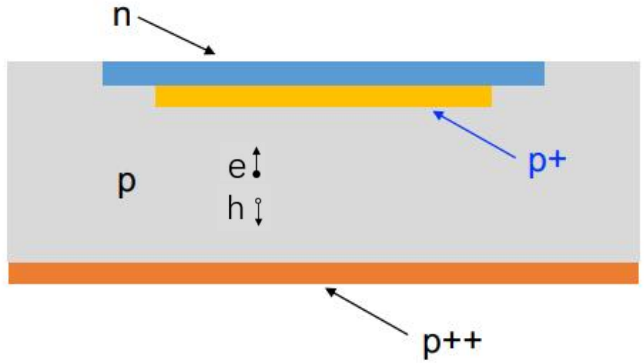
TCT测试研究

肖素玉

2022-09-15

TCT 简介

- 瞬态电流技术 Transient Current Technique 广泛应用于高能物理领域，可用于检测探测器芯片
- 探测探测器内部载流子漂移速度、收集电荷、捕获时间等

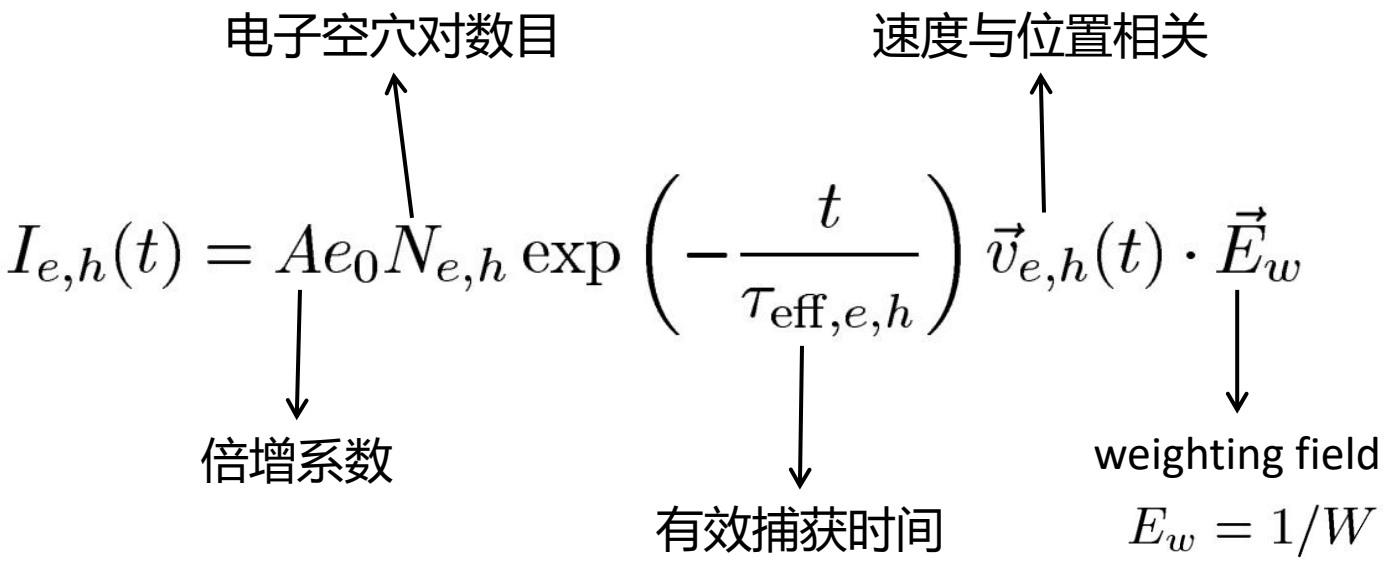


P型LGAD结构

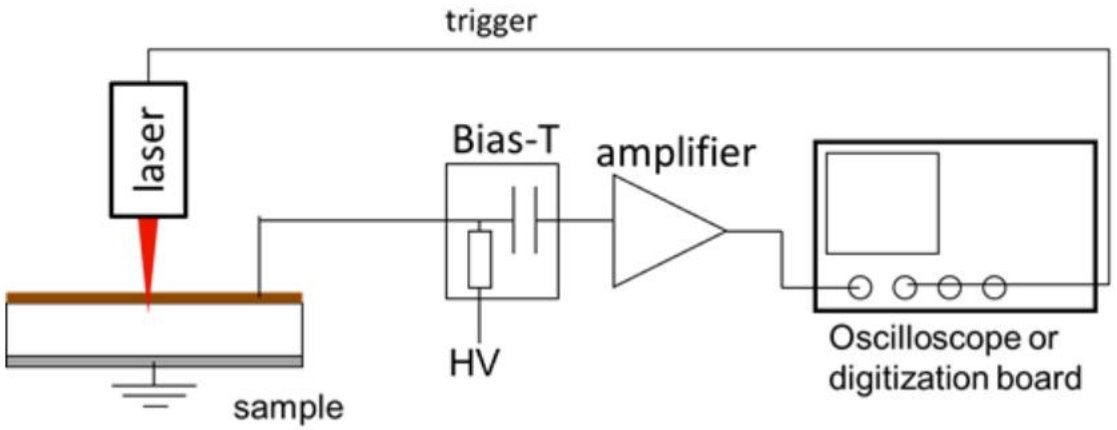
- nppp结构，p+层为增益层，bulk主体为p型
- 当粒子穿过LGAD时，电子空穴对产生，并在外加电场的作用下漂移

