

第 3 章 光 纤

3.1 光纤概述

1. 光纤的结构和分类

光纤的典型结构是多层同轴圆柱体,如图 3-1-1 所示。光纤由纤芯和包层构成,为了增强光纤的机械强度,在裸光纤的外面加上涂覆层。

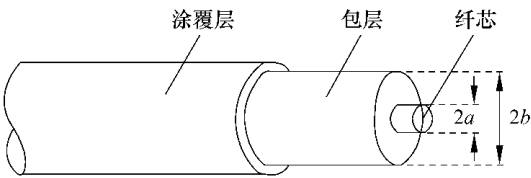


图 3-1-1 光纤结构

光纤的种类很多,从不同的角度,有不同的分类方法。通常人们可以按照传输模式、光纤材料和折射率分布来分类:

- 按照传输模式分类可分为单模光纤和多模光纤;
- 按照光纤材料分类可分为石英光纤、石英纤芯塑料包层光纤、塑料光纤等;
- 按照折射率分布来分类可分为阶跃型(突变折射率)光纤和渐变型光纤。

由于光纤在通信的重要性,建立国际标准是十分必要的。现在将国际电工委员会(IEC)和国际电信联盟电信标准化部(ITU-T)的有关建议汇总,参见表 3-1-1 和表 3-1-2,表中字母 A 表示多模光纤,字母 B 表示单模光纤。

表 3-1-1 单模光纤

国际电工委员会(IEC)代号	国际电信联盟—电信委员会(ITU-T)代号	名 称	材 料
B1.1	G. 652	普通型	二氧化硅
B1.2	G. 654	截止波长位移	
B2	G. 653	色散位移	
B3	—	色散平坦	
B4	G. 655	非零色散	

2. 光纤的导光原理

光纤按照折射率分布来分类可分为阶跃型光纤(SIF)和渐变型光纤(GIF)。阶跃型光

纤和渐变型光纤的导光原理不同,下面分别加以讨论。

按照光射线理论,光纤中的光射线可以分为子午射线和斜射线。过纤芯的轴线的平面称为子午面,在子午面的光线称为子午射线,不在子午面的光线称为斜射线。斜射线情况较为复杂,下面只对子午射线加以分析。

表 3-1-2 多模光纤

分类代号	折射率分布	纤芯直径/ μm	包层直径 μm	材 料
A1a	渐变折射率	50	125	二氧化硅
A1b	渐变折射率	62.5	125	
A1c	渐变折射率	85	125	
A1d	渐变折射率	100	140	
A2a	突变折射率	50	125	
A2b	突变折射率	85	125	
A2c	突变折射率	100	140	
A2d	突变折射率	200	250	
A3a	突变折射率	200	300	二氧化硅纤芯 塑料包层
A3b	突变折射率	200	300	
A4a	突变折射率	980~990	1000	塑料
A4b	突变折射率	730~740	750	
A4c	突变折射率	480~490	500	

1) 阶跃型光纤的导光原理

如果纤芯折射率 n_1 沿半径方向保持一定,包层折射率 n_2 沿半径方向也保持一定,而且纤芯和包层的折射率在边界处呈阶梯型变化的光纤,称为阶跃型光纤,也称为均匀光纤如图 3-1-2(a)所示。

纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 的相差程度可以用相对折射指数差 Δ 来表示

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (3-1-1)$$

对于阶跃型光纤,由于光纤的纤芯和包层是采用相同的基础材料 SiO_2 ,只不过分别掺入不同的杂质,折射率略有差别,而且差别极小,这种光纤称为弱导波光纤。弱导波光纤的相对折射指数差 Δ 可近似表示为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3-1-2)$$

石英光纤的相对折射指数差 Δ 近似为 0.01。

阶跃折射率光纤的导光原理比较简单,如图 3-1-3 所示。

按照光的全反射理论,如果光线满足 θ_1 大于临界角由式(3-1-3)确定的 θ_c ,将会在纤芯与包层界面上发生全反射,当全反射的光线再次入射到纤芯与包层的分界面时,又会再次发

生全反射而返回纤芯中传输形成导波;如果光线满足 θ_1 小于或等于临界角 θ_c ,那么这条光线将形成辐射模,不会在纤芯中传输形成导波。

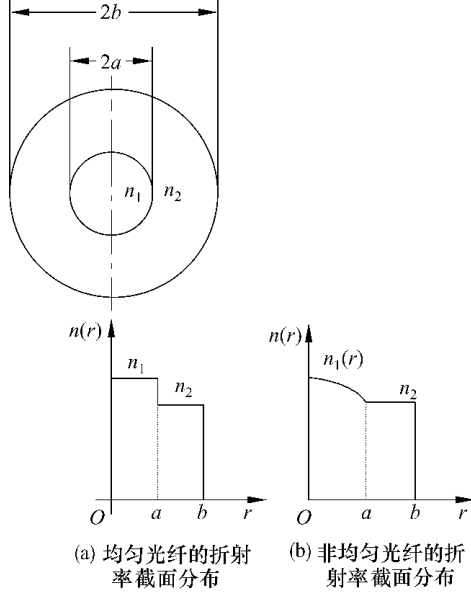


图 3-1-2 光纤的折射率截面分布

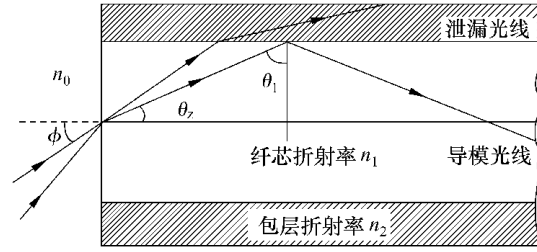


图 3-1-3 阶跃折射率光纤的导光原理

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (3-1-3)$$

由全反射条件 $\theta_1 > \theta_c$ 可得

$$\sin \theta_1 > \frac{n_2}{n_1} \quad (3-1-4)$$

在端面上,一条光线与光纤轴线成 ϕ 角入射到光纤中,由于光纤与空气界面的折射效应,光纤将会向轴线偏移,折射光线的角度 θ_z 由式(3-1-5)给出

$$\begin{aligned} n_0 \sin \phi &= n_1 \sin \theta_z \\ \theta_1 &= 90^\circ - \theta_z \end{aligned} \quad (3-1-5)$$

式中: n_1 、 n_0 分别为纤芯和空气折射率,空气折射率近似为 1。因此

$$\sin \phi = \frac{n_1}{n_0} \sin \theta_z = \frac{n_1}{n_0} \sin(90^\circ - \theta_1) = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_1 = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1}$$

则可得

$$\sin \phi \leq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3-1-6)$$

由上面分析可知,并不是由光源射出的全部光射线都能在纤芯中形成导波,光线与光纤轴线所成的角度 ϕ 满足式(3-1-6)角时入射到光纤中,才能在纤芯中传输形成导波。

光纤的数值孔径定义为表示光纤捕捉光射线能力的物理量,用 NA 表示。

$$NA = \sin \phi_{\max} \quad (3-1-7)$$

式中: $\phi_{\max}$ 是入射到光纤端面的光线被光纤捕捉而形成导波的最大角度,只要射入角小于 $\phi_{\max}$ 的所有射线均可被光纤所捕捉。数值孔径越大表示光纤捕捉射线的能力就越强。阶跃型光纤的数值孔径为常数,即

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3-1-8)$$

相对折射指数差 Δ 很小, 因此其数值孔径也不大, 约为 $0.1 \sim 0.3$ 。

2) 渐变型光纤的导光原理

如果纤芯折射率 n_1 随着半径加大而逐渐减小, 而包层中折射率 n_2 是均匀的, 这种光纤称为渐变型光纤, 又称为非均匀光纤, 它的折射率分布如图 3-1-2(b) 所示。

对于渐变型光纤, 相对折射指数差 Δ 一般以光纤的光轴点的折射率 $n(0)$ 和包层的折射率 $n(a)$ 的差别 Δ 来表示:

$$\Delta = \frac{n^2(0) - n^2(a)}{2n^2(0)} \quad (3-1-9)$$

对于渐变型光纤, 由于纤芯中各处的折射率不同, 因此各点的数值孔径也不相同。人们把射入点 r 处的数值孔径称为渐变型光纤的本地数值孔径用 $NA(r)$ 表示, 如式(3-1-10)。

$$NA = \sqrt{n^2(r) - n^2(a)} \quad (3-1-10)$$

采用渐变型折射率光纤的目的是为了降低模间色散, 其导光原理图如图 3-1-4 所示。

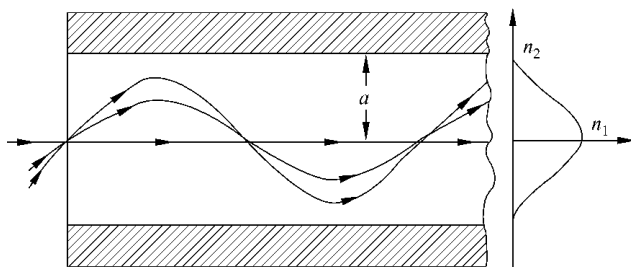


图 3-1-4 渐变型折射率光纤的导光原理

图 3-1-4 中给出了梯度折射率光纤中三条不同路径的光线沿光纤传播的情况, 与轴线夹角大的光线经过的路径要长一些, 然而它的折射率的较小, 光线速度沿轴向的传播速度较大; 而沿着轴线传播的光线尽管路径最短, 但传播速度却最慢。这样如果选择合适的折射率分布就有可能使所有光线同时到达光纤输出端。这样人们很容易理解为什么采用梯度折射率光纤可以降低模间色散。

3.2 阶跃型光纤的波动光学理论

1. 光纤传输光波的波动方程和求解方法

光波在阶跃型光纤中的传输满足麦克斯韦方程组。阶跃型光纤的内部是一个无源空间, 由麦克斯韦方程组可以推出对于时变电磁场随时间简谐规律变化时, 电场强度 E 和磁场强度 H 满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2 E = 0 \quad (3-2-1)$$

$$\nabla^2 H + k_0^2 n^2 H = 0 \quad (3-2-2)$$

式中: $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为自由空间的波数; n 为介质的折射率, 在纤芯中 $n = n_1$, 在包层中 $n = n_2$; ∇^2 为

拉普拉斯算符,在直角坐标系、球坐标系和圆柱坐标系中展开式有所不同。

在直角坐标系

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3-2-3)$$

在球坐标系

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \quad (3-2-4)$$

在圆柱坐标系

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3-2-5)$$

直接求解矢量的亥姆霍兹方程十分烦琐,得到的解也较为复杂,所以一般采用标量近似解法。阶跃型光纤中的纤芯和包层的折射率差很小,因而在纤芯和包层界面上发生全反射的临界角 θ_c 趋近 90° 。光线的入射角必须大于 θ_c 才能形成导波,即光纤中的光线几乎与光纤轴平行。这种波非常接近 TEM 波,其电磁场的轴向分量 E_z 和 H_z 非常小,而横向分量 E_t 和 H_t 则很强。设横向电场沿 y 轴偏振,即设横向场 E_t 用标量 E_y 表示,则它满足下面的标量波动方程

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n^2 E_y = 0 \quad (3-2-6)$$

将式(3-2-6)在圆柱坐标系中展开,得

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_y}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_y = 0 \quad (3-2-7)$$

