

多层像素芯片缪子成像装置中芯片位置校正方法研究

王宏凯 徐 翀 赵传奇 左嘉旭 韩静茹

(生态环境部核与辐射安全中心 北京 100082)

摘要 硅像素互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)芯片因具有微米级的位置分辨能力和极高的探测效率等特点,对于径迹精确重建具有举足轻重的作用。通过大面积拼接,能够将硅像素芯片用于 μ 子成像,但芯片拼接产生的机械误差,以及各层之间的相对位置误差,对 μ 子重建过程中的位置精度具有明显影响。本文利用 μ 子通过探测层时产生的观测点,建立了基于 μ 子径迹直线拟合模型的迭代芯片位置校正算法。通过在GEANT4程序中构建 μ 子成像探测原型装置,其中包含8个物理探测层,每层拼接了4块硅像素芯片,并添加芯片在 x, y 方向与旋转角 θ 三个自由度上的偏移量,模拟了真实情况下的机械误差对重建位置精度的影响。结果显示:该算法可用于芯片真实位置的高精度修正,使芯片位置修正精度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

关键词 硅像素芯片,位置分辨,径迹重建,位置校正

中图分类号 O572.19

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.070403

Chip position correction method for a multi-layer muon radiography detector

WANG Hongkai XU Chong ZHAO Chuanqi ZUO Jiaxu HAN Jingru

(Nuclear Radiation and Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China)

Abstract [Background] Benefit by the position resolution at the micro-meter level and the extremely high detection efficiency, complementary metal oxide semiconductor (CMOS) pixel sensors were widely used for particle tracking. Pixel sensors have the ability to be assembled on a large scale and can be applied to muon radiography. [Purpose] This study aims to improve the position deviations of the sensors to be less than ten microns to prevent deterioration of the position accuracy for multi-layer muon radiography. [Methods] First of all, an iterative position correction method was established based on cosmic muon tracks fitted by straight line model. Then a muon radiography prototype consisting of 8 physical layers was simulated by using GEANT4 with 4 pixel sensors on each physical layer. Finally, artificial deviation in the x - y plane and rotation angle θ along z axis for all the sensors were introduced to simulate and correct position deviations of the sensors. [Results] The results show that the precision of position correction is less than $5\text{ }\mu\text{m}$. [Conclusion] The proposed chip position correction method can be used to correct the real position of the chip with high accuracy.

Key words Pixel sensor, Position resolution, Track reconstruction, Position correction

中国博士后科学基金面上项目(No.2019M650611)、博士后“国际交流计划”引进项目(No.2018237)资助

第一作者:王宏凯,男,1987年出生,2018年于荷兰乌得勒支大学获博士学位,研究领域为核物理与核探测

通信作者:韩静茹, E-mail: hanjingru@chinansc.cn

收稿日期:2019-03-08,修回日期:2019-04-03

Supported by China Postdoctoral Science Foundation (No.2019M650611), Postdoctoral International Exchange Program (No.2018237)

First author: WANG Hongkai, male, born in 1987, graduated from Utrecht University with a doctoral degree in 2018, focusing on nuclear physics and detection

Corresponding author: HAN Jingru, E-mail: hanjingru@chinansc.cn

Received date: 2019-03-08, revised date: 2019-04-03

利用 μ 子穿行物体时发生多重散射的角分布与物质原子序数相关的特性进行物体成像成为了近年来无损检测技术的研究热点。经过近年来的发展, μ 子成像不仅在考古发掘、地质勘探等领域发挥巨大的作用,更将在核材料检测、反应堆成像、放射性废物处置、核应急监测等领域具有重要的应用前景^[1-5]。目前,由于受到探测器探测单元尺寸的限制, μ 子成像技术在 μ 子径迹重建精度上仍有待提高。硅像素互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)芯片作为一种近年来快速发展的带电粒子径迹探测器得到了快速的发展与应用,利用硅像素CMOS芯片测量最小电离粒子(Minimum Ionizing Particle, MIP)已经在技术上得以成功实现^[6-8]。将硅像素CMOS芯片应用在 μ 子探测领域具有以下几个优点:1)高探测效率,精细的位置分辨能力;2)能够在控制成本的前提下通过拼接实现大面积制造,以覆盖不同状态、不同尺寸核材料检测的应用需求^[9]。 μ 子成像装置通常采用多层探测结构,其目的在于将通过 μ 子穿过物体后的散射径迹进行精确重建,再通过成像算法对物体进行成像。因此, μ 子径迹的重建精度对于成像质量具有重要的意义。

