

硅光电探测器光谱量子效率的测定

林延东 吕亮 白山

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要 光电探测器量子效率的准确测定对光辐射计量具有重要意义。基于低温辐射计, 在氦氛、氩氦离子以及钛蓝宝石激光器的 10 个波长上测量了无窗型硅光电探测器的外量子效率。根据光电探测器表面反射比和二氧化硅层厚度的关系, 基于在 3 个激光波长上光电探测器表面反射比的测量结果, 通过最小二乘法得到光电探测器表面二氧化硅层的厚度, 并由此得到光电探测器表面的光谱反射比。根据表面反射比和激光波长上探测器外量子效率结果得到相应波长的内量子效率。进行了光谱量子效率拟合。在 488~900 nm 光谱范围内量子效率模型拟合结果与在相应激光波长上测定的量子效率结果的偏差在 1.5×10^{-4} 之内。

关键词 测量; 辐射度量学; 硅光电探测器; 量子效率

中图分类号 TB96 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1212005

Determination of Spectral Quantum Efficiency of Silicon Photodetector

Lin Yandong Lü Liang Bai Shan

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract The determination of quantum efficiency of a photodetector is of great importance in radiometry. External quantum efficiency of windowless silicon photodetectors is measured with cryogenic radiometer at ten wavelengths of He-Ne, Ar⁺ - Kr⁺ and Ti:sapphire lasers. Based upon measured reflectance at three laser wavelengths, the thickness of the silicon dioxide layer is obtained through least square method according to the relation between surface reflectance of a photodetector and the thickness of its silicon dioxide layer. Spectral reflectance of the photodetector surface is thereby obtained. Internal quantum efficiency is calculated from surface reflectance and external quantum efficiency result at the laser wavelengths, and spectral quantum efficiency is fitted. The deviation of modeled result from experimental result is within 1.5×10^{-4} in the spectral range from 488 to 900 nm.

Key words measurement; radiometry; silicon photodetector; quantum efficiency

OCIS codes 120.3940; 040.5160; 120.5630; 230.5160; 230.5170

1 引 言

光电探测器是光辐射测量的基础, 而量子效率是光电探测器最重要的参数^[1~4]。世界各国计量院都对光电探测器量子效率的测量进行了长期的研究, 并不断取得进展。

目前实现光电探测器量子效率测量的绝对方法主要有 3 种: 光电二极管自校准^[5]、相关光子检测^[6,7]和基于低温辐射计的量子效率测量^[8]。性能优异的光电探测器的内量子效率接近 100%, 基于这个特性发展出光电二极管自校准技术。但是受到物理机制无法进一步准确确定的限制, 这种方法实

现量子效率测量的最好准确度约为 5×10^{-4} 。相关光子检测技术是一项独特的技术, 采用这种方法实现量子效率测量不依赖于对其他任何物理量的溯源, 只要实现对纠缠光子对的单独和符合计数即可。但这一技术目前还处在发展阶段, 近期的发展目标是进入 10^{-4} 量级, 并且其测量的功率水平也相对较低^[6,7]。基于低温辐射计的量子效率测定是目前最准确的方法, 在激光波长上光电探测器量子效率测量的准确度能够达到优于 10^{-4} 的水平^[8]。对激光波长之间的光谱范围, 可以通过建立内量子效率的模型和测定探测器表面的光谱反射比, 采用光谱内

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-08-09

作者简介: 林延东(1964—), 男, 研究员, 主要从事光辐射测量方面的研究。E-mail: linyd@nim.ac.cn

插来确定探测器的量子效率。在硅光电探测器主要的灵敏波段,利用这一方法可以得到高准确度的光谱量子效率结果。

本文介绍了基于低温辐射计在 476.5~950 nm 的 10 个激光波长上光电探测器外量子效率测量的结果。通过光电探测器表面光谱反射模型的建立,在激光波长上确定了探测器的内量子效率,对量子效率模型的适用性和准确性进行了研究。

