

光纤通信系统中的器件可以分成有源器件和无源器件两大类。有源器件的内部存在光电能量转换的过程,而没有该功能的则称为无源器件。由于光纤系统网络化程度日益提高,本章所讨论的器件在光网络中得到广泛的应用,所以本章所涉及的器件也称为光网络器件。

5.1 光放大器

5.1.1 概述

光信号沿光纤传输一定距离后,会因为光纤的衰减特性而减弱,从而使传输距离受到限制。通常,对于多模光纤,无中继器的传输距离超过 20km,对于单模光纤,不到 80km。为了使信号传送的距离更大,就必须增强光信号。光纤通信早期使用的是光—电—光再生中继器,需要进行光电转换、电放大、再定时脉冲整形及电光转换,这种中继器适用于中等速率和单波长的传输系统。对于高速、多波长应用场合,则中继的设备复杂,费用昂贵。在光纤网络中,当有许多光发送器以不同比特率和不同格式将光发送到许多接收器时,无法使用传统中继器,因此产生了对光放大器的需要。经过多年的探索,科学家们已经研制出多种光放大器。光放大器的作用如图 5.1 所示。与传统中继器比较起来,它具有两个明显的优势。

(1) 可以对任何比特率和格式的信号都加以放大,这种属性称之为光放大器对任何比特率和信号格式是透明的。

(2) 不只是对单个信号波长,而是在一定波长范围内对若干个信号都可以放大。

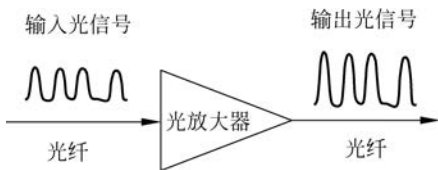


图 5.1 光放大器的作用

光放大器是基于受激辐射机理来实现入射光功率放大的,工作原理如图 5.2 所示。图中的激活介质为一种稀土掺杂光纤,它吸收了泵浦源提供的能量,使电子跳到高能级上,产生粒子数反转,输入信号光子通过受激辐射过程触发这些已经激活的电子,使其跃迁到较低的能级,从而产生一个放大信号。泵浦源

是具有一定波长的光能量源,以目前使用较为普及的掺铒光纤放大器来说,其泵浦光源的波长有 1480nm 和 980nm 两种,激活介质则为掺铒光纤。

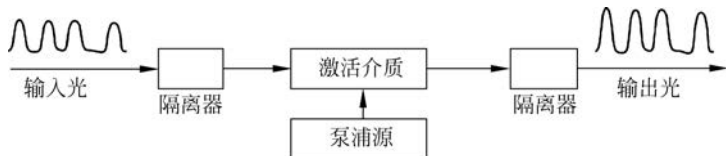


图 5.2 光放大器工作原理

图 5.3 给出了掺铒光纤放大器中掺铒光纤(Erbium Doped Fiber, EDF)长度、泵浦光强度与信号光强度之间的关系。泵浦光能量入射到掺铒光纤中后,将能量沿光纤逐渐转移到信号上,也即对信号光进行放大。当沿掺铒光纤传输到某一点时,可以得到最大信号光输出。所以对掺铒光纤放大器而言,有一个最佳长度,这个长度为 20~40m。而 1480nm 泵浦光的功率为数十毫瓦。

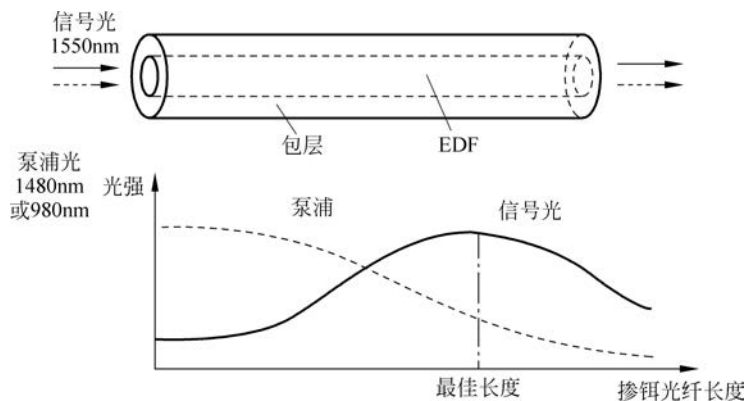


图 5.3 掺铒光纤中泵浦光功率与信号光功率之间的转换

1. 增益系数

光放大器是基于受激辐射或受激散射的原理来实现对微弱入射光进行放大的,其机制与激光器类似。当光介质在泵浦电流或泵浦光作用下产生粒子数反转时就获得了光增益。增益系数可表示为

$$g(\omega, P) = \frac{g_0(\omega)}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_{\text{sat}}} \quad (5.1)$$

其中, $g_0(\omega)$ 是由泵浦强度决定的增益峰值, ω 为入射光信号频率, ω_0 为介质原子跃迁频率, T_2 称作偶极子弛豫时间, P 是信号光功率, P_{sat} 是饱和功率,它与介质特性有关。对于小信号放大 $\frac{P}{P_{\text{sat}}} \ll 1$, 则式(5.1)可表示为

$$g(\omega) = \frac{g_0(\omega)}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2} \quad (5.2)$$

设光放大器增益介质长度为 L , 信号光功率将沿着放大器的长度按指数规律增长

$$\frac{dP(z)}{dz} = g(\omega)P(z) \quad (5.3)$$

$$P_{\text{out}} = P(L) = P_{\text{in}} \exp[g(\omega)L], \quad \omega = \omega_0 \quad (5.4)$$

$$G(\omega) = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \exp[g(\omega)L] \quad (5.5a)$$

$$G = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) \text{ dB} \quad (5.5b)$$

可见,放大器增益是频率的函数。当 $\omega = \omega_0$ 时, $g(\omega)$ 为最大, $G(\omega)$ 也为最大。图 5.4 画出了放大器增益曲线和其增益系数曲线。当 $G(\omega)$ 降至最大值一半时, $(\omega - \omega_0)^2 T_2^2 = 1$, 记 $\Delta\omega_g = 2|\omega - \omega_0|$, 则 $\Delta\nu_g = \Delta\omega_g/2\pi$ 。我们将 $\Delta\omega_g = 2/T_2$ 称作 $g(\omega)$ 的半最大值全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM), 而 $\Delta\nu_A$ 则是 $G(\omega)$ 的 FWHM, 也称作光放大器的带宽。经计算,得到

$$\Delta\nu_g = \frac{2}{\pi T_2} \quad (5.6)$$

$$\Delta\nu_A = \Delta\nu_g \left[\frac{\ln 2}{g_0 L - \ln 2} \right]^{1/2} \quad (5.7)$$

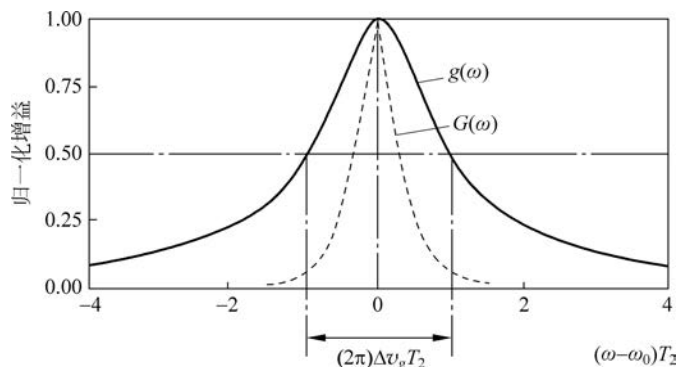
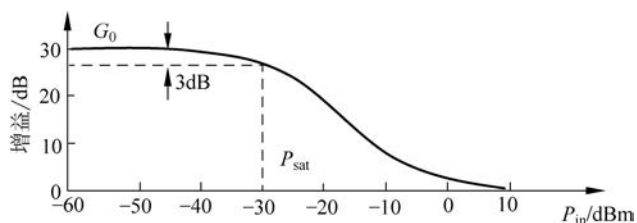


图 5.4 光放大器的增益曲线和增益系数曲线

2. 增益饱和

当输入光功率比较小时, G 是一个常数, 也就是说, 输出光功率与输入光功率成正比, 此时的增益用符号 G_0 表示, 称为光放大器的小信号增益。但当 P_{in} 增大到一定数值后, 光放大器的增益开始下降, 这种现象称为增益饱和, 如图 5.5 所示。

图 5.5 增益 G 与输入光功率的关系曲线

当光放大器的增益降至小信号增益 G_0 的一半, 用分贝表示为下降 3dB 时, 所对应的输出功率称为饱和输出功率。

产生增益饱和的原理可由式(5.1)解释。当 P 较大时, 分母中 P/P_{sat} 便不能省略。假设 $\omega = \omega_0$, 则有

$$g(\omega, P) = \frac{g_0(\omega)}{1 + P/P_{sat}} \quad (5.8)$$

将式(5.8)代入式(5.3), 并积分, 就可以得到大信号增益

$$G = G_0 \exp \left[-\frac{(G-1)P_{out}}{GP_{sat}} \right] \quad (5.9)$$

其中, $G_0 = \exp[g_0(\omega)L]$, 由上式可知, 随着 P_{out} 的增加, G 值将下降。根据饱和输出功率的定义, 可求得它的表达式

$$P_{out} = \frac{G_0 \ln 2}{G_0 - 2} P_{sat} \quad (5.10)$$

3. 噪声系数

我们知道, 光放大器是基于受激辐射或散射的机理工作。在这个过程中, 绝大多数受激粒子因受激辐射而被迫跃迁到较低的能带上, 但也有一部分是自发跃迁到较低能带上的, 它们会

自发地辐射光子。自发辐射光子的频率在信号光的范围内,但相位和方向是随机的。那些与信号光同方向的自发辐射光子经过有源区时被放大,所以叫作放大的自发辐射。因为它们的相位是随机的,所以对于有用信号没有贡献,就形成了信号带宽内的噪声。

光放大器的主要噪声来源是放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)。放大自发辐射功率为

$$P_{\text{ASE}} = 2n_{\text{sp}}h\nu(G-1)\Delta\nu \quad (5.11)$$

其中, $h\nu$ 是光子能量, G 是放大器增益, $\Delta\nu$ 是光带宽, n_{sp} 是自发辐射因子, 它的定义是

$$n_{\text{sp}} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad (5.12)$$

N_1 和 N_2 分别是受激高能级和低能级上的粒子数。当高能级上的粒子数远大于低能级粒子数时, $n_{\text{sp}} \rightarrow 1$, 自发辐射因子为最小值。 n_{sp} 为 1.4~4 时, 自发辐射噪声是一种白噪声, 叠加到信号光上, 会劣化信噪比(SNR)。信噪比的劣化用噪声系数 F_n 表示, 其定义

$$F_n = \frac{(\text{SNR})_{\text{in}}}{(\text{SNR})_{\text{out}}} \quad (5.13)$$

1) 输入信噪比

光放大器输入端的信号功率 P_{in} 经光检测器转化为光电流为

$$\langle I \rangle = RP_{\text{in}} \quad (5.14)$$

其中, R 为光检测器的响应度。 $\langle I \rangle^2 = (RP_{\text{in}})^2$ 则表示检测的电功率。

由于信号光的起伏, 光放大器输入端噪声的考虑以光检测器的散粒噪声为限制, 它可以表示为

$$\sigma_s^2 = 2q\langle I \rangle B \quad (5.15)$$

其中, q 为电子电荷, B 为光检测器的电带宽。由式(5.14)和式(5.15)可以得到输入信噪比

$$(\text{SNR})_{\text{in}} = \frac{(RP_{\text{in}})^2}{2q(RP_{\text{in}})B} = \frac{RP_{\text{in}}}{2qB} \quad (5.16)$$

2) 输出信噪比

光放大器增益为 G , 输入光功率 P_{in} 经光放大器放大后的输出为 GP_{in} 。相应的光检测器电功率就是 $(RP_{\text{in}})^2$ 。

光放大器的输出噪声主要由两部分组成, 一是放大后的散粒噪声 $2q(RP_{\text{in}})B$, 二是由自发辐射与信号光产生的差拍噪声。由于信号光和 ASE 具有不同的光频, 落在光检测器带宽的差拍噪声功率为

$$\sigma_{\text{S-ASE}}^2 = 4(RGP_{\text{in}})(RS_{\text{ASE}}B) \quad (5.17)$$

其中, S_{ASE} 为放大自发辐射的功率谱, 由此可得输出信噪比

$$(\text{SNR})_{\text{out}} = \frac{(RGP_{\text{in}})^2}{2q(RGP_{\text{in}})B + 4(RGP_{\text{in}})(RS_{\text{ASE}}B)} = \frac{RP_{\text{in}}}{2qB} \cdot \frac{G}{1 + 2n_{\text{sp}}(G-1)} \quad (5.18)$$

