

## 基于成像形态学特征的电离粒子甄别与提取

徐守龙 王治林 黄有骏 李卿鑫 邹树梁

### Ionizing particle discrimination and extraction based on morphological imaging features

XU Shou-long, WANG Zhi-lin, HUANG You-Jun, LI Qing-Xin, ZOU Shu-liang

引用本文:

徐守龙, 王治林, 黄有骏, 李卿鑫, 邹树梁. 基于成像形态学特征的电离粒子甄别与提取[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 347-357. doi: 10.37188/CO.2025-0134

XU Shou-long, WANG Zhi-lin, HUANG You-Jun, LI Qing-Xin, ZOU Shu-liang. Ionizing particle discrimination and extraction based on morphological imaging features[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 347-357. doi: 10.37188/CO.2025-0134

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0134>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 双有源区结构4.7 $\mu\text{m}$ 中波红外量子级联激光器

4.7  $\mu\text{m}$  mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1042 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0239>

#### 基于法向量和面状指数特征的文物点云棱界配准方法

Aligning method for point cloud prism boundaries of cultural relics based on normal vector and faceted index features

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 654 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0156>

#### 基于窄带成像及放大内镜的脂质分割方法

Lipid segmentation method based on magnification endoscopy with narrow-band imaging

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 982 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0024>

#### 基于曲率特征的文物点云分类降采样与配准方法

A point cloud classification downsampling and registration method for cultural relics based on curvature features

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 572 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0115>

#### 脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

#### 采用多角度偏振光学相干层析成像的滑油磨粒三维形貌检测和重建

3-D morphological feature measurement and reconstruction of wear particles using multi-view polarized optical coherence tomography

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1449 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2025-0018>

文章编号 2097-1842(2026)02-0347-11

## 基于成像形态学特征的电离粒子甄别与提取

徐守龙<sup>1\*</sup>, 王治林<sup>1</sup>, 黄有骏<sup>2</sup>, 李卿鑫<sup>1</sup>, 邹树梁<sup>1</sup>

(1. 南华大学, 湖南 衡阳 421001;

2. 中国核动力研究设计院设计所, 四川 成都 610213)

**摘要:** 为避免脉冲堆积效应, 改善辐射电离粒子的甄别效率, 本文利用 CMOS 有源像素传感器对电离粒子的光学响应特性进行分析, 提出了一种基于成像形态学特征的粒子甄别方法。通过对比分析不同电离粒子响应事件特征, 阐明增益及积分时间的调控机制, 并对甄别效果进行验证。研究表明,  $\alpha$  粒子响应事件的像素个数、平均像素值、矩形度、凸度与紧致度等 5 个特征参数与  $\beta$  和  $\gamma$  粒子响应事件存在显著差异。 $\beta$  和  $\gamma$  粒子响应事件在像素个数、矩形度和凸度等特征参数相似, 但可通过对比平均像素值或紧致度加以区分。利用响应事件所包含的像素个数来甄别  $\alpha$  事件的准确率大于 99%, 利用平均像素值甄别  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的准确率大于 82%。本文研究成果为混合辐射场的电离粒子甄别提供了新的方法和研究基础, 为发展核环境电离粒子甄别技术, 以及抗辐射噪声干扰技术提供新的路径与理论支撑。

**关键词:** 电离粒子甄别; 成像形态学特征; CMOS 有源像素传感器; 混合辐射场

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0134 CSTR: 32171.14.CO.2025-0134

## Ionizing particle discrimination and extraction based on morphological imaging features

XU Shou-long<sup>1\*</sup>, WANG Zhi-lin<sup>1</sup>, HUANG You-Jun<sup>2</sup>, LI Qing-Xin<sup>1</sup>, ZOU Shu-liang<sup>1</sup>

(1. University of South China, Hengyang 421001, China;

2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

\* Corresponding author, E-mail: xusl@usc.edu.cn

**Abstract:** To reduce pulse pile-up and improve ionizing particle discrimination efficiency, we use a CMOS active pixel sensor to analyze ionizing particle optical responses and propose morphology-based discrimination. By comparing the characteristics of response events of different ionizing particles, the regulatory mechanisms influenced by gain and integration time are elucidated, and the discrimination effectiveness is verified. Results show  $\alpha$  events differ significantly from  $\beta$  and  $\gamma$  events in pixel count, mean pixel value, rectangularity, convexity, and compactness.  $\beta$  and  $\gamma$  events are similar in pixel count, rectangularity, and convexity, but differ in mean pixel value or compactness. Using pixel count,  $\alpha$  events were identified with over 99% accuracy.  $\beta$  and  $\gamma$  events were discriminated by mean pixel value with over 82% accuracy. The results provide a new method and basis for ionizing particle identification in mixed radiation fields. It supports nuclear particle discrimination and noise mitigation, providing new approaches and theoretical guidance.

收稿日期: 2025-10-22; 修订日期: 2025-11-18

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11905102)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11905102)

**Key words:** ionizing particle discrimination; morphological imaging features; CMOS active pixel sensor; mixed radiation field

## 1 引言

光学探测技术在电离粒子甄别与测量中的普及,对于核安全监测、空间辐射防护、医学诊断及粒子物理研究等领域具有重要意义。随着半导体工艺的发展,互补金属氧化物半导体(CMOS)有源像素传感器(Active Pixel Sensor, APS)已得到广泛应用。例如,CMOS技术在单光子探测中表现出独特优势,并应用于量子成像和生物成像<sup>[1-2]</sup>,尤其在量子计算和医学成像中显示出高灵敏度和精确度<sup>[3-4]</sup>。此外,在光谱分析领域,CMOS技术可以用于检测生物体发出的极弱光信号,实现高分辨率光谱测量<sup>[5-7]</sup>。通过将高空间分辨率与低噪声特性相结合,CMOS有源像素传感器为核辐射探测技术的发展提供了新的视角<sup>[8-10]</sup>。

近年来,有研究表明,CMOS传感器具有良好的耐辐射性<sup>[11-13]</sup>,且相比传统依赖脉冲波形甄别的闪烁体探测器,CMOS器件在低能量区域表现出更稳定的探测能力,可有效应对脉冲堆积和信号失真等问题<sup>[14-16]</sup>。同时,研究发现,CMOS有源像素传感器对单个电离粒子敏感,其辐射响应特性可用于辐射成像,并在像素阵列中产生辐射响应事件<sup>[17-19]</sup>。不同的粒子,如X射线、 $\gamma$ 光子以及 $\alpha$ 和 $\beta$ 粒子,在帧图像中显示出典型响应事件的特定大小和形状<sup>[20-21]</sup>,利用有源像素传感器可对辐射粒子进行分类<sup>[22]</sup>。然而,现有关于电离粒子甄别与测量的研究仍主要集中于闪烁体探测器脉冲波形甄别方法的优化<sup>[23-25]</sup>,且针对CMOS APS的研究多聚焦于辐射响应性能测试<sup>[26-27]</sup>、抗辐射加固设计及成像性能提升等方面<sup>[28-31]</sup>,对于电离粒子响应事件的空间形态学特征及其分类应用仍缺乏系统深入的探讨,其光学响应特性尚未被研究者充分发掘。

