



太赫兹时域反射计(THz-TDR) 电子学关键技术研究

郑其斌 副教授

上海理工大学-健康科学与工程学院

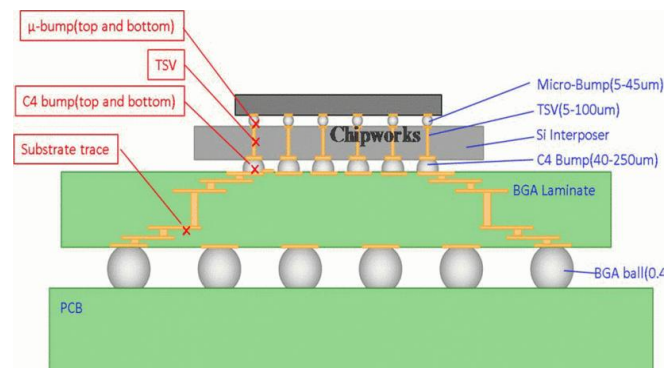
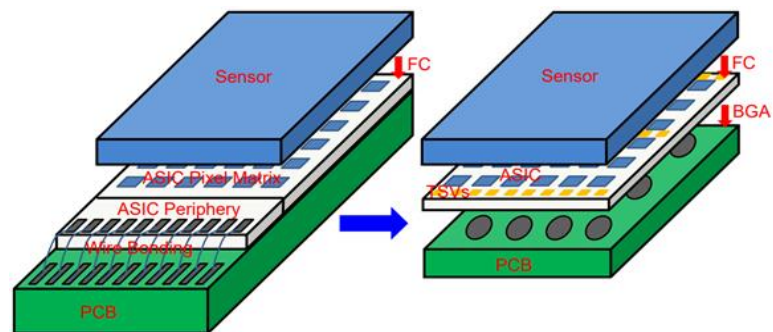
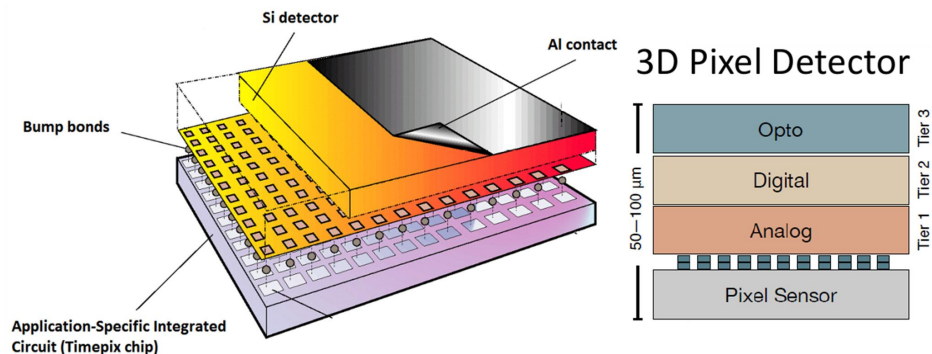
太赫兹探测与通信全国重点实验室 (筹)

上海市现代光学系统重点实验室

第二届非加速器实验粒子探测和电子学技术研讨会，济南，2026年3月27-29日

研究意义

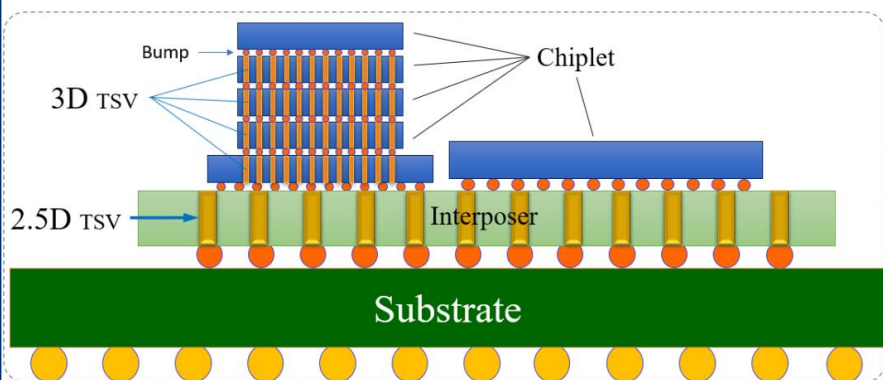
- 探测精度高、规模大
- 高集成度粒子探测器
- 多通道专用ASIC芯片
- ASIC的先进封装
 - 纵向堆叠
 - 高密度互连
 - 提高性能
 - 加剧封装失效风险
- 如何诊断封装缺陷位置
 - 提高研发效率、性能和可靠性
 - 促进实验物理发展



