

硅陷阱探测器在 350—1064 nm 波段的 绝对光谱响应度定标^{*}

李健军[†] 郑小兵 卢云君 张伟 谢萍 邹鹏

(中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2008 年 11 月 16 日收到 2009 年 1 月 19 日收到修改稿)

介绍了利用钛宝石可调谐激光器、倍频器和单波长激光器作为光源,在 24 个波长分立点定标了三个硅陷阱探测器的绝对光谱响应度,解决了红外激光的精确定位与调整、窗口透过率模拟定标等关键技术.结果显示在激光波长为 412—800 nm 时,三个陷阱探测器定标的不确定度约低于 0.05%;当激光波长大于 800 nm 以及低于 355 nm 时,获得的陷阱探测器的定标不确定度约低于 0.065%.硅陷阱探测器可以作为空间各类遥感器在 350—1064 nm 波段定标的传递标准探测器.

关键词:陷阱探测器,低温辐射计,光谱响应度,辐射定标

PACC:4262E

1. 引言

光辐射探测器定标在光辐射测量、遥感器定标以及全球气候监测等领域发挥着基础性关键作用.以低温绝对辐射计为初级标准,陷阱探测器为传递标准的新型辐射定标技术在很多国家的计量机构得到应用^[1-5].低温辐射计综合了真空、低温和超导技术,大大降低了外界环境热辐射,使光辐射加热和电加热达到了极好的等效,目前低温辐射计测量绝对光功率的不确定度达到了 0.01%^[6].由于低温辐射计系统复杂、对工作条件的要求严格、运行费用高,所以一般只能作为实验室内初级标准,而不直接用作标定应用仪器的工作标准,因此研制了由无窗式二极管构成的反射式陷阱探测器,它是采用三片硅光电二极管在空间上呈相交的排列结构,经过五次反射后入射光几乎全部被吸收,称之为陷阱式探测器^[6,7].

为了发展以低温辐射计为初级标准的高精度实验室定标系统,首先需要研制各个波段的光谱响应度标准探测器.这对于辐射度学本身的研究是必需的,在光谱响应度标准的基础上,可以进一步建立基于探测器的照度和亮度标准.在遥感应用领域,建立

高精度的光谱响应度标准是保障不同观测平台上的各类空间传感器的测量精度,长期工作稳定性以及数据可比较性的必要条件.

可调谐激光器是应用于高分辨率仪器光谱定标和精确光学计量不可或缺的激光光源.与其他光源相比,可调谐激光光源的优势体现在:1)较高的光谱辐射功率;2)较小的测量误差;3)较小的波长不确定度;4)较窄的激光光谱线宽.因此利用可调谐激光器作为低温辐射计标准传递定标光源已经成为高精度光谱定标实验的必要条件.在此基础上发展了以陷阱探测器为探测单元的光谱辐照度和光谱辐亮度系统.例如美国的 NIST 建立的基于可调谐激光器的积分球辐射定标系统(SIRCUS),已成功用于 MOBY, NISTAR,太阳辐射计等卫星传感器飞行前的定标,报道的光谱辐亮度响应度定标不确定度达到 0.15% ($k=2$),比基于灯和单色仪比较系统(SCF)的定标不确定度提高了一个量级^[8,9].

在 2000 年,德国的 PTB 实验室开展了可调谐激光器定标硅陷阱探测器光谱响应度实验研究工作,在紫外到近红外波段报道的光谱响应不确定度在 10^{-4} 量级,并对低温辐射计定标系统进行改造,在每个分立的波长对低温辐射计的窗口透过率进行了评价,这种定标方法精度高,不需要考虑窗口复位对定

^{*} 国家自然科学基金(批准号 760378027)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: jili@aiofm.ac.cn

标结果的影响,但需要对现有的低温辐射计系统进行改造^[10].本文介绍的窗口透过率复位方法可以在一个波长上精确复位并测量窗口透过率,利用数值模拟可以解析出其他波长的透过率,使定标过程大大简化.

