

电光晶体在MSLM中的应用

梁振宪 侯 洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 710068)

摘 要 本文利用MSLM电光调制理论对几种实用电光晶体的综合电光性能进行了理论分析和比较。讨论了材料固有的铁电相变及自然双折射等特性与器件制作工艺的兼容性问题。

结果指出LiNbO₃、LiTaO₃、BSO是目前可以利用的三种各具特点的电光晶体。

关键词 微通道板空间光调制器; 电光晶体

0 引 言

微通道板空间光调制器(MSLM)的一个特点就是该器件结构中敏光、放大、控制、存贮和电光调制等作用分别由不同的功能部件来完成。其中电光调制过程对器件的输出特性影响最大,因此在器件结构确定的情况下选取最佳的调制材料及运行方式是提高性能的重要途径。电光晶体具有高透过率、好对比度、大灰度级及响应快速等特点,是制作MSLM的理想材料。已有的研究结果表明一些氧八面体型铁电晶体具有良好的纵向电光效应且选择合适的取向可获得很低的半波电压¹²。但对空间调制器分辨率和灵敏度影响必须同时考虑。由于MSLM为一电荷控制器件,半波电荷密度 σ_{r} 是比半波电压 V_{r} 更能体现该器件性能的一个品质因数³。我们曾以点电荷模型为基础建立了MSLM中电光调制的传递理论^{4,5,6},用电荷灵敏度统一了上述两个参量;给出了空间频率的调制传递特性表达式(电荷—电压传递函数);应用这个理论研究了LN/MSLM的结构参数⁴、切割取向⁵对输出的影响及电荷图象的存贮性能⁶。本文在完善上述理论的基础上对几种有应用前景的电光晶体—KNbO₃(KN)、BaTiO₃(BT)、LiTaO₃(LT)、LiNbO₃(LN)和Bi₁₂SiO₂₀(BSO)在MSLM中的性能进行了理论分析、比较,并从实际制作的角度出发讨论了材料固有特性与工艺兼容等问题。建立一套完整的MSLM电光材料选择标准。

1 理 论

在MSLM调制结构的介质镜上放置一点电荷 q ,电光晶体上纵向电压的空间频率分布可由系统的电压传递函数来表征⁴:

$$V_L(\omega) = \frac{q}{\omega \epsilon_0} \frac{\sinh[\omega(a-d_1)]}{\epsilon_r \cosh(\omega a) + \coth(\omega l_x) \sinh(\omega a)} \quad (1)$$

收稿日期: 1991-04-13

其中, $a = d_1 + \frac{1}{\omega} \coth^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{\epsilon_{\perp} \epsilon_{\parallel}}}{\epsilon_r} \coth \left[\left(\frac{\epsilon_{\perp}}{\epsilon_{\parallel}} \right)^{1/2} l_o \right] \right\}$, ω 为空间角频率。定义调制结

构的电荷灵敏度 S 为由半波电压 $V_{\pi R}$ 归一化的单位电荷产生的纵向电压, 则其空间分布 $S(\omega)$ 可表示为:

$$S(\omega) = \frac{V_L(\omega)}{V_{\pi R} q} = \frac{\sinh[\omega(a - d_1)]}{\omega \epsilon_o V_{\pi R} [\epsilon_r \cosh(\omega a) + \coth(\omega l_o) \sinh(\omega a)]} \quad (2)$$

式中 l_o 为网电极间距, d_1 为介质镜厚度, l_o 为电光晶片厚度, $\epsilon_{\parallel}$ 、 $\epsilon_{\perp}$ 分别为电光晶体的纵向、横向等效介电常数。 S 实质上反映了MSLM调制结构的电光、介电综合过程。 $S(\omega)$ 的空间频率特性在高、低频情况下表现出不同的变化规律, 其极限形式为:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} S(\omega) = S_0 = \frac{\epsilon_r l_o l_x}{V_{\pi R} \epsilon_o [\epsilon_r (d_1 + \epsilon_r l_o) + \epsilon_r l_o]} \quad (3)$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} S(\omega) = \frac{1}{2 V_{\pi R} \epsilon_o} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}} + \epsilon_r + 1 + \frac{\sqrt{\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}}}{\epsilon_r}} \cdot \frac{\exp(-\omega d_1)}{\omega}$$

