

# 第3章 微波集成传输线

3.1 微带传输线

3.2 介质波导

3.3 光纤



## 主要内容:

1. 光纤结构和分类
2. 单模和多模光纤

## 基本要求:

1. 了解光纤结构和分类
2. 了解单模和多模光纤
3. 了解光纤的基本参数
4. 了解光纤的传输特性

习题: 3. 2, 3. 3, 3. 4, 3. 5, 3. 7, 3. 8, 3. 13, 3. 14

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 一、结构

◆由折射率为 $n_1$ 的光学玻璃拉成的纤维作芯，表面覆盖一层折射率为 $n_2$  ( $n_2 < n_1$ ) 的玻璃或塑料作为包层所构成，也可以在低折射率 $n_2$ 的玻璃细管内充以折射率为 $n_1$  ( $n_2 < n_1$ ) 的介质，见图3-15(a)。

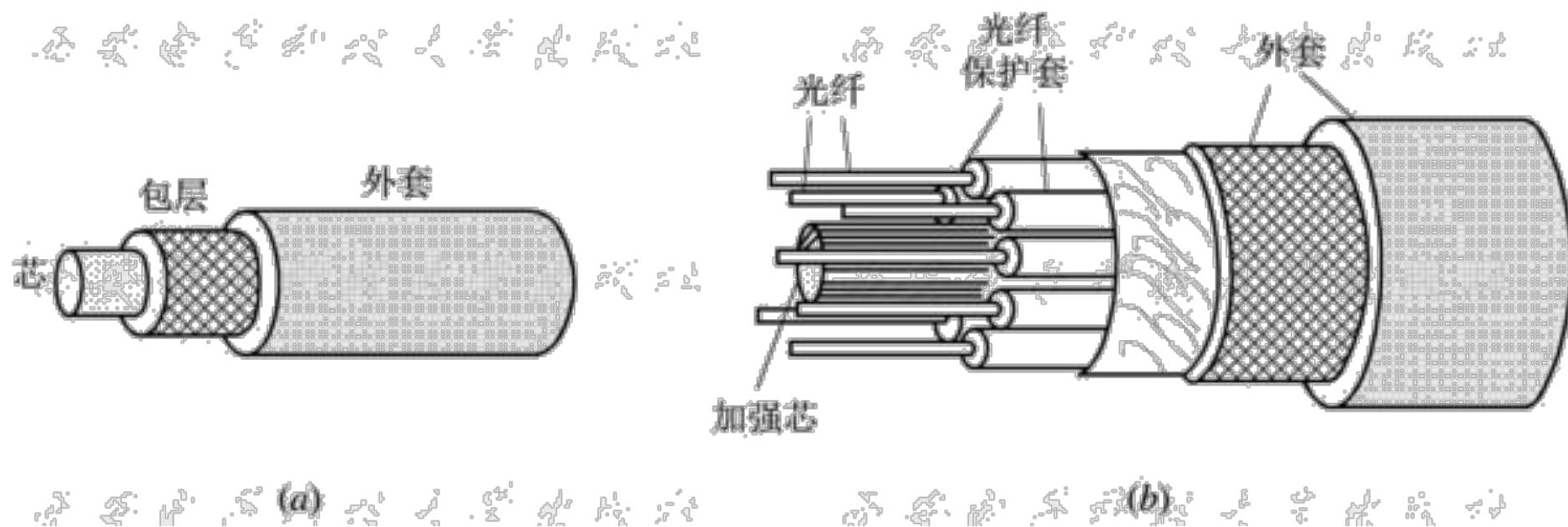


图3-15 光纤和光缆的结构

(a)光纤的结构；(b)多芯光缆

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 二、分类

◆①按组成材料可分为石英玻璃光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层玻璃芯光纤和全塑料光纤。其中，石英玻璃光纤损耗最小，最适合长距离、大容量通信。

