

空间软X射线单光子雪崩探测器

报告人：纪慧敏

单位：中国科学院微电子研究所

导师：李志华研究员，刘曼文副研究员

日期：2024年5月25日

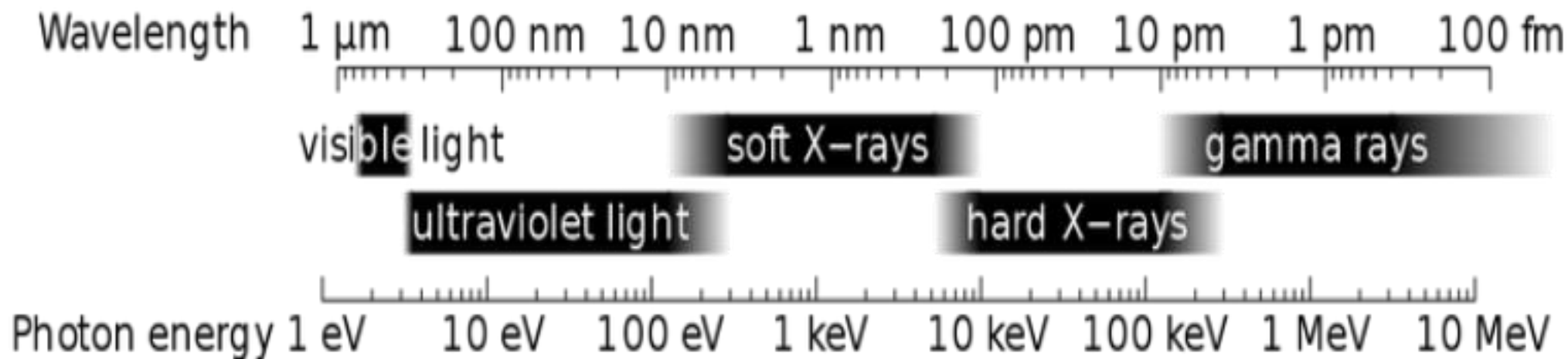
目 录



- 01 ■ 背景调研
- 02 ■ 基本原理
- 03 ■ 器件设计与仿真
- 04 ■ 结果分析
- 05 ■ 未来展望

空间软X射线 定义

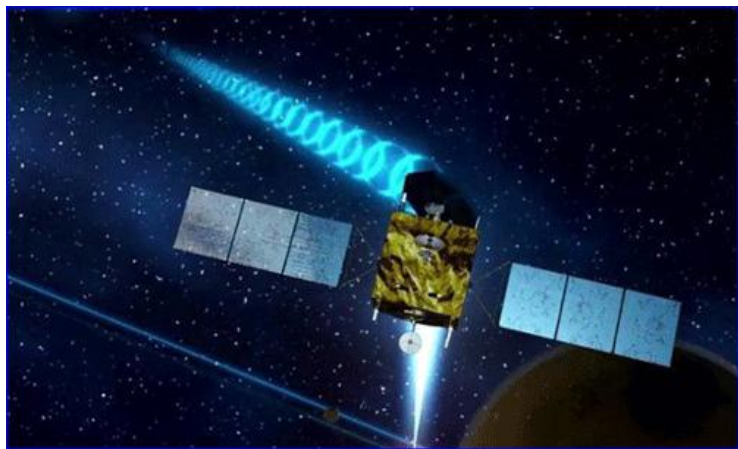
- **X 射线**相对于可见光和红外是一种波长极短的电磁波，波长在 0.01~10 nm 之间，按照谱段划分波长小于 0.1 nm 的为硬 X 射线，波长大于 0.1 nm 的为软 X 射线。
- **空间软X射线**一般指能量为0.5-10 keV的电磁波，对应波长范围为0.124-2.48 nm。



空间软X射线 探测意义

- ✓ 探索深空科学问题，研究天体的特性和结构
- ✓ 用于生物医学成像、蛋白质晶体学和分子生物学等研究
- ✓ 用于地球物理、地质学和环境科学等领域的研究
- ✓ 在 X 射线通信、空间灾害与环境监测等诸多方面有望发挥有效的作用。

脉冲星导航



X射线医学成像



地质勘探



- 决定着光子能量**分辨能力**、**响应速度**和**灵敏度**等关键指标
- **硅基半导体探测器**通常被用来进行软 X 射线探测。
 - 硅漂移探测器 (Silicon Drift Detector, SDD)
 - 电荷耦合探测器 (Charge-coupled Device, CCD)
 - 侧面碰撞探测器 (Side Collision Detector, SCD)
 - 雪崩光电二极管探测器 (Avalanche Photo Diode, APD)
 - 单光子雪崩光电探测器 (Single Photon Avalanche Diode, SPAD)
 -

硅基半导体探测器

分类	特点	优点	缺点
SDD	通过侧向耗尽原理进行工作	时间分辨率（微秒级）、能量分辨率较高、低功耗、小型化	对环境要求较高，需要低温工作环境
CCD	采用半导体探测器面阵形式	高空间分辨率、大面积覆盖	封装较厚，可能会增加探测器本身的质量
SCD	通过舍弃光子位置信息，来换取较快的读出速率	漂移距离较短、低功耗	光子能量分辨率较低
APD	在 PIN 探测器半导体本征区外加一层雪崩层，配合升压电路，在探测时达到雪崩效果	高增益、响应速度快	暗电流较大
SPAD	采用单光子计数技术	光子能量分辨率高、时间分辨率高、响应速度快、灵敏度高、抗辐射性能好	易受击穿电压稳定性影响

