

中波红外激光器的光束指向红外图像检测法

郭汝海 孙涛 王兵

(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, 吉林 长春 130033)

摘要 由于中波红外($3\sim 5\ \mu\text{m}$)探测器在军事上的广泛应用,基于中波红外激光器的定向红外发射装置已经成为发展的重点,而其中的激光束指向稳定性就成为非常重要的参数。对于一种光学参量振荡(OPO)产生的中波红外激光器进行了指向稳定性的测试,测试采用了中波红外成像系统及边缘提取与阈值的图像算法,获得了此种激光器的指向稳定性数据。实验结果表明,此激光器在常温下的最大指向偏移量为 $1.1\ \text{mrad}$,平均值为 $0.3\ \text{mrad}$ 。激光二极管(LD)抽运源晶体及非线性OPO晶体的温控还有进一步提高的可能性。研究结果将为中波红外激光器的研制、光束整形与光束指向测量与稳定技术提供参考。

关键词 激光技术;中波红外激光器;红外成像系统;图像处理;指向稳定性

中图分类号 TN241 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.081404

Method of Pointing Measurement Based on Infrared Image Processing for Mid-Infrared Laser

Guo Ruhai Sun Tao Wang Bing

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

Abstract The directed infrared projecting device based on mid-infrared laser has become more important because the mid-infrared ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) detectors have been widely applied in the military field. The beam pointing stability is the key parameter for such application. The beam pointing measurement is conducted for an optical parameter oscillation (OPO) mid-infrared laser. The mid-infrared imaging system, image edge extraction algorithm and threshold algorithm are adopted to obtain the pointing data of this mid-infrared laser. The experimental results show that the maximum pointing error is $1.1\ \text{mrad}$ and the average is $0.3\ \text{mrad}$ at room temperature. The main reason is that the temperature control system for laser diode (LD) is not perfect and it may be improved further. The measurement results can provide references for the investigation, beam shaping, pointing measurement and stability techniques of mid-infrared lasers.

Key words laser technique; mid-infrared laser; infrared imaging system; image processing; pointing stability

OCIS codes 140.3425; 140.3295

1 引言

中波红外($3\sim 5\ \mu\text{m}$)激光器在军事领域有非常重要的应用而受到广泛重视^[1~3]。有统计数字表明,从20世纪60年代以来,被红外制导武器击落的战机的比例超过80%,随着中波红外激光器的发展,一般可以利用这类激光器形成针对此波段传感器的红外定向对抗系统^[4,5]。

到目前为止,还没有相应的固体激光材料可直接获得 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的激光输出,一般采用光学参量振荡(OPO)的方式获得此波段的激光输出^[6]。当然目前还有一种半导体的量子级联激光器可获得此波段的输出,但由于工艺及能级剪裁的复杂性,还没有获得广泛的应用^[7]。中波红外激光器的诸多参数都对系统有着重要影响,如功率、能量、发散角、光斑尺寸、重复频率等,有很多专门的仪器设备对这些参数进行测试^[8]。而激光器输出光束的指向稳定性也是固体激光器非常重要的参数之一,它将影响激光设备跟踪瞄准的精度,较

收稿日期: 2012-03-09; 收到修改稿日期: 2012-05-04; 网络出版日期: 2012-06-07

基金项目: 吉林省自然科学基金(201115123)资助课题。

作者简介: 郭汝海(1976—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光束控制方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com

差的指向精度将使激光系统无法有效地击中目标,需要采取措施加以抑制^[9]。

目前测量中波红外激光指向稳定性的相关报道较少,一般都是常见的可见光波段激光指向的测量,如 He-Ne 激光^[10,11]。因为可见光激光可以很直观地观测到,而且有大量成熟的 CCD 探测器可以应用,因此已经进行了广泛的研究。但中波红外激光器由于光束不可见,中波红外成像系统价格昂贵,且 OPO 体制的中波激光器需要两次抽运才能获得中波红外激光的输出,可以预见的是其指向稳定性会较直接输出的激光器更差,对需要较高指向稳定性的激光系统影响更大。因此,本文拟采用一套自行研发的红外成像系统,利用图像处理的边缘检测的方法,获得光斑质心的变化情况,从中就可以得到光束指向的偏差。通过本文的研究可以为不可见的中波红外激光检测指向提供一种简便的测试装置及一般方法。

