

基于长波红外探测器绝对光谱响应度测量的激光源

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

(1. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555;

2. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘 要: 为满足长波红外探测器绝对光谱响应度参数的高准确度测量要求, 提高长波红外激光的功率稳定性, 优化激光光束质量, 研制了一套长波红外激光源。针对 CdTe 晶体的电光效应设计了一套提高长波红外激光功率稳定性的实验系统。利用激光光束传输原理设计了长波红外波段空间滤波器, 并分析了其各项参数的计算方法。实验结果表明: 长波红外激光的光功率不稳定性提升至 0.1% 以上, 长波红外激光的光束质量也得到显著提升, 满足了长波红外探测器绝对光谱响应度高准确度测量对光源的性能要求。

关键词: 长波红外; 绝对光谱响应度; 功率稳定性; 光束质量; 低温辐射计

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1205002

Laser source used for measurement absolute spectral responsivity of long-wave infrared detectors

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

(1. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, 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 long-wave infrared detectors with high accuracy, improve the long-wave infrared laser power stability and beam quality, a set of long-wave infrared laser source was developed. In this laser source, a feedback-control system, based on the electro-optics effect of CdTe crystal, was designed to improve the stability of long-wave infrared laser power and a long-wave infrared spatial filter, based on the propagation properties of laser beam, was designed to improve the long-wave infrared laser beam quality. The parameters of the spatial filter were also analyzed in this paper. Experimental result shows the laser power stability is elevated to above 0.1% and laser beam quality is improved obviously. The reliable laser source is provided to measure absolute spectral responsivity of long-wave infrared detectors with high-accuracy.

Key words: long-wave infrared; absolute spectral responsivity; power stability; beam quality; cryogenic radiometer

收稿日期: 2017-04-05; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 国防技术基础科研项目(JSJL2014210B014)

作者简介: 陈海东(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光辐射测量方面的研究。Email:haidong4523918@126.com

0 引言

长波红外波段,波长范围覆盖 8~14 μm ,是介于中波红外和太赫兹之间重要的电磁辐射波段。长波红外波段的重要性主要体现在两个方面:(一)星载和机载红外成像系统在进行对地观测时,不同温度的地面目标对应着不同的辐射波长。根据黑体辐射的普朗克公式可知,绝大多数地球表面常温目标物体的辐射波长恰好处于长波红外波段;(二)长波红外波段对应着地球的“大气窗口”,地球大气层对该波段红外光辐射吸收较小。而且,相对于短波和中波红外光辐射,长波红外光辐射受大气散射的影响也较小,即受大雾、沙尘暴等恶劣天气环境的影响较小。因此,长波红外光辐射在气象学、资源探测、环境污染检测、光学成像、侦查预警、精确武器制导等科研生产和国防军事领域都具有重要应用^[1-8]。

长波红外光辐射在以上各个领域的应用,都需要对长波红外光辐射进行探测和分析。目前,适用于长波红外波段的探测器主要包括 HgCdTe 等光电型探测器及热释电、热电堆等热探测器。对长波红外探测器的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指的是光入射到探测器光敏面,探测器响应电压与入射光功率的比值。绝对光谱响应度是表征探测器光电转换能力最重要的参数,因此,对于探测器的绝对光谱响应度的准确测量成为探测器应用的关键。

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标准为低温辐射计。低温辐射计采用低温、真空、超导等技术,利用电替代测量原理,将光功率测量等效为电功率测量,大大提升了光功率测量精度。为了实现长波红外探测器绝对光谱响应度的准确测量,国际上先进的计量研究机构通常将光功率测量溯源至低温辐射计。英国的国家物理实验室(NPL)和美国的国家标准技术研究院(NIST)等国外计量机构均利用低温辐射计在长波红外波段范围建立了绝对光谱响应度计量装置,其中,NPL 在 9.2~10.8 μm 波段内对其 HgCdTe 探测器进行测量,测量不确定度可以达到