所以噪声系数

$$F_n = \frac{1 + 2n_{\text{sp}}(G-1)}{G} \quad (5.19)$$

当光放大器的增益比较大时, 噪声系数可用自发辐射因子表示

$$F_n \approx 2n_{\text{sp}} \quad (5.20)$$

5.1.2 半导体光放大器

半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)分成法布里-珀罗放大器

(Fabry-Perot Amplifier, FPA) 和行波放大器 (Traveling-Wave Amplifier, TWA) 两大类。法布里-珀罗放大器两侧有部分反射镜面, 它是由半导体晶体的解理面形成的, 其自然反射率达 32%。当信号光进入腔体后, 在两个镜面间来回反射并被放大, 最后以较高的强度发射出去, 见图 5.6(a)。行波放大器在两个端面上有增透膜以大大降低端面的反射系数, 或者有适当的切面角度, 所以不会发生内反射, 入射光信号只要通过一次就会得到放大, 如图 5.6(b) 所示。它的光带宽较宽, 饱和功率高, 偏振灵敏度低。所以用途比法布里-珀罗放大器更广。

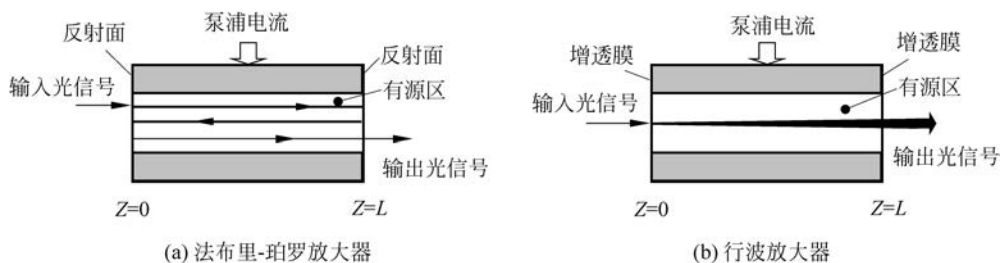


图 5.6 半导体光放大器的结构和机理

1. 光放大器的增益

法布里-珀罗放大器的增益可以表示为

$$G_{\text{FPA}}(\omega) = \frac{(1-R)^2 G_s}{(1-RG_s)^2 + 4RG_s \sin^2[(\omega - \omega_0)L/(c/n)]} \quad (5.21)$$

其中, R 为反射面的反射系数; G_s 为单程功率放大因子; L 为有源区长度; n 为折射率; c/n 即为光在有源区的速度。 G_s 是一个与频率有关的参量, 假设它与频率的关系为高斯型。由式(5.21)可作出图 5.7。

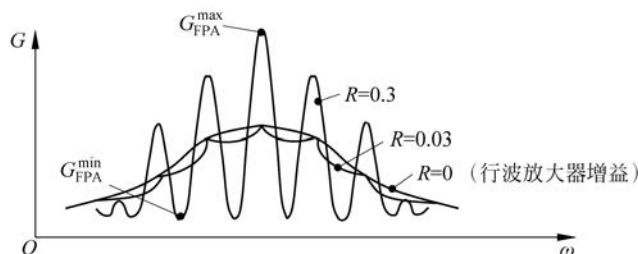


图 5.7 SOA 放大器的增益频谱

在图 5.7 中, $G_{\text{FPA}}^{\max} = \frac{(1-R)^2 G_s}{(1-RG_s)^2}$, $G_{\text{FPA}}^{\min} = \frac{(1-R)^2 G_s}{(1+RG_s)^2}$ 分别对应式(5.21)分母中的正弦项为 0 和 1 的情况。由图 5.7 可见, 法布里-珀罗放大器的增益频谱是一条振荡曲线。峰值频率为

$$\omega_N = \frac{2\pi\nu N}{2L} \quad (5.22)$$

在 $\omega = \omega_0$ 处, 增益最大。随着反射系数的降低, 增益振荡幅度逐渐减小, 当 $R=0$ 时, 增益频谱就为高斯型曲线, 即行波放大器的增益曲线。将行波放大器的增益写为

$$G_{\text{TWA}} = G_s(\omega) \quad (5.23)$$

单程增益用光放大器的参数可表示为

$$G_s = \exp[(\Gamma g - \bar{\alpha})L] \quad (5.24)$$

其中, Γ 为限制系数, 它反映了有源区波导结构对辐射光子的引导作用; g 和 $\bar{\alpha}$ 是有源区每单位长度的增益系数和损耗系数, 单位是 $1/\text{m}$; L 为激活区长度。

SOA 增益典型值为 20~30dB。需要说明的是, SOA 的增益依赖于输入信号的偏振状态,不同的极化模式具有不同的增益。增益对偏振依赖是有源区的矩形形状和晶体结构所致,使得增益系数 g 和限制系数与偏振方向有关,由此造成的偏振增益差为 5~7dB。

减小 SOA 的偏振增益的差可采用两种方法:一种是使有源区的横截面成正方形;另一种是通过串联或是并联两个 SOA 来补偿增益差。这些方法的使用可以使偏振增益差降至 0.5dB。

2. 光放大器的带宽

法布里-珀罗放大器的带宽在图 5.7 上为振荡主峰对应的频宽。根据光放大器带宽的定义,由式(5.21)可知,增益减小到峰值一半时, $2(\omega - \omega_0)$ 值就是带宽,由此求得

$$\Delta\omega_{\text{FPA}} = 2\left(\frac{v}{L}\right) \arcsin[(1 - RG_s)/2\sqrt{RG_s}] \quad (5.25)$$

式(5.25)成立的条件是: $0.7 < RG_s < 5.83$ 。

通常 FPA 的带宽值不超过 10GHz。对应 1550nm 的工作波长,允许的信道宽度约为 $0.08\text{nm}\left(|\Delta\lambda| = \frac{\lambda^2}{c} |\Delta\nu|\right)$,而典型的 WDM 网络带宽是 30nm,即 3.746THz,所以 FPA 是无法应用在这样的系统中的。FPA 常用在有源滤波器、光子开关、光波长转换器和路由器等场合。以有源滤波器为例,由于 FPA 的增益具有周期性特点,各振荡峰间距为 $\Delta\omega_N = \frac{2\pi v}{2L} = \frac{2\pi c}{2NL}$,通过改变泵浦电流可以改变有源区折射率,从而改变其振荡特性,由此实现可调谐的滤波。

理想行波放大器的反射系数 $R=0$,但实际上是很难做到的。一般用关系式

$$G_s R < 0.17 \quad (5.26)$$

作为行波放大器的条件。行波放大器的带宽用下式进行估算

$$\Delta\omega_{\text{TWA}} \approx \frac{C}{L\sqrt{G_s}} \sqrt{(1-R)^2/R} \quad (5.27)$$

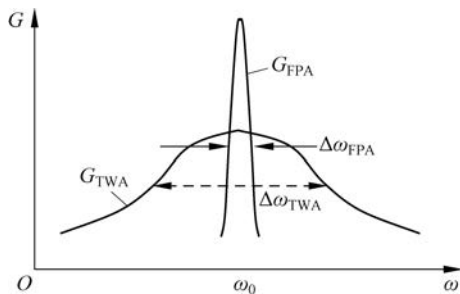


图 5.8 FPA 与 TWA 的带宽比较

TWA 的带宽大约是 40nm。图 5.8 给出了 FPA 与 TWA 的带宽比较。显然, FPA 增益较大,而带宽较小; TWA 增益略小,带宽较大。

3. 噪声系数

在前面已经提到,噪声系数主要取决于自发辐射因子 n_{sp} ,对于 SOA, $n_{\text{sp}} = \frac{N}{N - N_0}$, N 是 SOA 的载流子浓度, N_0 是透明载流子浓度。考虑到内部损耗 $\bar{\alpha}$ 使得可用增益减小到 $g - \bar{\alpha}$,所以噪声系数

$$F_n = 2\left(\frac{N}{N - N_0}\right) \frac{g}{g - \bar{\alpha}} \quad (5.28)$$

SOA 噪声系数的范围为 6~9dB。

5.1.3 掺杂光纤放大器

掺杂光纤放大器是利用光纤中掺杂稀土引起的增益机制实现光放大的。光纤通信系统最适合的掺杂光纤放大器是工作波长为 1550nm 的掺铒光纤放大器和工作波长为 1300nm 的掺镨光纤放大器。目前已商品化并获得大量应用的是 EDFA。

掺镨光纤放大器的工作波长为 1310nm,与 G-652 光纤的零色散点相吻合,在已建立的 1310nm 光纤通信系统中有着巨大的市场。但由于掺镨光纤的机械强度较差,与常规光纤的熔接较为困难,故尚未获得广泛的应用。另一掺杂光纤放大器——掺铒光纤放大器工作的波段为光传输开辟了新的波段资源。下面首先讨论掺铒光纤放大器的工作机制。

1. EDFA 结构

掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)是利用掺铒光纤作为增益介质、使用激光器二极管发出的泵浦光对信号光进行放大的器件。图 5.9 给了掺铒光纤放大器的结构。

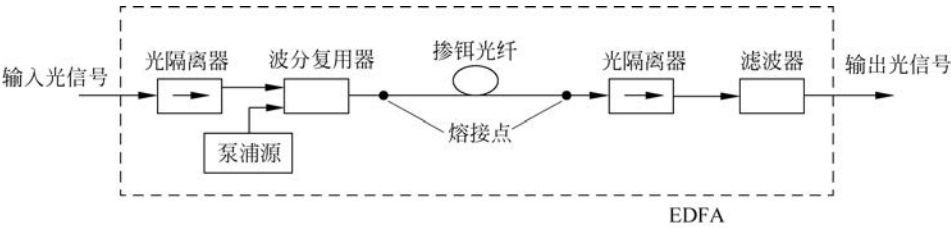


图 5.9 EDFA 的典型结构

掺铒光纤是 EDFA 的核心部件。它以石英光纤作为基质,在纤芯中掺入固体激光工作物质——铒离子。在几米至几十米的掺铒光纤内,光与物质相互作用而被放大、增强。

掺铒光纤的模场直径约为 3~6 μm ,比常规光纤的 9~16 μm 要小得多。这是为了提高信号光和泵浦光的能量密度,从而提高其相互作用的效率。但掺铒光纤芯径的减小也使得它与常规光纤的模场不匹配,从而产生较大的反射和连接损耗,解决的方法是在光纤中掺入少许氟元素,使折射率降低,从而增大模场半径,达到与常规光纤可匹配的程度。另外,在熔接时,通过使用过渡光纤、拉长常规光纤接头长度以减小芯径等方法减小 MFD 的不匹配。

为了实现更有效的放大,在制作掺铒光纤时,将大多数铒离子集中在纤芯的中心区域,因为在光纤中,可认为信号光与泵浦光的光场近似为高斯分布,在纤芯轴线上光强最强,铒离子在近轴区域将使光与物质充分作用,从而提高能量转换效率。根据掺铒光纤放大器的使用场合,有多种型号的掺铒光纤供设计 EDFA 时采用,如 EDF-PAX-01 用于设计在线放大器和前置放大器,其增益带宽具有平坦和宽的特性;EDF-LAX-01 可用于在线放大器,它的功率转换效率高且噪声系数低;EDF-BAX-01 能提供高的输出功率等。表 5.1 列出了一些掺铒光纤的技术指标。

表 5.1 掺铒光纤的技术指标

型 号	EDF-PAX-01	EDF-LAX-01	EDF-BAX-01
数值分析	0.24 $\pm$ 0.02	0.24 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.02
截止波长/nm	953 $\pm$ 35	953 $\pm$ 35	920 $\pm$ 40
峰值吸收波长/nm	$\leq$ 1529.5	1530.5 $\pm$ 0.5	1531 $\pm$ 0.5
峰值衰减/(dB/m)	7 $\pm$ 2	7 $\pm$ 2	5 $\pm$ 2
衰减(90nm)/(dB/m)	5 $\pm$ 1.5	5 $\pm$ 1.5	3.5 $\pm$ 1.5
背景损耗(1200nm)/(dB/m)	$\leq$ 35	$\leq$ 15	$\leq$ 15
饱和功率(1530nm)/mW	0.17	0.15	0.18
模场直径/ μm	4.8~5.9	4.8~5.9	5.2~6.6

泵浦源是 EDFA 的另一核心部件,它为光信号放大提供足够的能量,是实现增益介质粒子数反转的必要条件,由于泵浦源直接决定着 EDFA 的性能,所以要求其输出功率高、稳定性