本文利用CMOS APS对辐射电离粒子的光学响应特性,开展对 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线电离响应事件的分布特征研究,系统对比不同增益与积分时间调控下响应事件所包含的像素个数、凸度、长宽比和紧致度等空间形态学特征参数,以及像素值的

差异,提出一种新的基于电离粒子成像形态学特征的甄别方法。该研究将光学探测技术引入混合辐射场的电离粒子甄别过程,能够为混合辐射探测技术和抗辐射噪声干扰技术提供重要的理论支撑和研究基础。

## 2 实验准备与数据处理方法

### 2.1 实验样品与布局

本实验采用SONY MT9P031型有源像素传感器,支持8~10位数字信号输出。利用iCamera 51单片机实现参数调节、数据采集和传输,视频采样频率为5 Hz。实验采用的 $\alpha$ 放射源为 $^{241}\text{Am}$ 面源, $\beta$ 放射源为 $^{63}\text{Ni}$ 面源, $\gamma$ 放射源为 $^{60}\text{Co}$ 柱源。传感器与放射源的关键参数如表1所示。实验前去除传感器表面覆盖的玻璃保护层,使射线直接入射到传感器硅像素阵列表面。

表 1 实验样品参数

Tab. 1 Parameters of experimental samples

实验样品参数	参数值
传感器像素尺寸	$2.2\ \mu\text{m} \times 2.2\ \mu\text{m}$
传感器分辨率	$2592\ (\text{水平}) \times 1944\ (\text{垂直})$
$\alpha$ 放射源活度	$2.9 \times 10^4\ \text{Bq}\ (^{241}\text{Am})$
$\beta$ 放射源活度	$7.4 \times 10^7\ \text{Bq}\ (^{63}\text{Ni})$
$\gamma$ 放射源活度	$9 \times 10^{14}\ \text{Bq}\ (^{60}\text{Co})$

如图1所示,为确保不同粒子辐照实验条件的一致性,将两组CMOS APS通过主板与传感器电路板相连接形成双板结构,分别正对 $\alpha$ 和 $\beta$ 放射源, $\gamma$ 放射源位于CMOS APS正前方,以保证粒子对传感器的垂直入射。

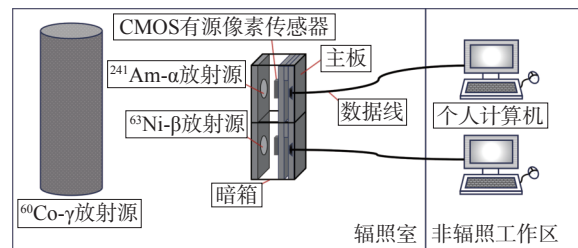


图 1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

样品置于暗箱内部,以隔绝辐射实验过程中环境可见光的干扰。实验时,环境温度为 21 °C,探测器模块通过数据线连接至非辐射环境工作区的个人计算机进行数据采集和处理。

## 2.2 数据处理方法

平均像素值 ( $M$ ) 用于表征响应事件的整体亮度水平,其计算公式为:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I(i, j)}{n \times m}, \quad (1)$$

式中,  $I(i, j)$  表示图像中第  $i$  行第  $j$  列像元的像素值,  $n$ 、 $m$  分别表示连通区域的行数和列数。

连通区域所包含的像素个数 ( $P$ ) 反映了响应事件的面积大小,其计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \delta(I(i, j)), \quad (2)$$

式中,  $\delta(\cdot)$  为筛选函数,用于确定该像元是否属于连通区域。帧图像经过二值化后,  $\delta(I(i, j))$  可通过以下逻辑确定:

$$\delta(I(i, j)) = \begin{cases} 1, & \text{if } I(i, j) = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, 1 表示帧图像二值化后的目标区域, 0 表示背景区域。

矩形度 ( $R$ ) 用于表征响应事件空间分布形状与理想矩形之间的相似度,当区域为圆形时,矩形度为 0.785。其计算公式为:

$$R = \frac{P}{P_{\text{MER}}}, \quad (4)$$

式中,  $P$  为连通区域的面积,  $P_{\text{MER}}$  为连通区域最小外接矩形的面积。

长宽比 ( $V$ ) 用于表征响应事件空间分布形状的对称性及方向性。其计算公式为:

$$V = \frac{W}{H}, \quad (5)$$

式中,  $W$  和  $H$  分别代表最小外接矩形的宽度和高度。

紧致度 ( $O$ ) 用于区分和识别响应事件形状类型,具有平移、尺度、旋转不变性。其计算公式为:

$$O = \frac{S^2}{P}, \quad (6)$$

式中,  $S$  是连通区域的边界长度。

凸度 ( $H$ ) 用于描述响应事件空间分布形状的复杂性及边缘凹陷程度,凸度越低,形状越不规则。其计算公式为:

$$H = \frac{P}{F}, \quad (7)$$

式中,  $F$  为连通区域的凸包面积。

## 3 CMOS APS 中的粒子响应机制

图 2(彩图见期刊电子版)为响应事件形成原理图。由图 2 可知,当带电粒子穿过传感器的像素阵列硅衬底时,会电离产生电子-空穴对。随后,这些载流子在器件内部的电场作用下发生漂移,同时,将从高浓度区域自发地向低浓度区域扩散,到达空间电荷区被收集,进而形成响应事件。由于 CMOS APS 采用浅 p-n 结并呈部分耗尽特性,电荷收集效率不仅与能量沉积位置与局域电离密度有关,还受像素几何及扩散路径等因素影响。不同类型辐射粒子在硅中的能量沉积分布、线性能量转移与电离密度差异导致事件响应显著不同。

$\alpha$  粒子具有高线性能量传递和极短射程,在硅表面附近形成局域化的高密度电离,在单像素或邻近像素产生接近饱和的电荷分布,其扩散半径较小但载流子密度极大。如图 2(a) 所示,  $\alpha$  粒子响应事件在图像上表现为一个明亮的白色亮斑,其中心区域的多个像元紧密相连且像素值达到 255。相比之下,  $\beta$  粒子的线性能量传递较低,且在与硅原子核外电子的库仑作用中会发生显著的散射,从而产生连续偏折的电离轨迹,电荷云扩散更为显著,部分电荷跨多个像素收集,形成细长、斑段状的响应。 $\gamma$  射线本身不带电,其能量沉积依赖康普顿散射、光电效应或电子对效应产生的次级电子,空间位置随机且每次沉积量小,往往表现为低能小簇。如图 2(b) 和图 2(c) 所示,  $\beta$ 、 $\gamma$  粒子响应事件明显弱于  $\alpha$  粒子,且仅有单个像元的像素值为峰值。其中,  $\gamma$  粒子响应事件相比  $\beta$  事件更弱,但其形态与  $\beta$  事件相似。

