



# 光模块基本原理





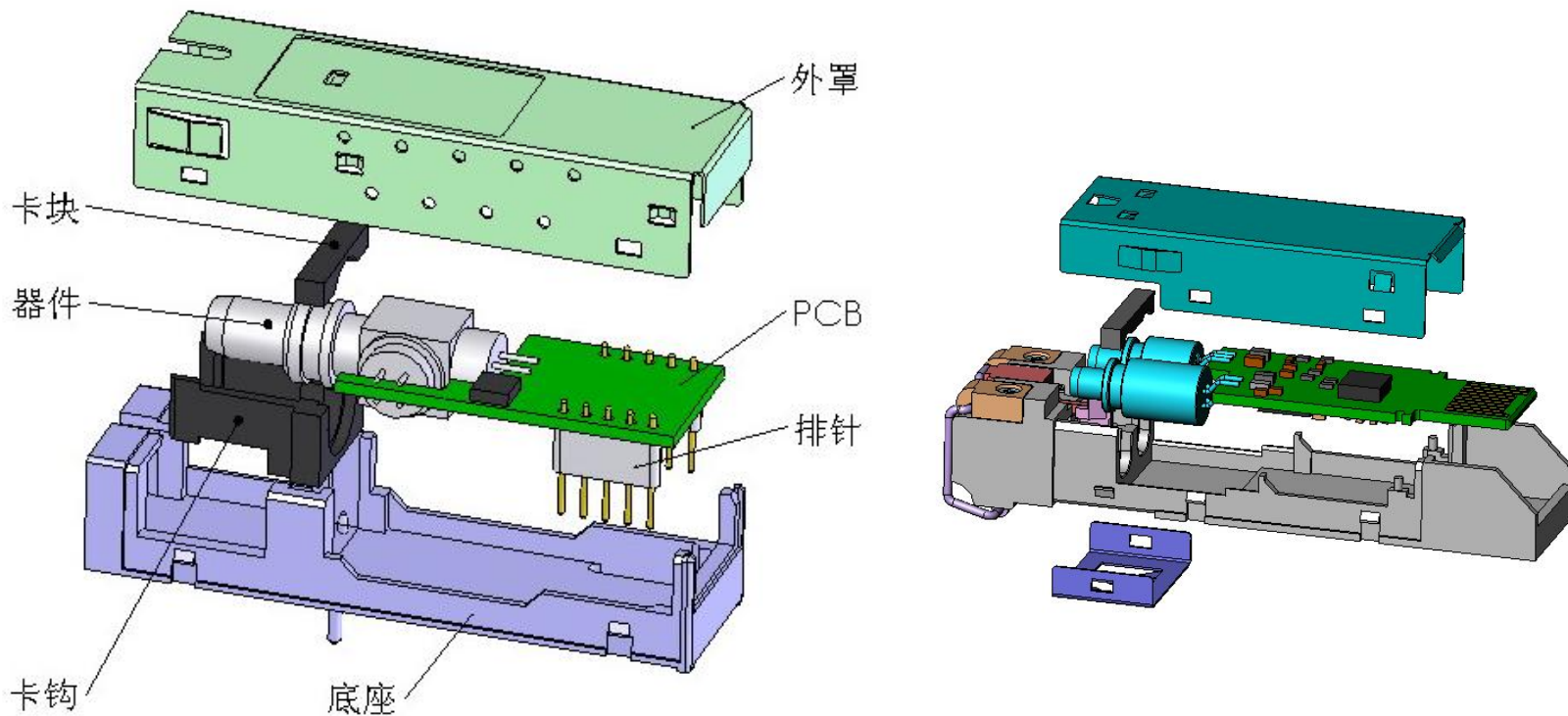
# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 光模块定义

以光器件为核心增加一些电路部分和结构件等完成相应功能的单元





# 光模块分类

- 按速率划分：**155Mb/s 622Mb/s 1.25Gb/s 2.5Gb/s 10Gb/s**等
- 按功能划分：**发射模块，接收模块，收发合一模块 (transceiver,)**
- 按封装划分：**1×9/ 2×9/SFF/GBIC/SFP/XFP/300pin**等
- 按使用条件划分：**热插拔 (GBIC/SFP/XFP) 带插针 (1×9/2×9/SFF)**
- 按应用划分：**SDH/SONET, Ethernet, Fiber Channel, CWDM, DWDM**等
- 按工作模式划分：**连续和突发 (OLT: Optic Line Terminal, 光线路终端; ONU : Optic Network Unit,光网络单元)**



# 光模块发展历史

封装形式: 1X9 → SFF → GBIC → SFP, XFP, SFP+

传输速率: 155M, 622M → 1.25G, 2.5G → 4.25G, 8.5G, 10G, → 40G

光接口形式: 尾纤型 (Pigtail); 插拔型 (Receptacle)

光传输形式: 双纤双向 (MSA); 单纤双向 (BiDi)

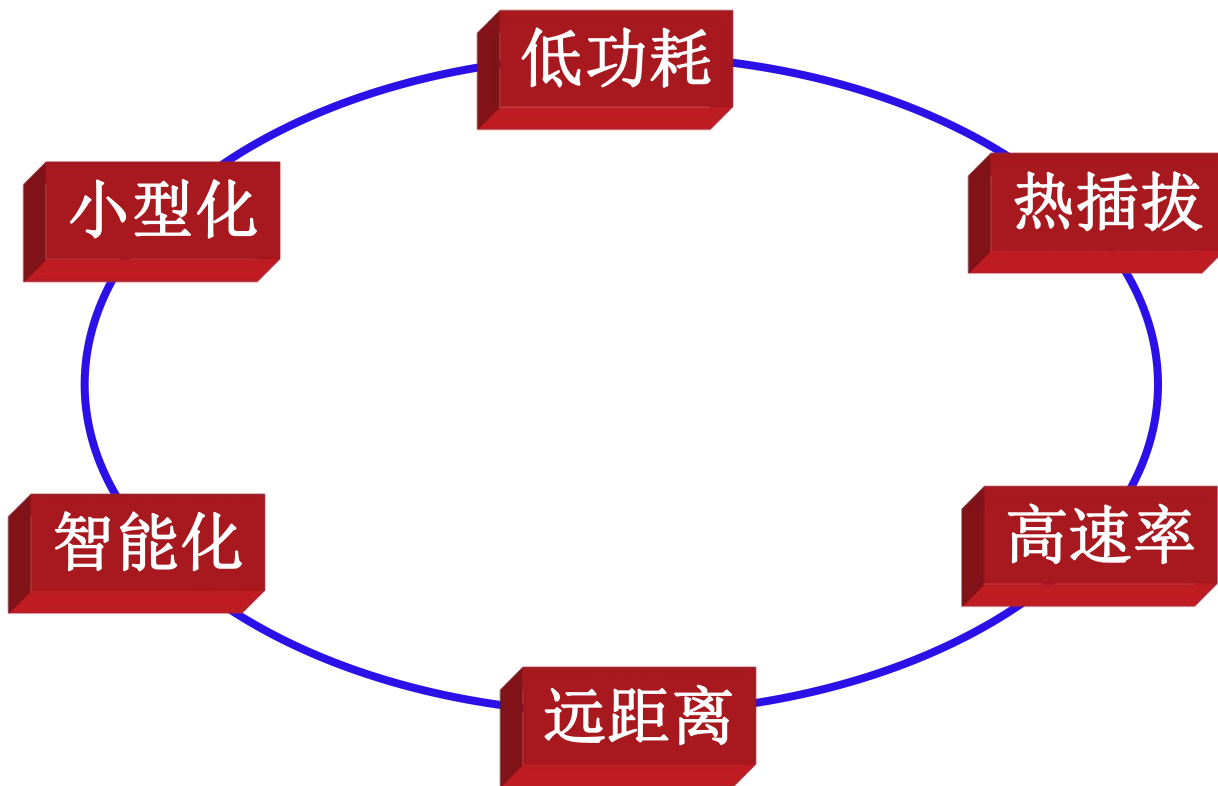
接入应用: P to P → P to MP: PON (GE-PON, GPON, WDM-PON)

功能: 不带监控功能 (None DDM) → 带数字诊断功能 (DDM)





