第2章 光纤的特性

本章主要介绍光纤的几何特性、机械特性、传输特性以及光学特性，对光纤的特性作全面的描述。

2.1 光纤的几何特性

一般讨论光纤的几何特性时，通常要考虑光纤几何尺寸的参数，包括芯径、外径、同心度和椭圆度。

(1) 芯径与外径

通信用标准多模光纤的芯径为 50 μm，单模光纤芯径为 7～10 μm；标准单、多模光纤的外径均可为 125 μm，如图 2-1 所示。非标准光纤的芯径从几十微米到几百微米不等，塑料光纤的芯径甚至可达数毫米。

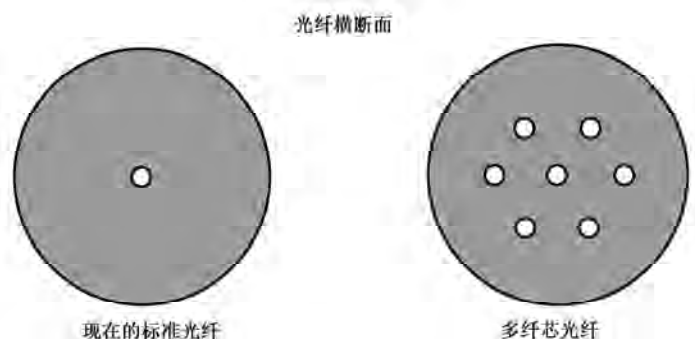


图 2-1 标准光纤的外径

(2) 光纤的同心度和椭圆度

同心度就是插芯内径距离整个圆心的偏移程度。理想状态是 0，就是不偏移。光纤的同心度是衡量纤芯和包层是否同心的参数。在圆形钢管的横截面上存在着外径不等的现象，即存在着不一定互相垂直的最大外径和最小外径，则最大外径与最小外径之差即为椭圆度。光纤的椭圆度是衡量纤芯及包层截面偏离圆形截面程度的参数。光纤的同心度和椭圆度对于光纤的连接与耦合是很重要的参数。为取

得低的连接损耗，要求光纤具有尽量低的非圆度与非同心度。

2.2 光纤的机械特性

光纤的机械特性主要包括耐侧压力、抗拉强度、弯曲以及扭绞性能等，使用者最关心的是抗拉强度。

(1) 抗拉强度

光纤抗拉强度即光纤在静拉伸条件下的最大承载能力，如图 2-2 所示。光纤的抗拉强度很大程度上反映了光纤的制造水平。一般要求实用化的光纤的抗拉强度不小于 240 g 拉力。高质量的光纤必须在具有高清洁度的环境中制备，任何污染物接触了光纤预制棒或裸光纤表面，都会使光纤制成品的抗拉强度大为降低。

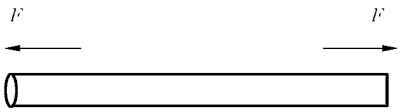


图 2-2 光纤的抗拉性

(2) 抗弯性

光纤抗弯性是指光纤抵抗弯曲不断裂的能力。抗拉强度好的光纤，其抗弯性也好，如图 2-3 所示。高质量的光纤无折断弯曲曲率半径小于 1～2 mm。为了加强光纤的机械特性，在预涂覆之后还要对光纤进行套塑并制成光缆，然后才能够在实际工程中应用。

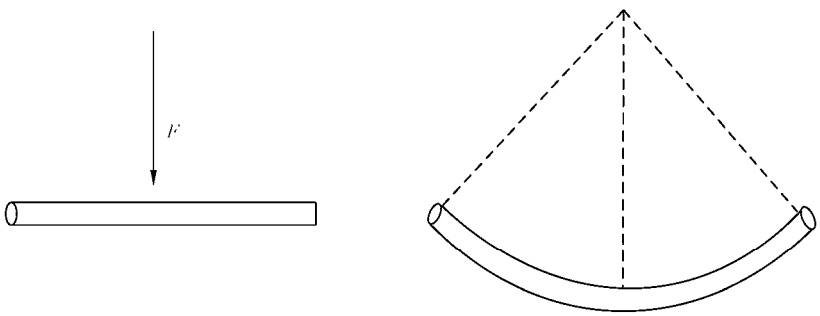


图 2-3 光纤的抗弯性

2.3 光纤的传输特性

光纤作为光通信的传输介质，从通信角度来看主要的光纤传输特性是衰减与色散。

2.3.1 衰减

光在光纤中传播时，将会有一部分能量转化成热能或者被光纤吸收，从而造成光强度不断减弱，这种现象称为衰减。当光纤的衰减大于一定程度时不能用于通信。一般光经光纤传输总是会衰减，平均光功率沿光纤长度方向呈指数规律减少，如表 2-1 所示。

