

# 激光与光电子学进展

## 影响 PSSD 位置分辨因素的蒙特卡罗模拟

宋海声<sup>1</sup>, 董彩霞<sup>1,2</sup>, 牛德芳<sup>1,2</sup>, 庄凯<sup>2,3</sup>, 李婷<sup>2,3</sup>, 秦秀波<sup>2,4\*</sup>, 刘鹏浩<sup>2</sup>, 杨雄斌<sup>2</sup>, 薛玉雄<sup>5</sup>

<sup>1</sup>西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730000;

<sup>2</sup>中国科学院高能物理研究所北京市射线成像技术与装备工程技术研究中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;

<sup>4</sup>中国航天科工集团有限公司第二研究院未来实验室, 北京 100049;

<sup>5</sup>兰州空间技术物理研究所真空技术与物理国家级重点实验室, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 以粒子与物质相互作用为理论基础, 使用 FLUKA 蒙特卡罗模拟软件分析带电粒子的能量、入射角度、探测器厚度和灵敏面积等因素对位置灵敏硅探测器(PSSD)位置分辨能力的影响。模拟结果表明, 随着电子能量的增加, 探测器的位置分辨能力变差, 当电子能量增大到可以穿过探测器时, 位置分辨能力随着能量的增加逐渐提高; 对于不同厚度的探测器来说, 当电子能量完全沉积在探测器中时, 探测器的位置分辨能力基本相同, 当电子能量未能完全沉积在探测器中时, 厚度较大的探测器位置分辨能力相对较差; 探测器的面积有限会影响位置分辨能力; 当电子以入射角度  $\alpha \leq 45^\circ$  入射探测器时, 探测到的电子位置会沿着入射角度发生偏移, 入射角度越大, 偏移越明显。

**关键词** 探测器; 带电粒子; FLUKA; 电子; 位置灵敏硅探测器; 位置分辨

中图分类号 TL814

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0504002

## Monte Carlo Simulation Affecting PSSD Position Resolution Factors

Song Haisheng<sup>1</sup>, Dong Caixia<sup>1,2</sup>, Niu Defang<sup>1,2</sup>, Zhuang Kai<sup>2,3</sup>, Li Ting<sup>2,3</sup>, Qin Xiubo<sup>2,4\*</sup>,  
Liu Penghao<sup>2</sup>, Yang Xiongbin<sup>2</sup>, Xue Yuxiong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730000, China;

<sup>2</sup>Beijing Engineering Research Center of Radiographic Techniques and Equipment, Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup>X Lab, the Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100049, China;

<sup>5</sup>Science and Technology on Vacuum and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, Gansu 730000, China

**Abstract** Based on the theoretical basis of the interaction between particles and matter, the influence of charged particle energy, incident angle, detector thickness, and sensitive area on position sensitive silicon detector (PSSD) position resolution is analyzed by using FLUKA Monte Carlo simulation software. The simulation results show that as the electron energy increases, the position resolution capability of the detector becomes worse. When the electron energy increases to pass through the detector, the position resolution capability gradually increases with the increase of energy. For the detectors of different thickness, when the electron energy is completely deposited in the detector, the position resolution ability of the detector is basically the same. When the electron energy is not completely deposited in

收稿日期: 2020-06-09; 修回日期: 2020-07-15; 录用日期: 2020-08-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501303)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ03062902)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA14020502)、国家自然科学基金(11705224, 11805213)

\*E-mail: qinxb@ihep.ac.cn

the detector, the position resolution ability of the detector with a larger thickness is relatively poor. The limited area of the detector will affect the position resolution. When electrons enter the detector at an incident angle  $\alpha \leq 45^\circ$ , the detected electron position will shift. The larger the incident angle, the more obvious the shift.

