
光纤技术

陈向飞 王峰

上课地点：（星期二 3-4，仙II-312）

现代工程与应用科学学院
南京大学光通信中心

迎接光子时代的到来

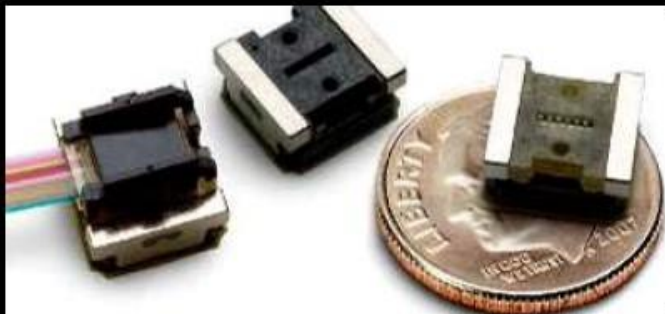
- 电子技术已经发展相对成熟，各种技术瓶颈已经出现：晶体管极限，电磁兼容等
- 光子作为信息的载体已经取得了很大的成功：95%的现代信息需要以光子的形式在光纤上传输
- 一根细若游丝的光纤里，可以容纳上亿门电话
- 美公司联手开发超级计算机光纤互连技术



Optical Interconnect: 1.1 TB/s HUB; 1,000,000 links

- 192 GB/s Host Connection
- 336 GB/s to 7 other local nodes in the same drawer
- 240 GB/s to local-remote nodes in the same supernode (4 drawers)
- 320 GB/s to remote nodes
- 40 GB/s to general purpose I/O

Avago microPOD™

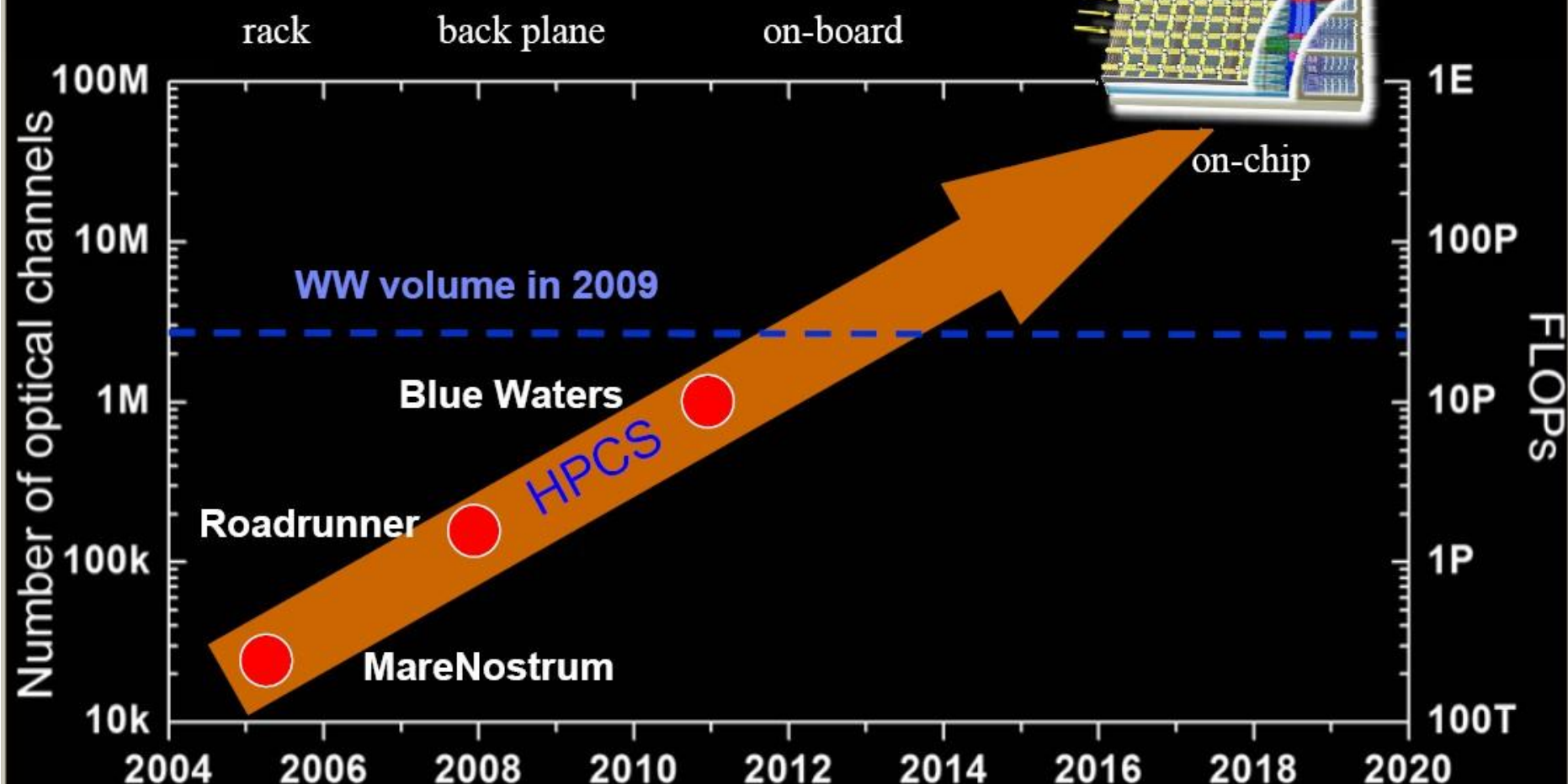


[M. Fields, Avago, OFC 2010, paper OTuP1]

[A. Benner, IBM, OFC 2010, paper OTuH1]

<http://www.ncsa.illinois.edu/BlueWaters/>

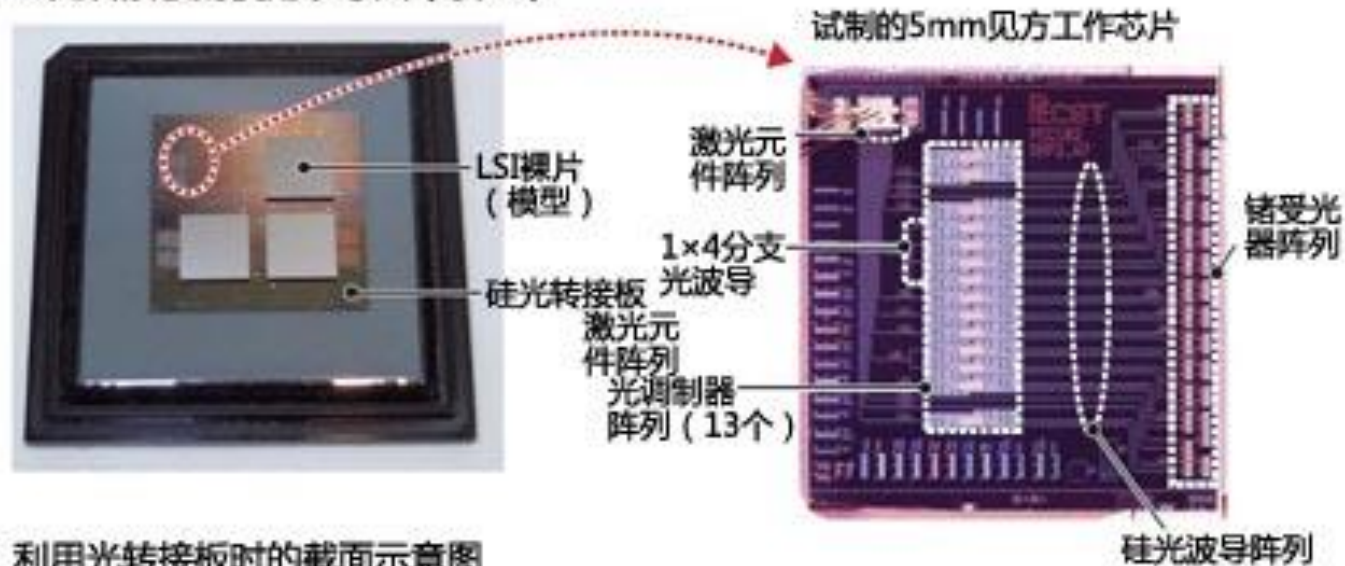
Penetration of optics into HPCS



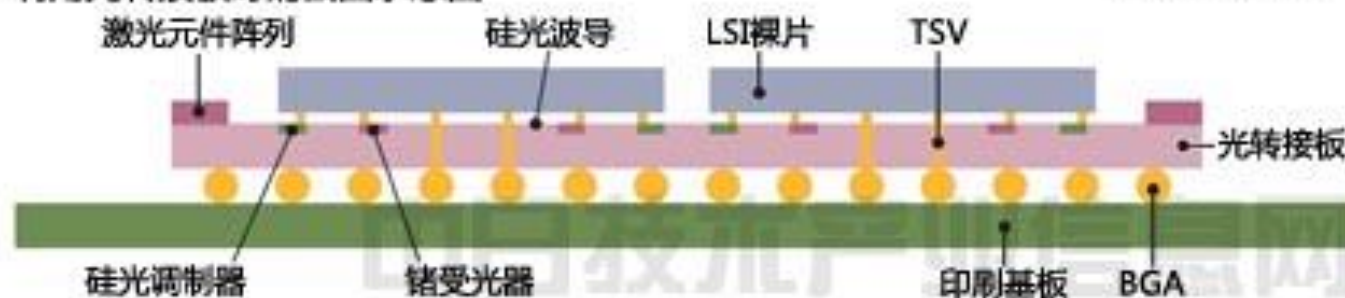
Single HPC machine will contain a similar number of optical channels as currently exist today in all parallel optical links worldwide

Courtesy of M. Taubenblatt

硅光转接板的使用示意图（模型）



利用光转接板时的截面示意图



1cm²的硅芯片上、集成526个数据传输速度为12.5Gbps的光收发器的技术

PECST的光收发器的实现主要依靠四项核心技术(图6)，分别为(1)作为光源的激光阵列元件、(2)连接光源与硅波导的光斑尺寸转换器(SSC)、(3)Mach-Zehnder型光调制器*、(4)锗光敏元件。

国家“十四五”规划纲要

以国家战略性需求为导向推进创新体系优化组合，加快构建以国家实验室为引领的战略科技力量。聚焦量子信息、光子与微纳电子、网络通信、人工智能、生物医药、现代能源系统等重大创新领域组建一批国家实验室，重组国家重点实验室，形成结构合理、运行高效的实验室体系。

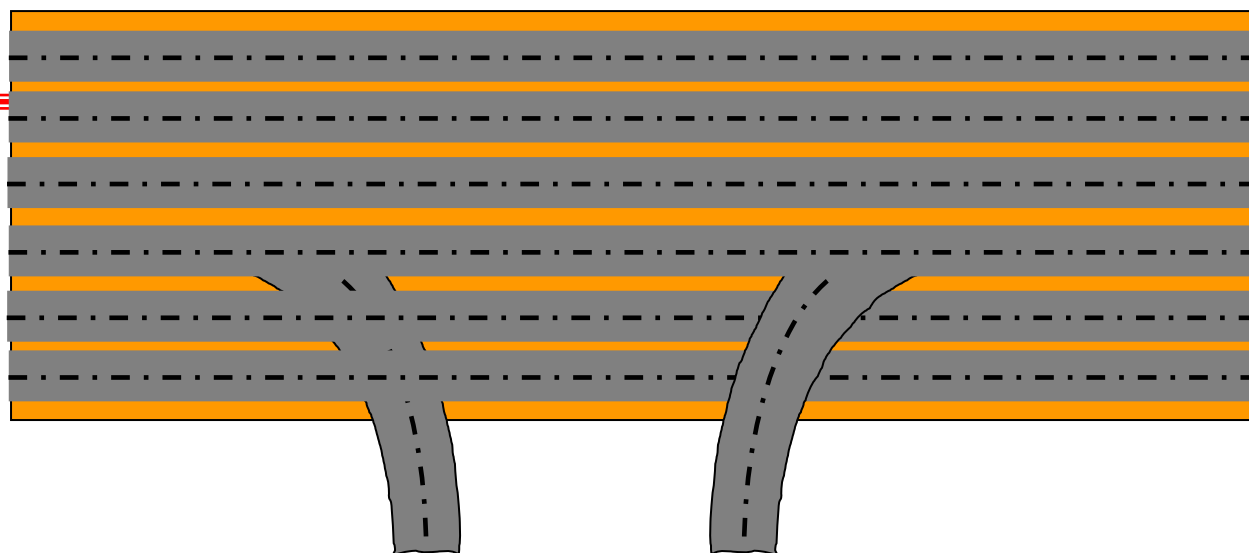
第二节 前瞻谋划未来产业：

在类脑智能、量子信息、基因技术、未来网络、深海空天开发、氢能与储能等前沿科技和产业变革领域，

迎接数字时代，激活数据要素潜能，推进网络强国建设，加快建设数字经济、数字社会、数字政府，以数字化转型整体驱动生产方式、生活方式和治理方式变革。

国家“十四五”规划纲要

围绕强化数字转型、智能升级、融合创新支撑，布局建设信息基础设施、融合基础设施、创新基础设施等新型基础设施。建设**高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效**的信息基础设施，增强数据感知、传输、存储和运算能力。加快**5G网络规模化部署**，用户普及率提高到56%，推广升级**千兆光纤网络**。前瞻布局**6G网络技术储备**。扩容骨干网互联节点，新设一批国际通信出入口，全面推进互联网协议第六版（IPv6）商用部署。实施中西部地区中小城市基础网络完善工程。推动物联网全面发展，打造支持固移融合、宽窄结合的物联接入能力。加快构建全国**一体化大数据中心体系**，强化算力统筹智能调度，建设若干**国家枢纽节点和大数据中心集群**，建设**E级和10E级超级计算中心**。积极稳妥发展**工业互联网和车联网**。打造**全球覆盖、高效运行的通信、导航、遥感空间基础设施体系**，建设商业航天发射场。加快交通、能源、市政等传统基础设施数字化改造，加强泛在感知、终端联网、智能调度体系建设。发挥市场主导作用，打通多元化投资渠道，构建新型基础设施标准体系。



“波导”：交通：公路，铁路，高速公路

电： 电线， 平面电路

光： 光纤， 平面光波导

公路、铁路、高速公路给交通带来了极大的推动；电通过电线的传输提供了强大的动力；电信号凭借平面集成电路产生了繁荣的电子工业；光纤和平面光波导的发展将带来信息交流的巨大改变。

第二章 介质光波导基础

2.1 光的基本特性

2.2 光在介质交界面的反射和折射

2.3 光在介质光波导的传输

光的波长

光是一种**电磁波**，与一般意义的微波的电磁特性相同，只是频率或波长不同而已。将电磁波按其频率或波长的次序排列成谱，则称为电磁波谱。通常所说的光学区域或光学频谱包括：红外线、可见光和紫外线。由于光的频率极高 $10^{12} \sim 10^{16} \text{Hz}$ ($10^{14} \sim 10^{15} \text{Hz}$)，一般采用波长表征，光谱区域的波长范围约从1 mm到10 nm。光的电磁波谱可分为

