

微通道板空间光调制器中 电光调制的传递特性

梁振宪 侯 洵

(中科院西安光机所)

摘 要

本文利用折射率椭球和点电荷模型研究了MSLM中偏 z 轴斜切 LiNbO_3 晶体的介电、电光传递过程。导出了在纵向、横向电场同时存在时电光效应的表达式及调制区的电荷——电压传递函数解析式。讨论了横向电场和器件结构参数对输出的影响及优化设计问题。指出偏 z 轴 $30^\circ \sim 60^\circ$ 切割晶体都可得到较好结果。

关键词: 电光调制、微通道板空间光调制器、传递函数。 LiNbO_3 晶体。

一、引 言

微通道板空间调制器(MSLM)是一种光电发射式光寻址光阀^[1]。器件分辨率和灵敏度对它的光学信息处理性能有大的影响。其主要由MSLM中电光晶体的介电、电光作用过程所决定。文献[2]—[4]分别对不同类型的电光调制器的电压传递函数进行了计算。但对采用各向异性介电的 LiNbO_3 电光调制的MSLM结构的处理尚未见报道。此外,在纵向运用时,为降低半波电压,一般采取偏 z 轴 55° 斜切 LiNbO_3 晶体^[3,6]。对实际存在的横向电场的影响均未加考虑。本文针对MSLM特殊结构利用折射率椭球分析纵向、横向电场共同作用下斜切 LiNbO_3 晶体电光效应随切角的变化及其对输出的影响。应用点电荷模型计算调制结构的电荷—电压传递函数。选用不同的数值组合研究结构参数对MSLM输出灵敏度和分辨率的影响,寻找改善器件性能的途径。从电荷—相位差(综合介电、电光作用)传递过程确定适合于MSLM的 LiNbO_3 的切角范围。

二、斜切 LiNbO_3 晶体的电光效应

(一) 传递过程

图1是MSLM电光调制区结构示意图,由网电极、介质反射镜和电光晶体(如 LiNbO_3)等组成。工作时,写入图象由光电阴极转换为电荷图象经MCP倍增后由网电极一侧沉积在介质反射镜上。此电荷分布在晶体内部产生对应的空间变化电场,通过电光效应调制晶体的折射率 n_o 、 n_e 。读出光(从透明电极一侧进入)经介质镜反射两次通过晶体,对应两感应主轴就有随信号变化的相位差。经读出系统,则其光场中的各点位

本文1990年4月24日收到

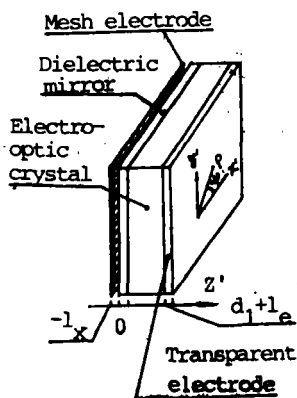


图 1 MSLM调制区结构

Fig. 1 Scheme of electro-optic modulation structure in MSLM

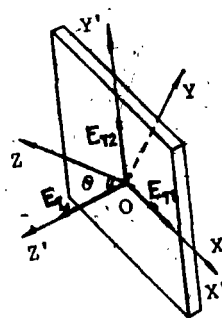
图 2 $ox'y'z'$ 坐标系的选取

Fig.2 coordinate system used in derivation of ϕ and G .

相。振幅/强度将按输入光强的空间分布发生相应的变化。即被进行了空间调制。

当输出系统为正交偏振分析器且读出光偏振方向平分感应主轴时输出 输出 振幅为: (4)

$$A(x, y) = \frac{1}{2} A_0 \begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi_1} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = i A_0 e^{i\phi} \sin G \quad (1)$$

这里 ϕ_1 、 ϕ_2 是读出光沿两感应主轴的相位变化， A_0 是扣除反射损失后的振幅。

$\phi = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$ 是输出光的相位响应， $G = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}$ 是对应两轴的半相位差。从(1)式

可以看出输出复振幅图象由 ϕ 、 G 决定。而 ϕ 、 G 是由图象引入的电场及自然双折射引起的。

(二) 斜切LiNbO₃晶体的电光效应

如果一个电场 $E(E_x, E_y, E_z)$ 加到3m点群对称的LiNbO₃晶体上，其折射率椭球在结晶学主轴坐标系中为：

$$\left(\frac{1}{n_o^2} - \gamma_{22} E_y + \gamma_{11} E_z \right) x^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{22} E_y + \gamma_{11} E_z \right) y^2 + \left(\frac{1}{n_o^2} + \gamma_{33} E_z \right) z^2 + 2\gamma_{42} E_y yz + 2\gamma_{41} E_z xz - 2\gamma_{23} E_z xy = 1 \quad (2)$$