THz-TDR的研究意义

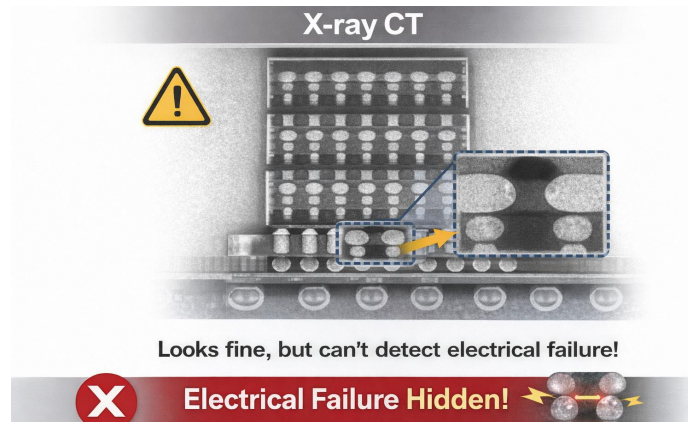
集成电路先进封装

集成电路3D封装



封装结构复杂：纵向堆叠，高密度互连

X-ray CT封装无损检测



只能表征结构信息，难以识别电气失效

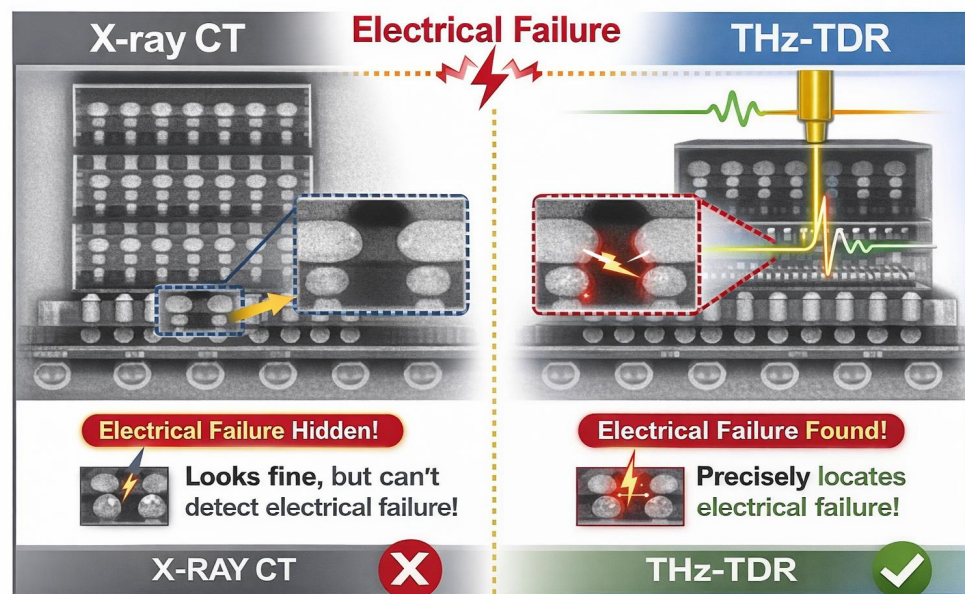
结构复杂更易产生电气缺陷，成为制约芯片可靠性与应用的“卡脖子”问题

亟需建立：含有**电磁特性**的，**高分辨**的**无损**表征新技术

THz-TDR的研究意义

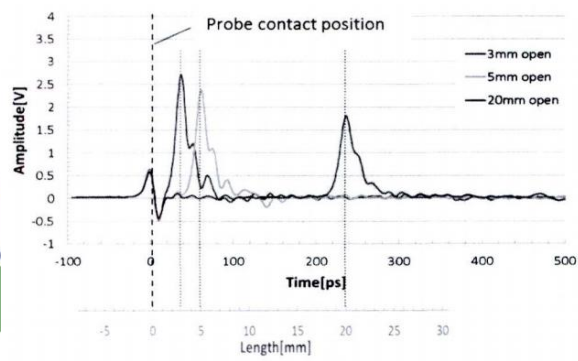
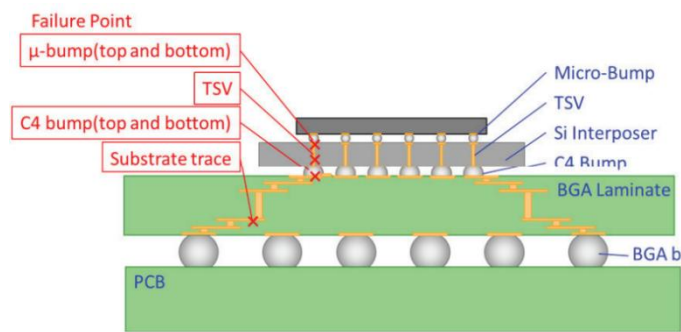
先进封装无损检测

	X-ray CT	传统 TDR	THz-TDR
基本原理	X射线成像	电信号时域反射	太赫兹时域反射
检测对象	结构信息	电气特性	电气特性
电磁信息	无	有	有
分辨率	高	低	高
成熟度	高	高	初期

