



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY

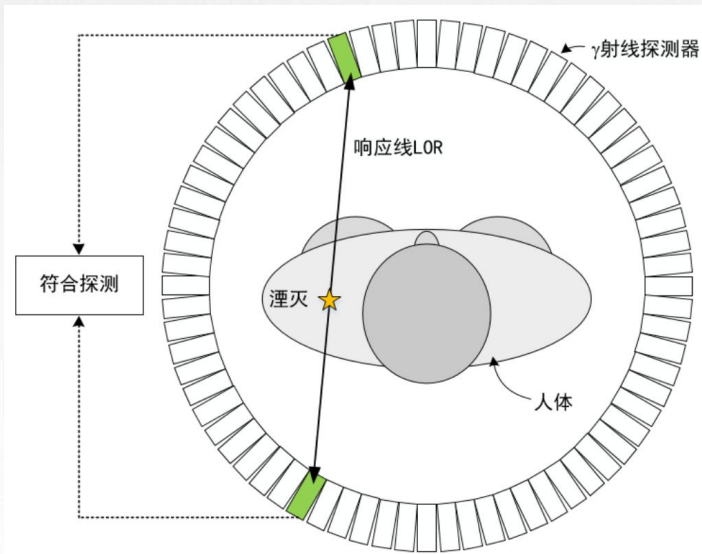
用于高精度时间探测器 (SiPM&LGAD) 的前端电路研究进展

汇报人：赵佳垚 吴瑶 郑然*

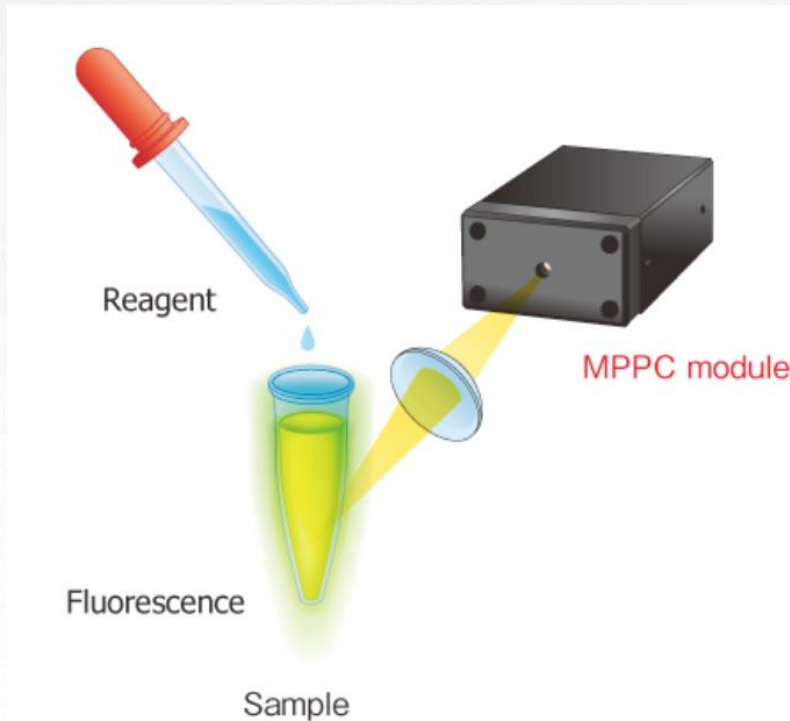
zhengran@nwpu.edu.cn
西北工业大学微电子学研究所



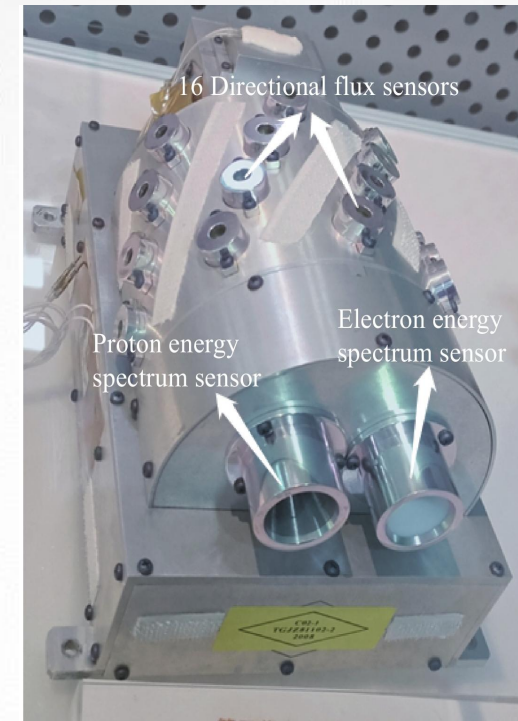
SiPM探测器应用



医学成像



粒子计数器



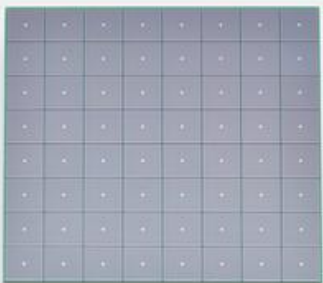
空间粒子探测



SiPM探测器特性

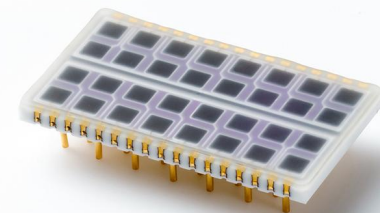
SiPM

- 增益高、量子效率高
gain $\sim 10^6$, 可进行单光子检测
- 响应速度快
 $t_r \sim 1\text{ns}$
- 工作电压低
工作电压仅需几十伏
.....



