

光纤技术及其应用

刘德明 向 清 黄德修 编著

GUANGXIAN
JISHU
JIQIYINGYONG

电子科技大学出版社



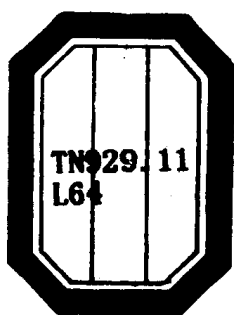
TN929.11

L64

441373

光纤技术及其应用

刘德明 向清 黄德修



00441373

电子科技大出版社

• 1994 •

[川]新登字 016 号

内容提要

本书系统、全面地讨论了光纤的基本理论与应用技术,内容包括光纤传输的基本原理、光纤无源与有源器件、光纤工程应用技术、光纤通信、传感与传像技术、特种光纤以及光纤技术的基本实验。本书对理论描述作了简化处理,注重阐述基本物理概念并列举实例介绍光纤技术的重要应用,其中包括了许多近期研究成果。本书适合于通信、激光、电子物理与器件、光电子技术等专业的大学本科生和专科生阅读,也可作为有关领域研究人员参考。

DW/5/16

光纤技术及其应用

刘德明 向 清 黄德修 编著

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学印刷厂印刷

新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 12.875 字数 300 千字

印数 1-3000 册

中国标准书号 ISBN 7-81043-046-7/TN·5

定价: 8.00 元

目 录

第一章 光纤传输原理与基本特性	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 光纤传输的基本原理	3
§ 1.3 光纤的损耗与色散	11
§ 1.4 光纤的机械特性与温度特性	15
§ 1.5 光纤的其它重要性能参数	16
第二章 光纤(光缆)制备技术	19
§ 2.1 概述	19
§ 2.2 光纤材料与提纯	20
§ 2.3 光纤预制棒制备	21
§ 2.4 拉丝、涂覆与套塑	26
§ 2.5 光纤成缆	28
§ 2.6 光纤(光缆)质量检验	34
第三章 光纤工程应用技术	42
§ 3.1 光纤端面的处理	42
§ 3.2 光纤(光缆)的连接	44
§ 3.3 光缆的敷设	48
§ 3.4 光缆的维护	50
第四章 光纤系统中的无源器件	55
§ 4.1 概述	55
§ 4.2 光纤连接器	57
§ 4.3 光纤定向耦合器	59
§ 4.4 光波分复用器	62
§ 4.5 光隔离器与环行器	65
§ 4.6 窄带光学滤波器	67
§ 4.7 光开关与光衰减器	69
第五章 有源光纤及器件	72
§ 5.1 有源光纤	72
§ 5.2 光纤放大器(EDFA).....	80
§ 5.3 EDFA 在光纤通信系统中的应用	86
§ 5.4 光纤激光器	91
第六章 光纤通信技术	95
§ 6.1 概述	95
§ 6.2 光源与光探测器件	96
§ 6.3 光纤通信系统	99

§ 6.4	光纤通信网	109
§ 6.5	发展中的光纤通信	113
第七章	光纤传感技术	120
§ 7.1	概述	120
§ 7.2	光纤温度传感器	121
§ 7.3	光纤位移传感器	128
§ 7.4	光纤应变传感器	131
§ 7.5	光纤旋转传感器(光纤陀螺).....	134
§ 7.6	光纤智能结构与智能蒙皮	138
§ 7.7	光纤磁场及电流与电压传感器	141
第八章	光纤传像技术	148
§ 8.1	光纤传像系统的本征分析理论	148
§ 8.2	单芯光纤传像	150
§ 8.3	光纤编码复用传像	154
§ 8.4	光纤束传像	158
§ 8.5	光纤传像技术的若干应用	163
第九章	光纤技术的其它应用	167
§ 9.1	光纤新材料	167
§ 9.2	光纤新结构	173
§ 9.3	光纤新应用	177
第十章	光纤技术实验	184
§ 10.1	光纤端面处理、耦合及焊接技术	184
§ 10.2	光纤损耗谱测试	185
§ 10.3	光纤数值孔径测试	187
§ 10.4	光纤模场分布观察与模场半宽测试	188
§ 10.5	光纤带宽测试	189
§ 10.6	LD / LED 功率-电流及电压-电流特性测试	191
§ 10.7	LD / LED 输出光谱特性测试	192
§ 10.8	LD 远场特性测试	194
§ 10.9	光探测器直流参数的测试	195
附录一	国内部分光纤产品生产单位及产品简介	197
附录二	主要参考文献	202

第一章 光纤传输原理与基本特性

§ 1.1 概述

光纤是“光导纤维”的简称，它是一种介质圆柱光波导。所谓“光波导”是指能够约束并导引光波在其内部或表面附近沿轴线方向传播的传输介质，通常以其截面形状分为平板波导、矩形波导、圆柱波导等等。

