



全光通信网

第三部分 全光网关键技术

陈根祥

北京交通大学 2006·秋

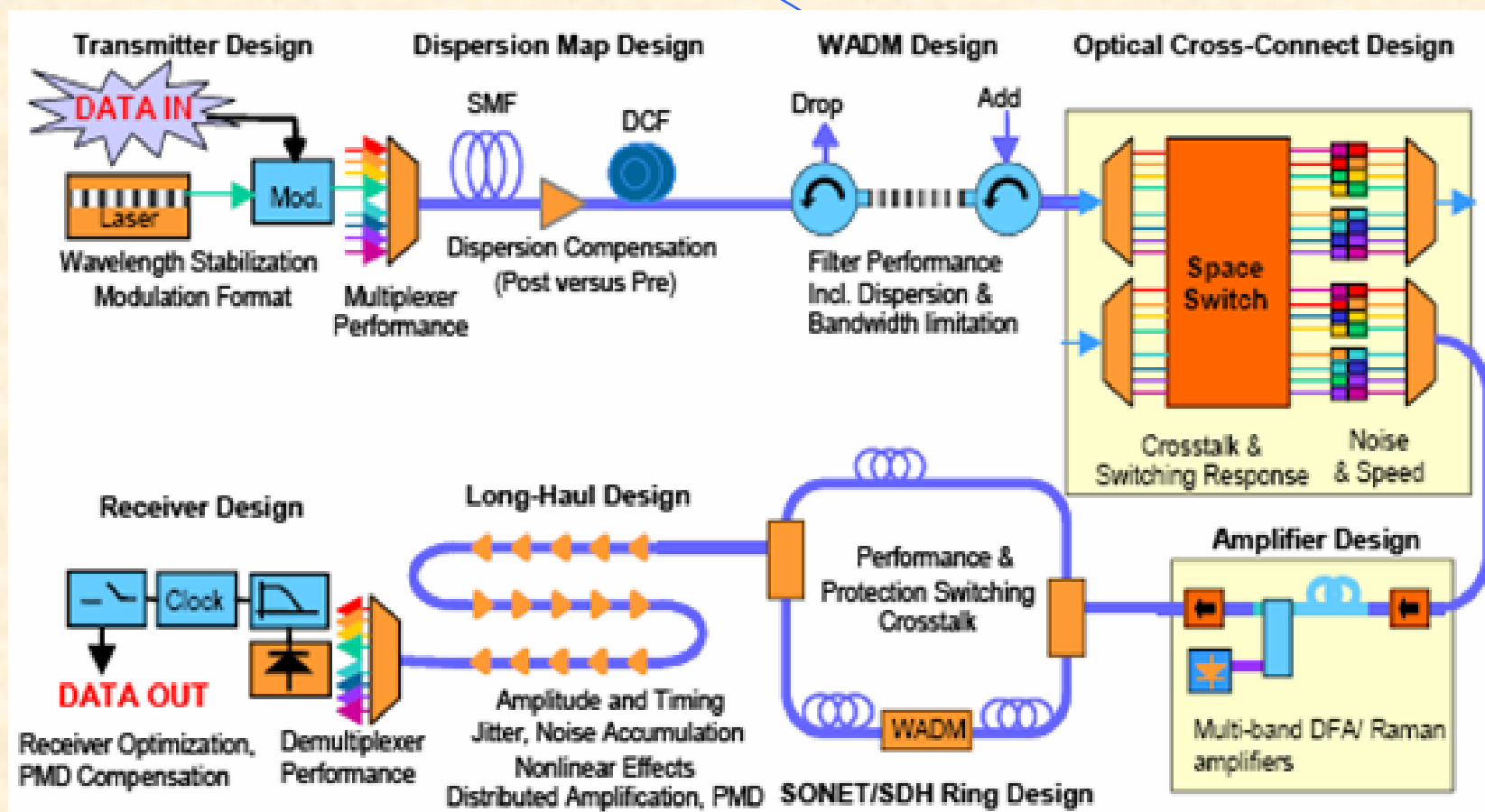


内容

- 光层
- 光复用技术
- 光交换技术
- 光分插复用器 (OADM)
- 多波长可调谐激光器技术



全光网核心技术概览





光层 (Optical Layer)



背景

- 当前，几乎所有网络信息的传输都是通过光纤实现的
- 采用WDM技术使光纤的通信容量成百倍的增长
- 虽然目前的光纤通信网均以光纤为传输介质，但所有与交换与分插复用相关的功能均需要在电的领域完成 — 第一代光纤通信网
- ITU-T已正式建议在通信网中引入光层，其目的是构建第二代光纤通信网 — 全光网

引入光层的必要性:

- 现有的PDH, SDH, ATM和IP等网络层针对Mbit/s – Gbit/s的传输容量设计
- 微电子技术的信息处理速度仅为数十Gbit/s量级 — 电子瓶颈

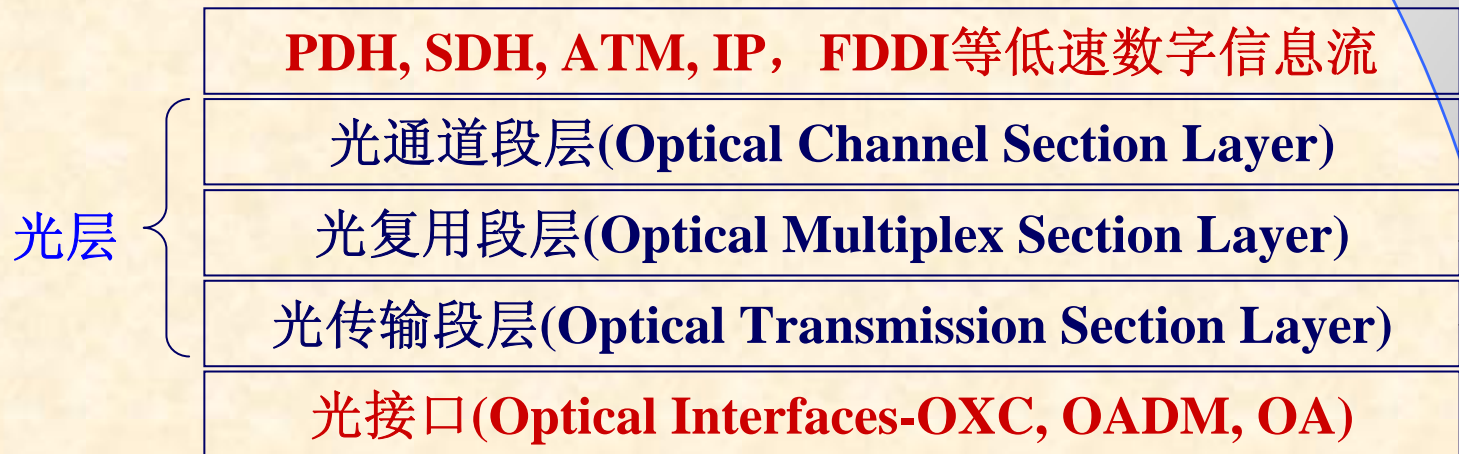


光层的功能与结构

功能:

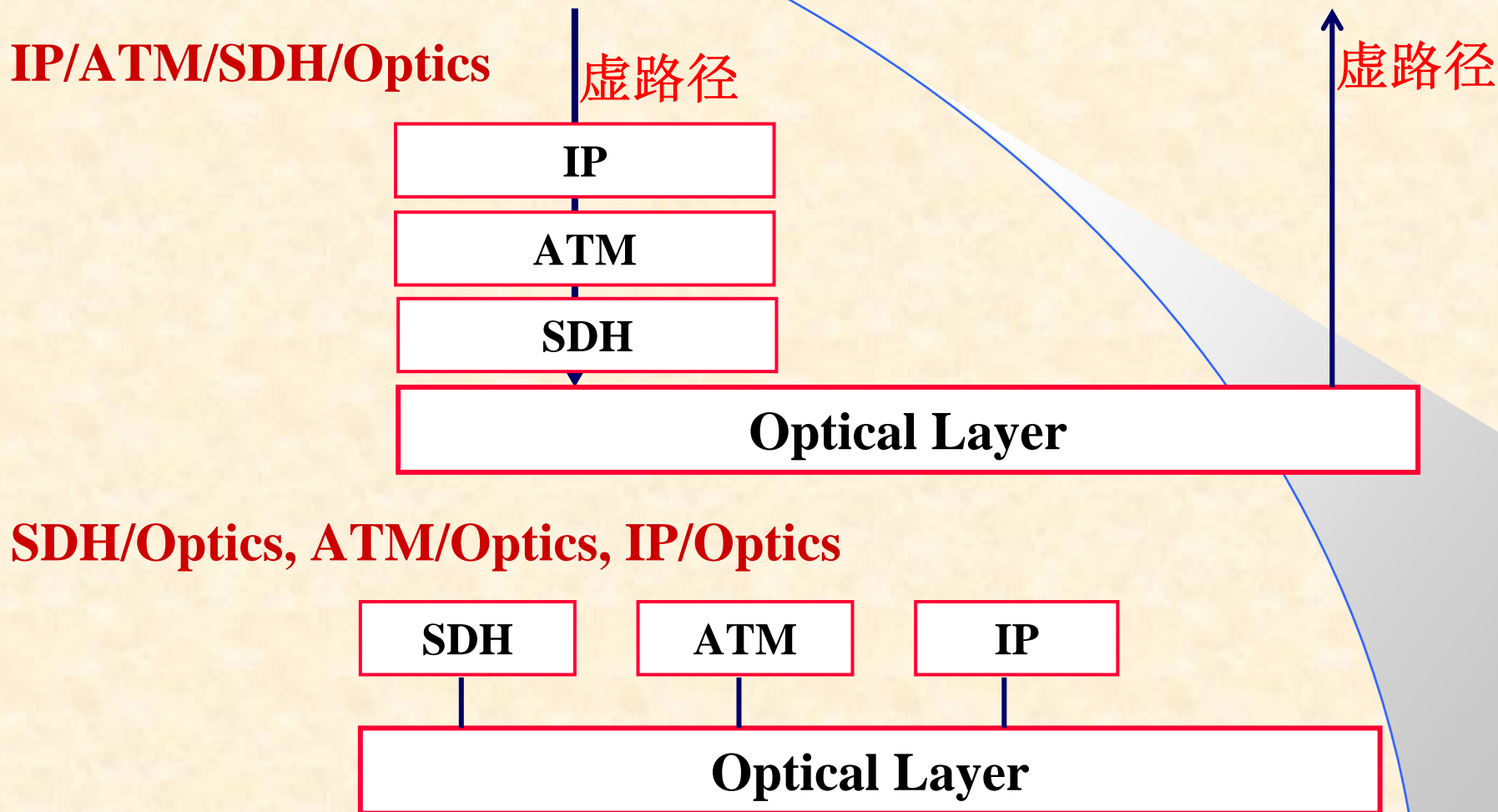
- 提供点对点光纤连接, 光放大, 光再生
- 提供光域的路由和分插复用功能
- 提供端到端的虚光路连接, 信号复接, 通道安排与倒换
- 由于WDM技术较为成熟, 上述功能主要针对波长通道实现

分层结构:





