闭环激励下荧光衰减与光纤延时复用相结合的高精度激光功率测量系统

自选类——物理实验仪器开发与改造类

目录

一 课题背景

二 实验原理

三 系统实现

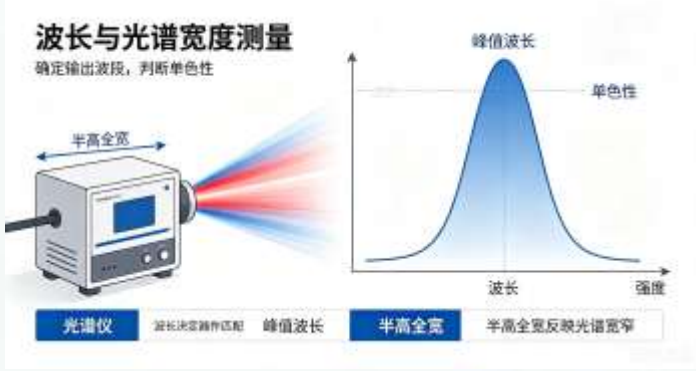
四 数据分析

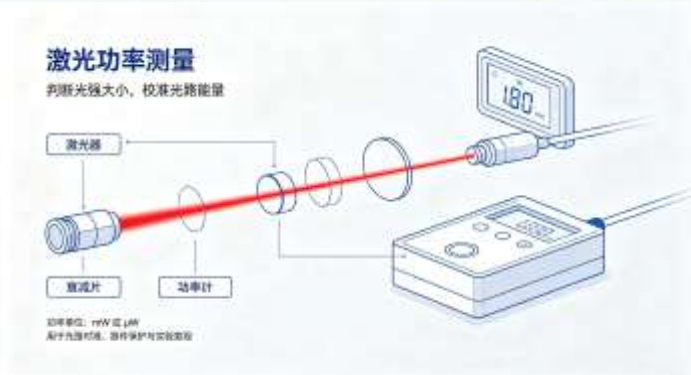
五 总结展望

六 附录

课题背景

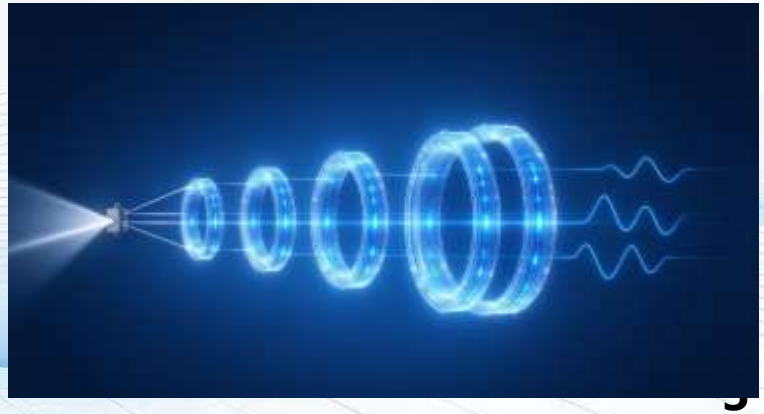
现有激光功率测量仪器多为“黑匣子”，学生只能读数值，看不到信号的时间演化；面对纳秒级快速光信号，教学仪器受限于探测器和采样率，无法直接展示时间结构。本项目在首先完成激光功率测量平台，并进一步引入光纤延时构成光学游标卡尺，用已知长度光纤产生可控时间错位，将 10ns 采样细分至 2.5ns，让学生亲手搭建、直观观察快速光信号的测量过程。





利用测量激光光谱峰值功率：光电传感器，测量峰值波长、FWHM、占空比等功能的测量：光谱仪高速测量，时间延迟的关键：光纤

目标：三合一，实现光强、光谱与时间信息一体化测量

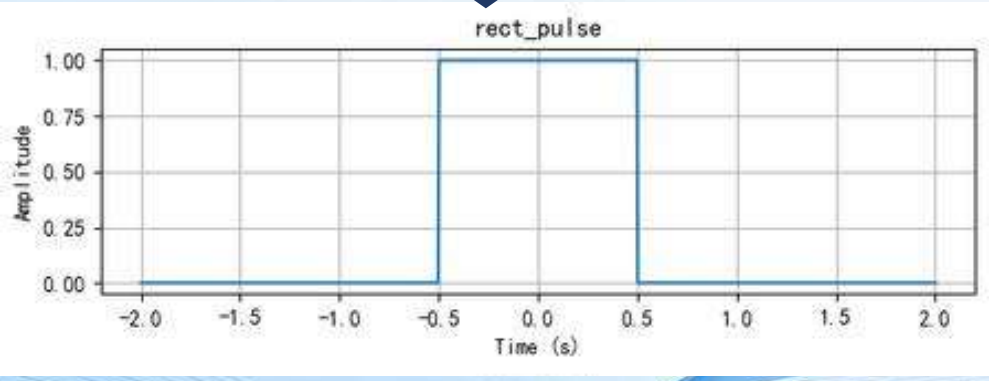


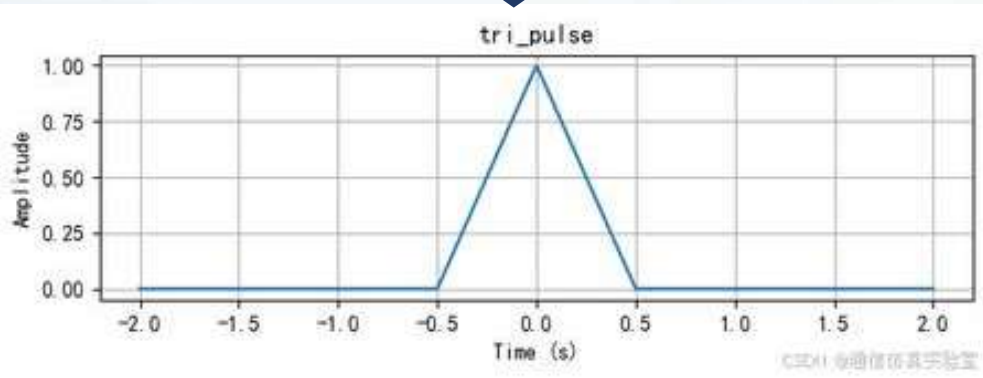
从“功率”走向“时间”

