

双横向电光克尔效应

李长胜

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 理论分析了克尔(Kerr)介质在两个横向电场作用下的电光调制特性,并由此确定了具有双横向电光克尔效应的光学材料种类。采用折射率椭球方法分析可知,各向同性克尔介质和一些晶体在横向外加电场作用下,其电光相位延迟与外加电场幅值的平方成正比,与电场方向无关;而其电光双折射主轴方位角与外加电场的方向角成正比,与电场幅值无关,称这种电光调制特性为双横向电光克尔效应。理论分析结果表明,排除兼有泡克耳斯(Pockels)效应和电致旋光效应的材料,立方晶系 432, m3m 点群和六角晶系 6/mmm 点群的晶体以及所有各向同性光学介质具有双横向电光克尔效应。目前已有克尔常数较大的陶瓷玻璃材料研制成功,将有力地促进双横向电光效应在光学各领域中的广泛应用。

关键词 物理光学;双横向电光克尔效应;折射率椭球;光偏振;光学器件

中图分类号 O43 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1671

Dual Transverse Electrooptic Kerr Effect

Li Changsheng

(School of Instrumentation Science and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Precision Opto-Mechtronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract This paper theoretically analyzes the electrooptic modulation characteristics of a Kerr medium under two transversely applied electric fields, and hence optical materials exhibiting dual transverse electrooptic Kerr effect are decided. The refractive index ellipsoid analyses demonstrate that the electrooptic phase retardation in some Kerr media is proportional to the square of the amplitude of applied electric field but independent of its direction; and the azimuth angles of the field-induced birefringent axes are only decided by the direction of the applied electric field and independent of its amplitude. This electrooptic modulation characteristic can be named as dual transverse electrooptic Kerr effect. Excluding optical materials exhibiting Pockels effect and electrogyratory effect, the crystals of cubic 432, m3m point groups and hexangular 6/mmm point group, and all the isotropic optical media exhibit dual transverse electrooptic Kerr effect. Transparent ceramic-glass with large Kerr constant has been reported in recent years, and it will accelerate the applications of dual transverse electrooptic Kerr effect in many fields of optical science and technology.

Key words physical optics; dual transverse electrooptic Kerr effect; refractive index ellipsoid, polarization of light; optical devices

1 引 言

电光效应是指晶体等光学介质在外加电场作用下,折射率发生变化的现象。简单而言,若介质折射率变化量与外加电场强度成正比,则称为线性电光效应或泡克耳斯(Pockels)效应;若介质折射率变化量与外加电场强度的平方成正比,则称为二次电光

效应或电光克尔(Kerr)效应^[1,2];电场三次方以上的量对介质折射率的影响通常被略去,因为一般介质的克尔效应比泡克耳斯效应小几个数量级,更高阶量的效应在实际应用中一般小到无法检测^[2]。

与泡克耳斯效应相比,由于大部分电光克尔介质的克尔系数很低(约 $10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$)^[1,2];故长期

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-10-30

基金项目: 北京航空航天大学引进人才基金(203137)资助课题。

作者简介: 李长胜(1967—),男,副教授,主要从事物理光学及其应用、光学器件和光纤传感技术方面的研究。

E-mail: cli@buaa.edu.cn

以来,电光克尔效应及克尔材料应用的研究并未引起广泛关注。在诸多应用场合,一般优先考虑泡克尔斯效应而忽略克尔效应。通过对光学介质中因电光双折射而产生的光波相位延迟的检测与利用,克尔效应已经成功应用于电场或电压的光学测量以及电光开关等^[3~5]。

然而,从材料选择角度而言,只有 20 种晶体具有线性泡克尔斯效应,但所有光学材料均具有电光克尔效应,包括各向同性的各种玻璃和液体介质,而玻璃是制造光纤和各种光学元件的材料;且各向同性介质通常便于各种光学应用。因而有必要继续深入研究电光克尔效应及其应用,尤其是克尔介质在两个以上独立外加电场作用下的电光调制与光学传播特性,现有文献报导很少。目前只见到 Harris 和 Willisen 等在电光频率变换和可调滤波器研究中应用了克尔介质的双重电光调制特性^[6~7],但尚未作系统研究。

