

上一节课程内容

§3-6 激光器的频率特性和稳频与模式选择原理

- 一、非均匀谱线增宽多模振荡
- 二、均匀谱线增宽多模振荡
- 三、稳频原理
- 四、模式选择技术

上一章内容简介

第三章：激光放大器与振荡器

§3.1 受激跃迁产生的吸收与放大

---粒子布居数反转

§3.2 产生粒子数反转的几种量子系统

§3.3.行波激光放大器

§3.4 再生谐振放大器·振荡阈值条件

§3.5 激光振荡器

§3-6 激光器的频率特性和稳频与模式选择原理

下一章内容简述

第四章 激光器调制

§4-1 调制的基本概念

§4-2 电光调制

§4-3 声光调制

§4-4 直接调制

本章需要回答的问题

◆激光调制有何意义？

◆调制的种类？

◆调制的方法？

◆调制的特点？

第四章 激光器调制

§4-1 调制的基本概念

1. 频率调制和相位调制（统称角度调制）
2. 强度调制
3. 振幅调制
4. 其他调制

§4-1 调制的基本概念

◆为什么要调制？

调Q、锁模、通讯、显示、测距等。

◆激光调制：就是把激光作为载波携带低频信号。

激光作为载波，所需传播的（电、光、声、磁等）信号叠加到载波上，使载波的参数（强度或者振幅、频率、相位）按照所加信号的规律变化，达到传播信号的目的。

§4-1 调制的基本概念

◆调制的方法：

◆内调制：直接调制（改变泵浦驱动电流）

间接调制（腔内调制元件）

◆外调制：腔外加调制器

（调制速度高，带宽大）

◆按性质分：调幅；调频；调相位；

强度调制等

1. 振幅调制

$$\begin{aligned} E(t) &= A_c (1 + m_a \cos \omega_m t) \cos(\omega_c t + \varphi_c) \\ &= A_c \cos(\omega_c t + \varphi_c) + \frac{m_a}{2} A_c \cos[(\omega_c + \omega_m)t + \varphi_c] \\ &\quad + \frac{m_a}{2} A_c \cos[(\omega_c - \omega_m)t + \varphi_c] \end{aligned}$$

其中调制信号

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

调幅系数：

$$m_a = \frac{A_m}{A_c}$$

2. 频率调制和相位调制 (统称角度调制)

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

m

为调相 (频) 系数

3. 强度调制

强度为

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

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

◆ 当然还有脉冲调制；脉冲编码调制

调制具体方法：

- ◆**电-机械调制**：机械斩波器---KHz量级
- ◆**电-光调制**：电光效应---折射率变化，光场调制变化-----电压高
- ◆**声-光调制**：透明介质的光学常数发生周期变化，光衍射和偏转-----GHz量级，电压低
- ◆**其他调制**：磁光调制（法拉第效应）；干涉调制；。。

第四章 激光器调制

§4-2 电光调制

1. 电光调制的物理基础

(a) 电致折射率变化

(b) 电光相位延迟

(c) 光偏振态的变化

2 . 电光强度调制

(a) 纵向电光调制

(b) 横向电光调制

3 . 电光相位调制

4 . 评价调制器质量的几个指标

§4-2 电光调制

- 某些晶体: LiNbO_3 , KDP
+ 外加电场

-----**双折射现象**

1. 电光调制的物理基础

◆ 晶体折射率：

$$n = n_0 + \gamma E + hE^2 + \dots$$

◆ γ 线性电光系数（**Pockels**效应）

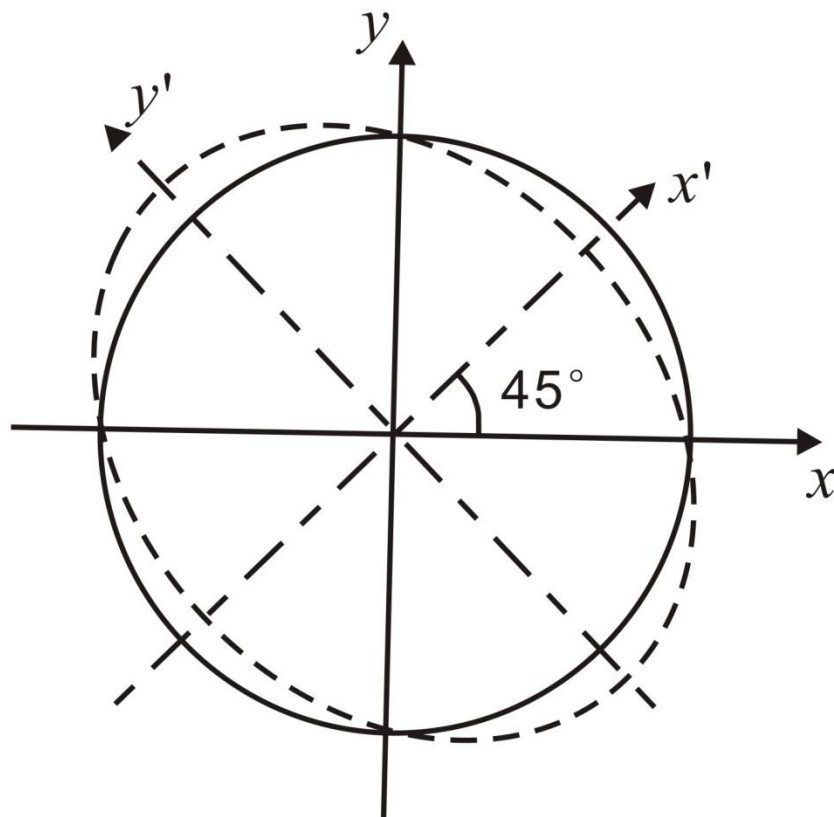
◆ h 二次电光效应（**Kerr**效应）

1. 电光调制的物理基础 (1) 电致折射率变化

(1) 电致折射率变化

一般折射率椭球

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



1. 电光调制的物理基础 (1) 电致折射率变化

◆加电场后

$$\Delta\left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij} E_j$$

◆ γ_{ij} 是6*3的电光张量, $i=1,2,3...,6$

1. 电光调制的物理基础 (1) 电致折射率变化

◆对KDP晶体 (负单 $n_o > n_e$) :

只有 $\gamma_{41}; \gamma_{52}; \gamma_{63}$ 不为零

◆外电场 $E_z = E$; $E_x = E_y = 0$ 时

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

1. 电光调制的物理基础 (1) 电致折射率变化

● 旋转45度变换主轴化后

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

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

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

$$n_{z'} = n_e$$

1. 电光调制的物理基础 (1) 电致折射率变化

● 电致折射率变化 (单轴变为双轴晶体)

$$\Delta n = n_{y'} - n_{x'} = n_o^3 \gamma_{63} E_z$$

1. 电光调制的物理基础 (2) 电光相位延迟

(2) 电光相位延迟

纵向电光效应：电场方向与通光方向一致

横向电光效应：电场方向与通光方向垂直

KDP纵向电光效应情况： $n_{y'} > n_{x'}$

$$\boxed{v_{x'} = \frac{c}{n_{x'}}} \quad \text{大于} \quad \boxed{v_{y'} = \frac{c}{n_{y'}}}$$

1. 电光调制的物理基础 (2) 电光相位延迟

◆两个方向的光波通过晶体后产生一个位相差

$$\Delta\varphi = \varphi_{n_{y'}} - \varphi_{n_{x'}} = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_{y'} - n_{x'})$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma_{63} V = \frac{\pi V}{V_{1/2}}$$

$$V_{1/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{63}}$$

其中：沿Z轴加的电压 $V = E_z * L$

1. 电光调制的物理基础 (2) 电光相位延迟

◆半波电压 ($\Delta\varphi = \pi$) :

$$V_{1/2} = \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{63}}$$

越小，需要的调制功率越小；

◆实测 $V_{1/2}$ 计算 γ_{63}

1. 电光调制的物理基础 (3) 光偏振态的变化

(3) 光偏振态的变化

一般合成的出射光振动是一个椭圆偏振光

$$\frac{E_{x'}^2}{A_1^2} + \frac{E_{y'}^2}{A_2^2} - \frac{2E_{x'}E_{y'}}{A_1A_2} \cos \Delta\varphi = \sin^2 \Delta\varphi$$