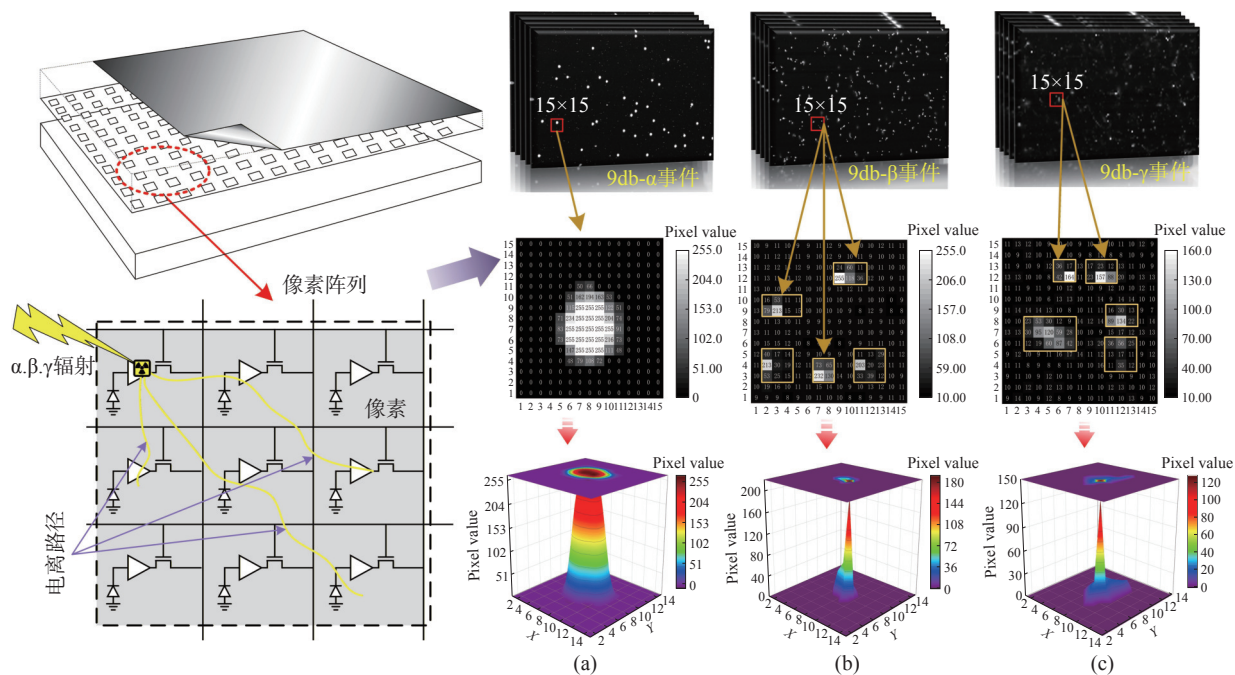


图 2 响应事件形成原理。(a) 9 db  $\alpha$  事件; (b) 9 db  $\beta$  事件; (c) 9 db  $\gamma$  事件

Fig. 2 Schematic illustration of the formation mechanism of response events. (a) 9 db  $\alpha$  event, (b) 9 db  $\beta$  event, and (c) 9 db  $\gamma$  event

### 4 响应事件特征与对比分析

图 3(彩图见期刊电子版)对比了响应事件在不同增益及积分时间调控下的像素个数分布。结果显示,增益的提升使  $\alpha$  事件所包含的像素个数明显增多,而  $\beta$ 、 $\gamma$  事件保持相对稳定。同时,  $\alpha$  事

件像素个数的分布与  $\beta$ 、 $\gamma$  事件存在显著差异,而  $\beta$  和  $\gamma$  事件的像素个数分布曲线在各增益条件下均存在大面积重叠。图 3(c) 中,重叠区域主要集中在 7~12 个像素之间。这表明利用像素个数的分布可以有效区分出  $\alpha$  事件,但对于  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的区分存在一定困难。此外还发现,积分时间未对事件像素的变化产生显著影响。

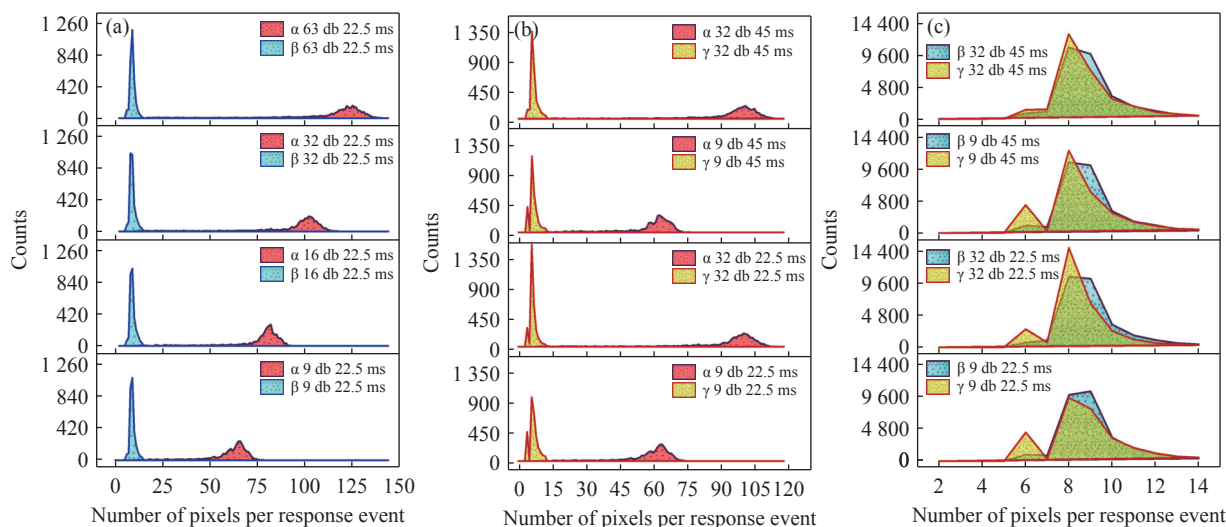


图 3 响应事件像素个数对比。(a)  $\alpha$  和  $\beta$  事件; (b)  $\alpha$  和  $\gamma$  事件; (c)  $\beta$  和  $\gamma$  事件

Fig. 3 Comparison of pixel counts in response events. (a)  $\alpha$  and  $\beta$  events; (b)  $\alpha$  and  $\gamma$  events; (c)  $\beta$  and  $\gamma$  events

