

文章编号: 1001-4322(2011)02-0303-05

高功率 TEA CO₂ 激光器两波长激光切换输出技术*

宋晓峰^{1,2}, 邵春雷¹, 郭 劲¹, 杨贵龙¹, 李殿军¹, 耿玉民¹, 谢冀江¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 长春 130033
2 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 以 TEA CO₂ 激光器通常采用的平-凹光学稳定腔为基础, 提出了一种新的波长选支方法 输出窗口镀膜选支方法。利用一台高平均功率 TEA CO₂ 激光器进行了选支实验研究, 结合现有光学镀膜技术, 得到了中心波长为 9.3 μm 的激光单谱线输出, 其单脉冲能量及平均功率与激光器原中心波长 10.6 μm 单谱线输出的相应参数基本相当。研究发现, 以相同单脉冲能量激光照射热敏纸时, 中心波长 9.3 μm 激光光斑与中心波长 10.6 μm 的明显不同。同时, 还设计出两波长窗口密闭免调切换装置, 在一台激光器上实现了 10.6 μm 9.3 μm 两个中心波长激光同等功率水平的免调切换输出, 切换位置误差小于 5, 密封性能满足使用要求。

关键词: TEA CO₂ 激光器; 光学谐振腔; 镀膜选支; 密闭免调切换; 两波长激光切换输出
中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **doi** 10.3788/HPLPB20112302.0303

TEA CO₂ 激光器采用脉冲重复频率工作制式, 可同时兼有高平均功率、高重复频率和高峰值功率, 具有重要的应用价值^[1-5]。随着高功率 TEA CO₂ 激光器技术的不断发展, 对其功能要求也不断增加。例如, 在激光与物质相互作用的研究中, 不仅需要输出中心波长 10.6 μm 的激光, 还需要输出中心波长 9.3 μm 的激光。CO₂ 激光在 9~11 μm 波段范围有上百条谱线, 在追求最高功率时, 通常输出的是增益最大的 10.6 μm 波长激光, 要得到其它波长激光输出, 需要在光学谐振腔中加入棱镜、光栅等色散元件来实现特定波长的选支输出。TEA CO₂ 激光器目前常用的波长选支方法有注入锁定、法布里-珀罗标准具调谐 (F-P 耦合腔) 和光栅调谐等^[6,9]。其中, 注入锁定难以得到单一波长输出, 且结构复杂, 不适宜工程应用; 法布里-珀罗标准具调谐只适用于激光增益长度较短的情况, 无法获得高能激光输出; 光栅调谐虽然具有很好的波长选择能力而被广泛采用, 但因受到损伤阈值的限制, 无法满足输出数 kW 以上高平均功率激光的要求。为得到在一台激光器上实现 10.6 μm 9.3 μm 两个波长激光以相同功率切换输出且具有工程适用性的 TEA CO₂ 激光器, 需要采用一种结构简单、易于实现和运行可靠的波长选支方法。为避免出现光学元件损伤, 同时还要减少激光能量损耗, 保证输出光束质量与指向性的稳定, 特别是要满足输出高平均功率要求, 就不能在光学谐振腔中插入任何光学元件。基于这种需求, 本文以高功率 TEA CO₂ 激光器所采用的平-凹光学稳定腔为基础, 提出了一种新的波长选支方法 输出窗口镀膜选支技术, 并利用一台高平均功率 TEA CO₂ 激光器, 进行了中心波长 9.3 μm 的激光选支输出研究, 在此基础上设计了两波长密闭免调切换窗口结构装置, 实现了在一台激光器上免调切换输出 10.6 μm 9.3 μm 两个中心波长的激光。

1 选支技术原理

TEA CO₂ 激光器采用的平-凹光学稳定腔, 通常由一个铜质凹球面全反射镜和一个 ZnSe 平面部分反射镜 (即输出窗口) 构成, 输出窗口镀膜选支技术基于激光在光学谐振腔中振荡放大竞争输出原理。CO₂ 激光按能级跃迁原则分为 10P, 10R, 9P, 9R4 支谱线, 分别对应中心波长为 10.6 μm, 2.9 μm, 9.3 μm^[10], 其中增益最强的是 10.6 μm, 其次是 9.6 μm。输出窗口的镀膜特性在 9~11 μm 波段范围具有相近的反射率或透过率, 激光谱线在光学谐振腔中以一种自由竞争的模式振荡放大, 而由于 10.6 μm 的增益最高, 因此, 通常输出的是中心波长为 10.6 μm 的激光^[11-13]。