红外线 (1 mm ~ 0.76 μm)	{	远红外	(1 mm ~ 20 μm)
		中红外	(20 μm ~ 1.5 μm)
		近红外	(1.5 μm ~ 0.76 μm)
可见光 (760 ~ 380 nm)	{	红 色	(760 nm ~ 630 nm)
		橙 色	(630 nm ~ 600 nm)
		黄 色	(600 nm ~ 570 nm)
		绿 色	(570 nm ~ 490 nm)
		青 色	(500 nm ~ 450 nm)
		蓝 色	(450 nm ~ 430 nm)
		紫 色	(430 nm ~ 380 nm)
紫外光 (380 ~ 10 nm)	{	近紫外	(380 nm ~ 300 nm)
		中紫外	(300 nm ~ 200 nm)
		真空紫外	(200 nm ~ 10 nm)

光的分析手段

光学研究的是光的传播以及光和物质相互作用，使用方法有

▲几何光学（成像光学仪器）

▲波动光学（研究光的电磁性质和传播规律，用在一般的导波光学）

▲量子光学（以光的量子理论为基础，研究光与物质相互作用的规律，如用在量子光通信）

麦克斯韦电磁方程

根据光的电磁理论，光波具有电磁波的所有性质，这些性质都电磁波的基本方程—麦克斯韦方程组：

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -(\partial B / \partial t)$$

$$\nabla \times H = J + (\partial D / \partial t)$$

其中 D 、 E 、 B 、 H 分别表示电感应强度（电位移矢量）、电场强度、磁感应强度、磁场强度； ρ 是自由电荷密度、 J 是传导电流密度。麦氏方程组将空间任一点的电、磁场联系在一起，可以确定空间任一点的电、磁场。

物质方程

$$D = \varepsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$J = \sigma E$$

其中 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 为介电常数，描述介质的光学性质 ε_r 是相对介电常数； ε_0 是真空中介电常数； $\mu = \mu_0 \mu_r$ 为介质磁导率，描述介质的磁学性质。 μ_0 是真空中磁导率， μ_r 是相对磁导率； σ 为电导率，描述介质的导电特性。

注：若介质的光学性质是各向异性的，则 ε 、 μ 和 σ 应当是张量。

光的麦克斯韦方程组

光一般只能在介质中传输，介质的是自由电荷密度 $\rho = 0$ 、 $\mu_r \rightarrow 1$ ；
电导率 $\sigma = 0$ ；光的麦克斯韦方程组

$$\nabla \cdot D = 0$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -(\partial B / \partial t)$$

$$\nabla \times H = (\partial D / \partial t)$$

物质方程

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$$

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

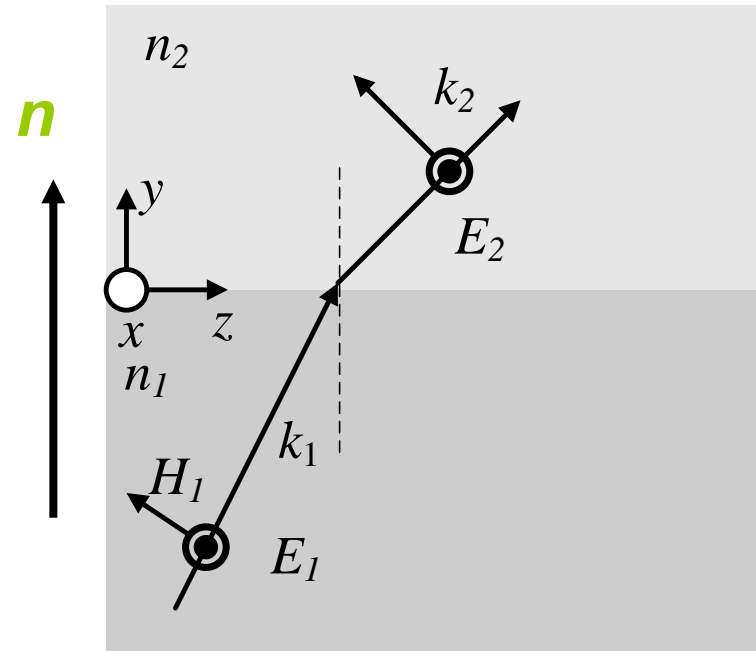
边界条件

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) = 0$$

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) = 0$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$$



波动方程

可以推导出与光传输相关的描述交变电磁场的波动方程：

$$\nabla^2 \mathbf{E} - (1/v^2)(\partial^2 \mathbf{E} / \partial t^2) = 0$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - (1/v^2)(\partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2) = 0$$

上述方程组说明交变电磁场是以速度 v 传播的电磁波动。式中：

$$v = (\mu\epsilon)^{-1/2}$$

光电磁波在真空中的传播速度一般用字母 c 表示 $c = (\mu_0\epsilon_0)^{-1/2} = 3 \times 10^8$ 米/秒。为表征光在介质中传播的快慢，引入光折射率：

$$n = c/v = (\mu_r\epsilon_r)^{1/2}$$

除铁磁性介质外，大多数介质的磁性都很弱，可以认为 $\mu_r \approx 1$ 。因此，折射率可以表示为： $n = (\epsilon_r)^{1/2}$

此式称为麦克斯韦关系。对于一般介质， ϵ_r 或 n 都是频率的函数，具体的函数关系取决于介质的结构。

波动方程

考虑简谐波, $\partial/\partial t = i\omega$, ω 是光波的圆频率, 也可以写成:

$$\nabla^2 E + n^2 k_0^2 E = 0$$

$$\nabla^2 H + n^2 k_0^2 H = 0$$

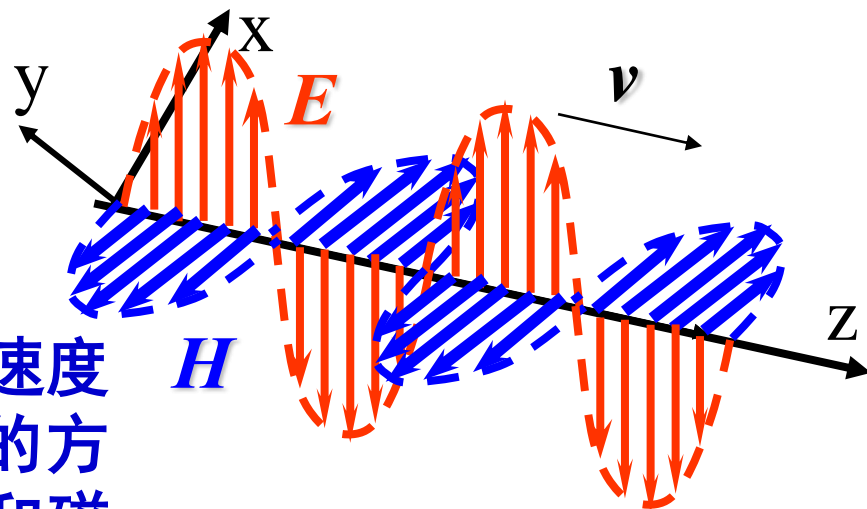
k_0 是光波在真空中的波矢量一波空间变化快慢的程度, 其大小等于 $2\pi/\lambda$, $k = nk_0$ 是介质中的波氏量。波动方程又可写成

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0$$

光的波动就是电场和磁场的波动

E 和 H 是矢量, 光在介质中的传播速度 v 也是矢量, v 的方向就是光传播的方向, E 、 H 和 v 相互垂直, 表示电场和磁场在空间沿着 z 方向总是相互正交传输



光波动描述

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$$

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi_x)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi_y)$$

ω 表示光波传输频率， k 是波矢量，
幅度是传播常数 $k=2\pi/\lambda$ ， φ_x 和 φ_y 是
初相位。相速度为 $v = \omega/k$

光场的能量密度也就是电磁场的能量密度

$$W = W_E + W_M = \frac{1}{2} (\varepsilon E^2 + \mu H^2)$$

因为

$$\sqrt{\varepsilon} E = \sqrt{\mu} H$$

因此电场能量和磁场能量相等，即

$$W = \varepsilon E^2$$

光波动描述

波印廷矢量

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

波印廷矢量的大小表示能流密度

$$S = EH = Wv$$

光强 I 是单位面积的功率通量，就是光场的能流密度，一般是能流密度的时间平均

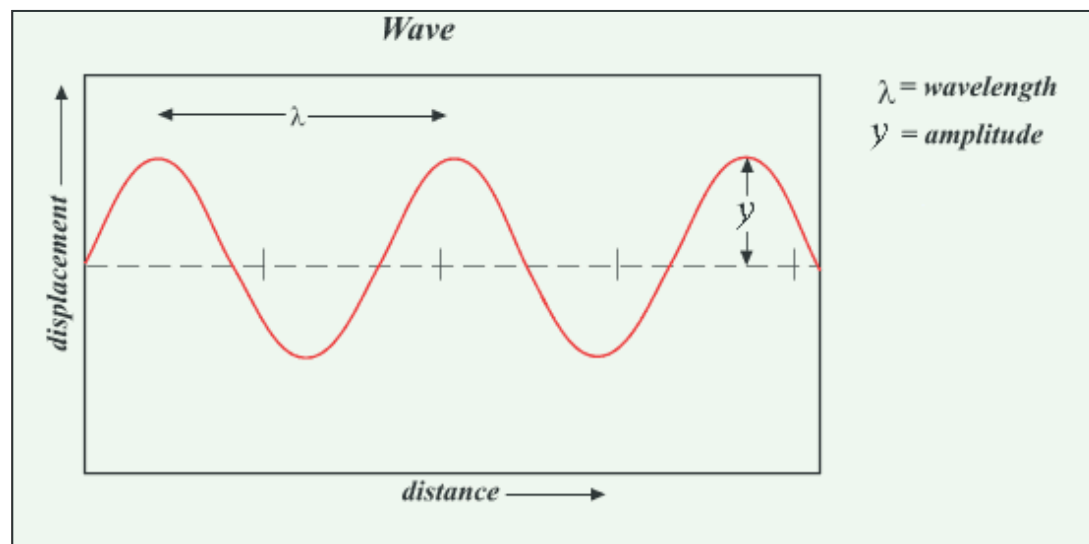
$$I = \frac{1}{2} v \epsilon E_0^2$$

其中 v 是光在介质中的速度

$$v = (\mu\epsilon)^{-1/2} = c/n$$

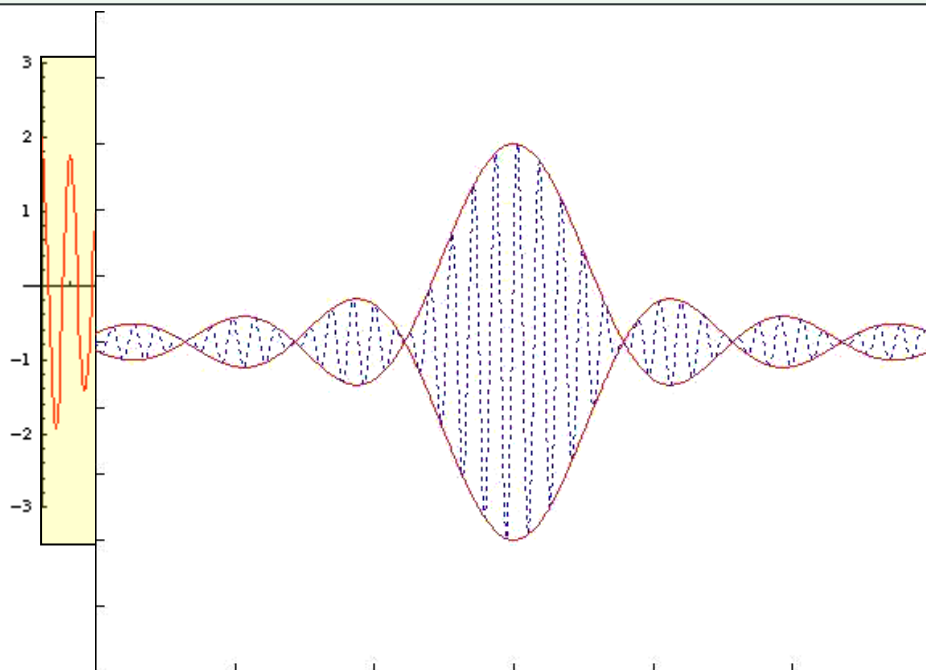
群速度

单一频率波的传播速度称为**相速度**



不同频率的叠加加形成合成波（波包）时，波包的波峰传播速度称为**群速度**。真空中的相速度和群速度是相等的。

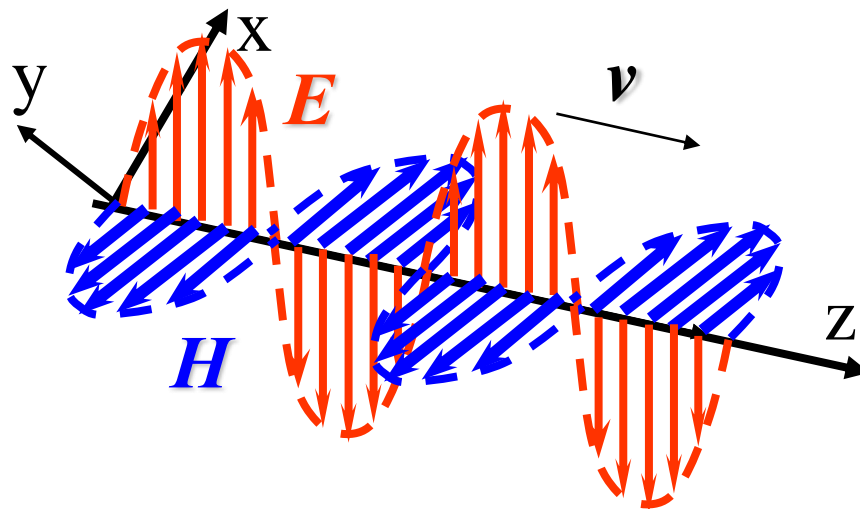
$$v_g = d\omega/dk$$



光的偏振

$$E_x = E_{x0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi_x)$$

$$E_y = E_{y0} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{z} + \varphi_y)$$

