

《光纤通信》第2章

《数据通信技术》

—第8章 光纤

主讲：郑秋匀

系部：数据科学与工程系

办公室：逸夫楼413

E-mail:109345@qq.com

光纤通信-第2章 光纤

1

光纤结构

重点

2

光纤传输原理

重点、难点

3

单模光纤

重点、难点

4

多模光纤

5

光纤使用特性和产品介绍

6

课后巩固提升

- 光纤是光纤通信系统的传输介质，它具有传输**损耗低**、**传输容量大**的特点。
- 对于光纤而言，其衰减和色散特性是影响系统性能的主要因素。当入射到光纤内的光功率较大时，光纤呈现的非线性效应对系统的传输会产生较大的影响。
- 本章用几何光学和波动方程两种方法阐述了光纤中光的**传输机理**，在此基础上，对**单模**光纤和多模光纤传输特性进行了分析，并介绍了光纤制作工艺、光纤产品及其光纤的使用特性。
- 本章**重点**：光纤的结构、传输原理及单模、多模光纤的色散及衰减特性。
- 本章**难点**：数值孔径及单模传输条件等的计算与分析
- 共**4**课时。

资料推送

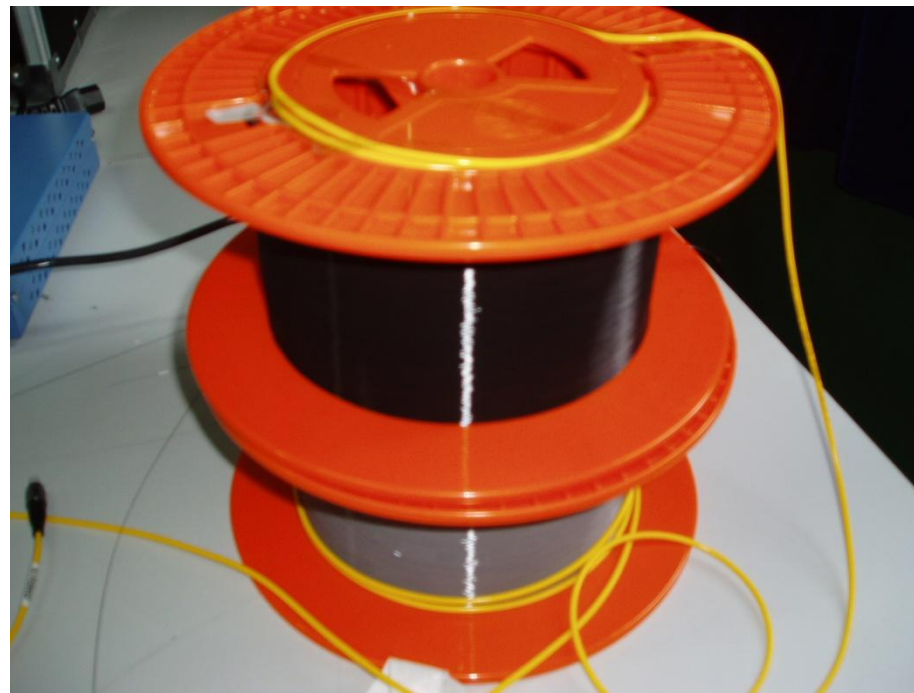
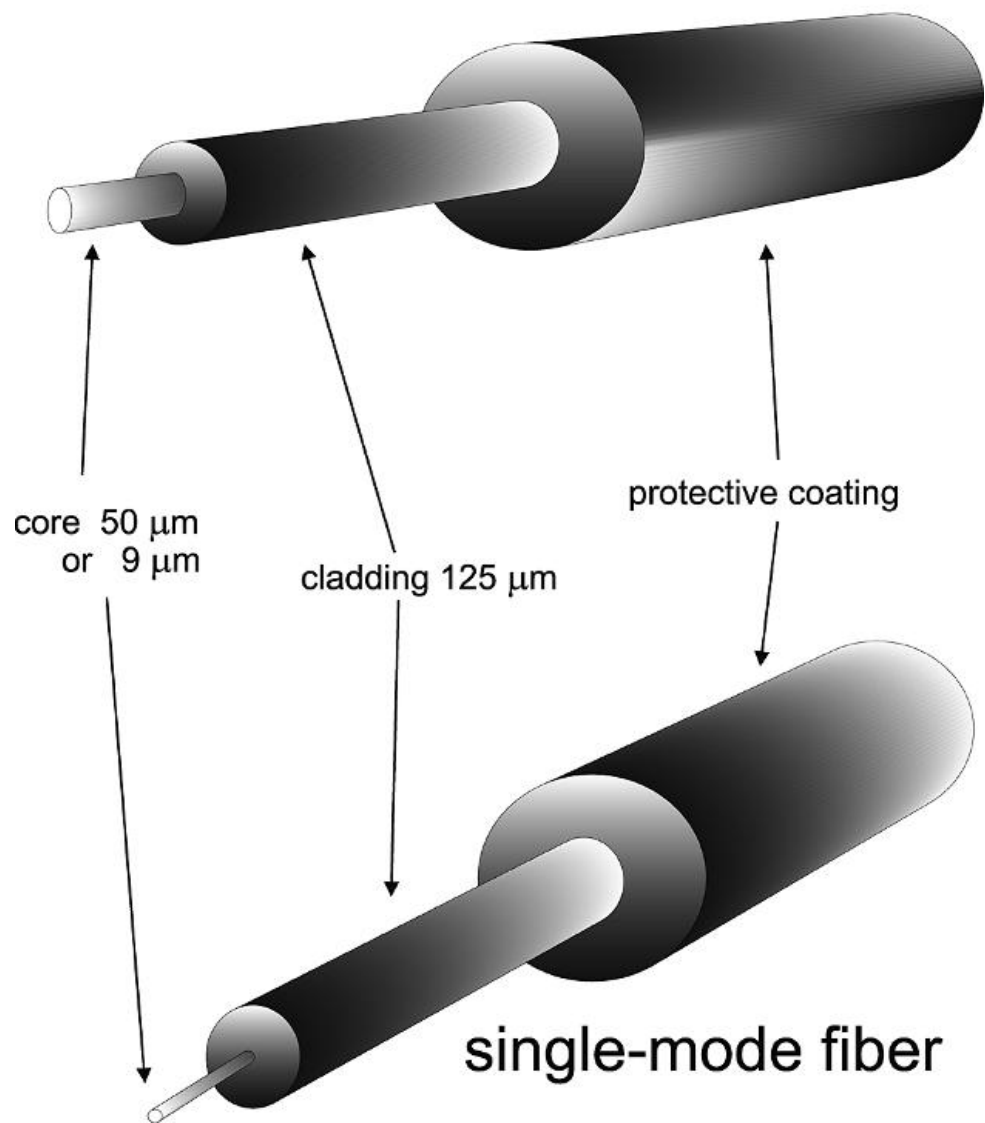


2009年诺贝尔物理学奖，演讲辞 (推送网址：

https://www.sohu.com/a/255711196_464025?f=index_betapagehotnews_4)

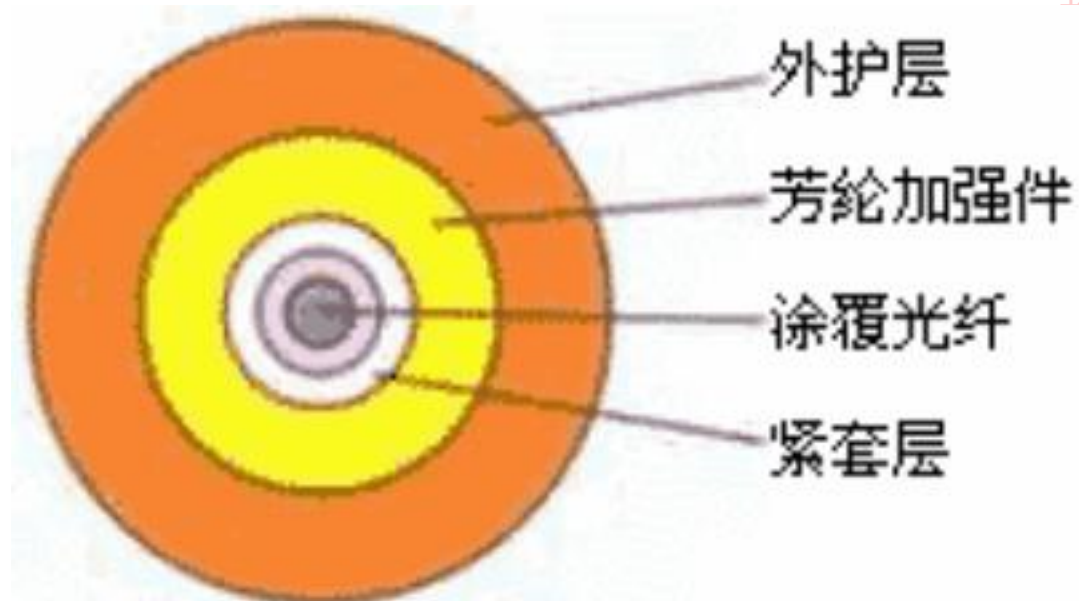
一根玻璃管子改变全世界的奇迹!

multimode fiber



光纤概述

- 任务：约束、导引光能量使其从发送端到达接收端。
- 定义
 - 光纤是一种介质圆柱光波导，它能够约束并导引光波在其内部或表面附近沿其轴向向前传播。
- 结构
 - 光纤由纤芯、包层、涂覆层、套塑层构成。