# 光模块发展趋势





# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 光模块内部主要元器件

探测器

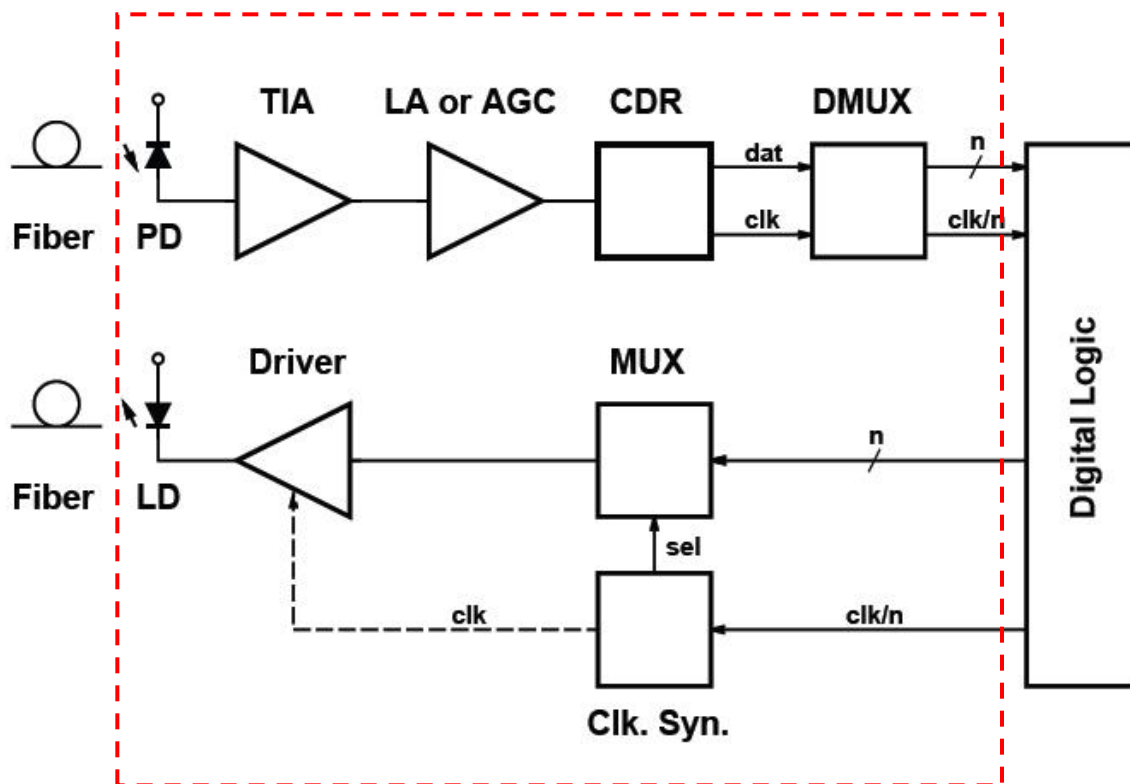
激光器

放大器

时钟数据恢复

驱动芯片

MUX&DeMUX



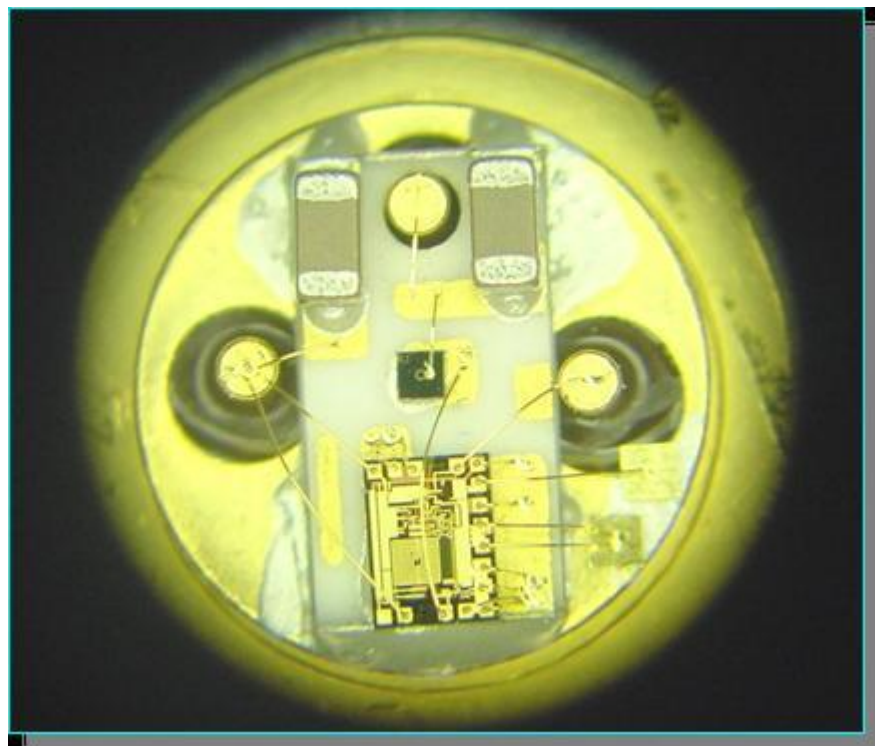




# 光器件

光器件是由少数几个光电子元件和IC、无源元件（如电阻、电容、电感、互感、微透镜、隔离器）、光纤及金属连线组合、封装在一起，完成单项或少数几项功能的混合集成件。

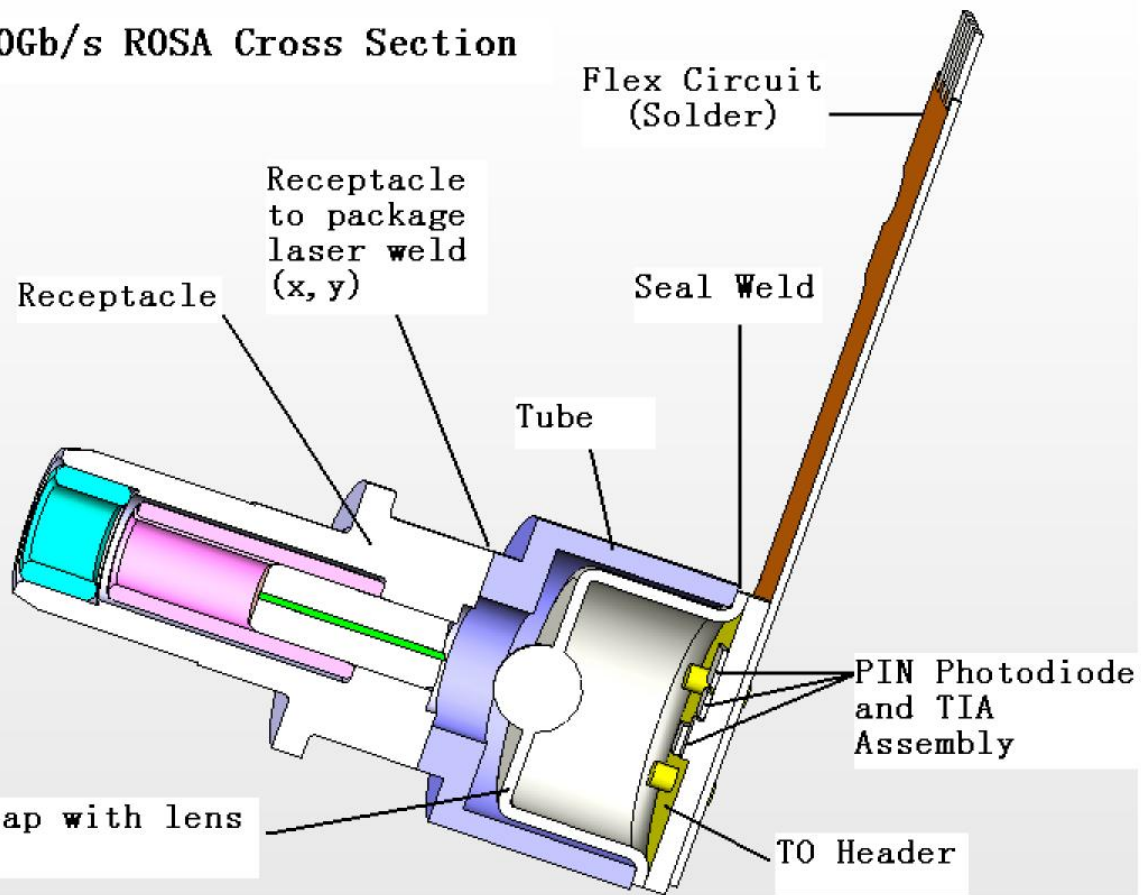
。





# 光器件结构图

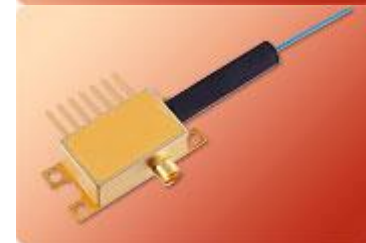
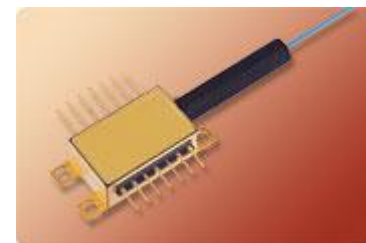
WTD 10Gb/s ROSA Cross Section





# 光器件分类

- 如按功能，可分为：
  - 光发射器件
  - 光接收器件
- 按结构，可分为：
  - TO器件(TOSA, ROSA, BOSA);**
  - DIP (或Butterfly) 器件;**
  - 表面贴装 (surface mount) 器件等;**
- 按传输速率，可分为
  - 155M、622M、1.25G、2.5G、10G等;**
- 传输距离，工作波长，工作方式等





# 探测器

## 光探测器

作用把光信号转变为电信号的器件。

### ➤ PIN探测器

P型掺杂、本征（I）和N型掺杂。

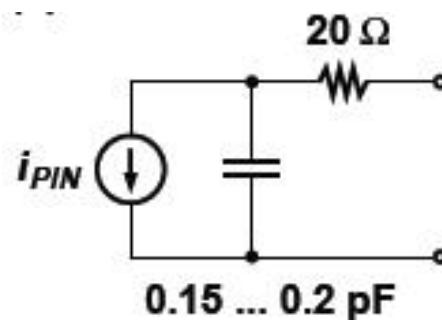
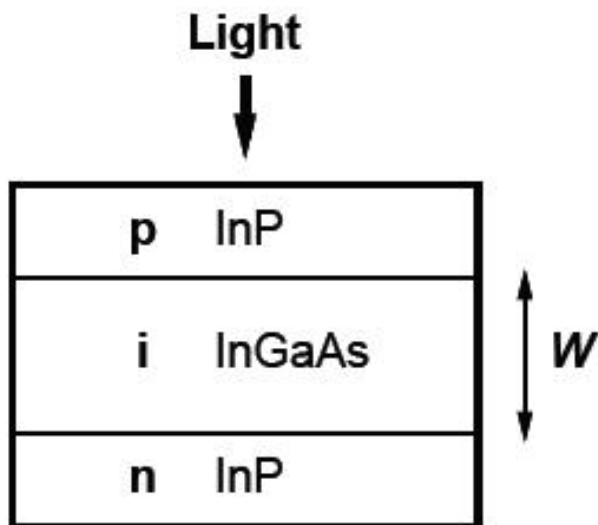
### ➤ APD探测器

内部具有光电倍增(或称雪崩)光电二极管。(Avalanche Photodetector)



# PIN探测器

PIN探测器即P-I-N 探测器：P型掺杂 + Intrinsic + N型掺杂



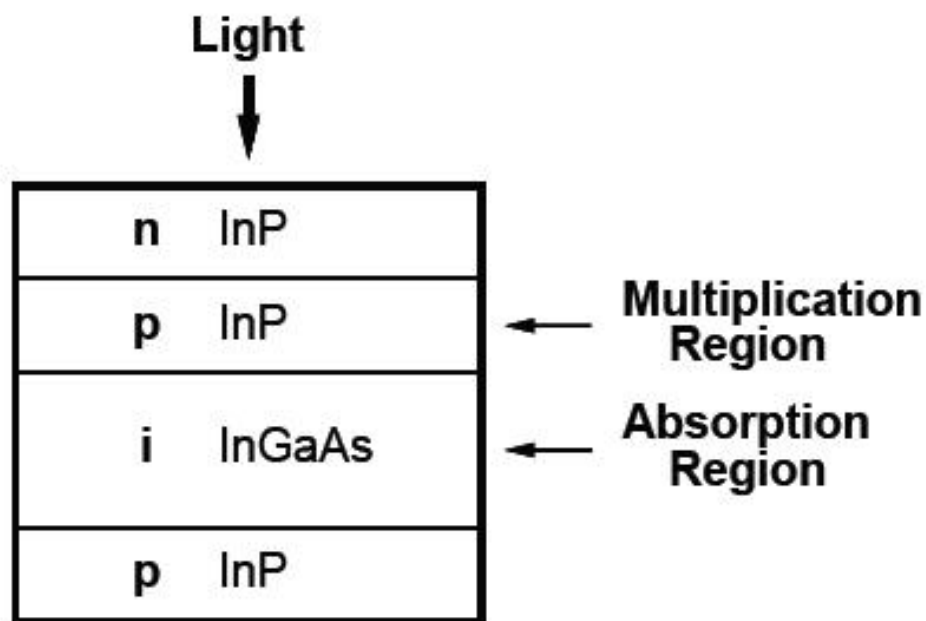
响应度： $I_{PIN} = R \cdot P$

需加5~10V反偏电压



# APD探测器

APD探测器：雪崩光电探测器（Avalanche photodetector）



响应度：

$$I_{APD} = M \cdot RP$$

M与温度和反偏电压有关  
需加30~60V反偏电压



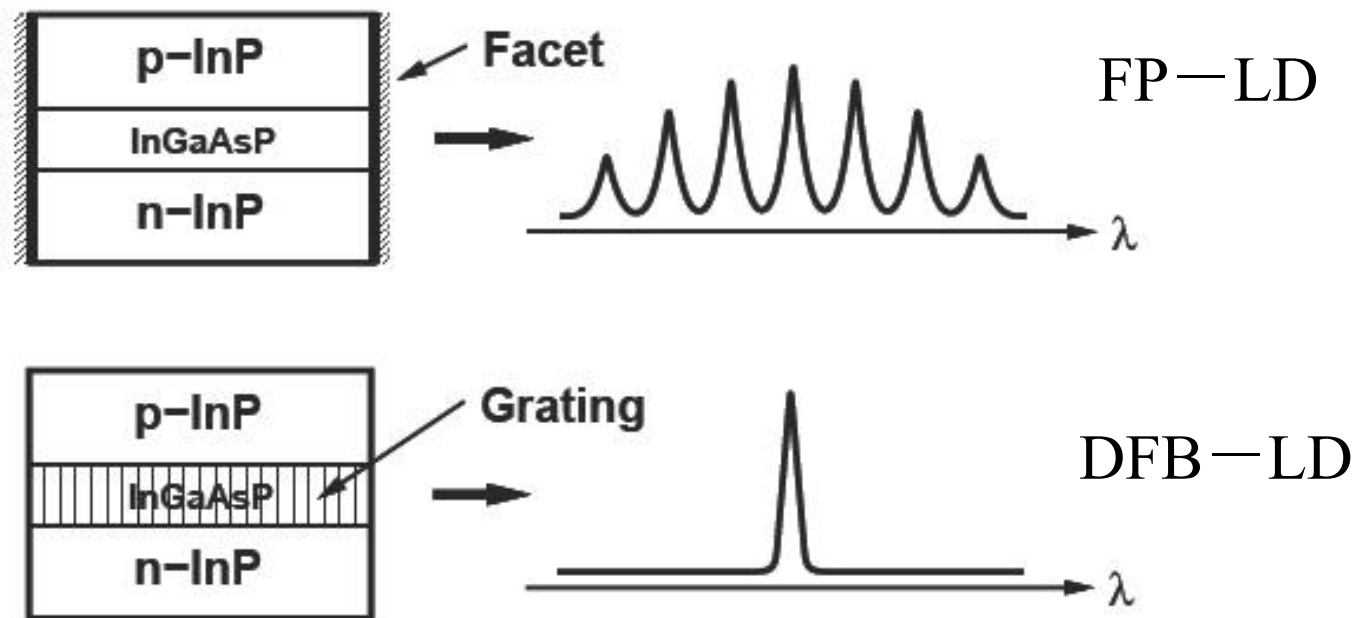
# 激光器

- **FP LD (*Fabry-Perot Laser*)**
- **DFB LD (*Distributed-Feedback Laser*)**
- **VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser*)**
- **LED (*Light-Emitting Diode*)**
- **EAM LD (*Electro-absorption modulated lasers*)**





# FP LD 和 DFB LD



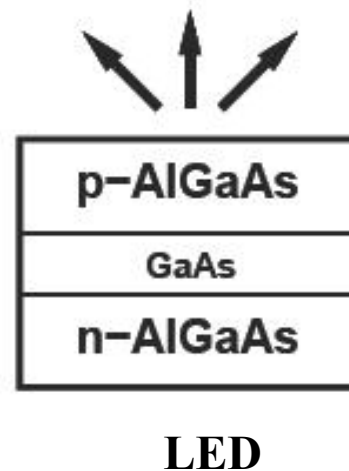
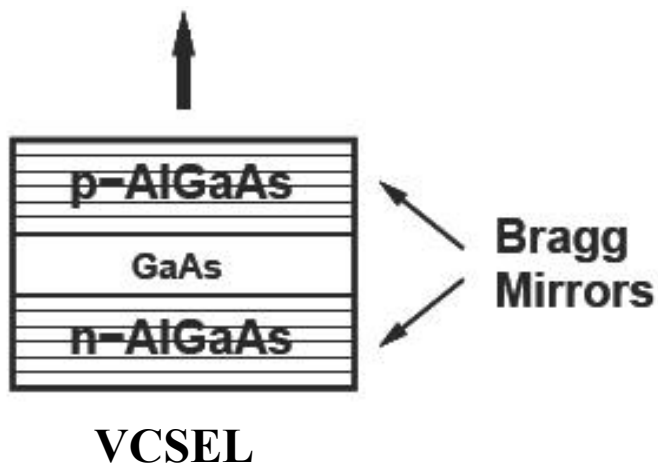
都是边缘发光

谐振腔结构不同





# LED 和 VCSEL

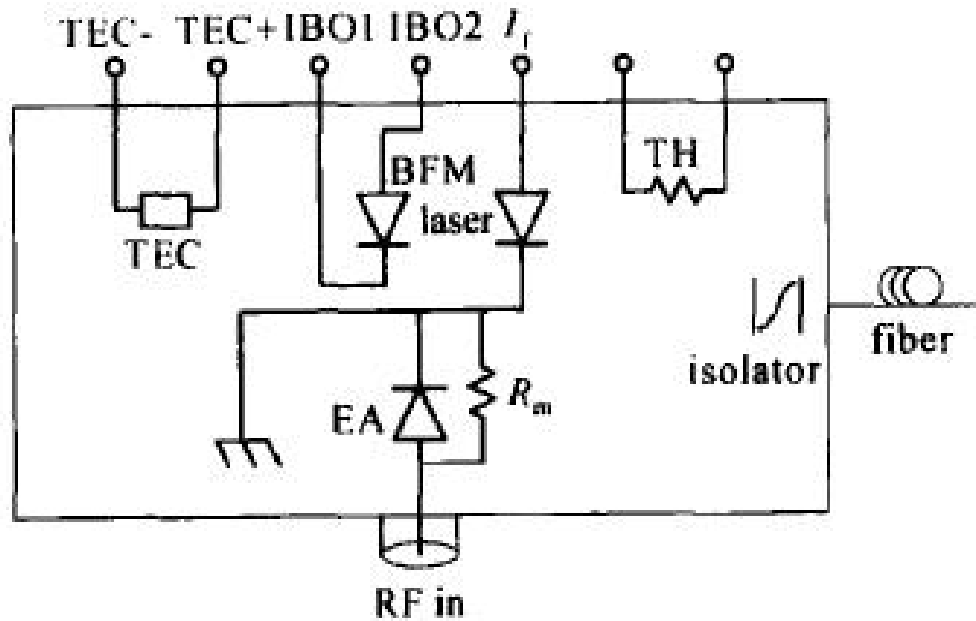
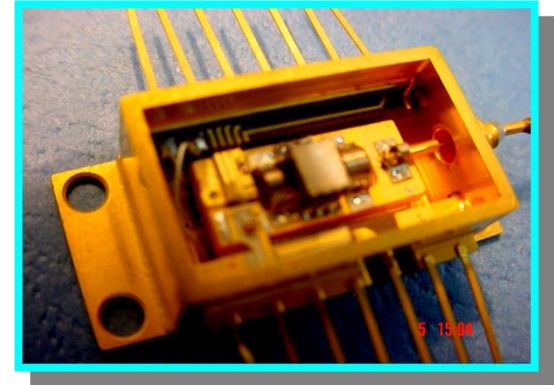
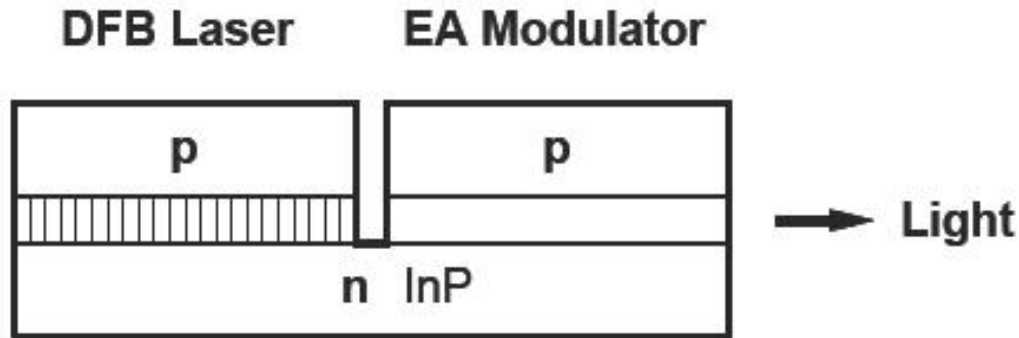