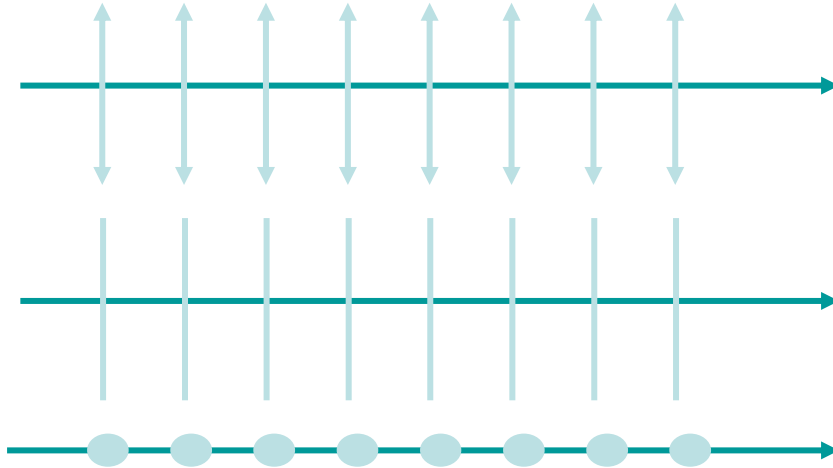


光波的偏振（也称极化）描述当它通过介质传输时其电场特性。

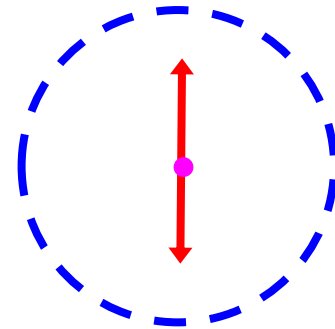
线偏振光

一束光只含有单一方向的光振动,光只在一个固定平面内沿单一方向振动的光叫线偏振光（也称平面偏振光）

完全偏振光：线偏振光的振动面固定不动。



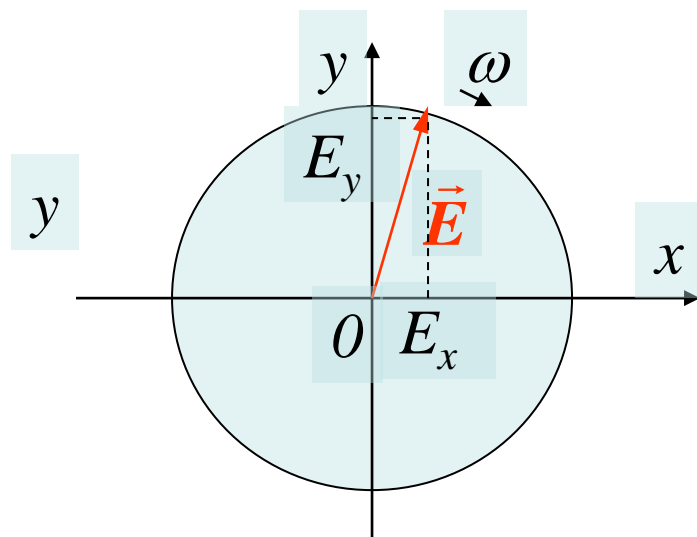
线偏振光图示法



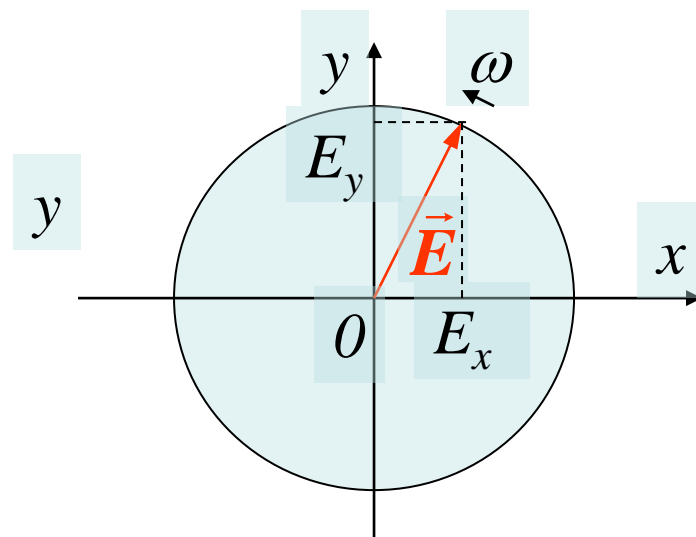
面对光的传播方向看

圆偏振光和椭圆偏振光

圆偏振光/椭圆偏振光: 可以看成两个相互垂直的简谐振动的合成, 光矢量在垂直于光的传播方向的平面内按一定的频率旋转 (左旋或右旋)。相位差如图。 E_x 与 E_y 幅度相等 (圆偏振), 不相等 (椭圆偏振)。



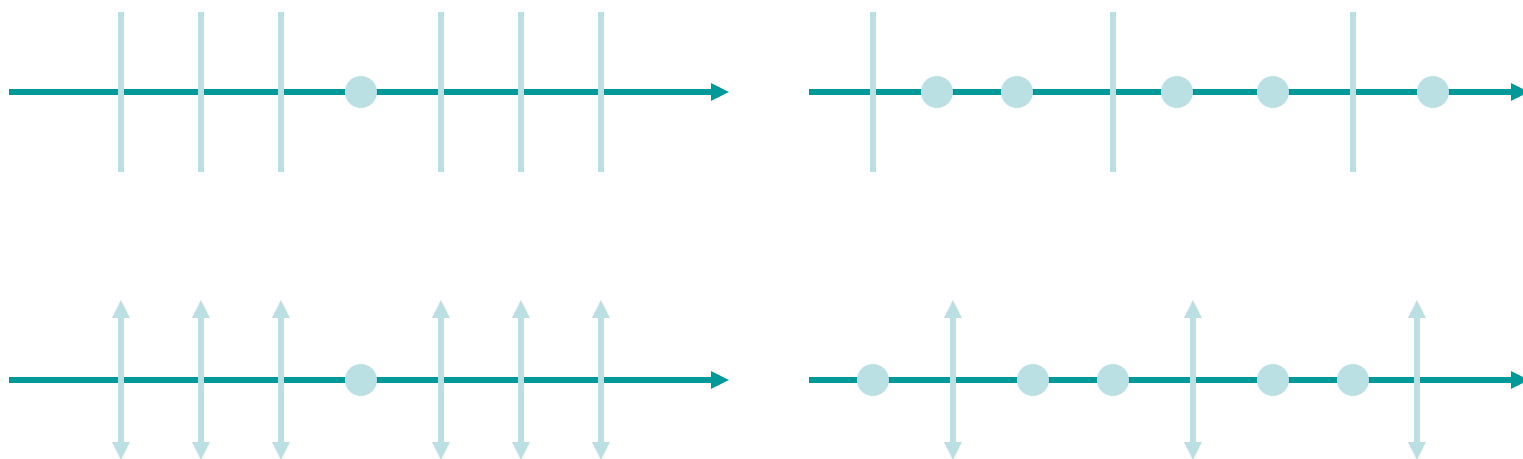
$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = \pi/2 \text{ 右旋}$$



$$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x = -\pi/2 \text{ 左旋}$$

部分偏振光

部分偏振光：在垂直于光传播方向的平面内，各方向的光振动都有，但它们的振幅不等。



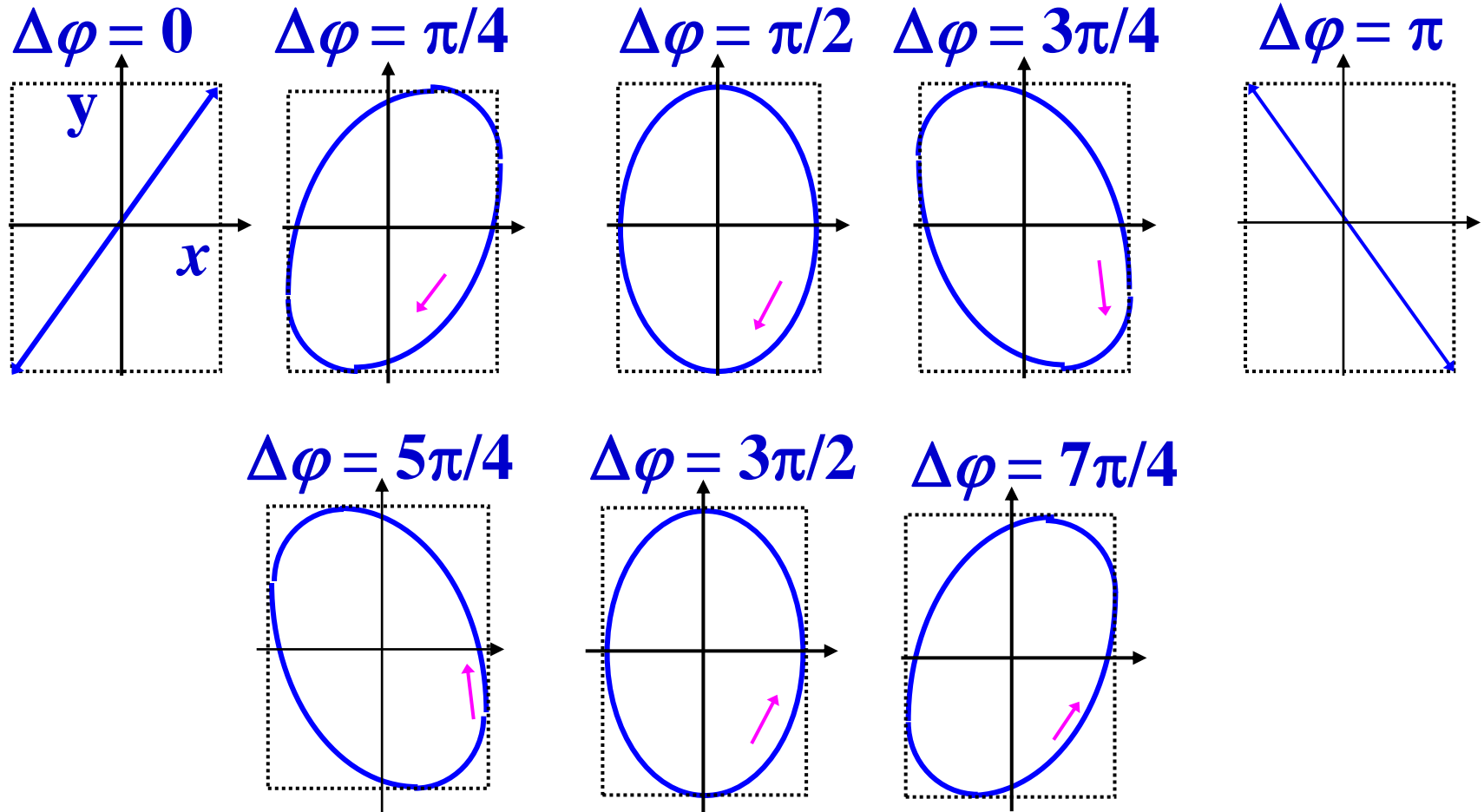
(a)线面内振动较强

(b)线面内振动较弱

部分偏振光图示法

各种偏振状态

$\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$ 不同，椭圆形状、旋向也不同。



小结

- 波动方程（边界条件）
- 频率、波矢量
- 相速度、群速度
- 能量密度
- 能流密度
- 光强
- 光的偏振
- 各种偏振状态

第二章 介质光波导

2.1 光的基本特性

2.2 光在介质交界面的反射和折射

2.3 光在介质光波导的传输

光在介质交界面的反射和折射

反射定律

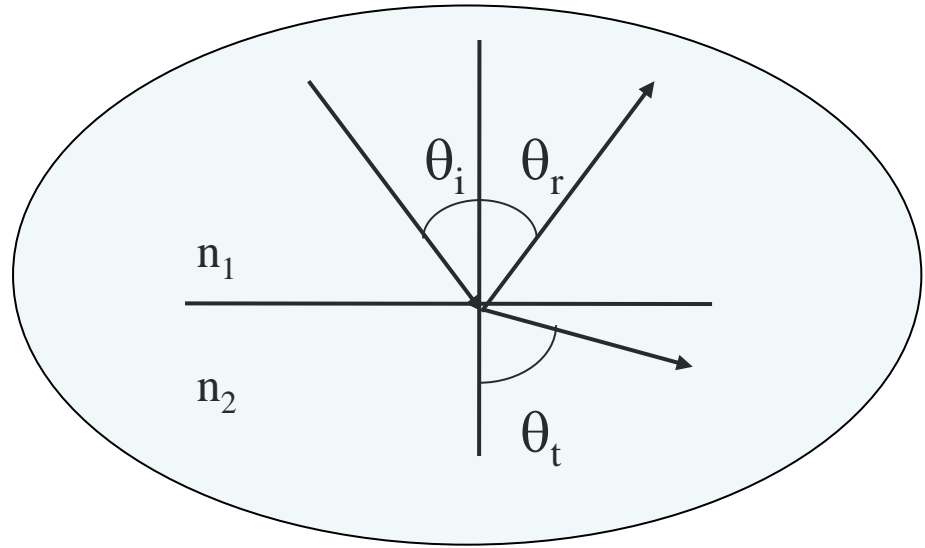
$$\theta_r = \theta_i$$

折射定律

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_2}{n_1}$$

临界角 θ_C

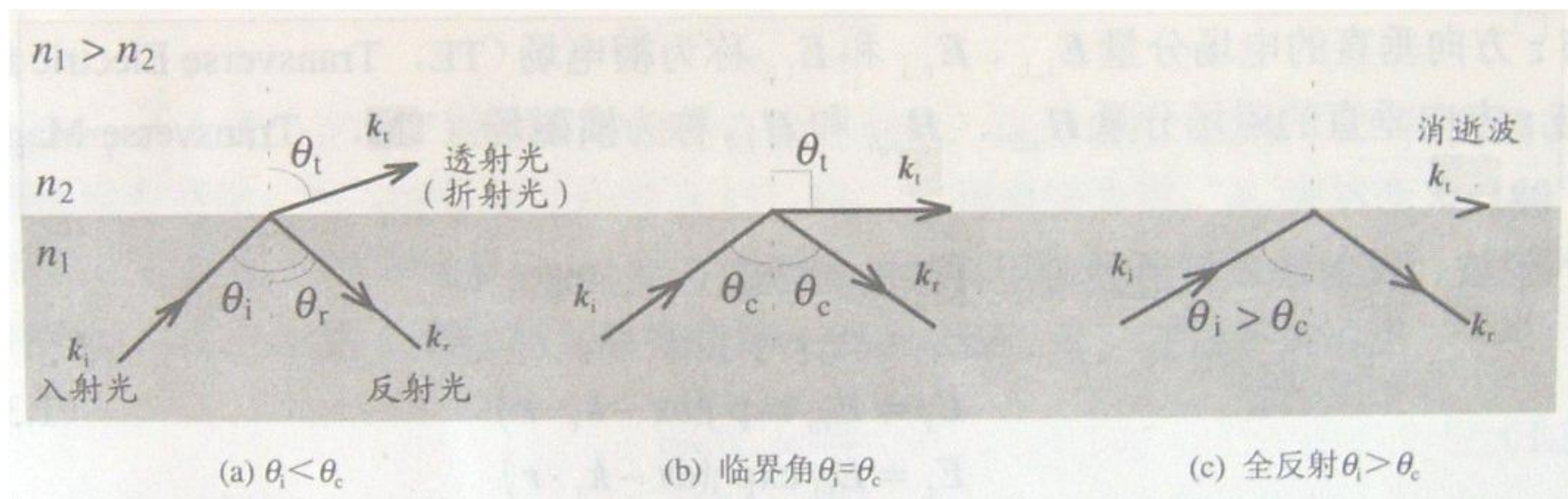
$$\frac{\sin \theta_C}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1}$$



