



硅像素探测器 X 射线探测效率实验研究

刘 军¹, 杨晨飞², 李胜泰¹, 袁 强¹, 金 恺¹, 孙向明^{1*}

(1. 华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室, 武汉 430079; 2. 埃科光电科技股份有限公司, 合肥 230000)

摘要: X 射线探测器经历了气体探测器和闪烁体探测器时代, 进入了半导体探测器时代。作为一种新型的半导体探测器, 硅像素探测器具有分辨率好、探测效率高、时间响应快、功耗低等特点。为了研究硅像素探测器 X 射线探测效率, 设计了一套 X 射线探测系统, 并进行了实验研究。实验分别测试了 4.51、5.41、6.40、8.05 keV 共 4 种不同能量的 X 射线的探测效率。后期进行了误差分析和数据处理, 得到 4 种不同能量 X 射线正面入射时探测效率分别为 53.00%、51.56%、40.65% 和 29.91%。该实验研究为寻找高探测效率的 X 射线探测器提供了一种新的思路。

关键词: X 射线; 硅像素探测器; 探测效率

中图分类号: TL814

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230498

X-ray Detection Efficiency Study Based on Silicon Pixel Detector

LIU Jun¹, YANG Chenfei², LI Shengtai¹, YUAN Qiang¹, JIN Kai¹, SUN Xiangming^{1*}

(1. Key Laboratory of Quark and Lepton Physics (MOE), Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2. i-TEK OptoElectronics Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: X-ray detector has experienced the era of the gas detector and the scintillator detector, and entered the era of semiconductor detector. As a new type of a semiconductor detector, the silicon pixel detector has the characteristics of high resolution, high detection efficiency, fast time response and low power consumption. In order to study the detection efficiency of silicon pixel detector, an X-ray detection system is designed and the experimental research is conducted. Four kinds of X-ray energies of 4.51, 5.41, 6.40, 8.05 keV are tested. After error analysis and data processing, the detection efficiencies of frontal incidence are 53.00%, 51.56%, 40.65% and 29.91%, respectively. This experimental study provides a new approach for finding a X-ray detector with high detection efficiency.

Key words: X-ray; silicon pixel detector; detection efficiency

X 射线是一种波长极短(0.001~10 nm)、能量很强的电磁波, 广泛应用于材料科学、医学诊断、安全检查、工业探伤等领域^[1-3]。X 射线看不见摸不着, 需要使用专门的仪器设备进行探测。X 射线探测器是一种用来接收 X 射线, 并把它转化成为可测量或可观察量的仪器。所有 X 射线探测器都是基于 X 射线与物质的相互作用特性制成。目前针对 X 射线探测的灵敏器件较多, 依据光子与物质相互作用的灵敏体类型, 可以分为气体探测器(如 GM 管、正比计数器等)、闪烁体探测器(如 NaI、CsI 等)、半导体探测器(如 Si、Ge、GaAs、CdTe、CdZnTe 等)^[4-5]。

气体探测器结构简单, 但灵敏度差、能量分辨率及探测效率低; 闪烁体探测器晶体尺寸大、具有较高的探测效率, 但需要结合光电倍增管, 器件庞大、能量分辨率低、易潮解; 半导体探测器作为第三代 X 射线探测器具有能量分辨率和空间分辨率高、探测效率高、器件尺寸小、功耗低等特点, 非常适合 X 射线探测, 具有较好的应用前景^[6]。

半导体探测器是以半导体材料为探测介质的辐射探测器, 它的灵敏区就是反向偏压的 PN 结。在 PN 结区, 可移动的载流子数量很少, 只留下不能移动的正负离子, 形成空间电荷区, 产生内电

收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2024-02-04

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFE0202002, 2022YFA1602103)。

作者简介: 刘军(1988-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事核电子学与探测器方面的研究。

*通信作者: 孙向明(1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事硅像素探测器方面的研究。E-mail: sphy2007@126.com