SPAD能够准确标记X射线单光子到达时间，从而提高空间软X射线探测器性能，推动空间天文研究、X射线脉冲星导航、空间X射线通信等诸多领域的进一步发展。



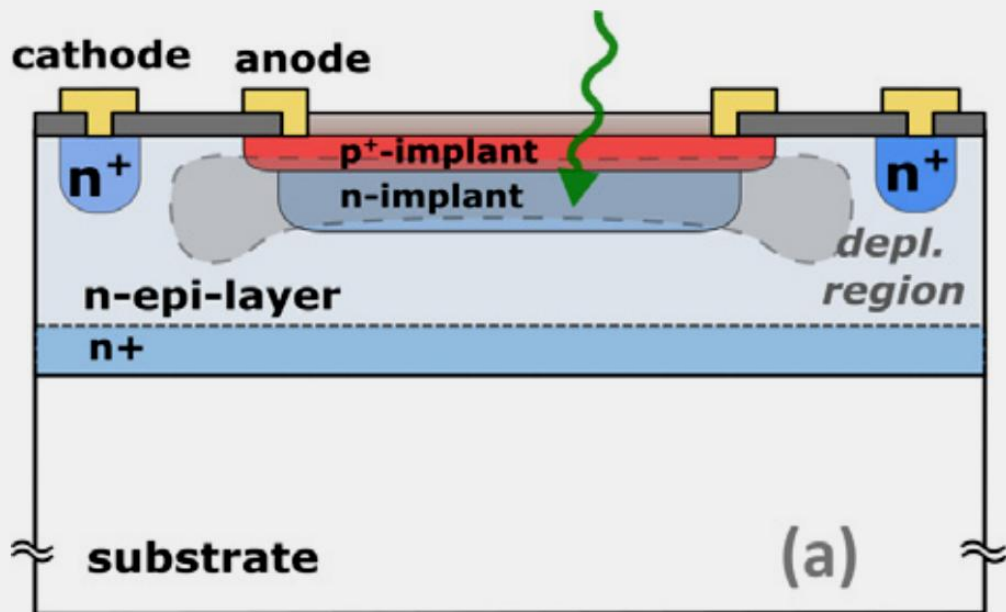
目 录



- 01 ■ 背景调研
- 02 ■ 基本原理
- 03 ■ 器件设计与仿真
- 04 ■ 结果分析
- 05 ■ 未来展望

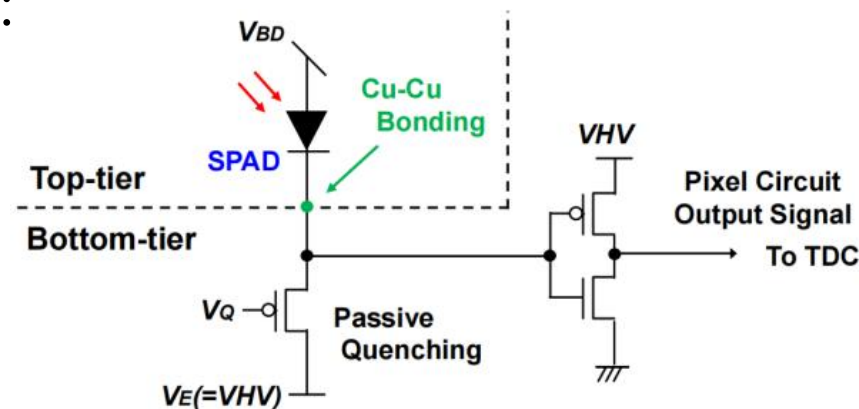
空间软X射线单光子雪崩探测器

硅基单光子雪崩探测器以p-on-n结构为例：

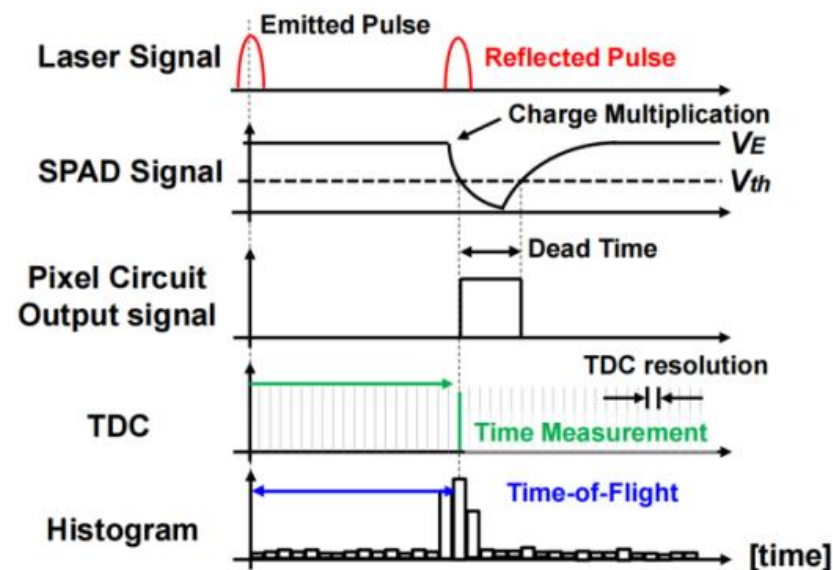


基本原理：空间软X射线单光子雪崩探测器能够在单个X射线光子击中时产生电子-空穴对，并通过雪崩放大效应放大信号，产生电荷增强的脉冲信号，通过精确测量电子和空穴的产生和扩散过程，可以实现对入射光子能量和时间的准确测量。

单个SPAD读出电路：



信号处理流程：

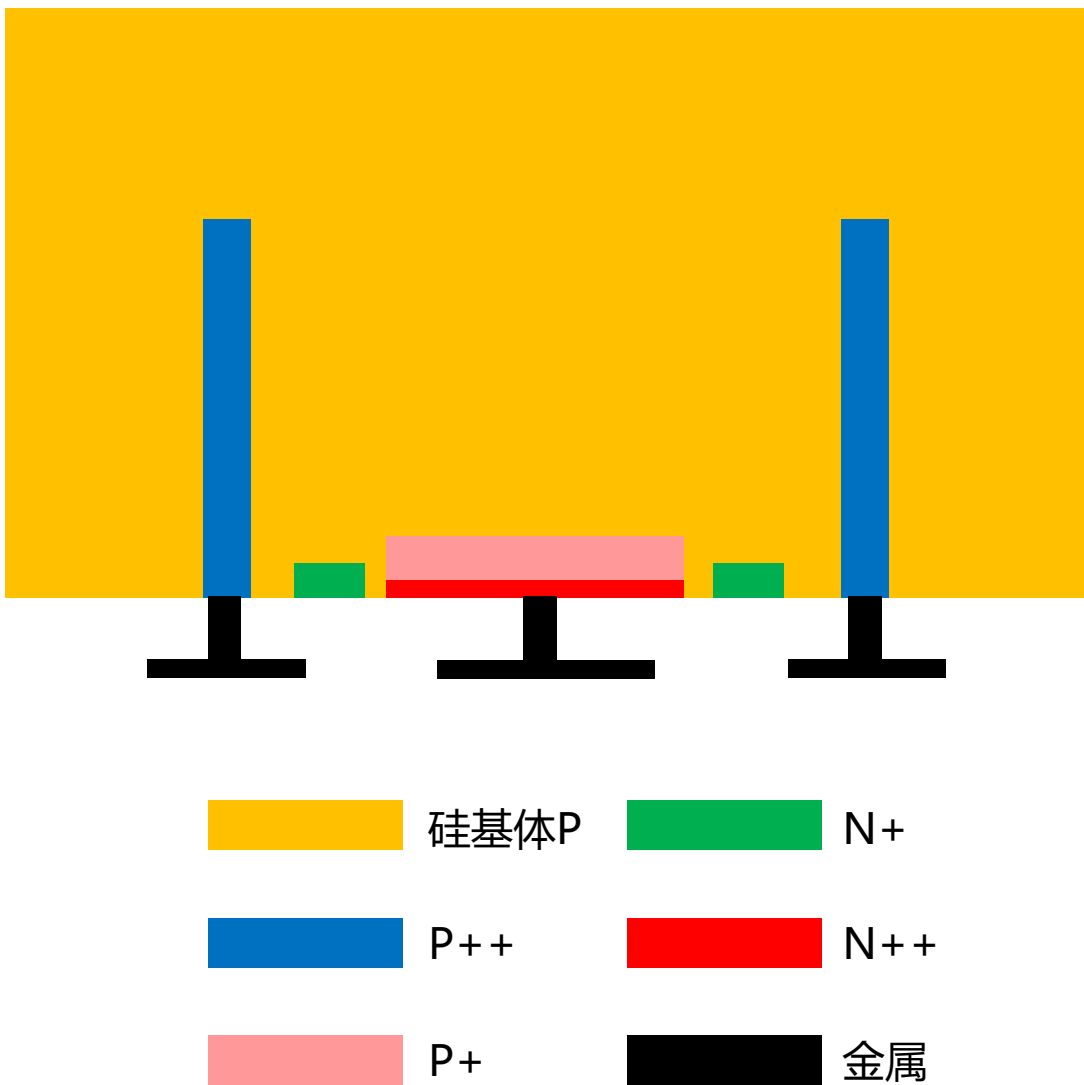


目 录



- 01 ■ 背景调研
- 02 ■ 基本原理
- 03 ■ 器件设计与仿真
- 04 ■ 结果分析
- 05 ■ 未来展望

新型三维电极单光子雪崩倍增探测器



- 采用n-on-p SPAD结构，在中央位置通过**掺杂梯度**形成倍增区，由于空间辐照背景的影响，增益控制在50以下，
- 通过TCAD仿真研究不同掺杂浓度等参数对探测器暗电流和增益的影响，来**优化电场分布**。
- 通过设计**深宽比高的三维电极**来使得偏置电压施加电极以及实现电学隔离，减小串扰并有效提高阵列的填充因子，减少“死区”比例。

