

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003735

电光晶体的 Pockels 效应仿真研究*

周扬¹ 卜乐平¹ 王黎明¹ 胡致远¹ 杨娅姣²(1. 海军工程大学 电气工程学院 武汉 430033; 2. 中国航天电子技术研究院
北京航天时代光电科技有限公司 北京 100094)

摘要:结合麦克斯韦方程组建立了光在电光晶体中传播的数学模型;通过有限元仿真分别建立了铌酸锂晶体和锗酸铋晶体的物理参数模型,提出了一种通用的入射光三维波动场仿真方法,该方法将晶体内部电场分布和电光效应耦合波理论相结合,计算了在横向调制下两种晶体的 Pockels 效应,其结果与理论差值在 10^{-5} 数量级内;同时,仿真结果表明,铌酸锂晶体的 Pockels 效应更为明显。最后对两种不同材质的电光晶体进行了 0~1 000 V 直流加压实验,实验表明铌酸锂晶体的 Pockels 效应测量精度优于 $\pm 2.9\%$ 。该方法为光学电压传感器电光晶体的选择和性能评估提供了新的研究思路与理论参考。

关键词:电光晶体;光学电压传感器;Pockels 效应;有限元分析;光波场仿真

中图分类号: TN98; 0436.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3015

Simulation research on pockels effect of electro-optic crystal

Zhou Yang¹ Bu Leping¹ Wang Liming¹ Hu Zhiyuan¹ Yang Yajiao²(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;
2. Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co., Ltd, China Academy of Aerospace
Electronic Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Combined with Maxwell's equations, a mathematical model of light propagation in electro-optic crystals was established; physical parameter models of lithium niobate crystal and bismuth germanate crystal were established through finite element simulation, and a universal three-dimensional wave field simulation method of incident light was proposed. This method combines the electric field distribution inside the crystal with the coupled wave theory of the electro-optic effect, and calculates the Pockels effect of the two crystals under transverse modulation. The difference between the results and the theory is within 10^{-5} orders of magnitude; at the same time, the simulation results show that the Pockels effect of lithium niobate crystals is more obvious. Finally, 0~1 000 V DC voltage experiments are carried out on two electro-optic crystals of different materials. The experiment shows that the measurement accuracy of the Pockels effect of the lithium niobate crystal is better than $\pm 2.9\%$. This method provides new research ideas and theoretical references for the selection and performance evaluation of electro-optic crystals for optical voltage sensors.

Keywords: electro-optic crystal; optical voltage sensor; pockels effect; finite element analysis; light wave field simulation

0 引言

随着光纤传感技术和电光调制技术以及智能电网建设的飞速发展,传统的电磁式电压传感器已经很难满足现代工业电力系统的发展需求,基于 Pockels 效应的光学

电压传感器(OVS)应运而生^[1-2]。OVS通过光纤传输,利用光信号在电光晶体材料中产生相位差信息对待测电压进行间接测量,而电光晶体的 Pockels 效应则是整个测量系统的核心部分,是保证系统稳定运行的关键^[3-5]。目前国内外有关光学电压传感器 Pockels 效应的理论研究,其采用的电光晶体材料主要是铌酸锂(LiNbO₃)晶体和锗

酸铋(BGO)晶体^[6]。

研究晶体 Pockels 效应的常用方法有光的电磁理论与光学琼斯矩阵,苏世达等^[7]通过推导 LiNbO₃ 晶体的折射率椭球方程,研究了光在晶体内部沿任意方向传播时晶体横向调制产生的 Pockels 效应机理特性。延云涛等^[8]直接从晶体的二阶非线性极化出发,推导出了 LiNbO₃ 晶体 Pockels 效应的物理本质。李霞等^[9]针对光纤电压互感器中采用 BGO 晶体,利用琼斯矩阵方法推导出 Pockels 效应的数学模型。李全志等^[10]利用 Jones 矩阵方法推出了光纤电压传感器中晶体自然双折射的数学模型,并使用高精度屏蔽变压器提高系统的信噪比。Shames 等^[11]利用琼斯矩阵推导出米勒矩阵,并结合有限元仿真模拟了电场分布下的 Pockels 效应。本文通过光的电磁理论对光在晶体传播中的数学模型做出简要推导,利用有限元仿真实现了入射光在晶体中传播的三维波动模型,分别建立了 BGO 和 LiNbO₃ 晶体的物理参数模型,在验证仿真 Pockels 效应可行性与正确性的同时,得出 LiNbO₃ 相比 BGO 作为电光晶体材料在横向调制时具有更敏感的电光效应,为电光材料的进一步应用提供了重要依据。