为降低纵向运用时的半波电压通常使晶片表面法线处于 $(-Y, Z)$ 平面内且与 Z 轴的夹角为 θ ，选取一个新的坐标系 $ox'y'z'$ 相对于 $oxyz$ 的关系见图2所示。图象电荷在晶体中引入的电场用沿 ox' 、 oy' 、 oz' 方向上的分量表示。记为 ET_1 、 ET_2 、 E_L 。

(2)式表示的椭球与 $ox'y'$ 平面的交线方程为：

$$\left(\frac{1}{n_0^2} - \gamma_{22} E_y + \gamma_{13} E_x\right) x'^2 + \left[\frac{1}{n_0^2} + (\gamma_{22} E_y + \gamma_{13} E_x) \cos^2 \theta + \gamma_{33} E_x \sin^2 \theta + 2\gamma_{42} E_y \cos \theta \sin \theta\right] y'^2 + (2\gamma_{42} E_x \sin \theta - 2\gamma_{22} E_x \cos \theta) x' y' = 1 \quad (3)$$

式中, $n_0' = \left[\frac{n_0^2 n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right]^{1/2}$ 。如果把加电场后的折射率记为: $n_i = n_{i0} - \Delta n_i$, Δn_i 为感应主轴 i 对应的场致折变。注意到上式交叉项仅与 E_x 分量有关, E_L 、 E_T 、 E_{Tz} 的结果如下:

(1) $\mathbf{E} = E_L (0, -\sin \theta, \cos \theta)$ 感应主轴与 ox' , oy' 重合。

$$\Delta n_x = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{13} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta + \cos \theta \right) E_L \quad (4)$$

$$\Delta n_y = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{13} \left(\frac{n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(-\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{33} - 2\gamma_{42}}{\gamma_{13}} \sin^2 \theta \cos \theta \right) E_L$$

$$\text{令 } g_L = \left[\left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta + \cos \theta \right) + \left(\frac{n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(-\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{33} - 2\gamma_{42}}{\gamma_{13}} \sin^2 \theta \cos \theta \right) \right] \quad (5)$$

$$g_L' = \left[\left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta + \cos \theta \right) - \left(\frac{n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{33} - 2\gamma_{42}}{\gamma_{13}} \sin^2 \theta \cos \theta \right) \right]$$

(2) $\mathbf{E}_T = E_T (0, \cos \theta, \sin \theta)$ 。同样, 感应主轴与 ox' , oy' 重合。

$$\Delta n_x = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{13} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos \theta + \sin \theta \right) E_T, \quad (6)$$

$$\Delta n_y = \frac{1}{2} n_0^3 \gamma_{13} \left(\frac{n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{13} + 2\gamma_{42}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{13}} \sin^3 \theta \right) E_T,$$

$$\text{同样令 } g_{Tz} = \left[\left(-\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos \theta + \sin \theta \right) + \left(\frac{n_0^2}{n_0^2 \cos^2 \theta + n_0^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{13} + 2\gamma_{42}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{13}} \sin^3 \theta \right) \right] \quad (7)$$

$$g'_{\tau_2} = \left[\left(-\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos \theta + \sin \theta \right) - \left(\frac{n_e^2}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta} \right)^{3/2} \left(\frac{\gamma_{22}}{\gamma_{13}} \cos^3 \theta + \frac{\gamma_{13} + 2\gamma_{12}}{\gamma_{13}} \sin \theta \cos^2 \theta + \frac{\gamma_{33}}{\gamma_{13}} \sin^3 \theta \right) \right] \quad (7)$$

$$(3) \mathbf{E}_{\tau_1} = E_{\tau_1} (1, 0, 0)$$

$\Delta n_x, \Delta n_y$ 很小, 其影响可以忽略。

这样沿两感应主轴(分别与 ox', oy' 重合) 电场引起的相位变化 ϕ_1, ϕ_2 分别为:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda} \int_{d_1}^{d_1+l_1} \Delta n_x dz' \\ \phi_2 &= \frac{4\pi}{\lambda} \int_{d_1}^{d_1+l_1} \Delta n_y dz' \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{相应的地, } \phi &= \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} = -\frac{2\pi}{\lambda} \int_{d_1}^{d_1+l_1} (\Delta n_x + \Delta y n_y) dz' \\ G &= \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} = -\frac{2\pi}{\lambda} \int_{d_1}^{d_1+l_1} (\Delta n_x - \Delta n_y) dz' \end{aligned} \quad (9)$$