式(3-2-7)为二阶三维偏微分方程,利用分离变量法求解 E_y ,设

$$E_y = AR(r)\Theta(\theta)Z(z) \quad (3-2-8)$$

式中: A 是常数, $R(r)$ 、 $\Theta(\theta)$ 、 $Z(z)$ 分别是坐标 r 、 θ 、 z 的函数。

然后分别求出 $R(r)$ 、 $\Theta(\theta)$ 、 $Z(z)$,得到横向场 E_y 的通解。再根据边界条件得到式(3-2-7)的标量近似解。

$$E_{y1} = A \frac{J_m \left(\frac{U}{a} r \right)}{J_m(U)} \cos m\theta \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (r \leq a) \quad (3-2-9)$$

$$E_{y2} = A \frac{K_m \left(\frac{W}{a} r \right)}{K_m(W)} \cos m\theta \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad (r \geq a) \quad (3-2-10)$$

式中: J_m ——第一类标准贝塞尔函数;

K_m ——第二类虚宗量贝塞尔函数;

β ——电磁波的相位常数;

$m=0,1,2,\dots$;

U 和 W 为解方程过程中引入的两个常数。

电磁场近似为 TEM 波,由电磁场的性质可得纤芯的磁场强度 H_{x1} 和包层的磁场强度 H_{x2} 。利用麦克斯韦方程组可以得到纤芯中纵向分量 E_{z1} 、 H_{z1} ,包层中纵向分量用 E_{z2} 、 H_{z2} 表示。这样光纤中的电磁场的场方程就都出来了。

2. 光纤的归一化频率和特征方程

在解方程(3-2-7)过程中已经引入的两个常数 U 和 W 的表达式分别为

$$U = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2} a \quad (3-2-11)$$

$$W = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2} a \quad (3-2-12)$$

U 称为导波的径向归一化相位常数,表明了光纤的纤芯中,导波沿半径 r 方向的场的分布规律。 W 称为导波的径向归一化衰减系数,表明了光纤的包纤中,场沿半径 r 方向的衰减规律。

由 U 和 W 可以得出两个重要的参量: 归一化传播常数 b 和归一化频率 V 。 b 和 V 定义为

$$V^2 = U^2 + W^2$$

$$b = \left(\frac{W}{V}\right)^2 = 1 - \left(\frac{U}{V}\right)^2$$

因此

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3-2-13)$$

$$b = \frac{\beta^2 / k_0^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (3-2-14)$$

对于弱导波光纤维:

$$b = \frac{\beta / k_0 - n_2}{n_1 - n_2} \quad (3-2-15)$$

$$V = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (3-2-16)$$

这两个常数由光纤的结构和波长决定。

人们需要确定导波传播的相位常数 β , 式(3-2-11)和式(3-2-12)是 U 、 W 和 β 的两个关系式, 还需要得到另外一个关系式, 它就是特征方程。

利用边界条件 $E_{z1} = E_{z2}$, 可以推出对于弱导波光纤维特征方程为

$$U \frac{J_{m+1}(U)}{J_m(U)} = W \frac{K_{m+1}(W)}{K_m(W)} \quad (3-2-17)$$

这个特征方程是一个超越方程, 通常用数值法求解即可以得到导波传播的相位常数 β , 进而分析其传输特性。

3. 阶跃型光纤中的线性偏振模式

在弱导波光纤维中传播的电磁波非常接近 TEM 波, 具有偏振方向保持不变的特性, 人们称为线性偏振模式, 也称为标量模, 用 LP_{mn} 表示。 m 取值为 $m=0, 1, 2, \dots$ 。 n 取值为 $n=1, 2, 3, \dots$ 。

不同的 m 和 n 的值, 则场的分布状况和传输特性都不同。当然不同的 m 和 n 的值, 对应着不同的模式。

图 3-2-1 给出几个低阶模的强度分布和可视图形, 可以很好地理解线性偏振模式。

线性偏振模式 LP_{mn} 中有的可以在光纤中传输, 有的则不能传输。不同结构的阶跃型光纤, 传输的 LP_{mn} 及数量都不相同。

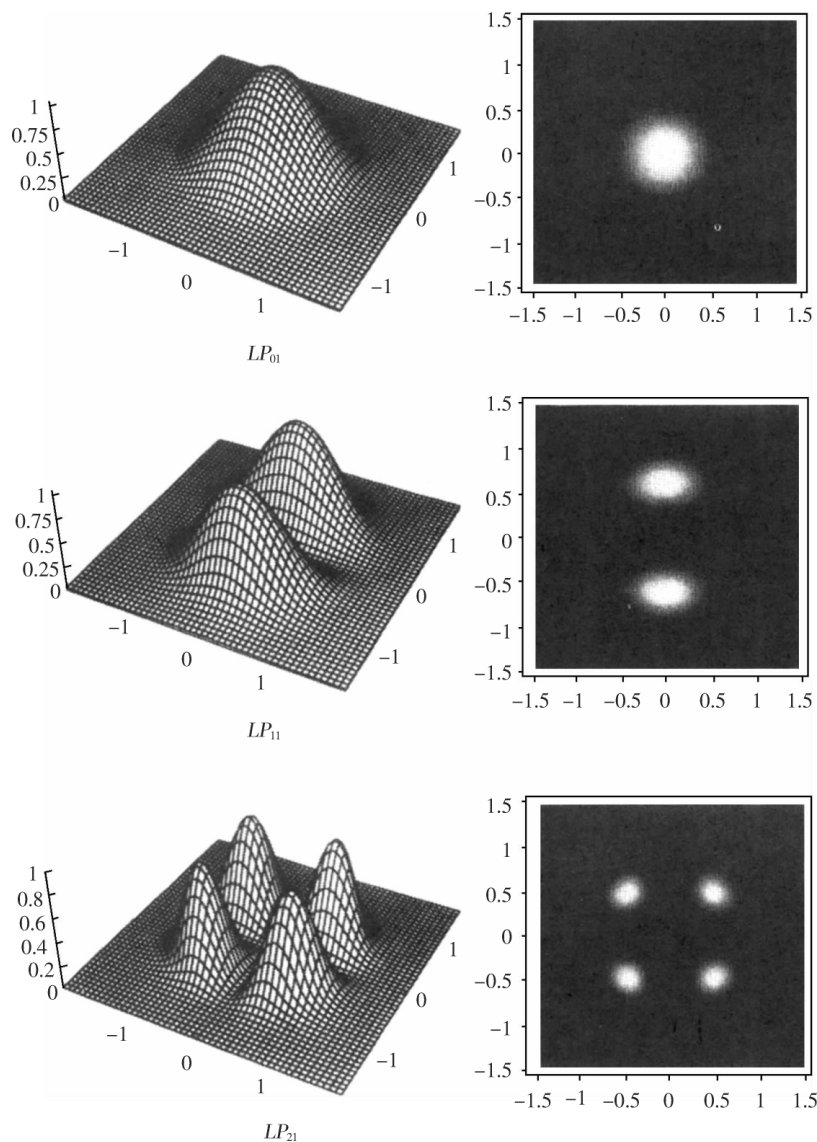


图 3-2-1 几个低阶模的强度分布和可视图形

特征方程通常用数值解法,从特征方程可以得出不同 V 值时的 U 、 W ,然后求出 β 。从线性偏振模式 LP_{mn} 传输特性的讨论,人们可以得出:如果光纤的归一化频率 V 满足 $0 < V < 2.405$ 时,只传导单一模式 LP_{01} 模, LP_{11} 以上的所有高阶模都处于截止状态,不能在光纤中传输,这种光纤称为单模光纤。满足的条件为

$$0 < V < 2.405 \quad (3-2-18)$$

称为单模传输条件。

由式(3-2-16)可知,对于单模光纤,纤芯直径 $2a$ 很小。

而对于多模阶跃型光纤,则归一化频率 V 很大,传导的模式很多,因此纤芯直径 $2a$ 很大,这可以从表 3-1-2 看出。

3.3 渐变型光纤的理论分析

1. 渐变型光纤的最佳折射指数分布

光功率以脉冲形式注入光纤后,将分布在光纤内所有模式之中,而不同模式沿着不同轨迹传输。每个模式的轴向传输速度不同,于是它们在相同的光纤长度上,到达某一点所需要的时间不同,从而使得沿光纤行进的脉冲在时间上展宽,这种色散称为模式色散。

多模阶跃型光纤的模式色散,需要人们在光纤的结构上加以改进,设计了多模渐变型光纤。

从渐变型光纤的导光原理可知:只要 $n(r)$ 合适,那么不同模式的光线就会具有相同的轴向速度。即具有不同条件的子午射线,从同一地点出发,达到相同的终端。利用渐变型光纤 n 随 r 变化的特点,可以减小模式色散。这种现象称为光纤的自聚焦现象,相应的折射指数分布称为最佳折射指数分布。

那么渐变型光纤的最佳折射指数分布是什么呢?

应用渐变型光纤的子午光线的轨迹方程可以证明为: $n(r)$ 为双曲正割分布,可以实现光纤自聚焦现象。通常折射指数选取平方律型分布形式

$$n(r) = n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3-3-1)$$

式中: $\Delta = \frac{n^2(0) - n^2(a)}{2n^2(0)}$;

$n(0)$ ——光纤轴线处($r=0$)的折射率;

a ——纤芯半径。

式(3-3-1)即为渐变型光纤的最佳折射指数分布。

2. 渐变型光纤的标量近似解法

渐变型的场分布和传输特性是怎样的? 这需要利用光的电磁理论来求解。把渐变型光纤的最佳折射指数分布式(3-3-1)代入到标量的亥姆霍兹方程中,得

$$\nabla^2 E_y + k_0^2 n^2(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] E_y = 0 \quad (3-3-2)$$

取直角坐标系,采用分离变量法求解可得

$$E_y = A_{mn} e^{-\frac{r^2}{2S_0^2}} H_m \left(\frac{x}{S_0} \right) H_n \left(\frac{y}{S_0} \right) e^{j(\omega t - \beta_{mn} z)} \quad (3-3-3)$$

式中: $H_m \left(\frac{x}{S_0} \right), H_n \left(\frac{y}{S_0} \right)$ ——两个厄米特多项式;

m, n ——整数;

$m=0, 1, 2, \dots$;

$n=0, 1, 2, \dots$;

A_{mn} ——与 m, n 有关的常数;

β_{mn} ——沿 z 轴传播的相位常数。

式(3-3-3)表明:

- (1) 场随 r 增加而迅速减小;
- (2) 场是振荡型的, 随 m, n 而不同。

渐变型光纤的标量模也用 LP_{mn} 表示。 $m=0, n=0$ 为基模 LP_{00} 。基模 LP_{00} 的场的表达式为

$$E_y = A_{00} e^{-\frac{r^2}{2S_0^2}} e^{i(\omega t - \beta_{00} z)} \quad (3-3-4)$$

LP_{00} 模的场分布如图 3-3-1 所示, 当 $r=S_0$ 时, 场减小为最大值的 $1/\sqrt{e}$ 。因此把 S_0 称为 LP_{00} 模的模斑半径。