1 数学模型

1.1 晶体中光波传播数学模型

光波属于电磁波的一种,在均匀、透明、非磁性且不存在自由电荷的晶体中,Maxwell 方程组的微分形式可描述电磁波在晶体中的传播^[12-14]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \rho \quad (4)$$

当涉及光与晶体相互作用时,可认为晶体相对磁导率 $\mu_r = 1$, 可仅考虑光电场的作用。通过对 Maxwell 方程组等式变换,取单色平面波特解,可得光波在晶体中指数形式的电磁波电场波动方程:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (5)$$

式中: \mathbf{k} 为波矢量, $|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$, \mathbf{k}_0 为单位波矢; ω 为角频率; \mathbf{r} 为波面任一点位置矢量。

在均匀、透明的各向异性晶体中,光学各向异性主要体现在电位移矢量 \mathbf{D} 和电场强度矢量 \mathbf{E} 的关系上,二者可通过介电张量来描述:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r \cdot \mathbf{E} \quad (6)$$

式中: ε_0 为真空介电常数, $\boldsymbol{\varepsilon}_r$ 为晶体二阶相对介电张量。

其分量形式即为物质方程:

$$D_i = \varepsilon_0 \varepsilon_{ri} E_i, i = x, y, z \quad (7)$$

式中: ε_{ri} 为主轴方向相对介电系数。晶体主折射率为 $n_i = \sqrt{\varepsilon_{ri}}, i = x, y, z$ 。

在晶体主轴坐标系中,菲涅耳波法线方程为:

$$\frac{k_{0x}^2}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{\varepsilon_{rx}}} + \frac{k_{0y}^2}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{\varepsilon_{ry}}} + \frac{k_{0z}^2}{\frac{1}{n^2} - \frac{1}{\varepsilon_{rz}}} = 0 \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_{rx}, \varepsilon_{ry}, \varepsilon_{rz}$ 为主介电系数,当任意给定一波矢量 \mathbf{K} (k_{0x}, k_{0y}, k_{0z}), 可求该入射光在晶体此方向上传播时折射率大小。

结合式(5)~(7)可得:

$$D_i = \frac{\varepsilon_0 k_{0i} (\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{E})}{\frac{1}{\varepsilon_i} - \frac{1}{n^2}} \quad i = x, y, z \quad (9)$$

现设入射线偏振光波矢方向沿 y 轴负方向(x, z 方向同理), 即 $\mathbf{k}_0 = (0, -1, 0)$, 代入式(8)得:

$$\begin{cases} n' = 0 \\ n'' = \pm n_x \\ n''' = \pm n_z \end{cases}$$

舍去 0 解和负值解(为入射光沿 y 轴正向传播时的方程解), 得:

$$\begin{cases} n'' = n_x = \sqrt{\varepsilon_{rx}} \\ n''' = n_z = \sqrt{\varepsilon_{rz}} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)的解代入式(9)可得:

$$\begin{aligned} D''_y = D''_z = 0, D''_x \neq 0 \\ D'''_y = D'''_x = 0, D'''_z \neq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10)、(11)可知,在主轴坐标系中,在晶体内部沿 y 轴负向传播的光波存在着两电矢量相互垂直的方向,在这两个方向上晶体有着不同的折射率, $n'' = \sqrt{\varepsilon_{rx}}$, $n''' = \sqrt{\varepsilon_{rz}}$; 光波在各向异性晶体中传播时,沿不同方向偏振的光波其折射率不同,致使其传播相速度也不同。通过建立入射光在各向异性晶体中传播的数学模型,为分析、推导光波在电光晶体中产生 Pockels 效应数学模型提供了理论基础。

1.2 晶体 Pockels 效应数学模型

当电光晶体材料在低频外电场作用下,晶体内部介电常数将发生改变而引起其折射率的变化。基于 Pockels 效应的光学电压传感器中电光晶体材料一般采用三方晶系中的 LiNbO₃ 和立方晶系中的 BGO。LiNbO₃ 晶体属于 3m 点群,具有透光性高,电光系数大等特点;而 BGO 晶体属于 $\bar{4}3m$ 点群,本身无自然双折射、无旋光性^[15-17]。