光纤波导是以各种导光材料制成的纤维丝，其基本结构通常包括纤芯和包层两部分，纤芯由高折射率材料制成，是光波的传输介质；包层材料折射率比纤芯稍低一些，它与纤芯共同构成光波导，形成对传输光波的约束作用。目前，已研制成功的光纤包括石英光纤、多组分玻璃光纤、塑料光纤、晶体光纤以及红外材料光纤等等。

在光纤波导中传播的光波称之为“导波光”，其特征是：沿传播方向以“行波”的形式存在，而在垂直于传播方向上则以“驻波”的形式存在。因此，对于理想的平直光纤波导，在垂直于光传播方向的任一截面上，都具有相同的场分布图，这种场分布只决定于光纤波导的几何结构，是光纤固有属性的表征。不同的场分布图通常又称之为“模式”，在一般的光纤中，可以允许几百至几千个模式传播，称之为“多模光纤”；如果光纤中只允许一个模式传播，则称之为单模光纤”。

光纤的传输特性与其横截面上折射率分布有很大关系。光纤依据其折射率分布可分为两类，即阶跃折射率分布光纤和渐变折射率分布光纤。在阶跃折射率分布光纤中，纤芯和包层折射率均为常数，分别等于 n_1 和 n_2 ($n_1 > n_2$)。在渐变折射率分布光纤中，包层折射率仍为 n_2 ，但纤芯折射率不再为常数，而是自纤轴沿半径 r 向外逐渐下降；在纤轴处 ($r=0$)，折射率最大（等于 n_1 ）；在纤壁处 ($r=a$)，折射率最小（等于 n_2 ）。光纤的折射率分布可由下式描述：

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^g]^{1/2} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & r > a \end{cases} \quad (1.1-1)$$

其中 a 为纤芯半径； Δ 是纤芯轴线折射率与包层折射率的相对差，定义为：

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.1-2)$$

g 是折射率分布参数，它决定了折射率分布曲线的形状，当 $g=\infty$ 时，即为阶跃折射率分布光纤；当 $g=2$ 时，称之为平方律分布（或抛物线分布）光纤； $g=1$ 时，为三角分布光纤。

在光纤中传播的光波遵从麦克斯韦方程组，由此出发，可以导出描述光波传播特性的“射线方程”与“波导场方程”：

$$\frac{d}{ds} \left[n(r) \frac{dr}{ds} \right] = \nabla n(r) \quad (1.1-3)$$

$$\nabla^2 \begin{bmatrix} \mathbf{E}(x,y) \\ \mathbf{H}(x,y) \end{bmatrix} + \chi^2 \begin{bmatrix} \mathbf{E}(x,y) \\ \mathbf{H}(x,y) \end{bmatrix} = 0 \quad (1.1-4)$$

式中 s 是光线轨迹的弧长, $\mathbf{r} = x\mathbf{e}_x + y\mathbf{e}_y + z\mathbf{e}_z$ 是光线轨迹上一点至参考点的矢径; ∇ 和 ∇^2 分别是梯度算符与横向拉普拉斯算符:

$$\nabla = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{e}_x + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{e}_y + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{e}_z & (\text{直角坐标}) \\ \frac{\partial}{\partial r}\mathbf{e}_r + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \varphi}\mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{e}_z & (\text{圆柱坐标}) \end{cases} \quad (1.1-5)$$

$$\nabla^2 = \begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} & (\text{直角坐标}) \\ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} & (\text{圆柱坐标}) \end{cases} \quad (1.1-6)$$

$\mathbf{E}$ 与 $\mathbf{H}$ 分别是光波的电场与磁场强度矢量, χ 是光波的横向传播常数, 它是波长 λ 的横向分量, 定义为:

$$\chi^2 = \omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2 = n^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (1.1-7)$$

式中 ω 为光波角频率; ε 和 μ 分别是传播媒质的介电常数和磁导率; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 是光波在真空中的波数; β 是光波的纵向传播常数, 它是波矢 $\mathbf{K}$ 的纵向分量, 定义为:

$$\beta = nk_0 \cos\theta_z \quad (1.1-8)$$

其中 θ_z 波矢 $\mathbf{K}$ 与 z 轴夹角。

射线方程(1.1-3)式与波导场方程(1.1-4)式分别构成光线理论与波动理论的基础。光线理论是用几何光学的方法来分析光波在光纤中的传播, 它仅在光波波长远小于光纤芯径时才适用, 它研究的重点是光波在光纤中的传播轨迹。波动理论以波动光学的方法分析光波在光纤中的传播, 具有普遍适用性, 它研究的重点是光波在光纤中激励的模式以及在传播过程中模式的变化。

本章将简要介绍光纤传输的基本原理, 注重基本概念和重要结论的描述, 而略去有关的数学推导, 以求在有限的篇幅内给读者以比较系统的介绍, 使读者建立起完整、清晰的物理概念。