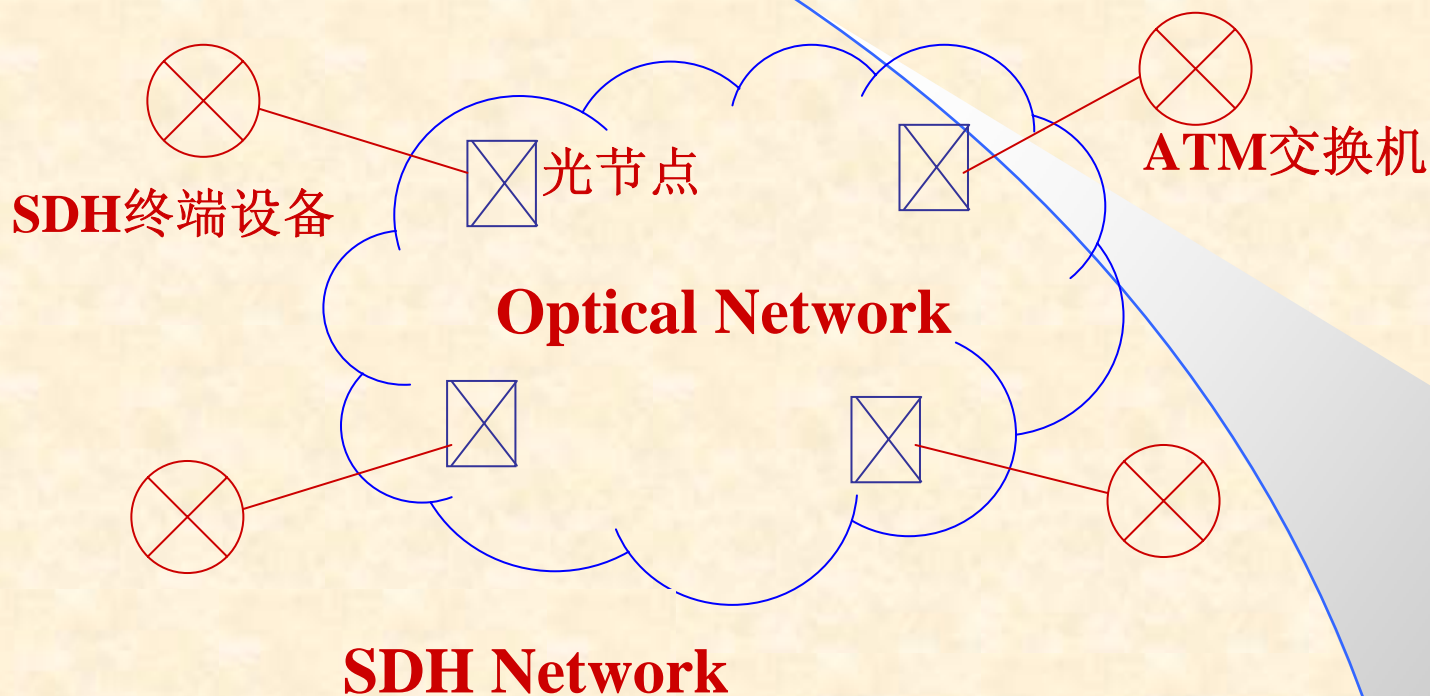
全光网逻辑结构



目前, Optics \approx WDM



SDH over Optics



SDH Layer

Optical Layer



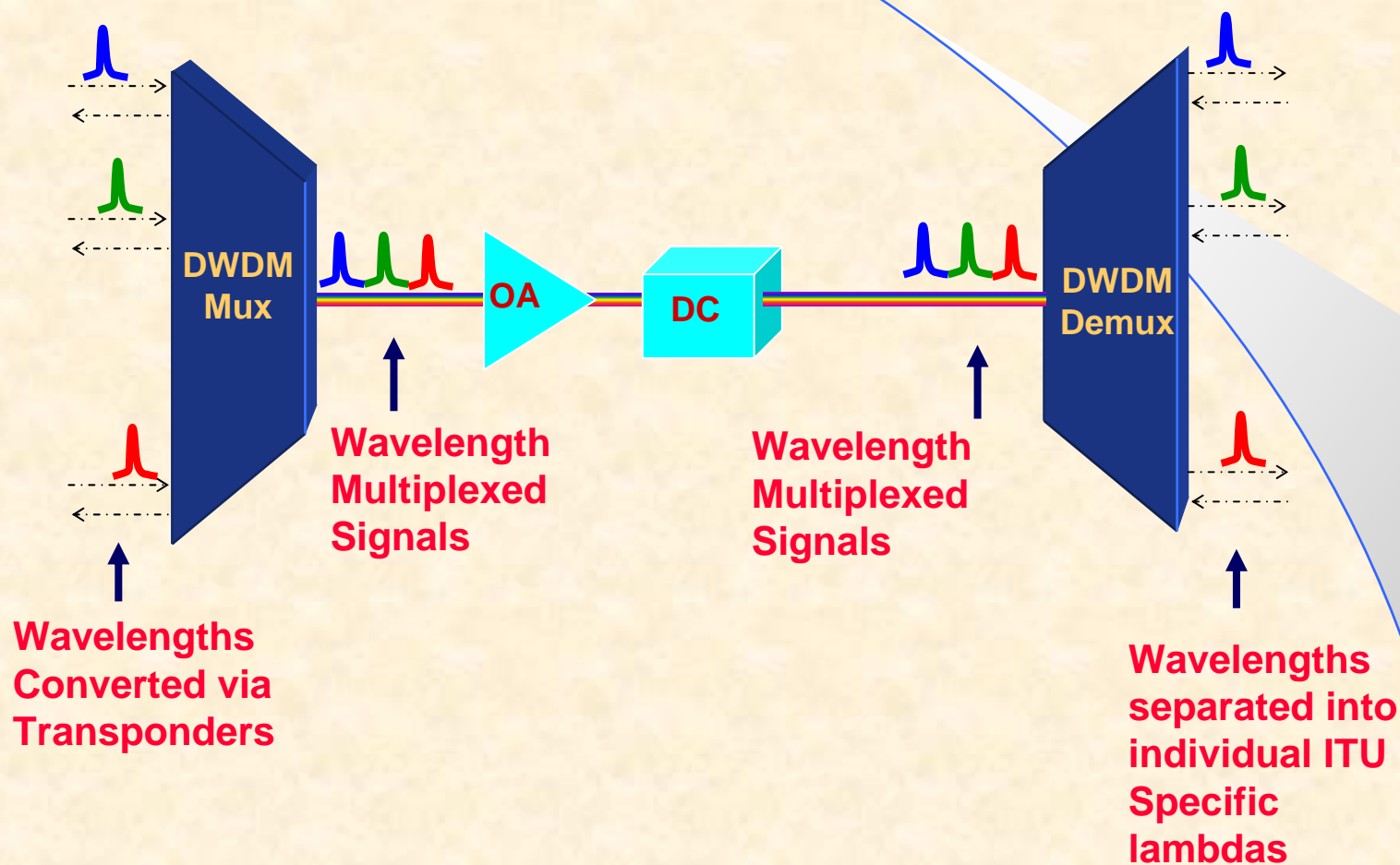
光复用技术



概述

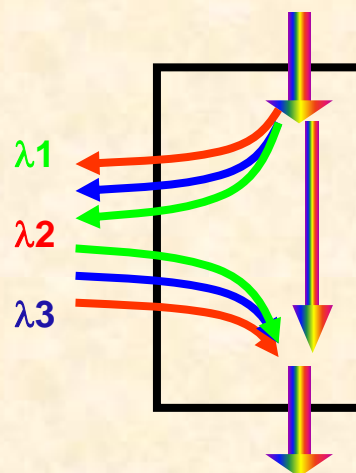
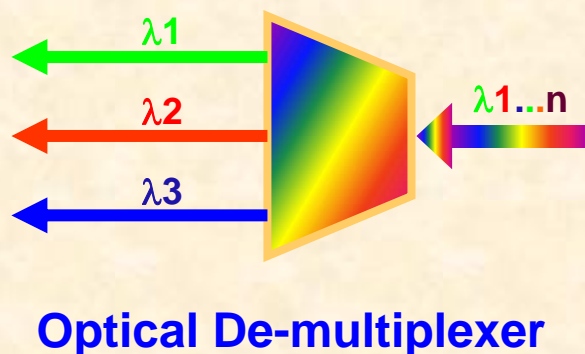
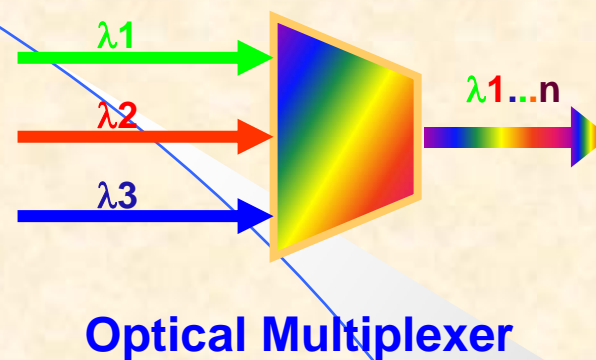
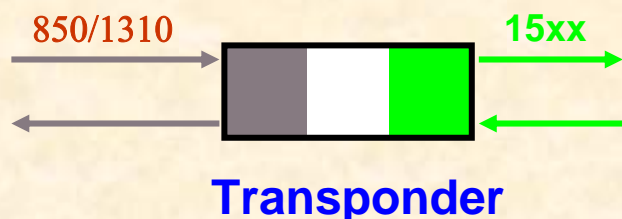
- 复用的目的是充分利用通信线路的带宽
- 波分复用 (WDM)
- 光时分复用 (OTDM)
- 光码分复用 (OCDMA)
- 副载波复用 (SCM)

波分复用 (WDM)





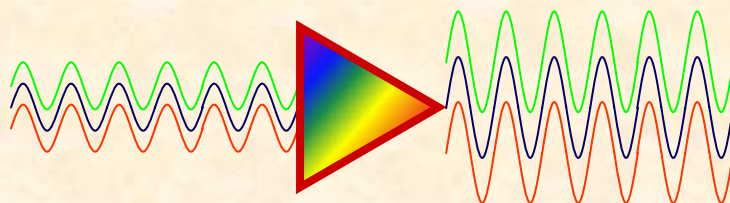
WDM Components



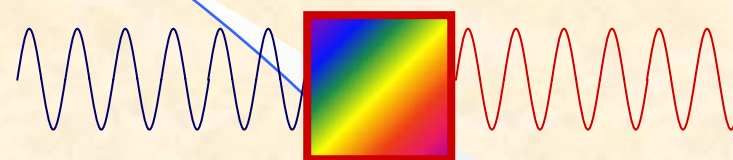
Optical Add/Drop Multiplexer (OADM)



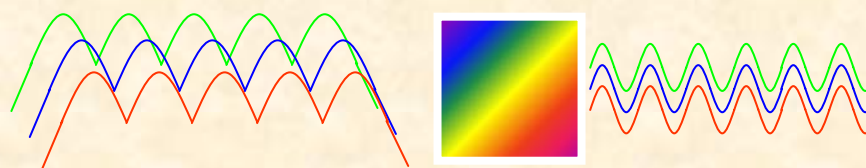
More DWDM Components



**Optical Amplifier
(EDFA)**

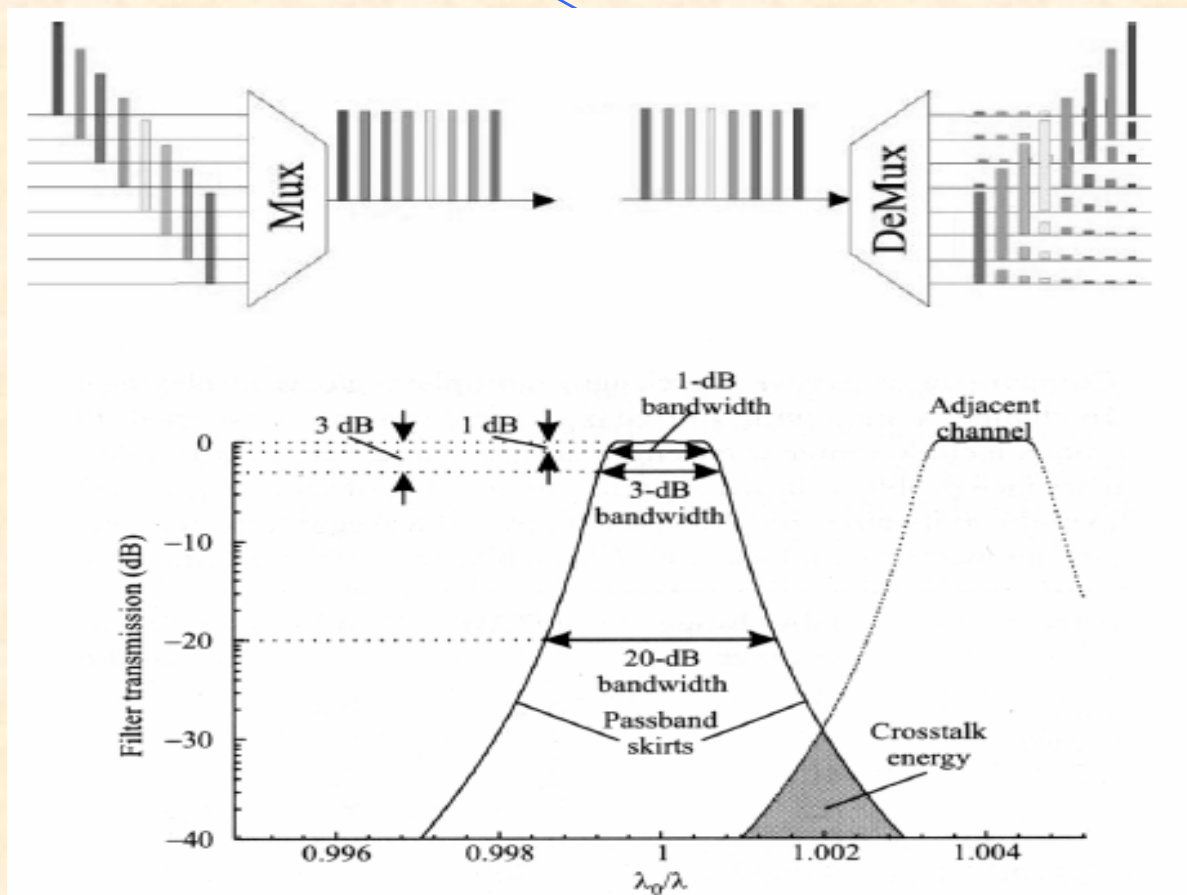


Wavelength Converter



Dispersion Compensator (DCM / DCU)

复用器性能指标

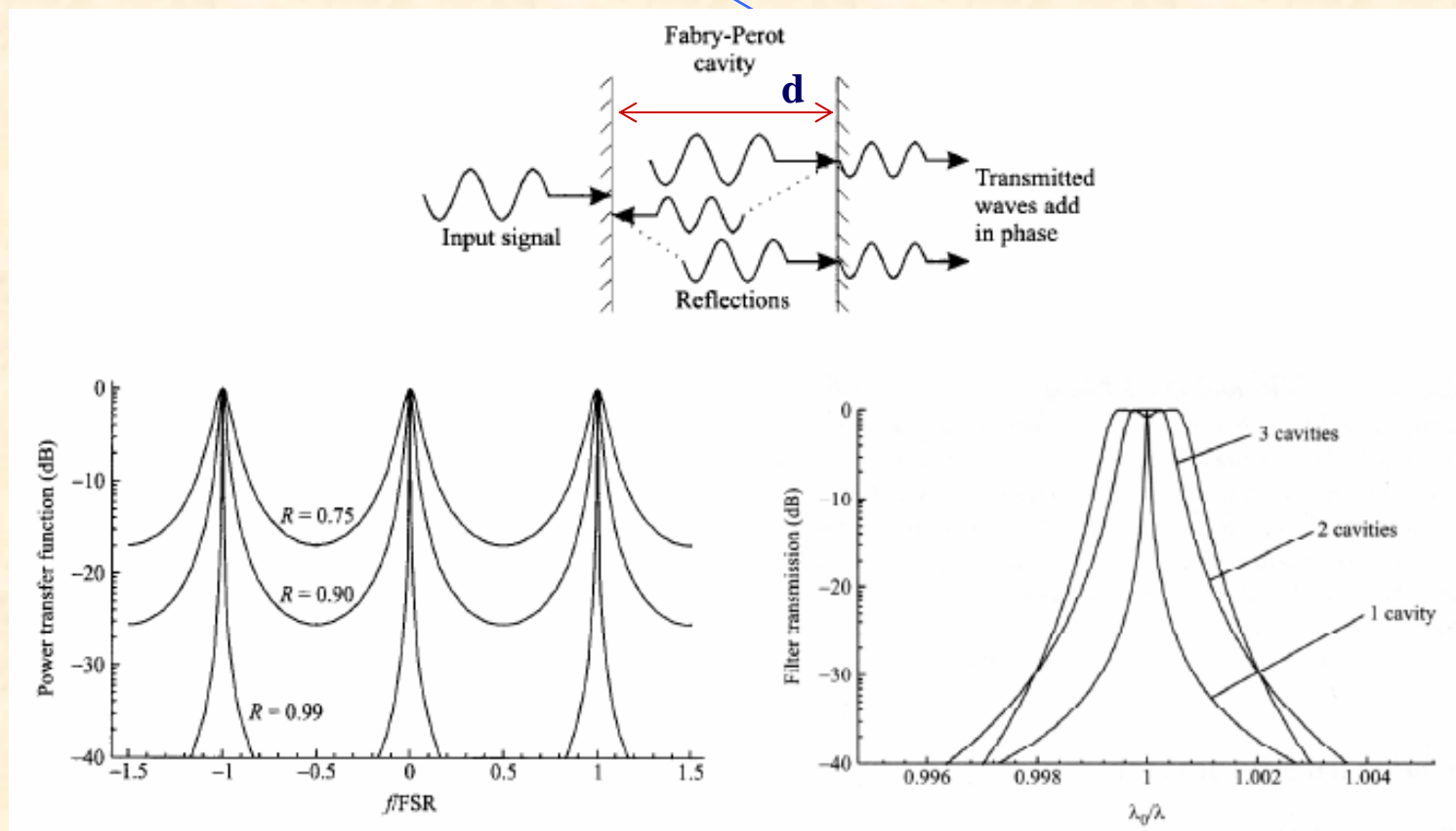


- 1dB, 3dB, 20dB带宽
- 通带平坦性, 通道间串扰
- 插入损耗, 温度和偏振敏感性

Fabry-Perot滤波器

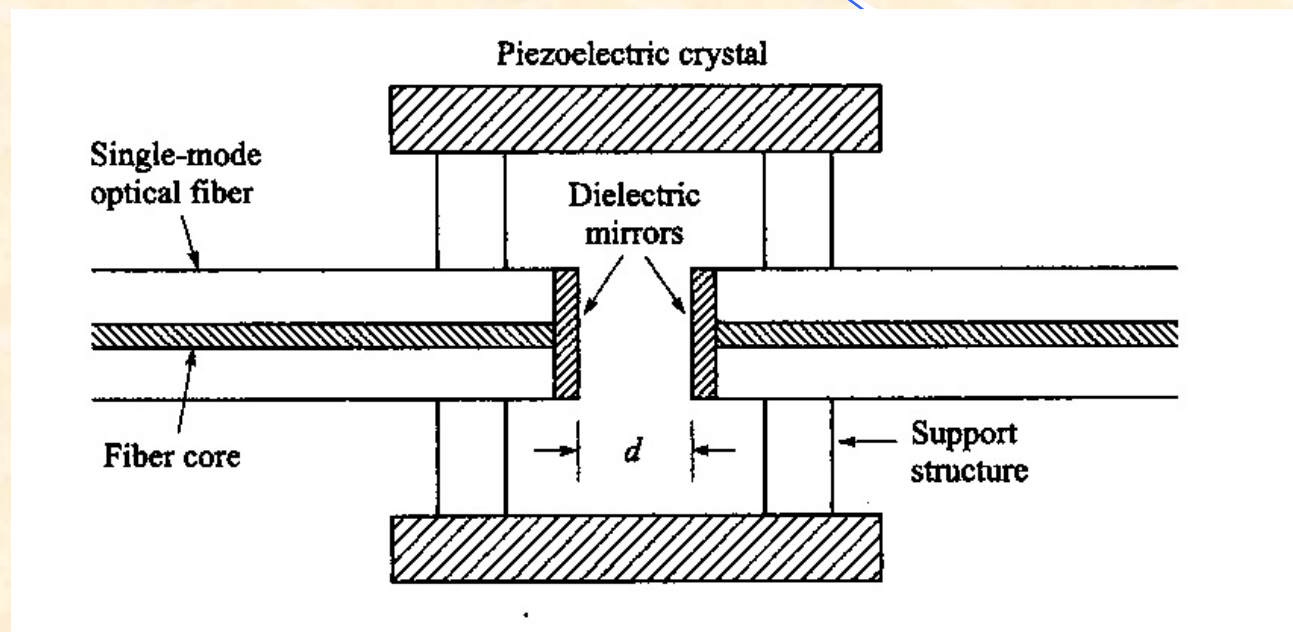
Beijing Jiaotong University

北京交通大学



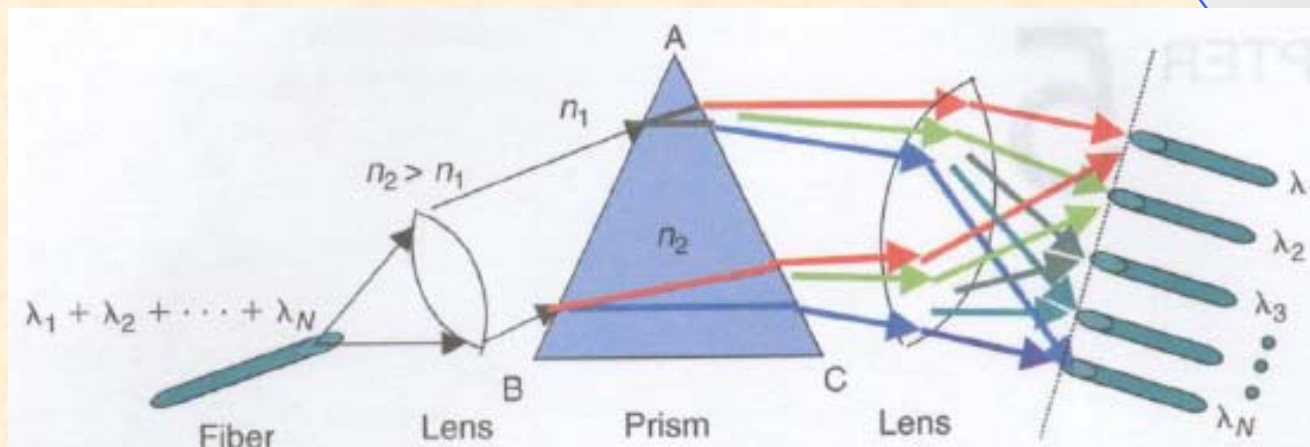
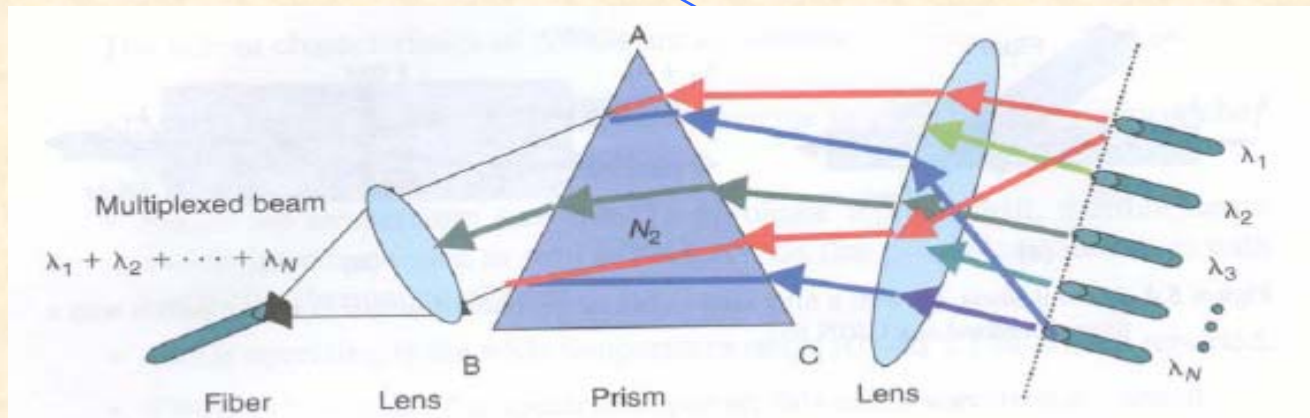
- 通带间隔(自由谱宽FSR)可通过改变 L , n_g 进行调节($FSR = c / 2n_g d$)
- 通带平坦性较差 (精细度 $Fineness = FSR / \delta f$)
- 采用复合腔技术可以获得通带平坦的梳状光学滤波器
- 利用自聚焦透镜可以实现光纤到光纤的低损耗耦合

