

硬X射线调制望远镜低能探测器量子效率标定

朱玥 张子良 杨彦佶 薛荣峰 崔苇苇 陆波 王娟 陈田祥 王于仁 李炜 韩大炜 霍嘉 胡渭 李茂顺 张艺 祝宇轩 刘苗 赵晓帆 陈勇

Quantum efficiency calibration for low energy detector onboard hard X-ray modulation telescope satellite

Zhu-Yue Zhang Zi-Liang Yang Yan-Ji Xue Rong-Feng Cui Wei-Wei Lu Bo Wang Juan Chen Tian-Xiang Wang Yu-Sa Li Wei Han Da-Wei Huo Jia Hu Wei Li Mao-Shun Zhang Yi Zhu Yu-Xuan Liu Miao Zhao Xiao-Fan Chen Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 112901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.112901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.112901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I11>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于阻性阳极读出方法的气体电子倍增器二维成像性能

Study of the two dimensional imaging performance for the gas electron multiplier using the resistive anode readout method

物理学报.2017, 66(7): 072902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072902>

高增益型气体电子倍增微网结构探测器的性能研究

Study on the performance of a high-gain gas electron multiplier-MicroMegas chamber

物理学报.2013, 62(12): 122901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.122901>

micro-bulk 工艺 micromegas 的研究

The study of micro-bulk micromegas

物理学报.2012, 61(9): 092901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.092901>

硬 X 射线调制望远镜低能探测器量子效率标定*

朱玥¹⁾ 张子良¹⁾ 杨彦佶¹⁾ 薛荣峰¹⁾²⁾ 崔苇苇¹⁾ 陆波¹⁾ 王娟¹⁾
 陈田祥¹⁾ 王于仁¹⁾ 李炜¹⁾ 韩大炜¹⁾ 霍嘉¹⁾ 胡渭¹⁾
 李茂顺¹⁾ 张艺¹⁾ 祝宇轩¹⁾ 刘苗¹⁾ 赵晓帆¹⁾ 陈勇^{1)†}

1) (中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

2) (吉林大学无线电物理系, 长春 130012)

(2017年3月1日收到; 2017年3月16日收到修改稿)

低能 X 射线望远镜是硬 X 射线调制望远镜卫星的主要载荷之一, 探测器采用 CCD236. 探测器的量子效率会影响能谱拟合和绝对流量, 有必要对其进行标定. 利用 ^{55}Fe 放射源, 以硅漂移探测器为标准探测器, 标定了 CCD236 在 Mn-K_α (5.899 keV) 和 Mn-K_β (6.497 keV) 能量点处的量子效率, 此能段在 Fe 线附近, 对 X 射线天文观测有重要价值. 考虑探测器的分裂事例后, Mn-K_α 和 Mn-K_β 处的量子效率分别为 71% 和 62%. 在 $-95\text{---}30\text{ }^\circ\text{C}$ 工作温度范围内, CCD 量子效率与温度无关. 利用 CCD236 的结构及实测的量子效率, 不考虑沟阻影响, 得到耗尽层厚度为 $38\text{ }\mu\text{m}$. 对 CCD236 施加不同的电压, 其量子效率基本不变, 表明其在两相驱动下高低电平的耗尽层厚度相等, 进而说明 CCD236 一直工作在深耗尽状态, 其耗尽层到了外延层和衬底层边界, 已达最大值.

关键词: 电荷耦合器件, 量子效率, 耗尽层

PACS: 29.40.Wk, 95.55.Ka

DOI: 10.7498/aps.66.112901

1 引言

硬 X 射线调制望远镜 (hard X-ray modulation telescope, HXMT) 卫星是我国第一颗自主研发的 X 射线天文卫星, 可实现高精度硬 X 射线巡天及定点观测^[1,2]. 低能 X 射线望远镜 (low energy X-ray telescope, LE 望远镜) 是 HXMT 的重要载荷, 工作在 $0.7\text{---}15\text{ keV}$ 能区, 用以观测 X 射线双星的能谱和时变, 研究其动力学和辐射过程, 还可用于研究宇宙软 X 射线背景^[3]. LE 望远镜的探测器使用扫式电荷器件 (swept charge device, SCD). SCD 改进了电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD) 的读出方式, 同时具有优秀的能量分辨和时间分辨性能^[4]. LE 望远镜探测器型号为 CCD236, 探测面

积为 4 cm^2 , 是目前探测面积最大的 SCD. CCD236 由中国科学院高能物理研究所和 e2v 公司合作研制, 前者负责完成性能测试及中子质子等辐照实验^[5,6].

量子效率 (quantum efficiency, QE) 指入射光子转化为电子空穴对后, 被 CCD 收集的光子数与入射光子总数的比, 是衡量 CCD 性能的一个重要参量^[7]. QE 与入射能量相关. 对 LE 望远镜的科学研究而言, QE 影响能谱拟合和流量计算, 因此需要进行标定. CCD 的 QE 由阻挡层和耗尽层厚度决定, 一般阻挡层厚度约为 $1\text{ }\mu\text{m}$, 对 3 keV 以上的光子透过率大于 95%. 通过测量 QE, 可以得到探测器耗尽层的厚度.

