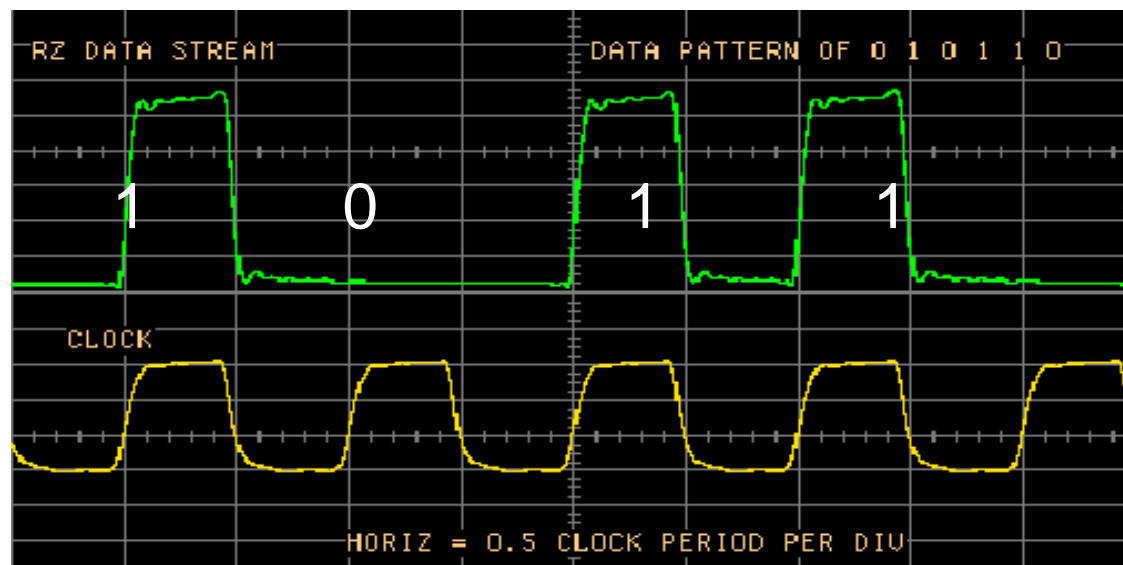


## 第六章 光调制



现代光通信系统中传输信息的光脉冲

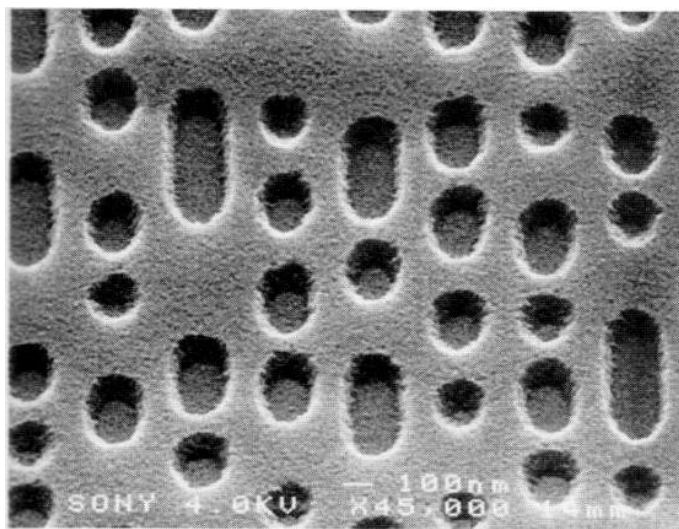
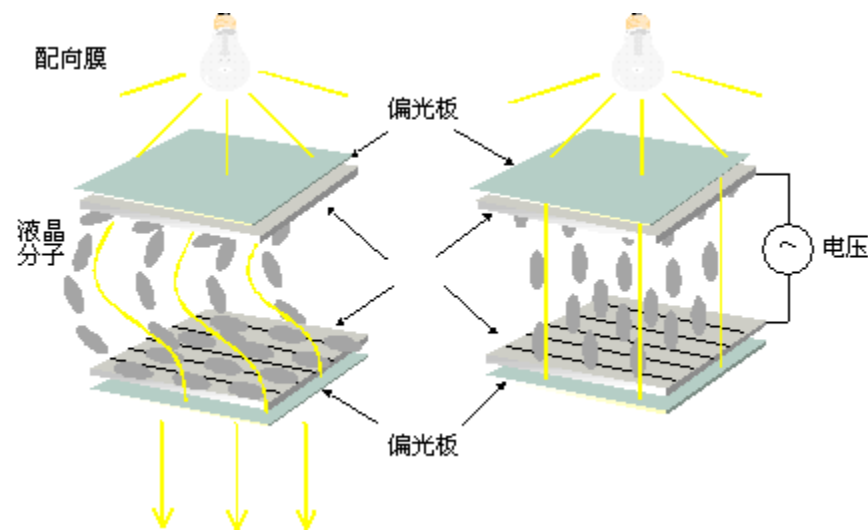


图 3.12 Deep-UV で記録した 25GB ディスク ( $p=0.32 \mu\text{m}$ ,  $q=0.348 \mu\text{m}$ )



液晶显示原理

## 6.1 电光调制

### 6.1.1 电光效应

### 6.1.2 线性电光效应

### 6.1.3 电光调制原理

### 6.1.4 电光光束偏转

## 6.2 声光调制

## 6.3 磁光调制

## 6.4 集成光学调制器

**电光效应：**指一些晶体在电场作用下表现出双折射效应。

电场：直流电场或频率不超过 $10^9\text{Hz}$

光场：频率为 $10^{14}$ – $10^{15}\text{Hz}$

其双折射的大小与电场强度有关；如果电场所加的晶体本身就具有双折射，那么电场将改变材料的双折射的大小。

**应用：**广泛用于控制光强和相位。如光通信、激光调制、激光锁模和激光扫描等。

二阶非线性极化：

$$P_i^{(2)}(\omega) = 2\varepsilon_0 \sum_{jk} \chi_{ijk}^{(2)}(-\omega; \omega, 0) E_j(\omega) E_k(0)$$

线性电光效应亦称普克尔（Pockels）效应。

三阶非线性极化：

$$P_i(\omega) = 3\varepsilon_0 \sum_{jkl} \chi_{ijkl}^{(3)}(-\omega; \omega, 0, 0) E_j(\omega) E_k(0) E_l(0)$$

平方律电光效应或称克尔（Kerr）电光效应。

各向异性材料:

$$D_i = \varepsilon_0 \sum_j \varepsilon_{ij} E_j$$

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}$$

由全对称性:  $F(\omega) = F(-\omega)$  所有 $\omega$ 在透明区域

$\chi^{(1)}_{\mu\alpha}(-\omega, \omega) = \chi^{(1)}_{\alpha\mu}(\omega, -\omega) \Rightarrow \varepsilon_{ij}$ 是一个对称矩阵

对角化:

$$\begin{bmatrix} D_X \\ D_Y \\ D_Z \end{bmatrix} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{YY} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{ZZ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_X \\ E_Y \\ E_Z \end{bmatrix}$$

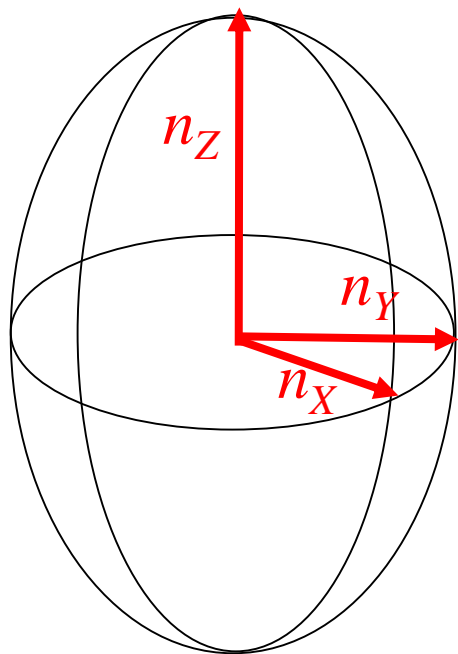
相应于三个主轴的光学折射率:

$$n_X = \sqrt{\epsilon_{XX}}, \quad n_Y = \sqrt{\epsilon_{YY}}, \quad n_Z = \sqrt{\epsilon_{ZZ}}$$

任意方向的折射率由下式的折射率椭球面给出:

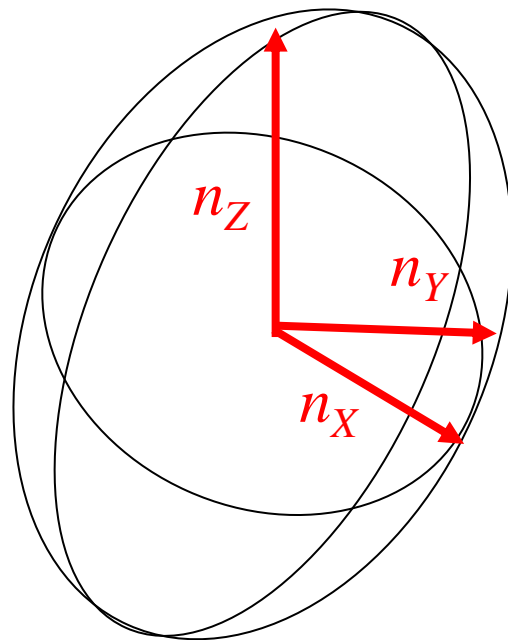
$$\frac{X^2}{n_X^2} + \frac{Y^2}{n_Y^2} + \frac{Z^2}{n_Z^2} = 1$$

未加电场



$$\frac{X^2}{n_X^2} + \frac{Y^2}{n_Y^2} + \frac{Z^2}{n_Z^2} = 1$$

加电场



$$\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 X^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_2 Y^2 + \left(\frac{1}{n^2}\right)_3 Z^2 + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 YZ + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 ZX + 2\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 XY = 1$$

矩阵表示:

有外场时  $\left(\frac{1}{n^2}\right)_i$  量的变化为

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \left(\frac{1}{n^2}\right)_i \Big|_E - \left(\frac{1}{n^2}\right)_i \Big|_0 \\ = \sum_j r_{ij} E_j$$

$r_{ij}$ : 电光系数

量级  $\sim 10^{-12}\text{mV}^{-1}$

共18个元素

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix}$$



KDP晶体  
 $\bar{4}2m$  晶类

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} r_{41} &= 8.0 \times 10^{-12} \text{ m/V} \\ r_{63} &= 11.0 \times 10^{-12} \text{ m/V} \\ \lambda &= 632.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

GaAs晶体  
 $\bar{4}3m$  晶类

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} r_{41} &= 10.6 \times 10^{-12} \text{ m/V} \\ \lambda &= 632.8 \text{ nm} \end{aligned}$$

### 6.1.3 电光调制原理

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} & \frac{X^2}{n_o^2} + \frac{Y^2}{n_o^2} + \frac{Z^2}{n_e^2} = 1 \\ & \frac{X^2}{n_o^2} + \frac{Y^2}{n_o^2} + \frac{Z^2}{n_e^2} + 2r_{41}E_X YZ + 2r_{41}E_Y XZ + 2r_{63}E_Z XY = 1 \end{aligned}$$

Z轴方向加电压:

$$\frac{X^2}{n_o^2} + \frac{Y^2}{n_o^2} + \frac{Z^2}{n_e^2} + 2r_{63}E_Z XY = 1$$

新主轴坐标系:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

$$X = \frac{x-y}{\sqrt{2}} \quad Y = \frac{x+y}{\sqrt{2}} \quad Z = z$$

$$X = \frac{x-y}{\sqrt{2}} \quad Y = \frac{x+y}{\sqrt{2}} \quad Z = z$$

$$\left( \frac{1}{n_0^2} + r_{63} E_z \right) x^2 + \left( \frac{1}{n_0^2} - r_{63} E_z \right) y^2 + \frac{z^2}{n_e^2} = 1$$