表 2-1 各种工序后光纤衰减的变化

管套	光纤	衰减@850nm （dB/km）				
		光纤	二套	成缆	内护	外护
蓝	蓝	4.15	2.23	2.50	2.35	2.36
	橙	5.31	3.66	3.70	3.70	3.66
	绿	1.78	2.31	2.36	2.32	2.35
	棕	5.67	2.97	3.04	2.92	2.90
橙	蓝	4.06	2.49	2.54	2.48	2.48
	橙	4.47	3.07	3.08	3.16	3.17
	绿	4.59	2.32	2.61	2.63	2.60
	棕	5.12	2.99	3.24	2.83	2.81
绿	蓝	4.09	2.46	2.46	3.16	3.17
	橙	4.40	3.12	3.05	2.95	2.95
	绿	5.07	2.49	2.36	2.43	2.44
	棕	4.84	3.20	3.00	3.05	3.01
棕	蓝	5.56	2.52	2.41	2.63	2.64
	橙	4.47	3.12	3.15	3.10	3.18
	绿	5.08	2.36	2.59	2.46	2.58
	棕	4.95	3.05	3.36	3.20	3.20

光纤的传输损耗是光纤最重要的传输特性之一，如图 2-4 所示，它是限制光纤通信的传输距离和传输速率的重要因素之一，研究光纤的传输损耗并设法降低损耗是光纤通信中一个极其重要的问题。一段光纤的损耗由通过这段光纤的光功率损失来衡量，稳态条件下单位长度的光纤损耗称为衰减系数 α，通常把 α 定义为

$$\alpha = 10\lg(P_{in}/P_{out})/L \quad (\mathrm{dB/km}) \tag{2-1}$$

式中：P_{in}为入射光功率；P_{out}为传输后的输出光功率。

稳态是指没有空间过渡态，在光纤中只有传输导模的情况。更全面了解光纤的损耗应测量光纤的衰减(损耗)谱。由于光纤损耗与入射光的波长有关，早期石英光纤的损耗(20 世纪 70 年代)谱如图 2-5 所示。从图中可见石英光纤在 1 550 nm波长附近损耗最小，大约为 0.2 dB/km，1 310 nm 波长附近损耗也较小，这两个波长是石英光纤的通信窗口波长。