**Key words** detectors; charged particles; FLUKA; electron; position sensitive silicon detector; position resolution

**OCIS codes** 040.1880; 040.5160; 040.6040

## 1 引言

带电粒子探测在高能物理、核物理、天体物理以及材料物理等领域中具有重要的应用价值。如高能物理领域中通过探测高能粒子对撞产生的各种次级粒子来发现“新粒子”<sup>[1-2]</sup>,材料物理领域中通过注入带电粒子来实现材料的改性<sup>[3]</sup>,天体物理领域中通过对空间带电粒子进行研究,证明该手段在空间灾害天气监测和空间探测等领域具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。上述实验通常要求精准测量带电粒子的种类、能量以及位置信息,甚至还需要同时测量带电粒子的入射方向信息,对精确分析模型或物理机制具有重要意义。

国内外已经研究了多种探测器并用于测量带电粒子的位置和能量,如基于气体探测原理的多丝正比室、微条气体正比室和气体电子倍增器等气体探测器<sup>[6-8]</sup>。上述探测器具有使用方便、高气体放大倍数和耐辐射损伤等优点<sup>[9]</sup>,但是因具有气体长期稳定性相对较差、漂移电压大和正离子漂移速度慢<sup>[10-12]</sup>等缺点制约了其在某些特定场合中的应用。基于半导体探测技术的硅微条探测器通常在上、下表面有多个相交成一定角度的微条状读出条,其可以提供入射带电粒子的二维位置坐标,具有线性度好、响应时间和能量分辨高等优点,但是微条的尺寸和间距会影响探测器的空间分辨率,而且对加工工艺的要求较高,并且每个硅条均需要独立的信号读取电子设备,导致电子设备的体积庞大<sup>[13-14]</sup>。

与硅微条探测器相比,二维位置灵敏硅探测器(PSSD)<sup>[15]</sup>具有结构紧凑、体积小和适配电路简单等优点。PSSD电极之间的电容很小,因此噪声减小,所以脉冲成形时间短,有利于提高能量分辨率和计数率,并且具有良好的二维位置分辨能力,在光电探测领域的应用广泛<sup>[16-17]</sup>。Henry等<sup>[18]</sup>研究了位置灵敏探测器(PSD)基底材料对灵敏度的影响,结果表明高阻器件可以得到更高的灵敏度。Banu等<sup>[19]</sup>对大面积四角读出位置灵敏探测器进行了 $\alpha$ 粒子和重离子实验,得到位置分辨率小于1 mm,能量分辨率约为1%。由于带电粒子的能量较高,所以在探测器中的

注入深度是影响位置分辨能力的主要因素之一,而且近年来相关的实验和研究较少。鉴于此,本文主要对电子这一最常用的带电粒子进行FLUKA<sup>[20]</sup>仿真建模,并分析电子入射能量、入射角度、探测器厚度和灵敏面积等因素对PSSD位置分辨能力的影响。

## 2 仿真模型的建立

目前,PSSD的灵敏面积通常较小,实验采用的位置灵敏探测器是由Micron公司生产型号为MSPSD DL04-300的双横向PSSD,使用FLUKA<sup>[20]</sup>模型仿真软件对其进行仿真建模。模拟过程中,设置探测器的灵敏面积为 $4 \text{ mm}^2$ ,尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ ,将探测器的灵敏面设为XY平面并平均分成 $100 \times 100$ 个像素块,每个像素块的尺寸均为 $0.02 \text{ mm} \times 0.02 \text{ mm}$ 。入射粒子为电子,能量范围为 $30 \text{ keV} \sim 5.8 \text{ MeV}$ ,设入射电子的事例数为 $10^6$ 个。为了使入射点尽可能地接近探测器中心点的位置,将硅探测器表面的入射点(51,51)作为像素中心位置,入射方向与Z轴的夹角为 $\alpha$ 。电子入射方向及位置如图1所示。

