

# 应用于高时间分辨能力测量的多 通道专用集成电路研究

清华大学工程物理系  
核电子学实验室

陈羽, 朱雪洲, 袁振雄, 周新,  
邓智, 刘以农

中国物理学会高能物理分会第十二届全国粒  
子物理学术会议 安徽 合肥

2016年8月24日





## 1、高时间分辨探测系统

- 时间分辨能力与读出电子学系统
- 基于电流模式的读出ASIC

## 2、MRPC探测器读出ASIC研究

- CAD-I & CAD-II

## 3、PET探测系统读出ASIC研究

- TIMPIC
- EXYT

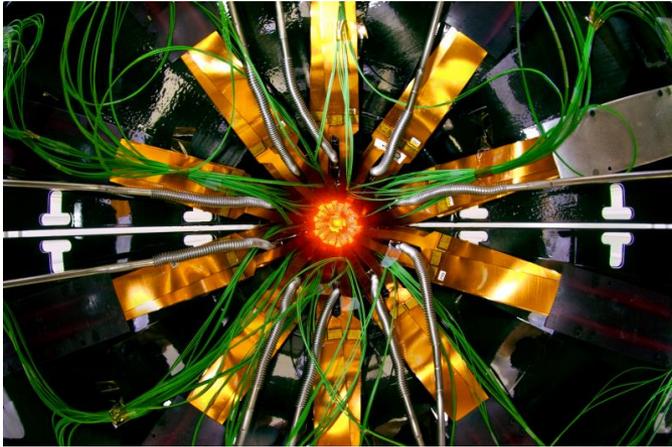
## 4、总结与之后的工作



# 高时间分辨能力辐射探测系统



- 时间测量在辐射探测系统中扮演重要角色。

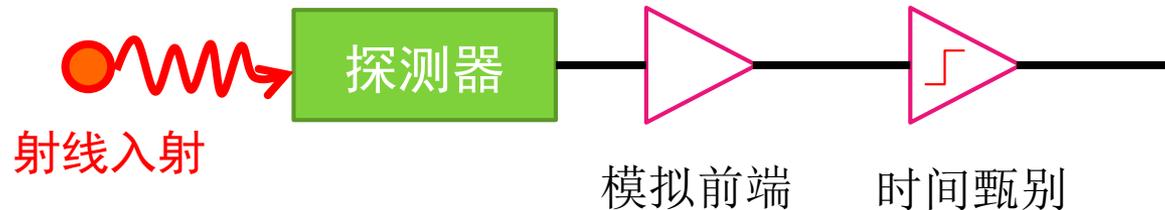


大型物理实验装置——飞行时间探测系统 (Time-of-flight, TOF)

核医学成像系统——正电子发射断层成像 (Positron Emission Tomography, PET)



- 高时间分辨能力探测系统对各个环节都有要求



使用高探测效率、高时间分辨能力的探测器：

- 多气隙阻性板室 (MRPC)
- 快闪烁体+光电转换器件



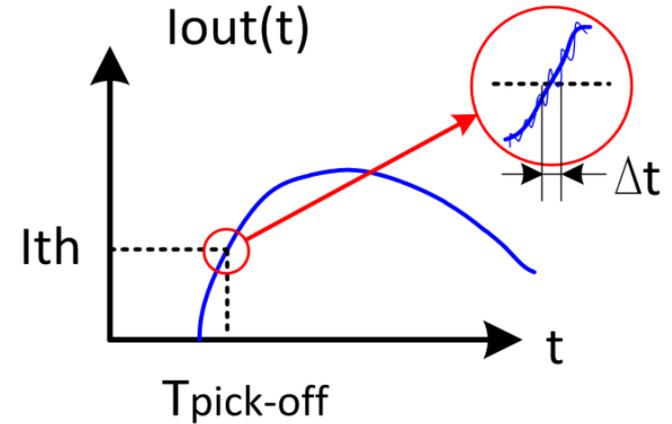
# 探测信号的时间甄别



- 读出电子学对甄别时间抖动的影响：
  - 给定阈值  $I_{th}$ ，波形过阈时刻  $T_{pick-off}$  的抖动 (rms) 受波形斜率与噪声影响：

$$\sigma_{T_{pick-off}} = \frac{\sigma_I}{dI_{out}(t)/dt} = \frac{\sqrt{\sigma_{det}^2 + \sigma_{elec}^2}}{dI_{out}(t)/dt}$$

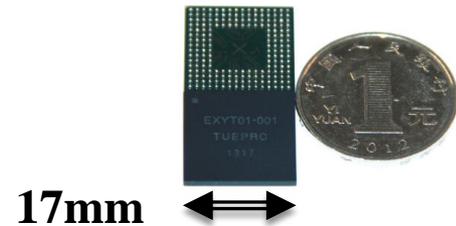
- 斜率  $dI_{out}/dt$  大 → 高带宽前端电路
- 电子学噪声  $\sigma_{elec}$  小 → 低噪声前端电路



相制约 →

读出电路的功耗和结构设计提出挑战

- 多通道探测器读出电路 → 低功耗、低复杂度的电路结构
- 采用专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC)
  - 集成度高，面积小
  - 功能可拓展性强，降低系统互联设计的难度  
可以较为灵活的实现复杂的算法和电路功能
  - 功耗相较于分立器件小





## 1、高时间分辨探测系统

- 时间分辨能力与读出电子学系统
- 基于电流模式的读出ASIC

## 2、MRPC探测器读出ASIC研究

- CAD-I & CAD-II

## 3、PET探测系统读出ASIC研究

- TIMPIC
- EXYT

## 4、总结与之后的工作

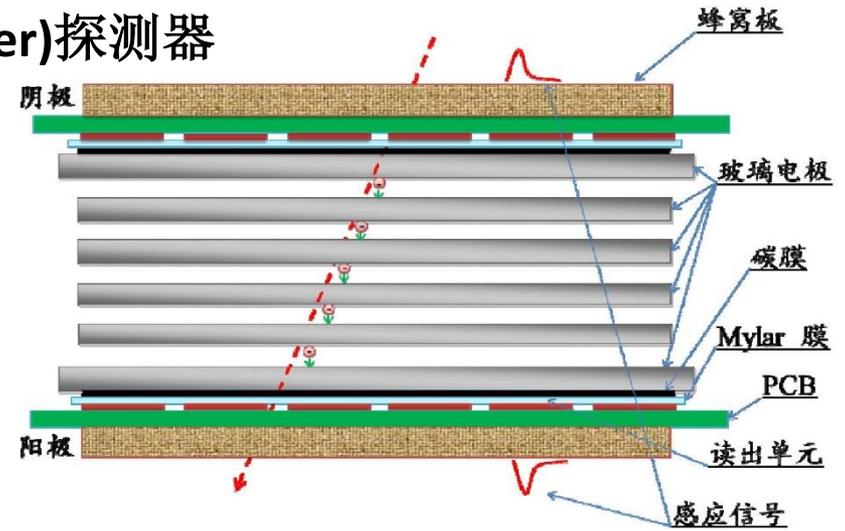


# 应用背景——MRPC探测器读出



## • MRPC(Multi-gap Resistive Plate Chamber)探测器

- ✓ 好的时间分辨特性
- ✓ 探测效率高
- ✓ 适合用于粒子鉴别的大面积  
TOF (Time of Flight) 飞行时间测量的应用

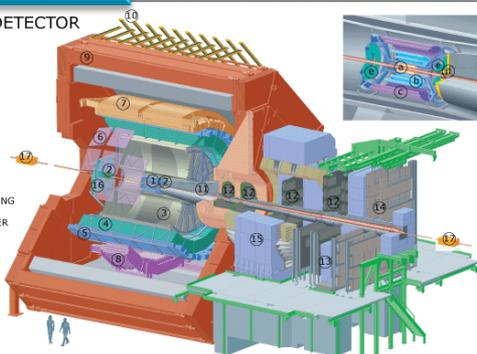


- MRPC探测器已广泛应用在多个大型物理实验装置之中。

### ALICE-TOF

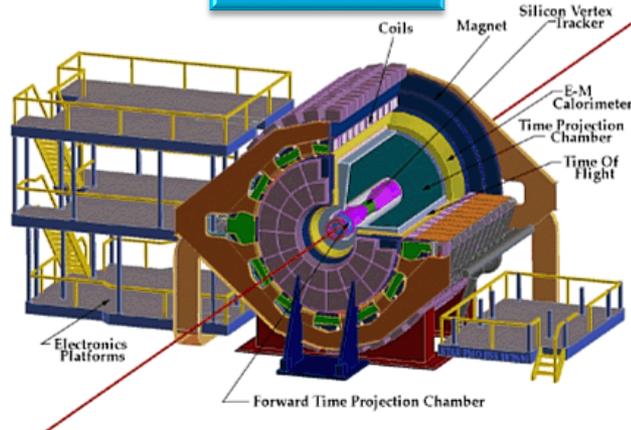
THE ALICE DETECTOR

- ITS
- FMD, TO, VO
- TPC
- TRD
- TOF
- HMPID
- EMCAL
- PHOS CPV
- MAGNET
- ACORDE
- ABSORBER
- MUON TRACKING
- MUON WALL
- MUON TRIGGER
- DIPOLE
- PMD
- ZDC

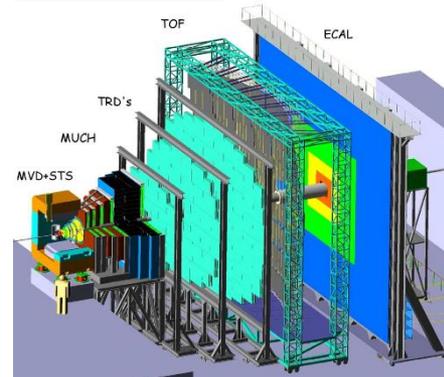


- ITS SPD Pixel
- ITS SDD Drift
- ITS SSD Strip
- VO and TO
- FMD

### STAR-TOF

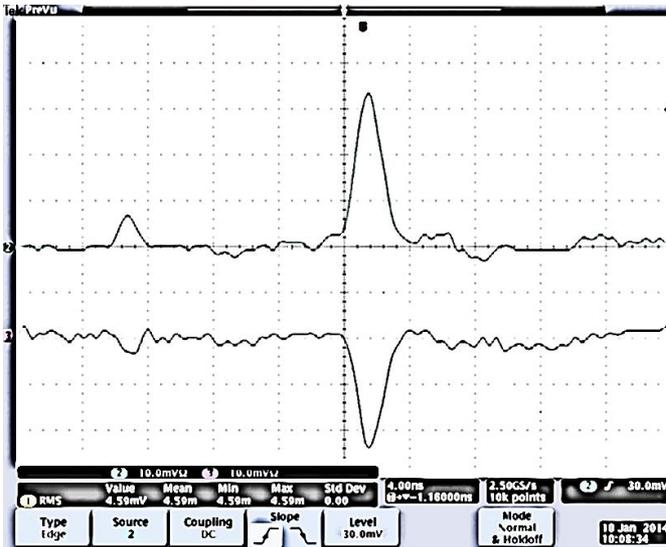


### CBM-TOF





# 应用背景——MRPC信号特点



- 定时探测器本征时间分辨可做到**20ps rms**
- MRPC信号主要特性：

参数	值
上升时间	~ 300ps
FWHM 半高宽	1ns ~ 2ns
下降时间	~ 300ps
幅度	0.5mV ~ 30mV (10μA ~ 600μA)