本文提出的输出窗口镀膜选支技术是在输出窗口镀上与原窗口有不同特性的光学膜层, 使所需要波长的激光在光学谐振腔内产生振荡放大定向输出。按此思路, 设计新的输出窗口镀膜特性曲线, 使其对 9.3 μm 的

* 收稿日期: 2010-03-01 修订日期: 2010-06-11

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目

作者简介: 宋晓峰 (1986), 女, 硕士研究生, 主要从事高功率 TEA CO₂ 激光器技术研究, songxiaofeng163@yahoo.cn

反射率高于对 9.6, 10.2, 10.6 μm 的反射率, 尽量提高对后 3 条谱线的透过率, 增大它们在光学谐振腔中的损耗, 从而抑制它们产生振荡放大。再结合 CO₂ 分子激光上能级间能快速转移, 亦即能级反转粒子数赢家通吃的机理, 以使所需要的中心波长 9.3 μm 激光能够唯一的在光学谐振腔内振荡放大, 实现高功率输出。

2 选支输出实验

利用一台高平均功率 TEA CO₂ 激光器进行选支实验研究, 所有试验都采用相同的放电参数, 用加拿大产 gentec-EO 激光能量计测试激光单脉冲能量, 用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 CO₂ 激光谱线分析仪测试输出激光波长, 用热敏纸接收激光光斑。该激光器光学谐振腔为平-凹稳定腔, 原有输出窗口镀膜特性设计要求是对 10.6 μm 波长的透过率为 70%, 对 9~11 μm 波段范围的透过率最大波动误差小于 10%。图 1 为原输出窗口镀膜特性测试曲线, 横坐标为波长, 纵坐标为透过率。以单脉冲工作方式发射激光, 输出激光谱线测试结果如图 2 所示, 为单条 10.6 μm 谱线。激光单脉冲热敏纸光斑如图 3 所示, 为方形光斑, 整体呈黑色。

