

中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, CAS

高时间分辨率TDC的研制

中国科学院高能物理研究所



报告人：蒋辉 导师：江晓山

指导老师：严雄波、李筱婷、叶竞波

日期：2025-04-29



目录

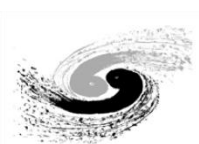
CONTENTS

1 研究背景

2 工作进展

3 研究计划

4 总结



1.1 项目背景

- 高时间分辨率的探测器在医学成像和粒子物理实验中具有重要作用；
- FPMT、SiPM等光电器件具有增益高、噪声低、响应时间快、时间分辨率高（多光子渡越时间展宽（TTS）小于10ps）；
- 需要极高时间分辨率（ps级）的时间测量芯片对探测器信号进行测量。

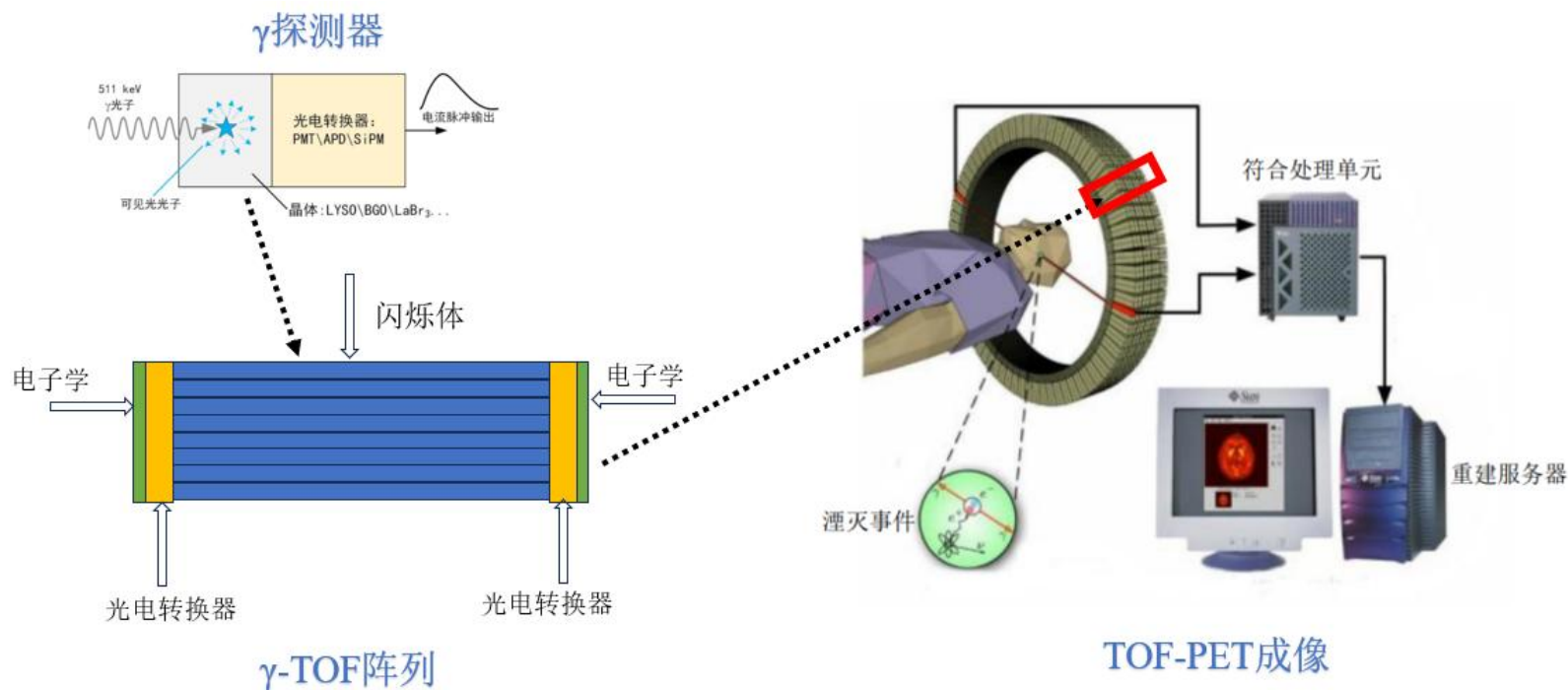
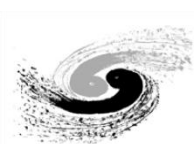


图1: TOF-PET结构示意图



1.2 工作规划

- I. 第一版TDC核心的设计与流片--**已完成**
- II. 设计文档的撰写--**正在进行**
- III. 测试PCB的绘制—未完成
- IV. 编码器与模拟前放的设计—未完成
- V.

