

## 中波红外激光器的近场远场测试方法及应用

赵新宇<sup>1,2</sup>, 乔彦峰<sup>1</sup>, 郭汝海<sup>1</sup>, 邵 帅<sup>1</sup>, 王思雯<sup>1</sup>, 孙 涛<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 高重频 3~5  $\mu\text{m}$  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。但该波段激光器输出具有较大的技术难度并且人眼不可见, 因此对于此种激光器的近远场测试方法的报道很少。文中首先简要介绍此类激光器的产生原理, 然后对激光器近场参数进行了详细测试。最后, 在室外 180 m 距离上通过单点探测器采样进行了中波红外激光器的远场绝对功率密度测量, 并与 Fresnel 衍射积分的理论结果进行了对比。理论和实验结果表明, 此激光器波长为 3.9  $\mu\text{m}$ , 具有高平均功率和高重频的特点, 功率不稳定度为 10%。远场测试结果和理论计算都表明此激光器在远场具有准高斯的光强分布。考虑大气影响, 测试得到远场平均能量密度为 6.367  $\text{nJ}/\text{cm}^2$ , 比大气经验模型计算的结果大 1.3 倍。该研究将对测试中波红外激光器的参数提供有益的参考, 并对此激光器圆场探测器干扰阈值评估具有一定的借鉴作用。

**关键词:** 中波红外激光器; 参数测试; 光强分布; 干扰阈值

中图分类号: TN248.1; TN247 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0049-04

## Method of near- and far-field measurement and application for mid-infrared laser

Zhao Xinyu<sup>1,2</sup>, Qiao Yanfeng<sup>1</sup>, Guo Ruhai<sup>1</sup>, Shao Shuai<sup>1</sup>, Wang Siwen<sup>1</sup>, Sun Tao<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The high-repetition 3-5  $\mu\text{m}$  mid-infrared laser has gain a lot of attention for its potential applications in civil and military. However, there are many technical difficulties to generate this band laser and it is invisible. Therefore, there are rarely such reports about methods of near- and far-field measurements for the lasers. In this article, the near-field measuring for the parameters of laser was conducted at first. Then, the absolute and relative energy density distribution were obtained by the point detector sampling. At last, the infrared imaging system was used to record the image of laser spot received in a far-field screen in the distance of 180 m. The relative energy density distribution could also be simulated by theory of Fresnel diffraction integral of circular aperture. The theoretical and experimental results show that the wavelength of this laser is about 3.9  $\mu\text{m}$  with the properties of high average power, high repetition and stability about 10%. The far-field theoretical results show that the energy density distribution is quasi-Gaussian distribution and agrees well with the average energy density of 6.367  $\text{nJ}/\text{cm}^2$ ,

收稿日期: 2011-05-07; 修订日期: 2011-06-11

基金项目: 吉林省自然科学基金(201115123)

作者简介: 赵新宇(1980-), 男, 助理研究员, 主要从事计算机应用及光电测控技术方面的研究。Email: zxy\_1122@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测控技术及相关领域方面的研究。

which is smaller than the evaluation of empirical formula by the factor of 1.3. This work will definitely be helpful to measure the parameters of pulsed high-repetition mid-infrared laser and judge the disturbing threshold for the detectors in more far distance.

**Key words:** mid-infrared laser; parameters measurement; optical intensity distribution; distribution threshold

## 0 引言

激光在大气中传输需要位于所谓的“大气窗口”中,目前已知的 3 个大气窗口分别为  $1\ \mu\text{m}$  附近、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$  以及  $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 。其中,中波  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的激光在军事上和激光通讯上都有非常重要的应用<sup>[1-3]</sup>。相比于其他两个波段,由于通常需要采用非线性光学的光参量振荡器(OPO)而在技术上存在相当难度<sup>[4-5]</sup>。因此,对于此波段的激光器远近场测试方法的研究也鲜见报道。

文中从几种产生中波激光器的机理出发,详细介绍了其内场参数的测试方法,给出了详细的测试方案。在此基础上,对于此激光器经过大气传输的远场特性进行了详细研究,进而对远距离的红外成像探测系统的干扰效果进行了定量分析,为中波红外激光器的近远场测试方法与干扰阈值判定提供了有益参考。

