

文章编号: 0253-2239(2008)05-0889-05

高精度光电探测器的线性测量

陈 风 李 双 王 骥 郑 小 兵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 遥感研究室, 安徽 合肥 230031)

摘要 介绍了一种高精度的光电探测器线性测量系统,讨论了线性测量的方法,确定以光束叠加法为线性测量系统的基础。设计了测量系统,以 944 nm 激光器为光源,测量了 Si 陷阱探测器和 InGaAs 陷阱探测器的非线性因子。实验结果表明,利用该系统在 0.1~200 μW 的入射光功率范围内。Si 陷阱探测器非线性因子平均值小于 0.009%,联合不确定度小于 3.18%;InGaAs 陷阱探测器非线性因子平均值小于 0.6%,联合不确定度小于 6.87%。实验结果证明该系统可以作为高精度光电探测器线性测量装置。

关键词 光学测量; 陷阱式光电探测器; 非线性因子; 不确定度

中图分类号 O432 **文献标识码** A

Linearity Measurement of Accurate Photodetector

Chen Feng Li Shuang Wang Ji Zheng Xiaobing

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

Abstract A linearity measurement systems of accurate photodetector is described. The principle of linearity measurement methods is discussed, and the beam-addition method is used in this measurement system. Structure of measurement system is designed, and the linearity measurement of Si trap photodetector and InGaAs trap photodetector is done with 944 nm laser. Experimental results show in the range of laser power (0.1~200 μW), the measured nonlinearity factor of Si trap photodetector is less than 0.009%, and its combined uncertainty is less than 3.18%, the measured nonlinearity factor of InGaAs trap photodetector is less than 0.6%, and its combined uncertainty of measurement is less than 6.87%. Experimental results prove that the system can be used in accurate photodetector's linearity measurement.

Key words optical measurement; trap photodetector; nonlinearity factor; uncertainty

1 引 言

陷阱探测器是近年来发展起来的一种高精度光辐射探测器^[1],它已被国内外光辐射计量学界作为精度仅次于低温绝对辐射计^[2]的绝对光功率传递标准,以它为核心研制的绝对辐照度、辐亮度标准探测器在光学遥感辐射定标等领域的应用也正在逐步扩展^[3]。陷阱探测器是由多片光电二极管按照一定空间结构组成的复合型光电探测器,它不仅具有高的绝对精度,而且工作波段宽、响应动态范围大、灵敏度高。人们对于陷阱探测器的研究一直很活跃,研

究方向主要围绕在降低不确定度和不断改进响应性能。目前在相对于低温绝对辐射计定标陷阱探测器时,受到低温辐射计动态范围的限制,入射光功率一般为 0.1~1 mW,在此范围内陷阱探测器的绝对响应率的不确定度可达到 10^{-4} 量级^[4~6]。从器件本身的特性而言,陷阱探测器的响应动态范围实际上至少可以达到 8 个量级。在更宽的入射功率动态范围内精确测量陷阱探测器的线性,对于保证大动态范围下陷阱探测器的精度、发展线性修正模型,以及提高在不同使用场合下的适用性都是非常必要的。线

收稿日期: 2007-08-24; 收到修改稿日期: 2007-11-27

作者简介: 陈 风(1977—),男,博士研究生,主要从事光学精确测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标等方面的研究。E-mail: fchen@aiofm. ac. cn

导师简介: 郑小兵(1969—),博士,研究员,主要从事光辐射测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和光学海洋学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm. ac. cn

性测量的不确定度应当也达到 10^{-4} 量级,才能与陷阱探测器的绝对不确定度相匹配。

线性是探测器^[7]的基本性质之一。当探测器响应度恒定时,即探测器的响应度不随入射光功率的变化而变化,探测器是线性的。任何入射光功率变化引起的响应度的变化都被认为是非线性的。探测器的线性与自身产生的光电流、入射光功率有关,与探测器的线性与波长无关^[8,9]。线性测量是光辐射度学^[10]研究和光电传感器性能评估不可缺少的环节之一。多数探测器和测量系统都存在线性问题,一般情况下对一个探测器或测量系统的定标只能在有限点进行,对于定标点以外的大部分测量区域只能靠探测器和测量系统的线性来推算。本文通过研制线性测量系统,精确测量 Si 陷阱探测器^[11,12]和 InGaAs 陷阱探测器的非线性因子,描述了测量方案和非线性因子的测量结果,分析了测量的不确定度以及整个测量系统的联合不确定度。

