



第八章 光波导器件

光波导器件

8.1 集成光学的概念

8.2 集成光子器件

8.3 基于耦合模理论的光波导器件

8.4 基于多模干涉的光波导器件



8.1 集成光学的概念

- 光学是物理科学的一个分支，处理光的产生、传输及其与物质的相互作用。
- 光学复兴的三大事件：
 - ① 1960年**激光器**的发明提供了性能优良的光源。
 - ② 半导体光学器件的发展，提供了非常有效和紧凑的光电子器件(**半导体探测器**)。
 - ③ 在19世纪80年代，利用新的制造技术，得到了接近理论极限的低传输损耗的、廉价**光纤**。

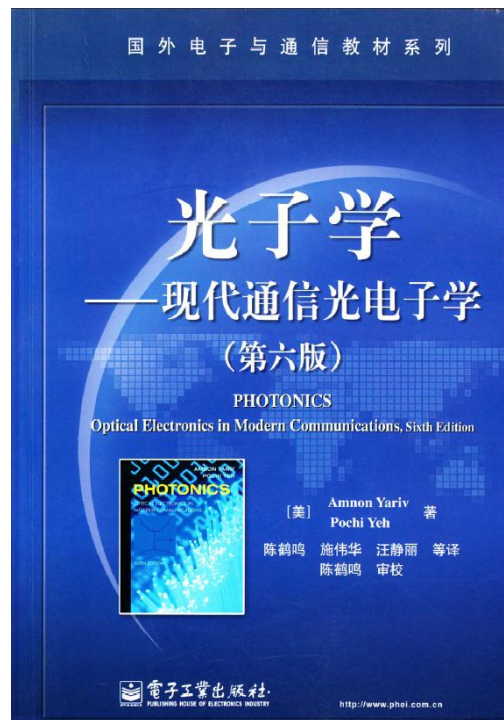


8.1 集成光学的概念

- 对于激光器、半导体探测器、光调制器等复杂器件，需要根据光学和电子学描述其工作原理，因此产生了交叉学科——光子学【强调光学器件中电子的作用、物质-光相互作用】

光子学与电子学的区别与联系：

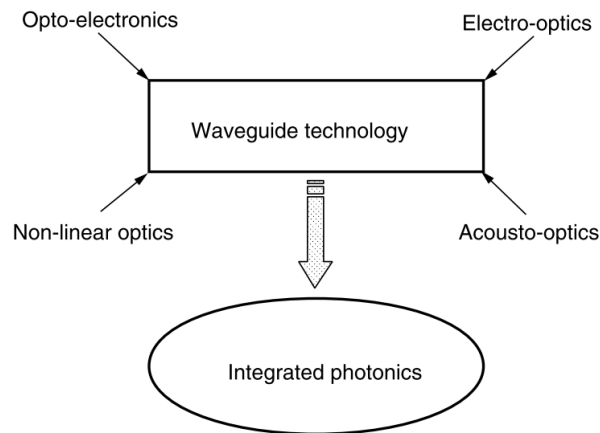
- 区别：“电子学”-“电子流动”；“光子学”-光子
- 联系：探测器（光子可以控制电子的流量）、半导体激光器或者电光调制器（电子可以决定光的传输性质）。





8.1 集成光学的概念

- 新型光子器件的出现导致了光学与电子学的重要联系，也导致了光子学在内的其它**分支学科**【电子光学（电子枪）、声光学（压电换能器）、光电子学（发光二极管、半导体激光器、探测器）、量子光学、量子电子学（光放大器）以非线性光学等】和**应用型学科**【光通信、显像与显示系统、光计算、光传感等】。
- 特别，“**波导技术**”研究广泛应用于光通信、光计算、光处理与光传感器的器件与系统。
- **集成光（子）学**由波导技术（导波光学）与其它学科如电子光学、声光学、非线性光学和光电子学结合而组成。



不同学科结合成集成光



8.1 集成光学的概念

- 从传统的光学系统到集成光学系统，光学系统的进化经历了三代

光学系统技术与相关特性的演化

	First generation	Second generation	Third generation
Technology	Conventional optics	Micro-optics	Integrated photonics
Typical components	Mirrors, prisms, lenses, gas lasers	LED, LD, tiny lenses, multi-mode fibres	Monomode channel waveguides, LD, monomode fibres
Alignment	Necessary	Necessary (hard)	Unnecessary
Propagation	Beam	Beams in multi-mode waveguides	Monomode waveguides (μm)
Control electrode size	1 cm	1 mm	1 μm
Device size	1 m ²	10 cm ²	1 cm ² (on a 1 mm thick substrate)

Note: LED: light emitting diode; LD: laser diode.

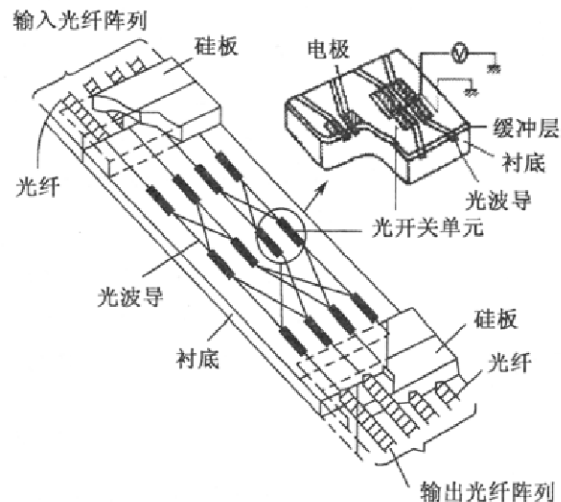
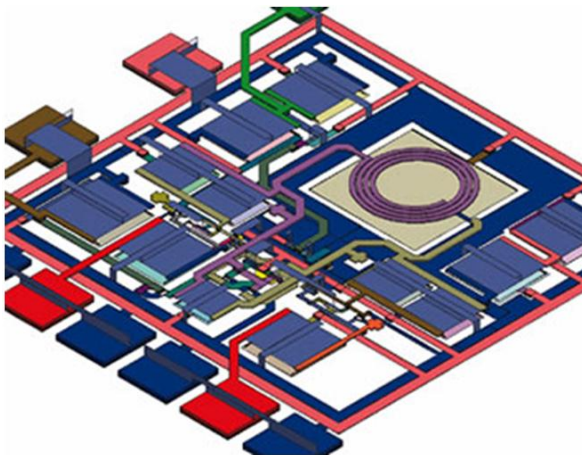


8.1 集成光学的概念

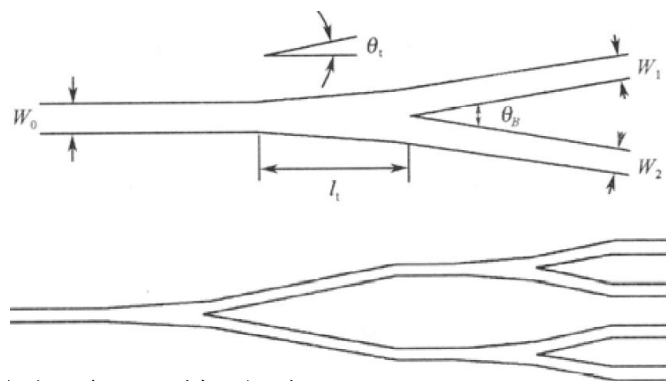
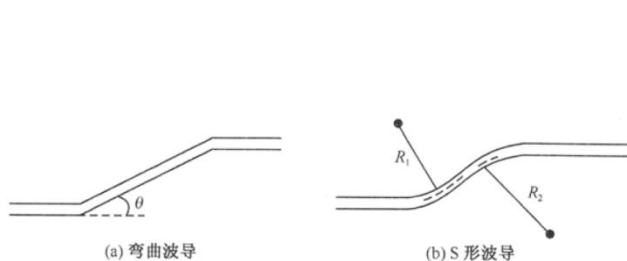
- 集成光学系统相对于前两代光学系统具有独特的性质，在材料选择、设计、制造以及特性等方面具有重要的优势：
 - ① 稳定的准直性 所有的光学器件被集成在单个衬底上
 - ② 导波模式容易控制 单模波导
 - ③ 低压控制 电光效应器件 ($E=uld$)，所需电压仅为几个伏特
 - ④ 更快的作用 电极尺寸小、低电容，开关速度快、调制带宽大
 - ⑤ 高的光能量密度 高性能非线性效应器件
 - ⑥ 紧凑、重量轻 单个衬底、几个毫米平方的面积
 - ⑦ 低成本 集成技术的发展使得大量制造成为可能



8.1 集成光学的概念



❖ 集成电路（正方、多层）与集成光路（狭长、单层）几何结构之间的比较



❖ 传统光波导（基于全内反射原理）的拐角及其分支



8.2 集成光子器件

- 基本集成光子器件（10种）
- 集成光子器件的分类（4类）
- 集成光子器件举例



基本集成光子器件

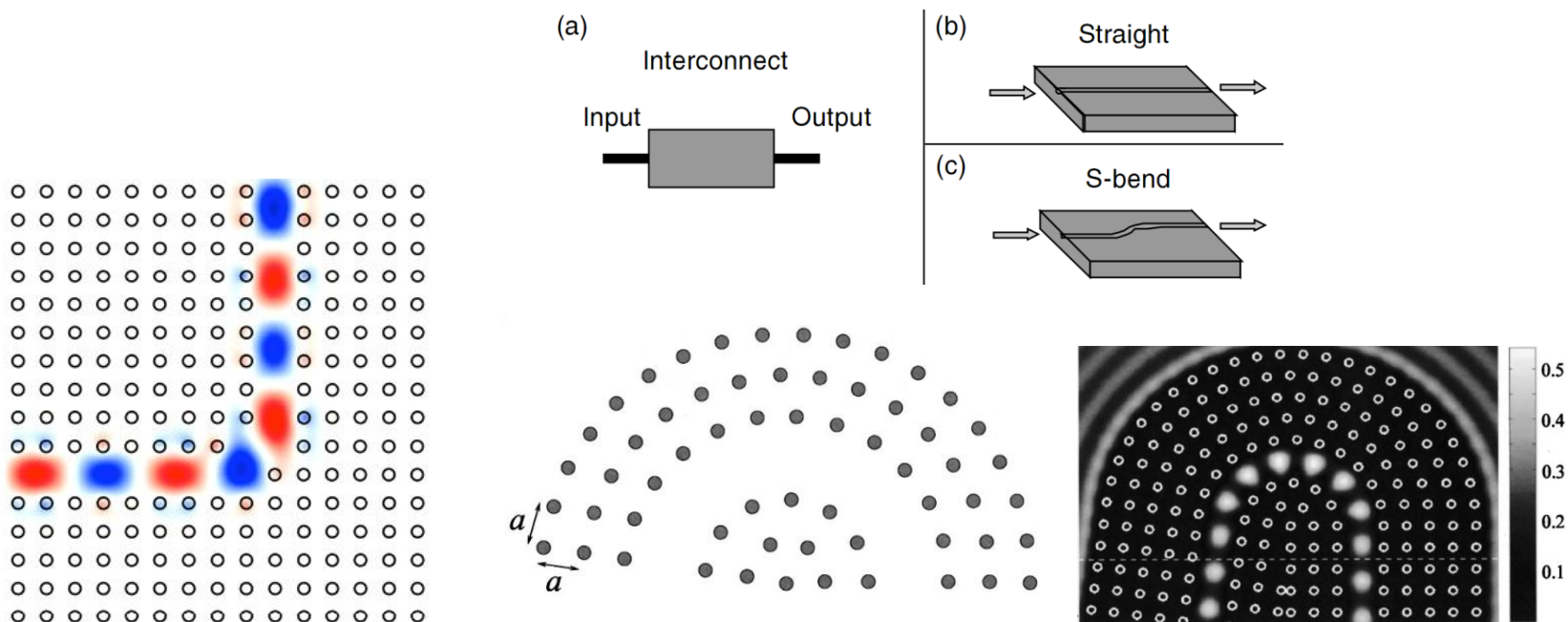
- 集成光子学中的所有器件都由三种基本元件构成：**直波导，拐角波导以及功率分配器**【电子学：电阻、电容、电感等基本元件；传统光学：反射镜、透镜、棱镜等】。
- 从本质上来说，集成光学中的基本元件与传统光学中基本元件功能相同，作用**原理完全不同**【传统光学中的作用原理基于将光行为看做**平面波或者光线**；在集成光学中，光束尺寸在光波波长量级，即微米量级，必须将光视为满足麦克斯韦方程组的**电磁波**来处理】。
- 使用这些基本元件，可以构建一些**基本器件**，来实现一些基本光学功能。
- 在电子学中，一个功能的实现可以有多种设计方案，最为典型的是电路设计；在集成光学当中，一个光学功能的实现可以有多种完全不同的设计方案，这也是集成光学的重要特征之一。



