体配比、输出镜透过率等,

来研究 9R 波段输出谱线的变化,从而为实际应用中实现某一特定谱线输出提供参考依据。

1 CO₂ 分子能级分布

图 1 所示为 CO₂ 分子的部分振动能级图。由图 1 可知,从 CO₂ 分子上能级 00⁰1 向下能级 02⁰0 的跃迁会产生 9.6 μm 的激光。由于两个振动能级上各自存在转动子能级,因此 9.6 μm 并不是单一的谱线,而是一条具有一定宽度的带状光谱。到目前为止,在此跃迁中,共观察到 P 支(9P)谱线 29 条,其中最强的为 P(18)、P(20)、P(22)、P(24)和 P(26),对应的波长分别为 9.54、9.55、9.57、9.59、9.60 μm;共观察到 R 支(9R)谱线 25 条,其中最强的为 R(18)、R(20)、R(22)和 R(24),对应的波长分别为 9.28、9.27、9.26、9.25 μm。文中的研究对象正是 9R 波段的 CO₂ 激光光谱。

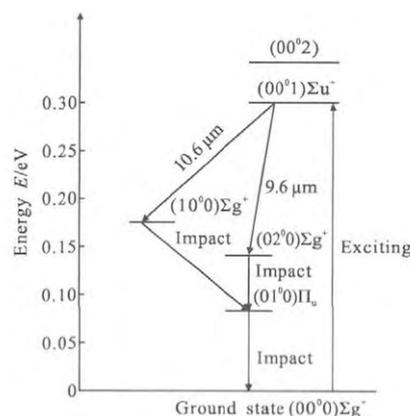


图 1 CO₂ 分子部分振动能级分布图

Fig.1 Distribution of some vibrational levels of CO₂ molecules

2 镀膜选支原理

“平-凹”稳定谐振腔由一块全反射镜和一块输出镜组成。全反射镜为铜质凹面镜,表面镀有提高 CO₂ 激光反射率的金膜;输出镜为以 ZnSe 为基底的平面镜。激光在谐振腔中振荡放大,当达到饱和增益时便由输出镜输出。CO₂ 激光上百条谱线在谐振腔中通过相互之间的激烈竞争获得振荡放大并输出,其中,10.6 μm 谱线在竞争中优先起振,增益最强,因此,若不采用波长选支手段,且要获得较大功率输出,CO₂ 激光器通常只输出 10.6 μm 谱线的激光^[15-16]。

在工程实际中,高功率 TEA CO₂ 激光器为获得 9R 波段的激光,通常采用在输出镜表面镀特殊光学

膜层的方法,通过镀膜使得只有 9R 波段的激光在光学谐振腔中振荡。因此,在镀膜时,所镀膜层要使对 9R 波段激光的反射率高于对 10P、10R (中心波长 10.2 μm)以及 9R 等波段激光的反射率,同时应尽可能地增大对这些谱线的透过率,目的是让这些谱线在谐振腔中最大限度地消耗掉,从而保证只剩下 9R 波段在谐振腔中振荡放大并输出。

3 试验装置和试验结果

3.1 试验装置

利用一台采用“平-凹”稳定光学谐振腔的高功率 TEA CO₂ 激光器,其输出镜根据设计的镀膜曲线经过镀膜处理后只输出 9R 波段的激光。通过单脉冲放电,利用 CO₂ 激光谱线分析仪来分析 9R 波段 CO₂ 激光光谱的波长、谱线数量和每支谱线在单脉冲激光能量中所占的比例。然后通过改变激光器的结构参数和工作参数,观察输出谱线的变化情况。经理论分析,影响 9R 波段输出谱线的主要因素有输出镜透过率(镀膜后对 9R 波段的透过率)、全反射镜曲率半径、工作气体比例、工作气体温度以及放电电压等。考虑到试验的安全性和易操作性,文中主要针对前 3 种影响因素进行试验分析。

