

光

纤

通

信





电子科技大学

光电信息学院 光纤通信课程组



第二章 光纤和光缆

- 光纤通信系统的基本要求是能将任何信息无失真地从发送端传送到用户端，这首先要求作为传输媒质的光纤应具有均匀、透明的理想传输特性，任何信号均能以相同速度无损无畸变地传输。
- 💣 但实际光纤通信系统中所用的光纤都存在损耗和色散，当信号强度较高时还存在非线性。
- ? 在实际系统中，光信号到底如何传输？其传输特性、传输能力究竟如何？——本章讨论的要点。



第二章 光纤和光缆

本章内容:

2.1 光纤结构和类型

2.2 光纤的几何光学分析

2.3 突变型光纤的波动光学分析

2.4 光纤的色散

2.5 光纤的损耗

2.6 光纤和光缆的连接

2.7 光纤特性测量方法



2.1 光纤的结构和类型

2.1.1 光纤的结构

- 一般光纤是一种高度透明的玻璃丝，由纯石英经复杂的工艺拉制而成。
- 光纤→中心部分(芯**Core**) + 同心圆状包裹层(包层**Clad**) + 表面涂层

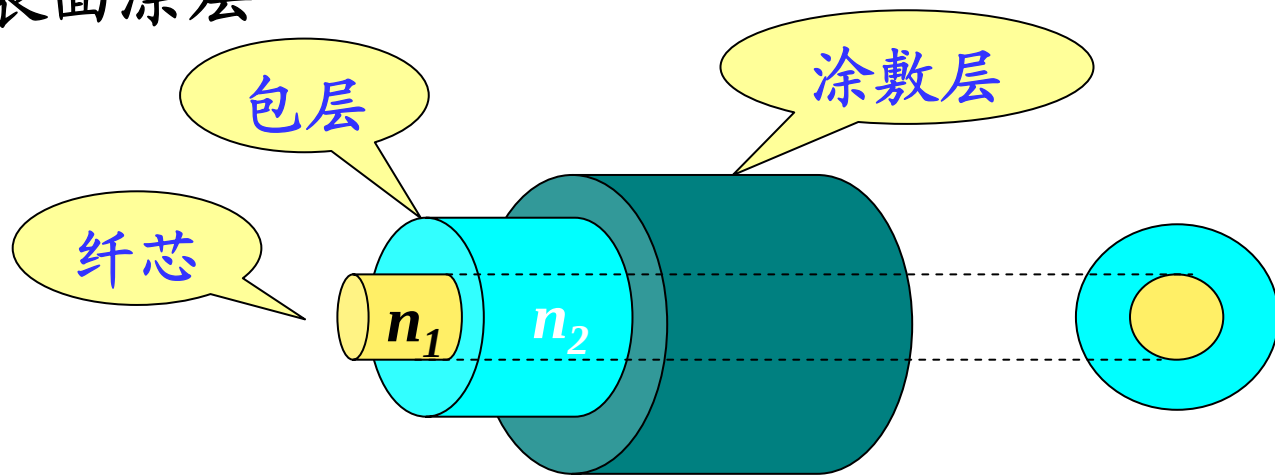


图2-1 光纤的结构图

- 特点: $n_{core} > n_{clad}$ $\Rightarrow$ 光在芯和包层之间的界面上反复进行全反射，并在光纤中传递下去。



2.1.1 光纤的结构

- 纤芯的作用——约束光的传输。
- 包层的作用——形成光波导效应。
- 涂敷层的作用——保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤，同时增加光纤的柔韧性。



2.1 光纤的结构和类型

2.1.2 光纤类型

■ 根据芯区折射率径向分布的不同，可分为：突变型和渐变型

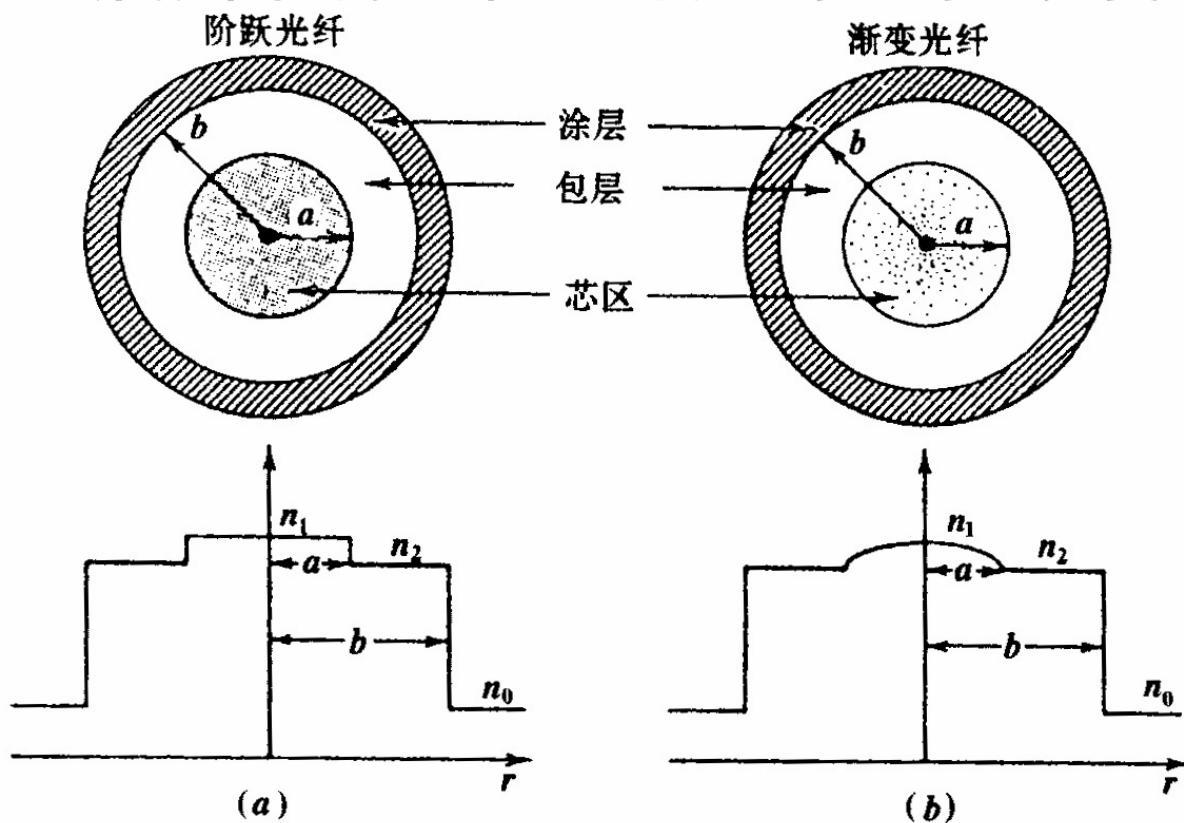


图 2.1 阶跃光纤(a)与渐变光纤(b)的横截面和折射率分布

不同的折射率分布，传输特性完全不同



2.1.2 光纤类型

按折射率分布分类

- ➡ 突变型光纤
- ➡ 渐变型光纤

按传输模式数目分类

- ➡ 单模光纤
- ➡ 多模光纤

按波长分类

- ➡ 短波长光纤 ($0.85\ \mu\text{m}$)
- ➡ 长波长光纤
($1.31\ \mu\text{m} / 1.55\ \mu\text{m}$)

按材料分类

- ➡ 石英光纤
- ➡ 塑料光纤
- ➡ 液体光纤



2.1.2 光纤类型

■ 实用光纤的基本类型：

● 突变型多模光纤

- ➡ 光线以折线形状沿纤芯中心轴线方向传播。
- ➡ 信号畸变大。

● 渐变型多模光纤

- ➡ 光线以正弦形状沿纤芯中心轴线方向传播。
- ➡ 信号畸变较小。

● 单模光纤

- ➡ 光线以直线形状沿纤芯中心轴线方向传播。
- ➡ 光纤中传输一个模式，信号畸变很小。



2.1.2 光纤类型

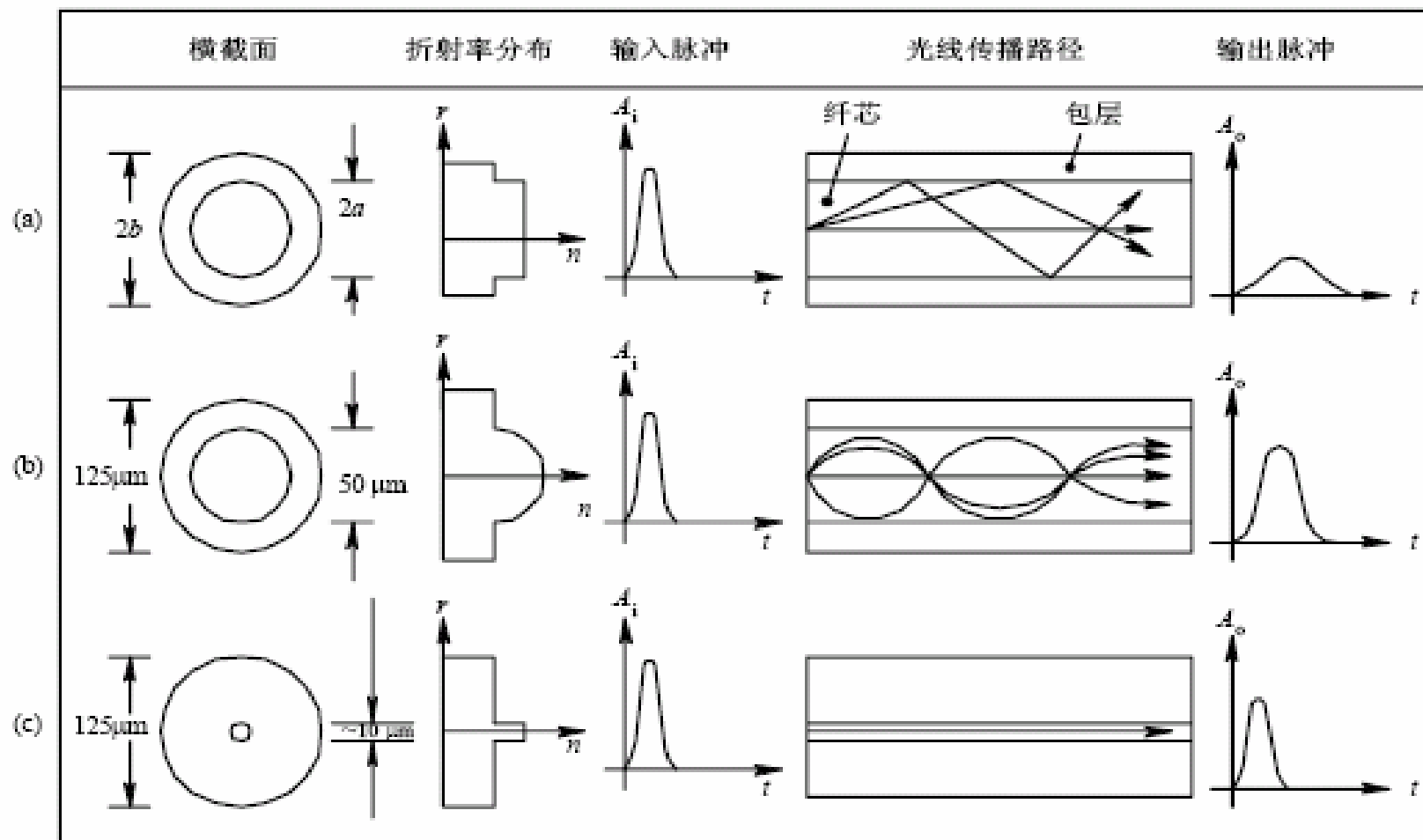
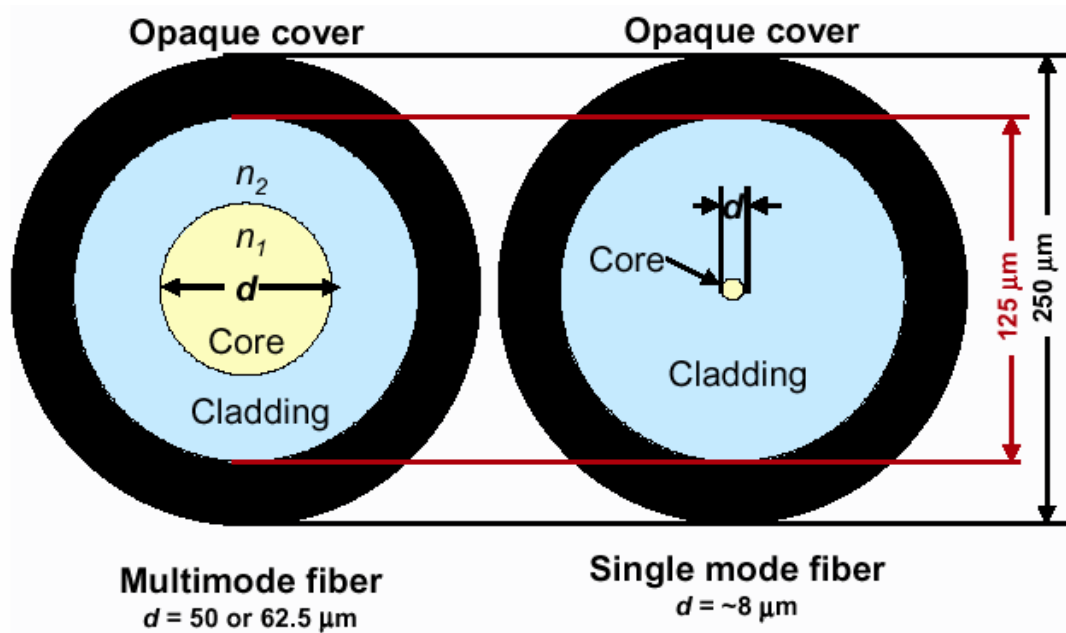


图 2.3 三种基本类型的光纤

(a) 阶跃（突变）型多模光纤； (b) 渐变型多模光纤； (c) 单模光纤



2.1.2 光纤类型



■ 多模光纤芯径

$$2a = 50 \mu\text{m} / 62.5 \mu\text{m}$$

■ 单模光纤芯径

$$2a = 8 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$$

■ 包层外径

$$2b = 125 \mu\text{m}$$

多模光纤和单模光纤的横截面图



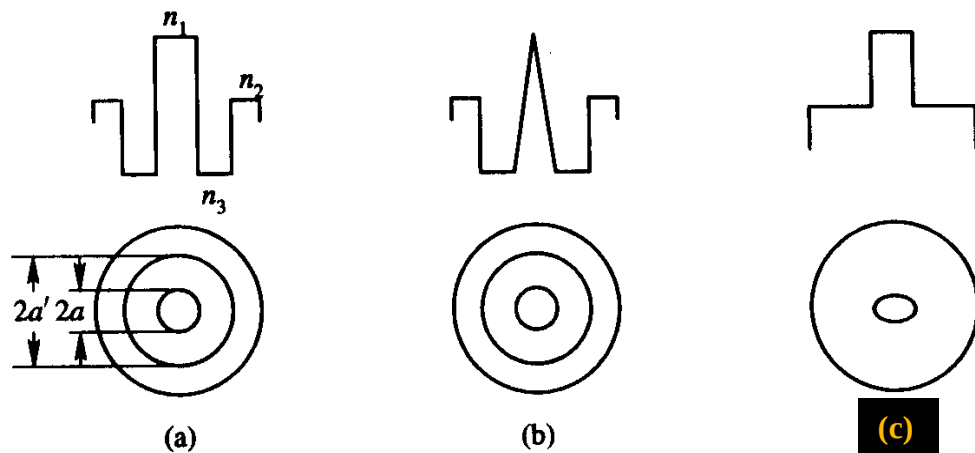
2.1.2 光纤类型

■ 常用的特种单模光纤:

● 双包层光纤 (W型光纤) 如图 (a)

● 三角芯光纤 如图 (b)

● 椭圆芯光纤 如图 (c)



典型特种单模光纤



2.1.2 光纤类型

■ 双包层光纤（W型光纤）

● 折射率分布为W形，具有两个包层， $a'/a \leq 2$ 。

● 用途：

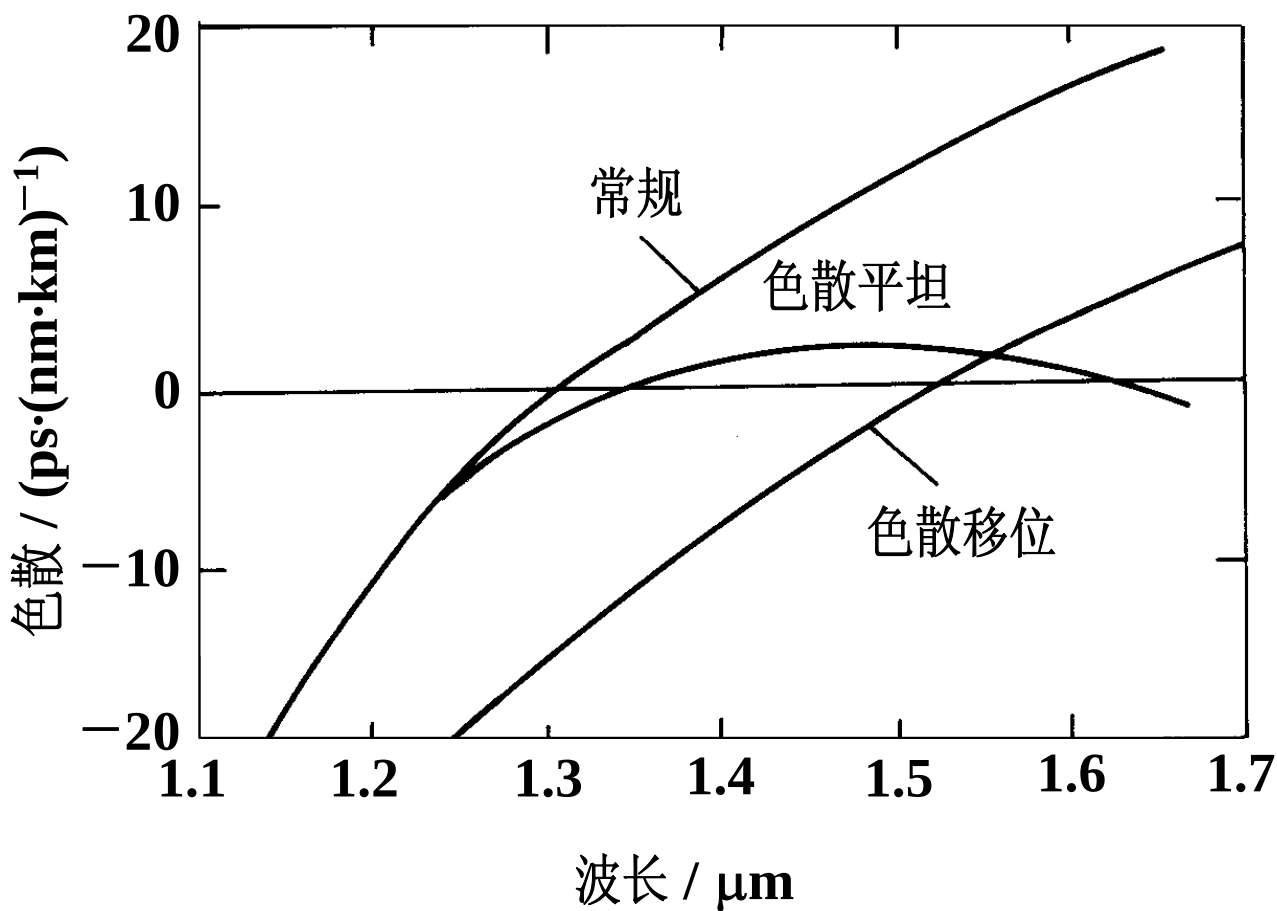
➡ 色散平坦光纤（Dispersion-Flattened Fiber, DFF）

：1.3 ~ 1.6 μm 之间色散变化很小。

➡ 色散移位光纤（Dispersion-Shifted Fiber, DSF）。



2.1.2 光纤类型



不同结构单模光纤的色散特性



2.1.2 光纤类型

■ 三角芯光纤

● 折射率分布呈三角形，改进的色散位移光纤。

● 非零色散光纤

● 特点：

➡ 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 有微量色散。

➡ 有效面积较大。

➡ 适合于密集波分复用和孤子传输的长距离系统使用。（康宁－长距离系统光纤）



2.1.2 光纤类型

■ 椭圆芯光纤

● 双折射光纤（偏振保持光纤）

● 特点：

- ➡ 纤芯折射率分布呈椭圆形。
- ➡ 具有强双折射特性。



2.1.2 光纤类型

- **突变型多模光纤**: 小容量 (8 Mb/s 以下) 短距离 (几 km 以内) 系统。
- **渐变型多模光纤**: 中等容量 ($34\sim 140 \text{ Mb/s}$) 中等距离 ($10\sim 20 \text{ km}$) 系统。
- **单模光纤**: 大容量 ($565 \text{ Mb/s}\sim 2.5 \text{ Gb/s}$) 长距离 (30 km 以上) 系统。
- **色散位移光纤**: 10 Gb/s 、 100 km 的超大容量超长距离系统。
- **色散平坦光纤**: 波分复用系统。
- **三角芯光纤**: 有利于提高入纤光功率, 增加传输距离。
- **偏振保持光纤**: 采用外差接收方式的相干光系统。



2.2 光纤的几何光学分析

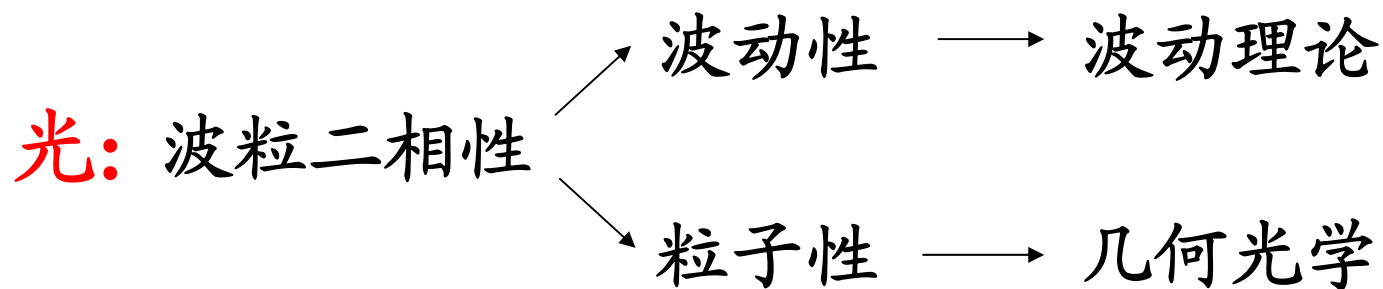
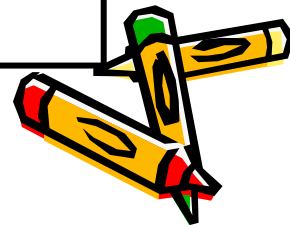


表 几何光学与波动理论的比较

	几何光学	波动理论
使用条件	$\lambda \ll d$	$\lambda \sim d$
适用光纤	多模光纤	单模等各种光纤
基本方程	射线方程	波动方程
研究内容	光线轨迹	模式分布



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

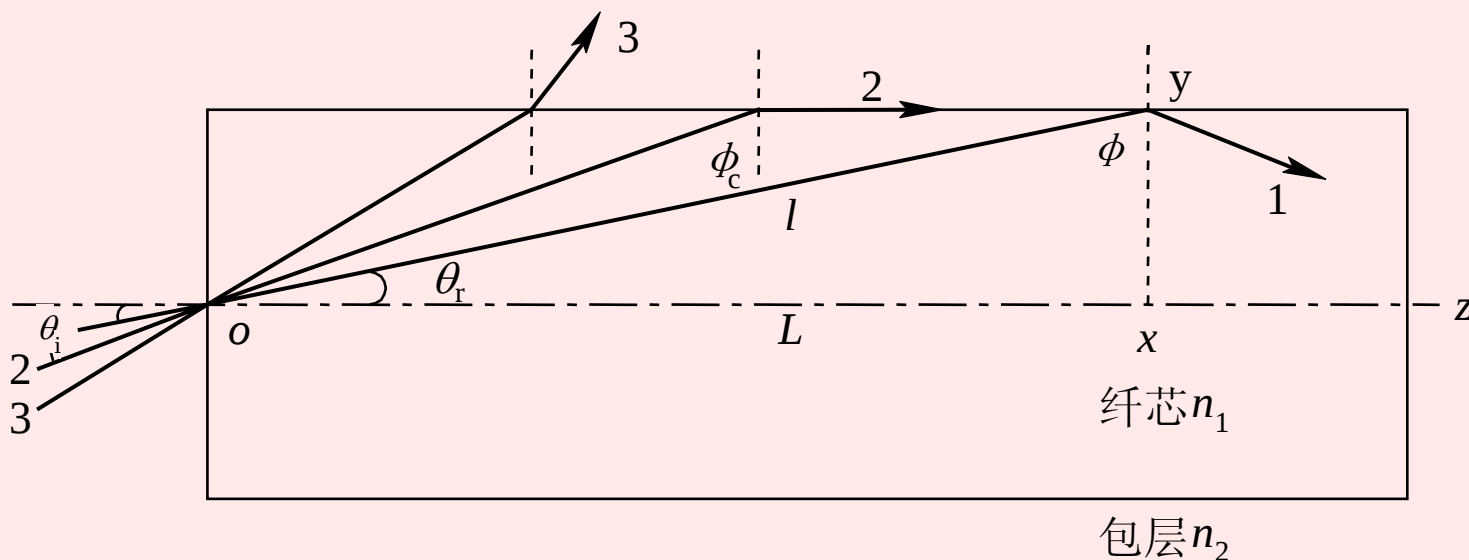


图 突变型多模光纤的光线传播原理

■ 根据全反射原理：

- $\theta_i < \theta_{imax}$: 光线将在纤芯和包层的交界面发生全反射而返回纤芯，以折线形状向前传播。
- $\theta_i = \theta_{imax}$: 光线以 ϕ_c 入射到交界面，折射角为 90° ，沿交界面向前传播。
- $\theta_i > \theta_{imax}$: 光线在交界面折射进入包层并逐渐消失



