

# 用于CEPC顶点探测CMOS像素读出的 片上高速数据串行发送ASIC设计

李筱婷 (IHEP)

CEPC MOST2顶点探测器设计组

2021.11.27

- ※ CEPC顶点探测对于串行读出的需求
- ※ 太初芯片中的串行器设计
- ※ 电学测试
- ※ 总结

## ※ CEPC-MOST2

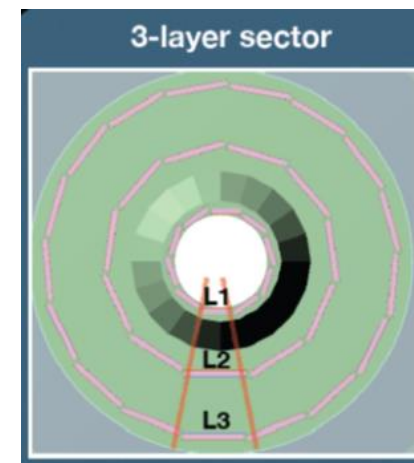
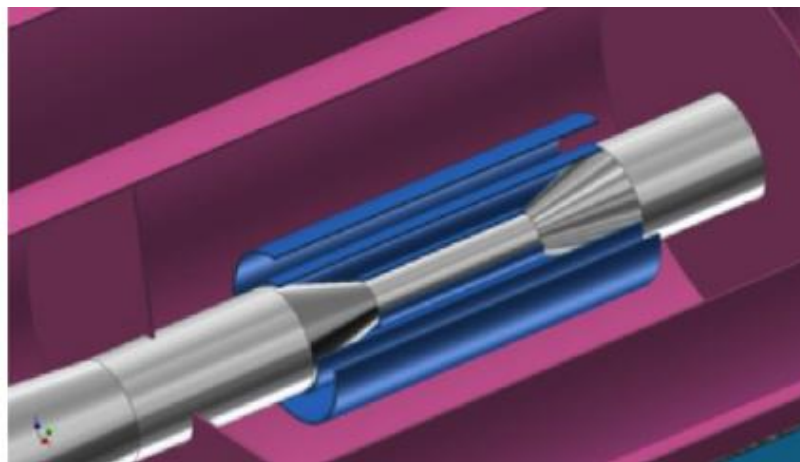
- 全尺寸、全功能探测器芯片
- 目标：3-5 $\mu\text{m}$ 空间分辨 ( $\sigma \sim 5\mu\text{m}$ : 单像素 $25 \times 25\mu\text{m}^2$ )，512 $\times$ 1024阵列规模，1Mrad TID
- 探测粒子：Higgs、W、Z

## ※ 串行读出

- 根据粒子的束团间隔、击中密度和簇团大小，以及芯片的单像素尺寸和阵列规模，可以得到一个平均 Hit rate 约120MHz/chip@W，每次击中产生32bits数据，因此原始数据率约3.84Gbps
- 触发模式：结合触发率、触发延迟、触发窗口等设置，得到数据率约110Mbps
- 需求：
  - 32bits并行数据
  - 无触发3.84Gbps
  - 触发110Mbps

## ※ 工艺

- 180nm CIS  $\rightarrow$  ~3.2 Gbps
- 130nm  $\rightarrow$  ~5 Gbps
- 55/65nm  $\rightarrow$  ~10 Gbps ?



# 太初芯片中的串行器设计



## ※ 常用串行器结构

- 线性移位链结构：结构简单，易于控制中断；速率受限，最高速率=最高时钟频率
- 二叉树型结构：易于实现高速输出，速率=2倍时钟频率；时序严谨， $2^N$ 数据输入
- 线型、树型相结合：数据输入位和输出速率优势结合

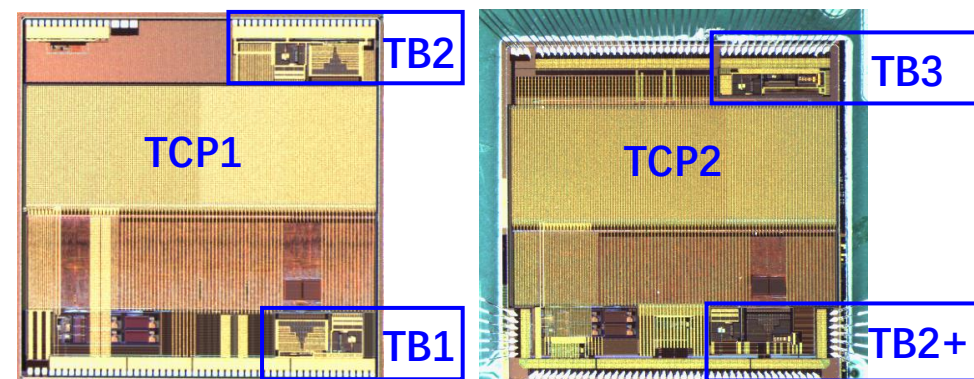
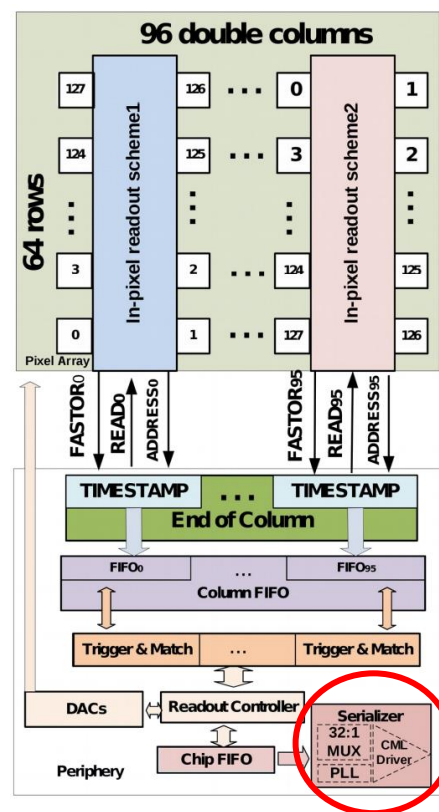
## ※ 高速串行器(SER)