传统激光功率测量能够告诉我们“光有多强”，但是对于快速变化的激光脉冲，还需要知道“光在时间上是怎样变化的”。

P

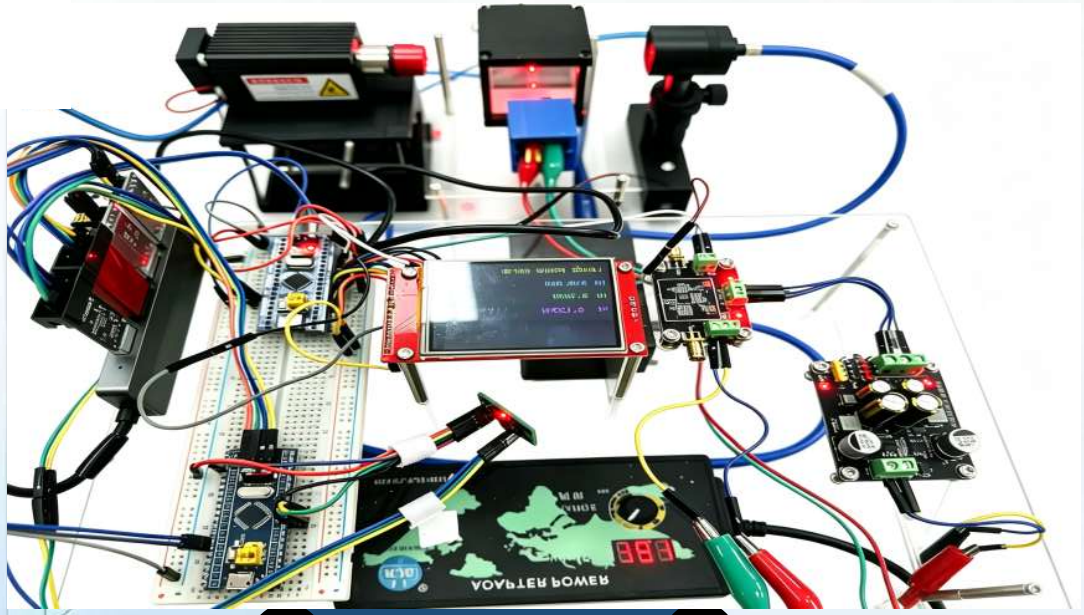
$P(t)$





对快速激光脉冲而言，时间结构本身就是重要测量信息

实验的改进思路





装置阐明

前期开发仪器具有低成本、全链路开放式硬件架构、模块化功能分区以及开源可扩展四大特点，完整展示了从光电探测、模拟信号调理、数字信号处理到闭环控制的完整技术链路。

改进痛点

当测量对象从连续/慢变化光信号扩展到快速脉冲时，仪器面对新的时间分辨需求。所以我们在此基础上需要让这个装置既能测量普通光功率又能捕捉快速激光脉冲信号。

面临问题

快速光信号的时间结构，现有采样精度无法分辨

单纯提升电子硬件性能，成本和复杂度难以接受

仪器既要满足测量精度，又要保持低成本、开放式实验平台的定位

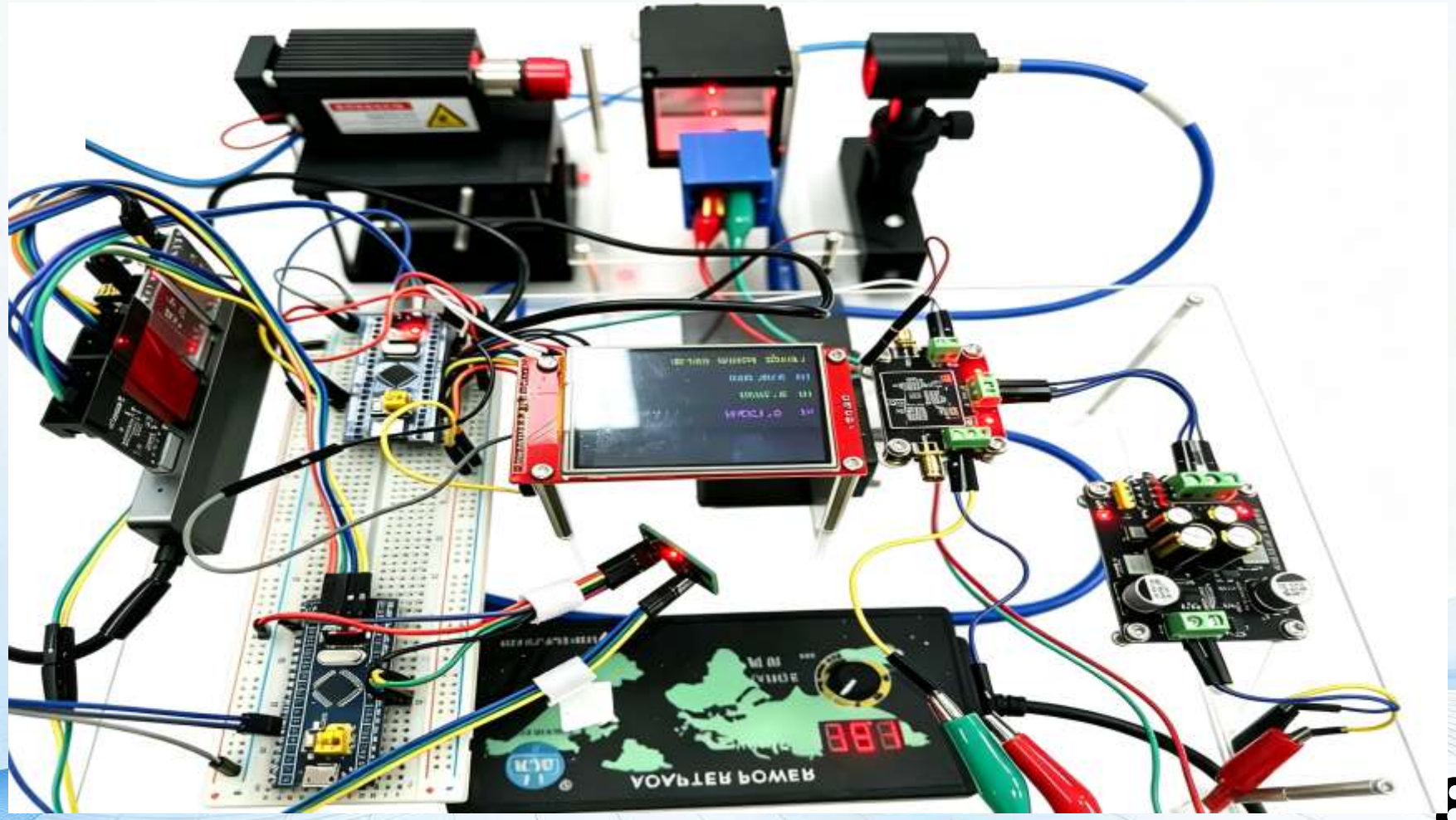
对于快速变化的激光，仅仅测量一个功率值还不够

设计思路

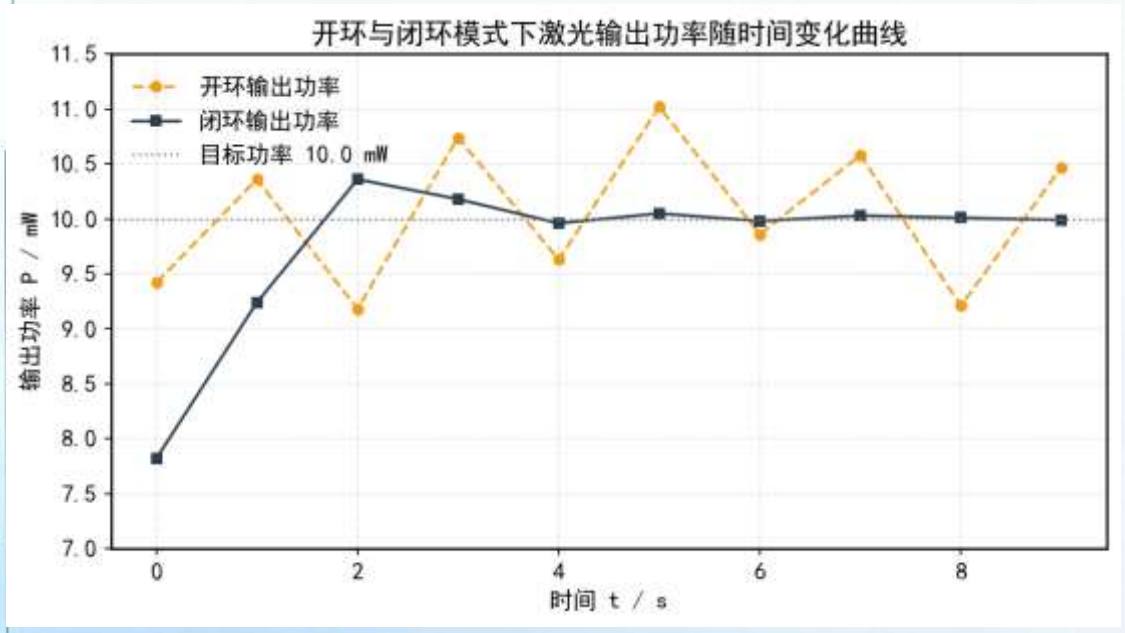


激光激发

通过实验设计了一套能结合光电探测、光谱分析、嵌入式控制与反馈调节技术，设计制作了一套自主化激光功率测试与闭环控制实验装置。利用这套先前的装置与荧光结合能够共同组成一个激光脉冲激发装置。



激发装置里的闭环控制

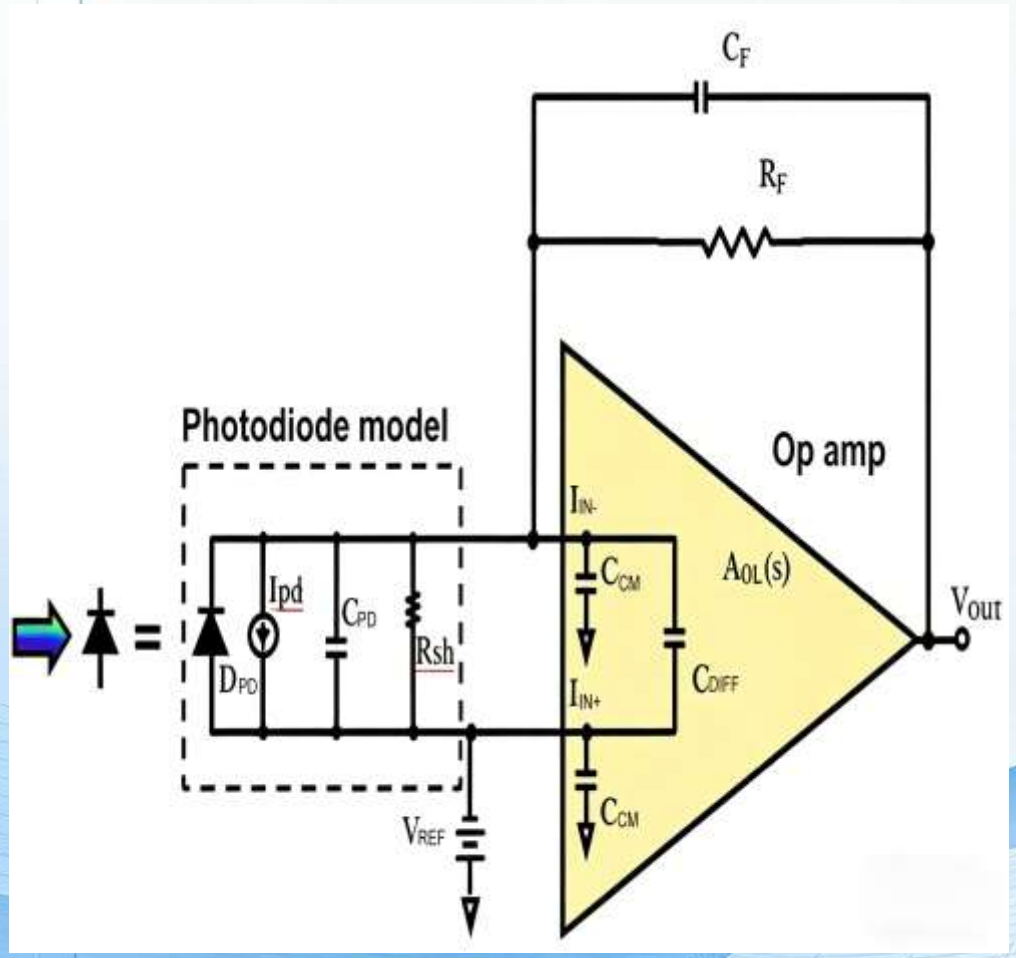


$$\Delta u(t) = K_p \times \Delta e(t) + K_i \times e(t) + K_d \times [e(t) - e(t-1)]$$

时间/s	闭环输出功率/mW
0	7.82
1	9.24
2	10.36
3	10.18
4	9.96
5	10.05
6	9.98
7	10.03
8	10.01
9	9.99

系统响应时间：12-15秒
稳态误差 <2%
超调量 <5%

TIA放大电路



光电转换与跨阻增益

$I_{ph} = \mathcal{R}(\lambda) \cdot P_{opt}$　　$|\Delta V_{out}| \approx I_{ph} \cdot R_f$