## MRPC探测器对读出电子学提出了很高的要求：

- ✓ 高带宽 : >百MHz水平，与信号上升时间相当
- ✓ 低输入阻抗
- ✓ 低噪声
- ✓ 低阈值甄别 : 探测器输出信号幅度小
- ✓ 低功耗
- ✓ 低串扰



# 国际上现有读出ASIC的研究情况

- 以NINO和PADI为为代表的基于电压模式的读出ASIC，已经应用于多个大型试验装置中，取得了较好的时间分辨能力。

表 1.1 NINO 芯片性能参数

表 1.2 PADI 系列芯片性能参数

参数	指标
达峰时间	1ns
差分输入阻抗	90Ω ~ 140Ω
甄别阈值	10fC ~ 100fC
前沿时间抖动	< 25ps
功耗	30 mW/Channel

参数	PADI-1	PADI-2,-3	PADI-6,-7	PADI-8
放大器带宽 [MHz]	280	293	416	411
放大器增益 [V/V]	74	87	244	251
输入阻抗 [Ω]	30-450	37-370	38-165	30-160
输入等效甄别阈值 [fC]	42	38	14	25
时间抖动 @10mV[ps]	< 10	< 10	< 10	< 10
功耗 [mW/Channel]	21.6	17.4	17.7	17

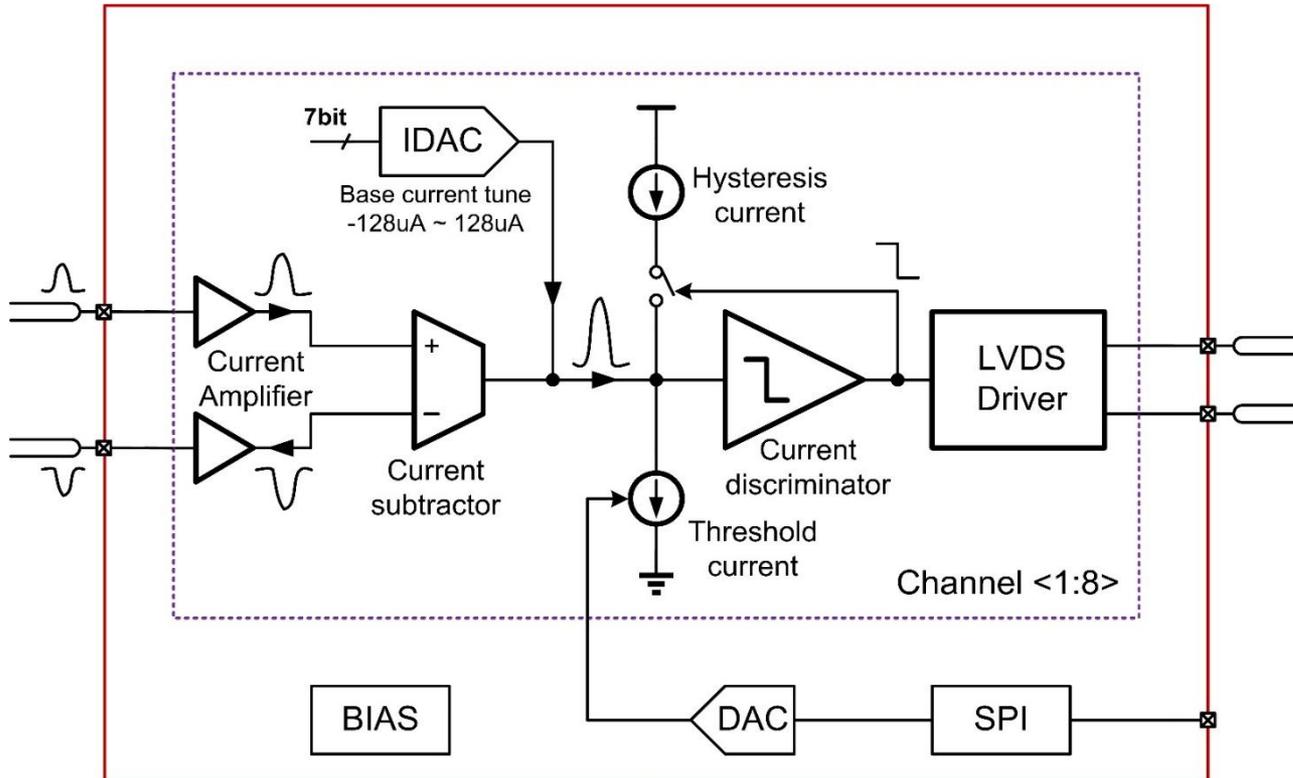
- 基于电流模式的CAD(**C**urrent **A**mplifier and **D**iscriminator)芯片
  - 前沿定时，过阈时间TOT用于时间游动的矫正
  - CAD-I芯片采用0.35微米工艺，4通道单端输入，在单通道<10mW的功耗水平上实现了<20ps rms (@170 fC)的电子学抖动，并与探测器连接实现了200ps rms的探测系统时间分辨能力。(Zhou X, Deng Z, Wang Y, et al. Development of a current-mode ASIC for MRPC detectors[J]. Journal of Instrumentation, 2014, 9(10): C10040.)



# CAD-II芯片整体结构



- 0.18微米CMOS工艺， 8通道模拟差分输入+LVDS输出。



电流模式（Current Mode）读出电路，直接对输入电流信号进行放大、滤波和过阈甄别，省去电流-电压转换。

- 带宽高
- 输入阻抗小
- 动态范围大
- 电路结构简单
- 受电源电压影响小

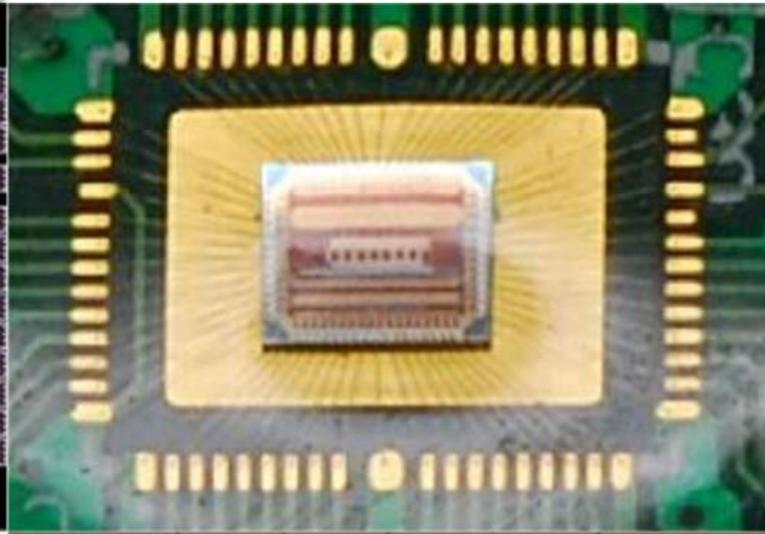
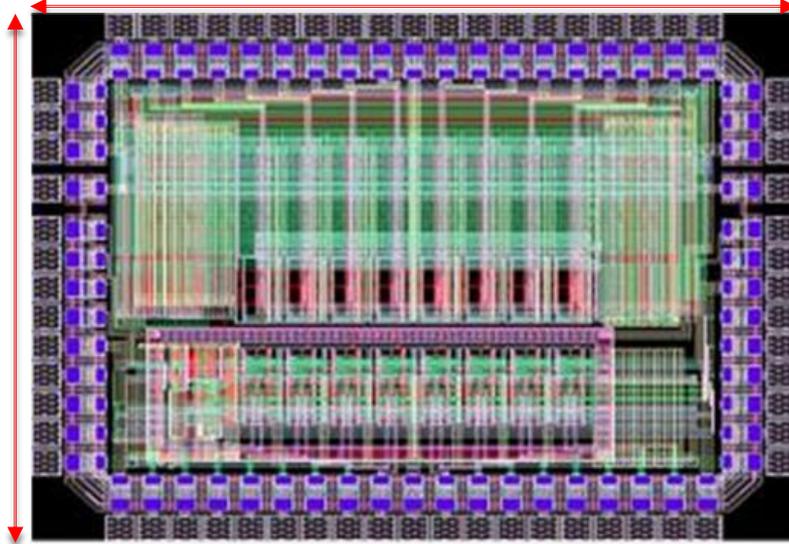