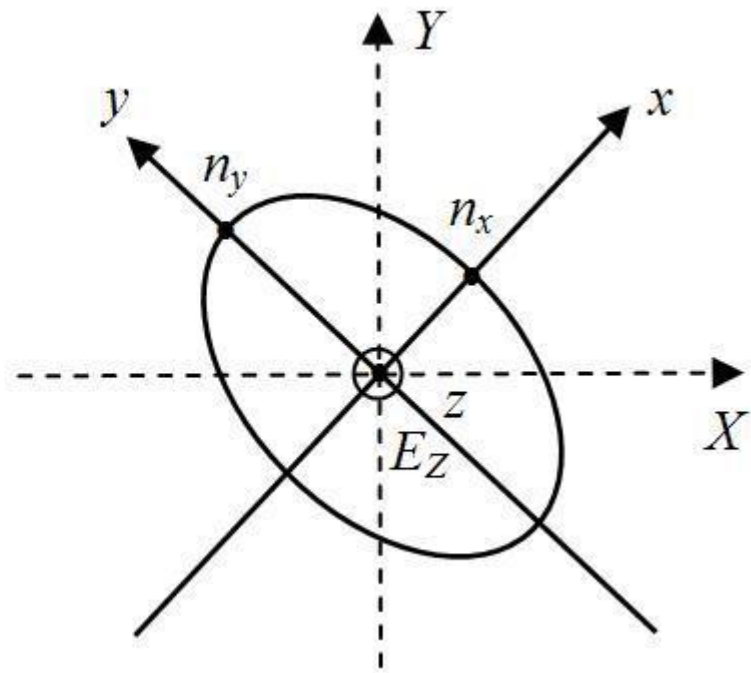
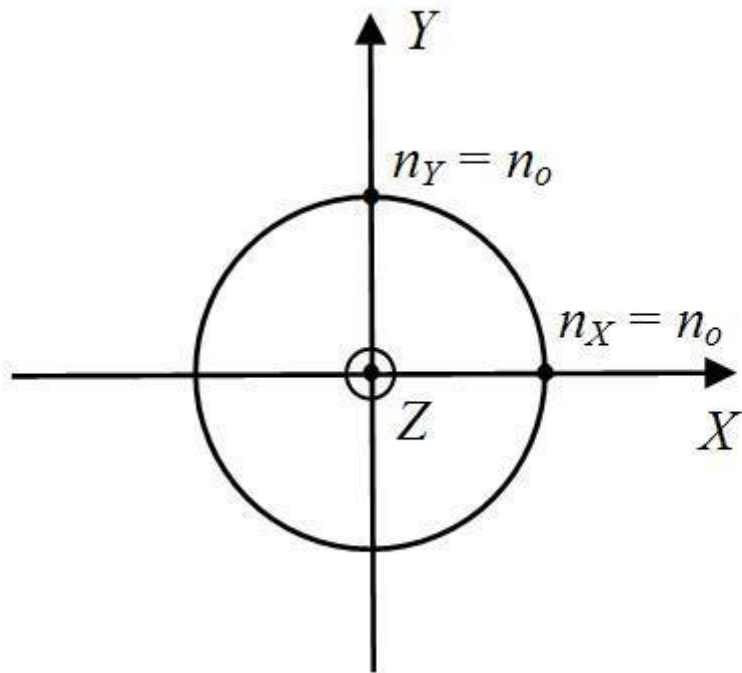
$$\frac{1}{n_x^2} = \frac{1}{n_0^2} + r_{63} E_z \quad \frac{1}{n_y^2} = \frac{1}{n_0^2} - r_{63} E_z \quad \frac{1}{n_z^2} = \frac{1}{n_e^2}$$

$$n_x = \left( \frac{1}{n_o^2} + r_{63} E_z \right)^{-\frac{1}{2}} = n_o (1 + r_{63} n_o^2 E_z)^{-\frac{1}{2}} \quad r_{63} E_z \ll 1$$

$$\approx n_o \left( 1 - \frac{1}{2} r_{63} n_o^2 E_z \right) = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z$$

$$n_x = n_o - \frac{1}{2}n_o^3 r_{63} E_z$$

$$n_y = n_o + \frac{1}{2}n_o^3 r_{63} E_z$$



KDP晶体的电光效应

光通过晶体后产生相位差： $\Gamma = (n_y - n_x) \frac{\omega L}{c}$  电光延迟

$$\Gamma = \frac{n_o^3 r_{63} E_z \omega L}{c} = \frac{n_o^3 r_{63} \omega V}{c} \quad \Gamma = \pi: \text{半波电压}$$

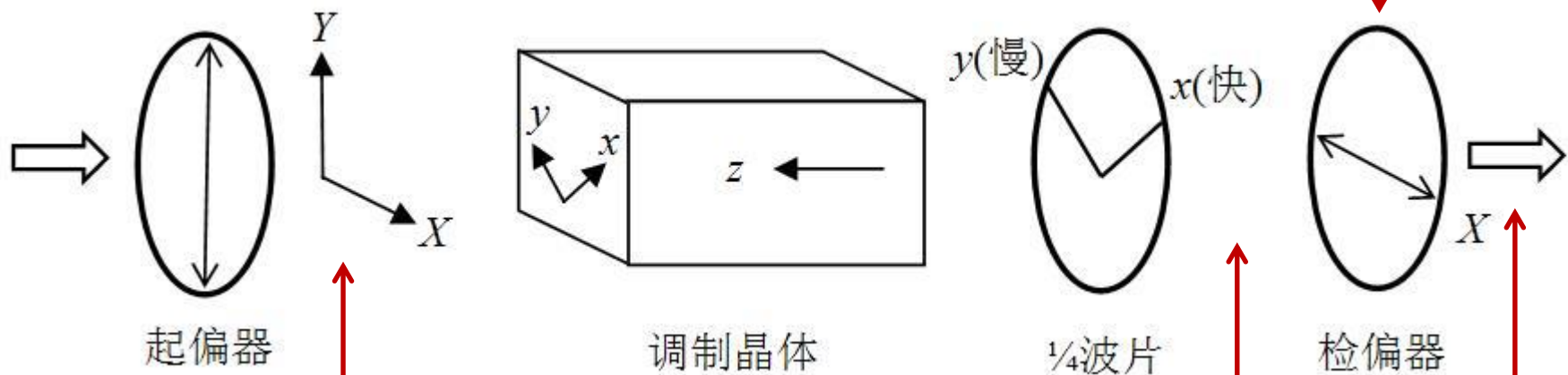
$$V_{\lambda/2} = \frac{\pi c}{\omega n_o^3 r_{63}} = \frac{\lambda}{2 n_o^3 r_{63}}$$

$$\Gamma = \pi V / V_{\lambda/2}$$

对于KDP晶体,  $r_{63} = 11 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ ,  $n = 1.5$ ,

对于可见光  $V_{\lambda/2} \approx 1$  万伏

# □ （纵向）电光光强调制器原理



$$\mathbf{X} = (\mathbf{x} - \mathbf{y}) / \sqrt{2}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{in} e^{-i\omega t} + c.c.$$

$$\mathbf{E}_{in} = E_{in} \mathbf{Y} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} (\mathbf{x} + \mathbf{y})$$

$$\mathbf{E} = \frac{E_{in}}{\sqrt{2}} (\mathbf{x} + e^{i\Gamma} \mathbf{y})$$

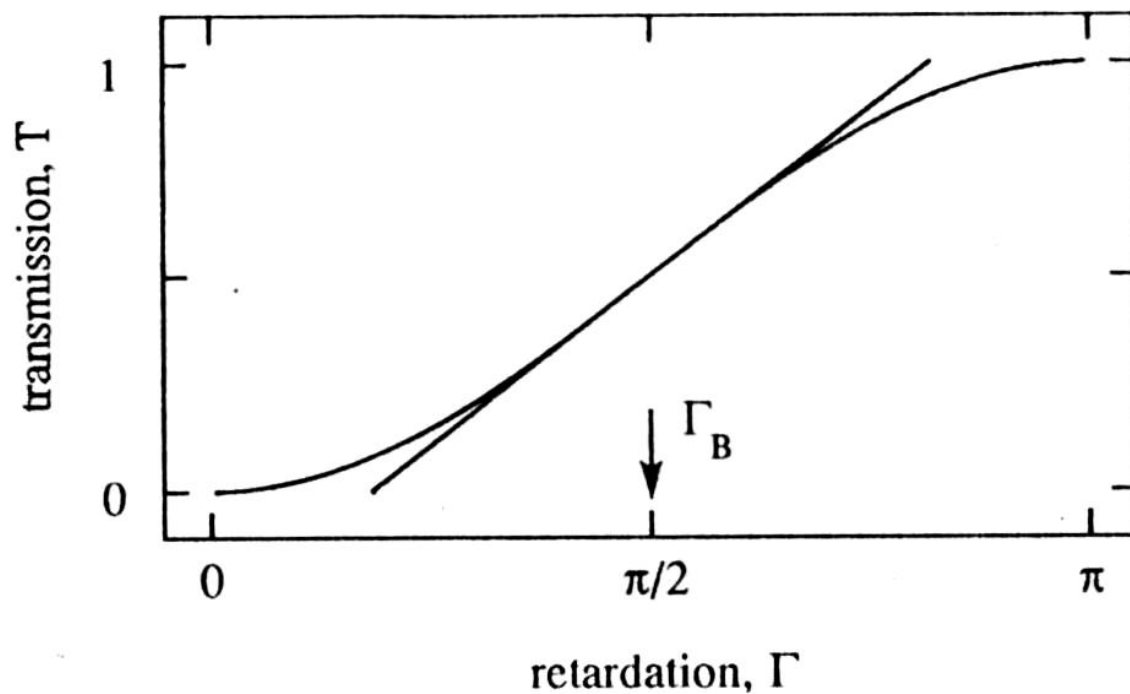
$$\mathbf{E}_{out} = (\mathbf{E} \cdot \mathbf{X}) \mathbf{X}$$

$$\mathbf{E}_{out} = \frac{E_{in}}{2} (1 - e^{i\Gamma}) \mathbf{X}$$

$$T = \frac{|\mathbf{E}_{out}|^2}{|\mathbf{E}_{in}|^2} = \frac{1}{4} |1 - e^{i\Gamma}|^2 = \sin^2(\Gamma/2)$$

$$\Gamma = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{V_{\lambda/2}} V(t)$$

$$T = \sin^2(\Gamma/2)$$

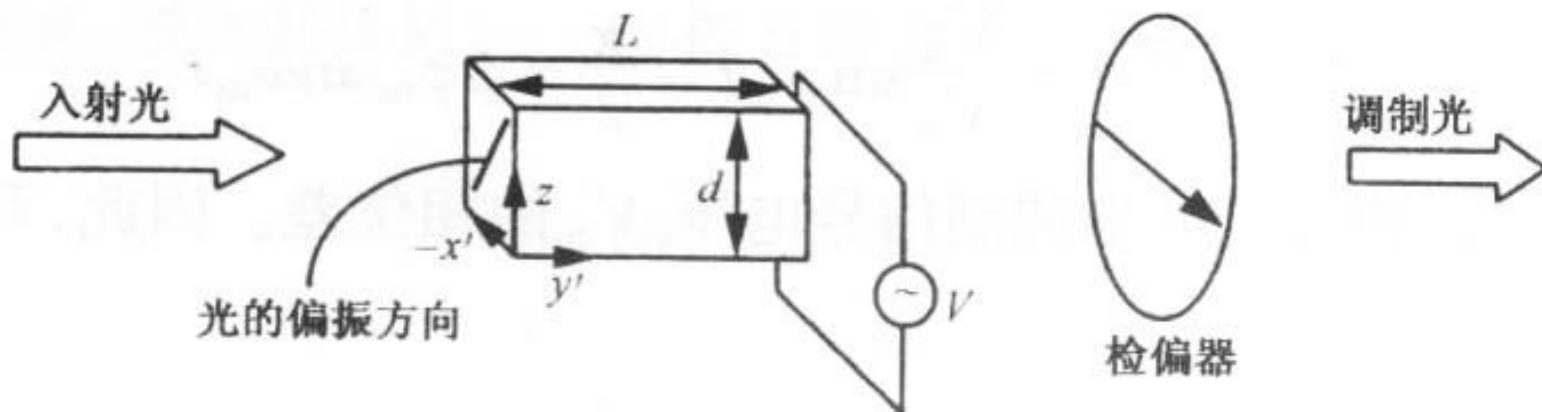


电光调制器的透过率

$V(t) \ll V_{\lambda/2}$ 时:

$$T = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \sin\left(\frac{\pi}{V_{\lambda/2}} V(t)\right) \right] \approx \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\pi}{V_{\lambda/2}} V(t) \right]$$

