

用于探测器中红外绝对光谱响应度测量的激光源

赵 坤¹, 史学舜^{1,2}, 刘长明¹, 刘玉龙¹, 陈海东¹, 刘红博¹, 陈坤峰¹, 李立功^{1,2}

- (1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;
2. 电子测试技术国防科技重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 为了实现中红外探测器绝对光谱响应度高准确度的测量, 从理论和实验上研究了中红外波段激光的功率稳定性的提高和光束质量的优化方法。采用声光调制和反馈控制的方法, 把中红外激光的功率稳定性提高到 0.1% 以内; 根据高斯光束传输理论计算了所需空间滤波器的各项参数, 设计中红外空间滤波器, 搭建了相应的实验装置, 显著提高了中红外激光光束质量。为中红外绝对光谱响应度的高精度测量提供了一个可靠的中红外波段激光光源。

关键词: 中红外; 绝对光谱响应度; 光束质量; 功率稳定性

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0705005

Laser source used in accurate measurement of mid-infrared absolute spectral responsivity of detectors

Zhao Kun¹, Shi Xueshun^{1,2}, Liu Changming¹, Liu Yulong¹, Chen Haidong¹, Liu Hongbo¹,
Chen Kunfeng¹, Li Ligong^{1,2}

- (1. The 41st Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China;
2. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

Abstract: In order to measure the absolute spectral responsivity of mid-infrared detectors with high accuracy, the improvement of power stability and beam quality of mid-infrared laser was theoretically and experimentally demonstrated. The power stability of mid-infrared laser was improved to be better than 0.1% by using acousto-optic modulator and feedback-control electronics. Based on propagation properties of Gaussian beam, the parameters were calculated and experimental setup of spatial filter was constructed. Owing to the spatial filter, the beam quality of mid-infrared laser was improved. A stable and reliable laser source is provided for the measurement of absolute spectral responsivity of mid-infrared detectors.

Key words: mid-infrared; absolute spectral responsivity; beam quality; power stability

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(863 计划); 空间辐射测量基准源研制基金(2015AA123702); 国防技术基础项目(J3120BA001)

作者简介: 赵坤(1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事光学辐射测量方向的研究。Email: kunzhao41@163.com

0 引言

中红外波段是介于可见、近红外光与太赫兹波之间的一定范围内的电磁辐射区域,波长范围为 3~5 μm 。中红外波段是一个特殊的电磁辐射波段,主要体现在以下两个方面。首先,中红外波段恰好对应着地球大气层的第二“窗口”,大气对光辐射普遍具有很强的吸收作用,但仅仅“大气窗口”波段内的红外光辐射吸收较小。另外,中红外波段对应着多数分子的振、转能级及特征指纹谱。因此,中红外波段光辐射在激光制导、红外遥感等国防军事领域^[1]以及高次谐波产生、化学分析、医学诊断和环境监测等科研生产领域^[2-3]都具有广泛的应用。

中红外波段光辐射在以上各个领域的应用过程中,都需要对中红外光辐射进行探测和分析。目前,适用于中红外波段的光电探测器主要包括 HgCdTe、PbSe、InSb 等光电型探测器以及热电堆、热释电等热探测器。对这些中红外探测器的主要性能参数进行准确测量,是探测器能够正常使用的前提。其中,探测器的绝对光谱响应度是指光入射到探测器光敏面,探测器的响应电压与入射的光功率的比值。绝对光谱响应度是衡量探测器光电转换能力最重要的参数,对探测器的绝对光谱响应度参数进行准确测量显得尤为重要。

为实现探测器绝对光谱响应度测量,需要对响应电压和入射光功率分别进行测量。电压属于电学量,目前对电压的测量可以达到很高的精度;对于光功率的测量,目前国际上公认的光功率计量基准为低温辐射计,低温辐射计采用低温、真空和超导技术,可以将光功率测量完全等效为电功率测量。英国的国家物理实验室(NPL)、美国的标准技术研究院(NIST)和德国的物理技术研究院(PTB)等国外先进计量机构以及中国计量科学院、国防光电子一级计量站等国内计量研究机构都相继在不同波段开展了基于低温辐射计的探测器绝对光谱响应度测量研究^[4-9]。最初,基于低温辐射计的探测器绝对光谱响应度测量研究主要针对可见光波段。目前,可见光波段绝对光谱响应度测量的研究也最成熟,测量不确定度可以达到 0.01%。近年来,随着紫外波段、近红外波段激光光源的发展,国内外也相继开展了这些

