

适用于任意电场分布和传播方向的电光器件仿真方法

邱鑫茂¹ 马 靖¹ 谢 楠^{2*} 徐启峰²

¹福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350108

²福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108

摘要 提出了1种通用的三维电光器件仿真方法。该方法将有限元电场分析和电光效应耦合波理论相结合,通过求解电光器件的琼斯矩阵,计算了任意光传播方向和任意电场分布下的电光调制特性。以横向调制的Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)晶体光学电压传感器(OVS)为例,对该方法进行了详细说明。讨论了Bi₄Ge₃O₁₂晶体内的非均匀电场及光路偏移对测量精度的影响,给出了在不同的精度等级条件下的最大允许光路偏移。该方法为光学电压传感器和其他电光器件的设计和性能评估提供了参考依据。

关键词 光学器件; 电光器件; 有限元分析; 耦合波理论; Bi₄Ge₃O₁₂晶体

中图分类号 O734; TM45 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1223001

A Method of Electro-Optic Device's Simulation and Analysis in Arbitrary Direction and Arbitrary Electric Field

Qiu Xinmao¹ Ma Jing¹ Xie Nan² Xu Qifeng²

¹College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

²College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China

Abstract A universal simulation method for 3-dimensional electro-optic device is proposed. This method combines the electro-optic wave coupling theory with finite-element method for electric field analysis. By solving Jones-matrix of electro-optic device, electro-optic modulation for arbitrary light propagating direction and arbitrary electric field direction can be computed. This method is elaborated by taking the transverse-modulated Bi₄Ge₃O₁₂(BGO) optical voltage sensor(OVS) for instance. The effect of inhomogeneous electric field and light beam shift on measurement accuracy is discussed. The maximum permitted beam shift for different accuracy grade is given. The method provides references for designing and evaluating optical voltage sensor and other electro-optic devices.

Key words optical device; electro-optic device; finite element analysis; wavecoupling theory; Bi₄Ge₃O₁₂ crystal

OCIS codes 230.2090; 230.4110; 280.4788; 260.1180; 130.6010

1 引 言

基于Pockels效应的电光器件在通信系统^[1-2]、集成光学^[3]、电光调制器^[4-5]和电场传感^[6-9]等领域已得到广泛应用。仿真在电光器件的设计过程中必不可少,用于对其性能进行预测、验证和改进。折射率椭球理论和电光效应耦合波理论是仿真电光器件的常用方法,并在近年来逐步发展完善。苏世达等^[10]使用折射率椭球理论计算了固定电场方向下的任意传播方向的铌酸锂晶体的横向电光调制特性。She等^[11]提出了电光效应耦合波理论,计算了任意均匀电场中任意传播方向的电光效应,并分析了不同传播方向上的电光效应和温度效应^[12-14],与实验结果相符^[15]。Shames等^[16]提出将折射率椭球理论和电场有限元分析相结合,模拟了电

收稿日期: 2015-07-06; 收到修改稿日期: 2015-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61177072, 51177016)、福州大学科研启动基金(510052)

作者简介: 邱鑫茂(1991—),男,硕士研究生,主要从事晶体光学和电光器件方面的研究。E-mail: qiuxinmao@foxmail.com

导师简介: 马 靖(1977—),女,博士,副教授,主要从事信息光学和激光光谱方面的研究。E-mail: majing@fzu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xien551@gmail.com

光器件内真实电场分布下的电光调制特性,并在实验上得到验证。但是,模拟过程将三维电场分布简化为二维电场,且仅考虑了正入射情形。迄今为止,对于三维真实电场下的任意传播方向的电光器件仿真还未见报道。

本文提出了1种三维电光器件的仿真分析方法。该方法将耦合波理论^[11]和有限元分析^[17]相结合,利用琼斯矩阵描述电光调制,适用于描述任意光传播方向、任意电场分布、任意电光晶体中的电光效应。以采用Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)晶体作为传感单元的电压传感器(OVS)为例,对仿真方法进行了详细说明,并利用该方法分析了光路偏移对测量精度的影响,给出了不同的精度条件下的最大允许光路偏移量。