APD

- 增益低
gain $\sim 10^3$



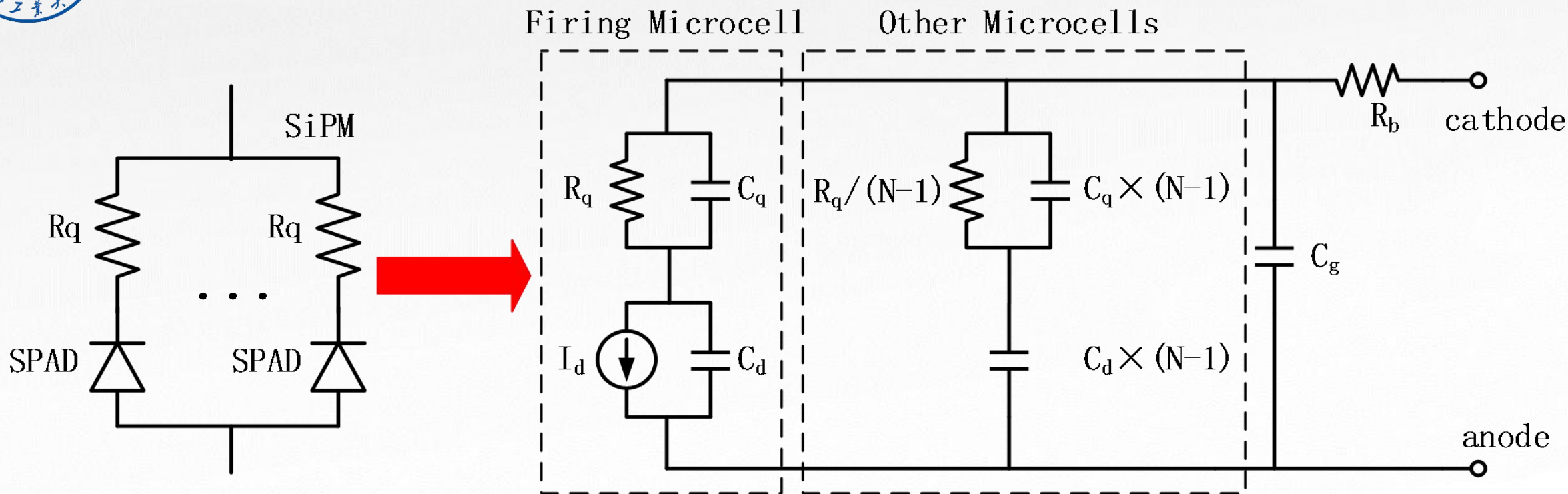
PMT

- 体积大、偏压高
 $V_{\text{bias}} > 1\text{kV}$
- 量子效率低
QE $\sim 25\%$ @420nm





SiPM探测器电学模型



| SiPM模型 | R_q/Ω | C_q/F | C_d/F | C_g/F | R_b/Ω | N |
|--------|--------------|---------|---------|---------|--------------|------|
| 模型一 | 160k | 7f | 80f | 6.8p | 0 | 3600 |
| 模型二 | 71.2k | 30f | 74f | 40.8p | 22.9 | 3600 |



研究现状

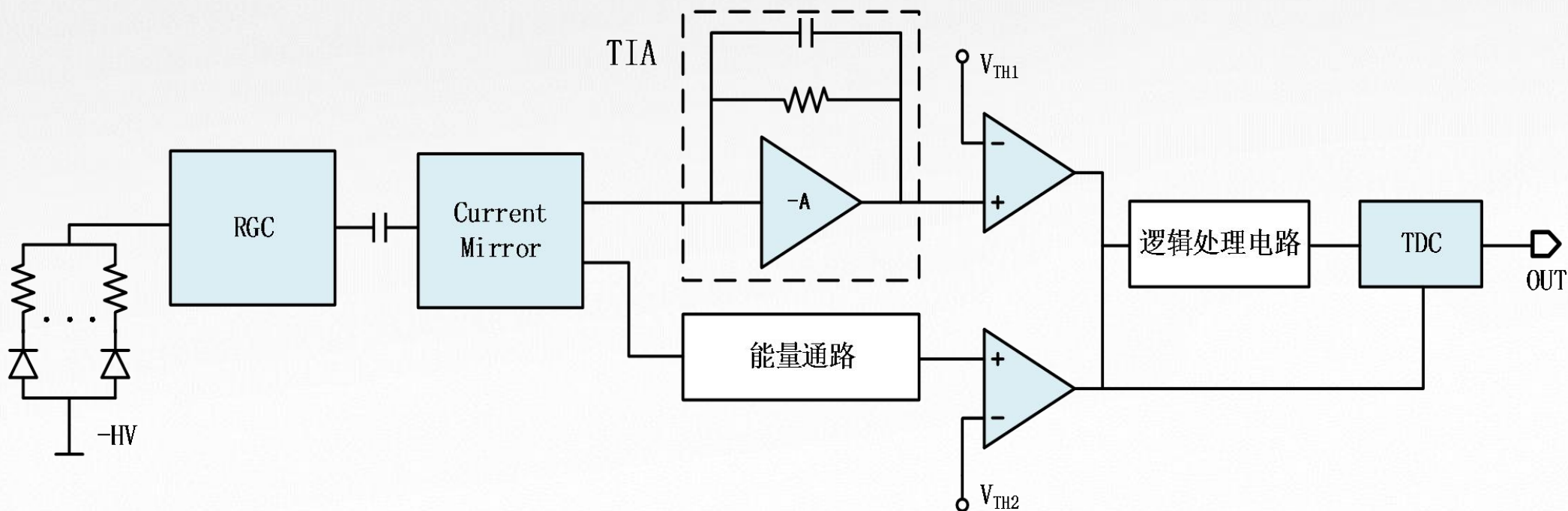
| 芯片名称 | 年份 | 工艺 | 输入级电路 | 时间分辨率 |
|-----------|------|--------------------|----------------------|----------------|
| BASIC64 | 2016 | 0.35 μm | CG | 300ps@1000p.e. |
| TOFPET2 | 2016 | 0.11 μm | RGC | 83ps@1p.e. |
| HRFlexToT | 2022 | 0.18 μm | RGC+HF _{FB} | 167ps@1p.e. |
| ToT-ASIC2 | 2023 | 0.25 μm | RGC | 52ps |

前端电路设计挑战:

- 探测器输出信号上升时间约1ns，电路带宽需**大于350MHz**；
- 探测器等效电容高达约**300pF**，会对电路响应速度及稳定性产生影响。



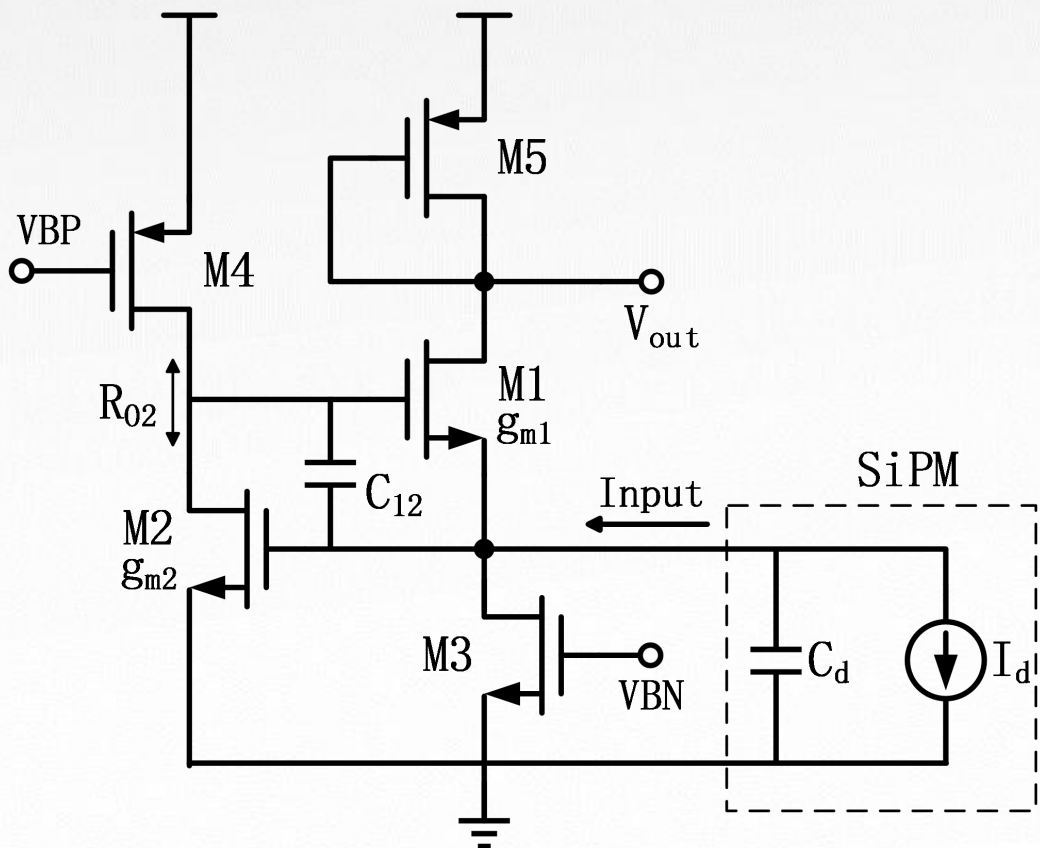
电路系统结构



- SiPM探测器端电容较大 ($\sim 300\text{pF}$)，故输入级使用低输入阻抗的RGC电路进行电流模式读出；
- 双阈值甄别信号，筛除SiPM探测器的暗电流触发；
- 能量通路拟对信号进一步整形，用于信号ToT测量。



RGCC 电路设计



$$\omega_0^2 = \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_d C_{12}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{g_{m1}A_0 C_{12} R_{o2}}}{C_d + A_0 C_{12}}$$

$$A_0 = g_{m2} R_{o2}$$

速度

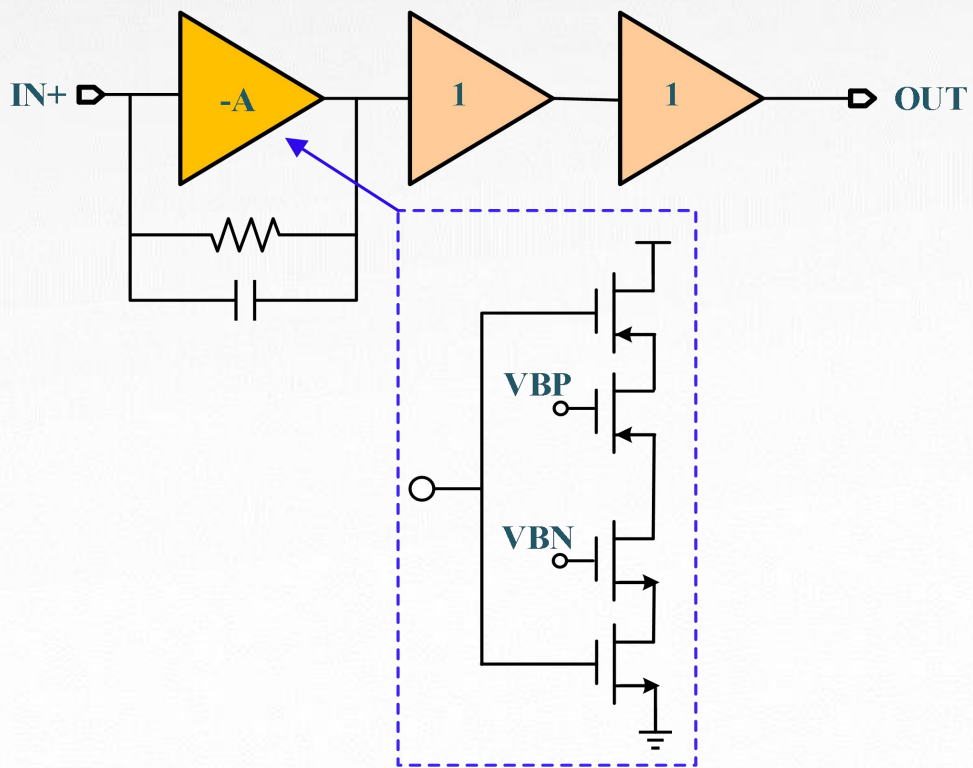


稳定性

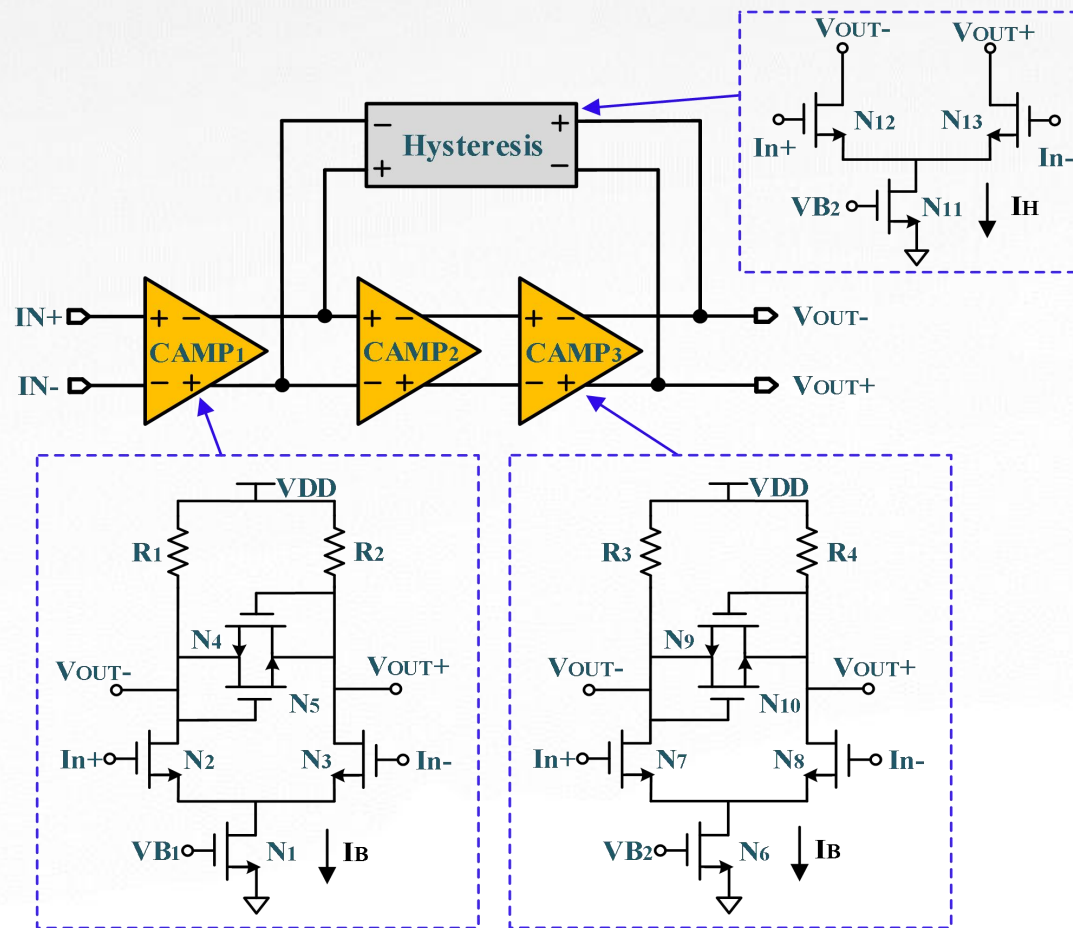
| RGCC 电路性能 | |
|-----------|--------|
| 带宽 | 430MHz |
| 噪声 | 1mV |
| 稳定性 | Q=0.54 |
| SPTR | 51ps |
| 功耗 | 2.2mW |