本文首先介绍基于低温辐射计的高精度标准传递定标的原理,接着介绍最近开展的基于自由空间光束传输方法高精度定标硅陷阱探测器响应度的定标装置、实验内容以及实验结果,并在实验过程中解决了近红外光路的调整,布儒斯特窗口透过率的测量以及高精度光谱响应度定标不确定度评估等技术问题.为下阶段实验室全波段定标各类空间遥感器做技术储备.

2. 基于低温辐射计的绝对定标实验

2.1. 定标原理

低温辐射计(Cryorad II)是上个世纪80年代发展起来的,它综合利用了低温、真空和超导技术,克服了常温电替代辐射计的缺点.吸收腔处于液氮(77 K)和液氦(4.2 K)两个杜瓦瓶的双层冷屏蔽下,极大地隔绝了环境热辐射,使光、电产生的温升达到了极大等效.吸收腔在低温环境下热容很小,所以时间常数大大降低.探测器部分使用了超导线,低温情况下导线的损耗可以忽略,低温辐射计技术参数如表1所示.

假定一束单色、偏振、准直、功率稳定的高斯激光束被低温计接收腔完全吸收,低温辐射计测量的入射光的绝对功率为 P ,再将待测的陷阱探测器切入到定标光路中,获得探测器的信号光输出和背景光输出分别为 V_s, V_b ,可以得到陷阱探测器的光谱响应度为

$$R(\lambda) = \frac{(V_s - V_b) T(\lambda)}{P}, \tag{1}$$

这里 $T(\lambda)$ 是低温辐射计布儒斯特窗口的等效透过率.

表 1 低温辐射计(Cryorad II)的技术参数

光谱范围/nm	250—50000
定标功率范围/ μ W	25—250
接收器响应率/(K/mW)	2.0
定标绝对精度/%	< 0.02
腔吸收率	> 0.9999
液氮保持时间/h	> 40

2.2. 实验系统

图1可调谐激光器及单波长激光器定标陷阱探测器的示意图,本实验采用的固体可调谐激光器系统,主要由作为抽运光源的二极管激光器(Verdi18, 532 nm)、钛宝石激光器(MBR110, 700—1064 nm)和倍频器(MBD200, 350—532 nm)组成,可调谐激光器具有波长精度高、线宽窄、调谐方便等优点,便于在传递定标实验中对待定标探测器进行光谱细分测量.

