

线性电光效应引起晶体介电张量变化的简单表示

尹 鑫

(山东大学晶体材料研究所, 济南 250100)

Expression for variation of dielectric tensor caused by linear electro-optic effects in crystals

Yin Xin

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan)

Abstract: This paper derives the general formula for variation of dielectric tensor, caused by the linear electro-optical effects in crystals. The changed matrix of dielectric tensor for the point groups of the main photorefractive crystals have been given.

Key words: linear electro-optic effect, dielectric tensor

晶体的光折变效应已被广泛应用于全息存贮、四波混频及相位共轭光学中, 这些研究不仅对单轴晶体, 而且已涉及到双轴晶体, 它们的基本原理均基于晶体中全息光栅的衍射原理, 而光衍射效率的大小又与晶体线性电光效应引起的光频介电常数的变化有关^[1,2]。文献[2]曾考虑到晶体中电场的方向, 给出了部分点群晶体介电张量的变化形式。本文导出线性电光效应作用下所有晶体介电张量变化的普遍表达式, 给出主要光折变晶体所属点群的介电张量的变化矩阵。

一、晶体介电不渗透张量和介电张量的表示

在主光轴坐标系中, 晶体的折射率一般用其椭球方程描述:

$$\frac{X_1^2}{n_1^2} + \frac{X_2^2}{n_2^2} + \frac{X_3^2}{n_3^2} = 1 \quad (1)$$

如果用介电不渗透张量表示, 则为

$$\beta_{ij} X_i X_j = 1 \quad (2)$$

当有电光效应作用时, β_{ij} 可记为

$$\beta_{ij} = \beta_{ij}^0 + \Delta\beta_{ij} \quad (3)$$

上式中 β_{ij}^0 为无电光效应作用时晶体的介电不渗透张量, 其值为

$$\begin{aligned} \beta_{11}^0 &= 1/n_1^2 & \beta_{22}^0 &= 1/n_2^2 & \beta_{33}^0 &= 1/n_3^2 \\ \beta_{23}^0 &= \beta_{32}^0 = 0 & \beta_{31}^0 &= \beta_{13}^0 = 0 & \beta_{12}^0 &= \beta_{21}^0 = 0 \end{aligned}$$

$$\Delta\beta_{ij} = \sum_{k=1}^3 \gamma_{ijk} E_k \quad (4)$$

γ_{ijk} 为晶体的线性电光系数, E_k 为电场矢量。

相应的、有电光效应作用时晶体的介电张量可记为

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^0 + \Delta\epsilon_{ij} \quad (5)$$

ϵ_{ij}^0 为无电光效应作用时的介电张量, 其值为

$$\begin{aligned} \epsilon_{11}^0 &= n_1^2 & \epsilon_{22}^0 &= n_2^2 & \epsilon_{33}^0 &= n_3^2 \\ \epsilon_{23}^0 &= \epsilon_{32}^0 = 0 & \epsilon_{31}^0 &= \epsilon_{13}^0 = 0 & \epsilon_{12}^0 &= \epsilon_{21}^0 = 0. \end{aligned}$$

二、线性电光效应引起晶体介电张量变化的普遍表达式

根据定义, 介电张量与介电不渗透张量的关系为^[3]

$$\epsilon = \beta^{-1} = \frac{\beta'^*}{|\beta|} \quad (6)$$

上式中 β'^* 为 β' 的转置矩阵

$$\beta'^* = \begin{pmatrix} \beta'_{11} & \beta'_{21} & \beta'_{31} \\ \beta'_{12} & \beta'_{22} & \beta'_{32} \\ \beta'_{13} & \beta'_{23} & \beta'_{32} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 β'_{ij} 是行列式 $|\beta|$ 中的元素 β_{ij} 的代数余子式, 其值为

$$\begin{cases} \beta'_{11} = \beta_{22}\beta_{33} - \beta_{23}\beta_{32} = \beta_{22}\beta_{33} - \Delta\beta_{23}\Delta\beta_{32} \\ \beta'_{12} = \beta_{23}\beta_{31} - \beta_{21}\beta_{33} = \Delta\beta_{23}\Delta\beta_{31} - \Delta\beta_{21}\beta_{33} \\ \beta'_{13} = \beta_{21}\beta_{32} - \beta_{22}\beta_{31} = \Delta\beta_{21}\Delta\beta_{32} - \beta_{22}\Delta\beta_{31} \\ \beta'_{21} = \beta_{13}\beta_{32} - \beta_{12}\beta_{33} = \Delta\beta_{13}\Delta\beta_{32} - \Delta\beta_{12}\beta_{33} \\ \beta'_{22} = \beta_{11}\beta_{33} - \beta_{13}\beta_{31} = \beta_{11}\beta_{33} - \Delta\beta_{13}\Delta\beta_{31} \\ \beta'_{23} = \beta_{12}\beta_{31} - \beta_{11}\beta_{32} = \Delta\beta_{12}\Delta\beta_{31} - \beta_{11}\Delta\beta_{32} \\ \beta'_{31} = \beta_{12}\beta_{23} - \beta_{13}\beta_{22} = \Delta\beta_{12}\Delta\beta_{23} - \Delta\beta_{13}\beta_{22} \\ \beta'_{32} = \beta_{13}\beta_{21} - \beta_{11}\beta_{23} = \Delta\beta_{13}\Delta\beta_{21} - \beta_{11}\Delta\beta_{23} \\ \beta'_{33} = \beta_{11}\beta_{22} - \beta_{12}\beta_{21} = \beta_{11}\beta_{22} - \Delta\beta_{12}\Delta\beta_{21} \end{cases} \quad (8)$$