2 原 理

探测器的线性^[13]测量研究开始得很早。自 1897 年以来,人们提出了多种测量探测器线性的方法,从原理上可分为直接测量法和间接测量法。直接测量法主要是叠加法^[14,15],间接测量法有距离平方反比法^[16]、滤色片或滤色片组合法^[17,18]、偏振片法^[19]等。间接测量法大多引入辅助量进行测量,在保持入射光功率不变的情况下,将已知透射率的滤光片组合放入光路中,或改变光源与探测器间的距离,或在光路中加入偏振片,通过旋转偏振片的角度

控制入射光的能量。进而根据不同的入射光能,产生相应的响应度,响应度与入射光能量之间的关系可以评价探测器的线性优劣。间接测量法的优点是测量速度快、测量过程简单,缺点是误差源复杂,由于测量时引入了辅助量,例如滤光片的透射率以及偏振片的偏振度的测量,必然会引入额外的误差,测量结果的精度相对难以控制。本文选择光束叠加法作为线性测量方法。

叠加法基本原理是光束的叠加性质,先用功率为 P 的光照射探测器,得到光电流 I_{AB} ;然后通过分束器把入射光功率分成 P_A 和 P_B 大致相等的两部分,分别照射探测器,得到光电流 I_A 和 I_B ;如果 $I_A + I_B = I_{AB}$,那么探测器是线性的,如果 $I_A + I_B \neq I_{AB}$,探测器是非线性的。探测器线性可以用国际照明委员会(CIE)推荐的非线性因子表示为

$$K = \frac{I_{AB}}{I_A + I_B} - 1. \quad (1)$$

3 实验装置

根据叠加法原理,建立了一套如图 1 所示的光路,其中光源使用单波长激光光源。以前测量探测器线性光源一般采用扩展光源而很少采用激光,因为灯的稳定性能达到 0.1% 量级,而激光器的功率稳定性一般只能在 5% 量级。随着激光功率稳定器的发展,激光的稳定性可以达到 $8 \times 10^{-5}/h$ 量级。由于待测陷阱探测器为 Si 陷阱探测器和 InGaAs 陷阱探测器,要在两在同一波长下对二者线性进行比较,所以选择波长为 944 nm 的激光。

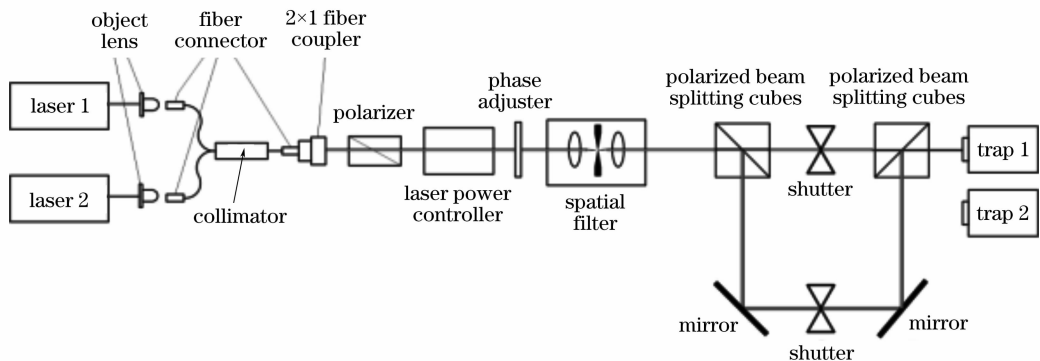


图 1 实验光路示意图

Fig. 1 Sketch of experimental setup

由于近红外不能为裸眼所见,这将给近红外光束准直调整、光路调整、近红外光斑调节到探测器腔体中带来困难。为了解决上述困难,利用光纤耦合器将可见光和近红外光联系起来,达到利用可见光

调节近红外光路的目的。利用 2×1 光纤耦合器实现可见光和近红外光两束激光共轴输出。从耦合器出射的光经过准直器和偏振器得到平行、垂直偏振的光束,激光功率控制器可调节探测器接收的激光