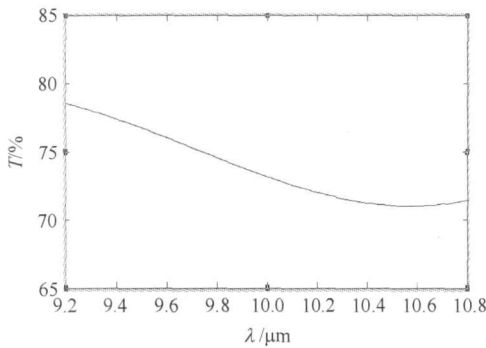


Fig 1 Coating testing curve of 10.6 μm window

图 1 10.6 μm 窗口镀膜测试曲线

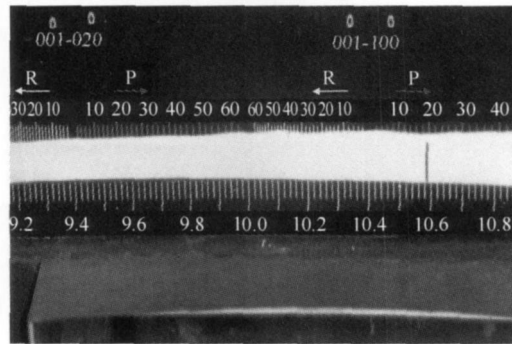


Fig 2 Output laser spectrum of 10.6 μm window

图 2 10.6 μm 窗口输出激光谱线

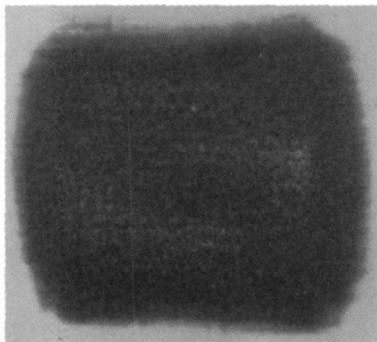


Fig 3 Output laser spot of 10.6 μm window

图 3 10.6 μm 窗口输出激光光斑

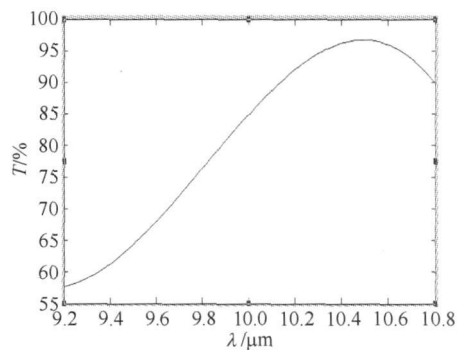


Fig 4 Testing curve of initial coating branch-selection window

图 4 初次镀膜选支窗口测试曲线

对输出中心波长 9.3 μm 激光的窗口镀膜透过率设计要求为 9.3 μm, 60%; 9.6 μm, 80%; 10.2 μm, 95%; 10.6 μm, 98%。因镀膜技术限制, 无法完全达到设计特性要求, 只能是在保证主要波长即 9.3 μm 要求的基础上, 尽量靠近设计要求。图 4 是窗口初次选支镀膜的测试曲线, 采用此窗口进行试验, 激光单脉冲能量比原输出 10.6 μm 单条谱线的低约 3%。激光谱线测试结果如图 5 所示, 输出了 9.6, 9.3 μm 两条谱线。激光单脉冲光斑如图 6 所示, 与 10.6 μm 激光光斑有所不同, 中间出现了很大区域的白色。

初次镀膜选支试验成功抑制了 10.6, 10.2 μm 谱线输出, 证明了研究思路的正确性。输出了 9.6, 9.3 μm 两条谱线是因为 9.6 μm 谱线是仅次于 10.6 μm 的强线, 且与 9.3 μm 位置很近, 现有镀膜技术无法达到设计要求, 使这 2 条谱线的透过率相差更大, 9.6 μm 谱线在光学谐振腔中仍产生很大的增益。对于图 6 的激光热敏纸光斑, 白色部分并不是热敏纸的本体颜色, 而是被激光照射后, 将因热效应变为炭黑的部分冲蚀掉的状态。在以往研究中, 只输出 10.6 μm 谱线的激光光斑, 在单脉冲能量达到图 3 光斑能量 1.5 倍以上时, 才会出现明显变白的现象, 图 3 光斑只是有不很明显的白色斑点。而此次输出 9.6, 9.3 μm 两条谱线的激光能量与图 3 光斑能量相当, 这说明因激光波长不同而产生了不同的作用效果。众所周知, 光具有波粒二象性, 波长变小, 光子能量增大, 因此, 在相同脉冲能量下, 不同波长激光对物质的作用效果就会有所不同, 短波长激光因光子能量的

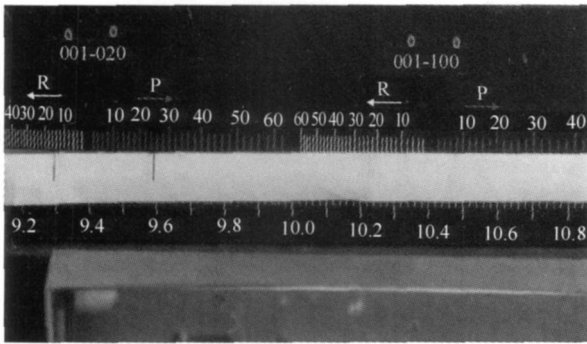


Fig 5 Output laser spectrum of initial coating branch-selection window
图 5 初次镀膜选支窗口输出激光谱线

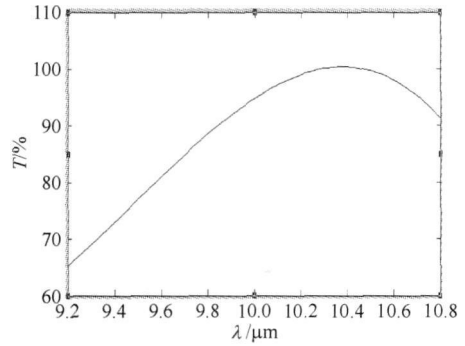


Fig 6 Output laser spot of initial coating branch-selection window
图 6 初次镀膜选支窗口输出激光光斑