### ➤ 核心电路包括

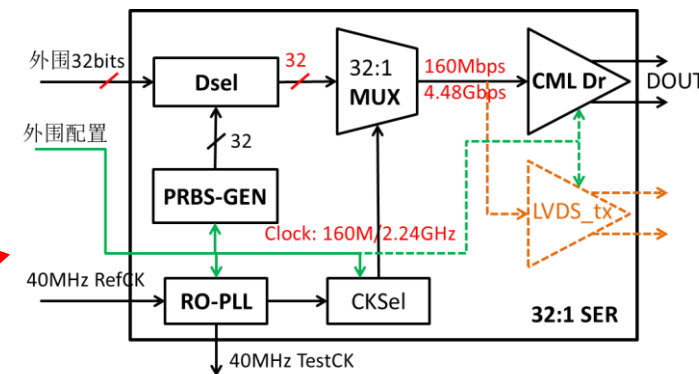
- RO-PLL：时钟产生和分配电路
- MUX：32:1
- CML driver：驱动高速数据输出
- PRBS产生器：快速自测

### ➤ TaiChuPix中的SER

- TB1和TB2中PLL的倍频比 (N) 不同
- TB2+：TB2的优化
- TB3：8b10b编码、40:1线型串行器
- 工程批：增加控制选择CMLdr和LVDS\_tx



芯片尺寸：5×5mm<sup>2</sup>；阵列：64×192



## ※ MUX

- 主体: 2:1单元
- 8mA @320Mbps; 44.2mA @4.48Gbps

## ※ RO-PLL

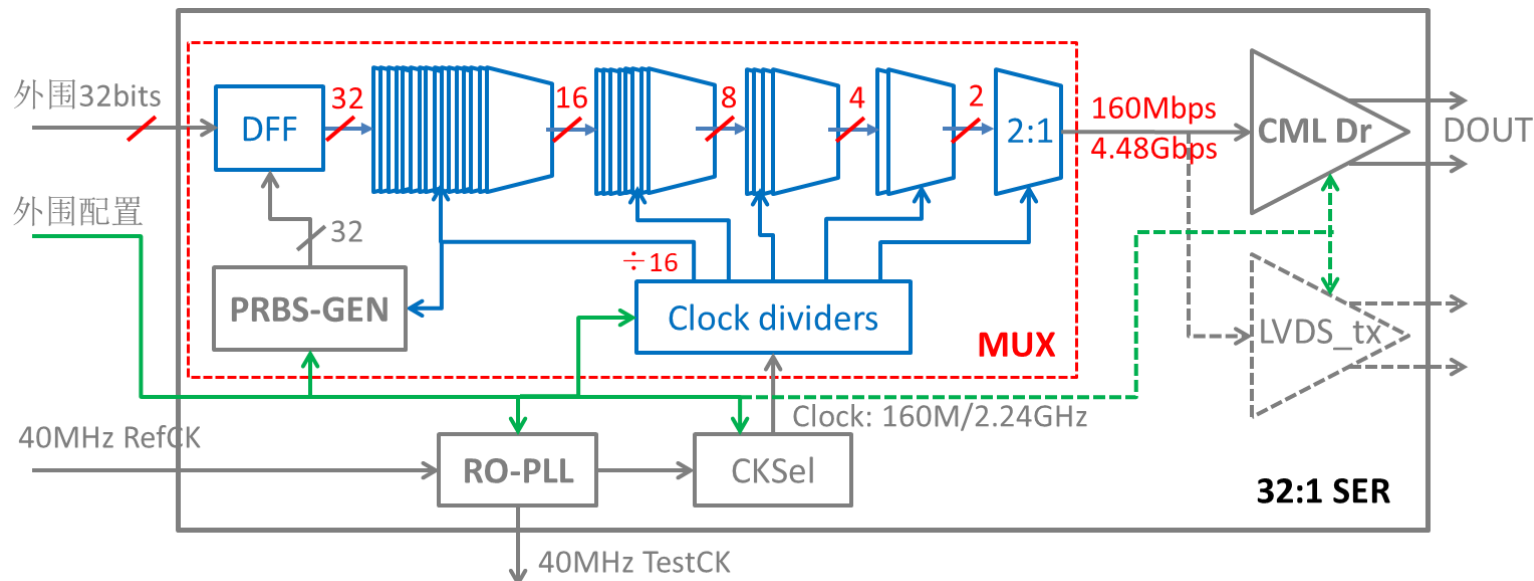
- 3阶环振结构; RO-VCO特征:
  - 0.34~3.42GHz @TT27
  - 相噪: 约-101dBc/Hz@1MHz offset
  - 3.6~26.3mA
- 26mA @2.56GHz

## ※ CML Driver

- 5级预放大+主驱动级
- 36.5mA @TT55
- LVDS\_tx: 4.8mA @250Mbps

## ※ SER

- < 85mA @触发; < 130mA @无触发



## ※ 测试内容

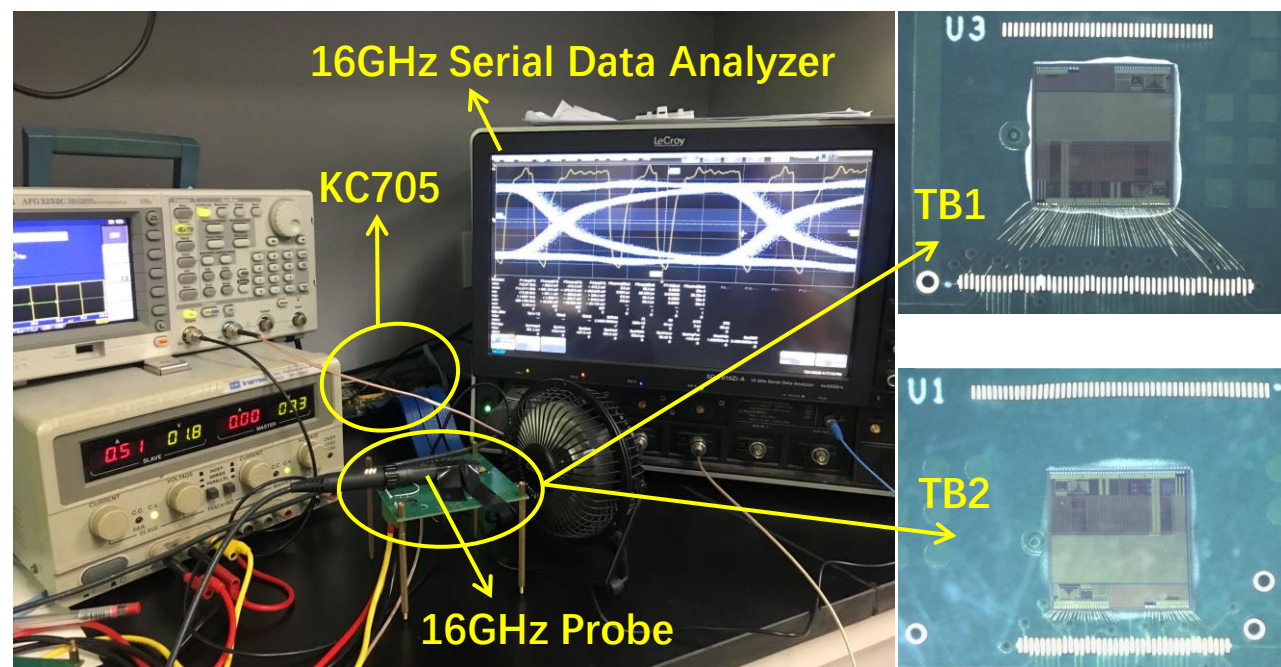
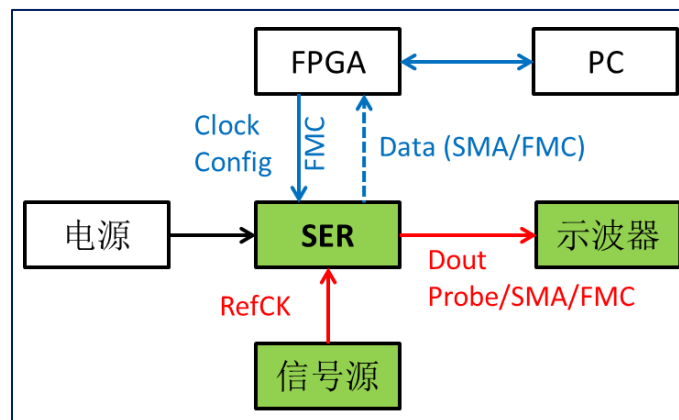
- RO-PLL的时钟锁频范围及性能
- DOUT码流验证
- DOUT数据眼图及性能