可以得出传输常数 β_{mn} 的表达式为

$$\beta_{mn} = k_0 n(0) \left[1 - \frac{2\sqrt{2\Delta}}{k_0 n(0)a} (m+n+1) \right]^{1/2} \quad (3-3-5)$$

式(3-3-5)说明如果 $p=m+n$ 相同, 则 β_{mn} 相同。 p 相同的所有模式构成模式群, 同一个模式群, β_{mn} 相同, 或者说这些模以相同的速度传输。

渐变型光纤中传输的模数量也与归一化频率 V 有关。 V 越大, 传输的模数量 M 越大。平方律型折射指数分布光纤中模数量 M 近似为

$$M = \frac{V^2}{4} \quad (3-3-6)$$

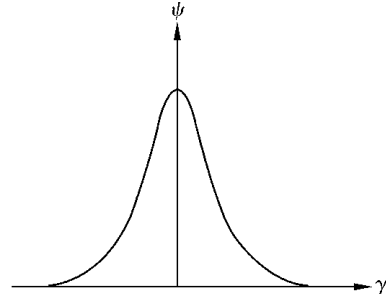


图 3-3-1 LP_{00} 模场分布

3.4 单模光纤

单模光纤是在给定的工作波长上, 只传输单一基模的光纤。在单模光纤中不存在模间色散, 因此它具有相当宽的传输频带, 适用于长距离、大容量的传输。本节对单模光纤的折射率分布、截止波长、模场直径和偏振特性等方面进行讨论。

1. 单模光纤的折射率分布

实际的单模光纤是折射率分布随半径变化的非均匀光纤。折射率分布的非均匀性有两种情况:

- (1) 由于纤芯材料和包层材料不同, 在制造过程中, 相互向对方扩散, 渗透, 使得在纤芯和包层的交界 $r=a$ 处, 折射率由 n_1 逐渐变化到 n_2 , 呈“圆形”变化。如图 3-4-1(b)所示, 其折射率分布可表示为

$$n(r) = n_2 \{ 1 + 2\Delta [1 - (r/a)^\alpha] \}^{1/2} \quad (3-4-1)$$

式中: α 为 $2 \sim \infty$, 它对于 LP_{11} 的截止的归一化频率 V_c 有一定影响。 Δ 为单模光纤相对折射指数差。

$$V_c(LP_{11}) \approx 2.405 \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)^{1/2} \quad (3-4-2)$$

(2) 由于在预制棒制作过程中,形成纤芯 $r=0$ 处,折射指数下陷,这就是通常所说的 MCVD 制造工艺所引起的一种典型缺陷。这种情况对于 LP_{11} 的截止的归一化频率 V_c 影响较小。

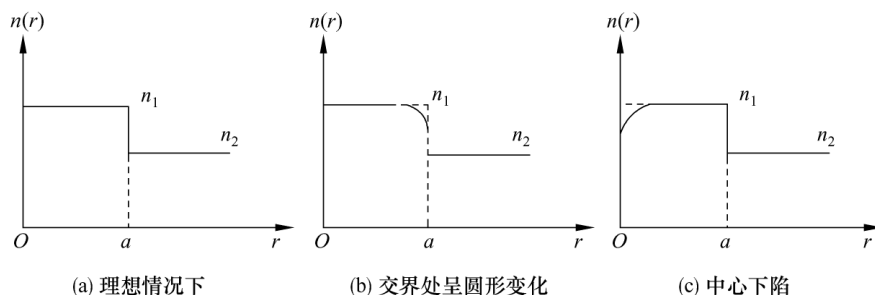


图 3-4-1 阶跃型单模光纤折射率分布

为了使材料色散和波导色散相互抵消,使光纤在某一低损耗窗口工作时色散达到最小,折射率分布可以采用下凹型。下凹型单模光纤的折射率分布如图 3-4-2 所示,在纤芯和包层之间设立一折射率比包层折射率还低的中间层,或称为内包层,采用这种结构形式,是为了减小单模光纤的色散。

2. 单模的截止波长 λ_c

在单模光纤中基模 LP_{01} 可以传输,忽略折射率分布的非均匀性的影响,把 $m=0, n=1$ 代入式 (3-2-9) 和式 (3-2-10) 中,就可以得到基模 LP_{01} 场的各个分量和基模 LP_{01} 的特征方程,在此不详细给出。

如前所述单模传输条件为 $0 < V < 2.405$ 。它是基模 LP_{01} 可以传输,第一高阶模 LP_{11} 处于截止状态的条件。考虑折射率分布的非均匀性对它的截止归一化频率 V_c 影响,需要做如下修正

$$0 < V < V_c(LP_{11}) \quad (3-4-3)$$

截止波长 λ_c 指的是 LP_{11} 模的截止波长,由式 (3-2-16) 可知

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (3-4-4)$$

3. 模场直径

制造商经常使用模场直径(MFD)来描述单模光纤的光学特性,是衡量光纤横截面上一定场强范围的物理量。

从理论上讲,单模光纤的基模 LP_{01} 的横向场分布如图 3-4-3 所示,非常接近高斯函数:

$$E(r) = E(0) \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \quad (3-4-5)$$

在 $1.2 < V < 2.8$ 范围内有

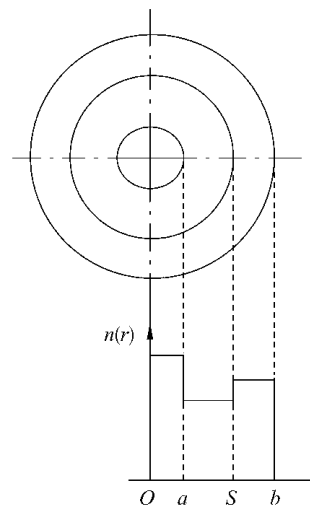


图 3-4-2 下凹型单模光纤的折射率分布

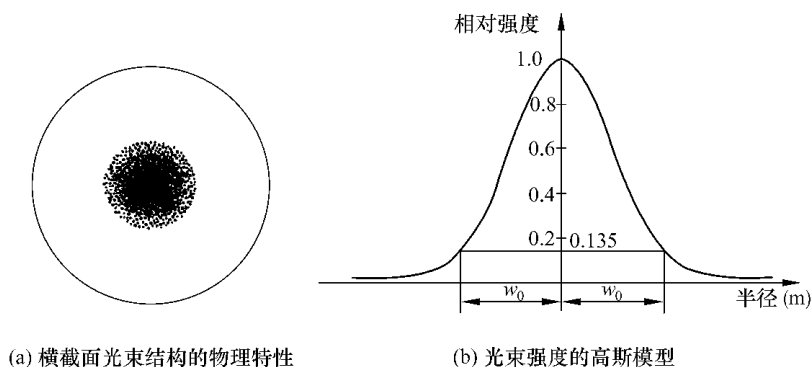


图 3-4-3 高斯光束

$$\frac{w_0}{a} = 0.65 + 1.62V^{-1.5} + 2.88V^{-6} \quad (3-4-6)$$

用式(3-4-6)计算的高斯函数模场半径 w_0 与实际分布相差很小,在 1% 以内。因此可以用高斯函数模场半径 w_0 来描述光纤横截面上一定场强范围,即定义纤芯中场分布曲线最大值的 $1/e$ 处所对应的宽度为模场直径。

单模光纤纤芯直径与 MFD 有所不同如图 3-4-4 所示,纤芯直径为 $8.3 \mu\text{m}$,而 MFD 通常为 $9.3 \mu\text{m}$ 。

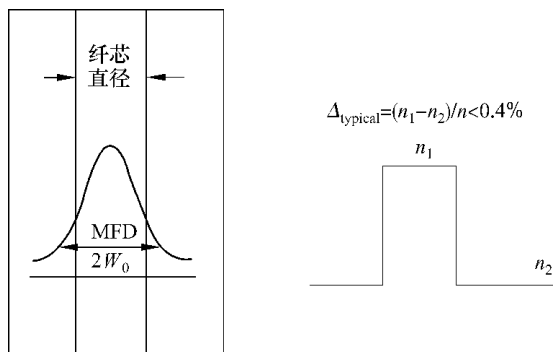


图 3-4-4 单模光纤中光束强度的分布

4. 偏振特性

在单模光纤传输的基模 LP_{01} 实际上是相互垂直的两个模式 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y ,在理想的轴对称单模光纤中,这两个模式相互简并,即具有相同的传播常数 β 。但是实际的光纤,它的形状不可能是理想的轴对称分布,折射率和应力分布的不均匀性,将会导致两个模式 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y 的简并性受到破坏,两个模式的传输相位常数 β_x 和 β_y 不同。

那么光场沿光纤传输时会发生什么现象呢?

这将会导致光场沿光纤传输时,偏振状态不断发生变化,如图 3-4-5 所示,线偏振状态→椭圆偏振状态→圆偏振状态→椭圆偏振状态→线偏振状态。这种现象也称为单模光纤的双折射效应。

人们把偏振状态变化一个周期所对应的传输长度称为拍长

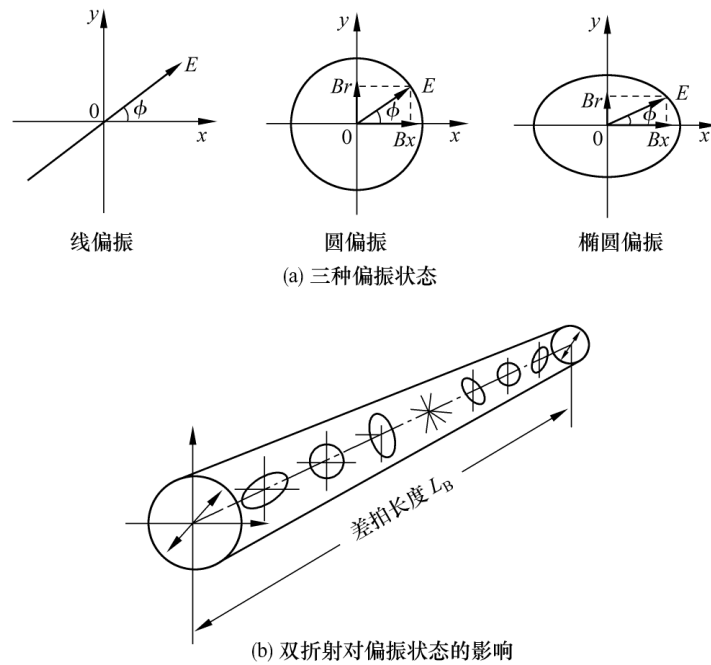


图 3-4-5 单模光纤的双折射效应

$$L_b = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{n_x - n_y} \quad (3-4-7)$$

式中： $\Delta\beta$ ——两个模式的传输相位常数 β_x 和 β_y 之差；

n_x 、 n_y ——两个模式的等效折射率。

单模光纤的双折射效应使模场偏振态在传输过程中发生变化,在相干光纤传输系统中,信号光与本振光的偏振态要保持一致,传输来的信号光偏振态变化会导致检测电平的变化,产生所谓偏振噪声。在采用集成光路的接收机中,对偏振态有选择性,也产生偏振噪声。

在常规单模光纤传输系统中,双折射效应产生偏振色散。偏振色散与两个模式的传输相位常数 β_x 和 β_y 之差 $\Delta\beta$ 成正比。普通单模光纤的双折射相对而言并不十分严重,它所引起的偏振色散的影响一般不大,但对大容量的1550 nm零色散单模光纤系统来说,它可能成为唯一的色散源。