好、寿命长。实用的 EDFA 泵浦源都是半导体激光二极管,其泵浦波长有 980nm 和 1480nm 两种,应用较多的是 980nm 泵浦源,其优点是噪声低,泵浦效率高,功率可高达数百毫瓦。

泵浦光与信号同时进入光纤,在掺铒光纤入口处泵浦光最强,当它沿光纤传输时,将能量逐渐转移给信号光,使得信号强度越来越大,自己的强度逐渐变小。

除了激光二极管 LD 外,作为泵浦模块还包括监视 LD 性能的光电二极管 PD 和控制并稳定 LD 温度的热电冷却器。

按泵浦源所在的位置可以分为 3 种泵浦方式:第一种如图 5.9 所示,称作同向泵浦,在这种方式下,信号光与泵浦光以同一方向进入掺铒光纤,这种方式具有较好的噪声性能;第二种方式为反向泵浦,信号光与泵浦光从两个不同的方向进入掺铒光纤,如图 5.10(a)所示,这种泵浦方式具有输出信号功率高的特点;第三种方式为双向泵浦源,用两个泵浦源从掺铒光纤两端进入光纤,如图 5.10(b)所示,由于使用双泵浦源,输出光信号功率比单泵浦源要高,且放大特性与信号传输方向无关。

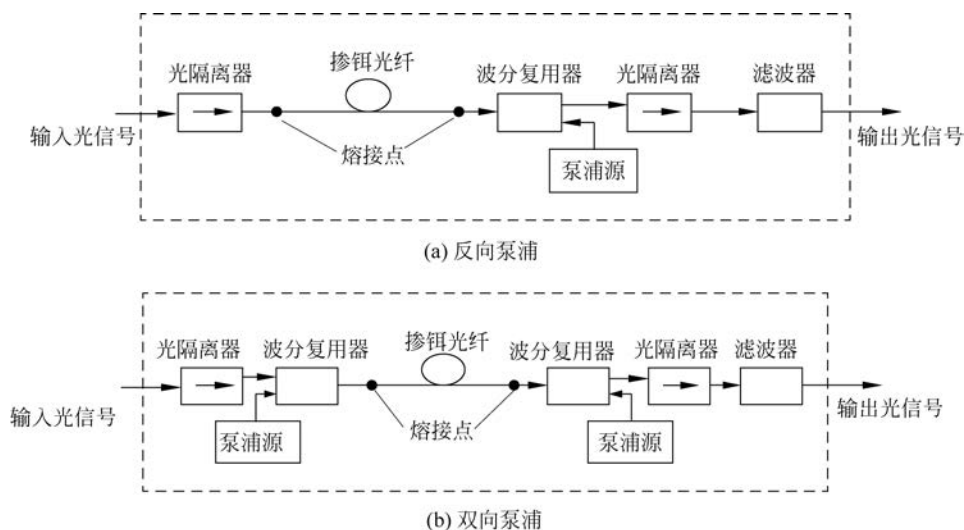


图 5.10 EDFA 的泵浦方式

图 5.11 为 3 种泵浦方式输出功率、噪声特性的比较,图 5.11(a)为输出光信号功率与泵浦光功率之间的关系,3 种泵浦方式的微分转换效率分别为 61%、76% 和 77%。图 5.11(b)为噪声系数与放大器输出功率的关系,随着输出功率的增加,粒子反转数将下降,结果是噪声系数增大。图 5.11(c)为噪声系数与掺铒光纤长度之间的关系。由图 5.11 可见,不管掺铒光纤的长度如何,同向泵浦方式的 EDFA 噪声最小。

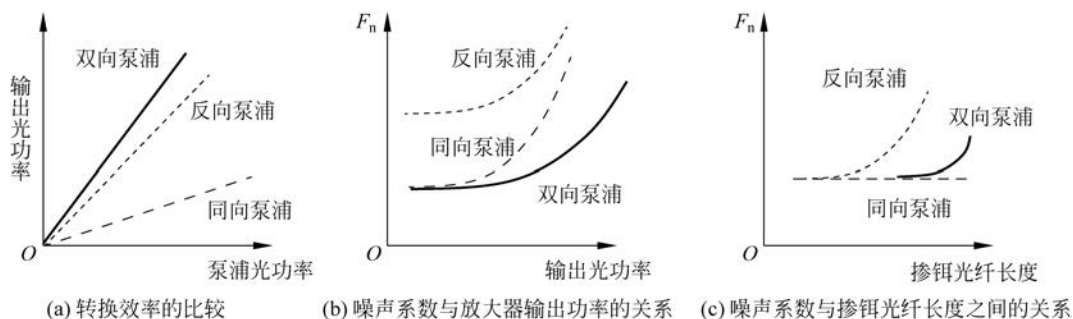


图 5.11 不同泵浦方式下输出功率及噪声特性比较

在图 5.10 中,波分复用器也称为合波器,它的功能是将 980nm/1550nm 或 1480nm/1550nm 波长的泵浦光和信号光合路后送入掺铒光纤,对它的要求是插入损耗小,而且对光的偏振不敏感。

光隔离器的功用是使光的传输具有单向性,防止光反射回原器件,因为这种反射会增加放大器的噪声并降低放大效率。

光滤波器的作用是滤掉工作带宽之外光放大器中的噪声,以提高系统的信噪比。

2. EDFA 工作原理

1) 能级与泵浦

EDFA 的工作机理基于受激辐射。我们首先讨论激活介质掺铒石英的能级图,图 5.12 为掺铒石英的能级图,这里用三能级表示。铒离子从能级 2 到能级 1 的跃迁产生的受激辐射光,其波长范围为 1500~1600nm,这是 EDFA 得到广泛应用的原因。

为了实现受激辐射,需要产生能级 2 与能级 1 之间的粒子数反转,即需要泵浦源将铒离子从能级 1 激发到能级 2。有两种波长的泵浦源可以满足要求。一种是 980nm 波长的泵浦。

在这种情况下,铒离子受激不断地从能级 1 转移到能级 3 上,见图 5.12,在能级 3 上停留很短的时间(生存期),约 $1\mu\text{s}$,然后无辐射地落到能级 2 上。由于铒离子在能级 2 上的生存期约为 10ms,所以能级 2 上的铒离子不断积累,形成了能级 1 和能级 2 之间的粒子数反转。在输入光子(信号光)的激励下,铒离子从能级 2 跃迁到能级 1 上,这种受激跃迁将伴随着与输入光子具有相同波长、方向和相位的受激辐射,使得信号光得到了有效的放大;另一方面,也有少数粒子以自发辐射方式从能级 2 跃迁到能级 1,产生自发辐射噪声,并且在传输过程中不断得到放大,成为放大的自发辐射。放大自发辐射噪声的总功率由式(5.11)表示。

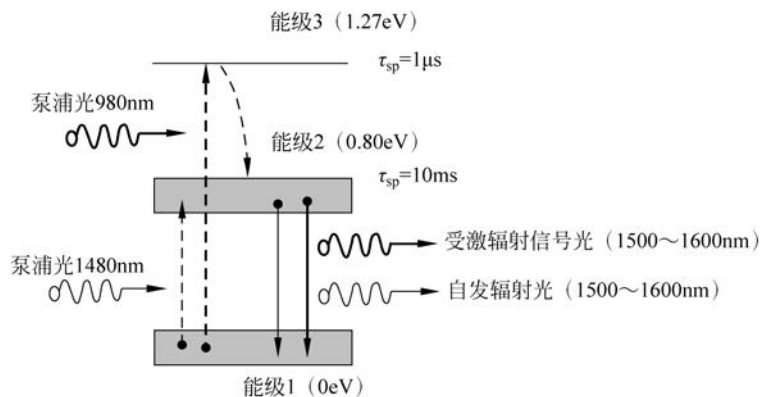


图 5.12 掺铒石英的能级图

另一种是 1480nm 波长的泵浦,它可以直接将铒离子从能级 1 激发到能级 2 上去,实现粒子数反转。

2) 增益

EDFA 的输出功率含信号功率和噪声功率两部分,噪声功率是放大的自发辐射产生的,记为 P_{ASE} ,则 EDFA 的增益用分贝表示

$$G_E = 10 \lg \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{ASE}}}{P_{\text{in}}} (\text{dB}) \quad (5.29)$$

其中, P_{out} 、 P_{in} 分别是输出光信号和输入光信号功率。

EDFA 的增益不是简单一个常数或解析式,它与掺铒光纤的长度、铒离子浓度、泵浦功率等因素有关。泵浦光和信号光在通过掺铒光纤时,其光功率是变化的,它们之间满足

$$\frac{dP_s}{dz} = \sigma_s(N_2 - N_1) - \alpha P_s \quad (5.30a)$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \sigma_p N_1 - \alpha P_p \quad (5.30b)$$

其中, P_s 、 P_p 分别表示信号光功率和泵浦光功率, σ_s 、 σ_p 分别是信号频率 ω_s 、泵浦频率 ω_p 处受激吸收和受激发射截面, α' 、 α 分别是掺铒光纤对信号光和泵浦光的损耗, N_2 、 N_1 分别是能级 2 和能级 1 的粒子数。由式(5.29)和式(5.30a)可以知道增益 G_E 与掺铒光纤长度与泵浦功率之间的关系。由于式(5.30a)及式(5.30b)是一个超越方程, 所以经常用数值解或图形来反映增益与泵浦功率或掺铒光纤长度的关系, 如图 5.13 所示。

由图 5.13 可以看出, 随着掺铒光纤长度的增加, 增益经历了从增加到减小的过程, 这是因为随着光纤长度的增加, 光纤中的泵浦功率将下降, 使得粒子反转数降低, 最终在低能级上的铒离子数多于高能级上的铒离子数, 粒子数恢复到正常的数值。由于掺铒光纤本身的损耗, 造成信号光中被吸收掉的光子多于受激辐射产生的光子, 引起增益下降。由上面的讨论可知, 对于某个确定的人射泵浦功率, 存在着一个掺铒光纤的最佳长度, 使得增益 G_E 最大。图 5.13 也显示了不同泵浦功率下增益与掺铒光纤长度的关系。例如, 当泵浦功率为 5mW 时, 掺铒光纤长为 30m 的放大器可以产生 35dB 的增益。

增益估算关系式

$$G_E = \frac{P_{s,out}}{P_{s,in}} \leq 1 + \frac{\lambda_p}{\lambda_s} \frac{P_{p,in}}{P_{s,in}} \quad (5.31)$$

其中, λ_p 和 λ_s 分别表示泵浦波长和信号波长, 而 $P_{p,in}$ 和 $P_{s,in}$ 则为泵浦光和信号光的入射功率, 单位为 mW。

图 5.14 示出了 EDFA 增益和噪声与输入光信号功率之间的关系。当输入光信号功率增大到一定值后, 增益开始下降, 出现了增益饱和现象, 与此同时, 噪声增加。

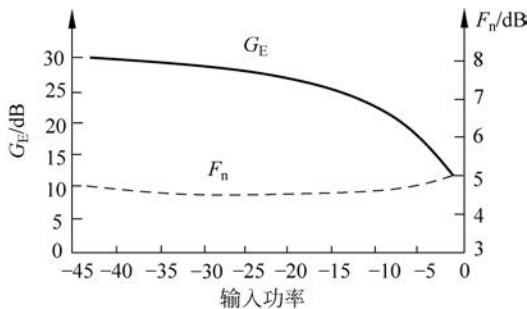


图 5.14 增益和噪声与输入光信号功率的关系

3) 噪声系数

噪声系数用式(5.19)计算, 实际上它也与掺铒光纤的长度及泵浦功率有关。理论分析还表明, 噪声系数与泵浦源波长有关, 使用 980nm 泵浦源的噪声特性优于 1480nm 泵浦源。EDFA 噪声系数的变化范围为 3.5~9dB。

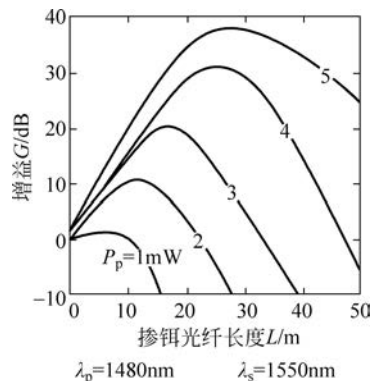


图 5.13 增益与掺铒光纤长度的关系

3. EDFA 增益平坦性

增益平坦性是指增益与波长的关系,很显然,我们所希望的 EDFA 应该在所需要的工作波长范围具有较为平坦的增益,特别是在 WDM 系统中使用时,要求对所有信道的波长都具有相同的放大倍数。但是作为 EDFA 的核心部件——掺铒光纤的增益平坦性并不理想,如图 5.15 所示。