## ※ 数据测试路径

- P1: 信号源 → SER → probe → 示波器
- P2: 信号源 → SER → SMA → 示波器
- P3: FPGA → SER → FMC → PC

## ※ 测试模式

- 触发: 160Mbps
- 无触发: ~2G/3G/4Gbps



# TaiChuPix1 测试结果



## ※ 时钟锁频范围

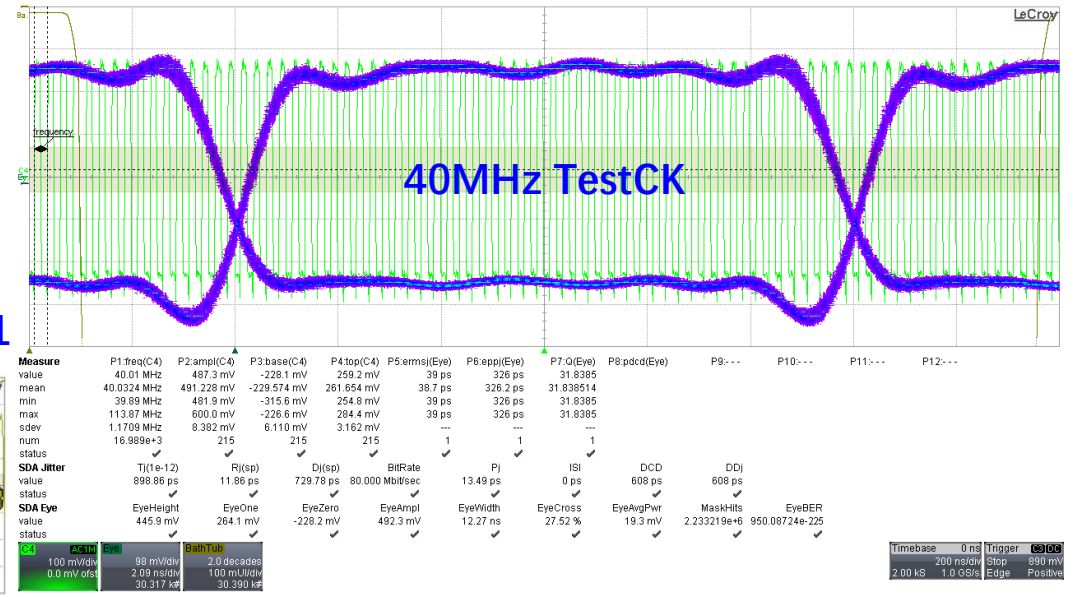
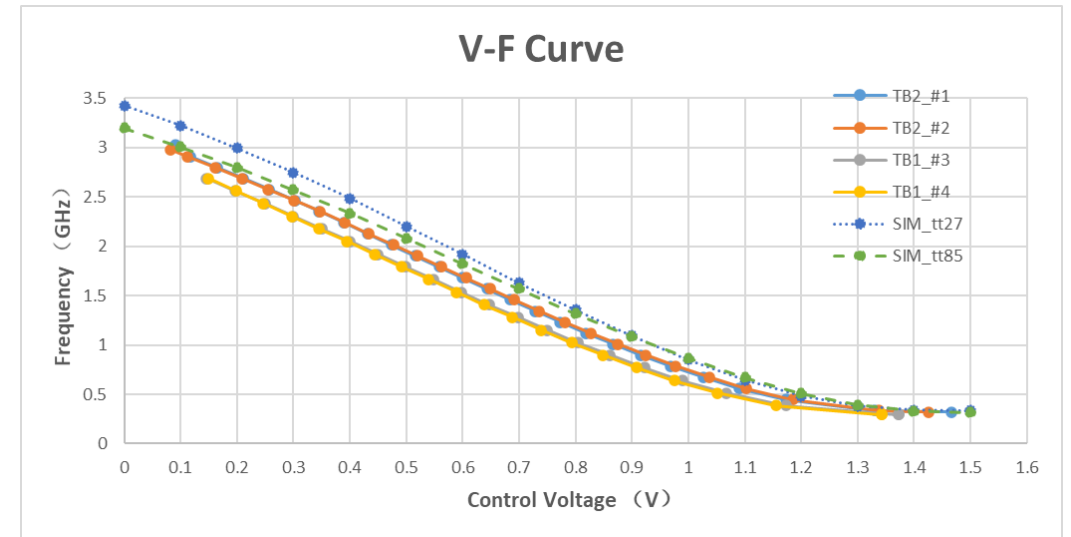
- TB1测量TR: 0.30~2.68GHz
- TB2测量 TR: 0.32~2.91GHz
- ➔ 频率上限均小于仿真值, 但能覆盖目标频率

