

第3章 传输线和波导

- 3.1 TEM, TE和TM波的一般解
- 3.2 矩形金属波导
- 3.3 圆波导
- 3.4 同轴线的高次模及单模传输
- 3.5 带状线和微带
- 3.6 介质波导

3.1 TEM, TE和TM波的一般解

○ 电磁波三种基本模式

- TEM波：横电磁波
- TM波：横磁波—E波
- TE波：横电波—H波

T-横：意义？

3.1 TEM, TE和TM波的一般解

3.1.1 简介

(1) 电磁波

(2) TEM波

3.1.2 波阻抗

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi$$

3.1.3 波的传播

3.1.4 由麦氏方程组推导波动方程

(1) 波动方程

(2) 趋肤深度

(3) 波的传输常数

$$k \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \gamma = \alpha + j\beta$$

3.1 TEM, TE和TM波的一般解

3.1.5 电磁场能量和能流

(1) 电磁场储存的能量

(2) 坡印庭矢量 $\vec{P} = \frac{1}{2} \left(\vec{E} \times \vec{H} \right)$ 单位: W/m²

(3) 平均坡印庭矢量 - 平均能量流 $S_{AV} = \int_S \vec{P} \cdot d\vec{S}$

3.1.6 坡印庭定理

(1) 流经闭合曲面的能量

$$\vec{P}_{AV} = \frac{1}{2} \text{Re} \left(\vec{E} \times \vec{H}^* \right)$$

(2) 本质: 能量守恒

3.1.7 传输线的等效参数

从能量角度分析传输线特征参数

3.1 TEM, TE和TM波的一般解

3.1.8边界条件

(1) 切向

(2) 法向

3.1.9波的极化

(1) 椭圆极化

(2) 圆极化、线极化

3.1.10无界空间的平面波

(1) 椭圆极化

(2) 圆极化、线极化

3.1 TEM, TE和TM波的一般解

3.1.11波的速度

(1) 群速(Group Velocity) 波包络传输速度 $v_g = d\omega / d\beta$

(2) 相速(Phase Velocity) 波本身传输速度 $v_p = \omega / \beta$

相速:波的等相位面沿波导轴向传播速度

波导波长 波导内沿轴向传播电磁波相邻两个同相位点之间的距离

$$\lambda_g = v_p T \quad \text{周期}$$

色散 (Dispersion) 现象 (相速和群速都随频率变化)

3.1.12波传输

(1) 波在不同介质 (损耗、低损耗、无损耗) 内的传输

(2) 波的反射、折射 (全反射、全折射)

微波传输线

1. 研究的对象

微波传输线、波导

2. 研究的目的

电磁波理论和微波电路间建立关系

3. 研究的内容

多导体线： 双导线、同轴线、微带线...（可传输TEM波）

单导体线： 矩形、圆柱型波导（不能传输TEM波）

开路边界结构： 电极、介质棒、

4. 研究的方法

麦克斯韦方程组

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

安培环路定律

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

法拉第电磁感应定律

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

高斯定律

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

磁通连续性定律

无源区域

均匀、线性、各向同性、理想介质

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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

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

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

波动方程

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

时谐场复数形式的波动方程

亥姆霍兹方程

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

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

$$k = \omega \sqrt{\mu\varepsilon}$$

传输线和波导

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

波导：一般是空心或者填充介质的腔体

理想情况下：

(1) 电磁场的幅值在横截面内的分布规律不随坐标 z 的变化 横向

(2) 场的幅度、相位沿 z 轴的变化规律与横截面坐标无关 纵向

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}(x, y) e^{-\gamma z} \quad \text{利用亥姆霍兹方程}$$

$$\nabla_{\tau}^2 \vec{E}(x, y) + (k^2 + \gamma^2) \vec{E}(x, y) = 0 \quad \text{令} \quad \underline{k_C^2 = k^2 + \gamma^2}$$