CMOS芯片的像素尺寸通常在几十微米量级。由于其尺寸通常为厘米量级,在 μ 子成像装置中通常需要将大量芯片通过物理拼接实现大面积使用。在拼接过程中,由于组装精度的不足,通常会导致芯片组装位置产生一定的偏差,加上各层之间的相对位置偏差,使得总位置偏差高达数百微米,进而严重影响径迹的重建位置精度。因此,在实际应用过程中,需要通过结合 μ 子通过芯片后观测到的击中点,对芯片的真实位置进行算法修正,以提高径迹重建精度。

1 基于GEANT4的模拟环境

1.1 探测器结构

在本研究中,为了验证芯片位置修正算法,在GEANT4中建立了一个小尺寸硅像素多层探测模型。通过 μ 子在探测层中沉积能量产生击中点对 μ 子在穿过被探测物体前后产生的径迹进行重建。如图1所示,探测器共含有8个物理探测层(编号从0~7),分为两个部分,两个部分之间距离24 mm。每个部分包含4层,每层间距为1 mm。其中每层上放置了4块硅像素芯片,每块芯片的尺寸为3.0 cm×

3.0 cm,芯片由1 000×1 000个像素构成,每个像素的尺寸为30 μ m×30 μ m。芯片被固定在用于读取的印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)上。在 z 方向上,由于通常探测层可稳定固定在支架上,保证了在芯片在 z 平面的位置精度,因此该方向上的位置偏差可忽略不计。在 x - y 平面上,由于组装工艺导致的芯片位置偏差有时可达数百微米量级以上。因此在本研究中通过人工方式为每块芯片添加了在 x 、 y 方向以及绕 z 轴方向旋转角 θ 共三个未限定的自由度上一定的位置偏移量来验证位置修正算法。

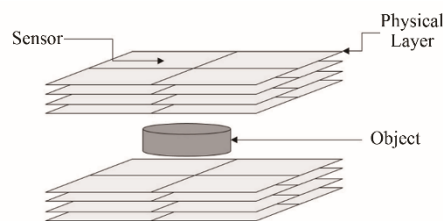


图1 GEANT4中建立的 μ 子探测器的几何结构示意图
Fig.1 The structure diagram of the muon detector in GEANT4

1.2 坐标系

在定义理想探测系统的坐标原点时,未考虑芯片位置偏移,即探测层上的4块芯片之间被认为是无缝拼接状态。因此在该情况下,并不能获知芯片在空间中的真实位置,故单个像素的坐标位置通过像素在芯片中的行列数推算获得。

如图2所示,构建过程中像素的理想位置(x_i , y_i)仅以坐标系原点为参考点,以像素中心为参考点,根据像素尺寸由式(1)获得。

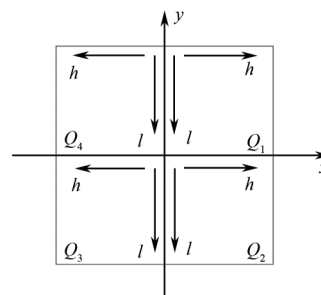


图2 探测器坐标系定义
Fig.2 The definition of the coordinate system

$$x_i = [j \times (h + 0.5)] \times 0.03, \quad j = \begin{cases} 1, Q = 1,2 \\ -1, Q = 3,4 \end{cases}$$

$$y_i = [k - l - 0.5] \times 0.03, \quad k = \begin{cases} 0, Q = 2,3 \\ 1\,000, Q = 1,4 \end{cases} \quad (1)$$

式中： Q 为芯片所在的象限位置； h 与 l 分别为像素所在的行数与列数。为了在本文中明确芯片位置修正前后像素的不同位置，本文采用 (x_r, y_r) 表示像素在模拟中的绝对位置（真实位置），该位置可在GEANT4中准确获得。此外，有像素的理想位置 (x_i, y_i) 经过算法校正之后的像素位置为 (x_c, y_c) ，表示通过算法修正之后的像素位置。芯片编号 S 与象限 Q 以及所在层数 L 之间的对应关系为： $S = 4L + Q - 1$ 。

