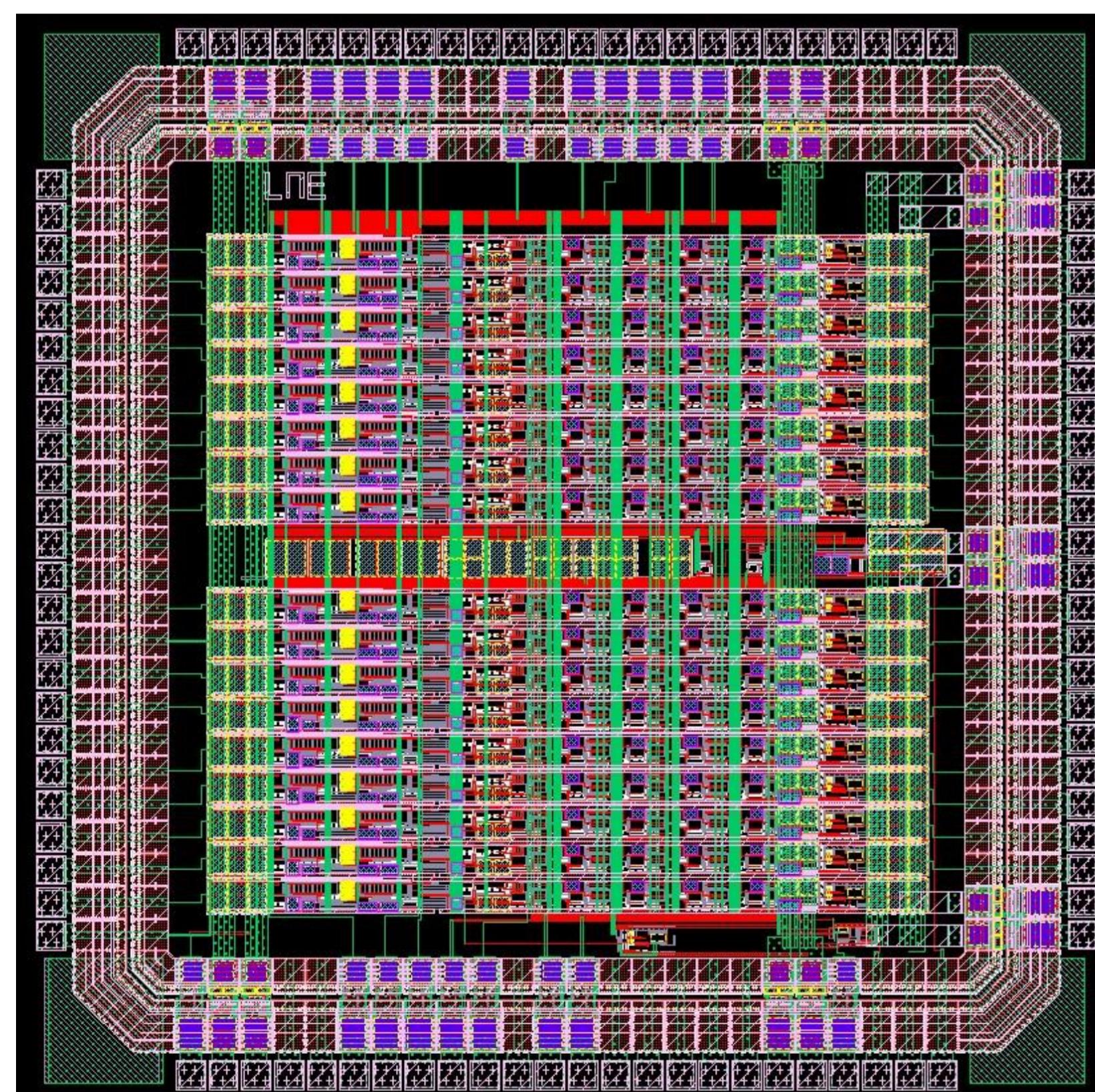


碲锌镉探测器低噪声前端读出 芯片及数据采集系统设计



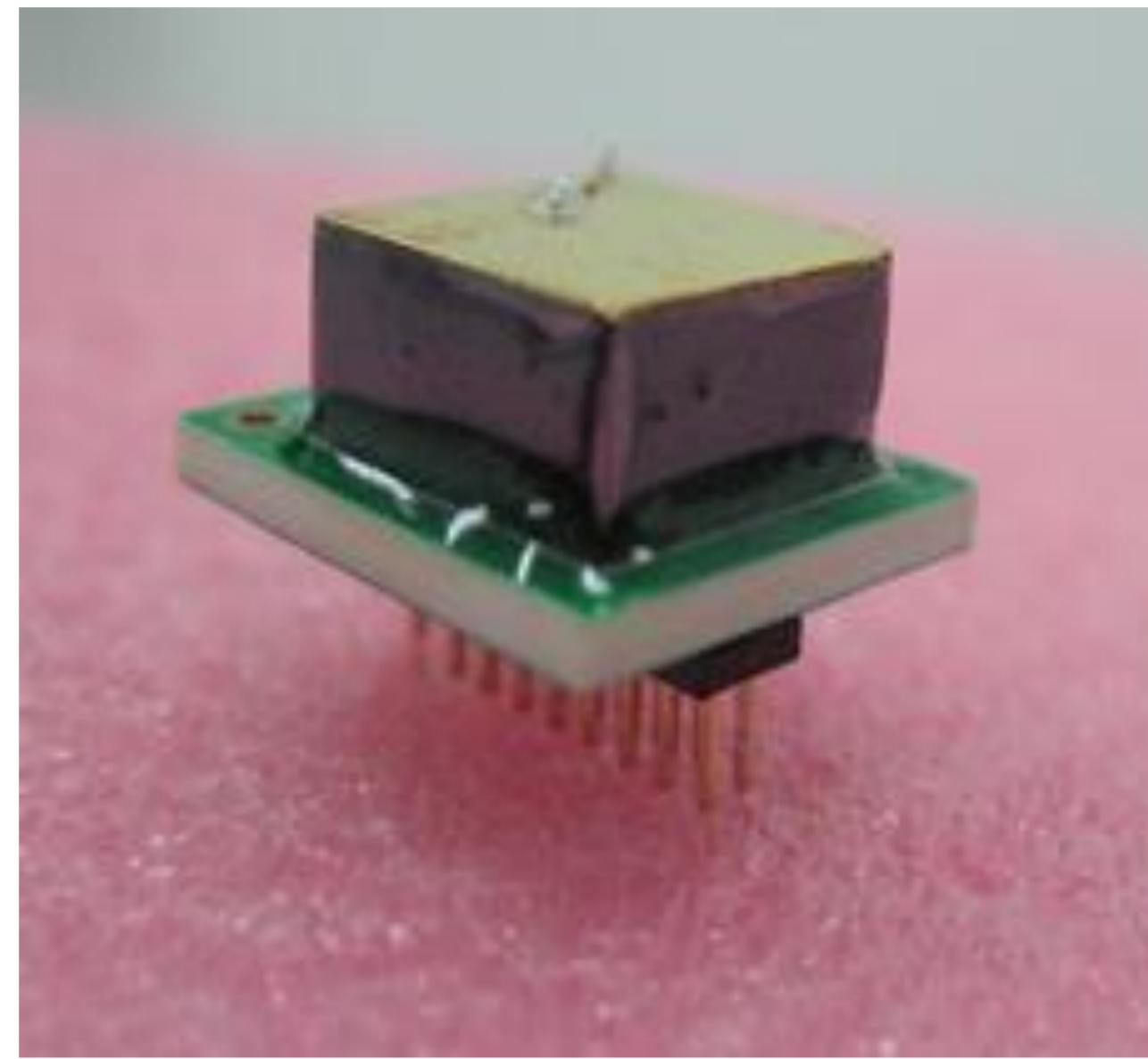
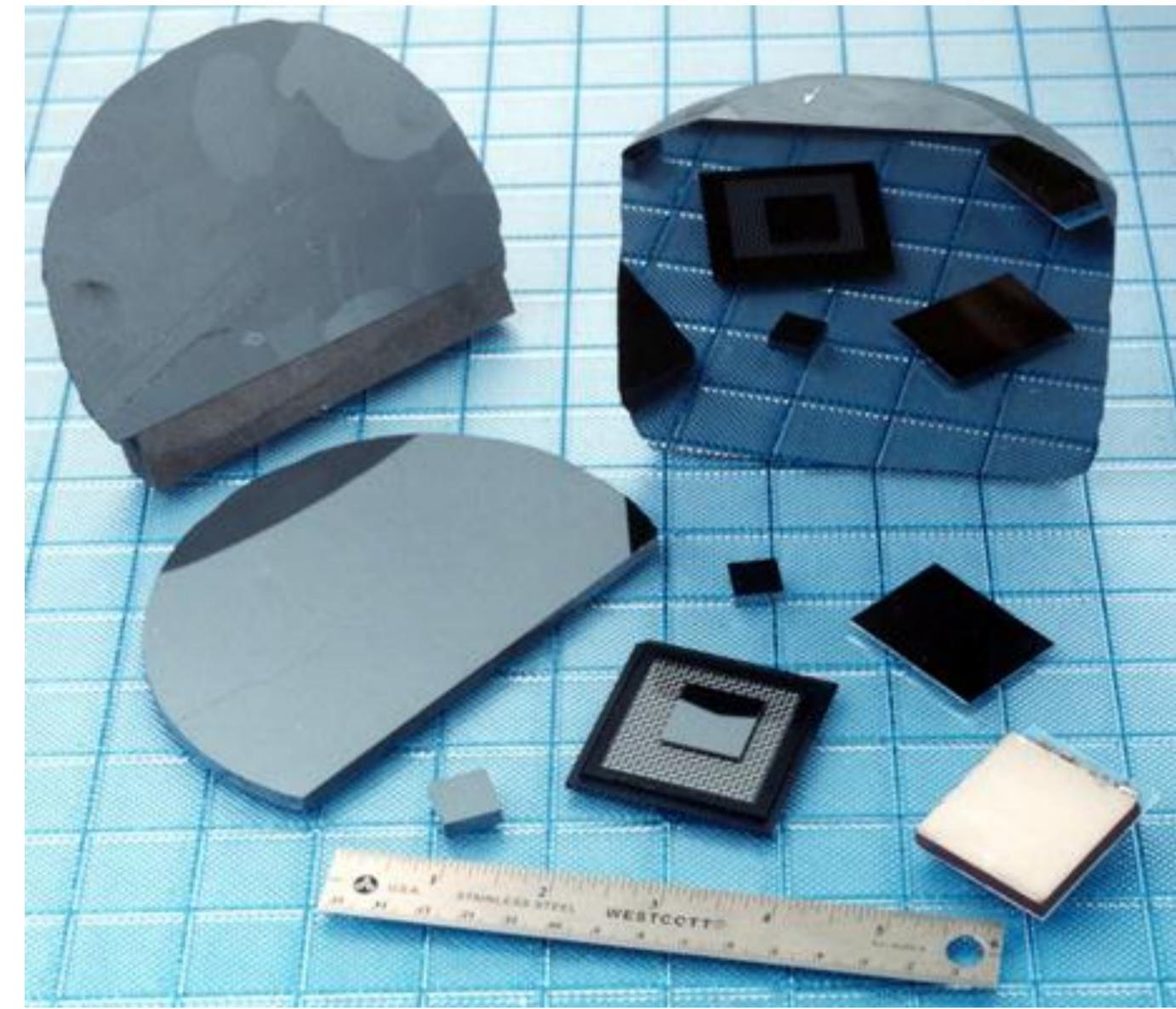
罗杰
清华大学工程物理系



主要内容

- ◆ CdZnTe探测器
- ◆ CASACZT16前端芯片电路设计
- ◆ CASACZT16芯片测试及噪声分析
- ◆ PDD数据采集系统
- ◆ 总结及后续工作展望