(3) 理想情况下截止波长

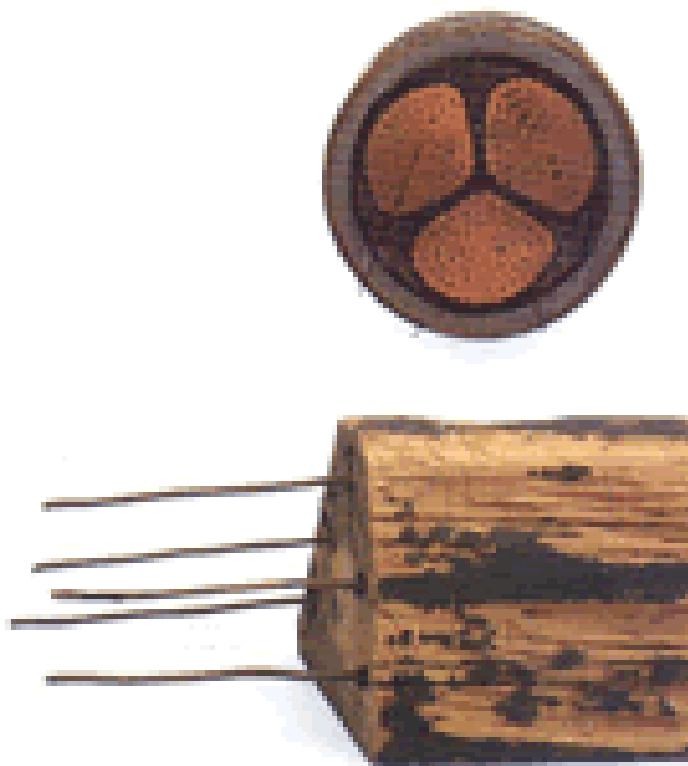
$$\gamma = 0 + j\beta$$

$$\beta = \sqrt{k^2 - k_C^2}$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} = \frac{2\pi}{\lambda}$$
$$\gamma = \alpha + j\beta$$

传输系统

电线

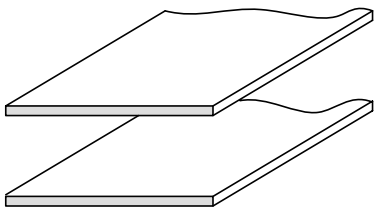


电缆(20世纪)

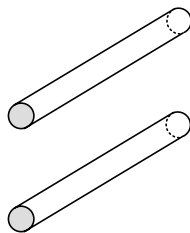
与

电报电缆(公元 1837 年)

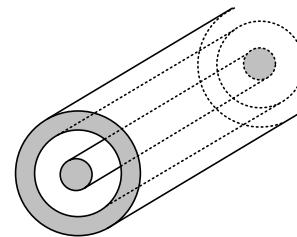
传输系统



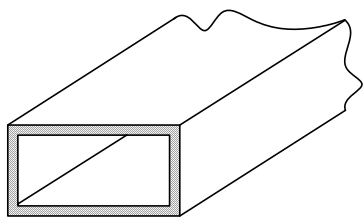
平行金属板传输线



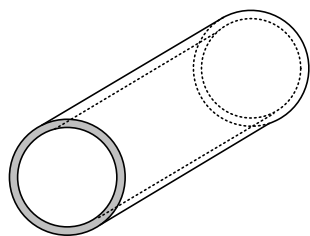
平行双导体传输线



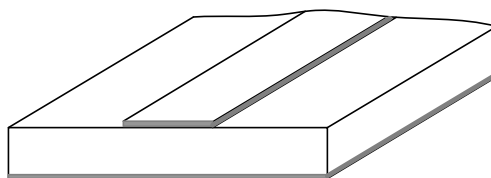
同轴传输线



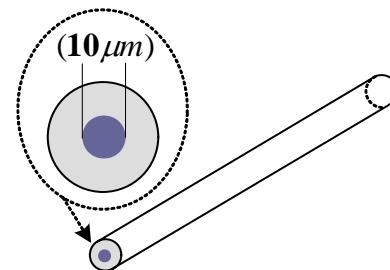
矩形波导传输线



圆柱波导传输线



微带传输线

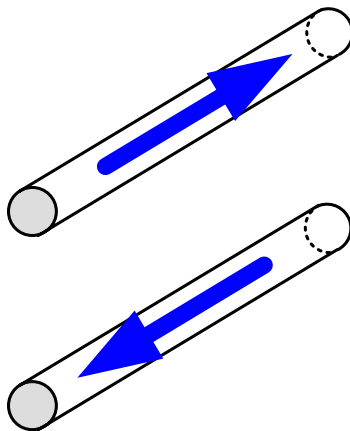


(g)

