RASER结构与功能

FU Chenxi

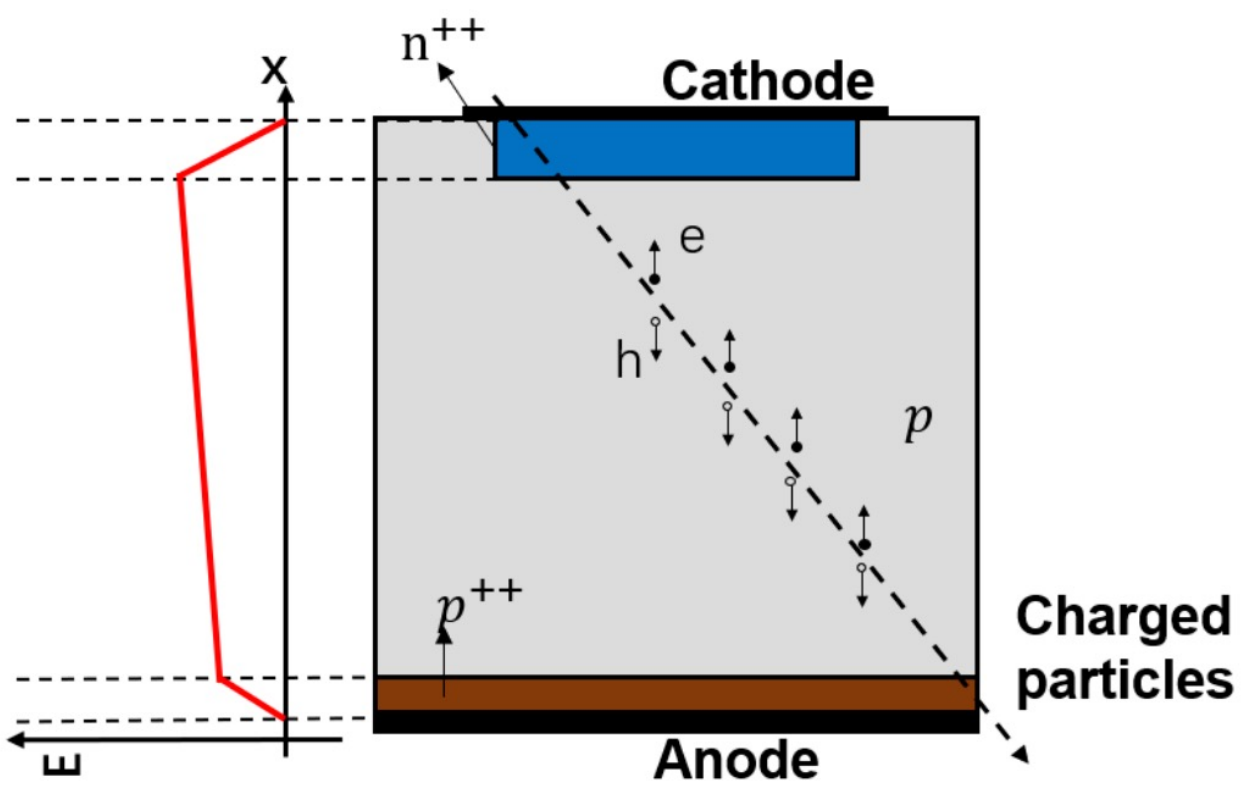
RASER简介

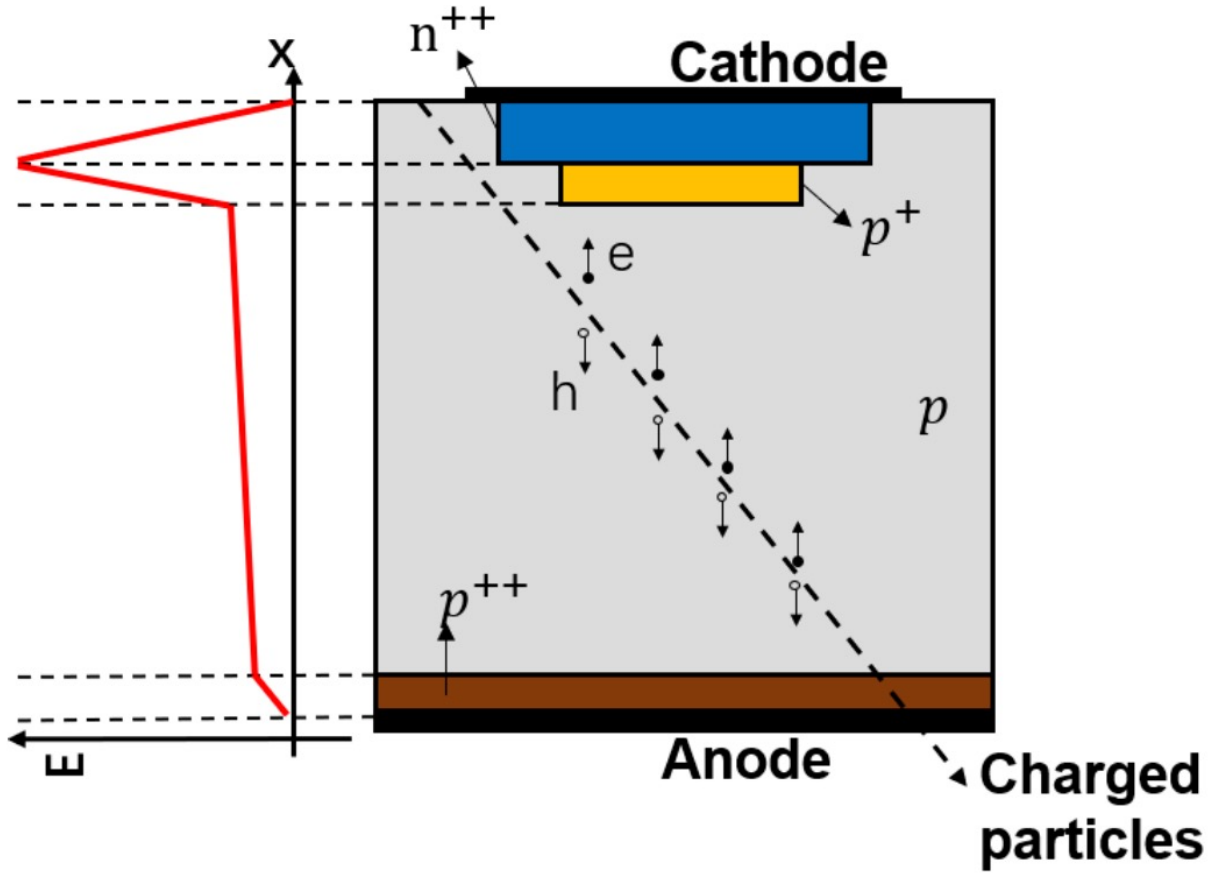
- python第三方库
- 模拟粒子探测的数据收集过程
  - 基本环节包括①参数设置，②探测器构型配置，③内建电场求解，④粒子射入，⑤载流子漂移与信号产生，⑥信号波形处理与⑦模拟噪声
    - 其中③~⑤为核心物理过程，⑥⑦为电子学过程
  - 额外环节有器件增益、光生载流子注入和缺陷模拟（待设计）等
- 目的在于辅助抗辐照半导体粒子探测器设计，提升时间分辨等性能

结，耗尽区，内建电场