1.3 μ 子事例的产生与选择方法

在本文中提到的模拟过程中，入射到探测器的 μ 子角分布采用了文献[10]中的关系式：

$$I_\mu = (72 - 7.8 \cdot \sin^2 \theta) \cdot \cos^2 \theta \quad (2)$$

式中： θ 为 μ 子与地平面垂线的天顶角。而海平面处的 μ 子能谱则根据方位角采用下式^[11]获得。

$$\frac{dN}{dE_\mu d\Omega} \approx 0.14 E_\mu^{-2.7} \quad (3)$$

在模拟中， μ 子的产生位置距离探测器首层10 cm处。共有6 237条 μ 子径迹被用于验证该位置修正方法。

1.4 μ 子重建算法

在GEANT4中，芯片的材料选择为硅，当 μ 子通过芯片的敏感区域时，会在其中沉积能量，当能量超过一定的阈值时，则判定该像素达到响应开启状态，反之则关闭^[12-13]。部分 μ 子会以一定角度穿过同一芯片的多个像素区域，因此可能会产生多个像素同时响应的像素集。此时 μ 子在该层的击中点位置取其重心位置。

在数据处理过程中，探测器每收集一个 μ 子信号，则所有芯片的像素响应情况均被计算机保存下来。根据像素的响应情况可有效筛选出 μ 子通过芯片的击中信号，通过联合多个探测上的击中信号即得到 μ 子在探测器中形成的重建径迹。由于CMOS芯片中的噪声概率远小于信号强度，因此重建过程中未考虑芯片噪声的干扰情况。 μ 子径迹采用直线模型，径迹拟合采用最小二乘法。

2 像素位置修正算法

根据实际中存在的问题，芯片的移动参数可分解为在 x, y 方向上的平移与绕 z 轴方向的转动共计三个自由度。因此，整个系统共含有96个待确定的自由度。对于每个芯片而言，其绕 z 轴方向旋转 θ 角

度后的位置可通过旋转矩阵获得，即：

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

芯片在 $x-y$ 平面产生的平移则可以通过转移矩阵获得，即：

$$T_{x-y} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

据此，我们能够通过式(6)获得芯片在位置修正前后的关系。

$$\vec{p}^c = T_{x-y} R_z \vec{p} \quad (6)$$

式中： $\vec{p}^c$ 为经过一次修正之后的像素位置； $\vec{p}$ 为修正之前的像素位置。为了求解含有芯片位置的移动参数，需要建立关于每块芯片移动参数的本地 χ^2 ，即：

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{p}_i^c(\vec{\alpha}) - \vec{p}_i^{\text{fit}}(\vec{\alpha}))^2}{n\sigma^2} \quad (7)$$

式中： $\vec{p}_i^c$ 为第 i 条 μ 子通过芯片后的击中点位置； $\vec{p}_i^{\text{fit}}$ 为第 i 条径迹拟合后在该芯片上的位置。 $\vec{\alpha}$ 为包含芯片移动参数的向量。 σ 为所有 μ 子在该芯片上产生的击中位置与拟合径迹之间残差的分布宽度。为了求解芯片的移动参数，需要将 χ^2 进行最小化。由于 $\vec{\alpha}$ 的计算无法仅通过一次计算而收敛到最佳值，因此需要通过迭代计算得到芯片的最终修正位置。

3 结果与讨论

3.1 用于表征芯片位置偏移的参数

利用 μ 子穿过探测器后在探测层中留下击中点的理想位置 (x_i, y_i) 与 μ 子径迹的拟合直线在该层上的位置 $(x_{\text{fit}}, y_{\text{fit}})$ 之间的差别（以下称为拟合残差），能够有效表征芯片的偏移情况。如图3所示，在模拟中，击中点像素的真实位置(true)与通过式(1)推导得到的击中点像素理想位置(ideal)之间的差异为芯片的绝对偏移量（以下称为绝对残差，以黑色点表示），而 μ 子击中点的拟合残差以白色圆圈表示。从图3中可见，直接利用拟合残差表示芯片的绝对偏移量，其差异的精度可控制在几十个微米量级内，虽然拟合残差能够较为准确地表征芯片的移动位置，但由于芯片存在绕 z 轴方向的转动不确定度，因此不能简单地通过 x, y 方向上的单次平移得到精确的芯片位置修正结果。故如前文所述，为了能够更为

