

第四章 光波导原理

光波导原理

4.1 平板型介质光波导

4.2 通道型介质光波导

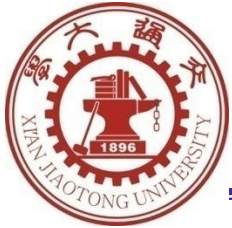
4.3 光纤

4.4 新型光波导



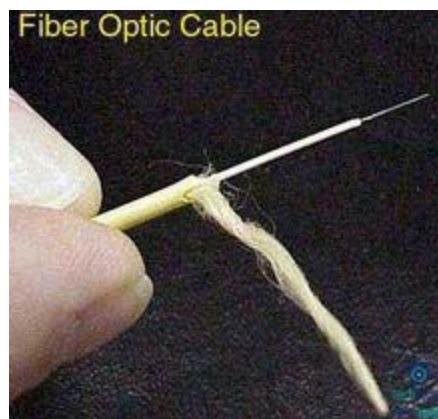
光纤（圆柱光波导）

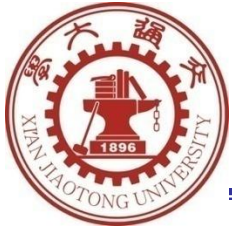
- 光纤的基本知识
- 光纤的结构参数
- 光纤的射线光学分析
- 光纤的物理光学分析
- 光纤的传输特性



光纤的基本知识

- 光纤是光导纤维的简写，是一种利用光在玻璃或塑料制成的纤维中的全内反射原理而达成的光传导工具。
- 前香港中文大学校长高锟和George A. Hockham首先提出光纤可以用于通讯传输的设想，高锟因此获得2009年诺贝尔物理学奖。
- 光纤一般分为三层：中心高折射率玻璃芯（芯径一般为50或62.5 μm ），中间为低折射率硅玻璃包层（直径一般为125 μm ），最外是加强用的树脂涂层。





光纤的基本知识—光纤的优缺点

传输介质	带宽	衰减系数 dB/km	中继距离 km	抗电磁干 扰性能	尺寸与 重量	敷设 安装	接续
对绞线	6 MHz	20	1~2	较差	大而重	一般	方便
同轴电缆	400 MHz	19	1.6	较差	一般	方便	较方便
光纤	>10GHz	0.2~3	>50	不受干扰	小而轻	方便	特殊

光纤的优点

带宽极宽，容量极大
衰减小，传输距离远
抗电磁干扰，保密性好，传输质量高
尺寸小重量轻**33g/km**，便于运输和敷设
原料丰富，节约金属

光纤的缺点

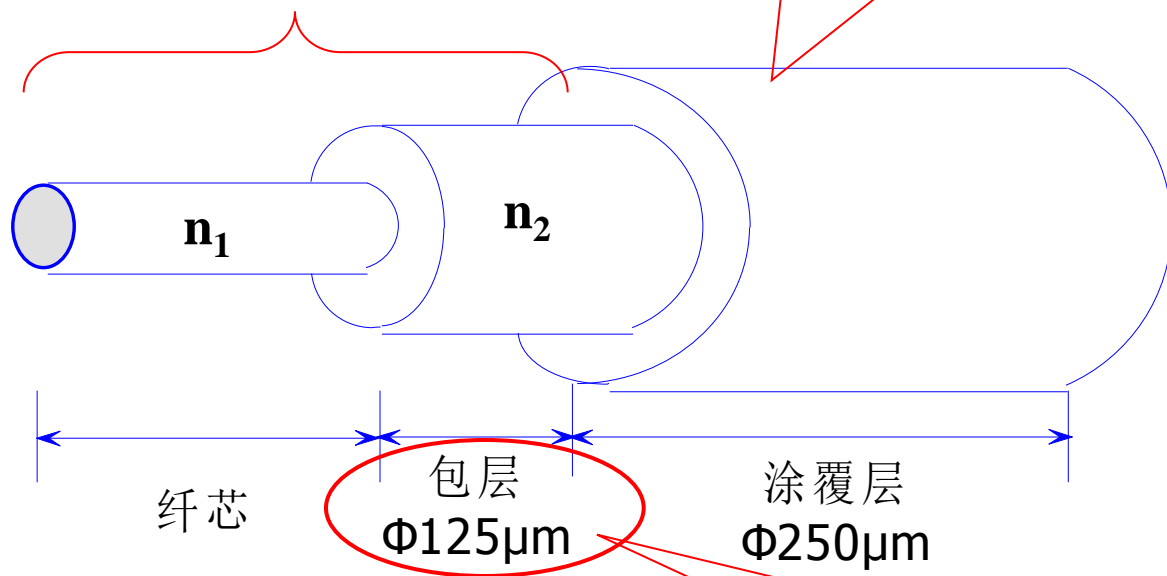
极易断裂
弯曲能力差
切断与接续要求高



光纤的基本知识—光纤的结构

纤芯和包层仅在折射率等参数上不同，结构上是一个完整整体

涂覆层的主要作用是
是为光纤提供保护



芯层: $\text{SiO}_2+\text{Ge}+\text{F}$

包层: SiO_2+F

内涂覆层: 丙烯酸树脂

外涂敷层: 丙烯酸树脂

通信光纤基本结构



光纤的基本知识—光纤的分类

按光纤折射率分布分：

- 阶跃折射率光纤；渐变折射率光纤

按光纤传输模式分：

- 单模光纤：芯径约10微米，光在其中几乎沿轴向传输，传输带宽10GHz.
- 多模渐变型光纤：芯径约50微米，光的传输轨迹近似为正弦型，传输带宽从数百MHz 到数GHz.
- 多模阶跃型光纤：芯径约62.5微米，光传输轨迹为“之”字形，传输带宽10MHz到50MHz.