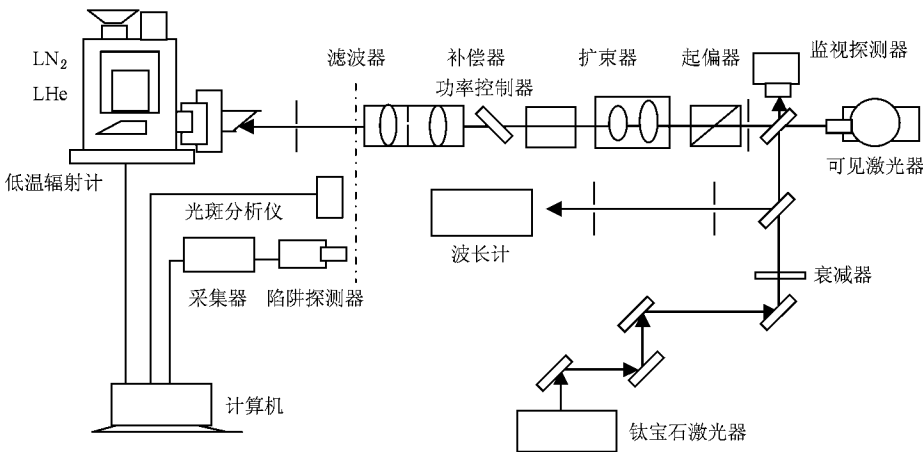


图 1 利用可调谐激光器和单波长激光器定标陷阱探测器示意图

低温辐射计传递定标实验光路如图1所示,钛宝石激光器输出的激光经衰减后一路进入波长计,

另一路经起偏、扩束、功率稳定、空间滤波后入射到低温辐射计腔底,这里所用的可见光激光器(488

nm)是用来调节红外光路的,只要能调节红外光和可见光共轴就能保证红外光入射到低温辐射计腔底;另外将待定标探测器和红外光束轮廓仪固定在电控平移台上,通过红外光束分析仪可以观察实际落在低温计腔底的红外光斑大小和形状,这对于高精度红外定标尤为重要.另外为了保证光束的稳定,在光路中插入了激光功率控制器,它的稳定性优于 0.05%/8 h,由于光束在空气以及在其他光学系统中长距离的传输,造成光束高阶模式的增多,因此在光路中插入空间滤波器,它可以选取激光光束的基模成分.在钛宝石激光器工作波段我们选取了 18 个波长用于传递定标实验,其定标波段分别为 702,720,753,789,800,819,830,865,900,938,944,970,1000,1020,1030,1050,1060 和 1064 nm.另外还选择了 2 个

波段的单波长激光器(波长为 514 nm,633 nm)进行了同样的标准传递定标实验,将单波长激光器置于图 1 所示的可见光激光器位置处即可实现对这两个波段探测器光谱响应度的绝对定标.这里采用的单波长激光器是为了定标硅陷阱探测器在可调谐激光器未覆盖光谱波段(500—700 nm)的绝对光谱响应度.

利用倍频器(350—532 nm)定标陷阱探测器的光路如图 2 所示,经倍频激光器后输出的水平偏振光,经 P_2 、 P_1 两偏振器后,入射到激光功率控制器以及空间滤波器,其中 P_2 的作用是分光和调节光功率, P_1 的作用是保证入射光是垂直线偏振光, P_1 和 P_2 的光轴的夹角低于 90° ,我们选择倍频器的定标波长分别为 355,412,443,488 nm.

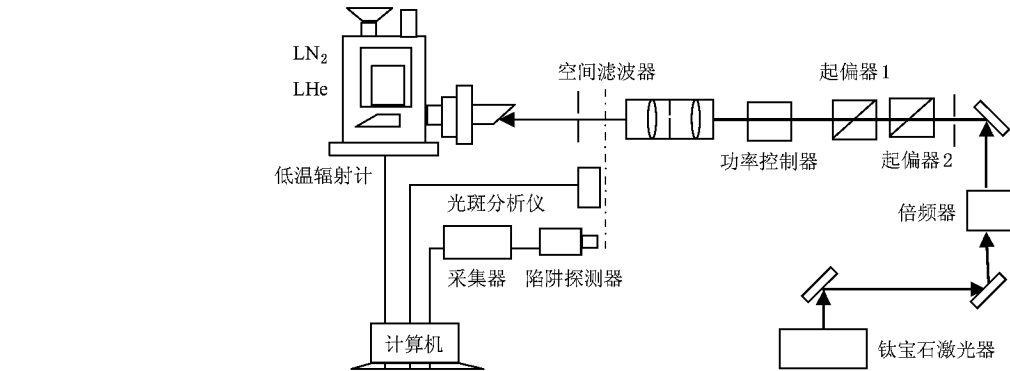


图 2 利用倍频激光器定标陷阱探测器示意图

3. 结果和讨论

3.1. 光谱响应度定标结果

采用图 1 和图 2 所示的实验定标系统,我们在 24 个激光波长上分别标定了 3 个硅陷阱探测器(编号分别为 A,B 和 M)的绝对光谱响应度,选用的硅光电二极管的型号是 S1337-1010BQ,其中,A,B 的 $I-V$ 放大电路的增益阻抗是 50 k Ω ,M 的 $I-V$ 放大电路的增益阻抗是 10 k Ω .每个波段低温辐射计的功率点设置在 100 μ W.激光光束直径约为 2 mm.实验室温度控制在 20—25 $^\circ$ C,相对湿度控制在 50%—55%.获得的三个硅陷阱探测器定标结果如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,硅陷阱探测器在 350—1064 nm 波段范围内的曲线近似为一平滑的曲线,但在 750 nm 附近近似有一个上翘的拐点,原因可能在于:

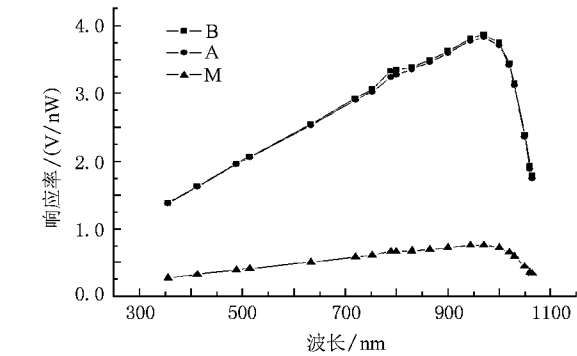


图 3 基于低温辐射计的硅陷阱探测器绝对光谱响应率

1) 光束的发散角过大,以至于到达低温辐射计腔底的光束超出了其内部孔径大小;2) 落在低温辐射计腔底光束是会聚光,只有一部分会聚光落在低温辐射计的吸收腔.以陷阱探测器 B 为例,在 970 nm 波段,硅陷阱探测器的光谱响应率达到最大值,约为 3.86×10^{-5} V/nW,在 970 nm 以后硅光电二极管的光

谱响应急剧下降,在 1064 nm 波段,硅光电探测器的光谱响应率约为 1.79×10^{-5} V/nW,在 1100 nm 附近硅陷阱探测器几乎不能响应,这主要是由于硅材料的光谱特性决定的.

另外,从图 3 可以看出,通过光谱拟合和内插方法可以建立硅陷阱探测器在整个光谱响应波段的绝对光谱响应度,其光谱内插模型在有关文献中做了报道^[3],这里不再进一步讨论.

3.2. 低温辐射计窗口透过率

由定标表达式(1)可知,窗口透过率是影响硅探测器光谱响应度定标不确定度的一个主要来源,影响窗口透过率测量因素主要有以下几个方面:1)入射光的偏振状态 2)窗口位置的恢复.因此为了提高窗口透过率的测量精度,首先保证入射光是垂直线偏振光,实验过程中选用偏振度极高(消光比约为 $10^5:1$)的格兰泰勒棱镜作为起偏器.为了保证低温辐射计布儒斯特窗口在拆卸前后状态保持不变,采用图 4 所示的方法恢复.在窗口上放置一刻有坐标网格的玻璃罩,在距离玻璃罩前端的某一位置处放置刻有坐标网格的挡板,通过观察入射光束落在玻璃罩上的坐标以及反射光束落在挡板上的坐标即可实现窗口位置的精确恢复,通过在窗口下方放置监视探测器来调节窗口的布儒斯特角.由于窗口透过率是波长的函数,窗口的布儒斯特角亦为波长的函数,若在每个波段对布儒斯特窗口位置进行精确测量显然很费时.实验中,我们将布儒斯特窗口透过率在 488 nm 波段进行了 10 次测量,测量的透过率达到了 99.9%.通过数值模拟^[11]将其他波段的窗口透过率值与该点进行归一化处理,图 5 是利用数值模拟方法对波长为 488 nm 波段窗口透过率进行归一化的结果.

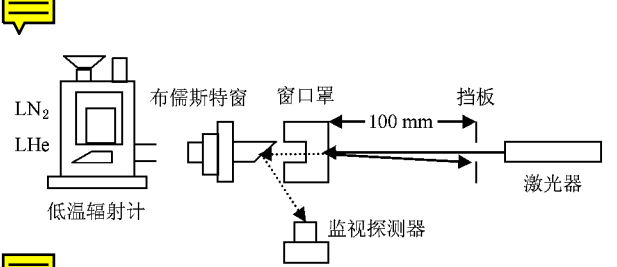


图 4 布儒斯特窗口复位示意图

$$T = \frac{n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1} \left(\frac{2 n_1 \cos i_1}{n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2} \right)^2, \quad (2)$$