精确地获得芯片的真实偏移,需要通过迭代算法求解芯片在三个自由度上的偏移量以提高精度。

3.2 迭代次数对芯片位置参数修正的影响

迭代次数对于算法结果精度具有显著影响,次数过少,则位置修正精度未达到最佳,易导致修正结果不收敛,反之,则容易造成计算效率降低,在输入

μ 子统计量上升时,显著增加计算时间。图4展示了一块芯片(8号)在 x 、 y 与偏转角 θ 共三个自由度上总偏移量绝对值与迭代次数之间的变化规律。由图4可知,芯片偏移总量的绝对值变化量随迭代次数逐渐减小,在约30次迭代之后,芯片的移动参数趋于平稳,表示修正算法达到收敛。

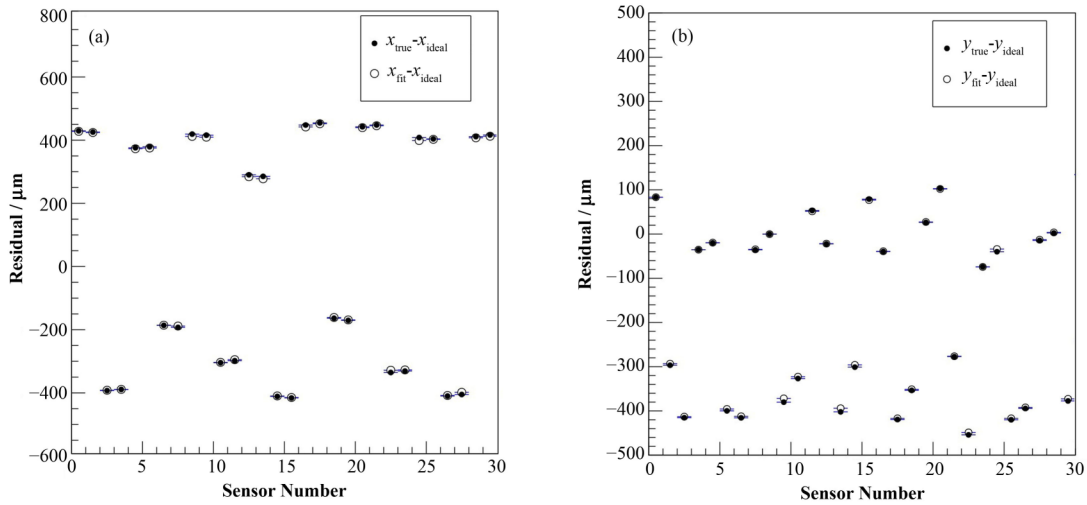


图3 在 x (a)与 y (b)方向上绝对残差与拟合残差之间的比较
Fig.3 The comparison between fitted residuals and true residuals in x (a) and y (b) directions

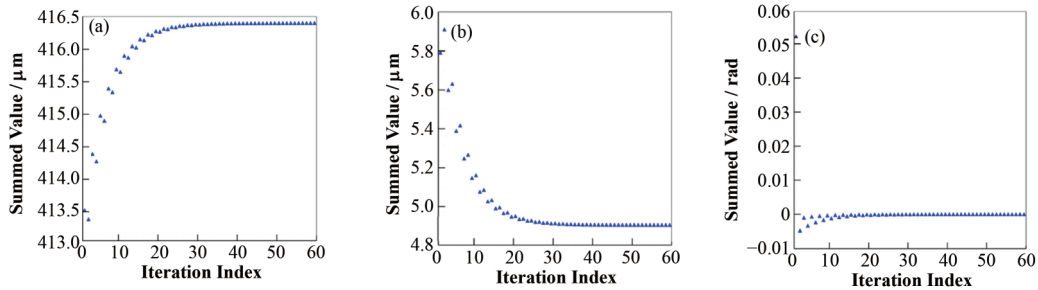


图4 8号芯片在 x (a)、 y (b)与偏转角 θ (c)三个自由度上的总修正量随迭代次数的变化情况
Fig.4 The summed total movement parameters of chip 8 as a function of iteration in x direction (a), y direction (b), rotation angle (c)