按光纤材料分：

- 石英光纤：损耗小、性能好，常用于通信.
- 塑料光纤：损耗大、易于耦合、制作容易，用于短距离能量传导等，未来希望向光纤入户与局域网方向发展.

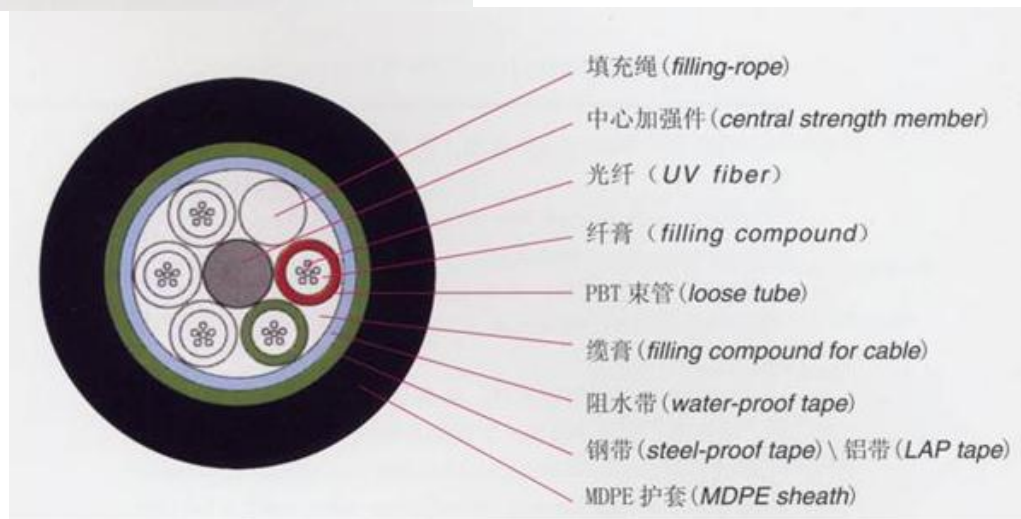


光纤的基本知识—光纤与光缆

- ▶ 光缆是以光纤为主要通信元件，通过加强件和外护层组合成的整体。
- ▶ 光缆是依靠其中的光纤来完成传送信息的任务，因此光缆的结构设计必须要保证其中的光纤具有稳定的传输特性。



松套管层绞式铠装光缆

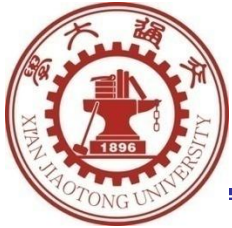




光纤的结构参数—直径

纤芯直径 $2a$ 、包层直径 $2b$

- 细要求：
 - 1、成本【光纤直径应尽量小】
 - 2、机械强度和柔韧性【石英光纤很脆，粗则易断】
- 粗要求：对接耦合【粗则易于耦合，损耗小】
- 平衡要求：总粗小于 $150\mu\text{m}$
 - 典型单模光纤芯径约 $10\mu\text{m}$ ，包层直径 $125\mu\text{m}$
 - 多模阶跃光纤芯径约 $62.5\mu\text{m}$ ，包层直径 $125\mu\text{m}$
 - 多模渐变光纤芯径约 $50\mu\text{m}$ ，包层直径 $125\mu\text{m}$



光纤的结构参数—数值孔径

➤ 数值空间 (N.A) 光纤可能接受外来入射光的最大受光角(ϕ_{0max})的正弦与入射区折射率的乘积.

全反射要求: $\theta_1 > \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$

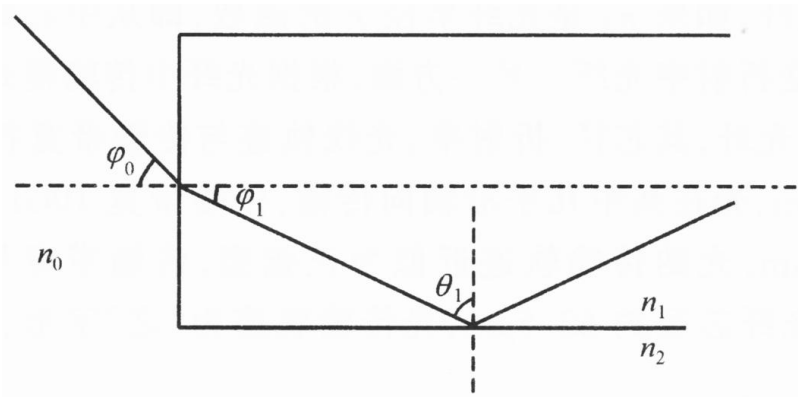
$$n_0 \sin \phi_{0max} = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c) = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

于是得 $N.A. = n_0 \sin \phi_{0max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

N.A.代表光纤接收入射光的能力, 只有 $\phi < \phi_{max}$ 的光锥内的光才可能在光纤中发生全反射而向前传播.

