

第八章 光波调制

- 8.1 光束的调制原理
- 8.2 晶体中光的传播特性
- 8.3 电光效应
- 8.4 电光调制
- 8.5 声光调制
- 8.6 磁光调制

3.1 光束的调制原理

调制：将信息加载于激光的过程。

调制器：完成该过程的器件。

激光：载波； **低频信号：**控制信号。

光载波：

$$E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$

按调制的对象分类：强度调制、调幅、调频、调相

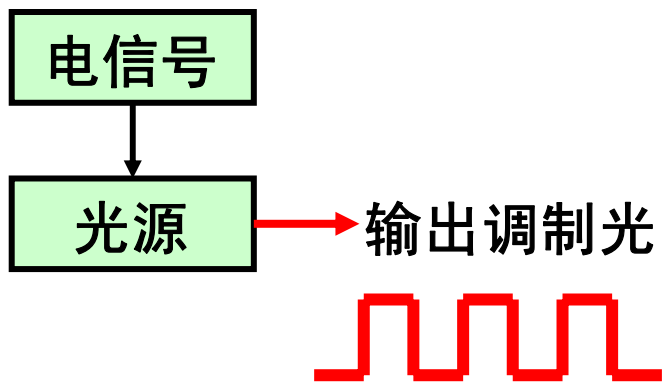
按调制器与激光器的关系分类（调制方法）：

内调制（直接调制）和外调制

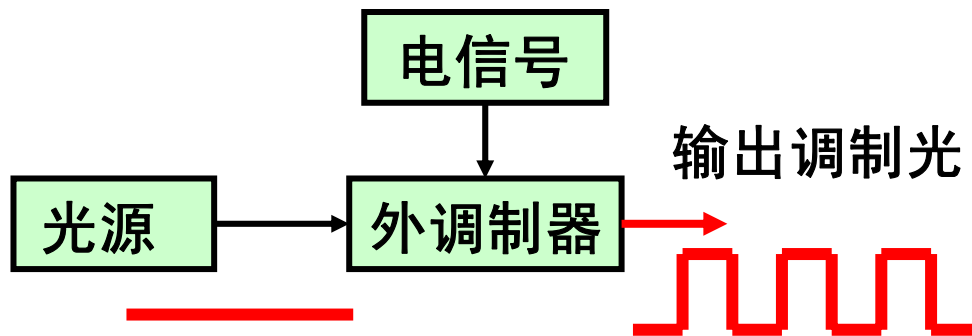
8.1 光束的调制原理

内调制：加载信号是在激光振荡过程中进行，用调制信号改变激光器的振荡参数，从而改变激光器输出特性以实现调制。

外调制：激光形成之后，在激光器光路上放置调制器，用调制信号改变调制器的物理性能，当激光束通过调制器时，使光波的某个参量受到调制。



内调制示意图



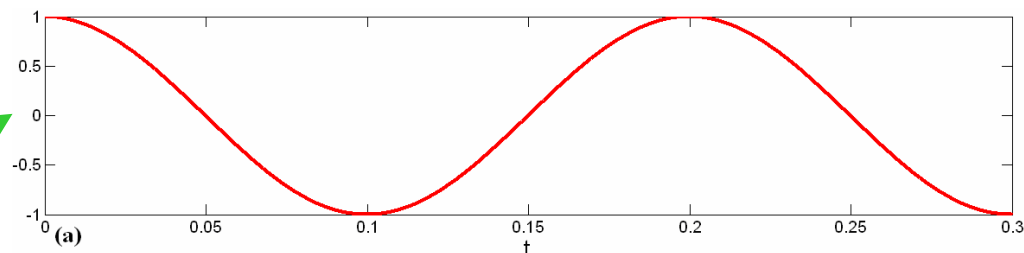
外调制示意图

— 振幅调制

振幅调制： 载波的振幅随调制信号的规律而变化振荡。

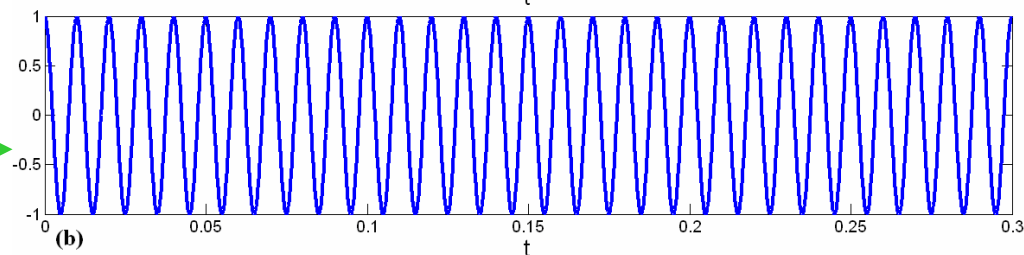
调制信号：

$$a(t) = A_m \cos \omega_m t$$



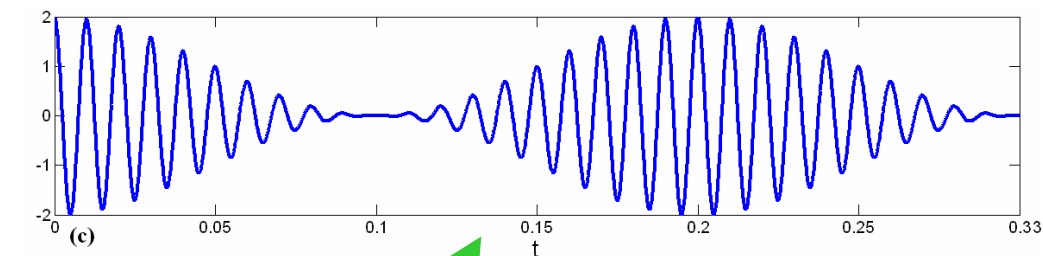
光载波：

$$E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$



调幅波：

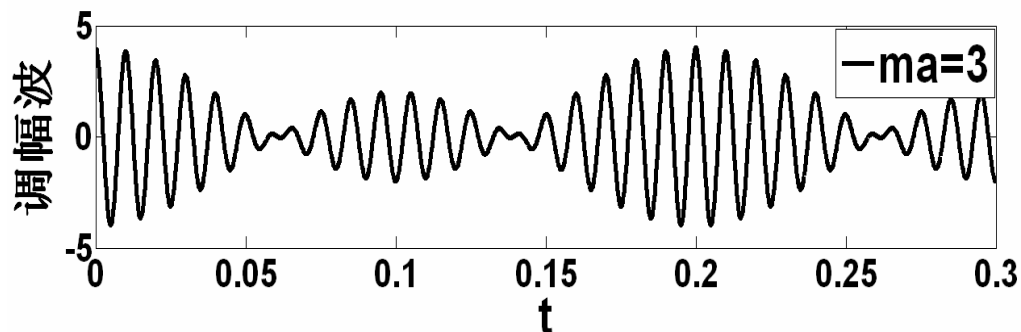
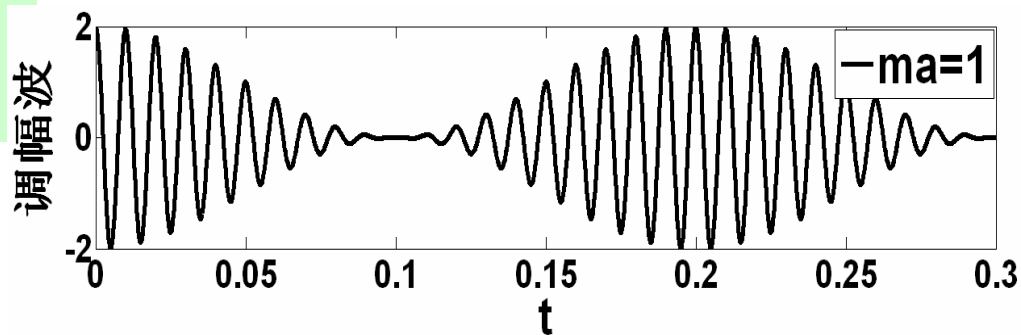
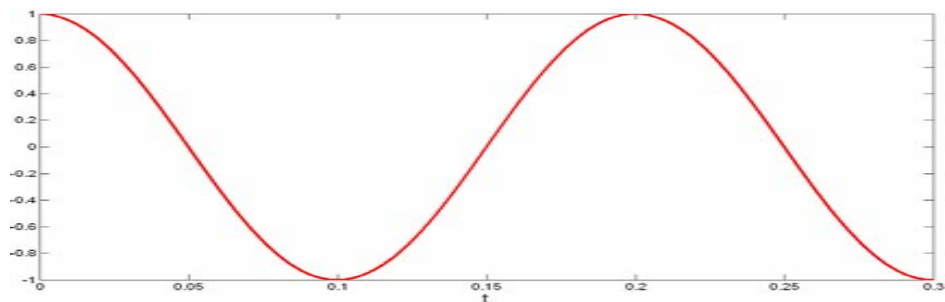
$$E(t) = [A_c + A_m \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c)$$



— 振幅调制

$$\begin{aligned} E(t) &= [A_c + A_m \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \\ &= A_c \left[1 + \frac{A_m}{A_c} \cos \omega_m t \right] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \\ &= A_c [1 + m_a \cos \omega_m t] \cos(\omega_c t + \varphi_c) \end{aligned}$$

调幅系数



二 频率调制和相位调制

1. 频率调制

光载波 $E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$

调制信号 $a(t) = A_m \cos \omega_m t$

调频: $\omega(t) = \omega_c + \Delta\omega(t) = \omega_c + k_f a(t)$

频率比例系数

调频波的总相角:

$$\psi(t) = \int \omega(t) dt + \varphi_c = \int [\omega_c + k_f a(t)] dt + \varphi_c = \omega_c t + \int k_f a(t) dt + \varphi_c$$

调频波:

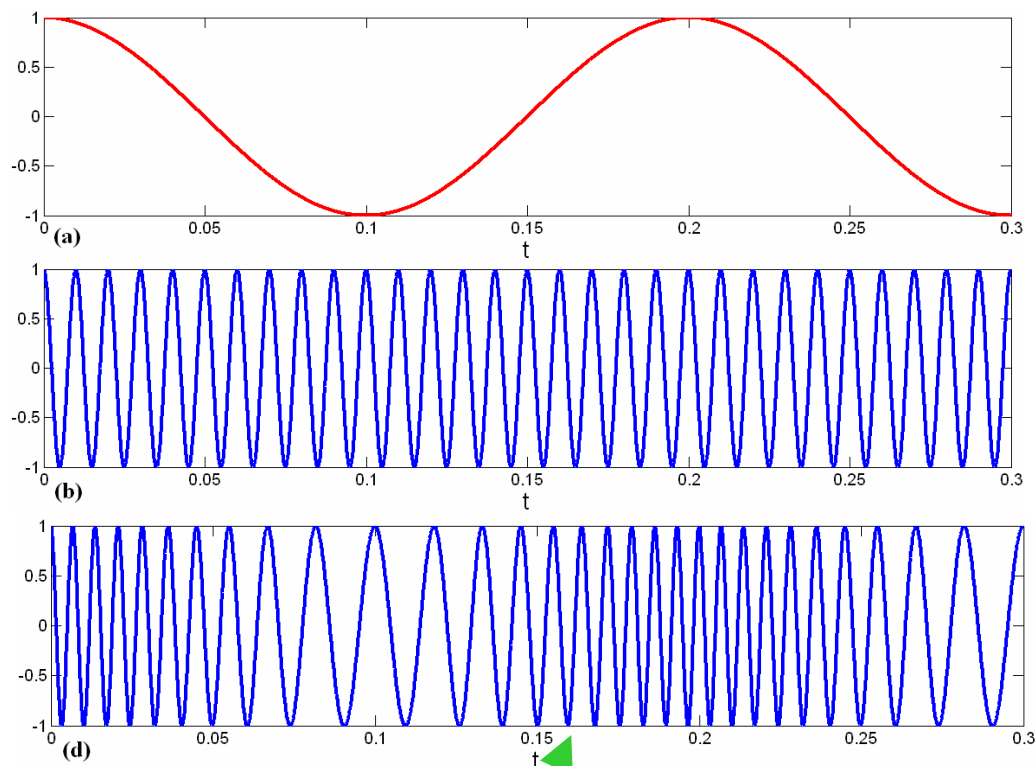
$$E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \frac{k_f A_m}{\omega_m} \sin \omega_m t + \varphi_c)$$

二 频率调制和相位调制

1. 频率调制

调频波：

$$E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \frac{k_f A_m}{\omega_m} \sin \omega_m t + \varphi_c)$$

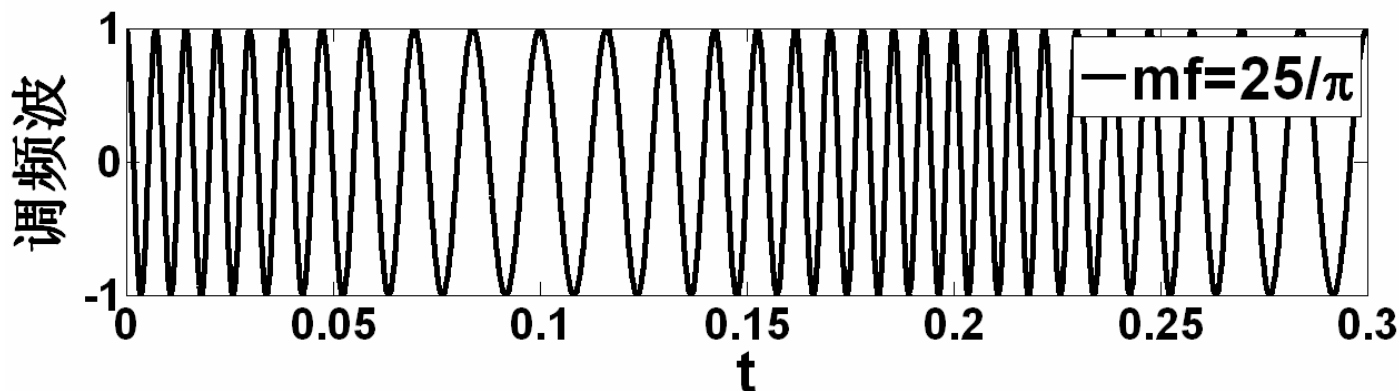
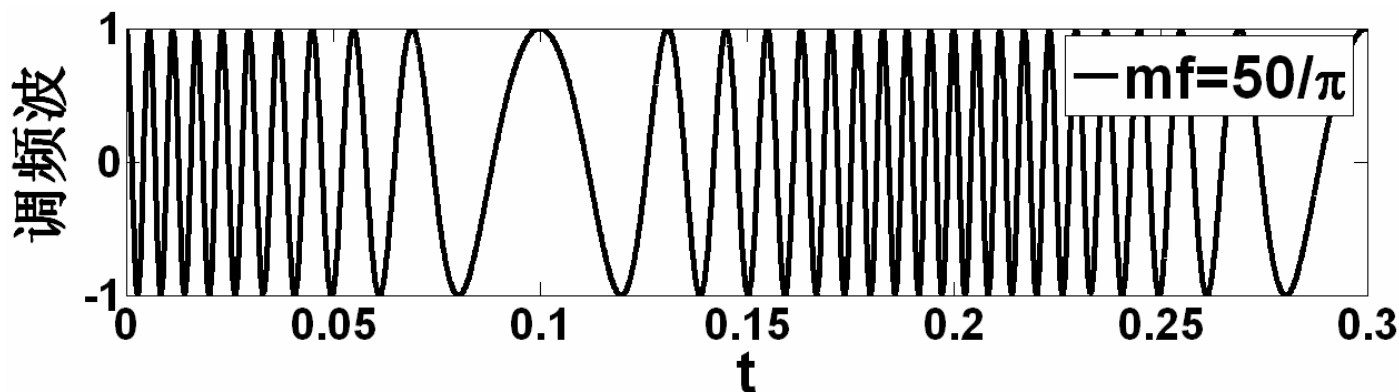