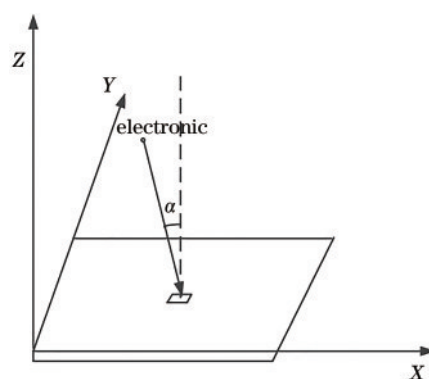


图1 电子入射示意图

Fig. 1 Schematic of electron incidence

当电子入射到物质中时,会与物质发生作用,导致能量损失,使电子偏离原来的入射方向,所以电子与物质的相互作用范围呈“梨形”<sup>[21]</sup>,如图2所示。入射电子的能量和角度不同,则电子与物质的相互作用范围不同,但作用形状基本不变。

电子在探测器中的作用范围是一个区域,这会导

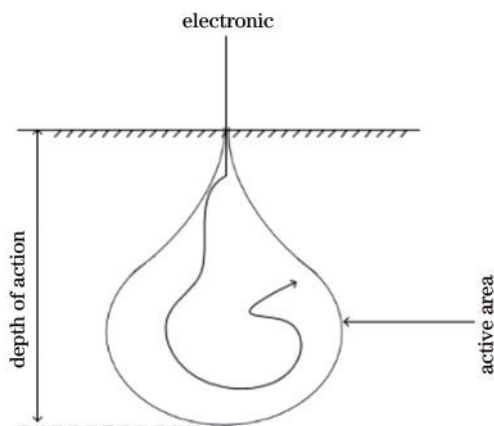


图 2 电子与物质的相互作用范围

Fig. 2 Range of interaction between electrons and matter

所不同。实验采用重心法来提取电子在探测器中作用区域的重心位置,并将其作为探测器探测到的电子位置,通过计算电子作用路径上的能量损失情况,即可得到一次电子事例的作用区域的重心位置。将探测器的灵敏面分成  $100 \times 100$  个像素块,每个像素均有确定的位置坐标  $(x_i, y_i)$ ,即像素中心点的坐标,其中  $i$  为第  $i$  个像素位置。单个电子事例在探测器中的沉积能量为  $E$ ,每个像素  $(x_i, y_i)$  的沉积能量为  $e_i$ ,可表示为

$$\sum_i e_i = E \quad (1)$$

探测器探测到的电子位置  $(X, Y)$  可表示为

$$X = \frac{\sum_i x_i \times e_i}{E} \quad (2)$$

$$Y = \frac{\sum_i y_i \times e_i}{E} \quad (3)$$

统计探测器探测到所有电子事例的位置并形成一定的位置分布曲线,选取半峰全宽(FWHM)来衡量探测器对电子的位置分辨能力,结果如图 3 所示。

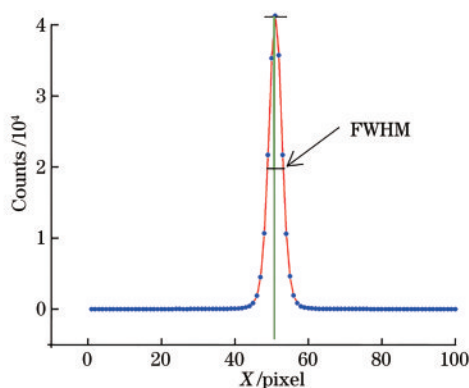


图 3 探测器探测的位置分布曲线

Fig. 3 Distribution curve of position detected by detector

半峰全宽是指电子在探测器上的位置分布剖面进行曲线拟合,并取拟合曲线峰高一半的全宽。

### 3 仿真结果与分析

#### 3.1 电子能量对位置分辨能力的影响

设电子的入射角度  $\alpha = 0^\circ$ , 选取厚度为 1 mm 的探测器进行位置分布的模拟测试。根据模拟结果计算不同能量的电子在探测器上的半峰全宽,结果如图 4 所示。从图 4 可以看到,探测器的位置分辨能力随着入射电子能量的增加呈先变弱后逐渐增强的趋势,当电子能量为 600 keV 时,位置分辨能力最弱。