## 横向电光调制器示意图



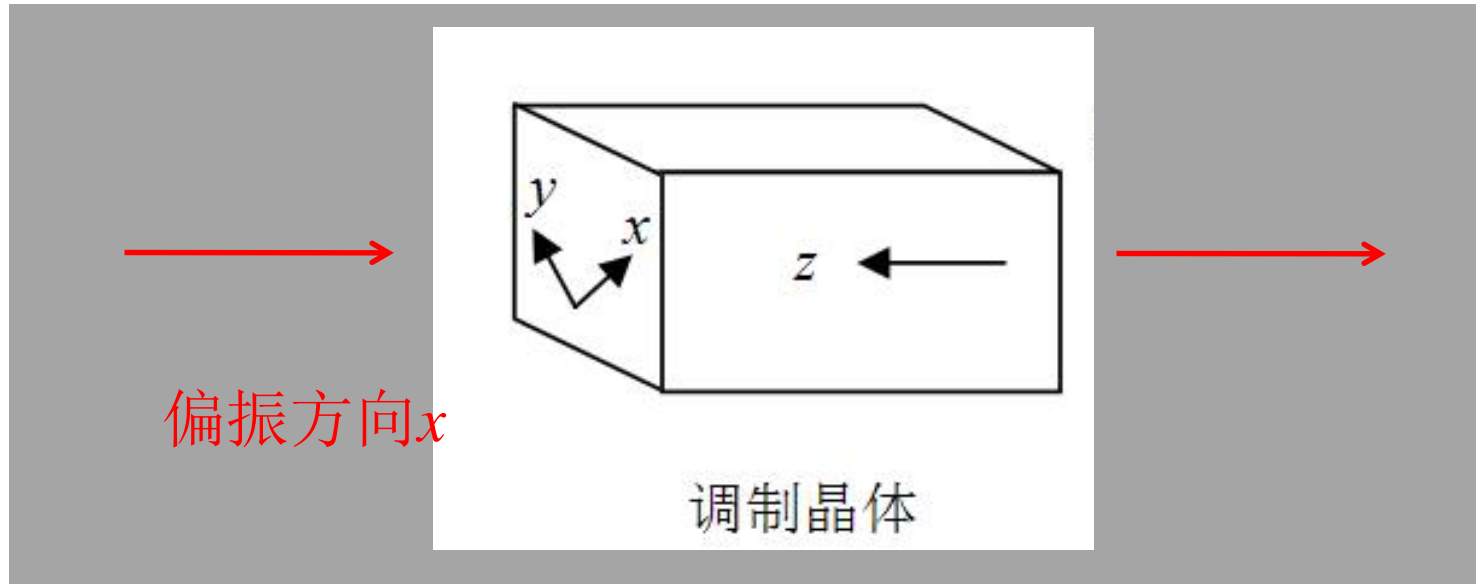
相位差

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{x'} - n_z) L = \frac{2\pi}{\lambda} \left[ \underline{(n_o - n_e) L} - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} L \frac{V}{d} \right]$$

与V无关



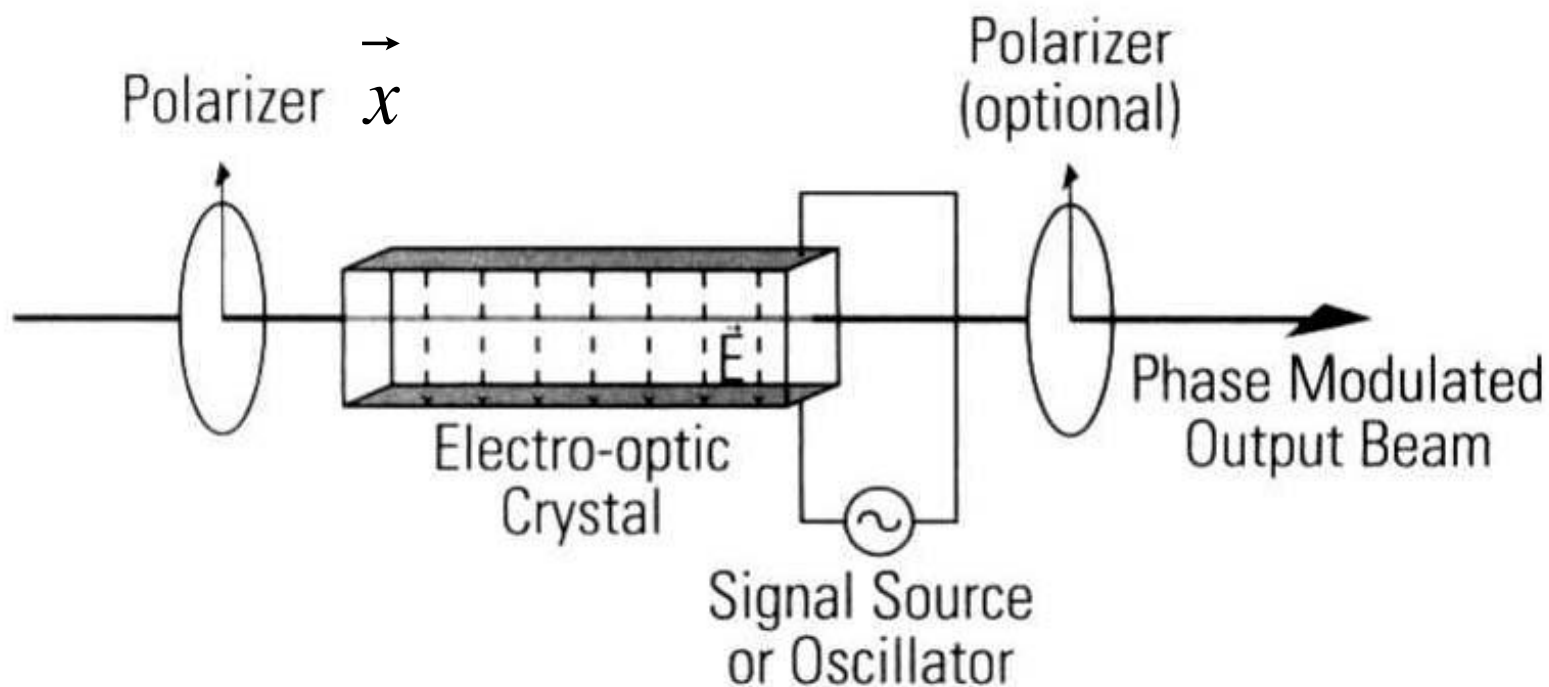
## □ 电光相位调制器



与 $V = 0$ 相比的相位变化:

$$\phi = (n_x - n_o) \frac{\omega L}{c} = -\frac{n_o^3 r_{63} E_z \omega L}{2c} = -\frac{n_o^3 r_{63} V \omega}{2c}$$

# 利用电光相位调制器调制光的频率



电光相位调制器所加电压： $V = V_0 \sin(\Omega t)$

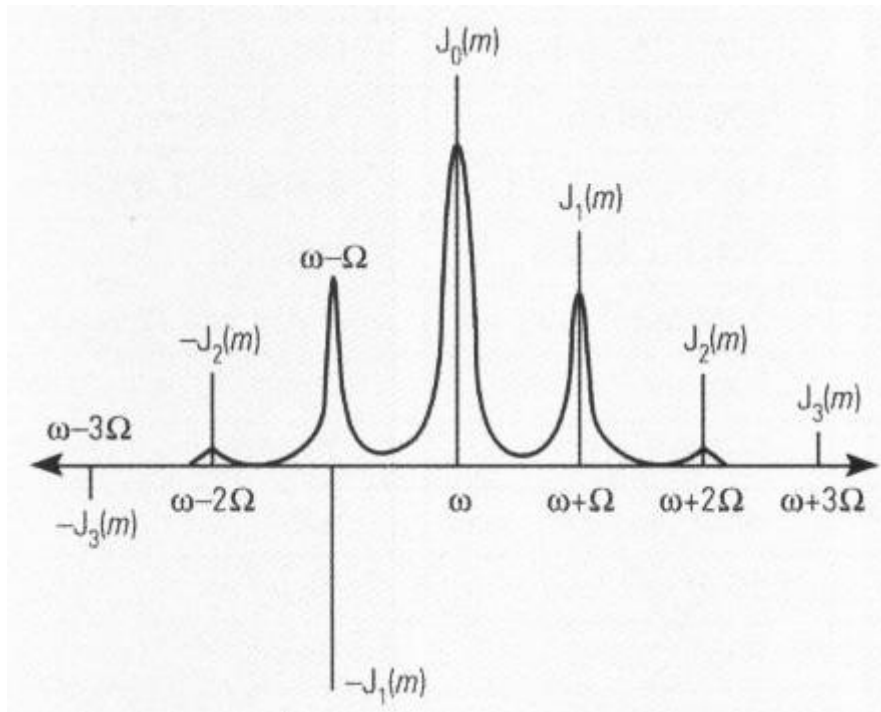
相位的改变量： $\phi(t) = m \sin(\Omega t)$

输出光电场：

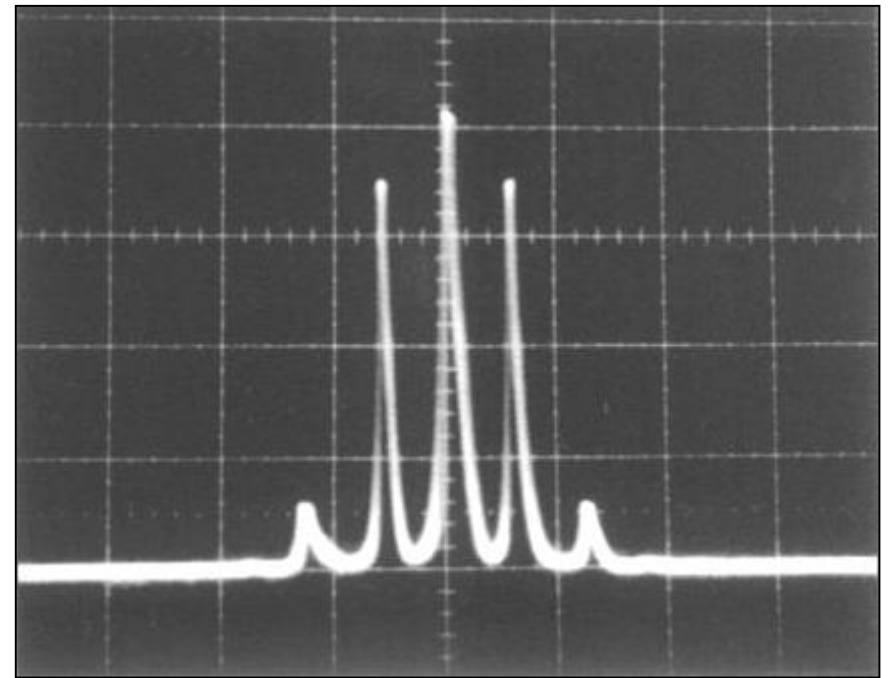
$$E = E_0 e^{i[\omega t + m \sin(\Omega t)]}$$
$$= E_0 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} J_k(m) e^{ik\Omega t} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_k(m) e^{-ik\Omega t} \right\} e^{i\omega t}$$

$J_k$ 为k阶贝赛尔函数

$$E = E_0 \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} J_k(m) e^{ik\Omega t} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_k(m) e^{-ik\Omega t} \right\} e^{i\omega t}$$

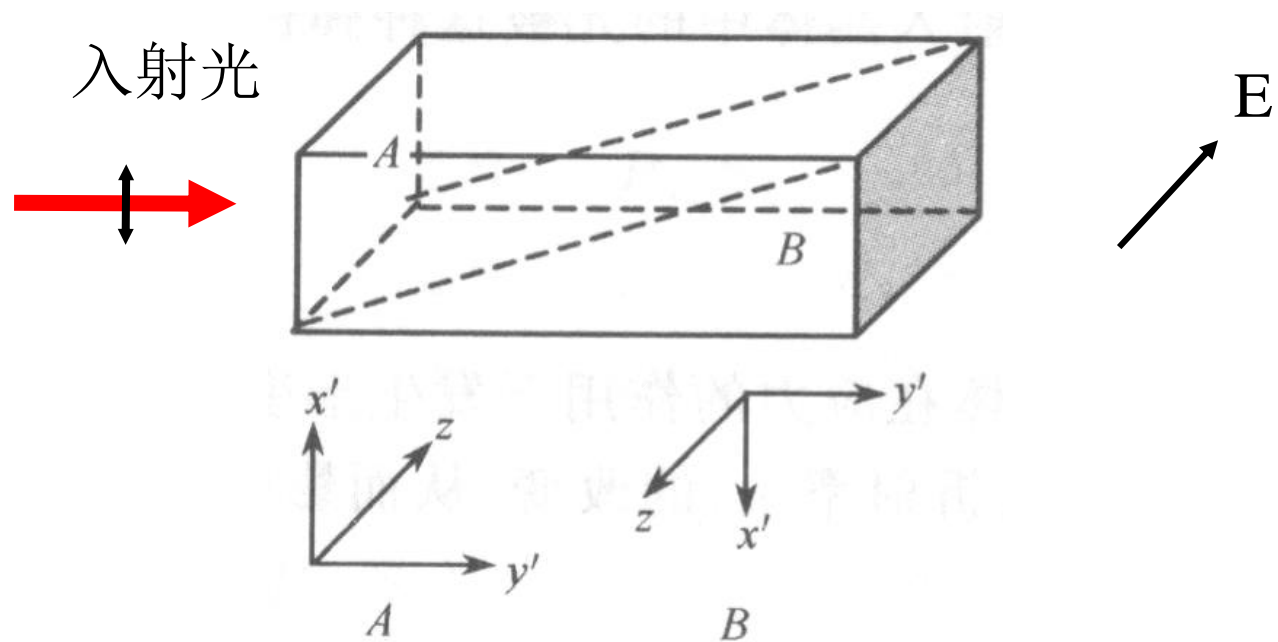


谱分布



实验结果

## 6.1.4 电光光束偏转



**KDP电光光束偏转器**

$$n_A = n_o - \frac{1}{2}n_o^3 r_{63} E$$

$$n_B = n_o + \frac{1}{2}n_o^3 r_{63} E$$

$$\Delta n = n_B - n_A = n_o^3 r_{63} E$$

$$\theta = \frac{\Delta n l}{d} = n_o^3 r_{63} E \frac{l}{d}$$

## 6.2 声光调制

### 6.2.1 弹光效应

### 6.2.2 声光衍射

### 6.2.3 声光器件

一、声光调制器

二、声光偏转器

- 1922年布里渊首先提出利用声波对光波进行衍射的概念，随后于1932年得到实验验证。
- 弹光效应的物理机制：晶体在应力的作用下发生形变时，分子间的相互作用力发生改变，导致介电常数 $\epsilon$ （及折射率 $n$ ）的改变。
- 声光调制：  
声波  $\rightarrow$  介质密度变化  $\rightarrow$  折射率正弦变化  $\rightarrow$   
对入射光产生衍射效应  $\rightarrow$  声波对光的调制