3.3 位置修正结果与精度

对于每一块芯片,经过位置修正之后,其拟合残差分布应当为正态分布,且峰位应当回归至0点附近。图5展示了经过100次迭代后的 μ 子拟合残差,由于 y 方向的行为与 x 方向的行为一致,因此图中仅展示了经过位置修正前后探测器中一个物理探测层中的4块芯片在 x 方向上的拟合残差分布图。由图5中得出,经过迭代之后,拟合残差分布的平均值由修正前的偏移位置移动至0点附近,且其分布的宽度也有所下降。这表明了通过芯片的旋转之后,该算法能够成功地对芯片位置进行校正。

图6展示了利用该算法进行位置校正后的精

度。图中的精度由校正后的芯片位置(x_c, y_c)与芯片真实位置(x_r, y_r)间的真实残差来表示,图6中能较显著得出,对于大多数芯片而言, μ 子真实位置与修正后的位置之间的差别小于 $5 \mu\text{m}$ 。

4 结语

硅像素芯片可通过大面积拼接用于 μ 子成像领域,但芯片拼接工艺过程中引入的机械误差以及各层之间的相对位置误差会严重影响探测器对 μ 子径迹重建的精度。本工作中提出了采用直线模型对入射 μ 子进行重建,并建立了用于校正芯片位置在不同自由度上的迭代修正算法,通过在GEANT4中建

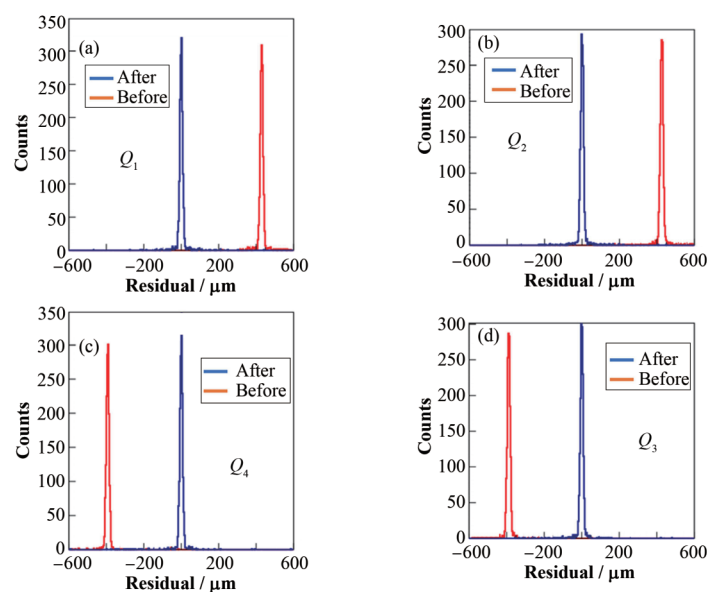


图5 芯片位置修正前后拟合残差分布的变化情况
Fig.5 The distributions of the fitted residual before and after position correction

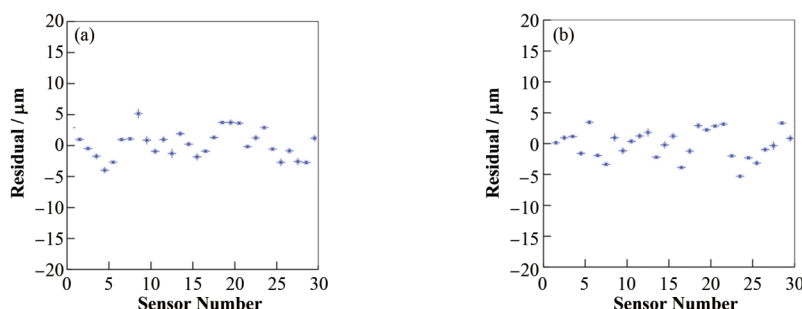


图6 探测器中各芯片校正位置与芯片真实位置之间真实残差分布 (a)x方向,(b)y方向
Fig.6 The residual between true position and corrected position of all sensors in the detector (a) x direction, (b) y direction