0.25%^[9];NIST 在 10.6 μm 波长点对其热释电探测器进行测量,测量不确定度达到 1%^[10]。

国内,中国科学院上海技术物理研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所等单位在 HgCdTe 等合金材料研究领域取得系统性成果,促进了 HgCdTe 等长波红外探测器的发展,并且将其成功应用于国内的国防军事、航天和国民生产科研领域^[11-12]。但目前国内还没有建立基于低温辐射计的长波红外光电探测器绝对光谱响应度高准确度测量装置,主要原因是缺少光功率稳定、光束质量高的激光光源。在利用低温辐射计进行光功率测量时,激光功率在测量周期内的稳定性是光功率测量是否准确的关键。在这种高准确度测量应用场合,长波红外激光在 1 h 内的光功率不稳定性至少需要达到 0.2%,而商品化的激光器光功率不稳定性一般只有 5%。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。文中利用波长可调谐的 CO₂ 气体激光器作为初始激光光源,基于 CdTe 电光调制器搭建了提高激光功率稳定性的反馈控制系统,根据高斯光束理论设计了优化激光光束质量的光学空间滤波器,为基于低温辐射计的长波红外光电探测器绝对光谱响应度高准确度测量提供了性能可靠的激光光源。

1 原理分析

1.1 CdTe 晶体电光效应

CdTe 晶体是一种很好的红外透光材料,在 10.6 μm 波长点处的吸收系数仅为 0.001 5,并且其电光张量大,调制频率高,可获得较大功率的调制功率输出,是一种理想的电光调制晶体材料^[13]。

如图 1 所示,当外加横向电场时,CdTe 晶体的折射率椭球发生旋转,入射偏振光分解为两束方向垂直且有一相位差的偏振光。晶体作 AM 切割可以获得最大相位延迟。取 110 面作为加电场电极面,

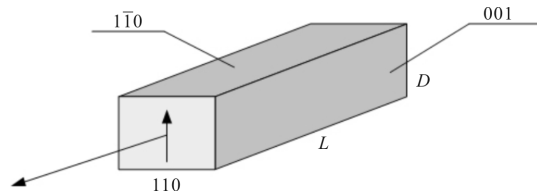


图 1 CdTe 晶体

Fig.1 CdTe crystal

垂直于光入射方向取作 110 面，在第三面 001 方向上的折射率变化为：

$$n_x' = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \quad (1)$$

$$n_y' = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{41} E \quad (2)$$

式中： n_0 为寻常光的折射率； E 为 Z 方向的电场。两个正交分量之间的折射率差为：

$$\Delta n = n_0^3 \gamma_{41} E \quad (3)$$

当晶体长度为 L 时，施加的电压 $V = E \cdot L$ ，此时激光光束偏转角可表示为：

$$\delta = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta n L = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \cdot n_0^3 \gamma_{41} \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot V \quad (4)$$

CdTe 晶体使用时，其之前与之后分别放置偏振方向互相垂直的起偏器和检偏器，如图 2 所示。激光首先通过起偏器，垂直方向入射电光晶体，当电光晶体无施加电压时，偏振方向不发生偏转，仍为垂直方向，经水平方向检偏器后，无激光辐射输出；当电光晶体横向施加电压 V 时，根据公式(4)可知，激光在电光晶体作用下偏振方向呈现一定角度偏转，此时经检偏器后输出一定功率的激光辐射。根据光辐射功率值与偏振夹角之间的关系，可以反算出需要施加在电光晶体上的电压值 V ，从而实现激光功率的稳定控制。

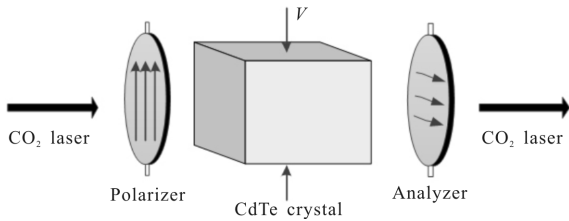


图 2 CdTe 晶体调制器示意图

Fig.2 Schematic diagram of CdTe crystal modulator

1.2 空间滤波器

如图 3 所示，空间滤波器由聚焦透镜、滤波针孔、准直透镜三部分组成，其中聚焦透镜和准直透镜为一对共焦正透镜，滤波针孔放置在其公共焦点处。激光束入射时，空间滤波器的聚焦透镜对光束进行傅里叶变换，频率越高的成分距离焦斑中心越远，位于公共焦点处的针孔就能够有效拦截掉高频成分，之后光束经过准直透镜进行傅里叶逆变换，从而实现

