



光电子技术 (12)

加电场下，折射率椭球各系数的变化量为：

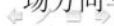
$$\Delta a_1 = \Delta a_2 = \Delta a_3 = 0, \Delta a_4 = \gamma_{41} E_1, \Delta a_5 = \gamma_{41} E_2, \Delta a_6 = \gamma_{61} E_3$$

外加电场下折射率椭球方程为：

$$\frac{x^2 + y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{41} E_x yz + 2\gamma_{41} E_y xz + 2\gamma_{63} E_z xy = 1$$

四、纵向和横向电光调制

纵向电光调制指电场方向与光波矢量平行，而横向电光调制指电场方向与光波矢量垂直。



光电子技术 (12)

(一)、外加电场沿Z方向，即 $E_z \neq 0$, $E_x = E_y = 0$

折射率椭球方程简化为：

$$\frac{x^2 + y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{63} E_z xy = 1$$

绕Z轴旋转XY坐标45度，消去xy交叉项得正椭球方程：

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



光电子技术 (12)

$$\begin{cases} \frac{1}{n_{x'}^2} = \frac{1}{n_0^2} + \gamma_{63} E_z \\ \frac{1}{n_{y'}^2} = \frac{1}{n_0^2} - \gamma_{63} E_z \\ \frac{1}{n_z^2} = \frac{1}{n_e^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} n_{x'} = n_0 - \frac{n_0^3 \gamma_{63} E_z}{2} \\ n_{y'} = n_0 + \frac{n_0^3 \gamma_{63} E_z}{2} \\ n_z = n_e \end{cases}$$

1、Z向纵向应用

如图示，电场和光波矢均沿Z轴方向，通过电光晶体后产生沿x'和y'偏振的两个正交分量，它们的位相差为：

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{y'} - n_{x'}) l_z = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{63} E_z l_z}{\lambda} = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{63} V_z}{\lambda}$$

光电子技术 (12)

式中 l_z 为晶体的Z向长度， $V_z = E_z l_z$ 为Z向电压。

半波电压定义为 $\delta = \pi$ 时所施加的电压，所以KDP晶体沿光轴纵向应用的半波电压位：

$$V_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{63}} \quad (\text{对KDP, 几千伏高压})$$

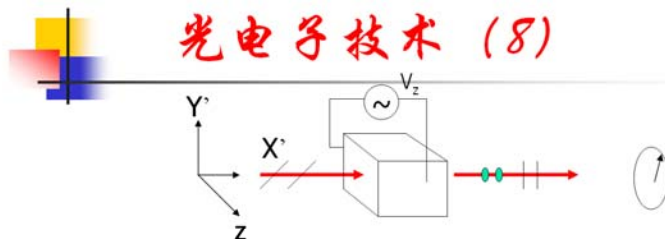
四分之一波长电压定义为 $\delta = \pi/2$ 时所施加的电压。所以KDP晶体沿光轴纵向应用的四分之一波长电压为：

$$V_{\frac{\lambda}{4}} = \frac{\lambda}{4n_0^3 \gamma_{63}} = V_{\frac{\lambda}{2}} / 2$$

2、横向运用

如图所示，光沿x'方向通过，产生y'和z方向的两个偏振分量，它们的位相差为：

光电子技术 (8)



KDP晶体沿 x' 方向通光，光轴方向加电压的横向电光调制

光电子技术 (12)

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{y'} - n_z) l_{x'} = \frac{2\pi l_{x'}}{\lambda} (n_0 - n_e) + \frac{\pi n_0^3 \gamma_{63} E_z l_{x'}}{\lambda} = \delta_0 + \frac{\pi n_0^3 \gamma_{63} V_z l_{x'}}{\lambda l_z}$$

式中 $l_{x'}$ 为沿 x' 轴方向的晶体厚度。

上式表明KDP晶体横向应用存在自然双折射引起的位相差 δ_0 。对温度稳定性要求提高，但由于**纵横比几何因子** $l_{x'}/l_z$ 的出现，可以利用大的几何因子来降低半波电压。这又是横向电光调制的优点。

$$\delta_0 = \frac{2\pi l_{x'}}{\lambda} (n_0 - n_e) \quad \text{称为静态相位延迟。}$$

静态1/4波片厚度为：

$$l_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{4(n_0 - n_e)}$$



光电子技术 (12)

静态1/2波片厚度为: $l_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2(n_0 - n_e)}$

动态1/2波长电压为: $V_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_0^3 \gamma_{63}} \frac{l_z}{l_x}$

动态1/4波长电压为: $V_{\lambda/4} = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{63}} \frac{l_z}{l_x}$

同理, 光波沿y'通过也存在自然双折射引起的位相差。

(二)、外加电场沿Y方向

$E_x = E_z = 0$, 折射率椭球方程为: $\frac{x^2 + y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{41}E_y xz = 1$



光电子技术 (12)

