

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：2024-12-27

目录

CONTENTS

01

研究目标

02

测量原理

03

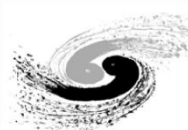
电路结构

04

前仿结果

05

总结与展望



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

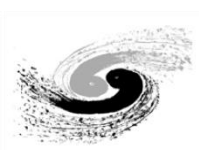


中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

Part.01

研究目标



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TDC对探测器信号进行测量。

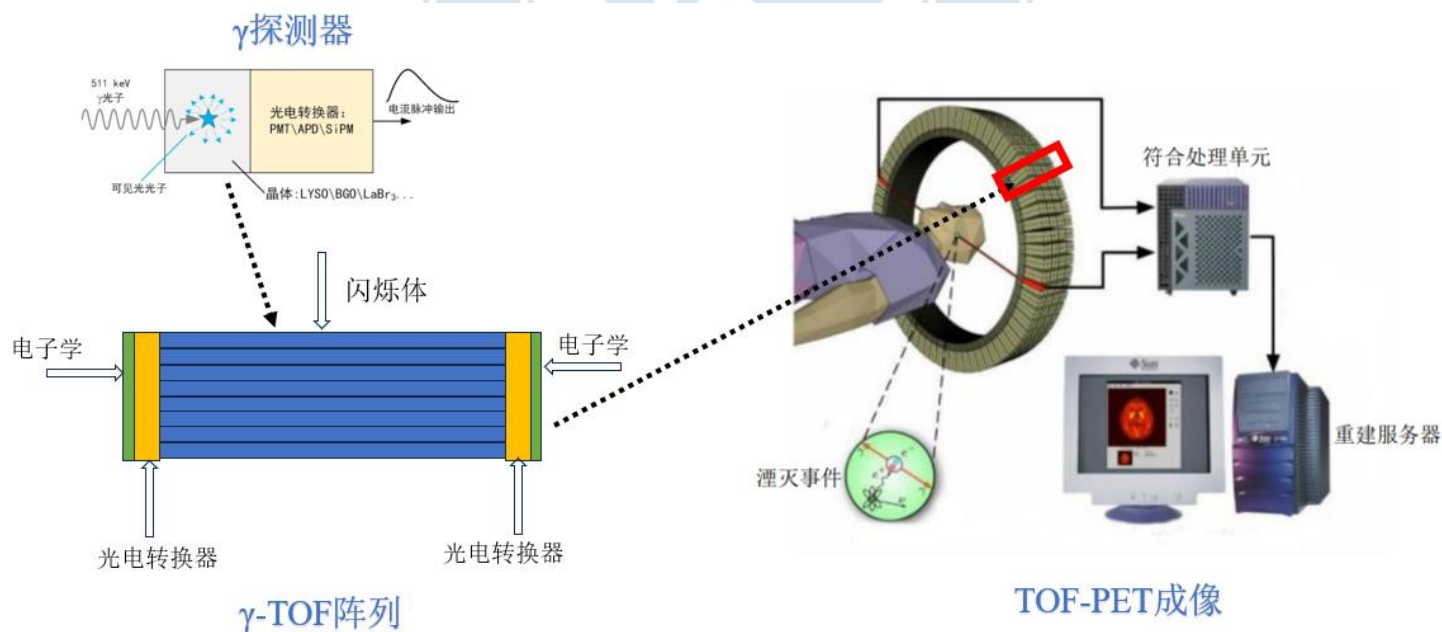
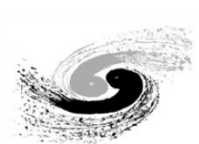