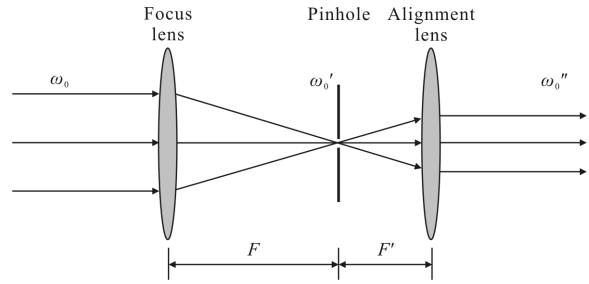


图 3 长波红外激光光束空间滤波原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the long-wave infrared laser beam spatial filter

一般在实际应用中，聚焦透镜距离激光器较远，满足 $l \gg F$ ，其中 l 为激光器出射激光束束腰位置与聚焦透镜之间的距离， F 为聚焦透镜焦距。此时，聚焦透镜聚焦之后高斯光束的束腰半径可表示为：

$$\omega_0' = \frac{\lambda}{\pi \omega_0} F \quad (5)$$

式中： ω_0' 为透镜聚焦之后的光束束腰半径； λ 为长波红外激光的波长； 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(5)计算出聚焦透镜聚焦后的高斯光束束腰半径的大小。

图 3 中，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：

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega_0'^2}\right) \quad (6)$$

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。由此可以根据所需透过率 η 反算出滤波小孔的半径。

激光经过准直透镜后，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：

$$\frac{\omega_0''}{\omega_0} = \frac{F'}{F} \quad (7)$$

式中： F' 为准直透镜的焦距。根据公式(7)，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'' ，可以计算出准直透镜的焦距大小。

2 激光源组成

如图 4 所示，CO₂ 激光器发出激光后，首先进行衰减，之后，通过两面镀金爬高镜，将激光束抬高至与光电探测器相一致的高度，入射倒置望远镜，对激

光进行缩束,以便于入射电光晶体调制器。在入射调制器之前,斩波器对光束进行斩波,斩波器与锁相放

大器配合使用,不但可以精确提取微弱信号,而且能够有效抑制干扰噪声,改善检测信噪比。

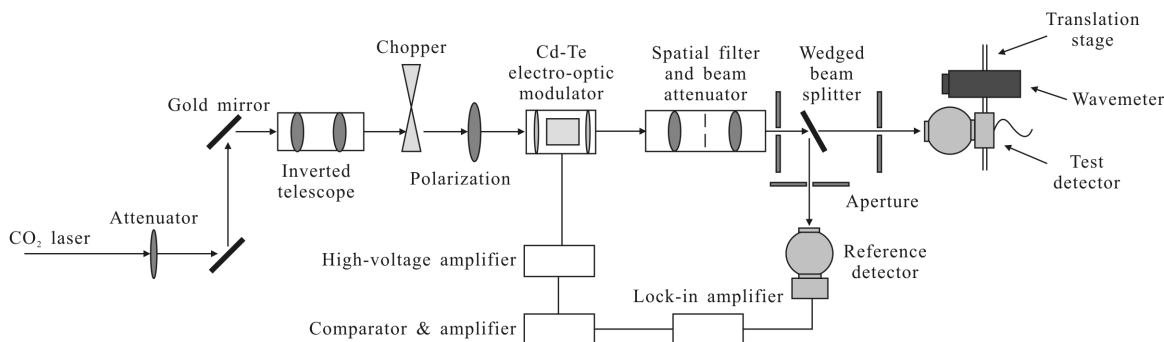


图 4 CO₂ 激光功率稳定与光束质量优化装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of CO₂ laser power stability and beam quality optimization

激光通过斩波器后,经偏振片,入射 CdTe 电光晶体调制器,进入反馈控制环节。根据 2.1 节电光晶体调制器工作原理可知,实验时将起偏器调整为竖直方向,检偏器为水平方向。之后进入空间滤波器,根据公式(4)计算和结合实际光路调整的情况,采用直径为 100 μm 的针孔用于光路中。在滤波器后设置一小孔光阑用以滤除针孔产生的高级衍射环。光束优化后,通过固定比例分光片进行分光,反射光进入反馈光路,小孔光阑滤去杂散光后,入射反馈探测器,反馈探测器产生的交流信号与斩波器的斩波频率值一并输入锁相放大器,锁相放大器进行相敏检波,将交流信号调制为直流信号输出至比较 & 放大器。比较 & 放大器计算并放大后,输出至高压放大器,将该差值信号进一步高压放大,最后施加在电光晶体上,从而完成激光功率的反馈控制。组成激光源的主要设备介绍见下文。