基本集成光子器件①—波导及波导拐角

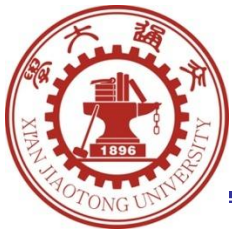
互联：在光学上，将光子芯片上的两个点连接起来。

- 直通道波导——最简单的导光结构，连接光学芯片上排成一行的不同元件。
- 拐角波导（偏移波导）——连接与晶片光轴不在同一条直线上的器件。



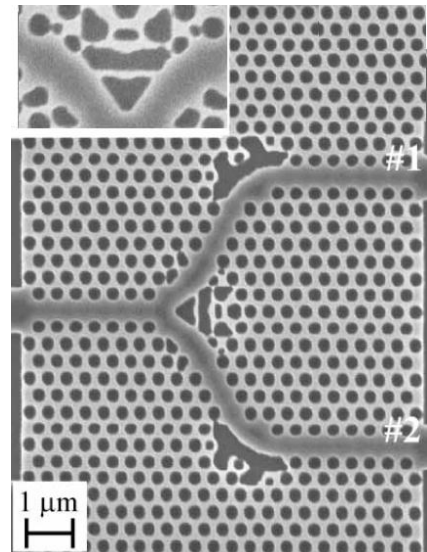
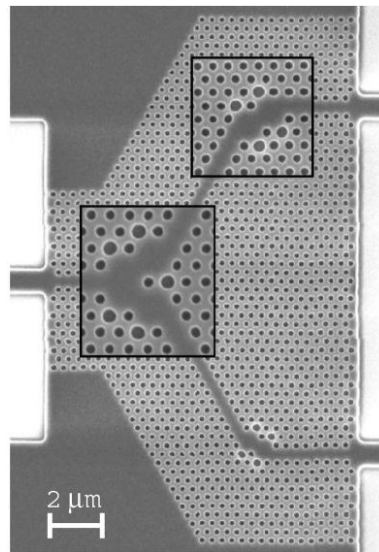
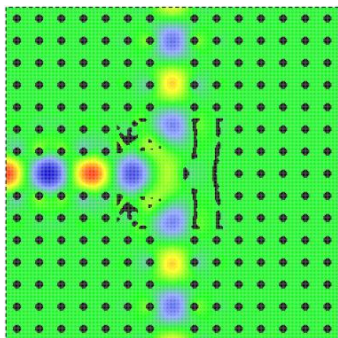
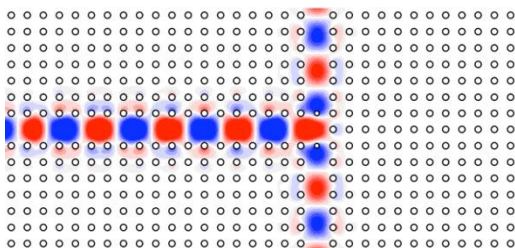
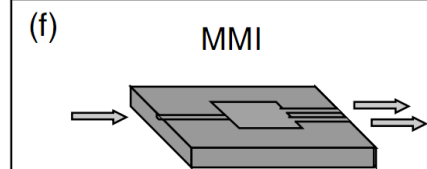
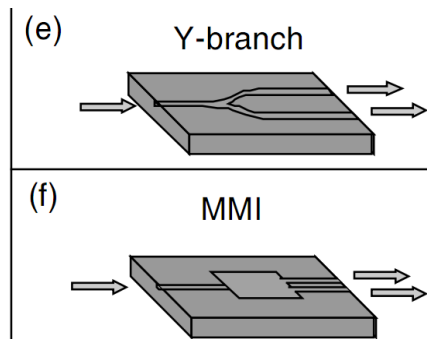
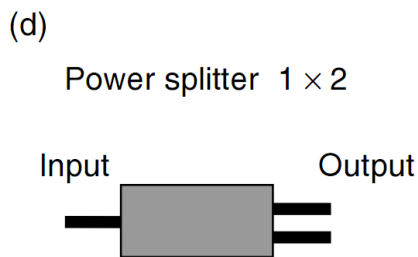
光子晶体波导拐角

任意角度波导拐角



基本集成光子器件②—功率分配器

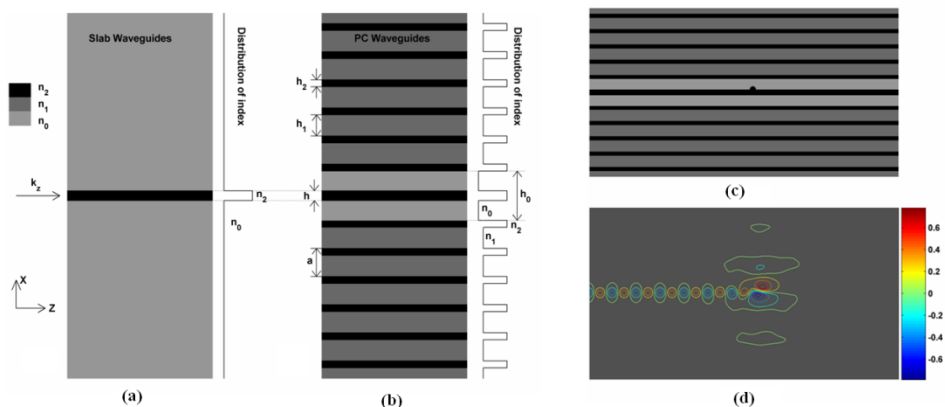
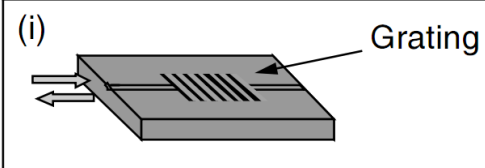
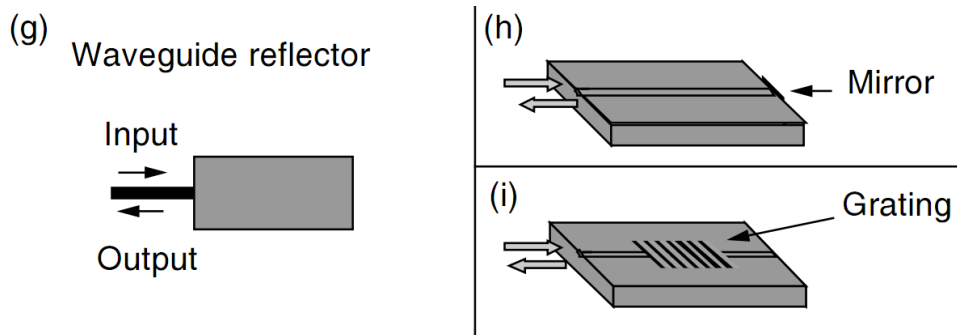
► **功率分配器**：通常是一种对称性器件，将来自于一个直波导的能量等分到两个输出波导中。



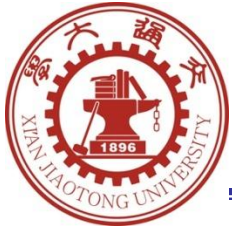


基本集成光子器件③—波导反射器

➤ **波导反射器**：波导反射器用于将光反射回直波导中。

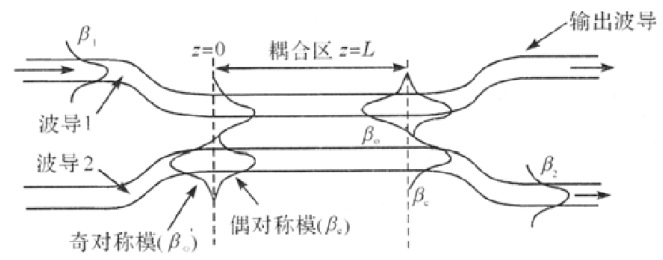
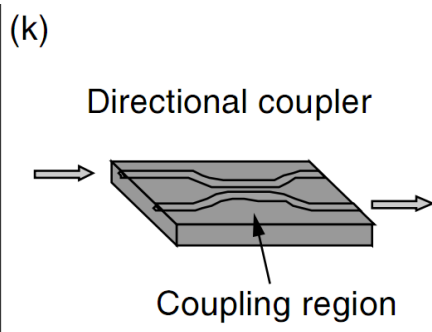
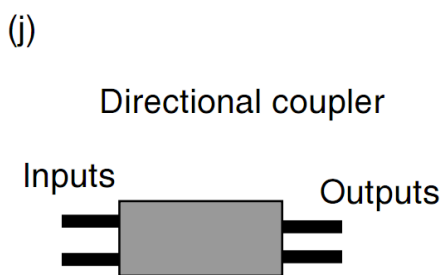
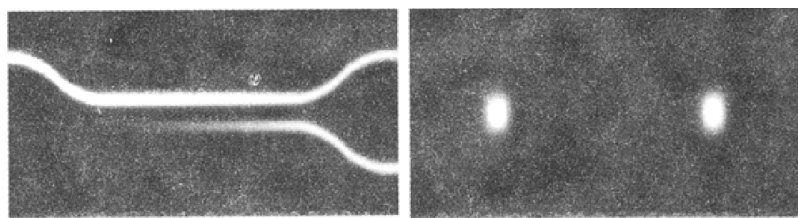


- ❖ 平板波导 (a) 和混合型一维光子晶体波导 (b) 结构示意图；
- ❖ 基于混合型一维光子晶体波导中半圆柱型缺陷结构的波导反射器结构 (a) 及其场分布 (b)



基本集成光子器件④—定向耦合器

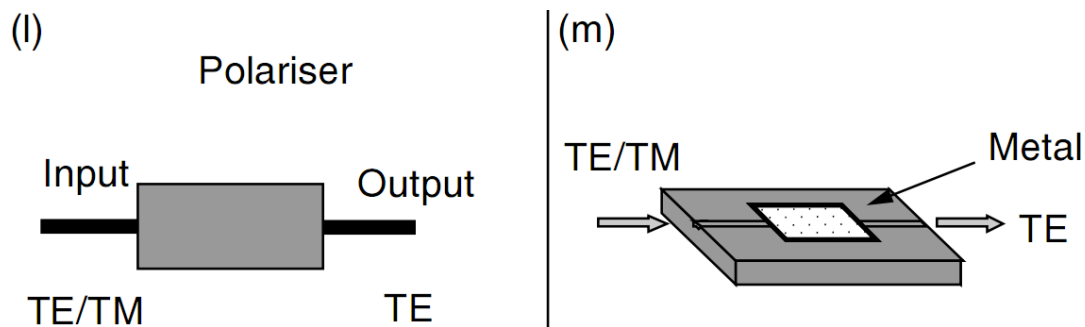
- **定向耦合器** 这种器件具有两个输入端口和两个输出端口，由两个空间上靠近的波导组成。
- 定向耦合器工作原理：在两个接近的波导之间，由于导波模式中隐失波重叠，发生周期性光能量交换。
- 通过设计参数【波导间距以及耦合长度】，两个输出波导端口之间能量比例可以设置在0-1之间。





基本集成光子器件⑤—极化器

- ▶ **极化器:** TE或者TM光，过滤掉其中的一个。
- ▶ **方法1:** 在波导上沉积一个金属薄膜，即可得到一个波导极化器。
- ▶ **方法2:** 设计仅支持一种极化模式的波导【例如，光子晶体波导，表面等离子体波导，布拉格反射光波导等新型光波导，多为只支持一种极化模式】。





基本集成光子器件⑥—极化分束器

- 极化分束器：在两个分离的波导输出端口将入射光分离成两个相互正交的极化，TE和TM.
- 这种极化选择性基于铌酸锂的双折射现象.

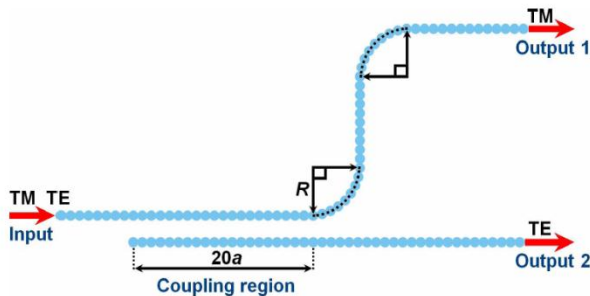
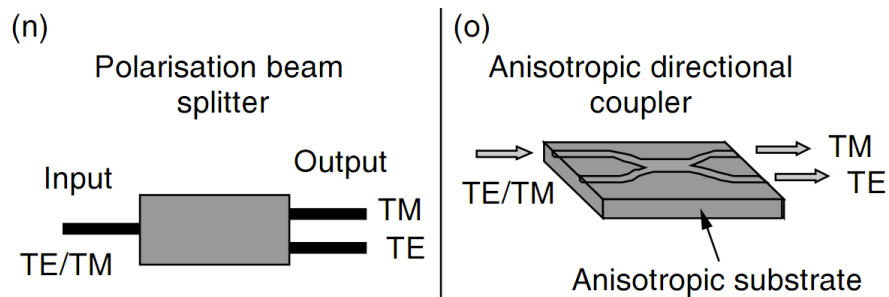
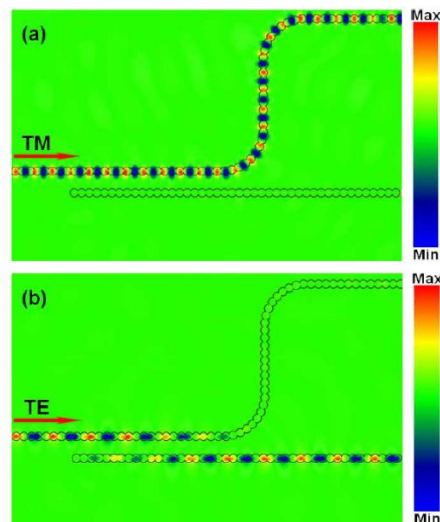


Fig. 9. Scheme of the polarization splitter in PDWGs.