立的基于CMOS像素探测器 μ 子成像原型,实现了多芯片位置的同步精确修正,使修正后的芯片位置精度小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。该算法是有效保证 μ 子径迹重建精度的先决条件,为利用CMOS硅像素芯片开展 μ 子成像研究奠定了基础。

参考文献

- 1 王烈铭,王红艳,刘志英,等.宇宙射线 μ 子探测裂变核材料的成像算法[J].核电子学与探测技术,2011,8(11): 874-877. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.08.010.
WANG Lieming, WANG Hongyan, LIU Zhiying, *et al.* Muon tomography algorithm for fissile nuclear material detection[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 8(11): 874-877. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2011.08.010.
- 2 Borozdin K N, Hogan G E, Morris C, *et al.* Surveillance: radiographic imaging with cosmic-ray muons[J]. Nature, 2003, 422(6929): 277-277. DOI: 10.1038/422277a.
- 3 Priedhorsky W C, Borozdin K N, Hogan G E, *et al.* Detection of high-z objects using multiple scattering of cosmic ray muons[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(10): 4294-4297. DOI: 10.1063/1.1606536.
- 4 Pesente S, Vanini S, Benettoni M, *et al.* First results on material identification and imaging with a large-volume muon tomography prototype[J]. Nuclear Instrument and Method A, 2009, 604(3): 738-746. DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.017.
- 5 Li Q T, Ye Y L, Ji W, *et al.* A sub-millimeter spatial resolution achieved by a large sized glass RPC[J]. Chinese Physics C, 2013, 37(1): 016002. DOI: 10.1088/1674-1137/37/1/016002.
- 6 Fu M, Tang Z. Preliminary evaluation of Gaussian-doped monolithic active pixel sensors for minimum ionizing particles detection[J]. Nuclear Instrument and Method A,

- 2011, **646**(1): 153–157. DOI: 10.1016/j.nima.2011.04.052.
- 7 de Haas A P, Nooren G, Peitzmaan T, *et al.* The FoCal prototype—an extremely fine-grained electromagnetic calorimeter using CMOS pixel sensors[J]. Journal of Instrumentations, 2018, (13): P01014. DOI: 10.1088/1748-0221/13/01/P01014.
- 8 Rinella G A. The ALPIDE pixel sensor chip for the upgrade of the ALICE inner tracking system[J]. Nuclear Instrument and Method A, 2017, **845**: 583–587. DOI: 10.1016/j.nima.2016.05.016.
- 9 Greiner L, Anderssen E, Matis H S, *et al.* A maps based vertex detector for the star experiment at RHIC[J]. Nuclear Instrument and Method A, 2011, **650**(1): 68–72. DOI: 10.1016/j.nima.2010.12.006.
- 10 Dinh P N, Dung N T, Hieu B D, *et al.* Measurement of the zenith angle distribution of the cosmic muon flux in Hanoi [J]. Nuclear Physics B, 2003, **661**(1): 3–16. DOI: 10.1016/S0550-3213(03)00337-7.
- 11 Patrignani C, Agashe K, Aielli G, *et al.* Particle data group collaboration, review of particle physics[J]. Chinese Physics C, 2016, **40**(10): 100001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- 12 杨振雷, 王晓辉, 苏弘, 等. 一种 Flash 型 FPGA 单粒子效应测试方法设计及验证[J]. 核技术, 2015, **38**(2): 020404. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.020404.
- YANG Zhenlei, WANG Xiaohui, SU Hong, *et al.* Design and verification of test method for the single event effect in Flash-based FPGA[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(2): 020404. DOI: 10.11889/j. 0253-3219.2015. hjs. 38. 020404.
- 13 Huang M Y, Pei H, Sun X M, *et al.* Simulation study of energy resolution with changing pixel size for radon monitor based on Topmetal- II– TPC[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**: 16. DOI: 10.1007/s41365-018-0532-8.