介质传输线(如: 光纤)

电线（双线）

○ 如图



○在高频时，会向外辐射电磁波，引起能量损失

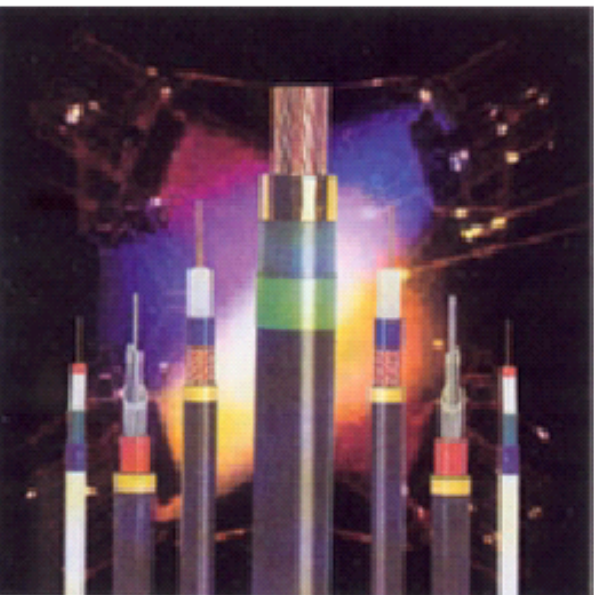
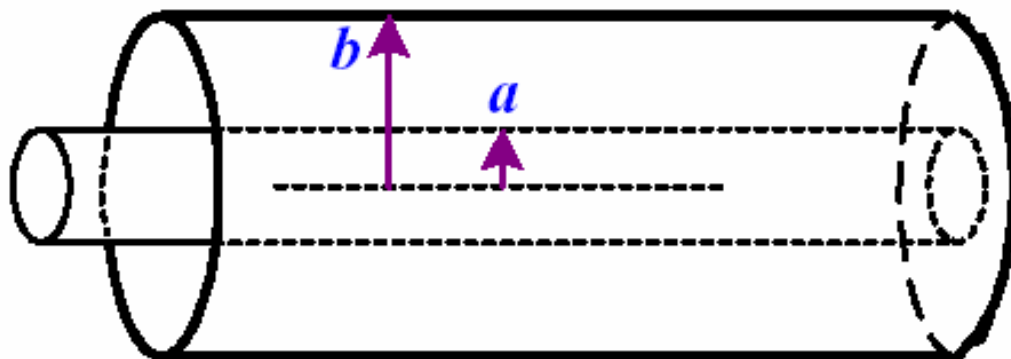
同轴线