➤ 芯片于8月流片回来进行测试，测试完成后预计10月进行下一版流片

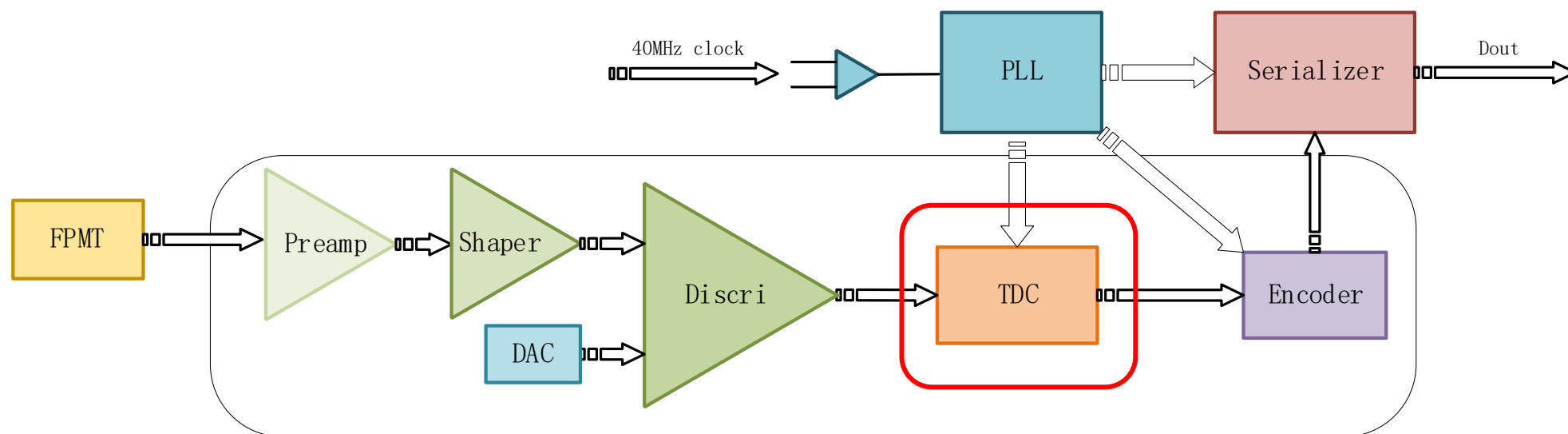
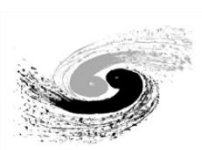


图2：系统整体框图



2.1 测量原理

- 两条振荡环中与非门的延迟不同，其中START链的延迟为 τ_1 ，STOP链的延迟为 τ_2 ，延迟之差为游标值，即时间分辨率： $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 > 0$ 。
- 时间测量的原理如图所示：