都是面发光

谐振腔结构不同



# EAM LD



构成：TEC致冷器，  
激光二极管，EA调  
制器，背光检测二极  
管和，热敏电阻等



# 放大器分类

- 跨阻放大器: **Transimpedance Amplifier (TIA)**
- 主放 **Main Amplifiers (MA)** 或后放 **Post Amplifiers**

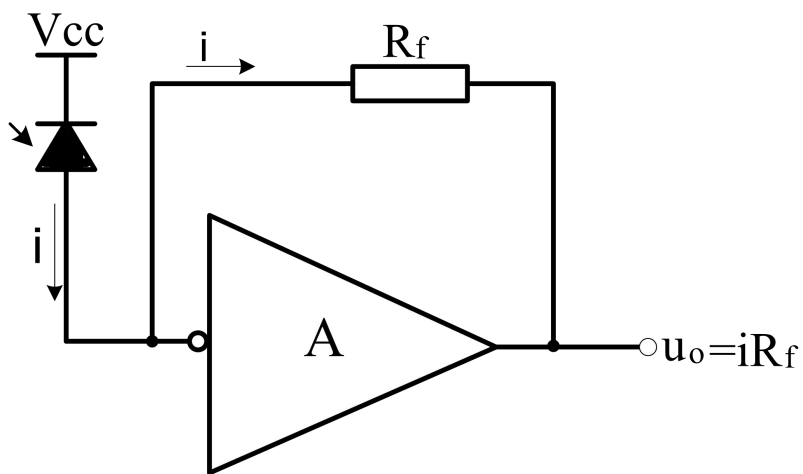
限幅放大器: **Limiting Amplifier (LA)**

自动增益控制放大器: **Automatic Gain Control Amplifier (AGC).**





# 跨阻放大器 (TIA)

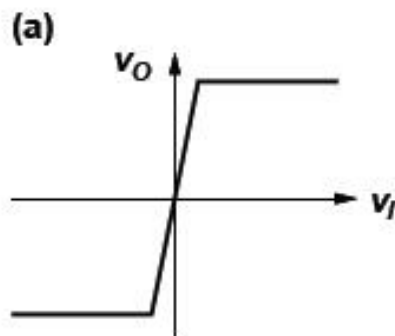
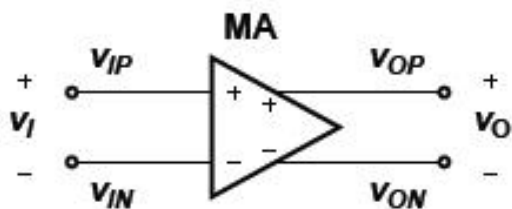


- 低的等效输入噪声电流
- 高输入阻抗，低输入电容
- 足够宽的通频带  $f_H \approx 0.75 \times$  工作速率
- 宽动态范围
- $R_f$  要足够大，以保证有足够大的输出电压

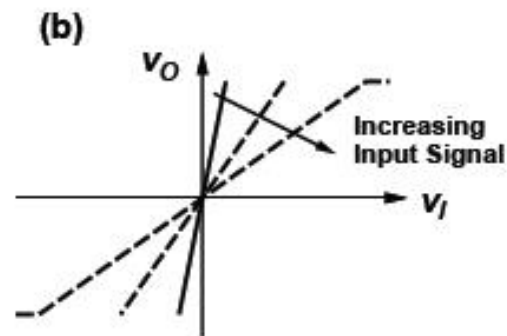
这种I-V变换电路中有一个负反馈电阻 $R_f$ ，所以又被称做跨阻放大器 (TIA)



# 主放



限幅放大器



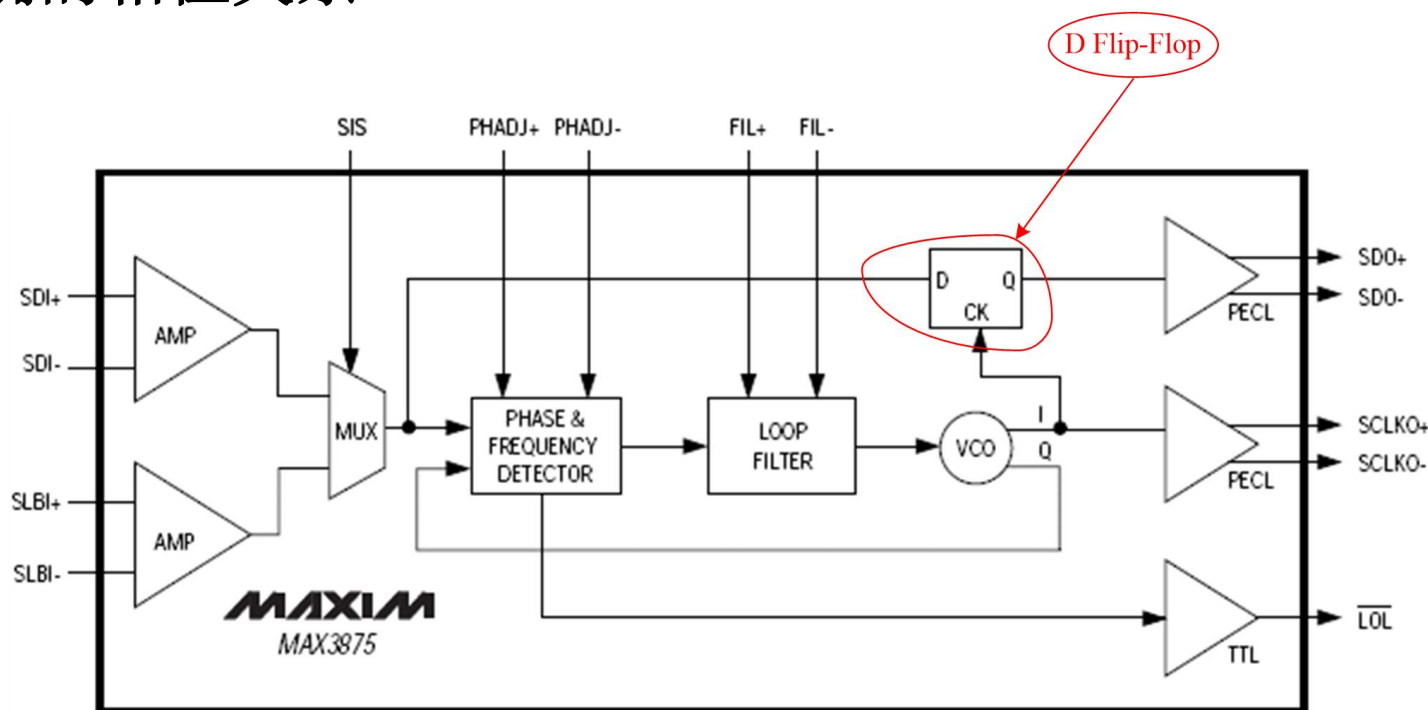
自动增益控制放大器

**LA:** 转换速度快，功耗低，但是非线性限制了其应用

**AGC:** 在很大的动态范围都是线性的，应用范围广。例如：带均衡器的接收机。

# 时钟和数据恢复（CDR）电路

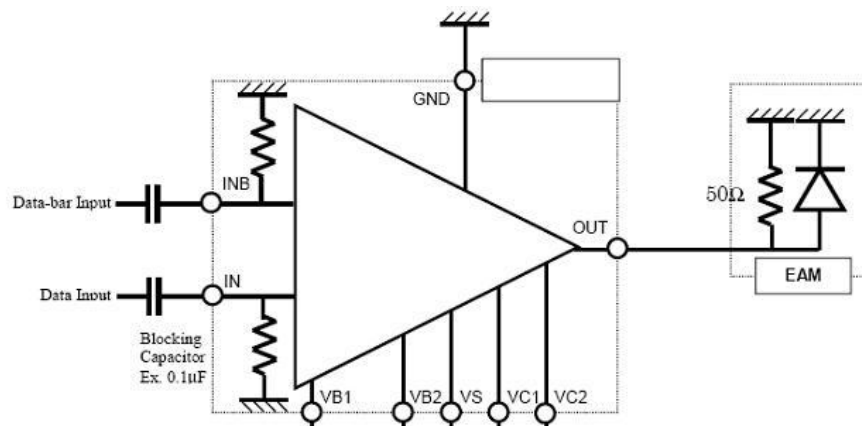
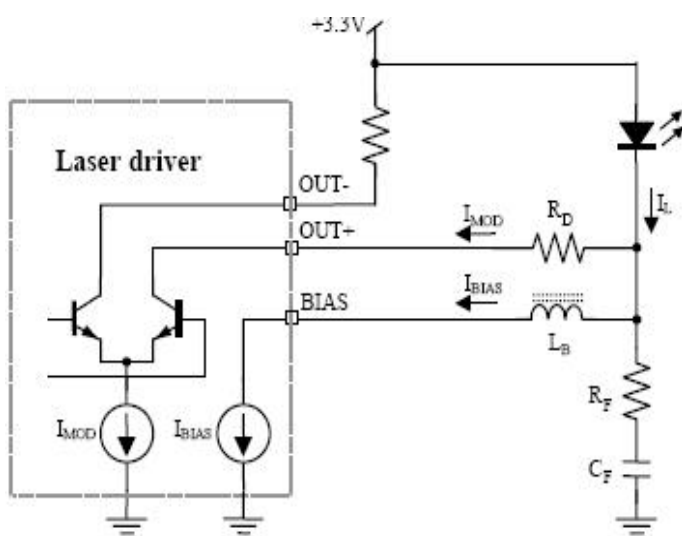
在数字通信系统中，码元同步是系统正常工作的必要条件。时钟和数据恢复电路（Clock and Data Recovery — CDR）的作用就是在输入数据信号中提取时钟信号并找出数据和时钟正确的相位关系





# 驱动芯片

- 激光器驱动（电流）
- 调制器驱动（电压）





## MUX & DeMUX

- MUX: 16路并行 数据输入，经过并串转换，输出数据。（如并行数据输入为622Mb/s，那么输出数据为9.95Gb/s）
- DeMUX: 则反过来，输入数据经过串并转换，输出16路并行 数据







# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 调制方式

- 直接调制
- 外调制

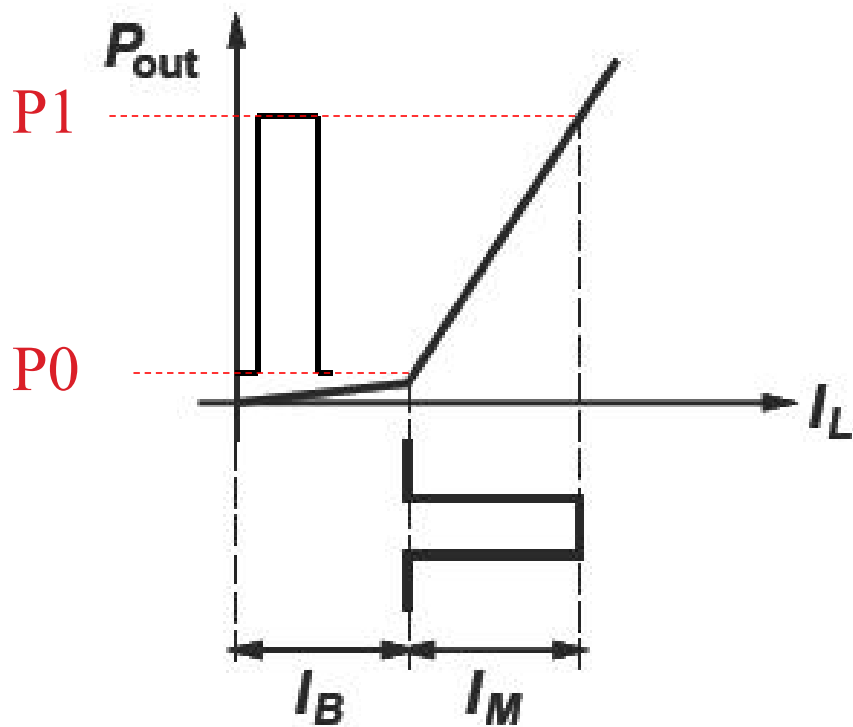
**EA调制 (Electroabsorption Modulator)**

**MZ调制 (Mach-Zehnder Modulator)**





# 直接调制

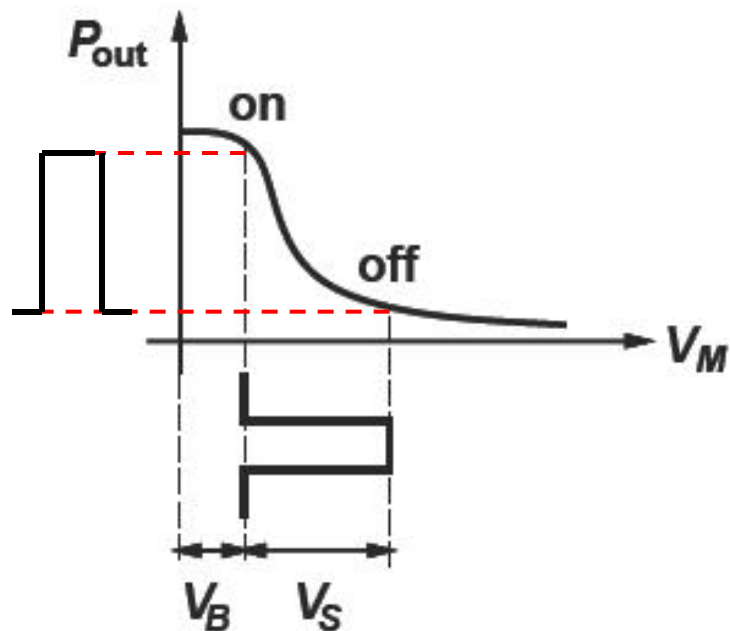


利用电信号的‘1’和‘0’  
控制激光器的电流大小。





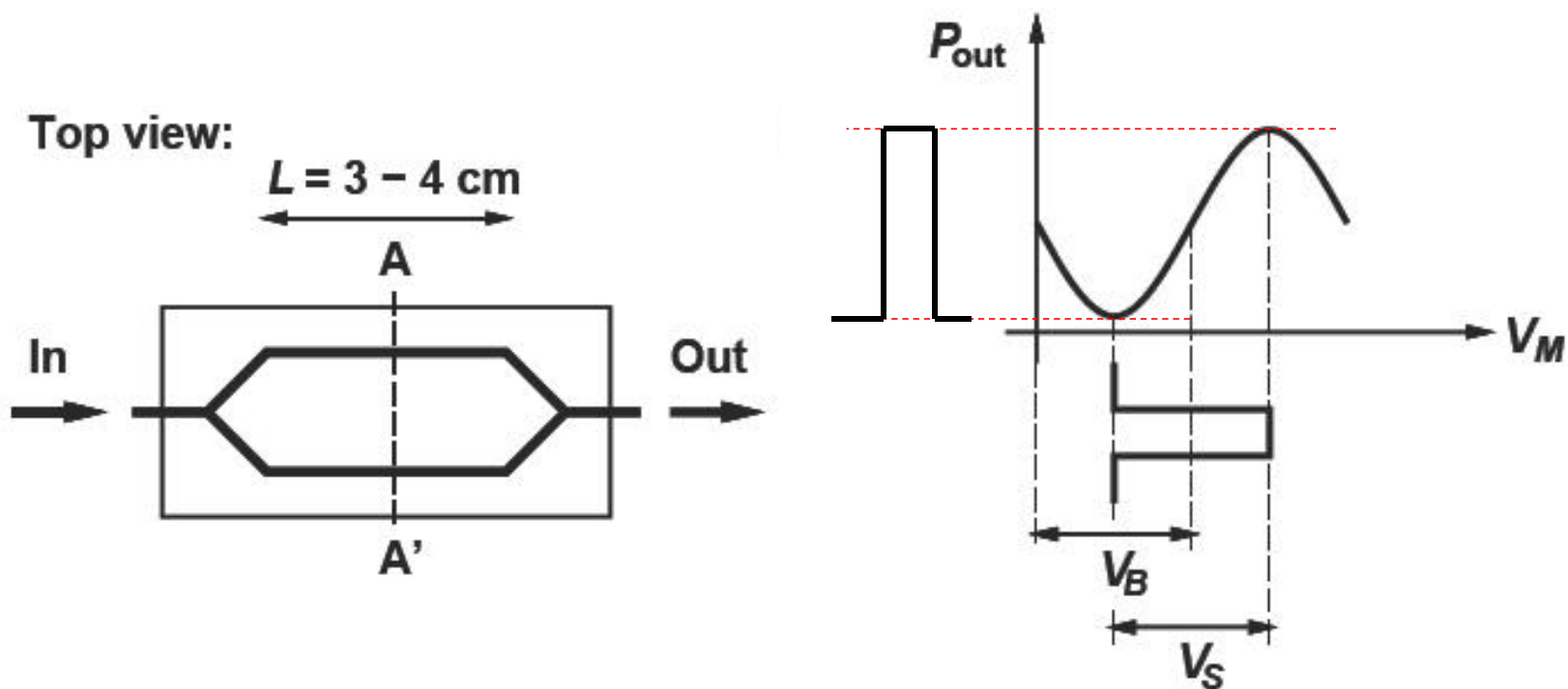
# EA调制



激光器一直处于发光状态，电信号‘1’、‘0’作用于电吸收调制器。来控制激光器出光大小。



# MZ调制



激光器一直处于发光状态，发出的光经过一个Y型波导分束器分出两束相位等一样的光信号，电信号控制两个干涉臂电极，使两束光信号产生不同的相位，再经过Y型合束器，‘1’信号时，相位相同，进行叠加，‘0’信号时，相位相差180度，光信号抵消。



# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 1X9光模块

## 特点:

- 工作速率: 155Mb/s~1Gb/s
- 工作电压: 3.3 V或5V
- 波长: 1310nm, 1550nm
- 宽温工作范围
- 传输距离可达80km

## 应用

- 数据通信: 快速以太网, 千兆以太网
- 电信: OC -3/STM -1, OC -12/STM -4



# GBIC模块

## 特点:

- 工作速率:155Mb/s~ 2.5Gb/s
- 工作电压: 3.3 V或5V
- 波长: 850nm, 1310nm, 1550nm
- 传输距离可达160km
- 带数字诊断功能 (部分)

## 应用:

- 数据通信: 千兆以太网, 1x/2x光纤通道
- 电信: OC-3/STM-1、OC-12/STM-4、OC-48/STM-16





# SFF模块

## 特点:

- 工作速率:155Mb/s~ 2.5Gb/s
- 工作电压: 3.3 V
- 波长: 850nm, 1310nm, 1550nm
- 宽温工作范围
- 传输距离可达80km
- 带数字诊断功能 (部分)

## 应用:

- 数据通信: 快速以太网, 千兆以太网, 1x/2x/4x 光纤通道
- 电信: OC -3/STM-1、OC -12/STM-4、OC-48/STM-16



# SFP模块

## 特点:

- 工作速率:155Mb/s~ 2.5Gb/s
- 工作电压: 3.3 V
- 波长: 850nm, 1310nm, 1550nm, WDM
- 宽温工作范围
- 传输距离可达100km+
- 带数字诊断功能

