

文章编号: 1001-3806(2015)06-0769-07

## 电场干扰对光学电压互感器性能的影响

赵一男, 郭志忠\*

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了研究电场干扰对纵向调制结构光学电压互感器的影响, 采用张量分析方法, 从电光晶体相对逆介电张量入手, 进行了仿真分析和实验验证, 并根据光线分离实验结果, 设计了光学电场传感器, 传感器的幅值误差在  $\pm 2\%$  以内。结果表明, 外界干扰电场会导致电光晶体内两传输简正模发生光线分离, 使得两束偏振光在检偏器处不能进行有效干涉, 进而使得有效输出信号变小; 当干扰电压为 500V、光斑半径达到 0.2mm 时, 磷酸二氢钾晶体干涉效率引起的误差可以达到 0.3%; 而当干扰电场强度小于  $10^5$  V/m 时, 铌酸铋晶体的干涉效率接近于 1; 干扰电场引起的互感器误差不仅与干扰电场大小有关, 还与入射光束半径及传感晶体长度有关; 选择具有较大光束半径的光源及减小传感晶体长度可以有效地降低干扰电场的影响。该研究成果将为光学电压互感器的设计提供一定的指导。

**关键词:** 光学器件; 离散角; 干涉; 光强; 干涉效率; 光学电压互感器

**中图分类号:** TM451 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.008

## Effect of electric field interference on performance of optical voltage transducers

ZHAO Yanan, GUO Zhizhong

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to investigate effect of electric field interference on the properties of an optical voltage transducer with longitudinal modulation structure, using tensor analysis method and based on the relative inverse dielectric tensor of the electro-optic crystal, simulation analysis and experimental verification were carried out. According to experimental result of light separation, an optical electric field sensor was designed. The magnitude error of sensor was within  $\pm 2\%$ . The results show that light separation will occur in two transmitting normal modes of electro-optical crystal while electric field interference exists, which makes that the two polarized beams can not interfere effectively in the analyzer and which leads to a smaller output signal. The error caused by interference efficiency of KDP crystal can reached 0.3% when interference voltage was 500V and spot radius was 0.2mm. When interference field intensity is less than  $10^5$  V/m, interference efficiency of  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) crystal is close to 1. The transducer error caused by electric field interference has the relationship not only with the magnitude of electric interference but also with the beam radius and the length of sensing crystal. The influence of interference electric field can be reduced effectively by selecting the light source with larger beam radius and the sensing crystal with smaller length. The research can provide the guidance for the design of optical voltage transducers.

**Key words:** optical devices; discrete angle; interference; light intensity; efficiency of interference; optical voltage transducer

### 引言

无磁饱和、频带宽的优势, 使得光学电压互感器可以改善传统保护的性能及实现新继电保护和控制原理, 如实现暂态保护、降低保护的裕度系数等<sup>[1-2]</sup>。除此之外, 与传统电压互感器相比, 光学电压互感器还具有绝缘结构简单、动态范围大、瞬变响应快、抗干扰能

力强、不会产生铁磁谐振、体积小、重量轻、输出数字化等一系列优点<sup>[3-6]</sup>。因此, 从光学传感的概念诞生到现在的几十年间, 光学电压互感器得到了广泛关注与研究<sup>[7-10]</sup>, 并有一系列样机问世<sup>[11-12]</sup>。

尽管如此, 光学电压互感器距真正的实用化还有一段距离, 这是因为光学电压互感器测量精度低、长期运行的稳定性和可靠性差<sup>[13-14]</sup>, 这主要由两个原因引起: (1) 外界电场干扰, 外界电场干扰主要与互感器的结构有关, 特别是在横向调制结构的光学电压互感器中电场引起的干扰问题尤为严重; (2) 测量精度的温度漂移, 主要来源于传感光路及电子电路部分。

光学电压互感器用电场传感器有横向调制和纵向

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11004040)

作者简介: 赵一男(1984-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为光学技术及其在电压传感中的应用。

\* 通讯联系人。E-mail: zhizhongzz@sina.com.cn

收稿日期: 2014-08-12; 收到修改稿日期: 2014-09-18

调制之分,通常认为干扰电场只对横向调制的传感器有影响,而纵向调制结构的光学电场传感器无电场干扰问题<sup>[14]</sup>。

本文中通过对光电光晶体内传播过程进行分析,得出结论:干扰电场对纵向调制结构传感系统亦有影响,但是可以通过改变传感晶体长度或选择入射光源半径来减小干扰电场引起的误差。

