



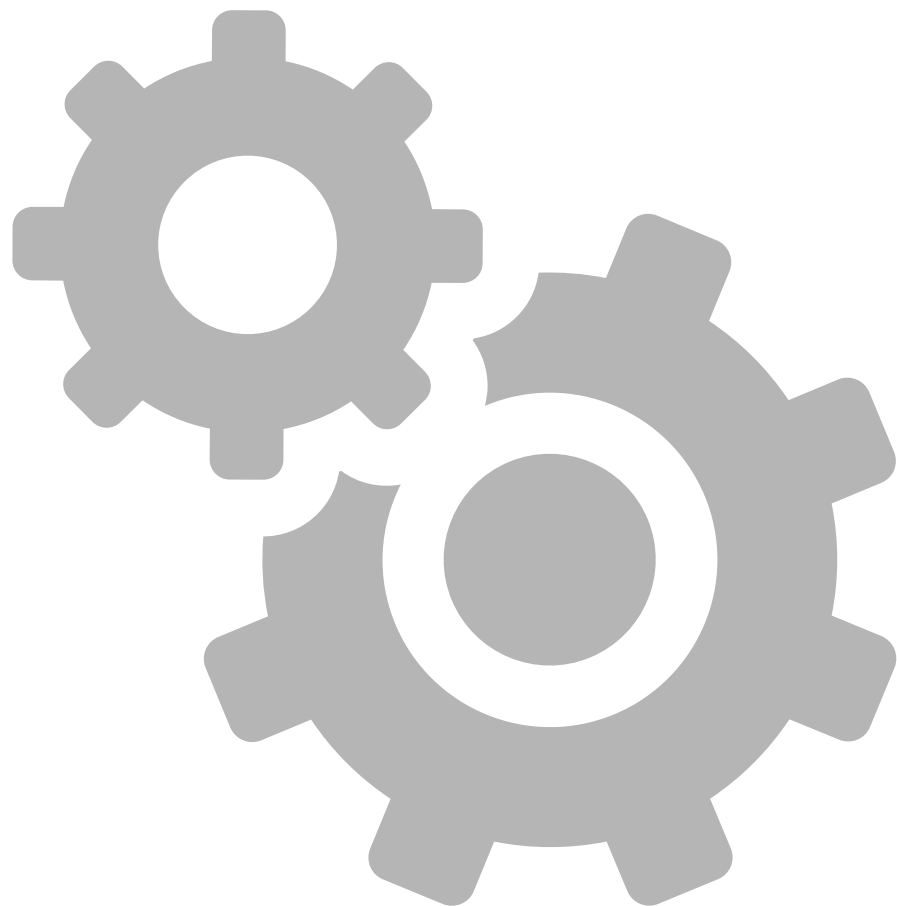
低温暗物质实验中高带宽多路复用 模拟光传输技术研究

唐剑男， 邬维浩

上海交通大学

2026年3月29日





1

背景和现状

2

模拟光传输研究

3

波分复用技术研究

4

联调测试

5

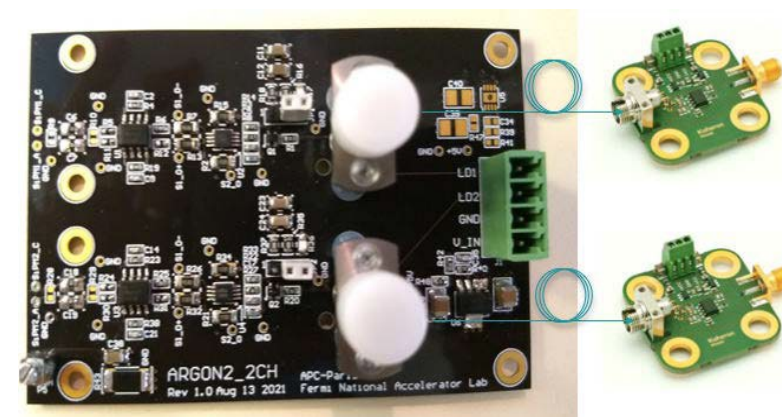
总结和展望

研究背景



- 液氙实验如：PandaX、XENONnT 和 LZ 实验
 - 低温下同轴电缆传输模拟信号至室温
- 液氙实验：DUNE 和 DarkSide-20k
 - 研究了光传输低温下模拟信号至室温
 - 优势：衰减小，低温至常温下馈通方便
- 仍存在的问题
 - 带宽相对较低约 30MHz，对于上升沿较快的 PMT 或 SiPM 信号，带宽不足

DOI: [10.1109/WOLTE55422.2022.9882876](https://doi.org/10.1109/WOLTE55422.2022.9882876)