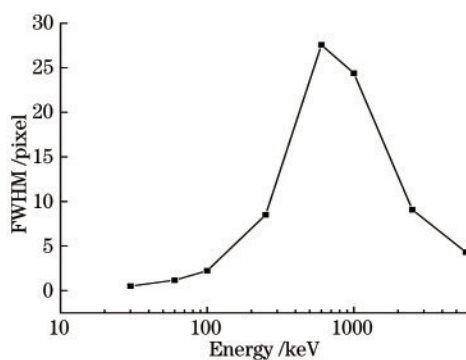


图 4 不同能量下电子位置分布的半峰全宽

Fig. 4 FWHM of electron position distribution at different energies

从图 4 可以看到,当电子能量较低时,电子能量全部沉积在探测器内,所以作用区域完全在探测器内;随着电子能量的增加,电子的作用范围增大,则探测器对电子的探测位置在横向上增大,位置分布的半峰全宽随之增大;当电子能量超过 600 keV 时,位置分布的半峰全宽却随之减小,这是由于 1 mm 厚的探测器未能完全沉积高能电子的能量,有一部分高能电子穿过探测器,所以电子在探测器中的作用范围只有一部分。使用穿透率来研究不同能量下的电子穿透情况,结果如图 5 所示。

根据电子与物质的相互作用可知,电子能量越高,则作用范围越大,但形状基本不变。从图 5 可以看到,对于 1 mm 厚的探测器,当入射电子能量不超过 600 keV 时,电子穿透率基本为零,说明电子能量完全沉积在探测器内,但是能量越高,电子在探测器中的作用范围越大,位置分布范围越大;当电子能量高于 600 keV 时,电子可能穿过探测器,所以电子在探测器内的作用范围只有“梨形”区域的一部分,并且电子的能量越高,在探测器内的作用范围越小,因此探测器探测到的电子位置分布范围越小。

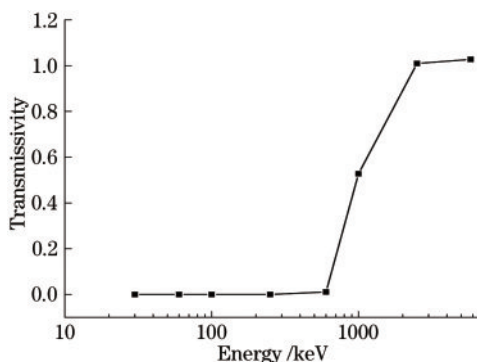


图 5 不同能量下的电子穿透率

Fig. 5 Electron penetration at different energies

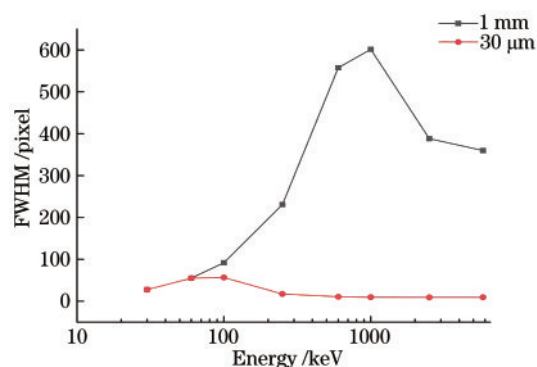


图 6 不同厚度下探测器的位置分辨能力

### 3.2 探测器厚度对位置分辨能力的影响

当电子能量一定时,探测器厚度的不同也会影响探测器的位置分辨能力。设探测器的厚度分别为  $30\ \mu\text{m}$  和  $1\ \text{mm}$ ,电子入射角度  $\alpha = 0^\circ$ ,两种厚度条件下探测器的位置分辨能力如图 6 所示。

