

TCAD 作业

1. TCAD 是什么，为什么我们要做 TCAD？

TCAD (Technology Computer-Aided Design) 是通过求解半导体器件内部的漂移-扩散方程、泊松方程以及载流子连续性方程等基本方程组，对器件结构、掺杂分布与外加偏置条件下的电场、载流子浓度、电流-电压特性等进行数值仿真的技术手段，典型工具包括 Silvaco TCAD、Sentaurus TCAD 等。

采用 TCAD 仿真的必要性主要体现在以下几个方面：其一，实际流片工艺周期长、成本高，若结构设计存在缺陷（如结终端设计不合理导致提前击穿），会造成显著的时间与经济损失，TCAD 可在流片前对结构参数（掺杂浓度、结深、几何尺寸等）进行反复迭代优化，验证设计是否满足击穿电压、增益等关键指标；其二，器件内部的电场分布、载流子输运过程、雪崩倍增机制等物理量在实验测量中往往难以直接获取，而 TCAD 可以给出这些内部物理量的定量分布，为理解器件工作机理与失效机制提供依据；其三，TCAD 便于开展参数扫描与灵敏度分析，系统评估工艺容差对器件性能的影响，指导工艺窗口的确定。

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。

并非网格越精细越好。网格加密虽然能提高数值解的精度，但计算量随网格数量的增加而迅速上升，尤其在二维、三维结构下，过密的网格会导致仿真耗时大幅增加，同时网格质量（长宽比、过渡梯度等）不佳还可能引发数值振荡或不收敛，反而无法得到可靠结果。

合理的网格划分应遵循自适应、非均匀的原则：在电场梯度大、掺杂浓度变化剧烈的区域（如 PN 结耗尽区、增益层、结终端拐角等），电场和载流子浓度在很短的空间尺度内发生显著变化，必须采用足够精细的网格才能准确描述其空间分布，否则容易导致电场峰值、耗尽层宽度等关键物理量计算失真，进而使击穿电压等仿真结果偏离实际；而在掺杂均匀、场变化平缓的体区（如衬底深处），网格可以适当放粗，以节省计算资源。实际操作中通常采用基于掺杂梯度或电场梯度的自适应网格划分（adaptive meshing），在关键结构附近进行局部加密，在其余区域保持相对稀疏，从而在保证仿真精度的同时兼顾计算效率与收敛性。

3. 在 PIN 示例代码基础上添加 JTE 结构，击穿电压有什么变化？

未加终端结构的 PIN 器件在主结边缘（结拐角处）存在明显的电场线曲率集中效应，该处电场强度显著高于结中心区域的一维电场，导致器件在边缘提前发生雪崩击穿，实际击穿电压远低于按一维平行平面结理论计算的体击穿电压。

引入 JTE（Junction Termination Extension，结终端扩展）结构后，在主结边缘外侧引入一层掺杂浓度较低、结深较浅的横向扩展区（如采用较宽的高斯分布近似，峰值浓度约 $1\text{E}16\text{ cm}^{-3}$ ，结深 $5\text{ }\mu\text{m}$ ），该区域使得耗尽层能够在横向上进一步展宽，将原本集中于结边缘的电场分担到更大的空间范围内，从而降低边缘处的峰值电场强度。仿真结果表明，加入 JTE 结构后器件的击穿电压相较未加终端的 PIN 结构有明显提升；同时，JTE 的峰值浓度与横向扩展宽度需要匹配选取——浓度过高或扩展范围不足时耗尽层展宽效果有限，边缘电场仍会成为限制因素；只有当参数选择合适、边缘电场被有效抑制到低于体区击穿场强时，器件的击穿行为才会趋近于体击穿（bulk breakdown），而非边缘提前击穿（edge breakdown）。