为了实现单一偏振光的传输,人们制造了保偏光纤,它包括低双折射及高双折射两种。低双折射保偏光纤是通过改进制造工艺达到尽量高的圆度、在结构材料及工艺上消除光纤内的残余应力,从而获得非常小的双折射。

高双折射保偏光纤是对光纤的结构进行特殊设计,光纤的纤芯仍为圆形,但在紧靠纤芯的包层采用特殊结构如图3-4-6所示,使两个基本模的传播常数相差很大,这样光纤中只有

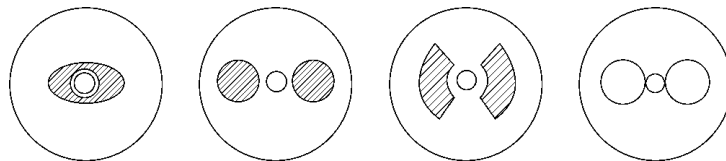


图 3-4-6 几种保偏光纤的横截面

一个模式处于主导地位,实现较长传输距离上偏振态基本不变。

3.5 光纤的损耗特性

1. 衰减系数

光功率的损耗是光纤的一个重要传输参量,是光纤传输系统中继距离的主要限制因素之一。光纤内光功率的衰减规律为

$$\frac{dp}{dz} = -\alpha p \quad (3-5-1)$$

式中: α 为衰减系数,它是由各种因素造成的功率损耗引起的。

对式(3-4-4)进行积分得

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha L} \quad (3-5-2)$$

式中: $P(0)$ 为输入端光功率; $P(L)$ 为传输到 L 处的光功率。

通常衰减系数 α 用单位长度光纤引起光功率衰减的分贝来表示,单位为 dB/km。定义为

$$\alpha = -\frac{10}{L} \lg \frac{P(L)}{P(0)} \quad (3-5-3)$$

衰减系数损耗是光纤的一个重要传输参量,是光纤传输系统中继距离的主要限制因素之一。

2. 光纤损耗特性

光纤损耗特性与光纤的材料有关,图 3-5-1 为石英光纤的损耗谱特性。由石英光纤的损耗谱曲线自然地显示光纤通信系统的三个低损耗窗口:

- (1) 第一低损耗窗口短波长 $0.85 \mu\text{m}$ 附近;
- (2) 第二低损耗窗口长波长 $1.31 \mu\text{m}$ 附近;

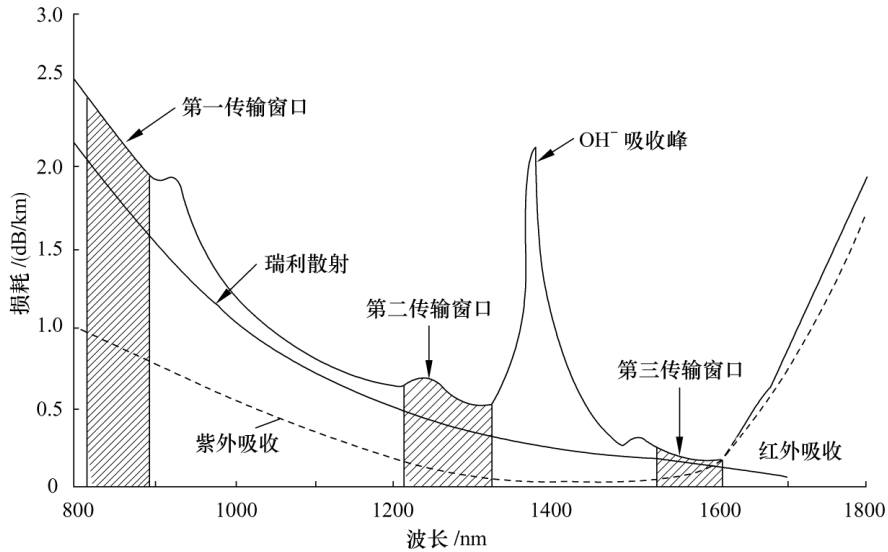


图 3-5-1 石英光纤的损耗谱特性

(3) 第三低损耗窗口长波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近。

对于单模光纤,实验曲线上的损耗值为:在 $0.85\ \mu\text{m}$ 时约为 $2.5\ \text{dB/km}$;在 $1.31\ \mu\text{m}$ 时约为 $0.4\ \text{dB/km}$;在 $1.55\ \mu\text{m}$ 时仅为 $0.2\ \text{dB/km}$,已接近理论值(理论极限为 $0.15\ \text{dB/km}$)。

3. 光纤损耗特性的分析

为了减小光纤的损耗,人们对引起光纤损耗的原因加以分析。引起光纤损耗的原因很多,第一种因素与光纤材料有关,主要有吸收损耗和散射损耗;第二种因素与光纤的几何形状有关,光纤使用过程中,弯曲不可避免,在弯曲到一定的曲率半径时,就会产生辐射损耗。

1) 吸收损耗

光纤材料的吸收损耗主要包括本征吸收损耗、杂质吸收损耗和原子缺陷吸收损耗。

(1) 本征吸收损耗是构成光纤的石英材料本身所固有的,主要有两种基本吸收方式:紫外吸收和红外吸收。

紫外吸收是光纤材料组成的原子系统中,一些处于低能级的电子会吸收光波能量而跃迁到高能级状态,这种吸收的中心波长在紫外的 $0.16\ \mu\text{m}$ 处,吸收峰很强,其尾巴延伸到光纤通信波段。在长波长区则小得多,约 $0.05\ \text{dB/km}$ 。

红外吸收是石英材料的 Si-O 键因振动吸收能量,造成损耗,产生波长为 $9.1\ \mu\text{m}$ 、 $12.5\ \mu\text{m}$ 和 $21\ \mu\text{m}$ 的三个谐振吸收峰,其吸收拖尾延伸至 $1.5\sim 1.7\ \mu\text{m}$,形成石英系光纤工作波长的工作上限。

(2) 杂质吸收损耗:光纤中的有害杂质很多,主要有过渡金属离子和 OH 离子两大类。

光纤材料中的金属杂质,如 V、Cr、Mn、Fe、Ni、Co 等,它们的电子结构产生 $0.5\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 的边带吸收峰($0.5\sim 1.1\ \mu\text{m}$)而造成损耗。现在由于工艺的改进,可以减小金属杂质浓度至最小程度,因此它们的影响已经很小。

OH 离子吸收损耗,在石英光纤中,O—H 键的基本谐振波长为 $2.73\ \mu\text{m}$,与 Si—O 键的谐振相互影响,在光纤的传输频带内产生一系列的吸收峰,影响较大的是在 $1.39\ \mu\text{m}$ 、 $1.24\ \mu\text{m}$ 及 $0.95\ \mu\text{m}$ 波长上,在峰之间的低损耗区构成了光纤通信的三个窗口。

(3) 原子缺陷吸收损耗是光纤材料的某个共价键断裂而产生原子缺陷,而吸收光能引起损耗,其吸收峰波长约 $0.63\ \mu\text{m}$,选择合适的制作工艺,这种因素的影响也可以减至最小。

2) 散射损耗

光纤散射是由于光纤中介质的不均匀性而使光向各个方向散开的现象,光纤散射会使一部分光功率辐射到光纤外面而造成损耗。光纤散射损耗包括线性散射损耗和非线性散射损耗两大类。

(1) 线性散射损耗主要有瑞利散射损耗和波导散射损耗:

瑞利散射损耗。光纤在加热制造过程中,热扰动使原子产生压缩性的不均匀,造成材料密度不均匀,进一步造成折射率不均匀。这种不均匀性在冷却过程中固定了下来并引起光的散射,称为瑞利散射。这正像大气中的尘粒散射了光,使天空变蓝一样。瑞利散射的大小与光波长的四次方成反比。因此对短波长窗口的影响较大。

波导散射损耗。当光纤的纤芯直径沿轴向不均匀时,产生导模和辐射模间的耦合,能量从导模转移到辐射模,从而形成附加的波导散射损耗。但目前的光纤制造水平,这项损耗已

降到 0.01~0.05 dB/km 范围之内。

(2) 非线性散射损耗,当光纤中传输的光强大到一定程度时,就会产生非线性受激喇曼散射和受激布里渊散射,使输入光能部分转移到新的频率分量上。在常规光纤通信系统中,半导体激光器发射的光功率较弱,因此这项损耗很小。但是采用掺铒光纤放大器(EDFA)时,非线性散射损耗就不能忽略了。

3) 弯曲损耗

当理想的圆柱形光纤受到某种外力作用时,会产生一定曲率半径的弯曲,导致能量泄漏到包层,这种由能量泄漏导致的损耗称为辐射损耗。光纤受力弯曲有两类:宏弯和微弯。

(1) 宏弯是曲率半径比光纤直径大得多的弯曲,例如,当光缆拐弯时就会发生这样的弯曲。一般情况下弯曲半径大于 5 mm 时,宏弯损耗可以忽略;但是弯曲半径在 5 mm 以下减小时,宏弯损耗会极大地增加,所以应该避免这种情况。

(2) 微弯是光纤成缆时由于涂覆材料而产生的随机性扭曲,微弯引起的附加损耗一般很小,基本上观测不到。但是当温度低到 50~60℃时,微弯损耗加大。

根据如上分析如果进一步减小光纤的损耗有如下方案:

- 全波光纤,也称无水光纤,进一步减小 OH^- 的浓度,这样 OH^- 吸收损耗就会减小,1.39 μm 的吸收峰极大地降低,从 1100~1600 nm 都会损耗较小,为波分复用提供广阔的空间。

- 新材料光纤,有一种新的氟化锆(ZrF_4)光纤,在 $\lambda=2.55 \mu\text{m}$ 附近具有极低的本征材料吸收损耗约 0.01 dB/km,比石英光纤低一个数量级,具有诱人的应用潜力。另一种硫化物多晶光纤在 $\lambda=10 \mu\text{m}$ 附近的红外区亦具有很低的损耗,理论上预示这类光纤的最低损耗将小于 10^{-3} dB/km。

3.6 光纤的色散特性

1. 光纤色散的概念和种类

光信号在光纤中传输时不仅由于光纤损耗而使光功率变小,波形也会变得越来越失真。光信号通过光纤传播期间,波形在时间上发生展宽的现象称为光纤色散。

光纤色散使输入的光信号在光纤传输过程中展宽到一定程度,就会产生码间干扰,增加误码率,从而限制了通信容量。

引起光纤色散的原因很多,主要有:

(1) 模式色散——也称为模间色散,在多模光纤中光信号是由很多模式携带的,不同的模式传输的相位常数不同,而引起的色散。

(2) 材料色散——由于材料折射率随光波长非线性变化引起的色散。

(3) 波导色散——由于光波导的结构(即光纤结构)而引起的色散,这种色散在无限大介质应该说不存在的,但是光信号被限制在光纤中传输,光纤的纤芯和包层的折射率不同,必然会导致色散。

(4) 偏振模色散——单模光纤传输的基模 LP_{01} 实际上是相互垂直的两个模式 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y ,这两个模式的传输相位常数 β_x 和 β_y 不同,而引起的色散。