组成

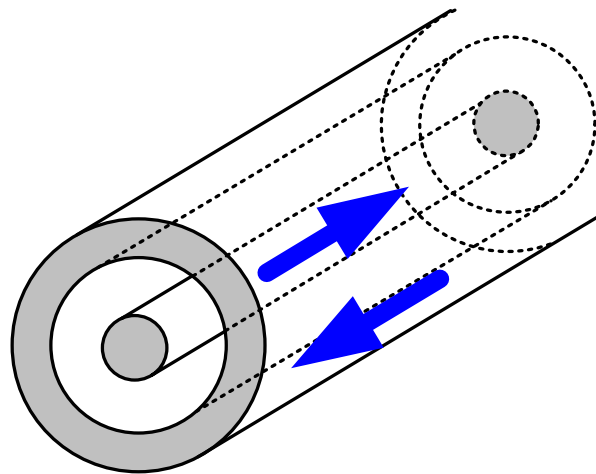
Perfect conductor 导体

Lossless dielectric 介质

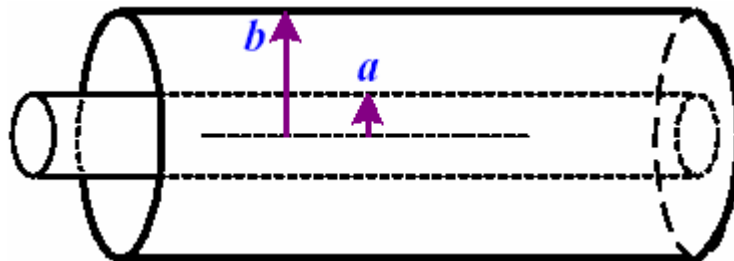
Homogeneous (均匀的)、理想同心圆柱体



同轴电缆



- 信号在内部传输，无辐射损耗
- 频率可做到6G、8G、10G
- 硬电缆（外面是铜管）



最小损耗

$$\frac{b}{a} \approx 3.6$$

最大耐压

$$\frac{b}{a} \approx 1.65$$

折中

$$\frac{b}{a} = 2.3$$

对应空气同轴波导: $Z_0 = 50 \quad (\Omega)$

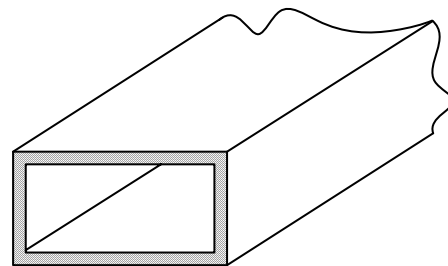
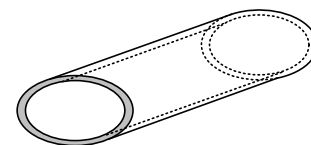
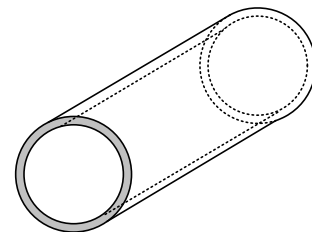
波导