波段探测器绝对光谱响应度的测量的研究。为继续拓展红外波段的测量研究,美国 NIST 和英国 NPL 都利用 CO₂ 气体激光器作为光源,在 9~11 μm 波段范围内对长波红外探测器的绝对光谱响应度进行了测量,测量不确定度可以达到 0.25%。但是,对于 3~5 μm 中红外波段,由于缺乏合适的中红外激光光源,因此国际上普遍采用电弧灯和单色仪作为光源配合低温辐射计对探测器绝对光谱响应度进行测量,受限于单色仪光源功率较低、线宽较宽以及输出光波长不稳定等诸多缺点,测量不确定度范围仅为 1.1%~6.2%,与其他波段的绝对光谱响应度的测量准确度存在较大差距。

近年来,中红外波段光参量振荡激光器的快速发展为这一难题提供了解决途径^[10-12]。使用常见的 1 μm 波段激光作为泵浦激光,设计非线性晶体和光参量振荡腔,可以得到可调谐中红外激光。文中利用中红外光参量振荡激光器作为光源,利用声光调制和反馈控制的方法提高激光功率的稳定性,设计了光学空间滤波器优化激光的光束质量,为中红外探测器绝对光谱响应度的高准确度测量提供了一个光功率稳定、光束质量高的激光光源。

1 实验原理分析

1.1 绝对光谱响应度测量原理

中红外探测器绝对光谱响应度是指探测器的响应电压与入射的光功率的比值,即为:

$$R=V/P \quad (1)$$

式中: R 为探测器绝对光谱响应度; V 为探测器响应电压; P 为入射到探测器上的光功率。因此,只要准确测量探测器的响应电压 V 和入射光功率 P , 就可以计算出探测器的绝对光谱响应度 R 。

在中红外探测器绝对光谱响应度的测量过程中,如图 1 所示,首先将中红外波段激光入射到待测的中红外探测器光敏面,测量出探测器的响应电压。然后,将中红外探测器移出光路,用低温辐射计精确测量中红外波段激光的光功率。探测器响应电压和光功率测量完成后,利用公式(1)就可以计算出中红外探测器的绝对光谱响应度。由于是比较测量,所以激光功率在这段测量时间内的稳定性是探测器绝对光谱响应度测量是否准确的关键。在这种高准

准确度测量应用场合,中红外激光光功率的稳定性至少需要达到 0.1%,而商品化的激光器输出功率稳定性一般在 5%以内。另外,利用低温辐射计精确测量光功率,要求激光有较高的光束质量。这也是文中开展的核心工作。

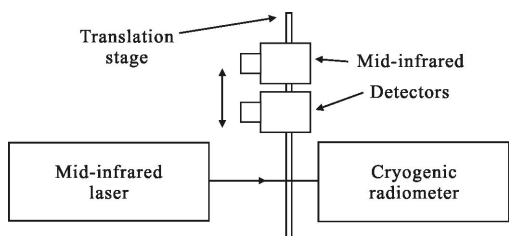


图 1 绝对光谱响应度测量原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the measurement of absolute spectral responsivity

1.2 中红外激光功率稳定及光束质量优化设计分析

目前,中红外光参量振荡激光器输出激光波长可调谐范围大、光束质量好,是一种性能优异的中红外激光源。实验中使用的参量振荡激光器输出激光的功率稳定性为 5%,不能满足测量要求。因此,需要另外采取措施提高中红外激光功率的稳定性。如图 2 所示,利用声光晶体和反馈控制电路提高激光

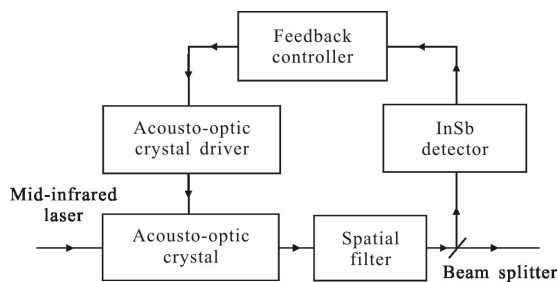


图 2 中红外激光光功率稳定装置原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the power-stability system of mid-infrared laser

