

文章编号 : 0253-2239(2001)06-749-04

# 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器

郑小兵 吴浩宇 章骏平 周 威 刘玉成 王乐意 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感部, 合肥 230031)

摘要: 讨论了由无窗硅光电二极管构成的反射式陷阱探测器的设计方案和工作原理, 通过实验测试证明它具有良好的线性、空间响应均匀性、偏振非敏感性和稳定性。在可见波段的 7 个激光波长上(488 nm~786 nm), 通过低温辐射计标定了陷阱探测器的绝对光谱响应率, 不确定度小于 0.035%, 比现有的标准辐射源的精度提高了约 2 个量级, 证明其可以作为高精度的绝对光谱响应率标准探测器。

关键词: 光谱响应率标准; 陷阱探测器; 不确定度

中图分类号: TH744 文献标识码: A

长期以来光谱辐射量的标准是建立在辐射源(黑体和不同等级的标准灯)基础上的, 其精度已不能适应计量、遥感等领域日益发展的要求。例如在可见波段, 作为工作标准的标准灯的不确定度一般为 1%~2%, 而为满足长期对地观测的要求, 星载传感器的定标精度应达到 1%~5%<sup>[1]</sup>。这意味着需要不确定度优于 0.1% 的工作标准。

近 10 年来光谱辐射测量的原理和方法正在经历一次突破性的发展过程, 具有代表意义的是低温绝对辐射计取代了传统的黑体成为辐射度学的新型初级标准, 而基于探测器的标准传递链正逐步取代传统的基于辐射源(如标准灯)的标准传递链<sup>[2]</sup>。

由于综合应用了电替代、低温和超导等技术, 低温辐射计测量光功率达到了前所未有的精确程度(可见波段不确定度为 0.005%~0.02%<sup>[1,2]</sup>)。但限于其结构的特殊性, 目前它只适于测量具有良好空间性质的激光束的功率。它的系统组成复杂、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的初级标准, 而不直接用作标定应用仪器的工作标准。

为了建立以低温辐射计为源头的传递链, 首先需要研制各个波段的高精度光谱响应率标准探测器。这对于辐射度学本身的研究是必需的, 在光谱响应率标准的基础之上, 可以进一步建立基于探测器的照度和亮度标准。在遥感等应用领域, 高精度的光谱响应率标准是保障不同观测平台上的各类传感器的测量精度、长期工作稳定性以及数据可比较

性的必要条件。对于发光和显示光学器件的研究和生产, 高精度的光谱探测器也有重要的应用价值。

我们已建立了基于低温辐射计的高精度光谱功率测量系统<sup>[3]</sup>。在此基础上又研制了由无窗硅光电二极管构成的反射式陷阱探测器, 作为可见波段绝对光谱响应率的标准探测器。本文讨论陷阱探测器的设计和工作原理, 通过实验测试证明它具有良好的线性、空间响应均匀性、偏振非敏感性和稳定性。在可见波段的 7 个激光波长上(488 nm~786 nm), 通过低温辐射计标定了陷阱探测器的绝对光谱响应率, 不确定度小于 0.035%<sup>[4]</sup>, 比现有的标准辐射源的精度提高了约 2 个量级。

## 1 陷阱探测器的设计和性能测试

标准探测器应当具有较宽的光谱响应范围和光谱灵敏度, 并且其响应率不受入射光的功率、偏振状态、光敏面上的照射位置以及工作时间的影 响。本文用在可见波段具有优良性质的无窗硅光电二极管作为光敏元件, 采用了三片反射式陷阱结构, 如图 1 所示。

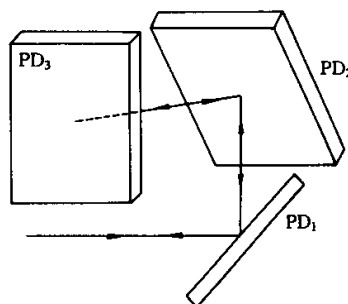


Fig. 1 Geometry of 3-photodiode reflection trap detector

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。这种设计的优点是: 1) 总反射率大为降低, 约为单个硅管反射率的 1%, 光敏面反射损失所引起的测量不确定度也随之大大降低; 2) 第一、二个硅管的入射面相互垂直, 入射角相等, 第三个硅管正入射, 从而保证了探测器对入射光的偏振状态是非敏感的。这在许多应用中有重要的意义; 3) 提高了光电转换效率和灵敏度。

三个光电二极管均为 Hamamatsu S1337-11 型无窗器件, 光敏面积为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。它们在电路上并联, 总光电流经过前置放大器转换为输出电压, 如图 2 所示。