## 6.2.1 弹光效应

逆介电张量



不加声场:  $B_{11}^0 x^2 + B_{22}^0 y^2 + B_{33}^0 z^2 = 1$

弹性应变 $S_{kl}$ : 表示介质中两粒子之间的距离每单位长度的伸长, 是二阶张量。

外力作用引起的弹性应变导致折射率椭球变化:

$$B_{11}x^2 + B_{22}y^2 + B_{33}z^2 + 2B_{23}yz + 2B_{13}xz + 2B_{12}xy = 1$$

$$B_{ij} = B_{ij}^0 + \Delta B_{ij}$$

弹光系数张量



对折射率的影响： $\Delta B_{ij} = P_{ijkl} S_{kl}$  ← 应变张量

逆介电张量对角元素相等：

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} \\ & & & \vdots & & \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}$$

以各向同性熔融石英为例，在某一方向加应力：

$$(B^0 + P_{11}S_1)x^2 + (B^0 + P_{12}S_1)(y^2 + z^2) = 1$$

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2 + z^2}{n_2^2} = 1$$

$$n_1 = n_0 - \frac{n_0^3}{2} P_{11} S_1 \quad n_2 = n_0 - \frac{n_0^3}{2} P_{12} S_1$$

折射率的改变与弹性应变成线性关系

沿y或z向传播时，双折射率为：

$$\Delta n = n_1 - n_2 = -\frac{n_0^3}{2} (P_{11} - P_{12}) S_1$$

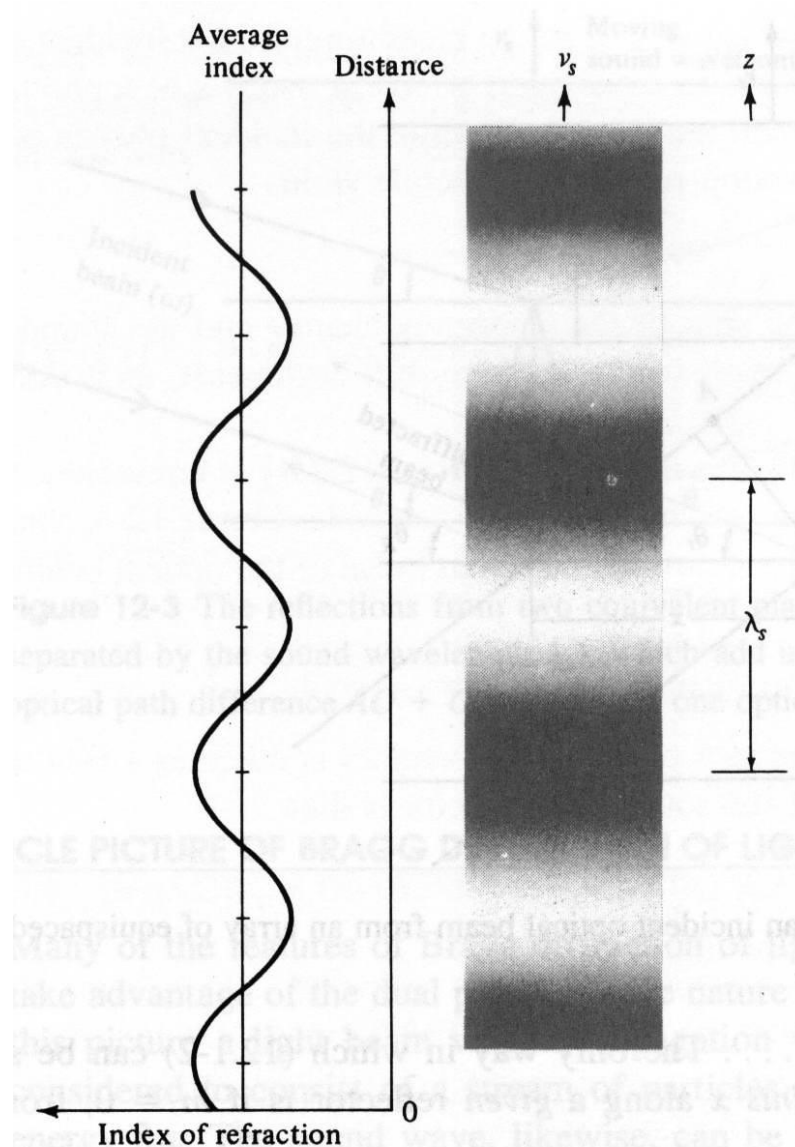
## 5.2.2 声光衍射

质点的位移:

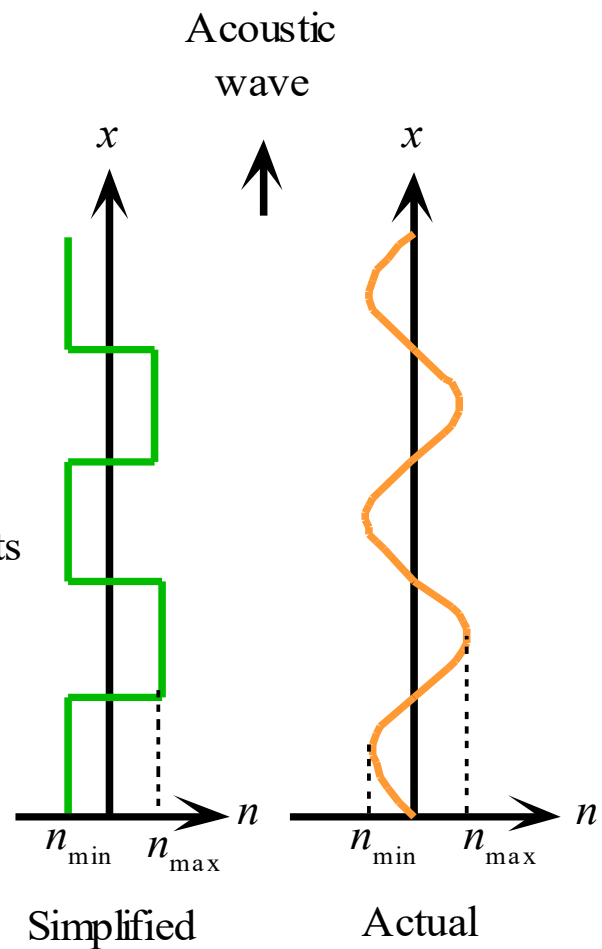
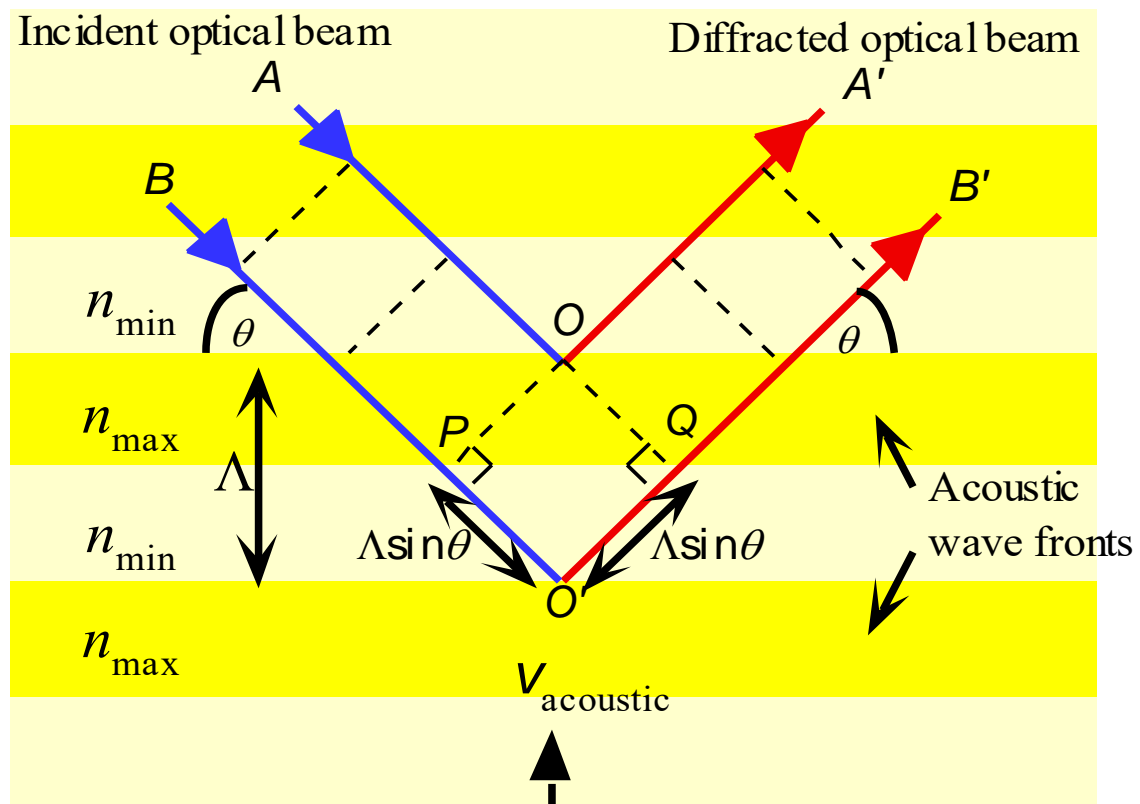
$$u(z, t) = A \cos(\Omega t - Kz)$$

应变场:

$$S_3(z, t) = S \sin(\Omega t - Kz)$$



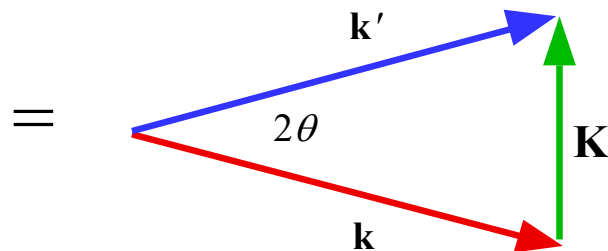
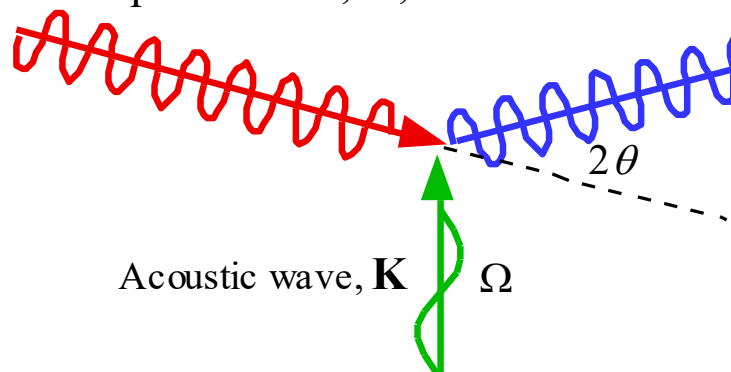
伴随着声波的传播，  
折射率显周期性变化。