图1： TOF-PET结构示意图



1.2 研究目标

- 高时间分辨率——小于2ps
- 暂时不对功耗、面积、防辐射性能进行限制

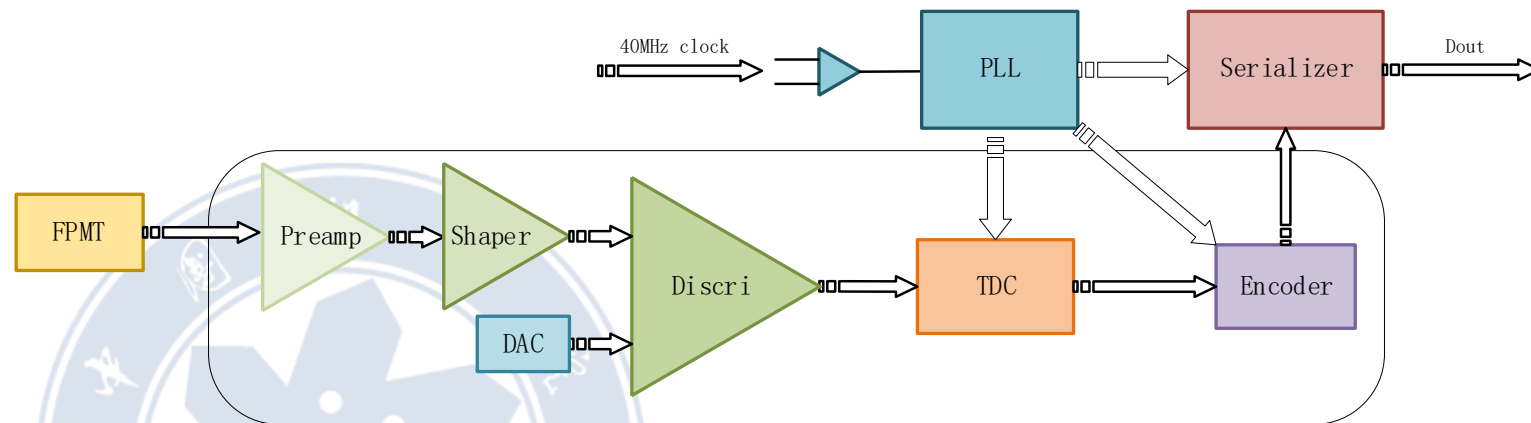


图2：系统整体框图

1.3 工作规划

- 文献调研：学习各种TDC的架构及其性能--**已完成**
 - 方案比较和确定：选择ps级分辨率的TDC架构--**已完成**
 - 电路仿真：对该架构进行仿真，实现基本功能--**正在进行**
 - 后仿真：版图与后仿真，芯片工作性能；
 -
- 计划于2025年4月进行流片

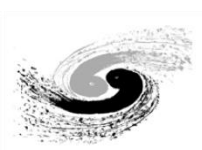


中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

Part.02

测量原理



2.1 TDC结构

- ps级时间分辨率的TDC结构及其缺点：
 - 游标延迟链型：较难实现环形游标，动态范围小；
 - 门控振荡环：很难实现振荡环的完全关断；
- 最终采用压控游标振荡环结构，优点：
 - 游标型能够达到工艺限制之下的时间分辨；
 - 振荡环结构能够提高TDC的动态范围；
 - 饥饿电流镜压控实现延迟可调，达到高时间分辨。

