

小阴极环间距硅漂移探测器的设计和模拟

胡耀鹏, 王连锴*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月3日

摘要

硅漂移探测器(silicon drift detector, SDD)被广泛地用于X射线探测。本研究设计了小阴极环间距的SDD结构, 使用Silvaco TCAD仿真软件分别对阴极环间距为10 μm 和30 μm SDD进行了建模与仿真, 对10 μm 和30 μm 阴极环间距SDD的电学特性进行了比较, 对10 μm 阴极环间距SDD的电容、瞬态阳极电流和电荷收集机制进行了分析。结果表明, 相对于30 μm 阴极环间距SDD, 10 μm 阴极环间距SDD有小的漏电流, 平滑的电子漂移沟道, 更大的横向漂移电场, 均匀的电势分布, 较低的电容, 电荷收集时间约为100 ns。

关键词

硅漂移探测器, 阴极环间距, 漏电流

Design and Simulation of Silicon Drift Detector with Small Cathode Ring Spacing

Yaopeng Hu, Liankai Wang*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 3rd, 2025

Abstract

Silicon drift detector (SDD) is widely used for X-ray detection. This study designed an SDD structure with small cathode ring spacing, and modeled and simulated SDDs with cathode ring spacing of 10 μm and 30 μm using Silvaco TCAD simulation software. The electrical characteristics of SDDs with cathode ring spacing of 10 μm and 30 μm were compared, and the capacitance, transient anode current, and charge collection mechanism of SDDs with cathode ring spacing of 10 μm were analyzed. The results indicate that compared to the 30 μm cathode ring spacing SDD, the 10 μm cathode ring spacing SDD has smaller leakage current, smoother electron drift channel, larger lateral drift

*通讯作者。

文章引用: 胡耀鹏, 王连锴. 小阴极环间距硅漂移探测器的设计和模拟[J]. 计算机科学与应用, 2025, 15(4): 33-42.
DOI: 10.12677/csa.2025.154075

electric field, uniform potential distribution, lower capacitance, and charge collection time of about 100 ns.

Keywords

Silicon Drift Detector, Cathode Ring Spacing, Leakage Current

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硅漂移探测器(silicon drift detector, SDD)由 Gatti 和 Rehak 于 1983 年提出[1] [2]。相比于其他半导体探测器, SDD 采用侧向耗尽的结构设计, 其阳极电容很小与探测面积无关, 因而具有优异的能量分辨率[3] [4]。由于 SDD 在 X 射线探测方面的优越性能, 全世界都在大力研制 SDD。此外, SDD 在材料分析[5]-[9]、X 射线荧光光谱[10]、核物理研究[11] [12]、医学成像[13] [14]等领域具有极其广阔的应用前景[15]。

早先与 SDD 相关的研究工作主要集中在不同形状和结构的器件制造和实验测试[16]-[19]。SDD 主要包括螺旋环 SDD 和同心圆环 SDD [20]。螺旋环 SDD 的结构设计是围绕载流子漂移通道进行设计和建模的, 不需要外加电压分压器就可以实现电压分压, 但其内部电场分布不均匀且设计和制作工艺困难[21]。同心圆环 SDD 的阳极设计在探测器正面的中心, 阴极环在阳极外侧且围绕阳极[17], 其电容很小, 内部的电场均匀分布, 制作工艺较为简单, 然而其具有较大的表面漏电流, 降低了能量分辨率。为了减小同心圆环 SDD 的表面漏电流。本文设计了一种小阴极环间距的同心圆环 SDD, 通过减小 SDD 表面的 Si-SiO₂ 界面面积, 进而减小界面态, 最大限度地减小 SDD 的表面漏电流, 提高 SDD 的能量分辨率。

本文提出了一种 SDD 的新型结构, 使用 Silvaco TCAD 仿真软件分别对阴极环间距为 10 μm 和 30 μm SDD 进行了建模与仿真, 对阴极环间距为 30 μm 和 10 μm SDD 的漏电流、电场分布、电势分布、电子浓度分布进行了比较。此外, 还分析了阴极环间距为 10 μm SDD 的电容, 瞬态阳极电流和电荷收集机制。

2. SDD 模型

由于同心圆环 SDD 具有对称性, 本研究中采用了二维结构模拟。图 1 为 X=0(Y-Z 平面)的 SDD 结构图。本文提出了一种同心圆环小阴极环间距的 SDD, 使用厚度为 525 μm 的 n 型超纯高阻硅作为衬底, 掺杂浓度为 $4 \times 10^{11}/\text{cm}^3$ 。n 型硅衬底中重掺杂五价的 P 和三价的 B, 在探测器正面(收集侧)形成 n 型重掺杂的阳极和 p 型重掺杂的阴极环和保护环。SDD 由内至外依次为阳极、阴极环和保护环, 其中阳极尺寸为 50 μm, n 型重掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 掺杂深度为 1 μm。阴极环的宽度为 90 μm, p 型重掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 掺杂深度为 1 μm。在 SDD 的边缘存在保护环, 宽度为 40 μm, p 型重掺杂浓度为 $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$, 掺杂深度为 1 μm。保护环可以在 SDD 的边缘形成均匀的电场分布, 避免边缘不均匀电场的影响, 还可以减小 SDD 的漏电流, 保护探测器的性能。阳极、阴极环和保护环均为高斯掺杂。