增大对物质的冲蚀现象更加明显。

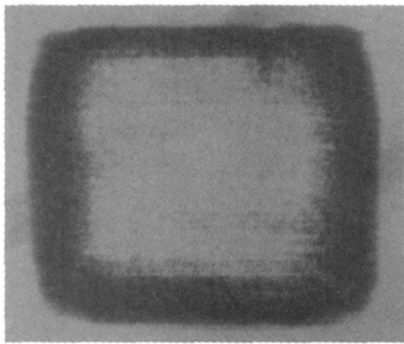


Fig 7 Testing curve of improved coating branch-selection window
图 7 改进镀膜选支窗口测试曲线

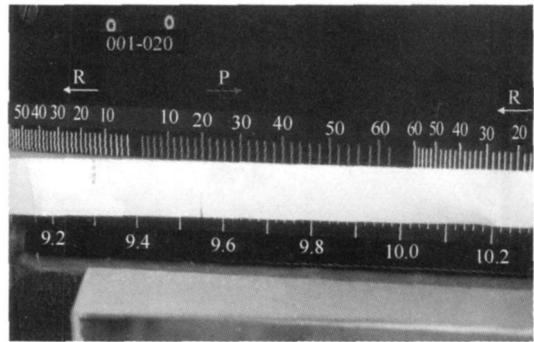


Fig 8 Output laser spectrum of improved coating branch-selection window
图 8 改进镀膜选支窗口激光输出谱线

为得到中心波长 9.3 μm 的单条谱线输出, 还需抑制 9.6 μm 谱线的振荡放大, 改进的思路是输出窗口的镀膜需再提高对 9.6 μm 的透过率, 进一步增大其在光学谐振腔中的损耗。对输出窗口镀膜特性的改进设计是, 将图 4 的透过率曲线左移, 使对 9.6 μm 波长的透过率达到 80%, 并保持对 10.6~10.2 μm 波长高透过率。图 7 是改进后窗口镀膜的测试曲线, 采用此窗口再进行试验, 激光单脉冲能量比原输出 10.6 μm 单条谱线的低约 4%。激光谱线测试结果如图 8 所示, 得到了 9.3 μm 单条谱线输出, 并且在激光器以高平均功率连续运行一段时间后, 测试输出谱线仍然不变。激光单脉冲光斑如图 9 所示, 与图 3 示能量相当的 10.6 μm 单谱线光斑比较, 能量分布都比较均匀, 但光斑颜色黑白分明, 再次说明了相同脉冲能量下不同波长激光对物质具有不同的作用效果。

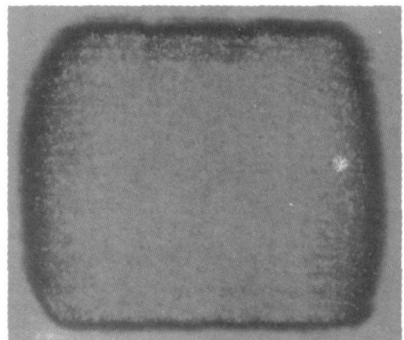


Fig 9 Output laser spot of improved coating branch-selection window
图 9 改进镀膜选支窗口输出激光光斑

3 切换输出设计与实验

若要在同一台激光器上实现 10.6/9.3 μm 两个波长切换输出要求, 就需要安装两个不同镀膜的输出窗口, 共用一个凹面全反射镜, 需要哪个波长激光输出时, 就将该窗口移动到与凹面全反射镜对应的位置构成光学谐振腔。激光输出窗口是密闭工作腔的一个密封元件, 为具有工程适用性, 两个波长激光切换输出时, 不应在切换后还需对窗口进行对准调整, 即两个窗口在切换到位后, 还应保持很高的空间位置精度。因此, 需要设计一个两窗口密闭免调切换装置, 将其安装在激光器光学支架的前端。

按以上要求设计的两窗口密闭免调切换装置如图 10 所示, 两窗口都以激光振荡基准平面的腔内侧平面作为定位基准, 安装在切换移动平台 5 的同一平面上, 这保证了两个窗口之间具有误差很小的空间位置精度。切换移动平台 5 与可调导轨座 4 之间采用燕尾导轨结构, 来保证移动位置精度要求。可调导轨座 4 安装在光学支架前端立板上, 它即是切换装置的安装基座, 也是实现光学谐振腔前后腔镜初始对准调整的功能部件。在切