2.1 CO₂ 气体激光器

实验采用波长可调谐的稳频 CO₂ 气体激光器,该激光器可调谐输出 60 线,调谐范围 9.1~10.9 μm,光束直径 4.8 mm,发散角 6.5 mrad,最强线输出功率 10 W。

2.2 电光晶体

电光调制器由两块 5×5×25 的 CdTe 晶体组成,电阻率 3.5 Ω·cm,体电容为 27 pF,采用 AM 切割方式,双面镀增透膜,在典型波长点 10.6 μm 处透过率 99%。

2.3 探测器

实验采用光导型 HgCdTe 探测器,测量范围 2~13 μm,响应率 ≥ 100 V/W,光敏面面积 4.0 mm ×

4.0 mm。为了提高探测器光敏面的均匀性,消除探测器的偏振敏感性,采用探测器与积分球组合的方式进一步提升探测器的测试性能。积分球开两个端口,一端设计夹具与 HgCdTe 探测器相连,另一端直接作为探测器的入射端面。

2.4 比较 & 放大器

比较 & 放大器主要实现两个功能,一是设定基准电压值,该值根据实验所需输出功率的大小和电光晶体偏转角之间的关系,利用公式(4)反算出来,在功率调制前设定基准电压值用以保证调制后的输出功率大小满足测量需求;二是计算锁相放大器输入的反馈信号与基准电压值之间的差值,并对该差值进行放大,使输出值处于高压放大器的合理输入范围。之后该值经高压放大器再次放大后施加在电光晶体两端,实现反馈控制。

比较 & 放大器的工作流程如图 5 所示,上电后

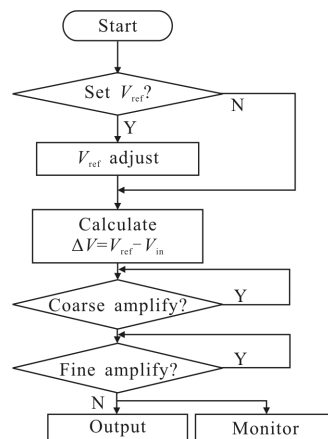


图 5 比较 & 放大器工作流程图

Fig.5 Working flow chart of comparator & amplifier

首先询问是否重新设置基准电压值,若是,则调整值大小;若否,则使用默认的基准电压值。之后,比较 & 放大器接收锁相放大器输入的反馈信号,并计算该信号与设置的之间的差值。接着进入放大环节,按照先粗调放大再精细放大的顺序,将差值电压放大到适于高压放大器后输出。为了便于监测输出电压,比较 & 放大器特意留出一个监测端口,该端口与输出端口信号相同,直接连接示波器便可实时监视输出电压的变化。

另外,比较 & 放大器上设置有放大倍数的粗调和细调旋钮,用以调整比较 & 放大器的输出电压的放大倍数。当入射 CdTe 晶体光功率值变化时,通过调整比较 & 放大器的放大倍数和锁相放大器的敏感因子,可以调节基准电压值改变 CdTe 晶体折射率,从而使得光功率输出值始终满足低温辐射计的测量和光电探测器校准的要求。

3 实验结果及讨论

3.1 激光稳定性

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。设定斩波频率 1 000 Hz,对激光功率稳定性进行了 5 组测试,每组测试持续时间为 15 min,数字电压表每间隔 1 s 进行一次记录。将测量结果见表 1。

表 1 长波红外激光功率稳定性测试实验结果

Tab.1 Experimental results of long-wave infrared laser power stability

Item	1	2	3	4	5
Maximum/mV	819.0	818.0	821.0	819.0	819.0
Minimum/mV	815.0	815.0	815.0	816.0	816.0
Mean/mV	816.4	816.3	816.8	817.1	817.2
Average deviation/mV	0.643	0.604	0.666	0.677	0.727
Non-stability	0.08%	0.08%	0.09%	0.09%	0.09%