### 1 电光晶体的逆介电张量

未施加电场前,铋酸铋晶体为各向同性体<sup>[15]</sup>,其相对逆介电张量  $B_0$  为:

$$B_0 = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\beta$  为主逆介电系数。

纵向调制结构晶体待测电场施加方向与通光方向平行(见图1)。

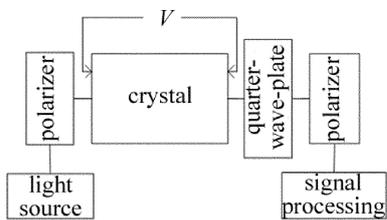


Fig. 1 Structure diagram of longitudinal modulator

设待测电场为  $[0 \ 0 \ E_3]^T$ , 外界干扰电场表示为  $[E_1 \ E_2 \ 0]^T$ , 则施加在晶体上总电场为  $[E_1 \ E_2 \ E_3]^T$ , 将其与铋酸铋晶体的电光系数矩阵相乘, 可以得到在原有主轴坐标系  $\langle xyz \rangle$  下, 施加电场后晶体的相对逆介电张量矩阵  $B_r$ :

$$B_r = \begin{bmatrix} \beta & \gamma_{41}E_3 & \gamma_{41}E_2 \\ \gamma_{41}E_3 & \beta & \gamma_{41}E_1 \\ \gamma_{41}E_2 & \gamma_{41}E_1 & \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\gamma_{41}$  为  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO) 晶体的电光系数。

按照纵向调制电压互感器的设计要求, 将其旋转到实验坐标系  $\langle XYZ \rangle$  下:

$$B_r = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta & \gamma_{41}E_3 & \gamma_{41}E_2 \\ \gamma_{41}E_3 & \beta & \gamma_{41}E_1 \\ \gamma_{41}E_2 & \gamma_{41}E_1 & \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \beta - \gamma_{41}E_3 & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2}(\gamma_{41}E_2 - \gamma_{41}E_1) \\ 0 & \beta + \gamma_{41}E_3 & \frac{\sqrt{2}}{2}(\gamma_{41}E_2 + \gamma_{41}E_1) \\ \frac{\sqrt{2}}{2}(\gamma_{41}E_2 - \gamma_{41}E_1) & \frac{\sqrt{2}}{2}(\gamma_{41}E_2 + \gamma_{41}E_1) & \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

分别用  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$  表示逆介电张量矩阵各元素, 则电场作用下电光晶体逆介电张量矩阵统一简化为:

$$B_r = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \beta_5 \\ 0 & \beta_2 & \beta_4 \\ \beta_5 & \beta_4 & \beta_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

以下针对电光晶体的分析均基于该矩阵。

### 2 偏振光在传感晶体内部的传播特性分析

#### 2.1 传播方程

晶体内部光传输满足的基本公式为:

$$n^2[\mathbf{E} - \mathbf{s}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{E})] - \mu c^2 \mathbf{D} = 0 \quad (5)$$

式中,  $n$  为波法线折射率;  $\mathbf{s}$  为波法线单位矢量;  $\mathbf{E}$  为光电场强度;  $\mu$  为磁导率;  $c$  为真空光速;  $\mathbf{D}$  为光电位移矢量。

对于非铁磁性物质  $\mu = \mu_0 \mu_r \approx \mu_0$  ( $\mu_0$  和  $\mu_r$  分别为真空磁导率和相对磁导率), 同时考虑到  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$  及晶体的物质方程:

$$\mathbf{E} = \beta_0 \mathbf{B}_r \mathbf{D} \quad (6)$$

式中,  $\beta_0$  为真空逆介电常数。

$$\text{令: } \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_2 s_1 & s_1 s_3 \\ s_2 s_1 & s_2^2 & s_2 s_3 \\ s_1 s_3 & s_2 s_3 & s_3^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{则: } \mathbf{s}(\mathbf{s} \cdot \mathbf{E}) = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_1 s_2 & s_1 s_3 \\ s_2 s_1 & s_2^2 & s_2 s_3 \\ s_3 s_1 & s_2 s_3 & s_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \mathbf{E} \quad (8)$$

因此, 可以将基本方程(5)式转换为如下形式:

$$[(\mathbf{I} - \mathbf{S}) \mathbf{B}_r - n^2 \mathbf{I}] \mathbf{D} = 0 \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为单位矢量。