A1, A2是投影在x, y轴上的振幅

1. 电光调制的物理基础 (3) 光偏振态的变化

◆当晶体未加电场 , $\Delta\varphi = 0$ 或者 $2q\pi$ ($q=0,1,2,\dots$) , 出射的光是与入射光偏振方向一

致 ;

$$\frac{E_x'^2}{A_1^2} + \frac{E_y'^2}{A_2^2} - \frac{2E_x'E_y'}{A_1A_2} = 0$$

$$\left(\frac{E_x'}{A_1} - \frac{E_y'}{A_2}\right)^2 = 0$$

◆当 $V = V_{1/4}$ 时 (相当与四分之一波

片) , $\Delta\varphi = (2q + 1)\frac{\pi}{2}$, 得到椭圆偏振光或者

圆偏振光

$$\frac{E_x'^2}{A_1^2} + \frac{E_y'^2}{A_2^2} = 1$$

1. 电光调制的物理基础（3）光偏振态的变化

◆当 $V = V_{1/2}$ 时（二分之一波

片）， $\Delta\varphi = (2q + 1)\pi$ ，出射光是线偏振

光，相对于入射光旋转一个 2θ 角，如果 $A_1 = A_2$

$$\theta = 45^\circ$$

2 . 电光强度调制

(1) 纵向电光调制

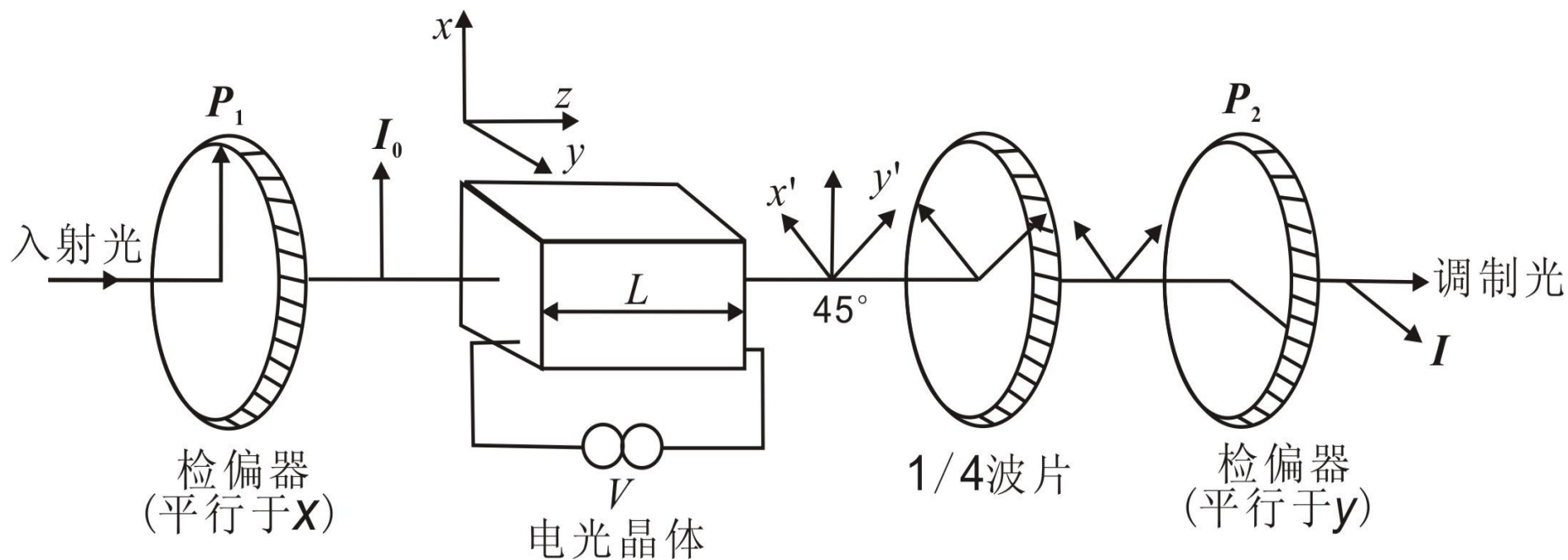


图 纵向电光强度调制

2 . 电光强度调制 (1) 纵向电光调制

◆光进入晶体后分解为沿 x' , y' 方向的两个分量
(振幅为入射振幅的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$) , 相位相同 :

$$E_{x'} = A \cos \omega_c t$$

$$E_{y'} = A \cos \omega_c t$$

或者

$$E_x(t) = A * \exp[i\omega_c t]$$

$$E_y(t) = A * \exp[i\omega_c t - i\Delta\varphi]$$

2 . 电光强度调制 (1) 纵向电光调制

◆入射光强

$$I_i \propto 2A^2$$

◆出射光强

$$I \propto 2A^2 \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$

◆透射率

$$T = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \frac{V}{V_\pi}\right)$$

◆对于KDP晶体

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

2 . 电光强度调制 (1) 纵向电光调制

◆电光调制输出特性曲线：

$$V = V_{\pi/2} + V_m \sin \omega_m t$$
$$\Delta\varphi = \pi \frac{V}{V_\pi} = \frac{\pi}{2} + \pi \frac{V_m}{V_\pi} \sin \omega_m t$$

$$T = \frac{I}{I_m} = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$$
$$= \frac{1}{2} [1 + \sin(\Delta\varphi_m \sin \omega_m t)]$$