2 外量子效率的测定

光电探测器的外量子效率是入射到探测器的光子数转化为可测量的电子数的比例。光电探测器的量子效率一般是指外量子效率。基于低温辐射计对光电探测器量子效率测量的方法如下:1)用低温辐射计测量光束功率稳定、空间分布洁净的激光束的光功率 P ;2)测量光电探测器在同一光束照射下的响应电流 I 。于是可得光电探测器的外量子效率

$$\eta_e = \frac{\left(\frac{I\Delta t}{e}\right)}{\frac{P\Delta t}{(hc_0/n\lambda)}} = \frac{Rhc_0}{ne\lambda} = 1239.48 \frac{R}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 h 为普朗克常数; c_0 为真空中的光速; e 为电子电量; λ 为空气中的波长(单位为 nm); n 为空气在该波长上的折射率; R 为探测器的响应度, $R = I/P$ (单位为 A/W); Δt 为测量的时间长度(单位为 s)。

硅光电探测器是目前半导体加工制造工艺所能实现的最接近理想探测器特性的实用探测器。研究表明 S1337 型探测器的光谱内量子效率较平坦,适于采用内插法确定激光波长之间的内量子效率。采用自行研制的由 3 片无窗型 S1337 制作的反射式陷阱探测器作为标准探测器,在 10 个激光波长对陷阱探测器进行了量子效率的测量。其中一个陷阱探测器的外量子效率结果如表 1 所示。

表 1 光电探测器外量子效率

Table 1 External quantum efficiency of photodetector

Wavelength /nm	External quantum efficiency
476.47	0.91855
488.00	0.99306
514.54	0.99391
530.88	0.99465
568.21	0.99530
632.82	0.99616
647.11	0.99628
850.00	0.99688
900.00	0.99641
950.00	0.99060

3 无窗型探测器表面反射比模型

光辐射入射到光电二极管,进入光电转换的结区之前,表面的反射是影响二极管量子效率的重要因素。无窗型硅光电探测器的外量子效率可以表示为

$$\eta_e(\lambda) = [1 - \rho(\lambda)]\eta_i(\lambda), \quad (2)$$

式中 $\rho(\lambda)$ 为探测器前表面的反射比, η_i 为探测器的内量子效率,即透过探测器的表面、入射到探测器结区的光子数转化为可测量的电子数的比例。

对入射光的反射,光电二极管从物理构造上可视为一个表面带有二氧化硅薄层的硅基片。因此,光电二极管表面的反射比可通过二氧化硅膜层厚度、二氧化硅的折射率 n_2 和硅的折射率 n_3 计算出。其振幅反射比为^[9]

$$\bar{r} = r_{01} + \frac{t_{01}t_{10}\bar{r}_{12}\exp(-2i\beta)}{1 + r_{01}r_{12}\exp(-2i\beta)}, \quad (3)$$

式中 r_{lm}, t_{lm} 分别为第 l 与 m 界面间的振幅反射比和透射比,是偏振方向、入射角及两相关介质折射率的函数; β 为波面像差, $\beta = 2\pi n_1 d \cos \theta_1 / \lambda$,其中 d 为 SiO₂ 表层厚度。功率反射比通过振幅反射比得到

$$\rho_{s,p}(\theta_0) = |\bar{r}|^2. \quad (4)$$

对 3 片反射式陷阱探测器,正入射的线偏振光束经历两次对于 s 偏振面是 45°入射角的反射,一次垂直入射以及两次对于 p 偏振面是 45°入射角的反射。陷阱探测器的反射比为

$$\rho_{\text{trap}}(\lambda) = \rho(0^\circ)\rho_s^2(45^\circ)\rho_p^2(45^\circ). \quad (5)$$

以上分析表明,探测器总反射比与 SiO₂ 表层厚度之间有明确对应关系。为得到表征 3 个光电二极管构成的陷阱探测器表面 SiO₂ 层综合效果的等效厚度,在接近正入射的条件下在不同波长实验测量了探测器的反射比。测量的实验装置如图 1 所示。在 488,514,633 nm 这 3 个激光波长对探测器的反射比进行了测量。实际测量条件与正入射的偏离小于 2°。通过陷阱探测器的角度响应实验验证了偏离正入射的影响。测量结果表明,在 3°之内,探测器响应度的变化小于 5×10^{-5} 。