功率的稳定性^[13-14]。中红外激光入射进声光晶体发生衍射,通过调节激光入射角度,可以使二级以上的高级衍射光干涉相消,只剩零级光和一级衍射光从声光晶体中出射。在声光晶体后放置光阑孔隔离一级衍射光,只取零级光通过空间滤波器。激光经过空间滤波器滤波后,被分光片分为两路,其中一路光透过分光片用作光功率测量,另外一路光经分光片反射用做反馈控制。经分光片反射的激光被 InSb 探测

器检测后转换为相应的电压信号,由反馈控制器对电压信号进行分析运算,然后输出电压信号控制声光调制器驱动信号的大小,声光调制器的驱动信号可以控制零级衍射光功率在总功率中所占比例,这样就形成一个反馈控制回路,通过反馈控制的方式提高中红外激光功率的稳定性。

另外,对中红外激光进行空间滤波是进一步优化激光的光束质量的有效手段。如图 3 所示,空间滤波器是由一对共焦正透镜和在公共焦点处的一个滤波针孔组成。空间滤波器的前置透镜对光束进行傅里叶变换,空间频率越高的成分距离焦斑中心越远,位于焦斑处的针孔就能够拦截掉高频成分,光束经

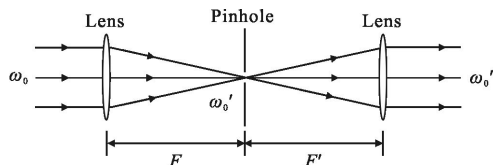


图 3 中红外激光光束空间滤波原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the mid-infrared laser spatial filter

过后置透镜进行傅里叶逆变换就实现了低通滤波。因此,空间滤波器可以滤除激光傅里叶频谱中的高频分量和隔离杂散光,有效地改善激光的光束质量。另外,通过合理搭配前置透镜、后置透镜的焦距,空间滤波器还可以起到改变激光的光束直径的作用。实验中,前置透镜距离激光器较远,满足 $l \gg F$,其中 l 为激光器出射激光的光束束腰位置与前置透镜位置之间的距离, F 为前置透镜焦距。在满足 $l \gg F$ 的情况下,前置透镜可以实现对激光的优良聚焦,聚焦之后高斯光束的束腰半径为:

$$\omega_0' = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} F \quad (2)$$

式中: ω_0' 为透镜聚焦之后的光束束腰半径; λ 为中红外激光的波长; ω_0 为透镜聚焦之前的光束束腰半径; F 为透镜焦距。因此,在前置聚焦透镜的焦距 F 选定之后,可以根据公式(2)计算出前置透镜聚焦后的高斯光束束腰半径的大小。在计算出聚焦之后的光束束腰半径之后,就可以计算出所需要的针孔的直径大小。空间滤波器的针孔直径既不能太大,要起到滤除激光傅里叶高频分量和杂散光的作用;同时针孔直径又不能太小,对激光功率产生太大的损耗。如图 2 所示,束腰半径为 ω_0' 的高斯光束透过针孔后,光功

率的透过率公式为:

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega_0'^2}\right) \quad (3)$$

式中: η 为光功率的透过率; P 为透过针孔之后的光功率; P_0 为针孔之前的光功率; a 为针孔的半径。为了保证滤除杂散光, 一般让 90% 以上的激光功率通过针孔, 这样可以根据公式(3)计算出所需针孔的大小 a 。为了使调节光路简单, 一般适当增大针孔的直径, 采用针孔直径为公式(3)计算值的 2 倍左右。激光经过后置透镜后, 高斯光束的束腰半径 ω_0'' 与入射到空间滤波器的高斯光束的束腰半径 ω_0 满足关系:

$$\frac{\omega_0''}{\omega_0} = \frac{F'}{F} \quad (4)$$

式中: F' 为后置透镜的焦距。根据公式(4), 由激光器输出激光的束腰半径 ω_0 与最终需要的高斯光束的束腰半径 ω_0'' , 可以选择后置透镜的焦距大小。至此, 可以根据实验具体条件, 计算出中红外激光空间滤波器的透镜焦距、针孔直径等各项结构参数。