- 同轴电缆内芯细，有损耗

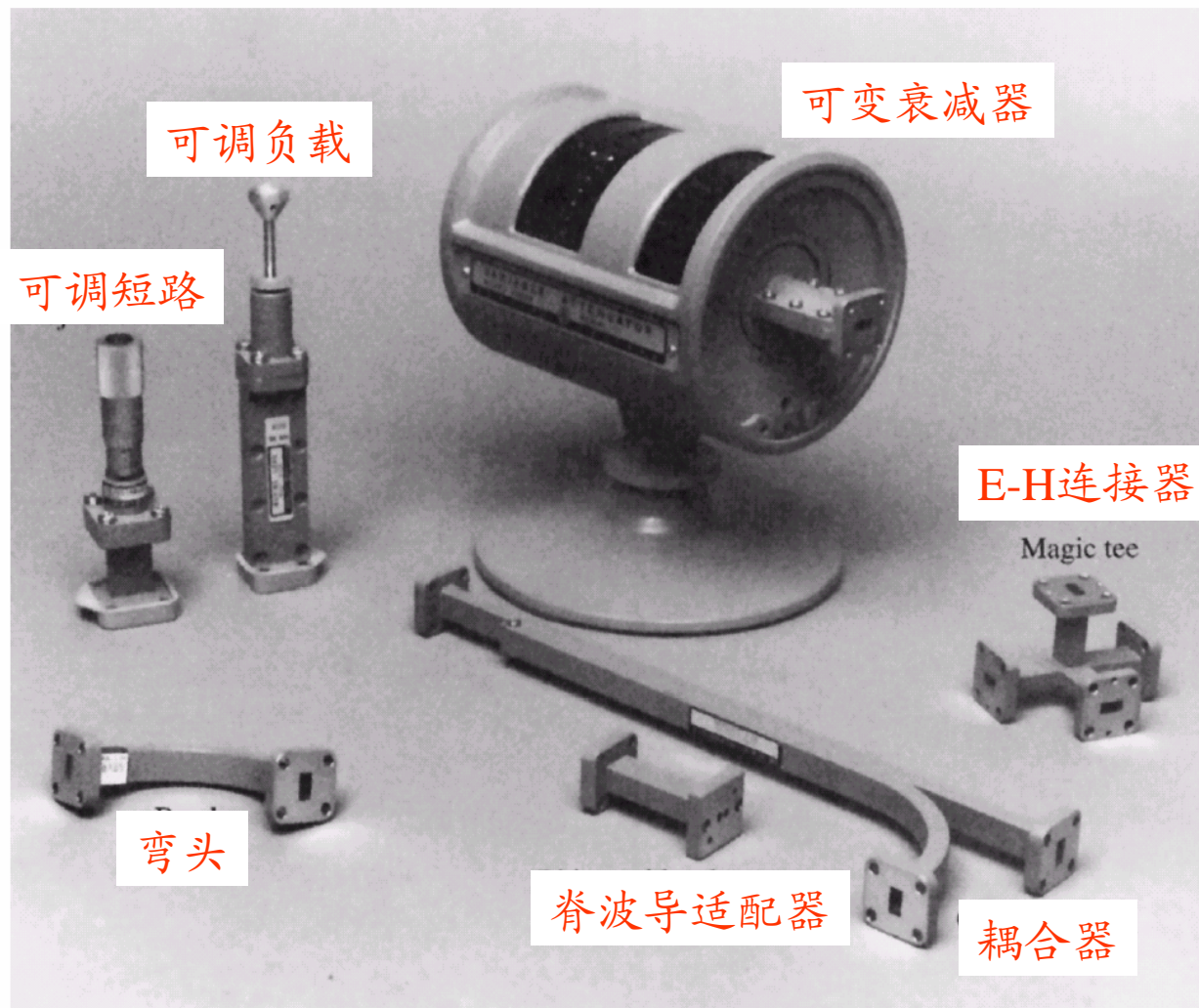
- 把芯去掉，成为圆波导

- 还可做成椭圆形（波长mm量级）

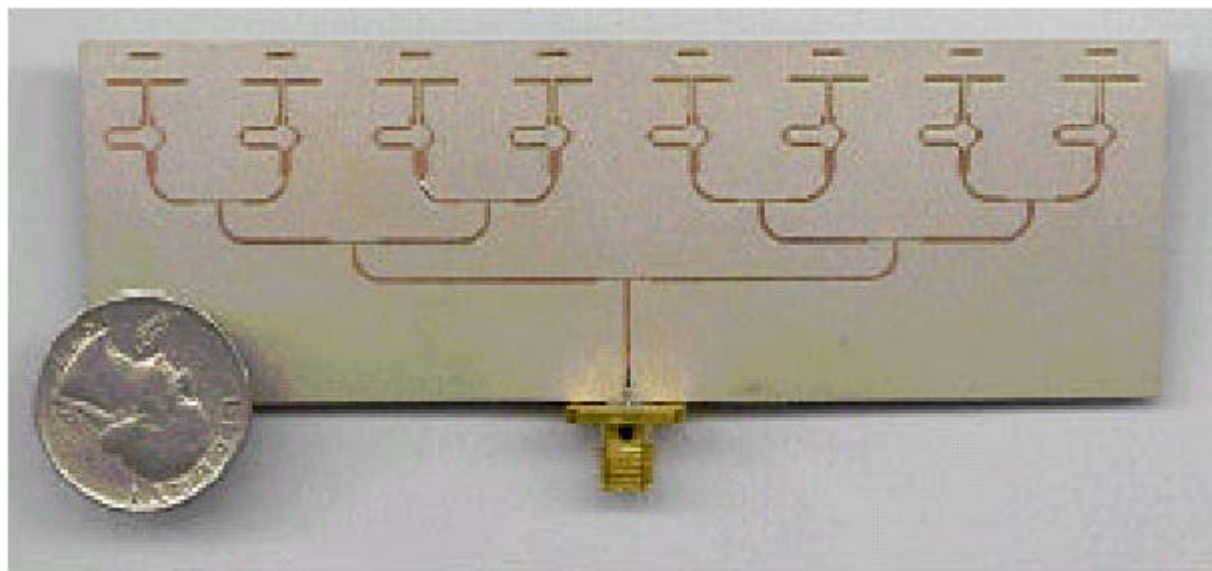
- 可做成矩形，即矩形波导
（比同轴损耗小）



矩形波导（Ka波段）27~40GHz



平面传输线



特点

- (1) 扁平、小尺寸、轻——低损耗