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

■ 由斯奈尔 (Snell) 定律:

$$\text{光线1: } n_0 \sin \theta_i = n_1 \sin \theta_r = n_1 \cos \phi$$

$$\text{同理, 光线2: } n_0 \sin \theta_{i_{\max}} = n_1 \cos \phi_c$$

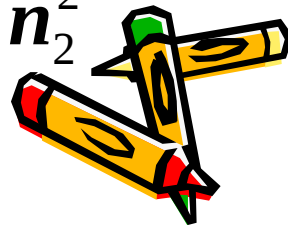
■ 由全反射定律:

$$n_1 \sin \phi_c = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\therefore \sin \phi_c = n_2 / n_1 \Rightarrow \cos \phi_c = \sqrt{1 - n_2^2 / n_1^2}$$

■ 解得:

$$n_0 \sin \theta_{i_{\max}} = n_1 \cos \phi_c = n_1 \sqrt{1 - n_2^2 / n_1^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

● 定义数值孔径 (*Numerical Aperture, NA*) :

$$NA = n_0 \sin \theta_{i\max}$$

● 当入射介质为空气时, NA为临界角 $\theta_{i\max}$ 的正弦。

■ 引入纤芯和包层相对折射率差:

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$$

$$\therefore NA = n_1 \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)/n_1^2} = n_1 \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)/n_1^2}$$

$$\approx n_1 \sqrt{2n_1(n_1 - n_2)/n_1^2} = n_1 \sqrt{2\Delta}$$



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

$$NA = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}}$$

■ 例:

$$\Delta = 0.01, n_1 = 1.5$$

■ 得到:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta} = 1.5 \times \sqrt{2 \times 0.01} \approx 0.21$$

$$\begin{aligned} \theta_c &= \arcsin(NA) = \arcsin(0.21) \approx 0.212 \text{ 弧度} \\ &= 0.212 \times 180^\circ / \pi \approx 12.2^\circ \end{aligned}$$



2.2.1 几何光学方法－突变型光纤

- NA 表示光纤接收和传输光的能力。

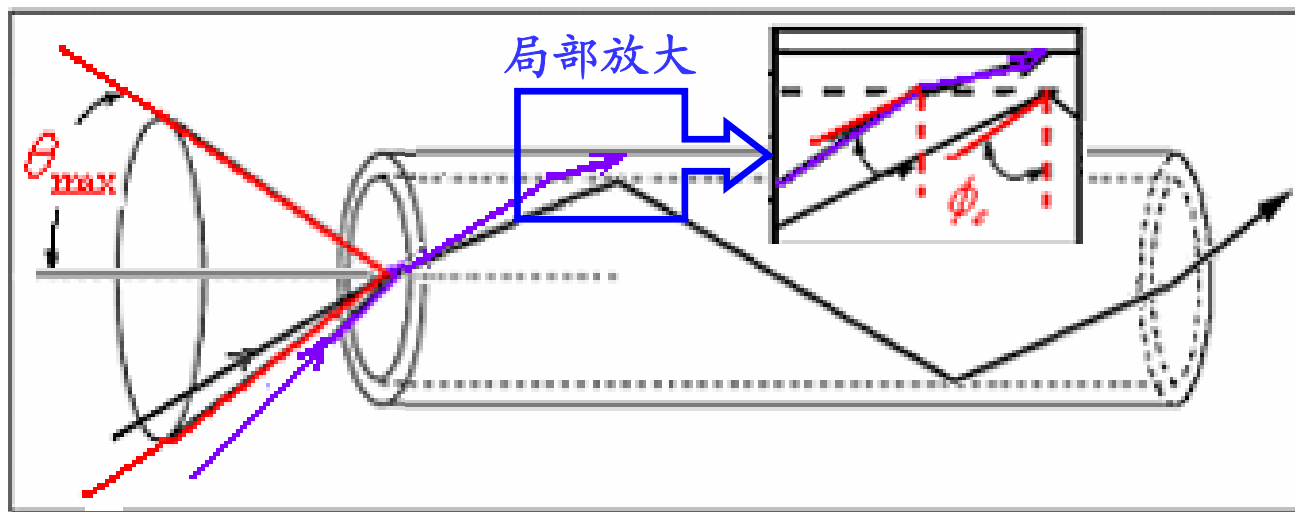


图 数值孔径示意图



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

- **NA**越大，光纤接收光的能力越强，纤芯对能量的束缚越强，光纤抗弯曲性能越好。

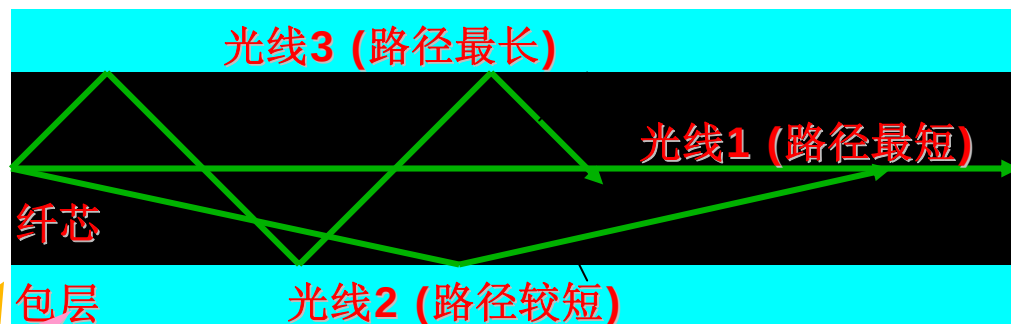
$$NA = n_1(2\Delta)^{\frac{1}{2}}$$

- 从公式上看， Δ 越大，**NA**越大，光纤的收光效果越好。
- 但 Δ 太大，经光纤传输后产生的信号畸变越大，会产生较为严重的模间色散，限制了信息传输容量。



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

■ 突变型多模光纤:



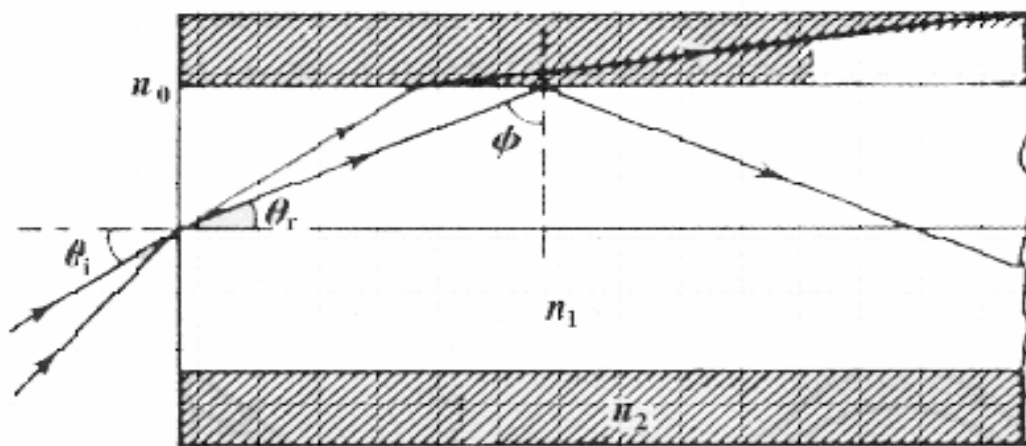
模间色散

突变型多模光纤的光线传播原理

以不同入射角进入光纤的光线将经历不同的路径，虽然在输入端同时入射并以相同的速度传播，但到达光纤输出端的时间却不同，出现了时间上的分散，导致脉冲严重展宽。



2.2.1 几何光学方法－突变型光纤



■ **最短路径:** 当 $\theta_i = 0^\circ$ 时, $L_{\min} = L$ 。

■ **最长路径:** 当 $\phi = \phi_c$ 时, $L_{\max} = L / \sin \phi_c$



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

■ 到达输出端的最大时差 ΔT : ($\sin \phi_c = n_2/n_1$)

$$\Delta T = \Delta L/v = \frac{(L/\sin \phi_c) - L}{c/n_1} = \frac{L \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right)}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2}$$

■ 利用: $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$, 得:

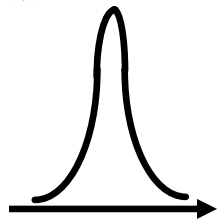
$$\begin{aligned} \therefore \Delta T &= \frac{L(n_1/n_2 - 1)}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_2} \\ &= \frac{Ln_1^2}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_1 n_2} = \frac{L n_1^2}{c n_2} \Delta \end{aligned}$$



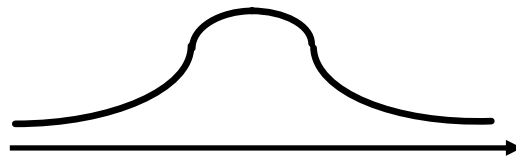
2.2.1 几何光学方法－突变型光纤

- 原来很窄的光脉冲在光纤中传播，由于多径色散的影响，其宽度展宽到 ΔT ：

输入脉冲



输出脉冲



- 为使展宽不产生码间干扰， ΔT 应小于比特间隔：

$$\Delta T < T_B = 1/B$$

$$\Rightarrow B < 1/\Delta T$$

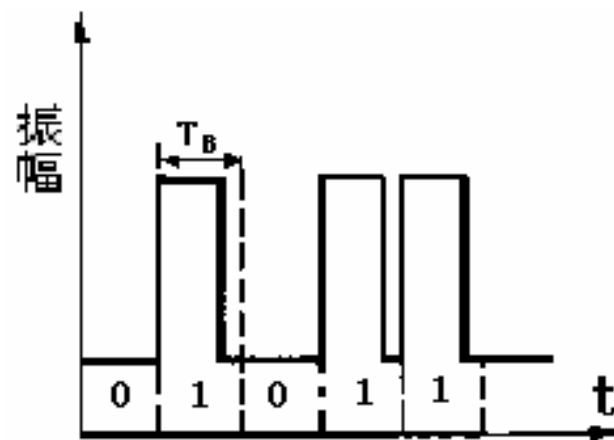
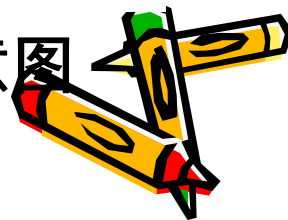


图 比特间隔示意图



2.2.1 几何光学方法－突变型光纤

—传输容量限制:

$$\Delta T < \frac{1}{B} \Rightarrow BL < \frac{n_2}{n_1^2} \frac{c}{\Delta}$$

B--信号比特率

对于无包层的特殊光纤, $n_1=1.5$, $n_2=1.0$ (空气),
 $\Delta=0.33$ 很大, $BL<0.4(\text{Mb/s}).\text{km}$

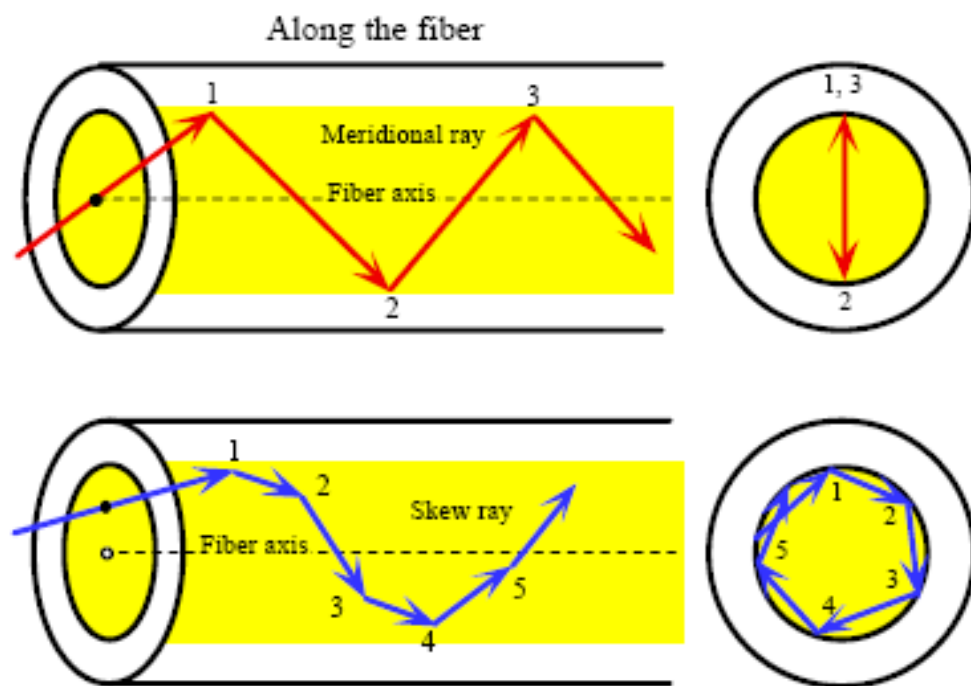
如果在纤芯外加一层包层, 便减小 Δ 值, BL 能提高很多。
一般通信光纤的 $\Delta<0.01$ 。

当 $\Delta=0.002$ 时, $BL<100(\text{Mb/s}).\text{km}$, 10Mb/s 的速率传输 10km , 适用于一些局域网。

注意: 上式只是近似估计。



2.2.1 几何光学方法－突变型光纤



子午光线： 通过纤芯轴线的光线

偏斜光线： 与光轴轴线不相交。

■ 只考虑了通过纤芯轴线的光线的全反射。



2.2.1 几何光学方法 – 突变型光纤

➤ 即使同是子午光线，不同入射角的光线在光纤内损耗也不一样。

$$\Delta T < \frac{1}{B} \Rightarrow BL < \frac{n_2}{n_1^2} \frac{c}{\Delta}$$

➤ 只是粗略估算。

模间色散可以通过采用渐变光纤来大大减小。



2.2.2 几何光学方法－渐变型光纤

■ 渐变折射率光纤的折射率分布——“ α 分布”

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1 - \Delta(r/a)^\alpha] & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases}$$

其中， a 为光纤芯半径， r 为光线离轴线的径向距离。

■ 参数 α 决定折射率分布。

■ 突变型光纤， $\alpha = \infty$

■ 当 $\alpha = 2$ 时，折射率为抛物线分布。

■ 抛物线型光纤几乎没有多径或模间色散。



2.2.2 几何光学方法 – 渐变型光纤

- 在阶跃光纤中光线以曲折的锯齿形状向前传播，而在渐变光纤中则以一种正弦振荡形式向前传播。

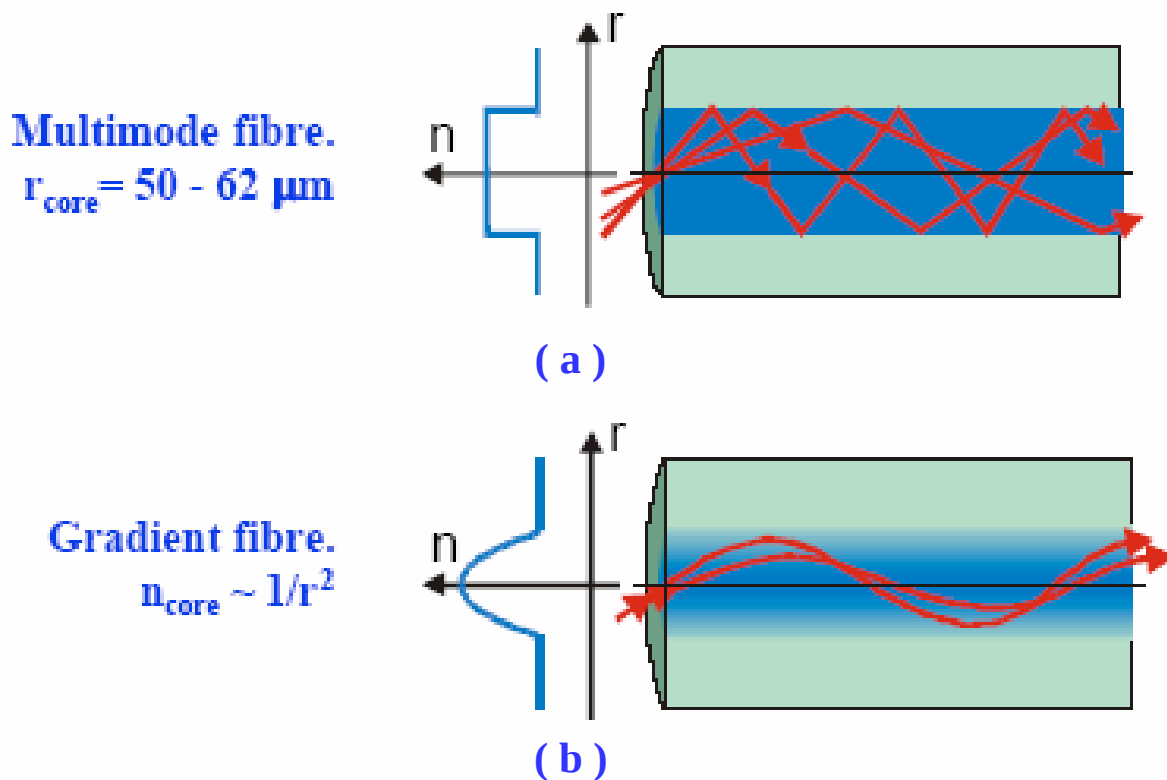
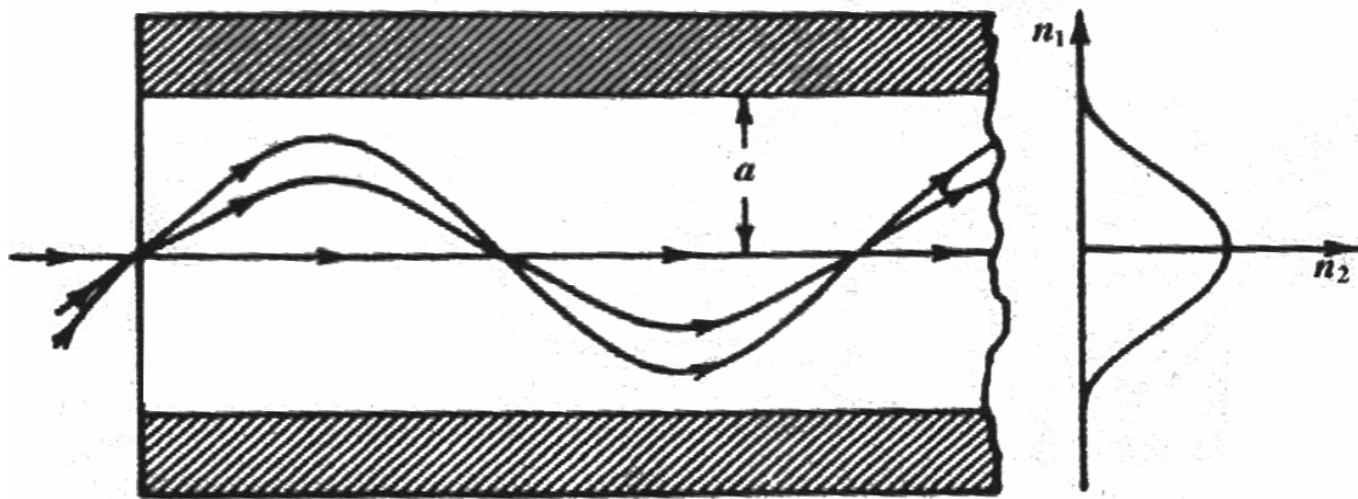


图 (a) 阶跃多模光纤 (b) 渐变多模光纤



2.2.2 几何光学方法－渐变型光纤

- 入射角大的光线路径长, 由于折射率的变化, 光速在沿路径变化, 虽然沿光纤轴线传输路径最短, 但轴线上折射率最大, 光传播最慢.
- 斜光线大部分路径在低折射率的介质中传播, 虽然路径长, 但传输快.
- 通过合理设计折射率分布, 使光线同时到达输出端, 降低模间色散.