$\mathcal{R}(\lambda)$：响应度（A/W）　　Rf：反馈电阻（Ω）

增益、带宽与稳定性的取舍

Rf 按最大光电流和输出摆幅确定，避免饱和。
Cf 与输入总电容共同影响稳定性和闭环带宽。
运放需核对增益带宽积、噪声与输出驱动能力。

采集接口

按 ADC 的输入范围、共模及阻抗设计驱动与滤波。
50 Ω 端接的幅度损耗须计入整链路标定

对测量方法的思考

1

直接提高采样率

靠高速 ADC 直接 “拍” 下快速波形，要求采样率远高于信号带宽；高速 ADC 价格高、功耗大、对 PCB 和时钟要求苛刻。

3

用专业超快测量设备

条纹相机、高速示波器等确实能测超快光信号，
但：价格昂贵、功能封闭、体积大，不适合作为学生实验平台

2

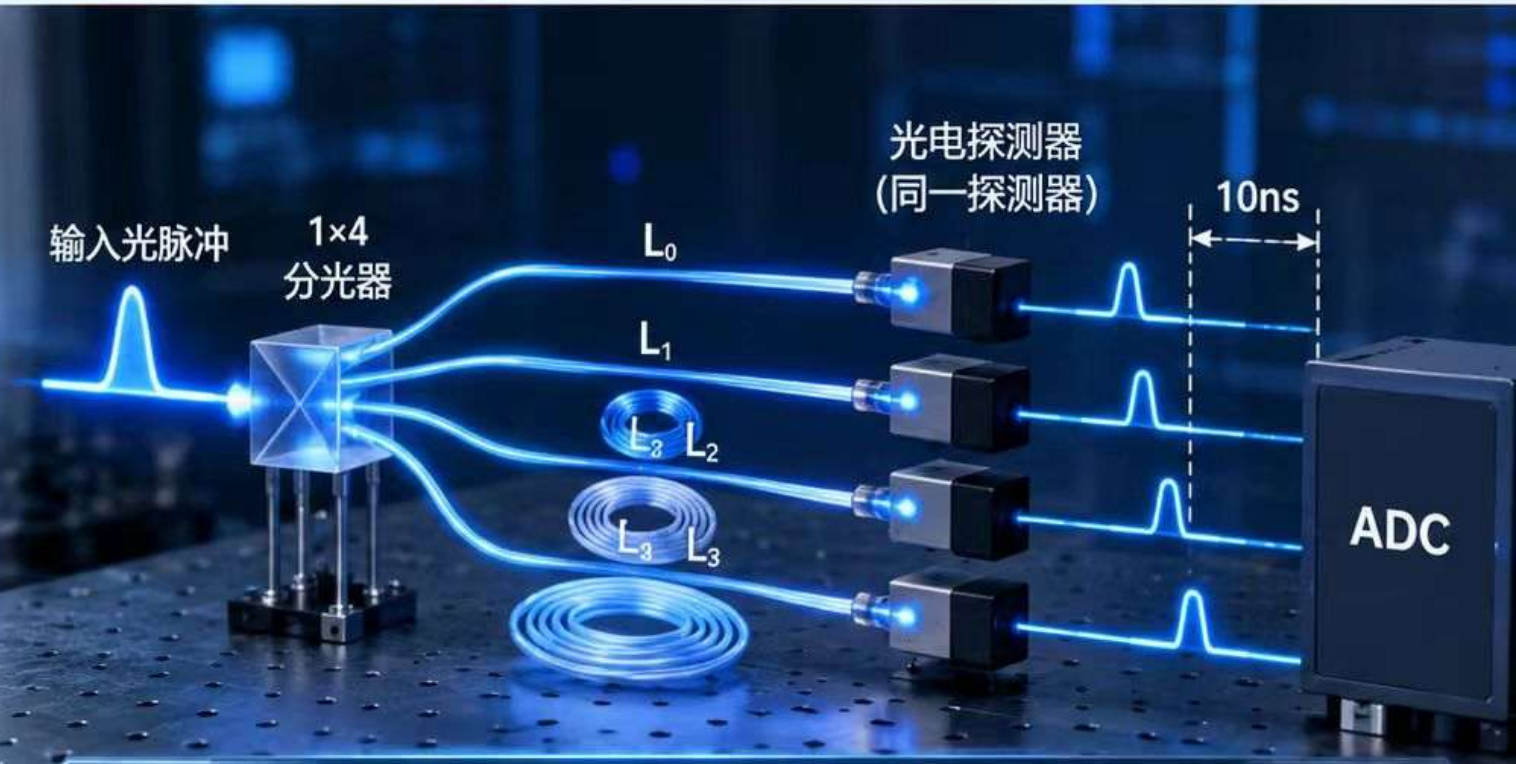
换更快的探测器

探测器响应时间有限，对快速脉冲天然会展宽、失真波形
要跟上纳秒 / 亚纳秒级信号，必须用高速光电二极管 + 高速放大电路
器件贵、带宽越高噪声越大、电路设计难度陡增

光纤尺

设计起点

面对快速光信号的时间测量，三条老路都走不通，那我们把光劈成四路，走不同长度的光纤，让同一个信号在四个错开的时间点被同一块探测器采样，再用数字方式拼起来。探测器不换、ADC 不换，靠光纤延迟把 10ns 的采样读出 2.5ns，这就是光学游标卡尺的思路。



通俗阐释

快速光脉冲 → 10ns 采样看不清细节 → 把光劈成四路，走不同长度光纤 → 每路晚到几十纳秒，四路采样相位错开 2.5ns → 拼到同一时间轴 → 10ns 读出 2.5ns → 就是一把 "光学游标卡尺"。



数学模型的搭建

时间编码

$$y = Hx + n$$

x：真实快速光信号
H：时间编码系统
y：探测器获得的观测数据
n：噪声

探测器响应

真实模型：
$y = H_{fiber}H_{detector}x + n$
或者用卷积形式：$y(t) = x(t) * h_d(t)$探测器决定“实际观测过程中的时间响应”，但最终得到的仍然是离散采样

从连续到离散

探测器最终得到的仍然是离散采样，但编码使这些采样具有可利用的时间关系，因此可以建立“离散观测值”与“未知原始波形”之间的确定关系。

时间编码与反演

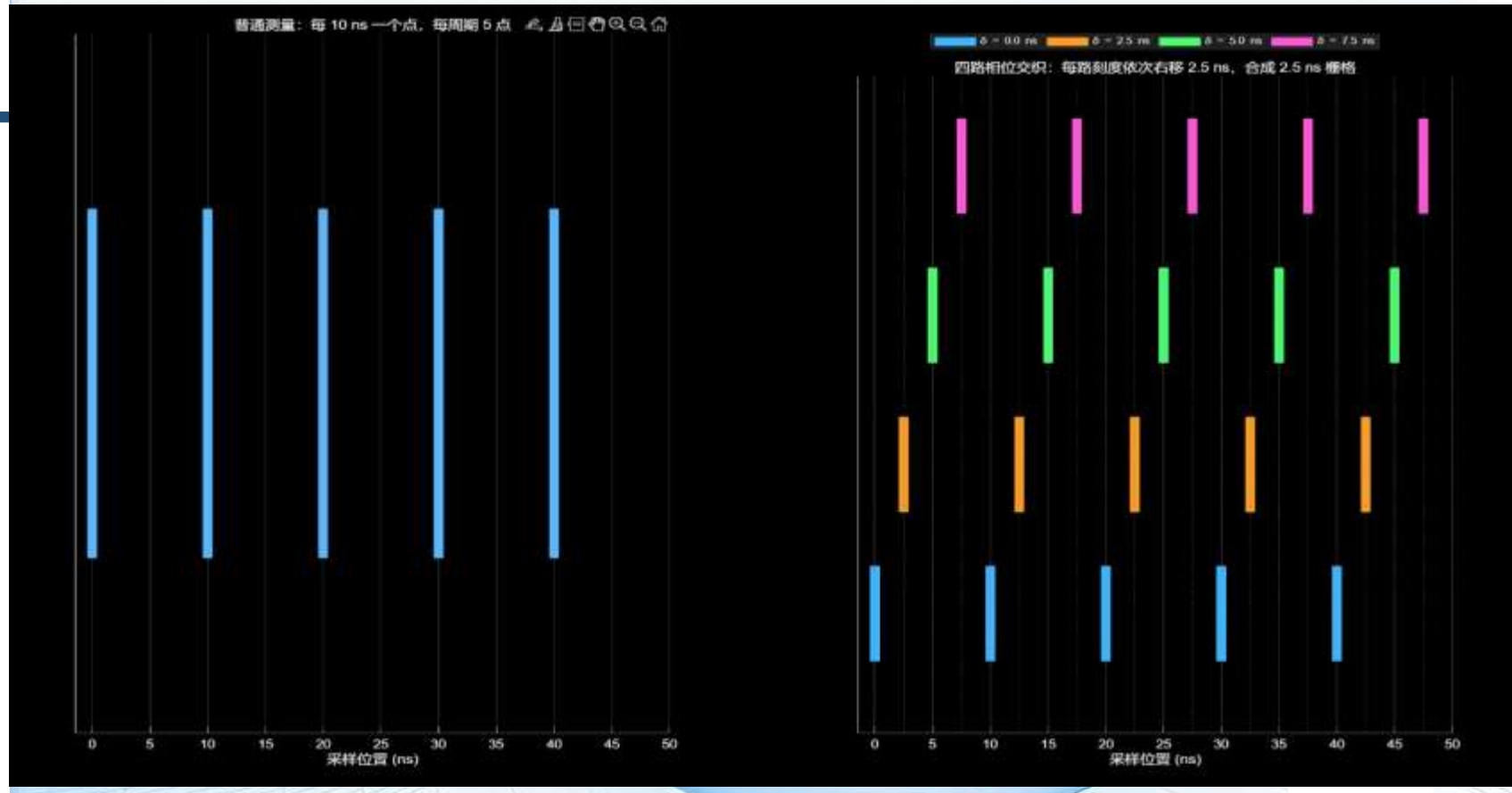
已知编码方式，就可以从观测
信号反推出原始信号
基本形式：
$\hat{x} = \arg\min_x \{|H - y|^2 + \lambda R(x)\}$

其中λ是正则化参数。

创新设计

为什么是四路光纤

我们采用光学时间交错采样。单探测器采样间隔是10 ns，无法分辨信号里的快成分。我们通过四路不同长度的光纤精确调控相位，让四路信号依次错开2.5 ns到达探测器——这样，在探测器每次采样瞬间，抓住的是原始波形上不同时刻的强度。四路合起来，物理上把采样间隔从10 ns细分到2.5 ns。