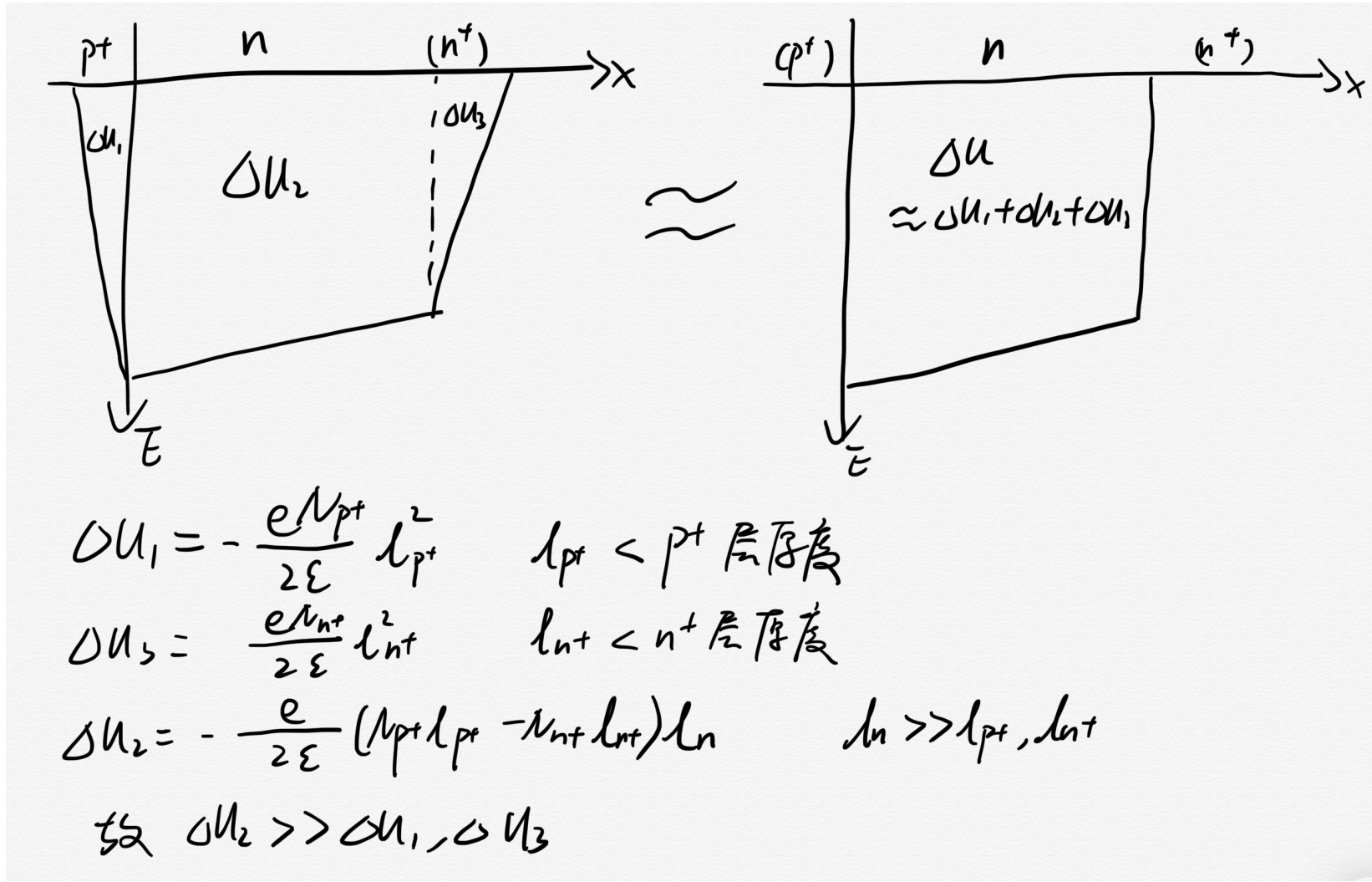
- pn结或肖特基结中会产生耗尽区，又称空间电荷区
- 耗尽区的特点：
  - 几乎没有自由流动的电荷，即使外加偏压
  - 故内部的电场完全由束缚电荷决定，继而由掺杂浓度和偏压决定
  - 由于没有自由电荷，粒子碰撞产生的载流子迅速漂移到非耗尽区
- 为使以上性能得到完全发挥，需要器件有稳定的大块耗尽区和很薄的非耗尽区
  - 耗尽深度反比于掺杂浓度，故需要两端薄、高掺，中间厚、低掺
  - 以一种pin构型p^+-n-n^+为例，当n层全耗尽时，p^+层与n^+层仅少量耗尽
  - 故RASER中只模拟中间低掺区域，将电压直接加到低掺层上