可调谐滤波器



- 通过改变 PZT 晶体上的电压实现对腔长 d 的调节
- 也可采用在腔内注入液晶等电光材料，通过改变电压调节其折射率实现对滤波波长的调谐

棱镜型复用/解复用器

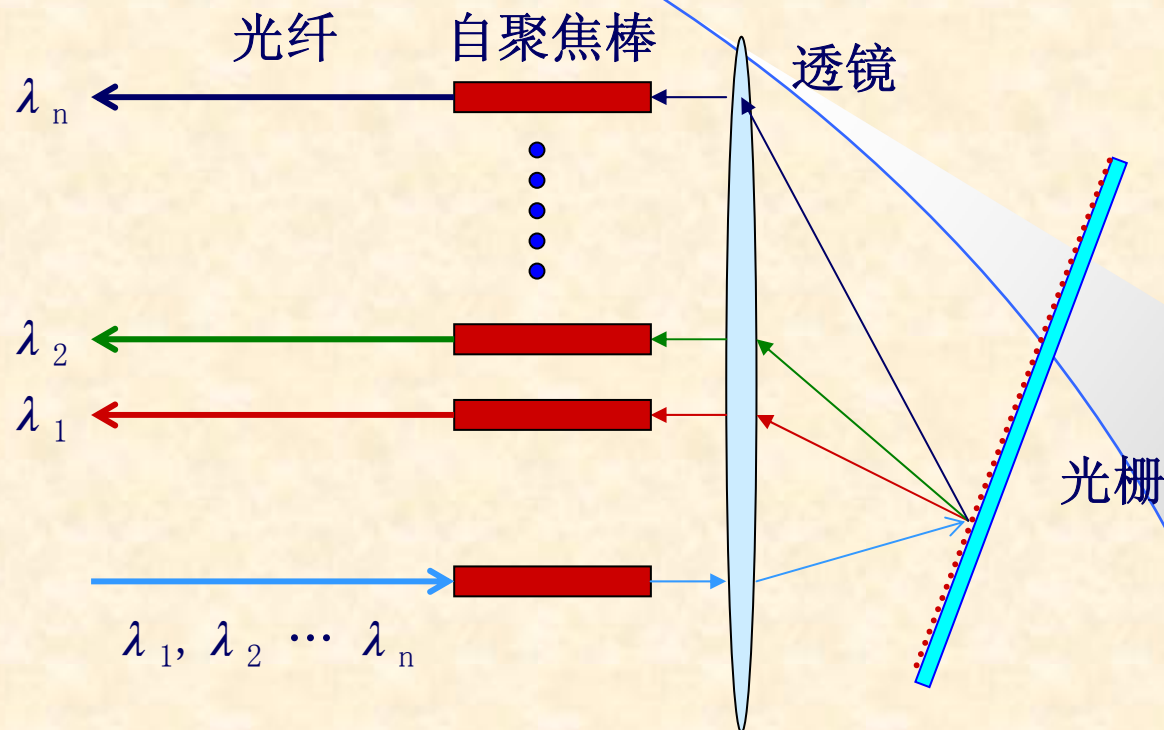


- 体光学器件，光纤到光纤耦合损耗较大
- 分立器件过多，不利于器件的长期稳定性
- 制作难度和成本较高

光栅型复用/解复用器

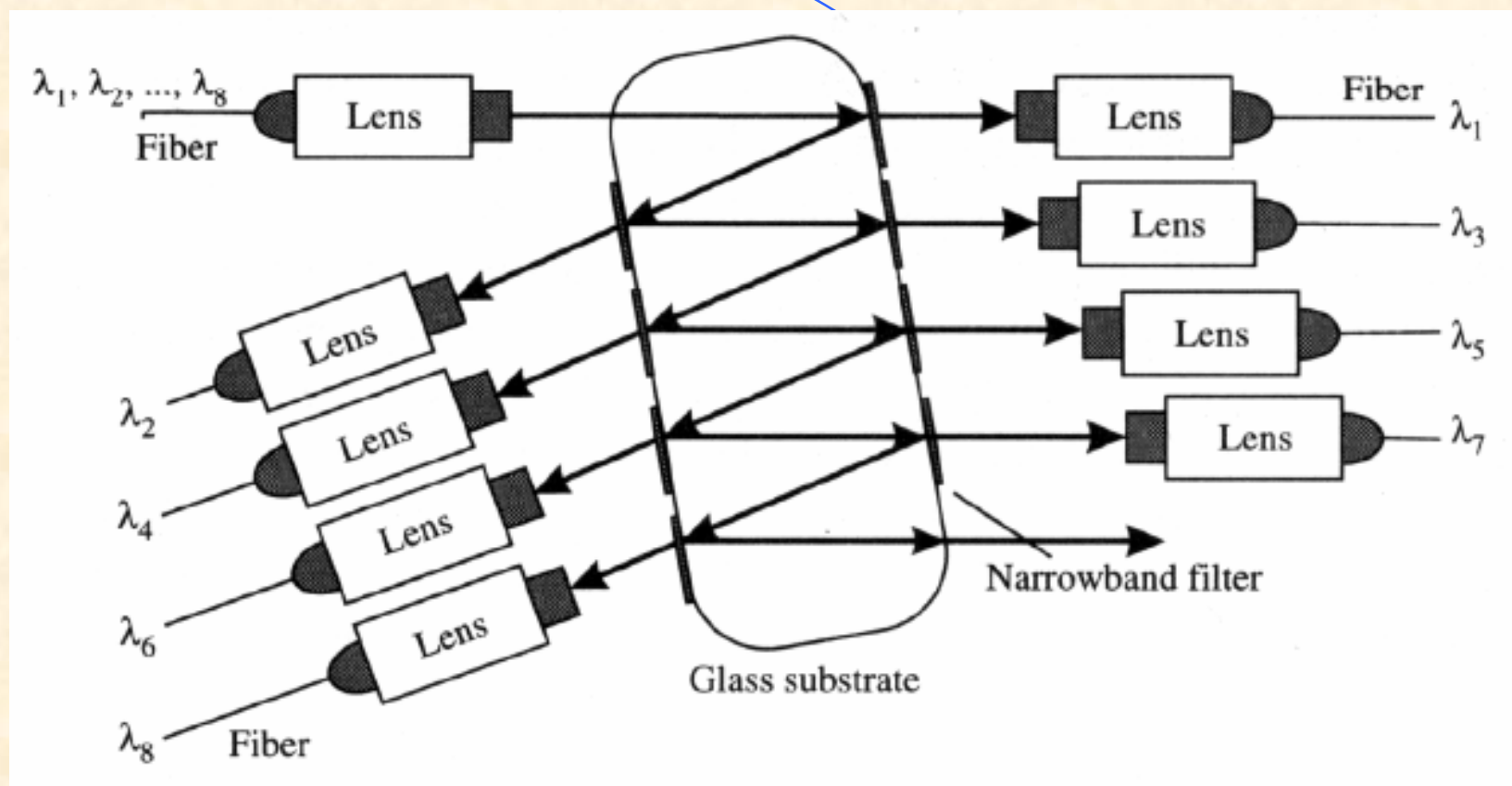
Beijing Jiaotong University

北京交通大学



- 体光学器件，光纤到光纤耦合损耗较大
- 分立器件较多，不利于器件的长期稳定性
- 光栅制作难度较大和器件整体成本较高

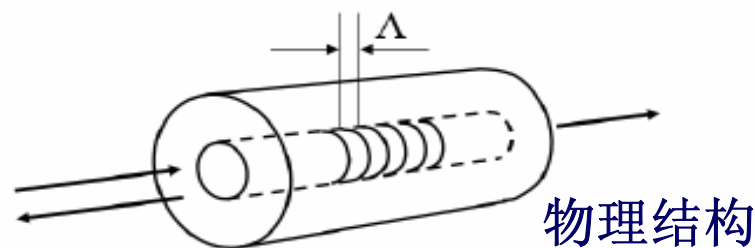
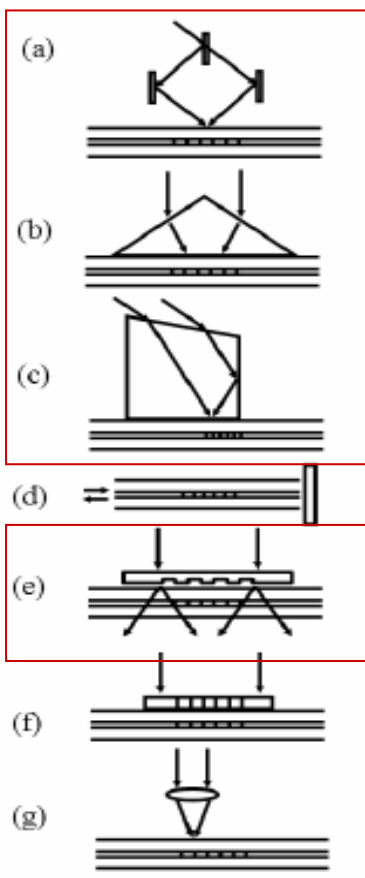
多层膜波分复用器



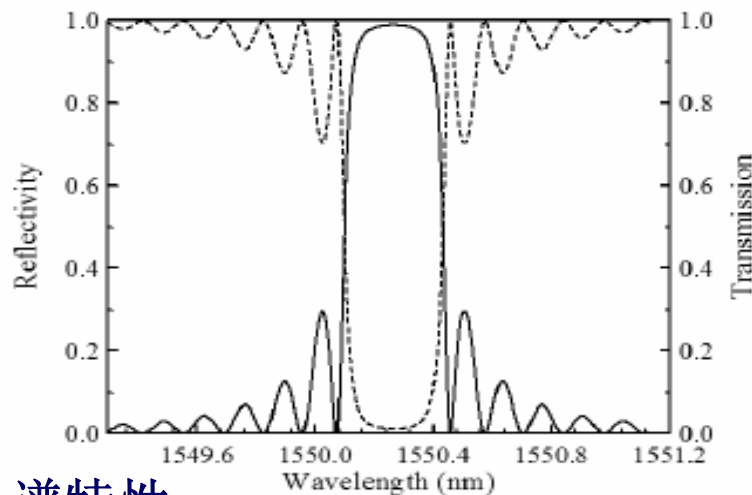
- 技术成熟，已商业化
- 当波长通道数较多时，器件体积较大
- 不适用于通道数较多的情况

光纤光栅

制作技术



$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$



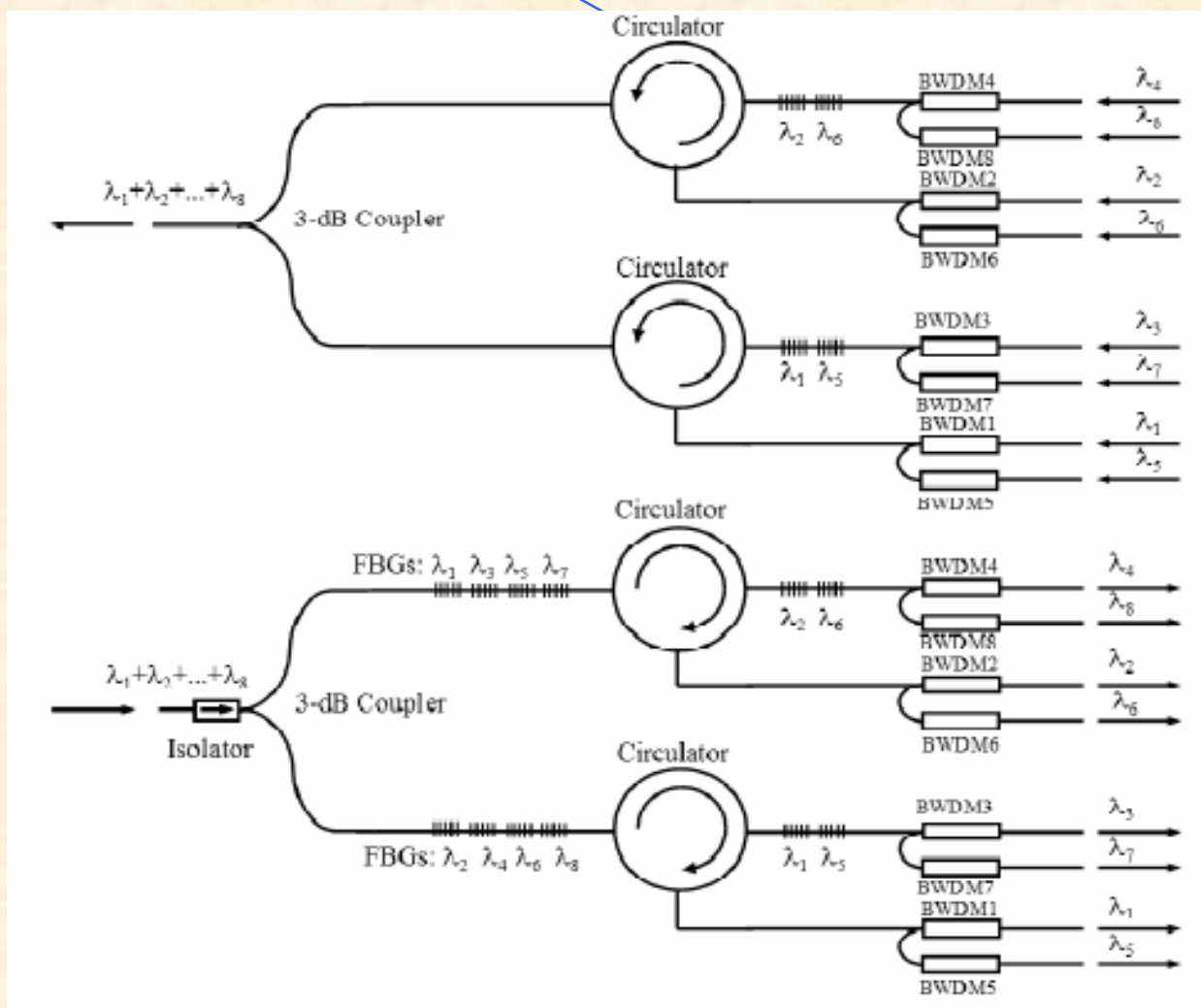
光谱特性

- 光栅的光谱特性可根据需要通过改变制作参数进行设计
- 光栅的主要类型有均匀光栅，切趾光栅，啁啾光栅，取样光栅
- 采用取样光栅技术可以制作出符合WDM标准的梳状滤波器

