

第九次作业——半导体探测与 TCAD 仿真

赵强

1. TCAD 是什么，为什么我们要做 TCAD？

首先先来说说它的定义——TCAD 是 Technology Computer-Aided Design 的缩写，中文叫"技术计算机辅助设计"。就是说，它是半导体和器件借助计算机来辅助设计，来对器件的三个物理方程求解，从而对电子、空穴、载流子等进行推导求解

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:

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

老师在课上讲到，它主要分为三 PART：

SDE 用于画器件结构和定义掺杂分布：画器件几何形状（理想化）、构造网格

Sprocess 用于模拟工艺步骤如离子注入和扩散，通过模拟物化工艺得到结构

Sdevice 用于求解器件的电学特性，经器件仿真后对于方程进行数值求解

我们为什么要做呢？

原因 1:可以看到实验无法直接看到的内部信息,将其可视化。半导体器件内部发生的事情是肉眼看不见的,耗尽区在位置在哪？电压击穿的位置在哪？电场峰值是多少？这些问题我们都可以通过 TCAD 都能算出来并以图形方式显示出来

原因 2：降低器件研发成本，低成本设计优化。实际工厂里制造器件具有周期长、成本高的问题，而且一旦做成结构就固定了，想改参数得重新来。TCAD 可以在计算机里快速尝试几十种参数组合，简单挑几个参数就能马上就能看到效果。我们可以通过在电脑上仿真后得

到最具有性价比的选择

原因 3: TCAD 可以引入辐射损伤模型，解决复杂问题。我们在设计探测器时一定要考虑器件在经过辐照后的表现。TCAD 可以通过引入辐射损伤模型相对简单的进行相应的研究。比如模拟晶格缺陷的产生、陷阱能级的形成,以及这些缺陷如何影响载流子寿命和电场分布。这在实际实验中很难单独控制变量去研究，但在仿真里相对容易实现。

问题 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。

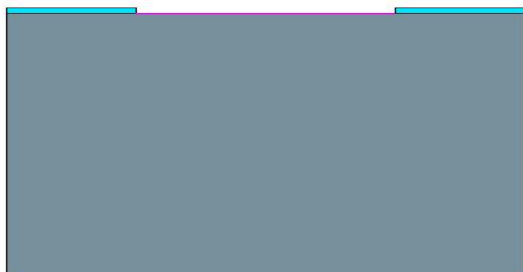
TCAD 不是网格越细越好。网格划分需要在计算精度和计算效率之间取得平衡。

因为当我们把网格划分的更细，计算量会增加，数值收敛变困难，存储量也会增加，所以我们应该挑选关键区域进行细化观察！均匀变化差异不大的地方可以适当粗化

对于掺杂均匀、电场变化缓慢区域，可以使用较粗网格；对于 PN 结、增益层等掺杂梯度和电场变化剧烈区域，需要进行网格加密。

因此合理的方法是根据物理变化选择局部细化网格。

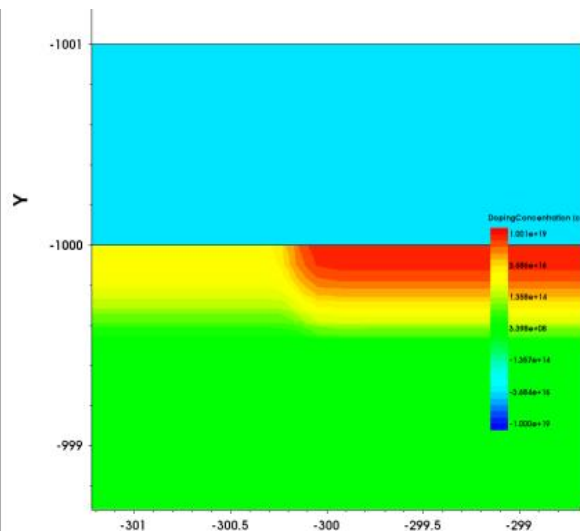
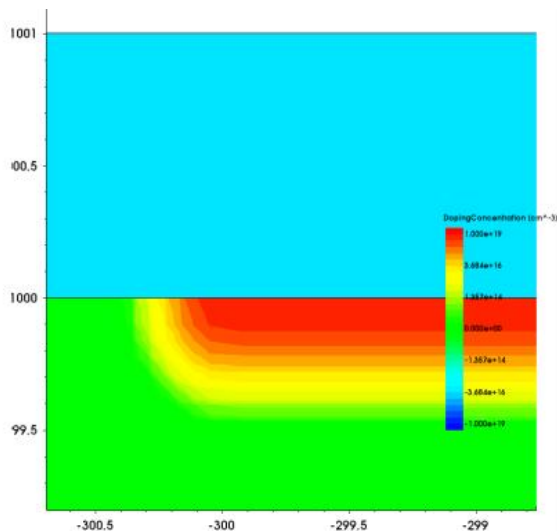
问题 3: 根据提供的一个 PIN 的示例代码的基础上，给 PIN 添加 JTE 的结构，看看击穿电压有什么变化？（提示：可以用一个比较宽的高斯分布来近似）