其他电路设计



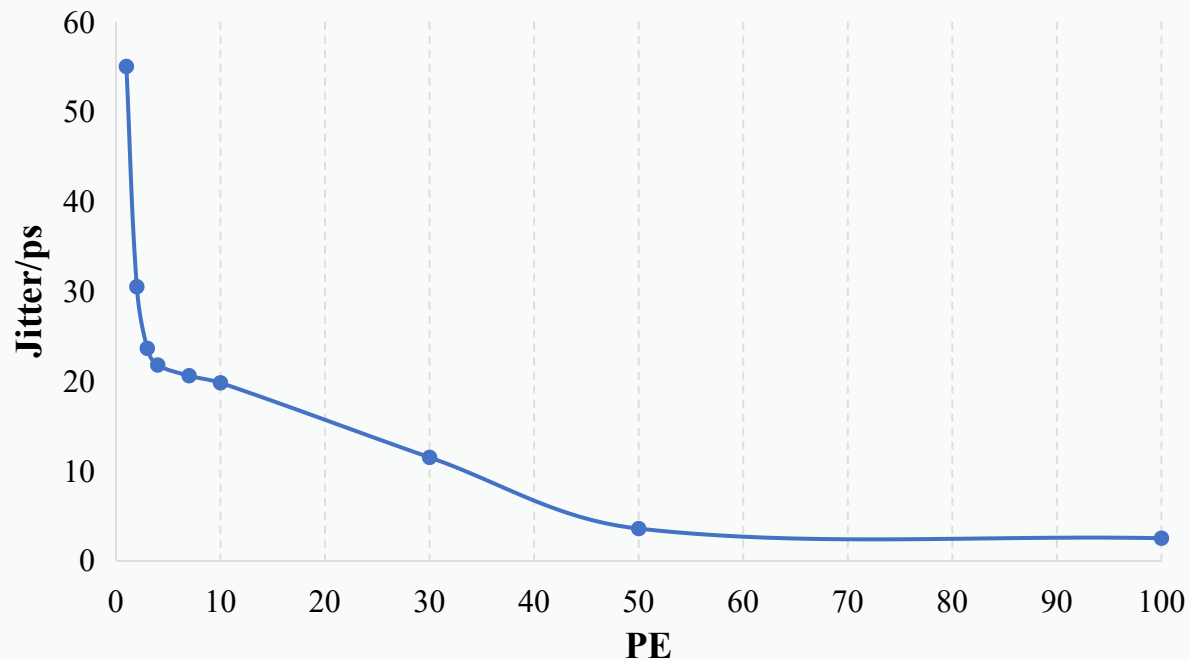
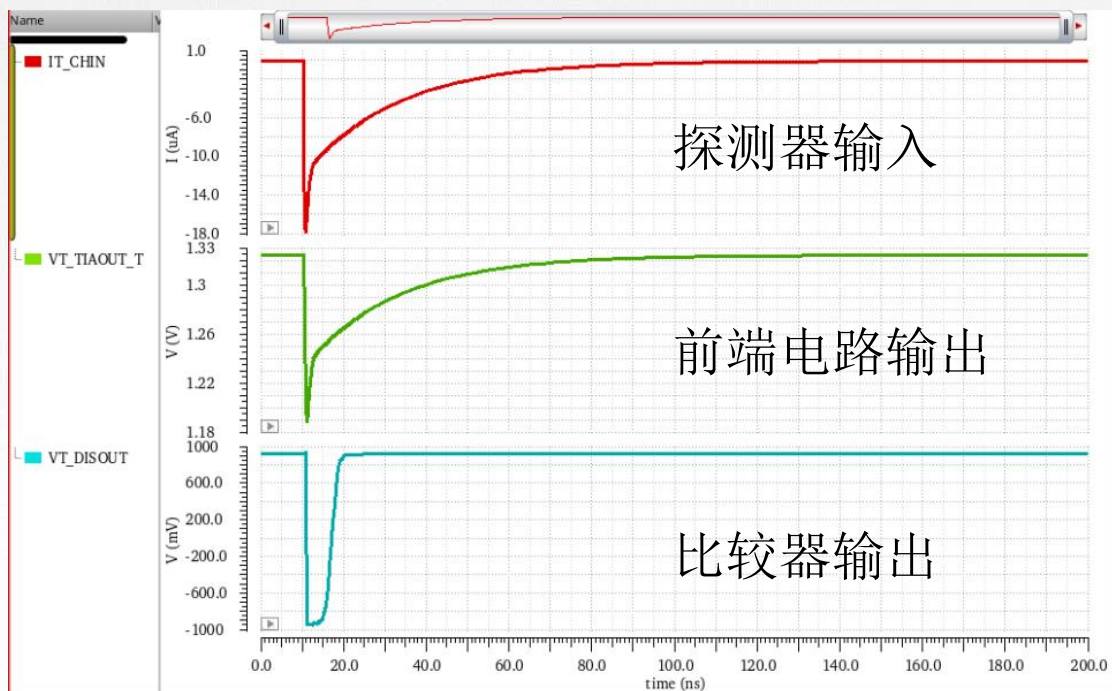
TIA电路