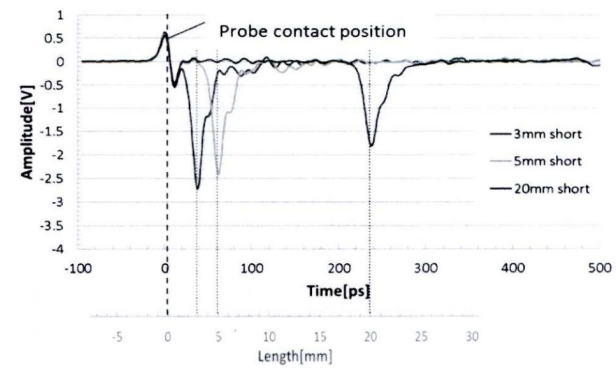


THz-TDR是先进封装微观电气缺陷定量表征的关键

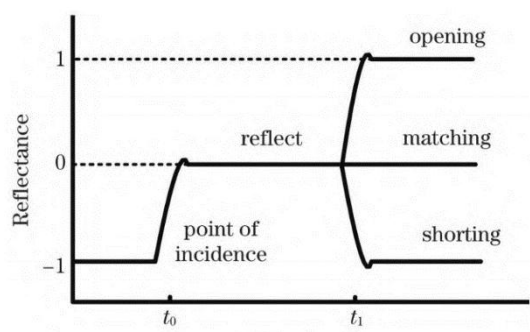
THz-TDR基本原理



开路故障测试结果

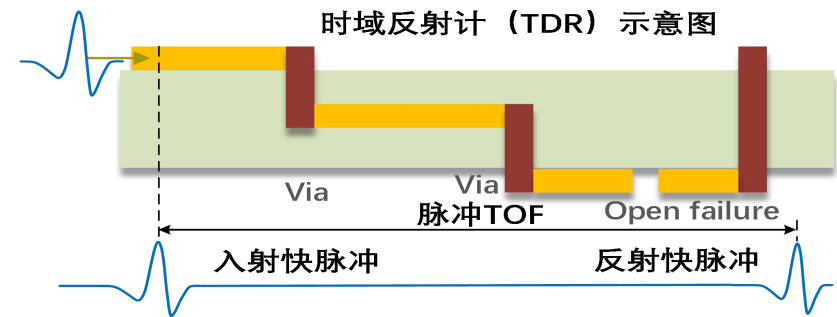


短路故障测试结果



空间分辨率与上升沿的估算关系

$$d_{min} = \frac{v \cdot T_r}{2}$$



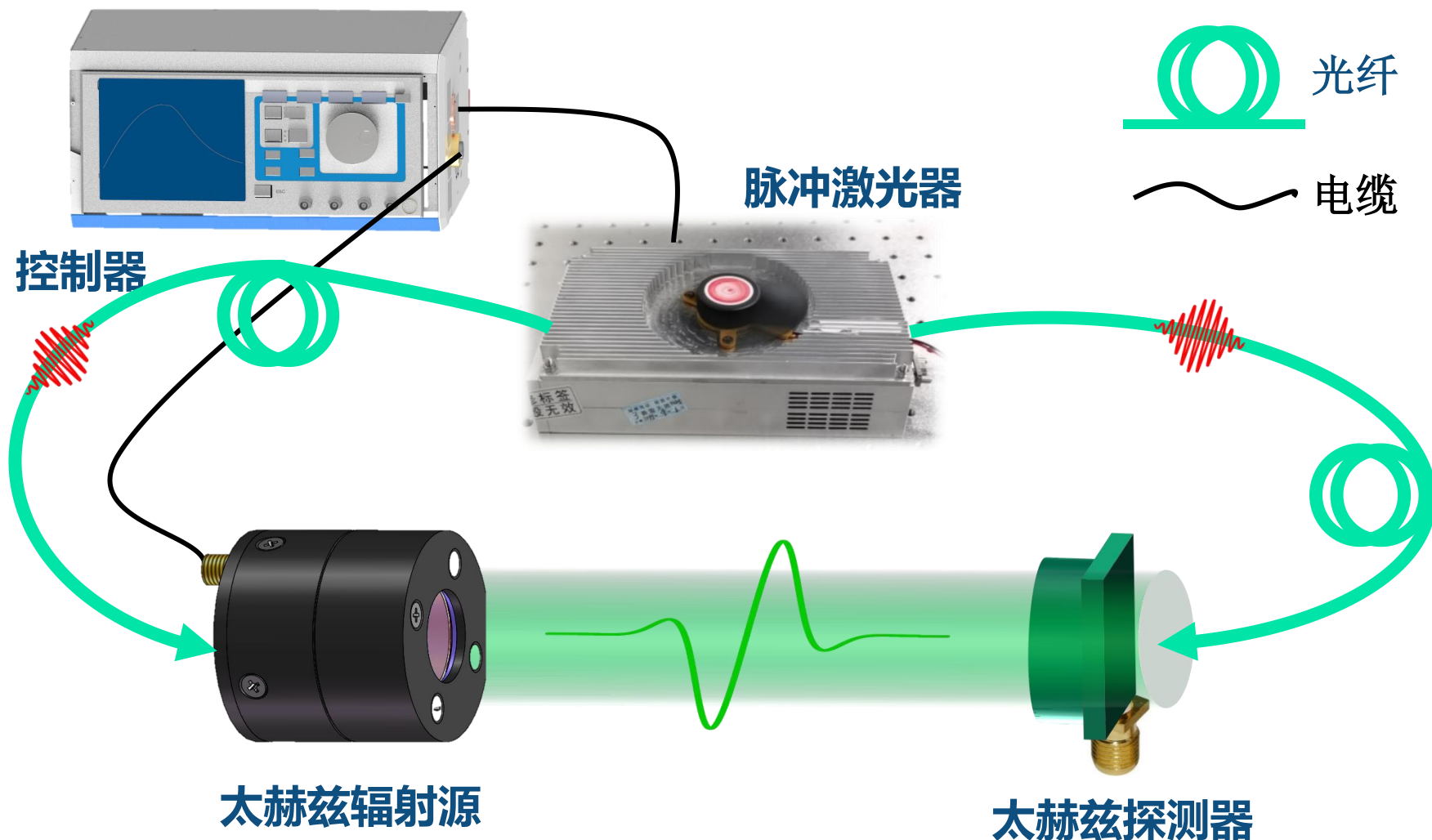
树脂基质的传播速度约为150μm/ps

μm级空间分辨 → 10fs级时间分辨

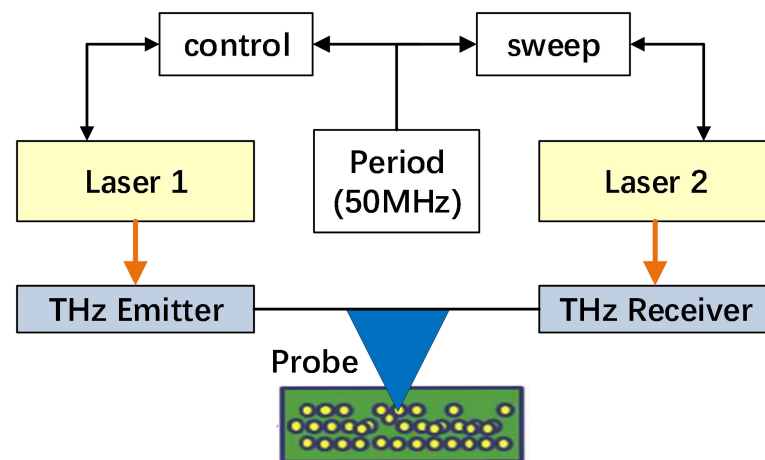
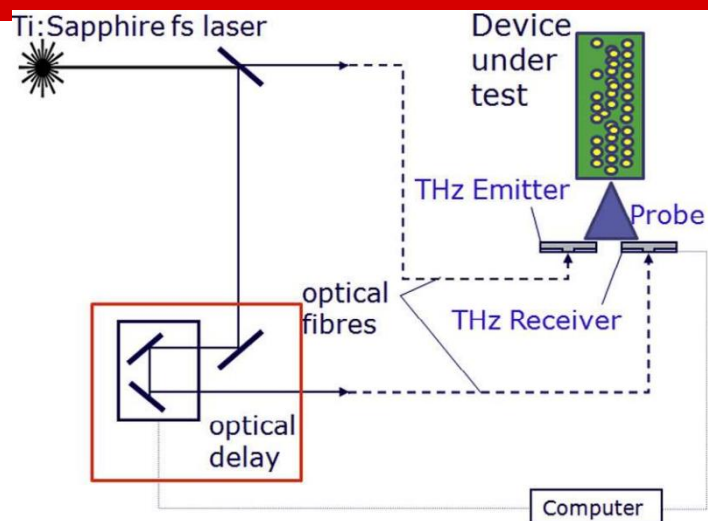
Ndagijimana F. Signal Integrity: From High-Speed to Radiofrequency Applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014, Chapter 6.

THz脉冲: 频率在0.1THz-30THz 的电磁波, 脉冲前沿陡, 生物特性好, 对人体无辐射损害

THz脉冲的产生与探测示意



典型的THz-TDR系统

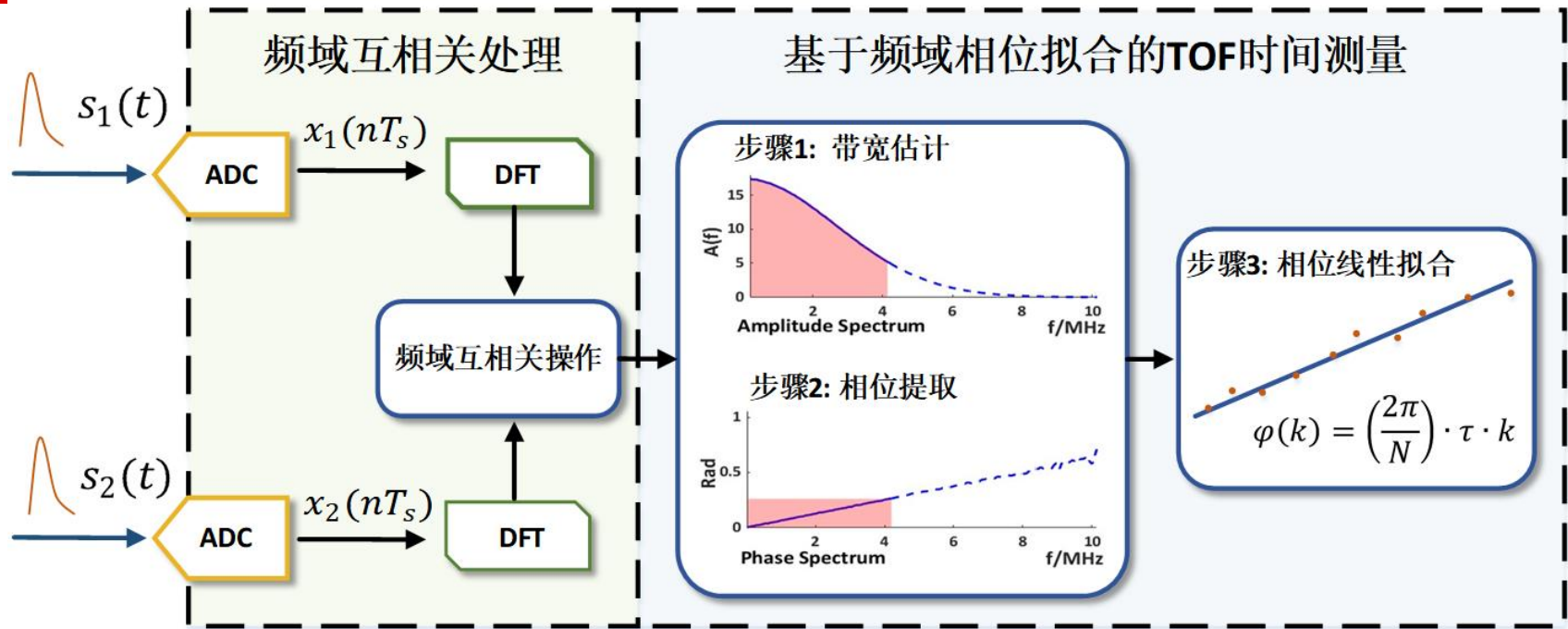


- 单激光器，分光Pump和Probe
- 机械延迟线等
- Pump光脉冲激发THz信号
- Probe光探测THz信号
- 英国TeraView的EOTPR 5000