换移动平台 5 与可调导轨座 4 相对的平面上安装有跑道形密封圈 6 该密封圈随切换移动平台 5 运动, 在两个窗口切换过程中, 始终将切换移动平台上的两个窗口通孔与可调导轨座 4 上的通光孔包容在里面, 从而达到切换移动中的密封功能。

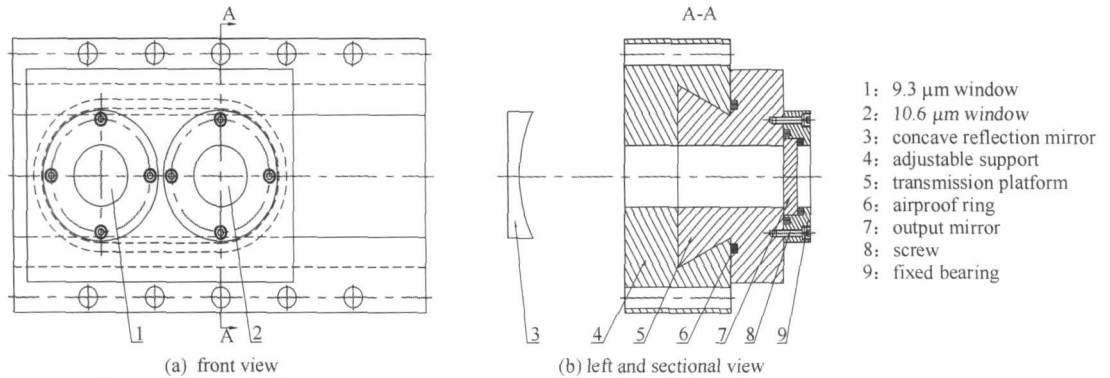


Fig 10 Schematic diagram of hermetic closure and auto switching device of two-wavelength windows

图 10 两波长窗口密闭免调切换装置示意图

可见, 在很高的设计和加工精度保证下, 由于是对可调导轨座进行光学谐振腔的初始对准调整, 切换装置是整体位置变动, 在将任一个窗口与凹面全反射镜对准后, 另一个窗口切换到与凹面全反射镜对应位置时, 其位置误差变化很小。由于窗口是平面镜, 因此两个窗口之间移动的长度精度要求不高, 只要将激光增益截面完全包容在内即可。

切换装置加工完成后, 采用平行光管对两个窗口腔内侧平面切换位置精度进行检测, 以任一个窗口为基准, 另一个窗口切换到位的角度误差不超过 $5'$ 。在 2 个位置安装上输出同一波长激光的窗口进行切换输出试验, 激光单脉冲能量几乎不变。采用真空计检测切换窗口装置的密封性, 在将激光器工作腔抽真空至 10 Pa 左右时, 每切换 10 次, 腔压升高 6 Pa 左右, 即相当于每切换 1 次泄漏 0.6 Pa 而激光器实际工作时腔的压力为 80 kPa 左右, 腔内外压差降低了 80% , 切换移动时的泄漏将会成数量级的减小, 对激光器一次充气使用时间的影响可忽略不计。

4 结 论

TEA CO_2 激光器通常输出中心波长 $10.6 \mu\text{m}$ 激光, 若想得到以高平均功率输出中心波长 $9.3 \mu\text{m}$ 激光时, 原有一些波长选支技术不能满足实用要求。本文采用一种新的波长选支方法——输出窗口镀膜选支技术, 利用一台高平均功率 TEA CO_2 激光器进行实验, 得到了中心波长 $9.3 \mu\text{m}$ 激光的单谱线输出, 其单脉冲能量和平均功率与该激光器原中心波长 $10.6 \mu\text{m}$ 单谱线输出的相应参数基本相当。研究发现: 以相同单脉冲能量的激光照射热敏纸时, $9.3 \mu\text{m}$ 激光光斑与 $10.6 \mu\text{m}$ 的有明显不同, 说明了短波长激光因光子能量高, 对物质的作用效果高于长波长激光。本文设计出的两波长窗口密闭免调切换装置, 在一台激光器上实现了 $10.6/9.3 \mu\text{m}$ 两波长激光同等功率水平的免调切换输出, 使输出窗口镀膜选支技术具备了工程实用价值。

参考文献:

- [1] 王云飞, 吴谨, 刘世明, 等. 长脉冲 TE CO_2 激光器的调谐特性 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 226-229. (Wang Yunfei, Wu Jin, Liu Shiming et al. Tunable characteristic of long pulse TE CO_2 laser. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 226-229)
- [2] 许德富, 李育德, 刘智峰, 等. 具有同空间特性的双波长可调谐 TEA CO_2 激光器 [J]. 光学技术, 2005, 31(3): 384-387. (Xu Defu, Li Yude, Liu Zhifeng et al. Same space dual-wavelength tunable TEA CO_2 laser. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 384-387)
- [3] 陈家璧, 余重秀, 张元芳, 等. 激光原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 120-145. (Chen Jiabi, Yu Chongxiu, Zhang Yuanfang et al. The principles and applications of laser. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 120-145)
- [4] 卢远添, 吴谨, 王东蕾, 等. 大能量长脉冲 TE CO_2 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1437-1440. (Lu Yuanlian, Wu Jin, Wang Donglei et al. Long-pulse TE CO_2 laser with high energy. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(9): 1437-1440)
- [5] Hasson V. Review of recent advancements in the development of compact high power CO_2 laser radar system [C] // Proc of SPIE, 1999, 3707: 499-512
- [6] 程永强. 光栅选线 TEA CO_2 激光快速调谐技术研究 [D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2006. (Cheng Yongqiang. Investigation on rapidly tunable technology of grating line selection TEA CO_2 laser. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2006)
- [7] 廖均梅, 李育德, 李忠华, 等. 可调谐 TEA CO_2 激光器多频输出 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1459-1461. (Liao Junmei, Li Yude, Li Zhonghua et al. Multi-frequency transversely excited atmospheric pressure CO_2 laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1459-1461)

1461)

- [8] 许德富, 李育德, 陈梅. 具有同空间特性的双频可调谐 TEA CO₂ 激光器研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 441-444 (Xu D efu Li Yude Chen M ei Theoretic model of sam e space dual-wavelength tunable TEA CO₂ laser *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 38(5): 441-444)
- [9] Harris M R, W illetts D V. Transversely excited CO₂ laserw ith long pulse duration discharge[J]. *Opt Commun*, 1991, 83(3/4): 227-230.
- [10] 郑义军, 谭荣清, 柯常军, 等. 基于调谐 TEA CO₂ 激光推进的研究 [J]. 激光杂志, 2006, 27(6): 22-23. (Zheng Y ijun Tan Rongqing Ke Chang jun et al The study of laser propulsion based on tunable TEA CO₂ laser *Laser Journal*, 2006, 27(6): 22-23)
- [11] 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: 56-79 (Li Shim in, HuangW eiling The principles and design of laser devices Beijing NationalDefense Industry Press 2005: 56-79)
- [12] 俞宽新, 江铁良, 赵启大. 激光原理与激光技术 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1998: 8-46 (Yu Kuanxin, Jiang Tieliang Zhao Qida Laser principles and laser techniques Beijing Beijing University ofTechnology Press 1998 8-46)
- [13] 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): 323-325 (Liao Junmei Li Yude Zhong G eng et al Output character of sequence band lines of TEA CO₂ laser *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 323-325)

Two-wavelength laser sw itching output technology in high power TEA CO₂ laser

Song Xiaofeng^{1,2}, Shao Chunlei¹, Guo Jin¹, Yang Guibong¹, Li Dianjun¹, Geng Yun in¹, Xie Jijiang¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

Abstract Based on the plano-concave resonator, a new way to choose a branch of wavelength is reported. A laser with 9.3 μm single-line output is attained by using a high average power TEA CO₂ laser and the existing optical coating technology. The single pulse energy and average power are basically the same as those of the original single 10.6 μm output. It is found that the laser spots attained by shooting the heat-sensitive paper with the same laser pulse energy at 9.3 μm and 10.6 μm are significantly different. A two-wavelength windows sw itching device is designed, which can realize free sw itching between 10.6 μm and 9.3 μm lasers at the same output power level on one laser. The sw itch position error is less than 5%, and the sealing performance meets the requirements.

Key words TEA CO₂ laser; optical resonant cavity; coating branch selection; hermetic closure and auto sw itching; two-wavelength laser sw itching output