行列式 $|\beta|$ 的值则为

$$\begin{aligned} |\beta| &= \beta_{11}\beta_{22}\beta_{33} - \beta_{11}\Delta\beta_{23}\Delta\beta_{32} + \Delta\beta_{12}\Delta\beta_{23}\Delta\beta_{32} - \Delta\beta_{12}\Delta\beta_{21}\beta_{33} \\ &\quad + \Delta\beta_{13}\Delta\beta_{21}\Delta\beta_{32} - \Delta\beta_{13}\beta_{22}\Delta\beta_{31} \end{aligned} \quad (9)$$

(9)式等号右边其它项比 $\beta_{11}\beta_{22}\beta_{33}$ 小 10^{-10} 以上, 可略去不计, 则有

$$|\beta| \approx \beta_{11}\beta_{22}\beta_{33} \quad (10)$$

忽略平方项电光效应后得

$$\epsilon_{11} = \frac{\beta'_{11}}{|\beta|} \approx \frac{1}{\beta_{11}} = n_1^2 \left(\frac{1}{1 + n_1^2 \Delta\beta_{11}} \right) \quad (11)$$

将其展成幂级数, 忽略平方项电光效应后得

$$\epsilon_{11} \approx n_1^2 - n_1^4 \Delta\beta_{11} \quad (12)$$

同理可解得

$$\epsilon_{22} = n_2^2 - n_2^4 \Delta\beta_{22} \quad (13)$$

$$\epsilon_{33} = n_3^2 - n_3^4 \Delta\beta_{33} \tag{14}$$

忽略平方项电光效应的影响, 则有

$$\epsilon_{23} = \epsilon_{32} = \frac{\beta'_{32}}{|\beta|} = \frac{\beta'_{23}}{|\beta|} \approx \frac{-\Delta\beta_{32}}{\beta_{22}\beta_{33}} = \frac{-\Delta\beta_{32}}{\beta_{22}\beta_{33}} \tag{15}$$

展成幂级数, 取线性电光效应项得

$$\epsilon_{23} = \epsilon_{32} \approx -n_2^2 n_3^2 \Delta\beta_{23} \tag{16}$$

同理得

$$\epsilon_{31} = \epsilon_{13} \approx -n_3^2 n_1^2 \Delta\beta_{31} \tag{17}$$

$$\epsilon_{12} = \epsilon_{21} \approx -n_1^2 n_2^2 \Delta\beta_{12} \tag{18}$$

综合(12)、(13)、(14)和(16)、(17)、(18)式得

$$\epsilon_{ij} \approx n_i n_j \delta_{ij} - n_i^2 n_j^2 \Delta\beta_{ij} \tag{19}$$

上式中 $i=j$ 时, $\delta_{ij}=1$; $i \neq j$ 时, $\delta_{ij}=0$ 。如果介电张量和电光系数张量采用简化足符, 令 $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \rightarrow 4, 31 \rightarrow 5, 12 \rightarrow 6$, 对比(5)式和(4)式可得到

Table 1 Changed matrices of dielectric tensor for the point groups of the main photorefractive crystals

