

文章编号: 1001-4322(2007)02-0271-03

# 光子计数型 CCD 测量激光等离子体 X 射线\*

熊 勇, 黄文忠, 张双根, 谷渝秋, 温天舒, 何颖玲, 郑志坚

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了光子计数型电荷耦合器件(CCD)的工作原理,标定了 2.0~30 keV 的探测效率。在超强超短激光等离子体相互作用中,实验用靶为复合靶,分别用 Cu + Mo 和 Al + Cu 制作。第 1 层靶是 Cu 或 Al 物质作为电子示踪材料,第 2 层靶是 Mo 或 Cu 物质作为荧光材料,利用光子计数型 CCD 测量了 Mo 和 Cu 的 X 射线能谱,同时得到 CCD 的能量分辨率大于 37。该 CCD 可用于激光等离子体低通量高能 X 射线测量实验。

关键词: CCD; 探测效率; X 射线测量; 激光等离子体

中图分类号: O434.12 文献标识码: A

在过去几十年里,电荷耦合器件(CCD)的研究和应用取得了惊人的发展,已经成为现代光电子学和现代分析测试技术中最活跃、最富有成果的新型领域<sup>[1-2]</sup>。CCD 这种新型光电转换器件的主要优势<sup>[3]</sup>在于能存储由光子产生的信号电荷,当对它施加特定时序的脉冲时,其存储的信号电荷便可在 CCD 内作定向传输,实现自扫描。它主要由光敏单元、输入结构和输出结构等组成,具有光电转换、信息存贮和延时等功能,而且集成度高,功耗小,已经在摄像、信号处理和存贮三大领域中得到广泛的应用。在激光等离子相互作用中,经常通过测量 X 射线来推测激光等离子体的某些性质。对于微弱的 X 光测量,传统的探测装置,如能谱仪、晶体谱仪等,由于灵敏度低,在使用过程中受到诸多限制。光子计数型 CCD 采用前(后)向照射、深损耗层、低噪音技术,动态范围大,灵敏度高,能实时测量,是弱信号的良好测量装置。

## 1 光子计数型 CCD 的工作原理

CCD 是由多个光敏像元按一定规律排列组成的。每个像元就是一个 MOS(金属-氧化物-半导体)电容器,如图 1 所示。它是在 P 型 Si 衬底表面上用氧化的办法生成 1 层厚度为 100~150 nm 的 SiO<sub>2</sub>,再在 SiO<sub>2</sub> 表面蒸镀一金属层(多晶硅),在衬底和金属电极间加上 1 个偏置电压,就构成 1 个 MOS 电容器。当有 1 束光线投射到 MOS 电容器上时,光子穿过透明电极及氧化层,进入 P 型 Si 衬底,衬底中处于价带的电子将吸收光子的能量,跃入导带。光子进入衬底时产生的电子跃迁形成电子-空穴对,电子-空穴对在外加电场的作用下,分别向电极的两端移动,这就是信号电荷。这些信号电荷储存在由电极形成的“势阱”中。

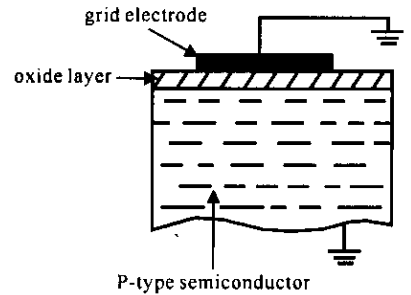


Fig. 1 MOS structure of CCD

图 1 CCD 的 MOS 结构

光子计数型 CCD 测量系统主要由面形 CCD 探测器、ST-133 控制器以及计算机组成。CCD 的主要计数参数<sup>[4]</sup>如表 1 所示。当 X 光子穿过 Be 窗沉积在 CCD 阵列,CCD 就把光信号转变为电信号,然后传递给 ST-133 控制器,ST-133 控制器收集数据,然后把数据传递给电脑进行处理。每一个像素可对一个入射光子响应产生计数。