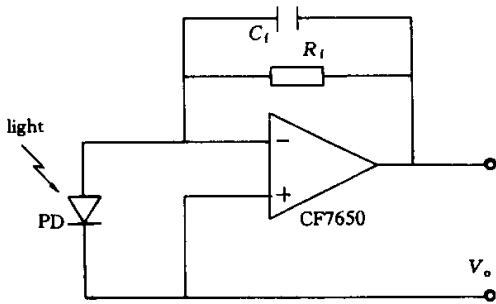


Fig. 2 Pre-amplifier of trap detectors

我们测量了陷阱探测器的线性、空间响应均匀性、偏振敏感性和稳定性, 结果如图 3 所示。从图中可见, 有如下特性:

1) 线性。采用双光束叠加法测量。当入射激光功率范围为  $10\ \mu\text{W} \sim 475\ \mu\text{W}$  时, 陷阱探测器的非线性因子最大为  $-1.03 \times 10^{-3}$ , 线性的测量不确定度为 0.00434%。

2) 空间响应均匀性。使陷阱探测器在垂直于入射光束的  $x$ 、 $y$  方向上以步长  $0.5\text{ mm}$  平移, 同时测量其输出电压。当陷阱探测器相对于入射孔径中心的平移范围在  $x$ 、 $y = -2\text{ mm} \sim 2\text{ mm}$  时, 其响应的均方根起伏为 0.0199%。

3) 偏振敏感性。使陷阱探测器相对于入射光轴作  $360^\circ$  旋转, 每隔  $30^\circ$  测量其输出电压, 均方根起伏为 0.00492%。

4) 稳定性。在经过充分预热后, 使陷阱探测器连续工作 8 h, 每 30 s 采集其输出电压。通过双光路取比值消除激光功率的起伏后, 得到探测器自身的均方根起伏为 0.00678%。通过定期用低温辐射计标定可以保证陷阱探测器的长期(数月甚至数年)稳定性。

除了上述 4 项因素外, 影响陷阱探测器性能的因素还有温度效应以及与前置放大回路的阻抗匹配问题。温度效应主要体现在暗噪声随温度变化的起伏较大, 会直接影响低光照条件下的测量精度。我们在测量陷阱探测器的特性时, 将实验室内的温度控制在  $19^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 在此范围内 S1337-11 型硅光

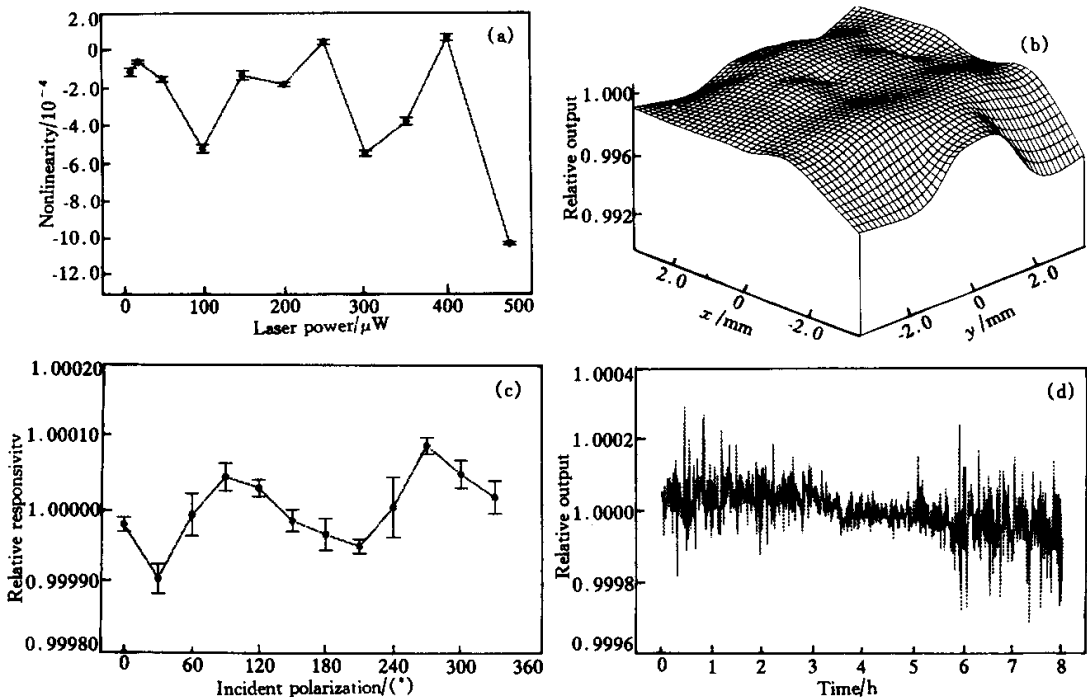


Fig. 3 Characterization of trap detector (trap-A). (a) Linearity; (b) Spatial uniformity;