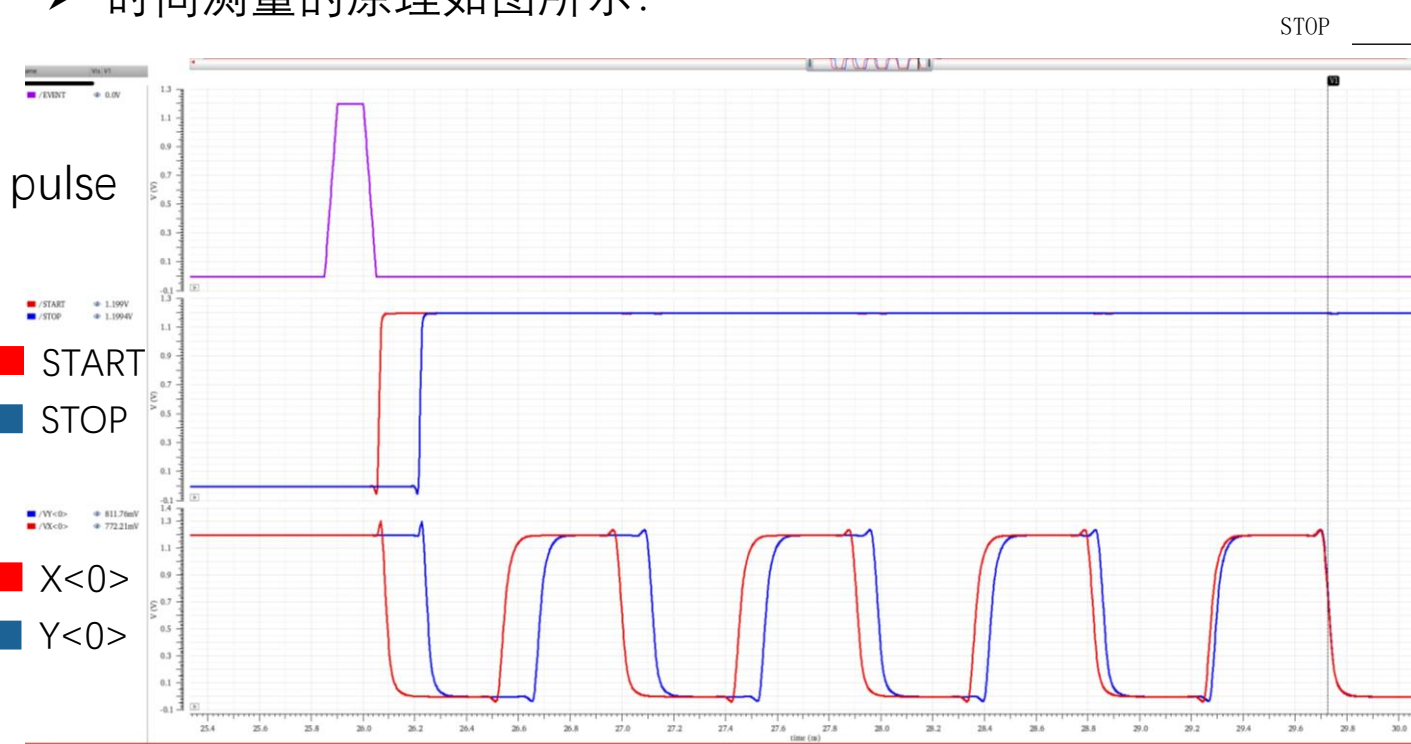


图4：TOT时间测量示意图
(VX代表START链、VY代表STOP链)

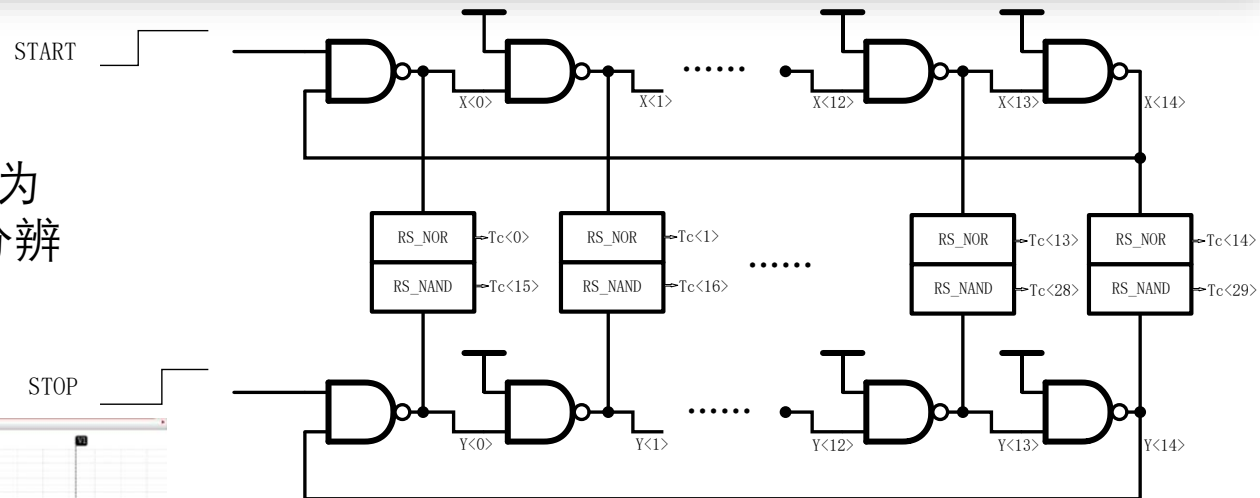


图3：游标振荡环的结构

- 二者相位差不断减小；
- 通过鉴相器得到STOP链追上START链时经过的延迟单元数，即可计算得到时间测量值。

2.2 TDC整体结构

- TDC同时包含TOA和TOT测量;
- TDC由控制器、游标振荡环、量化锁存器和计数器四部分组成:

1. 控制器接收前端产生的pulse信号及参考时钟, 产生环振启停信号。
2. 游标振荡环在接收上升沿信号后开始振荡。
3. 量化锁存对START链和STOP链的信号进行鉴相并将量化结果锁存为30位温度码。
4. 计数器包括10位粗计数和10位细计数, 提高TDC的动态范围。