试验中,光学谐振腔采用两种不同透过率的输出镜,其透过率分别为:35%、40%,同时采用两种不同曲率半径的全反射镜,其曲率半径分别为:20 m 和 25 m。在 TEA CO₂ 激光器的工作气体中,CO₂ 占主导地位,根据 CO₂ 激光的振-转跃迁激励机理,CO₂ 的浓度将直接影响上能级的粒子数分布,继而影响激光器的单脉冲能量和输出功率。同时,CO₂ 分子上能级粒子数的变化会直接影响 CO₂ 激光的输出谱线。N₂ 和 He 两种气体只是在 CO₂ 分子激发和跃迁过程中起到辅助作用,而对激光能量和输出谱线的影响较小。因此,在试验中,为分析不同气体比例对激光输出谱线的影响,只需改变 CO₂ 的含量即可,其他两种气体含量则保持不变。据此,采用了两种不同比例的工作气体,其比例分别为 CO₂:N₂:He=5:9:25、6:9:25。

试验中,利用 CO₂ 激光谱线分析仪记录输出谱线的波长和数量,并用激光能量计测量每支谱线在单脉冲激光能量中的分布。图 2 所示为 CO₂ 激光谱线分析仪的工作原理示意图。

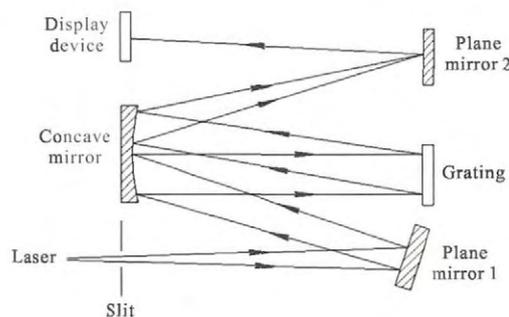


图 2 CO₂ 激光谱线分析仪工作原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of principle of CO₂ laser spectrum analyzer

图 2 中,激光光束通过狭缝照射到平面镜 1 上,由平面镜 1 反射到凹面镜后被准直成平行光,平行光投射到光栅,经过光栅的多缝衍射和干涉效应,将平行光按波长在空间分解为光谱,然后经凹面镜聚焦,再经平面镜 2 反射输出,最后通过显示装置可读取激光的输出谱线。

3.2 试验结果

利用上述装置和测量原理,测出了各种条件下 TEA CO₂ 激光器在 9R 波段的输出光谱,结果如表 1 和表 2 所示,图 3 展示了几种情况下测试的激光谱线。

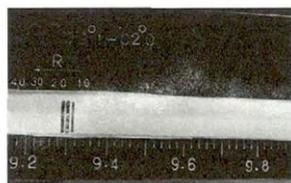
表 1 全反射镜曲率半径为 20 m 时的激光谱线

Tab.1 Laser spectrums when the curvature radius of total reflector is 20 m

Gas proportion CO ₂ :N ₂ :He	9R band transmittance	Wavelength/μm	Energy rate
5:9:25	35%	9.29	78.68%
		9.30	21.32%
		9.29	29.91%
	40%	9.30	42.52%
		9.31	27.57%
		9.24	18.37%
6:9:25	35%	9.28	10.4%
		9.29	44.74%
		9.31	26.49%
	40%	9.28	10.67%
		9.29	22.58%
		9.30	19.09%
		9.31	47.66%

表 2 全反射镜曲率半径为 25 m 时的激光谱线
Tab.2 Laser spectrums when the curvature radius
of total reflector is 25 m

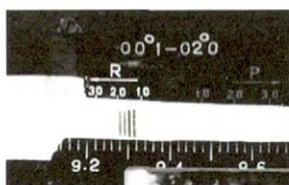
Gas proportion CO ₂ :N ₂ :He	9R band transmittance	Wavelength/ μ m	Energy rate
5:9:25	35%	9.28	46.54%
		9.31	53.46%
5:9:25	40%	9.28	14.67%
		9.30	32.82%
	9.31	52.51%	
	9.30	71.85%	
6:9:25	35%	9.31	28.15%
		9.25	25.25%
		9.28	26.84%
6:9:25	40%	9.28	26.84%
		9.31	47.91%