## 1 中波激光器的产生原理

中波激光器可以通过化学激光器 HF/DF 直接产生,也可以通过  $\text{CO}_2$  激光器倍频产生,但它们普遍的缺点就是体积大,后勤供应困难,并且造价较高<sup>[6]</sup>。半导体量子级联激光器也可以实现中波激光的输出,但由于能带剪裁设计和生长的复杂性,还处于基础研究阶段<sup>[7]</sup>。而固体激光器通过 OPO 技术可以很容易的实现高重复频率、高峰值功率、高光束质量的中波输出,同时可做成轻型、紧凑、高效的器件,因而成为目前中波激光器研究的热点。

固体激光器产生中波红外输出主要有以下几种方案,如图 1 所示。

文中测试的中红外激光器采用图 1(e)的输出方案,此方案只需要一次频率转换就可以得到中波红外激光输出,具有结构紧凑、造价合理及环境适应性高等特点。

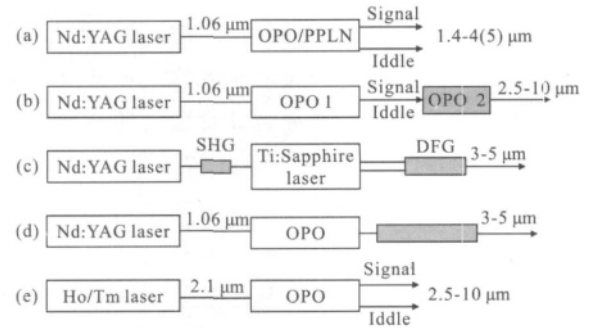


图 1 几种固体中波红外激光器的输出原理

Fig.1 Several output schemes of solid-state mid-infrared laser

## 2 中红外激光的大气传输

在激光远距离传输中,由于激光发散角的存在将导致激光光斑面积逐渐变大,单位面积的激光能量或功率会随着传输距离的增加而下降;此外,激光束传输距离,大气散射、大气吸收以及大气湍流等都会对激光能量值进行衰减,导致到达远场的能量密度值变小。一般的中红外激光的远场功率密度可以表示为:

$$E_d = \frac{4E_0}{\pi \times D^2} \tau(\lambda) = \frac{4E_0}{\pi(\theta L + D_0)^2} \tau(\lambda) \quad (1)$$

式中: $E_d$ 为激光远场平均能量密度; $E_0$ 为激光的单脉冲能量; $D$ 为远场光斑的直径; $\theta$ 为激光器的发散角, $L$ 为激光大气的传输距离; $D_0$ 为激光器本身的出光口径; $\tau(\lambda)$ 为中波激光的大气透过率,它由大气的吸收系数、散射系数、传输距离以及气象条件所共同决定。对于中波红外激光,大气中主要吸收分子为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ ,其他大气成分的吸收可忽略。因此,大气透过率可写为:

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \times \tau_{\text{CO}_2}(\lambda) \quad (2)$$

式中: $\tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$ 和  $\tau_{\text{CO}_2}(\lambda)$ 均可以查表得到<sup>[8]</sup>,也可以通过 Modtran3.7 进行计算,为了和后续的试验进行比较,文中计算了秋天北半球 9 km 外的中红外大气透过率曲线,如图 2 所示。

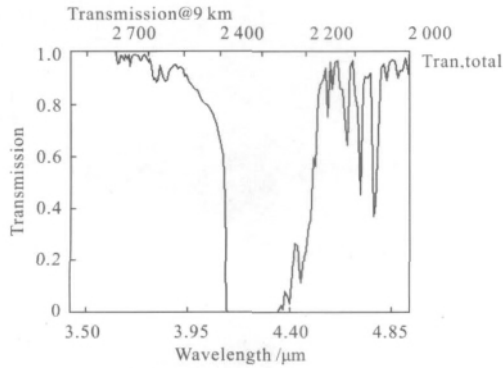


图 2 中波激光器 9 km 外大气透过率

Fig.2 Atmospheric transmittance of mid-infrared laser in the distance of 9 km

从图 2 可以看出,中波激光器除了 4.1~4.4 μm 波段,在远距离传输时均具有极高的大气透过率,因此对于中波激光器的远场应用,必须准确测量其波长范围。中波激光器能量衰减的另一个主要原因是粒子散射,粒子散射引起的大气透过率变化可用如下经验公式表示<sup>[9]</sup>:

$$\tau_s(\lambda) = \exp[-3.91 \frac{L}{R_v} (\frac{0.55}{\lambda})^q] \quad (3)$$