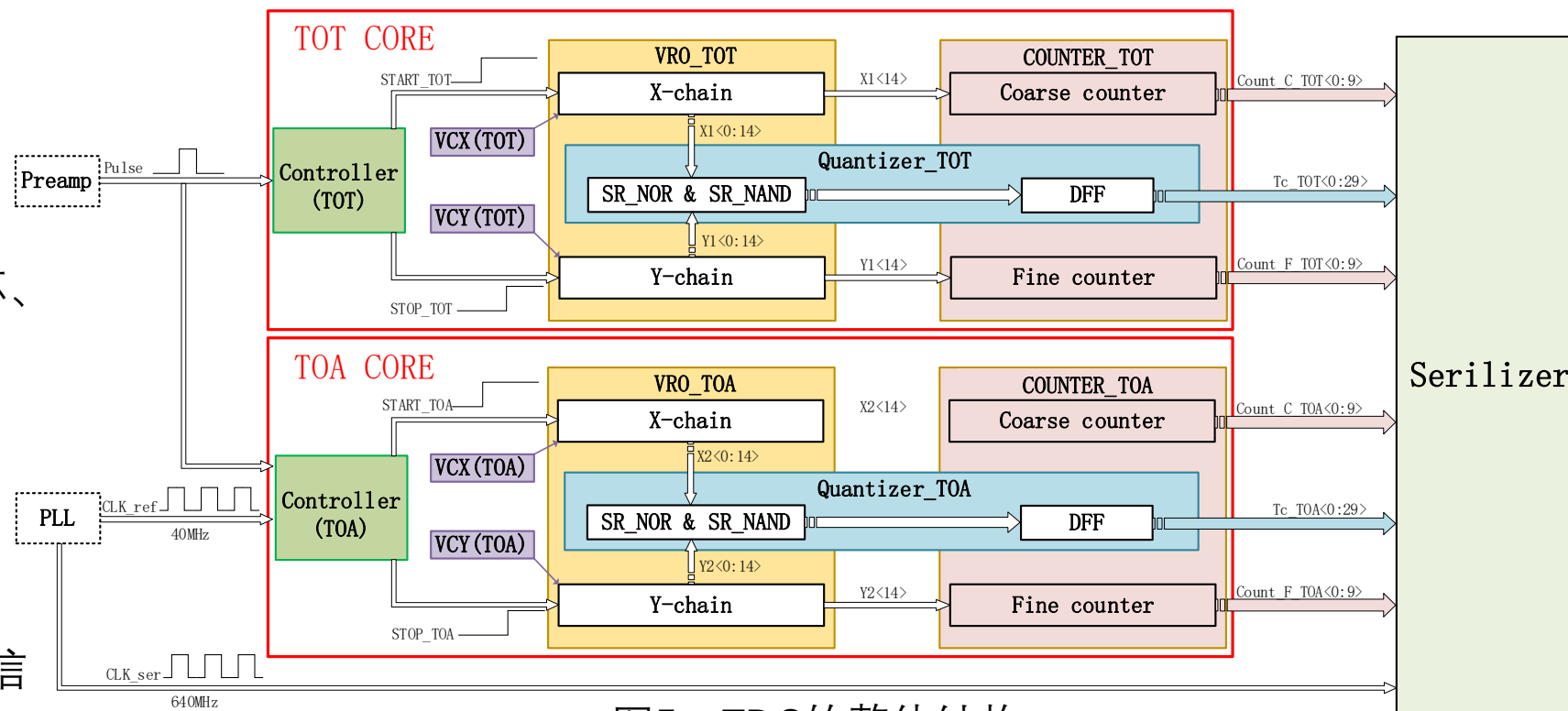
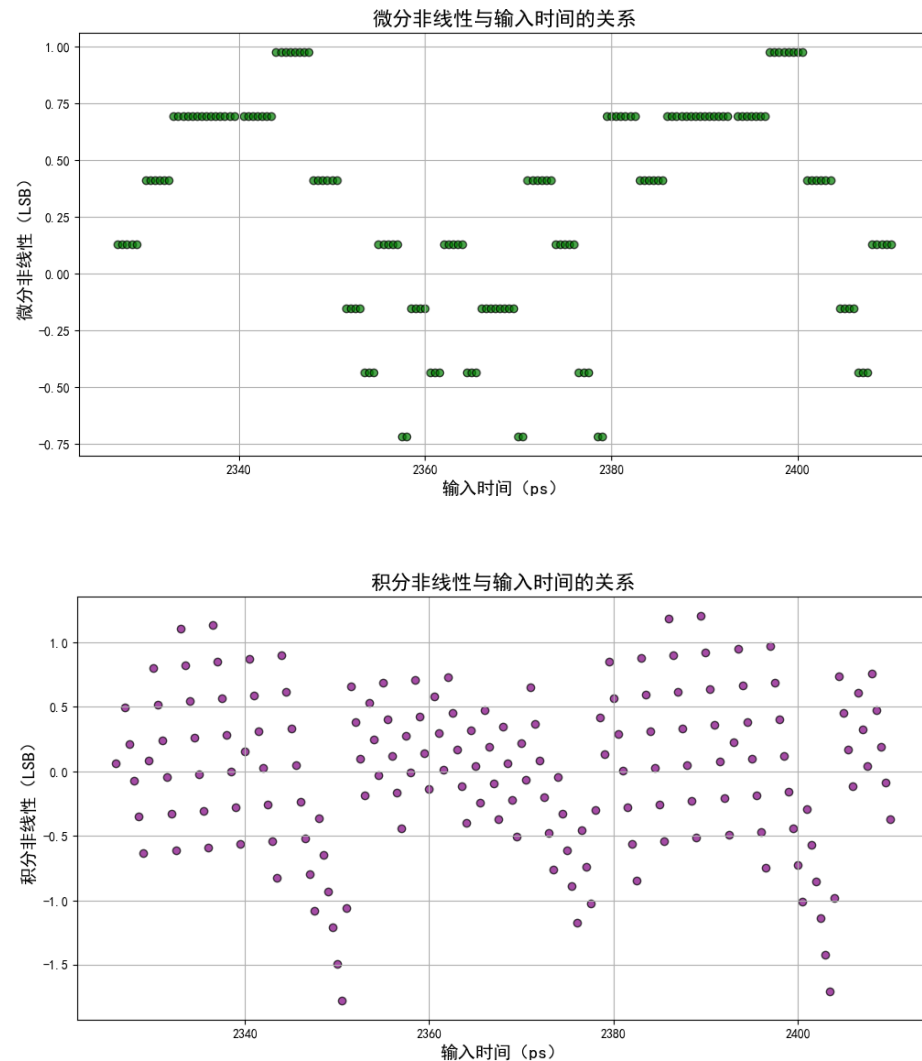