# CAD-II 芯片及其测试系统



2.8 mm

2.2 mm

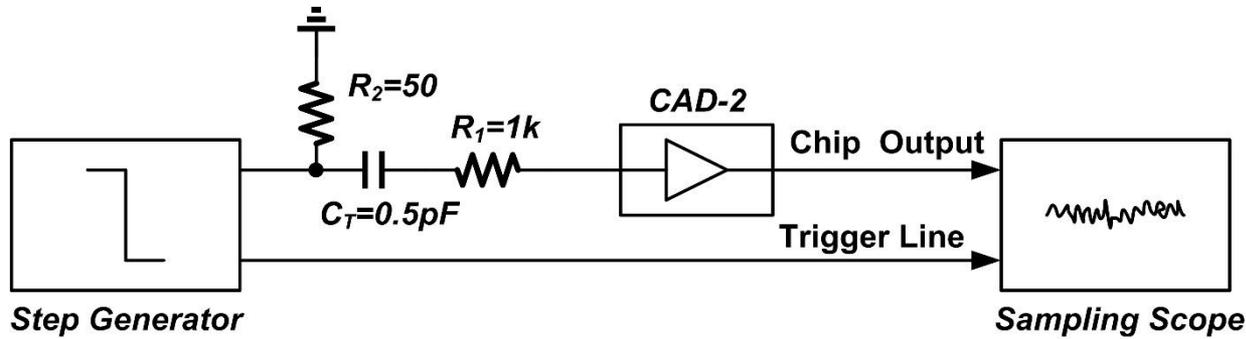


PCB上直接打线以减小输入寄生电容

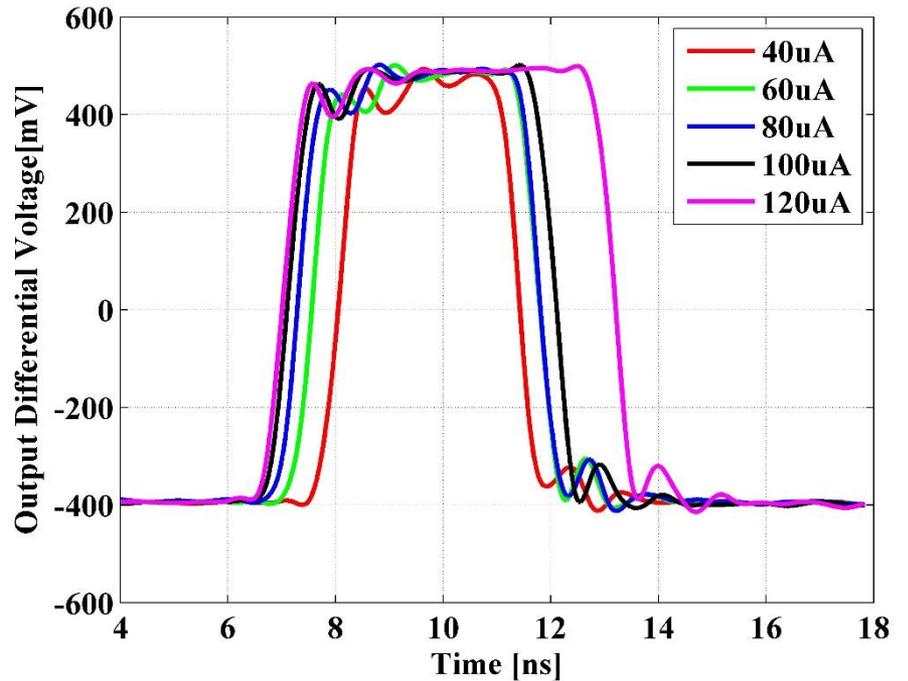
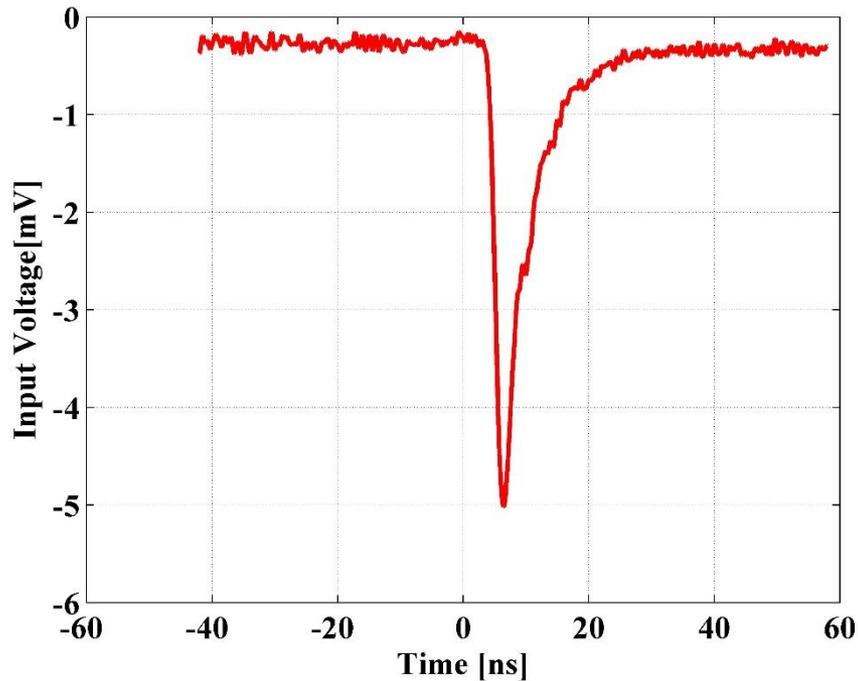




# 时间分辨能力测量



测试系统  
时间抖动  
10ps rms

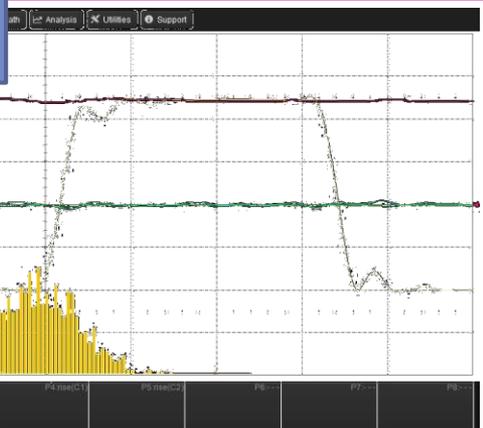




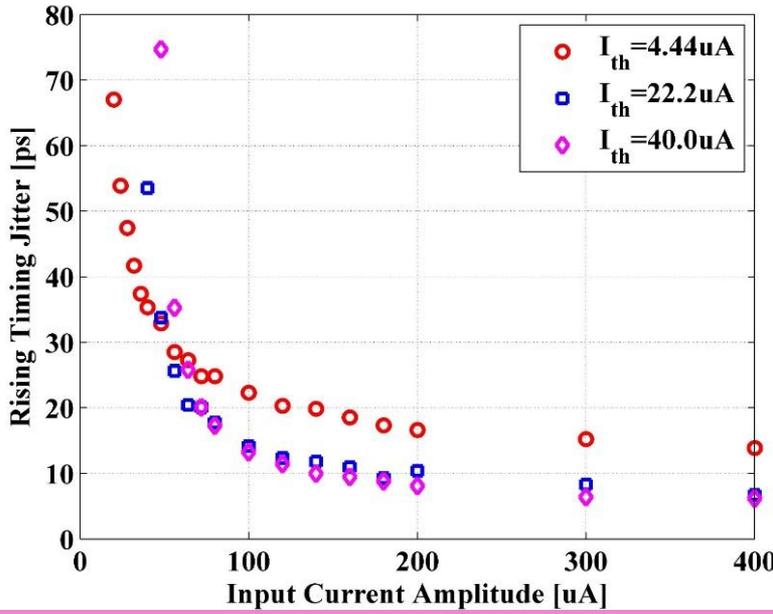
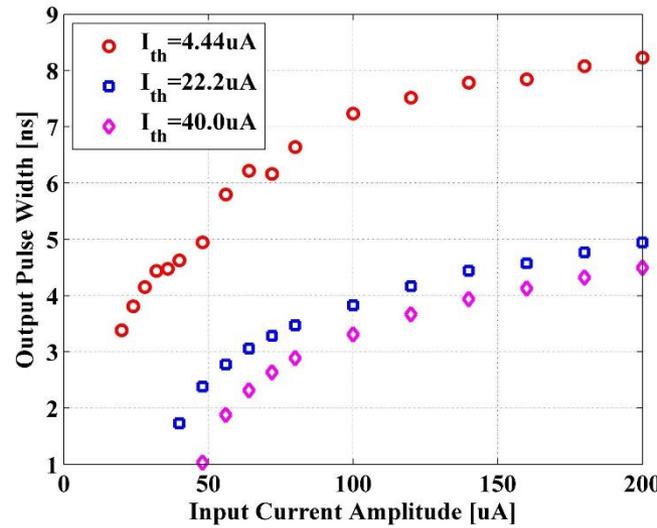
# 时间抖动测量



红色——输入信号  
 黄色——输出TOT脉冲  
 直方图——甄别时刻



TOT脉宽-脉冲幅度关系:



- 前沿时间抖动:
  - 输入电流100 μ A——15ps rms
  - 输入电流大于200 μ A——<10ps rms
- 脉冲宽度用于时间游动矫正



# CAD-II电子学测试总结



- CAD-II芯片在保证低功耗的条件下，实现了低阈值甄别和高时间分辨的特点，电子学测试具有与NINO和PADI相比拟的性能。

设计参数	CAD-II Sim	CAD-II Test	NINO	PADI-6	PADI-8
通道数	8	8	8	4	8
前放带宽	380MHz	N-A	N-A	416MHz	411MHz
输入阻抗	30~80Ω	32~80Ω	40~75Ω	38~165Ω	30~160Ω
等效输入噪声	0.53uA (26.5uV)	0.56uA (28uV)	0.57fC	23.8uV	22.0uV
最小阈值	5fC	9fC	10fC	14fC	25fC
每通道功耗	13.9mW	15mW	30mW	17.7mW	17mW
前沿时间抖动 @200uA(10mV)	<10ps	<10ps	<20ps	<10ps	<10ps

- 连接探测器的测试正在进行
- More Details in : Z. X. Yuan, Z. Deng, Y. Wang, and Y. N. Liu. CAD-II: the second version current-mode readout ASIC for high-resolution timing measurement. *Journal of Instrumentation*, Vol. 11, July 2016.



## 1、高时间分辨探测系统

- 时间分辨能力与读出电子学系统
- 基于电流模式的读出ASIC

## 2、MRPC探测器读出ASIC研究

- CAD-I & CAD-II

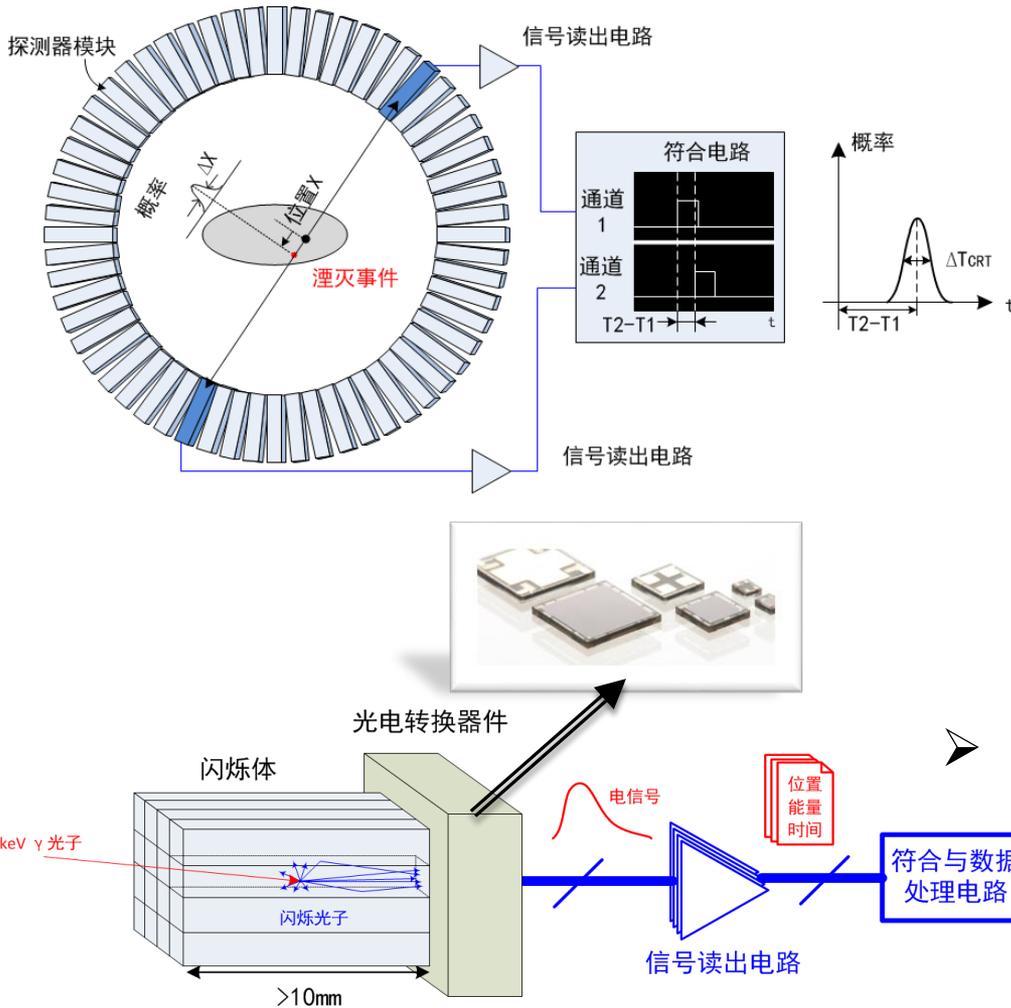
## 3、PET探测系统读出ASIC研究

- TIMPIC
- EXYT

## 4、总结与之后的工作



# PET探测系统



- 符合测量需要探测器对较好的符合时间分辨能力（Coincidence Timing Resolution, CRT），**FWHM~ns**。
- 飞行时间PET（TOF-PET）能够给成像过程提供更多的有效信息，提升图像质量和成像效率。
- 商业TOF-PET系统已经能够达到300~400ps水平的CRT。
- 研究型TOF-PET探测模块能够达到**~200ps CRT**，并向100ps努力。