1) 基于 LiNbO₃ 晶体的 Pockels 效应数学模型

LiNbO₃ 晶体为单轴晶体,晶体在无外加电场时表现

为各向异性。在主轴坐标系中,其主折射率为 n_o, n_e 。设电场方向沿 z 轴,电压为 V ,采用横向调制, $E_x = E_y = 0$,入射光沿 y 轴传播, LiNbO_3 晶体长宽高分别为 l, h, d , 其中, l 为 y 轴方向上晶体的长度, d 为 z 轴方向上晶体的厚度。此时晶体电光系数矩阵为:

$$[\gamma_{mk}] = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & \gamma_{22} & \gamma_{13} \\ 0 & 0 & \gamma_{33} \\ 0 & \gamma_{51} & 0 \\ \gamma_{51} & 0 & 0 \\ -\gamma_{22} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

光通过晶体时产生的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{13} E_z \right) - \left(n_e - \frac{1}{2} n_e^3 \gamma_{33} E_z \right) \right] l = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) l + \frac{\pi V}{\lambda} \frac{l}{d} (n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) \quad (13)$$

式(13)即为 LiNbO_3 晶体 Pockels 效应数学表达式,等号右边为第 1 项为晶体固有双折射。

2) 基于 BGO 晶体的 Pockels 效应数学模型

BGO 晶体在无外加电场时,为各向同性晶体。在主轴坐标系中,3 个主轴折射率 $n_x = n_y = n_z = n_o$ 。设电场方向沿 z 轴,电压为 V ,横向调制, $E_x = E_y = 0$,入射光沿 y 轴传播, BGO 晶体长宽高分别为 l, h, d , 其中, l 为 y 轴方向上晶体的长度, d 为 z 轴方向上晶体厚度。晶体电光系数矩阵为:

$$[\gamma_{mk}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{41} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于对晶体 z 轴方向施加电压后,晶体感应折射率椭球的 3 个主轴方向将沿原来的 3 个主轴绕 z 轴旋转 45° 得到。光通过晶体时产生的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\left(n_o + \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{41} E_z \right) - \left(n_o - \frac{1}{2} n_o^3 \gamma_{41} E_z \right) \right] l = \frac{2\pi}{\lambda} g n_o^3 \gamma_{41} E_z l = \frac{2\pi V}{\lambda} n_o^3 \gamma_{41} \frac{l}{d} \quad (15)$$

式(15)即为 BGO 晶体 Pockels 效应数学表达式。

2 仿真研究

几何光学以光线模型为基础,把组成物体的物点看作几何点,研究光的成像与传播规律问题,不涉及光的物理本质。而波动光学以光的电磁理论为基础,可以形象

有效地描述光的传播及光与物质相互作用的问题,晶体的 Pockels 效应正属于此研究范畴。

2.1 晶体受压建模与仿真分析

利用有限元软件 Comsol 中静电模块实现对电光晶体的受压仿真,分析晶体内部电场电势分布,为建立晶体 Pockels 效应仿真提供建模基础。当入射光波长 $\lambda = 600 \text{ nm}$ 时,晶体室温自由状态下各物理参数如表 1 所示^[18-19]。

表 1 晶体各物理量的参数值

Table 1 Parameter value of each physical quantity of crystal

Electro-optic crystal material	Refractive index	Relative permittivity	Primary electro-optic coefficient/ ($\text{m} \cdot \text{V}^{-1}$)
LiNbO ₃	$n_o = 2.297$	$\varepsilon_{rx} = 84.6$	$\gamma_{13} = 10.0 \times 10^{-12}$
	$n_e = 2.208$	$\varepsilon_{ry} = 84.6$	$\gamma_{22} = 6.80 \times 10^{-12}$
		$\varepsilon_{rz} = 28.6$	$\gamma_{33} = 30.9 \times 10^{-12}$
BGO	$n_o = 2.1058$	$\varepsilon = 16$	$\gamma_{41} = 0.96 \times 10^{-12}$

首先建立由晶体材料和金属铜极板组成的三维几何模型,晶体长宽高分别为 16、6、5 mm,其几何中心为坐标原点(0,0,0),铜极板厚度为 0.3 mm。静电模块中电场与电压关系式为:

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (16)$$

$$\nabla g(\varepsilon_0 \mathbf{E}, \mathbf{E}) = \rho_v \quad (17)$$

式中: \mathbf{E} 为晶体内部电场强度; V 为外加电压大小; $\varepsilon_0, \varepsilon_r$ 分别为真空介电常数与晶体相对介电常数; ρ_v 为自由电荷密度。

电光晶体模型中,晶体内部电位移矢量 \mathbf{D} 与电场 \mathbf{E} 关系式为:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (18)$$

对建立的电光晶体几何模型进行网格剖分,如图 1 所示。

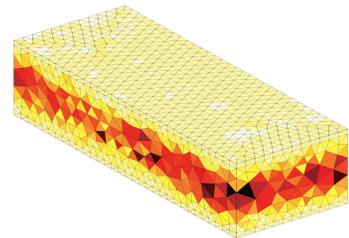


图 1 网格剖分后的晶体物理模型

Fig. 1 Crystal physical model after meshing

当金属上极板加载 $V_2 = 200 \text{ V}$ 直流电压,下极板接地时,晶体内部 y - z 截面电势分布如图 2 所示。

将表 1 各物理量参数代入晶体物理模型中,晶体内部电场强度方向如图 3 所示,晶体内部电场方向一致,且垂

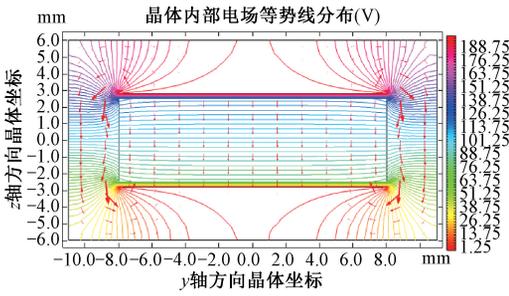


图 2 晶体 y - z 截面上电势分布

Fig. 2 Potential distribution on the y - z section of the crystal

直向下,作为横向电光调制晶体的 Pockels 效应仿真环境十分理想。

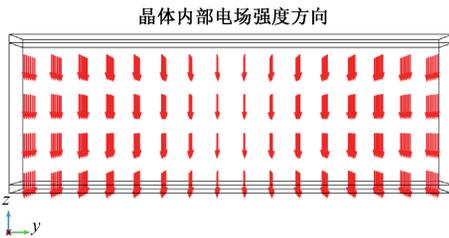


图 3 两晶体内部电场强度方向分布

Fig. 3 Direction distribution of electric field intensity inside two crystals

通过仿真知,两晶体内部 y - z 截面上电场场强大小分布如图 4 所示,晶体内部各自电场场强大小处处相等。但由于两晶体的相对介电常数不同,在加载相同电压时,其内部电场场强大小不同,其中 LiNbO_3 晶体内部电场大小 $E = 9\ 025.3\ \text{V/m}$, BGO 晶体内部电场大小 $E = 13\ 699\ \text{V/m}$ 。

2.2 Pockels 效应仿真与分析

当光学元器件几何尺寸达到波长 1 000 倍以后,光的波动性就不明显了,而 OVS 光学元器件的几何尺寸远远超过此值,对晶体的 Pockels 效应仿真可从微观入手^[20]。设入射光 $\lambda = 60\ \text{nm}$,微元电光晶体长宽高分别为 $1.2, 0.5, 0.5\ \mu\text{m}$,金属电极板厚度为 $0.03\ \mu\text{m}$ 。

设 BGO 晶体采用横向调制,外加电压方向与 z 轴平行,两入射光传播方向沿 y 轴,电矢量 E_1, E_2 方向分别沿 z, x 轴,则由电场定义电磁波表达式:

$$E_1 = \exp(-i \cdot \text{ewfd} \cdot k_0 \cdot y) (0, 0, 1) \quad (19)$$

$$E_2 = \exp(-i \cdot \text{ewfd} \cdot k_0 \cdot y) (1, 0, 0) \quad (20)$$

式中: $\text{ewfd} \cdot k_0$ 为电磁波在传输介质中的波矢。当金属上极板加载电压 $V_0 = 0$ 时,两电矢量分布如图 5 所示,此时晶体内部折射率表现为各向同性,电矢量 E_1, E_2 分别在晶体 y - z 截面和 y - x 截面上的偏振态保持一致性。