CdZnTe探测器



✓ CdZnTe

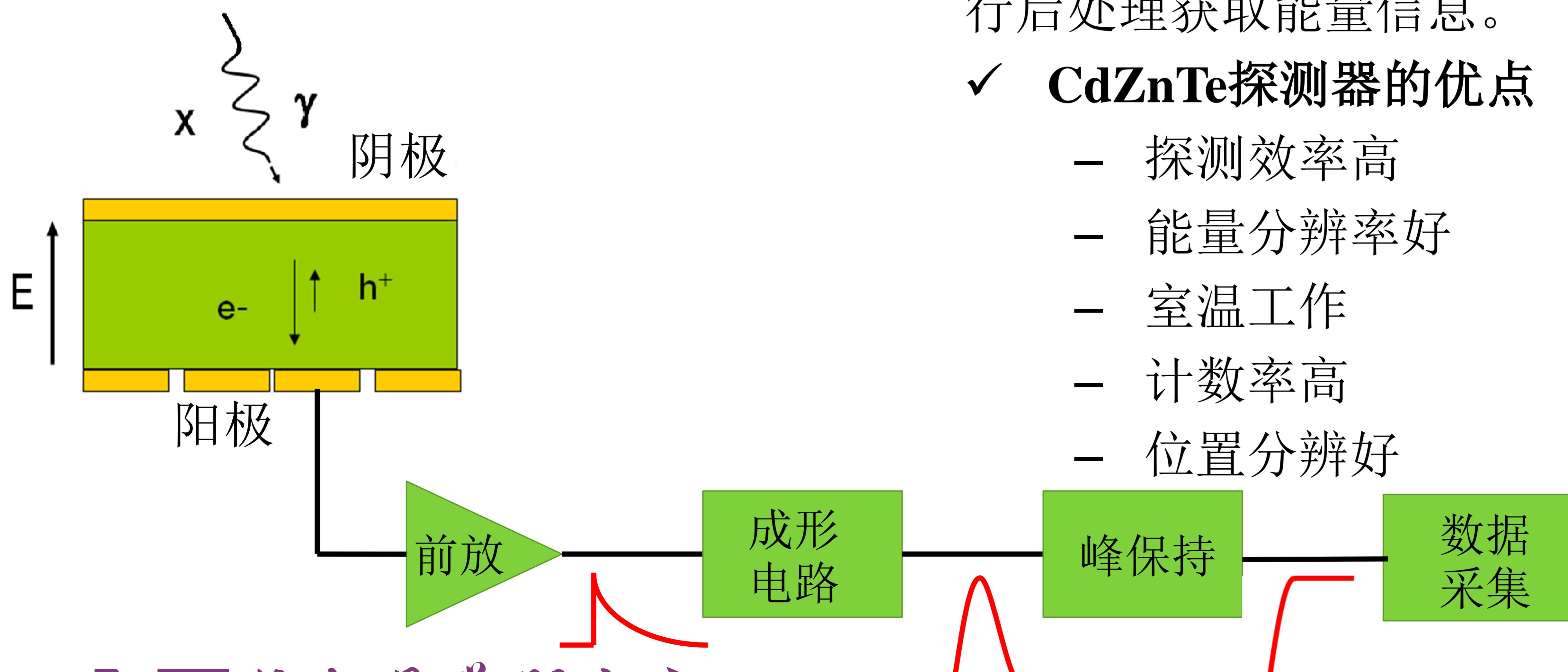
- 新型的室温半导体探测器
- 可以将X或 γ 光子直接转换为电子空穴对

✓ 工作原理

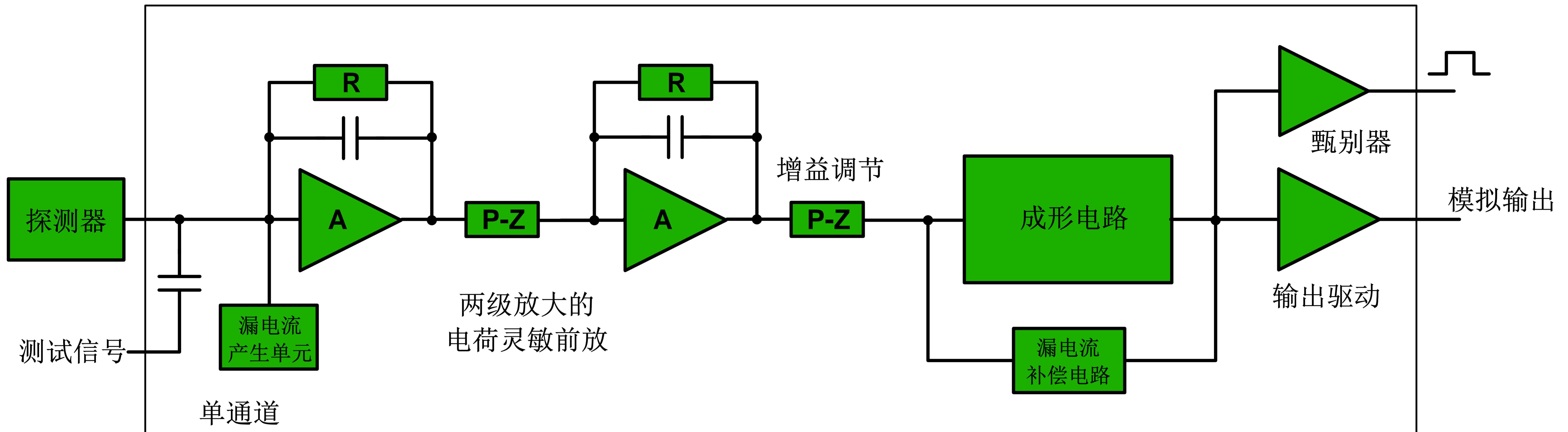
射线与物质相互作用产生电子空穴对，在外加电场的作用下电荷被收集并产生感应电荷，产生的电荷与射线能量成正比，信号被放大和滤波，并进行后处理获取能量信息。

✓ CdZnTe探测器的优点

- 探测效率高
- 能量分辨率好
- 室温工作
- 计数率高
- 位置分辨好



CASACZT16原理框图

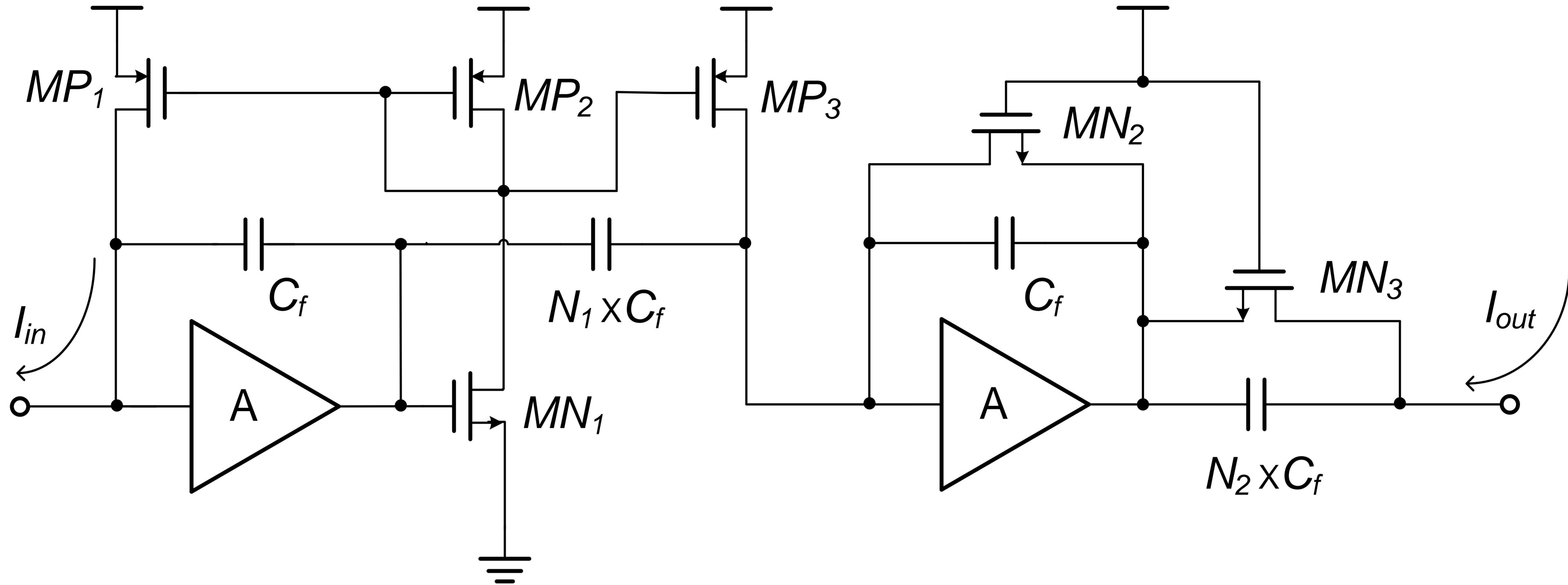


CASACZT16单通道电路图

$$V_{out} = NQ \frac{\tau/C}{(1 + s\tau)^5} \quad \tau = \lambda R C$$

- 两级放大的电荷灵敏前放，4阶半高斯成形电路，漏电流补偿电路，甄别器，输出驱动放大器，漏电流产生单元
- 电荷增益: 64~256, 通道增益: 100mV/fC~400mV/fC, 外部可调
- 达峰时间: 1us~4us, 外部可调

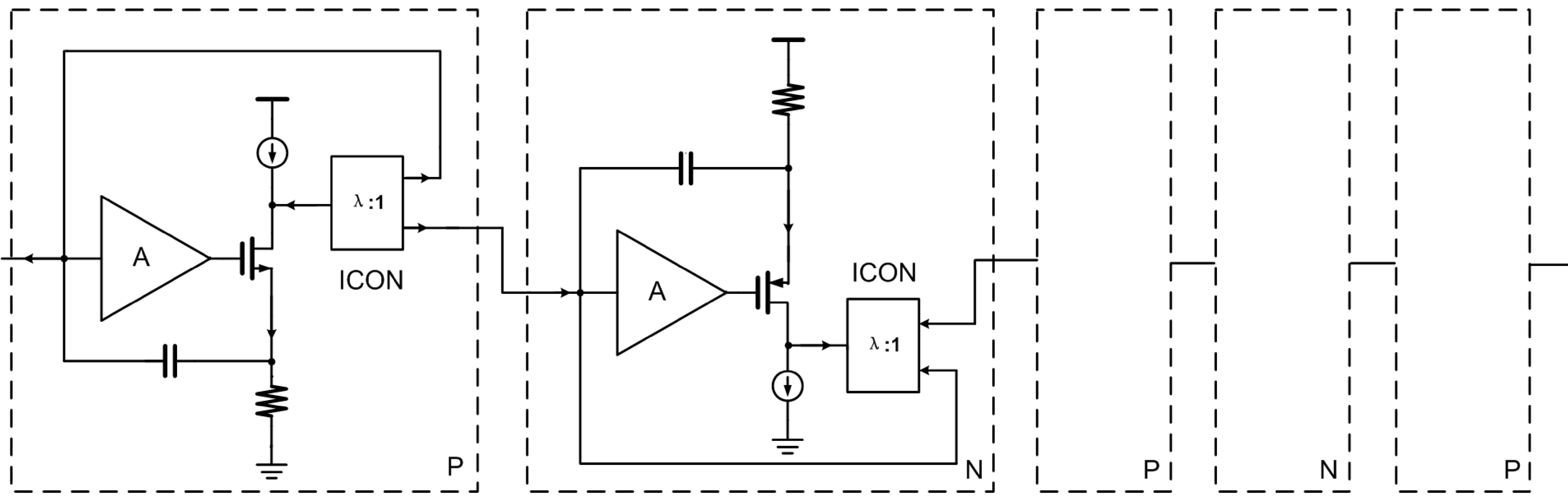
两级电荷灵敏前放



两级放大的电荷灵敏前放^[1]

- 电荷放大倍数: $N_1 \times N_2$, $N_1=16$, $N_2=4\sim 16$
- 输入PMOS管针对5pF输入电容进行噪声优化: 尺寸为800um/0.35um, 电流为400uA, 跨导为7.1mS, 仿真ENC贡献为30e
- 反馈电容:0.125pF, 反馈MOS管: 0.4um/50um
- 前放运放采用折叠共源共栅单端运算放大器

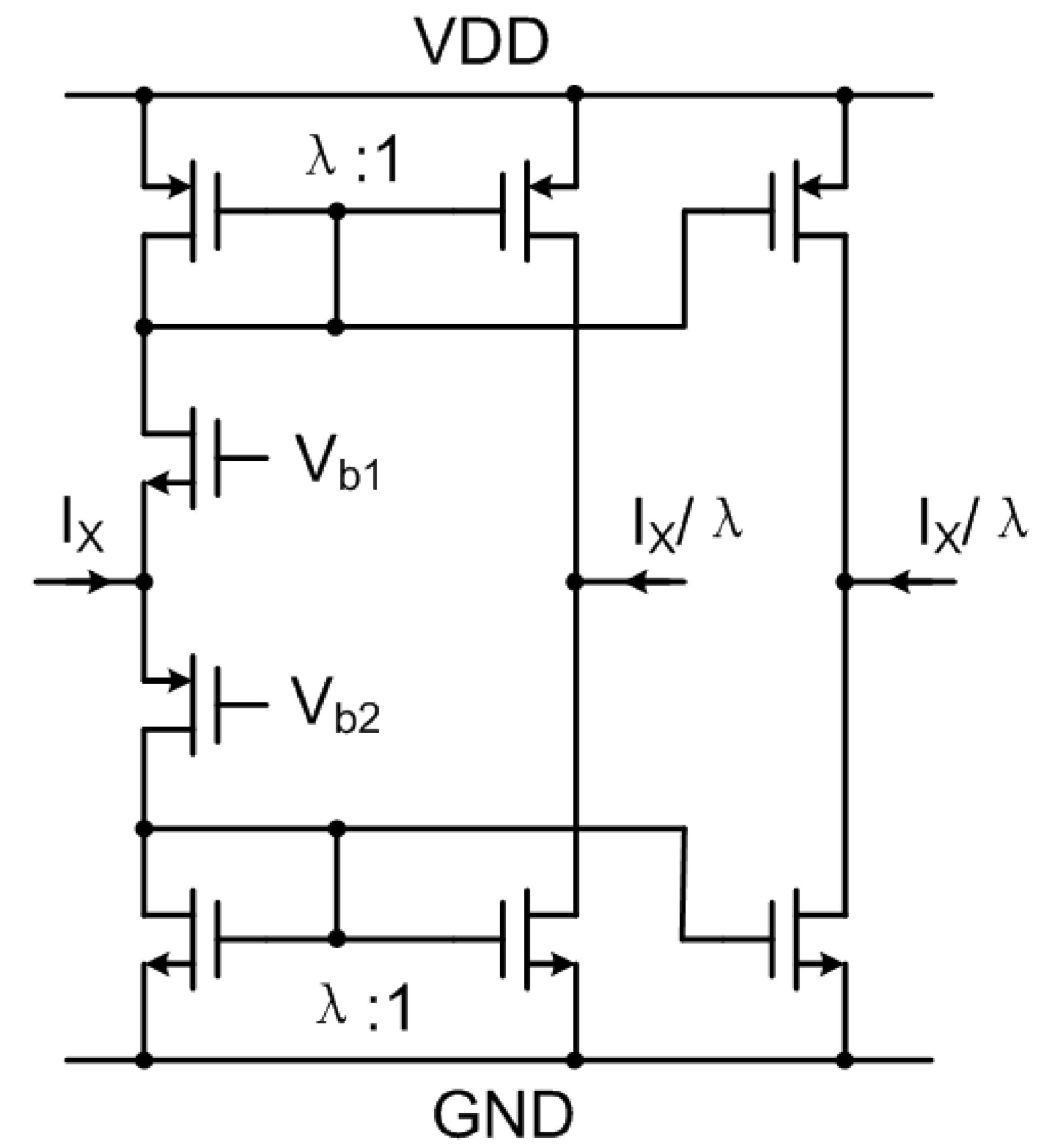
成形电路



4阶半高斯成形电路[2]