2 基于有限元分析和耦合波理论的电光器件仿真方法

2.1 有限元分析

电场有限元方法具有良好的数值精度,可用于复杂结构的电场仿真,它是将整个求解域分割成若干单元实现离散化,在给定的边界条件下求解电场微分方程^[17]为

$$\nabla \cdot [\boldsymbol{\varepsilon} \cdot \nabla \varphi(x, y, z)] = -\rho, \quad (1)$$

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \varphi(x, y, z), \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为介电张量, $\varphi(x, y, z)$ 为三维电势分布, $\rho(x, y, z)$ 为体电荷密度, \boldsymbol{E} 为电场强度,通过计算电势 $\varphi(x, y, z)$ 的负梯度得到。

使用 Maxwell 3D 软件仿真晶体内电场。当确定了仿真模型的结构、施加电压和网格剖分等参数后,可求得满足边界条件和精度要求三维电势 $\varphi(x, y, z)$ 分布和电场分布 $\boldsymbol{E}(x, y, z)$ 。图 1(a)给出了横向调制 OVS 传感头电极和晶体的简化结构,电极为 1 对圆形平行铝板,半径为 15 mm;BGO 晶体置于铝板中心并与地电极相连,晶体尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,相对介电常数为 16.4^[18]。BGO 与高压电极之间存在 10 mm 空气间隙,采用空气间隙分压可提高传感结构的电压测量范围。在两电极间施加 5 kV 的直流电压。在有限元分析中,网格的剖分质量会影响分析结果精度和计算效率。采用 ansoft 有限元软件中的自适应剖分方式进行网格剖分,BGO 晶体和平行板内部及尖端处采用了较密集的网格,空气层、平行板和 BGO 晶体的网格最大边长分别设定为 3、2、0.5 mm,剖分网格尺寸在迭代时不断调节细化,使网格分布与物理解相耦合^[17]。

图 1(b)为晶体内电势分布,可以看出中心区域等势面基本平行,电场较均匀,但是在远离中心区域均匀性变差。原因是 BGO 晶体的介电常数远大于空气的介电常数,晶体内电势下降较慢,晶体外的电势下降较快,在晶体上方边缘附近出现了等势面的扭曲^[19],使得 BGO 晶体内电场方向不完全垂直于晶体上下表面。

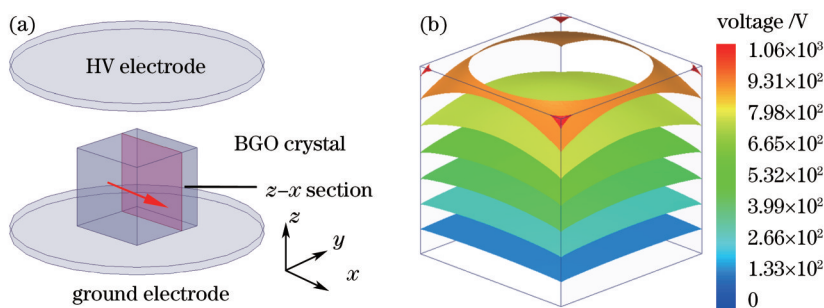


图 1 (a)有限元分析仿真三维模型示意图; (b) 三维电势分布

Fig.1 (a) Three-dimensional finite element analysis model for simulation; (b) distribution of electric potential

为了进一步说明晶体内电场分布,图 2(a)、(b)、(c)分别给出远离中心区域的 $z-x$ 方向截面($y=2.5$ mm)的 E_x 、 E_y 和 E_z 分布,截面如图 1(a)所示。晶体内电场以横向电场 E_z 为主。从图 2(a)可见, E_z 电场分布从上至下逐渐增强,底部电场值约为顶部的 3 倍。从图 2(b)、(c)可以看出,横向电场 E_y 和纵向电场 E_x 的电场分布变化更大,其平均值比 E_z 低 1 个数量级,产生显著的干扰相位延迟。可见,当通光路径位于该截面时,需要考虑 E_z 电场不均匀性以及横向电场 E_y 和纵向电场 E_x 对电光调制的影响,以便得到更高精度的计算结果。

