

改善 OVT 内电场分布的介质包裹法

黄奕钒,徐启峰,陈霖扬,谭巧,谢楠

(福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350116)

摘要:基于 Pockels 效应的光学电压传感器(Optical Voltage Transducer,OVT),运行中不可避免地存在震动、元器件连接的老化与热胀冷缩等问题,导致光学器件的相互位置产生偏移,进而影响电光晶体的内电场分布。文中以基于会聚偏光干涉原理的 110 kV 纵向调制的 OVT 为例,进行了仿真分析与实验研究,发现当入射光发生 $\pm 0.5^\circ$ 的偏移或电光晶体发生 $\pm 1^\circ$ 的偏移时,分别引入约 0.107%和 0.124%的电场积分误差。由于 OVT 必须满足 0.2%的准确度要求,上述影响不容忽视。为此提出了介质包裹法,将 Al_2O_3 陶瓷包裹在电光晶体外部,使电场积分误差分别降低至 0.001%和 0.003%。实验与应用的情况表明,介质包裹法简单、实用、有效。

关键词: 光学电压传感器; Pockels 效应; 内电场分布; 电场积分误差

中图分类号: TM451⁺.6 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0722004

Medium enwrapping method for improving internal electric field distribution of OVT

Huang Yifan, Xu Qifeng, Chen Linyang, Tan Qiao, Xie Nan

(College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: There are some inevitable problems such as vibration, instable connection between the optical elements, hot expansion and cold contraction in the practical application of optical voltage transducer (OVT) based on Pockels effect. These factors cause the deviation between the optical elements, which affects the internal electric field distribution in the electro-optic crystal. The OVT based on convergent polarized light interference was adopted as an example. The simulation analysis and experimental research show that when the incident light has a $\pm 0.5^\circ$ deviation or the BGO crystal has a $\pm 1^\circ$ deviation, it leads to electric field integral errors of about 0.107% or 0.124%, respectively. As the OVT needs to guarantee the accuracy of 0.2%, the effect induced by the electric field integral errors cannot be ignored. Therefore, a new method of medium enwrapping was proposed and the alumina ceramic was selected as the medium to wrap out of the electro-optic crystal. So that the maximum electric field integral errors can be reduced to 0.001% or 0.003% respectively. The experimental result and its applications show that the medium enwrapping method is simple, practical and effective.

Key words: optical voltage transducer (OVT); Pockels effect; internal electric field distribution; error of electric field integral

收稿日期:2016-11-10; 修订日期:2016-12-20

作者简介:黄奕钒(1993-),男,硕士生,主要从事光学电压互感器方面的研究。Email: yoiteonkey@163.com

导师简介:徐启峰(1959-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事智能电网测量新技术方面的研究。Email: ranger123098@163.com

0 引言

光学电压互感器 (Optical Voltage Transducer, OVT) 能有效地克服传统电磁式电压互感器的固有缺陷, 具有广阔的发展前景。其中, OVT 多基于 Pockels 电光效应, 按其调制方式分为横向调制和纵向调制^[1-9]。通常认为纵向调制的电场积分误差与电场分布无关, 外电场的干扰和极间电场分布的不均匀不会影响测量结果^[10-11]。但是在实际应用中, 光路因震动、器件之间连接的老化、热胀冷缩等因素, 使光学器件的相互位置产生偏移, 造成测量误差^[12]。参考文献[2]提出了一种多片晶体叠层的纵向调制 OVT, 颇具创意, 在 OVT 的发展历程中有一定的代表性。其特点是利用 8 片晶体薄片叠加将晶体的半波电压从单片的 33.26 kV 提高到 702 kV, 提高了测量灵敏度, 扩大了测量范围。但是当一片或多片晶体之间发生微小位移, 或光的入射角度发生微小偏移时, 将严重影响测量准确度^[13]; 参考文献[10]指出, 当光路发生位置偏离和角度偏离时, 测量误差可以达到 1.4%; 参考文献[13]提出了石英介质分层法, 可以改善电光晶体的内电场分布, 但是无法改善由光学器件相互位置的偏移产生的误差。

