

## 中、远红外双波段激光器的性能优化

袁圣付\*, 罗威, 钟炜, 孙旭

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**对两根放电管驱动的中、远红外双波段(3~5  $\mu\text{m}$  & 8~12  $\mu\text{m}$ )激光器的输出镜透过率、输出窗口等器件与参数进行了优化,试验获得了25.5 W的中、远红外双波段激光输出,两个单波段的输出功率均大于10 W,中红外波段DF激光为 $\text{TEM}_{00}$ 模,远红外波段 $\text{CO}_2$ 激光为 $\text{TEM}_{20}$ 模.利用 $\Phi 8$  mm光阑对双波段激光器的横模进行了选择,试验获得了15.4 W的 $\text{TEM}_{00}$ 基横模双波段激光输出.为红外双/多波段探测器阵列及相关系统的应用研究提供了激光光源.

**关键词:**中红外和远红外;DF &  $\text{CO}_2$ 双波段激光器;红外探测器阵列;激光束横模

中图分类号:TN248.5 文献标识码:A

## Performance optimization of a middle infrared and long infrared dual-band laser

YUAN Sheng-Fu\*, LUO Wei, ZHONG Wei, SUN Xu

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A total output power of 25.5W was achieved after optimizing the transmissivity of the output mirror and the design of the output window in the middle infrared and long infrared dual-band (3~5  $\mu\text{m}$  & 8~12  $\mu\text{m}$ ) laser driving by two glow discharge tubes. Power in either single band is greater than 10W. The transverse mode of DF and  $\text{CO}_2$  laser beam in the middle and long infrared band is  $\text{TEM}_{00}$  and  $\text{TEM}_{20}$ , respectively. An output power of 15.4W was obtained for  $\text{TEM}_{00}$  fundamental mode selected with a  $\Phi 8\text{mm}$  diaphragm. The dual-band laser can work as light source for research of dual-band or multi-band infrared detector arrays and the related systems.

**Key words:** middle infrared and long infrared; DF& $\text{CO}_2$  dual-band laser; infrared detector array; transverse mode of laser beam

**PACS:** 42.55.Lt, 42.60.Jf, 42.55.Ks

### 引言

中红外(3~5  $\mu\text{m}$ )和远红外(8~12  $\mu\text{m}$ )是两个最常用的大气窗口,也是多数发动机尾气和生物体的热辐射峰值探测波段范围,3~5  $\mu\text{m}$ 和8~12  $\mu\text{m}$ 探测器阵列一直是研究热点之一<sup>[1,2]</sup>.为了降低探测虚警率,采用红外探测器阵列作为焦平面器件的第三代红外成像系统已同时探测中、远红外两个波段<sup>[3]</sup>.为了避开红外成像系统的侦察探测或导引攻击,红外对抗系统也随之发展成采用红外双/多波段激光器作为光源来实施定向干扰<sup>[4,5]</sup>.因此,研究

中、远红外双波段激光器对红外双/多波段探测器阵列及其成像系统的应用研究具有重要实际意义<sup>[6]</sup>.

基于 $\text{ZnGeP}_2$ 晶体的光参量振荡器(OPO)技术可以实现中、远红外两个单波段激光输出,如Inrad公司的3.8~12.4  $\mu\text{m}$ 脉冲OPO激光器<sup>[7]</sup>,但OPO激光器是可调谐单一波长输出,且在8~12  $\mu\text{m}$ 远红外波段的平均功率/能量一般较低,报道的最高平均功率仅1~5 W左右<sup>[5,8]</sup>,如BAE公司的Viper激光器等,从而制约了激光干扰的有效作用距离.与OPO技术相比,中红外波段氟化氘(DF)激光器和远红外波段二氧化碳( $\text{CO}_2$ )为宽波段、多谱线输出,光

收稿日期:2012-10-25,修回日期:2012-11-18

基金项目:国家自然科学基金资助(10974255)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (10974255)

作者简介(Biography):袁圣付(1975-),男,安徽肥东人,博士,副教授,主要从事红外多波段激光器及其应用技术研究. E-Mail: shengfuyuan\_bb@163.com

Received date: 2012-10-25, revised date: 2012-11-18

束质量好(流动气体介质均匀性好),且容易放大到更高功率.因此,我们通过组合 DF 和  $\text{CO}_2$  增益介质,采用同一个谐振腔从两种增益介质中提取激光,从而在同一台激光器上同时输出共光轴、可远距离传输的 DF ( $3.5 \sim 4.1 \mu\text{m}$ ) 和  $\text{CO}_2$  ( $9 \sim 11 \mu\text{m}$ ) 双波段激光,前期已经获得了 18W 的双波段连续波激光输出,并测量得到了双波段激光器的光谱成分<sup>[9]</sup>,但未进行横模测量和性能优化.