2.2 耦合波理论

线性电光效应耦合波理论是 2001 年由 She 和 Lee 提出^[11],适用于描述任意晶体中任意光传播方向和任

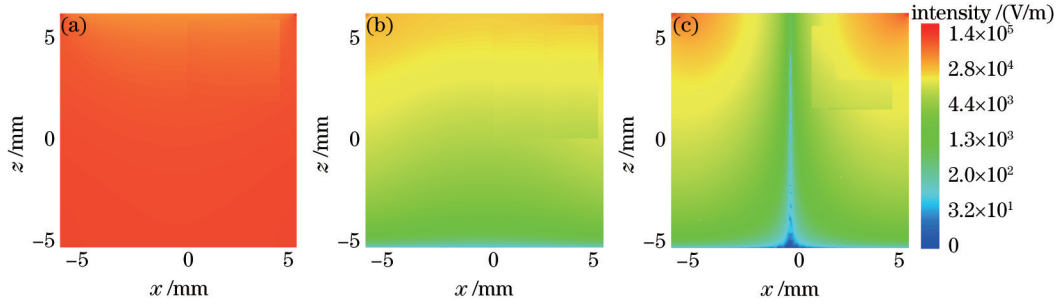


图2 (a)~(c)z-x 截面($y=2.5$ mm)上 $|E_z|$ 、 $|E_y|$ 和 $|E_x|$ 的电场分布(对数图例)

Fig.2 (a)~(c) Electric field distribution of $|E_z|$ 、 $|E_y|$ and $|E_x|$ in the $z-x$ section ($y=2.5$ mm) (logarithm legend)

意电场方向下的线性电光效应。

假设电光介质是透明非吸收和非磁性的,且介质内没有净余电荷,单色平面波存在2个独立的光电场分量 (E_1 和 E_2), E_0 为外加静电场或频率远小于 ω 的低频电场。 a 、 b 和 c 分别为 $E_1(r)$ 、 $E_2(r)$ 和外电场 E_0 的单位向量,且 $a \cdot b = 0$ 。取光轴为 z 轴,波矢量 k_1 (或 k_2) 在球坐标系中的平顶角与方位角分别为 θ 和 φ , 则 a 、 b 可表示为

$$a = [\sin \varphi, -\cos \varphi, 0], b = [-\cos \theta \cos \varphi, -\cos \theta \sin \varphi, \sin \theta]. \quad (3)$$

电光效应的耦合方程可以写为

$$\frac{dE_1(r)}{dr} = -id_1 E_2(r) \exp(i\Delta k r) - id_2 E_1(r), \quad (4a)$$

$$\frac{dE_2(r)}{dr} = -id_3 E_1(r) \exp(-i\Delta k r) - id_4 E_2(r), \quad (4b)$$

式中 $\Delta k = k_2 - k_1$, k_1 和 k_2 分别对应 E_1 和 E_2 的波矢,参数 d_i ($i=1,2,3,4$) 表达式为

$$d_1 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff1}} E_0, d_2 = \frac{k_0}{2n_1} r_{\text{eff2}} E_0, d_3 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff1}} E_0, d_4 = \frac{k_0}{2n_2} r_{\text{eff3}} E_0, \quad (5)$$

其中, k_0 为真空的波矢, n_1 和 n_2 分别为 E_1 和 E_2 对应的折射率, $r_{\text{eff}i}$ ($i=1,2,3$) 为有效电光系数,可表示为

$$r_{\text{eff1}} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj} \epsilon_{kk}) (a_j \gamma_{jkl} b_k c_l), \quad (6a)$$

$$r_{\text{eff2}} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj} \epsilon_{kk}) (a_j \gamma_{jkl} a_k c_l), \quad (6b)$$

$$r_{\text{eff3}} = \sum_{j,k,l} (\epsilon_{jj} \epsilon_{kk}) (b_j \gamma_{jkl} b_k c_l), \quad (6c)$$

其中, a_j 和 a_k 为单位向量 a 的分量, b_j 和 b_k 为单位向量 b 的分量, $j, k = 1, 2, 3$, γ_{jkl} 为电光张量元, ϵ_{jj} 和 ϵ_{kk} 为介电张量对角元,并且 $\epsilon_{jj} = n_{jj}^2$, $\epsilon_{kk} = n_{kk}^2$ 。