创新设计

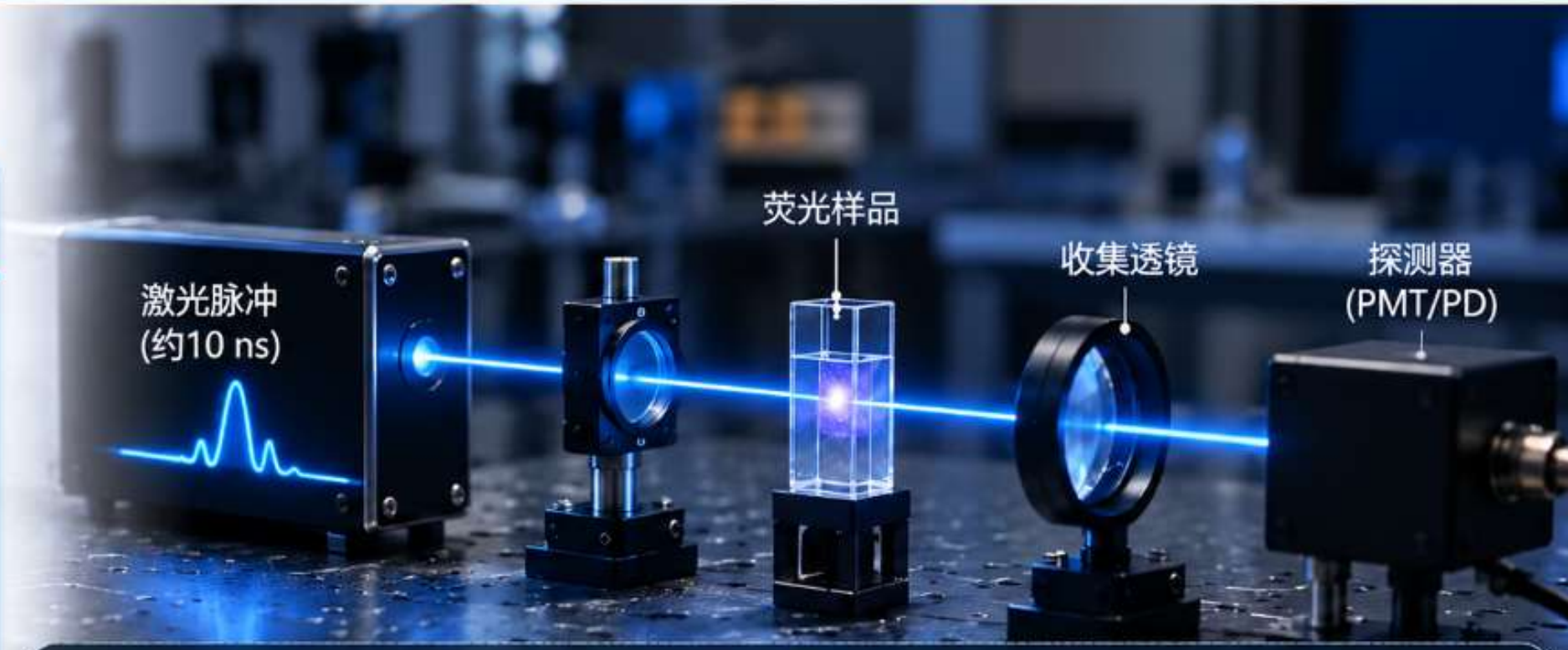
为什么选择荧光

1 作为真值已知的时域标定信号源。

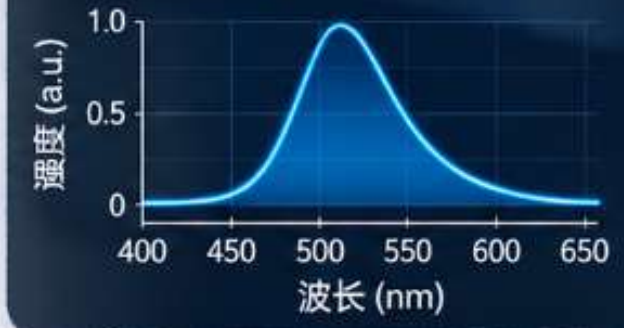
四路光纤的相位错开、采样点的实际位置，都需要一个能精确表征的信号来标定。荧光衰减曲线是理想的标定源。

2 作为快速光信号到可测信号的转换媒介。

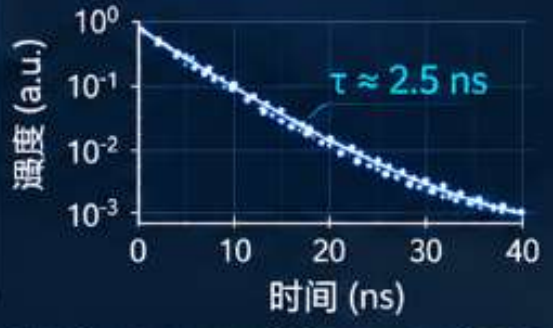
荧光材料把激光脉冲的快速时域信息转换为缓变的衰减曲线，便于时间交错采样系统捕获。



荧光光谱（示例）



荧光寿命（示例）



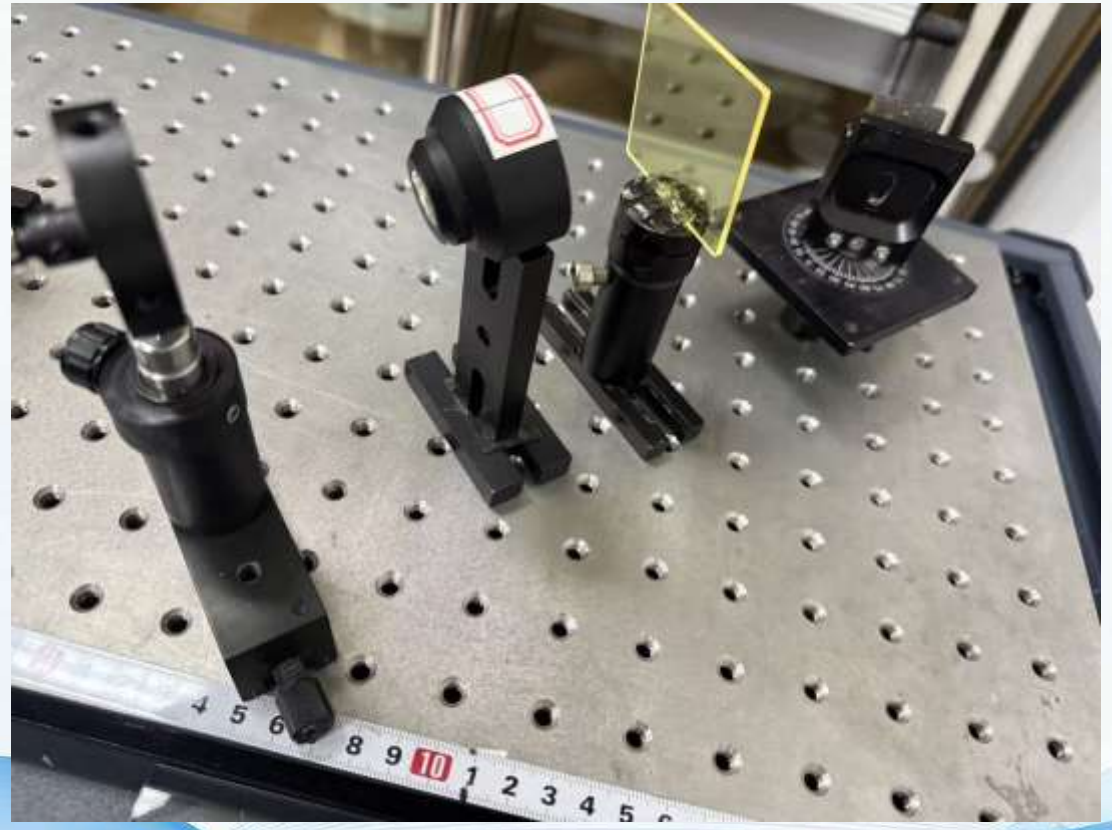
常用荧光材料（示例）



PPO (τ~1.6 ns)　Coumarin 6 (τ~2.5 ns)　Rhodamine B (τ~1.6 ns)