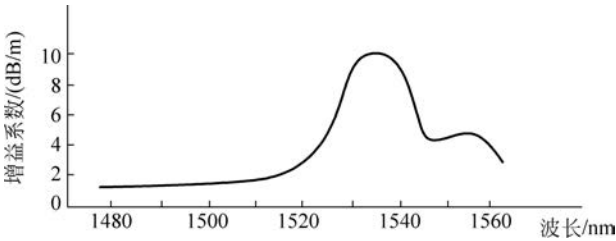


图 5.15 掺铒光纤增益系数与波长的关系

为了获得较为平坦的增益特性,增大 EDFA 的带宽,有两种方法可以采用:一种是采用新型宽谱带掺杂光纤,如在纤芯中再掺入铝离子;另一种方法是在掺铒光纤链路上放置均衡滤波器。如图 5.16 所示,该均衡滤波器的传输特性恰好补偿掺铒光纤增益的不均匀。

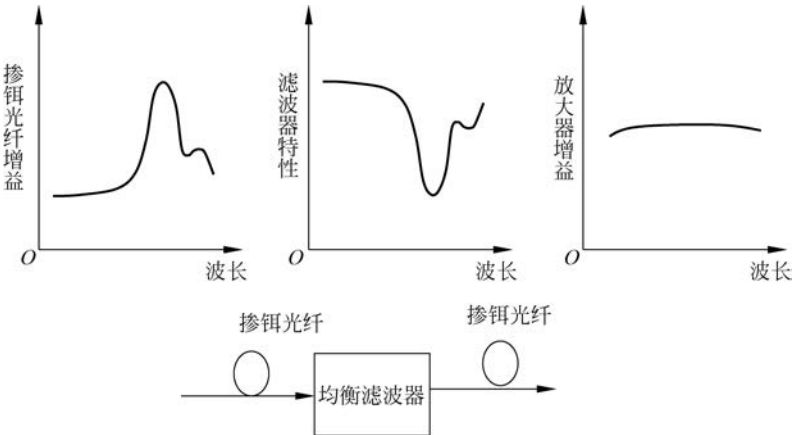


图 5.16 EDFA 中均衡滤波器的作用

4. EDFA 的性能指标

这里给出 3 种型号(16 通道)的掺铒光纤放大器的性能指标,如表 5.2 所示。

表 5.2 EDFA 的性能指标

参 数	A1W-C-16	A2W-C-16	A3W-C-16
波长范围	1545~1561nm	1545~1561nm	1545~1561nm
典型输入功率范围	-17~-5dBm	-23~-11dBm	-20~-8dBm
噪声系数	≤5dB	≤4.5dB	≤4.5dB
输入/输出回波损耗	≥40dB	≥40dB	≥40dB
泄露到输入端的泵浦功率	≤-60dBm	≤-60dBm	≤-60dBm
泄露到输出端的泵浦功率	≤-30dBm	≤-30dBm	≤-30dBm
输出功率	≥17dBm	≥12dBm	≥17dBm
增益响应时间	≤5ms	≤5ms	≤5ms
信道增益	20~25dB	20~25dB	20~25dB
增益平坦度(增益固定)	≤1dB	≤1dB	≤1dB

续表

参 数	A1W-C-16	A2W-C-16	A3W-C-16
增益平坦度(增益可调)	$\leq 1.2\text{ dB}$	$\leq 1.2\text{ dB}$	$\leq 1.2\text{ dB}$
偏振相关增益	0.2dB	0.2dB	0.2dB

除了光通道性能指标外,还有表明工作电压及功耗的电气性能以及温度、湿度的环境要求,在使用时都应注意。

5. 掺镨光纤放大器

目前已铺设的光纤大都工作在 1310nm 窗口,而 EDFA 只能用于 1550nm 的系统,所以工作在 1310nm 波段上的掺镨光纤放大器 PDFA 具有较大的实用价值。与 EDFA 不同的是,掺镨光纤是在氟化物玻璃而不是石英玻璃中掺入镨离子(Pr^{3+})制作的。目前已研制出的 PDFA 模块所采用泵浦波长为 1017nm,在 1310nm 波长处放大器的增益可达 24dB,噪声系数为 6.6dB。在-3dBm 输入时放大波段为 1281~1381nm,放大带宽达 37nm。

图 5.17 示出了 PDFA 的增益和噪声与波长的关系曲线,图中取输入信号功率为-30dBm。

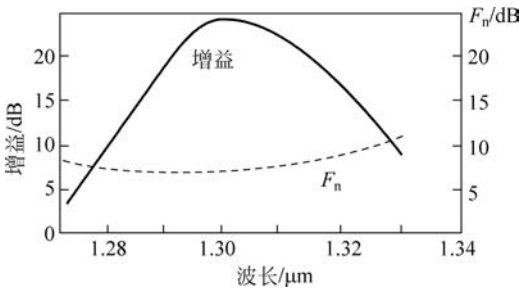


图 5.17 增益和噪声与波长的关系

6. 掺铥光纤放大器

掺铥光纤是在氟化物玻璃中掺入铥离子(Tm^{3+})制作的,其工作波长范围为 1450~1480nm,增益可达 22dB,噪声系数在 6dB 以下,主要与 EDFA 配合应用在 DWDM 系统中。

5.1.4 拉曼光纤放大器

在常规光纤系统中,光纤一般呈现线性传输的特性,但当入射到光纤中的光功率较大时,光纤对光的响应将呈现为非线性,光纤的参数不再是恒定的,而是依赖于光强的大小。光纤中的非线性效应主要有自相位调制(Self Phase Modulation,SPM)、受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering,SRS)、受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering,SBS)、交叉相位调制(Cross Phase Modulation,XPM)和四波混频(Four Wave Mixing,FWM)。

受激拉曼散射是指当较强功率的光入射到光纤中时,会引起光纤材料中的分子振动,对入射光产生散射作用,它可以造成波分复用系统中的短波长信道产生过大的信号衰减,从而限制了系统的信道数目。

受激布里渊散射与受激拉曼散射相似,只不过强光入射到光纤中时引起的是声子振动,散射光方向与光传输方向相反。当光强达到某一数值时,将产生大量后向传输的波,对光通信造成不良的影响。

光纤中的非线性效应,一方面可以引起传输信号的损耗、信道之间的串话、信号频率的移动等不良后果;另一方面又可以被利用来开发出新型器件,如激光器、放大器、调制器等,如四

波混频效应可以实现波长变换,自相位调制与光纤色散相互作用可以形成光孤子,使光孤子通信成为可能。

在光纤通信系统中,高输出功率的激光器和低损耗单模光纤的使用,使得光纤中的非线性效应越来越显著,这是因为单模光纤中的光场主要束缚于很细的纤芯内,场强非常大,低损耗又使得大的场强可以维持很长距离的缘故。对非线性效应有足够的重视。

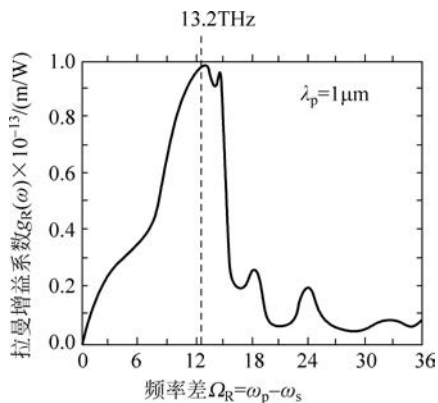


图 5.18 拉曼增益谱的实验曲线

基于受激拉曼散射机理,可以制造出拉曼光纤放大器(Raman Fiber Amplifier, RFA)。如果将频率为 ω_s 的小功率信号光与一个频率差为 $\Omega_R = \omega_p - \omega_s$ 的大功率泵浦光同时注入光纤,并且它们的频差(也称为频移)落在拉曼增益谱带宽范围之内,则信号光沿着光纤传输时将得到有效放大。对于固定的泵浦光频率,由于拉曼增益谱宽度很大,如图 5.18 所示,所以利用 SRS 效应可以在相当宽的波长范围对信号光进行放大。由图 5.18 可知,当 $\Omega = 13.2\text{THz}$ 时,拉曼增益达到最大。该频差对应的信号光(1550nm)要比泵浦光的波长长 100nm。

1. 增益

在小信号放大的情况下,因为信号光强 I_s 比泵浦光强 I_p 小很多,所以可以忽略泵浦光因对信号光放大而产生的衰减。在长为 L 的光纤输出端,信号光功率可由下式表示,

$$P_s(L) = P_s(0) \exp \left[g_R \frac{P_p(0)}{A_{\text{eff}}} L_{\text{eff}} - \alpha_s L \right] \quad (5.32)$$

其中, $P_s(0)$ 是信号光的输入功率, $P_p(0)$ 是泵浦光的输出功率, g_R 是拉曼增益系数, α_s 是光纤对信号光的衰减系数, A_{eff} 和 L_{eff} 分别为光纤有效面积和有效长度。

若没有拉曼放大,则经光纤输出的信号为 $P_s(0) = \exp(-\alpha_s L)$,故拉曼放大器的小信号增益定义为

$$G_R = \frac{P_s(L)}{P_s(0) \exp(-\alpha_s L)} = \exp \left[g_R \frac{P_p(0)}{A_{\text{eff}}} L_{\text{eff}} \right] \quad (5.33)$$

随着信号光的增强,泵浦光的减弱,增益会逐渐降低达到饱和。设 $\alpha_s = \alpha_p$ 可算得饱和增益

$$G_{R0} = \frac{1 + r_0}{r_0 + G_R \exp[-(1 + r_0)]} \quad (5.34)$$

$$r_0 = \frac{\omega_p P_s(0)}{\omega_s P_p(0)} \quad (5.35)$$

其中, G_R 为由式(5.33)定义的小信号增益。

2. 带宽

光纤的 SRS 增益与拉曼增益系数之间的关系是 $g(\omega) = g_R(\omega) I_p$, I_p 是泵浦光强度,因此有

$$g(\omega) = g_R(\omega) \frac{P_p}{A_{\text{eff}}} \quad (5.36)$$

SRS 增益与拉曼增益系数的形状相似,图 5.19 画出了泵浦功率分别为 100mW 和 200mW 的 SRS 增益,由拉曼增益谱曲线可见,在增益峰值附近的增益带宽为 6~7THz。如果采用不同波长的多个泵浦源同时作用,则可获得更为平坦的、带宽更宽的增益特性。目前拉曼

放大器的带宽已达 132nm。

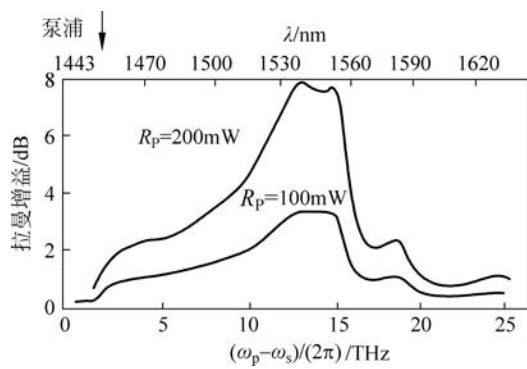


图 5.19 SRS 增益

3. 性能指标

表 5.3 给出了工作在 C 波段和 L 波段两种拉曼放大器的一些性能指标。

表 5.3 拉曼放大器的性能指标

参 数		X-RPU-C(C 波段)	X-RPU-L(L 波段)
波长范围/nm		1528~1562	1570~1612
泵浦功率输出(最小值)/mW		550	550
泵浦极化	典型值/%	5.0	5.0
	最大值/%	7.5	7.5
C 波段输入损耗	典型值/dB	0.8	
	最大值/dB	1.1	
L 波段输入损耗	典型值/dB	—	0.8
	最大值/dB		1.1
温度范围内输入损耗变化(最大值)/dB		0.2	0.2
波长范围内输入损耗变化(最大值)/dB		0.2	0.2
极化损耗	最大值/dB	0.1	0.1
极化模式色散	最大值/ps	0.1	0.1
泵浦源数目		4	4
功耗	典型值/W	40	40
	最大值/W	70	70
工作温度/℃		—5~70	—5~70
储存温度/℃		40~85	40~85
SMF28 增益/dB		10~12	10~12
LEAF 增益/dB		15~17	14~16
TW-RS 增益/dB		17~19	19~22
SMF28 增益/dB		—0.1~0.9	0.5~1.7
LEAF 增益/dB		—1~2.1	—1.1~2.7
TW-RS 增益/dB		—1.1~2.2	—1.6~3.3

注：SMF28,G652：常规单模光纤；LEAF,G652：非零色散位移光纤(大有效截面)；TW-RS,G652：低色散斜率光纤

上述拉曼光纤放大器带光输出、光监控,面板为数字可控式,内置集成化泵浦光与信号光复用器,具有低噪声、增益平坦性能好的特点,可应用在超长距离 DWDM 及 40Gb/s DWDM 等系统中。