## ➤ LYSO闪烁晶体+硅光电倍增管(SiPM)

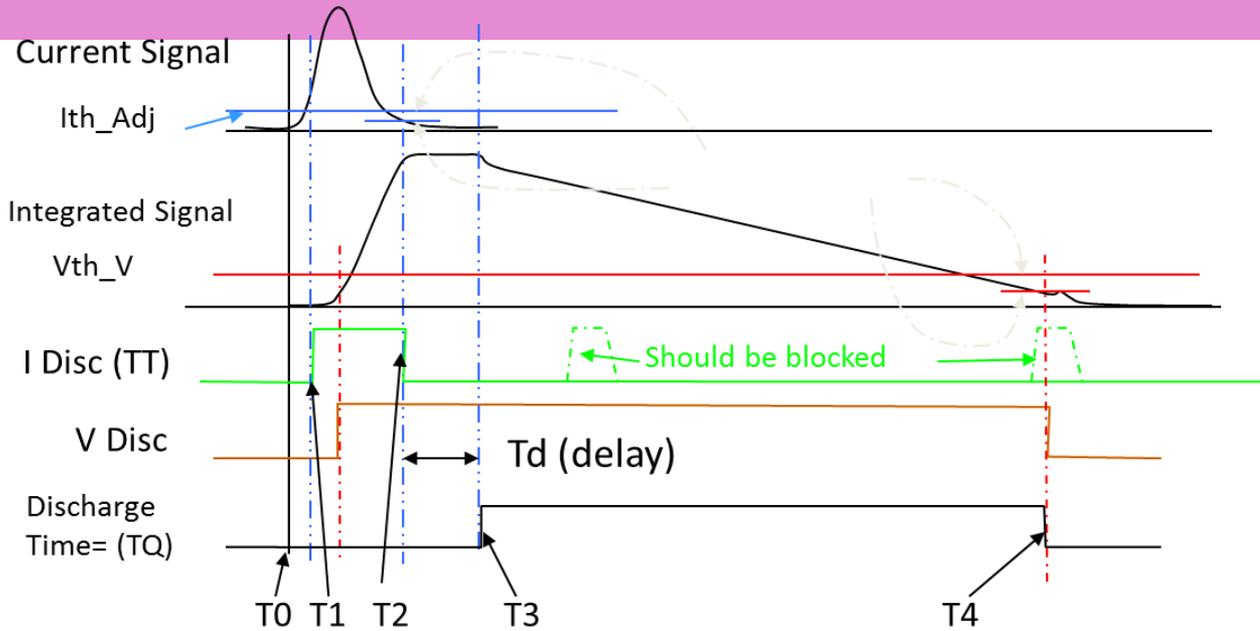
- ✓ 响应速度快；尺寸小，空间分辨率好
- ✗ SiPM寄生电容大，暗计数率高
- ✗ 通道数目多
- ✗ SiPM性能受温度、工作电压影响大



- LYSO/SiPM探测器时间分辨特性的研究，及其对读出电子学的要求：
  - 低输入阻抗、高带宽、低噪声、低甄别阈值
  - 考虑探测器的非理想因素：暗噪声
- 探测系统温度、偏置电压的控制：
  - 单通道功耗控制；
  - 单通道温度、工作电压的补偿
- 多通道设计——能量、位置和时间信息的输出与数字化。



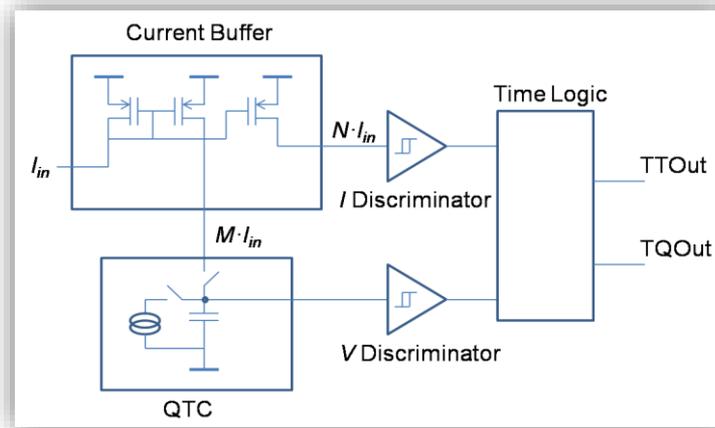
# 1、基于时间的读出ASIC —— TIMPIC



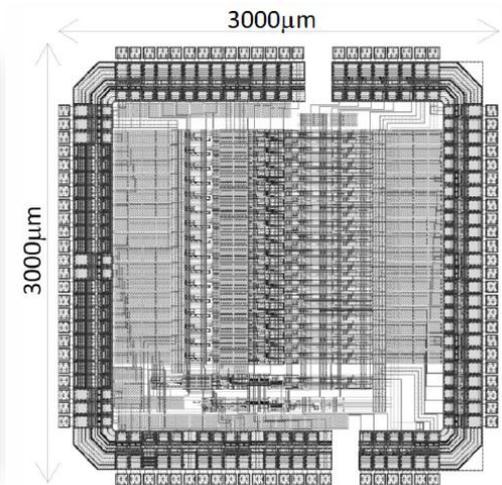
- 基于时间的读出方法：
- ✓ 后端只需要TDC实现对时间和能量的测量，无需ADC
  - ✓ 模拟信号→数字方波

死时间与动态范围直接相关 ( $1\mu\text{s max}$ ) ☹

工艺	0.35 $\mu\text{m}$ CMOS
输入阻抗	< 50 $\Omega$
输入带宽	> 100 MHz
动态范围	800 pC
噪声 (RMS)	<250fC
探测系统时间分辨能力	$\sim 1$ ns FWHM
每通道功耗	< 10 mW



16通道 TIMPIC-II





# TIMPIC测试



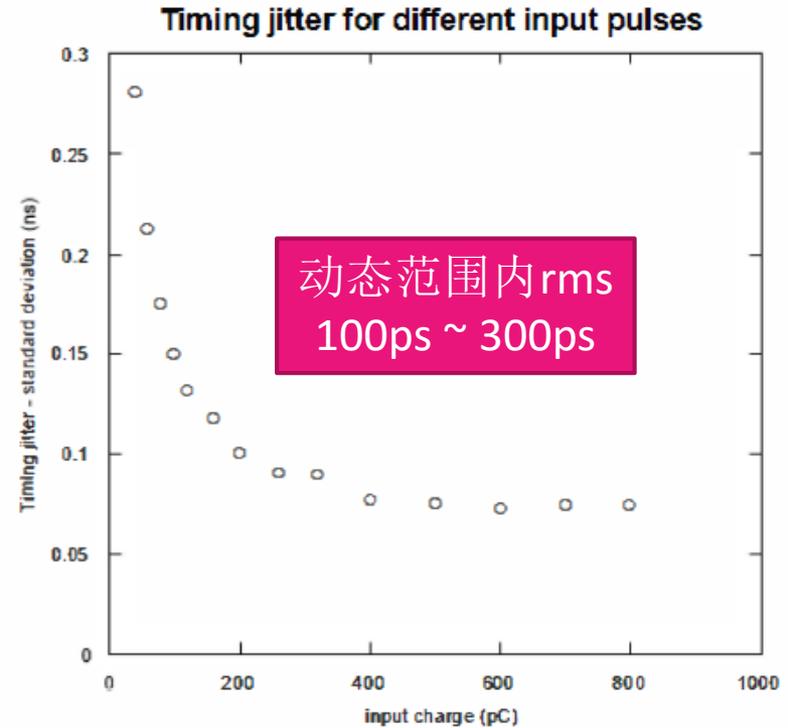
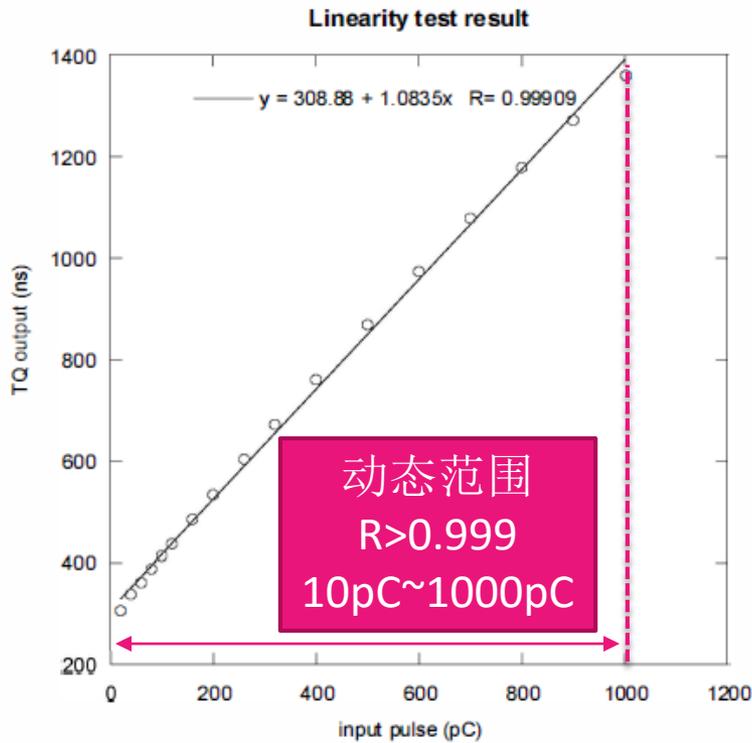
测试系统



