

中波红外固体激光器的指向监视系统

郭汝海, 陈 宁, 王 兵, 丛俊峰

(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: 高重频 3~5 μm 中波红外固体激光器由于其多方面的潜在应用而受到了广泛的重视, 但由于其本身固体激光的特性, 在传输过程中难免受到本身腔体温度梯度及外界环境振动的影响, 而产生指向上较大的抖动和漂移, 难以用于对指向精度要求较高的场合, 需要在激光器出口处加入监视对准系统来抑制激光指向的抖动和漂移。因此, 拟采用两种不同的探测器(四象限探测器和热释电探测器)作为此种激光器的监视对准元器件, 对其在监视对准系统中的性能进行了对比试验分析。结果表明: 两种监视系统得到的激光指向抖动的 $P-V$ 值都在 $9''$ 左右, 热释电探测器的指向监视误差为 $5.39''$ 。四象限探测器相比于热释电探测器具有更高的响应带宽, 而热释电探测器由于基于图像的方法更加直观, 因此, 对于中波红外激光器而言, 可以根据实际使用需要来选择相应的探测器以搭建指向监视系统。

关键词: 中波红外固体激光器; 监视对准; 抖动漂移; 指向稳定

中图分类号: TN247 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2013)12-3185-05

Monitoring and alignment system for mid-infrared solid-state laser

Guo Ruhai, Chen Ning, Wang Bing, Cong Junfeng

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

Abstract: The high-repetition 3–5 μm mid-infrared solid-state laser has gain a lot of attention for its potential applications in civil and military. Because of the characteristic of solid-state laser, the temperature gradient of resonator and the environmental vibration in the transmission will influence the pointing of laser to generate quite large jitter and drift, which cannot be applied in some fields that the requirement of pointing precision is quite high. In such case, the monitoring and alignment system after laser are installed to control jitter and drift of laser beam. Therefore, there are two kinds of detector will conduct the comparable experiments to verify the performance. One is the infrared quadrant detector and the other is pyroelectric array camera. The experimental results show that the pointing errors for these two detectors are about $9''$. The pointing error of pyroelectric detector is $5.39''$. The quadrant detector has wider bandwidth than the pyroelectric array camera and the pyroelectric array camera based on the thermal image is more intuitive. Therefore, for the mid-infrared laser, corresponding detector can be chosed to built up the monitor system based on the applications requirement.

Key words: mid-infrared solid-state laser; monitoring and alignment; jitter and drift; pointing stability

收稿日期: 2013-04-05; 修订日期: 2013-05-03

基金项目: 吉林省自然科学基金(201115123); 应用基础研究基金(201205094)

作者简介: 郭汝海(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光光学设计与光束控制方面的研究。Email: hitgrh@163.com

0 引言

中波 3~5 μm 的激光由于处于“大气窗口”,在军事上和激光通讯上都有非常重要的应用^[1-3]。而对于固体激光器增益介质本身很难产生这一波段的激光,主要是由于它具有非常小的带隙(0.6~0.24 eV),以往通常采用化学激光器,目前普遍上采用一个固体激光器加上非线性晶体 OPO 的方法来实现此波段激光的输出^[4-6]。由于其本身固体激光器的特性,难免受到温度梯度及环境振动的影响,使其指向在发射过程中产生较大的变化,因此,在应用中需要加入监视对准系统来抑制激光光束的抖动和漂移。

监视对准系统的主要元件包括高分束比的分束镜、监视对准用的探测器以及调整光路方向的快速反射镜组成,目前为止,用于监视对准的探测器有多种类型,如常用的 CCD、PSD、CMOS 和象限探测器等。但这些探测器一般基于 Si 材料,响应波段为 400~1 100 nm,很难用于中波红外激光器的监视对准系统中。因此,对于此波段激光器的监视对准系统的研究鲜见报道^[7-10]。文中从对应此波段的两种探测器出发,在同等实验条件下,采用精密电动转台对其进行标定,给出其各自的指向监视精度,分析其用于激光监视对准光路中的优缺点,为其合理应用于中波红外激光器系统打下良好基础。

1 中波红外探测器简介

随着探测材料的发展,象限探测器的波长逐渐向红外谱段扩展,波兰的 VIGO 公司生产的型号 FYM-PCQ-10.6 四象限探测器就可以在非致冷的情况下探测 2~11 μm 的红外激光,可以用来作为中波及长波红外监视对准的探测器。