显然 $S(\omega)$ 在低频时为一水平直线而高频时随 ω 的变化为 $\frac{\exp(-\omega d_1)}{\omega}$ 。用分段函数作

$S(\omega_1) = S_0$ 近似, 则

$$\omega_1 = \frac{\epsilon_{\parallel} d_1 + \epsilon_r l_o + \epsilon_{\parallel} \epsilon_r l_x}{2 \epsilon_r l_o l_x (\sqrt{\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}} + \epsilon_r + 1 + \frac{\sqrt{\epsilon_{\parallel} \epsilon_{\perp}}}{\epsilon_r}) + d_1 (\epsilon_{\parallel} d_1 + \epsilon_r l_o + \epsilon_{\parallel} \epsilon_r l_x)} \quad (4)$$

在此我们把 ω_1 定义为调制结构的空间带宽, S_0 为其灵敏度。从上式可以看出 S_0 、 ω_1 均与各层厚度及介电特性有关。半波电压及介电常数均随电光晶体的取向而变化。当结构参数确定后, 这为晶体的最佳化切割提供了更具实际意义的判据。

2 计算与结果讨论

BaTiO₃、KNbO₃ 属钙钛矿型结构, 室温分别具有四方 4 mm 和正交 mm 2 点群对称性。LiNbO₃、LiTaO₃ 氧八面体组成类钛铁矿结构, 室温为三方 3 m 点群对称。这几种晶体的电光特性表现出共同的特点: 在 YZ 平面当通光方向与氧八面体的 3 度轴重合时纵向电光效应最强^{7, 8}。按 (3) 式计算的上述四种晶体在MSLM中的电光传递灵敏度随与 Z 轴的夹角 θ ((ZYW) θ 切割) 的变化关系及比较

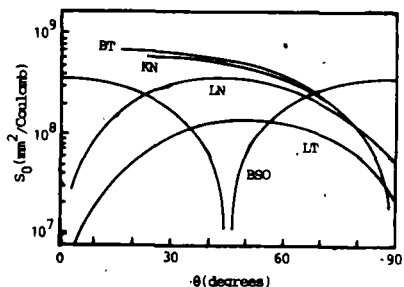


图 1 调制灵敏度随切角的变化

Fig. 1 The Dependence of Modulation Sensitivity on Cut Angle θ .

如图 1 所示。可以看出, 当 θ 在 $45^\circ \pm 20^\circ$ 切角范围内 S_e 均呈现一相对平缓的变化。即从灵敏度角度考虑, 最佳切角具有一较宽的选择范围。这是由于 S_e 综合了电光和介电两个有关联的作用过程的结果。这里以及后面的计算结构参数均采用文献“中的“标准”条件。上图中不同材料的 S_e 比较表明, 在上述角度范围内 BaTiO_3 、 KNbO_3 比 LiNbO_3 、 LiTaO_3 高出 2 倍以上; 同类晶体的 S_e 数值及变化规律比较接近但仍有差别。LN 的灵敏度明显优于 LT。图 1 同时给出了属立方晶系点群 23 对称的压电晶体 BSO 的调制灵敏度。表现出完全不同的变化规律。在 $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ 处 S_e 有最大值; 偏离这些方向则很快衰减当 $\theta = 45^\circ$ 无纵向电光效应。因此可利用的取向只能是结晶学主轴方向。图 2 给出了调制带宽 ω_1 随

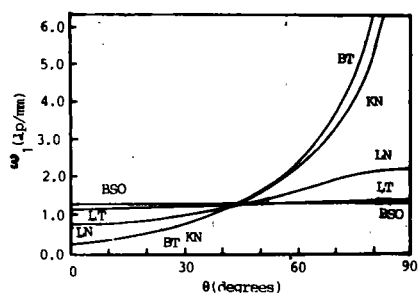


图 2 调制带宽与切角 θ 的关系

Fig.2 Modulation Bandwidth as a Function of Cut Angle θ .

切角 θ 的变化关系。随着 θ 增大 ω_1 均单调地提高。三组不同结构的晶体具有明显不同的变化规律。当 $\theta < 45^\circ$, $\omega_1(\text{BSO}) > \omega_1(\text{LN}, \text{LT}) > \omega_1(\text{BT}, \text{KN})$; 在 45° 附近 ω_1 基本相同; 当 $\theta > 45^\circ$, $\omega_1(\text{BT}, \text{KN}) > \omega_1(\text{LN}, \text{LT}) > \omega_1(\text{BSO})$ 且随 θ 增大 $\omega_1(\text{BT}, \text{KN})$ 急剧提高。在 $\theta = 90^\circ$ 时(即在 $-Y$ 方向透光) BT 类 ω_1 比 LN 类高 1 个数量级。应当注意, BSO 的 ω_1 在整个 θ 取值范围内保持一常数不变。此外, 对四种铁电晶体可以得出结论: 1) θ 越大电光调制传递的空间频率特性越好, 但当 θ 接近 90° 时 S_e 则均有严重的衰减。因此设计时须折衷考虑; 2) BT 类晶体不但具有比 LN 类晶体高的灵敏度且在大切角时有很大的带宽, 在空间调制方面显示出优越的本征质量指标。