对于波长 $\lambda = 1.55\mu m$ 处典型值 $n_1 = 1.46$, $n_2 = 1.455$, 可算得

$$N.A. = 0.12$$



光纤界面光传输情况



光纤的结构参数—相对折射率、归一化频率

- 相对折射率 Δ 定义为纤芯折射率同包层折射率的差与纤芯折射率之比：

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

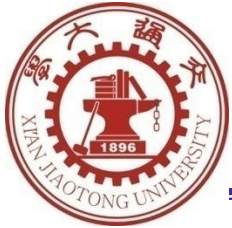
一般 n_1 只略大于 n_2 ：单模光纤 $\Delta=0.3\%$ ，多模光纤 $\Delta=1\%$ ，于是

$$N.A. = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{n_1 \Delta (n_1 + n_2)} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

- 归一化频率 V 表示在光纤中传播模式多少的参数，定义为

$$V = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} N.A.$$

- 与平板波导中的归一化频率定义一致。
- a 和 $N.A.$ 越小， V 越小，在光纤中的传播模式越少。
- 当 $V < 2.405$ 时，只有基模能传播；而当 $V > 2.405$ 时，为多模传输态。

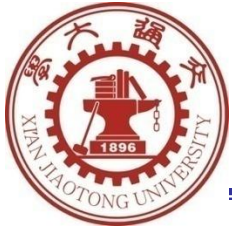


光纤的结构参数—折射率分布

➤ 纤芯折射率分布 $n(r)$ 通式为:

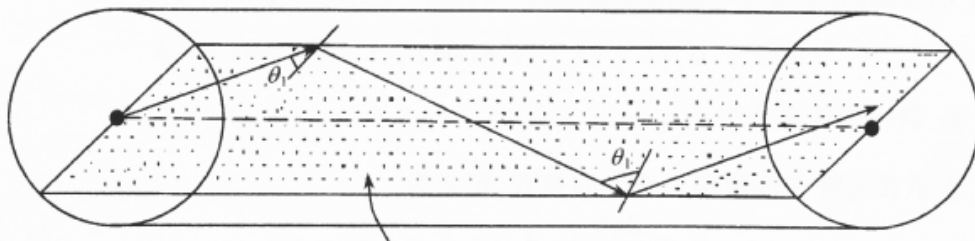
$$n(r) = n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}}$$

- $n(0)$ 为纤芯中心折射率, r 取值范围为 $0 \leq r \leq a$, α 为折射率分布系数.
- α 取值不同, 折射率分布不同:
 - $\alpha = \infty$ 时, 折射率为阶跃型分布
 - $\alpha = 2$ 时, 折射率为平方律分布(渐变型分布的一种)
 - $\alpha = 1$ 时, 折射率为三角型分布



光纤的射线光学分析—子午光线

- 平板波导：光轨迹在一个平面内，只要用界面入射角 θ 就能描述光线的方位。
- 光纤：光线可能通过波导轴线(子午光线)而在同一平面内传播，也可不通过轴线(偏射光线)在不同的平面内传播【光线与界面法线夹角 θ ，与轴线夹角 φ 】。
- 子午光线：入射角通过圆柱轴线，且大于临界角时，光将在柱面上不断发生反射，形成曲折光线，传导光线的轨迹始终处于入射光线与轴线决定的平面(子午面)内。

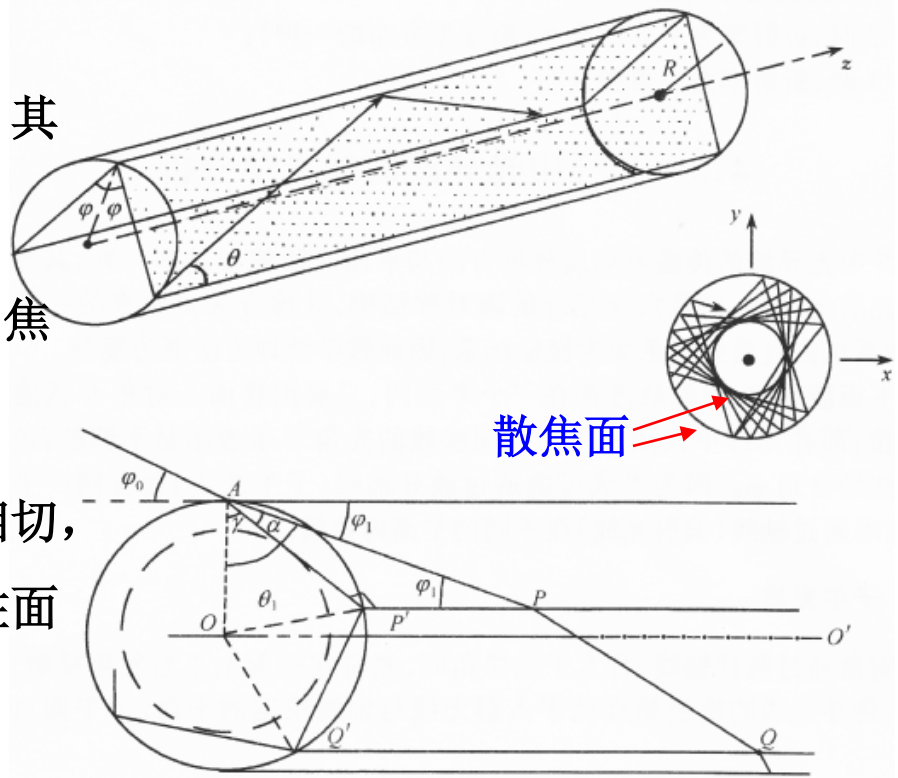


光纤芯中的子午光线



光纤的射线光学分析—偏射光线

- 入射光线不通过圆柱波导轴线时，传导光线按空间折线传播，称**偏射光线**。
- 偏射光线的端截面投影被完全被限制在**两个共轴圆柱面【散焦面】**间。
- 两散焦面之间光波按驻波分布，其外场沿径向按指数衰减。
- 入射角 θ_1 越大，内焦面越逼近外焦面【 $\theta_1=90^\circ$ 时，两焦面重合】。
- 光纤端面光线入射面与圆柱面相切，光纤中的传导光线为一条与圆柱面相切的螺线。