2.2.2 几何光学方法－渐变型光纤

- 傍轴近似下，光线轨迹为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dz}$$

- $\alpha = 2$ 时，通解为

$$r = r_0 \cos(Pz) + (r_0' / P) \sin(Pz)$$

- 其中 $P = (2n_1 \Delta / a^2)^{1/2}$ ， r_0 和 r_0' 分别为入射光线的位置和方向。
- $z = 2m\pi / P$ 处，所有光线回复到初始位置和方向，即所有光线的轴向速度相等，不再出现模间色散。
- 注意：基于几何光学和傍轴近似，对于实际光纤并不严格成立，总是会存在一定色散。



2.2.2 几何光学方法－渐变型光纤

■ 更严格的分析发现，模间色散 $\Delta T/L$ 随 α 而变。

最小色散发生在 $\alpha = 2(1 - \Delta)$

此时 $\Delta T/L = n_1 \Delta^2 / 8c$

利用 $B \Delta T < 1$

则 $BL < 8c / (n_1 \Delta^2)$

• 优化设计的渐变光纤，数据以 100Mb/s 的速率传输 100km，其 BL 积达约 10 (Gb/s)·km，比阶跃光纤提高了 3 个数量级。

• 第一代光波系统就是使用的渐变光纤。

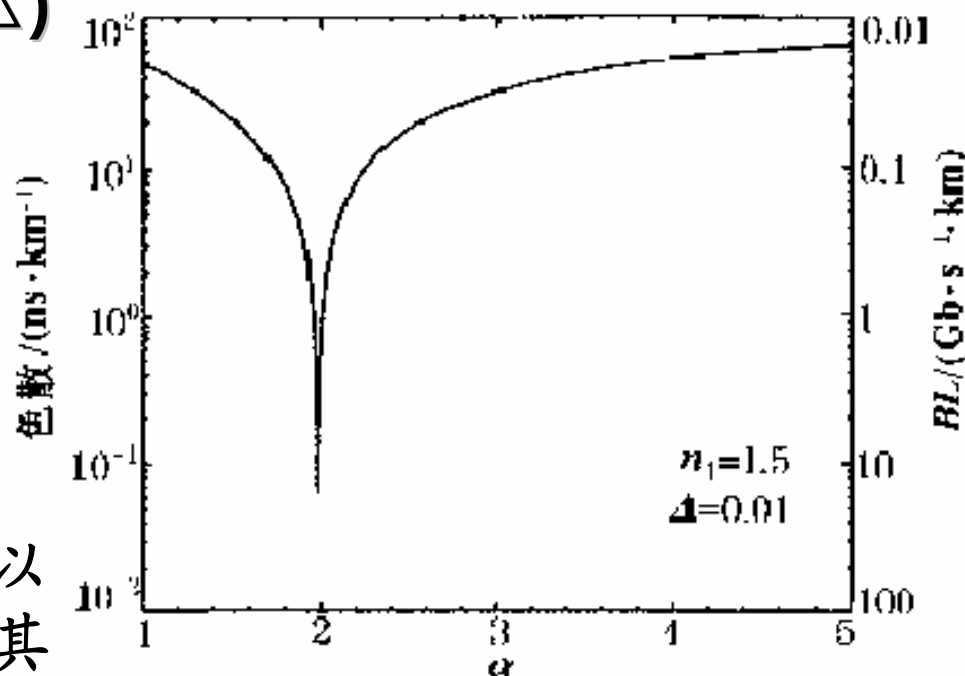
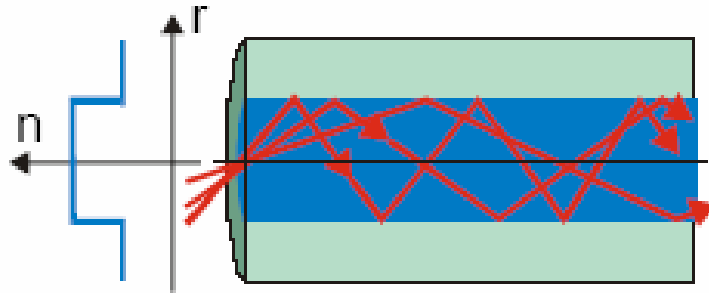


图 2.4 渐变光纤模间色散和 BL 积随 α 的变化

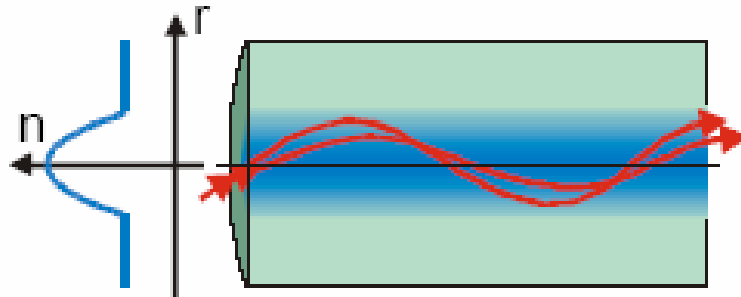


对模间色散问题更好的解决方案——单模光纤

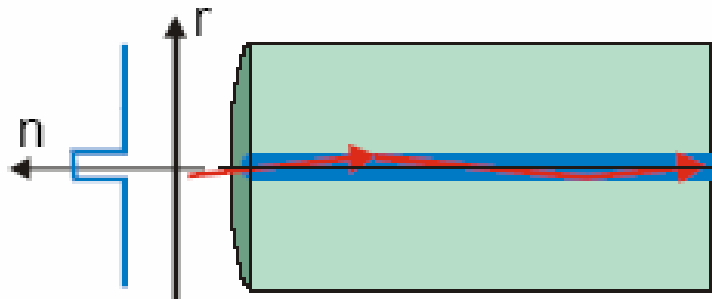
Multimode fibre.
 $r_{\text{core}} = 50 - 62 \mu\text{m}$



Gradient fibre.
 $n_{\text{core}} \sim 1/r^2$



Monomode fibre
 $r_{\text{core}} = 5 - 10 \mu\text{m}$



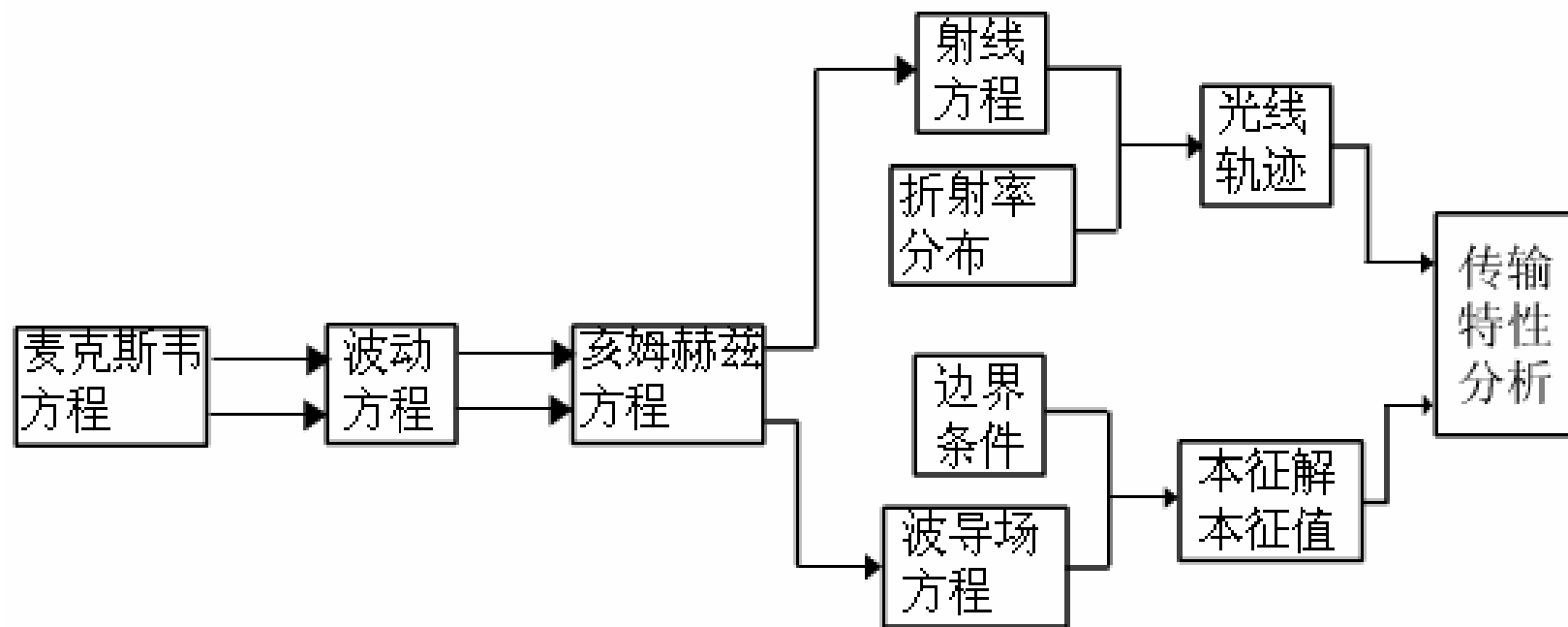
■ 单模光纤不存在模间色散，因此能进一步提高信道容量。

■ 当 $2a$ 与 λ 可比拟时（如：单模光纤），射线理论不再适用。



2.3 突变光线的波动光学分析

- 几何光学方法对光纤中光线传播可提供直观图象，但是对传输特性只提供近似结果。必须用电磁理论分析电磁场的分布性质，更准确获得光纤的传输特性。
- 分析思路：



2.3.1 波动方程

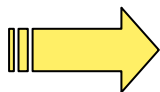
- 光是电磁波，用波动理论来分析电磁场的分布，获得更准确的光纤的传输特性必须从麦克斯韦方程组出发：

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$



$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\vec{E}: \text{电场强度})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\vec{H}: \text{磁场强度})$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (\vec{D}: \text{电通密度})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\vec{B}: \text{磁通密度})$$

- 光纤不是电的导体，不存在电流，电流密度 $J = 0$ 。
- 光纤中不存在自由电荷，所以电荷体密度 $\rho_v = 0$ 。



2.3.1 波动方程

■ $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{D}$ 之间关系为：

$$\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}}$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \vec{\mathbf{H}} + \vec{\mathbf{M}}$$

ε_0 、 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率；

$\vec{\mathbf{P}}$ 、 $\vec{\mathbf{M}}$ 分别为感应电极化强度和感应磁极化强度。

■ 光纤为玻璃材质，玻璃材料不具备磁性，则 $\mathbf{M} = \mathbf{0}$ 。

■ 只考虑感应电极化强度与电场强度具有线性关系，有：

$$\vec{\mathbf{P}}(\vec{\mathbf{r}}, t) = \varepsilon_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \chi(\vec{\mathbf{r}}, t - t') \mathbf{E}(\vec{\mathbf{r}}, t') dt'$$

χ 为线性极化率，一般为二阶张量，在这里假设光纤为各向同性，因此 χ 为一个标量。



2.3.1 波动方程

- 设光纤无损耗，在光纤中传播的为角频率为 ω 的单色光，电磁场与时间 t 的关系为 $\exp(j\omega t)$ ，则波动方程为：

$$\nabla^2 \vec{E} + n^2 k_0^2 \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} + n^2 k_0^2 \vec{H} = 0$$

- k_0 为真空中的波数：

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

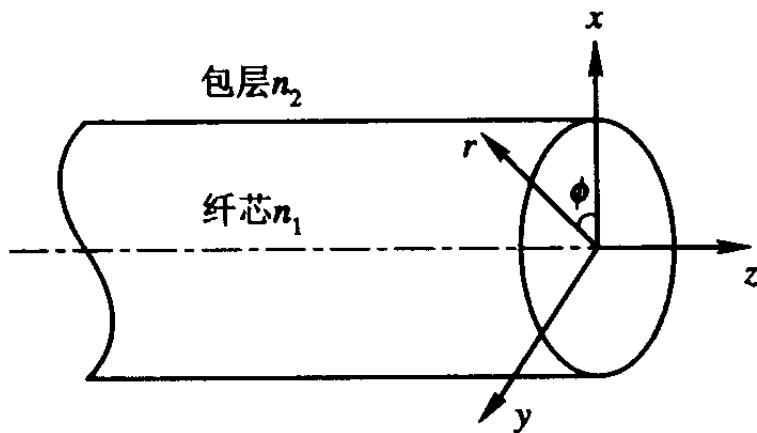


2.3.2 光纤中的模式

- 利用光纤的圆柱对称性，将波动方程写成圆柱坐标的形式：
- 电场的 z 分量 E_z 的波动方程为：

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \left(\frac{n\omega}{c}\right)^2 E_z = 0$$

$$(\text{利用: } \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2})$$



2.3.2 光纤中的模式

- 为简化起见，去掉了 $\mathbf{E}$ 的上加符号。
- 讨论包层无限大的理想光纤情况，对芯径为 a 的突变光纤，折射率分布为

$$\mathbf{n} = \begin{cases} \mathbf{n}_1 & r \leq a \\ \mathbf{n}_2 & r > a \end{cases}$$

- 用分离变量法求解：

$$E_z(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z)$$



2.3.2 光纤中的模式

求得三个微分方程：

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0$$

具有 $Z = \exp(i \beta z)$ 形式的解。

✓ β 为传输常数，表明场沿轴向方向传播分量情况。

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0$$

具有 $\Phi = \exp(im \phi)$ 形式的解。

✓ 表明场沿圆周角方向的分布。因为场随 ϕ 必须以 2π 为周期变化，所以 m 为整数。

$$\frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(k^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2}\right) R = 0$$

✓ 贝塞尔方程，表明场沿径向方向的分布。



2.3.2 光纤中的模式

■ 对于突变型光纤:

$$\begin{cases} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + (n_1^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2}) R = 0 & (0 \leq r \leq a) \\ \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + (n_2^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2}) R = 0 & (r > a) \end{cases}$$

■ 上式是贝塞尔函数的微分方程，可以有多种 $R(r)$ 与 β 的组合满足方程。每一个组合称为一个模式。

■ 在纤芯中，要求具有振荡特性，即

$$n_1^2 k_0^2 - \beta^2 > 0, \beta < n_1 k_0$$

■ 在包层中，要求具有衰减特性，即

$$n_2^2 k_0^2 - \beta^2 < 0, \beta > n_2 k_0$$

■ 所以传播常数必须满足的条件是 $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$



2.3.2 光纤中的模式

■ 对于突变型光纤，贝塞尔方程的解的形式为：

$$R(r) = \begin{cases} AJ_m(\chi r) + A'Y_m(\chi r), & r \leq a \\ BK_m(\gamma r) + B'I_m(\gamma r), & r > a \end{cases}$$

A、A'、B、B'为常数；

J_m 为第一类贝塞尔函数；

Y_m 为第二类贝塞尔函数；

K_m 为第二类变型贝塞尔函数；

I_m 为第一类变型贝塞尔函数；

■ χ 、 γ 定义为

$$\chi^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$$



2.3.2 光纤中的模式

■ 导模在 $r=0$ 时为有限值, Y_m 在 $r=0$ 时不为零 $\rightarrow A' = 0$

■ 导模在 $r=\infty$ 时为零, I_m 在 $r=\infty$ 时不为零 $\rightarrow B' = 0$

■ 波动方程的通解的形式为:

$$E_z = \begin{cases} AJ_m(\chi r) \exp(im\phi) \exp(i\beta z) & r \leq a \\ BK_m(\gamma r) \exp(im\phi) \exp(i\beta z) & r > a \end{cases}$$

■ 同样可以得到:

$$H_z = \begin{cases} CJ_m(\chi r) \exp(im\phi) \exp(i\beta z) & r \leq a \\ DK_m(\gamma r) \exp(im\phi) \exp(i\beta z) & r > a \end{cases}$$

A、B、C、D待定。



2.3.2 光纤中的模式

贝塞尔函数 $J_m(xr)$ 类似振幅衰减的正弦曲线。

要求 $x^2 > 0$, 否则场将衰减, 即 $\beta < n_1 k_0$ 。

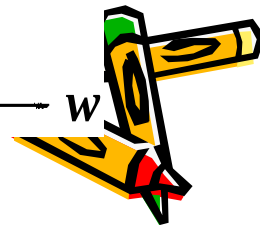
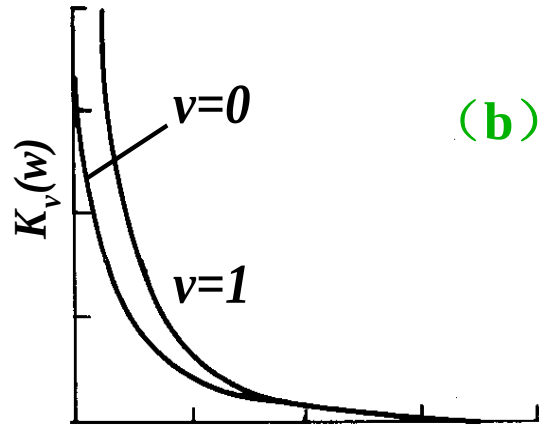
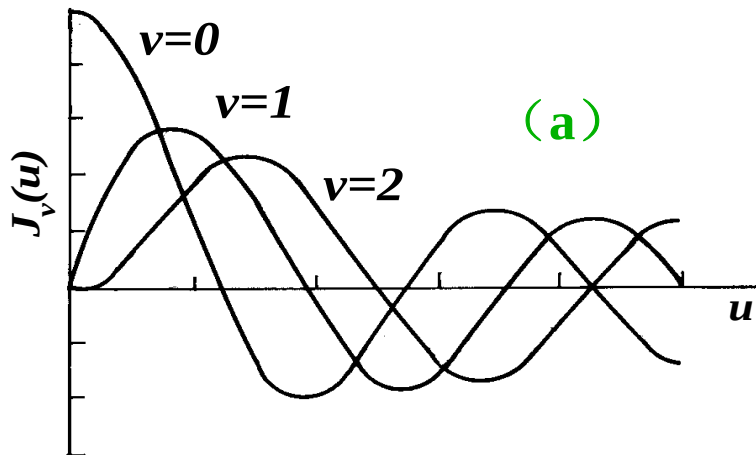
修正的贝塞尔函数 $K_m(\gamma r)$ 类似振幅衰减的指数曲线。

$\gamma r \rightarrow \infty$ 时, $K_m(\gamma r) \rightarrow \exp(-\gamma r)$

$r \rightarrow \infty$ 时, $K_m(\gamma r)$ 必须为零

要求 $\gamma > 0$, 即 $\beta > n_2 k_0$ 。

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$$



2.3.2 光纤中的模式

设光纤中的导波模式具有以下形式：

$$E = E_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (a)$$

$$H = H_0(r, \phi) e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (b)$$

代入Maxwell方程的前两个旋度方程得到六个电磁场分量方程：

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial E_z}{\partial \phi} + j r \beta E_\phi \right) = -j \omega \mu H_r$$

$$j \beta E_r + \frac{\partial E_z}{\partial r} = j \omega \mu H_\phi$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi) + \frac{\partial E_r}{\partial \phi} \right) = -j \omega \mu H_z$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial H_z}{\partial \phi} + j r \beta H_\phi \right) = -j \omega \mu E_r$$

$$j \beta H_r + \frac{\partial H_z}{\partial r} = j \omega \mu E_\phi$$

$$\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (r H_\phi) + \frac{\partial H_r}{\partial \phi} \right) = -j \omega \mu E_z$$



2.3.2 光纤中的模式

求出 E_z 、 H_z 后，由麦克斯韦方程组可得其他四个分量可以表示为：

$$E_r = -\frac{i}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \mu_0 \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right)$$

$$E_\phi = -\frac{i}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \mu_0 \omega \frac{\partial H_z}{\partial r} \right)$$

$$H_r = -\frac{i}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \varepsilon_0 n^2 \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right)$$

$$H_\phi = -\frac{i}{k_0^2 n^2 - \beta^2} \left(\frac{\beta}{r} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \varepsilon_0 n^2 \omega \frac{\partial E_z}{\partial r} \right)$$



2.3.2 光纤中的模式

A、B、C、D四个常数表示出了光纤纤芯和包层的电磁场分布情况。这些常数必须满足电场**E**、磁场**H**在纤芯和包层分层界面上切向分量连续的边界条件，即在 **$r=a$** 处有：

$$E_z(r \leq a) = E_z(r > a)$$

$$E_\phi(r \leq a) = E_\phi(r > a)$$

$$H_z(r \leq a) = H_z(r > a)$$

$$H_\phi(r \leq a) = H_\phi(r > a)$$

- 可得**A、B、C、D**四个常数必须满足的**4**个齐次方程。
- 这些方程只有系数矩阵的行列式为零时，才有平凡解。



2.3.2 光纤中的模式

- 在对贝塞尔函数的微分方程的求解过程中，应用纤芯—包层边界条件，求得：

$$\left[\frac{J'_m(\chi a)}{\chi J_m(\chi a)} + \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] \left[\frac{J'_m(\chi a)}{\chi J_m(\chi a)} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] \\ = \left(\frac{m\beta}{n_1 a K_0} \right)^2 \left(\frac{1}{\chi^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right)$$

——传播常数 β 的特征方程

- 因无法导出 β 的解析表达式，只能数值求解。
- 特征方程的解的一个重要结论：电磁场不是以连续的、而是以离散的模式在光纤中传播。



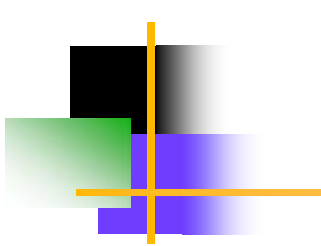
2.3.2 光纤中的模式

■ 模式: β_{mn} 所对应的这种空间分布, 在传播过程中只有相位变化, 没有形状的变化, 且始终满足边界条件, 这种空间分布称为 模式。

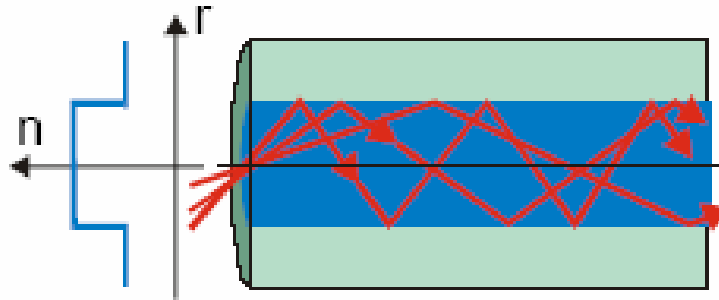
■ 一个模式由 β_{mn} 唯一确定。

- 进入光纤的光分解成称为“模式”的离散光束, 模式是在光纤内部存在的稳定的电磁场模型。
- 每个模式可认为是以特定传播角传播的一个独立光束。
- 以不同角度入射到光纤的射线将形成光纤中不同的模式。





Multimode fibre.
 $r_{\text{core}} = 50 - 62 \mu\text{m}$



- 完全沿着光纤中心轴线传播的模式称为“基模”。
- 模式的传播角度越大，它的级就越高。
- 最高级的模式就是以临界角传播的模式。
- 只支持一个模式（基模）的光纤被称作单模光纤。
- 可支持多个模式的光纤为多模光纤。



2.3.2 光纤中的模式

- 光纤中的电磁场模式不同于平面波导，一般 E_z 、 H_z 都不为零。
- 当方位角模数 $m = 0$ 时：
 - 在传输方向无磁场的模式称为横磁模 TM_{0n} 。
($H_z = H_r = 0$, $E_\phi = 0$; 仅有 E_z 、 E_r 、 H_ϕ)
 - 在传输方向无电场的模式称为横电模 TE_{0n} 。
($E_z = E_r = 0$, $H_\phi = 0$; 仅有 H_z 、 H_r 、 E_ϕ)



2.3.2 光纤中的模式

- 当 $m \neq 0$ 时，电磁场六个分量都存在， E 和 H 都拥有纵向（即沿着传播方向 z ）分量，这些模式称为混合模。

● 磁场贡献为主 ($H_z > E_z$) —— HE_{mn}

● 电场贡献为主 ($E_z > H_z$) —— EH_{mn}

- 在弱导光纤中， E_z 、 H_z 都近似零。存在的模式为线性偏振 (*Linearly Polarized*) 模 —— LP_{mn} 。



2.3.2 光纤中的模式

■ 为了方便起见，引入了模折射率（或有效折射率）：

$$\bar{n} = \beta / k_0 \quad (\text{其中}, k_0 = 2\pi / \lambda)$$

■ 有效折射率的物理含义：表明该模式在折射率为 $\bar{n}$ 的介质中传播。

$$n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0 \quad \longrightarrow \quad n_2 < \bar{n} < n_1$$

修正的贝塞尔函数 $K_m(\gamma r)$ 类似振幅衰减的指数曲线。

$$\gamma r \rightarrow \infty \text{ 时}, K_m(\gamma r) \rightarrow \exp(-\gamma r)$$

$r \rightarrow \infty$ 时， $K_m(\gamma r)$ 必须为零，要求 $\gamma > 0$ 。

$$\bar{n} < n_2 \longrightarrow \gamma^2 < 0 \quad \text{模式不存在} \longrightarrow \text{模式截止} \quad \bar{n} = n_2$$

$$\bar{n} = n_2 \longrightarrow \gamma = 0, \chi^2 = n_1^2 k_0^2 - n_2^2 k_0^2$$



2.3.2 光纤中的模式

■ 为了决定截止条件，定义归一化频率**V**：

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} a NA \\ \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} \end{cases}$$

■ 归一化频率**V**越大，能够传播的模式数就越多。

■ 还定义了一个归一化传播常数**b**：

$$b = \frac{\frac{\beta}{k_0} - n_2}{n_1 - n_2} = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}$$



2.3.2 光纤中的模式

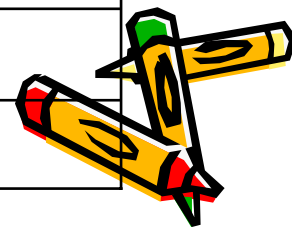
表 1.3.1

贝赛尔函数的根

贝赛尔函数	$J_0(u)$	$J_1(u)$	$J_2(u)$
前三个根 (不包括零根)	2.405	3.832	5.136
	5.520	7.016	8.417
	8.654	10.173	11.620

表 光纤中的模式

V	模式	简并模式
0~2.4048	HE ₁₁	LP ₀₁
2.4048~3.8327	TE ₀₁ , TM ₀₁ , HE ₂₁	LP ₁₁
3.8327~5.1356	EH ₁₁ , HE ₃₁ , HE ₁₂	LP ₂₁ , LP ₀₂
5.1356~5.5201	EH ₂₁ , HE ₄₁	LP ₃₁
5.5201~6.3802	TE ₀₂ , TM ₀₂ , HE ₂₂	LP ₁₂
6.3802~7.0156	EH ₃₁ , HE ₅₁	LP ₄₁



2.3.2 光纤中的模式

- 归一化频率 V 越大，能够传播的模式数就越多。
- V 值较高的光纤可以支持较多的模式，称为多模光纤。
- 模式数目随 V 的减小快速减少。 $V=5$ ，7 个模式。
- 当 V 小于某个值，除 HE_{11} 模式外，所有模式被截止。只支持一个模式（基模）的光纤被称作单模光纤。
- 光纤中可传播的模式数 M 与 V 的关系（当 $V > 20$ 时）：

$$M = \begin{cases} \frac{1}{2} V^2 & (\text{阶跃光纤}) \\ \frac{1}{4} V^2 & (\text{渐变光纤}) \end{cases}$$



2.3.2 光纤中的模式

■ 例：对于典型的渐变型光纤：NA = 0.275，纤芯直径50 μm，求当工作在1310 nm窗口时，光纤中可容纳的模式数。

解：利用： $V = \frac{2\pi}{\lambda} aNA$

$$\therefore V = \frac{2\pi \times 50/2}{1310 \times 10^{-3}} \times 0.275 \approx 32.97$$

$$\text{又： } M = \frac{1}{4} V^2 \quad (\text{渐变光纤})$$

$$\therefore \text{一根光纤可容纳的模式数： } M = 272$$



2.3.3 单模光纤

1. 阶跃折射率分布光纤的单模条件

- 单模光纤：除了 HE_{11} 模外，其它模式均截止，只传输单个模式，这种光纤称为单模光纤。
- HE_{11} 模称为光纤的基模。
- 归一化频率 V 决定了光纤传输的模式数 M ，各模式的截止条件决定于 V 。
- **基模不会截止** —— 即使 V 值再小，基模也仍然存在。