图5: TDC的整体结构

2.3 版图仿真结果



在TDC版图绘制完成之后进行了后仿:

- $LSB = 1.77 ps @ VC = 0.9V$;
- $-0.5 LSB < DNL < 1 LSB$;
- $-2.0 LSB < INL < 1.5 LSB$;

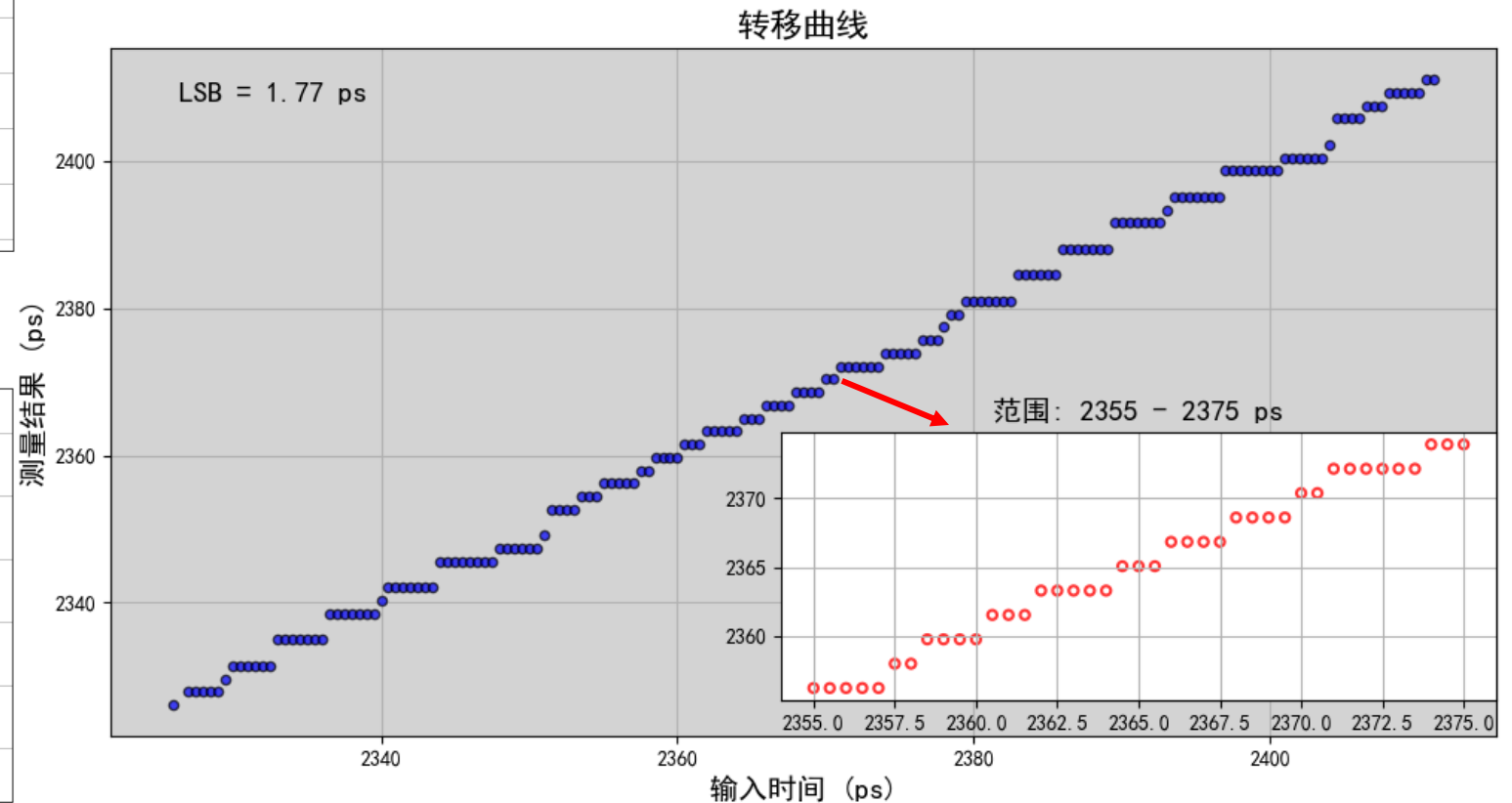


图7: TDC的后仿曲线

2.4 TDC整体版图

- TDC同时包含TOA和TOT测量;
- 芯片一共60个IO;
- 敏感信号（例如参考时钟、输入pulse信号等）使用差分输入/输出。

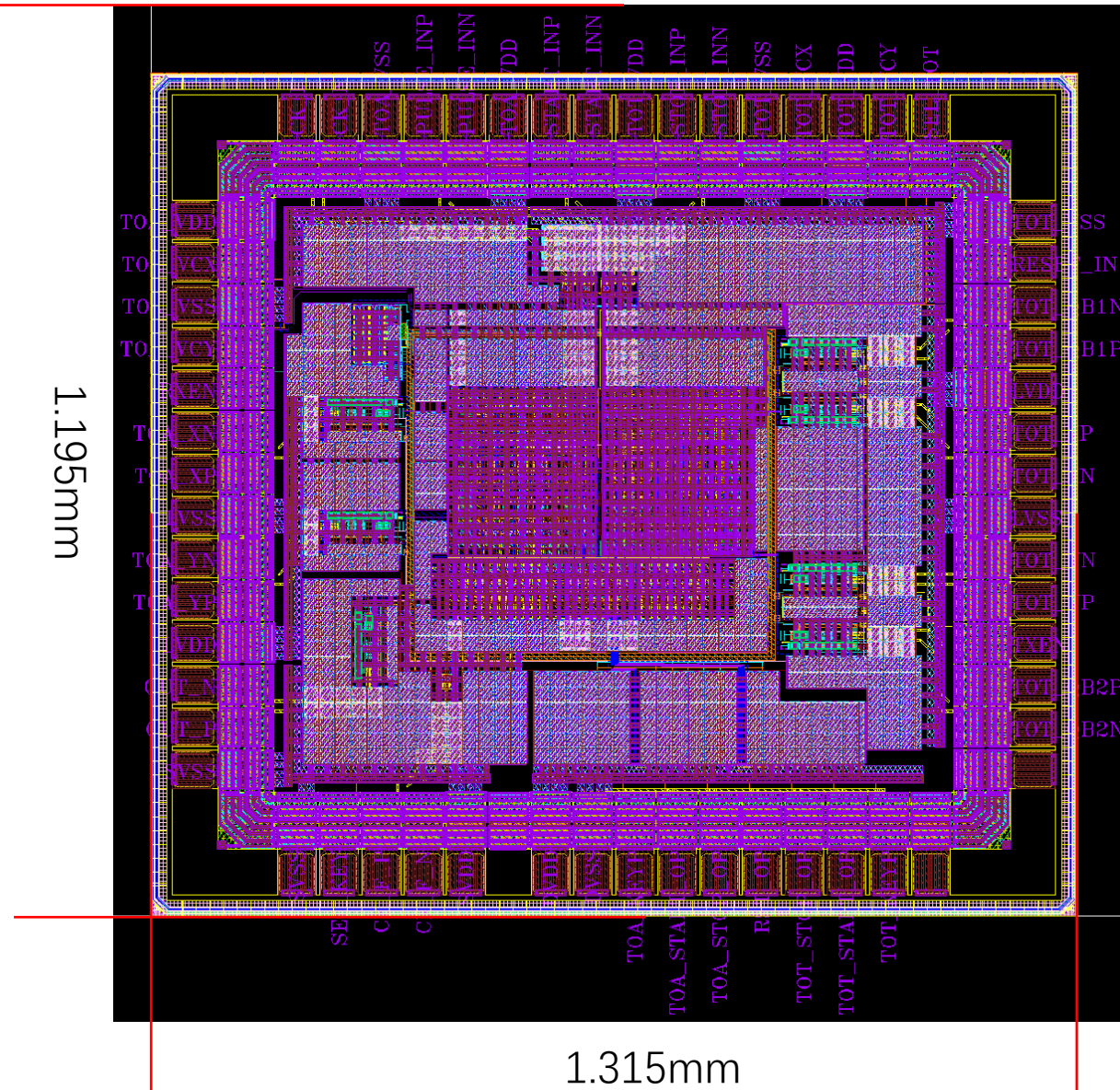


图8：TDC整体版图

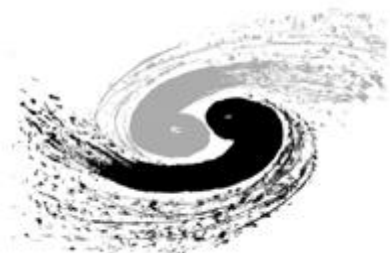
3 研究计划

研究工作	预期成果	时间
✓ 调研各种TDC结构和FPMT项目要求，确定设计方案 ✓ TDC各模块的设计、仿真、验证	提交流片	2024年7月 ~2025年4月