PIN与LGAD构型示意





电场近似：以PIN构型为例



$$\Delta U_1 = -\frac{eN_{p+}}{2\varepsilon} l_{p+}^2 \qquad l_{p+} < p^+ \text{层厚度}$$

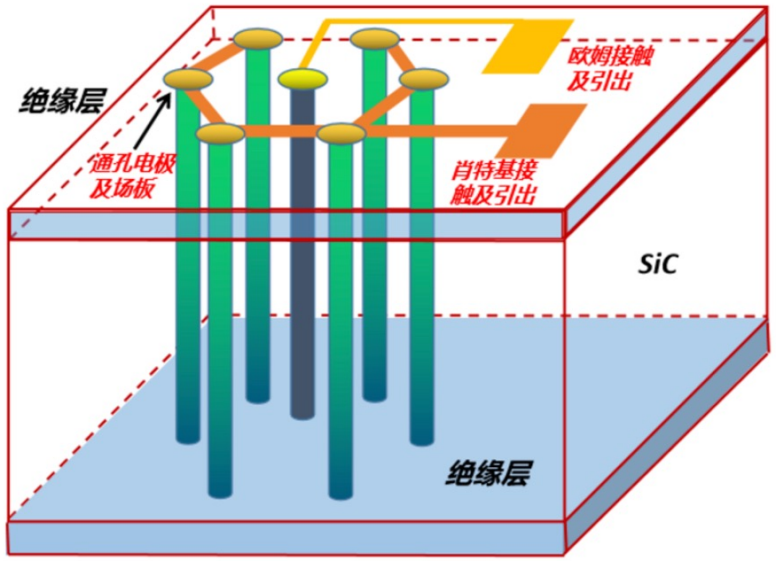
$$\Delta U_3 = \frac{eN_{n+}}{2\varepsilon} l_{n+}^2 \qquad l_{n+} < n^+ \text{层厚度}$$

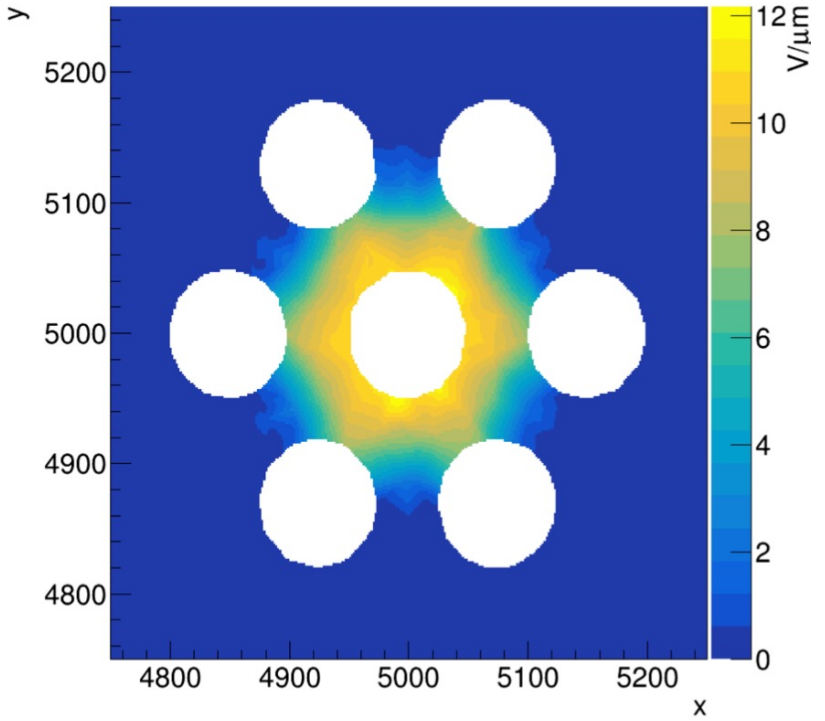
$$\Delta U_2 = -\frac{e}{2\varepsilon}(N_{p+} l_{p+} - N_{n+} l_{n+}) l_n \qquad l_n >> l_{p+}, l_{n+}$$