式中 d_1 为介质镜厚度, 对于 E_L, E_{τ_2} 分别有:

$$\begin{aligned} \phi_L &= g_L \frac{\pi V_L}{2V_{\pi R}} \\ G_L &= g_L' \frac{\pi V_L}{2V_{\pi R}} \\ \phi_{\tau_2} &= g_{\tau_2} \frac{\pi V_{\tau_2}}{2V_{\pi R}} \\ G_{\tau_2} &= g_{\tau_2}' \frac{\pi V_{\tau_2}}{2V_{\pi R}} \end{aligned} \quad (10)$$

这里, $V_{\pi R} (= \frac{\lambda}{2n_o^3 \gamma_{13}})$

为 Z 轴纵向运用时的绝对反射半波电压。 V_L, V_{τ_2} 为按下式定义的广义电压:

$$V_j = \int_{d_1}^{d_1+l_1} E_j(z') dz' \quad j = E_L, E_{\tau_2} \quad (11)$$

(10) 式中的系数 $g_L', g_L, g_{\tau_2}', g_{\tau_2}$ 反映了 E_L 和 E_{τ_2} 的电光作用结果, 由电光系数 γ 和切角 θ 所决定。 g' 及 g 随 θ 的变化如图 3 所示。对于纵向电场 E_L , 在 θ 为 50° 和 77° g_L 为 0, 而在 $\theta = 55^\circ$ 处 g_L' 取最大值, 此处 g_L 也较小。对纵向运用强度/振幅调制时具有最佳的品质因数。其半波电压为 $V_{\pi R} / g_L' = 1.6 \text{KV}$ ($\lambda = 6328 \text{\AA}$)。从图中还可看出在 $20^\circ \sim 90^\circ$ 切角范围内 g_{τ_2}', g_{τ_2} 都大于 g_L 。不应忽视横向电场对输出的影响。表现在: (1) 输出复振幅 $A(x, y)$ 由相位图象与振幅图象相乘而成。随输入信号变化的相位图象将增大振幅图象在付里叶面上的二次谐波分量(SHD), 这是不利的。(2) 如果输入为正弦栅, 其波长在 (x', y') 面上取不同 ψ 角时 (ψ 为栅波矢与 ox' 轴夹角), 横向电场对

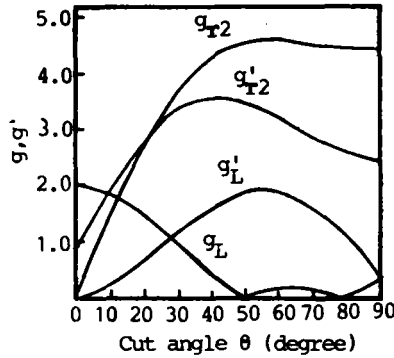


图 3 电场引起的 ϕ G 系数 g' 、 g 随晶体切角的变化, 计算时取 $n_0 = 2.28$,
 $n_e = 2.20$, $\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$
 $\gamma_{42} = 28 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$.

Fig. 3 dependence of longitudinal and transverse electric fields induced electro-optic effects on cut angle θ . g , g' are defined in the text. the used values are: $n_0 = 2.28$ $n_e = 2.20$ $\gamma_{13} = 8.6 \times 10^{-12} \text{ m/V}$;
 $\gamma_{22} = 3.4 \times 10^{-12} \text{ m/V}$; $\gamma_{42} = 28 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ and $\gamma_{33} = 30.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$.

输出的贡献随 ψ 急剧变化。在 55° 切割时 (采用柱坐标) 当 $V_L(\rho)$ 、 $V_T(\rho)$ 同时存在时, ϕ 、 G 分别为:

$$\begin{aligned}\phi(\rho, \psi) &= \frac{\pi V_T(\rho) \sin \psi}{2V_{\pi R}} \times 4.55 - 0.12 \times \frac{V_L(\rho) \pi}{2V_{\pi R}} \\ G(\rho, \psi) &= 3.37 \times \frac{V_T(\rho) \pi \cos \psi}{2V_{\pi R}} + 1.91 \times \frac{V_L(\rho) \pi}{2V_{\pi R}}\end{aligned}\quad (12)$$

可以看出, 单位电压对 ϕ 、 G 的贡献 E_T 是大于 E_L 的。且横向电场的贡献与其作用方向有关。还应注意, 根据定义横向电场与纵向电场的取值在横向面 (x', y') 上有一相对位移。因而与输入图象有一偏移, 其大小又与方位角 ψ 有关。所以对 E_T 必须抑制。