为此, 文中基于课题组设计的一种基于会聚偏光干涉原理的 110 kV 纵向调制 OVT 样机, 分析了当发生光路偏移和晶体偏移时, 晶体的内电场积分电压的变化情况及其产生的误差影响, 提出了对 BGO 晶体进行介质包裹的方法。通过仿真计算出该方法能够有效地改善晶体内电场的均匀性, 显著地减小积分电压误差。搭建了实际测量光路, 并进行了实验分析和结果验证。实验结果表明, 介质包裹法对 BGO 晶体的电场分布具有很好的改善效果。

1 基于会聚偏光干涉原理的 OVT

基于会聚偏光干涉原理的 OVT, 是将晶体电光相位延迟转换为光斑图像的旋转, 通过测量光斑旋转角获得相位延迟, 实现了电压的直接线性测量^[8-9]。

由于该测量方法不受晶体半波电压的限制, OVT 采用了单 BGO 晶体, 双石英晶体分压的结构。具体尺寸如下: 绝缘子高度 1 500 mm, 支柱厚度 10 mm; 下环氧树脂绝缘支柱高度 575 mm; 高低压电极为中

间开孔的半球电极, 孔径为 10 mm, 电极外半径 30 mm, 厚度 6 mm, 电极间绝缘支撑厚度 20 mm, 电极间距 322 mm; 内充 0.1 MPa SF₆ 气体。其中传感头为上下两根长 100 mm, 厚度为 10 mm 的石英晶体, 中间粘接长 50 mm, 直径为 10 mm 的 BGO 晶体, 如图 1 所示。

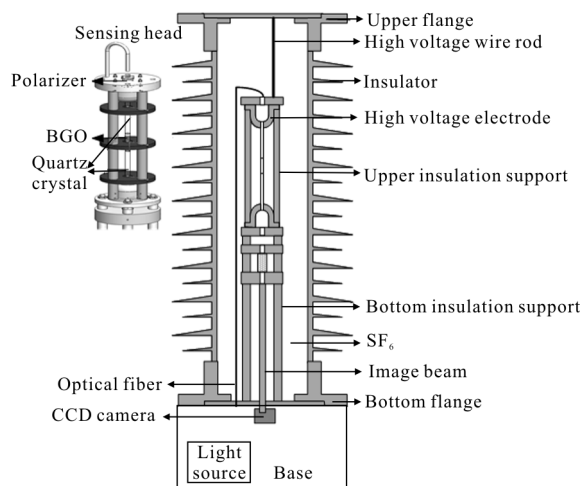


图 1 基于会聚偏光干涉原理的 OVT 结构

Fig.1 Structure of the optical voltage transducer based on convergent polarized light interference

BGO 晶体的电光相位延迟角 φ 与光斑旋转角 θ 满足线性关系:

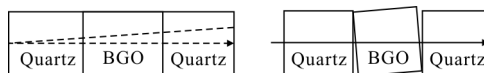
$$\varphi = 4\theta \quad (1)$$

通过测量光斑的旋转角 θ , 得到电光相位延迟角 φ , 进一步计算得到施加在 BGO 晶体上的电压 U 为^[14]:

$$U = \frac{\lambda\varphi}{2\pi\gamma_{41}n_0^3} \quad (2)$$

式中: n_0 为晶体初始折射率; λ 为光源的中心波长; γ_{41} 为晶体电光系数。

光路偏移或者晶体偏移使得通光路径发生改变 (如图 2 所示), 导致电场分布不均匀。入射光在 BGO 晶体内感应到不均匀的电场强度, 产生积分电压误差 ΔU 。由 φ 与 U 和 θ 的正比关系, 由 ΔU 产生的测量误差为 $\Delta\theta$ ^[15]。



(a) 光路偏移

(b) BGO 晶体偏移

(a) Optical path deviation (b) BGO crystal deviation

图 2 入射光和 BGO 晶体偏移示意图

Fig.2 Schematic diagram of the deviation of the input light and BGO crystal

2 内电场分布的误差分析

对于工频交流电压,晶体内部电场属于低频似稳态场,通常以静电场进行仿真分析。在高压电极施加 $110/\sqrt{3}$ kV 额定电压,通过 ANSYS Maxwell 软件仿真得出传感头部分 BGO 晶体的等位线分布,如图 3 所示。由于 BGO 晶体($\epsilon=16$)、石英晶体($\epsilon=3.8$)和 SF₆($\epsilon=1.002$)的介电常数相差较大,导致 BGO 晶体内电场等位线分布稀疏,石英晶体内分布密集,而 BGO 晶体、石英晶体和 SF₆ 接触面的电场等位线出现弯曲现象,其晶体内电场分布严重不均匀。