故 $\Delta U_2 >> \Delta U_1, \Delta U_3$

3D构型

- 器件的构型不必须为平板式，将高掺杂的半导体柱插入低掺杂的块体内同样可以产生耗尽区





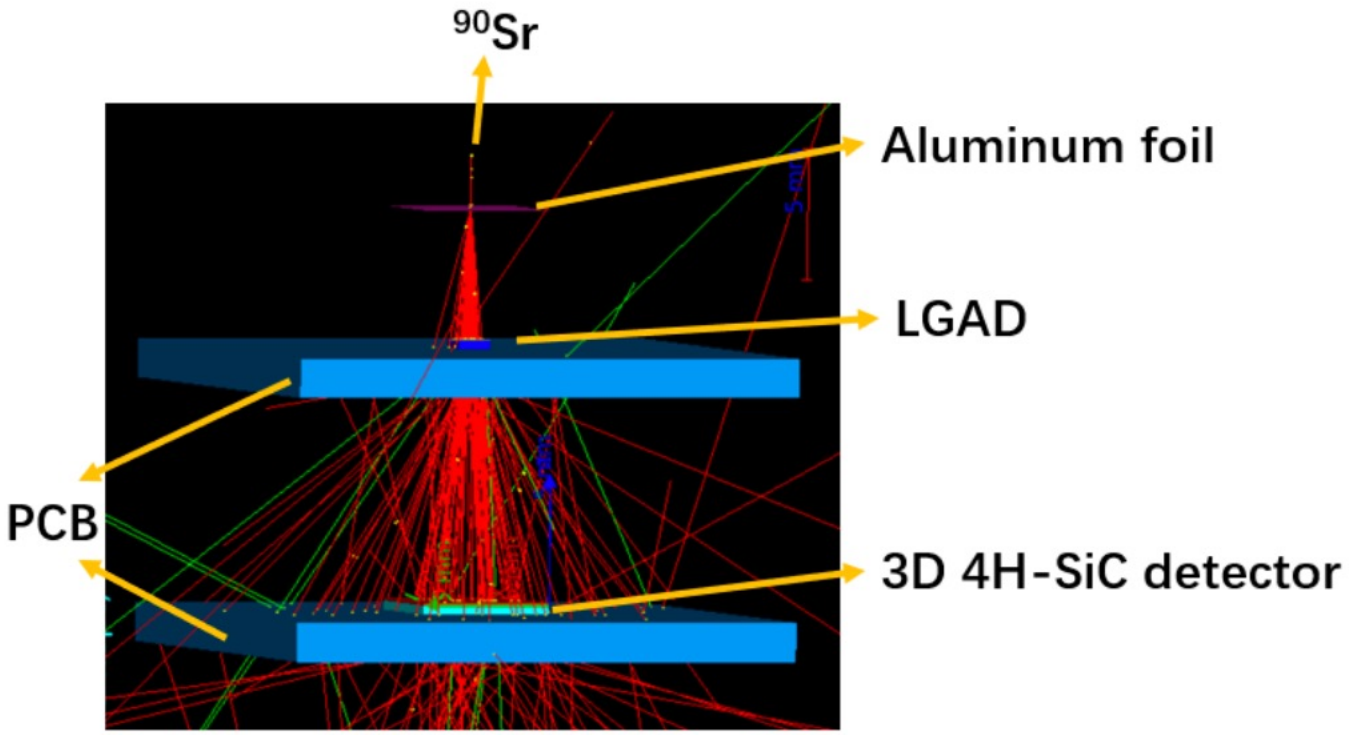
粒子射入与Geant4

- 对于高速穿过探测器的粒子，其行为类似于MIP（minimum ionizing particle 最小电离粒子），在介质中穿行一定距离，能量会减少固定值（dE/dx=C，可由贝特-布洛赫公式得到）

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \cdot \frac{nz^2}{\beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