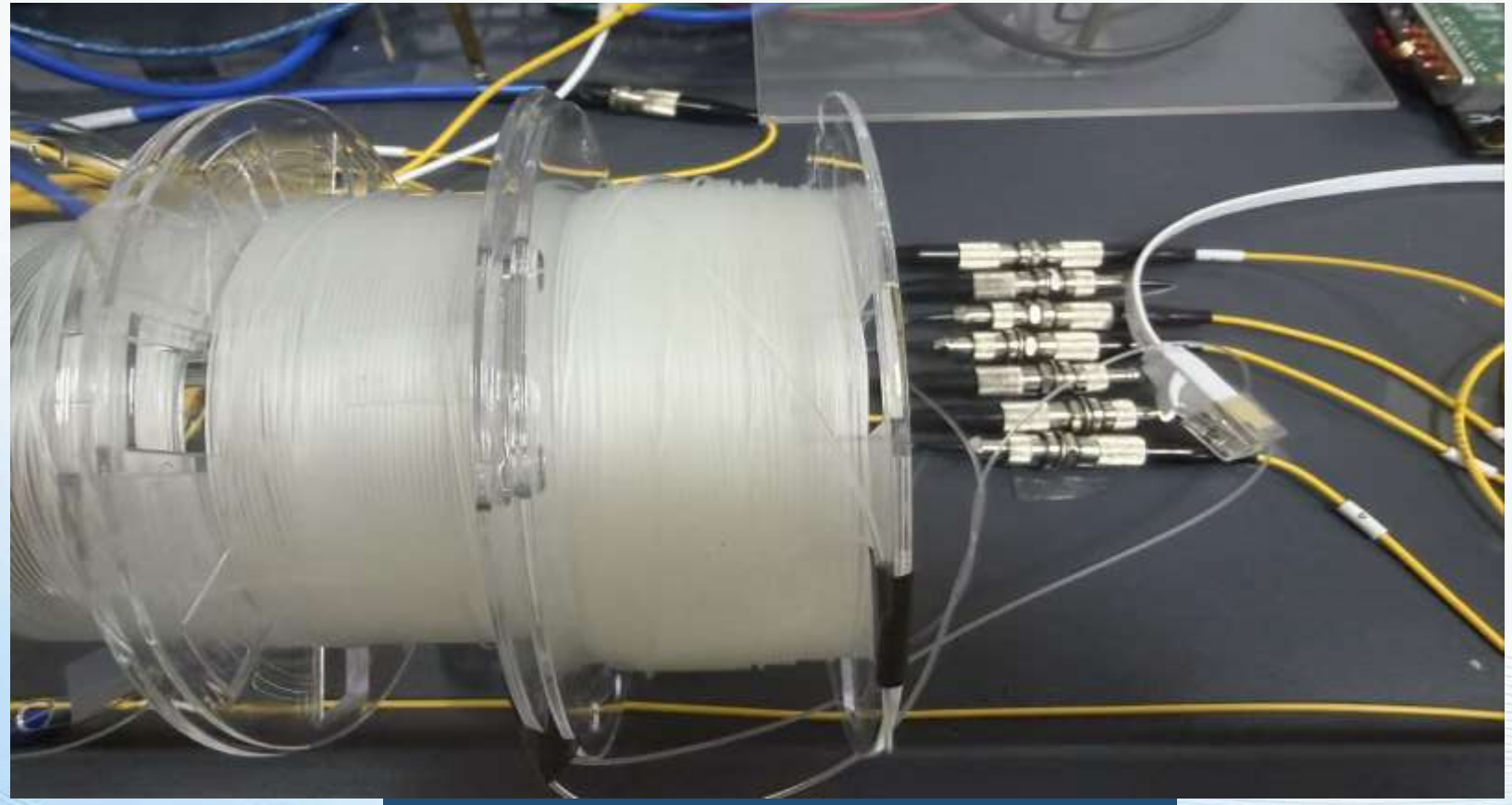
硬件系统





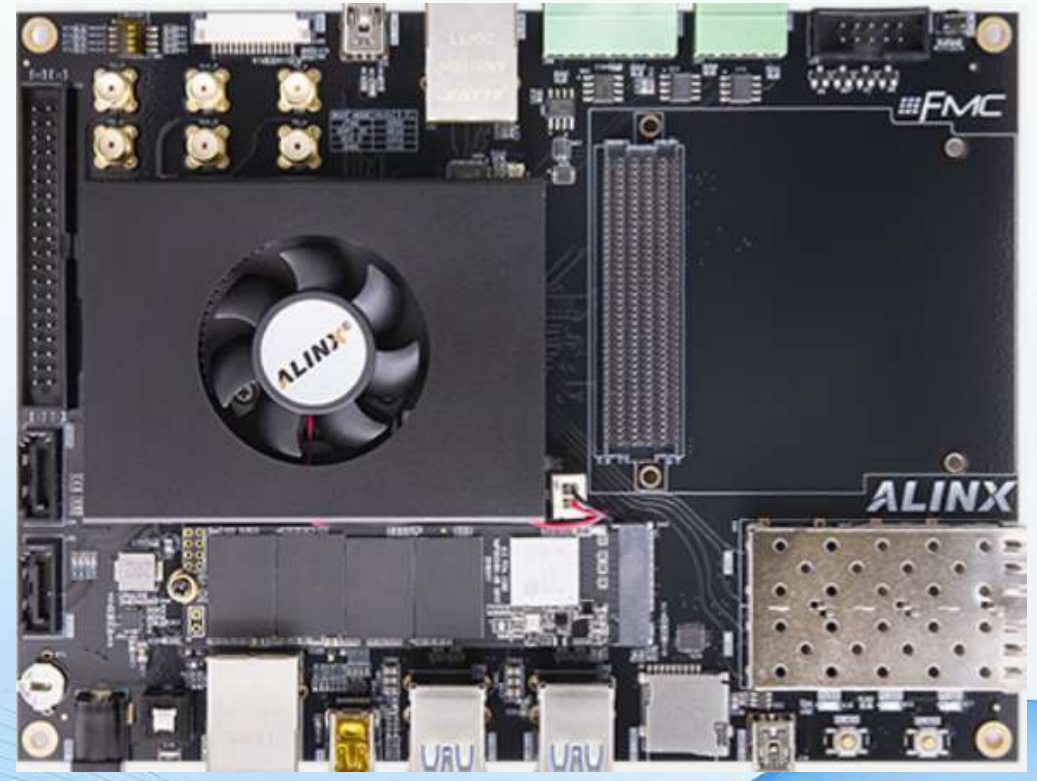
激光测量装置+荧光=激光激发装置

硬件系统

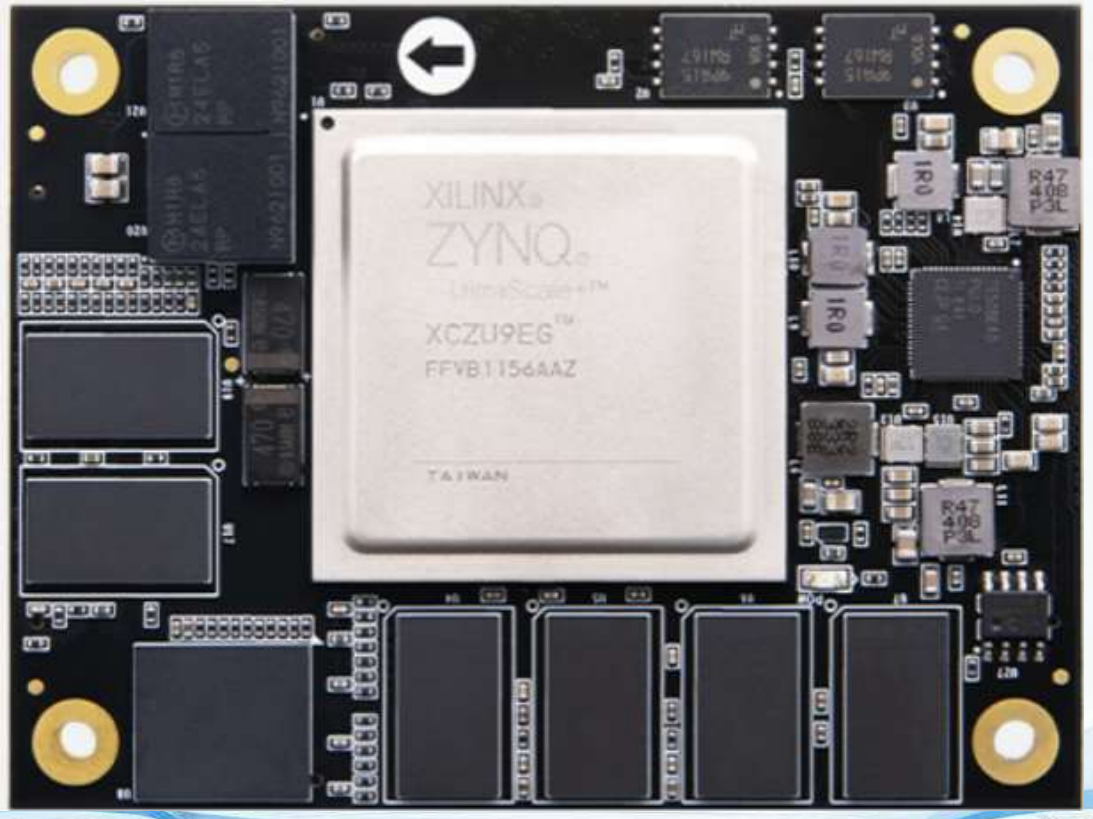


四路光纤作为测量尺

硬件系统

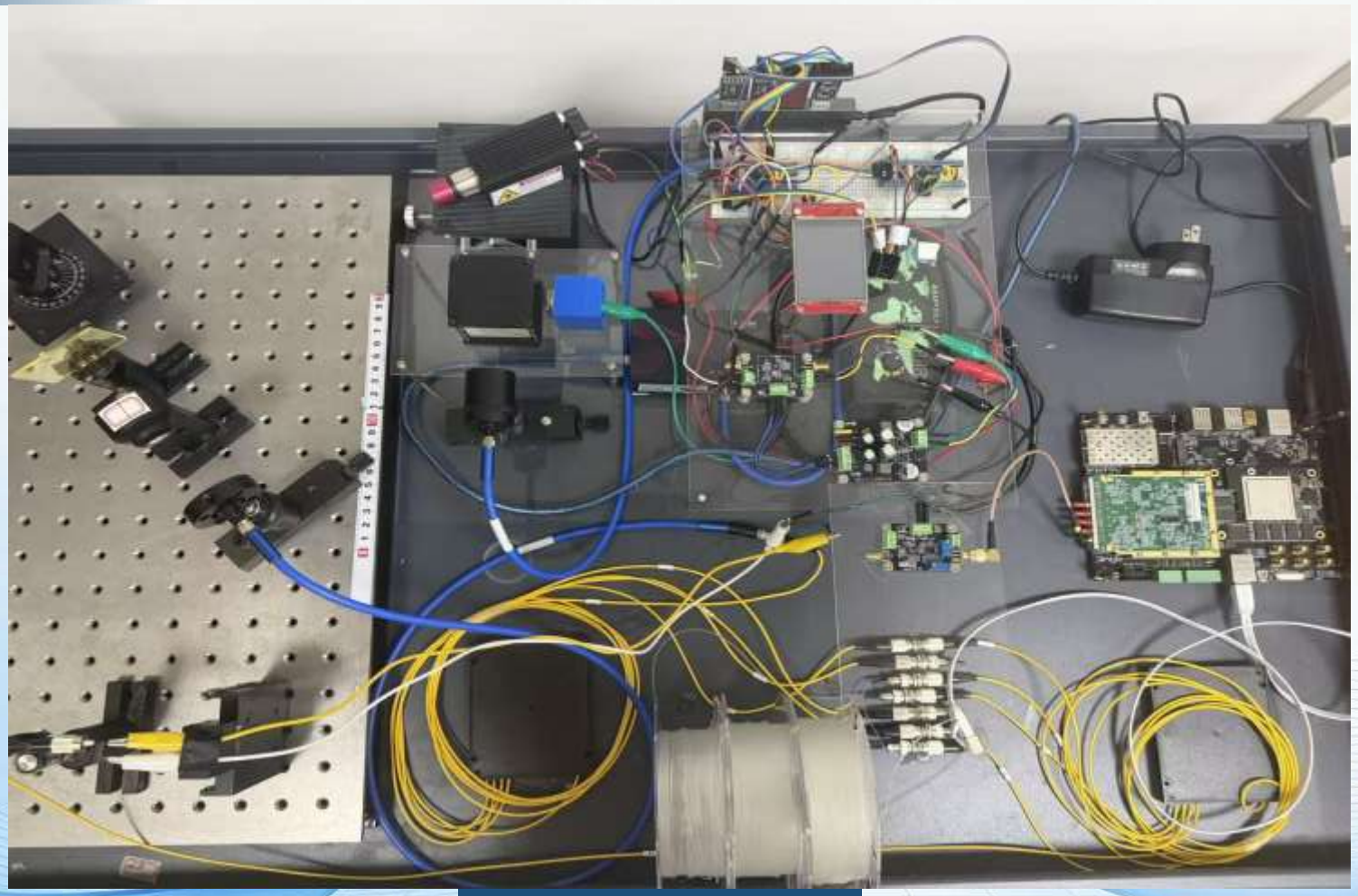


ALINX Xilinx Zynq FPGA开发板



Xilinx FPGA 核心板

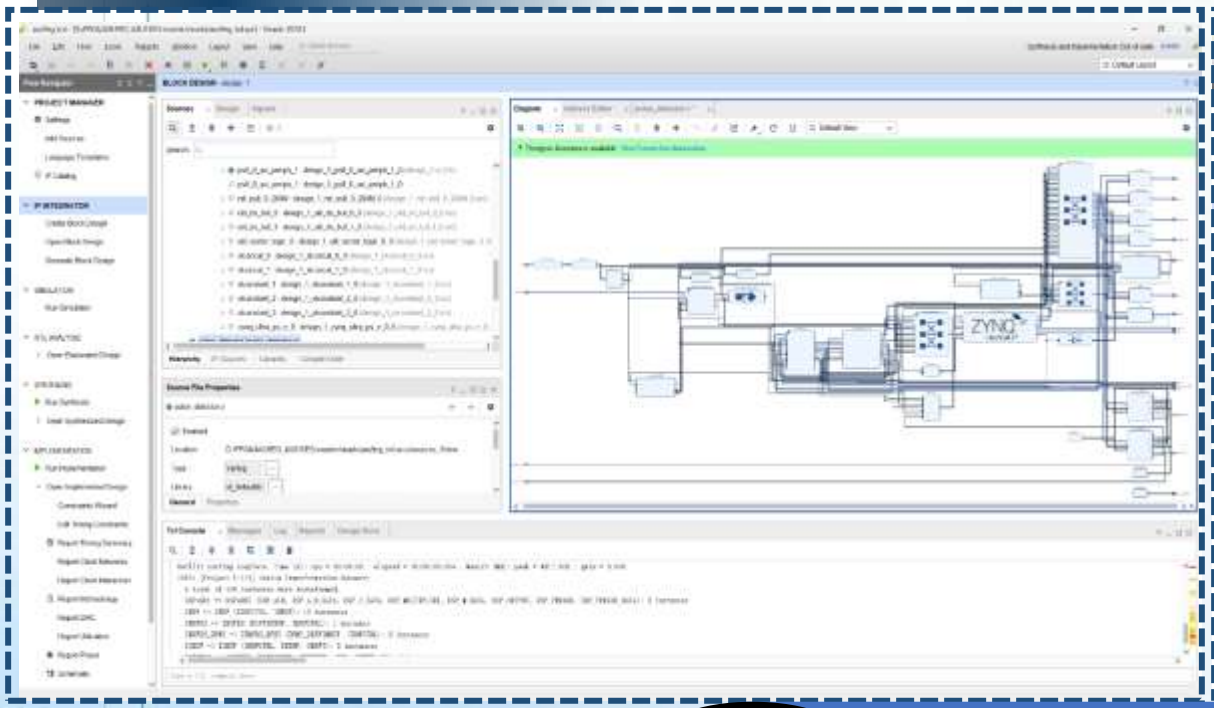
硬件系统

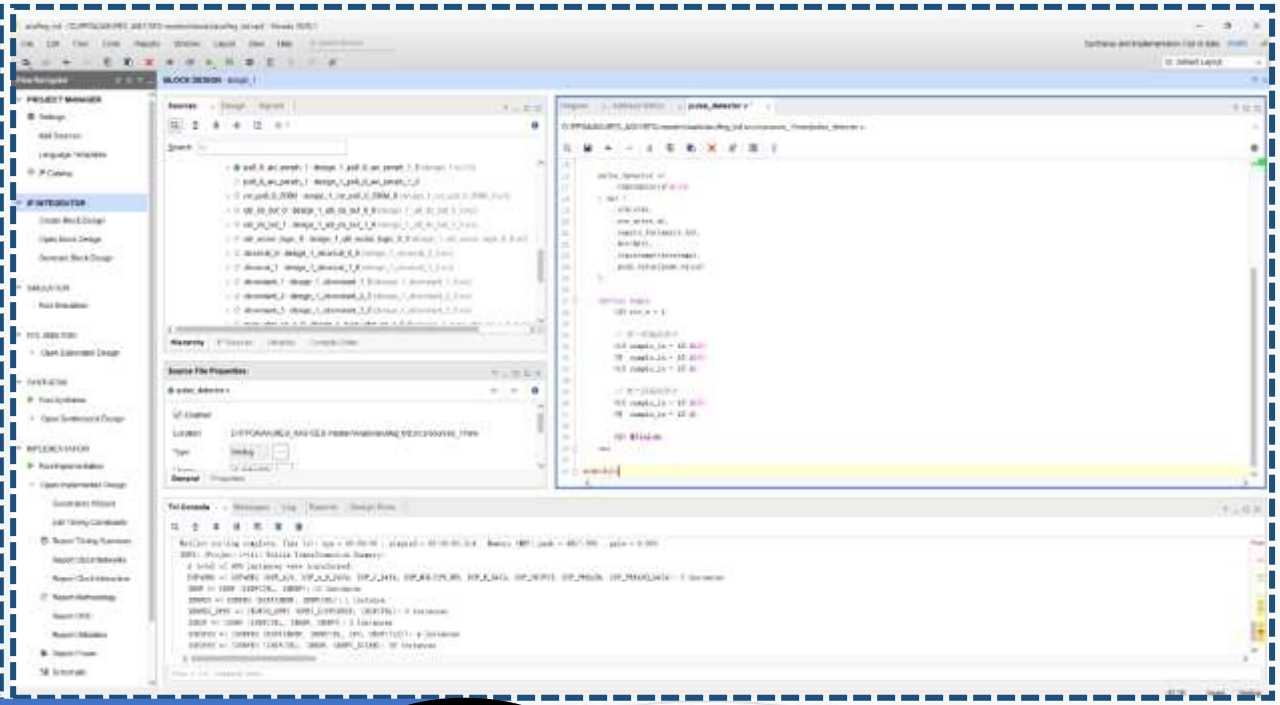


装置总体

系统实现

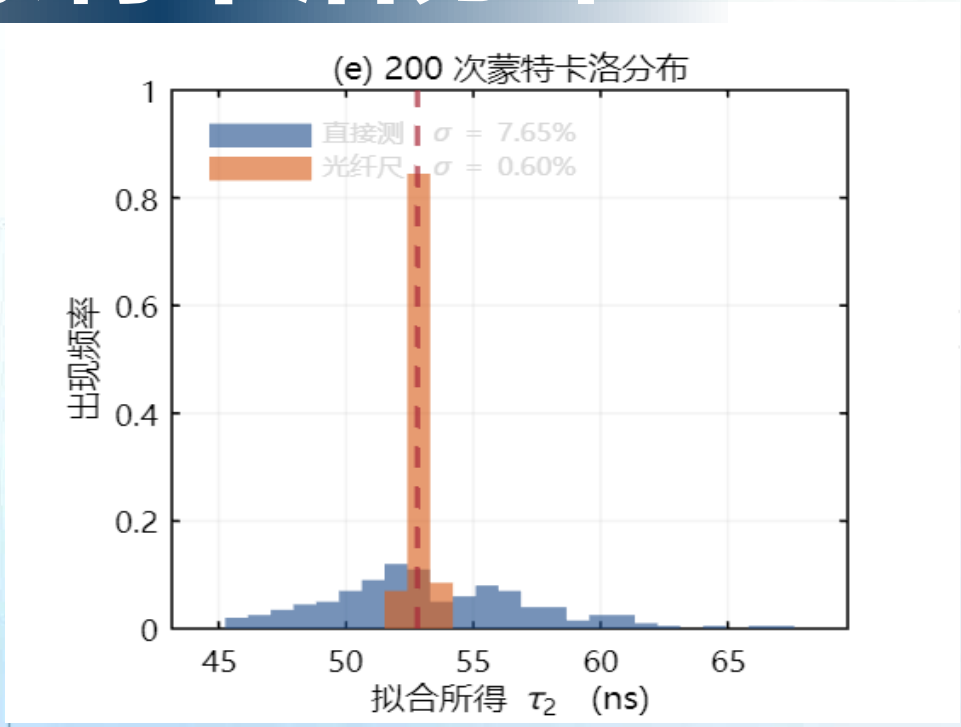
程序编辑