图 4(彩图见期刊电子版)对比了响应事件在不同增益及积分时间调控下的长宽比分布。如

图 4 所示,各响应事件的长宽比曲线分布峰值及各区间均存在大面积重叠,峰值主要集中在 1 附

近。利用响应事件长宽比的分布难以区分  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  事件。图 5(彩图见期刊电子版)对比了响应事件在不同增益及积分时间调控下的凸度分布, 结果显示, 增益的提升导致  $\alpha$  事件的凸度呈现增大的趋势, 事件形态的趋向更加规则化。且  $\alpha$  事件的凸度明显高于  $\beta$  或  $\gamma$  事件, 其曲线与  $\beta$ 、 $\gamma$  在各增益水平下均保持一定距离, 与  $\gamma$  曲线之间的距离更为显著。而  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的凸度变化曲线在各增

益水平下均存在大面积重叠。图 5(c) 中,  $\beta$  事件仅在凸度超过 0.6 的区域分布明显多于  $\gamma$ 。这表明基于响应事件的凸度特征可以有效区分出  $\alpha$  事件, 但对于  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的区分存在困难。同样, 积分时间对事件凸度的变化未产生显著影响, 这可能是由于电离作用时间非常短, 粒子在一个积分周期内完成所有能量沉积过程, 积分时间影响单帧图像上响应事件的数量, 而非事件的形态特征。

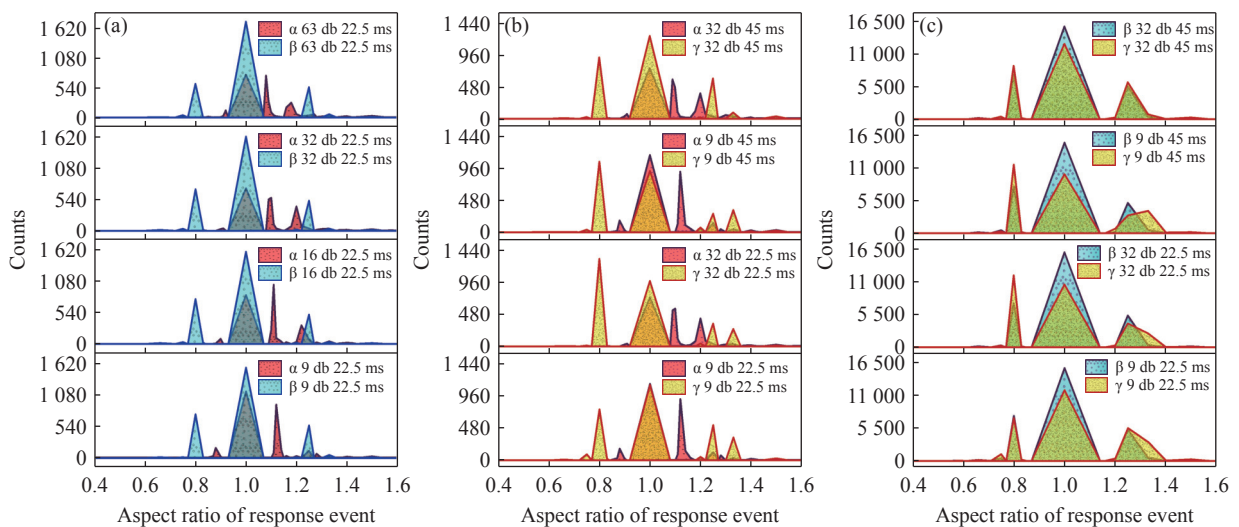


图 4 响应事件长宽比对比。(a)  $\alpha$  和  $\beta$  事件; (b)  $\alpha$  和  $\gamma$  事件; (c)  $\beta$  和  $\gamma$  事件

Fig. 4 Comparison of the aspect ratios of response events. (a)  $\alpha$  and  $\beta$  events; (b)  $\alpha$  and  $\gamma$  events; (c)  $\beta$  and  $\gamma$  events

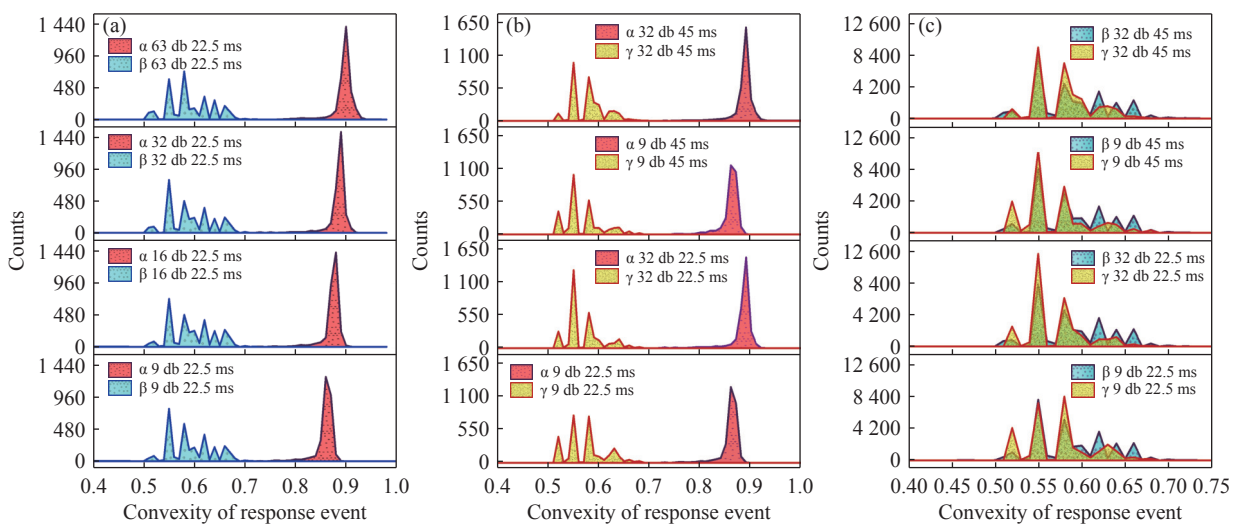


图 5 响应事件凸度对比。(a)  $\alpha$  和  $\beta$  事件; (b)  $\alpha$  和  $\gamma$  事件; (c)  $\beta$  和  $\gamma$  事件

Fig. 5 Comparison of the convexity of response events. (a)  $\alpha$  and  $\beta$  events; (b)  $\alpha$  and  $\gamma$  events; (c)  $\beta$  and  $\gamma$  events

图 6(彩图见期刊电子版)对比了响应事件在不同增益及积分时间调控下的矩形度分布。结果显示,  $\alpha$  事件的矩形度明显高于  $\beta$ 、 $\gamma$  事件。随着增益的提升逐渐向 0.78 靠近, 且与  $\beta$ 、 $\gamma$  事件分布