## ※ 时钟抖动性能

- 后仿真估算 $R_j \approx 2.7\text{ps}$  (带内)、 $0.6\text{ps}$  (带外)
- 40MHz TestCK测量 $T_j \approx 0.9 \sim 1.1\text{ns}$ ,  $R_j \approx 9 \sim 12\text{ps}$
- ➔ CMOS信号抖动偏大, 不能真实反映高频时钟性能

## ※ 码流验证

- 示波器捕捉高达3.36Gbps数据验证
- FPGA获取160Mbps数据验证
- ➔ 与PRBS码流一致

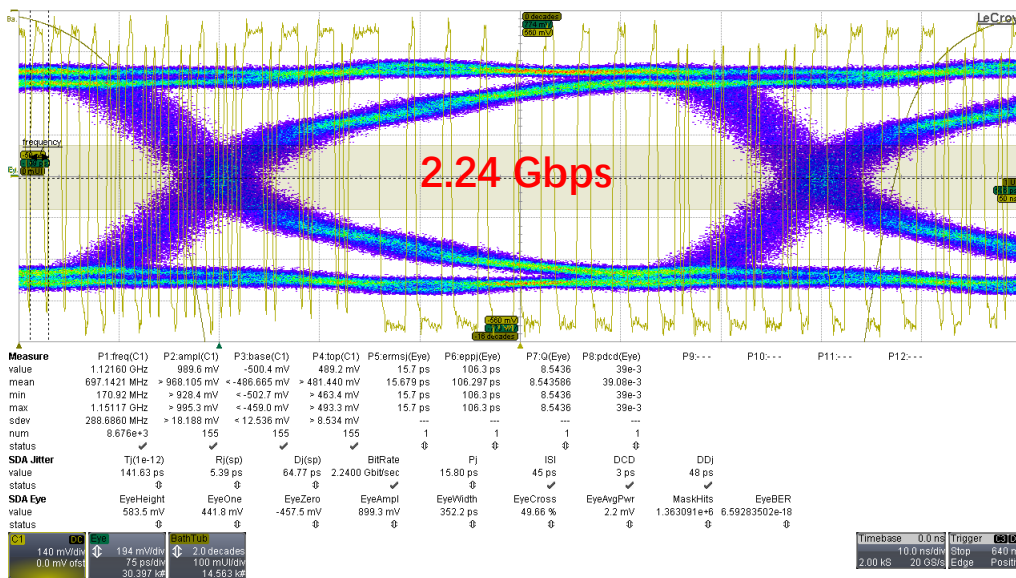


# TaiChuPix1 测试结果——DOUT眼图性能

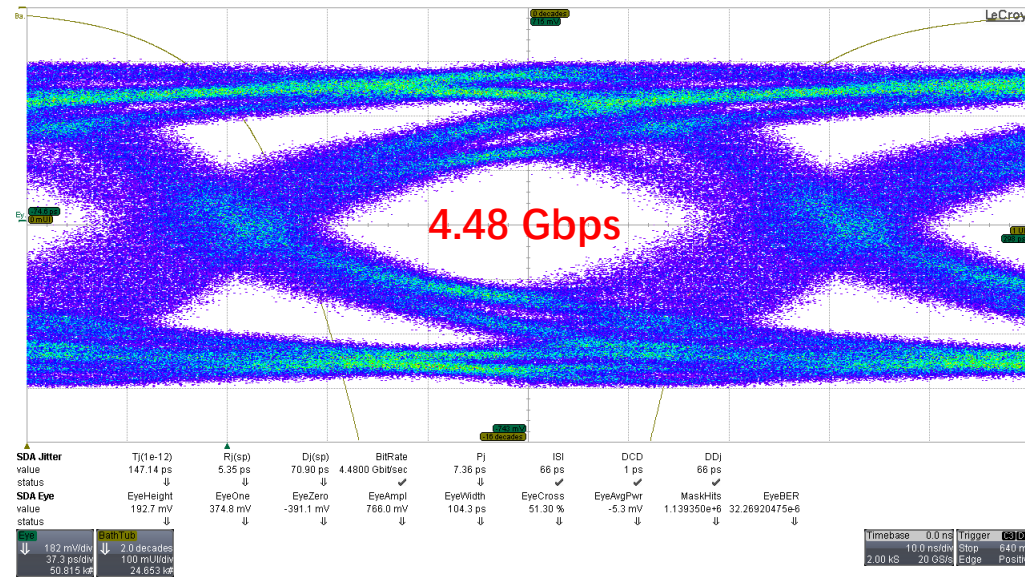
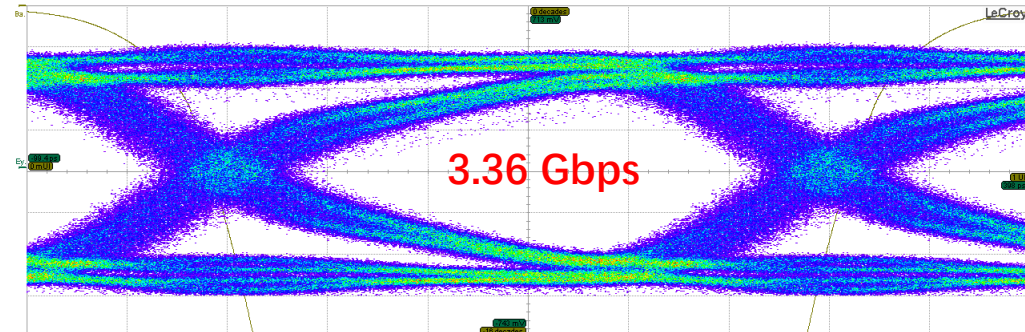


## ※ 高速传输对负载十分敏感

- 绑定线: ~4mm (TB1)、~2.5mm (TB2)
  - 有过孔
  - Probe+SMA+FMC的切换 (电阻电容焊盘)
- Probe (图) 优于 SMA 优于 Probe+FMC接头