➤ 研究芯片的系统级测试方案，制备测试PCB ➤ TDC芯片测试	完成芯片测试	2025年4月 ~2025年10月
➤ TDC编码器的设计、仿真、验证 ➤ 模拟前端放大器的设计、仿真、验证	完成功能芯片	2025年4月 ~2026年
➤ 多通道TDC设计与电子学系统集成 ➤ 电子学系统与探测器系统连接进行测试	完成系统集成	2026年 ~2028年

4 总结

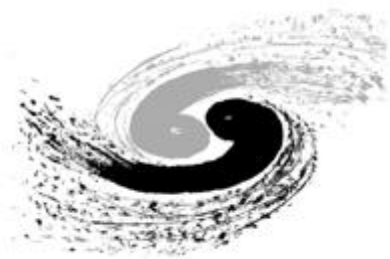
- 研究课题：基于FPMT的高时间分辨时间测量系统的研制。
- 工作内容：
 - ✓ 独立完成了TDC各模块的设计、仿真、验证的全流程研发；
 - ✓ 对TDC整体版图进行后仿，基本满足要求；
 - ✓ 已提交流片，芯片将作为独立单元进行划片和测试。

指标	需求	后仿(tt27@VC=0.9V)
工艺	SMIC55	-
LSB	2ps	1.77ps
测量范围	>400ps	300ps~2us
DNL/INL	±0.5LSB/±1LSB	±1LSB/±2LSB