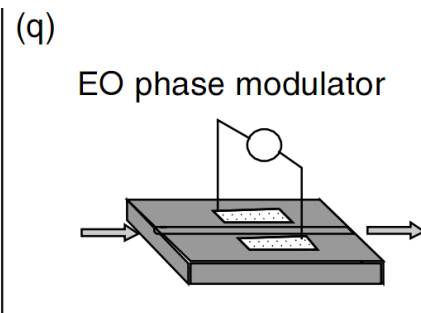
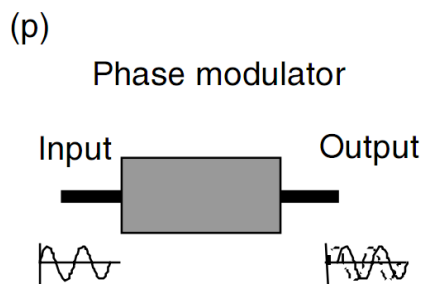


基于周期性介质波导的极化分束器



基本集成光子器件⑦—相位调制器

- **相位调制器**：用于调整一个光束的相位（图p），由通道波导组成，该通道波导制造在一个利用外场（热、声、电等）可以改变衬底折射率。
- 最为普通的相位调制器的是基于电光效应：将电场应用到电光材料中，如铌酸锂，诱导了其折射率的变化。
- 如果电场被应用于整个的通道波导，那么折射率的改变会引起传输模式**传输常数**的一个变化，因此通过这个区域传输的光会受到一个确定的相位移（图q）。

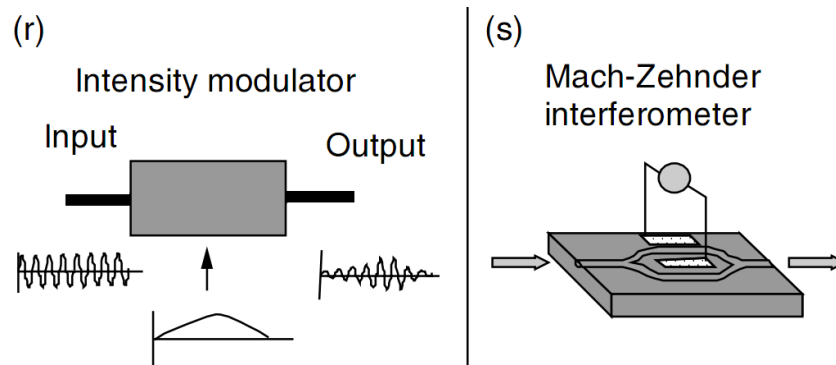




基本集成光子器件⑧—强度调制器

强度调制器：光学芯片最重要的功能之一是非常高频率的光强度调制（图r）。

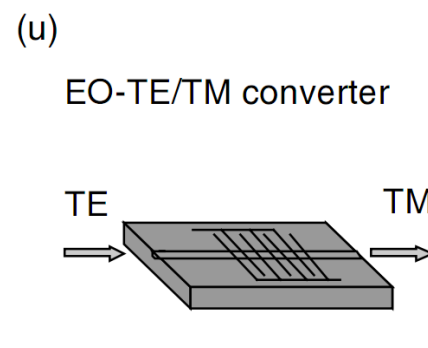
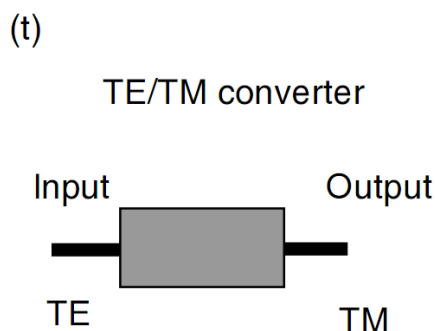
最简单的一种方法是在一个电光衬底上构建集成马赫曾德尔干涉仪（MZI）（图s）。





基本集成光子器件⑨—TE/TM模式转换器

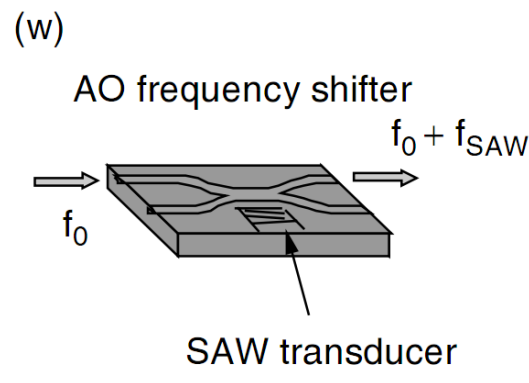
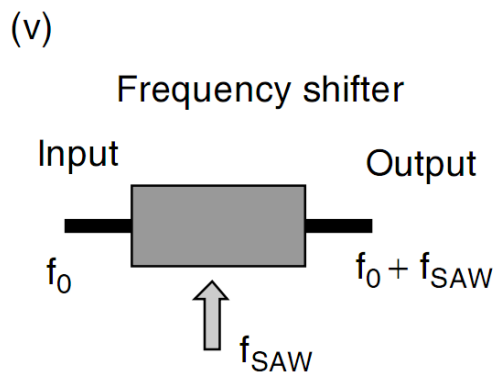
- **TE/TM 模式转换器**: 在正常情况下, TE和TM模式是正交的, 二者之间不存在能量的转换. 然而, TE到TM转换 (图t) 能够实现, 通过使用电光系数矩阵中必须有非零的非对角线量的电光衬底材料.
- 如果铌酸锂用作衬底, 需要**周期性电极**, 因为这种晶体是双折射的, 因此, TE和TM模式具有不同的有效折射率 (传输速度) (图u).

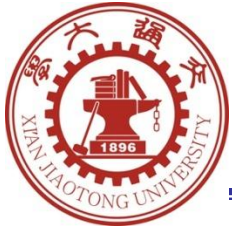




基本集成光子器件⑩—频移器

- **频移器**: 集成光学中的频移器（图v）可以利用声光效应来实现。
- 压电换能器所产生的**声表面波（SAW）**在声电衬底上产生了布拉格光栅，该光栅与在特殊设计区域中的传输光相作用，导致了多普勒效应产生频移的衍射光（图w）。
- 该频移对应于声波的频率。





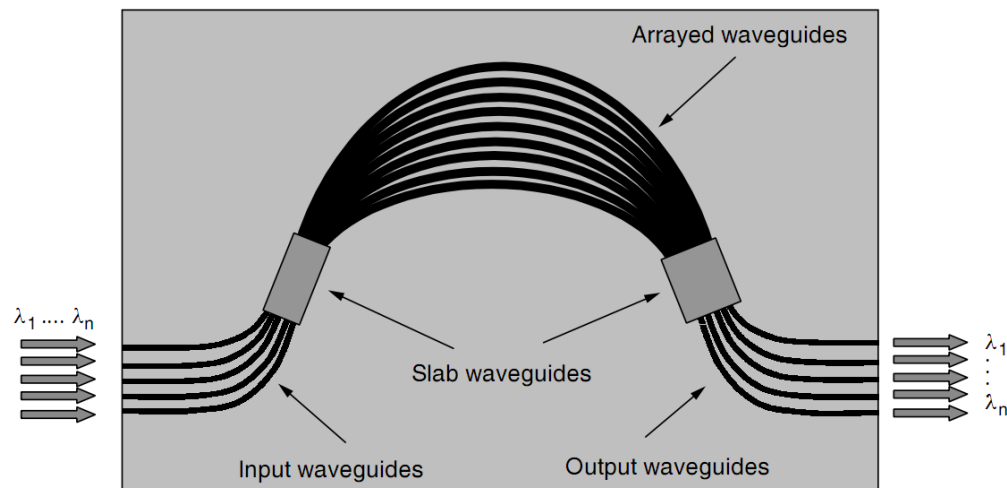
集成光子器件的类型

- 光学芯片中的光学元件根据其功能可以分为：**无源、功能、有源和非线性器件**.
- **无源器件**：具有固定的输入/输出特性，这些特性在器件制造时就已确定，其作用不需要外部信号。
典型器件：功率分配器、波导反射器、定向耦合器、极化器、极化分束器。
- **功能器件**：是由外场（如电、声、热）驱动的光子器件。
典型器件：相移调制器、强度调制器。
- **有源器件**：具有光学放大以及激光振荡特性的光子器件。
典型器件：集成光学放大器、集成激光器。
- **非线性器件**：利用非线性效应实现倍频或者光学参数振荡的光学器件，光学芯片的功能是通过非线性光学过程产生新的频率【由于非线性过程的效率正比于光强，因为波导传输束小的横向面积，因此这些集成光子器件产生了一个非常好的性能】。



集成光子器件举例1

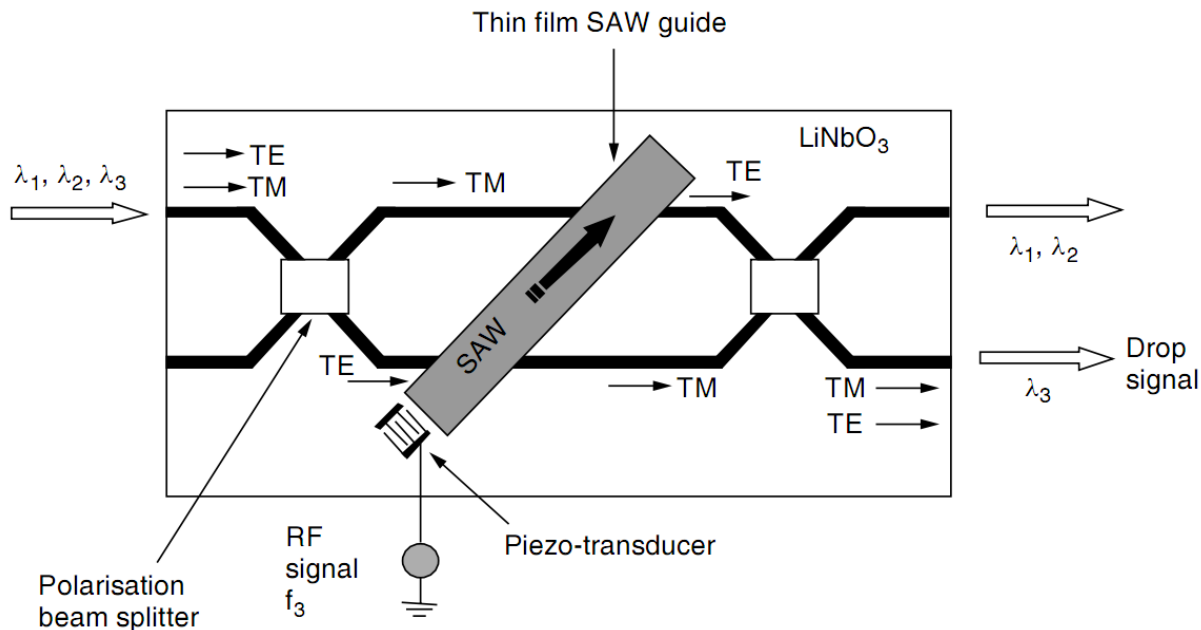
❖ 阵列波导光栅 (AWG), 或者波导光栅波长路由器-WGR



- 结构: N条输入波导, N条输出波导, 两个聚焦平板波导 (自由传输区, 又称输入/输出耦合器), 波导阵列
- 功能: 在光通信系统中, 复用或者解复用波长
- 原理: 来自于光纤的几个波长通过任意一个输入波导进入到输入耦合器, 在输入耦合器中将光分开, 经过不同长度的弯曲波导产生了不同的相移, 在输出耦合器中通过干涉将不同波长的光聚焦在输出圆弧的不同空间位置.



集成光子器件举例2

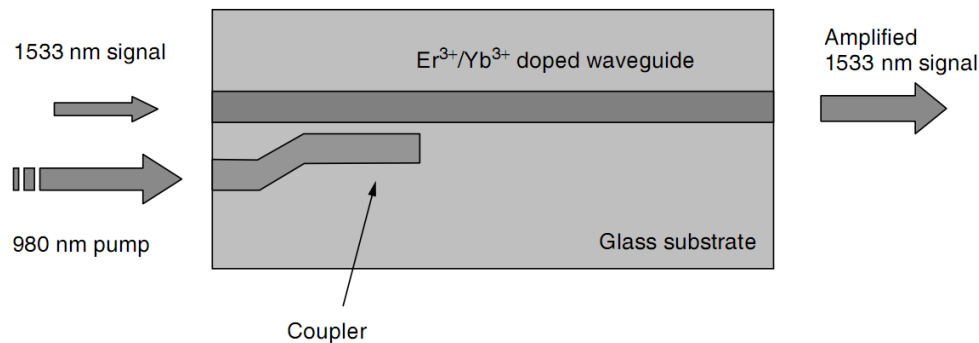


❖ 声光可调滤波器 (AOTF)

- 极化分束器: TE交叉态, TM直通态输出
- TE/TM模式转换器仅对 λ_3 起作用

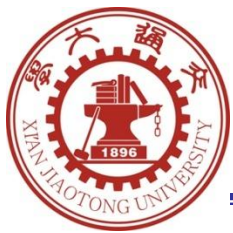


集成光子器件举例3



❖ 基于稀土(铒和镱离子)的集成光学放大器

- 结构: 由掺杂稀土离子的直波导, 一个未掺杂波导和一个定向耦合器组成.
- 980nm的输入泵浦入射到未掺杂波导中, 耦合器将泵浦能量转换到掺杂直波导中, 1533nm处的微弱输入信号被放大, 并沿着直波导传输.
- 如果将一对介质镜放置在波导两端口, 放大的信号能够震荡, 因此可以得到集成激光器.
- 波导端口的介质镜可以用集成光栅所取代, 用作一个实际的波长选择反射器.