2.3.3 单模光纤

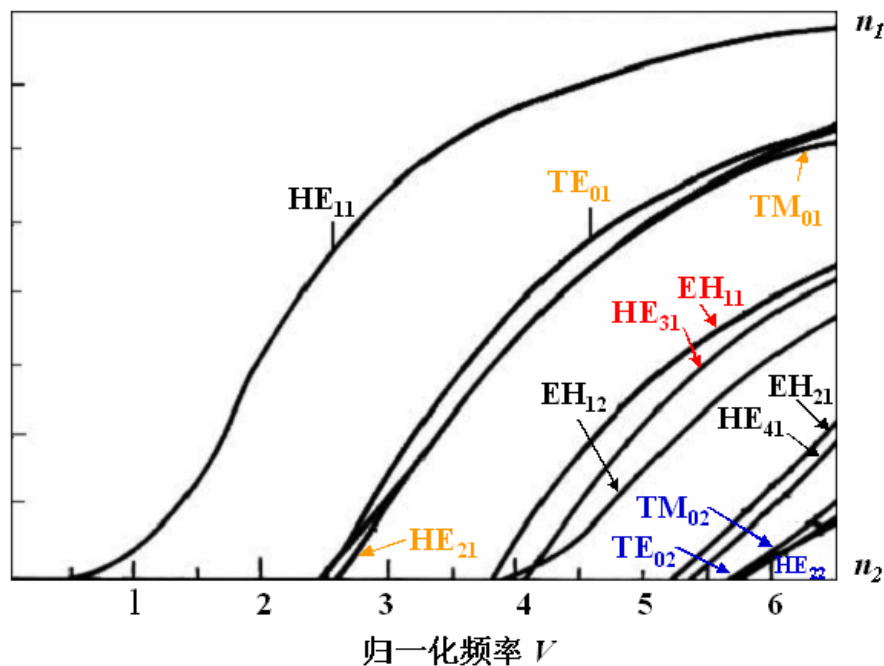
单模条件:

- 由 TE_{01} 、 TM_{01} 模式达到截止时的 V 值确定。这两个模式截止的条件是:

$$J_0(V) = 0$$

- 阶跃折射率光纤的（只传输 HE_{11} 模）单模条件是:

$$V < 2.405$$



2.3.3 单模光纤

■ 单模光纤的截止波长：

● 单模条件：

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

■ $\lambda = \lambda_c$ ， $V = 2.405$ 。

■ $\lambda > \lambda_c$ ，单模传输。

■ $\lambda < \lambda_c$ ，多模传输。



2.3.3 单模光纤

■ 由此可知:

$$\begin{cases} \frac{2\pi a}{\lambda_c} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2.405 \\ \lambda = \frac{2\pi a}{V} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{cases}$$

■ 由上面两式可得:

$$V = 2.405 \frac{\lambda_c}{\lambda} \quad \text{或} \quad \lambda_c = \frac{V\lambda}{2.405}$$



2.3.3 单模光纤

例：利用单模条件估算光波系统中单模光纤的纤芯半径。其中，取 $\lambda = 1.2\mu m$, $n_1 = 1.45$, $\Delta = 5 \times 10^{-3}$ 。

$$\text{解：} \because V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$$\Rightarrow a = \frac{V}{\frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sqrt{2\Delta}}$$

由阶跃折射率光纤的单模条件： $V < 2.405$

$$a < \frac{2.405}{\frac{2\pi}{1.2\mu m} \times 1.45 \times \sqrt{2 \times 5 \times 10^{-3}}} = 3.2\mu m$$

实际中， Δ 降至 3×10^{-3} ，单模光纤的纤芯半径设计在：

$$a \approx 4\mu m$$



2.3.3 单模光纤

2. 模折射率与归一化传播常数:

■ 模折射率（有效折射率）：

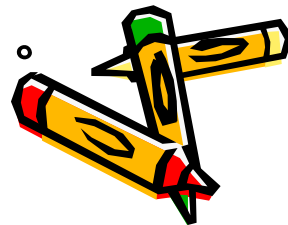
■ 由式：
$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2}$$

■ 有：
$$\bar{n} = n_2 + b(n_1 - n_2) \approx n_2(1 + b\Delta)$$

■ 由图2.4中 HE_{11} 模式 b 与 V 的曲线，可以近似得到：

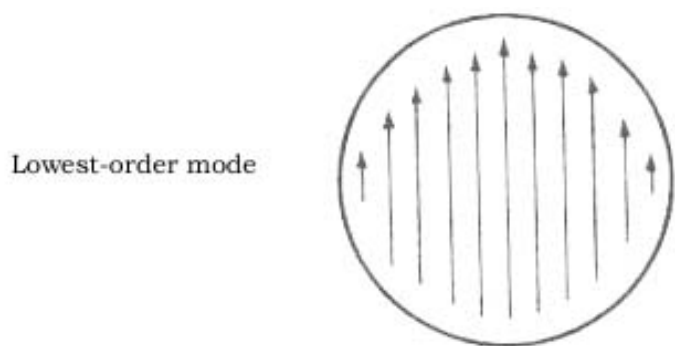
$$b(V) = (1.1428 - 0.996/V)^2$$

■ 上式当 V 在1.5~2.5范围内，误差在0.2%以内。

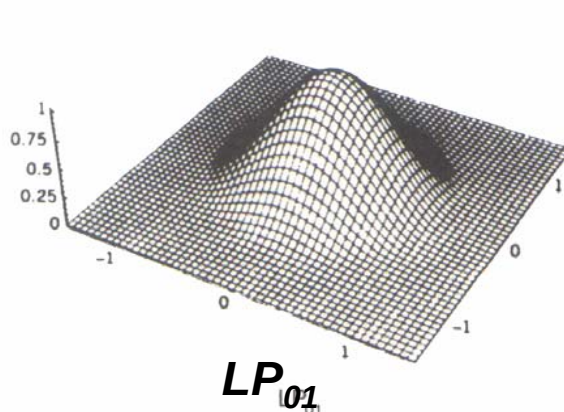


2.3.3 单模光纤

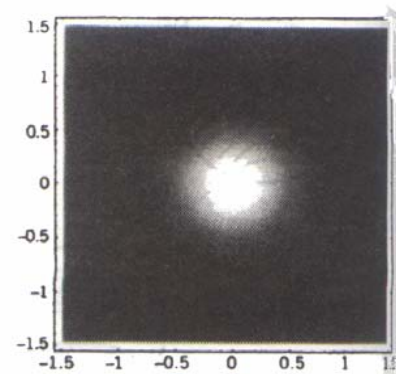
3. 单模场结构



LP_{01} 模 (HE_{11}) 的电力线分布



LP_{01} 模式的强度点和可视模式



■ 当 $\Delta \ll 1$ 时 (弱导光纤), 电场和磁场轴向的分量都很小, 因此 HE_{11} 模可近似为线偏振模 LP_{01} 。



2.3.3 单模光纤

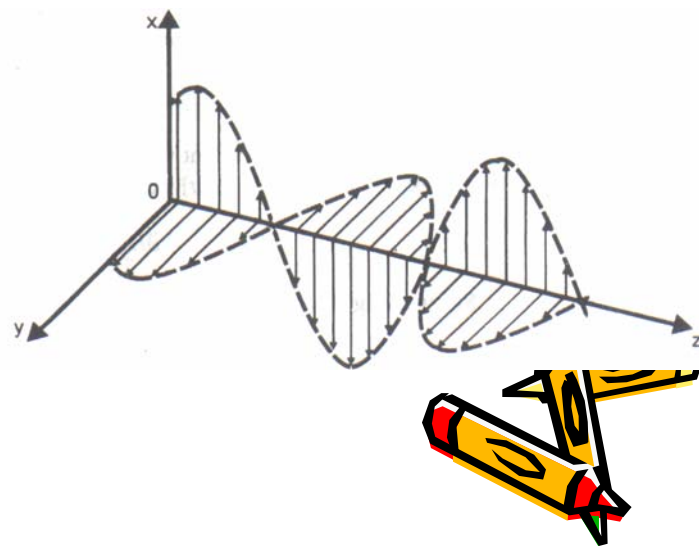
■对于线性极化模，设场的一个横向分量为零，如令 $E_y = 0$ ，则 HE_{11} 模电场的 E_x 分量表示为：

$$E_x = E_0 \begin{cases} [J_0(\chi r) / J_0(\chi a)] \exp(i\beta z) & r \leq a \\ [K_0(\chi r) / K_0(\chi a)] \exp(i\beta z) & r > a \end{cases}$$

■ E_0 为决定于传输功率的一个常数，该模式的 H_y 分量表示为：

$$H_y = n_2 (\epsilon_0 / \mu_0)^{1/2} E_x$$

■上面的模式为沿 x 轴线性极化的模，同一根光纤还承载另一个沿 y 轴线性极化的模，所以单模光纤实际上承载两个正交简并的偏正模式，这两个模式具有相同的模折射率。



2.3.3 单模光纤

4. 单模光纤的双折射特性

■ 出现双折射现象的原因：

● 实际光纤的纤芯形状不完善——不是理想的圆柱形。

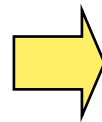
● 应力不均匀也使光纤的圆柱对称性受到破坏。

■ 结果：

折射率分布
的各向异性



简并特性
的破坏



双折射



2.3.3 单模光纤

- 双折射程度的定义：两个偏振模的模折射率的差

$$B = \left| \bar{n}_x - \bar{n}_y \right| = \frac{\beta_x - \beta_y}{k_0} = \frac{\Delta\beta}{2\pi/\lambda}$$

- 双折射效应将导致两个偏振分量间功率的周期交换，该周期为拍长。
- 把两个正交偏振模的相位差达到 2π 的光纤长度定义为拍长 L_B ：

$$L_B = \lambda / B = 2\pi / \Delta\beta$$



2.3.3 单模光纤

■ 双折射现象带来的影响:

- 如果纤芯是理想圆柱形，这两个正交的模式将以相同的速度传播，并同时到达输出端。
- 如果圆柱对称性出现了改变，这两个模式就会以不同的速度传播，导致脉冲展宽。
- 偏振的不确定性对相干通信系统对信号的检测、接收将产生不良影响。



2.3.3 单模光纤

■ 解决双折射问题的方法：

● 减小单模光纤的不完善性。

● 采用保偏光纤（线偏振光沿一个主轴偏振）

➡ 人为引入较高的固定双折射，压低小的双折射随机波动的影响。

➡ 典型保偏光纤， $B = 10^{-4}$ 。

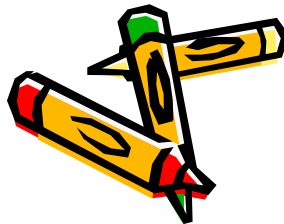
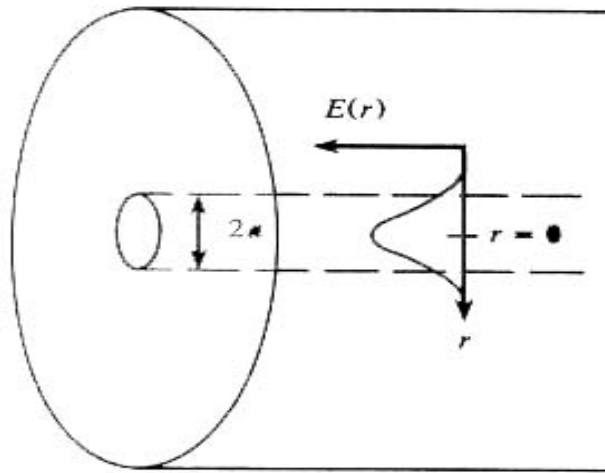


2.3.3 单模光纤

5. 光斑尺寸

- 单模光纤纤芯直径的概念没有实际意义，而常用模场直径的概念。

● 因为场分布不完全局限在纤芯内，有相当部分处于包层中（约**20%**）。



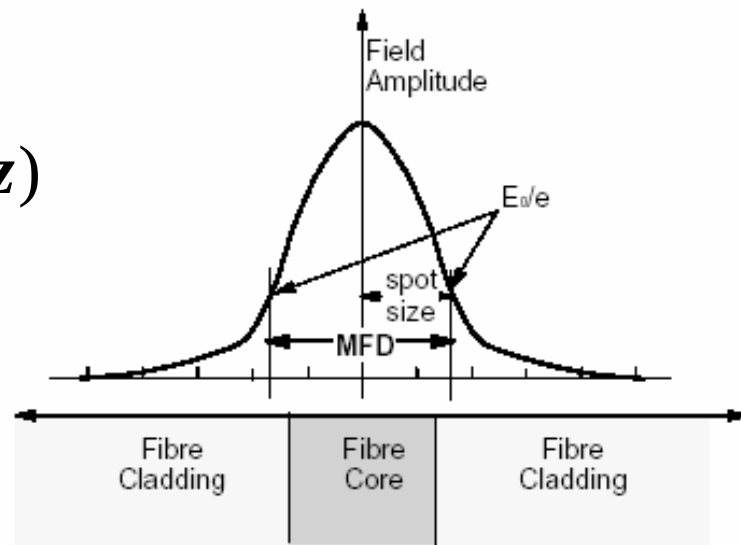
2.3.3 单模光纤

❖ 一般将光场近似作为高斯分布：

- 实际场分布与高斯分布近似的结果符合得相当好；
- 高斯分布便于理论计算。

$$E_x = A \exp\left[-\left(\frac{r}{W}\right)^2\right] \exp(i\beta z)$$

- A 为常数， W 为模场半径，即光斑尺寸。



❖ 在 $1.2 < V < 2.4$ 区间内，可用近似公式计算模场半径：

$$W/a \approx 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}$$



2.3.3 单模光纤

- ❖ 模式纵向传输（沿光纤轴向）的功率流在纤芯和包层两个区域同时传输；
- ❖ 大部分集中在芯区，小部分在包层内传输。
- ❖ 芯区功率流与总功率的比表征了基模功率在空间的集中程度。
$$P_{\text{芯}}/P \approx 1 - \exp(-2a^2/W^2)$$

当 $V=2$ 时，有**75%**的光功率限制在纤芯内传输。当 $V=1$ 时，比值降为**20%**。因此，大多数单模光纤 V 值设计在**2~2.4**之间。



2.4 光纤色散

- **损耗**和**色散**是光纤最重要的传输特性。
- 损耗导致脉冲幅度减小，限制系统的传输距离。
- 色散导致脉冲展宽、畸变，限制系统的传输容量。



2.4 光纤色散

■ 色散 (*Dispersion*) :

色散是在光纤中传输的光信号，由于不同成分的光的时间延迟不同而产生的一种物理效应。

色散 { 模式色散 (模间色散)
模内色散 (色度色散) { 材料色散
波导色散



2.4 光纤色散

● 模式色散:

- ➡ 是由于不同模式的时间延迟不同产生的。
- ➡ 取决于光纤折射率分布，并和光纤材料折射率的波长特性有关。

● 材料色散:

- ➡ 由于光纤的折射率随波长而改变，模式内部不同波长成分的光时间延迟不同产生的。
- ➡ 取决于光纤材料折射率的波长特性和光源的谱宽

● 波导色散:

- ➡ 由于波导结构参数与波长有关产生的。
- ➡ 取决于波导尺寸，以及纤芯与包层的相对折射率差。



2.4.1 单模光纤色散

- 设频率为 ω 的一光谱分量经过单模光纤时，其时延为：

$$T = L/v_g$$

其中， v_g 为群速度：

$$v_g^{-1} \stackrel{?}{=} d\beta/d\omega = \beta_1$$



2.4.1 单模光纤色散

① 利用 β 与模折射率 $\bar{n}$ 的关系 $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n}\omega/c$ ，得

:

$$\beta_1 = d\beta/d\omega = \frac{\bar{n}}{c} + \frac{\omega}{c} \cdot \frac{d\bar{n}}{d\omega} = \frac{\bar{n} + \omega \cdot \frac{d\bar{n}}{d\omega}}{c} = \frac{1}{c / (\bar{n} + \omega \cdot \frac{d\bar{n}}{d\omega})} = \frac{1}{c/n_g} = \frac{1}{v_g}$$

➤ 群折射率 n_g : $n_g = \bar{n} + \omega \cdot \frac{d\bar{n}}{d\omega}$

➤ 群速度 v_g : $v_g = c/n_g$



2.4.1 单模光纤色散

- 光脉冲包含许多频率分量，因而导致了脉冲在传输过程中展宽，脉冲展宽程度为：

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega$$

$$\text{其中, } \beta_2 = d^2\beta/d\omega^2 = \frac{d}{d\omega} \cdot (1/v_g)$$

β_2 直接决定了脉冲在光纤中的展宽程度，称为群速度色散参数。



2.4.1 单模光纤色散

❖ 对比用 $\Delta\omega$ 表示的展宽程度 ΔT :

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{d}{d\omega} (L/v_g) \Delta\omega = L \cdot \frac{d}{d\omega} (1/v_g) \cdot \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \\ \Delta T = \frac{d}{d\lambda} (L/v_g) \Delta\lambda = L \cdot \frac{d}{d\lambda} (1/v_g) \cdot \Delta\lambda = LD\Delta\lambda \end{cases}$$

其中 $D = \frac{d}{d\lambda} (1/v_g) = \frac{d}{d\omega} (1/v_g) \cdot \frac{d\omega}{d\lambda} = \beta_2 \cdot (-2\pi c/\lambda^2)$ (ps/nm·km)

D 称为 色散参数，简称为色散，单位为 ps/(nm·km)。它代表两个波长间隔为 1 nm 的光传输 1 km 后，到达时间延迟了多少 ps。



2.4.1 单模光纤色散

❖ 利用不产生相邻脉冲重叠的准则，可以粗略估算色散效应对系统码率的限制：

$$B\Delta T < 1 \quad \Rightarrow \quad BL|D|\Delta\lambda < 1$$

❖ 单模光纤通信容量可估算为：

$$BL < 1/(|D|\Delta\lambda)$$

例：对于波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的单模光纤， D 值可达到 $1\text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ，如果半导体激光器的 $\Delta\lambda$ 取 $2\sim 4\text{nm}$ ，则通信容量即 BL 积可超过 $100\text{Gps}\cdot\text{km}$ 。比多模光纤提高了很多。



2.4.1 单模光纤色散

■ 模内色散的组成:

● 材料色散

● 波导色散

■ 因此色散参数 D 可写为: $D = D_M + D_W$



2.4.1 单模光纤色散－材料色散

材料色散：由于材料的色散特性引起的脉冲扩展。

$$D_M = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \frac{dn_g}{d\omega} = -\frac{2\pi}{\lambda^2} \left(2 \frac{d\bar{n}}{d\omega} + \omega \frac{d^2\bar{n}}{d\omega^2} \right)$$

产生原因：

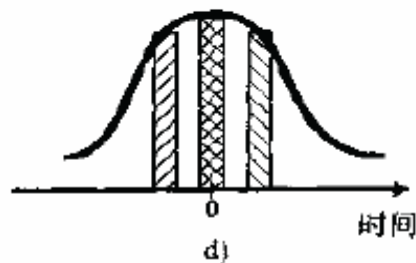
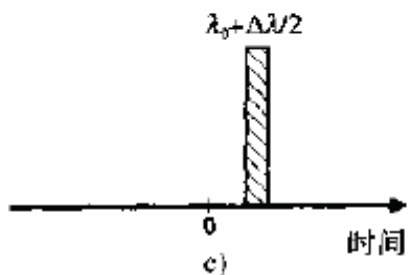
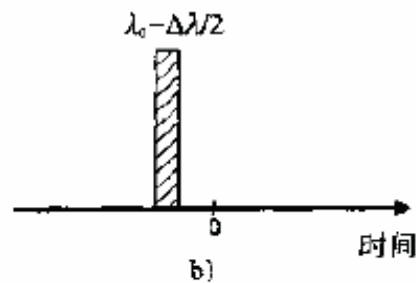
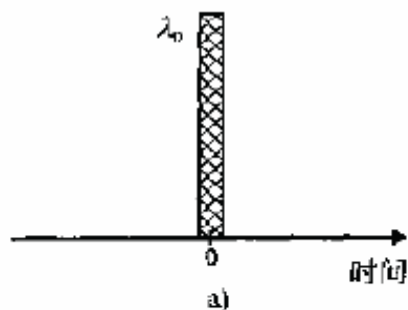
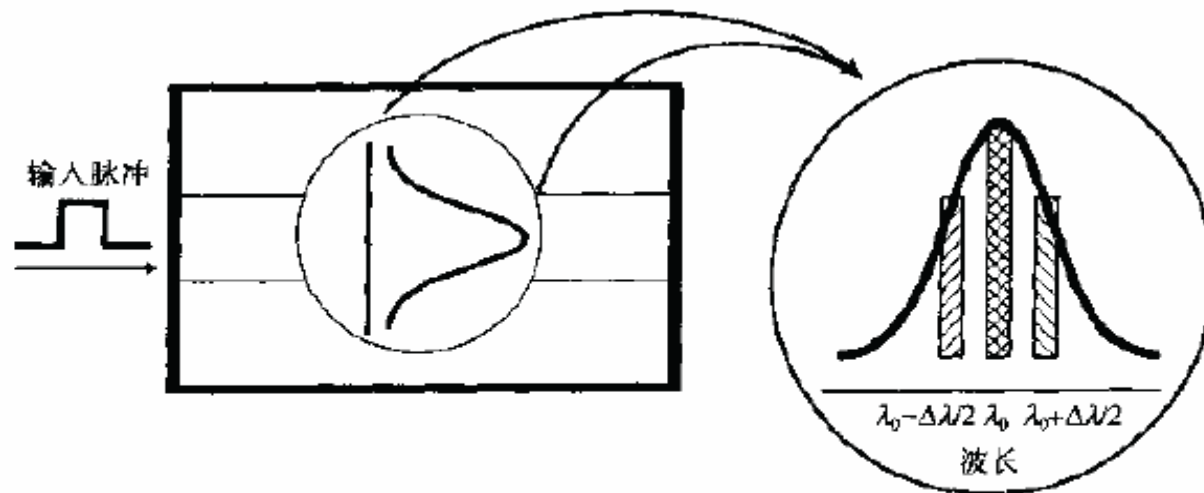
- 纤芯材料的折射率对不同的波长是不同的 — $n=n(\lambda)$ 。
- 光源辐射具有一定光谱宽度的光，一个携带信息的光脉冲包含了不同的波长。

产生结果：

脉冲中具有不同波长的分量在光纤中会以不同的速度传播并以不同的时间到达光纤端，造成了脉冲扩展。



2.4.1 单模光纤色散－材料色散



2.4.1 单模光纤色散－材料色散

熔融石英在0.5~1.6 μm 波长范围内n、n_g与波长的关系曲线

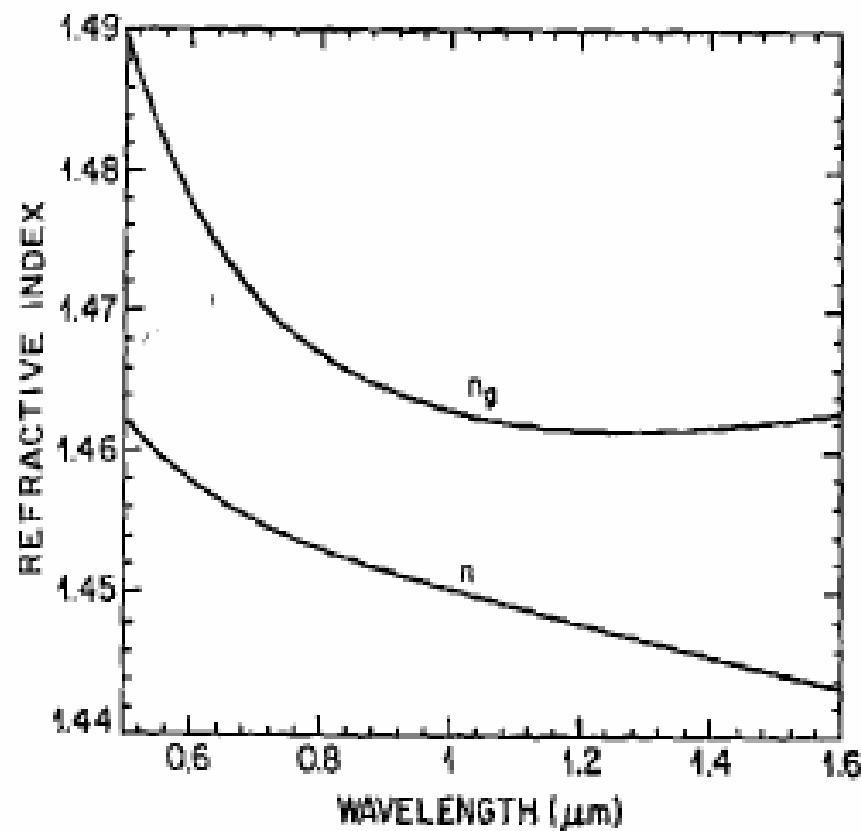
■ 材料色散大小由n_g ~ λ

斜率决定。
$$D_M = \frac{1}{c} \frac{dn_g}{d\lambda}$$

■ 当D_m = (1/c) dn_g/dλ = 0时，
零色散波长 λ_{ZD} = 1.276 μm

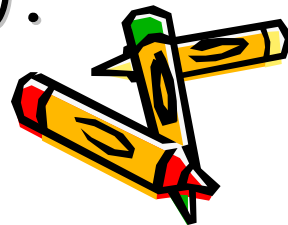
■ λ > λ_{ZD}, D_m为正值;