圆柱介质波导中的偏射光线



光纤的物理光学分析—场方程

- 假设光纤为无限长圆柱系统，芯区半径 a ，折射率 n_1 ；包层沿径向延伸至无限远【 $r \rightarrow \infty$ ，这一假定主要是考虑到实际的导波模的包层内的场随 r 的增加迅速衰减，“看”不到包层的外边界】，折射率 n_2 ($< n_1$)； $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ，无损。

- E_z 满足的波动方程为

$$\nabla^2 E_z(x, y, z) + k_0^2 n^2 E_z(x, y, z) = 0$$

- 在圆柱坐标系中波动方程为

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z(\varphi, r, z)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z(\varphi, r, z)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E_z(\varphi, r, z)}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 E_z(\varphi, r, z) = 0$$

- 采用分离变量法，令 $E_z = R(r)\Phi(\varphi)Z(z)$ ，则上式可化为三个独立的方程：



光纤的物理光学分析—场方程

$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = \beta^2$
光沿z向传播, 考虑无穷远处场有限
 $\rightarrow Z(z) = C_1 e^{-i\beta z}$

$\frac{1}{\Phi} \frac{\partial^2 \Phi(\varphi)}{\partial \varphi^2} = -v^2$
圆柱对称性, 稳定的电磁场沿 φ 向的分布必须是以 2π 为周期的函数【即正弦或余弦函数(虚指数函数)】
 $\rightarrow \Phi(\varphi) = C_2 e^{iv\varphi}$

$r^2 \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + r \frac{\partial R(r)}{\partial r} + R(r) [(k_0^2 n^2 - \beta^2) r^2 - v^2] = 0$

$\xi^2 = (k_0^2 n^2 - \beta^2) r^2 = s^2 r^2$
 $s^2 = k_0^2 n^2 - \beta^2$

$\xi^2 \frac{d^2 R(\xi)}{d\xi^2} + \xi \frac{dR(\xi)}{d\xi} + (\xi^2 - v^2) R(\xi) = 0$
Bessel函数



光纤的物理光学分析—导模的解

根据 $Z(z)$ 、 $\Phi(\varphi)$ 、 $R(r)$ 的表达式，得出导模的解：

$$\left. \begin{aligned} E_{z1} &= C_1 C_2 e^{iv\varphi} e^{-j\beta z} J_v(s_1 r) = A J_v\left(\frac{u}{a} r\right) e^{iv\varphi} e^{-i\beta z} \\ H_{z1} &= B J_v\left(\frac{u}{a} r\right) e^{iv\varphi} e^{-i\beta z} \end{aligned} \right\} (r \leq a)$$

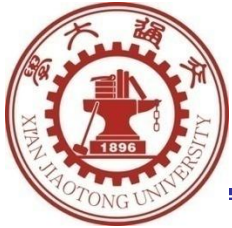
$$\left. \begin{aligned} E_{z2} &= C K_v\left(\frac{w}{a} r\right) e^{iv\varphi} e^{-i\beta z} \\ H_{z2} &= D K_v\left(\frac{w}{a} r\right) e^{iv\varphi} e^{-i\beta z} \end{aligned} \right\} (r \geq a)$$

式中 $A = C_1 C_2$

$$u = s_1 a = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2} a$$

$$w = s_2 a = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2} a$$

$$\longrightarrow \sqrt{u^2 + w^2} = \sqrt{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) a^2} = V$$



光纤的物理光学分析—导模的解

➤ 以纵向场表达横向场，有：

$$E_r = -\frac{i}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\omega \mu_0}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad E_\phi = -\frac{i}{k^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial r} \right)$$

$$H_r = -\frac{i}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\omega \epsilon}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \quad H_\phi = -\frac{i}{k^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} \right)$$