图 1 给出了此种探测器的实物照片,图 2 给出了此种探测器的响应曲线,将基于此探测器开发一套测量激光光斑重心位置的监视系统。



图 1 红外四象限探测器

Fig.1 Photo of infrared quadrant detector

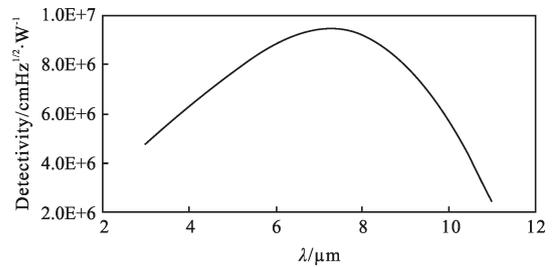


图 2 红外四象限探测器的响应曲线

Fig.2 Responding curve of infrared quadrant detector

另外一种红外探测器为美国 Spiricon 公司出品的光束质量分析仪,型号为 py-iii-c-a,探测器类型为热释电探测器。红外响应波段为 1.06~3 000 μm ,通过附带的软件界面可以直接读出光斑在某一时间的质心位置。此探测器的实物照片如图 3 所示。



图 3 红外热释电探测器

Fig.3 Infrared pyroelectric detector

文中的对比试验就是基于上述两种探测器分别进行的,特别是基于四象限探测器的光束监视对准系统,笔者已经开发出了一套数据采集及显示的软硬件系统,在原有探测器的基础上增强了其使用功能。

2 试验配置

2.1 热释电探测器试验

热释电探测器的光路如图 4 所示。

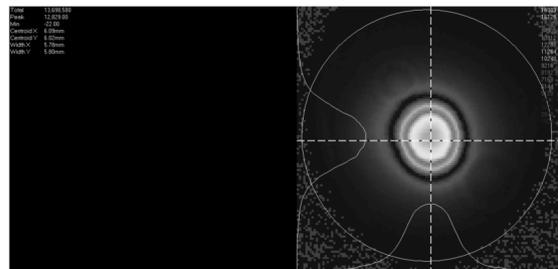


图 4 热释电探测器的光斑图像

Fig.4 Optical spot image of pyroelectric detector

上述测试图中,左侧为光斑的形心位置及光斑大小信息,右侧为探测器所获取的光斑的光强分布图。测试中的光路图如图 5 所示。

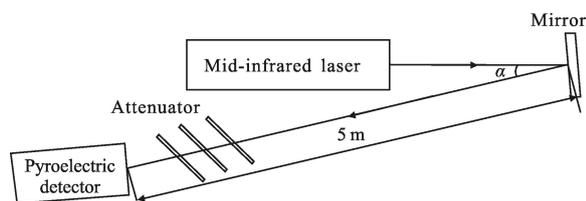


图 5 热释电探测器的实验光路图

Fig.5 Experimental setup for pyroelectric detector

首先,在光路不变的情况下,进行了激光指向稳定性的分析,从试验结果可知,激光器的光束指向抖动值极差为 0.047 mrad,同时随着激光器输出功率的增加,激光指向稳定性变差,在激光器功率从 3 W 变化到 10 W 过程中,激光器发生了 0.066 mrad 的指向偏转。

在测试完激光指向稳定性后,进行了此探测器的指向监测标定试验,试验光路图如图 6 所示。

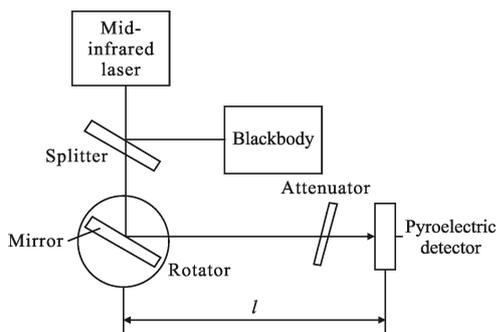


图 6 热释电探测器指向监测标定

Fig.6 Pointing monitor calibration of pyroelectric detector

2.2 四象限探测器试验

由于四象限探测器的靶面尺寸较小,这是由于过大的靶面面积会使四个探测单元无法做到很好的一致性从而影响测量精度。文中采用的靶面面积仅为 8 mm,因此需要在探测器前加入 245 mm 焦距的 Ge 透镜,此焦距的选择是根据光斑在象限探测器上最好具有整个靶面一半大小的光斑设计加工的,整个测试光路如图 7 所示。

