

光

纤

通

信





电子科技大学

光电信息学院 光纤通信课程组



第六章 光放大及波分复用技术

本章内容:

6.1 光放大器基础

6.2 半导体光放大器

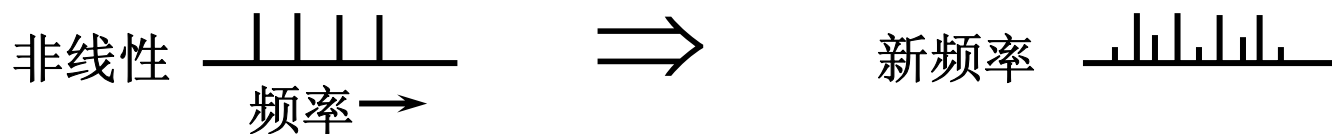
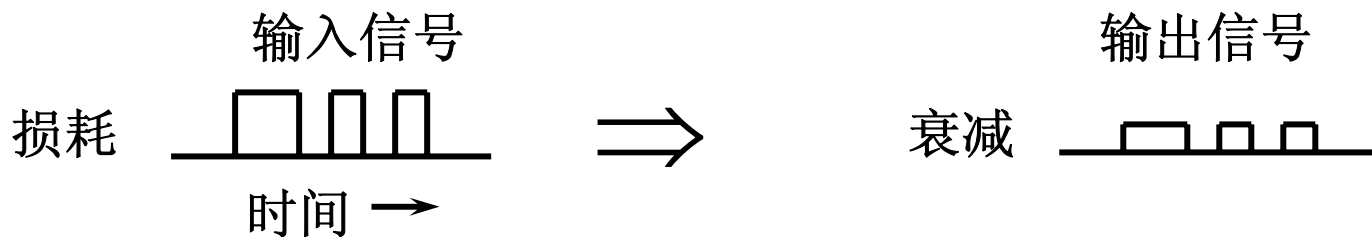
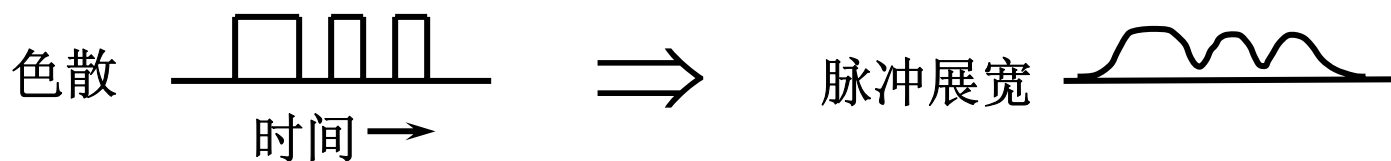
6.3 掺铒光纤放大器

6.4 波分复用技术



6.1 光放大器基础

■ 光纤的**损耗**和**色散**限制了通信距离。



6.1 光放大器基础

- 为了满足长距离通信的需要，必须在光纤传输线路上每隔一定距离加入一个中继器。以补偿光信号的衰减和对畸变信号进行整形，然后继续向终端传送。

- 中继方法：

- 光电光混合中继器

- ➡ 结构复杂，价格昂贵，且不能用于波分复用系统中。

- 全光中继器

- ➡ 对光信号进行直接放大。



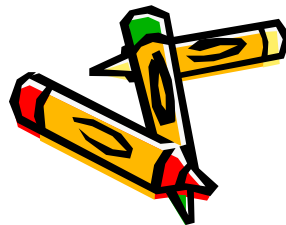
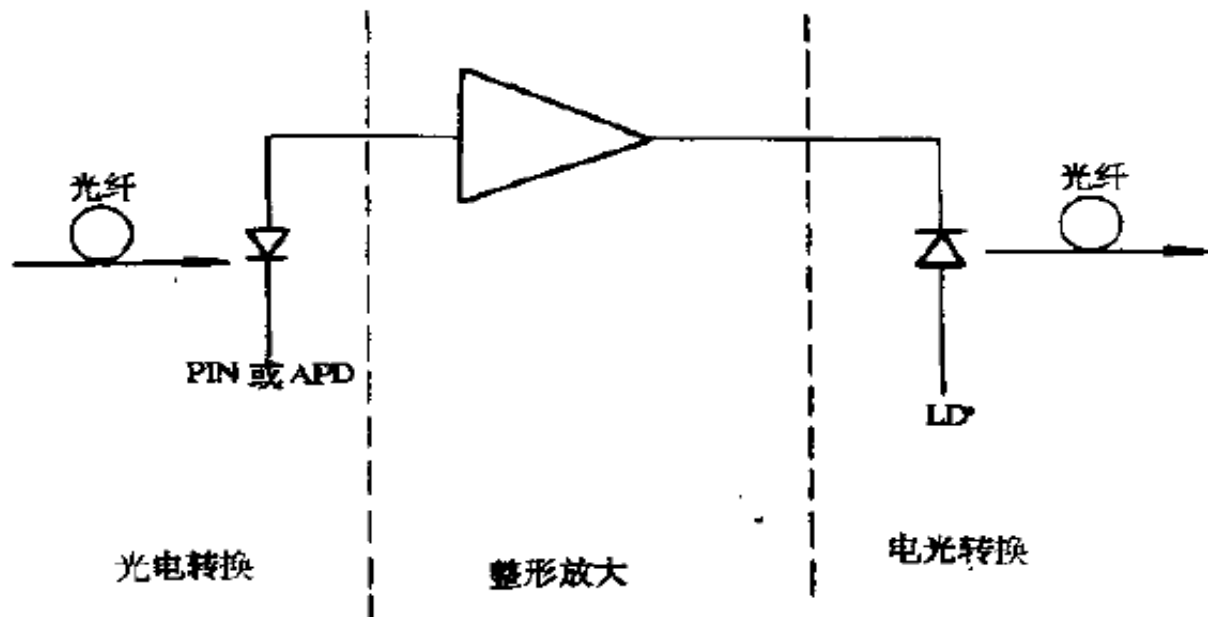
6.1.1 光纤通信中的光电中继器

■ 传统的光通信系统采用的是光电转换的中继器。

■ 中继原理：

● 光信号首先由光电二极管转变成电信号。

● 电信号经电路整形放大后再重新驱动一个光源，实现光信号的再生。



6.1.1 光纤通信中的光电中继器

缺点:

- 装置复杂

- 体积大

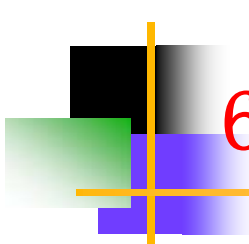
- 耗能多

特别对多信道复用和双向复用光纤通信系统，这种中继方式十分复杂，极其昂贵。

- 对色散限制的系统，有必要对光信号进行再生，采用光电转换的中继器。
- 对损耗限制的系统，只用对光信号进行放大，采用光放大器。

光放大器优点：结构简单、价格便宜





6.1.2 光放大器的种类

● 半导体激光放大器 (**SLA**)

● 非线性光纤光放大器

● 掺杂光纤放大器



6.1.2 光放大器的种类

■ 半导体光放大器

● 半导体激光器芯片两端镀上增透膜。

■ 优点：单程增益高，小型化，容易与其他半导体器件集成。

■ 缺点：

- 性能与光偏振方向有关，
- 与光纤的耦合损耗大。



6.1.2 光放大器的种类

■ 非线性光纤放大器

- 利用光纤中的非线性效应，利用受激拉曼散射（SRS）和受激布里渊散射（SBS）。
- 需要对光纤注入泵浦光，泵浦光能量通过**SRS**或**SBS**传送到信号上，同时部分能量转换成分子震动（**SRS**）或声子（**SBS**）。

➡ 光纤喇曼放大器（FRA）

泵浦光与信号光可同向或反向传输，增益带宽约为6THz。

➡ 光纤布里渊放大器（FBA）

泵浦光与信号光只能反向传输，增益带宽相当窄，为30~100MHz。



6.1.2 光放大器的种类

■ 掺杂光纤放大器

● 利用掺杂离子在泵浦光作用下形成粒子数反转分布，当有入射光信号通过时实现对入射光信号的放大作用。

● 优点：

➡ 掺铒与掺镨光纤放大器具有增益高、噪声低、频带宽、输出功率高等优点，具有广泛的应用前景。



PTA5101 掺铒光纤放大器

- 980nm泵浦激光器
- 低噪声特性保证信号质
- 多种输出功率供不同应用选择
- 双路输出可选
- 前面板液晶显示整体内部数据状态
- RS-485接口实现远距离状态监控



6.1.2 光放大器的种类

■ 掺杂光纤放大器的特性主要由掺杂元素决定:

● 掺铒(Er)光纤放大器(EDFA): 工作波长1550 nm

● 掺镨(Pr)光纤放大器(PDFA): 1300 nm

● 掺铥(Tm)光纤放大器(TDFA): 1400 nm



几种光放大器的比较

放大器类型	原理	激励方式	工作长度	噪声特性	与光纤耦合	与光偏振关系	稳定性
掺稀土光纤放大器	粒子数反转	光	数米到数十米	好	容易	无	好
半导体光放大器	粒子数反转	电	100 μ m~1mm	差	很难	大	差
光纤(喇曼)放大器	光学非线性(喇曼)效应	光	数千米	好	容易	大	好

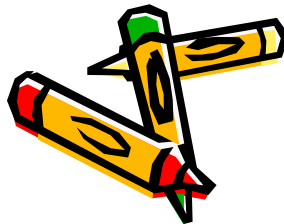
6.1.3 光放大器的性能

■ 光放大器的功能:

- 提供光信号增益，以补偿光信号在通路中的传输衰减，增大系统的无中继传输距离。

■ 光放大器原理:

- 在泵浦能量作用下实现粒子数反转，然后通过受激辐射实现对入射光信号的放大
- 光放大器是基于受激辐射或受激散射原理实现入射光信号放大的一种器件，其机制与激光器完全相同。
- 实际上，光放大器在结构上是一个没有反馈或反馈较小的激光器。



6.1.3 光放大器的性能

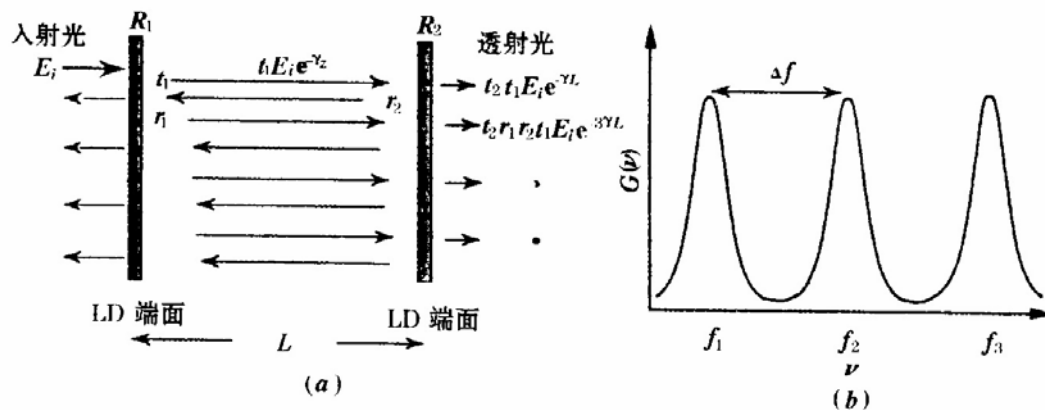


图 7.4 半导体激光放大器分析模型图
(a)FP腔;(b)增益特性。

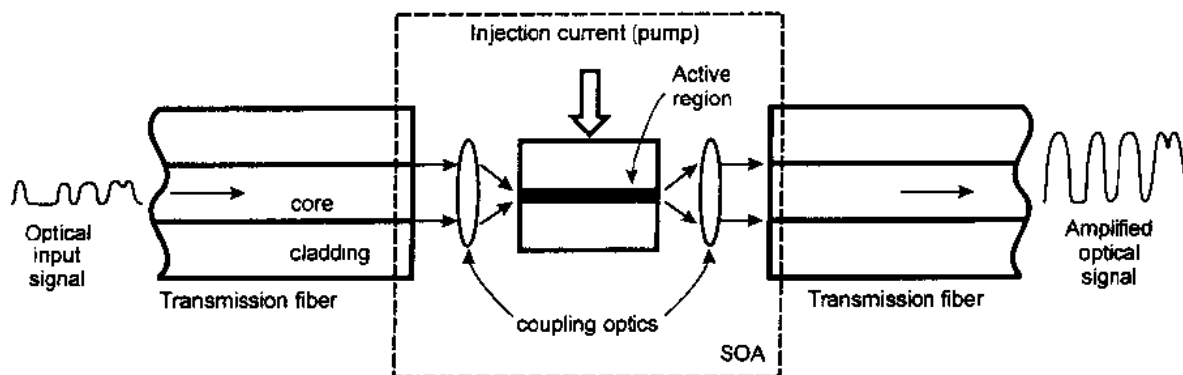


Figure 12.15 Semiconductor optical amplifier (SOA).



6.1.3 光放大器的性能

表 7.1 1.5 μm 光放大器的性能比较

性能 \ 放大器类型	EDFA	SLA	FRA	FBA
小信号增益/dB	> 40	> 30	> 40	> 40
效率(增益/泵功率)/(dB $\cdot\text{mW}^{-1}$)	5 ~ 11	> 28dB/50mW	> 0.08	> 5.5
输出功率/mW	> 500	> 115	1 000	/
失真或串话	可忽略	严重	/	/
瞬态特性	> 15GHz 平坦, > 100GHz, < 80fs 脉冲	> 25Gb/s	> 20Gb/s	$\leq 100\text{MHz}$
增益带宽	几十 nm	几十 nm(TWA)	几十 nm	$\leq 100\text{MHz}$
噪声指数/dB	4($\lambda_p = 0.82\mu\text{m}$) ≈ 3 ($\lambda_p = 0.98\mu\text{m}$) 4($\lambda_p = 1.48\mu\text{m}$)	≈ 5	≈ 3	≈ 20
偏振灵敏度	否	< 几分贝	否	否
连接损耗/dB	< 1	6 ~ 10	< 1	< 1
放大方式	集中或分布	集中	分布	分布
热稳定性	好	差	/	/



6.1.3 光放大器的性能

■ 放大器的增益:

- 不仅与信号光的频率有关，而且还依赖于其强度。
- 对于均匀展宽二能级系统，增益系数 g 可表示为：

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P / P_s}$$

- g_0 为由放大器泵浦大小决定的峰值增益， ω 为入射光信号的频率， ω_0 为激活介质的跃迁频率， P 为信号光功率， P_s 为饱和光功率， T 为横向驰豫时间。



6.1.3 光放大器的性能—增益和带宽

■ 增益谱宽:

- 增益谱宽定义为增益谱 $g(\omega)$ 降至最大值一半处的全宽 (FWHM)。

■ 放大器的增益或放大倍数:

- $$G = P_{out} / P_{in}$$

■ 放大器带宽 $\Delta \nu_A$:

- 放大器的带宽定义为增益 $G(\omega)$ 降至最大放大倍数一半处的全宽度 (FWHM)。



6.1.3 光放大器的性能—增益和带宽

- 当频率 ω 偏离 ω_0 时, $G(\omega)$ 下降得比 $g(\omega)$ 快得多。

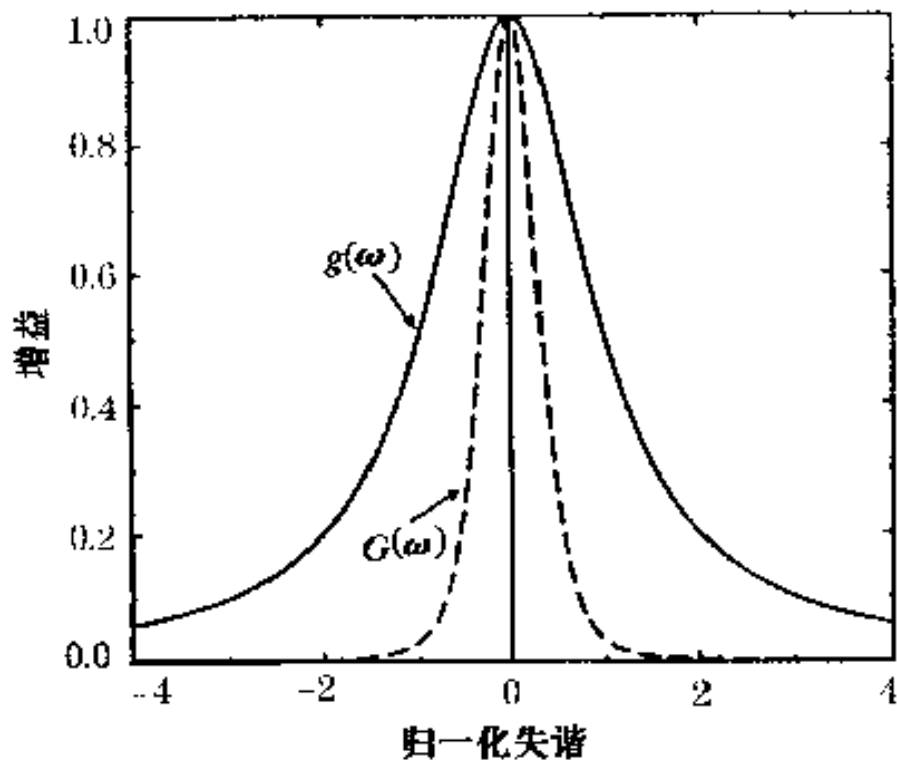


图 7.1 二能级光放大器增益谱及其相应介质的洛伦兹增益谱特性



6.1.3 光放大器的性能—增益饱和

■ 小信号增益:

● 当 $P / P_s \ll 1$, 或 $P \ll P_s$, 称为小信号增益。(P_s 为饱和功率)

■ 当 P 增大至可与 P_s 相比拟时, $G(\omega)$ 降低, $g(\omega)$ 也降低。

■ 饱和输出功率:

● 定义放大器增益降至最大小信号增益一半时的输出功率为饱和输出功率。



6.1.3 光放大器的性能—增益饱和

- 随着输出功率的增大，增益出现了饱和。

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{G-1}{G} \cdot \frac{P_{out}}{P_s}\right)$$

