

文章编号: 0253-2239(2004)03-401-7

高精度光谱辐射标准探测器的温度特性研究

李照洲 郑小兵 吴浩宇 李 双 王乐意 乔延利
(中国科学院安徽光机所遥感研究室, 合肥 230031)

摘要: 高精度辐射定标技术是现代空间遥感的主要支撑技术之一。基于滤光片辐射计的新型光辐射标准探测器在野外、机载和星上高精度辐射定标中具有广阔的应用前景。温度特性是工程应用中影响标准探测器绝对精度和稳定性的一项关键因素。在 20~60 °C 的宽温度范围内,对基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计温度特性进行了系统测试和定量研究,在所获取的完备的实验数据基础上设计并研制了一套精密温控系统。实验结果显示在加入精密温控后,滤光片辐射计的温度系数降低了约一个数量级,从而有利于在不同温度工作平台上保持标准探测器的高精度。

关键词: 光学测量; 高精度辐射定标; 硅陷阱探测器; 滤光片辐射计; 精密温控
中图分类号: TN206 文献标识码: A

Temperature Characteristics Research of High-Precision Spectral Radiometer Standard Detector

Li Zhaozhou Zheng Xiaobing Wu Haoyu Li Shuang Wang Leyi Qiao Yanli
(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)
(Received 25 December 2002; revised 20 March 2003)

Abstract: The high-precision radiometric calibration technology is one of the primary technologies of modern remote sensing. The trap-based filter radiometer is a key unit of new optical radiometric standard detectors, and has potential applications in radiometric calibration of field, air-borne and space-borne sensors. The temperature characteristics of trap-based filter radiometer are a primary factor of affecting its precision and stability. Temperature coefficients of standard detectors are systematically studied within large temperature range (20~60 °C) and at different wavelengths. A temperature controlling device is designed and is used to stabilize the temperature of trap-based filter radiometer with high precision. The temperature controlling device effectively decreases the temperature coefficient of trap-based filter radiometer by nearly one order of magnitude. The results will provide a reliable reference for the future design of standard detectors on-board different platforms and under various temperature environments.

Key words: optical metrology; high-precision radiometric calibration; Si trap detector; filter radiometer; high-precision temperature control

1 引 言

发达国家空间遥感的定量化研究经验表明,20世纪 80 年代末以来低温绝对定标技术^[1]、量子自定标技术^[2,3]、硅陷阱探测器(trap)标准传递技术^[4]以及替代定标技术的迅速发展,将空间、空中和地面辐

射测量的精度提高了近两个数量级。高精度辐射定标已成为现代空间遥感的主要支撑技术之一。

硅陷阱探测器是由硅光电二极管按照一定的空间结构组合而成的一种复合型光电探测器^[5],其工作原理如图 1 所示。入射光在三个光敏面上依次经历了 5 次反射后沿原路返回。目前,在光学遥感传感器定标领域,基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计是解决波段式仪器高精度辐射定标的有效途径,因其体积

E-mail: zzli@aiofm.ac.cn

收稿日期:2002-12-25;收到修改稿日期:2003-03-20

小、重量轻、功耗低,在野外、机载和星载高精度辐射定标中具有广阔的应用前景。硅陷阱探测器的响应是随温度变化的。在以往光辐射计量学研究中,人们曾经在某个约定的温度(一般为 25 °C 或 20.5 °C)测试过其温度系数^[6,7]。考虑到工程应用中环境温度的变化,在较宽的温度范围内研究探测器的温度特性并进行温度控制,是保证滤光片辐射计(光谱辐射标准探测器)绝对精度和稳定性的一项关键因素。

