

科创9

1 TCAD 是什么，为什么我们要做 TCAD？

TCAD 是 Technology Computer-Aided Design 的缩写，即半导体工艺与器件计算机辅助设计。它以半导体物理模型为基础，通过数值方法模拟器件制造过程以及器件在不同偏置条件下的电学行为。课件使用的是 Synopsys Sentaurus TCAD，其中最常用的模块包括 SDE、SProcess 和 SDevice。

模块	主要作用	典型输出或用途
SDE	建立器件的几何结构，设置材料、掺杂分布和电极，并进行网格划分。	生成理想化器件结构和网格，供后续器件仿真使用。
SProcess	模拟离子注入、扩散、退火、氧化、沉积和刻蚀等实际工艺步骤。	得到由工艺条件决定、更加接近真实制造结果的器件结构。
SDevice	在给定器件结构、物理模型和边界条件下，求解 Poisson 方程以及电子、空穴连续性方程。	计算 IV、CV、电势、电场、载流子分布和粒子瞬态响应。

为什么需要 TCAD

做探测器时，器件内部的电势、电场、耗尽区和载流子分布很难直接测量。TCAD 可以把这些量算出来并画成分布图。出现漏电、边缘提前击穿或信号收集不完全时，也能结合内部电场和载流子分布查找原因。

实际流片的成本和周期都比较高，不可能把每一种尺寸和掺杂方案都做出来测试。用 TCAD 先扫描结构尺寸、掺杂浓度和工艺参数，可以筛掉明显不合适的方案，再决定后续做哪些样品。

探测器还需要考虑辐照后的变化。仿真中加入缺陷能级、俘获和复合模型后，可以比较辐照前后的漏电流、耗尽电压和电荷收集效率。

TCAD 的结果最终还是要和实验对照，但它能先回答器件内部发生了什么，也能减少反复试制的次数。

2 TCAD 一定是网格越精细越好吗？简单聊聊你对网格划分的理解吧。

不一定。细网格能够看清局部物理量的快速变化，但节点越多，计算时间和内存占用也越大。半导体方程本身是非线性的，网格过细有时还会让收敛变慢。因此，没有必要把整个器件都划得很细。

合理的网格划分方法

- (1) 在硅体区、均匀掺杂区以及电势和载流子变化平缓的区域，可以使用较粗网格，以减少不必要的计算量。
- (2) 在 PN 结、掺杂浓度梯度较大的区域、电极附近、材料界面、器件边缘和局部高电场区域，需要进行网格加密。对于加入 JTE 的结构，N++ 与 JTE 的连接处以及 JTE 外缘也应重点加密。
- (3) 网格尺度应能够解析器件中的关键物理尺度，例如结深、耗尽层变化范围和高场区宽度。如果网格过粗，可能低估局部电场峰值，从而错误预测击穿电压；也可能使 IV、CV 或瞬态响应结果不准确。
- (4) 应进行网格独立性检验。具体方法是逐步细化关键区域，并比较击穿电压、漏电流、耗尽电压或收集电荷等目标量。如果继续加密后结果变化已经很小，就可以认为当前网格满足精度要求。

我的理解是，体区可以用粗网格，PN 结、材料界面和高场区再局部加密。最后还要做一次网格独立性检验，不能只看网格图够不够密。

3 我前面提供了一个 PIN 的示例代码，在这个代码的基础上，给 PIN 添加 JTE 的结构，看看击穿电压有什么变化？（提示：可以用一个比较宽的高斯分布来近似）

4 在（3）的基础上，给器件添加一个增益层吧。如果添加这个增益层之后，你的器件可以正常工作，恭喜你得到了一个 DC-LGAD 的基本结构了！（选做）（提示：同样可以用高斯分布来近似，但是记得浓度不要太高哦）

第 4 题要接着第 3 题做，所以我准备把两题放在一起完成。目前这部分仿真还在练习，等结果确认后再一起补交。

5 我们的 LGAD 通常采用 P 型的高阻硅，采用 N++ 接触 - P+ 增益层 - P 型高阻硅 - P++ 接触的结构。你可以思考一下为什么主流采用这种结构（而不是 P++ 接触 - N+ 增益层 - N 型高阻硅 - N++ 接触的结构）吗？（提示：考虑一下器件全耗尽时，器件内部的电场方向）

这两种结构的差别，主要在于全耗尽后的电场方向不同。电场方向一变，穿过增益层的载流子也会从电子变成空穴。

N-on-P 主流结构	互补结构
N++ / P+ / P- / P++	P++ / N+ / N- / N++
反向偏置后，粒子产生的电子向顶部 N++ 电极漂移，并穿过 N++/P+ 附近的高场增益区；空穴向底部 P++ 电极漂移。	反向偏置后，空穴向顶部 P++ 电极漂移，并穿过 P++/N+ 附近的高场增益区；电子向底部 N++ 电极漂移。

在 N++ / P+ / P- / P++ 结构中，反向偏置会把电子拉向顶部的 N++ 电极。电子在被收集之前会经过 N++ 下方的 P+ 增益层，并在高场区发生碰撞电离。空穴则向背面的 P++ 电极运动。

硅中电子的碰撞电离系数通常高于空穴，迁移率和饱和漂移速度也更高。由电子进入增益区，更容易得到需要的倍增，信号建立也更快，这对 LGAD 的时间分辨率比较有利。

如果换成 P++ / N+ / N- / N++ 结构，进入顶部增益区并承担主要倍增的是空穴。空穴的碰撞电离能力和漂移速度都低一些，要得到相近的增益会更困难。

所以主流 LGAD 采用 N++ / P+ / P- / P++，主要是为了让电子穿过增益层并触发倍增。