



第四章 光波导原理

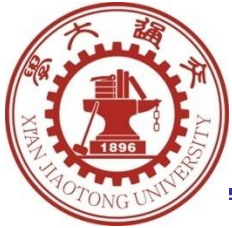
光波导原理

4.1 平板型介质光波导

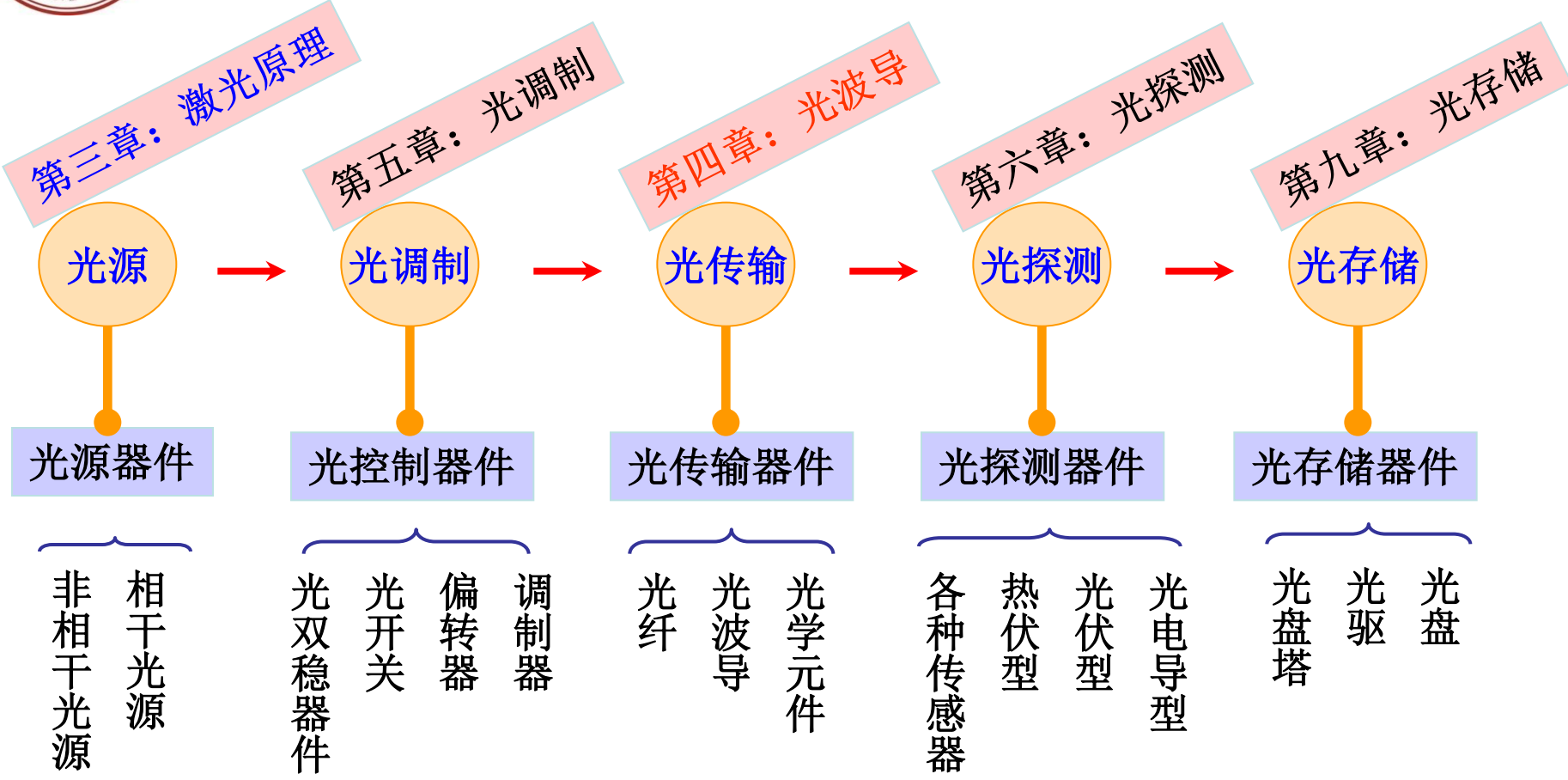
4.2 通道型介质光波导

4.3 光纤

4.4 新型光波导



回顾：典型信息光电子系统

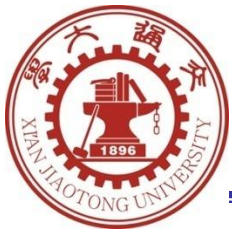


- 光波导作用：是光源与接收器之间连接的桥梁
- 对光波导的要求：传输损耗低；传输信号不失真



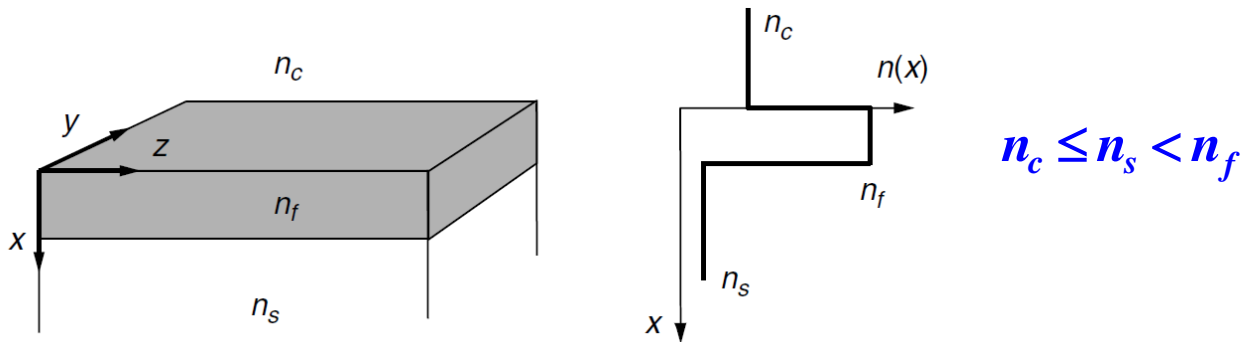
4.0 光波导及导波光学

- 光波导类型
- 导波光学的概念

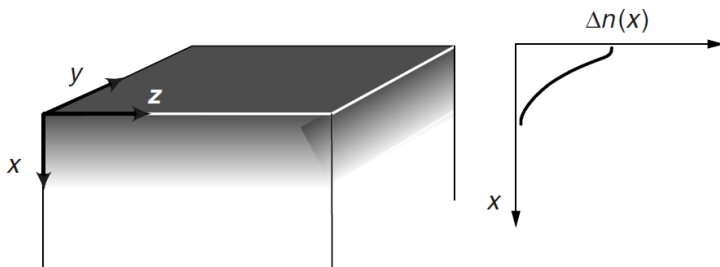


平板型光波导

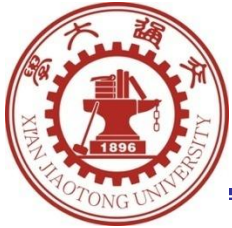
- 类型：阶跃折射率波导、渐变折射率波导.
- 导波机理：来自于上边界的全内反射的反射波，与来自于下边界的全内反的反射波之间的、结构性干涉，形成传输模式.