曲线在各增益水平下均保持一定距离。而  $\beta$ 、 $\gamma$  事件矩形度曲线分布仍存在大面积重叠。图 6(c) 中,  $\gamma$  事件矩形度在 0.36 及 0.53 附近的数量分布多于  $\beta$  事件, 而在 0.56 处的数量分布明显少于

β 事件。这表明增益的提升使 α 事件在暗图像中的形态更加趋近于圆形, 基于响应事件的矩形度

特征可以有效区分出 α 事件, 但对于 β、γ 事件的区分也同样存在困难。

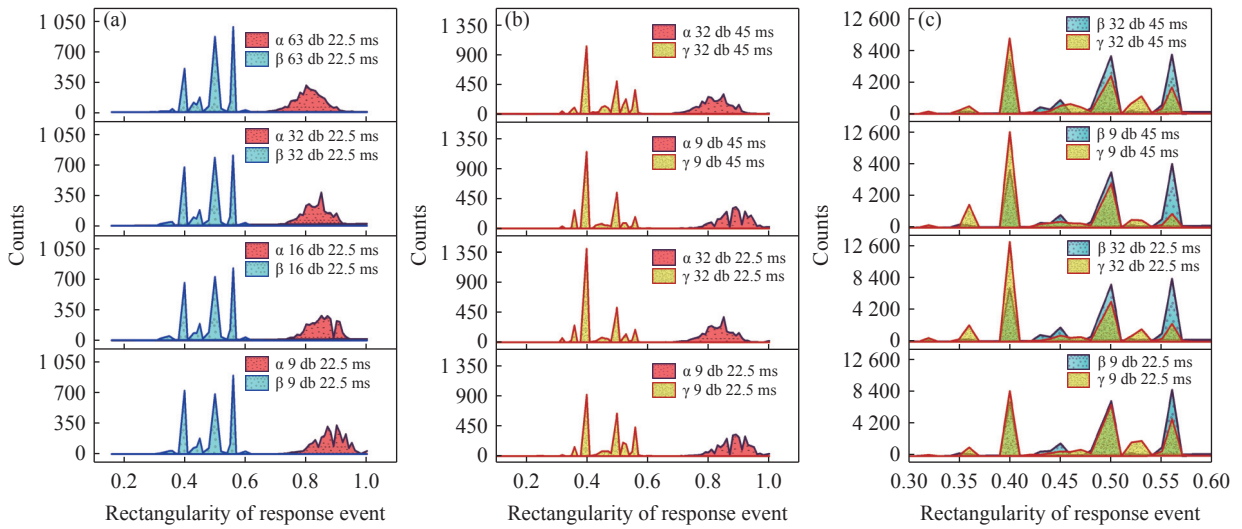


图 6 响应事件矩形度对比。(a) α 和 β 事件; (b) α 和 γ 事件; (c) β 和 γ 事件

Fig. 6 Comparison of the rectangularity of response events. (a) α and β events; (b) α and γ events; (c) β and γ events

图 7(彩图见期刊电子版)将响应事件在不同增益及积分时间调控下的紧致度分布进行了对比。结果显示, α 事件的紧致度明显低于 β、γ 事件, 而 β、γ 事件紧致度分布仍存在大面积重叠。将 β、γ 事件的紧致度特征仅保留整数位。图 8(彩图见期刊电子版)为 β、γ 事件紧致度取整后

随增益及积分时间的调控关系图。如图 8 所示, γ 事件的紧致度整体上大于 β 事件, 其在紧致度为 15 至 16 处的数量分布明显多于 β 事件。这表明 γ 事件的形态相较 β 事件更加扁平, 利用响应事件的紧致度特征能够区分 β、γ 事件。

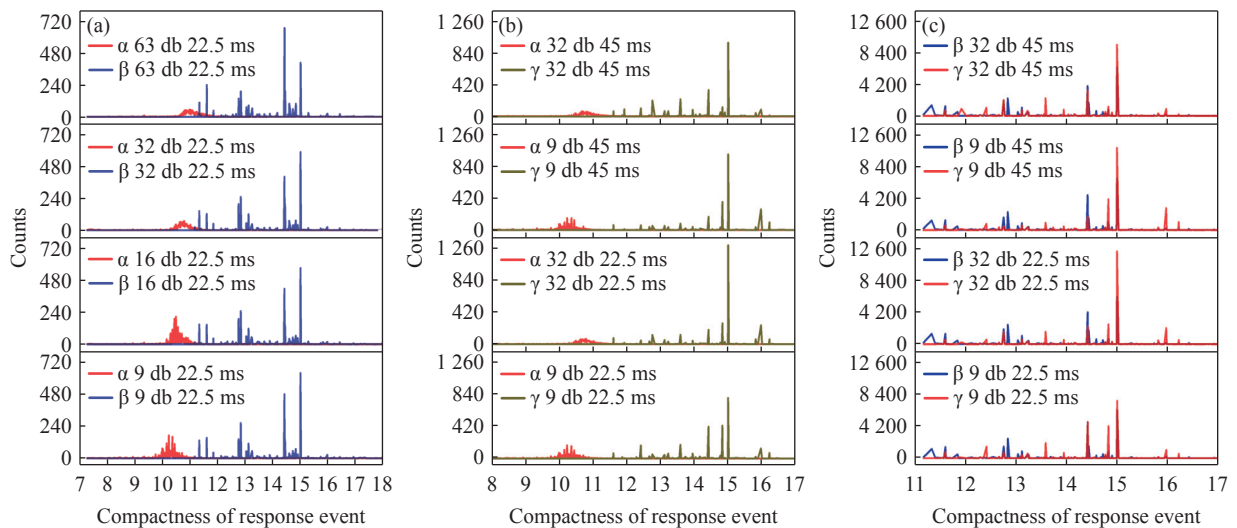


图 7 响应事件紧致度对比。(a) α 和 β 事件; (b) α 和 γ 事件; (c) β 和 γ 事件

Fig. 7 Comparison of the compactness of response events. (a) α and β events; (b) α and γ events; (c) β and γ events

图 9(彩图见期刊电子版)对比了响应事件在不同增益及积分时间调控下的平均像素值分布。如图 9(a) 和图 9(b) 所示, α、β 事件的平均像素值分布曲线随着增益的提升逐渐靠近, 当增益达到

63 db 后, 在像素值 112 至 135 的范围内出现重叠, 而 α、γ 事件的平均像素值分布曲线在各增益水平下均保持一定距离。对于 β、γ 事件来说, 平均像素值区间的分布峰位不同, 当增益达到