光纤光栅复用/解复用器

Beijing Jiaotong University

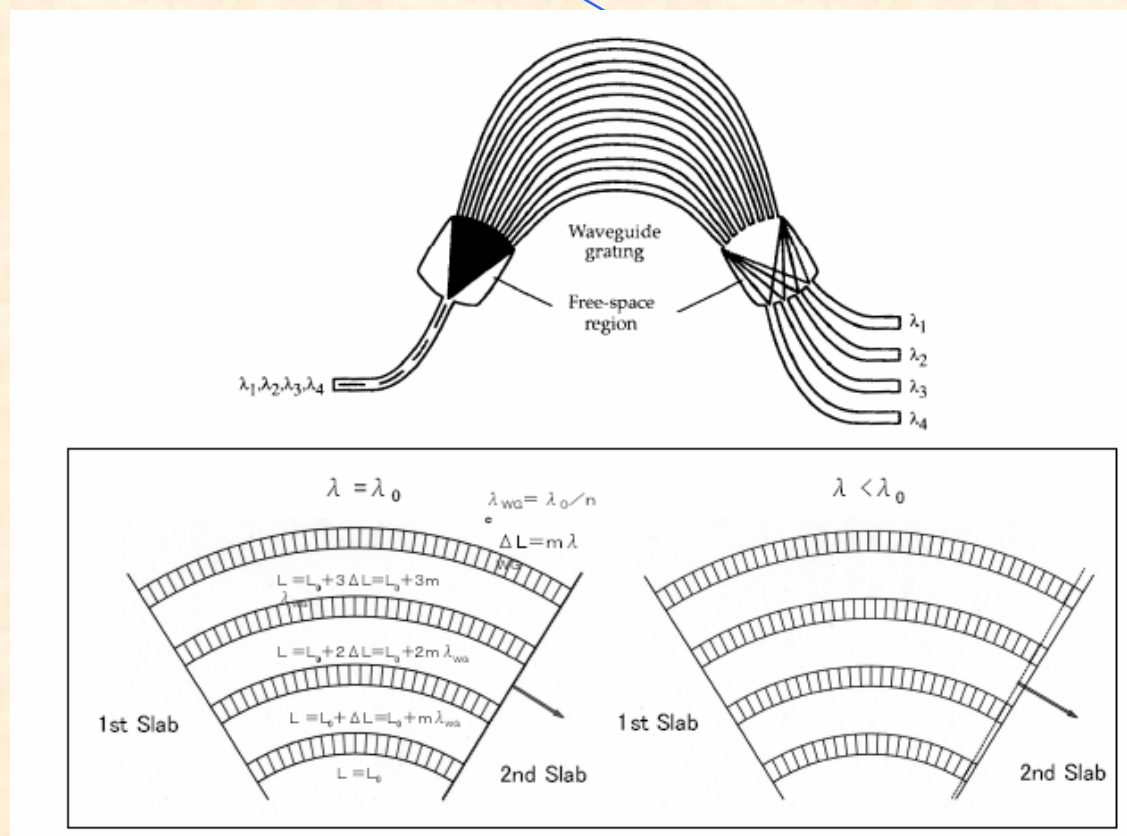
北京交通大学



➤ 全光纤器件，无须耦合

➤ 光纤光栅本身的长期稳定性不够理想

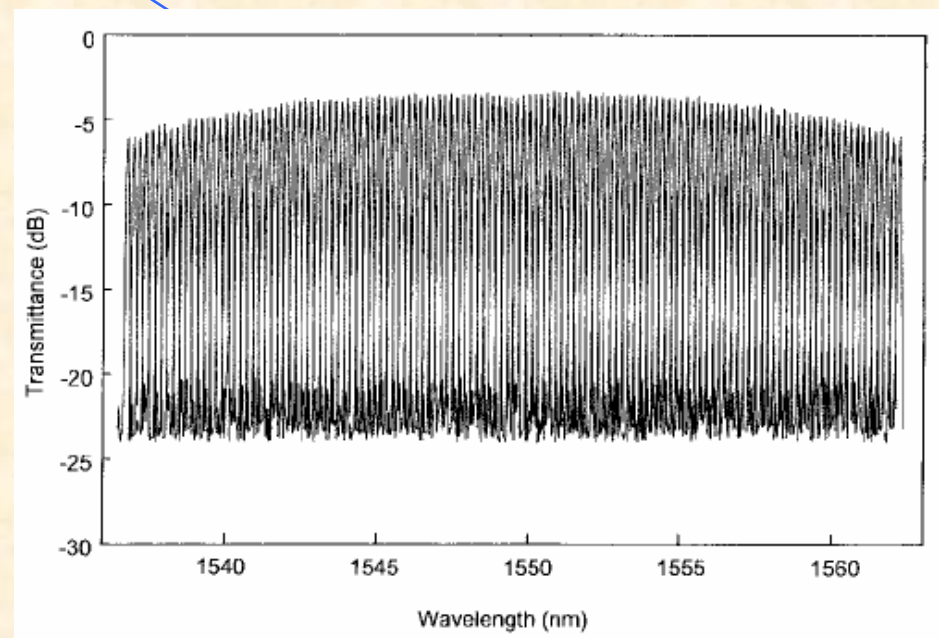
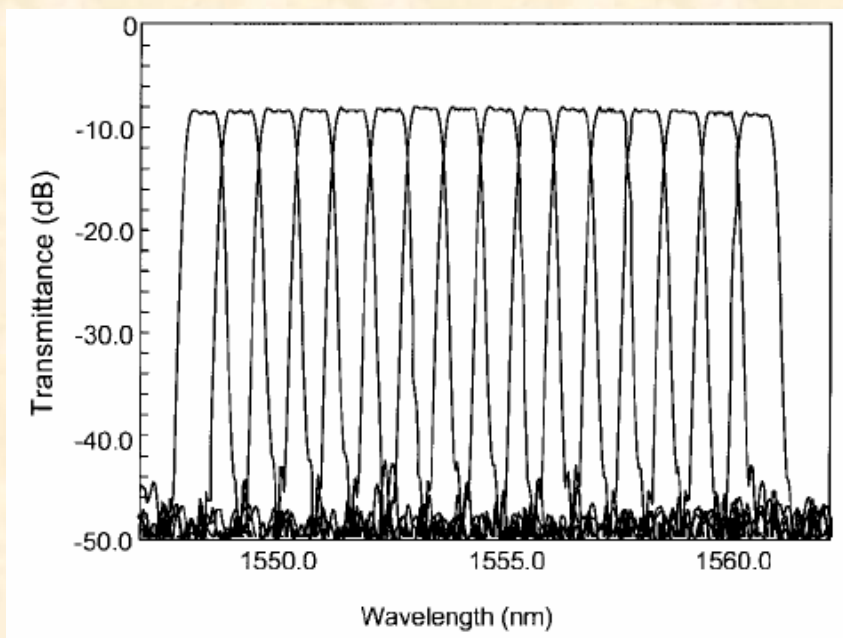
阵列波导光栅 (AWG)



- 导波光学器件，适合高信道数WDM系统
- 易于与其它导波光学器件集成
- 是WDM器件开发的主要方向
- 易于受温度，制作过程中引入的应力，入射光偏振态等的影响



AWG的滤波特性

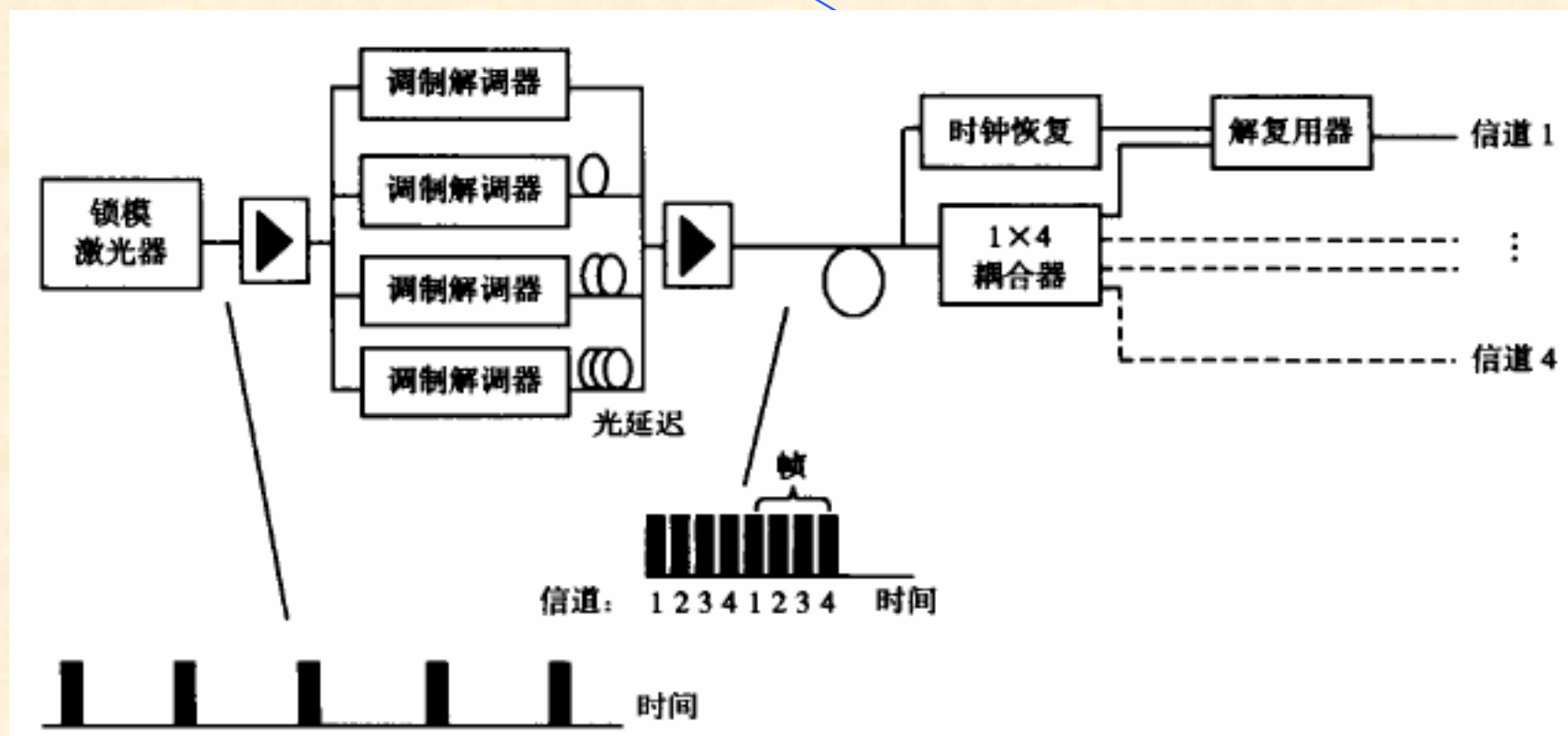


16 channel 100GHz spacing AWG

128 channel 25GHz spacing AWG

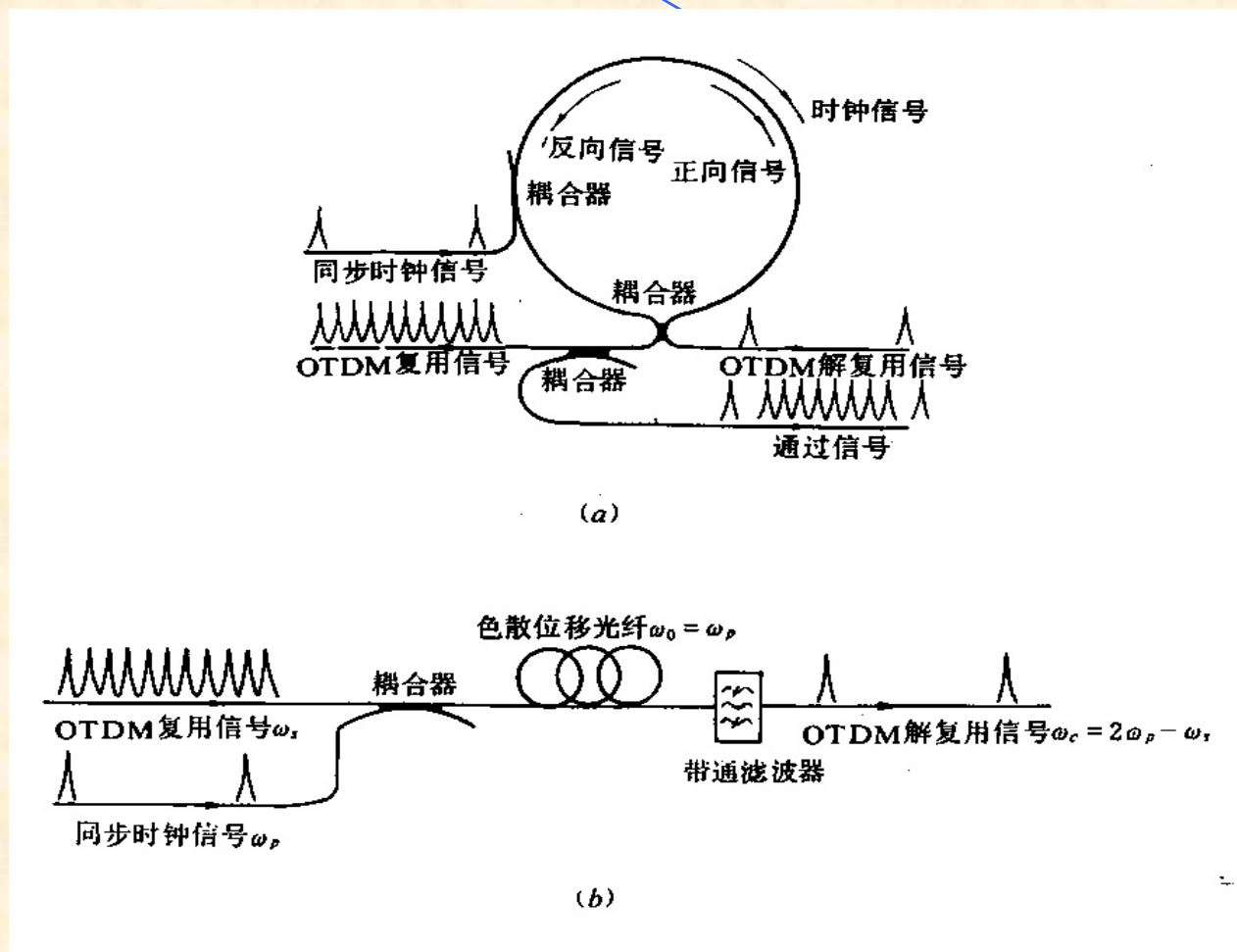
- AWG本身是一个无源器件
- 由于易受温度影响，目前的商品化AWG一般均带有温度控制机构
- 关于AWG的各种无源温度和偏振补偿方案是目前AWG的研究热点

光时分复用 (OTDM)



- 帧定位和帧同步问题
- 通道管理和信令信息等如何标识与阅读

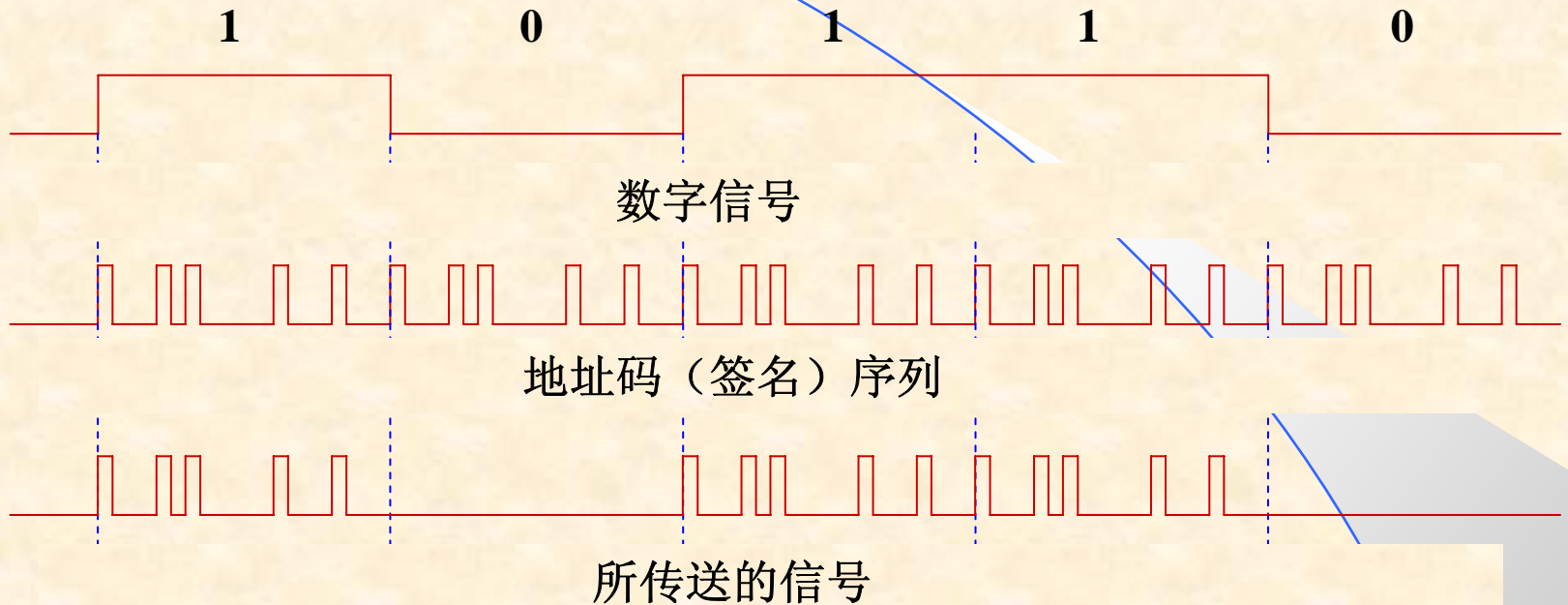
OTDM解复用技术



- 利用交叉相位调制的非线性环形镜技术进行OTDM解复用
- 利用光纤和半导体光放大器中的四波混频效应进行OTDM解复用



光码分多址 (OCDMA)