DUNE 低温模拟光传输发射和接收模块

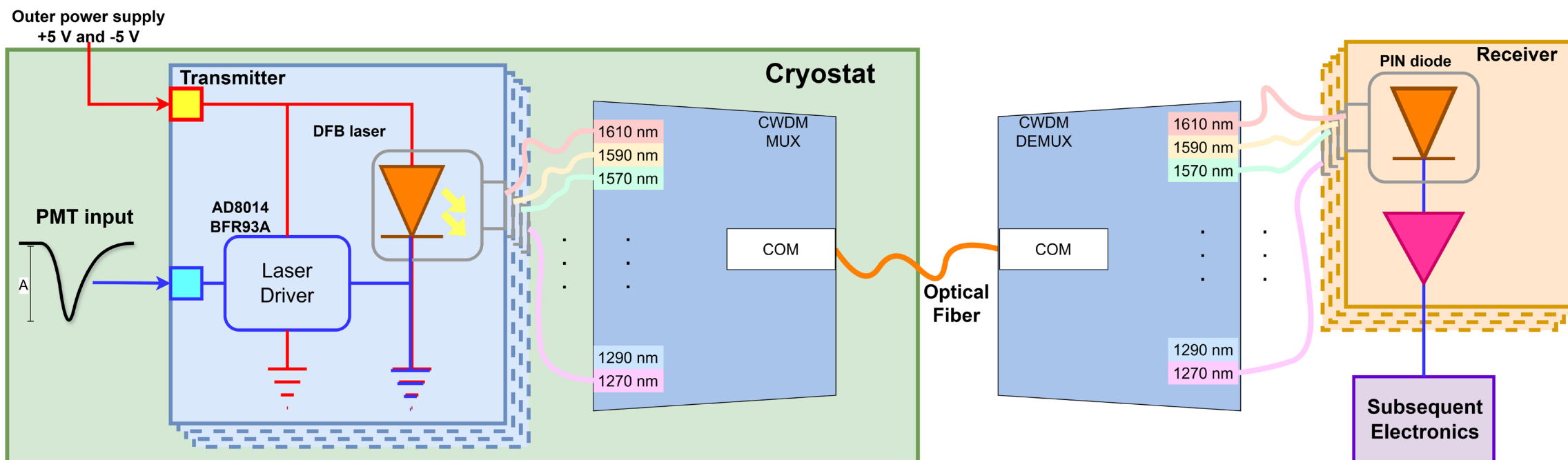


DarkSide-20k 光传输发射和接收模块

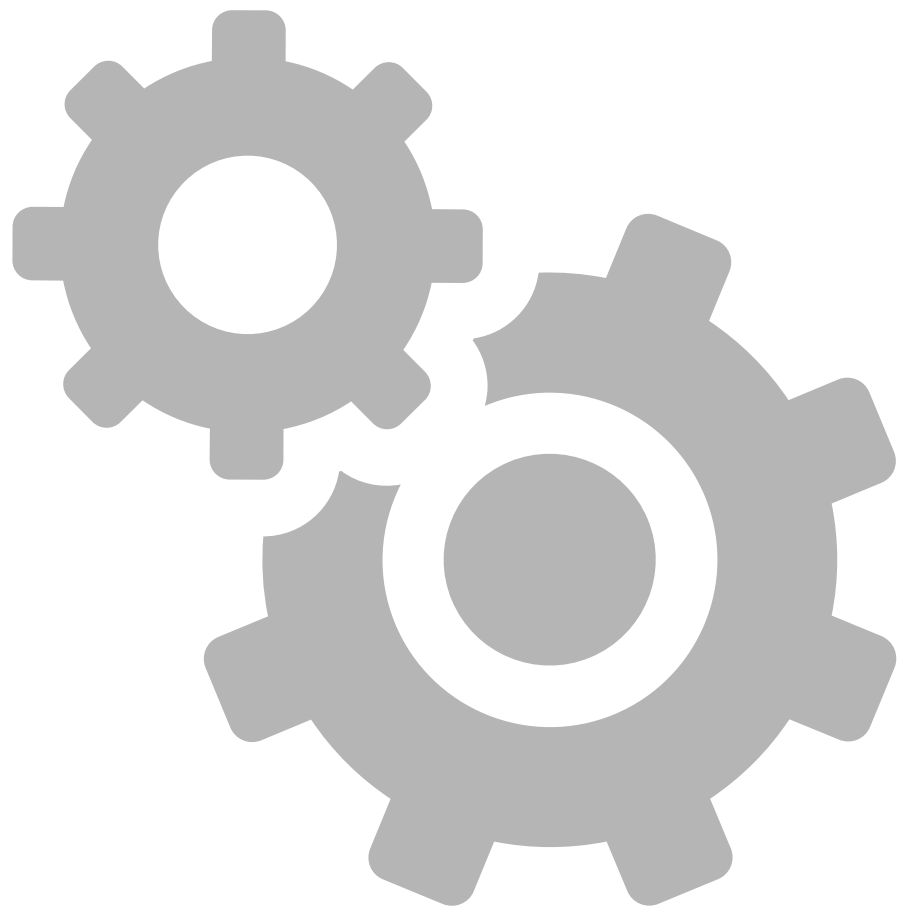
本研究的信号传输方案



- 研究一种稳定工作于低温下的高带宽、大动态范围的模拟光传输方案。
- 研究低温下的光纤波分复用技术，减少光纤传输通道。



高带宽、低串扰、多路复用的稳定低温模拟光传输



1

背景和现状

2

模拟光传输研究

3

波分复用技术研究

4

联调测试

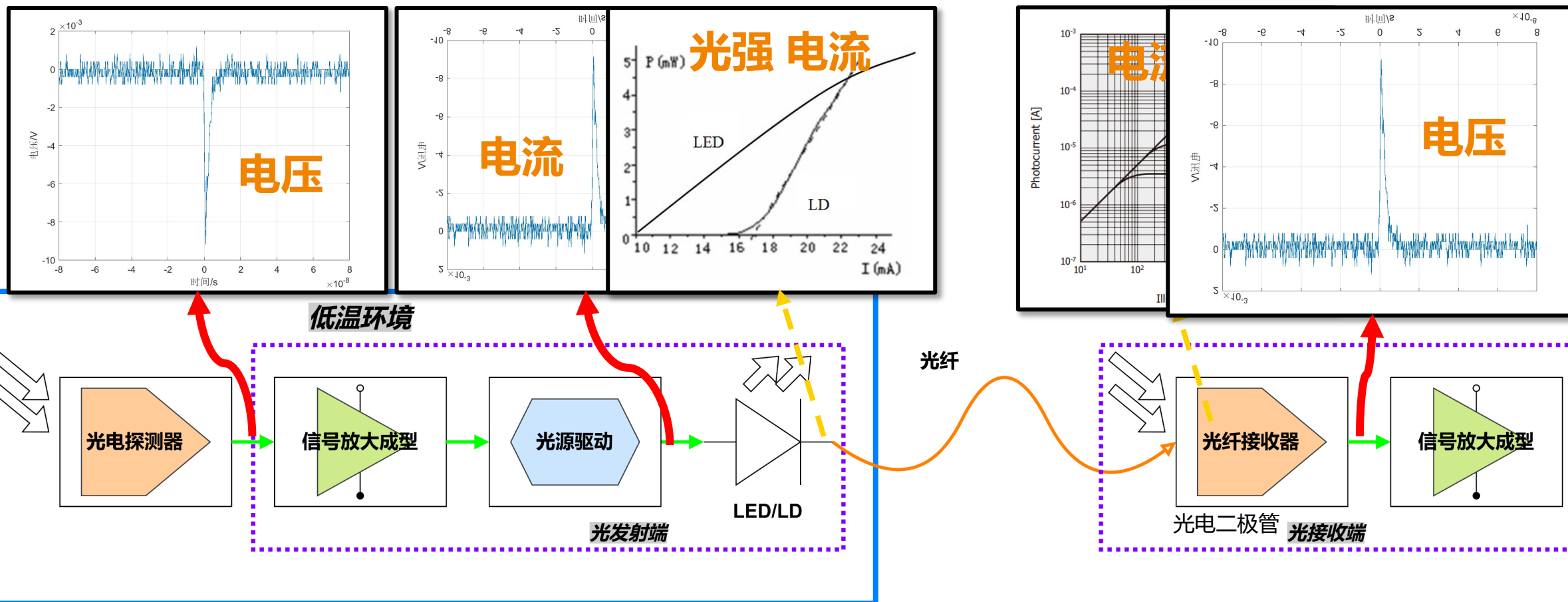
5

总结和展望

模拟信号光传输方案



- 低温下，电压模拟信号经放大，驱动发射光脉冲，光纤传输至室温下。电转光。
- 室温下，光电二极管接收光脉冲，还原为电压模拟信号，完成传输。光转电。

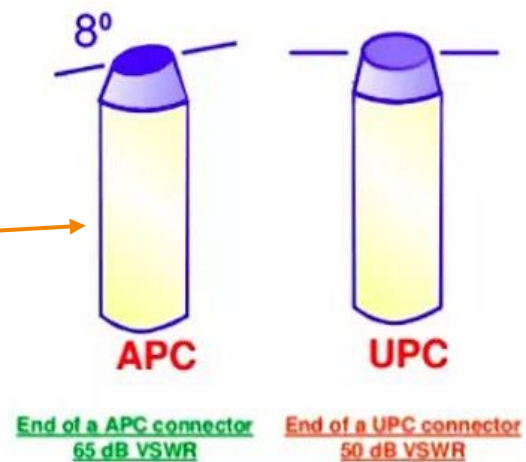