二 频率调制和相位调制

1. 频率调制

调频系数

$$E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \frac{k_f A_m}{\omega_m} \sin \omega_m t + \varphi_c) = A_c \cos(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t + \varphi_c)$$



二 频率调制和相位调制

2. 相位调制

光载波: $E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ 调制信号: $a(t) = A_m \cos \omega_m t$

调相: $\varphi = \varphi_c + \Delta\varphi(t) = \omega_c + k_\varphi a(t)$

相位比例系数

调相波的总相角: $\psi(t) = \omega_c t + k_\varphi A_m \cos \omega_m t + \varphi_c$

调相波: $E(t) = A_c \cos(\omega_c t + k_\varphi A_m \cos \omega_m t + \varphi_c)$

三 强度调制

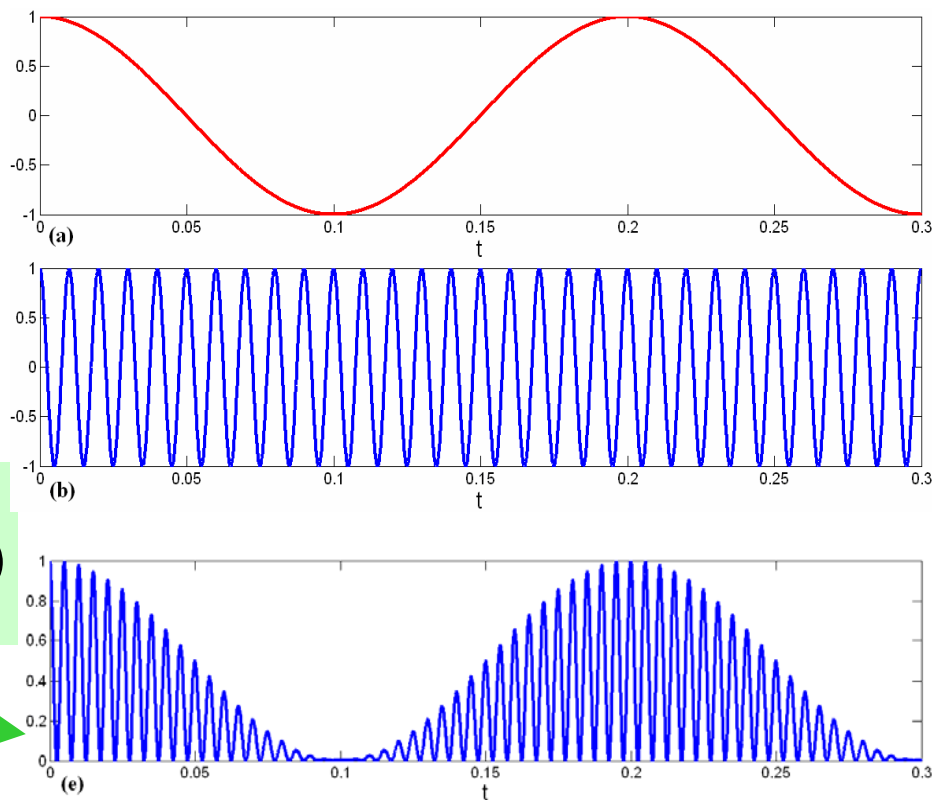
强度调制： 光载波的强度(光强)随调制信号规律变化的激光振荡。

光束强度：光波电场的平方

$$I(t) = E^2(t) = A_c^2 \cos^2(\omega_c t + \varphi_c)$$

强度调制的光强：

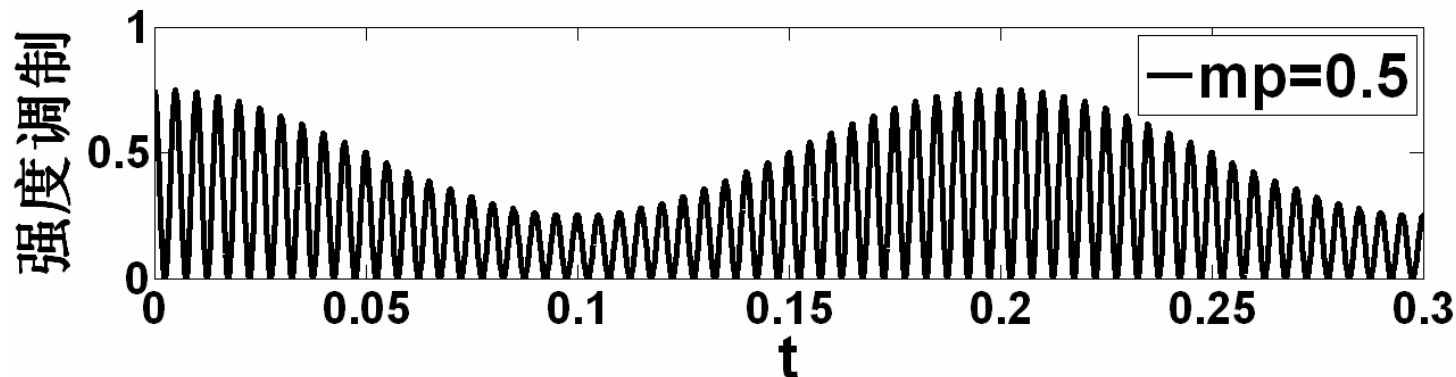
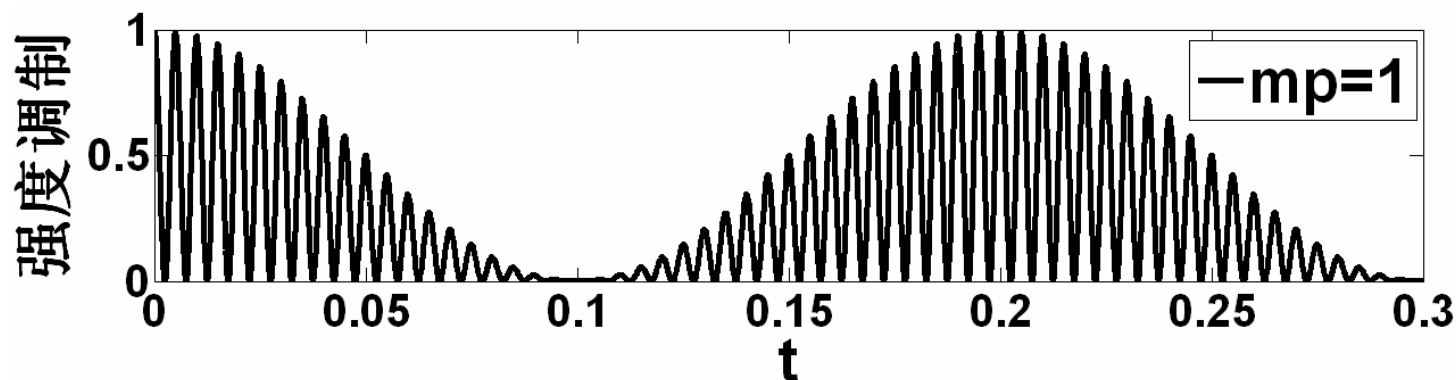
$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + k_p a(t)] \cos^2(\omega_c t + \varphi_c)$$



三 强度调制

强度调制系数

$$I(t) = \frac{A_c^2}{2} [1 + k_p A_m \cos \omega_m t] \cos^2(\omega_c t + \varphi_c) = \frac{A_c^2}{2} [1 + m_p \cos \omega_m t] \cos^2(\omega_c t + \varphi_c)$$

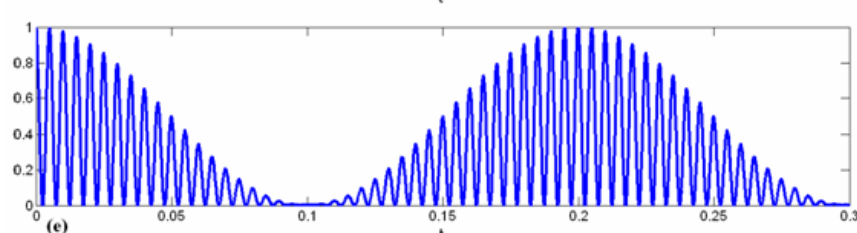
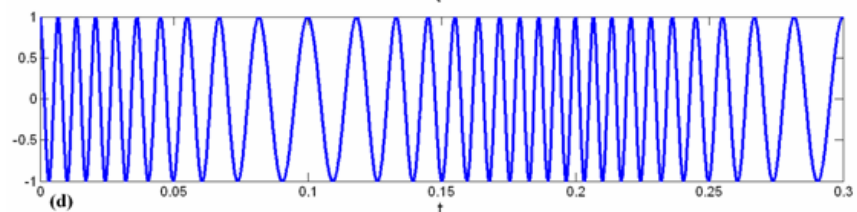
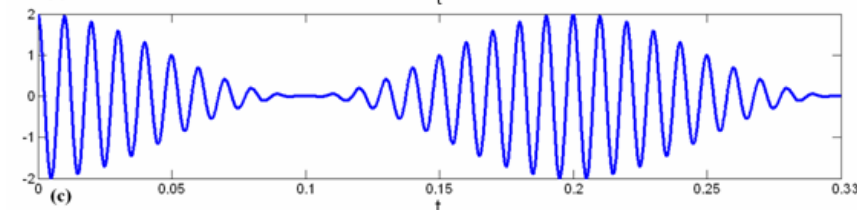
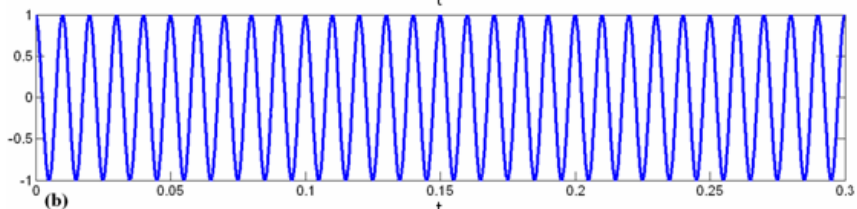
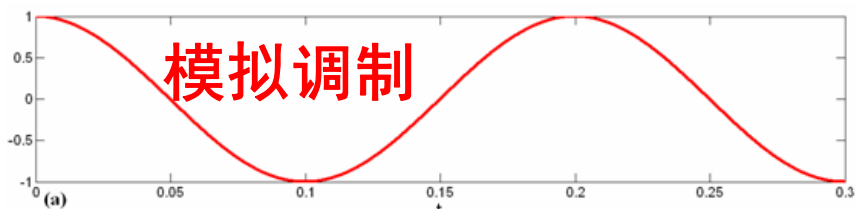


光载波: $E(t) = A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$

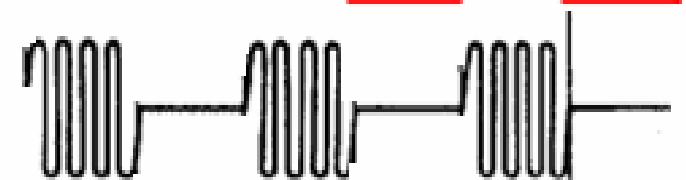
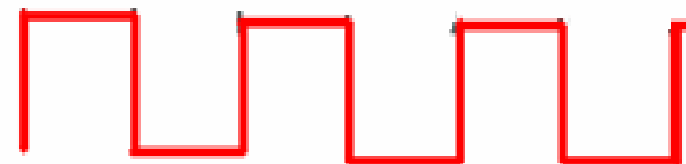
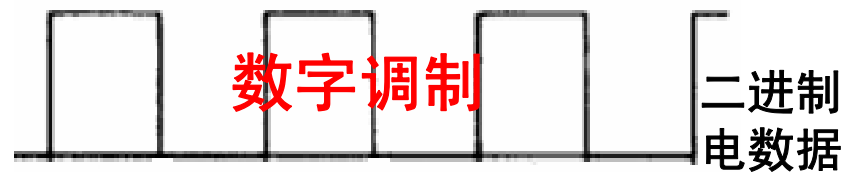
$a(t) = A_m \cos \omega_m t$