比较器电路



电路性能仿真



- 基于上述模型一仿真单光子时域响应;
- 探测器输出电流达峰时间约为**600ps**,
前端电路输出达峰时间约为**900ps**。

- 基于上述模型一进行仿真;
- 输入信号为272fC/PE(gain= 1.7×10^6);
- Jitter < 60ps@1PE, Jitter < 3ps@100PE。



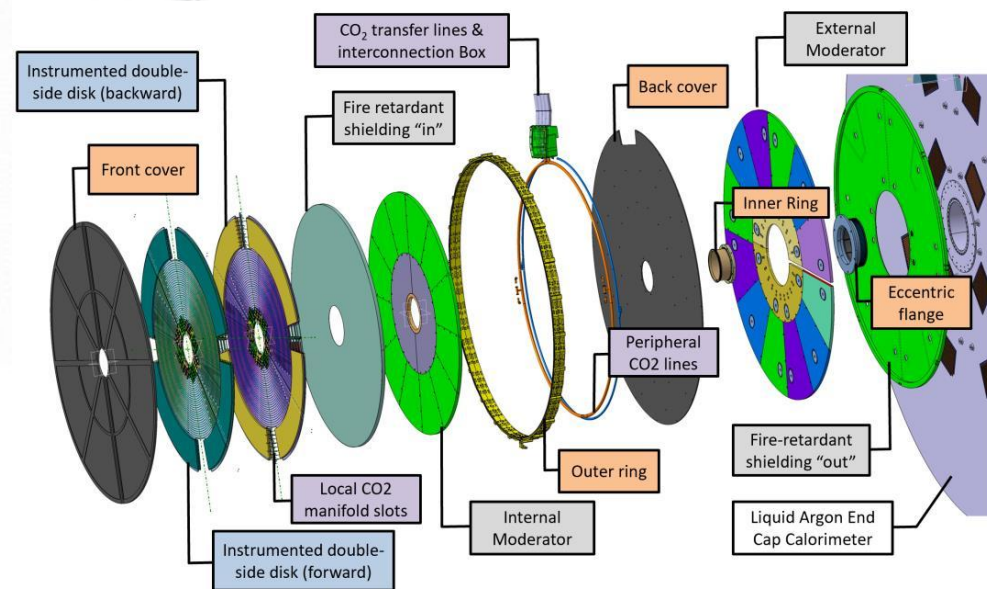
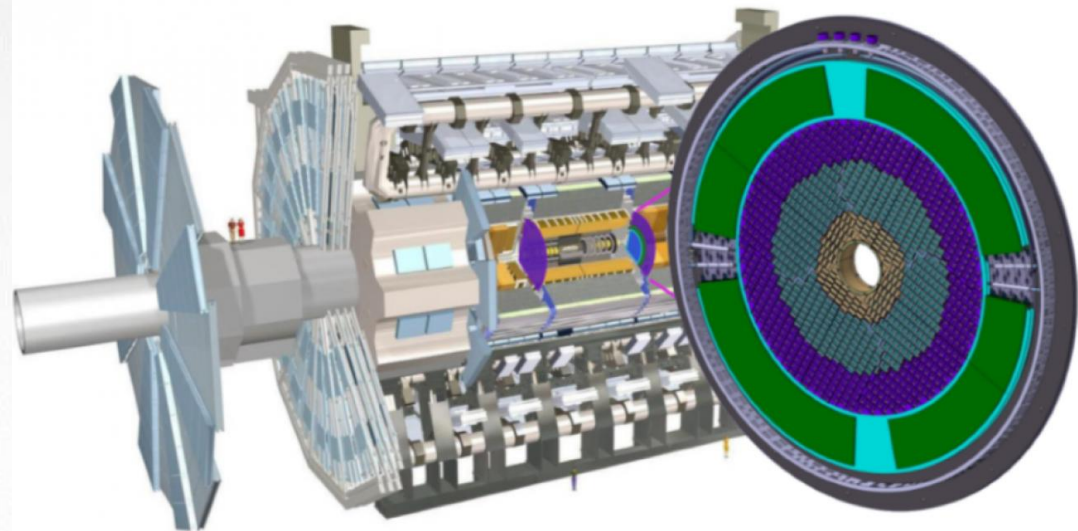
ATLAS升级中的LGAD

欧洲大型强子对撞机高亮度II期升级: ATLAS High Granularity Timing Detector (HGTD)

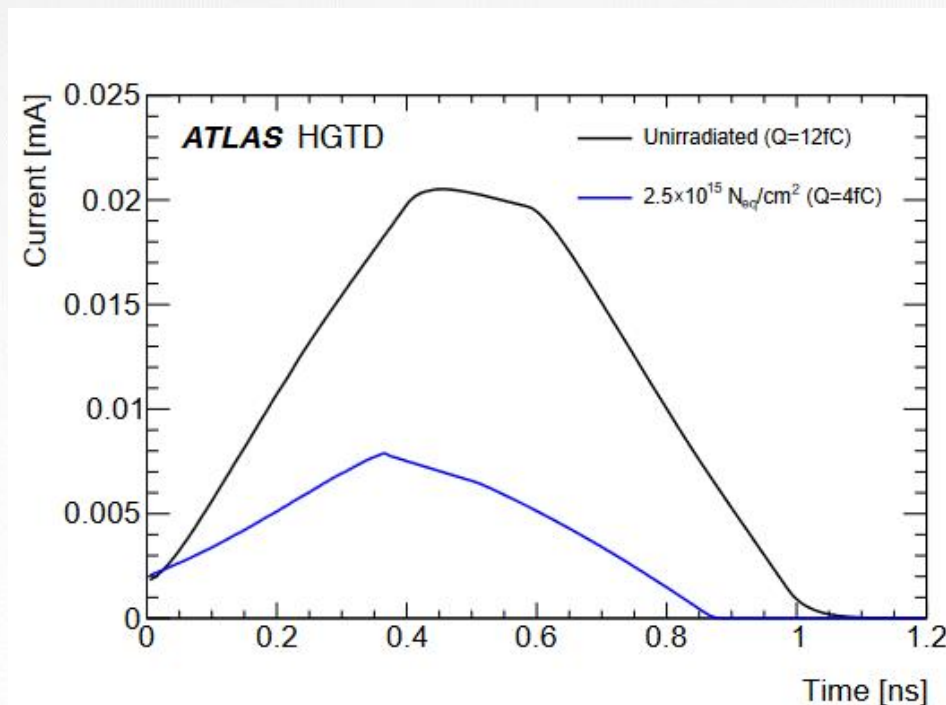
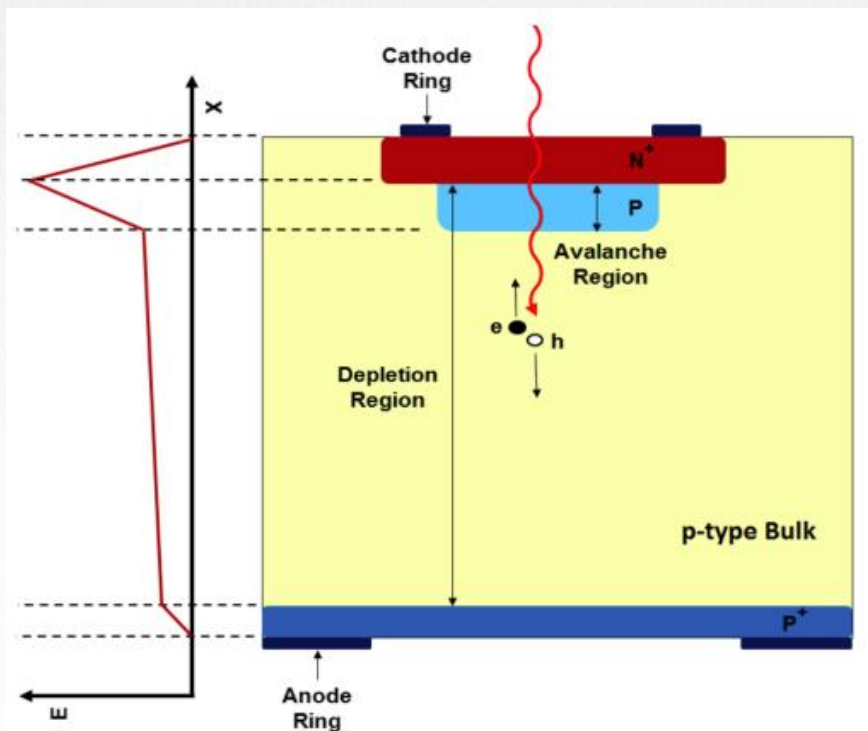
- 把粒子到达时间的测量精度提高到30ps以内;
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题;
- 能承受 2.5×10^{15} neq/cm²的等效中子通量的辐照。