通过激光波长上实测的反射比的测量结果,根据(5)式用最小二乘法得到 SiO₂ 表层厚度为 26.9 nm。基于这个厚度得到陷阱探测器光谱反射比,如图 2 所示。

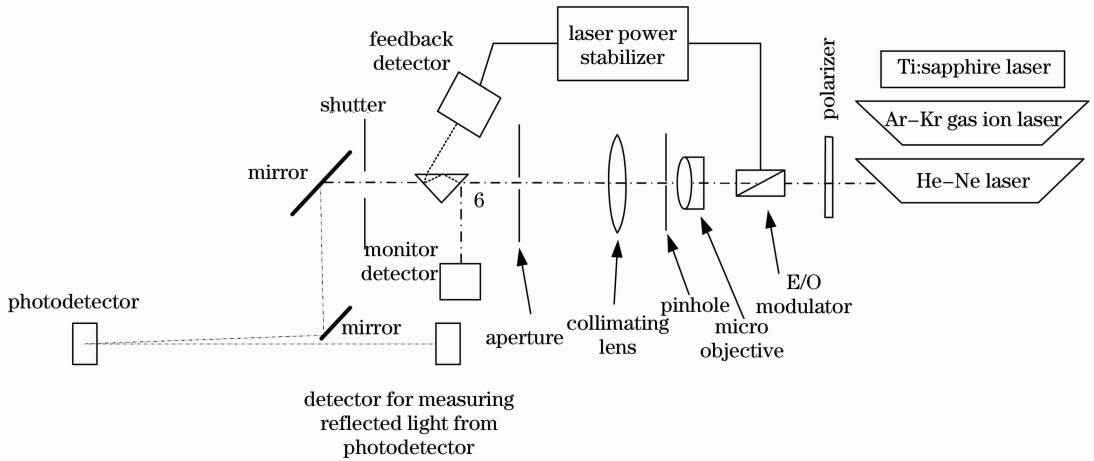


图 1 探测器表面反射比测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of surface reflectance measurement facility for photodetectors

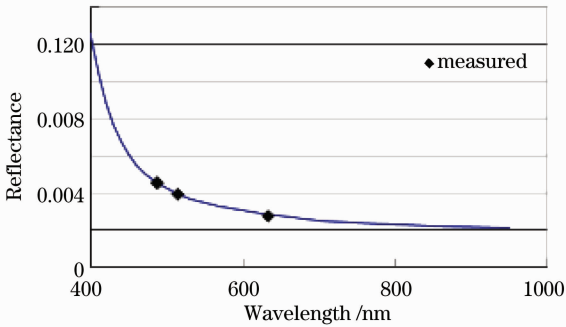


图 2 探测器表面光谱反射比

Fig. 2 Spectral reflectance of photodetector surface

4 内量子效率的确定

根据低温辐射计在激光波长上标定的探测器的外量子效率以及实验测量和理论计算确定的探测器表面的光谱反射比,得到陷阱探测器在激光波长上的内量子效率,如表 2 所示。

表 2 激光波长上探测器的内量子效率

Table 2 Internal quantum efficiency of photodetector at laser wavelengths

Wavelength /nm	Internal quantum efficiency
476.47	0.92304
488.00	0.99757
514.54	0.99784
530.88	0.99834
568.21	0.99858
632.82	0.99900
647.11	0.99906
850.00	0.99910
900.00	0.99857
950.00	0.99269

不同类型的探测器因物理结构的差异会有不同的参数值甚至不同的物理模型。光谱内量子效率的拟合计算采用 Gentile 等^[8]根据半导体理论提出的适用于选用探测器类型的内量子效率模型

$$\eta_i = P + \frac{1-P}{\alpha(\lambda)T} \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)T]\} - \frac{h}{\alpha(\lambda)L^2} \exp[-\alpha(\lambda)H], \quad (6)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为硅在波长 λ 处的吸收系数, H 为前区和耗尽区的宽度之和, L 是少数载流子的体扩散长度, T 为前表面到耗尽层的深度, P 为载流子在二氧化硅与硅表面的复合损耗。其中 $\alpha(\lambda)$ 在所考虑的大于 400 nm 波长范围内近似为^[10]

$$\alpha(\lambda) = A_1 \exp\left(\frac{A_2}{\lambda - \lambda_0}\right) + A_3 \lambda + A_4 \lambda^{-1} + A_5, \quad (7)$$

式中 $A_1 = 0.53086 \mu\text{m}^{-1}$, $A_2 = 0.469643 \mu\text{m}$, $A_3 = -0.28801 \mu\text{m}^{-2}$, $A_4 = -0.988739$, $A_5 = 0.282028 \mu\text{m}^{-1}$, $\lambda_0 = 0.256897 \mu\text{m}$ 。

