

## 基于单片有源像素传感器的探测模块测试研究

杨生辉 董明义 渠超越 田兴成 董静 吴冶 马晓妍 章红宇 江晓山 欧阳群 李岚坤 郑国恒

### Test study of detector modules based on monolithic active pixel sensor

Yang Sheng-Hui Dong Ming-Yi Qu Chao-Yue Tian Xing-Cheng Dong Jing Wu Ye Ma Xiao-Yan  
Zhang Hong-Yu Jiang Xiao-Shan Ouyang Qun Li Lan-Kun Zheng Guo-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 170702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210464

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210464>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### CdZnTe像素探测器的电输运性能

Investigation on electrical transport properties of CdZnTe pixel detector

物理学报. 2017, 66(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.206101>

#### 图像传感器像素化效应对菲涅耳非相干关联全息分辨率的影响

Influence of pixelation effect of image sensor on resolution of Fresnel incoherent correlation holography

物理学报. 2019, 68(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181844>

#### 基于选区外延技术的单片集成阵列波导光栅与单载流子探测器的端对接设计

Butt-joint design in a uni-traveling carrier photodiode array monolithic with an arrayed waveguide grating by the selective area growth technique

物理学报. 2017, 66(15): 158502 <https://doi.org/10.7498/aps.66.158502>

#### 单像素探测频谱重构成像理论分析

Theoretical analysis of spectrum reconstruction imaging using single-pixel detection

物理学报. 2017, 66(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.034201>

#### 二维多丝室探测器读出方法的优化

Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber

物理学报. 2017, 66(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.072901>

#### 基于Hadamard矩阵优化排序的快速单像素成像

Fast single-pixel imaging based on optimized reordering Hadamard basis

物理学报. 2019, 68(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181886>

## 基于单片有源像素传感器的探测模块测试研究\*

杨生辉<sup>1)2)</sup> 董明义<sup>2)3)†</sup> 渠超越<sup>2)3)</sup> 田兴成<sup>2)3)</sup> 董静<sup>2)</sup> 吴冶<sup>2)3)</sup>  
 马晓妍<sup>2)</sup> 章红宇<sup>2)3)</sup> 江晓山<sup>2)</sup> 欧阳群<sup>2)3)</sup> 李岚坤<sup>1)2)</sup> 郑国恒<sup>1)</sup>

1) (郑州大学物理学院 (微电子学院), 郑州 450001)

2) (中国科学院高能物理研究所, 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2021 年 3 月 10 日收到; 2021 年 4 月 16 日收到修改稿)

硅像素探测器因具有优异的空间分辨率、极高的耐计数能力和较低的功耗等优点, 近年来已被广泛应用于高能对撞机实验的顶点探测器和内径迹探测器. 基于 MIMOSA28 芯片的硅像素探测器研究是北京谱仪 III 漂移室内室的升级预研方案之一, 该方案计划建造一个漂移室内室 1/10 规模的模型. 探测模块是该模型的基本探测单元. 为了对探测模块的性能进行研究, 搭建了实验室测试系统. 该系统主要由五层探测模块、读出电子学系统以及数据获取系统组成. 本文围绕带有触发标记的连续数据读出方法的实现、探测模块的噪声水平和放射源响应测试以及击中位置重建算法研究展开. 测试结果验证了探测模块工作性能良好, 触发读出逻辑正确, 而且重建算法准确有效, 为后续探测模块性能的进一步研究奠定了基础.

**关键词:** 硅像素探测器, 单片有源像素传感器, 连续读出方法

**PACS:** 07.77.Ka, 29.40.Gx, 95.55.Vj

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210464

## 1 引言

基于互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS)<sup>[1]</sup> 工艺的像素传感器, 具有极高的空间分辨 (可达几  $\mu\text{m}$ )、计数率 ( $10^8 \text{ Hz}/\text{cm}^2$ ) 和探测效率 (约 100%), 良好的抗辐照性能以及可在室温下工作等特点, 近二三十年在高能物理实验中得到迅速发展, 成为顶点探测器和径迹探测器的主要技术. 并且, 由于采用高度工业化的 CMOS 标准工艺及先进光刻技术, 并借助电子设计自动化 (electronic design automation, EDA)<sup>[2]</sup> 工具, 可以缩短像素传感器芯片的研发周期, 降低其研制成本. 目前, 美国相对论重离子对撞机 (relativistic heavy ion collider, RHIC) 上的 STAR 实验<sup>[3,4]</sup> 已采用此类型芯片成功升级了其顶

点探测器, 欧洲核子中心 (European Organization for Nuclear Research, CERN) 大型强子对撞机 (large hadron collider, LHC)<sup>[5]</sup> 上的 ALICE<sup>[6]</sup> 实验也选择了 CMOS 像素传感器 (称为 ALPIDE)<sup>[7]</sup> 对其内径迹探测器系统 (inner tracking system, ITS) 进行升级<sup>[8]</sup>. 在国内高能物理领域, 硅像素探测器的研究和应用也在积极开展<sup>[9,10]</sup>. 其中, 为了对北京正负电子对撞机 II (Beijing electron positron collider II, BEPC II)<sup>[11]</sup> 上的高精度通用探测器——北京谱仪 III (Beijing spectrometer III, BES III)<sup>[12]</sup> 的主漂移室 (multilayer drift chamber, MDC) 内室进行升级改造, 提出了采用单片式有源像素传感器 (monolithic active pixel sensor, MAPS)<sup>[13,14]</sup> 建造 1/10 内室规模的硅像素探测器模型的升级预研方案. MAPS 的传感器和专用读出电子学集成在同一块芯片上, 有利于降低探测器的物质的量, 减

\* 国家自然科学基金 (批准号: U1232202, 11875274) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [dongmy@ihep.ac.cn](mailto:dongmy@ihep.ac.cn)

小多次散射,从而提高带电粒子径迹的测量精度. 预研方案采用法国 IPHC(Institute Pluridisciplinaire Hubert Curien) 研制的 MIMOSA28 芯片<sup>[15]</sup>, 其空间分辨率可达到 3.5—4.0  $\mu\text{m}$ , 计数能力可达  $10^6 \text{ Hz/cm}^2$ <sup>[16]</sup>, 远高于漂移室内室的最大事例率 (约为  $4 \text{ kHz/cm}^2$ )<sup>[12]</sup>, 完全满足 BESⅢ 漂移室内室升级的要求.