## 应用:

- 数据通信: 快速以太网, 千兆以太网, 1x/2x/4x 光纤通道
- 电信: OC-3/STM-1、OC-12/STM-4、OC-48/STM-16



# PON模块

## 特点:

- 工作速率:155Mb/s~ 2.5Gb/s
- 工作电压: 3.3 V
- 传输距离可达20km
- 带数字诊断功能

## 应用:

- PON接入网



# XFP模块

## 特点:

- 工作速率:10Gb/s
- 波长: 1310nm, 1550nm, DWDM
- 传输距离可达80km
- 带数字诊断功能

## 应用:

- 数据通信: 10G以太网, 10G光纤通道
- 电信: OC -192/STM -64



# 300-pin Transponder模块

## 特点:

- 速率可达10Gb/s
- 波长: 1550nm, DWDM
- 传输距离可达80km
- 带数字诊断功能

## 应用:

- 电信: OC -192/STM -64

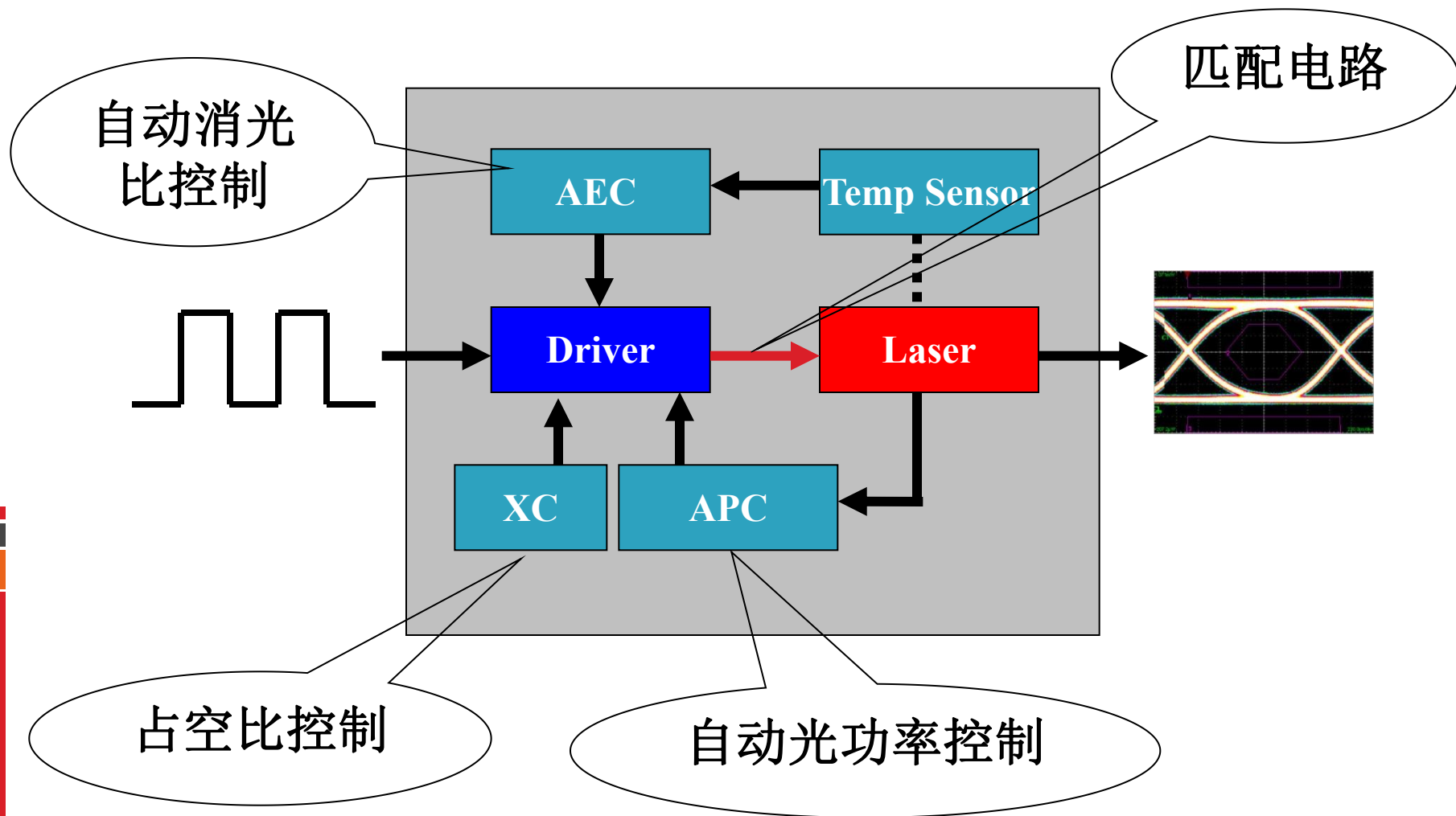


# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平

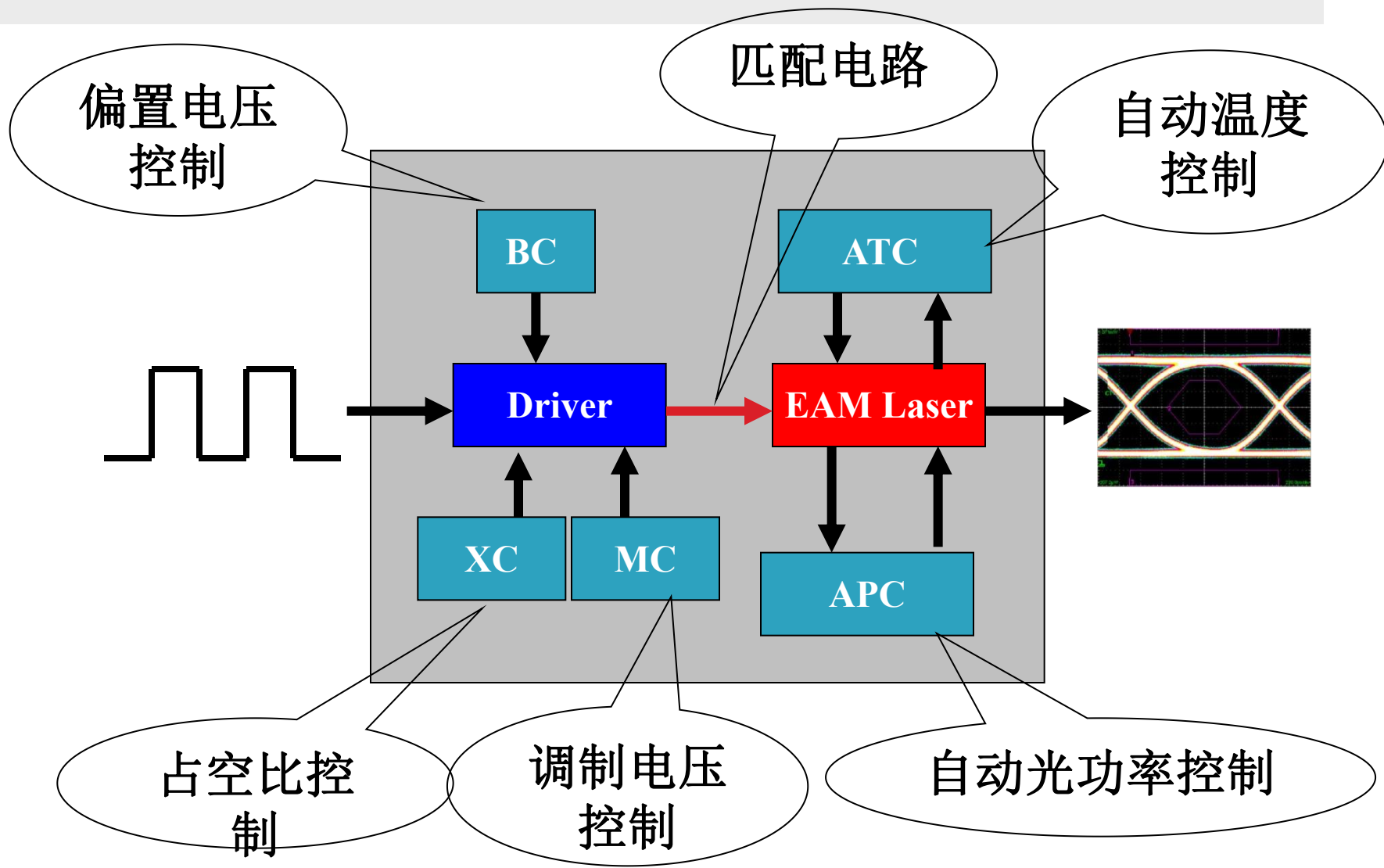


# 典型光发射模块功能框图（直接调制）





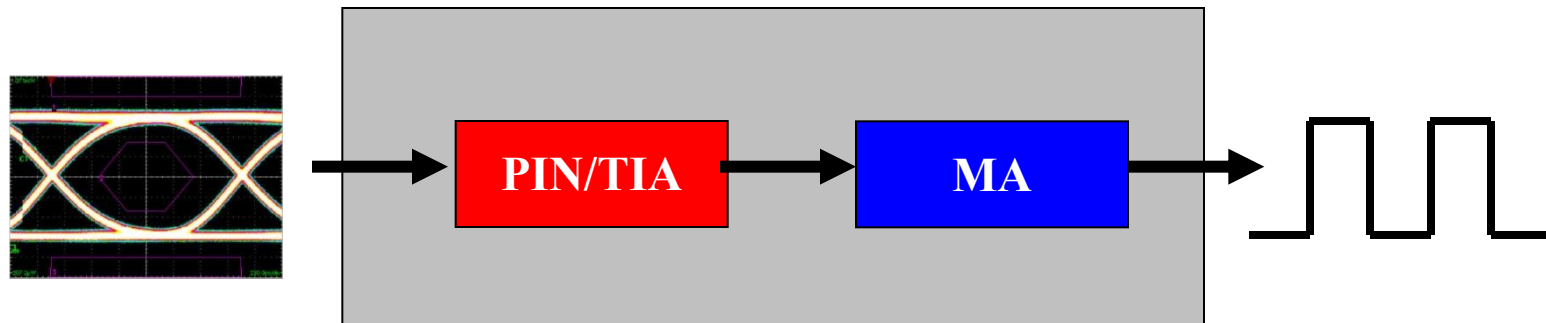
# 典型光发射模块功能框图（外调制）



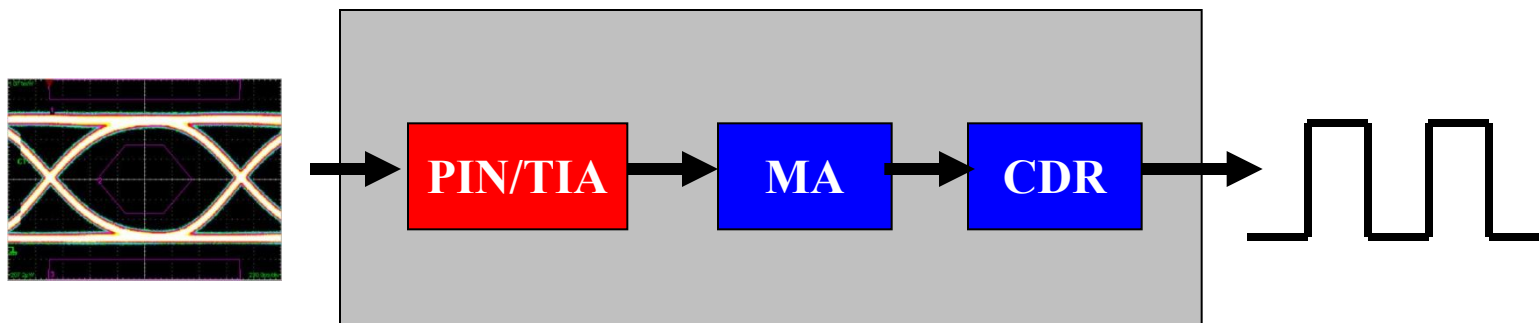




# PIN型光接收模块功能框图



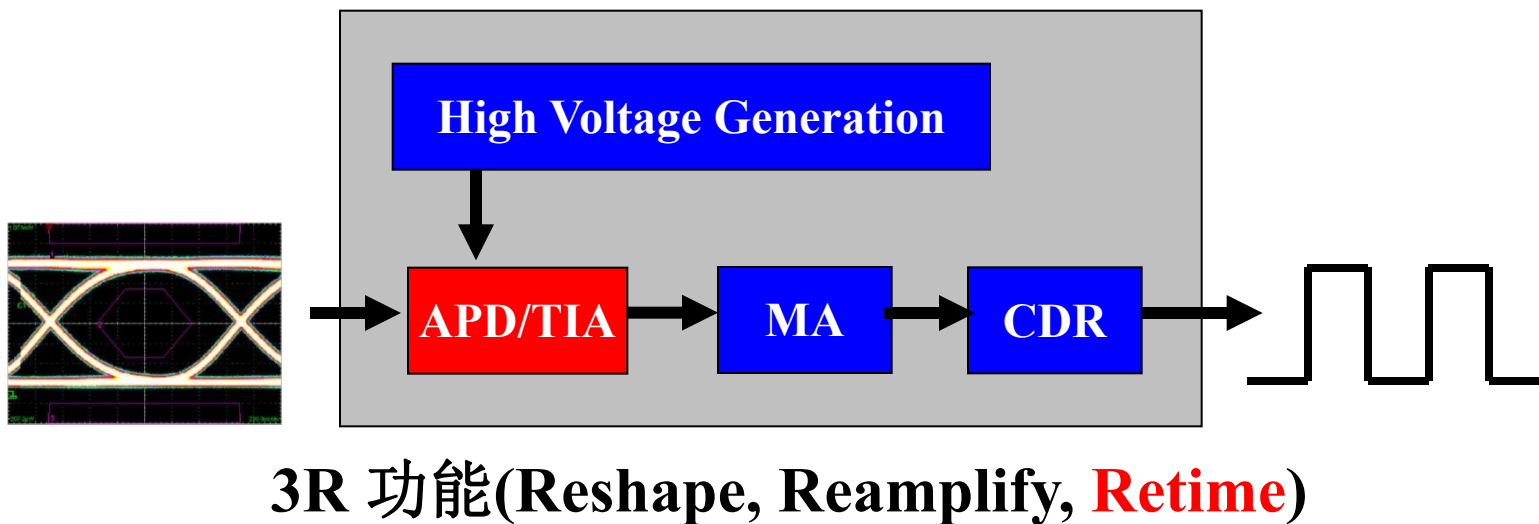
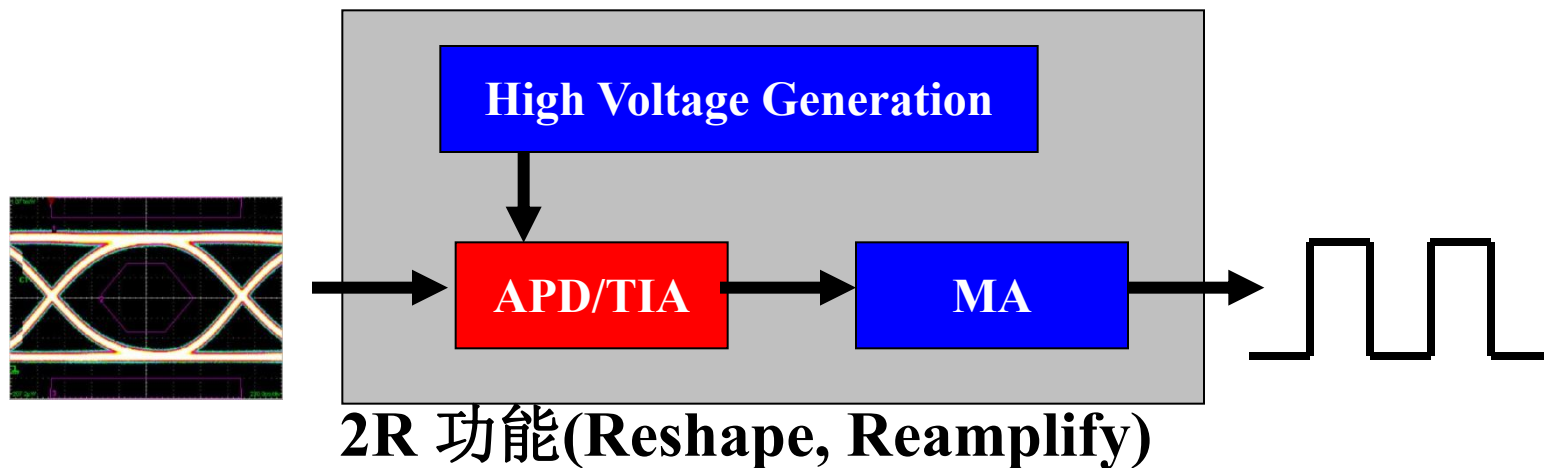
2R 功能(Reshape, Reamplify)



3R 功能(Reshape, Reamplify, **Retime**)