光线在两种介质界面上的
反射及折射

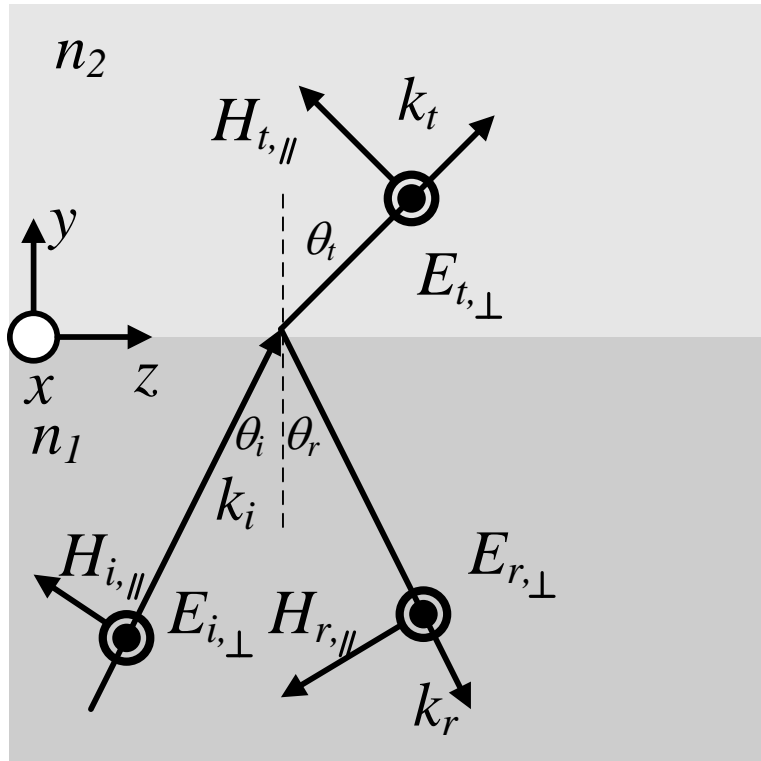
$$\sin \theta_C = \frac{n_2}{n_1}$$

在两种介质界面上光的反射及折射



光波从折射率大的介质入射到折射率小的介质的三种情况

光的反射及折射



- 电磁波
 - 电场— E
 - 磁场— H

波矢: k_i, k_r, k_t

横电场 (TE) : $E_{i\perp}, E_{r\perp}, E_{t\perp}$

横磁场 (TM) : $H_{i\perp}, H_{r\perp}, H_{t\perp}$

电磁波（光波）从折射率大的介质入射到折射率小的介质（横电场）

入射波，反射波和折射波

$$E_i = E_{i0} \exp[j(\omega t - k_i \cdot r)]$$

$$E_r = E_{r0} \exp[j(\omega t - k_r \cdot r)]$$

$$E_t = E_{t0} \exp[j(\omega t - k_t \cdot r)]$$

把上述方程代入光的波动方程， 就可以得到反射波与入射波的关系以及折射波与入射波的关系

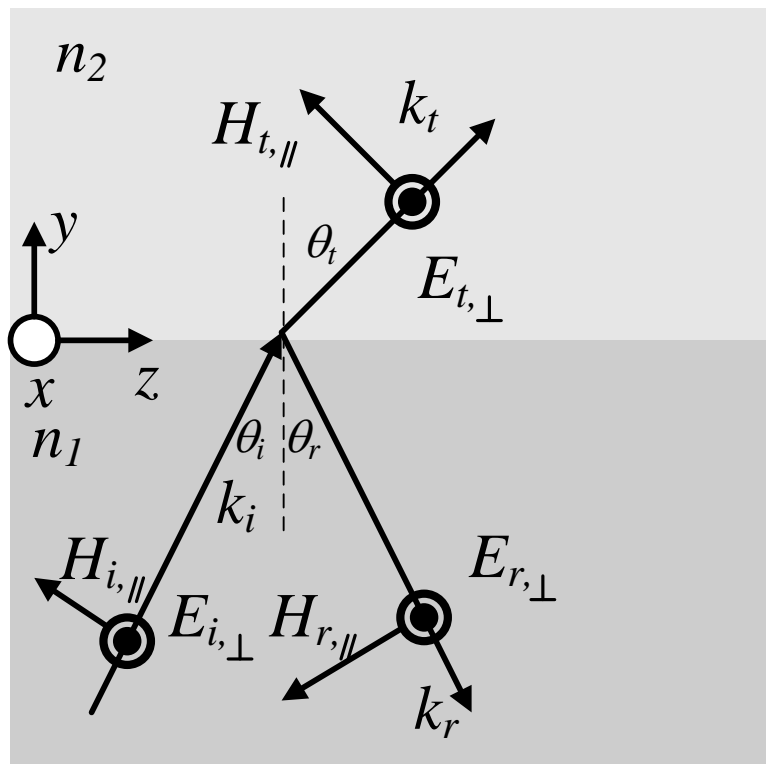
光波在介质界面的反射和透射 – 垂直入射 (电场)

反射系数的定义

$$\rho = \frac{E_r}{E_i}$$

透射系数的定义

$$t = \frac{E_t}{E_i}$$

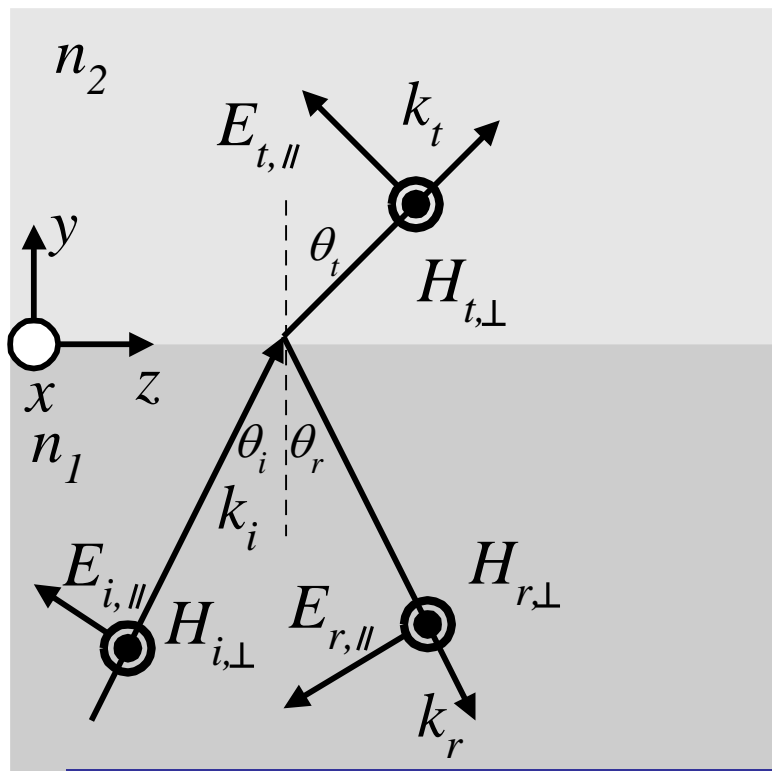


$$\rho_{\perp} = \frac{n_1 \cos \theta_i - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_1 \cos \theta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$t_{\perp} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

《物理光学》，梁铨廷，机械工业出版社

光波在介质界面的反射和透射 — 平行入射（电场）



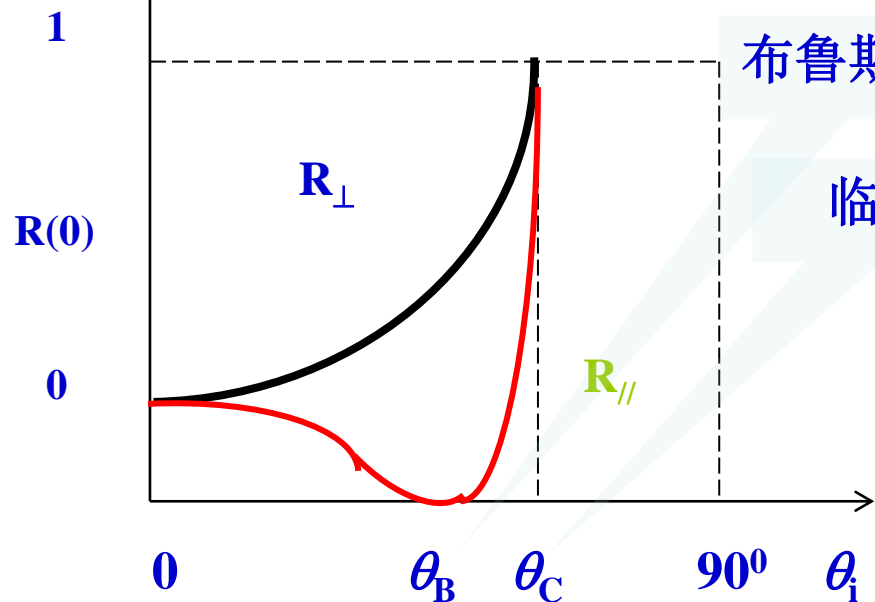
$$\rho_{//} = \frac{n_2^2 \cos \theta_i - n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}{n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

$$t_{//} = \frac{2n_1 n_2 \cos \theta_i}{n_2^2 \cos \theta_i + n_1 \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i}}$$

电磁波（光波）从折射率大的介质入射到折射率小的介质（横磁场）

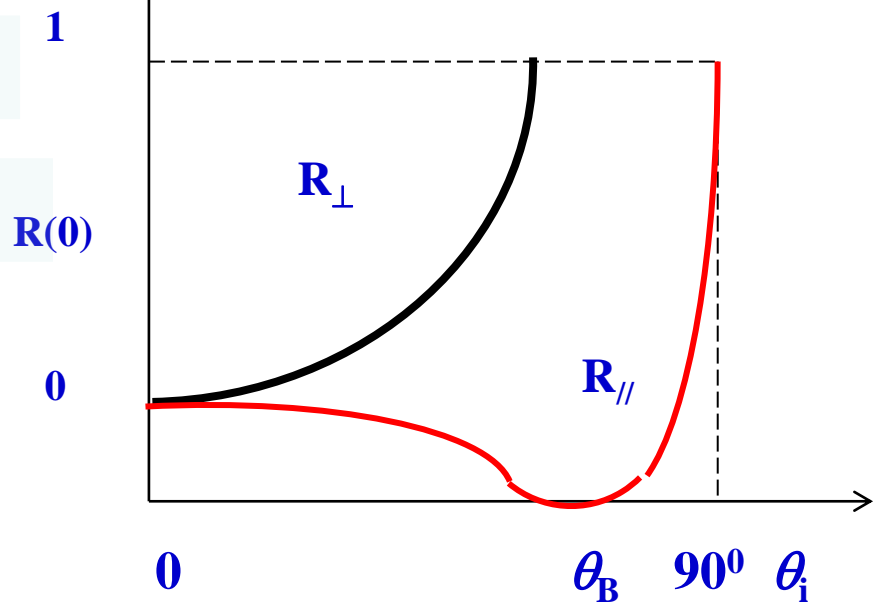
反射率R 随 θ_i 的入射角变化

存在一个入射角 θ_B 使 $R=0$ ，即全透射。此角称**布鲁斯特 (Brewster) 角**只有偏振方向平行入射面的光，且是线偏振光



$n_1 > n_2$ 的情况

反射率R的定义



$n_1 < n_2$ 的情况

$$R = |\rho|^2 = \left(\frac{E_r}{E_i} \right)^2$$

$$\text{当 } \theta_i = 0 \text{ 时} \quad R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

全反射的相位变化

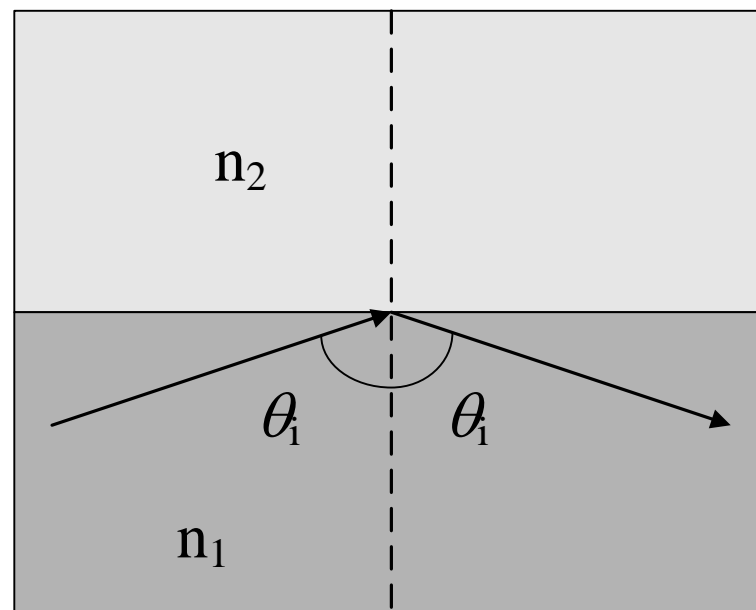
$$\theta_i > \theta_C$$

横电场

$$\tan\left(\frac{\theta_{\perp}}{2}\right) = \frac{(n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2)^{1/2}}{n_1 \cos \theta_i}$$

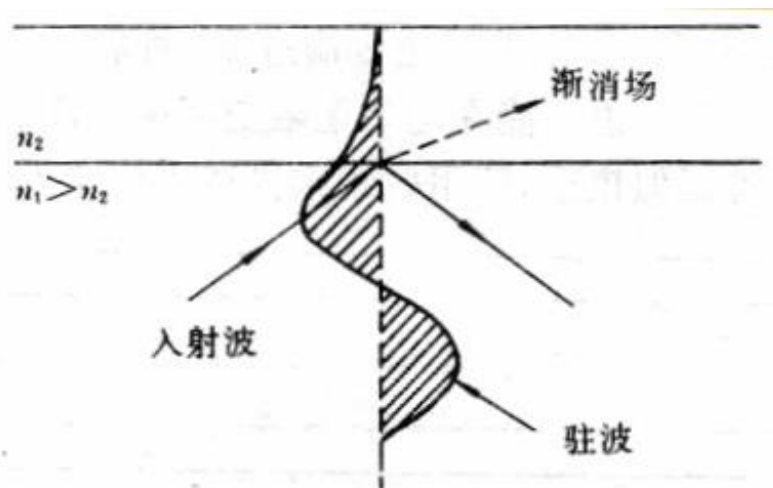
横磁场

$$\tan\left(\frac{\theta_{\parallel}}{2}\right) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \frac{(n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2)^{1/2}}{n_1 \cos \theta_i}$$

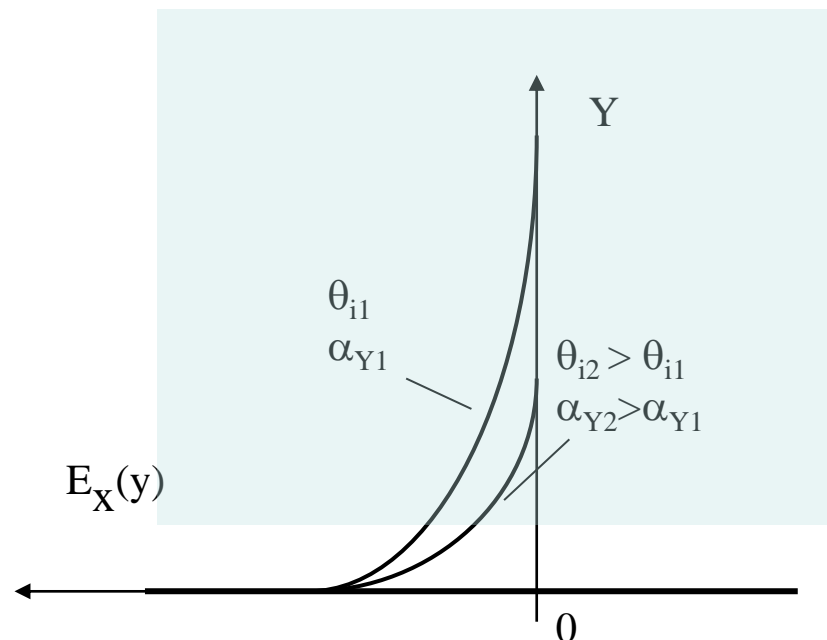


$$n_1 > n_2$$

消逝波(Evanescent wave)