光纤的分类

□材料

- 石英系光纤、多组份玻璃光纤、塑料包层光纤、全塑光纤等

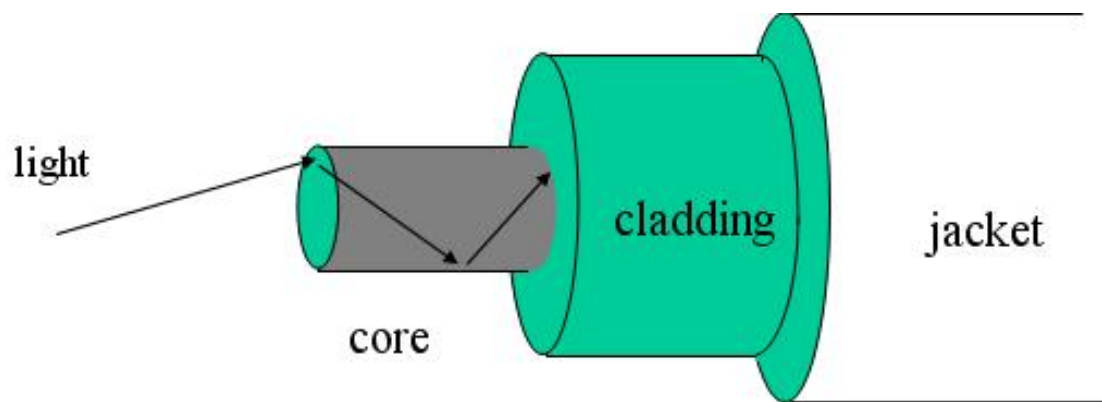
□折射率分布

- 阶跃光纤、梯度光纤

□传输特性

- 多模光纤、单模光纤

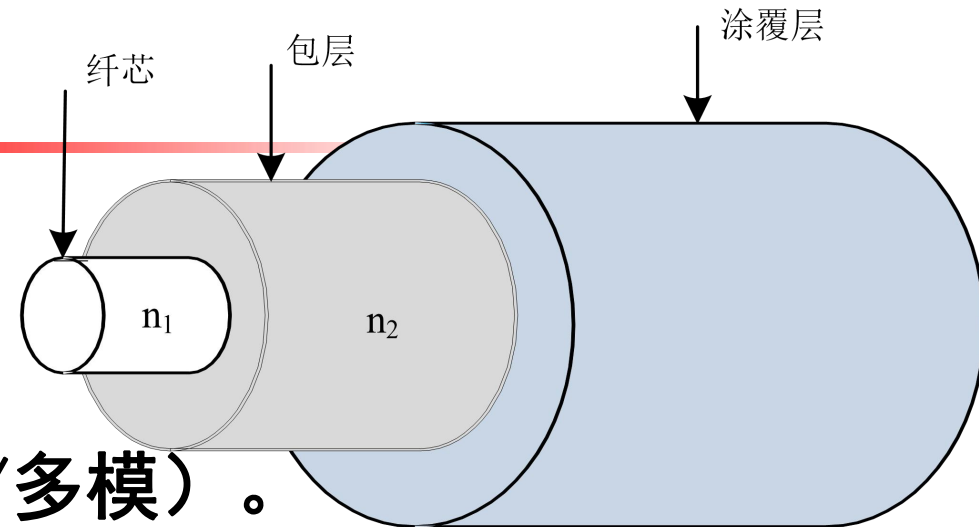
石英光纤



于1954年由荷兰人van Heel提出的光纤结构

- ❑ 石英是已知的具有最低光学损耗的介质材料。
- ❑ 纤芯（fiber core）通常为掺锗石英（ $\text{SiO}_2:\text{Ge}$ ）折射率 n_1 大，包层（cladding）通常为纯石英（ SiO_2 ）的折射率 n_2 ，涂覆层为树脂材料，用来增加韧性，保护光纤不易折断。
- ❑ 在芯包界面上满足全反射条件的光将被约束在芯子内沿光纤传输。

石英光纤



□ 纤芯

- 1) 位置：光纤的中心部位。
- 2) 尺寸：直径 $d_1 = 4 \sim 50 \text{ um}$ （单/多模）。
- 3) 材料：高纯度 SiO_2 ，掺有极少量的掺杂剂(GeO_2 , P_2O_5)，作用是提高纤芯折射率(n_1)，以传输光信号。

□ 包层

- 1) 位置：位于纤芯的周围。
- 2) 尺寸：直径 $d_2 = 125 \text{ um}$ 。
- 3) 材料：高纯度 SiO_2 ，极少量掺杂剂(如 B_2O_3)的作用则是适当降低包层折射率(n_2)，使之略低于纤芯折射率，使得光信号能约束在纤芯中传输。

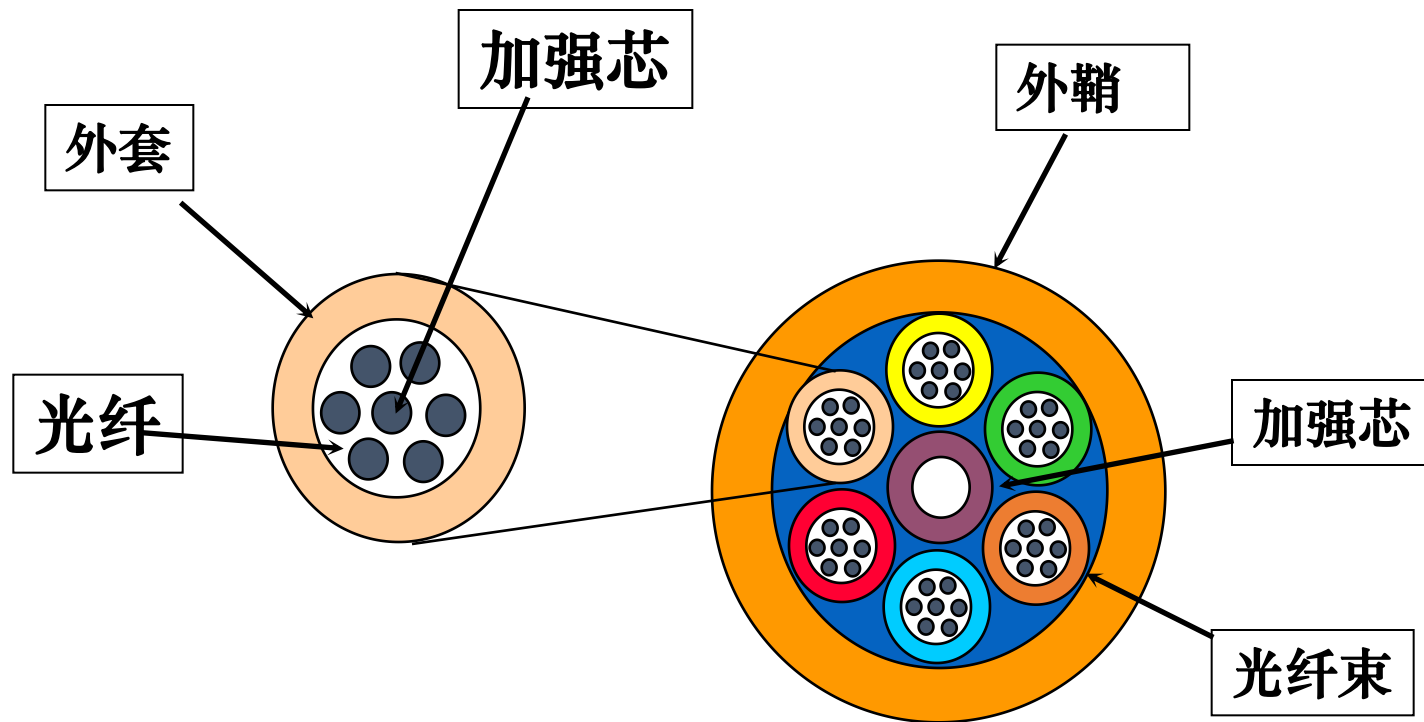
石英光纤

□ 涂覆层



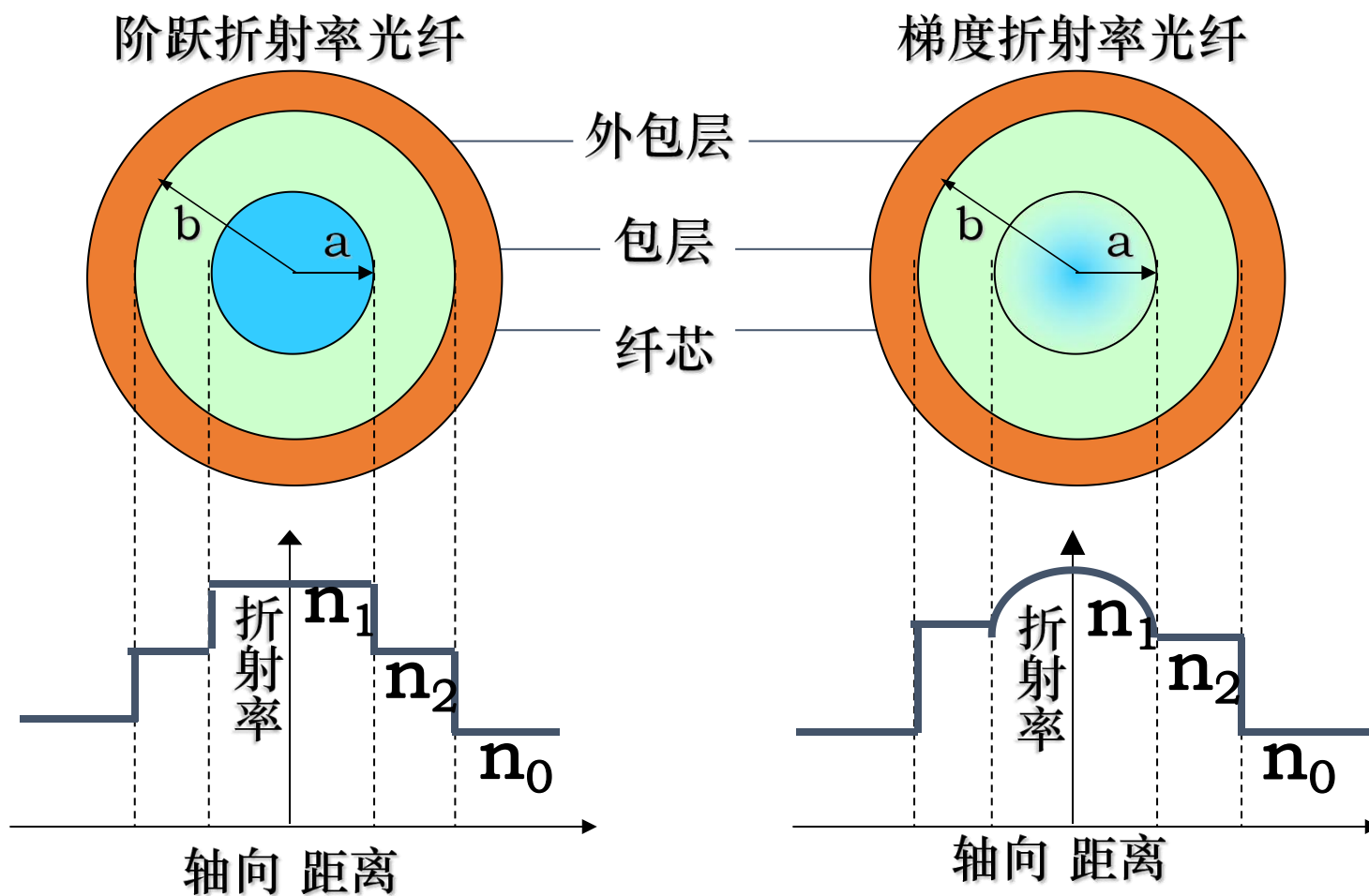
- 1) 位置：位于光纤的最外层；
- 2) 尺寸：涂覆后的光纤外径约为1.5 mm；
- 3) 结构和材料：包括一次涂覆层，缓冲层和二次涂覆层
 - a) 一次涂覆层一般使用丙烯酸酯、有机硅或硅橡胶材料；
 - b) 缓冲层一般为性能良好的填充油膏（防水）；
 - c) 二次涂覆层一般多用聚丙烯或尼龙等高聚物；
- 4) 作用：保护光纤不受水汽侵蚀和机械擦伤，同时又增加光纤的机械强度与可弯曲性，起着延长光纤寿命的作用。