本文对两根放电管驱动的中、远红外双波段激光器的输出镜透过率与输出窗口等器件与参数进行了优化,开展了双波段激光器的性能优化试验研究,报道优化后的双波段激光器出光参数和输出横模.

## 1 优化设计和测量方法

DF& $\text{CO}_2$  双波段激光器的工作原理与器件结构及相关参数详见文献<sup>[9]</sup>,其优化设计主要包括三个方面:

(1) 输出镜透过率优化:为确保双波段激光器能够顺利出光,前期使用的双波段输出镜透过率较低,其中 DF 波段透过率为  $3.5\% \sim 5\%$ , $\text{CO}_2$  波段透过率为  $6\% \sim 10\%$ ,参考 DF 和  $\text{CO}_2$  两个单波段优化出光参数<sup>[9]</sup>,优化后的双波段输出镜透过率理论值为:DF 波段透过率为  $10\%$ , $\text{CO}_2$  波段透过率为  $15\%$ ,优化前后的双波段输出镜透过率实测曲线如图 1 所示,DF 和  $\text{CO}_2$  两个波段的实际透过率分别为  $10\% \sim 13.5\%$  和  $10\% \sim 14\%$ ,仍然采用硒化锌(ZnSe)作为镜片基底材料.

(2) 优化输出窗口设计:双波段激光器原先采用双面未镀膜的 ZnSe 作输出窗口,在中红外波段透过率较低,不利于中红外波段的激光输出.优化后的设计方案是去掉了原先的输出窗口,直接利用  $\Phi 40 \times 5 \text{ mm}$  平面输出镜兼作双波段激光器输出窗口,用来隔绝光腔低压真空气流和外界大气,输出镜前表面按优化设计的耦合输出透过率镀膜,后表面镀双波段增透膜,在  $3.5 \sim 4.1 \mu\text{m}$  和  $9 \sim 11 \mu\text{m}$  的透过率均不低于  $95\%$ .

(3) 输出横模优化:采用光阑选模法对横模进行选择,实现双波段激光的单横模输出.根据腔长  $650 \text{ mm}$ 、增益区高度  $6 \text{ mm}$ 、腔镜曲率等尺寸参数,在理论估算的基础上,保守选取光阑孔径的初始尺寸为  $\Phi 4 \text{ mm}$ ,实际试验过程中,先加工出  $\Phi 4 \text{ mm}$  光阑,试验观测横模模式,然后以  $1 \text{ mm}$  增量逐步扩孔增加光阑孔径,再进行试验观测横模模式,直至多横模输出,从而确定能保持单横模输出的光阑最大孔

径,进而获得单横模的最大模体积和输出功率.

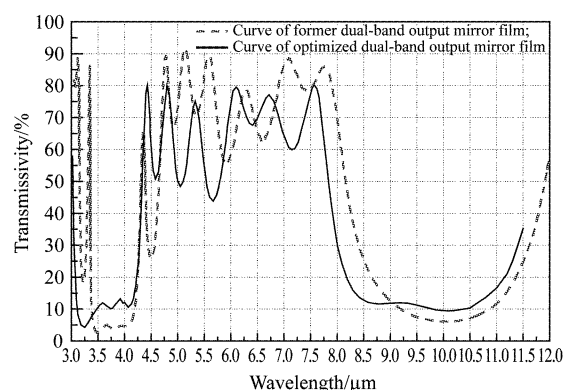


图 1 优化前后的双波段输出镜透过率实测曲线  
Fig. 1 The real measured transmissivity curves of the former and the optimized dual-band output mirrors

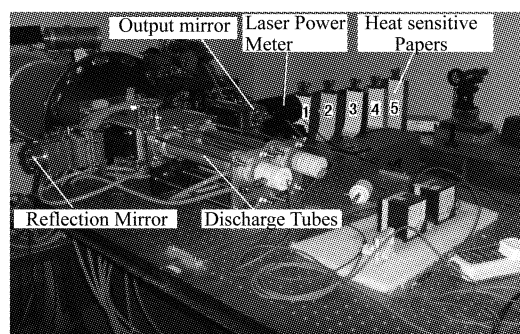


图 2 双波段激光器输出功率和横模测量图  
Fig. 2 Measurement photograph of output power and transverse mode of the dual-band laser

