

# 半导体粒子探测原理

RASER 仿真

# 粒子探测器在测什么？

资料：Spieler 2005, Ch. 1

- 最低要求是判断是否有粒子通过。
- 更进一步，要测量沉积能量、到达时间和穿越位置。
- 多层位置测量组成径迹；重建点与参考径迹之差就是位置残差。
- 用很多事例的时间差和位置残差分布表征测量精度。

# Why semiconductor?

资料: Spieler 2005; 刘恩科等 2017

- 带电粒子与物质电子作用，能量最终进入电离和激发。
- 半导体中产生一对可移动载流子只需几 eV，薄层内即可得到大量电荷。
- 外加电场可以快速收集电荷；微细加工可以把电极分割成条带和像素。
- 固态材料密度高、器件紧凑，因此适合精密位置和时间测量。

# 位置测量：条带、像素与径迹

资料：Spieler 2005, Fig. 1.10

- 每个电极只读出局部区域；电极编号先给出一个粗位置。
- 条带给出一维位置，像素给出二维位置，多层命中拟合成径迹。
- 斜入射和横向扩散会让电荷落到多个电极上，为模拟插值提供信息。

provides position information in one dimension. Angled tracks that deposit charge on two or more strips. Evaluating the ratio of charge deposition allows interpolation to provide position resolution better than expected from the electrode pitch alone. We'll return to this later. A second orthogonal set of strips on the opposite face gives two-dimensional position readout, shown in the second panel of Figure 1.11.

In a colliding-beam experiment the strip pitch (center-to-center distance) is typically  $25 - 100 \mu\text{m}$  and lengths range from centimeters to tens of centimeters, usually aligned parallel to the beam axis to provide  $r\phi$  coordinates. The maximum strip length per sensor is limited by wafer size ( $10 - 15 \text{ cm}$  for detector-grade Si), so multiple sensors are ganged to form longer electrodes. Practical detectors

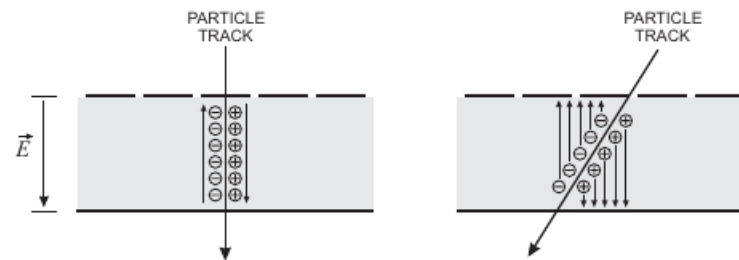


FIG. 1.10. Segmenting the sensor electrode provides position information. Angled tracks deposit charge on two or more electrodes.

# 信号形成

资料: Spieler 2005, Fig. 1.2

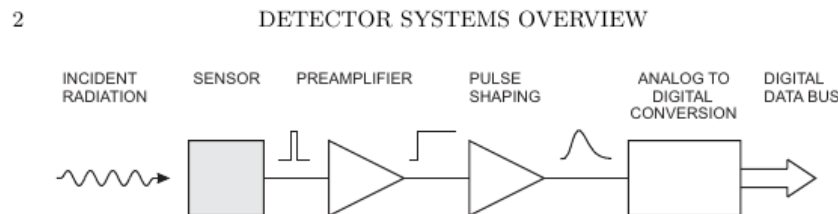


FIG. 1.2. Basic detector functions: Radiation is absorbed in the sensor and converted into an electrical signal. This low-level signal is integrated in a preamplifier, fed to a pulse shaper, and then digitized for subsequent storage and analysis.

- 相互作用给出沉积的位置、时间和能量。
- 器件电场决定载流子怎样运动; weighting field 决定怎样感应到电极。
- 前端网络把微小电流变成可记录的电压, 再由采样和量化得到数字波形。
- RASER 将这些理论关系逐步计算为波形和残差分布。

# 能带、载流子与掺杂

资料：刘恩科等 2017

- 价带、导带和带隙  $E_g$  描述电子允许占据的能量范围。
- 导带电子和价带空穴是能够移动并形成电流的载流子。
- 施主和受主决定 n 型、p 型以及结区中的固定空间电荷。
- $E_g$ 、n/p、 $N_D/N_A$  和迁移率是后续器件方程的基本量；系统学习请读《半导体物理学》。

# Si 与 4H-SiC

资料：Spieler 2005; Capan 2022

## 典型室温参数

- 带隙  $E_g$ : Si 1.12 eV; 4H-SiC 3.26 eV。
- 平均电离能  $W$ : Si 3.6 eV; 4H-SiC 约 8 eV。
- 相对介电常数  $\epsilon_r$ : Si 11.7; 4H-SiC 约 9.7。
- 电子迁移率: Si 约 1350; 4H-SiC 约 1000–1200  $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。
- 临界电场: Si 约 0.3; 4H-SiC 约 2.5–3.0 MV/cm。

*晶向、掺杂、温度和模型会改变具体数值。*

# device：把器件写成可求解的问题

资料：懒小木，SDE 原理性建模

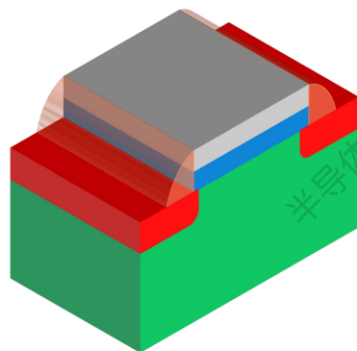


原理性建模

Structure Modeling based on Sentaurus Structure Editor

## 半导体内的原理性的建模

ACIS是美国Spatial Tech.公司推出的三维几何构造引擎, 基于边界的(boundary representation) 结构构造内核。



Sentaurus Structure Editor



- 几何构造
- 掺杂定义
- 接触定义
- 网格生成

- 材料区域、掺杂/缺陷分布和电极边界都要赋到计算域中。
- 同一份计算域与网格供泊松方程、连续性方程和 weighting potential 使用。

# 几何、掺杂与网格

资料：懒小木，SDE 原理性建模

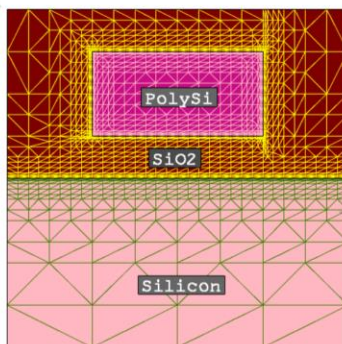


原理性建模

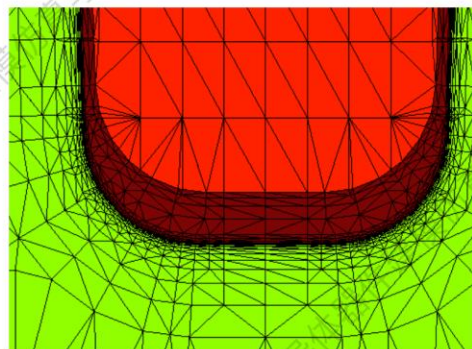
Structure Modeling based on Sentaurus Structure Editor