- 双激光器，Pump和Probe
- 双激光器重复频率稍有不同
- Pump光脉冲激发THz信号
- Probe光探测THz信号
- 日本Advantest的TS9001

国际：核心技术封锁，售价昂贵，仅日英美少数发达国家掌握
国内：尚无自主研发THz-TDR ASIC封装检测仪

THz-TDR时间测量新方法



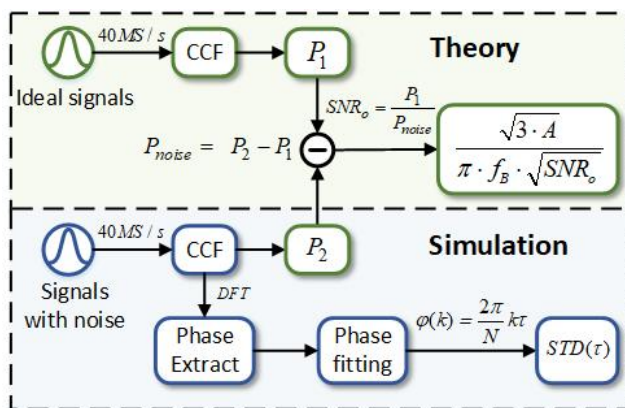
- 相位 $\varphi(k)$ 与时间间隔 τ 关系: $\varphi(k) = \frac{2\pi}{N} k\tau$ 。 k 为频率, N 为采样点数。

- 时间 τ 测量误差: $\varepsilon = \frac{\sqrt{3}A}{\pi f_B \sqrt{N} SNR_n}$ A 为常数系数, f_B 为信号带宽,

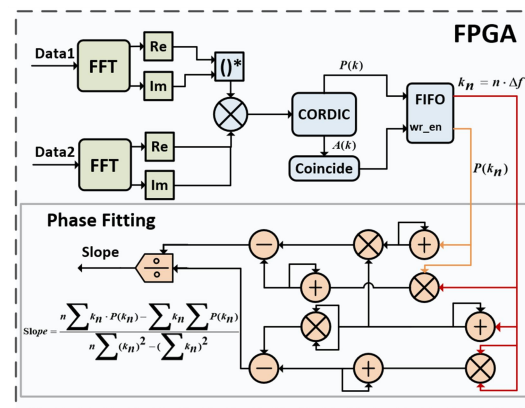
SNR_n 为互相关函数的信噪比。

J. Wang, Z. Bu, Z. Wang, J. Xu, L. Zhou and Q. Zheng*, "A High Precision Time Measurement Method Based on Frequency-domain Phase-Fitting for Nuclear Pulse Detection," , IEEE TNS 72(2025)5. 发明专利CN202410356268.2

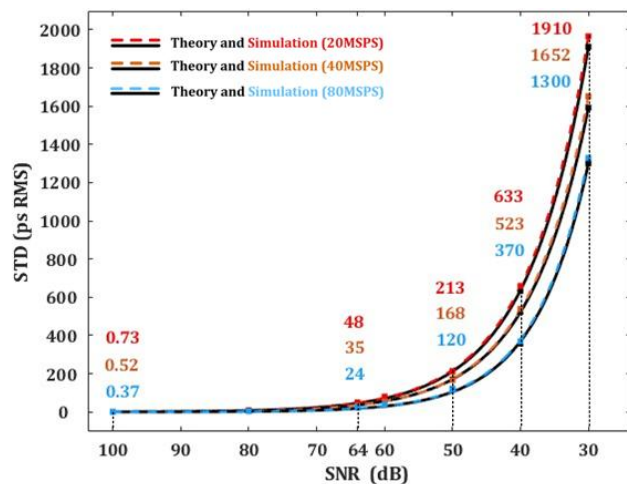
THz-TDR时间测量新方法



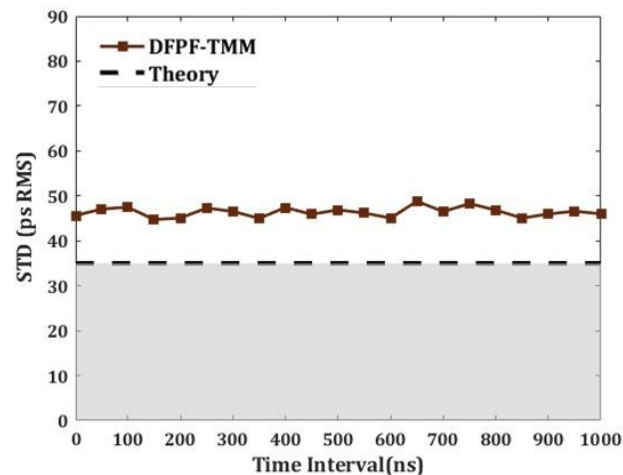
理论分析与仿真测量原理框图



FPGA实现相位拟合的高精度时间方法原理框图

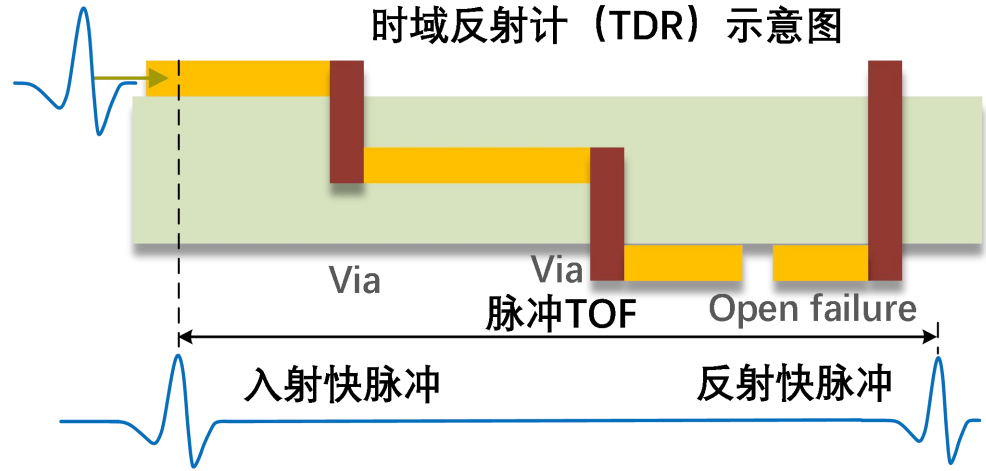
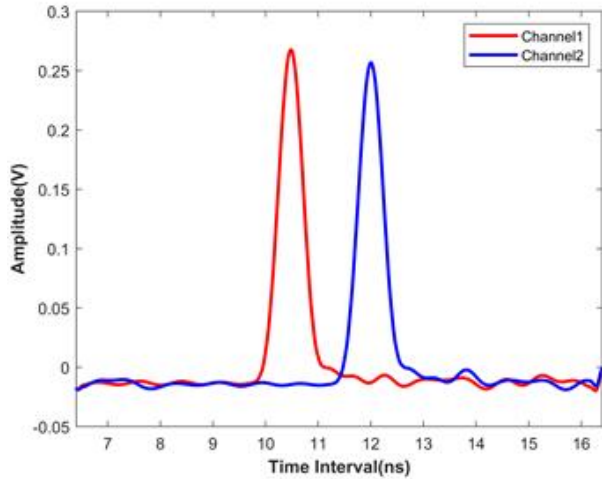