表 1 光子计数型 CCD 的主要技术参数

Table 1 Main technological parameters of photon counting CCD

pixel size / $\mu\text{m}^2$	imaging area / $\text{mm}^2$	pixel format	dark current $(\text{e}^- \cdot \text{pixel}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	Be thickness / $\mu\text{m}$	working temperature / $^{\circ}\text{C}$
20 × 20	26.6 × 26	1 340 × 1 300	14.5	254	-55 ~ 20

\* 收稿日期 2006-08-10; 修订日期 2007-01-30

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(51480010104Z57702)

作者简介 熊 勇(1975—),男,重庆人,博士,从事超短超强激光等离子体相互作用研究;xiongyong@lfcenter.ac.cn.

## 2 探测效率

光子计数型 CCD 的探测效率  $\eta = (N_0/N_p) \times 100\%$   $N_0$  为  $t$  时间内探测器测量得到的光子数  $N_p$  为放射源在  $t$  时间内辐射的光子数。光子计数型 CCD 的理论探测效率如图 2 所示。从图中可以看出带 Be 窗的 CCD 对 2.0 ~ 30 keV 的能量范围响应, 在 5.3 keV 处时, 探测效率为 75%。

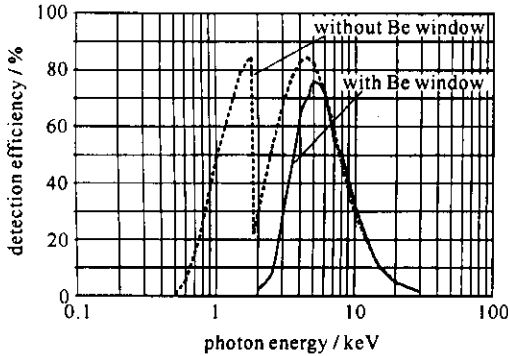


Fig. 2 Detection efficiency of photon counting CCD

图 2 CCD 的探测效率

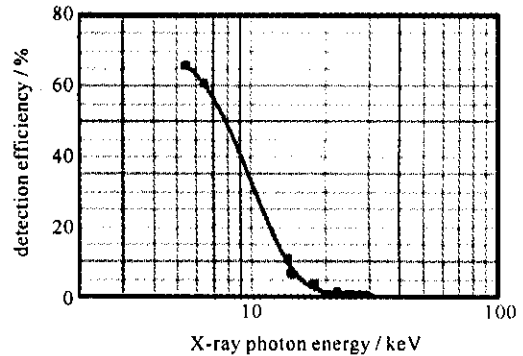


Fig. 3 Detection efficiency vs photon energy of X-ray

图 3 探测效率与光子能量的关系

实验采用  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{109}\text{Cd}$ ,  $^{129}\text{I}$  等作为放射源<sup>[5]</sup>。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 曝光时间, 保证单光子计数测量。实验测得了光子计数型 CCD 在不同能点的探测效率曲线 (见图 3)。从图中可以看出, 在 5.3 keV 处, 探测效率最高, 约为 65%。随着能量的增加, 探测效率下降。当能量大于 30 keV 时, 探测效率逐渐趋于 0。

## 3 实验的建立和实验结果

实验布局见图 4。实验用靶为复合靶, 分别用 Cu + Mo 和 Al + Cu 制作。第 1 层靶是 Cu 或 Al 物质作为电子示踪材料, 第 2 层靶是 Mo 或 Cu 物质作为荧光材料。入射激光经由离轴抛物面镜聚焦照射复合靶, 由于集体相互作用, 在靠近靶面的地方产生大量超热电子, 其密度接近临界密度。超热电子成准麦克斯韦能量分布。当其能量大于传播物质 K 壳层的电离能时, 产生  $K_\alpha$  特征线,  $K_\alpha$  光子产额与超热电子数额和能量相关。在其传播过程中, 部分会被物质吸收, 其出射强度在靶背法线附近随角度变化不大。实验时, 用光子计数 CCD 探测器和滤片组成无色散谱仪测量  $K_\alpha$  特征线强度。无色散谱仪滤片的作用是对入射光子信号进行衰减, 保证 CCD 探测器在单光子计数条件下工作, 同时用针孔相机对打靶激光焦斑进行测量。入射激光与靶法线成  $23^\circ$ , 无色散谱仪与靶背法线成  $1^\circ$ 。典型的实验参数见表 2。

