

一、TCAD 是什么，为什么我们要做 TCAD？

TCAD 全称是 **Technology Computer-Aided Design**（工艺计算机辅助设计）。针对 Synopsys 公司的 Sentaurus TCAD，最常用的三个模块是：

SDE（结构编辑器）：绘制器件的几何形状，定义不同区域的类型和掺杂分布，并生成网格。

SPROCESS（工艺仿真）：通过输入的工艺指令（如离子注入的剂量、能量等）进行对应的物理化学反应模拟，生成更接近实际器件的结构。

SDEVICE（器件仿真）：根据器件结构以及设置的电学仿真条件，对网格节点进行泊松-电子-空穴方程的数值求解，获得器件的电学特性。

为什么我们要做 TCAD？

1. 可视化器件内部物理过程：TCAD 可以帮助我们看见器件内部的载流子分布、电场分布、电势分布，帮助我们更好地理解器件的工作状态和物理机理。
2. 降低设计成本、提高效率：通过 TCAD 可以尝试非常多的参数组合，而实际在工厂里做一个器件再测试，只能尝试有限的几种方案，且时间和经济成本都非常高。
3. 方便研究辐照效应：我们在设计探测器时，一定会考虑器件经过辐照后的表现。

TCAD 可以通过引入辐射损伤模型，相对简单地进行辐照效应的研究。

二、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。

TCAD 不一定是网格越精细越好。

粗网格虽然计算量小，速度快，但是精度不足，可能无法正确捕捉物理量的剧烈变化（PN 结界面处的电场尖峰），仿真结果可能不准确甚至不收敛；细网格虽然精度高，能准确描述物理量的空间变化，但是计算量大，内存占用高，仿真时间显著增加，对于大规模或三维仿真可能无法承受。

应当整体使用较粗的网格以减小计算量，在掺杂浓度梯度变化剧烈的区域（如 PN 结界面）对网格进行加密，以保证仿真的精度。

具体实现上，可以使用代码：

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

这条命令的作用是根据掺杂浓度的梯度自动加密网格——在掺杂浓度变化剧烈的地方自动细化网格，而在掺杂均匀的区域保持较粗的网格。

三、在 PIN 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？

我由于请假没有参加会议，没有会议回放，以下是我自己结合 AI 跑出来的，我调整多次，一开始一直无法击穿，调整了总高度，增加雪崩效应，

Sde

；

```
=====
=====
```

； 参数定义

；

```
=====
=====
```

(define Ltot (* 1 1e3)) ; 总宽度 1000 um (保持不变)

(define Htot (* 50 1e0)) ; ★ 总高度改为 50 um ★ (原来是 (* 1 1e3))

(define depth 0.5) ; 注入深度 0.5 um

(define HOxide 1) ; 氧化层厚度 1 um

```

(define Lanode (* Ltot 0.6)) ; N++区域宽度 600 um
(define Xmax (/ Ltot 2))      ; x 方向半宽度 500 um
(define Ymax (* Htot -1))     ; y 方向底部坐标 -50 um (原来是 -1000)
(define Xanode (/ Lanode 2)) ; N++半宽度 300 um

;
=====
====
; 绘制几何结构
;
=====
====
; 硅主体
(sdegeo:create-rectangle
 (position (* Xmax -1.0) 0.0 0.0)
 (position Xmax Ymax 0.0)
 "Silicon" "EPI")

; 左侧氧化层
(sdegeo:create-rectangle
 (position (* Xmax -0.5) Ymax 0.0)
 (position (* Xmax -1.0) (- Ymax HOxide) 0.0)
 "SiO2" "SiO22")

; 右侧氧化层
(sdegeo:create-rectangle
 (position (* Xmax 0.5) Ymax 0.0)
 (position (* Xmax 1.0) (- Ymax HOxide) 0.0)
 "SiO2" "SiO21")

;
=====
====
; 定义电极
;
=====
====
(sdegeo:define-contact-set "anode" 4.0 (color:rgb 1.0 0.0 0.0) "###")
(sdegeo:define-contact-set "cathode" 4.0 (color:rgb 0.0 0.0 1.0) "###")

(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")

;