本文理论分析了克尔介质在与光波传播方向垂直的两个横向外加电场作用下,介质折射率及其双折射主轴的变化情况,通过对电光相位延迟和双折射主轴取向与外加电场的函数关系分析,确定了具有双横向电光克尔效应的光学介质种类。此外,提出了电光克尔效应在光传感和光通信领域中的可能应用。

2 双横向电光克尔效应

根据晶体对称性与其电光效应的关系,有 20 种非中心对称晶体具有泡克尔斯效应^[1,2]。选用这些晶体作为电光材料且外加电场较小时,一般可以不考虑克尔效应。但当选用某些中心对称晶体以及各向同性介质如玻璃和液体等作为电光材料时,只能应用其电光克尔效应,因为这些材料本身一般不存在泡克尔斯效应。

首先考虑没有泡克尔斯效应而具有电光克尔效应的立方和单轴晶体。这些晶体包括,立方晶系的 432, m3m, m3 点群,六角晶系的 6/mmm, 6/m 点

群,四角晶系的 4/mmm, 4/m 点群,以及三角晶系的 $\bar{3}m, \bar{3}$ 点群。但需注意其中 432 点群晶体具有自然旋光性^[1],而 m3, 6/m, 4/m 和 $\bar{3}$ 点群晶体具有电致旋光效应^[8]。由于一般晶体的电致旋光系数都很小(约 1 pm/V),故在实际应用中是否需要考虑电致旋光效应,主要取决于具体晶体材料的电致旋光系数与克尔系数的相对数值以及外加电场的方向。若同时去除具有泡克尔斯效应或电致旋光效应的晶体,只考虑电光克尔效应,则这些晶体还剩余 432, m3m, 6/mmm, 4/mmm 和 $\bar{3}m$ 五个点群,分别讨论。

当两个独立的外加电场同时施加于电光材料上时,一般性讨论应考虑任意方向的电场及其对电光调制性能的影响,可采用耦合波理论分析方法^[9]。但为了便于分析,主要讨论在笛卡儿直角坐标系中两个独立且正交的横向外加电场 E_x 和 E_y 沿晶体 x 和 y 轴方向,且偏振光载波沿晶体主轴(z)方向传播的情况。根据文献^[1,2]中已给出的不同材料的电光克尔系数张量,采用折射率椭球分析法可以获知材料的电光双折射及其主轴方向。

对于立方晶系的 432 和 m3m 点群晶体,根据文献^[1],若只考虑电光克尔效应,其折射率椭球方程可写为

$$\begin{aligned} & (n_o^{-2} + s_{11}E_x^2 + s_{12}E_y^2)x^2 + \\ & (n_o^{-2} + s_{12}E_x^2 + s_{11}E_y^2)y^2 + \\ & (n_o^{-2} + s_{12}E_x^2 + s_{12}E_y^2)z^2 + \\ & 2s_{44}E_xE_y \cdot 2xy = 1, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_o 为材料折射率, s_{11} , s_{12} , s_{44} 为材料的电光克尔系数。如图 1 所示,若设新的电光诱导双折射主轴分别为 x' , y' 和 z' ,则由(1)式可知, x' 轴和 y' 轴将围绕 z 轴转动,而 z' 轴方向不变,与 z 轴重合。设新主轴坐标系绕 z' 轴向右旋转了 θ 角,即新主轴 x' 与 x 轴成方位角 θ ,则根据线性代数中主轴化方法可以求出

$$\tan(2\theta) = \frac{4s_{44}E_xE_y}{(s_{11} - s_{12})(E_x^2 - E_y^2)}, \quad (2)$$