TCT

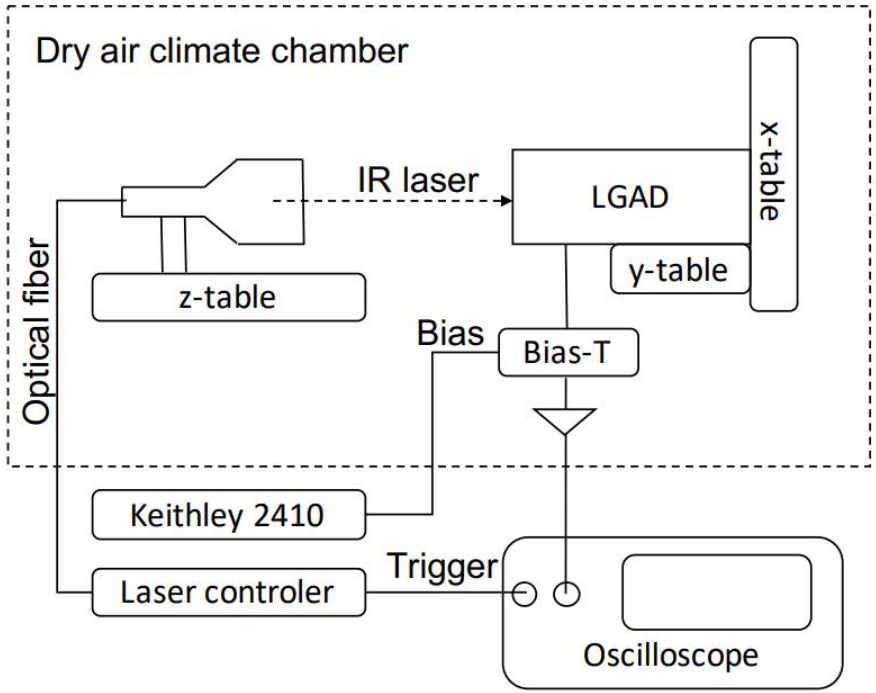
- TCT探测依赖于感应电流的测量



TCT两种测试方法



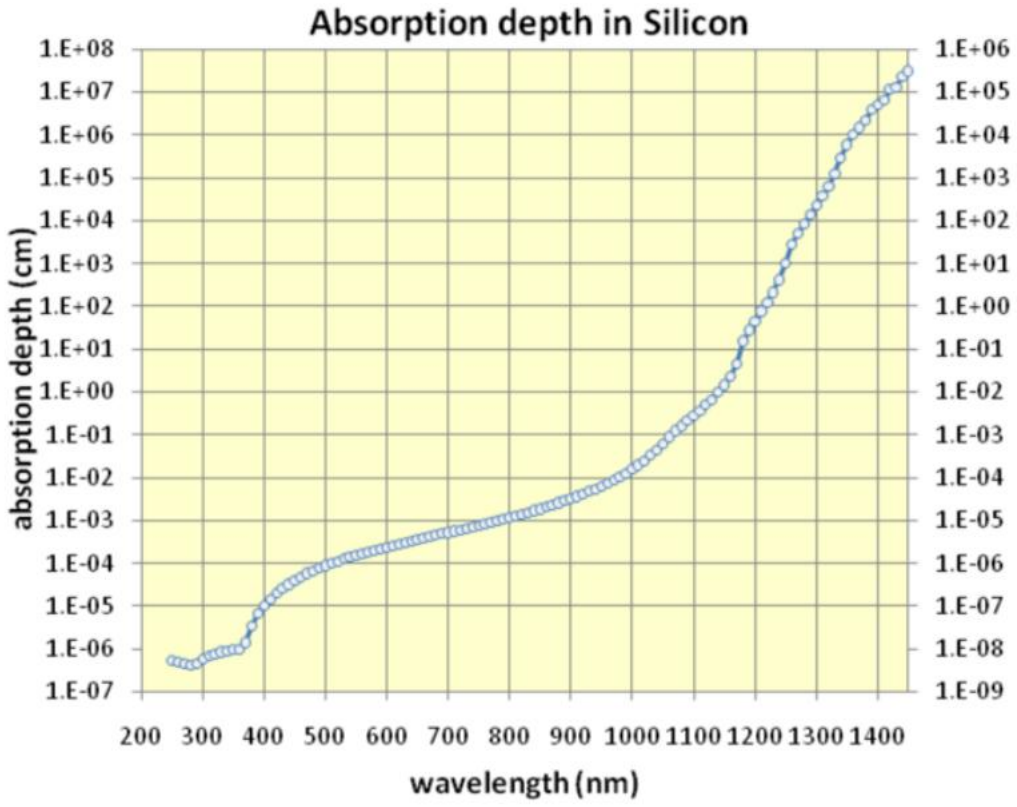
Top-TCT set-up



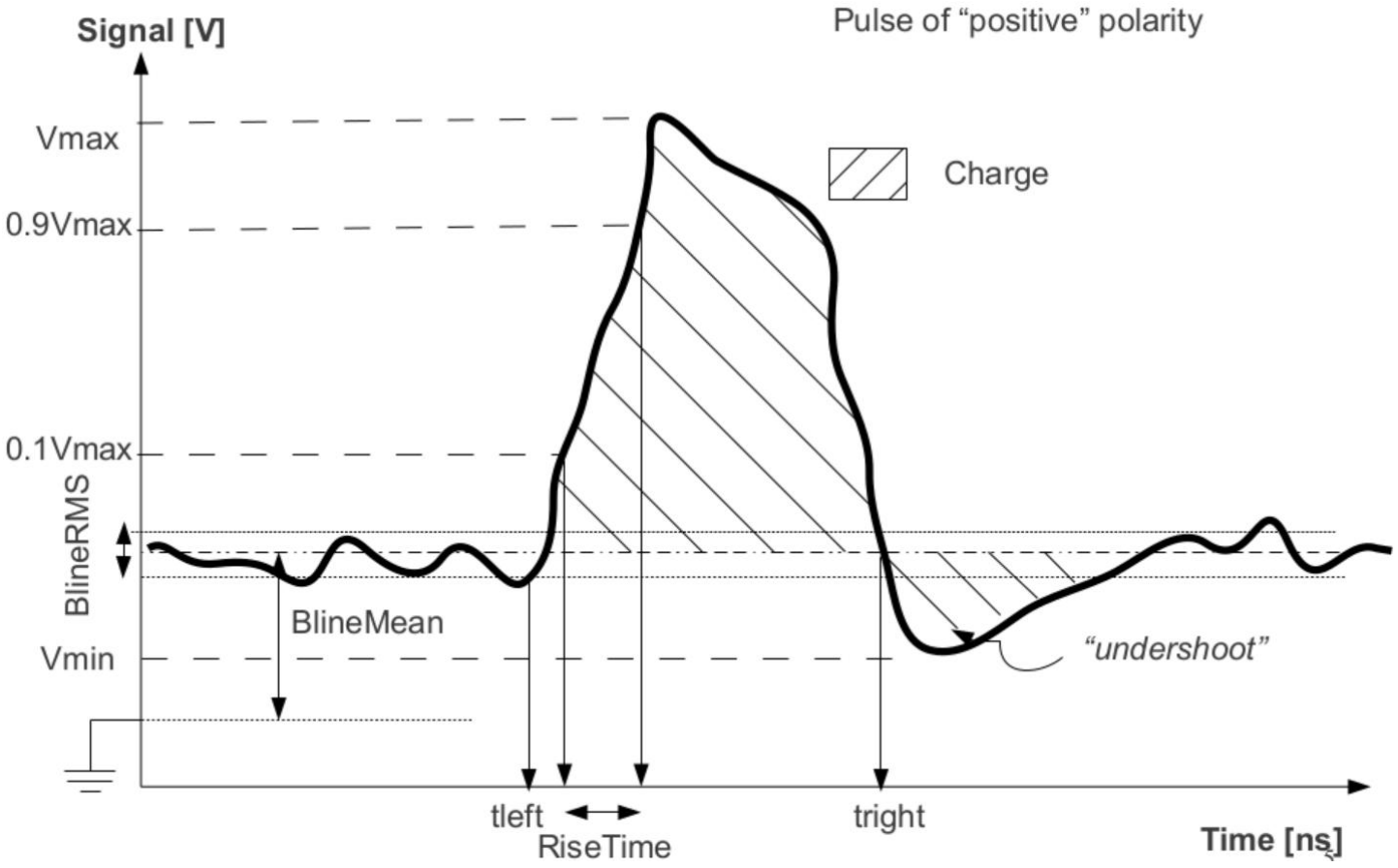
Edge-TCT set-up

激光的选取

- 红光在Si中穿透深度~3um，可用于top-TCT测试