**Blue:** 测试信号  
**Yellow:** 电容积分电压  
**Purple:** 输出脉冲



# TIMPIC芯片测试结果



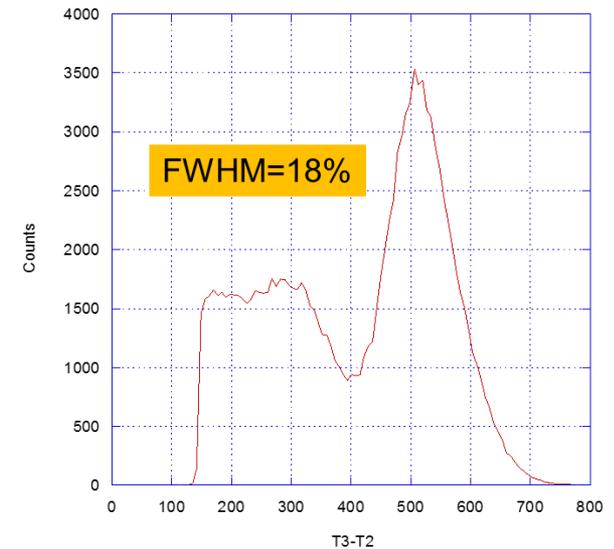
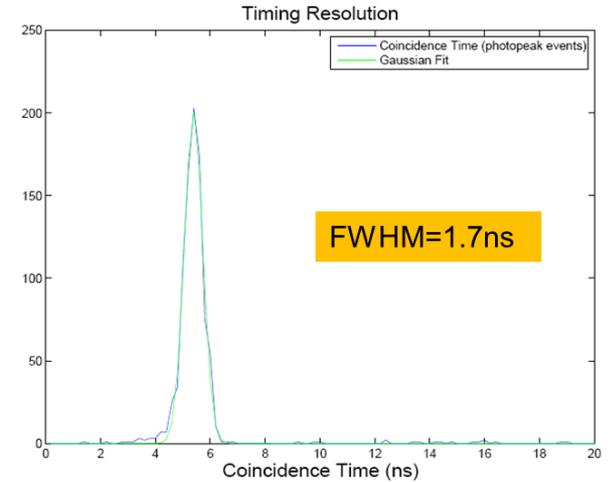
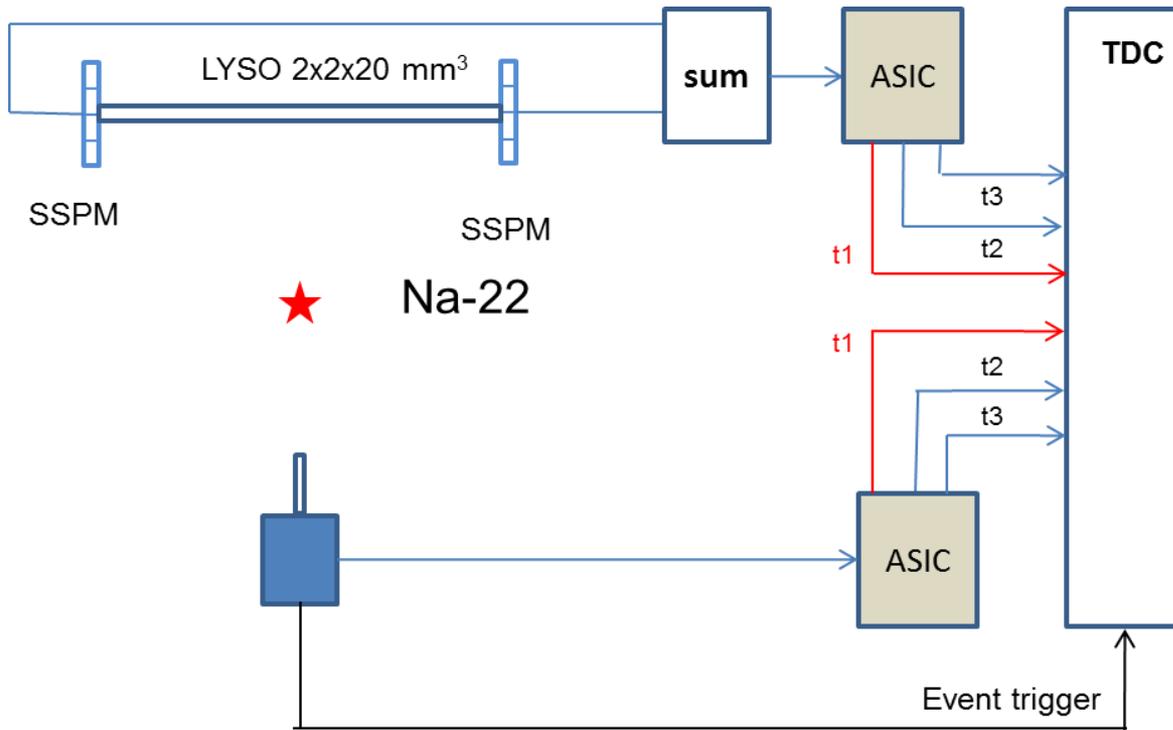
- More Details in :
- Deng Z, Lan A K, Sun X, et al. Development of an eight-channel time-based readout ASIC for PET applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6): 3212-3218.
- Zhu X, Deng Z, Lan K A, et al. TIMPIC-II: the second version time-based-readout ASIC for SSPM based PET applications[C]//Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 1474-1478.



# 探测系统测试结果



- $\geq 20\text{mm}$  长的LYSO以保证足够的探测效率
- $3 \times 3 \text{ mm}^2$  像素面积的SensL<sup>®</sup> Array4型SiPM。
- 系统时间分辨能力受SiPM暗计数影响较大

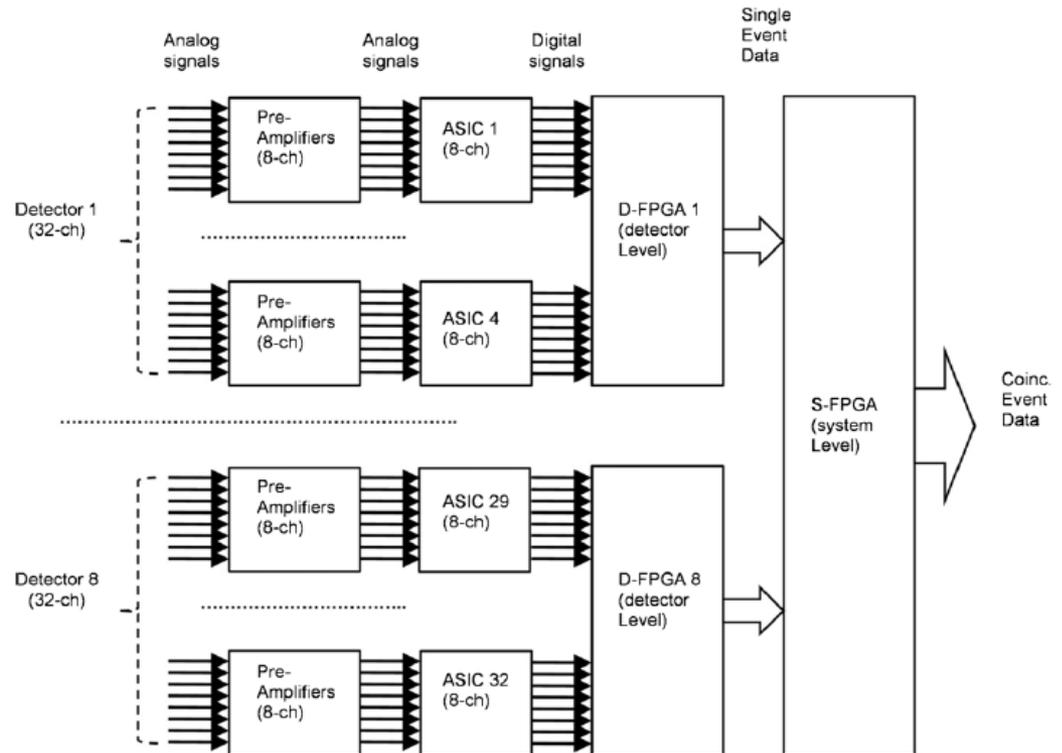
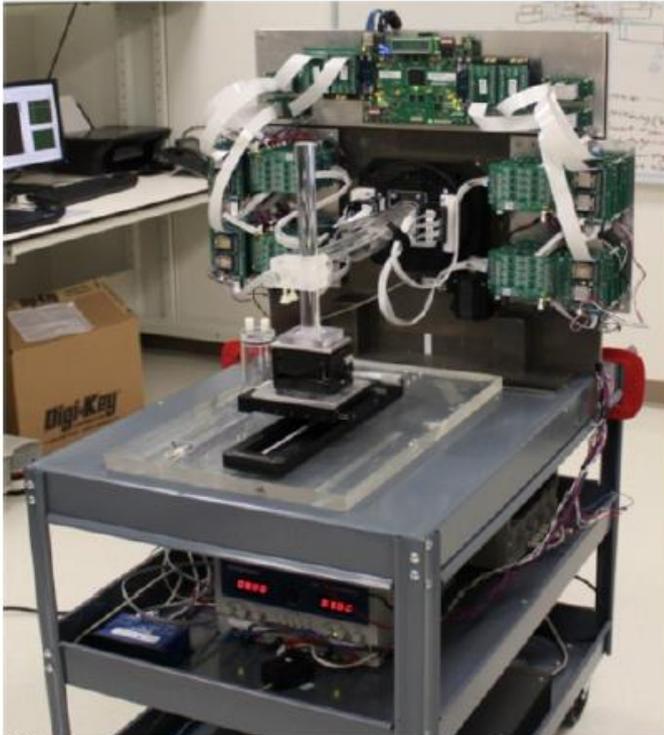




# TIMPIC在探测系统中的应用

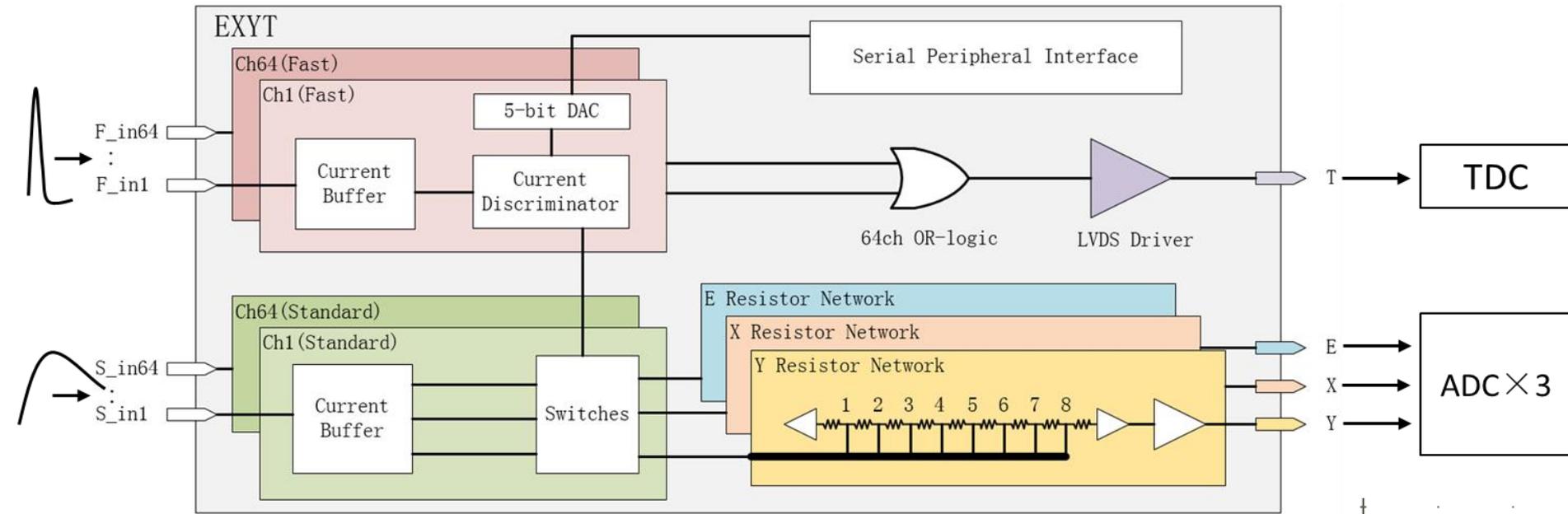


- Shao, Yiping, et al. "Development of a prototype PET scanner with depth-of-interaction measurement using solid-state photomultiplier arrays and parallel readout electronics." *Physics in medicine and biology* 59.5 (2014): 1223.
  - 256 CHs, 2mm Spacing Resolution on 3 dimensions.