在介质边界的消逝波



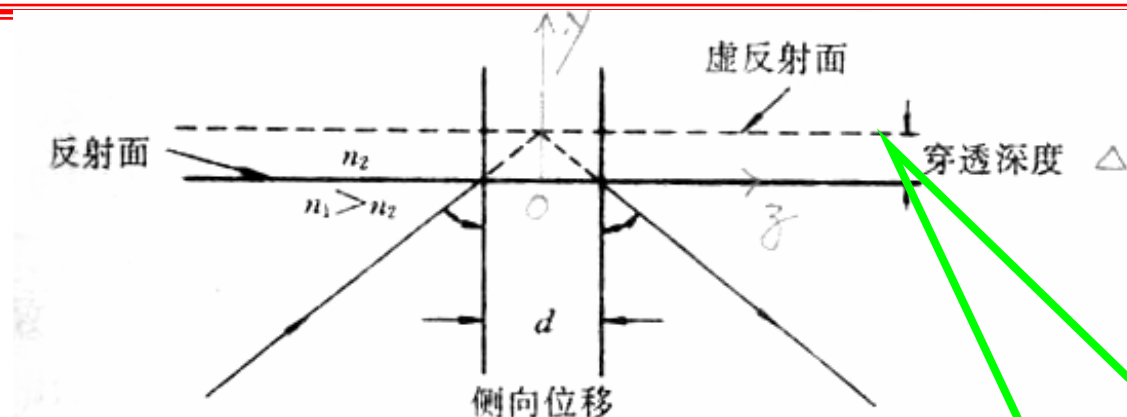
$$E_{t\perp} = \exp(-\alpha y) \exp[j(\omega t - k_{iz} z)]$$

$k_{iz} = k_i \sin \theta_i$ 是沿 z 方向的波矢

$$\alpha = \frac{2\pi n_2}{\lambda} \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \sin^2 \theta_i - 1 \right]$$

是电场进入介质2的衰减系数

古斯－汉欣位移 (Goos -Hanchen)



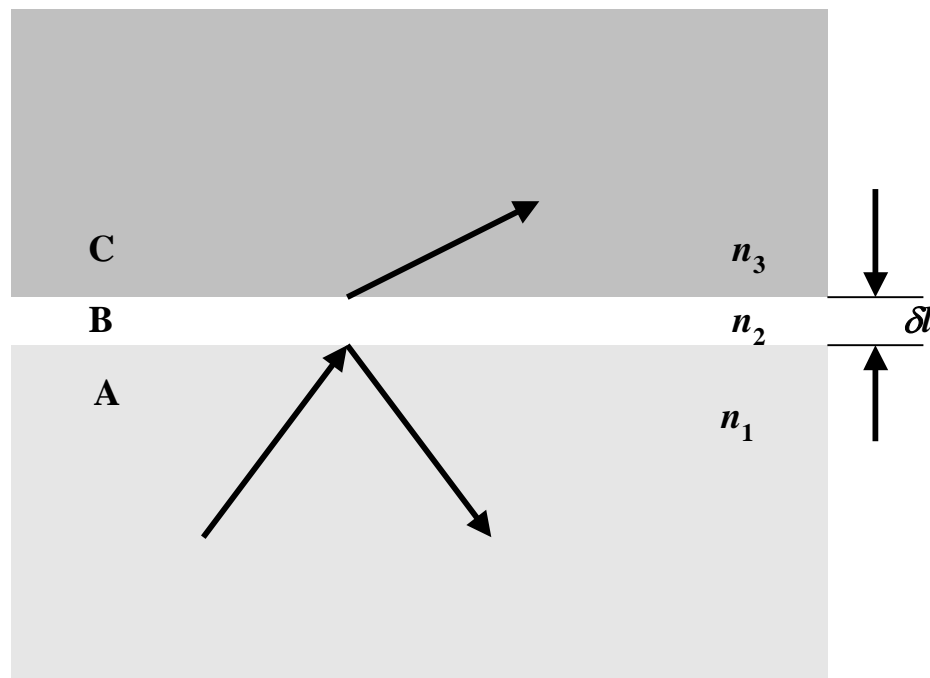
全反射时古斯－汉欣位移

穿透深度! $1/\alpha$

当 $\theta_i > \theta_c$ 时, 发生全反射, 同时发生相位的变化, 相位的变化表示在介质的表面发生了反射光沿 z 方向移动一个距离 Δ

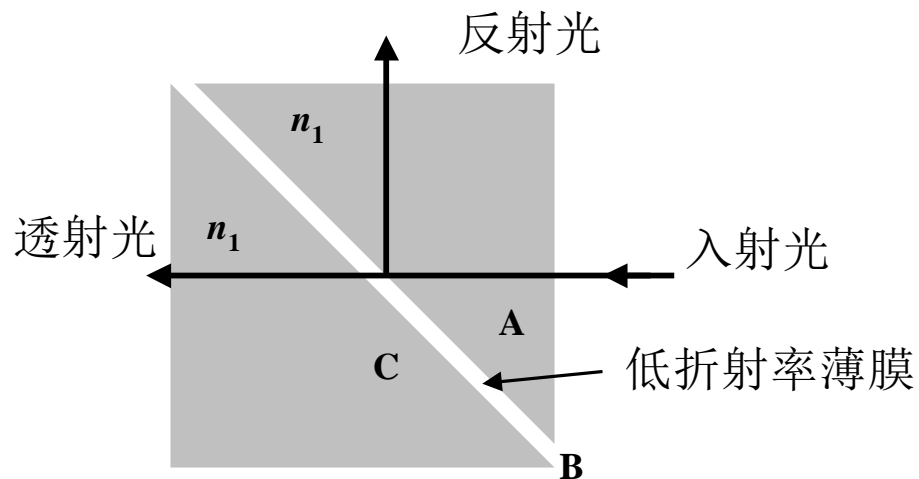
$$\Delta = \frac{2}{\alpha} \tan \theta_i$$

光学隧道效应(Optical Tunneling)



当 $\delta l <$ 穿透深度, 在A和B之间发生全反射情况下, 光仍然可以穿透B进入介质C, 称为**光学隧道效应**

用光学隧道效应制作的分光镜



小结

- 光的反射和折射定律
- 横电波和横磁波的反射率和透射率表达式
- 全反射和布鲁斯特（Brewster）角
- 各种入射条件下的反射和透射
- 全反射情况下的穿透深度
- 古斯—汉欣位移
- 光学隧道效应

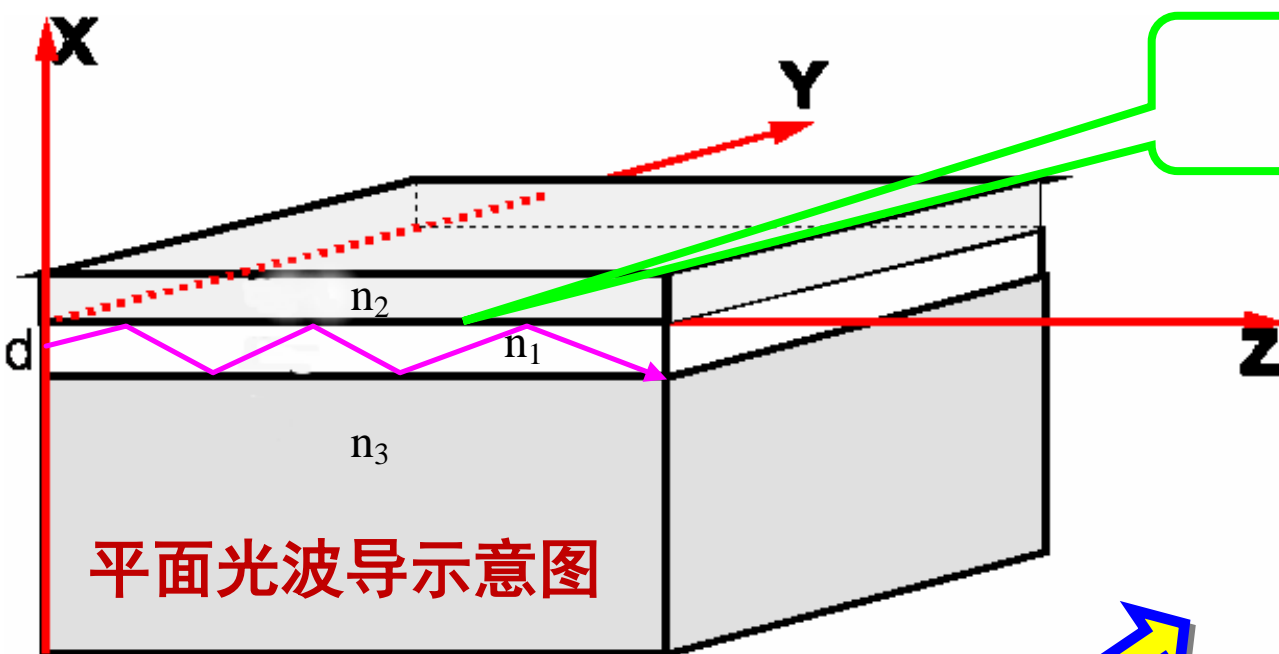
第二章 介质光波导

2.1 光的基本特性

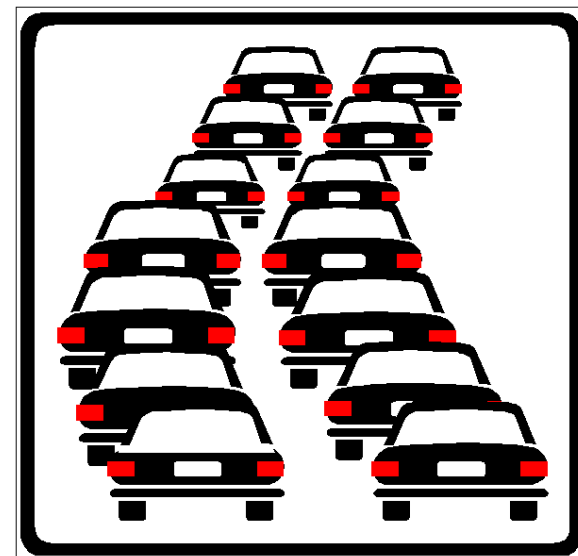
2.2 光在介质交界面的反射和折射

2.3 光在介质光波导的传输

光在介质光波导的传输



全反射！

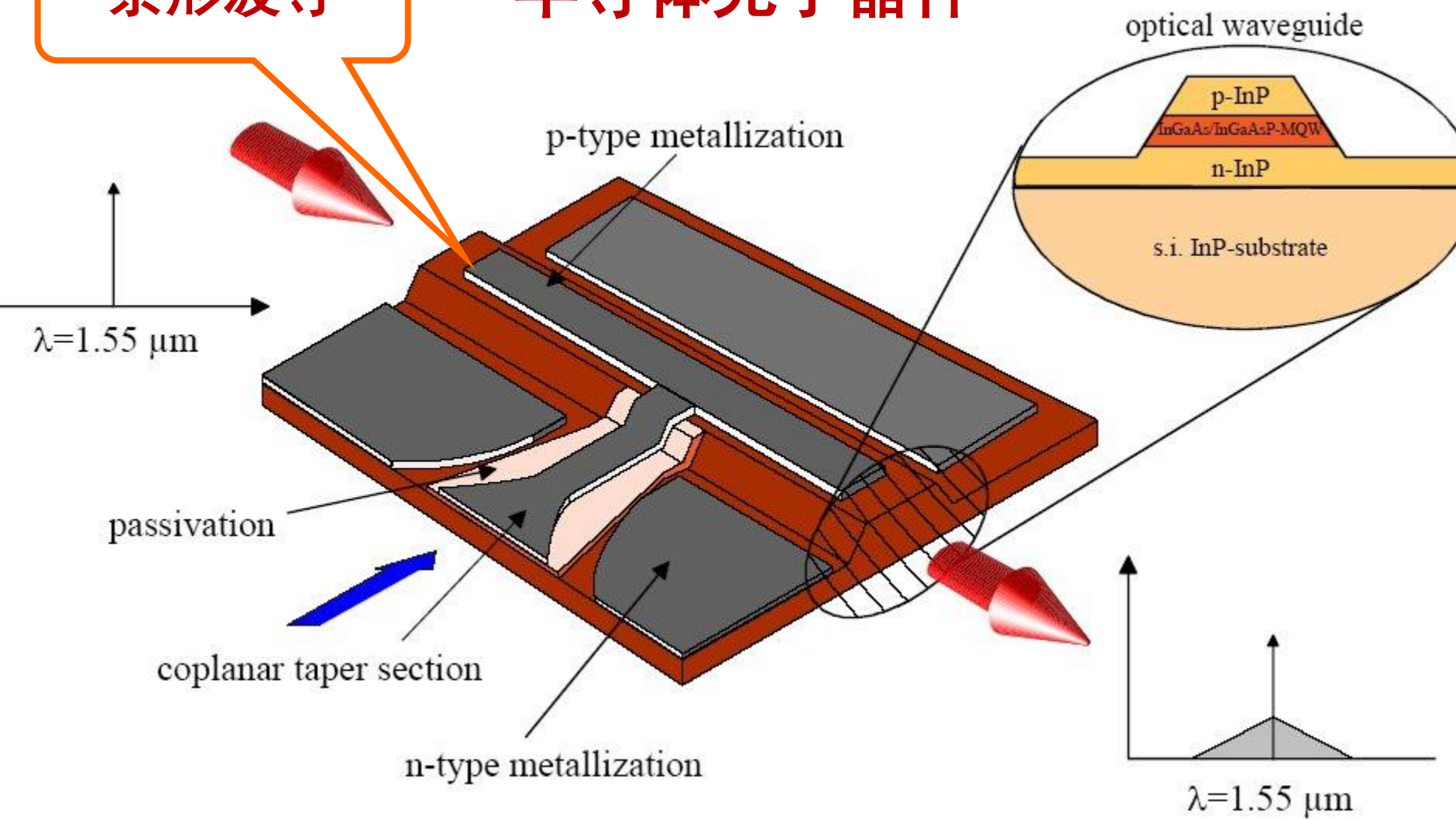


稳定的传输：有秩序！

- 折射率：覆盖层、芯区、衬底分别为： n_1 、 n_2 、 n_3 ，且 $n_1 > n_2$ ， $n_1 > n_3$ 。方便起见 $n_1 > n_2 > n_3$
- 对称波导： $n_2 = n_3$
- 非对称波导： $n_2 \neq n_3$