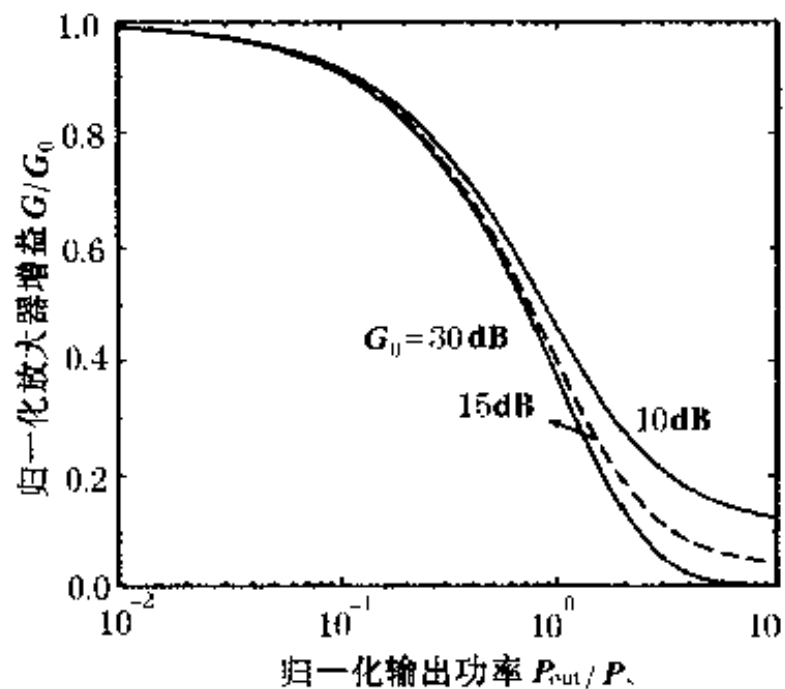
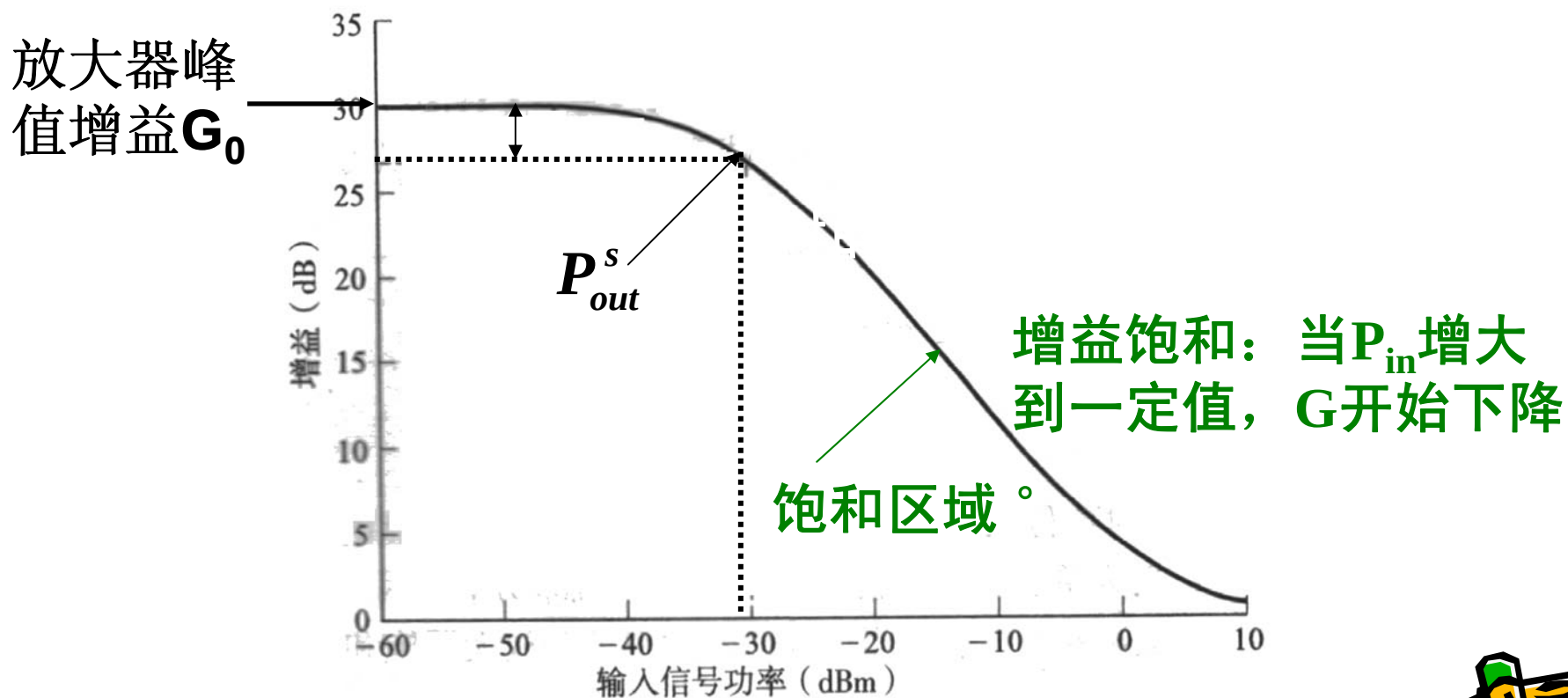


图 7.2 放大器增益随输出功率的变化



6.1.3 光放大器的性能－增益饱和



6.1.3 光放大器的性能—放大器噪声

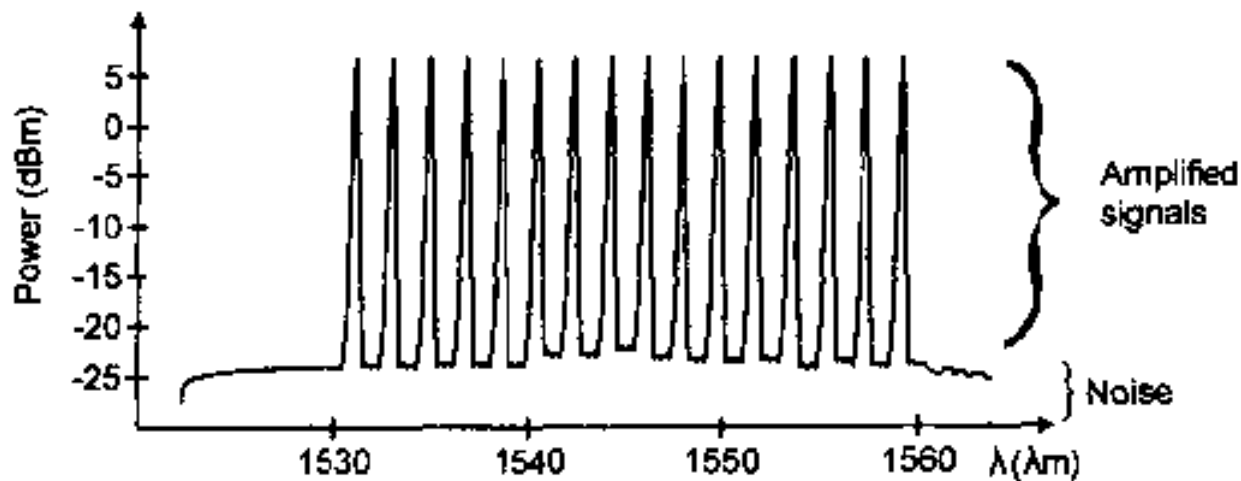
- 所有光放大器在放大过程中都会把自发辐射（或散射）叠加到信号光上，导致被放大信号的信噪比（**SNR**）下降。
- 其降低程度通常用噪声指数 F_n 来表示：

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}$$



6.1.3 光放大器的性能－放大器噪声

- 在放大器输出端信号已得到放大，但也产生了新的自发辐射噪声。
- ASE噪声叠加在信号上，导致信噪比下降



EDFA噪声

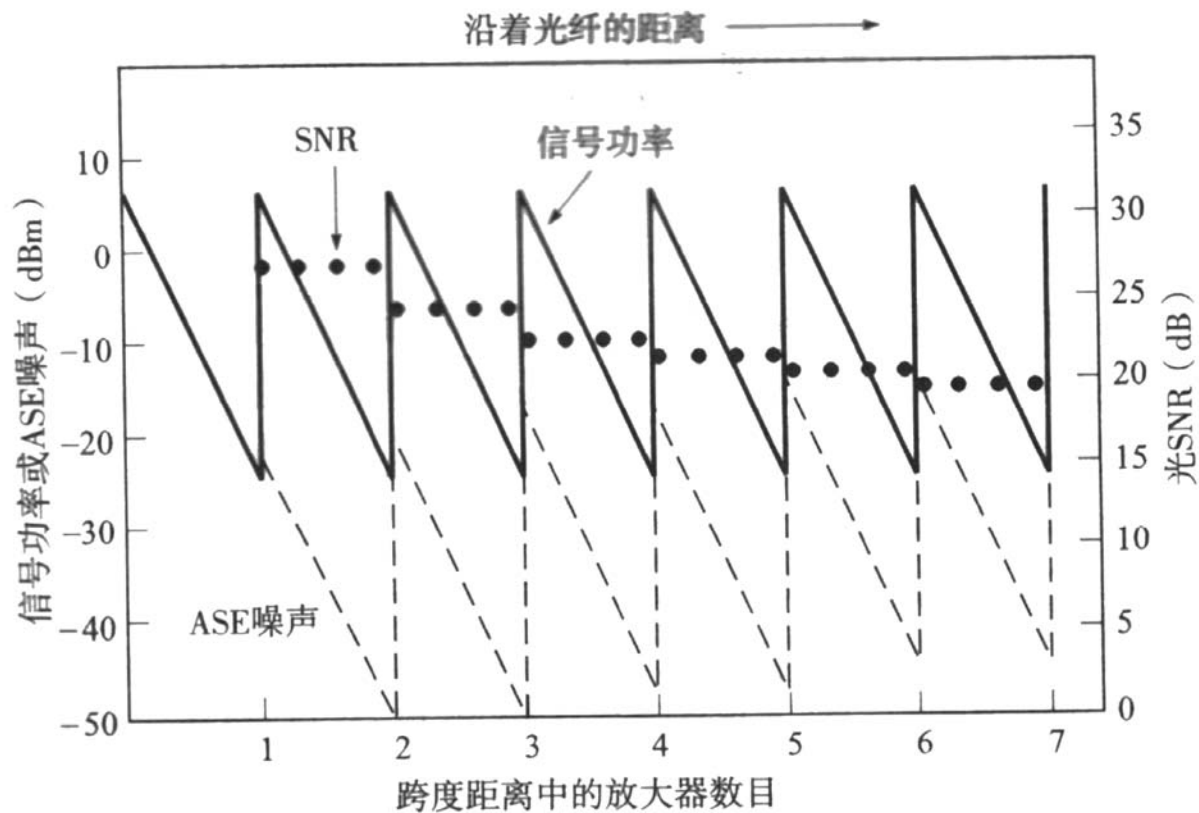


6.1.3 光放大器的性能－放大器噪声

■ 因此：

$$(SNR)_{out} \neq (SNR)_{in}$$

$$F_n \neq 1$$



EDFA噪声



6.1.3 光放大器的性能—放大器噪声

■ ASE噪声近似为白噪声，噪声功率谱密度为：

$$S_{sp} = (G - 1)n_{sp}h\nu$$

自发发射因子或粒子数反转因子

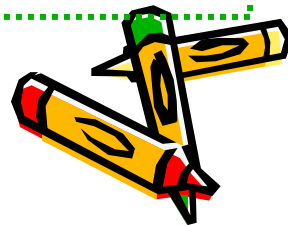
• 对于原子都处于激发态或完全粒子数反转的光放大器， $n_{sp}=1$ ；

• 当粒子数不完全反转时， $n_{sp}>1$ ；

$$n_{sp} = N_2 / (N_2 - N_1)$$

激发态的粒子数

基态的粒子数



6.1.3 光放大器的性能—放大器噪声

- 接收机前接入光放大器后，新增加的噪声主要来自**ASE**噪声与信号本身的差拍噪声。噪声指数为：

$$F_n = 2 n_{sp} \frac{G - 1}{G} \approx 2 n_{sp}$$

- 表明：即使对 $n_{sp}=1$ 的完全粒子数反转的理想放大器，被放大信号的**SNR**也降低了**3dB**。
- 对大多数实际的放大器 F_n 均超过**3dB**，并可能达到**6~8dB**。
- 要求 F_n 尽可能低。



6.1.3 光放大器的性能—放大器噪声

■ **增益、输出功率、噪声指数**是表征光放大器性能的两项主要参数。

■ 此外：

● **能量转换效率** → 增益/泵功率。

● **瞬态特性**

● **串音** → 由于其他信道的存在的引起的本信道的失真。实质上是四波混频效应。

● **偏振灵敏性**



6.1.4 光放大器在光纤通信中的应用形式

光放大器的应用

线路放大(In-line): 周期性补偿各段光纤损耗

功率放大(Boost): 增加入纤功率, 延长传输距离

前置放大(Pre-Amplify): 提高接收灵敏度

局域网的功率放大器: 补偿分配损耗, 增大网络节点数

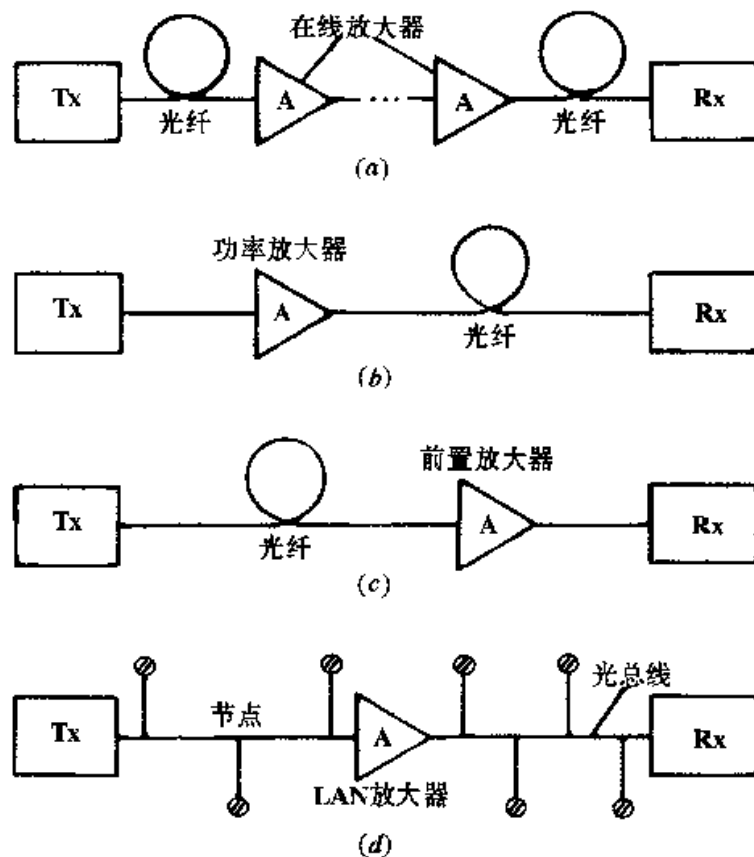


图 7.3 光放大器在光波系统中的可能应用

(a) 用作线路放大器; (b) 用作光发送机功率放大器; (c) 用作光接收机前置放大器;
(d) 用作局域网的功率放大器。

6.1.4 光放大器在光纤通信中的应用形式

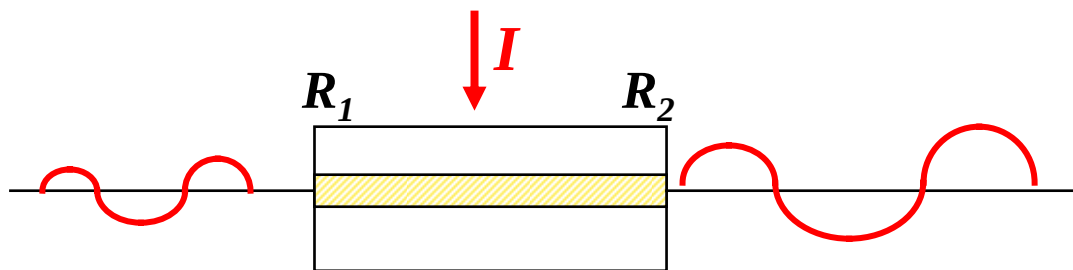
表 7.2 光波系统应用对 EDFA 的要求

放大器类型	后置	在线	前置	功放
使用要求	增加发送功率	中继	提高接收机灵敏度	补偿分支损耗
增益	低	高	高	高
输出功率	高	高	低	高
噪声指数	✓	低	低	稍低
偏振灵敏度	✓	低	稍低	稍低
应用系统	中继线路, 海底和陆上系统			CATV LAN



6.2 半导体光放大器

- 所有靠近阈值但在阈值以下偏置的半导体激光器都可以实现光放大，做成半导体激光放大器。



半导体光放大器示意图



6.2.1 工作原理

- 半导体光放大器的放大特性主要决定于激光腔的反射特性与有源层的介质特性。
- 根据光放大器端面反射率和工作偏置条件，将半导体光放大器分为：
 - 法布里-珀罗放大器(FPA)
 - 行波放大器(TWA)



6.2.1 工作原理

■ 工作原理:

- LD两端面构成FP谐振腔;
- 入射光从左端面进入, 通过具有增益的有源层;
- 到达右端面后, 部分从端面反射, 然后反向通过有源层至左端面, 部分光从左端面出射;
- 其余部分又从端面反射, 再次通过有源层;
- 如此反复, 使入射光得到放大。



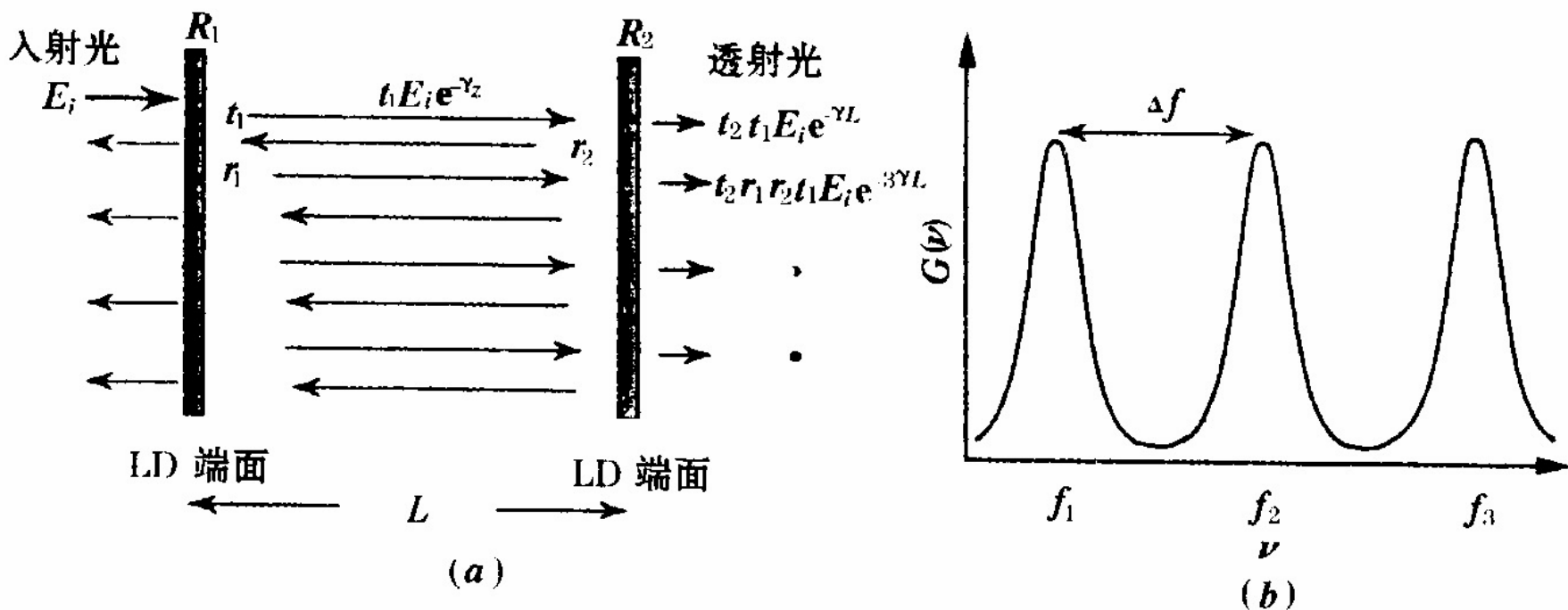


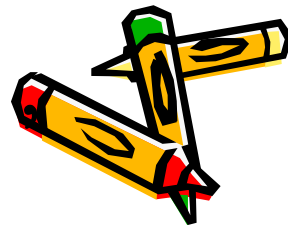
图 7.4 半导体激光放大器分析模型图

(a) FP 腔; (b) 增益特性。

■ 放大器输出光为多次透射光之和。

(等比数列求和: $S = a_1 / (1 - q)$)