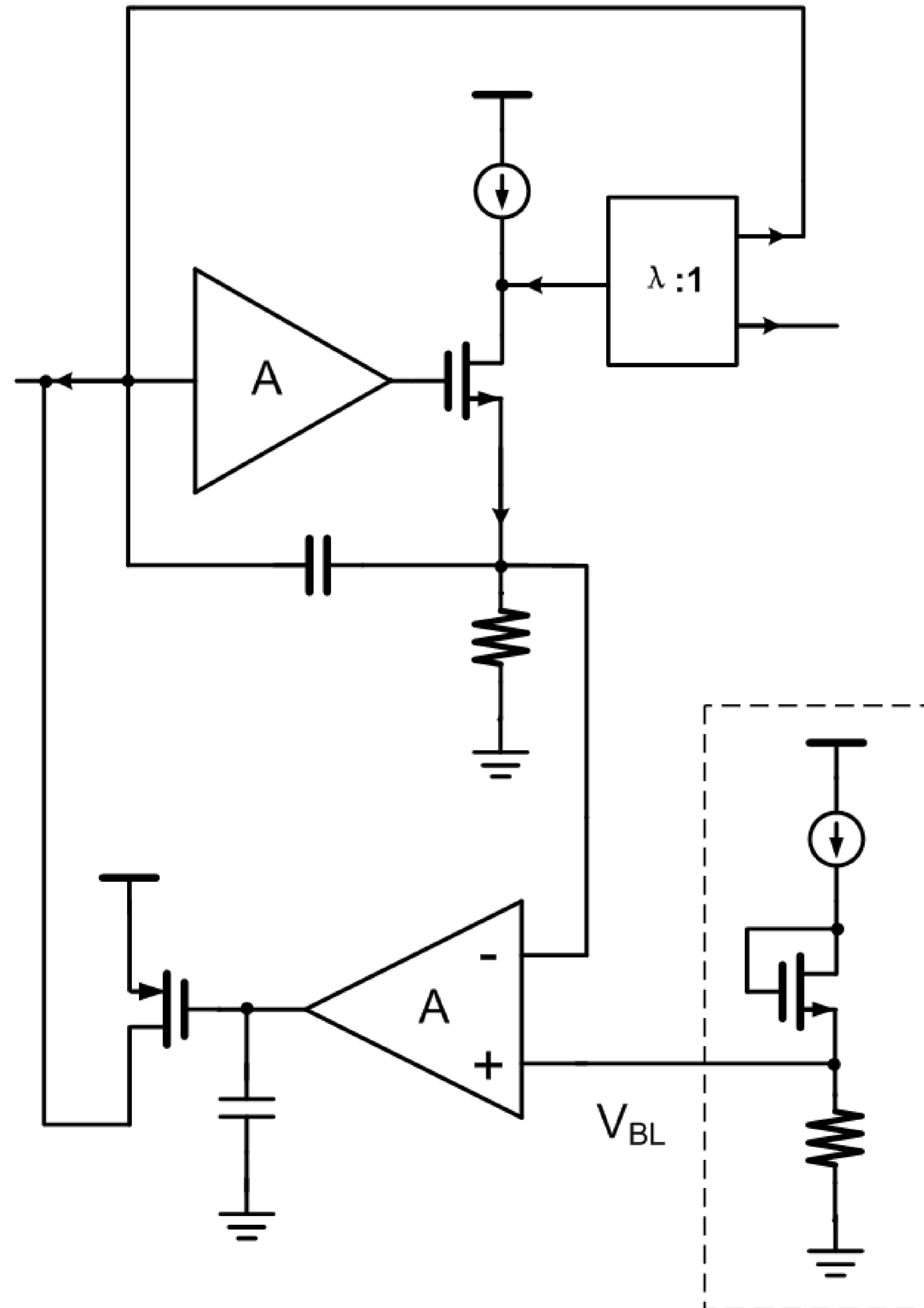
$$I_{out} = I_{in} \frac{1 + sRC}{1 + sRC(1 + \lambda)}$$

$$V_{out} = I_{in} \times \lambda R \frac{1 + sRC}{1 + sRC(1 + \lambda)}$$

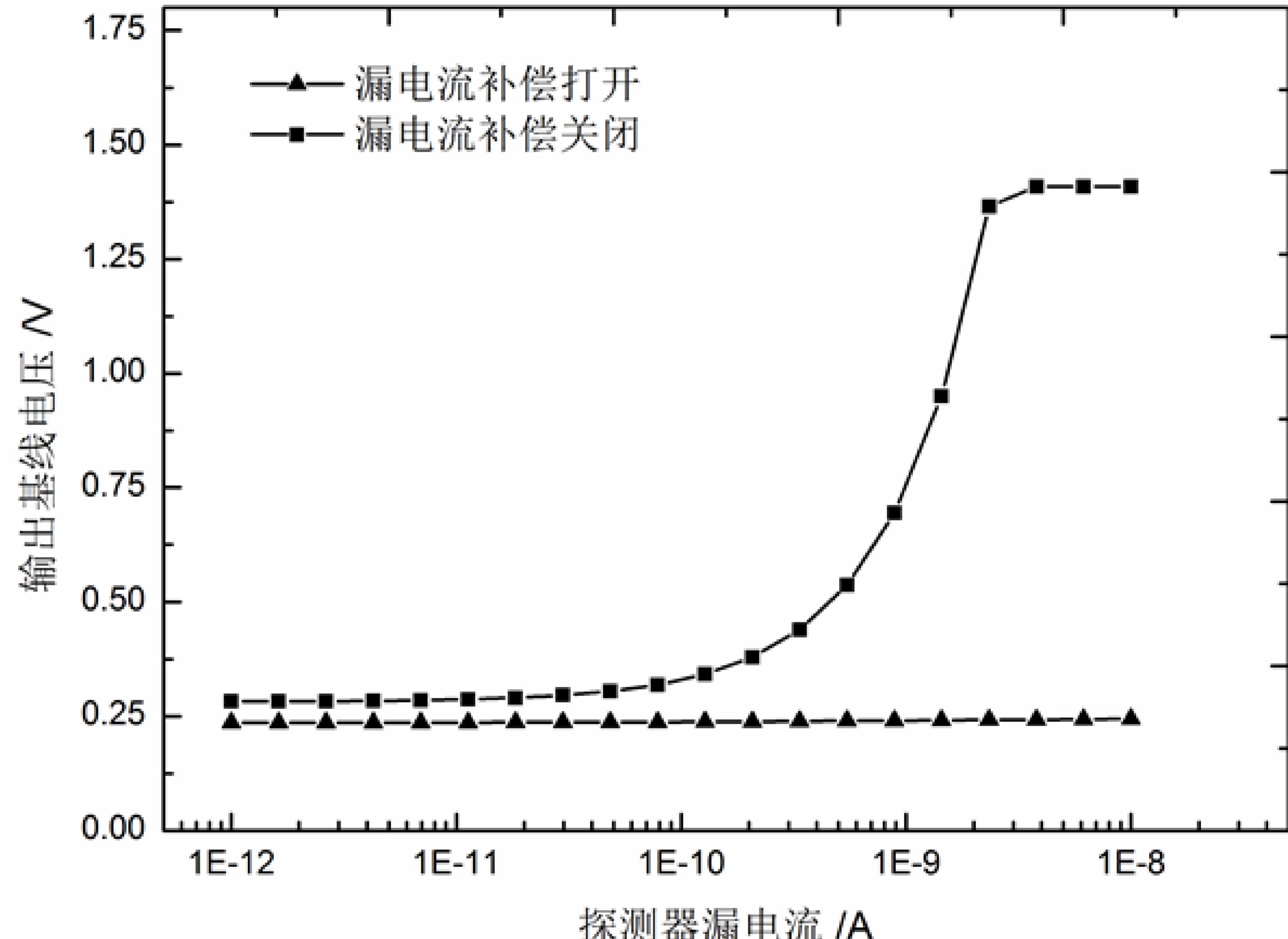


ICON 单元电路

漏电流补偿电路



漏电流补偿电路原理图^[3]

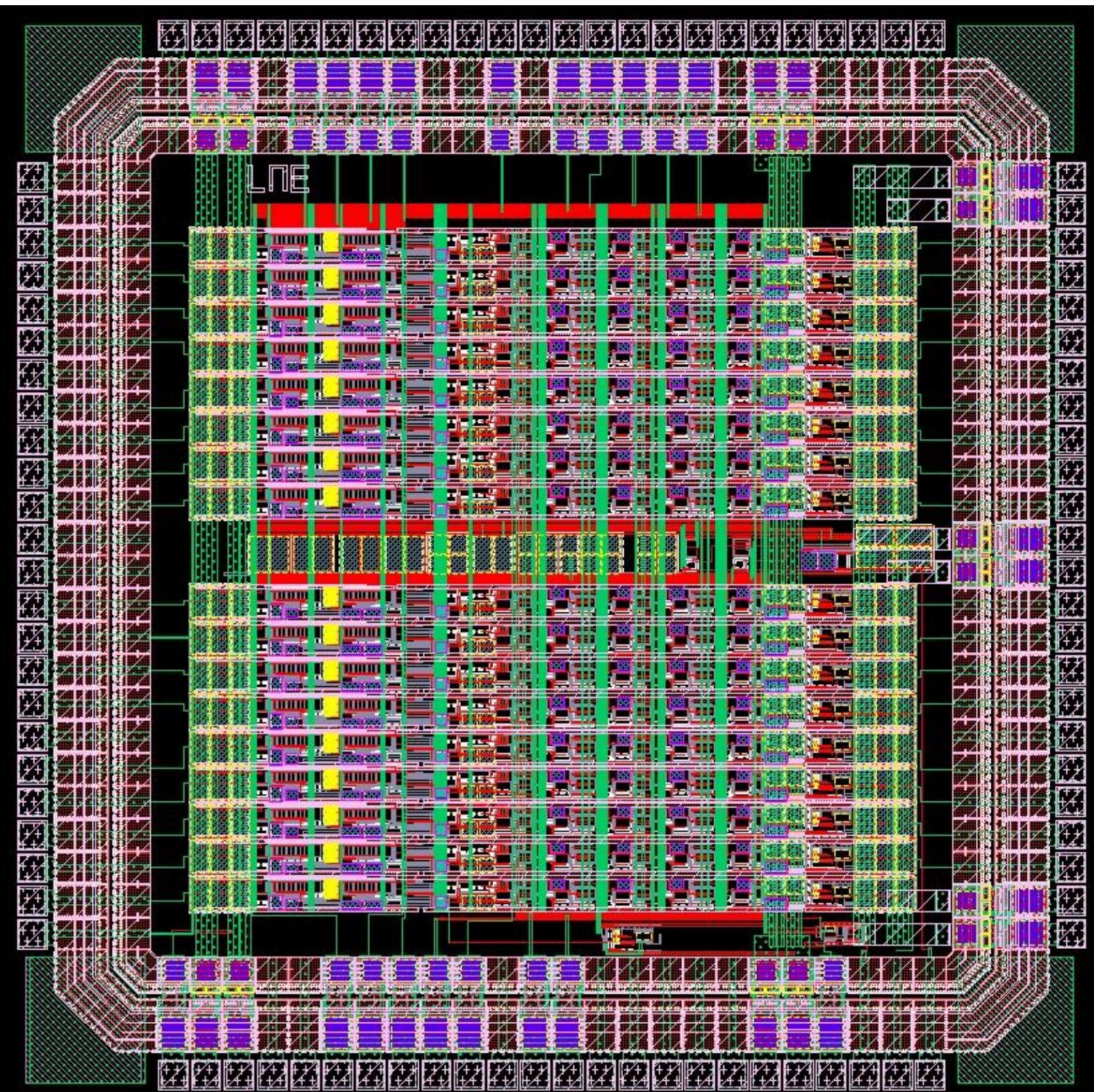


输出基线电压随漏电流变化的仿真结果

主要性能

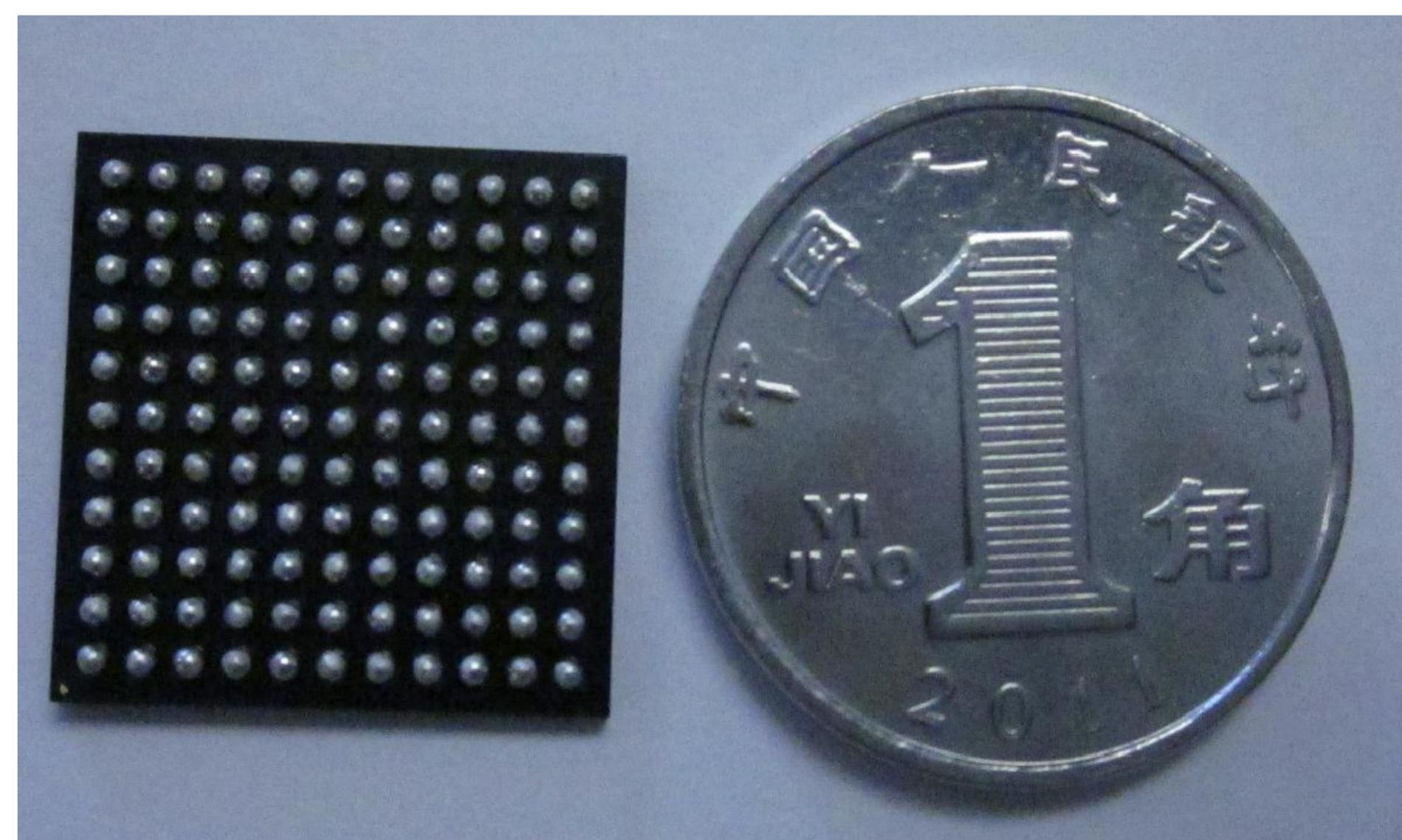
表 1 CASACZT16 的基本性能指标

工艺	Chartered 0.35μm CMOS
增益	100、200、300、400mV/fC
达峰时间	1、1.3、2、4μs
ENC	116e@4μs
积分非线性	0.39%
动态范围	360keV
功耗	7.3mW/通道