当 $V_0 = 0$ 时,晶体表现为各向同性,此时两电矢量

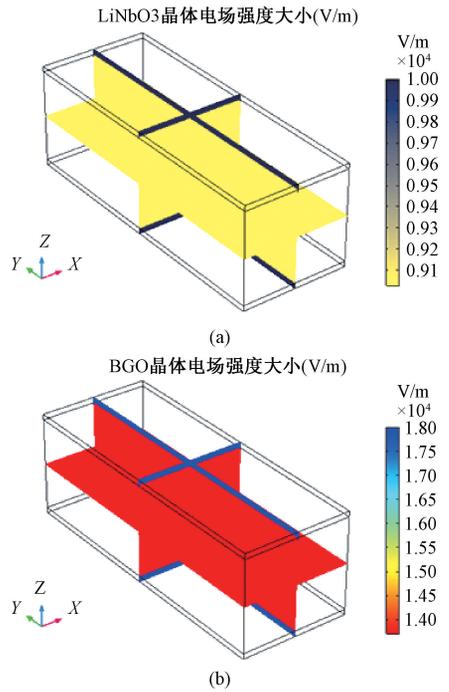


图 4 (a) LiNbO_3 晶体内部电场场强大小分布; (b) BGO 晶体内部电场场强大小分布

Fig. 4 (a) Strong and small distribution of electric field inside LiNbO_3 crystal; (b) Strong and small distribution of electric field inside BGO crystal

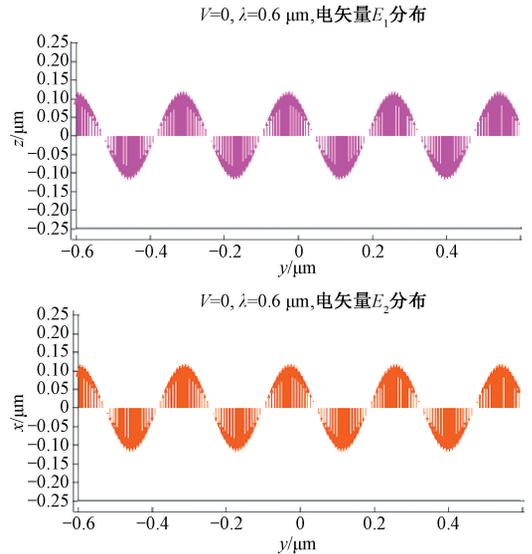


图 5 (a) y - z 截面上电矢量 E_1 偏振态; (b) y - x 截面上电矢量 E_2 偏振态

Fig. 5 (a) E_1 electric vector polarization state on y - z section; (b) E_2 electric vector polarization state on y - x section

E_1, E_2 的相位并未产生差值,两电矢量波形重合,如图 6 所示。

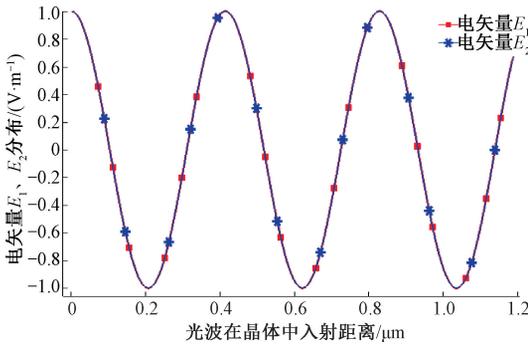


图6 $V_0=0$, 两电矢量分布

Fig. 6 $V_0=0$, two electric vector distribution

当晶体上有电场作用时,光波的电矢量在晶体内部不同偏振方向上所对应的晶体折射率不同,晶体将表现出各向异性, $V_{10}=1\ 000\ \text{V}$ 时,晶体内部两入射光波形分离,且随着两光波在晶体中传播距离的增加,两电矢量的相位差值不断增大,如图7所示。