- 对粒子能量的减少，认为其全部用于给价带电子提供能量以跨越禁带，故粒子在路径上产生的电子空穴对数目正比于路径长度
- 因粒子在探测器内的漂移具有随机性，并需模拟大量事例，故使用Geant4库来随机生成不同角度粒子射入材料块体，以产生随机路径，并对路径上每一段生成对应数量的载流子

Geant4可视化效果



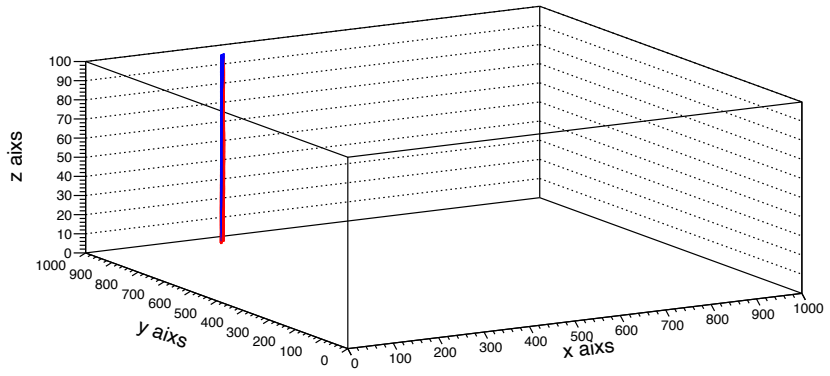
准粒子与载流子漂移

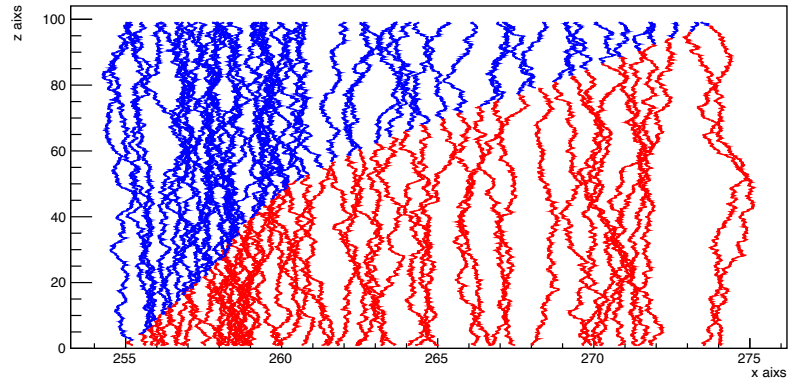
- 高能粒子碰撞满带中的电子会使其激发，并在满带顶留下空穴
- 粒子穿过块体速度远快于载流子漂移，故前者用时在RASER中被忽略
- 载流子大致满足牛顿运动定律，但是质量要被更换为准质量
- 由于没有自由电荷，产生的信号载流子以正比于电场的速度漂移到两极产生信号（遵循欧姆定律）

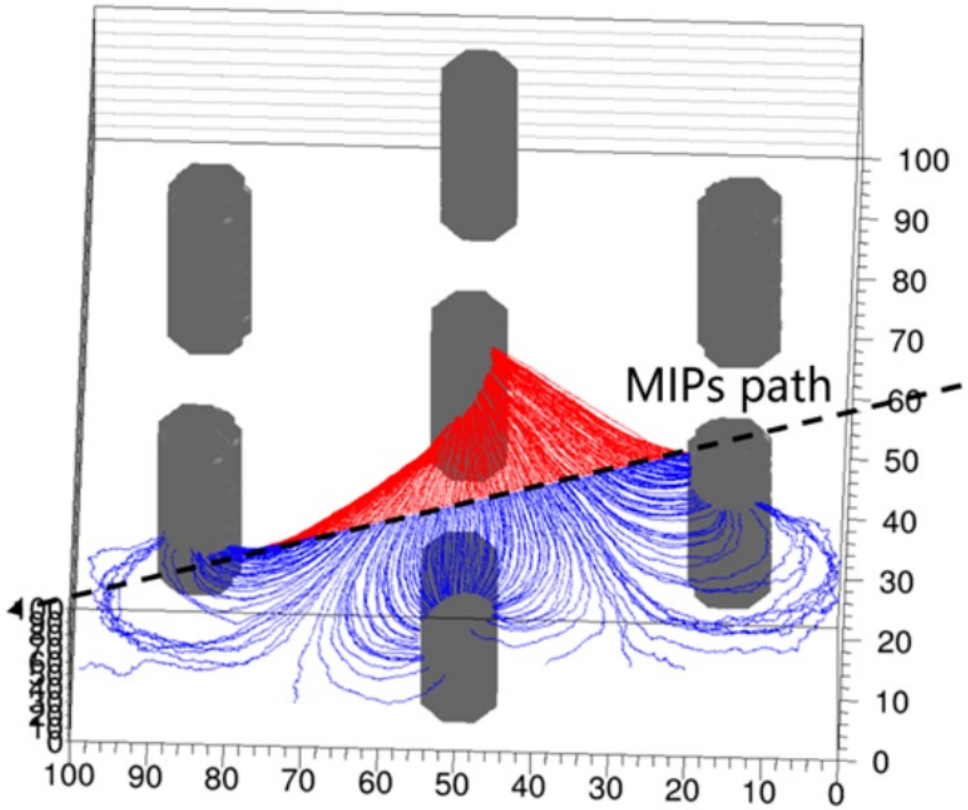
$$\boldsymbol{v}_d = \mu \boldsymbol{E} \qquad \mu_e^L = 1430 \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{V\,s}} \cdot \left(\frac{T}{300\ \mathrm{K}} \right)^{-2} \qquad \mu_h^L = 460 \frac{\mathrm{cm}^2}{\mathrm{V\,s}} \cdot \left(\frac{T}{300\ \mathrm{K}} \right)^{-2.18}$$