半高宽118ns高斯脉冲仿真结果



实测结果，半高宽118ns高斯脉冲@40MSPS

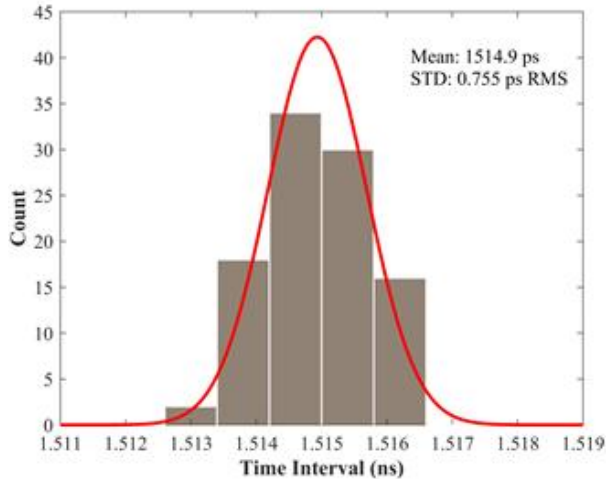
THz-TDR时间测量新方法



树脂基质的传播速度约为150μm/ps

μm级空间分辨 → 10fs级时间分辨

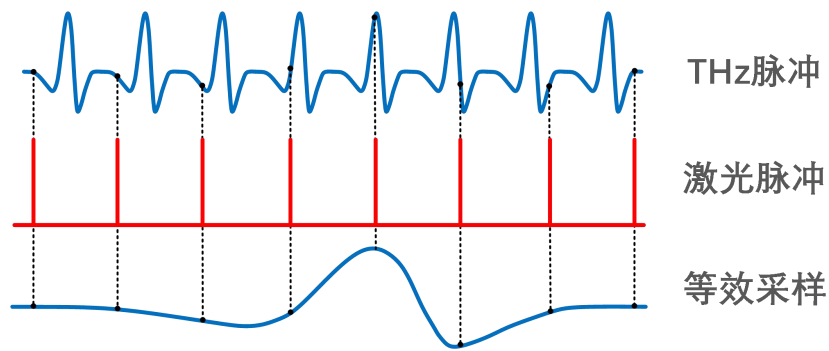
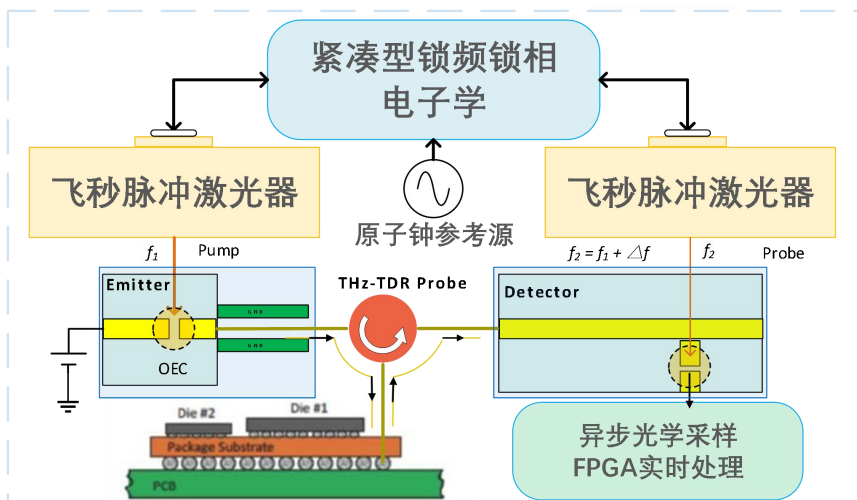
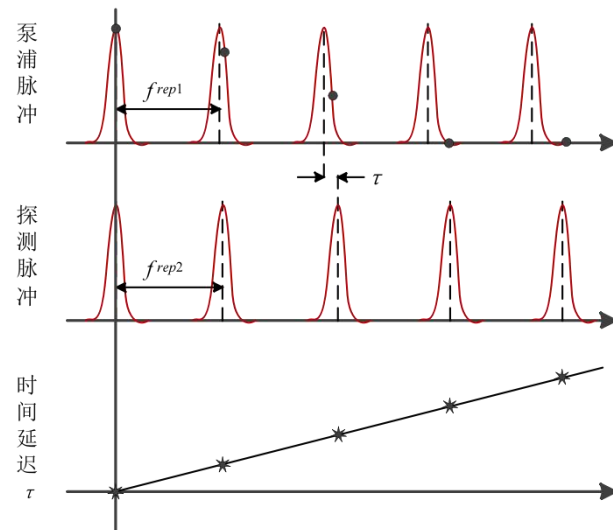
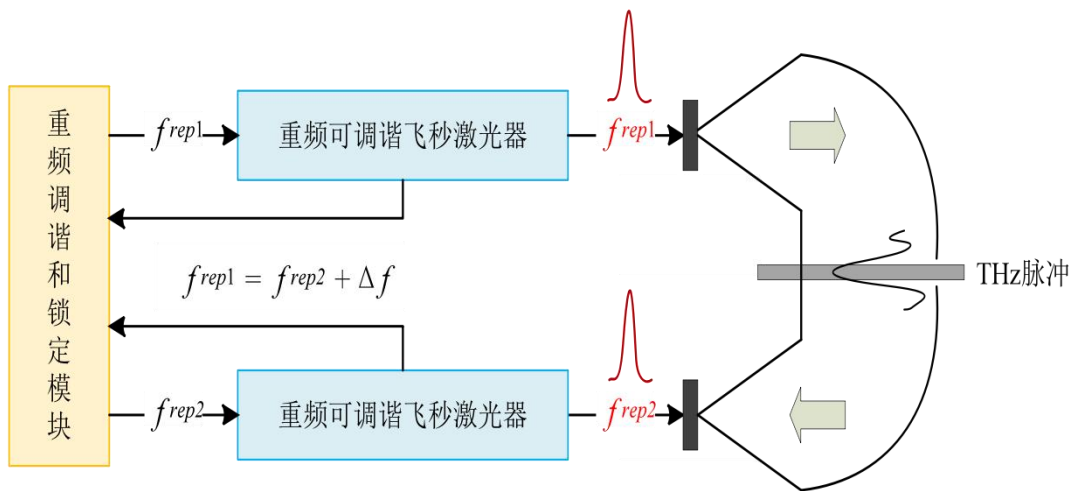
$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3}A}{\pi f_B \sqrt{N} SNR_n}$$