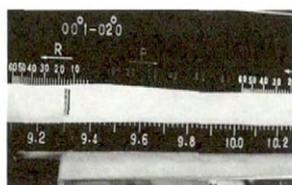
(a) Gas proportion: 5:9:25
Transmittance: 40%
Curvature radius: R=20 m



(b) Gas proportion: 5:9:25
Transmittance: 35%
Curvature radius: R=25 m



(c) Gas proportion: 6:9:25
Transmittance: 40%
Curvature radius: R=20 m



(d) Gas proportion: 6:9:25
Transmittance: 35%
Curvature radius: R=25 m

图 3 不同情况下 CO₂ 激光 9R 波段输出谱线

Fig.3 CO₂ laser output spectrums in 9R band at different conditions

4 结果分析

由表 1 的测量结果可知,CO₂ 激光在 9R 波段输出了多条谱线,且激光器的参数不同,输出的谱线、谱线数量和每支谱线所占的能量比例也不同。从表 1 中可看出,保持气体比例和全反射镜曲率半径不变,改变输出镜的透过率,CO₂ 激光在 9R 波段的输出谱线随之发生变化,并且每支谱线的能量分布也发生了

变化。同样,改变气体比例和全反射镜的曲率半径,9R 波段的输出谱线和其能量分布也会随之改变。

造成 CO₂ 激光 9R 波段输出多支谱线的原因在于,在 9R 波段附近,相邻谱线之间的跃迁几率非常相近,在相同的工作条件下,这些谱线在谐振腔内同时起振,且在模式竞争中不分上下,因此在振荡过程中同时获得增益而输出。

根据表 1 的测试结果,CO₂ 激光 9R 波段的输出谱线随激光器结构参数和工作参数的改变而改变。这是因为,改变激光器的参数,则会改变某些谱线的跃迁几率,即会改变谱线的竞争能力。改变工作气体中 CO₂、N₂ 和 He 的比例,则会改变 CO₂ 分子在各个转动子能级上的反转粒子数分布,因而,某些不能起振的谱线,在反转粒子数改变以后提高了模式竞争能力,在谐振腔中便产生了振荡放大。同时,某些能量低的谱线,随着 CO₂ 分子浓度的增加,其能量也随之增加。当然,某些谱线能量增加的同时,其他谱线由于受到抑制或被削弱竞争能力,它们的能量则会随之降低,甚至不能形成谐振。

改变全反镜的曲率半径,也会改变激光的输出谱线。这是因为改变全反镜曲率半径的同时,会改变谐振腔内的有效模体积,因此就会改变谐振腔内参与振荡的谱线的数量和强度,从而改变 CO₂ 激光的输出谱线及其能量分布。在镀膜过程中改变输出镜的透过率,可改变某些谱线在谐振腔内的反射率,即改变了某些谱线参与谐振的强度,因此输出镜透过率不同,CO₂ 激光在 9R 波段的输出谱线也不同,且每支谱线的能量比例也会随着谐振强度的改变而改变。

另外,在保持激光器的结构参数和工作参数不变的情况下进行多次单脉冲放电试验,发现 CO₂ 激光 9R 波段输出谱线的波长、数量和每支谱线的强度都保持不变。

5 结论

利用一台高功率 TEA CO₂ 激光器,通过镀膜选支技术实现了 9R 波段激光的输出。并利用 CO₂ 激光谱线分析仪测试了 9R 波段输出谱线的波长,谱线数量。利用能量计测试了每支谱线在单脉冲激光能量中所占的比例。

