

文章编号: 1001-4322(2006)01-0077-04

# 用于激光等离子体中 X 射线测量的 单光子计数型 CCD 的标定\*

张双根<sup>1,2</sup>, 黄文忠<sup>2</sup>, 谷渝秋<sup>2</sup>, 蒋刚<sup>1</sup>, 熊勇<sup>2</sup>, 温贤伦<sup>2</sup>, 王光昶<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 原子分子物理研究所, 成都 610065;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 高温高密度等离子体物理国家级重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 介绍了单光子计数型 CCD 的工作原理。实验选择参数准确的 X 射线放射源前向辐照 CCD 的像元面, 计数由此产生; 通过积分获得 X 射线的强度分布, 在 CCD 处于单光子计数状态下, 扣除本底信号, 得到该型 CCD 产生一个计数所需的光子能量, 约 6.453 eV。标定了该型 CCD 的探测效率。结果表明: 在单光子计数型 CCD 的有效能区内, 对于不同能量的入射光子, 其探测效率不同, 在 5.3 keV 处获得最高探测效率 66%; 随着能量的增大, 探测效率降低。标定结果可为激光等离子体研究中定量测量 X 射线光谱提供实验参考。

**关键词:** CCD; 能量响应; 探测效率; 标定; X 射线

**中图分类号:** TN386.5

**文献标识码:** A

电荷耦合器件(charge-coupled devices, 简称 CCD)是从 20 世纪 70 年代初迅速发展起来的一种新型光电成像器件, 在信号处理和成像领域得以广泛应用<sup>[1]</sup>。单光子计数型 CCD 采用前向照射、深耗层制作工艺, 具有动态范围大、灵敏度高和线性度好、实时测量等特点, 是弱光信号测量的良好工具, 同时, 它也是激光等离子体光谱学重要的诊断设备。在激光等离子体相互作用过程中, 激光等离子体产生的 X 射线包含了丰富的物理信息, 可以通过它来研究激光-物质的相互作用、高温物质的特性以及等离子体中的原子物理过程等<sup>[2-3]</sup>。单光子计数型 CCD 作为十分重要的诊断设备, 其对 X 射线的响应特性直接影响实验测量结果的精确性, 是实验中不确定度的重要来源之一。

## 1 单光子计数型 CCD 的工作原理

CCD 器件以电荷作为信号, 构成 CCD 的基本单元是 MOS(金属-氧化物-半导体)结构, 在一定的偏压下, MOS 结构成为可储存电荷的分立势阱, 当光照射到硅片上时, 由光电效应产生的电荷将储存在 MOS 势阱中, 这些势阱构成了 CCD 的探测微元。一个 CCD 芯片由几百至上万个光敏微元组成, 这些微元组成线阵或面阵的 CCD 探测器。

表 1 单光子计数型 CCD 的主要技术参数

Table 1 Main technological parameters of single-photon counting CCD

energy/keV	imaging area	pixel size	dark current at -40 °C /(e <sup>-</sup> · pixel <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> )	nonlinearity	working temperature /°C
2~30	26.6 mm×26.0 mm	20 μm×20 μm	14.5	<2%	-55~20

实验标定的单光子计数型 CCD 的主要技术参数如表 1 所示。单光子计数型 CCD 采用面阵结构, 像敏元数为 1 300×1 340, 系统包括 ST133 控制器和 CCD 探测器两个组成部分。该 CCD 采用单光子计数技术, 即每个像素可对一个入射光子响应产生计数, 每个像素灵敏层上吸收的 X 射线光子能量通过光电效应损耗, 产生电子-空穴对(电子-空穴对的数目正比于入射光子的能量), 然后经过模-数转换成数字输出图像。利用相应的图像处理软件(如 WinView/32 或 WinSpec/32 等), 可以对输出信号进行处理, 获得不同像素单元的计数, 再经过统计可得到具有相同计数值的像素数量, 进而得到计数值-像素数的关系曲线。如果 CCD 处于单光子计数状态, 则像素数就表示同一能点的 X 射线光子数, 不同计数值表示不同能点, 但计数值对应的能量必须经过实验的精确标定。

\* 收稿日期: 2005-08-22; 修订日期: 2005-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(10275056); 国防科技重点实验室基金资助课题(51480010104ZS7702)