32 db 后,  $\gamma$  事件平均像素值的峰位出现在 24 附近,  $\beta$  事件出现在 58 附近。该结果表明利用平均

像素值分布峰位的差异, 可以有效地在混合辐射场中区分出  $\beta$ 、 $\gamma$  事件。

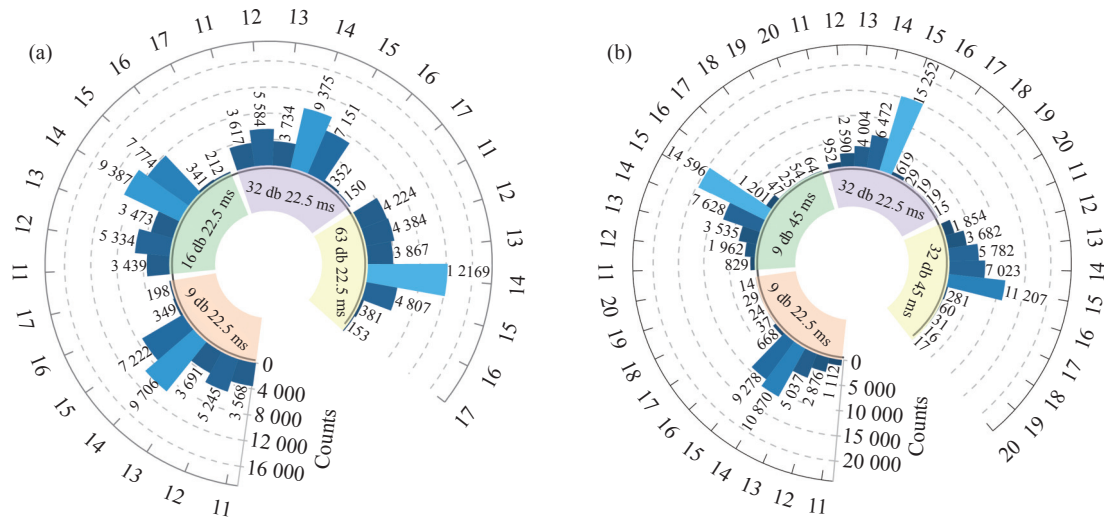


图 8 响应事件紧致度取整。(a)  $\beta$  事件; (b)  $\gamma$  事件

Fig. 8 Rounded compactness of response events. (a)  $\beta$  events; (b)  $\gamma$  events

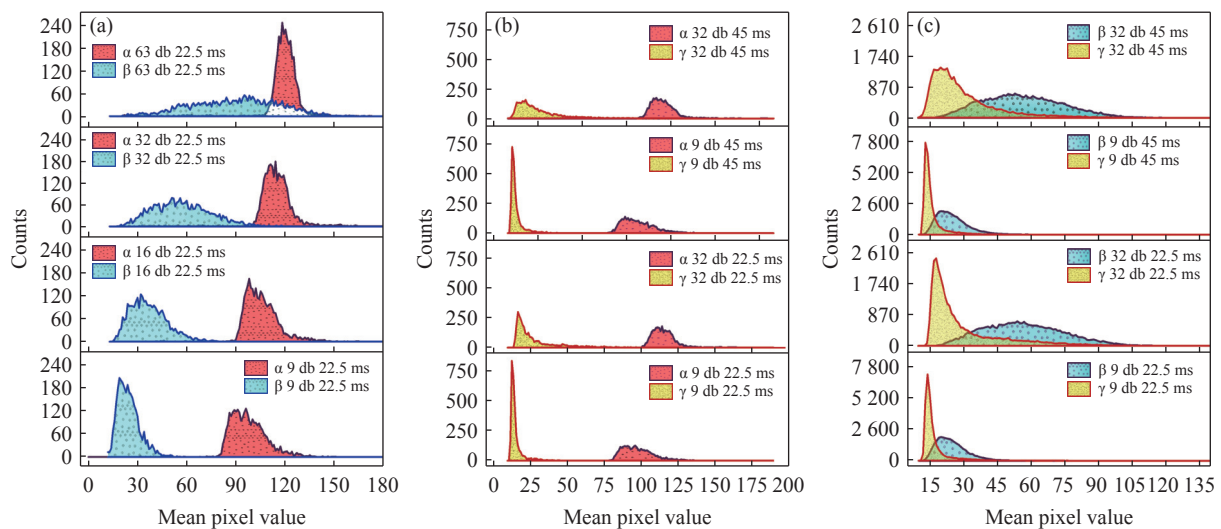


图 9 响应事件平均像素值对比。(a)  $\alpha$  和  $\beta$  事件; (b)  $\alpha$  和  $\gamma$  事件; (c)  $\beta$  和  $\gamma$  事件

Fig. 9 Comparison of mean pixel values of response events. (a)  $\alpha$  and  $\beta$  events; (b)  $\alpha$  and  $\gamma$  events; (c)  $\beta$  and  $\gamma$  events

综上所述, 在各增益水平下,  $\alpha$  事件所包含的像素个数、平均像素值、矩形度、凸度和紧致度的分布与  $\beta$ 、 $\gamma$  均存在显著差异, 因此可凭借这些特征在混合辐射场中区分出  $\alpha$  事件。而  $\beta$ 、 $\gamma$  事件所包含的像素个数、矩形度、凸度较为相似, 但可通过平均像素值或紧致度的分布差异进行区分。值得注意的是,  $\beta/\gamma$  事件在像素数量、长宽比和凸度等特征上呈现多峰分布, 与  $\alpha$  粒子通过高密度的能量沉积形成的形态单一的事件簇形成显著对比。这主要是由于  $\alpha$  粒子作为重带电粒子, 不像

电子那样容易发生大角度的散射, 而  $\beta$  粒子及  $\gamma$  光子通过与硅原子相互作用, 其能量沉积模式具有离散和随机的特征, 包括局部点状沉积及库仑散射形成的曲折径迹, 从而产生了点状、条状等多样化的事件类型。因此, 它们在各项形态参数的统计分布中形成了多个独立的峰值。

### 5 电离粒子甄别方法

基于上述特征分析结果, 以响应事件所包含

的像素个数及平均像素值作为甄别  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  响应事件的主要特征依据。电离粒子甄别方法逻辑框图如图 10 所示。首先对响应事件连续帧图像进行二值化处理,将帧图像中所有可能的目标区域与背景分离。目标与背景被计算为:

$$B(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } I(x,y) > T \\ 0, & \text{if } I(x,y) \leq T \end{cases}, \quad (8)$$

式中,  $I(x,y)$  表示坐标  $(x,y)$  处的像元像素值,  $T$  为设定的像素值阈值,  $B(x,y)$  为二值化结果。其中, 1 表示帧图像中的目标区域, 0 表示背景区域。