$$\Delta\varphi_m = \pi \frac{V_m}{V_\pi}$$

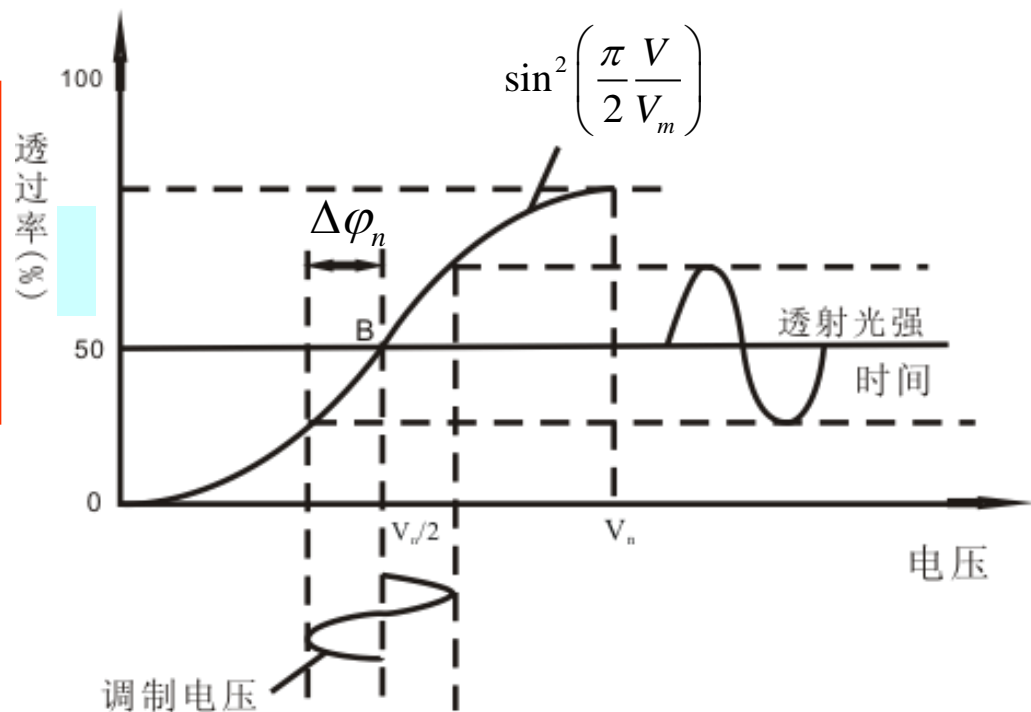


图1.2-6 电光调制特性曲线

**调制信号不宜过大；
简单，但半波电压高。**

2. 电光强度调制 (2) 横向电光调制

(2) 横向电光调制

半波电压小，但结构复杂，加工精度高，温度变化灵敏

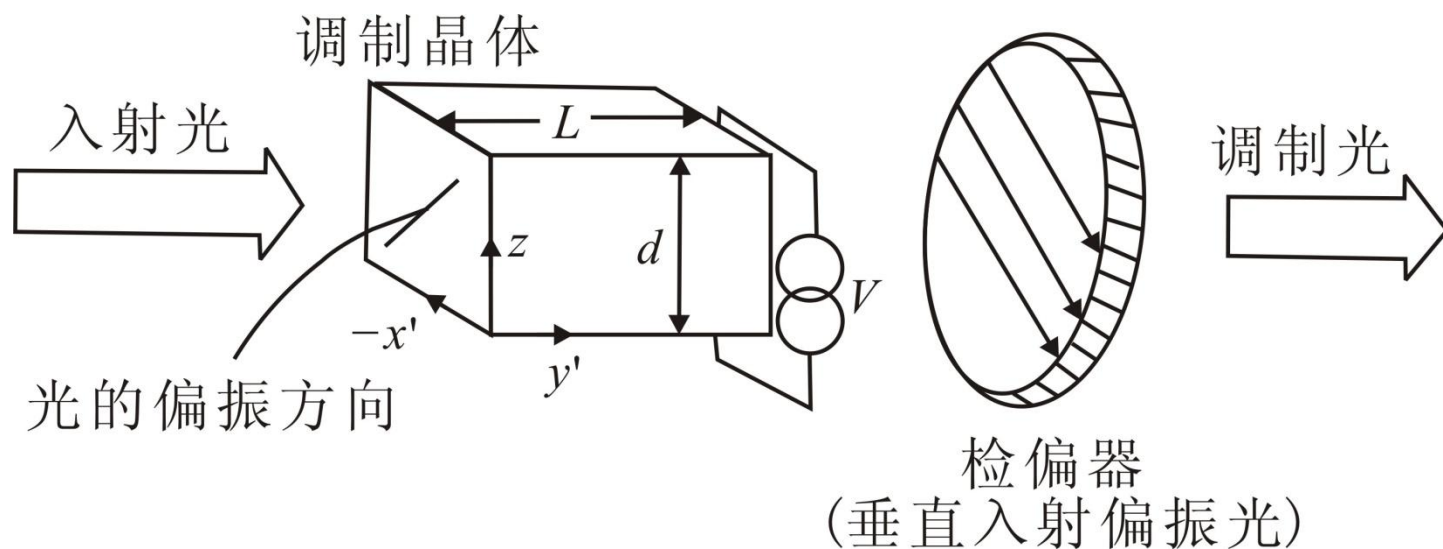


图 横向电光调制示意图

3 . 电光相位调制

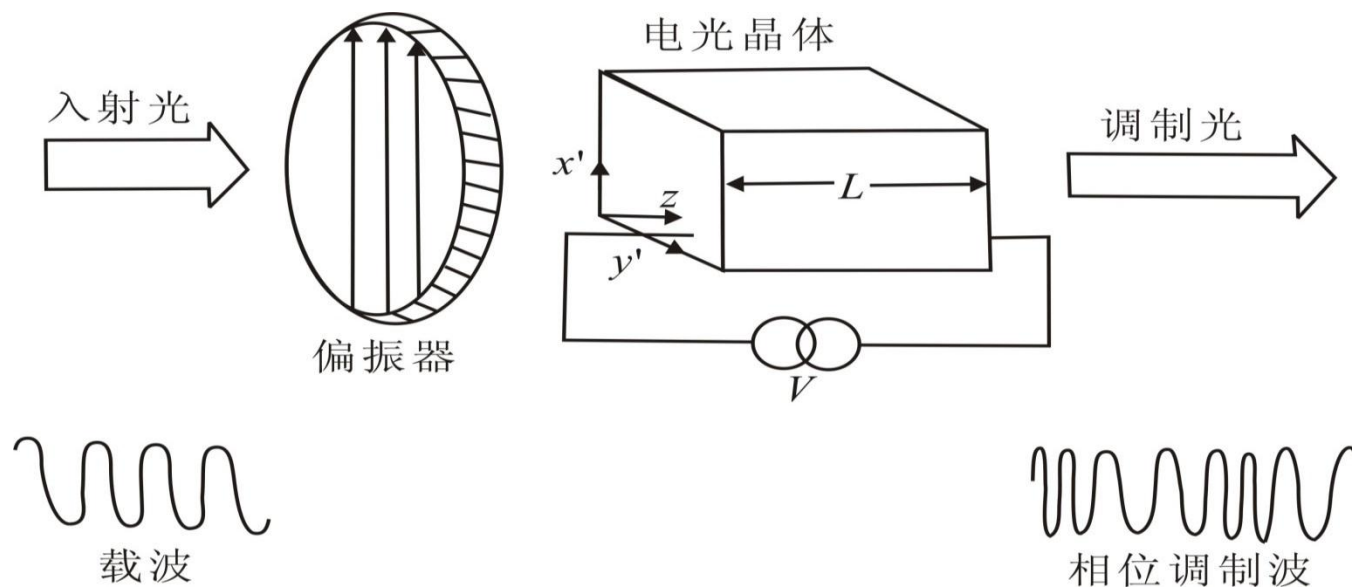


图 电光相位调制原理图

起偏器偏振方向平行于晶体的感应主轴 x' (或者 y'), 入射晶体后, 只有沿 x' (或者 y')方向的偏振, 外电场不改变出射光偏振状态, 仅改变相位。

3 . 电光相位调制

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

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

$$E_z = E_m \sin \omega_m t$$

$$v = \frac{c}{n_{x'}}$$

3 . 电光相位调制

⇒

$$\begin{aligned} E_{out} &= A_c \cos\left(\omega_c t - \frac{\omega_c}{v} L\right) \\ &= A_c \cos\left(\omega_c t - \frac{\omega_c}{c} n_o L + m_\varphi \sin \omega_m t\right) \end{aligned}$$

其中相位调制系数：

$$m_\varphi = \frac{\pi n_o^3 \gamma_{63} E_m L}{\lambda}$$

4 . 评价调制器质量的几个指标

- ◆ **半波电压**：与电光系数成反比，与晶体长度、厚度及光波波长有关。几伏到几百伏。
- ◆ **透射率**要高
- ◆ **消光比**要大：晶体质量与加工精度有关。