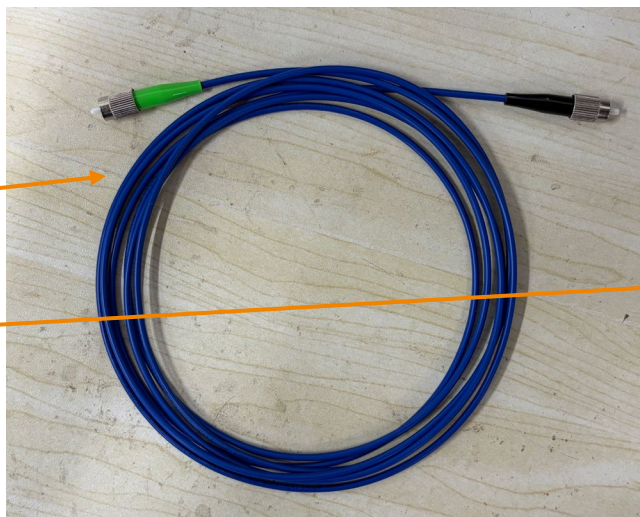


光传输方案



• 传输用光纤:

- 单模光纤色散和衰减更小, 保持信号波形
- FC 铠装光纤跳线, 安装稳定
- APC 端面: 端面被研磨成 8° 夹角, 回波损耗很小 (避免光反射引起震荡)



• 光发射器件:

- 激光二极管 LD, 波长范围 1270-1610nm, 损耗更小, FC 跳线座子。
- 型号: LSCDLDX-4-S-0-2-fJKFC

• 光接受器件:

- 光电二极管 PD,
- 型号: LSIPD-A75-B-2JKFC

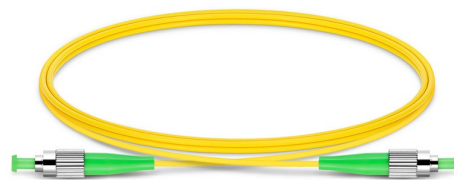
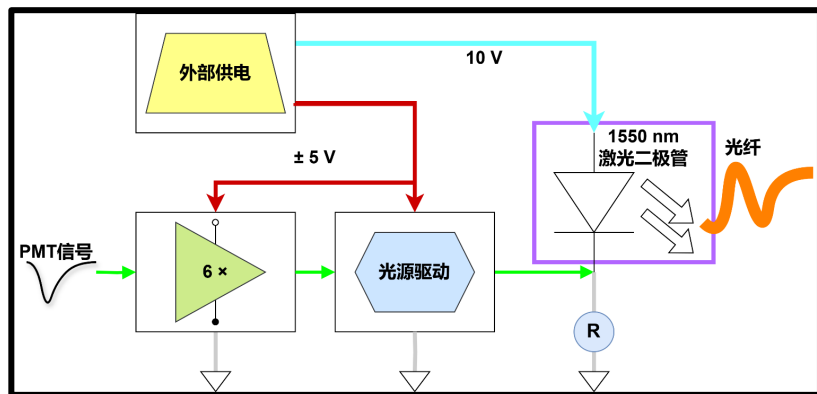
高速
高灵敏度
大动态范围



光发射和光接收模块设计

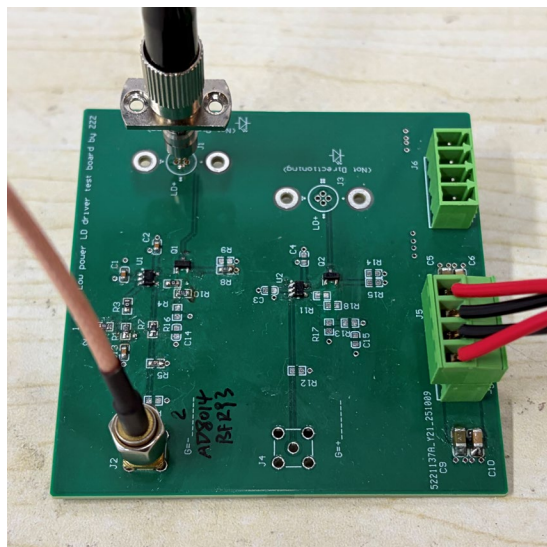
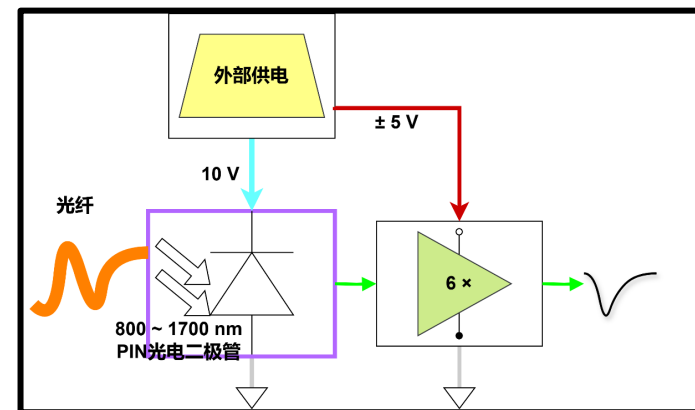