非对称性阶跃平板波导【右图：折射率分布】

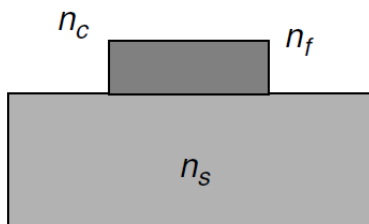


渐变折射率平板波导



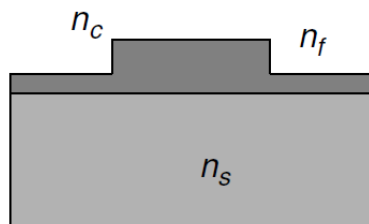
通道型光波导

- 类型：条形波导；脊波导；掩埋式通道波导。
- 结构：芯区的折射率高于任何周围媒质的折射率。
- 导波机理：全内反射不仅发生在上下分界面之间，而且也发生在侧边界之间。



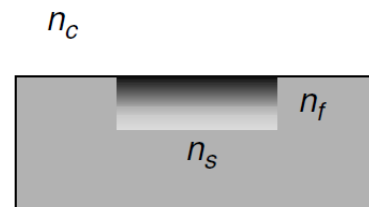
(a)

(a) 条形波导；



(b)

(b) 脊波导；



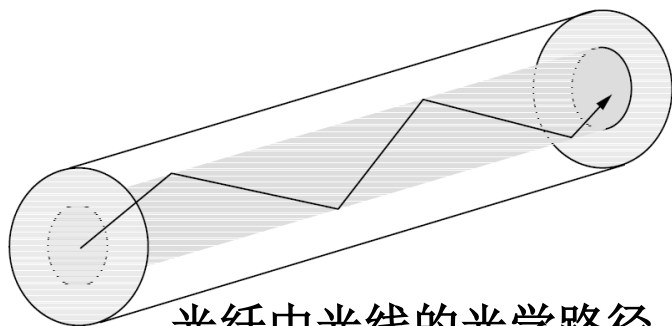
(c)

(c) 掩埋式通道波导

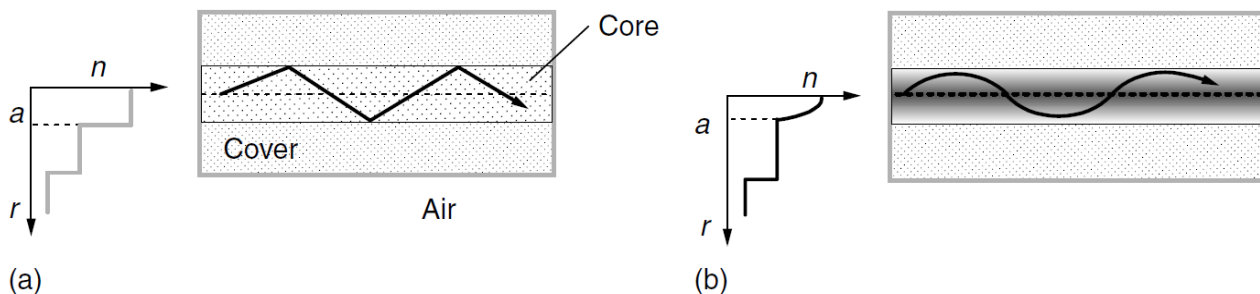


光纤（圆柱光波导）

- 光纤是通道波导的一个特殊类型.
- 分类：阶跃光纤；折射率渐变光纤.

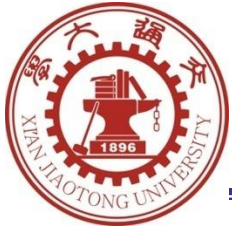


光纤中光线的光学路径



(a) 阶跃光纤；

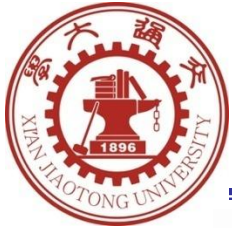
(b) 折射率渐变光纤。



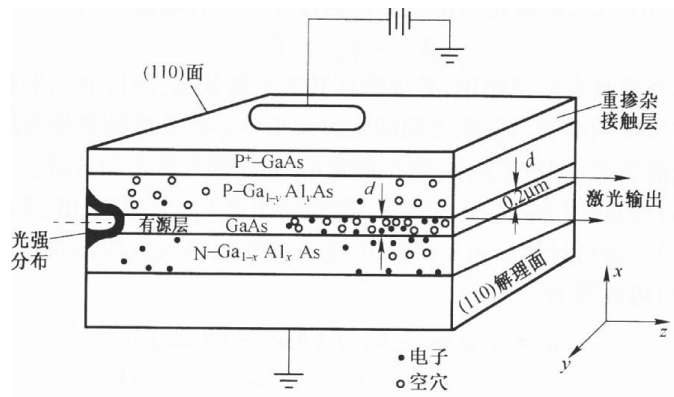
光波导的类型

✓ 光波导是将光限制在特定介质中进行传输的导光通道。

- 目前，**实用**的光波导有三类：平板光波导、通道光波导和光纤。
- **光纤**的传输特性：
 - ① 衰减很小、频带很宽、抗电磁干扰，主要用于**通信**；
 - ② 对外界的温度和压力等因素敏感，因而可以制成**光纤传感器**，用测量温度、压力、声场等物理量。
- **平板光波导与通道光波导**主要用于制作有源和无源光波导器件，如激光器、调制器和光耦合器等；它们都采用**半导体薄膜工艺**，适合制成平面结构的**集成光路**。

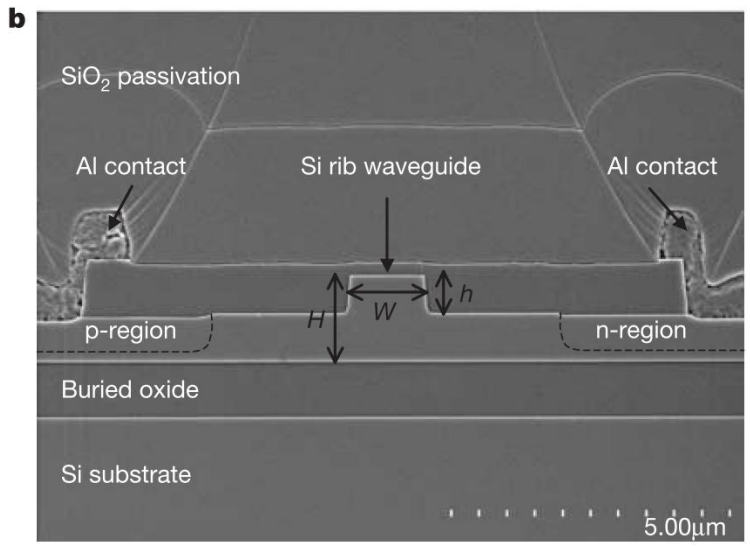
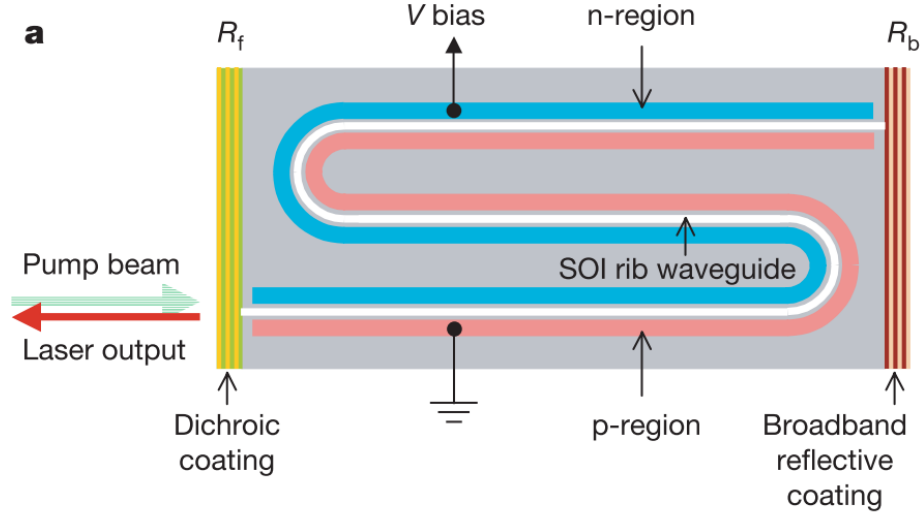


连续拉曼硅激光器



AlGaAs/GaAs/AlGaAs 双异质结半导体激光器

- Si是一种间接带隙半导体，不能通过传统的带间载流子复合发光；
- 受激拉曼散射：在一定条件下，强光照射介质的散射光具有受激性质（相干辐射）



$$W = 1.5 \mu\text{m}, H = 1.55 \mu\text{m}, h = 0.7 \mu\text{m}$$

2005_Nature_A continuous-wave Raman silicon laser

Silicon waveguide used in the Raman laser experiment. (a) schematic layout of the silicon waveguide laser cavity with optical coatings applied to the facets and a p-i-n structure along the waveguide. (b) Scanning electron microscope cross-section image of a silicon rib waveguide with a p-i-n diode structure.