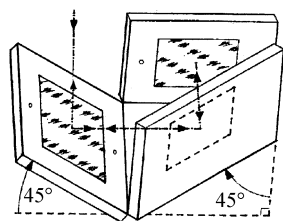


Fig. 1 Geometry of 3-photodiode reflection trap detector

本文在 20~60 °C 的宽温度范围内,以实验方法从局部到整体系统测试了滤光片辐射计各组成单元(单片硅管、硅陷阱探测器及基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计整体)的温度特性。从中找出了对滤光片辐射计温度系数影响最大的部分,对其重点作精密温控,有效降低了滤光片辐射计的温度系数,从而使基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计在不同温度工作平台上其高精度都能得以保持。在实际工程应用中有很重要的意义。

2 硅陷阱探测器及单片硅管温度系数计算

外界环境温度的变化对硅光电二极管的内量子效率、暗电流及表面反射率三者都有影响。我们的现有硅陷阱探测器是采用日本滨松公司 S1337-10 硅光电二极管组成的。这种硅光电二极管的内量子效率温度系数很小^[2],可以忽略。现有硅陷阱探测器采用了不加偏压的光伏型工作方式,其总的暗电流值很小,约为 $10^{-10} \sim 10^{-14}$ A,与信号电流 ($>10^{-8}$ A) 相比可忽略。这样,温度变化导致硅光电二极管表面反射率的变化就成了引起其响应变化的主要原因。

根据硅光电二极管及硅陷阱探测器的表面反射率,结合硅表面反射率的温度系数,即可估算出单片硅管及硅陷阱探测器的温度系数。

硅光电二极管可以认为是由硅(Si)作为衬底,由表面覆盖一层 SiO₂ 薄层组成的,总体可看作空气-二氧化硅-硅的薄膜结构。其反射率可通过

SiO₂ 膜层厚度、SiO₂ 折射率及 Si 的折射率根据薄膜光学原理按照以下方法计算得到。

令 SiO₂ 折射率为 n_2 , Si 的折射率为 \bar{n}_3 , 在可见区, SiO₂ 的折射率 n_2 是实数,而 Si 的折射率 n_3 为复数:

$$\bar{n}_3 = n_3 - ik_3, \quad (1)$$

式中, n_3 是折射率的实部; k_3 是消光系数,是折射率中的虚部。

SiO₂ 的折射率 n_2 值可以参考^[8], Si 的 n_3 值可参考^[9]。考虑一束光线由空气(折射率为 n_1)以入射角 θ_1 入射至二极管表面,部分光线在 SiO₂ 表面反射,透射过的光线在 SiO₂ 和 Si 表面又被反射一部分。当光线由介质 m 入射到介质 n 时,在两种介质表面的振幅反射和透射系数为 r_{mm} 和 t_{mm} ,由菲涅耳定律可得,对于 p 偏振光有

$$\left. \begin{aligned} r_{pm} &= \frac{n_n \cos \theta_m - n_m \cos \theta_n}{n_n \cos \theta_m + n_m \cos \theta_n}, \\ t_{pm} &= \frac{2n_m \cos \theta_m}{n_n \cos \theta_m + n_m \cos \theta_n}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对于 s 偏振光有

$$\left. \begin{aligned} r_{sm} &= \frac{n_m \cos \theta_m - n_n \cos \theta_n}{n_m \cos \theta_m + n_n \cos \theta_n}, \\ t_{sm} &= \frac{2n_m \cos \theta_m}{n_m \cos \theta_m + n_n \cos \theta_n}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在 Si 和 SiO₂ 界面上,该反射和透射系数是复数。SiO₂ 和 Si 的折射角 θ_2 和 θ_3 分别可由斯涅耳公式计算如下:

$$\left. \begin{aligned} \theta_2 &= \arcsin(n_1 \sin \theta_1 / n_2), \\ \theta_3 &= \arcsin(n_1 \sin \theta_1 / \bar{n}_3), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

部分反射光在 SiO₂ 层的前后表面间产生无穷序列互反射。两个相继离开 SiO₂ 膜层前表面的波前的相位差为

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_1} n_2 t \cos \theta_2, \quad (5)$$