■ 多峰值、带宽窄，不适合通信系统应用
只可用于一些信号处理。

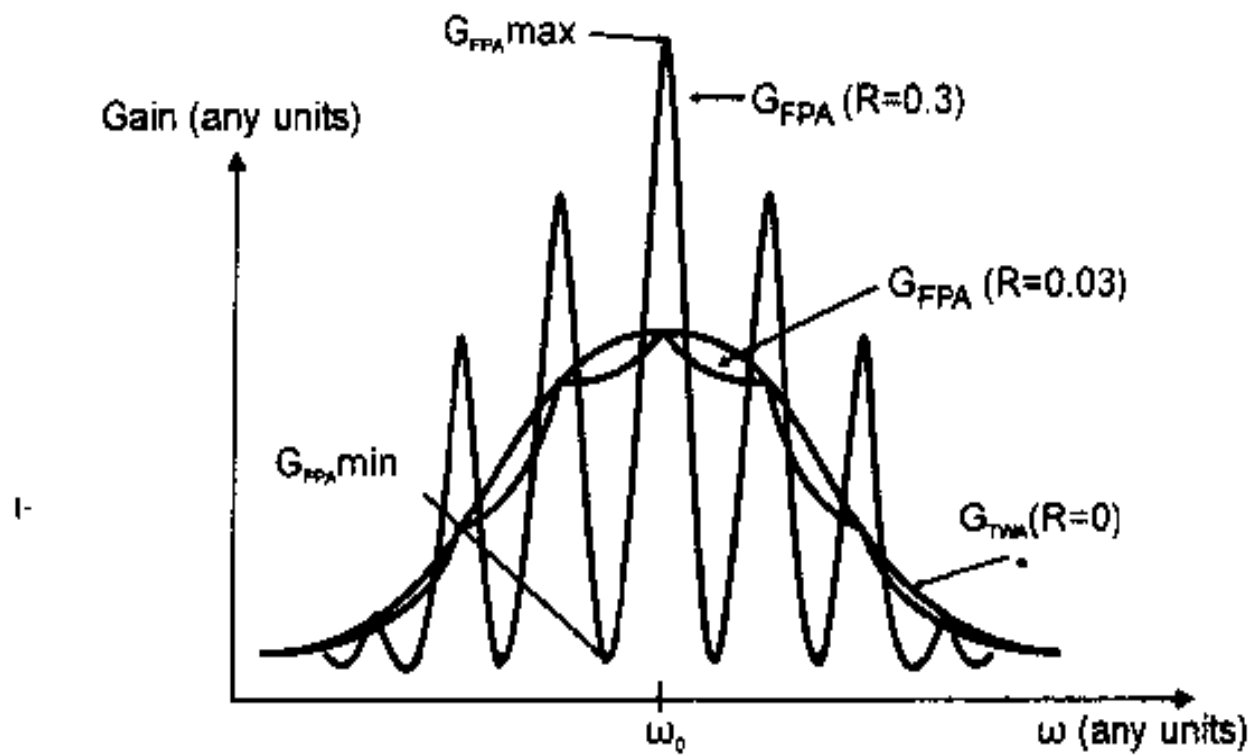


6.2.1 工作原理

- 当 $\sqrt{R_1 R_2} G_s \ll 1$ 时, $\frac{G_{\max}}{G_{\min}} \rightarrow 1$, $G_{FP} \rightarrow G_s$
- 增益起伏消失, 相应于宽带单程行波半导体放大器。
- 通常 G_s 应有足够大的值, 因此 R_1 和 R_2 必须做得很小。
- 实际上, 要使 R_1 和 R_2 做得很小是很困难的。
- 因此, **FPA** 的增益总存在一定的起伏, 带宽总是有限的。



6.2.1 工作原理

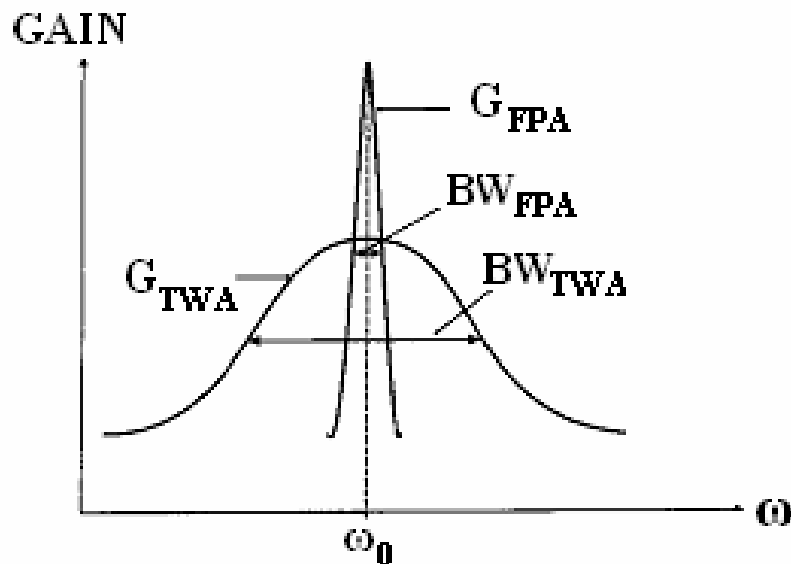


c)



6.2.1 工作原理

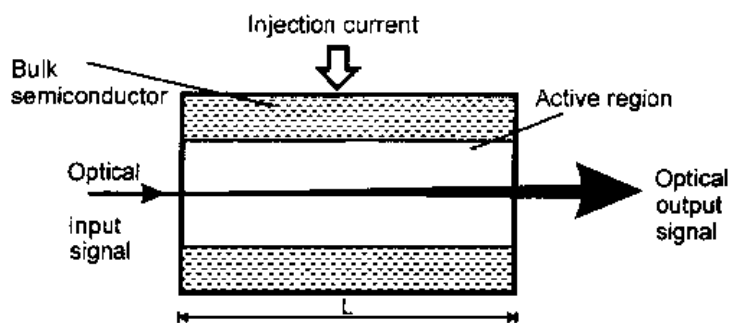
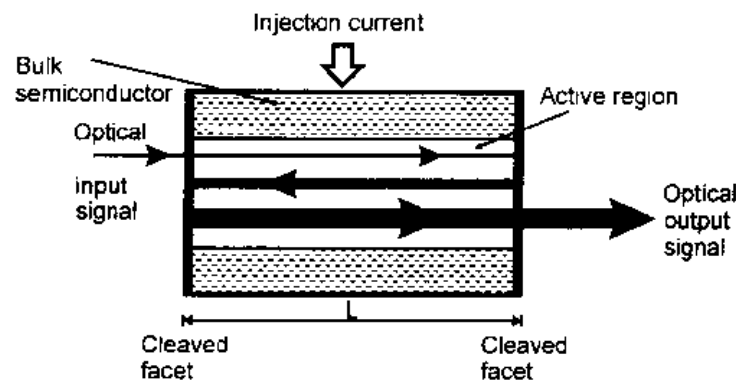
- 为实现高增益放大，应使 $\sqrt{R_1 R_2} G_s \rightarrow 1$
- 这将使带宽 $\Delta \nu_A$ 变窄， $\Delta \nu_A < 10 \text{ GHz}$ 。
- **FPA**的带宽比**TWA**小得多，不适于光波系统作为放大器应用。但可作为有源滤波器。



6.2.1 工作原理

行波半导体光放大器

- TWA与FPA的区别在于端面的反射率大小。
- TWA具有极低的端面反射率，通常在0.1%以下。



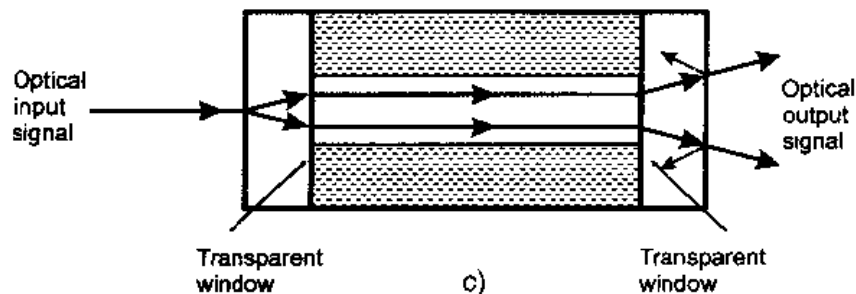
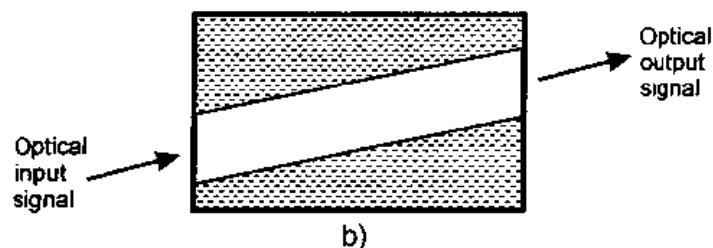
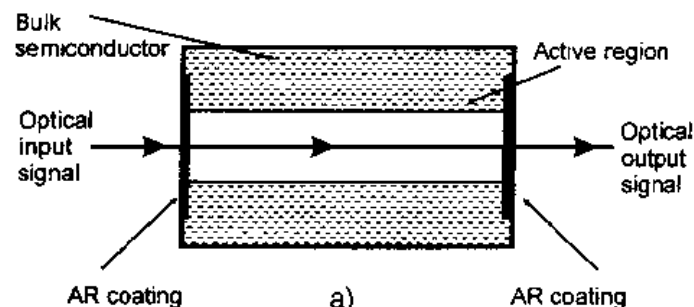
6.2.1 工作原理

降低端面反射方法:

● 减反膜

● 倾斜有源区法

● 窗面结构等



6.2.2 放大器特性

- 对光信号增益的饱和性

- 噪声指数

- 偏振灵敏性

- 饱和输出功率:

 - ➡ 典型值: $5\text{mW} \sim 10\text{mW}$



6.2.2 放大器特性

■ 噪声指数:

- 自发辐射噪声;
- 腔中自由载流子吸收和散射等腔内损耗使增益降低;
- 放大器端面的反射率引起 F_n 增加 (对TWA, 端面残留反射率的影响可忽略)。

$$F_n = 2 \left(\frac{N_2}{N_2 - N_0} \right) \left(\frac{g}{g - \alpha_{\text{int}}} \right)$$

- F_n 典型值: 5 dB ~ 7 dB.



6.2.2 放大器特性

■ 偏振灵敏性

● 定义：

➡ 偏振灵敏性是指放大器的增益随输入信号光的偏振态而变化的特性。

● 起因：

➡ 有源层横截面呈扁长方形，对横向和竖向光场的约束不同。

● 光信号偏振方向取横向时增益大，竖向时小。



6.2.2 放大器特性

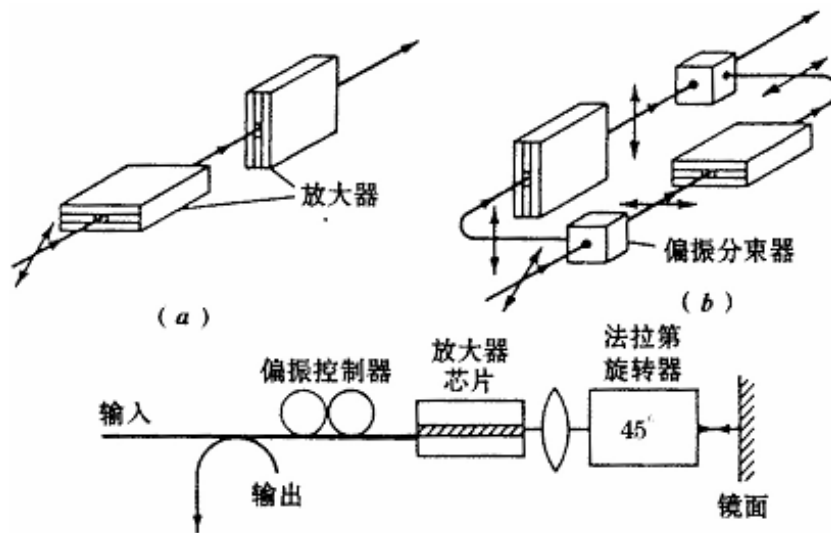
●解决方法:

- 从放大器设计着手，采用宽度和厚度可比拟的有源层设计。
- 从使用方法上着手，将两个相同的放大器组合或使信号两次通过同一放大器。



6.2.2 放大器特性

相同结构SOA互相垂直串接，所得增益将与偏振无关



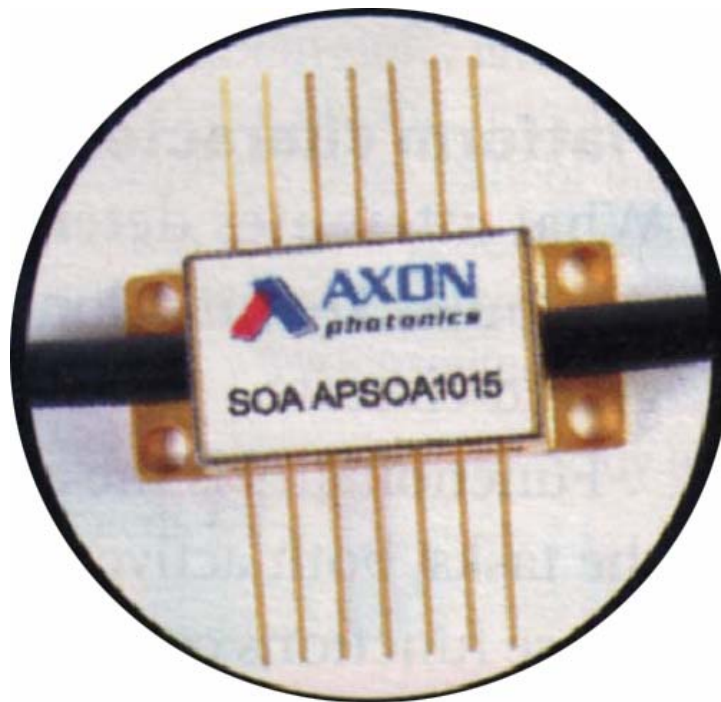
相同结构SOA互相垂直并接，在输入端采用偏振分束器将信号分成TE和TM偏振信号，分别输入至相互垂直的SOA，然后将两只SOA放大的TE和TM偏振信号合成，得到与输入光同偏振态的放大信号。

输入光信号往返两次通过同一SOA，但反向通过前，采用法拉第旋转器使返回光旋转90°

降低SOA偏振灵敏性的方法



6.2.3 放大器应用



SOA Product



6.2.3 放大器应用

■ SOA的应用:

- 串级全光中继放大器
- 光接收机前置放大器
- 用于局域网中分支损耗补偿放大器

● 适用系统:

- ➡ 强度调制直接检测光纤通信系统
- ➡ 相干光纤通信系统



6.2.3 放大器应用

- **TWA**具有高增益、高输出功率、宽带宽等特点，特别适于用作波分复用光纤通信系统中多路光信号直接放大，亦可用作高比特率光纤通信系统中超短光脉冲的直接放大。
- **SOA**的增益、输出功率、瞬态特性、非线性失真、偏振灵敏性和连接损耗等诸多特性，均不如**EDFA**，因此目前光纤通信系统中均普遍采用**EDFA**作为光放大器。



6.2.3 放大器应用

■ SOA多信道放大中存在问题:

- 噪声大

- 信道串扰(交叉增益调制XGM、四波混频FWM)

- 增益饱和引起信号畸变



6.3 掺铒光纤放大器

■ 为什么要用掺铒光纤放大器:

- 工作频带正处于光纤损耗最低处(**1525-1565nm**);
- 频带宽, 可对多路信号同时放大(波分复用);
- 对数据率/格式透明, 系统升级成本低;
- 增益高(**>40dB**)、输出功率大(**~30dBm**)、噪声低(**4~5dB**);
- 全光纤结构, 与光纤系统兼容;
- 增益与信号偏振态无关, 故稳定性好;
- 所需的泵浦功率低(数十毫瓦)。



6.3 掺铒光纤放大器

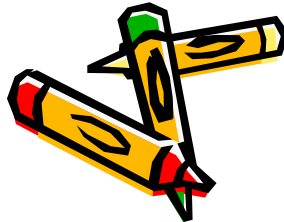
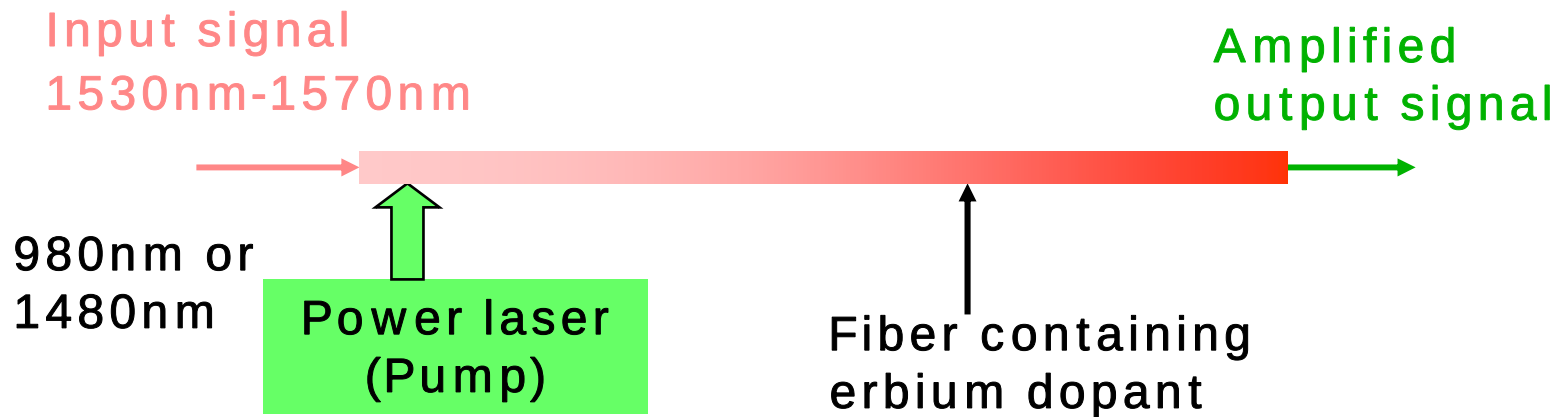
■ 掺铒光纤放大器给光纤通信领域带来的革命:

- EDFA解决了系统容量提高的最大的限制——光损耗。
- 补偿了光纤本身的损耗，使长距离传输成为可能。
- 大大增加了功率预算的冗余，系统中引入各种新型光器件成为可能。
- 支持了最有效的增加光通信容量的方式——WDM。
- 推动了全光网络的研究开发热潮。

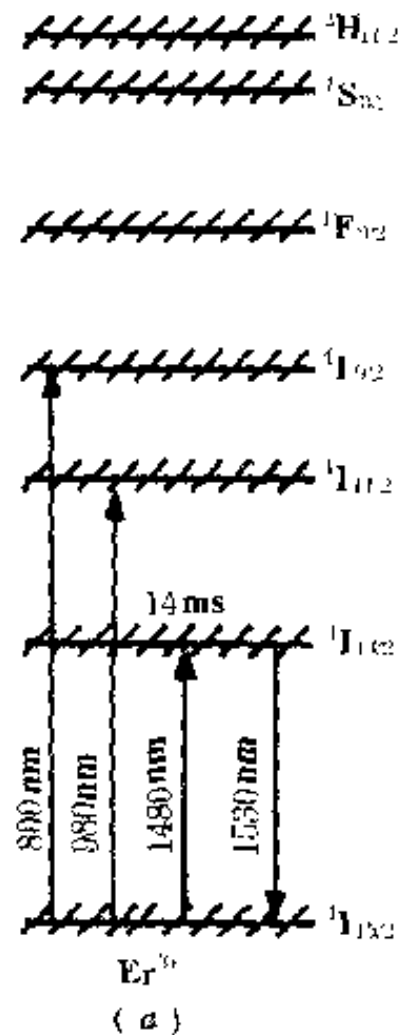
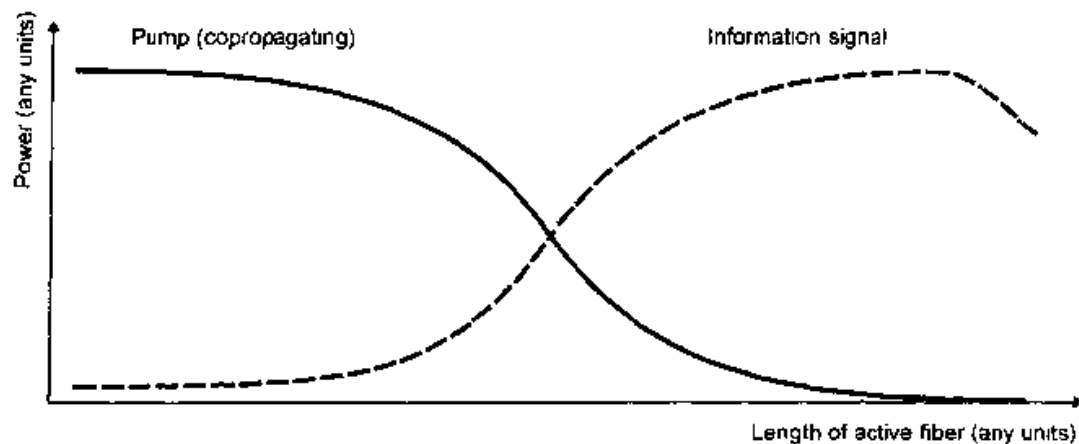