## 定义网格

### Axis-Aligned网格



### Offsetting网格



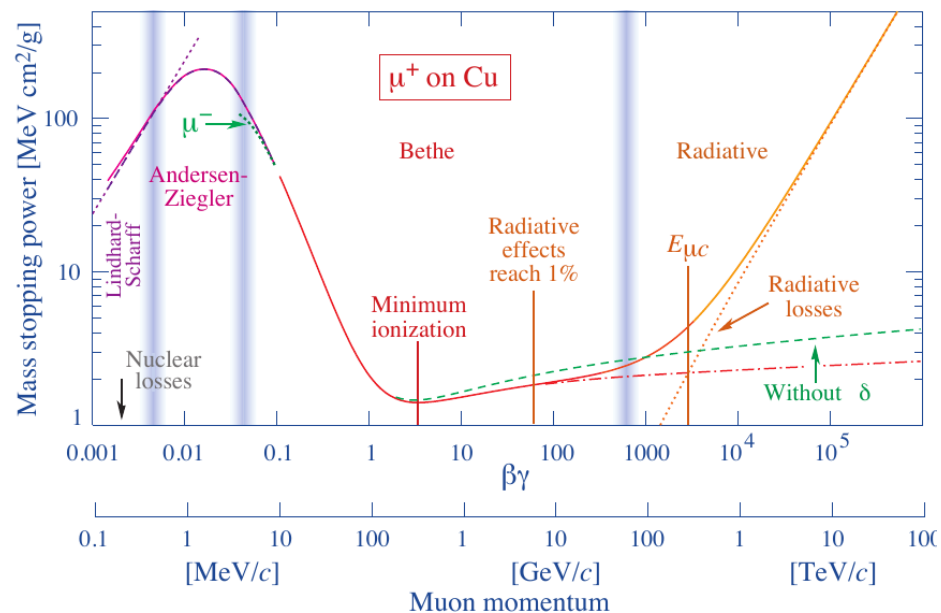
- 结区、电极边缘和增益层的梯度最大，需要局部加密。
- 材料边界、电极边界和掺杂界面必须在网格上保持可辨。

# Bethe–Bloch：平均能损

资料：PDG 2024, Passage of Particles Through Matter

$$-dE/dx \propto (Z/A) \cdot z^2/\beta^2 \cdot [\ln(\dots) - \beta^2 - \delta/2]$$

- 出发点是入射带电粒子与原子电子的量子力学散射截面。
- 对允许的能量转移积分，得到单位长度的平均电离损失。
- $z^2/\beta^2$  给出主要速度和电荷依赖； $Z/A$ 、 $I$  和密度效应描述材料。
- Bethe–Bloch 给出期望值；单个事例仍服从能损涨落。



# 平均曲线之外：涨落与 $\delta$ -ray

资料：PDG 2024, Secs. 34.2–34.3

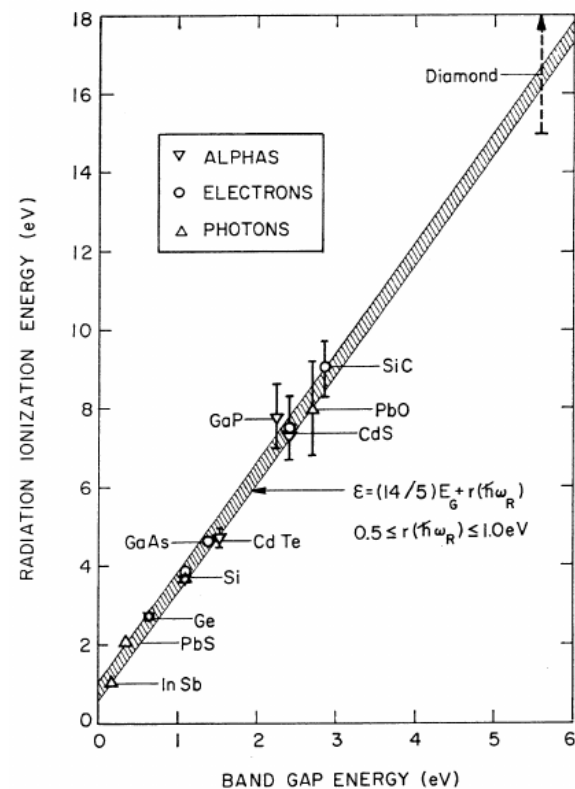
- 有限厚度中的碰撞次数和单次能量转移都在涨落。
- 薄层能损常呈 Landau/Vavilov 型长尾。
- 一次大能量转移可以产生  $\delta$ -ray，把电离带到主径迹之外。
- 因此同样的入射粒子，也会得到不同的总电荷和空间分布。

# 沉积能量与电子—空穴对

资料: Spieler 1998, Part 1, p. 8

$$N_{eh} \approx E_{dep} / W$$

- $W$  大于带隙  $E_g$ : 产生载流子还要满足动量守恒, 多余能量进入声子。
- Si 中  $W \approx 3.6$  eV; 4H-SiC 中约为 8 eV。
- 给定  $E_{dep}$ ,  $W$  决定初始信号电荷的尺度。
- interaction 要把沉积转成载流子数, 并保留沉积的位置和时间。

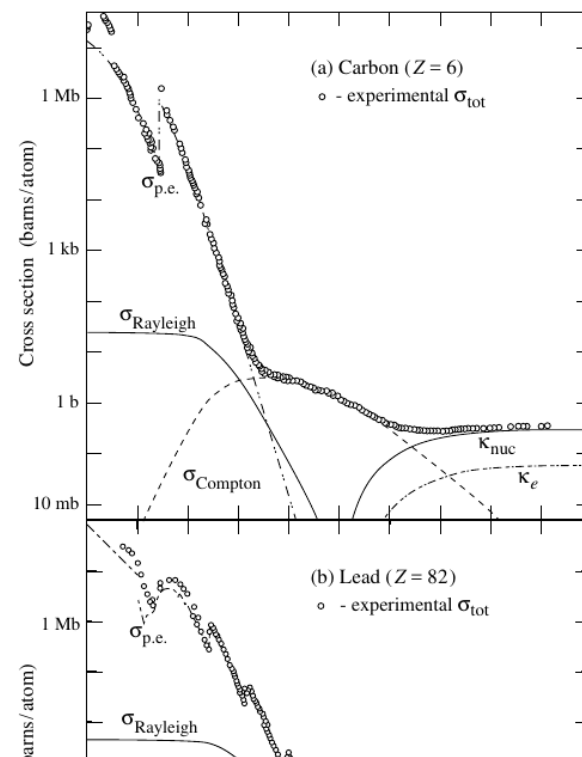


# X/ $\gamma$ : 先产生次级带电粒子

资料: PDG 2024, Photon cross sections

- X/ $\gamma$  不连续电离; 它们先发生光电效应、康普顿散射或对产生。
- 真正沿路径留下电子—空穴对的是次级电子和正电子。
- 主导过程取决于光子能量和材料原子序数。
- 本讲保留相互作用位置和能量分配, 不讨论光子谱学。

## 34. Passage of Particles Through Matter



# 简单 MIP 何时够用？

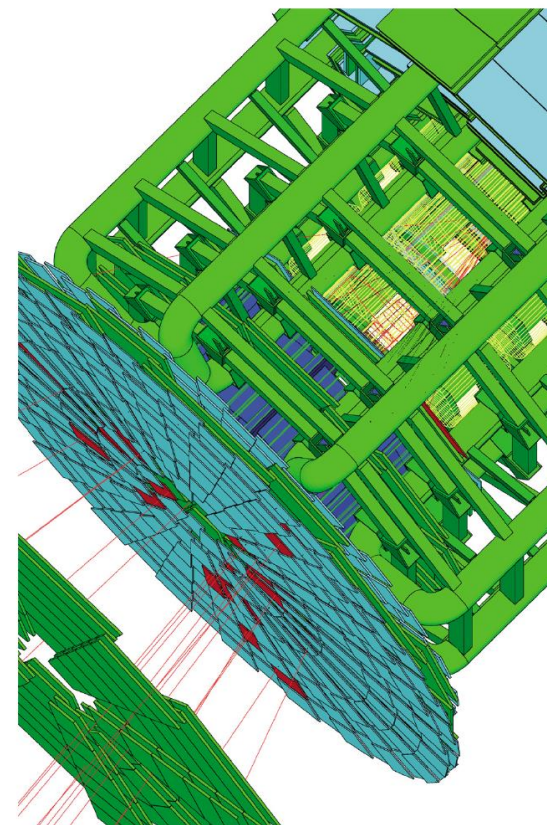
资料：PDG 2024; Geant4 application model

- 简单模型：直线径迹、给定平均  $dE/dx$ ，再按  $W$  生成载流子。
- 它适合快速估算平均电荷、典型脉冲和参数趋势。
- 若材料层次、有限几何、涨落、 $\delta$ -ray、 $X/\gamma$  或次级粒子重要，就需要事例级输运。
- 两种模型最终都生成沉积记录  $\{x, t, E_{dep}, N_{eh}\}$ 。