```

```

=====
=====
; 定义掺杂
;
=====
=====
; 1. 高阻硅均匀掺杂 (P 型,  $1e11 \text{ cm}^{-3}$ )
(sdedr:define-constant-profile "Const.EPI" "BoronActiveConcentration" 1e11)
(sdedr:define-constant-profile-material "PL.EPI" "Const.EPI" "Silicon")

; 2. P++底部接触 (Boron, 高斯分布)
(sdedr:define-gaussian-profile
  "DD.cathode"
  "BoronActiveConcentration"
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" 1e19
  "ValueAtDepth" 1e11
  "Depth" depth
  "Gauss" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-refeval-window
  "Baseline.cathode"
  "Line"
  (position (* Xmax -1) 0 0)
  (position (* Xmax 1) 0 0))

(sdedr:define-analytical-profile-placement
  "PL.cathode"
  "DD.cathode"
  "Baseline.cathode"
  "Negative" "NoReplace" "Eval")

; 3. N++顶部接触 (Phosphorus, 高斯分布)
(sdedr:define-gaussian-profile
  "DD.anode"
  "PhosphorusActiveConcentration"
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" 1e19
  "ValueAtDepth" 1e11
  "Depth" depth
  "Gauss" "Factor" 0.8)

(sdedr:define-refeval-window
  "Baseline.anode"

```

```

"Line"
(position (* Xanode -1) Ymax 0)
(position (* Xanode 1) Ymax 0))

(sdedr:define-analytical-profile-placement
  "PL.anode"
  "DD.anode"
  "Baseline.anode"
  "Positive" "NoReplace" "Eval")
;
=====
====
; ★★ ★ 威力加强版 JTE ★★ ★
;
=====
====
; 左侧 JTE (宽度和浓度都加大)
(sdedr:define-gaussian-profile
  "DD.JTE_left"
  "PhosphorusActiveConcentration"
  "PeakPos" 0
  "PeakVal" 5e16 ; 浓度稍微降低一点, 避免引入新问题
  "ValueAtDepth" 1e11
  "Depth" (* depth 20) ; ★ 宽度从 1.5um 暴增到 10um!
  "Gauss" "Factor" 2.0
)

(sdedr:define-refeval-window
  "Baseline.JTE_left"
  "Line"
  ; ★ 窗口从 N++ 边缘 (-300um) 一直延伸到器件边缘 (-500um)
  (position (* Xmax -1.0) Ymax 0) ; 从器件最左边开始
  (position (* Xanode -1.0) Ymax 0) ; 到 N++ 区域边缘结束
)

(sdedr:define-analytical-profile-placement
  "PL.JTE_left"
  "DD.JTE_left"
  "Baseline.JTE_left"
  "Positive" "NoReplace" "Eval"
)

; 右侧 JTE (对称)
(sdedr:define-gaussian-profile

```

```
"DD.JTE_right"
"PhosphorusActiveConcentration"
"PeakPos" 0
"PeakVal" 5e16
"ValueAtDepth" 1e11
"Depth" (* depth 20)
"Gauss" "Factor" 2.0
)
```

```
(sdedr:define-refeval-window
  "Baseline.JTE_right"
  "Line"
  (position (* Xanode 1.0) Ymax 0) ; 从 N++区域边缘开始
  (position (* Xmax 1.0) Ymax 0) ; 到器件最右边结束
)
```

```
(sdedr:define-analytical-profile-placement
  "PL.JTE_right"
  "DD.JTE_right"
  "Baseline.JTE_right"
  "Positive" "NoReplace" "Eval"
)
```

```
;
=====
====
; 划分网格
;
=====
====
```

```
(sdedr:define-refeval-window
  "RW.Global" "Rectangle"
  (position -10000 -10000 0)
  (position 10000 10000 0))
```

```
(sdedr:define-refinement-size
  "RD.Global"
  (* Ltot 4e-2) (* Htot 4e-2)
  (* depth 0.1) (* depth 0.1))
```

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

```

(sdedr:define-refinement-placement
  "RPL.Global"
  "RD.Global"
  "RW.Global")

;
=====
====
; 生成网格
;
=====
====
(sde:build-mesh "n34")

```

Sedive 代码

File 模块

```

File {
  Grid = "n34_msh.tdr"
  Current = "@plot@"
  Output = "@log@"
}

```

Electrode 模块

```

Electrode {
  { Name = "anode"    Voltage = 0.0  AreaFactor = 100 }
  { Name = "cathode" Voltage = 0.0  AreaFactor = 100 }
}

```

Physics {

```

  Fermi
  EffectiveIntrinsicDensity(OldSlotboom)
  Mobility(DopingDep eHighFieldsaturation(GradQuasiFermi)
           hHighFieldsaturation(GradQuasiFermi) Enormal)
  Recombination(SRH(DopingDependence TempDependence)
                Auger Band2Band(Hurkx)
                eAvalanche(OkutoCrowell)    # 电子雪崩
                hAvalanche(OkutoCrowell))    # 空穴雪崩
}

```

Plot 模块

```

Plot {
  ElectricField Potential
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
  eDensity hDensity
}