2 实验装置介绍

为了实现利用低温辐射计对中红外波段探测器绝对光谱响应度的准确测量, 需要搭建实验装置提高中红外激光功率稳定性并且优化中红外激光的光束质量。具体实验装置如图 4 所示, 中红外激光光源为一台输出连续光的中红外波段可调谐光参量振荡激光器(OS 4500 DC+, Qioptiq Photonics)。光参量振荡器内的泵浦激光波长为 1 064 nm, 最大输出功率为 8 W, 远高于光参量振荡器的振荡阈值, 可以保证光参量振荡器输出激光波长及功率的稳定。非线性晶体为特殊设计的 PPLN 晶体, 一块晶体由 18 个不同部分组成, 每个部分的极化周期均不同。通过将晶体的不同部分移入光路, 可以改变输出激光的波长。在使用每个不同极化周期时, 晶体温度均可以在 50~170 °C 之间连续调节, 通过调节晶体的温度实现输出激光波长的连续调节。光参量振荡激光器输出的信号光波长可调谐范围为 1.38~2 μm , 输出闲频光波长可调谐范围为 2.28~4.67 μm 。另外, 光参量振荡器腔内安装了一个标准具, 通过改变标准具的温度, 可以实现输出激光波长以最小调节步长 0.01 nm 来进行调谐。该激光光源的波长可调谐范围大, 输出激光的波长和功率稳定, 适合作为中红外探测器绝对

光谱响应度测量的激光光源。

为了测量探测器在 3.39 μm 波长点的绝对光谱响应度, 使用红外波长计, 将激光器的输出激光波长精确调节到 3.39 μm 。激光器在 3.39 μm 波长点的输出激光功率为 80 mW。金镜 M1、M2 组成爬高镜, 通过使用爬高镜将激光器输出激光的高度调整到与低温辐射计高度一致。激光器输出激光为高斯光束, 光斑直径为 ~5.5 mm。实验中利用两个 CaF₂ 透镜的组合 f1、f2 来对激光进行缩束处理, 其中 f1、f2 的焦距分别为 200 mm 和 -75 mm, 可以对激光光斑进行 ~2.7 倍的缩束, 缩束后激光光斑直径为 ~2 mm。中红外激光器中的光参量振荡晶体在泵浦激光的作用下, 除了发生光参量振荡过程外, 还会发生其他复杂的非线性过程, 因此输出激光中存在可见光波段、近红外波段的杂散光。光路中使用中心波长 3.39 μm 、带宽 180 nm 的带通滤波片 BP 来滤除杂散光。另外, 光路中的双色片 DM 对可见光高反、对中红外波段激光高透, 也可以起到滤除杂散光的作用。

实验中使用声光晶体和反馈控制电路来提高中红外激光的稳定性。激光进入声光调制器 AOM 前, 首先通过一个中红外偏振片 P, 保证激光的偏振方向为 p 偏振。激光进入声光调制器 AOM 发生衍射, 声光调制器最高工作频率可达 40 MHz, 工作波段范围为 2.5~4.5 μm , 在该波段范围内衍射效率均在 85% 以上。调节声光调制器 AOM 的角度使高级衍射光干涉相消, 只保留零级光和一级衍射光。光阑孔 AP1 放置在声光调制器 AOM 之后 20 cm 处, 挡住一级衍射光, 只让零级衍射光通过。然后, 激光通过由聚焦透镜 f3、针孔 PH 和准直透镜 f4 组成的空间滤波器。其中, 根据具体实验条件, 聚焦透镜 f3 的焦距选为 75 mm。由公式(2)可以计算出聚焦后激光的束腰半径为 ~80 μm 。根据公式(3), 为了保证让 90% 以上的激光功率通过针孔, 可以计算出需要的针孔直径为 ~40 μm 。为了使调节光路简单, 一般应适当增大针孔的直径为公式(3)计算值的 2 倍左右。因此, 实验中选择直径为 100 μm 的针孔用于空间滤波器中。从空间滤波器中出射的激光光束束腰半径与入射进空间滤波器的激光光束束腰半径 1 mm 保持一致即可, 因此由公式(4)可知, 后置透镜的焦距应选为 75 mm。然后, 使用光阑孔 AP2 挡住激光通过针孔 PH 产生的高级衍射环。空间滤波器可以有效地改善