微米尺寸硅电光调制器

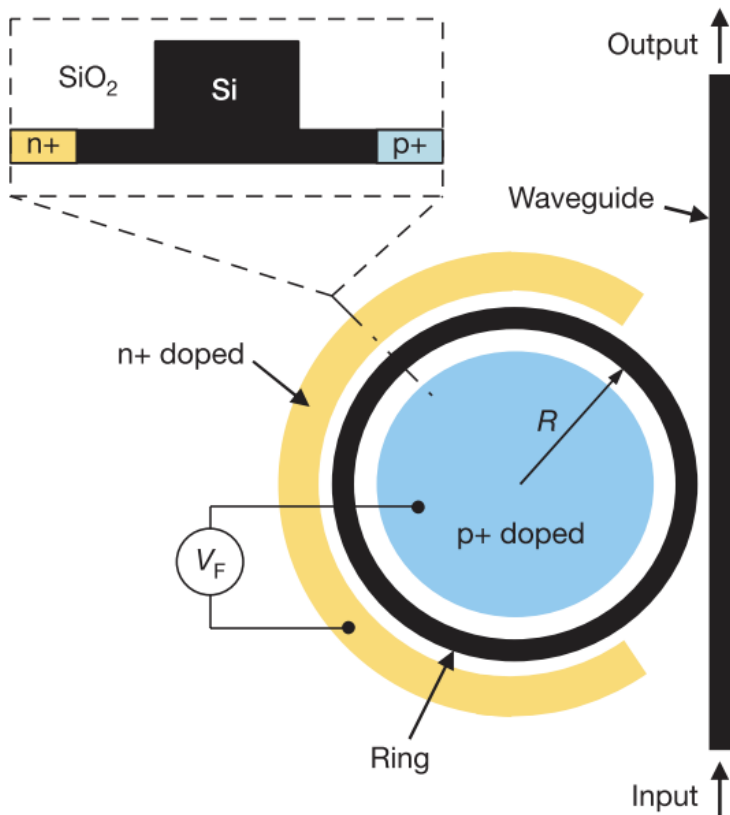


Figure 1 | Schematic layout of the ring resonator-based modulator. The inset shows the cross-section of the ring. R , radius of ring. V_F , voltage applied on the modulator.

2005_Nature_Micrometre-scale silicon electro-optic modulator

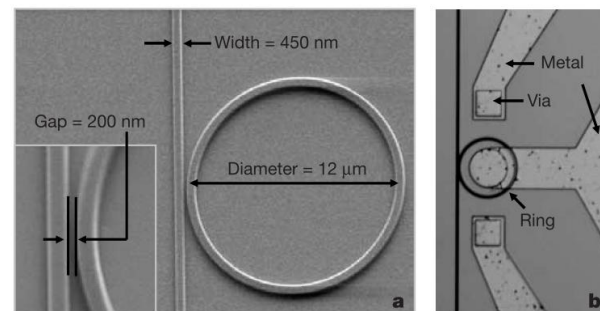


Figure 2 | SEM and microscope images of the fabricated device. **a**, Top-view SEM image of the ring coupled to the waveguide with a close-up view of the coupling region. **b**, Top-view microscope image of the ring resonator after the metal contacts are formed. The metal contact on the central p-doped region of the ring goes over the ring with a 1- μm -thick silicon dioxide layer between the metal and the ring.

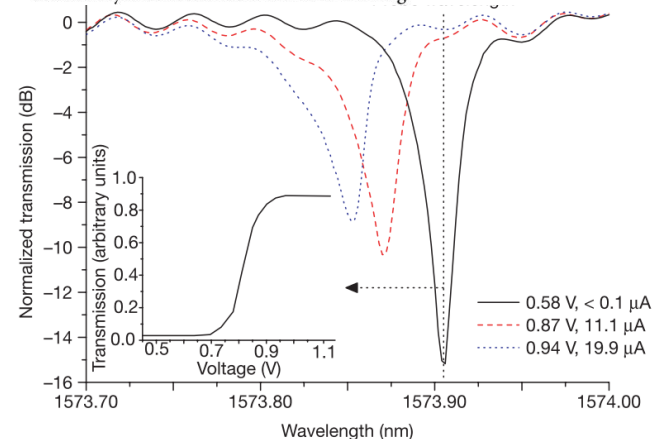
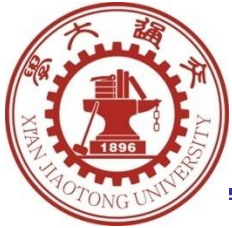


Figure 3 | DC measurement of the ring resonator. The main panel shows the transmission spectra of the ring resonator at the bias voltages of 0.58 V, 0.87 V, and 0.94 V, respectively. The vertical dashed line marks the position of the probe wavelength used in the transfer function and dynamic modulation measurements. The inset shows the transfer function of the modulator for light with a wavelength of 1,573.9 nm.



导波光学的概念

导波光学

- 导波光学是纤维光学和集成光学统称【或光导波技术包括光纤技术和集成光路技术】
- 导波光学以光的电磁理论为基础，研究光波在光波导中的传播、耦合、散射和衍射等效应。
- 导波光学是各种光波导器件设计和制作的理论基础。

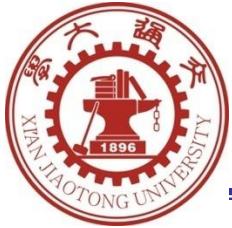
导波光学的研究重点

- 光波导传光理论；（课本第四章）
- 光波导电光、声光、磁光等调制技术；（课本第五章）
- 光波导器件设计与制作技术；（课本第八章内容）
- 光波导的应用技术



导波光学的发展史

- 制造集成光路首先要解决光源的小型化，因此**导波光学**是伴随着半导体激光器（1962年7月）发展起来的【另一种说法：**导波光学**是1969年美国贝尔实验室的Miller博士提出**集成光学**的概念后发展起来的】。
- 1972年，Somekh和Yariv提出了在同一个衬底上同时制作光波导器件和电子器件的构想，自此开始，研究人员开始利用各种材料和制备方法制作**光波导器件**。
- 最主要的光波导器件就是**微型光源器件**和**低损耗传光器件**。
- 在**微型光源器件**方面：各种类型的**半导体激光器**不断涌现，为导波光学提供了所需的微型光源，为光波导技术长远发展奠定了基础。
- 在**低损耗传光器件**方面：从1970年第一根低损耗石英光纤(传输损耗20dB/km)开始，光纤的传输损耗逐渐降低：1974年—1dB/km；1990年—0.14dB/km，到目前已经降低到了0.1dB/km。

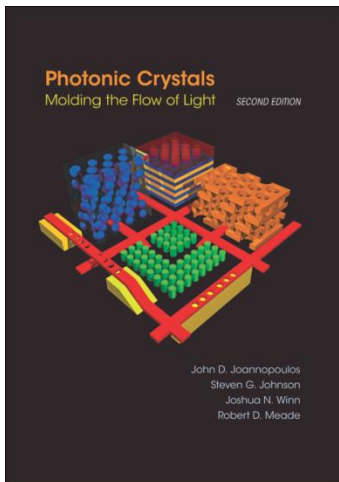


导波光学的发展趋势

- 相对于微电子学，光波导器件尺寸较大和集成度不高是限制光波导技术发展的一个重要问题。
- 近年来，光子晶体、微腔激光器、纳米量子线等新材料、新技术的出现，为实现小尺寸和高密度集成提供了技术和工艺基础，使得光波导技术进入了高速发展的新阶段。
- 光子晶体自1987年Yablonovitch和John提出以来，迄今为止，已经有多种基于光子晶体的全新光子学器件被相继提出，包括无阈值的激光器，无损耗的反射镜和弯曲光路，高品质因子的光学微腔，具有色散补偿作用的光子晶体光纤，以及高效率的发光二极管等。
- 光子晶体的出现使信息处理技术的“全光子化”和光子技术的微型化与集成化成为可能，它可能在未来导致信息技术的一场革命，其影响可能与当年半导体技术相提并论。