X 射线从 SDD 背面入射。背面由阴极环和保护环组成, 掺杂类型和掺杂浓度与前侧阴极环相同。SDD 的正面和背面两侧都覆盖有 1 μm 厚的 SiO₂ 层。在阳极、最内侧阴极环、最外侧阴极环、背面阴极环和最外侧保护环进行刻蚀然后沉积 1 μm 的铝层作为电极。在电极接触点处施加不同的偏置电压, 探测器内部的耗尽区中形成载流子漂移沟道, 当入射 X 射线照射探测器的背面时, 产生的自由电子在电场的

作用下通过漂移沟道漂移到收集阳极, 产生电信号, 通过对电信号的处理实现对未知 X 射线的标定。

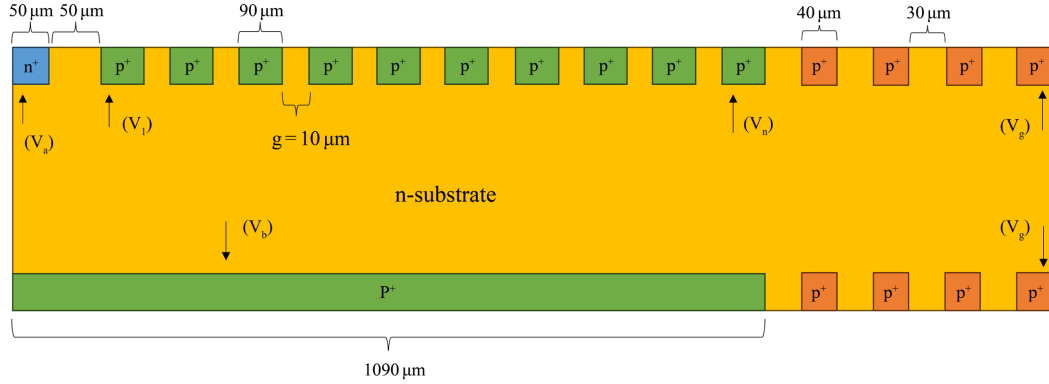


Figure 1. SDD (Y-Z section) structural diagram

图 1. SDD (Y-Z 剖面) 结构图

3. SDD 电学特性分析

本文使用 Silvaco TCAD 仿真软件的器件模拟模块对 SDD 的电学特性进行模拟, SDD 的全耗尽电压 V_{depl} 可根据公式(1)进行计算:

$$V_{depl} = \frac{qNd^2}{2\epsilon_0\epsilon_{si}} \quad (1)$$

其中, ϵ_0 是真空介电常数(8.854×10^{-12} F/m), ϵ_{si} 是硅的介电常数(11.5 F/m), q 是电子电量(1.6×10^{-19} C), N 是 n 型硅衬底的掺杂浓度($4 \times 10^{11}/\text{cm}^3$), d 是硅衬底厚度($525 \mu\text{m}$), 根据上述公式计算出耗尽电压 V_{depl} 约为 -84 V。在 SDD 正常工作的情况下, 正面和背面间的电势差不能超过 $|V_{depl}|$, 否则将会发生击穿现象, 大量的空穴电流将会在电极之间流动[17] [22], 导致 SDD 表面电子的缺失, 影响能量分辨率。为保证 n 型硅衬底全耗尽且不击穿, 取阳极电压 V_a 和最外保护环电压 V_g 为 0 V, 最内漂移环电压、最外漂移环电压和背面阴极电压分别为 -25 V、 -160 V 和 -80 V。在下文中, 将分析不同阴极环间距 g 对 SDD 电学特性的影响。

3.1. 漏电流

噪声是影响 SDD 性能的重要指标, 决定了 SDD 的能量分辨率, SDD 噪声与能量分辨率的关系如公式(2)所示:

$$(\delta E)^2 = K_F E + ENC^2 \quad (2)$$

其中, $K_F E$ 是 SDD 载流子产生过程中的量子波动, ENC 是 SDD 的噪声, 可根据公式(3)进行计算:

$$ENC^2 = qI_{leak} \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) dt = q\tau_{leak} I_{leak} \quad (3)$$

其中, τ_{leak} 为 SDD 的峰值响应时间, I_{leak} 为漏电流。减小 SDD 的漏电流, 可以减小噪声, 提高 SDD 的能量分辨率。SDD 中的漏电流有三个来源: 扩散电流、产生电流和表面电流。扩散电流源于自由电子 - 空穴对从耗尽区外扩散到其中。产生电流是因为耗尽区中的自由电子 - 空穴对复合率高于产生率, 扩散电流和产生电流都与探测器衬底有关。表面电流与 Si-SiO₂ 界面态有关, 减小 Si-SiO₂ 的接触界面可以有效的减小表面漏电流。图 2 是阴极环间距为 $10 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ SDD 的漏电流与最外环偏压的 I-V 特性曲线,