探测模块是硅像素探测器的基本单元, 其性能的测试研究在探测器研制过程中非常关键. 本文介绍探测模块性能研究测试系统, 在此系统上, 对探测模块芯片的噪声水平进行测试研究; 同时, 为了实现探测器模型不同模块间的事例对齐, 研究并实现了带触发 (trigger) 标记的数据连续读出的方法; 通过对探测模块的放射源测试, 研究了探测模块的响应性能以及粒子击中位置重建算法. 该研究为后续进一步测试探测模块以及探测器模型的性能奠定了基础.

## 2 实验测试系统

图 1 为测试系统示意图, 主要包含三个部分: 五层探测模块, 读出电子学系统和数据获取系统 (data acquisition, DAQ).

五层探测模块平行放置, 其间距设置值是影响探测模块空间分辨率测量精度的一个重要参量. 随着探测模块间距的增大, 当带电粒子穿过探测模块

时, 受多次库仑散射的影响, 径迹偏转程度 ( $L$ ) 增大,  $L$  计算公式为

$$L = d\theta_0, \quad (1)$$

其中  $d$  表示相邻探测模块的间距,  $\theta_0$  表示带电粒子穿过探测模块时散射角的平均值, 可用 Highland 公式<sup>[17]</sup>描述:

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right], \quad (2)$$

其中,  $\beta c$  和  $p$  分别表示入射粒子的速度和动量,  $Z$  表示入射粒子的电荷量,  $x/X_0$  为探测模块的物质的量.  $L$  的增大将会导致粒子径迹重建精度降低, 从而影响探测模块的空间分辨率. 因此, 探测模块的间距需尽可能小, 但考虑到探测模块的元器件高度和安装操作空间的要求, 将两个探测模块之间的间距设置为 20 mm.

### 2.1 探测模块

探测模块的设计在满足核心功能的基础上, 还满足低物质的量和高强度的要求, 从而减少多次库仑散射, 提高测量精度. 探测模块的结构如图 2 所示, 10 片减薄至 50  $\mu\text{m}$  的 MIMOSA28 芯片紧密排布在 kapton 柔性电缆上, 柔性电缆和芯片之间通过打线 (wire bonding) 实现电气连接. 碳纤维复合板位于探测模块的最底层, 为探测模块提供稳定的机械支撑. MIMOSA28 芯片、柔性电缆和碳纤维复合板之间通过丙烯酸酯胶粘接成一个整体.

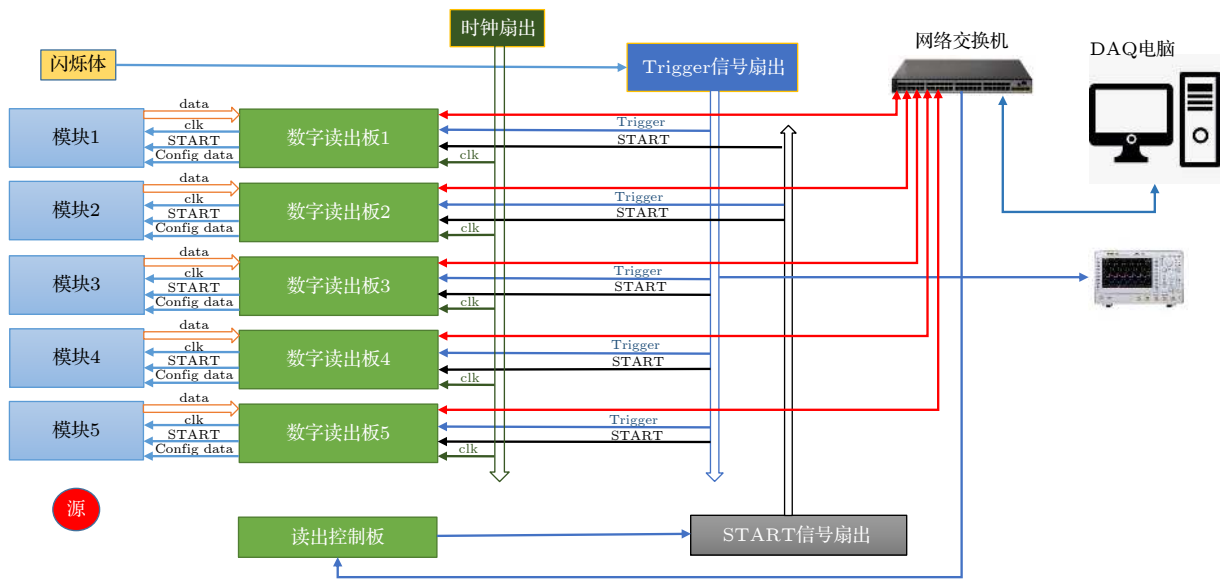


图 1 实验室测试系统装置示意图

Fig. 1. Schematic of the experimental setup in the laboratory.

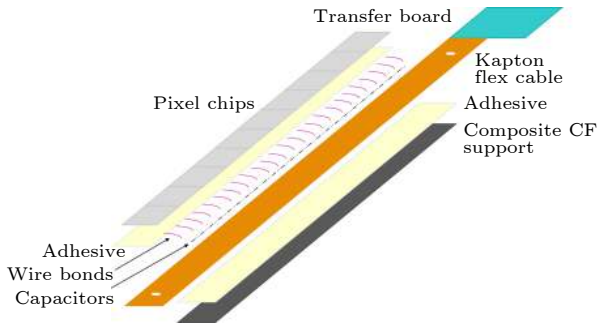


图 2 探测模块结构

Fig. 2. Structure of the detector module.