(5) 高级色散——它是由色散斜率而引起的一种色散。

色散的程度在时域用脉冲展宽 $\Delta\tau$ 来描述,脉冲展宽 $\Delta\tau$ 也就是信号最先到达和最后到达的时延差,脉冲展宽 $\Delta\tau$ 越大,色散就越严重。 $\Delta\tau$ 如果很大,就会产生码间干扰,整个光纤通信系统就不能正常的工作。因此对光纤色散的分析与研究是十分重要的。

色散的程度在频域可以用带宽来描述,二者的关系通过推导可得

$$B = \frac{441}{\Delta\tau} \quad (3-6-1)$$

式中: $\Delta\tau$ 为脉冲展宽,单位为 ps; B 为 3 dB 光带宽(FWHM),单位为 GHz。

2. 多模光纤的模式色散

1) 多模阶跃型光纤的模式色散

多模阶跃型光纤的模式色散是指在多模阶跃型光纤中不同模式群速不同而引起的色散,可以用光纤中传输的最高模式与最低模式之间的时延差来表示。

下面导出多模阶跃型光纤时延差的表达式,图 3-6-1 画出了多模阶跃型光纤的两条不同的子午线,它代表差别最大的两种模式的传输路径。

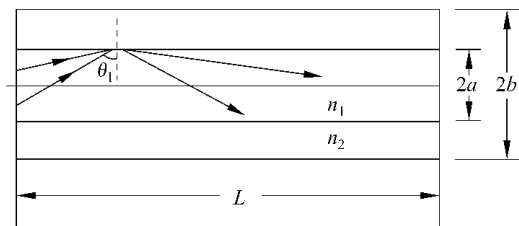


图 3-6-1 多模阶跃型光纤的模式色散

光射线形成导波的条件是 $90^\circ > \theta_1 > \theta_c$, 当 $\theta_1 = 90^\circ$ 时,射线与光纤轴线平行,此时轴向速度最快,在长度为 L 的光纤上传输时所用的时间 τ_0 最短

$$\tau_0 = \frac{L}{v_1} = \frac{L}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \quad (3-6-2)$$

当 $\theta_1 = \theta_c$ 时,射线倾斜得最陡,此时轴向速度最慢,在长度为 L 的光纤上传输时,所用的时间最长,计算式为

$$\tau_c = \frac{L}{v_1 \sin \theta_c} = \frac{L}{\frac{c}{n_2} \frac{n_2}{n_1}} = \frac{Ln_1^2}{cn_2} \quad (3-6-3)$$

这两条射线的最大时延差为

$$\Delta\tau_{SI} = \tau_c - \tau_0 = \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1}{c} \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right)$$

对于弱导波光纤,计算式为

$$\Delta\tau_{SI} = \frac{Ln_1}{c} \Delta \quad (3-6-4)$$

从式(3-6-4)中可以看出,多模阶跃型光纤的色散和相对折射指数差 Δ 有关,弱导波光纤 Δ 很小,因此可以减小模式色散。

例 3-6-1 对于 $NA=0.275, n_1=1.487$ 的多模阶跃型光纤, 一个光脉冲传输了 5 km, 求光脉冲展宽了多少? 光纤带宽为多少?

解:
$$\Delta\tau_{SI} = \frac{Ln_1}{c}\Delta = \frac{L}{c} \frac{(NA)^2}{2n_1} = \left(\frac{5 \times 10^3 \times 0.275^2}{3 \times 10^8 \times 2 \times 1.487} \right) \text{ns} = 423.8 \text{ ns}$$

$$B = \frac{441}{\Delta\tau} = \frac{441}{423.8 \times 10^3} = 1.04 \times 10^{-3} \text{GHz} = 1.04 \text{ MHz}$$

2) 多模渐变型光纤的模式色散

对于多模渐变型光纤的时延差一般按照式(3-6-5)估算。

$$\Delta\tau_{GI} = \frac{LN_1\Delta^2}{8c} \quad (3-6-5)$$

式中: $\Delta\tau_{GI}$ 为多模渐变型光纤的时延差; N_1 为纤芯模式群的折射率; Δ 为多模渐变型光纤的相对折射指数差。

多模渐变型光纤的时延差还受材料色散的影响, 但相比之下略小一些, 所以暂不分析。

例 3-6-2 对于 $N_1=1.487, \Delta=1.71\%$ 的多模渐变型光纤, 一个光脉冲传输了 5 km, 求光脉冲展宽了多少? 光纤带宽为多少?

解:
$$\Delta\tau_{GI} = \frac{LN_1\Delta^2}{8c} = \left(\frac{5 \times 10^3 \times 1.487 \times (1.71\%)^2}{8 \times 3 \times 10^8} \right) \text{ns} = 0.9 \text{ ns}$$

$$B = \frac{441}{\Delta\tau} = \left(\frac{441}{0.9 \times 10^3} \right) \text{GHz} = 0.49 \text{ GHz}$$

从如上两个例题可以看出, 多模渐变型光纤的时延差与多模阶跃型光纤时延差相比要小许多, 也就是带宽要大许多, 因此具有很大的优越性。

对于多模光纤, 制造商通常给出每千米光纤带宽, 单位为 $\text{MHz} \cdot \text{km}$ 。

3. 单模光纤的材料色散和波导色散

材料色散和波导色散引起的时延差 $\Delta\tau$ 可以从信号的群速度即调制包络的速度 v_g 来分析,

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (3-6-6)$$

光脉冲沿光纤传播的延迟时间称为群时延

$$\tau = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad (3-6-7)$$

式中: β 为光信号传输相位常数; $\omega = 2\pi c/\lambda$ 为光的角频率。

脉冲展宽程度为

$$\Delta\tau = \frac{d\tau}{d\omega} \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2} \Delta\lambda \right) = L \left(-\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right) \Delta\lambda$$

则

$$\Delta\tau = LD\Delta\lambda \quad (3-6-8)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为光源发光的波长范围

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (3-6-9)$$

式(3-6-9)中 D 称为色散系数,工程上单位采用 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。

由式(3-6-8)还可以知道减小时延差 $\Delta\tau$ 有两个途径:减小光纤的色散系数 D ;减小光源发光的波长范围 $\Delta\lambda$ 。

下面推导色散系数的影响因素,从传播常数 β 和 U 、 V 的关系式(3-2-11)和式(3-2-13)可以得出

$$\beta = k_0 n_1 \left(1 - 2\Delta \frac{U^2}{V^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-6-10)$$

对于弱导光纤

$$\beta = k_0 n_1 - k_0 (n_1 - n_2) \frac{U^2}{V^2} \quad (3-6-11)$$

把式(3-6-11)代入式(3-6-9),得

$$D(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} - \frac{n\Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (3-6-12)$$

1) 材料色散

式(3-6-12)的第一项是由于材料折射率随光波长非线性变化引起的,称为材料色散

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad (3-6-13)$$

SiO_2 的折射率及材料色散系数与波长的关系如图 3-6-2 所示。从图中可以看出不同波长 λ 的材料色散系数 D_m 是不同的,在第二低损耗的窗口的材料色散较小。在 $\lambda_0 = 1.27 \mu\text{m}$ 时,时延差最小,这个波长称为材料的零色散波长。

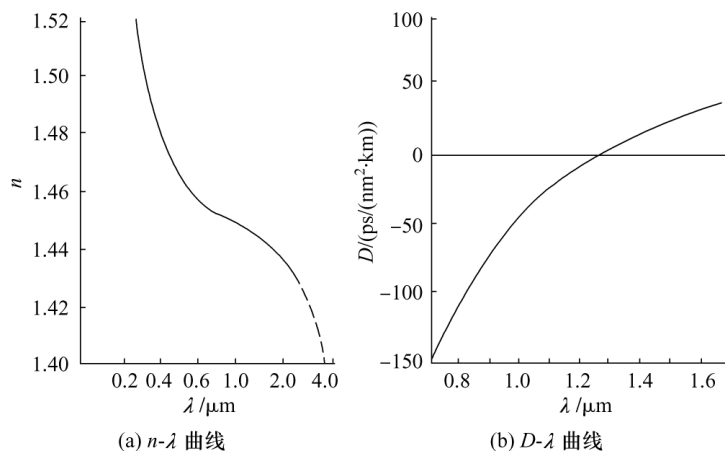


图 3-6-2 SiO_2 的折射率及材料色散系数与波长的关系

2) 波导色散

式(3-6-12)的第二项是由于光波导的结构不同而引起的色散,称为波导色散。波导色散系数用 D_w 表示。

$$D_w(\lambda) = -\frac{n\Delta}{c\lambda} V \frac{d^2(Vb)}{dV^2} \quad (3-6-14)$$

式(3-6-14)表明波导色散 D_w 是光波导的结构参数 V 和 b 的函数。对于多模光纤,波导色散比材料色散小得多,常可忽略不计,但对于单模光纤,波导的作用则不能忽略。

图 3-6-3 为普通单模光纤的材料色散系数 D_m 、波导色散系数 D_w 和总色散 D 随波长变化的曲线,总色散在 $1.31 \mu\text{m}$ 附近为零,这个波长称为零色散波长。而在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近色散系数 $D = 15 \sim 18 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$ 。

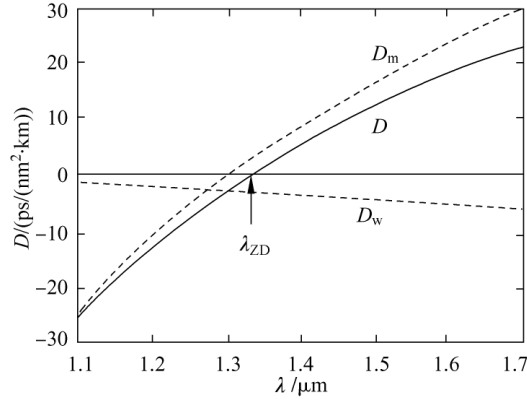


图 3-6-3 普通单模光纤的 D_m 、 D_w 和 D 随波长的变化曲线

在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的损耗最低,如果合理地设计光波导的结构就可以把零色散波长移到 $1.55 \mu\text{m}$ 附近,这样 $1.55 \mu\text{m}$ 附近色散也最小,利用这种原理制成色散位移光纤(DSF)。无疑对长距离大容量的光纤通信是十分有利的。

4. 偏振模色散

在前面已经讲过单模光纤的偏振特性,在单模光纤中传输的基模 LP_{01} 是相互垂直的两个模式 LP_{01}^x 和 LP_{01}^y ,实际的光纤,它的形状不可能是理想的轴对称分布,折射率和应力分布的不均匀性,将会导致这两个模式的简并性受到破坏,两个模式的传输相位常数 β_x 和 β_y 不同,因此会产生色散。这种色散称为偏振模色散(PMD)。

偏振模色散引起的时延差 $\Delta\tau/L$ 为

$$\frac{\Delta\tau}{L} = \left| \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} \right| \quad (3-6-15)$$

对于 G.652 光纤,PMD 约 $0.1 \sim 0.5 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$,因此对小于 2.5 Gb/s 的低速和小于 100 km 的短距离系统,偏振色散很小可以忽略。