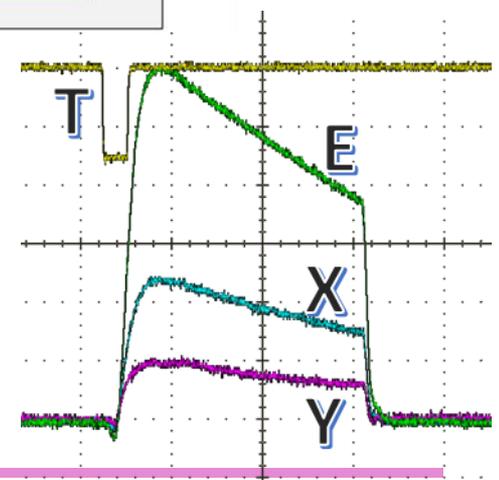




## 2、应用于TOF-PET的读出ASIC —— EXYT



- 结合SensL FB和FJ系列双端输出SiPM，通过优化电路结构，在**保证低功耗的条件下进一步提高时间分辨能力**。
  - 输入带宽：210MHz                      差分增益：160mV/mA
  - 单通道功耗：3mW                        动态范围：0~10mA
- 采用加权结构，将64个通道位置信息编码到3路输出信号
- 通道阈值单独调节——补偿通道间差异性



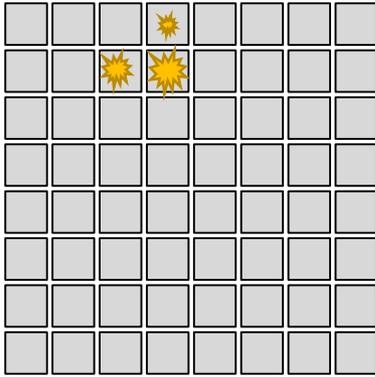


# 门控方法：改善死时间和噪声叠加问题

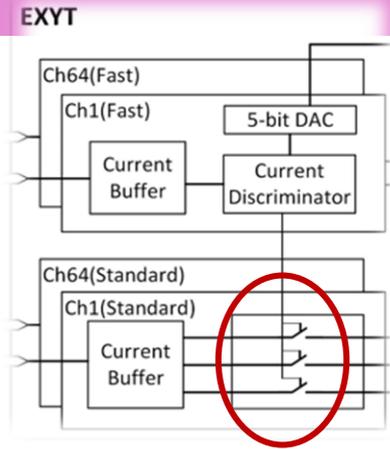


## • 噪声抑制

一个事件发生的同时，未触发SiPM通道暗计数产生输出

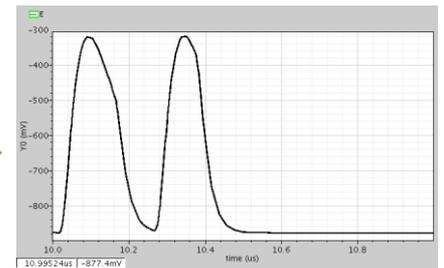
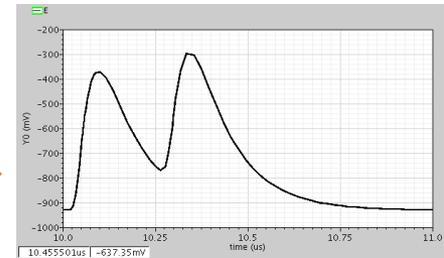
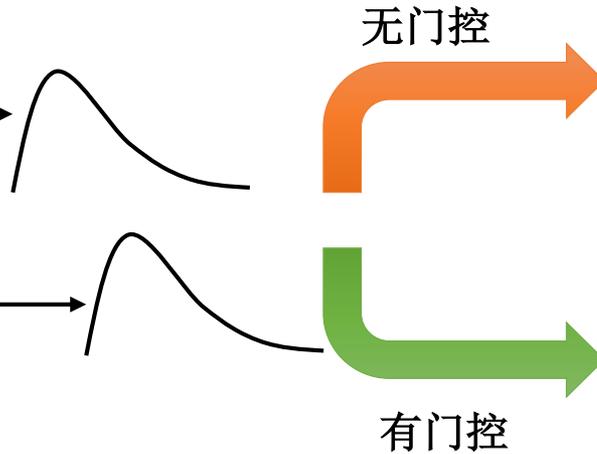
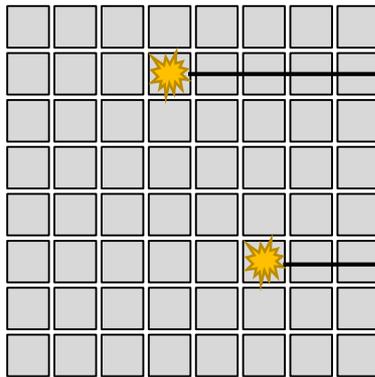


只有被触发的通道才被接入电阻网络，未触发的通道的探测器暗噪声被屏蔽



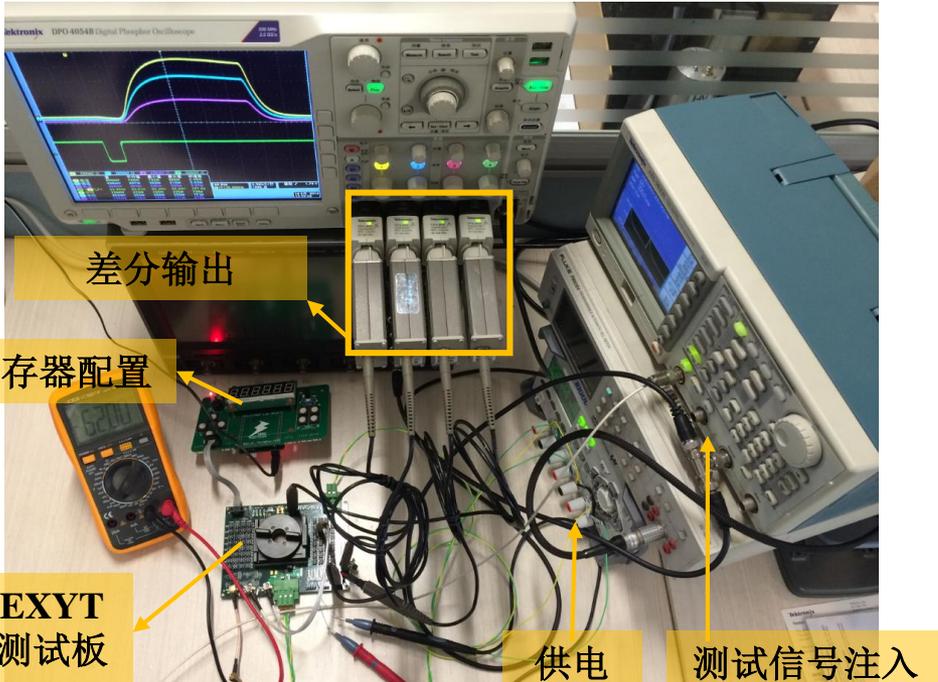
## • 减小死时间

两个事件接连发生

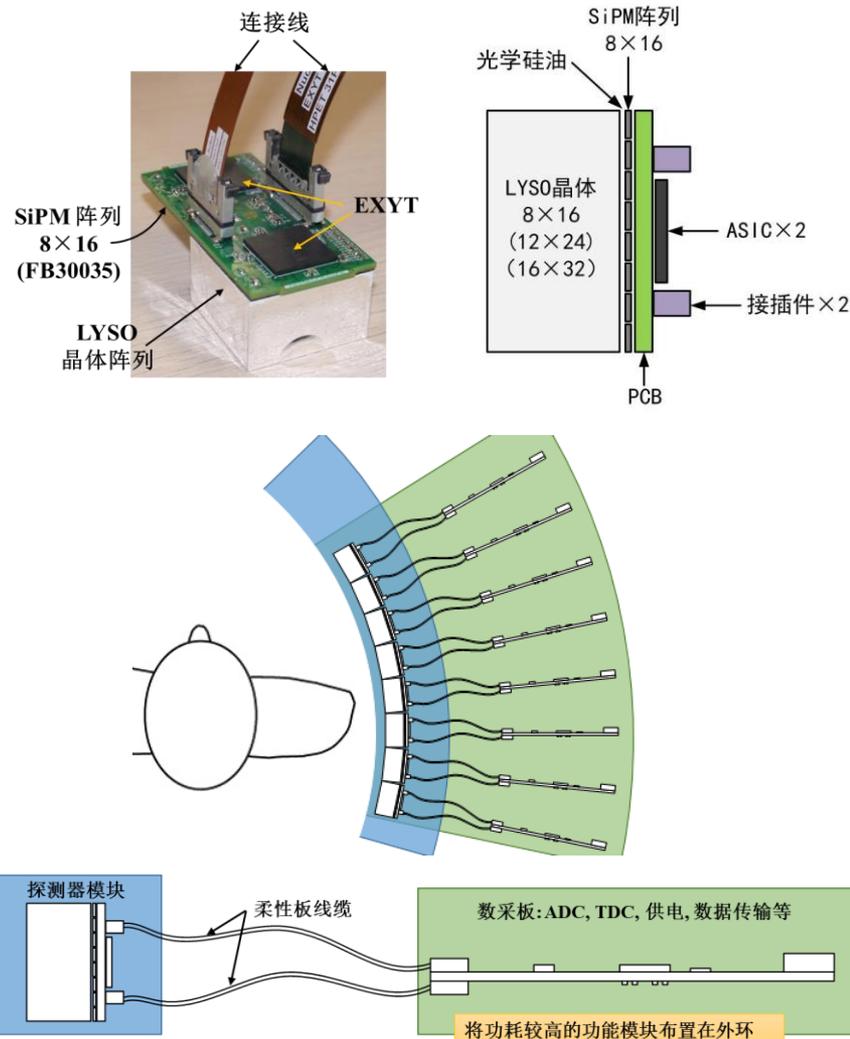




# 芯片测试 & 探测模块搭建



- 差分输出信号范围: 0~1.7V
- 增益INL: < 2.1% DR
- 输出噪声: <1mV rms
- T通道抖动: <30ps (RMS)  
@ 典型511keV 信号输入  
(电流信号峰值~3.4mA)

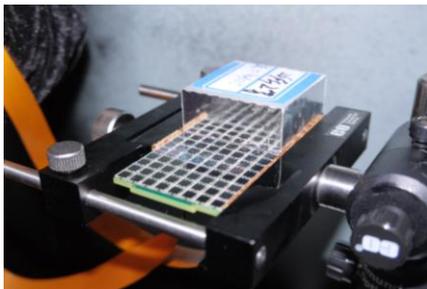
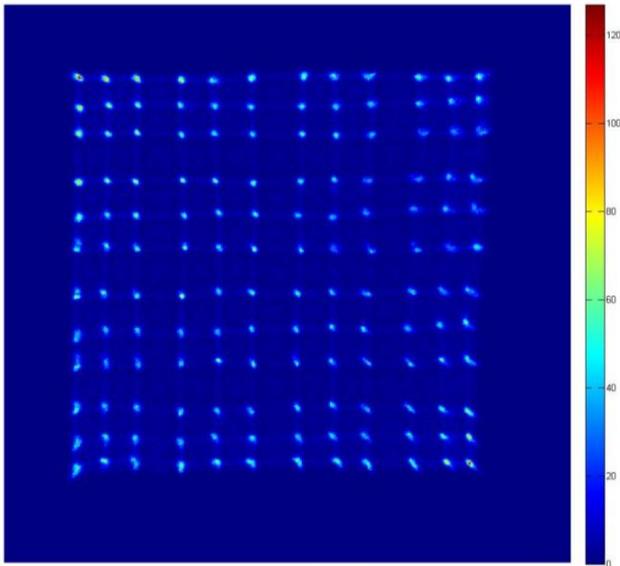




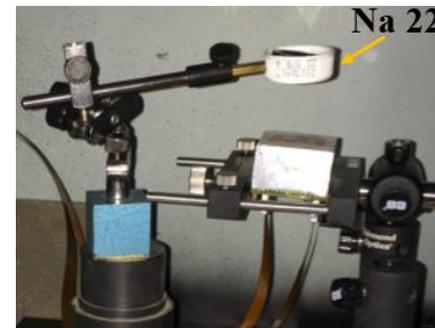
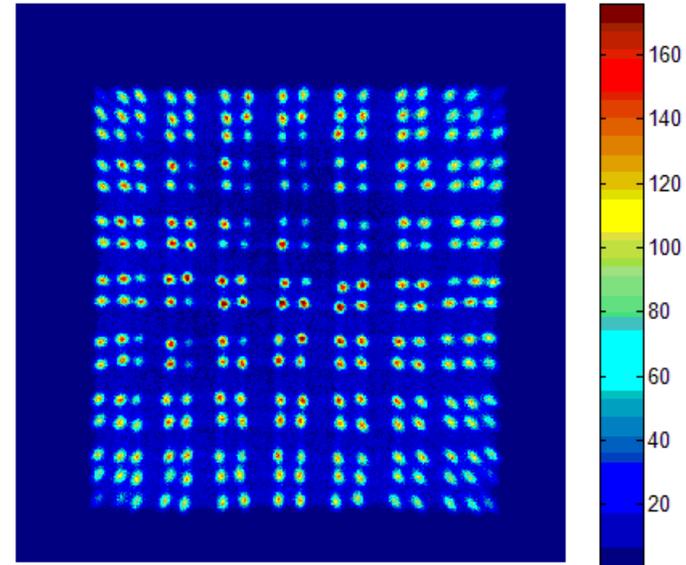
# PET探测模块测试——多通道位置分辨