5.1.5 光放大器的应用

光放大器的类型很多,不同的使用场合对光放大器参数的要求不一样,这就要求除了知道光放大器的一些基本特性外,还要对它的实际应用有所了解。根据光放大器在光链路中所处位置的不同,将其应用分成 3 个类型。

1. 在线放大(in-line amplifying)

在单模光纤通信系统中,光纤的色散影响较小,限制传输距离的主要因素是光纤的衰减,所以用光放大器可以补偿传输损耗。它适用于超长距离传输的系统,见图 5.20(a)。

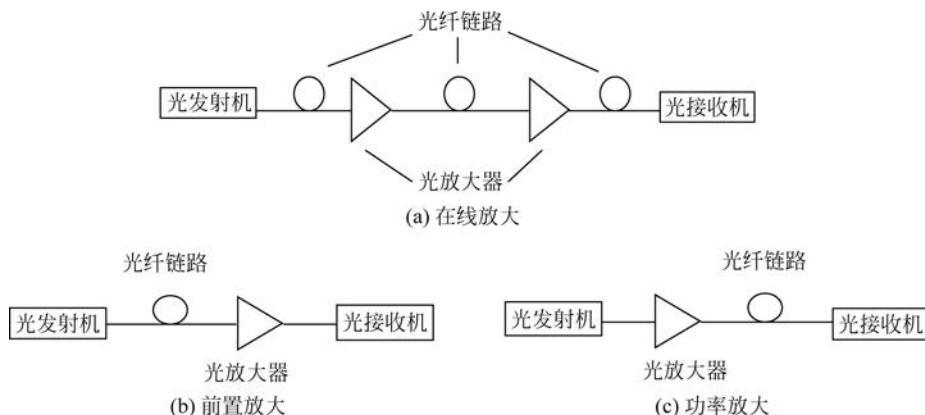


图 5.20 光放大器的几种应用

每个在线放大器的增益必须恰好补偿前面一段光纤中的信号损耗。在设计光纤系统时,还要考虑放大器噪声等因素的影响,使用多个在线放大器,光纤链路中会积累 ASE 噪声,它随着信号光一起传输,最终影响输出端的信噪比,造成信噪比下降。当 k 个放大器级联时,考虑 ASE 噪声影响的噪声系数为

$$F_n = \frac{F_{n1}}{\alpha L_1} + \frac{F_{n2}}{\alpha L_1 G_1 \cdot \alpha L_2} + \cdots + \frac{F_{nk}}{\alpha L_1 G_1 \cdot \alpha L_2 G_2 \cdots G_{k-1} \cdot \alpha L_k} \quad (5.37)$$

其中, αL_i 表示两个放大器之间的链路损耗, $F_i G_i$ 表示放大器的噪声系数和增益。如果放大器之间链路长度相等,每个放大器的噪声系数和增益也相等,记为 F 、 G ,且每个放大器的增益恰好补偿与前一个放大器之间的链路损耗,即

$$F_n = \frac{k F_{n1}}{\alpha L_1} = k F G \quad (5.38)$$

可见噪声系数大大提高了,因而输出信噪比 $(\text{SNR})_{\text{out}} = (\text{SNR})_{\text{in}} / F_n$ 劣化了。通过放大器增益和级联数目的选择,可以得到总增益和 $(\text{SNR})_{\text{out}}$ 的最佳组合。

一般而言,选择在线放大器的输入信号标称范围为 -26dBm ($2.5\mu\text{W}$) $\sim -9\text{dBm}$ ($125\mu\text{W}$),增益大于 15dB 。

2. 前置放大(pre-amplifying)

前置放大是指光放大器的位置在光纤链路末端、接收机之前,如图 5.20(b)所示。在光电检测之前将弱信号放大,可以抑制在接收机中由于热噪声引起的信噪比下降。设接收机的噪声电功率为 N ,接收机可探测的最小电信号功率为 S_0 ,则 S_0/N 为接收机要求的最小信噪比。当接收机前置光放大器时,接收到的信号电功率为 $G^2 S'$,则此时接收机的信噪比为

$$\text{SNR}' = \frac{G^2 S'}{N + N'} \quad (5.39)$$

其中, N' 为前置光放大器的自发辐射噪声经光电二极管转化为附加的背景噪声。设加前置放大器后接收机可探测到的最小电信号功率为 S'_0 , 且接收机要求的最小信噪比不变, 仍为 S_0/N , 则下式成立

$$\frac{G^2 S'_0}{N + N'} = \frac{S_0}{N} \quad (5.40)$$

式(5.40)又可表示成

$$\frac{S_0}{S'_0} = G^2 \frac{N}{N + N'} = G^2 \frac{1}{1 + \frac{N'}{N}} \quad (5.41)$$

由于光放大器的增益足够高, 使得 $G^2 > 1 + \frac{N'}{N}$, 也即 $S'_0 < S_0$, 它说明前置放大器的加入, 使可检测到的最小信号功率降低了。换句话说, 是使得接收机的灵敏度提高了。

3. 功率放大(power amplifying)

功率放大是指在光发射机后安装一个光放大器, 如图 5.20(c) 所示, 以提高发射功率, 一般可使传输距离增加 10~100km。如果同时使用前置放大, 即可实现 200~250km 的无中继海底传输。由于功率放大器直接放置于光发射机后, 其输入功率较高, 要求的泵浦功率也较大。其输入一般要在 -8dBm 以上, 具有的增益必须大于 5dB。

【例 5-1】 用 EDFA 作为功率放大器, 设其增益为 20dB, 泵浦波长 $\lambda = 980\text{nm}$, 输入光信号的功率为 0dBm, 波长为 1550nm, 求所用的泵浦源功率为多少?

解: 入射功率 0dBm, 即为 1mW。由功率放大器增益表达式

$$G_E = 10 \lg \frac{P_{S,\text{out}}}{P_{S,\text{in}}}$$

可求出 EDFA 的输出光信号功率

$$P_{S,\text{out}} = P_S \times 10^{\frac{G}{10}} = 1\text{mW} \times 10^{\frac{20}{10}} = 100\text{mW}$$

由式(5.31)得

$$P_{P,\text{in}} \geq \frac{\lambda_S}{\lambda_P} (P_{S,\text{out}} - P_{S,\text{in}}) = \frac{1550}{980} (100\text{mW} - 1\text{mW}) = 156.6\text{mW}$$

5.2 光无源器件

光无源器件是能量消耗型光学器件, 其种类繁多, 功能各异, 是一类实用性很强的不可缺少的器件, 主要产品包括耦合器、滤波器、隔离器、衰减器、光开关和连接器等。它们的作用概括起来是连接光路, 控制光的传输方向, 控制光功率的分配, 控制光波导之间、器件之间以及光波导与器件之间的光耦合、合波、分波。下面分别介绍几种主要的光无源器件。

5.2.1 耦合器

1. 耦合器类型

耦合器是对光信号实现分路、合路和分配的无源器件, 是波分复用、光纤局域网、光纤有线电视网以及某些测量仪表中不可缺少的光学器件。图 5.21 展示了几种典型的光纤耦合器结构图。

其中图 5.21(b) 也称为 2×2 耦合器, 它用来完成光功率在不同端口间的分配, 是构成其

他光学元件的基础。图 5.2.1(c) 有多个输入端口和多个输出端口, 称为星状耦合器, 它通常完成将单个输入信号分配给多个输出信号的功能。星状耦合器常用多个 2×2 耦合器级联而成。图 5.21(d) 除了涉及光功率的分配外, 还涉及不同波长的分配, 我们将它称为波分复用器。它可以看作一种特殊形式的光纤耦合器。光纤耦合器有熔锥型和研磨型。除用光纤制成耦合器外, 还可用集成光波导制作耦合器。

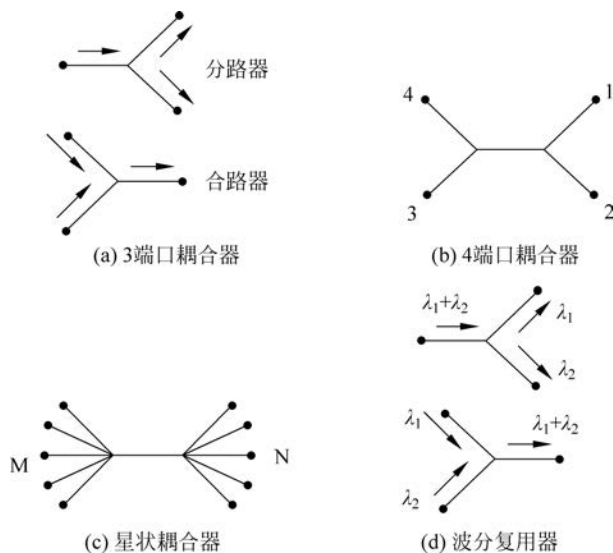


图 5.21 光纤耦合器结构图

2. 工作原理

2×2 耦合器是最简单的器件, 我们以它为例来说明耦合器的工作原理。图 5.22 为熔锥型光纤耦合器结构示意图。

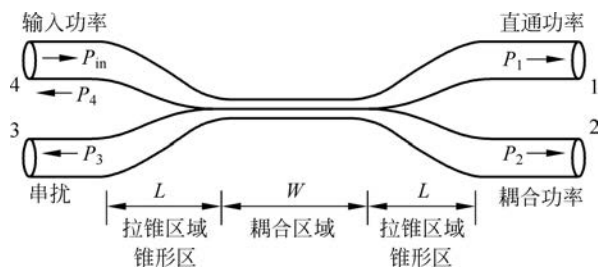


图 5.22 熔锥型光纤耦合器结构示意图

将两根单模光纤扭绞在一起, 然后加热并拉伸, 使它在长为 W 的距离内均匀熔融以形成耦合器。在耦合区, 纤芯直径变小, 归一化频率 V 下降, V 值越小模场直径越大, 也即模场超过光纤直径的部分越多, 如图 5.22 所示。这样, 一个光模式的更多部分在耦合区的包层部分传播, 然后被耦合到另一根光纤的纤芯中。

从一根光纤耦合到另一根光纤的光功率取决于耦合区内两个纤芯之间的距离、两个纤芯直径和工作波长, 并与耦合区的长度有关。

图 5.22 中 P_{in} 是输入功率, P_1 称为直通功率, P_2 是耦合到第二根光纤中的功率, P_3 、 P_4 是由于耦合器弯曲和封装而产生的反射和散射功率。假设耦合器是无损耗的, 因为 P_3 、 P_4 所占的比例很小, 所以在此忽略掉, 则耦合功率和直通功率分别可表示为

$$P_2 = P_{in} \sin^2(cz) \quad (5.42)$$

$$P_1 = P_{\text{in}} - P_2 = P_{\text{in}} \cos^2(cz) \quad (5.43)$$

其中, c 为耦合系数, 则有

$$c = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \cdot \frac{U^2}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0\left(\frac{Wd}{a}\right)}{K_1^2(W)} \quad (5.44)$$

其中, d 为两光纤耦合区中的纤芯距离, K_0 、 K_1 为第二类零阶和一阶的贝塞尔函数。

图 5.23 示出了归一化功率与耦合区长度以及波长的关系。显然, 当波长固定时, 可以通过改变 W 等参数制作不同性能的耦合器。

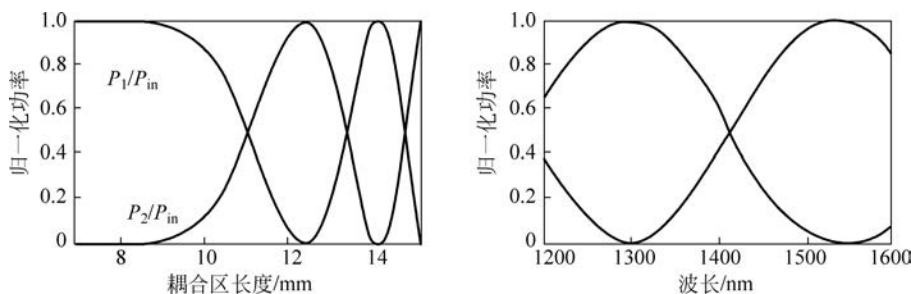


图 5.23 归一化功率与耦合区长度以及波长的关系曲线

3. 性能参数

表示光纤耦合器性能的主要参数有插入损耗、附加损耗、分光比与隔离度(串音)。在实际的耦合器中, 信号通过它时, 总会有一些损耗。两种基本类型的损耗就是插入损耗和附加损耗。