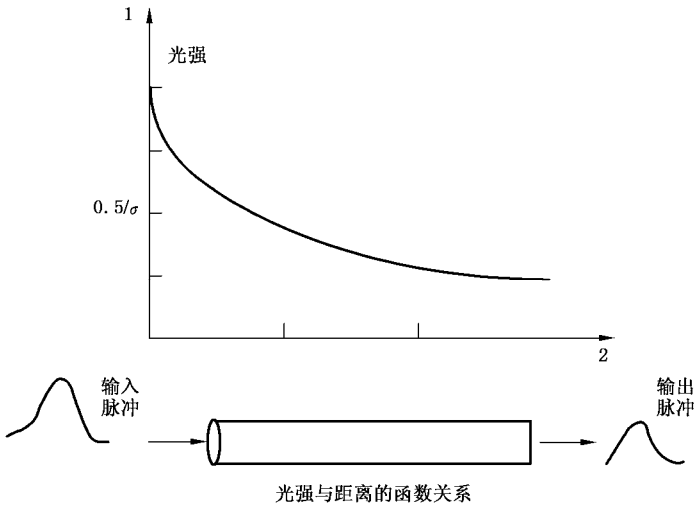


图 2-4　光纤的损耗

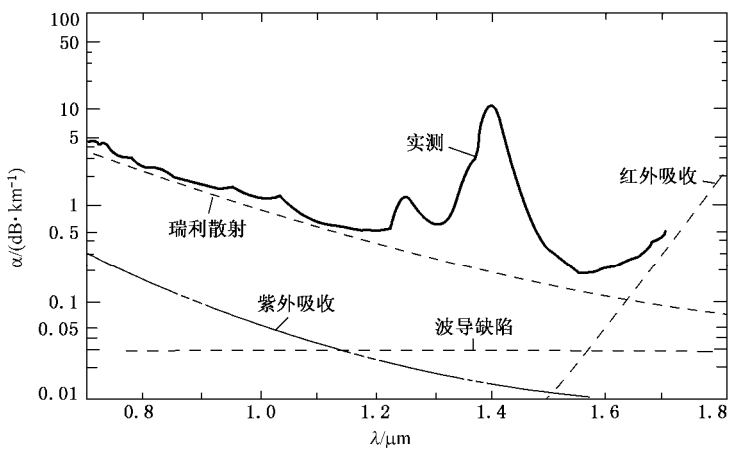


图 2-5　早期石英光纤的损耗图

产生光纤损耗的机制很复杂，主要与光纤材料本身的特性有关，其次制造工艺也影响光纤的损耗，影响损耗的制造工艺因素很多。从原理上讲光纤损耗主要有

吸收和辐射两大类。光与物质作用，一部分反射，一部分透射，一部分吸收。反射和透射能量仍是光。光在光纤中经过反射和吸收后，只有一部分光能到达终端，其余部分以光的形式辐射掉，或被吸收。被吸收的光转化为热和其他形式的能量，因此，能够导致产生辐射与吸收的因素都可能产生损耗。

2.3.2 色散

由于光纤中的信号是由不同频率成分和不同的模式成分来携带的，这些不同的频率成分和不同的模式成分的传输速度不同，从而引起色散(Dispersion)。色散小，脉冲展宽小。从而要求光纤有较小的色散，才可能以高速率传输信号或者说有较大的通信容量。另外，随着光纤通信的发展，光纤的偏振特性和非线性效应对光信号的传输也有较大的影响。

光脉冲在光纤中传输时，由于传输常数 β 是光频率 ω 的函数，当 $\frac{d^2\beta(\omega)}{d\omega^2}$ 与更高阶导数不为零时，意味着光信号的不同频率(或波长)具有不同的群延迟或群速度，这种群速度随光频率分量变化的现象称为群速度色散(Group Velocity Dispersion，GVD)，简称色散。

所谓色散是指入射到光纤的光脉冲经光纤传输以后，出射端光脉冲将发生时间展宽的这种现象。光纤色散按产生原因的不同，大致可分为三种，即模式色散、材料色散和波导色散。下面就此进行简略说明。

(1) 模式色散

在多模光纤中由于各传输模式的传输路径不同，各模式到达出射端的时间不同，从而引起光脉冲展宽，由此产生的色散称为模式色散，如图 2-6 所示。



图 2-6 模式色散

(2) 材料色散

光纤材料石英玻璃的折射率对不同的传输光波长有不同的值，包含有许多波长的太阳光通过棱镜以后可分成 7 种不同颜色就是一个证明，如图 2-7 所示。由于上述原因，材料折射率随光波长而变化从而引起脉冲展宽的现象称为材料色散。

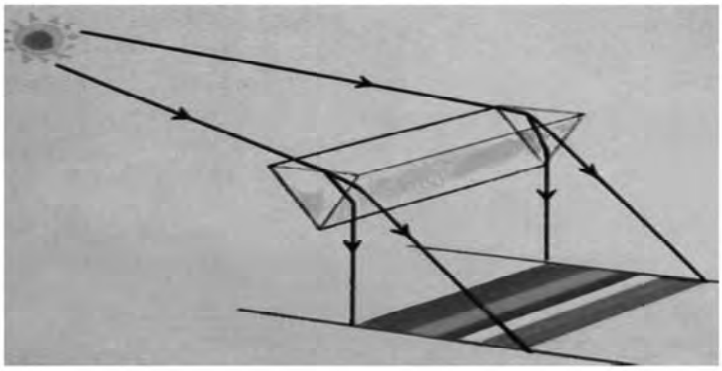


图 2-7　石英玻璃棱镜的折射色散

(3) 波导色散

由于光纤的纤芯与包层的折射率差别很小，因而在界面产生全反射现象时，有一部分光进入包层之内。由于出现在包层内的这部分光，大小与光波长有关，这就相当于光传输路径长度随光波波长的不同而异。具有一定波谱线宽的光源所发出的光脉冲射入光纤后，由于不同波长的光其传输路程不完全相同，所以到达光纤出射端的时间也不相同，从而使脉冲展宽，如图 2-8 所示。具体说入射光的波长越长，进入包层的光强比例就越大，传输路径距离越长。由上述原因所形成的脉冲展宽现象叫作波导色散。