场。当 PN 结加上一定的负电压时,空间电荷区变宽,内电场增强。当 X 射线入射到半导体探测器的灵敏区时,通过光子与物质相互作用产生的光电效应、康普顿效应、电子对效应会损失能量,在灵敏区产生电子空穴对。与气体中电子和离子的漂移运动一样,电子和空穴在电场作用下分别向两极运动,被电极收集产生电信号脉冲,信号幅度正比于入射光子的能量^[7-8]。通过电信号的测量即可实现 X 射线的探测。

硅像素探测器是一种新型的半导体探测器,由于硅的原子系数低,一般用于低能 X 射线的探测。探测效率是 X 射线探测器的重要参数之一。为了研究硅像素探测器对低能 X 射线的探测效率,本文设计了基于硅像素探测器的 X 射线探测系统,并对 4 种不同能量的 X 射线进行了测试。希望实验结果能对 X 射线探测效率的相关研究提供一些参考。

1 实验原理

硅像素探测器是由许多小面积片状电极形成的二维读出探测器,探测介质为硅^[9-10]。每一个像素代表一个探测单元,包含传感器和读出电子学两部分。粒子穿过传感器时通过与硅原子发生相互作用产生电子空穴对,读出电子学对传感器收集到的电荷进行放大、成形、甄别等处理。根据传感器和读出电子学是否集成在一块硅片上,硅像素探测器可以分为混合型硅像素探测器和单片型硅像素探测器两类。单片型硅像素探测器利用标准的互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术将传感器和读出电子学集成在一块芯片上,具有成本低、功耗低、噪声小、分辨率高、易于大规模集成等特点^[11]。

单片型硅像素探测器的传感器为 PN 结型二极管,采用四阱 CMOS 工艺设计^[12],其截面示意图和探测原理如图 1 所示。在重掺杂的 p^+ 型基底上,低掺杂的 p-型高阻外延层作为灵敏区,上层是 n-阱和 p-阱,深 p-阱将 n-阱和高阻外延层隔开^[13]。n-阱和 p-型高阻外延层形成 PN 型二极管结构作为电荷收集电极,二极管的 PN 结区有很强内电场。当 X 射线穿过高阻外延层时,与硅原子发生相互作用产生电子空穴对,在电场的作用下电子漂移到 n-阱被收集产生电压信号,从而实现 X 射线的探测。电压信号经过读出电子学电路进

行放大、成形和甄别等处理,最后将信号送片外。通过给 PN 加反向电压,可以使耗尽层扩展,增大灵敏区的体积,减小电子收集时间并提高电子收集效率。

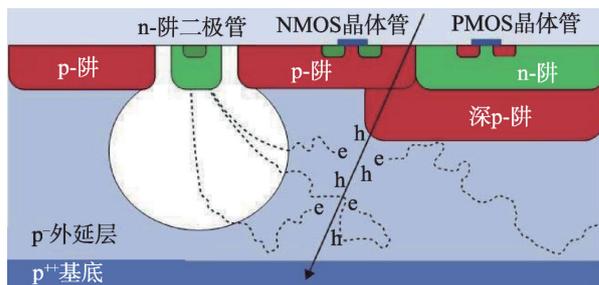


图 1 单片型硅像素探测器截面示意图及射线探测原理图

2 X 射线探测系统

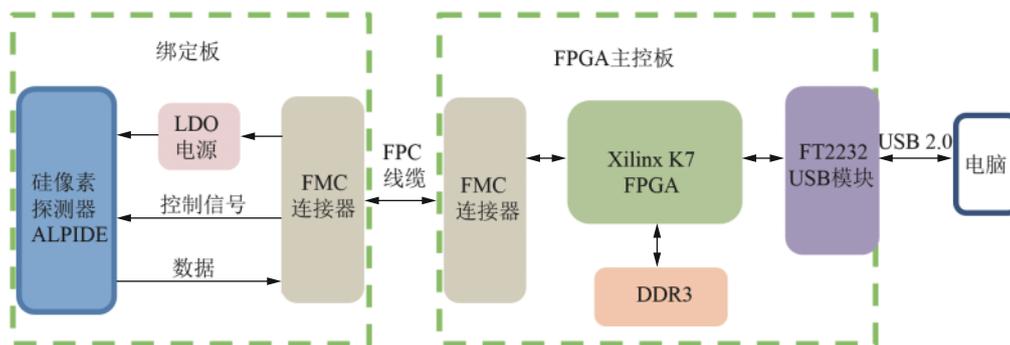
X 射线探测系统是基于硅像素探测器设计,可以将探测 X 射线产生的电信号进行放大、成形和甄别,然后将数字化信息进行缓存,最终通过 USB 2.0 将数据传输到电脑做离线数据分析。该探测系统主要由硅像素探测器芯片、芯片绑定板和现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)主控板等部分组成,系统框图和实物图如图 2 所示。