调制信号: 1011000

模拟调制



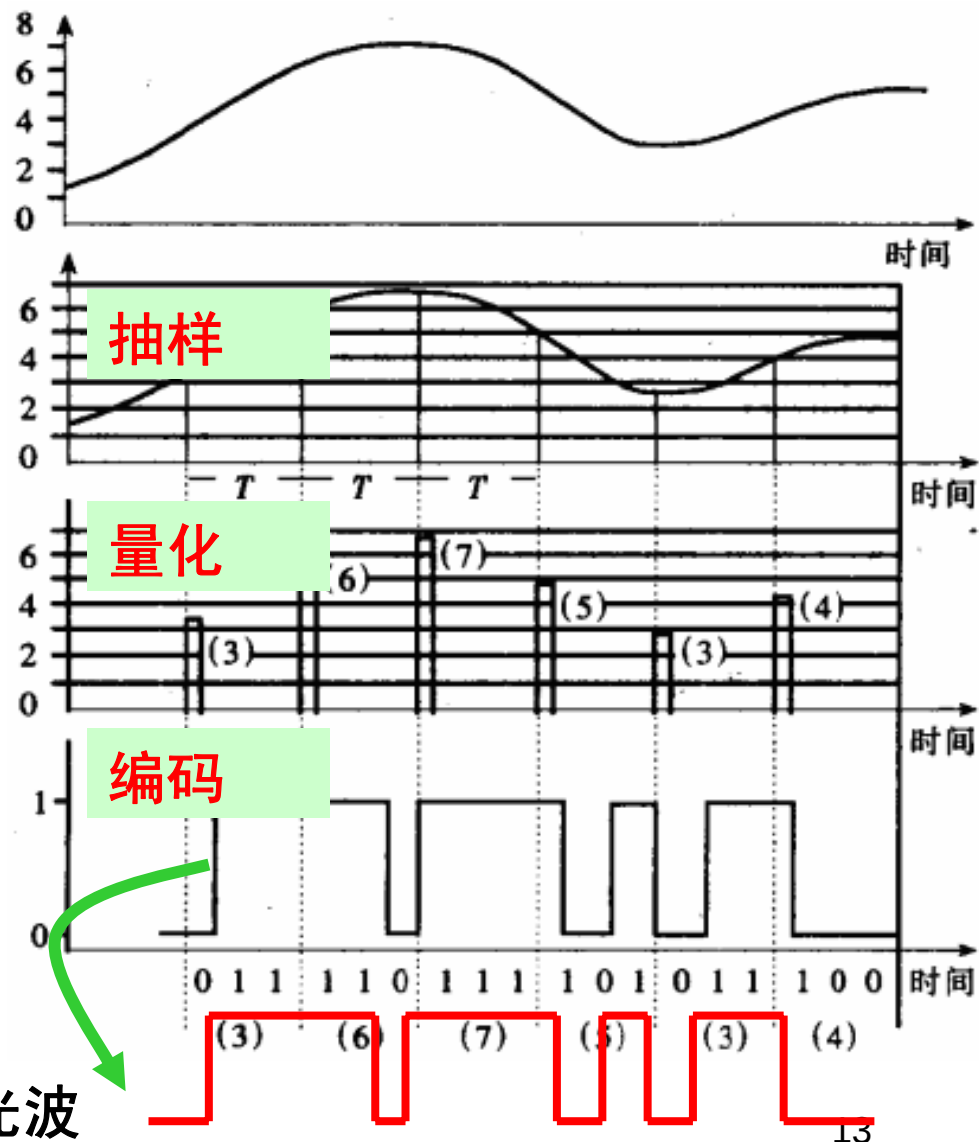
数字调制



四 脉冲编码调制

先把模拟信号变为**电脉冲序列**，再将脉冲幅值变为和信息对应的二进制编码，再对光载波进行**强度调制**。

步骤：抽样、量化和编码

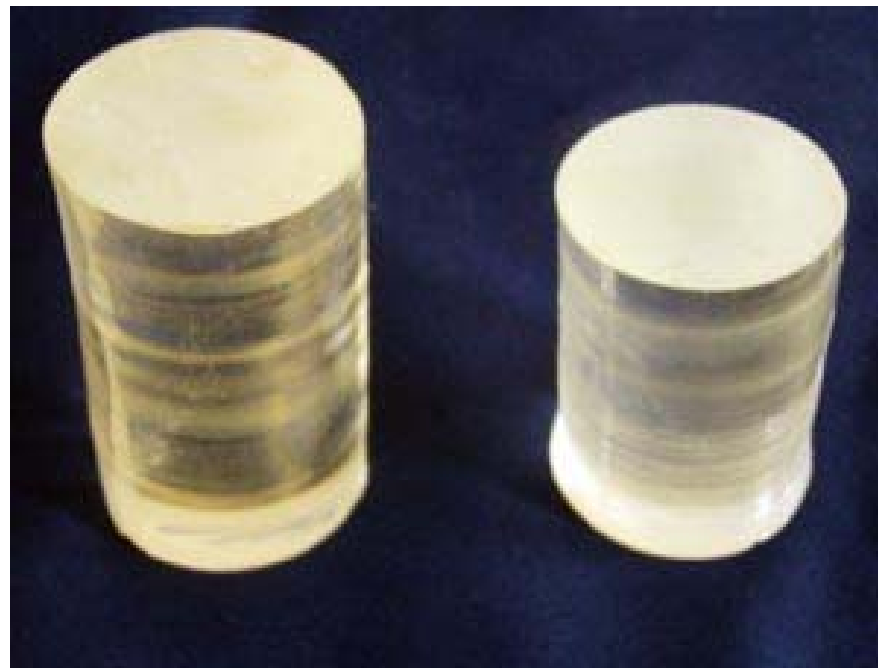


8-2 晶体中光的传播特性

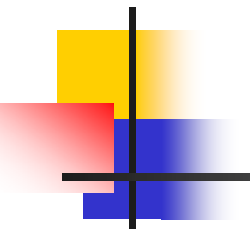
常用的电光晶体



KDP (磷酸二氢钾)



LiNbO_3 (铌酸锂)



一 介电张量

各向异性晶体中：

$$\begin{cases} P_i = \varepsilon_0 \chi_{ij} E_j \quad (i, j = x, y, z) \\ \vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \\ \vec{\varepsilon} = \varepsilon_0 (1 + \vec{\chi}) \end{cases} \Rightarrow D_i = \varepsilon_{ij} E_j$$

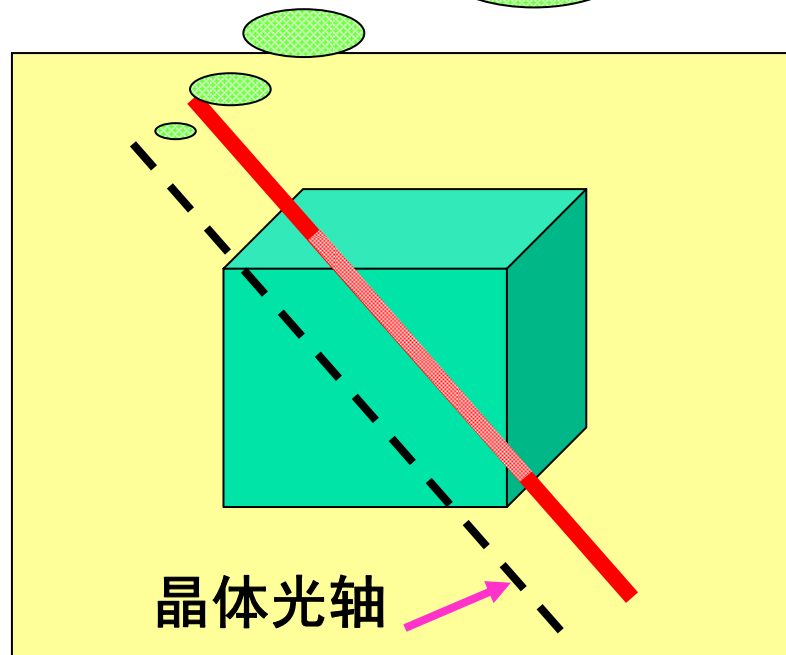
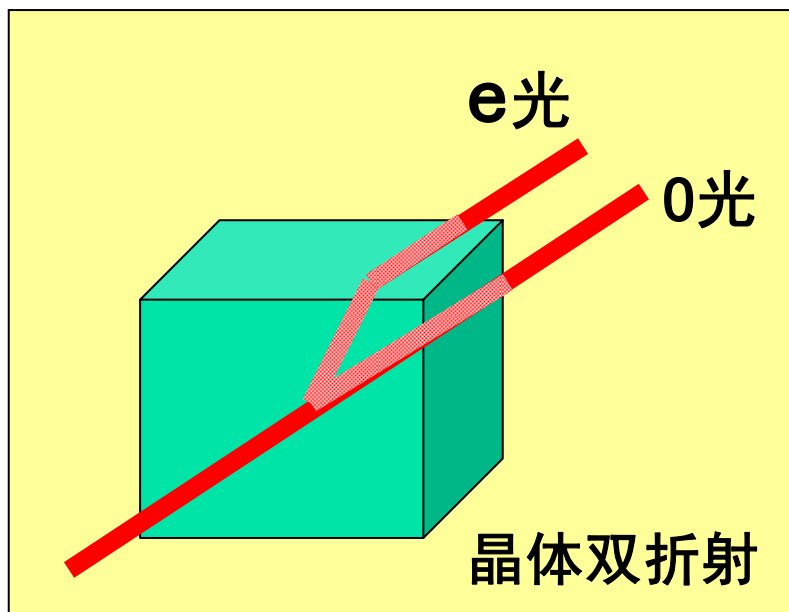
若存在某些特殊方向，使得D与E方向一致，有：

$$\begin{pmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$

x,y,z三个方向构成的坐标系：主介电轴坐标系（主轴坐标系）

二 双折射现象

光轴仅标志一定的方向，并不限于某条特殊的直线！



单轴晶体： 只有一个光轴。（石英、方解石）

双轴晶体： 有两个光轴。

正晶体： e光速度在除光轴外的任何方向上都比o光小（石英）

负晶体： e光速度在除光轴外的任何方向上都比o光大（方解石）

三 折射率椭球

晶体光学性质的各向异性起因： $[\varepsilon_{ij}]$ 二阶对称张量

二阶对称张量的表示：示性曲面

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

$$E_i = \beta_{ij} D_j$$

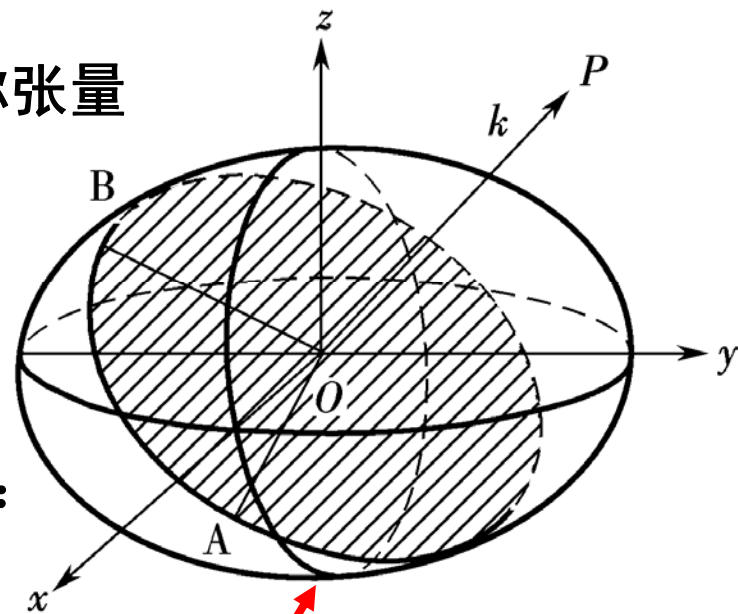
主轴坐标系中， ε_{ij} 和 β_{ij} 的二阶示性曲面方程：

$$\varepsilon_1 x^2 + \varepsilon_2 y^2 + \varepsilon_3 z^2 = 1$$

$$\beta_1 x^2 + \beta_2 y^2 + \beta_3 z^2 = 1$$

菲涅耳椭球

折射率椭球



折射率椭球表达式：

$$\frac{x^2}{\varepsilon_1} + \frac{y^2}{\varepsilon_2} + \frac{z^2}{\varepsilon_3} = 1$$

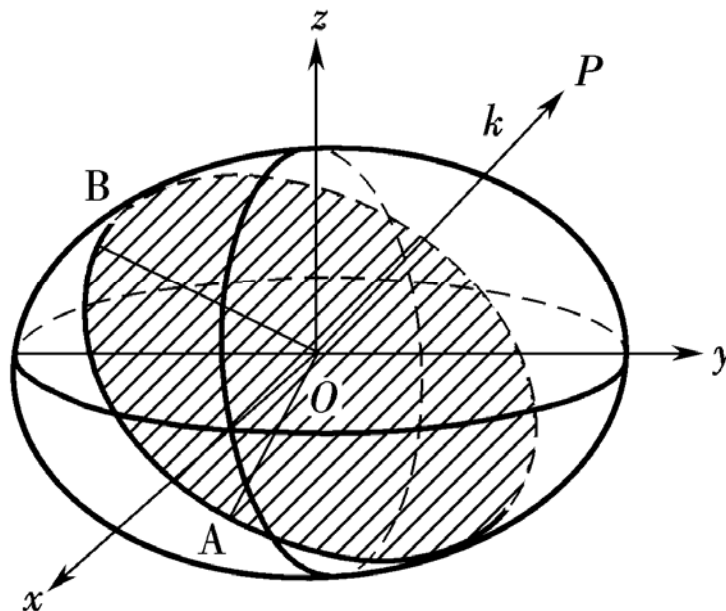
$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1$$

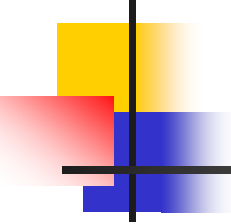
三 折射率椭球

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1$$

折射率椭球的物理意义：

- 表示晶体折射率（对某个确定频率）在晶体空间各方向（光波的D矢量方向）上的全部取值分布的几何图形。
- 通过椭球中心的每个矢径方向，代表D矢量的一个方向，其长度即为其D矢量在此方向振动的光波折射率。





8-3 电光效应

晶体施加电场，引起束缚电荷重新分布，导致离子晶格的微小形变，其结果将引起介电系数的变化，最终导致晶体折射率的变化。

$$\Delta n = n - n_0 = c_1 E + c_2 E^2 + \dots$$

一次(线性)电光效应：折射率的改变与外加**电场大小**成正比。

二次电光效应(克尔)：折射率的改变与外加电场强度的**平方**成正比。

引入电场的方式：

- 纵向电光效应：电场方向与光束传播方向**平行**
- 横向电光效应：电场方向与光束传播方向**垂直**

— 线性电光效应

主轴坐标系中未加外电场:

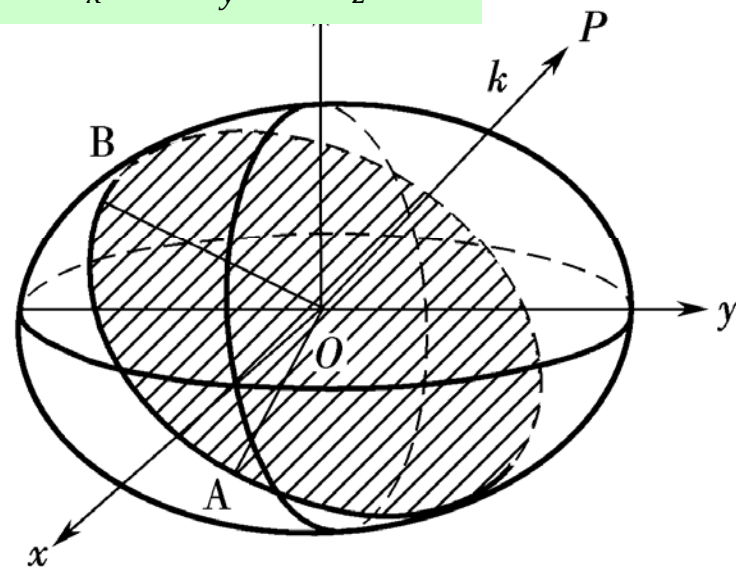
$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = \frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1$$

KDP晶体（负单轴）：

$$n_x = n_y = n_o, n_z = n_e, n_o > n_e$$

引入电场:

$$\left(\frac{1}{n'^2}\right)_1 x^2 + \left(\frac{1}{n'^2}\right)_2 y^2 + \left(\frac{1}{n'^2}\right)_3 z^2 + 2\left(\frac{1}{n'^2}\right)_4 yz + 2\left(\frac{1}{n'^2}\right)_5 xz + 2\left(\frac{1}{n'^2}\right)_6 xy = 1$$



折射率椭球

— 线性电光效应

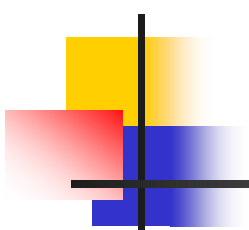
$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

KDP晶体

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ r_{41}E_x \\ r_{41}E_y \\ r_{63}E_z \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{1,2,3} = \left(\frac{1}{n'^2}\right)_{1,2,3} - \left(\frac{1}{n^2}\right)_{1,2,3} \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_{4,5,6} = \left(\frac{1}{n'^2}\right)_{4,5,6} \end{cases}$$

引入电场:
$$\frac{1}{n_o^2}x^2 + \frac{1}{n_o^2}y^2 + \frac{1}{n_e^2}z^2 + 2\gamma_{41}yzE_x + 2\gamma_{41}xzE_y + 2\gamma_{63}xyE_z = 1$$



一 线性电光效应

主轴不再与
X, Y, Z轴平行!