高密度多芯光缆剖面结构



2.1 光纤结构

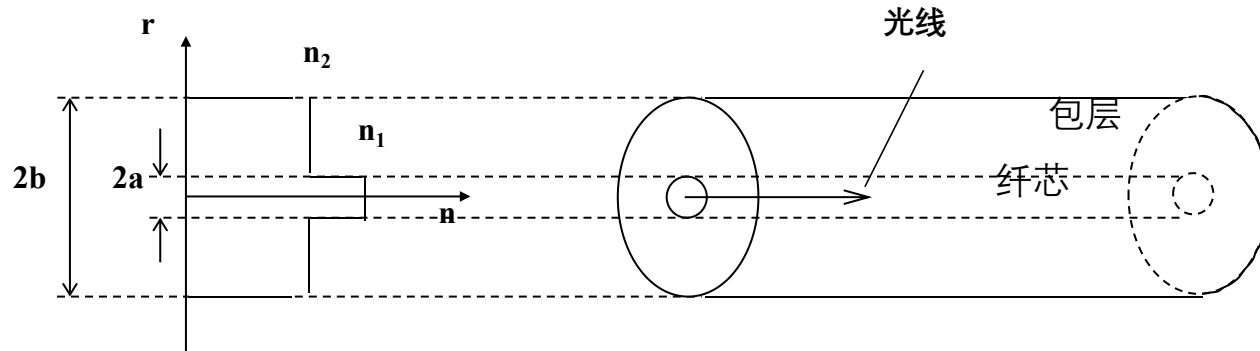
- 按照光纤横截面上径向**折射率的分布**特点，我们把光纤分为阶跃折射率光纤和渐变折射率光纤两大类。



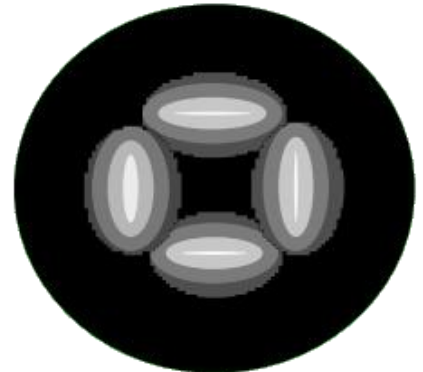
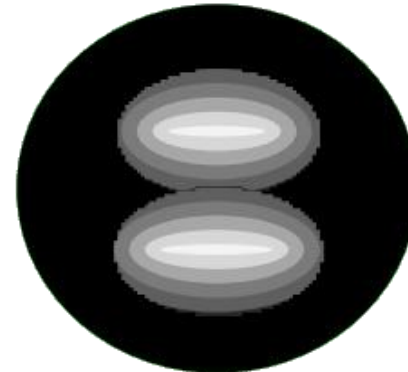
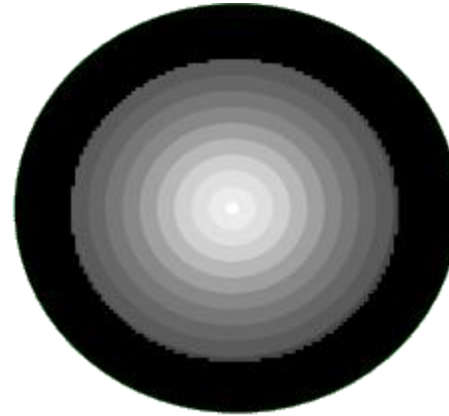
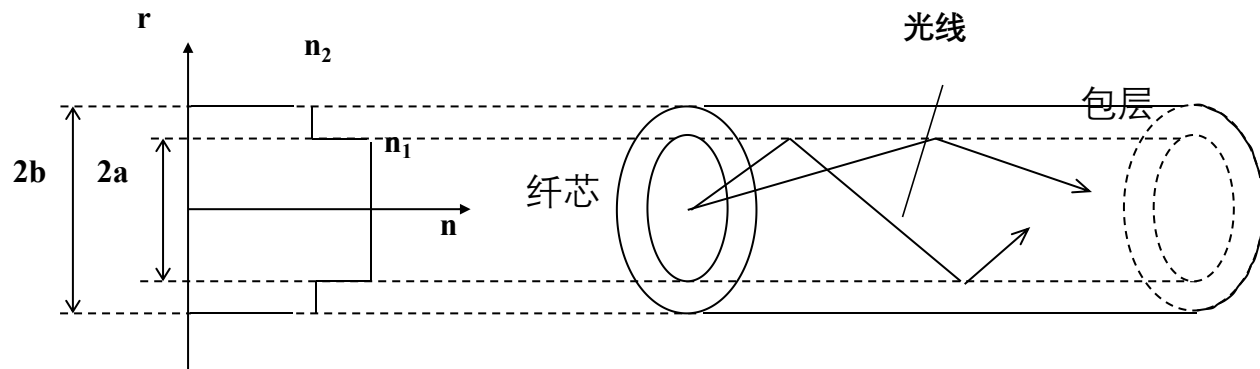
2.1.1 阶跃折射率光纤

□ 阶跃折射率光纤的折射率分布

(a) 单模阶跃折射率光纤



(b) 多模阶跃折射率光纤



□ 多模阶跃光纤由于存在着较大的模间色散，使用受到了很大限制。

2.1.2 渐变折射率光纤

- 渐变折射率光纤纤芯中折射率不是常数，而是在纤芯中心最大，为 n_1 ，沿径向（ r 方向）按一定的规律逐渐减小至 n_2 ，包层中折射率不变仍为 n_2 。其折射率分布是：

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\gamma \right]^{1/2}, & r < a \\ n_2, & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (2.1.2)$$

式中， r 是光纤的径向半径，参数决定折射率形式。 Δ 为**相对折射率差**。 Δ 值越大，把能量束缚在纤芯中传输的能力越强，对渐变多模光纤而言，其典型值为0.015。

2.1.2 渐变折射率光纤

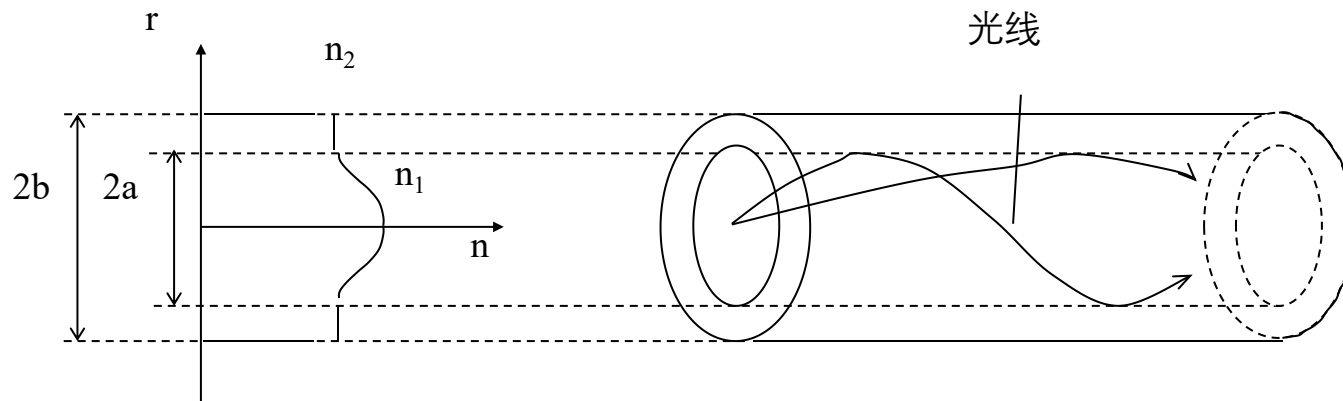


图2.1.2 渐变折射率光纤

- 与阶跃型光纤不同的是，光线传播的路径是连续的**弯曲线**。
- 渐变折射率光纤的纤芯折射率不是常数，在中心轴线处最高，然后沿径向逐渐减小。
- 光在每层传输后，方向都要发生变化，渐变折射率光纤中光线会向轴线方向发生弯曲现象，而且越靠近轴线弯曲程度就越高，渐变折射率光纤对光的这种作用也称为**自聚焦**。