■ λ < λ_{ZD}, D_m为负值;



➤ 在1.25~1.66 μm 波长范围内, D_m近似表示为:

$$D_M \approx 122 \left(1 - \frac{\lambda_{ZD}}{\lambda} \right)$$



2.4.1 单模光纤色散－波导色散

波导色散

✓ 模式传播常数 β 随波长的变化而变化导致波导色散。

$$D_w = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega} \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

产生原因:

- 单模光纤中，携带信息的光脉冲在纤芯和包层间分布：主要部分在纤芯中传输，剩余部分在包层中传播。
- 纤芯和包层拥有不同折射率，两个部分以不同的速度传播。
- 光被限制在一个拥有不同折射率的结构－纤芯和包层的组合中传播，脉冲会扩展。

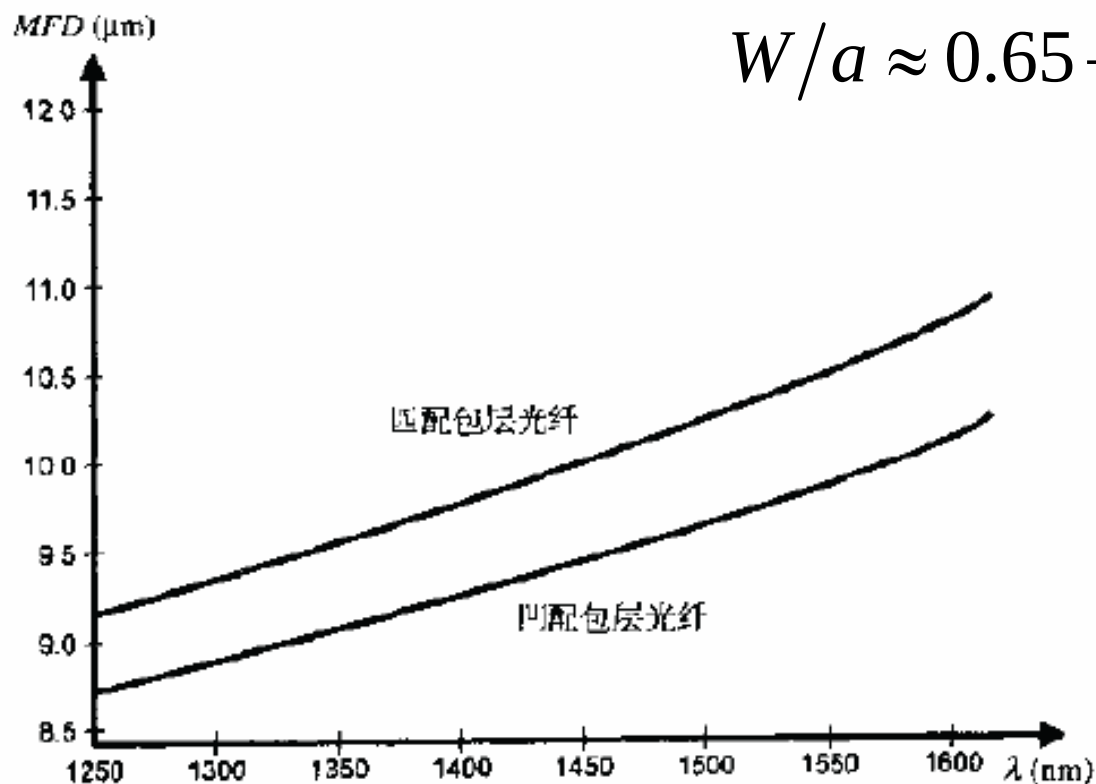
注意：即使光纤材料没有色散特性，波导色散也会发生。
纯波导色散仅因为将光限制在一个特定的结构中而产生



2.4.1 单模光纤色散－波导色散

波导色散依赖于波长：

- 波导色散依赖于纤芯和包层间的模场分布，即依赖于模场半径，而模场半径依赖于波长。



$$W/a \approx 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}$$

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

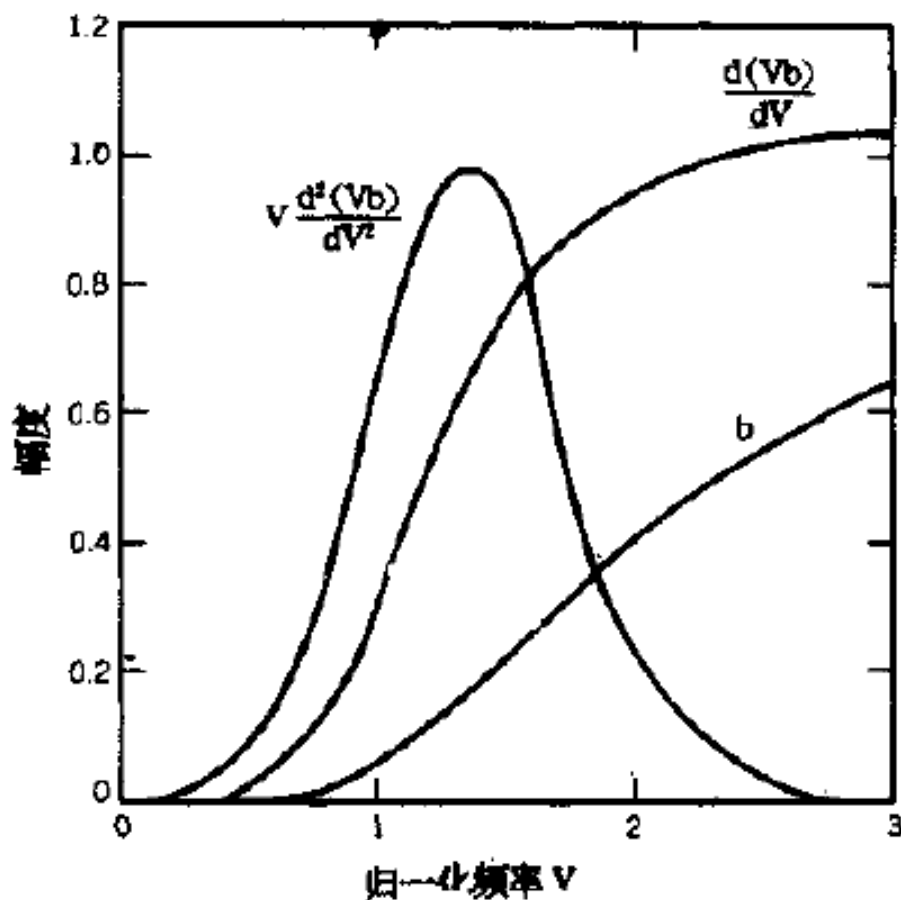
图5-4 模场直径MFD为波长的函数



2.4.1 单模光纤色散—波导色散

■波导色散决定于光纤的V参数。

$$D_w = -\frac{2\pi\Delta}{\lambda^2} \left[\frac{n_{2g}^2}{n_2\omega} \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + \frac{dn_{2g}}{d\omega} \frac{d(Vb)}{dV} \right]$$

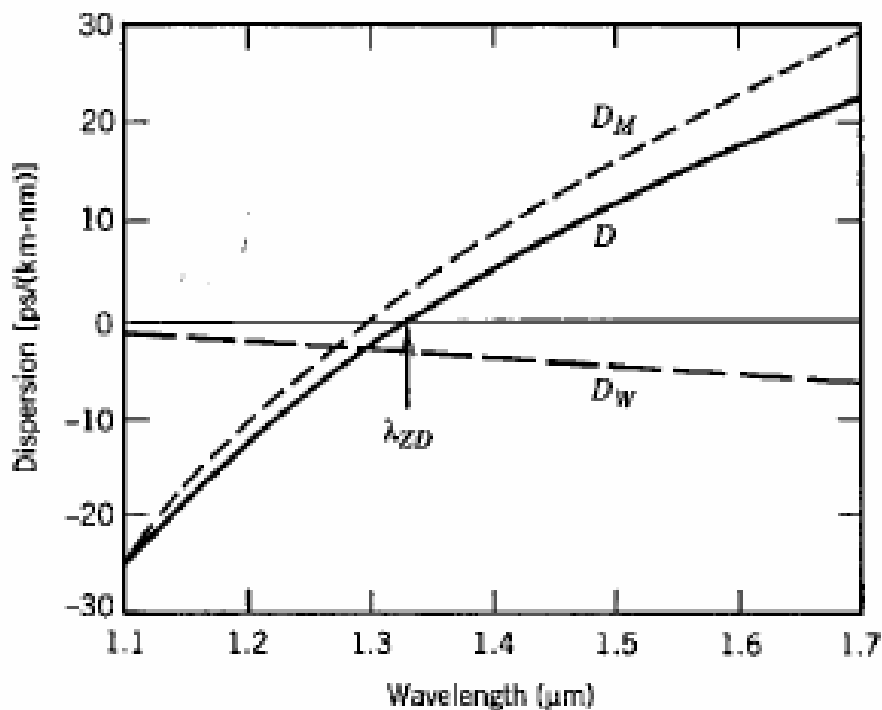


✓ $d(Vb)/dV$ 和 $Vd^2(Vb)/dV^2$ 两项都为正，所以 D_w 在 $0 \sim 1.6 \mu m$ 整个波长范围内都是负值。



2.4.1 单模光纤色散－波导色散

图：典型单模光纤的 D_M 、 D_W 和它们的和随波长的变化情况。

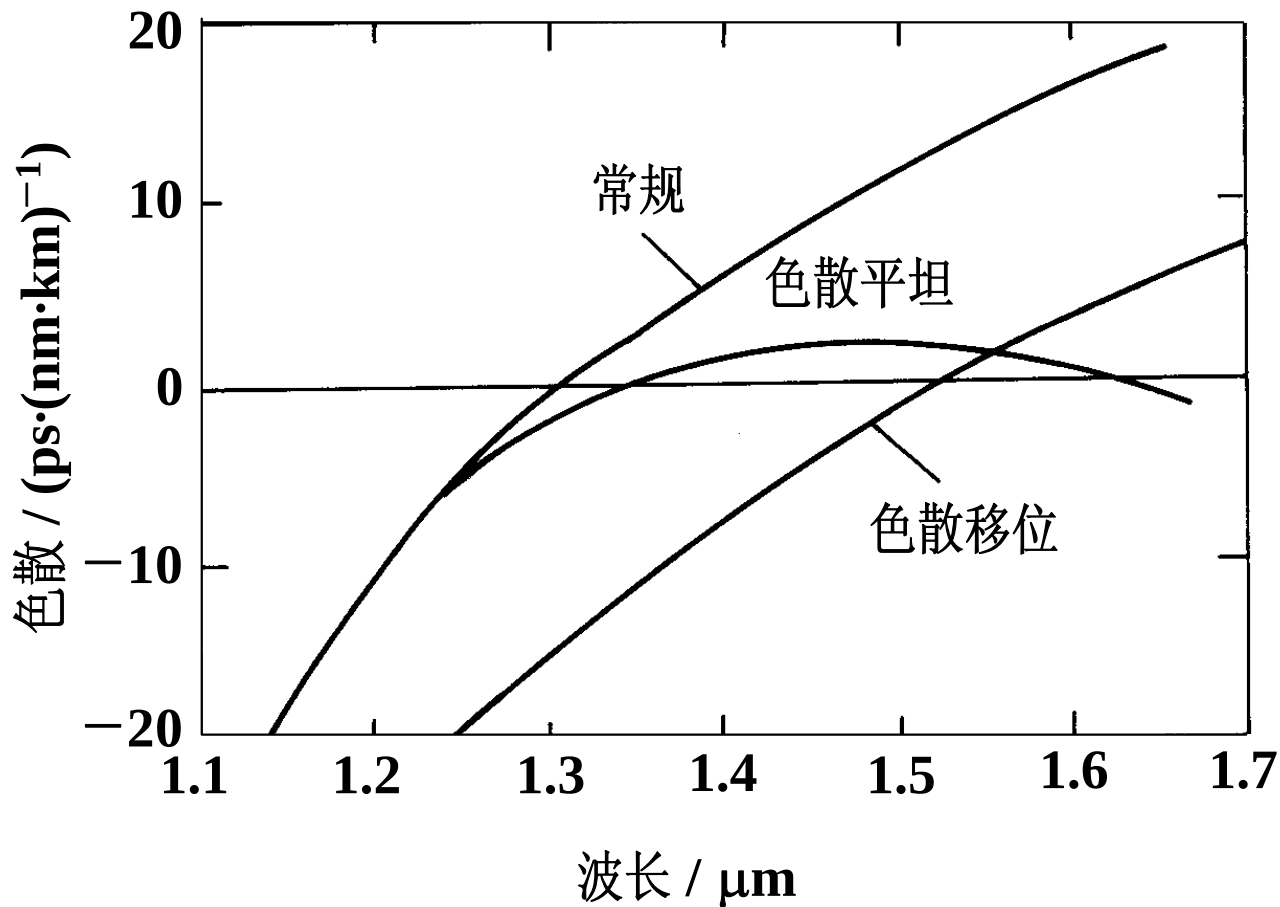


- ✓ 波导色散使零色散波长从 $1.276 \mu\text{m}$ 向右移动了 $0.03 \sim 0.04 \mu\text{m}$ ，总色散在 $\lambda = 1.31 \mu\text{m}$ 附近为零，即零色散波长 λ_0 为 $1.31 \mu\text{m}$ 。
- ✓ 波导色散使得 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内的总色散减小。
- ✓ $1.55 \mu\text{m}$ 波长附近， D 的典型值为 $15 \sim 18 \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$ 。



2.4.1 单模光纤色散

■波导色散与芯径、折射率差等光纤参数有关。



不同结构单模光纤的色散特性



2.4.2 光纤带宽

- 如果光源的频谱宽度比信号的频谱宽度大得多，光纤可以近似为线性系统。
- 这样，输入光脉冲功率 $P_i(t)$ 和输出光脉冲功率 $P_o(t)$ 的关系为：

$$P_o(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - t') P_i(t') dt'$$



2.4.2 光纤带宽

- 当输入光脉冲为 δ 函数时，输出光脉冲为：

$$P_o(t) = h(t)$$

式中， $h(t)$ 为光纤冲击响应。

- $h(t)$ 的傅里叶 (Fourier) 变换为：

$$H(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \exp(-j2\pi ft) dt$$

- 频率响应 $|H(f)|$ 随频率的增加而下降，光纤起低通滤波器的作用。



2.4.2 光纤带宽

■ 光纤 **3dB** 光带宽 ($f_{3\text{ dB}}$) :

归一化频率响应 $|H(f)/H(0)|$ 下降一半 (减小 **3 dB**) 的频率。

$$|H(f_{3\text{dB}})/H(0)| = 1/2$$

或

$$T(f) \text{ (dB)} = 10 \lg |H(f_{3\text{dB}})/H(0)| = -3$$



2.4.2 光纤带宽

■ 通常设输出光脉冲为高斯形：

$$P_o(t) = h(t) = \exp[-t^2/(2\sigma^2)]$$

■ σ 为均方根脉宽，与1/e强度半宽 T_0 关系为 $\sigma = 2^{-1/2} T_0$ 。

■ 对上式进行傅里叶变换后，代入 $|H(f_{3dB})/H(0)| = 1/2$ 有

$$\exp(-2\pi^2\sigma^2 f_{3dB}^2) = 1/2$$

■ 则3 dB光带宽为：

$$f_{3dB} = \frac{\sqrt{2\ln 2}}{2\pi} \frac{1}{\sigma} = \frac{187}{\sigma} (\text{MHz})$$



2.4.2 光纤带宽

- 利用高斯脉冲半极大值全宽 (T_{FWHM}) 和均方根脉宽的关系式:

$$T_{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.355\sigma$$

- 得:

$$f_{3dB} = \frac{440}{T_{FWHM}} (MHz)$$

f_{3dB} 、 T_{FWHM} 、 σ 的定义如图所示。



2.4.2 光纤带宽

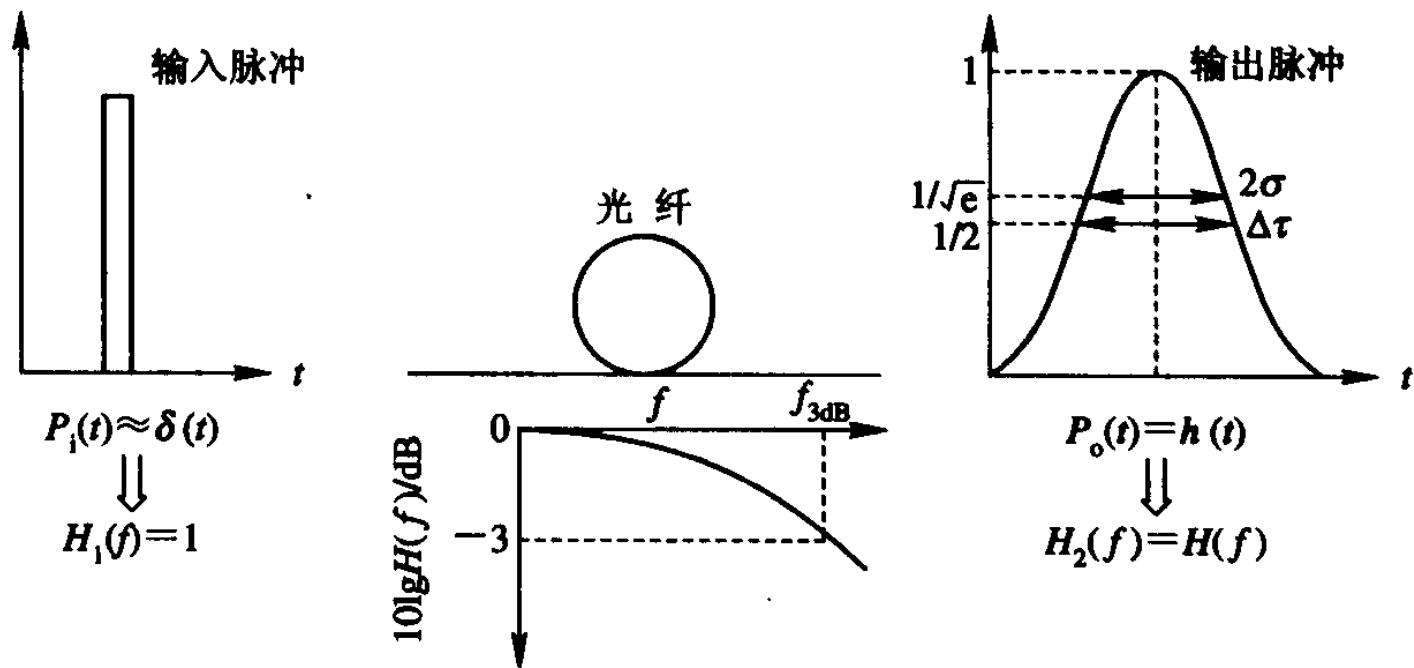


图 光纤带宽和脉冲展宽的定义



2.5 光纤损耗

- 光纤损耗成为限制光纤传输容量（ BL 积）的另一因素，它是通信距离 L 的固有限制。
- 给定发送功率和接收机灵敏度条件下，损耗决定了从光发送机到光接收机之间的最大距离。
- 损耗过大会影响通信系统的性能。



2.5.1 衰减系数

■ 关于衰减系数 α 的推导:

● 信号在光纤中传输时的衰减由下式定义:

$$\alpha = -\frac{1}{P} \left(\frac{dP}{dz} \right)$$

● 分离变量:

$$\alpha dz = -dP/P$$

● 对上式两边同时积分:

$$\begin{aligned} \int_0^L \alpha dz &= \int_{P_{in}}^{P_{out}} -dP / P \Rightarrow \alpha(L - 0) = -\ln(P) \Big|_{P_{in}}^{P_{out}} \\ &= -[\ln(P_{out}) - \ln(P_{in})] = \ln(P_{in} / P_{out}) \end{aligned}$$



2.5.1 衰减系数

● 解得输出功率 P_{out} 为: $P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L)$

● 从上式解出损耗系数 α : $\alpha = -\frac{10}{L} \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}$

通常单位为 dB/Km。

❖ 高琨指出只有光纤衰减下降至 $\alpha = 20 \text{ dB/km}$, 光纤在通信中的实际使用才可能开始。

光信号传输 1km 后: $P_{out} / P_{in} = 10^{-\alpha L / 10}$

$$= 10^{-20/10} = 1/100$$



2.5.1 衰减系数

芯径为 $9\mu\text{m}$ ， $\Delta = 1.9 \times 10^{-3}$ ，截止波长为 $1.1\mu\text{m}$ 的单模光纤的损耗谱

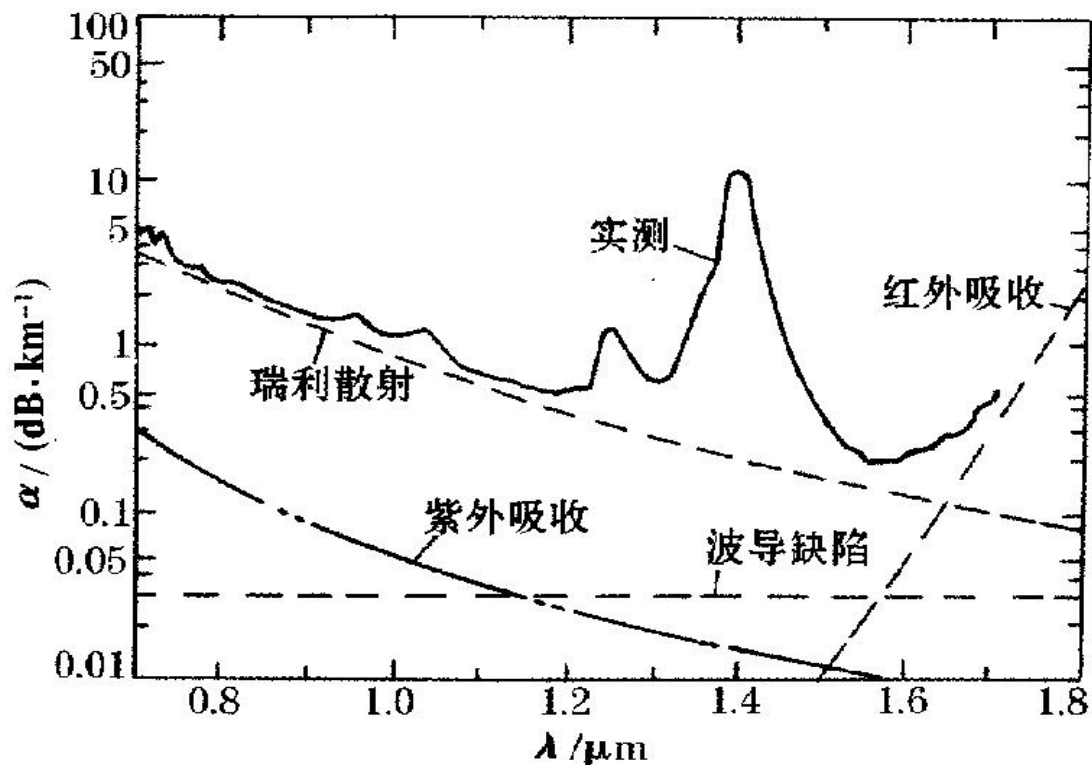


图 2.13 单模光纤的损耗谱特性

■ $1.55\mu\text{m}$ 附近损耗最低， $\alpha = 0.2\text{dB/km}$

■ 氢氧根离子(OH^-)产生的吸收峰 ——

$0.95\mu\text{m}, 1.24\mu\text{m}, 1.39\mu\text{m}$

■ $1.3\mu\text{m}$ 附近损耗较低， $\alpha \leq 0.5\text{dB/km}$

损耗与波长有关。在短波长区域，光纤损耗大大增加。



2.5.2 衰减机理

衰减机理

材料吸收损耗

本征吸收损耗

非本征吸收损耗

散射损耗

—— 瑞利散射

波导缺陷损耗

米氏散射损耗

弯曲损耗



2.5.2 衰减机理—材料吸收

材料吸收损耗

● 本征吸收——纯石英引起的损耗

- 紫外区 ($\lambda < 0.4 \mu\text{m}$) 出现电子谐振
- 红外区 ($\lambda > 7 \mu\text{m}$) 出现分子谐振