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, CAS

请各位老师指正



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, CAS

Backup

1 事例驱动型环振

- 使能信号START/STOP为0时，延迟链各与非门输出端状态为：

- 101010101010101

- 当使能信号置1时，环振按以下规律开始震荡：

- 101010101010101

- 001010101010101

- 011010101010101

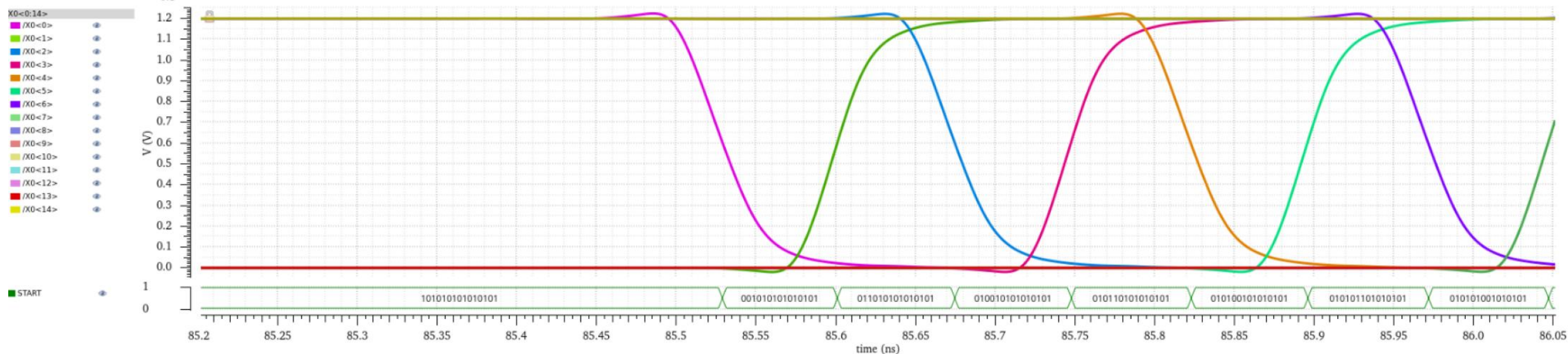
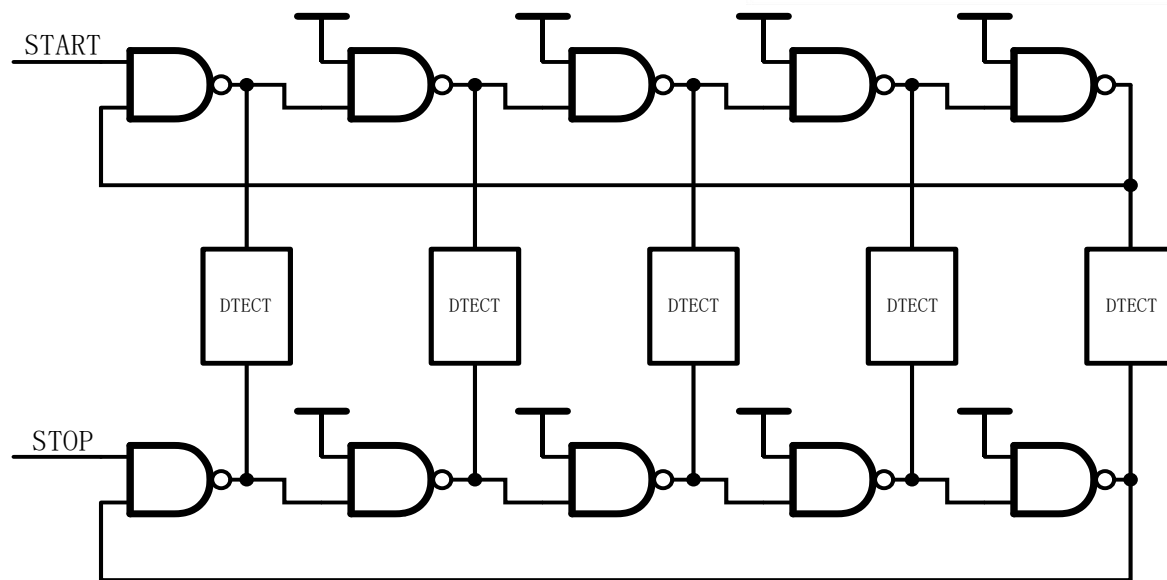