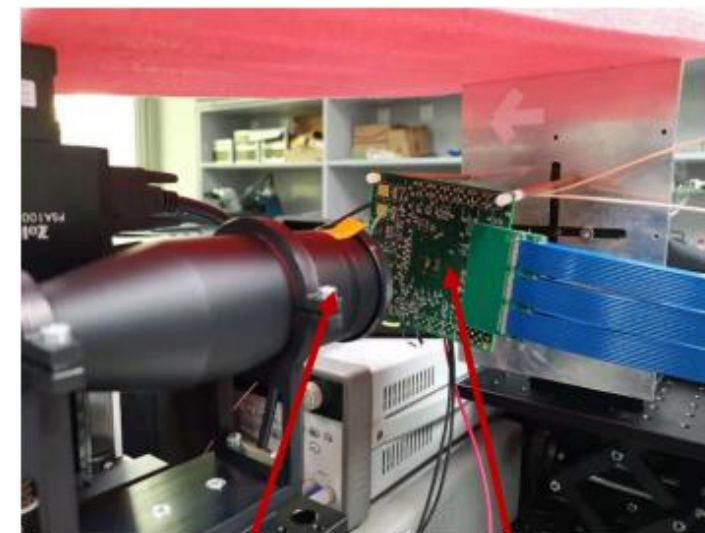
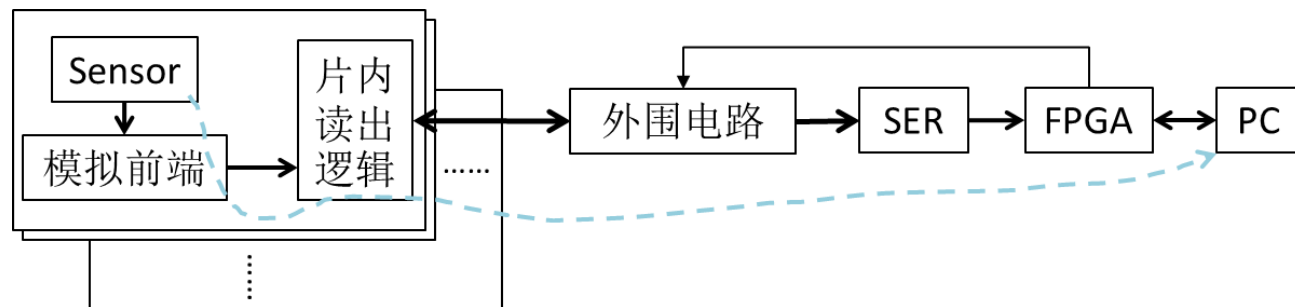
TB2\_#1



| DataRate  | IUI (ps) | EyeWidth | Tj (ps) @1e-12 | Rj (ps) | Dj (ps) | eyeBER    |
|-----------|----------|----------|----------------|---------|---------|-----------|
| 2.24 Gbps | 446.43   | 0.79 UI  | 141.63         | 5.39    | 64.77   | 6.59 e-18 |
| 3.36 Gbps | 297.62   | 0.67 UI  | 123.27         | 4.84    | 54.26   | 9.14 e-13 |
| 4.48 Gbps | 223.21   | 0.47 UI  | 147.14         | 5.35    | 70.90   | 3.23 e-5  |

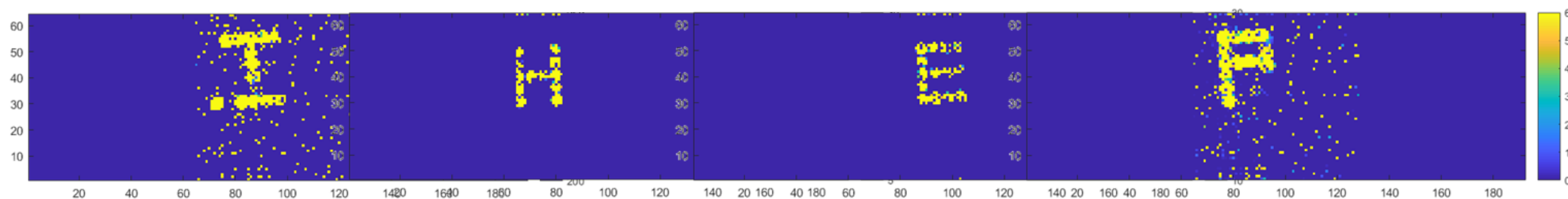


# TaiChuPix成像



Laser 1064nm

TaichuPix-2

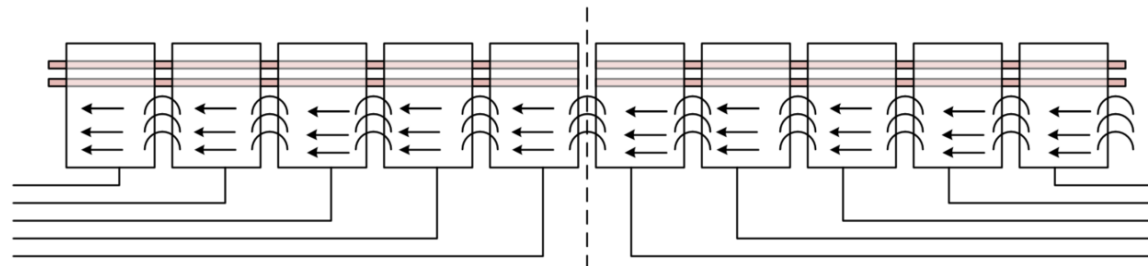


# TCP芯片串联测试



## ※ 低质量需求

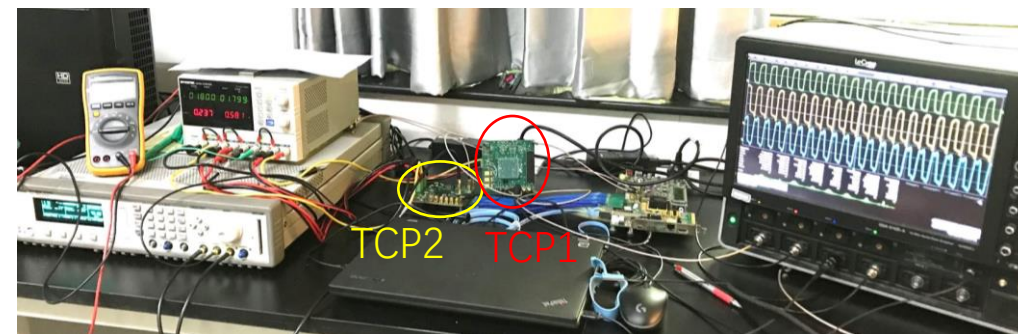
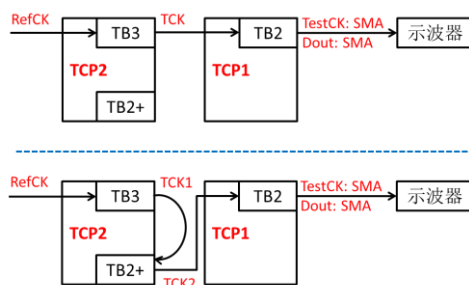
- 柔性板布线资源有限
- 慢控信号采用片上+片间绑定线的方式传递