# Geant4：粒子输运与相互作用

资料：Agostinelli et al. 2003

- Geant4 在给定材料和几何中输运粒子，并抽样各类相互作用。
- 它包含材料与几何、粒子与过程、physics list、tracking、event/run 和 hits。
- 每一步传播都可以发生散射、能损、衰变或产生次级粒子。
- 不同能区和过程要选用相应的物理模型与 physics list。



# Geometry 与 SensitiveDetector

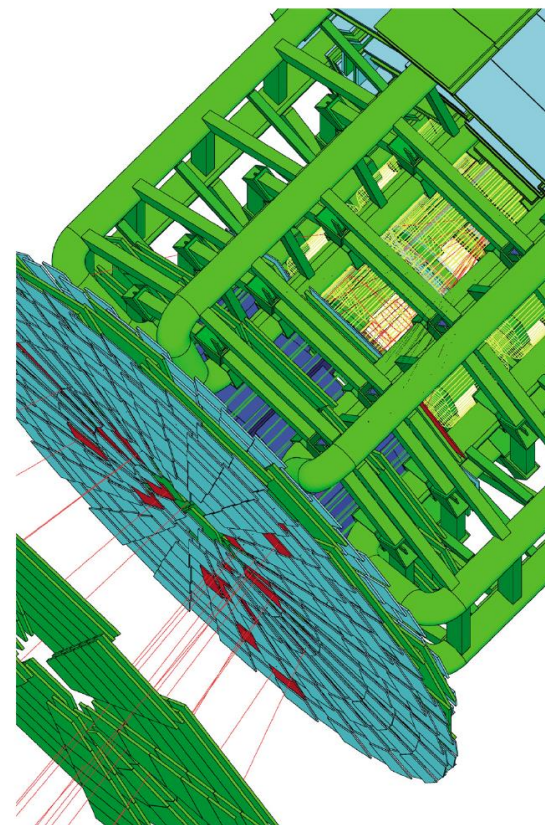
资料: Geant4 Book for Application Developers

- DetectorConstruction 建立 world、材料以及 logical/physical volumes。
- SensitiveDetector 挂到选定的 logical volume, 把 step 中的信息转成 hit。
- 在我们的系统里, sensitive 通常对应器件; 电路板和支架通常不记 hit。
- 非 sensitive 体积仍参与输运和相互作用, 只是不把 step 收进探测器数据。
- 记录量通常包括位置、时间、沉积能量和 track 信息。

# interaction: 一次沉积记录

资料: Agostinelli et al. 2003; Geant4 文档

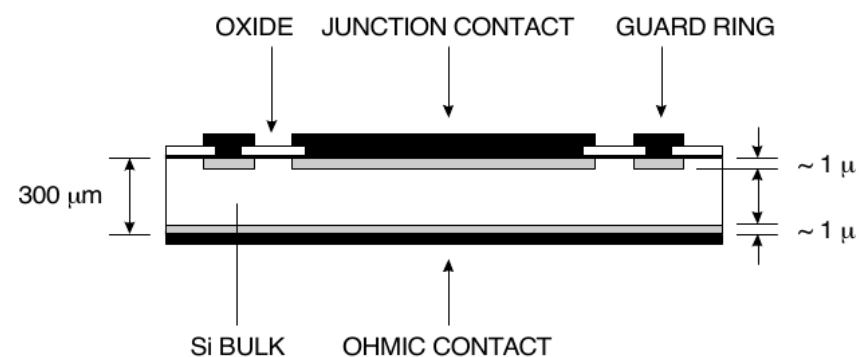
- 一个 hit 保存  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $t$ 、 $E_{\text{dep}}$ , 以及对应的粒子和 track。
- $E_{\text{dep}}/W$  给出电子—空穴对数; 沉积位置和时间原样保留。
- 一个 event 通常包含多个 hit,  $\delta$ -ray 和次级粒子会形成分离的沉积点。
- 这些记录构成载流子输运的初始条件。



# 反向偏置与耗尽区

资料: Spieler 1998, Part 1; Capan 2022

- pn/PiN 结的内建场分离载流子; 反向偏置扩大耗尽区并提高场强。
- 轻掺杂的本征/漂移区承担主要耗尽宽度, 成为有效敏感体积。
- 耗尽区内自由载流子少; 低漏电和低电容使沉积电荷不被背景电流淹没。
- Schottky 势垒也能形成耗尽区, 在 4H-SiC 探测器中很常见。

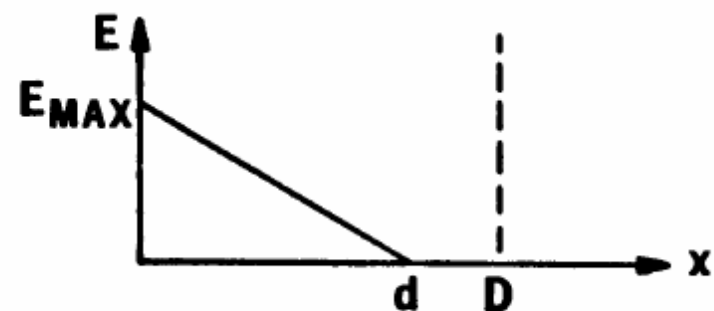
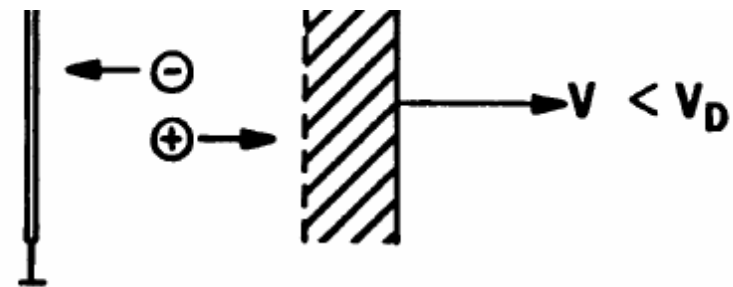


# 泊松方程给出电势与电场

资料: Spieler 1998, Part 1, p. 36

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \varphi) = -\rho \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi$$

- $\rho$  来自离化掺杂、电子、空穴以及带电缺陷。
- 电极电压给出 Dirichlet 边界; 绝缘表面通常给出法向通量条件。
- 反偏耗尽后, 固定空间电荷决定体内场形。
- 载流子输运在每个位置查询  $E(r)$ 。