在测量方法方面,采用余姚银环流量计厂生产的浮子流量计测量气体流量,其入口压力设置为  $3 \text{ atm}$ ,各工作气体的典型流量( $\text{m}^3/\text{h}$ ):气幕  $\text{N}_2$ :  $3.0$ ; DF 模块,  $\text{He}/\text{NF}_3/\text{D}_2$ :  $1.5/0.5/0.8$ ;  $\text{CO}_2$  模块,  $\text{He}/\text{N}_2/\text{CO}_2$ :  $0.8/1.9/2.3$ ;采用合肥中亚传感器厂的绝压传感器测量光腔静压,DF 模块和  $\text{CO}_2$  模块的典型腔压分别为  $0.9 \text{ kPa}$  和  $1.1 \text{ kPa}$ ;采用北京物科光电公司的 LP-3C 型功率计对双波段激光器的输出功率进行测量;采用德国 Bruker 公司的 Tensor37 谱仪对输出光谱成分进行测量;采用短时烧蚀的“热敏纸烧斑法”对激光横模进行观测,即通过手动拿开激光遮挡板 1 秒左右,在沿光束传输的方向上,在 5 张不同位置的热敏纸上,烧蚀形成 5 个不同的热烧斑来观测和判断光束横模.热敏纸烧斑法具有测量方法简单、快速、便宜等优点,缺点是烧斑存在拖尾问题.试验布局如图 2 所示,在激光器输出端依次放置功率计和 5 张热敏纸,热敏纸离输出窗口的距离

分别为:200 mm、350 mm、500 mm、650 mm、800 mm, 5 个位置标记为 1~5.

采用“单波段气体关闭法”来分辨并测量双波段与两个单波段输出功率和光束横模,具体的测试流程是:开启双波段激光器,调节光腔、放电管、气流等运行参数,输出双波段激光,测量得到双波段激光输出功率与位置 1~5 处的热敏纸烧斑;仅关闭  $\text{CO}_2$  气体,输出 DF 单波段激光,测量得到 DF 单波段功率与位置 1~5 处的热敏纸烧斑;重新开启并调节  $\text{CO}_2$  气体流量到关闭前的参数,关闭  $\text{D}_2$  气体,输出  $\text{CO}_2$  单波段激光,测量得到  $\text{CO}_2$  单波段功率与位置 1~5 处的热敏纸烧斑. 试验结果证明:气体关闭法具有原理可靠、方法可行、测量简单的优点. 需要说明的是,由于镀膜价格和膜层透过率等原因,采用滤光片来测量单波段输出功率和光束横模经试验证明并非更佳方案.

## 2 试验结果与分析

在不加光阑和选取  $\text{D}_2$  气注入孔下游 3 mm 位置作光轴的情况下,优化后的双波段激光器典型输出功率为 25.5 W,保持运行状态不变,仅关闭  $\text{CO}_2$ ,功率计显示中红外波段 DF 激光功率为 10.3 W;再开启  $\text{CO}_2$  至此前的气流量,并关闭  $\text{D}_2$  气体,功率计显示远红外波段  $\text{CO}_2$  激光功率为 17.4 W. 优化后的双波段激光器 25.5 W 输出功率较先前输出的 18 W<sup>[9]</sup>提高了 ~42%,DF 单波段 10.3 W 较先前输出的 7 W<sup>[9]</sup>提高了 ~47%, $\text{CO}_2$  单波段 17.4 W 较先前输出的 13.4 W<sup>[9]</sup>提高了 ~30%. 两个单波段输出功率之和(10.3 W + 17.4 W = 27.7 W)略大于双波段 25.5 W 输出功率,原因是两种增益介质之间并非完全独立和隔离,相互间存在一定的气流干扰,关闭  $\text{CO}_2$  或  $\text{D}_2$  气会导致相应模块腔内静压有一点下降,这会对另一个模块腔内静压和增益区位置存在一定的影响.  $\text{CO}_2$  单波段功率提高较少的原因是由于双波段膜层的实际透过率在远红外波段内(9~11  $\mu\text{m}$ )并没有完全达到优化设计值 15%,且要与 DF 增益模块的运转参数进行匹配. 值得一提的是,利用优化后的双波段腔镜,在光轴微调和不考虑两个模块腔内静压参数匹配的情况下,加大  $\text{CO}_2$  模块气流量( $\text{m}^3/\text{h}$ , He/ $\text{N}_2$ / $\text{CO}_2$ : 1.1/2.3/3.0),试验测得的  $\text{CO}_2$  单波段激光最大输出功率可达 39.6 W.