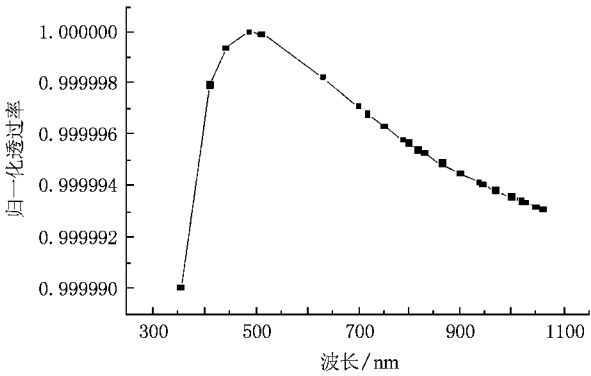


图 5 布儒斯特窗口透过率模拟图

$$n_2 = 1.50375 + \frac{4359.03478}{\lambda^2}, \quad (3)$$

$$\sin i_1 = n_2 \sin i_2. \quad (4)$$

这里 n_1 是空气的折射率, i_1 选用的是波长为 488 nm 所对应的布儒斯特角, $i_1 = 56.69^\circ$, 联合式(3), (4), (2), 可以获得布儒斯特窗口透过率的模拟结果^[4].

3.3. 光谱响应度定标不确定度分析

我们依据国际通行的规范考察了测量中不确定度因素的来源,硅光电探测器光谱响应度定标不确定度 U_R 主要是由低温辐射计绝对功率定标不确定度 U_O 、窗口透过率测量不确定度 U_T 以及陷阱探测器的自身测量不确定度(包括探测器线性 U_l 、空间均匀性 U_n 、偏振敏感性 U_p 、输出电压 U_v)组成,这里提到的不确定度指的是测量值的相对标准偏差,硅陷阱探测器线性、空间均匀性、偏振敏感性引用有关文献的定标数据^[12].由不确定度传递定律,可知

$$U_R = \sqrt{U_T^2 + U_O^2 + U_l^2 + U_n^2 + U_p^2 + U_v^2}. \quad (5)$$

(5)式中低温辐射计功率测量的不确定度可以用下式来表示,即

$$U_O = \sqrt{U_{\text{heat}}^2 + U_n^2}, \quad (6)$$

其中 U_{heat} 是电加热器两次功率测量的不确定度, U_n 是低温辐射计光加热和电加热非等效性因子的定标不确定度.

图 6、图 7 分别表示在激光波长为 350—1064 nm 获得的低温辐射计绝对功率测量不确定度以及硅光电探测器的光谱响应度的测量不确定度,在激光波长为 412—800 nm 时,三个陷阱探测器定标的不确定度较小,约低于 0.05%;当激光波长大于 800 nm 以及低于 355 nm 时,获得的陷阱探测器的定标不确