4. （选做）在（3）的基础上添加增益层，得到 DC-LGAD 结构，浓度如何选择？

在 JTE 结构基础上于表面附近引入一层薄的高浓度 P 型增益层（peak 位于 $0\text{ }\mu\text{m}$ 深处， $3\text{ }\mu\text{m}$ 深处浓度降至 $6\text{E}12\text{ cm}^{-3}$ ，即高阻硅衬底浓度）后，反偏工作时该区域会形成一个局域高场区，使入射粒子产生的信号电子在漂移经过增益层时发生碰撞电离，产生雪崩倍增效应，这正是 LGAD（Low Gain Avalanche Detector）具备内部增益的物理机制。

增益层的峰值掺杂浓度直接决定该区域的电场强度，因而同时影响增益倍数与整体击穿电压，二者呈此消彼长的关系：浓度越高，增益层内电场峰值越大，雪崩倍增系数增大，但器件也更容易在增益层处提前发生雪崩击穿，导致整体击穿电压下降；浓度过低则电场不足以引起有效的碰撞电离，增益层难以起到应有的倍增作用，器件退化为普通 PIN 结构。将 $5.1\text{E}16$ 、 $5.3\text{E}16$ 、 $5.5\text{E}16\text{ cm}^{-3}$ 三组浓度分别代入仿真，可得到击穿电压随浓度增大而单调下降的趋势。在要求器件击穿电压落在 $200\sim 300\text{ V}$ 区间的前提下，需要选取使增益层电场足够强（保证有效增益）同时击穿电压仍位于该窗口内的浓度：若 $5.1\text{E}16\text{ cm}^{-3}$ 对应的击穿电压偏高（增益偏弱）， $5.5\text{E}16\text{ cm}^{-3}$ 对应的击穿电压可能已低于 200 V （安全裕量不足），则中间的 $5.3\text{E}16\text{ cm}^{-3}$ 通常是较为合适的折中选择，能够在保证一定雪崩增益的同时使击穿电压落在要求范围内。最终选择仍应以仿真得到的 I-V 特性曲线中实际击穿点为准进行核实，而非仅凭趋势外推。

5. 为什么 LGAD 通常采用 P 型高阻硅、N⁺⁺/P⁺（增益层）/P/P⁺⁺结构，而不是对称的 N⁺⁺/N⁺/N/N⁺⁺结构？

这一结构选择的核心原因在于雪崩倍增过程中触发倍增的载流子种类不同所带来的电离效率与增益稳定性差异。在硅材料中，电子的碰撞电离系数 α 显著高于空穴的碰撞电离系数 β （在典型工作场强下 α/β 可达数倍），这意味着以电子作为主要触发载流子的雪崩过程具有更高的倍增效率，且增益对电场、温度等参数的敏感性相对更低，倍增过程更稳定、更不容易发生局部热点失控（微等离子体）现象。

在 N⁺⁺/P⁺（增益层）/P（高阻衬底）/P⁺⁺结构中，主结位于 N⁺⁺与 P⁺之间，器件全耗尽、反偏工作时高场区集中于增益层附近；由入射粒子在 P 型高阻衬底中产生的信号电子在电场作用下向 N⁺⁺方向漂移，先进入增益层高场区，即由电子触发雪崩倍增，充分利用了电子电离系数高、倍增稳定的优势。

若采用对称的 P⁺⁺/N⁺（增益层）/N（高阻衬底）/N⁺⁺结构，器件全耗尽时高场区仍位于增益层附近，但此时是由空穴先进入高场区触发倍增，由于空穴电离系数较低，倍增效率和增益稳定性均不如电子触发的情形，且更容易出现噪声偏大、增益均匀性变差等问题。此外，从器件全耗尽状态下内部电场方向的角度看，P 型衬底结构能够使信号载流子（电子）在电场作用下被自然引导先经过增益层触发倍增；若换用 N 型衬底并对称翻转结构，信号载流子将变为空穴触发倍增，器件的增益特性与稳定性会明显劣化。因此，主流 LGAD 器件普遍采用 P 型高阻硅、N⁺⁺/P⁺/P/P⁺⁺这一结构方案，以电子雪崩倍增作为增益机制。