发射模块

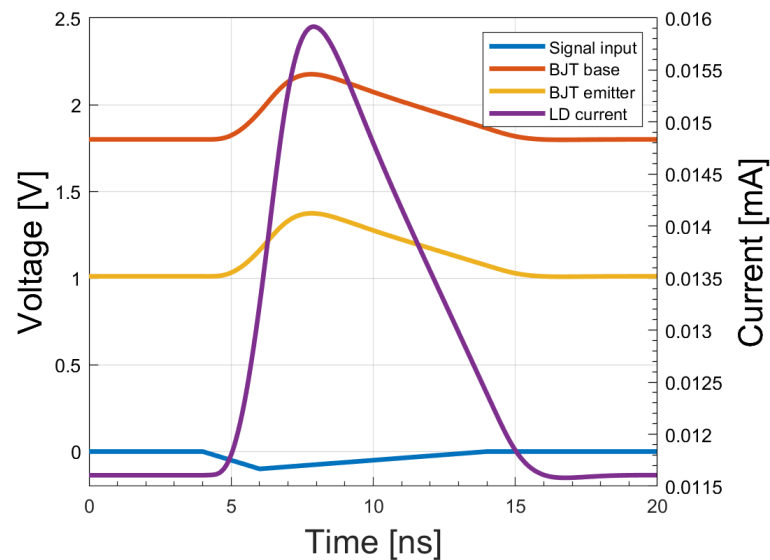


FC APC 光纤

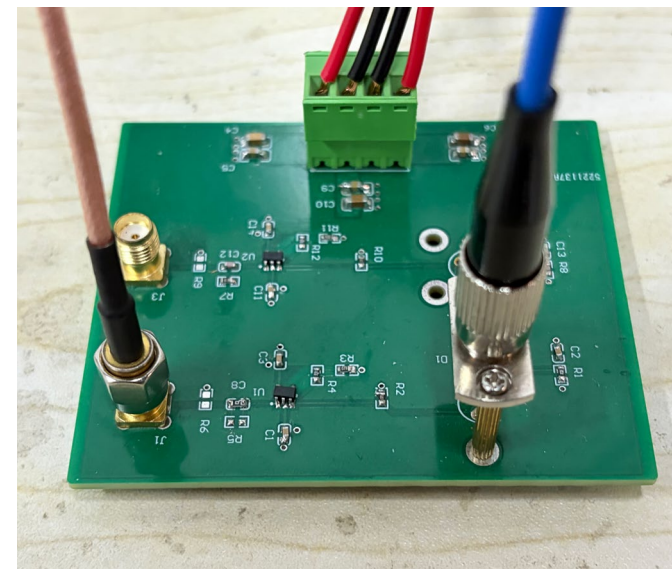
接收模块



单通道模拟光发射模块

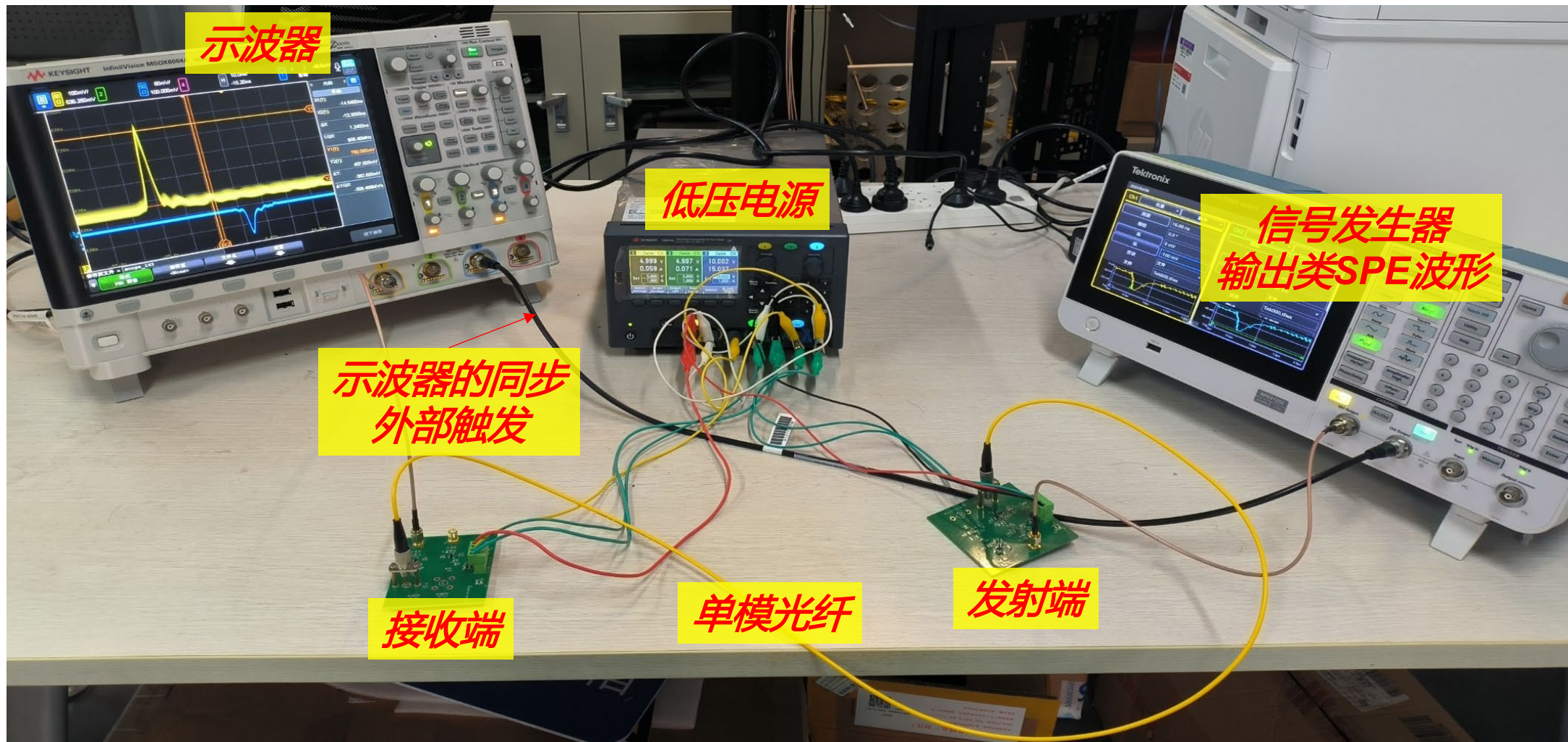


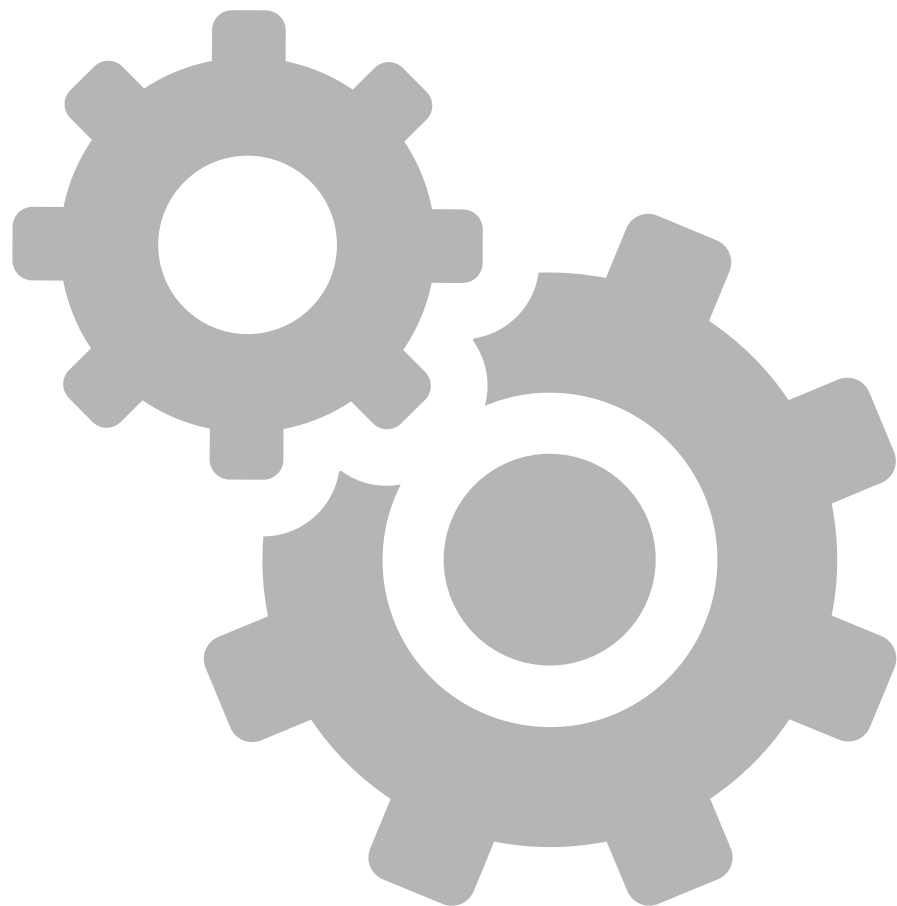
光发射模块电路仿真结果



单通道模拟光接收模块

光传输方案常温测试





1