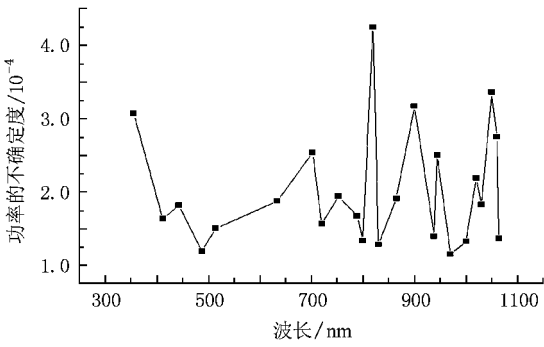


图 6 低温辐射计光绝对测量功率的不确定度

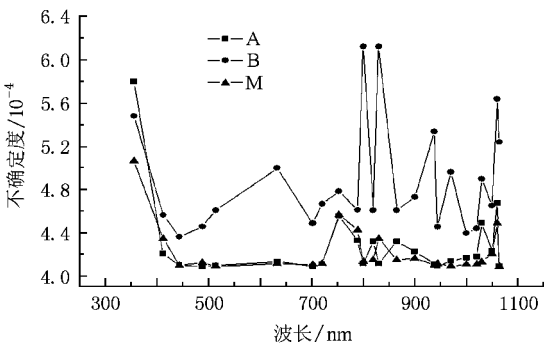


图 7 硅陷阱探测器绝对定标不确定度

定度约低于 0.065%，近红外波段和紫外波段不确定度较大主要由光路调整精度引起的。

4. 结 论

针对定量化遥感的发展需要,本文利用钛宝石激光器、倍频器和单波长激光器作为光源,低温辐射计作为初级标准,在实验室条件下,绝对定标硅陷阱探测器在 350—1064 nm 波段的绝对光谱响应度,介绍了标准传递实验的定标原理和测量装置,分析了定标系统的测量不确定度来源,并介绍了低温辐射计窗口透过率的恢复方法,最终评价了定标系统的测量不确定度.结果显示:在激光波长为 412—800 nm 时,三个陷阱探测器定标的不确定度约低于 0.05%;当激光波长大于 800 nm 以及低于 355 nm 时,获得的陷阱探测器的定标不确定度约低于 0.065%。

从定标结果来看,目前的定标系统运行稳定,定标精度高.我们设计的硅陷阱探测器具有结构紧凑、空间均匀、线性好、动态范围大等优点,满足各类空间遥感器在可见—近红外波段高精度定标发展的需要。

[1] Gottwald A, Kroth U, Krumrey M *et al* 2006 *Metrologia* **43** 125

[2] Carter A C, Lorentz S R, Jung T M 2005 *Appl. Opt.* **44** 871

[3] Samedov F, Durak M, Bazkır Ö 2005 *Optics and Lasers in Engineering* **43** 1252

[4] Ahtee V, Brown S W, Larason T C *et al* 2007 *Appl. Opt.* **46** 4228

[5] Chang J H, Wu L A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1132 (in Chinese) [常君、吴令安 2003 物理学报 **52** 1132]

[6] Zheng X B, Wu H Y, Zhang J P *et al* 2000 *Chinese Science Bulletin* **45** 2009 (in Chinese) [郑小兵、吴浩宇、章骏平等 2000 科学通报 **45** 2009]

[7] Zheng X B, Wu H Y, Zhang J P *et al* 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 749 (in Chinese) [郑小兵、吴浩宇、章骏平等 2001 光学学报 **21** 749]

[8] Houston J M, Rice J P 2006 *Metrologia* **43** S31

[9] Taylor B N, Kuyatt C E 1994 *MD* 20899-0001

[10] Werner L, Fischer J, Johannsen U *et al* 2000 *Metrologia* **37** 279

[11] Zhao K H, Zhong X H 1984 *Optics* (Beijing: Peking University Press) p248

[12] Li S Wang J, Zhang J P 2005 *Acta Opt. Sin.* **25** 609 (in Chinese) [李双、王骥、章骏平等 2005 光学学报 **25** 609]

Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1064 nm^{*}

Li Jian-Jun[†] Zheng Xiao-Bing Lu Yun-Jun Zhang-Wei Xie Ping Zou Peng

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 16 November 2008 ; revised manuscript received 19 January 2009)

Abstract

In optical remote sensing, the calibration of remote sensor plays a key role in the quantificational remote sensing. A state-of-the-art highest accuracy standard transfer method is developed, which can transfer the standard cryogenic radiometer to secondary standard trap-type detector, and the absolute spectral responsivity calibration system is set up in the band between the visible to near-infrared in our laboratory. It is required that the process of standard transfer should produce little measurement uncertainty. In this paper a Ti:sapphire tunable laser, doubler and single wavelength laser in 24 interval of wavelengths respectively are used, the spectral responsivity of three silicon trap detectors are calibrated absolutely. The key techniques involved are the accurate positioning and adjustment of the infrared laser and the simulation calibration of window transmittance etc., which have been successfully resolved. The result shows, in the visible (412 nm to 800 nm) region, the total relative standard uncertainty of the spectral responsivity at the laser lines is less than 0.05%, while in the UV (350 nm) and NIR regions above 800 nm, the total relative standard uncertainty is less than 0.065%. So the trap detector can be used as a transfer standard detector for calibration of space sensors in the band of 350 nm to 1064 nm.

Keywords: trap detector, cryogenic radiometer, spectral responsivity, radiometric calibration

PACC: 4262E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60378027).

[†] Corresponding author. E-mail: jjli@aiofm.ac.cn