第四章 激光器调制

§4-3 声光调制

1. 物理基础

2. 声光调制器的典型结构原理

3. 声光互作用的两种类型

(a) Raman-Nath型声光调制器

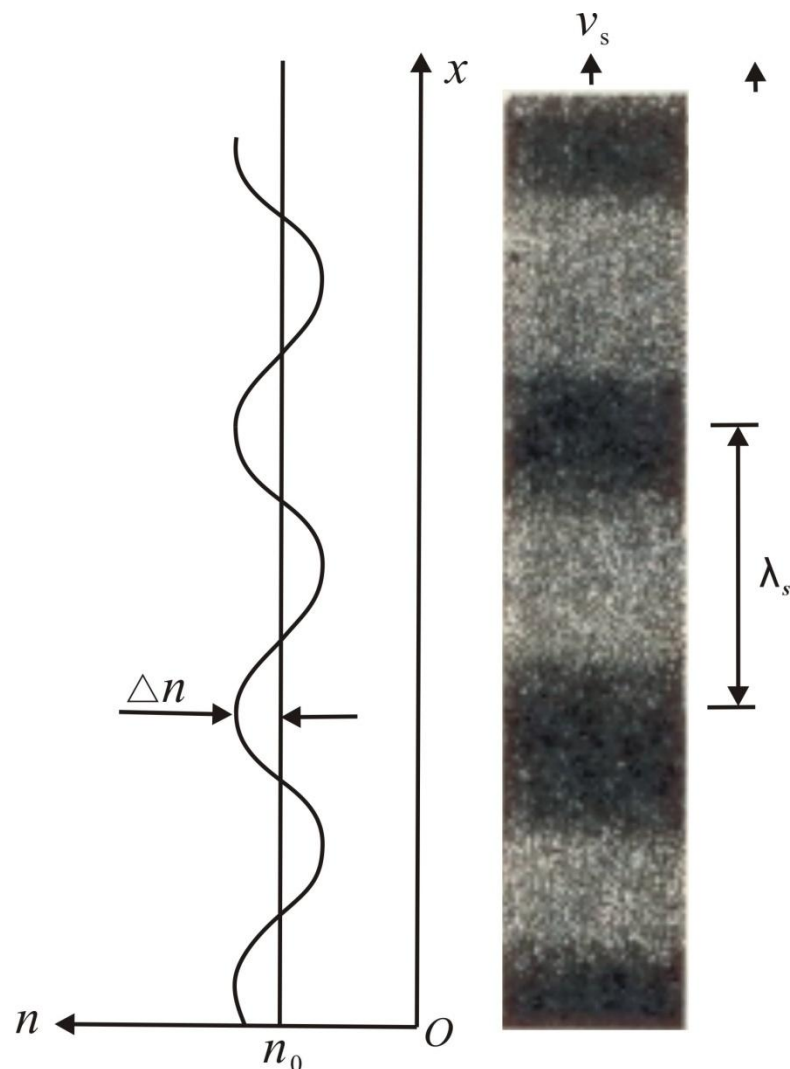
(b) Bragg型声光调制器

4. 声光调制器的工作原理和调制带宽

§4-3 声光调制

1. 物理基础

- ◆ **声波：弹性波**，激起介质中各质点沿声波传播方向振动，介质的密度呈疏密相同的交替变化。
- ◆ 介质折射率发生相应的周期变化。形成**相位光栅**（光栅间距或者常数=声波波长）。
- ◆ 导致衍射光（强度、频率、方向等）变化。



图：超声行波在介质中的传播

1. 物理基础

◆ 声光介质中质点随时间的位移

行波：

$$a(x, t) = A \sin(\omega_s t - k_s x)$$

驻波：

$$a(x, t) = 2A \cos(2\pi \frac{x}{\lambda_s}) \sin(2\pi \frac{t}{T_s})$$

◆ 声波角频率 ω_s ，波矢 k_s ，速度 v_s ，运动的声光栅是静止的。

◆ 光弹性效应：超声波（机械应力波）作用在声光介质上会使介质产生机械形变，从而引起折射率发生变化。

1. 物理基础

◆行波时：

$$n(x, t) = n_o + \Delta n \cos(\omega_s t - k_s x)$$

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

$$= -\frac{1}{2} n_o^3 PS \cos(\omega_s t - k_s x)$$

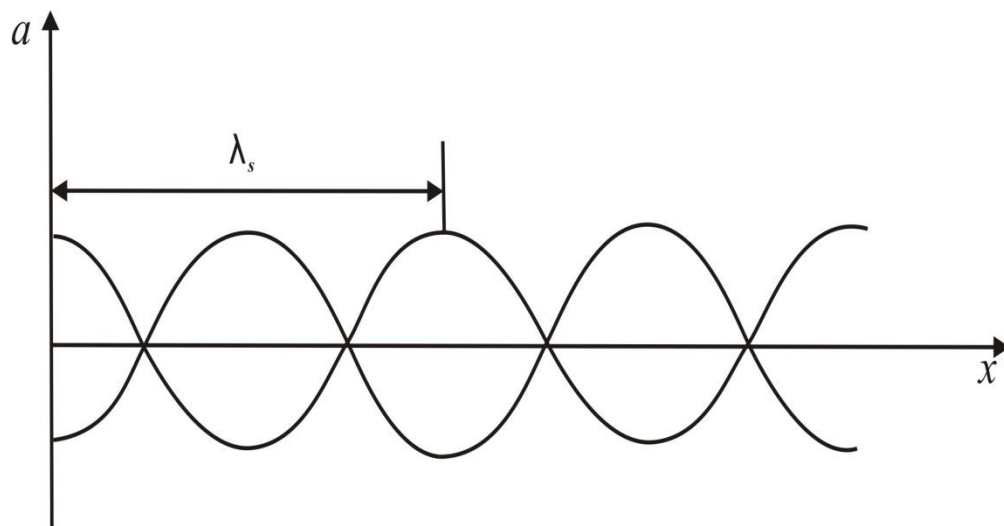
$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_o^3 PS$$

P是光弹性系数，S是弹性应变场振幅

1. 物理基础

◆驻波时： $\Delta n(x, t) = 2\Delta n \sin \omega_s t \sin k_s x$

◆声驻波在一个周期内出现两次介质疏密层，则光通过该介质后，**调制光的调制频率将为声频的两倍。**



图：超声驻波

2. 声光调制器的典型结构原理

◆ 四部分组成：

(1) 驱动电源：电声换能器工作

(2) 声光介质：

(a) 介质的品质因素要大 $M = n^6 P^2 / \rho v^3$

n, P, v, ρ , 是折射率, 光弹性系数, 声速, 密度。

(b) 对声波的吸收要小

吸收系数

$$\alpha \propto f_0^2$$

f_0 声频

2. 声光调制器的典型结构原理

(3) 换能器：将电信号转化为超声信号的元件

- ◆ 压电晶体：石英， LiNbO_3
- ◆ 压电半导体：CdS, ZnO等
- ◆ 依赖于声光介质（声阻匹配）

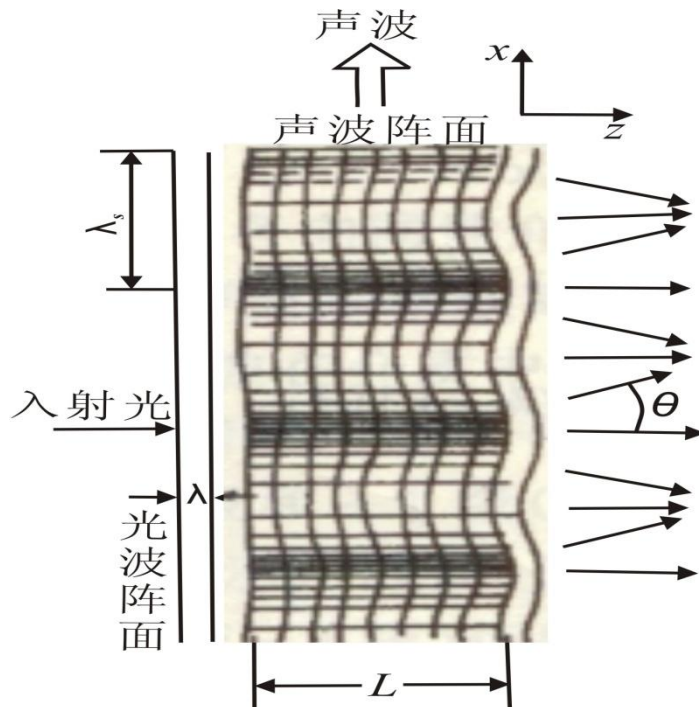
(4) 吸声或者反射材料

- ◆ 超声行波用吸声材料；超声驻波用反射材料

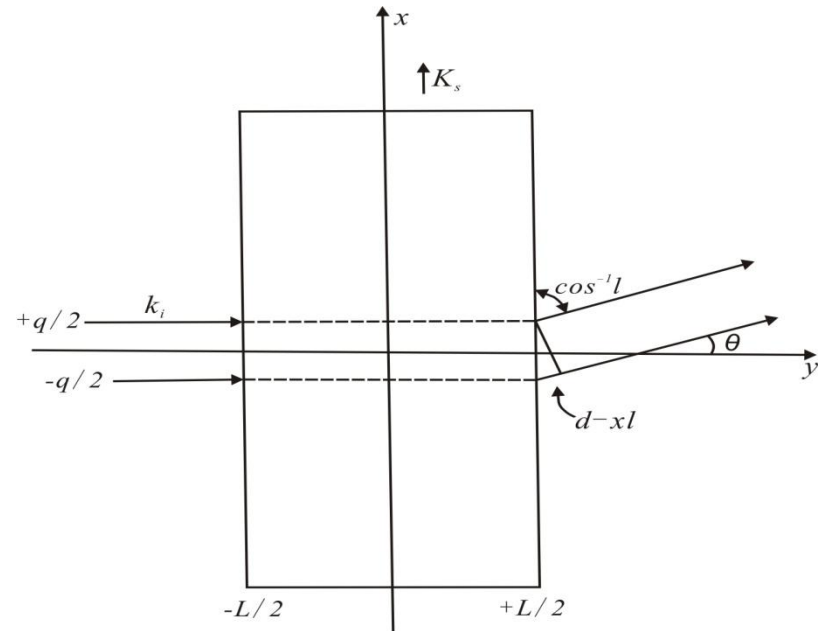
3. 声光互作用的两种类型

(a) Raman-Nath型声光调制器

◆ 超声频率较低，光波垂直于声场传播方向，光声相互作用长度 L 较短时



图：拉曼-纳斯衍射



图：垂直入射情况

3. 声光互作用的两种类型

◆光衍射角

$$\theta_m$$

$$\sin \theta_m = \pm m \frac{\lambda}{\lambda_s}$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