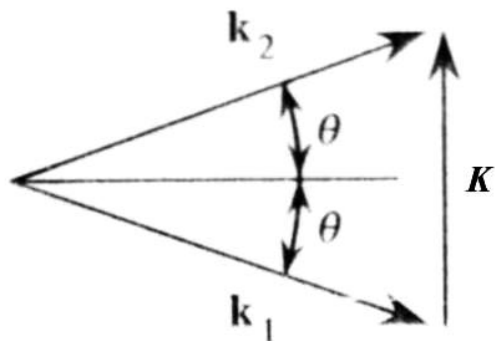
# 相位匹配条件

Incident optical beam,  $\mathbf{k}, \omega$

Diffracted optical beam,  $\mathbf{k}', \omega'$

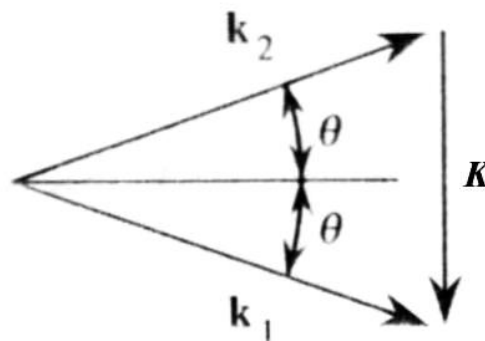


(a)



$$\begin{aligned} \mathbf{k}_2 &= \mathbf{k}_1 + \mathbf{K} \\ \omega_2 &= \omega_1 + \Omega \end{aligned}$$

(b)



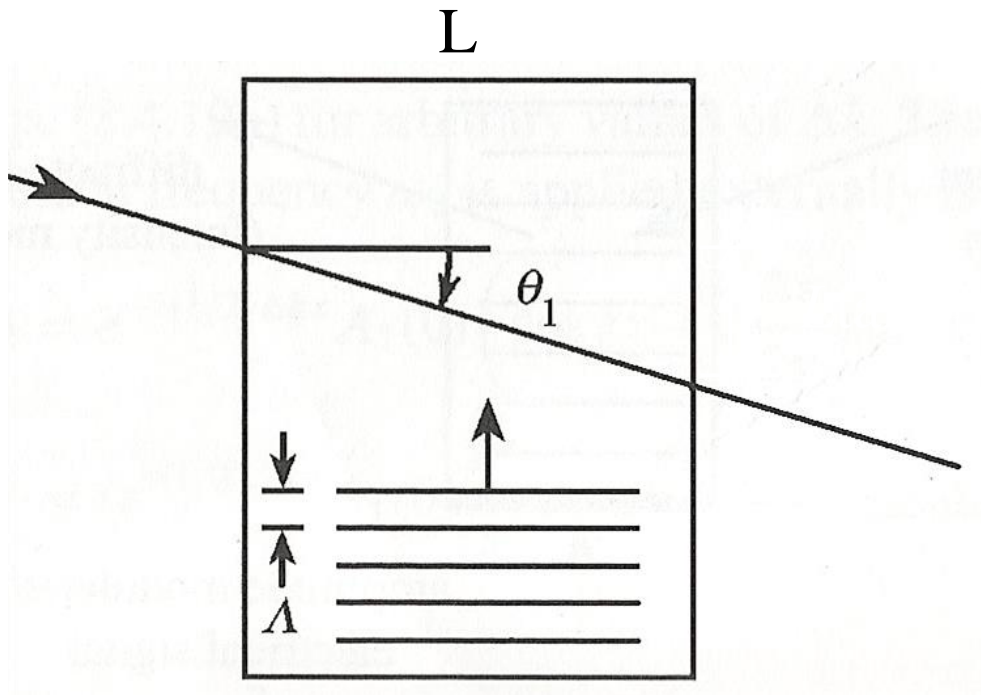
$$\begin{aligned} \mathbf{k}_2 &= \mathbf{k}_1 - \mathbf{K} \\ \omega_2 &= \omega_1 - \Omega \end{aligned}$$

布拉格条件:

$$k_1 \sin \theta_1 \approx \frac{1}{2} K$$

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

## 布拉格角入射



特征长度 $L_0$ :