2.1 硅像素探测器 ALPIDE

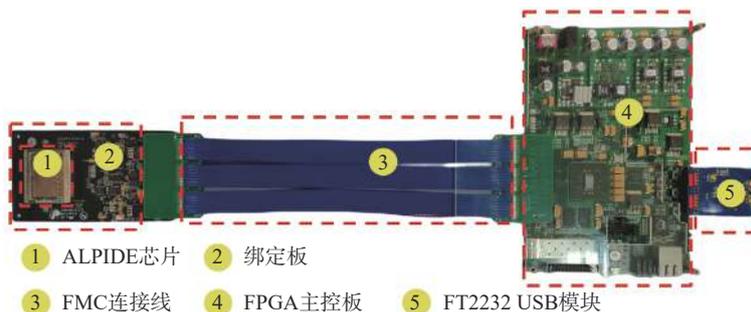
ALPIDE 是由欧洲核子中心为大型重离子对撞实验内径迹探测系统升级设计的一款单片型硅像素探测器芯片^[13-15]。该芯片基于 Tower Jazz 180 nm CMOS 工艺设计,整个芯片大小为 15 mm×30 mm,包含 512×1024 像素阵列和偏置电路、读出电路、控制电路等外围电路^[16]。单个像素大小为 29.24 μm×26.88 μm,像素内包含感应二极管、前置放大和整形、甄别器和数字逻辑部分,像素电路结构如图 3 所示。前置放大电路(front end)的小信号增益为 4 mV/e⁻,等效噪声电荷(ENC)为 3.9 e⁻,甄别器的最小阈值小于 100 e⁻。感应二极管电容的典型值是 2.5 fF,前置放大电路的输入电容小于 2 fF。感应二极管收集电荷产生电压信号 PIX_IN,信号幅度正比于二极管收集的电荷量。PIX_IN 信号经模拟前端放大成形后的信号为 OUT_A,峰值时间约为 2 μs。成形输出经甄别器后得到脉冲信号 OUT_D,典型脉宽为 10 μs。甄别器输出信号 OUT_D 通过一个全局闸门信号 STROBE 控制其存储输出。信号读出采用优先编