从图 6 可以看到,当电子能量不超过  $60\ \text{keV}$  时,  $30\ \mu\text{m}$  和  $1\ \text{mm}$  厚的探测器的位置分辨能力是一致的,原因在于当电子能量较低时,  $30\ \mu\text{m}$  和  $1\ \text{mm}$  厚的探测器中的电子均未穿过探测器,则全部能量沉积在探测器内,所以在两个探测器内的作用区域一致,采用重心法计算的电子位置分布也一致;当电子能量超

过  $60\ \text{keV}$  时,可以穿透  $30\ \mu\text{m}$  厚但不能穿透  $1\ \text{mm}$  厚的探测器,原因在于电子在  $1\ \text{mm}$  厚的探测器中的作用区域大于  $30\ \mu\text{m}$  厚的探测器,所以位置分辨能力有差异;当电子能量足以穿透  $1\ \text{mm}$  厚的探测器时,两个探测器厚度有差异,因为电子在探测器中的能量沉积不同,作用范围也不同,导致两个探测器的位置分辨能力不同,较厚的探测器的位置分辨能力相对较差。

### 3.3 探测器灵敏面积对位置分辨能力的影响

模拟过程中发现,当电子能量为  $1\ \text{MeV}$ 、探测器的厚度为  $1\ \text{mm}$  以及灵敏面积为  $4\ \text{mm}^2$  时,探测器探测到的电子位置分布如图 7 所示。

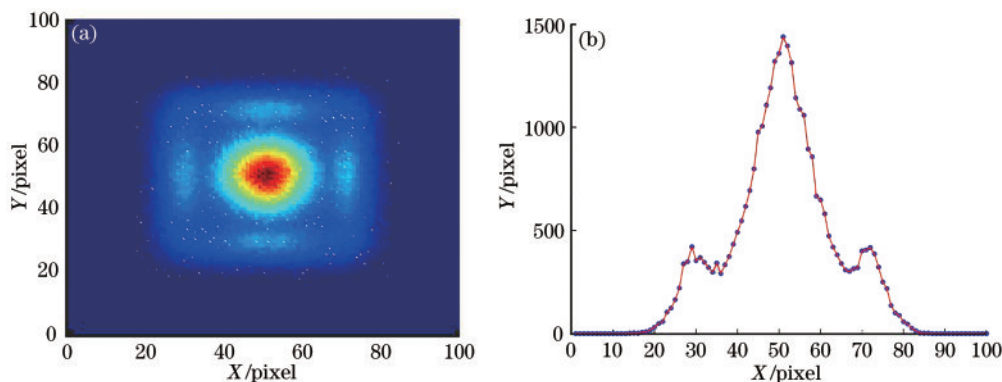


图 7  $4\ \text{mm}^2$  灵敏面积下的位置分布图。(a)位置分布色彩图;(b)位置分布剖面图

Fig. 7 Location distribution under  $4\ \text{mm}^2$  sensitive area. (a) Color map of location distribution; (b) profile of location distribution

从图 7 可以看到,探测器探测到电子周围有异常的事例聚集现象,原因在于探测器基于重心法原理对电子进行探测定位,这会造成从侧面穿出的电子集中在四周一定的区域;对于灵敏面积为  $4\ \text{mm}^2$  和厚度为  $1\ \text{mm}$  的探测器,当电子能量为  $1\ \text{MeV}$  时,电子在探测器的理论作用区域的横截面大于探测器的实际作用范围,所以电子从探测器的侧面逃逸出来。

为了验证电子周围有异常的事例聚集现象是

由探测器的灵敏面积有限造成的,对仿真模型进行改进。仿真设定探测器的厚度为  $1\ \text{mm}$ ,灵敏面积为  $16\ \text{mm}^2$ ,将探测器的灵敏面分成  $200 \times 200$  个像素,电子能量为  $1\ \text{MeV}$ ,入射在探测器的像素中心位置  $(101, 101)$ ,其他条件不变。通过对仿真结果分析计算,得到电子在灵敏面积为  $16\ \text{mm}^2$  的探测器中的位置分布如图 8 所示。