其中 λ_1 是空气中的波长, t 是 SiO₂ 膜层的厚度。考虑几何特点得到二极管的振幅反射系数为 \bar{r}

$$\bar{r} = r_{12} + \frac{t_{12} t_{21} \bar{r}_{23} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{12} \bar{r}_{23} \exp(-2i\beta)}, \quad (6)$$

式中下标 1, 2, 3 分别代表空气, SiO₂ 和 Si 不同介质。

强度反射系数可由振幅反射系数得到(对 s 和 p 偏振光)

$$\rho_{s,p}(\theta_1) = |\bar{r}|^2. \quad (7)$$

对于偏振非敏感的 3 片反射式硅陷阱探测器,如图 1 结构图所示,入射光共经历了光电二极管表面的 5 次反射,由于硅陷阱探测器的几何结构特点,

使这 5 次反射中,其入射角分别为:两次 s 偏振方向 45°入射,一次垂直入射,两次 p 偏振方向 45°入射,所以硅陷阱探测器的表面反射率为

$$\rho_{\text{trap}} = \rho(0^\circ)\rho_s^2(45^\circ)\rho_p^2(45^\circ). \quad (8)$$

设光辐射通量为 $\phi(\lambda)$ 的单色光垂直入射到硅陷阱探测器,经过 5 次反射和吸收后,硅陷阱探测器输出电流为 I_{out} 。

单位时间入射到硅陷阱探测器探测器表面的光子数为

$$\frac{\phi(\lambda)}{h\nu} = \frac{\phi(\lambda)\lambda}{hc}, \quad (9)$$

式中, h 为普朗克常量, ν 为入射光的频率。

单位时间内硅陷阱探测器的输出信号电子数 N 为

$$N = [1 - \rho_{\text{trap}}]\eta_i(\lambda) \frac{\phi(\lambda)\lambda}{hc}, \quad (10)$$

式中, ρ_{trap} 为硅陷阱探测器的表面反射率, $\eta_i(\lambda)$ 为硅陷阱探测器的内量子效率(输出信号电子数与探测器吸收的光子数之比)。

则,硅陷阱探测器的输出电流 I_{out} 为

$$I_{\text{out}} = \phi(\lambda)(1 - \rho_{\text{trap}}) \frac{\lambda e \eta_i(\lambda)}{hc}, \quad (11)$$

式中, e 为电子电量。

由于温度变化导致硅光电二极管表面反射率的变化是引起其响应变化的主要原因,内量子效率随温度的变化很小^[2],故这里假设 $\eta_i(\lambda) = 1$,令 $C = \lambda e/hc$,则有

$$I_{\text{out}} = C\phi(1 - \rho_{\text{trap}}), \quad (12)$$

考虑(8)式,有

$$I_{\text{out}} = C\phi(\lambda)[1 - \rho(0^\circ)\rho_s^2(45^\circ)\rho_p^2(45^\circ)], \quad (13)$$

两边对温度 T 求偏导,得

$$\frac{\partial I_{\text{out}}}{\partial T} = -\phi(\lambda)C \left\{ \frac{\partial[\rho(0^\circ)]}{\partial T} \rho_s^2(45^\circ)\rho_p^2(45^\circ) + \rho(0^\circ) \frac{2\partial[\rho_s(45^\circ)]}{\partial T} \rho_p^2(45^\circ) + \rho(0^\circ) \frac{2\partial[\rho_p(45^\circ)]}{\partial T} \rho_s^2(45^\circ) \right\}, \quad (14)$$

我们所选用的硅光电二极管,其表面 SiO_2 膜层厚度约为 29 nm,将参量 $t = 29 \text{ nm}$, $\lambda_1 = 632.8 \text{ nm}$, $n_1 = 1$, $n_2 = 1.457$, $n_3 = 3.889$ 代入(2)式~(7)式可得

$$\rho_p(45^\circ) = 0.32, \rho_s(45^\circ) = 0.43, \rho(0^\circ) = 0.2,$$

又由于硅反射系数的温度系数为: $1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ^[10],即(14)式中 $\frac{\partial \rho}{\partial T} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,将以上参量代入(14)式,即可得硅陷阱探测器响应的温度系数为 $-1.83 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。(14)式中,对温度 T 求偏导后,等式右边出现了负号,故温度系数是个负值,负温度系数意味着硅陷阱探测器响应随温度升高会减小。