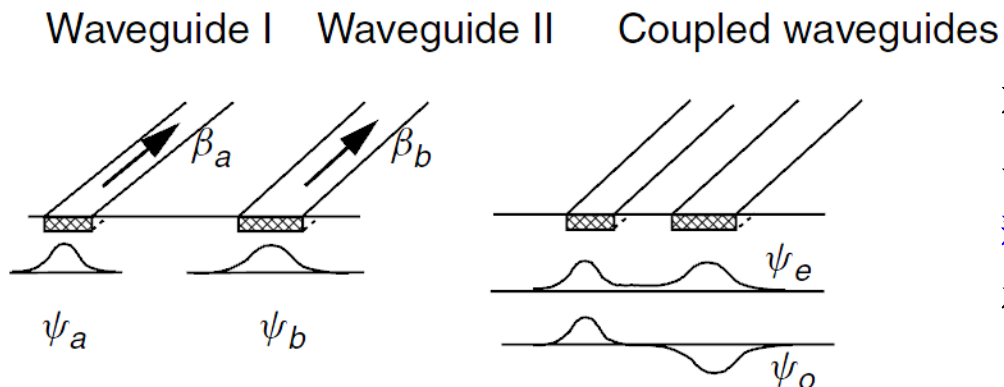
8.3 基于耦合模理论的光波导器件

- 耦合模理论
- 同向耦合
- 基于同向耦合的光子器件



耦合模理论

左图：两个独立波导结构（非耦合），模场 Ψ_a 和 Ψ_b ，传播常数 $\beta_a < \beta_b$



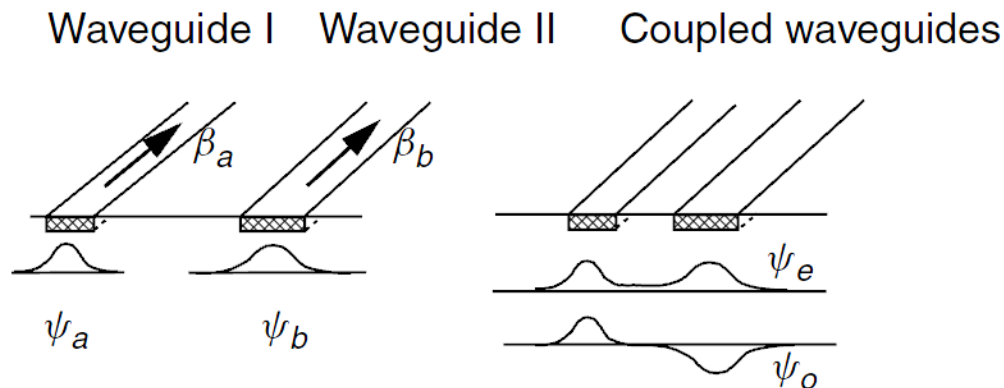
右图：当两个波导靠近时，相互耦合，模场为 Ψ_e 和 Ψ_o

扰动波导中的光传输模式

- 精确解（数值方法）：可以通过解适当边界条件的麦克斯韦方程组来计算新结构的模式。
- 近似解：利用模式耦合理论，将扰动光场表示为未扰动波导模式的和；简单直接，允许定量分析问题中所涉及的基本性质和现象，所给出的解通常是非常精确的。



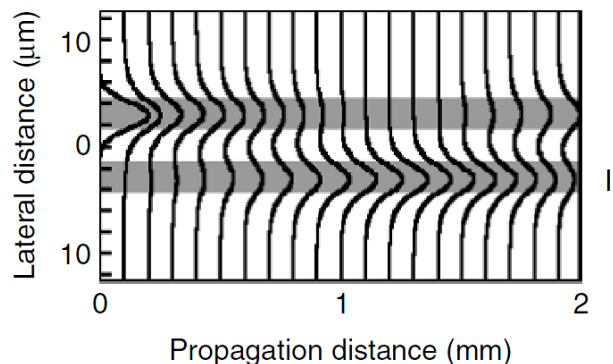
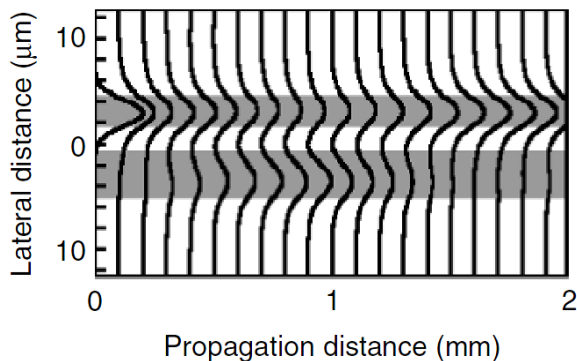
耦合模理论



- ▶ **模式耦合** 当两个波导彼此靠近的时候， Ψ_a 和 Ψ_b 不再是新结构的模式，模式 Ψ_e 和 Ψ_o 出现，这两个模式沿着耦合波导系统传输 $\beta_o < \beta_a < \beta_b < \beta_e$ ，这两个模式可以被分别激励，独立传输。也可以同时激发，由于传输常数不同，导致了节拍现象：似乎光的能量在两个波导之间周期性转换，以此方式，能量明显的从模式 Ψ_a 向模式 Ψ_b 转换。
- ▶ **模式耦合理论的目的**是得到模式场 Ψ_e 和 Ψ_o ，传输常数 β_o, β_e ，节拍周期以及其它相关的参数，作为已知对应于扰动系统的模式的函数 Ψ_a 和 Ψ_b 。



耦合模理论



左图：两个耦合的（不同传输常数）单模波导系统：部分能量交换

右图：两个耦合的（相同传输常数）单模波导系统：全部能量交换

➤ 如果波导I、II之间发生耦合（足够近）

$$\begin{cases} \psi_a(x, y, z, t) = A(z)e^{-i\beta_a z} f_a(x, y)e^{i\omega t} \\ \psi_b(x, y, z, t) = B(z)e^{-i\beta_b z} f_b(x, y)e^{i\omega t} \end{cases} \begin{cases} \pm \frac{\partial A(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ab} B(z)e^{-i(\beta_b - \beta_a)z} \\ \pm \frac{\partial B(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ba} A(z)e^{+i(\beta_b - \beta_a)z} \end{cases}$$

➤ 两个模式之间的相位失配： $e^{\pm i(\beta_b - \beta_a)z}$

➤ 失配 2Δ （单位为 m^{-1} ）： $2\Delta \equiv \beta_b - \beta_a$ 表示模式 a 和模式 b 之间的同步程度。

➤ 当两个模式同步（ $\beta_b = \beta_a$ ），称为完全相位匹配条件。



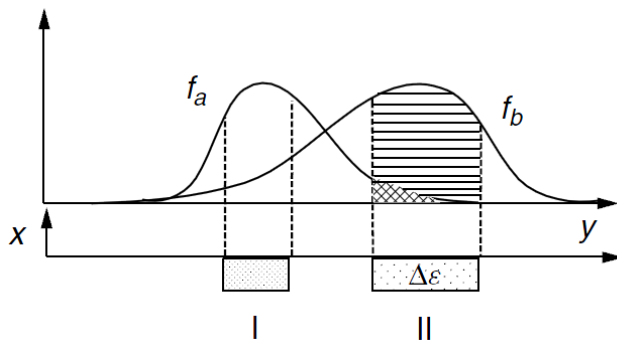
耦合模理论

➤ 如果波导I、II之间发生耦合（足够近）

$$\begin{cases} \psi_a(x, y, z, t) = A(z)e^{-i\beta_a z} f_a(x, y)e^{i\omega t} \\ \psi_b(x, y, z, t) = B(z)e^{-i\beta_b z} f_b(x, y)e^{i\omega t} \end{cases} \begin{cases} \pm \frac{\partial A(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ab} B(z)e^{-i(\beta_b - \beta_a)z} \\ \pm \frac{\partial B(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ba} A(z)e^{+i(\beta_b - \beta_a)z} \end{cases}$$

➤ κ_{ab} (κ_{ba}) 是模式 a, b (b, a) 之间的耦合系数

$$\kappa_{ab} = C \int_{II} f_a^* \Delta\epsilon f_b dx dy \quad C \text{ 通过考虑函数 } \Psi_a \text{ 和 } \Psi_b \text{ 的归一化来决定}$$





同向耦合

- 假设两个共线导波模式沿着耦合波导系统相同方向 (+z) 传输, 且传输 $\beta_a > 0, \beta_b > 0$, $\kappa_{ab} = \kappa_{ba}^* = \kappa > 0$

$$\begin{cases} \pm \frac{\partial A(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ab} B(z) e^{-i(\beta_b - \beta_a)z} \\ \pm \frac{\partial B(z)}{\partial z} = -i\kappa_{ba} A(z) e^{+i(\beta_b - \beta_a)z} \end{cases}$$



$$\begin{cases} \frac{\partial A(z)}{\partial z} = -i\kappa B(z) e^{-i(\beta_b - \beta_a)z} \\ \frac{\partial B(z)}{\partial z} = -i\kappa A(z) e^{+i(\beta_b - \beta_a)z} \end{cases}$$

$$\gamma = \sqrt{(\kappa^2 + \Delta^2)}$$

$$\begin{cases} A(z) = A e^{-i\gamma z} e^{-i\Delta z} \\ B(z) = B e^{-i\gamma z} e^{+i\Delta z} \end{cases}$$



$$\begin{aligned} A(z) &= (A_e e^{-i\gamma z} + A_o e^{+i\gamma z}) e^{-i\Delta z} \\ B(z) &= \left(\frac{\kappa A_e}{\gamma - \Delta} e^{-i\gamma z} - \frac{\kappa A_o}{\gamma - \Delta} e^{+i\gamma z} \right) e^{+i\Delta z} \end{aligned}$$

$$\frac{B}{A} = \frac{\kappa}{\gamma - \Delta} \quad \frac{B_e}{A_e} = \frac{\kappa}{\gamma - \Delta} \quad \frac{B_o}{A_o} = -\frac{\kappa}{\gamma - \Delta}$$

$$\begin{aligned} \psi_a(x, y, z, t) &= A(z) e^{-i\beta_a z} f_a(x, y) e^{i\omega t} \\ \psi_b(x, y, z, t) &= B(z) e^{-i\beta_b z} f_b(x, y) e^{i\omega t} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \psi_a(x, y, z, t) &= (A_e e^{-i\beta_e z} + A_o e^{-i\beta_o z}) f_a(x, y) e^{i\omega t} \\ \psi_b(x, y, z, t) &= (B_e e^{-i\beta_e z} + B_o e^{-i\beta_o z}) f_b(x, y) e^{i\omega t} \end{aligned}$$



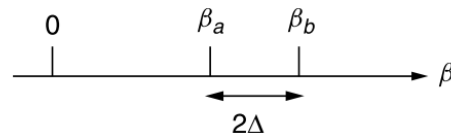
同向耦合

$$\psi_a(x, y, z, t) = (A_e e^{-i\beta_e z} + A_o e^{-i\beta_o z}) f_a(x, y) e^{i\omega t}$$

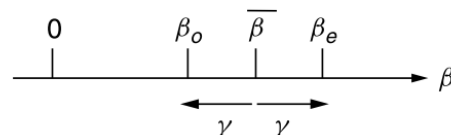
$$\psi_b(x, y, z, t) = (B_e e^{-i\beta_e z} + B_o e^{-i\beta_o z}) f_b(x, y) e^{i\omega t}$$

$$\beta_e = \frac{\beta_a + \beta_b}{2} + \gamma \quad \beta_o = \frac{\beta_a + \beta_b}{2} - \gamma \quad \gamma = \sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}$$

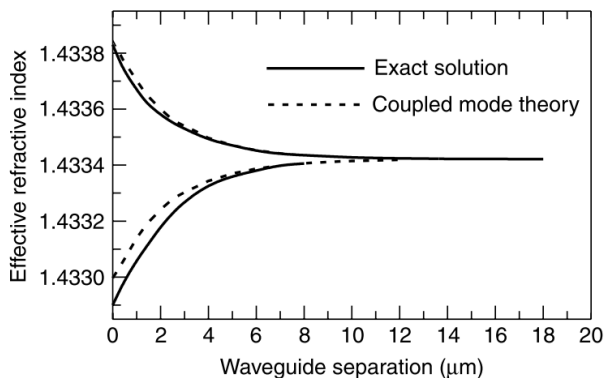
$$\beta_e > \beta_a, \beta_b, \beta_o < \beta_a, \beta_b$$