思考题：阶跃型光纤和梯度（渐变）型光纤主要区别？

- 1. 折射率发布不同。阶跃型在纤芯和包层界面（ $r=a$ ）处，折射率呈阶跃式变化；而渐变型光纤在纤芯中心折射率最大，沿着径向方向按一定规律逐渐减少至包层折射率。
- 2. 模式色散不同。理想单模阶跃型光纤只有一个光模式（光线）在光纤中传输，不存在模间色散，而多模阶跃型光纤存在较大模间色散；而渐变型光纤具有自聚焦现象，模间色散小。

表 2.1 不同类型光纤的典型参数

参 数	阶跃型单模光纤	阶跃型多模光纤	渐变型多模光纤
Δ	0.003	0.02	0.015
芯径 $2a$ (μm)	7~10	100	50~62.5
包层直径 $2b$ (μm)	125	140	125
可用光源	LD	LED	LED、LD
工作波长	1310,1550	850, 1310, 1550	850, 1310, 1550
应用场合	长距离、高速率	短距离、低速率	中距离、高速率

2.2 光纤传输原理

- 光具有**粒子**性和**波动**性，对其分析也有两种方法：一是几何光学分析法，二是波动方程分析法。
- 用射线光学理论分析光纤中光传输特性的方法。
- 分析方法的前提条件是光的波长要远小于光纤尺寸，用这种方法可以得到一些基本概念：全内反射、数值孔径等，其特点是直观、简单。

2.2.1 几何光学分析法

□ 1. 全内反射

光在不同介质中的传播速度不同，折射率与光之间的关系为

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.2.1)$$

- 式中， c 是光在真空中的传播速度， $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ， v 是光在介质中的传播速度， n 是介质的折射率。空气的折射率近似为1。
- 折射率越高，介质材料密度越大，光在其中传播的速度越慢。
- 在均匀介质中，光是直线传播的，当光由一种折射率介质向另一种折射率介质传播时，在介质分界面上会产生反射和折射现象。

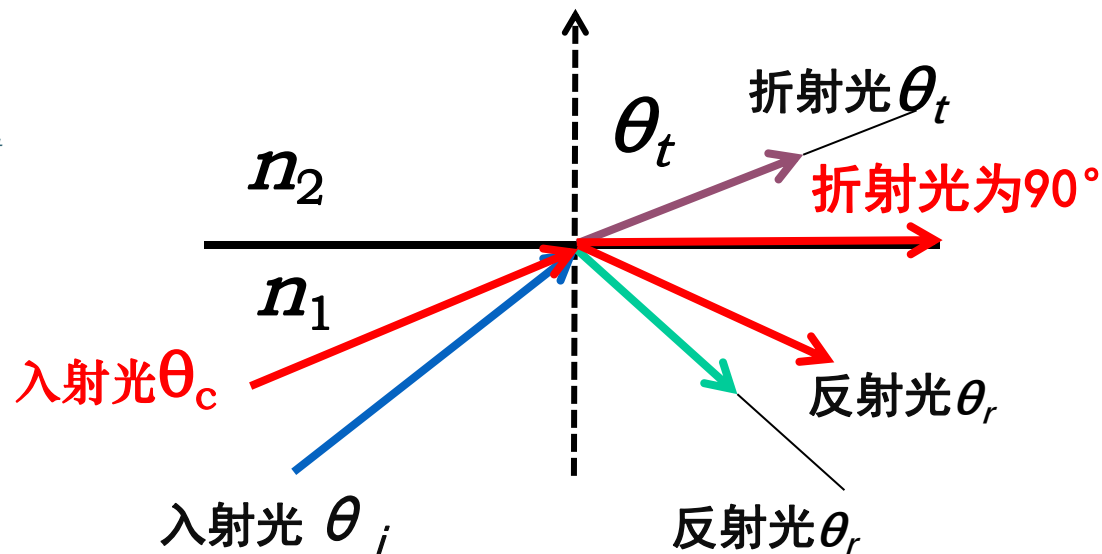
1. 全内反射

□ 斯涅尔定理，光的折射与反射

■ 折射定律 $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$

■ 反射定律 $\theta_i = \theta_r$

■ 全反射 $\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$

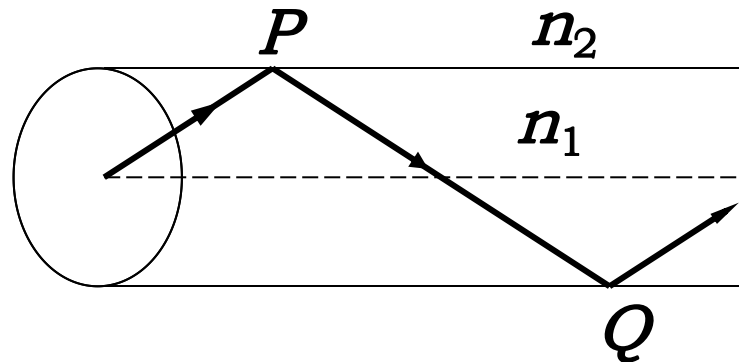
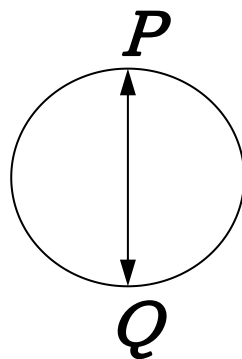


- 当折射角 θ_2 为 90° 时，折射光将沿着分界面传播，此时对应的入射角 θ_1 称为**临界入射角**，记为 θ_c ，即 $n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$
- 如果入射光的入射角，所有的光将被反射回入射介质，这种现象称之为**全反射**，光纤就是利用这种折射率安排来传导光的。
- 光纤纤芯的折射率高于包层折射率，在纤芯与包层的分界面上，光发生全内反射，沿着光纤轴线**曲折**前进。

光纤中光线的分类

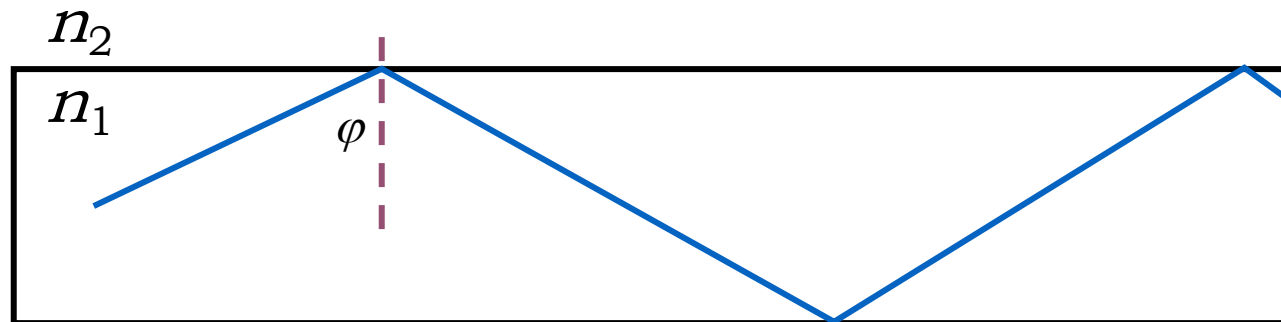
- 由于光纤的结构为圆柱体，光线可分为两类：子午光线和斜光线
- 1. 子午光线。传播路径为光纤纵剖面内的平面折线，与光纤轴相交，在横截面投影为一条直径

(a)子午光线



- 子午光线的传播条件必须在纤芯与包层的界面处形成全反射，即

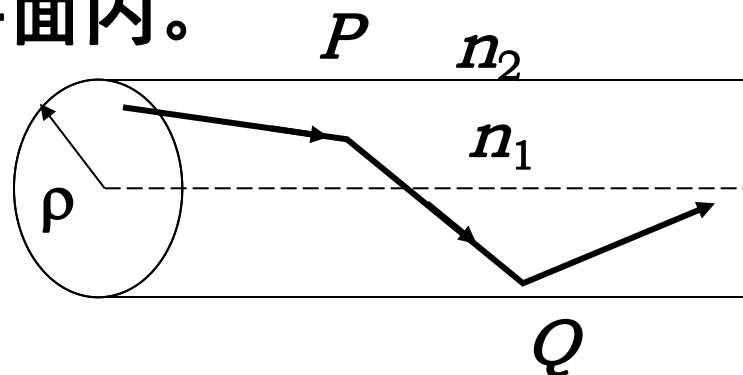
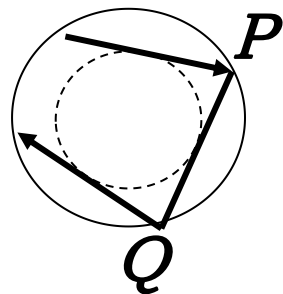
$$\sin \varphi_{\min} = \frac{n_2}{n_1}$$



光纤中光线的分类

- 2. 斜光线。传播路径为**空间折线**，入射光线与光纤轴心线不相交，沿一条类似于螺旋形的路径传播，在横截面内的投影为非封闭多边形，在传播过程中不固定在一个平面内。