横坐标为最外漂移环电压, 纵坐标为漏电流。如图所示, 漏电流最初随着最外漂移环偏压的增加而快速增加, 当达到一定电压时缓慢增加, 最终趋于稳定。这是因为: 当 SDD 没有完全耗尽时, 电子漂移速度随着偏压的增加而增加, 漏电流增大; 当 SDD 完全耗尽时, 电子漂移速度达到饱和, 不随着偏压的增加而增加, 漏电流趋于稳定。比较图 2 的两条曲线可以得知, 阴极环间距 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 比 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD 具有更小的饱和漏电流和噪声, 有利于 X 射线探测。

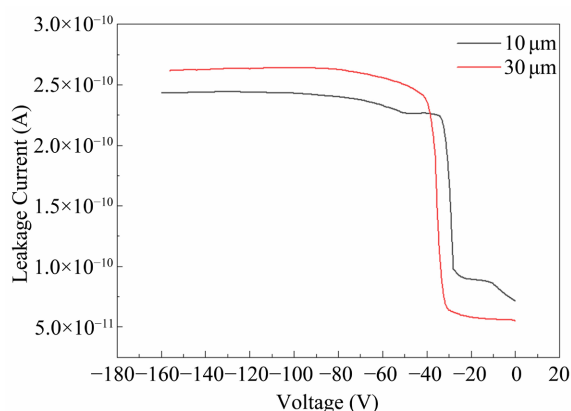


Figure 2. $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$ cathode ring spacing SDD leakage current
图 2. $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 阴极环间距 SDD 漏电流

3.2. 电子浓度

图 3 为不同阴极环间距 SDD 内部电子浓度分布模拟图。从图中可以得知, 相对于两侧, 探测器中心电子浓度较高, 图中的绿色区域就是电子漂移沟道, 该通道位于探测器内部, 指向收集阳极。入射 X 射线产生的电子在垂直电场和横向电场的作用下漂移到漂移通道, 然后通过该通道漂移到收集阳极。电子漂移沟道的电子浓度较大, 但仍低于 n 型硅衬底的掺杂浓度, 这表明衬底中的电子已经完全漂移到收集阳极, 衬底完全耗尽。不同阴极环间距 SDD 的电子漂移沟道存在差异, 相对于阴极环间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD, 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 电子漂移沟道远离探测器表面, 避免了自由电子在 Si-SiO₂ 界面被捕获, 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 拥有更窄和更平滑的电子漂移沟道, 有利于电子漂移到收集阳极。

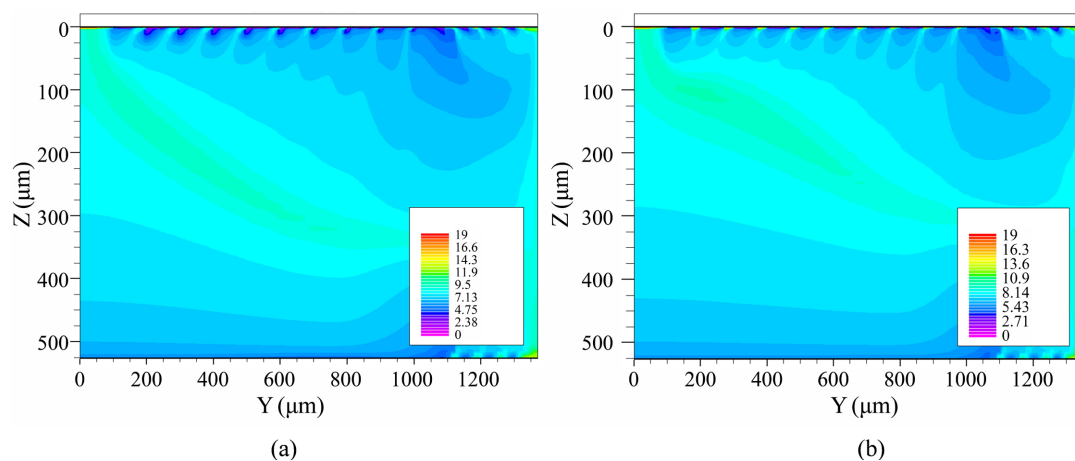


Figure 3. Simulation of electron concentration distribution in SDD with cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$ respectively: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

图 3. 阴极环间距分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD 电子浓度分布模拟: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

3.3. 电势分布

图 4 为不同阴极环间距 SDD 内部电势分布。如图所示, 阳极电势最高, 最外漂移环附近的电势最低, 随着半径的增加, 电势降低。相对于阴极环间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD, 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 内部的电势分布更均匀。提取电子漂移沟道内的电势分布曲线如图 5 所示。从图中可以得知, 随着半径的增加, 电势均匀减小, 相对于阴极环间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD, 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 电子漂移沟道内电势差大, 电势梯度大且分布均匀。电势梯度越大, 入射 X 射线产生的电子就会获得更大的漂移速度, 更快地漂移到收集阳极。