实际应用时, 如果忽略电荷图象 $\sigma(x', y', 0)$ 的横向迁移与扩散, 输出 $V_L(x', y')$ 应与之理想对应。但在实际介电过程中受电场扩展效应的限制, 将有所偏离。这样与写入电荷对应的电压空间调制就决定着 MSLM 的灵敏度和频率特性。

三、电荷—电压传递函数

(一) 点电荷模型

电光调制中电荷分布与电压 (场) 分布之间的传递过程可以简化为一线性空不变系统⁽⁴⁾来处理, 可由一传递函数来表征。对 MSLM 放置一点电荷 q 于介质镜上作为系统电荷面密度脉冲输入, 输出电压响应的频域表达式 $V_L(\omega)$ 、 $V_T(\omega)$ 则为要求的电压传递函数。其具体特性依赖于调制结构的介电性能。

(二) $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 的计算

由于问题的轴对称性, 用图 1 所示的圆柱坐标 (ρ, ψ, Z) 则较简便。调制区内各层的电势可表示为 Hankel 变换形式:

$$V(\rho, \psi, Z) = V(\rho, Z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty V(\omega, Z) J_0(\omega \rho) \omega d\omega \quad (13)$$

实空间中电势在图 4 所示的 3 个区域内必须满足拉氏方程及边界条件。读出时认为网及透明电极接地。 $Z = 0$ 面上点电荷面密度可写为:

$$\sigma(\rho, 0) = \frac{q\delta(\rho)}{2\pi\rho} = \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty J_0(\omega\rho) \omega d\omega \quad (14)$$

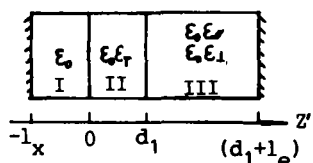


图 4 MSLM 电光调制的介电模型

l_x —间隙宽度, d_1 —介质镜厚度, l_s —LiNbO₃ 厚度

$\epsilon_\perp$ 、 $\epsilon_\parallel$ 分别为 LiNbO₃ 垂直和平行面法线方向的介电常数

Fig. 4 The dielectric model of MSLM electro-optic modulation.

l_x —gap width; d_1 —dielectric mirror thickness; l_s —LiNbO₃ wafer thickness; $\epsilon_\parallel, \epsilon_\perp$ —dielectric constant of LiNbO₃.

这里 $\delta(\rho)$ 为单位脉冲函数, 经计算 (详见附录 A) 电光晶体 LiNbO₃ 中的电位频域表示为:

$$V_{\text{II}}(\omega, Z) = \frac{q}{\omega\epsilon_0} \cdot \frac{\sinh[\omega(d_1 - a)] \sinh[\omega(\epsilon_\perp/\epsilon_\parallel)^{1/2}(Z - d_1 - l_s)]}{\sinh[\omega(\epsilon_\perp/\epsilon_\parallel)^{1/2}l_s] [\epsilon_\parallel \cosh(\omega a) + \sinh(\omega a) \cosh(\omega l_s)]} \quad (15)$$

$$\text{其中 } a = d_1 + \frac{1}{\omega} \cosh^{-1} \left\{ \frac{(\epsilon_\perp/\epsilon_\parallel)^{1/2}}{\epsilon_\parallel} \cosh[\omega(\epsilon_\perp/\epsilon_\parallel)^{1/2}l_s] \right\}$$

$$\text{按 } V_L(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty V_L(\omega) J_0(\omega\rho) \omega d\omega = \int_{d_1}^{d_1+l_s} \left[-\frac{\partial}{\partial Z} V_{\text{II}}(\rho, Z) \right] dZ$$

$$\text{则有 } V_L(\omega) = V_{\text{II}}(\omega, d_1) = \frac{q}{\omega\epsilon_0} \cdot \frac{\sinh[\omega(a - d_1)]}{\cosh(\omega a) \left[\epsilon_\parallel + \frac{\cosh(\omega l_s)}{\cosh(\omega a)} \right]} \quad (16)$$

$$\text{同理 } V_T(\omega) = \int_{d_1}^{d_1+H_0} \omega V_{\square}(\omega, Z) dZ$$

$$= \frac{q}{\omega \epsilon_0 (\epsilon_2 / \epsilon_{11})^{1/2}} \cdot \frac{\sinh[\omega(d_1 - a)] \{1 - \cosh[\omega(\epsilon_1 / \epsilon_{11})^{1/2} l_0]\}}{\sinh[\omega(\epsilon_1 / \epsilon_{11})^{1/2} l_0] [\epsilon_T \cosh(\omega a) + \sinh(\omega a) \coth + h(\omega l_0)]}$$

$$\text{而 } V_T(\rho) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty V_T(\omega) J_1(\omega \rho) \omega d\omega \quad (18)$$