光束以布拉格角入射，横向穿过距离为 $\Lambda/2$ 时的 $L$

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda}{2\Lambda}$$

$$L_0 = \frac{\Lambda^2}{\lambda}$$

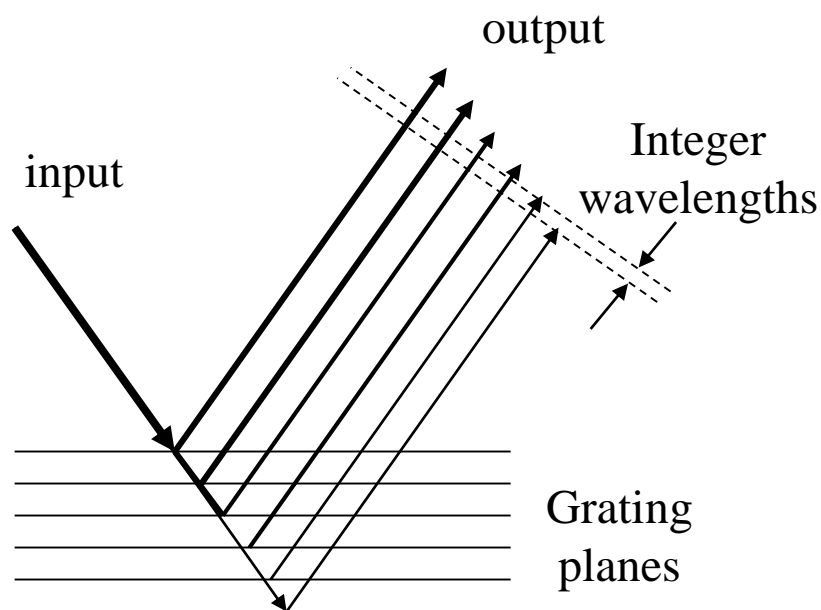
拉曼-奈斯衍射:  $L \leq \frac{L_0}{2}$

布拉格衍射:  $L \geq 2L_0$

过渡区:  $\frac{L_0}{2} \leq L \leq 2L_0$

## 布拉格衍射

特点：作用区长度较长，相位匹配条件必须满足，只产生单一的衍射光，衍射效率可达50%以上。



布拉格衍射情况



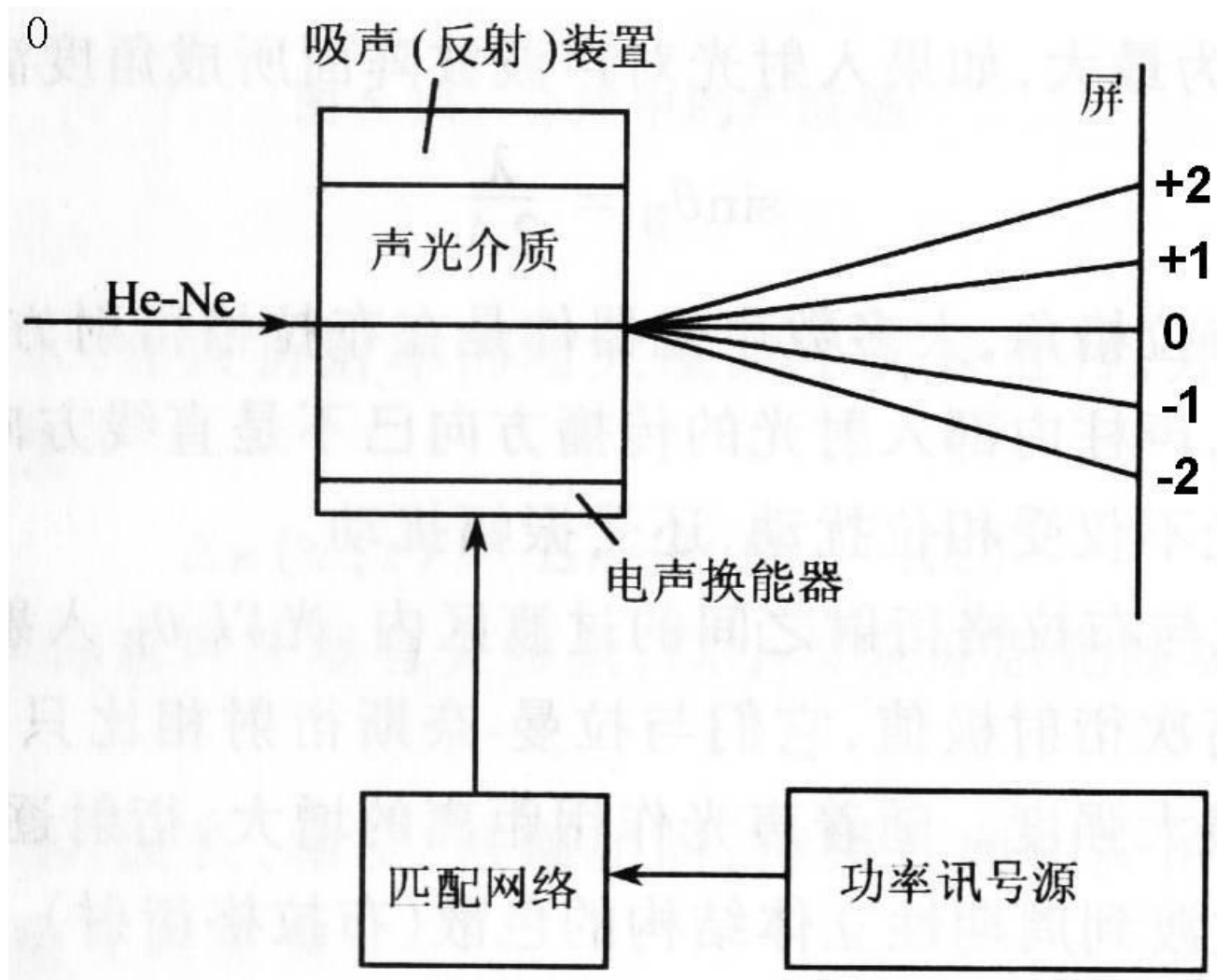
# 声光器件：

## 1. 布拉格衍射

特点：作用区长度较长，相位匹配条件必须满足，只产生单一的衍射光，衍射效率可达50%以上。

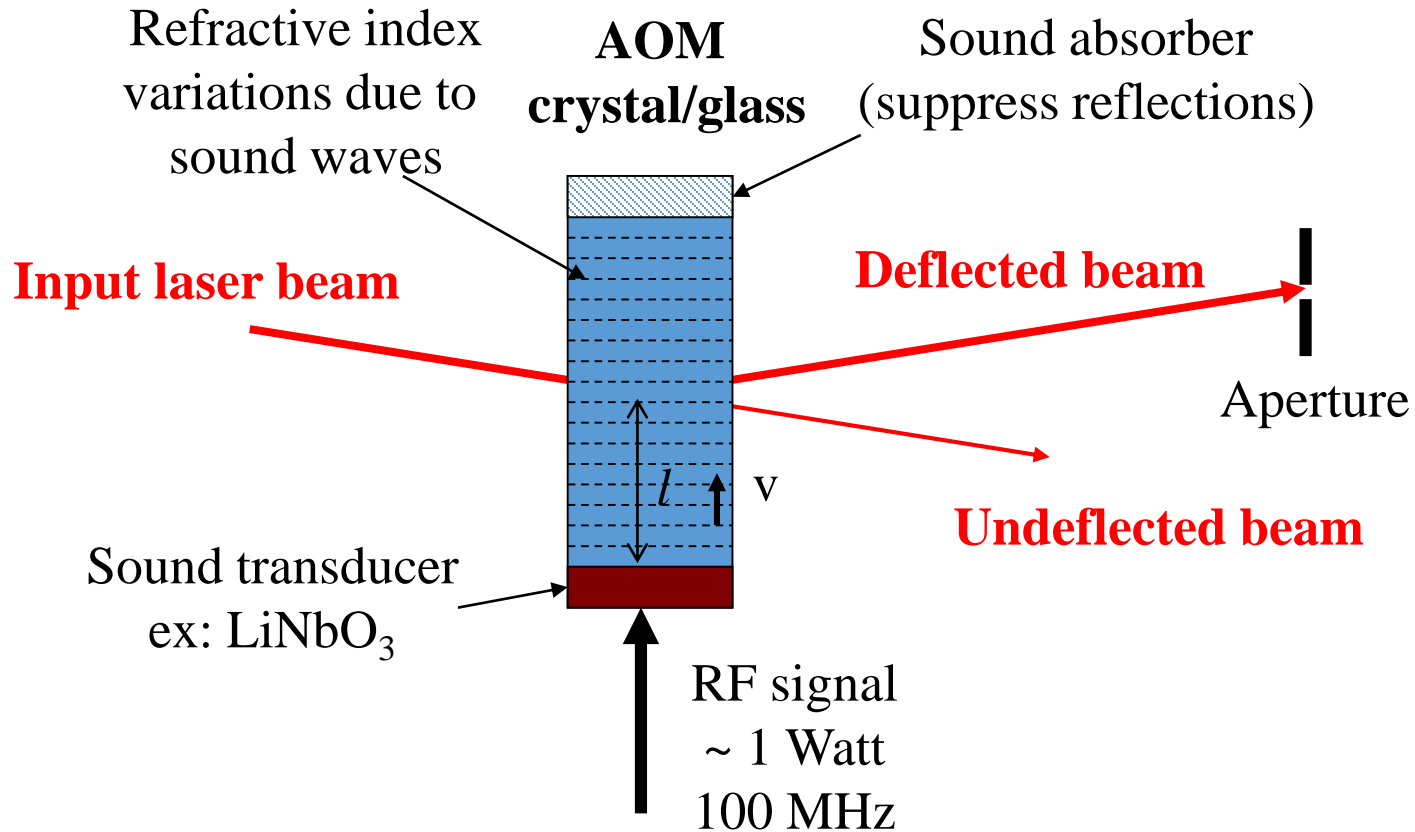
## 2. 拉曼-奈斯衍射

特点：作用区长度较短，相位匹配条件不重要，将产生多级衍射（光被多个声子散射）。



拉曼-奈斯衍射

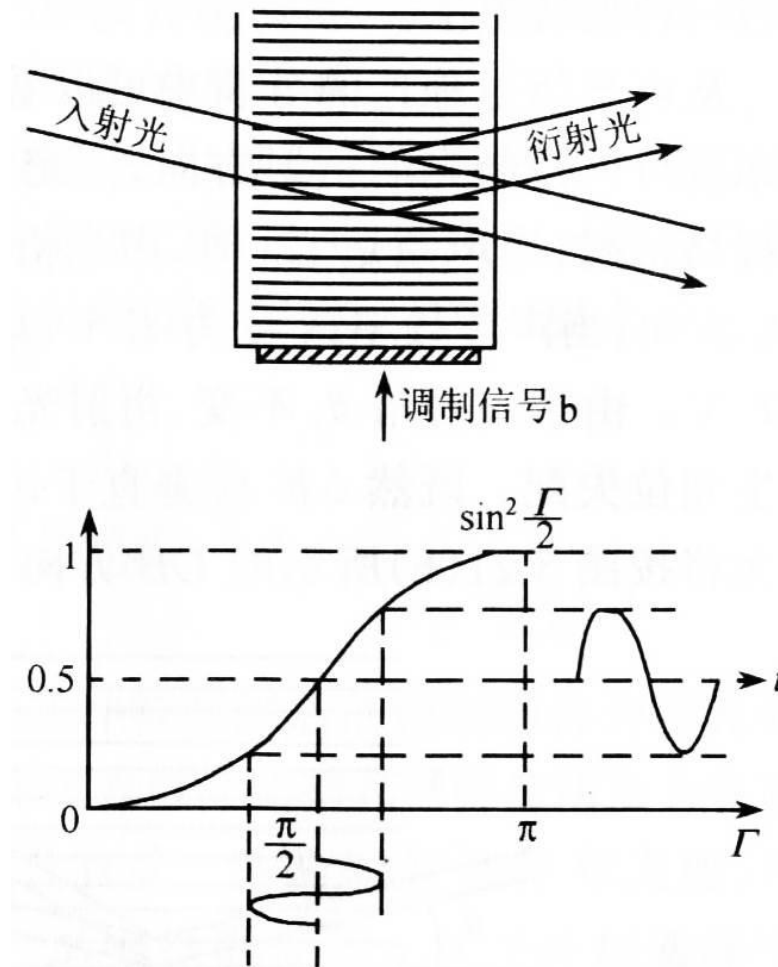
# 布拉格衍射



$$\text{Time delay: } t_D = l / v$$

## 6.2.3 声光器件

### 一、声光调制器



布拉格声光调制器

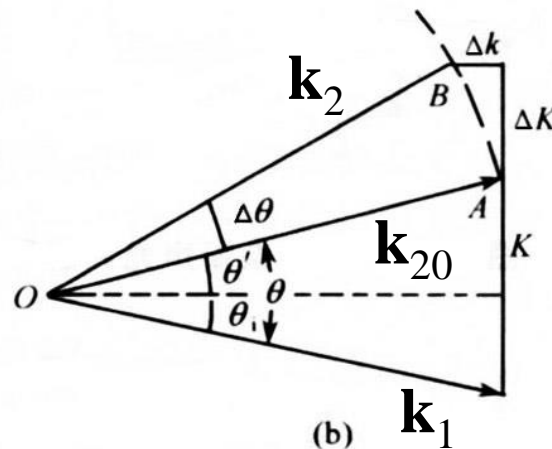
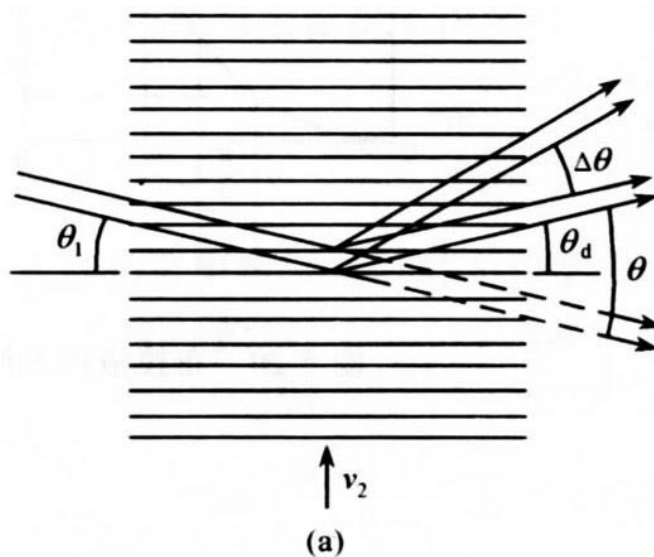


声光调制器（电子部26所）

## 二、声光偏转器

利用布拉格声光衍射，衍射角与声频在一定范围内存在着比例关系，通过改变声频来改变衍射角，使得光束偏转。

# 布拉格声光偏转



布拉格角入射： $\mathbf{k}_{20} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{K}$

声波角频率改变： $\Omega = \Omega_0 + \Delta\Omega$ 时，声波波矢 $K = \Omega/v$ ， $v$ 是声速，声波波矢的变化量为 $\Delta K = \Delta\Omega/v$ 。

$$\mathbf{k}_1 + (\mathbf{K} + \Delta\mathbf{K}) = \mathbf{k}_2 + \Delta\mathbf{k}$$

$$\theta_i + \theta' = 2\theta_B = 2\sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2\Lambda}\right) = 2\sin^{-1}\left(\frac{\lambda_0\Omega}{4\pi n v}\right) \approx \frac{\lambda_0\Omega}{2\pi n v}$$



$$K = \frac{\Omega}{v} = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

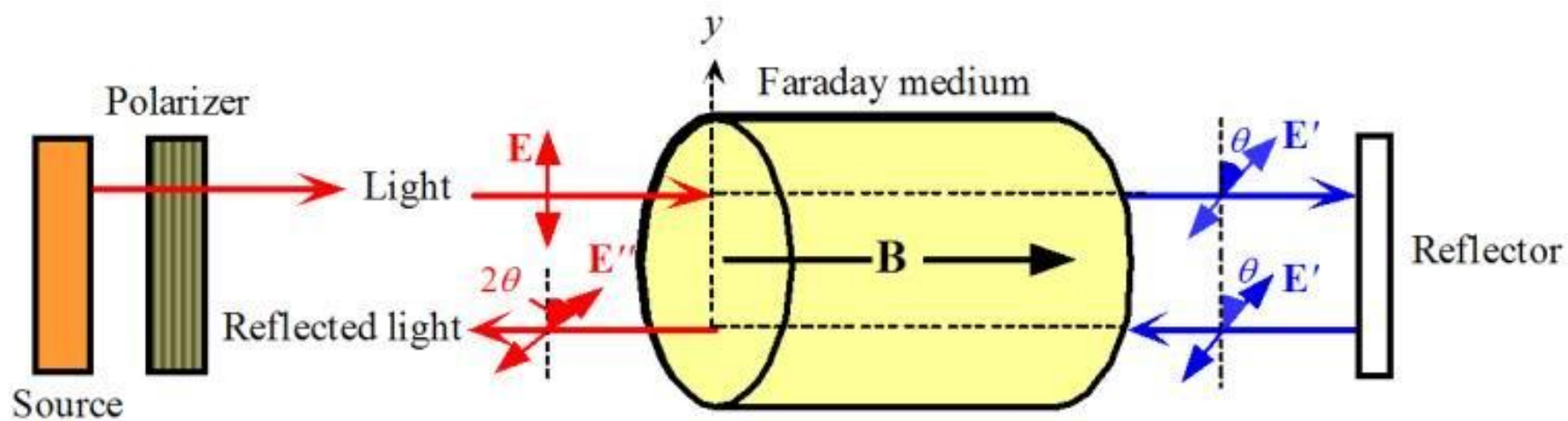
$$d\theta \approx \frac{\lambda_0}{2\pi n v} d\Omega$$



## 6.3 磁光效应

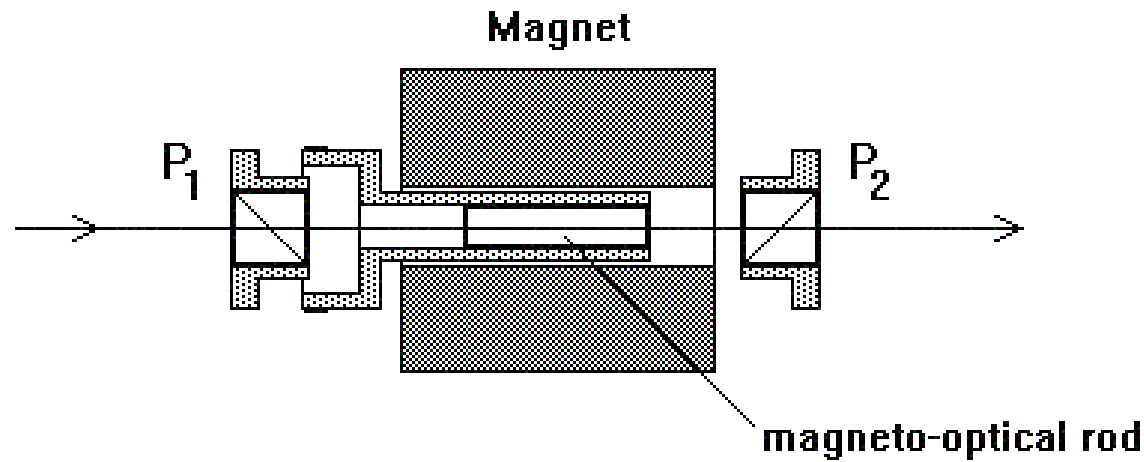
### 6.3.1 法拉第磁光效应

- 1845年，法拉第以磁场作用于玻璃，观察到一束沿磁场方向传播的线偏振光通过玻璃时，其偏振面发生旋转。这效应就称为法拉第磁光效应。
- 线偏振光旋转的角度  $\theta = fBL$
- 法拉第磁光效应最重要的特性是：不管光的传播方向与磁场平行或反平行，线偏振光的旋转方向是相同的。