```

```

        eCurrent hCurrent
    }

# Math 模块
Math {
    Extrapolate
    Iterations = 50
    RelErrControl
    Digits = 4
    Method = Blocked
    SubMethod = Super
    Notdamped = 100
}

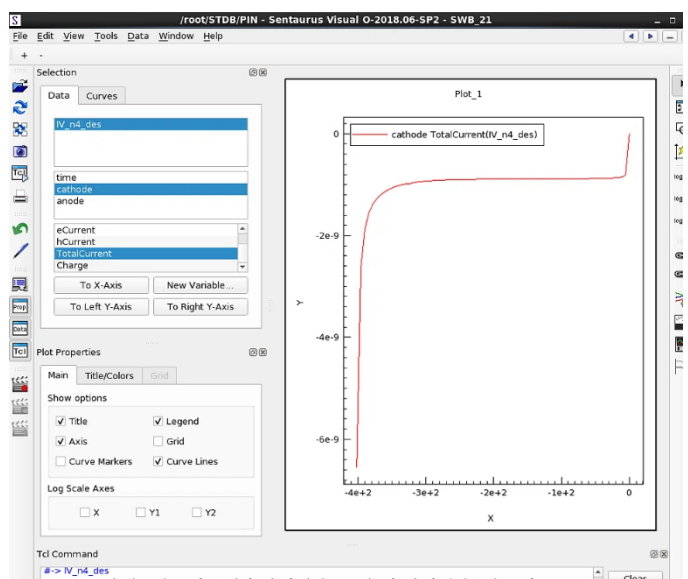
# Solve 模块
Solve {
    Poisson
    Coupled { Poisson Electron Hole }

    NewCurrentPrefix = "IV_"

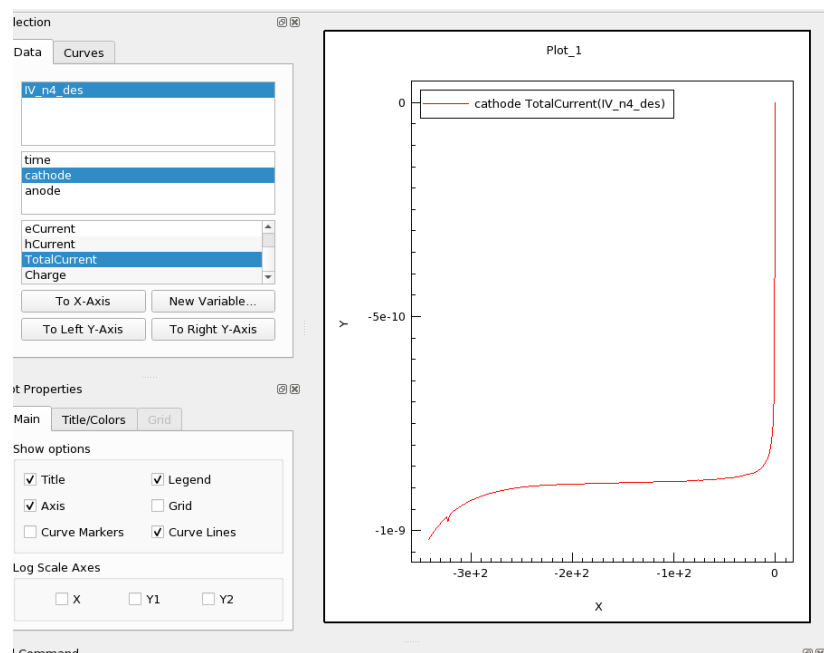
    Quasistationary (
        InitialStep = 0.1
        Increment = 1.5
        MaxStep = 5.0
        Minstep = 1e-6
        Goal { name = cathode Voltage = -3000 }
    ){
        Coupled { Poisson Electron Hole }
        CurrentPlot (Time = (Range = (0 1) Intervals = 500))
    }
}