MIMOSA28 芯片是由法国 IPHC 研究所设计的基于标准  $0.35\ \mu\text{m}$  CMOS 工艺的芯片. 该芯片在高阻衬底上生长外延层作为灵敏层, 外延层厚度为  $15\ \mu\text{m}$ , 电阻率为  $400\ \Omega\cdot\text{cm}$ . 芯片尺寸为  $20.22\ \text{mm} \times 22.71\ \text{mm}$ , 像素阵列为  $928(\text{行}) \times 960(\text{列})$ , 像素尺寸为  $20.7\ \mu\text{m}$ . 芯片的每个像素包括一个放大器和一个相关双采样电路 (correlated double sampling, CDS)<sup>[18]</sup>, 并且在每一列底部还配有一个甄别器, 用于将模拟信号转化为数字信号 (0 或 1, 即像素是否被击中着火). 芯片采用逐行扫描的读出方式, 按帧格式输出数据. 为了保证数据的连续输出, 该芯片引入了独特的内存管理机制, 采用两个存储模块用来交替存储和输出数据, 每帧读出时间为  $185.6\ \mu\text{s}$ <sup>[15]</sup>.

## 2.2 读出电子学系统和数据获取系统

读出电子学系统由数字读出板、读出控制板、START 信号扇出板、Trigger 信号扇出板以及时钟扇出板等部分组成, 如图 1 所示. 探测模块通过 Samtec 高速电缆与数字读出板连接. 数字读出板以 Xinlinx 公司的 XC7K325T-2FFG676 型现场可编程逻辑门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片<sup>[19]</sup>作为核心控制器, 负责配置芯片的工作参数, 产生 MIMOSA28 芯片的工作时钟, 同时接收探测模块上的 MIMOSA28 芯片输出的数字信号并进行解析、对齐、串并转换、重新组装等操作. 组装后的数据在芯片数据 (chip data) 的基础上添加了探测模块的标志信息 (ladder flag)、模块触发号 (ladder trigger count)、模块帧号 (ladder frame count)、模块数据长度 (ladder data length)、模块数据结尾 (ladder data end) 和芯片的标志信息 (chip flag), 构成的数据包格式如图 3 所示. 数

据包采用 TCP/IP 协议, 通过千兆以太网传输到 DAQ 进行离线存储.

Ladder flag
Ladder trigger count
Ladder frame count
Ladder data length
Chip1 flag
Chip1 data
Chip2 flag
Chip2 data
...
Chip10 flag
Chip10 data
Ladder data end

图 3 探测模块的数据经 FPGA 处理后的格式

Fig. 3. Format of the data of the detector module processed by FPGA.

读出控制板接收来自 DAQ 发送的启动和停止取数的控制命令, 并根据这个命令产生启动 (START) 或停止 (STOP) 信号, 然后通过 START 信号扇出板输出到每个探测模块的数字读出板, 控制每个数字读出板的起始与停止状态. 塑料闪烁体计数器将粒子穿过闪烁体产生的光信号通过光电转换等处理转变为脉冲信号, 该脉冲信号在 Trigger 信号扇出板内经过处理后变成数字信号, 然后扇出到每个探测模块的数字读出板, 作为触发信号被 FPGA 接收并处理. 时钟扇出板生成  $100\ \text{MHz}$  的同步时钟信号用于同步每个数字读出板的工作状态.

DAQ 采用慢控制协议发送启动和停止指令以控制数据读取的进程, 同时通过用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 传输探测模块上的 MIMOSA28 芯片的配置数据和电子学的配置数据. DAQ 还通过 TCP/IP 协议接收数字读出板发出的数据包, 并将它们存储到硬盘上以用于离线分析.

## 2.3 带触发标记的连续读出方法

由 MIMOSA28 芯片的逐行扫描机制和内存管理机制<sup>[15]</sup>可知, 当带电粒子击中芯片使像素着火时, 若击中位置位于当前扫描位置之后, 则本次扫描可以记录着火像素的信息, 正在存储的这一帧数据 (第  $m$  帧) 就是当前击中所对应的数据; 若击

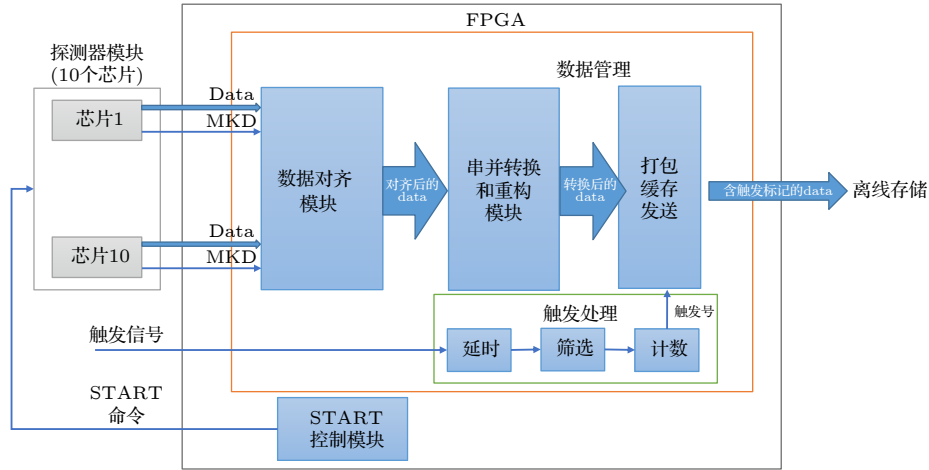


图 4 连续读出流程

Fig. 4. Process of continuous readout.