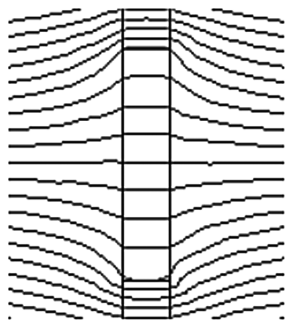


图 3 传感头中 BGO 晶体部分等位线分布

Fig.3 Equipotential line distribution of BGO crystal in the sensing head

2.1 光路偏移对测量的影响

以理想通光路径为基准,入射光向左偏移为负,向右偏移为正,选取角度偏移量为 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$,计算 BGO 晶体内沿不同通光路径的电场积分电压误差和电场不均匀系数,如图 4 所示。为了描述 BGO 晶体内电场的均匀性,引入电场不均匀系数 f ,其表达式为:

$$f = E_{\max} / E_{\text{av}} \quad (3)$$

$$E_{\text{av}} = U / l \quad (4)$$

式中: E_{\max} 为通光路径上的最大电场强度; E_{av} 为通光路径上的平均电场强度; U 是通光路径上的积分电压; l 是 BGO 晶体内通光路径的长度。

由图 4 可知,在入射光不发生偏移时, BGO 晶体内理想通光路径上电场不均匀系数 $f=1.064$ 。当入射光发生角度偏移 0.5° 时,电场不均匀系数 $f=1.065$,最大积分电压误差为 0.107%,对 0.2% 的准确度要求而言,其影响已不容忽视。

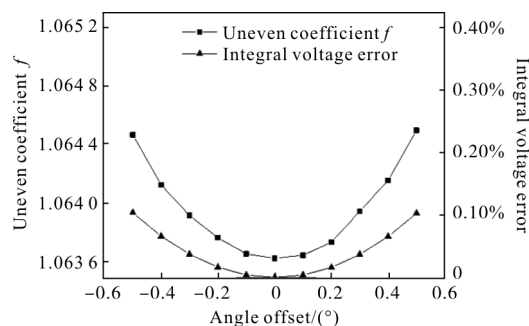


图 4 f 与电压积分误差随入射光角度偏移的变化情况

Fig.4 Changes of f and integral voltage error with different deviation angles of the incident light

2.2 晶体偏移对测量的影响

以理想通光路径为中轴线,如图 2(b)所示, BGO 晶体向左偏移为负,向右偏移为正,选取角度偏移量为 $\pm(0.6^\circ \sim 1^\circ)$,分析 BGO 晶体偏移对通光路径积分电压造成的影响,如图 5 所示。当 BGO 晶体发生左偏或右偏时,产生的积分电压误差相近,产生的最大电场积分电压误差为 0.124%,同样不容忽视。因此,文中针对改善纵向调制 OVT 电光晶体内电场的均匀性、减小电光晶体通光路径上的积分电压误差,提出了介质包裹法。

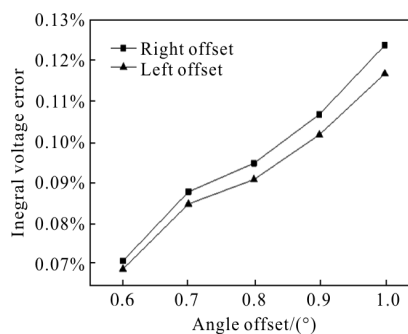


图 5 积分电压误差随 BGO 晶体相对偏移的变化情况

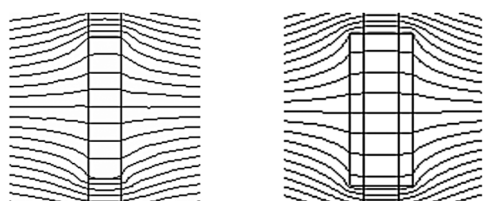
Fig.5 Changes of integral voltage errors with different deviation angles of BGO crystal