背景和现状

2

模拟光传输研究

3

波分复用技术研究

4

联调测试

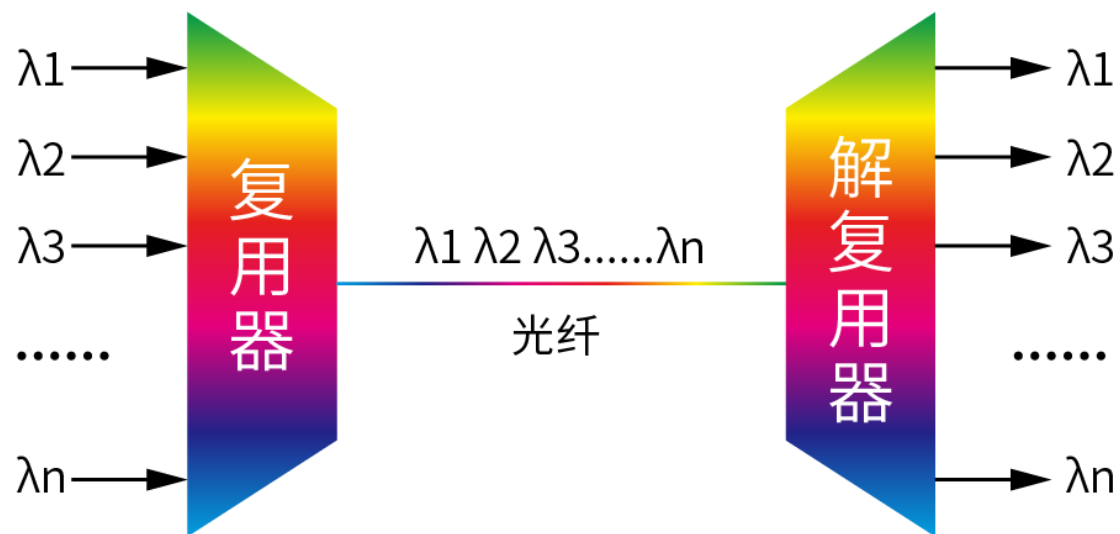
5

总结和展望

波分复用技术



- 1270-1610nm 波段，使用**稀疏波分复用**CWDM，波长间隔20nm
- 要求：**低插入损耗，高隔离度，宽通道带宽**

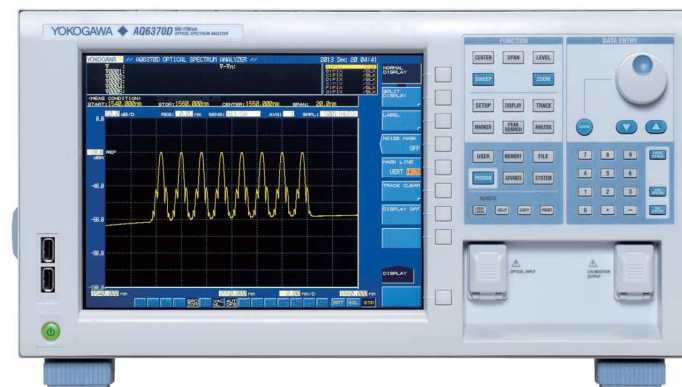


带 FC/APC 光纤跳线的波分器

