

# 用 Si 光电二极管标定软 X 射线探测器

曹继红, 尼启良, 陈 波

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了实现软 X 射线波段光源相对光谱分布的测量, 引进了一种利用新型软 X 射线波段传递标准探测器—Si 光电二极管对软 X 射线探测器进行标定。标定了软 X 射线波段光谱测量实验中常用的探测器—通道电子倍增器在放大电压为 1.3 kV 时的量子效率, 并对实验结果进行了分析, 得出在 8~30 nm 波段内探测器标定误差为 5.7%~8.9%。

**关键词:** 软 X 射线探测器; 软 X 射线; 硅光电二极管; 标定; 量子效率

**中图分类号:** TN366 **文献标识码:** A

## Calibration of soft X-ray detector

CAO Ji-hong, NI Qi-liang, CHEN Bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics & Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to measure the relative spectrum distribution of soft X-ray source, it is proposed to calibrate the channel electron multiplier (CEM) using a silicon transfer standard photodiode calibrated by NIST. The quantum efficiency of the CEM has been determined using the calibration method proposed while CEM was biased to 1.3 kV. The analysis of calibration results indicates that the calibration error of CEM is 11%~17% in the 8~30 nm region.

**Key words:** soft X-ray detector; soft X-ray; silicon photodiode; detector calibration; quantum efficiency

## 1 引言

实验室经常需要测量软 X 光源的绝对或相对光谱分布, 并对其光谱特性进行研究。在过去的十几年里, 这种要求在基础和应用研究方面更是与日俱增。如医学领域, 由于只有某个波段的 X 射线能治疗肿瘤, 就必须知道 X 射线源是否在这个波段有最大的辐射强度。然而, 在实际光谱测量中, 单色仪、探测器在不同的波段对光源的辐

射有不同的响应效率, 未经标定的测量系统的测量结果不能反映光源光谱辐射的真实情形, 所以需要单色仪、探测器在不同波段的响应效率进行标定。标定软 X 射线探测器的传统方法是利用同步辐射、稀有气体电离室或壁稳氩弧灯等标准(或传递标准)仪器进行标定, 而本文则是利用一种新型的传递标准探测器—Si 光电二极管对软 X 射线探测器进行标定。虽然 Si 光电二极管在可见光和红外线等波段已得到广泛应用, 但在软 X 射线波段的使用在国内尚无先例。

收稿日期: 2003-11-22; 修订日期: 2003-12-04.

基金项目: 国家重点基金项目 (No. 10333010)

Si 光电二极管是一种新型半导体光敏探测器。基于 Si 光电二极管在软 X 射线波段有较高稳定的量子效率和高分辨率的探测本领, 它逐渐受到短波光谱学领域的科学工作者的青睐。欧洲科学家在 SOHO 人造卫星上用它来研究太阳光谱, 美国 NASA 计划把它安装到 COES、TIMED 和 EOS 等太空探测仪器上, 俄罗斯的卫星上也安装了 Si 光电二极管探测器。由 IRD 公司 (International Radiation Detectors Inc.) 开发的 Si 光电二极管是美国 NIST (National Institute of Standards and Technology) 认可的在 5 ~ 250 nm 波段唯一的传递标准探测器。近年来, Si 光电二极管作为极紫外和软 X 射线波段的传递标准探测器正逐渐成为该波段辐射计量的主流探测器<sup>[1-5]</sup>。

## 2 Si 光电二极管作软 X 射线传递标准探测器的优越特性

用作传递标准探测器的 Si P-N 结光电二极管 AXUV 系列适用于极紫外光和软 X 射线波段 (5 ~ 254 nm)。图 1 是其内部结构; 图 2 是其外观尺寸。其工作原理是: 当一定能量 (约 3.7 eV) 的光子入射到二极管, 便在二极管中产生一个电子空穴对 (载流子), 电子空穴对在 PN 结电场的作用下形成一个与光子数成正比的电流, 由外电路导出并测量。在短波段的光子能量比 3.7 eV 要大很多, 一个光子产生的电子空穴对就不只一个, 因而使量子效率随波长变短而线性增加。