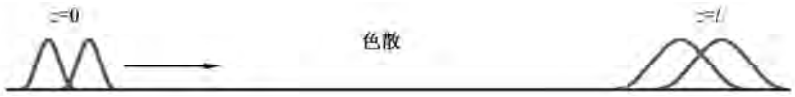


图 2-8　波导色散

材料色散和波导色散都与光波长有关，所以又统称为波长色散，如图 2-9 所示。模式色散仅在多模光纤中存在，在单模光纤中不产生模式色散，而只有材料色散和波导色散。通常各种色散的大小顺序是模式色散＞材料色散＞波导色散，因此多模光纤的传输带宽几乎仅由模式色散所制约。在单模光纤中由于没有模式色散，

所以它具有非常宽的带宽。色散的单位是指单位光源光谱宽度、单位光纤长度所对应的光脉冲的展宽(延时差)。

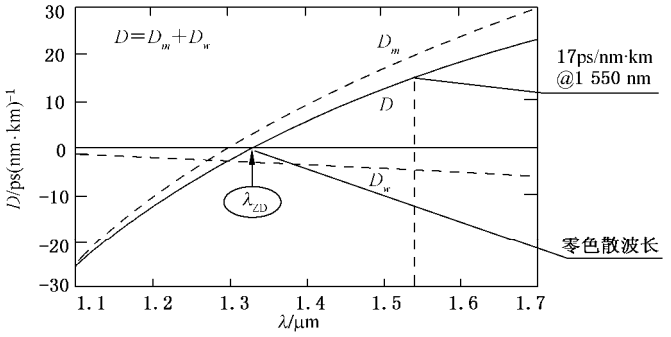


图 2-9　材料色散和波导色散随波长变化的关系

色散将导致光脉冲在光纤中传输时脉冲展宽,从而限制了光纤通信的信息传输速率,即通信容量。

在多模光纤中,由于存在多个模式,对于相同的光频率 ω,不同模式的传输常数 β 不同,因此群速度也必然不同,这种色散称为模式间色散。

对于单模光纤,由于只有基模,光脉冲中的不同频率成分具有不同的群延迟或群速度,这种色散要比模式间色散小很多,下面讨论这种色散。

$\Delta\tau$ 为时延差,即光波中群速度最慢与最快频率成分的传输时延差

$$\Delta\tau = L \cdot D \cdot \Delta\lambda \tag{2-2}$$

D 为色散系数,L 为光传输长度,$\Delta\lambda$ 为传输光的波长范围,单位 ps/(nm · km),D 与传输常数 β 之间的关系为

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2}\frac{\mathrm{d}^2\beta}{\mathrm{d}\omega^2} \tag{2-3}$$

根据光纤的模式理论,可以得到

$$D = D_m + D_w + D_p \tag{2-4}$$

式中:D_m 为材料色散;D_w 为波导色散;D_p 为折射率剖面色散。

其中材料色散和波导色散是比较大的,折射率剖面色散较小,通常可以忽略。石英单模光纤的色散曲线如图 2-10 所示,ZMD 是材料色散的色散零点,λ_0 是总色散零点波长,常规石英光纤 λ_0 约为 1 310 nm。