测量 QE 的方法有两种^[8]: 1) 已知入射光子数, 与 CCD 探测到的光子数作对比, 如文献^[9]

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11403024) 和中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (批准号: KZCX2-EW-J01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ychen@ihep.ac.cn

通过BESSY II同步辐射源,标定了CCD236在0.2—1.9 keV范围内的量子效率;2)入射光子数未知,CCD与标准探测器观测同一个源,得到CCD的量子效率,如文献[7]用X光管,以Si(Li)为标准探测器,得到CCD54(与CCD236结构类似)在1—9 keV范围内的量子效率,文献[10]用电子束离子阱(EBIT),以高纯锗探测器为标准探测器,标定了CCD236在6.7—13.3 keV范围内6个能量点的相对量子效率。

本文利用⁵⁵Fe放射源,以硅漂移探测器(silicon drift detector, SDD)作为标准探测器,对CCD236进行量子效率的标定.实验用X射线源能量点为Mn-K_α(5.899 keV), Mn-K_β(6.497 keV),与文献[9,10]的能量测量点不同.在X射线天文观测中,Fe线在这两个能量点附近,因此这一能段的效率标定具有重要意义.此能量点的X射线光子会部分穿透耗尽层,可以用于测量耗尽层厚度.实验方法简单有效,实验过程中放射源的流量变化可精确计算,探测效率不受X射线源与探测器的相对位置影响,可以得到比较精确的量子效率.本文通过CCD236的量子效率计算其耗尽层厚度,并讨论了量子效率与温度的关系.

2 实验介绍

⁵⁵Fe是X射线实验中常用的放射源,在CCD中主要产生5条谱线: Mn-K_α全能峰(5.899 keV), Mn-K_β全能峰(6.497 keV), Mn-K_α逃逸峰(约4.1 keV), Mn-K_β逃逸峰(约4.7 keV), Si特征X射线(1.8 keV). ⁵⁵Fe半衰期为2.7年,依据半衰期对实验数据进行放射源流量修正.实验用放射源活度小于100 Bq.

采用Ketek公司H80作为SDD标准探测器[11],探测面积为80 mm²,真空密封,带有25 μm Be窗,内置半导体制冷装置. H80是一种全耗尽型探测器,耗尽层厚度为450 μm,在6 keV能段Be窗影响很小,因此量子效率约为100%.

实验在真空低温罐[12]中进行,如图1所示.实验装置如图2所示, SDD和CCD236探测器分别放置于两个外形一致的机盒内,通过各自的电连接器与冷板下方相应的电子学机箱连接,再通过真空罐壁的电连接器与位于真空罐外部的地检设备连

接,最后通过地检设备将采集到的数据发送至计算机中.

为减小放射源放置位置不同引入的系统误差,两个机盒共用一个机盖.机盖的小孔中固定放置一枚⁵⁵Fe放射源.放射源距离探测器约为几毫米,放射源通过小孔后照射到探测器上的面积远小于探测器的有效面积,因此忽略放射源与探测器距离不同及放射源方位角等位置因素造成的误差.

实验分两部分进行. SDD实验: 将SDD(连同机盒)放入真空罐,抽真空,使用SDD自带的半导体制冷装置,使SDD降温到-80 °C左右,记录数据1 h. 根据实验中X射线的流强,1 h的数据可以满足统计分析的要求(小于1%). CCD实验: 将CCD236(连同机盒)放入真空罐的相同位置,抽真空,使CCD236降温至100 °C. 待温度稳定后,随着温度缓慢回升记录数据7 h(结束时CCD温度约为-30 °C). 设定不同的电压,进行CCD实验多次.

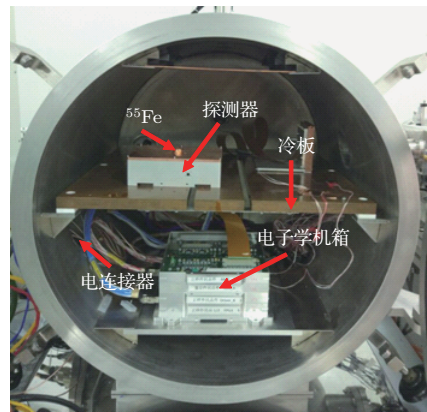


图1 实验装置

Fig. 1. Experimental setup.

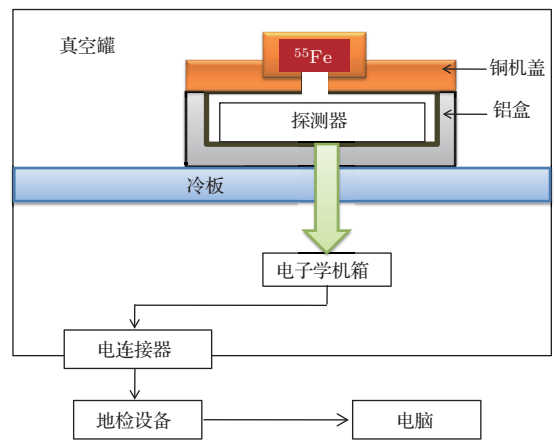


图2 实验装置框图

Fig. 2. Block diagram of the experimental equipment.