(1) 插入损耗是指光功率从特定的端口到另一端口路径的损耗。从输入端口 k 到输出端口 j 的插入损耗可表示为

$$L_i = 10 \lg \frac{P_{\text{in},k}}{P_{\text{out},j}} \quad (5.45)$$

(2) 附加损耗的定义是输入功率与总输出功率的比值

$$L_e = 10 \lg \frac{P_{\text{in}}}{\sum_j P_{\text{out},j}} \quad (5.46)$$

对于如图 5.22(b)所示的 2×2 耦合器有

$$L_e = 10 \lg \frac{P_{\text{in}}}{P_1 + P_2}$$

(3) 分光比是某一输出端口的光功率与所有输出端口光功率之比

$$S_R = \frac{P_{\text{out},j}}{\sum_j P_{\text{out},j}} \times 100\% \quad (5.47)$$

它说明输出端口间光功率分配的百分比。对于 2×2 耦合器可以是

$$S_R = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \times 100\%$$

(4) 隔离度也称之为方向性或串扰, 隔离度高意味着线路之间的串扰小。它表示输入功率出现在不希望的输出端的概率大小。对于 2×2 耦合器, 其数学形式是

$$L_c = 10 \lg \frac{P_3}{P_{\text{in}}} \quad (5.48)$$



图 5.24 1×2 耦合器的实物照片

图 5.24 为某一耦合器的实物照片。表 5.4 为其性能指标,表中的均匀性是在工作带宽范围内,各输出端口输出功率的最大变化量。偏振相关损耗(Polarization Dependant Loss)是衡量耦合器对传输光信号偏振态敏感程度的参数,它指的是传输光信号的偏振方向发生 360° 的变化时,耦合器输出端口输出光功率的最大变化量。

表 5.4 1×2 耦合器的性能指标

参 数	单 窗 口	
规格	P	A
工作波长/nm	1310 或 1550	
工作带宽/dB	± 40	
附加损耗/dB	0.1	0.2
插入损耗/dB	3.4	3.6
偏振相关损耗/dB	0.1	0.13
均匀性	0.5	0.8
方向性/dB	55	
工作温度/℃	$-20 \sim +27$	
储存温度/℃	$-40 \sim +85$	
封装尺寸/mm	3.0×48	
分光比	插入损耗(最大值)/dB	
	P	A
50/50	3.4/3.4	3.6/3.6
40/60	4.4/2.5	4.6/2.8
30/70	5.6/5.8	6.0/2.0
20/80	7.4/1.2	7.7/1.3
10/90	10.8/0.6	11.2/0.7
5/95	13.8/0.4	14.5/0.5
3/97	16.5/0.3	17.0/0.4
1/95	21.0/0.2	22.0/0.3

5.2.2 滤波器

滤波器是一种波长选择器件,在光纤通信系统中有着重要的应用。特别在 WDM 光纤网络中每个接收机都必须选择所需要的信道,因此滤波器成为必不可少的部分。

滤波器分成固定波长滤波器和可调谐滤波器两大类。前者是允许一个确定波长的信号光通过,后者是可以在一定光带宽范围内动态地选择波长,如图 5.25 所示。

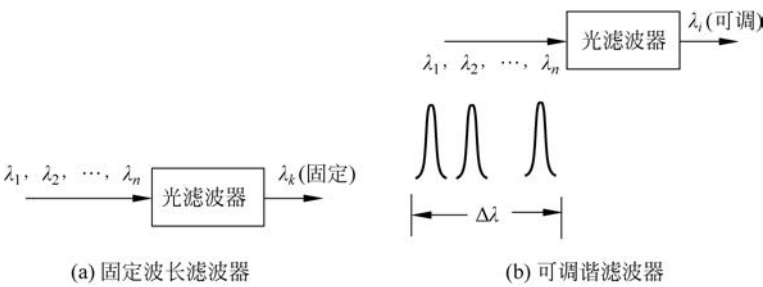


图 5.25 光滤波器类型

滤波器的特性如图 5.26 所示,此图给出了固定波长滤波器的主要参数,包括中心波长

λ_0 、带宽 $\Delta\lambda$ 、插入损耗及隔离度等。对于可调谐滤波器,主要参数有调谐范围、带宽、可分辨信道数、调谐速度、插入损耗、偏振相关损耗和分辨率等。其中可分辨信道数是信道范围与最小信道间隔之比。调谐速度指的是滤波器调到指定波长所需要的时间。分辨率是滤波器能检测的最小波长偏移。

下面首先介绍固定波长滤波器的工作原理。

1. 固定波长滤波器

1) 薄膜干涉滤波器

这种滤波器由多层不同材料的介质薄膜构成,一层为高折射率,一层为低折射率,交叠而成。每层介质的等效光学厚度为 $\lambda/4$,利用各层的反射光与入射光的干涉效应实现滤波。图 5.27 示出了薄膜干涉滤波器的原理。当光由光疏介质入射到光密介质时,反射光不产生相移;而当光由光密介质入射到光疏介质时,反射光产生 180° 的相移。由于介质厚度为 $\lambda/4$,光经低折射率层传输、反射、再传输后的总相移为 360° ,与经高折射率层的反射光同相叠加,这样,在中心波长附近,各层的反射光叠加,在滤波器的上端面形成很强的反射光,得到具有一定带宽的光信号。其他频率的光因不能满足相长干涉条件而不能被反射。

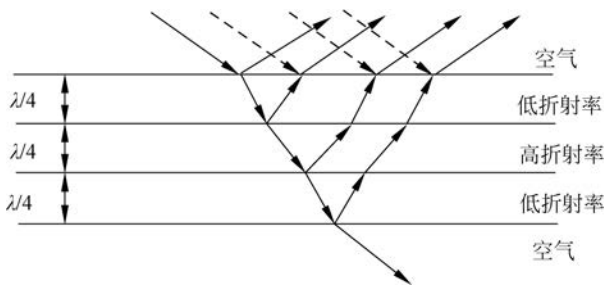


图 5.27 薄膜干涉滤波器的原理

2) F-P 固定波长滤波器

F-P 固定波长滤波器由两片平行镜组成的谐振腔构成,如图 5.28 所示。当入射光波长满足谐振条件时方能通过。该滤波器的传输特性可表示为

$$T_{\text{FPF}}(\omega) = \frac{\alpha_m (1 - R)^2}{(1 - \alpha_m R)^2 + 4\alpha_m R \sin^2[(\omega - \omega_0)L/v]} \quad (5.49)$$

其中, α_m 是介质和平行镜吸收引起的插入损耗, R 为两平行镜的反射率, v 是光在腔体中的速度,由式(5.49)可以看出,传输特性是与 R 密切相关的一个周期函数,图 5.28(b)画出了传输特性曲线,其中周期长度称为自由光谱范围(FSR)

$$\text{FSR} = \frac{c}{2nL} \quad (5.50)$$

F-P 滤波器的带宽为

$$\Delta f_{\text{F-P}} = \frac{c}{2nL} \cdot \frac{1 - R}{\pi \sqrt{R}} \quad (5.51)$$

定义

$$F = \frac{\text{FSR}}{\Delta f_{\text{F-P}}} = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R} \quad (5.52)$$

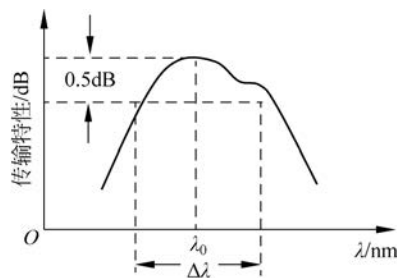


图 5.26 滤波器的特性

为 F-P 滤波器的精细度,它反映滤波器的选择性,即能分辨的最小频率差。

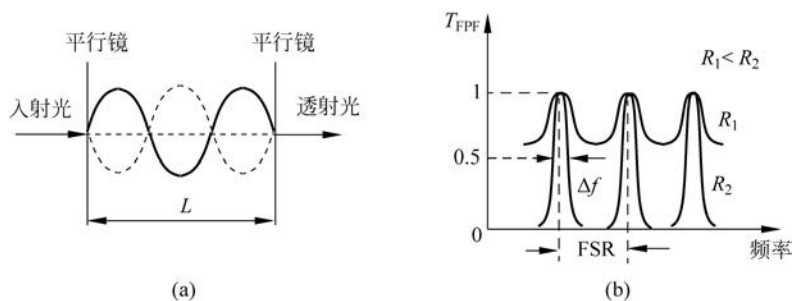


图 5.28 F-P 滤波器原理

2. 可调谐滤波器

严格来说,可调谐滤波器属于有源器件,它可以通过控制电压或温度的变化来改变滤波器的某些参数,从而达到波长动态选择的目的。

可调谐滤波器主要使用在 WDM 系统中,WDM 网络中所有波长都应基于 ITU 标准选取,如波长间隔约为 0.8nm(1550nm 窗口),则对应信道频率间隔是 100GHz。所以可调谐滤波器的调谐范围、带宽应该根据要求来设计。

1) 光纤 F-P 滤波器

图 5.29 示出了一个光纤 F-P 滤波器的结构示意图,其工作原理与 F-P 固定波长滤波器相同,输入光纤和输出光纤的两个端面被抛光镀膜,两个光纤端面之间的部分构成了法布里-珀罗腔,这两根光纤经过支架与压电陶瓷相连,对压电陶瓷施加电压(300~500V)可使支架产生左右变化的位移,从而改变反射镜之间的长度,达到波长调谐的目的。

如果不是通过压电陶瓷改变 F-P 腔长而是在两光纤端面之间填入液晶介质,那么由于液晶的折射率随着施加电压的变化迅速改变,F-P 腔的光子长度也随之变化。这种填充液晶的滤波器调谐时间在 10μs 内,调谐范围达 80nm,波长分辨率 0.05~10nm,插入损耗为几个分贝。

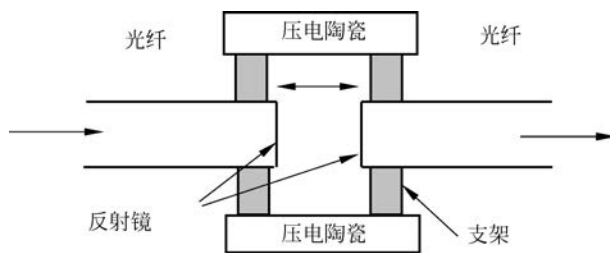


图 5.29 光纤 F-P 滤波器的结构示意图

2) 马赫-曾特干涉滤波器

马赫-曾特(M-Z)干涉滤波器的机理是基于单色光经过不同长度光波导传输后之间的干涉。在图 5.30 中,两个波长之和的光信号输入光纤,经过方向耦合器使它们均匀地被分配到滤波器的两臂上,光信号经过两臂时,获得的相位变化不等,也即产生了相位差,当它们以不同的相位到达第二个方向耦合器时,如果相位差满足一定的条件,那么在输出光纤端口 1,波长 λ_1 “相长”干涉,波长 λ_2 “相消”干涉,所以输出波长为 λ_1 的光波。同理,输出光纤端口 2 输出波长为 λ_2 的光波。在图 5.30 中,臂 2 上放置了光电材料,当臂上的电压改变时,该臂的折射率便发生变化,假设两臂的长度相等为 L ,臂 1 的折射率为 n_1 ,臂 2 的折射率为 $n_1 + \Delta n$,则在

第二个耦合器输入端两个臂中光波的相位差为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f_i L \Delta n}{c} \quad (5.53)$$

其中, $f_{i(i=1,2)}$ 表示两个光波频率, c 为光速。进一步用传输特性描述 M-Z 干涉滤波器, 可表示为

$$T_{MZ} = \begin{cases} \cos^2(\Delta\phi/2) \\ \sin^2(\Delta\phi/2) \end{cases} \quad (5.54)$$

显然, 如果 $\Delta\phi = \frac{2\pi f_1 L \Delta n}{c} = (2m-1)\pi$ (m 为整数), 则由式(5.54)可知, 在端口 1 将输出波长为 λ_1 的光波, 在端口 2 则无光信号输出; 如果同时满足条件 $\Delta\phi = \frac{2\pi f_2 L \Delta n}{c} = 2m\pi$, 那么端口 2 将出现波长 λ_2 的光, 也即 λ_1 和 λ_2 波长的光信号分别由端口 1 和端口 2 输出。