#### 2.2 传感晶体内部光传播特性分析

由图1可知, 起偏器出射的偏振光经  $\lambda/4$  波片和准直器后沿  $Z$  轴方向垂直入射到晶体表面, 波法线单位矢量为  $\mathbf{s} = \langle 0, 0, 1 \rangle$ , 可知波法线在双轴晶体表面满足折射定律, 由于入射角为  $\pi/2$ , 因此偏振光入射到晶体后其波法线方向仍然沿  $Z$  轴方向, 而电位移矢量与

波法线方向垂直,即电位移矢量沿  $Z$  轴的分量  $D_z$  (由电磁场的边界条件可以得到同样结论)。将上述条件代入(8)式和(9)式,可以得到传感晶体内偏振光传播的本征方程:

$$\begin{bmatrix} \beta_1 - n^{-2} & 0 \\ 0 & \beta_1 - n^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

进而可以求得两个本征折射率:

$$\begin{cases} n_1^{-2} = \beta_1 \\ n_2^{-2} = \beta_2 \end{cases} \quad (11)$$

由(3)式可知:  $\beta_1 = \beta - \gamma_{41} E_3, \beta_2 = \beta + \gamma_{41} E_3$ 。

可见本征折射率仅与待测电场有关,与干扰电场无关,这与现有研究成果结论一致。

将本征折射率代入本征方程,可以得到两个正交的本征电位移矢量,写成 3 维形式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{D}' = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{D}'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

根据晶体的物质方程(6)式,可以得到两个本征电场强度:

$$\begin{cases} \mathbf{E}' = \beta_0 \mathbf{B}_t \mathbf{D}' = \beta_0 \begin{bmatrix} \beta_1 \\ 0 \\ \beta_5 \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}'' = \beta_0 \mathbf{B}_t \mathbf{D}'' = \beta_0 \begin{bmatrix} 0 \\ \beta_2 \\ \beta_4 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (13)$$

显然,  $\mathbf{E}'$  与  $\mathbf{E}''$  并不正交,  $\mathbf{E}'$  与  $\mathbf{E}''$  在  $Z$  轴的分量并不影响其相位的传播,但是却导致两束特征光光线方向发生分离(如图 2 所示),光线方向的分离导致两本征偏振光由晶体出射位置出现偏差,这种偏差可以用出射两束光的光束圆心距  $q$  表示。

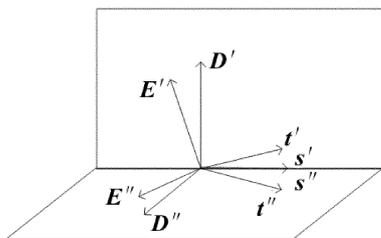


Fig. 2 Diagram of light separation inside crystal

要求出射点距离,应先求出离散角  $\alpha$ , 两束特征光的离散角分别为:

$$\begin{cases} \cos\alpha_1 = \frac{\mathbf{D}' \cdot \mathbf{E}'}{|\mathbf{D}'| |\mathbf{E}'|} = \frac{\beta_1}{\sqrt{\beta_1^2 + \beta_5^2}} \\ \cos\alpha_2 = \frac{\mathbf{D}'' \cdot \mathbf{E}''}{|\mathbf{D}''| |\mathbf{E}''|} = \frac{\beta_2}{\sqrt{\beta_2^2 + \beta_4^2}} \end{cases} \quad (14)$$

由于  $\beta_5, \beta_4 \ll \beta_1, \beta_2$ , 即离散角  $\alpha_1, \alpha_2$  很小,接近于 0。设晶体通光方向长度为  $L$ ,则可以计算光束圆心距为:

$$q = \sqrt{(L \tan\alpha_1)^2 + (L \tan\alpha_2)^2} = L \sqrt{\frac{\beta_5^2 \beta_2^2 + \beta_4^2 \beta_1^2}{\beta_1^2 \beta_2^2}} \quad (15)$$

### 2.3 广义琼斯矩阵

由于离散角的存在,从晶体出射的线偏振光已经由入射到晶体上的一束线偏振光变为两束光线偏振光。通常对于两束线偏振光应用两条光路进行分析,但是对于纵向调制传感晶体有其特殊性,仍可以用一个琼斯矩阵进行分析。