3 改善内电场分布的方法

3.1 介质包裹法的提出

造成 BGO 晶体内电场分布不均匀的主要原因是其介电常数远大于 SF₆ 气体的介电常数。BGO 晶体中的电场强度小,电势下降慢,而其外部的电场强度大,电势下降快,导致晶体边缘电场等位线严重扭曲。文中提出在 BGO 晶体外围包裹介电常数与其相近的材料,以避免晶体与 SF₆ 气体的直接接触,使

晶体内电场的分布得到改善。图 6 是附加包裹介质前后 BGO 晶体内等位线对比图,由图可见,晶体边缘处的等位线弯曲现象转移至不具有电光效应的包裹介质上,使晶体内以及边角处的等位线分布变得均匀。



(a) 包裹介质前 (b) 包裹介质后
(a) Before enwrapping medium (b) After enwrapping medium

图 6 附加包裹介质前后 BGO 晶体内等位线分布对比

Fig.6 Comparison of equipotential line distribution in the BGO crystal before and after enwrapping medium

3.2 介质包裹法的优化

3.2.1 晶体形状的选择

不同形状的 BGO 晶体对电场不均匀程度的影响不同。文中对图 7 所示的长方体晶体 (10 mm×10 mm×50 mm)、圆柱体晶体 (Φ10×50 mm³) 和外切圆为 (Φ10×50 mm³) 的八边形晶体进行对比分析。

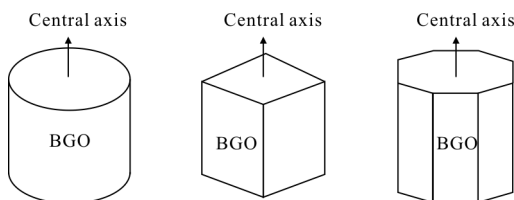


图 7 三种不同 BGO 晶体形状示意图

Fig.7 Schematic diagram of three different shapes of BGO crystal

利用有限元仿真软件对图 7 所示的三种 BGO 晶体形状进行分析,得到中轴线上的最大电场强度 E_{max} 、积分电压值 U 以及电场不均匀系数 f ,如表 1 所示。在三种不同形状下,通光路径上的最大电场强度值相差不大,中轴线上的积分电压也相近,但采用圆形柱状晶体时,电场分布的均匀性最好。

表 1 三种 BGO 形状的传感头仿真计算结果

Tab.1 Simulation results of sensing heads with three different BGO shapes

Cross section of columnar crystal	$E_{max}/V \cdot m^{-1}$	U/V	f
Square	108 495.9	4 996.5	1.085 7
Circular	105 788.1	4 971.6	1.063 9
Octagon	111 494.2	5 141.9	1.084 2

3.2.2 包裹材料的选择

介质包裹法不要求材料的透光性,主要考虑介电常数、绝缘性能、温度特性、材料成本等因素,因此选取了普通玻璃、Y₂O₃ 陶瓷、Al₂O₃ 陶瓷三种材料进行仿真对比^[16-20],分别计算通光路径上的不均匀系数、光路偏移和晶体偏移引起的最大积分电压误差。先暂定包裹材料只包裹在 BGO 晶体部分,壁厚为 5 mm,结构如图 8 所示。

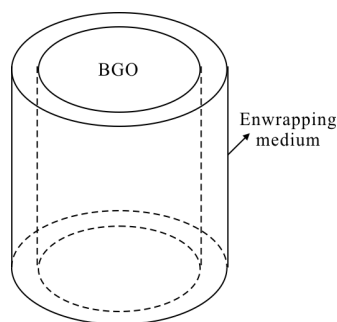


图 8 介质包裹法结构示意图

Fig.8 Structure diagram of enwrapping medium method

仿真得到包裹不同介质后,光路偏移和 BGO 晶体偏移造成的最大积分电压误差见表 2,选择 Al₂O₃ 陶瓷(介电常数为 10)作为包裹材料的效果最佳。在入射光不发生偏移时,BGO 晶体理想通光路径上电场不均匀系数为 1.036。当入射光发生 -0.5°~0.5° 偏移时,最大积分电压误差由 0.107% 减小到 0.013%;当 BGO 晶体发生 ±(0.6°~1°) 偏移时,最大积分电压误差由 0.124% 减小到 0.054%。