- (2) 所有线集成在一个平面内——易制作

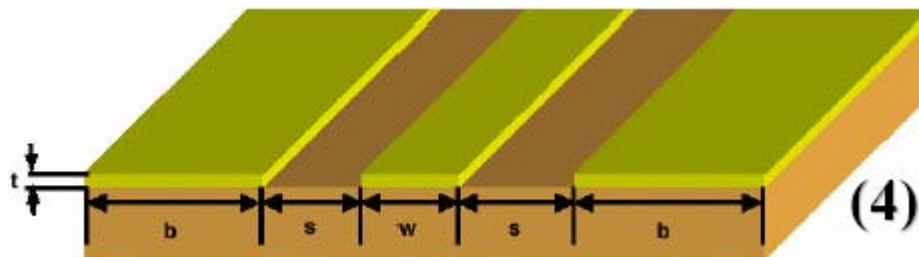
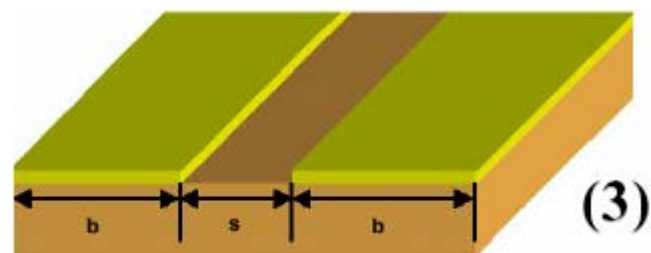
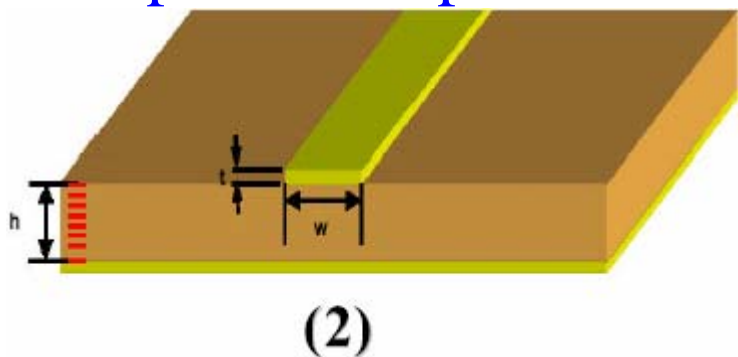
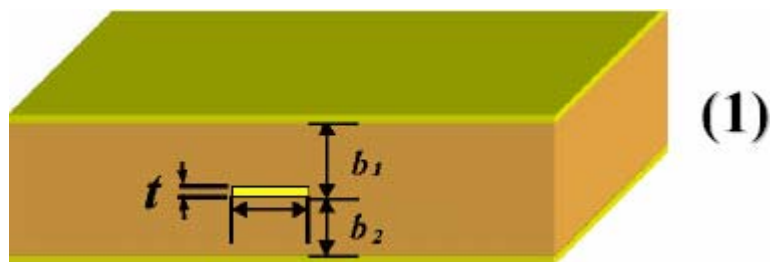
4种平面传输线

