



## 光电子技术 (13)

式中 $\Delta\varphi = \alpha A_m c \tau_d / n = \alpha A_m l$ 为静态最大相位调制。Sinc函数的分布如图65。表明随调制频率或渡越时间的增加，相位调制深度会减小，即调制效果变差。

$$\text{取: } \omega_m \tau_d = \pi/2 \quad \text{则} \quad \text{sinc}\left(\frac{\omega_m \tau_d}{2}\right) = 0.9$$

上面的估计表明要使高频相位调制的调制幅度衰减量小于静态调制幅度的10%，调制频率 $\omega_m$ 和渡越时间 $\tau_d$ 的乘积应小于 $\pi/2$ 。这是设计高频相位调制器的判据。在此判据下，调制器的最高工作频率为：

$$(\nu_m)_{\max} = \frac{1}{4\tau_d} = \frac{c}{4nl} \sim \text{GHz}$$

(三)、高频调制特性的改善——行波调制器

行波调制器的结构如图66，采用横向调制。



## 光电子技术 (8)

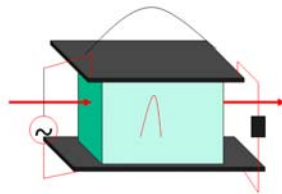


Fig.66 行波调制器结构

## 光电子技术 (13)

设行波电场为:

$$e(t', z(t')) = A_m e^{i(\omega_m t' - k_m z)} = A_m e^{i[\omega_m t' - k_m c(t' - t)/n]}$$

式中  $k_m = \omega_m / c_m$ ,  $c_m$  为行波电场沿电极的传播速度,  $t$  为光波到达调制器入射面的时间。代上式入相位延迟积分公式得:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{\alpha c}{n} A_m \int_t^{t+\tau_d} e^{i[\omega_m t' - k_m c(t' - t)/n]} dt' = \Delta\varphi e^{i\omega_m t} \frac{e^{i\omega_m \tau_d (1 - c/nc_m)} - 1}{i\omega_m \tau_d (1 - c/nc_m)}$$

式中  $\Delta\varphi = \alpha \frac{c\tau_d}{n} A_m = \alpha L A_m$  为静态电光调制相位延迟量。

衰减因子为:

$$\gamma = \frac{e^{i\omega_m \tau_d (1 - c/nc_m)} - 1}{i\omega_m \tau_d (1 - c/nc_m)} \Rightarrow |\gamma| = \left| \sin c \left[ \frac{\omega_m \tau_d}{2} \left( 1 - \frac{c}{nc_m} \right) \right] \right|$$

## 光电子技术 (13)

衰减到直流调制量的90%时, 有:  $\omega_m \tau_d \left( 1 - \frac{c}{nc_m} \right) = \frac{\pi}{2}$

所以行波调制器的最大调制频率为:

$$(\nu_m)_{\max} = \frac{1}{4\tau_d (1 - c/nc_m)} = \frac{c}{4nl(1 - c/nc_m)}$$

上式表明行波调制器的带宽是非行波型调制器的  $(1 - c/nc_m)^{-1}$  倍。当光速  $c/n$  与电场在电极上的传播速度  $c_m$  一致时,  $(1 - c/nc_m)^{-1} \rightarrow \infty$ 。所以, 只要匹配电场速度和光速, 能极大地增加行波调制器的带宽。行波调制提高调制带宽的物理解释如图66a所示, 相对论效应

### § 3.3 声光调制

声光调制利用超声波调制介质的折射率分布, 进而调制光的参数。

## 光电子技术 (13)

声波在介质中传播可以形成行波型和驻波型折射率分布：

行波： $\Delta n(x, t) = \Delta n \sin(\omega_s t - k_s x)$

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

按照声光衍射谱的结构，声光衍射分为拉曼-奈斯和布拉格衍射。

### 一、拉曼-奈斯衍射

当声光栅较薄时（细声柱），声光衍射是多级衍射的，类似平面光栅的衍射情况，称为拉曼-奈斯衍射。每一级的衍射效率低。

如图66b所示，设超声相位光栅的折射率分布为：

$$n(x) = n_0 - \Delta n \sin(\omega_s t - k_s x)$$

设垂直入射光波为： $E(t) = Ae^{i\omega t}$

通过厚度为L的声光栅后，变为相位调制波。在出射面上的光场为：

## 光电子技术 (13)

$$e(t, x) = Ae^{i\omega t} e^{ikn(x)L} = Ae^{i\omega t} e^{ik[n_0 - \Delta n \sin(\omega_s t - k_s x)]L}$$