中位置位于扫描位置之前, 则本次扫描无法记录该着火像素的信息, 该着火信息将在下一次扫描中记录, 则下一次扫描存储的数据 (第  $m+1$  帧) 为本次击中事例对应的数据, 因此对每个击中事例, 理论上需要分析连续两帧 (第  $m$  帧和第  $m+1$  帧) 数据以找到对应的击中信息.

为了确保不丢失数据, 同时又能实现探测器模型中不同模块的事例对齐, 研究并实现了带有触发标记的连续读出方法. 连续读出的流程如图 4 所示.

启动读数进程之后, 探测模块上 10 个芯片同时输出数据. 由于探测模块上芯片的位置与数据读出模块的距离不相等, 数据并不是严格地同时到达 FPGA. 为了保证能够正确对数据进行重构, 在 START 命令发出后, FPGA 先以 MIMOSA28 芯片的信号标记位 (MKD) 作为每帧数据的起始标志, 接收每个 MIMOSA28 芯片传来的数据, 然后根据每个芯片 MKD 的到达时间对先到的芯片数据进行延时 (一般为 1 个时钟周期), 从而将 10 个芯片数据对齐. 对齐后的芯片数据在 FPGA 内部进行串-并转换和重构操作. 与此同时, 通过计算找到触发信号与对应数据帧的 MKD 的时间关系. 当系统判断接收到了有效触发信号, 触发号加 1, 并根据预先计算出的时间关系找到该触发对应的数据帧, 将触发号添加到数据帧里, 从而使数据与触发对应起来. 如果没有接收到触发信息, 也将在数据帧里添加触发号, 但触发号不变. 通过这样的方式既实现了数据的连续读出, 又保证了触发与数据

的对应关系, 实现了探测器模型不同模块间的事例对齐, 便于后续的数据分析.

### 3 测试与分析

#### 3.1 触发逻辑测试

为了验证触发读出逻辑的正确性, 采用信号发生器产生的脉冲信号 (频率为 5 kHz, 幅度为  $-600$  mV, 脉宽为 100 ns) 作为触发信号, 同时对五层探测模块进行测试, 每个模块都获取 200 万帧的数据. 图 5 为测试结果, 其中横坐标为触发号, 纵坐标为每次触发模块 2—模块 5 的数据帧号分别与模块 1 的数据帧号相减得到的值. 根据测试结果, 不同探测模块的数据中, 每次触发对应的数据帧号随机出现相等或差值为 1 的情况, 这是由于触发扇出板所扇出的信号实际上不是理想对齐的信号, 并且由于线路延时的影响, 触发信号到达 FPGA 的时间有细微差别, 在逻辑判断时, 触发号变化会有先后顺序, 时间间隔为纳秒级 (远小于数据帧的间隔  $185.6 \mu\text{s}$ ). 当触发号在两帧数据交界附近变化时, 在 FPGA 内进行触发号写入, 可能会出现同一触发号写在不同的两帧 (帧号连续) 数据上, 从而导致同一触发号对应的帧号差值出现 1. 但考虑到读出及触发标记机制 (2.3 节)、硬件延时固定的因素, 即使在下一帧数据中触发号又发生了变化, 该触发号对应的帧号最多差 1 或恢复为 0, 不会出现差 2 或不断增加的情况. 结合 MIMOSA28 芯片的内存管理机制, 若每个事例都取连续三帧

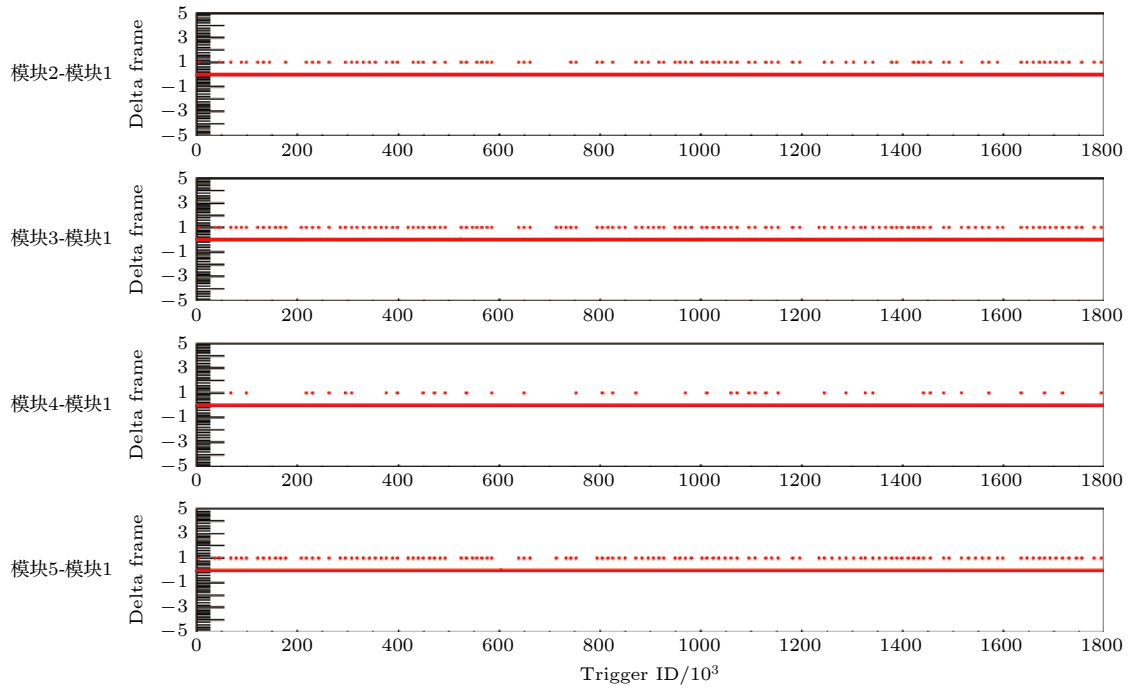


图 5 每次触发模块 2—模块 5 对应的数据帧号与模块 1 对应的数据帧号的差值

Fig. 5. Difference of the frame number between module 2—module 5 and module 1 corresponding to the same event (trigger).