5. 高阶色散

在入射光为零色散波长 λ_0 时, $D=0$,BL 积应该无限大。但是实际情况并非如此,它还受到色散斜率的影响

$$\Delta\tau = S (\Delta\lambda)^2 L \quad (3-6-16)$$

式中: S 为色散斜率,单位 $\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。

$$S = \frac{dD}{d\lambda} = - \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2} \right)^2 \frac{d^3\beta}{d\omega^3} + \frac{2}{\lambda} D \quad (3-6-17)$$

高阶色散比较小,只有在高速光纤系统才予以考虑。

3.7 光纤的特性参数

光纤的特性参数很多,概括起来主要包括以下几大类,即几何特性、光学特性、传输特性、机械特性、温度特性。

1. 几何特性

光纤的几何特性参数是指与光纤横截面的物理构成相关的参数,与光缆施工密切相关。多模光纤的几何特性参数一般包括纤芯直径、包层直径、芯/包同心度偏差、纤芯不圆度和包层不圆度、光纤翘曲度等。

单模光纤的几何特性参数略有不同,制造商经常使用模场直径(MFD)而不使用纤芯直径,因此单模光纤的几何特性参数包括模场直径、包层直径、模场同心度误差、模场不圆度和包层不圆度等。

2. 光学特性

光纤的光学特性主要有折射率分布、多模光纤的数值孔径(NA),模场直径(MFD)和有效面积、截止波长等。

3. 传输特性

光纤的传输特性主要包括光纤的衰减系数、多模光纤的带宽、单模光纤的色散特性等。

4. 机械特性

光纤的机械特性是非常重要的,由于石英光纤具有细和脆的特性,其机械性能比金属导线差。光纤的机械特性主要包括抗张强度、耐侧压力、弯曲以及扭绞性能和使用寿命等,使用者最关心的是抗张强度。

抗张强度是指光纤受到张力的作用而断裂时的最大强度。目前构成光纤的材料是 SiO_2 ,大多数光纤通常被拉成 $125\text{ }\mu\text{m}$ 的细丝。从理论上推算,光纤的抗张强度可达 20 GPa 。但实际上由于光纤内部的气泡、微粒、杂质等影响,抗张强度只有 $0.1\sim 0.2\text{ GPa}$ 。但是光纤加上涂覆层后抗张强度极大增强。

5. 温度特性

通常情况下,光纤的特性受温度影响不大,但是在温度很低时,损耗随温度降低而增加,尤其是在温度非常低时,损耗急剧增加,所以高寒地区工作的光缆应注意到这个特性。

产生这种现象的原因是光纤的热胀冷缩。构成光纤的石英材料(SiO_2)的热膨胀系数很小,在温度降低时几乎不收缩。而光纤在成缆过程中必须经涂覆和加上一些其他构件,涂覆材料及其他构件的膨胀系数较大,当温度降低时,收缩比较严重,所以当温度变化时,材料的膨胀系数不同,将使光纤产生微弯,尤其表现在低温区。

光纤的附加损耗与温度之间的变化曲线,如图 3-7-1 所示。从图中看出,随着温度的降低,光纤的附加损耗逐渐增加,当温度降至-55℃左右时,附加损耗急剧增加。

因此,在设计光纤通信系统时,必须考虑光缆的高、低温循环试验,以检验光纤的损耗是否符合指标要求。

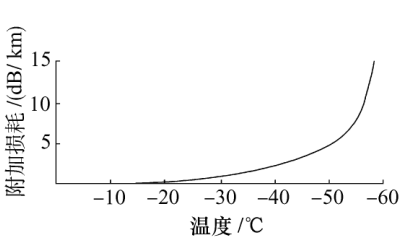


图 3-7-1 光纤的附加损耗与温度之间的变化曲线

6. 技术参数

下面从应用的角度出发,对光纤的技术参数做一些介绍。

1) 多模光纤

多模光纤应用在通信中,常用在数据链路、局域网等多种场合。多模光纤 A1 类几何尺寸参数如表 3-7-1 所示。

表 3-7-1 多模光纤 A1 类几何尺寸参数

分类代号	纤芯直径/ μm		包层直径/ μm		芯-包同心度偏差	纤芯不圆度	包层不圆度
	基本尺寸	极限偏差	基本尺寸	极限偏差			
A1a	50	± 3	125	± 3	$\leq 6\%$	$\leq 6\%$	$\leq 2\%$
A1b	62.5	± 3	125	± 3			
A1c	85	± 3	125	± 3			
A1d	100	± 3	140	± 4			

多模光纤 A1 类为渐变型折射率分布多模光纤,正是由于折射率呈现的精确梯度分布,从而使其带宽和衰减性能比阶跃多模光纤的相应性能要好得多。一般在直径相同的情况下,渐变型折射率分布光纤的芯径大大小于阶跃型多模光纤的芯径,这就赋予渐变型折射率分布多模光纤具有更高的抗弯曲性能。表 3-7-2 列出了三种渐变型多模光纤的传输性能及应用场合。

表 3-7-2 三种渐变型多模光纤的传输性能及应用场合

光纤类型	A1a		A1b		A1d	
工作波长/ μm	850	1300	850	1300	850	1300
最大衰减系数/(dB/km)	2.4~3.5	0.7~1.5	2.8~3.5	0.7~1.5	3.5~7.0	1.5~4.5
最小模式带宽/MHz	200~800	200~1200	100~800	200~1000	10~200	100~300
数值孔径	0.20 $\pm$ 0.02 或者 0.23 $\pm$ 0.02		0.275 $\pm$ 0.015		0.26 $\pm$ 0.015 或者 0.29 $\pm$ 0.03	
应用场合	数据链路、局域网		数据链路、局域网		局域网、传感等	

20 世纪 90 年代以来,特别是计算机网络的普及和发展,使数据传输业务得到了大幅度增长。为此,以太网的数据传输速率从 10 Mb/s 逐渐提高到 100 Mb/s 和 1 Gb/s,一直到 2004 年 6 月美国电气与电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)通过了 10 Gb/s 以太网标准 IEEE 802.3ae。顺应 10 Gb/s 以太网的发展需要,人们又研制出一种新型高带宽的 50/125 μm 多模光纤,即新一代多模光纤。究其原因是 10 Gb/s 以太网都必须用激光器,如在链路中应用价格便宜的 850 nm 波长垂直腔表面发射激光器

(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)作为光源。由于所用的激光器发射的光束具有窄频率的光谱,小的光学发射角和小的光斑尺寸,使普通多模光纤的传输距离非常有限,所以研制出新一代 50/125 μm 高带宽多模光纤。新一代多模光纤的传输性能能够支持 10 Gb/s 传输 300m 的距离。IEC 60793-2-10 附录 E《Gb/s 以太网应用》给出了资料性信息。表 3-7-3 结合了 10 Gb/s 以太网的要求,列出了国内著名光纤光缆公司生产的新一代多模光纤,即 50/125 μm 梯度型折射率分布多模光纤的传输性能。

表 3-7-3 50/125 μm 多模光纤的光学性能

光学特性	单位	条件	数值
衰减系数	dB/km	850 nm	≤ 2.5
		1300 nm	≤ 0.7
满注入带宽	MHz $\cdot$ km	850 nm	≥ 3500
		1300 nm	≥ 500
有效带宽	MHz $\cdot$ km	850 nm	≥ 4700
10 Gb/s 以太网链路长度	m	850 nm	≤ 550

2) 单模光纤

目前 ITU-T 建议定义了 5 种单模光纤 G. 652、G. 653、G. 654、G. 655 和 G. 656,其中 G. 652 和 G. 655 是目前光纤通信工程中最广泛使用的单模光纤。

(1) G. 652 光纤

G. 652 光纤的特点是:其设计的最佳工作波长在 1310 nm 附近,也可以用于 1550 μm 波段。G. 652 光纤细分为 4 个子类:G. 652A、G. 652B、G. 652C 和 G. 652D 光纤。按照 G. 652 光纤的性能特点的实质,国家标准将 G. 652 光纤分为两大类:标准单模光纤(G. 652A 和 G. 652B)和波长扩展单模光纤(G. 652C、G. 652D)。

标准单模光纤(G. 652A、G. 652B)又称为常规单模光纤,于 1983 年开始商用。标准单模光纤的性能特点是:①在 1310 nm 波长的色散为零;②在波长为 1550 nm 附近衰减系数最小约为 0.22 dB/km,但在 1550 nm 附近其具有最大色散系数为 18~20 ps/nm $\cdot$ km,传输距离被限制在 70~80 km 之间;③这种光纤工作波长既可选在 1310 nm 波长区域,又可选在 1550 nm 波长区域,它的最佳工作波长在 1310 nm 区域。这种光纤常称为标准单模光纤(Standard Single Mode Fiber,SSMF)或称为常规单模光纤。它是当前最为广泛使用的光纤。

波长扩展单模光纤(G. 652C、G. 652D)。随着光波分复用技术的发展,在城域网方面,人们广泛采用的解决方案是选用数十至上百个复用波长的高密集波分复用技术。众所周知,制约标准单模光纤 G. 652 工作波长区窄的原因是 1385 nm 附近高的水吸收峰,在 1385 nm 附近,标准单模 G. 652 光纤中只要含有几个 ppm 的氢氧根离子就会产生几个分贝的衰减。为此,光纤制造商通过改进生产工艺,使 G. 652 光纤在 1385 nm 附近的水吸收峰基本消失,从而研究出了可以在 1260~1670 nm 整个波长范围工作的新型 G. 652 光纤。由于这种新型 G. 652 光纤的工作波长比常规单模光纤工作波长要宽得多,所以人们将其称为波长扩展单模光纤(全谱光纤),即 G. 652C 光纤、G. 652D 光纤。波长扩展单模光纤完全能够满足城域网粗波分复用技术发展的需要。

2005 年 5 月 ITU-T SG15 对 4 种 G. 652 光纤性能参数最新建议值如表 3-7-4 所示。

表 3-7-4 ITU-T G. 652 光纤和光缆性能参数最新建议值

光纤参数	G. 652A	G. 652B	G. 652C	G. 652D
1310 nm 模场直径/ μm	$(8.6\sim9.5)\pm0.6$	$(8.6\sim9.5)\pm0.6$	$(8.6\sim9.5)\pm0.6$	$(8.6\sim9.5)\pm0.6$
包层直径/ μm	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
芯同心度误差最大值/ μm	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.6	≤ 0.6
包层不圆度最大值/%	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
光缆截止波长最大值/nm	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260
筛选应力最小值/GPa	≥ 0.69	≥ 0.69	≥ 0.69	≥ 0.69
宏弯损耗/dB(30mm 半径, 100 圈)	$\leq 0.1(1550\text{nm})$	$\leq 0.1(1550\text{ nm})$ $\leq 0.5(1625\text{ nm})$	$\leq 0.1(1550\text{ nm})$ $\leq 0.5(1625\text{ nm})$	$\leq 0.1(1550\text{ nm})$ $\leq 0.5(1625\text{ nm})$
最小零色散波长/nm	1300	1300	1300	1300
最大零色散波长/nm	1324	1324	1324	1324
零色散波长最大斜率 S_{max} (ps/(nm ² ·km))	0.092	0.092	0.092	0.092
未成缆光纤 PMD 系数/ (ps/km ^{1/2})	不要求	可规定	可规定	可规定