6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理

- **EDFA**采用掺铒离子单模光纤为增益介质，在泵浦光作用下产生粒子数反转，在信号光诱导下实现受激辐射放大。



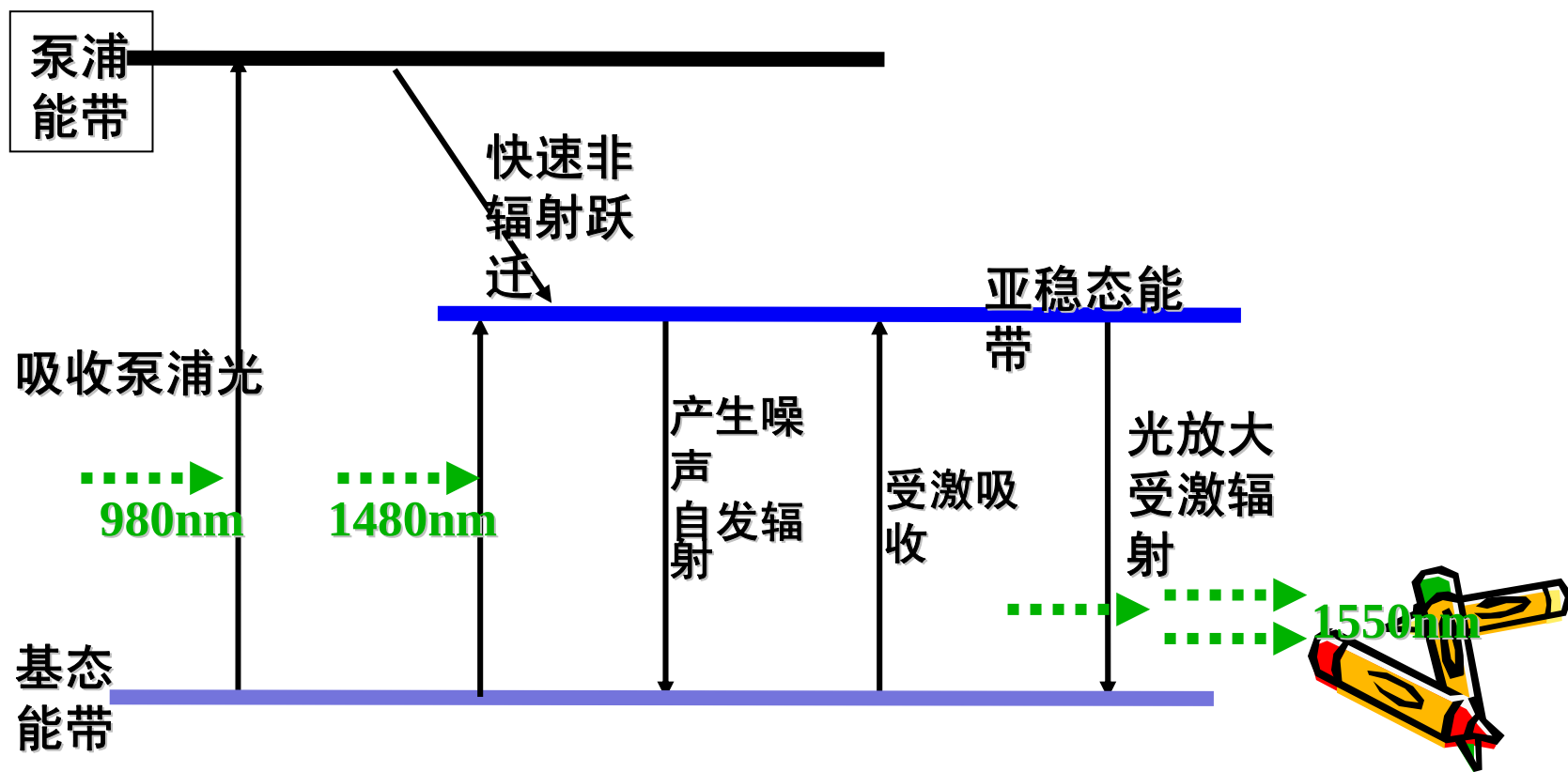
6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理



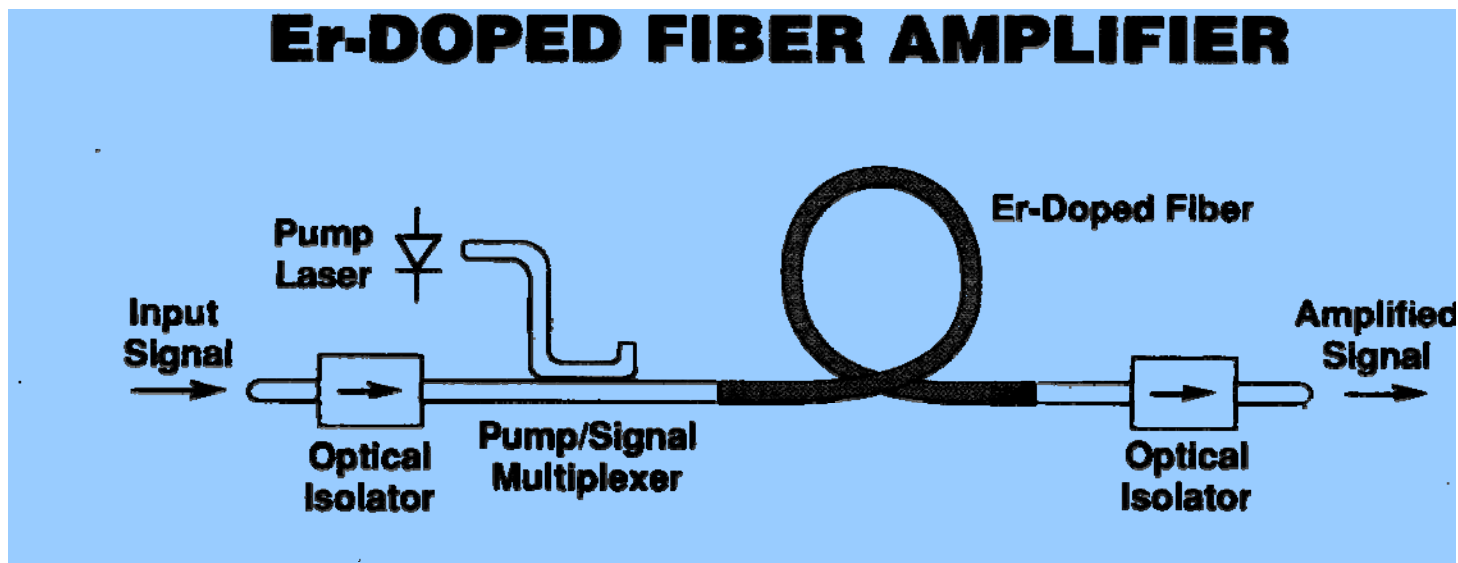
EDFA中的 Er^{3+} 能级结构:

- 由于石英的非晶态特性, Er^{3+} 能级展宽为一定宽度的能带。
- 泵浦波长可以是800 nm、980 nm、1480 nm等。
- 利用980 nm和1480 nm附近的半导体激光器可以有效泵浦EDFA (泵浦效率高)。

钇离子简化能级示意图



掺铒 光纤 放大器 的基本 结构



掺铒光纤：当一定的泵浦光注入到掺铒光纤中时， Er^{3+} 从低能级被激发到高能级上，由于在高能级上的寿命很短，很快以非辐射跃迁形式到较低能级上，并在该能级和低能级间形成粒子数反转分布。

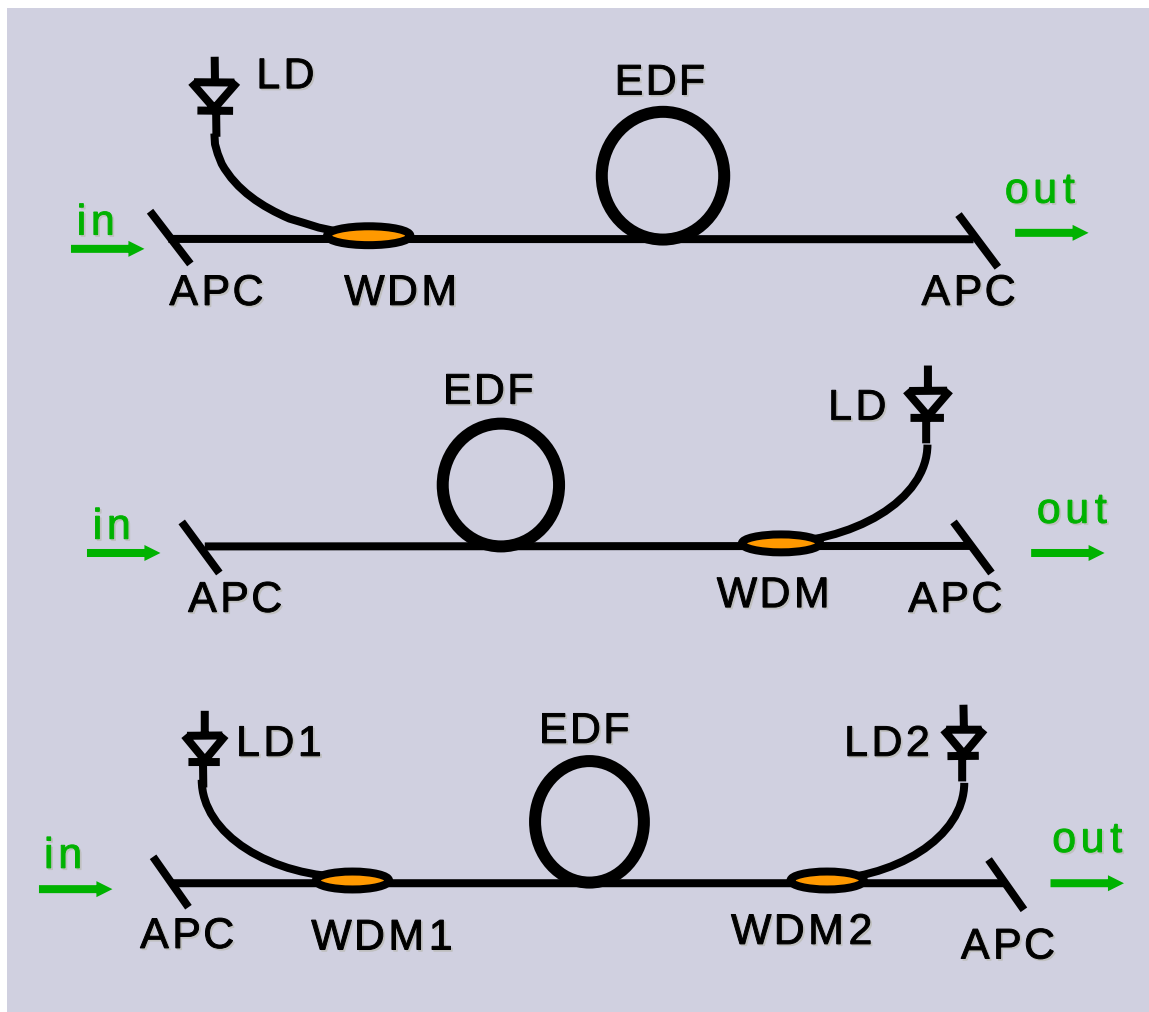
半导体泵浦二极管：为信号放大提供足够的能量，使物质达到粒子数反转。

波分复用耦合器：将信号光和泵浦光合路进入掺铒光纤中。

光隔离器：使光传输具有单向性，放大器不受发射光影响，保证稳定工作。

6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理

三种泵浦方式的EDFA



同向泵浦(前向泵浦)
型: 好的噪声性能

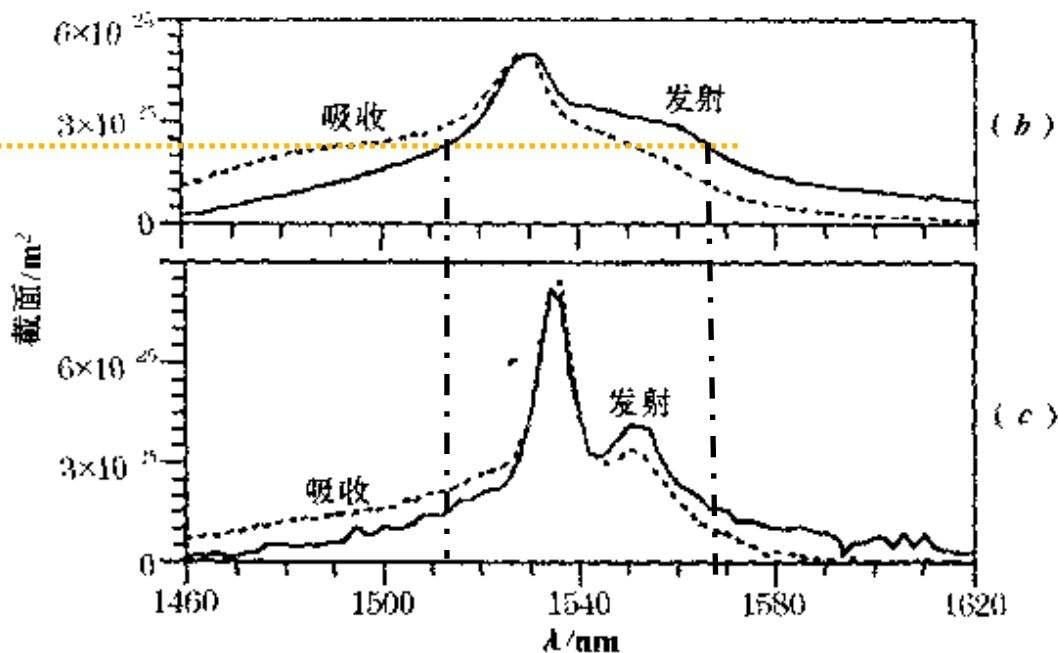
反向泵浦(后向泵浦)
型: 输出信号功率高

双向泵浦型: 输出信号功率比单泵浦源高3dB, 且放大特性与信号传输方向无关



6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理

- 掺铒EDF的增益谱很宽 (FWHM > 10 nm), 有双峰结构。
- 纤芯掺入铝后, 增益谱将进一步展宽。



6.3.2 掺铒光纤放大器的工作原理

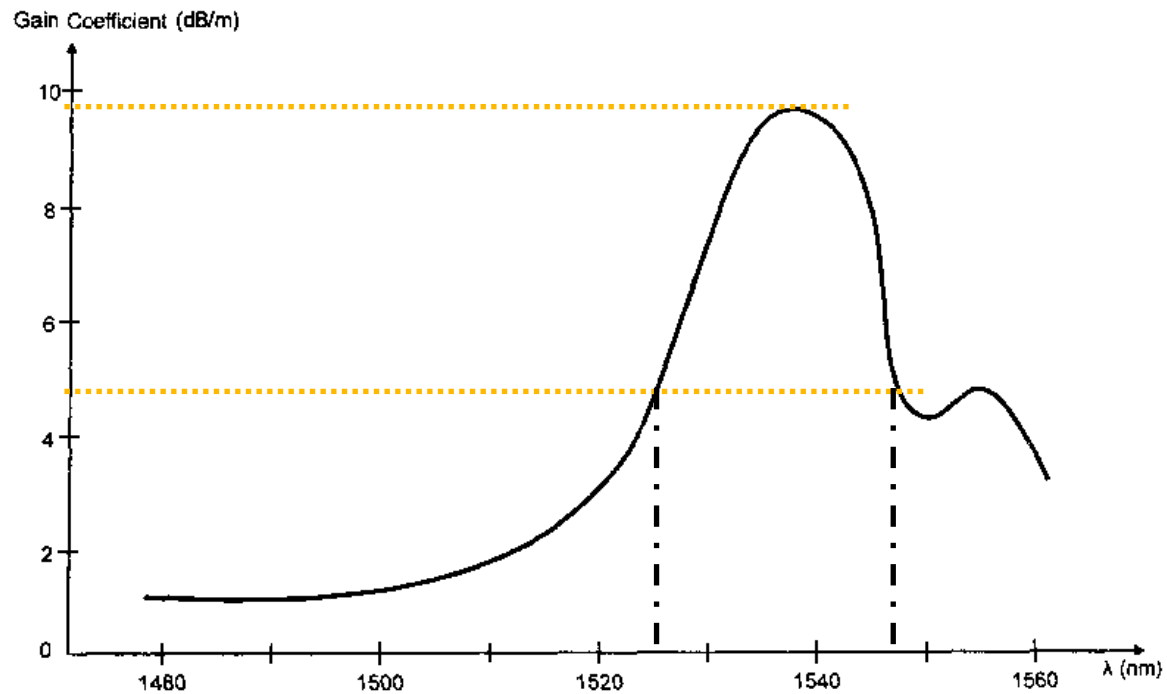


Figure 12.28
Gain versus wave-
length in erbium-
doped silica fiber.