(b)斜光线



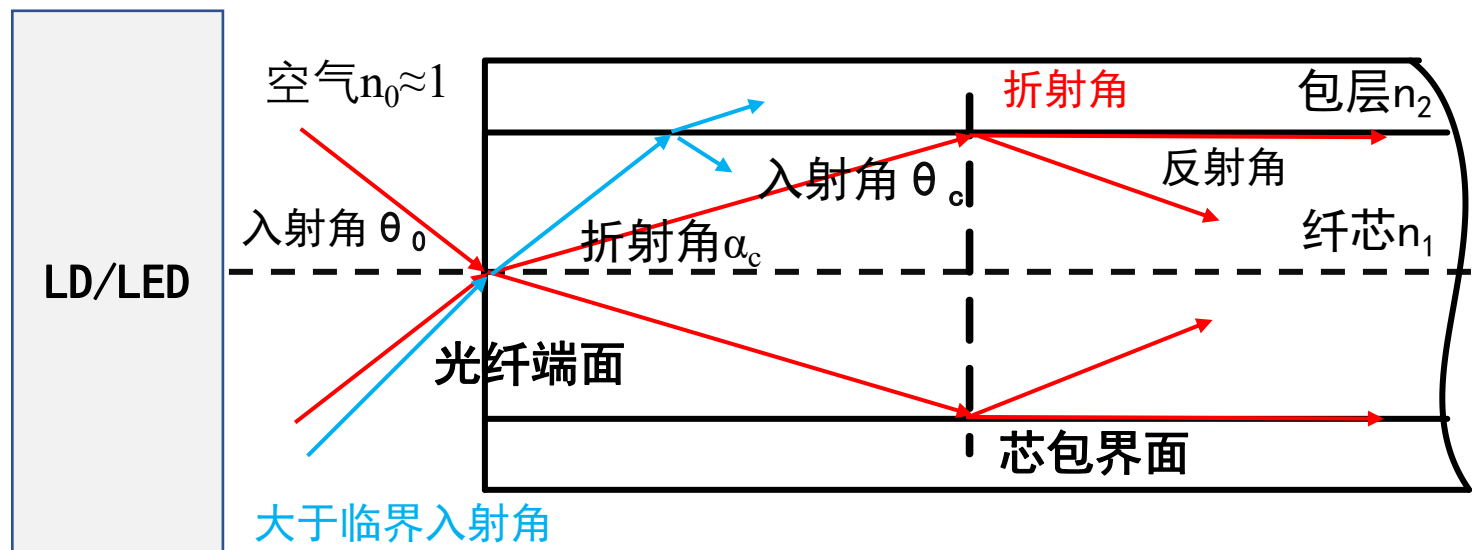
- 光在光纤里面传播，**不同路径**的光波，将以不同的相位到达纤芯和包层界面，光波在纤芯和包层界面发生全反射，光波在反射时，也会发生相位移，只有那些在同一等相位面上各点同相的波，才能不断反射并传播下去。

2. 数值孔径

□ 数值孔径是光纤一个非常重要的参数，体现光纤与光源之间的耦合效率。

□ 三区：空气 n_0 ，纤芯 n_1 ，包层 n_2 ， $n_1 > n_2 > n_0$

□ 两面：光纤端面，芯包界面



□ 只有从空气缝隙到光纤端面光的入射角**小于** θ_0 ，入射到光纤里的光线才能传播。实际上 θ_0 是个空间角，也就是说如果光从一个限制在 $2\theta_0$ 的锥形区域中入射到光纤端面上，则光可被光纤**捕捉**。

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \alpha_c \quad \alpha_c + \theta_c = 90^\circ \quad \sin \theta_0 = \frac{n_1}{n_0} \sin \alpha_c = \frac{n_1}{n_0} \cos \theta_c = \frac{n_1}{n_0} (1 - \sin^2 \theta_c)^{1/2} = \frac{n_1}{n_0} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{1/2}$$

2. 数值孔径

□ 对空气，有 $n_0 \approx 1$ ，故有 $\sin \theta_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ (2.2.6)

□ 光纤端面上入射光线形成导波光线的最大入射角的正弦，它的大小，决定光纤捕捉光线的能力。

□ 记作 **NA** (Numerical Aperture) 光纤的数值孔径

$$NA = \sin \theta_0 = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.2.7)$$

□ **数值孔径**还可以表示成，

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = (2n_1^2)^{1/2} \times \frac{(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{(2n_1^2)^{1/2}} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.2.8)$$

式中 Δ 相对折射率差 $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

2. 数值孔径

- 不同的光纤，其NA的值不同。NA是一个无量纲的数，通常NA的数值在0.14~0.5范围之内。
- 光纤的数值孔径NA越大，外部光源发送的光线就越容易被耦合到该光纤中。
- 数值孔径是可以测量的，可用专门的仪器测量，相比之下，光纤的折射率就不容易精确测量，纤芯和包层折射率 n_1 ， n_2 为常数， n_1 ， n_2 为相差很小，光纤通信中实际的光纤都是属于弱导光纤。所以，在光纤产品的技术资料中，能找到数值孔径NA值，但并没有光纤纤芯和包层折射率的值。
- 相对折射率差 Δ 大一些，光纤与光源之间的耦合效率就高一些，但是 Δ 过大，色散影响就会严重，实际光纤总有 $\Delta \ll 1$ 。

课堂消化：弱导阶跃光纤纤芯和包层折射率指数分别为 $n_1=1.48$ ， $n_2=1.46$ ，请计算：（1）芯和包层的相对折射率差 Δ ；（2）光纤的数值孔径NA；（3）最大接收角是多少？。

解（1）相对折射率差

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1.48 - 1.46}{1.48} \approx 0.0135$$

（2）光纤的数值孔径

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1.48^2 - 1.46^2} \approx 0.242$$

（3）最大接收角

$$\theta_0 = \arcsin(NA) = 14^\circ$$

2.2.2 波动方程分析法

- ❑ 当光纤的尺寸与光的波长相当时，用几何光学分析法分析光纤中光的特性便受到了限制，这时须用**波动**方程分析法。
- ❑ 波动方程法是基于电磁场理论，在麦克斯韦方程的基础上，运用光纤纤芯与包层分界面的边界条件，从而导出光纤中光场的分布形式，得到光在光纤中的传播特性。通常有两种方法求解光的波动方程：**矢量解法和标量解法**。
- ❑ 矢量解法是一种严格的传统解法，求**满足边界条件**的波动方程的解，这种方法比较烦琐，所得结果也比较复杂。
- ❑ 目前实用的光纤几乎都可以看成是弱导波光纤，对于这种弱导波光纤，可以寻求一些**近似解法**，使问题得到简化。

1. 光波基本理论

□行波：沿着z方向传播的行波表达式

$$E_x(t, z) = E_0 \cos(\omega t - kz + \phi_0) \quad (2.2.15)$$

式中， E_0 是振幅， ω 是光波的角频率， k 是传播常数或波数， $k=2\pi/\lambda$ ， λ 为介质中光波的波长， ϕ_0 是初始相位常数。记 λ_0 为光在真空中的波长， k_0 为光在真空中的波数，那么有

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda_0} = k_0 n \quad (2.2.16)$$

电场是个有方向的量，(2.2.15)式表示电场的指向是在x方向上，大小是在x方向上随着时间t和传输距离z变化，如果将电场写成一般表达式，设它沿r方向传播，则有

$$\vec{E}(t, \vec{r}) = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \phi_0) \quad (2.2.17)$$

1. 光波基本理论

- 电场和磁场总是同时存在，它们频率相同，方向相互垂直，如图2.2.6所示。从图中可以看出 E_x 场量总是在 x 方向， H_y 场量总在 y 方向，两者矢量乘的方向是 z 方向，即光波能量的传播方向。
- 电磁波为**平面波**。（在与波传播方向垂直的无限大平面内，电场、磁场的方向和振幅以及相位都保持不变的波）

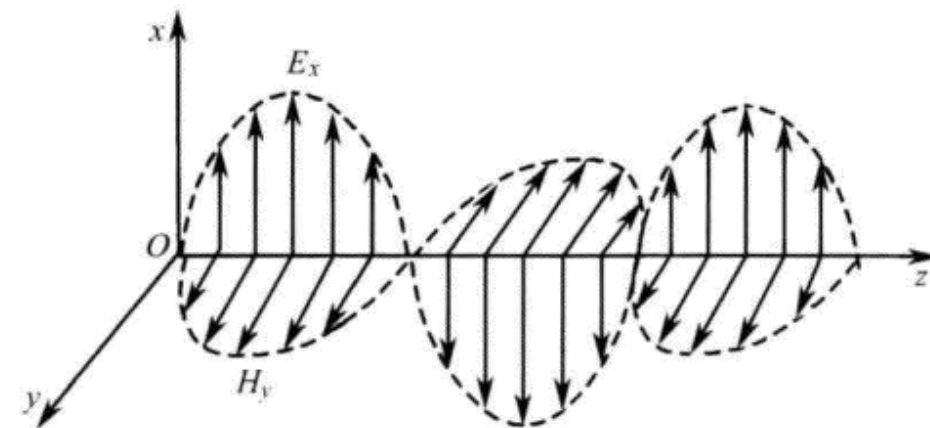


图 2.2.6 电场 E_x 与磁场 H_y 在空间固定的 z 点上随时间按正弦规律变化，在固定的时间点上随空间坐标 z 按正弦规律变化，沿着 z 方向传播且相互正交

$$E_x = E_0 e^{j(\omega t - kz + \phi_0)} = E_0 e^{j\phi_0} e^{j(\omega t - kz)} = E_{0x} e^{j(\omega t - kz)} \quad (2.2.20)$$

2. 光纤中的光波

□ (1) 麦克斯韦方程

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{array} \right. \quad (2.2.31)$$

式中为E电场强度矢量，D为电位移矢量，H为磁场强度矢量，B为磁感应强度矢量

2. 光纤中的光波

□ (2) 波动方程及其解

$$E_z = Ae^{-j\beta z} \sin m\varphi \begin{cases} \frac{J_m(\frac{U}{a}r)}{J_m(U)}, & r \leq a \\ \frac{K_m(\frac{W}{a}r)}{K_m(W)}, & r > a \end{cases} \quad (2.2.38)$$