从图 8 可以看到,电子在厚度为  $1\ \text{mm}$  和灵敏面积为  $16\ \text{mm}^2$  的探测器中并未出现异常分布的现象,

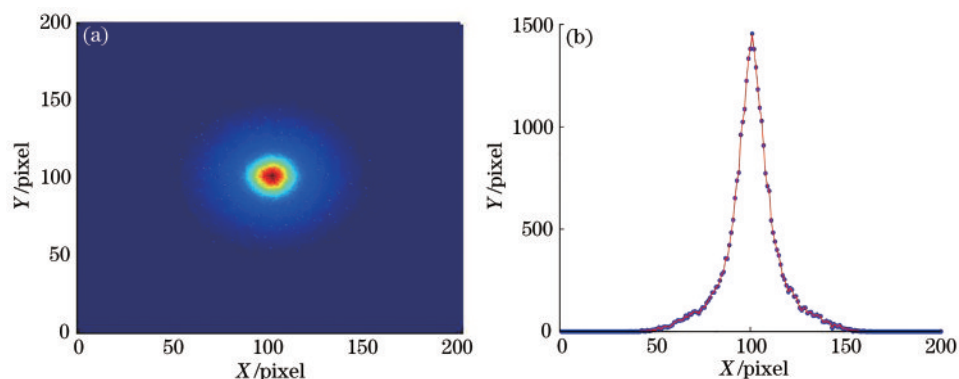


图 8 16 mm<sup>2</sup>灵敏面积下的位置分布图。(a)位置分布色彩图;(b)位置分布剖面图

Fig. 8 Location distribution under 16 mm<sup>2</sup> sensitive area. (a) Color map of location distribution; (b) profile of location distribution

将探测器的面积扩大后,位置分布的异常情况消失,原因在于没有或者极少数的电子从探测器的侧面逃逸出来。

当电子的入射点靠近探测器边缘时,出现电子从探测器侧面逃逸的现象,则探测到的电子位置会出现图 7 的位置偏差,这会对探测器的位置分辨能力造成一定的影响,具体入射边缘位置及其对位置分辨能力的影响还需要进一步的研究。

### 3.4 入射角度对位置分辨能力的影响

当电子能量和探测器的厚度及灵敏面积一定时,电子入射角度的不同会对探测器的位置分辨能力造成一定程度的影响。设探测器的厚度为 1 mm,灵敏面积为 4 mm<sup>2</sup>。能量范围 30.0 keV~5.8 MeV 的电子以小角度( $\alpha \leq 45^\circ$ )入射在探测器的像素中心位置(51,51),仿真模拟不同的入射角度在不同能量下对探测器位置分辨能力的影响,结果如图 9 所示。