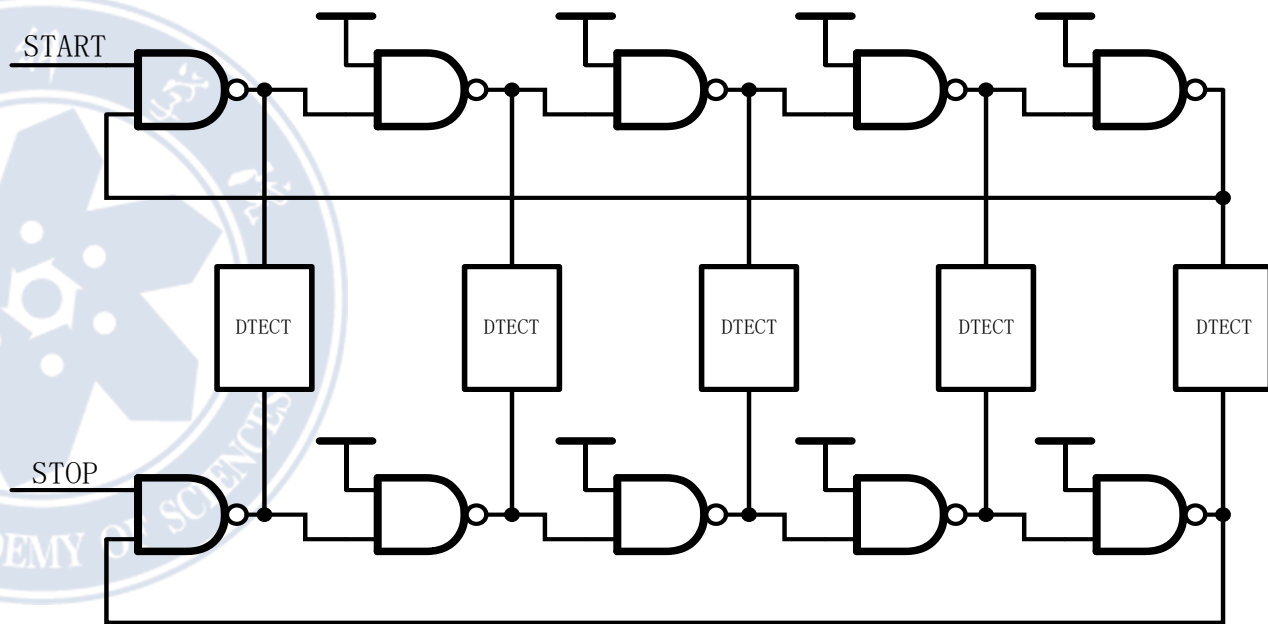
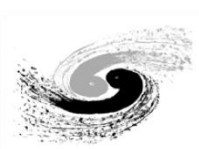


图3：游标振荡环的结构

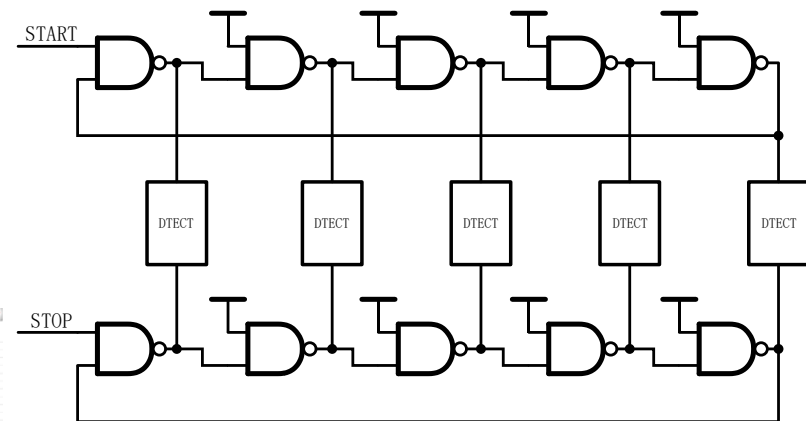


2.2 测量原理

- 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 ，二者延迟之差为游标： $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 > 0$ 。
- 时间测量的波形如图所示：



图4：时间测量示意图
(VX代表START链、VY代表STOP链)



- 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，即可计算得到时间间隔。

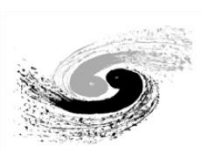


中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

Part.03

电路结构



3.1 电路结构

➤ TDC的结构主要有9个模块，分别为：

- ① 脉冲转换器；
- ② 压控游标振荡环；
- ③ 鉴相器；
- ④ 控制信号链；
- ⑤ 锁存信号链；
- ⑥ 温度码产生器；
- ⑦ 粗计数；
- ⑧ 细计数；
- ⑨ 数据处理与存储；