类似的,对于单片硅管,有

$$I_{\text{out}} = \phi(\lambda)C[1 - \rho(0^\circ)],$$

$$\frac{\partial I_{\text{out}}}{\partial T} = -\phi(\lambda)C \frac{\partial[\rho(0^\circ)]}{\partial T},$$

从而得单片硅管的温度系数约为 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。

以上估算是内量子效率假设为 1,且垂直入射等理想状态下讨论的。与实际情况有一定差异,因而所得的温度系数具体数值必然存在一定偏差,但结果所反映的两者温度系数的相对大小关系应是比较准确的。

综上所述,单片硅管在 20 °C, 633 nm 的温度系

数约比 3 片反射式硅陷阱探测器的温度系数高 1 个数量级左右。

3 基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计温度特性综合测试

通过对硅陷阱探测器温度特性综合测试研究,可以较准确的知道实验室温度波动对功率测量不确定度的影响;可为野外、机载和星载时在不同环境温度条件下的测量结果提供修正因子;也可为硅陷阱探测器的温控系统的研制提供必要的实验数据依据。

3.1 实验装置及测量原理

如图 2 所示,实验时,不同波长激光依次通过滑轨上的反射镜切入光路,入射光束先经过格兰-泰勒棱镜,调节该棱镜可以得到垂直偏振的激光束,这是激光功率控制器(LPC)的工作要求决定的,然后使光束经过激光功率控制器后,得到功率输出稳定的激光束。

激光功率控制器的出射光束被分束片分为主光路和监测光路,构成双光路测量。主光路光束经过反射镜和低温试验箱壁上的通光孔,进入试验箱工作室被测试硅陷阱探测器(trap B),trap B 将所接受的光能量,经光电转换、采样、放大输出为电压信

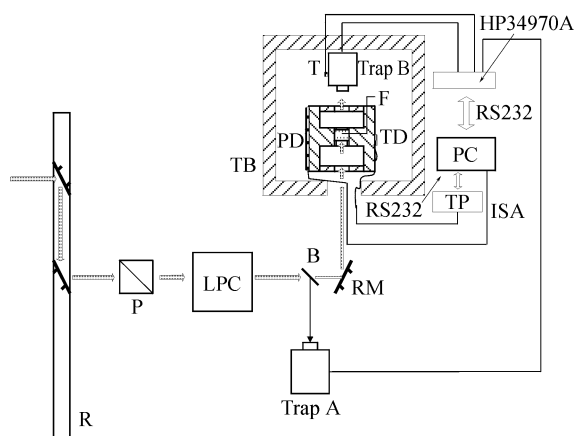


Fig. 2 High accuracy standard detector temperature characteristics measure system. R: rail; P: polarizer; LPC: laser power controller; B: beam splitter; RM: reflecting mirror; TP: temperature processor; TD: temperature detector; F: filter; T: thermocouple; PD: Peltier device; TB: test box; PC: personal computer

号。该电压信号由 HP34970A 多路采集器实时采集,然后通过串口 RS232 送入计算机存储处理。监测光路光束由另一硅陷阱探测器(trap A)监测记录。实验测试时,通过计算机控制,同时测量记录下两路硅陷阱探测器的电压输出。Trap A 和 Trap B 的设计完全相同,因而在数据处理时,用测量得到的 trap B 的电压值除以 trap A 的电压输出值,可以消除激光功率起伏对测试带来的影响,从而使测量结果更能真实地客观反映标准探测器温度特性。实验中,由于室温变化非常缓慢,15 h 左右一般只波动 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,加之硅陷阱探测器的响应随温度变化很小 ($\sim 10^{-5}$ 量级),这样置于非温控环境中的 Trap A,其输出受环境温度起伏的影响就可忽略。