3 数据处理

3.1 能谱处理

SDD原始能谱如图3所示, 能谱中没有噪声峰, 其最高峰为Mn-K α 全能峰, 次高峰为Mn-K β 全能峰. 将能谱通过双高斯函数拟合得到K α 和K β 全能峰的中心位置和方差. 利用K α 和K β 全能峰的对应能量值及峰位, 确定SDD的能量能道关系.

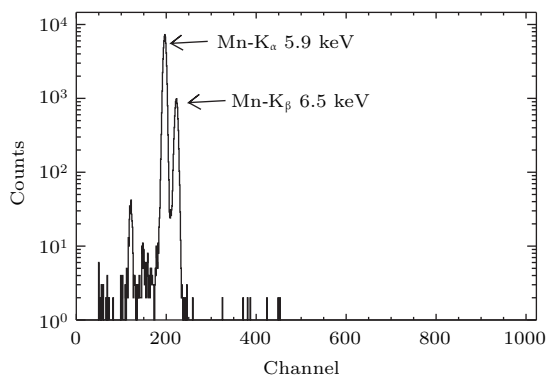


图3 SDD原始能谱

Fig. 3. Raw spectrum of SDD.

CCD236原始能谱如图4所示, 其中最高峰为噪声峰, 表示能量的零点; 2000道左右的两个峰从左到右分别为Mn-K α 和Mn-K β 全能峰. 由于信号幅度会随温度变化而变化(变化率约 $0.001\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [8]), 所以两个峰的形状不是高斯分布, 需要对能谱进行分温度处理. 实验温度范围为 $-95\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$, 每间隔 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 处理一次能谱. 图5所示为不同温度下采集的能谱, 能谱颜色从右到左由深变浅, 表示采集温度由低升高, Mn-K α 和Mn-K β 峰位明显移动, 此时谱型均为高斯型.

CCD236还需要考虑分裂事例的影响. 分裂事例是由于X射线产生的电子云扩散到相邻电极而产生的[13]. 连续 n 个事例信号读出时间间隔都等于 $10\text{ }\mu\text{s}$ (最小的读出时间间隔)为 n 分裂事例. 在CCD236中, 约80%为独立事例(不分裂事例), 约20%为分裂事例. 分裂事例中二分裂事例占绝大多数, 三分裂事例所占比例小于 $1/1000$, 四分裂及以上分裂事例是宇宙线造成的[8]. 在数据处理中, 阈值(探测能量下限)会影响分裂事例比, 分裂事例比会随阈值增高而降低. 阈值太高会丢失事例信号, 减小探测效率. 实验阈值设为 300 eV , 数据处理时小于 300 eV 的事例全部丢弃. 能量为 5.9 keV 时,

二分裂事例比为 0.162 ± 0.003 ; 能量为 6.5 keV 时, 二分裂事例比为 0.164 ± 0.027 . 将 n 分裂事例的道数相加, 减去 $n - 1$ 乘以噪声峰峰位后, 得到分裂事例谱, 将其累加到独立事例谱中得到总的能谱.

对总能谱的噪声峰、Mn-K α 和Mn-K β 全能峰的峰位作线性拟合, 利用能量能道关系将能道转换为能量.

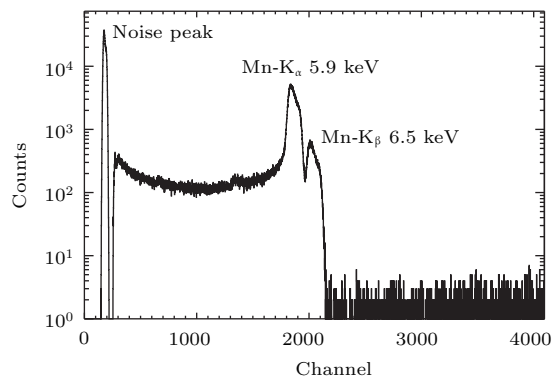


图4 CCD236原始能谱

Fig. 4. Raw spectrum of CCD236.

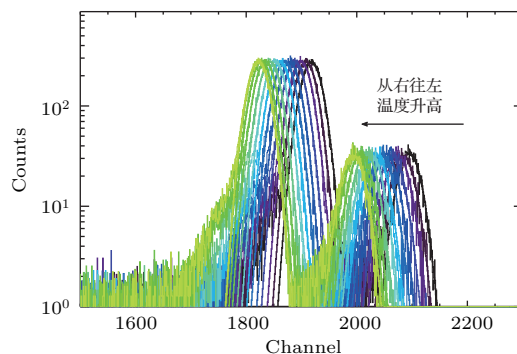


图5 (网刊彩色) CCD236分温度能谱

Fig. 5. (color online) CCD236 spectra in different temperature intervals.

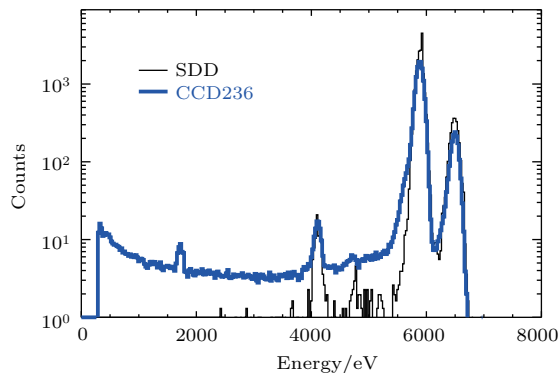


图6 (网刊彩色) SDD和CCD236的能谱(计数时间为1000 s)

Fig. 6. (color online) Comparison between SDD and CCD236 spectra in 1000 s.

