

一.TCAD 是什么？为什么要做 TCAD？

1.TCAD 定义

TCAD (Technology Computer Aided Design, 半导体工艺计算机辅助设计) 是一种利用计算机数值计算方法, 对半导体器件制造过程和电学性能进行模拟分析的技术。

在半导体器件中, 载流子的运动受到: 泊松方程 (Poisson Equation), 电子连续性方程 (Electron Continuity Equation), 空穴连续性方程 (Hole Continuity Equation) 的共同约束。TCAD 通过建立器件结构、定义材料参数、掺杂分布以及边界条件, 然后利用数值方法求解这些方程, 从而得到器件内部: 电势分布、电场分布、载流子浓度、电流响应等微观物理信息。

2.为什么需要 TCAD

- ① **观察器件内部物理过程:** 传统实验只能测量电流、电压、电容等宏观参数。但是无法直接观察: PN 结内部电场、耗尽区域变化、雪崩倍增区域。*TCAD 可以直接得到这些信息。*
- ② **降低器件研发成本:** 实际制造半导体器件需要经历光刻、离子注入、热扩散、刻蚀等过程, 成本高且周期长。*通过 TCAD 可以提前优化掺杂浓度和结构尺寸等参数, 减少实验次数。*
- ③ **研究辐照损伤:** 粒子探测器长期工作在辐射环境中, 会产生: 晶格缺陷和漏电增加, 导致增益下降。*TCAD 可以加入缺陷模型, 模拟辐照后的器件性能。*

3.仿真流程

器件结构设计→掺杂分布设置→网格划分→电极定义→SDevice 求解→电学参数提取
→结果分析

二.TCAD 是不是网格越精细越好？

不是！

1. TCAD 采用有限元方法（Finite Element Method）。

计算区域被划分成大量网格，每个网格节点需要求解：电势、电子浓度、空穴浓度等具体参数。如果网格过细，虽然可以提高精度，但节点数量大量增加，导致计算时间增加和内存占用增加。

2.正确网格划分方法：自适应网格

物理变化剧烈区域采用细网格；变化平缓区域采用粗网格。

eg.本节课中展示代码即可实现根据掺杂浓度梯度自动调整网格。

```
(sdedr:define-refinement-function  
"RD.Global"  
"DopingConcentration"  
"MaxTransDiff" 1.0)
```

三.给 PIN 添加 JTE 结构并分析击穿电压变化

1.JTE 结构：在 N++边缘加入低浓度 N 型区域。

作用：降低边缘电场峰值，提高击穿电压。

2.添加 JTE 结构并查看图形：

①新增 JTE 结构：

```
(sdedr:define-gaussian-profile  
"DD.JTE"  
"PhosphorusActiveConcentration"  
"PeakPos" 0  
"PeakVal" 1e16
```

"ValueAtDepth" 1e11

"Depth" 5

"Gauss"

"Factor" 0.8)

②放置 JTE:

(sdedr:define-refeval-window

"Baseline.JTE"

"Line"

(position -500 1000 0)

(position 500 1000 0)

)

(sdedr:define-analytical-profile-placement

"PL.JTE"

"DD.JTE"

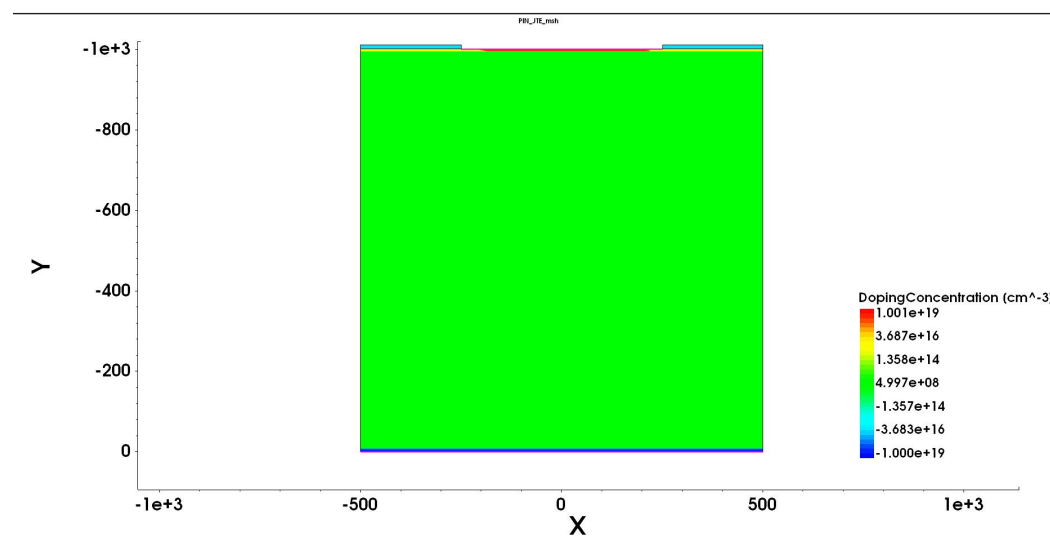
"Baseline.JTE"