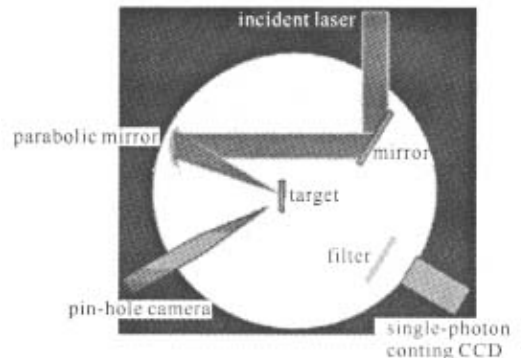


Fig. 4 Setup of the experiment

图 4 实验布局

表 2 典型的实验参数

Table 2 Typical parameters of the experiment

shot	layered target	$E_L/\text{J}$	angle of incident laser/ $(^\circ)$	angle of detector/ $(^\circ)$	filter thickness
114	0.1 $\mu\text{m}$ Cu + 50 $\mu\text{m}$ Mo	0.199	23	1	50 $\mu\text{m}$ Mo
119	0.1 $\mu\text{m}$ Cu + 50 $\mu\text{m}$ Mo	2.490	23	1	50 $\mu\text{m}$ Mo
188	0.5 $\mu\text{m}$ Al + 50 $\mu\text{m}$ Cu	3.470	23	1	81 $\mu\text{m}$ Cu

图 5 为 X 射线能谱测量结果。可以看出 Mo 的  $K_\alpha$  射线峰值为 17.48 keV,  $K_\beta$  光子能量为 19.59 keV。从图 5(c) 可以看出 Cu 的  $K_\alpha$  光子能量为 8.048 keV,  $K_\beta$  光子能量为 8.9 keV。Mo 和 Cu 的  $K_\alpha$  线以及  $K_\beta$  线清晰可见, 其中  $K_\alpha$  线的强度远大于本底及其它能量谱线。在图 4 实验布局的条件下, Mo 的  $K_\alpha$  线谱强度是  $K_\beta$  线强度的 4.06 倍, Cu 的  $K_\alpha$  线强度为  $K_\beta$  线强度的 2.7 倍, 这对谱线的选取十分有利。从图 5(b) 中我们可以得出  $K_\alpha$  射线的  $\Delta E_{\text{FWHM}}$  (半高全宽) 为 470 eV, 由于  $K_\alpha$  射线不是单线, 故谱仪的能量分辨率  $\eta_E \approx E/\Delta E_{\text{FWHM}} > 37$ 。图 6 为  $K_\alpha$  光子产额随入射激光能量变化曲线, 横坐标表示入射激光能量, 纵坐标表示单位立体角内的  $K_\alpha$  光