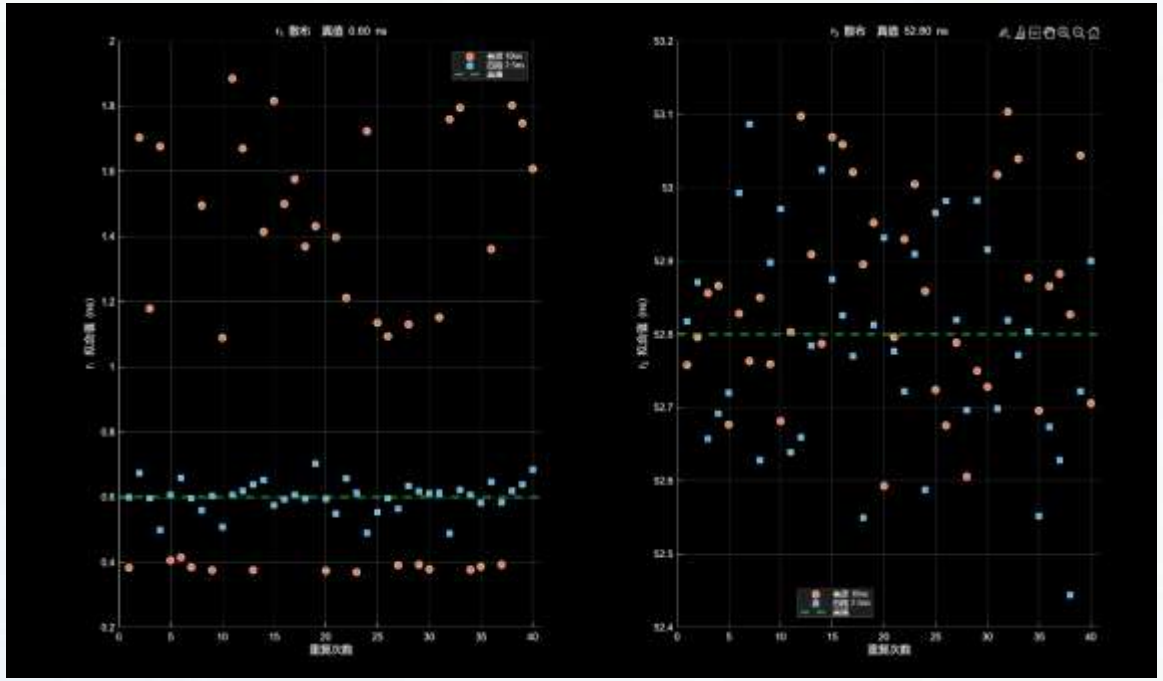




完成基于 XCZU9EG 的 FPGA 主控基础工程构建与编译；实现完成，所有用户时序约束满足，并成功生成可下载 bitstream。

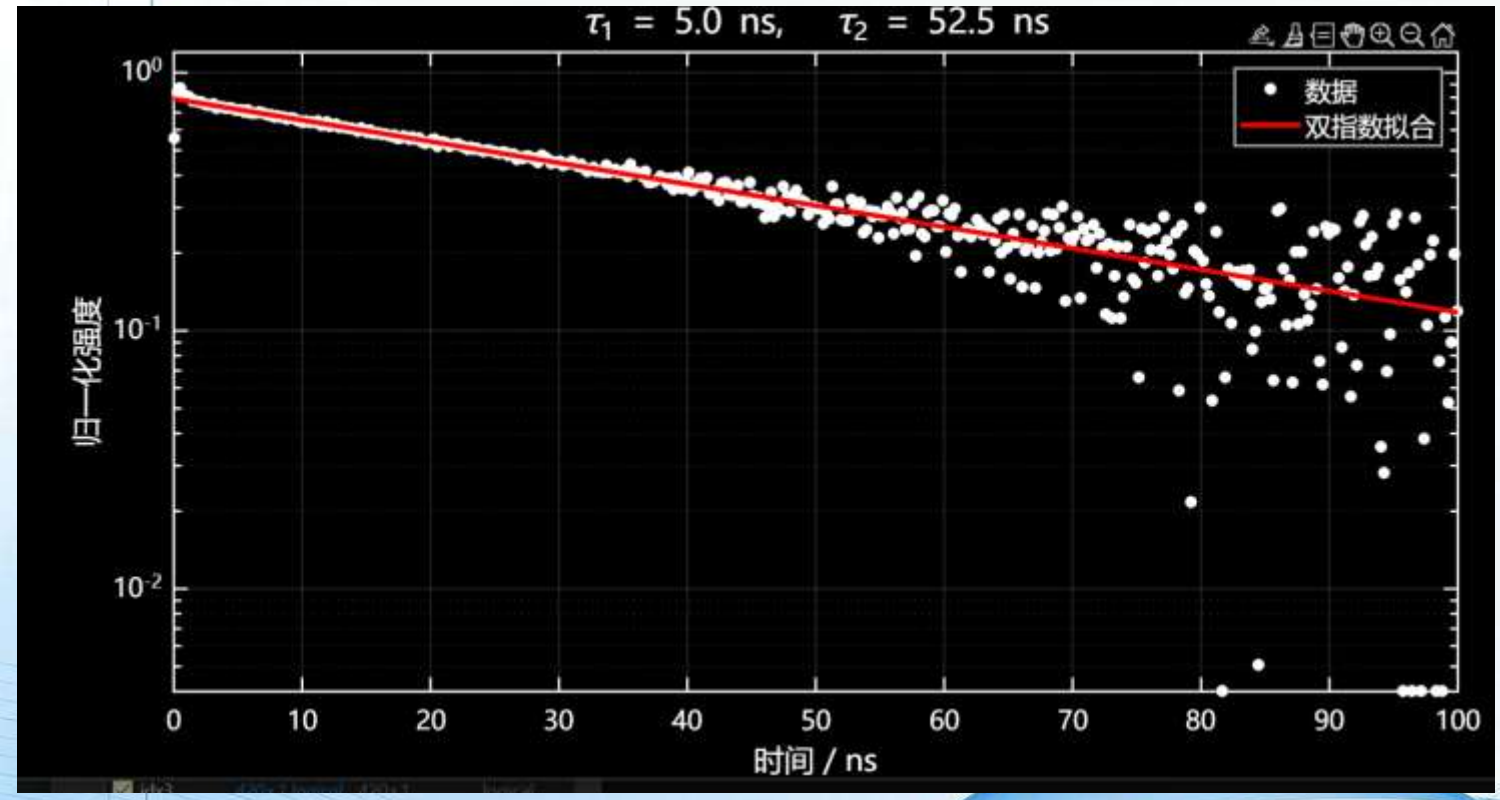
蒙特卡洛分布





为验证光纤尺方案的稳定性，我们进行了 200 次蒙特卡洛仿真。左侧直方图对比了直接测量与光纤尺方案下慢成分寿命 τ_2 的拟合分布：直接测量结果散布很宽，标准差达 7.65%；而引入光纤时间编码后，拟合结果高度集中在真值附近，标准差仅为 0.60%，精度提升超过十倍。右侧散点图进一步展示了快成分 τ_1 与慢成分 τ_2 在重复测量中的稳定性 —— 单路测量下 τ_1 估计值散布范围极大，与真值严重偏离；四路光纤尺方案下，两个时间常数都紧密收敛于真值，证明了光学时间编码对参数估计精度和重复性的显著改善。