上式中汉克尔积分的核为一阶贝塞尔函数。对于同一频率 ω ，横向电压与纵向电压的取值在横截面上的偏移关系表现为 $J_0(\omega \rho)$ 、 $J_1(\omega \rho)$ 函数关系。结合(14)式， $V_T(\rho)$ 则与 $\sigma(\rho, \omega)$ 有类似的情形。这就是点电荷输入时场量的关系。

(三) $V_L(\omega)$ 、 $V_T(\omega)$ 与器件结构参数的关系

在得到电压传递函数以前先分析一下实际器件中各层的介电特征。图4中的Ⅱ区是多介质膜反射镜，以 SiO_2 膜系为例，膜系为、厚度及等效介电常数随层数的变化规律如表I所示。对于偶数层，等效介电常数均为6.02，对奇数层则在5.7~5.8范围内。厚度约

表 I 层数对介质镜参数的影响 (中心波长 $\lambda_0 = 6328 \text{ \AA}$)

层数	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
反射率(%)	89.4	89.5	89.4	94.5	94.3	97.1	97.1	98.5	98.5	99.2	99.2
厚度(μm)	0.9688	1.0816	1.1623	1.2753	1.3560	1.4690	1.5497	1.6627	1.7434	1.8564	1.9371
ϵ_T	6.02	5.69	6.02	5.74	6.02	5.77	6.02	5.80	6.02	5.82	6.02

注: 1) $n_0 = 1.38$ $n_{\text{LiNbO}_3} = 2.24$ $n_{\text{ZrO}_2} = 1.96$ $n_{\text{SiO}_2} = 1.40$

2) $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 3.9$ $\epsilon_{\text{ZrO}_2} = 25$ (测量频率 1 KHz)

从 $1.0 \mu\text{m}$ 变到 $2.0 \mu\text{m}$ 。Ⅱ区电光晶体 LiNbO_3 的介电常数是各向异性的。采用附录B介绍的方法计算得到的 ϵ_{11} 、 $\epsilon_{\perp}$ 、 $(\epsilon_{\perp} \epsilon_{11})^{1/2}$ 、 $(\epsilon_{\perp} \epsilon_{11})^{1/2}$ 随晶体切割方向的变化示于图5。可以看

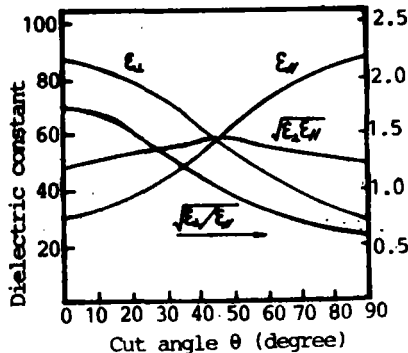


图5 LiNbO_3 晶体介电常数随切割切割角 θ 的变化

Fig.5. Dependence of the dielectric constants of LiNbO_3 on θ .

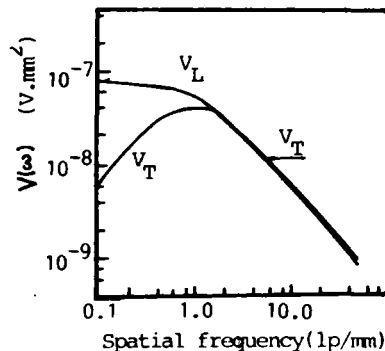


图6 MSLM电光调制典型的电压传递函数

$d_1 = 1.5 \mu\text{m}$ $\epsilon_T = 6.02$ $l_s = 0.5 \text{ mm}$
 $l_e = 0.3 \text{ mm}$ $\theta = 55^\circ$

Fig.6. The typical voltage transfer function $V_L(\omega)$ and $V_T(\omega)$.

出, 改变切割角度 θ , 上述几个量均有明显的变化。这样也可以象图 3 那样通过选择最佳切角 θ 来实现介电常数的调节。

应用点电荷输入得到的 $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 函数可以了解电光调制的灵敏度及频率特征, 进而可以了解 MSLM 的输出特性。为此改变调制区结构参数 d_1 , ε_1 , l_1 , l_2 及 ε_2 , ε_3 (通过改变切角 θ) 等计算了电光调制的电压传递函数。图 6 是选择实际器件制作时采用的结构参数 (记为“标准”) 得到的 $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 曲线。可以看出, 当空间频率大于 1.0 线对/mm 以后, $V_L(\omega)$ 则呈 $\frac{1}{\omega}$ 趋势下降, 对于 $V_T(\omega)$ 在极低频时响应为 0, 这反映了对于均匀电荷分布将不产生横向电场, 而在 1.0 线对/mm 处出现大值随后亦按 $\frac{1}{\omega}$ 下降, 但应注意, 对应同一频率点电荷产生的 $V_T(\omega)$ 却大于 $V_L(\omega)$ 。图 7 是改变介质镜厚度 d_1 所出现的变化。增加厚度灵敏度则会使频率特性明显变差。而改变 ε_1 的大小, $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 几乎未发生变化。因此, 应选择尽可能薄的膜系。[1] 文曾提到介质镜对横向电场有屏