◆衍射光强度：

$$I_m \propto J_m^2(\Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda} L$$

◆光频率：

$$\omega = \omega_i \pm m\omega_s \approx \omega_i$$

$$\text{声频 } \omega_s = 10^9 \text{ Hz}$$

$$\text{光频 } \omega_i = 10^{14} \text{ Hz,}$$

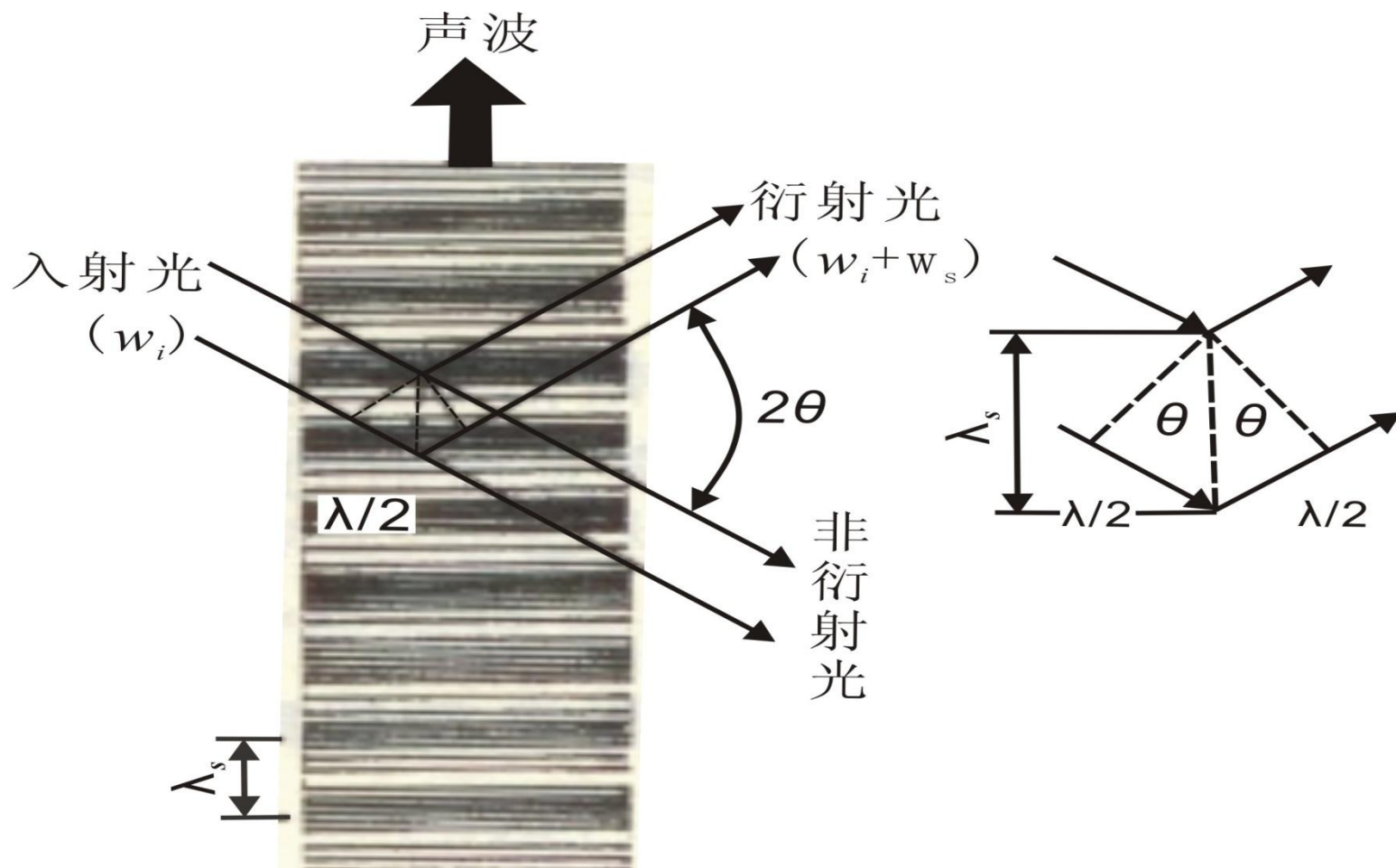
3. 声光互作用的两种类型

(b) Bragg型声光调制器

声波频率较高， L 较大，不是垂直入射。

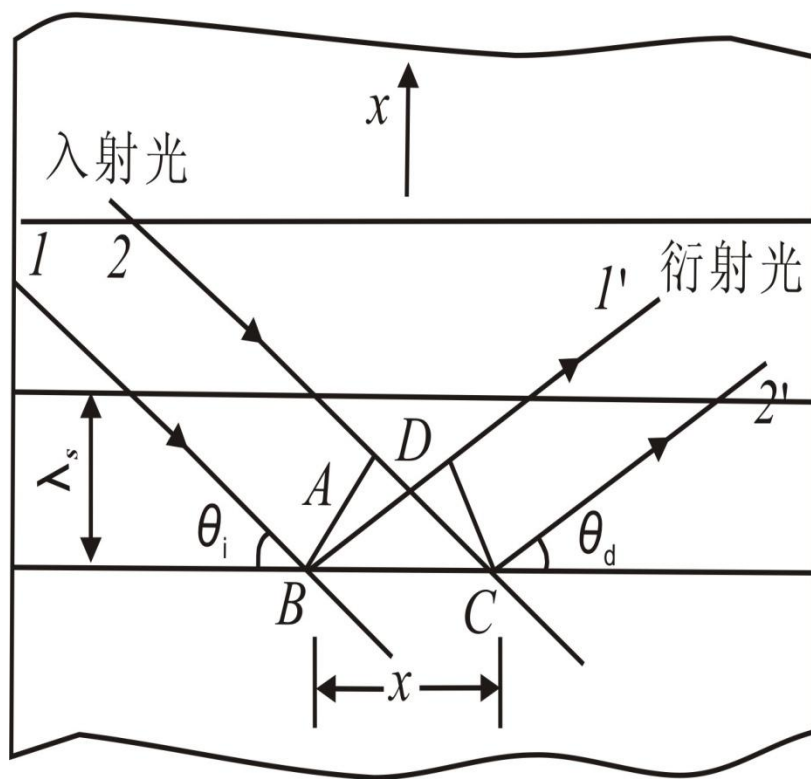
当入射光与声波面间夹角满足一定条件
只出现0级和+1级（或者-1级）的衍射光--
-----布拉格衍射