LGAD:

- 高信噪比
- 响应速度快
- 抗辐射特性好



ATLAS升级中的LGAD



- LGAD的信号脉冲宽度和电荷幅度主要受LGAD工艺与设计参数影响；
- 上升时间约为**400ps**，信号持续时间约为**1ns**，典型电荷量为**10fC**，探测器电容约**4pF**；
- 当辐照中子注量增加时，电荷较小，上升时间和信号持续时间相比辐照前较短。注量越高，输出信号量会逐渐减小，因此，**ASIC需要能够处理4-50fC动态范围的信号**，同时确保高的分辨率。



基于LGAD探测器的时间前端电路

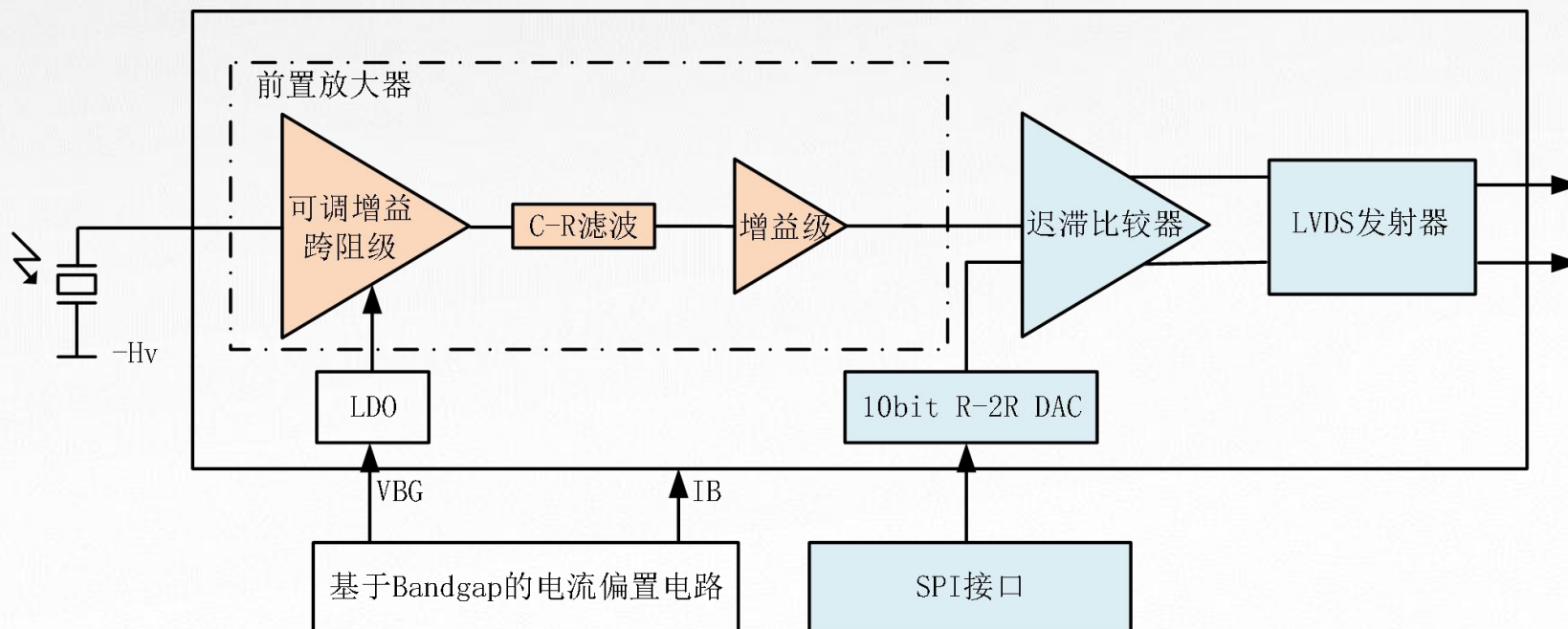
| 芯片名称 | 年份 | 工艺 | 结构 | 结果 |
|----------|------|-------|-------------------|------------|
| ALTIROC0 | 2018 | 130nm | NMOS CS | 27ps@10fC |
| ALTIROC1 | 2020 | 130nm | NMOS CS | <25ps@10fC |
| ETROC | 2021 | 65nm | NMOS CS | <16ps@10fC |
| LATIC | 2022 | 180nm | Inverter-Based CS | <20ps@10fC |

前端电路设计挑战:

- 探测器输入信号上升时间约400ps，电路带宽需**大于800MHz**；
- 辐射条件下探测器输出幅度变小，前端电路需针对微弱信号进行低噪声信号处理。



电路系统结构

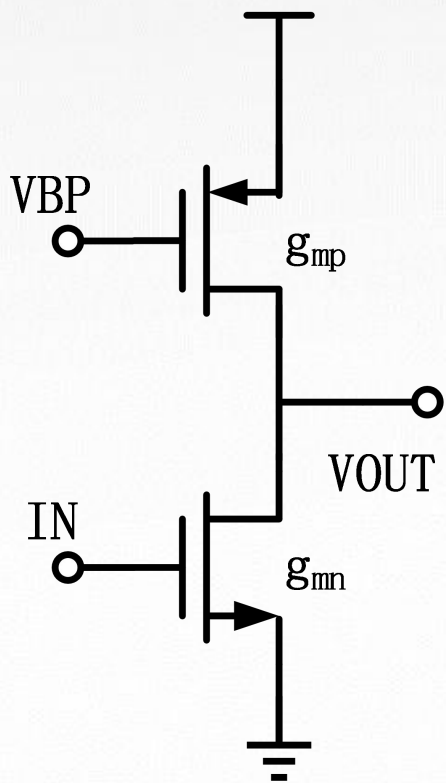


- 前置放大器采用跨阻结构，使用电流模式处理探测器信号；
- 跨阻级增益可调，以匹配不同动态范围。



基于反相器结构的共源共栅跨阻放大器

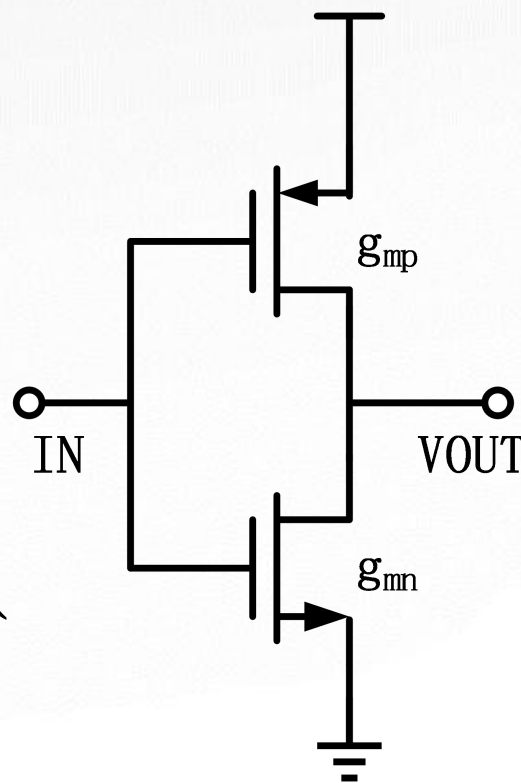
$$Jitter = \frac{Gain \times e_n \sqrt{t_d}}{Gain \times Q_{in}/C_d} \propto \frac{U_n}{Amp}$$



共源极放大器

$$\frac{U_n}{Amp} \propto \sqrt{\frac{4KT(g_{mp} + g_{mn})}{(V_{in} \times g_{mn})^2}}$$

减小抖动要求 $g_{mp} \downarrow$, $g_{mn} \uparrow$



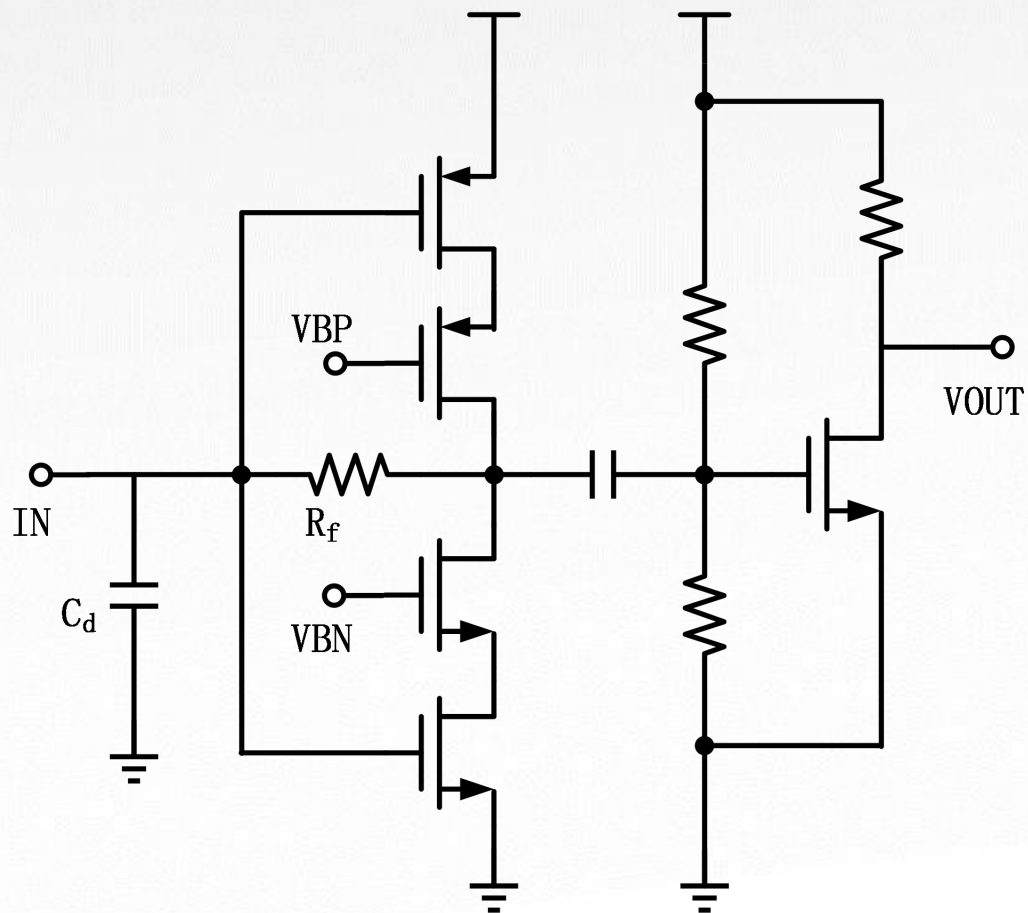
基于反相器结构的共源极放大器

$$\frac{U_n}{Amp} \propto \sqrt{\frac{4KT}{V_{in}^2 \times (g_{mp} + g_{mn})}}$$

相同功耗下
时间性能大大改善!