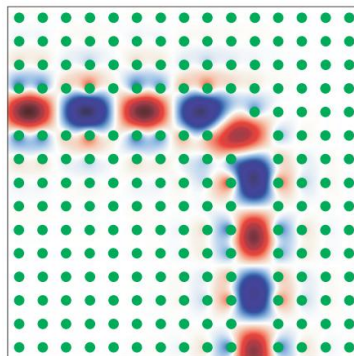


导波光学的发展趋势

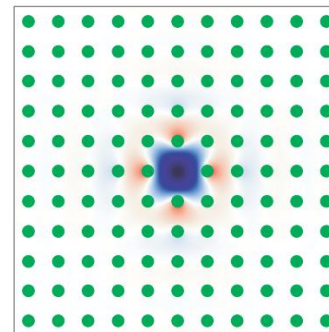


著作：《光子晶体》


光子晶体波
导T分支




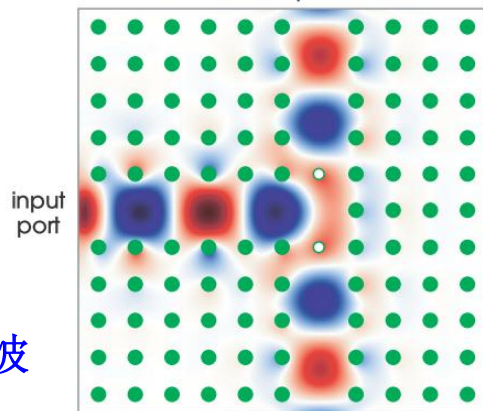
光子晶体90
度波导拐角




光子晶
体微腔

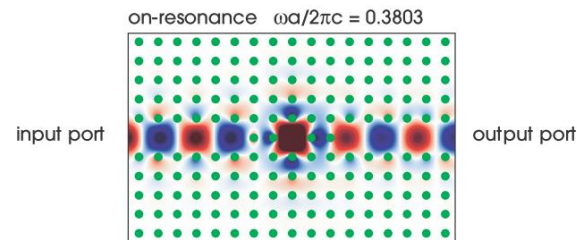
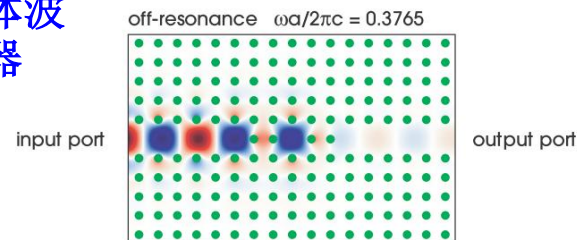
neg  pos
 E_z

neg  pos
 E_z




光子晶体波
导滤波器

neg  pos
 E_z



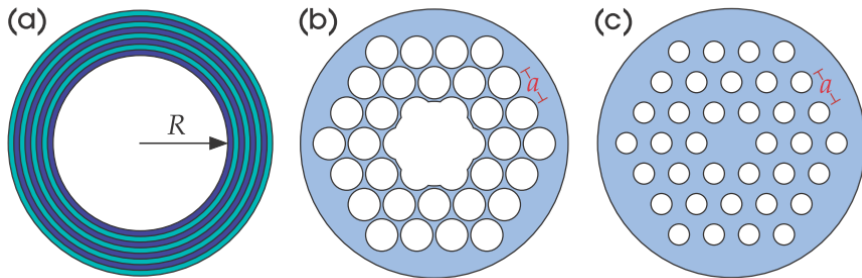
off-resonance $\omega a/2\pi c = 0.3765$

on-resonance $\omega a/2\pi c = 0.3803$

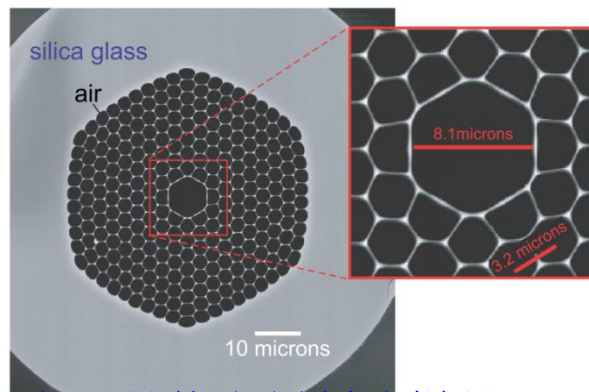
neg  pos
 E_z



导波光学的发展趋势

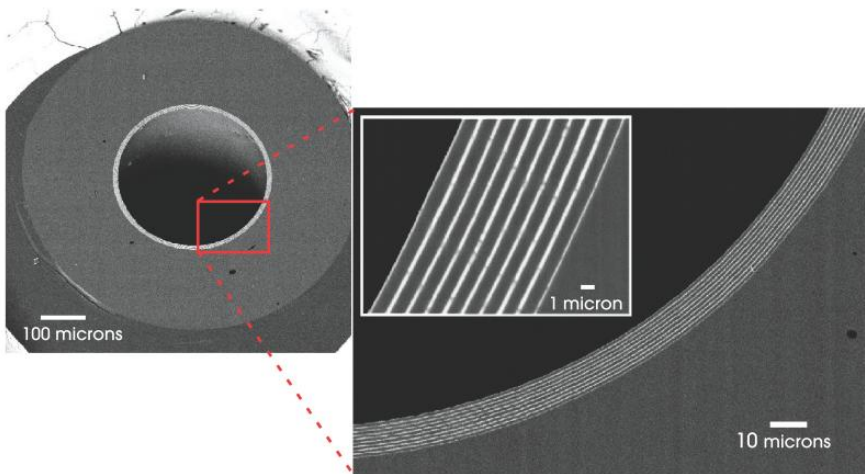
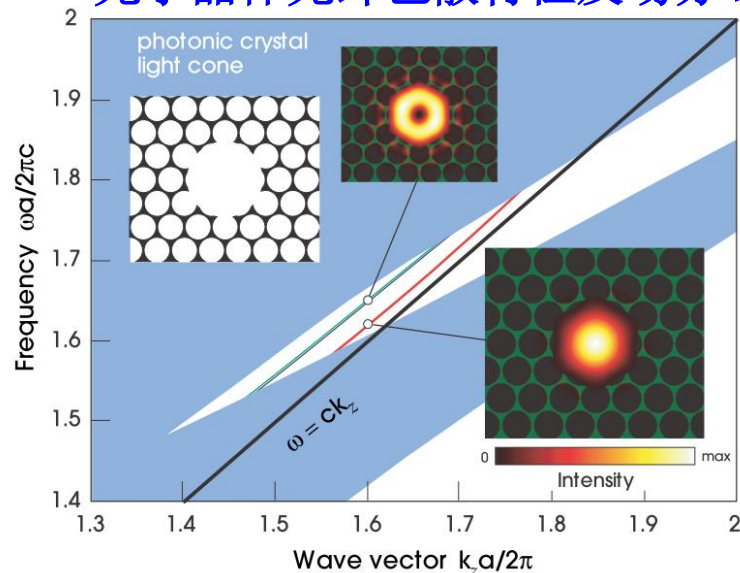


光子晶体光纤结构示意图

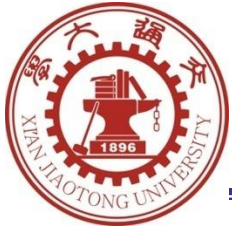


光子晶体光纤制造样品 (b)