令

$$\gamma = \frac{d_4 - d_2 - \Delta k}{2}, \mu = \frac{\sqrt{(\Delta k + d_2 - d_4)^2 + 4d_1 d_3}}{2}, \gamma = \frac{d_4 - d_2 - \Delta k}{2}, \mu = \frac{\sqrt{(\Delta k + d_2 - d_4)^2 + 4d_1 d_3}}{2}, \quad (7)$$

其中, $\Delta k = (n_2 - n_1)k_0$ 。通过求解耦合方程可以得到的均匀电场调制下出射光的偏振态,用琼斯矩阵表示为

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} E_1(0) \\ E_2(0) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\mu r) + i\gamma \sin(\mu r)/\mu & -id_1 \sin(\mu r)/\mu \\ -id_3 \sin(\mu r)/\mu & \cos(\mu r) - i\gamma \sin(\mu r)/\mu \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$E_1(0)$ 和 $E_2(0)$ 分别为2个独立光电场分量 (E_1 和 E_2) 的初始值, r 为通光长度。

2.3 有限元分析与耦合波理论结合

2.3.1 电场的坐标变换

BGO 晶体的切割面为 (110)、 $(\bar{1}\bar{1}0)$ 和 (001), 耦合波理论的计算采用晶体的晶向坐标系。有限元电场仿

真采取的空间坐标系与耦合波理论坐标系不一致,二者需通过坐标变换进行统一。以BGO晶体横向调制为例,说明坐标变换矩阵的计算方法。在BGO晶向坐标系下通光方向 $\mathbf{k}_1 = [-\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0]$, 电场方向矢量为 $\mathbf{c}_1 = [\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0]$, 与 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{c}_1 正交的方向为 $\mathbf{g}_1 = [0, 0, 1]$ 。在电场仿真坐标系下, $\mathbf{k}_2 = [1, 0, 0]$ (x 方向), $\mathbf{c}_2 = [0, 0, 1]$ (z 方向), 与 \mathbf{k}_2 和 \mathbf{c}_2 正交的方向为 $\mathbf{g}_2 = [0, 1, 0]$ (y 方向)。变换矩阵 \mathbf{B} 表示如下:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{k}_1 \\ \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{g}_1 \end{pmatrix} / \begin{pmatrix} \mathbf{k}_2 \\ \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{g}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}/2 & 0 & \sqrt{2}/2 \\ \sqrt{2}/2 & 0 & \sqrt{2}/2 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

2.3.2 电光效应计算说明

图3为BGO晶体横向电光调制示意图。入射光沿着 x 方向传播,通过光轴方向为 z 方向的起偏器,进入BGO晶体后获得电光相位延迟。之后经过快慢轴与BGO晶体一致的 $1/4$ 波片,再经过透光轴方向为 y 方向的检偏器后出射。

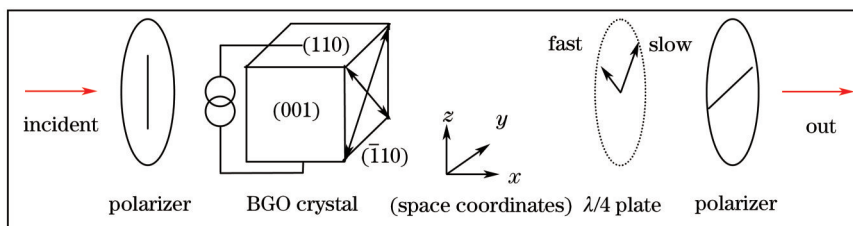


图3 BGO晶体横向调制示意图

Fig.3 Schematic diagram of transverse modulation with BGO crystal

由于晶体内电场的不均匀性,通光路径上的电场方向和大小均不相同,需将通光路径分割,当分割足够细,可认为每段路径上的电场均匀,应用耦合波理论计算每段路径的电光调制,每段调制前后光的电矢量可表示为

$$\begin{bmatrix} E_1(i) \\ E_2(i) \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} E_1(i-1) \\ E_2(i-1) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中 $A_i (i = 1, \dots, n)$ 为每段路径的电光调制矩阵,其表达式为(9)式。

图3中 45° 方位角的 $1/4$ 波片的琼斯矩阵可表示为

$$Q_{45^\circ} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

对所有分割路径(n 段)的电光效应进行累积,则经过晶体和波片后的电矢量为

$$\begin{bmatrix} E_1(n) \\ E_2(n) \end{bmatrix} = Q_{45^\circ} A_n A_{n-1} \dots A_1 \begin{bmatrix} E_1(0) \\ E_2(0) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