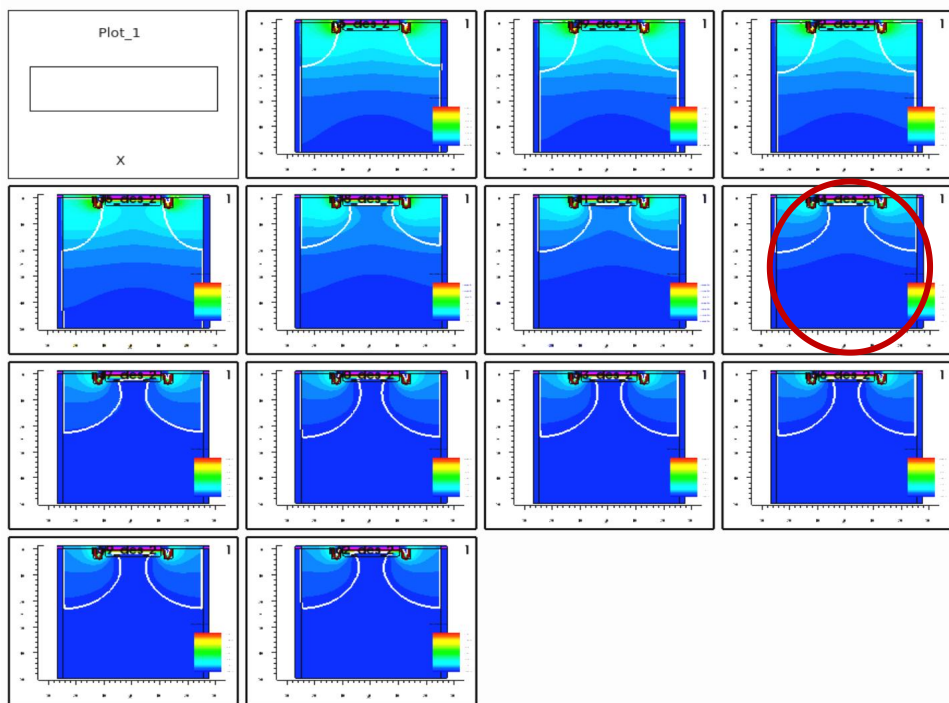


新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

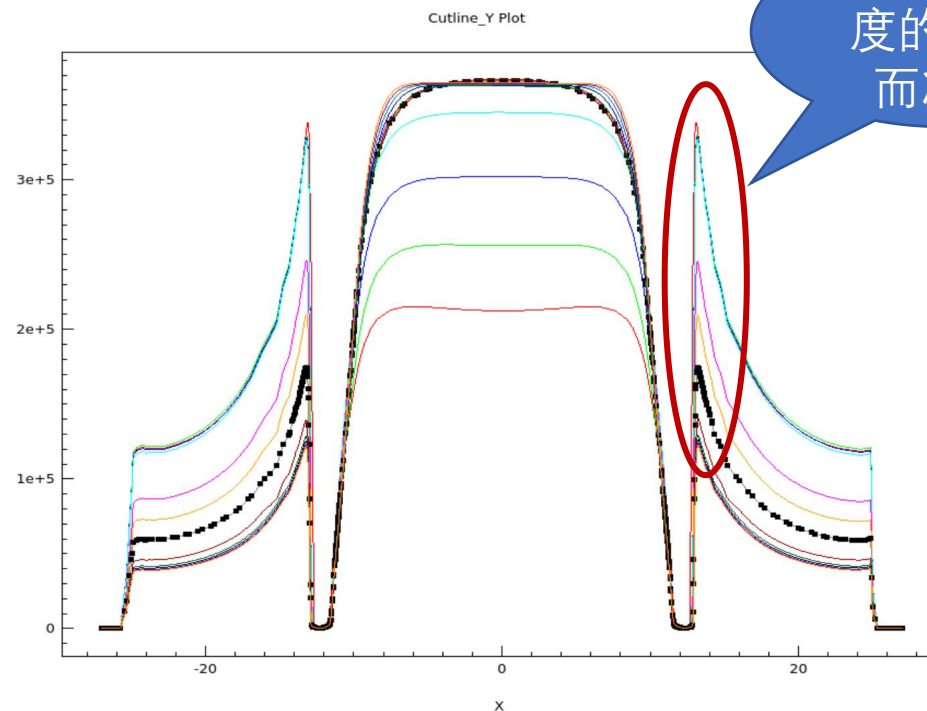
P+掺杂浓度分别为

$1e16/1.4e16/1.8e16/2.2e16/2.6e16/2.7e16/2.8e16/2.9e16/3e16/3.1e16/3.2e16/3.3e16/3.4e16 \text{ cm}^{-3}$

电场分布



横向电场分布



随掺杂浓度的增加而减小

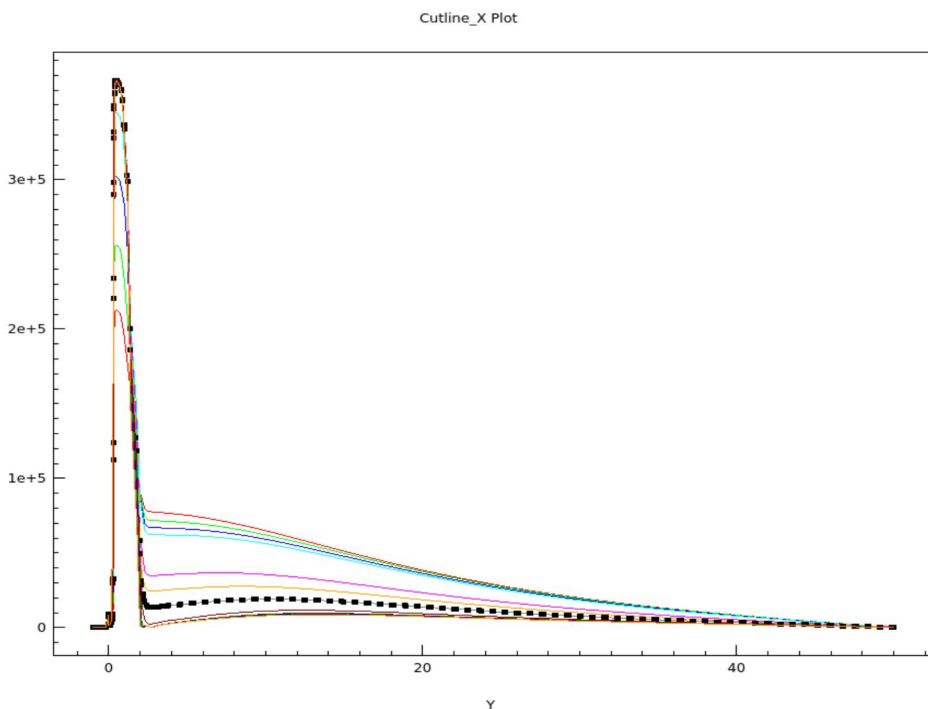


新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

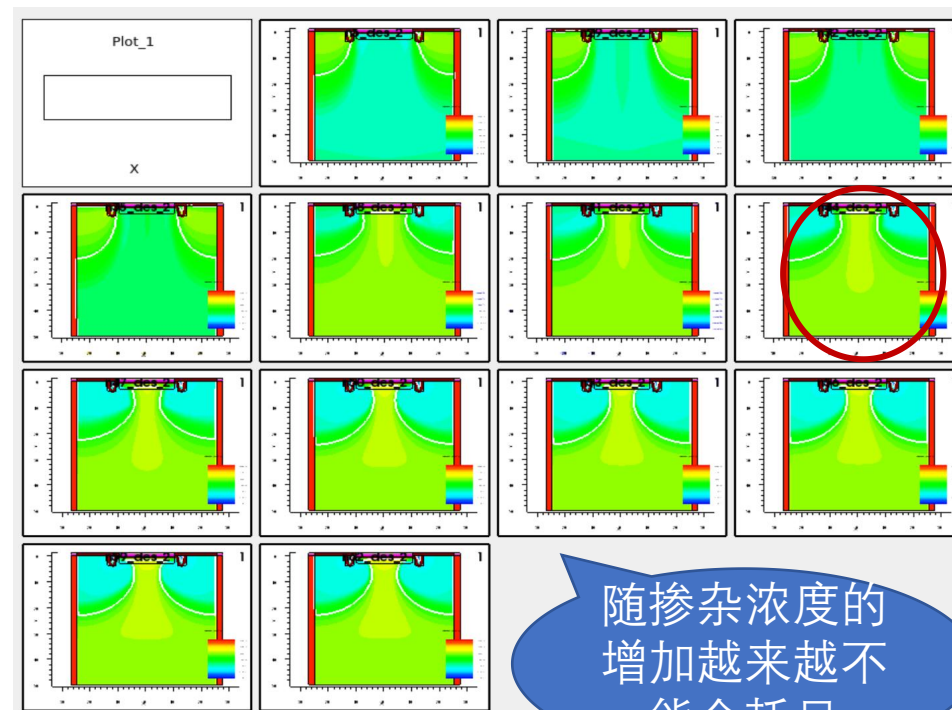
P+掺杂浓度分别为

$1e16/1.4e16/1.8e16/2.2e16/2.6e16/2.7e16/2.8e16/2.9e16/3e16/3.1e16/3.2e16/3.3e16/3.4e16 \text{ cm}^{-3}$