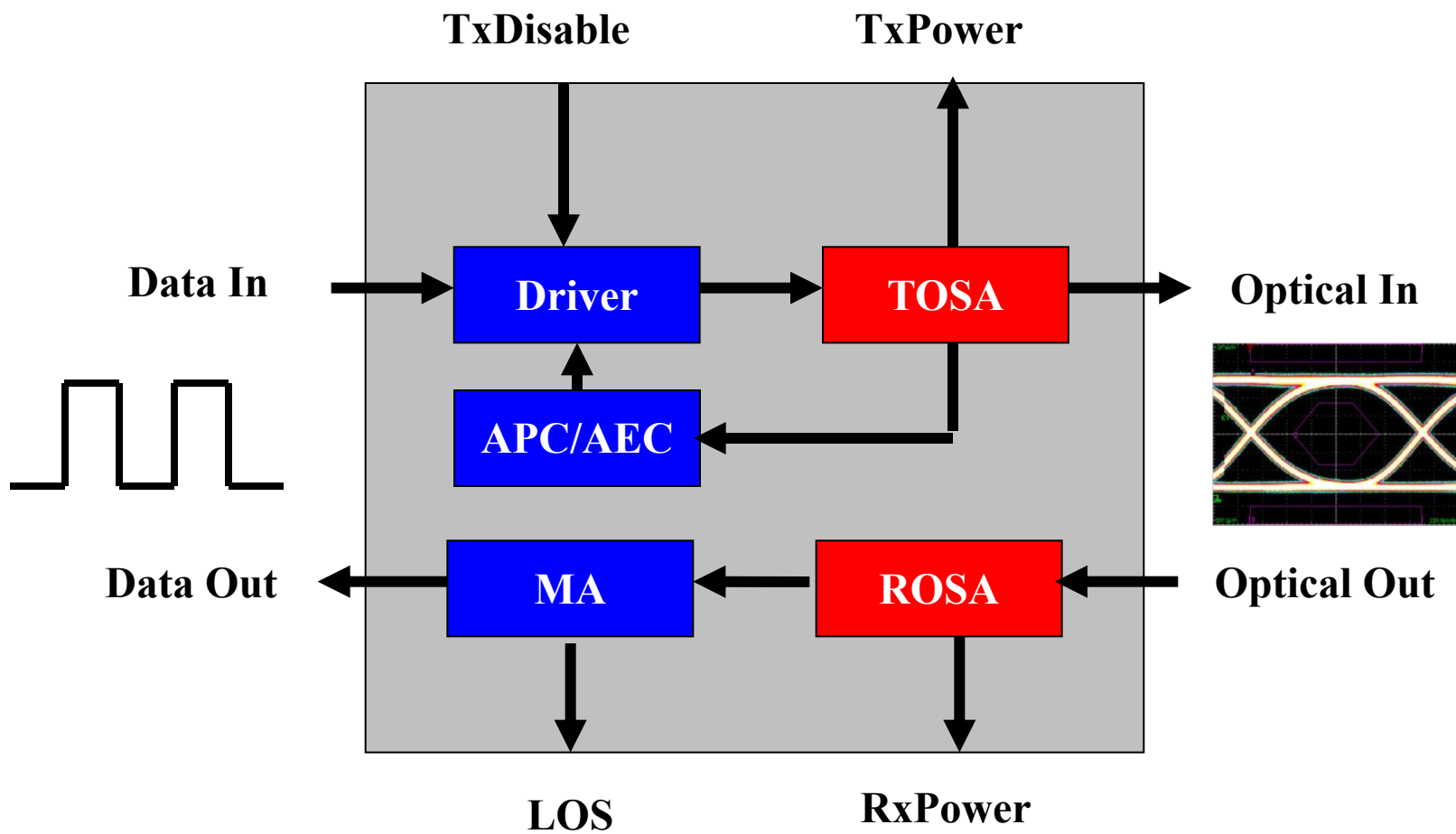


# APD型光接收模块功能框图



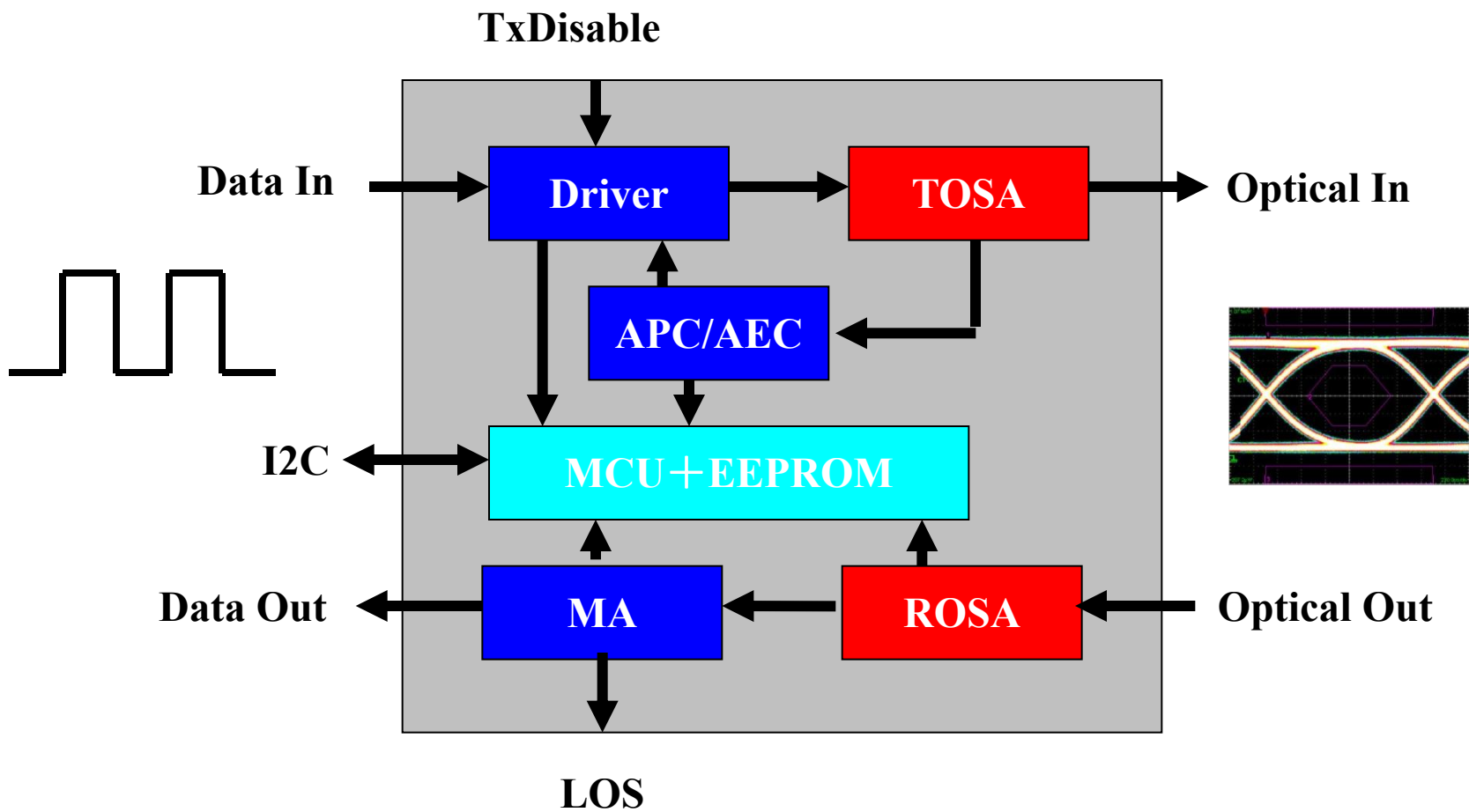


# 光收发合一模块(Transceiver)功能框图





# 带数字诊断功能(DDM)光收发合一模块功能框图





# 数字诊断(DDM)模块特点

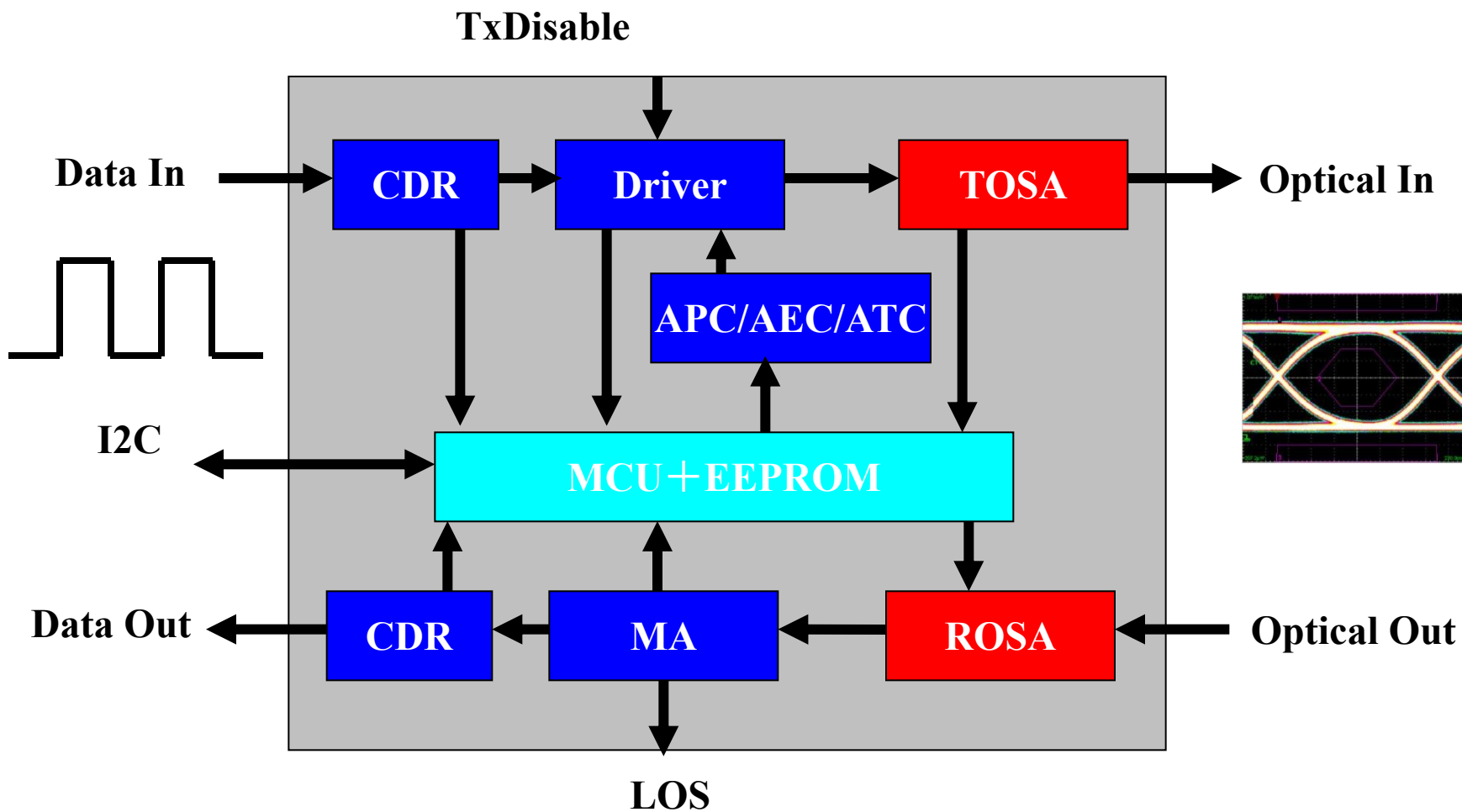
特点一：数字电位器（或ADC）代替传统调节电阻，通过串行数据总线I2C访问及读写

特点二：**EEPROM**（电可擦除可编程只读存储器）空间有**A0h**和**A2h**两个空间组成：其中，**A0h**用来存固定信息；而**A2h**则主要用来存储与**DDM**监控功能相关的信息。

特点三：模块具有监控（**Monitoring**）功能。即能实时监控上报温度（**Temperature**），供电电压（**Vcc**），偏流（**Bias**），发射功率（**TxP**）及接收功率（**RxP**）五个特性参数

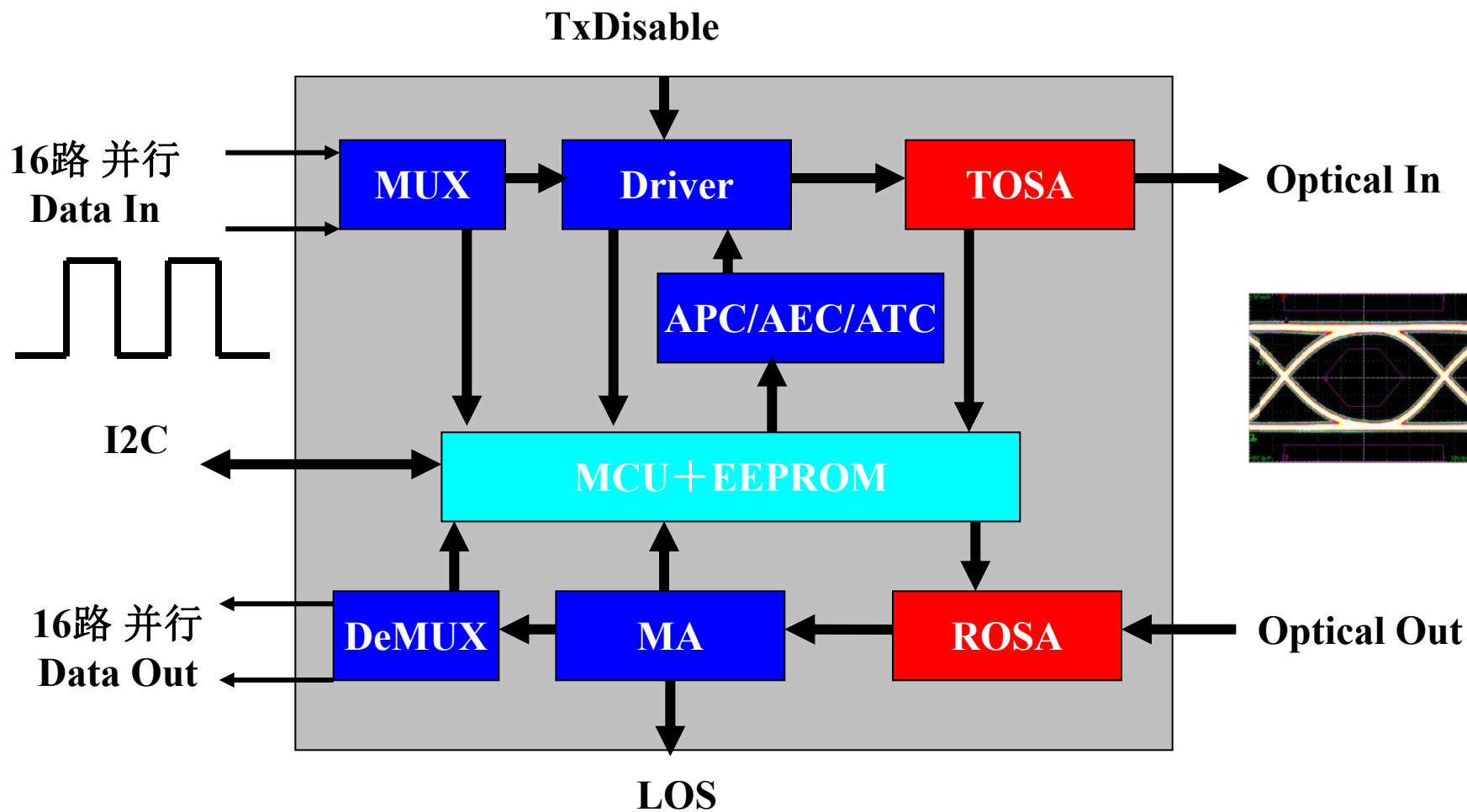
特点四：模块具有诊断功能。模块通过相应的接口监控待测模块的**5**个上报参数是否在正常的范围内。如**SFF-8472**中规定每个参数有两级告警，分别称作**Alarm**和**Warning**告警，而每级又分为**High**和**Low**两个告警

# 光收发合一模块(XFP)功能框图





# Transponder模块功能框图

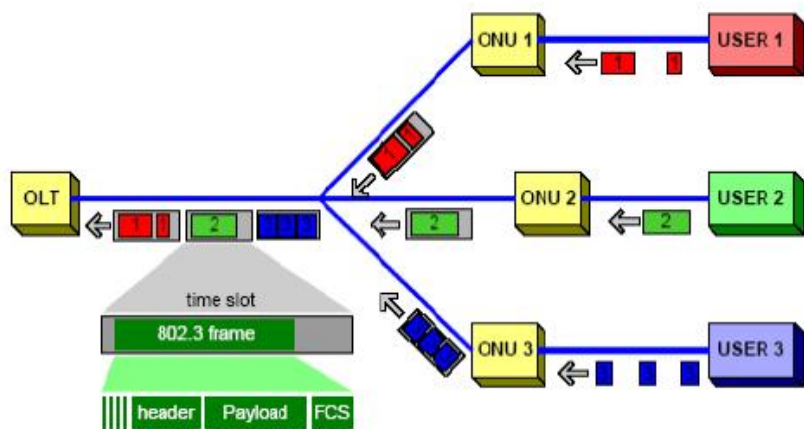




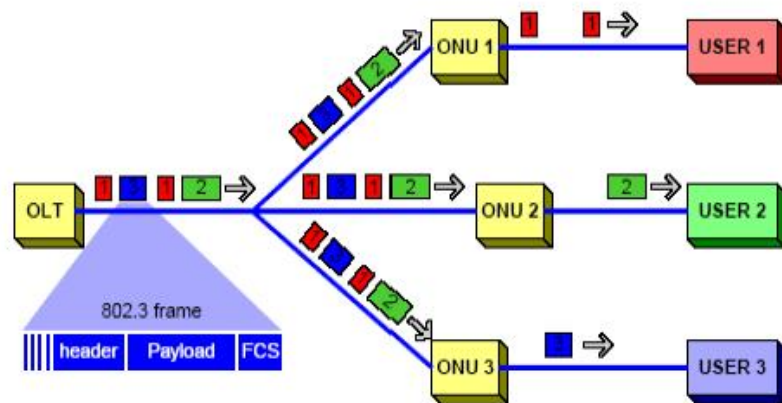
# PON模块

PON系统采用点到多点的网络拓扑结构，WDM技术的运用使得不同的方向使用不同波长的光信号。为了分离同一根光纤上多个用户的来去方向的信号，采用以下两种复用技术：下行数据流采用TDM技术，而上行数据流采用TDMA技术。