# 连续性方程、IV 与 CV

资料：半导体漂移—扩散方程

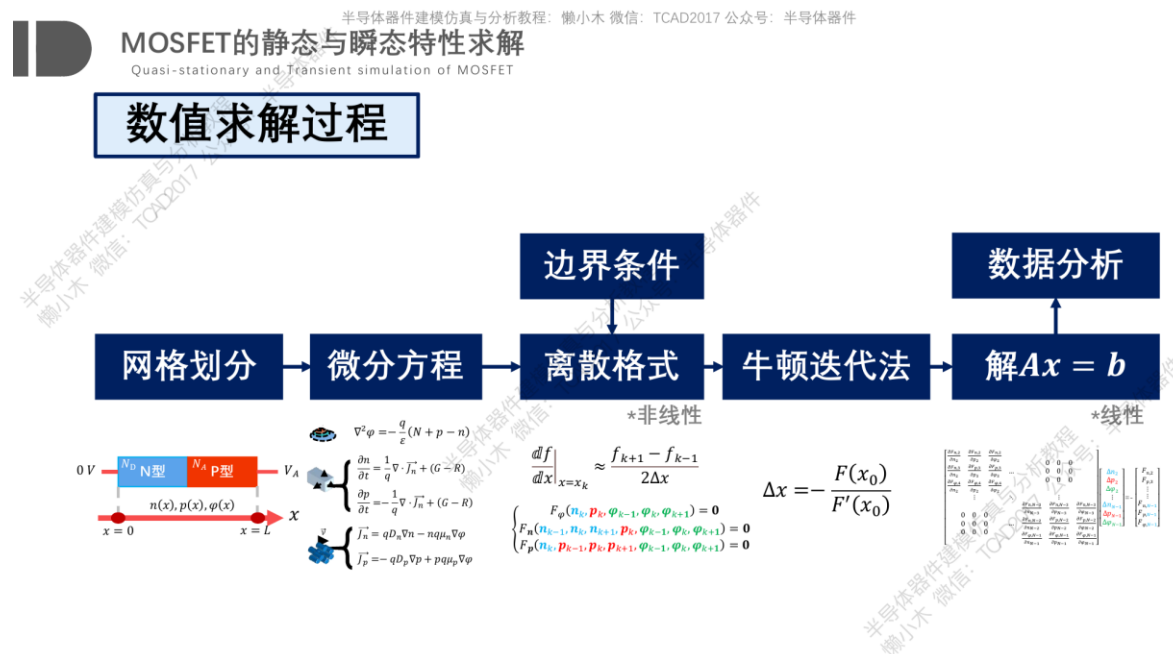
$$\partial n / \partial t = (1/q) \nabla \cdot J_n + G - R$$

$$\partial p / \partial t = -(1/q) \nabla \cdot J_p + G - R$$

- $J_n$ 、 $J_p$  同时含漂移和扩散； $G$ 、 $R$  描述产生与复合。
- 每个直流偏压点求稳态解，积分端电流即可得到 I-V。
- 在同一偏置解附近施加小信号，或求电极电荷对电压的导数，即得到 C-V。
- 同一偏压解同时给出电场、端电流和小信号电荷响应。

# 网格边上的漂移—扩散通量

资料: Scharfetter & Gummel 1969; 懒小木 TCAD 教程



- 泊松和连续性方程在网格上离散, Newton 迭代得到自洽的  $\varphi$ 、 $n$ 、 $p$ 。
- SG 通量在每条网格边上联合处理漂移与扩散, 高场下仍保持稳定。

# SRH、陷阱与辐照

资料: Gaggl et al. 2025

- SRH 模型用缺陷能级、密度和俘获截面描述产生—复合。
- 辐照会引入陷阱, 改变有效空间电荷、漏电、寿命和电荷收集。
- 陷阱参数必须由测量或文献标定; 不同缺陷模型可能给出不同外推。
- 同一套器件方程因此可以同时预测 I-V、C-V 和收集效率的变化。

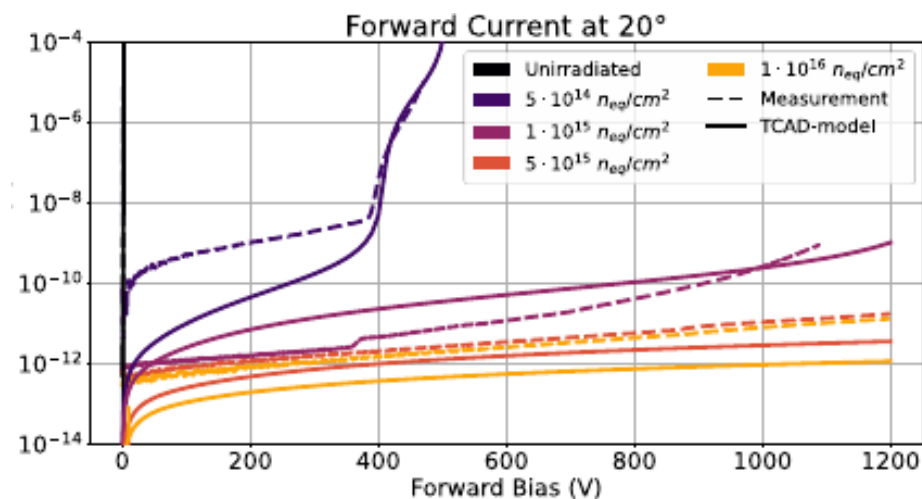


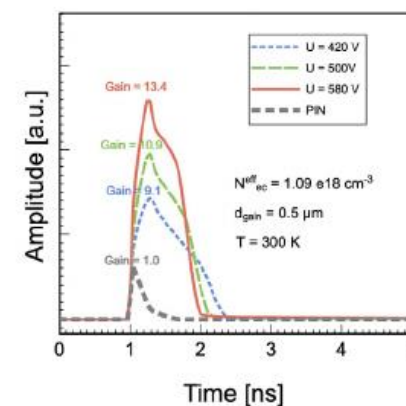
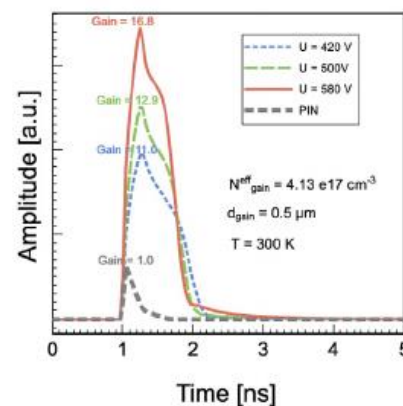
Figure 1: Forward bias I-V measurements [5] vs. simulation.

# 碰撞电离与 LGAD

资料: Yang et al. 2023

- 高场载流子获得足够能量后可以碰撞电离, 产生新的电子—空穴对。
- LGAD 用增益层制造局部高场; 倍增取决于沿路径积分的  $\alpha(E)$  和  $\beta(E)$ 。
- 场太弱没有增益, 场太强会进入击穿。
- 因此必须让泊松方程、输运和电离模型在同一器件解中保持一致。

*Nuclear Inst. and Methods in Physics*



# field： 偏压扫描得到什么

资料： Yang et al. 2023, Figs. 3–4

- 每个偏压点保存  $\varphi(r)$ 、 $E(r)$ 、 $n(r)$  和  $p(r)$ 。
  - 端电流随偏压组成 I–V； 电极电荷的小信号响应组成 C–V。
  - 碰撞电离模型给出倍增和击穿； 缺陷模型改变漏电与空间电荷。
  - current 按载流子位置查询对应偏压下的  $E(r)$
- 