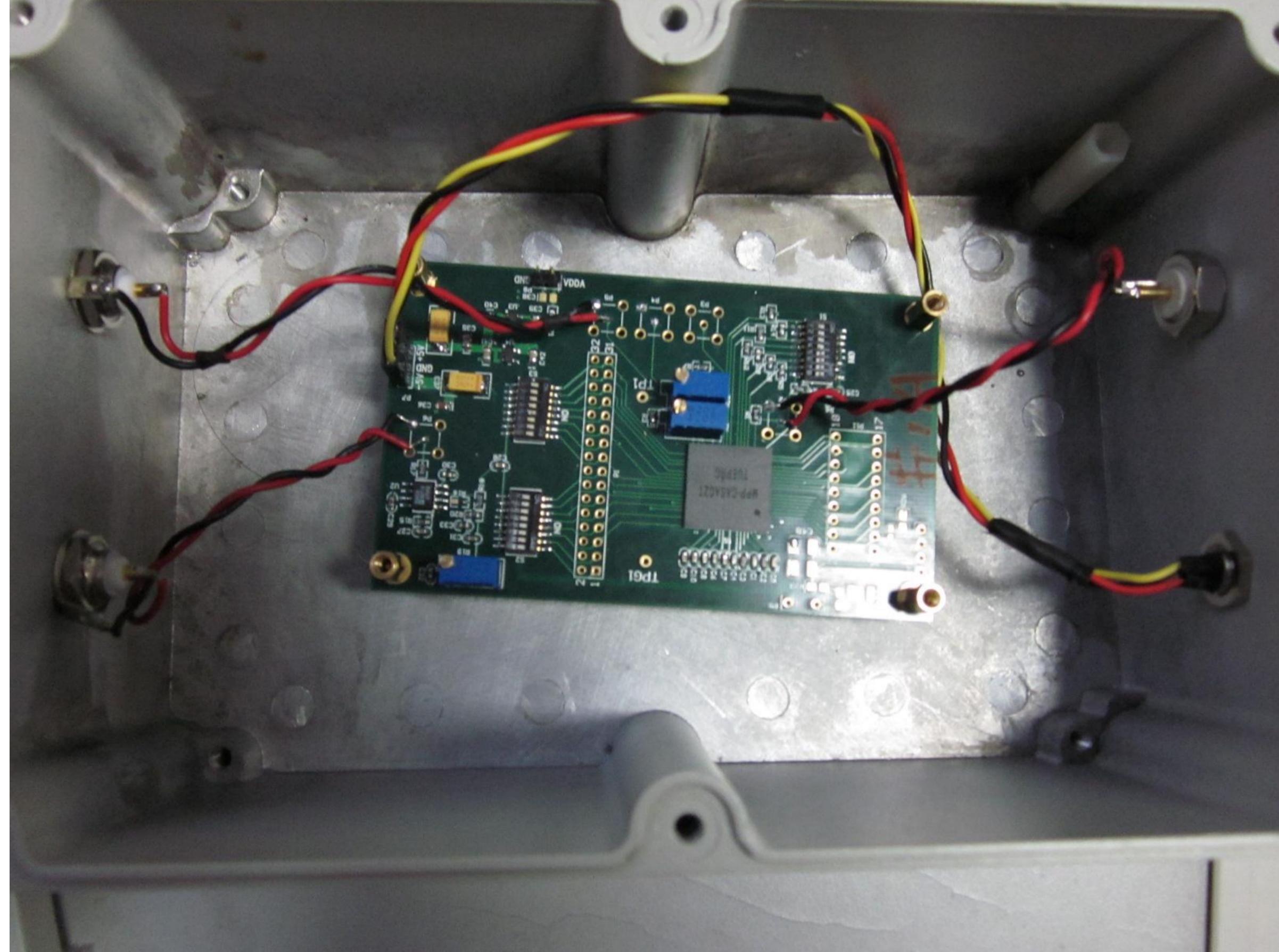
芯片版图

- 面积3mmX3mm
- 16通道+1测试通道
- 3.3V供电
- BGA封装

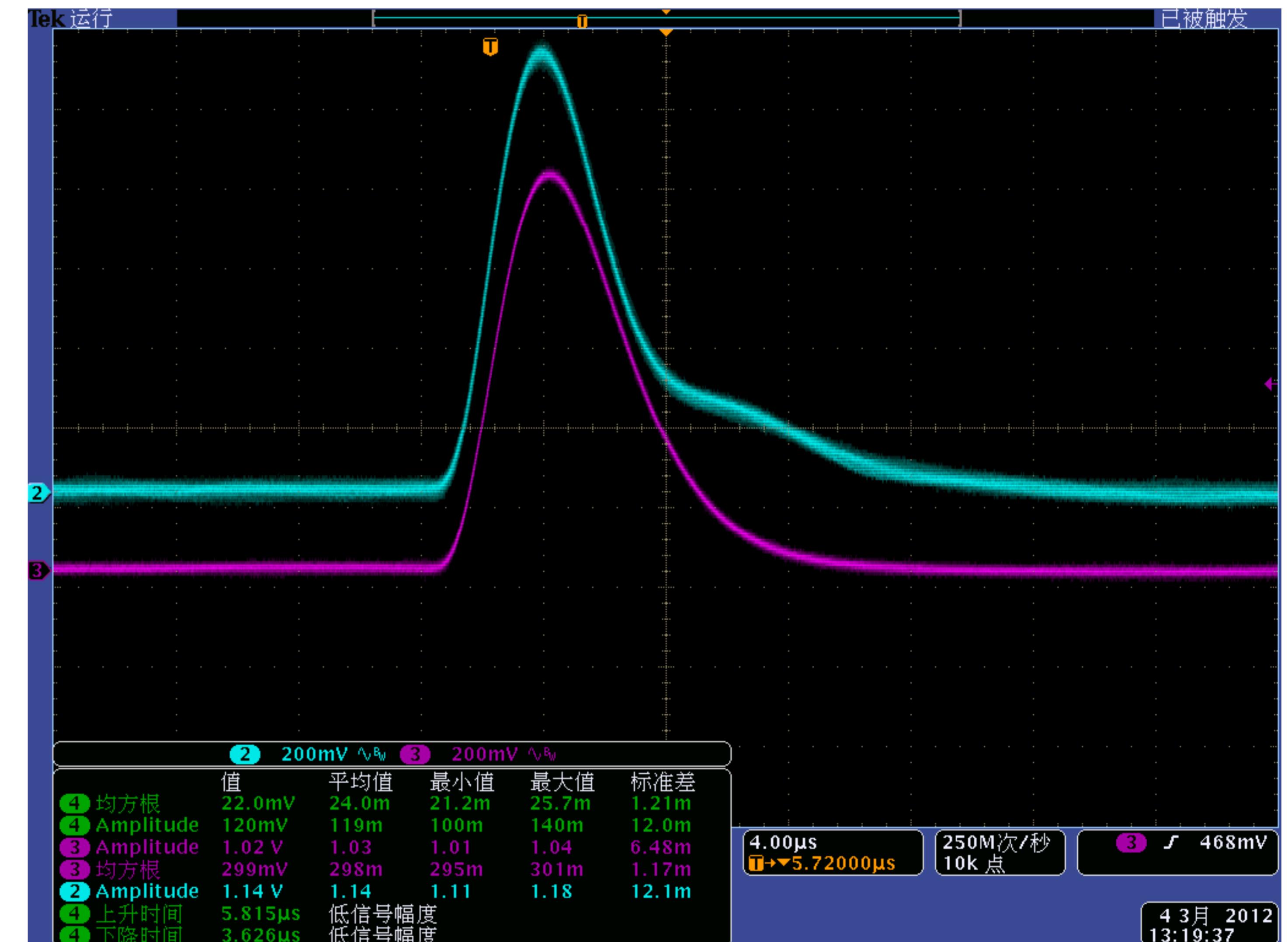
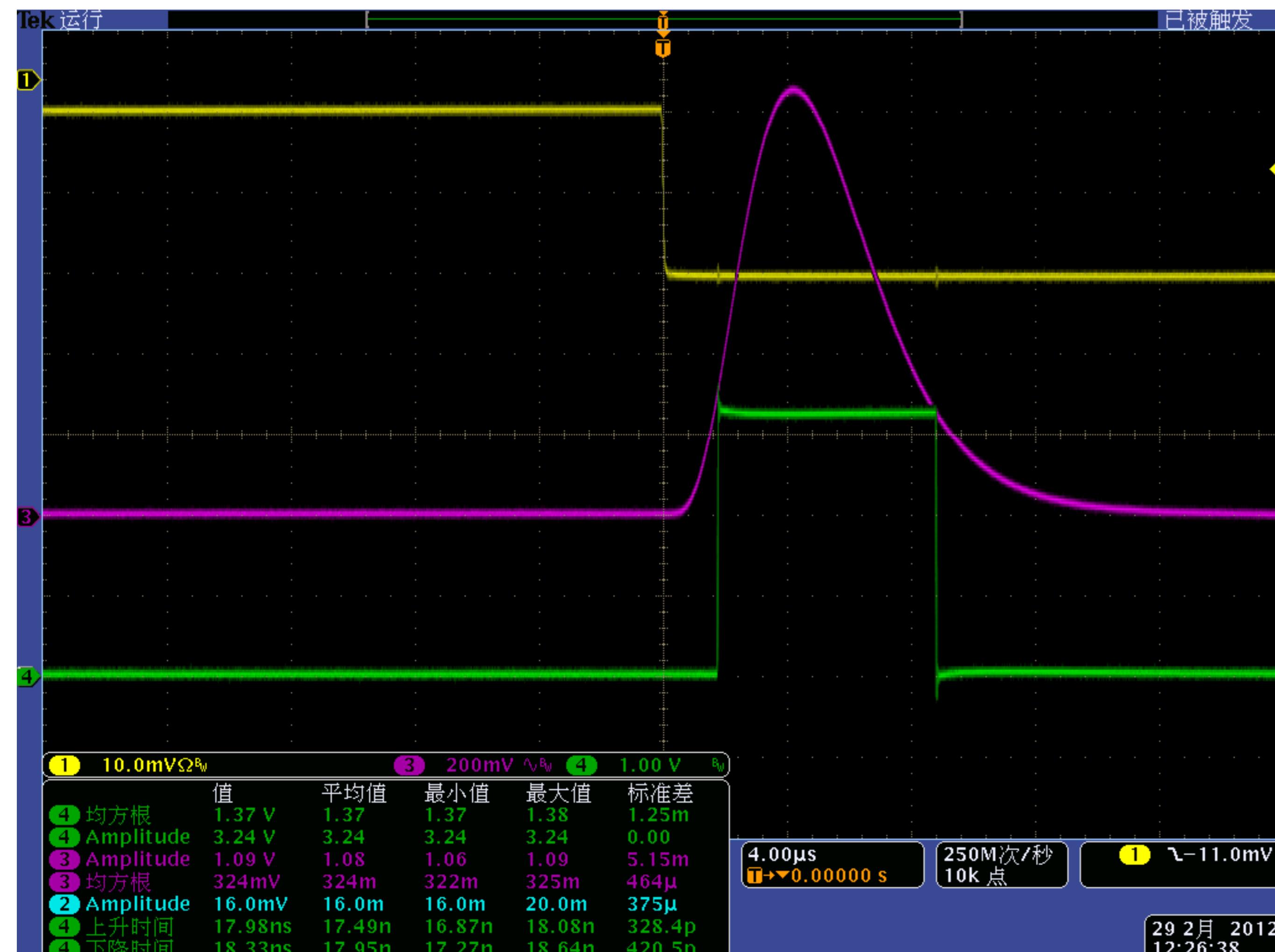