本章也对光纤的一些重要的基本特性加以简略讨论, 以便为后续各章节内容打下基础。

§ 1.2 光纤传输的基本原理

一、光线理论

在光线理论中, 近似认为光波波长 $\lambda_0 \gg 0$, 从而将光波近似看成为光线, 其在光纤中的传播遵从几何光学的反射定理与折射定理。对于给定折射率分布 $n(r)$ 的光纤, 可由(1.1-3)式导出其中传播光波的光线轨迹, 并进而分析光线传播特性。

1. 光线轨迹

对于阶跃折射率分布光纤, 子午光线的传播轨迹是限制在子午平面内的锯齿形折线, 倾斜光线则是螺旋状折线。

对于渐变折射率分布光纤, 其子午光线也限制在子午平面内传播, 但光线轨迹是光滑曲线; 倾斜光线的轨迹则比较复杂: 一方面光线沿径向呈周期性变化, 另一方面又沿角向以周期性变化的角速度旋转。不同折射率分布 $n(r)$ 对应于不同的光线轨迹, 对于子午光线可由下式来描述:

$$z = \int_{r_0}^r \frac{n(r_0) \cos \theta_z(r_0) dr}{\sqrt{n^2(r) - n^2(r_0) \cos^2 \theta_z(r_0)}} \quad (1.2-1)$$

式中 r_0 是光纤端面上光线入射点径向坐标; $\theta_z(r_0)$ 是入射点处光纤一侧光线与纤轴(z 方向)夹角; $n(r_0)$ 是入射点处光纤材料折射率。给定光纤的折射率分布 $n(r)$, 即可由(1.2-1)式求得相应的子午光线轨迹曲线函数表达式, 如:

(1) 平方律分布

$$n(r) = n(0)[1 - (\sqrt{A} r)^2]^{1/2} \quad (1.2-2)$$

对应于正弦函数轨迹曲线:

$$r(z) = \left[r_0^2 + \frac{n^2(r_0) \sin^2 \theta_z(r_0)}{n^2(0)A} \right]^{1/2} \sin \left\{ \frac{n(0)\sqrt{A}Z}{n(r_0)\cos \theta_z(r_0)} + \tan^{-1} \left[\frac{r_0 n(0)\sqrt{A}}{n(r_0)\sin \theta_z(r_0)} \right] \right\} \quad (1.2-3)$$

(2) 双曲正割分布

$$n(r) = n(0) \operatorname{sech}(\sqrt{A} r) \quad (1.2-4)$$

对应的轨迹曲线函数形式为

$$\sin(\sqrt{A} r) = \left[\frac{\cosh^2(\sqrt{A} r_0)}{\cos^2 \theta_z(r_0)} - 1 \right]^{1/2} \sin \left\{ \sqrt{A} Z + \sin^{-1} \left[\frac{\sinh(\sqrt{A} r_0) \cos^2 \theta_z(r_0)}{\cosh^2(\sqrt{A} r_0) - \cos^2 \theta_z(r_0)} \right] \right\} \quad (1.2-5)$$

这两种光线轨迹曲线的周期在近轴近似条件下均可表示为:

$$P = 2\pi / \sqrt{A} = 2\pi a / \sqrt{2\Delta} \quad (1.2-6)$$

这表明, 由一点发出的不同角度的子午光线将在传播一周期长度之后会聚于另一点, 这种会聚作用类似于一个正透镜的聚焦作用, 故称这类光纤为“自聚焦光纤”。

2. 数值孔径与孔径角

光纤的数值孔径 NA 定义为入射媒质折射率 n_1 与最大入射角 θ_m 的正弦值之积,

$$NA = n_1 \sin \theta_m \quad (1.2-7)$$

对于阶跃折射率分布光纤,其子午光线所对应的数值孔径为:

$$NA_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.2-8)$$

它只和光纤的折射率有关,而与光纤的几何尺寸无关;其倾斜光线所对应的数值孔径为:

$$NA_s = NA_m / \sin \theta_\phi \quad (1.2-9)$$

其中 θ_ϕ 是光线轨迹在端面投影线与光线在纤壁反射点处切线的夹角。因此,倾斜光线更容易为光纤所接收。

对于渐变折射率分布光纤,其数值孔径是入射点径向距离 r_0 的函数,称为局部数值孔径:

$$NA(r_0) = \sqrt{n^2(r_0) - n_2^2} \quad (1.2-9)$$

在纤壁处 $n^2(r_0) = n^2(a) = n_2^2$, 有 $NA(a) = 0$; 在纤轴处, $n^2(r_0) = n^2(0) = n_1^2$, 有

$$NA_{max} = NA(0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2-10)$$

称之为渐变折射率光纤的最大理论数值孔径或标称数值孔径。

光纤的数值孔径表征了光纤接收光功率能力的大小,即只有落入以 θ_m 为半锥角的锥形区域之内的光线才能够为光纤所接收,故称 θ_m 为光纤的“孔径角”。标准多模光纤的标称数值孔径为 0.2, 其孔径角为 11.5° ; 标准单模光纤的数值孔径为 0.1~0.15, 其孔径角为 $5.7^\circ \sim 8.6^\circ$ 。