1. 外加电场的方向平行于z轴

引入电场:

$$\frac{1}{n_o^2} x^2 + \frac{1}{n_o^2} y^2 + \frac{1}{n_e^2} z^2 + \underline{2\gamma_{41}yzE_x + 2\gamma_{41}xzE_y + 2\gamma_{63}xyE_z} = 1$$

特例:

$$E_x = E_y = 0, E_z = E$$

$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + \underline{2\gamma_{63}xyE_z} = 1$$

1. 外加电场的方向平行于z轴

引入电场:

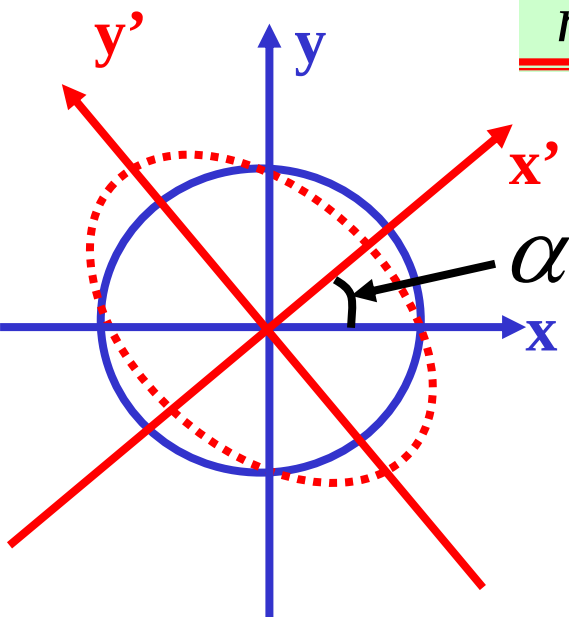
$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + \underline{2\gamma_{63}xyE_z} = 1$$

坐标轴变换:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \alpha - y' \sin \alpha \\ y &= x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \end{aligned}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$\underline{\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63}E_z\right)x'^2} + \underline{\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63}E_z\right)y'^2} + \underline{\frac{1}{n_e^2}z'^2} = 1$$



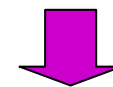
$$\frac{x'^2}{\underline{n_{x'}^2}} + \frac{y'^2}{\underline{n_{y'}^2}} + \frac{z'^2}{\underline{n_{z'}^2}} = 1$$



$$\begin{cases} n_{x'} = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{63}E_z \\ n_{y'} = n_o + \frac{1}{2}n_o^3\gamma_{63}E_z \\ n_{z'} = n_e \end{cases}$$

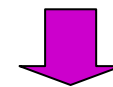
2. 外加电场的方向平行于x轴

引入电场:
$$\frac{1}{n_o^2} x^2 + \frac{1}{n_o^2} y^2 + \frac{1}{n_e^2} z^2 + 2\gamma_{41} yzE_x + 2\gamma_{41} xzE_y + 2\gamma_{63} xyE_z = 1$$



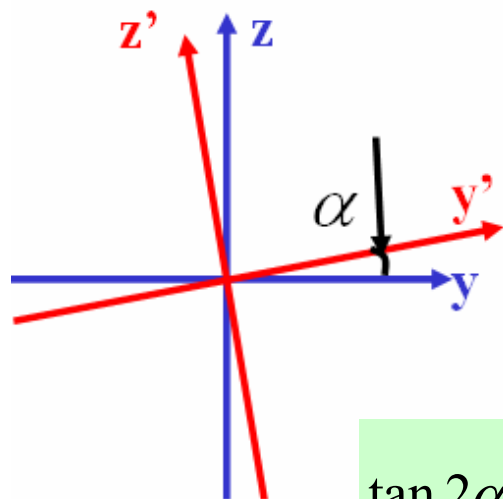
特例:
$$E_x = E, E_z = E_y = 0$$

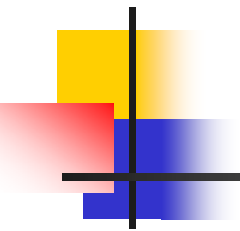
$$\frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{41} yzE_x = 1$$



$$\tan 2\alpha = \frac{2r_{41}E_x}{\frac{1}{n_o^2} - \frac{1}{n_e^2}}$$

$$\begin{cases} n'_x = n_o \\ n'_y = n_o - \frac{1}{2} \frac{n_o^5 n_e^2}{(n_e^2 - n_o^2)^2} r_{41}^2 E_x^2 (2n_e^2 - n_o^2) \\ n'_z = n_e - \frac{1}{2} \frac{n_o^2 n_e^5}{(n_o^2 - n_e^2)^2} r_{41}^2 E_x^2 (2n_o^2 - n_e^2) \end{cases}$$





— 线性电光效应

1. 外加电场的方向平行于z轴

- 晶体由单轴晶体变成了双轴晶体。
- 折射率椭球的主轴绕z轴旋转了 45° 角，此转角与外加电场大小无关，其折射率变化与电场成正比。

2. 外加电场的方向平行于x轴

- 晶体由单轴晶体变成了双轴晶体。
- 折射率椭球的主轴绕x轴旋转了 α 角，此转角与外加电场大小有关，角度值很小。

二 二次非线性电光效应

折射率椭球各系数的变化量：

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 E_1 \\ E_2 E_2 \\ E_3 E_3 \\ 2E_2 E_3 \\ 2E_1 E_3 \\ 2E_1 E_2 \end{bmatrix}$$

b_{mn} ：二级电光系数

各项同性介质：

$$b_{mn} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & 0 & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{66} \end{bmatrix}$$

二 二次非线性电光效应

令： $E_1 = E_x, E_2 = E_y, E_3 = E_z, E_x = E_y = 0, E_z \neq 0$

$$b_{mn} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 \\ b_{12} & b_{12} & b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(b_{11} - b_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(b_{11} - b_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(b_{11} - b_{12}) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} n'_x = n'_y = n - \frac{1}{2}n^3 b_{12} E_z^2 = n_o \\ n'_z = n - \frac{1}{2}n^3 b_{11} E_z^2 = n_e \end{cases}$$

折射率椭球方程变为：

$$\left(\frac{1}{n^2} + b_{12} E_z^2 \right) x^2 + \left(\frac{1}{n^2} + b_{12} E_z^2 \right) y^2 + \left(\frac{1}{n^2} + b_{11} E_z^2 \right) z^2 = 1$$

8-4 电光调制

一 电光相位延迟

折射率椭圆方程:

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{63} E_z \right) x'^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{63} E_z \right) y'^2 = 1$$

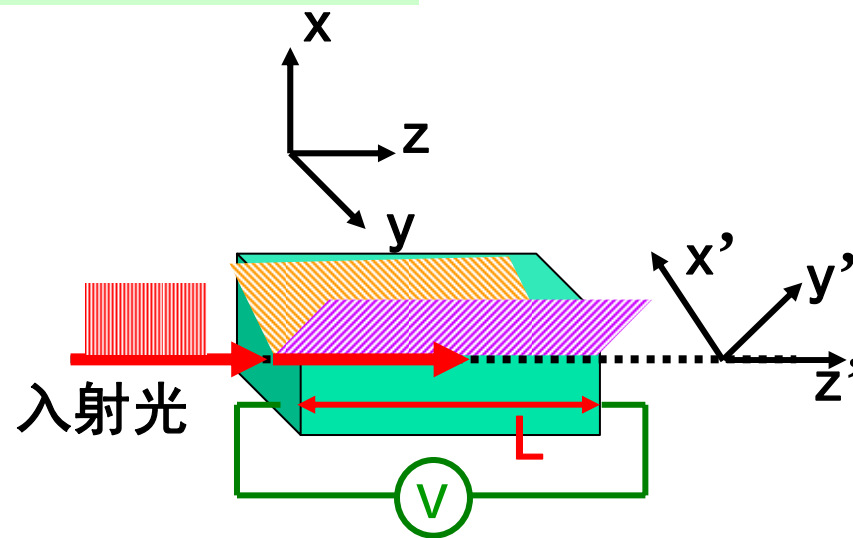
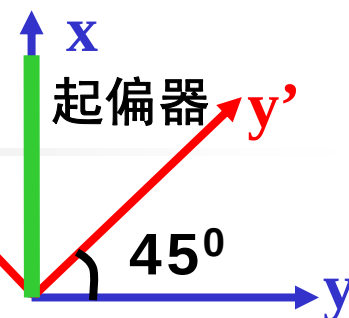
x' , y' 两偏振分量的相位延迟:

$$\varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} L = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z \right)$$

$$\varphi_{y'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{y'} L = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z \right)$$

相位延迟差:

$$\Gamma = \varphi_{y'} - \varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} L n_o^3 r_{63} E_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{63} V$$



z 向电场作用下KDP
晶体的纵向运用

— 电光相位延迟

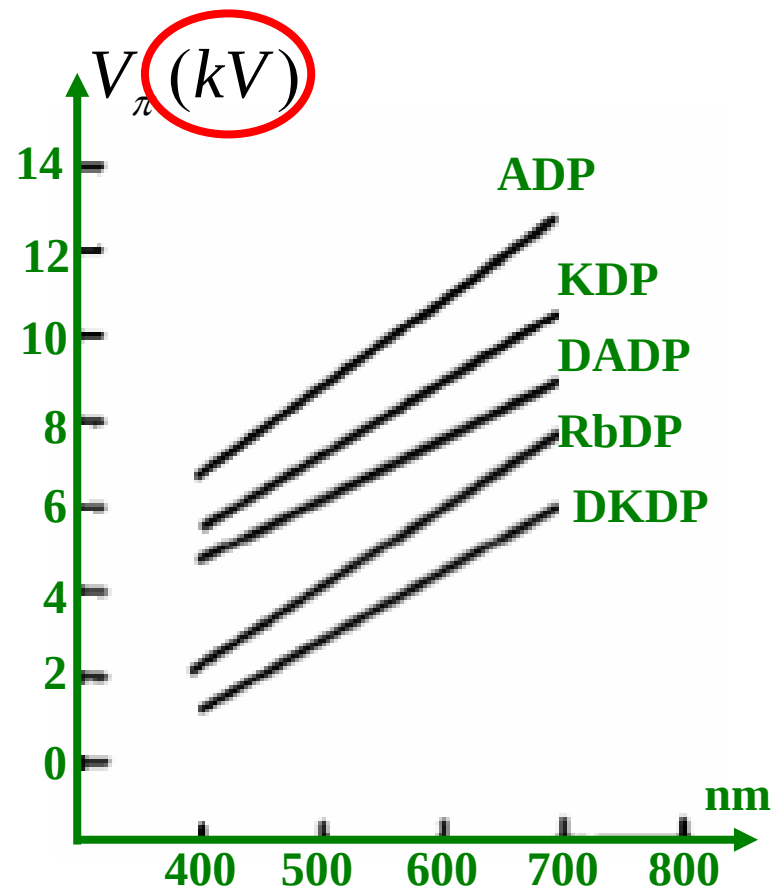
半波电压 V_π 或 $V_{\lambda/2}$: $E_{x'}$, $E_{y'}$
的光程差为半个波长 (相应的相位差为 π) 时所需电压。

相位延迟差 :

$$\Gamma = \varphi_{y'} - \varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} L n_o^3 r_{63} E_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{63} V$$

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

$$\Gamma = \pi \frac{V}{V_\pi}$$



KDP类晶体半波电压与波长关系

一 电光相位延迟

出射的合成振动:

$$\frac{E_{x'}^2}{A_1^2} + \frac{E_{y'}^2}{A_2^2} - 2 \frac{E_{x'} E_{y'}}{A_1 A_2} \cos \Gamma = \sin^2 \Gamma$$

➤ $V = 0, \Gamma = 0, E_{y'} = \frac{A_2}{A_1} E_{x'}$

线偏振光，且与入射光偏振方向一致

➤ $V = \frac{1}{2} V_\pi, \Gamma = (1/2)\pi, \frac{E_{x'}^2}{A_1^2} + \frac{E_{y'}^2}{A_2^2} = 1$

合成光为椭圆偏振光

➤ $V = V_\pi, \Gamma = \pi, E_{y'} = -\frac{A_2}{A_1} E_{x'} = E_{x'} \tan(-\theta)$

线偏振光，偏振方向相对于入射光旋转 2θ 角

二 电光调制

电光调制：根据光波在电光晶体中的传播特性实现光束调制。

可实现：强度调制和相位调制

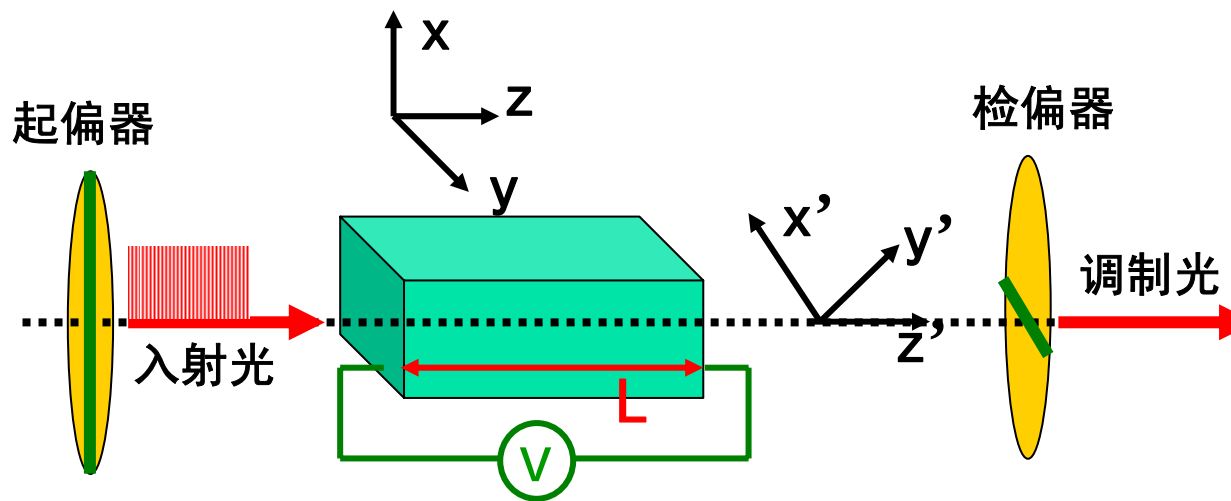
1. 纵向电光强度调制

入射光场：

$$(E_x)_{in} = \sqrt{2}E_0 \exp(i\omega_c t)$$

入射光强度：

$$I_i \propto E \cdot E^* = |E_{x'}(0)|^2 + |E_{y'}(0)|^2 = 2E_0^2$$



纵向电光强度调制器结构图

二 电光调制

1. 纵向电光强度调制

进入晶体后被分解为沿 x' 和 y' 方向的两个分量:

$$\begin{cases} E_{x'}(0) = E_0 \exp(i\omega_c t) \\ E_{y'}(0) = E_0 \exp(i\omega_c t) \end{cases}$$

通过长度为 L 的晶体之后, 两分量:

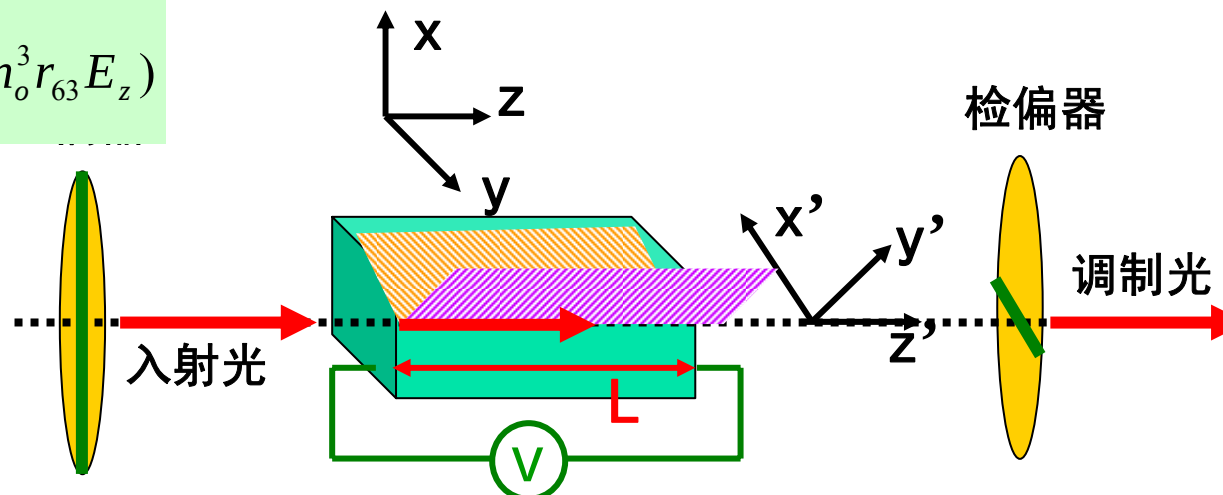
$$\begin{pmatrix} E_{x'}(L) \\ E_{y'}(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \exp[i(\omega_c t - \varphi_{x'})] \\ E_0 \exp[i(\omega_c t - \varphi_{y'})] \end{pmatrix}$$