实际测试时,保持激光功率稳定不变,调节低温试验箱的设定温度,使其工作室内温度从 $20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内逐渐增加,每次增加 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在每一温度测试点,预热 40 min 左右,待试验箱内完全达到热平衡后,通过计算机控制,采用 HP34970A 多路数据采集器的 J 型热电偶来采样 trap B 附近温度,同时测量记录两路硅陷阱探测器的电压输出值。重复上述过程,直至完成整个温度范围内各点测试。最后通过双光路比对消除激光功率本身起伏,即可绘出被测硅陷阱探测器 trap B 响应-温度曲线。由温度系数定义式 $C_t = \frac{Y(T) - Y(T_0)}{T(T_0)(T - T_0)}$ 知,响应-温度曲线上每一点的斜率与该点响应的比值即为这一点的温

度系数。

为了对基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计各组成单元温度特性有一个全面了解,实验中分别测量了单片硅管、硅陷阱探测器及基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计的温度特性,从中找出对滤光片辐射计整体温度系数影响最大的部分。然后,通过加入必要的温控系统,对该部分重点控温,就可以达到有效降低滤光片辐射计整体温度系数而保持其高精度的目的。对不同单元测试时,只须在图 2 所示的低温试验箱内放置相应的待测试单元即可。

3.2 单片硅管温度特性测试及数据分析

图 3 所示为日本滨松公司的 S1337-10 型单片 Si 光电二极管响应-温度曲线的两次测量结果 (Measure1 和 Measure2),图中实心点是实测值,细实线是采用最小二乘法通过线性拟合得到的结果 (本文中响应-温度曲线图中,实心点均代表实测值,细实线均代表拟合结果;温度系数曲线均是由响应-温度曲线的多次测量结果取平均后按照温度系数定义式计算得到的)。

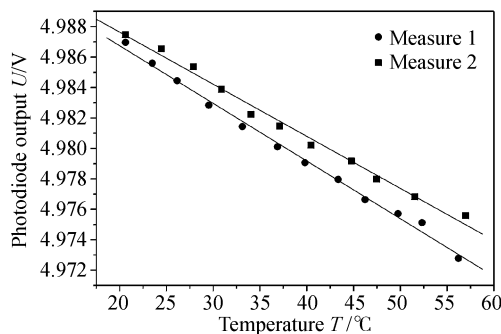


Fig. 3 Response of single photodiode (PD) as a function of temperature

图 4 是将图 3 中的两次测量结果取平均,然后按照温度系数定义式计算得出的单片硅管温度系数曲线。从图 4 中可以看出,单片硅管在 $20\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,其温度系数约为 $-7.24 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ 。其中,在

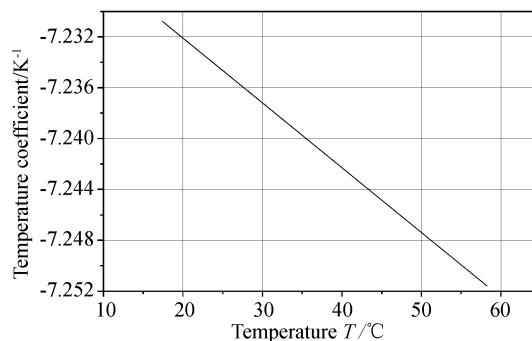


Fig. 4 Temperature coefficient of single photodiode

25 °C 附近,其温度系数约为 $-7.235 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 。这与 Fu Lei 和 Fischer^[6] 在相似条件下,针对同型号硅管的测量结果 ($-7.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) 是相当一致的。