➤ 将 E_z 、 H_z 代入，并考虑**边界连续条件**，得到导模本征方程(色散方程)：

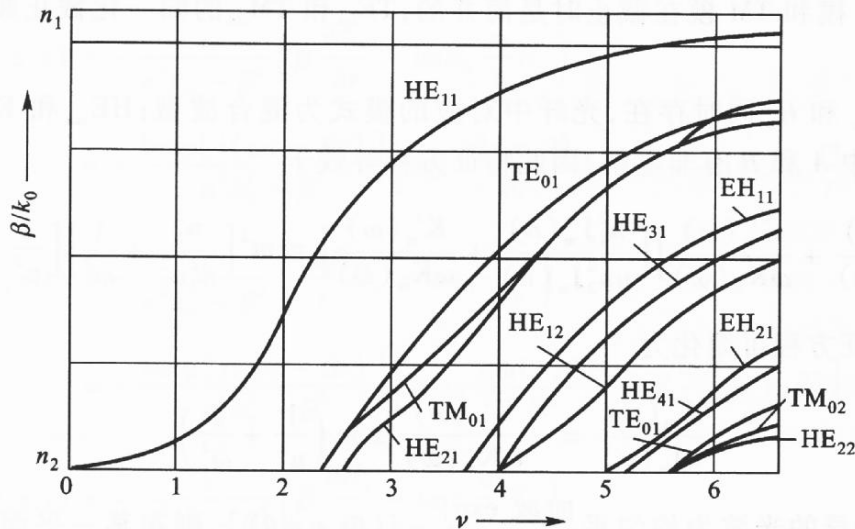
$$\beta^2 v^2 \left(\frac{1}{u^2} + \frac{1}{w^2} \right)^2 = \left[\frac{J'_v(u)}{u J_v(u)} + \frac{K'_v(w)}{w K_v(w)} \right] \cdot \left[k_1^2 \frac{J'_v(u)}{u J_v(u)} + k_2^2 \frac{K'_v(w)}{w K_v(w)} \right]$$

$$u = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2} a, w = \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2} a$$