图6为CCD236处理后的总能谱与SDD能谱的比较(归一到相同的时间, 设为1000 s). 基于处理后的能谱, 对Mn-K α 和Mn-K β 全能峰分别作高斯拟合, 得到峰中心位和标准差 σ . 峰面积等于峰中心位 $\pm 3\sigma$ 内事例数的和, 将峰面积除以时间得到计数率.

3.2 量子效率

量子效率由探测器结构和材料决定. SDD与CCD236均为硅探测器, 假设其电荷转移效率为100%, 则QE的理论计算公式为^[14,15]

$$QE(E) = \prod_{j=1}^N \exp[-d_j/l_j(E)] \times \{1 - \exp[-d_{Si}/l_{Si}(E)]\}, \quad (1)$$

式中 d 代表探测器各层的厚度, l 为不同能量的光子在各层材料中的衰减长度^[16], N 为总层数, 下标 j 表示阻挡层, 下标Si表示耗尽层.

SDD结构如图7所示. 外置Be窗厚度为25 μm , Al电极厚度0.15 μm , 耗尽层厚度为450 μm ^[11]. 通过(1)式计算得到5.9及6.5 keV处的理论量子效率分别为0.9836和0.9877.

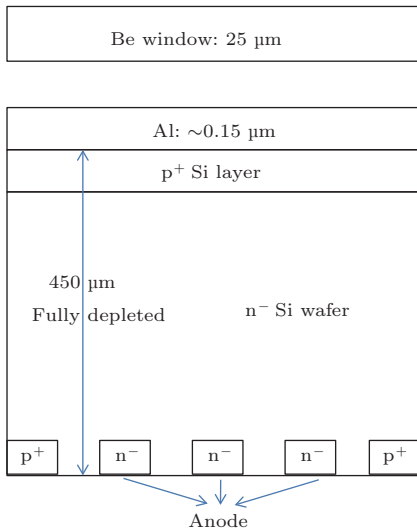


图7 SDD结构

Fig. 7. Structure of SDD.

已知SDD的量子效率, 则CCD236测量得到的量子效率 $QE_{\text{CCD_measured}}(E)$ 为

$$QE_{\text{CCD_measured}}(E) = QE_{\text{SDD}}(E) \cdot n_{\text{CCD}}(E)/n_{\text{SDD}}(E), \quad (2)$$

式中 $n_{\text{CCD}}(E)$ 和 $n_{\text{SDD}}(E)$ 分别为CCD236和SDD探测器在能量 E 下的计数率, $QE_{\text{SDD}}(E)$ 为根据SDD结构算出的理论量子效率. 实验中由于放射源照射到探测器上的面积远小于探测器的有效面积, 因此不需要考虑SDD和CCD有效面积对量子效率的影响.

3.3 CCD236耗尽层

CCD236的耗尽层厚度与所加电压及掺杂浓度有关. 一般情况下, 掺杂浓度不能准确知晓, 所以无法确定耗尽层厚度. 在已知各层结构及量子效率的情况下, 可以通过(1)式拟合得到耗尽层的厚度.

CCD236是科学级CCD, 特征为具有n型埋沟^[17]. 其结构如图8所示, SiO₂保护层厚750 nm, 多晶硅电极厚300—400 nm, 绝缘层Si₃N₄和SiO₂厚度各为85 nm^[8]. 拟合得到的平均耗尽层厚度为(38.07 \pm 1.10) μm .

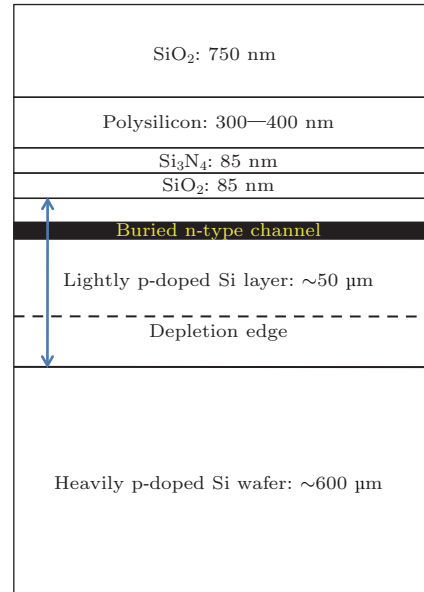


图8 CCD236结构

Fig. 8. Structure of CCD236.