3. 光线最大延时差

对于阶跃折射率分布光纤,不同角度的光线传播相同长度轴向距离所花时间是不同的,这就导致了光脉冲的展宽,这种展宽可由光线的最大延时差 $\Delta\tau$ 来描述, $\Delta\tau$ 定义为沿最大角度传播光线与沿轴向传播光线之间的时间差。对于子午光线,

$$\Delta\tau = n_1 \Delta / c \quad (1.2-11)$$

其中 c 是真空中光速。对于 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 1\%$ 的多模光纤,由上式计算的 $\Delta\tau$ 为 50ns/km , 这仅相当于 20MHz 的传输带宽。因此,多模阶跃光纤的传输容量是较低的。

二、波动理论

在波动理论中,以电场与磁场强度矢量 E 和 H 来描述光波的传播特性,由(1.1-4)式并根据给定的折射率分布 $n(r)$ 和光纤的边界条件,求出 E 和 H 在指定坐标系中的全部分量表达式,即可确定光波的场分布。

1. 导模、漏模与辐射模的概念

在光纤中存在有三类模式，即导模、漏模和辐射模。

导模的场分布特点是：在纤芯内为驻波场或传播场；在包层中为衰减场或消逝场，光波场功率限制在纤芯内传播。导模存在的条件是：

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0 \quad (1.2-12)$$

漏模的场分布特点是：在纤芯内传播的光波场功率透过一定厚度的“隧道”泄漏到包层之中，因此，在纤芯及距纤壁一定距离的包层之中，均为传播场。

辐射模则在纤芯和包层之中均为传播场，光纤失去了对光波场功率的限制作用。

导模对应于分立的本征值，而辐射模对应于连续的本征值。

2. 导模的分类

根据导模场的 E_z 和 H_z 的存在与否，可将光纤中的导模分为 TE_{lm} 模、 TM_{lm} 模、 HE_{lm} 模和 EH_{lm} 模几种， TE_{lm} 模的 $E_z = 0$, $H_z \neq 0$ ，称之为横电模； TM_{lm} 模的 $H_z = 0$, $E_z \neq 0$ ，称之为横磁模； EH_{lm} 模和 HE_{lm} 模的 E_z 及 H_z 均不为零，称之为混杂模，其中 EH_{lm} 模为电场占优势， HE_{lm} 模为磁场占优势。这里，角标 l 和 m 分别是模式的角向标号与径向标号，不同的 (l, m) 标识不同的模式。

当光纤满足弱导条件

$$n_1 \approx n_2 \approx n$$

时，由于光纤对于光波的约束和导引作用大为减弱，使得导模的某些场分量抵消为零，场分布得以简化；形成一种线偏振模，即 LP_{lm} 模，其特征是场的某一横向分量远大于其它场分量，场近似地沿某一方向线偏振。 LP_{lm} 模可由 $HE_{l+1,m}$ 和 $EH_{l-1,m}$ 模式构成。

3. 导模的截止与远离截止

光纤中传播模式的特性由其横向传播常数 χ 决定，在纤芯中，导模的传播常数 $\beta < n_1 k_0$ ，有

$$\chi_1 = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (1.2-13)$$

χ_1 为实数；在包层中，导模的传播常数 $\beta > n_2 k_0$ ，有

$$\chi_2 = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (1.2-14)$$

χ_2 为虚数。为分析方便起见，定义两个归一化横向传播常数 U 和 W 为：

$$U = a\chi_1 = a \cdot \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (1.2-15)$$

$$W = -ia\chi_2 = a \cdot \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (1.2-16)$$

其中， U 值大小反映了导模在芯区中的驻波场的横向振荡频率； W 值的大小则反映了导模在包层中的消逝场的衰减速度。 W 的取值范围为 $0 \sim \infty$ ，当 $W \rightarrow 0$ 时，场在包层中不衰减，导模转化为辐射模，称之为“导模截止”；当 $W \rightarrow \infty$ 时，场在包层中的衰减最大，光

纤对导模场的约束最强，称之为“导模远离截止”。U 与 W 之间有如下关系式成立：

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = ak_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = ak_0 NA \quad (1.2-17)$$

式中 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 为光纤的理论数值孔径，V 称为光纤的归一化频率，是一个重要的参数。