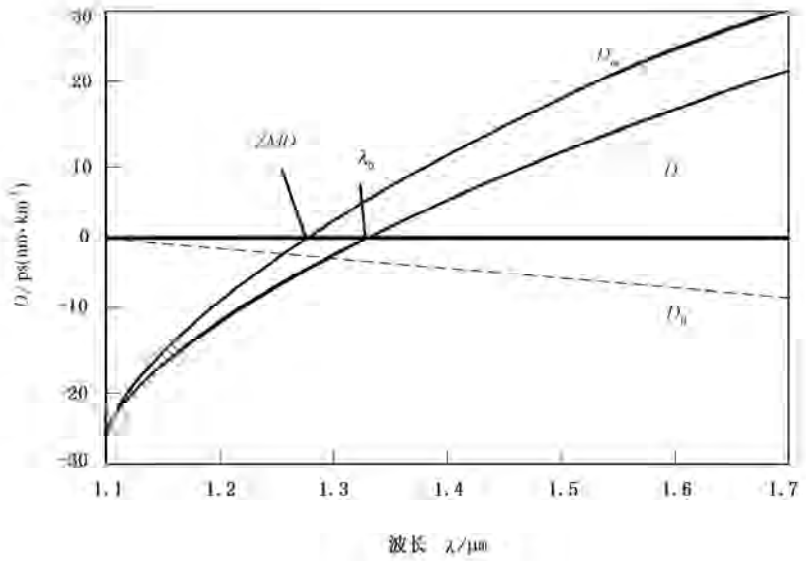


图 2-10　常规石英光纤的色散曲线

2.3.3　偏振特性

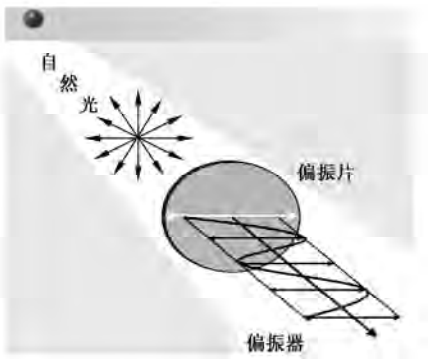


图 2-11　偏振现象

在光纤的横截面内，由于材料和几何形状的非圆对称性，都会导致双折射现象，即当一束线偏光（圆偏光也有类似定义）通过光纤时，其传输常数 β 随偏振方向改变的现象，如图 2-11 所示。

双折射现象对光通信的影响主要体现在产生偏振模色散（Polarzation Mode Dispersion，PMD），单模光纤在其基模工作时有两个正交的极化方向，每个方向代表一个偏振模。传播常数为 β_x 和 β_y，由于双折射，$\beta_x \neq \beta_y$，单位距离的时延分别为

$$\tau_x = \frac{\mathrm{d}\beta_x}{d\omega}$$

$$\tau_y = \frac{\mathrm{d}\beta_y}{\mathrm{d}\omega}$$

时延差 $\Delta\tau_p = \tau_x - \tau_y = \frac{\mathrm{d}}{\omega}(\beta_x - \beta_y) = \frac{\mathrm{d}\Delta\beta}{\mathrm{d}\omega}$，因为归一化双折射率 $B = \frac{\beta_x - \beta_y}{k} = \frac{\Delta\beta}{k}$，故 $\Delta\tau_p = \frac{\mathrm{d}(kB)}{\mathrm{d}\omega} = \frac{B}{c} + \frac{\omega}{c}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}\omega}$，对于石英光纤，第二项远小于第一项，因此

$$\Delta\tau_p \approx \frac{B}{c} = \frac{\Delta\beta}{\omega} = \frac{\Delta\beta}{2\pi f} \tag{2-5}$$

普通光纤 B 在 10^{-6} 数量级，$\Delta\tau_p \approx 3.3$ ps/nm·km。

2.3.4 非线性效应

通常在光场较弱的情况下，可以认为光纤的各种特征参量随光场强弱呈线性变化，这时光纤对光场来讲是一种线性媒质。但是在很强的光场作用下，光纤对光场就会呈现出另外一种情况，即光纤的各种特征参量会随光场强度呈非线性变化。光纤的非线性效应是指在强光场的作用下，光波信号和光纤介质相互作用的一种物理效应。它主要包括两类：一类是由于散射作用而产生的非线性效应，如受激拉曼散射及布里渊散射；另一类是由于光纤的折射指数随光强度变化而引起的非线性效应，如自相位调制、交叉相位调制以及四波混频等。如图 2-12 所示。