起偏器的作用为

$$\begin{bmatrix} E_1(0) \\ E_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由图3和图4可知,快、慢光经过 $1/4$ 波片获得 90° 相位延迟,静态工作点(无外加电压的光强值)被平移至近似线性区域,实现电光相位延迟的线性测量。同时该区域内的斜率最大,测量信号的敏感度最高。

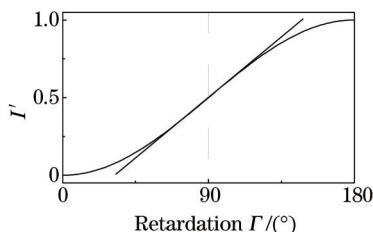


图4 相位延迟与透射率关系

Fig.4 Transmission characteristics versus retardation

由图 4 可知,静态工作点的归一化光强为 0.5,因此有效的电光调制光强为实际测量光强(已归一化)和静态工作点光强之差^[20]:

$$I = |E_2(n)|^2 - 0.5, \quad (15)$$

光的电矢量在快、慢轴上的投影分别是 $E_t(n)$ 和 $E_s(n)$,并可表示为

$$\begin{bmatrix} E_t(n) \\ E_s(n) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1(n) \\ E_2(n) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

因此电光调制引起相位延迟为

$$\Delta = \{ \arg[E_t(n)] - \arg[E_s(n)] \} - 90^\circ. \quad (17)$$

2.3.3 路径分割

研究路径分割数目与计算精度的关系,以 z 方向的电场为例,通光路径为图 1(a)晶体中心的红色箭头。图 5(a)为路径上的电场大小分布,因此就 z 方向的电场而言,即使光在晶体正中心穿过,电场也是变化的。对通光路径进行分段,每段上的电场取该段中点处的值,利用(13)式计算电光调制,通过(15)式得到有效调制光强为 0.03691。图 5(b)给出光路的分段数 n 对电光效应计算误差的影响,当分段数增加到为 1000 后,误差稳定在 10^{-4} 以内。当电场变化剧烈时应适当增加分段数,以使计算结果达到同样的精确度。

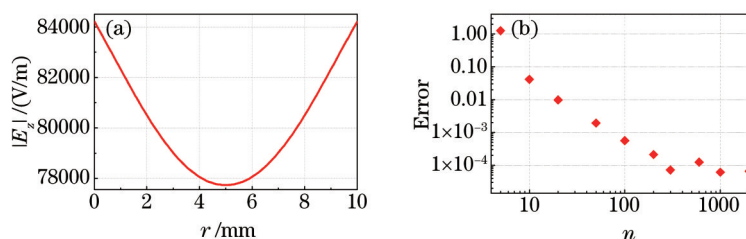


图 5 (a) z 方向的电场在通光路径上的分布; (b) 误差随分段数目增加的变化

Fig.5 (a) Distribution of the electric field in z direction along the light path; (b) error versus number of section

本文提出的三维电光器件仿真方法可以适用于任意光传播方向,任意电场分布,任意电光晶体的电光效应。这是由耦合波理论和有限元仿真的特点决定:1)耦合波理论是通过计算入射光的 2 个偏振分量 E_1 、 E_2 与电场 E_0 之间的耦合作用来分析电光效应,不需要对折射率椭球方程进行标准化,适合计算任意通光方向和任意电场方向的电光效应;2)电光晶体的参数主要通过介电张量和电光矩阵来描述,该方法借助耦合波理论,可以分析不同类型的电光晶体;3)有限元方法可以对任意电光器件的电场分布进行求解,当通光方向确定,光路上的电场分布也随之确定,对于任意的电场分布,都可以通过对通光路径进行细分,使得每个分路段内的电场变化可以忽略不计,可通过耦合波理论分别求解电光效应。因此该方法适用于任意电场分布的电光器件。

3 结果与讨论

由于振动和器件老化等原因,OVS 中 BGO 晶体内的光路会发生不同程度的偏移,包括位置偏移和角度偏移^[19],由于电场的非均匀性,光路偏移将导致电光相位延迟发生改变,引起测量误差。文献[19]通过计算通光路径的计算电场 E_z ,代入 BGO 横向调制公式计算测量误差。采用本文提出的方法对电场不均匀性引起的测量误差进行计算,并与文献的计算结果进行对比,说明方法的有效性。