但是, 在 MSLM 制作过程中除镀膜、粘接等工艺需作高温处理外, 制管时晶体还须受到长时间的高温烘烤, 铁电晶体特有的相变特性将带来新的问题: 1) 退极化, 当铁电体被加温到相变点以上时无外场条件下回到室温原已单畴化(极化)的晶体会转变成多畴状态。相应地其电光性能退化甚至消失。表 1 列出了这 5 种晶体的铁电相变规律。

表 1 材料的铁电相变过程

材 料	结 构 相 变	晶 格 常 数 变 化
BaTiO_3	$m3m \xrightarrow{120^\circ\text{C}} 4mm^5 \xrightarrow{-80^\circ\text{C}} mm2 \xrightarrow{-80^\circ\text{C}} 3m$	$c/a = 1 \xrightarrow{120^\circ\text{C}} 1.015 \xrightarrow{5^\circ\text{C}} 0.992$
LiNbO_3	$\bar{3}m \xrightarrow{1210^\circ\text{C}} 3m$	$\Delta(\text{Nb}-\text{Li}) \xrightarrow{1210^\circ\text{C}} 0.70 \text{ \AA}$
LiTaO_3	$\bar{3}m \xrightarrow{665^\circ\text{C}} 3m$	$\Delta(\text{Ta}-\text{Li}) \xrightarrow{665^\circ\text{C}} 0.50 \text{ \AA}$
KNbO_3	$m3m \xrightarrow{435^\circ\text{C}} 4mm \xrightarrow{225^\circ\text{C}} mm2 \xrightarrow{-10^\circ\text{C}} 3m$	$c/a = 1 \xrightarrow{435^\circ\text{C}} 1.017 \xrightarrow{225^\circ\text{C}} 1.0$
$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	$T < 900^\circ\text{C}$ 无相变	无

2) 随着相变的发生晶格结构及相应的尺寸亦发生变化。温度的周期变化在晶体内部将会引入很大的应力。从表 1 可以看出 BT、KN 的相变温度均低于热处理所要求的温度

且有较大的晶格参数变化。3) 即使在室温下点群4mm中会存在180°和90°畴, mm2还会有60°畴存在。考虑到晶片厚度只有几百微米, 很容易达到矫顽场的数值且纵向电场偏z轴一个角度 θ 施加到晶片上, 这就很容易引起畴的重新分布。总结上述三点低维度的高温铁电体(又具有高的电阻率)才能满足MSLM的要求。表1中LN、LT均属一维型高温铁电晶体, BSO为高熔点压电晶体熔点下无结构相变。这些材料基本上可以满足MSLM的制作要求。

纵向电光调制时双折射是由自然双折射 Δn 和电致双折射 $\Delta n(E)$ 两部分形成的。除立方晶系BSO的 Δn 恒等于0以外, 其余四种材料的自然双折射随切角 θ 的变化如图3所示。可以看出 $|\Delta n|$ 均随 θ 单调地增大。LT具有 10^{-3} 量级KN、BT、LN均达 10^{-2} 量级。而 $\Delta n(E)$ 最大仅具有 10^{-4} 量级。因此要使晶片的几何尺寸不均匀通过自然双折射引入的相位差分布误差小于 $\pi/10$ 则加工精度必须满足 $\theta \leq 0.3^\circ$, $N \leq 1/5$ 。对于厚度小于500微米的大面积晶片来说加工难度相当大。另外自然双折射的温度变化会引起器件的温度不稳定性。这样看来, 立方晶系材料 $\Delta n=0$, LT比LN的 Δn 小一个多数量级相对则易于光学加工且稳定性好。

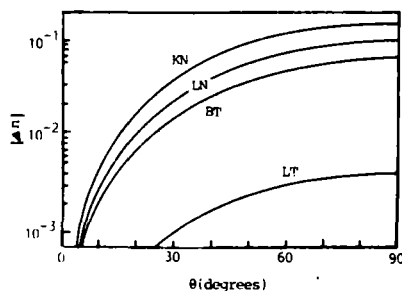


图3 自然双折射随切角 θ 的变化
($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)

Fig.3 Natural Birefringence vs θ .