码的方式, 保证每次只读出有信号击中的像素信息, 如果没有信号则不读出, 这种读出方式大大

降低了芯片的功耗。ALPIDE 芯片的假命中概率小于 10^{-5} , 空间分辨率在 $5 \mu\text{m}$ 左右。



(a) 探测系统框图



(b) 探测系统实物图

图2 探测系统框图及实物图

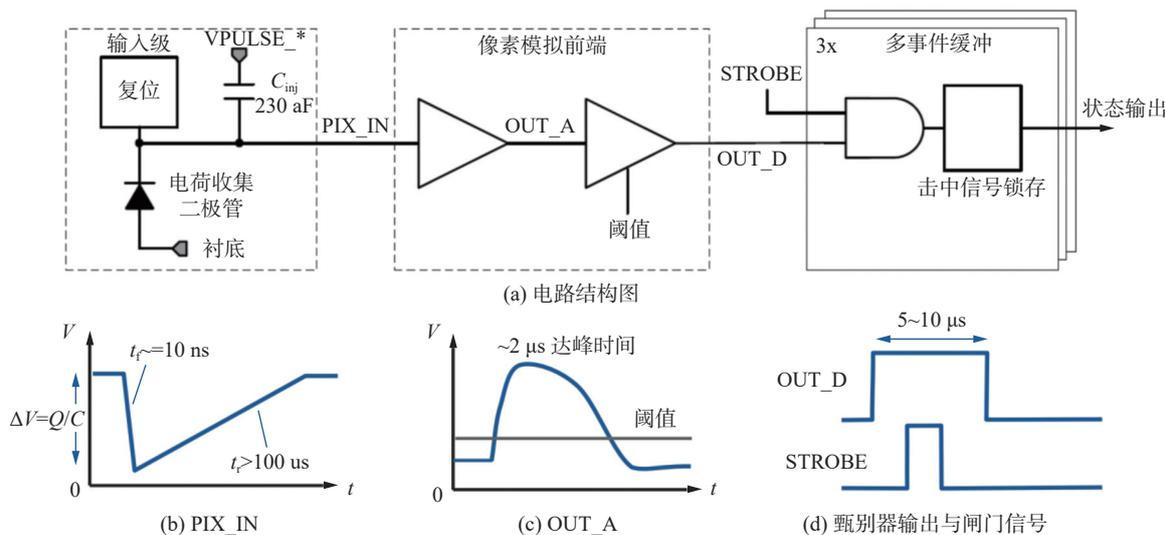


图3 ALPIDE 芯片像素电路结构及信号波形图

2.2 绑定板

ALPIDE 芯片绑定板具有芯片绑定、芯片供电、控制信号传输、串行数据读出的功能。ALPIDE 芯片是未经封装的裸片, 通过导电胶粘贴在绑定板上, 采用铝线键合的形式将芯片焊盘和绑定板上对应的焊盘进行电气连接。为减小物质损耗, 方便 X 射线从背面入射, 芯片底下的电

路板需要做挖空处理, 挖空区域略小于芯片的尺寸。

绑定板上外部总电源为 3.3 V , 通过 FMC 连接器从 FPGA 主控板的 DCDC 获取。ALPIDE 芯片工作需要 1.8 V 模拟电源和 1.8 V 数字电源。为减小芯片电源噪声, 板上采用微芯科技公司的低压差线性稳压器 MIC29302 完成 3.3 V 电压到

1.8 V 电压转换。MIC29302 是输出可调的线性稳压器，最大输出电流 3 A，具有输出控制引脚。为保护 ALPIDE 芯片，需对芯片的电流进行监控，当监测到供电电流大于芯片正常工作的电流时，通过主控板上的 FPGA 关断 MIC29302 的输出，给芯片断电，从而保护芯片不被损坏。电流监控电路采用“采样电阻+仪表放大器+模数转换器”的方案。芯片供电电流通过采样电阻产生电压，仪表放大器对此电压信号进行放大，然后送到模数转换器进行模数转化，最后通过主控芯片进行分析。此外，由于 ALPIDE 芯片的数字信号电平为 1.8 V，FPGA 输出信号电平为 3.3 V，需对数字信号进行电平转化。采用 TI 公司转换方向可控的 4 通道电平转换芯片 SN74AVC4T245 完成电平转换。

2.3 FPGA 主控板

FPGA 主控板是一块基于 Xilinx XC7K70T FPGA 设计的通用读出板。主控板可以通过外部电源适配器供电，输入电源+12V。通过板子上的 DCDC 转换产生 FPGA 所需的内核电压、辅助电压、IO bank 电压及板上其他器件所需的电压。板上有 1 颗 16 bit 位宽 BPI flash，存储容量为 1 GB，主要用于 FPGA 逻辑的固化和远程逻辑更新。为了对数据进行缓存，板上搭载了 2 颗美光公司的 DDR3 内存芯片 MT41J128M16JT-125，总储存容量达到 512 MB。FPGA 主控板的对外通信接口有千兆以太网接口和万兆光纤接口，满足数据传输的基本要求。为了方便控制，板子上设计有高密度 FMC 连接器和双排针将 FPGA 的 IO 口引出。FT2232 是一款 USB 到 UART/FIFO 的转换芯片，具有多种工业标准串行或并行接口配置能力。基于 FT2232 设计了一个 USB 2.0 模块用于 FPGA 主控板和上位机之间进行通信，最大传输速度为 480 Mbps。该模块通过双排针和 FPGA 主控板进行连接。