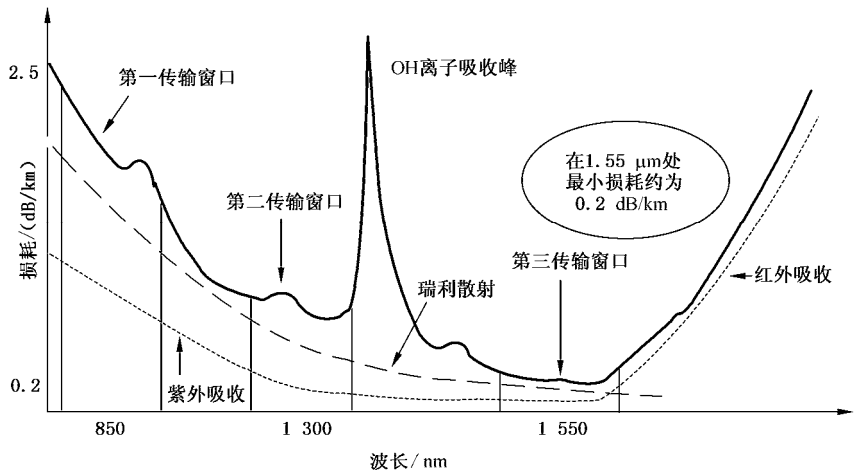


图 2-12 光纤的非线性效应

(1) 散射产生的非线性效应

由于光纤材料的缺陷，有可能使得光通过介质时发生散射。瑞利散射属于线性散射，即散射光的频率保持不变。但当输入光功率很强时，任何介质对光的响应都是非线性的，在此过程中，光场把部分能量转移给非线性介质，即在这种非线性散射过程中，光波和介质相互作用时要交换能量，使得光子能量减少。

1）受激拉曼散射(SRS)

拉曼散射是指光波在被散射后频率发生变化的现象。当强光信号输入光纤后，就会引发介质中分子振动，这些分子振动对入射光调制后就会产生新的光频，从而对入射光产生散射作用，这种现象称为受激拉曼散射，如图 2-13 所示。拉曼散射产生的散射光(斯托克斯波)强度与泵浦功率及光纤长度有关，因此可制成分布式拉曼散射激光器。

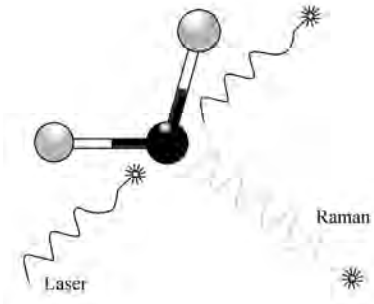


图 2-13　拉曼散射

2）受激布里渊散射(SBS)

布里渊散射是入射光波场与介质内弹性声波场相互作用而产生的一种光散射现象。受激布里渊散射和受激拉曼散射的物理过程相似，都是在散射过程中通过光波与介质相互作用，而发生能量交换，但本质上也存在差异。受激拉曼散射产生的斯托克斯波属于光频范畴，其波的方向与泵浦光方向一致。而受激布里渊散射所产生的斯托克斯波在声频范围，波的方向与泵浦波方向相反，即在光纤中只要达到受激布里渊散射的阈值，就会产生大量的向后传输的斯托克斯波，这将使信号功率降低，反馈回的斯托克斯波也会使激光器的工作不稳定，将对系统产生不良影响。但是，由于受激布里渊散射的阈值比受激拉曼散射的阈值低很多，可以利用其低阈值功率提高布里渊放大效果。

(2) 折射率变化产生的非线性效应

折射率随光场强度的变化引起的非线性变化，最重要的是自相位调制、交叉相位调制及四波混频。

1）自相位调制(SPM)

在强光场作用下，光纤的折射率出现非线性，这个非线性变化的折射率使得光纤中所传输光脉冲的前后沿的相位相对漂移，必导致所传光脉冲频谱发生变化。由信号分析理论可知，频谱的变化必然使得波形变化，从而使传输脉冲在波形上被压缩或者展宽。把光脉冲在传输过程中由于自身引起的相位变化而导致光脉冲频谱展宽的现象称为自相位调制，如图 2-14 所示。

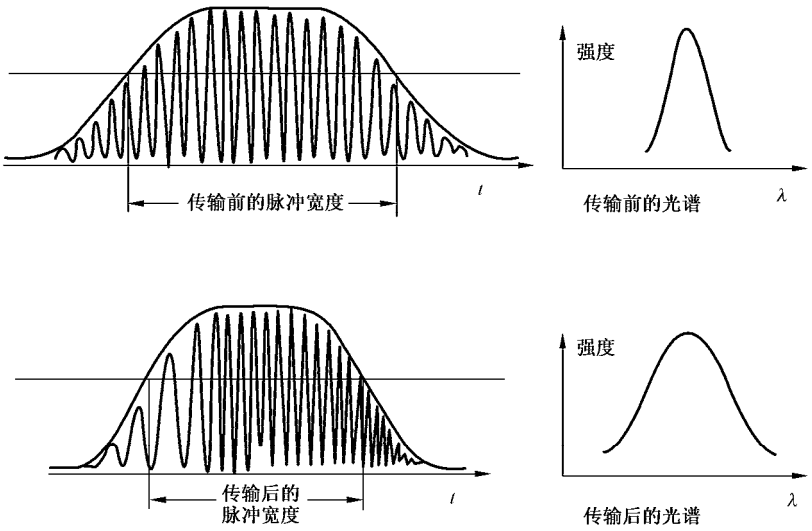


图 2-14　自相位调制

2）交叉相位调制(XPM)