## □ 上行传输：TDMA



## □ 下行传输：广播方式

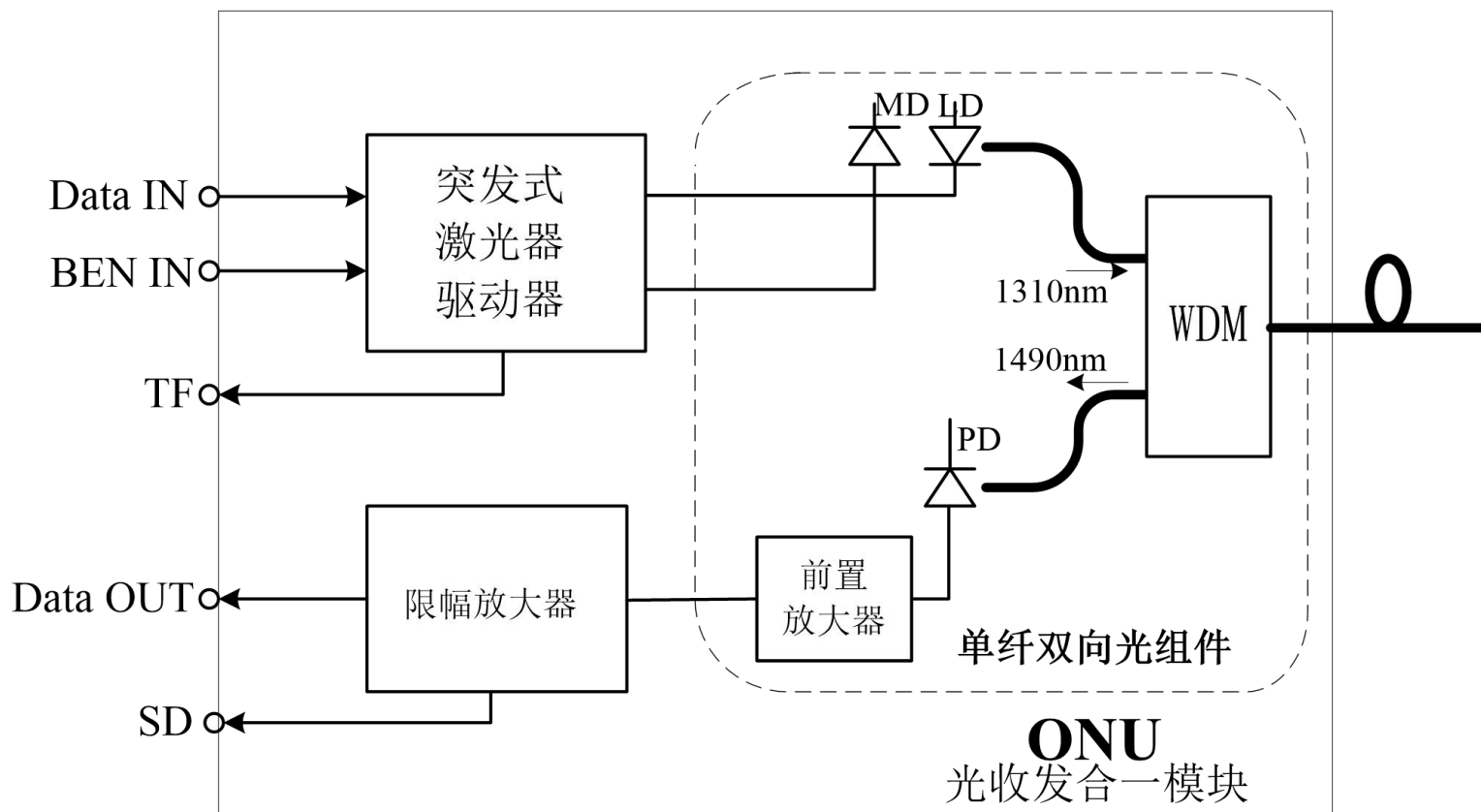


**TDM: Time Division Multiplex** 时分多路复用

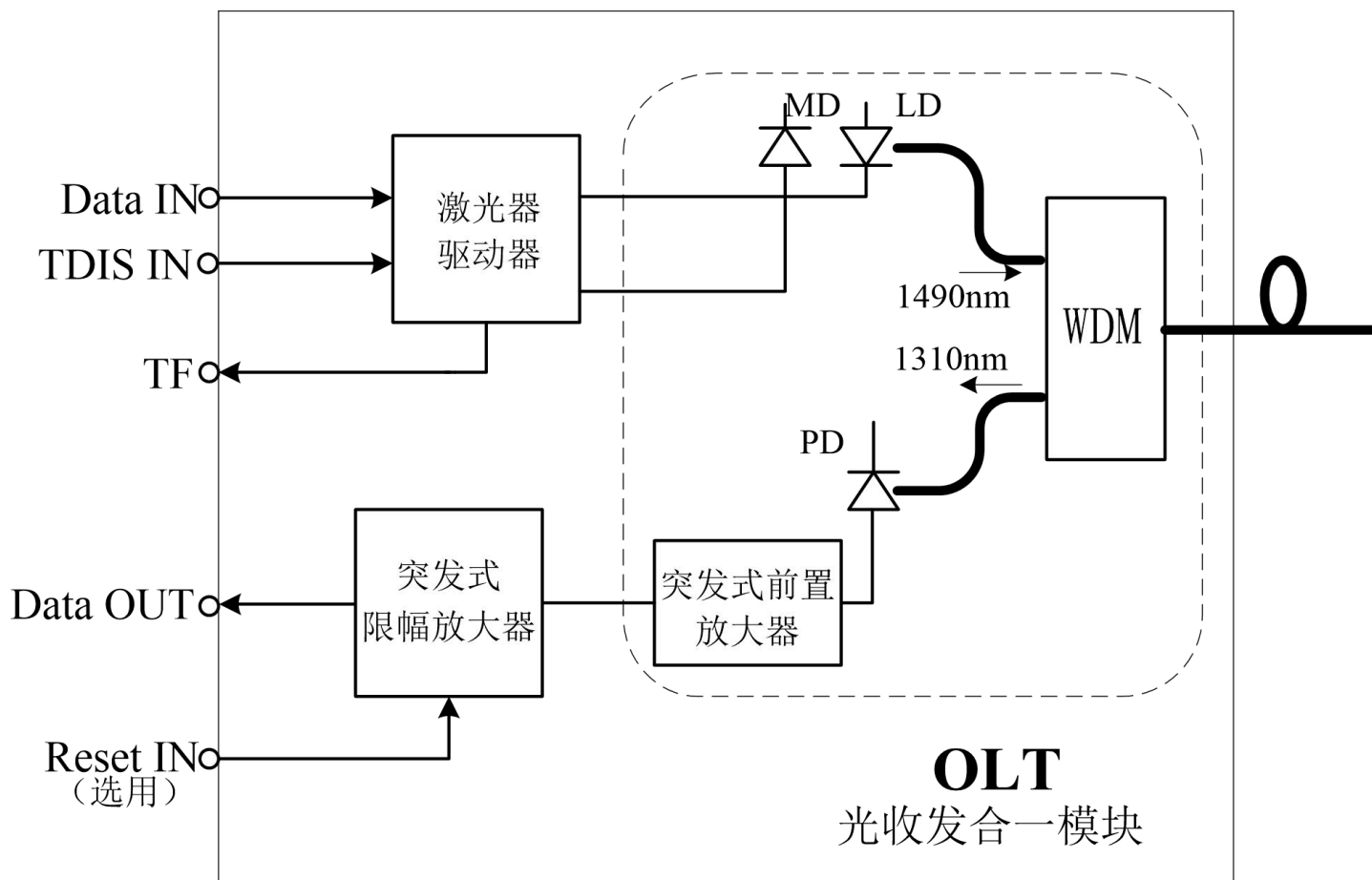
**TDMA: Time Division Multiple Address** 时分多路访问



# ONU光收发合一模块功能框图

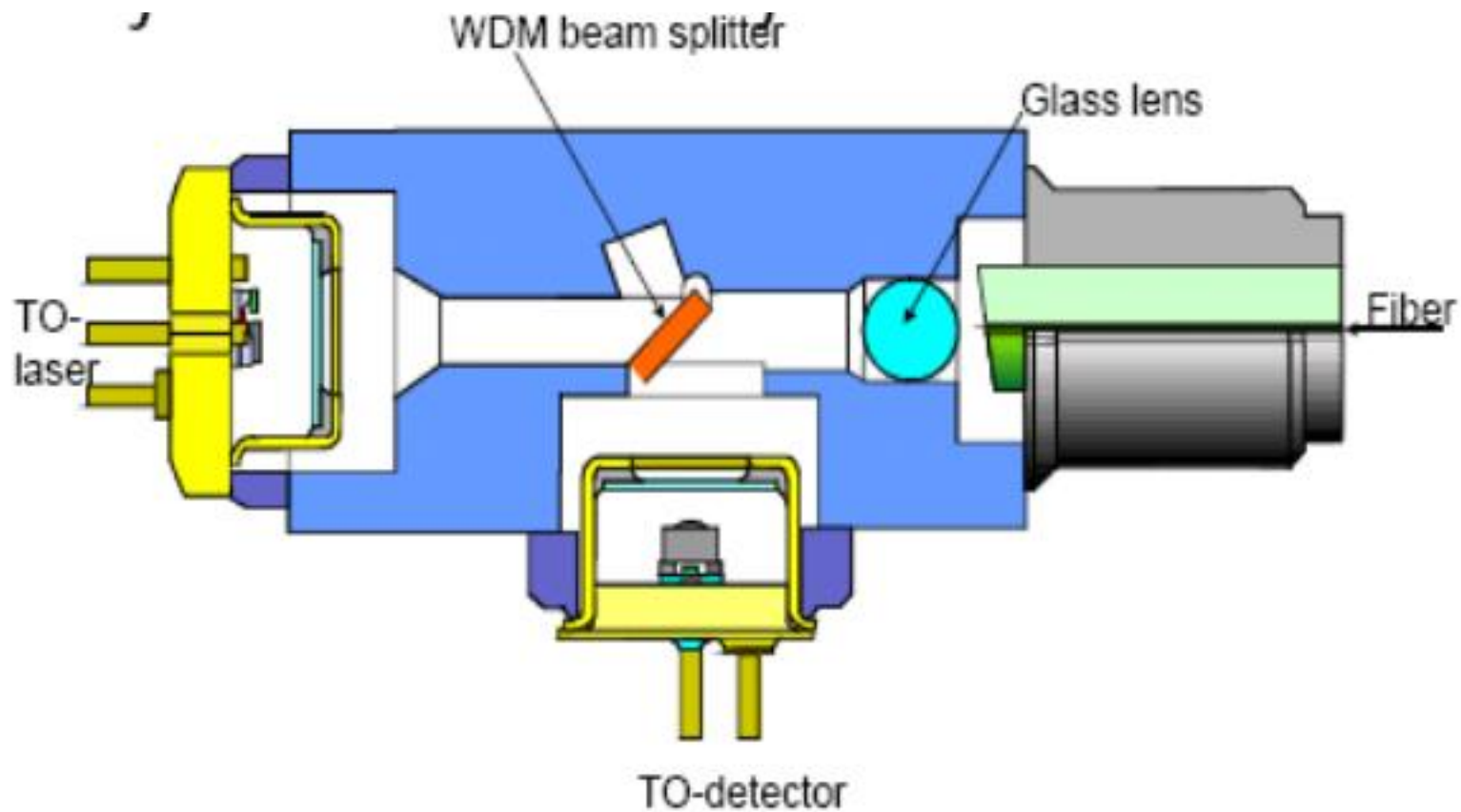


# OLT光收发合一模块功能框图





## ➤ 单纤双向光组件(Bi-Directional Optical Subassembly)





# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 光模块主要性能指标

- 传输速率
- 传输距离
- 平均发射光功率
- 消光比
- 光眼图
- 谱宽
- 最小边模抑制比
- 接收灵敏度
- 接受器过载
- 光通道代价
- 抖动



# 传输速率

传输速率指在单位时间内通过信道的平均信息量，一般有比特速率和码元速率两种表示方法。由于对于二进制码元，比特速率和码元速率相等。比特速率指系统每秒钟传送的比特数，单位为bit/s

SDH等级	系列比特率
STM-1	155.52Mb/s
STM-4	622.08Mb/s
STM-16	2.48832Gb/s
STM-64	9.95328Gb/s



# 传输距离

传输距离指模块在特定光纤传输系统中能够无差错传输的最大距离  
影响传输距离的因素：光纤（损耗、色散等），激光器（功率，波长，工作方式），探测器灵敏度，传输速率等

- 功率受限系统传输距离的计算：（光功率，灵敏度，光纤损耗等）

目标传输距离L(km)  $L < (P_{min} - S_{min} - P_b - M) / K$ （K为光纤损耗系数、 $P_b$ 是传输代价、M为功率裕量、 $P_{min}$ 发射最小光功率、 $S_{min}$ 接收最小灵敏度）。

(以G.652光纤为例)  $K=0.18\text{dB/km}$  @ $\lambda_c=1.31\mu\text{m}$   $K=0.35\text{dB/km}$  @ $\lambda_c=1.55\mu\text{m}$

- 色散受限系统传输距离的计算：（光纤模式，激光器工作方式，传输速率等）

$$B_{[Gb/s]}^2 \cdot L_{[km]} \cdot D_{[ps/nm/km]} = 10^5$$

B 比特速率，D 色散系数，L为距离



## 平均发射光功率

- 发送机的发射光功率和所发送的数据信号中“1”占的比例有关，“1”越多，光功率也就越大。
- 当发送伪随机信号时，“1”和“0”大致各占一半，这时测试得到的功率就是平均发送光功率。
- 单位为dBm，和mw的关系---- $10\log P(\text{mw})$