●石英光纤 是一种以高折射率的纯石英玻璃材料为芯，以低折射率的有机或无机材料为包皮的[光学纤维](#)。由于石英光纤传输波长范围宽（从近紫外到近红外，波长从0.38-2.1 $\mu\text{m}$ ），所以石英光纤适用于紫外到红外各波长信号及能量的传输，石英光纤数值孔径大、光纤芯径大、机械强度高、弯曲性能好和很容易与光源耦合等优点，故在传感、光谱分析、过程控制及激光传输、激光医疗、测量技术、刑侦，信息传输和照明等领域的应用极为广泛。尤其是在工业和医学等领域的激光传输中得到了广泛的应用，这是其他种类的光纤无法比拟的。

●多组分玻璃光纤 组成光纤的玻璃成分以 $\text{SiO}_2$ 为主，约占百分之几十，此外还含有碱金属、碱土金属、铅硼等的氧化物。它的特点是熔点低（1400 以下），可用传统的坩埚法拉丝，适于制做大芯径、大数值孔径光纤。这种光纤尚处于研制阶段，故应用不多。

●塑料包层光纤 这是一种以高纯石英作纤芯、塑料（如有机硅）作包层的[突变型多模光纤](#)。芯径和数值孔径较大，例如芯径大于200微米，NA大于0.3。这种光纤便于连接和耦合，适于短距离小容量系统使用。

●全塑料光纤 光纤材料主要是特制的高透明度的有机玻璃、聚苯乙烯等塑料，可做成突变型或[渐变型多模光纤](#)，光纤衰减已从初期的500~1000分贝/公里降低到数十分贝/公里，但仍须进一步降低。它的特点是柔软、加工方便、芯径和数值孔径大。

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 二、分类

- ◆①按组成材料可分为石英玻璃光纤、多组分玻璃光纤、塑料包层玻璃芯光纤和全塑料光纤。其中，石英玻璃光纤损耗最小，最适合长距离、大容量通信。
- ◆②按折射率分布形状，光纤可分为阶跃光纤和渐变型光纤。
- ◆③按传输模式分，光纤可分为单模光纤和多模光纤。

## 二、单模和多模光纤

### ◆1、单模光纤

- ⊕①只传输一种模式的光纤称为单模光纤
- ⊕②单模光纤中传输的模式为 $HE_{11}$ 模
- ⊕③单模光纤的直径 $D$ 必须满足以下条件：
$$D < \frac{2.405\lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$
- ⊕④适当选择包层折射率,一方面可简化光纤制造工艺,另外还能保证单模传输,这也是光纤包层抑制高次模的原理所在。

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 二、单模和多模光纤

### ◆2、多模光纤

- ⊕①同时传输多种模式的光纤称为多模光纤
- ⊕②多模光纤的内芯直径可达几十微米
- ⊕③多模光纤制造工艺相对简单一些, 同时对光源的要求也比较低, 有发光二极管就可以了
- ⊕由于大量的模式以不同的幅度、相位与偏振方向传播, 出现较大的模式离散, 从而使传播性能变差, 容量变小。

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 三、光纤的基本参数

⊕①光纤的直径**D**:  $D < \frac{2.405\lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$

⊕②光波波长 **$\lambda_g$** :  $\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} \quad n_2 k < |\beta| < n_1 k$

⊕③光纤芯与包层相对折射率差 **$\Delta$** :  $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$

### ⊕④折射率分布因子 **$g$** :

**$g$** 是描述光纤折射率分布的参数。一般情况下, 光纤折射率随径向变化如下式所示:

$$n(r) = \begin{cases} n_1[1 - 2\Delta(\frac{r}{a})^g] & r \leq a \\ n_2 & r \geq a \end{cases}$$