- 由于熔融石英的非晶体结构，使两个吸收带都拖尾至可见光区。
- 在 $0.8 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ ，石英材料本征吸收小于 0.1dB/km 。
- 在 $1.3 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 通信用波长窗口，石英材料本征吸收小于 0.03dB/km 。

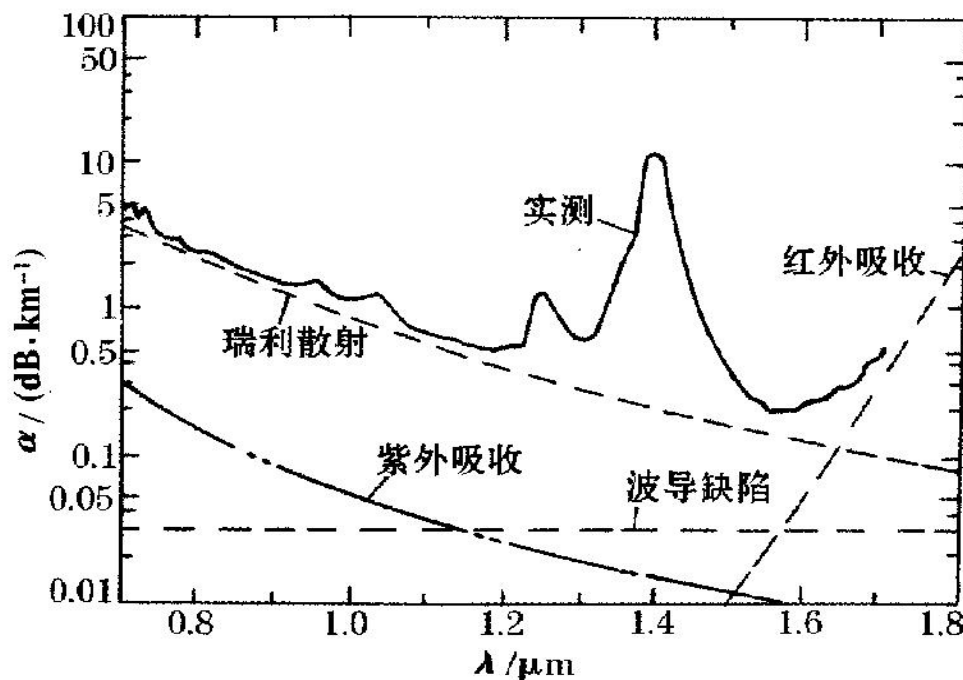


图 2.13 单模光纤的损耗谱特性

2.5.2 衰减机理—材料吸收

材料吸收损耗

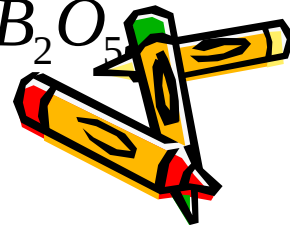
● 非本征吸收——杂质引起的损耗

➡ 过渡金属杂质吸收: Fe 、 Cu 、 Co 、 Ni 、 Mn 、 Cr
 $0.6\mu m \sim 1.6\mu m$ 有较强吸收。损耗小于 1dB/Km ，要求
含量 $< 10^{-9}$

➡ 氢氧根离子(OH^-)吸收

三个吸收峰: $0.95\mu m$, $1.24\mu m$, $1.39\mu m$

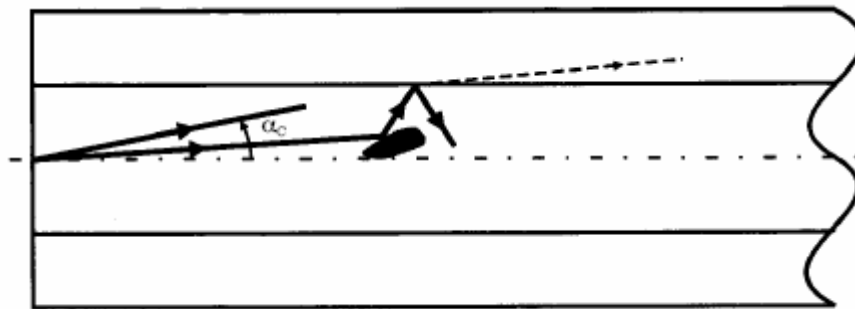
➡ 折射率差掺杂带来的附加损耗 GeO_2 、 P_2O_5 、 B_2O_5



2.5.2 衰减机理—瑞利散射

瑞利散射损耗

- 定义：纤芯折射率起伏不均匀引起光信号的散射。
- 原因：制造光纤过程中形成的局部浓度微观漂移，浓度漂移导致折射率在比波长小的尺度上发生随机的变化。



2.5.2 衰减机理—瑞利散射

■ 瑞利散射与波长的四次方成反比：

$$\alpha_R = C/\lambda^4$$

◆ 常数C的值依纤芯结构不同在 $0.7\sim 0.9(\text{dB/Km})\cdot \mu\text{m}$ 的范围内。

◆ 在短波长区域较为严重。

● $1.55\ \mu\text{m}$ 处为
 $0.12\sim 0.16\text{dB/Km}$ 。此
处损耗主要由瑞利散
射引起。

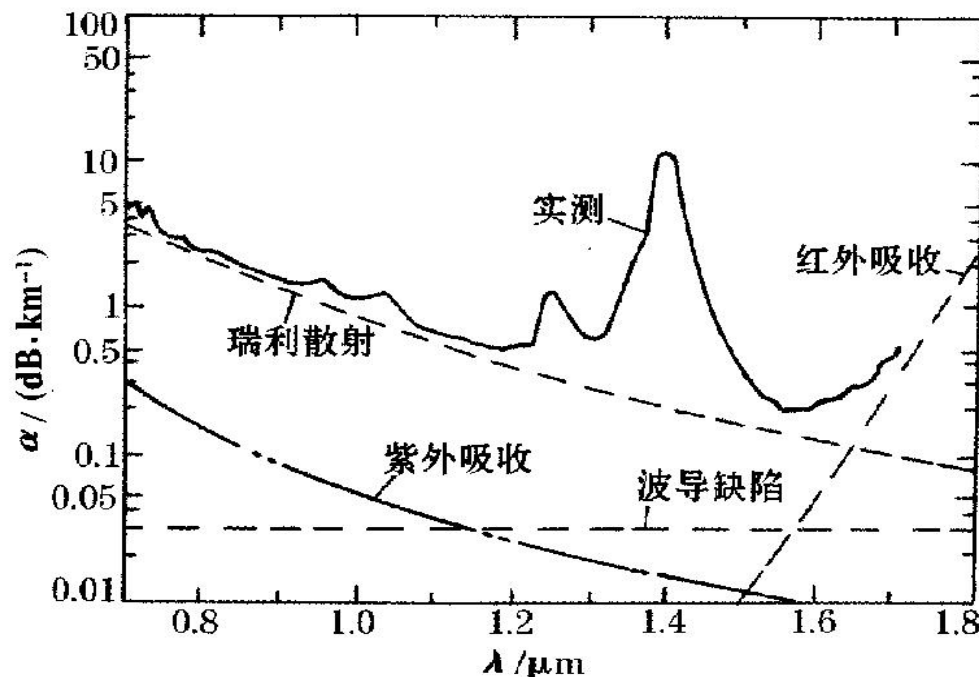


图 2.13 单模光纤的损耗谱特性

2.5.2 衰减机理—波导缺陷

波导缺陷损耗

● 包括:

✓ 米氏散射损耗

✓ 辐射损耗（弯曲损耗）

■ 米氏散射损耗

● 定义：理想的光纤具有完整圆柱对称性，实际上纤芯和包层分界面上存在缺陷，芯径发生漂移，使光纤产生附加损耗。在大于光波长尺度上出现折射率的非均匀性而引起的散射。

● 措施：制造时控制芯径漂移。



2.5.2 衰减机理－波导缺陷

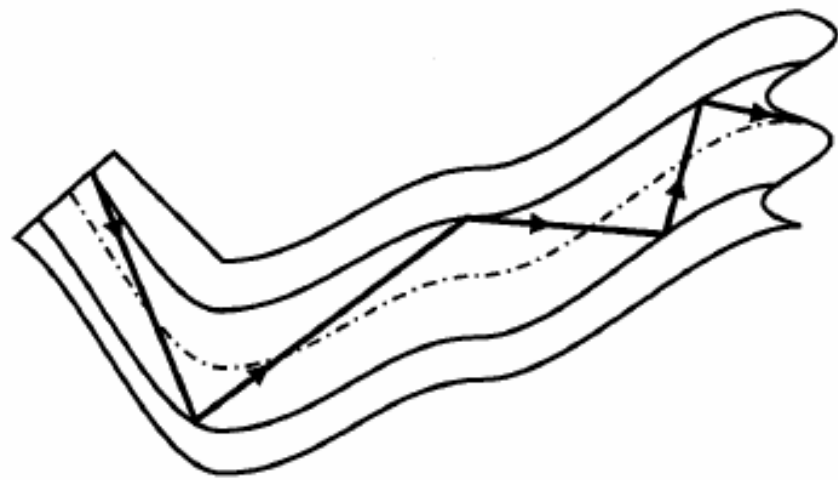
■ 辐射损耗

● 定义：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，引起能量泄漏到包层中，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：

➡ 宏观弯曲

➡ 微观弯曲



宏观弯曲和微观弯曲示意图



2.5.2 衰减机理－波导缺陷

✓宏观弯曲：曲率半径比光纤直径大得多的弯曲。

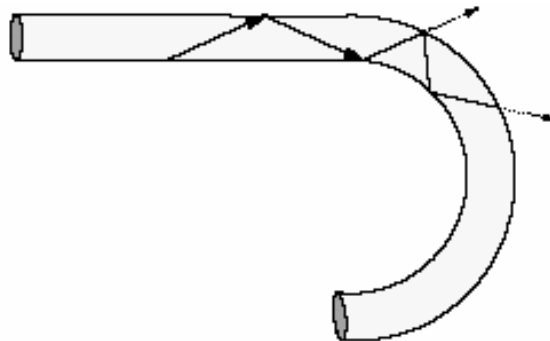


Figure 29. Propagation around a Bend in the Fibre

❖弯曲损耗正比于 $\exp(-\frac{R}{R_c})$

R 为弯曲半径， $R_c = a(n_1^2 - n_2^2)$

❖单模光纤， R_c 的典型值为0.2~0.4mm。

❖如果 $R > 5\text{mm}$ ，损耗小于0.01dB/Km，可以忽略



2.5.2 衰减机理—波导缺陷

✓**微观弯曲**：光纤成缆时光纤与非光滑表面接触受压而产生的随机性扭曲。

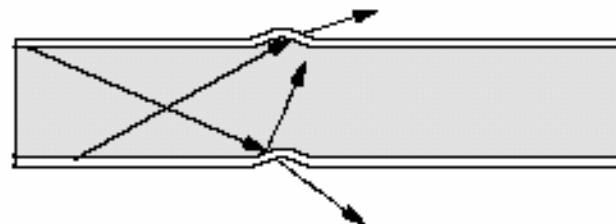


Figure 30. Effect of a Micro-Bend

❖可高达**100dB/Km**。

❖减小微弯损耗的方法：

➤选择**V**参数为**2.405**，使模式能量大部分局限在纤芯内。

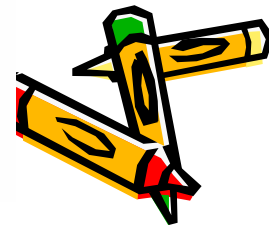
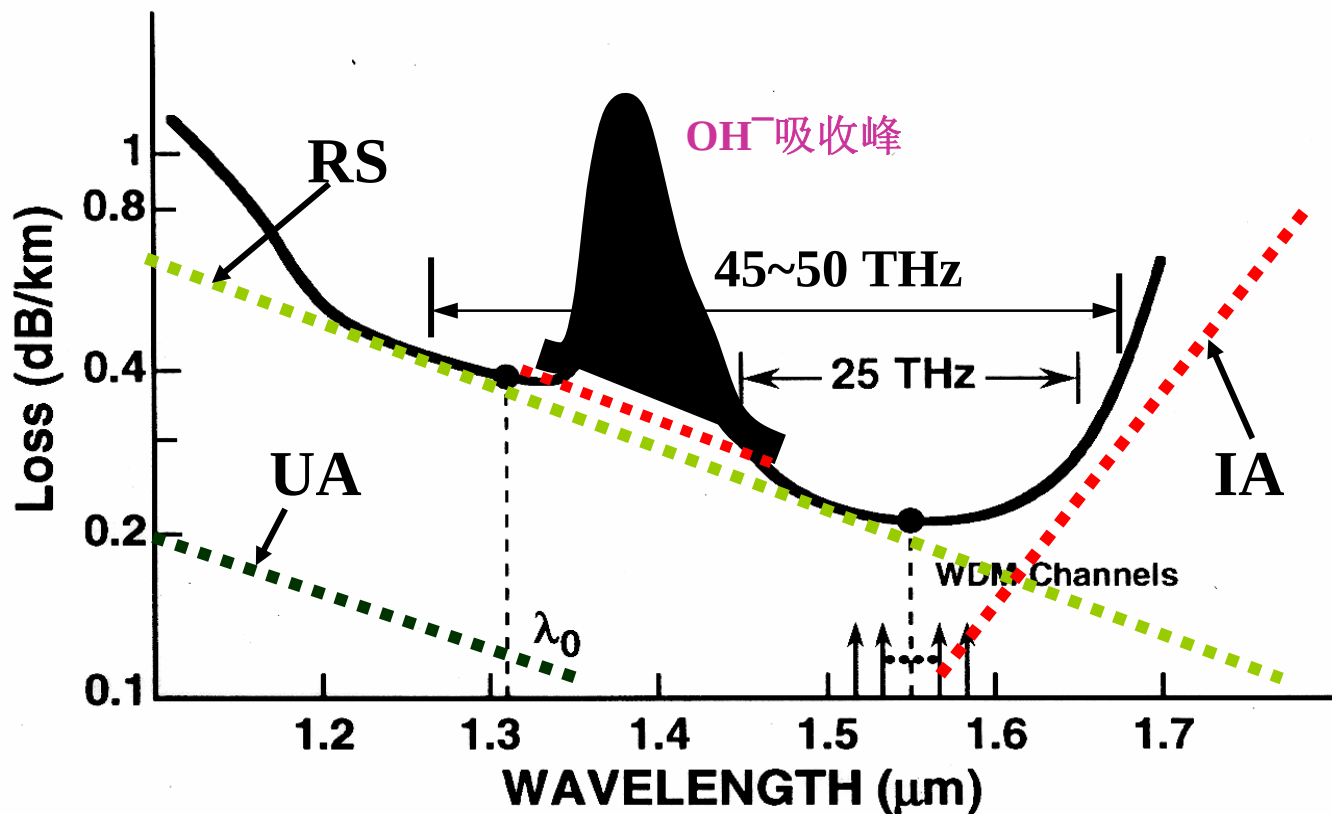
$$W/a \approx 0.65 + 1.619V^{-3/2} + 2.879V^{-6}$$

➤在光纤表面上安装护套。



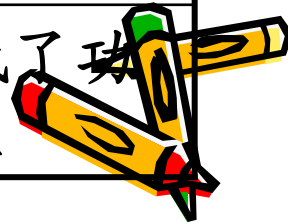
2.5.2 衰减机理－全波光纤

- 单模光纤的损耗谱特性已逐渐拉平，消除了三个吸收峰值，获得了0.8~1.6 μm 整个波长段上具有较低损耗。可提供50 THz的带宽，这种光纤称为全波光纤。



2.5.3 光纤标准和应用

型号	光纤	特点
普通单模光纤	G.652	可用于 1310nm ，也可用于 1550nm
色散位移光纤 DSF	G.653	将零色散波长移至 1550nm ，具有低损耗和低色散
截止波长位移光纤 CSF	G.654	降低 1550nm 波长的损耗，零色散波长仍为 1310nm
非零色散光纤 NZDSF	G.655	在 1550nm 波段有微量色散，解决了 G.652 的色散限制以及四波混频
大有效面积光纤 LEAF		增大光纤的有效面积，降低了功率密度，减小了非线性效应



2.5.3 光纤标准和应用

■ 使用场合

● G. 651: 多模渐变型光纤

➡ 中小容量、中短距离系统。

● G. 652: 常规单模光纤

➡ 目前世界上已敷设的光纤线路大部分采用这种光纤。

● G. 653: 色散位移光纤

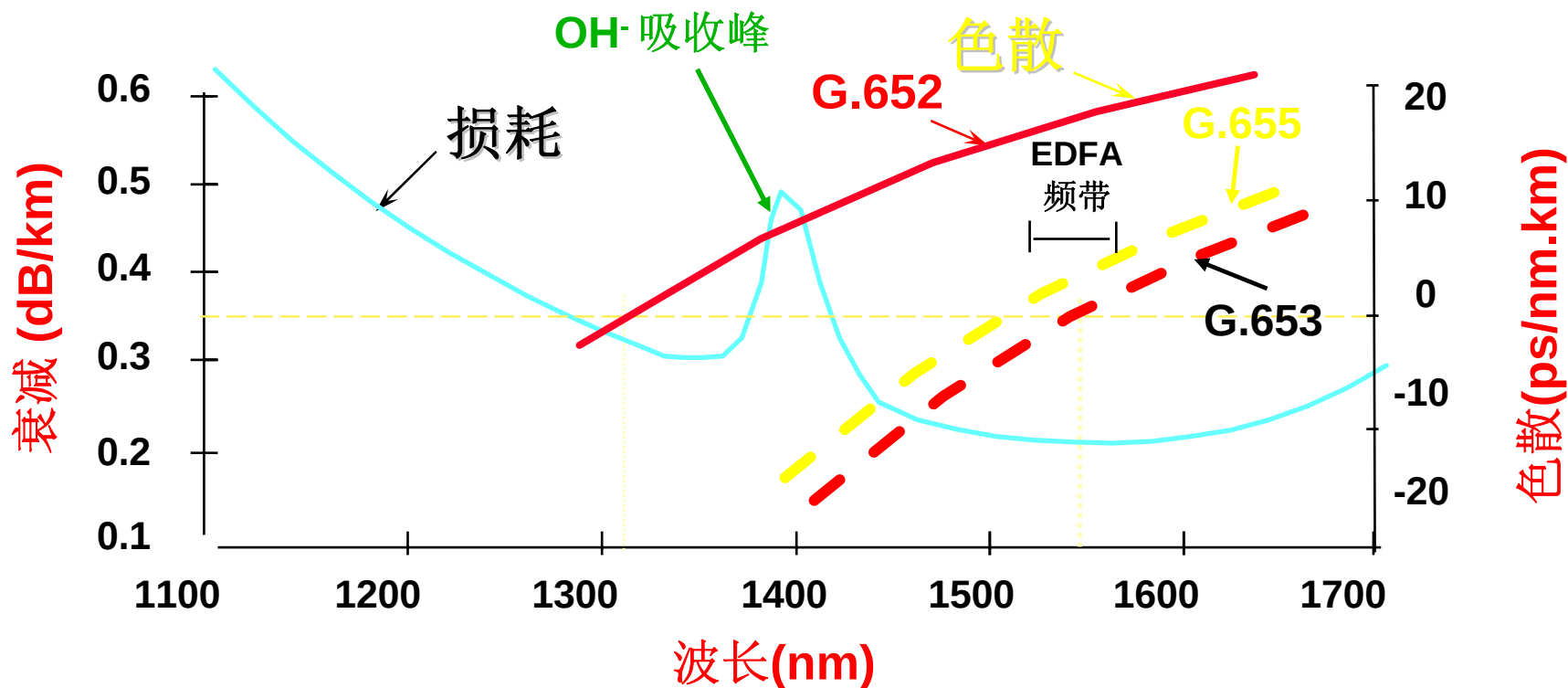
➡ 大容量长距离通信系统（1550 nm波段）。

● NZDSF（G. 655）、LEAF

➡ 密集波分复用系统。



2.5.3 光纤标准和应用



色散位移与非零色散光纤的色散参数

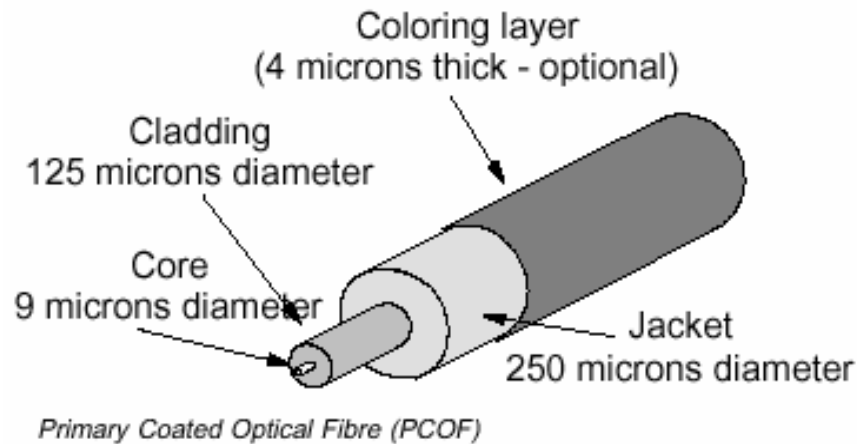


2.6 光纤光缆设计与制造

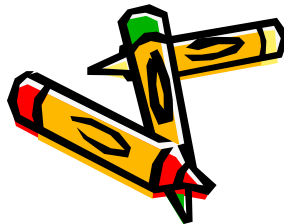
2.6.1 光纤的结构设计与制造

光纤的结构:

- 光纤是由折射率稍低于纤芯的包层包裹圆柱型纤芯组成的。



单模光纤



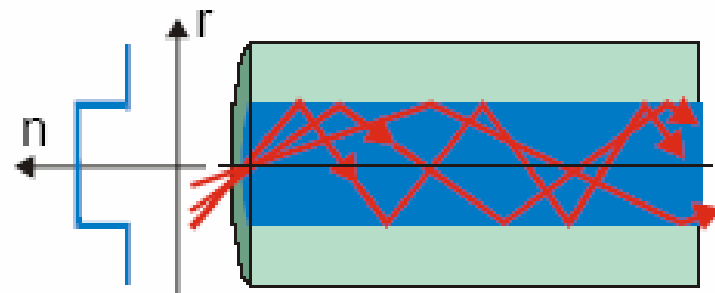
2.6.1 光纤的结构设计与制造

■ 纤芯和包层都用石英作为基本材料

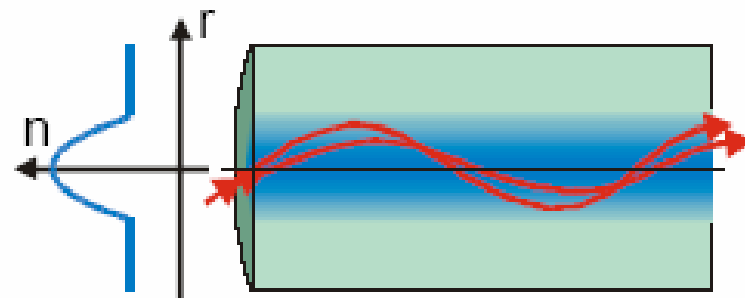
❖ 在纤芯中掺入 GeO_2 和 P_2O_5 可适当提高折射率；

❖ 在包层中掺入 B_2O_3 可降低折射率。

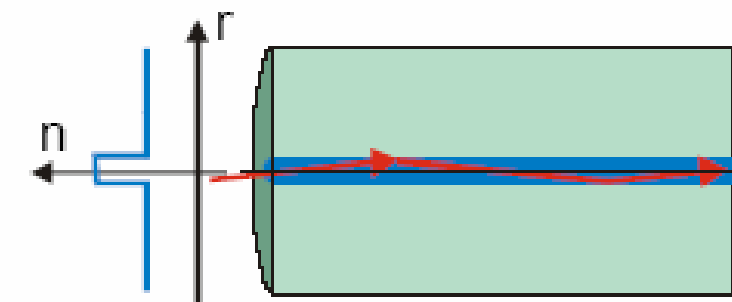
Multimode fibre.
 $r_{\text{core}} = 50 - 62 \mu\text{m}$



Gradient fibre.
 $n_{\text{core}} \sim 1/r^2$



Monomode fibre
 $r_{\text{core}} = 5 - 10 \mu\text{m}$

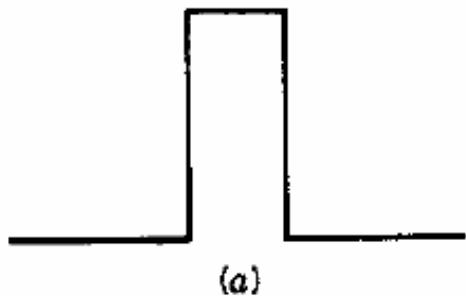


2.6.1 光纤的结构设计与制造

在光纤设计主要考虑:

- 折射率分布
- 掺杂成分
- 掺杂量

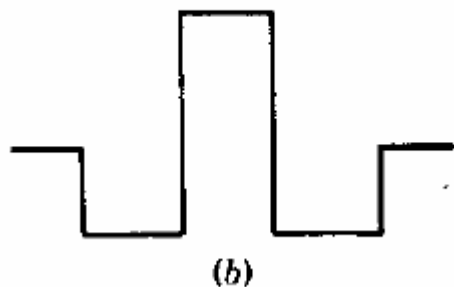
几种典型的折射率分布:



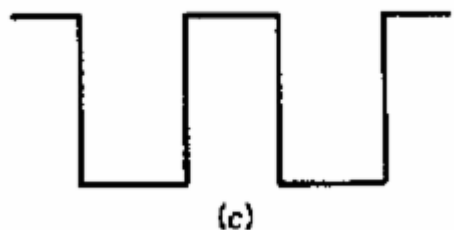
❖ 图 (a): 由纤芯掺入 GeO_2 , 以得到相对折射率差 $= 3 \times 10^{-3}$
工作波长设计在 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 附近



2.6.1 光纤的结构设计与制造

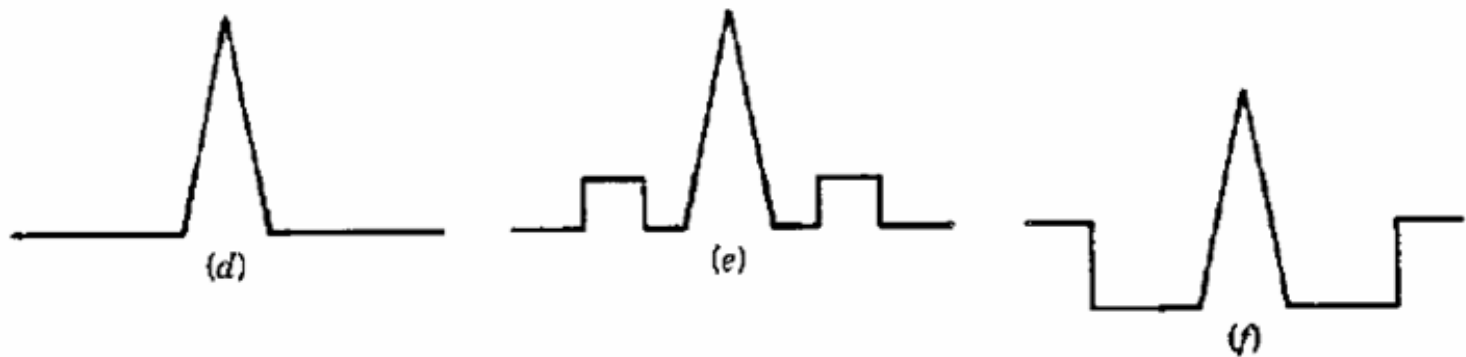


❖ 图 (b)：由纤芯掺入 GeO_2 后，再在纤芯旁边掺入 B_2O_3 。
工作波长： $\lambda = 1.3\mu\text{m}$

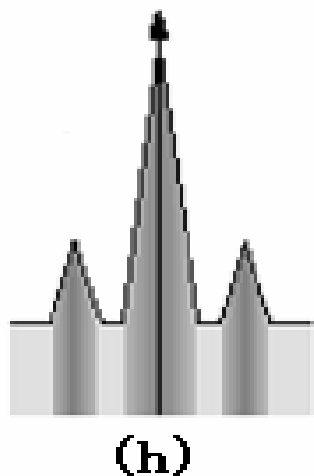


❖ 图 (c)：纤芯和包层均未掺杂，而在纤芯 - 包层之间掺入杂质，以降低折射率。工作波长： $\lambda = 1.3\mu\text{m}$





❖ 图(d)、(e)、(f): 色散位移光纤 (G. 653) ——
在工作波长 $\lambda = 1.55\mu m$ 附近, 具有最低色散和损耗

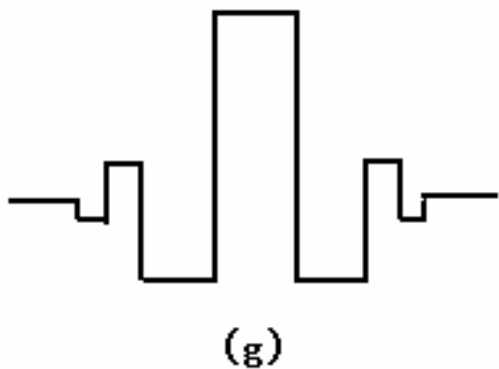


❖ 图 (h): 非零色散光纤 (G.655)

—— 1530 - 1565nm, D值很小, 但不为零, 解决了G.652 的色散限制以及G. 653 的四波混频等问题。



2.6.1 光纤的结构设计与制造



❖ 图 (g)：色散平坦光纤

——光纤的零色散特性不是出现在一个波长处，而是沿着一个波长区域分布。



2.6.1 光纤的结构设计与制造

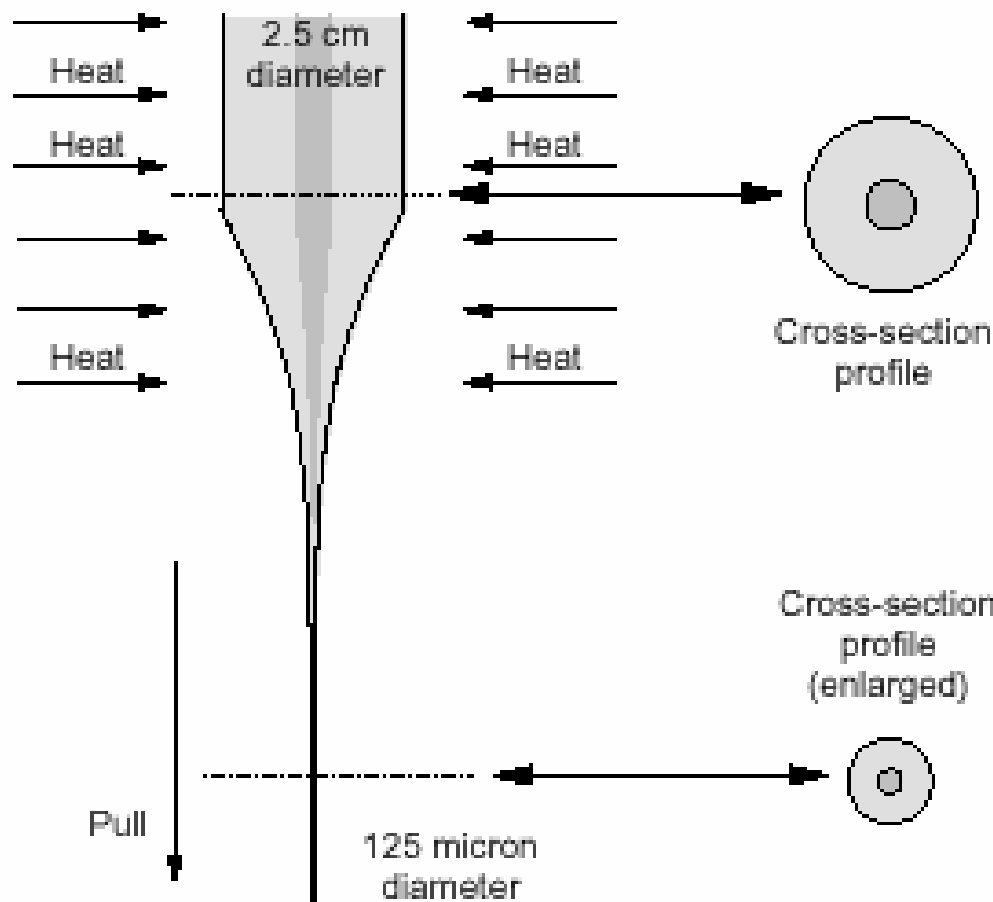
光纤的制造过程:

■ 制造预制棒 ——

这就是我们预想的光纤，只不过是尺寸大一些；

■ 拉纤成丝 —— 把预

制棒拉伸成光纤，以达到所需的尺寸。



2.6.1 光纤的结构设计与制造

■ 制造预制棒的常用方法:

● 改进的化学气相沉积法 (*MCVD*)

● 棒外气相沉积法 (*OVD*)

● 轴向气相沉积法 (*VAD*)

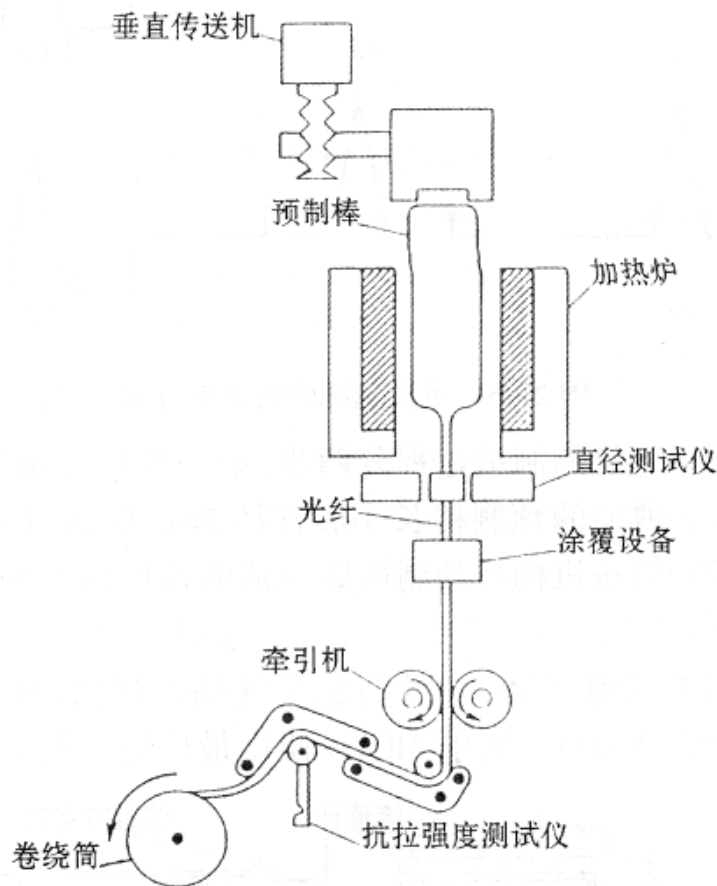
● 活化等离子体化学气相沉积法 (*PCVD*)



2.6.1 光纤的结构设计与制造

光纤的拉丝过程：

- 把预制棒放进拉伸炉，加热至 2000°C ，使底端受热熔化；
- 直径测试仪通过改变拉伸速率控制光纤直径；
- 涂敷设备在包层外面加上外套，同时用同心监控设备加以控制；



光纤拉丝装置示意

2.6.2 光缆的结构设计与制造

■ 光缆基本要求

- 保护光纤的机械强度和传输特性，防止施工过程中和使用期间光纤断裂，保持传输特性稳定。

■ 保护光纤固有机械强度的方法：

- 塑料被覆
- 应力筛选

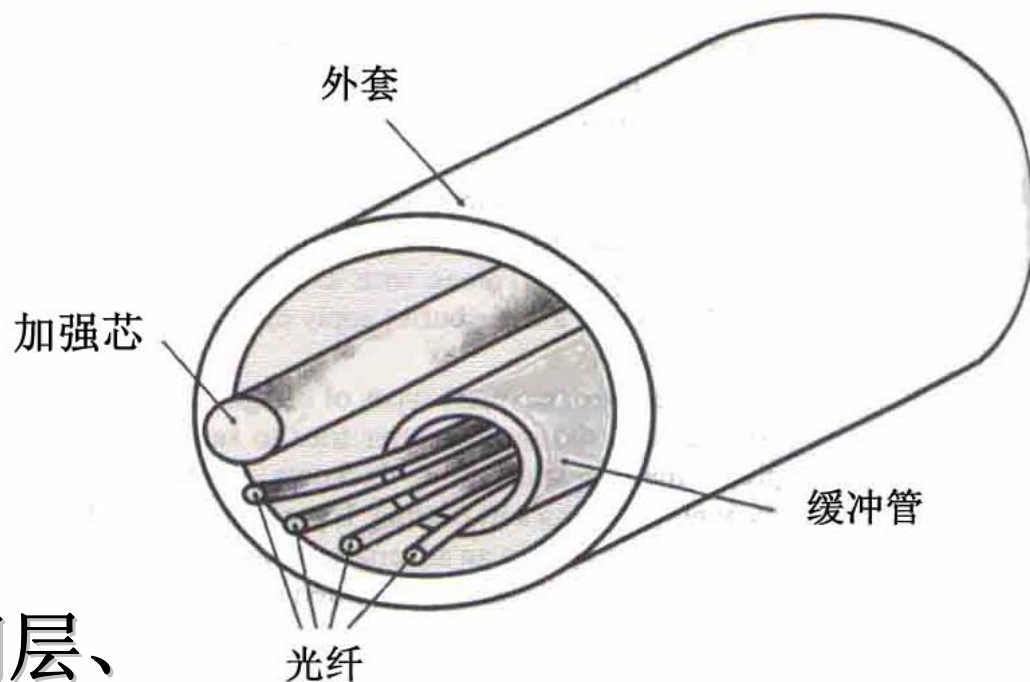


2.6.2 光缆的结构设计与制造

光缆的基本结构：

- 光纤
- 缓冲管
- 加强芯
- 外套

此外，还包括防潮层、
油膏、开索等。



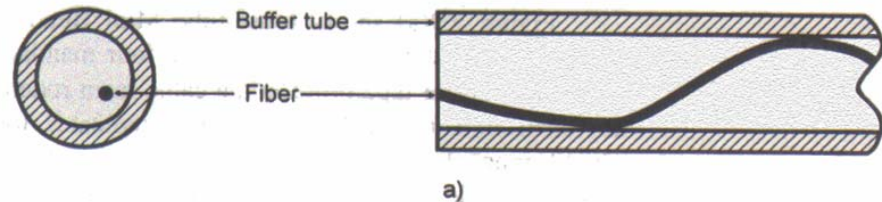
2.6.2 光缆的结构设计与制造

各部分的作用：

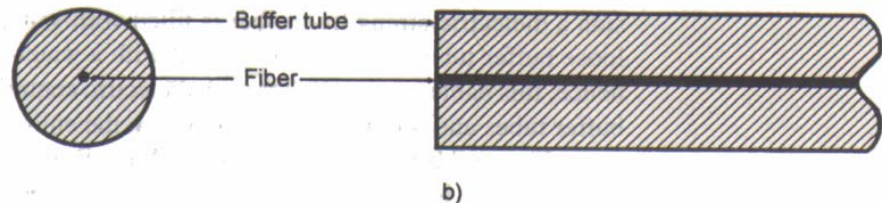
■ 缓冲管：是保护光纤免受环境损害的第一层结构，缓冲管中可以放入多根光纤，也可以只有一根光纤

；

✓ 松缓冲管

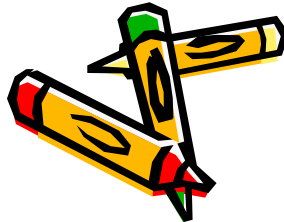


✓ 紧缓冲管



■ 加强芯：安装光纤时，释放光纤承受的机械压力

■ 外套：保护整个机构，以适应恶劣的环境。



2.6.2 光缆的结构设计与制造

■ 光缆的类型：

● 按缆芯结构特点分类：

- ➡ 层绞式
- ➡ 骨架式
- ➡ 中心束管式
- ➡ 带状式



2.6.2 光缆的结构设计与制造

● 按使用条件分类：

➡ 室内光缆

➡ 架空光缆

➡ 埋地光缆

➡ 管道光缆



2.6.2 光缆的结构设计与制造

特种光缆:

- ➡ 架空地线复合光缆 (OPGW)
- ➡ 海底光缆
- ➡ 阻燃光缆
- ➡ 军用光缆



2.6.2 光缆的结构设计与制造

■ 光缆特性:

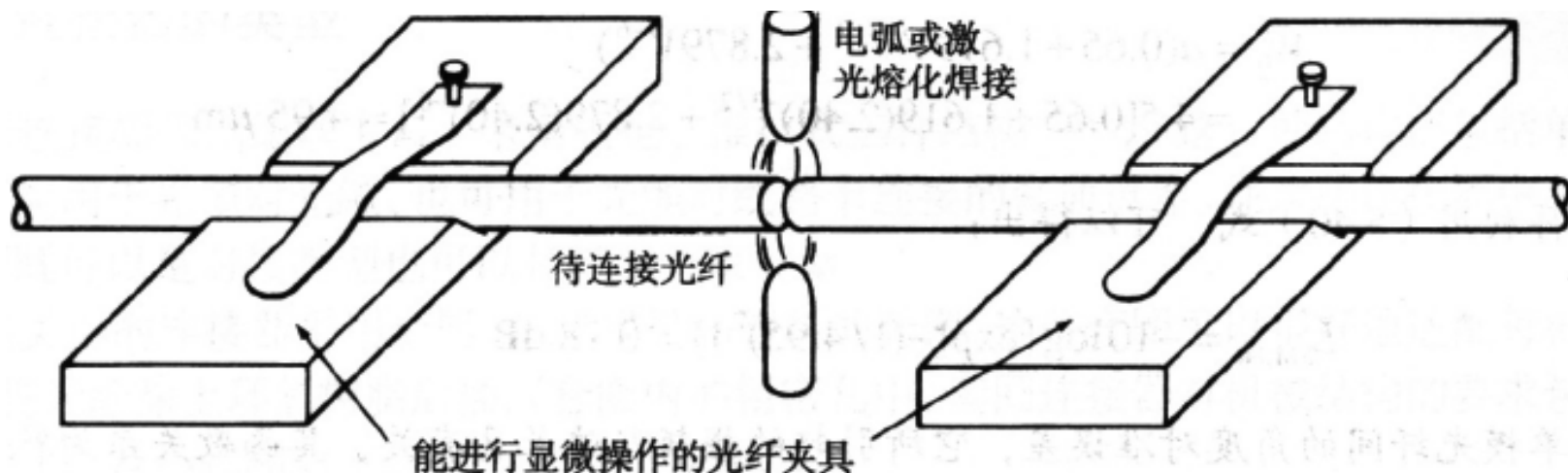
- **拉力特性:** 取决于加强件的材料和横截面积。
- **压力特性:** 最大侧压力取决于护套的材料和结构。
- **弯曲特性:** 取决于纤芯与包层的相对折射率差以及光缆的材料和结构。
- **温度特性:** 温度变化时, 由于热胀冷缩过程中光纤受到应力作用, 使损耗增加。



2.6.3 光纤和光缆的连接

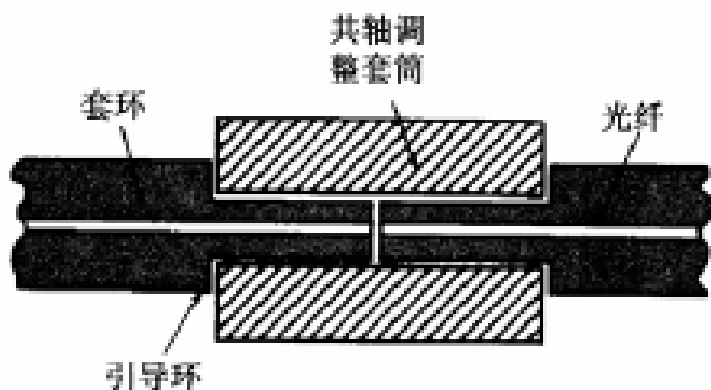
1 光纤的连接

- **固定连接**：永久性，用于光纤线的连接，损耗小，小于**0.1dB**。常用电弧熔接。



2.6.3 光纤和光缆的连接

- **活动连接**：可拆卸，用于收发端机与光纤的连接及实验室中，损耗较大，**0.2dB**。



2 光缆的连接

- 光纤熔接好后，放入光缆接头盒中加以保护。



2.7 光纤特性测量方法

■ 光纤特性参数:

● 几何特性参数:

➡ 纤芯与包层的直径、偏心度和不圆度等。

● 光学特性参数:

➡ 折射率分布、数值孔径、模场直径和截止波长等。

● 传输特性参数:

➡ 损耗、色散和带宽等。



2.7.1 损耗测量

■ 测量光纤损耗的方法:

● 剪断法

● 插入法

● 后向散射法



2.7.1 损耗测量

■ 剪断法测量光纤损耗:

● 先测量长光纤（长度 L_2 ）的输出光功率 P_2

。

● 保持注入条件不变，在注入装置附近剪断光纤，保留长度为 L_1 的短光纤。

● 测量短光纤 L_1 的输出光功率 P_1 （即长度为 $L=L_2-L_1$ 这段光纤的输入功率）。

● 光纤损耗为:

$$\alpha = \frac{10}{L} \lg \frac{P_1}{P_2} (\text{dB} / \text{km})$$



2.7.1 损耗测量

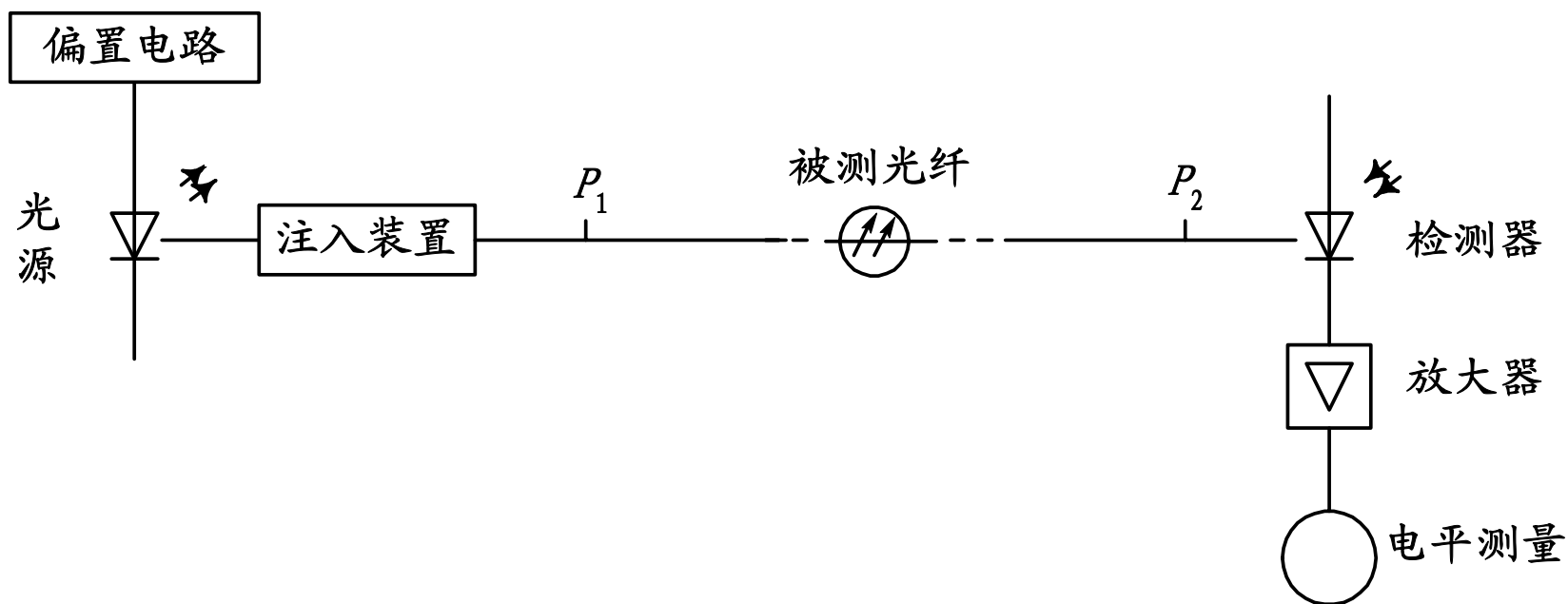


图2-23 剪断法光纤损耗测量系统框图



2.7.1 损耗测量

■ 获得稳态模式分布有三种方法：

- 建立 $NA_b \approx NA_f$ 的光学系统。
- 建立稳态模式模拟器，一般包括扰模器和包层模消除器。
- 用一根性能和被测光纤相同或相似的辅助光纤，代替光纤耦合长度的作用。



2.7.1 损耗测量

● 剪断法优点:

- 精确、方便、易行，是测量光纤损耗的方法中精度最高。

● 缺点:

- 测量方法具有破坏性，不利于多次重复测量。



2.7.1 损耗测量

■ 插入法测量光纤损耗:

- 在注入装置的输出和光检测器的输入之间直接连接，测出光功率 P_1 。
- 然后在两者之间插入被测光纤，再测出光功率 P_2 ，算出损耗。
- 这种方法可以根据工作环境，灵活运用，但应对连接损耗作合理的修正。