标准拟合

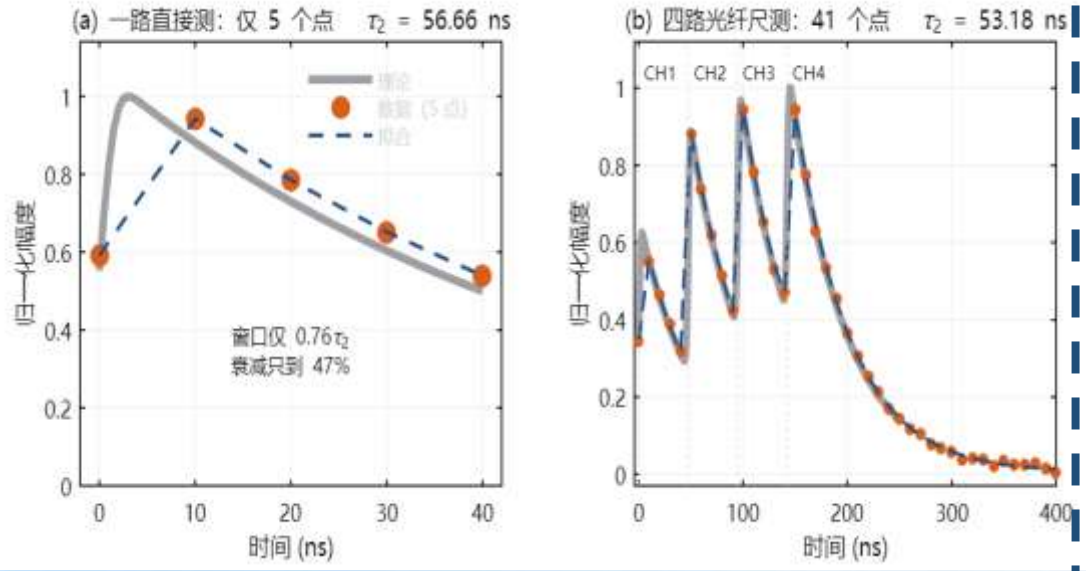


验证公式：$I_{\text{true}}(t) = 0.16e^{-t/0.6} + 0.84e^{-t/52.8}$

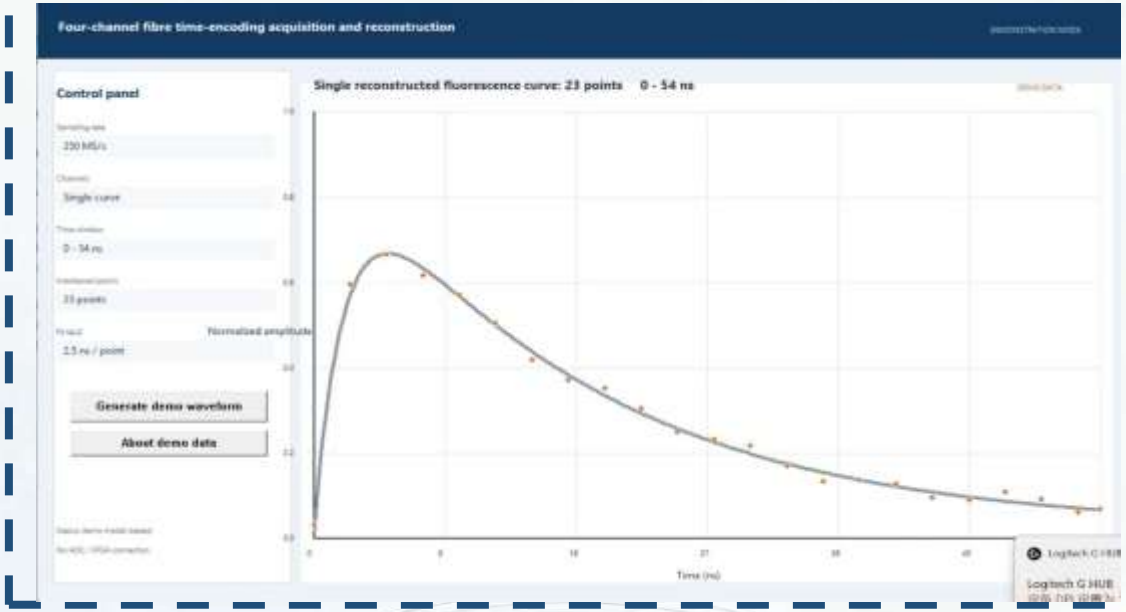
本图给出拟合模型的理论基准验证。
图中曲线为荧光衰减的解析真值：
$I_{true}(t) = 0.16e^{-t/0.6} + 0.84e^{-t/52.5}$
拟合结果：由标准数据反演所得 τ_2 = 52.5 ns，与设定真值 52.5 ns 完全一致，反演偏差为零。
本图的作用是确立基准：在无系统误差、无噪声污染的理想条件下，本项目的拟合模型与反演算法能够从标准数据中精确复现设定寿命。这为后续引入实测数据、逐项叠加误差源提供了判据——任何偏离本基准的结果，都可归因于相应的误差机制，而非算法本身的缺陷。