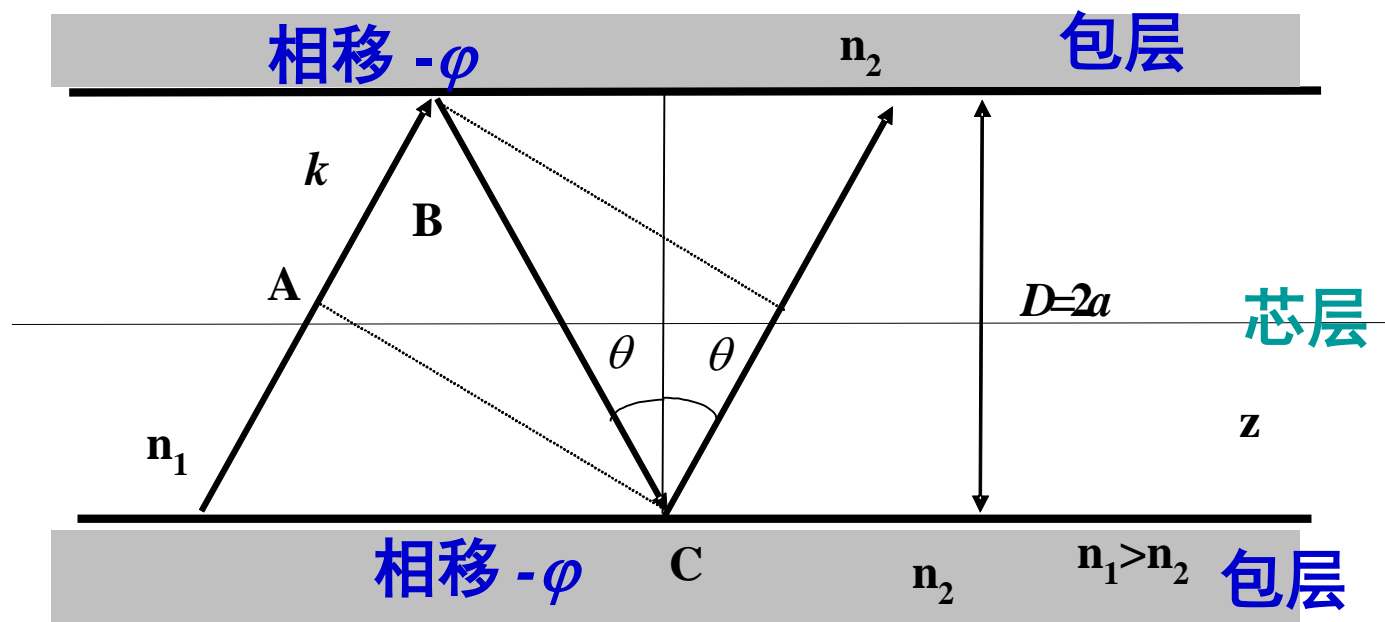
条形波导

半导体光子器件





对称平面波导



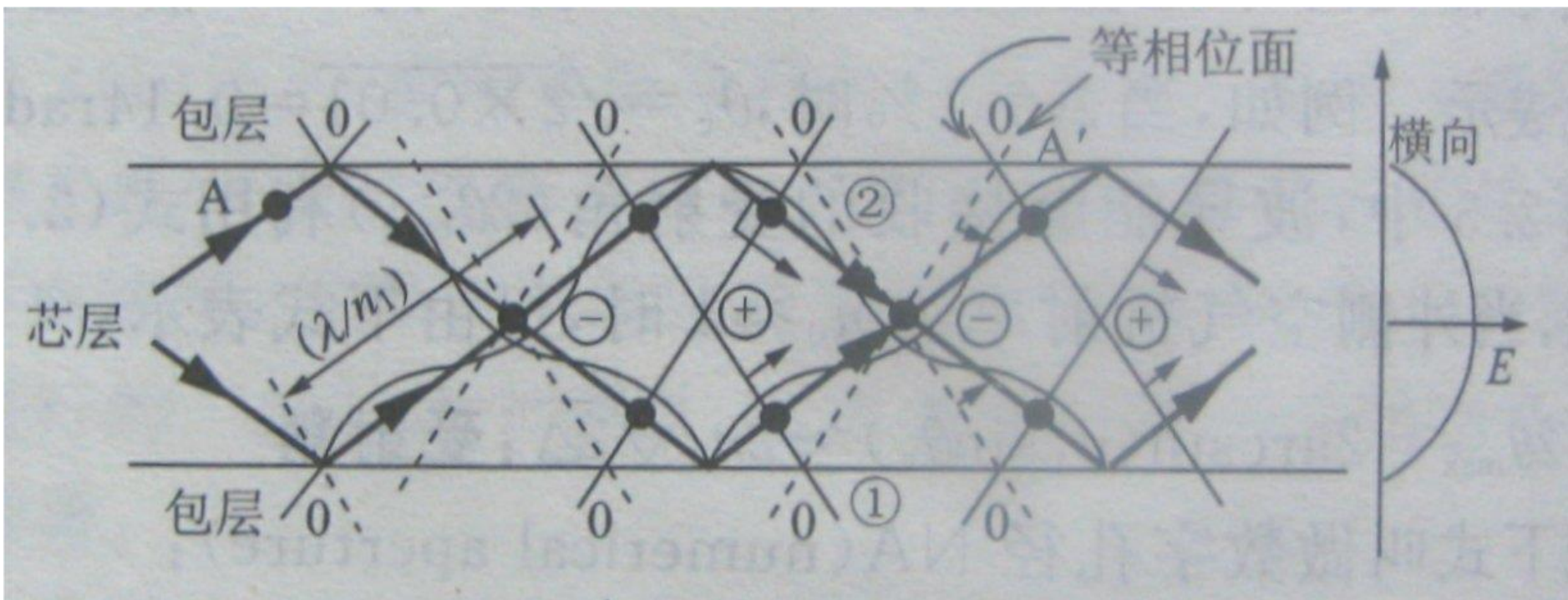
波导中光波稳定的传输

稳定传输情况下: A与C同相

$$\Delta\phi_{AB}=k(AB+BC)-2\phi=m(2\pi)$$

$$BC=D/\cos(\theta) \quad AB=BC\cos(2\theta)$$

$$kD\cos(\theta)-\phi=m\pi \quad (m=0,1,2,\dots)$$



光在芯层与包层的界面上反射，所以在横向往返一次的相位变量为 2π 的整数倍时，就成为**横向驻波**。在芯层和包层附近，正负相位面总是重合而使**电场变为零**；而中心附近则因**相互叠加**

对称平面波导的条件

φ 是 θ 的函数，也与偏振有关，因此只有一定的 φ 和 θ 才能满足式。对于每个 m 值，将允许有一个 θ_m 和一个相对应的 φ_m ，得出波导相长干涉的波导条件：

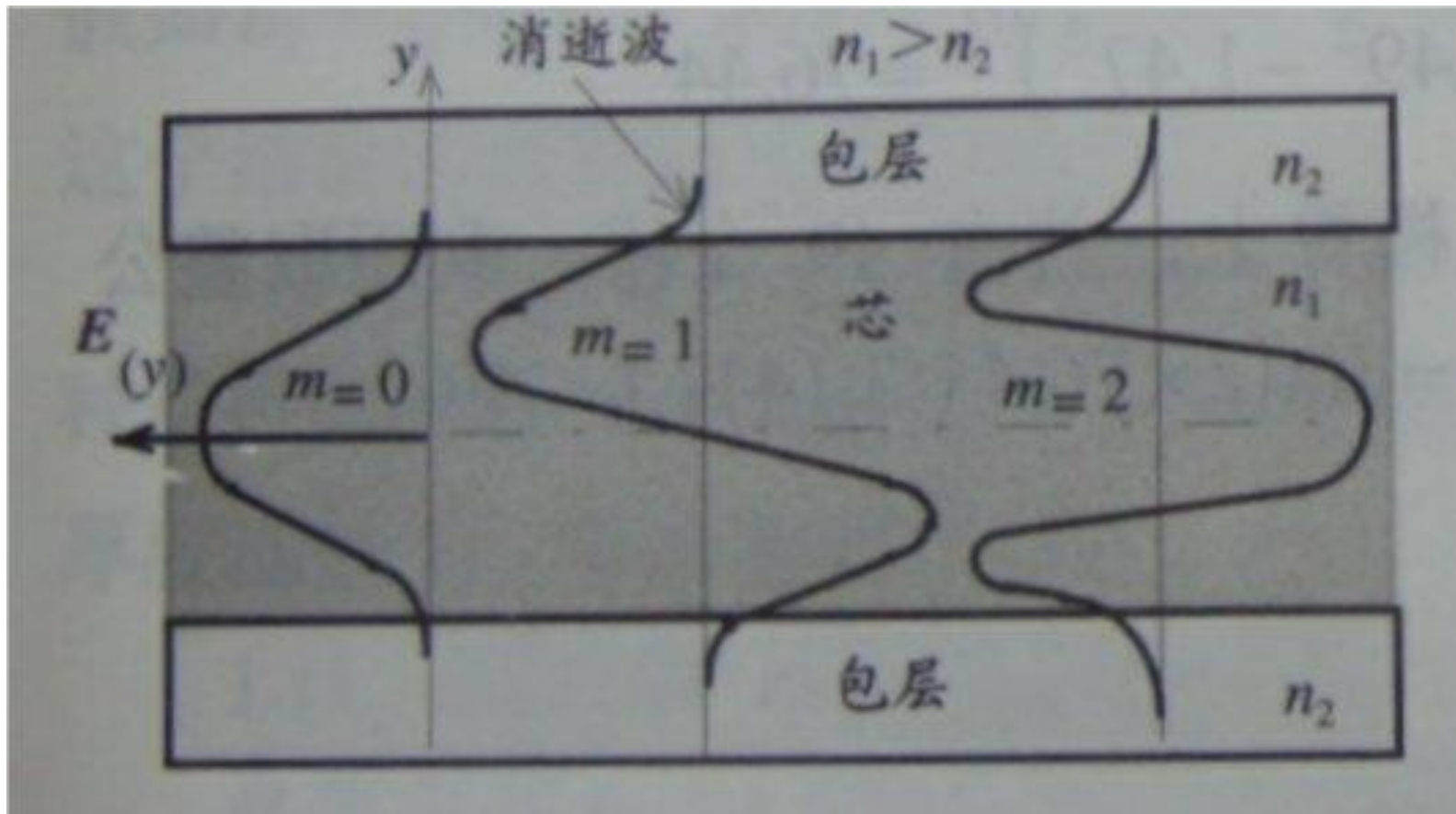
$$\frac{2\pi n_1 D}{\lambda} \cos(\theta_m) - \varphi_m = m\pi \quad m = 0, 1, 2$$

上式说明只有一定入射角的光线才能在波导内传输，每个不同的 m 值将产生不同的传输函数，此时光强的横向分布在波导传输方向并无变化。将这种形态称为模， m 也称为模数。

$$\beta_m = k \sin(\theta_m) = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \sin(\theta_m)$$

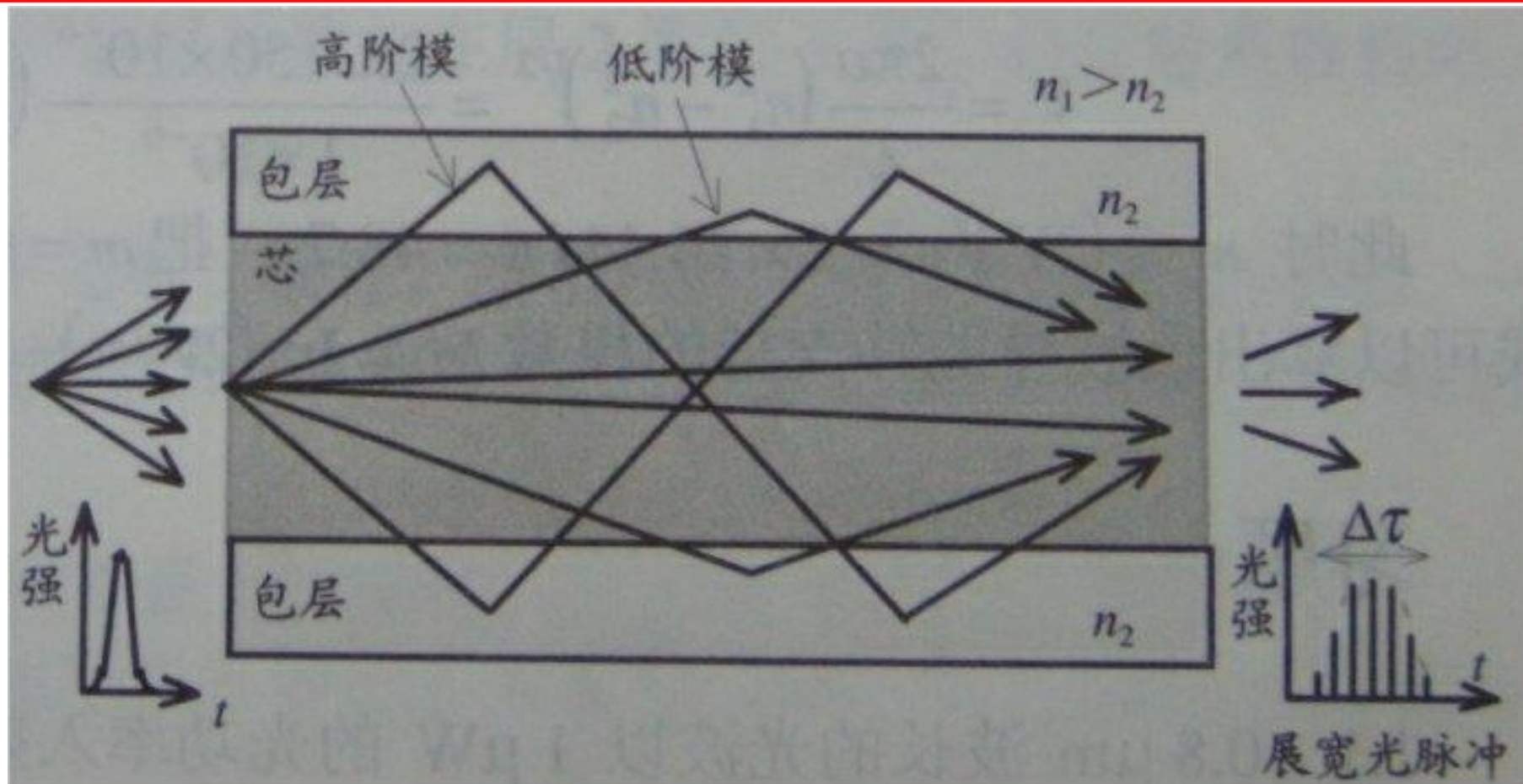
是光沿光波导传输方向的传播常数

光在介质波导上电场分布



$m=0, 1, 2$ 模式的波沿波导 y 方向的电场分布

多模传输



光脉冲的多模传输

根据对称平面波导的条件

归一化频率 V : $V = \frac{2\pi n_1 (D/2)}{\lambda} \cos(\theta_c) = \frac{\pi n_1 D}{\lambda} \cos(\theta_c) = \frac{\pi D}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$

由于 $\sin(\theta_m) > \sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}$ 及 $\frac{2\pi n_1 D}{\lambda} \cos(\theta_m) = m\pi + \varphi_m$