- 光码分复用的原理与电通信领域基于码分多址 (CDMA) 的扩频通信技术相似
- 为每一用户分配一个地址码，不同用户的地址码相互正交
- 在发送端用接收端用户的地址码进行编码，在接收端用该地址码进行相关解码
- 所有用户的信息通过一个波长信道进行传送



OCDMA有关概念

- 地址码（签名）长度 n
- 地址码权重（码重） w ，（码字中“1”的个数）
- 最大用户数（容量） $N \sim [(n-1)/w(w-1)]$
- 接收端相关解码：

$$R(m) = \frac{1}{w} \sum_{k=1}^n s(k) f(k-m)$$

$s(k)$ 为接收到的光信号， $f(k)$ 为本地地址码，若信号1到达正确地址 $s(k)=f(k)$ ，解码器输出为地址码的自相关函数。

- 正交码的构造应当使各地址码的互相关函数最小化(理想情况为零)
- 在电通信领域，正交码是由“1”和“-1”组成的双极性码，易于构造
- 在强度调制—直接检测（IM-DD）光通信系统中采用的是由“0”和“1”组成的单极性码，构造正交码较为困难
- 关于光正交码的研究尚处在不断探索之中



光交换技术



概述

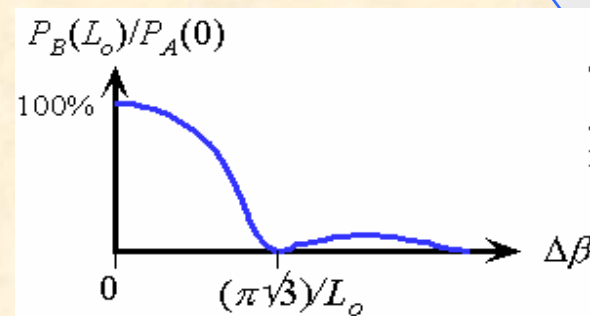
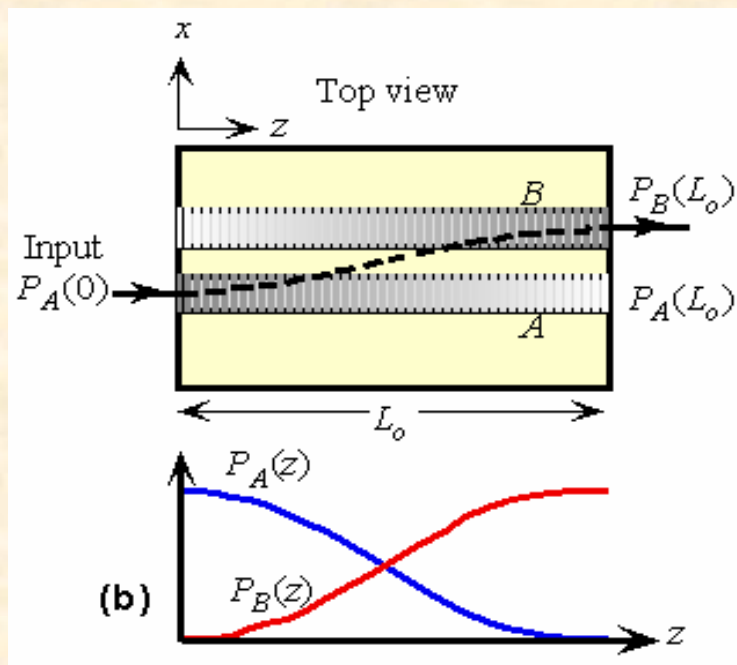
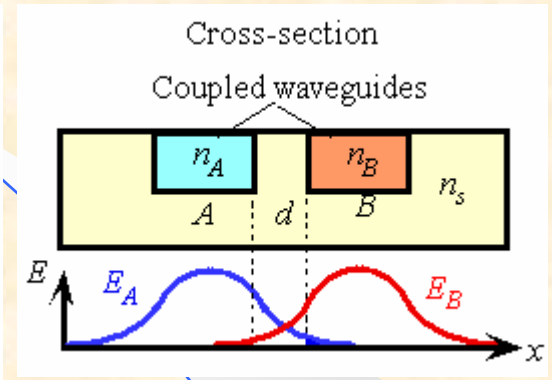
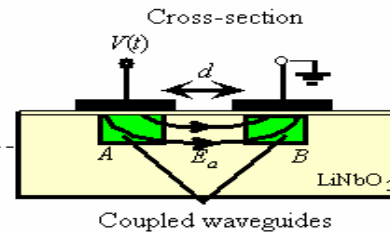
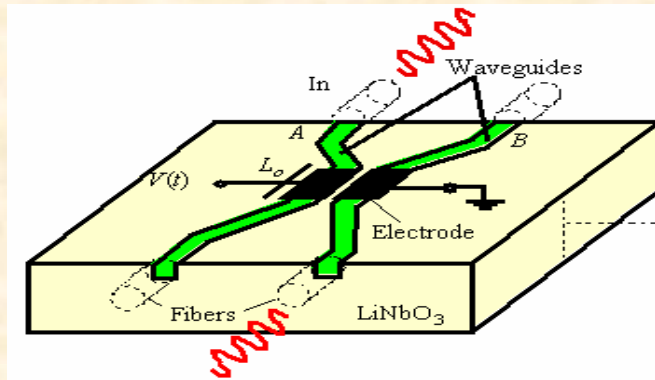
- 空间光交换
 - 波长交换
 - 时分光交换
 - 光突发交换
 - 光标记交换
- 光线路交换
- 光分组交换



空间光交换

- **2×2光开关和光开关矩阵**
Multi-stage interconnection networks of 2 × 2 switches (directional couplers)
 - *electro-optic switch, thermo-optic switch, and the Mach-Zehnder interferometer.*
- **数字微电子机械系统**
Digital *micro electronic mechanical systems (MEMS)*
- **由半导体光放大器构成的光开关矩阵**
Semiconductor optical amplifiers (SOA).

电光开关

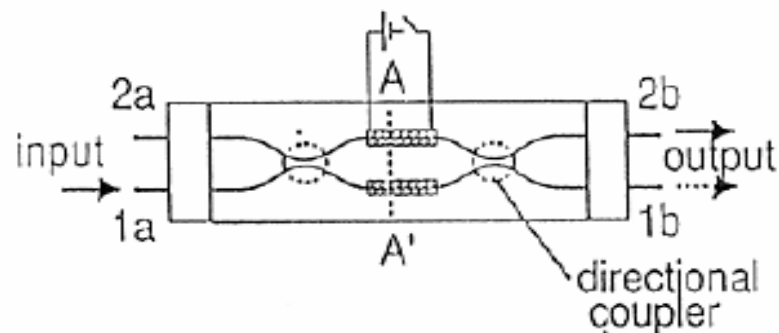


$$\Delta \beta \approx 2 \Delta n (2 \pi / \lambda)$$

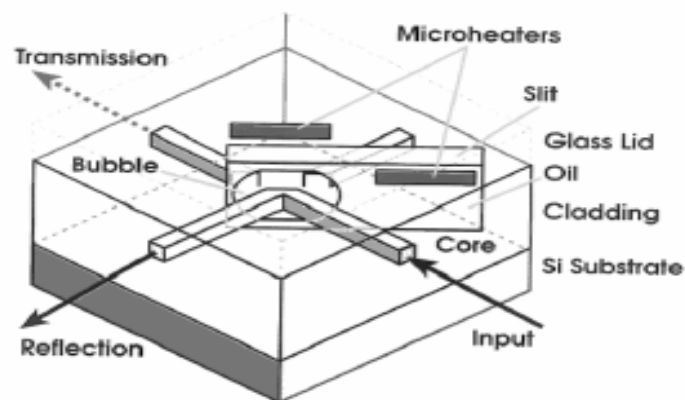
$$\Delta n = (1/2) n_o \gamma_{22} (V/d)$$

热光开关

■ Thermo-optic Switch



■ Thermal Bubble Optical Switch



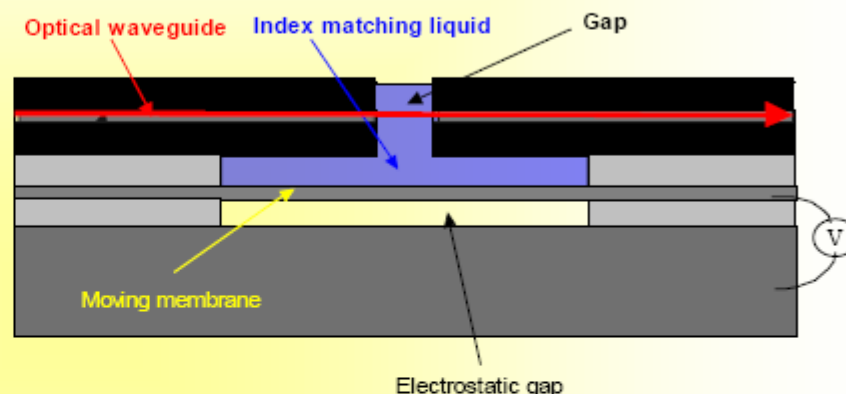
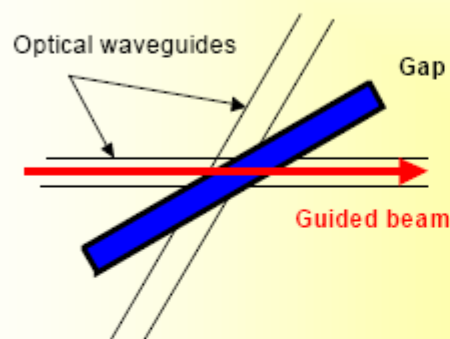
➤ 商品化器件

➤ 开关时间 < 10ms

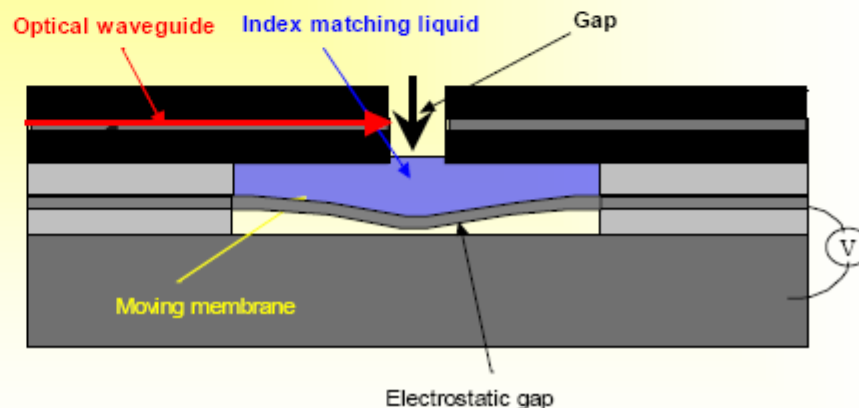
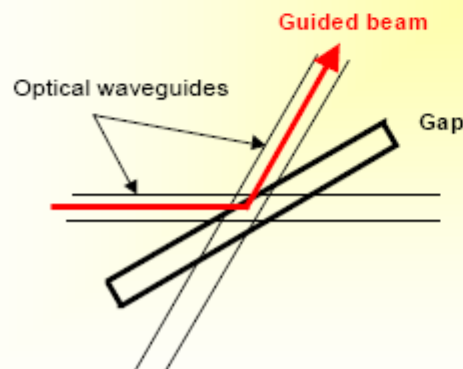
折射率匹配液 2×2 电光开关

➡ Switching element : TIR + index matching liquid + electro-mechanical actuation

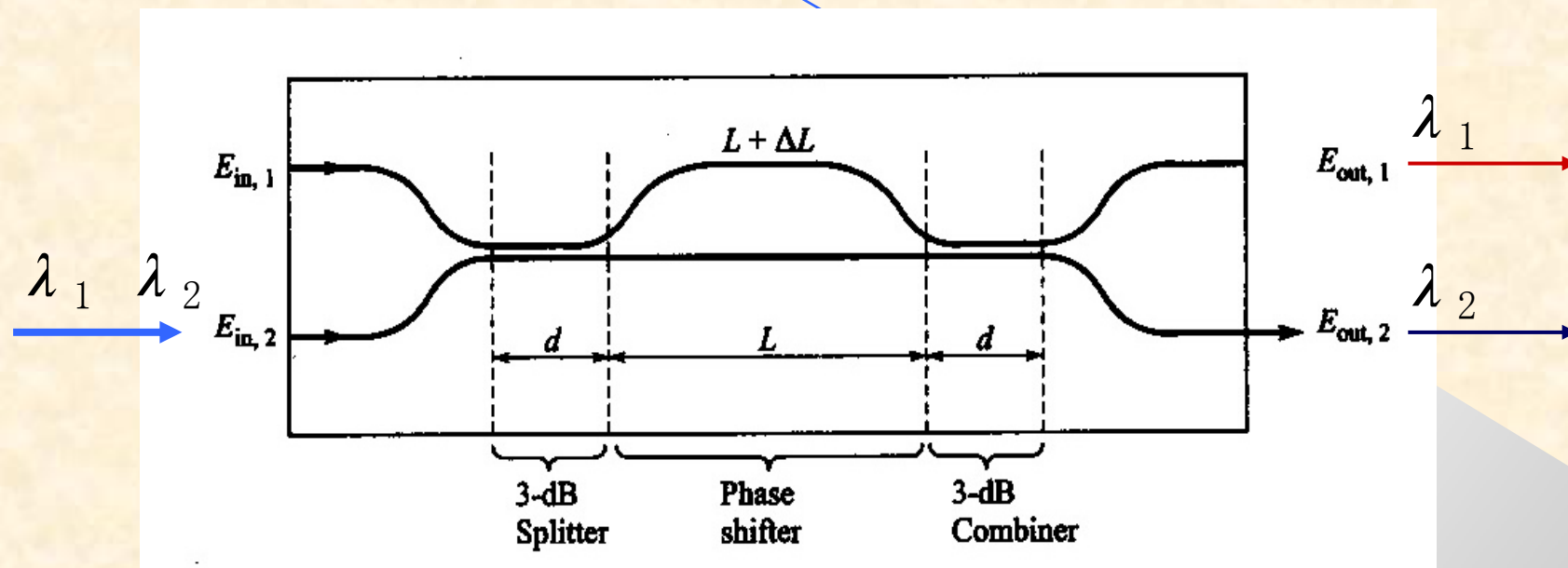
« Transmitting State » (Gap filled with index matching liquid)



« Reflecting State » (Gap empty)



非对称Mach-Zehnder干涉仪



$$P_{out,1} = P_{in,1} \sin^2(\beta_1 \Delta L / 2) + P_{in,2} \cos^2(\beta_2 \Delta L / 2)$$

$$\beta_1 = 2\pi n_{eff,1} / \lambda_1$$

$$P_{out,2} = P_{in,1} \cos^2(\beta_1 \Delta L / 2) + P_{in,2} \sin^2(\beta_2 \Delta L / 2)$$