两偏振分量的相位延迟:

$$\begin{cases} \varphi_{x'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{x'} L = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z) \\ \varphi_{y'} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{y'} L = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z) \end{cases}$$

相位延迟差:

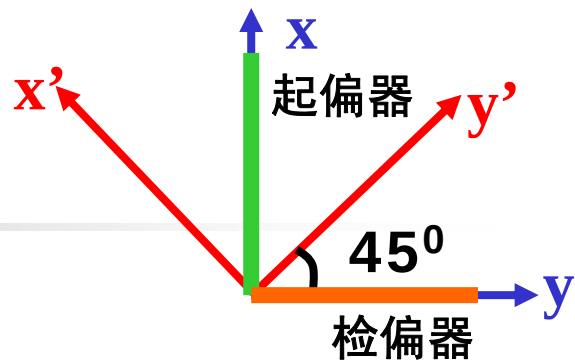
$$\Gamma = \pi \frac{V}{V_\pi}$$



纵向电光强度调制器结构图

二 电光调制

1. 纵向电光强度调制



$$\begin{pmatrix} E_{x'}(L) \\ E_{y'}(L) \end{pmatrix} = \exp[i(\omega_c t - \varphi_{x'})] \begin{pmatrix} E_0 \\ E_0 \exp[-i(\varphi_{y'} - \varphi_{x'})] \end{pmatrix} = \exp[i(\omega_c t - \varphi_{x'})] \begin{pmatrix} E_0 \\ E_0 \exp(-i\Gamma) \end{pmatrix}$$

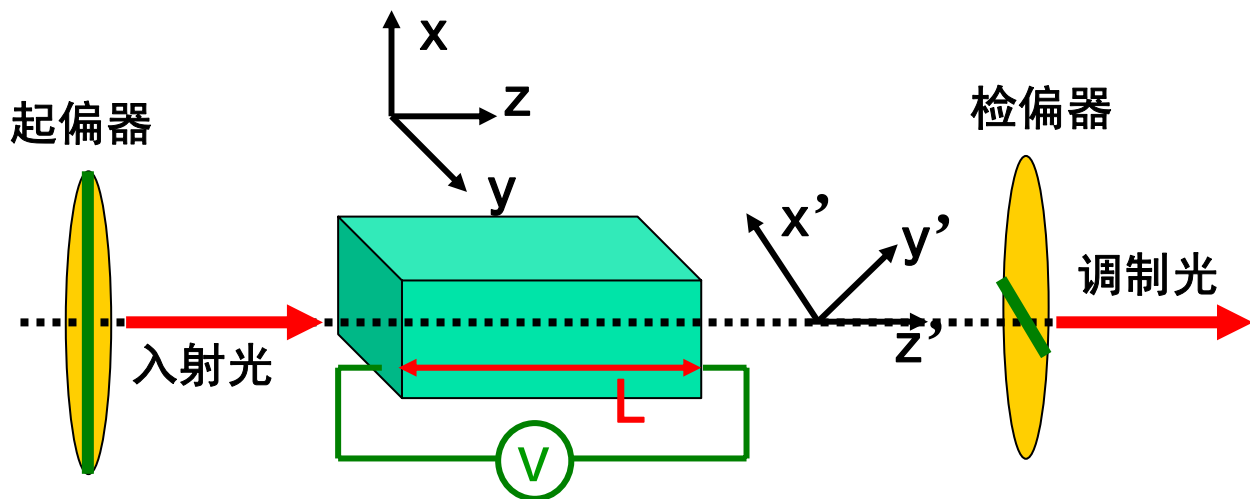
$$\begin{pmatrix} E_{x'}(L) \\ E_{y'}(L) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \\ E_0 \exp(-i\Gamma) \end{pmatrix}$$

检偏器输出光场:

$$(E_y)_o = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (e^{-i\Gamma} - 1)$$

输出光强:

$$I_2 \propto [(E_y)_o \cdot (E_y^*)_o] = \frac{E_0^2}{2} (e^{-i\Gamma} - 1)(e^{i\Gamma} - 1) = 2E_0^2 \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right)$$



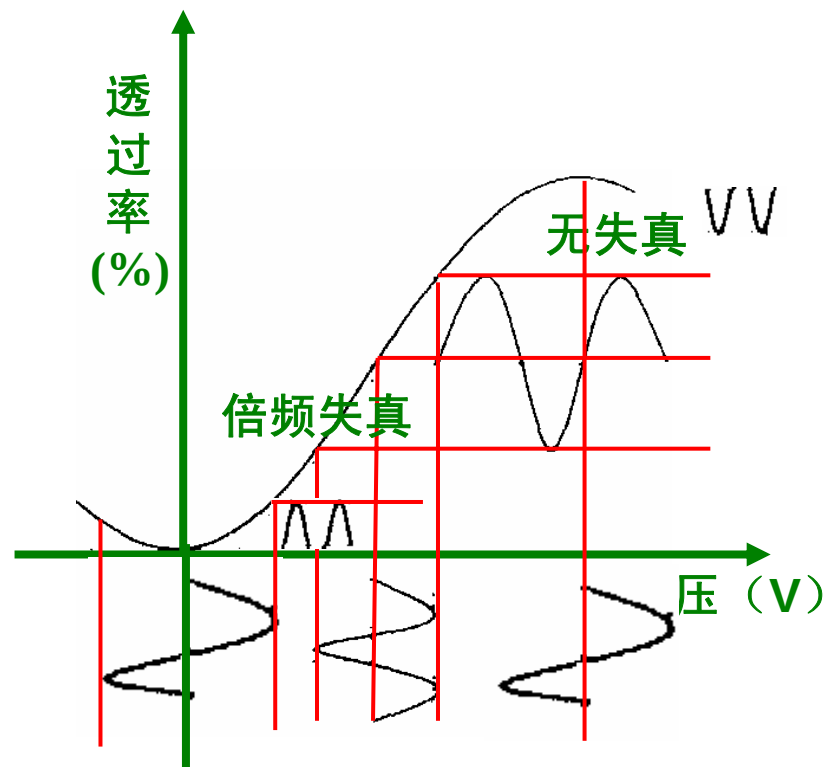
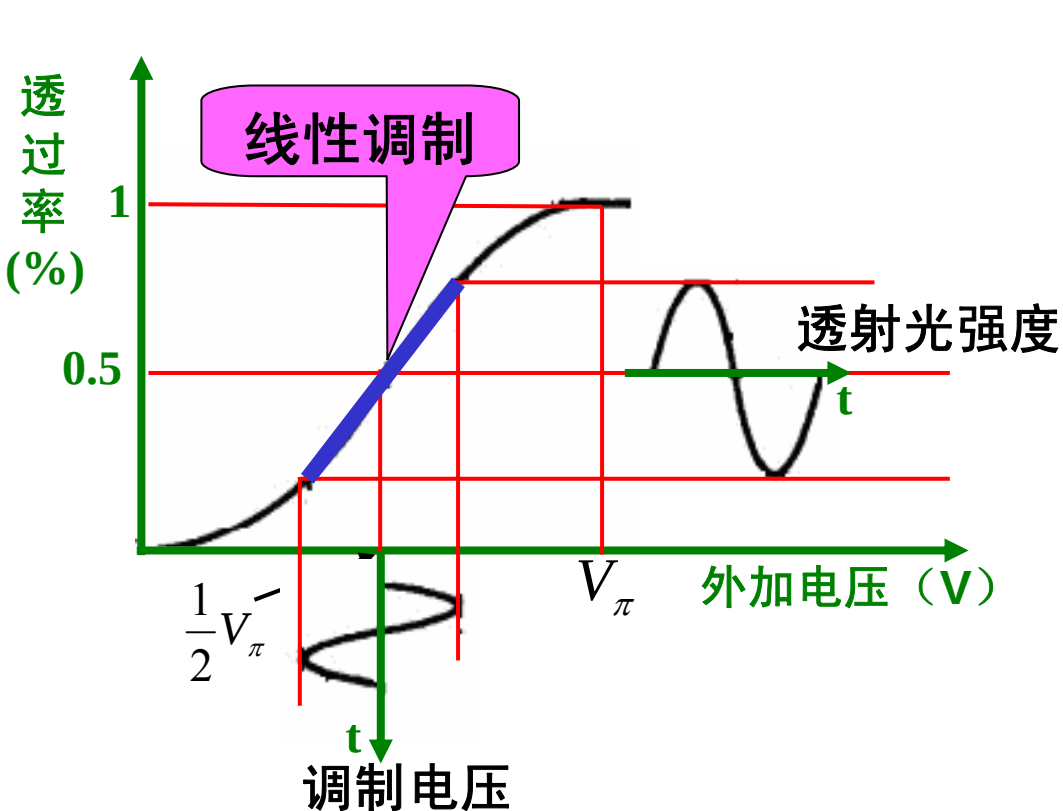
纵向电光强度调制器结构图

二 电光调制

1. 纵向电光强度调制

调制器透过率:

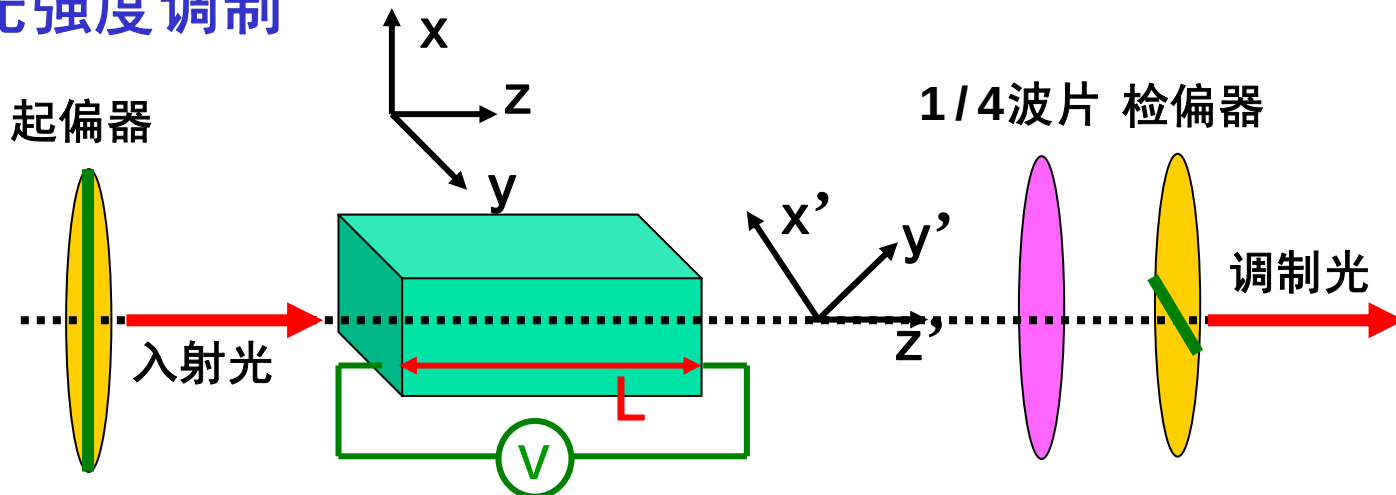
$$\eta = \frac{I_2}{I_1} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi}\right)$$



电光振幅调制特性曲线

二 电光调制

1. 纵向电光强度调制



纵向电光强度调制器结构图

引入 $\lambda/4$ 波片:

$$\eta = \frac{I_2}{I_1} = \sin^2 \left(\frac{\Gamma + \frac{\pi}{2}}{2} \right) = \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi} \right)$$

调制器消光比:

$$\gamma(dB) = 10 \lg \frac{I_m}{I_1}$$

调制电压引起的最大光强

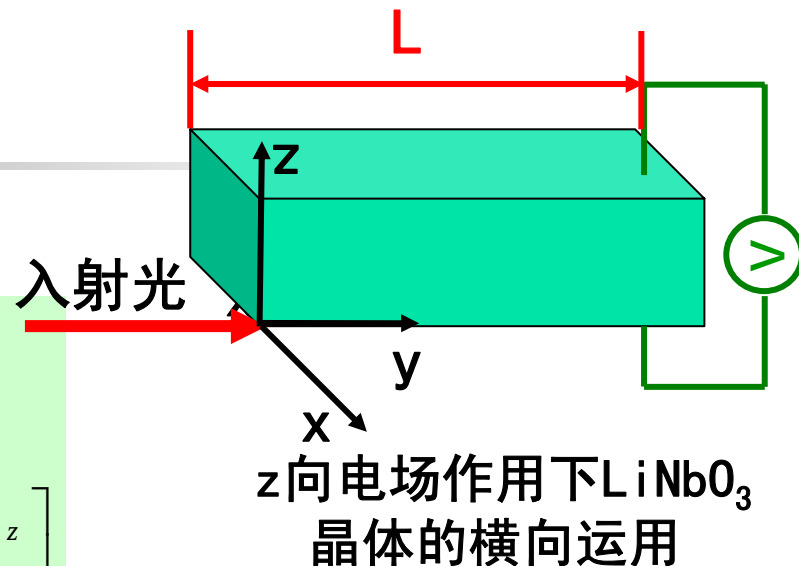
无电压时光强

二 电光调制

2. 横向电光强度调制

LiNbO₃晶体

$$\begin{bmatrix} \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_1 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_2 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_3 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_4 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_5 \\ \Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{42} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{13} E_z \\ r_{13} E_z \\ r_{33} E_z \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



$$\begin{cases} n'_x = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \\ n'_y = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \\ n'_z = n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z \end{cases}$$

引入电场: $\left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z\right)^2 x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} E_z\right)^2 y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} E_z\right)^2 z^2 = 1$

二 电光调制

2. 横向电光强度调制

沿x方向、z方向偏振的分量的相位延迟：

$$\begin{cases} \varphi_x = \frac{2\pi}{\lambda} n'_x L = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z \right) \\ \varphi_z = \frac{2\pi}{\lambda} n'_z L = \frac{2\pi L}{\lambda} \left(n_e - \frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z \right) \end{cases}$$