1、Strip line 带状线

2、Microstrip line 微带线

3、Slot Line 槽线

4、Coplanar Strip Line 共面带状线

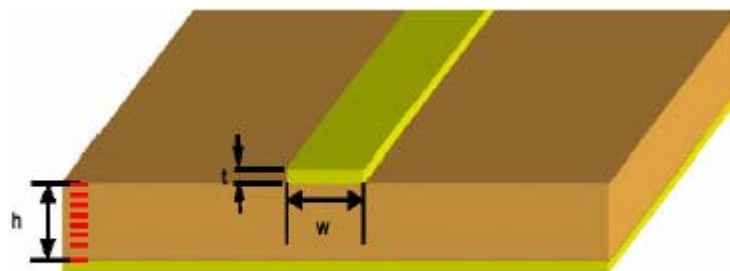


Symmetry 对称

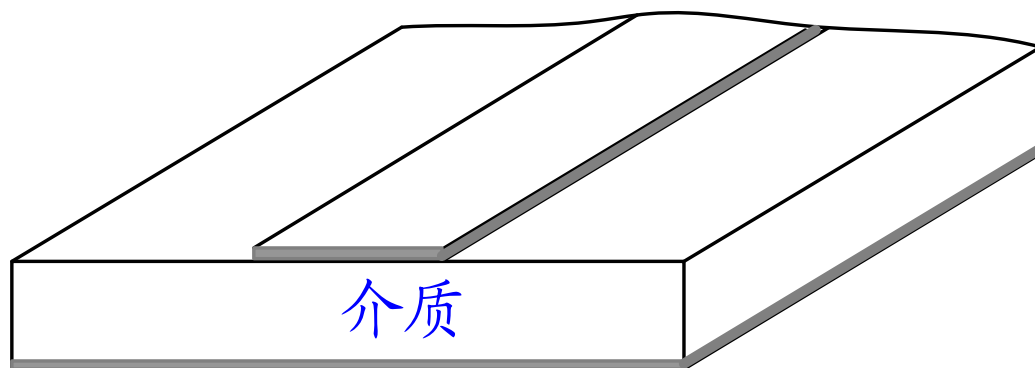
Asymmetry 非对称

微带线

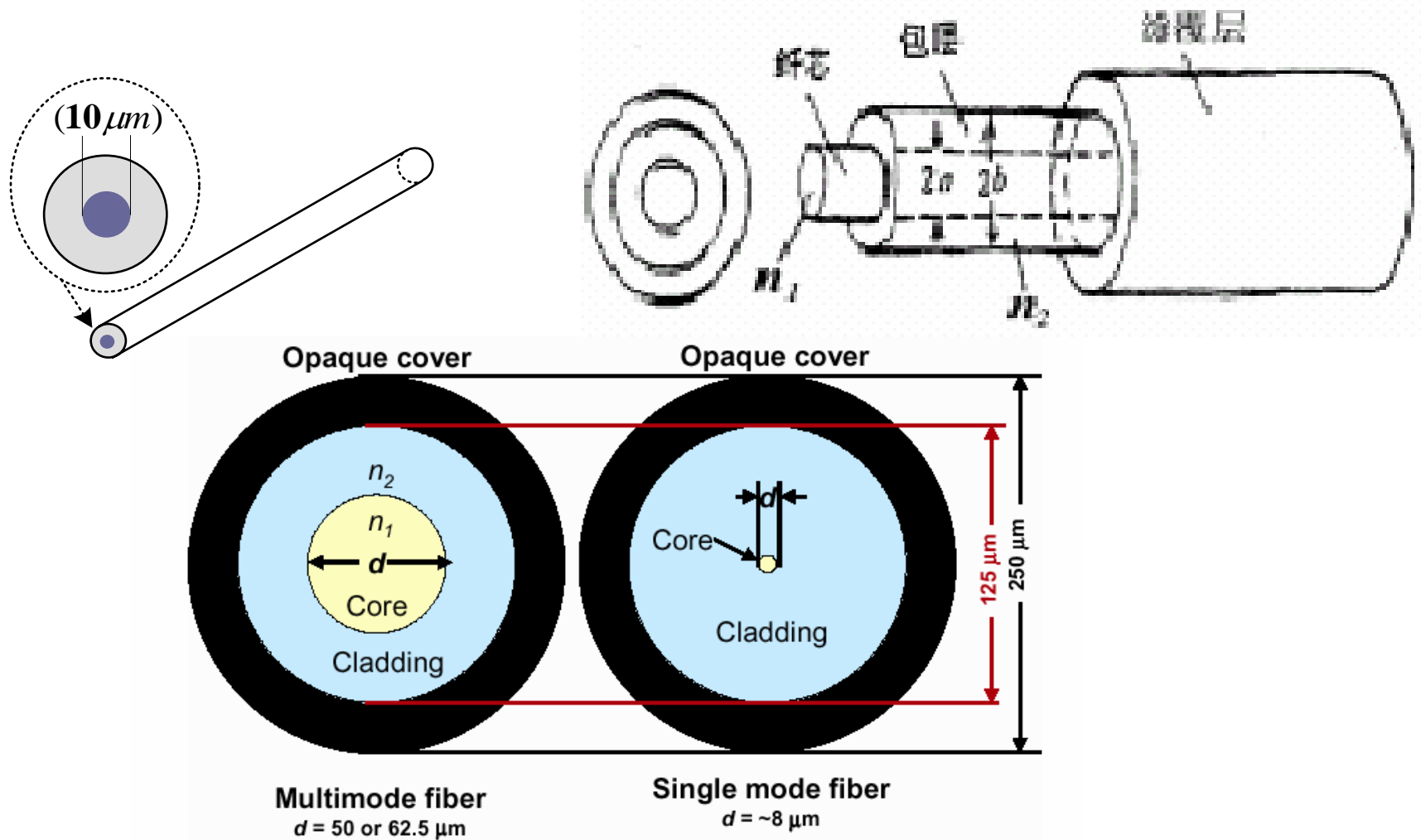
如图



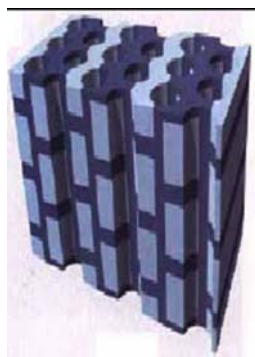
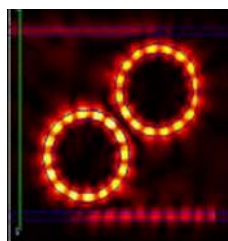
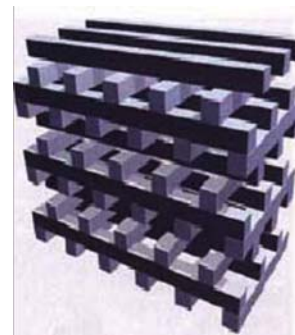
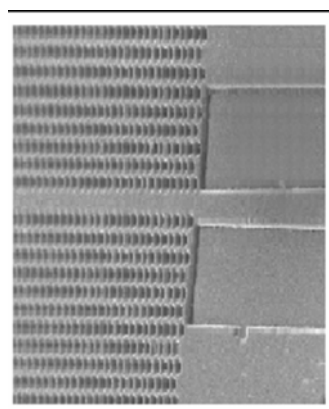
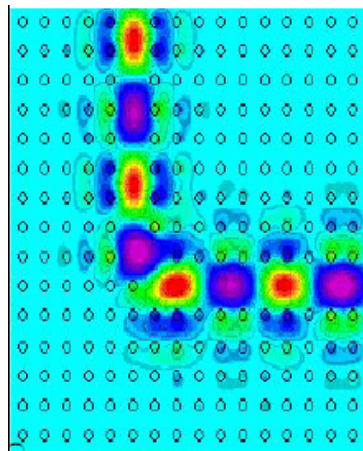
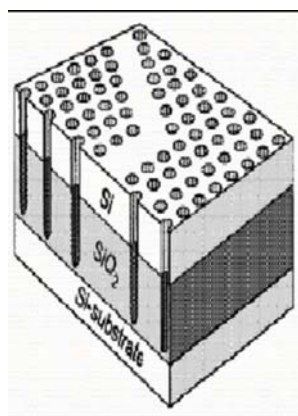
(2)



○频率再高，就需要用光纤



光子晶体



目前光与电差别

	光	电
灵活性	弱	强
带宽	大	小

损耗

- 同轴线损耗（粗：分米量级）：0.1-0.3dB/m
- 光纤：0.17dB/km
- 波导、微带线：介于上面二者之间

材料	电导率 σ_2 (Ω/m)	磁导率 $\mu_2(H/m)$	趋肤深度 $\delta(m)$	表面电阻 $R_s(\Omega)$
银	6.17×10^7	$4\pi \times 10^{-7}$	$0.0642/\sqrt{f}$	$2.52 \times 10^{-7}\sqrt{f}$
紫铜	5.80×10^7	$4\pi \times 10^{-7}$	$0.0660/\sqrt{f}$	$2.61 \times 10^{-7}\sqrt{f}$
铅	3.72×10^7	$4\pi \times 10^{-7}$	$0.0826/\sqrt{f}$	$3.62 \times 10^{-7}\sqrt{f}$
黄铜	1.57×10^7	$4\pi \times 10^{-7}$	$0.127/\sqrt{f}$	$5.01 \times 10^{-7}\sqrt{f}$
焊锡	0.706×10^7	$4\pi \times 10^{-7}$	$0.185/\sqrt{f}$	$7.73 \times 10^{-7}\sqrt{f}$