色散方程中主要的参量是 v 、 a 、 k_0 、 n_1 、 n_2 和 β 。



阶跃多模光纤的色散曲线



光纤中几种低阶模式的 $\beta/k_0 - \nu$ 曲线

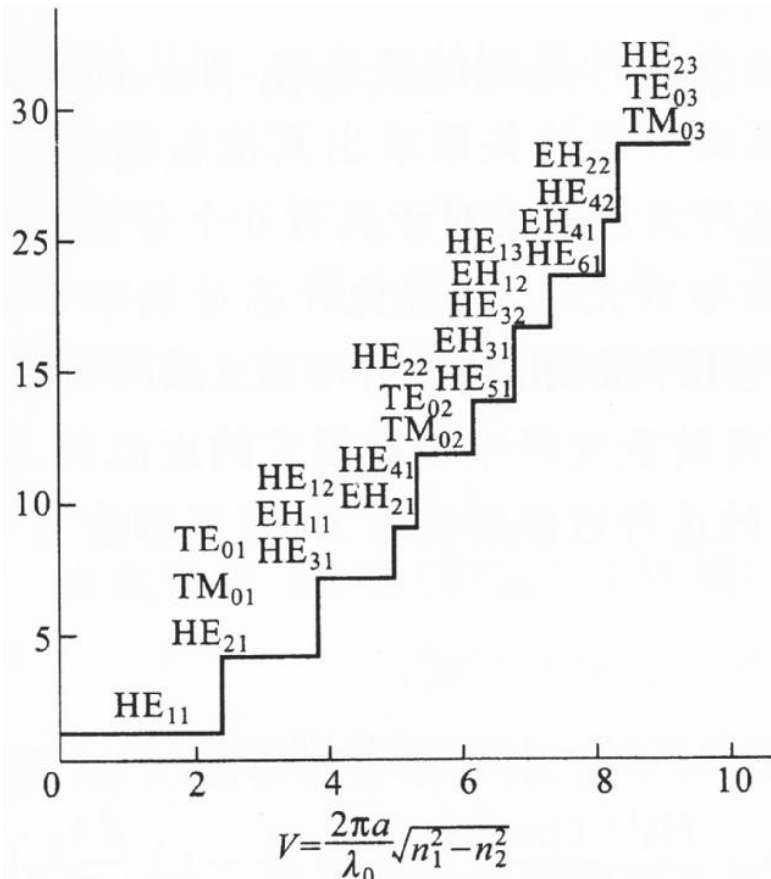
阶跃多模光纤色散曲线

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$

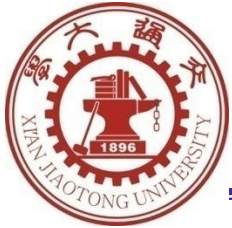
光纤中传播的唯一的模式

HE₁₁ 模，光纤为单模传输

传输模数

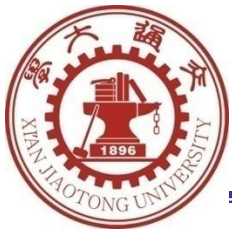


阶跃多模光纤中传导模的数量与V的函数关系

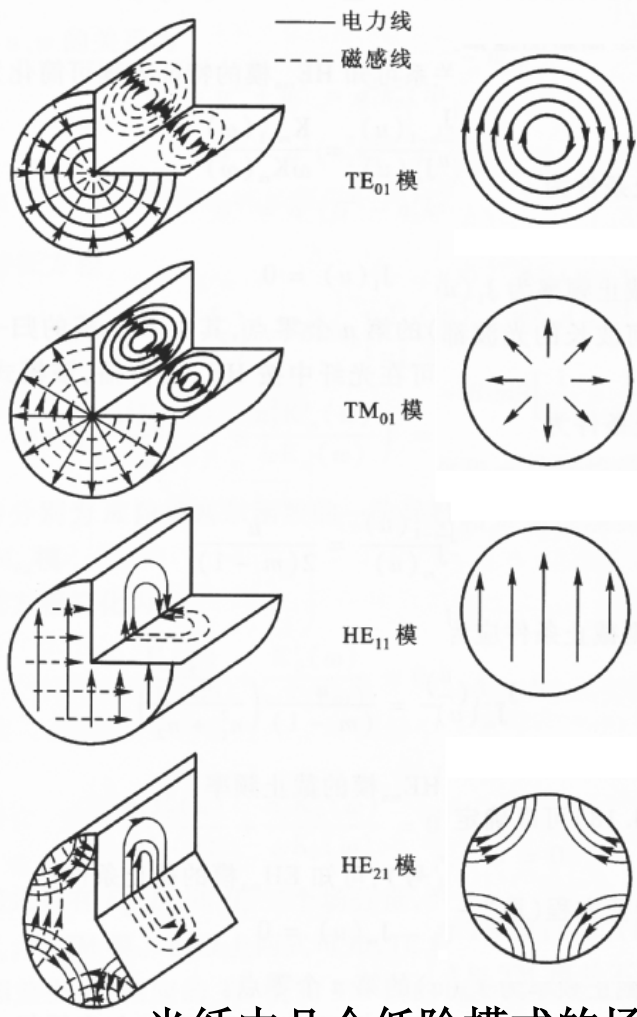


光纤的物理光学分析—模式分析

- 当 $\nu=0$ 时【子午光线】，可以得到两套独立的分量：一套是 H_z 、 H_r 、 E_ϕ ，Z向上只有H分量，称为**TE模**；一套是 E_z 、 E_r 、 H_ϕ ，Z向上只有E分量，称为**TM模**。
- $\nu \neq 0$ 【偏射光线】，Z向上既有 E_z 分量，又有 H_z 分量，称之为**混合模**。Z向上的 E_z 分量比 H_z 分量大，称为**EH $_{\nu\mu}$ 模**，若Z向上的 H_z 分量比 E_z 分量大，称为**HE $_{\nu\mu}$ 模**。
- ν 是贝塞尔函数的阶数，称为**方位角模数**，它表示纤芯沿方位角 ϕ 绕一圈场变化的周期数； μ 是贝塞尔函数的根按从小到大排列的序数，称为**径向模数**，它表示从纤芯中心（ $r=0$ ）到纤芯与包层界面（ $r=a$ ）场变化的周期数。



光纤的物理光学分析—场分布



✓TE_{0μ}和TM_{0μ}模式:

场沿φ向分布没有变化

✓混合模【HE_{νμ}/EH_{νμ}】:

ν越大, 场越集中于边界

光纤中几个低阶模式的场图



光纤的传输特性

➤ **现象：**光信号经过一定距离的光纤传输后要产生**衰减和畸变**【因而输出信号和输入信号不同：光脉冲信号不仅幅度要减小，而且波形要展宽】。

➤ **危害：**损耗和色散是光纤的最主要的传输特性，它们限制了系统的传输距离和传输容量。

➤ **原因：**是光在光纤中传输时存在**损耗和色散**等性能劣化。

✓ 造成光纤损耗的原因是**吸收损耗**【与光纤材料有关】、**散射损耗**【由材料不均匀性引起】和**辐射损耗**【由光纤几何形状的微观和宏观扰动引起】。



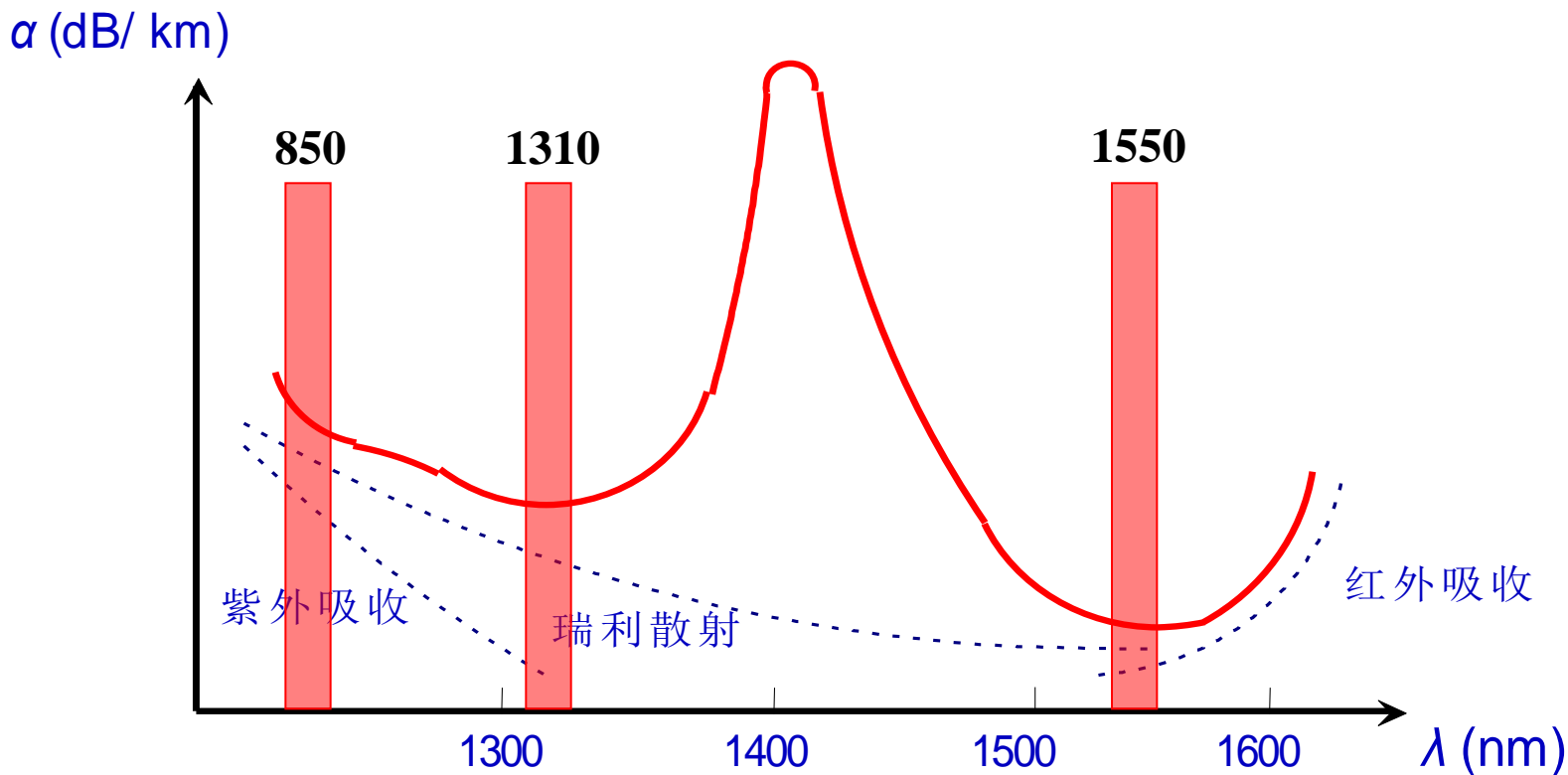
光纤的吸收损耗

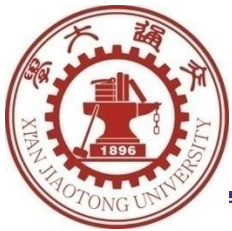
- ✓ 光纤的吸收损耗包括本征吸收损耗和非本征吸收损耗.
- **本征吸收**是由材料中的固有吸收引起的. 材料中存在着紫外光区域光谱吸收和红外光区域光谱吸收. 吸收损耗与光波长有关【**紫外吸收带**是由于原子跃迁引起的; **红外吸收**是由分子振动引起的】.
- SiO_2 的光纤材料中含有一定的掺杂剂(如锗Ge, 硼B, 磷P等)和跃迁金属杂质(如铁Fe, 铜Cu, 铬Cr等). 这些成分的存在把紫外吸收尾部转移到更长的波长上去【**非本征吸收**】. 所含的杂质离子, 在相应的波长段内有强烈的吸收. 杂质含量越多, 损耗越严重. 除了跃迁金属杂质吸收外, 氢氧根离子(OH^-)的存在也产生了大的吸收.



光纤的散射损耗

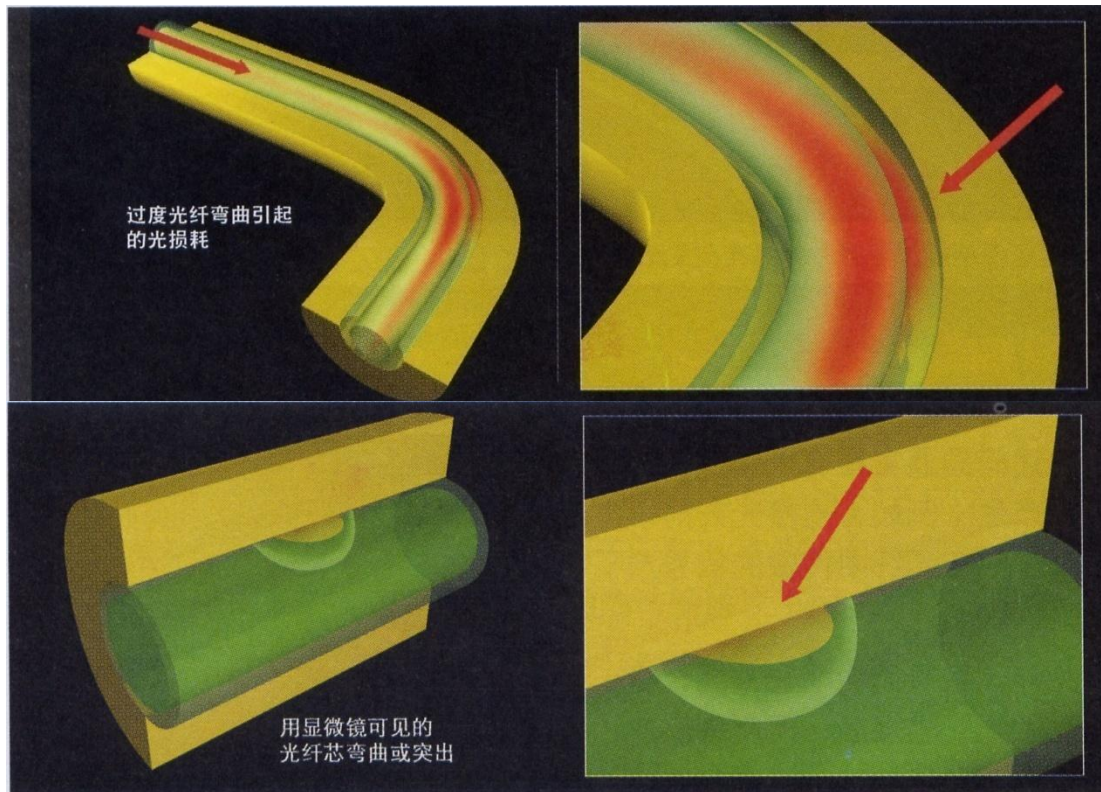
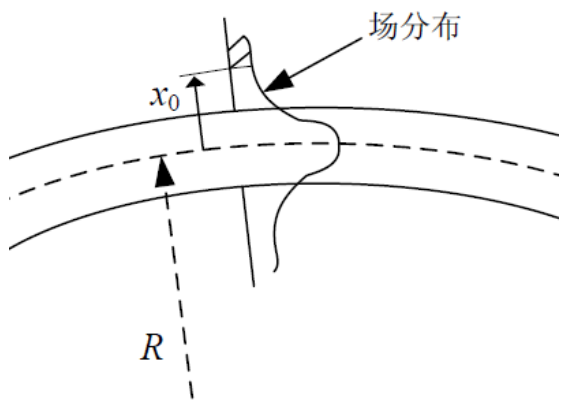
- **瑞利散射损耗:** 是由于光纤内部的**密度不均匀**引起的. 瑞利散射损耗的大小与 $1/\lambda^4$ 成正比.
- **波导散射损耗:** 由于光纤在制造过程中的某些**缺陷**引起的散射损耗.