(有效触发对应的前一帧, 当前帧和后一帧) 的数据进行分析, 上述帧号差 1 的情况将不会造成数据丢失, 并且能够实现不同模块间的事例对齐。

### 3.2 噪声测试

#### 3.2.1 阈值扫描

噪声水平是探测模块的一个重要的参数, 通过芯片甄别器的阈值扫描可以获取探测模块上芯片的噪声水平. 设置合适的甄别器阈值可以有效降低芯片的噪声计数, 同时又能保证探测模块不损失效率. 室温下将芯片每列的甄别器设置不同的阈值, 测试芯片像素在不同阈值下的噪声响应, 以获得芯片的传输曲线、暂态噪声 (temporal noise, TN)、固定模式噪声 (fixed pattern noise, FPN) 以及甄别器 DAC 的参考值等. DAC 的扫描范围为 0—255, 扫描步长为 5. 对芯片所有列的噪声传输曲线采用正态分布的累积分布函数进行拟合. 正态分布的累积分布函数为

$$f(x) = P_0 \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x - P_1}{\sqrt{2} \times P_2}\right), \quad (3)$$

其中  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  均是拟合参数,  $\operatorname{erfc}(x)$  的定义为

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (4)$$

将  $P_1$  和  $P_2$  分别填入直方图, 使用高斯函数拟合后

得到传输曲线的均值 (Mean) 和标准差 (Sigma) 分布直方图如图 6 所示, 其中 Mean 分布图的 Sigma 值代表每列甄别器阈值不一致性, 为 FPN; Sigma 分布图的 Mean 值为芯片的 TN.

芯片的噪声 ( $\sigma$ ) 定义为

$$\sigma = \sqrt{\text{FPN}^2 + \text{TN}^2}. \quad (5)$$

而芯片的甄别器阈值可设置为

$$\text{Threshold} = \text{Mean}_{\text{FPN}} + n \times \sigma, \quad (6)$$

其中  $\text{Mean}_{\text{FPN}}$  是 Mean 分布图的 Mean 值.  $n$  的下限需要通过在无放射源的情况下测试不同阈值下芯片像素的误击中率 (fake hit rate, FHR) 来确定, 芯片正常工作的最小阈值所对应的  $n$  值即为  $n$  的下限.  $n$  值的上限需要通过测试模块的探测效率来确定, 标准为其对应的阈值不明显影响探测模块的探测效率, 这将在后续的束流测试中研究.

#### 3.2.2 误击中率

FHR 定义为

$$\text{FHR} = \frac{\text{Fired pixels}}{\text{Number of frames} \times \text{Number of pixels}}, \quad (7)$$

其中 Number of frames 为测试中获取的数据帧数, Number of pixels 为芯片像素数, Fired pixels 代表测试中着火像素的总数.

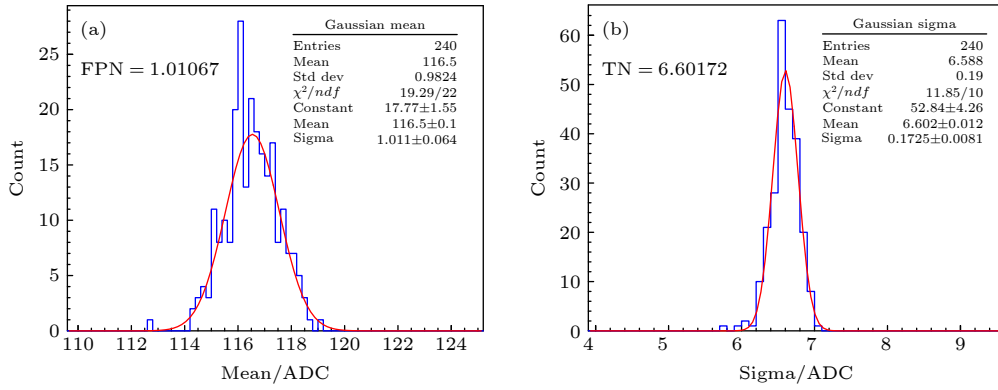


图 6 探测模块的噪声水平 (1 ADC=0.25 mV) (a) 传输曲线的 Mean 值分布 (FPN 为 1.01067 ADC, 转换成电压值为 0.253 mV); (b) 传输曲线的 Sigma 值分布 (TN 为 6.60172 ADC, 转换成电压值为 1.65 mV)

Fig. 6. Noise level of detector module (1 ADC unit = 0.25 mV): (a) Mean distribution of transmission curve (FPN is 1.01067 ADC, converted into the voltage is 0.253 mV); (b) Sigma distribution of transmission curve (TN is 1.01067 ADC, converted into the voltage is 1.65 mV).

在不同阈值条件下测得 FHR 随阈值的变化如图 7 所示. 可以看出, 芯片的误击中率随着阈值的增大呈下降趋势, 阈值设置为  $4\sigma$  及以上时 ( $n \geq 4$ ), 每帧每个像素的误击中率低于  $10^{-5}$ , 在该阈值下, 芯片的噪声不会对探测模块的效率产生影响.

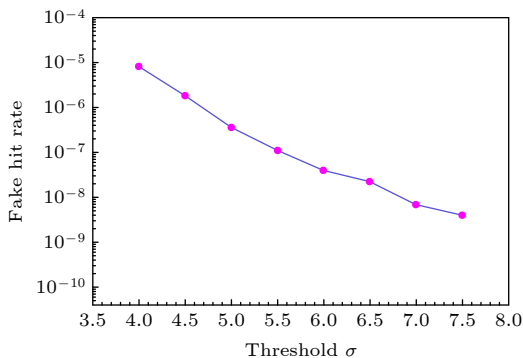


图 7 误击中率随阈值的变化  
Fig. 7. FHR as a function of the threshold.