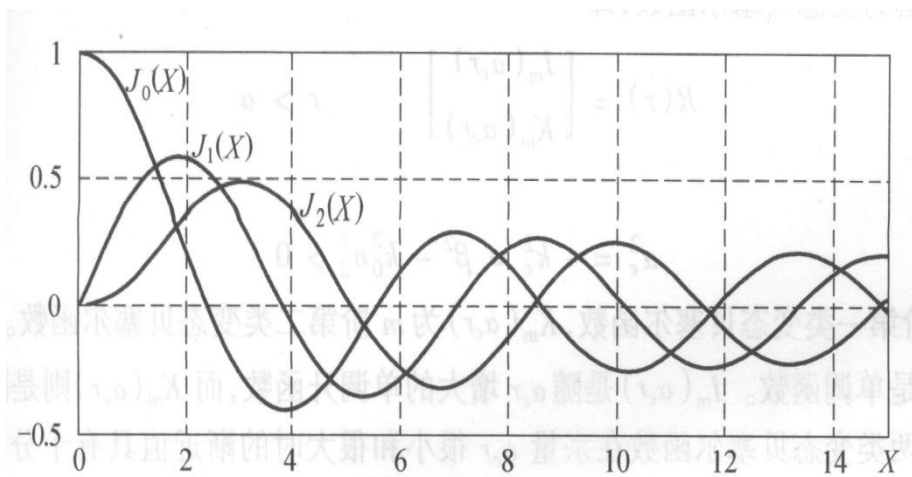
$$H_z = Be^{-j\beta z} \cos m\varphi \begin{cases} \frac{J_m(\frac{U}{a}r)}{J_m(U)}, & r \leq a \\ \frac{K_m(\frac{W}{a}r)}{K_m(W)}, & r > a \end{cases} \quad (2.2.39)$$

- 忽略时间因子，引入无量纲参数 U 、 W 和 V 。
- 式中 m 为整数， U 为**横向传输**常数， W 为**横向衰减**常数， U 和 W 决定纤芯和包层横向， r 方向电磁场的分布。
- β 决定 z 方向电磁场分布和传输性质，是**纵向**传输常数。
- 利用这三个无量纲参数，可得到两个贝塞尔方程

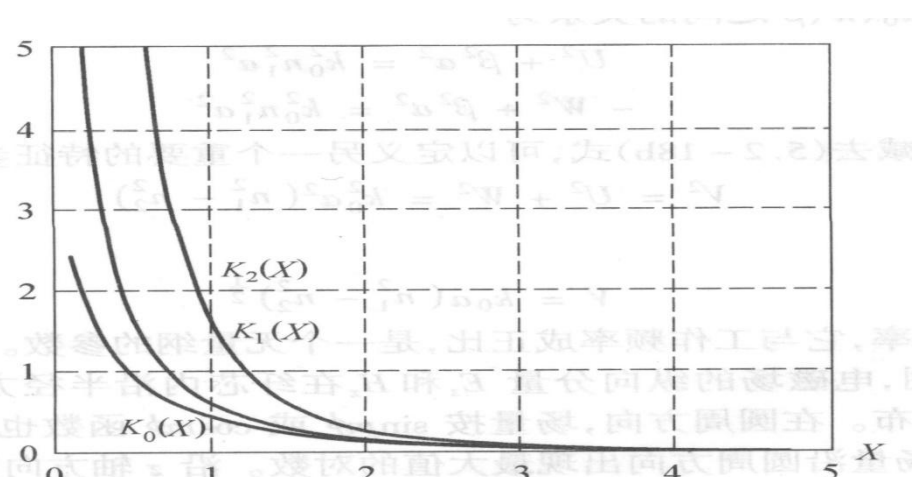
2. 光纤中的光波

图2.2.8 贝塞尔函数曲线

(a) 第一类贝塞尔函数曲线



(b) 第二类贝塞尔函数曲线



- 光能量主要在纤芯中传输，在 $r = 0$ 时，电磁场为有限实数，在包层中，光能量沿径向 r 迅速衰减，当 r 趋于无穷时，电磁场消失为零。
- $m = 0、1、2$ 阶贝塞尔函数

2. 光纤中的光波

- 1. 电磁场的纵向分量 E_z 和磁场 H_z 在纤芯内沿半径方向用第一类贝塞尔函数描述，其场量在径向呈驻波分布，在圆周方向，场量按 $\sin m\Phi$ 或 $\cos m\Phi$ 规律变化，也呈驻波分布。
- 2. 电磁场沿 z 轴方向呈行波状态，其传播常数（也称相位常数）为 β 。包层中场量沿圆周方向以及轴向分布规律与纤芯一样，这样可以保证包层与纤芯界面处的边界条件得到满足。
- 3. 与纤芯中场不同的是，包层中场量用第二类贝塞尔函数描述，它随 r 的增长呈现指数迅速衰减的特性。这样，电磁波能量主要集中在纤芯之内传播。
- 4. 从波动方程解的结果分析，它并不象几何光学分析法形容的那样，光线完全在纤芯内反射传播，在包层内，电磁场同样存在，只不过能量较小而已，这也是在纤芯与包层分界面上，电磁场须满足边界条件的结果。

2. 光纤中的光波

- 每一条曲线都相应于一个导模。每一条曲线表示一个传输模式的 β 随 V 的变化，平行于纵轴的竖线与色散曲线的交点数就是光纤中允许存在的导模数，由交点纵坐标可求出相应导模的传播常数 β 。
- **V 为光纤的归一化频率**，它与光纤的结构参数和工作波长有关。

$$V = \sqrt{U^2 + W^2} = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (2.2.42)$$

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda_0} = k_0 n \quad (2.2.16)$$

3. 光波的模式

- 光纤中光波的模式可以简单地分为导波模和辐射模。
- **导波模**是指电磁场作**纤芯**中按简谐函数变化，在**包层**中按指数规律衰减的模式。导波模存在的条件是 $W>0$ ， $U>0$ 。
- **辐射模**是指电磁波能量在向 z 轴方向传播的同时又在包层中形成径向的辐射。
 - 实际上由于光源入射到光纤端面光线的入射空间角 θ 大于最大接收角 θ_0 ，导致光进入纤芯后在纤芯与包层的分界面上产生折射的结果。显然这类模式的光波不可能沿 z 轴方向长距离传输。

3. 光波的模式

- 导波模式是指在光纤中的光波的分布模式，即**电磁场分布形式**，通过对它的讨论，可以深入了解光纤中光的传播机理。
- 能在光纤中传播的光场的一个空间分布，这种空间分布在传播的过程中只有**相位**的变化，没有形态的变化，且始终满足边界条件，这种空间分布称为导波模的模式，简称模式。
- 光纤中导波模的模式分布中，电场和磁场的纵向分量都存在，我们将这种情况称之为**混合模**，根据或哪一个相对作用大些，又可将混合模分成**模EH** ($E_z > H_z$) 和**HE模** ($H_z > E_z$) ；
- 当 $m=0$ 时，将模 HE_{0n} 和模 EH_{0n} 分别记为 TE_{0n} 和 TH_{0n} ，它们分别对应于场的纵向分量 $E_z=0$ 和 $H_z=0$ 的模式，（横电模TE，传输方向无电场）简称**TE模和TM模**（横磁模TM，传输方向无磁场）。

4. 导波模截止

- 一个**导波模**的特性可以用三个参数 U 、 W 和 β 来表达， U 表示导波模场在**纤芯**内部的横向分布规律， W 表示它在**包层**中的横向分布规律，两者结合起来，就可以完整地描述导波模的横向分布规律， β 是轴向的相位传播常数，表明导模的纵向传输特性，要得到特征方程的精确解，须用数值法求解。
- **导波模截止**是指电磁能量已经不能集中在纤芯中传播而向包层弥散的临界状态，此时的导波模径向归一化衰减常数 $W=0$ ，将此时的归一化频率和归一化相位常数分别记为 U_c 、 V_c 。

$$V_c^2 = U_c^2 + W_c^2 = U_c^2$$

4. 导波模截止

□ (1) TE、TM模的截止条件

光波在光纤中传播时，如果工作波长、光纤参数 a 、 n_1 、 n_2 都是确定的，则归一化频率 是一个完全确定的数。如果大于某个模式的归一化频率，则有 $W>0$ ，该模式可以在光纤中传播；反之，如果小于某个模式的归一化截止频率，则 $W<0$ ，该模式截止，成为辐射模，也就是说，光纤中任意一个模式传播条件为

$$V > V_c \quad (2.2.54)$$

如 $V > 2.405$ ，则模就能在光纤中存在，所有 TE_{0n} 和 TM_{0n} 模中， TE_{01} 和 TM_{01} 模的归一化截止频率最低、截止波长最大。

课堂消化:

【例 2.2.2】 已知某光纤参数如下： $a = 4.0\mu\text{m}$ ， $\Delta = 0.003$ ，纤芯折射率 $n_1 = 1.48$ 。试问此光纤能否传输波长 $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ 的 TE_{01} 和 TM_{01} 模？如要使 TE_{01} 、 TM_{01} 模能够传输，光波长应做怎样的调整？

解：由方程 (2.2.42) $V = k_0 n_1 a \sqrt{2\Delta}$ 可得

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 a \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi}{1.31 \times 10^{-6}} \times 1.48 \times 4.0 \times 10^{-6} \sqrt{2 \times 0.003} = 2.2$$

而 TE_{01} 和 TM_{01} 模的归一化截止频率 $V_c = 2.405$ ，显然 $V < 2.405$ ，故不能传输波长为 $1.31\mu\text{m}$ 的 TE_{01} 和 TM_{01} 模。

对于 TE_{01} 和 TM_{01} 模，其截止波长为

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{V_c} n_1 a \sqrt{2\Delta} = \frac{2\pi}{2.405} \times 1.48 \times 4.0 \times 10^{-6} \sqrt{2 \times 0.003} = 1.20\mu\text{m}$$

即入射光波长应小于 $1.20\mu\text{m}$ 时，才能传播。

4. 导波模截止

□ (2) HE模的截止条件

□ $m=1$ 时，HE₁₁模不会截止，它可以以任意低的频率在光纤中传输。HE₁₁称为光纤中的**基模**或主模。当然，实际上如基模HE₁₁的工作波长过长，其携带的能量将向包层转移，传输损耗将加大。

□ $m>1$ 时

表 2.2 若干 HE_{*mn*} 模的截止频率

模式 HE _{<i>mn</i>}	HE ₂₁	HE ₂₂	HE ₂₃	HE ₂₄	HE ₃₁	HE ₃₂	HE ₃₃	HE ₃₄
截止频率 V_c	2.405	5.520	8.654	11.792	3.832	7.016	10.173	13.324

4. 导波模截止

□ (3) EH模的截止条件

表 2.3 若干 EH_{mn} 模的截止频率

模式 EH_{mn}	EH_{11}	EH_{12}	EH_{13}	EH_{14}	EH_{21}	EH_{22}	EH_{23}	EH_{24}
截止频率 V_c	3.832	7.016	10.173	13.324	5.136	8.417	11.620	14.796