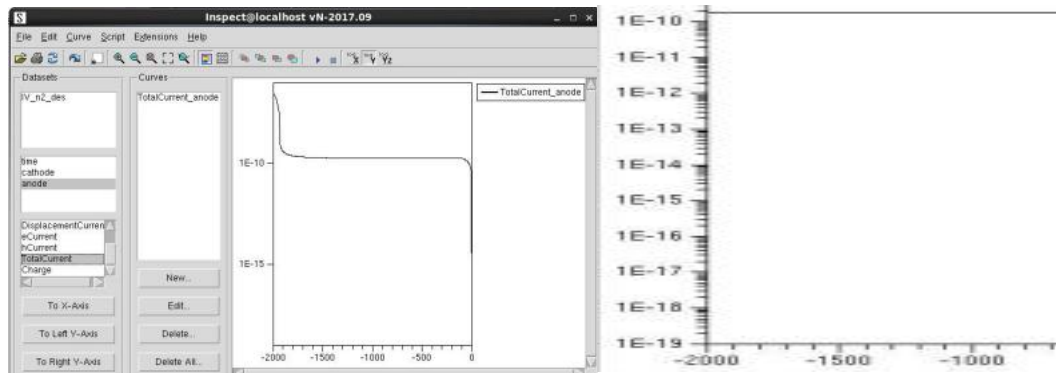
```

(position (* Xmax 0.5) Ymax 0.0)
(position (* Xmax 1.0) (- Ymax Hoxide) 0.0)
"Si02" "Si02L")
(sdegeo:create-rectangle
(position (* Xmax -0.5) Ymax 0.0)
(position (* Xmax -1.0) (- Ymax Hoxide) 0.0)
"Si02" "Si022")
(sdegeo:define-contact-set "anode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "#s")
(sdegeo:define-contact-set "cathode" 4.0 (color:rgb 0.0 0.0 1.0) "#s")
(sdegeo:define-2d-contact
(find-edge-id (position 0.0 Ymax 0.0)) "anode")
(sdegeo:define-2d-contact
(find-edge-id (position 0.0 0.0 0.0)) "cathode")
(sedr:define-constant-profile "Const.EPI"
"BoronActiveConcentration" 1e11)
(sedr:define-constant-profile-material "PL.EPI"
"Const.EPI" "Silicon")
(sedr:define-gaussian-profile "DD.cathode" "BoronActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e19 "ValueAtDepth" 1e11 "Depth" depth "Gauss" "Factor" 0.8)
(sedr:define-refeval-window "Baseline.cathode"
"Line"
(position (* Xmax -1) 0 0)
(position (* Xmax 1) 0 0))
(sedr:define-analytical-profile-placement "PL.cathode"
"DD.cathode" "Baseline.cathode"
"Negative" "NoReplace" "Eval")
(sedr:define-gaussian-profile "DD.anode" "PhosphorusActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e19 "ValueAtDepth" 1e11 "Depth" depth "Gauss" "Factor" 0.8)
(sedr:define-refeval-window "Baseline.anode" "SSS"
"Line"
(position (* Xanode -1) Ymax 0)
(position (* Xanode 1) Ymax 0))
(sedr:define-analytical-profile-placement "PL.anode"
"DD.anode" "Baseline.anode"
"Positive" "NoReplace" "Eval")
(sedr:define-gaussian-profile "DD.jte" "PhosphorusActiveConcentration" "PeakPos" 0 "PeakVal" 1e16 "ValueAtDepth" 1e11 "Depth" depth "Gauss" "Factor" 0.8)
(sedr:define-refeval-window "Baseline.jte"
"Line"
(position (* Xanode -1.2) Ymax 0)
(position (* Xanode -1) Ymax 0))
(sedr:define-analytical-profile-placement "PL.jte"
"DD.jte" "Baseline.jte"
"Positive" "NoReplace" "Eval")
(sedr:define-refeval-window "Baseline.jter"
"Line"
(position (* Xanode 1) Ymax 0)
(position (* Xanode 1.2) Ymax 0))
(sedr:define-analytical-profile-placement "PL.jter"
"DD.jte" "Baseline.jter"
"Positive" "NoReplace" "Eval")
(sedr:define-gaussian-profile "DD.gain" "BoronActiveConcentration" "PeakPos" depth "PeakVal" 1e16 "ValueAtDepth" 1e11 "Depth" (* depth 2) "Gauss" "Factor" 0.8)
(sedr:define-refeval-window "Baseline.gain"
"Line"
(position (* Xanode -1) (+ Ymax (* depth 0.3)) 0)
(position (* Xanode 1) (+ Ymax (* depth 0.3)) 0))
(sedr:define-analytical-profile-placement "PL.gain"
"DD.gain" "Baseline.gain"
"Positive" "NoReplace" "Eval")
(sedr:define-refeval-window "FW.Global" "Rectangle" (position -10000 -10000 0) (position 10000 10000 0))
(sedr:define-refinement-size "RD.Global" (* Ltot 4e-2) (* Htot 4e-2) (* depth 0.1) (* depth 0.1) )
(sedr:define-refinement-function "RD.Global" "DopingConcentration" "MaxTransDiff" 1.0)