6.3.3 掺铒光纤放大器的增益特性

■ EDFA的工作特性

- 光放大器的增益（小信号增益与增益饱和）
- 放大器的噪声
- EDFA的高速与多信道放大特性
- EDFA的大功率化



6.3.3 掺铒光纤放大器的增益特性

- 增益**G**是描述光放大器对信号放大能力的参数。定义为：

$$G(dB) = 10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

→ 输出信号光功率
→ 输入信号光功率

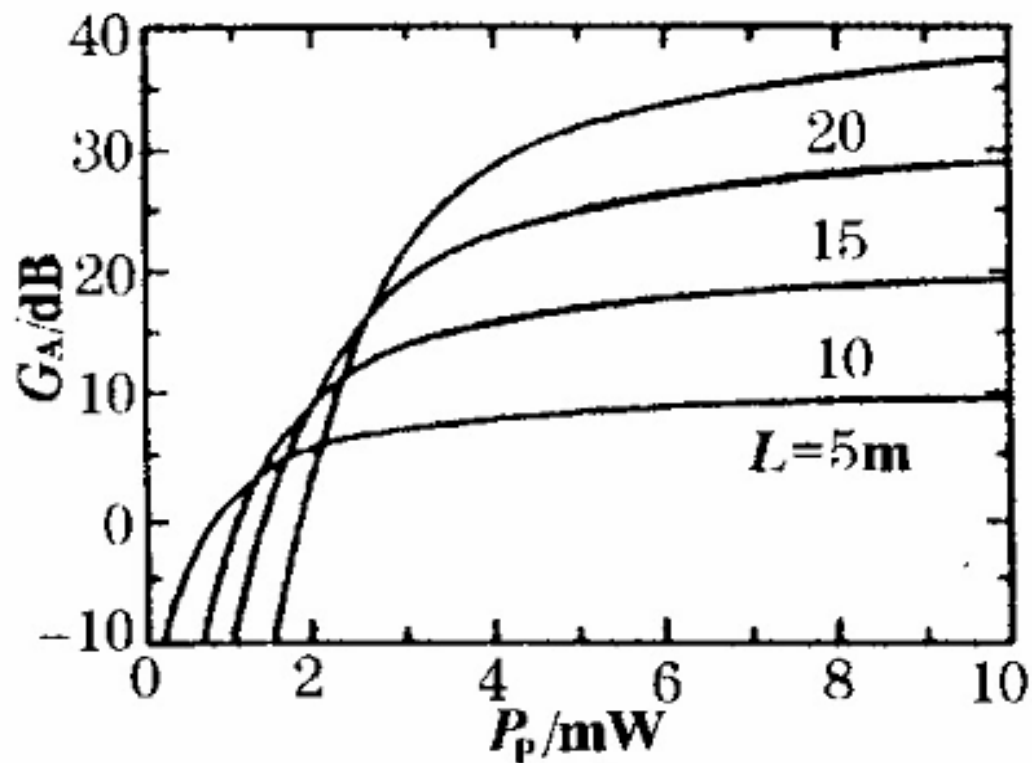
- **G**与光放大器的泵浦功率、掺杂光纤的参数和输入光信号有很复杂的关系。



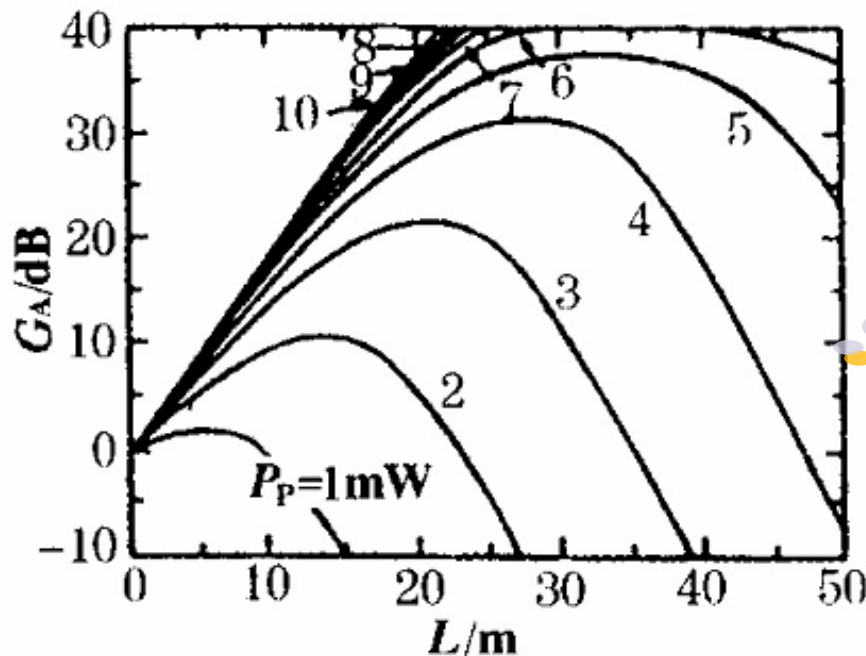
6.3.3

掺铒光纤放大器的增益特性

小信号增益
随泵浦功率
而变的曲线



对于给定的放大器长度（EDF长度），增益先随泵浦功率在开始时按指数增加，当泵浦功率超过一定值时，增益增加变缓，并趋于一恒定值。



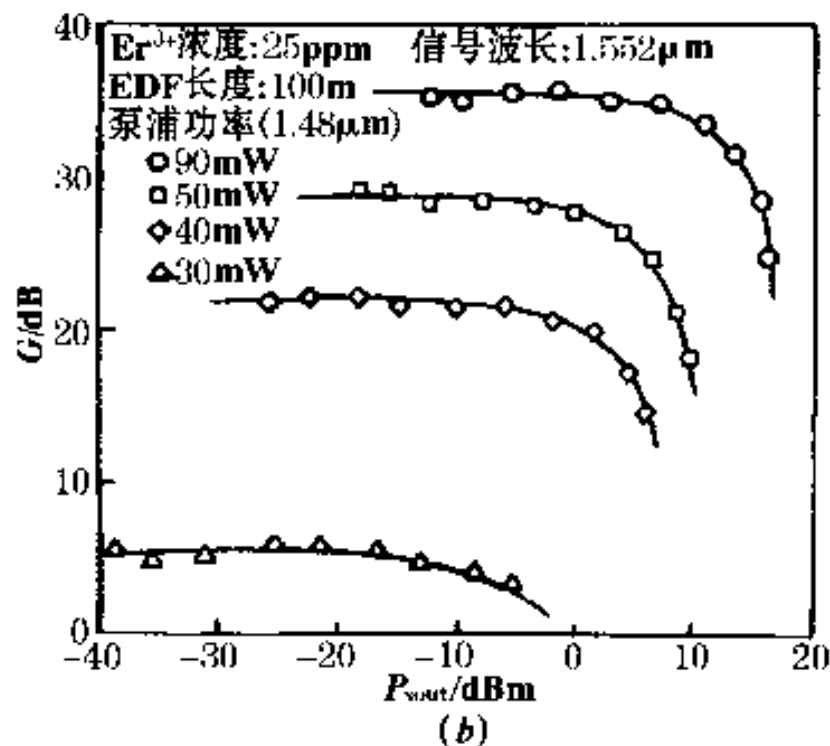
小信号增益随
放大器长度而
变的曲线

当泵浦功率一定时，放大器在某一最佳长度时获得最大增益，如果放大器长度超过此值，由于泵浦的消耗，最佳点后的掺铒光纤不能受到足够泵浦，而且要吸收已放大的信号能量，导致增益很快下

因此，在EDFA设计中，需要在掺铒光纤结构参数的基础上，选择合适的泵浦功率和光纤长度，使放大器工作于最佳状态。

6.3.3

掺铒光纤放大器的增益特性



某典型参数EDFA在不同泵浦功率时增益随输出功率的变化及增益饱和特性。

当增益降低3 dB时→饱和输出功率

6.3.3

掺铒光纤放大器的增益特性

■ EDFA噪声指数 F_n 可近似为

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} = 2n_{sp}$$

F_n 的极限值为3dB。

$n_{sp}=1$ 时（理想放大器）
被放大信号的SNR也降低了
二倍（或3dB）。

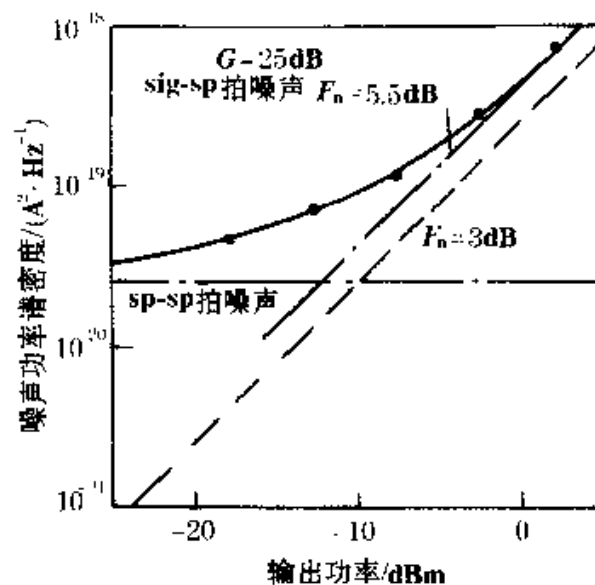
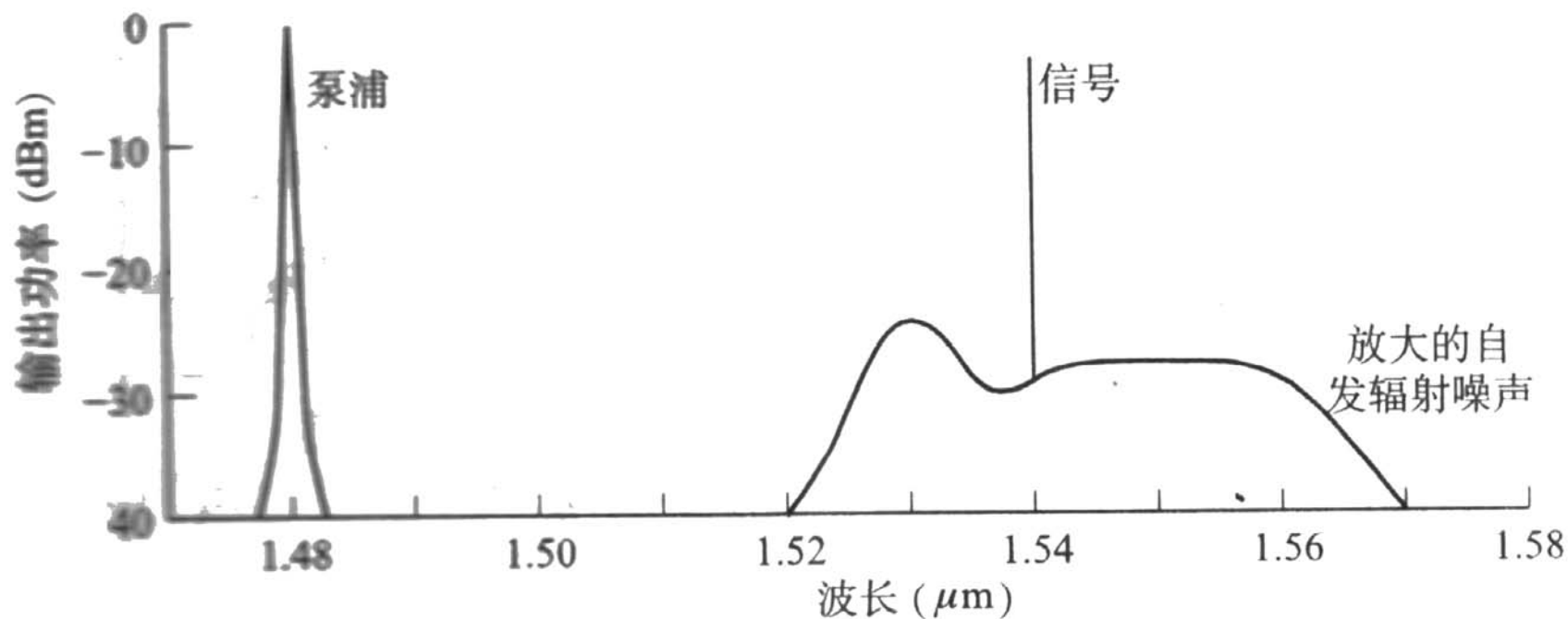


图 7.15 EDFA 噪声功率谱密度随输出功率的变化



6.3.4 掺铒光纤放大器的噪声

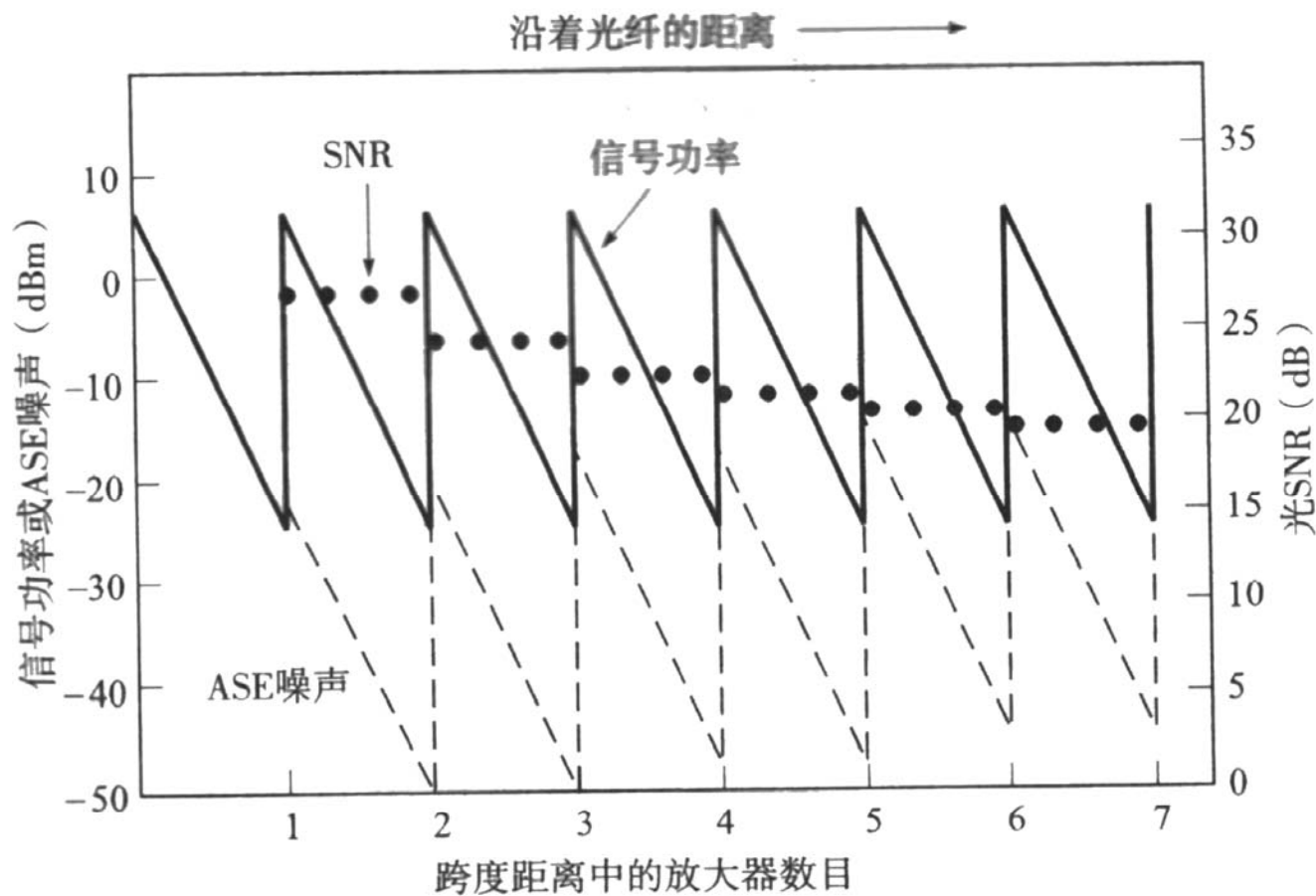
EDFA放大1540波长信号时产生的影响



ASE噪声叠加在信号上，导致信噪比下降。



6.3.4 掺铒光纤放大器的噪声



6.3.5 EDFA的高速与多信道放大特性

- 高速信号放大特性：
 - EDFA具有宽带特性。
 - 普通型EDFA: 12 nm。
 - 宽带型: 采用铝基EDF和增益均衡技术, 带宽35 nm。
 - 超宽带型: 采用碲基EDF和增益均衡技术, 带宽80 nm。
- 如此高的带宽使其非常适用于放大高速超短脉冲和WDM多信道信号。



6.3.5

EDFA的高速与多信道放大特性

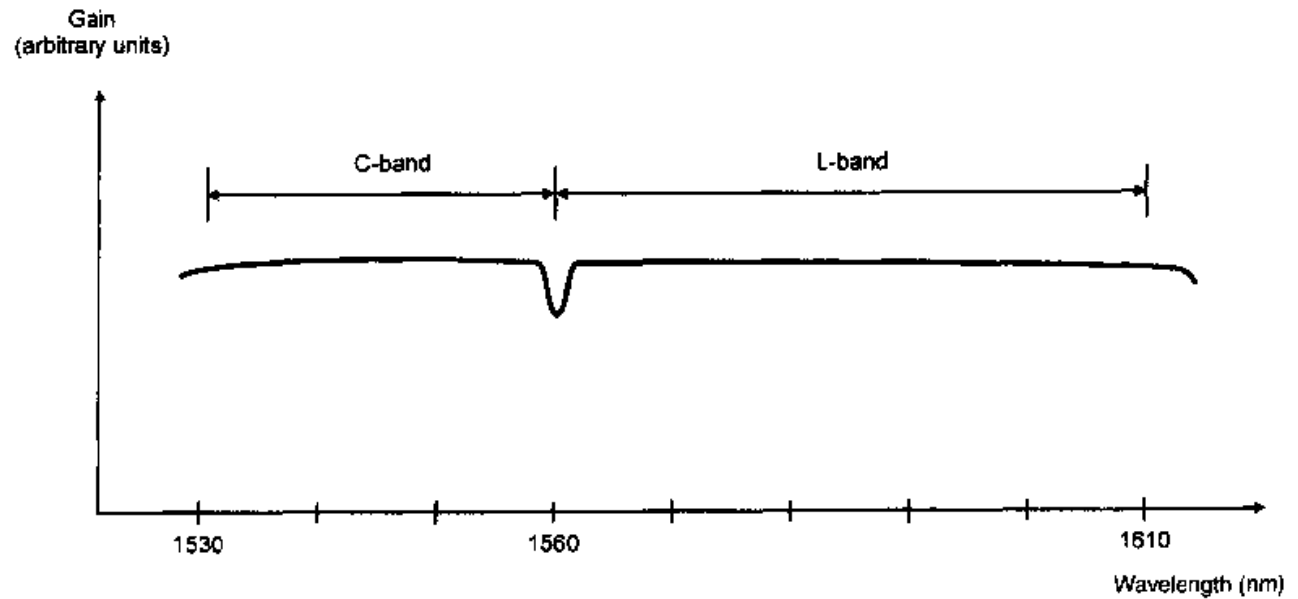
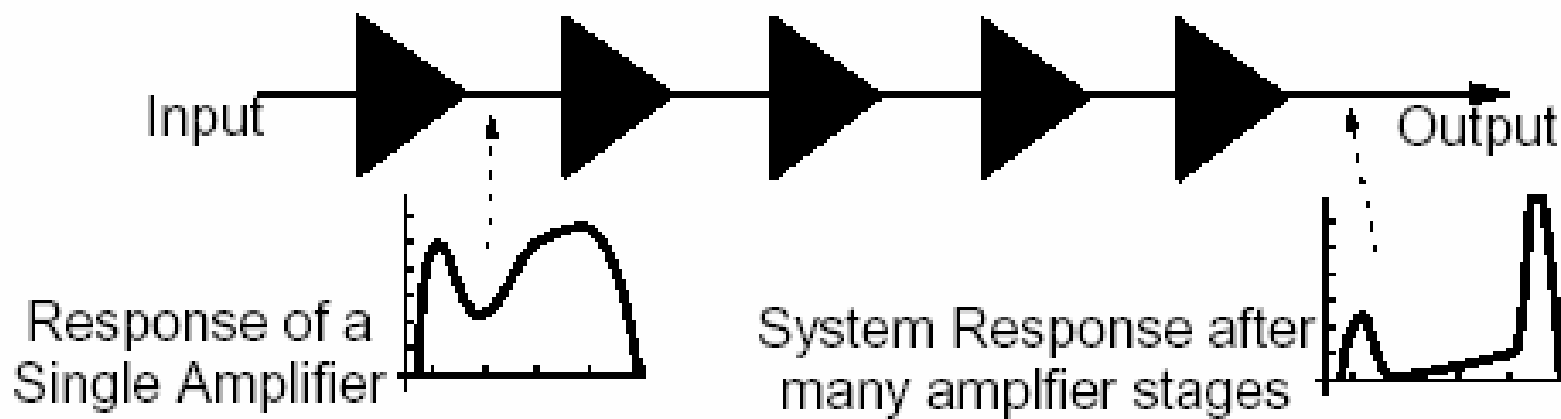


Figure 12.27
C-band and L-band
of an EDFA band-
width.



