

一、

1. TCAD 是什么？

TCAD 是半导体工艺与器件计算机辅助设计，是一套基于半导体物理方程（Poisson 方程、电子连续性方程和空穴连续性方程约束等）的数值仿真工具，分为两大分支：

（1）工艺 TCAD：仿真离子注入、扩散、刻蚀、薄膜生长、光刻等晶圆制造工艺流程，输出器件掺杂分布、几何形貌；

（2）器件 TCAD：基于工艺得到的器件结构，仿真电学特性如 IV、CV、击穿电压、增益、电场、载流子分布、辐射响应等。

半导体内部载流子的运动由Poisson方程、电子连续性方程和空穴连续性方程约束。

Poisson Equation:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{q}{\epsilon} (p - n + N_D^+ - N_A^-)$$

Electron Continuity Equation:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_n + G_n - R_n$$

Hole Continuity Equation:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \mathbf{J}_p + G_p - R_p$$

2. 为什么要做 TCAD？

（1）降低流片成本与周期：晶圆流片成本极高、周期长，通过 TCAD 提前仿真结构性能，迭代优化设计，减少多次试流；

（2）观测器件内部微观物理量：流片后只能测外部电流电压，TCAD 可直观输出内部电场、载流子浓度、碰撞电离率、耗尽区分布，定位击穿、漏电、增益衰减等失效机理；

（3）新工艺/新器件研发：如 LGAD、SPAD、功率器件、辐射探测器，无成熟工艺参考，依靠 TCAD 预判性能，指导版图与工艺参数；

（4）工艺窗口优化：仿真掺杂剂量、退火温度、外延厚度对器件性能的影响，确定稳定可靠的工艺参数区间；

（5）失效与可靠性分析：仿真雪崩击穿、隧穿漏电、热载流子退化、辐射损伤等失效行为，提前规避可靠性风险。

二、

1. 网格划分理解

（1）网格过细的弊端

① 仿真时间爆炸、内存占用极高：网格数量正比于计算节点，精细网格会大幅提升泊松方程、连续性方程迭代求解量，二维/三维仿真耗时从小时拉长至数天，甚至工作站内存溢出报错；

② 数值收敛难度上升：极小网格会引入数值噪声，迭代残差难下降，容易出现不收敛、振荡、仿真报错。

(2) 网格划分核心原则（分区差异化）

① 高梯度区域密网格：电场/掺杂浓度剧烈变化区域必须加密：PN 结界面、雪崩增益层、JTE 结终端、器件表面、金属接触边缘、耗尽区边界；

② 平缓区域粗网格：高阻衬底、中性区、远离结的基底，掺杂/电场几乎无变化，使用粗网格减少计算量；

③ 自适应网格策略：

1) 工艺仿真：离子注入峰值、结界面自动细化；

2) 器件仿真：先粗网格完成直流预仿真，再根据电场梯度自动加密高场区域；

④ 网格尺寸约束：增益层、JTE 等高场区网格尺寸需小于载流子平均自由程/耗尽区特征长度，保证雪崩、击穿物理量计算精度；衬底网格可放大 5~20 倍。

三、

添加 JTE 后，击穿电压显著提升：

(1) 原生 PIN 结拐角电场集中，峰值电场提前达到硅碰撞电离临界电场，低压雪崩击穿；

(2) JTE 渐变掺杂将边界尖锐 PN 结拆分为缓变结，横向分摊边缘峰值电场，降低拐角最大电场；

(3) 反向高压下最大电场从器件侧壁转移至 I 层体内，器件能承受更高反向偏压，击穿电压大幅提高，同时抑制边缘表面漏电。

四、

1. 载流子电离效率差异

(1) 硅中电子碰撞电离系数 α 远大于空穴电离系数 β ，电子更容易触发雪崩倍增；

(2) 标准 LGAD：探测层是 P 型高阻，辐射产生电子-空穴对，电子漂移向阴极侧 P+增益层，电子进入高场增益层产生雪崩，倍增效率高；

(3) 反结构 N 高阻衬底：辐射产生的空穴漂移向 N+增益层，空穴电离系数低，同等电场下增益极低，无法实现有效信号放大。

2. 全耗尽时内部电场方向匹配

P 高阻探测层内部电场方向：阳极（**P++**）→阴极（**N++**）；电场推动电子向阴极侧的 **P+** 增益层汇聚，增益层位于电场下游，所有信号电子都会穿过增益层，全局均匀增益；若为 **N** 高阻衬底，电场方向阴极→阳极，空穴向阳极增益层漂移，空穴电离

3. 抑制表面漏电与边缘击穿

标准结构阳极侧为同型 **P++/P** 高阻，搭配 **P** 型 JTE，同掺杂类型终端平缓电场；若采用 **N** 增益层+**N** 衬底，阳极 **P++** 与 **N** 衬底形成尖锐反型结，侧壁电场集中严重，漏电流大、击穿电压退化。

4. 电荷收集一致性

粒子在整个 **P** 高阻吸收层产生电子，全部向增益层漂移，无电荷丢失；反结构中空穴迁移率低，漂移速度慢，电荷收集时间变长，时间分辨率变差