3.4 量子效率与温度的关系

CCD236的实验温度范围为-95—-30 $^{\circ}\text{C}$, 可以研究其量子效率与温度之间的关系. 对量子效率与温度的关系进行线性拟合, 得到能量值为5.9 keV时, 斜率为 $(-0.0002 \pm 0.0002) ^{\circ}\text{C}^{-1}$, 能量为6.5 keV时, 斜率为 $(-0.0001 \pm 0.0009) ^{\circ}\text{C}^{-1}$, 两者斜率在 1σ 内均为0, 可以认为量子效率不受温度

影响。图9所示为温度与量子效率之间的关系，红色虚线为拟合直线。

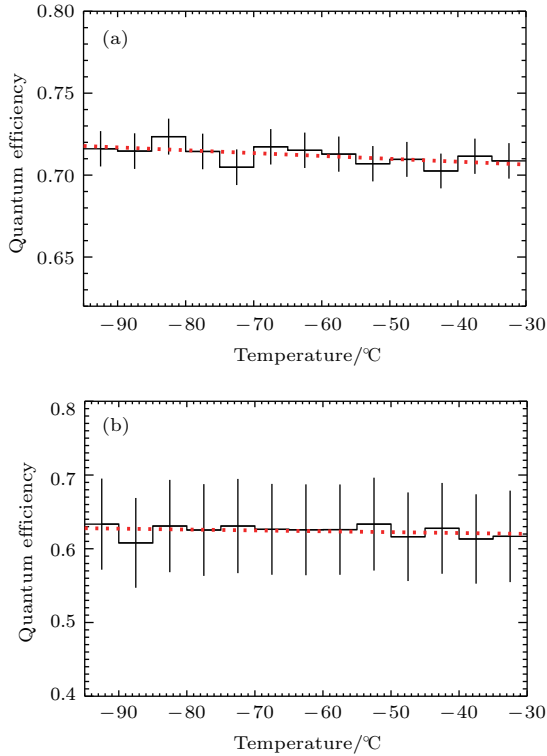


图9 (网刊彩色)量子效率与温度的关系 (a) 5.9 keV; (b) 6.5 keV
Fig. 9. (color online) Relationship between temperature and quantum efficiency: (a) 5.9 keV; (b) 6.5 keV.

4 讨论

4.1 与EBIT实验的交叉验证

文献[10]利用复旦大学电子束离子阱，以高纯锗探测器为标准探测器，标定了CCD236在6.7, 8.3, 9.1, 10.4, 11.9, 13.3 keV 6个能量点的相对量子效率(relative quantum efficiency, RQE)，将能量值为6.7 keV时的RQE定为100%，其他能量点的RQE见表2第1行[10]。当耗尽层厚度为38 μm时，CCD236在能量E下的理论量子效率QE(E|d_{Si} = 38 μm)见表2第2行。设6.7 keV处的量子效率为aQE(6.7 keV|d_{Si} = 38 μm)，a为归一

化因子，其他能量点的RQE按比例变化，拟合理论值得到a = 0.9335，从而得到EBIT各能量处的QE_{EBIT}(E)，见表2第3行。

利用χ²方法[18]检验EBIT实验与本实验的一致性。EBIT实验有6个能量点，自由度为6。在显著性α = 0.005水平，临界值χ_{α=0.005}²(6) = 0.676[19]，χ_{EBIT}²为

$$\chi_{\text{EBIT}}^2 = \sum_{i=1}^6 \frac{[\text{QE}_{\text{EBIT}}(i) - \text{QE}(i|d_{\text{Si}} = 38 \mu\text{m})]^2}{\text{QE}(i|d_{\text{Si}} = 38 \mu\text{m})} = 0.006 < 0.676. \quad (3)$$

因此在显著性α = 0.005水平上，EBIT的量子效率符合耗尽层厚度为38 μm的理论量子效率曲线，而此耗尽层厚度是由实验独立测量的，说明EBIT实验与本实验一致。

综合实验与EBIT及文献[9]的结果，如图10所示，可以看出三个实验的结果十分符合，说明CCD236的耗尽层厚度约为38 μm。

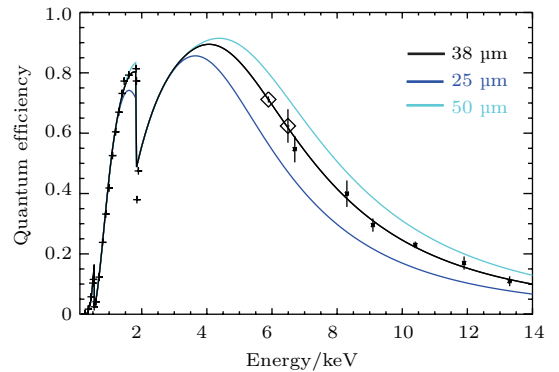


图10 (网刊彩色)实验结论与EBIT实验[10]及文献[9]结果的一致性。菱形为本次实验数据，点为EBIT数据，十字符号为文献[9]结果。黑线、深蓝、浅蓝曲线对应耗尽层厚度分别为38, 25, 50 μm时的CCD236量子效率理论曲线
Fig. 10. (color online) Consistency of EBIT[10], Ref. [9] and our experiment. The results of our experiment, EBIT, and Ref. [9] are shown in the symbol of diamond, dot and cross, respectively. The theoretical quantum efficiencies with the depletion region thickness of 38, 25, 50 μm are shown in black, dark blue and light blue lines, respectively.

表2 EBIT实验中CCD236的量子效率
Table 2. Quantum efficiency of CCD236 in EBIT experiment.