- 红外光在Si中穿透深度~1mm，可用于edge-TCT测试

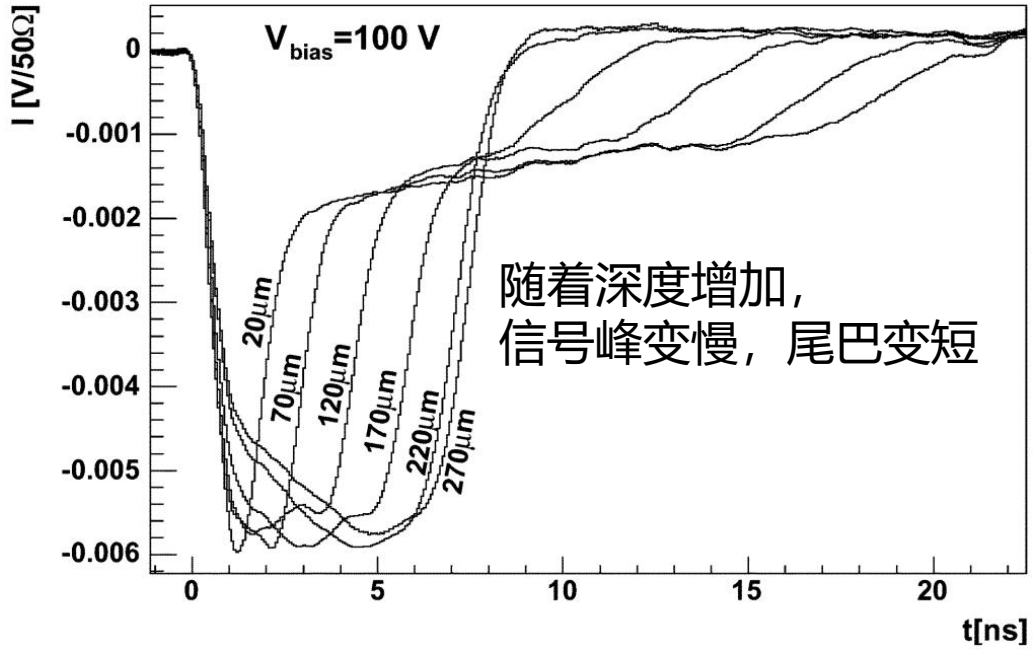


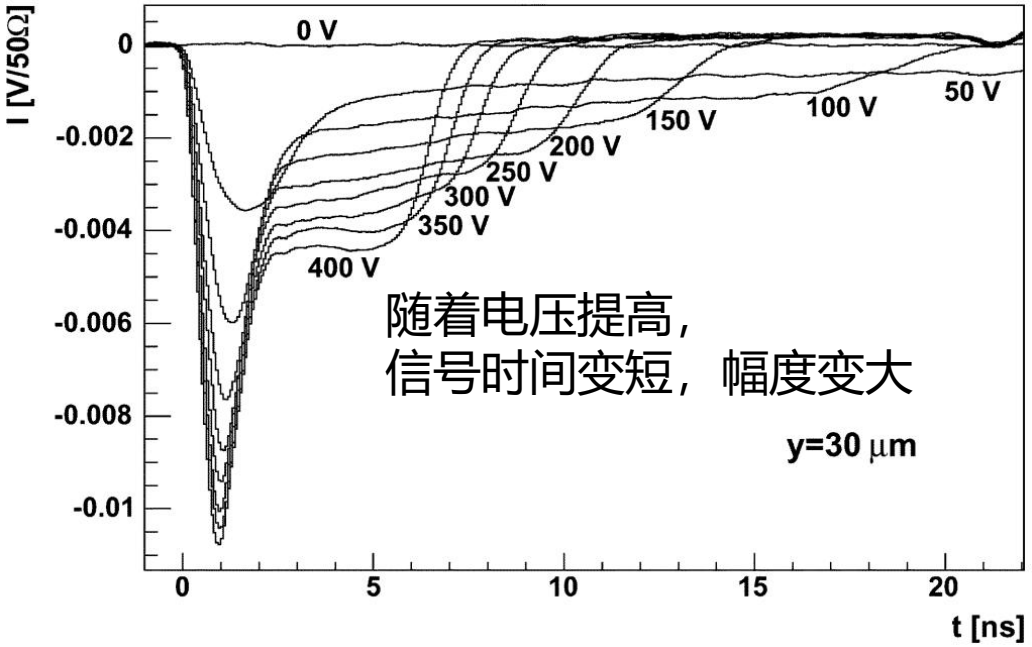
典型波形

- 
Signal [V]
Pulse of “positive” polarity
Vmax
0.9Vmax
0.1Vmax
BlineRMS
Vmin
Charge
BlineMean
“undershoot”
tleft
RiseTime
tright
Time [ns]