通过四象限探测器得到重心抖动,利用几何光学知识即可得到发射光束偏转角的抖动,几何推导公式如下所示:

$$u = \arctan\left(\frac{r}{l}\right) \tag{1}$$

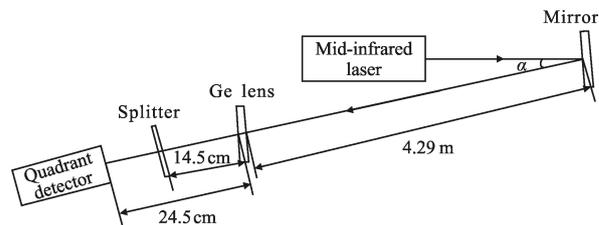


图 7 四象限探测器试验光路图

Fig.7 Experimental setup for the quadrant detector

对中波红外激光器的光束进行了 10 min 的数据记录,单个脉冲波形如图 8 所示。

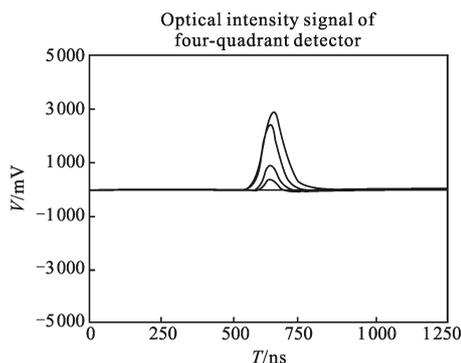


图 8 单个脉冲波形

Fig.8 Single pulsed waveform

从上图可以看出,四象限探测器具有极佳的响应带宽,此中波激光器的单个脉冲的脉冲宽度仅为 30 ns 左右,且重频为 10 kHz,这些信息都可以在笔者开发的软件显示系统中有所体现,同时根据各象限的电压信息可以解算出照射到其上光斑的位置信息,再根据图 7 所示光路及公式(1)就可以解算出此套系统的指向误差。此探测器的指向标定的光路和图 6 类似,只是热释电探测器换成了四象限探测器。

3 结果与讨论

热释电探测器的指向标定测量结果如表 1 所示,注意到转台转动一个 θ 角,实际光束转动 2θ 角,因此用热释电探测器测量的各个角度对应的相对位置值除以到转台的距离就可以得到实际的测量角度值,以测量的角度值和实际转动的 2θ 角进行比较,就可以得到热释电的光束指向监视误差值。其中转台的角度精度达到 0.1"。

按照前一部分的近场测试步骤测量了中波激光

器的各项参数,可以看出此激光器非常适于远距离的大气传输,测量结果如表 1 所示。

表 1 热释电探测器指向标定试验

Tab.1 Pointing calibration experiments for pyroelectric detector

No.	Angle of rotator	Measurement angle	Error
1	1"	5.60"	3.60"
2	2.39"	10.37"	5.59"
3	5.56"	17.42"	6.30"
4	11.51"	28.21"	5.19"
5	29.89"	53.47"	6.31"

从表 1 可以看出,热释电探测器测量光束指向时,测量的误差平均值在 5.39",分析其主要原因为热释电探测器的像元分辨率较低,像元大小为 85 $\mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$,分辨率为 124 \times 124。

采用四象限探测器测量的光斑位置信息的软件采集界面如图 9 所示。由于此激光的频率较高,脉宽较窄,在软件中将多个脉冲的最大值取平均作为一次平滑处理,这可以加快计算机程序的位置解算效率,达到实时显示光斑位置的目的。

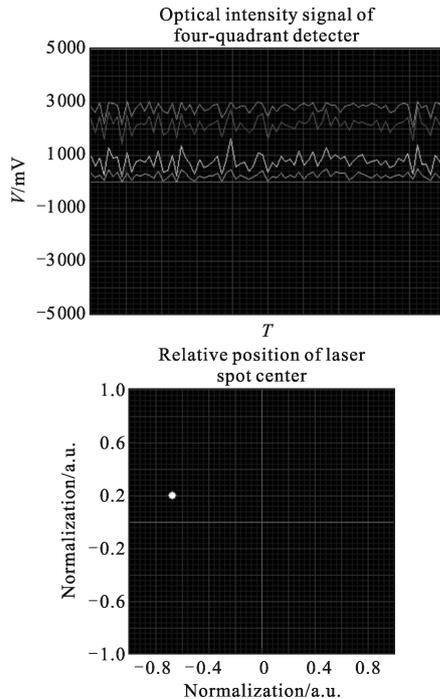


图 9 四象限光斑位置采集界面

Fig.9 Software collection interface for position of laser beam in quadrant detector