纵向电场分布



空穴浓度分布



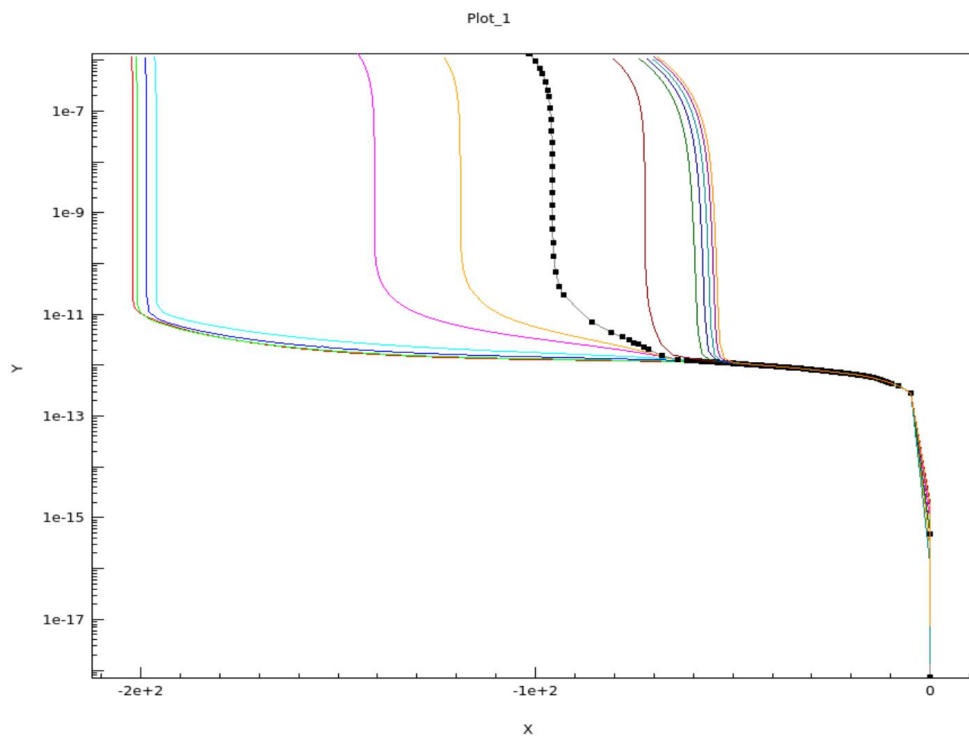
随掺杂浓度的增加越来越不能全耗尽



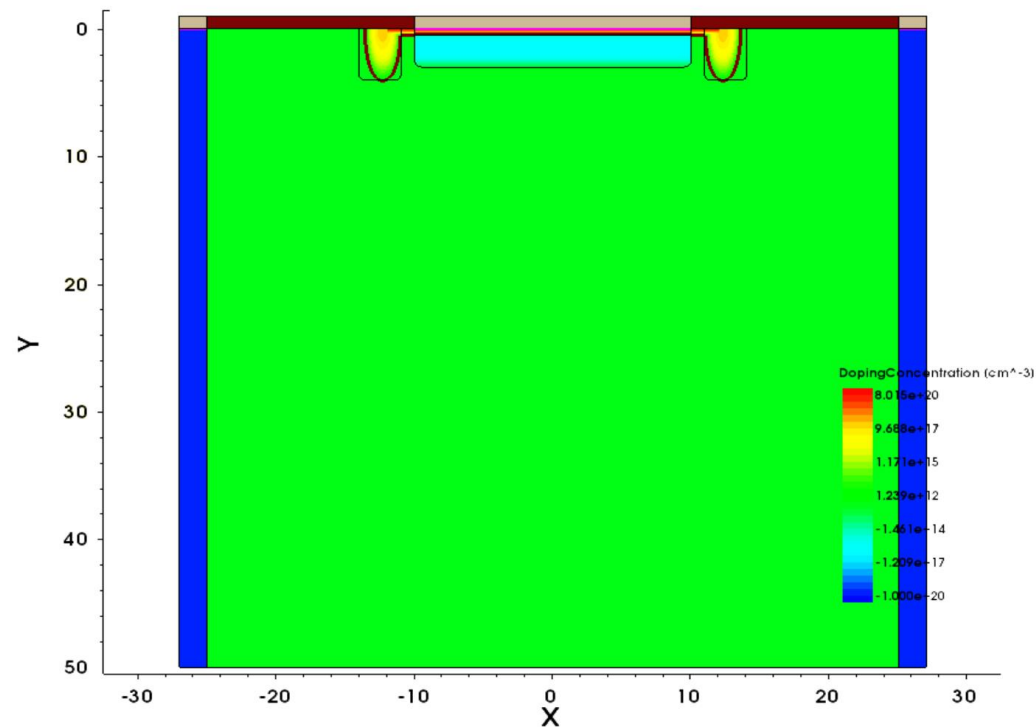
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

结论：折中考虑，选择P+掺杂浓度为 $2.8e16\text{ cm}^{-3}$ ，中间电场区虽还未达到全耗尽状态，但反向饱和电压在100V左右，在y接近保护环深度处电场也没有急剧下降到趋近于0，**保护环边界处电场可以降到 $1.8e5\text{ V/cm}$ 且雪崩区电场可达到 $3.6e5\text{ V/cm}$ 。**

暗电流IV曲线



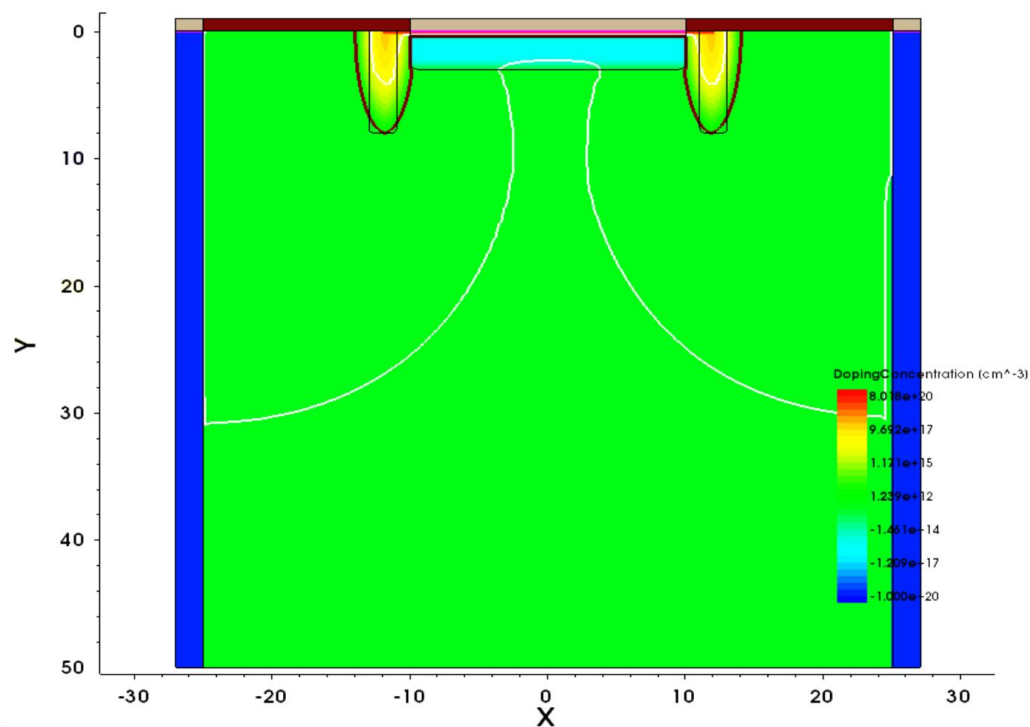
器件结构



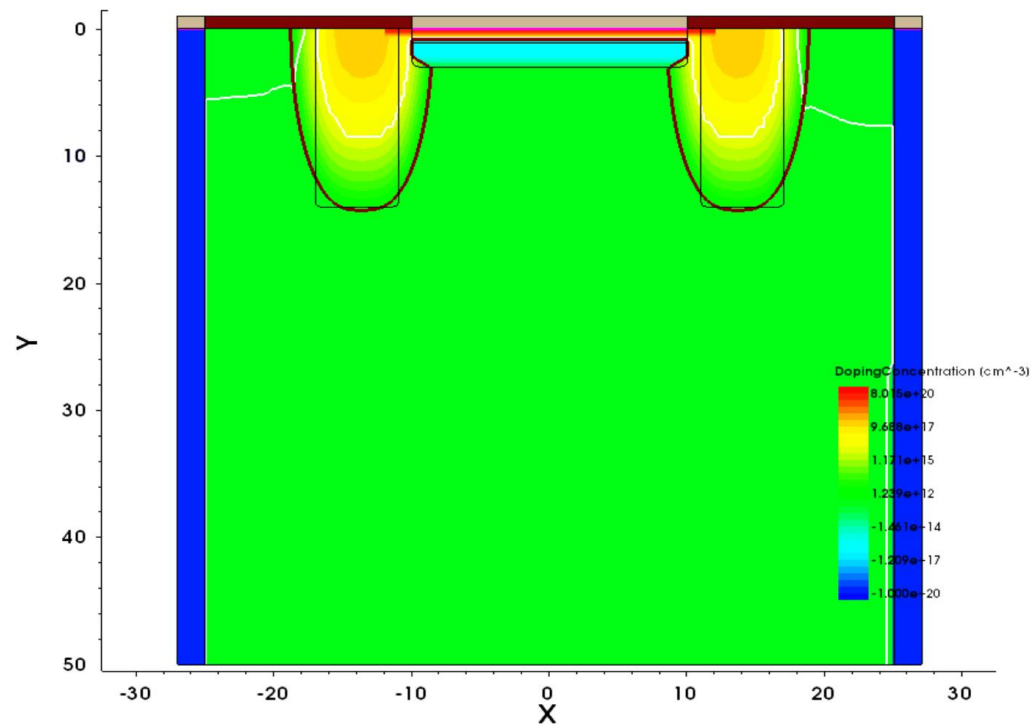
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