FPGA 主控板和绑定板之间通过 FMC 连接器进行连接。FMC 连接器上电源引脚可为绑定板提供外部输入电源，数字输出引脚为 ALPIDE 芯片提供控制信号，数字输入引脚接收芯片输出数据。板上 DDR3 芯片对 FPGA 接收到的数据进行缓存，打包处理，然后通过 USB 2.0 模块将数据发送到电脑端进行进一步的分析。

2.4 FPGA 逻辑设计

FPGA 逻辑设计如图 4 所示，主要包含时钟模

块、USB 控制模块、命令控制和数据上传 4 部分。时钟模块接收板上差分晶振产生的 200 MHz 系统时钟，通过 FPGA 内部的锁相环(phase-locked loop, PLL)产生其他逻辑模块所需要的时钟信号。USB 控制模块完成 FT2232 芯片的控制，实现 USB 2.0 的传输功能。命令控制包含命令解析模块和写命令模块。命令解析模块将电脑端下发的命令解析后分为两路，一路控制模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)进行模数转换，另外一路进入写命令模块，通过写命令模块完成 ALPIDE 芯片的控制。ALPIDE 芯片数据和 ADC 数据通过数据上传逻辑完成数据发送。数据读取模块完成芯片数据读取，通过先入先出缓冲器(first input first output, FIFO)缓存后送到数据打包模块，经过 USB FIFO 后通过 USB 发送到电脑端。ADC 输出串行数据，经过 ADC 控制模块完成串并转换后送到数据打包模块，然后通过 USB 发送到电脑端。

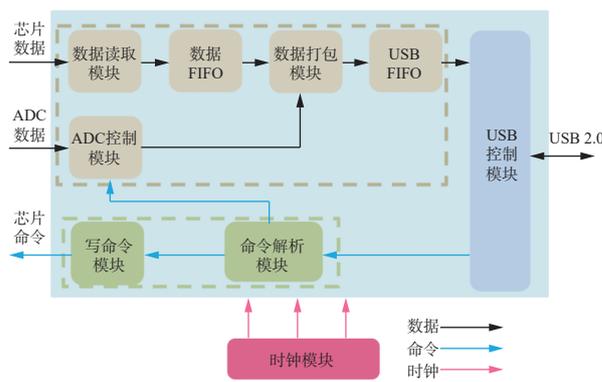


图 4 FPGA 逻辑设计框图

3 实验平台搭建

3.1 X 射线源

为了研究该 X 射线探测系统对于低能 X 射线的探测效率，使用能量可调、光子流量可调的单色 X 射线源进行了测试。单色 X 射线源主要由射线源控制系统、栅控 X 射线球管和单能 X 射线腔 3 部分组成。控制系统控制栅控 X 射线球管产生初级 X 射线，初级 X 射线轰击单能 X 射线腔室中金属靶材，产生次级 X 射线，该 X 射线为单色谱，通过更换不同的金属靶材可以获得所需的不同能量单色 X 射线^[17]。

3.2 探测系统安装

实验测试平台如图 5 所示，X 射线探测系统

置于真空屏蔽罐中, 安装在 X 射线标定探测器边上。真空环境中探测系统散热需要仔细考虑。读出系统正常工作时, FPGA 主控板是主要的发热源。首先利用 FLIR T620 红外热像仪找出主控板上主要的发热器件, 然后通过导热硅胶将导热块粘在发热器件上, 最后再利用导热硅胶将所有导热块和一块大的金属板连接。系统测试时, 将导热金属板放置在金属测试平台上, 主控板上的热量通过热传导的形式从发热器件传导到金属测试平台上, 最终达到散热的目的, 满足测试的要求。



图 5 实验测试平台

真空屏蔽罐上只留有 SMA 连接器供信号传输, 所以罐内探测系统的供电和数据信号传输都要通过 SMA 进行转接。读出系统和 PC 之间使用 USB 线进行数据传输, 通过将 USB 线剪断后两边分别焊上 SMA 接头, 就可以将信号从真空罐中引出。但是在实际测试过程中发现, 数据传输不稳定, 容易出错。通过分析发现数据传输不稳定的原因是 USB 线过长以及 USB 线被剪断后焊接导致信号质量变差。为了解决传输问题, 选用了一款迈拓的 USB 延长器, 发送端和接收端之间通过网线连接, 解决了 USB 线不能长距离传输的问题。在罐内读出系统通过 USB 线和延长器的发送端连接, 在罐外电脑通过 USB 线和延长器的接收端连接, 发送端和接收端之间通过网线连接, 将网线剪断两边分别焊上 SMA 接头就可以将信号从真空罐中引出了。USB 延长器通过 TCP/IP 协议传输数据, 传输稳定无误。