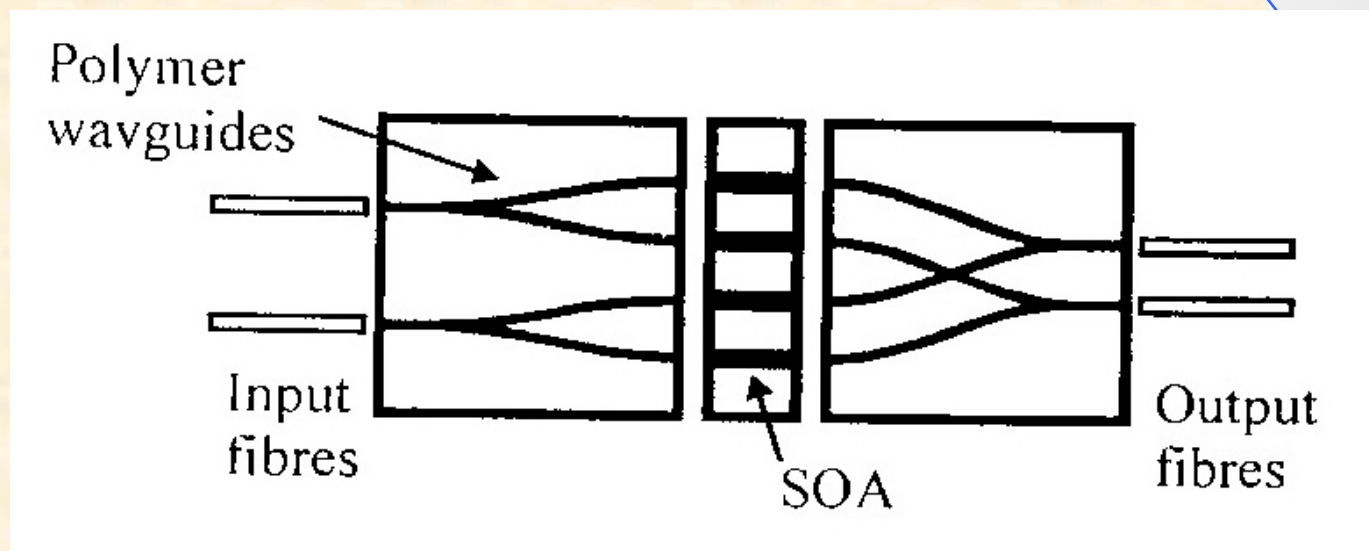
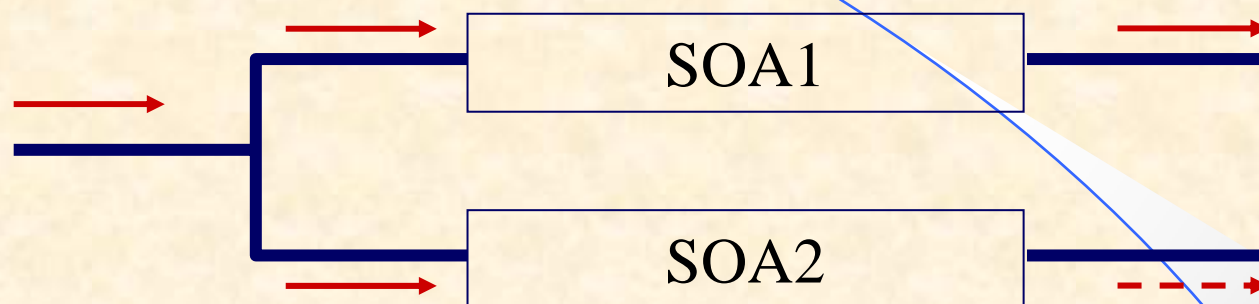
$$\beta_2 = 2\pi n_{eff,2} / \lambda_2$$

Example: if $P_{in,1} = 0$, $P_{in,2} = 1$, $\beta_2 \Delta L = 2\pi$ then $P_{out,1} = 1$, $P_{out,2} = 0$

if $\beta_1 \Delta L = 2\pi$, $\beta_2 \Delta L = \pi$ then $P_{out,1} = P_{in,2}$, $P_{out,2} = P_{in,1}$

➤ 可以是无源固定连接器件，也可实现有源电控

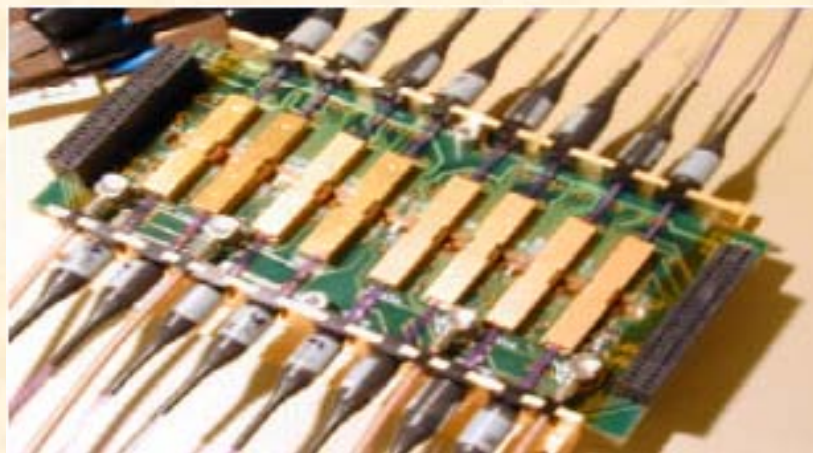
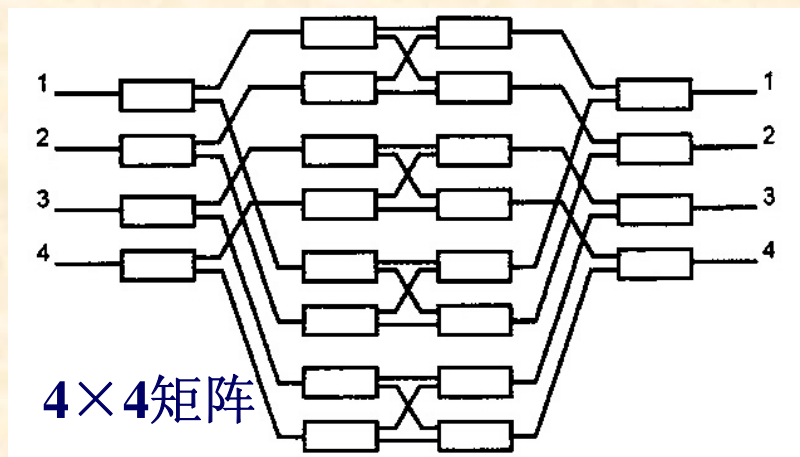
SOA光开关



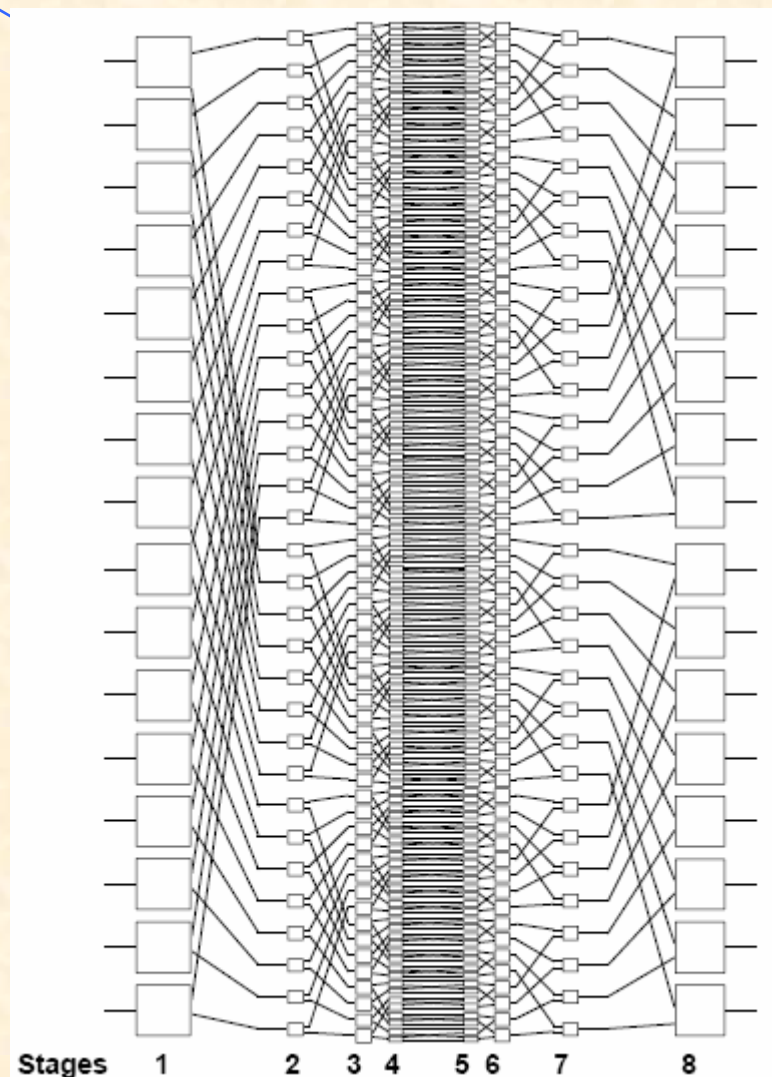
➤ 可提供增益



光开关矩阵



8×8矩阵

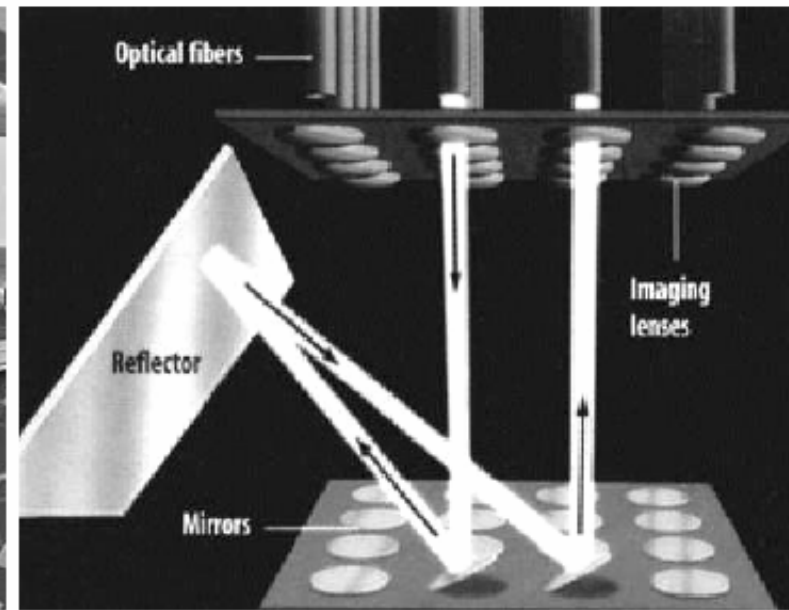
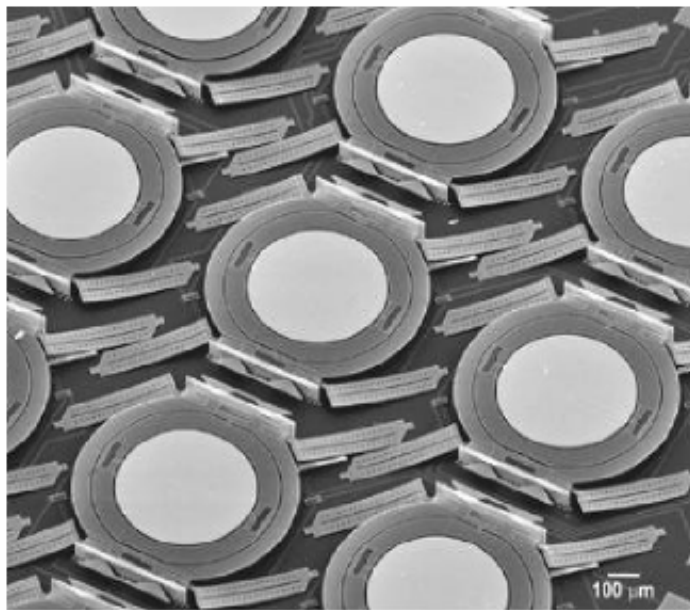
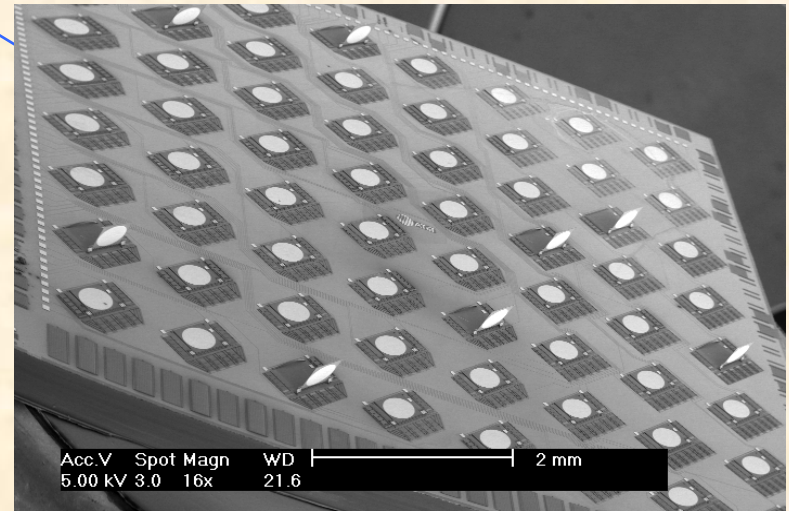


➤ 目前可达 128×128 的水平

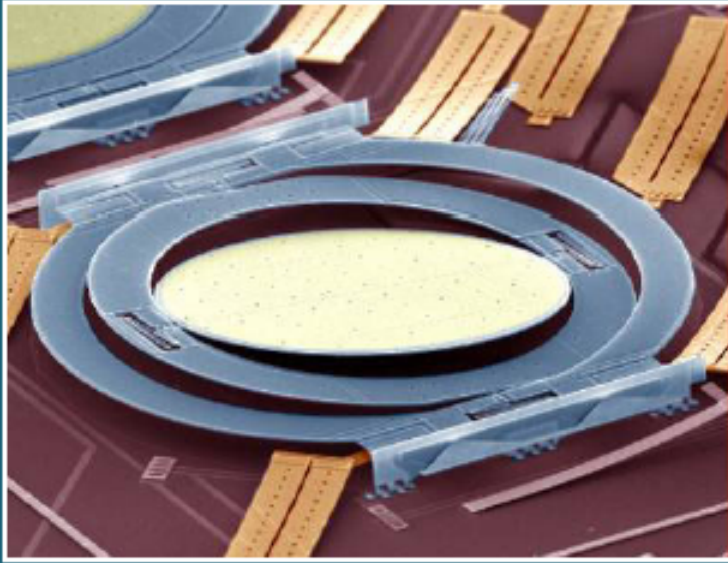


微电子机械系统光开关 (MEMS)

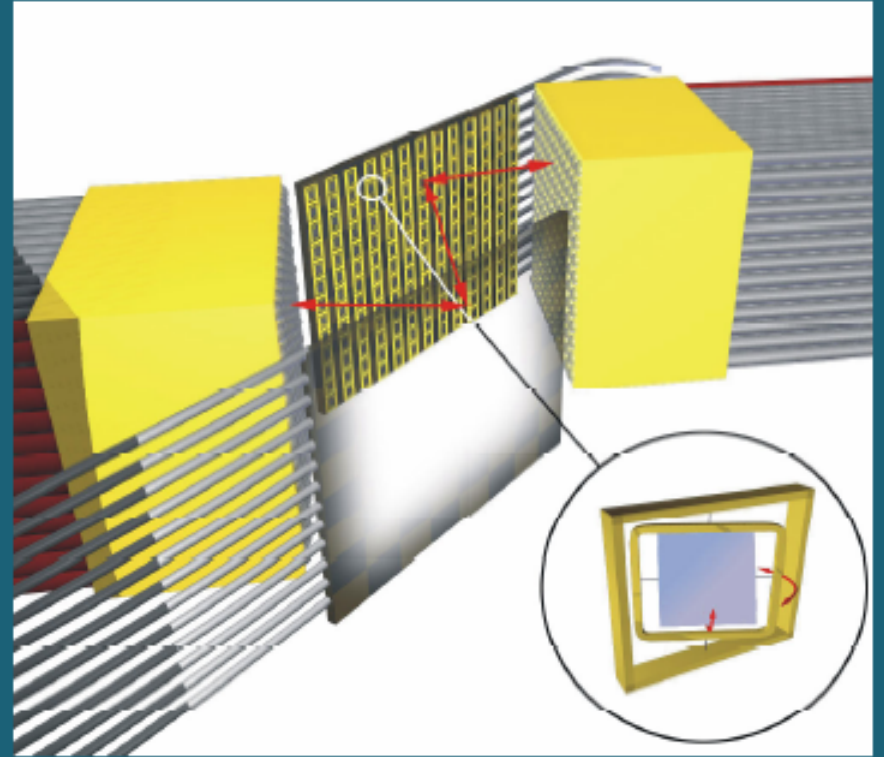
- ✓ *dimension from a few hundred microns to millimeters.*
- ✓ *fabricated on silicon substrates using standard semiconductor processing techniques.*
- ✓ *robust, long-lived, and inexpensive to produce.*