4. 本征值方程与本征值

传播常数 β 又称为导模的本征值， β 通过(1.2-15)和(1.2-16)式与 U 和 W 相联系，因此 U 与 W 也称为“本征值”，其值由导模本征值方程决定。本征值方程可由圆柱坐标系中波导场方程的本征解在边界上的连续条件导出，对于一般阶跃光纤，其本征值方程为：

$$l^2 \beta^2 \left(\frac{1}{U^2} + \frac{1}{W^2} \right)^2 = \left[\frac{J'_l(U)}{U J_l(U)} + \frac{K'_l(W)}{W K_l(W)} \right] \cdot \left[\frac{k_1^2 J'_l(U)}{U J_l(U)} + \frac{k_2^2 K'_l(W)}{W K_l(W)} \right] \quad (1.2-18)$$

对于弱导阶跃光纤，其本征值方程简化为：

$$U \frac{J_{l+1}(U)}{J_l(U)} = \pm W \frac{K_{l+1}(W)}{K_l(W)} \quad (1.2-19)$$

显然，导模的本征值方程是一个复杂的超越方程，因此本征值的求解只能借助于计算机进行数值计算。不过，本征值方程在导模截止和远离截止两种情形下具有特别简单的形式，如表 1.2-1 所示。

表 1.2-1 截止和远离截止时的本征值方程

模 式	截止($W \rightarrow 0$), $U = U_{lm}^c$	远离截止($W \rightarrow \infty$), $U = U_{lm}^\infty$
TE_{0m}, TM_{0m}	$J_0(U) = 0$	$J_1(U) = 0$
HE_{lm}	$J_{l-2}(U) = 0$	$J_{l-1}(U) = 0$
EH_{lm}	$J_l(U) = 0$	$J_{l+1}(U) = 0$
LP_{lm}	$J_{l-1}(U) = 0$	$J_l(U) = 0$

注：表内所列各方程，除 HE_{lm} 和 LP_{0m} 以外，U 不能够为零。

表 1.2-1 所列截止和远离截止时的本值值方程又称之为截止条件和远离截止条件，它们规定了各个导模的 U 值的取值范围，即 U 值在截止时的本征值 U_{lm}^c 和远离截止时的本征值 U_{lm}^∞ 之间取值。对于渐变折射率光纤，当 l 和 m 较大时，可由 WKB 法导出如下的本征值表达式：

$$\beta_{l,m} = n_1 k_0 \left\{ 1 - 2\Delta \left[\frac{(2m+l)\sqrt{2(g+2)}}{V\sqrt{g}} \right]^{2g/(g+2)} \right\}^{1/2} \quad (1.2-20)$$

当 $g=2$, 即光纤为平方律折射率分布时, 上式成为:

$$\beta_{l,m} = n_1 k_0 \left[1 - \frac{2\sqrt{2\Delta}}{n_1 k_0 a} (2m+l) \right]^{1/2} \quad (1.2-21)$$

5. 导模数

由本征值方程求出的每一个本征值 (U_{lm} 或 β_{lm}) 都对应于一个导模或几个导模(简并情形)。在一个给定结构参数的光纤中, 允许存在的导模数目与其归一化频率 V 的大小有关, V 值越大, 允许存在的导模数就越多; 反之亦然。导模总数可由下式来估算:

$$M = gV^2 / [2(g+2)] \quad (1.2-22)$$

对于平方律折射率分布光纤, $g=2$, 有

$$M = V^2 / 4 \quad (1.2-23)$$

对于阶跃折射率分布光纤, $g=\infty$, 有

$$M = V^2 / 2 \quad (1.2-24)$$

即平方律折射率分布光纤导模数比阶跃折射率分布光纤导模数减少一半, 这对于减小多模光纤模间色散是十分有利的。

6. 导模场分布

导模场分布与光纤的折射率分布有关。对于弱导阶跃折射率分布光纤, 其 LP_{lm} 模的场分布为:

$$(E_r)_{lm} = A \frac{J_l(U_{lm}r/a)}{J_l(U_{lm})} \cdot \cos l\varphi \quad (1.2-25)$$

其场分布图特征是: 沿径向有 m 个亮斑; 沿角向有 $2l$ 个亮斑。对于最低阶模(基模) LP_{01} 模, 其场分函数为零阶贝塞尔函数。

对于平方律折射率分布光纤, 场的本征解为:

$$E_z = A (\sqrt{2}r/W_0)^l L_{(m)}^{(l)} (2r^2/W_0^2) \exp\left[-(r/W_0)^2\right] \cdot e^{il\varphi} \quad (1.2-26)$$

即导模场沿径向的分布为高斯函数与拉盖尔多项式之积(拉盖尔-高斯函数)。对于基模, 其场分布函数为高斯函数,

$$(E_z)_{00} = A \exp\left[-(r/W_0)^2\right] \quad (1.2-27)$$

式中参数 W_0 是基模场振幅衰减到最大值的 $1/e$ 时的场分布半宽度, 通常称之为基模模场半径(MFR),

$$W_0 = \sqrt{2a / (n_1 k_0 \sqrt{2\Delta})} \quad (1.2-28)$$

一般光纤的场分布函数比较复杂, 而且难以获得精确的解析解, 限于篇幅, 这里不予

深入讨论。

7. 导模功率传输特性

在阶跃光纤中，当导模远离截止时，其功率几乎全部集中在纤芯中传输；当导模临近截止时，低阶模功率几乎全部在包层之中传输，而高阶模功率仍有相当大部分留存于纤芯之中传输。