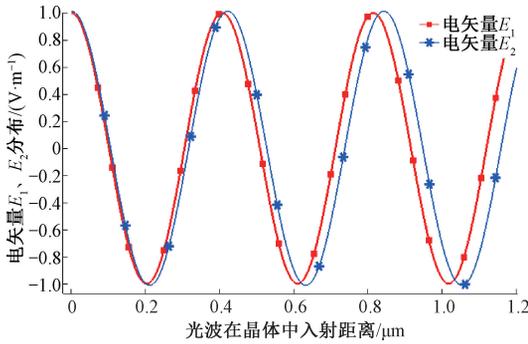


图7 $V_{10}=1\ 000\ \text{V}$, 两电矢量分布

Fig. 7 $V_{10}=1\ 000\ \text{V}$, two electric vector distribution

图8所示为入射光在离开晶体末端处外加电压与 Pockels 效应产生的相位差关系。当电压分别取 $V_2=200\ \text{V}$, $V_8=800\ \text{V}$, Pockels 效应产生的相位差 $\delta_2=0.045\ 087\ \text{rad}$, $\delta_{10}=0.180\ 256\ \text{rad}$ 。通过式(15)理论计算可得 Pockels 效应相位差分别为 $\bar{\delta}_2=0.045\ 060\ \text{rad}$, $\bar{\delta}_{10}=0.180\ 240\ \text{rad}$, 相差分别为 $\Delta\delta_2=0.000\ 027\ \text{rad}$, $\Delta\delta_{10}=0.000\ 016\ \text{rad}$, 误差在 10^{-5} 数量级内,验证了模型建立的正确性及仿真数据的有效性。

当电光晶体材料分别选择 BGO 和 LiNbO_3 时,晶体上外加电压相同时,随着光波在晶体内传播距离增加, Pockels 效应产生的相位差也增大;当传播距离相同时,随着外加电压的增大,相位差也增大,两两间呈现线性递增关系。BGO 与 LiNbO_3 晶体中产生的 Pockels 效应相位差与外加电压和光波在晶体中的入射距离关系如图9、10所示。经线性拟合,得到两晶体在 $0\sim 1\ 000\ \text{V}$ 电压值下相位差的残差均值,在 $V_{10}=1\ 000\ \text{V}$ 时,都取得最大残

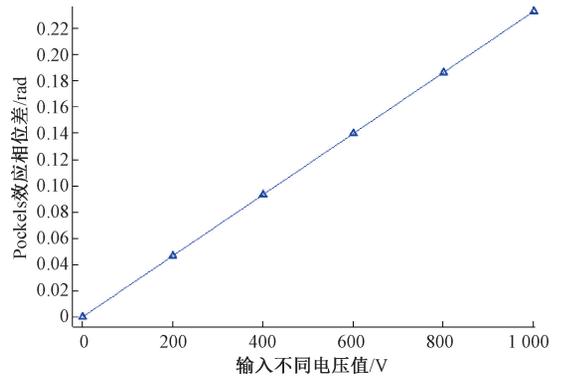


图8 相位差与电压关系

Fig. 8 Phase difference and voltage relationship

差均值,分别为 $v_{\text{BGO}}=6.98\times 10^{-4}$, $v_{\text{LiNbO}_3}=1.77\times 10^{-4}$, 由残差均值和比较晶体仿真结果图知, LiNbO_3 晶体的线性拟合度更好。

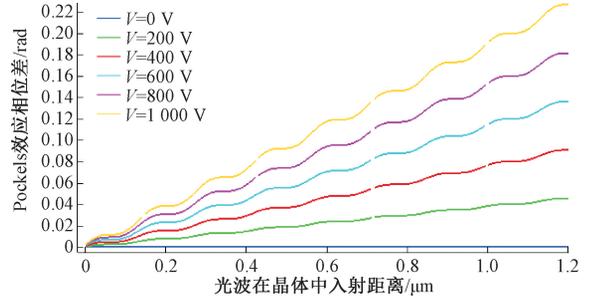


图9 BGO 晶体中 Pockels 效应相位差与外加电压和光波在晶体中的入射距离关系

Fig. 9 The relationship between the phase difference of the Pockels effect in the BGO crystal and the incident distance of the applied voltage and the light wave in the crystal

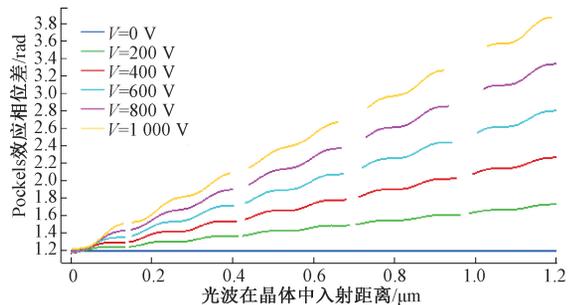


图10 LiNbO_3 中晶体 Pockels 效应相位差与外加电压和光波在晶体中的入射距离关系

Fig. 10 The relationship between the phase difference of the Pockels effect in the LiNbO_3 crystal and the incident distance of the applied voltage and the light wave in the crystal