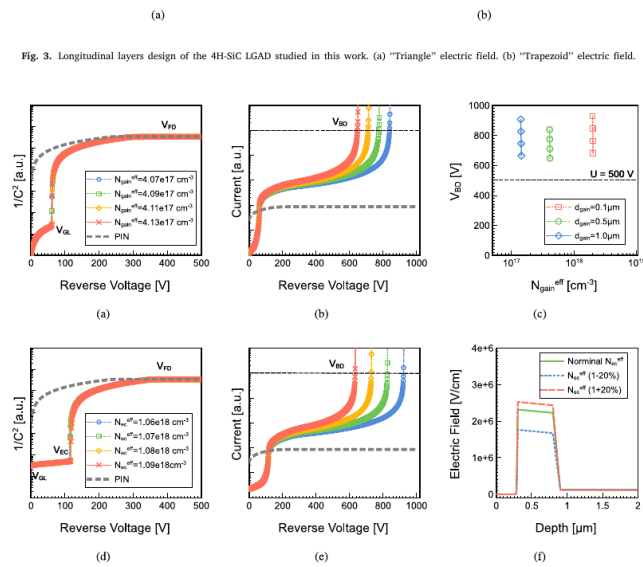


Fig. 4. Simulated results for 4H-SiC LGAD with  $d_{gain} = 0.5$   $\mu$ m. (a)(b)  $1/C^2 - V$  and  $I - V$  relations of Triangle-Type. (c)  $V_{BD} - N_{sc}^{eff}$  relations of different  $d_{gain}$ . (d)(e)  $1/C^2 - V$  and  $I - V$  relations of Trapezoid-Type. (f) Electric field in the gain layer of Trapezoid-Type when  $N_{sc}^{eff}$  changed  $\pm 20\%$ . For (a)(b)(d)(e) the colored lines are for 4H-SiC LGADs and the dotted gray lines are for PIN.

doping concentration of the field control layer compared with the  $V_{BD} - N_{sc}^{eff}$  of the Triangle-Type.

Fig. 4(f) demonstrates the control effect to the electric field when the effective doping level of the control layer  $N_{sc}^{eff}$  changed  $\pm 20\%$ . When the electric field is approximately  $2.3 \times 10^6$  V/cm, a gain factor about 10 can be achieved in the 4H-SiC LGAD with  $d_{gain} = 0.5$   $\mu$ m.

As shown in Figs. 4(b) and 4(e), when  $U < V_{GL}$ , the depletion area volume of 4H-SiC LGAD is very small, so its leakage current is less than that of PIN. As the voltage increases, the depletion region increases gradually, and its leakage current increases rapidly and is far greater than that of PIN. The gain of leakage current is  $\sim 10$ , which indicates

3.3. Simulation of MIP detection

Apart from electrical properties, as a particle detector, one of the most valuable indicators of the LGAD are the gain factor. To determine the gain factor when MIPs pass through 4H-SiC LGAD, we use a heavy ion model in TCAD with the same e-h pair generation rate as MIP, which is defined as:

$$Gain = \frac{Q_{LGAD}}{Q_{PIN}} = \frac{\int_0^T i(t)_{LGAD}}{\int_0^T i(t)_{PIN}} \quad (6)$$

where  $Q$  is the collected charge,  $i(t)$  is the stimulated current by MIP

# 漂移、扩散与俘获

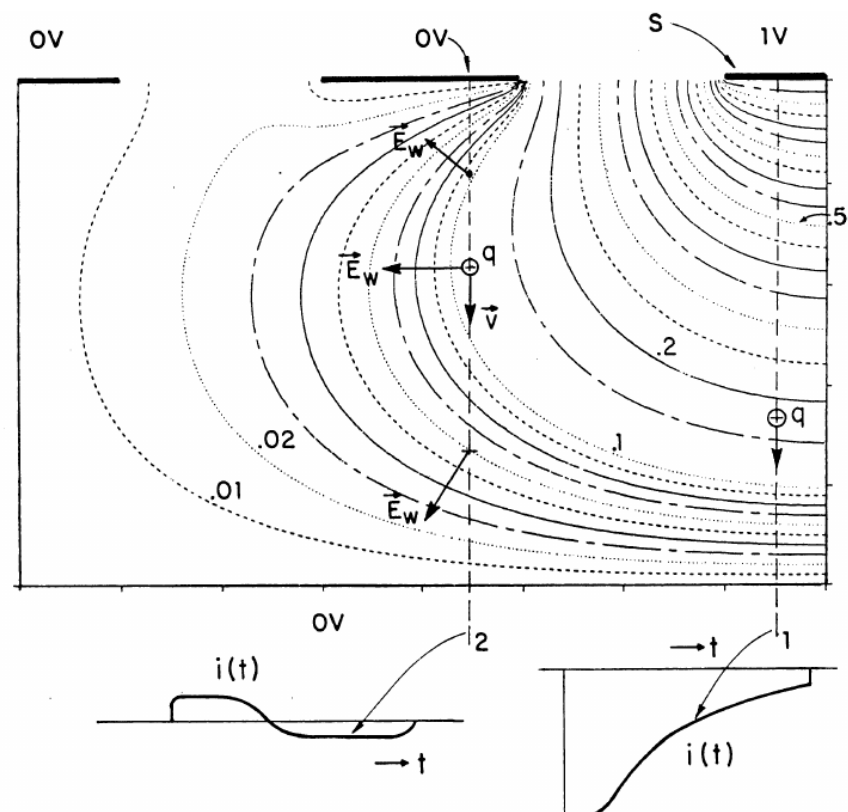
资料：Spieler 1998, Part 1, Charge Collection

- 低场近似  $v=\mu E$ ；高场时速度趋于饱和。电子和空穴向相反方向运动。
- 浓度梯度引起扩散，横向扩散决定电荷共享的基本尺度。
- 陷阱会俘获载流子，减少可收集电荷并改变波形时间结构。
- 输入是 interaction 的  $x$ 、 $t$ 、 $N_{eh}$  和 field 的  $E(r)$ ；输出是每个时刻的位置与速度。

# 电场与 weighting field

资料: Spieler 1998; He 2001

- 电场  $E$  来自真实偏压和空间电荷, 决定载流子的轨迹与速度。
- 某个读出电极的 weighting potential: 该电极置 1, 其余置 0, 去掉空间电荷后解 Laplace 方程。
- weighting field 只由几何和所选电极决定; 每个读出电极各有一个。
- 载流子受真实  $E$  运动;  $E_w$  只把这段运动换算成指定电极的信号。