作者简介: 张双根(1979—), 男, 安徽潜山人, 硕士, 从事超短超强激光等离子体相互作用研究; shuanggenzhang@163.com。

## 2 标定方法与实验

标定实验布局为 X 射线源→CCD 探测器→计算机采集系统。实验标定的关键是寻找稳定性好、参数准确的放射性核素作为 X 射线放射源。本实验所用的放射源是点放射源,其相关参数<sup>[4-5]</sup>如表 2 所示。我们调整 CCD 探测器距放射源的距离,选择单能的或能量分支较少的 X 射线源,并要求测试系统分辨率足够高,以保证 CCD 处于单光子计数状态。我们选择放射源与单光子计数型 CCD 探测器的距离为 4.25 mm,单光子计数型 CCD 探测器前未放置晶体等分光元件。当放射源辐射的 X 射线辐照到单光子计数型 CCD 像元上时,产生计数,在每个像元接受单光子的条件下,通过对产生相同计数的像素进行积分,得到 X 射线的强度分布。通过改变单光子计数型 CCD 的曝光时间(单光子计数型 CCD 内部的电路设置可以控制曝光时间),可得到辐照单光子计数型 CCD 不同的 X 射线的积分强度。

利用 X 射线源产生的 X 射线,对单光子计数型 CCD 的能量刻度进行标定,得到单光子计数型 CCD 探测器产生一个计数(ADU)所需要的光子能量;根据不同能量的 X 射线,得到不同能点的单光子计数型 CCD 的探测效率。

表 2 放射性核素及其相关参数  
Table 2 Nuclides and relative parameters

nuclides	half-life	energy/keV	intensity/%	radiative activity/Bq
<sup>54</sup> Mn	312.12 d	5.412	22%	$2.100 \times 10^4$
		5.947	2.48%	
<sup>57</sup> Co	271.74 d	6.399 6	49.5%	$1.702 \times 10^4$
		7.058	5.91%	
<sup>109</sup> Cd	453 d	22.1	84.6%	$6.549 \times 10^4$
		25.0	17.8%	
<sup>129</sup> I	$1.57 \times 10^7$ a	4.11	7.9%	$1.808 5 \times 10^3$
		29.461	19.9%	
<sup>241</sup> Am	432.2 a	13.9	13.3%	$4.089 \times 10^4$
		17.8	19.3%	

### 2.1 本底信号测量

安装连接单光子计数型 CCD 探测系统的各器件,通过 WinView/32 软件处理程序,设置相应的状态参数,使单光子计数型 CCD 进入正常的工作状态。在探测器前不放置放射源的情况下进行本底信号的采集,根据放射源的强度确定探测器与放射源的距离以及单光子计数型 CCD 的曝光时间,保证 CCD 处于单光子计数测量状态。设置不同的曝光时间 5, 10, 20, 30, 40 s, ..., 采集相应的本底信号,获得各时间段的本底计数数据。本底信号主要来自工作环境中的宇宙射线和仪器系统的热噪声等。

### 2.2 能量刻度标定

完成本底信号的测量后,将各个源强已知的放射源置于源架上,调整放射源与单光子计数型 CCD 探测器之间的距离  $L$ , 固定放射源的位置不变,选择合适的曝光时间  $t$ , 扣除相应时间内的本底信号,采集各放射源产生的 X 射线光谱。

在单光子计数型 CCD 响应的有效能区内,对于各种放射源产生的 X 射线,单光子计数型 CCD 灵敏面上产生的计数是不相同的,并且入射光子的能量越高,产生的计数越大。相应计数与光子能量的关系如图 1 所示。

单光子计数型 CCD 灵敏面上产生的计数与入射光子的能量有关,从图 1 可以看出两者成良好的线性关系,对实验测量的数据点进行线性拟合,得到拟合曲线斜率的倒数为 0.006 453,表示单光子计数型 CCD 灵敏面上产生一个计数,需要的光子能量约为 6.453 eV。