➡ 波导中所传输的模数满足 $m \leq (2V - \varphi_m) / \pi$

实际光器件, $\theta_m \rightarrow \pi/2$ 时, $\varphi \rightarrow \pi$

$$V \geq (m\pi + \pi) / 2$$

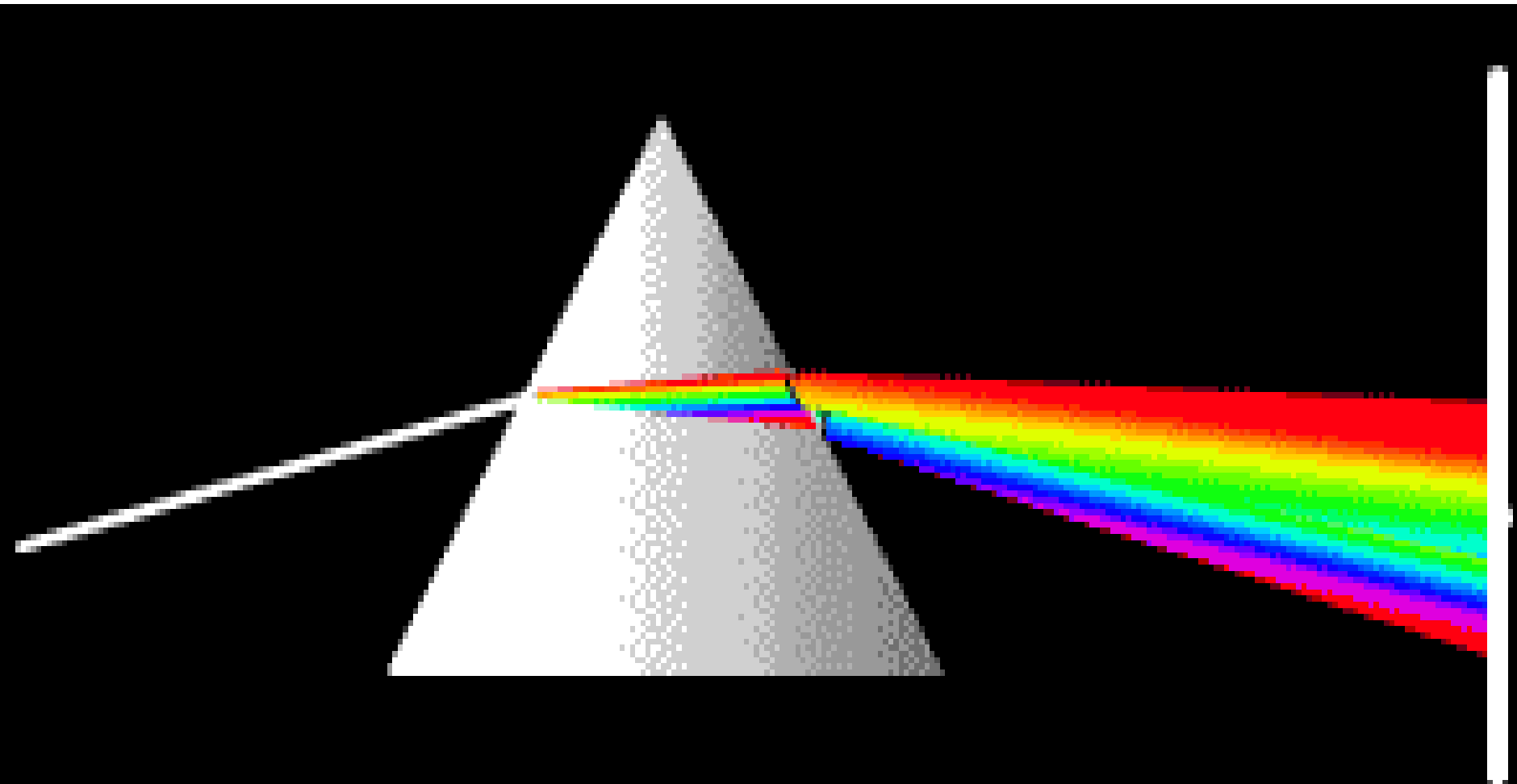
单模 $m=0$ 即 $V > \pi/2$ 或者 $V_c = \pi/2$

一般: $n_2 \sim n_1, \delta n = n_1 - n_2$

单模截至波长 $\lambda_c = 2\sqrt{2}D\sqrt{n_1\delta n}$

光的色散现象

相速与工作频率的关系称为色散特性，白光是复色光，同一介质中，不同颜色的光的折射率不同



波导色散

光波传播常数

$$k = k_0 n_1 = \frac{2\pi f}{c} n_1 = \frac{\omega}{c} n_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

沿z方向的光波传播常数

$$\beta = k \sin(\theta_i) = k_0 n_1 \sin(\theta_i)$$

$$\beta_m D / \tan(\theta_m) - \varphi_m = m\pi \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

$$\varphi_m = \varphi_m(\theta_m)$$

对 $m=0$ 的 θ_i 角解，称为**基模**，也称**最低模式**
对 $m=1$ 的 θ_i 角解，称为**次高次模**
对 $m>1$ 的 θ_i 角解，称为**高次模**

波导色散
曲线

$$\beta_m = k_0 n_1 \sin(\theta_i)_m = \frac{\omega}{(v_p)_m}$$

$$k_0 n_2 \leq \beta_m \leq k_0 n_1$$

相速

$$(v_p)_m = \frac{c}{n_1 \sin(\theta_m)}$$

$$n_2 \leq (n_{eff})_m \leq n_1$$

有效折射率

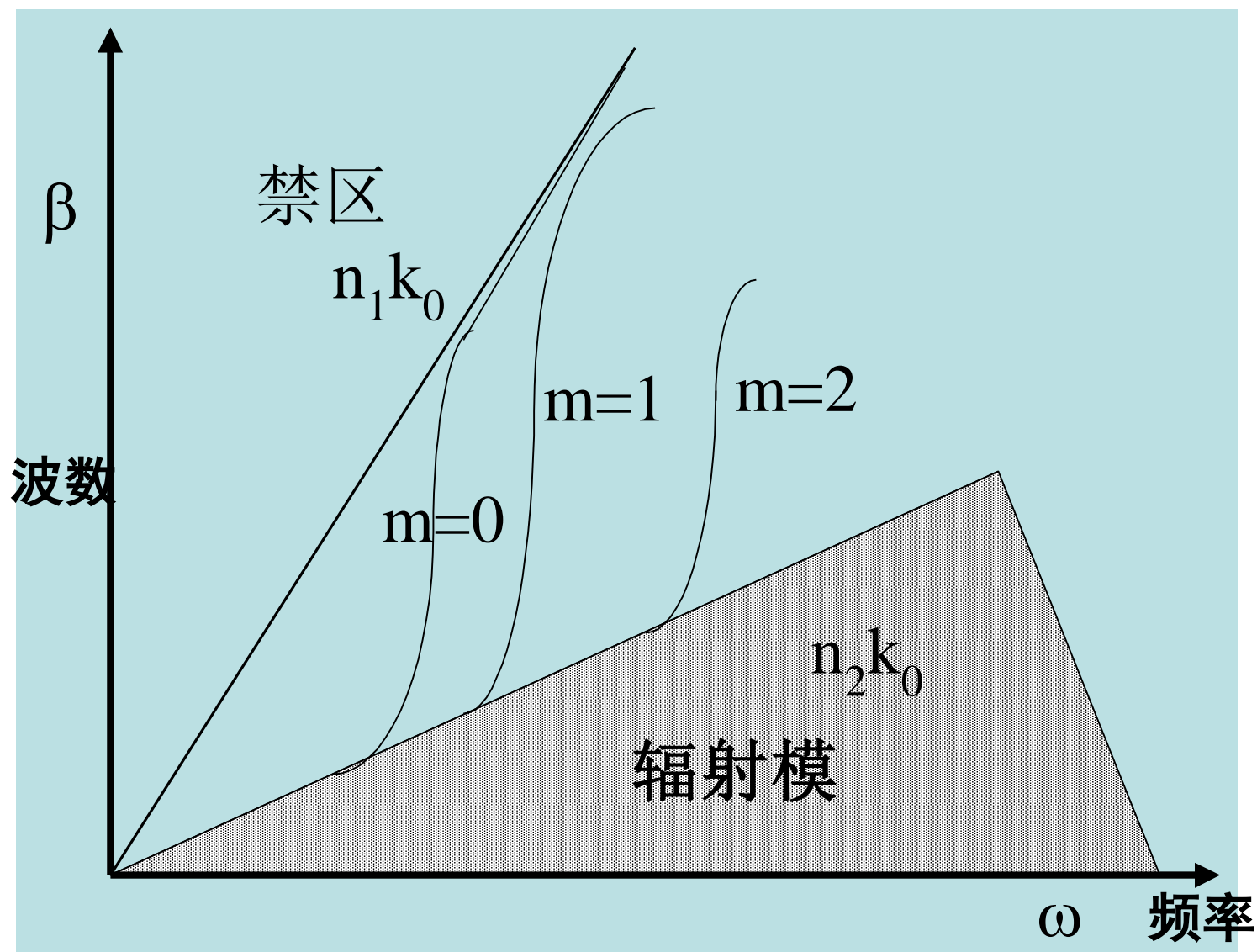
$$(n_{eff})_m = \frac{c}{(v_p)_m} = n_1 \sin(\theta_m)$$

β_m 随 ω 的变化关系就是色散关系—波导色散

波导色散的比拟



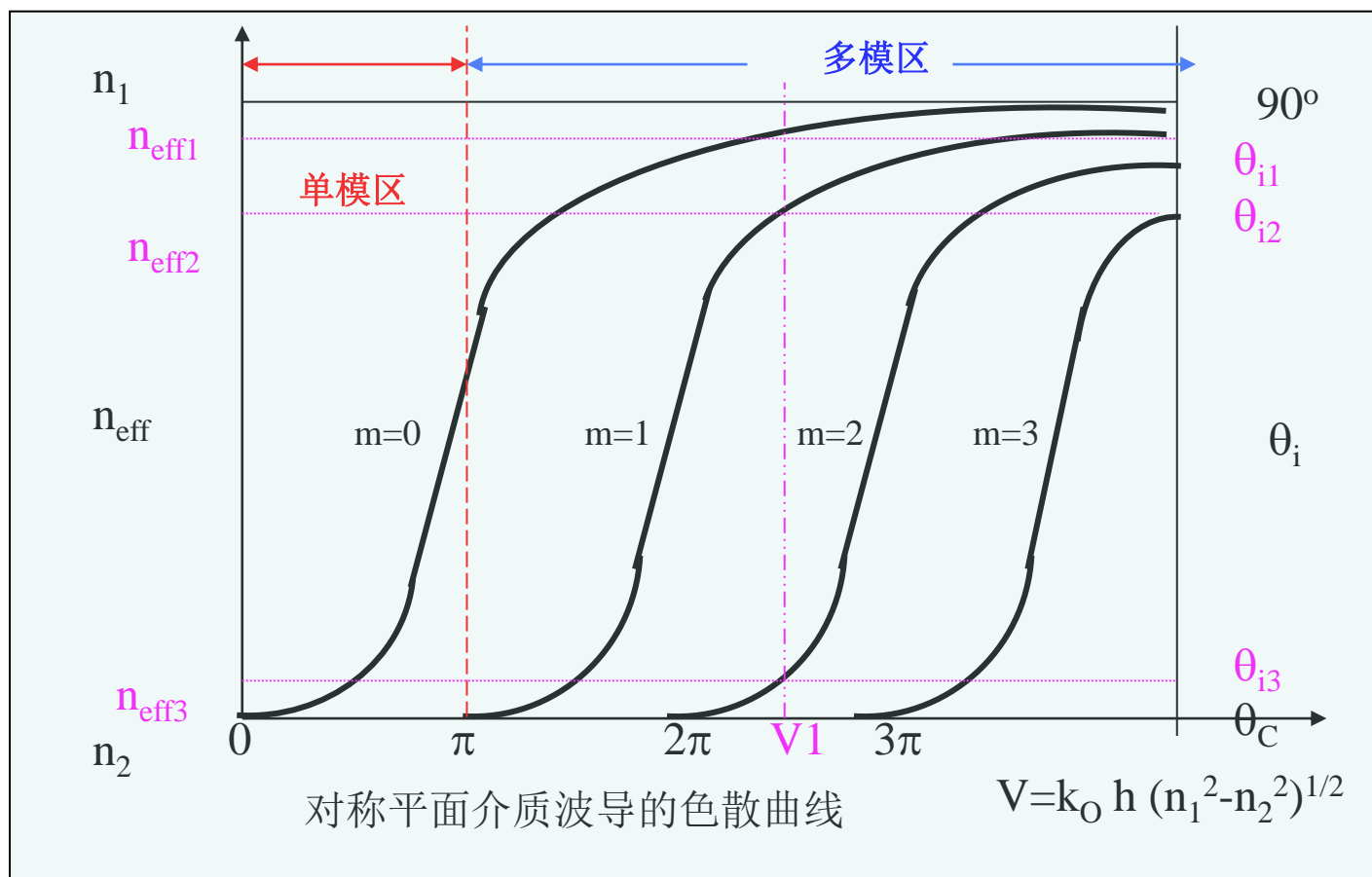
对称平面波导



对称平面波导

归一化频率

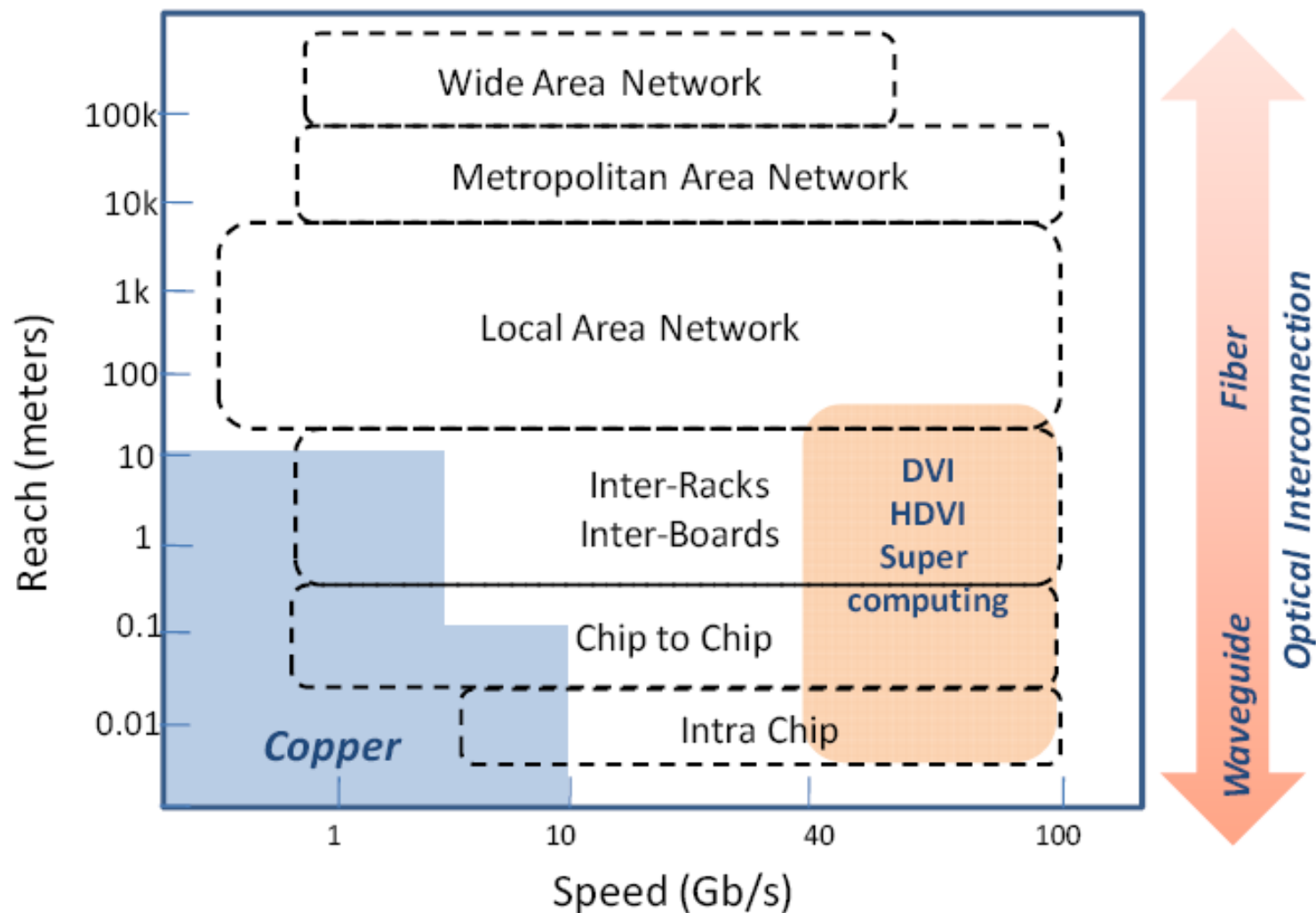
$$V = \frac{\pi D}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$