式中: $R_v$ 为大气能见度; $q$ 为波长修正因子;当 $R_v > 20$  km 时, $q=1.6$ ,当 $R_v$ 为 6~20 km 时, $q=1.3$ ,当 $R_v < 6$  km 时, $q=0.585$ 。

综合公式(1)~(3),中波激光器的远场能量密度可以近似写成:

$$E_d = \frac{4E_0}{\pi(\theta L + D_0)^2} \tau_{H_2O}(\lambda) \tau_{CO_2}(\lambda) \tau_s(\lambda) \quad (4)$$

### 3 实验设置

在进行远场实验之前,先进行了近场参数测试,由于为中波红外波段,所以采用不同于可见光激光的测量器件。波长的测量采用红外谱线分析仪,范围为 3.6~4.2 μm。重频和脉宽采用非致冷的波兰 VIGO 公司的单点探测器,通过安捷伦示波器进行采集。功率测量采用了 OPHIR 公司的 8 mm 口径的功率计,同时利用此功率计通过刀口法测量此激光器的发散角。

近场测试的激光器参数可以为远场激光测量提供参考,远场实验配置如图 3 所示。

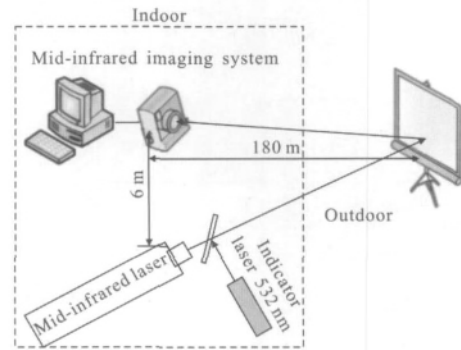


图 3 中波激光器远场实验测量配置

Fig.3 Experimental setup for far-field measurement

实验采用中波红外激光器照射 180 m 外的漫反射屏,采用 532 nm 的绿色激光作为指示光源。同时在漫反射屏上分割成 5×5 的阵列,如图 4 所示,采用单点探测器(OPHIR 公司),型号为 PE9-F 激光能量计。将测量数值输入到 MATLAB 软件中并进行 3 次样条插值,可以得到绝对的激光远场能量密度分布。测量用的中波成像红外系统可以得到激光远场的相对能量密度分布,同时,此套系统可用于更远距离的激光远场干扰实验,系统照片如图 5 所示。

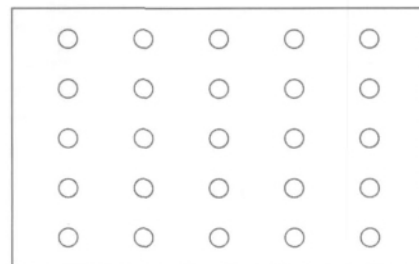


图 4 漫反射屏单点探测器分布图

Fig.4 Array of single point detector in the screen

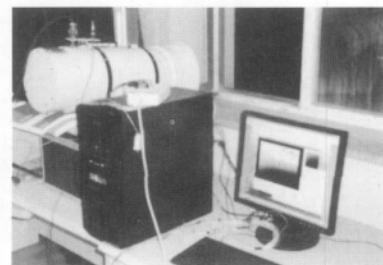


图 5 中波红外成像系统

Fig.5 Photo of mid-infrared imaging system

### 4 结果与讨论

按照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 中波激光器参数

Tab.1 Mid-infrared laser parameters

Parameters	Value
Wavelength	3.9 $\mu\text{m}$
$D_0$	4 mm
Power(max)	-
Repetition rate	-
Pulse width	-
Divergence	-
Degree of stability	10%