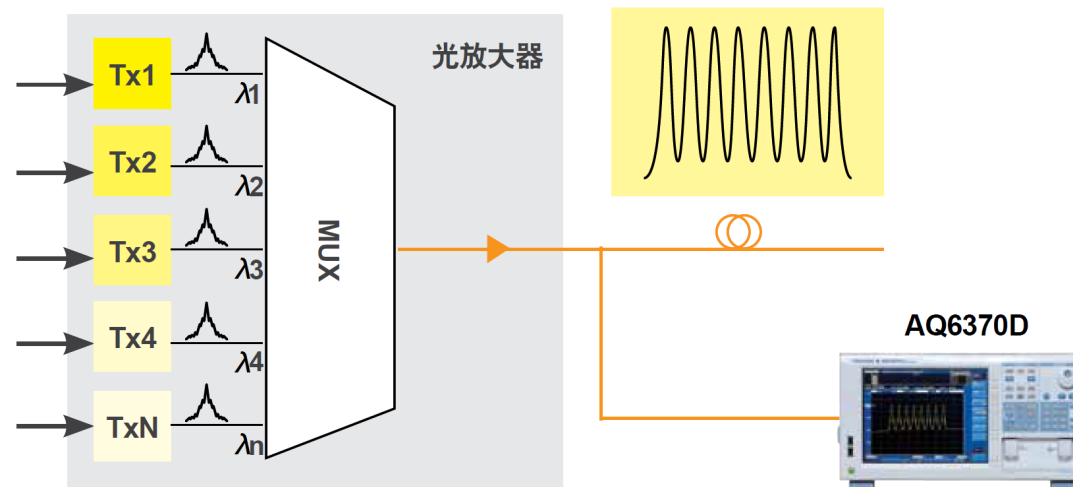
低温下波分复用与激光器匹配

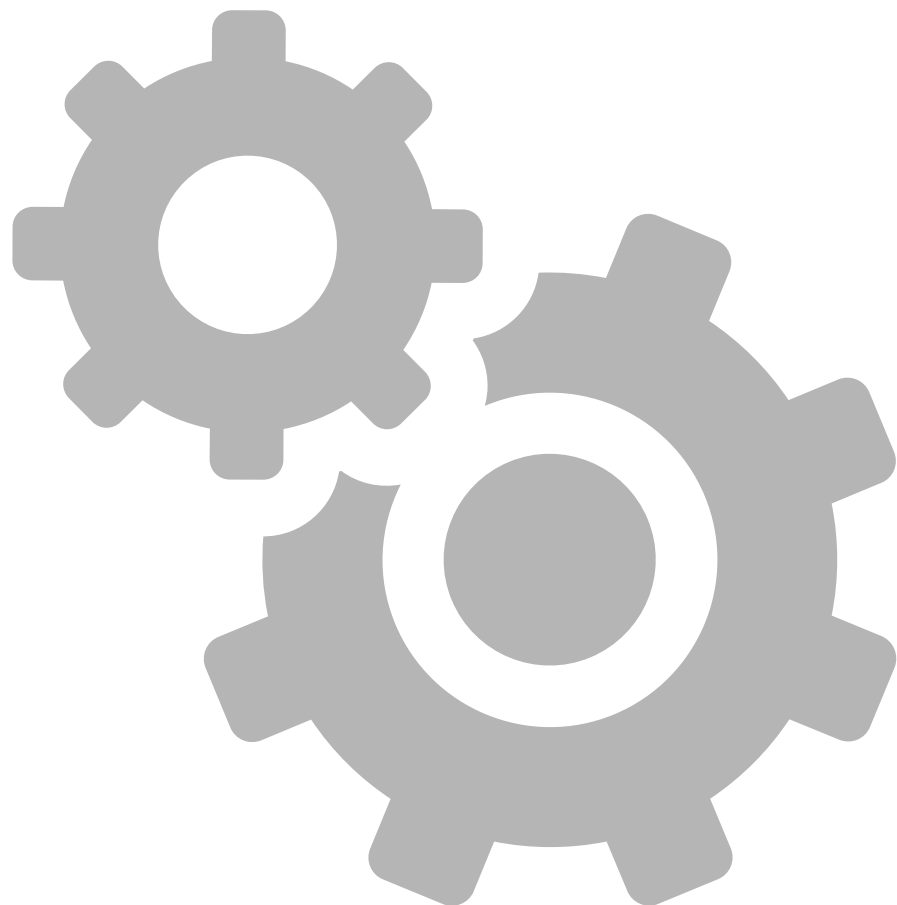


- 问题：低温下激光二极管发光蓝移（约 $0.2-0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ ），导致波分复用失配
- 解决方案：
 - 精确测量激光二极管发光光谱，建立发光波长—温度模型
 - 在液氦温度 -100°C 下，精准匹配激光器和波分器波长