Independent waveguides



Coupled waveguides

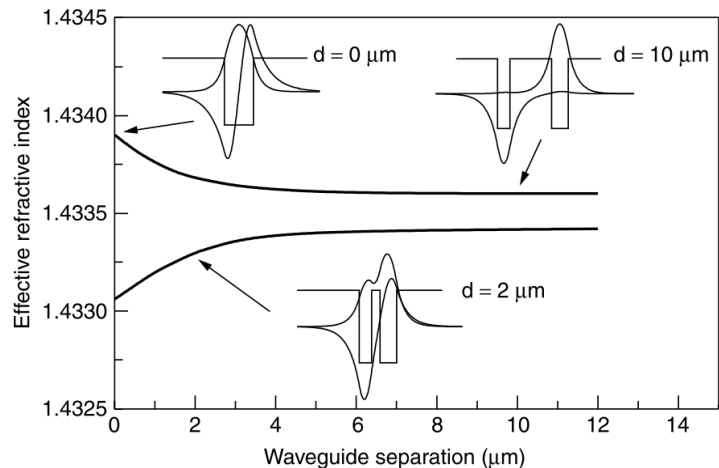


CMT提供的模式有效折射率 ($\beta = k_0 n_{\text{eff}}$) 与精确解, 作为波导间距的函数。波导参数: 相同的阶跃折射率对称波导

$$d = 3 \mu\text{m}; n_c = 1.43280; n_f = 1.43423; \lambda = 0.663 \mu\text{m}$$



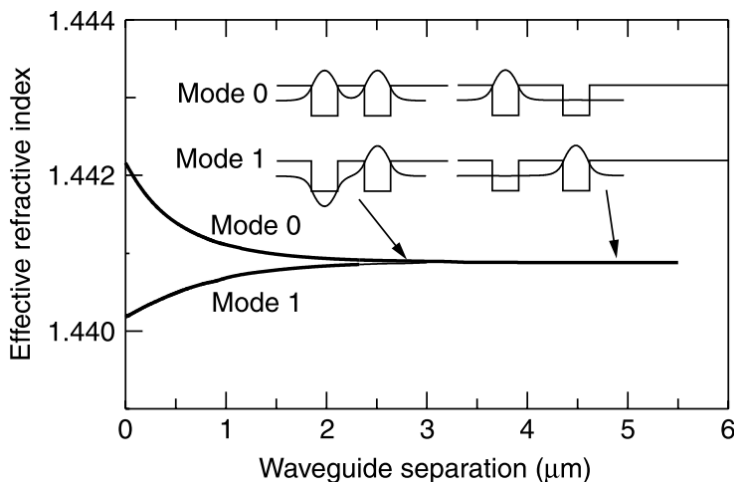
同向耦合



✓ 随着分离距离的减小，两个单模波导传输常数和模式场分布的演变。

波导参数：阶跃折射率对称波导；

$$d_1 = 3 \mu\text{m}; d_2 = 4 \mu\text{m}; n_c = 1.43280;$$
$$n_f = 1.43423; \lambda = 0.663 \mu\text{m}$$



✓ 两个相同波导传输常数和模式场分布作为其分离距离的函数。

波导参数：阶跃折射率对称波导；

$$d = 3 \mu\text{m}; n_c = 1.43280; n_f = 1.43423;$$
$$\lambda = 0.663 \mu\text{m}$$



同向耦合

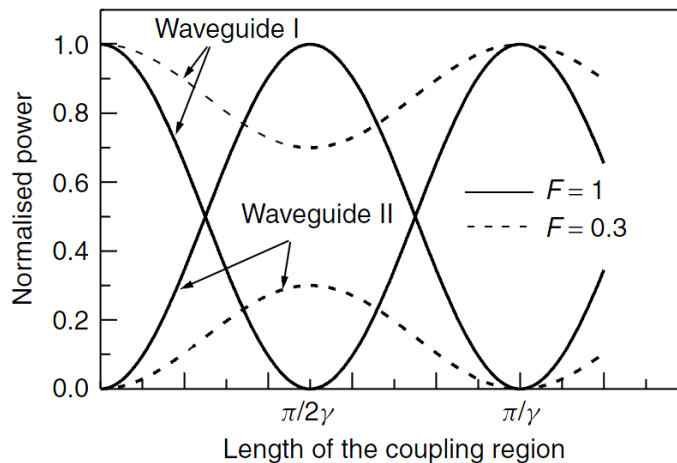
➤ 在 $z=0$ 处, 选择波导I为输入: $A(0)=1, B(0)=0$, 则

$$\begin{cases} A(z) = e^{-i\Delta z} \left(\cos \gamma z + i \frac{\Delta}{\gamma} \sin \gamma z \right) \\ B(z) = -e^{+i\Delta z} \frac{i\kappa}{\gamma} \sin \gamma z \end{cases}$$

➤ f_a, f_b 是归一化函数, 沿着波导I和II光强分别被描述为 $|A(z)|^2, |B(z)|^2$

$$\frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} = 1 - F \sin^2 \gamma z \quad \frac{|B(z)|^2}{|A(0)|^2} = F \sin^2 \gamma z$$

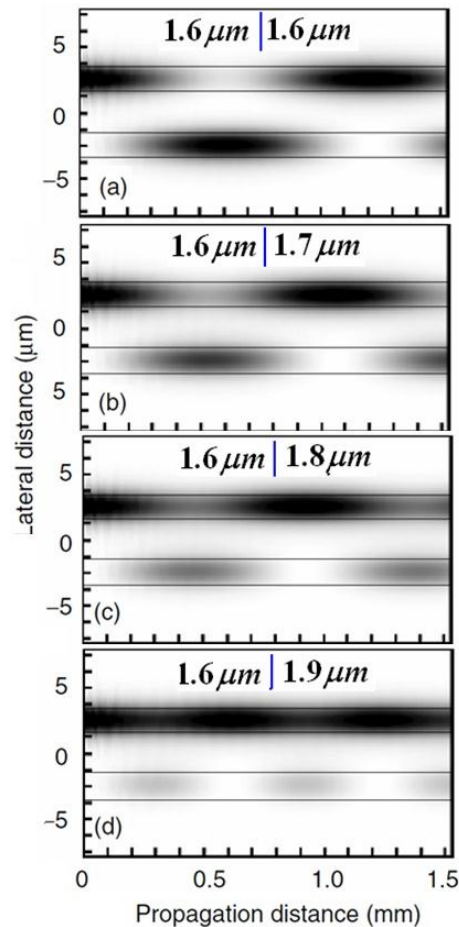
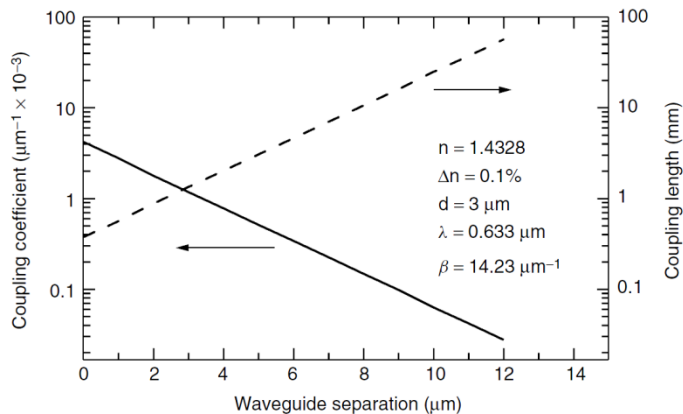
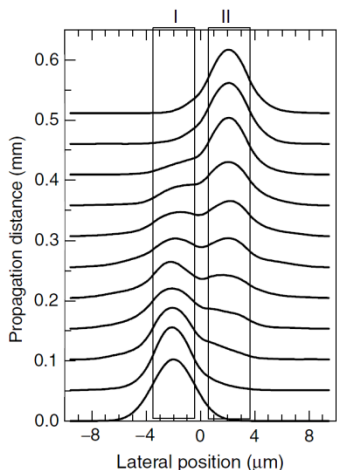
$$F \equiv \left(\frac{\kappa}{\gamma} \right)^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\Delta}{\kappa} \right)^2} \quad \left(\begin{array}{l} 2\Delta \equiv \beta_b - \beta_a \\ \gamma = \sqrt{\kappa^2 + \Delta^2} \end{array} \right)$$



✓ 沿着 z 方向传输的两个波的能量周期性变化

✓ 最大功率转换所对应的最小传输距离 L 称为耦合长度: $L = \frac{\pi}{2\gamma}$

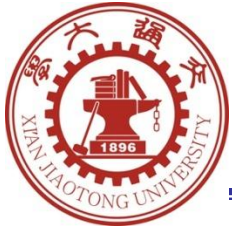
✓ 如果两个模式同步, $L = \frac{\pi}{2\kappa}$



❖ $\Delta = 0$, 全部能量转换

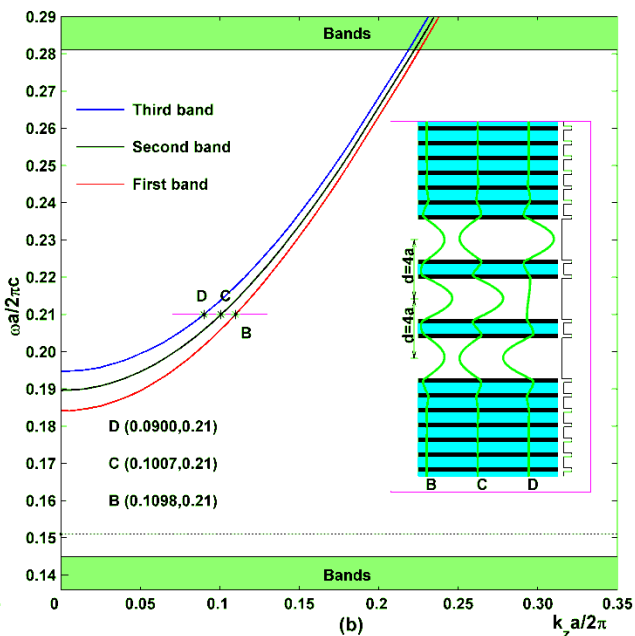
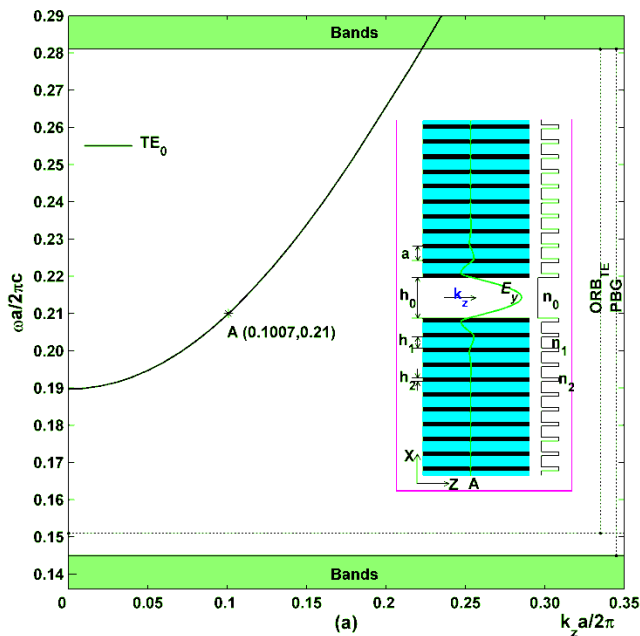
❖ $\Delta = 0$, 耦合系数 κ (实线) 作为波导间距的函数, 虚线表示耦合长度 L

- ✓ 两模式同步 ($\beta_b = \beta_a$), 耦合系数仅仅影响到耦合长度, 总能够得到100%的功率交换.
- ✓ 两模式不同步 ($\beta_b \neq \beta_a$), 不可能得到100%的转换, 转换的程度决定于耦合系数 κ 和同步程度 Δ .
- ✓ 失配增加, 能量转换较小, 耦合长度减小.