3.3 硅陷阱探测器温度特性测试及数据分析

图 5 是硅陷阱探测器的响应-温度曲线,图 6 是由图 5 计算得到的硅陷阱探测器温度系数曲线。从图 5 中可以看出:硅陷阱探测器响应整体随温度升高而下降,这与前面得到的负温度系数的计算结果是一致的。另外,在温度约小于 47 °C 时,硅陷阱探测器的响应随温度升高下降得较快;而大于 47 °C 后,响应缓慢升高。从图 6 中的温度系数曲线中可以看出,在 20.5 °C 附近,硅陷阱探测器的温度系数约为 $-0.64 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,该结果与 1999 年 BIPM (法国国际计量局) 国际比对报告中所给出的 3 片反射式硅陷阱探测器在 633 nm 的温度系数 $-1.0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ^[7] 很接近。

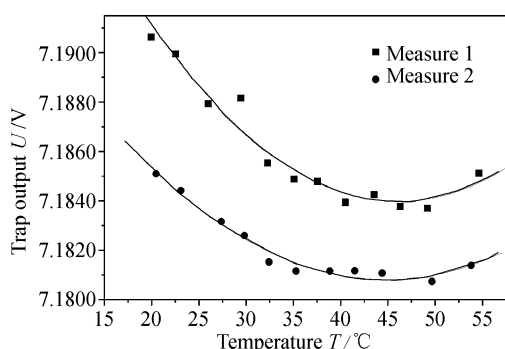


Fig. 5 Response of trap as a function of temperature

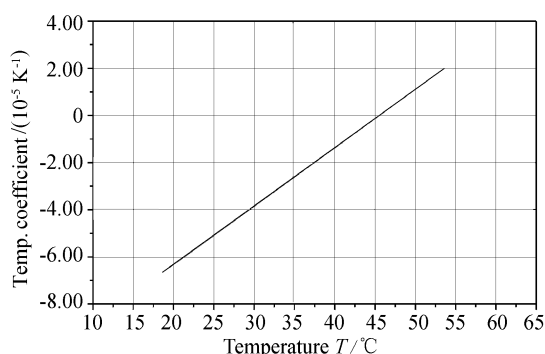


Fig. 6 Temperature coefficient of trap

由图 4 和图 6 的结果可知,在 633 nm, 20 °C 时,单片硅管温度系数约为 $-7.232 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,硅陷阱探测器温度系数约为 $-0.65 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,可见单片硅管温度系数约为硅陷阱探测器的 11 倍左右。该结果与前面温度系数计算部分得出的单片硅管温度系数比硅陷阱探测器大一个量级左右的结论吻合得

较好,这也从另一个方面进一步证实了实验测量结果的可靠性。

3.4 滤光片辐射计温度特性测试及数据分析

图 7 为 633 nm 滤光片辐射计响应-温度曲线。从图中可以看出,滤光片辐射计随温度升高其响应总体呈下降趋势。另外,也可以明显看到,随温度升高滤光片辐射计响应呈现类似周期性的起伏变化。这种现象是由于滤光片前后反射面的干涉引起的。实验中当温度升高时,滤光片厚度发生变化引起其前后表面两干涉光束的相差随之变化,根据干涉原理,其干涉总光强会呈现余弦性(周期性)起伏变化。实际上,对于上述干涉现象,若滤光片前后表面不完全平行则可避免,因而我们建议今后滤光片的设计中,可以采用前后表面不完全平行的楔形结构。另外,针对这种干涉现象,当采用激光作光源时,由于激光的相干时间远大于硅陷阱探测器的响应时间 ($\sim 10^{-9} \text{ s}$),硅陷阱探测器能测量到干涉带来的影响;而采用自然光源时,由于自然光的相干时间远小于硅陷阱探测器的响应时间,探测器所接收到的是时间平均效应的叠加信号,此时硅陷阱探测器测量不到干涉产生的影响。故我们推测,当采用自然光源测试滤光片辐射计的温度特性时,上述类似周期性的起伏变化可能会随之消失。以下图 8 和图 9 是换用自然光源(1000 W 石英碘钨灯)后的测试结果。可以看出,滤光片辐射计响应随温度升高,呈现周期性起伏变化的现象已完全消失了,验证了我们分析是正确的。