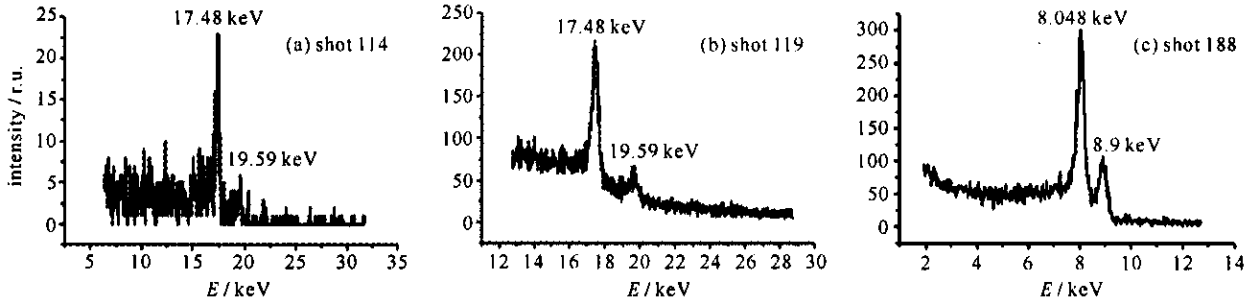


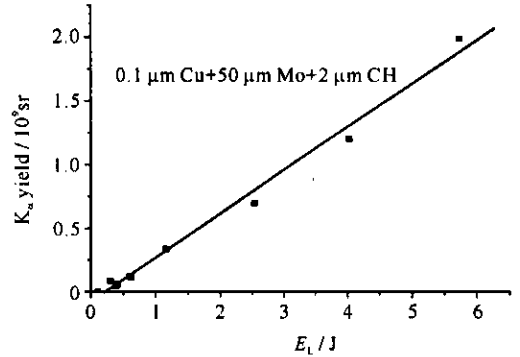
Fig. 5 Measured X spectra

图5 X射线能谱

子产额。从图6可以看出,入射激光能量越高, $K_{\alpha}$ 光子产额越大。在6 J能量范围内, $K_{\alpha}$ 光子产额近似线形增长。

#### 4 结论

利用光子计数型 CCD 组成的无色散型特征线谱能测量 2.0 ~ 30 keV 的 X 射线光子,能量分辨率大于 37。该 CCD 在光谱测量中能得到广泛的应用,尤其是在低通高能 X 线的测量中更有优势,这为超强超短激光等离子体相互作用 X 射线测量提供了有力的工具。

Fig. 6  $K_{\alpha}$  yield vs laser energy图6  $K_{\alpha}$  光子产额随入射激光能量变化曲线

#### 参考文献：

- [1] 王庆有,孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社,1993.(Wang Q Y, Sun X Z. CCD application technology. Tianjin: Tianjin University Press, 1993)
- [2] 蔡文贵,李永远,许振华. CCD 技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,1992.(Cai W G, Li Y Y, Xu Z H. CCD technology and application. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1992)
- [3] 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 of modern photoelectric devices and its applications. Beijing: National Defence Industry Press, 2004)
- [4] Princeton Instrument, Roper Scientific, Inc. The instruction of PI-LCX system[EB/OL]. www.princetoninstruments.com.
- [5] T. B. 格那希维里, B. П. 契切夫, O. O. 帕塔尔肯, 等. 核素数据手册[M]. 北京:原子能出版社,2004.(Golashvili T V, Chev V P, Patarakin O O, et al. Nuclide guide. Beijing: Atomic Energy Press, 2004)

## Measurement of X ray in interaction of laser plasmas by photon counting CCD

XIONG Yong, HUANG Wen-zhong, ZHANG Shuang-gen, GU Yu-qiu,

WEN Tian-shu, HE Ying-ling, ZHENG Zhi-jian

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-983, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A new technique of single-photon counting X-ray CCD was presented. The detection efficiency in the range from 2 keV to 30 KeV was characterized by several X-ray sources. In the interaction of laser plasmas, the layered targets were chosen consisting of 0.1  $\mu\text{m}$  Cu layer coated with 50  $\mu\text{m}$  Mo layer and 0.5  $\mu\text{m}$  Al layer coated with 50  $\mu\text{m}$  Cu layer, and the  $K_{\alpha}$  spectra with the Mo layer and the Cu layer were obtained and the results show that the energy resolution of CCD is more than 37.

**Key words:** CCD; Detection efficiency; Measurement of X-ray; Laser plasma