同理，对N+区保护环深度、宽度以及N++区深度等参数均进行优化仿真，最终折中选择下图所示两种器件结构，二者各有优势，左图电场较好，右图耗尽状态较好。

器件结构1



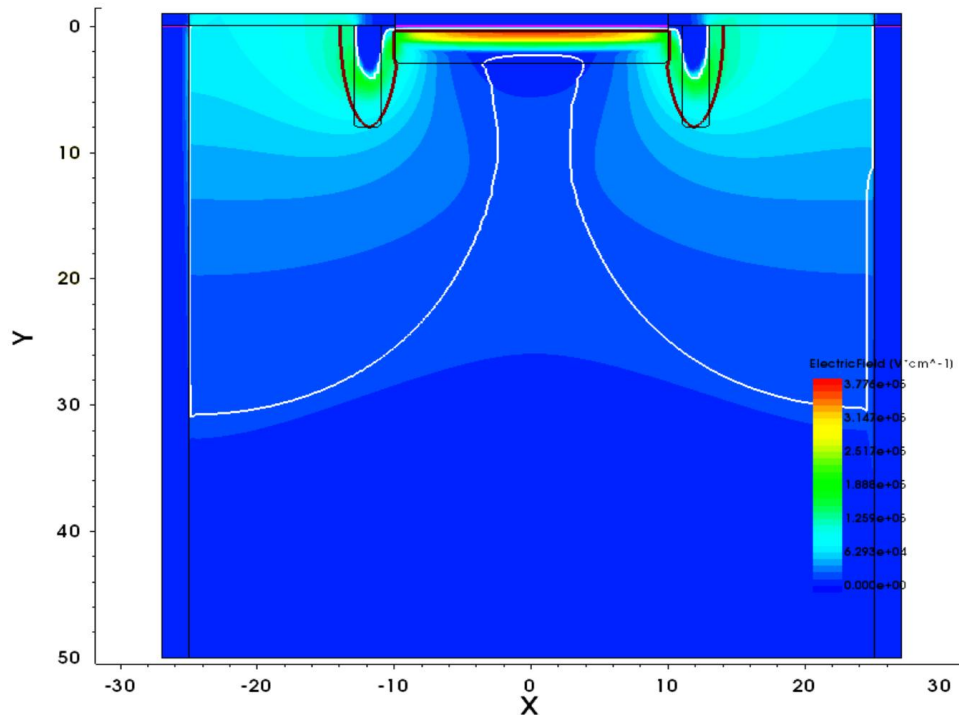
器件结构2



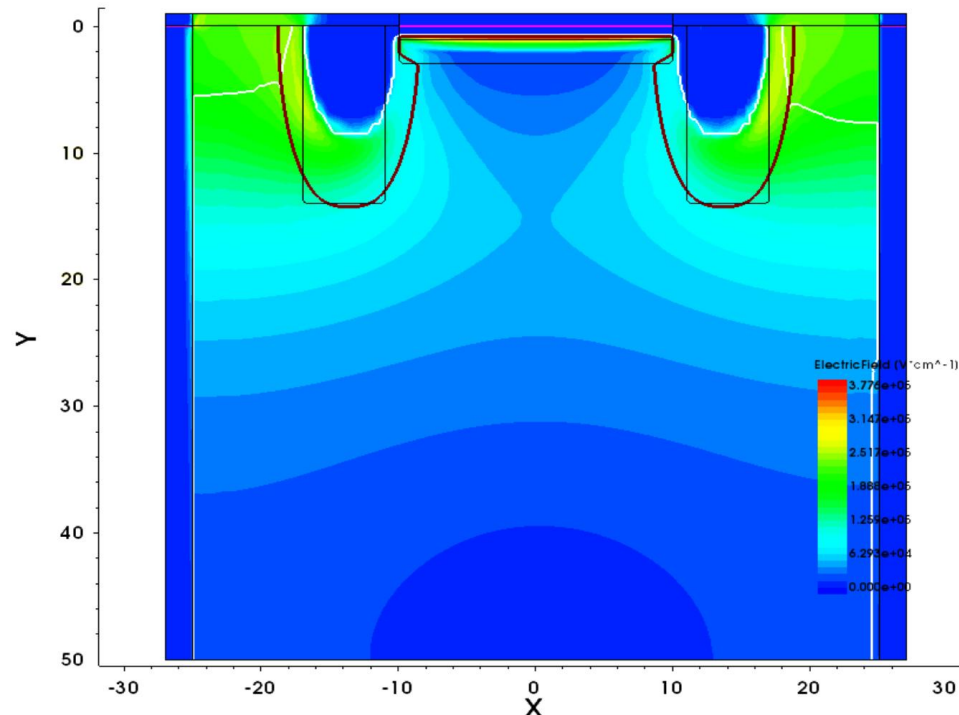
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