表 2 附加不同包裹介质的最大积分电压误差

Tab.2 Maximum integral voltage errors after enwrapping different kinds of medium

Enwrapping medium	ϵ	f	Errors of optical path offset	Errors of crystal deviation
Nothing	-	1.065	0.107%	0.224%
Normal glass	5.5	1.065	0.047%	0.078%
Al ₂ O ₃	10	1.036	0.013%	0.054%
Y ₂ O ₃	13	1.048	0.052%	0.068%

3.2.3 包裹范围的确定

为了确定包裹范围的影响,文中选取另外两种情况进行对比分析,即 Al₂O₃ 陶瓷包裹部分石英晶体和 BGO 晶体、包裹全部的石英晶体和 BGO 晶体,二维结构示意图与分析结果分别如图 9 与表 3 所示。

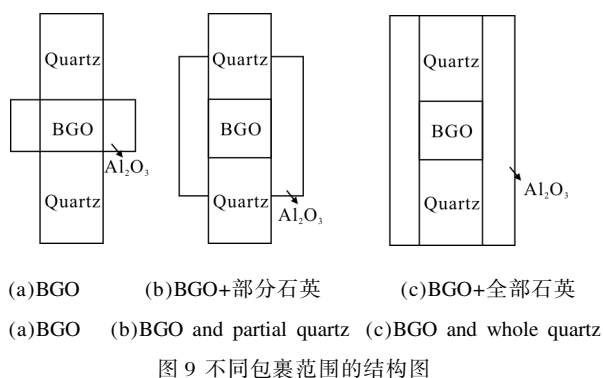


图 9 不同包裹范围的结构图

Fig.9 Structure diagram of different ranges of enwrapping

表 3 不同包裹范围的最大积分电压误差

Tab.3 Maximum integral voltage errors with different enwrapping ranges

Scope of enwrapping	f	Errors of optical path offset	Errors of crystal deviation
BGO	1.036	0.013%	0.054%
BGO and partial quartz	1.082	0.247%	0.231%
BGO and whole quartz	1.077	0.245%	0.237%

由表 3 可知,采用图 9(b)、(c)所示的两种包裹结构时,BGO 晶体内的不均匀系数仍然比较大,光路与 BGO 晶体偏移时的最大积分电压误差均大于 0.2%。因此图 9(a)的结构最佳。

3.2.4 包裹厚度的选择

仿真得到不同包裹厚度的最大电场积分电压误差的变化情况见表 4。在 1~8 mm 的范围内,4 mm 厚度的效果最好。

表 4 不同包裹厚度的最大积分电压误差

Tab.4 Maximum integral voltage errors with different enwrapping thickness

Thickness of the enwrapping/mm	Errors of optical path offset	Errors of crystal deviation
1	0.066%	0.128%
2	0.039%	0.116%
3	0.018%	0.049%
4	0.001%	0.003%
5	0.013%	0.054%
6	0.026%	0.093%
7	0.036%	0.126%
8	0.045%	0.131%