功率,并将其稳定在 $8 \times 10^{-5}/\text{h}$ 。为了消除光束高阶模式对测量精度的影响,采用空间滤波器保证只有良好基模光束进入陷阱探测器。激光功率控制器和空间滤波器之间放置一个相位调节器,用来调节激光光束的偏振态。

空间滤波器后放置偏振分光棱镜,可以把一束光分成振动方向相互垂直的两束光,其中水平偏振方向的光直接从棱镜中透射过去,而垂直振动方向的光以 90° 从棱镜中反射出去,经过两个反射镜的两次垂直反射,又与水平偏振方向的光束相交。在光束交汇点上放置一个偏振分光棱镜,它的方向与第一个棱镜相反,它的作用变成了一个合束镜,因此两束光合成一束相互叠加的光入射到探测器。由于两束光偏振方向相互垂直,所以在探测器光敏面上不会产生干涉,因此不会对测量精度产生影响。由于探测器采用了三片反射式陷阱结构,如图 2 所示,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态非敏感。在两个光路中分别安装两个电子快门,通过快门的开合来控制光路的通断,即可以测量透射光、反射光和叠加光束。

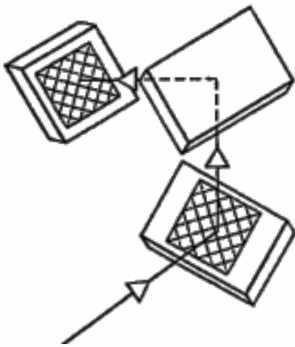


图 2 三片立体反射型陷阱探测器

Fig. 2 Three-dimensional three-piece reflected trap detector

光路利用可见光调节进行近红外测量,因此需要对不同波长之间由于色散效应造成对测量的影响进行分析和估算^[20],并在光路调节中加以考虑和适当的修正。这些影响包括空间滤波器中显微物镜焦距的变化、光斑尺寸的变化和光束准直性的变化等。

光电探测器所接收到的光信号转化为电压值,非线性因子可为

$$N = \frac{V_{AB}}{V_A + V_B} - 1, \quad (2)$$

式中 V_A 和 V_B 为探测器分别测光束 A 和光束 B 的电压值, V_{AB} 为两个光束叠加在一起时探测器所测的

电压值。

4 探测器线性测量和不确定度分析

4.1 硅陷阱探测器线性测量结果

根据实验装置,在 $0.1 \sim 200 \mu\text{W}$ 范围内,测量了硅陷阱探测器的非线性因子。图 3 和图 4 给出 Si 陷阱探测器和 InGaAs 陷阱探测器非线性因子曲线。

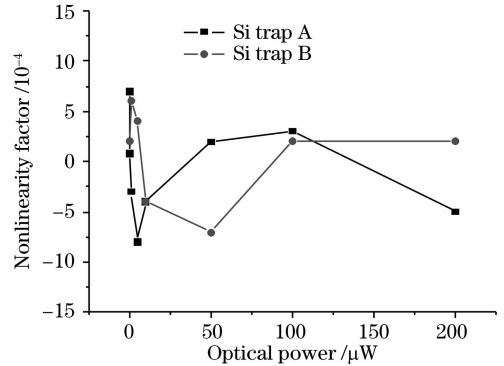


图 3 硅陷阱探测器非线性因子

Fig. 3 Nonlinearity factor of Si trap detector

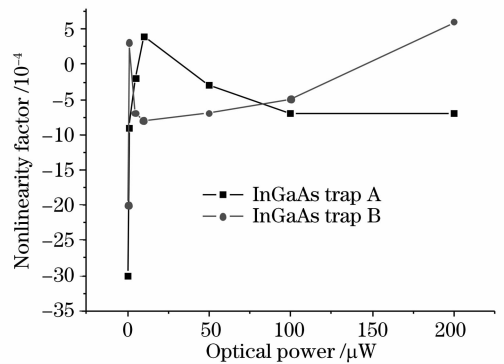


图 4 InGaAs 陷阱探测器非线性因子

Fig. 4 Nonlinearity factor of InGaAs trap detector

4.2 不确定度分析

测量系统的不确定度是由以下几个因素共同作用产生:

1) 光源不稳定产生的不确定度,光源带来的不确定度主要是激光功率及稳定性。随着激光功率稳定器的发展,激光功率和稳定性的问题得到了有效解决。在光路加入了激光功率稳定器,可使激光功率稳定在 $8 \times 10^{-5}/\text{h}$ 范围内。