理论上 Si 光电二极管的电流测量用高精度静电计就可以, 但一般的商用静电计外形较大, 无法和二极管靠近连接, 必须借助较长的电缆, 这势必带来强噪音信号的干扰。采用一个前置运算放大器, 将其与二极管紧密连接后封装到圆柱形铝质容器里。只有光入射到二极管的窗孔和导线的出孔处有一个小孔和外界相通, 其余空间全由铝屏障 (见图 3), 从而消除大部分噪音信号干扰。其噪音性能几乎与电子倍增管和雪崩光敏管相近。

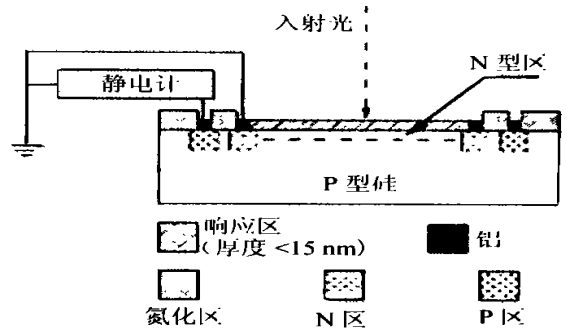


图 1 Si 光电二极管内部结构  
Fig. 1 Structure of the Si photodiode

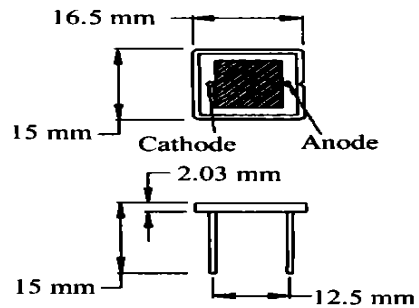


图 2 AXUV-100 的外形  
Fig. 2 Figure of AXUV-100

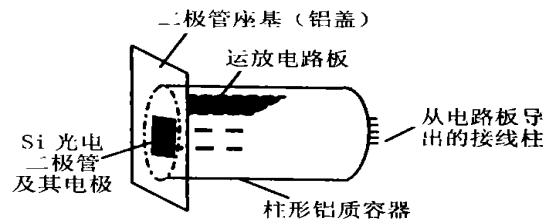


图 3 Si 光电二极管的安装  
Fig. 3 Setup of the Si photodiode

下面是实验中实际应用的 Si 光电二极管 AXUV-100 的一些特性:

量子效率: 量子效率是指一个光子进入探测器后产生的光电子数。根据工作需要, 实际使用的 Si 光电二极管的标定范围是 5 ~ 50 nm。图 4 是其实际量子效率曲线。有了量子效率, 就可以按照公式

$$I = i_d / eP_{se} \quad (1)$$

计算测得光子流量  $I$  (光子 / s),  $P_{se}$  是 Si 光电二极管的量子效率,  $i_d$  是光电二极管测得的电流, 它

是波长的函数。

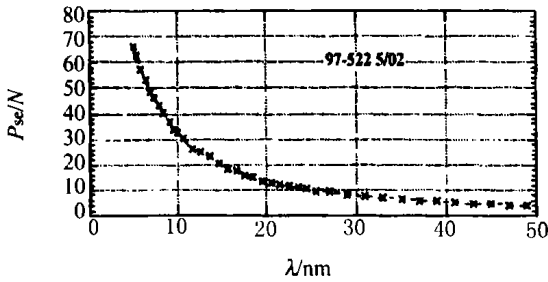


图 4 AXUV-100 的实际量子效率  
Fig. 4 Quantum efficiency of AXUV-100

**稳定性:** 指量子效率的稳定性。经过测试,在致密氧化膜的保护下, Si 光电二极管放入 100 % 的相对湿度环境下存放 4 周或者室温下存放若干年,量子效率几乎不发生变化。这种探测器保存方便。

**分辨率:** Si 光电二极管能分辨 3.63 eV 的光子,这也是半导体探测器普遍具有的优势。

此外还有其他特性,如较高的灵敏度,几 nA 的暗电流和几十到几百倍的信噪比等。与传统的软 X 射线探测器相比较,AXUV 光电二极管探测器还有很多优点:低噪音、无偏压、线路少、体积小、对磁场无感应、相对大的收集面积、量子效率的空间分布均匀以及较大的电流动态范围等。其光电转换发生在二极管的内部,不受外部污染的影响。所有这些都决定了它适合作实验室软 X 射线传递标准探测器。