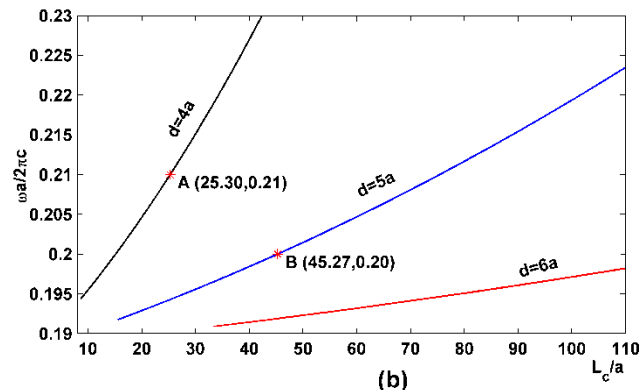
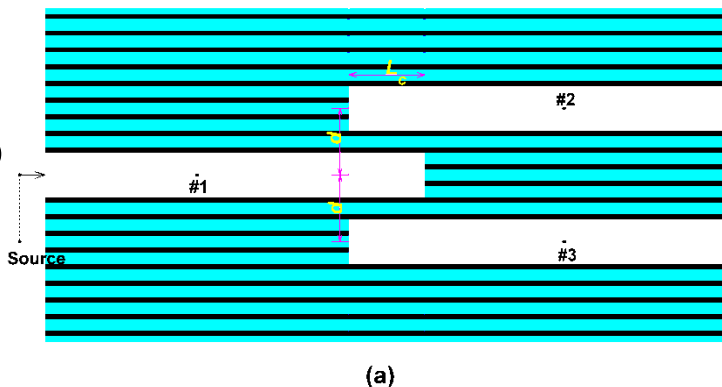


同向耦合举例1

❖ 单通道波导（左图）
与三通道波导（右图）
的色散曲线



❖ 平行三波导方向耦合器结构示意图（左图）
及其不同间距 d 情况
下的耦合长度 L_c

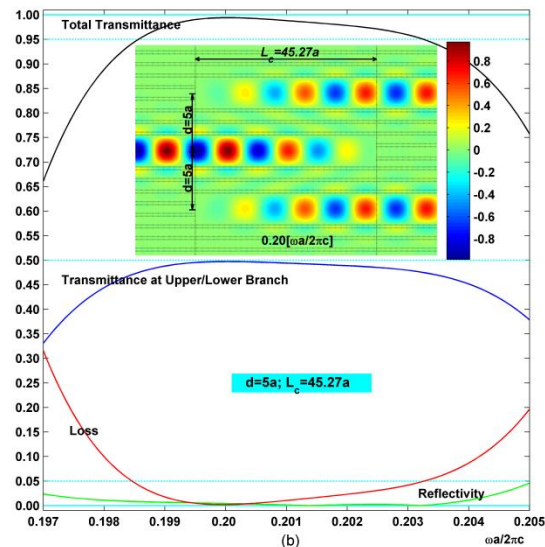
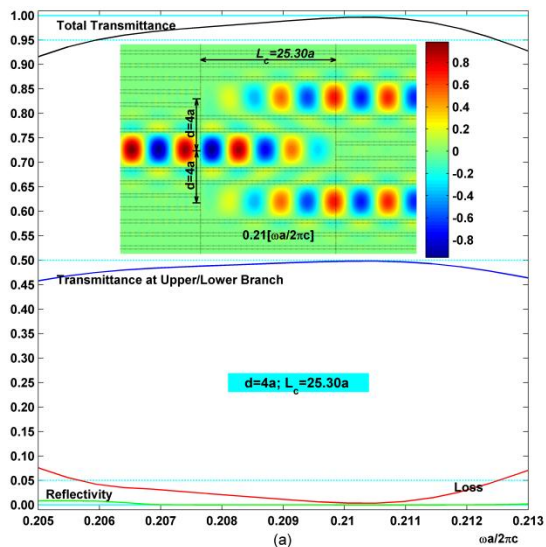




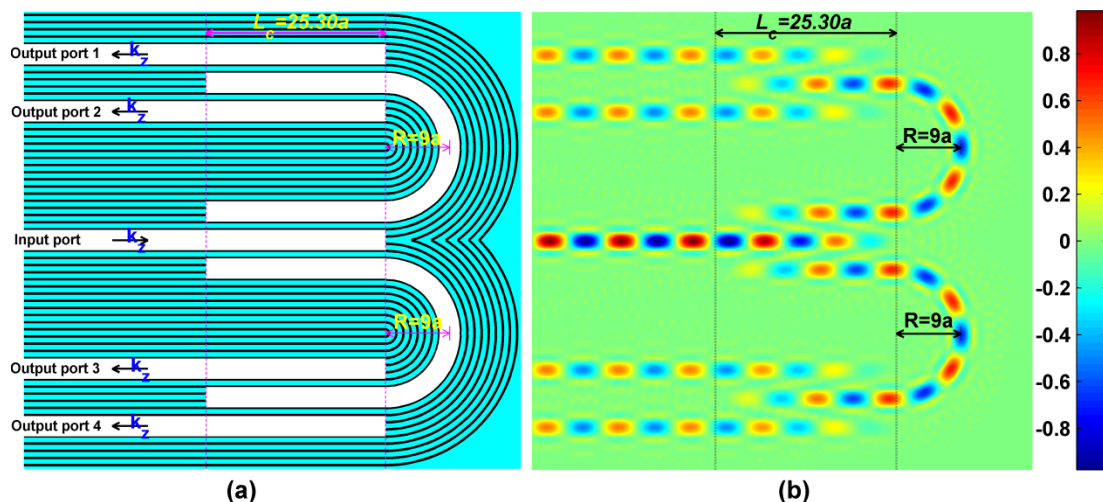
同向耦合举例1

➤ **定向耦合**：当两个孤立的波导相互靠近时候所出现的能量在两个波导之间的周期性交换现象。

❖ **1×2功分器传输特性**
(两组不同结构参数情况下)



❖ **1×4功分器结构示意图及其稳态场分布**

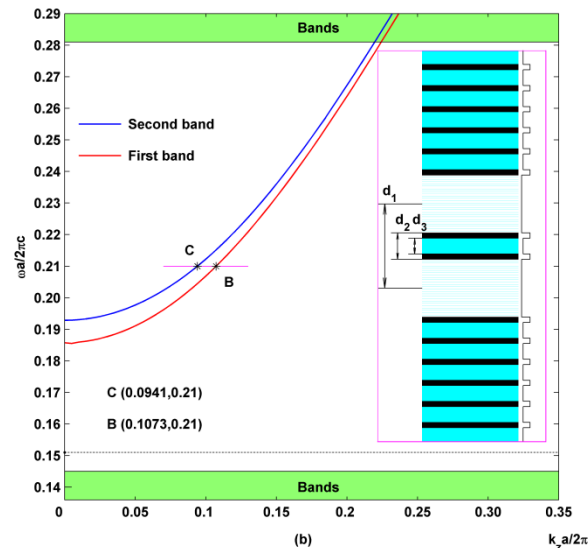
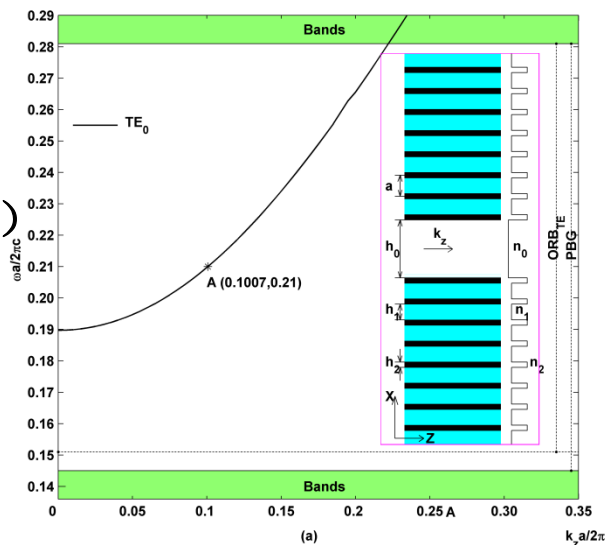