2) 叠加光束可能在探测器光敏面干涉产生的不确定度。在光路中光学元件要保持一定偏角放置,防止反射光原路返回产生干涉。对于叠加光路,使用偏振分光棱镜可以把入射光分成偏振方向相互垂直的两束光,在两束光叠加时探测器光敏面不会产生干涉,把干涉的影响降到最低。

3) 探测器本身性能不稳定产生的不确定度,主要是探测器光敏面的均匀性、稳定性。

4) 其他因素,包括杂散光、温度漂移、数据采集误差等。对于杂散光的影响,首先保证实验必须在暗室中进行,叠加光路放置在暗仓中,只留有小孔保证激光的入射和出射,在暗仓内不涂高吸收的黑色涂层,尽可能地降低杂散光在暗仓中的反射,在光路中加入光阑减小杂散光对测量的影响。对于温度、数据采集等误差,通过缩短测量的时间、降低测量不确定度。

5) 测量本身的不确定度,根据(2)式,使用国家计量技术规范 JJF1059-1999 的“测量不确定度评定与表示”进行计算。

本文所有被测量的结果都是取多次测量的平均

值,即

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3)$$

式中 n 为测量次数, x_i 为第 i 次测量结果。

根据“测量不确定度评定与表示”,测量结果的标准不确定度在数值上等于均值的标准偏差,即

$$u_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n(n-1)}. \quad (4)$$

通常使用的是相对标准不确定度,即标准不确定度与均值的比值:

$$u_{rx} = u_x / x, \quad (5)$$

本文不确定度在数值上等于测量值均值的标准偏差。根据不确定度的传递定律,非线性因子的不确定度为

$$u_N^2 = \left(\frac{1}{V_A + V_B} \right)^2 u_{V_{AB}}^2 + \left[\frac{V_{AB}}{(V_A + V_B)^2} \right]^2 u_{V_A}^2 + \left[\frac{V_{AB}}{(V_A + V_B)^2} \right]^2 u_{V_B}^2, \quad (6)$$

一般采用相对不确定度

$$u_{rN} = \frac{u_N}{N} = \sqrt{u_{rV_{AB}}^2 + \left(\frac{V_A}{V_A + V_B} \right)^2 u_{rV_A}^2 + \left(\frac{V_B}{V_A + V_B} \right)^2 u_{rV_B}^2}, \quad (7)$$

根据测量所得到的非线性因子,可以计算测量的不确定度。

由不确定度传递定律可知,陷阱探测器线性测量系统不确定度由几个不确定度因子共同产生,根据不确定度传递定律^[6],线性测量系统相对联合不确定度为

$$u_{rR} = \frac{u_R}{m_R} = \sqrt{\frac{1}{P^2} u_P^2 + \frac{1}{U^2} u_U^2 + \frac{1}{S^2} u_S^2 + \frac{1}{V^2} u_V^2 + \frac{1}{N^2} u_N^2} = \sqrt{u_{rP}^2 + u_{rU}^2 + u_{rS}^2 + u_{rV}^2 + u_{rN}^2}, \quad (8)$$

式中 P 为激光功率产生的不确定度, U 为探测器空间不一致性产生的不确定性, S 为探测器不稳定性产生的不确定度, V 为其他因素产生的不确定度, N 为测量本身的不确定度。

表 1 是给出利用(8)式计算得到的线性测量系统的不确定度。从表可见, Si 陷阱探测器联合不确定度分别为 0.0318% 和 0.0266%, InGaAs 陷阱探测器由于空间均匀性产生的不确定度比较大,其联合不确定度分别为 0.063% 和 0.0687%。取不确定度最大值为测量系统的不确定度。

表 1 线性测量系统不确定度 ($/10^{-4}$)

Table 1 Uncertainty ($/10^{-4}$) of linearity measurement system

Trap detector	Si trap A	Si trap B	InGaAs trap A	InGaAs trap B
Laser power u_P	0.55			
Detector spatial uniformity u_U	1.99		6.13	6.4
Detector stability u_S	0.67		0.81	1.24
Other uncertainty source u_V	0.03			
Measurement uncertainty u_N	2.32	1.53	2.34	2.11
Combined uncertainty u_{rR}	3.18	2.66	6.63	6.87