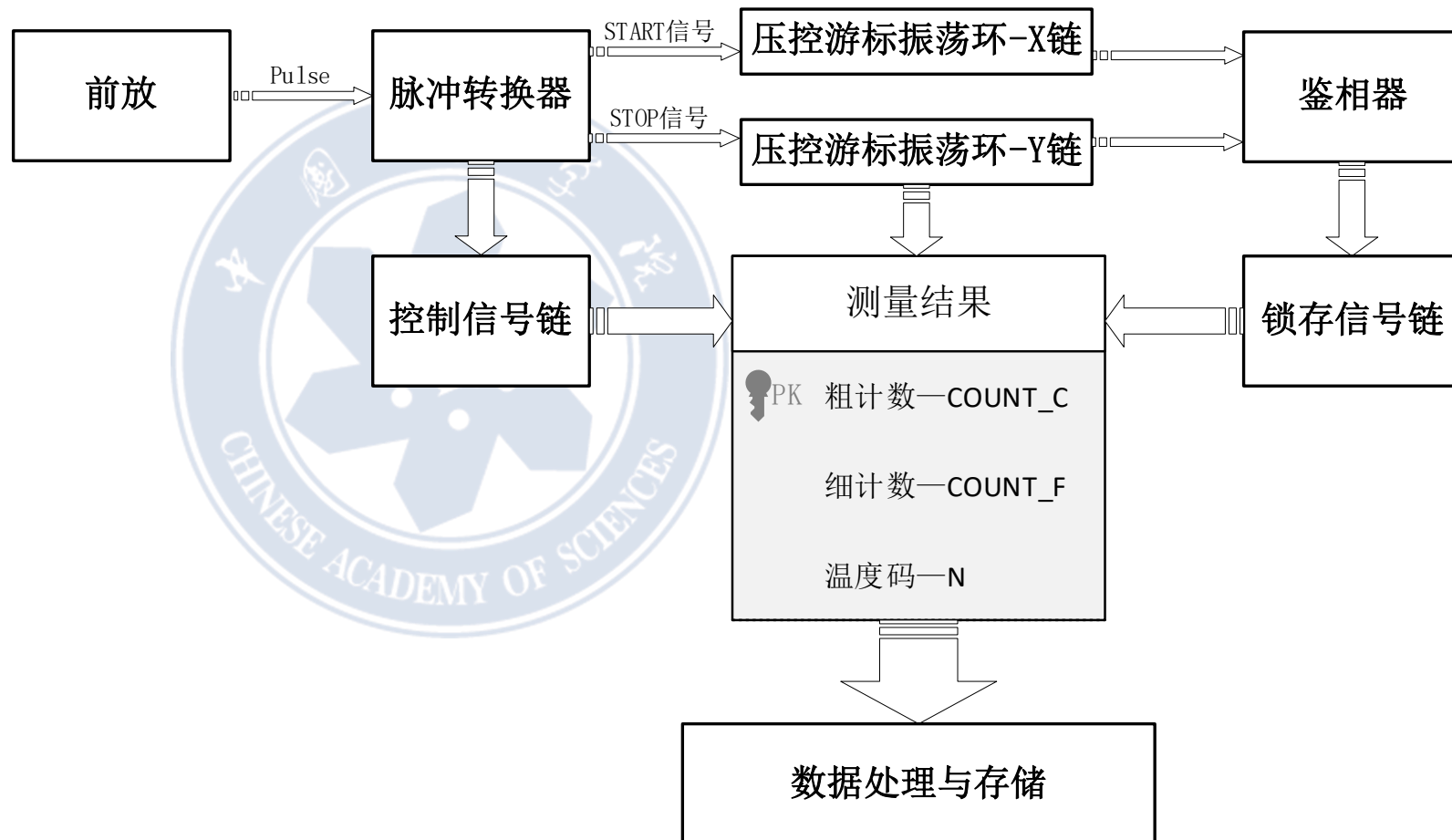
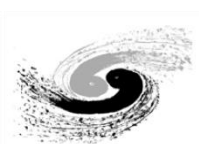