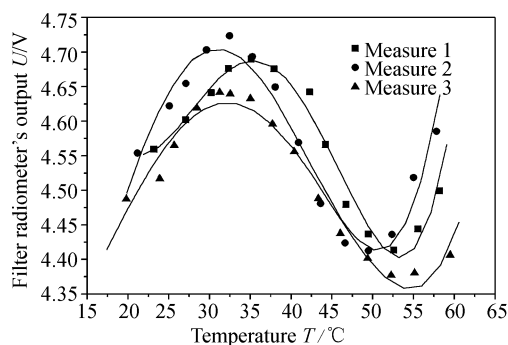


Fig. 7 Response of filter radiometer as a function of temperature

图 10 中同时给出了 633 nm 基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计温度系数曲线(A)和硅陷阱探测器温度系数曲线(B)。由于入射光穿过窄带干涉滤光片时发生干涉导致滤光片辐射计响应呈现周期性起伏变化,因而其温度系数曲线上出现了过零点(图 10 中点 1 和点 2)。从图 8 中可以明显看出,滤光片

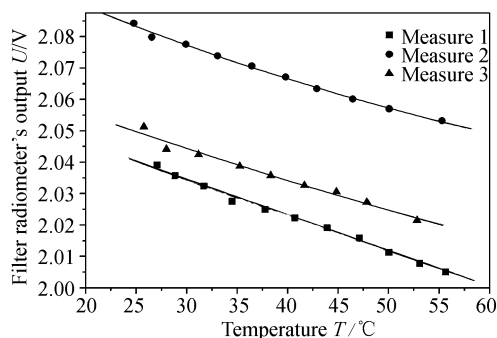


Fig. 8 Temperature coefficient of filter radiometer

辐射计的温度系数远大于硅陷阱探测器的。由此可以推知,对滤光片辐射计温度系数影响最大的部分是滤光片,要想有效降低辐射计的温度系数,就应对滤光片部分重点作精密控温。

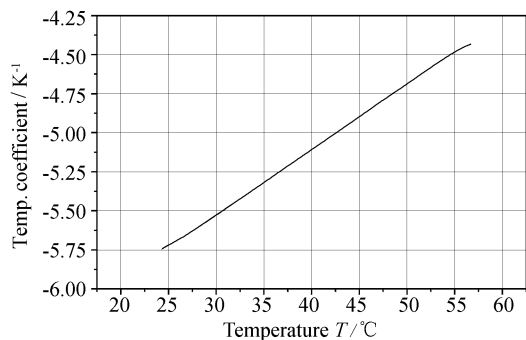


Fig. 9 Response of filter radiometer as a function of temperature

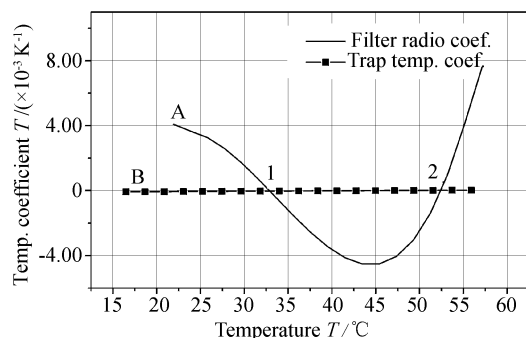


Fig. 10 Temperature coefficient of filter radiometer

从图 10 中可以看出,基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计,其温度系数达到了 10^{-3} 量级,从稍后的实验结果可知 488 nm 的甚至更大。虽然我们的现有硅陷阱探测器其测量不确定度达到了 3.5×10^{-4} [5],然而由其组成的滤光片辐射计,若不加温控,其整体高达 10^{-3} 量级的温度系数,使硅陷阱探测器测量精度高的优势就会完全丧失,可见对基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计,要保持其高精度,精