在距光栅出口面z处的远场光分布为上述光场的夫琅禾费衍射：

$$\begin{aligned} U(\xi) &= \int_{-q/2}^{q/2} e^{ik\Delta n L \sin(\omega_s t - k_s x)} e^{-ikx\xi/z} dx = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(k\Delta n L) \int_{-q/2}^{q/2} e^{im(\omega_s t - k_s x)} e^{-ikx\xi/z} dx \\ &= q \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(v) e^{im\omega_s t} \frac{\sin[(mk_s - k\xi/z)q/2]}{(mk_s - k\xi/z)q/2} \\ &= q \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(v) e^{im\omega_s t} \frac{\sin[(mk_s - k \sin \theta)q/2]}{(mk_s - k \sin \theta)q/2} \end{aligned}$$

式中 $v=k\Delta n L$ ， $q$ 为光束直径， $\theta$ 为光束的衍射角，满足如下关系：

$$\sin \theta \approx \tan \theta = \xi / z$$

## 光电子技术 (13)

由上式确定的衍射极大条件为:  $k \sin \theta - mk_s = 0$

如图67所示, 衍射极大角满足:  $\sin \theta \approx \tan \theta = m \frac{k_s}{k} = m \frac{\lambda}{\lambda_s}$

各衍射极大级的强度值为:  $I_m = J_m^2(\nu)$

各级衍射波为:  $J_m(\nu)e^{i(\omega+m\omega_s)t}$

衍射光波频率发生了多普勒频移, 各级衍射光的频率不同, 但变化量很小, 远小于激光器的纵模频率间隔, 不致于出现颜色变化。

对驻波型声光衍射, 数学处理方法上是一样的, 只是复杂一些, 因为驻波可以分解为两个相反方向传播的行波的叠加, 所以, 衍射光场为两个行波衍射场的相干叠加。

驻波声光栅的折射率分布为:

## 光电子技术 (13)

$$n(x, t) = n_0 - \Delta n(x, t) = n_0 - 2\Delta n \sin(\omega_s t) \sin(k_s x) = n_0 + \Delta n [\cos(\omega_s t + k_s x) - \cos(\omega_s t - k_s x)]$$

类似地, 相位调制波为:

$$e(t, x) = Ae^{i\omega t} e^{ikn(x, t)L} = Ae^{i\omega t} e^{ik[n_0 + \Delta n \cos(\omega_s t + k_s x) - \Delta n \cos(\omega_s t - k_s x)]L}$$

类似地, 调相波的远场衍射为:

$$\begin{aligned} U(\xi) &= \int_{-q/2}^{q/2} e^{ik\Delta nL \cos(\omega_s t + k_s x)} e^{-ik\Delta nL \cos(\omega_s t - k_s x)} e^{-ikx\xi/z} dx \\ &= \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} i^m J_m(k\Delta nL) i^l J_l(-k\Delta nL) \int_{-q/2}^{q/2} e^{im(\omega_s t + k_s x)} e^{il(\omega_s t - k_s x)} e^{-ikx\xi/z} dx \\ &= q \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} i^{m+l} J_m(\nu) J_l(-\nu) e^{i(m+l)\omega_s t} \frac{\sin\{[(m-l)k_s - k\xi/z]q/2\}}{[(m-l)k_s - k\xi/z]q/2} \end{aligned}$$