双波段与两个单波段激光在位置 1~5 处的热烧斑如图 3、图 4、图 5 所示. 对比 DF 单波段、 $\text{CO}_2$  单波段和双波段激光热烧斑分布图可以看出:DF 单波

段与  $\text{CO}_2$  单波段的横模不同,DF 波段激光为  $\text{TEM}_{00}$  基横模输出,发散角较小; $\text{CO}_2$  波段激光则为  $\text{TEM}_{20}$  单一高阶横模输出,发散角较大. 两个波段输出不同横模的原因:两种增益模块的激射区长度存在差异,且峰值位置不完全重合,DF 增益模块激射区长度约 10 mm,而  $\text{CO}_2$  增益模块的激射区长度可达 30 mm<sup>[10]</sup>;此外,较大的激射区长度/高度(~30 mm/6 mm)及合适的腔失调度是导致  $\text{CO}_2$  增益模块输出单一高阶横模的基本原因<sup>[11]</sup>. 还可以看出:双波段激光器横模由 DF 和  $\text{CO}_2$  两个单波段激光横模在谐振腔内迭加而成,两个单波段在同一个谐振腔内独立振荡形成各自的横模,然后通过共同的腔镜输出.

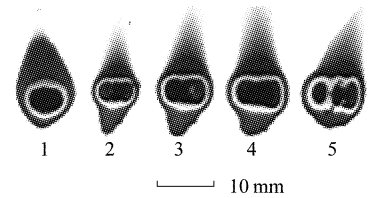


图 3 DF& $\text{CO}_2$  双波段激光在位置 1~5 处的热烧斑图 ( $\text{TEM}_{00} + \text{TEM}_{20}$ )

Fig. 3 Ablated spots ( $\text{TEM}_{00} + \text{TEM}_{20}$ ) of DF& $\text{CO}_2$  dual-band laser on heat sensitive papers@ 1~5 locations

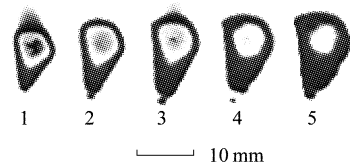


图 4 DF 单波段激光在位置 1~5 处的热烧斑图 ( $\text{TEM}_{00}$ )

Fig. 4 Ablated spots ( $\text{TEM}_{00}$ ) of DF single-band laser on heat sensitive papers@ 1~5 locations

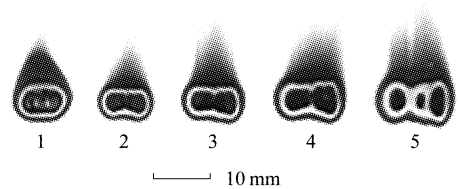


图 5  $\text{CO}_2$  单波段激光在位置 1~5 处的热烧斑图 ( $\text{TEM}_{20}$ )

Fig. 5 Ablated spots ( $\text{TEM}_{20}$ ) of  $\text{CO}_2$  single-band laser on heat sensitive papers@ 1~5 locations

在采用光阑选横模的情况下,试验结果表明:双波段能够输出单横模的光阑最大尺寸约  $\Phi 8$  mm.  $\Phi 8$  mm 光阑选横模时双波段激光器的典型输出功率为 15.4 W,仅关闭  $\text{CO}_2$  气体,测量得到中红外波段 DF

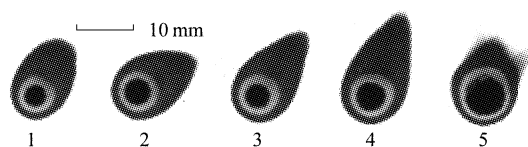


图6  $\Phi 8$  mm 光阑选模时 DF&CO<sub>2</sub> 双波段激光在位置 1 ~ 5 处的热烧斑图 (TEM<sub>00</sub>)

Fig. 6 Ablated spots (TEM<sub>00</sub>) of DF&CO<sub>2</sub> dual-band laser with  $\Phi 8$ mm diaphragm on heat sensitive papers@ 1 ~ 5 locations

激光功率为 6.4 W;仅关闭 D<sub>2</sub> 气体,测量得到远红外波段 CO<sub>2</sub> 激光功率为 11.5 W.  $\Phi 8$  mm 光阑选横模时双波段激光的热烧斑如图 6 所示,为 TEM<sub>00</sub> 单横模输出,两个单波段激光的热烧斑基本类似.实际上,DF 增益模块在不加光阑的情况下已经基本实现单横模输出,但由于 CO<sub>2</sub> 增益模块对应的单横模光轴与 DF 增益模块的单横模光轴存在位移偏差,因此,光阑不仅对 CO<sub>2</sub> 增益模块的输出横模进行了限制和选择,同时也使得 DF 增益模块的模体积和输出功率下降.