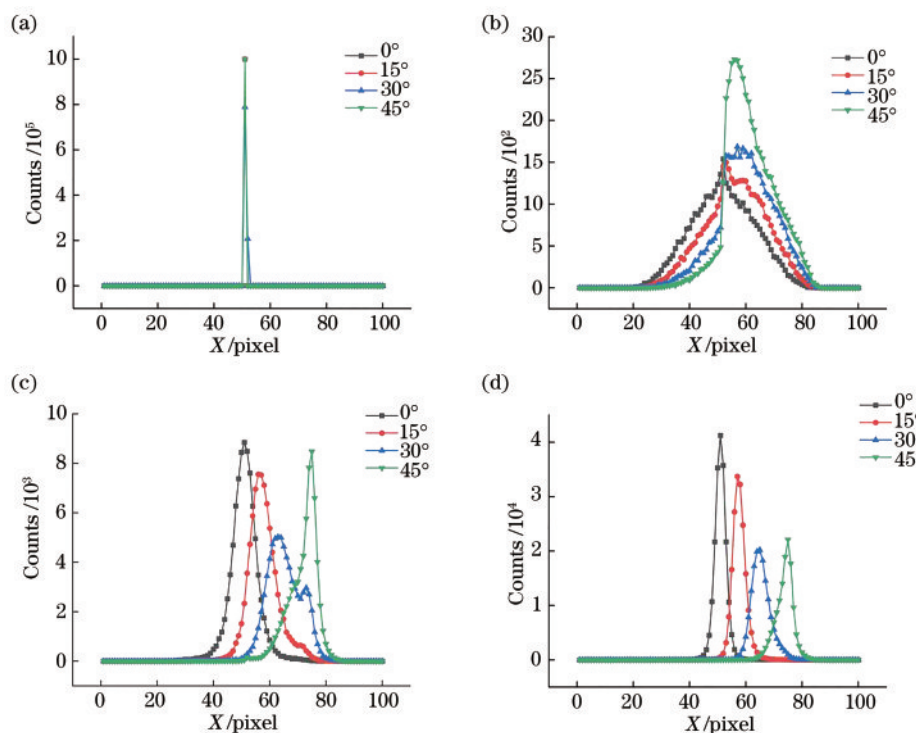


图 9 不同能量下的电子位置分布曲线。(a)30 keV;(b)600 keV;(c)2.5 MeV;(d)5.8 MeV

Fig. 9 Electron position distribution curves at different energies. (a) 30 keV; (b) 600 keV; (c) 2.5 MeV; (d) 5.8 MeV

从图 9 可以看到,电子在探测器中的位置分布曲线沿着入射角度发生偏移(入射角度  $\alpha < 45^\circ$ ),入射角度越大,偏移量也就越大,这是由于当电子斜

入射时,电子在探测器中的作用深度和作用区域沿着电子入射方向发生倾斜,入射角度越大,电子在探测器内部沿着入射方向运动的分量越大,电子重

心随着入射方向的偏移量也就越大;当电子的入射角度不确定时,入射角度会使探测器探测到的电子位置沿着入射角度发生偏移,从而降低探测器的位置分辨能力。

## 4 结 论

电子的入射能量、探测器的厚度、灵敏面积和入射角度对 PSSD 位置分辨能力都有影响。模拟结果表明,当能量范围为 30.0 keV~5.8 MeV 的电子入射到 1 mm 厚的探测器时,探测器的位置分辨能力随着电子能量的增加呈先变弱后逐渐变强。相同能量下,当电子未能穿透探测器时,不同厚度的探测器位置分辨能力相同。当电子能量可以穿透探测器时,较厚的探测器位置分辨能力相对较弱。当电子能量达到某一值时,电子从探测器的侧面逃逸出来,探测到的电子位置在入射点和逃逸侧面之间,这会降低探测器的位置分辨能力。当电子以小角度( $\alpha \leq 45^\circ$ )入射到 1 mm 厚的探测器时,探测器探测到的电子位置会沿着入射方向发生偏移,从而降低探测器的位置分辨能力。