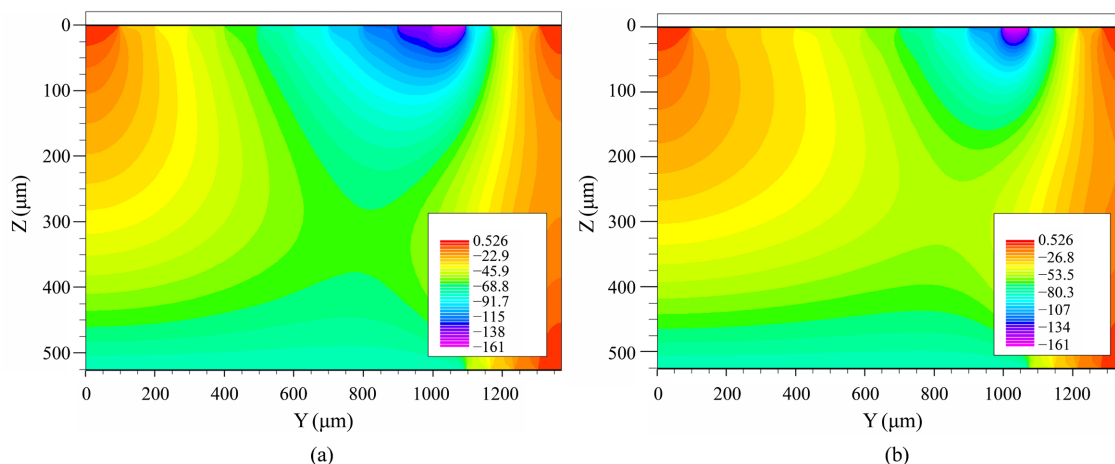


Figure 4. Simulation of internal potential distribution in SDD with cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$, respectively: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

图 4. 阴极环间距分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ SDD 内部电势分布模拟: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

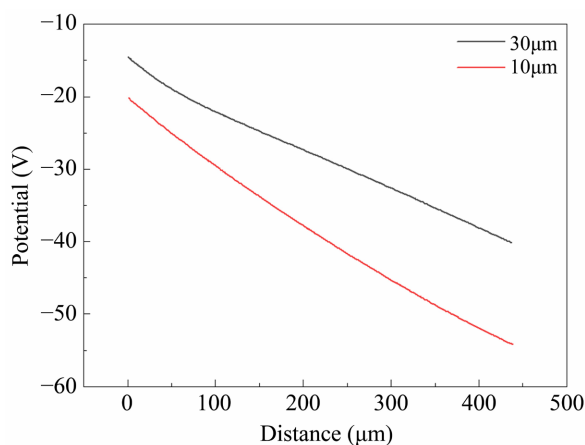


Figure 5. Potential distribution curves in SDD electron drift channels with cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$, respectively

图 5. 阴极环间距分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ SDD 电子漂移沟道内的电势分布曲线

3.4. 电场分布

电场是电势的梯度, 图 6 为不同阴极环间距 SDD 内部电场分布。从图中可以得知, 整个探测器处于非零电场中, 表明其已经完全耗尽。探测器的正面和背面的电场不是恒定的, 但在中间区域, 有相对恒定的电场分布, 入射 X 射线产生的电子, 首先会聚集到这个区域, 然后在电场的作用下漂移到收集阳极。

相对于阴极环间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 SDD, 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 低电场区域更小, 有更均匀的电场分布。提取电子漂移沟道的电场分布曲线如图 7 所示。距离收集阳极越远, 电场强度越小。阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ 的 SDD 中心阳极位置处的电场较大, 且横向漂移电场也较大, 为电子运动提供了大的漂移电场。随着阴极环间距的减小, 电子漂移沟道内的电场分布更平坦、更均匀, 有利于电子漂移到收集阳极。

因此, 根据以上分析结果, 小阴极环间距 SDD 相对于大阴极环间距 SDD 有更优异的电学性能, 因此应尽可能地减小阴极环间距 g , 提高 SDD 的性能。然而, 在实际的 SDD 工艺制造中, 阴极环间距尺寸受到工艺技术的限制, 如果阴极环间距过小, 两个相邻阴极环之间的电场很大, 导致阴极环之间发生击穿现象, 降低 SDD 的性能。因此, 在下文中将以 $10\ \mu\text{m}$ SDD 为研究对象进行分析。