3. 声光互作用的两种类型

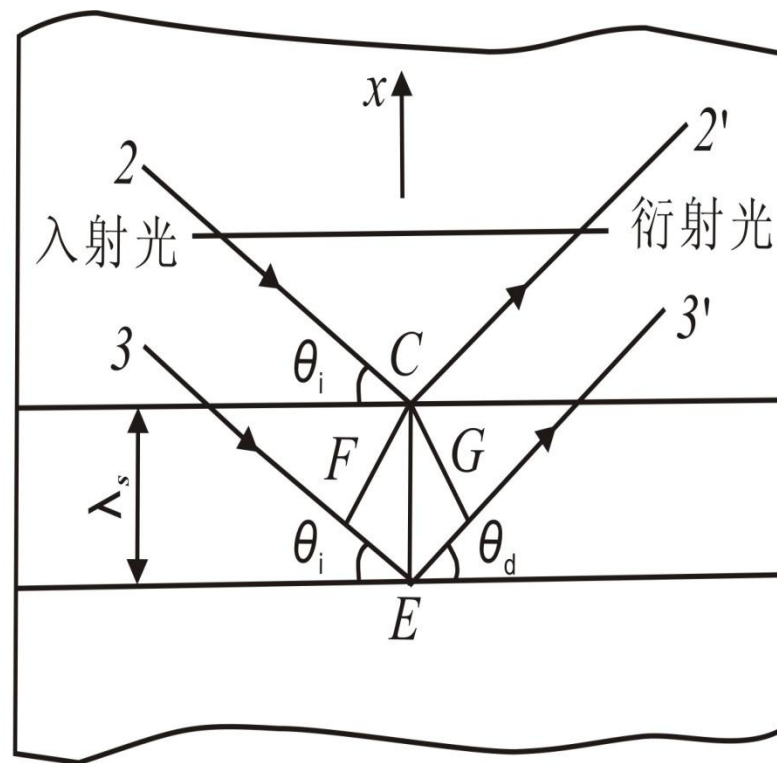


图：布拉格声光衍射

3. 声光互作用的两种类型



(a)



(b)

图： 产生布拉格衍射条件的模型

3. 声光互作用的两种类型

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\lambda_s}$$

◆衍射光与入射光之比：

$$\eta_s = \frac{I_1}{I_i} = \sin^2 \left[\frac{\Delta\varphi}{2} \right]$$

$$\Delta\varphi = \Delta n \frac{2\pi}{\lambda} L$$

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n^3 PS = -\frac{1}{2} n^3 P \sqrt{\frac{2I_s}{\rho v_s^3}}$$

P是光弹性系数，S是弹性应变场振幅

3. 声光互作用的两种类型

◆所以

$$\eta_s = \sin^2 \left[\frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} MP_a \right]$$