(2) G. 653 光纤

G. 653 光纤又称为色散位移单模光纤。针对 G. 652 光纤在 1550nm 工作窗口衰减系数最低,而色散太大的问题,人们通过改变光纤的结构参数、折射率分布形状,力求加大波导色散,从而将最小零色散点从 1310nm 位移到 1550nm,同时达到 1550nm 波长处衰减最小和色散为零的最佳性能。1985 年 G. 653 光纤正式进入商用。2003 年 12 月颁布的 ITU-T 建议 G. 653《色散位移单模光纤和光缆的特性》的光纤参数建议值,如表 3-7-5 所示。

G. 653 光纤的工作窗口 1550nm 恰好位于掺铒光纤放大器 1530~1565nm 工作波长区域内。就理论而言,G. 653 光纤非常适合于单波长高速长距离光纤通信系统使用,如可在这种光纤上直接开通 20 Gb/s 系统,不需要采取任何色散补偿措施。

但是在 DWDM 系统大量推广应用时发现,由于掺铒光纤放大器(Erbium Doped Optical Fiber Amplifier,EDFA)在 DWDM 中的使用,EDFA 使进入光纤中的光功率大大提高,进而导致 G. 653 光纤中产生四波混频等非线性效应。产生非线性效应的原因是 G. 653 光纤在 1550 nm 窗口的色散太小。为此,G. 653 光纤因其在 DWDM 系统使用中出现的严重非线性效应被迫退出了 DWDM 系统中的使用。当然,为了能够充分利用由 G. 653 光纤构成原有的网络资源,可以采用不等间隔方式,在 G. 653 光纤上进行波分信号的传输。

表 3-7-5 G. 653 光纤和光缆性能参数建议值

光 纤 参 数	数 值
1550 nm 模块直径/ μm	$(7.8\sim8.5)\pm0.8$
包层直径/ μm	125 ± 1
芯同心误差/ μm	0.8
包层不圆度/%	2.0
光缆截止波长最大值/nm	1270
宏弯损耗/dB(30mm 半径,100 圈)	0.5 (1550nm)
筛选应力/GPa	0.69
最小色散波长/nm	1525

续表

光 纤 参 数	数 值
最大色散波长/nm	1575
色散系数/(ps/(nm ² · km))	3.5
最小零色散波长/nm	1500
最大零色散波长/nm	1600
色散斜率/(ps(nm ² · km))	0.085
未成缆光纤 PMD 系数/(ps/km ^{1/2})	—

(3) G. 654 光纤

G. 654 光纤是截止波长位移单模光纤。其实质是 G. 652 光纤,与 G. 652 光纤不同的是:截止波长位移到了 1530 nm 波长区域。最佳工作波长范围为 1550~1625 nm。目前世界上所制造的最小衰减系数的截止波长位移单模光纤已经达到 0.15 dB/km。这种单模光纤被应用于长距离数字传输,例如使用了光放大器的长途陆地线路系统和海底光缆系统。

为了适应高速率、远距离光传输系统的需要,2004 年 6 月颁布的最新 ITU-T 建议 G. 654《截止波长位移单模光纤和光缆的特性》参数建议值如表 3-7-6 所示。

表 3-7-6 G. 654 光纤性能参数建议值

光 纤 参 数	G. 654A	G. 654B	G. 654C
1550 nm 模块直径/nm	(9.5~10.5) ±0.7	(9.5—13.0) ±0.7	(9.5—10.5) ±0.7
包层直径/μm	125±1.0	125+1.0	125 ± 1.0
芯同心误差/μm	0.8	0.8	0.8
包层不圆度/%	2.0	2.0	2.0
光缆截止波长最大值/nm	1530	1530	1530
宏弯损耗/dB(30mm 半径,100 圈)	0.50(1550 nm)	0.50(1550 nm)	0.50(1550 nm)
筛选应力/GPa	0.69	0.69	0.69
1550 nm 色散系数/(ps/(nm ² · km))	20	22	20
1550 nm 色散斜率/(ps/(nm ² · km))	0.070	0.070	0.070

G. 654A、G. 654B 和 G. 654C 三者间的区别是:G. 654B 光纤更适合应用于长距离大容量 WDM 传输系统。G. 654C 的 PMD 更小,最适合用于 G. 959.1 所规定的更高速率、更长距离的海底光纤通信系统。

(4) G. 655 光纤

G. 655 光纤在整个工作波长区的色散不为零,故其也被称为非零色散位移单模光纤。G. 655 光纤的基本设计思想是从两个方面改进光纤色散特性。一方面要确实保证光纤在 1550 nm 波长区域具有合理的低色散,可以支持 10 Gb/s 信号足够长的距离传输而无须色散补偿,即使对于更长距离的传输或 40 Gb/s 信号传输也只需要比较少的色散补偿。以求节省昂贵的色散补偿模块及其附加光纤放大器成本,同时比较的低色散也降低了 40 Gb/s 系统的自相位调制影响。另一方面,设法使光纤必须保持非零特性,以一个最小的合理色散值(例如至少大于 2(ps/(nm² · km)))来抑制四波混频、交叉相位调制等非线性效应的影响,使 G. 655 光纤能够适应 40 Gb/s DWDM 系统波长通路间隔日益变宽窄,通路数量日益增多的发展趋势。

G. 655 光纤品种由最早的 G. 655A,通过不断的性能优化逐渐出现 G. 655B、G. 655C、G. 655D 和 G. 655E。ITU-TG. 655A、G. 655B 和 G. 655C 光纤性能参数建议值如表 3-7-7 所示。ITU-TG. 655D 和 G. 655E 光纤性能参数建议值如表 3-7-8 所示。

表 3-7-7 ITU-T G. 655A、G. 655B 和 G. 655C 光纤性能参数建议值

光纤参数		G. 655A	G. 655B	G. 655C
1550 nm 模场直径/ μm		$(8\sim 11)\pm 0.7$	$(8\sim 11)\pm 0.7$	$(8\sim 11)\pm 0.7$
包层直径/ μm		125 ± 1	125 ± 1	125 ± 1
芯同心度误差/ μm		≤ 0.8	≤ 0.8	≤ 0.8
包层不圆度/ $\%$		≤ 2	≤ 2	≤ 2
光缆截止波长/nm		≤ 1580	≤ 1580	≤ 1580
筛选应力/GPa		≥ 0.69	≥ 0.69	≥ 0.69
宏弯衰减/dB(30mm 半径,100 圈)		≤ 0.5 (1550 nm)	≤ 0.5 (1625nm)	≤ 0.5 (1625nm)
色散特性		1530~1565	1530~ 1565	1530~ 1565
C 波段	最小到最大零色散波长/nm			
	最小色散/(ps/(nm ² · km))			
	最大色散/(ps/(nm ² · km))			
	色散符号	正或负	正或负	正或负
L 波段	最小零色散波长/nm	不要求	待定	待定
	最小色散/(ps/(nm ² · km))	不要求	待定	待定
	最大色散/(ps/(nm ² · km))	不要求	待定	待定
	色散符号	不要求	正或负	正或负
未成缆光纤 PMD 系数/(ps/km ^{1/2})		可规定	可规定	可规定
1550 衰减系数最大值/(dB/km)		≤ 0.35	≤ 0.35	≤ 0.35
1625 nm 衰减系数最大值/(dB/km)		—	≤ 0.4	≤ 0.4
PDM 系数	光缆段数 M	20	20	20
	概率 $Q\%$	0.01	0.01	0.01
	PDM 系数链路设计	0.5	0.5	0.20
	最大值/(ps/km ^{1/2})			

表 3-7-8 ITU-T G. 655D 和 G. 655E 光纤性能参数建议值

光纤参数		G. 655D	G. 655E
1550 nm 模场直径/ μm		$(8\sim 11)\pm 0.7$	$(8\sim 11)\pm 0.7$
包层直径/ μm		125 ± 1	125 ± 1
芯同心度误差/ μm		≤ 0.8	≤ 0.8
包层不圆度/ $\%$		≤ 2	≤ 2
光缆截止波长/nm		≤ 1580	≤ 1580
筛选应力/GPa		≥ 0.69	≥ 0.69
宏弯衰减/dB(30 mm 半径,100 圈,1625 nm)		0.1	0.1
色散特性			
1460~1550 nm	最小色散/(ps/(nm ² · km))	$\frac{7.0}{90}(\lambda-1460)-4.20$	$\frac{5.42}{90}(\lambda-1460)+0.64$
	最大色散/(ps/(nm ² · km))	$\frac{2.91}{90}(\lambda-1460+3.29)$	$\frac{4.65}{90}(\lambda-1460)+4.66$

续表

光纤参数		G. 655D	G. 655E
1550~1625 nm	最小色散/(ps/(nm ² ·km))	$\frac{2.97}{75}(\lambda-1550)+2.80$	$\frac{3.30}{75}(\lambda-1550)+6.06$
	最大色散/(ps/(nm ² ·km))	$\frac{5.06}{75}(\lambda-1550)+6.20$	$\frac{4.12}{75}(\lambda-1550)+9.31$
1550 衰减系数最大值/(dB/km)		≤0.35	0.35
1625 nm 衰减系数最大值/(dB/km)		—	≤0.4
PDM 系数	光缆段数 <i>M</i>	20	20
	概率 <i>Q</i> /%	0.01	0.01
	PDM 系数链路设计		
	最大值/(ps/km ^{1/2})	0.20	0.20

(5) G. 656 光纤

G. 656 光纤也称为宽带光传输用非零色散位移单模光纤,进一步扩大了 G. 655 光纤可用工作波范围,即由现在的 C 波段+L 波段扩大到 S 波段+C 波段+L 波段。

G. 656 光纤的原理是通过改变纤芯/包层的结构和折射率分布来实现的。人们采取获得非零色散平坦的色散曲线的方法是通过调整纤芯与内包层折射率环之间的下凹环的宽度与深度,以达到满足色散平坦的新要求。武汉邮电研究院研究出了 G. 656 光纤,所设计的该 G. 656 光纤的折射率分布结构如图 3-7-2 所示。

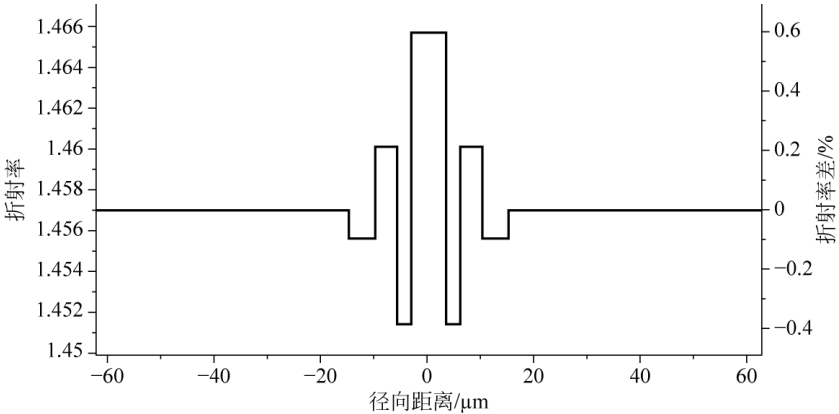


图 3-7-2 G. 656 光纤折射率分布的结构

为了进一步规范光纤制造厂商宽带光传输用非零色散位移光纤的性能指标,2004 年 6 月国际电信联盟标准化部门发布了宽带光传输用非零色散光纤和光缆的特性(ITU-T G. 656 单模光纤和光缆)的建议。G. 656 光纤是“宽带光传输用非零色散光纤,即在宽阔的工作波长 1460~1625 nm 内,色散值在 2~15 ps/(nm²·km)之间。G. 656 光纤实质上是一种宽带非零色散平坦光纤,其特点是在工作波长范围内,色散值应该大小合适,有效面积合适,色散斜率<0.07 ps/(nm²·km)。因此,G. 656 光纤既可以显著降低系统的色散补偿成本,又可以进一步发掘石英玻璃光纤潜在的巨大带宽。G. 656 光纤可保证通道间隔 100 GHz、50 Gb/s 系统至少传 500 km。G. 656 光纤和光缆的性能参数建议值如表 3-7-9 所示。