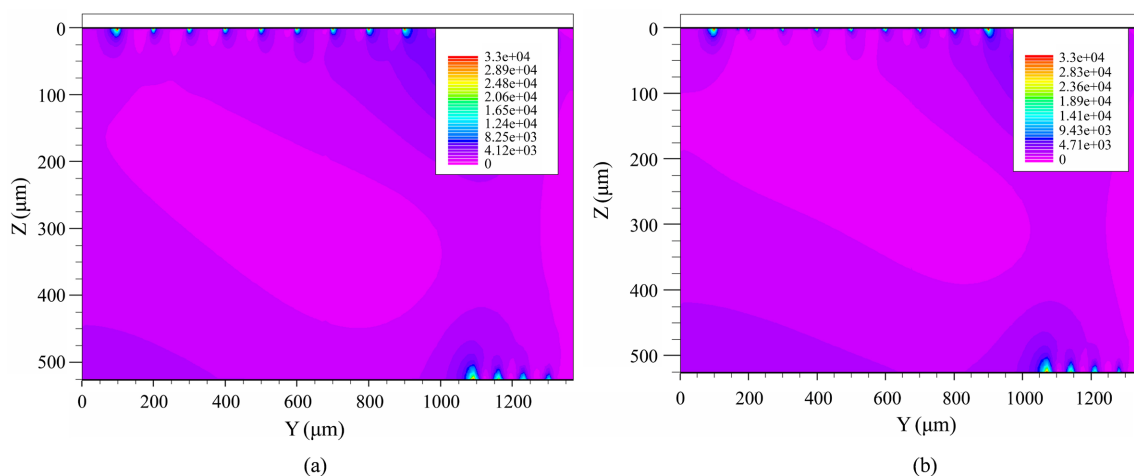


Figure 6. Simulation of internal potential distribution in SDD with cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$, respectively: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

图 6. 阴极环间距分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ SDD 内部电势分布模拟: (a) $10\ \mu\text{m}$; (b) $30\ \mu\text{m}$

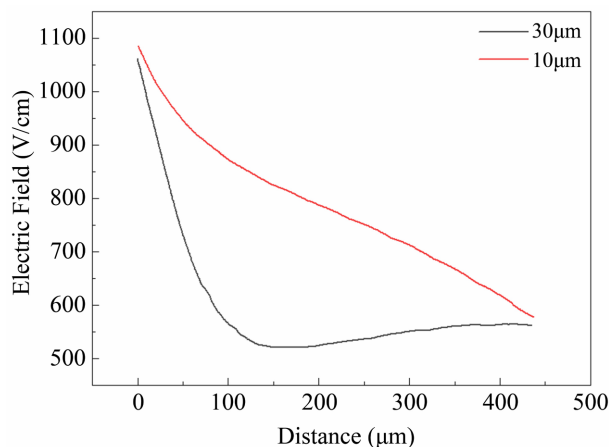


Figure 7. Electric field distribution curves in SDD electron drift channels with cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ and $30\ \mu\text{m}$, respectively

图 7. 阴极环间距分别为 $10\ \mu\text{m}$ 和 $30\ \mu\text{m}$ SDD 电子漂移沟道内的电场分布曲线

3.5. C-V 特性曲线

信噪比是有用信号与无用噪声的比值。噪声会明显降低 SDD 的探测性能, 电容是影响 SDD 噪声的主要因素, 较低的电容会使 SDD 具有较高的信噪比和能量分辨率。SDD 的电容 C_d 可以通过公式(4)进行

计算:

$$C_d = \frac{\varepsilon_{si} S}{w} \quad (4)$$

式中, ε_{si} 是硅的介电常数, S 是阳极面积, w 是耗尽层厚度, SDD 全耗尽状态下, 耗尽层厚度等于硅衬底厚度 d 。探测器电容与阳极面积成正比, 可以通过调节 SDD 的阳极面积减小探测器的电容。SDD 具有很小的阳极面积, 因此其具有很小的电容, 更低的噪声, 更大的信噪比。

图 8 为 $10\ \mu\text{m}$ 阴极环间距 SDD 的 C-V 特性曲线。其中横坐标为最外漂移环偏压, 纵坐标为 SDD 的电容。从图中可以得知, 电容随着最外漂移环偏压的增加而减小, 当达到 SDD 的全耗尽电压时, 电容趋于稳定约为 $2\ \text{fF}$ 。 $10\ \mu\text{m}$ 阴极环间距的 SDD 拥有比较理想的电容值, 优异的能量分辨率, 有利于 X 射线的探测。

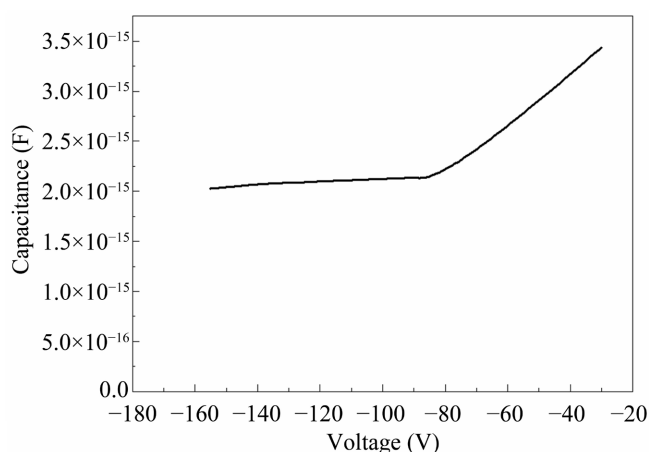


Figure 8. C-V characteristic curve of SDD with a cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$
图 8. 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ SDD 的 C-V 特性曲线