此外,关于 Tensor37 光谱仪的测量和评估方法见文献[12],测得结果与文献[9]基本相同,不再讨论.

### 3 结论

通过对两个放电管驱动的双波段激光器进行参数优化,我们实现了 25.5 W 的中、远红外双波段共光轴激光输出,两个单波段的输出功率均大于 10 W. 采用气体关闭法测量得到中红外波段 DF 激光功率约 10.3 W,远红外波段 CO<sub>2</sub> 激光功率约 17.4 W. 采用热敏纸烧斑法测得中、远红外双波段与 DF、CO<sub>2</sub> 两个单波段的横模分别为:TEM<sub>00</sub> + TEM<sub>20</sub>、TEM<sub>00</sub>和 TEM<sub>20</sub>模. 双波段激光的横模由两个单波段激光的横模在谐振腔内迭加而成. 采用  $\Phi 8$ mm 光阑选横模得到了 15.4 W 发散角较小的 TEM<sub>00</sub>基横模中、远红外双波段激光输出,中红外波段 DF 激光功率约为 6.4 W,远红外波段 CO<sub>2</sub> 激光功率约 11.5 W,较 Viper 等双/三波段激光器在远红外波段的连续/平均输出功率提高一倍以上. 从而可为红外双/多波段探测器阵列及其相关系统的应用研究提供中、远红外双波段激光光源.

由于双波段激光器具有三个优点:(1)、单台激光器可同时输出 3 ~ 5  $\mu\text{m}$ 、8 ~ 12  $\mu\text{m}$  中、远红外两个波段;(2)、DF 和 CO<sub>2</sub> 增益模块容易按比例进行功率放大;(3)、采用共同的光学谐振腔,两个波段的激光光轴完全重合,适合远距离传输应用. 因此,本研究作为双波段激光器的按比例放大奠定了基础,采用 12 根放电管驱动的大模块和非稳腔的试验平台目前已基本搭建完成,下一步将对更高功率中、远红外双波段激光器输出性能参数进行试验研究.

### REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors; an overview [J]. *Infrared Physics & Technology*. 2002, 43: 87 - 210.
- [2] Rogalski A. Infrared detectors for the future [J]. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 2009, **116**(3): 389 - 406.
- [3] Fan C J, Wang Z Q, Lin L, et al. Design of infrared inverted Telephoto-Optical system with Double-Layer harmonic diffractive [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(7): 1973 - 1976.
- [4] Moloche B. Countermeasure laser development. [C]. *Proc. of SPIE* 2005, Vol. 5989, 598902: 1 - 10.
- [5] ZHONG Ming, REN Gang. 3-5 $\mu\text{m}$  mid-infrared laser countermeasure weapon system [J]. *Sichuan Ordnance Journal*. (钟鸣,任钢. 3-5 $\mu\text{m}$  中红外激光对抗武器系统, *四川兵工学报*). 2007, **28**(1): 3 - 6.
- [6] Rogalski A. Infrared devices and techniques [J]. *Opto-electronics review*, 2002, **10**(2): 111 - 136.
- [7] Vodopyanov K L, Ganikhanov F, Maffetone J P, et al. ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator with 3.8 - 12.4  $\mu\text{m}$  tenability [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(11): 841 - 843.
- [8] Lippert E, Rustad G, Stenersen K. High Power and efficient far infrared ZnGeP<sub>2</sub>-based optical parametric oscillator [C]. *Proc. of SPIE* 2007, Vol. 6738, 67380D: 1 - 5.
- [9] Shengfu Yuan, Wei Luo, Baozhu Yan, et al. Research on a middle infrared and long infrared dual-band laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(3): 031404.
- [10] LUO Wei, YUAN Sheng-fu, ZOU Qian-jin, et al. Gain medium matching for mid- and far-infrared dual-band laser [J]. *High Power laser and particle beam*(罗威,袁圣付,邹前进,等. 中、远红外双波段激光器增益介质匹配. *强激光与粒子束*), 2011, **23**(12): 3279 - 3282.
- [11] An Yu-ying, Shi Shun-xiang, Wen Jian-guo. Multi-transverse modes running He-Ne Laser [J]. *Laser & Infrared* (安毓英,石顺祥,文建国. 多横模运转 He - Ne 激光器. *激光与红外*), 1993, **23**(1): 56 - 58.
- [12] YUAN Sheng-fu, LUO Wei, ZOU Qian-jin, et al. Measurement and evaluation of middle infrared and long infrared dual-band laser emitting spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(袁圣付,罗威,邹前进,等. 中、远红外双波段激光器发射光谱测量与评估. *光谱学与光谱分析*), 2012, **32**(1): 83 - 87.