密温控部分是必不可少的。

3.5 加入精密温控系统后的滤光片辐射计温度特性研究及数据分析

以下是加入我们自主开发的精密温控系统后的滤光片辐射计温度特性测试结果。限于篇幅,这里不再对所研制的精密温控系统作详细介绍。

图 11 和图 12 分别同时给出了 488 nm 及 633 nm 滤光片辐射计温控前 (TC Before) 和温控后 (TC After) 的温度系数对比曲线。从图中可以看出加入温控系统后滤光片辐射计在不同波长下各温度点的温度系数都有了较为明显的降低,其中 633 nm 的减小了约 4~5 倍左右,488 nm 的温度系数较以前减小了约 1 个量级。从实验结果来看,加入温控系统后,滤光片辐射计的温度系数得到了有效降低了,达到了可以满足工程应用的量级,解决了滤光片辐射计工程化进程中的温控关键技术。

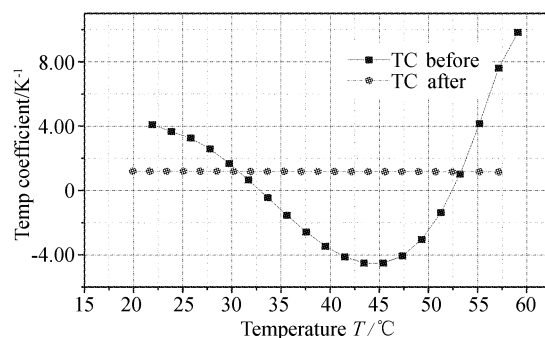


Fig. 11 Comparison of temperature coefficient of filter radiometer for different wavelength between with and without temperature controlling

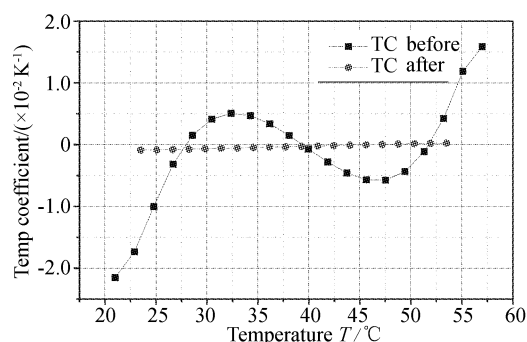


Fig. 12 Comparison of temperature coefficient of filter radiometer for different wavelength between with and without temperature controlling

结论 文中对基于硅陷阱探测器的滤光片辐射计的各组成单元温度特性进行了系统测试,得到了完备的实验数据。所得实验结果为硅陷阱探测器的高精

度定标工程化应用提供了有价值的技术依据。实验证明所研制的精密温控系统,有效降低了滤光片辐射计的温度系数,为滤光片辐射计在野外、机载和星载等不同温度工作平台上的高精度辐射定标提供了有力保障,对推动星载高精度辐射定标的工程化进程具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Martin J E, Fox N P, Key P J. A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements. *Metrologia*, 1985, **21**(3):147~155
- 2 Zalewski E F, Duda C R. Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(18):2867~2873
- 3 Zalewski E F, Geist J C. Silicon Photodiode absolute spectral response self-calibration. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(8):1214~1216
- 4 Touayar O, Reyn H, Bastie J *et al.*. Indirect comparison of cryogenic radiometers from the INM (France) and the VTT (Finland) with a QED-200 from the VSL (Netherlands). *Metrologia*, 1996, **32**(6):561~564
- 5 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junpinge *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035%. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6):749~752 (in Chinese)
- 6 Fu Lei, Fischer J. Characterization of photodiodes in the UV and visible spectral region based on cryogenic radiometry. *Metrologia*, 1993, **30**(4):297~303
- 7 Kohler R, Goebel R, Pello R. Results of an international comparison of spectral responsivity of silicon photodetectors. *Metrologia*, 1996, **32**(6):463~468
- 8 Malitson I H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(10):1205~1209
- 9 Jellison G E J. Optical functions of silicon determined by two-channel polarization modulation ellipsometry. *Opt. Mater.*, 1992, **1**(1):41~47
- 10 Weakliem H A, Redfield D. Temperature dependence of the optical properties of silicon. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3):1491~1493