BGA封装的芯片

功能测试



测试电路板



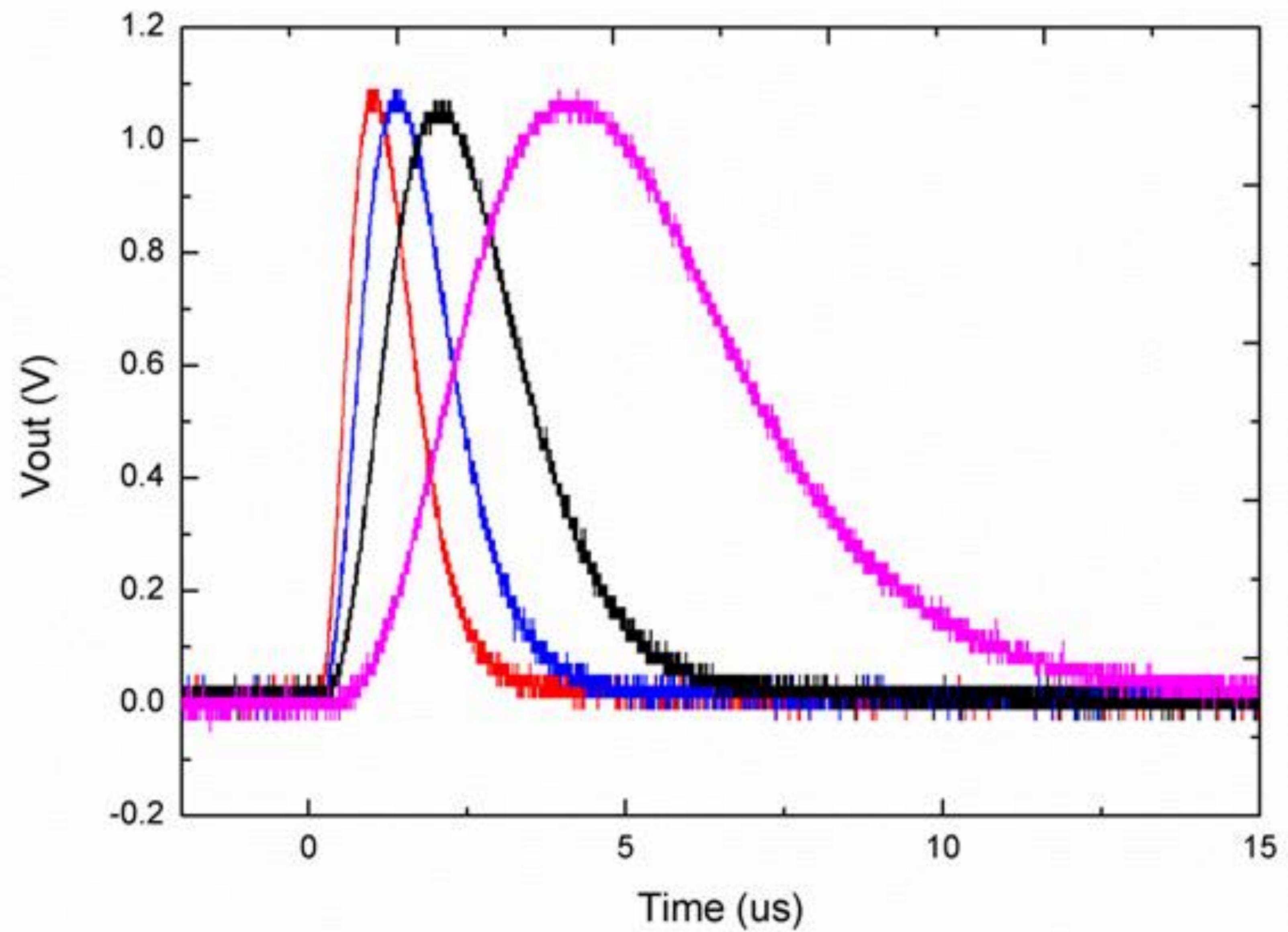
大增益时输出波形尾部畸变

芯片输入端的寄生电感效应

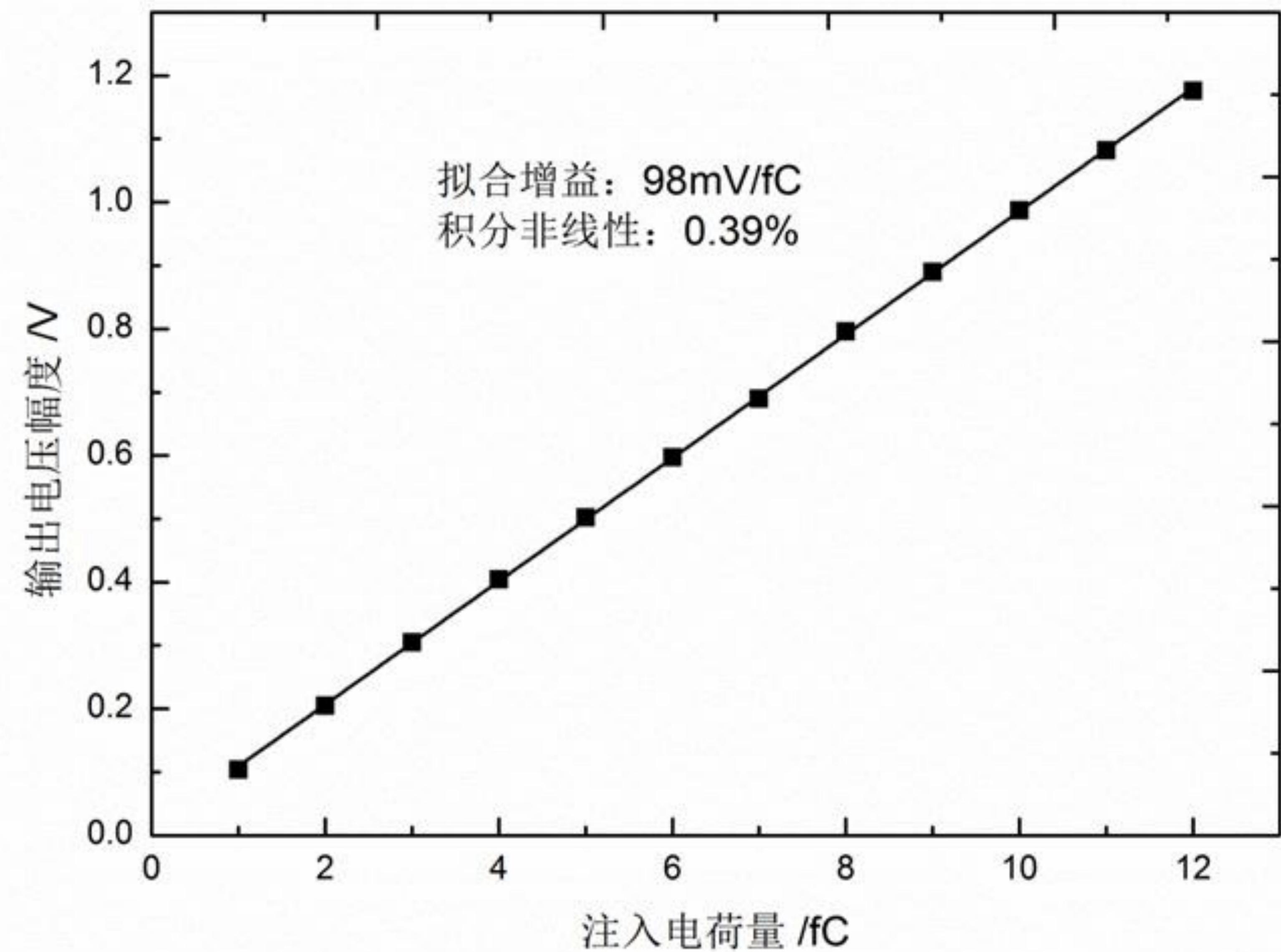


清华大学
Tsinghua University

线性测试

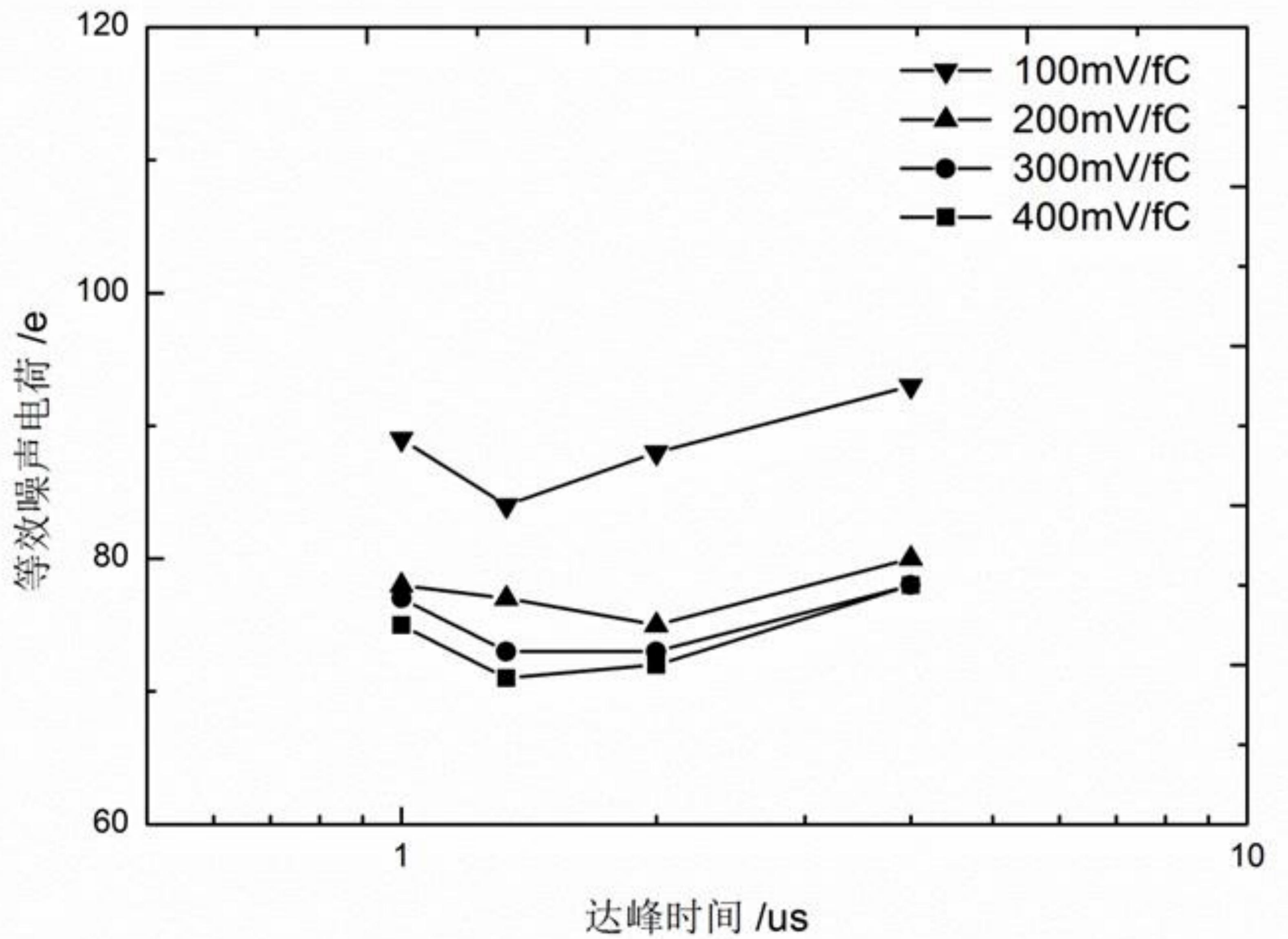


不同成形时间下的输出波形

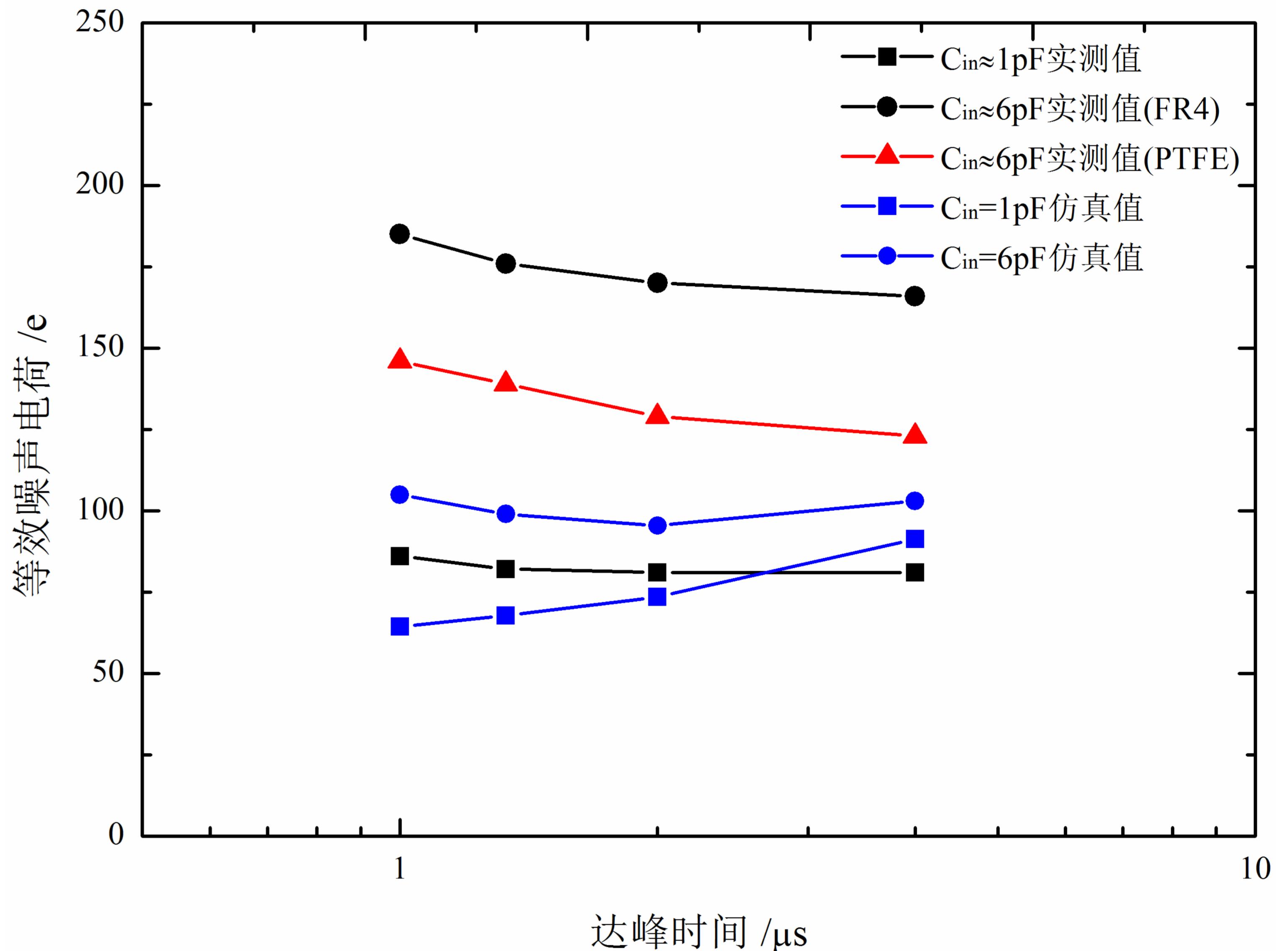


输出电压与注入电荷的线性关系曲线

ENC测试



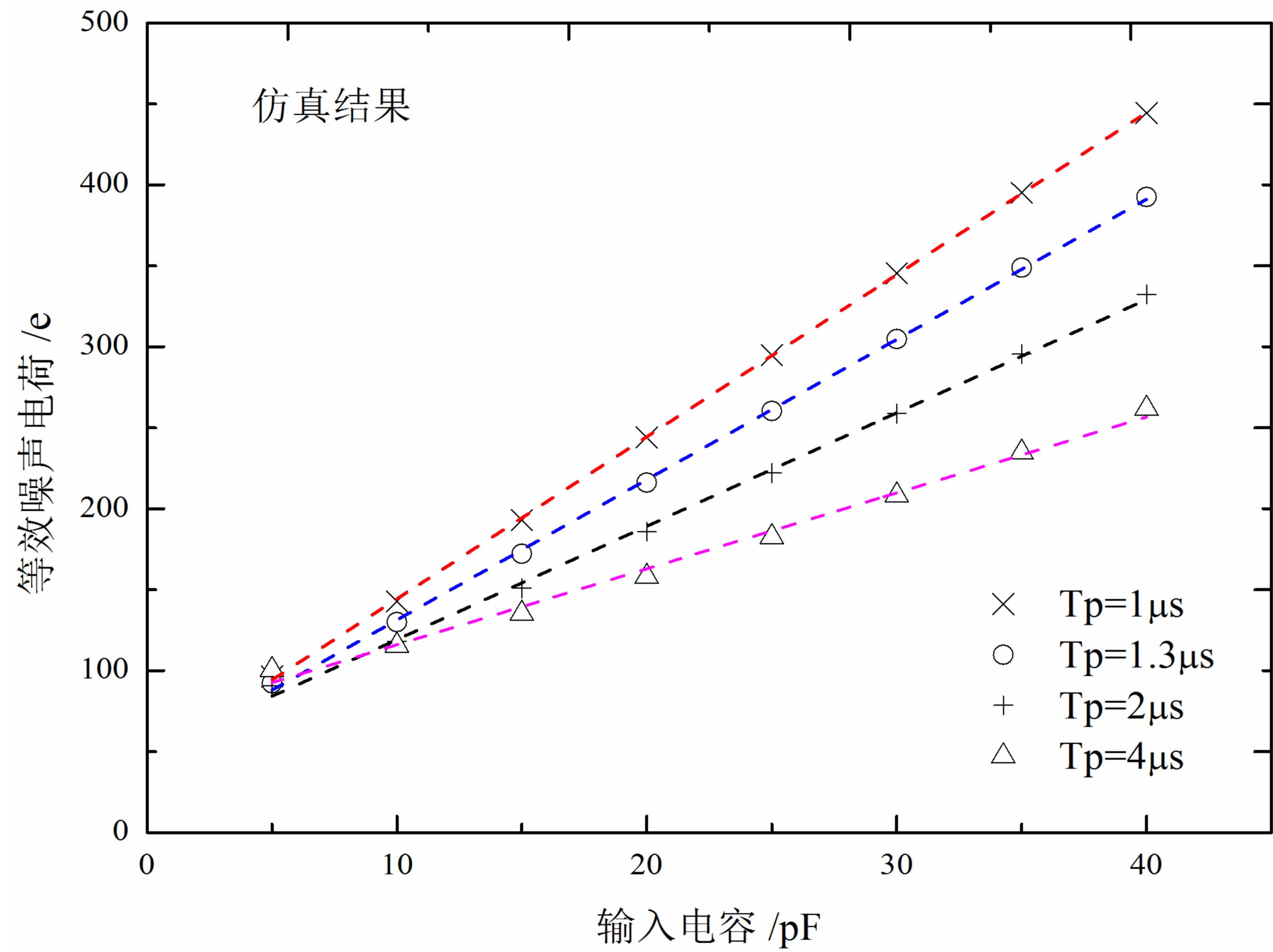
不同增益等效噪声电荷随达峰时间的变化曲线



不同通道等效噪声电荷随达峰时间的变化曲线