电源  
慢控总线  
信号

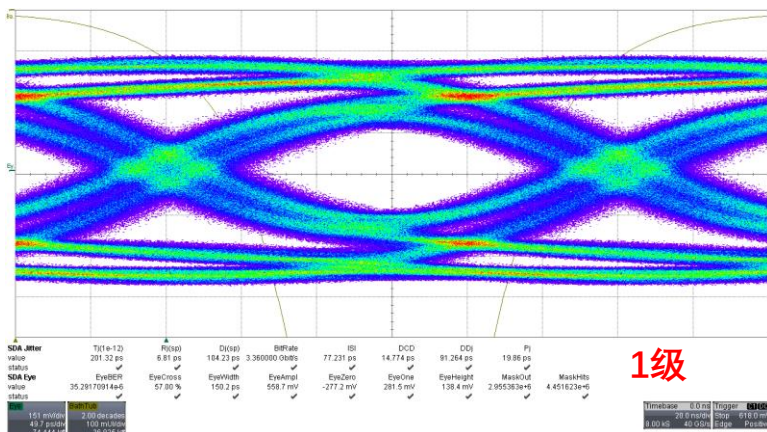
## ※ 串联测试

- 2级: RefCK → TB2+ / TB3 → TB2 → 示波器
- 3级: RefCK → TB2+ → TB3 → TB2 → 示波器
- PLL均能锁定, Dout输出噪声明显增大
- 表明PLL输出的时钟会累积噪声
- 更多的测试

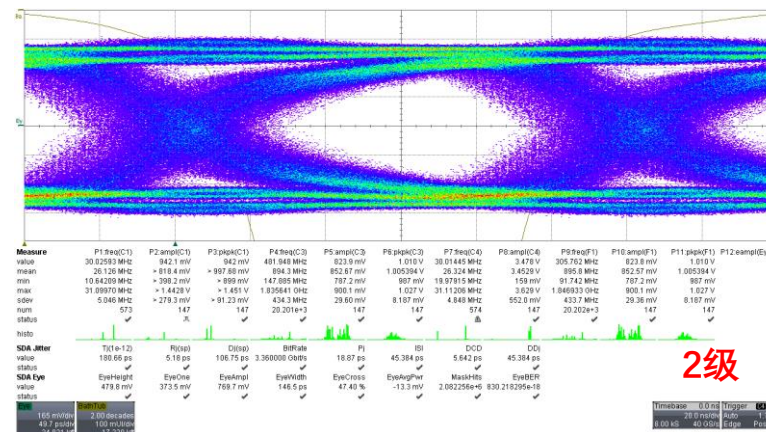


## ※ 优化

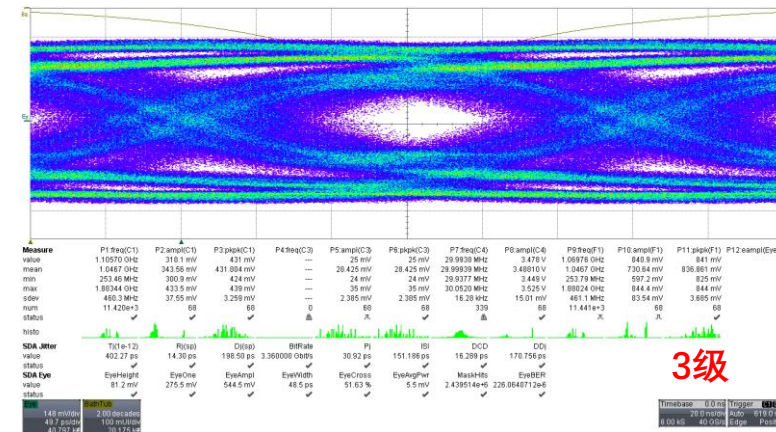
- ▶ 片间时钟采用差分互联;
- ▶ 不采用PLL的输出时钟作片间互联



1级



2级



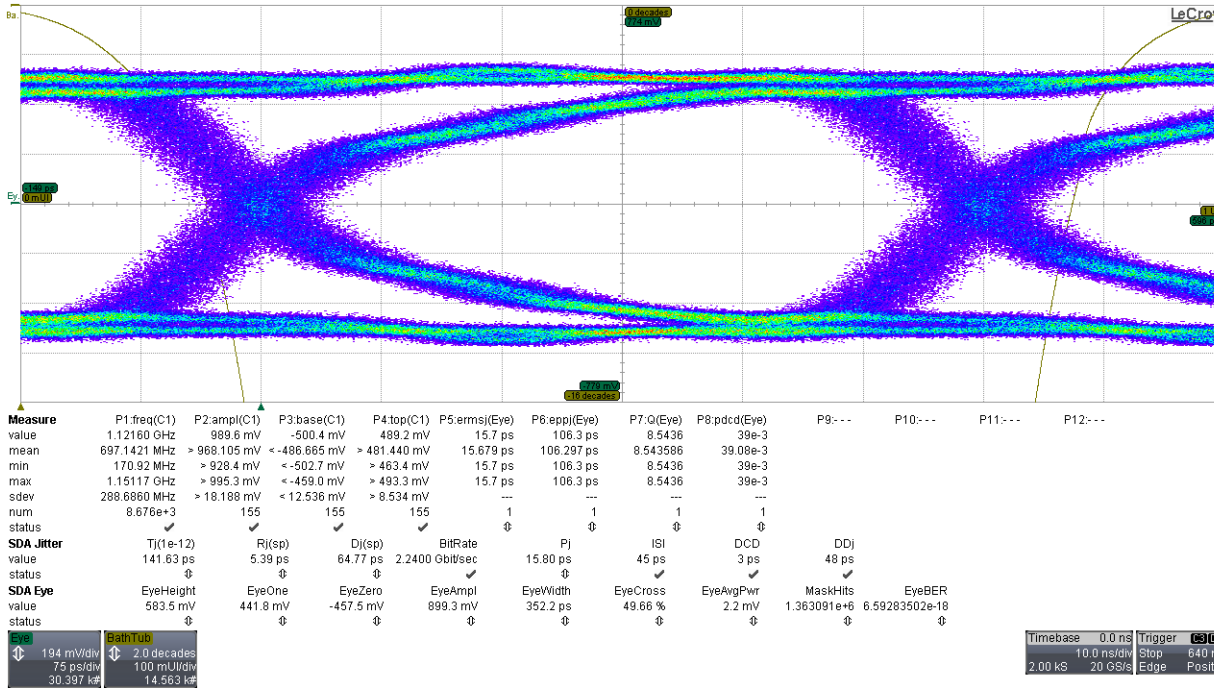
3级

- ※ 小规模原型芯片TaiChuPix在电学和辐照测试中，均通过了完整信号链的功能验证
- ※ 高速串行器测试可工作在3.36Gbps，面向CEPC最高速率3.84Gbps的需求，现有工艺下需2路串行器更为稳定和可靠；提高单通道速率和优化噪声则需要：
  - 更小尺寸的工艺
  - 减小负载失配：缩短打线距离，减小负载；IO? ESD?
  - LC型PLL：减小时钟噪声，提高噪声容限；工艺？面积？
  - 预加重驱动器：增强输出驱动力；功耗？
- ※ 下一步计划
  - 针对负载失配设计了新的测试板，测量TCP1\_TB2，与之前结果对照
  - 辐照情况下的SER自测试
  - 线型+树型结构SER设计，并行输入位扩展至40bits