同理，对N+区保护环深度、宽度以及N++区深度等参数均进行优化仿真，最终折中选择下图所示两种器件结构，二者各有优势，左图电场较好，右图耗尽状态较好。

电场分布1



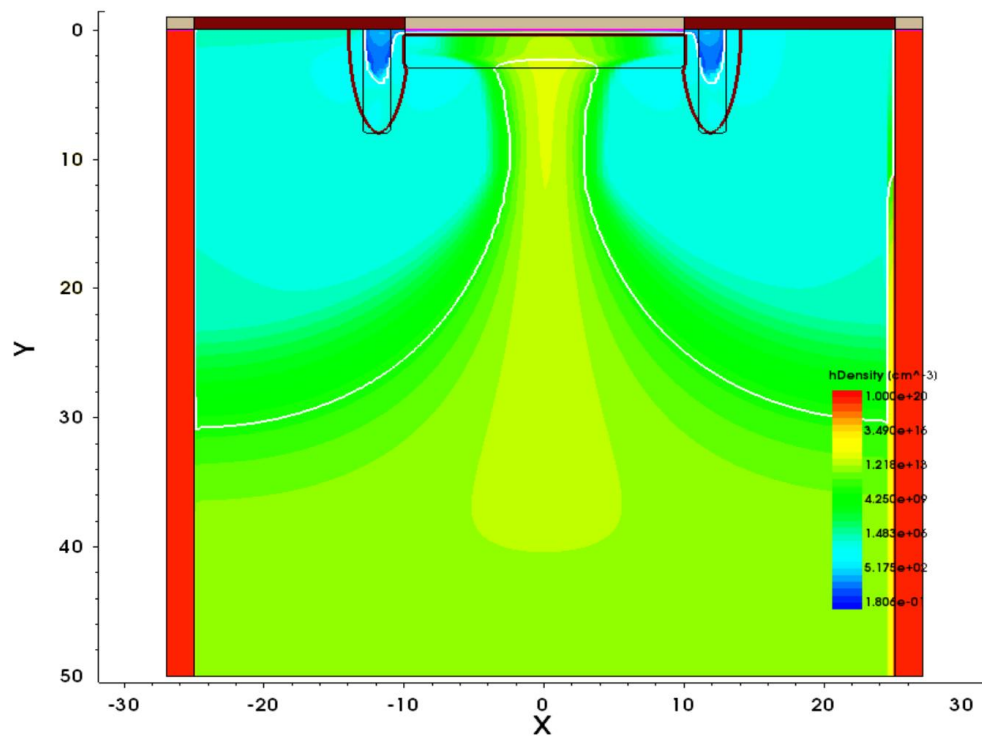
电场分布2



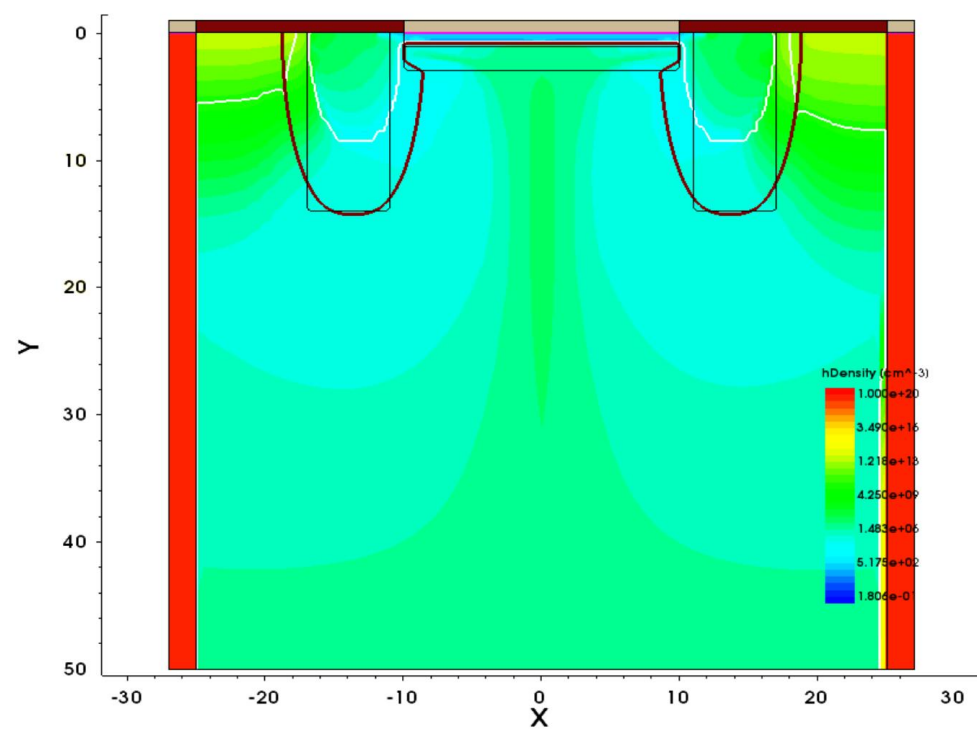
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

同理，对N+区保护环深度、宽度以及N++区深度等参数均进行优化仿真，最终折中选择下图所示两种器件结构，二者各有优势，**左图电场较好**，**右图耗尽状态较好**。

空穴浓度分布1



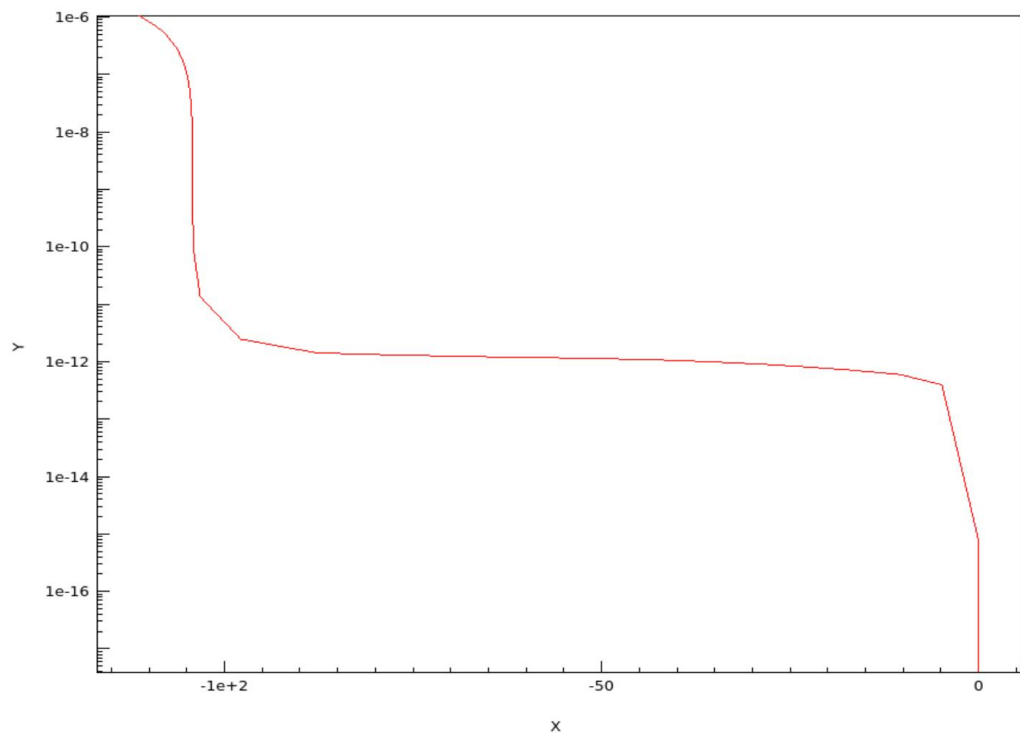
空穴浓度分布2



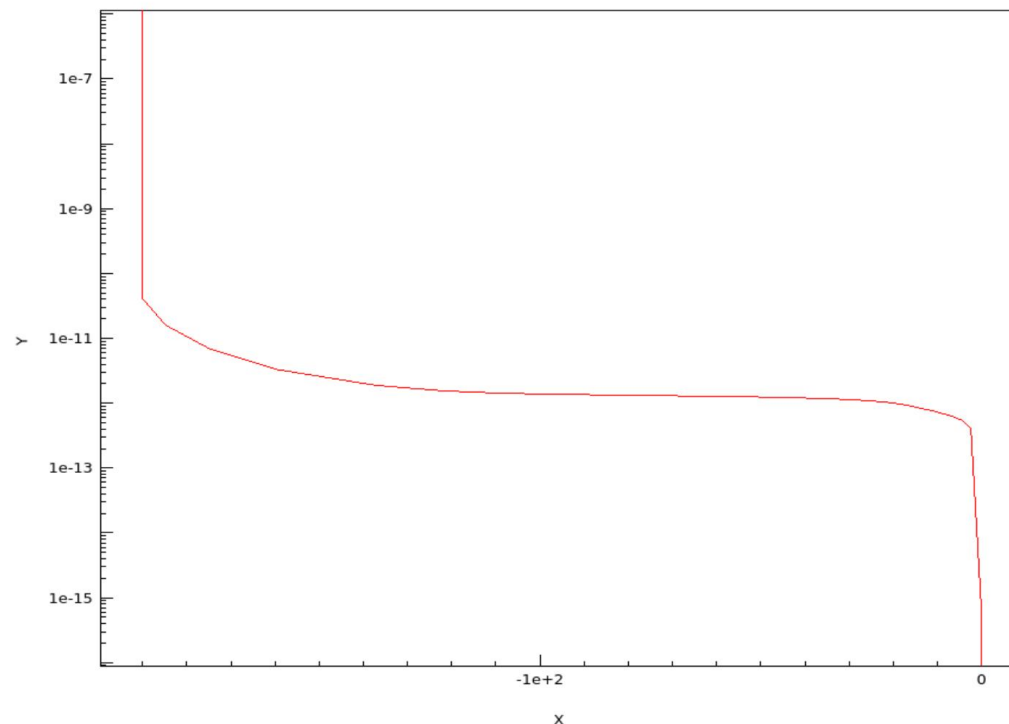
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