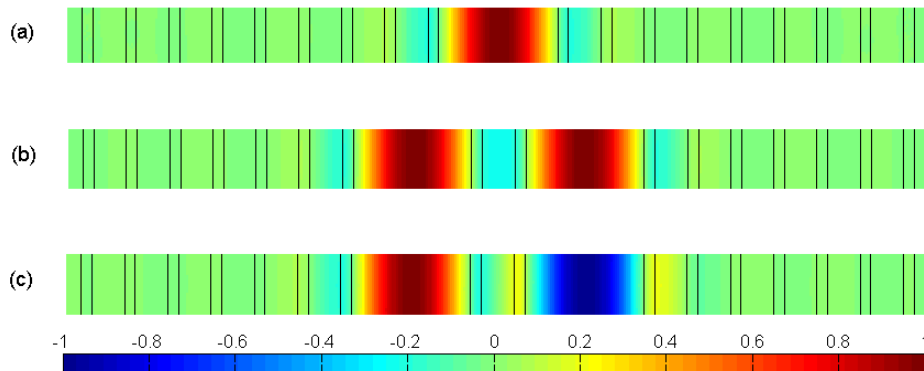
同向耦合举例2

➤ 问题：基于同向耦合原理，能否实现不同波长光波的分离（波分器）？

❖ 单通道波导（左图）与双通道波导（右图）的色散曲线

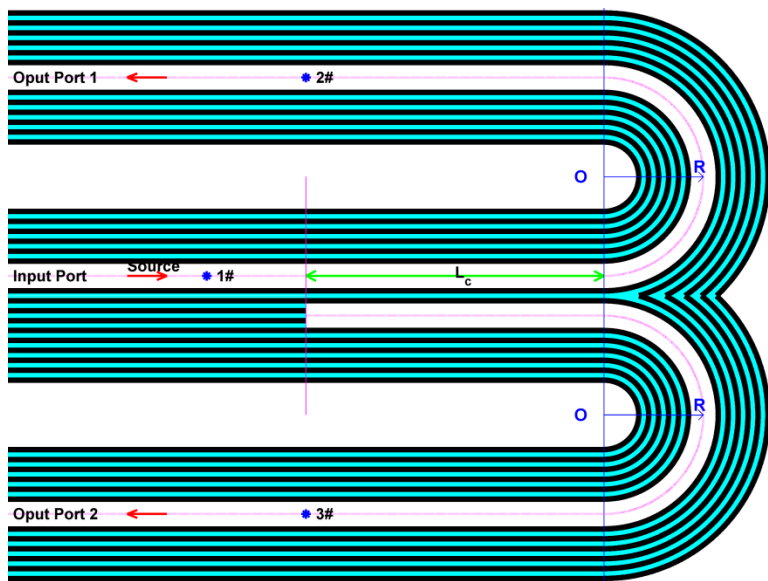


❖ 上图中A, B和C点处的场分布

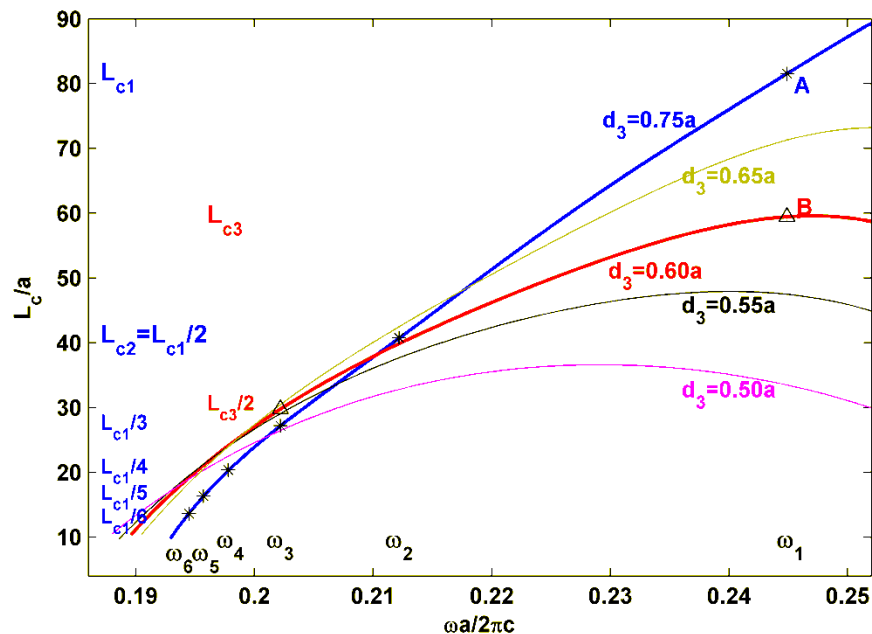




同向耦合举例2



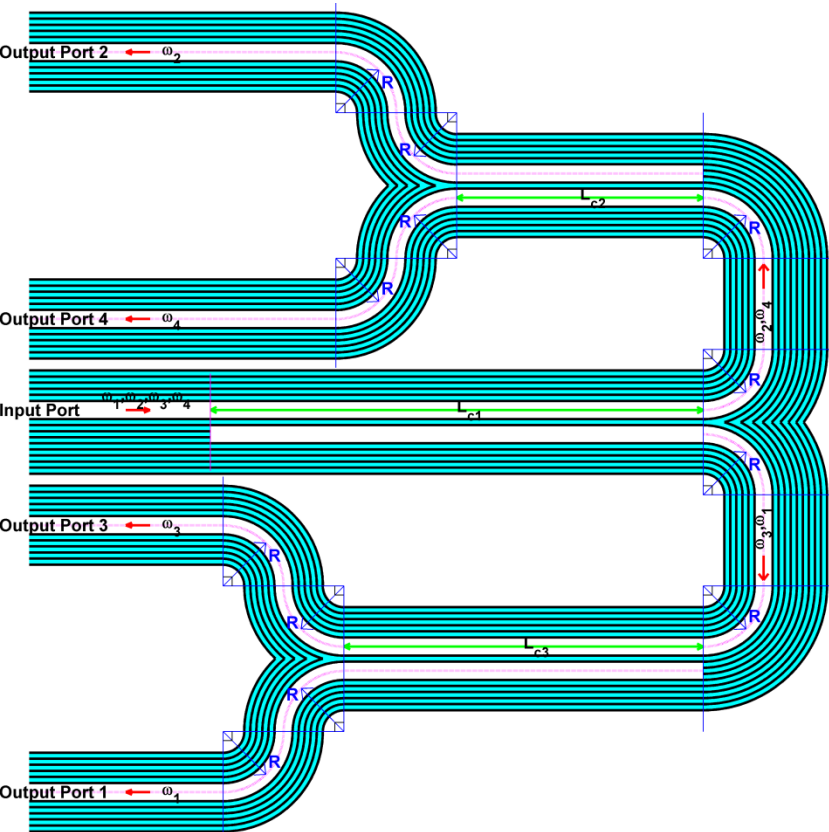
❖ 1×2波分器结构示意图



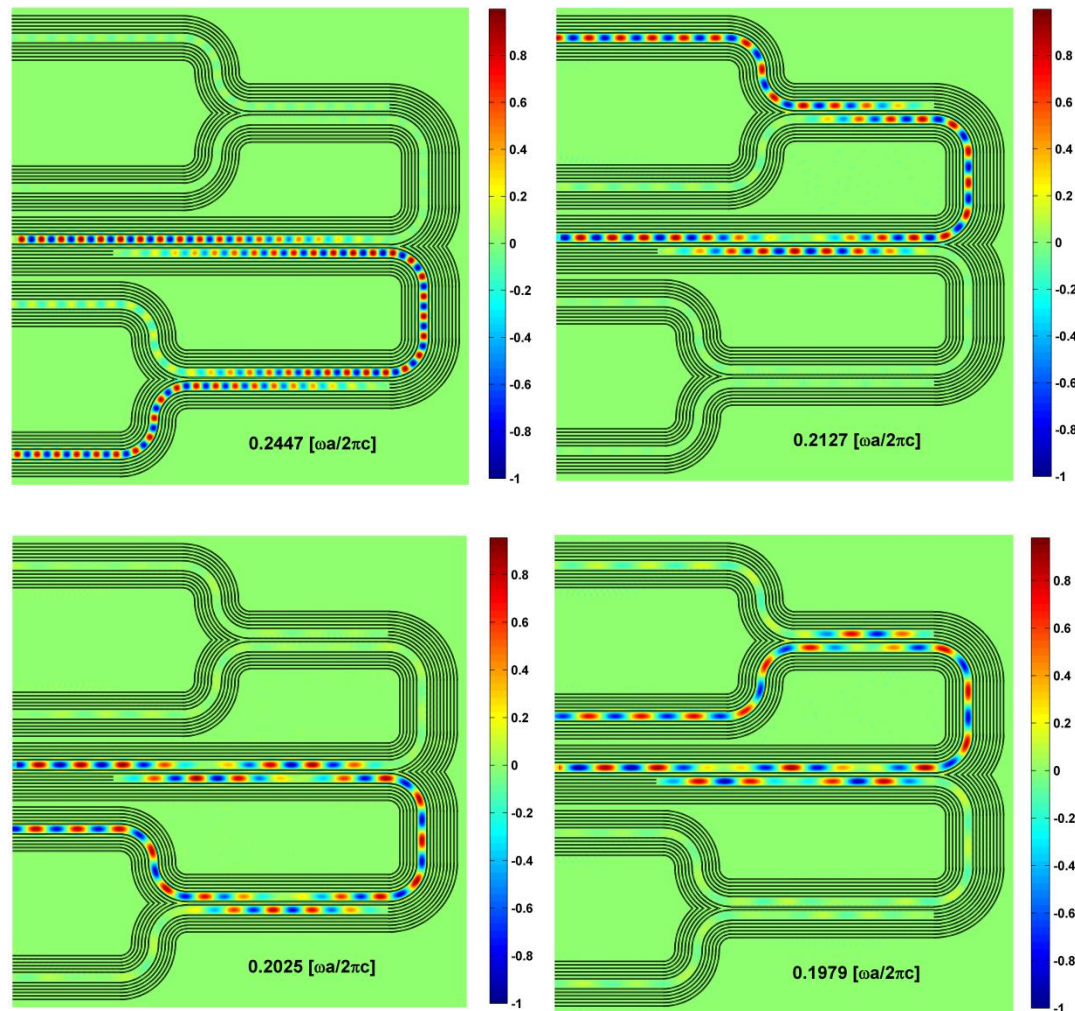
❖ 不同 d_3 对应的归一化耦合长度 L_c/a 曲线



同向耦合举例2

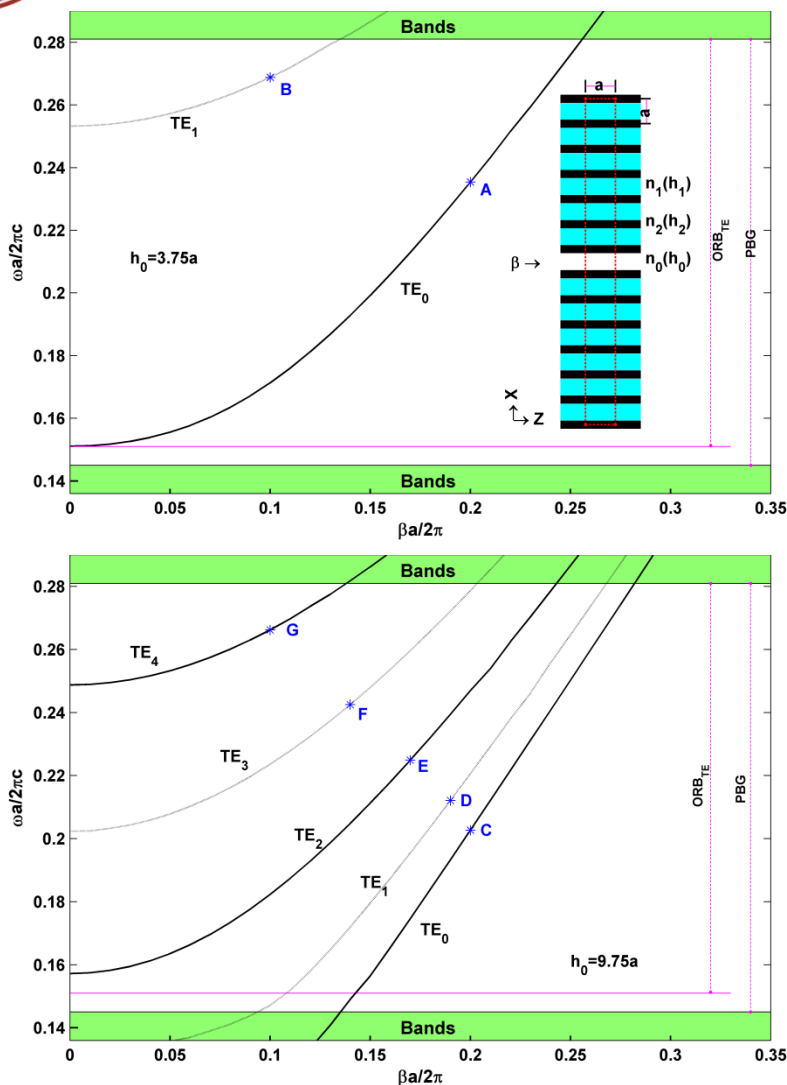


❖ 1×4波分器结构示意图及其稳态场分布

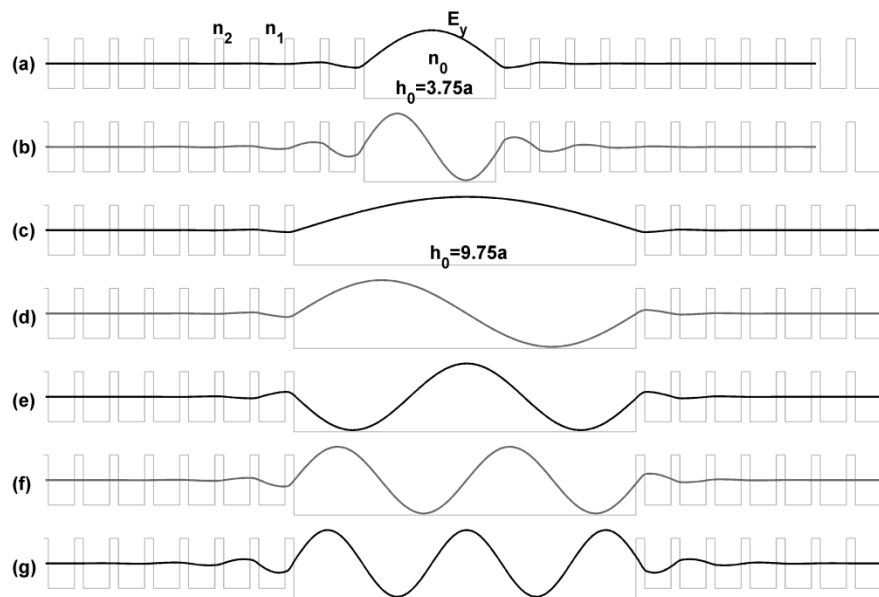




8.4 基于多模干涉的光波导器件

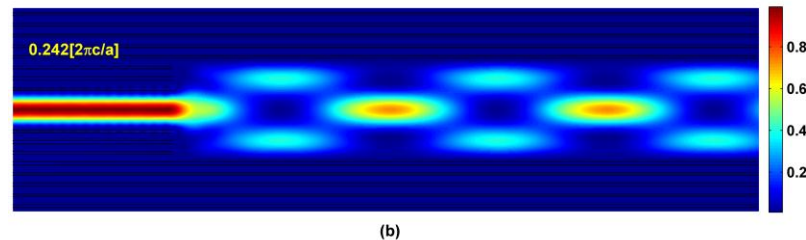
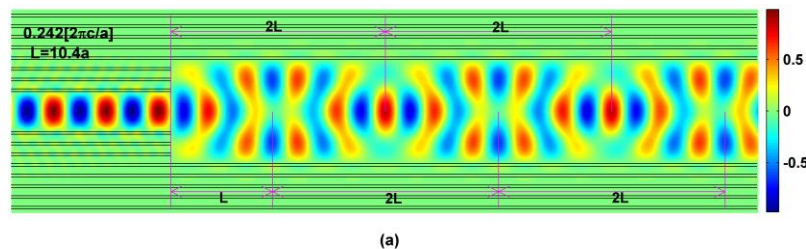
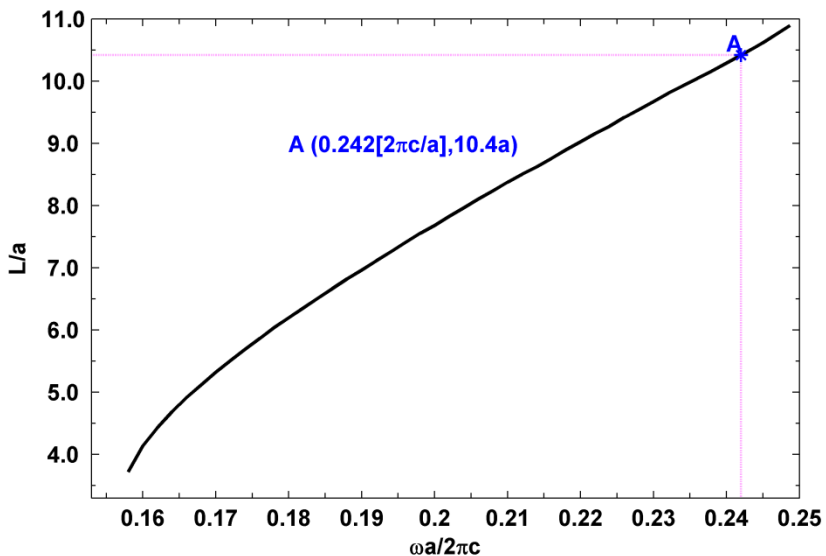
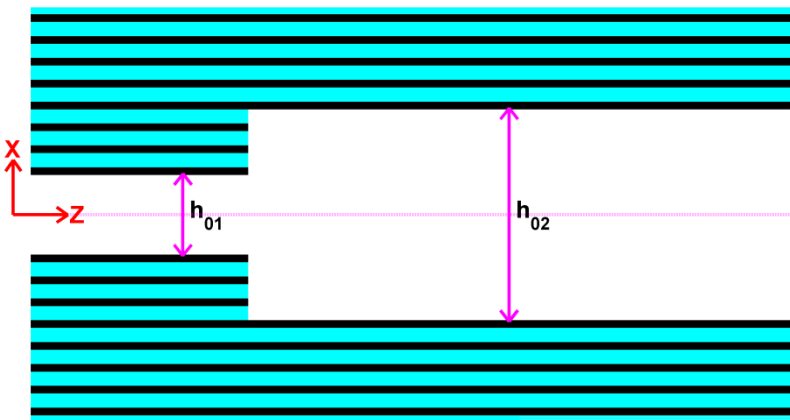


Self-imaging is a property of multi-mode waveguides by which an input field profile is reproduced in single or multiple images at periodic intervals along the propagation direction of the guide.