2 检测原理及实验装置

中波红外激光器采用 ZnGeP₂ 晶体的 OPO 来获得激光输出。目前国内已经可以生长长度大于 25 mm 的高质量晶体,根据 ZnGeP₂ 晶体的相位匹配条件和 Sellmeier 方程,可以计算出输出光波长与晶体相位匹配角之间的关系曲线,如图 1 所示。采用 I 类匹配技术,获得了 3~5 μm 波长激光的输出。检测此激光器的指向稳定性的基本原理如下。

从 Helmholtz 方程出发,可以得到垂直于光轴横截面的基模高斯光束的振幅分布为^[12]

$$A(r, \phi, z) = \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right], \quad (1)$$

式中 $w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)^2\right]$ 为光束传输 z 距离后的光束半径。从(1)式可以看出:在光轴处,振幅值最大。

沿中心向外,振幅按距离的平方指数衰减。当 $r = w(z)$ 时,振幅减小到最大值的 $1/e$ 。

用功率(或能量)密度分布函数的二阶矩定义光束半径时,就是将光斑包括 86.5% 的激光总功率时测得的半径定义为光束的半径,即^[8]

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{w_{86.5\%}} I(r, \phi, z) r dr = 86.5\% \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\infty} I(r, \phi, z) r dr, \quad (2)$$

式中 $I(r, \phi, z)$ 为功率密度分布函数,正比于振幅的平方。

根据上述定义,采用红外成像系统采集一定距离上的激光光斑,通过光斑灰度值的 86.5% 界定光斑环围区域,按照此环围区域的中心定义光束的指向中心,这样检测一段时间的此中心位置的位移信息就可以表示出激光指向的变化。

检测系统主要由中红外激光器、红外成像系统、两个隔振光学平台、反射镜及漫反射屏组成。具体的光路示意图如图 2 所示。

此次测试的中红外激光器是国内某大学研制的具有高平均功率和高重复频率的指标较先进的激光器。红外成像系统为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的设备。根据测量光束指向的原理编制了图像处理算法,整个测试系统的照片如图 3 所示。

3 结果与讨论

为了保证激光指向稳定性测试的可重复性,在实验中固定了激光器、反射镜、红外成像系统和漫反射屏的位置,其中激光器采用了机械的定位销孔的方式,定位精度可达到 $10''$ 量级。

采集的视频录像采用图像处理的方式,按照前一部分所述理论,从(2)式出发,以灰度值最大的 86.5% 作为光斑截取阈值,然后计算中心点像素坐标,根据相机至漫反射屏的距离来计算光斑中心抖动的绝对距离

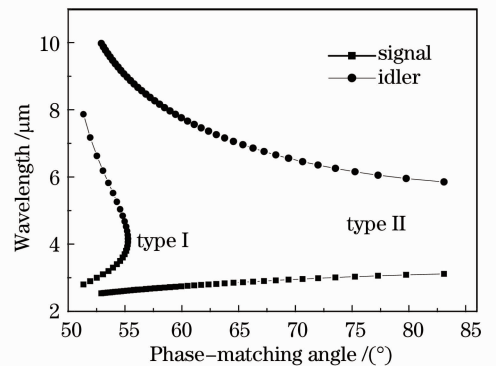


图 1 激光抽运 ZnGeP₂ OPO I 类、II 类相位匹配调谐曲线

Fig. 1 Type I and type 2 phase-matching tuning curve for laser pumping ZnGeP₂ crystal