波形分析

- 感应电流随探测器深度、外部电压的变化曲线

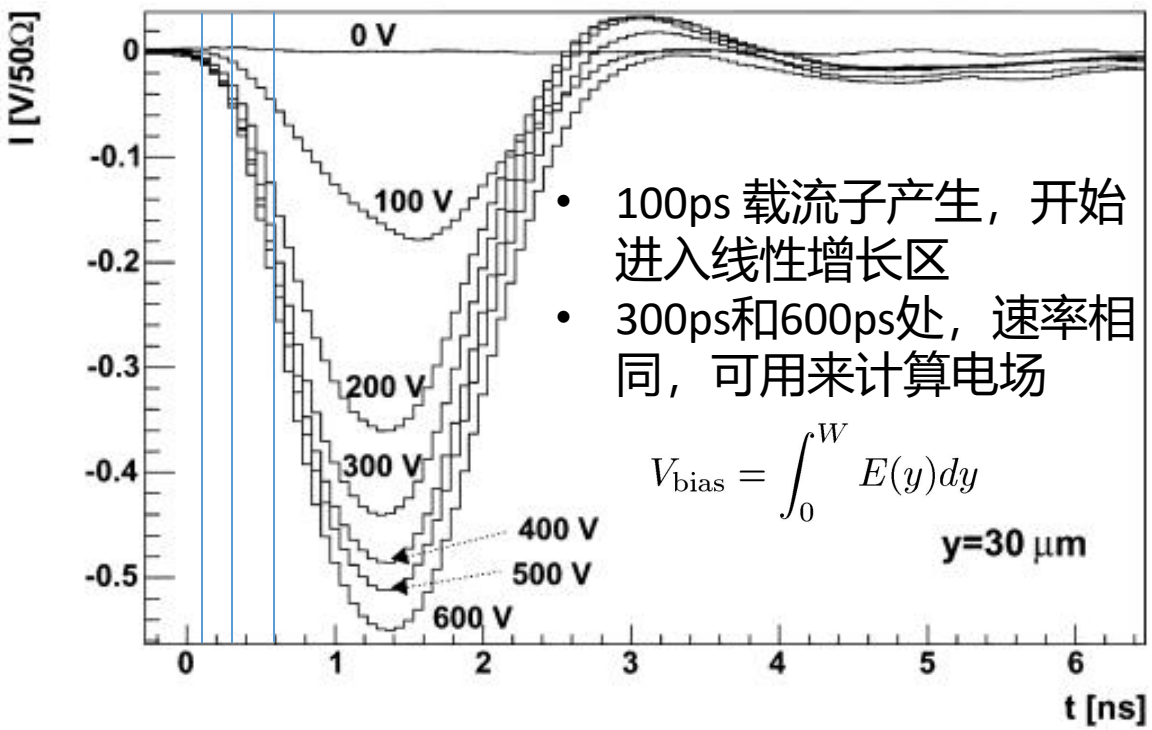




电场获取 -- 上升沿

$$\exp(-t/\tau_{\mathrm{eff},e,h}) \approx 1$$

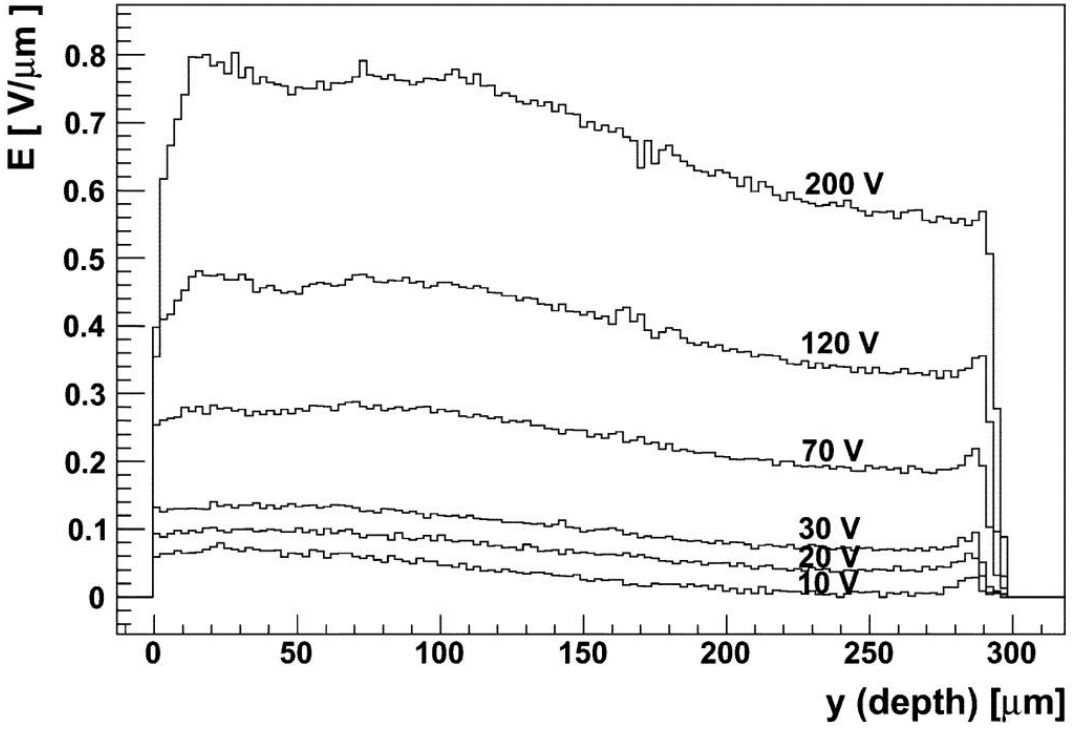
$$I(y,t) = I_e(y,t) + I_h(y,t) \approx e_0 A N_{e,h} \frac{v_e(y) + v_h(y)}{W} \approx \frac{e_0 A N_{e,h}}{W}[\mu_e(E) + \mu_h(E)]E(y)$$