远场红外成像系统记录的光斑图像如图 6 所示,可知光斑为圆形分布,根据距离和光斑 86.5% 环围直径可知远场光斑实测发散角为 10 mrad,此值小于近场通过刀口法测量的结果,主要原因是激光通过大气会产生一定的热透镜效应,同时所采用的数值图像处理算法也会引入一定的误差所致。

图 7(a)给出了高斯光束通过圆孔衍射的远场光斑强度分布图,图 7(b)给出了单点探测器阵列测量并经过插值的远场光斑能量密度分布图。理论和实测的结果表明,光斑远场强度分布为近高斯分布,同时从图 7(b)中计算光斑的平均能量密度为 14.2  $\text{nJ}/\text{cm}^2$ ,实测光斑的能量密度分布和理论仿真结果的差异主要来自于大气环境的影响,通过公式(4)可推知此时的平均能量密度为 18.5  $\text{nJ}/\text{cm}^2$ ,比实测的结果大 1.3 倍,这种差异的主要原因是理论估算没有考虑大气湍流的影响,同时激光器本身有 10% 的能量随机波动。

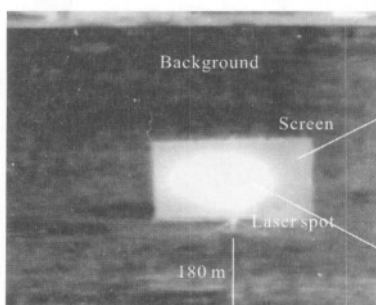


图 6 远场中红外激光器光斑

Fig.6 Far-field mid-infrared laser spot

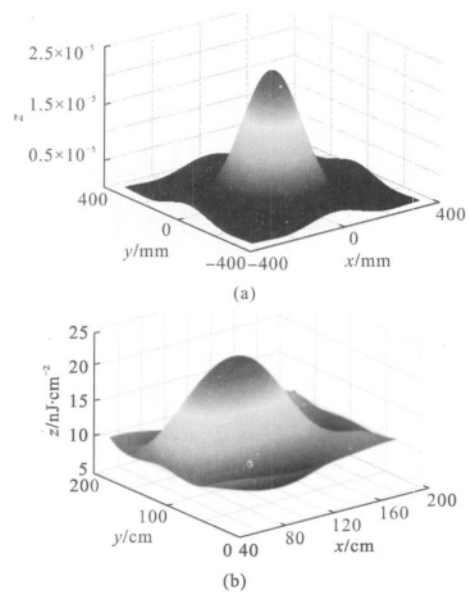


图 7 远场光强分布

Fig.8 Far-field optical intensity distribution

上述的近场和远场中波红外激光器的测量结果可以应用于实际的远距离干扰实验中,采用此激光器和中波红外成像系统,在远距离上直接照射所记录的干扰光斑图像如图 8 所示。根据公式(4)和图 3 大气透过率参数,以 10 mrad 的发散角计算,可知此时理论估算的平均能量密度为 0.5  $\text{nJ}/\text{cm}^2$ ,按照前述的 1.3 倍的差异估算,中红外激光器在有效的作用距离上,对于中波红外成像系统的干扰阈值在  $\text{nJ}/\text{cm}^2$  的量级上。对于高重频脉冲激光(>1kHz),对应的干扰阈值在功率密度计上为  $\text{mW}/\text{cm}^2$  量级。

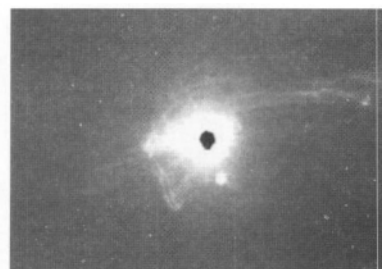


图 8 中波红外激光器在远距离的干扰图像

Fig.8 Long range disturbing image of mid-infrared laser

## 5 结论

文中对一种 OPO 体制的固体中波红外激光器进行了近场和远场测量,测量结果表明这种中波红外

(下转第 78 页)