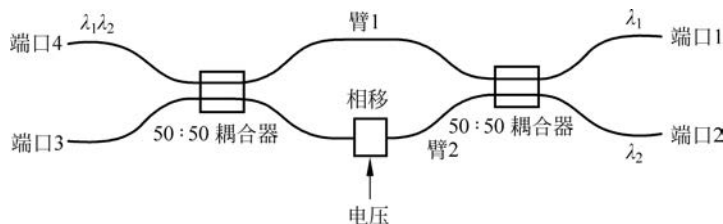


图 5.30 M-Z 干涉滤波器

由于 m 的多值性, M-Z 干涉滤波器的通带具有循环的特点, 光信道间隔

$$\Delta f = c/(2L \Delta n) \quad (5.55)$$

图 5.30 中的电压起到调谐的作用, 调谐时间小于 50ns。可调谐滤波器的类型还有光栅滤波器, 声光滤波器。光栅滤波器是通过施加压力或者加热光栅改变光栅的周期长度, 从而达到调谐的目的。声光滤波器的结构类似于 M-Z 干涉滤波器。其中的两臂被刻蚀在 LiNbO_3 双折射半导体中, 进入的光被输入偏振器分成 TE 波和 TM 波, 见图 5.31, 一个换能器产生表面声波, 在 LiNbO_3 中引起折射率的周期性波动, 这种波动等效为动态的布拉格光栅, 由于光栅的相互作用, 满足谐振条件(对应某一波长)的 TE 模光能被转换成 TM 模, 而 TM 模的光能转换成 TE 模, 然后经输出偏振器输出, 波长不满足谐振条件的信号将从另一个端口输出。

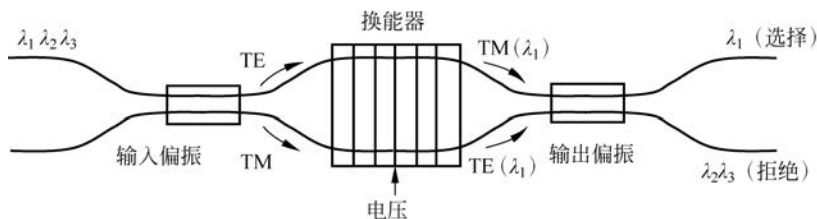


图 5.31 声光可调性滤波器的结构

表 5.5 示出了光梳滤波器的性能指标。表 5.5 中回波损耗也称为反射损耗, 它反映了输入端反射的光功率占总输入光功率之比, 以分贝表示为 $L_R = -10 \lg \frac{P_{in}}{P_{out}}$ (dB)。

表 5.5 光梳滤波器的性能指标

参 数	指 标	
信道间隔/GHz	50	100
工作波长范围/nm	C 波段 1528~1564	
	L 波段 1568~1610	
1568 至中心波长/nm	ITU-U 标准	
波长精度(0.5dB 通带内平均值)/nm	±0.02	±0.04
插入损耗(全通带)/dB	典型 2.0	典型 1.7
通带宽度 0.5dB/nm	≥0.15	≥0.35
通带宽度 25dB/nm	≤0.7	≤1.3
通带平坦度/dB	≤0.5	
插入损耗均匀性/dB	≤0.5	
隔离度/dB	≥25	
回波损耗/dB	≥45	
方向性/dB	≥55	
偏振相关损耗(PDL)/dB	≤0.3	
偏振模色散(PMD)/ps	≤0.2	
色散/(ps/nm)	±15	
工作温度/℃	0~+60	
储存温度/℃	-4.5~+8.5	
封装尺寸 A 型/mm	121×32×11.5	86×32×11.5
封装尺寸 B 型/mm	118×19×8	83×19×8

5.2.3 隔离器

隔离器是一种只允许光单方向传输的器件。光纤通信系统中的很多光器件(如激光器),光放大器对来自连接器、熔接点、滤波器的反射光非常敏感,反射光将导致它们的性能恶化,例如,半导体激光器的线宽受反射光的影响会展宽或压缩,甚至可达几个数量级。因此应在靠近这种光器件的输出端放置隔离器,阻止反射光的影响。

隔离器由 3 个功能部件组成:输入偏振器(起偏器)、法拉第旋转器和输出偏振器(检偏器),如图 5.32 所示。输入偏振器和输出偏振器的作用是将光变成固定偏振方向的线偏振光。法拉第旋转器是使入射光的偏振方向发生旋转变化,旋转的角度为

$$\alpha = \rho HL$$

(5.56)

其中, L 是法拉第旋转器的长度, H 是法拉第旋转器沿光束传播上所加的磁场强度,单位为 A/m(安培/米),对石英光纤, $\rho = 4.86 \times 10^{-6}$ rad/A(弧度/安培)。隔离器的工作过程如下:入射光经过输入偏振器后变成垂直偏振光,见图 5.32。经过法拉第旋转器,垂直偏振光的偏

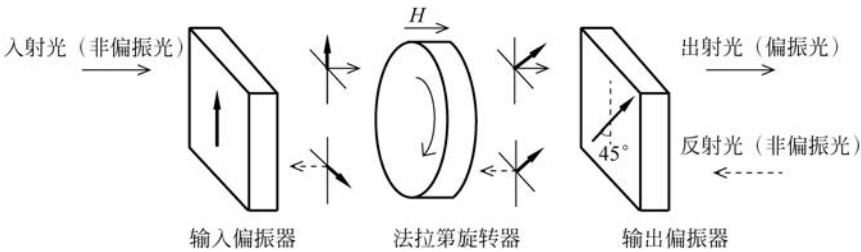


图 5.32 隔离器的工作原理

振方向旋转了 45° , 输出偏振器的方向设计成 45° , 所以允许其通过; 另一方面, 在隔离器的反方向上, 反射光经输出偏振器变成 45° 的线偏振光, 经法拉第旋转器又一次旋转 45° 后, 变成了水平偏振, 由于输入偏振器只允许垂直偏振光通过, 所以反射光便无法到达隔离器输入端。

隔离器的主要性能指标有工作波长、典型插入损耗(参考值: 0.4dB)、最大插入损耗(参考值: 0.6dB)、典型峰值隔离度、最小隔离度(参考值: 40dB)、最大偏振灵敏度(参考值: 0.05dB)、回波损耗[参考值: $60\text{dB}/60\text{dB}$ (输入/输出)]等。

5.2.4 环形器

环形器有 3 端口、4 端口和 6 端口之分, 它是只允许某端口的入射光从确定端口输出的器件, 如图 5.33 所示, 对于 3 端口环形器, 端口 1 的输入光信号只能从端口 2 输出, 而端口 2 的输入光信号只能从端口 3 输出。环形器的主要功能部件为双折射分离器件、法拉第旋转器和相位旋转器。双折射分离器件不仅能入射光分离成相互正交的偏振光, 而且两者具有一定的分裂度, 即在空间上可以分离开来, 如图 5.34 所示。

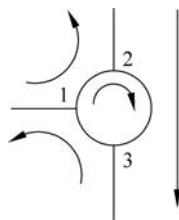


图 5.33 3 端口环形器

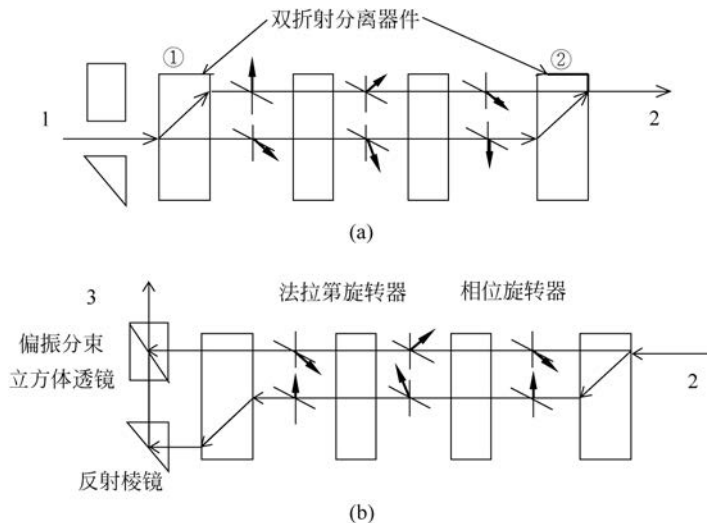


图 5.34 环形器的工作原理

光束由端口 1 向端口 2 传播的工作过程如下: 入射光经过双折射分离器件①后, 被分离成两束, 上束为垂直偏振光(也称 E 光), 下束为水平偏振光(也称为 O 光), 经过法拉第旋转器和相位旋转器分别再旋转 45° 后, 上束变为水平偏振光, 下束变为垂直偏振光, 由于水平偏振光通过双折射分离器件②时其偏振方向不变, 且不发生折射, 而垂直偏振光通过时发生折射, 过程与分离器件①相反, 所以光束在端口 2 处被合成后输出。

光束由端口 2 向端口 3 传播的工作过程如图 5.34(b) 所示, 经过双折射分离器件的两次分离后, 它们已经偏离了端口 1 的轴, 两束光线分别通过反射棱镜和偏振分束立方体透镜重新组合, 并从端口 3 输出。

这里以某环形器产品说明其性能指标, 它们是中心波长(1310nm 或 1550nm)、波长范围(20nm)、典型插入损耗(0.7dB)、最大插入损耗(0.8dB)、隔离度($\geq 45\text{dB}$)、串扰($\geq 50\text{dB}$)、回波损耗($\geq 55\text{dB}$)、偏振相关损耗($\leq 0.1\text{dB}$)、偏振模式色散($\leq 0.1\text{ps}$)、最大承载功率(300mW)、最大承担拉力(5N)、光纤类型(Corning SMF28)、工作温度($-5\sim+70^\circ\text{C}$)、环境温度($-40\sim+85^\circ\text{C}$)、封装尺寸($5.5\text{mm}\times 5.5\text{mm}\times 54\text{mm}$)等。

5.2.5 衰减器

衰减器的功能是对光功率进行预定量的衰减。在光纤通信系统中,许多场合都需要减少光信号的功率。例如,光接收机对光功率的过载非常敏感,必须将输入功率控制在接收机的动态范围内,防止其饱和;光放大器前的不同信道输入功率间的平衡,防止某个或某些信道的输入功率过大,引起光放大器增益饱和等。另外,在光系统的评估、研究和调整、校正等方面也大量使用衰减器。

根据工作机理,衰减器可以分为以下几种。

(1) 耦合型。它是通过输入、输出两根光纤纤芯的偏移来改变光耦合的大小,从而达到改变衰减量的目的,如图 5.35(a)所示。耦合型衰减器有横向位移和轴向位移两种,衰减器与位移、横场直径、纤态和两端面介质的折射率等因素有关。

(2) 反射型。如图 5.35(b)所示,通过改变反射镜的角度,控制透射光的大小。

(3) 吸收型。采用光吸收材料制成衰减片,对光的作用是吸收和透射。

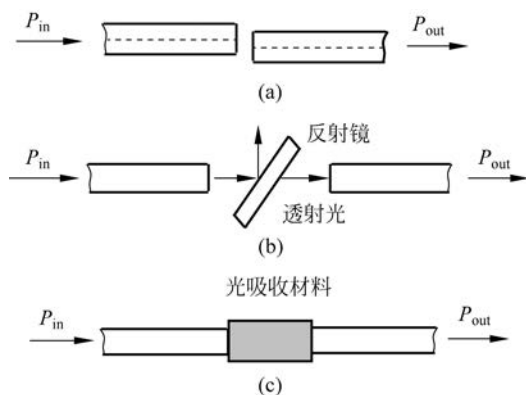


图 5.35 衰减器的工作原理

衰减器还可分成固定式、步进可变式和连续可变式 3 种类型。固定衰减器引入一个预定的损耗,例如,5dB、10dB 等。步进衰减器常表示成诸如 10dB×5 的形式,也即 5 步进式,每步为 10dB。连续可变式是指衰减量在一个范围内连续可调,如 0~60dB。

根据使用场合的不同,又可将衰减器分为在线型衰减器、适配器型固定衰减器、插头式衰减器、光纤端口终止器等。

技术参数主要有中心波长、带宽、衰减器、衰减精度、最小回波损耗、最大偏振灵敏度等,其中的衰减精度是指能精细调节衰减的准确性。

5.2.6 连接器

光纤的连接常采用两种办法。一种是要求两根光纤(缆)的连接是固定和永久的。在光缆施工中,因为一盘光缆的长度一般在 2km 以内,所以两根光缆的接续要采用熔接机将它们熔融相连。另一种是光纤与光发射机(附带尾纤)、光接收机或仪表之间的连接,或者是与另一根光纤暂时性的连接,这就要用到连接器。连接器是易出故障的器件,也是用途最广泛的无源器件。

1. 连接器结构

连接器的基本功能部件有插针件、闭锁装置、后壳、压接套管和保护套,图 5.36(a)为一个与光接收机相连的连接器的示意图。

图 5.36(b)是准备连接的光缆示意图。准备工作包括剥离光缆外层护套,揭开紧固件,除去缓冲管,将光纤裸露出来,这种准备好的光纤插进连接器时,插针才能护住裸露的光纤。