(c) Polarization sensitivity; (d) Stability

电二极管的暗噪声大约变化 20%。测试陷阱探测器性能时使用的是单色功率较高的激光光源,最小入射功率为  $25 \mu\text{W}$ 。相比之下,硅光电二极管的等效噪声功率约为  $10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ,因此具有极高的信噪比(大于  $10^8:1$ )。这意味着即使噪声电平随温度有一定的变化,由于它自身在总信号电平中占的比例极小,对测量结果的影响是非常小的。此外,由于采用了具有斩波稳零功能的 CF7650 型集成运放,温度变化对放大器增益的影响也可以忽略。我们曾经人为地在  $16^\circ\text{C} \sim 23^\circ\text{C}$  范围内改变环境温度以评估温度效应,发现同激光功率起伏、光学调整误差等因素相比,温度效应基本上无法辨别出来,是一个在现有实验条件下可以忽略的误差因素。

硅光电二极管作为电流源型的光敏器件,它本身的分流电阻应当远大于负载电阻,以保证有最大的光电流传输到负载上,降低分流电阻对线性的影响。S1337-11 型分流电阻最小为  $5 \times 10^7 \Omega$ 。在陷阱探测器中,3 个硅光电二极管是并联使用的,总分

流电阻即为  $1.7 \times 10^7 \Omega$ 。陷阱探测器的负载是电流-电压转换放大器,其等效输入电阻也就是陷阱探测器的负载电阻为  $R_f/B$ ,其中  $R_f$  为反馈电阻, $B$  为开环电压增益。这里  $R_f = 60 \text{ k}\Omega$ , $B = 120 \text{ dB}$ ,等效输入电阻为  $6 \times 10^{-2} \Omega$ ,同陷阱探测器的分流电阻相差 8~9 个量级,可以忽略不计。因而可以认为分流电阻对线性的影响非常微弱,可以忽略不计。

## 2 绝对响应率的定标和不确定度分析

陷阱探测器的绝对光谱响应率是通过 CryoRad II 型低温辐射计来标定的,其实验装置如图 4 所示。激光束在经过起偏振、功率稳定和空间滤波后,进入低温辐射计的高吸收率(大于 0.9999)接收腔。低温辐射计测量激光的绝对功率  $P_L$  后,将陷阱探测器切入光路,测量其输出电压  $V_o$ 。在不同波长下重复这一过程,即得到绝对光谱响应率为  $R(\lambda) = V_o(\lambda)/P_L(\lambda)$ 。

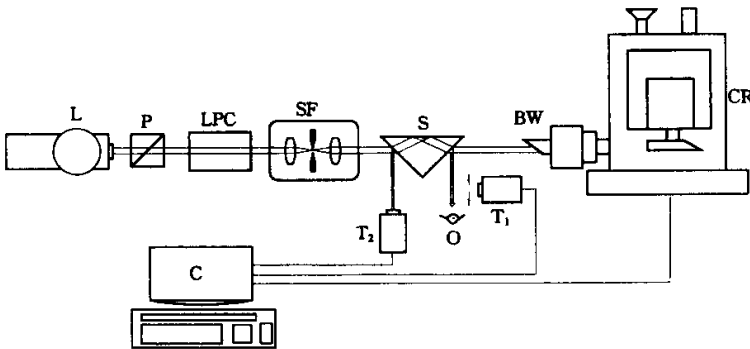


Fig.4 Spectral responsivity calibration of trap detector by cryogenic radiometer. L: lasers; P: polarizer; LPC: laser power controller; SF: spatial filter; S: splitting prism; CR: cryogenic radiometer; BW: Brewster window;  $T_1, T_2$ : trap detectors; O: observer; C: computer

我们在 7 个激光波长上标定了 3 个同样的陷阱探测器(A、B、C),激光波长分别为 488 nm、514 nm、544 nm、594 nm、633 nm、676 nm 和 786 nm。每个波长的激光功率均在低温辐射计允许的  $25 \mu\text{W} \sim 250 \mu\text{W}$  范围内以  $25 \mu\text{W}$  为间隔测量 10 次,每次均标定 3 个陷阱探测器。激光束直径约为 2 mm。低温辐射计测量激光功率可由(1)式表示

$$P_L = \frac{1}{T} \left( \frac{NP_h}{A} + P_s \right), \quad (1)$$

其中, $T$  为布儒斯特窗口透过率, $A$  为接收腔吸收率, $N$  为光电加热的非等效因子, $P_s$  为窗口的散射功率, $P_h$  为电加热功率。可以看出,激光功率的测量不确定度直接取决于上式右边的 5 个参数的不确定度。除接收腔的吸收率引用厂家的原标定值外,我们