- RASER程序中需要综合考虑欧姆定律、载流子的随机漂移（以高斯函数的形式表现）和载流子漂移的起终条件
  - 目前认为载流子漂移到n区边缘即到达电极

PIN与3D构型中载流子漂移路径







肖克莱-拉莫定理与初级信号

- 对于一组电极中的一个，某个带电体移动在其上诱发的电流大小满足

$$I_s = - \ q \ \nabla U_w \cdot \vec{v}_{dr}$$

  - 其中U_w 是加权电场，即以本电极上为1、其他电极上为0为边界条件解拉普拉斯方程 $\nabla^2 \mathrm{U_w} = 0$ 得到的标量场
- 对于探测器，“带电体”指载流子，即电子与空穴在耗尽区中漂移引发的电流
- 实验中探测器耗尽程度越深载流子漂移距离越长，信号越大
  - 信号饱和时可以认为器件全部耗尽

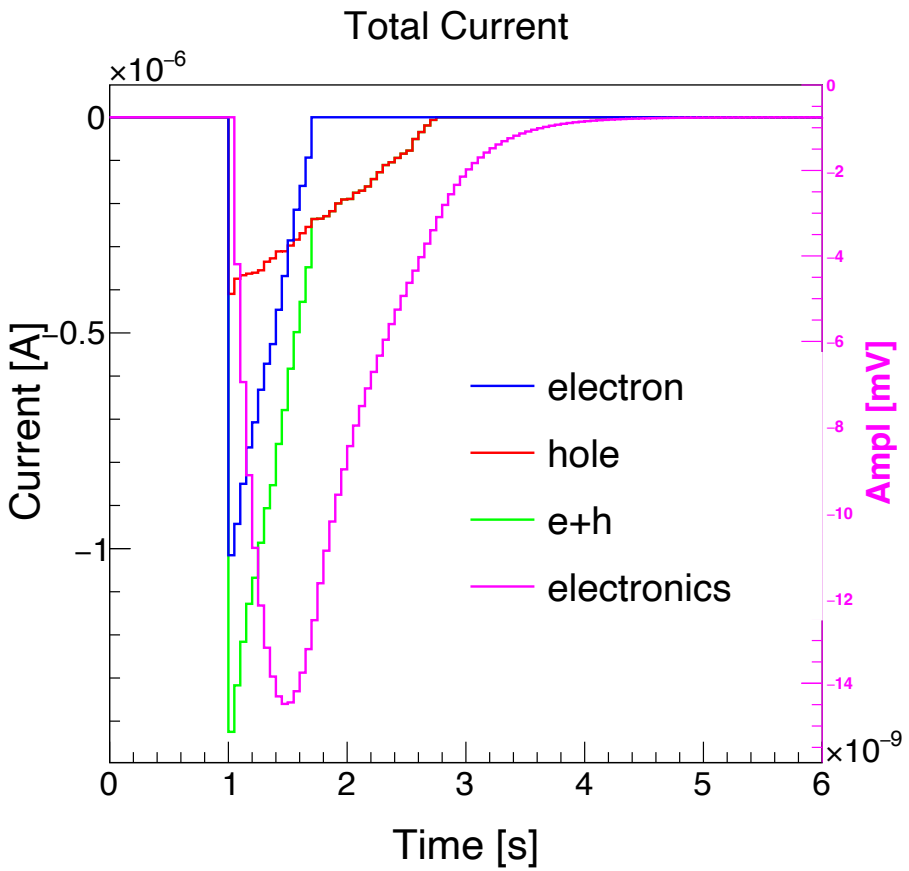
雪崩探测器(APD/LGAD)原理

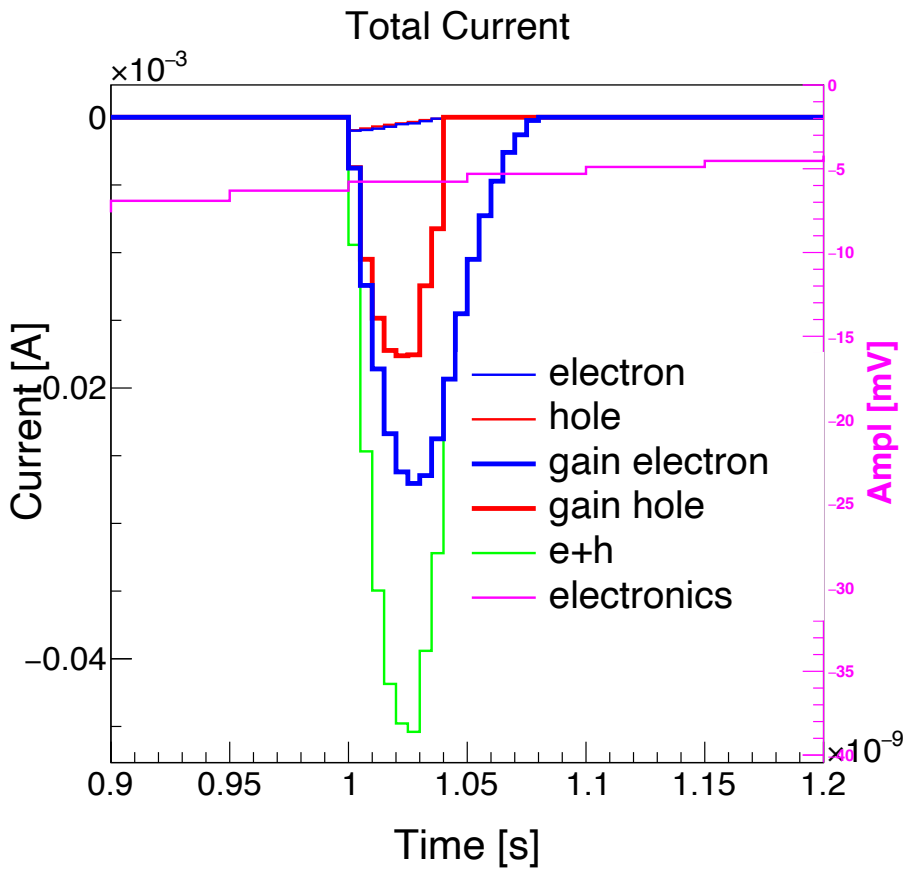
- 当载流子被电场加速到一定程度时，可能与束缚电子碰撞，产生新的载流子，称为增益载流子
- 增益载流子也有信号产生，并在原生载流子信号成峰之后
- 由于载流子速度基本取决于某处电场，故某段路径上载流子增加的倍数也是一定的
  - 若需产生高倍增益，需要器件在设计上容纳高电场区
  - 常见的设计有p^{++}- n^{+}-n-n^{++}（三角势垒）和p^{++}-n-n^{+}-n-n^{++}（方势垒）