Energy/keV	6.7	8.3	9.1	10.4	11.9	13.3
RQE[10]	1.00 ± 0.08	0.73 ± 0.08	0.54 ± 0.04	0.42 ± 0.02	0.31 ± 0.04	0.20 ± 0.03
QE d _{Si} = 38 μm	0.586	0.383	0.310	0.222	0.156	0.115
QE _{EBIT}	0.547 ± 0.044	0.399 ± 0.044	0.295 ± 0.022	0.230 ± 0.011	0.170 ± 0.022	0.109 ± 0.016

4.2 关于耗尽层厚度的进一步讨论

CCD耗尽层厚度 d_{Si} 的理论公式为^[20]

$$d_{Si} = \left(\frac{2\epsilon_{Si}V_T}{qN_A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

式中 ϵ_{Si} 为硅介电常数, $\epsilon_{Si} = 1.04 \times 10^{-12} \text{ C}\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$; q 为电子电量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; N_A 为硅受主掺杂剂浓度水平, 一般未知; V_T 为沟道电压, 具体计算公式为^[9,21]

$$V_T = V_g + \Phi_{cho} - V_{SS}, \quad (5)$$

式中 Φ_{cho} 为空埋沟道电势 (empty buried channel potential), 它是探测器的内禀参数, 一般情况下未知; V_g 为驱动电压, 主要影响电子的读出; V_{SS} 为基底电压, 主要影响暗电流的大小. V_g 和 V_{SS} 均为外加电压. 在 LE 望远镜的工作温度范围内 (-50 — -80 °C), 取 $V_g = 7 \text{ V}$, $V_{SS} = 9 \text{ V}$, 此时 CCD236 具有最稳定的性能及优秀的能量分辨率^[22].

CCD236 为双相 CCD^[23], 驱动高电平为 V_g , 低电平为 0 V . 在探测器未全耗尽的情况下, (4) 式表明高低电平对应不同深度的耗尽层, 如图 11 所示, 探测器量子效率 $QE_{2dep}(E)$ 是两个耗尽层共同作用的结果:

$$\begin{aligned} QE_{2dep}(E) &= \frac{1}{2} \prod_{j=1}^N \exp[-d_j/l_j(E)] \\ &\times \left\{ \left\{ 1 - \exp[-d_{Si_HIGH}/l_{Si}(E)] \right\} \right. \\ &\left. + \left\{ 1 - \exp[-d_{Si_LOW}/l_{Si}(E)] \right\} \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

式中 d_{Si_HIGH} 和 d_{Si_LOW} 分别为高低电平下对应的耗尽层厚度, 其他参量同 (1) 式. 当 $d_{Si_HIGH} = d_{Si_LOW}$ 时, (6) 式与 (1) 式相同.

当耗尽层边缘到达外延层 (轻掺杂硅) 与衬底层 (重掺杂硅) 的交界处时, 耗尽层的厚度达到最大值, 继续增大沟道电压 V_T 不能增加耗尽层厚度, 即 (3) 式不再适用. 通过观察 V_g 和 V_{SS} 的变化对量子效率的影响, 推测高低电平下的耗尽层厚度. 结果如表 3 所示, 保证探测器正常工作的情况下, 对于不同的 V_g 和 V_{SS} , 其量子效率变化很小, 对应的平均耗尽层厚度在误差范围内可看作不变. 这说明高低电平的耗尽层厚度相同, 进一步表明 CCD236 在工作时, 探测器均处于深耗尽的状态, 耗尽层的厚度不变.

CCD236 的工作模式一般为多点钉扎模式 (multipinned phase mode)^[24], 这要求 V_{SS} 为 9 — 11 V ; 当 $V_{SS} = 2 \text{ V}$ 时, CCD236 工作在普通模式. 一般而言, 多点钉扎模式能更好地抑制暗电流. 两种工作模式在 -90 — -70 °C 温度范围内量子效率及耗尽层厚度无明显差异.

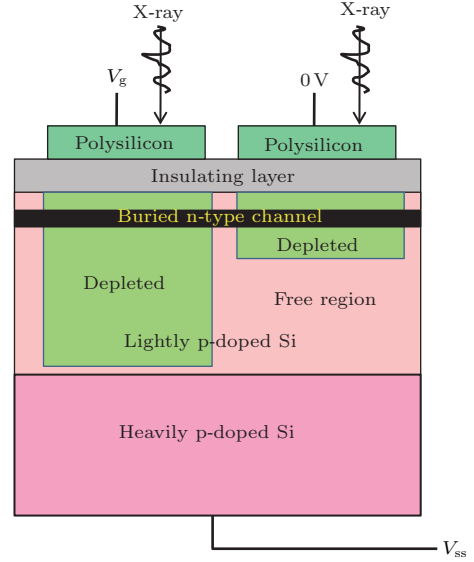


图 11 (网刊彩色) 双相 CCD 示意图

Fig. 11. (color online) Different depleted regions in two phase CCD.

与文献^[9]一致, 以上计算没有考虑 CCD236 沟阻 (channel stop) 的影响, 沟阻的面积约占 CCD236 感光面积的 6% ^[25], 沟阻下方对此能段 X 射线几乎不感光, 所以实验中测得的量子效率应为实际值的 94% . 经过沟阻修正后, 得到耗尽层厚度 (外延层厚度) 约为 $45 \mu\text{m}$.