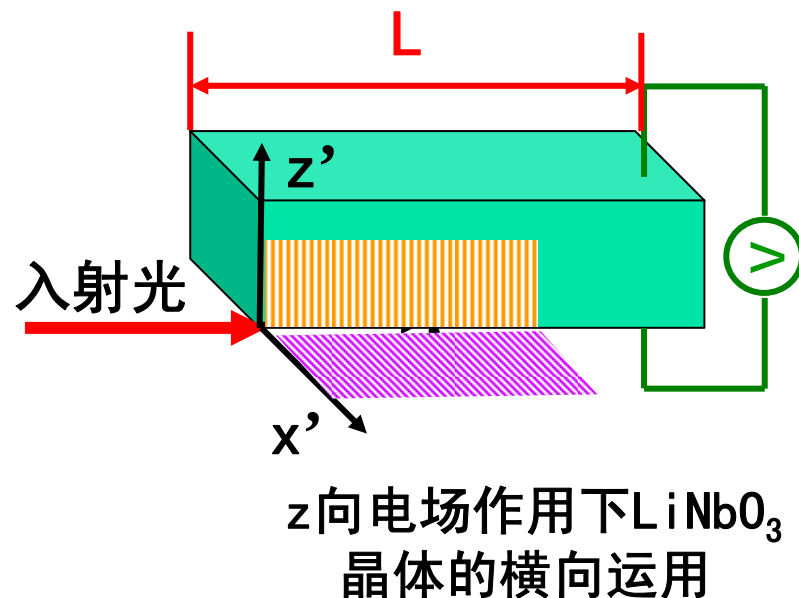
相位差：

$$\Gamma = \varphi_z - \varphi_x = \cancel{\frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) L} - \frac{\pi}{\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \left(\frac{L}{d} \right) V$$

自然双折射

半波电压：

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) L}$$



二 电光调制

3. 纵向与横向运用的比较

纵向运用:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} L n_o^3 r_{63} E_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{63} V$$

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

横向运用:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o) L - \frac{\pi}{\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) \left(\frac{L}{d} \right) V$$

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{(n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13}) L}$$

(1) 横向运用时, 存在自然双折射产生的固有相位延迟, 表明在没有外加电场时, 入射光的两个偏振分量通过晶体后其偏振面已转过了一个角度。

(2) 横向运用时, 增大 L 或减小 d 就可大大降低半波电压。

二 电光调制

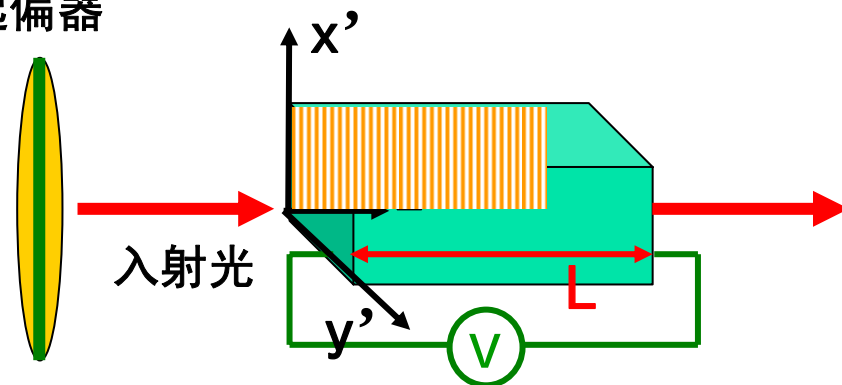
4. 电光相位调制

线偏振光相位变化量:

$$\Delta\varphi_{x'} = \frac{\omega}{c} n_{x'} L$$

$$n_{x'} = n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{63} E_z$$

起偏器



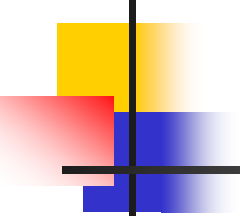
电光相位调制原理图

输出光场:

$$E_{\text{出}} = E_0 \cos\left[\omega t - \frac{\omega}{c} \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_m \sin \omega_m t\right) L\right] = E_0 \cos(\omega t - \cancel{\delta} + \delta \sin \omega_m t)$$



$$\begin{aligned} E_{\text{出}} &= E_0 \cos(\omega t + \delta \sin \omega_m t) \\ &= E_0 J_0(\delta) \cos \omega t + E_0 \boxed{J_1(\delta)} [\cos(\omega + \omega_m)t - \cos(\omega - \omega_m)t] + \\ &\quad E_0 J_2(\delta) [\cos(\omega + 2\omega_m)t - \cos(\omega - 2\omega_m)t] + \dots \end{aligned}$$



2.3 光波在声光体中的传播

一 声光效应

弹光效应：机械应力引起介质光学性质变化

声光效应：声波引起介质折射率发生相应变化

主轴坐标系中未加外场：

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1$$

引入应力：

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

一 声光效应

P_{ij} : 弹光系数; S : 应变

KDP晶体(正交晶系),
超声波沿z轴传播

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{n_{11}^2} - \frac{1}{n_1^2} \\ \frac{1}{n_{22}^2} - \frac{1}{n_2^2} \\ \frac{1}{n_{33}^2} - \frac{1}{n_3^2} \\ \frac{1}{n_{23}^2} \\ \frac{1}{n_{13}^2} \\ \frac{1}{n_{12}^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & 0 & 0 & 0 \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ s_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{1}{n_{11}^2} - \frac{1}{n_1^2} = p_{13}s_3$$

$$\frac{1}{n_{22}^2} - \frac{1}{n_2^2} = p_{23}s_3$$

$$\frac{1}{n_{33}^2} - \frac{1}{n_3^2} = p_{33}s_3$$

$$\frac{1}{n_{23}^2} = \frac{1}{n_{13}^2} = \frac{1}{n_{12}^2} = 0$$

一 声光效应

引入应力后折射率椭球:

$$\left(\frac{1}{n_o^2} + p_{13}s_3\right)x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + p_{23}s_3\right)y^2 + \left(\frac{1}{n_e^2} + p_{33}s_3\right)z^2 = 1$$

结论: 三个主轴方向没有发生变化, 折射率发生变化。

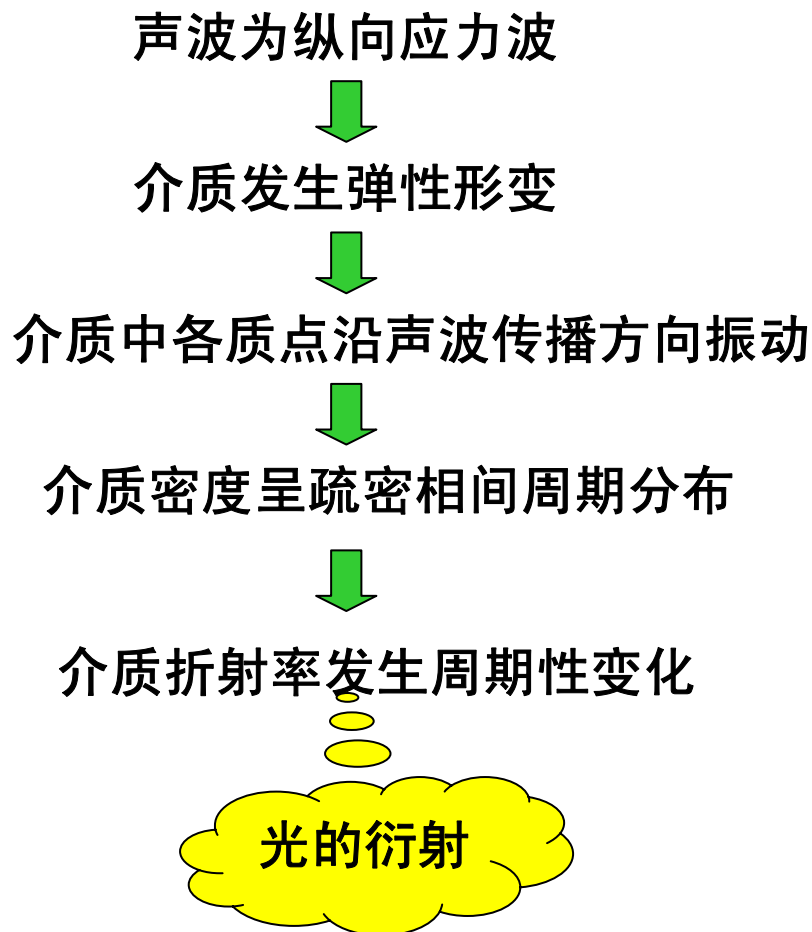
$$\begin{cases} n_x = n_o - \frac{1}{2}n_o^3 p_{13}s_3 \\ n_y = n_o - \frac{1}{2}n_o^3 p_{23}s_3 \\ n_z = n_e - \frac{1}{2}n_e^3 p_{33}s_3 \end{cases}$$

弹光效应折射率改变的**统一形式**:

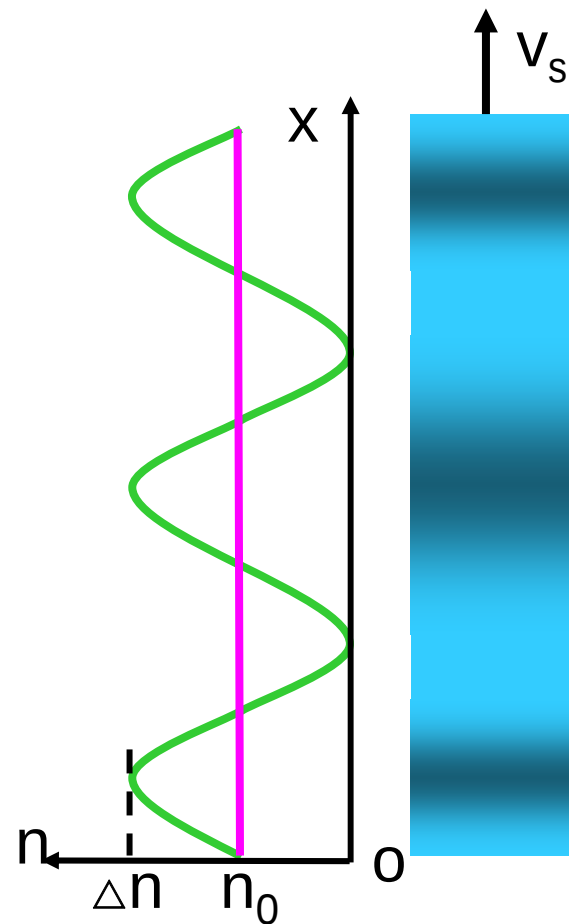
$$\Delta n = -\frac{1}{2}n^3 PS$$

未引入应力时介质折射率

二 光波在声光晶体中的传播



声光效应：机械应力引起的折射率变化。



超声波在介质中的传播

二 光波在声光晶体中的传播

超声行波

质点位移: $u(x, t) = u_0 \cos(\omega_s t - k_s x)$

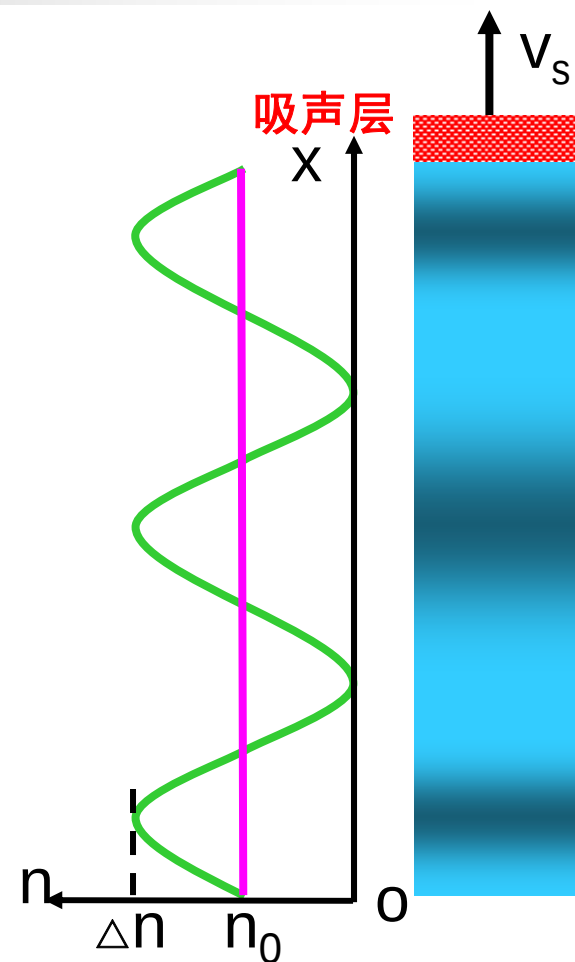
应变场: $S = -\frac{\partial u}{\partial x} = u_0 k_s \sin(\omega_s t - k_s x)$

介质折射率变化:

$$\Delta n(x, t) = -\frac{1}{2} n^3 P S = -\frac{1}{2} n^3 P u_0 k_s \sin(\omega_s t - k_s x)$$

介质折射率:

$$n(x, t) = n_0 - \frac{1}{2} n^3 P u_0 k_s \sin(\omega_s t - k_s x)$$



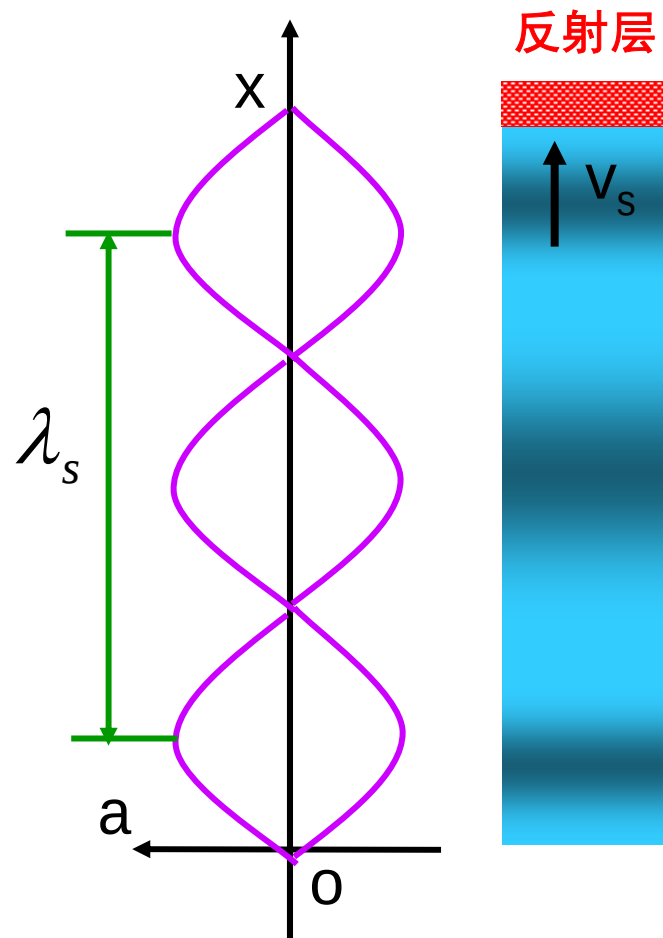
超声行波在介质中的传播

2.3 光波在声光体中的传播

超声驻波

介质折射率:

$$n(x,t) = 2\Delta n \sin(\omega_s t) \cos(k_s x)$$



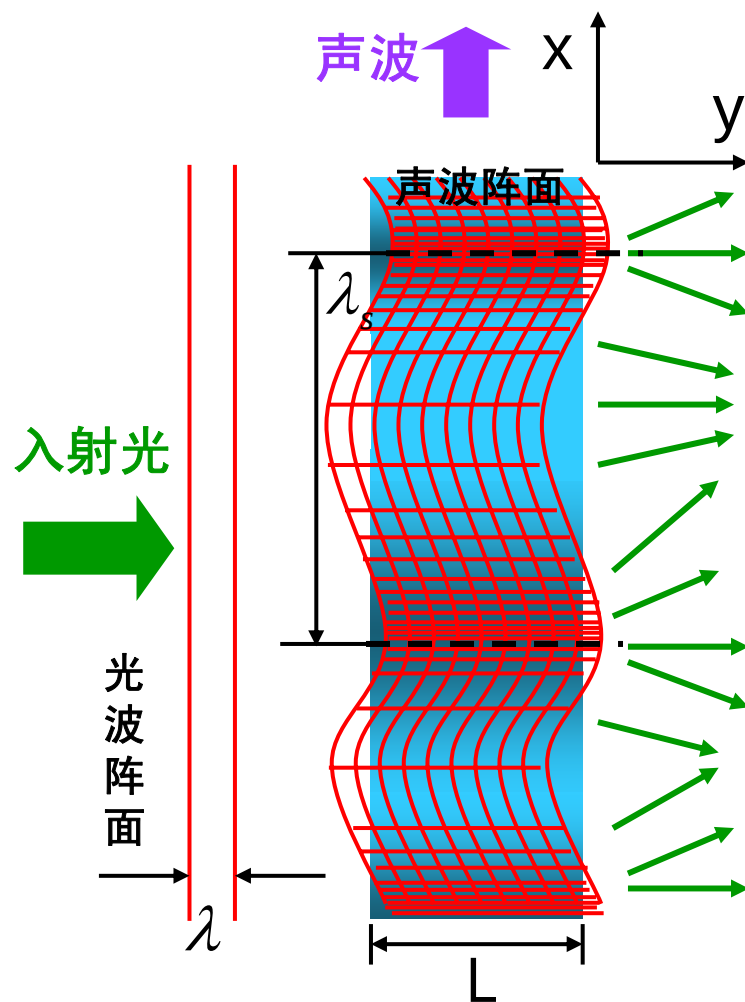
超声驻波在介质中的传播

三 拉曼—纳斯衍射

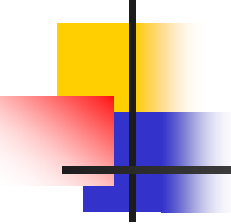
条件:

1. 超声波频率较低
2. 光波平行于声波波面入射 ($\theta_i = 0$)
3. 声光相互作用长度较短

特点: 由出射波阵面上各子波源发出的次波将发生相干作用, 形成与入射方向对称分布的多级衍射光。



拉曼—纳斯衍射图



三 拉曼—纳斯衍射

各级衍射光强度：

$$I_m \propto J_m^2(\Delta\varphi), \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L$$

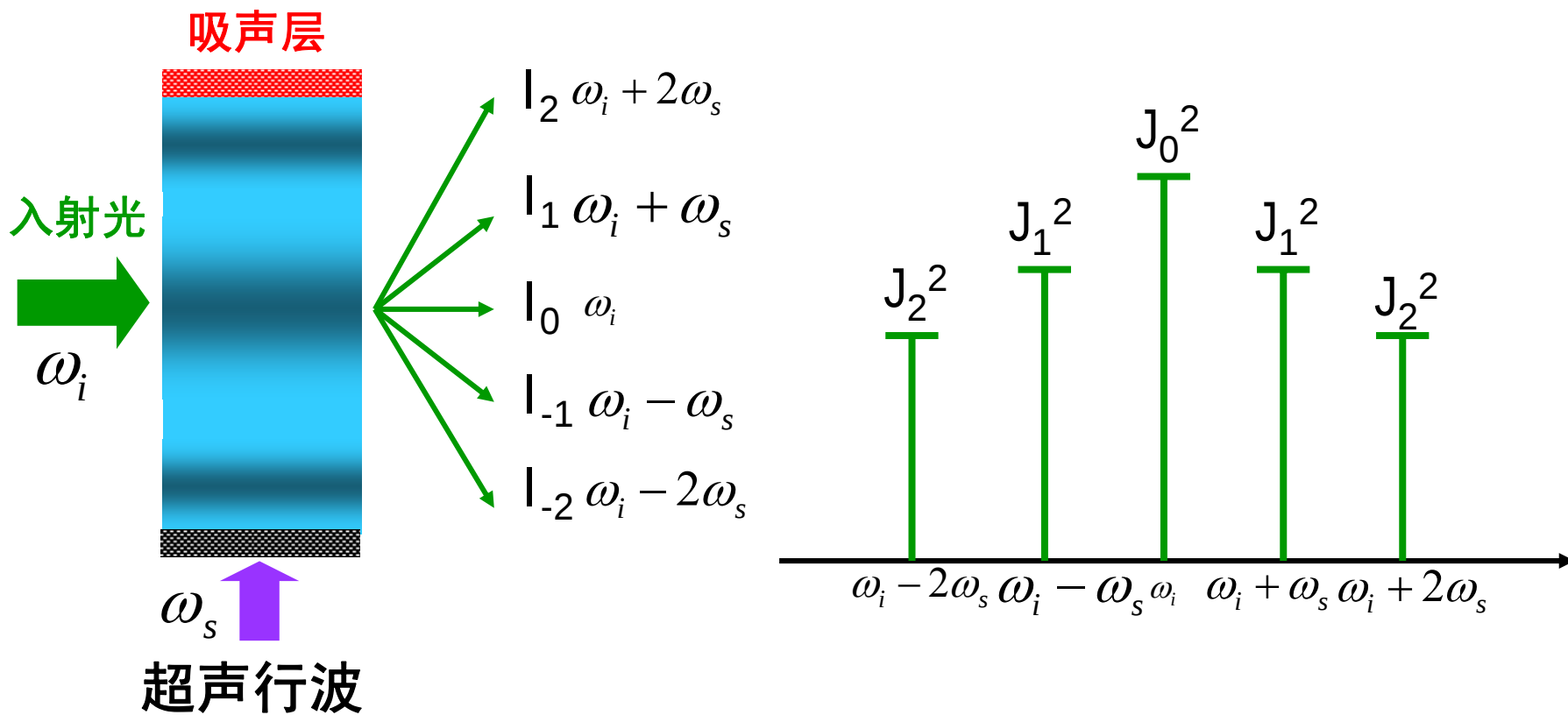
各级衍射光的方位角：

$$\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{\lambda_s} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

考虑到声束的宽度，**多级衍射条件：**

$$L < L_0 \approx \frac{n\lambda_s^2}{4\lambda_0}$$

三 拉曼—纳斯衍射



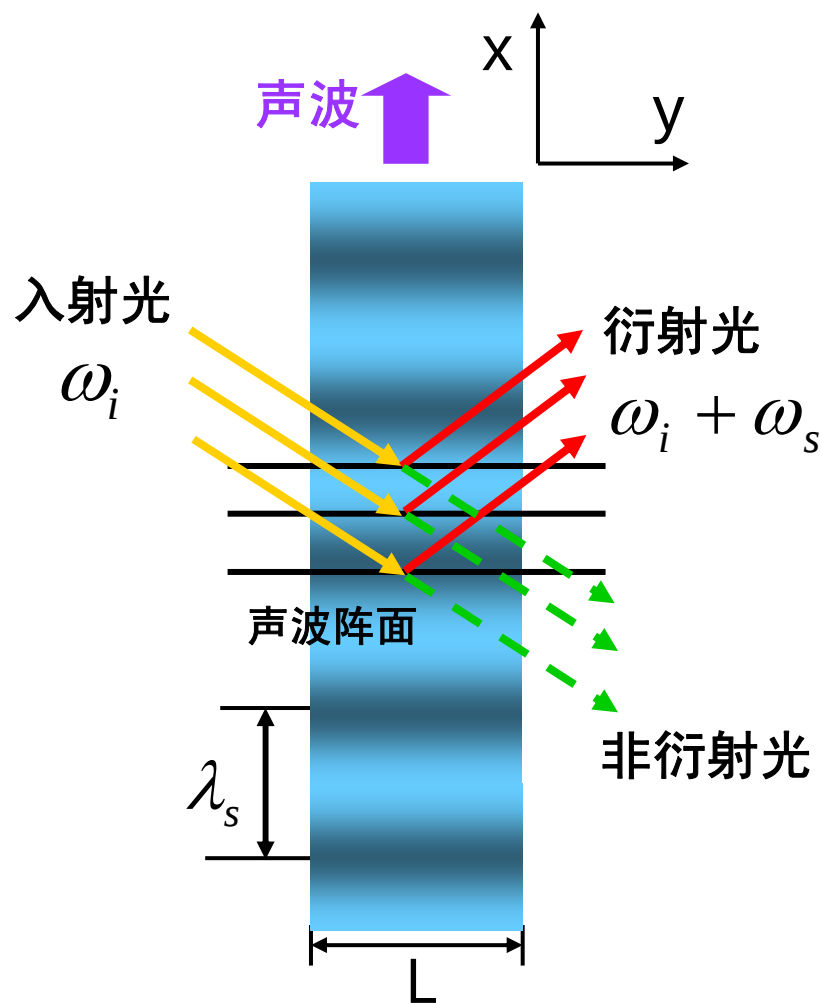
各级衍射光的空域和频域分布

四 布喇格衍射

条件:

1. 超声波频率较高
2. 光束与声波波面间以一定角度斜入射 ($\theta_i \neq 0$)
3. 声光互作用长度较长

特点: 衍射光各高级次衍射光发生干涉, 各高级衍射光将互相抵消, 只出现0级和+1级 (或-1级) 衍射光。

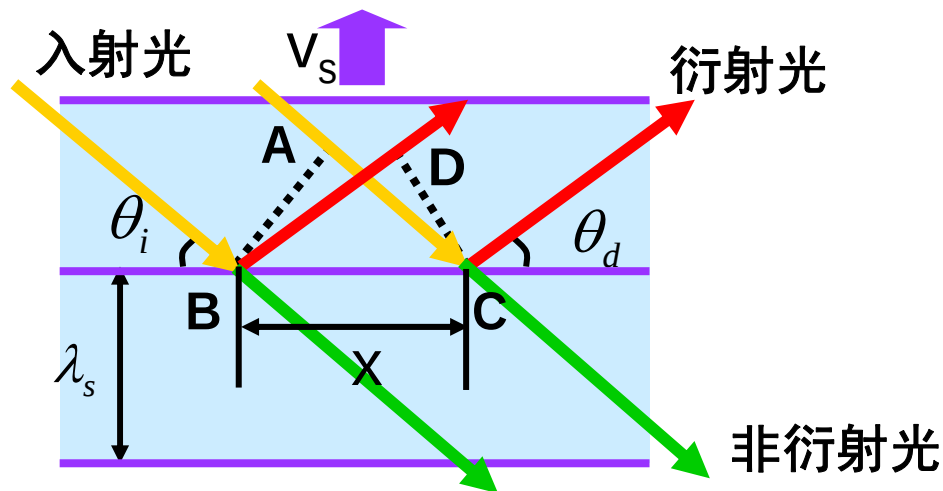


布喇格声光衍射图

四 布喇格衍射

变化超声波频率
可控制衍射
光方向

1. 布喇格衍射条件的推导

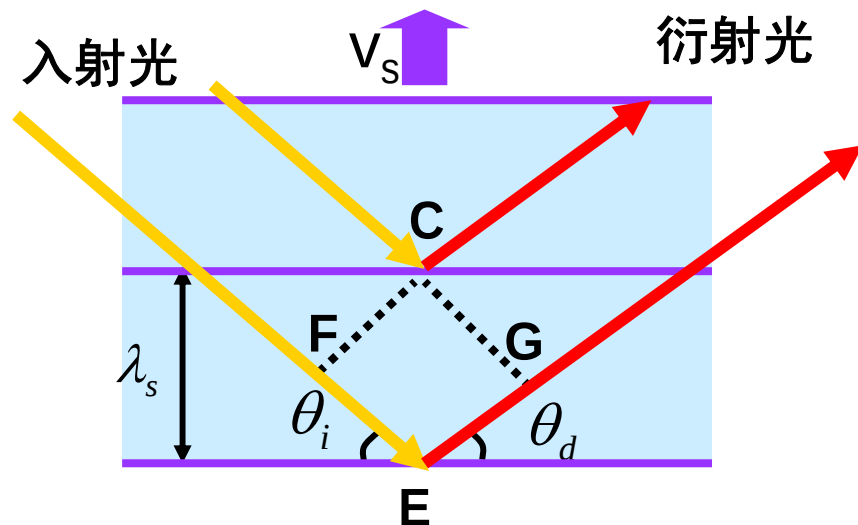


$AC - BD$ 等于光波波长的整倍数

$$x(\cos \theta_i - \cos \theta_d) = m \frac{\lambda}{n} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\theta_i = \theta_d \quad (m = 0)$$

布喇格方程: $\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\lambda_s} = \frac{\lambda}{2nv_s} f_s$



$FE + EG$ 必须等于光波波长的整倍数

$$\lambda_s (\sin \theta_i + \sin \theta_d) = m \frac{\lambda}{n}$$

$$\theta_i = \theta_d = \theta_B \quad (m = 1)$$

四 布喇格衍射

2. 布喇格衍射效率

0 级衍射光强: $I_0 = I_i \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$

1 级衍射光强: $I_1 = I_i \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right)$

附加相移: $\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n L$

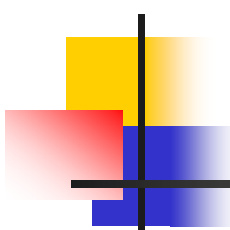
$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 P S$$

$$S = \sqrt{\frac{2P_s}{HL\rho v_s^3}}$$

$$M = \frac{n^6 P^2}{\rho v_s^3}$$

衍射效率:

$$\eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2 \left[\frac{\pi L}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} M P_s \right]$$



四 布喇格衍射

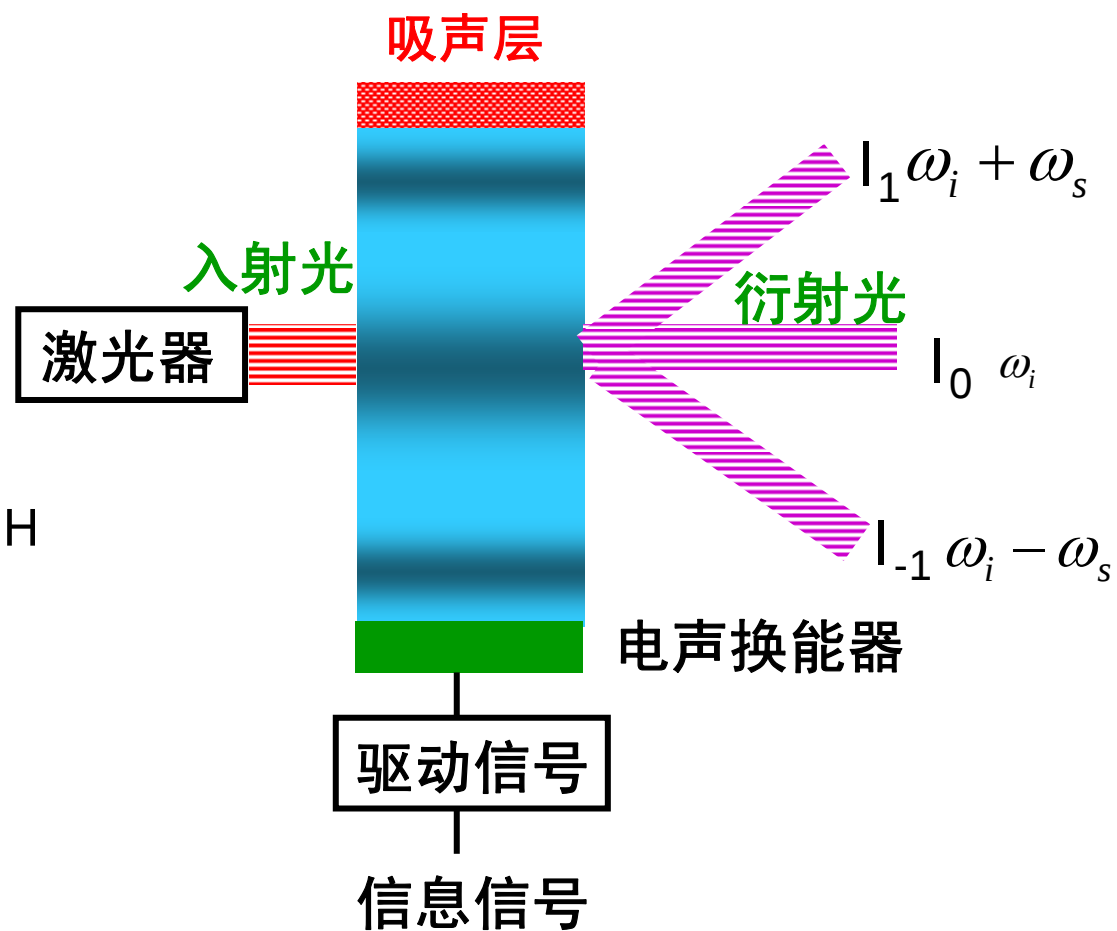
2. 布喇格衍射效率

衍射效率：1级衍射光强度与入射光强度之比。

$$\eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2 \left[\frac{\pi L}{\sqrt{2} \lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} M P_s \right]$$