器件1反向击穿电压在104V左右，器件2反向击穿电压在190V左右。

暗电流IV曲线1



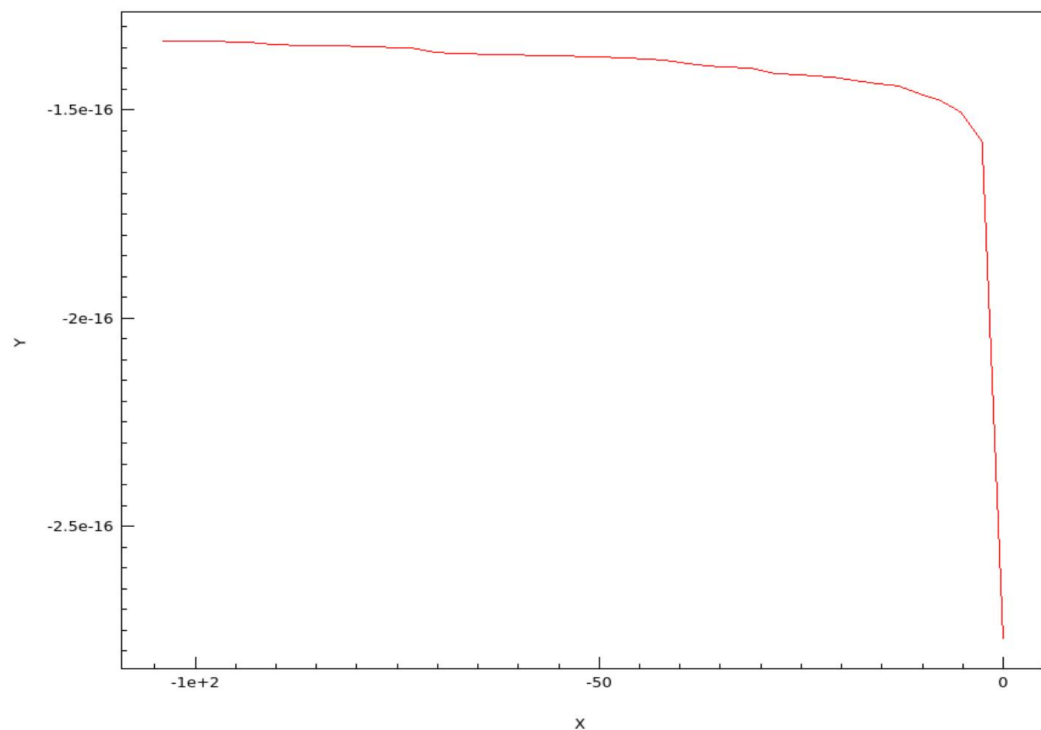
暗电流IV曲线2



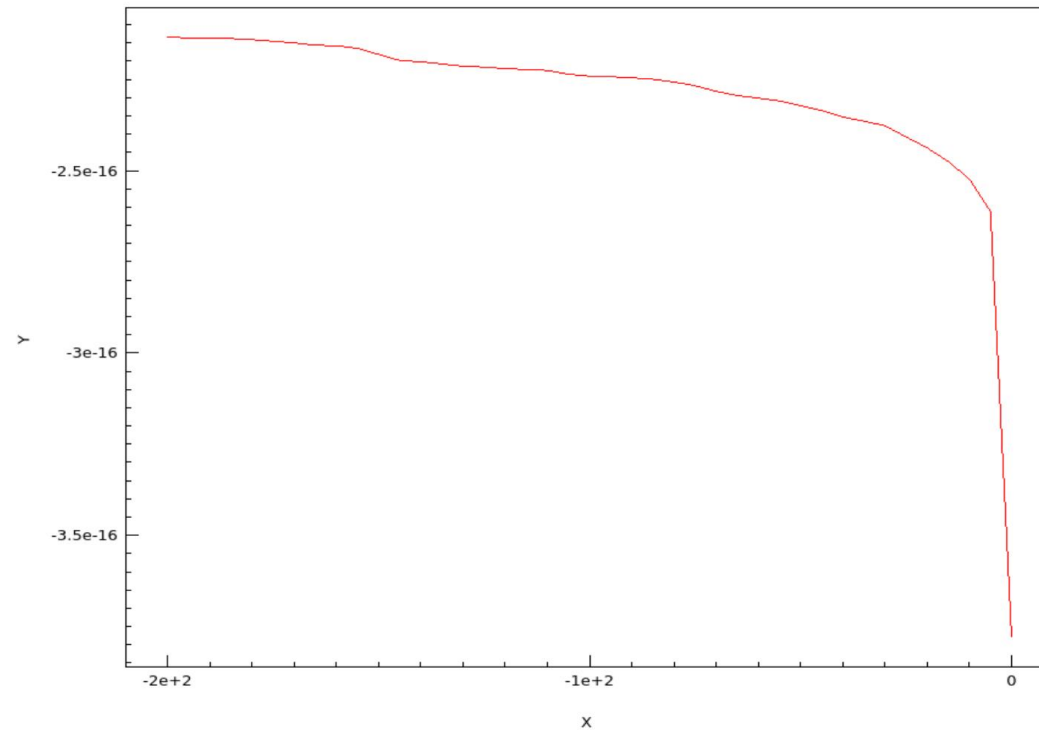
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

仿真得到电容都比较小，在 $1.3e-16 \text{ F}/\mu\text{m} \sim 2.3e-16 \text{ F}/\mu\text{m}$ 。

电容CV曲线1



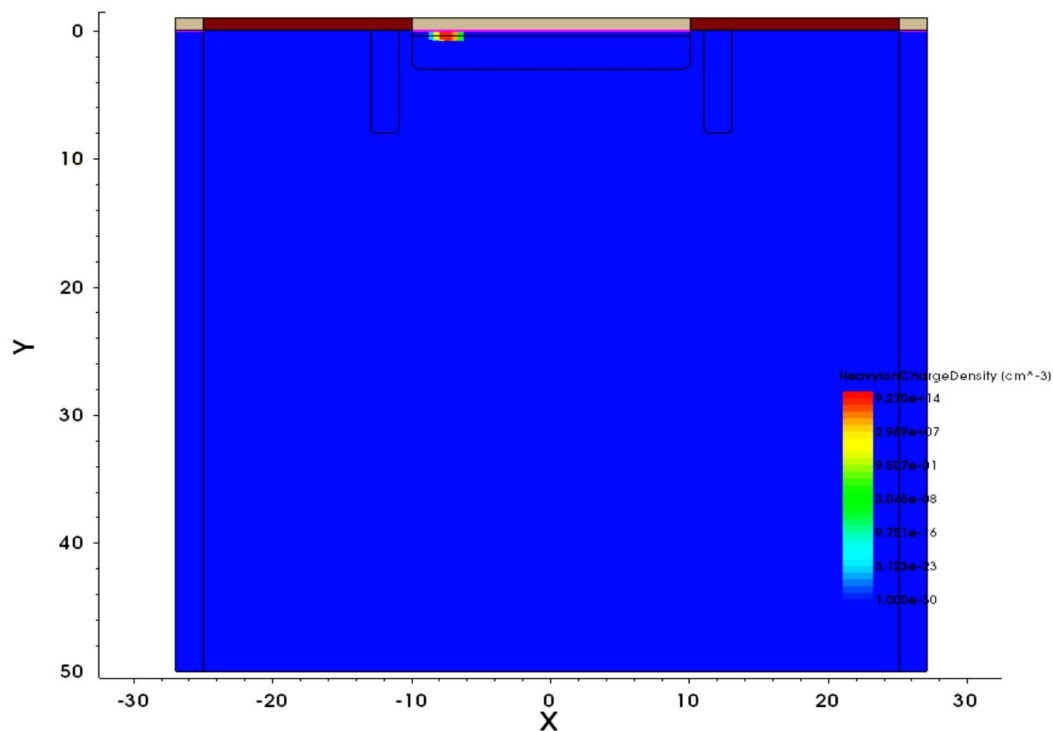
电容CV曲线2



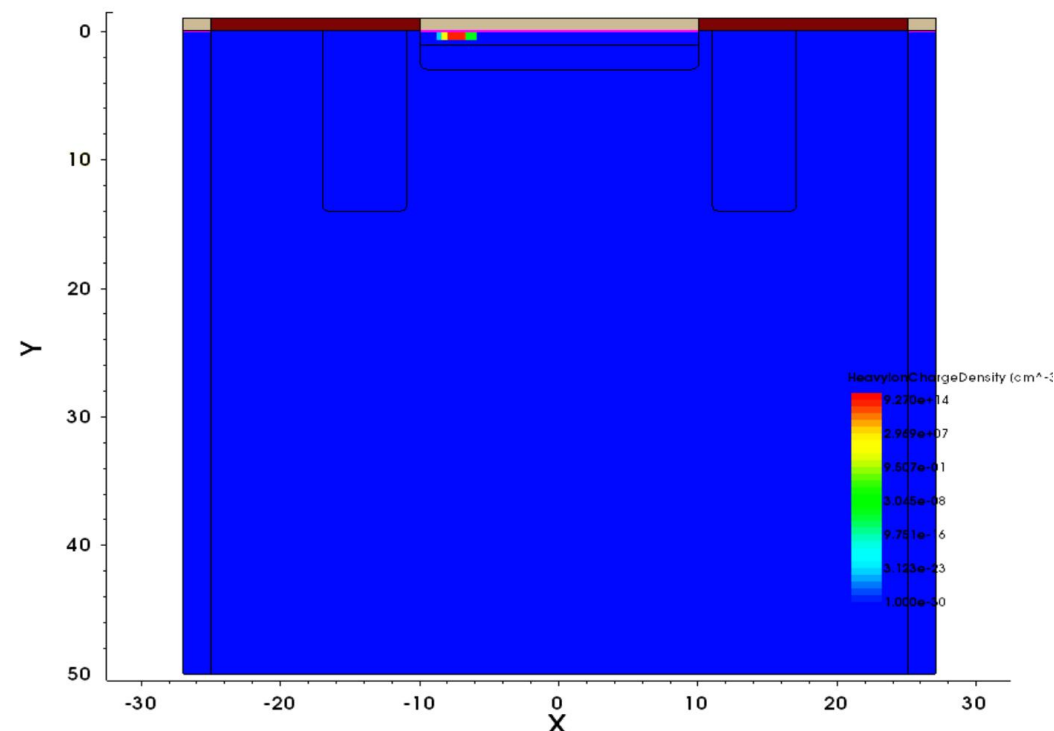
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