- 100ps 载流子产生，开始进入线性增长区
- 300ps和600ps处，速率相同，可用来计算电场

$$V_{\mathrm{bias}} = \int_0^W E(y)dy$$

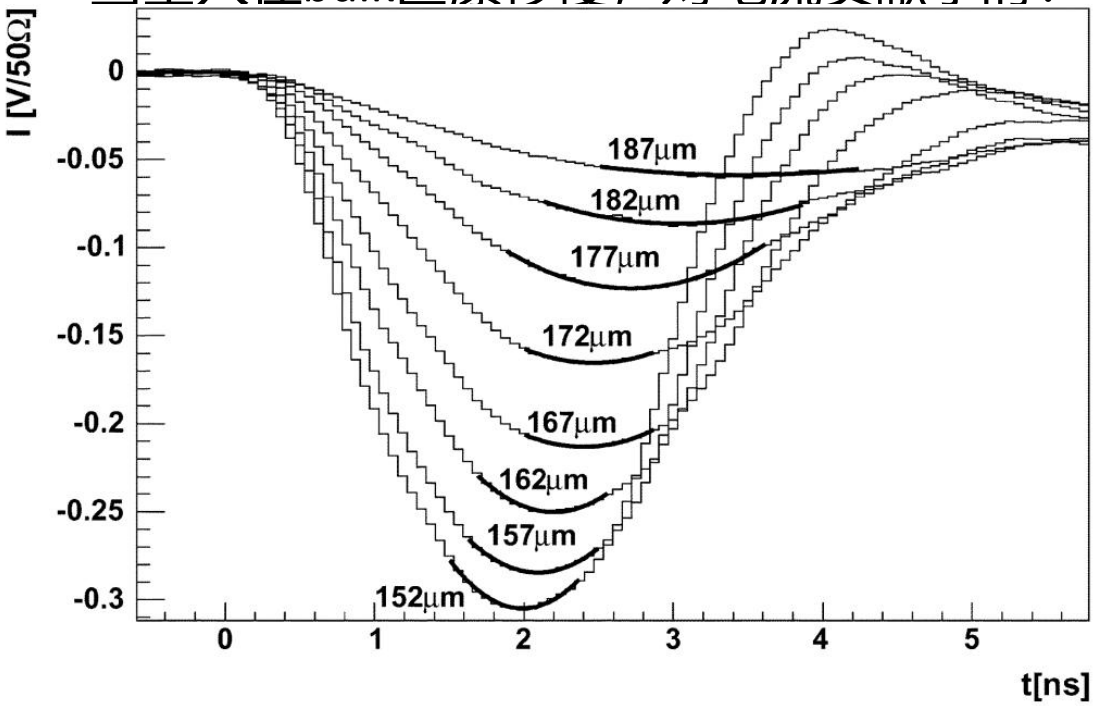
y=30 μm

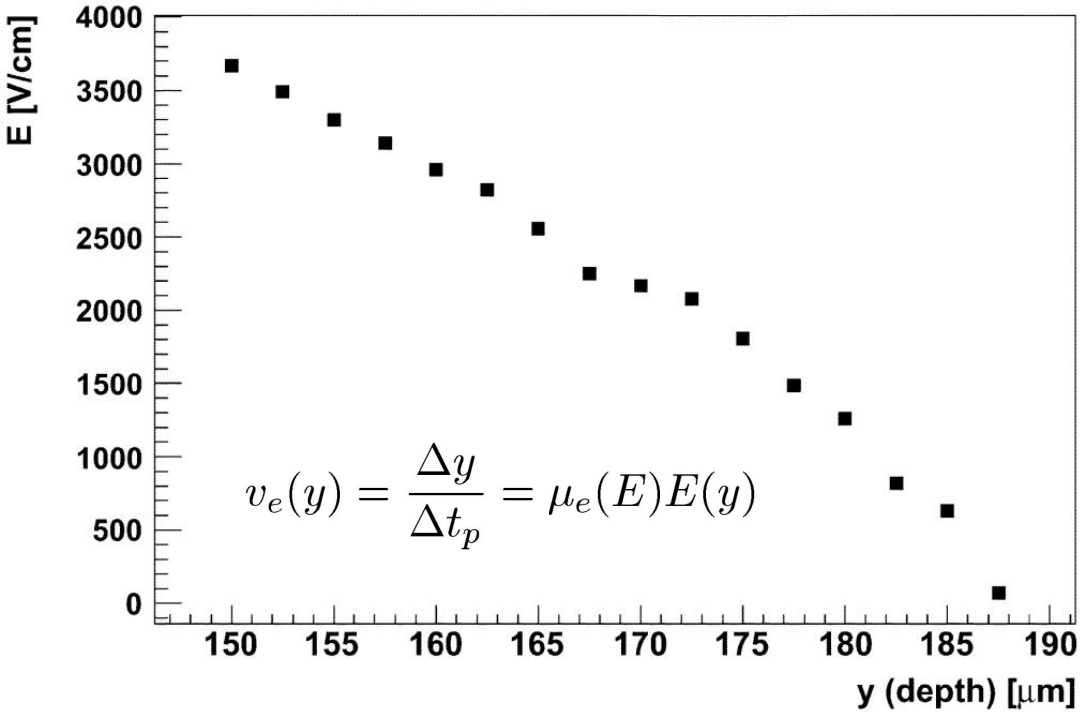


难题：对于电场非常高的区域，载流子漂移速率达到饱和，无法反映正确的电场强度

电场获取 -- 峰值时间

当空穴在bulk区漂移慢，对电流贡献小时：



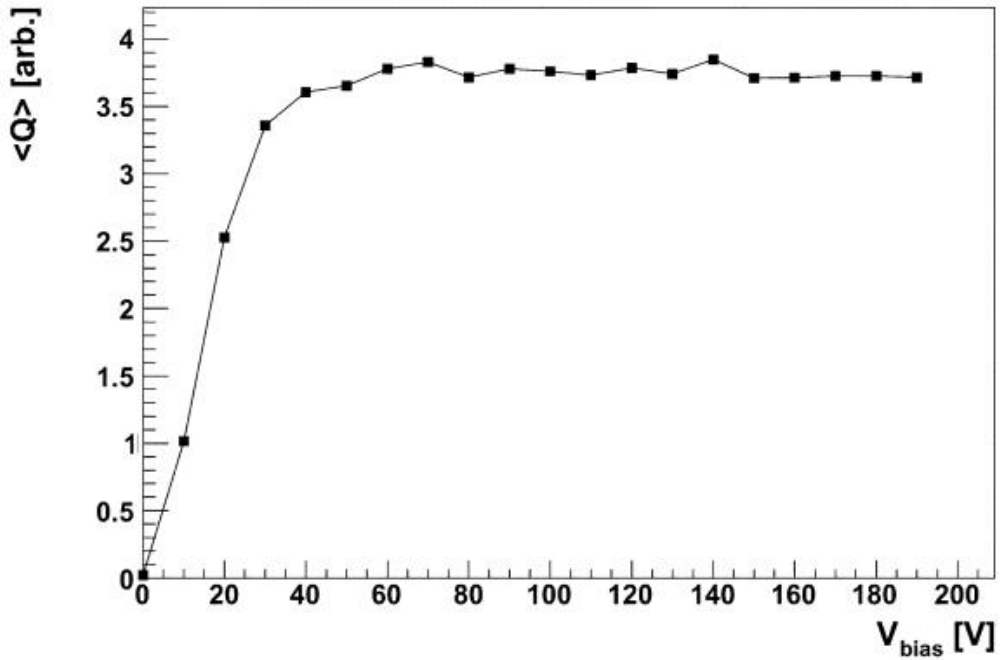


- peak time + 电子的漂移距离 -> 电子的漂移速率
- 限制条件：空穴贡献可忽略。

收集电核

- 通过感应电流对时间的积分，计算探测器收集电荷的大小

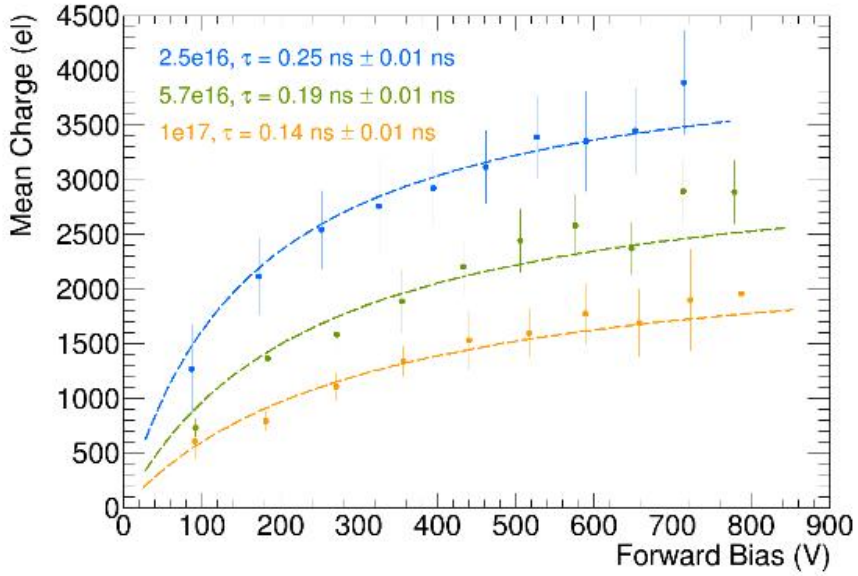
$$Q(y) = \int_0^{t_{\text{int}}} I(y,t)dt$$