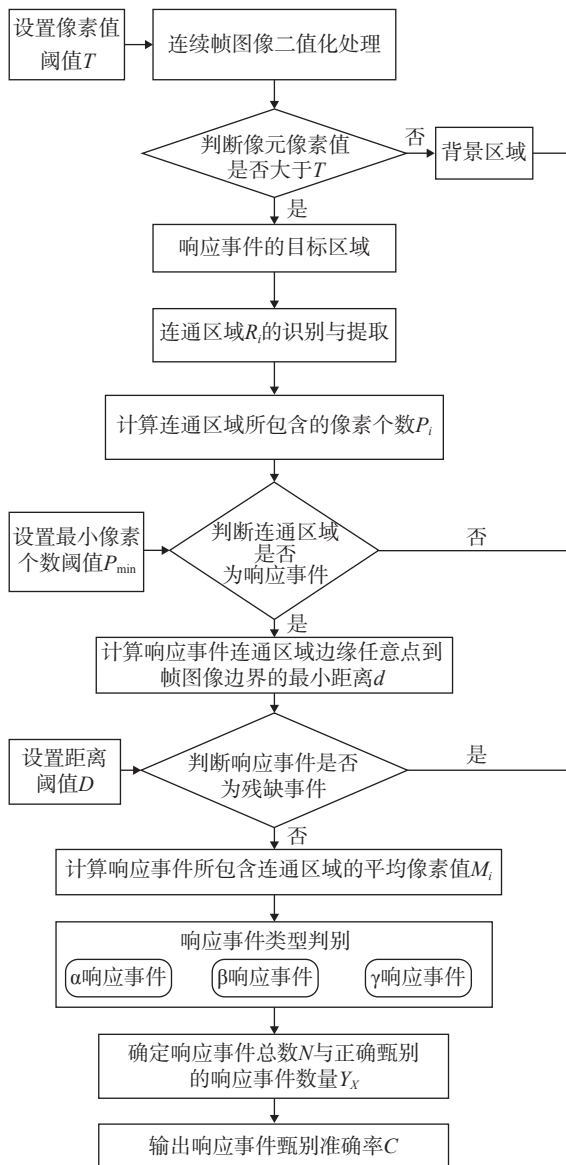


图 10 响应事件甄别逻辑图

Fig. 10 Flowchart of response event identification

目标与背景分离后,利用连通区域算法在所有可能的目标中筛选出响应事件,确定连通区域所包含的像素个数,响应事件被计算为:

$$P_i = \sum_{(x,y) \in R_i} B(x,y), \quad (9)$$

$$f(R_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } P_i \geq P_{\min} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (10)$$

式中,  $R_i$  表示第  $i$  个连通区域,  $P_i$  为连通区域  $R_i$  所包含的像素个数,  $P_{\min}$  为响应事件所包含的最小像素个数阈值。

确定每个响应事件连通区域边缘任意点到帧图像边界的最小距离  $d$ , 排除靠近帧图像边缘显示不全的残缺事件:

$$d(R_i) = \min_{(x,y) \in \partial R_i} \{x, W-1-x, y, H-1-y\}, \quad (11)$$

$$H(R_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } d(R_i) \geq D \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (12)$$

式中,  $\partial R_i$  为响应事件连通区域边缘像素点坐标集合,  $D$  为距离阈值。对于每个边缘像素点  $(x,y)$ ,  $x$  为像素点到帧图像左边界距离,  $W-1-x$  为像素点到帧图像右边界距离,  $y$  为像素点到帧图像上边界距离,  $H-1-y$  为像素点到帧图像下边界距离。

筛选出响应事件后,确定每个响应事件所包含连通区域的平均像素值  $M_i$ :

$$M_i = \frac{1}{P_i} \sum_{(x,y) \in R_i} I(x,y). \quad (13)$$

对每个响应事件连通区域的类型进行判别,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  响应事件被计算为:

$$Y(R_i) = \begin{cases} \alpha, & \text{if } M_1 \leq M_i \leq M_2 \wedge P_1 \leq P_i \leq P_2 \\ \beta, & \text{if } M_3 \leq M_i \leq M_4 \wedge P_3 \leq P_i \leq P_4 \\ \gamma, & \text{if } M_5 \leq M_i \leq M_6 \wedge P_5 \leq P_i \leq P_6 \\ \text{None}, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (14)$$

确定响应事件的甄别准确率  $C$ :

$$C = \left( \frac{Y_x}{N} \right) \times 100\%, \quad (15)$$

式中,  $Y_x$  为正确甄别的响应事件数量,  $N$  为甄别的响应事件总数。

表 2 为 10000 个响应事件的甄别验证实验结果。如表 2 数据所示,  $\alpha/\beta$  和  $\alpha/\gamma$  事件的甄别准确率达 99% 以上,  $\beta/\gamma$  事件甄别准确率达 82% 以

上。验证结果表明, 利用响应事件所包含的像素个数及平均像素值可对电离粒子进行甄别与提取, 证实了基于成像形态学特征的电离粒子甄别与提取方法的可行性。

表 2 响应事件的甄别效果

Tab. 2 Identification performance of response events

混合辐射场类型	甄别事件总数	准确率
$\alpha/\beta$	10000	> 99.9%
$\alpha/\gamma$	10000	> 99.9%
$\beta/\gamma$	10000	> 82.5%

## 6 结 论

本文结合 CMOS 有源像素传感器对辐射电离粒子的光学响应特性, 研究了一种基于成像形态学特征的粒子甄别方法。通过对比不同类型电离粒子响应事件形态学特征, 实现电离粒子的甄别。结果表明,  $\alpha$  事件所包含的像素个数、平均像

素值、矩形度、凸度和紧致度的分布与  $\beta$ 、 $\gamma$  存在显著差异。而  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的甄别可通过平均像素值或紧致度分布的差异进行区分。利用像素个数甄别  $\alpha$  事件的准确率可达到 99.9%, 而利用平均像素值甄别  $\beta$ 、 $\gamma$  事件的准确率超过 82%。该研究证实了利用电离粒子成像形态学特征进行粒子甄别的可行性。

本文所提出的响应事件甄别与提取方法能够提供训练数据集, 通过设计特定的网络结构, 来提取响应事件更多的特征信息。此外, 本文仅考虑了粒子在垂直入射条件下的特征分布。而在实际过程中, 由于粒子在器件灵敏体积内的能量沉积特性与电荷收集效率之间的相互作用, 入射角会对特征响应产生一定的影响。因此, 未来的研究将重点从两个方面展开: 一方面, 将引入卷积神经网络对响应事件图像进行局部感知与特征提取, 以进一步提升甄别准确率; 另一方面, 将系统研究不同入射角度对粒子响应事件特征的影响, 以验证该方法在复杂辐照环境中的适应性与实用性。