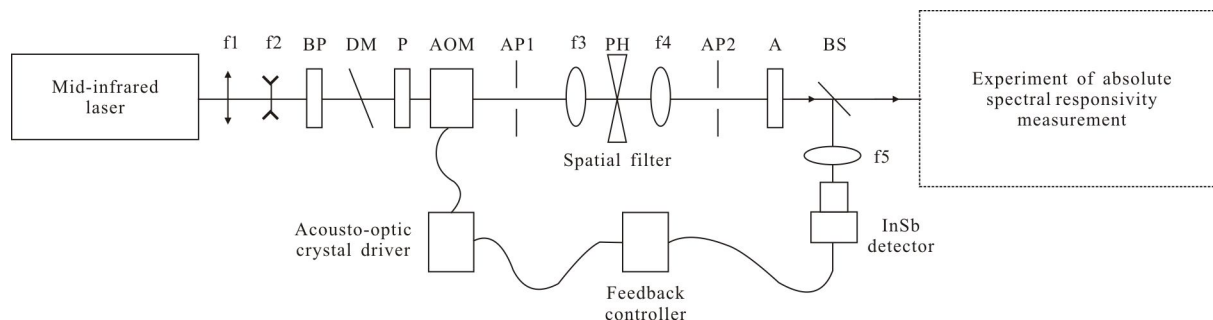


图 4 中红外激光功率稳定与光束质量优化实验装置图

Fig.4 Schematic layout of the system improving the power stability and beam quality of mid-infrared laser

系统的光束质量，中红外激光通过空间滤波器后功率只有 30 mW。使用光学衰减片 A, 提供大约 50 倍的衰减倍数, 将激光功率降为~600 μW。然后, 激光通过分光片 BS 进行分光, 反射光功率与透射光功率的比例分别为 55% 与 45%。反射激光进入反馈光路, 经焦距为 25 mm 的聚焦透镜 f5 聚焦到 InSb 探测器的光敏面, 由 InSb 探测器转换为相应的电流信号, 经过微电流放大器将此电流信号转换为可用的电压信号, 此电压信号被反馈控制器采集。反馈控制系统工作前的设置过程中可以人为设定系统输出功率, 将反馈控制器采集的电压信号与之前的设定电压信号比较得到偏差信号, 利用比例积分微分算法(PID 算法) 对该偏差信号进行处理得到实时的声光调制器驱动控制电压信号, 声光调制器根据此驱动控制电压信号实时调制零级衍射光在总功率中所占的比例, 从而抑制通过声光调制器之后的零级衍射光功率的波动, 最终实现提高输出光功率稳定性的目标。透过分光片 BS 的激光, 被用于探测器绝对光谱响应度测量实验。实验中, 传递标准探测器选用薄膜热电堆探测器 TS-76, 传递标准探测器通过电动平移导轨移入、移出光路。首先, 传递标准探测器移入光路, 测量探测器响应电压; 然后, 传递标准探测器移出光路, 利用低温辐射计测量光功率, 从而实现探测器绝对光谱响应度的测量。在实验测量期间, 中红外激光功率的稳定性对测量精度的影响至关重要。

3 实验结果与讨论

以上实验装置中采取声光晶体结合反馈控制电路提高激光功率的稳定性, 为了检测该方法对激光功率的稳定效果, 进行了激光功率稳定性测试实验。

实验采用液氮制冷的 InSb 光电二极管探测器检测中红外激光功率大小。将 InSb 光电探测器置于分光片 BS 之后, 使用焦距为 25 mm 的 CaF₂ 透镜将激光聚焦到 InSb 光电探测器的光敏面。InSb 光电探测器的输出电压经放大器放大, 输入到数字电压表进行观察。实验中对激光功率稳定性进行了 5 组测试, 每次测试持续时间为 15 min, 数字电压表每间隔 1 s 进行一次电压数值记录。表 1 中记录了测试结果, 包括每次测试时间内 InSb 光电探测器的输出电压的最大值、最小值、平均值以及 15 min 内所有记录的电压值的标准偏差。表 1 中稳定性为每次测试时间内标准偏差与平均值的比值。从表 1 中可以看出, 激光功率的稳定性测试结果均优于 0.05%。相对于激光器输出激光功率稳定性只有 5%, 实验装置中的中红外功率稳定系统的效果非常明显。