由电磁场的边界条件知道界面两侧电场强度切向分量是连续的(见图 3)。

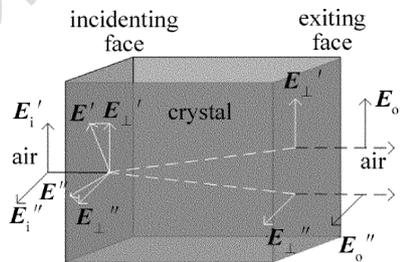


Fig. 3 Electric field distribution in the interface of light

则在入射面上,有:

$$\begin{cases} \mathbf{E}'_i = \mathbf{E}'_{\perp} \\ \mathbf{E}''_i = \mathbf{E}''_{\perp} \end{cases} \quad (16)$$

在出射面上,有:

$$\begin{cases} \mathbf{E}'_o = \mathbf{E}'_{\parallel} \\ \mathbf{E}''_o = \mathbf{E}''_{\parallel} \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{E}'_i, \mathbf{E}''_i$  为入射前偏振光沿  $\mathbf{D}'$  和  $\mathbf{D}''$  的分量;  $\mathbf{E}'_o, \mathbf{E}''_o$  为晶体内部两束本征光沿  $\mathbf{D}'$  和  $\mathbf{D}''$  的投影;  $\mathbf{E}'_{\parallel}, \mathbf{E}''_{\parallel}$  为入射后两束光电场强度,其方向分别与  $\mathbf{D}'$  和  $\mathbf{D}''$  平行。

则晶体前后电场矢量各分量的关系可以写为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}'_o = \mathbf{E}'_i \exp\left(j \frac{2\pi n_1 L}{\lambda}\right) \\ \mathbf{E}''_o = \mathbf{E}''_i \exp\left(j \frac{2\pi n_2 L}{\lambda}\right) \end{cases} \quad (18)$$

可见,晶体前后偏振光虽然由一束变成两束,当仅考虑其相位变化时,仍可以用琼斯矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_o' \\ \mathbf{E}_o'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\delta}{2}} & 0 \\ 0 & e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_i' \\ \mathbf{E}_i'' \end{bmatrix} = \mathbf{F}\mathbf{E}_i \quad (19)$$

式中,  $\delta$  为两本征偏振光的相位差,  $\delta = 2\pi(n_2 - n_1) \times \lambda^{-1}$ 。

由于  $\mathbf{E}_o'$  和  $\mathbf{E}_o''$  代表的是两束偏振光的电场强度, 因此将  $\mathbf{F}$  称为广义琼斯矩阵。

### 3 传感系统光路输出信号

#### 3.1 相干面积

设检偏器输出光束半径为  $R$ , 则在晶体出射面输出两光束为两个半径为  $R$  的光束, 其圆心相距  $q$ , 如图 4 所示。

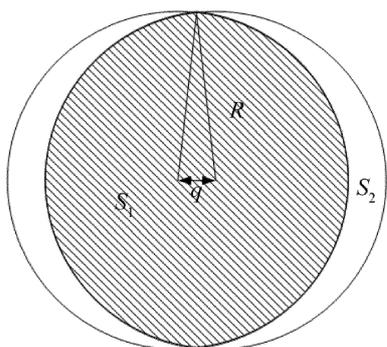


Fig. 4 Cross-section diagram of two output light beams

则在检偏器处, 只有相交部分的两束偏振光可以在检偏器透射方向上发生干涉, 非相交部分则单独沿光路进行传输, 并最终最光电探测器接收。用  $R$  表示光束半径,  $S, S_1, S_2$  分别表示单个光束、相交光束、非相交光束面积:

$$\begin{cases} S = \pi R^2 \\ S_1 = 2R^2 \arccos \frac{q}{2R} - q \sqrt{R^2 - \frac{q^2}{4}} \\ S_2 = 2\pi R^2 - 4R^2 \arccos \frac{q}{2R} + 2q \sqrt{R^2 - \frac{q^2}{4}} \end{cases} \quad (20)$$

#### 3.2 晶体输出线偏振光输出信号

下面对图 1 所示的传感光路进行分析, 由起偏器出射的偏振光电场琼斯矢量为:

$$\mathbf{E}_p = \frac{\sqrt{2}}{2} E \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

输出光强为:  $I_0 = E^2$ 。

传感晶体广义琼斯矩阵为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} e^{-j(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4})} & 0 \\ 0 & e^{j(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4})} \end{bmatrix} \quad (22)$$