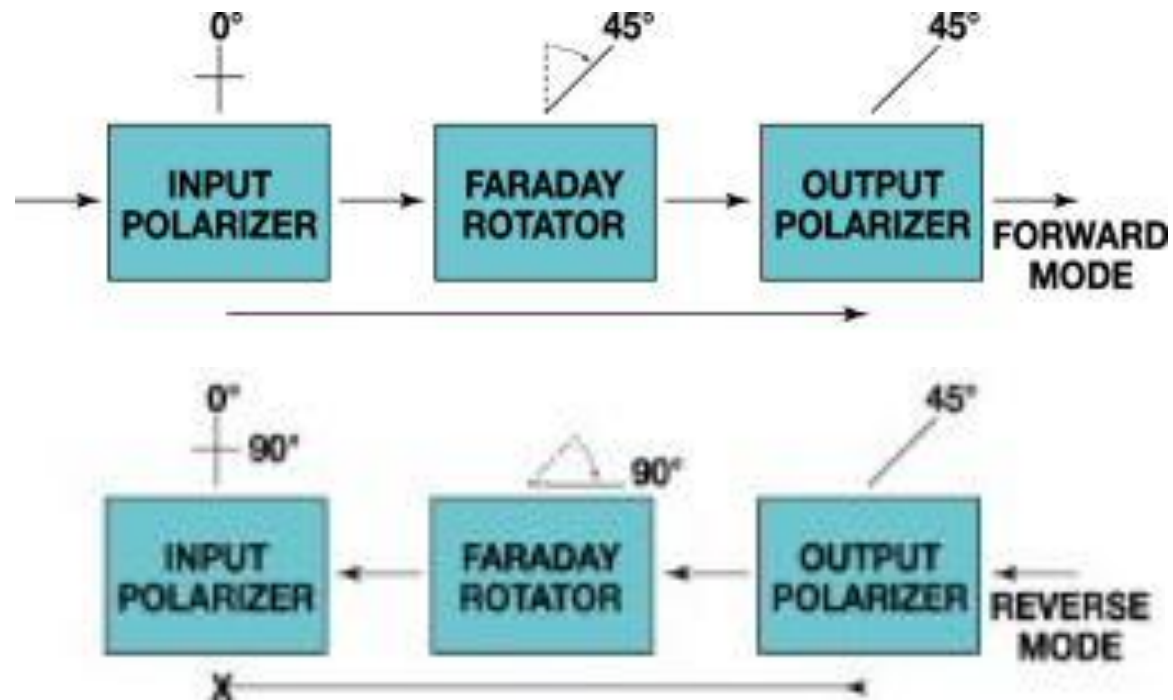


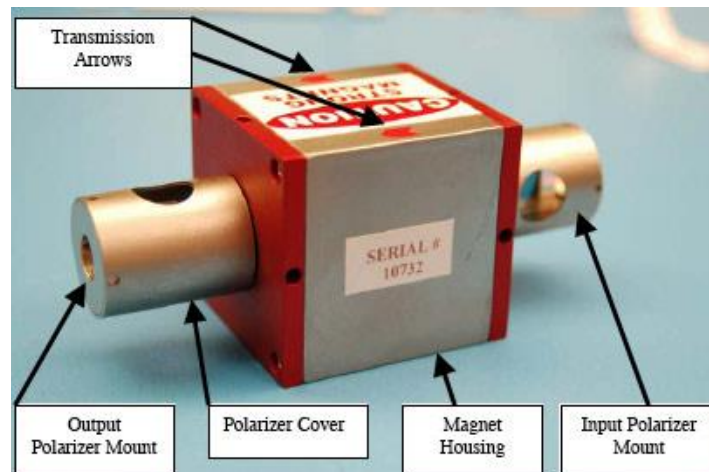
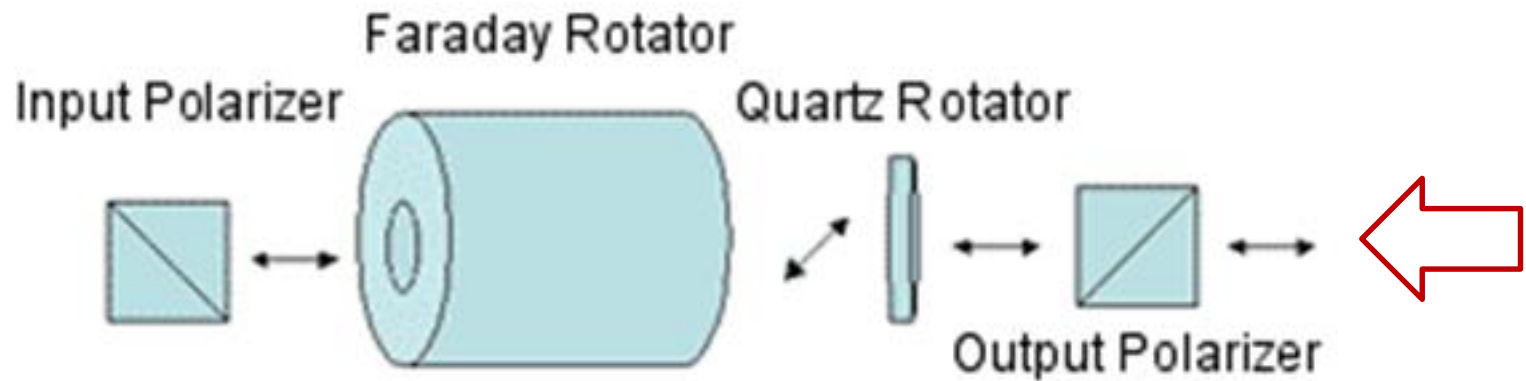
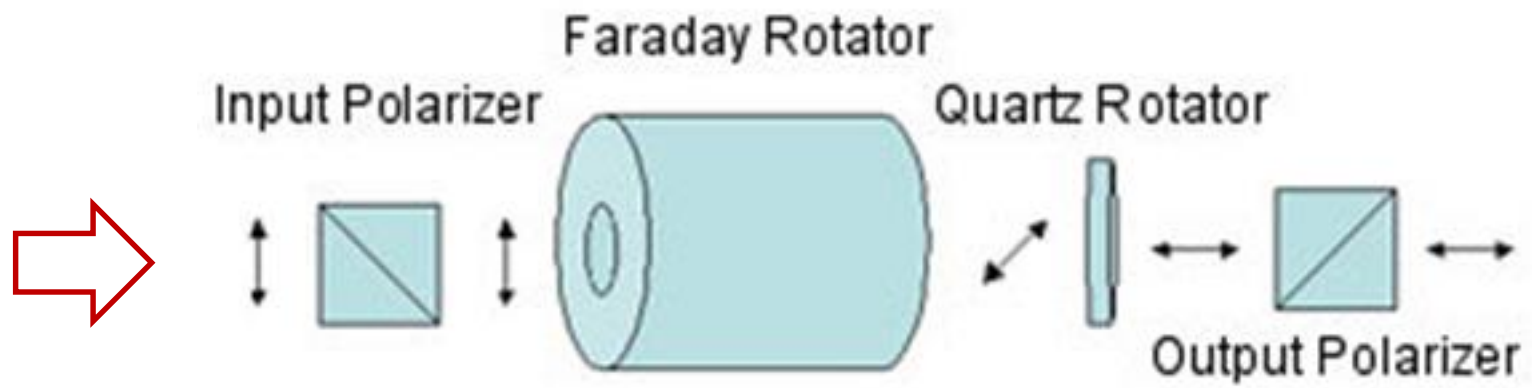
法拉第效应示意图

# 法拉第磁光隔离器示意图



$P_1$ 和 $P_2$ 夹角为 $45^\circ$







自由空间的光隔离器

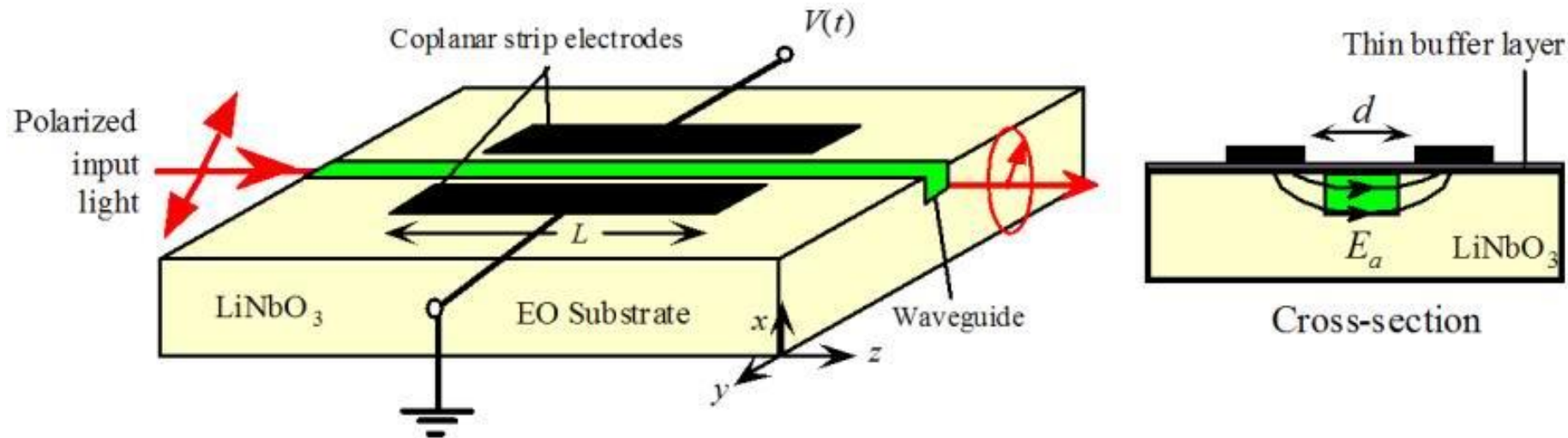


半导体激光器到光纤用隔离器

## 6.4 集成光学调制器

- **集成光学**指的是将不同的光学器件和元件集成到单一的基底上，例如在光通信中将半导体激光器、波导、分束器、光调制器和光探测器集成在一起实现小型化，并提高系统的性能。

## 6.4.1 相位和偏振调制器

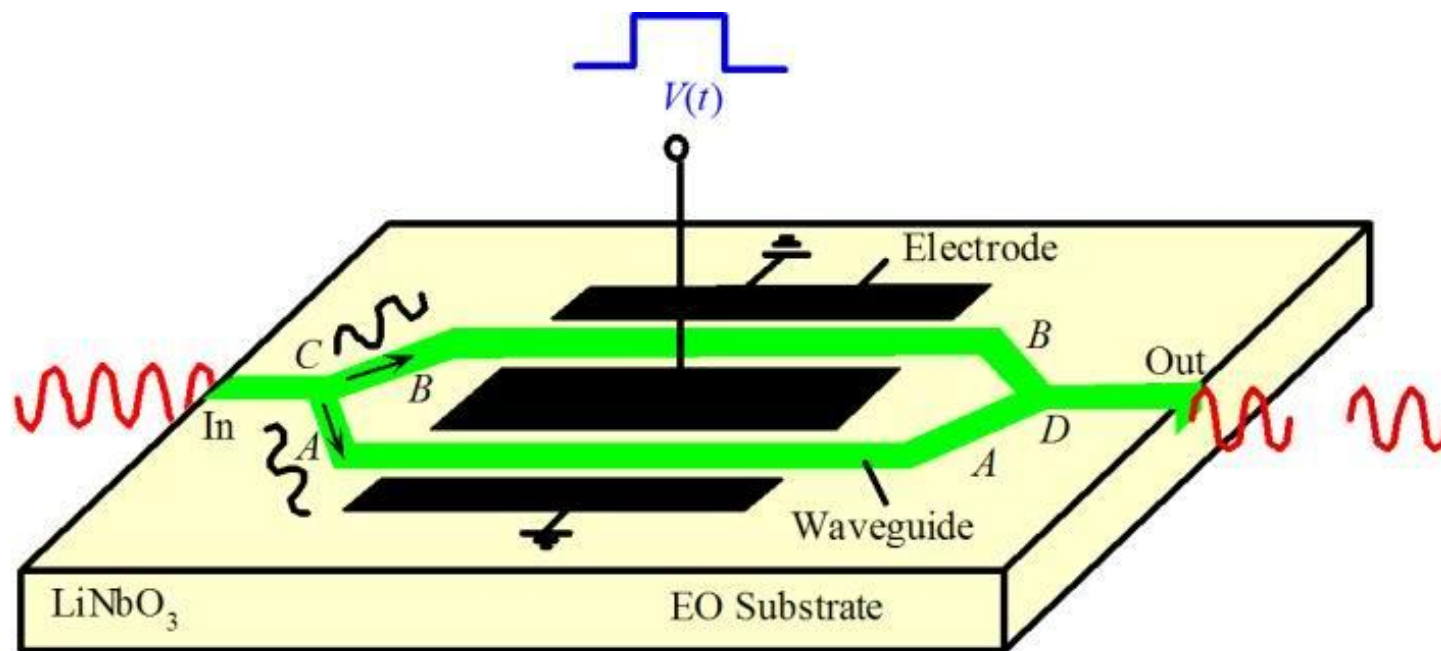


集成横向普克尔相位调制器示意图

$E_x$ 和 $E_y$ 通过波导后的相位差: 
$$\Delta\phi = \Gamma \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{22} \frac{L}{d} V$$