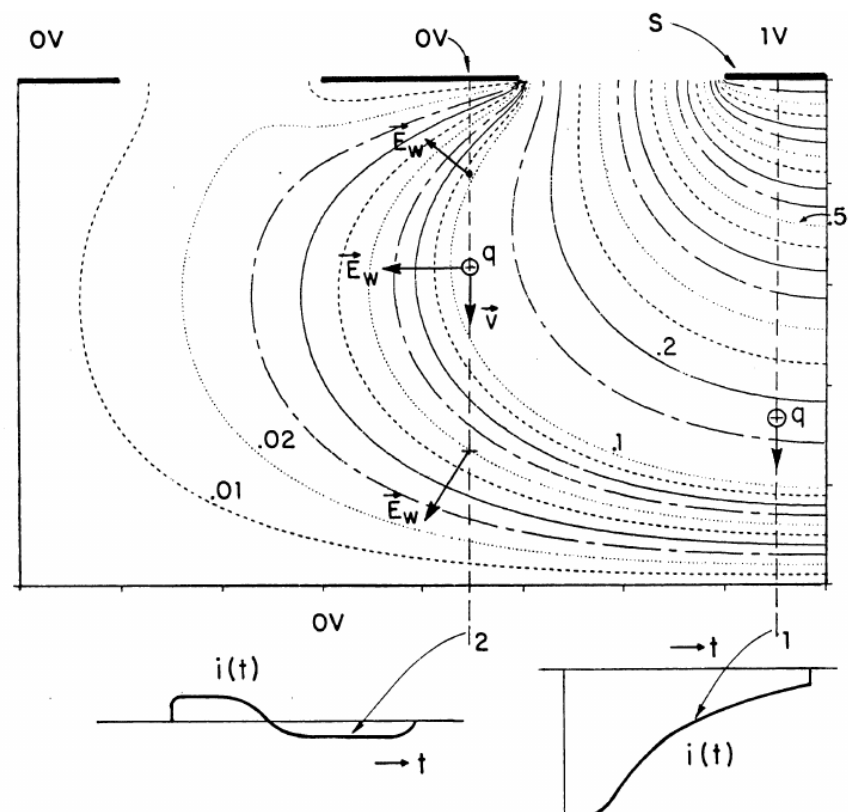


# Shockley–Ramo 感应电流

资料: He 2001; Spieler 1998

$$i_k(t) = q \mathbf{v}(t) \cdot \mathbf{E}_{w,k}(\mathbf{r}(t))$$

- 电荷一旦运动，电极上立即出现感应电流；不必等载流子到达电极。
- 积分电流得到感应电荷： $\Delta Q_k = -q[\phi_{w,k}(\text{final}) - \phi_{w,k}(\text{initial})]$ 。
- 电子和空穴虽然运动方向相反，对同一电极常给出同极性的信号。
- 原始波形同时编码轨迹、速度和电极几何。

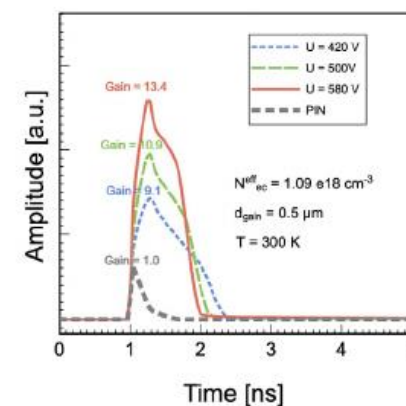
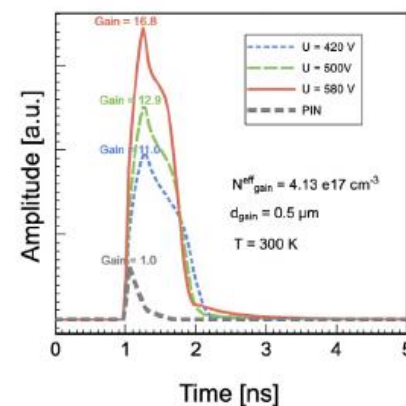


# current: 电子、空穴与各电极波形

资料: He 2001; Yang et al. 2023

- 每个时间步计算  $v(E,T)$ , 并在每个读出电极上累加  $qv \cdot Ew$ 。
- 电子和空穴分别求和; 时间积分给出该电极的感应电荷。
- 入射位置、偏压、电极几何和俘获共同改变波形。
- 输出是进入寄生与前端网络之前的原始电流。

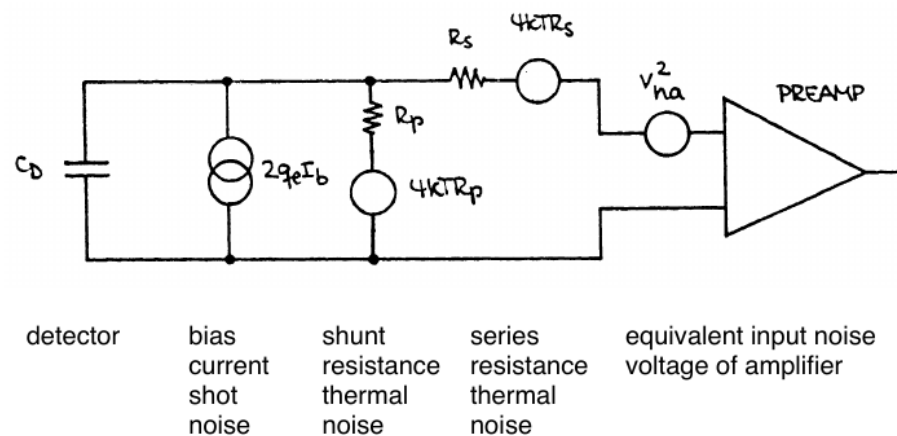
*Nuclear Inst. and Methods in Physics*



# 探测器等效电路

资料: Spieler 1998, Part 2, p. 33

- 在前端看来，探测器近似为信号电流源、结电容和漏电流。
- 偏置电阻、接触电阻、键合线、PCB 和放大器输入继续增加阻抗与噪声源。
- 原始电流很小、很快，不能直接送入远端数字系统。
- 前端输入由探测器及其连接寄生共同决定。



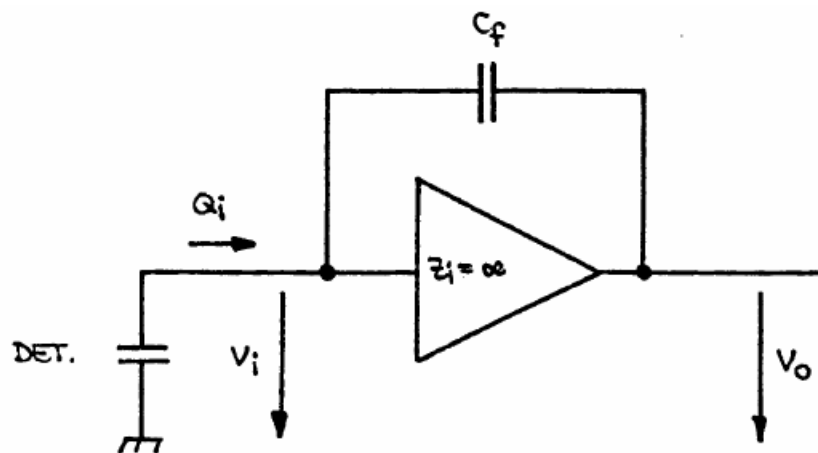
# 电荷敏感前放

资料: Spieler 1998, Part 2, p. 4

$$V_{out} \approx -Q / C_f$$

- 高开环增益使输入节点近似保持不动，信号电荷被积到反馈电容  $C_f$  上。
- $C_f$  决定电荷增益； $R_f$  或复位开关让基线回到工作点。
- 它把  $fC$  量级的电荷变成可继续整形和采样的电压。
- 理想积分关注总电荷，但有限带宽和收集时间仍会影响实际脉冲。

A feedback capacitor,  $C_f$ , between output and input.



# 整形时间与噪声

资料: Spieler 2005, Fig. 1.29

- 整形限制带宽并把前放输出变成适合测量的脉冲。
- 短整形时串联电压噪声占优；长整形时并联电流噪声占优。
- 总等效噪声电荷在某个整形时间附近最小。
- 时间选择还要同时考虑上升沿、pile-up、基线恢复和功耗。

DETECTOR SYSTEMS OVERVIEW

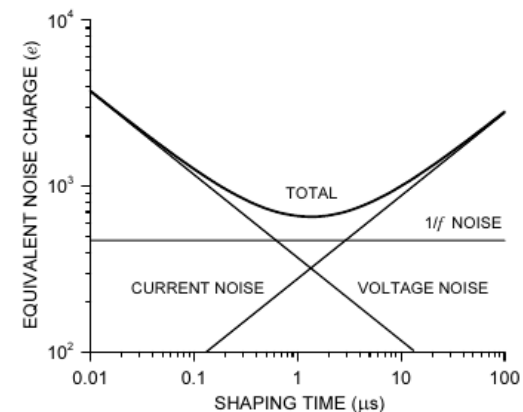


FIG. 1.29. Equivalent noise charge *vs.* shaping time of a typical detector system.

normalized to unity. For more details see the papers by Goulding (1972), Radek (1968, 1974), and Goulding and Landis (1982).