晶体出射两束线偏振光电场强度沿  $\mathbf{D}'$ ,  $\mathbf{D}''$  方向的分量  $\mathbf{E}_{D'}$  和  $\mathbf{E}_{D''}$  为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_{D'} \\ \mathbf{E}_{D''} \end{bmatrix} = \mathbf{F}\mathbf{E}_p = \frac{\sqrt{2}}{2} E \begin{bmatrix} e^{-j(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4})} \\ e^{j(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4})} \end{bmatrix} \quad (23)$$

双光路检偏器的琼斯矩阵为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_\perp = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_\parallel = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (24)$$

式中, 下标  $\perp$  和  $\parallel$  分别表示垂直光路和平行光路。

可得双光路相干部分电场强度  $\mathbf{E}_{c,\perp}$  和  $\mathbf{E}_{c,\parallel}$  为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{c,\perp} = \frac{\sqrt{2}}{4} E \sin\left(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} -j \\ j \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{c,\parallel} = \frac{\sqrt{2}}{4} E \cos\left(\frac{\delta}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

相干部分光束光强  $I_{c,\perp}, I_{c,\parallel}$ :

$$\begin{cases} I_{c,\perp} = S_1 |\mathbf{E}_{c,\perp} \cdot \mathbf{E}_{c,\perp}^*| = \frac{S_1}{2} I_0 (1 - \sin\delta) \\ I_{c,\parallel} = S_1 |\mathbf{E}_{c,\parallel} \cdot \mathbf{E}_{c,\parallel}^*| = \frac{S_1}{2} I_0 (1 + \sin\delta) \end{cases} \quad (26)$$

非相干部分光束电场强度为:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{inc,\perp}' = \frac{\sqrt{2}}{4} E \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\delta}{2}} \\ -e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{inc,\perp}'' = \frac{\sqrt{2}}{4} E \begin{bmatrix} -e^{j\frac{\delta}{2}} \\ e^{j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{inc,\parallel}' = \frac{\sqrt{2}}{4} E \begin{bmatrix} e^{-j\frac{\delta}{2}} \\ e^{-j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{E}_{inc,\parallel}'' = \frac{\sqrt{2}}{4} E \begin{bmatrix} e^{j\frac{\delta}{2}} \\ e^{j\frac{\delta}{2}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (27)$$

非相干部分光束光强为:

$$\begin{cases} I_{inc,\perp} = \frac{S_2}{2} |\mathbf{E}_{inc,\perp}' \cdot \mathbf{E}_{inc,\perp}'^*| + \frac{S_2}{2} |\mathbf{E}_{inc,\perp}'' \cdot \mathbf{E}_{inc,\perp}''^*| = \frac{S_2}{4} I_0 \\ I_{inc,\parallel} = \frac{S_2}{2} |\mathbf{E}_{inc,\parallel}' \cdot \mathbf{E}_{inc,\parallel}'^*| + \frac{S_2}{2} |\mathbf{E}_{inc,\parallel}'' \cdot \mathbf{E}_{inc,\parallel}''^*| = \frac{S_2}{4} I_0 \end{cases} \quad (28)$$

从而可以得到双光路光电探测器探测到的总光强

$I_\perp$  和  $I_\parallel$  为:

$$\begin{cases} I_\perp = I_{c,\perp} + I_{inc,\perp} = \frac{I_0}{2} \left( S_1 + \frac{1}{2} S_2 - S_1 \sin\delta \right) \\ I_\parallel = I_{c,\parallel} + I_{inc,\parallel} = \frac{I_0}{2} \left( S_1 + \frac{1}{2} S_2 + S_1 \sin\delta \right) \end{cases} \quad (29)$$

传感系统输出信号  $u$  为:

$$u = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{//} + I_{\perp}} = \frac{S_1 \sin \delta}{S_1 + \frac{1}{2} S_2} \quad (30)$$

式中,  $S_1 + \frac{1}{2} S_2$  刚好等于一个光束面积  $\pi R^2$ , 于是传感系统输出信号变为:

$$u = \frac{\sin \delta}{\pi R^2} \left( 2R^2 \arccos \frac{q}{2R} - q \sqrt{R^2 - \frac{q^2}{4}} \right) \quad (31)$$