5 结 论

介绍了一种高精度的光电探测器线性测量系统。实验表明,入射光功率在 0.1~200 μW 范围内,两个硅探测器的非线性因子小于 0.08% 以内,在所测光功率范围内保持良好的线性;两个 InGaAs

探测器在 0.1 μW 功率点,非线性因子在 0.3% 左右。由于 InGaAs 探测器响应率比 Si 探测器低,在低功率点时外部噪声变大,对测量结果的精度有很大的影响,而在其他功率点上非线性因子都小于 0.09%。Si 陷阱探测器联合不确定度为 0.0318%,

而 InGaAs 陷阱探测器联合不确定度为 0.0687%。如果除去光源等产生不确定度的因素,那么系统本身的不确定度远小于这个值。为了进一步扩大陷阱式光电探测器的应用领域,有必要在更宽的光功率范围测量其线性,因此测量系统要进一步扩大测量的范围、降低测量不确定度,提高测量的精度。

参 考 文 献

- 1 E. F. Zalewski, J. Geist. Silicon photodiode spectral response self-calibration[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(8): 1214~1216
- 2 N. P. Fox. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes[J]. *Metrologia*, 1996, **32**(6): 535~543
- 3 N. P. Fox, C. J. Chunnillall, M. G. White. Detector based transfer standards for improved accuracy in spectral irradiance and radiance measurements[J]. *Metrologia*, 1998, **35**(4): 555~561
- 4 L. Werner, J. Fischer, U. Johannsen U *et al.*. Accurate determination of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 238 nm and 1015 nm using a laser-based cryogenic radiometer[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(4): 279~284
- 5 L. Werner, R. Friedrich, U. Johannsen *et al.*. Precise scale of spectral responsivity for InGaAs detectors based on a cryogenic radiometer and several laser sources[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 523~526
- 6 B. N. Taylor, C. E. Kuyatt. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results. <http://physics.nist.gov/pubs/guidelines>
- 7 Li Li, Lu Qisheng, Jiang Houman *et al.*. Photoconduction-type CdS detector irradiated by two laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 85~89
李 莉, 陆启生, 江厚满等. 双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 85~89
- 8 Toomas Kübarsepp, Atte Haapalinna, Petri Kärhä *et al.*. Nonlinearity measurements of silicon photodetectors[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(13): 2716~2722
- 9 Atte Haapalinna, Toomas Kübarsepp, Petri Kärhä *et al.*. Measurement of the absolute linearity of photodetectors with a diode laser[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**(11): 1075~1078
- 10 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 749~752
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 749~752
- 11 Feng Yu, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Optical radiometric calibration based on correlated photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 457~460
冯 瑜, 郑小兵, 张 伟等. 基于相关光子的光辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 457~460
- 12 Li Shuang, Wang Ji, Zhang Junping *et al.*. Highly accurate calibration of optical radiation based on cryogenic radiometer at visible and near infrared spectrum (488~944 nm) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 609~613
李 双, 王 骥, 章骏平等. 可见-近红外(488~944 nm)基于低温辐射计的高精度光辐射绝对定标研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 609~613
- 13 C. L. Sanders. A photocell linearity tester[J]. *Appl. Opt.*, 1962, **1**(3): 207~211
- 14 W. Budde. Multidecade, linearity measurements on Si photodiodes[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(10): 1555~1558
- 15 Zeng Danhua, Xiao Tiqiao, Xi Zaijun *et al.*. Detector nonlinear error and compensation in phase-stepping interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1358~1362
曾丹华, 肖体乔, 席再军等. 相移干涉仪中探测器非线性误差及其补偿[J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1358~1362
- 16 D. A. Swyt, J. G. LaRock. Inverse-fourth apparatus for photometric calibrations[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, **49**(8): 1083~1089
- 17 R. C. Hawes. Technique for measuring photometric accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(6): 1246~1253
- 18 C. L. Sanders. Accurate measurements of and corrections for nonlinearities in radiometers[J]. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1972, **76**(4): 437~455
- 19 H. E. Bennett. Accurate method for detecting photometric linearity[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(8): 1265~1270
- 20 Li Shuang, Wu Haoyu, Li Zhaozhou *et al.*. Highly accurate calibration of optical radiation detectors at near infrared spectrum [J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 498~501
李 双, 吴浩宇, 李照洲等. 光辐射标准探测器近红外高精度定标的实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 498~501