光子晶体光纤色散特性及场分布



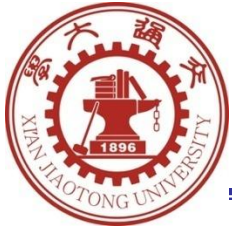
光子晶体光纤制造样品 (a)



导波光学的发展趋势

- 谐振腔尺度在光波波长量级的激光器称为**微腔激光器**.
- **微腔激光器**是当代半导体研究领域的热点之一，它采用了现代超精细加工技术和超薄材料加工技术，具有高集成度、低噪声的特点，其功耗低的特点尤为显著【100万个激光器同时工作，功耗只有5W】.
- 微腔激光器具有尺寸小、阈值低【光泵浦InGaAs / InGaAsP微碟激光器，工作波长1.55微米，阈值电流2.3mA】、转化效率高和易调制等特点.
- 在光集成、光互联、光神经网络以及光通信等波导光学系统中有着广泛的应用前景.
- 微腔激光器相关知识可以参考：中科院半导体所

http://www.semi.cas.cn/xwzx/kyjz/201104/t20110413_3114159.html



导波光学的发展趋势

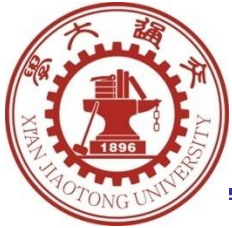
- **纳米线**是一种具有在横向被限制（**100nm**以下）的结构. 这种尺度上，量子力学效应很重要，因此也被称作“量子线”
- 根据材料的不同，纳米线可以分为金属纳米线（**Ni, Pt, Au**等）、半导体纳米线（如**InP, Si, GaN**等）和绝缘体纳米线（如**SiO₂, TiO₂**等）.
- 纳米线不仅可以用来制作超小电路，甚至可以制作超低损耗的光波导



光波导及其器件的应用

- 信息时代的特征是信息量十分巨大、信息传输非常快捷、信息处理十分迅速，与之分别对应的光存储、光传输和光计算将成为信息时代最显著的标志。
- 在[信息获取](#)方面：可对位移、振动、温度、压力、应变、应力、电流、电压、电场、磁场、流量、浓度等物理量进行测量。
- 在[信息传输](#)方面：可以制成有源器件、无源器件，可以构成光纤通信干线、可组成光交换接入网等。
- 在[信息处理](#)方面：可实现光(电)子集成，完成集成光路中光收发模块、光接入模块、光开关模块和光放大模块的研制。
- 在[生产生活](#)方面：可用于广告显示屏、激光手术刀、仪表照明、工艺装饰、光纤面板、医用内窥镜和潜望镜等。

✓ 光波导理论和光波导器件的研究将为信息时代的发展奠定基础。



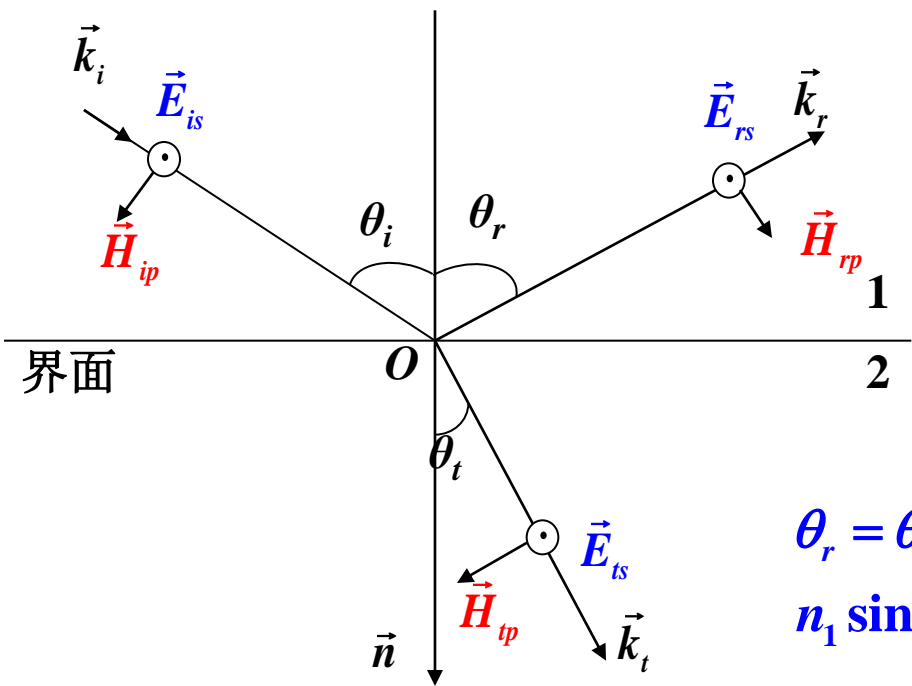
4.1 平板型介质光波导

- 平板光波导中的模式类型
- 二维波导中的TE和TM模式
- 导波模式的射线光学分析
- 平板波导中的波动方程及其通解
- 阶跃平板波导中的导波模式
- 渐变折射率平板波导

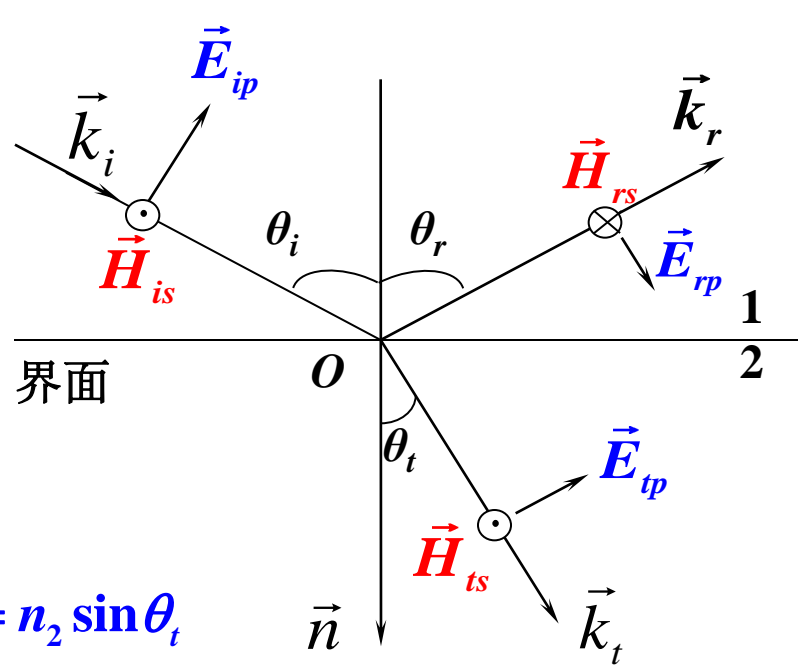


回顾：根据菲涅耳公式讨论反射波和透射波的性质

单独存在s分量的情形



单独存在p分量的情形





回顾：根据菲涅耳公式讨论反射波和透射波的性质

2. $n_1 > n_2$ 的情形

即由光密媒质入射到光疏媒质的情形。

- 由折射定律可知, $\theta_i < \theta_t$.
- 把 $\theta_t = 90^\circ$ 所对应的入射角称为全反射临界角, 用 θ_c 表示:

$$\sin \theta_c = n_2/n_1 \text{ 或 } \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

- 当 $\theta_i > \theta_c$ 时, $\sin \theta_t > 1$, θ_t 在实数范围内不存在, 可以将有关参量扩展到复数领域.