时间测量新方法+等效采样新技术

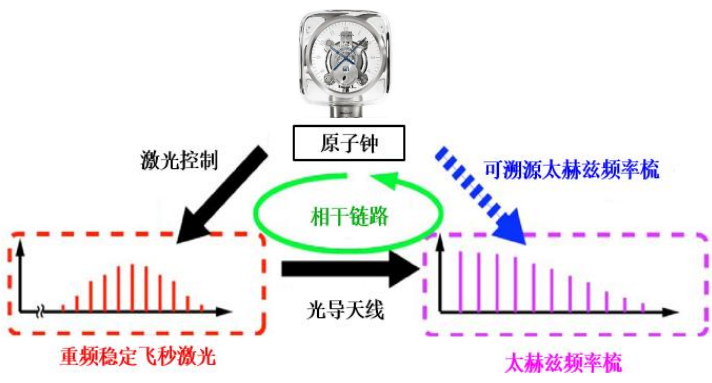
单次测量亚ps精度@10GSPS

基于异步光学等效采样的THz-TDR系统

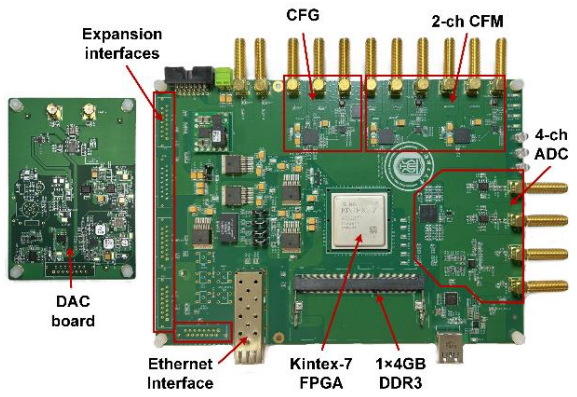


系统性能依赖重复频率稳定性

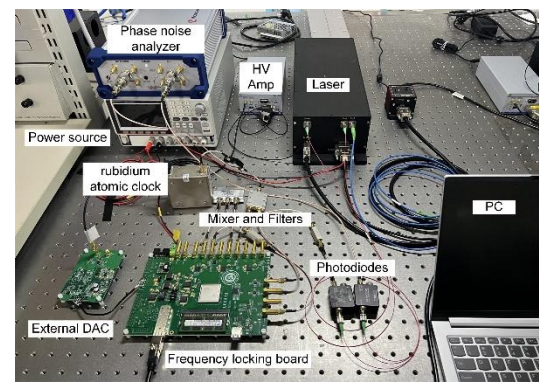
以原子钟为基准高稳锁定激光重频



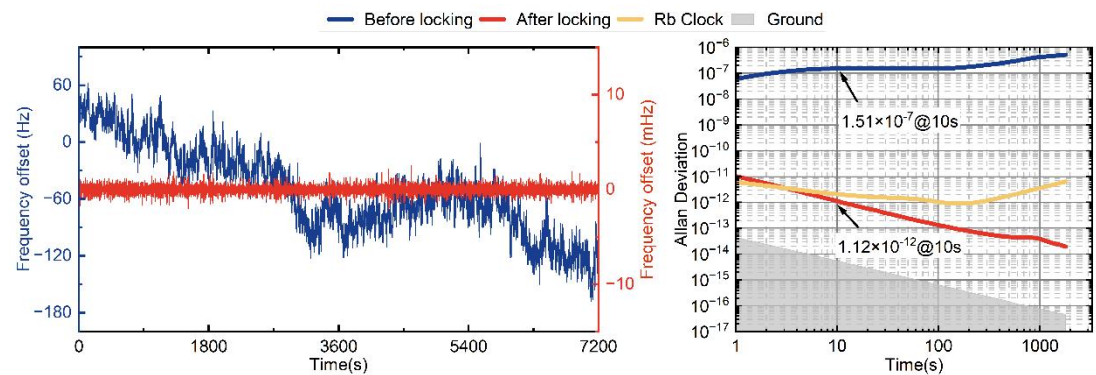
以原子钟为基准，高稳锁定激光



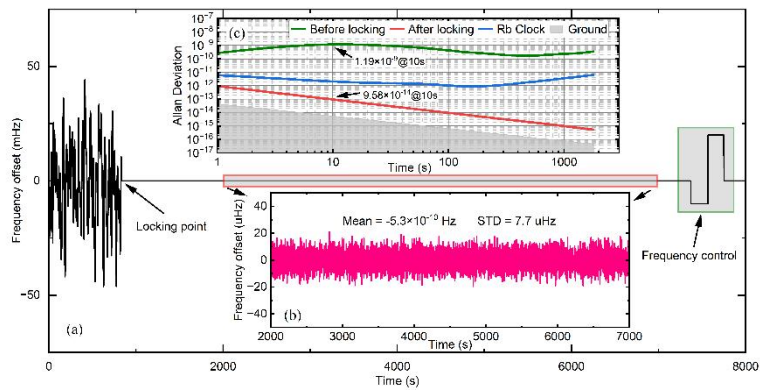
激光重频锁定电路模块



激光重频锁定联调现场照片

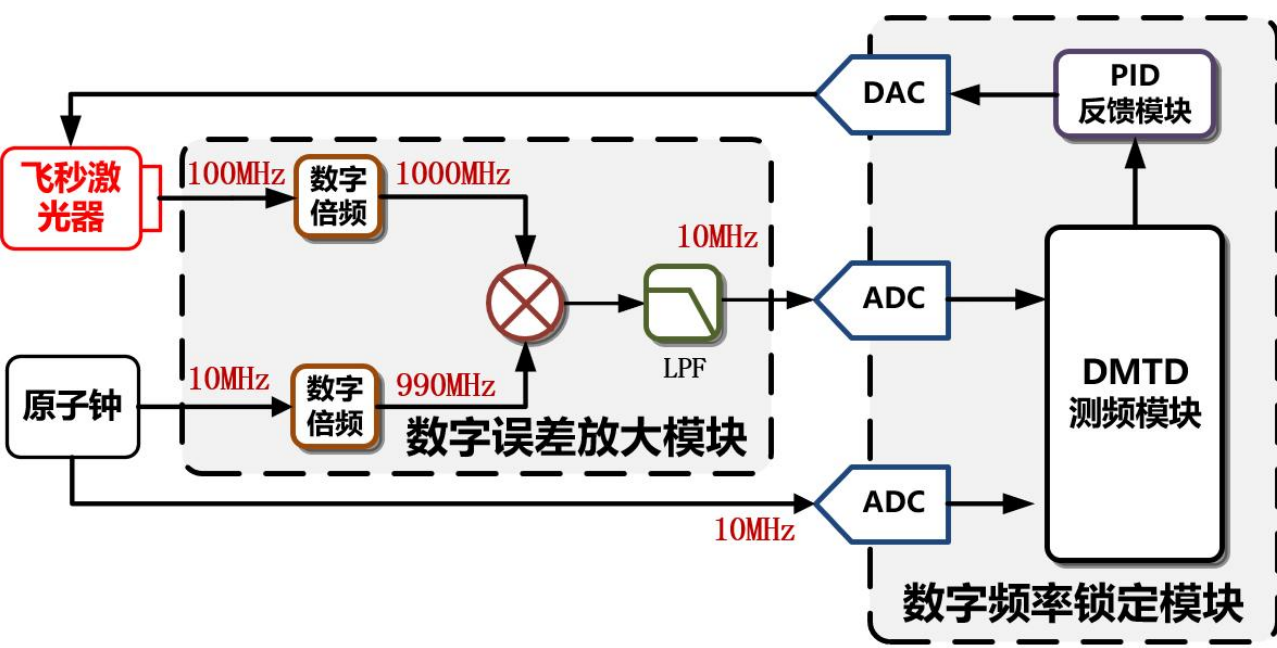


自研激光器重频系统的锁定效果对比

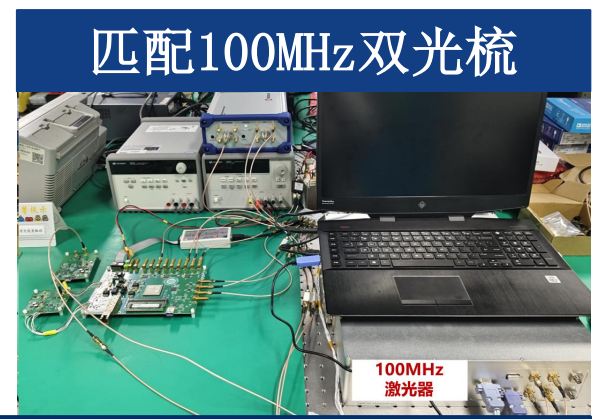
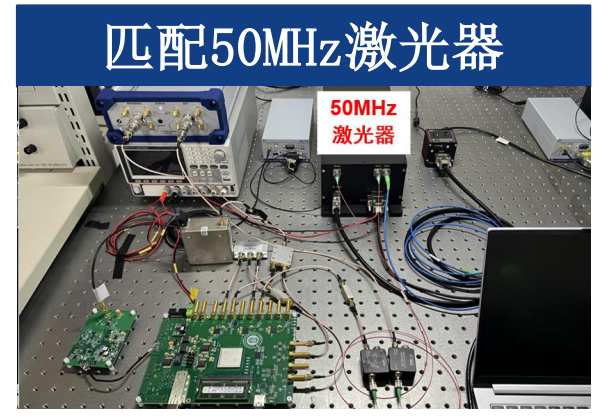