上式中存在XZ交叉项, 需要绕Y轴旋转XZ坐标 φ 角, φ 满足下式:

$$\tan(2\varphi) = \frac{2n_0^2 n_e^2 \gamma_{41} E_y}{n_0^2 - n_e^2} \rightarrow 0, \sin \varphi \approx \frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41} E_y}{n_0^2 - n_e^2}, \cos \varphi \approx 1$$

坐标变换: $z = z' \cos \varphi - x' \sin \varphi = z' - x' \frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41} E_y}{n_0^2 - n_e^2}$

$$x = x' \cos \varphi + z' \sin \varphi = x' + z' \frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41} E_y}{n_0^2 - n_e^2}$$

代上式入椭球方程化简得:



光电子技术 (12)

$$\left[\frac{1}{n_0^2} - \frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41}^2 E_y^2}{n_0^2 - n_e^2} \left(1 - \frac{n_e^2}{n_0^2 - n_e^2} \right) \right] x'^2 + \frac{y'^2}{n_0^2} + \left[\frac{1}{n_e^2} + \frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41}^2 E_y^2}{n_0^2 - n_e^2} \left(1 + \frac{n_0^2}{n_0^2 - n_e^2} \right) \right] z'^2 = 1$$

1、纵向应用

由于 γ_{41} 在 10^{-12}m/V 量级, 所以, $\frac{n_0^2 n_e^2 \gamma_{41}^2 E_y^2}{n_0^2 - n_e^2} \rightarrow 0$, 故沿 x' 和 z' 偏振的两分量的电光延迟随电场变化很小, 不能纵向应用。

2、横向应用

与纵向应用相似, 沿 x' 或 z' 轴通光, 两个偏振分量之间的电光延迟量很微弱, 半波电压非常高, 没有使用价值。

✎ ✎ ✎ ✎



光电子技术 (12)

(三)、外加电场沿X方向

$E_y = E_z = 0$, 椭球方程为:
$$\frac{x^2 + y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2\gamma_{41} E_x yz = 1$$

情况与沿Y方向加电场一样, 电光效应太弱, 没有实用价值。

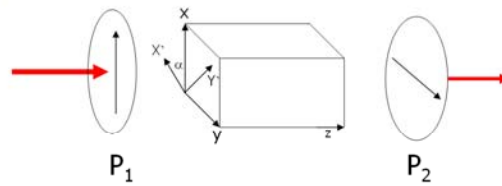
结论: KDP晶体仅沿光轴方向施加电场时有显著的电光效应, 纵向应用无自然双折射引起的相位延迟, 而横向应用有自然双折射引起的相位延迟, 并且出现几何因子, 可以用它降低半波电压。

五、电光调制应用

(一)、强度调制

电光强度调制器结构如图。设通过起偏器 P_1 后的偏振光振幅为 E_x

光电子技术 (8)



电光强度调制器， P_1 、 P_2 分别为相互正交的起偏振、检偏振器。 xyz 和 $x'y'z'$ 分别为无、有调制电压时折射率椭球主轴。 α 为 x' 与 x 之间的夹角。 P_1 、 P_2 偏振方向分别平行于 x 、 y 轴。

光电子技术 (12)

进入电光晶体后，分解为 $E_{x'}$ 和 $E_{y'}$ 两个分量：

$$\begin{cases} E_{x'} = E_x \cos \alpha \\ E_{y'} = E_x \sin \alpha \end{cases}$$

设通过电光晶体后， $E_{x'}$ 和 $E_{y'}$ 两分量的相对相位延迟量为 δ ，则两分量的复振幅为：

$$\begin{cases} E_{x'}(l_z) = E_x \cos \alpha \\ E_{y'}(l_z) = E_x \sin \alpha e^{i\delta} \end{cases}$$

通过检偏振器 P_2 后的复振幅为：

$$\begin{aligned} E_y &= -E_{x'}(l_z) \cos(90 - \alpha) + E_{y'}(l_z) \cos \alpha = -E_x \cos \alpha \sin \alpha + E_x \sin \alpha e^{i\delta} \cos \alpha \\ &= E_x \sin \alpha \cos \alpha (e^{i\delta} - 1) \end{aligned}$$

光电子技术 (12)

透过检偏振器 P_2 后的光强为:

$$I_y = |E_y|^2 = |E_x|^2 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha |e^{i\delta} - 1|^2 = I_x \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\delta}{2}$$

讨论: (1) 小信号非线性调制, $I_y \propto \delta^2$ 。

(2) 直流偏置线性化。加直流 $V_{\lambda/4}$ 电压, 设置静态工作点在半高点, 即

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \delta'$$

则,

$$\begin{aligned} I_y &= I_x \sin^2 2\alpha \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta'}{2} \right) = I_x \sin^2 2\alpha \left[\frac{1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} + \delta' \right)}{2} \right] \\ &= \frac{I_x}{2} \sin^2 2\alpha * (1 + \sin \delta') \approx \frac{I_x}{2} \sin^2 2\alpha * (1 + \delta') \end{aligned}$$