计算模型为图 1(a)所描述的模型,平行板电极间隙为 20 mm,采用空气分压,加载电压为 5 kV,BGO 晶体的尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的方形,电光系数 γ_{41} 为 1.01 pm/V,折射率为 2.0972,光波长为 633 nm,光波初始电场 $E(0)$ 设为 $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

3.1 位置偏移对测量信号的影响

设光束沿坐标 x 方向传播,入射点坐标为($y=0, z=0$)时,光束从晶体中心入射。图 6(a)、(b)给出入射点位置坐标在 $-1 \text{ mm} < y < 1 \text{ mm}$, $-1 \text{ mm} < z < 1 \text{ mm}$ 范围内的电光相位延迟 Δ 和有效调制光强 I 。当光束位置沿 z (竖直)方向变化 $\pm 1 \text{ mm}$ 时,相位差从 3.9770° 变化到 4.4285° ,与 $z=0$ 时的测量值 4.2334° 相比,产生测量误差约为

6.29%, 光强从 0.03468 变化到 0.03861, 与 $z=0$ 时的测量值 0.03691 相比, 产生测量误差约为 6.05%, 此结果与利用积分电场估算误差的方法得到误差 5.91% 相比基本相同^[19]。利用积分电场估算误差中只考虑将 z 方向的电场积分, 然后利用折射率椭球理论计算电光效应, 本文计算还考虑 E_x 和 E_y , 但由于晶体几何结构的对称性, 在晶体中心区域 E_x 相对于 E_z 来说非常小, 且 E_y 方向电场几乎为 0, 所以误差主要由 E_z 电场变化引起。当光束位置沿 y (水平) 变化 ± 1 mm 时, 产生的相位延迟和光强误差分别约为 0.45% 和 0.41%。可见垂直方向偏移产生的误差远大于水平方向, 原因在于晶体内电场在垂直方向上的变化远大于水平方向上的变化。因此 OVS 在实际设计中应该尽量减少垂直方向的光路偏移。

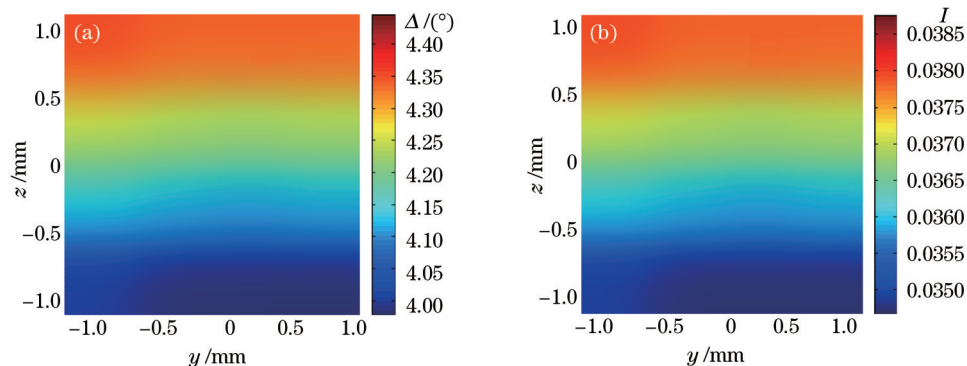


图 6 (a) 光路位置偏移形成的相位差分布; (b) 光路位置偏移形成的调制光强分布

Fig.6 (a) Distribution of phase delay when optical position shifts; (b) distribution of modulated intensity when optical position shifts