### 3 通道电子倍增器标定实验

在相同条件下分别用通道电子倍增器和 Si 光电二极管 AXUV-100 测量单色仪输出的光谱强度(记为  $I_{go}$ , 单位光子/s),则由公式(1)有

$$I_{go} = i_{ds} / eP_s e = i_{dr} / eP_{re}, \quad (2)$$

$i_{ds}$  是 Si 光电二极管电流,  $i_{dr}$  是倍增器的电流,  $P_{re}$  是倍增器的量子效率。但是,实验中不是直接测量电流,而是利用积分电容  $Q = VC = i_{dt}$  的关系,测量电流的积分电压  $V$ ,即上式(2)可变换为

$$V_{ds} C_s / t_s P_s e = C_r V_{dr} / t_r P_{re}, \quad (3)$$

这仅是一个理想的计算公式,没有考虑运放和前置放大器的增益以及电子倍增器的放大倍数。不过运放电压和前置放大器电压是恒定的,增益是常数。只要在电子倍增器的放大电压一定的情况下,实际的计算公式与理想公式(3)就只差一个

常数,而且式(3)中的  $C, t$  对特定的 Si 光电二极管积分电路和电子倍增器积分电路而言也是常数。现在把所有的常数用  $K$  代替,得到测量的实验公式

$$P_{re} = KV_{dr} P_s e / V_{ds}, \quad (4)$$

实验具体步骤如下:在样品室的样品台上装上 Si 探测器和电子倍增器,布局如图 5。样品台可以在计算机控制的步进电机驱动下旋转。当完成一个探测器的测量工作后,在真空下转动样品台,使另一个探测器对准入射光。转动角度在实验前的大气状态下已经调节好。波长扫描范围是 8~30 nm,间距与 Si 光电二极管的量子效率曲线一致(见图 4)。真空度在  $\sim 10^{-4}$  Pa,采用氦气靶激光等离子体光源。测量数据由虚拟数据采集器采集和处理<sup>[6]</sup>。图 6 是分别用 Si 光电二极管和通道电子倍增器测得的单色仪输出的光谱分布(测量值是  $V_{dr}, V_{ds}$ )。图 7 是利用式(4)计算出的通道电子倍增器在放大电压为 1.3 kV 时的量子效率  $P_{re}$  的分布曲线。