3.6. 瞬态阳极电流

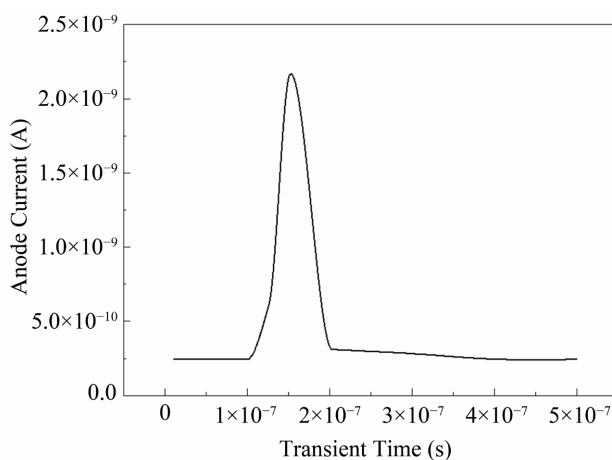


Figure 9. Cathode ring spacing of $10\ \mu\text{m}$ SDD transient anode current
图 9. 阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$ SDD 的瞬态阳极电流

漂移沟道和漂移电场影响入射 X 射线产生的自由电子漂移到收集阳极的时间。阴极环间距为 $10\ \mu\text{m}$

的 SDD 具有良好的漂移沟道且沟道内电场大于 600 V/cm , 使得电子被阳极收集的时间很短。图 9 为 X 射线入射在阴极环间距为 $10 \mu\text{m}$ SDD 背面 $r = 400$ 时, SDD 产生的瞬态阳极电流。从图中可知, 在 X 射线未入射时, 阳极电流约为漏电流($2.4 \times 10^{-10} \text{ A}$); 在 $1 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时 X 射线入射, 探测器内部产生大量的自由电子 - 空穴对, 在电场的作用下自由电子漂移到阳极, 空穴漂移到附近的阴极, 阳极电流增加到最大值。然后, 由于电子扩散, 阳极电流减小到 X 射线未入射时的水平, 电荷收集时间约为 100 ns 。

图 10 为在 $r = 400 \mu\text{m}$ 处 X 射线入射到阴极环间距为 $10 \mu\text{m}$ SDD 背面后的不同时刻电子浓度分布变化。在 $1 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时, X 射线入射, 在 $1.02 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时, SDD 内产生小的高浓度电子云。随着时间的增加, 电子云逐渐扩大且向电子漂移沟道运动, 在 $1.2 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时, 可以看到电子云已经进入漂移通道并向阳极移动, 在 $1.52 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时, 电子继续沿着漂移沟道运动, 已经有部分电子被阳极收集, 最后, 在 $2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$ 时, 电子云消失, 所有电子都漂移到阳极并被收集, 电子浓度恢复到 X 射线入射前的状态。