**$a$** 为光纤芯半径。对阶跃型光纤而言 **$g \rightarrow \infty$** 。对于渐变型光纤 **$g$** 为某一常数。当 **$g=2$** 时为抛物型光纤

## 3.3 光纤(Optical Fiber)

### 三、光纤的基本参数

⑤**数值孔径NA**:描述光纤收集光能力的一个参数, 只有角度小于某一个角度 $\theta$ 的光线, 才能在光纤内部传播, 如图3-17所示。接收锥角为 $\theta$ , 数值孔径为

$$NA = \sin\theta = n_1(2\Delta)^{1/2}$$

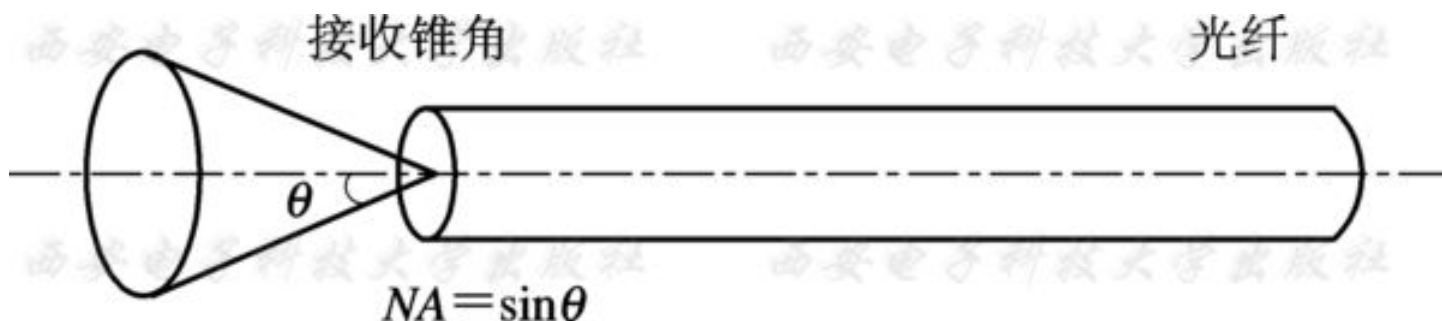


图3-17 光纤波导的数值孔径NA



# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 四、光纤的传输特性

◆描述光纤的传输特性主要有光纤的损耗和色散

### 1、光纤的损耗

◆光纤损耗大致分为吸收损耗、 散射损耗和其它损耗

◆不管是哪种损耗，都可归纳为光在光纤传播过程中引起的功率衰减

◆一般用衰减常数 $\alpha$ 来表示：

$$\alpha = -\frac{10\lg(P_1 / P_0)}{L} \quad (dB / km)$$

$P_0$ 、 $P_1$ 分别是入端和出端功率，  
 $L$ 是光纤长度

⊕当功率采用 $dB_m$ 表示时，衰减常数 $\alpha$ 可用下列公式来表示：