图 5.36 示出的结构称为套管结构,是应用最为广泛的一种形式。除此之外,还有双锥结构、V 形槽结构、球面空心结构和透镜耦合结构,如图 5.37 所示。

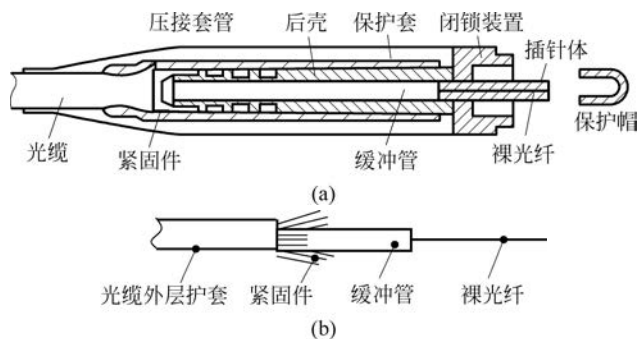


图 5.36 连接器的结构

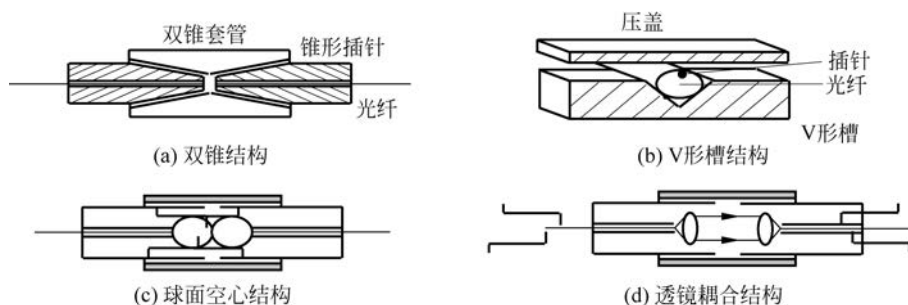


图 5.37 连接器的几种形式

2. 连接损耗

连接损耗产生的原因可归为两类：一类是光纤公差引起的固有损耗,如芯径、折射率分布等的失配,如图 5.38(a)所示；另一类是连接器加工装配引起的外部损耗,如图 5.38(b)所示。外部损耗往往是主要的,其中间隙和横向偏移造成的损耗占有较大的比例。

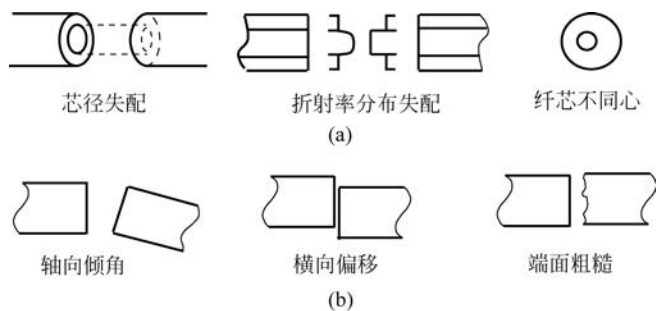


图 5.38 连接损耗机理

3. 连接器型号和参数

常用的连接器型号有 FC/PC、FC/APC、SC/PC、SC/APC 和 ST/PC,其中分子部分表示外部加强件的材料、固定方式: FC 是金属套筒,卡口螺旋式; SC 是插拔式,外壳为矩形; ST 是弹簧带锁卡口结构。分母部分表示内部光纤端面的处理形式: PC 的端面处理成凸球面形, APC 的端面处理成斜面。值得说明的是,APC 连接器端面的倾斜角为 8° ,这是为了保证光传

输到两光纤端面产生部分反射时,反射光不会反射传播回去,而是近距离消失。因为标准单模光纤的数值孔径是 0.13,这相当于 7.5° ($NA = \sin\theta_0$),所以 8° 的倾斜角使反射光角度大于接收角,如图 5.39 所示。

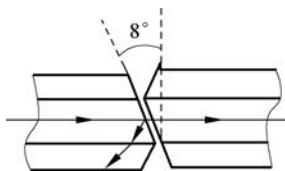


图 5.39 APC 的端面为斜面

除了单芯活动连接器外,已经有大量双芯和多芯连接器问世,它们在光纤用户接入网中得到了广泛应用。

连接器的规格型号繁多,各种型号的连接器的都有自己的特点和用途。例如,FC/PC 型连接器,插入损耗小,适用于长距离干线网。APC 型连接器回波段损耗大,可用于高速率数字系统或模数视频系统。

连接器的主要性能指标有:插入损耗,一般在 0.5dB 以下;重复性,即每插拔一次或数次之后,其损耗的变化情况,一般应小于 0.1dB;互换性,是指同一种连接器不同插针替换时损耗的变化量,它应小于 0.1dB;寿命,即在保证连接器具有上述损耗参数范围内插拔次数的多少,一般应在千次以上;温度性能是指在一定温度范围内连接器损耗的变化量,一般为 $-25 \sim +70^\circ\text{C}$,损耗变化应小于或等于 0.2dB。此外,还有反射损耗(一般应小于 -35dB)、抗拉强度等性能指标。

5.2.7 光开关

光开关是光交换的关键器件,它具有一个或多个可选择的传输端口,可对光传输线路中的光信号进行相互转换或逻辑运算,在光纤网络系统中有着广泛的应用。

光开关可分为机械式和非机械式两大类。机械式光开关依靠光纤或者光学器件的移动,使光路发生转换。非机械式光开关依靠电光、声光、热光等效应来改变波导的折射率,使光路发生变化。下面对这两类光开关的结构、工作原理进行介绍。

1. 机械式光开关

新型机械式光开关有微光机电系统光开关和金属薄膜光开关两类。

微光机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)光开关在半导体衬底材料上制造出可以作微小移动和旋转的微反射镜阵列,微反射镜的尺寸非常小,约 $140\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$,它在驱动力的作用下,将输入光信号切换到不同的输出光纤中。加在微反射镜上的驱动力是利用热力效应、磁力效应或静电效应产生的。图 5.40 示出了 MEMS 光开关的结构。当微反射镜为取向 1 时,输入光经输出波导 1 输出;当微反射镜为取向 2 时,输入光经输出波导 2 输出。微反射镜的旋转由控制电压($100 \sim 200\text{V}$)完成。这种器件的特点是体积小,消光比(光开关处于通状态时的输出光功率与断状态时的输出光功率之比)大,对偏振不敏感,成本低,开关速度适中,插入损耗小于 1dB。

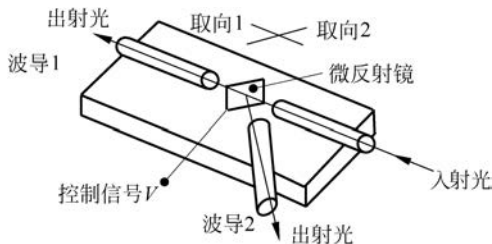


图 5.40 MEMS 光开关的结构

金属薄膜光开关的结构如图 5.41 所示。波导芯层下面是底包层,上面则是金属薄膜,金属薄膜与波导之间为空气。通过施加在金属薄膜与衬底之间的电压,使金属薄膜获得静电力,在它的作用下,金属薄膜向下移动与波导接触在一起,使波导的折射率发生改变,从而改变了通过波导光信号的相移。图 5.42 为金属薄膜 M-Z 型光开关结构示意图。如果不加电压,那么金属薄膜翘起,M-Z 干涉滤波器两个臂的相移相同,此时光信号从端口 2 输出;如果加电压,那么金属薄膜与波导接触,导致该臂相移为 π ,光信号从端口 1 输出。



图 5.41 金属薄膜光开关的结构

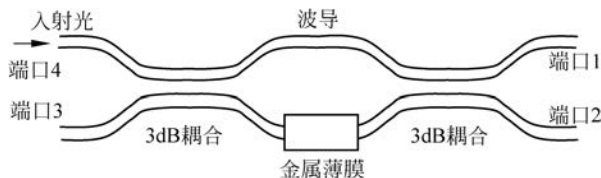


图 5.42 金属薄膜 M-Z 型光开关结构示意图

2. 非机械式光开关

非机械式光开关的类型有液晶光开关、电光效应光开关、热光效应光开关、半导体光放大器光开关等。

液晶光开关是在半导体材料上制作出偏振光束分支波导,在波导交叉点上刻蚀具有一定角度的槽,槽内注入液晶,槽下安置电热器。不对槽加热时,光束直通;加热后,液晶内产生气泡,经它的全反射,光改变方向,输出到要求的波导中。

电光效应光开关、热光效应光开关等是利用材料的折射率随电压和温度的变化而改变,从而实现光开关的器件。

半导体光放大器光开关利用改变放大器的偏置电压实现开关功能。

光开关的参数主要有波长范围、插入损耗、光路回波损耗、串扰、光路输入功率、偏振相关损耗、重复性、开关速度和寿命等。

本章小结

光放大器和光无源器件的重要性随着光纤通信应用范围的不断扩大而日益提升,它们的性能会直接影响到信号传输的各种指标。对于光放大器,应了解增益系数、增益饱和和噪声系数的含义,各类放大器的基本工作原理、参数和应用。EDFA 已经得到了广泛应用,读者对它应有足够的了解。光无源器件的种类很多,读者除了理解其基本工作原理外,更应注重它们的参数和应用,并且借助网络搜索有关产品的性能指标。

习题

5.1 某放大器增益参数 $g(v) = \frac{g_0}{1 + 4(v - v_0)^2 / (\Delta v)^2}$, 其中 Δv 为光带宽, v_0 为最大增益频率,证明 3dB 带宽 $2(v - v_0)$ 与光带宽 Δv 之比为 $\frac{2(v - v_0)}{\Delta v} = [\log_2(g_0/2)]^{-1/2}$ 。

5.2 放大的自发辐射噪声是怎样产生的?

5.3 某光放大器输入信号功率为 $320 \mu\text{W}$, 输入噪声功率在 1 nm 带宽上是 30 nW , 输出信号功率是 50 mW , 且输出噪声功率在 1 nm 带宽上是 $12 \mu\text{W}$, 该光放大器的噪声系数为多少?

- 5.4 已知 F-B 放大器 $RG_s = 0.96$, $n = 3.6$, $L = 50 \mu\text{m}$, 试计算其带宽。
- 5.5 行波放大器工作波长 $\lambda = 1300\text{nm}$, 增益为 30dB , 带宽为 40nm , 求它产生的 ASE 功率。
- 5.6 已知行波放大器 $g = 52(1/\text{cm})$, $\bar{\alpha} = 14(1/\text{cm})$, $\Gamma = 0.8$, $L = 500 \mu\text{m}$, 计算其单程增益。
- 5.7 试述 EDFA 的工作原理。
- 5.8 掺铒光纤放大器中的关键器件是什么? 对于 980nm 泵浦和 1480nm 泵浦的 EDFA, 哪一种泵浦方式的功率转换效率高? 哪一种泵浦的噪声系数小? 为什么?
- 5.9 设 EDFA 饱和功率是 20mW , 每毫瓦泵浦功率产生 5dB 的增益, 泵浦功率是 5mW , 试问没有饱和的最大输入功率是多少?
- 5.10 有一个 EDFA 功率放大器, 工作波长 $\lambda = 1545\text{nm}$, 输入光信号功率为 -10dBm 时, 输出光信号功率为 22dBm , 试求:
- (1) 该放大器的增益;
 - (2) 所需的最小泵浦功率为多大?
- 5.11 在线放大器、前置放大器和功率放大器在功能和性能上有什么不同?
- 5.12 计算 20 个光放大器级联时的输出信噪比, 设每个光放大器的噪声系数相等, $F = 3\text{dB}$, 光发射机信噪比为 10^8 , 两个放大器之间的光纤损耗为 20dB , 放大器的增益为 20dB 。
- 5.13 已知某 2×2 双锥形光纤耦合器的输入功率 $P_{\text{in}} = 200 \mu\text{W}$, 另外 3 个端口的输出功率分别为 $P_1 = 90 \mu\text{W}$ 、 $P_2 = 85 \mu\text{W}$ 、 $P_3 = 6.3\text{nW}$, 试求该耦合器的插入损耗、附加损耗、分光比和隔离度。
- 5.14 什么是滤波器的主要特性? 解释 M-Z 干涉滤波器的工作原理。
- 5.15 法拉第旋转器由 BIG 晶体制成, $\rho = 9^\circ/(\text{Oe} \cdot \text{cm})$, 设磁场为 1000Oe , 求旋转光偏振面为 45° 时的晶体长度。注: $1\text{Oe} = 10^3/4\pi(\text{A}/\text{m})$ 。
- 5.16 连接器的类型有哪些?
- 5.17 引起连接器损耗的因素有哪些?