图5：TDC的主体结构



3.2 测量时间的计算

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：

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

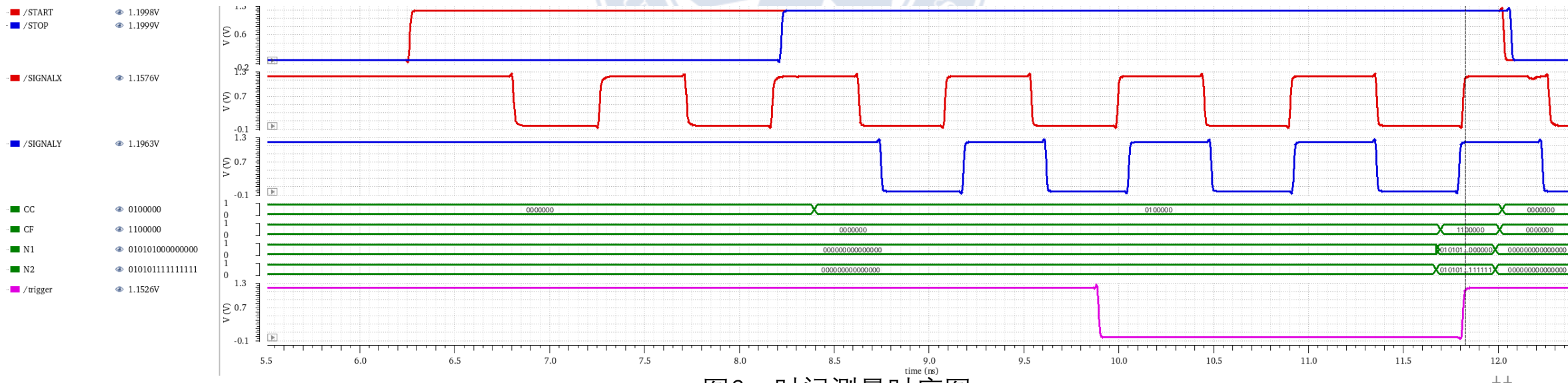


图6：时间测量时序图

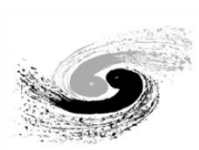


中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

Part.04

前仿结果



4.2 转移曲线

转移曲线如下图所示，测量了200ps~1.5ns的时间间隔，在该范围内未发现明显测量错误的点，平均Binsize=1.3ps(<2ps)。

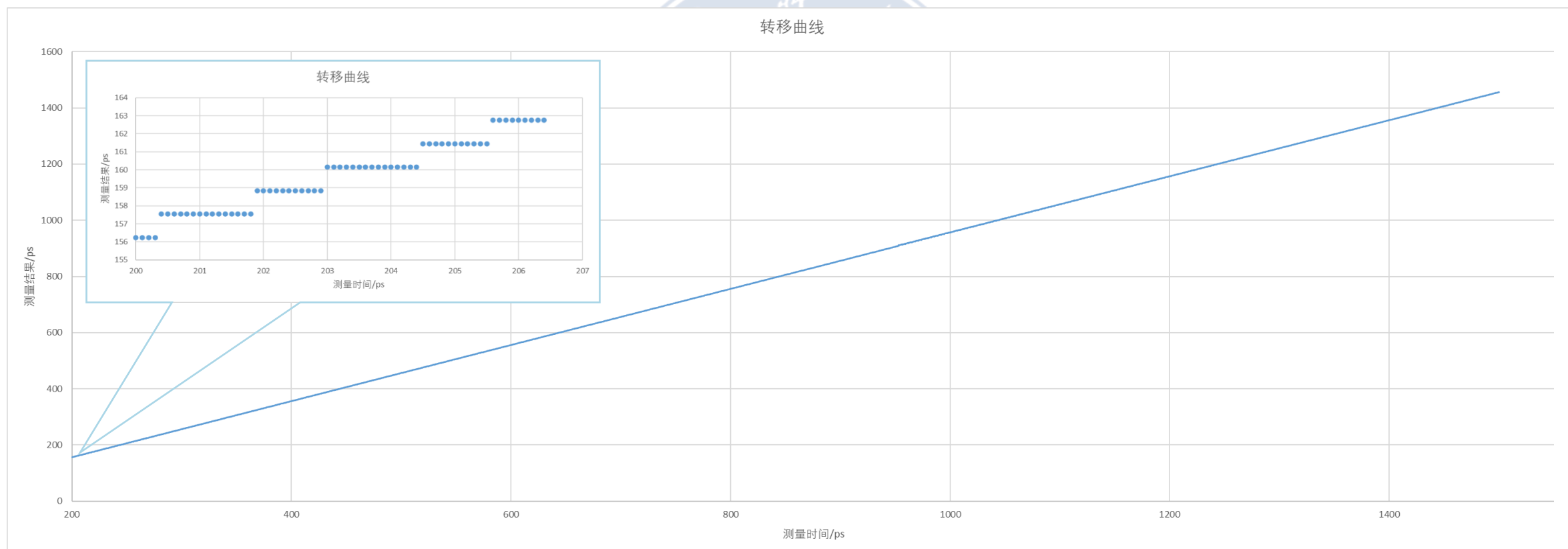


图7：TDC的转移曲线