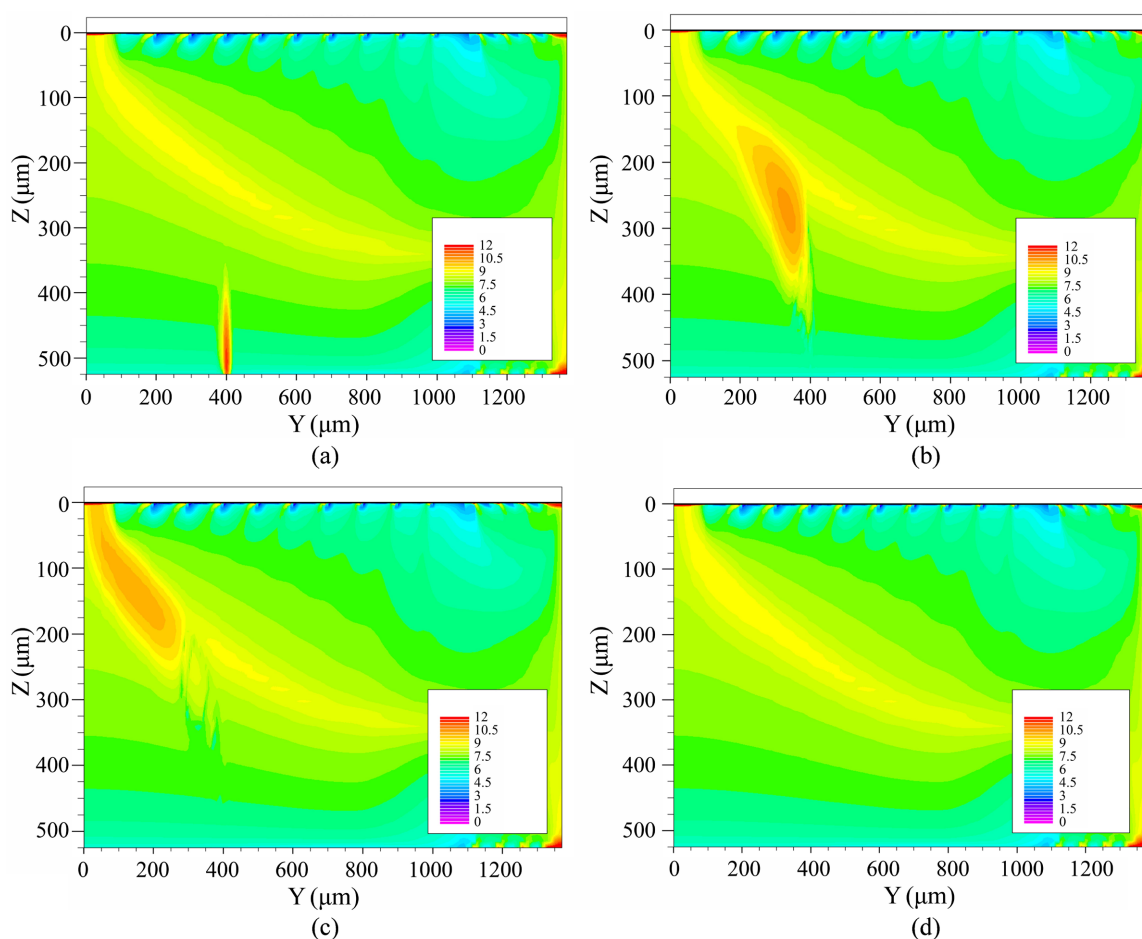


Figure 10. The electron concentration distribution inside SDD with a cathode ring spacing of $10 \mu\text{m}$ at different times: (a) $1.02 \times 10^{-7} \text{ s}$; (b) $1.2 \times 10^{-7} \text{ s}$; (c) $1.52 \times 10^{-7} \text{ s}$; (d) $2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$

图 10. 不同时刻阴极环间距为 $10 \mu\text{m}$ SDD 内部电子浓度分布: (a) $1.02 \times 10^{-7} \text{ s}$; (b) $1.2 \times 10^{-7} \text{ s}$; (c) $1.52 \times 10^{-7} \text{ s}$; (d) $2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$

4. 总结

本文提出了一种具有小阴极环间距的 SDD 新型结构。这种新结构减少了 SDD 表面 Si 与 SiO_2 接触的表面积, 从而减少了 SDD 表面的漏电流, 优化了 SDD 的电学特性, 使其具有较低的噪声和较高的能

量分辨率, 多保护环的设计可以使 SDD 边缘电场分布均匀避免了击穿现象。模拟结果表明, 阴极环间距为 10 μm 的 SDD 具有较低的漏电流、平滑的电子漂移沟道、较大的电势梯度和电场强度、电容约为 2 fF、电荷收集时间约为 100 ns。这表明阴极环间距为 10 μm 的 SDD 电学性能优异, 是一种可行的结构, 具有很好的能量分辨率和探测性能。SDD 在医学成像、X 射线通信和脉冲星导航等领域具有广泛的应用, 本研究为 SDD 的研制提供了参考方向。