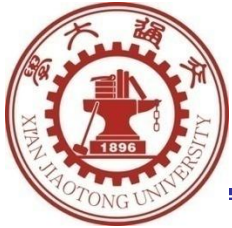




光纤的辐射损耗

- 光纤受到某种外力作用时, 会产生一定曲率半径的**弯曲**. 弯曲后的光纤可以传光, 但会使光的传播途径改变. 一些传输模变为辐射模, 引起能量的泄漏, 这种由能量泄漏导致的损耗称为辐射损耗.





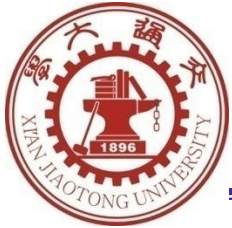
光纤的色散

- ✓ 光纤中的色散可分为材料色散、模式间色散、波导色散和偏振模色散等.
- **材料色散**: 由于材料本身折射率随频率而变, 于是信号各频率的群速度不同, 引起色散.
- **模式间色散**: 在多模传输下, 光纤中各模式在同一光源频率下传输系数不同, 因而群速度不同而引起色散.
- **波导色散**: 它是模式本身的色散. 对于光纤中某一模式本身, 在不同频率下, 传输系数不同, 群速不同, 引起色散.
- **偏振模色散**: 输入光脉冲激励的两个正交的偏振模式之间的群速度不同而引起的色散.



光纤的色散

- ✓ 单模光纤和多模光纤中色散构成不同
 - 材料色散和波导色散是发生在同一模式内，所以称之为**模内色散**；而模式间色散和偏振模色散，可称之为**模间色散**。
 - 对于**多模传输**，**模间色散**占主导，材料色散相对较小，波导色散一般可以忽略。
 - 对于**单模传输**，**材料色散**占主导，波导色散较小。由于光源不是单色的，总有一定的谱宽，这就增加了材料色散和波导色散的严重性。



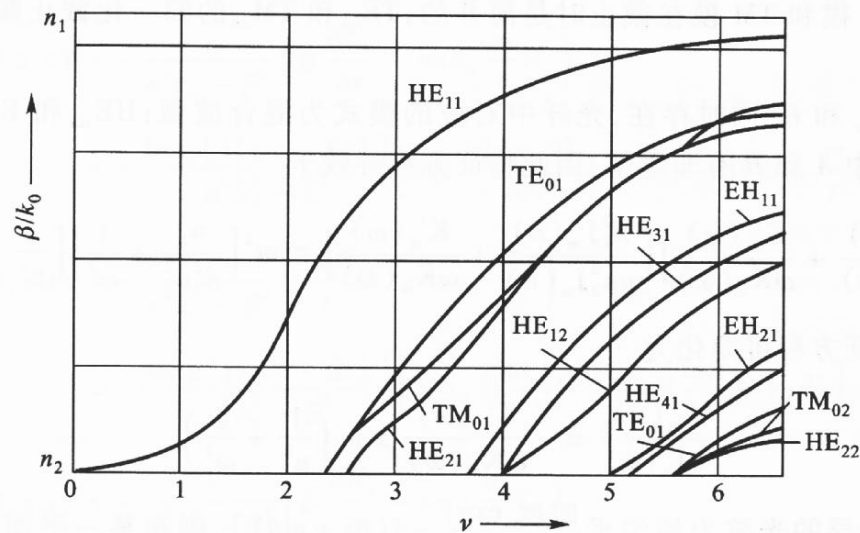
光纤的色散——偏振模色散

- ✓ 偏振模色散主要是由于光纤的**双折射效应**引起的。
- 实际光纤总有某种不同程度的不完善，例如纤芯几何形状的椭圆变形、光纤内部的残余应力、光纤的弯曲等引起的折射率各向异性，都将使导波模的简并受到破坏，它们的传播常数 β_x 、 β_y 不再相等，这种现象就称之为**双折射现象**。
- 由于导波模的传播常数 β_x 、 β_y 不同，将引起这两个模式传输的不同步，从而形成色散，这种色散也叫做**偏振模色散**。



思考题

1. 根据下图分析光纤的色散特性



光纤中几种低阶模式的 $\beta/k_0 - \nu$ 曲线

阶跃多模光纤色散曲线

2. 简述光纤传输中光信号的衰减和畸变