```



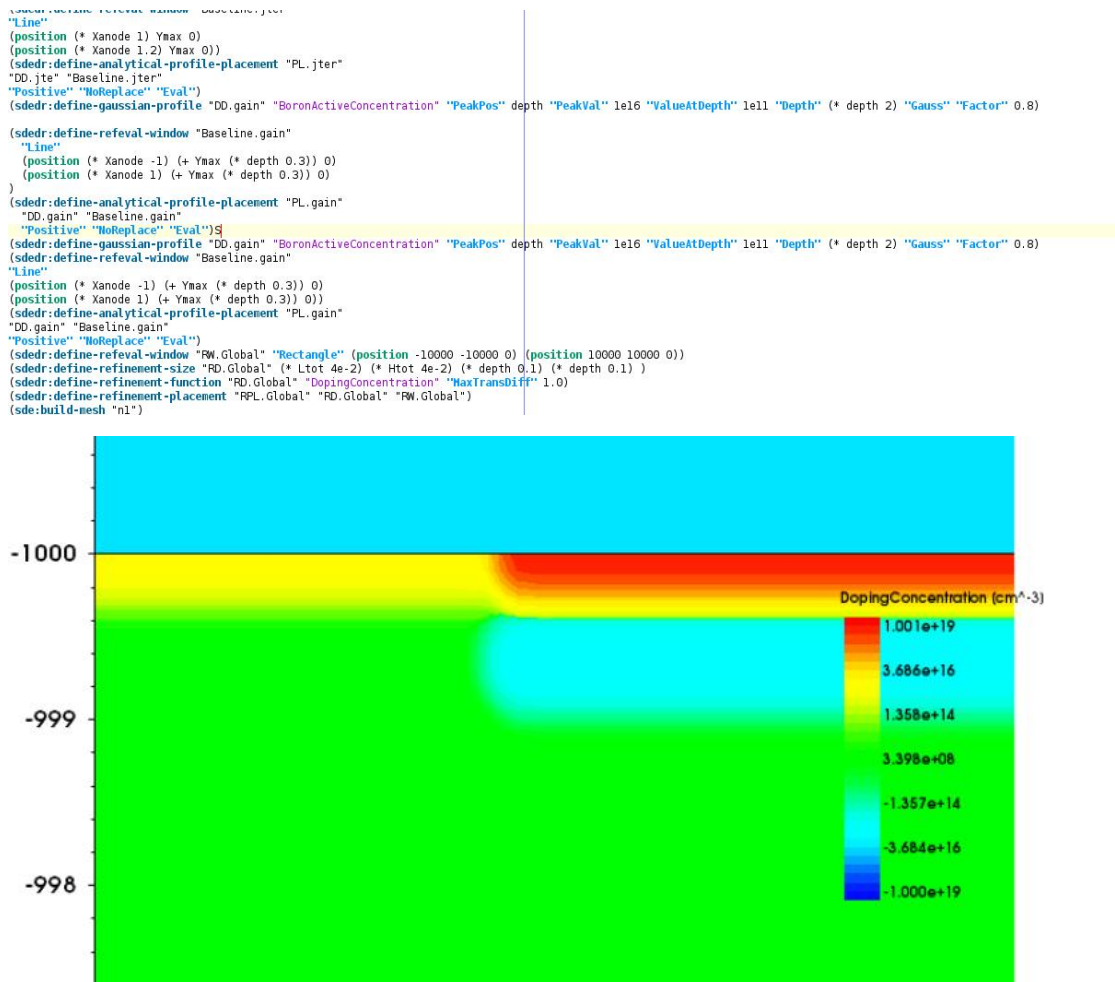
击穿电压变化改变的话，原 PIN 约在近 2000V 击穿，但加入 JTE 结构后，在 2000V 处没有发生击穿，说明它的击穿电压确实得以变大了，验证了老师在课上说的观点