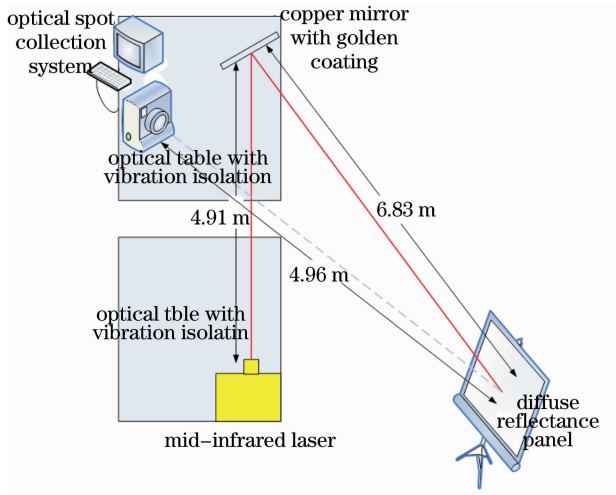


图 2 中波红外激光器指向测试装置图

Fig. 2 Experimental setup for pointing measurement of mid-infrared laser

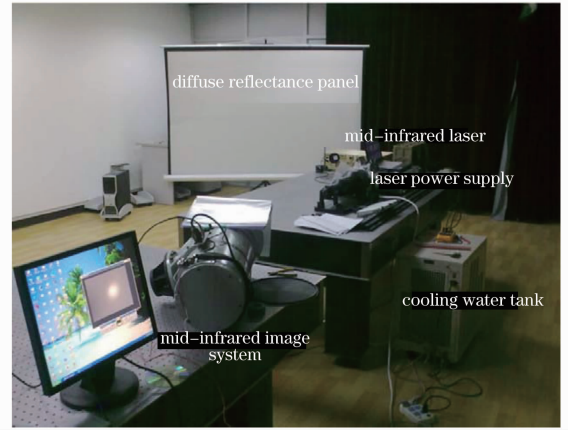


图 3 测试实物照片

Fig. 3 Photo of experimental setup

大小,最终由激光器到漫反射屏的距离计算光斑漂移的不稳定度。采用图像处理的视频截取照片如图 4 所示。

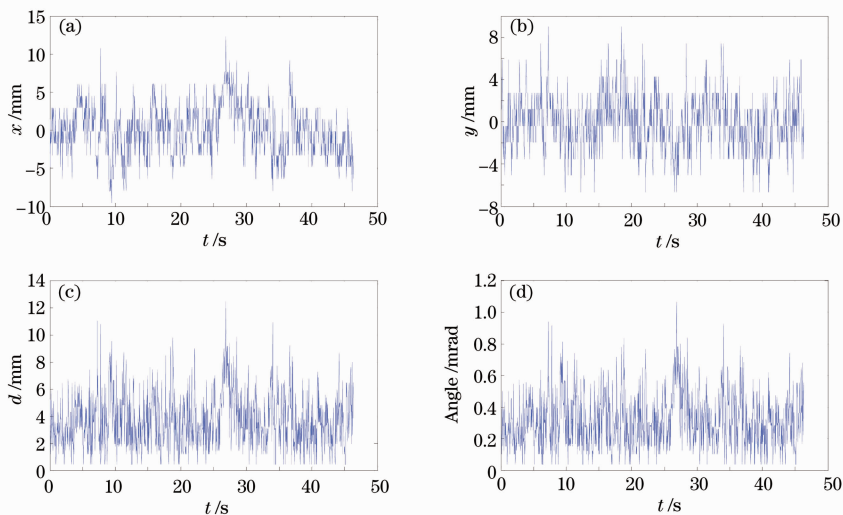
把视频采集的光斑中心坐标输入到 Matlab 软件中,统计了 45 s 时间内激光指向的变化值,变化曲线如图 5 所示,其中图 5(a)为 x 坐标的变化量,图 5(b)为 y 坐标的变化量,图 5(c)为综合变化量,图 5(d)为换算的抖动角度偏差的变化量,这需要根据激光器到屏幕间的距离计算。

计算结果表明光斑常温下的最大偏移量为 1.1 mrad,平均值为 0.3 mrad,说明此激光器的激光指向稳定性较差(一般商业固体激光器的指向稳定性在 0.03~0.05 mrad 之间)。这也与中波红外激光束没有加入光束整形装置有



图 4 光斑图像处理

Fig. 4 Image processing of optical spot

图 5 中波红外激光指向稳定性实验结果。(a) x 方向;(b) y 方向;(c) 综合变化量;(d) 抖动角度偏差Fig. 5 Experimental results of pointing stability for mid-infrared laser. (a) x direction; (b) y direction; (c) combined variation; (d) vibration angle obtained by transformation of above results