- RASER为计算方便，认为增益载流子只由原生载流子经Chynoweth公式产生

$$\alpha_s^c = \alpha_s^c \exp(-b_s^c/E)$$

- 雪崩探测器可以为信号带来增益，某些增益倍数可以提升探测器的信噪比

PIN与LGAD信号对比





电子学和模拟噪声

- 由于MIP产生的载流子量不大，信号脉冲一般为ns宽，在μA量级
- 为了提取信号，提升信噪比及处理数据，需要多个环节的信号放大、整流、滤波
- 对探测器来说，只有粒子射入时刻是重要数据，其他信息可以丢失
  - 但是对器件设计来说这些信息依然重要

- 噪声由环境干扰等因素产生，加在电路上，不能由第一性原理直接得到，需要进行外加参数模拟

时间分辨

- 已知两个探测器测量粒子进入各自耗尽区时刻，可以得到粒子飞过对应空间距离的时长
- 两探测器时刻上的不确定度（时间分辨）相叠加即粒子飞行时长的不确定度
- 器件的时间分辨由若干项组成

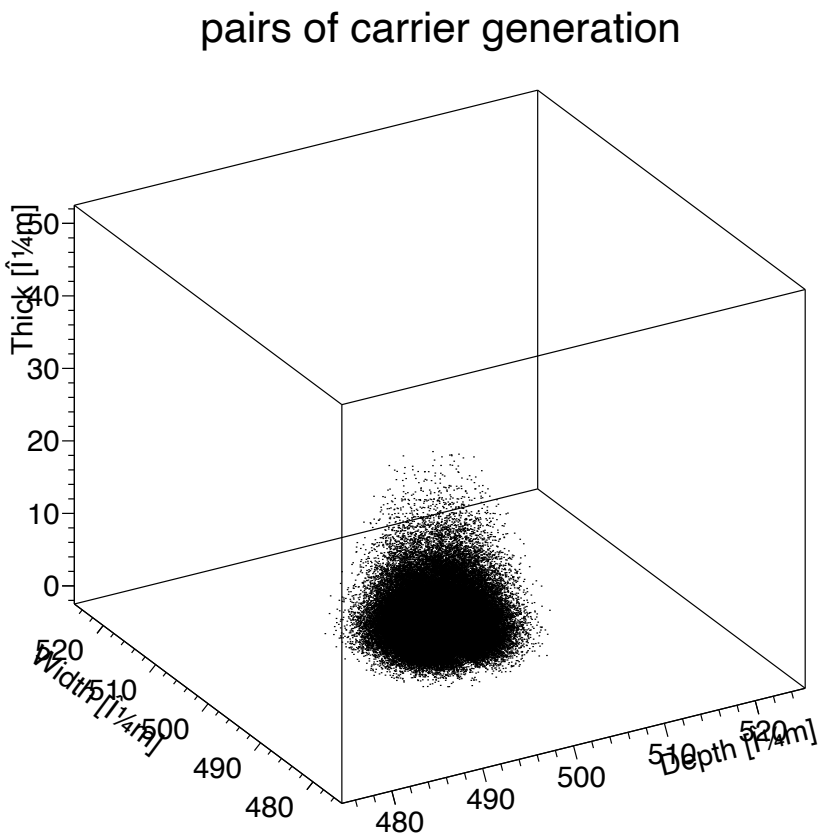
$$\sigma_{\mathrm{t}}^2 = \sigma_{\mathrm{Time\ Walk}}^2 + \sigma_{\mathrm{Landau\ Noise}}^2 + \sigma_{\mathrm{Jitter}}^2 + \sigma_{\mathrm{TDC}}^2$$