在 488~900 nm 的光谱范围内,通过最小二乘法对测量结果用(6)式拟合,拟合结果如图 3 所示。得到的内量子效率拟合结果与实际测量结果最大相对偏差仅为 1.5×10^{-4} 。这个结果表明,在实验的不确定度范围内,该光谱范围内拟合确定的光谱量子效率模型与实验结果相符。

根据前面得到的光电探测器表面光谱反射比和内量子效率模型,可以得到光电探测器在 488~900 nm 光谱范围内的外量子效率

$$\eta_e = [1 - \rho_{\text{trap}}(\lambda)] \left\{ P + \frac{1-P}{\alpha(\lambda)T} \{1 - \exp[-\alpha(\lambda)T]\} - \frac{h}{\alpha(\lambda)L^2} \exp[-\alpha(\lambda)H] \right\}. \quad (8)$$

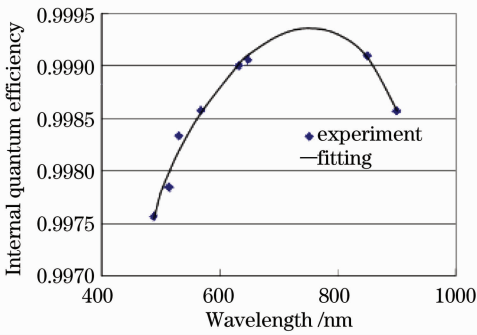


图3 拟合的内量子效率结果与实验结果

Fig. 3 Result of fitted internal quantum efficiency and experimental results

5 结 论

在 476.5~950 nm 波段内,基于低温辐射计测量了无窗型硅光电二极管组成的陷阱探测器的外量子效率。根据陷阱探测器光谱反射比模型和 3 个激光波长上反射比测量的结果,得到探测器表面二氧化硅层的厚度。根据二氧化硅层的厚度,得到陷阱探测器表面的光谱反射比。在 488~900 nm 波段内,根据 Gentile 等^[8]提出的内量子效率模型得到的内量子效率计算结果与激光波长上测定的量子效率结果相符,偏差在 1.5×10^{-4} 之内。该结果表明,在实验不确定度范围内,量子效率模型与实验结果相符。

在 476.5~950 nm 波长范围内,探测器的内量子效率在光谱的短波和长波两侧下降较多,因此需要在更宽的光谱范围内尝试更适合的内量子效率模型。另外,为使模型与原始数据更好地符合,也需要在 650~850 nm 之间其他激光波长得到实测量子效率结果,以确保在更宽的光谱范围内量子效率模型与实验结果符合程度较高。

参 考 文 献

- 1 Lin Yandong. Fifty Years of Research on Metrology [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005. 839~845
林延东. 计量科学研究 50 年 [M]. 北京:中国计量出版社,2005. 839~845
- 2 Yang Zhaojin, Yu Shuai, Xie Qi. Radiation metrology technology after into 21 century [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(3): 031201
杨照金,于帅,解琪. 迈入 21 世纪的光辐射计量测试技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(3): 031201
- 3 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1310~1314
徐秋云,郑小兵,张伟等. 利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1310~1314
- 4 Chen Hongyao, Zhang Liming, Zou Peng *et al.*. 400~900 nm spectral irradiance of cryogenic radiometer-based irradiance standard lamp using system level calibration method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3349~3353
陈洪耀,张黎明,邹鹏等. 系统级定标方法实现基于低温辐射计的标准灯 400~900 nm 波段光谱辐照度 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3349~3353
- 5 E. F. Zalewski, C. R. Duda. Silicon photodiode device with 100% external quantum efficiency [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(18): 2867~2873
- 6 Jessica Y. Cheung, Martin P. Vaughan, John R. Mountford *et al.*. Correlated photon metrology of detectors and sources [C]. *SPIE*, 2004, **5161**: 365~376
- 7 Lü Liang, Lin Yandong. Realization and correction of coincidence counting setup used in correlated photon detection [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2011, **19**(5): 1005~1012
吕亮,林延东. 相关光子符合计数的实现及修正 [J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(5): 1005~1012
- 8 T. R. Gentile, J. M. Houston, C. L. Cromer. Realization of a scale of absolute spectral response using the National Institute of Standards and Technology high-accuracy cryogenic radiometer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22): 4392~4402
- 9 A. Haapalinnä, P. Kärhä, Erkki Ikonen. Spectral reflectance of silicon photodiodes [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 729~732
- 10 L. Werner, J. Fischer, U. Johannsen *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

栏目编辑:何卓铭