## 光电子技术 (13)

$$\begin{aligned}
 &= q \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} i^{m+l} J_m(\nu) J_l(-\nu) e^{i(m+l)\omega_s t} \frac{\sin\{[(m-l)k_s - k \sin \theta]q/2\}}{[(m-l)k_s - k \sin \theta]q/2} \\
 &= q \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} i^{p+2l} J_{p+l}(\nu) (-1)^l J_l(\nu) e^{i(p+2l)\omega_s t} \frac{\sin[(pk_s - k \sin \theta)q/2]}{(pk_s - k \sin \theta)q/2} \\
 &= q \sum_{p=-\infty}^{\infty} J_p(2\nu \sin(\omega_s t)) \frac{\sin[(pk_s - k \sin \theta)q/2]}{(pk_s - k \sin \theta)q/2}
 \end{aligned}$$

衍射极大条件为:  $k \sin \theta - pk_s = 0$

衍射极大角:  $\sin \theta \approx \operatorname{tg} \theta = \frac{\xi}{z} = p \frac{k_s}{k} = p \frac{\lambda}{\lambda_s}$

衍射极大的强度:  $J_p^2(2\nu \sin(\omega_s t))$  外差干涉, 交变调制

### 二、布拉格衍射

如图68所示, 当声光栅较厚, 光波倾斜入射角满足布拉格条件时,

## 光电子技术 (13)

产生仅有正或负一级的衍射。

布拉格衍射方程为:  $2\lambda_s \sin \theta_B = \pm \lambda$

布拉格衍射效率:  $\eta = \sin^2 \left[ \frac{\pi L}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3}} I_s \right]$

式中  $p$  为光弹系数,  $L$  为声光作用长度,  $I_s$  为超声强度,  $\rho$  为密度。

令:  $M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v_s^3}$  称为声光衍射效率品质因数

衍射效率可重写为:  $\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi L}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{M_2 I_s} \right) = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\sqrt{2}\lambda} \sqrt{\frac{L}{H}} M_2 P_s \right)$

式中  $H$  为换能面的宽度,  $P_s$  为超声功率。

引入参数:  $G = \frac{k_s^2 L}{k \cos \theta_i} = \frac{2\pi \lambda L}{\lambda_s^2 \cos \theta_i}$



## 光电子技术 (13)

当  $G \leq \pi$  时, 为拉曼-奈斯衍射

当  $G \geq 4\pi$  时, 为布拉格衍射

否则为混合型衍射, 既有拉曼-奈斯衍射, 又有布拉格衍射。

定义  $\frac{\lambda_s^2 \cos \theta_i}{\lambda} \approx \frac{\lambda_s^2}{\lambda} = L_0$  称为声光调制器的特征长度

则:  $L \leq L_0/2$ , 为拉曼-奈斯衍射

$L \geq 2L_0$ , 为布拉格衍射

### 三、声光调制器设计考虑

#### 1、材料选择



## 光电子技术 (13)

①应使调制器的调制效率高, 而驱动功率低, 选择  $M_2$  大的材料。

②调制器应有较大的带宽。带宽为:  $\Delta f = \frac{1.8nv_s^2}{\pi\lambda f_s}$ , 要求  $nv_s^2$  大。

③渡越时间考虑。要选择声速较小的介质, 提高分辨率

衍射效率和调制带宽要求的条件是互相矛盾的, 所以要折衷考虑二者, 选择合适的材料。

#### 2、电-声换能器

它是实现电能转换为超声波能的元件, 利用某些材料的反压电效应, 如压电陶瓷、石英片等, 在交变外加电场下产生机械振动。

电-声换能器设计考虑的问题包括: 振动频率、机械强度, 电特性等。



## 光电子技术 (13)

### § 3.4 磁光调制

磁光调制利用某些介质的磁光效应。如法拉弟效应，使光的偏振面旋转。旋转角与磁场强度、晶体长度和介质性质有关：

$$\theta = KHL$$

式中K为磁光系数，又称范德特常数（维尔德Verdet）

特点：（1）磁旋光效应的功率要求低。

（2）偏振面旋转方向与光传播方向无关，只与磁场强度方向有关。磁场方向不变时，光往返两次通过磁光调制器偏振面转角加倍。

磁光调制器结构与电光强度调制器结构相同，需要相互正交的起、检偏振器。调制信号控制磁场线圈中的电流，实现对光强的调制。



## 光电子技术 (13)

### 磁光效应的物理解释

通常认为它起源于电子自旋与磁场作用，产生塞曼分裂，使得原来自旋简并的能级分裂。

自旋分裂后，材料的消光系数对左、右旋圆偏振光的吸收峰分裂，根据K-K关系，消光系数的谱变化会引起折射率变化，所以左、右旋圆偏振光的折射率不同。这种效应称为圆二色性。