- 因为 θ_i 始终是实参量, 形式上有: $\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i$

$$\cos \theta_t = (1 - \sin^2 \theta_t)^{\frac{1}{2}} = i \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i - 1 \right]^{\frac{1}{2}} = i \Gamma \quad \Gamma = \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} = \frac{n_1 \cos \theta_i - i n_2 \Gamma}{n_1 \cos \theta_i + i n_2 \Gamma} = |r_s| \exp(i \phi_{rs})$$



回顾：根据菲涅耳公式讨论反射波和透射波的性质

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - in_2 \Gamma}{n_1 \cos \theta_i + in_2 \Gamma} = |r_s| \exp(i\phi_{rs})$$

$$r_p = -\frac{n_2 \cos \theta_i - in_1 \Gamma}{n_2 \cos \theta_i + in_1 \Gamma} = |r_p| \exp(i\phi_{rp})$$

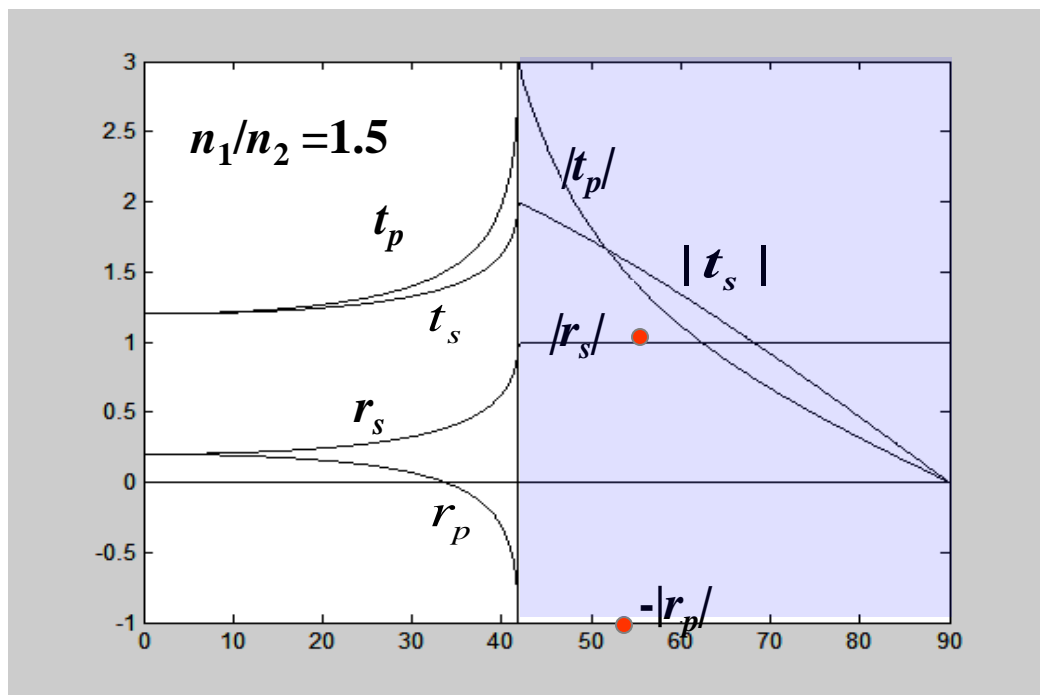
- 反射系数的模值 $|r_s|$ 、 $|r_p|$ 仍然可以理解为反射波和入射波对应分量的振幅比；
- $|r_s|=|r_p|=1$ ，因而 $R_s=R_p=R=1$ ；

✓结论：当 $\theta_i > \theta_c$ 时，入射波的能量全部返回到 n_1 媒质里，这种现象称为全反射或者全内反射。

- ϕ_{rs} 和 ϕ_{rp} 它们可以理解为反射波和入射波对应分量在界面处的位相跃变。

$$\phi_{rs} = 2 \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{\cos \theta_i}$$

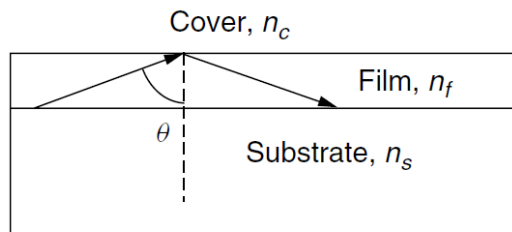
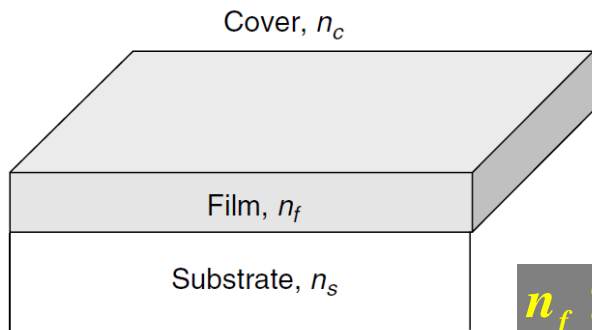
$$\phi_{rp} = 2 \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{(n_2/n_1)^2 \cos \theta_i}$$





平板光波导中的模式类型

应用几何光学（射线光学）对波导中光的行为进行初步分析（直观）



$$n_f > n_s > n_c$$

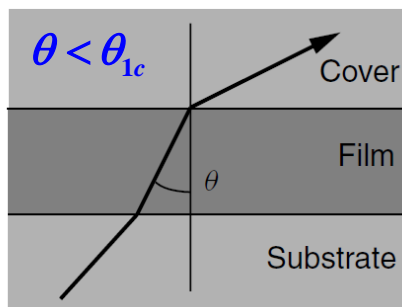
$$\theta_{1c} = \sin^{-1}(n_c / n_f)$$

$$\theta_{2c} = \sin^{-1}(n_s / n_f)$$

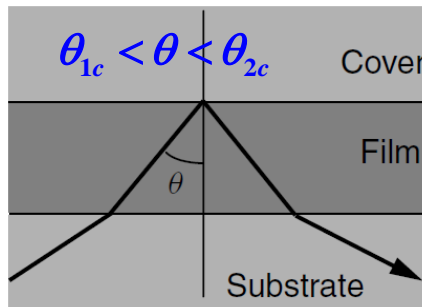
$$\theta_{2c} > \theta_{1c}$$

(a) 非对称性平板波导

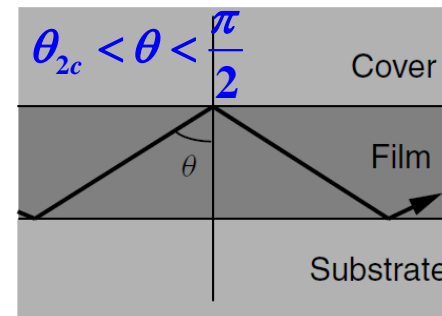
(b) 薄膜中光线的Zig-zag轨迹



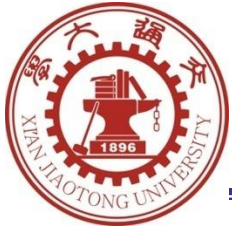
光渗透到包覆层中和衬底中。
辐射模式



在上界面发生全反射，
在下界面辐射。
衬底辐射模式（衬底模式）



在上下分界面全反射。
导波模式



二维波导中的TE和TM模式

麦克斯韦方程组

电介质的本构方程（物质方程，介质方程）

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1) \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2) \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3) \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} \quad (a) \\ \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} \quad (b) \end{array} \right.$$

非磁性材料 $\vec{M} = 0$

- 非线性、非色散、各向同性、介电媒质 ($\sigma=0$)、无源 $\rho=0, \vec{J}_s=0$

麦克斯韦方程组简化为：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{array} \right. \quad (n \text{ 是折射率})$$