表 3 不同 V_g 和 V_{SS} 下的量子效率及平均耗尽层厚度
Table 3. Quantum efficiency and average depletion thickness for different V_g and V_{SS} .

V_g/V	V_{SS}/V	Quantum efficiency		Depletion thickness/ μm
		5.9 keV	6.5 keV	
5	9	0.710 ± 0.010	0.626 ± 0.058	37.9 ± 1.1
7	2	0.708 ± 0.010	0.620 ± 0.056	37.7 ± 1.1
7	9	0.712 ± 0.011	0.623 ± 0.055	38.1 ± 1.1
7	10	0.707 ± 0.010	0.640 ± 0.060	37.6 ± 1.1
10	2	0.711 ± 0.010	0.629 ± 0.057	38.0 ± 1.1
10	9	0.719 ± 0.011	0.635 ± 0.058	38.9 ± 1.1

5 结 论

观测目标的绝对流量及能谱是进行天体物理研究的基础参量,探测器的量子效率会影响流量计算和能谱拟合,因此标定LE望远镜探测器的量子效率具有重要意义.本文利用 ^{55}Fe 放射源,以SDD为标准探测器,测量了CCD236在能量点5.9和6.5 keV处的绝对量子效率.这两个能量点是以前CCD236的标定实验未覆盖的能区,它们在Fe线附近,对X射线观测有重要价值.考虑分裂事例后,CCD236在5.9和6.5 keV处的量子效率分别为71%和62%.在 $-95\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,5.9和6.5 keV处的量子效率不随温度变化而变化.利用探测器的结构和量子效率,不考虑沟阻影响,得到耗尽层厚度约为 $38\text{ }\mu\text{m}$,与其他方法得到的结果进行对比,验证了此耗尽层厚度的合理性.量子效率不随驱动电压和基底电压的变化而变化,证明了CCD236在工作中,高电平或低电平时耗尽层均处于深耗尽状态,其厚度保持一致和稳定.

实验设计使测量结果不受放射源与探测器的相对位置影响,探测器的堆积效应可以忽略,因此可以得到比较准确的绝对量子效率.

未来可考虑采用X光管,利用不同靶材料来标定CCD探测器在更多能量点处的量子效率.

感谢中国电子科技集团公司第四十四研究所汪朝敏高工的讨论.

参考文献

- [1] Li T P, Wu M 2008 *Physics* **37** 648 (in Chinese) [李惕磬, 吴枚 2008 物理 **37** 648]
- [2] Lu F J, Xu Y P, Zhang F, Liu H W 2016 *Mod. Phys.* **4** 4 (in Chinese) [卢方军, 徐玉朋, 张帆, 刘红薇 2016 现代物理知识 **4** 4]
- [3] Chen Y, Cui W W 2016 *Mod. Phys.* **4** 25 (in Chinese) [陈勇, 崔苇苇 2016 现代物理知识 **4** 25]
- [4] Holland A, Pool P 2008 *Proceedings of SPIE: High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy III* Marseille, June 23—27, 2008 p7021
- [5] Wang Y S, Chen Y, Xu Y P, Wang J, Cui W W, Li W, Han D W, Zhang Z L, Chen T X, Li C K 2010 *Chin. Phys. C* **34** 1812
- [6] Yang Y J, Lu J B, Wang Y S, Chen Y, Xu Y P, Cui W W, Li W, Li Z W, Li M S, Liu X Y 2014 *Chin. Phys. C* **38** 60
- [7] Murray N, Holland A, Smith D, Gow J, Pool P, Burt D 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **604** 180
- [8] Yang Y J 2014 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [杨彦佶 2014 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [9] Smith P, Gow J, Murray N, Tutt J, Soman M, Holland A 2014 *J. Instrum.* **9** P04019
- [10] Liu X Y, Yang Y J, Chang Z, Xiao J, Wang Y S, Cui W W, Yao K, Fu Y Q, Chen T X, Hu W, Chen Y 2016 *Nucl. Electron. Detect. Technol.* **36**144 (in Chinese) [刘晓艳, 杨彦佶, 常治, 肖君, 王于仁, 崔苇苇, 姚科, 傅云清, 陈田祥, 胡渭, 陈勇 2016 核电子学与探测技术 **36** 144]
- [11] KETEK GmbHVITUS *Silicon Drift Detectors User's Manual* [2017-3-21] http://www.ketek.net/downloads/vitus-sdd/?eID=dam_frontend_push&docID=2148
- [12] Wang Y S, Chen Y, Xu Y P, Yang Y J, Cui W W, Li M S, Liu X Y, Wang J, Han D W, Chen T X, Li C K, Huo J, Li Z W, Li W, Hu W, Zhang Y, LU B, Zhu Y, Liu Y, Wu D, Sun Q R, Zhang Z L 2012 *Chin. Phys. C* **36** 991
- [13] Janesick J 2001 *Scientific Charge Coupled Device* (Washington: SPIE Press) p141
- [14] Janesick J 2001 *Scientific Charge Coupled Device* (Washington: SPIE Press) p173
- [15] Gow J 2009 *Ph. D. Dissertation* (London: Brunel University)
- [16] Kocher D C 1981 *Int. J. Radiat. Biol.* **41** 305
- [17] Zeng J Z, Li Y D, Wen L, He C F, Guo Q, Wang B, Maria, Wei Y, Wang H J, Wu D Y, Wang F, Zhou H 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 194208 (in Chinese) [曾骏哲, 李豫东, 文林, 何承发, 郭旗, 汪波, 玛丽娅, 魏莹, 王海娇, 武大猷, 王帆, 周航 2015 物理学报 **64** 194208]
- [18] Zhu Y S 2006 *Probability and Statistics in Experimental Physics* (2nd Ed.) (Beijing: Science Press) p417 (in Chinese) [朱永生 2006 实验物理中的概率和统计 (第二版) (北京: 科学出版社) 第 417 页]
- [19] Zhu Y S 2006 *Probability and Statistics in Experimental Physics* (2nd Ed.) (Beijing: Science Press) p616 (in Chinese) [朱永生 2006 实验物理中的概率和统计 (第二版) (北京: 科学出版社) 第 616 页]
- [20] Janesick J 2001 *Scientific Charge Coupled Device* (Washington: SPIE Press) p75
- [21] Pavlov G, Nousek J 1999 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **428** 348
- [22] Han D K 2009 *M. S. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [韩德凯 2009 硕士学位论文 (长春: 吉林大学)]
- [23] Levato T, Labate L, Galimberti M, Giuliotti A, Giuliotti D, Gizzi L A 2008 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **592** 346
- [24] Gow J, Smith P, Pool P, Hall D, Holland A, Murray N 2015 *J. Instrum.* **10** C01037
- [25] Athiray P S, Sreekumar P, Narendranath S, Gow J 2015 *Astronomy & Astrophysics* **583** A97