对包裹厚度在 3.5~4.5 mm 范围内进行细化仿真分析,结果如图 10 所示。

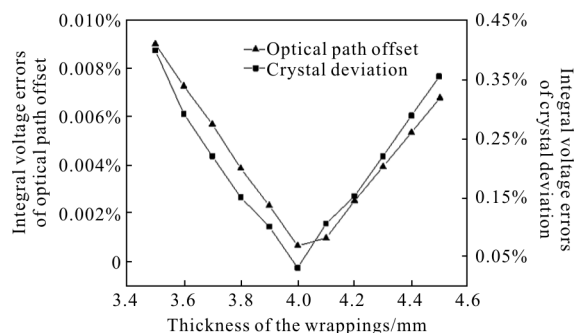


图 10 包裹厚度细化分析结果

Fig.10 Zoom analysis results of the thickness of enwrapping

由上图可见,厚度选择 4 mm 最佳,由光路偏移和 BGO 晶体偏移引起的最大积分电压误差分别减小到 0.001%和 0.003%,已可以忽略不计。

4 实验结果

4.1 实验装置

实验装置如图 11 所示。光源为 Thorlabs 生产的紧凑型激光光源(CLD1015),波长为 980 nm;经起偏器得到线偏振光,起偏方向为垂直方向;通过四倍扩束镜扩束后,使光束完全覆盖电光晶体的通光面;四分之一波片将电光相位延迟增加 90°;BGO 晶体的尺寸为 $\Phi 10 \times 50 \text{ mm}^3$,半波电压为 51.5 kV;石英晶体的尺寸为 $\Phi 10 \times 100 \text{ mm}^3$;Al₂O₃ 陶瓷的长度为 50 mm,内径 10 mm,外径 18 mm,如图 12 所示;检偏器将电光相位延迟解调后,利用 Thorlabs 生产的 CCD 光束质量分析仪测量出射光斑的光强分布。

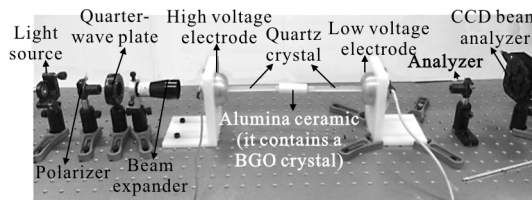


图 11 实验装置示意图

Fig.11 Schematic diagram of experimental device

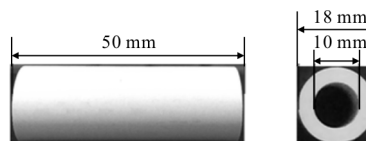


图 12 Al₂O₃ 陶瓷示意图

Fig.12 Schematic diagram of alumina ceramics

根据 OVT 偏光干涉检测原理, 输出光强 I 与电光相位延迟角 φ 的关系近似为:

$$I=I_0(1+\varphi)/2 \quad (5)$$

式中: I_0 为输入光强。

由第 1 节的分析可知, I 与 BGO 晶体上所加的电压 U 的关系式为:

$$I=I_0(1+KU)/2 \quad (6)$$

式中: $K=2\pi n_0^3 \gamma_{41}/\lambda$ 。

当光路或 BGO 晶体发生偏移时, 产生积分电压误差 ΔU , 输出光强变化量 ΔI 与 ΔU 的关系可表示为:

$$\Delta I = \frac{I_0(1+KU_2)}{2} - \frac{I_0(1+KU_1)}{2} = \frac{I_0 K \Delta U}{2} \quad (7)$$

式中: U_1 为发生偏移前施加在 BGO 晶体上的电压; U_2 为发生偏移后施加的电压。可见 ΔI 与 ΔU 成正比, 通过实验手段检测包裹介质前后出射光强分布的变化, 可以验证方法的有效性。

为了定量分析光强分布的变化, 引入标准差来描述光强图像数据的离散程度。标准差小则离散程度小、光强分布均匀、积分电压误差小。标准差的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (8)$$

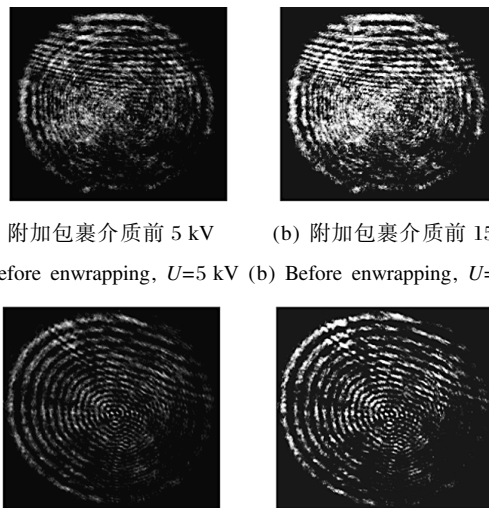
式中: N 为光强图像矩阵中元素总数; x_i 为光强图像矩阵中第 i 个元素; μ 为光强图像矩阵中各元素的平均值。

受实验条件的限制, 实验中的气体环境为空气, 与前文分析时的气体环境为 SF_6 不一致。但是, 两种气体的介电常数相近, 分别为 1.001 和 1.002, 且都与 BGO 晶体的介电常数相差较大, 符合文中提出的造成晶体内电场分布不均匀的主要原因是晶体介电常数与绝缘气体介电常数相差较大的前提。因此, 采用空气替代 SF_6 作为气体环境不影响实验结果的可信性。