✓ 在二维平板波导中，上面的麦克斯韦组可以分解为两组独立的方程组，分别定义为TE模式和TM模式【分别对应于S极化（分量）和P极化（分量）】。

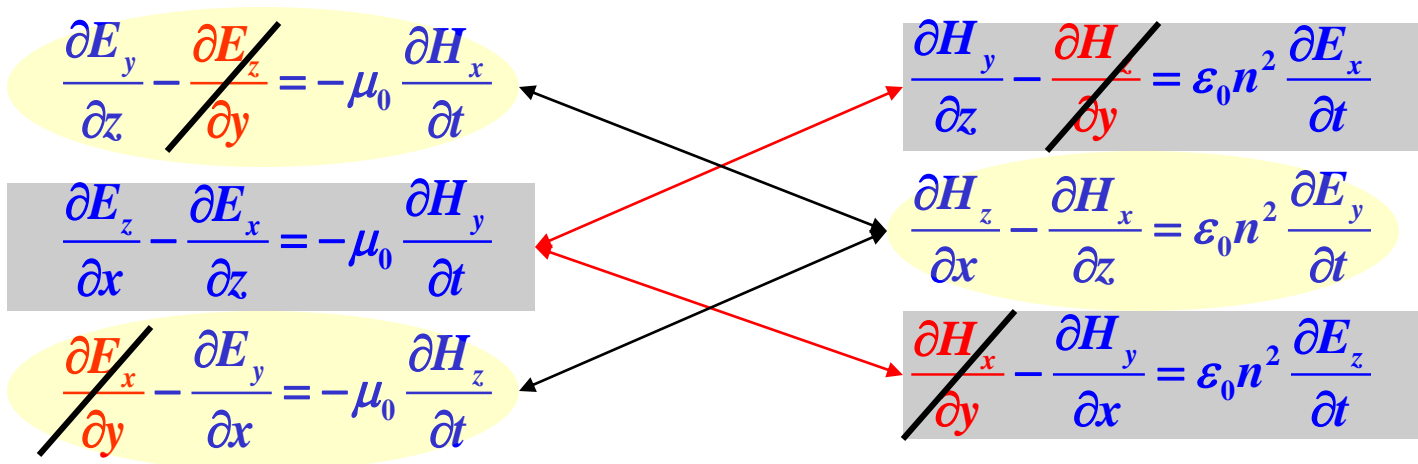


二维波导中的TE和TM模式

对于y方向无限均匀的二维结构，电场和磁场的分量 ϕ 满足 $\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



TE模式 E_y, H_x, H_z

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

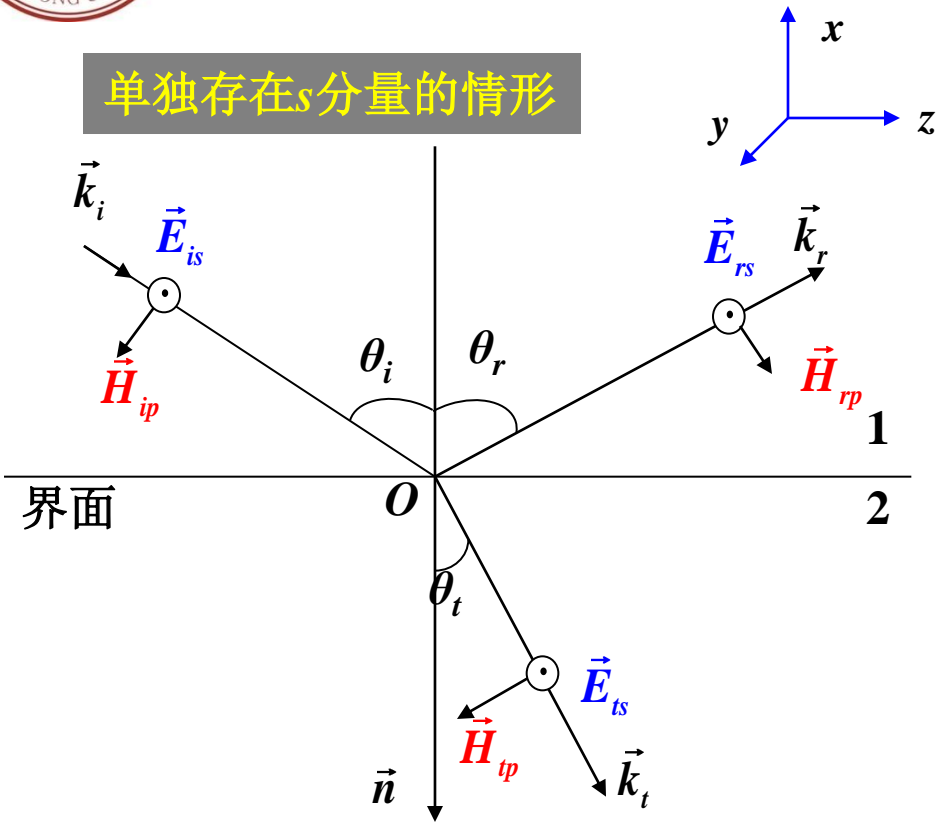
TM模式 H_y, E_x, E_z

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = -\epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

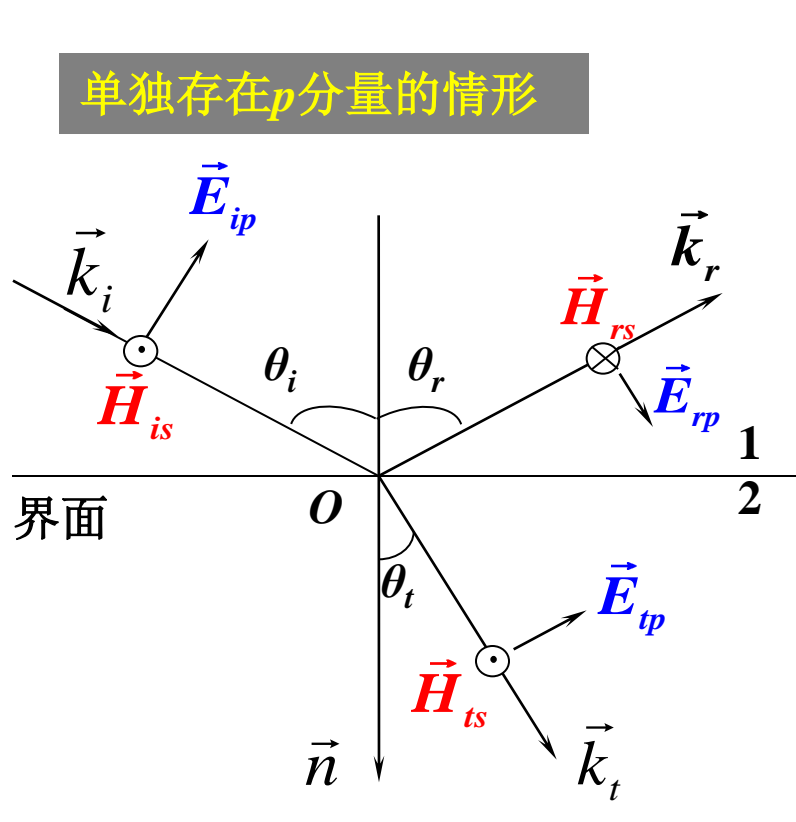


s分量-TE模式, p分量-TM模式

单独存在s分量的情形

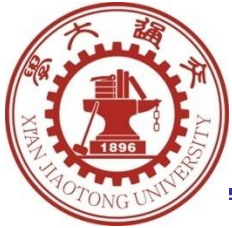


单独存在p分量的情形



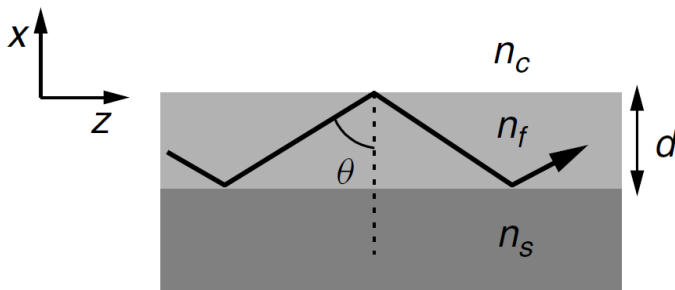
平板波导中的TE传输非零场分量为 E_y, H_x, H_z ; 其余场分量为零。