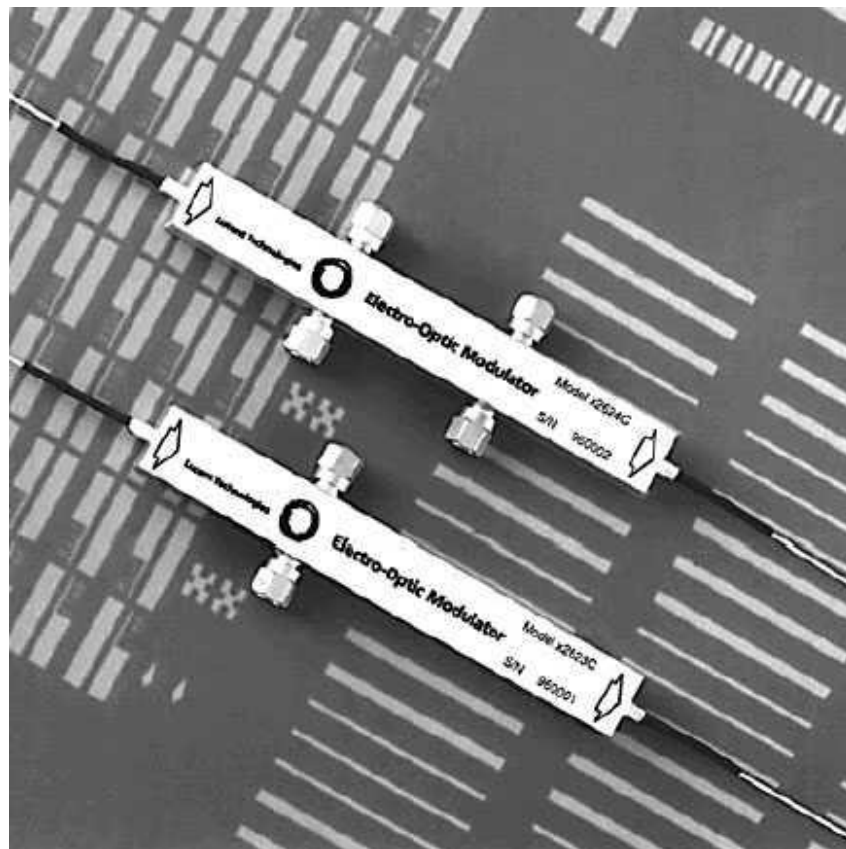
$\lambda = 1.5 \mu\text{m}, L = 2 \text{ cm}, d = 10 \mu\text{m}: V_{\lambda/2} = 17.5 \text{ V}$

## 6.4.2 麦克斯韦调制器



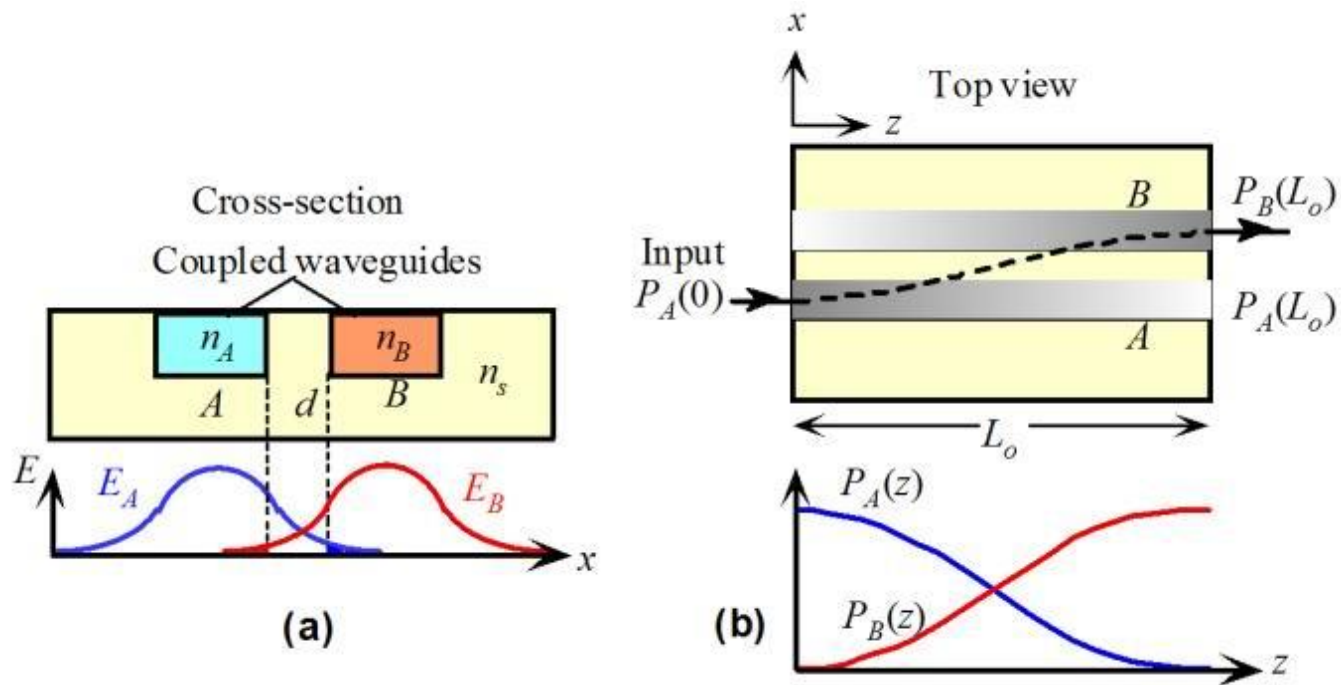
集成麦克斯韦光强调制器



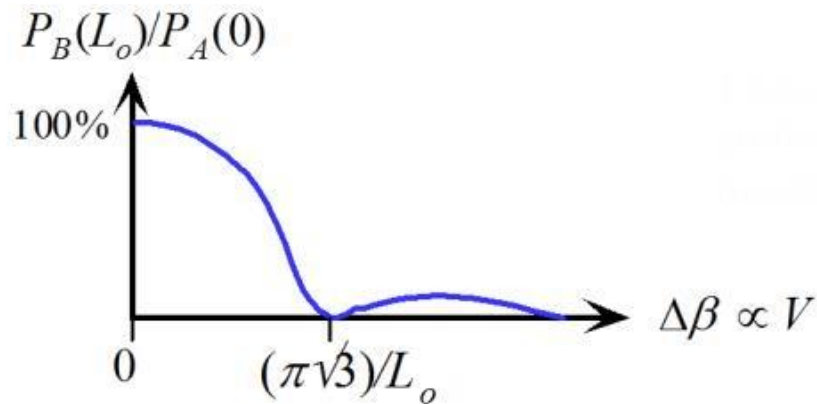


用于高速光通信的铌酸锂电光调制器，可达16GHz，波长为1550nm，最大调制电压 $\pm 20\text{V}$ 。

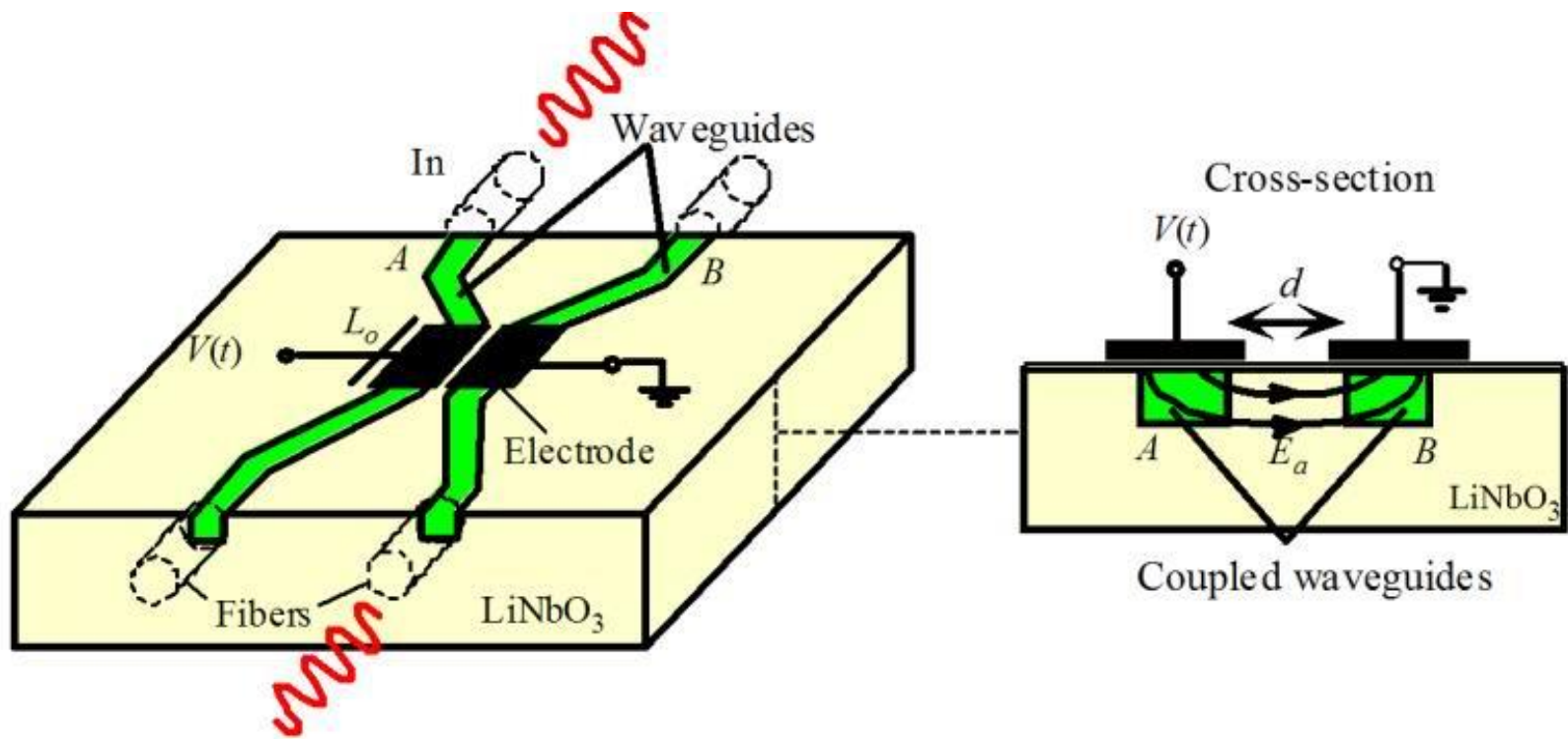
### 6.4.3 耦合波导调制器



两波导耦合示意图



透射功率比随 $\Delta\beta$   
的变化



集成耦合波导调制器示意图

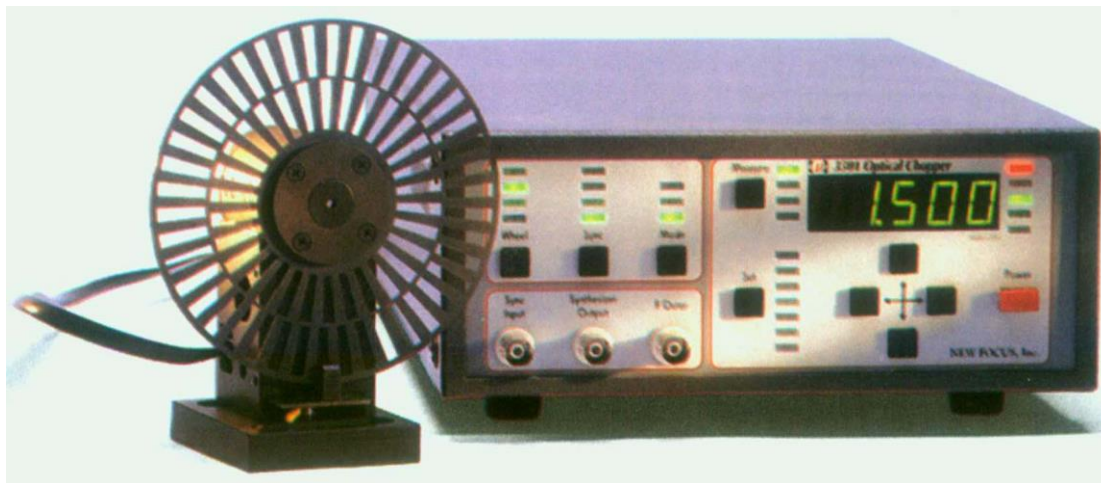
# 液晶空间光调制器



分为反射式和透射式

反射式的优点：高解析度、高光学利用率、高响应速度、高对比度

# 机械光调制器



斩波器



快门

# 振镜