表 1 中红外激光功率稳定性测试实验结果

Tab.1 Experimental results of mid-infrared laser power stability

	1	2	3	4	5
Maximum/mV	3 220	3 220	3 217	3 218	3 142
Minimum/mV	3 213	3 214	3 214	3 214	3 134
Mean/mV	3 216	3 217	3 216	3 217	3 138
Average deviation/mV	1.41	1.41	0.633	0.784	1.70
Stability	0.04%	0.04%	0.02%	0.02%	0.05%

另外, 实验中进行了持续 1 h 的长时间激光稳定性测试。使用液氮制冷的 InSb 光电二极管探测器对激光功率进行采样, 每间隔 1 s 进行一次采样。未经

声光调制器和反馈控制系统调节的激光功率的稳定性如图 5(a)所示,激光功率呈现缓慢、无规则漂移,功率稳定性较差,波动已经超过 $\pm 1.5\%$ 。经声光调制器和反馈控制系统调节的激光功率的稳定性如图 5(b)所示,中红外激光功率的波动可以控制在 $\pm 0.1\%$ 以内。根据图 4 中两图的对比,可以看出声光调制器和反馈控制系统的功率稳定效果非常明显。当然,探测器绝对光谱响应度测量过程不会持续 1 h,因此具体实验过程的较短时间内的功率稳定性水平要优于 0.1%。

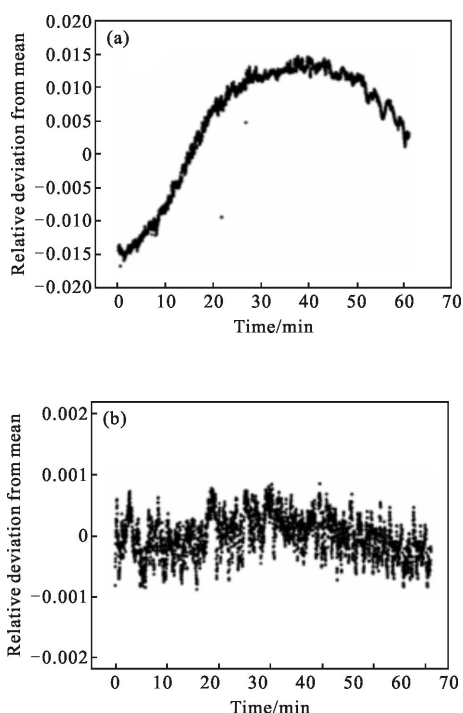


图 5 经过稳功率系统前(a)、后(b)的激光功率稳定性
Fig.5 Laser power stability before(a) and after(b) turning on the power-stability system

为了检测实验装置中空间滤波器对光束质量的优化效果,使用中红外波段光斑轮廓分析仪分别对空间滤波器前与空间滤波器后的光斑形状进行测量,测量结果如图 6 所示。图 6(a)为激光在空间滤波器前的光斑形状,激光光斑为椭圆且分布不均匀,边缘存在杂散光。实验中,根据激光器输出激光光束等实验条件计算出空间滤波器各项参数,经过空间滤波器滤波后,激光光斑形状如图 6(b)所示,激光光斑为平整、均匀的圆形,激光光斑的空间分布为平滑的高斯型,光斑边缘的杂散光已滤除。激光光束质量的优化完成后,才可以达到绝对光谱响应度测量实验要求。

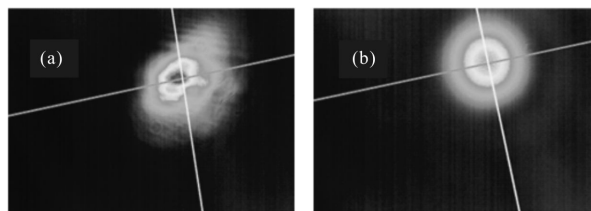


图 6 空间滤波器前(a)、后(b)的光斑形状
Fig.6 Mid-infrared laser spot in front of the spatial filter (a) and behind the spatial filter(b)