归一化比较

实验数据

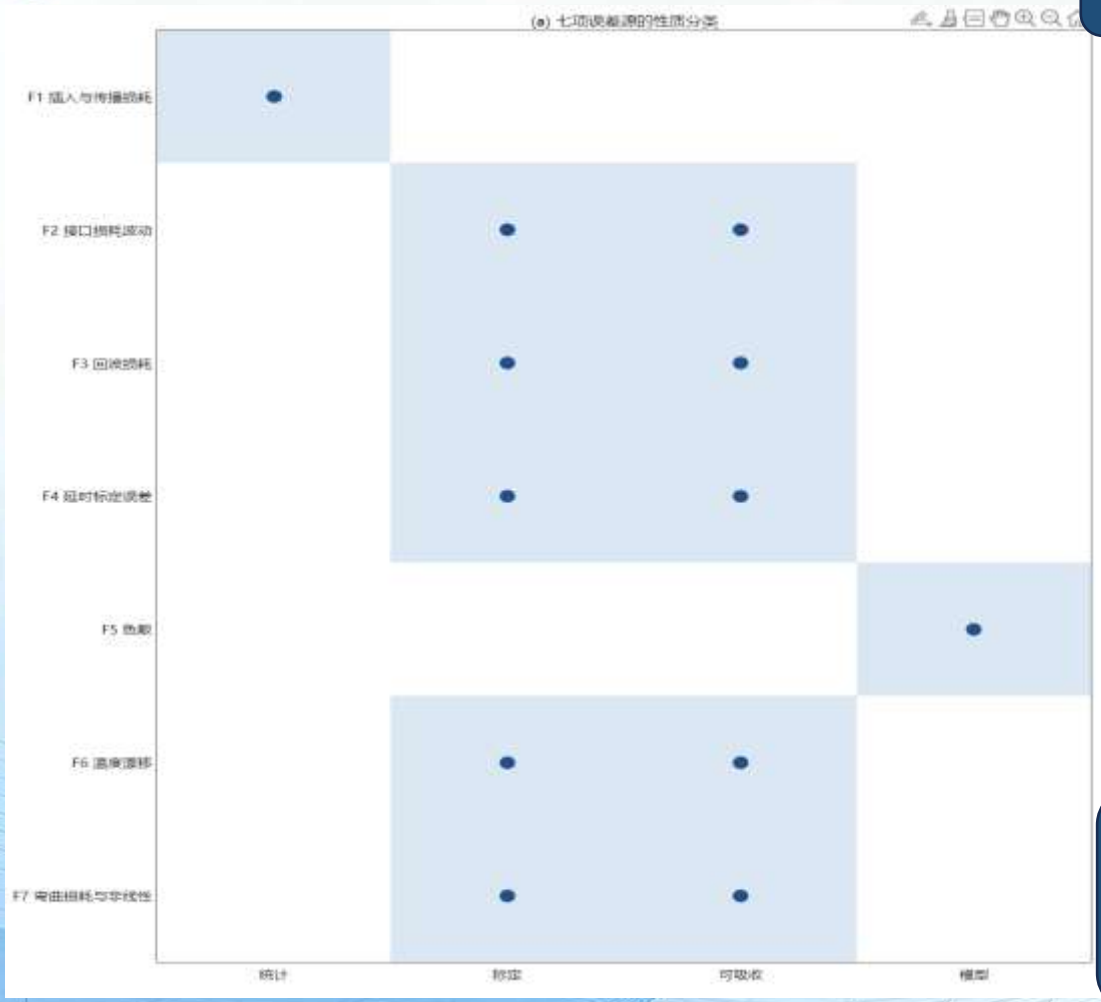


数据拟合



验证公式：$I_{\text{true}}(t) = 0.16e^{-t/0.6} + 0.84e^{-t/52.5}$

光纤尺的误差分析

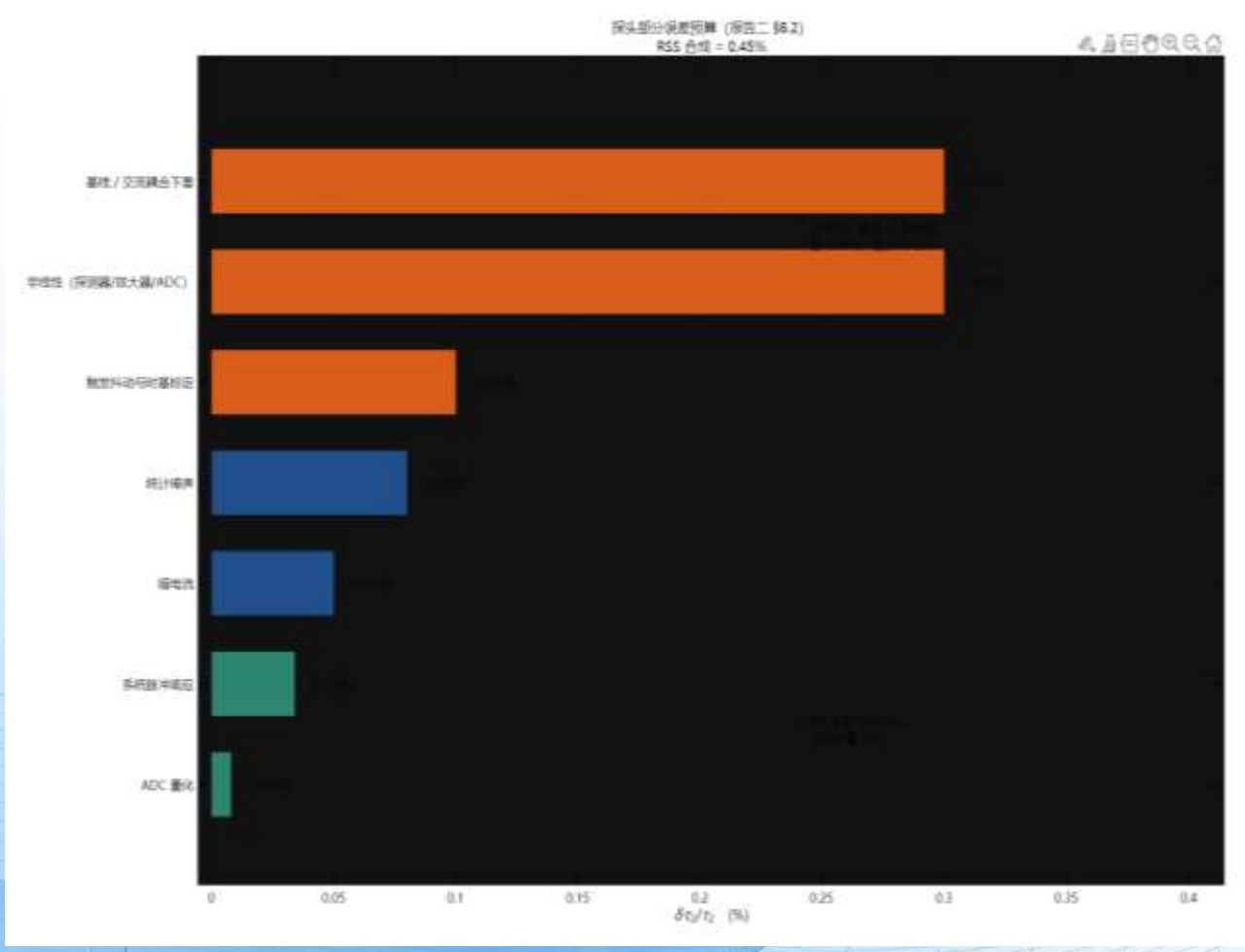


以下三项在正确的模型下严格为零，但若采用简化模型会产生显著偏差：

机制	错误模型	错误模型下的偏差	正确模型
通道权重失配	强制各峰等幅	失配 14% → 7.2%	保留自由 $A_k \to 0$
延时标定误差	固定 t_k 为标称值	0.01 ns → 0.019%	保留自由 $t_k \to 0$
温度漂移	固定 A_k、t_k	可达 10^{-3} 量级	二者自由 → 0

因此拟合模型必须保留每个峰的自由幅度与自由位置 。这一条同时决定了：通道插损失配、延时标定残差、温漂三项都无需在误差预算中列项，只需保证模型正确。

探头的误差预算



合成计算：$\delta\tau_2/\tau_2 =$

$$\left\{\sqrt{\{0.30^2 + 0.30^2 + 0.10^2 + 0.08^2 + 0.05^2 + 0.034^2 + 0.008^2\}} = 0.45\%\right\}$$

1. **系统脉冲响应贡献 0.034%，仅占总量的 1/13。 探头响应本身贡献 0.0002%。响应卷积不构成本系统的精度瓶颈。**
2. **主导项为基线与线性度，各 0.30%，均在数据处理层面消除，与硬件无关。 这是本系统精度的真正决定因素。**

四路光纤游标卡尺实验数据记录表

序号	时间(ns)	第1组	第2组	第3组	第4组	理论值
1	0	0.3442	0.3608	0.3431	0.3562	0.3510
2	10	0.5678	0.5504	0.5634	0.5518	0.5593
3	20	0.4561	0.4732	0.4532	0.4673	0.4627
4	30	0.3937	0.3721	0.3892	0.3748	0.3829
5	40	0.3102	0.3244	0.3128	0.3218	0.3168
6	50	0.8893	0.8735	0.8931	0.8796	0.8844
7	60	0.7338	0.7512	0.7361	0.7548	0.7442
8	70	0.6258	0.6085	0.6249	0.6058	0.6159
9	80	0.5052	0.5198	0.5038	0.5156	0.5096
10	90	0.4301	0.4122	0.4258	0.4098	0.4217
11	100	0.9452	0.9557	0.9421	0.9562	0.9500
12	110	0.7958	0.7772	0.7942	0.7765	0.7858
13	120	0.6428	0.6572	0.6452	0.6578	0.6502
14	130	0.5438	0.5322	0.5462	0.5308	0.5381
15	140	0.4362	0.4548	0.4348	0.4522	0.4453
16	150	0.9408	0.9292	0.9398	0.9278	0.9349
17	160	0.7768	0.7624	0.7782	0.7612	0.7735
18	170	0.6452	0.6322	0.6432	0.6302	0.6400
19	180	0.5262	0.5328	0.5242	0.5348	0.5296
20	190	0.4368	0.4462	0.4482	0.4482	0.4383

实际误差计算

为验证四路光纤时间尺的重复性，在0～190 ns范围内每隔10 ns测量4组。80组数据的RMSE为0.00775，MAE为0.00737，最大相对误差为2.82%；取4次平均后，RMSE降至0.00192，平均绝对相对误差约0.21%，说明系统具有较好的测量一致性和重复性。

总结展望

成果优势

方法创新：
1.光学时间编码替代高速电子测量
2.机三测一台仪器上同步取光强 / 功率、光谱、时间波形三类信息
3.探测器协同设计
4.实验验证充分
5.将 “光在介质中变慢”、游标卡尺数学、光纤时间延迟等概念转化为可动手实验，具有教学意义

不足之处

1.目前以荧光衰减信号替代短脉冲激光验证，尚未接入真实脉冲激光源实测
2.系统工程化程度不足
未与标准高速仪器做并排对比测试
3.稳定性与误差补偿待完善温度、振动对光纤延迟漂移的影响未做系统性测试

未来展望

1.可拓展至瞬态发光、光电材料瞬态响应、微弱脉冲光检测等场景
2.可接入真实脉冲激光（不同脉宽、重复频率）开展实测
3.可拓展至瞬态发光、光电材料瞬态响应、微弱脉冲光检测等场景
4.具有教学意义，低成本仪器利于教学

总结展望

A 负责光学系统与四段光纤编码模块的搭建调试

B 负责 MATLAB 建模、反演算法实现与实验数据分析

C 负责数据采集系统搭建与实验操作

D 负责探测电路与信号调理硬件的设计焊接

E 负责 PPT 制作、文档撰写与答辩整体统筹。

- [1] BRUSCHINI C, GUNTHNER F, DUPERRON A, et al. Single-photon avalanche diode imagers in biophotonics: review and outlook[J]. Light: Science & Applications, 2019, 8: 87.
- [2] LIU X, SHI Y, CHEN Y, et al. Advantages and limitations of fluorescence lifetime measurement using SPAD array detector[J]. Sensors, 2022, 22(10): 3822.
- [3] ZHANG Y, LI W, WANG H, et al. Recurrent neural network coupled to SPAD TCSPC for real-time fluorescence lifetime imaging[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 2426.
- [4] AHN S, PARK J, KIM D, et al. A 12.5-Gb/s 0.13-μm CMOS inductorless transimpedance amplifier with 1 pF input capacitance[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(9): 3105-3119.
- [5] IVANOV A, PETROV S, SOKOLOV M. A 10 Gb/s broadband transimpedance amplifier in 0.18 μm CMOS[J]. IEEE EExPolytech, 2023: 1-4.
- [6] CHEN L, ZHANG Q, LIU J, et al. Fiber-delay-based fluorescence-Raman multifunctional combined detection system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-9.
- [7] KHILO A, SPECTOR S, SHULMAN M, et al. Photonic-assisted time-interleaved ADC based on optical delay line[J]. Journal of Optics, 2016, 18(1): 015704.
- [8] ZHOU K, WANG X, LI Y, et al. Photonic sampling of microwave signals with adjustable sampling frequencies using an optical frequency comb[J]. Optics Express, 2024, 32(18): 31542-31556.
- [9] KUFCSAK A, ERDBRUEGGER T, MEGIA-FERNANDEZ A, et al. Multispectral depth-resolved fluorescence lifetime spectroscopy using SPAD arrays and fiber probes[J]. Sensors, 2019, 19(12): 2678.
- [10] ZHU Y, CHEN H, LI M, et al. Multiplexed imaging in live cells using pulsed interleaved excitation spectral fluorescence lifetime imaging microscopy[J]. Optics Express, 2023, 31(22): 36051-36065.

恳请评委
老师指正