对应的新主轴折射率分别为

$$n_{x'} \approx n_o - \frac{1}{4}n_o^3 \{ (s_{11} + s_{12})(E_x^2 + E_y^2) + [(4s_{44}E_xE_y)^2 + (s_{11} - s_{12})^2(E_x^2 - E_y^2)^2]^{1/2} \}, \quad (3)$$

$$n_{y'} \approx n_o - \frac{1}{4}n_o^3 \{ (s_{11} + s_{12})(E_x^2 + E_y^2) - [(4s_{44}E_xE_y)^2 + (s_{11} - s_{12})^2(E_x^2 - E_y^2)^2]^{1/2} \}, \quad (4)$$

$$n_{z'} \approx n_o - \frac{1}{2}n_o^3 s_{12} (E_x^2 + E_y^2), \quad (5)$$

故沿 z' 方向传播光波的电光相位延迟量为

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda}(n_y - n_x)l = \frac{\pi}{\lambda}n_o^3 l [(4s_{44} E_x E_y)^2 + (s_{11} - s_{12})^2 (E_x^2 - E_y^2)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

式中 l 为材料在 z 方向上的长度。

图 1 中同时给出了两个外加电场及其合成电场的强度大小和方向, 即 $E_m = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$, $\beta = \arctan(E_y/E_x)$ 。故(2)式和(6)式又可写为

$$\tan(2\theta) = \frac{2s_{44}}{s_{11} - s_{12}} \tan(2\beta), \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{\lambda} n_o^3 l [4s_{44}^2 \sin^2(2\beta) + (s_{11} - s_{12})^2 \cos^2(2\beta)]^{1/2} E_m^2. \quad (8)$$

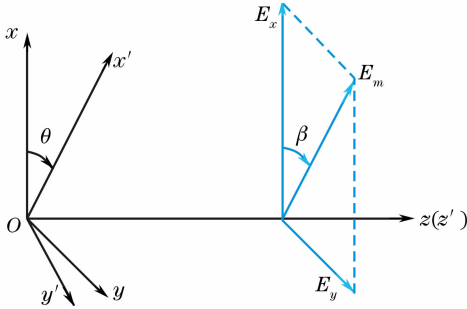


图 1 两个横向外加电场(E_x, E_y)及克尔介质电光双折射主轴(x', y')方位角示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the field-induced birefringent principal axes (x', y') of Kerr medium and its two transversely applied electric fields (E_x, E_y)

对于各向同性材料,由文献[1]可知其克尔系数张量与这些立方晶体相似,但式中 $s_{44} = (s_{11} - s_{12})/2$, 将其代入(7)式、(8)式,在方位角主值区间内可得

$$\theta = \beta, \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{\lambda} n_o^3 l (s_{11} - s_{12}) E_m^2. \quad (10)$$

(9)式和(10)式表明,各向同性电光克尔介质的电场诱导双折射主轴方位角只与外加电场方向成正比,与其强度大小无关;而电光相位延迟量与外加电场幅值的平方成正比,与其电场方向无关。即此类克尔介质的电光诱导主轴取向及其电光延迟量可以分别由外加电场方向和幅值独立控制,称这种电光调制特性为“双横向电光克尔效应”。

利用文献[1]中列出的材料克尔系数张量,用类似方法分析结果表明,六角晶系的 $6/mmm$ 点群晶体也具有双横向电光克尔效应,其电光诱导主轴方位角及电光延迟量表达式与(9)式和(10)式相同。但四角晶系的 $4/mmm$ 点群和三角晶系的 $\bar{3}m$ 点群晶体则不具有上述双横向电光克尔效应,其中 $4/mmm$ 点群晶体的电光诱导主轴方位角及电光延迟量表达式与(7)式和(8)式相似,只是将式中克尔系数 s_{44} 换为 s_{66} 。

此外,根据文献[6]的结论,对于 432 和 $m\bar{3}m$ 点群的立方晶体,当两个横向电场 E_x, E_y 分别沿晶体 $[11\bar{2}]$ 和 $[\bar{1}10]$ 方向,且偏振光波沿 $[111]$ 方向传播时,也可呈现上述双横向电光克尔效应。但并未给出详细分析。