针对稳定度,用贝塞耳公式计算测量重复性^[14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \approx 5.5 \times 10^{-5} \quad (9)$$

式中: n 为同一组测量数据中的采样数量; X_i 为同一组测量中的采样值; \bar{X} 为同一组测量采样值的平均值。

表 1 中记录了测试结果,包括每次测试时间内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。从表 1 中可以看出,使用功率稳定系统后,长波红外激光功率不稳定度均优于 0.1%。

继续对激光功率进行超过 1 h 的长时间稳定性测量,每分钟采样 10 次。图 6(a)为不经过稳功率系统的功率测量结果,图 6(b)为经过稳功率系统的功率测量结果。

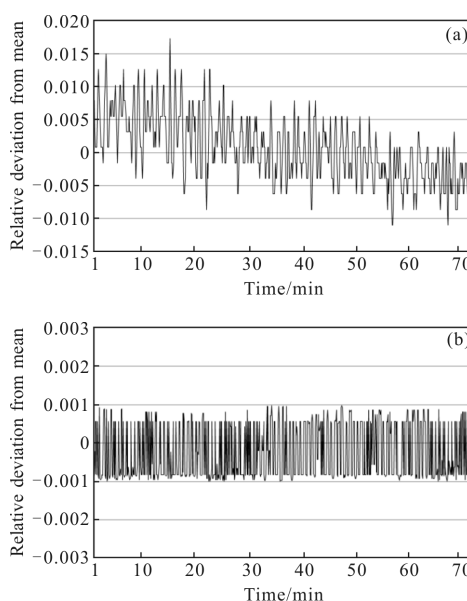


图 6 经过稳功率系统前(a)和稳功率后(b)的功率稳定性

Fig.6 Laser power stability before(a) and after(b) turning on the power-stability system

图 6 中,由图(b)可以看到,在长达 1 h 内,使用稳功率系统的激光功率不稳定度在 0.1% 以内,与图(a)不加稳功率系统的测量结果对比可以看出,稳功率系统的效果十分明显。

3.2 光束质量

为了检测实验装置中空间滤波器对光束质量的优化效果,使用长波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 7 所示。

图 7(a)为激光在空间滤波器前的光斑形状,图 7(b)为激光经过空间滤波器后的光斑形状,可以看到图(a)光斑为不规则几何形状且光斑大,分布不均匀,光斑中心之外较大范围存在杂散光;图(b)光斑为平整、均匀的圆形,激光光斑呈平滑的高斯型分布,光斑直

径为 3 mm,且光斑边缘的杂散光已滤除。另外,采用目前常用的多点法,借助于长波红外波段 CCD 图像采集器和图像采集卡(美国 DataRay Inc 公司,型号 WinCamD-FIR2-16-HR),并利用二次曲线拟合的方法对空间滤波器使用前后的 M^2 因子进行了测量和分析。结果表明,使用空间滤波器前后, M^2 因子分别为 1.46 和 1.08。

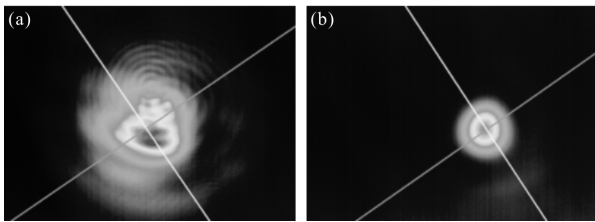


图 7 空间滤波器前(a)与空间滤波器后(b)的光斑形状

Fig.7 Long-wave infrared laser spot in front of the spatial filter (a) and behind the spatial filter (b)

通过以上对比可知,空间滤波器对于激光光束优化效果明显,输出的光束质量满足入射低温辐射计的要求。

4 结 论

文中围绕优化长波红外激光光源的输出特性开展研究工作,分析了利用 CdTe 晶体电光效应提高激光功率的稳定性,计算了长波红外空间滤波器的各项参数,搭建了相应的实验装置。实验结果表明,激光功率稳定系统的效果明显,15 min 内长波红外激光功率不稳定度提升至 0.1%以内,1 h 内激光功率不稳定度控制在 0.1%以内。经过空间滤波器后,长波红外激光的光束质量得到明显优化。文中的研究工作为基于低温辐射计的长波红外探测器绝对光谱响应度高准确度测量提供了一个可靠的激光光源。另外,该长波红外稳定光源未来可以应用于长波红外偏振片消光比测量,也可以应用于长波红外波段各种光学镜片的反射率、透过率等光学参数的高准确度测量。