光电子技术 (12)

(3) 加四分之一波片线性化。在调制器前或后面加四分之一波片, 使四分之一波片的快、慢轴分别与 x' 、 y' 轴平行, 同样有:

$$\delta = \frac{\pi}{2} + \delta'$$

(二)、相位调制

如果只调制光的位相, 而保持强度不变, 则实现位相调制。如图63所示, 设置起偏振方向与调制器容许的某一偏振方向一致。透射光的相位调制正比于沿 y' 方向偏振的光的折射率变化:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{y'} l_z \propto \frac{2\pi}{\lambda} E l_z$$

对纵向调制KDP晶体, $\Delta n_{y'} = n_0^3 \gamma_{63} E_z / 2$, 所以, 光波的初相位调制量:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_{y'} l_z = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{63} E_z l_z = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{63} V_z$$

光电子技术 (12)

六、电光高频调制

(一)、电光晶体的等效电路

电光晶体等效为电容 C 与电阻 R 的并联，如图64，它的阻抗为：

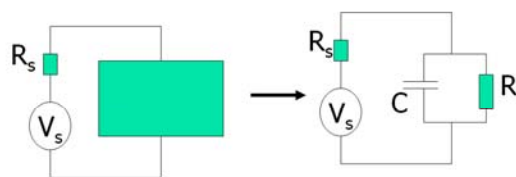
$$Z_c = \frac{1}{\omega_m C} \parallel R = \frac{R}{1 + \omega_m^2 C^2 R^2}$$

当调制频率 ω_m 足够高时， $Z_c = 1/\omega_m C < R_s$ ， R_s 为信号源内阻。此时信号功率消耗在内阻上，不能有效加载到调制晶体上，为此，高频调制时需要给晶体并联一电感 L ， L 值大小由下式确定：

$$L = \frac{1}{\omega_m^2 C}$$

此时，总阻抗为 $R > R_s$ ，所以调制功率能有效加载到晶体上。然而

光电子技术 (8)



电光晶体等效电路

光电子技术 (12)

此时调制器的最大有效信号带宽为: $\Delta\nu = \frac{1}{2\pi RC}$

(二)、电光调制的渡越时间

前面我们计算相位延迟量或相位调制量时，都是用折射率变化量乘以调制器的通光方向的长度。这实际上隐含了一个假设：光通过调制器时，调制电压不变化或光通过晶体所花费的时间，即渡越时间 τ_d 为零。这个假设仅在低频调制时成立，即光通过调制器期间调制信号变化很小，可以忽略，即**低频近似**。然而，高频调制时，这个近似不成立，通过调制器的总相位变化应该由积分给出：

$$\Delta\varphi(l) = \alpha \int_0^l e(t') dz = \alpha c \int_{t-\tau_d/2}^{t+\tau_d/2} \frac{e(t')}{n(t')} dt' \approx \frac{\alpha c}{n} \int_{t-\tau_d/2}^{t+\tau_d/2} e(t') dt'$$

光电子技术 (12)

式中 $\tau_d = nl/c$ 即为渡越时间， α 为单位电场作用下单位长度调制器引起的相位变化量。

设调制信号为正弦变化: $e(t) = A_m \cos \omega_m t$

则相位调制量为:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) &= \frac{\alpha c A_m}{n} \int_{t-\tau_d/2}^{t+\tau_d/2} \cos \omega_m t' dt' = \frac{\alpha c A_m}{n \omega_m} [\sin \omega_m (t + \frac{\tau_d}{2}) - \sin \omega_m (t - \frac{\tau_d}{2})] \\ &= \frac{\alpha A_m c \tau_d}{n} 2 \sin \frac{\omega_m \tau_d}{2} \cos \omega_m t = \Delta\varphi \frac{\sin \frac{\omega_m \tau_d}{2}}{\frac{\omega_m \tau_d}{2}} \cos \omega_m t \\ &= \Delta\varphi \sin c \frac{\omega_m \tau_d}{2} \cos \omega_m t \end{aligned}$$

光电子技术 (12)

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 ω_m 和渡越时间 τ_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。

复习要点

- 1、线性电光效应的计算，电光调制器设计，半波电压、1/4波长电压，纵、横向电光调制？
- 2、KDP晶体电光调制器如何应用最有效？
- 3、电光强度、相位调制器？线性工作点的设置？
- 4、电光调制器的渡越时间和带宽，高频电光调制的阻抗匹配？



作业十二

1、一束细光束掠入射于一单轴晶体，晶体的光轴与入射面垂直，晶体的另一个面与折射表面平行。测得o光和e光在第二面个分开的距离是2.5mm。若 $n_o=1.525$ ， $n_e=1.479$ ，计算晶体的厚度？

2、利用半波电压的概念，设计一种测量KDP晶体电光系数 γ_{63} 的实验方法？