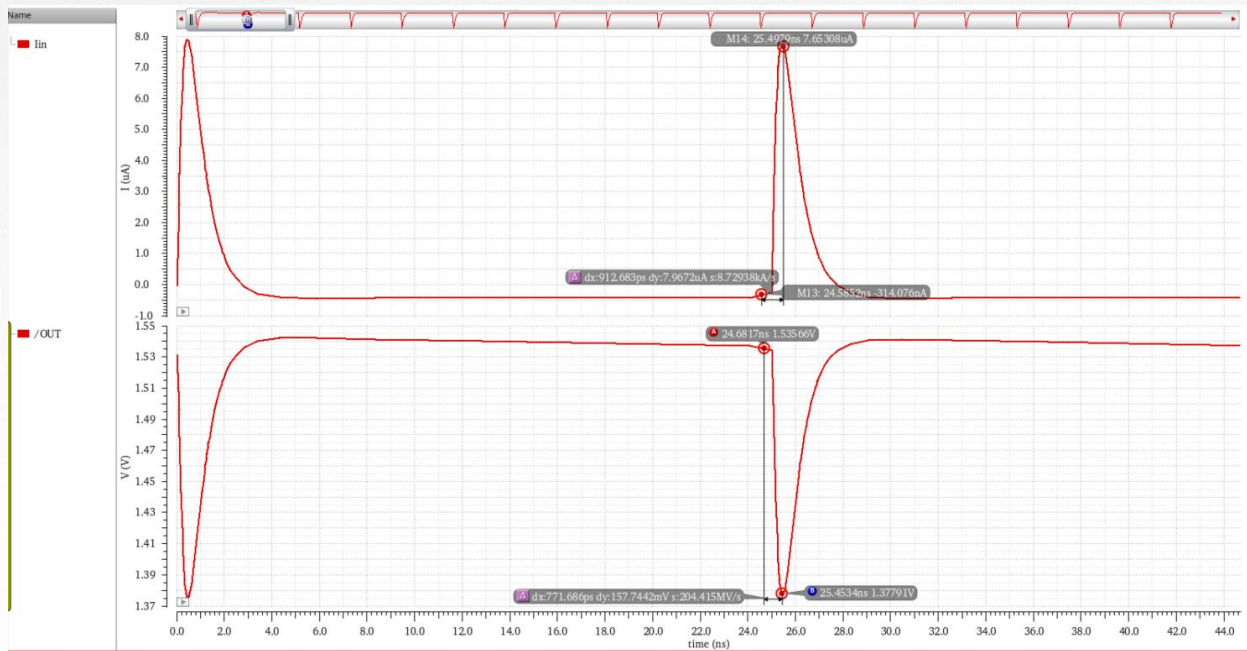
基于反相器结构的共源共栅跨阻放大器



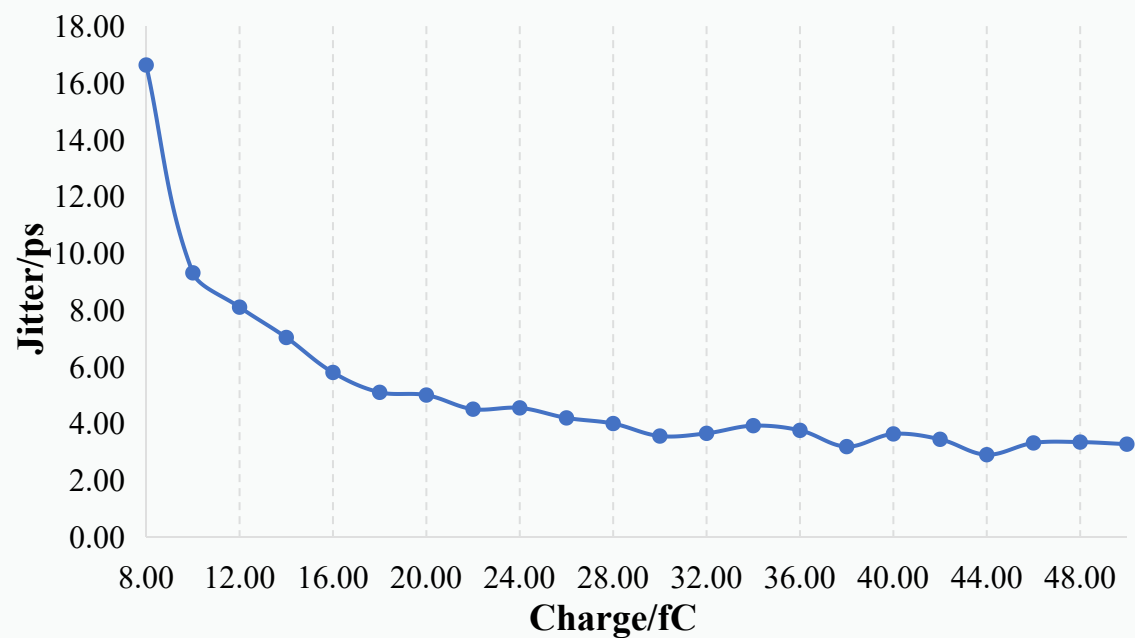
- ✓ 使用基于反相器结构的共源共栅极电路，**减小输入端密勒等效电容**，提高带宽；
- ✓ 为使输入极点向高频移动，反馈电阻 R_f 较小，导致TIA增益较低，故增加共源极放大器**提高增益**；
- ✓ 前后级使用**交流耦合**，抑制低频噪声及PVT影响，防止基线漂移。



电路性能仿真



输入电荷10fC进行时域仿真 ($C_{in}=4$ pF),
前端电路输出信号达峰时间约为800ps。



输入电荷10fC时抖动为9.3ps;
输入电荷50fC时抖动为3.3ps。



总结

基于SiPM探测器的 时间前端检测电路研究总结

| 基于SiPM探测器的时间前端电路 | |
|------------------|---------------------|
| 工艺 | 180nm |
| 增益 | 77dB _{ohm} |
| 带宽 | >400MHz |
| 噪声(rms) | 11mV |
| SPTR | <60ps |
| 功耗 | 6.39mW |

- ✓ 针对SiPM探测器大输入电容进行电路优化，单光子时间分辨率（SPTR）小于60ps
- ✓ 对电路稳定性进行优化，Q值小于0.6

拟流片时间：2024.08

基于LGAD探测器的 时间前端检测电路研究总结

| 基于LGAD探测器的时间前端电路 | |
|------------------|--------|
| 工艺 | 180nm |
| C_d | 4pF |
| 带宽 | 1.4GHz |
| 噪声(rms) | 2mV |
| Jitter@10fC | <10ps |
| 功耗 | 3.6mW |

- ✓ 在4pF输入电容下实现1.4GHz带宽
- ✓ 针对LGAD探测器信号特征优化电路噪声，输入电荷10fC下抖动小于10ps

拟流片时间：2024.06



西北工业大学

NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



Thanks!

上述工作受到以下项目支持：

- 1、国家自然科学基金面上项目，项目编号：12375191
- 2、工信部产业链协同攻关项目，项目编号：TC230H0AG-59