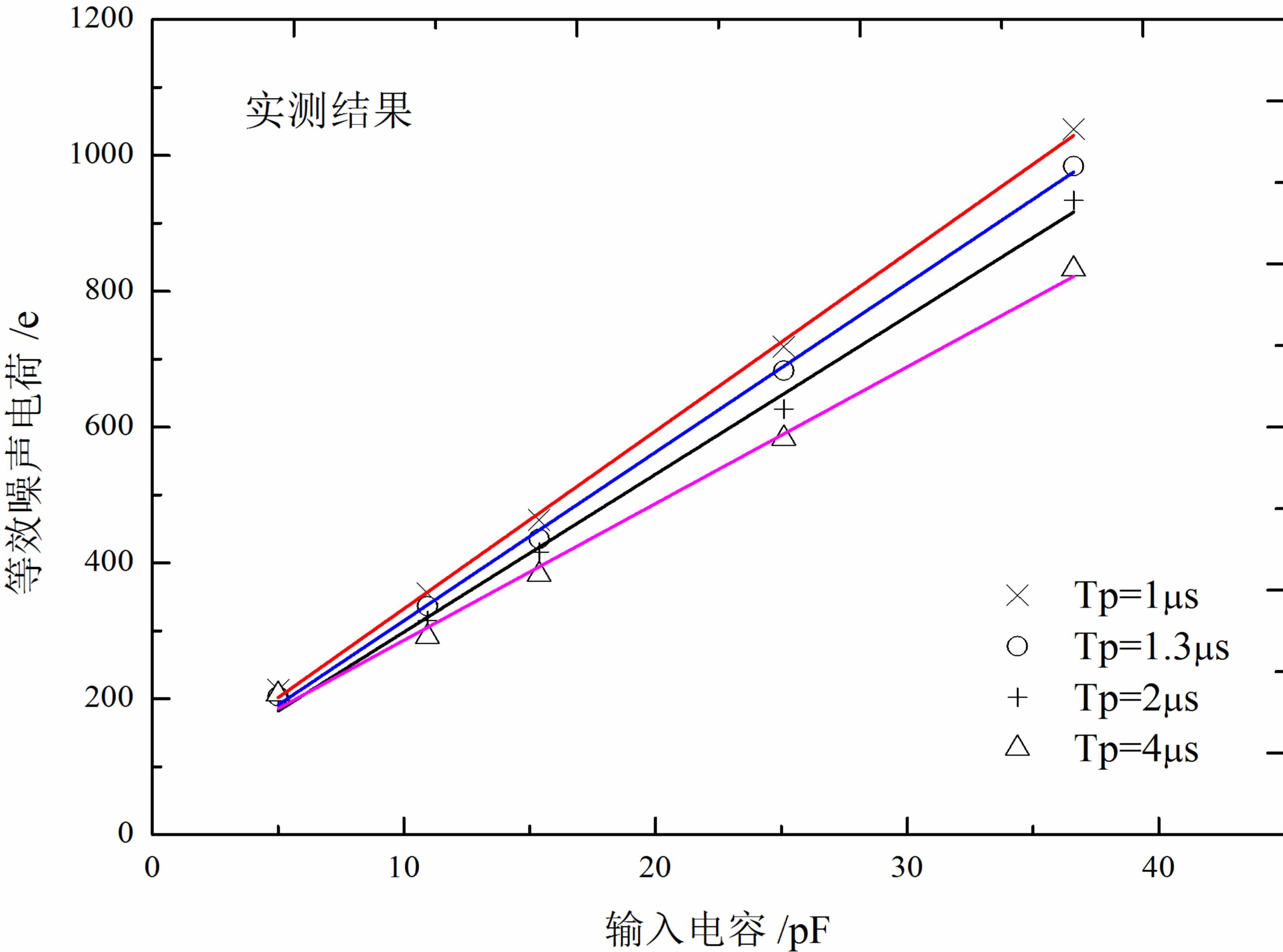
- $C_{in}=1\text{pF}$: 测试通道，输入端没有引出来
- $C_{in}=6\text{pF}$: 普通通道，输入端连接到PCB上，封装寄生电容、PCB走线寄生电容使得输入电容增加为6pF
- 测试PCB板分别采用了FR4和PTFE两种板材

噪声斜率测试



不同达峰时间仿真得到的噪声电容斜率

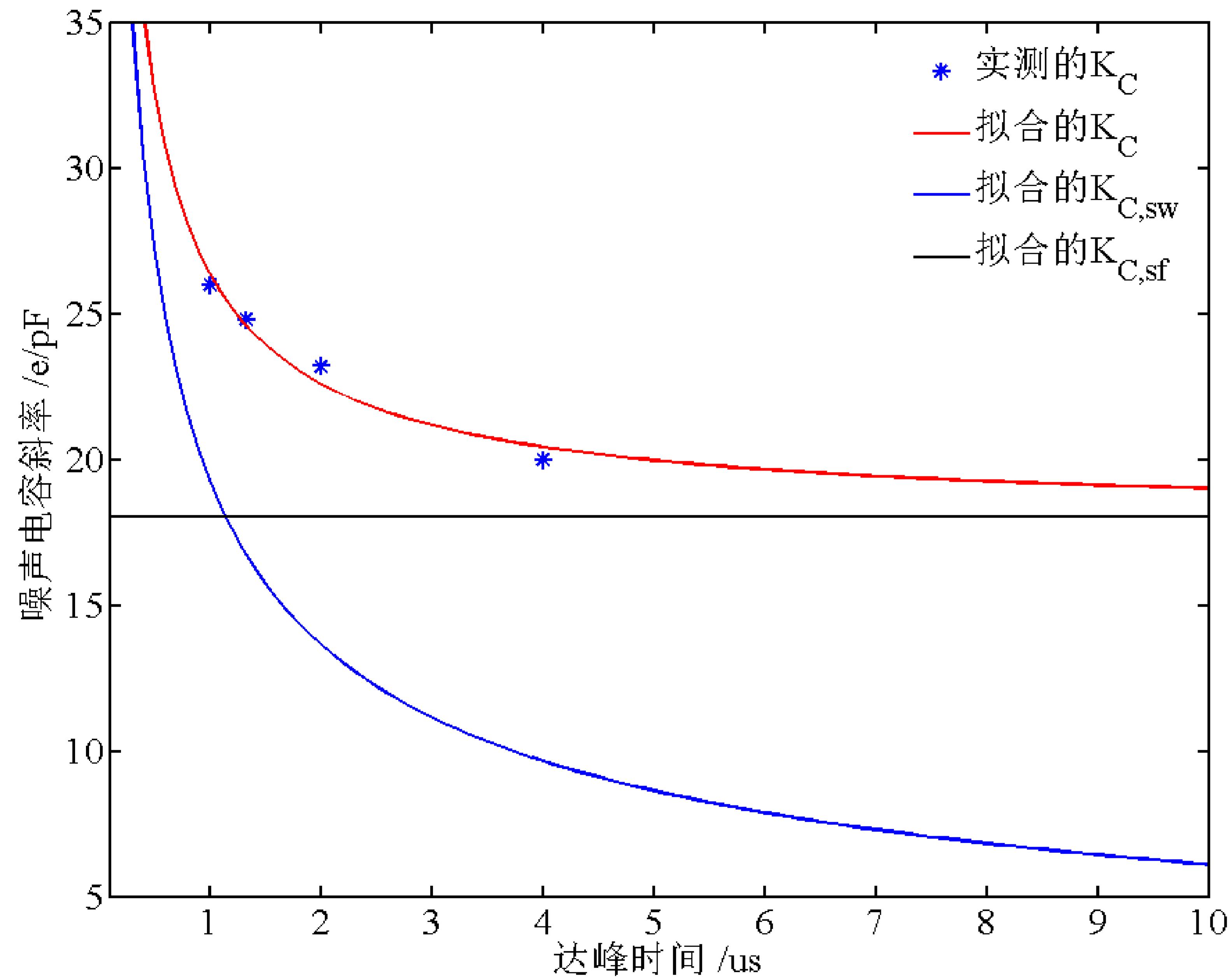
仿真ENC:
44e+10e/pF@1us达峰时间
69e+4.7e/pF@4us达峰时间



不同达峰时间实测的噪声电容斜率

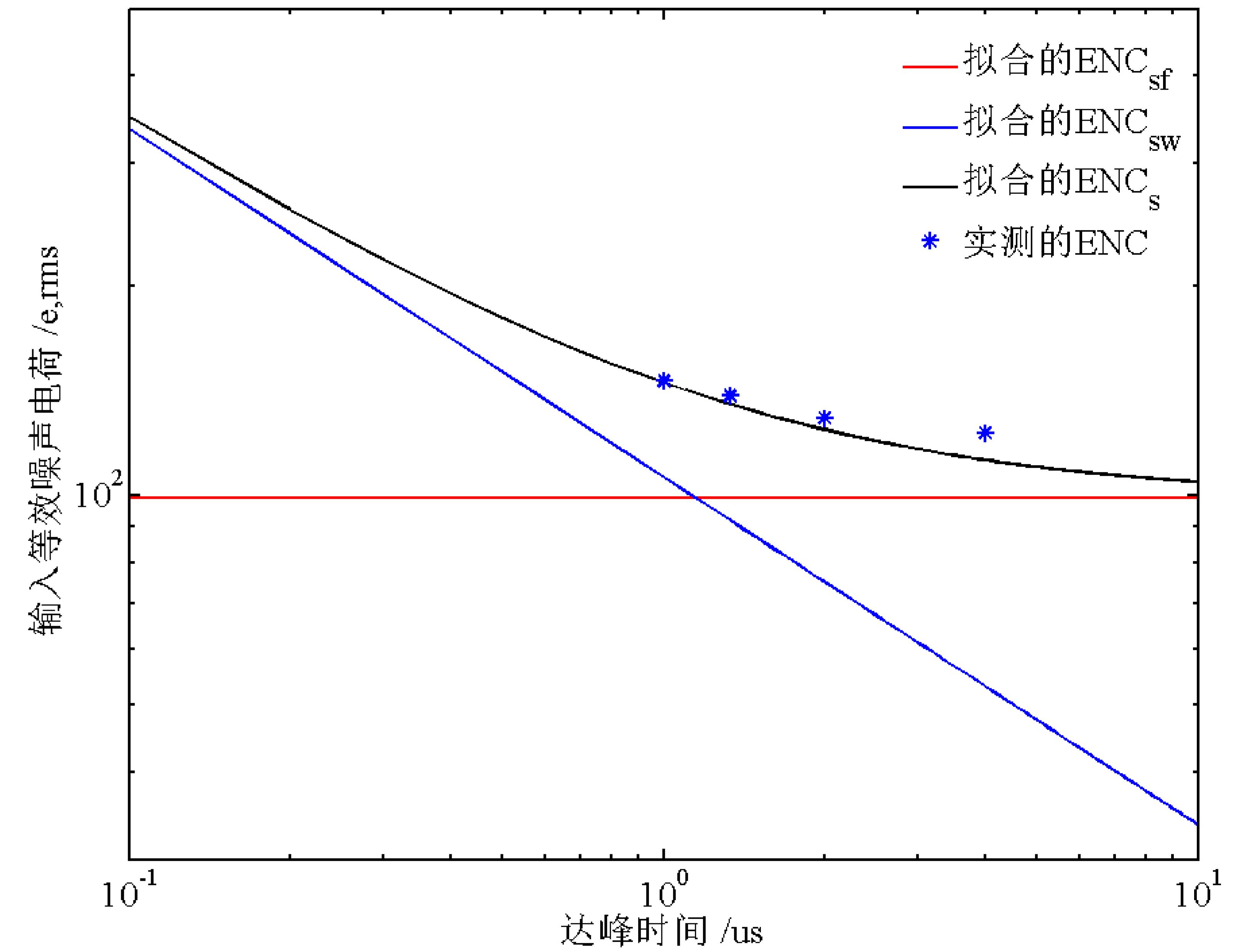
实测ENC:
71e+26e/pF@1us达峰时间
85e+20e/pF@4us达峰时间