## 参 考 文 献

- [1] Gao W D. A high-speed data test system for CMOS silicon pixel detector[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2016.  
高万东. CMOS 硅像素探测器高速数据测试系统[D]. 新乡: 河南师范大学, 2016.
- [2] Shen C P, Fang Y Q, Ruan M Q. Research on particle physics in collider experiments[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 296-304.  
沈成平, 方亚泉, 阮曼奇. 对撞机实验上的粒子物理研究[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 296-304.
- [3] Chen Y H. Study on mechanism and key techniques of ion implantation surface modification method for ultra-precision machining [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.  
陈耘辉. 离子注入表面改性超精密加工机理及工艺的研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [4] Wang Q Y, Chen A M, Li S Y, et al. Influence of diameter and depth on spatially confined laser-induced silicon plasma spectroscopy with cylindrical cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 0847007.  
王秋云, 陈安民, 李苏宁, 等. 圆柱形空间约束腔直
- 径和深度对激光诱导硅等离子体光谱的影响[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 0847007.
- [5] Wu F. The research on the electronics for the silicon tracker of high energy particle detection[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.  
吴峰. 空间高能粒子探测器望远镜系统电子学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [6] Chiba J, Iwasaki H, Kageyama T, et al. Study of position resolution for cathode readout MWPC with measurement of induced charge distribution [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1983, 206(3): 451-463.
- [7] Oed A. Properties of micro-strip gas Chambers (MSGC) and recent developments [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1995, 367(1/2/3): 34-40.
- [8] Sauli F. GEM: a new concept for electron amplification in gas detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1997, 386(2/3): 531-534.
- [9] Dong J. The study of two-dimensional position sensitive X-ray gas electron multiplier [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.  
董静. 二维位置灵敏 X 射线气体电子倍增器(GEM)的研制[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [10] Li J. Recent developments of the position sensitive new gas detectors [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2001, 21(1): 70-75.  
李金. 蓬勃发展的位置灵敏气体探测器[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(1): 70-75.
- [11] Yan J Q, Xie Y G, Hu T, et al. THGEM-based two dimension position detector for low energy electron [J]. Nuclear Techniques, 2016, 39(9): 56-61.  
颜嘉庆, 谢宇广, 胡涛, 等. 基于国产厚型气体电子倍增器的低能电子二维位置探测器[J]. 核技术, 2016, 39(9): 56-61.
- [12] Zhu J J, Zhang S L, Liu H T, et al. Position-sensitive microstrip gas chamber [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997, 17(1): 1-3.  
朱俊杰, 章世玲, 刘海涛, 等. 位置灵敏微条气体室[J]. 核电子学与探测技术, 1997, 17(1): 1-3.
- [13] Kramberger G, Cindro V, Mandic I, et al. Influence of trapping on silicon microstrip detector design and performance [J]. IEEE Transactions on

- Nuclear Science, 2002, 49(4): 1717-1723.
- [14] Meng X C. Silicon microstrip detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2003, 23(1): 4-18.  
孟祥承. 硅微条探测器[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(1): 4-18.
- [15] Liu W P, Kubo T, Kumagai H, et al. Identification of projectile fragments using position sensitive silicon detectors [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1990, 287 (3) : 476-480.
- [16] Li G C, Fang Y M, Ji R Y, et al. High-precision laser tracking system based on two-dimensional galvanometers and position sensitive detectors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0704007.  
李桂存, 方亚秒, 纪荣祎, 等. 基于二维振镜与位置灵敏探测器的高精度激光跟踪系统[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0704007.
- [17] Teng Y K, Hao Y M, Fu S F, et al. Calibration technology of visual measurement system based on position sensitive detector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 081202.  
滕玉坤, 郝颖明, 付双飞, 等. 基于位置敏感器件的视觉测量系统标定技术[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 081202.
- [18] Henry J, Livingstone J. Optimizing the response of Schottky barrier position sensitive detectors [J]. Journal of Physics D, 2004, 37(22): 3180-3184.
- [19] Banu A, Li Y, McCleskey M, et al. Performance evaluation of novel square-bordered position sensitive silicon detectors with four-corner readout [C]//2007 Annual Meeting of the Division of Nuclear Physics, October 10-13, 2007, Newport News, Virginia. Washington, DC: APS, 2007.
- [20] Ferrari A, Sala P, Fasso A, et al. FLUKA: a multi-particle transport code [EB/OL]. [2020-06-08]. [http://www.fluka.org/content/manuals/FM\\_2006.pdf](http://www.fluka.org/content/manuals/FM_2006.pdf).
- [21] Yang N R. Test method for inorganic non-metallic materials [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1990: 122-123.  
杨南如. 无机非金属材料测试方法 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1990: 122-123.