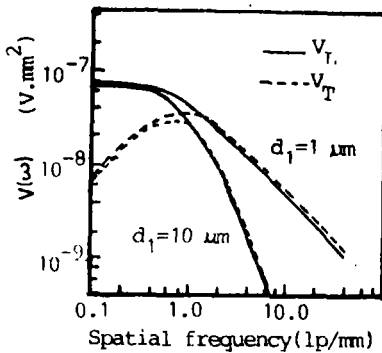


图 7 $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 随 d_1 的变化

Fig.7. dependence of $V_L(\omega)$ and $V_T(\omega)$ on d_1 .

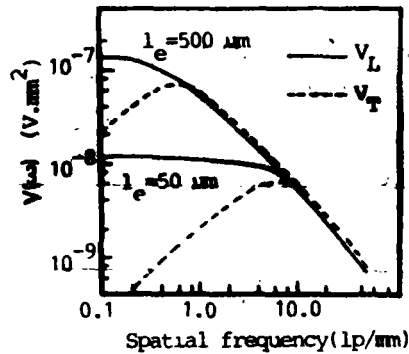


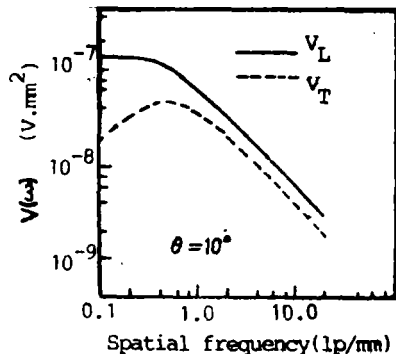
图 8 $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 随晶体厚度的变化

Fig.8. dependence of $V_L(\omega)$ and $V_T(\omega)$ on the LiNbO₃ wafer thickness.

蔽作用。从这里的分析来看, 在感兴趣的频率范围内, 介质膜对纵、横电场的影响是等同的。

改变 LiNbO₃ 晶体的厚度, $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 有显著的变化。这如图 8 所示。减薄晶体频率特征得到改善, 而且横向电场的峰值频率从 1.0 线对/mm 移到 10.0 线对/mm 附近, 这对降低 $V_T(\rho)$ 大小是有利的, 此外, 在 1.0-10.0 线对/mm 范围内出现 $V_L(\omega)$ 大于 $V_T(\omega)$ 的结果, 这也是所希望的。但灵敏度有较大的减少。计算同样表明, 减小网电极间隙 l_1 , 频率特性会得到改善。这与电荷图象传递过程的要求一致。只是受工艺及击穿限制不可能太小。

前已提及, 改变切角 θ 可改变介电常数。而 $V_L(\omega)$, $V_T(\omega)$ 的相应变化如图 9 所示。明显地, $V_T(\omega)$, $V_L(\omega)$ 的相互关系出现变化。当 $\theta = 45^\circ$ 时, 两曲线在较高频率处重合, 而 $\theta < 45^\circ$ 时, $V_T(\omega) > V_L(\omega)$; 而当 $\theta > 45^\circ$ (如 55° , 80°) 时,



相反地则有 $V_T(\omega) > V_L(\omega)$, 且随 θ 增大其差别也变大。这是因为 $V_L(\omega)$ 的灵敏度与 ε_{11}

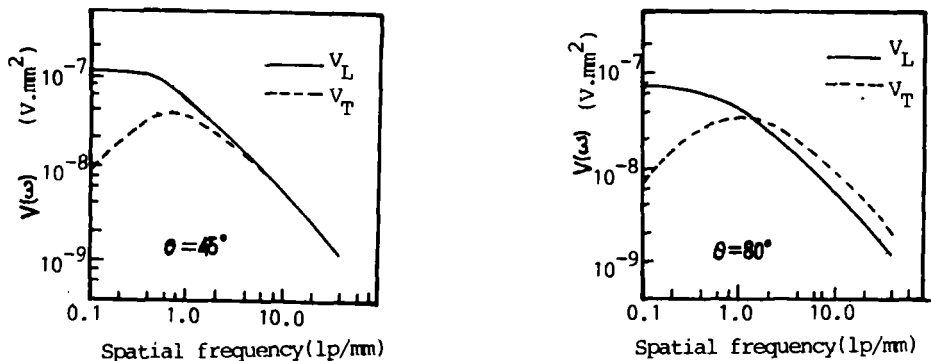


图9 $V_L(\omega)$ 、 $V_T(\omega)$ 随切割角 θ 的变化

Fig.9. dependence of $V_L(\omega)$ and $V_T(\omega)$ on crystal cut angle.