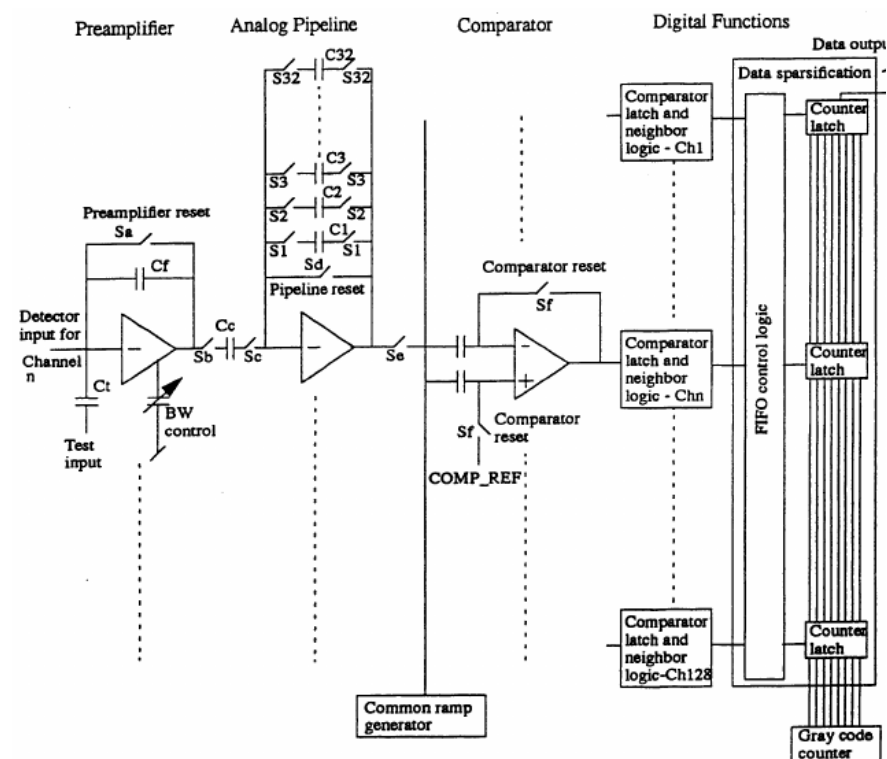
A pulse shaper formed by a single differentiator and integrator with equi

# 寄生参数与数字化

资料: Spieler 1998, Part 2, p. 81

- 探测器、键合线、PCB 和输入管带来电容、电阻与电感。
- 寄生会改变增益、带宽、噪声、振铃和通道间串扰。
- ADC 对电压采样并量化; 比较器、TDC 和稀疏读出会只保留部分信息。
- frontend 必须把原始电流通过同一网络、滤波器和采样规则。

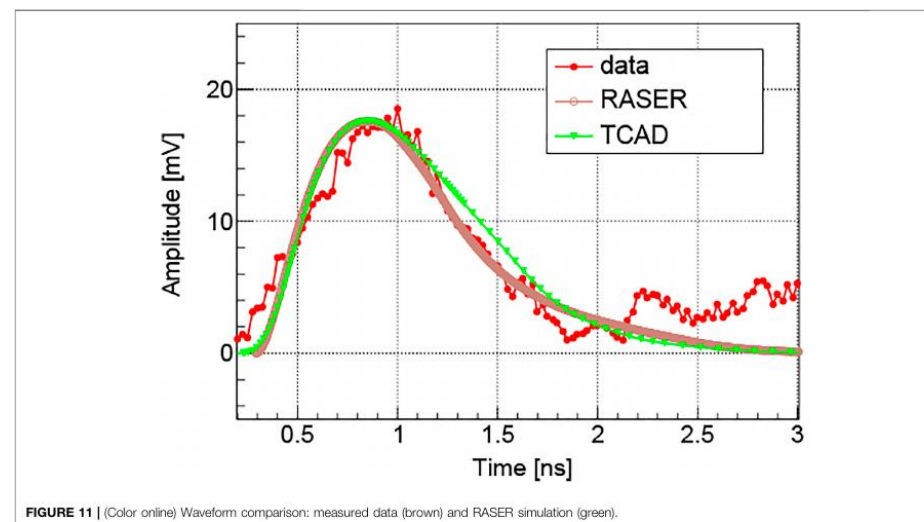
Block diagram of SVX2



# frontend: 从电流到数字波形

资料: Yang et al. 2022, Fig. 11; Spieler 1998

- 等效网络的冲激响应  $h(t)$  把  $i(t)$  变成  $V_{out}(t)$
- 
- 噪声源经过相同带宽叠加到波形上。
- 采样、ADC/TDC 量化和阈值规则生成与实验相同的数据格式。
- 图中 RASER、TCAD 与测量波形使用同一读出条件比较。



# 时间分辨率

资料: Yang et al. 2022; Spieler 2005

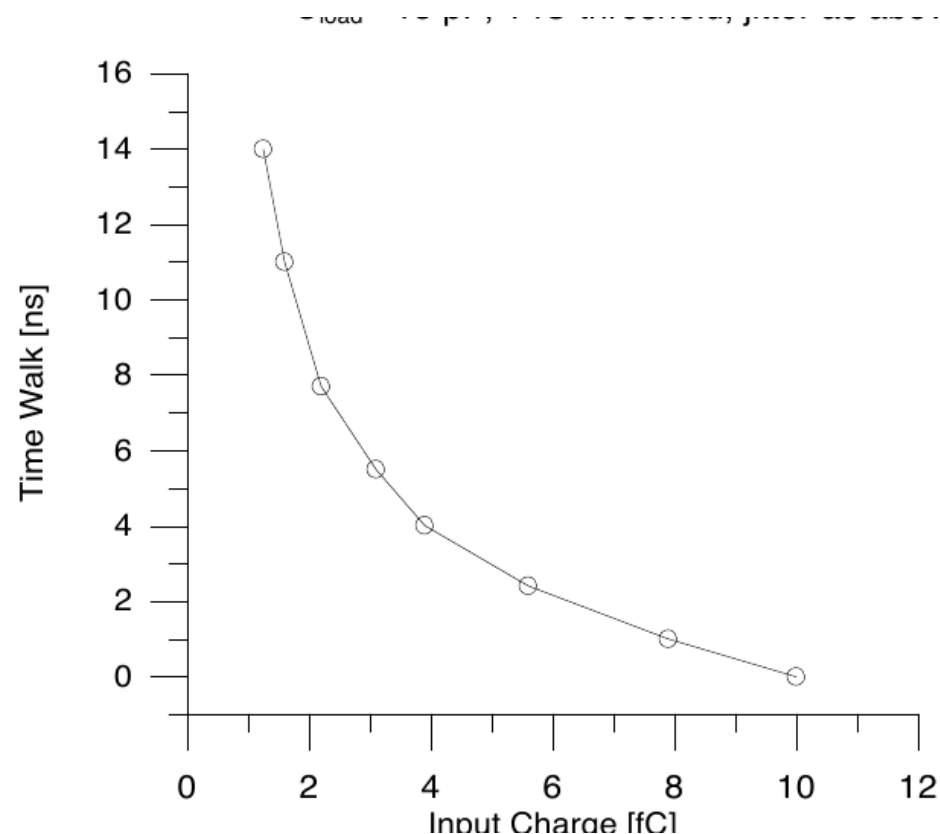
- 对重复事例定义  $\Delta t = t_{\text{DUT}} - t_{\text{ref}}$ , 时间分辨率由  $\Delta t$  分布的宽度给出。
- 若参考与 DUT 独立且参考分辨率已知:  $\sigma^2_{\text{DUT}} = \sigma^2_{\Delta t} - \sigma^2_{\text{ref}}$ 。
- 必须说明时间提取方法、事件选择以及宽度指标: Gaussian  $\sigma$  或  $\sigma_{68}$ 。
- 在无噪声、连续采样的理想读出中, 剩余宽度来自沉积与运输的物理涨落。