基于VCO的测试结果

双光梳THz-TDR的全数字锁频架构

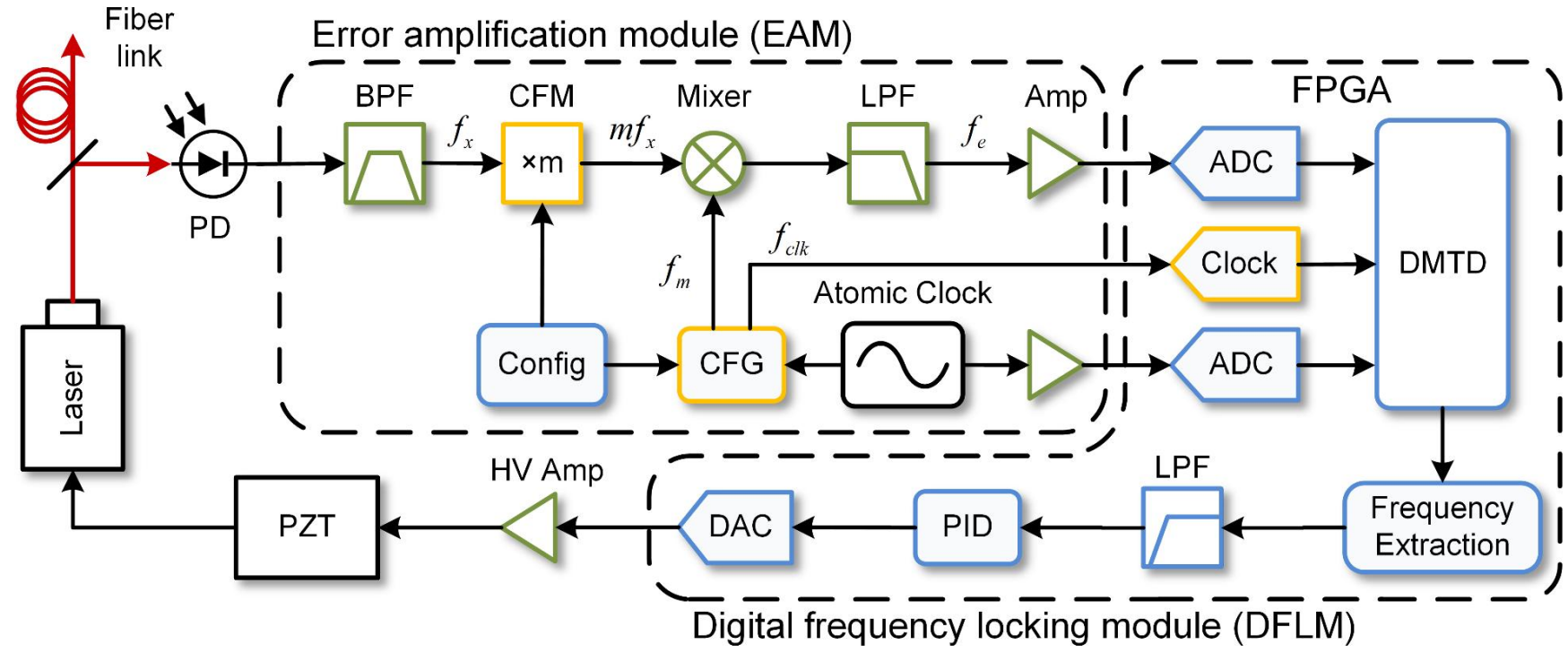


前端数字误差放大 + 通用数字锁频 架构



提高精度并简化系统设计，系统架构层面压缩系统复杂度与功耗

全数字化的锁频方案

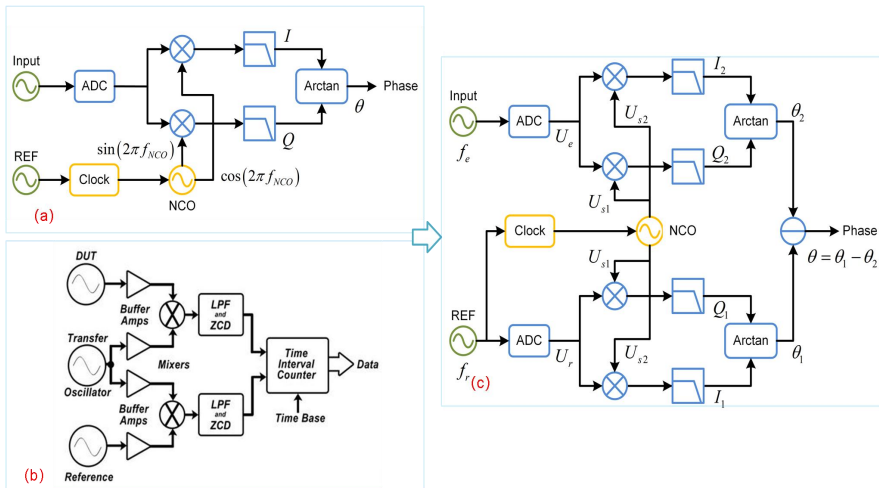


兼顾高精度和小型化

全数字双混频时差锁频法

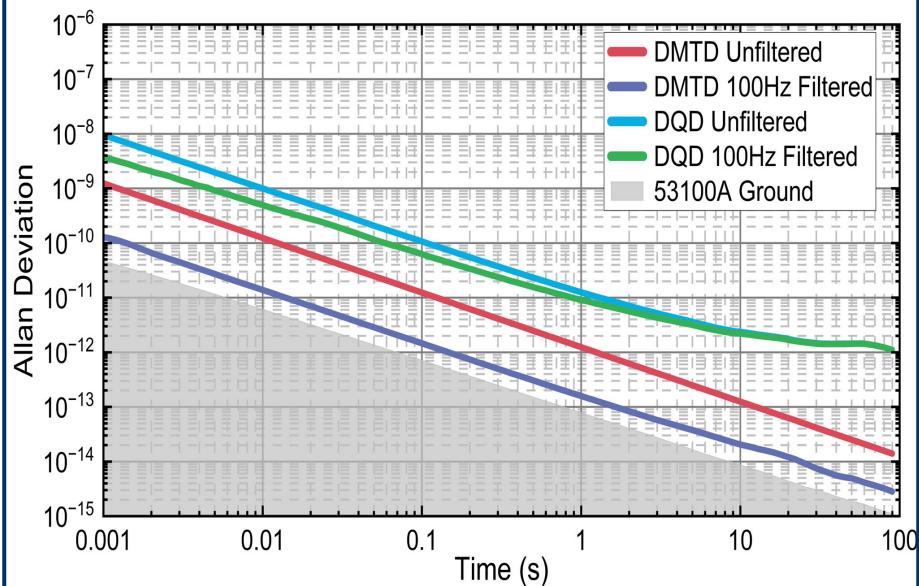


ADC-based DMTD锁频法



差分降低本底，双混频时差提高精度

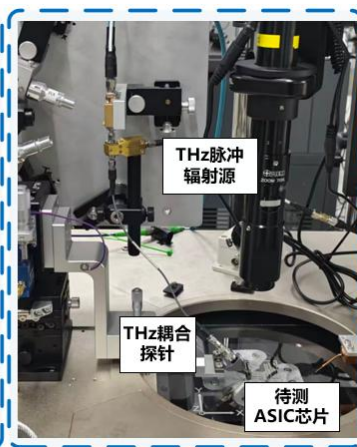
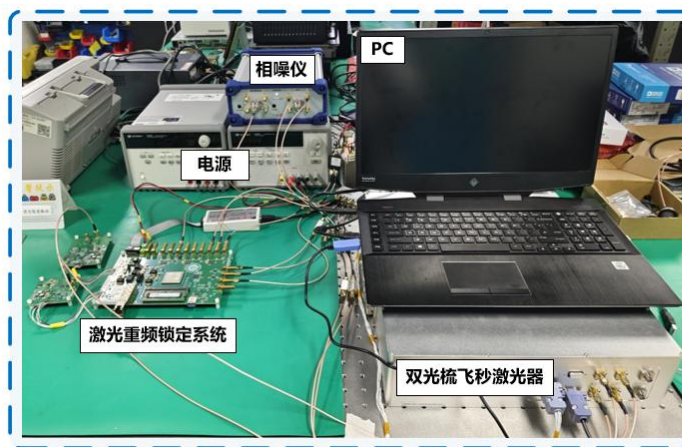
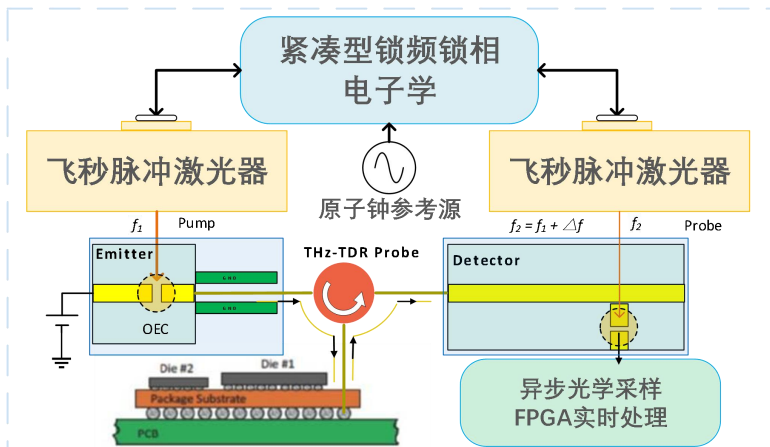
ADC-based DMTD方法本底



相较现有数字锁频方法本底噪声优化约**50**倍

Qibin Zheng*, Zhengyi Tao, Lei Wang, et al. A digital and compact high-precision locking system for pulse laser repetition frequency[J]. IEEE TIM 74(2025)2007710, 发明专利CN202410339095.3

THz-TDR先进封装检测仪

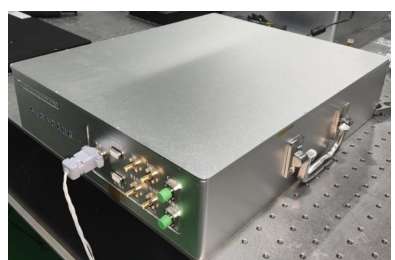


国产自主的高分辨THz-TDR先进封装检测仪

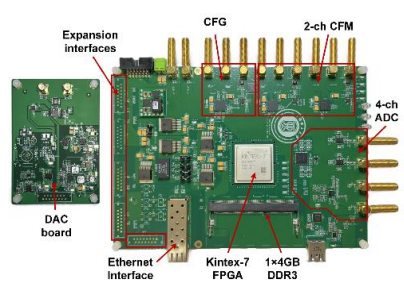
① 国产THz辐射源



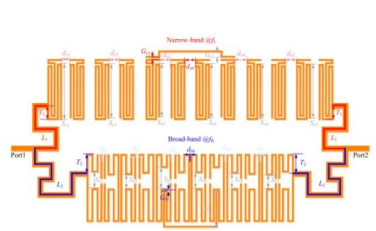
② 国产飞秒激光器



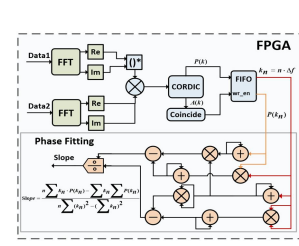
③ 自研锁频锁相电子学

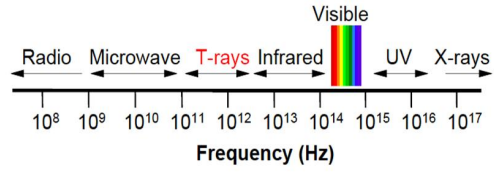
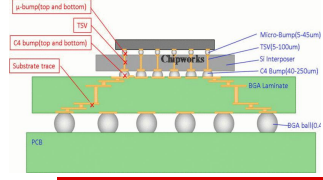


④ 高频滤波耦合器件



⑤ FPGA实时算法





敬请批评指正!



基于频域相位拟合的核脉冲TOF测量