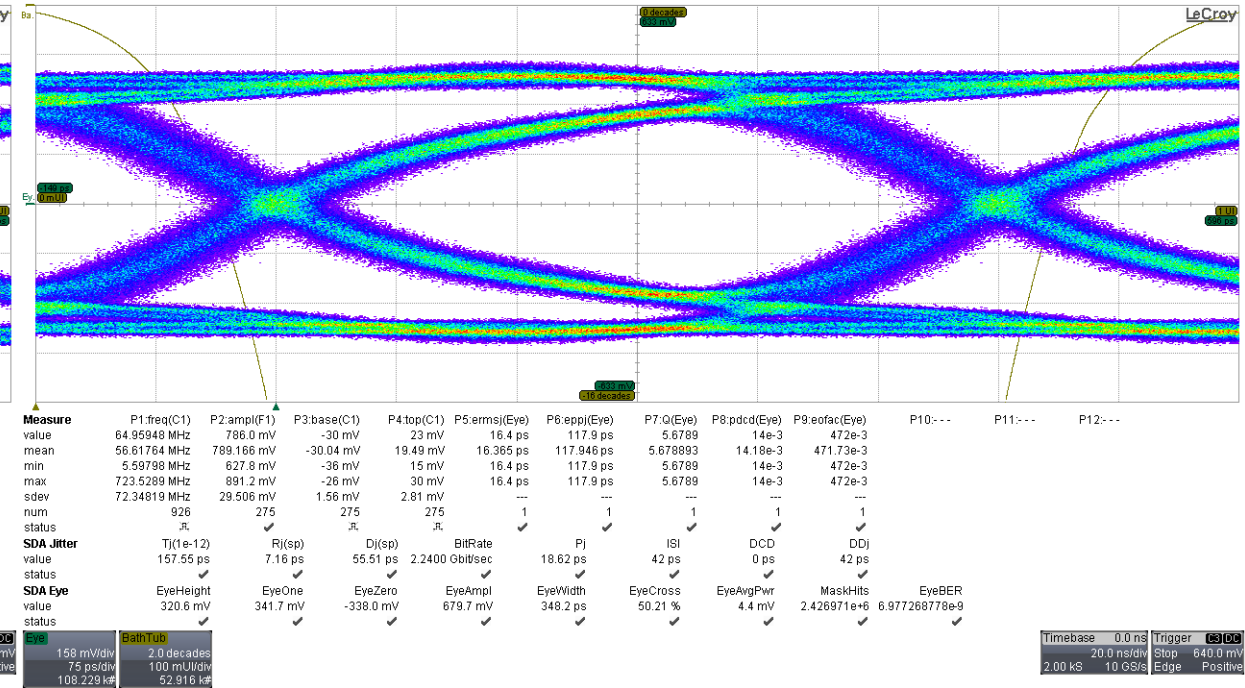
谢谢各位老师!