在超短超强激光-固体靶相互作用的实验中,我们用单光子计数型 CCD 分别测量了 Cu 和 Mo 的 X 射线谱,

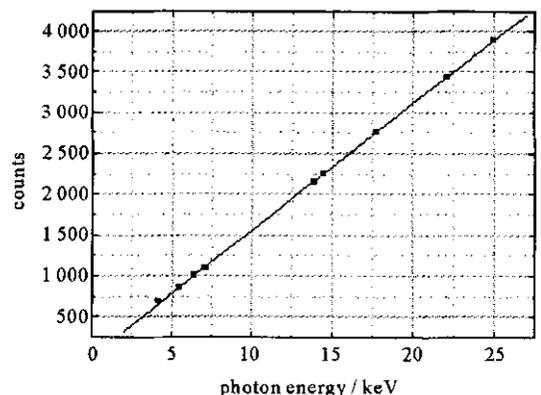


Fig. 1 Relationship between counts and photon energy

图 1 计数与光子能量的关系

如图 2、图 3 所示。

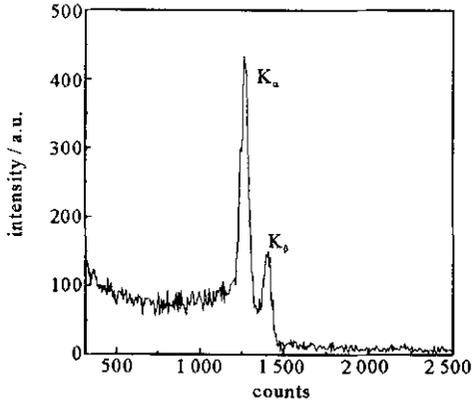


Fig. 2 Cu X-ray spectrum

图 2 Cu X 射线谱

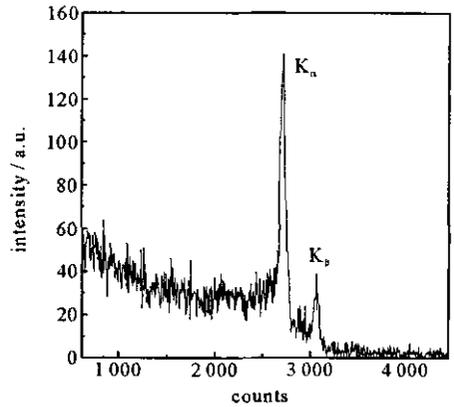


Fig. 3 Mo X-ray spectrum

图 3 Mo X 射线谱

在图 2、图 3 中，横轴是单光子计数型 CCD 记录的计数。根据 K<sub>α</sub>、K<sub>β</sub> 谱线的能量和对应的计数，可以确定单光子计数型 CCD 产生一个计数需要的光子能量为 6.453 eV，这与标定结果相一致。

从 X 射线谱的半高宽，得到单光子计数型 CCD 的能量分辨率。利用 <sup>55</sup>Fe 作为 X 射线源，单光子计数型 CCD 仪器测量的 <sup>55</sup>Fe X 射线光谱如图 4 所示。从 <sup>55</sup>Fe X 射线能谱，得到全能峰的半高全宽 (full width at half maximum, 即 FWHM) 为 243 eV，其能量分辨率  $\Delta E/E = 0.041$ 。另外，从能谱图上，得到了二级谱线，其峰值能量约为特征谱线的 2 倍，这是两个光子同时撞击 1 个像素造成的，这种情况出现的几率约为 5.1%，因此可以忽略其对单光子计数测量的影响。

### 2.3 探测效率测量

在单光子计数型 CCD 能量响应特性测量的同时，可进行单光子计数型 CCD 探测效率的标定。将单光子计数型 CCD 记录的信号进行积分，得到单光子计数型 CCD 在  $t$  时间内测量到的光子数  $N_0$ ，由单光子计数型 CCD 响应的光子数和放射源在  $t$  时间辐照到灵敏面上的光子数  $N_p$ ，可得到单光子计数型 CCD 的探测效率： $\eta = (N_0/N_p) \times 100\%$ 。在单光子计数型 CCD 响应的有效能区，实验标定得到的单光子计数型 CCD 在不同能

点的探测效率及测量相对误差见表 3，相对误差范围为 2.99%~18.18%。

利用数学处理软件 ORIGIN 得到单光子计数型 CCD 在不同能点的探测效率曲线，如图 5 所示。从图 5 可看出，在单光子计数型 CCD 的有效能区内，对于不同能量的入射光子，单光子计数型 CCD 的探测效率是不同的。在 5.3 keV 处获得最高探测效率，约为 66%；随着能量的逐渐增大，探测效率逐渐下降。受到放射源种类的限制，在更低能区探测效率的标定需要合适的放射源，才能得到全能区的探测效率曲线，进行更低能区探测效率曲线的精密标定将是我们下一步要进行的工作。