3 实验

实验中 OVS 硬件部分包括 SLD 保偏光源, 光路组件、调制解调电路和电场敏感光路, 采用 0~1 000 V 直流电源作为 OVS 待测电压信号, 电光晶体分别采用 BGO 和 LiNbO_3 , 搭建的实验平台如图 11 所示。

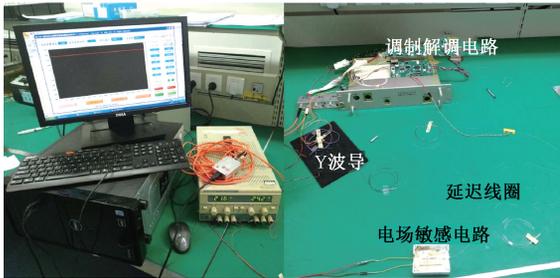


图 11 光学电压传感器实验平台

Fig. 11 Optical voltage sensor experimental platform

系统输入与输出电压有效值如表 2 所示。由表 2 可知, 当 LiNbO_3 作为 Pockels 效应的电光晶体时, 整体测量精度优于 BGO 晶体。由于随着输入电压的增大, 系统测量精度明显呈现增高, 这是由于在测量小电压时, 入射光在晶体内部产生的 Pockels 效应相位差很小, 导致此时的测量信噪比较小。

表 2 系统输入与输出电压有效值

Table 2 System input and output voltage RMS

输入电 压/V	BGO 电压输出 有效值/V	LiNbO_3 电压输 出有效值/V	BGO 测量 精度/%	LiNbO_3 测量 精度/%
200	206.3	205.8	3.15	2.9
400	412	405.6	3	1.4
600	587	609.6	2.17	1.6
800	818.4	805.5	2.3	0.68
1 000	988.6	1 005.2	1.14	0.52

4 结 论

本文利用麦克斯韦方程组将抽象的入射光用其电场矢量来表达, 为分析光在不同晶体中的 Pockels 效应提供了理论基础, 形象地展示了光在晶体传播过程中的光学波动性, 描述了晶体中外加电压与入射光波的作用机理。

通过对晶体 Pockels 效应的波动性光学仿真, 得到 LiNbO_3 晶体的 Pockels 效应线性拟合度更好, 这是由于 LiNbO_3 晶体相比 BGO 晶体具有更大的电光系数和更良好的光学均匀性; 同时, 在相同条件下 LiNbO_3 晶体的 Pockels 效应将产生更大的相位差值, 对外界电压信号更为敏感, 实验验证了在相同电压下 LiNbO_3 作为电光晶体时测量精度优于 BGO 晶体。当设计与制作更高灵敏度

的光学电压传感器时, 前者是较好的晶体材料选择。

参考文献

- [1] 王凤钧, 罗志会, 陈思, 等. 基于 CCD 解调的光纤光栅电压传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1725-1730.
WANG F J, LUO ZH H, CHEN S, et al. Fiber grating voltage sensor based on CCD demodulation, Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1725-1730.
- [2] 黄世龙, 刘建锋, 周健. 基于铌酸锂晶体的电场测量仪设计[J]. 电力电子技术, 2019, 53(11): 121-124.
HUANG SH L, LIU J F, ZHOU J. Design of electric field measuring instrument based on Lithium Niobate crystal [J]. Power Electronics, 2017, 53(11): 121-124.
- [3] 尚思飞. 光学电压互感器光路系统温度特性的理论研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018: 1-2.
SHANG S F. Theoretical study on the temperature characteristics of optical system of optical voltage transformer [D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018: 1-2.
- [4] 肖智宏, 于文斌, 张国庆, 等. 一种提高光学电压传感器温度稳定性的方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 106-112.
XIAO Z H, YU W B, ZHANG G Q, et al. A method to improve temperature stability of optical voltage sensor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 106-112.
- [5] 陈振宜, 王伟男, 陈娜, 等. 电场作用下掺锰石英光纤中线偏振光传输特性研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(18): 48-51.
CHEN ZH Y, WANG W N, CHEN N, et al. Linear polarized light transmission characteristics in Mn-doped silica fiber under electric field [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(18): 48-51.
- [6] 王德贺, 潘科, 张月金. 基于 pockels 电光效应的电场测量传感器研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(15): 109-110.
WANG D H, PAN K, ZHANG Y J. Study on electric field measurement based on pockels photoelectric effect [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(15): 109-110.
- [7] 苏世达, 万玲玉, 周煜, 等. 任意传播方向下铌酸锂晶体的横向电光效应研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2972-2977.
SU SH D, WANG L Y, ZHOU Y, et al. Transversal electro-optic effect of light propagating in arbitrary direction in LiNbO_3 [J]. Acta Optic Sinica, 2010, 30(10): 2972-2977.