# Backup

# TCP1: Probe/SMA @2.24Gbps、TB2\_#1

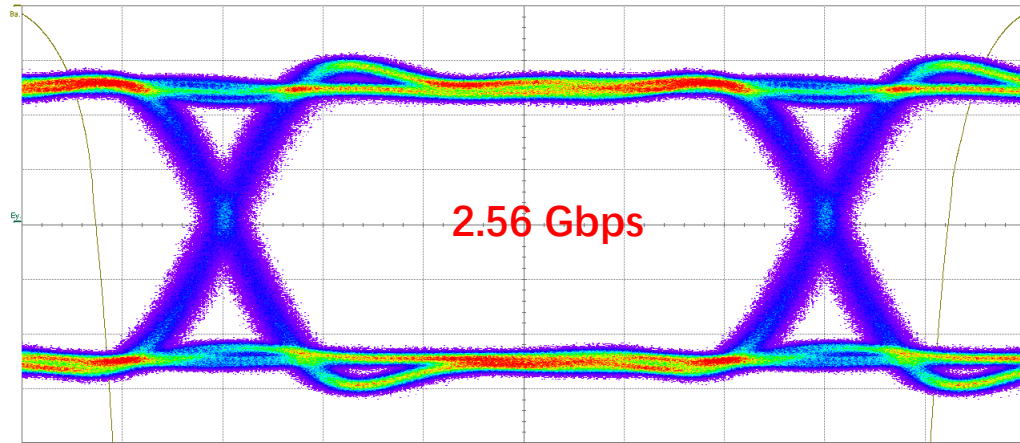


16GHz Probe



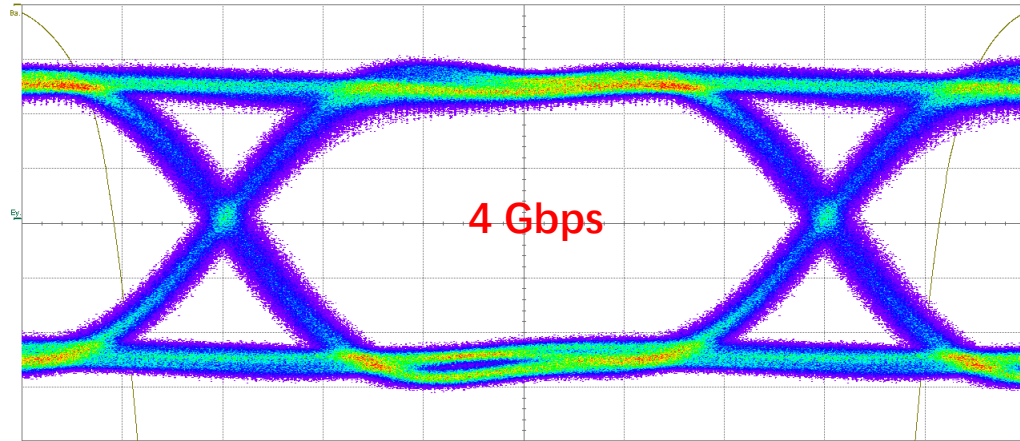
SMA-BNC-DC50

# 130nm工艺Ser5G芯片2G、4G和5G传输



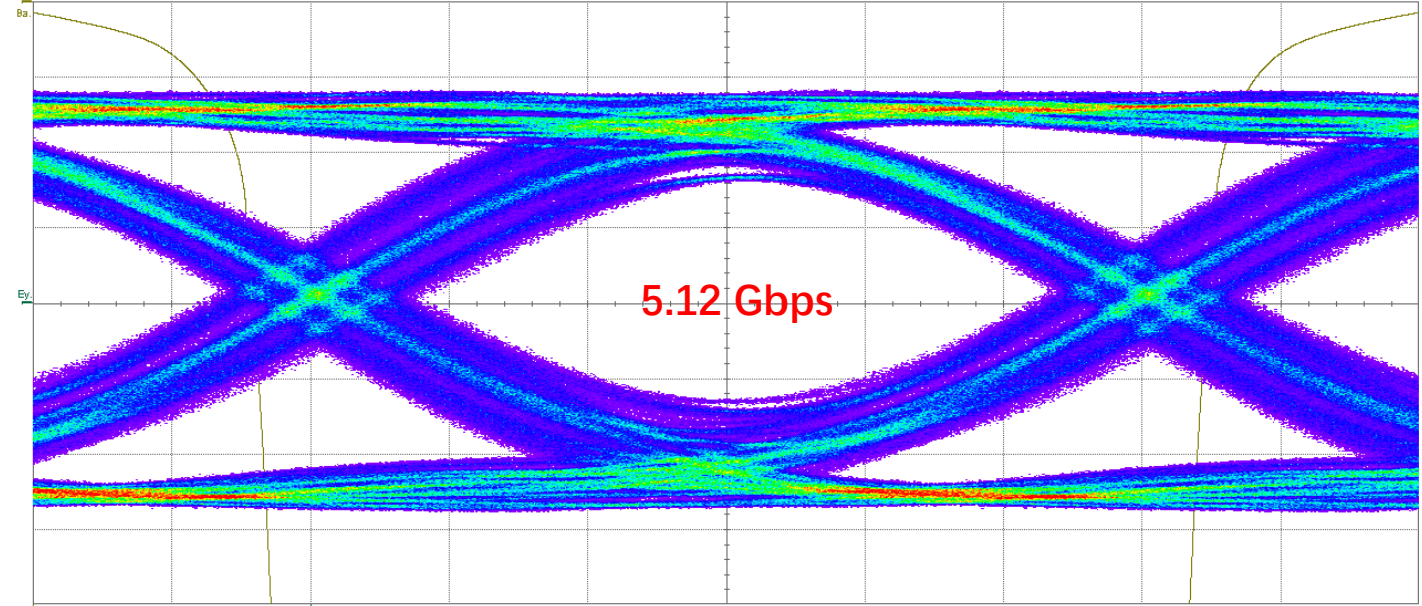
2.56 Gbps

|                   |                |          |          |               |           |          |           |             |
|-------------------|----------------|----------|----------|---------------|-----------|----------|-----------|-------------|
| <b>SDA Jitter</b> | Tj(1e-12)      | Rj(sp)   | Dj(sp)   | BitRate       | ISI       | DCD      | DDj       | Pj          |
| value             | 67.03 ps       | 2.51 ps  | 31.24 ps | 2.560000 Gb/s | 21.268 ps | 4.252 ps | 22.701 ps | 5.94 ps     |
| status            | ✓              | ✓        | ✓        | ✓             | ✓         | ✓        | ✓         | ✓           |
| <b>SDA Eye</b>    | EyeBER         | EyeCross | EyeWidth | EyeAmpl       | EyeZero   | EyeOne   | EyeHeight | MaskOut     |
| value             | 141.42093e-128 | 52.09 %  | 905.8 mV | 905.8 mV      | -463.7 mV | 442.1 mV | 792.5 mV  | 3.046701e+6 |
| status            | ✓              | ✓        | ✓        | ✓             | ✓         | ✓        | ✓         | ✓           |



4 Gbps

|                   |                |          |           |               |           |          |           |             |
|-------------------|----------------|----------|-----------|---------------|-----------|----------|-----------|-------------|
| <b>SDA Jitter</b> | Tj(1e-12)      | Rj(sp)   | Dj(sp)    | BitRate       | ISI       | DCD      | DDj       | Pj          |
| value             | 51.519 ps      | 2.231 ps | 19.716 ps | 4.000000 Gb/s | 13.897 ps | 3.839 ps | 17.653 ps | 4.15 ps     |
| status            | ✓              | ✓        | ✓         | ✓             | ✓         | ✓        | ✓         | ✓           |
| <b>SDA Eye</b>    | EyeBER         | EyeCross | EyeWidth  | EyeAmpl       | EyeZero   | EyeOne   | EyeHeight | MaskOut     |
| value             | 121.100878e-54 | 52.08 %  | 221.8 ps  | 915.7 mV      | -475.3 mV | 440.4 mV | 735.2 mV  | 2.105054e+6 |
| status            | ✓              | ✓        | ✓         | ✓             | ✓         | ✓        | ✓         | ✓           |



5.12 Gbps

|                   |           |          |           |               |           |           |             |                |
|-------------------|-----------|----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-------------|----------------|
| <b>SDA Jitter</b> | Tj(1e-12) | Rj(sp)   | Dj(sp)    | BitRate       | Pj        | ISI       | DCD         | DDj            |
| value             | 63.870 ps | 929 fs   | 50.626 ps | 5.120000 Gb/s | 18.25e-12 | 26.477 ps | 6.732 ps    | 31.352 ps      |
| status            | ✓         | ✓        | ✓         | ✓             | ✓         | ✓         | ✓           | ✓              |
| <b>SDA Eye</b>    | EyeHeight | EyeOne   | EyeAmpl   | EyeWidth      | EyeCross  | EyeAvgPwr | MaskHits    | EyeBER         |
| value             | 349.8 mV  | 305.7 mV | 597.9 mV  | 131.1 ps      | 52.28 %   | 9.1 mV    | 4.597440e+6 | 247.532210e-15 |
| status            | ✓         | ✓        | ✓         | ✓             | ✓         | ✓         | ✓           | ✓              |

←6GHz Probe

↑SMA-BNC-DC50