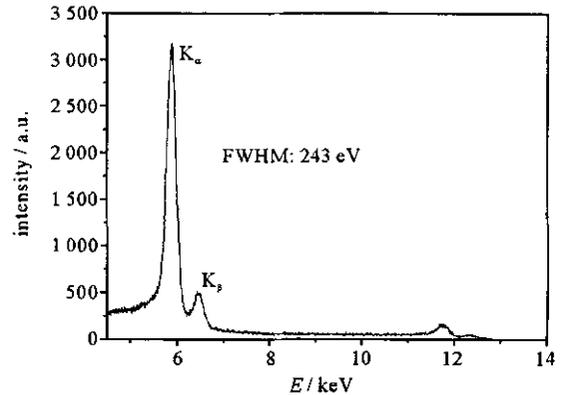


Fig. 4 <sup>55</sup>Fe X spectrum

图 4 <sup>55</sup>Fe X 射线能谱

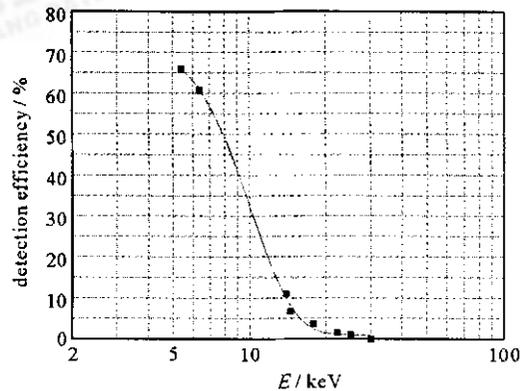


Fig. 5 Detection efficiency vs photon energy of X-ray

图 5 光子能量与探测效率

表 3 单光子计数型 CCD 的探测效率标定结果

Table 3 Calibration results of detection efficiency for single-photon counting CCD

E/keV	5.41	6.4	13.9	14.41	17.8	21.1	25.0
-------	------	-----	------	-------	------	------	------

$\eta/\%$	66.0	60.9	11.0	6.7	3.6	1.5	1.1
$(\Delta\eta/\eta)/\%$	5.90	6.40	10.00	2.99	16.67	6.67	18.18

### 3 结 论

本工作对单光子计数型 CCD 进行了标定,得到了单光子计数型 CCD 的能量刻度,并与激光等离子体相互作用中 X 射线的光谱测量实验进行了比对,结果吻合较好。同时获得了单光子计数型 CCD 在 2~30 keV 的有效能区内多个能点的探测效率,给出了测量的相对误差范围,在 2.99%~18.18% 之间。在 5.3 keV 处获得最高探测效率 66%。标定结果可为定量测量激光等离子体 X 射线光谱提供实验参考。

致 谢 本工作得到了中国计量科学研究院的杨元第、李作前、梁珺成等老师的帮助和指导,在此表示衷心地感谢!

### 参考文献:

- [1] 宋丰华. 现代光电器件技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004. (Song F H. Technology and application of modern photoelectronic devices. Beijing: National Defense Industry Press,2004)
- [2] Hou B, Nees J A, Theobald W, et al. Dependence of hard X-ray yield on laser pulse parameters in the wavelength-cubed regime[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(13):2259-2261.
- [3] Eder D C, Pretzler G, Fill E, et al. Spatial characteristics of  $K_\alpha$  radiation from weakly relativistic laser plasmas[J]. *Appl Phys B*, 2000, **70**:211-217.
- [4] 格拉希维里 T B, 契切夫 B II, 帕塔尔肯 O O, 等. 核素数据手册[M]. 北京:原子能出版社,2004. (Golashvili T V, Chechev V P, Patarakin O O, et al. Nuclide guide. Beijing: Atomic Energy Press,2004)
- [5] Thompson A C, Vaughan D. X-ray data booklet (second edition)[M]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

## Calibration of single-photon counting X-ray CCD

ZHANG Shuang-gen<sup>1,2</sup>, HUANG Wen-zhong<sup>2</sup>, GU Yu-qiu<sup>2</sup>, JIANG Gang<sup>1</sup>,  
XIONG Yong<sup>2</sup>, WEN Xian-lun<sup>2</sup>, WANG Guang-chang<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China*;  
2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P.O. Box 919-986, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** This paper introduced a new technique about calibration of a single-photon counting X-ray CCD. The principle of the CCD was described. In the calibration experiment, several standard X-ray sources were adopted to radiate forward the CCD detector and the counts occurred. When the CCD was in a state of single-photon counting, the X-ray intensity was obtained with integral. After deducting the background, the photon energy of 6.453 eV that produced one count was calibrated. Based on this result, the detection efficiency of the CCD was calculated. The detection efficiency changed with photon energies in the range of 5.3~30 keV. The efficiency decreased with the increase of the photon energy.

**Key words:** CCD; Energy response; Detection efficiency; Calibration; X-ray