- 王卫京, 李华军, 刘文军, 等. 用频率分辨光学开关法测量飞秒激光脉冲[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 12-16.
- [4] Jiang Zhonghai, Xin Li, Fang Guangyu, et al. Mechanism of distortion in autocorrelation of fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 125-128. (in Chinese)
- 姜忠海, 辛丽, 方光宇, 等. 飞秒光纤激光自相关谱畸变产生机理的研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 125-128.
- [5] Sutter D H, Steinmeyer G, Gallmann L, et al. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(9): 631-633.
- [6] Chen Bifang, Liu Tianfu. Chirp characteristics of modified spectrum autointerferometric correlation for femtosecond pulse [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6): 587-589. (in Chinese)
- 陈碧芳, 刘天夫. 飞秒脉冲干涉自相关修正光谱的啁啾特性[J]. 激光技术, 2007, 31(6): 587-589.
- [7] Liu T F, Hu G L. Study of the time standards and calibrating methods of ultrashort laser pulses detection [C]// SPIE, 2002, 4231: 608-612.
- [8] Chen Bifang, Liu Tianfu. Numerical simulation of femtosecond pulses measurement with SPIDER [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1): 13-15. (in Chinese)
- [9] Liu Tianfu, She Weilong, Qiu Zhiren, et al. Calibration method for the measurement of ultrashort-pulsed lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(1): 111-114. (in Chinese)
- 刘天夫, 余卫龙, 丘志仁, 等. 超短脉冲激光测量的标定方法[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 111-114.
- [10] Liu Tianfu, Wen Ruhong, Chen Bifang. Method for measuring the chirp of femtosecond laser pulse [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(1): 1-4. (in Chinese)
- 刘天夫, 文汝红, 陈碧芳. 测量飞秒激光脉冲啁啾的方法[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(1): 1-4.

(上接第 52 页)

激光器非常适合用于远距离大气传输, 并且具有高功率、高重频、窄脉宽等特点, 实现了对于远距离中红外成像系统干扰阈值的估算, 结果表明远场中红外激光功率密度达到  $\text{mW}/\text{cm}^2$  量级时就能起到较好的干扰效果。以往由于探测器灵敏度及外场气象条件, 根本无法在远距离 ( $>1\text{km}$ ) 得到准确的测量数值。因此, 文中工作对于中红外激光器的远近场参数测量及激光定向干扰系统设计都具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] Guo Ruhai, Li Dianjun. Experiments of second harmonic generation output in pulsed TEA  $\text{CO}_2$  laser [C]//SPIE, 2010, 7843: 78430E-1-78430E-5.
- [2] Tittel F K, Dirk R, Alan F. Mid-infrared laser applications in spectroscopy [J]. *Topics Appl Phys*, 2003, 89: 445-516.
- [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): 30-35.
- [4] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E. High-pulse-energy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in  $\text{ZnGeP}_2$  [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14263-14273.
- [5] Jiang Hailin, Bian Jintian, Nie Jinsong, et al. Theoretical investigation on a method generating  $4.3 \mu\text{m}$  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  $4.3 \mu\text{m}$  激光方案 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 210-219.
- [6] David H T. A consideration of the requirements for laser devices used in countermeasure applications [C]// SPIE, 2007, 6451: 64511Q-1-64511Q-14.
- [7] Zhang Yonggang, Gu Yi, Li Yaoyao et al. Mid-infrared semiconductor light sources, detectors and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (10): 1846-1850. (in Chinese)
- 张永刚, 顾溢, 李耀耀, 等. 中红外半导体光源和探测器件及其应用 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1846-1850.
- [8] Zhang Mingping, Zhang Jingxian, Li Yudan. Night Vision System [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993: 152-234. (in Chinese)
- 张鸣平, 张敬贤, 李玉丹. 夜视系统 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 152-234.
- [9] Zhou Jianmin, Yin Hongyan, Guo Jin. Research on evaluation method of remote fluence distribution of laser irradiation [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, 21(6): 62-64. (in Chinese)
- 周建民, 尹洪妍, 郭劲. 激光辐照远场能流分布估算方法研究 [J]. 光电技术应用, 2006, 21(6): 62-64.