当光纤中有两个或两个以上不同波长的光波同时传输时，由于非线性效应的存在，它们之间会相互作用，如图 2-15 所示。光纤中存在自相位调制，因此一个光波的幅度调制将引起其他光波的相位调制。这种由光纤中某一波长的光强对同时传输的另一个不同波长的光强所引起的非线性相移，称为交叉相位调制。由此可见，交叉相位调制与自相位调制总是相伴而生，而且光波的相位调制不仅与自身光强有关，还与同时传输的其他光波强度有关。交叉相位调制，可由不同频率光波引起，也可由不同偏振方向的光波引起。

3）四波混频(FWM)

当多个频率的光波以较大的功率在光纤中同时传输时，由于光纤中非线性效应的存在，光波之间会产生能量交换，如图 2-15 所示。设频率分布为 ω_1，ω_2，ω_3 的光波同时在光纤中传输，三阶电极化率将会引起频率为 $\omega_4=\omega_1\pm\omega_2\pm\omega_3$ 的光波出现，这种现象称之为四波混频。四波混频对系统的传输性能影响很大，特别是在 WDM 系统中，当信道间隔非常小时，可能有相当大的信道功率通过四波混频的参量过程转换到新的光场中去。这种能量的转换不仅导致信道功率衰减，而且会引起信道之间的干扰，降低系统的传输性能。

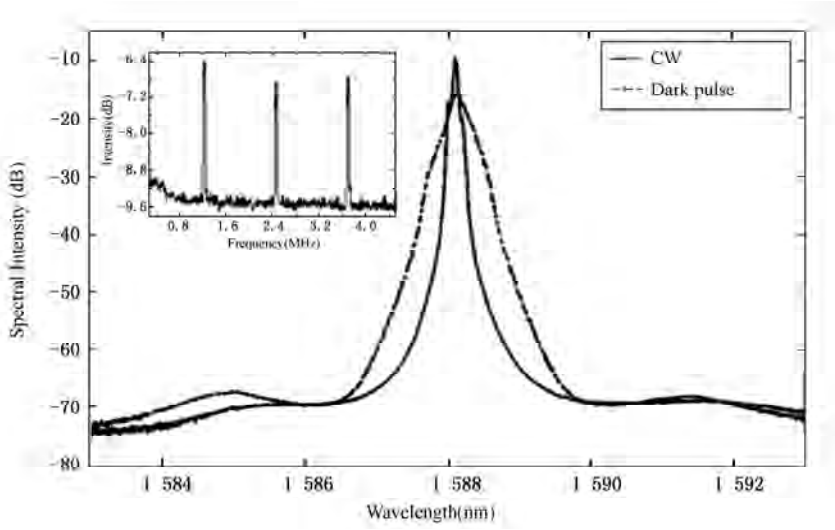


图 2-15　交叉相位调制、四波混频

2.4　光纤的光学特性

光纤的光学特性有折射率分布、最大理论数值孔径、模场直径及截止波长等。

(1) 光纤的折射率分布

依据对光纤色散的不同要求，光纤的折射率分布被设计成各种形式，如 1.3.3 节所述。

光能够被束缚在光纤芯中传输的必要条件是纤芯折射率大于包层的折射率。纤芯内折射率分布可以是均匀的或是渐变的，也可能有更复杂的分布。常见光纤的折射率分布 $n(r)$如图 2-16 所示。

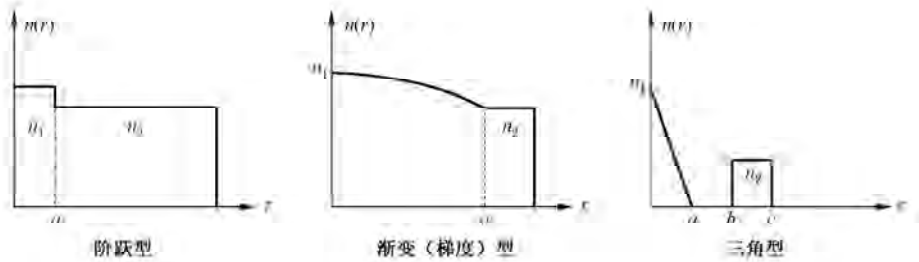
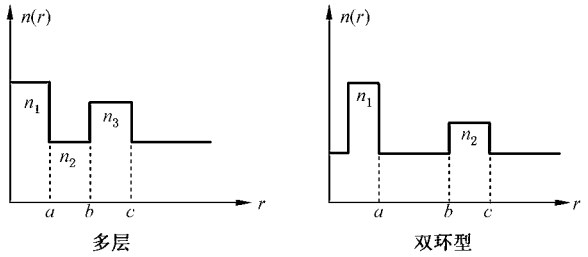