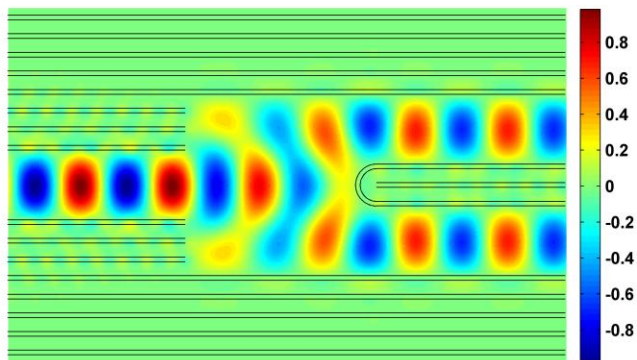


多模干涉（自成像）

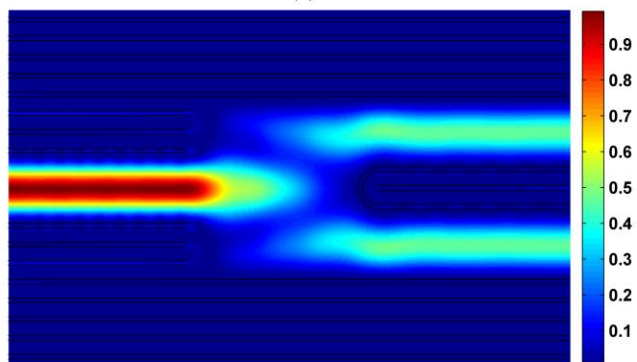




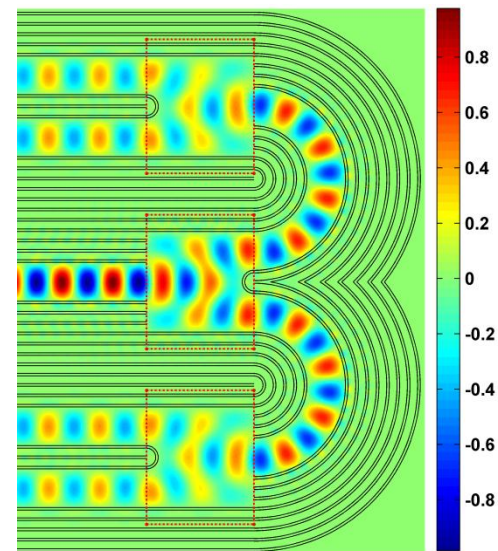
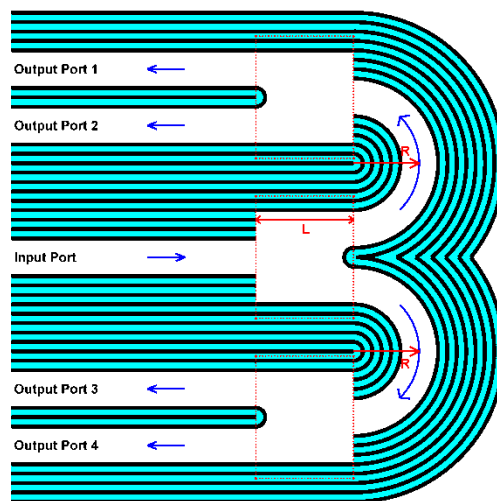
多模干涉（自成像）



(a)



(b)



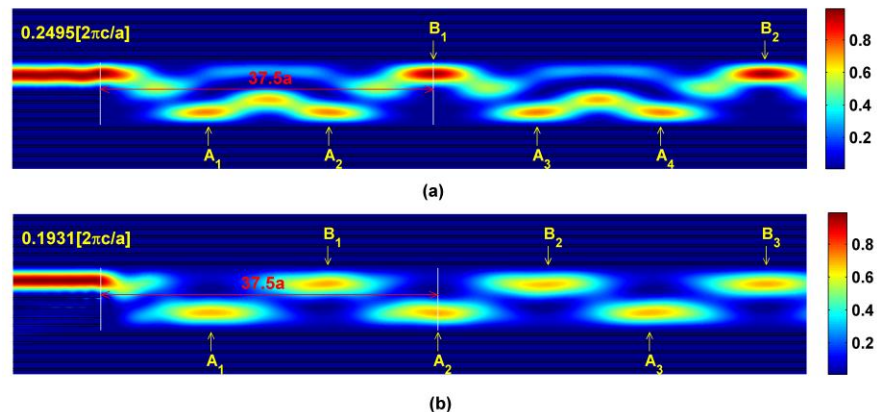
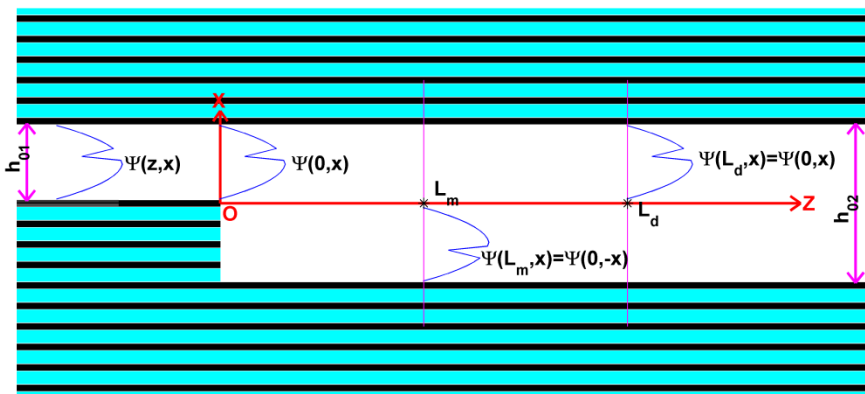
❖ 1×4功分器结构示意图及其稳态场分布

❖ 1×2功分器稳态场分布



多模干涉（自成像）

➤ 问题：基于多模干涉原理，能否实现不同波长光波的分离（波分器）？



➤ when the field $\Psi(x, z)$ from the single-mode waveguide goes into the multi-mode waveguide at $z=0$, that is $\Psi(0, x)$, a **mirrored single image** (or a symmetrical image about the Z-axis) appear at $z=L_m$, that is $\Psi(L_m, x) = \Psi(0, -x)$; and a **direct single image** appear at $z=L_d$, that is $\Psi(L_d, x) = \Psi(0, x)$

$$\beta_n L_m = k_n \pi, k_n = \begin{cases} 1, 3, 5, 7, \dots & \text{for odd modes} \\ 2, 4, 6, 8, \dots & \text{for even modes} \end{cases}$$

$$\beta_n L_d = k_n \pi, k_n = 2, 4, 6, 8, \dots$$

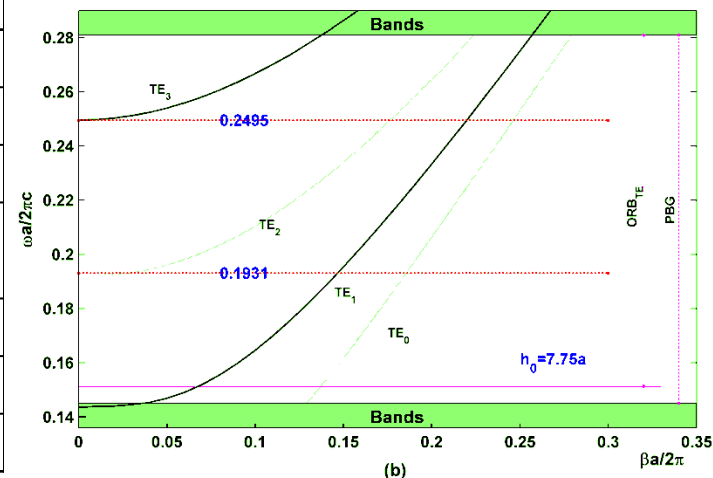
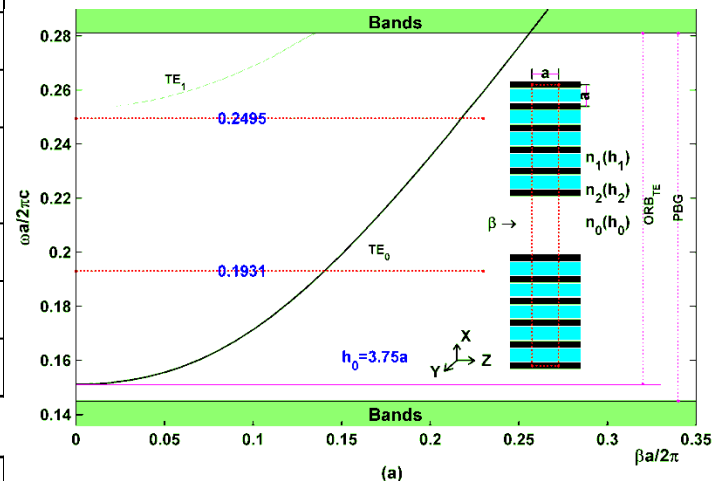


多模干涉（自成像）

Frequency ($2\pi c/a$)	0.1931		
Mode order number	0 th	1 st	2 nd
Parity	Even	Odd	Even
Wave vector ($\beta a/2\pi$)	0.1855	0.1467	0.0268
Propagation constant (π/a)	0.371	0.2934	0.0536
k_n	14	11	2
$L_m = k_n\pi/\beta_n$	37.7359a	37.4915a	37.3134a
Average value of L_d	37.514a		

Frequency ($2\pi c/a$)	0.2495		
Mode order number	0 th	1 st	2 nd
Parity	Even	Odd	Even
Wave vector ($\beta a/2\pi$)	0.2462	0.2199	0.1672
Propagation constant (π/a)	0.4924	0.4398	0.3344
k_n	18	16	12
$L_d = k_n\pi/\beta_n$	36.5557a	36.3802a	35.8852a
Average value of L_d	36.274a		

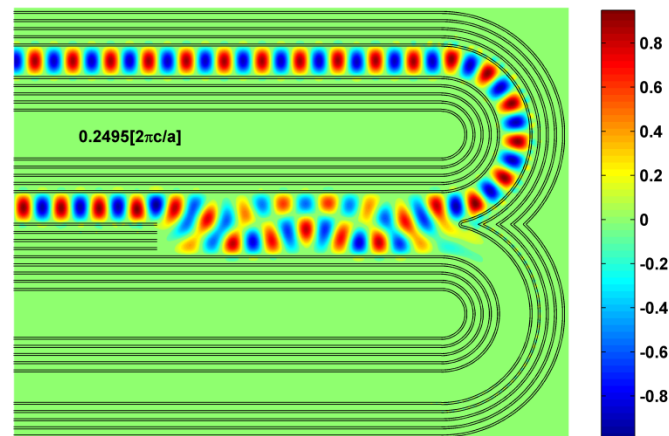
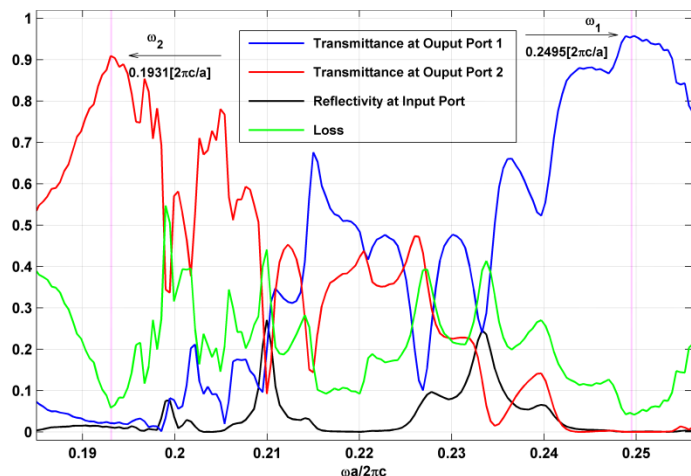
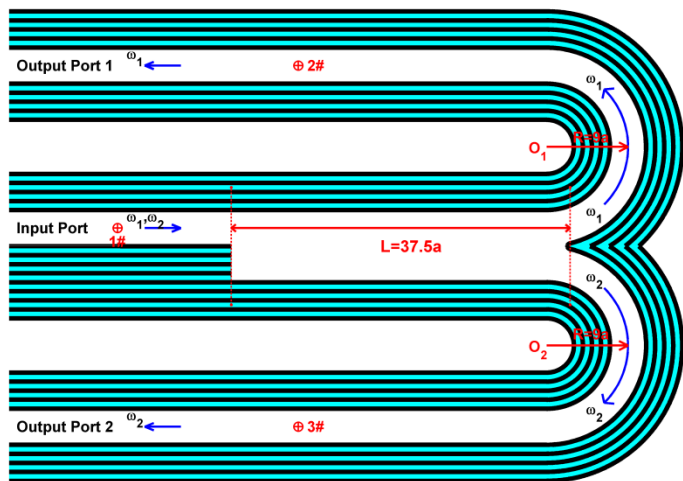
➤ 根据色散特性（曲线）估算 L_m 和 L_d



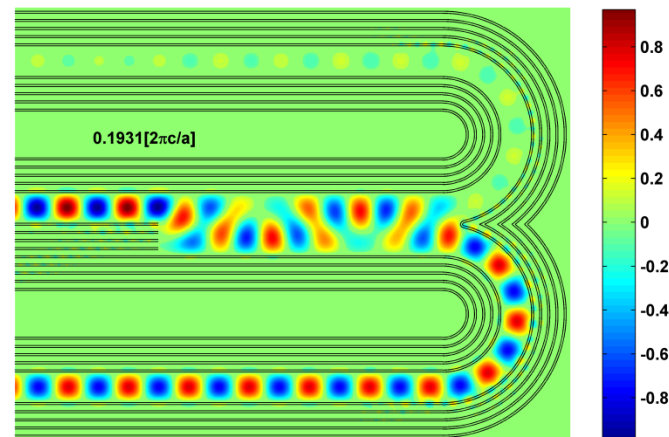


多模干涉（自成像）

❖ 基于自成像原理的波分器的结构示意图（左上）、传输特性（左下）以及稳态场分布（右）



(a)



(b)



思考题

1. 简述基本集成光子器件类型及其功能.
2. 以二维阶跃对成型平板波导为例，简述同向耦合的概念及其特点，并给出基于此原理的功分器和波分器结构示意图.
3. 以二维阶跃对成型平板波导为例，简述多模干涉（或自成像）现象，并给出基于此原理的功分器和波分器的结构示意图.