在光纤的输出端，光功率的近场和远场分布可分别表示为：

$$P_{out}(r) = P_{out}(0)[1 - (r/a)^2] \quad (1.2-29)$$

$$P_{out}(\theta) = P_{out}(0)[1 - (\sin\theta/NA)^2]^{2/g} \quad (1.2-30)$$

利用(1.2-29)式可以测量任意折射率分布光纤的折射率分布参数 g ；利用(1.2-30)式可测量光纤的数值孔径 NA 。

三、单模光纤

当光纤的 V 值小到一定值时，在光纤中将只允许一个模式传输，这就是光纤的基模 HE_{11} 模或 LP_{01} 模，这时的光纤即为单模光纤。单模光纤的芯径一般在 $5 \sim 10\mu m$ (依传输光波长的不同而有所不同)，不能够用光线理论来分析光波的传输而只有波动理论才适用。

1. 单模条件

在光纤中，最邻近 HE_{11} 模的高阶模是 TE_{01} 和 TM_{01} 模(或 LP_{11} 模)，只有当这些模式截止了，光纤才成为单模光纤。光纤传输单模的条件取决于不同的折射率分布，对于阶跃折射率分布光纤， TE_{01} 和 TM_{01} 及 LP_{11} 模式截止的条件是满足

$$J_0(U) = 0 \quad (1.2-31)$$

的第一个根值，即 $U = 2.405$ 。由于截止时 $W > 0$ 有 $V \approx U$ ，故阶跃折射率分布光纤的单模条件可表示为：

$$V_c = ak_0 n_1 \sqrt{2\Delta} = a \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta} = 2.405 \quad (1.2-32)$$

由上式看到，在给定光纤的结构参数(a 、 n_1 、 Δ)之后，单模条件就取决于传输光波波长，通常称使得 LP_{11} 模截止的波长为单模光纤的截止波长，记为 λ_c ，由(1.2-32)式得：

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.2-33)$$

有时，也用截止频率 f_c 来表示，

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{c V_c}{2\pi a n_1 \sqrt{2\Delta}} \quad (1.2-34)$$

仅当光波的波长或频率满足 $\lambda > \lambda_c$ 或 $f < f_c$ 时，才可实现单模传输。

对于渐变折射率分布光纤, 单模条件可表示为:

$$V_c = 2.405(1 + 2/g)^{1/2} \quad (1.2-35)$$

由此计算出的 V_c 值要大于 2.405, 例如对于平方律分布光纤($g=2$)有,

$$V_c = 3.401 \quad (1.2-36)$$

在实际的单模传输系统中, 通常取光纤的归一化频率 V 略大于 V_c (例如对于阶跃光纤取 $V \approx 3$), 这时会出现高阶模, 但在传输过程中将很快衰减为零, 而基模由于受到更强的约束而可以减小弯曲损耗。

2. 单模光纤模场分布

阶跃折射率分布光纤的基模模场分布在芯区为贝塞尔函数, 在包层为变态汉克尔函数, 如下式所述:

$$E_r = -\frac{Z_0}{n} H_\phi = E_0 \begin{cases} J_0\left(\frac{Ur}{a}\right) / J_0(U) & (0 \leq r \leq a) \\ K_0\left(\frac{Wr}{a}\right) / K_0(W) & (r > a) \end{cases} \quad (1.2-37)$$

式中 U 与 W 由本征值方程

$$U \frac{J_1(U)}{J_0(U)} = W \frac{K_1(W)}{K_0(W)} \quad (1.2-38)$$

决定, E_0 为场分布归一化常数,

$$E_0 = \frac{UK_0(W)}{VK_1(W)} \left(\frac{2Z_0}{\pi a^2 n} \right)^{1/2} = \frac{WJ_0(U)}{VJ_1(U)} \left(\frac{2Z_0}{\pi a^2 n} \right)^{1/2} \quad (1.2-39)$$

Z_0 为真空中平面波的特征阻抗,

$$Z_0 = \frac{WU}{k_0} = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \quad (1.2-40)$$

式中 μ_0 和 ϵ_0 是真空中磁导率和介电常数。

(1.2-38)式是一超越方程, 需要进行复杂的数值计算方可确定 U 和 W , 在实际应用中也可采用如下近似式计算 U 和 W :

$$W \approx 1.1428V - 0.9960 \quad (1 < V < 3) \quad (1.2-41)$$

$$U = (V^2 - W^2)^{1/2} \quad (1.2-42)$$

对于平方律折射率分布光纤, 其基模场分在纤芯中为高斯函数分布, 在包层中则为负指数衰减分布,

$$E_r = \begin{cases} A \exp\left[-(r/W_0)^2\right] & 0 \leq r \leq a \\ B \exp(-W_0 r/a) & r > a \end{cases} \quad (1.2-43)$$