MEMS



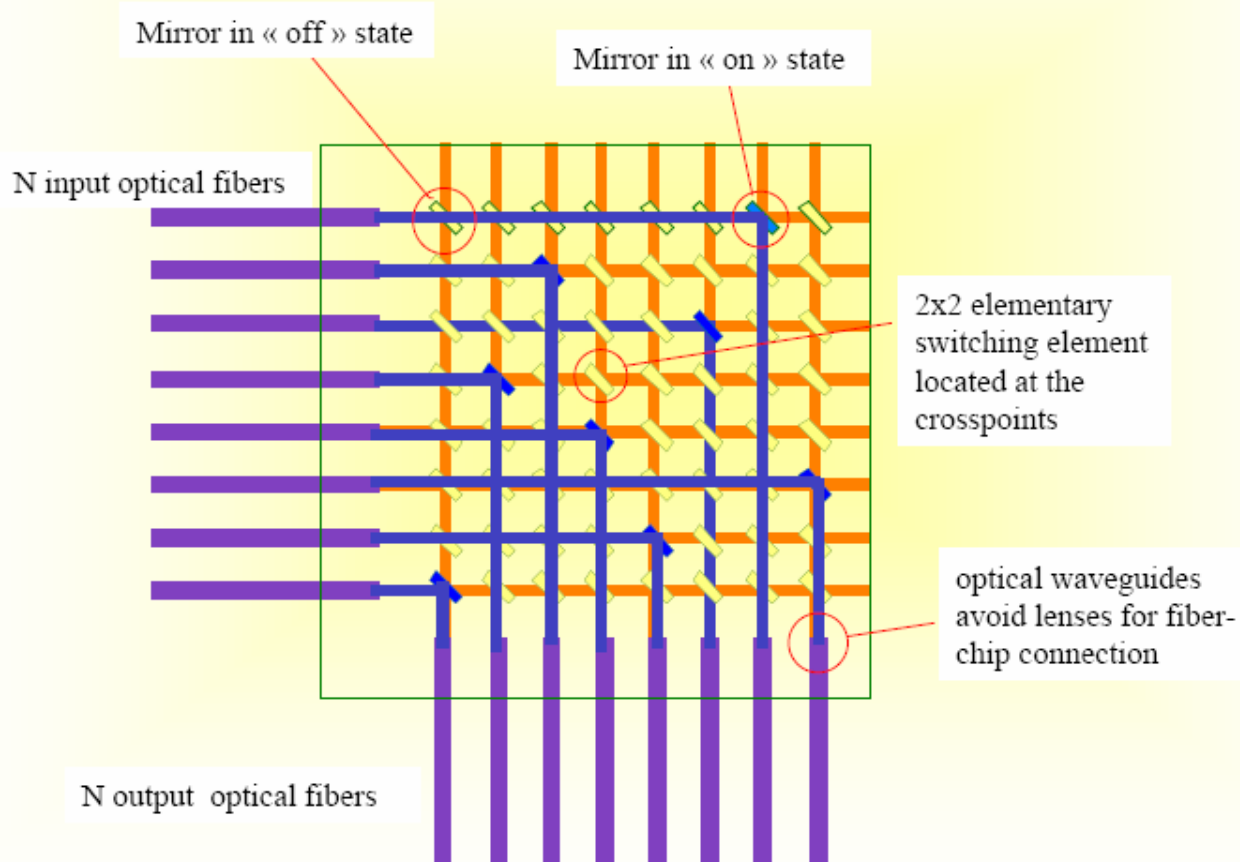
Lucent's "LambdaRouter" Device



➤ 目前端口数可达 256×256 的水平

二维开关矩阵

➔ 2D configuration : Planar lighthwave circuit + elementary 2x2 switching elements

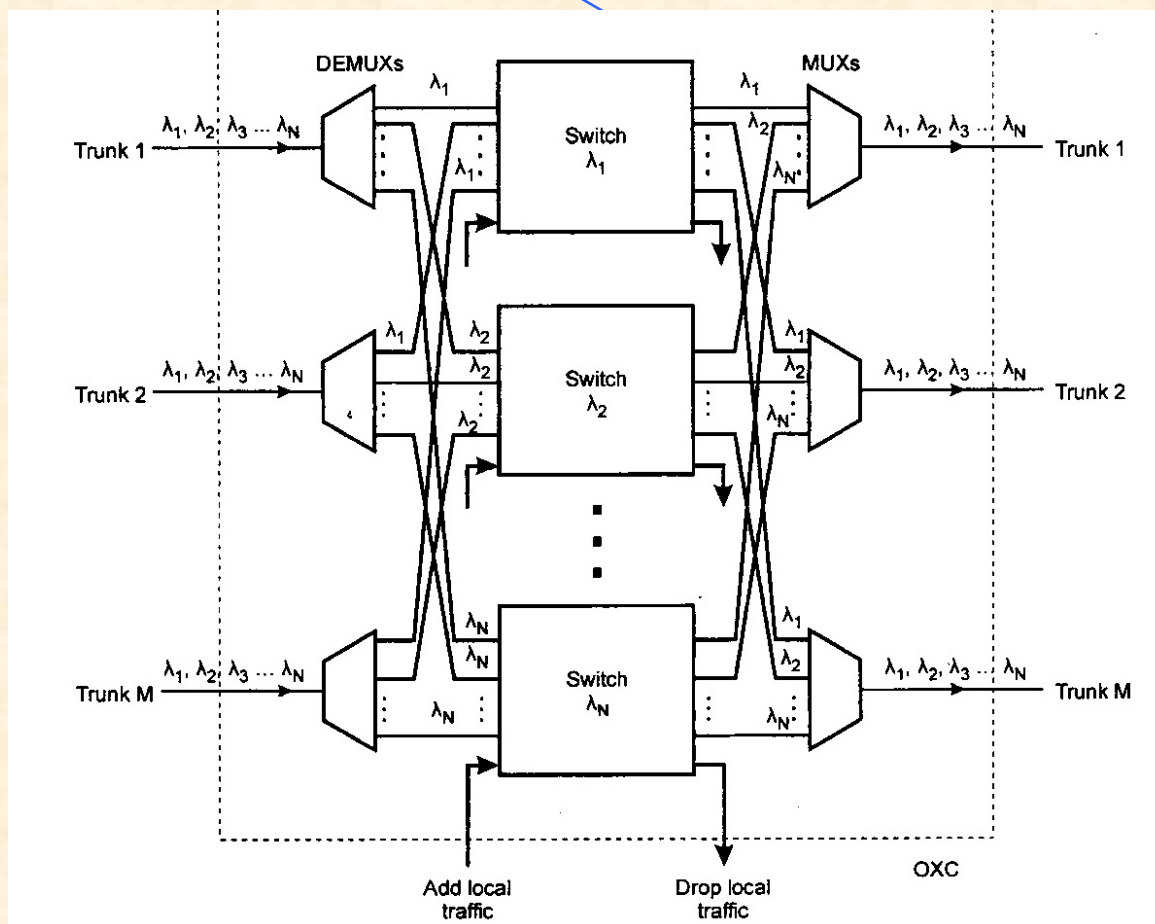


- 目前端口数可达 512×512 的水平
- 反射镜可以是MEMS，也可以是电控折射率匹配液

波长交换 (without wavelength conversion)

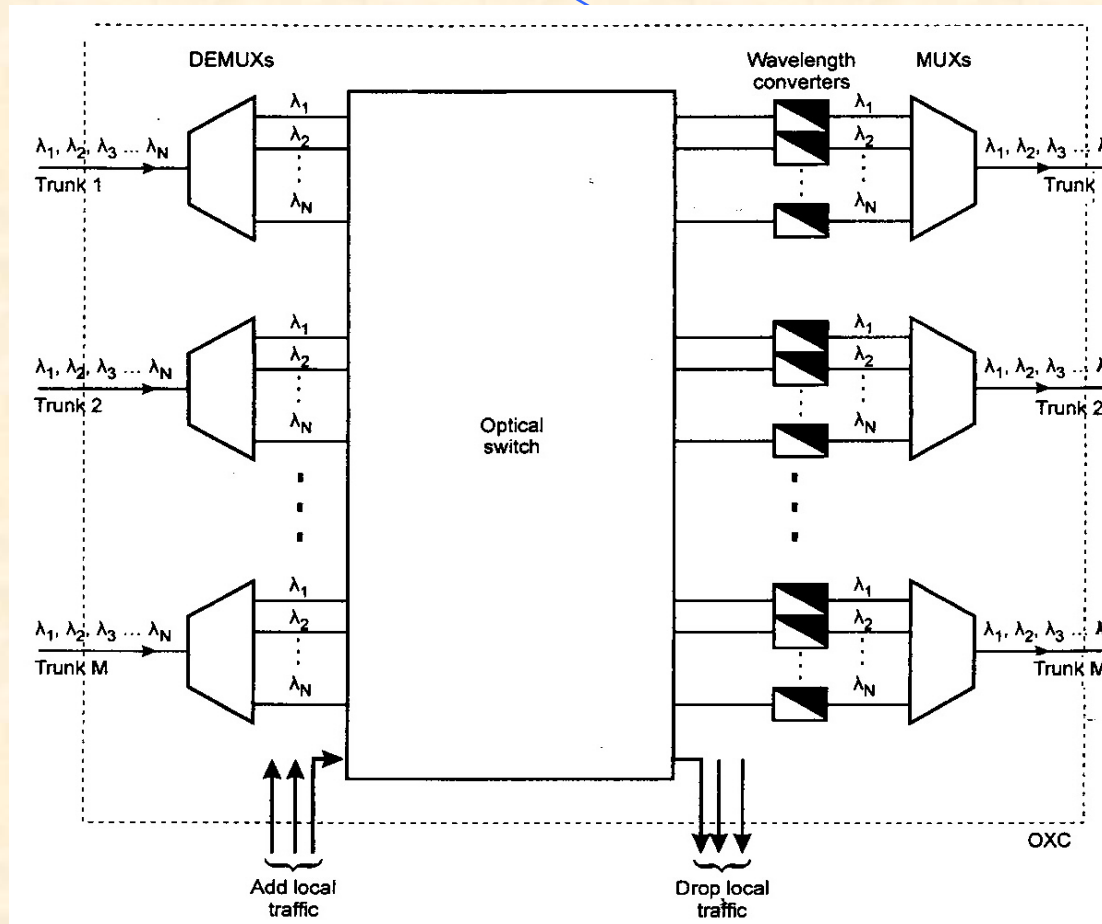
Beijing Jiaotong University

北京交通大学



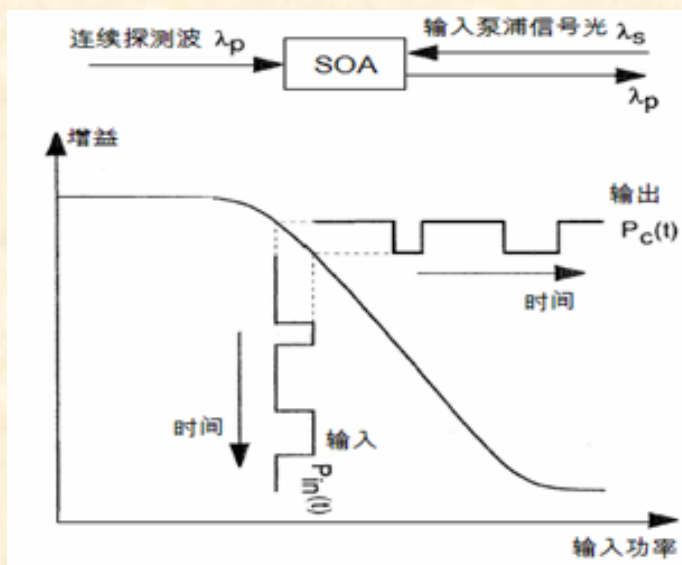
- 缺点：波长不能冲突
- 例如：光纤1和光纤M中的 λ_1 不能同时路由至输出光纤1

波长交换 (with wavelength conversion)

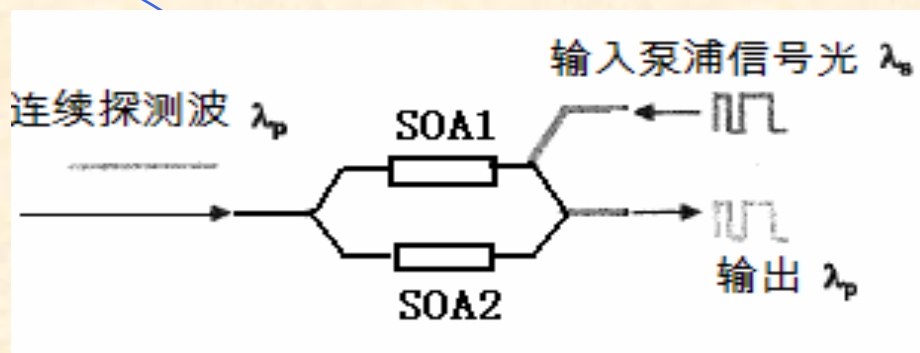


- 任意输入光纤上的任意波长可以转接至任意输出光纤的任意波长通道
- 代价是需要超大光开关矩阵和波长转换器

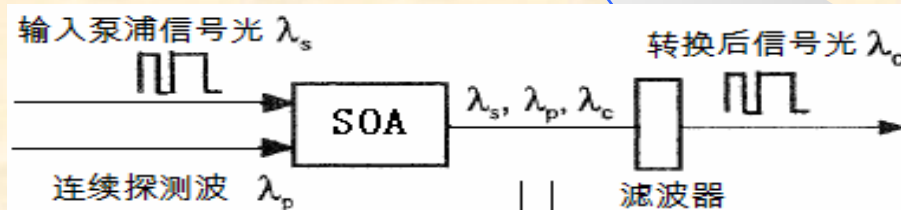
波长转换器



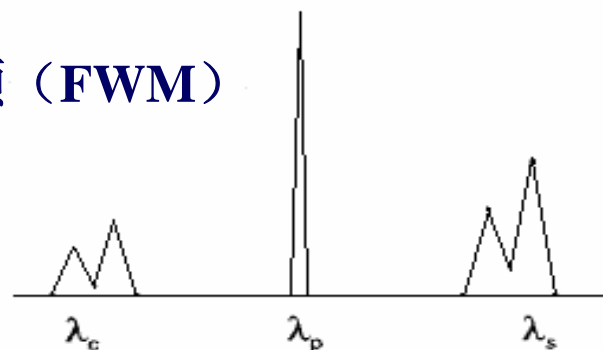
交叉增益调制 (XGM)



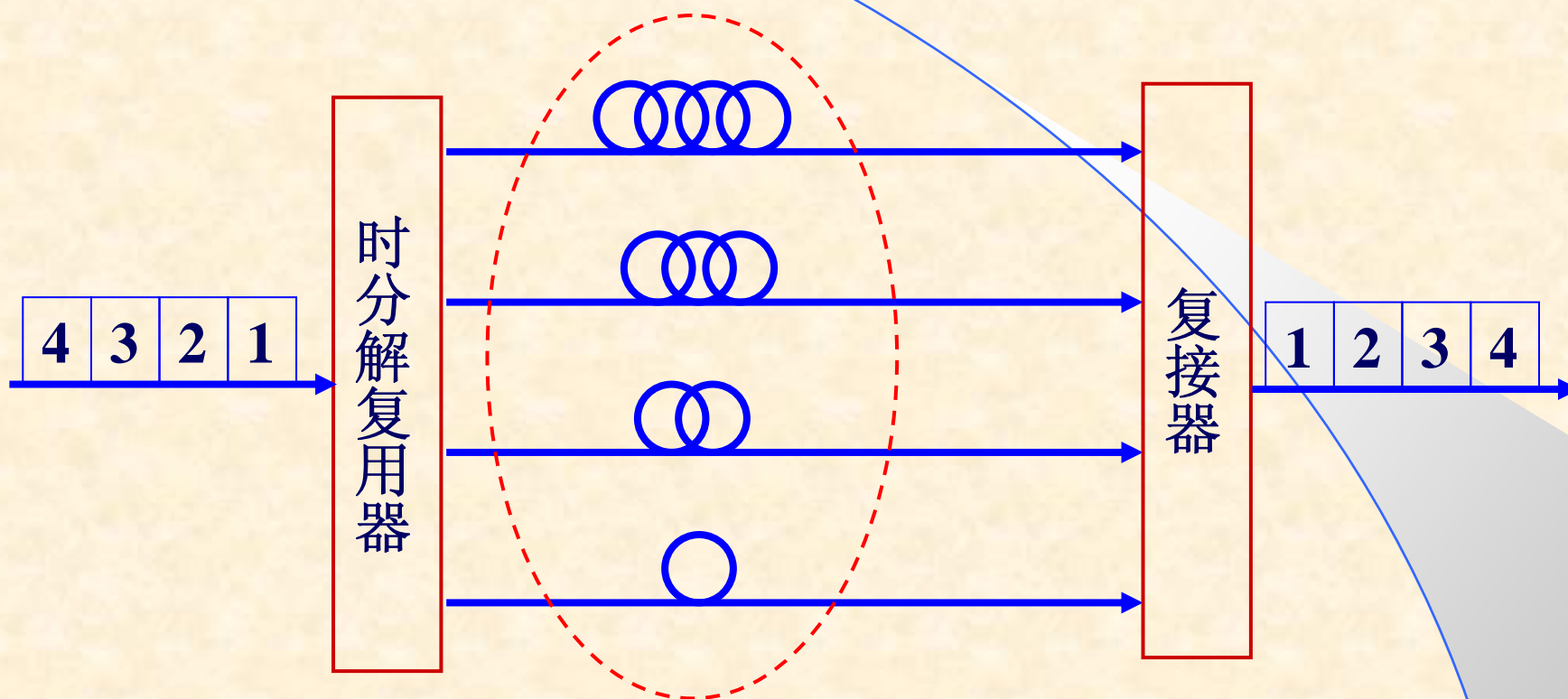
交叉相位调制 (XPM)