- 12x12 LYSO晶体阵列
  - 2.7x2.7x20mm<sup>3</sup>

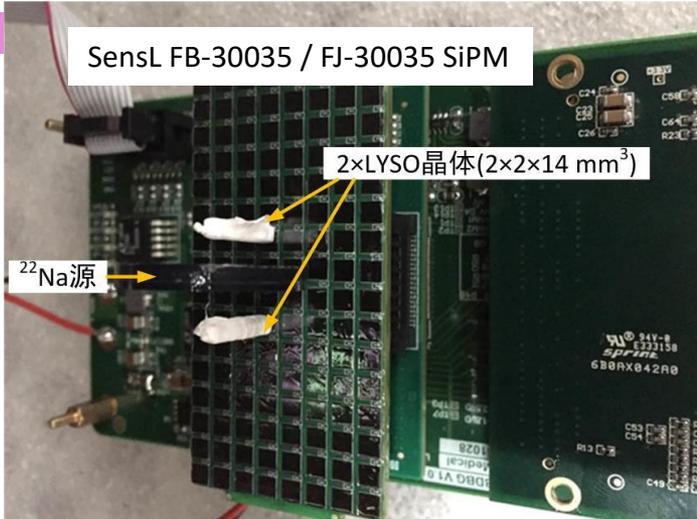


- 16x16 LYSO晶体阵列
  - 2x2x20mm<sup>3</sup>

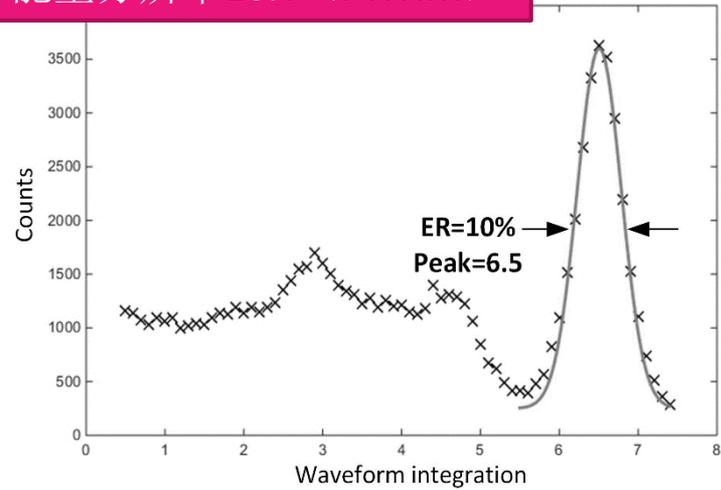




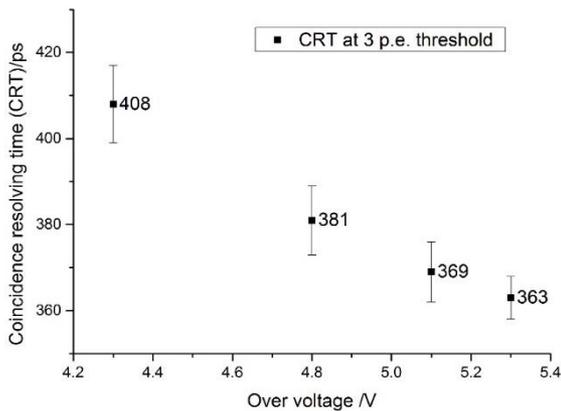
# PET探测模块测试——时间&能量分辨



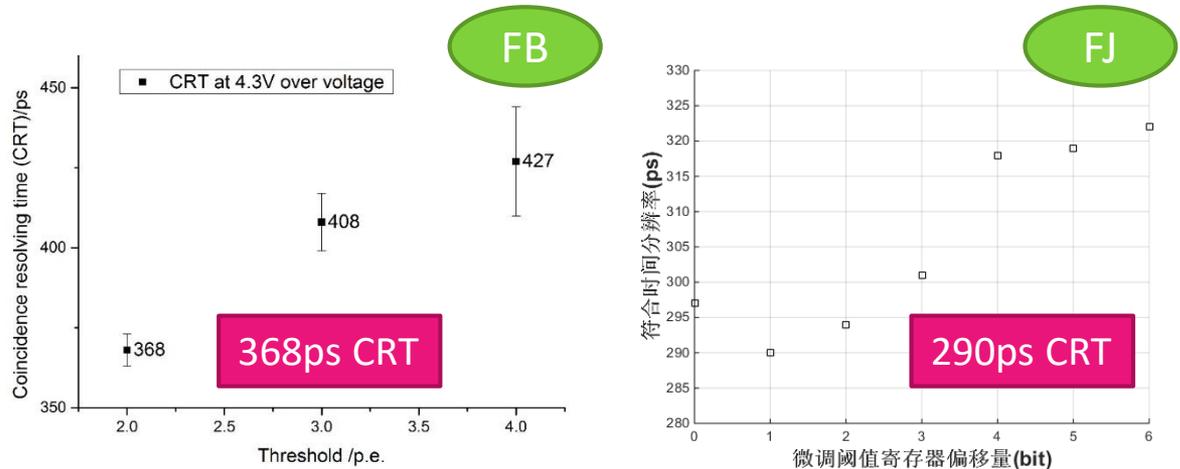
## 能量分辨率10% (FWHM)



## 符合时间分辨 (CRT) vs SiPM工作电压



## 符合时间分辨 (CRT) VS 甄别阈值





# PET读出ASIC性能对比



年份	研究组	名称	通道数	多通道输出结构	功耗 (每通道)	所用工艺	最佳CRT FWHM (或电子学rms)	LYSO晶体尺寸 (mm <sup>3</sup> )	所使用 SiPM
2009	INFN	BASIC	8	加权	6.6mW	0.35 μm	50ps rms	--	--
2015		EXYT	64	加权	3mW	0.18 μm	290ps	2x2x14	SensL
2011	INFN	VATA64	64	多路复用	15mW	0.35 μm	24 ns	12x12x5	MPPC
2013	IN2P3 Omega	PETIROC	16	多路复用	3.5mW	0.35 μm	402ps	3x3x3	KETEC
2014		TIMPIC2	16	脉冲宽度调制	10mW	0.35 μm	~100ps rms	--	--
2014	海德堡大学	STiC3	64	脉冲宽度调制	25mW	0.18 μm	214ps	3.1x3.1x15	MPPC
2014	CERN	NINO	32	脉冲宽度调制	20mW	0.25 μm	175ps	3x3x15	MPPC
2012	海德堡大学	PETA4	36	片内ADC/TDC	40mW	0.18 μm	~460ps	4x4x25	FBK
2011	IPHC	IMOTEPAD	64	片内ADC/TDC	15mW	0.35 μm	42ps rms	--	--
2012	IPHC	PETROC	10	片内ADC/TDC	13mW	0.35 μm	159ps rms	--	--
2013	JAXA	MPPC32	32	片内ADC+TAC	16mW	0.35 μm	491ps	3x3x10	MPPC
2013	IN2P3 Omega	SPIROC	36	片内ADC+TAC	2.5mW	0.35 μm	223ps rms	--	--
2016	LIP	TOFPET2	64	片内ADC+TAC	8mW	0.11 μm	20ps rms	--	--



## 1、高时间分辨探测系统

- 时间分辨能力与读出电子学系统
- 基于电流模式的读出ASIC

## 2、MRPC探测器读出ASIC研究

- CAD-I & CAD-II

## 3、PET探测系统读出ASIC研究

- TIMPIC
- EXYT

## 4、总结与之后的工作



- 研究组基于**电流模式**的电路结构，设计了应用于高时间分辨探测系统的读出ASIC，具有电路结构简单、输入阻抗小、带宽高、动态范围大、受电源电压影响小等优点。
- 针对MPRC探测器和PET探测系统的设计了多个系列的多通道ASIC，在保证**低功耗**的条件下实现了10ps rms水平的**高时间分辨能力**，并且实现了**通道密度较高**的条件下信号的有效输出。
- 下一阶段，结合探测系统的设计要求，在电路结构、参数和信号读出方法上做进一步的优化和升级。
  - 应用于新型探测器的前端参数优化 → <200ps CRT for PET
  - 通道信号的片上数字化输出



谢谢!

*Thank You!*

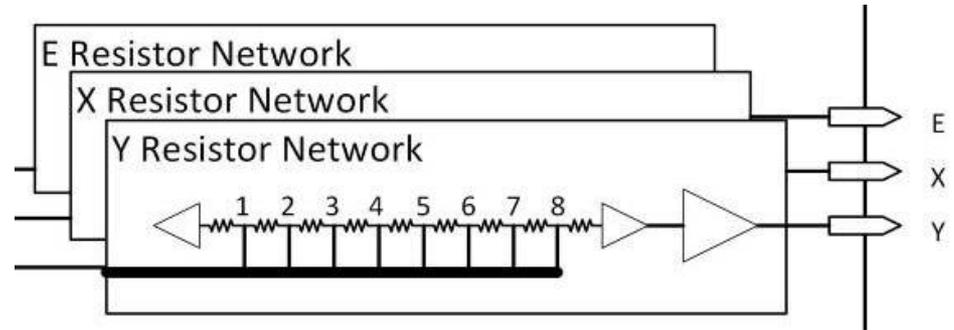




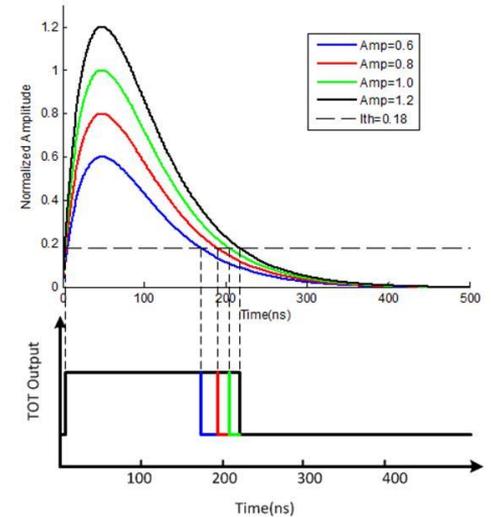
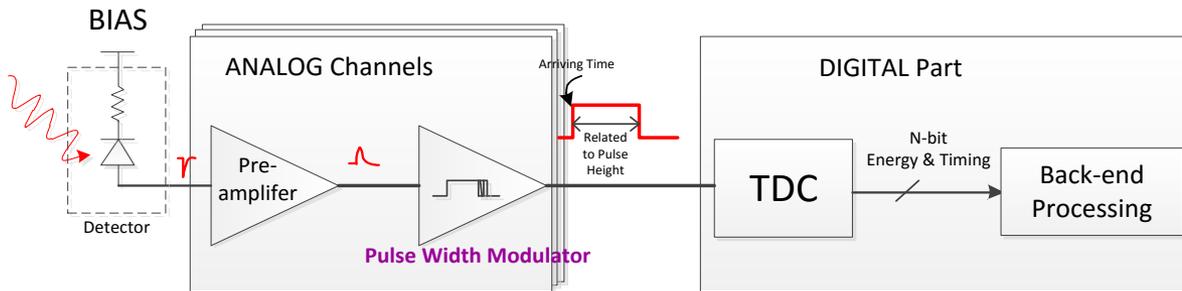
# 多通道读出电路设计