• 平板波导中的TM传输非零场分量为 H_y, E_x, E_z ; 其余场分量为零。



导波模式的射线光学分析

- 平板光学波导中，导波模式的光线路径由薄膜中光线，以之字形路径移动组成



在非对称性阶跃平板波导中，光线的之字形路径

✓ 光线必须满足条件： $\theta > \theta_{2c} \geq \theta_{1c}$ ；相长干涉

- 相长干涉：在一个完整的回路中全部横向相位移应该是 2π 的整数倍。
- 导波模式的横向共振条件 $\phi - \phi_c - \phi_s = 2\pi m$ （其中整数 m 是模式的阶数）
- 在一个回路中，之字形路径所导致的、光线所经历的横向相位移为：

$$\phi = 2k_x d = 2k_0 n_f d \cos \theta$$



导波模式的射线光学分析

- 由于全内反射，在上（ ϕ_c ）下（ ϕ_s ）边界光线所遇到的相位移：

$$\phi_{TE} = 2 \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{\cos \theta_i} \quad \phi_{TM} = 2 \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_2/n_1)^2}}{(n_2/n_1)^2 \cos \theta_i}$$

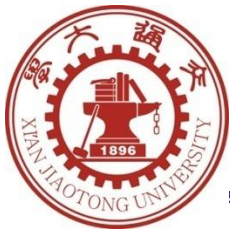
- 导波模式的横向共振条件包含了波导参数（ n_c , n_f , n_s 和 d ），工作波长 λ_0 和传输角度 θ_m

✓结论：仅有一些离散的角度满足这些条件，即对应于导波模式的传输角度

- 模式的传输常数 β_m ：沿着传输方向的波矢量的分量，与传输角度的关系为

$$\beta_m = k_0 n_f \sin \theta_m$$

射线光学或者几何光学无法求解模式的场分布；必须将麦克斯维方程组应用于波导结构，才能得到场分布



回顾：波动方程

麦克斯韦方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1) \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2) \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3) \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4) \end{array} \right.$$

电介质的本构方程（物质方程，介质方程）

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E} \quad (a) \\ \vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 \vec{H} \quad (b) \end{array} \right.$$

非磁性材料 $\vec{M} = 0$



简单介质中电场的时域波动方程

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}_s}{\partial t}$$

简单介质中磁场的时域波动方程

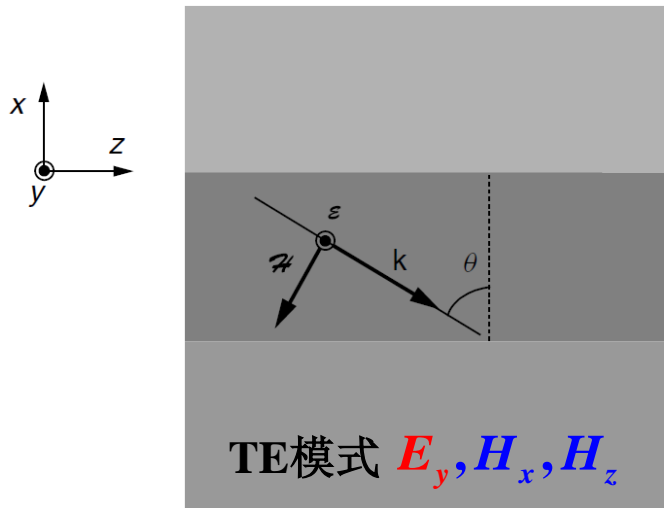
$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{J}_s$$



平板波导中波动方程：TE 模式

不导电介质中无源波动方程（电场）：
$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

式中 ∇^2 为拉普拉斯算符，在直角坐标系中
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} = 0$$

$$E_y(x, z, t) = E_y(x) e^{i(\omega t - \beta z)} \rightarrow$$

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + [k_0^2 n^2(x) - \beta^2] E_y(x) = 0$$

切向分量 $H_z(x)$ 连续

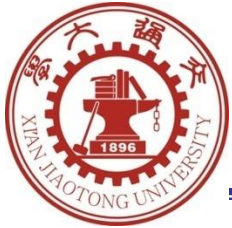
 \rightarrow $\frac{\partial E_y(x)}{\partial x}$ 连续

切向分量 $E_y(x)$ 连续

✓ 求出 $E_y(x)$

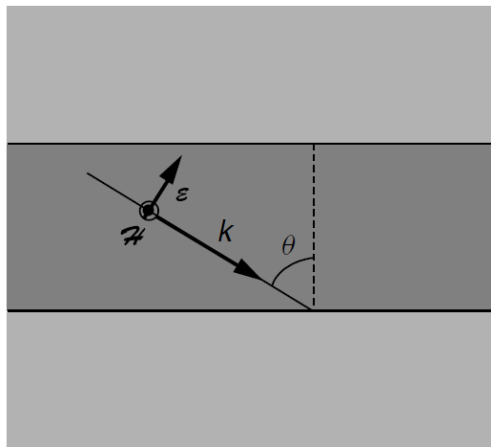
$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad \frac{\partial E_y}{\partial x} = \mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$



平板波导中波动方程：TM 模式

不导电介质中无源波动方程（磁场）： $\nabla^2 \vec{H} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$



TM模式 H_y, E_x, E_z

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 H_y}{\partial t^2} = 0$$

$$H_y(x, z, t) = H_y(x) e^{i(\omega t - \beta z)}$$

$$\frac{d^2 H_y(x)}{dx^2} + [k_0^2 n^2(x) - \beta^2] H_y(x) = 0$$

切向分量 $E_z(x)$ 连续 $\rightarrow \frac{1}{n^2} \frac{\partial H_y(x)}{\partial x}$ 连续

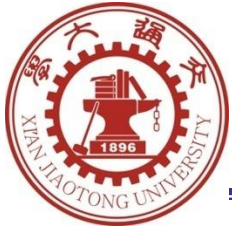
切向分量 $H_y(x)$ 连续

✓ 求出 $H_y(x)$

✓ 求出 $E_x(x), E_z(x)$

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} = -\epsilon_0 n^2 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$



平板波导中波动方程的通解

$$\frac{d^2 E_y(x)}{dx^2} + [k_0^2 n^2(x) - \beta^2] E_y(x) = 0$$

切向分量 $H_z(x)$ 连续

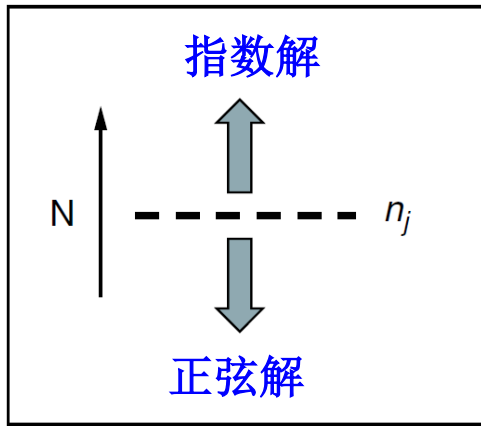
$$\frac{\partial E_y(x)}{\partial x} \text{ 连续}$$

切向分量 $E_y(x)$ 连续

✓ 求出 $E_y(x)$

通解: $E_j(x) = A_j \exp(i\gamma_j x) - B_j \exp(-i\gamma_j x)$

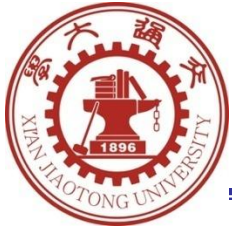
$$\gamma_j = \sqrt{k_0^2 n_j^2 - \beta^2}$$



在给定区域中的电场分量，依赖于 N

✓ 有效折射率 N : 表示沿着 z 轴传输的模式的折射率: $\beta = k_0 N$

- $\beta < k_0 n_j$ (或者 $N < n_j$), γ_j 是一个实数, $E_j(x)$ 是正弦函数
- $\beta > k_0 n_j$ (或者 $N > n_j$), γ_j 是一个纯虚数, $E_j(x)$ 是指数函数



思考题

1. 对于二维波导结构，如何将麦克斯韦方程组分解成两组独立的方程？并推导每一种模式中的各场量之间的关系。