#### 4 仿真分析

为了分析光线分离对传感系统输出信号的影响, 定义干涉效率  $k$  为:

$$k = \frac{2R^2 \arccos \frac{q}{2R} - q \sqrt{R^2 - \frac{q^2}{4}}}{\pi R^2} \quad (32)$$

当  $k = 1$ , 表示没有发生光线分离, 晶体出射两束等效率线偏振光在检偏器处全部发生干涉; 当  $k = 0$ , 表示光线分离距离超过了光束直径, 晶体出射两束等效率线偏振光在检偏器处没有发生干涉。

图 5 中给出了干涉效率  $k$  随光束半径和光束圆心距变化的曲线图, 图 5a 中的曲线从左至右依次是光斑半径  $R$  为 0.05mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm 时干涉效率随圆心距的变化; 图 5b 中的曲线从上至下依次是光束圆心距  $q$  为 0.2 $\mu$ m, 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 4 $\mu$ m 时干涉效率随圆心距的变化。

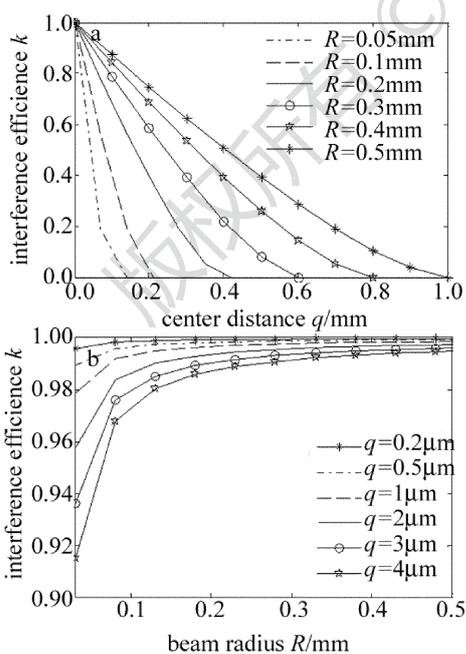


Fig. 5 Curve of interference efficiency

a—influence of center distance on interference efficiency b—influence of light beam radius on interference efficiency

从图 5a 可以看出, 当光束半径  $R = 0.05$ mm 时, 光

束圆心距达到 0.1 $\mu$ m 可以使得干涉效率为 0, 此时测量系统无法正确测量。从图 5b 可以看出, 光束圆心距达到 0.01 $\mu$ m, 在可用光束半径范围内, 由于干涉效率引起的误差小于 0.01%, 此时可以不必考虑光线分离引入的误差; 但是当光束圆心距达到 0.1 $\mu$ m 时, 当光束半径小于 0.15mm 时, 由于干涉效率引入的误差已经达到 0.05%, 此时必须考虑光线分离引入的误差。

#### 5 光线分离实验及分析

根据仿真结果, 选择了两种常用的电光晶体——磷酸二氢钾 (KDP) 和铌酸钪晶体来进行光线分离的实验。铌酸钪晶体通光方向长度为 10mm, 施加电压方向长度为 5mm, 固有介电常数为 16; 磷酸二氢钾晶体通光方向长度为 50mm, 施加电压方向长度为 20mm, 固有介电常数为  $\epsilon_{11} = 42, \epsilon_{33} = 21$ 。为了测量干涉效率, 对原有双光路检测进行了改进, 拿掉了  $\lambda/4$  波片, 此时两个光路检测到的光强分别为:

$$\begin{cases} I_{\perp} = I_{c,\perp} + I_{inc,\perp} = \frac{I_0}{2} \left( S_1 + \frac{1}{2} S_2 - S_1 \cos \delta \right) \\ I_{//} = I_{c,//} + I_{inc,//} = \frac{I_0}{2} \left( S_1 + \frac{1}{2} S_2 + S_1 \cos \delta \right) \end{cases} \quad (33)$$