经过反复的单脉冲放电试验,发现 CO₂ 激光在 9R 波段同时输出了多条谱线,且这些谱线彼此相邻

很近。形成这种现象的原因在于,在 9R 波段多支谱线的跃迁几率非常相近,它们在模式竞争中不分彼此,因此,在光学谐振腔内相邻的多支谱线同时获得增益放大而输出。但是这些谱线并不稳定,当改变激光器输出镜透过率、全反射镜曲率半径和气体比例时,9R 波段输出激光的谱线、谱线数量以及每支谱线在单脉冲激光能量中所占的比例都将随之变化。产生这种变化的原因在于,改变激光器的结构参数或工作参数,会改变 CO₂ 分子在上能级的反转粒子数,从而改变谱线的跃迁几率。

参考文献:

- [1] Zhang Kuo, Chen Fei, Li Ruolan, et al. Analysis on thermal performance of output window in high power CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205005. (in Chinese)
张阔, 陈飞, 李若斓, 等. 大功率 CO₂ 激光器输出窗口热性能分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0205005.
- [2] Yu Deyang, Guo Lihong, Chen Fei, et al. Design of control system for high-power TEA CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0705002. (in Chinese)
于德洋, 郭立红, 陈飞, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器控制系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0705002.
- [3] Chen Xueye, Shen Jienan, Hu Zengliang, et al. Optimization of processing micro-channels with CO₂-laser on polyethylene terephthalate (PET) sheet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 224-228. (in Chinese)
陈雪叶, 沈杰男, 胡增亮, 等. CO₂ 激光在 PET 基板加工微通道的工艺优化[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 224-228.
- [4] Wu Wuming, Leng Jinyong, Zhou Pu, et al. Research progress of high average power electric-energy laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 204-209. (in Chinese)
吴武明, 冷进勇, 周朴, 等. 高平均功率电能激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 204-209.
- [5] Pan Qikun, Chen Fei, Shi Ningning, et al. Theoretical analysis and experimental research on tunable acousto-optic Q-switched CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0705002. (in Chinese)
潘其坤, 陈飞, 石宁宁, 等. 声光调 Q CO₂ 激光器波长调谐理论分析与实验研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(7): 0705002.
- [6] Hasson V. Review of recent advancements in the development of compact high power CO₂ laser radar system[C]//SPIE, 1999: 3707.
- [7] Ivashchenko M V, Karapuzikov A I, Malov A N, et al. A TEA CO₂ Laser with a Peak Radiation Power of 100 MW [J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2000, 43(1): 119-125.
- [8] Razhuv A M, Ch Urkin D S. Pulsed inductive discharge gas lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 238-251.
- [9] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)
安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 321-330.
- [10] Zhao Yuan'an, Hu Guohang, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938-2947. (in Chinese)
赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2938-2947.
- [11] Ma Chen, Ma Zhuang, Gao Lihong, et al. Laser damage mechanism of flake graphite modified phenolic resin coating [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 249-255. (in Chinese)
马琛, 马壮, 高丽红, 等. 激光对鳞片石墨改性酚醛树脂涂层的损伤机理[J]. 中国光学, 2017, 10(2): 249-255.
- [12] Yan Jixiang. Laser Theory and Technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
阎吉祥. 激光原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [13] Shao Chunlei, Yang Guilong, Li Dianjun, et al. 9.3 μm branch selection research of high power pulse CO₂ laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 1-6. (in Chinese)
邵春雷, 杨贵龙, 李殿军, 等. 高功率脉冲 CO₂ 激光器 9.3 μm 波长选支研究[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 1-6.
- [14] Shao Chunlei, Song Xiaofeng, Zhang Laiming, et al. High power TEA CO₂ laser with two wavelengths free shift output structure [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(2): 429-436. (in Chinese)
邵春雷, 宋晓峰, 张来明, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器的双波长免调切换结构[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 429-436.
- [15] Li Shimin, Huang Weiling. Principles and Design of Laser Devices[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
李适民, 黄维玲. 激光器件原理与设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [16] Liao Junmei, Li Yude, Zhong Geng, et al. Output character of sequence band lines of TEA CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 3223-3225. (in Chinese)
廖均梅, 李育德, 钟耿, 等. TEA CO₂ 激光器序列带的输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(2): 3223-3225.