参考文献:

[1] Li Yangyu, Fang Yonghua, Liu Yang. Optical design of a miniature long-wave infrared grating spectrometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, 7

(4): 315-320. (in Chinese)

李扬裕,方勇华,刘洋.小型长波红外光栅光谱仪光学设计[J].*大气与环境光学学报*,2012,7(4):315-320.

[2] Cheng Guimei, Liu Tao, Rong Peng, et al. Design of multi-detector data control and processing system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0420002. (in Chinese)

成桂梅,刘涛,荣鹏,等.多探测器数据控制与处理系统设计[J].*红外与激光工程*,2016,45(4):0420002.

[3] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 268-276. (in Chinese)

白瑜,廖志远,廖胜,等.共孔径消热差红外双波段光学系统[J].*光学精密工程*,2016,24(2):268-276.

[4] Men Tao, Shi Jinxia, Xu Rong, et al. Correction method of atmospheric refraction based on the low elevation infrared measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (1): 0117004. (in Chinese)

门涛,史金霞,徐蓉,等.基于低仰角红外测量的蒙气差修正方法[J].*红外与激光工程*,2016,45(1):0117004.

[5] Shen Weimin, Xue Mingqiu, Yu Jianjun. Optical design of a wide_angle lens for long-wave infrared earth sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (4): 329-332. (in Chinese)

沈为民,薛鸣球,余建军.长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J].*光学精密工程*,2002,10(4):329-332.

[6] Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, et al. Design of hybrid refractive and reflective optical system of long-wave infrared region imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122005. (in Chinese)

张晓龙,刘英,孙强,等.折/反混合式长波红外成像光谱仪光学系统设计[J].*光学学报*,2012,32(11):1122005.

[7] Yan Xiaoke, Zheng Junjie. Surface-type decoy recognition for long wave infrared imaging seeker based on anti-ship missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2583-2587. (in Chinese)

闫晓珂,郑均杰.反舰长波红外成像导引头诱饵弹识别算法[J].*红外与激光工程*,2012,41(10):2583-2587.

[8] Chang Shuai, Gao Xiuwei, Tong Shoufeng, et al. Power measurement device of jamming bomb based on infrared radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0117002. (in Chinese)

常帅,高秀伟,佟首峰,等.红外辐射式干扰弹能量测量装置研究[J].*红外与激光工程*,2016,45(1):0117002.

[9] Gentile T R, Houston J M, Eppeldauer G, et al. Calibration of a pyroelectric detector at 10.6 μm with the national

- institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(16): 3614–3621.
- [10] Theocharous E, Prior T R, Haycocks P R, et al. High-accuracy, infrared, spectra responsivity scale [J]. *Metrologia*, 1998, 35: 543–548.
- [11] Lin Li, Zhang Yanbing, Chen Shida, et al. Void defect of molecular beam epitaxial HgCdTe layer crown on GaAs substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1997, 26(2): 45–50. (in Chinese)
林立, 张艳冰, 陈世达, 等. 分子束外延碲镉汞薄膜中 Void 缺陷的研究[J]. *红外与激光工程*, 1997, 26(2): 45–50.
- [12] Hu Weida, Liang Jian, Yue Fangyu, et al. Recent progress of subwavelength photo trapping HgCdTe infrared detector[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2016, 35(1): 25–36. (in Chinese)
胡伟达, 梁健, 越方禹, 等. 新型亚波长陷光结构 HgCdTe 红外探测器研究进展[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(1): 25–36.
- [13] Zhou Muchun, Chen Yanru, Zhao Qi, et al. Encoding using CdTe crystal in laser polarization encoding guidance[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 515–518. (in Chinese)
周末春, 陈延如, 赵琦, 等. 激光偏振编码制导中 CdTe 晶体编码技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S): 515–518.
- [14] 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性技术[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(7): 2127–2131.