通过HeavyIon 模型模拟软X射线单光子入射时的器件响应电流，选用高能粒子能量为1 keV，入射深度为0.7 μm

高能粒子电荷密度1



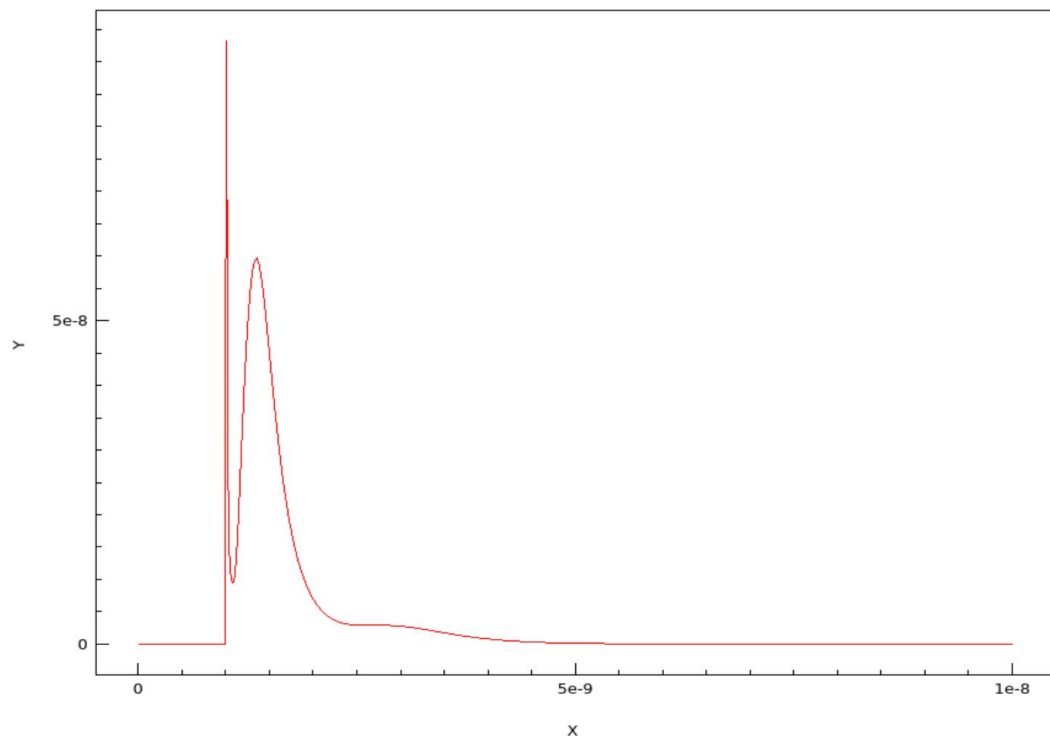
高能粒子电荷密度2



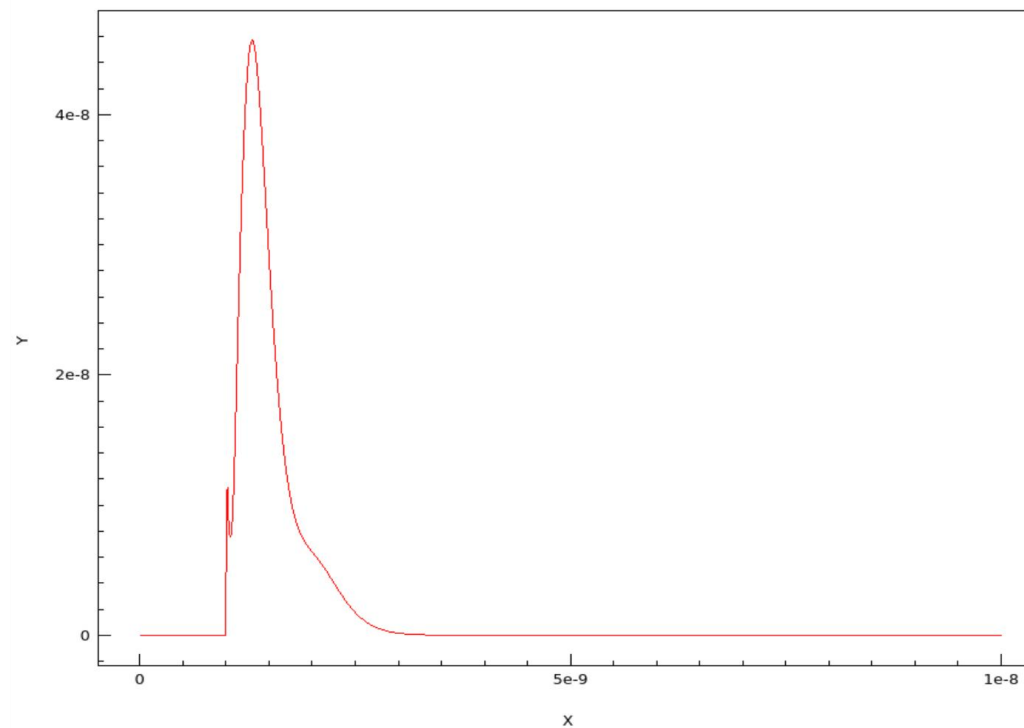
新型三维电极单光子雪崩倍增探测器——二维仿真

通过Heavylon 模型模拟软X射线单光子入射时的器件响应电流，选用高能粒子能量为1 keV，入射深度为0.7 μm

响应电流曲线1



响应电流曲线2



目 录



- 01 ■ 背景调研
- 02 ■ 基本原理
- 03 ■ 器件设计与仿真
- 04 ■ 结果分析
- 05 ■ 未来展望

新型三维电极单光子雪崩倍增探测器

- 本文仿真了新型三维电极雪崩倍增探测器的电势、电场、空穴浓度等电学分布，以及暗电流和电容等电学参数。
- 通过Heavylon 模型模拟软X射线单光子入射时的器件响应电流，可以通过计算得到器件的增益
- 仿真发现在达到响应电流峰值前器件1和2有不同的波动，可能是由于硅体未完全耗尽导致，后续将做进一步研究。



目 录



- 01 ■ 背景调研
- 02 ■ 基本原理
- 03 ■ 器件设计与仿真
- 04 ■ 结果分析
- 05 ■ 未来展望

- 将通过与传统平面电极探测器的仿真结果进行对比，来考察新型器件的倍增性能。
- 进一步对器件进行优化设计，使得该新型三维电极单光子雪崩倍增探测器不仅具有一定的倍增效果，同时保持探测器低暗电流与低电容的性能优势，提高器件响应速度以及灵敏度，有效拓宽低能软X射线的探测下限。
- 在仿真完成后将进行对该器件的版图绘制、工艺开发和流片测试。



- [1] ACERBI F, GUNDACKER S. Understanding and simulating SiPMs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators , Spectrometers , Detectors and Associated Equipment, 2019, 926:16-35.
- [2] 孙鸣捷,王知冠.基于单光子雪崩二极管阵列的成像技术研究进展 (特邀) [J].光子学报,2022,51(08):188-204.
- [3] S. Shimada, et al., "A Back Illuminated 6 μm SPAD Pixel Array with High PDE and Timing Jitter Performance," IEDM, pp. 20.1.1-4, Dec. 2021.
- [4] 董联庆,杨立欣,苏云,等.空间X射线探测技术发展新趋势[J].航天返回与遥感,2022,43(04):67-77.

谢谢聆听
请老师同学批评指正

内容回顾

- 背景调研
- 基本原理
- 器件设计与仿真
- 结果分析
- 未来展望