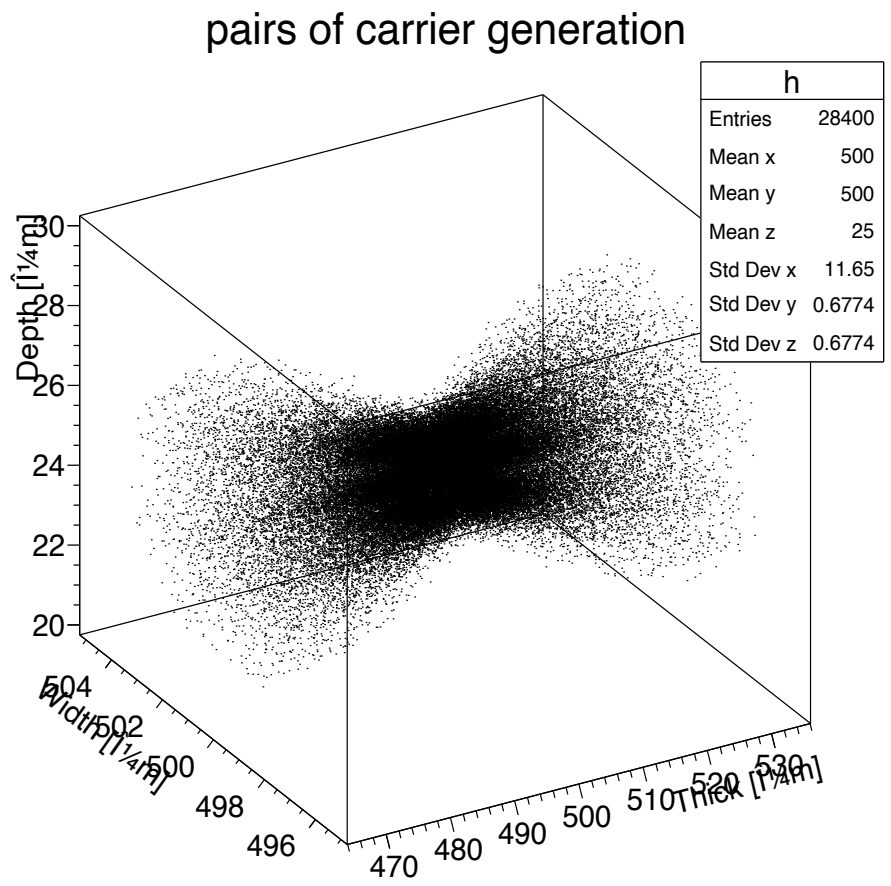
  - 分别为能量损失不确定性、能量损失不均匀性、噪声叠加、模数转换
  - 前两者在粒子漂移阶段模拟，后两者在电子学阶段模拟
- 实验上从总飞行时长的不确定度中消去一探测器已知的时间分辨，即得另一探测器未知的时间分辨

瞬时电流技术（TCT）

- 对于某些带有缺陷的器件，其载流子捕获率影响着其探测性能
  - 现版本只能对无缺陷器件做TCT
- 为了测量捕获率，可以引进光生非平衡载流子
- RASER程序中，将这些光生载流子视同粒子碰撞产生的载流子
  - *但是某处载流子密度过高很可能有库仑斥力、复合、偏离价带顶/导带底等情形发生，目前暂未考虑
- 对不同的器件适用顶注入、底注入、侧边注入等不同方法
  - 载流子集中在器件表面或光轴附近
- 双光子瞬时电流技术（TPA-TCT）
  - 载流子在焦点附近产生，有对器件进行三维扫描的潜力

TCT与TPA载流子密度图





待实现功能：缺陷模拟

- 器件在辐照过程中会受到损伤，使器件性能改变
  - 错位、空位、团块、杂质
  - 表现为各种深能级，进而表现为有效掺杂浓度
  - 有效掺杂浓度变化后器件耗尽深度等会直接改变
- 空间上的不均匀性？
- 具体辐射源产生的损伤模拟？
- ……