关,激光器本身光束发散角大于 20 mrad。

另一个主要原因是中波红外激光器产生的原理决定的,从基频 2 μm 左右的激光通过非线性效应(OPO)才能得到 3~5 μm 的激光,这样非线性转换晶体就成为此激光器非常关键的部件。基频激光在晶体中进行频率转换时,由于转换效率较低,必然会产生大量的废热,造成晶体的温升而产生温度梯度,使晶体的折射率发生快速的变化,从而使其中传输的激光束指向发生快速变化。要想抑制这种光束抖动,必须采取更加有效的制冷方式。

4 结 论

对一种 OPO 体制的固体中波红外激光器进行了指向稳定性的测试,测量结果表明这种中波红外激光器指向稳定性较差,最大值达到了 1.1 mrad,不及一般商业激光器的平均水平。分析其主要原因有两点:1)激光器光束质量较差,没有加入适当的光束整形光学装置;2)非线性晶体的热管理系统没有有效地带走废热。

本文的工作为中波红外激光器指向稳定性的测试提供了一种简便易行的方法,同时测试结果可以指导激光器进一步进行优化设计,以达到良好的激光指向稳定性。这种测量结构和系统可以进一步应用到激光束的指向稳定系统中,通过快反镜形成闭环控制系统,进一步抑制激光器本身的抖动和漂移。

参 考 文 献

- 1 Guo Ruhai, Li Dianjun. Experiments of second harmonic generation output in pulsed TEA CO₂ laser [C]. *SPIE*, 2010, **7843**: 78430E
- 2 Wang Keqiang, Han Long, Wang Jianjun *et al.*. 3~5 μm solid state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s): 169~173
王克强,韩 隆,王建军等. 3~5 μm 固体激光器 [J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(增刊): 169~173
- 3 Guo Ruhai, Shi Long, Wang Siwen *et al.*. Development review of HF/DF chemical lasers [J]. *OME Information*, 2010, **27**(3): 30~35
郭汝海,施 龙,王思雯等. HF/DF 化学激光器的研究进展 [J]. 光机电信息, 2010, **27**(3): 30~35
- 4 D. H. Titterton. A review of the development of optical countermeasures [C]. *SPIE*, 2004, **5615**: 1~15
- 5 M. Petersson. Real-time DIRCM system modeling [C]. *SPIE*, 2004, **5615**: 149~160
- 6 M. Henriksson, L. Sjöqvist, M. Tiihonen *et al.*. Tandem OPO systems for mid-infrared generation using quasi phase-matching and volume Bragg gratings [C]. *SPIE*, 2007, **6738**: 673805
- 7 A. Lyakh, R. Maulini, R. Go *et al.*. New midwave infrared laser sources for defense and security needs [C]. *SPIE*, 2009, **7434**: 743401
- 8 Zhao Xinyu, Qiao Yanfeng, Guo Ruhai *et al.*. Method of near- and far-field measurement and application for mid-infrared laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(1): 49~52
赵新宇,乔彦峰,郭汝海等. 中波红外激光器的近场远场测试方法及应用 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(1): 49~52
- 9 Chen Guimin, Jia Jianyuan, Fan Guobin. Platform foundation vibration effects upon pointing stability of laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(z1): 393~395
陈贵敏,贾建援,范国滨. 光学平台基础振动对激光束瞄准稳定性的影响 [J]. 中国激光, 2004, 31(z1): 393~395
- 10 Qi Jingang, Li Chunjie. Measuring the pointing stability of laser beam [J]. *Physics Experimentation*, 2007, **27**(12): 34~36
祁金刚,李春杰. 激光光束指向稳定性的测量 [J]. 物理实验, 2007, **27**(12): 34~36
- 11 Zhang Guoxuan, Chen Gang, He Hong *et al.*. The beam-pointing stability for laser output measured by CCD camera [J]. *Applied Optics*, 1998, **19**(2): 15~18
张国轩,陈 刚,何 红等. 用 CCD 摄像机检测激光器输出光束的指向稳定性 [J]. 应用光学, 1998, **19**(2): 15~18
- 12 Zuo Tiechuan. Lasers for Manufacturing-Optical Beam Quality, Transmission Quality and Focus Quality [M]. Beijing: Science Press, 2008. 10~11
左铁钊. 制造用激光-光束质量、传输质量与聚焦质量 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. 10~11