6.3.5 EDFA的高速与多信道放大特性

EDFA的级联特性



信道间增益竞争，
多级级连使用导致
“尖峰效应”

6.3.5 EDFA的高速与多信道放大特性

■ 多信道放大特性:

● EDFA可同时放大多路信号，只要多信道的总带宽小于放大器带宽。

● 适用于波分复用或频分复用光波通信系统。

■ 多信道放大中存在的问题:

● 串音等



6.4 光波分复用技术

■ WDM的概念

● 频分复用 (FDM) :

在模拟载波通信系统中，为了充分利用电缆的带宽资源，提高系统的传输容量，通常利用频分复用 (FDM) 的方法，即在同一根电缆中同时传输若干个信道的信号，接收端根据各载波频率的不同，利用带通滤波器就可滤出每一个信道的信号。



6.4 光波分复用技术

波分复用 (WDM):

在光纤通信系统中也可以采用光的频分复用的方法来提高系统的传输容量，在接收端采用解复用器（光带通滤波器）将各信号光载波分开。

由于在光的频域上信号频率差别比较大，人们更喜欢采用波长来定义频率上的差别，因而这样的复用方法称为波分复用。



6.4.1 光波分复用原理

■ 光波分复用（WDM: Wavelength Division Multiplexing）基本原理：

在发送端将不同波长的光信号组合起来（复用），耦合到同一根光纤中进行传输，在接收端又将组合波长的光信号分开（解复用），恢复出原信号后送入不同的终端。



6.4.1 光波分复用技术

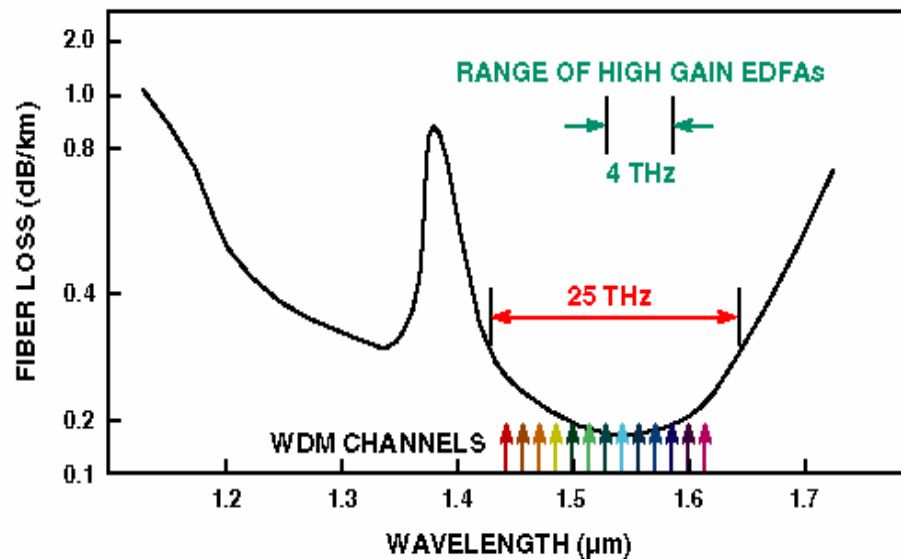
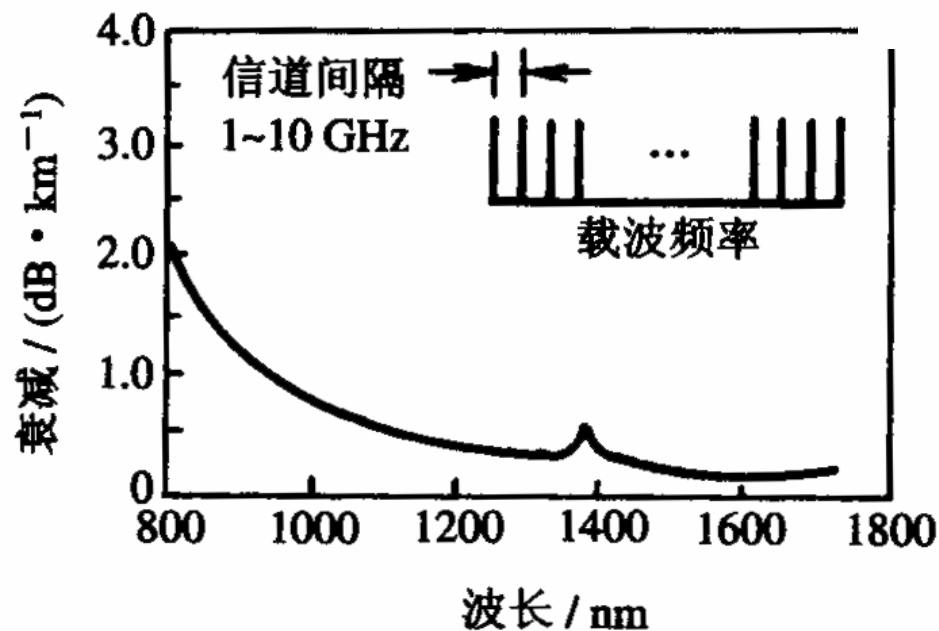


图 中心波长在1.3 μm 和1.55 μm 的硅光纤低损耗传输窗口

(插图表示1.55 μm 传输窗口的多信道复用)

6.4.1 光波分复用原理

- 光纤的带宽很宽。波长为 $1.31\ \mu\text{m}$ ($1.25\ \mu\text{m} \sim 1.35\ \mu\text{m}$) 的窗口，相应的带宽为 **17 700 GHz**：

$$\begin{aligned} |\Delta f| &= \left| -\Delta\lambda c / \lambda^2 \right| \\ &= \left| -(1.35 - 1.25) \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 / (1.3 \times 10^{-6})^2 \right| \\ &\approx 17.7 \times 10^{12} \text{ Hz} = 17.7 \text{ THz} \end{aligned}$$

其中， λ 和 $\Delta\lambda$ 分别为中心波长和相应的波段宽度。

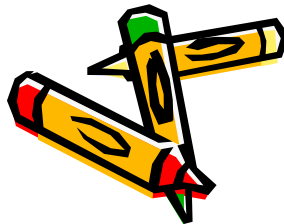


6.4.1 光波分复用原理

● 同理，波长为 **1.55 μm** (**1.50 μm ~ 1.60 μm**) 的窗口， 相应的带宽为 **12 500 GHz**

$$\begin{aligned} |\Delta f| &= \left| -\Delta\lambda c / \lambda^2 \right| \\ &= \left| -(1.60 - 1.50) \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 / (1.55 \times 10^{-6})^2 \right| \\ &\approx 12.5 \times 10^{12} \text{ Hz} = 12.5 \text{ THz} \end{aligned}$$

● 两个窗口合在一起，总带宽超过 **30 THz**。如果信道频率间隔为 **10 GHz**，在理想情况下，一根光纤可以容纳 **3000** 个信道。



6.4.1 光波分复用原理

■ 波分复用的常规分类

- 光频分复用(OFDM): 光频(信)道间距很小的频分复用。
- 密集波分复用(DWDM): 光频(信)道间距小于10nm的波分复用, D:Dense (密集)
- 粗波分复用(CWDM): 光频(信)道间距大于10nm 的波分复用, C: Coarse (粗), 也称稀疏波分复用。
- DWDM(1550波段)的标准信道间距:

$$\Delta \lambda = 1.6\text{nm}, \quad 0.8\text{nm}, \quad 0.4\text{nm}$$
$$(\Delta f = 200\text{GHz}, 100\text{GHz}, 50\text{GHz})$$



6.4.1 光波分复用原理

- 目前，“掺铒光纤放大器（**EDFA**）+ 密集波分复用（**WDM**）+ 非零色散光纤（**NZDSF**）+ 光子集成（**PIC**）”正成为国际上长途高速光纤通信线路的主要技术方向。



6.4.1 光波分复用原理

■ WDM系统的基本构成:

- 将不同波长的信号结合在一起经一根光纤输出的器件称为复用器(也叫合波器)。
- 反之, 经同一传输光纤送来的多波长信号分解为各个波长分别输出的器件称为解复用器(也叫分波器)。
- 复用器和解复用器一般是相同的(除非有特殊的要求)。



6.4.1 光波分复用原理

■ WDM系统的基本构成主要有以下两种形式:

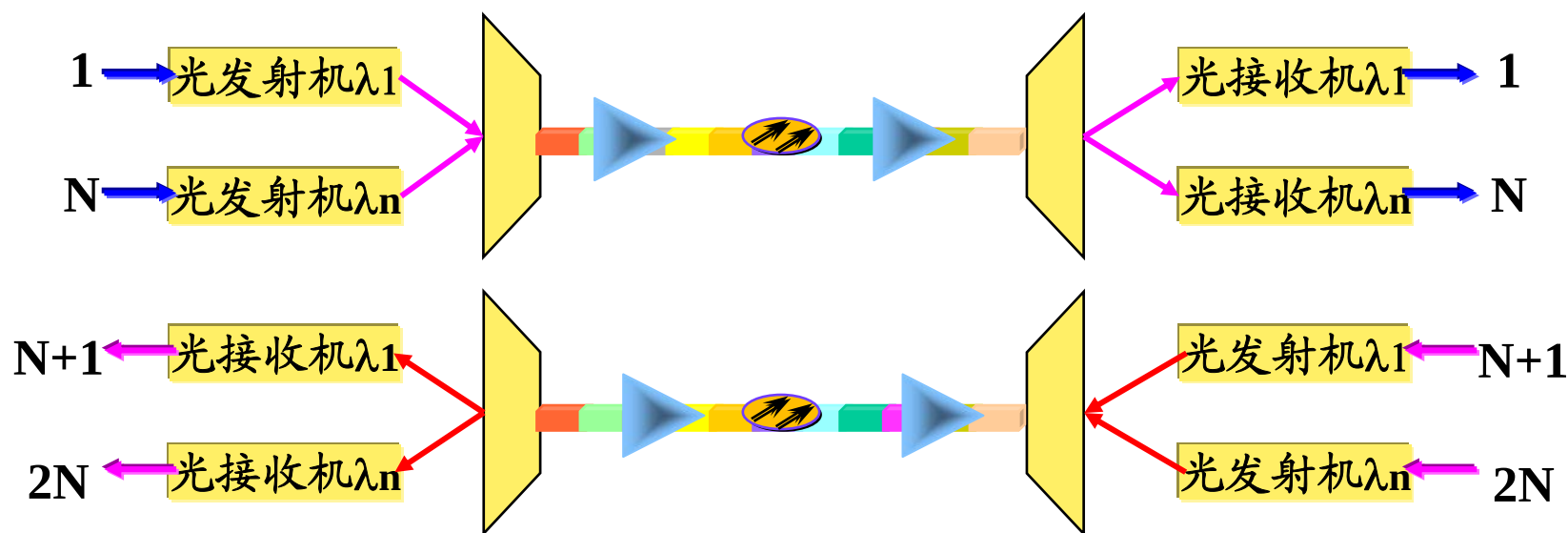
● 双纤单向传输:

■ 单向WDM传输: 所有光通路同时在一根光纤上沿同一方向传送。在发送端将载有各种信息的、具有不同波长的已调光信号 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 通过光复用器组合在一起, 并在一根光纤中单向传输。在接收端通过光解复用器将不同波长的信号分开, 完成多路光信号传输的任务。



6.4.1 光波分复用原理

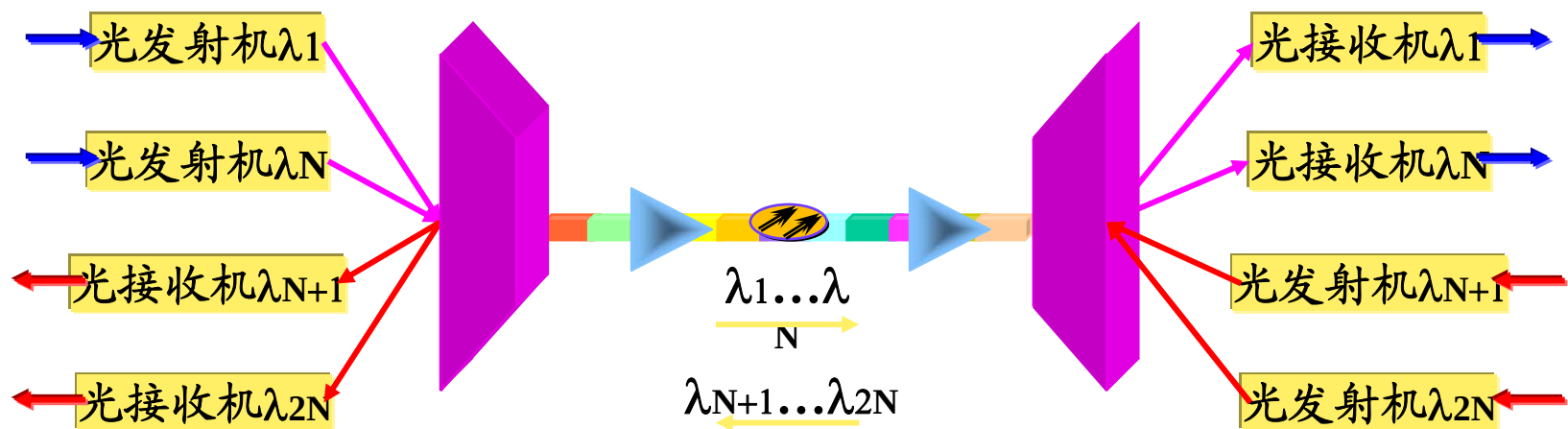
- 优点：各信号通过不同光波长携带，彼此不会混淆。同一波长可以在两个方向上重复利用。
- 缺点：光纤以及光器件资源利用率不高。



6.4.1 光波分复用原理

● 单纤双向传输:

■ 双向WDM传输: 光通路在一根光纤上同时向两个不同的方向传输。所用波长相互分开, 以实现双向全双工的通信。



6.4.1 光波分复用原理

- ➡ 优点：双向WDM系统可以减少使用光纤和线路放大器的数量，节约成本。
- ➡ 缺点：双向WDM系统的开发和应用相对说来要求较高，需要解决多通道干扰，要进行光放大，以延长传输距离等。



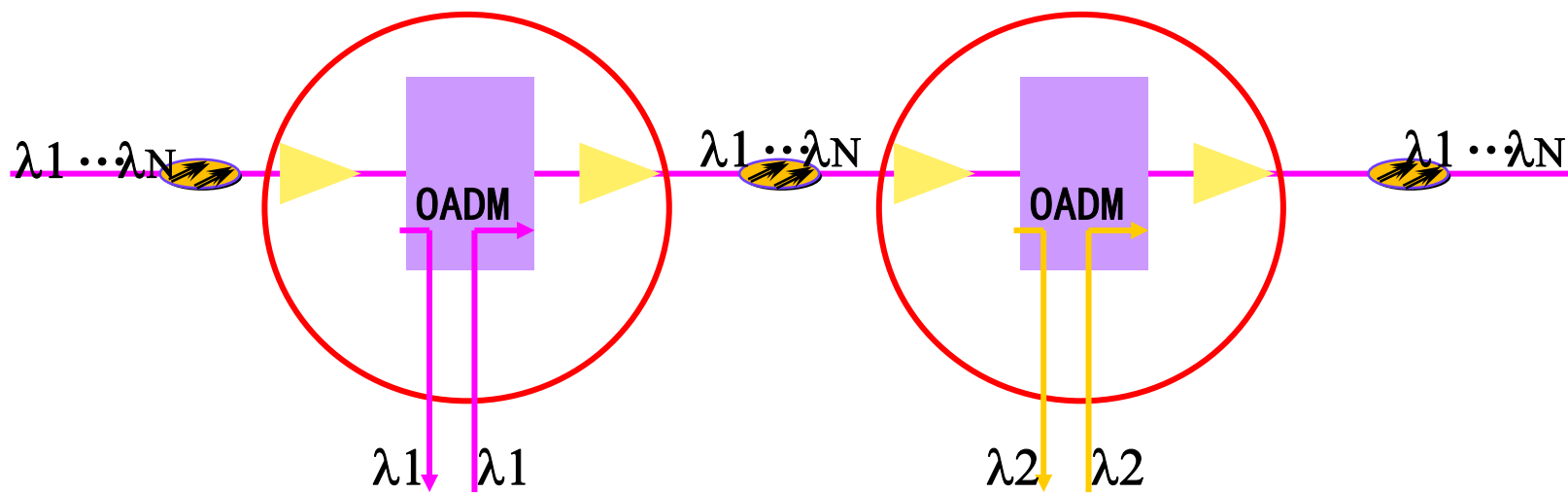
6.4.1 光波分复用原理

●含OADM的传输:

- 通过在中間設置光分/插复用器（**OADM**）或光交叉连接器（**OXC**），可使各波长光信号进行合流与分流，实现波长的上/下路(**Add/Drop**)和路由分配。
- 这样就可以根据光纤通信线路和光网的业务量分布情况，合理地安排插入或分出信号。



6.4.1 光波分复用原理



6.4.1 光波分复用原理

■ 光波分复用器的性能参数：

● **插入损耗**：指由于增加光波分复用器/解复用器而产生的附加损耗。

■ 定义为该无源器件内的输入和输出之间的光功率之比，即：

$$\alpha = 10 \lg P_1 / P_2 \quad (dB)$$



6.4.1 光波分复用原理

串扰抑制度:

串扰是指其他信道的信号耦合进某一信道，并使该信道传输质量下降的影响程度，有时也可以用隔离度来表示这一程度。

$$C_{ij} = -10\lg(P_{ij} / P_i)$$



6.4.1 光波分复用原理

● **回波损耗**: 指从无源器件的输入端口返回的光功率与输入光功率的比, 即

$$RL = -\lg(P_r / P_j) \quad (dB)$$

P_j 为发送进输入端口的光功率, P_r 为从同一个输入端口接收到的返回光功率。

● **反射系数**: 指在WDM 给定端口的反射光功率与入射光功率之比。

$$R = \lg(P_r / P_j) \quad (dB)$$



6.4.1 光波分复用原理

- **工作波长范围**：指 **WDM** 够按规定的性能要求工作的波长范围。
- **信道宽度**：指各光源之间为避免串扰应具有有的波长间隔。
- **偏振相关损耗**（**PDL, Polarization-dependent Loss**）：指由于偏振态的变化所造成的插入损耗的最大变化值。



6. 4. 2 WDM系统的基本结构

■ 实际的DWDM系统主要由五部分组成：

● 光发射机

● 光中继放大

● 光接收机

● 光监控信道

● 网络管理系统



6.4.2 WDM系统的基本结构

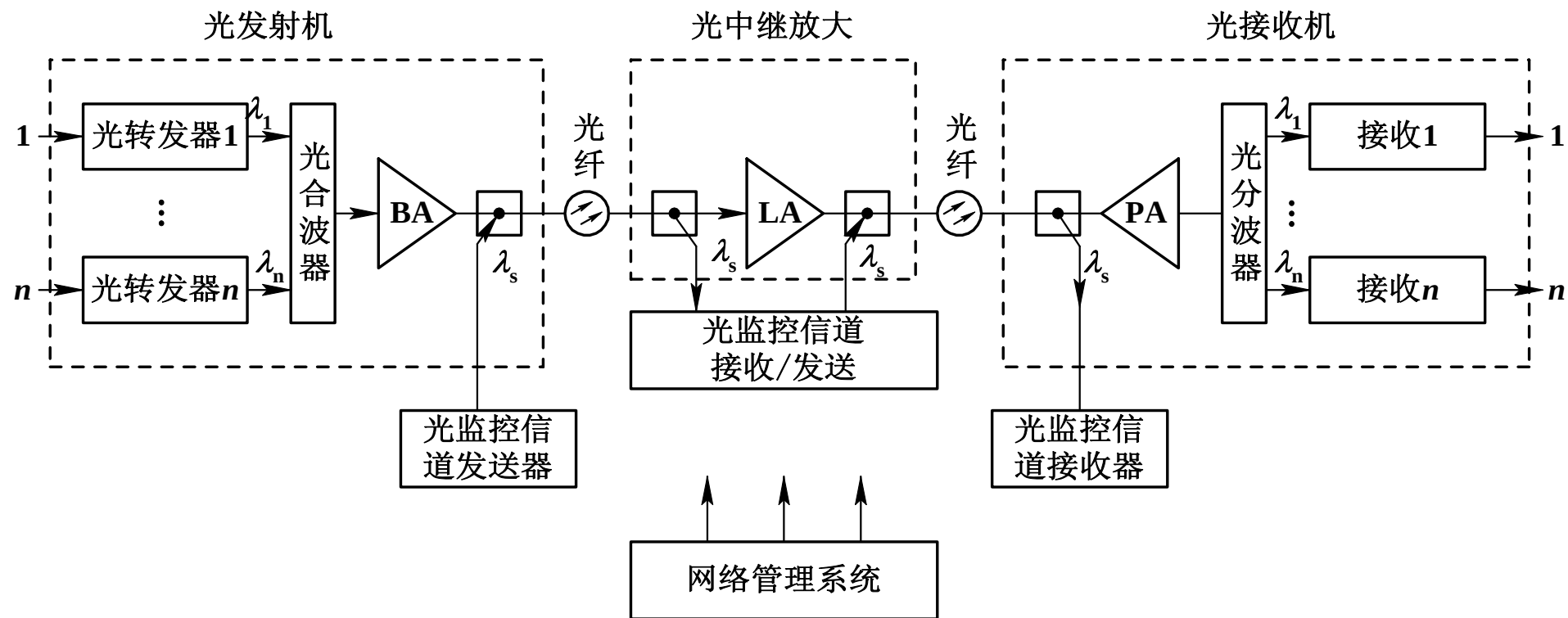


图 实际WDM系统的基本结构



6.4.2 WDM系统的基本结构

■ 光发射机:

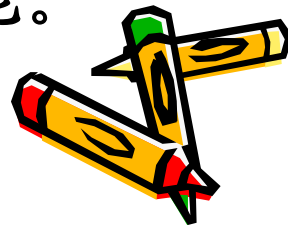
- 光发射机位于**WDM**系统的发送端。
- 在发送端首先将来自终端设备输出的光信号，利用光转发器（**OUT**）转换成具有稳定的特定波长的光信号。
- 利用合波器合成多路光信号。
- 通过光功率放大器（**BA: Booster Amplifier**）放大输出多路光信号。



6.4.2 WDM系统的基本结构

■ EDFA:

- 经过一定距离传输后，要用EDFA对光信号进行中继放大。
- 可根据具体情况，将EDFA用作“线放(LA: Line Amplifier)”，“功放(BA)”和“前放(PA: Preamplifier)”。
- 在WDM系统中，对EDFA必须采用增益平坦技术，使得EDFA对不同波长的光信号具有接近相同的放大增益。
- 还要考虑到不同数量的光信道同时工作的各种情况，保证光信道的增益竞争不影响传输性能。



6.4.2 WDM系统的基本结构

■ 光接收机:

- 由光前置放大器(PA)放大经传输而衰减的主信道光信号。
- 光分波器从主信道光信号中分出特定波长的光信号。
- 接收机不但要满足一般接收机对光信号灵敏度、过载功率等参数的要求，还要能承受有一定光噪声的信号，要有足够的电带宽。



6.4.2 WDM系统的基本结构

■ 光监控信道（OSC: Optical Supervisory Channel）：

● 主要功能：监控系统内各信道的传输情况。

- 在发送端，插入本结点产生的波长为 λ_s （1510 nm）的光监控信号，与主信道的光信号合波输出。
- 在接收端，将接收到的光信号分离，输出 λ_s 波长的光监控信号和业务信道光信号。
- 帧同步字节、公务字节和网管所用的开销字节等都是通过光监控信道来传送的。



6.4.2 WDM系统的基本结构

■ 网络管理系统:

● 通过光监控信道物理层传送开销字节到其他结点，或接收来自其他结点的开销字节对**WDM**系统进行管理，实现配置管理、故障管理、性能管理和安全管理等功能，并与上层管理系统（如**TMN**）相连。



6.4.3 WDM技术的主要特点

■ WDM技术的主要特点:

● 充分利用光纤的巨大带宽资源。

➡ 光纤具有巨大的带宽资源(低损耗波段), WDM技术使一根光纤的传输容量比单波长传输增加几倍至几十倍甚至几百倍, 从而增加光纤的传输容量, 降低成本, 具有很大的应用价值和经济价值。



6.4.3 WDM技术的主要特点

● 同时传输多种不同类型的信号。

➡ 由于**WDM**技术使用的各波长的信道相互独立，因而可以传输特性和速率完全不同的信号，完成各种电信业务信号的综合传输，如**PDH**信号和**SDH**信号，数字信号和模拟信号，多种业务(音频、视频、数据等)的混合传输等。



6.4.3 WDM技术的主要特点

● 节省线路投资。

➡ 采用**WDM**技术可使**N**个波长复用起来在单根光纤中传输，也可实现单根光纤双向传输，在长途大容量传输时可以节约大量光纤。

➡ 另外，对已建成的光纤通信系统扩容方便。



6.4.3 WDM技术的主要特点

●降低器件的超高速要求。

➡随着传输速率的不断提高，许多光电器件的响应速度已明显不足，使用**WDM**技术可降低对一些器件在性能上的极高要求，同时又可实现大容量传输。

●高度的组网灵活性，经济性和可靠性。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

- 光滤波器在WDM系统中是一种重要元器件，与波分复用有着密切关系，常用来构成各种波分复用器和解复用器。
- 光滤波器的应用：
 - 单纯的滤波应用
 - 波分复用器中应用
 - 波长路由器中应用



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

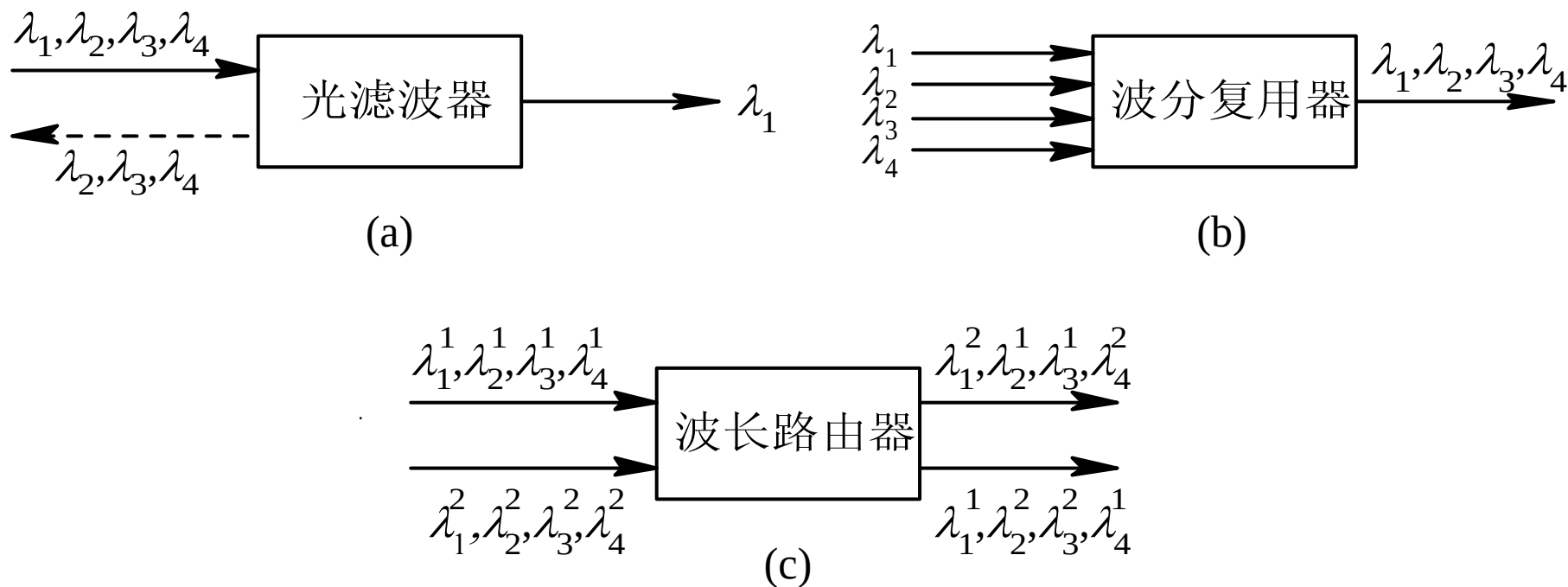


图 光滤波器的三种应用

(a) 单纯的滤波应用； (b) 波分复用器中应用； (c) 波长路由器中应用



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

由波分复用器构成的静态路由器：

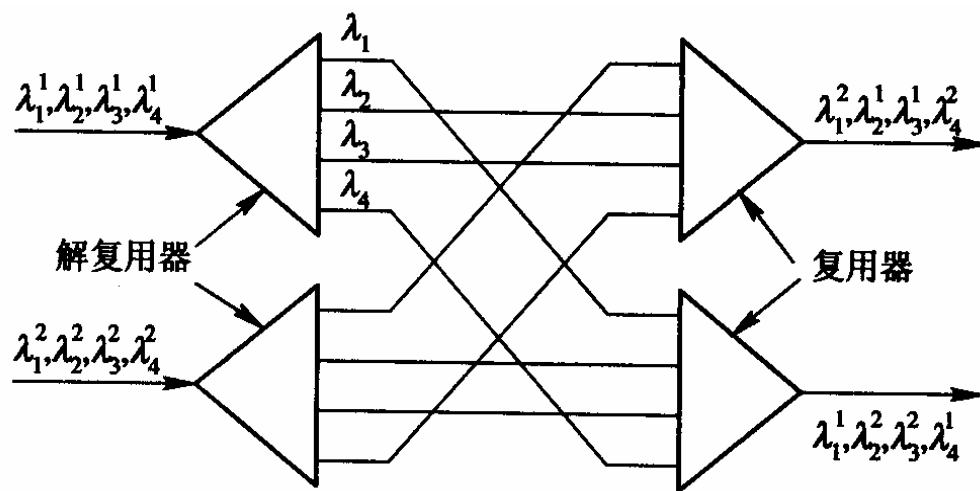


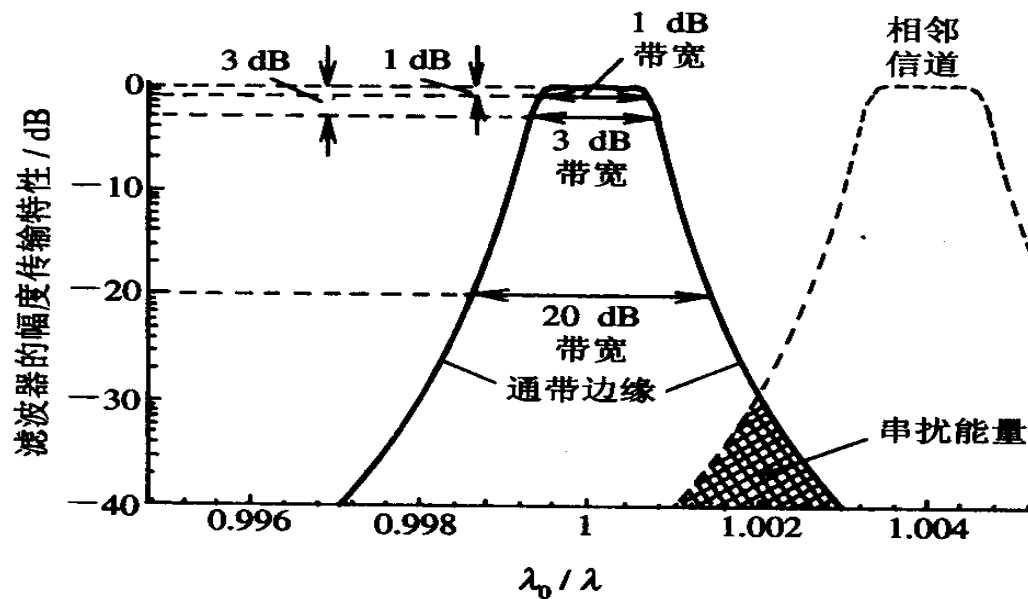
图 由波分复用器构成静态路由器



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 光滤波器的主要要求:

- 低插入损耗，且损耗与输入光的偏振态无关。
- 温度特性好。
- 带宽特性好。



(λ_0 : 滤波器的中心波长, λ : 光信号的波长)

图 7.12 光滤波器的 1 dB 带宽

6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 光栅 (Grating) :

● 光栅被广泛地用来将光分离为不同波长的单色光。

● 在WDM系统中，光栅主要用在解复用器中，以分离出各个波长。

➡ 透射光栅

➡ 反射光栅



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

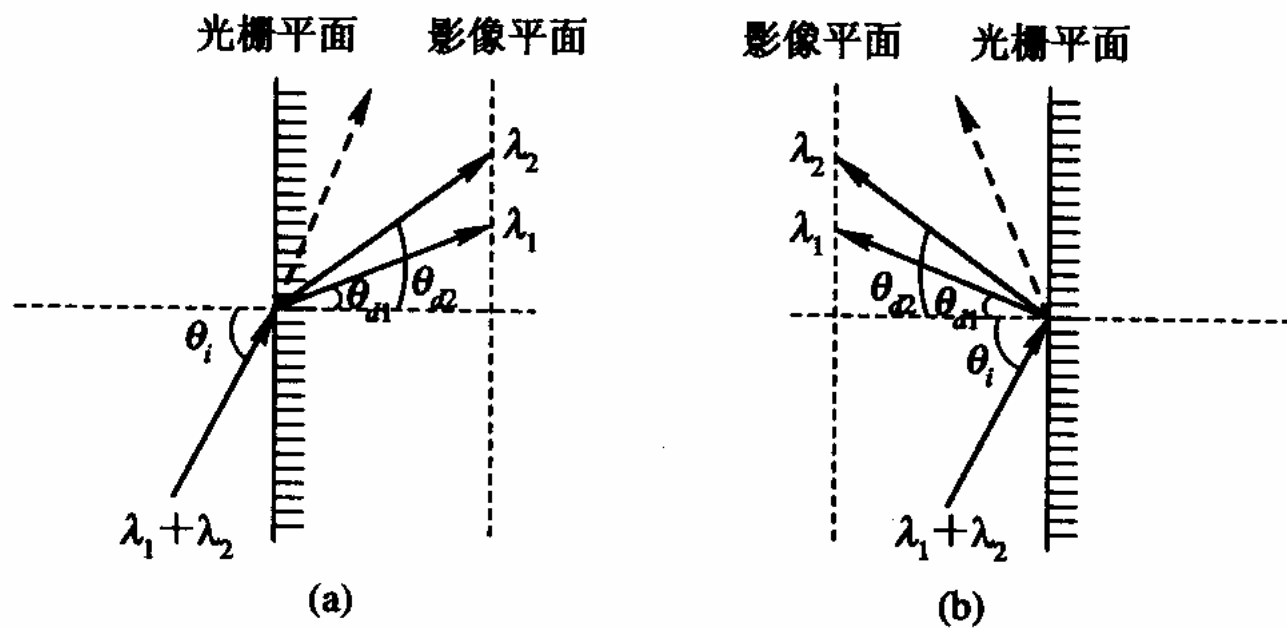


图 光栅

(a) 透射光栅 (b) 反射光栅



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 光栅解复用原理:

● 光栅方程为:

$$a(\sin \theta_i - \sin \theta_d) = m\lambda$$

● a 和 θ_i 一定时, 不同的 θ_d 对应不同的波长 λ 。

● 像面上的不同点对应不同的波长, 可用作 WDM 中的解复用器。

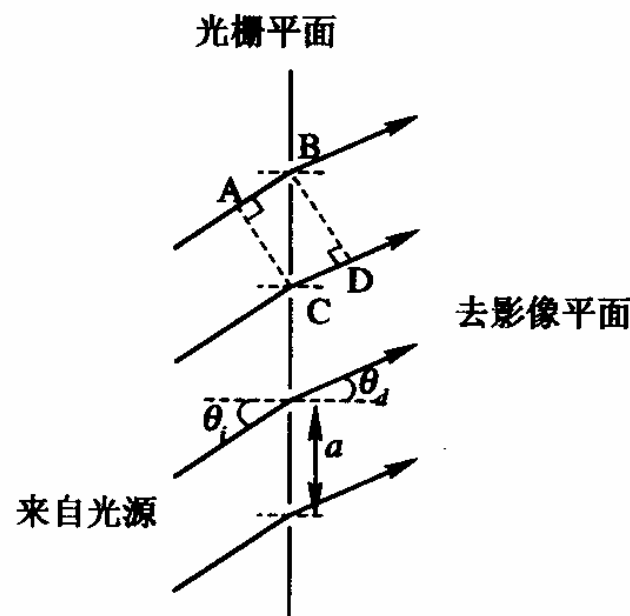


图 透射光栅的工作原理



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 布喇格光栅 (Bragg Grating) :

在光纤中，写入布喇格光栅后可以用于光滤波器、光分插复用器和色散补偿器。

● 滤波原理:

➡ 设两列波沿着同一方向传播，传播常数分别为 β_0 和 β_1 ，如果满足布喇格条件：

$$|\beta_1 - \beta_2| = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

则一个波的能量可以耦合到另一个波中去。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

➡ 对于反射型滤波器，如果：

$$|\beta_0 - (-\beta_0)| = 2\beta_0 = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

➡ 则这个光波的能量可以耦合到沿它的反方向传播的具有相同波长的反射光中去。

➡ 设 $\beta_0 = 2\pi n_{eff} / \lambda_0$ ，即 $\lambda_0 = 2n_{eff} \Lambda$ ，光波将发生反射， λ_0 称作布喇格波长。

➡ 如果具有几个波长的光同时传输到光纤布喇格光栅上，则只有波长等于布喇格波长的光才反射，而其它的光全部透射。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 光纤光栅 (Fiber Grating) :

● 用途：可用作光滤波器、光分插复用器和色散补偿器。

● 优点：

➡ 是全光纤器件，插入损耗低，易于与光纤耦合，对偏振不敏感，温度系数低，封装简单，成本较低。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

- 利用某种特殊光纤的光敏特性，就可在光纤中写入光栅。
- 在传统光纤的 SiO_2 中掺入少量锗(Ge)后就具有了光敏特性，再由紫外(UV)光照射，就可引起光纤纤芯的折射率变化。
- 若用两束相干的紫外光照射掺杂后的光纤纤芯，则照射光束的强度将沿着光纤长度方向周期性地变化，强度高的地方纤芯折射率增加，强度低的地方纤芯折射率几乎无任何变化，这样就在光纤中写入了光栅。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 光纤布喇格光栅 (FBG: Fiber Bragg Grating)

- 光栅使正向传输模同反向传输模之间发生耦合，只对布喇格波长及其附近很窄的波长范围内的光发生反射，而不影响其它波长的光通过。

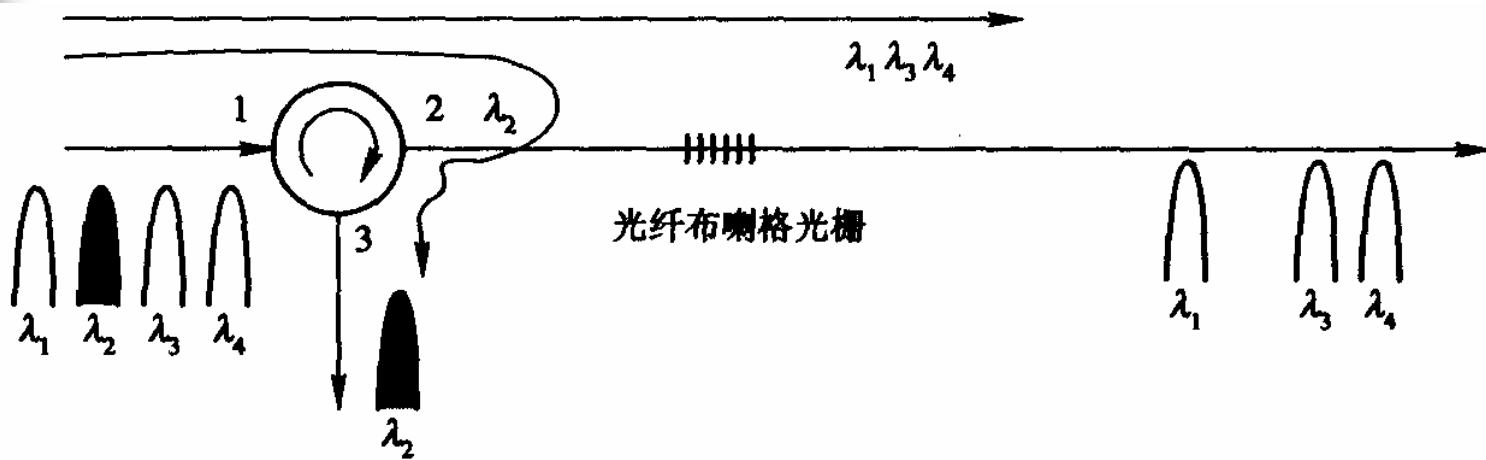


6.4.4 光滤波器与光波分复用器

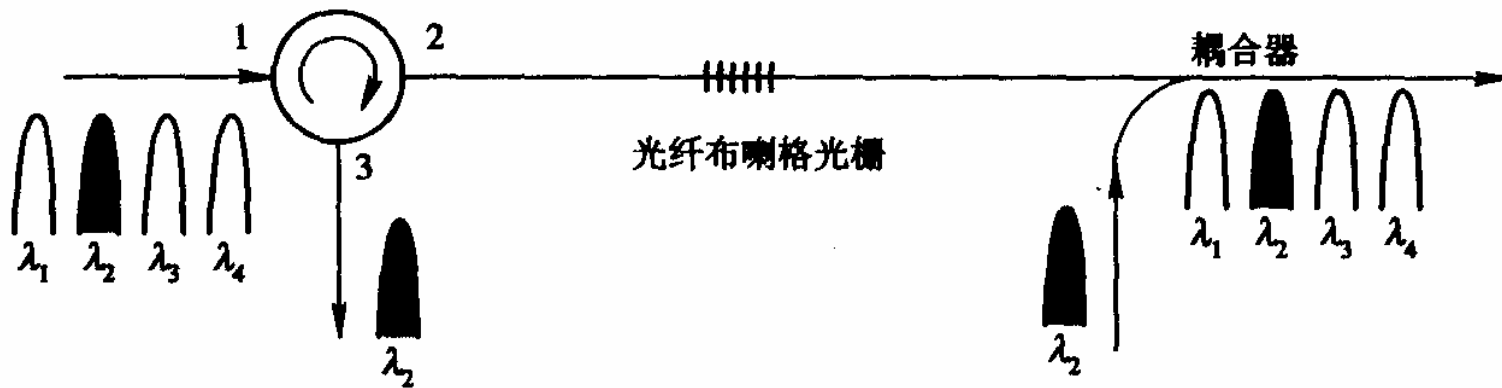
■ 基于光纤光栅结构的光分插复用器原理:

- 由一个三端口光环行器和一个光纤布喇格光栅构成，由光栅反射回来的波长 λ_2 从环行器的端口**3**取出，余下的波长继续前行。
- 在上面的基础上加上一个耦合器，就可以实现光的分插功能。