这时, 决定场分布函数形状的唯一参数是基模模场半宽 W_0 , 通过一定的方法选择合适的 W_0 , 可将任意折射率分布光纤的场分布函数近似为(1.2-43)式表述的高斯分布, 这称之为单模光纤的高斯近似。确定 W_0 的近似计算公式有,

$$W_0/a = 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6} \quad (1.5 < V < 3) \quad (1.2-44)$$

上式适合于对阶跃折射率分布光纤进行高斯近似。对于渐变折射率分布光纤, 则有:

$$W_0/a = AV^{-5/(s+2)} + BV^{-3/2} + CV^{-6} \quad (1.5 < V < 3) \quad (1.2-45)$$

其中, A、B、C 为三个实验参数,

$$\begin{cases} A = (0.4 + 2.851g^{-5/6})^{1/2} \\ B = \exp(0.298g^{-1}) - 1 + 1.478[1 - \exp(-0.077g)] \\ C = 3.76 + \exp(4.19g^{-0.418}) \end{cases} \quad (1.2-46)$$

对于任意折射率分布光纤, 也可以采用“等效阶跃光纤 (ESF) 近似”的方法, 将实际渐变折射率分布 $n(r)$ 用等效阶跃折射率分布 $\bar{n}(\bar{r})$ 代替, 选择合适的等效参数 $\bar{n}_1, \bar{a}, \bar{\Delta}$ (或 $\bar{V}$), 进而求出等效本征值 $\bar{U}$ 和 $\bar{W}$ (或 $\bar{\beta}$), 从而可以用已知的阶跃光纤场分布函数描述实际光纤的场分布。

3. 单模光纤的双折射与基模的偏振特性

在单模光纤中传输的基模 HE_{11} 模实际上是由两个偏振方向相互垂直的线偏振模 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 所构成, 对于理想的均匀各向同性直圆柱光纤, HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 的传播常数相同, 即具有相同的位相, 其合成光场是一个方向不随时间变化的线偏振场。如果 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 存在相位差 Φ , 则合成光场的方向将以光频作周期变化, 形成圆偏振或椭圆偏振, 实际光纤总是不同程度地存在非均匀性和各向异性, 从而导致形成“双折射”, 即 x 方向的折射率 n_x 与 y 方向折射率 n_y 不相等, 这时, HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的传播常数不相等 ($\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$), 形成相位差 $\Delta\beta \cdot L$ (L 为传播长度), 使得光波在光纤中传播时, 其偏振状态将沿着光纤长度作线偏振-椭圆偏振-圆偏振-椭圆偏振-线偏振的周期性变化。

光纤的双折射大小由双折射参数 B 来描述:

$$B = \Delta\beta / k_0 \quad (1.2-47)$$

式中 $\Delta\beta$ 为两正交线偏振模传播常数之差, 基模偏振特性的变化则由双折射的拍长 L_B 来描述:

$$L_B = 2\pi / \Delta\beta = \lambda_0 / B \quad (1.2-48)$$

单模光纤的基模偏振方向的随机变化, 对于光纤通信以及光纤传感等应用是有害的, 在光纤通信中, 它会引起偏振色散, 导致脉冲信号展宽; 在光纤传感中, 偏振态不稳定会

带来测量误差。因此，在许多应用场合，都要求对光纤的偏振态进行控制，或者采用各种偏振保持光纤，以获得稳定的基模偏振态。

§ 1.3 光纤的损耗与色散

1. 光纤的损耗

光波在实际光纤中传输时，光功率将随传输距离增加而作指数衰减，即

$$P(z) = P(0) \exp(-\kappa z) \quad (1.3-1)$$

式中 κ 即为光纤的功率损耗系数，

$$\kappa = \frac{1}{z} \ln \frac{P(0)}{P(z)} \quad (1.3-2)$$

κ 的单位为“奈贝”。在光纤应用中，通常以“分贝(dB)”来表示光纤的损耗，记为 α ， α 定义为每单位长度光纤的功率衰减分贝数，

$$\alpha = \frac{10}{z} \log_{10} \frac{P(0)}{P(z)} \approx 4.34\kappa(\text{dB}) \quad (1.3-3)$$