$$\alpha = \frac{p_0(dB_m) - p_1(dB_m)}{L} \quad (dB / km)$$

## 3.3 光纤(Optical Fiber)

### 四、光纤的传输特性

#### 1、光纤的损耗

◆图3-18 给出了单模光纤波长与损耗的关系曲线

◆由图可见，在 $1.3\ \mu\text{m}$ 和  $1.55\ \mu\text{m}$  波长附近损耗较低，且带宽较宽。

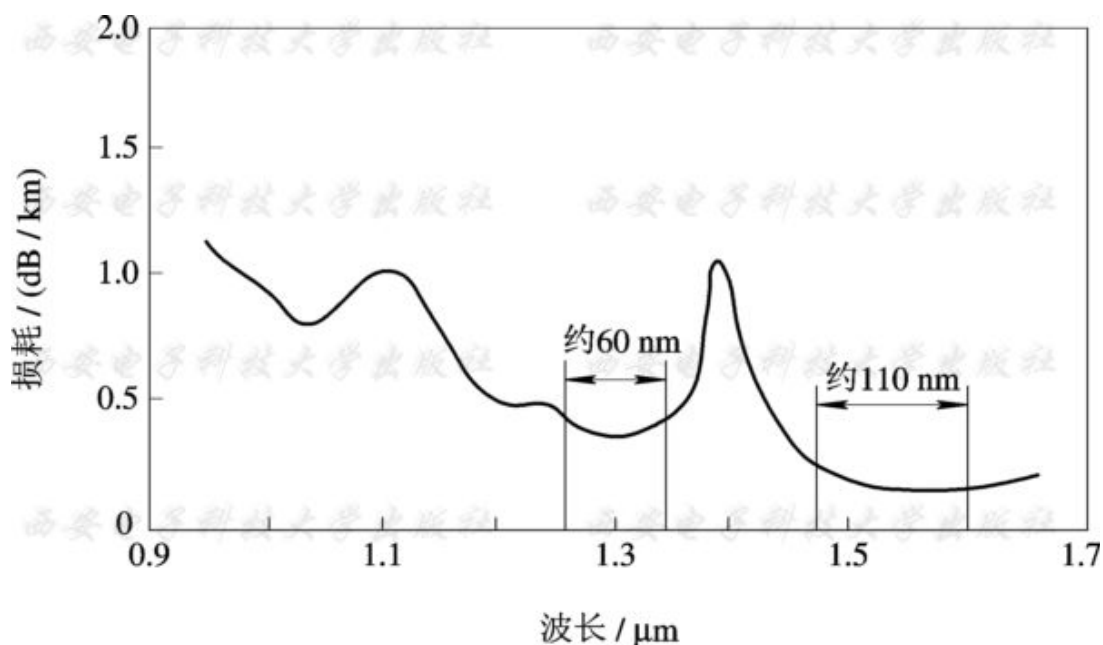


图3-18 单模光纤波长与损耗的关系曲线

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 四、光纤的传输特性

### ◆1、光纤的损耗

◆表3-1给出了几种常用光纤的损耗与用途

表3-1 常用光纤的损耗与用途

光纤		损耗/（dB/Km)	用途
短波	0.8um	3.0	短距离，低速
长波	1.3um	0.5	中距离，高速
	1.55um	0.2	长距离， 高速

在图 2.2 中，曲线 a 为一条直线，表示相速的大小与频率无关，即  $dv_p/df=0$ ，代表无色散波；曲线 b 具有  $dv_p/df > 0$  的特点，即相速随频率的增加（减小）而增加（减小），代表异常色散或者反常色散；曲线 c 具有  $dv_p/df < 0$  的特点，即相速随频率的增加（减小）而减小（增加），代表正常色散。