在实验中测量了其余参数并评估了不确定度。

图 5 为 7 个波长下标定的陷阱探测器的绝对光谱响应率。488 nm~786 nm 波段内其它波长的响应率可通过三次样条内插得到。

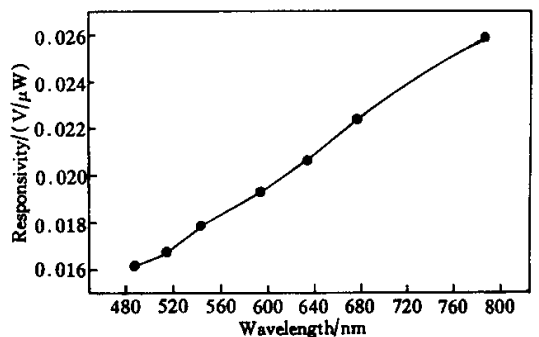


Fig.5 Absolute spectral responsivity of trap detector (trap-A)

我们依据国际通行的规范<sup>[5]</sup>考察了测量中不确定度因素的来源,得到了如表 1 所示的陷阱探测器绝对光谱响应率的不确定度分析结果。各波长对应

的不确定度均取实际测量的最大值。其中 786 nm 的不确定度明显高于其它波长,这是因为该波长几乎不可见,光学调整的精度受到很大的影响。

Table 1. Uncertainties of absolute spectral responsivity of trap detectors /10<sup>-4</sup>

uncertainty sources		laser wavelength /nm						
		488	514	544	594	633	676	786
Cryogenic radiometer	heater power	1.030	1.450	0.873	0.449	2.270	0.673	1.370
	window transmittance	0.2000	0.3160	0.1290	0.1150	0.1530	0.0775	0.1650
	cavity absorptance	0.1						
	non-equivalence	0.113						
trap detector	linearity	0.434						
	spatial uniformity	1.99						
	polarization sensitivity	0.492						
	stability	0.678						
	output voltage	0.1390	0.0908	0.0779	0.1060	0.1980	0.0490	2.2900
combined uncertainty		2.45	2.66	2.38	2.26	3.18	2.31	3.47

结论 介绍了硅光电二极管陷阱探测器的设计和工作原理,通过低温辐射计标定了它在可见波段的绝对光谱响应率,不确定度小于 0.035%。陷阱探测器具有优良的线性、空间响应均匀性、偏振非敏感性和工作稳定性。以陷阱探测器为基础,可以进一步研制高精度的光谱照度和亮度标准探测器。作为一种全固化、体积重量小、功耗低的高精度探测器,它在空间遥感等领域具有潜在的应用价值。

### 参 考 文 献

[1] Foukal P V, Kochling H, Miller P. Cryogenic absolute

radiometer as laboratory irradiance standards, remote sensing detectors, and pyroheliometers. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(7):988~993

[2] Gentile T R, Houston J M, Hardis J E *et al.*. The NIST high accuracy cryogenic radiometer. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7):1056~1068

[3] 郑小兵,吴浩宇,章骏平 等. 高精度光辐射定标和标准传递方法研究. *科学通报*, 2000, **45**(12):1341~1344

[4] Kubarsepp T, Karha P, Ikonen E. Characterization of a polarization-independent transmission trap detector. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13):2807~2812

[5] Taylor B N, Kuyatt C E. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>

## Absolute Spectral Responsivity Standard Detectors with Uncertainty Less than 0.035%

Zheng Xiaobing Wu Haoyu Zhang Junping Zhou Wei Liu Yucheng  
Wang Leyi Qiao Yanli

(Remote Sensing Department, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 2 February 2000; revised 24 April 2000)

**Abstract:** The design and principle of reflective trap detectors are discussed which consist of three windowless Hamamatsu S1337-11 silicon photodiodes. Linearity, spatial uniformity, polarization sensitivity and stability of the trap detectors were measured. By calibration against a CryoRad-II cryogenic radiometer, absolute spectral responsivity of the trap detectors was obtained between 488 nm~786 nm with uncertainty less than 0.035%.

**Key words:** spectral responsivity standard; trap detector; uncertainty