双光路输出信号为:

$$u = k \cos \delta \quad (34)$$

实验装置如图 6 所示。

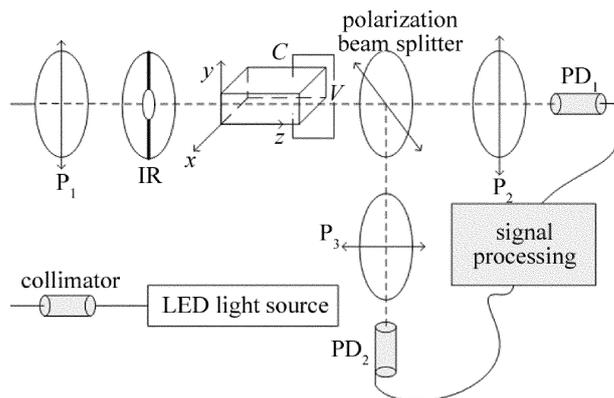


Fig. 6 Diagram of experimental device

图中 LED 光源输出光束中心波长为 635nm,  $P_1$  为起偏器, IR 为可变光阑,  $P_2$  和  $P_3$  分别为垂直光路检偏器和平行光路检偏器,  $PD_1$  和  $PD_2$  为相应的功率计。电压施加于原有主轴坐标系的  $y$  方向, 在通光方向未施加电压, 因此晶体内两束本征光产生的相位差为 0, 由 (34) 式知, 经过双光路信号处理后, 输出为:

$$u = k \cos 0 = k \quad (35)$$

实验中所加的电压为 500V, 对于铌酸钪晶体, 相当于干扰电场为  $E_2 = 5 \times 10^4$  V/m; 对于磷酸二氢钾晶体, 相当于干扰电场为  $E_2 = 1 \times 10^4$  V/m, 实验结果如图

7 和图 8 所示。从实验结果可以看出,在 500V 干扰电压下,锆酸铋晶体由干涉效率引起的误差几乎为 0,电压互感器在使用过程中,一般不会有超过  $10^5 \text{V/m}$  的干扰电场存在,因此锆酸铋晶体在使用过程中可以不用考虑光线分离对测量结果的影响;磷酸二氢钾晶体则不然,由于晶体尺寸较长、电光系数较大,因此由干涉效率引起的误差相对较大,特别是当入射光斑直径为 0.2mm 时,其幅值误差达到 0.3%,这对于测量来说是相当不利的。换句话说,使用磷酸二氢钾晶体作为光学电压传感器的传感材料,则要求有更好的电场屏蔽措施。

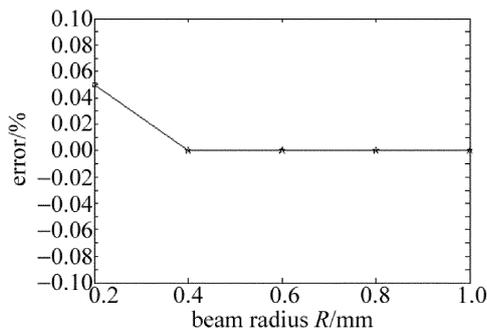


Fig. 7 Test results of BGO crystal

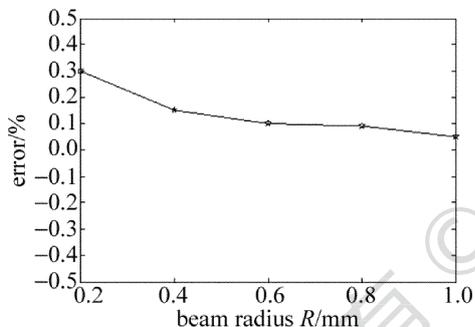


Fig. 8 Test results of KDP crystal

需要说明的是,实验中所得误差略大于计算误差,这是由于光波通过空气传播,因此外部光源引起部分实验误差。

通过实验可以看出,光源的选择对光学电压互感器的测量精度有影响,在实际应用过程中,不能选择光斑尺寸过小的光源,尽管小光斑直径有利于互感器的设计与实施;而且晶体的尺寸和电光系数也并非越大越好,通光方向长度越长、电光系数越大,互感器在响应度增加的基础上,也会增加干涉效率引入的误差。

根据光线分离实验结果,选择  $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 10\text{mm}$  的锆酸铋晶体作为传感材料,设计了光学电压传感器,该传感头光源采用安捷伦公司的 LED 光源,为了减小光斑半径引入的误差,增加了准直器,扩大了光纤耦合进晶体的光斑半径,在线性误差小于 0.1% (要求待测电压小于 1116.5V) 范围内,设置传感头额定电压为  $V_r = 450\text{V}$ ,传感部分实验结果如图 9 所示。