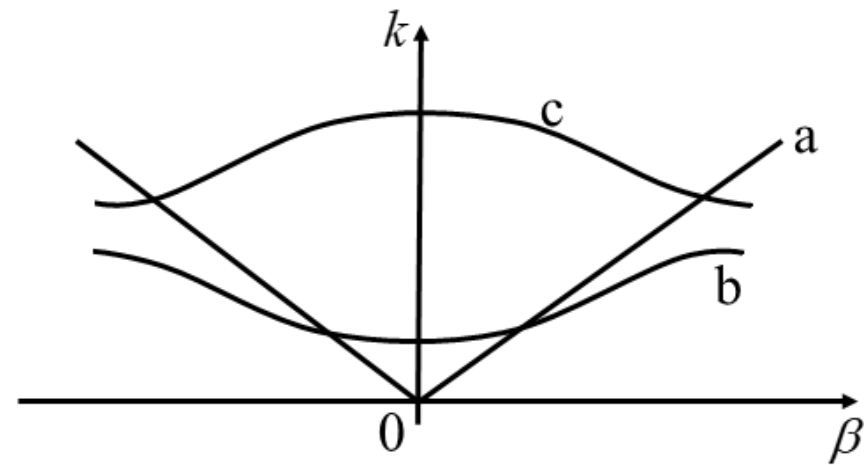


图 2.3 布里渊图

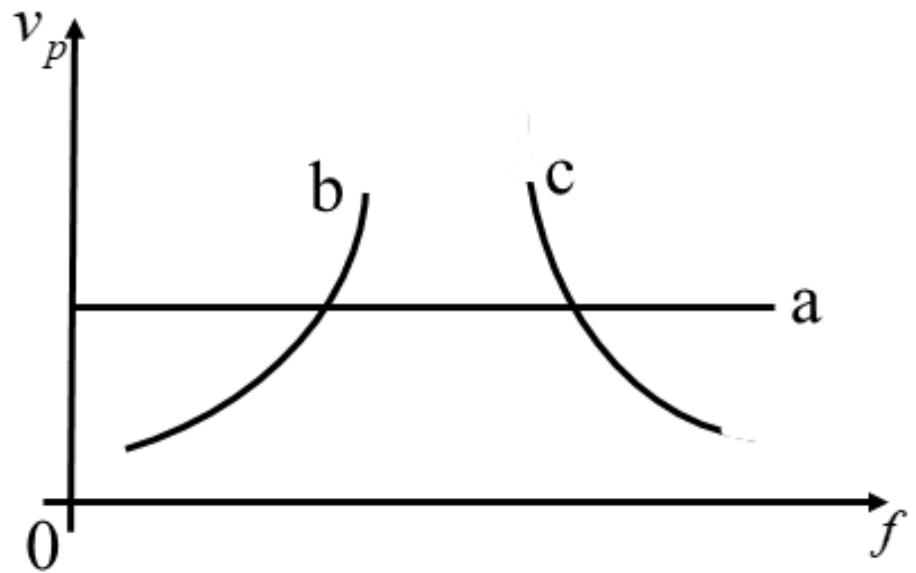


图 2.2 色散特性的直接表示

# 3.3 光纤(Optical Fiber)

## 四、光纤的传输特性

### 2、光纤的色散特性

◆所谓光纤的色散是指光纤传播的信号波形发生畸变的一种物理现象，表现为使光脉冲宽度展宽。光脉冲变宽后有可能使到达接收端的前后两个脉冲无法分辨，因此脉冲加宽就会限制传送数据的速率，从而限制了通信容量。

◆光纤色散主要有材料色散、波导色散和模间色散三种色散效应。

◆通常用时延差来表示色散引起的光脉冲展宽程度

⊕对材料色散引起的时延差 $\Delta\tau_m$ 可表示为 
$$\Delta\tau_m = \frac{L}{c} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \lambda^2 \frac{d^2 n}{d\lambda^2} = -L \frac{\Delta\lambda}{\lambda} D_n$$

⊕由波导色散引起的时延差 $\Delta\tau_\beta$ 可表示为 
$$\Delta\tau_\beta = -L \frac{\lambda}{\omega} \frac{d\beta}{d\lambda}$$

## 3.3 光纤(Optical Fiber)

### 四、光纤的传输特性

#### ◆3、1.55 $\mu\text{m}$ 零色散单模光纤的工作原理

- ◆①单模光纤的色散只存在材料色散和波导色散
- ◆②而材料色散与波导色散随波长的变化呈相反的变化趋势
- ◆③在1.55 $\mu\text{m}$ 的波长区，单模光纤的两种色散大小相等符号相反，总色散为零，从而构成零色散单模光纤。

### 五、结论

- ◆①光纤通信是以光纤为传输媒质来传递信息的，光纤的传输原理与圆形介质波导十分相似。
- ◆②描述光纤传输特性的主要有损耗和色散
- ◆③光纤的损耗影响了传输距离
- ◆④而光纤的色散影响了传输带宽和通信容量。

### 3.3 光纤(Optical Fiber)

例题：阶跃光纤的芯子和包层的折射率分别为 $n_1=1.51$ ， $n_2=1.50$ ，周围媒质为空气。求：

① $\lambda=820\text{nm}$ 的单模光纤直径；

②求此光纤的NA和入射线的入射角范围。

解：①单模光纤的直径D必须满足以下条件： $D < \frac{2.405\lambda}{\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$

求得  $D < 3.62\mu\text{m}$

②光纤的数值孔径

$$\text{NA} = n_1 (2\Delta)^{\frac{1}{2}} = n_1 \left( 2 \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.1738$$

入射线的入射角范围

$$\theta \leq \arcsin 0.1738 = 10^\circ$$

## 3.3 光纤(Optical Fiber)

作业: 3.13, 3.14