双轴晶体在两个横向电场作用下不具有双横向电光克尔效应。

3 讨 论

有许多晶体同时具有电光泡克耳斯效应和克尔效应,现以 $\bar{6}2m(m \perp x_2)$ 点群单轴晶体为例讨论这些晶体在两个横向外加电场作用下的电光调制特性。当电光克尔效应可以忽略时, $\bar{6}2m(m \perp x_2)$ 点群晶体具有双横向泡克耳斯效应,即晶体的电光相位延迟量和电光诱导双折射主轴方位角可分别由外加电场的幅值和方向角独立控制^[10]。

当材料的电光克尔效应不能忽略,需同时考虑泡克耳斯和克尔效应时,根据给定的电光张量^[1],其折射率椭球方程可写为

$$\begin{aligned} & (n_o^{-2} + r_{11} E_x + s_{11} E_x^2 + s_{12} E_y^2) x^2 + \\ & (n_o^{-2} - r_{11} E_x + s_{12} E_x^2 + s_{11} E_y^2) y^2 + \\ & (n_e^{-2} + s_{31} E_x^2 + s_{31} E_y^2) z^2 + \\ & 2[-r_{11} E_y + (s_{11} - s_{12}) E_x E_y] xy = 1. \end{aligned} \quad (11)$$

由(11)式可见,与图 1 所示情况类似,晶体 z 主轴不变,但其 x 和 y 轴将绕 z 轴转动。仍设转动角为 θ , 则用折射率椭球主轴化方法可以求出

$$\tan(2\theta) = \frac{2[-r_{11} E_y + (s_{11} - s_{12}) E_x E_y]}{2r_{11} E_x + (s_{11} - s_{12})(E_x^2 - E_y^2)}, \quad (12)$$

且晶体的电光相位延迟量为

$$\begin{aligned} \gamma = \frac{\pi n_o^3 l}{\lambda} [& (2r_{11} E_m)^2 + (s_{11} - s_{12})^2 E_m^4 + \\ & 4r_{11} E_x (s_{11} - s_{12})(E_x^2 - 3E_y^2)]^{1/2}. \end{aligned} \quad (13)$$

由(12)式和(13)式可见,同时考虑泡克耳斯效应和克尔效应时, (γ, θ) 已不能由 $(E_m$ 或 $E_m^2, \beta)$ 各自独立

控制,即已不存在双横向泡克尔斯效应或双横向克尔效应。当外加电场较小以致可以忽略克尔效应时,略去(12)式和(13)式中与克尔效应有关的项, (γ, θ) 即可由 (E_m, β) 各自独立控制,即可近似认为晶体具有双横向泡克尔斯效应。

对于立方晶系 432 点群晶体,在实际应用中还需考虑其自然旋光性,已有许多文献对具有自然旋光性的电光晶体内的光传播特性进行了分析^[10]。

常用电光克尔介质主要有液体和固体两类,克尔常数较大的液体介质如硝基苯(有毒性)、碳酸丙烯酯等,它们已被用于电压测量^[3];固体克尔介质如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚乙烯的克尔常数 K 约为 $10^{-15} \text{ m} \cdot \text{V}^{-2}$ ^[11];掺镧锆钛酸铅(PLZT)以及最近报道的立方锂钽铌酸钾(KLTN, $\text{K}_{0.95}\text{Li}_{0.05}\text{Ta}_{0.61}\text{Nb}_{0.39}\text{O}_3$)晶体,在室温下其克尔系数均已达到约 $10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$ ^[4, 12];此外,近年来已报道克尔常数较大的透明陶瓷玻璃,其克尔常数已达到 $K \geq 0.6 \text{ pm} \cdot \text{V}^{-2}$,且其物理、化学性能稳定^[13]。这种玻璃的出现,将重新引起人们对克尔效应进行研究开发的兴趣,也为双横向电光克尔效应的广泛应用提供了材料基础。在实际应用中,电光克尔材料的选择主要取决于具体应用场合以及材料的综合特性。

与双横向泡克尔斯效应类似,双横向电光克尔效应也可应用于多重电光调制,光传感与光通信等领域。例如文献[6,7]已研究了基于介质电光克尔效应的光频变换器和电光可调滤波器等。其它可能的应用包括设计制作电光乘法器^[14],用于实现两个电压信号的乘法运算,制作高速电光采样器件^[15],实现二维电场传感等。