Point groups	Changed matrices of dielectric tensor
$\bar{4}3m$	$\begin{bmatrix} 0 & -n_0^4 r_{41} E_3 & -n_0^4 r_{41} E_2 \\ -n_0^4 r_{41} E_3 & 0 & -n_0^4 r_{41} E_1 \\ -n_0^4 r_{41} E_2 & -n_0^4 r_{41} E_1 & 0 \end{bmatrix}$
$4mm$	$\begin{bmatrix} -n_0^4 r_{13} E_3 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 & -n_0^4 r_{13} E_3 & 0 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 & 0 & -n_0^4 r_{33} E_3 \end{bmatrix}$
$\bar{4}2m$	$\begin{bmatrix} 0 & -n_0^2 r_{63} E_3 & -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_2 \\ -n_0^2 r_{63} E_3 & 0 & -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_1 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_2 & -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_1 & 0 \end{bmatrix}$
$3m(m \perp X_1)$	$\begin{bmatrix} -n_0^4 (r_{13} E_3 - r_{22} E_2) & n_0^2 n_0^2 r_{22} E_1 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 \\ n_0^2 n_0^2 r_{22} E_1 & -n_0^4 (r_{13} E_3 + r_{22} E_2) & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 & -n_0^4 r_{33} E_3 \end{bmatrix}$
32	$\begin{bmatrix} -n_0^4 r_{11} E_1 & n_0^4 r_{11} E_2 & n_0^2 n_0^2 r_{41} E_2 \\ n_0^4 r_{11} E_2 & n_0^4 r_{11} E_1 & -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_1 \\ n_0^2 n_0^2 r_{41} E_2 & -n_0^2 n_0^2 r_{41} E_1 & 0 \end{bmatrix}$
6	$\begin{bmatrix} -n_0^4 r_{13} E_3 & 0 & -n_0^2 n_0^2 (r_{51} E_1 - r_{41} E_2) \\ 0 & -n_0^4 r_{13} E_3 & -n_0^2 n_0^2 (r_{41} E_1 + r_{51} E_2) \\ -n_0^2 n_0^2 (r_{51} E_1 - r_{41} E_2) & -n_0^2 n_0^2 (r_{41} E_1 + r_{51} E_2) & -n_0^4 r_{33} E_3 \end{bmatrix}$
$6mm$	$\begin{bmatrix} -n_0^4 r_{13} E_3 & 0 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 \\ 0 & -n_0^4 r_{13} E_3 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_2 & -n_0^4 r_{33} E_3 \end{bmatrix}$
$mm2$	$\begin{bmatrix} -n_0^4 r_{13} E_3 & 0 & -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 \\ 0 & -n_0^4 r_{23} E_3 & -n_0^2 n_0^2 r_{42} E_2 \\ -n_0^2 n_0^2 r_{51} E_1 & -n_0^2 n_0^2 r_{42} E_2 & -n_0^4 r_{33} E_3 \end{bmatrix}$

$$\Delta\epsilon_k = \Delta\epsilon_{kf} = -n_k^2 n_f^2 \sum_{j=1}^3 r_{kj} (k=1\sim 6, f=1\sim 3) \quad (20)$$

这就是线性电光效应引起晶体介电张量变化的普遍表达式。根据上式,可给出主要光折变晶体所属点群介电张量的变化矩阵。

值得指出的是文献[2]中 $\Delta\epsilon_k$ 的符号有误。其它点群晶体介电张量的变化矩阵可根据电光系数矩阵和(20)式求出。

参 考 文 献

- 1 J. Feinberg, Optical Phase Conjugation, Edited by R. A. Fischer, Academic Press, 1983, 417~441
- 2 岳学锋, 光学学报, 8 (1), 8 (1988)
- 3 蒋民华, 晶体物理, 山东科技出版社, 济南, 213, 323

(收稿日期: 1989年8月21日)

第四届全国光电技术和系统学术会议在合肥召开

由中国科技大学和安徽省光学学会联合承办的第四届全国光电技术和系统学术会议1991年5月13~14日在合肥市召开。共有300多位代表参加了会议。

交流会共录取论文301篇,在6个分会场上交流了150多篇,论文内容涉及面较宽,主要包括光电检测技术和在线测量;光电图像测量、分析和混合处理;光电控制系统、光学装备自动化和智能化;新型光电、电光、声光、磁光器件及集成化;光纤技术及其应用;激光技术和应用等。许多论文报告来自国家攻关项目、国家自然科学基金项目、国家重点实验室和博士、博士后的科研工作。代表普遍反映,论文报告的质量较高,有些达到了国际先进水平。

在交流会之前的5月12日还召开了光电技术专业委员会的换届选举工作,听取了上一届专业委员会的工作报告,并对第二届专业委员会的工作作了安排和讨论。

(吉 禾)

91年内腔激光医学学术交流会在北京召开

由中国光学学会激光医学分科学会主办的91年度激光医学学术交流会在1991年5月22~25日在北京举行,来自17个省市和解放军医院的51名代表参加了会议,有30篇论文在会上进行了交流。

会议探讨了CO₂、YAG激光加光敏剂对内腔疾病进行光动力学治疗的适应症和禁忌症,交流了激光在治疗消化道、泌尿系统、胸腔、子宫等腔体内的息肉、结石、异物、早中期癌症上的应用潜力,对激光打通食道梗阻、狭窄等也给予了应有的重视,对光敏剂、激光的使用剂量等问题进行了热烈的讨论。代表们对蓝宝石激光微探头在内镜技术中的应用表现出极大的兴趣,说明内腔医生渴望一种新的激光“刀”,以免除光纤在内腔应用时的污染、损坏而影响手术的蔽病。

(周德观)