Quantum efficiency calibration for low energy detector onboard hard X-ray modulation telescope satellite*

Zhu Yue¹⁾ Zhang Zi-Liang¹⁾ Yang Yan-Ji¹⁾ Xue Rong-Feng¹⁾²⁾ Cui Wei-Wei¹⁾
 Lu Bo¹⁾ Wang Juan¹⁾ Chen Tian-Xiang¹⁾ Wang Yu-Sa¹⁾ Li Wei¹⁾ Han Da-Wei¹⁾
 Huo Jia¹⁾ Hu Wei¹⁾ Li Mao-Shun¹⁾ Zhang Yi¹⁾ Zhu Yu-Xuan¹⁾ Liu Miao¹⁾
 Zhao Xiao-Fan¹⁾ Chen Yong^{1)†}

1) (*Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*Department of Radio Physics, Jilin University, Changchun 130012, China*)

(Received 1 March 2017; revised manuscript received 16 March 2017)

Abstract

Low energy X-ray telescope, working over 0.7—15 keV energy band, is one of the main payloads in the hard X-ray modulation telescope satellite. The primary scientific objectives are to survey large sky area to investigate galactic X-ray transient sources as well as the cosmic X-ray background, and to observe X-ray binaries or black holes for studying the dynamics and emission mechanism in strong gravitational or magnetic field. The detector of low energy X-ray telescope is CCD236, a new generation of swept charge device, which has good time and energy resolution. Quantum efficiency (QE) of the detector has a crucial influence on X-ray spectrum fitting and absolute luminosity calculation. To provide valuable scientific data, QE should be calibrated in detail. In this paper, QE calibration is accomplished with respect to a silicon drift detector (SDD), using an Fe-55 radioactive source, at energy points Mn-K_α (5.899 keV) and Mn-K_β (6.497 keV). The energies of Mn-K_α and Mn-K_β are near that of iron-K, which is an important line in X-ray observation. Additionally, Mn-K_α and Mn-K_β X-ray will partially pass through the depletion region of CCD236, and these energy points can be used to measure the depletion thickness. This experiment is set up in a vacuum cooling chamber. The X-ray source perpendicularly illuminates SDD and CCD236 through a small hole, whose area is far less than those of two detectors; therefore, QE measurements are irrelevant to neither the distance nor the azimuth angle between the X-ray source and the detector. For CCD236, split events should be corrected. Energy spectra of SDD and CCD236 are fitted with two Gaussian distributions, respectively, to obtain peak positions and standard variations of Mn-K_α and Mn-K_β. With known structure of SDD, the QE of CCD236 can be calculated. QE values at Mn-K_α and Mn-K_β are 71% and 62%, respectively. QE and temperature are uncorrelated with each other in a temperature range from −95 °C to −30 °C. According to the specific structure of CCD236 and the measured QE, without considering the effect of channel stop, the best-fit thickness of depletion region is obtained to be 38 μm. When CCD236 is applied with different driving or substrate voltages, no obvious variation of QE is observed. It indicates that the thickness values of depletion region with high and low level voltages are equal. Furthermore, it shows that working CCD236 is deep depleted, and the thickness of depletion region will not change because it reaches its maximum, the edge of epitaxial layer and substrate layer.

Keywords: charge-coupled device, quantum efficiency, depletion region

PACS: 29.40.Wk, 95.55.Ka

DOI: 10.7498/aps.66.112901

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11403024) and the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX2-EW-J01).

† Corresponding author. E-mail: ychen@ihep.ac.cn