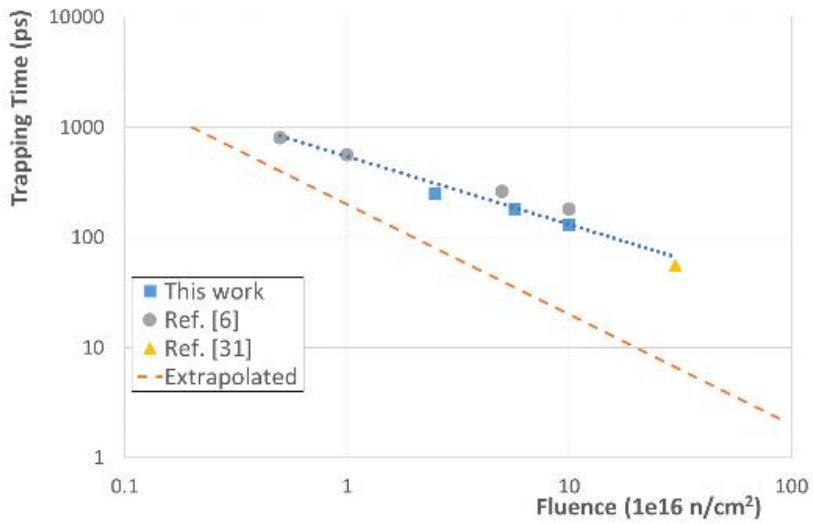


辐照　捕获时间

- 有效掺杂浓度改变：$N_{\mathrm{eff}} = N_{\mathrm{eff},0} - N_{\mathrm{c}} \cdot (1 - e^{-c\Phi_{\mathrm{eq}}}) + g_c \cdot \Phi_{\mathrm{eq}}$
- 探测器辐照之后，引入了新的缺陷，导致载流子在漂移过程中更容易被俘获，从而捕获时间发生改变

$$Q = \frac{\Delta Q}{\delta x} \cdot D \cdot \frac{1}{D} \cdot v \cdot \tau = \frac{\Delta Q}{\delta x} \cdot v \cdot \tau, \quad v = v_e + v_h = \frac{\mu_{0,\mathrm{sum}} E}{1 + \frac{\mu_{0,\mathrm{sum}} E}{v_{e,sat} + v_{h,sat}}} \quad \mu_{0,\mathrm{sum}} = 