成反比, 而 $V_T(\omega)$ 与 $(\varepsilon_{11}\varepsilon_{11})^{1/2}$ 成反比。从图5不难解释 LiNbO_3 晶体的这种介电特性。另外其特征频率与 $(\varepsilon/\varepsilon_1)^{1/2}$ 成正比, 与[1]文结论一致。单从介电性能来说切角 θ 越小越好。

四、电荷——相位延迟传递

从上面讨论可以看出 LiNbO_3 晶体的介电、电光效应都随 θ 变化。MSLM中的电光调制是两者的综合。为此, 可用半波面电荷密度 $\sigma_{\pi R}$ 来作为品质因数。其定义为产生 π

相位延迟的面电荷密度、对 $V_L(\rho)$ 与 $\frac{\varepsilon_{11}}{g'_1}$ 成正比, 对 $V_T(\rho)$ 与 $\frac{(\varepsilon_{11}\varepsilon_{11})^{1/2}}{g'_{T2}}$ 成正比。这两参数随 θ 的变化如图10所示。从图中可以看到, 对纵向电场, θ 在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内 $(\frac{\varepsilon_{11}}{g'_1})$ 取较低的值对应这些角度的切割都是可得到较好效果的。对于横向电场当 $\theta > 20^\circ$ 以后 $(\frac{\varepsilon_{11}\varepsilon_{11}}{g'_{T2}})^{1/2}$ 基本上不随 θ 而变化。这时, 横向电

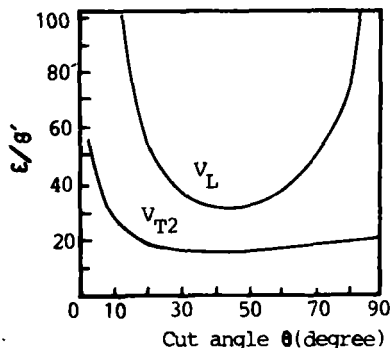


图10 电光调制作用与 θ 的关系

Fig.10 the electro-optic modulation effects versus cut angle.

场的电光调制作用优于纵向电场。这里讨论的是点电荷输入的结果。在器件工作时, 横向电场是与电荷图象调制直接有关的。这样, 可以通过施加纵向流偏压改变工作点等措施使横向电场的影响得以抑制。其详细过程有待于进一步讨论。

五、结 论

通过对斜切 LiNbO_3 晶体的电光、介电特性的分析及对电光调制传递函数的计算, 得到以下结论:

- 1) MSLM输出是由纵向电场和横向电场共同决定的。横向电场除自身的复杂性外,

其作用表现为空间(平面上)不均匀。

2) 纵向、横向电场使振幅输出时附加一相位图象。影响 MSLM 的信息处理性能。

3) 切割角度在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围都可获得良好的电光调制。而不仅限于 55° 。而且角度越小, 特征分辨率越高。

4) 对于常规 55° 切割的 LiNbO_3 晶体, 电压传递函数有下列规律: (1) 输出电压响应在频域中由一解析式表示。(2) 减小 LiNbO_3 晶体厚度降低了灵敏度, 频率特性显著改善。(3) 介电过程对横向电场没有选择性抑制。(4) 减小介质镜厚度同时改善灵敏度和频率响应。而介电常数影响不大。(5) 减小网电极与晶体间隙频率特性稍有改善。

附录A、三层介电结构电位分布计算

由 (13) 式表示的且满足拉氏方程的特解为:

$$V(\rho, z) = \int_0^\infty G(\omega) \exp(\pm \omega z) J_0(\omega \rho) d\omega \quad (\text{A } 1)$$

假设读出时网电极、透明电极接地则边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} V(\rho, -l_1) &= V(\rho, d_1 + l_2) = 0 \\ V_{\text{I}}(\rho, 0) &= V_{\text{II}}(\rho, 0^+) \\ \frac{\partial V_{\text{I}}(\rho, 0^-)}{\partial z} - \epsilon_1 \epsilon_0 \frac{\partial V_{\text{II}}(\rho, 0^+)}{\partial z} &= \sigma(\rho, 0) \\ V_{\text{I}}(\rho, d_1^-) &= V_{\text{II}}(\rho, d_1^-) \\ \frac{\partial V_{\text{I}}(\rho, d_1^-)}{\partial z} &= \epsilon_{11} \frac{\partial V_{\text{II}}(\rho, d_1^+)}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A } 2)$$