产生光纤损耗的机理主要有三个方面：吸收、散射和弯曲所引起的损耗。

吸收损耗是指由于光纤材料的量子跃迁，使得光功率转换成热量。光纤的吸收损耗包括基质材料的本征吸收、杂质的吸收和原子缺陷的吸收。本征吸收是指紫外和红外电子跃迁与振动跃迁带引起的吸收，这种吸收带的尾端延伸到光纤通信波段，但引起的损耗一般很小(0.01~0.05dB/km)。杂质吸收主要是各种过渡金属离子(Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{3+} 、 Mn^{3+} 、 Cr^{6+} 等等)的电子跃迁以及氢氧根离子(OH^-)的分子振动跃迁所引起的吸收，通过适当的光纤制备工艺可以得到纯度很高的光纤材料，使过渡金属离子的含量降到ppb(10^{-9})量级以下，从而基本上可以消除金属离子引起的杂质吸收，而 OH^- 所引起的吸收则难以根除，它构成了光纤通信波段内的三个吸收峰(1.39 μm 、1.24 μm 和0.95 μm)和三个通信窗口(0.85 μm 、1.31 μm 和1.55 μm)，其中1.55 μm 是光纤的最低损耗波长。原子缺陷吸收主要是光纤材料受到热幅射或光幅射作用所引起的吸收，对于以石英为纤芯材料的光纤，这种吸收可以忽略不计。

散射损耗是光纤中由于某种远小于波长的不均匀性(如折射率不均匀、掺杂粒子浓度不均匀等等)引起的对光的散射所造成的光功率损耗。其中，在小信号功率传输时，最基本的散射过程是“瑞利散射”，其特征是，散射光强正比于 $1/\lambda^4$ 。正因为如此，目前光纤通信的光源波长逐步向长波长发展。当光纤中传输的光功率超过一定值(阈值功率)时，还会诱发另外两种散射过程，即受激喇曼散射与受激布里渊散射，引起光纤的非线性损耗。因此，在光纤通信中，一般要求信号功率低于非线性散射的阈值功率。

多模光纤弯曲损耗是指由于光纤的弯曲，使一部分高阶模从光纤纤芯中辐射出去，所引起的损耗。光纤的弯曲损耗随着光纤弯曲的曲率半径的减小而指数增大，当曲率半径小于某一个临界曲率半径 R_c 时，所引起的损耗将大至不能忽略的量级。对于多模光纤， $R_c \approx 10\text{cm}$ ，对于单模光纤，弯曲损耗主要是基模 LP_{01} 模的功率泄漏所致，其临界曲率半径 R_c 。

可近似表示为:

$$R_c \approx 20 \frac{\lambda_o}{\Delta^{3/2}} \left(2.748 - 0.996 \frac{\lambda_o}{\lambda_c} \right)^{-3} \quad (1.3-4)$$

除了上述三种损耗机理之外, 实际光纤在包层之外的涂覆层(见下章)也会产生附加损耗, 这是因为导模的功率(尤其是高阶模)有相当一部分是要在包层之中传输的, 如果涂覆层材料折射率与包层材料折射率相近, 这部分光功率就会进入涂覆层之中, 而涂覆层材料的损耗是非常高的, 这就带来导模光功率的损耗。

2. 光纤的色散

光纤的色散是指由于光波脉冲的不同频率成份的传播速度(群速度)不同所导致的脉冲展宽。在多模光纤中存在有三种色散, 即 1) 材料色散, 它是由于不同的光源频率所对应的群速度不同所引起的脉冲展宽; 2) 波导色散, 它是由于不同的光源频率所对应的同一导模的群速度不同所引起的脉冲展宽; 3) 多模色散, 它是由于不同的导模在某一相同光源频率下具有不同的群速度所引起的脉冲展宽。在单模光纤中, 由于只有基模传输, 因此不存在着多模色散, 但波导色散与材料色散依然存在; 此外, 由于构成基模的两个正交线偏振模具有不同的群速度, 还会引起偏振色散。

光脉冲展宽可由其在光纤中传播的群延时差来表征, 记为 $\Delta\tau$,

$$\Delta\tau = \Delta\tau_n + \Delta\tau_w + \Delta\tau_m \quad (1.3-5)$$

其中, $\Delta\tau_n$ 、 $\Delta\tau_w$ 和 $\Delta\tau_m$ 分别为材料色散、波导色散和多模色散引起的群延时差。导模在光纤中传播的群延时 τ 定义为光脉冲行经单位轴向距离所需的时间, 它等于群速度 V_g 的倒数:

$$\tau = \frac{1}{V_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d\beta}{cdk_0} \quad (1.3-6)$$

对于弱导阶跃光纤, 可导出材料色散和波导色散群延时 τ_n 和 τ_w 分别为:

$$\tau_n = \frac{1}{c} \left(n - \lambda_o \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (1.3-7)$$

$$\tau_w = \frac{n\Delta}{c} \frac{d(Vb)}{dV} \quad (1.3-8)$$

其中 b 为定义的归一化传播常数,

$$b = \frac{W^2}{V^2} = \frac{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}{n_1^2 k_0^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (1.3-9)$$

由此导出 $\Delta\tau_n$ 和 $\Delta\tau_w$ 分别为:

$$\Delta\tau_n = \frac{d\tau_n}{d\lambda} \cdot \delta\lambda = -\frac{\lambda_o}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \cdot \delta\lambda \quad (1.3-10)$$