- (1) P_s 固定，要使 I_1 尽量大，则需材料 M 大，换能器 L 大 H 小。
- (2) 若 P_s 足够大， $I_1/I_i = 100\%$
- (3) 改变 P_s ， I_1/I_i 改变。通过控制 P_s 可控制**衍射光强**。

五 声光强度调制器



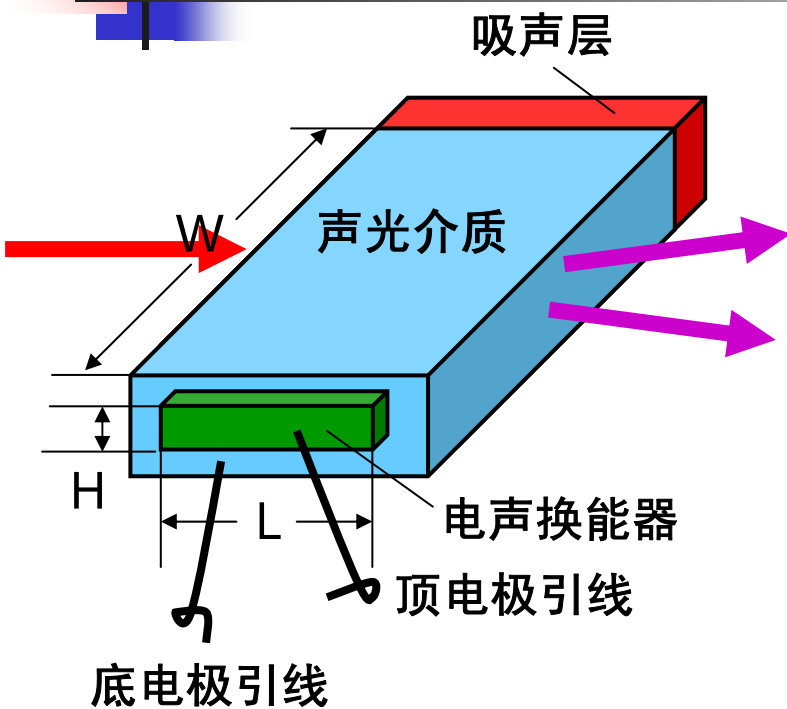
声光调制器原理结构图

电—声换能器：利用压电晶体或压电半导体的反压电效应，在**外电场**作用下产生机械振动后形成**超声波**。

吸声装置：吸收通过介质的声波使得调制器工作于**行波**状态。

反射装置：使调制器工作于**驻波**状态。

五 声光强度调制器



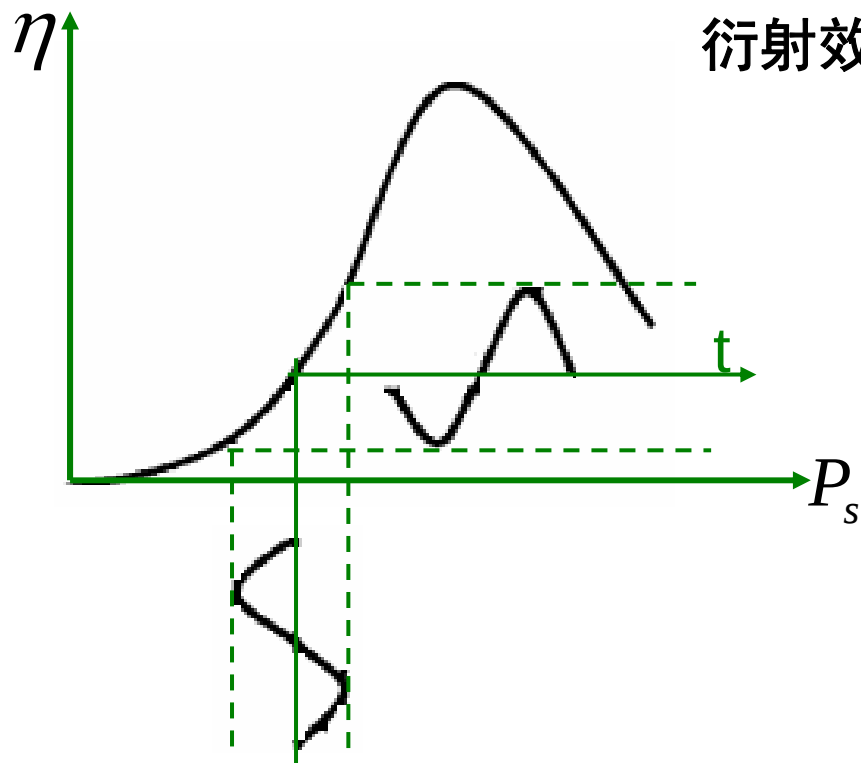
声光调制器实物图



五 声光强度调制器

衍射效率:

$$\eta = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} MP_s \right]$$



声光调制特性曲线

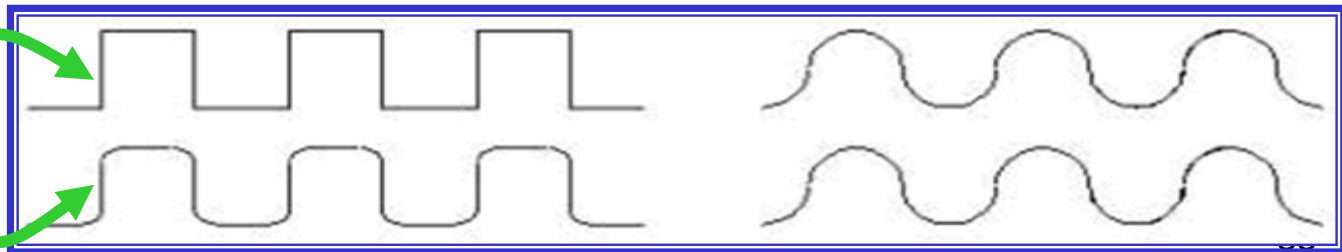
P_s

$$\frac{I_1}{I_i} = 100\%$$

变化超声波功率可控制衍射光强

控制电信号

调制光信号



8-6 磁光调制

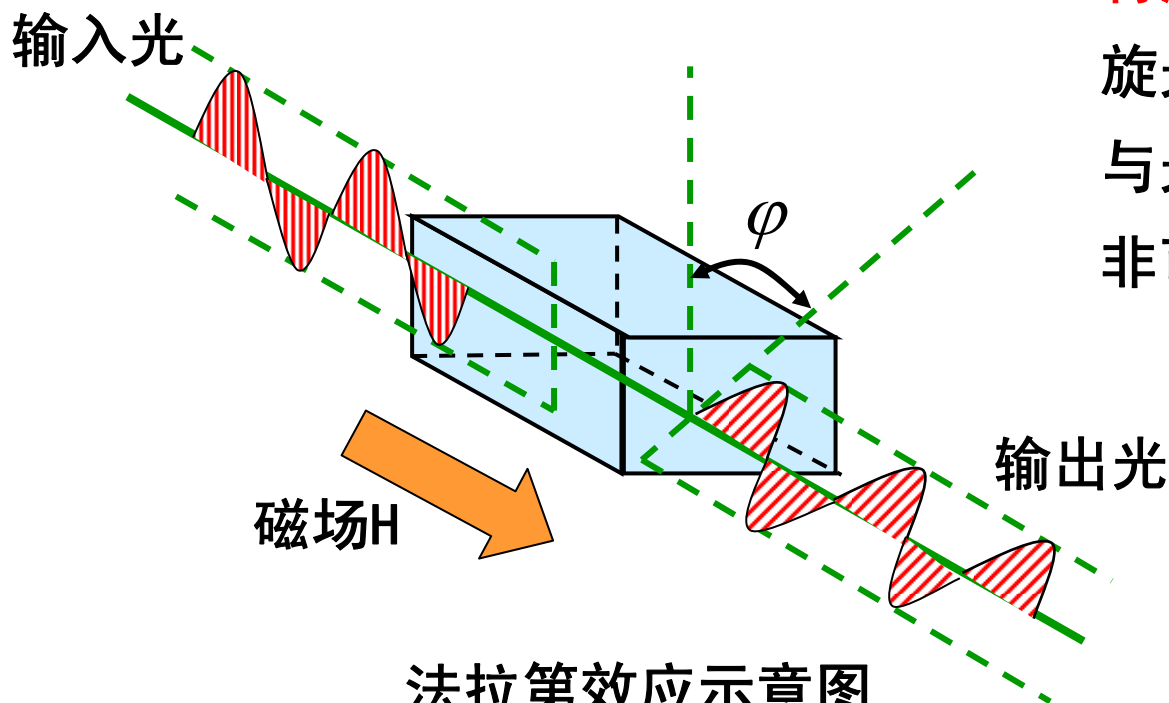
一 法拉第磁光效应

法拉第效应：线偏振光在外加磁场作用下在介质中传播时，其偏振面将发生旋转。

$$\varphi = VHL$$

特点：

旋光方向和磁场方向有关
与光束传播方向无关
非可逆过程



法拉第效应示意图

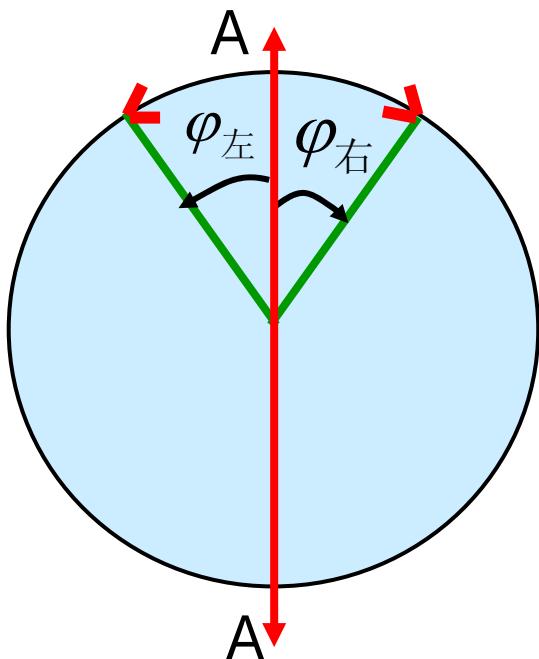
— 法拉第磁光效应

1825年菲涅尔唯象解释：

非旋光物质

$$n_{\text{左}} = n_{\text{右}}$$

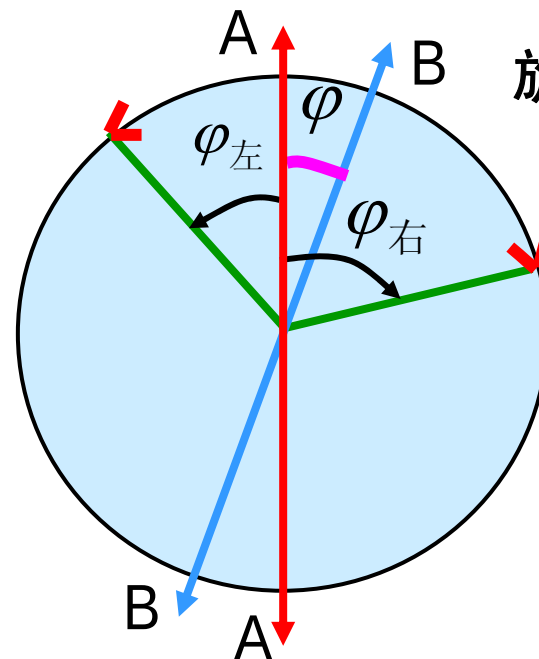
$$\varphi_{\text{左}} = \varphi_{\text{右}}$$



旋光物质

$$n_{\text{左}} \neq n_{\text{右}}$$

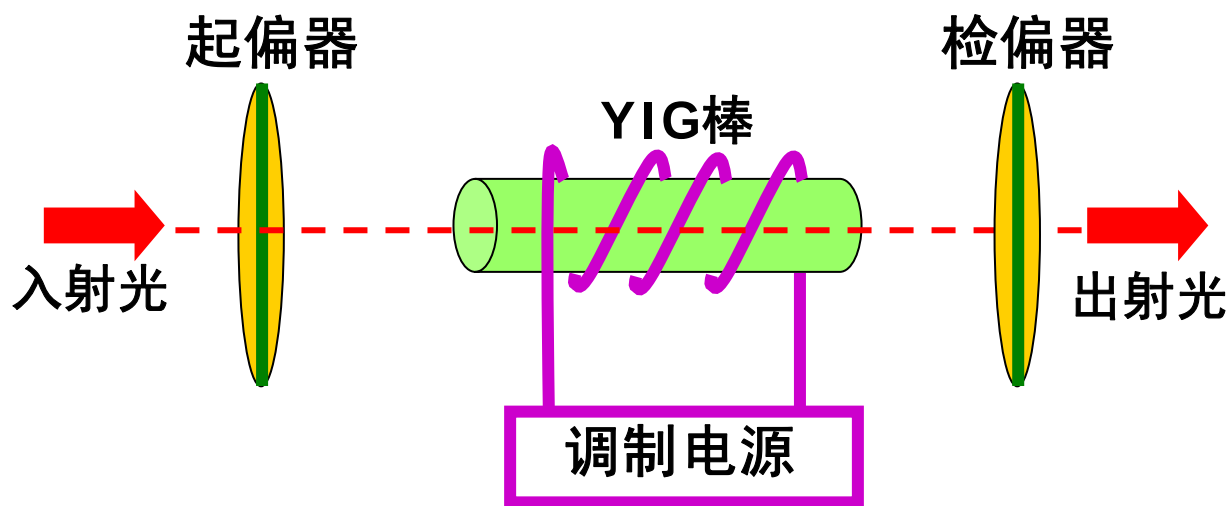
$$\varphi_{\text{左}} \neq \varphi_{\text{右}}$$



非旋光物质和旋光物质的合成偏振面

$$\varphi = \frac{\pi L}{\lambda} (n_{\text{左}} - n_{\text{右}}) = \frac{\pi L}{\lambda} (n_{+} - n_{-})$$

二 磁光强度调制器



磁光体调制器结构图