- [8] 延云涛, 吴重庆, 刘岚岚, 等. 任意通光方向与加电压方向铌酸锂晶体的泡克尔斯效应[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(5): 33-41.
YAN Y T, WU C Q, LIU L L, et al. The pockels effect of Lithium niobate crystal in arbitrary light direction and voltage direction [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(5): 33-41.
- [9] 李霞, 李立京, 张朝阳. 一种具有互易光路的光学电压传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(S2): 293-296.
LI X, LI L J, ZHANG C Y. An optical voltage sensor with reciprocal light path [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2008, 22 (S 2): 293-296.
- [10] 李志全, 王志斌, 吴朝霞. 一种基于偏振调制的光纤电压传感器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(5): 492-494.
LI ZH Q, WANG ZH B, WU CH X. Study on optical voltage sensor based on polarization modulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(5): 492-494.
- [11] SHAMES P E, SUN P C, FAINMAN Y. Modeling of scattering and depolarizing electro-optic devices [J]. Applied Optics, 1998, 37(17): 3717-3725.
- [12] 郭守月, 周倩, 袁兴红, 等. 基于 Maxwell 电磁论的波动方程与光线轨迹方程[J]. 吉林大学学报(理学版), 2013, 51(6): 1151-1154.
GUO SH Y, ZHOU Q, YUAN X H, et al. Wave equation and equation of the ray track based on maxwell electromagnetic theory [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2013, 51(6): 1151-1154.
- [13] 晏子悦. 麦克斯韦方程组与电磁波传播规律[J]. 南方农机, 2018, 49(24): 201-202, 206.
YAN Z Y. Maxwell' s equations and the law of electromagnetic wave propagation [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2018, 49(24): 201-202, 206.
- [14] 石顺祥, 王学恩, 马琳. 物理光学与应用光学 [M]. 第3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014: 233-238.
SHI SH X, WANG X EN, MA L. Physical Optics and Applied Optics [M]. 3th ed. Xian: Xidian University Press, 2014: 4-6.
- [15] 曹则贤. 晶体几何系列之一晶体的点群与空间群[J]. 物理, 2019, 48(2): 113-116.
CAO Z X. The point group and space group of a crystal, one of the crystal geometry series [J]. Physical, 2019, 48(2): 113-116.
- [16] 周龙, 行鸿彦, 张志鹏, 等. 基于 Pockels 效应的大气电场测量研究 [J]. 电子测量技术, 2012, 35 (6): 17-24.
ZHOU L, XING H Y, ZHANG ZH P, et al. Study on atmospheric electric field measurement based on Pockels effect [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(6): 17-24.
- [17] LI K W, WANG S, HAN Z B, et al. Dispersion measurement of electro-optic coefficient γ_{22} of lithium niobate based on photoelastic modulation [J]. Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics III, 2020, 10(1): 395-395.
- [18] WILLIAMS P A, ROSE A H, LEE K S, et al. Optical, thermo-optic, electro-optic, and photoelastic properties of bismuth germanate ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) [J]. Applied Optics, 1996, 35(19): 3562-3569.
- [19] PETRIS A, HEIDARI BATENI S, MALONZO, et al. The r_{33} electro-optic coefficient of Er: LiNbO_3 [J]. Journal of Optics, 2010, 12(1): 1-5.
- [20] 贺鸿鹏. 基于 COMSOL 的 OCT 传感单元的多物理场研究与设计 [D]. 保定: 华北电力大学, 2014: 51-54.
HE H P. Multiphysics research and design of OCT sensing unit based on COMSOL [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014: 51-54.

作者简介



周扬, 中国人民解放军海军工程大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感检测技术方面的研究。

E-mail: 913748573@qq.com

Zhou Yang is a M. Sc. candidate at Naval Engineering University of People' s Liberation Army now. His main research interest includes the research of optical fiber sensing detection technology.