5. 导波模远离截止

- 远离截止时的导波模是指归一化频率远大于归一化截止频率、能量几乎完全集中在纤芯中的模式状态。

2.3 单模光纤

□ HE11模是光纤的主模。如果光纤的归一化频率 $V < 2.405$ ，TE01、TM01、HE21等低阶模就不会出现，光纤中只有HE11模传输，因此阶跃型折射率光纤单模传输的条件：

$$V < 2.405$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_1 a \sqrt{2\Delta} < 2.405 \quad (2.3.1)$$

$$\lambda_c = \frac{2\pi n_1 a \sqrt{2\Delta}}{2.405} = 2.61 n_1 a \sqrt{2\Delta} \quad (2.3.2)$$

- 当单模光纤中的光波长满足 $\lambda > \lambda_c$ （单模光纤的截止波长），即可实现单模传输。
- 当传输条件 $\lambda < \lambda_c$ （截止），传输多种模式（基模和高次模等）。

课堂消化：有阶跃型光纤，若 $n_1=1.5$ ， $\lambda=1.31\mu\text{m}$ ，那么

1.若 $\Delta=0.25$ ，为保证单模传输，光纤纤芯半径 a 应取多大？

2.若纤芯 $a=5\mu\text{m}$ ，保证单模传输时， Δ 应怎么选取？

解：（1）由单模传输条件 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2.405$

得 $a \leq \frac{2.405 \times \lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$

由 $\lambda=1.31\mu\text{m}$ ， $n_2=n_1 - \Delta n_1=1.125$ ，则 $a \leq \frac{2.405 \times 1.31 \times 10^{-6}}{2\pi \sqrt{1.5^2 - 1.125^2}} = 0.5015\mu\text{m}$

（2）若纤芯 $a=5\mu\text{m}$ ，则 $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq \frac{2.405 \times \lambda}{2\pi a} = \frac{2.405 \times 1.31}{2\pi \times 5} = 0.0995$

$$n_2^2 \geq n_1^2 - 0.0995^2 = 1.5^2 - 0.0995^2 = 2.2400$$

即， $n_2 \geq \sqrt{2.24}$ 所以 $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \leq \frac{1.5 - \sqrt{2.24}}{1.5} = 0.0016$

【例 2.3.1】 已知某阶跃型光纤参数为 $\Delta = 0.003$ ， $n_1 = 1.46$ ，光波长 $\lambda = 1.31\mu\text{m}$ ，求单模传输时光纤应具有纤芯半径。

解：由式 (2.3.1) 可得

$$a < \frac{2.405\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{2\Delta}} = \frac{2.405 \times 1.31 \times 10^{-6}}{2\pi \times 1.46 \sqrt{2 \times 0.003}} = 4.44(\mu\text{m})$$

2.4 多模光纤

- **单模**光纤： **纤芯**较细4-10 μm
- 与光源**耦合**较难
- 光纤**接续**较难
- 传输**带宽**极宽：几百GHz
- **色散**小
- 适合长**距离**，大**容量**传输
- LD为光源，成本高
- **多模**光纤： **纤芯**较粗50-100 μm
- 与光源**耦合**较易
- 光纤**接续**较易
- 传输**带宽**较窄：几GHz
- **色散**较小
- 适合短**距离**，小**容量**传输
- 其终端设备结构简单，可用LED发光二极管作为光源，所以成本较为低廉。在小范围场所得到了广泛的应用

2.4.1 多模光纤的衰减

多模光纤的衰减机理与单模光纤相似，分成弯曲损耗、散射损耗和吸收损耗。

□ **弯曲损耗**分为两类：宏弯损耗和微弯损耗。

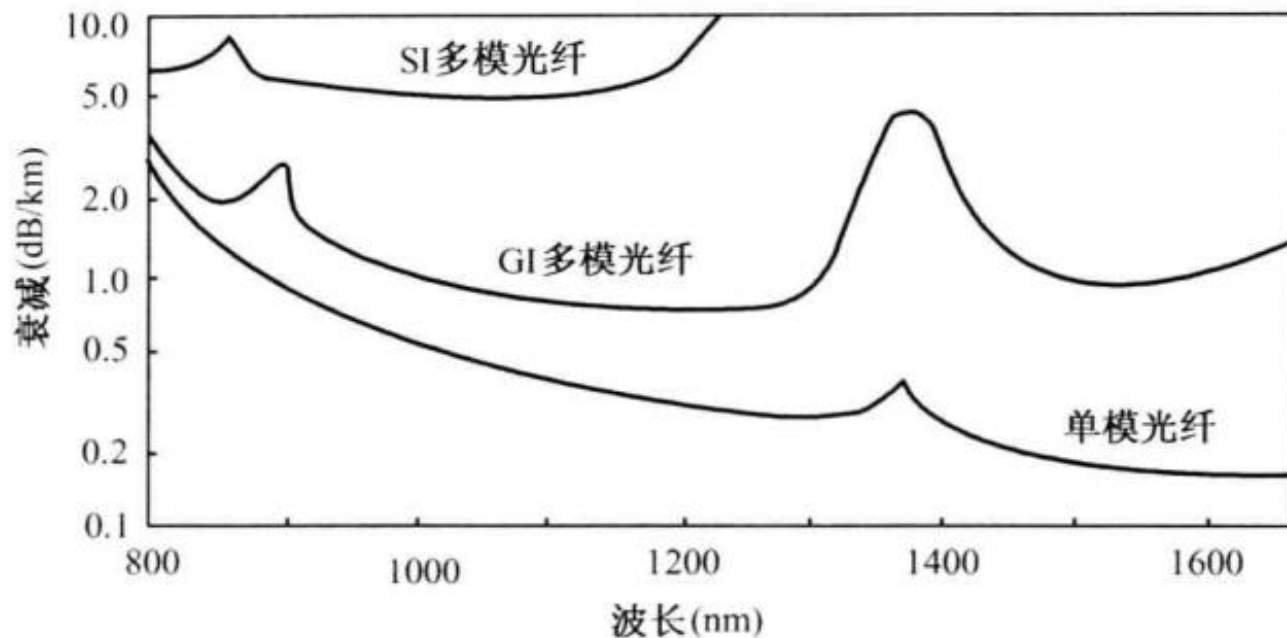
□ **宏弯损耗**是随着光纤弯曲的曲率半径的减小，光纤的辐射损耗增加的一种衰减，它与模式有密切的关系。当光纤弯曲时，高阶模式首先消逝。因为纤芯对高阶模式的限制作用不如低阶模式，所以首先从光纤中辐射出去的是高阶模式。宏弯损耗与弯曲半径成反比。

□ **微弯损耗**是因为光纤轴线的微观畸变引起的，光纤生产中的**不均匀性**或光纤在成缆时受到的**不均匀压力**都会造成微弯损耗，对于多模光纤，高阶模式比低阶模式到达纤芯包层边界的次数更多，所以受微弯损耗影响的几率大于低阶模式。



2.4.1 多模光纤的衰减

- ❑ **散射和吸收损耗**：由于多模光纤的掺杂浓度较高，因此散射和吸收损耗比单模光纤大。
- ❑ 在多模光纤中，高阶模式比低阶模式消逝得快。高阶模式在光纤中实际传输的距离更长，他们经历了更多的散射和吸收。



GI为渐变多模光纤
SI为阶跃多模光纤

图2.4.1 多模光纤和单模光纤的衰减

2.5 光纤使用特性和产品介绍

□ 2.5.1 光纤制作工艺

□ 光纤的制作工艺包括两个主要阶段，第一是制作预制棒，第二是拉丝。



2.5.2 光纤的使用特性

- 光纤的使用特性包括传输特性，几何特性，机械特性，环境特性等。
- 1. 传输特性：
 - 内容主要有衰减，数值孔径，色散，反向散射特性，群折射率(渐变折射率光纤的等效折射率)。
- 2. 几何特性
 - 几何特性有纤芯直径，包层直径和涂覆盖层直径，纤芯非圆性，包层非圆性和涂敷层非圆性，纤芯/包层和涂敷层同心性误差，标准长度。
- 3. 机械特性
 - 机械特性对光纤的使用特别重要。光纤必须能够经受住成缆和光纤敷设过程中的压力和张力，其参数有抗拉强度，静态、动态稳定疲劳，光纤翘曲半径，涂敷层剥离力等。
- 4. 环境特性
 - 环境特性有温度特性，水浸性能和湿热性能，这部分说明因为环境条件的变化导致衰减会增加多少，比如因为石英和光纤涂敷层的热膨胀系数不同，两者的长度的变化量相差非常大，于是产生的张力会使光纤发生弯曲，增加损耗。

2.5.3 光纤产品介绍

□ G. 651 光纤（渐变多模光纤）

- G. 651 光纤的工作波长有两种：1310nm 和 1550nm。在 1310nm 处具有最小色散值，在 1550nm 处具有最小衰减系数。
- 按照纤芯/包层尺寸，G. 651 进一步分为 4 种，它们的纤芯/包层直径/数值孔径分别为 50/125/0.200，62.5/125/0.275，85/125/0.275 和 100/140/0.316。
- 色散大，传输距离近，**应用于**中小容量，中短距离的通信系统。

2.5.3 光纤产品介绍

□2. G. 652光纤（标准单模光纤）

- G. 652是零色散波长在1310nm处的单模光纤，它的传输距离一般只受光纤衰减的限制。在1310nm处，该光纤的衰减率达到0.3~0.4dB/km。
- 目前已经铺设的光缆线路绝大部分都采用这种光纤，该光纤也可用于1.55波段、2.5Gb/s的干线传输，虽然在1550nm处的色散较大，为20dB/km，但如果采用高性能的电吸收调制器，传输距离可达600公里。但如果传输的数据速率达10Gb/s，只能传输50公里。
- 运用色散补偿技术，还可以用于波分复用系统。