3.2 角度偏移对测量信号的影响

图 7(a)、(b) 给出角度偏移 0.2 rad 范围内的电光相位延迟和调制光强。 α 角和 ψ 角分别表示垂直方向和水平方向的偏移角度。当 α 在 $(-0.10 \sim 0.10)$ rad 内变化时, 相位差从 4.1113° 变化到 4.3363° , 与 $\alpha=0$ 时的测量值 4.2334° 相比, 产生测量误差约为 2.88%, 光强从 0.03585 变化到 0.03781, 产生测量误差约为 2.87%, 与利用积分电场估算的误差 2.87% 相同^[19]。当 ψ 变化时, 产生的相位延迟和光强误差分别约为 0.054% 和 0.12%, 因此水平方向角度变化引起的误差与垂直方向相比基本可以忽略。积分电场的计算中不考虑光传播方向对电光效应的影响, 但其得到的误差却与本文考虑了光传播方向计算的结果基本相同, 可见横向调制中入射角微小变化对电光效应本身的影响比较弱, 因此本文将入射角变化产生的测量误差原因主要归结为, 在非均匀的电场中, 入射角变化引起光路变化, 不同光路上的电场分布不同, 进而影响到最终调制结果。因此通过优化电场传感头结构, 增强电光晶体内电场的均匀性和减少电光器件的振动很有必要。

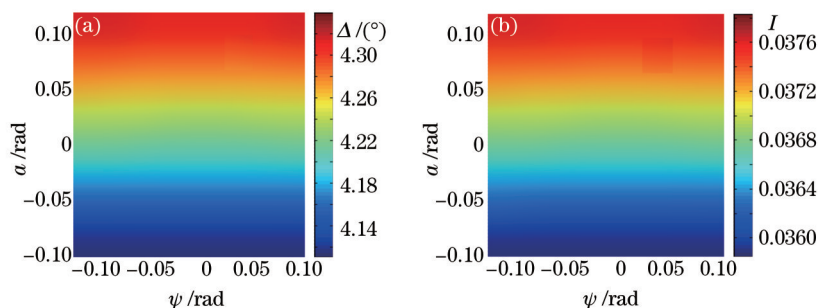


图 7 (a) 入射角偏移造成相位差变化; (b) 入射角偏移造成调制光强变化

Fig.7 (a) Phase delay versus shift of incident angle; (b) modulated intensity versus shift of incident angle

3.3 光路偏移对 OVS 精度的影响

通过计算, 垂直方向偏移造成的误差远大于水平方向误差, 因此本文暂不考虑水平方向偏移造成的误差。OVS 具有不同的准确级, 1 级的 OVS 一般用于电压测量, 要求误差小于 $\pm 1.0\%$ ^[21], 就采用图 1(a) 所示的仿真模型来说, 若仅存在位置偏移, 则偏移量不能超过 0.184 mm; 仅考虑角度偏移, 偏移量不能超过 0.0384 rad。而 0.5 级要求误差小于 $\pm 0.5\%$ ^[21], 其对偏移量的要求更高。表 1 给出 OVS 不同精度条件下垂直方向上允许的最大位置偏移和角度偏移, 将为基于 BGO 晶体横向电光调制原理的 OVS 设计精度提高提供理论依据。

表1 OVS精度对光路平移量和入射角 α 角的要求Table 1 Requirements of light path shift and incident angle α for different accuracy levels of OVS

Accuracy level	1.0%	0.5%	0.2%	0.1%
Path displace/mm	0.184	0.094	0.038	0.019
Deflection angle α /rad	0.0384	0.0179	0.0073	0.0037

4 结 论

提出了1种三维电光器件仿真方法。该方法采用有限元方法分析电光晶体的内电场分布,结合电光效应耦合波理论对通光路径上的电光效应进行分段累积计算,适用于任意通光路径和任意电场分布下的三维电光器件仿真。将电光效应耦合波理论运用到BGO电光晶体中,以横向调制的BGO晶体OVS为例,对仿真方法进行了详细说明,并计算了晶体内的非均匀电场对测量精度的影响。水平方向的角度偏移和位置偏移对精度的影响有限,垂直方向的角度偏移和位置偏移对测量精度影响较大: $y=\pm 1$ mm时,误差为6.05%; $\alpha=\pm 0.1$ rad时,误差为2.87%。针对该OVS仿真模型,分析了不同的精度所允许的最大位置偏移和角度偏移,若要使精度提高,则需要增加传感单元的电场均匀性,并着重避免垂直方向的偏移。计算结果与文献报道的结果相符,验证了该方法的可行性。由于本方法考虑了3个电场分量产生的电光相位延迟,因此计算结果的准确度较高,特别适用于电场分布极其不均匀的情形。所提出的方法可对OVS的电光调制行为进行综合分析,同时也适用于任意三维电光器件的仿真设计和性能评估。