### 3.3 探测模块响应和成像性能测试

为了验证探测模块的功能是否正常, 根据阈值扫描和误击中率测试的结果对 MIMOSA28 芯片的甄别器设置合适的阈值  $\text{Mean}_{\text{FPN}} + 4\sigma$ , 并用  $^{90}\text{Sr}$  放射源对 5 层探测模块进行了响应测试.

放射源放置在第五层模块的前方, 电子束经准直圆孔后连续穿过 5 层探测模块, 最后进入第一层后方的闪烁体计数器, 闪烁体计数器的输出信号作为五层探测模块的触发信号. 在进行击中挑选时, 根据 3.1 节的触发逻辑测试结果, 分析每次触发对

应的前一帧和后两帧的数据. 五层探测模块的击中挑选结果如图 8 所示. 可以看到, 距离放射源最近的模块 5 和模块 4 上有一个明显的亮斑, 这是电子通过准直圆孔在芯片上所成的像, 另外由于  $^{90}\text{Sr}$  衰变产生的电子能量较低, 受多次库仑散射的影响, 距离放射源越远的探测模块, 击中数目逐渐变少, 因此准直孔的像逐渐变得模糊. 但距离放射源最远的模块 1 上也显示出一个近似圆形的阴影, 这是由于产生触发信号的闪烁体距离模块 1 最近, 模块 1 上击中粒子的位置受触发闪烁体位置和尺寸的影响最大, 该阴影代表了闪烁体的位置和尺寸. 此测试结果表明探测模块能够正常工作, 且成像性能良好.

### 3.4 击中重建算法

#### 3.4.1 Charge sharing 效应

由于 MIMOSA28 芯片的 PN 结工作在非耗尽模式下, 带电粒子穿过 MIMOSA28 芯片的灵敏区所产生的电子-空穴对通过热扩散的方式被周围的数个像素收集, 使像素着火, 形成簇团, 这就是电荷分享效应<sup>[20]</sup>. 相比于每次事例仅有单个像素着火的情况, 利用着火簇团的信息重建粒子在芯片上的击中位置有利于提高芯片的空间分辨率. 由于 MIMOSA28 芯片输出数字信号, 只能获得像素是否着火的信息, 在进行击中位置重建时所有着火像素是平权的, 我们研究了不同算法如相邻法和比较法来重建簇团的几何中心从而重建粒子在芯片上击中位置.

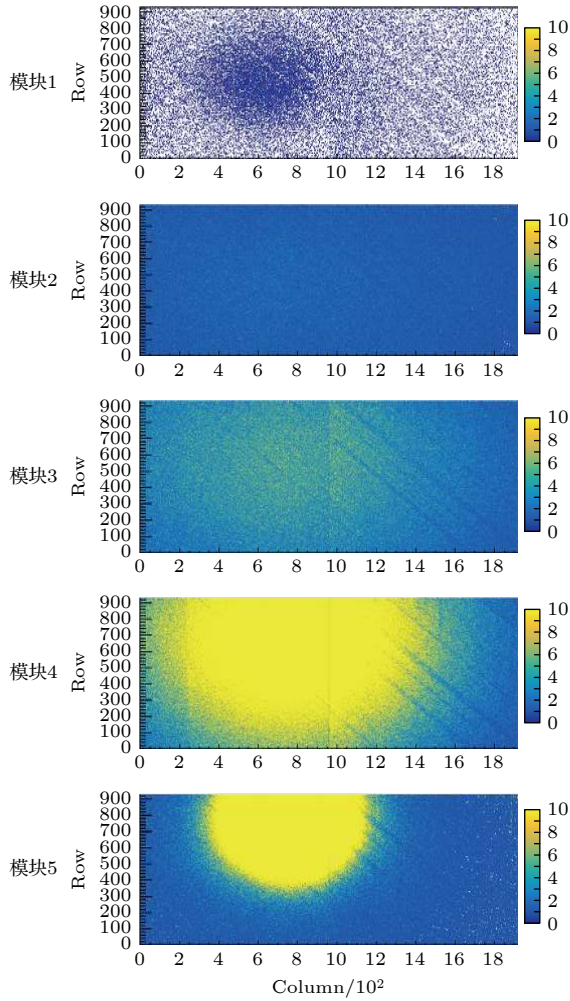


图 8 五层探测模块击中挑选结果 (右侧色温表给出像素被击中的次数)

Fig. 8. Hit selection of the five-layer detection module (The rainbow indicates the number of times a pixel being hit).

### 3.4.2 重建算法——相邻法和比较法

相邻法的实现流程如图 9 所示, 其中白色方块表示未着火的像素, 蓝色方块表示着火但未被标记的像素, 黄色方块表示着火且标记过的像素. 按照图 9(a)—图 9(d) 的顺序, 首先确定一个着火像素, 将其标记为  $hit\_1$ , 以这个像素为基准寻找其周围 (上下左右) 相邻的着火像素, 同样标记为  $hit\_1$ , 然后再以相邻像素为基准, 继续寻找周围的相邻着火像素, 一直迭代下去直到找完  $hit\_1$  的所有相邻的着火像素, 再依据中心法把  $hit\_1$  的着火像素坐标重建为击中位置, 然后重复  $hit\_1$  着火像素寻找及击中位置重建的过程, 寻找并重建该帧数据中其他击中信息 ( $hit\_2, hit\_3, \dots$ ).

比较法是将所有着火像素的行列坐标放入数组, 遍历数组中的像素, 将每一个像素与它之后的

所有像素两两比较, 若比较判断两个像素相邻则有四种情况, 如图 10 所示, 方块颜色的含义同图 9.