"Positive"

"NoReplace"

"Eval")

③查看图形:

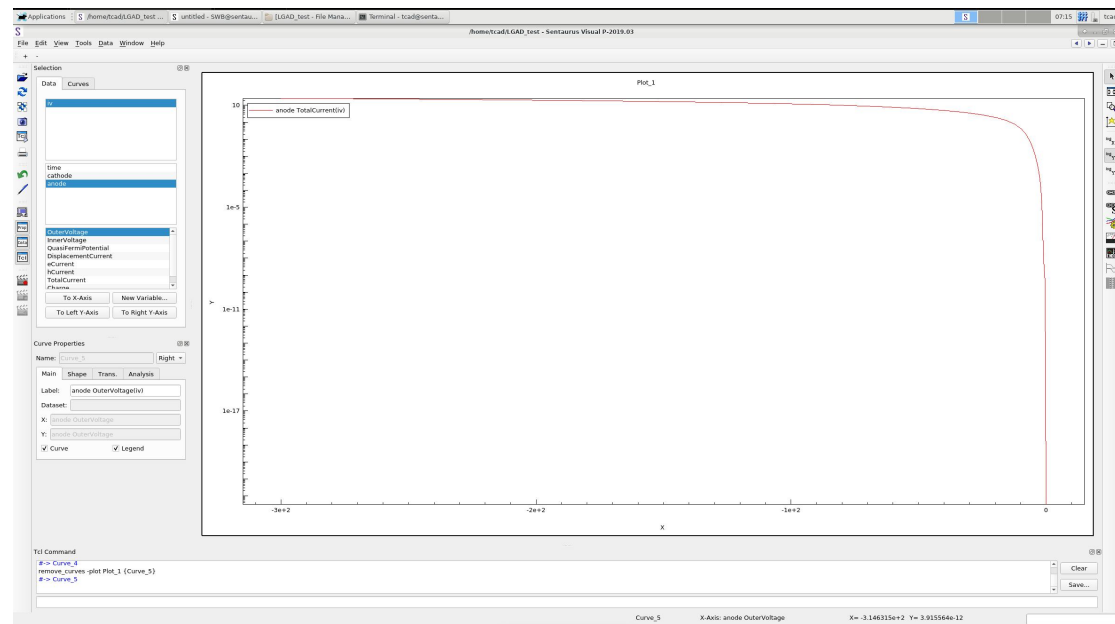


④分析 I-V 图线

参数	数值
硅厚度	1000 μm
漂移层浓度	$1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
N++峰值浓度	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
JTE 浓度	$1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
注入深度	5 μm