四波混频 (FWM)



时分光交换

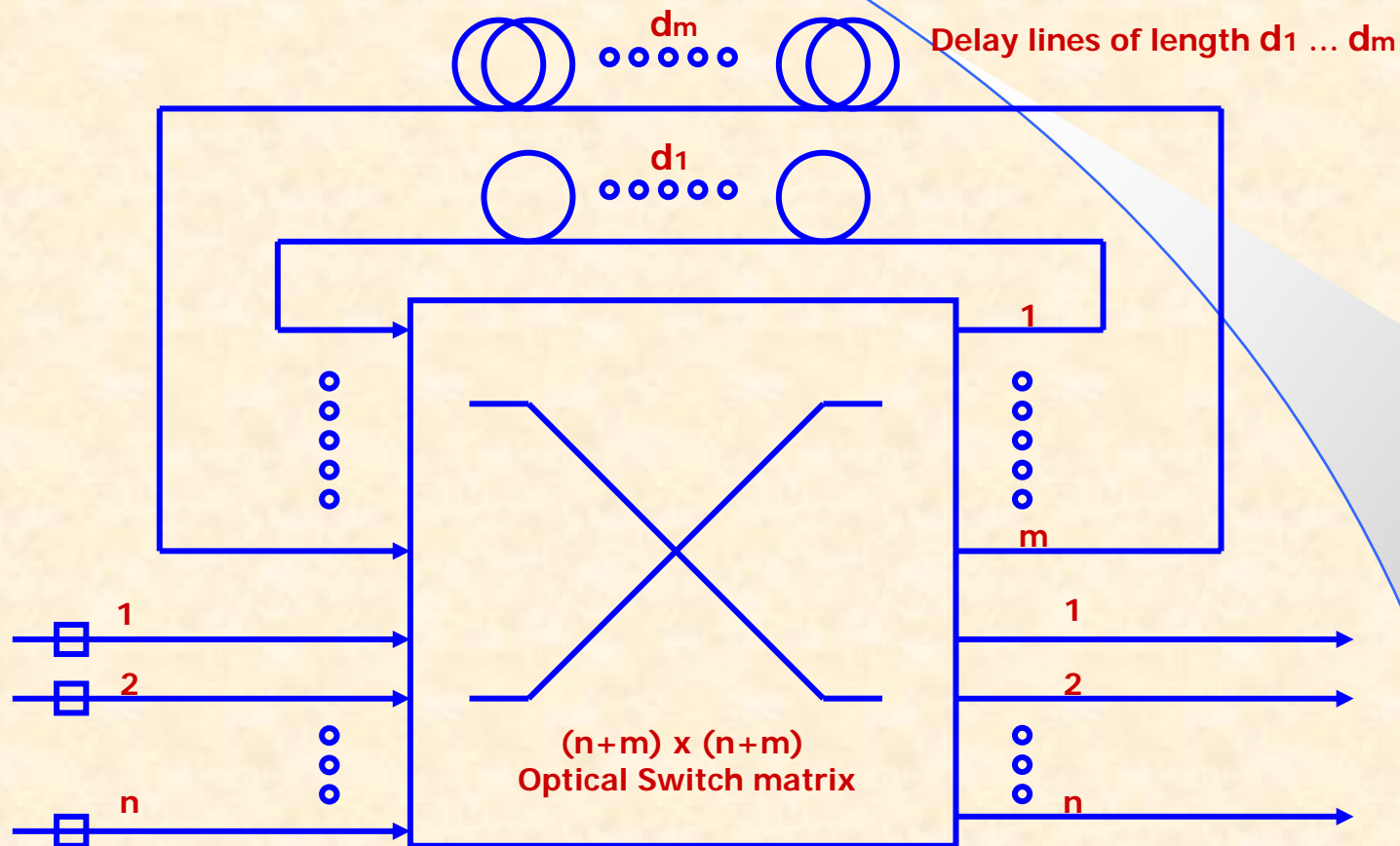


电控可变光纤延迟线

时序互换原理

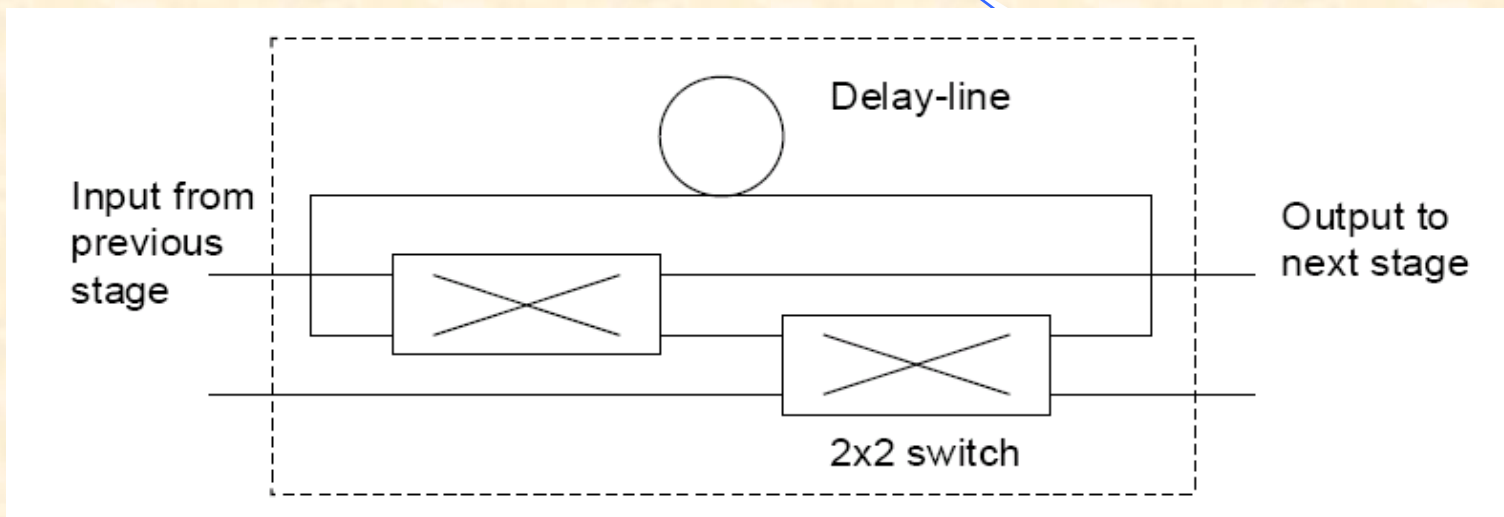


电控延迟线与光存储器





2×2光开关与可变延迟线

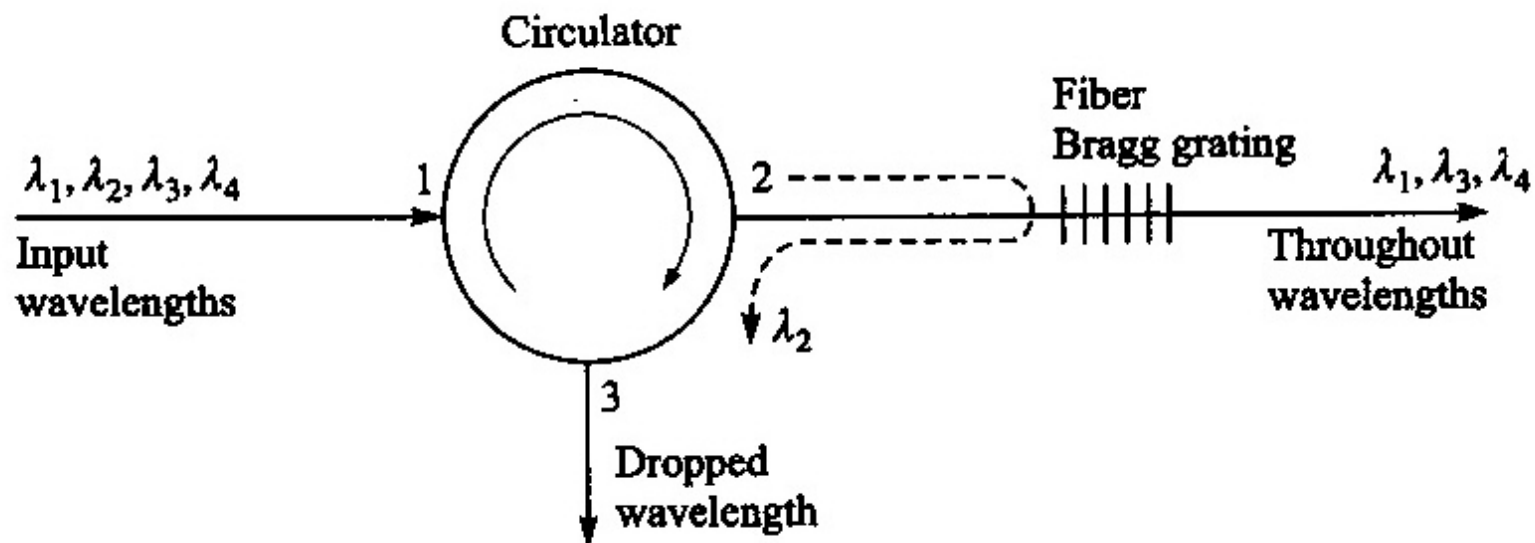




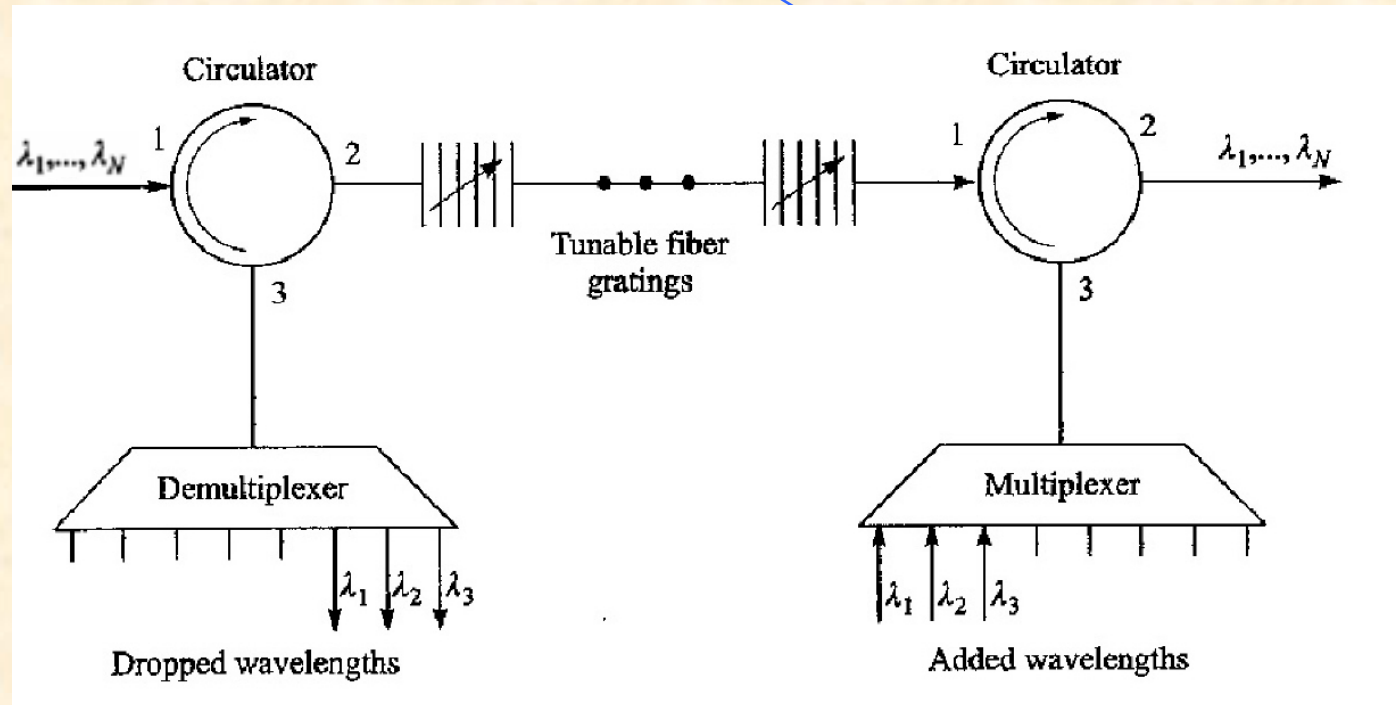
光分插复用器

OADM – Optical Add/Drop Multiplexer

光纤光栅与光纤环形器

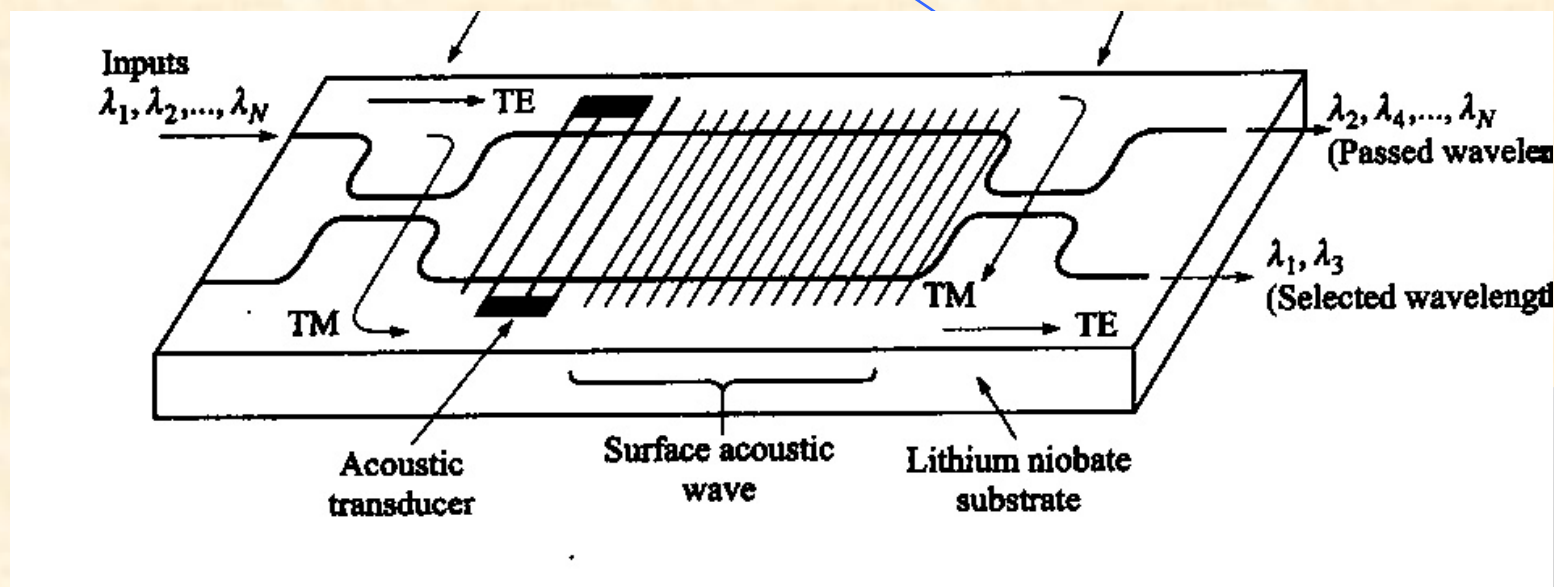


光纤光栅型OADM



- 存在的主要问题是光纤光栅本身的长期稳定性不能保证

声光可调谐滤波器 (AOTF)



- 施加在叉指电极上微波电信号在器件表面产生声表面波
- 声表面波通过弹光效应在波导内产生动态光栅
- 动态光栅造成某些波长上TE与TM模之间的耦合和转化
- 在输出端利用偏振相关耦合器实现通过波长与下路波长的分离



多波长可调谐激光器技术



多波长激光器



小结

- ✓ 光层的功能是在光域实现高速信号的复接、传输、交换和上下话路，其具体内容尚在不断发发展之中
- ✓ 光信号的复用技术包括波分、时分、码分和副载波复用等几种形式
- ✓ 光交换技术主要包括空间光交换、波长交换和时分光交换等线路交换技术以及光分组交换技术
- ✓ 光分组交换是目前全光网技术的研究热点
- ✓ 与光信号的复用、交换和分插复用有关的器件研究是目前光通信技术的前沿，进展十分迅速，但尚未达到可以商业应用的水平
- ✓ 如何在光域进行路由或分组信息的识别是构建全光网所面临的最严峻的困难，目前尚没有基本可行的技术方案