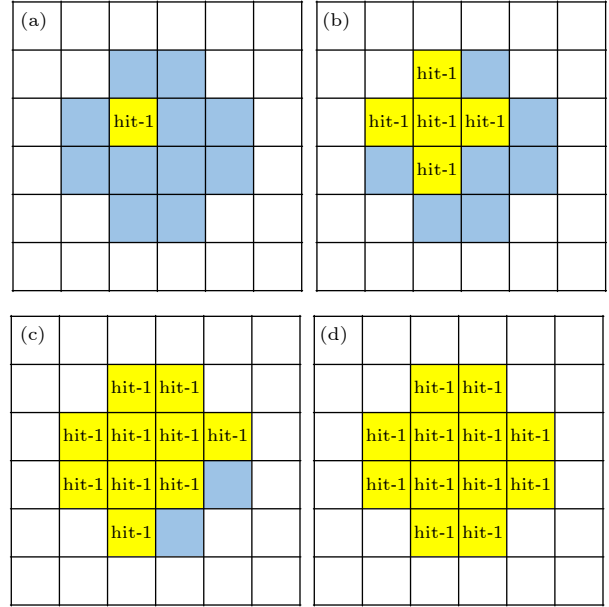


图 9 相邻法实现流程图

Fig. 9. Flow chart of adjacent method.

若两个像素都未标记, 则新建一个标记, 将它们标记为  $hit\_1$ , 如图 10(a) 所示; 若两个像素一个有标记 (标记值为  $hit\_i$ ) 另一个未标记, 则将未标记的像素标记为  $hit\_i$ , 如图 10(b) 所示; 若两像素的标记值相等, 则不需处理, 如图 10(c) 所示; 若两像素标记值不同 (标记值分别为  $hit\_j, hit\_k$ , 且  $j < k$ ), 则将标记值为  $hit\_k$  的像素全标记为  $hit\_j$ , 如图 10(d) 所示. 像素遍历完毕之后, 根据中心法分别把标记号相同的着火像素重建成坐标.

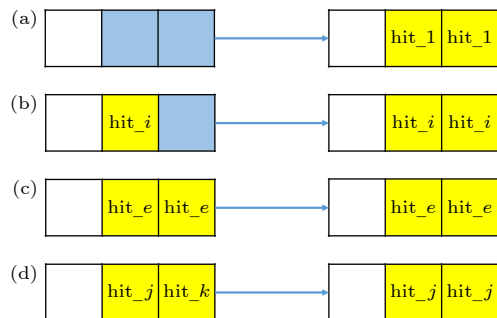


图 10 比较法中相邻像素的四种标记情况

Fig. 10. Four marking situations of adjacent pixels in the comparison method.

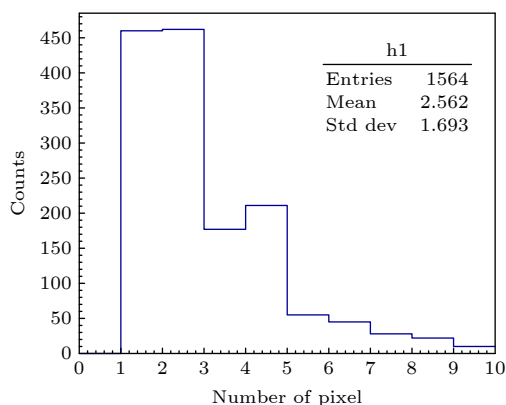
假设每个击中的簇团有  $M$  个着火像素, 一帧数据中有  $N$  个击中, 则两种算法的复杂度如表 1 所列.

表 1 两种算法的复杂度比较

Table 1. Comparison of the complexity of the two algorithms.

	相邻法	比较法
循环次数	$4 \times M \times N$	$(M^2 \times N^2 - M \times N)/2$
时间复杂度 $T(N)$	$O(N)$	$O(N^2)$

采用  $^{90}\text{Sr}$  放射源测试两种算法, 得到的 cluster size 分析结果相同, 如图 11 所示, 验证了 cluster 重建算法的有效性. 从图 11 中可以看出, 每个击中所引起的着火像素数的平均值为 2.562. 在  $M = 2.562$  的情况下, 经分析计算, 当  $N \geq 4$  时, 相邻法能够更快地找到所有着火像素, 反之比较法更快.

图 11  $^{90}\text{Sr}$  放射源测试得到芯片上 cluster size 的分布Fig. 11. Cluster size distribution on the chip tested by  $^{90}\text{Sr}$  source.

## 4 结 论

本文在实验室测试环境下, 对硅像素探测模块的性能进行了测试研究. 通过探测模块上芯片的噪声水平测试, 测得其固定模式噪声为 0.253 mV, 瞬态噪声为 1.65 mV, 芯片阈值为  $4\sigma$  及以上时 ( $n \geq 4$ ), 每帧每个像素的误击中率低于  $10^{-5}$ , 这种情况下噪声对探测模块的影响可以忽略. 为了实现不同探测模块的事例对齐, 研究并实现了包含触发标记的 MAPS 数据连续读出方法, 测试结果表明读出逻辑正确, 可用于实现探测器模型中不同模块的事例对齐. 此外, 对芯片的击中重建算法进行了研究,  $^{90}\text{Sr}$  放射源电子引起的着火像素数的平均值为 2.562, 在这个值下, 当每帧击中数目大于或等于

4 时, 相邻法能够更快地找到所有着火像素, 反之比较法更快. 测试结果表明, 探测模块和读出电子学系统工作正常, 噪声水平符合预期, 该研究为后续在束流上进一步测试研究奠定了基础.