基金项目

国家自然科学基金(12274041)、国家自然科学基金(U21B2061)。

参考文献

- [1] Gatti, E. and Rehak, P. (2005) Review of Semiconductor Drift Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **541**, 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.01.037>
- [2] Gatti, E. and Rehak, P. (1984) Semiconductor Drift Chamber—An Application of a Novel Charge Transport Scheme. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **225**, 608-614. [https://doi.org/10.1016/0167-5087\(84\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0167-5087(84)90113-3)
- [3] Bertuccio, G., Ahangarianabhari, M., Graziani, C., Macera, D., Shi, Y., Rachevski, A., *et al.* (2015) A Silicon Drift Detector-CMOS Front-End System for High Resolution X-Ray Spectroscopy up to Room Temperature. *Journal of Instrumentation*, **10**, P01002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/01/p01002>
- [4] Hafizh, I., Carminati, M. and Fiorini, C. (2020) TERA: Throughput-Enhanced Readout ASIC for High-Rate Energy-Dispersive X-Ray Detection. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **67**, 1746-1759. <https://doi.org/10.1109/tns.2020.3001459>
- [5] Fernando, P.U.A.I., Kennedy, A.J., Pokrzywinski, K., Jernberg, J., Thornell, T., George, G., *et al.* (2024) Development of Alginate Beads for Precise Environmental Release Applications: A Design of Experiment Based Approach and Analysis. *Journal of Environmental Management*, **351**, Article 119872. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119872>
- [6] Zhu, Q., Sun, G., Wang, P., Sui, X., Liu, C., Wang, J., *et al.* (2024) Imaging the Space-Resolved Chemical Heterogeneity of Degraded Graphite Anode through Scanning Transmission X-Ray Microscope. *Journal of Power Sources*, **591**, Article 233882. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233882>
- [7] Gholami Hatam, E., Pelicon, P., Punzón-Quijorna, E., Kelemen, M. and Vavpetič, P. (2023) Three-Dimensional Element-by-Element Surface Topography Reconstruction of Compound Samples Using Multisegment Silicon Drift Detectors. *Microscopy and Microanalysis*, **29**, 1980-1991. <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad119>
- [8] van der Ent, A., Brueckner, D., Spiers, K.M., Falch, K.V., Falkenberg, G., Layet, C., *et al.* (2023) High-Energy Interference-Free K-Lines Synchrotron X-Ray Fluorescence Microscopy of Rare Earth Elements in Hyperaccumulator Plants. *Metallomics*, **15**, mfad050. <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfad050>
- [9] Newbury, D.E. and Ritchie, N.W.M. (2015) Quantitative Electron-Excited X-Ray Microanalysis of Borides, Carbides, Nitrides, Oxides, and Fluorides with Scanning Electron Microscopy/Silicon Drift Detector Energy-Dispersive Spectrometry (SEM/SDD-EDS) and NIST DTSA-II. *Microscopy and Microanalysis*, **21**, 1327-1340. <https://doi.org/10.1017/s1431927615014993>
- [10] Wu, B., Xia, J., Zhang, S., *et al.* (2023) Elemental Composition X-Ray Fluorescence Analysis with a TES-Based High-Resolution X-Ray Spectrometer. *Chinese Physics B*, **32**, Article 097801. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/acd926>
- [11] Manzanillas, L., Ablett, J.M., Choukroun, M., *et al.* (2024) Development of an X-Ray Polarimeter at the SOLEIL Synchrotron. *Review of Scientific Instruments*, **95**, Article 053302. <https://doi.org/10.1063/5.0207370>
- [12] Zhao, K., Xue, M., Zhang, Y., Peng, H., Wen, S., Zhang, Z., *et al.* (2023) Measuring the Thermal Neutron Fluence of NTD-Ge Using the Self-Monitoring Method. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **1054**, Article 168425. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168425>
- [13] Bulut, S., Türemen, G., Yeltepe, E., Porsuk, D., Serin, N.Ö. and Kaya, Ü. (2024) An Irradiation System for Nuclear and Materials Research in a Medical Cyclotron. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **1058**, Article 168927. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168927>
- [14] Metzger, W., Engdahl, J., Rossner, W., Boslau, O. and Kemmer, J. (2004) Large-Area Silicon Drift Detectors for New Applications in Nuclear Medicine Imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **51**, 1631-1635. <https://doi.org/10.1109/tns.2004.832666>

- [15] Salge, T., Tagle, R., Hecht, L., Ferriere, L., Ball, A.D., Kearsley, A.T., *et al.* (2014) Advanced EDS and MXRF Analysis of Earth and Planetary Materials Using Spectrum Imaging, Computer-Controlled SEM and an Annular SDD. *Microscopy and Microanalysis*, **20**, 1716-1717. <https://doi.org/10.1017/s1431927614010319>
- [16] Liu, S., Xue, Y., Jia, R., Tao, K., Jiang, S., Wu, Y., *et al.* (2019) Design and Preparation of Integrated Voltage Divider for Silicon Drift Detector by Ion Implantation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **30**, 10152-10161. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-01351-8>
- [17] Rehak, P., Gatti, E., Longoni, A., Sampietro, M., Holl, P., Lutz, G., *et al.* (1989) Spiral Silicon Drift Detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **36**, 203-209. <https://doi.org/10.1109/23.34435>
- [18] Li, Y., Xiong, B. and Li, Z. (2016) 3D Design and Electric Simulation of a Silicon Drift Detector Using a Spiral Biasing Adapter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **831**, 29-33. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.05.040>
- [19] Rehak, P., Carini, G., Chen, W., De Geronimo, G., Fried, J., Li, Z., *et al.* (2010) Arrays of Silicon Drift Detectors for an Extraterrestrial X-Ray Spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **624**, 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.058>
- [20] Bruner, N.L., Frautschi, M.A., Hoefkamp, M.R. and Seidel, S.C. (1995) Characterization Procedures for Double-Sided Silicon Microstrip Detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **362**, 315-337. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00280-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00280-4)
- [21] Sun, J., Li, Z., Li, X., Li, X., Cai, X., Tan, Z., *et al.* (2022) Novel Spiral Silicon Drift Detector with Equal Cathode Ring Gap and Given Surface Electric Fields. *Micromachines*, **13**, Article 1682. <https://doi.org/10.3390/mi13101682>
- [22] Fiorini, C., Longoni, A. and Lechner, P. (2000) Single-Side Biasing of Silicon Drift Detectors with Homogeneous Light-Entrance Window. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **47**, 1691-1695. <https://doi.org/10.1109/23.870862>