3500\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{Vs} \cdot \left(\frac{\Phi}{10^{15}\mathrm{n/cm}^2}\right)^{-0.46},$$





模拟软件 RASER

- 电场和势场的求解：

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{U}}(\mathrm{r}) = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

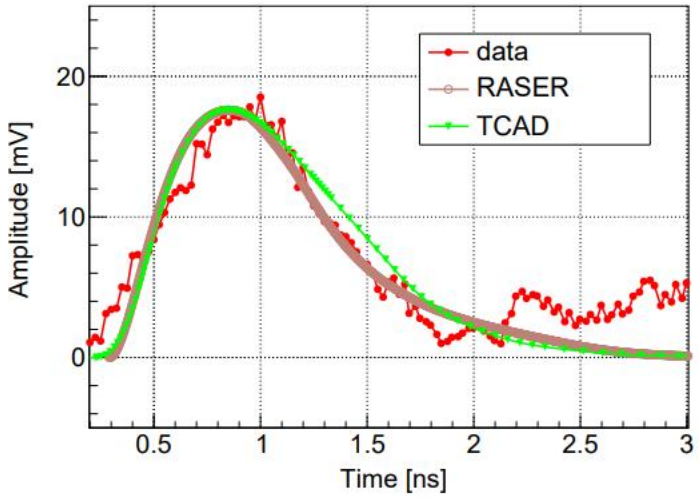
$$\nabla^2 \vec{\mathrm{U}}_{\mathrm{w}}(\mathrm{r}) = 0$$

- 感应电流求解（Ramo-Shockley law）：

$$\mathrm{I} = -\mathrm{q}\vec{\mathrm{v}}(\mathrm{r}) \cdot \vec{\mathrm{E}}_{\mathrm{w}}(\mathrm{r})$$