- 通道信号加权
  - 噪声叠加
  - 死时间的增加



- 基于时间的读出方式
  - 脉冲宽度调制:
  - 过阈时间 (Time-over-threshold, TOT):



- 多路复用
- 片上ADC/TDC的数字化

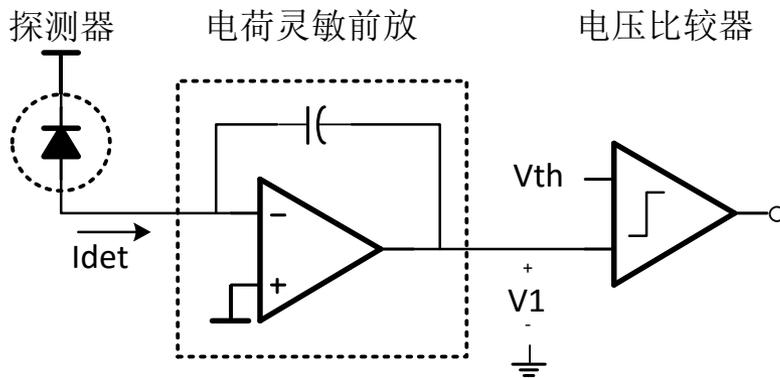


# 电压模式 VS 电流模式



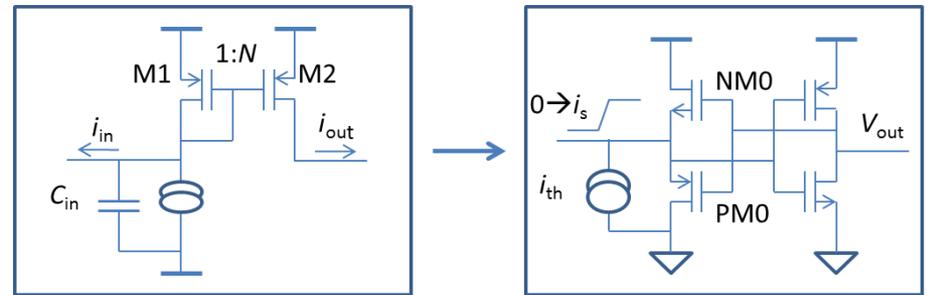
- 电压模式 (Voltage-mode) 电路:

- 以电压放大器和电压比较器为主要单元, 中间信号为电压
- 受寄生参数影响小, 是分立器件读出电路的主流选择



- 电流模式 (Current-mode) 电路:

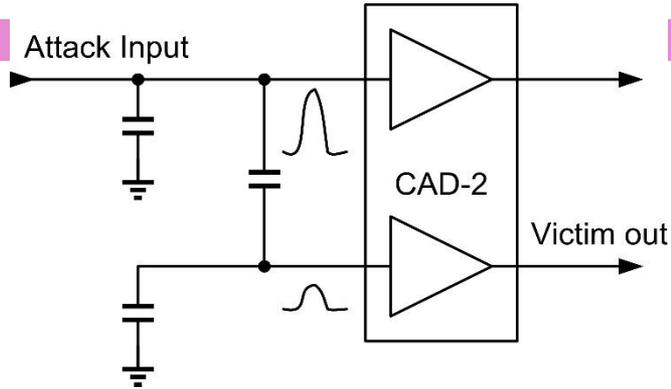
- 带宽高
- 输入阻抗小
- 动态范围大
- 电路结构简单
- 受电源电压影响小



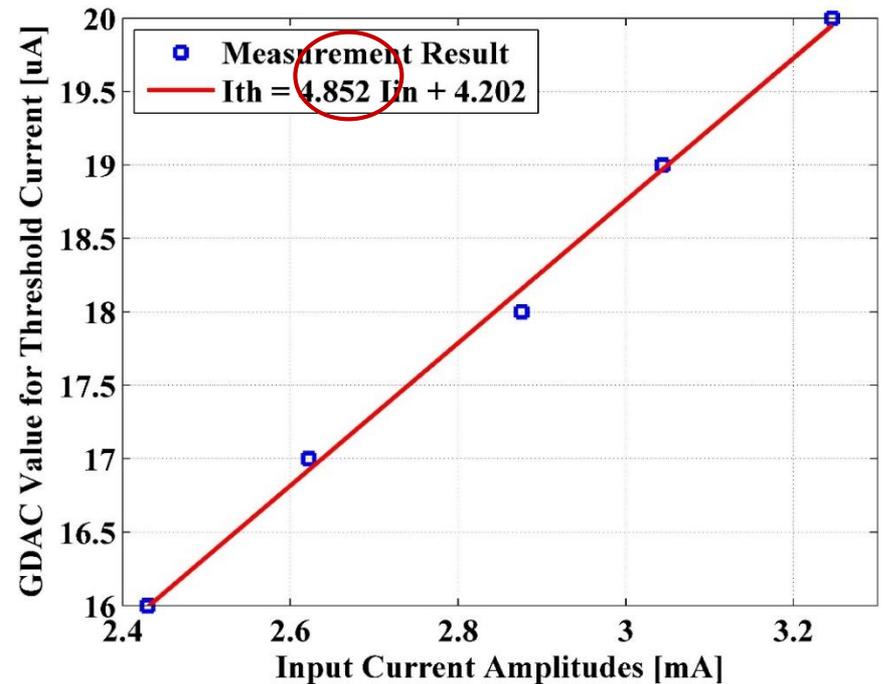
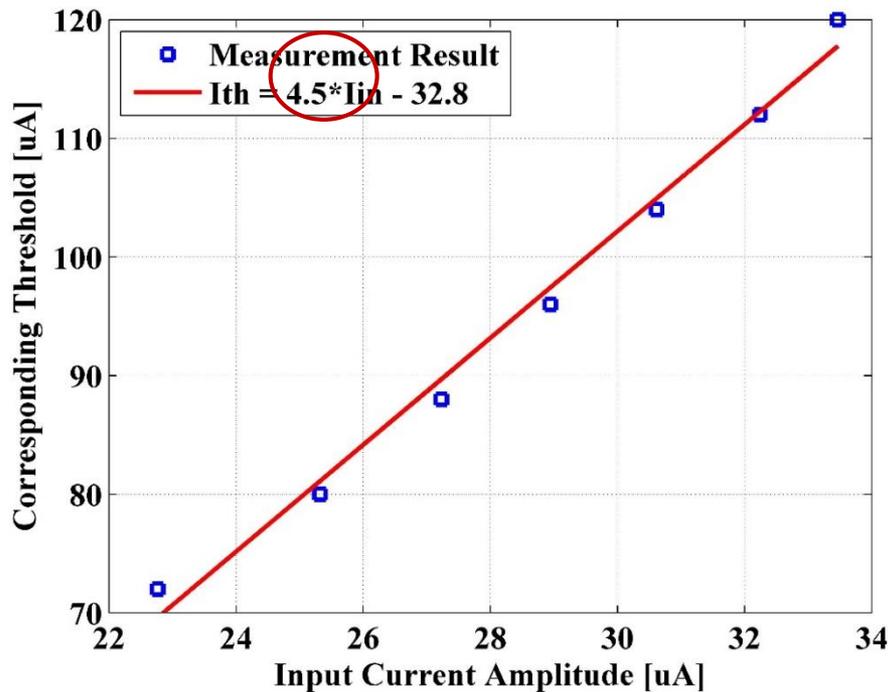
- 在ASIC内容易实现
- 噪声大



# CAD-II 芯片通道间串扰



$$CTRR = 20 \log \left( \frac{4.5}{4.852 \times 10^{-3}} \right) = 59.3 \text{dB}$$

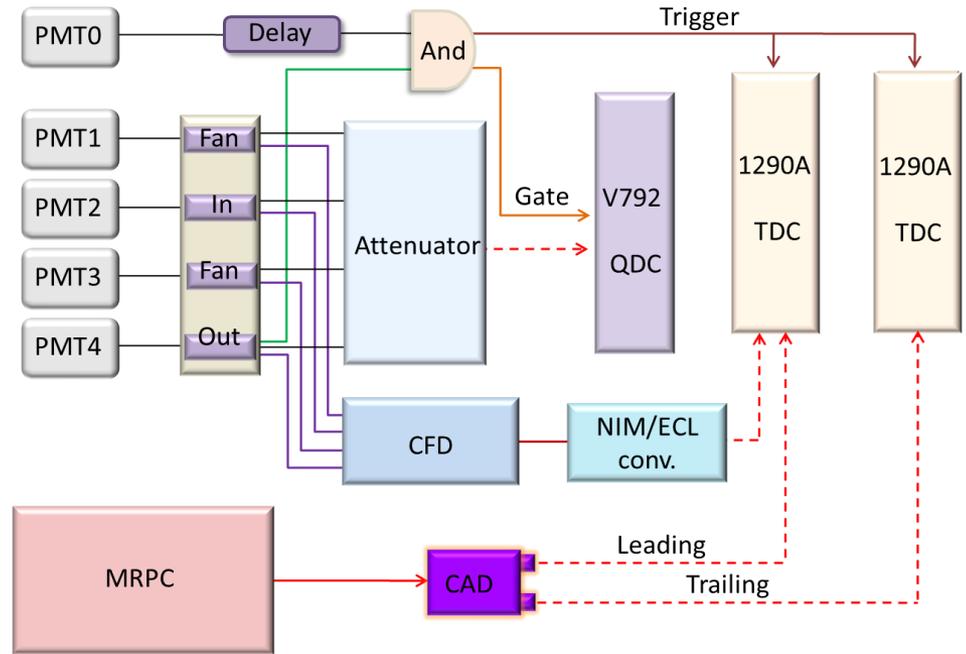
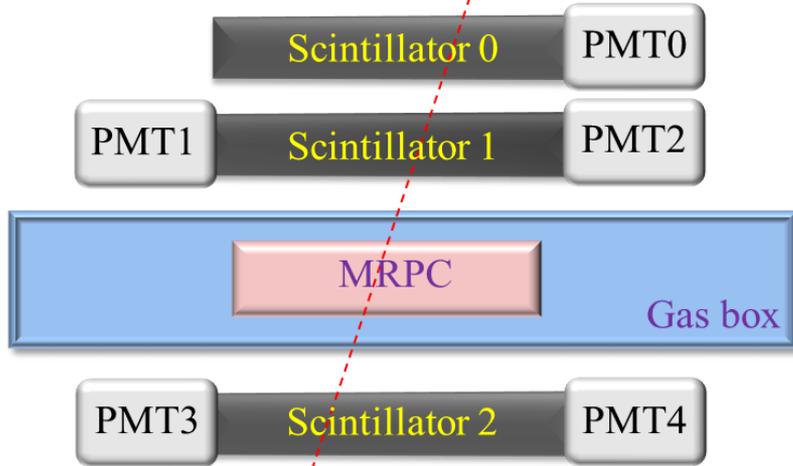




# CAD-I芯片连接探测器的测试



Muon



事例: 1352  
 平均值:  $5.92e-11s$   
 时间抖动: 227ps

信号前沿  
 时间抖动  
 227ps rms