这样, 图 4 中三个区域电位形式具体表示为:

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{I}}(\rho, z) &= \int_0^\infty A_1(\omega) \sinh[\omega(z + l_1)] J_0(\omega \rho) d\omega \\ V_{\text{II}}(\rho, z) &= \int_0^\infty A_2(\omega) \sinh[\omega(z - a)] J_0(\omega \rho) d\omega \\ V_{\text{III}}(\rho, z) &= \int_0^\infty A_3(\omega) \sinh[\omega(\epsilon_1/\epsilon_{11})^{1/2}(z - d_1 - l_2)] J_0(\omega \rho) d\omega \end{aligned} \right\} \quad (\text{A } 3)$$

其中 ϵ_1 , ϵ_{11} 分别为电光晶体垂直于 Z 方向的相对介电常数,

将 (A 3) 代入 (A 2) 解为:

$$\begin{aligned} V_{\text{II}}(\omega, z) &= \frac{2\pi A_3(\omega) \sinh[\omega(\epsilon_1/\epsilon_{11})^{1/2}(z - d_1 - l_2)]}{\omega} \\ &= \frac{q \sinh[\omega(d_1 - a)] \sinh[\omega(\epsilon_1/\epsilon_{11})^{1/2}(z - d_1 - l_2)]}{\epsilon_0 \omega \sinh[\omega(\epsilon_1/\epsilon_{11})^{1/2}l_2] [\epsilon_1 \cosh(\omega a) + \sinh(\omega a) \cosh(\omega l_1)]} \end{aligned} \quad (\text{A } 4)$$

此式即为文中式 (15)

附录B、 LiNbO_3 斜切时各向异性介电常数的计算。

对 LiNbO_3 晶体, 在晶体学主轴坐标系介电张量为:

$$\left\{ \begin{array}{ccc} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{array} \right\} \quad (\text{B } 1)$$

室温时 $\epsilon_{11}^T = 84.6$, $\epsilon_{33}^T = 28.6$

当偏Z轴 θ 角斜切时,介电张量在图2所示 $ox'y'z'$ 坐标系的椭球表示为:

$$a_3 x'^2 + (a_1 \cos^2 \theta + a_3 \sin^2 \theta) y'^2 + (a_1 \sin^2 \theta + a_3 \cos^2 \theta) z'^2 + (a_3 - a_1) \sin 2\theta y' z' = 1 \quad (B2)$$

可认为,等效电介常数沿 y' 方向(ET_2 方向)为

$$a_1 = a_1^T \cos^2 \theta + a_3^T \sin^2 \theta, \text{ 沿 } Z' \text{ 方向为: } a_3 = a_1^T \sin^2 \theta + a_3^T \cos^2 \theta.$$

改变角度计算则有图5所示结果。

- [1] C. Warde and J. Thackara: *Opt. Eng.*, **22**, 695(19)
- [2] I. M. Krittman: *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-10**, 404(1963)
- [3] W. R. Roach: *IEEE Trans. Electron Devices* **ED-21**, 453(1974)
- [4] Y. Owechko and A. R. Tanguay: Jr., *J. Opt. Soc. Am.*, **A1**(1), 635(1984)
- [5] K. F. Hulme: *IEEE J.*, **QE-7**, 236(1971)
- [6] T. Hara, M. Sugiyama and Y. Suzuki: "Advances in Electronics and Electron Physics", **Vol. 64B**, 637(1985)

THE TRANSFER CHARACTERISTICS OF ELECTRO-OPTICAL MODULATION IN THE MICROCHANNEL SPATIAL LIGHT MODULATOR

Liang Zhenxian, Hou Xun

Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica

Abstract

The electro-optic modulation transfer process of oblique-cut LiNbO₃ crystal used in the Microchannel Spatial Light Modulator(MSLM) has been studied in detail by utilizing the index ellipsoid and single point-charge model. The electrooptic effects in the simultaneous presence of longitudinal and transverse fields are analyzed and the analytic expression of charge-voltage transfer function shown dependent on device construction parameters is derived. The implications of these results for device optimum design are discussed and it is also pointed out that ZY_w (+30° ~ +60°) cut LiNbO₃ wafers are all suited for fabricating MSLM and smaller cut angle can get better spatial-frequency characteristics.

Keywords: Electro-optic Modulation; MSLM; Transfer function; LiNbO₃ crystal