◆其中

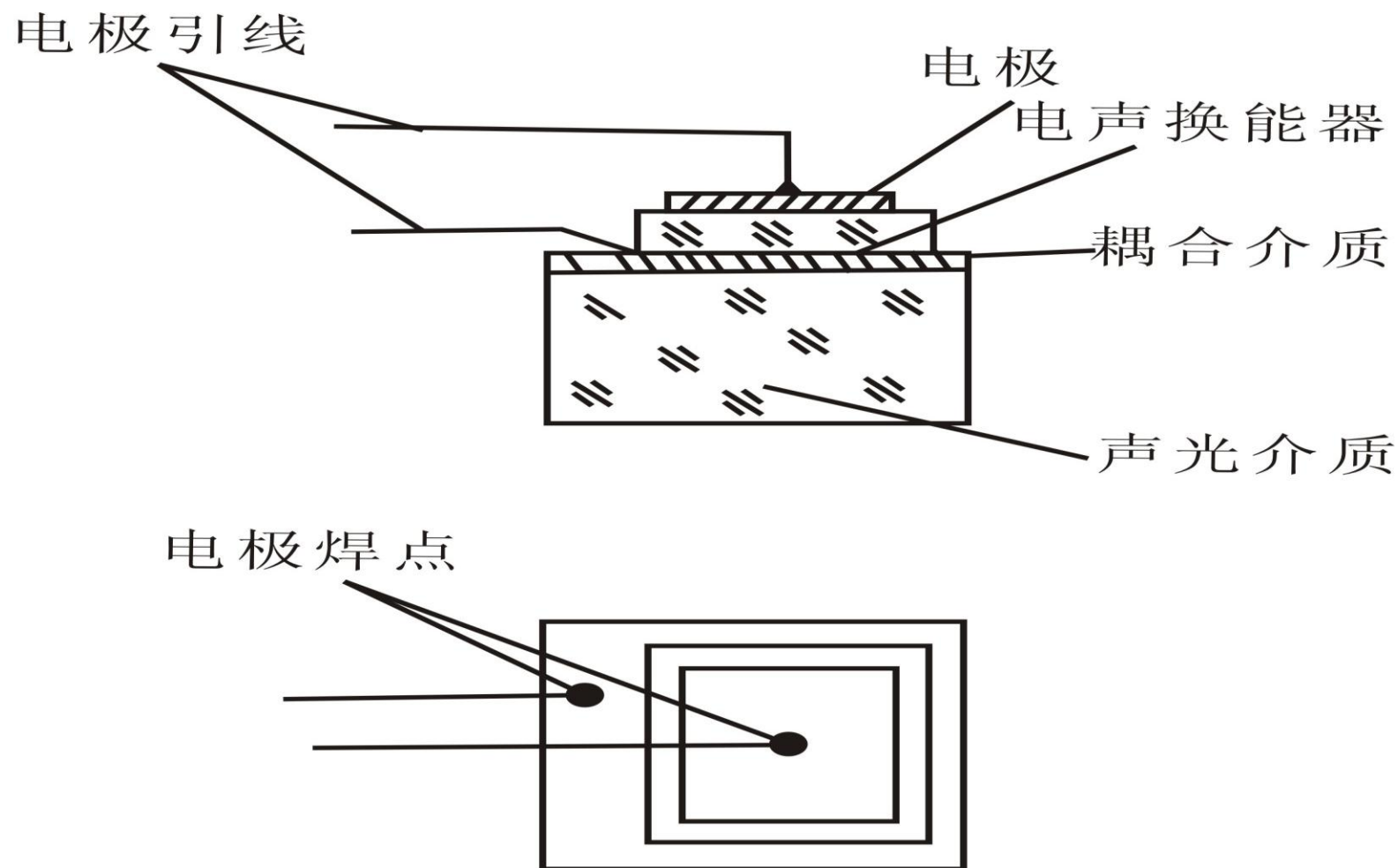
$$I_s = \frac{P_a}{LH}$$

是超声强度，**Pa**超声驱动功

率，**L**，**H**是换能器长度和宽度。

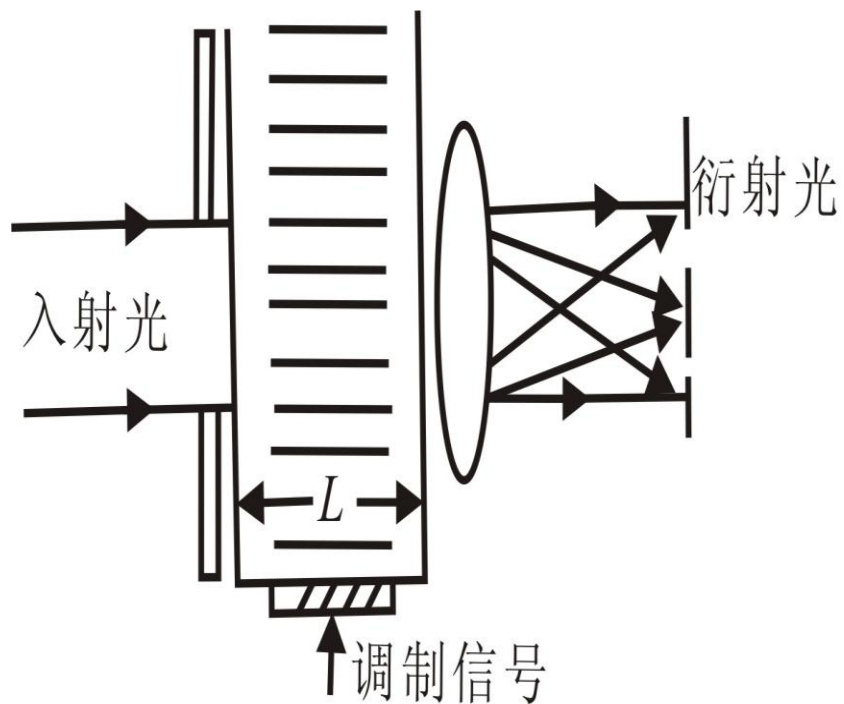
◆结论：**L大，H小，Pa大，M大，则衍射强**

4. 声光调制器的工作原理和调制带宽

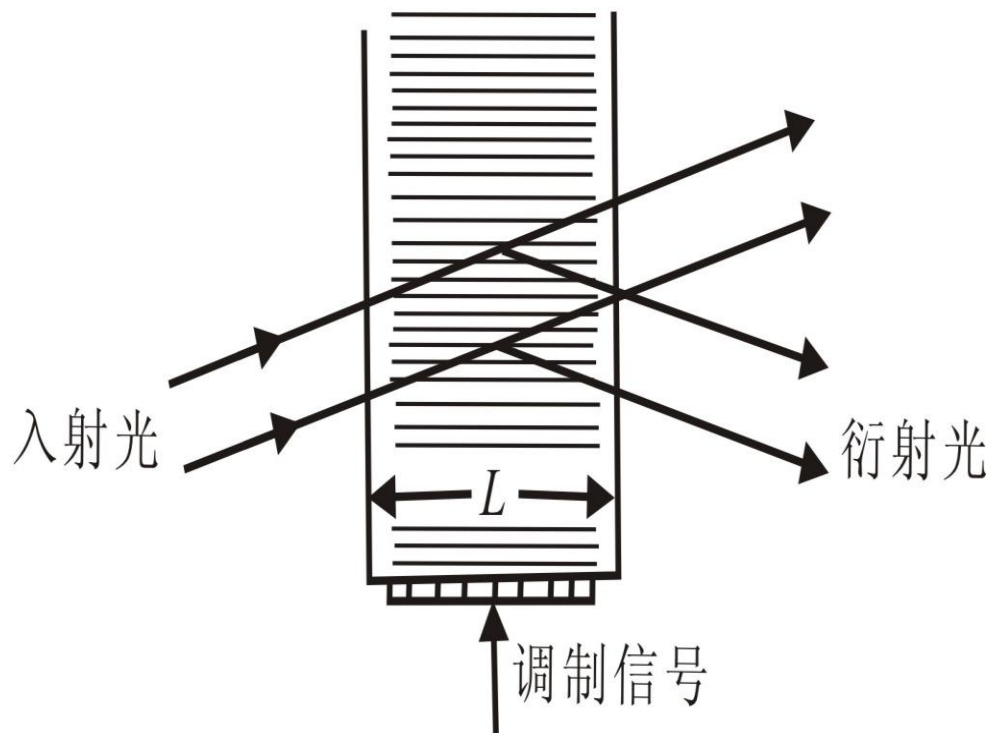


图：声光调制器结构

4. 声光调制器的工作原理和调制带宽



(a) 拉曼-纳斯型



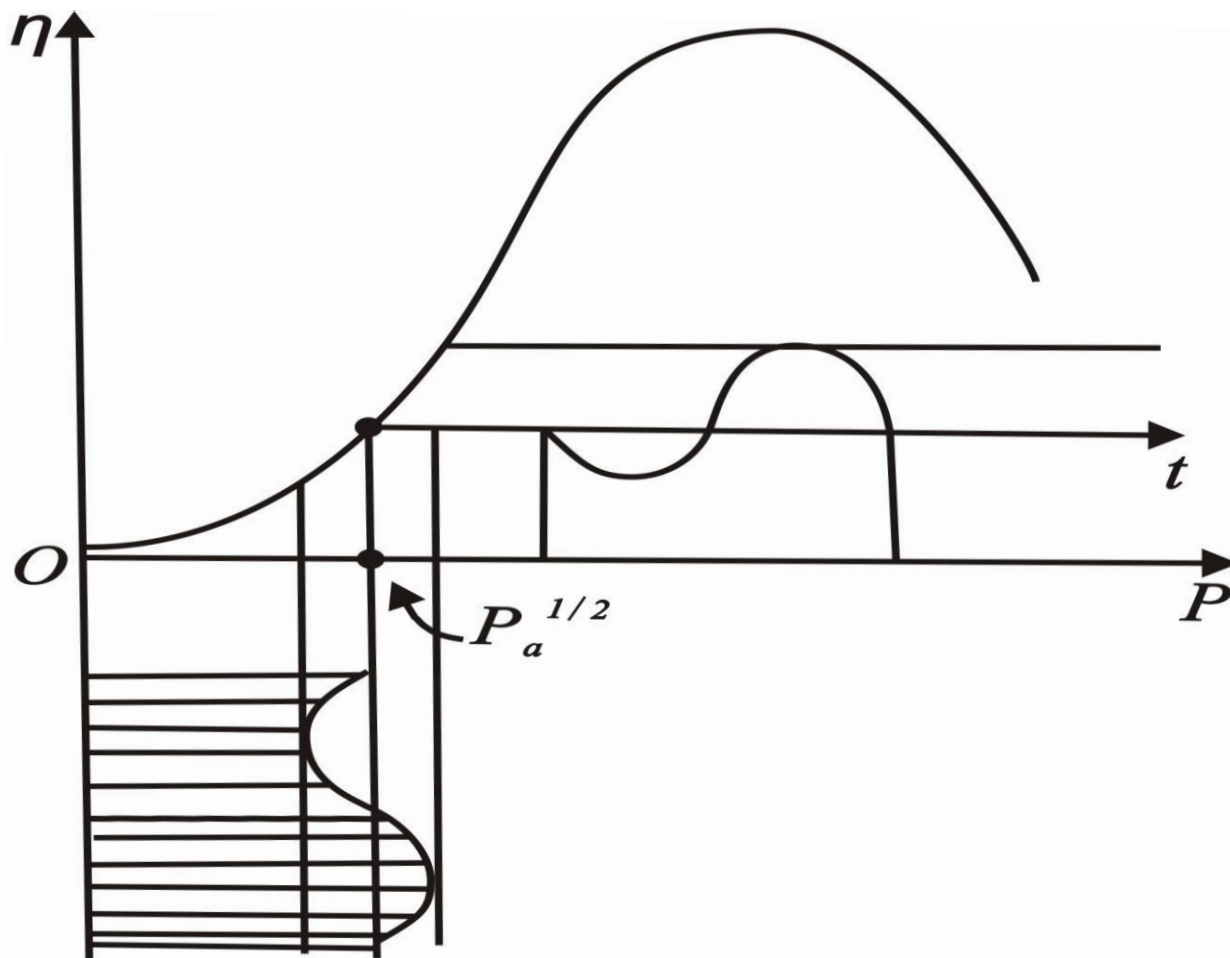
(b) 布拉格型

图 声光调制器

4. 声光调制器的工作原理和调制带宽

超声
偏置

$$P_a^{1/2}$$



图：调制特性曲线

4. 声光调制器的工作原理和调制带宽

◆由布拉格方程

$$\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2n\lambda_s} = \frac{\lambda}{2n\nu_s} f_s$$