光纤光谱仪
AQ6370D





1

背景和现状

2

模拟光传输研究

3

波分复用技术研究

4

联调测试

5

总结和展望

模拟光传输低温性能测试

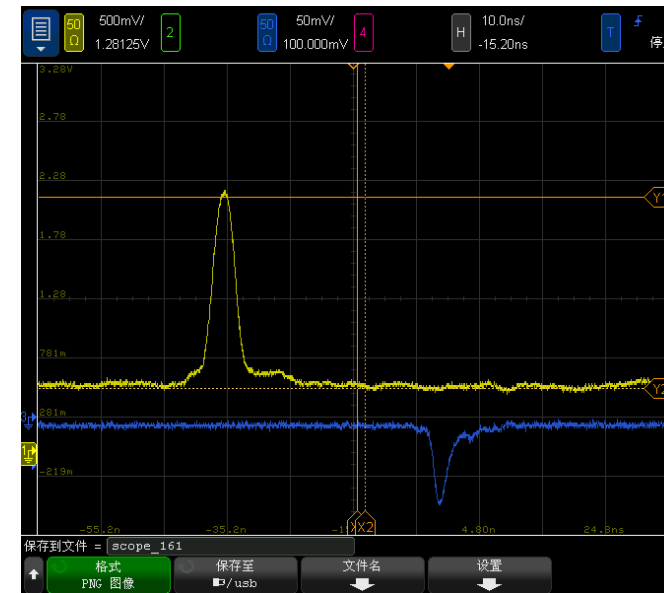


- 低温测试平台:

- 1小时可至-120°C

- 传感器信号传输测试:

- 输入信号: 信号源产生SPE波形
- 接收端波形如右图黄线



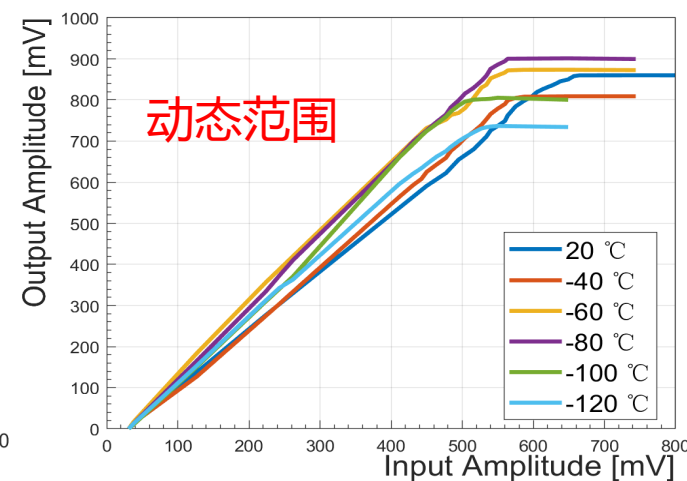
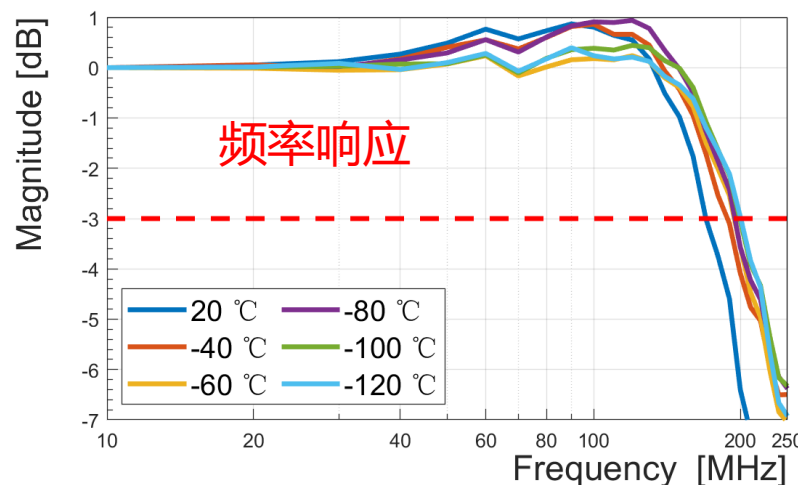
- 性能参数测试:

- 频率响应:

- -100°C下大于200MHz

- 动态范围:

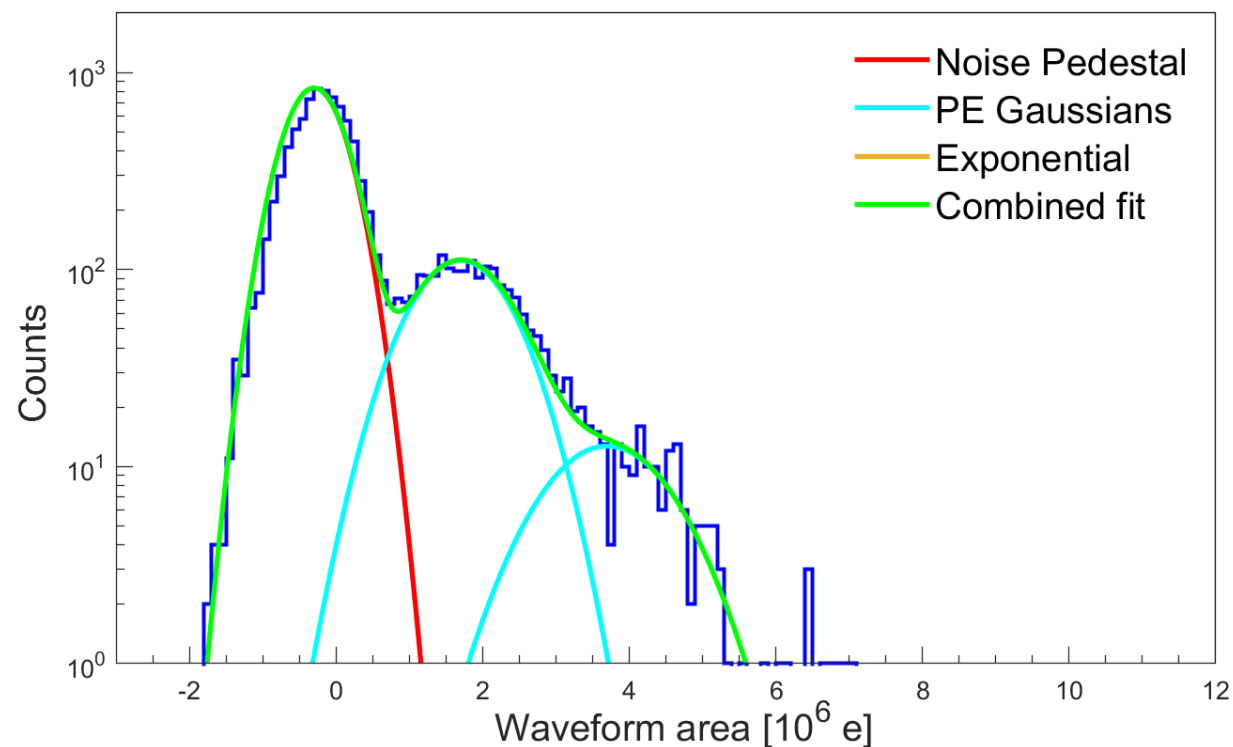
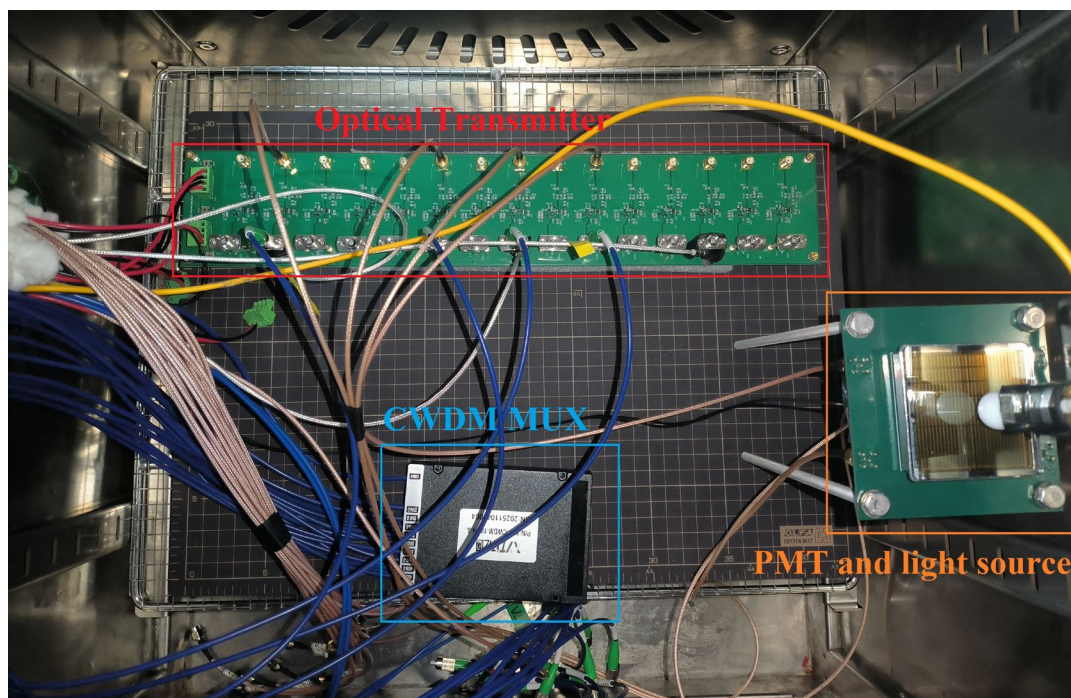
- -100摄氏度下约500mV