```

最后在-350V~-400V 击穿

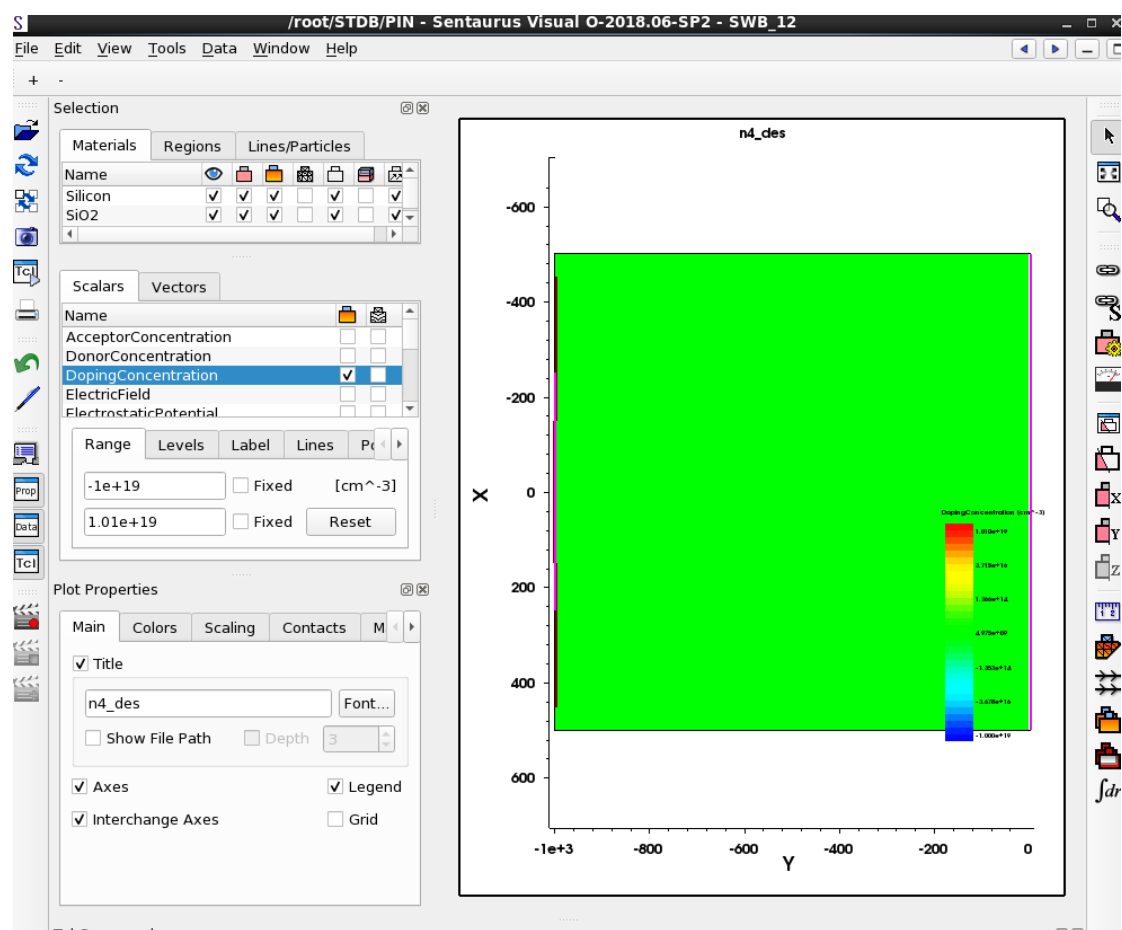


删除了 JET 的代码部分再次运行,



击穿电压在 -250V~-300V, 可以看到 JET 使得击穿电压增加。

四、



在未增加增益层时 tdr 用 sedive 节点打开是这样, 添加了好像也没什么区别, 没看懂。

五、为什么主流 LGAD 采用 P 型高阻硅 + N⁺⁺ 接触 + P⁺ 增益层 + P⁺⁺ 接触的结构？

从电场分布角度看：增益层必须在电场最强处。

当 PIN 结构加反向偏压时，PN 结（N⁺⁺/P⁻ 界面）处电场强度最大，然后向 P 型区逐渐衰减。

主流：增益层（P⁺）紧贴着 N⁺⁺ 下方，正好位于 PN 结界面处电场最强的位置。电子和空穴漂移到这里都会被加速到足够高的能量，触发雪崩电离。

反型：增益层（N⁺）位于 N 型区内部，电场强度已衰减，雪崩效率远低于主流。从载流子输运角度看：电子是“快信号”

在硅中，电子迁移率（~1400 cm²/V·s）是空穴迁移率（~450 cm²/V·s）的约 3 倍。

主流：粒子入射产生的电子向 N⁺⁺（顶部）漂移，穿过增益层，信号主要由高速电子贡献 → 响应速度快，时间分辨好。

反型：信号主要由低速空穴贡献 → 响应速度慢，时间分辨差。

从工艺兼容性角度看：P 型高阻硅是行业标准

高阻 P 型 FZ 硅（Float-Zone Silicon）是辐射探测器领域最成熟、最广泛使用的材料，成本低、一致性好。

在该材料上注入 N⁺⁺ 接触和 P⁺ 增益层的工艺已非常成熟，与主流 CMOS 工艺兼容。

从信号收集效率角度看：两种载流子都倍增

电子和空穴都经过增益层，两种载流子都发生雪崩倍增 → 增益高，信噪比好。相比之下，如果增益层在 N 型区，只有空穴经过增益层，倍增效率较低。