3.3 实验流程

实验开始前, 通过标定探测器对 X 射线源的光子流量进行标定, 标定探测器采用美国 AMPTEX 公司的 XR-100SDD 探测器。将 X 射线源的光轴中心和标定探测器接收面的几何中心对准, 开启 X 射线源系统进行预热, 待光子流量稳定后开始计数, 计数时间 300 s, 通过测试结果计算出 X 射线源在该处的光子流量。标定完成后, 通过控制

系统控制 X 射线源的光轴中心对准 ALPIDE 芯片几何中心。设置 X 射线探测系统工作在内部触发、连续读出模式, 触发时间间隔 10 μ s, 测试时间 300 s。更换不同的靶材得到不同能量的 X 射线, 重复标定和测试的过程, 保存对应的实验数据。本次实验分别对 4.51、5.41、6.40、8.05 keV 共 4 种不同能量的 X 射线进行了测试。

4 实验结果分析

4.1 误差分析

X 射线探测效率实验误差来源主要有像素击中、连续击中和丢数 3 种类型。下面分别对 3 种误差来源进行分析。

1) 单个光子导致多个像素同时击中

由于像素之间紧密相连, 当光子打在像素之间时, 可能造成多个像素同时被击中。4 个像素同时击中响应图如图 6 所示, 这时只能记录一个光子, 而不能记录多个光子。为了减小误差, 需要通过算法对每一帧数据中的多像素击中进行处理。

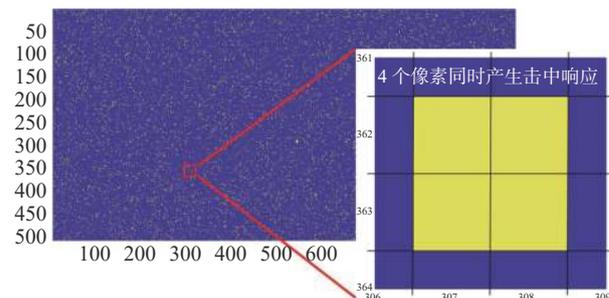


图 6 4 个像素同时产生击中响应图

2) 单个光子导致同一像素连续两帧击中

当闸门信号 STROBE 脉宽较宽, OUT_D 信号同时被相邻两个 STROBE 信号锁存, 使得同一个像素连续两帧击中, 这时只能记录一次, 如图 7 所示。测试发现, 对于 4 种不同能量的 X 射线, 当闸门信号 STROBE 脉宽小于等于 3 μ s 时, 单个光子导致同一像素连续两帧击中的现象基本消失。

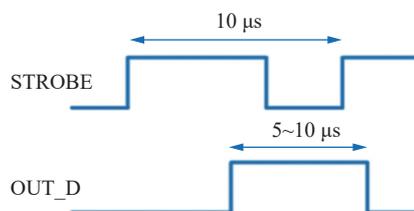


图 7 单个光子导致同一像素连续两帧击中

3) 光子在闸门信号 STROBE 间隔未计数

当闸门信号 STROBE 脉宽较窄, OUT_D 信号在两个相邻 STROBE 信号之间未被任何一个锁存, 造成一次计数丢失, 如图 8 所示。测试发现, 对于 4 种不同能量的 X 射线, 当闸门信号 STROBE 脉宽大于等于 5 μs 时, 光子在 STROBE 信号间隔未计数的现象基本消失。

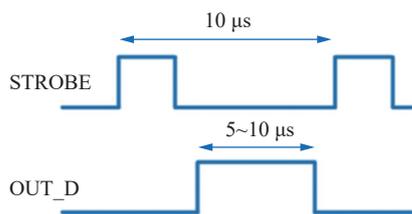


图 8 光子在 STROBE 信号间隔未计数

通过前面的分析可知, 连续击中丢数产生的误差可以通过调整芯片配置参数解决, 多像素击中不能通过调整参数解决, 多像素击中和丢数可以通过后期数据分析进行修正, 丢数无法进行修正, 如表 1 所示。