RASER与TCT波形对比

- RASER模拟的波形与TCT测试的波形如图：



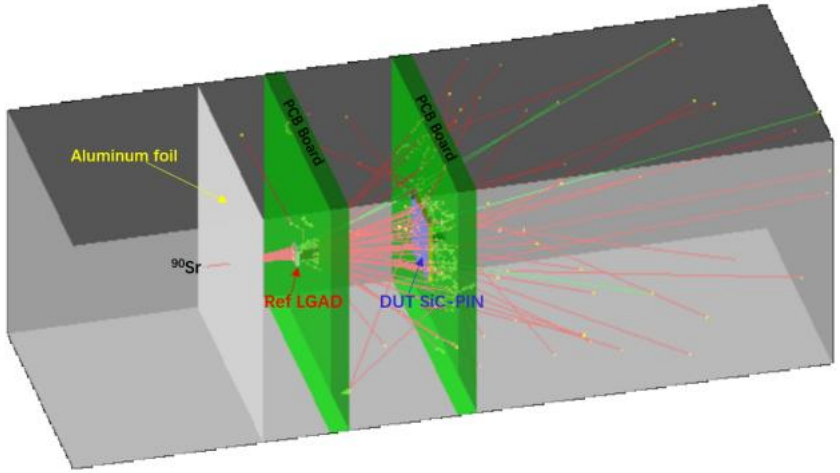
- 经过RASER模拟，计算感应电流、考虑CSA电荷灵敏放大器作用，可以得到与实验测试较为符合的波形。

获取时间分辨

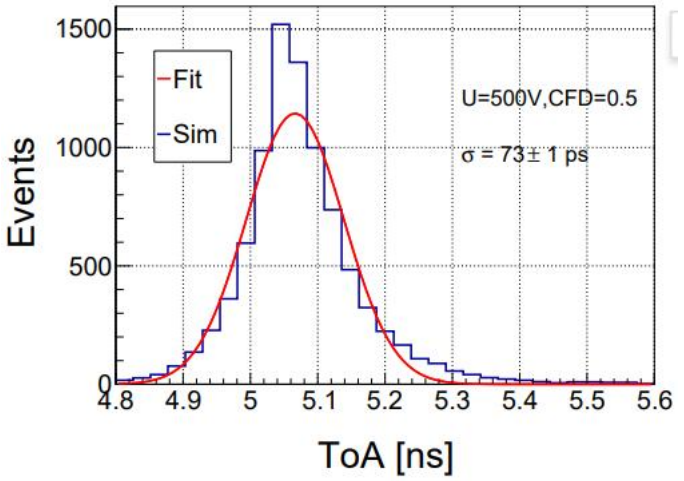
- 时间分辨

$$\sigma_t^2 = \sigma_{\text{Time Walk}}^2 + \sigma_{\text{Landau Noise}}^2 + \sigma_{\text{Distortion}}^2 + \sigma_{\text{Jitter}}^2 + \sigma_{\text{TDC}}^2$$

$$\sigma_{Jitter} = \text{N}/(\text{dV}/\text{dt}) \approx t_{rise}/(\text{S}/\text{N})$$



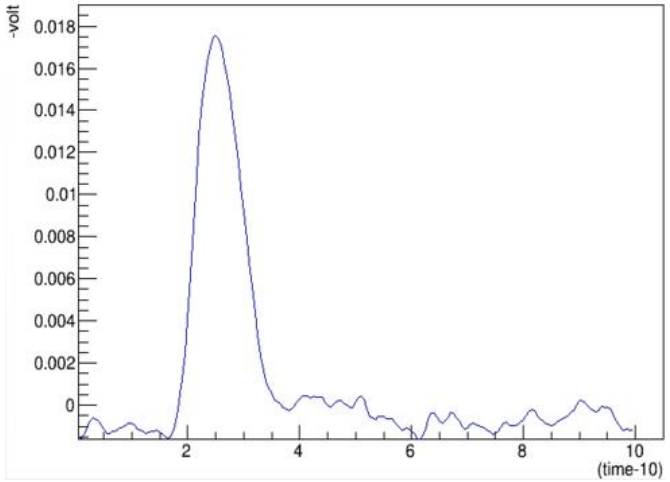
时间分辨测试实验装置示意图



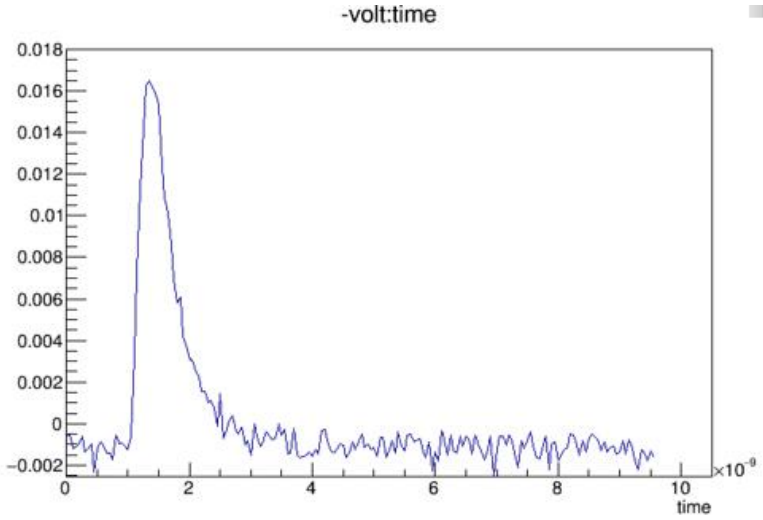
高斯拟合得到时间分辨

RASER TCT模拟

- 波形比较



TCT测试波形



RASER模拟波形
(理论计算感应电流+高斯随机数噪声)

总结

- TCT作为高能物理领域的探测手段，能实现对探测器电场、电荷、俘获时间等方面的研究，帮助我们进一步探索辐照后探测器的变化。
- RASER作为我们开发的模拟软件，有望实现对于TCT的模拟，电子学有待进一步优化。受制于载流子饱和速度的影响，电场计算方法有待改善。