图 2-16　常见折射率分布



续图 2-16

(2) 光纤的数值孔径

在波导里,射线只有一种,即经过波导中心轴,在上下两个边界之间来回反射,其路径呈锯齿形。在光纤中,光线有两种,一种是始终处在一个平面里,经过波导的中心轴线,在芯与包层界面上作全反射,呈锯齿形,这种射线称为子午线,如图 2-17(a)所示。另一种光线不在同一平面里,不经过光纤的中心轴线,但仍在芯与包层的界面上作全反射,这种光线的范围是在边界面和焦散面之间,称为偏射线,如图 2-17(b)所示。

子午线是平面折线,偏射线是空间曲线。偏射线的极限是焦散面与芯包层界面重合,这时偏射线称为螺旋线,如图 2-17(c)所示。光纤端面外侧是另外一种介质,一般是空气,其折射率为 n_0,入射光线与光纤轴成 φ 角,根据折射率定律:

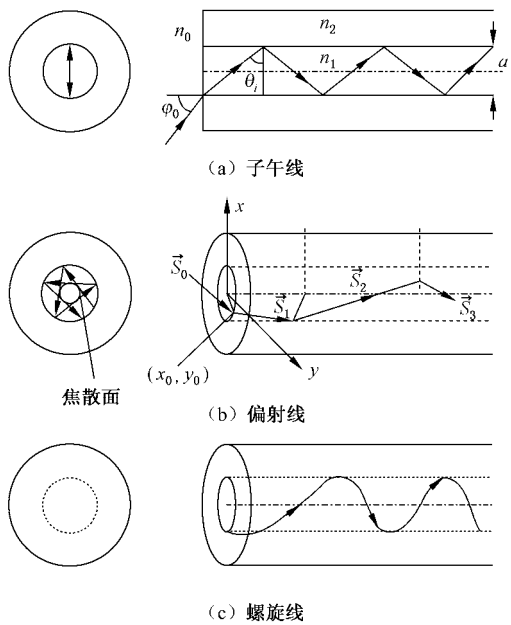


图 2-17　子午线和偏射线

$$n_0 = \sin\varphi = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_i\right) = n_1 \cos\theta_i \tag{2-6}$$

当入射角 $\sin\theta_c \frac{n_2}{n_1}$时，折射角为 90°，称 θ_c 为临界角。

只有当入射角 θ_i 大于临界角 θ_c 时，光线在波导内作全反射，才可以形成导波，因此$\theta_i > \theta_c$，即 $\sin\theta_i > n_2/n_1$。为了得到导波，光线的入射角 φ 必须满足

$$\sin\varphi = \frac{n_1 \cos\theta_1}{n_0} = \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\sin^2\theta_i} \leqslant \frac{n_1}{n_0}\sqrt{1-\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \tag{2-7}$$

即 $\sin\varphi \leqslant \sqrt{n_1^2 - n_2^2}/n_0$。

可以激发导波的入射光线的最大角度 φ_{max}的正弦值即为数值孔径 NA。一般情况下 $n_0 = 1$，则数值孔径为 $NA = \sin\varphi_{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$。此计算是依据子午线而进行的，偏射线需要修正。

数值孔径越大则入射光线越密，越易进入光纤形成导波。光纤的数值孔径是衡量光纤接收光功率能力的参数。多模标准光纤的数值孔径为 0.2；单模光纤的数值孔径为 0.1。数值孔径越大，光纤的收光能力就越强，光功率的入纤效率就越高。

(3) 模场半径与截止波长

单模光纤的模场半径是描述单模光纤中光能量集中程度的参量。模场直径越小，通过光纤横截面的能量密度就越大。理论上的截止波长是单模光纤中光信号能以单模方式传播的最小波长。截止波长条件可以保证在最短光缆长度上单模传输，并且可以抑制高次模的产生或将产生的高次模噪声功率减小到完全可以忽略的地步。