上述几种晶体都不同程度存在光损伤问题。这与它们特殊的结构特别是晶体中的缺陷有关, 限制了器件读出光的选择和运用方式。对二维器件上述晶体的光学参数均匀性亦是必须考虑的因素。

除电光晶体LN、LT之外, 变形薄膜已成功地应用于MSLM中⁹。Ignatossyan等人¹⁰也尝试用液晶作调制材料。同样由于难耐高温恐难于实用化。电光陶瓷材料特别是PLZT只能利用其横向电光效应必须预极化或应力偏置¹¹。看来可以在MSLM中使用的电光调制材料还有待于进一步探索。

3 结 论

通过对KNbO₃、BaTiO₃、LiNbO₃、LiTaO₃、BSO五种晶体在MSLM中的电光调制特性的理论分析及材料本征特性对制作工艺的限制研究可以得出以下结论:

1) 虽然KN、BT有较好的电光调制性能, 但铁电特性限制了它们在现行的MSLM中的应用。只有低维度高温绝缘铁电材料才可用于MSLM中。

2) 目前可利用的电光晶体有LN、LT、BSO等。LN有最好的灵敏度和空间频率特性, 但其自然双折射较高, 光学加工难度很大, LT虽然灵敏度及频带宽度均低于LN, 但自然双折射亦小1个多数量级, BSO无自然双折射只是空间频率特性稍差。选择时需折衷考虑。

3) MSLM中的材料还要求抗光损伤, 好的光学均匀性, 暗电阻及击穿强度均应满足承受高于半波电压的外电场的要求。

参考文献

- 1 Maldonado T A, Gaylord T K. Appl Opt, 1988, 27(24):5051
- 2 Nelson D F. J Optical Society of America, 1975, 65(10):1144
- 3 Warde C, Thackara J. Proc SPIE 1983, 388:96
- 4 梁振宪, 侯洵. 高速摄影与光子学. 1990, 19(4):365
- 5 Liang Zhenxian, Hou Xun. submitted to Appl Opt
- 6 梁振宪. 中科院(光学口) 研究生优秀论文交流会文集, 1990:21
- 7 Ingold M, Gunter P. Proc SPIE 1988, 1018:12
- 8 Hulme K F. IEEE J Quantum Electronics, 1971, QE-7(6):236
- 9 Fisher A D, et al. Opt Eng 1986, 25:261
- 10 Ignatossyan S S, et al. Proc of 19th ICHSPP, 1990
- 11 Maldonado J R, Meitzler A H. Proc IEEE, 1971, 59:368

APPLICATION OF ELECTRO-OPTIC CRYSTALS IN MICROCHANNEL SPATIAL LIGHT MODULATOR

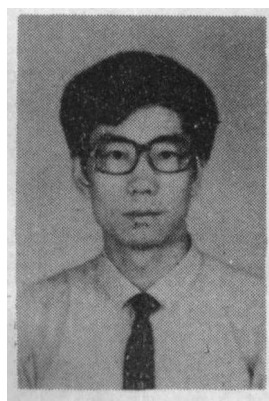
Liang Zhenxian, Hou Xun

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, 710068

Received date: 1991-04-13

Abstract The electro-optic modulation sensitivity and spatial resolution are theoretically studied for MSLM with oblique-cut E-O crystals such as KNbO_3 , BaTiO_3 , LiNbO_3 , LiTaO_3 and BSO. It is evident that the E-O modulation transfer is determined by both dielectric and electro-optic properties of crystals which vary with the crystal orientation. Although KN and BT offer higher sensitivity and better spatial resolution, the fabrication processes set a limit to them in MSLM with low ferroelectricity phase transition characteristics. The Influences of natural birefringence of selecting electro-optic materials for fabricating advanced MSLM has been established.

Keywords Microchannel spatial light Modulator; E-O crystals.



Liang Zhenxian was born in Shaanxi, China, in 1962. He received his BS and MS degrees in electronic engineering in 1983 and 1986, respectively, both from Xi'an Jiaotong University. From May 1986 to Nov. 1988 he was a research and teaching assistant in the Institute of Microelectronic Technology at Xi'an Jiaotong University. His previous research has included Ion Implantation and RTA, Interface and bulk defects in Semiconductors; Thin-film Technology; and IC design. Currently, he is pursuing the Ph D degree in Optics at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica and is involved in research on Electro-optic Modulation Theory, Fabrication of MSLM; and its applications in optical information processing.