4 结 论

文中围绕从理论和实验上优化中红外激光光源的输出特性开展了研究工作。研究了声光调制器的衍射特性,计算了空间滤波器的各项参数,搭建了相应的实验装置。实验中,中红外激光在 15 min 的测试时间段内的功率稳定性可以提高到 0.05%以上,1 h 时间段内的长时间稳定性也可以达到 0.1%以上;另外,中红外激光通过空间滤波器后,光束质量得到明显优化。该研究工作中中红外波段光电探测器绝对光谱响应度的测量提供了一个可靠的激光光源。在此中红外激光光源的基础上,通过使用低温辐射计对光功率进行绝对测量,可以在中红外波段建立绝对光谱响应度测量装置,实现中红外探测器绝对光谱响应度的高准确度测量。

参考文献:

[1] Fan Jinxiang, Li Liang, Li Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 789–794. (in Chinese)
范晋祥, 李亮, 李文军. 定向红外对抗系统与技术的发展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 789–794.

[2] Xu Hanlie, Hu Xiuqing, Xu Na, et al. Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1874–1879. (in Chinese)
徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 1874–1879.

[3] Liu Jianguo, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Detection of formaldehyde using mid-infrared difference-frequency-based tunable absorption spectrometer at room temperature [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35 (S): 211–215. (in Chinese)

- Chinese)
- 刘建国, 刘文清, 张玉钧, 等. 差频中红外激光光谱技术探测大气甲醛污染研究[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 211-215.
- [4] Hoyt C, Foukal P. Cryogenic radiometers and their application to the metrology[J]. *Metrologia*, 1991, 28(3): 163-167.
- [5] Xueshun S, Kunfeng C, Hongyuan L, et al. Experimental study on absolute spectral responsivity value transfer with cryogenic radiometer[C]//SPIE, 2009, 7511: 75111A-1-6.
- [6] Shi Xueshun, Chen Kunfeng, Wang Hengfei, et al. Experimental studies on Si trap detector absolute spectral responsivity calibration [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(5): 63-65. (in Chinese)
- 史学舜, 陈坤峰, 王恒飞, 等. 硅陷阱探测器绝对光谱响应率校准实验研究[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(5): 63-65.
- [7] Shi Xueshun, Liu Changming, Liu Yulong, et al. Absolute spectral responsivity of silicon trap detector based on absolute cryogenic radiometer [C]//the International Conference on Photonics and Optical Engineering, Proc.of SPIE, 2014, 9449: 94490U-1-94490U-6.
- [8] Liu Changming, Shi Xueshun, Liu Yulong, et al. Determination of absolute spectral response and quantum efficiency of Si trap detector in band of 325-980 nm[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(4): 667-670. (in Chinese)
- 刘长明, 史学舜, 刘玉龙, 等. 硅陷阱探测器在 325-980 nm 波段的绝对光谱响应率和量子效率测定[J]. 光电子·激光, 2015, 26(4): 667-670.
- [9] Liu Yulong, Liu Changming, Shi Xueshun, et al. Development of the transfer standard of near infrared absolute spectral response [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015, 35(3): 48-54. (in Chinese)
- 刘玉龙, 刘长明, 史学舜, 等. 近红外绝对光谱响应度传递标准的研制[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(3): 48-54.
- [10] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 557-566. (in Chinese)
- 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 557-566.
- [11] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501-512.
- 谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.
- [12] Su Hui, Li Zhiping, Duan Yanmin, et al. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillatro based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1404-1409. (in Chinese)
- 苏辉, 李志平, 段延敏, 等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1404-1409.
- [13] Sun Quanshe, Chen Kunfeng, Shi Xueshun. Mid infrared laser power stabilizer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2127-2131. (in Chinese)
- 孙权社, 陈坤峰, 史学舜. 中红外激光器功率稳定器技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2127-2131.
- [14] Gao Miao, Shao Xiaopeng, Wang Lin, et al. Power stabilization system of medium wave infrared laser based on acousto-optic modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1975-1979. (in Chinese)
- 高苗, 绍晓鹏, 王琳, 等. 基于声光调制的中波红外激光功率稳定系统[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 1975-1979.