4 结 论

通过折射率椭球法分析可知,一些单轴晶体和立方晶体,以及所用的各向同性介质均具有双横向电光克尔效应,即介质的电光相位延迟及其电光双折射主轴方位角可以分别由外加电场幅值的平方及电场方向角独立控制。若去除兼有泡克尔斯效应和电致旋光效应的介质,则具有双横向电光克尔效应的晶体主要包括立方晶系 432, $m\bar{3}m$ 点群和六角晶系 $6/mmm$ 点群的晶体。当需要同时考虑泡克尔斯效应和克尔效应时,晶体将失去可独立控制的双横向电光调制特性。具有较大克尔常数的透明陶瓷玻璃的出现将促

进克尔效应的进一步广泛应用。双横向电光克尔效应有望应用于诸多光科学与技术领域。

参 考 文 献

- 1 Yariv A., Yeh P. Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation [M]. New York: John Wiley and Sons, 1984, 256~264
- 2 Chen Gang, Liao Liji. Fundamentals of Crystal Optics [M]. Beijing: Science Press, 1992, 436~442
陈 纲,廖理几. 晶体物理学基础[M]. 北京:科学出版社,1992, 436~442
- 3 Helgeson A. and Zahn M., Kerr electro-optic measurements of space charge effects in HV pulsed propylene carbonate [C]. IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, **9**(5): 838~844
- 4 Liu Feng, Ye Qing, Qu Ronghui *et al.*. Polarization independent Lanthanum-doped lead zirconium titanate electro-optical switch based on fiber loop mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 107~110
刘 峰,叶 青,瞿荣辉等. 基于光纤环形镜的偏振无关的掺镧锆钛酸铅电光开关[J]. 光学学报,2006, **26**(1): 107~110
- 5 Guo Wengang, Li Enbang LüFuyun, *et al.*. A novel electrooptic ceramics Q-switched fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 726~729
郭文刚,李恩邦,吕福云等. 新型电光陶瓷调 Q 光纤激光器[J]. 光学学报,2008, **28**(4): 726~729
- 6 Harris S. E., Siegman A. E.. A technique for optical frequency translation utilizing the quadratic electro-optic effect in cubic crystals [J]. *Applied Optics*, 1964, **3**(9): 1089~1090
- 7 Willisen F. K.. A tunable birefringent filter [J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(1): 97~104
- 8 Anastassakis E.. Electro-optical activity of crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, **21**(5): 212~213
- 9 Chen Haibo, She Weilong. Temperature dependence of electrooptic Modulator and its optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1353~1357
陈海波,余卫龙. 电光调制器的温度特性及其最优化设计[J]. 光学学报,2004, **24**(10): 1353~1357
- 10 Li Changsheng. Complete polarization conversion using one crystal with dual transverse Pockels effect [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(13): 2241~2251
- 11 Cooper D. E., Cheng T. C., Kim K. S. *et al.*, Kerr type electro-optic effect in solid dielectrics [C]. *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, 1980, **15**(3): 294~300
- 12 Tian H., Zhou Z. X., Wang H. F. *et al.*, Optical properties of cubic $\text{K}_{0.95}\text{Li}_{0.05}\text{Ta}_{0.61}\text{Nb}_{0.39}\text{O}_3$ single crystal [J]. *Optical Materials*, 2008, **31**: 106~109
- 13 Lipovskii A. A., Tagantsev D. K., Tatarintsev B. V. *et al.*, The origin of electrooptical sensitivity of glassy materials; crystal motifs in glasses [J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 2003, **318**: 268~283
- 14 Li Changsheng, Cui Xiang. Electro-optic crystal multiplier and its application [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(12): 1079~1084
李长胜,崔 翔. 电光晶体乘法器及其应用[J]. 中国激光, 1997, **A24**(12): 1079~1084
- 15 Li Changsheng, Yoshino Toshihiko. Optical voltage sensor based on electro-optic crystal multiplier [J]. *J. Lightwave Technology*, 2002, **20**: 843~849