4.2 实验过程与结果

实验前对光路进行调试, 保证光束垂直入射至各个光学器件, 并确保通过晶体的出射光斑被光束分析仪完全接收。给高压电极施加 0 V~15 kV 的直流电压, 步长 1 kV, 观察并记录通光面上的光强分布。利用光束分析仪采集 5 kV 和 15 kV 时包裹介质

前后出射光的光强分布, 如图 13 所示。利用 MATLAB 软件对获取的光强图像进行灰度处理, 将所得光强图像转换为矩阵形式进行标准差计算。



(a) 附加包裹介质前 5 kV (b) 附加包裹介质前 15 kV
(a) Before wrapping, $U=5$ kV (b) Before wrapping, $U=15$ kV

(c) 附加包裹介质后 5 kV (d) 附加包裹介质后 15 kV
(c) After wrapping, $U=5$ kV (d) After wrapping, $U=15$ kV

图 13 附加包裹介质前后 5 kV 和 15 kV 下通光面的光强分布

Fig.13 Light intensity distribution of the light pass surface under the voltage of 5 kV and 15 kV before and after wrapping medium

通过 MATLAB 计算得到电压在 5 kV 和 15 kV 时, 包裹介质前的标准差分别为 7.501 6 和 8.229 8, 包裹介质后的标准差分别为 6.174 4 和 6.428 2。可见包裹介质后, 图像离散程度明显减小, 光强分布均匀性得到提高, 因此 BGO 晶体内电场的分布和积分电压误差得到改善。实验与仿真结果一致。

5 结 论

文中通过对基于会聚偏光干涉原理的 110 kV 纵向调制 OVT 的仿真与实验分析, 发现当光路或 BGO 晶体有微小偏移时, 晶体内电场分布的不均匀导致较大的电场积分误差, 使得 OVT 难以保证 0.2% 的准确度要求。为此, 文中提出采用介质包裹法来改善电光晶体的内电场分布。并经过优化设计, 确定最终方案为选择圆柱体 BGO 晶体, 包裹介质 Al_2O_3 陶瓷的厚度为 4 mm, 且介质的包裹范围为仅包裹 BGO 晶体部分。优化后的方案可以将 OVT 中因光路偏移引起的积分电压误差从 0.107% 降低到 0.001%, 和因 BGO 晶体偏移引起的积分电压误

差从 0.124%降低到 0.003%，改善效果十分明显。且通过实验验证了方法的可行性，实验与仿真结果一致。

参考文献:

- [1] Guo Zhizhong. Review of electronic instrument transformers [J]. *Power System Protection and Control*, 2008, 36(15): 1-5. (in Chinese)
郭志忠. 电子式互感器评述 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 1-5.
- [2] Josemir Coelho Santos, Cengiz Taplamacioglu M, Kunihiro Hidaka. Pockels high-voltage measurement system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(1): 8-13.
- [3] Liu Feng, Bi Weihong, Wang Jian. Structure of sensor head for optical high voltage transducer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(5): 43-48. (in Chinese)
刘丰, 毕卫红, 王健. 光学高压电压互感器传感头结构的研究[J]. 电工技术学报, 2008, 23(5): 43-48.
- [4] Xiao Zhihong. Study and comment of the optical transformers in power system [J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(12): 148-154. (in Chinese)
肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 148-154.
- [5] Xiao Zhihong, Yu Wenbin, Zhang Guoqing, et al. A method to improve temperature stability of optical voltage sensor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(4): 106-112. (in Chinese)
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.
- [6] Chen Jinling, Xie Latang, Song Jianhe, et al. Recent research on optical voltage transducer [J]. *China Measurement Technology*, 2004, 30(3): 18-20. (in Chinese)
陈金令, 谢腊堂, 宋建和, 等. 光学电压互感器研究现状 [J]. 中国测试技术, 2004, 30(3): 18-20.
- [7] Zhang Mingming, Li Hongbin, Liu Yanbing, et al. Optical voltage transformer based on longitudinal Pockels effects[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(6): 58-59. (in Chinese)
张明明, 李红斌, 刘延冰, 等. 基于纵向 Pockels 效应的光学电压互感器[J]. 传感器技术, 2005, 24(6): 58-59.
- [8] Huang Lisheng, Ma Shanjun, Xu Canhua, et al. Polarization interference measuring mode of optical voltage transducer (part one) limitation analysis of polarization interference measuring mode [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(2): 97-101. (in Chinese)
黄荔生, 马善军, 许灿华, 等. 光学电压互感器偏光干涉测量模式(一)常见偏光干涉测量模式局限性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 97-101.
- [9] Huang Lisheng, Ma Shanjun, Xu Canhua, et al. Polarization interference measuring mode of optical voltage transducer (part two) optical voltage transducer based on convergent polarized light interference[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(3): 166-170. (in Chinese)
黄荔生, 马善军, 许灿华, 等. 光学电压互感器偏光干涉测量模式(二)基于会聚偏光干涉原理的光学电压互感器[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 166-170.
- [10] Xiao Yueyu. Influence of the electric field distribution on the optical voltage transformer [J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(5): 37-40. (in Chinese)
肖悦悦. 光学电压互感器的电场分布对测量的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 37-40.
- [11] Qian Siyuan, Cai Zhencai, Xu Qifeng. Internal electric field structure design and optimization of optical voltage transformer [J]. *Guangdong Electric Power*, 2012, 25(12): 66-71. (in Chinese)
钱思源, 蔡振才, 徐启峰. 光学电压互感器内电场结构与优化[J]. 广东电力, 2012, 25(12): 66-71.
- [12] Xiao Xia. Stability analysis and reliability research on optical voltage transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)
肖霞. 光学电压互感器的稳定性分析及可靠性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [13] Chen Linyang, Xu Qifeng, Xie Nan, et al. A method for improving the electric field distribution of longitudinal modulation OVT[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(4): 158-162. (in Chinese)
陈霖扬, 徐启峰, 谢楠, 等. 改善纵向调制 OVT 内电场分布的新方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 158-162.
- [14] Wang Xiang. Optical Crystallography [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2014. (in Chinese)
汪相. 晶体光学[M]. 南京: 南京大学出版社, 2014.
- [15] Xie Rongfang, Xu Qifeng, Xie Nan, et al. A method for improving the electric field distribution of OVT's electro-optical crystal [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(6): 91-95. (in Chinese)
谢榕芳, 徐启峰, 谢楠, 等. 一种改善光学电压互感器电光晶体内电场分布的方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(6): 91-95.

- [16] Niu Jinye, Sun Chenggong. Recent progress and application prospect of transparent ceramics [J]. *Advanced Ceramics*, 2007, 28(4): 19–24. (in Chinese)
牛金叶, 孙成功. 透明陶瓷的研究现状及应用进展[J]. 现代技术陶瓷, 2007, 28(4): 19–24.
- [17] Lu Bin, Zhao Guijie. Research situation and prospect of transparent ceramics[J]. *Materials Review*, 2005, 19(8): 20–24. (in Chinese)
卢斌, 赵桂洁. 透明陶瓷研究现状及展望 [J]. 材料导报, 2005, 19(8): 20–24.
- [18] Yu Kaikun, Zhang Guanjun, Zheng Nan, et al. Effects of surface laser treatment on flashover characteristics across alumina ceramics in vacuum [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(12): 28–34. (in Chinese)
于开坤, 张冠军, 郑楠, 等. 表面激光处理对氧化陶瓷真空中闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 28–34.
- [19] Li Weidong, Cao Ying, Fang Minghao, et al. Development trend of transparent ceramics [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2007, 36(1): 102–105. (in Chinese)
李卫东, 曹瑛, 房明浩, 等. 透明陶瓷的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2007, 36(1): 102–105.
- [20] Zhu Zhibin, Guo Zhijun, Liu Ying, et al. Development and application of alumina ceramics[J]. *Ceramics*, 2003, 161(1): 5–8. (in Chinese)
朱志斌, 郭志军, 刘英, 等. 氧化铝陶瓷的发展与应用[J]. 陶瓷, 2003, 161(1): 5–8.