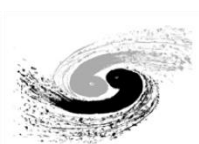


中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

Part.05

总结与展望



5.1 总结

- 通过调研与仿真确定TDC结构;
- 对压控游标振荡环型TDC进行前仿得到转移曲线;
- 在前仿中实现了TDC的功能 (TOA、TOT测量), 平均BinSize为 $1.3\text{ps}(<2\text{ps})$;

5.2 展望

- 进一步细化前仿的步长;
- 进行版图绘制, 后仿检验TDC工作情况;

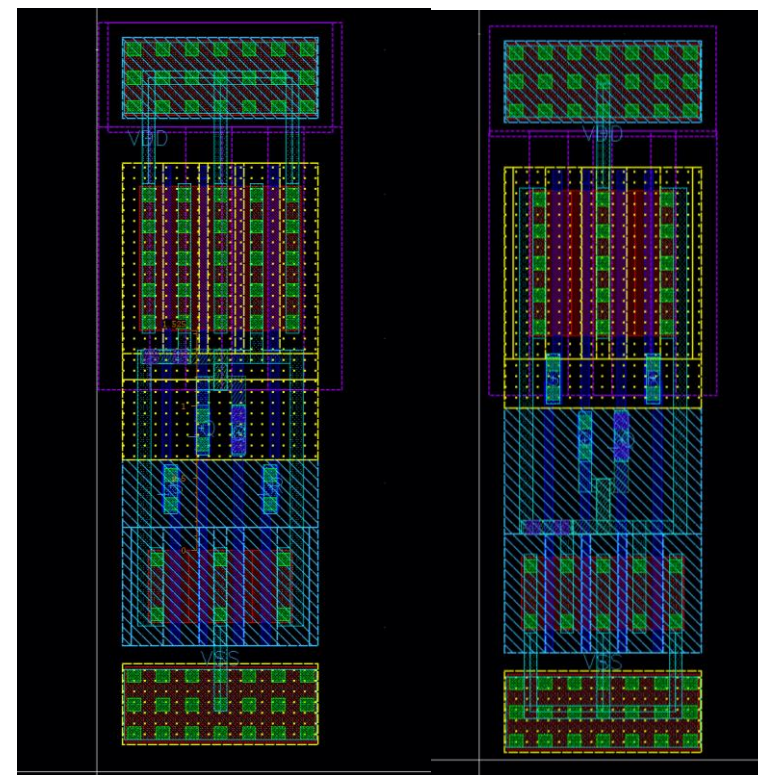
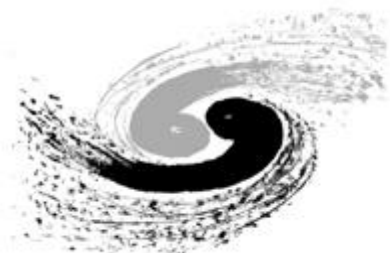


图8: 鉴相器版图



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