◆得：
$$\Delta f_s = \frac{2n\nu_s \cos \theta_B}{\lambda} \Delta \theta_B$$

◆ ω_0, n, L 分别为光束腰半径，折射率，声束宽度。

◆结论：L大，调制带宽小

$$\Delta \theta_B \approx \delta \theta_i + \delta \phi_s$$

$$\delta \theta_i \approx \frac{2\lambda}{\pi n \omega_0}$$

$$\delta \phi_s = \frac{\lambda_s}{L}$$

第四章 激光器调制

§4-4 直接调制

1. 半导体激光器直接调制原理
2. 半导体发光二极管的调制特性

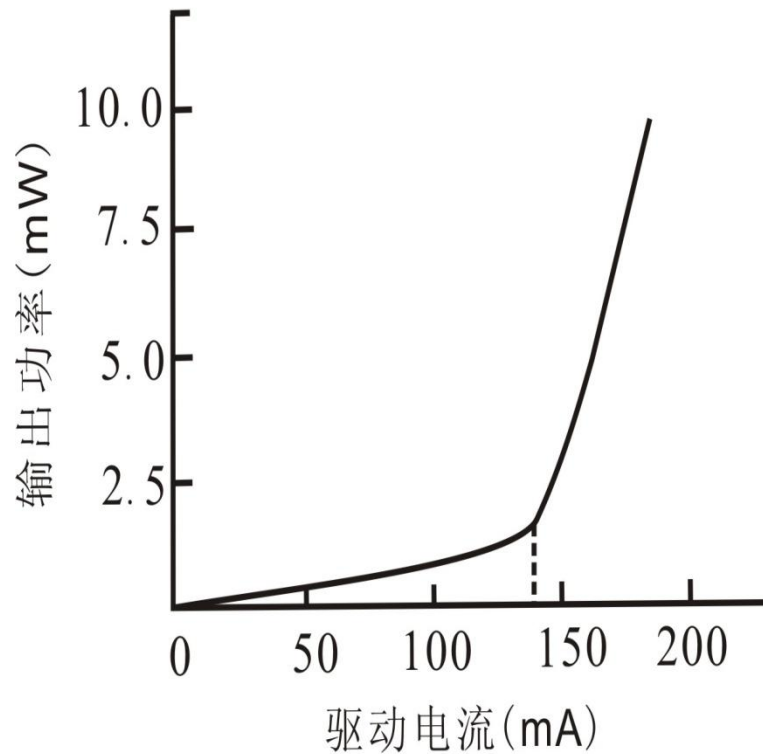
§4-4 直接调制

把要传递的信息转变为电流信号注入半导体光源（LD，LED），获得已调制的信号。光通信，包括视频话音。

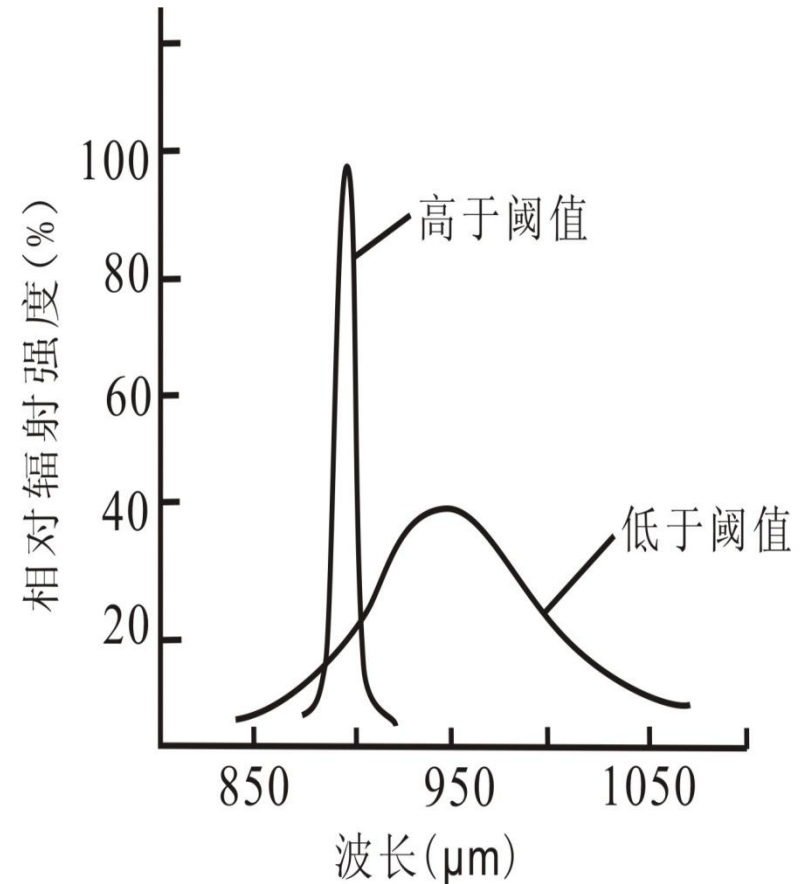
1. 半导体激光器直接调制原理

2. 半导体发光二极管的调制特性

1. 半导体激光器直接调制原理

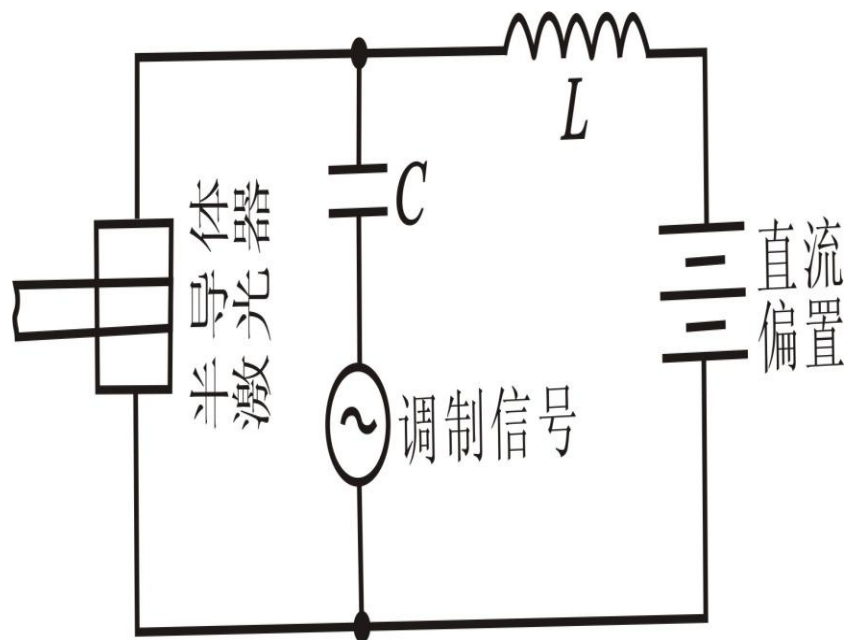


图： 半导体激光器
的输出特性

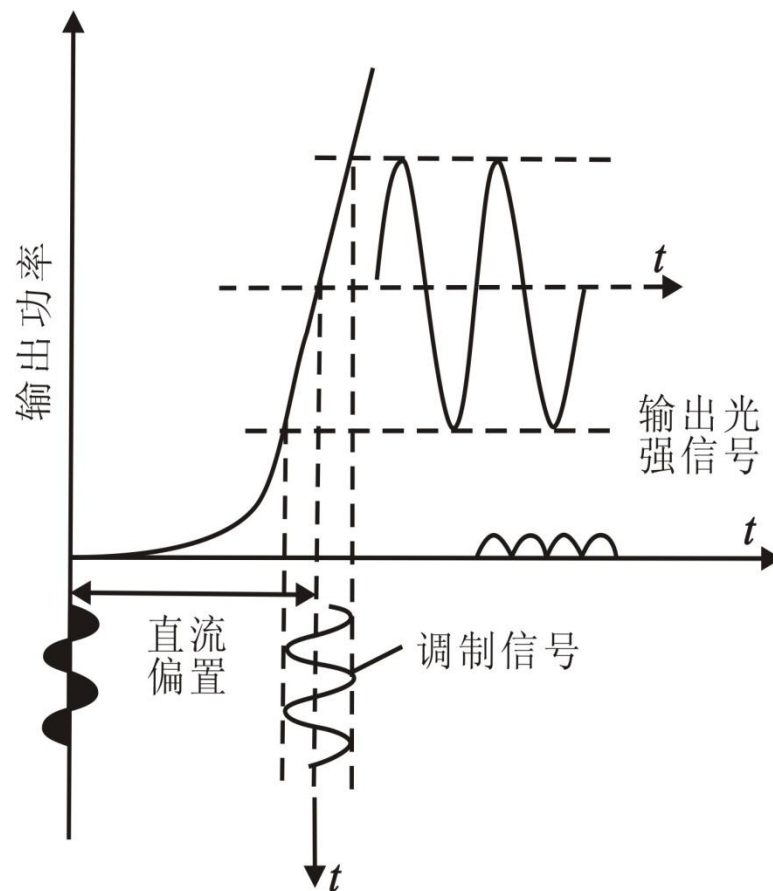


图： 半导体激光器
的光谱特性

1. 半导体激光器直接调制原理



(a) 电原理图



(b) 调制特性曲线

图： 半导体激光器调制