小结

- 平面光波动结构及其特点
- 什么是传输模式（模）？
- 对称平面光波导的描述
- 对称平面波导的条件
- 光在介质波导上电场分布
- 多模和单模
- 模数和截止波长
- 色散—波导色散、模式间色散
- 对称平面波导的归一化表示

应用举例-光互连

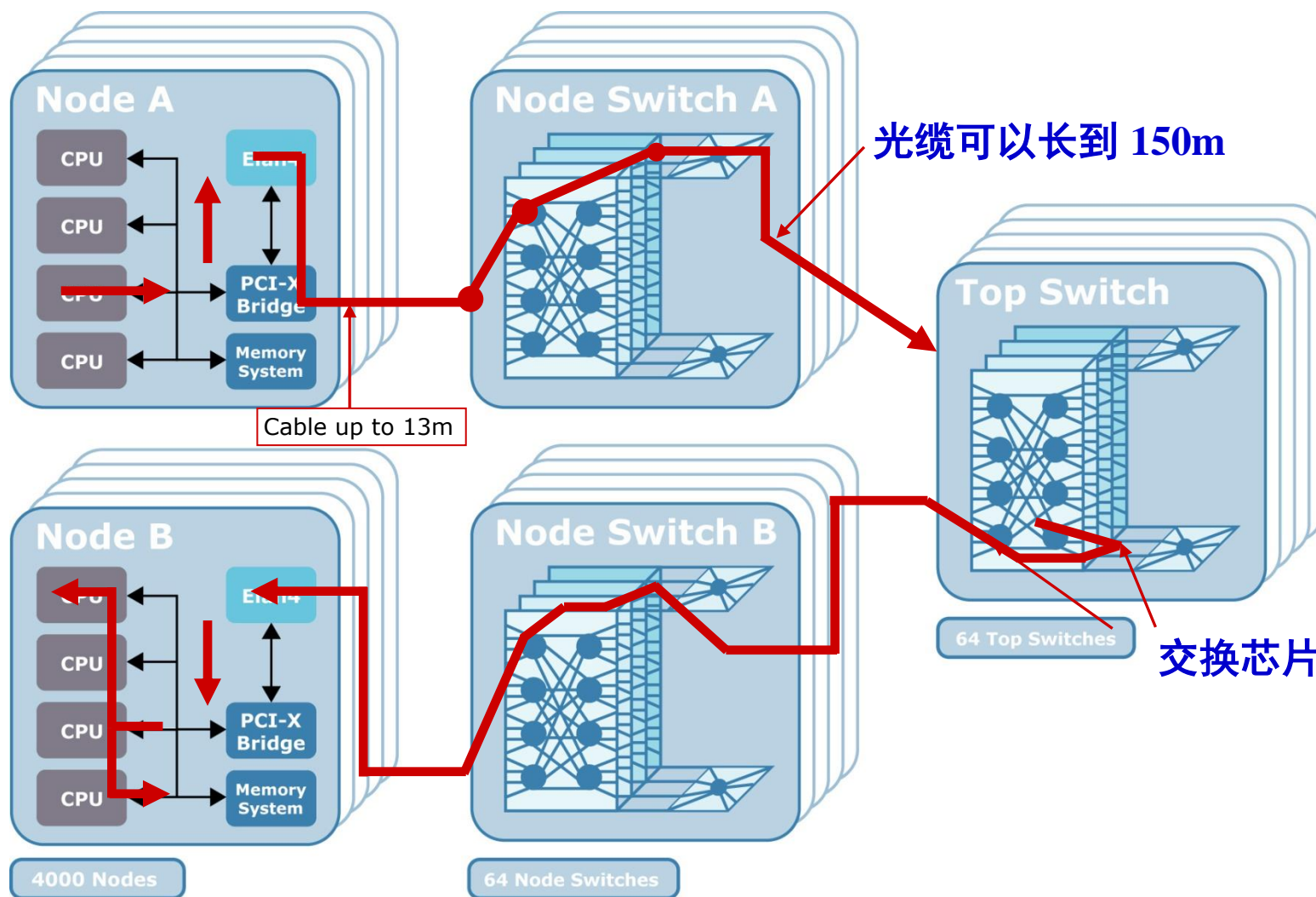


物理互連

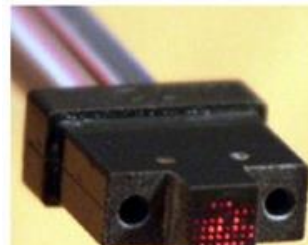
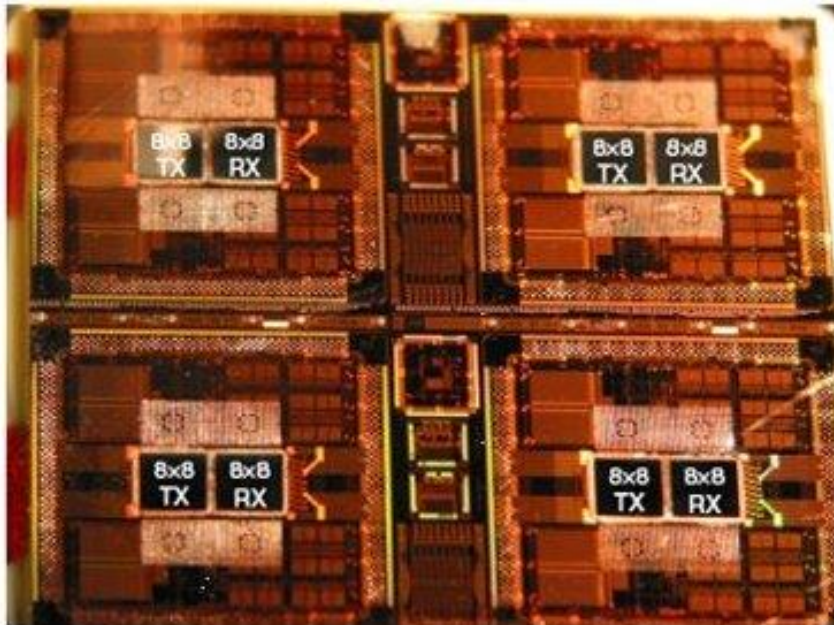
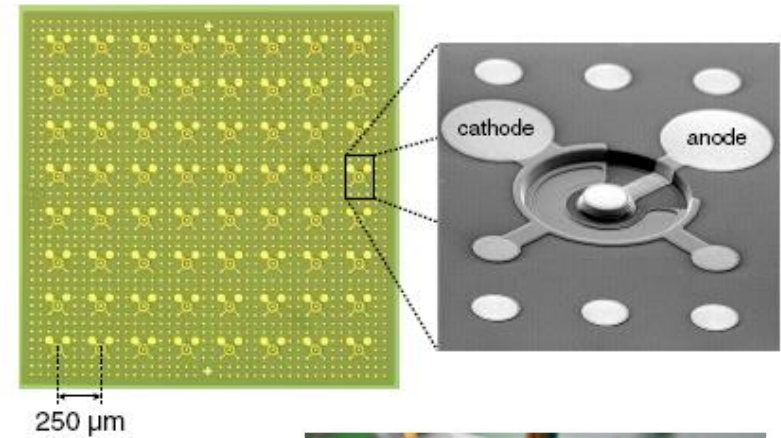
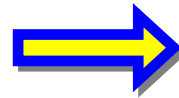
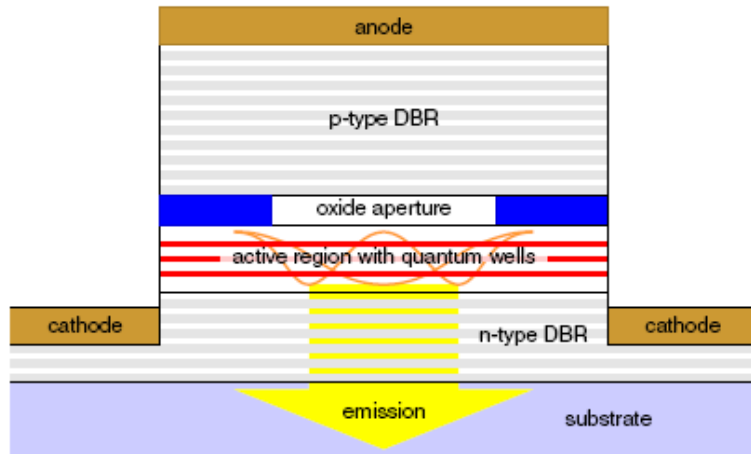


Source IDC: 2006, Document # 201722, "The Impact Of Power and Cooling On Data Center Infrastructure", John Humphreys, Jed Scaramella

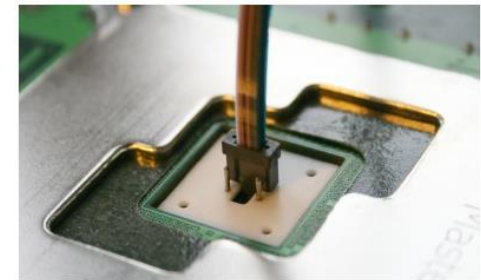
互连结构



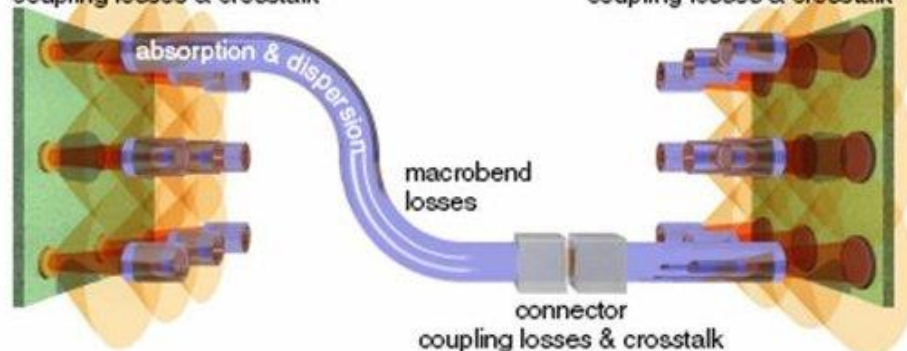
光連接 (VCSEL)



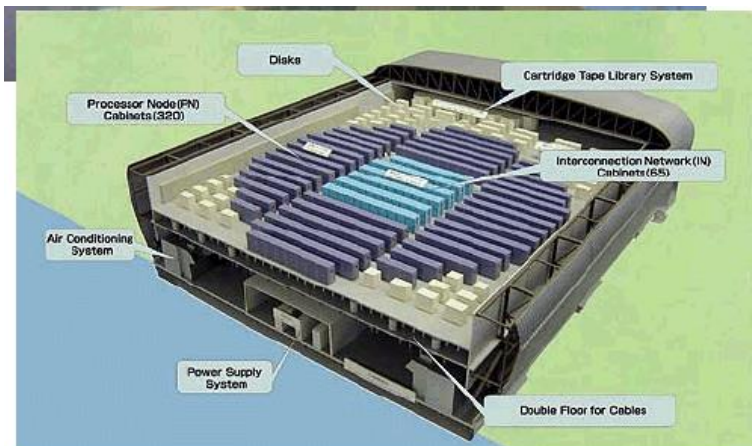
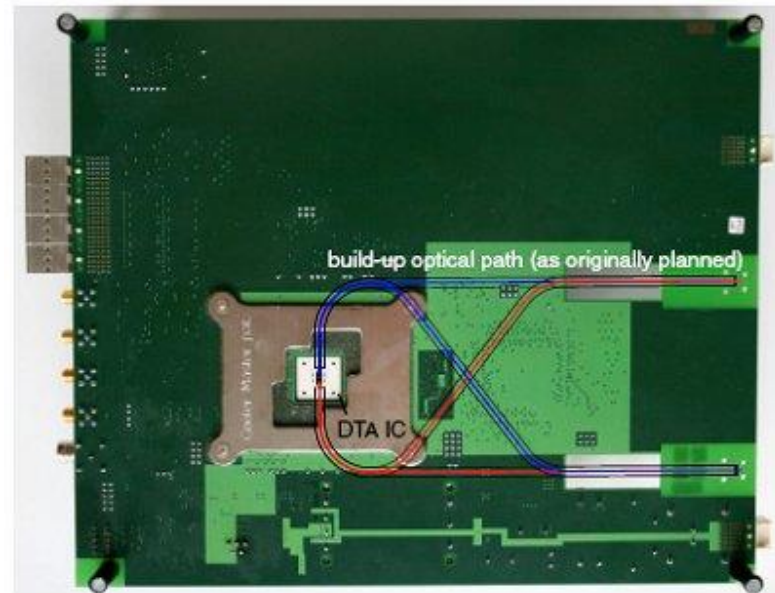
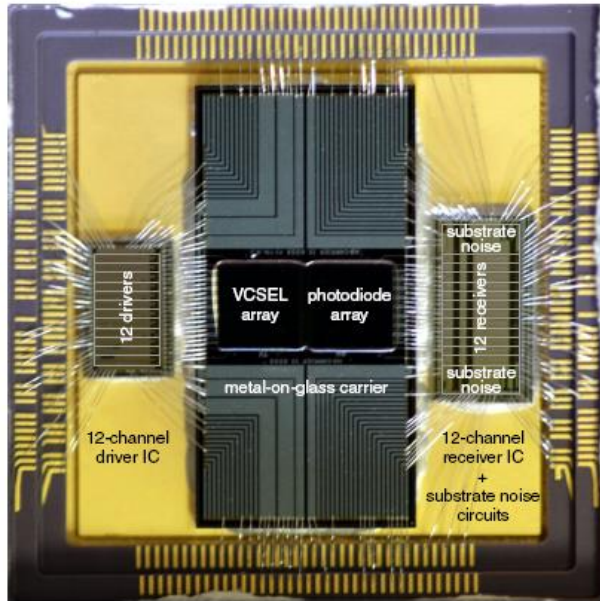
VCSEL-fiber coupling losses & crosstalk



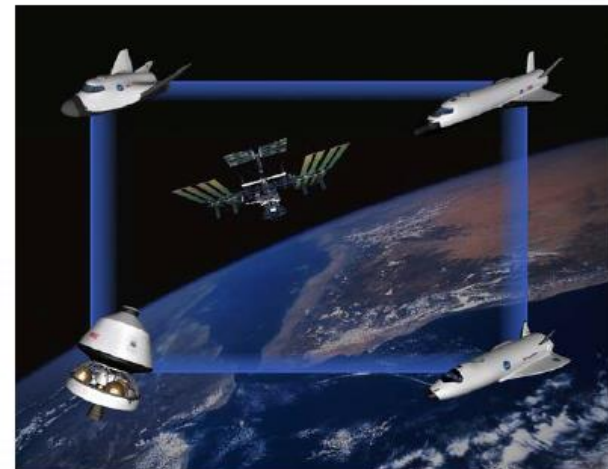
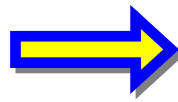
fiber-photodiode coupling losses & crosstalk



光互連



(Earth Simulator Picture from JAERI web)



谢谢 !