## 参考文献

- [1] Weste N H E, Eshraghian K 1985 *NASA STI/Recon Technical Report A* **85** 47028
- [2] MacMillen D, Camposano R, Hill D, Williams T W 2000 *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.* **19** 1428
- [3] Greiner L, Anderssen E, Matis H S, Ritter H G, Schambach J, Silber J, Stezelberger T, Sun X, Szelezniak M, Thomas J, Videback F, Vu C, Wieman H 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **650** 68
- [4] Contin G, Anderssen E, Greiner L, Schambach J, Silber J, Stezelberger T, Sun X, Szelezniak M, Vu C, Wieman H, Woodmansee S 2015 *JINST* **10** C03026
- [5] Brünig O, Burkhardt H, Myers S 2012 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **67** 705
- [6] Schukraft J 2012 *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* **370** 917
- [7] Mager M 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **824** 434
- [8] Keil M 2015 *JINST* **10** C03012
- [9] Zhou Y, Lu Y P, Wu Z G, Shi T, Ju X D, Dong J, Zhu H B, Ouyang Q 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **980** 164427
- [10] Wei W, Zhang J, Ning Z, Lu Y P, Fan L, Li H S, Jiang X S, Lan A K, Ou-Yang Q, Wang Z, Zhu K J, Chen Y B, Liu P 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **835** 169
- [11] Zhang C 2009 *Chin. Phys. C* **33** 60
- [12] Harris F A 2006 *Nucl. Phys. B* **162** 345
- [13] Hu G C, Baudot J, Bertolone G, et al. 2010 *Nucl. Instrum. Meth. A* **623** 480
- [14] Contin G, Greiner L, Schambach J, Szelezniak M, Anderssen E, Bell J, Cepeda M, Johnson T, Qiu H, Ritter H G, Silber J, Stezelberger T, Sun X M, Tran C, Vu C, Wieman H, Wilson K, Witharm R, Woodmansee S, Wolf J 2018 *Nucl. Instrum. Meth. A* **907** 60
- [15] Ultimate user manual, Himmi A, Doziere G, Bertolone G, Dulinski W, Coll-edani C, Dorokhov A, Hu Ch, Morel F, Pham H, Valin I, Wang J [http://www.iphc.cnrs.fr/IMG/pdf/Ultimate\\_UserManual.pdf](http://www.iphc.cnrs.fr/IMG/pdf/Ultimate_UserManual.pdf) [2021-3-9]
- [16] Valin I, Hu-Guo C, Baudot J, Bertolone G, Besson A, Colledani C, Clau G, Dorokhov A, Doziere G, Dulinski W, Gelin M, Goffe M, Himmi A, Jaaskel-ainen K, Morel F, Pham H, Santos C, Senyukov S, Specht M, Voutsinas G, Wang J, Winter M 2012 *JINST* **7** C01102
- [17] Highland V L 1975 *Nucl. Instrum. Meth.* **129** 497
- [18] Szelezniak M A, Deptuch G W, Guilloux F, Heini S, Himmi A 2007 *IEEE J. Sensor* **7** 137
- [19] 7 Series FPGAs Data Sheet: Overview, Xilinx [https://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds180\\_7\\_Series\\_Overview.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds180_7_Series_Overview.pdf) [2021-4-19]
- [20] Mathieson K, Passmore M S, Seller P, Prydderch M L, O' Shea V, Bates R L, Smith K M, Rahman M 2002 *Nucl. Instrum. Meth. A* **487** 113

# Test study of detector modules based on monolithic active pixel sensor<sup>\*</sup>

Yang Sheng-Hui<sup>1)2)</sup> Dong Ming-Yi<sup>2)3)†</sup> Qu Chao-Yue<sup>2)3)</sup> Tian Xing-Cheng<sup>2)3)</sup>  
 Dong Jing<sup>2)</sup> Wu Ye<sup>2)3)</sup> Ma Xiao-Yan<sup>2)</sup> Zhang Hong-Yu<sup>2)3)</sup>  
 Jiang Xiao-Shan<sup>2)</sup> Ouyang Qun<sup>2)3)</sup> Li Lan-Kun<sup>1)2)</sup> Zheng Guo-Heng<sup>1)</sup>

1) (*School of Physics and Microelectronics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China*)

2) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 10 March 2021; revised manuscript received 16 April 2021)

## Abstract

Silicon pixel detectors are widely used as vertex detectors or inner trackers in high-energy collider experiments because of their excellent spatial resolution, extremely high counting capability and low power consumption. The study of the silicon pixel detector based on the monolithic active pixel sensor (MAPS) is one of the R&D schemes for upgrading the inner chamber of the Beijing spectrometer III (BES III) drift chamber (MDC). It is planned to build a 1/10 scale prototype of the inner chamber. The detector module is the basic component of the prototype, consisting of ten MIMOSA28 chips thinned to 50  $\mu\text{m}$ , a flexible cable and a carbon fiber support. In order to study the performance of the module, a test system is set up. The system is composed mainly of five-layer modules, readout electronics and data acquisition system. This article focuses on the realization of the continuous data readout method with trigger marking function, the measurement of the noise level of the detector modules, the module response test by a radioactive source, and the study of the hit reconstruction algorithm. The test of trigger readout logic verifies the correctness of the continuous readout method with trigger marking. It can be concluded that analyzing consecutive three frames data (the previous frame, the current frame and the next frame) of each valid trigger will not lead to effective hit data loss. The noise level of the detector module is tested. The results show that the fixed pattern noise (FPN) is 0.253 mV, and the temporal noise (TN) is 1.65 mV. The fake hit rate is less than  $10^{-5}$  that can be ignored when the chip threshold is set to be above  $4\sigma$  of noise. Two algorithms for hit reconstruction (i.e. adjacent method and comparison method) are studied and compared. When the average number of fired pixels caused by each hit is 2.562 and more than four hits in each frame of data, the adjacent method can find all of the fired pixels to be faster. During the test, the detector module and the electronics are proved to work well. These studies lay a foundation for further testing the performance of the detector prototype.

**Keywords:** silicon pixel detector, monolithic active pixel sensor, continuous readout method

**PACS:** 07.77.Ka, 29.40.Gx, 95.55.Vj

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210464

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1232202, 11875274).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [dongmy@ihep.ac.cn](mailto:dongmy@ihep.ac.cn)