致谢 感谢福州大学电气与自动化学院电力测量新技术研究中心全体成员的帮助。

参 考 文 献

- 1 Ed L Wooten, Karl M Kissa, Alfredo Yi-Yan, *et al.*. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(1): 69-82.
- 2 Ahmed Nabih Zaki Rashed, Abd El-Fattah A Saad. Transmission behavior improvement of electro-optic modulators for integrated photonic systems in the present communication technology[J]. International Journal of Communication Systems, 2013, 28(3): 574-584.
- 3 Woo-Sung Chu, Sung-Wook Heo, Min-Cheol Oh. Polymeric integrated-optic bias chip for optical voltage transducers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(24): 4128-4133.
- 4 Ma Weiguang, Zhao Gang, Fu Xiaofang, *et al.*. Stability analysis of fiber electro-optic modulator based PDH frequency locking technique [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0115002.
马维光, 赵刚, 付小芳, 等. 基于光纤电光调制器的PDH频率锁定稳定性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0115002.
- 5 Fan Liwen, Meng Zhou, Sun Qiao, *et al.*. Operating points control for Mach-Zehnder electro-optic modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0905001.
樊理文, 孟洲, 孙乔, 等. 马赫-曾德尔电光调制器工作点自动控制[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905001.
- 6 Feng Pan, Xia Xiao, Yan Xu, *et al.*. Optical AC voltage sensor based on two Bi₄Ge₃O₁₂ crystal[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(4): 1125-1129.
- 7 Akiko Kumada, Kunihiko Hidaka. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1306-1313.
- 8 Changsheng Li, Xiang Cui, Toshihiko Yoshino. Measurement of AC electric power based on dual transverse pockels effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1375-1380.
- 9 Liu Xijing, Yang Dewei, Yu Jia, *et al.*. Quasi-reciprocal reflective digital closed-loop optical voltage sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0205002.
刘汐敬, 杨德伟, 于佳, 等. 准互易反射式数字闭环光波导电压传感器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0205002.
- 10 Su Shida, Wan Lingyu, Zhou Yu, *et al.*. Transversal electro-optic effect of light propagating in arbitrary direction in LiNbO₃[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2972-2977.
苏世达, 万玲玉, 周煜, 等. 任意传播方向上铌酸锂晶体的横向电光效应研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2972-2977.
- 11 W L She, W K Lee. Wave coupling theory of linear electro optic effect[J]. Optics Communications, 2001, 195(1-4): 303-311.
- 12 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.
- 13 Nan Xie, Qifeng Xu, Jing Ma, *et al.*. Thermally insensitive design for LiNbO₃ electro-optical modulator under dynamic electric field[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(8): 085201.
- 14 Zheng Guoliang, She Weilong. A temperature insensitive design for eletro-optic modulator and variable optical attenuator[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1077-1080.
郑国梁, 余卫龙. 温度不敏感电光调制器和保偏光衰减器设计[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1077-1080.
- 15 Guoliang Zheng, Jie Xu, Lixing Chen, *et al.*. Athermal design for potassium titanyl phosphate electro-optical modulator[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(27): 6774-6778.
- 16 Paul E Shames, Sun Pang Chen, Yesaiahu Fainman. Modeling of scattering and depolarizing electro-optic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(17): 3726-3734.
- 17 Zhao Bo, Zhang Hongliang. The Application of Ansoft12 in Engineering Electromagnetic Field[M]. Beijing:China Water and Power Press, 2010: 208-221.
赵 博, 张洪亮. Ansoft12在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 208-221.
- 18 V Trnovcová, I Furár, D Schultze. Electrical properties of bismuth phosphate and bismuth germanate single crystals[J]. *Solid State Ionics*, 2008, 179(1-6): 131-134.
- 19 Xiao Yueyu. Influence of the electric field distribution on the optical voltage transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 37-40.
肖悦娱. 光学电压传感器的电场分布对测量的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 37-40.
- 20 Robert W Boyd. *Nonlinear Optics*[M]. New York: Academic Press, 2008: 520-523.
- 21 Ling Zishu. *Technical Manual of High Voltage Transformer*[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2005: 273.
凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 273.

栏目编辑: 史 敏