### 参考文献:

- [1] HADFIELD R H, LEACH J, FLEMING F, *et al.*. Single-photon detection for long-range imaging and sensing[J]. *Optica*, 2023, 10(9): 1124-1141.
- [2] DUTTON N A W, GYONGY I, PARMESAN L, *et al.*. A SPAD-based QVGA image sensor for single-photon counting and quanta imaging[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(1): 189-196.
- [3] MADONINI F, SEVERINI F, ZAPPA F, *et al.*. Single photon avalanche diode arrays for quantum imaging and microscopy[J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2021, 4(7): 2100005.
- [4] MA J J, ZHANG D X, ROBLEDO D, *et al.*. Ultra-high-resolution quanta image sensor with reliable photon-number-resolving and high dynamic range capabilities[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 13869.
- [5] GUO X D, HE P, LV X J, *et al.*. Material decomposition of spectral CT images via attention-based global convolutional generative adversarial network[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(3): 45.
- [6] YANG J ZH, LI M F, CHEN X X, *et al.*. Single-photon quantum imaging via single-photon illumination[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(21): 214001.
- [7] CHENG Q Q, MA CH W, YUAN Y ZH, *et al.*. X-ray detection based on complementary metal-oxide-semiconductor sensors[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, 30(1): 9.
- [8] HE R, NIU X Y, WANG Y, *et al.*. Advances in nuclear detection and readout techniques[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(12): 205.
- [9] CHAKRABORTY A, PARASHAR N, PANDEY D K, *et al.*. Radiological complexity of nuclear facilities: an information complexity approach to workplace monitoring[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2024, 44(2): 021511.
- [10] 罗智文, 冯婕, 郭旗, 等. 质子辐照下动态星敏感器质心定位[J]. 光学精密工程, 2025, 33(13): 2089-2107.  
LUO ZH W, FENG J, GUO Q, *et al.*. Centroid localization of dynamic star sensors under proton irradiation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(13): 2089-2107. (in Chinese).
- [11] YOO S, PARK S, YUN S, *et al.*. Impact of the fiber-optic faceplate on the imaging performance of a CMOS X-ray

- detector[J]. *Journal of Instrumentation*, 2024, 19(12): P12003.
- [12] ALMEIDA B D, AMARO F D, ANTONIETTI R, *et al.*. Noise assessment of CMOS active pixel sensors for the CYGNO Experiment[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(12): 125145.
- [13] 刘塔拉, 任同阳, 于勇, 等. 地基大型光学望远镜大靶面相机成像电路设计[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(21): 3373-3382.
- LIU T L, REN T Y, YU Y, *et al.*. Design of imaging circuit for large-format camera of ground-based large optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(21): 3373-3382. (in Chinese).
- [14] ZHOU ZH, ZHOU SH Q, WANG D, *et al.*. Low-noise and low-power pixel sensor chip for gas pixel detectors[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35(3): 58.
- [15] LIU SH H, GAO C S, ZHANG X, *et al.*. CMOS direct conversion X-ray detector coupled with fluorinated liquid[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2025, 36(1): 1.
- [16] XU R, HSU C K, KALANI S, *et al.*. Single-event upset responses of metal-oxide-metal capacitors and diodes used in bulk 65-nm CMOS analog circuits[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(4): 698-707.
- [17] HU M D, PADGETT F, MCCURDY M W, *et al.*. Probing the single-event sensitivity of a COTS 3D-integrated imager with alpha particle irradiation[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2023, 70(4): 410-417.
- [18] XU SH L, ZOU SH L, HAN Y C, *et al.*. Study on the availability of 4T-APS as a video monitor and radiation detector in nuclear accidents[J]. *Sustainability*, 2018, 10(7): 2172.
- [19] PÉREZ M, LIPOVETZKY J, HARO M S, *et al.*. Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 827: 171-180.
- [20] BAR O, BIBRZYCKI Ł, NIEDŹWIECKI M, *et al.*. Zernike moment based classification of cosmic ray candidate hits from CMOS sensors[J]. *Sensors*, 2021, 21(22): 7718.
- [21] HARO M S, BESSIA F A, PÉREZ M, *et al.*. Soft X-rays spectroscopy with a commercial CMOS image sensor at room temperature[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, 167: 108354.
- [22] XUE Y Y, WANG Z J, MA W Y, *et al.*. Comparison of displacement damage effects on the dark signal in CMOS image sensors induced by CSNS back-n and XAPR neutrons[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35(10): 169.
- [23] LUO D W, WU H Y, LI ZH H, *et al.*. Performance of digital data acquisition system in gamma-ray spectroscopy[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32(8): 79.
- [24] GU Z, PROUT D L, TASCHEREAU R, *et al.*. A new pulse pileup rejection method based on position shift identification[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2016, 63(1): 22-29.
- [25] LIU X H, LIU B Q, LIU M ZH, *et al.*. An optimized SVR algorithm for pulse pile-up correction in pulse shape discrimination[J]. *Sensors*, 2024, 24(23): 7545.
- [26] LIU J, ZHOU ZH, WANG D, *et al.*. Prototype of single-event effect localization system with CMOS pixel sensor[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33(11): 136.
- [27] LIANG B, LIU J H, ZHANG X P, *et al.*. Total ionizing dose effect modeling method for CMOS digital-integrated circuit[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2024, 35(2): 26.
- [28] TIWARI M K, DIWAN J, SINGH S K, *et al.*. Study of TID & dose rate effect of gamma radiation on COTS CMOS camera[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2025, 563: 165700.
- [29] 任同群, 曹润焮, 张国锐, 等. 星敏感器 CMOS 电路板靶面自动装调系统[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(16): 2513-2522.
- REN T Q, CAO R G, ZHANG G R, *et al.*. Automatic assembly and adjustment system for target surface of CMOS circuit board of star sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(16): 2513-2522.
- [30] YANG M Y, QIAN Y, PU T L, *et al.*. Edims: an event-driven internal memory synchronized readout prototype ASIC chip developed for HFRS-TPC[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, 34(12): 196.
- [31] INAGAKI Y, MATSUYA Y. A method for detecting timing of photodiode saturation without in-pixel TDC for high-dynamic-range CMOS image sensor[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2021, E104. C(10): 607-616.

## 作者简介:



徐守龙(1988—), 男, 甘肃嘉峪关人, 博士, 副教授, 2017 年于南华大学获得博士学位, 主要从事 CMOS 有源像素传感器电离辐射损伤及核辐射探测技术的研究。E-mail: [xusl@usc.edu.cn](mailto:xusl@usc.edu.cn)

---

## 《中国光学(中英文)》征稿启事

《中国光学(中英文)》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2097-1842/CN 22-1431/04; 国内外公开发行业, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 美国工程索引(EI)数据库
- ★ 美国 ESCI 数据库
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

**主要栏目:**微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

**发稿类型:**学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学(中英文)》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: [chineseoptics@ciomp.ac.cn](mailto:chineseoptics@ciomp.ac.cn)

联系电话: 0431-84627061

传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)