(a)



(b)

图 基于光纤光栅结构的光分插复用器
(a) 简单光分 (b) 光分插



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 长周期光纤光栅的工作原理:

- 在长周期光纤光栅中，纤芯中正向传输模的能量耦合到包层里的正向传输模上，包层模沿着光纤传输时极易消逝掉，因此相应波长位置的光波被衰减，出现一些损耗峰。
- 长周期光纤光栅适合用作带阻滤波器，主要用于EDFA中作滤波器，使EDFA增益平坦化。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

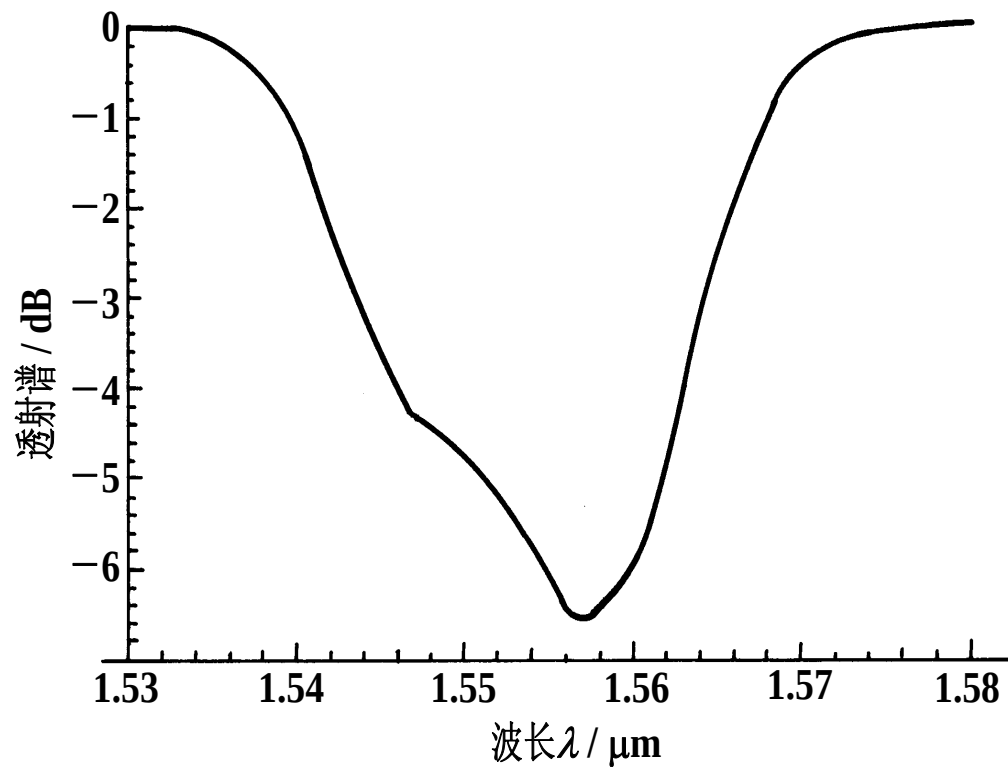


图7.17 长周期光纤光栅的透射谱



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 法布里-珀罗 (F-P: Fabry-Perot) 滤波器:

● 选择波长的方法:

➡ 改变腔长。

➡ 改变腔内介质的折射率。

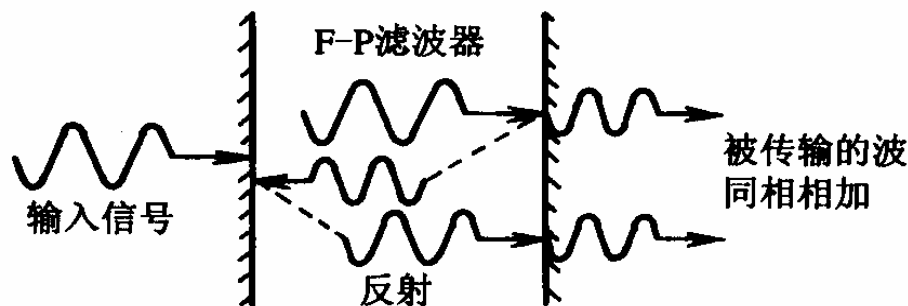


图 F-P滤波器



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 多层介质薄膜滤波器（Multilayer Dielectric Thin Film Filter）：

- 实质上是F-P干涉仪。
- 可用作带通滤波器，只允许特定波长的光通过而让其它所有波长的光反射，腔的长度决定要通过的波长。
- 这种滤波器多个级联后，可以做成波分复用器。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

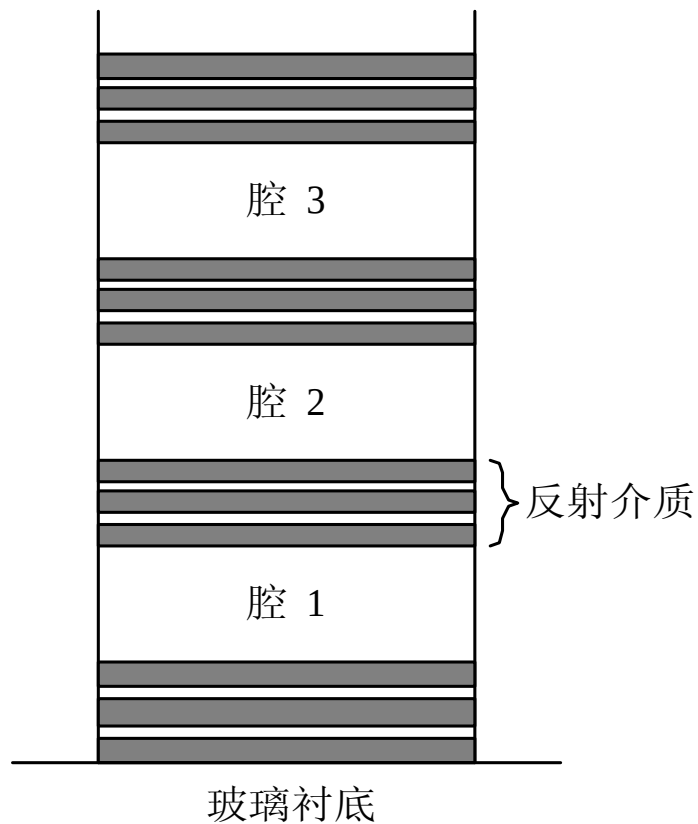


图 三腔介质薄膜谐振腔滤波器



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

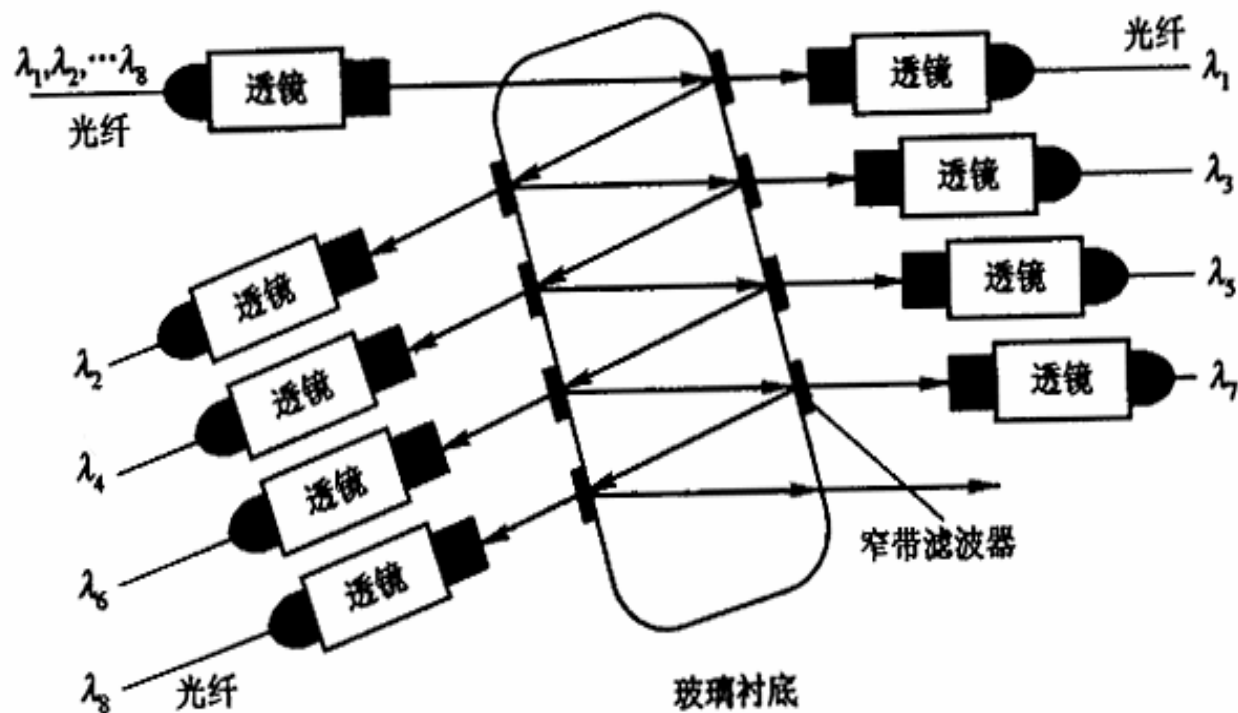
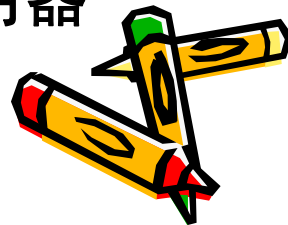


图 基于多层介质薄膜滤波器的波分复用/解复用器



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 马赫-曾德尔干涉仪 (MZI: Mach Zehnder Interferometer) :

- MZI使用两条不同长度的干涉路径来决定不同的波长输出。
- MZI通常以集成光波导的形式出现。
- 用两个3 dB定向耦合器来连接两条不同长度的光通路，衬底通常采用Si，波导区采用 SiO_2 。
- MZI可用来作滤波器和波分复用器。
- 通过级联几个MZI也可以做成窄带滤波器。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

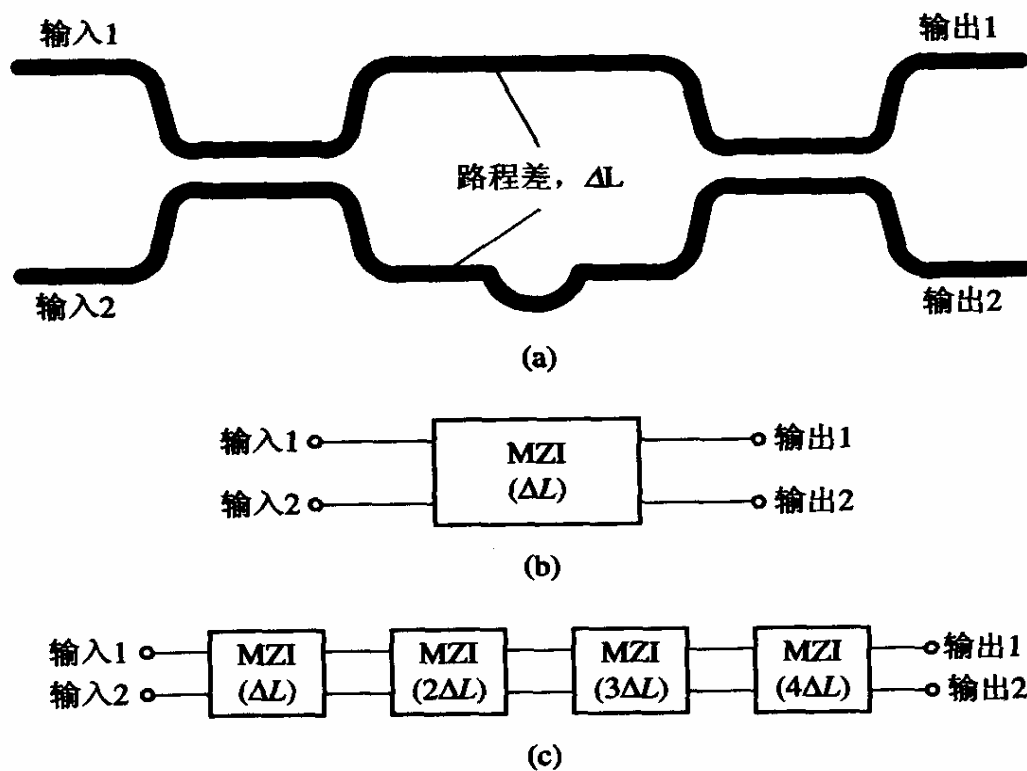


图 马赫-曾德尔干涉仪(MZI)
(a) 结构图 (b) 方框图 (c) 四级MZI



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 阵列波导光栅(AWG: Arrayed Waveguide Grating):

● **AWG**由两个多端口耦合器和连接它们的阵列波导构成。

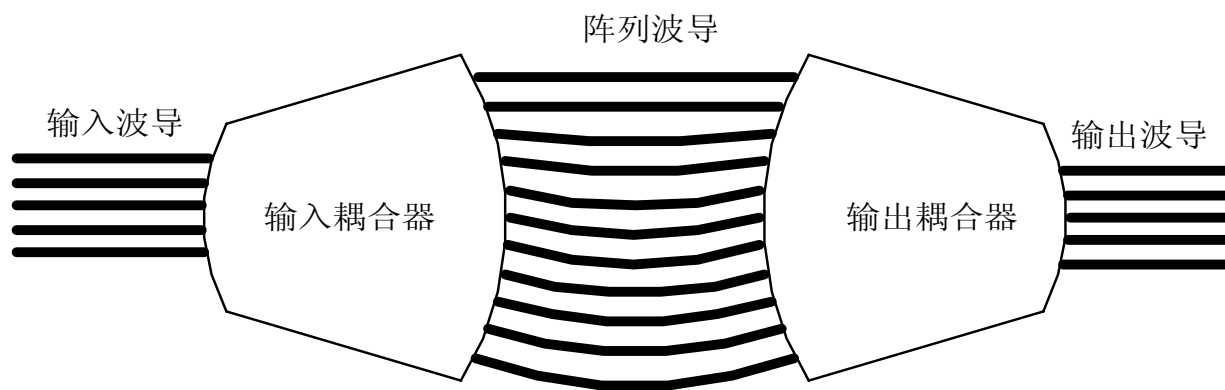


图 阵列波导光栅 (AWG)



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

● **AWG** 可用作 $n \times 1$ 波分复用器和 $1 \times n$ 波分解复用器。

● **AWG** 也可用作静态波长路由器。

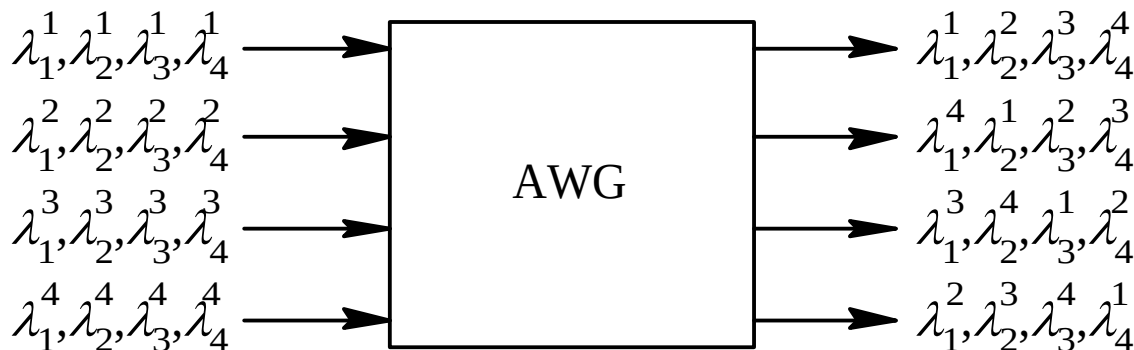


图 基于AWG的静态波长路由器



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

■ 声光可调谐滤波器(AOTF: Acousto Optic Tunable Filter):

- 一个简化的AOTF: 波导材料是一种双折射物质, 仅能支持最低阶TE模和TM模。
- 假设输入光完全是TE模, 一个只能选择TM模的偏振器放在波导的输出端。
- 如果在被选择的波长附近的一个窄谱范围内的光能量转换为TM模式, 而其余光能量仍保持TE模式, 这样就可以制成一个波长选择性滤波器。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

- 可以通过沿着光波的传播方向或逆着光波的传播方向发射一系列声波来完成。
- 声波传播引起媒质的密度周期性变化，其变化周期等于声波波长，这相当于形成了一个布喇格光栅。
- 当满足布喇格条件时，光波从一种模式耦合到另一种模式。
- 满足布喇格条件在波长 λ 附近的窄谱范围内的光将从**TE**模转换为**TM**模。如果这种器件的输入光只是**TE**模，输出只选择**TM**模，那么就可以作为一个窄带滤波器使用。



6.4.4 光滤波器与光波分复用器

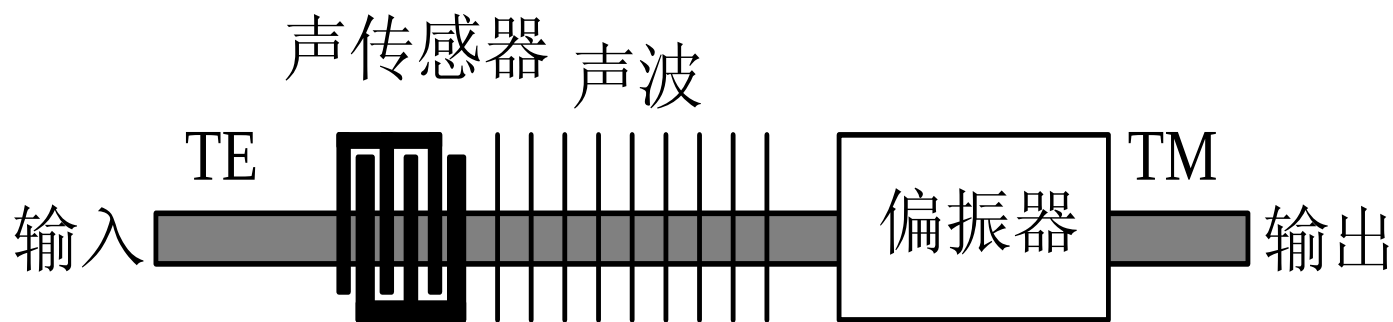
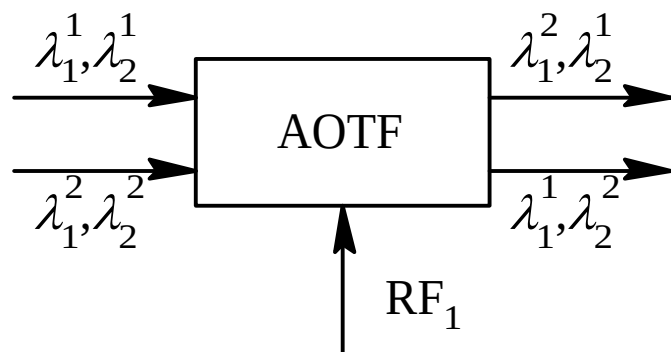


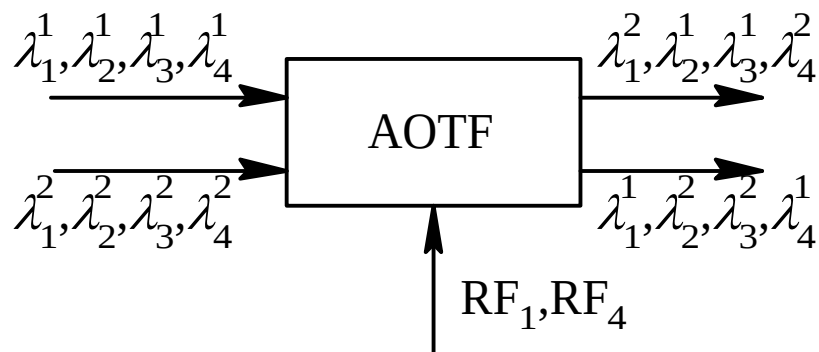
图 简化的AOTF



6.4.4 光滤波器与光波分复用器



(a)



(b)

图 基于AOTF的波长路由器

(a) 交换波长 λ_1 ; (b) 同时交换波长 λ_1 和 λ_4