图中左侧为光斑在四个象限产生的光电压信号,右侧为激光光斑的重心位置。试验按照不同的时间周期对光束指向稳定性进行分析,具体分析结果如表 2 所示。表中不同的数值代表采集卡不同的采样周期,300 个采样周期为 10 min。从表中可以看到,对不同周期采样数据进行处理后,周期长的光束指向主要表现为漂移,而瞬随机抖动值经过平均处理后表现不明显。周期短的光束指向主要表现为抖动,周期越短,抖动越明显,可以看到:在 30 个采样周期内,光束指向抖动值极差为 0.043 mrad,和上述热释电探测器的测试结果较为接近。而长周期的漂移必须经过一段时间的积累才能表现出来。

表 2 不同周期下的激光指向稳定性

Tab.2 Laser pointing stability under different periods

θ	Pulse	300	250	200	150	100
Average	Average / μrad	4.35	4.31	4.89	5.36	5.94
	$P-V$ / μrad	17.10	20.81	20.39	20.75	27.15
	RMS / μrad	3.60	3.55	3.63	4.00	4.69
u		78	50	40	30	
	Average / μrad	6.29	7.45	8.44	9.04	
	$P-V$ / μrad	35.51	39.30	43.25	43.12	
	RMS / μrad	5.10	5.84	6.58	7.11	

从以上测试过程及结果来看,两种探测器均可以直接测量中波激光器的指向。其中基于热释电探测器的光束指向监视更为直观,但其响应带宽较窄,无法分辨单个脉冲的光斑位置,且分辨率较低,极易在超短脉冲下产生靶面损伤。基于四象限探测器的光束指向监视需要单独开发硬件配套系统,对于系统的集成度要求较高,此系统试验证明具有较高的带宽,能够分辨单个脉冲的光斑位置,且具有较高的损伤阈值,适用于高功率脉冲中波红外激光光路中的指向监视。

同时需要特别注意的是,热释电探测器得到的是光斑形心位置,而四象限得到的是重心位置,对于激光器光斑光强分布不均匀及光斑形状不规则的情况,两个探测器系统会得到不同的测量结果,需要根

据实际使用需求来决定选择哪种探测器。

4 结 论

文中对中波红外固体激光器进行了指向的监测试验,由于此激光器的波段特殊,采用了两种探测器进行了对比试验,试验结果表明,两种探测器系统都可以很好地完成中波红外激光光束的指向监视,为采用此两种探测器的自动准直系统提供了先决条件,基于这两种探测器的自动监视对准系统已经开始搭建调试,将在后续的工作中予以报道。

参考文献:

- [1] Guo Ruhai, Li Dianjun. Experiments of second Harmonic generation output in pulsed TEA CO₂ laser [C]//SPIE, High-Power Laser and Applications V, 2010, 7843: 78430E-1-78430E-5.
- [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. (in Chinese)
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(S): 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. (in Chinese)
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): 30-3.
- [4] Ruan Peng, Zhang Laiming, Xie Jijiang, et al. Key technologies of pulsed non-chain DF lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 313-318. (in Chinese)
阮鹏, 张来明, 谢冀江, 等. 非链式脉冲 DF 激光器的关键技术[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 313-318
- [5] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP₂ [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [6] Jiang Hailin, Bian Jintian, Nie Jinsong, et al. Theoretical investigation on a method generating 4.3 μm laser based on the tandem optical parametric oscillator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 210-219. (in Chinese)
姜海林, 卞进田, 聂劲松, 等. 利用双光学参量振荡器结构输出 4.3 μm 激光方案 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 210-219.
- [7] Cordes A, Davidson A. CMOS cameras allow robust active stabilization of laser beams[J]. *Laser Focus World*, 2011, 47(8): 73-75.
- [8] Liu Daizhong, Zhu Jiangqiang, Xu Renfang, et al. Laser beam automatic alignment in multipass amplifier [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(9): 2066-2070.
- [9] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)
孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 275-279.
- [10] Tang Xiaojun, Li Yujun, Liu Junhua, et al. Optimization design for alignment and measurement system based on four-quadrant photo-detector: system optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(7): 1359-1364. (in Chinese)
汤晓君, 李玉军, 刘君华, 等. 基于四象限光电探测器的对准与测量系统优化设计-系统优化 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1359-1364.