表 1 误差来源与修正

误差来源	能否调整参数解决	能否后期修正
多像素击中	否	能
连续击中	STROBE脉宽 ≤ 3 μs	能
丢数	STROBE脉宽 ≥ 5 μs	否

4.2 实验结果

当探测系统触发周期设置为 10 μs, 闸门信号 STROBE 脉宽设置为 8 μs 时, 分别测得 4.51、5.41、6.40、8.05 keV 这 4 种不同能量的 X 射线正面入射和背面入射到 ALPIDE 芯片上的探测效率如图 9~图 10 所示。从实验结果可以看出: X 射线从正面入射时, 能量越低, 探测效率越高, X 射线能量为 4.51 keV 时探测效率达到 53.00%; X 射线从背面入射时, 能量越高, 探测效率越高, X 射线能量为 8.05 keV 时探测效率达到 14.53%。

ALPIDE 芯片总厚度为 100 μm, 感应区在芯片正面, 厚度 20 μm 左右, 其他区域为衬底。由于不同能量的 X 射线在硅中的穿透能力不一样, 正面入射时, 能量高的光子穿过感应区的可能性大, 收集到的光子就少, 对应的探测效率就小。背面入射时刚好相反, 由于衬底较厚, 能量低的光子无法穿过衬底, 能量高的光子穿过衬底进入

感应区被收集的可能性大, 故而对应的探测效率就大。

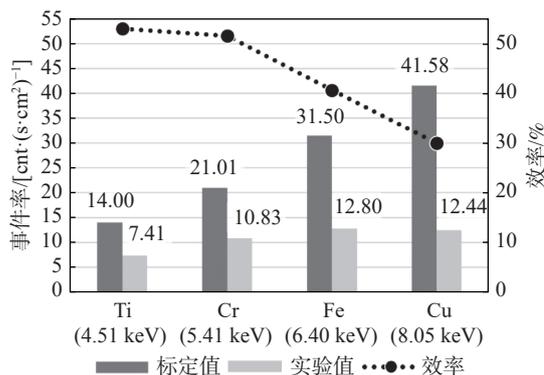


图 9 正面入射条件下不同能量 X 射线探测效率图

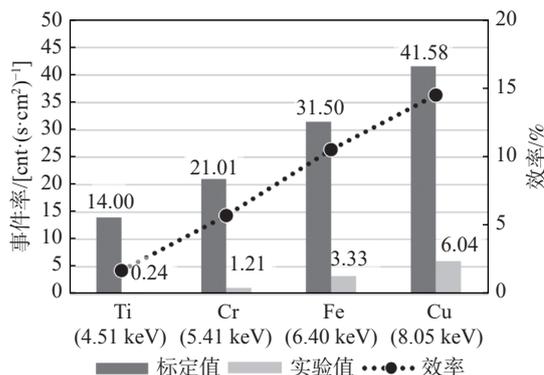


图 10 背面入射条件下不同能量 X 射线探测效率图

5 结束语

在 X 射线能谱和成像探测研究领域, 为了得到高探测效率的探测器, 对于许多探测器进行了实验研究。本文基于硅像素探测器芯片设计了一套 X 射线探测系统, 并分别对 4.51、5.41、6.40、8.05 keV 共 4 种不同能量的 X 射线的探测效率进行了测试。实验结果表明, 正面入射条件下 X 射线能量越高探测效率越低, 背面入射条件下 X 射线能量越高探测效率越高。该实验研究对于硅像素探测器应用于低能 X 射线探测具有重要的意义。

参考文献

[1] 孙锡娟, 夏梦玲, 许银生, 等. 钙钛矿直接型 X 射线探测成像研究进展[J]. 发光学报, 2022, 43(7): 1014-1026.
 [2] 张锋, 范珺亭, 王新光, 等. X 射线散射实验测量装置设计[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(7): 120-124.

(下转第 40 页)