表 3-7-9 G. 656 光纤参数建议值

参 数 名 称		数 值
1550 nm 模块直径/ μm		$(7.0\sim 11.0)\pm 0.7$
包层直径/ μm		125 ± 1
芯同心误差/ μm		0.8
包层不圆度/%		2.0
光缆截止波长最大值/nm		1550
宏弯损耗/dB(30mm 半径,100 圈)		0.50(1625 nm)
筛选应力/GPa		0.69
色散系数	最小和最大色散波长/nm	1560~1625
	最小色散/(ps/(nm ² ·km))	2
	最大色散/(ps/(nm ² ·km))	15
	符号	正
衰减系数	在 1560nm 的最大值/(dB/km)	0.5
	在 1550nm 的最大值/(dB/km)	0.35
	在 1620nm 的最大值/(dB/km)	0.5
PMD 系数	M 样本数	20
	Q 超过定值的概率	0.01%
	最大/(ps/km ^{1/2})	0.20
$D_{\text{max}}\sim D_{\text{min}}$	在 C 波段: 5.0 ps/(nm ² ·km)	无此项
1460 nm 衰减系数最大值	不规定	0.4 dB/km

(6) G. 657 光纤

G. 657 光纤是弯曲不敏感的单模光纤。

正如人们所预料的那样,随着宽带业务向着家庭延伸,通信光网络的建设重点正在由长途干线光网络向接入光网络乃至光纤到户(Fiber To The Home, FTTH)发展。在 FTTH 建设中,由于光缆被安放在拥挤的管道中或者经过多次弯曲后被固定在接线盒和插座等具有狭小空间的线路终端设备,所以 FTTH 用的光缆应该是结构简单、铺设方便和价格便宜的光缆。在 FTTH 建设需要结构简单的光缆和弯曲不敏感单模光纤的背景下,一些著名的光纤制造商纷纷开展了弯曲不敏感单模光纤的研究。

弯曲损耗的机理可以通过弯曲试验方法来探寻。通过实验可以得到光纤的弯曲损耗 α 与光纤折射率分布结构参数(相对折射率 Δ 、纤芯半径 a)的关系为

$$\alpha = k\left(\frac{a}{\Delta}\right)^2$$

(3-7-1)

式中, k 是比例常数,它与光纤接触面的粗糙程度和材料特性有关。从式(3-7-1)可以得到一个结论,即通过增大 Δ 就可以提高光纤抗弯曲性能。由此,可以推测弯曲不敏感光纤应该具有比较大的芯/包折射率差的结构。

按照工作波长和使用范围 G. 657 光纤可以分为 G. 657A 和 G. 657B 两类。G. 657A 光纤可用在 D、E、S、C 和 L 五个波带,其可以在 1260~1625 nm 整个工作波长范围进行工作。G. 657A 光纤的传输和互连性能与 G. 652D 相同。与 G. 652D 光纤不同的是,为了改善接入光网络中的光纤接续性能,G. 657A 光纤具有更好的弯曲性能和几何尺寸技术要求更精确。G. 657B 光纤的传输工作波长分别是 1310 nm、1550 nm 和 1625 nm。G. 657B 光纤

被限制使用在建筑物内的信号传输。G. 657B 光纤具有的熔接和连接特性与 G. 652 光纤完全不同。G. 657B 光纤可以在弯曲半径非常小的情况下正常工作。表 3-7-10 列出了国际电信联盟规范的接入网用的 ITU-T G. 657 光纤技术性能指标。

表 3-7-10 G. 657 光纤技术性能指标

光 纤 类 型		G. 657A		G. 657B		
模场直径 1310 nm		$[(8.6\sim9.5)\pm0.4]\mu\text{m}$		$[(6.3\sim9.5)\pm0.4]\mu\text{m}$		
包层直径		$(125\pm0.7)\mu\text{m}$		$(125\pm0.7)\mu\text{m}$		
芯同心度误差		0.5 μm		0.5 μm		
包层不圆度		1.0%		1.0%		
光缆截止波长最大值		1260 nm		1260 nm		
筛选应力		0.69 GPa		0.69 GPa		
色散系数		$\Delta_{0\text{min}}$ 为 1300 nm		待定		
		$\Delta_{0\text{max}}$ 为 1324 nm				
		$S_{0\text{max}}$ 为 0.092ps/nm ² ·km				
宏 观 弯 曲 损 耗	弯曲半径	15 mm	10 mm	15 mm	10 mm	7.5 mm
	弯曲圈数	10	1	10	1	1
	1550 nm 最大	0.25 dB	0.75 dB	0.03 dB	0.1 dB	0.5 dB
	1625 nm 最大	1.0 dB	1.5 dB	0.1 dB	0.2 dB	1.0 dB

小结

1. 光纤概述
- 了解光纤的基本结构和种类,了解阶跃型光纤和渐变型光纤的导光原理。
- 阶跃型光纤相对折射指数差 $\Delta=\frac{n_1^2-n_2^2}{2n_1^2}$,对于弱导波光纤 Δ 近似为 $\Delta=\frac{n_1-n_2}{n_1}$ 。
- 光纤的数值孔径 NA 定义为表示光纤捕捉光射线能力的物理量,数值孔径越大表示光纤捕捉射线的能力就越强。阶跃型光纤的数值孔径为常数: $NA=\sqrt{n_1^2-n_2^2}=n_1\sqrt{2\Delta}$;渐变型光纤的本地数值孔径用 $NA(r)$ 表示: $NA=\sqrt{n^2(r)-n^2(a)}$ 。
- 采用渐变型折射率光纤的目的是为了降低模间色散。
2. 阶跃型光纤的波动光学理论
- 了解在阶跃型光纤中的波动方程和求解方法,一般采用标量近似解法。
- 对于弱导波光纤,光纤的结构参数 $b=\frac{\beta/k_0-n_2}{n_1-n_2}$ 和 $V=k_0n_1a\sqrt{2\Delta}$ 由光纤的结构和波长决定;了解弱导波光纤的特征方程。
- 标量模用 LP_{mn} 表示,不同的标量模,场的分布状况和传输特性都不同。了解导波传播的相位常数 β 。
3. 渐变型光纤的理论分析
- 渐变型光纤的最佳折射指数分布为

$$n(r)=n(0)\left[1-2\Delta\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^{1/2}$$

式中: $\Delta = \frac{n^2(0) - n^2(a)}{2n^2(0)}$ 。

了解渐变型光纤的标量近似解法。

4. 单模光纤

对单模光纤的折射率分布、截止波长、模场直径和偏振特性等方面进一步分析。

了解实际的单模光纤折射率分布。

单模光纤的截止波长 λ_c 指的是 LP_{11} 模的截止波长, 单模光纤传输条件为 $0 < V < V_c$ (LP_{11})。

经常使用模场直径(MFD)来描述单模光纤的光学特性, 模场直径(MFD)定义为纤芯中场分布曲线最大值的 $1/e$ 处所对应的宽度。

5. 光纤的损耗特性

衰减系数 α 定义为

$$\alpha = -\frac{10}{L} \lg \frac{P(L)}{P(0)}, \text{单位 dB/km}$$

了解石英光纤的损耗谱曲线, 光纤通信系统的三个低损耗窗口为:

- (1) 第一低损耗窗口短波长 $0.85 \mu\text{m}$ 附近;
- (2) 第二低损耗窗口长波长 $1.31 \mu\text{m}$ 附近;
- (3) 第三低损耗窗口长波长 $1.55 \mu\text{m}$ 附近。

分析产生光纤损耗的原因。

6. 光纤的色散特性

了解光纤色散的概念和种类, 光纤色散包括模式色散、材料色散、波导色散、偏振模色散、高级色散。色散的程度用时延差 $\Delta\tau$ 来描述, 时延差 $\Delta\tau$ 越大, 色散就越严重。

分析各种色散产生的原因。多模光纤的模式色散影响最大, 多模渐变型光纤的时延差与多模阶跃型光纤时延差相比要小许多, 也就是带宽要大许多, 因此具有很大的优越性。

单模光纤主要受材料色散和波导色散的影响, 其特性参数之一是色散系数 D , 工程上单位采用 $\text{ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$ 。

7. 光纤的特性参数

光纤的特性参数包括几何特性、光学特性、传输特性、机械特性和温度特性。

了解光纤的重要参数。

习 题

3-1 填空题:

- (1) 通信用的光纤绝大多数用_____材料制成。
折射率高的中心部分叫_____, 折射率稍低的外层称为_____。
- (2) 表示光纤捕捉光射线能力的物理量被定义为_____, 用_____表示。
- (3) 在阶跃型光纤中, _____模是最低工作模式, _____是第一高阶模。
- (4) 阶跃型光纤的单模传输条件是_____。
- (5) 渐变型光纤中不同射线具有相同轴向速度的现象称为_____。

3-2 试分析阶跃型光纤和渐变型光纤的导光原理。

- 3-3 阶跃型光纤纤芯折射率 $n_1 = 1.48$, 包层折射率 $n_2 = 1.46$, 试计算光纤的数值孔径。
- 3-4 什么是光纤的归一化频率? 写出表达式。
- 3-5 阶跃型光纤纤芯折射率 $n_1 = 1.48$, 包层折射率 $n_2 = 1.46$, 在工作波长为 $1.31 \mu\text{m}$ 条件下, 要保证单模传输, 纤芯半径应如何选择?
- 3-6 什么是渐变型光纤的最佳折射指数分布? 写出平方律型折射指数分布光纤的折射指数表达式。
- 3-7 写出光纤的衰减系数表达式。衰减系数的单位是什么?
- 3-8 对于 $NA = 0.275$, $n_1 = 1.487$ 的多模阶跃型光纤, 一个光脉冲传输了 8 km , 求光脉冲展宽了多少?
- 3-9 对于 $N_1 = 1.487$, $\Delta = 1.71\%$ 的多模渐变型光纤, 一个光脉冲传输了 2 km , 求光脉冲展宽了多少?
- 3-10 材料色散和波导色散引起的时延差 $\Delta\tau$ 与色散系数 D 的关系是什么? 色散系数 D 工程通常采用什么单位?
- 3-11 普通单模光纤的零色散波长大约为多少? 色散位移光纤(DSF)是利用什么原理制成的?
- 3-12 查阅资料, 论述单模光纤的最新进展。