噪声斜率测试



噪声电容斜率随成形时间变化的拟合值

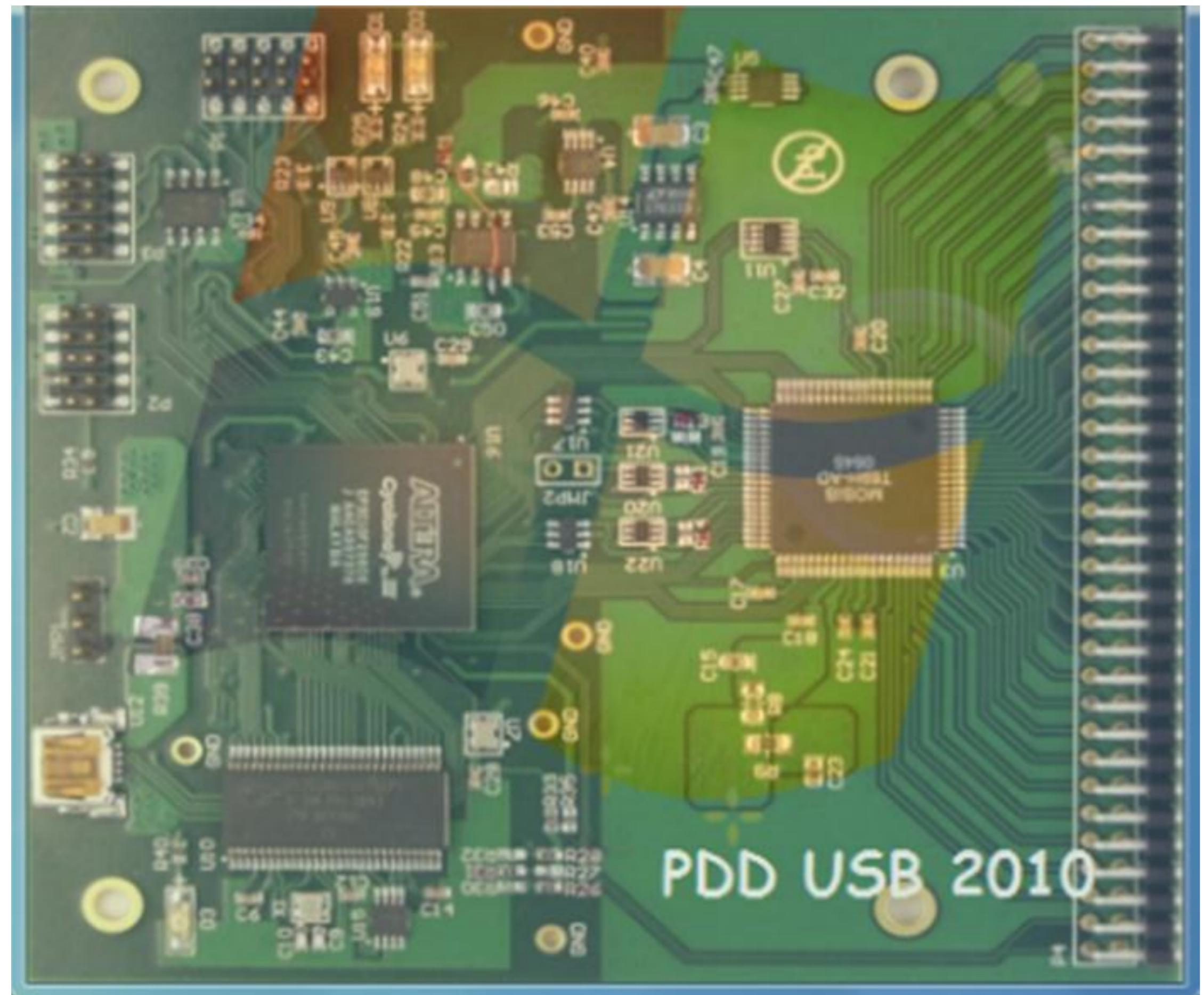
$$\text{噪声电容斜率公式: } K_C = \sqrt{\frac{a}{\tau_p} + b}$$



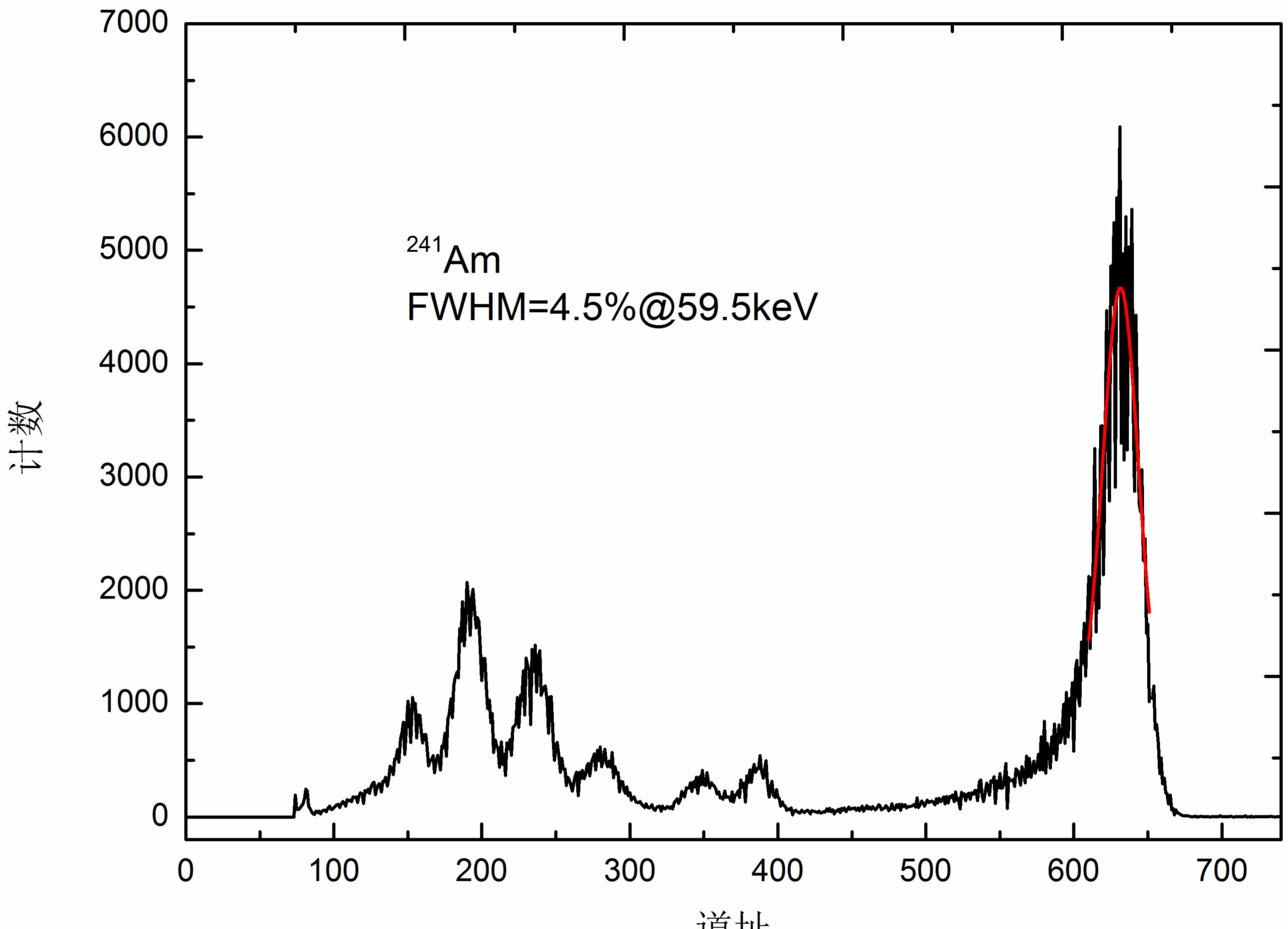
ENC随成形时间变化的拟合值

	a (nV^2/Hz)	b (μV^2)
仿真值	5.15	0.95
实测值	24.4	21.2

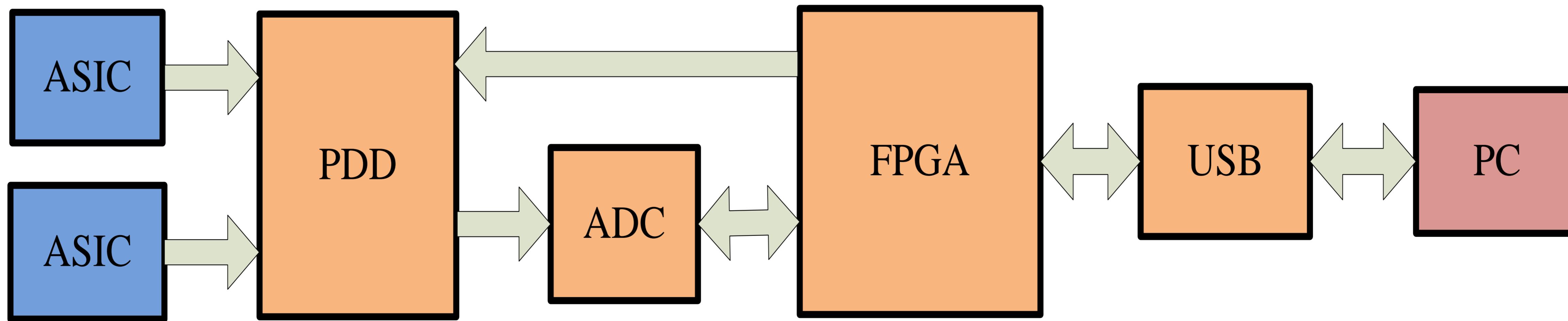
PDD数据采集系统



PDD USB数据采集板^[4]



使用PDD数据采集板测得²⁴¹Am的能谱图



32通道CdZnTe探测器能谱数据采集系统框图

总结及后续工作展望

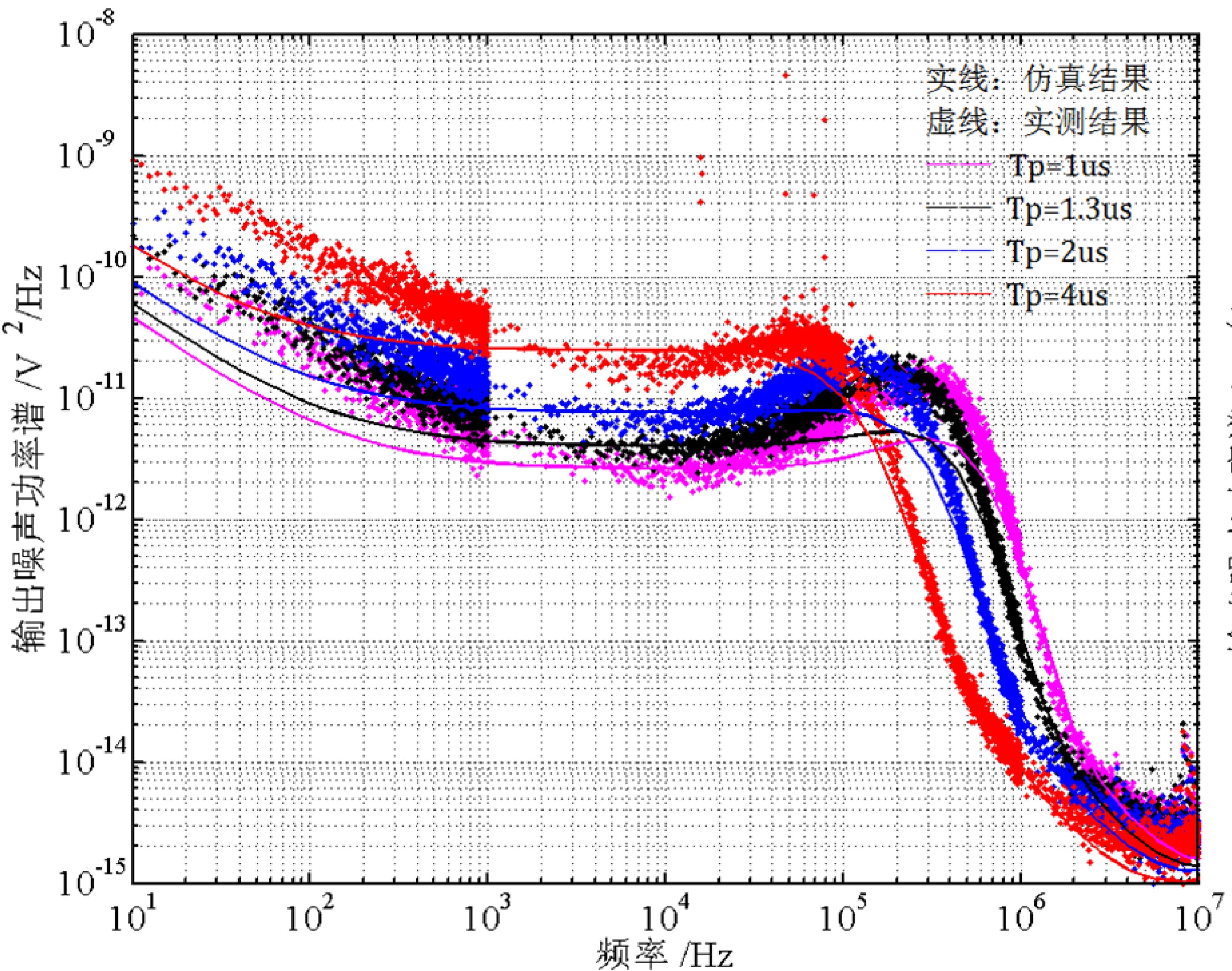
- 设计了一款用于碲锌镉探测器信号读出的低噪声前端芯片，实现了前放、成形、漏电流补偿、甄别以及输出驱动放大等基本功能。
- 初步测试结果表明芯片各项功能均正常，基本达到了设计指标，满足应用需求。
- 6pF输入电容时测得的最小ENC为120e，测试通道测得的最小ENC为70e，1us和4us达峰时间测得的噪声斜率分别为26e/pF和20e/pF，实测结果比仿真结果偏大。
- 采用了PDD数据采集板搭建了一个32通道的数据采集系统，目前正在准备多通道的像素CdZnTe探测器，后续工作将使用该32通道数采系统对探测器进行性能评估和能谱测量。