在波形数字化的后基于频域相位拟合的高精度时间测量 (DFPF) 与传统DCFD方法的对比表

Method	Features	Pulse Width (ns)	fs (MSPS)	Precision (ps rms)	Implement On board	Ref
DCFD	Non-linear fitting	~10	100	~37	Difficult	[20]
DCFD	Weighted average	~10	100	~108	Moderate	[20]
DCFD	Non-linear fitting	~10	250	~21	Difficult	[20]
DCFD	Weighted average	~10	250	~30	Moderate	[20]
DCFD	Linear interpolation	~3	500	~127	Easy	[13]
DCFD	Cubic interpolation	~3	500	~16	Moderate	[13]
DCFD	Sinc interpolation	~3	500	~3.0	Moderate	[13]
DFPF	Frequency-domain Linear fitting	~10	100	~18	Easy	Our work
DFPF	Frequency-domain Linear fitting	~10	250	~14	Easy	Our work
DFPF	Frequency-domain Linear fitting	~3	500	~2.9	Easy	Our work

推断采用太赫兹脉冲、等效采样后可以实现飞秒级精度的TOF时间测量

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3 \cdot A}}{\pi \cdot f_B \sqrt{SNR_0}}$$

J. Wang, Z. Bu, Z. Wang, J. Xu, L. Zhou and Q. Zheng*, "A High Precision Time Measurement Method Based on Frequency-domain Phase-Fitting for Nuclear Pulse Detection," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, doi: 10.1109/TNS.2025.3554967.