线偏振光可以看成左旋和右旋圆偏振光的叠加。当线偏振光通过具有磁致圆二色性的材料后，左、右旋圆偏振光的相位不同，合成的光为一个偏振面发生旋转的线偏振光。

数学分析如下





## 光电子技术 (13)

线偏振光:  $x = a \cos \omega t$

分解为左、右旋圆偏振光的叠加:

$$\begin{aligned} \text{左旋: } \begin{cases} x = \frac{a}{2} \cos \omega t \\ y = \frac{a}{2} \sin \omega t \end{cases} & \quad \text{右旋: } \begin{cases} x = \frac{a}{2} \cos \omega t \\ y = -\frac{a}{2} \sin \omega t \end{cases} \end{aligned}$$

设晶体长度为 $L$ , 左、右旋圆偏振光的折射率分别为 $n_-$ 、 $n_+$ , 则通过具有圆二色性物质后, 左、右旋圆偏振光变为:

$$\begin{aligned} \text{左旋: } \begin{cases} x = \frac{a}{2} \cos(\omega t + \phi_-) \\ y = \frac{a}{2} \sin(\omega t + \phi_-) \end{cases} & \quad \text{右旋: } \begin{cases} x = \frac{a}{2} \cos(\omega t + \phi_+) \\ y = -\frac{a}{2} \sin(\omega t + \phi_+) \end{cases} \end{aligned}$$



## 光电子技术 (13)

$$\text{式中: } \phi_- = \frac{2\pi}{\lambda} n_- L, \quad \phi_+ = \frac{2\pi}{\lambda} n_+ L$$

合成光为:

$$\begin{cases} x = \frac{a}{2} [\cos(\omega t + \phi_-) + \cos(\omega t + \phi_+)] = a \cos \frac{\delta_d}{2} \cos(\omega t + \frac{\delta_s}{2}) \\ y = \frac{a}{2} [\sin(\omega t + \phi_-) - \sin(\omega t + \phi_+)] = a \sin \frac{\delta_d}{2} \cos(\omega t + \frac{\delta_s}{2}) \end{cases}$$

$$\text{式中: } \delta_d = \phi_- - \phi_+, \quad \delta_s = \phi_- + \phi_+$$

显然, 它是一个旋转 $\delta_d/2$ 角的线偏振光。磁光效应就是引起 $\delta_d$ 变化, 实现线偏振光的偏振面旋转。

$$\text{磁光强度调制器的透射强度为: } I = I_0 \sin^2(\delta_d/2)$$





## 复习要点

- 1、行波调制器结构，提高带宽的原理及带宽？
- 2、声光衍射原理，声光栅的形成，行波型和驻波型拉曼-奈斯声光衍射的异同？
- 3、光栅衍射类型的判定， $G$ 参数和 $L_o$ 参数定义，判断值？
- 4、磁光效应，物理起因？磁光旋光的特点，双折射波片的旋光的异同？



## 作业十三

- 1、已知某横向电光调制器的90%衰减点带宽为1GHz，如果将它改成行波结构，电极的上电场的传播速率为 $1 \times 10^8$ 米/秒，调制器电光晶体材料的折射率为2，求该行波调制器的90%衰减点带宽？
- 2、说明行波型和驻波型声光拉曼-奈斯衍射的异同？
- 3、一个磁光晶体长5厘米，在轴向磁场作用下，它对500nm波长的左、右旋圆偏振光的折射率分别为1.8和1.8001，求线偏振光通过此磁光晶体后偏振面转角？在调制器出口设置偏振方向与入射光偏振一致的检偏振器，透过检偏振器后光强会有显著变化吗，为什么？