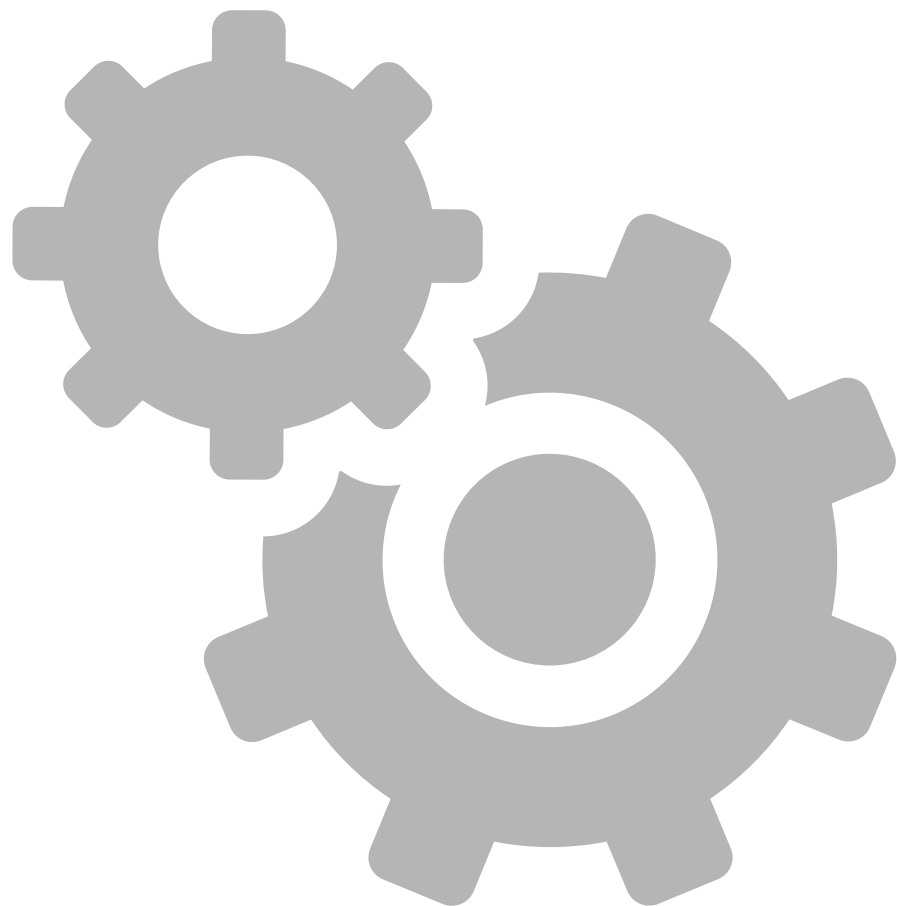


低温下与PMT和波分复用的联调测试



- 实现了 **4 通道**波分复用光传输系统, 1350、1430、1470、1510nm四种波长
- 系统在低温下读出PMT信号, 并用LED刻度了PMT增益





1

背景和现状

2

模拟光传输研究

3

波分复用技术研究

4

联调测试

5

总结和展望



- 本研究提出了一种新型的高带宽、多路复用的低温模拟信号读出方法。
- 目前已经实现-100°C下带宽 200MHz, 500mV 输入范围的模拟光传输, 并与 PMT 联调测试, 实现了 PMT SPE 信号读出。
- 目前已经实现-100°C下 4 通道波分复用技术, 未来计划通过研究低温下激光二极管波长偏移, 精确匹配波分复用器, 实现 16 通道的波分复用传输技术。



谢谢各位老师 and 同学!