# 消光比

光数据全部为“1”时，平均光功率为A；光数据全部为“0”时，平均光功率为B，则消光比为：

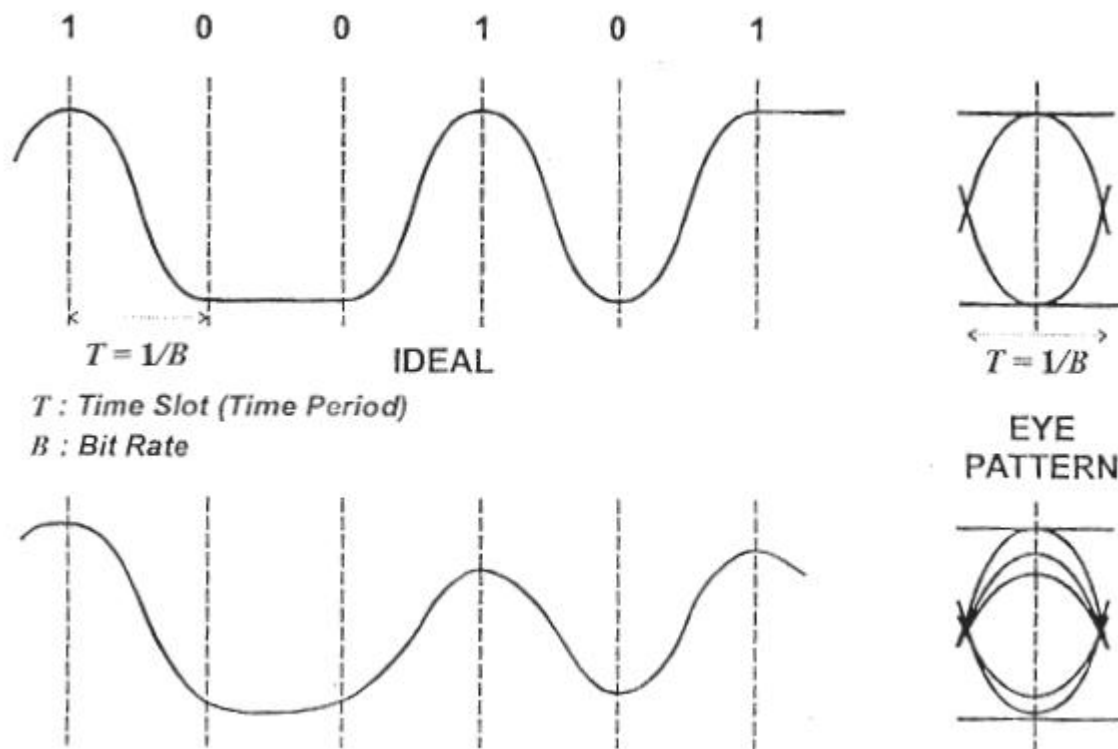
$$EX=10\lg(A/B)$$

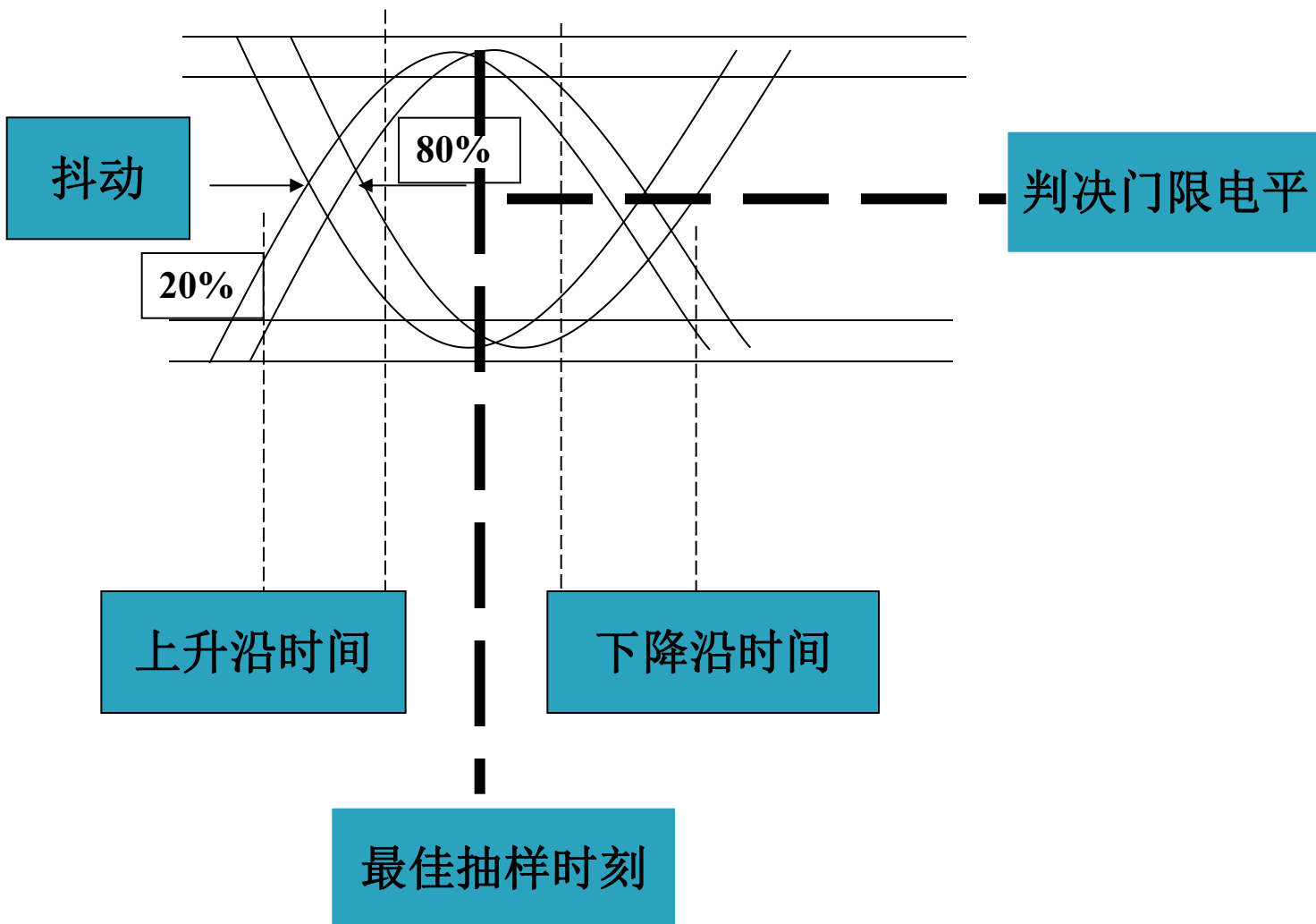
- 消光比太大，则引起啁啾声，频谱变宽，色散变大；消光比太小，则接收机很难将光的“1”和“0”分开，因此消光比不能太小，也不能很大，在协议上只规定了最小消光比。
- 一般建议实际消光比实际光接口类型与速率传输距离有关的最低要求消光比大0.5~1.5dB
- 这不是一个绝对的数值之所以给出这么一个数值是害怕消光比太高了传输以后信号劣化太厉害导致误码产生或通道代价超标
- 如果一个光模块传输传输其标称距离以后没有产生误码并且通道代价满足指标要求只要消光比大于ITU-T建议的最低值多大都可以



# 光眼图

- 眼图包含了信号的上升时间、下降时间、脉冲过冲、脉冲下冲以及震荡等特性







# 眼图信息

对于数字信号的质量,可通过眼图分析(过识别)来衡量,数字信号的质量包括幅度稳定度、码间干扰、信号畸变、光反射、消光比、抖动过冲和张弛振荡、噪声、调制电路匹配等

- 眼图中心眼张开度和眼皮厚度,反映码间干扰、色散、消光比的可容忍程度,以及幅度稳定度、过冲和张弛振荡、光反射、噪声的大致量度
- 眼图上/下前沿反映带宽和电路匹配信息. 陡度反映带宽,线粗度反映电路匹配信息,但过陡易产生色散相位调制和交叉相位调制
- 眼图上/下沿交点在50%处消光比最好,但由于传输过程中光信号的脉冲宽度将会展宽,导致接收侧的交叉点相对于发送侧上移。为了有利于长距离传输保证接收侧的交叉点比例在大约50 左右,使得接收侧的灵敏度最佳。我们一般建议在发送侧把交叉点的位置稍微下移一些。一般发送侧交叉点比例建议控制在40%~45%
- 眼图上/下沿交点的粗细程度反映了抖动的大小.



# 谱宽

## ➤ 最大均方根谱宽

发光二极管（LED）和多纵模（MLM）激光器的参数，指光谱中比主峰小20dB 的谱宽

## ➤ 最大-20dB 谱宽

单纵模（SLM）激光器的参数，是用中心波长的幅度下降到20dB 处对应的波长宽度来表示





## 最小边模抑制比

- 单纵模（SLM）激光器的参数，指主纵模的平均光功率与最显著边模的光功率之比的最小值。
- 如果太小，那么经过长距离的传输，可能会引起比较大的色散。





# 接收机灵敏度

在一定误码率的条件下，模块所能接收到的最小光功率，单位为dBm

影响接收灵敏度的因素：

- 比特速率 (Bit rate)
- 发射光信号质量 (眼图；抖动，OSNR等)
- 发射消光比
- 传输后的脉冲波形失真(Distortion)
- 接收机的带宽(Bandwidth)
- 电源纹波
- 串扰等



# 接收机过载功率

- 这个参数指接收机在达到规定的比特差错率所能接收到的最高平均光功率。
- 影响最过载点的主要因素
  - PIN/APD饱和
  - TIA饱和







## 光通道代价

光通道代价代表了由于反射、符号间的干扰、模式分配噪声、激光器的啁啾声等引起的总的色散代价。

由于发送机发出来的光不是理想的激光，而且在激光器处存在反射等等都引起了光的色散，在接收机处要对色散加以一定的处理，因此光通道代价是说明了发送机和接收机两个方面的性能。

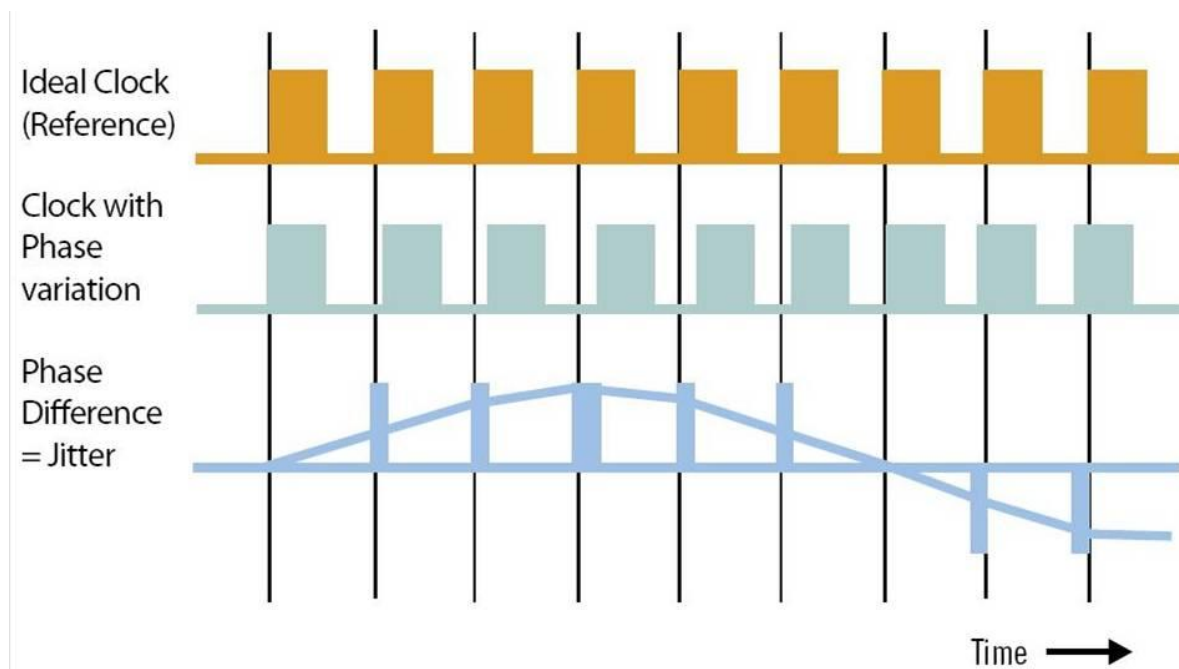




# 抖动

所谓抖动，其定义为数字信号各有效瞬间相对于理论规定时间位置的短期偏离。

抖动的单位为UI，所谓UI指光传送比特率的倒数：例如10Gb/s信号， $1\text{UI}=1/10\text{G}=100\text{ps}$





# 主要内容

- 光模块简介
- 光模块内部主要元器件
- 光模块调制方式
- 光模块的特点及应用
- 光模块原理框图
- 光模块主要性能指标
- 光模块接口电平



# 模块接口电平

- **TTL (Transistor-Transistor Logic )**晶体管-晶体管逻辑电平 和**LVTTTL (Low Voltage TTL)**
- **PECL (Positive Emit-Coupled Logic)**发射极耦合逻辑电平、**LVPECL**和**ECL**
- **CML (Current Mode Logic)** 电流型逻辑电平
- **LVDS (Low Voltage Differential Signals)**低压差分信号





# TTL和LVTTTL电平

- **TTL: Transistor-Transistor Logic 三极管结构**  
**Vcc: 5V; VOH $\geq$ 2.4V; VOL $\leq$ 0.5V; VIH $\geq$ 2V; VIL $\leq$ 0.8V**  
。

因为2.4V与5V之间还有很大空闲，对改善噪声容限并没有什么好处，又会白白增大系统功耗，还会影响速度。

- **LVTTTL又分3.3V、2.5V以及更低电压**  
**3.3V; VOH $\geq$ 2.4V; VOL $\leq$ 0.4V; VIH $\geq$ 2V; VIL $\leq$ 0.8V。**

TTL使用注意：TTL电平一般过冲都会比较严重，可能在始端串22欧或33欧电阻；TTL电平输入脚悬空时是内部认为是高电平。要下拉的话应用1k以下电阻下拉。



# ECL, PECL和LVPECL电平

- **ECL: Emitter Coupled Logic** 发射极耦合逻辑电路(差分结构)  
 $V_{cc}=-5.2V$ ;  $VOH=-0.88V$ ;  $VOL=-1.72V$ ;  $VIH=-1.24V$ ;  $VIL=-1.36V$ 。

速度快, 驱动能力强, 噪声小, 很容易达到几百M的应用。但是功耗大, 需要负电源。为简化电源, 出现了PECL(ECL结构, 改用正电压供电)和LVPECL。

- **PECL: Pseudo/Positive ECL**  
 $V_{cc}=5V$ ;  $VOH=4.12V$ ;  $VOL=3.28V$ ;  $VIH=3.78V$ ;  $VIL=3.64V$

- **LVPECL: Low Voltage PECL**  
 $V_{cc}=3.3V$ ;  $VOH=2.42V$ ;  $VOL=1.58V$ ;  $VIH=2.06V$ ;  $VIL=1.94V$

ECL、PECL、LVPECL使用注意: 不同电平不能直接驱动。中间可用交流耦合、电阻网络或专用芯片进行转换。以上三种均为射随输出结构, 必须有电阻 拉到一个直流偏置电压。(如多用于时钟的LVPECL: 直流匹配时用130欧上拉, 同时用82欧下拉; 交流匹配时用82欧上拉, 同时用130欧下拉。但两种工作方式后直流电平都在1.95V左右。)



# LVDS电平

## **LVDS: Low Voltage Differential Signaling**

差分对输入输出，内部有一个恒流源3.5-4mA，在差分线上改变方向来表示0和1。通过外部的100欧匹配电阻(并在差分线上靠近接收端)转换为±350mV的差分电平。

**LVDS使用注意：**可以达到600M以上，PCB要求较高，差分线要求严格等长，差最好不超过10mil(0.25mm)。100欧电阻离接收端距离不能超过500mil，最好控制在300mil以内。



# CML电平

CML电平是所有高速数据接口中最简单的一种。其输入和输出是匹配好的，减少了外围器件，适合于更高频段工作。

CML接口典型的输出电路是一个差分对形式。该差分对的集电极电阻为 $50\ \Omega$ ，输出信号的高低电平切换是靠共发射极差分对的开关控制的。差分对的发射极到地的恒流源典型值为 $16\ \text{mA}$ 。







谢谢!