DWDM的标准： ITU-T G. 692

- 对**G. 652**光纤，以193.1THz为中心、间隔100GHz的41个波长（192.1~196.1THz）
- 波长范围1530~1561nm，其中1548~1560nm波长区的16个波长更受青睐
- 16和8通路DWDM系统波长如下表示。

序号	中心频率（THz）	波长（nm）
1	192.1	*1560.61
2	192.2	1559.79
3	192.3	*1558.98
4	192.4	1558.17
5	192.5	*1557.36
6	192.6	1556.55
7	192.7	*1555.75
8	192.8	1554.94
9	192.9	*1554.13
10	193.0	1553.33
11	193.1	*1552.52
12	193.2	1551.72
13	193.3	*1550.92
14	193.4	1550.12
15	193.5	*1549.32
16	193.6	1548.51

2.5.3 光纤产品介绍

□3. G. 653光纤（色散位移光纤）

- G. 652光纤由于零色散与低衰减不在同一波长上，使工程应用受到很大限制，而G. 653则把零色散点从1.31 μm处移到1.55 μm处，所以也称G. 653为色散移位光纤DSF (dispersion-shifter fiber)。
- 它是单波长传输的最佳选择，但是对多信道应用而言，由于各信道光波之间的相位匹配很好，四波混频效应较强，会产生非常严重的干扰产物，所以不适合于WDM系统，目前已不再铺设。

□4. G. 654光纤（衰减最小光纤，又叫截止波长位移光纤）

- 为了满足海底光缆长距离通信的需求而研制的，其特点是在1.55 μm的衰减很小，仅为0.185dB/km，但在该波长处的色散较大，约为17~20 ps/nm·km，其零色散点在1.31 μm处。
- 截止波长移至1530nm处。

2.5.3 光纤产品介绍

□5. G. 655光纤（非零色散位移光纤）

- G. 655光纤是一种改进型的色散移位光纤，与G. 653相比，其零色散点不在1.55 μm 处，而是在1.525 μm 或者1.585 μm 处，1.55 μm 处有适当的微量色散。
- G. 655光纤适用于密集波分复用DWDM系统中，光纤中存在少量色散，四波混频反而减少。
- G. 655光纤目前为A, B, C三个子类。G. 655A光纤在C波段支持10Gb/s的波长速率、200GHz及以上间隔DWDM系统应用，C波段最大色散6ps/(nm.km)；
- 在C和L波段支持10Gb/s波长速率、100GHz及以下间隔的DWDM应用。C波段最大色散为10 ps/(nm.km)；
- G. 655C光纤在G. 655B的基础上将PMD降低到0.2 ps/(nm.km)，可支持10Gb/s波长速率DWDM系统传输距离达3000km以上。

G. 652和G. 655的比较

	G. 652光纤	G. 655光纤（真波）	LEAF光纤
1550nm窗口色散系数	15~20ps/nm. km	1.3~5.8ps/nm. km	1.0~6.0ps/nm. km
TDM 10Gb/s	需要DCF色散补偿技术, 价格较高	不需要色散补偿, 无电中继距离可达300km以上	不需要色散补偿, 无电中继距离可达300km以上
2.5Gb/s×N WDM系统	可以, 目前可实现600km的光复用段传输	可以, 可实现1100km的光复用段传输	可以, 可实现1700km的光复用段传输
10Gb/s×N WDM系统	需要进行色散补偿	不需要色散补偿	不需要色散补偿
光纤价格	1	1.5	2
光缆价格	1	1.2	1.3~1.4

2.5.3 光纤产品介绍

□6. G. 656光纤

- 这种光纤零色散点在S波段的短波侧。在1460至1565nm波长范围内，色散系数D有2、8.11和15ps/(nm.km)三个待定值，并且在S、C及L三个波段都有DWDM适应的色散。

□7. G. 657光纤：接入网用光纤

- 适用于小型器件和家庭布线使用的光纤，这种光纤对弯曲不敏感，数值孔径较大，可以承受较小的弯曲半径；

□8. 其他如色散补偿光纤等

- 色散补偿光纤DCF是具有负色散系数的光纤，为了便于现已铺设的1310nm系统采用波分复用和掺铒光纤放大器技术，将光纤工作波长从1310nm处移至1550nm处。标准单模光纤在1550nm处的色散为(17~20ps/(nm.km))，具有正的色散斜率，在其中加接具有负色散的色散补偿光纤，进行色散补偿。

2.5.4 光纤的型号

□ 光纤的规格代号由光纤数目、光纤类别、光纤主要尺寸参数、传输特性（使用波长、损耗系数、模式带宽）及适用温度等5个部分组成，各组成部分均用代号或数字表示。

□ 1. 光纤数目

光纤数目在光缆中用阿拉伯数字表示，见第7章。

□ 2. 光纤类别的代号及其意义

J—二氧化硅多模渐变型光纤

Z—二氧化硅多模准突变型光纤

X—二氧化硅纤芯塑料包层光纤

T—二氧化硅系多模突变光纤

D—二氧化硅系单模光纤

S—塑料光纤

2.5.4 光纤的型号

□3. 光纤主要尺寸参数

用阿拉伯数字以微米为单位表示多模光纤的芯径/包层直径或单模光纤的模场直径/包层直径。

□4. 传输性能

这部分用三组数字分布表示使用波长、损耗系数及带宽距离积，第一组数字规定如下：

1—使用波长在 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ 区域

2—使用波长在 $1.31\text{ }\mu\text{m}$ 区域

3—使用波长在 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 区域

第二组数字表示损耗系统的个数和小数点后一位的值，单位为dB/km，第三组数字是带宽距离积的千位数和百位数，单位为MHz·km，单模光纤无此项。

2.5.4 光纤的型号

□5. 适用温度代号及意义

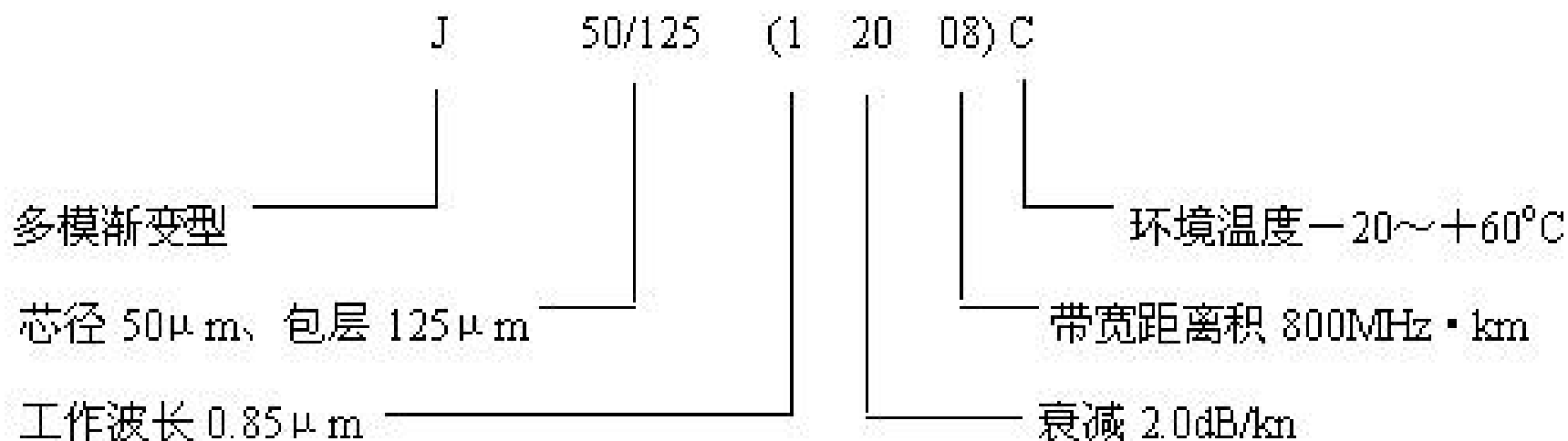
A—适用于 $-40\sim+40^{\circ}\text{C}$

B—适用于 $-30\sim+50^{\circ}\text{C}$

C—适用于 $-20\sim+60^{\circ}\text{C}$

D—适用于 $-5\sim+60^{\circ}\text{C}$

例：J50/125(12008)C，意义如下



2.6 课后巩固提升

- 1. 数值孔径是怎么定义的，其物理意义是什么？
- 2. **计算**：一阶跃折射率光纤的相对折射率差 $\Delta=0.005$ ， $n_1=1.5$ ，当波长分别为 $0.85\text{ }\mu\text{m}$ ， $1.31\text{ }\mu\text{m}$ ， $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 时，要实现单模传输，纤芯半径 a 应小于多少？

1. 数值孔径是怎么定义的，其物理意义是什么？

□答：数值孔径 (Numerical Aperture, NA)：光线进入光纤进行全反射的临界角 θ_0 的正弦值定义为数值孔径，反映光纤的收集光线的能力。

$$NA = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

数值孔径NA的**物理含义**：NA(或 θ_0)越大，光纤接收光的能力越强，耦合效率越高；NA越大，纤芯对光的束缚越强，光纤抗弯曲性能越好；NA越大，经光纤传输后产生的信号畸变越大，因而限制了信息传输容量。

2. 计算:一阶跃折射率光纤的相对折射率差 $\Delta=0.005$, $n_1=1.5$, 当波长分别为 $0.85\ \mu\text{m}$, $1.31\ \mu\text{m}$, $1.55\ \mu\text{m}$ 时, 要实现单模传输, 纤芯半径 a 应小于多少?

解 由单模传输的条件 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \leq 2.405$

推导出 $a \leq \frac{2.405 \times \lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$ 则 $\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} = 0.15$

当 $\lambda=0.85\ \mu\text{m}$ 时, $a \leq \frac{2.405 \times \lambda}{2\pi \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \approx \frac{2.405 \times 0.85 \times 10^{-6}}{2\pi \times 0.15} = 2.164\ \mu\text{m}$

同理, 当 $\lambda=1.31\ \mu\text{m}$, $a \leq 3.343\ \mu\text{m}$

当 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$, $a \leq 3.955\ \mu\text{m}$