-

- 010101010101010

- 110101010101010

-

- 101010101010101



2 测量结果计算

三步时间测量：

- 粗计数CC——STOP链开始振荡时START链振荡次数；
- 细计数CF——追上时刻STOP链振荡次数；
- 温度码N——游标追上的具体位置。
- 可用参数：START链延迟： τ_1 ；延迟时间差： $\Delta\tau$ ；
- 测量时间T：

$$T = CC \times 30 \times \tau_1 + CF \times 30 \times \Delta\tau + N \times \Delta\tau$$

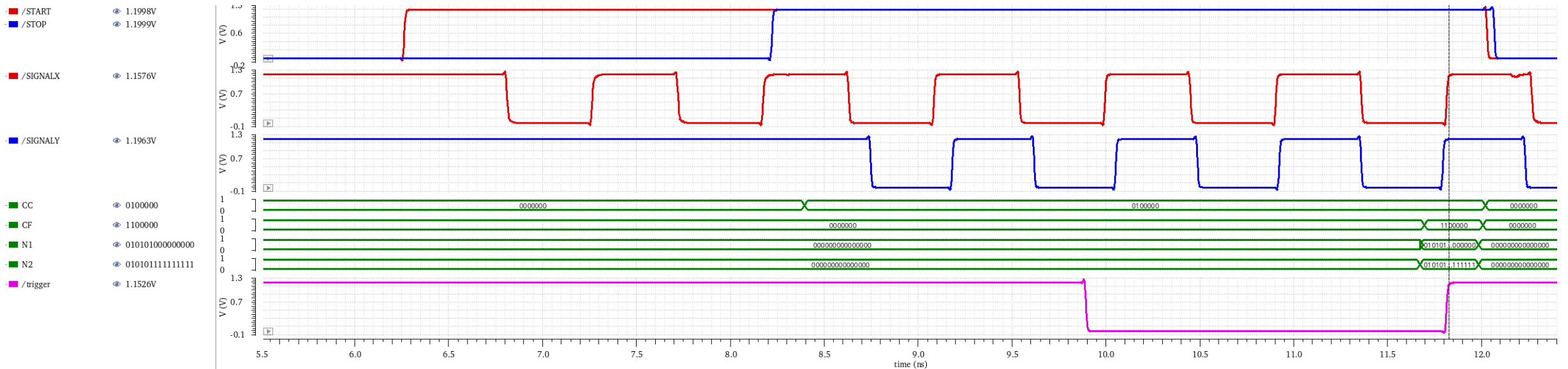


图6：时间测量时序图