问题 4：在（3）基础上，给器件添加一个增益层 P+

在 PIN 基础上加入 P+增益层形成 DC-LGAD 结构。P+层形成局部高电场区域，使漂移载流子发生碰撞电离，实现内部增益。产生更多电子空穴。这就是雪崩增益。注意：不要太高。

容易提前击穿。看粒子响应，如果电流放大说明 LGAD 成功



问题 5：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）

LGAD（Low Gain Avalanche Detector，低增益雪崩探测器）的核心思想是在器件内部加入一个局部高电场区域（增益层），使漂移载流子经过该区域时发生碰撞电离，从而产生内部电荷放大。

虽然从结构上看，N 型和 P 型结构似乎都可以实现类似的设计，但实际应用中主流 LGAD 选择：N++接触 — P+增益层 — P 型高阻硅 — P++接触，主要原因与全耗尽状态下器件内部电场方向以及载流子运动方向有关。

LGAD 工作时，需要给器件施加反向偏压，使整个 P 型高阻硅区域完全耗尽

N++区域为电子收集端；

P+区域为增益层；

P 型高阻硅为耗尽区。

在反向偏压作用下，P 型硅中的受主杂质电离，形成固定负电荷，因此器件内部形成由 N++指向 P++方向的电场。由于电子带负电，其漂移方向与电场方向相反，因此电子会向 N++电极运动进入高电场区域发生碰撞电离，产生更多电子-空穴对。因此，电子能够有效穿过 P+增益层，是 LGAD 获得增益的关键。

我们如果采用反向结构，增益效果会降低：由于 N 型材料中的施主杂质电离后形成正空间电荷，因此全耗尽状态下内部电场方向发生改变。电子受到电场作用会向远离增益层的方向运动，而主要漂移的空穴才可能经过 N+区域。因此，让空穴作为主要经过增益层的载流子，会导致增益不稳定、雪崩效率降低

所以说电子比空穴更适合作为雪崩载流子,电子更容易获得足够能力撞击晶格产生新电子空穴对

总结主要原因是: 我们选择 N^{++} 接触—— P^{+} 增益层—— P 型高阻硅—— P^{++} 接触的结构

全耗尽后, 该结构能够形成合适的电场方向, 使电子漂移经过 P^{+} 增益层;

硅中电子具有更高的迁移率和更强的碰撞电离能力, 更适合作为雪崩倍增载流子;

电子通过 P^{+} 高场区域时可以产生稳定的碰撞电离, 实现低增益雪崩放大;

反向结构中主要依靠空穴参与倍增, 而空穴电离能力较弱, 导致增益效率和稳定性较差。