2.7.1 损耗测量

■ 后向散射法测量光纤损耗:

● **原理:** 由于瑞利散射光功率与传输光功率成比例, 利用与传输光相反方向的瑞利散射光功率来确定光纤损耗系数的方法, 称为后向散射法。



2.7.1 损耗测量

- **具体方法：**设在光纤中正向传输光功率为 P ，依次经过 L_1 和 L_2 点时分别为 P_1 和 P_2 ，后向散射光功率分别为 $P_d(L_1)$ 、 $P_d(L_2)$ ，则：

$$\alpha = \frac{10}{2(L_2 - L_1)} \lg \frac{P_d(L_1)}{P_d(L_2)} \quad (\text{dB} / \text{km})$$

- **后向散射法还可用来确定光纤的长度：**

$$L = \frac{ct}{2n_1}$$



2.7.1 损耗测量

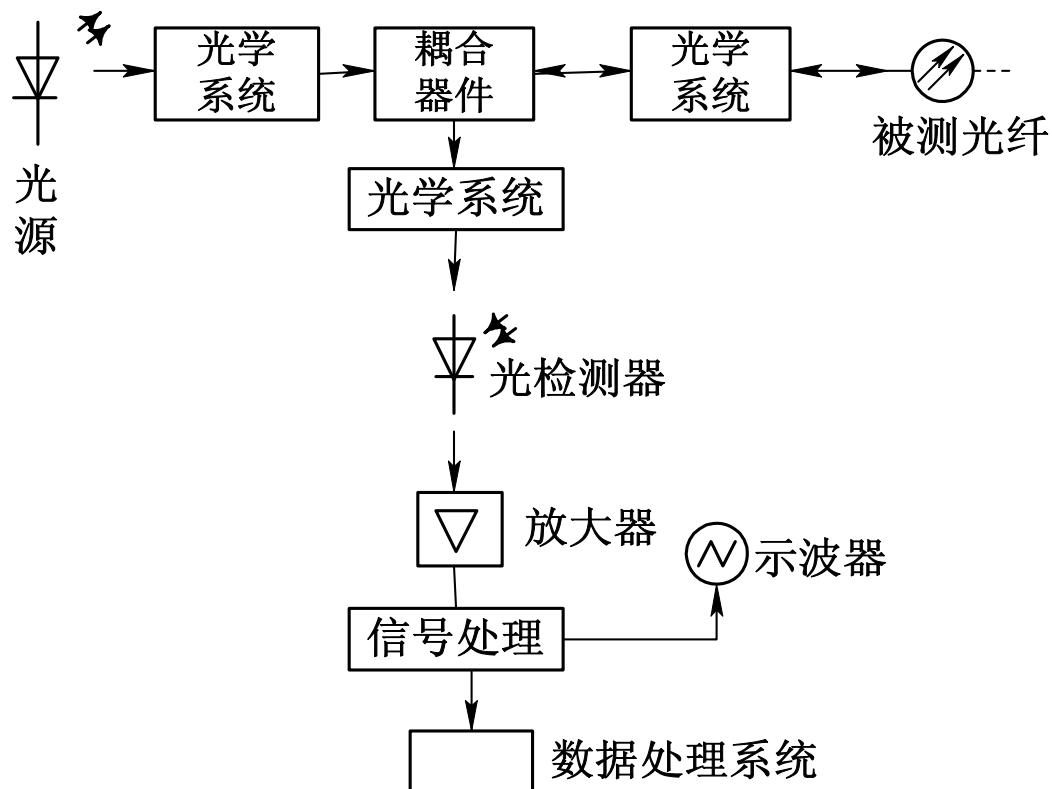


图 后向散射法光纤损耗测量系统框图



2.7.1 损耗测量

■ 对测量器件的要求：

- 光源应采用特定波长稳定的大功率激光器，调制的脉冲宽度和重复频率应和所要求的长度分辨率相适应。
- 耦合器件把光脉冲注入光纤，又把后向散射光注入光检测器。
- 光检测器应有很高的灵敏度。



2.7.1 损耗测量

■ 光时域反射仪 (OTDR)

● 是利用后向散射法的原理设计的测量仪器。

● 用途:

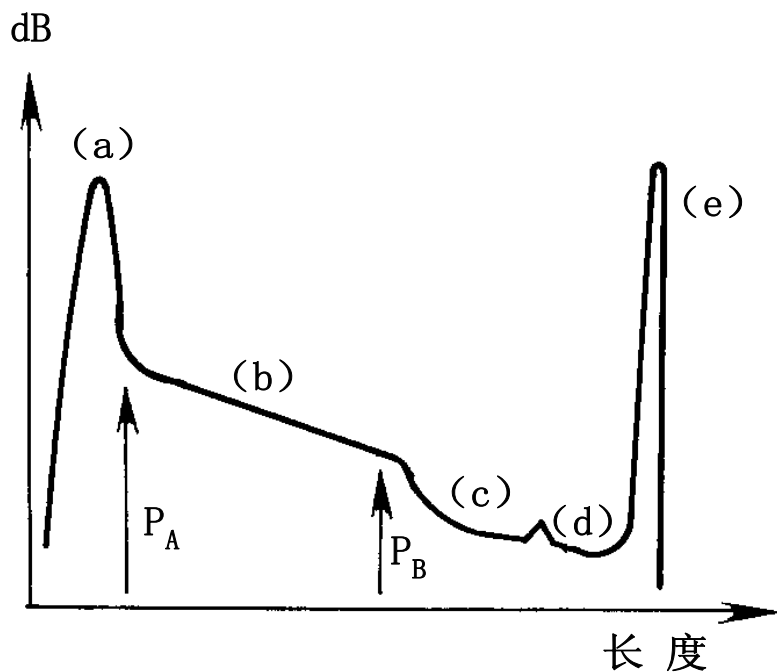
- ➡ 测量光纤损耗系数、光纤长度、连接器/接头损耗。
- ➡ 观察光纤沿线的均匀性，确定故障点的位置。

● 优点:

- ➡ 采用单端输入和输出，不破坏光纤，使用方便。



2.7.1 损耗测量



■ 图中：

- (a) 输入端反射区
- (b) 恒定斜率区
- (c) 连接器、接头或局部缺陷引起的损耗
- (d) 介质缺陷引起的反射
- (e) 输出端反射区

图 后向散射功率曲线示例图



2.7.2 带宽测量

光纤带宽测量有时域和频域两种基本方法。时域法是测量通过光纤的光脉冲产生的脉冲展宽，又称脉冲法；频域法是测量通过光纤的频率响应，又称扫频法。两种方法是等效的，这里只介绍扫频法。这种方法通常用于多模光纤的测量。

设在测量系统中，接入一段短光纤时，测出的频率响应为 $H_1(f)$ ，接入被测长光纤时，测出的频率响应为 $H_2(f)$ ，则光纤频率响应 $H(f)$ 和3dB光带宽 f_3 dB应满足下式：

$$|H(f_3 \text{ dB})| = \frac{|H_2(f)|}{|H_1(f)|} = \frac{1}{2}$$



2.7.2 带宽测量

写成对数形式：

$$T(f) = 10 \lg |(Hf_3 \text{ dB})| = 10 [\lg |H_2(f)| - \lg |H_1(f)|] = -3$$

注意：由于经光检测器后，光功率按比例转换为电流(或电压)，因此3dB光带宽相应于6dB电带宽。图2.25示出用对数电平显示的频率响应 $H_1(f)$ 、 $H_2(f)$ 和由两曲线相减得到的光纤频率响应 $H(f)$ 和6dB电带宽。

图 2.26示出扫频法光纤带宽测量系统的框图。扫频仪输出各种频率的正弦信号，对光源进行直接光强调制，输出光经光纤传输和光检测后，由选频表直接获得频率响应。



2.7.2 带宽测量

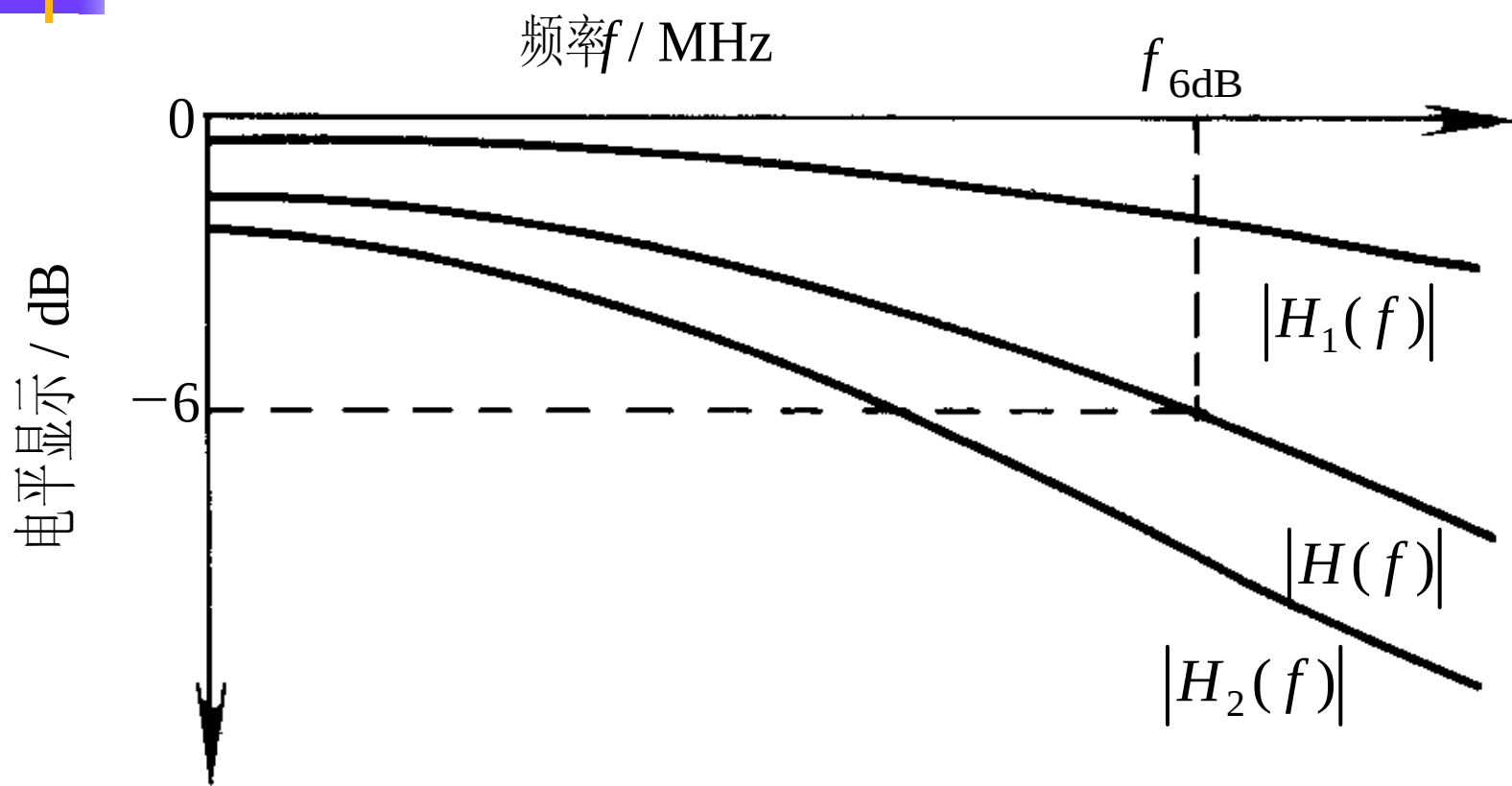


图 光纤频率响应和6dB电带宽



2.7.2 带宽测量

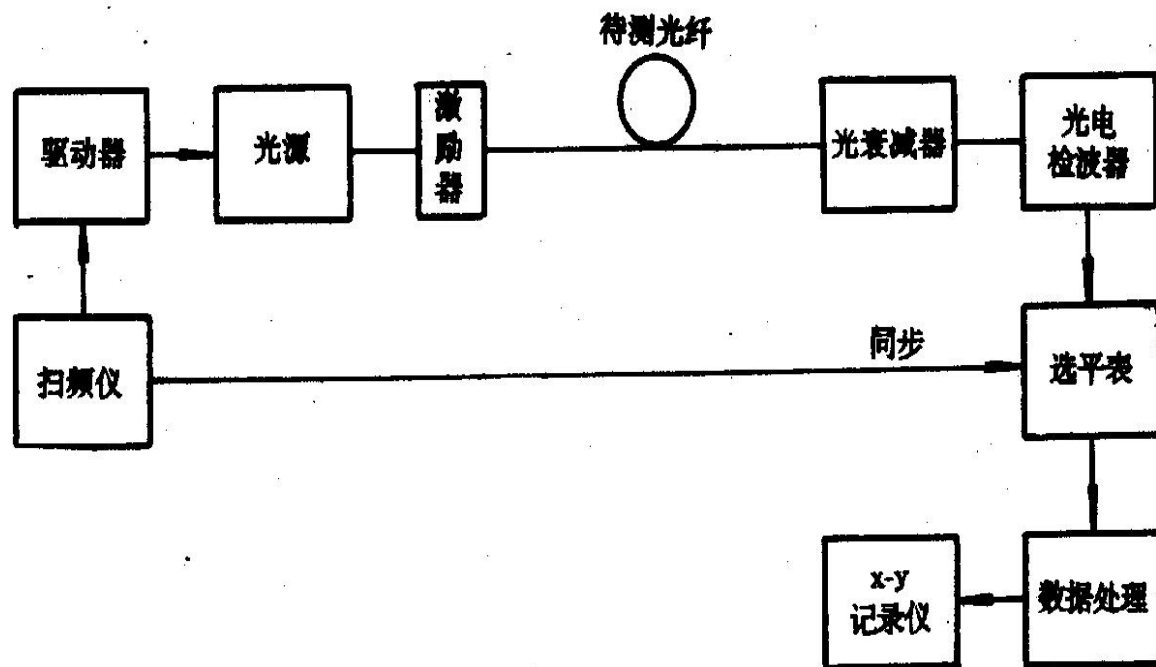


图 扫频法光纤带宽测量系统框



2.7.2 带宽测量

光源应采用线性良好、功率和频率稳定的激光器，其调制频率上限应大于光纤带宽。光检测器应采用高速光电二极管，其频率响应要与光源调制频率相适应。频谱分析仪应具有良好的幅度—频率特性。



2.7.3 色散测量

光纤色散测量有相移法、脉冲时延法和干涉法等。这里只介绍相移法，这种方法是测量单模光纤色散的基准方法。

用角频率为 ω 的正弦信号调制的光波，经长度为 L 的单模光纤传输后，其时间延迟 τ 取决于光波长 λ 。不同时间延迟产生不同的相位 ϕ 。用波长为 λ_1 和 λ_2 的受调制光波，分别通过被测光纤，由 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 产生的时间延迟差为 $\Delta\tau$ ，相位移为 $\Delta\phi$ 。根据式(2.52)，长度为 L 的光纤总色散为

$$C(\lambda)L = \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda}$$

用 $\Delta\tau = \Delta\phi / \omega$ 代入上式，得到光纤色散系数



2.7.3 色散测量

$$C(\lambda) = \frac{\Delta\phi}{Lw\Delta\lambda}$$

图示出相移法光纤色散测量系统的框图。用高稳定度振荡器产生的正弦信号调制光源，输出光经光纤传输和光检测器放大后，由相位计测出相位。可变波长的光源可以由发光管(LED)和波长选择器组成，也可以由不同中心波长的激光器(LD)组成。为避免测量误差，一般要测量一组 $\lambda_i - \phi_i$ 值，再计算出 $C(\lambda)$ 。



2.7.3 色散测量

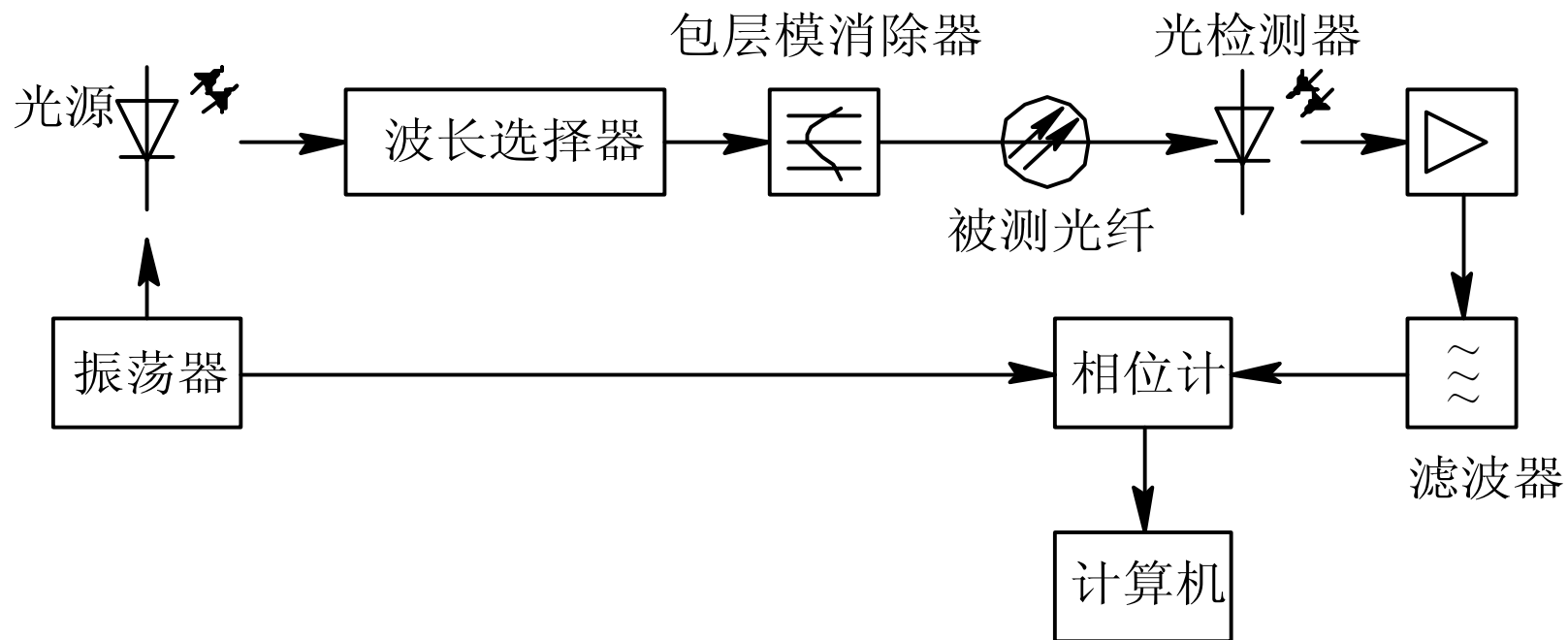


图 相移法光纤色散测量系统框图



2.7.4 截止波长测量

根据式(2.37)和式(2.36)，截止波长

$$\lambda_c = \frac{2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{2.405}$$

对常规单模光纤，通过对折射率分布的测量，确定纤芯半径 a ，纤芯和包层的折射率 n_1 和 n_2 ，由式(2.66)就可以计算出理论截止波长 λ_c 。

实际截止波长的测量有：在弯曲状态下，测量损耗—波长函数的传输功率法；改变波长，观察 LP_{01} 模和 LP_{11} 模产生的两个脉冲变为一个脉冲的时延法；改变波长，观察近场图由环形变为高斯形的近场法。这里只介绍传输功率法，这种方法是测量单模光纤截止波长的基准方法。



2.7.4 截止波长测量

LP₁₁模在接近截止波长时，其传输功率对光纤弯曲十分灵敏，而基模LP₀₁模在接近LP₁₁模的截止波长时，其传输功率对光纤弯曲不十分灵敏。利用这个特点，测量在弯曲状态下的传输光功率随波长的变化，就可以确定截止波长。用2m长的被测光纤，接入测量系统的注入装置和光检测器之间，把被测光纤弯曲成Φ280的圆圈，测量输出光功率P₁(λ)；保持注入条件不变，把被测光纤弯曲成Φ60的圆圈，这时消除了次低阶模LP₁₁，只有基模LP₀₁存在，测量输出光功率P₂(λ)。由此得到弯曲状态下损耗-波长函数

$$R(\lambda) = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)}$$



2.7.4 截止波长测量

图示出 $R(\lambda)$ 曲线， 0.1dB 平行线与 $R(\lambda)$ 的交点，确定为截止波长 λ_c 。一般实测截止波长稍小于理论截止波长。

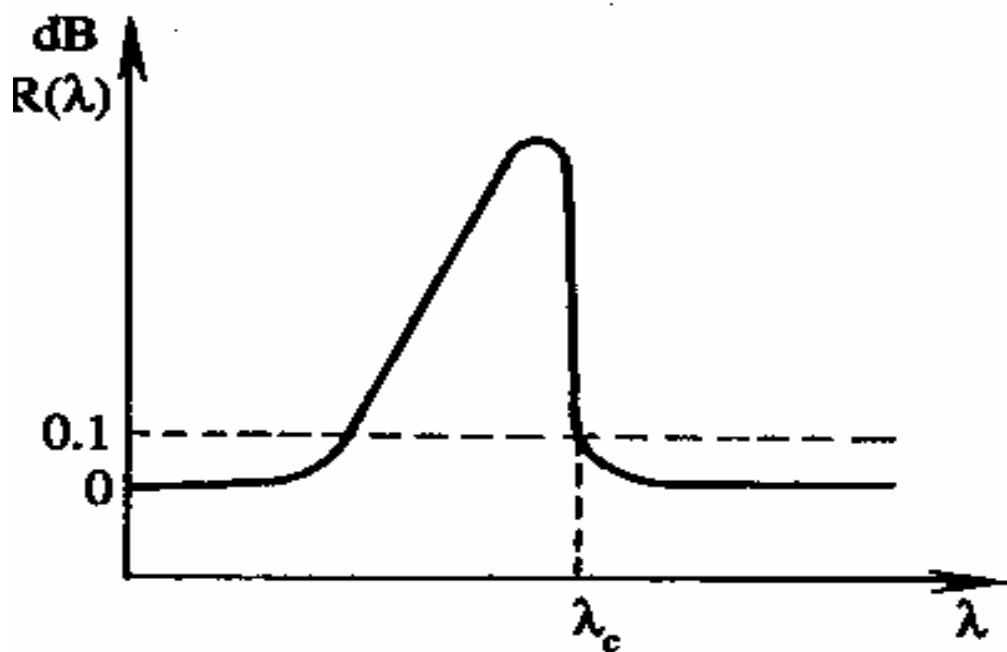


图 2.28 弯曲损耗—波长函数 $R(\lambda)$



2.7.4 截止波长测量

图示出传输功率法截止波长测量系统的框图，这个系统和损耗谱测量系统完全相同。由卤灯输出的稳定白光，经斩光器变为矩形光脉冲，单色仪选择的波长一般可以在 $0.6\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 范围变化，经光检测器后进行放大和数据处理。

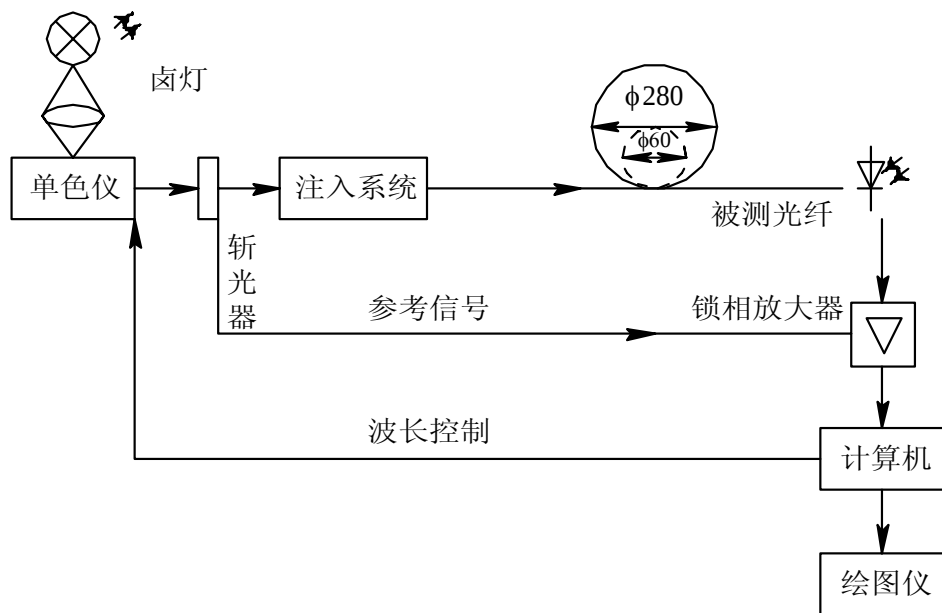


图 传输功率法截止波长测量系统框图