设置 Anode 反向扫描为：0V $\rightarrow$ -300V，提取： $I - V$ 曲线。

结果显示：器件在低电压区域保持低漏电流。当反向电压达到约 $V_{BD} = 280\text{V}$ 时，电流快速增加，说明器件发生雪崩击穿。

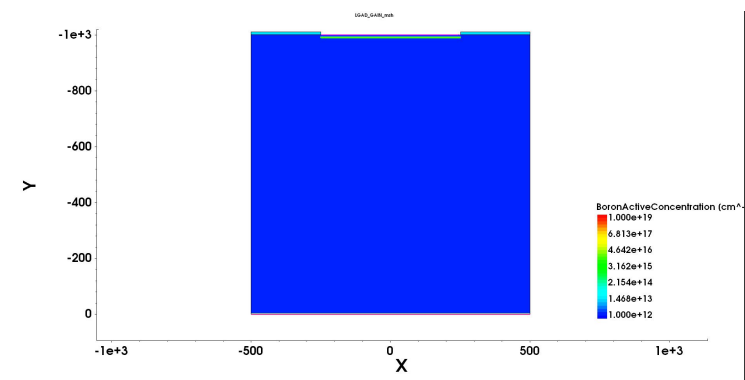


四.添加 P+增益层

1.N+作为阳极，P+作为阴极，P+增益层(Gain Layer)通过高电场实现载流子倍增。

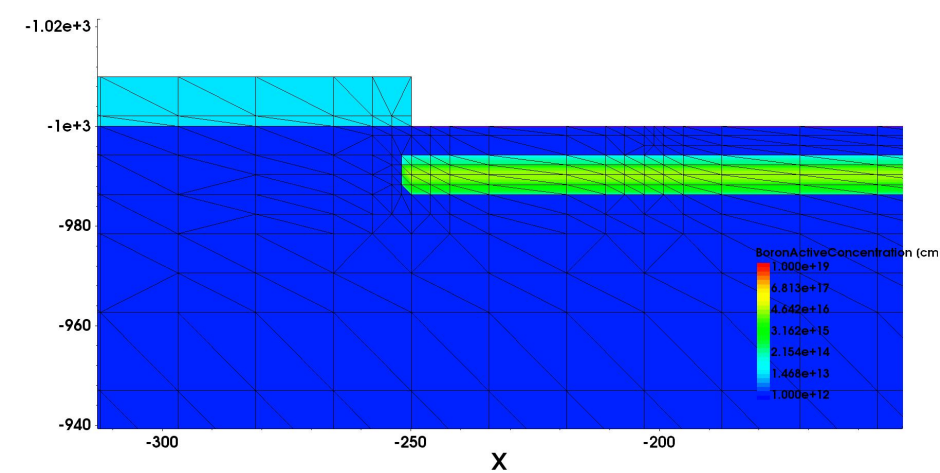
2.参数表

区域	材料	掺杂
硅衬底	Si	B 1e12 cm-3
N+区域	Si	P 1e19 cm-3
Gain Layer	Si	B 5e16 cm-3
P++接触	Si	B 1e19 cm-3



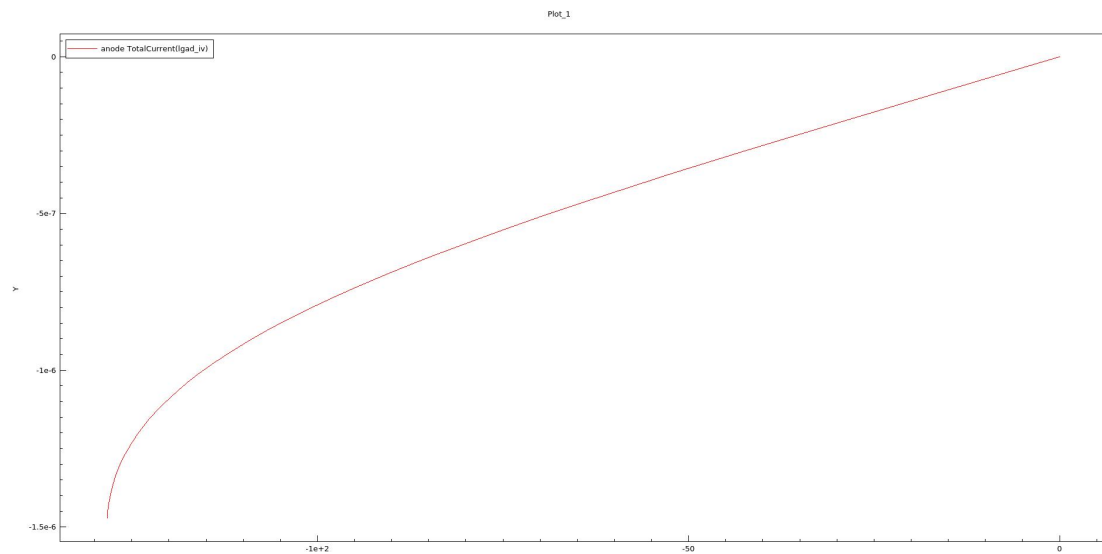
中间一条浅红色区域即为增益层 Gain Layer

3.网格划分



为提高结区计算精度，在掺杂浓度变化明显区域进行网格加密。由于 LGAD 电场峰值集中在增益层附近，因此需要较小网格尺寸描述局部电场变化。

4. LGAD 反向漏电流曲线



随着反向偏压增加，器件漏电流逐渐增大。当电场达到较高水平时，载流子倍增效应增强，使电流出现快速增长趋势。

5. 仿真结果分析

从电场分布结果可以看出，LGAD 内部电场并非均匀分布，而是在反向偏压作用下，LGAD 增益层附近形成局部高电场区域，最大电场集中于 P+增益层附近。

这是由于增益层与衬底之间形成高浓度掺杂结，使空间电荷区电场增强，为后续碰撞电离和载流子倍增提供条件。