参考文献

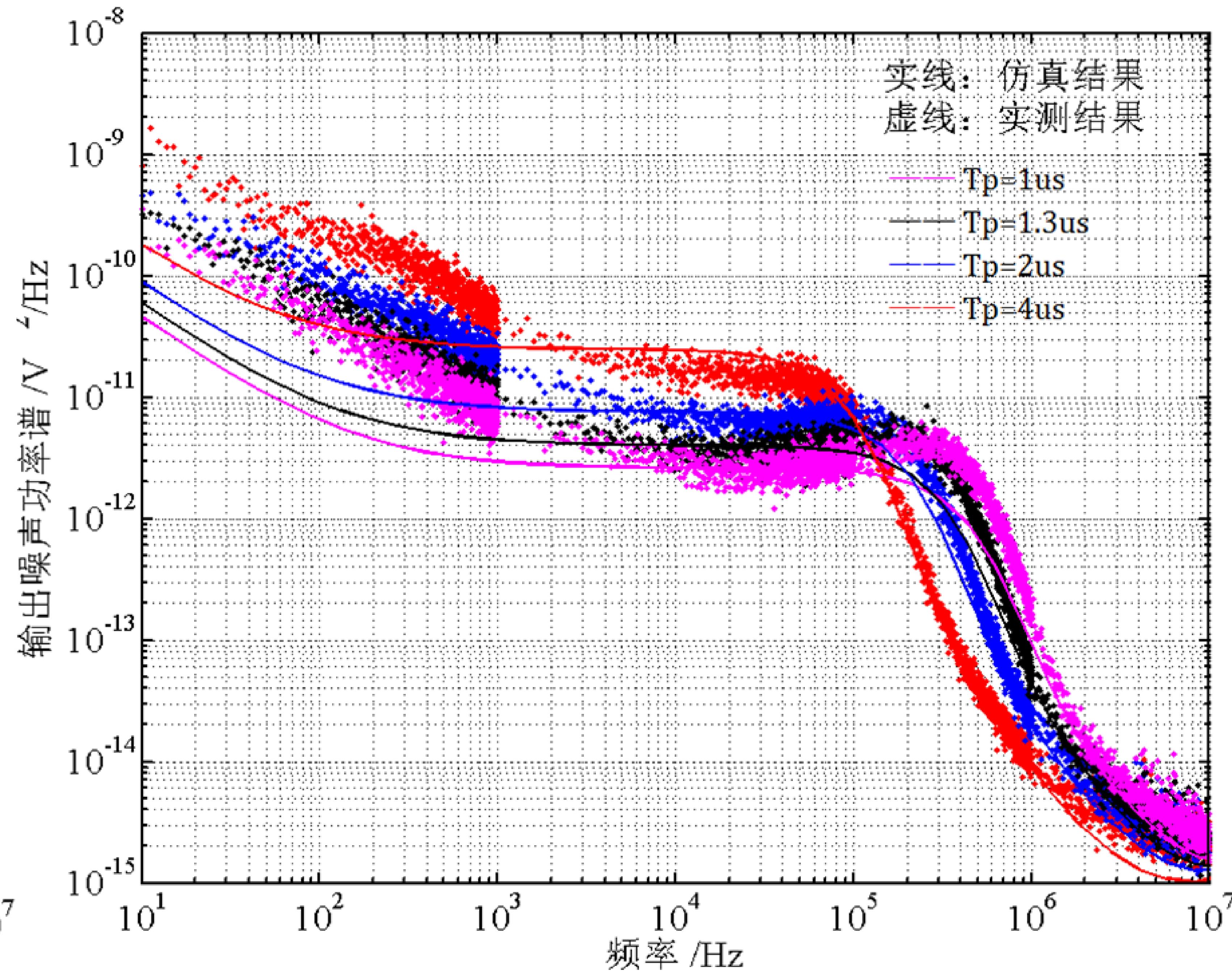
- [1] G. De Geronimo et al, “A CMOS detector leakage current self-adaptable continuous reset system: Theoretical analysis”, *NIMA*, 1999, 421:322-333.
- [2] C. Fiorini et al, “Integrated RC cell for time-invariant shaping amplifiers”, *IEEE TNS*, 2004, 51:1953-1960.
- [3] G. De Geronimo et al, “A CMOS baseline holder (BLH) for readout ASICs”. *IEEE TNS*, 2000, 47: 818-822.
- [4] G. De Geronimo et al, “Analog peak detector and derandomizer for high-rate spectroscopy”, *IEEE TNS*, 2002, 49: 1769-1773.

谢谢！

输出噪声功率谱分析

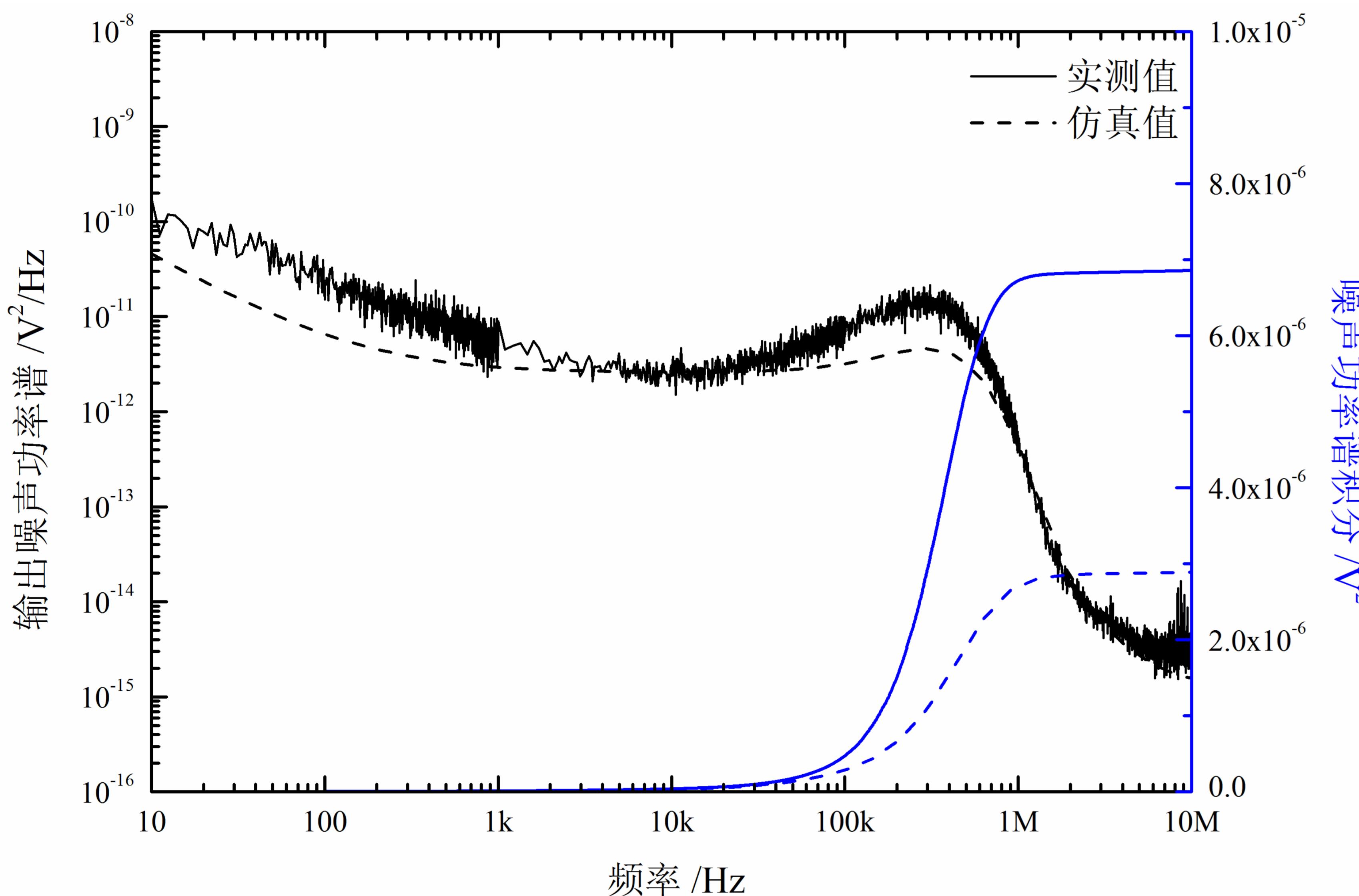


第5通道($C_{in} \approx 6\text{pF}$)输出噪声功率谱

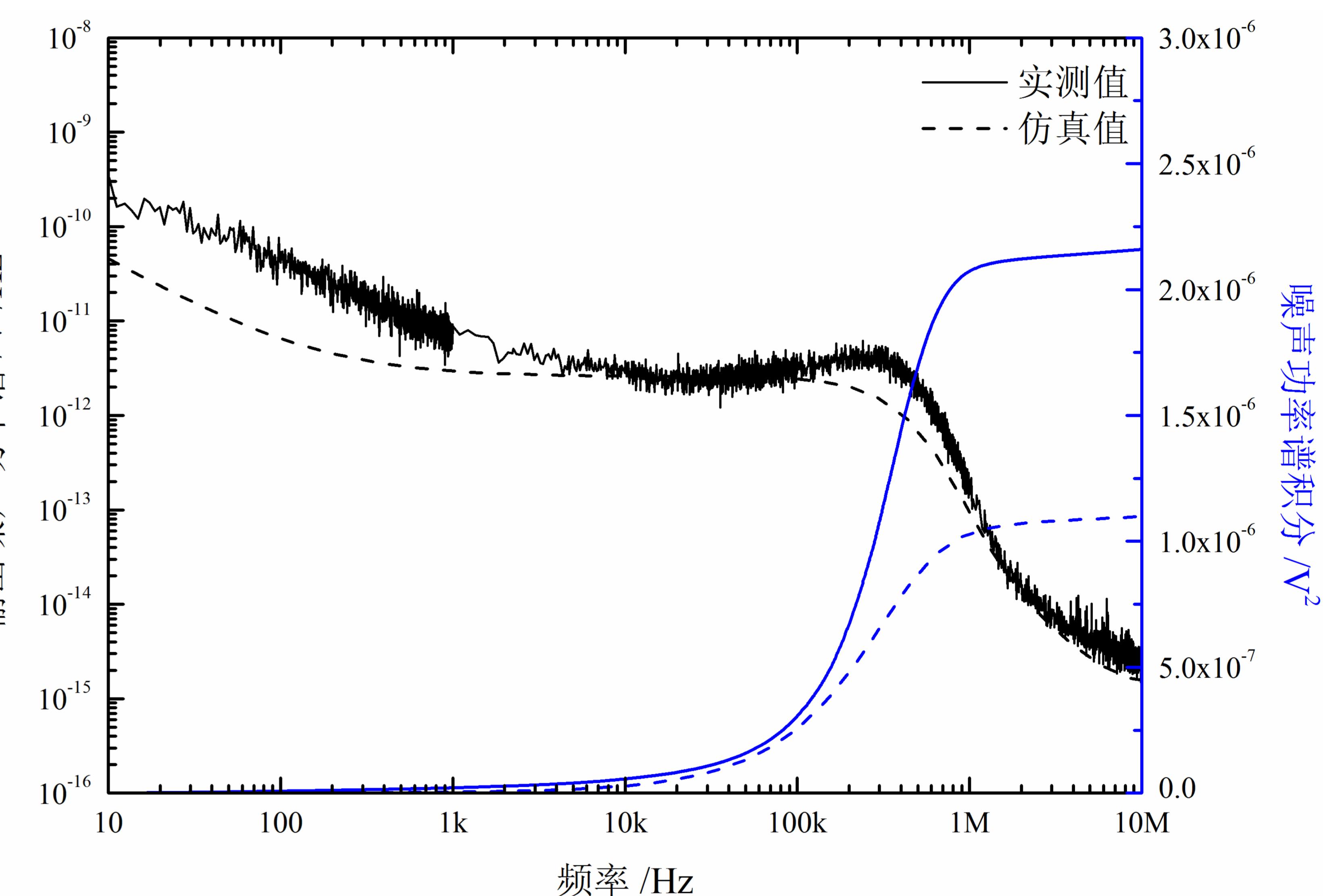


测试通道($C_{in} \approx 1\text{pF}$)输出噪声功率谱

输出噪声功率谱分析



第5通道($C_{in} \approx 6\text{pF}$)输出噪声功率谱



测试通道($C_{in} \approx 1\text{pF}$)输出噪声功率谱