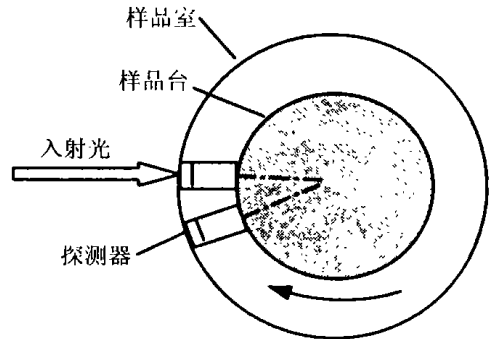


图 5 探测器的布局

Fig. 5 Positions of two detectors

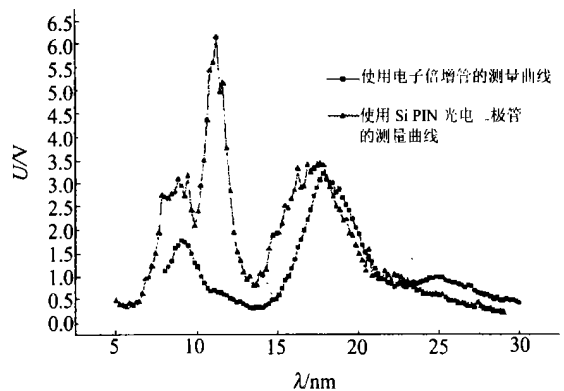


图 6 用 Si 光电二极管和电子倍增器测得的光谱

Fig. 6 Spectrum measured by photodiode and multiplier

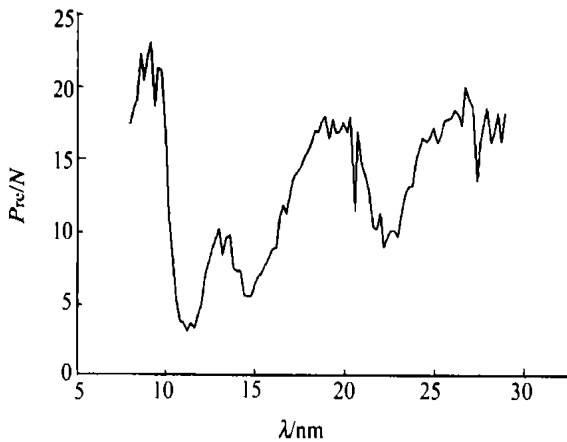


图 7 电子倍增器的效率曲线

Fig. 7 Efficiency of the electron multiplier

以认为  $K$  是线性变化的, 即放大电压的微小变化不会影响光谱的相对分布。

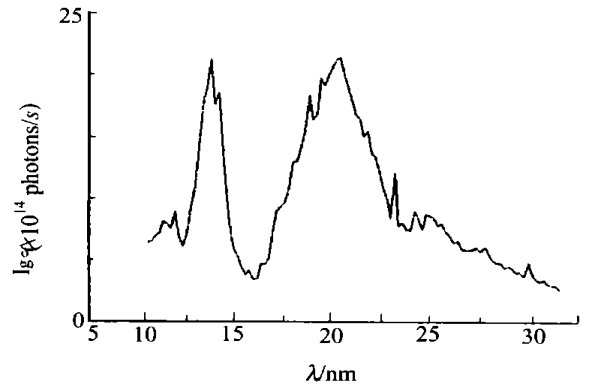


图 8 用电子倍增器测得的单色仪输出的光谱分布

 $I_{go}(C_S = 1 \text{ PF}, t_s = 40 \text{ ns})$ 

Fig. 8 Spectrum distribution of monochromator output, measured by electron multiplier

## 4 实验分析

图 8 是用标定后的电子倍增器测得的单色仪输出的光谱强度分布, 与用 Si 光电二极管测得的光谱分布相同。虽然在这次测量中电子倍增器的放大电压读数是 1.3 kV, 但由于读数时偶然误差的影响, 实际的放大电压可能和前面实验中的放大电压有所不同, 因而式 (4) 中的常数  $K$  发生一些变化。但在放大电压很小的变化范围内, 可

下面是探测器标定误差分析: 根据 NIST 对 Si 光电二极管的标定误差数据得出实际应用的 8 ~ 30 nm 波段内误差是 7 ~ 11 % (峰值波长 12.5 和 17.5 nm 处均为 8 %), 该误差来源于 NIST 的标定系统; 作传递标准探测器进行标定实验时的校准误差为 4 ~ 6 %, 该误差来源于 Si 光电二极管自身, 因而以高斯传递方式带入待标定的电子倍增器的误差为 5.7 ~ 8.9 %。

### 参考文献:

- [1] FONCK R J. Low noise photodiode detector for optical fluctuation diagnostics [J]. *Rev Sci Instr*, 1992, 63: 4924-4926.
- [2] EPPELDAUER G, HARDIS J E. Fourteen decade photocurrent measurement with large-area silicon photodiodes at room temperature [J]. *Appl Opt*, 1991, 30: 3091-3099.
- [3] FARNIKOVA M. Absolute measurement of soft X-ray emission by laser plasma using thermoluminescent dosimeters and semiconductor detectors [J]. *SPIE*, 1996, 2762: 113.
- [4] WINICK M. Synchrotron Radiation Sources [Z]. 1994.
- [5] RYC L. Application of silicon photodiode for studying X-ray emission from picosecond plasma [C]. *International Symposium Plasma*, 2001.
- [6] 曹继红, 尼启良, 巩岩. 虚拟仪器实现极紫外波段光谱数据采集和处理 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (6 增): 103-106.  
CAO J H, NI Q L, CONG Y, et al. Data acquisition and processing in EUV with labview program [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (6 增): 103-106. (in Chinese)

作者简介: 曹继红 (1978 -), 男, 四川邻水人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室硕士研究生, 主要研究方向为短波光学。E-mail: caojohn@sohu.com.cn