# 时间抖动与 time walk

资料: Spieler 1998, Part 2, p. 101

$$\sigma_t \approx \sigma_V / |dV/dt|_{\text{threshold}}$$

- 噪声在阈值附近转化成时间抖动；斜率越大，同样噪声造成的时间误差越小。
- 固定前沿阈值下，大脉冲更早过阈值，小脉冲更晚，形成 time walk。
- CFD 或基于幅值/ToT 的校正可以减少确定性的幅值依赖。
- 采样时钟和 TDC binning 还会加入数字化时间误差。



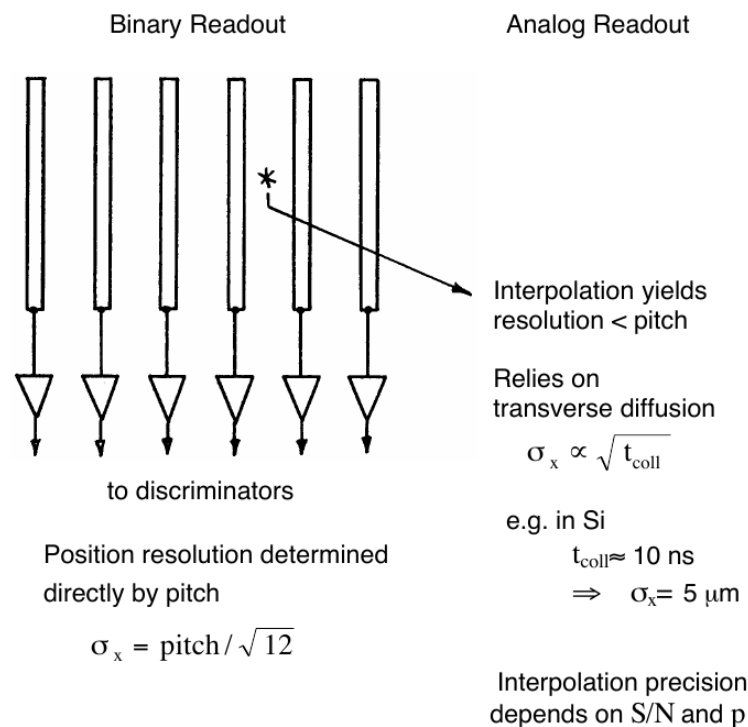
# 二进制位置：pitch 的几何极限

资料：Spieler 1998, Part 1, p. 7

$$\sigma_x = \text{pitch} / \sqrt{12}$$

- 若只知道哪一个等宽电极命中，就把电极中心作为重建位置。
- 真实位置在一个 pitch 内均匀分布时，残差标准差为  $\text{pitch} / \sqrt{12}$ 。
- 这是假设满效率、无错判且只保留单通道地址的几何结果。
- $\text{pitch} / \sqrt{12}$  对应满效率、无错判的单地址读出；阈值和噪声另行改变命中效率。

two options:

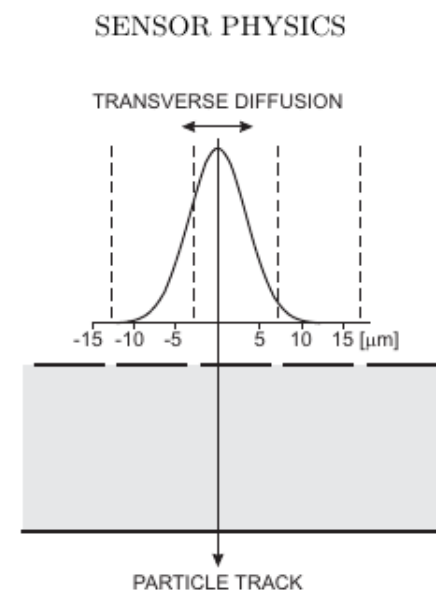


# 模拟位置：电荷共享与重心

资料：Spieler 2005, Charge sharing

$$\hat{x} = \sum A_i x_i / \sum A_i$$

- 扩散、斜入射和 weighting field 让电荷分布到相邻电极。
- 两条带位于  $x_1=0$ 、 $x_2=100\text{ }\mu\text{m}$ ；若  $A_1=70$ 、 $A_2=30$ ，则  $\hat{x}=30\text{ }\mu\text{m}$ 。
- 理想情况下，幅值比例随真实位置单调变化，可以做到优于 pitch 的分辨率。
- 实际映射还会受非线性电荷共享、边缘场和通道增益差影响。



1.18. Transverse diffusion distributes charge on multiple strip electrodes, shown on a  $20\text{ }\mu\text{m}$  pitch. The charge division boundaries are indicated by d

# 噪声、阈值和 ADC 怎样影响位置

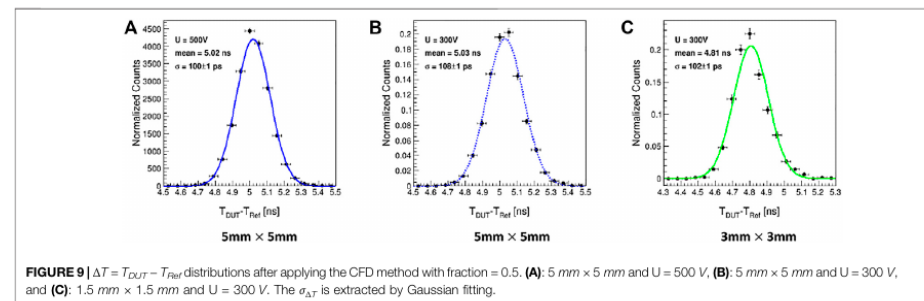
资料：Spieler 1998/2005, readout and noise

- 噪声：70/30 变成 65/35，重心从 30  $\mu\text{m}$  变成 35  $\mu\text{m}$ ；误差是连续随机的。
- 阈值：若第二通道低于门限而被丢弃，重建会突然退回 0  $\mu\text{m}$ ，并产生效率损失和长尾。
- ADC：把 65 和 35 量化成离散码，位置只能取若干台阶；饱和还会破坏幅值比例。
- 仿真中分别实现加性噪声、阈值删失和 ADC 量化。

# metric: 从事件集合得到分辨率

资料: Yang et al. 2022, Fig. 9

- 每条数字波形用同一算法重建  $\hat{t}$  和  $\hat{x}$ 。
- 与真值或参考探测器比较, 逐事例计算  $\Delta t$  和  $\Delta x$ 。
- 固定事件选择后, 同时报告效率、中心位置和残差宽度。
- Gaussian  $\sigma$  与  $\sigma_{68}$  分开计算和标注。



# 结论

- interaction 给出沉积的  $x$ 、 $t$ 、 $E_{dep}$  和  $N_{eh}$ 。
- field 给出  $E(r)$ 、 $IV$ 、 $CV$ ，以及缺陷和碰撞电离改变后的器件状态。
- current 用输运和 weighting field 得到感应电流  $i(t)$ 。
- frontend 把电流通过寄生与电子学网络，得到可数字化波形。
- metric 对大量波形应用实际重建，得到时间残差和位置残差。
- RASER 保留这些物理量的传递，最终给出可比较的波形和残差分布。