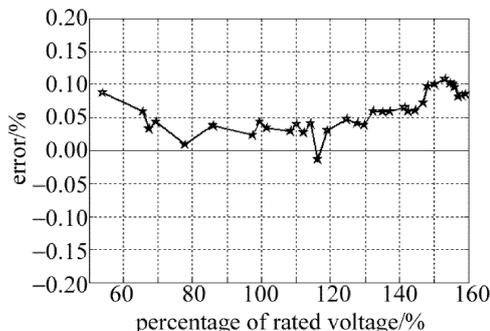


Fig. 9 Test results of sensor

## 6 结 论

提出了一种新的引起电压互感器测量误差的机制——光线分离机制:当存在外界干扰电场时,将使得传感晶体内传播的两束简正模发生光线分离,从而导致检偏器处偏振光干涉效率降低。

提出了干涉效率的概念,证明了光线分离通过干涉效率影响光学电压互感器的测量精度,同时证明了以往纵向调制结构仅与纵向调制电场有关的结论有失偏颇。

给出了干涉效率的计算公式,仿真分析了干涉效率激光器输出光束半径及光线分离度的关系。同时以常用传感晶体为例,对新的干扰机制进行了实验测试。测试结果表明:当干扰电压为 500V,光斑半径达到 0.2mm 时,磷酸二氢钾晶体干涉效率引起的误差可以达到 0.3%,而当干扰电场强度小于  $10^5 \text{V/m}$  时,锆酸铋晶体的干涉效率接近于 1;干扰电场引起的互感器误差不仅与干扰电场大小有关,还与入射光束半径及传感晶体长度有关;选择具有较大光束半径的光源及减小传感晶体长度可以有效地降低干扰电场的影响;根据光线分离实验结果,设计了光学电场传感器,传感器的测试结果显示幅值误差在  $\pm 0.2\%$  以内。

通常情况下,干涉效率引起的误差可以不用考虑,但是当光斑半径很小时,则必须考虑其对干涉效率的影响,选择较大的光斑半径是减小干涉效率引入误差的有效手段,最后设计了基于锆酸铋晶体的光学电压传感系统并进行了实验。

## 参 考 文 献

- [1] WEN H Y, LEI L X, ZHANG Ch Y, *et al.* Design and experimental research of pockels effect based optical voltage transducer[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1180-1184 (in Chinese).
- [2] LIU M, LI J Zh, LIU R, *et al.* Review on technology and application of electronic instrument transformer[J]. Transformer, 2013, 50(2): 24-28 (in Chinese).
- [3] YAN P L, ZHANG Y Y, CHEN X. Transient voltage protection of EHV transmission line based on OVT[J]. Electric Switchgear, 2008, 46(2): 36-38 (in Chinese).

- [4] HUO G Y, ZHANG G Q, YU W B, *et al.* Research on weak signal detection and imbalance of dual optical path of optical voltage transducer [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3):31-35 (in Chinese).
- [5] LUO Ch M, ZHANG G X, WANG P. Electronic type instrument transformer and it's present technical development manner[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(1):20-24 (in Chinese).
- [6] ROGERS A J. Optical measurement of current and voltage on power systems[J]. Electric Power Applications, 1979, 2(4):120-124.
- [7] SONG M, LI H R, CHEN X R, *et al.* Electro-optic effect of Light propagating in non-paraxial direction in  $\text{LiNbO}_3$  [J]. Laser Technology, 2014, 38(2):149-154 (in Chinese).
- [8] LI Ch Sh, CUI X, LI B Sh, *et al.* A review of optical potential Transducers[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2):40-43 (in Chinese).
- [9] WANG H X, ZHANG G Q, GUO Zh Zh, *et al.* Electronic transformer and its application in digital substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9):115-120 (in Chinese).
- [10] XIAO Zh H. Study and comment of the optical transformers in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12):10-13 (in Chinese).
- [11] ZHU Y, YE M Y, LIU J, *et al.* Design of 220kV combined optical voltage and current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2):34-36 (in Chinese).
- [12] WANG H X. Research of capacitor divider optical voltage transducer [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010:12-20 (in Chinese).
- [13] WEN H Y, LEI L X, ZHANG Ch Y, *et al.* The principle and research status of optical voltage transducer used in electric power system[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2013, 47(4):1-6 (in Chinese).
- [14] LI Y, ZHANG M, LI L J, *et al.* Analysis and restraint of crystal birefringence errors in optical voltage sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(4):181-191 (in Chinese).
- [15] LUO S A, YE M Y, XU Y. Stability research on optical fiber voltage transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12):15-19.