

准互易反射式数字闭环光波导电压传感器

刘汐敬 杨德伟 于 佳 张芳杰

(北京航空航天大学光学工程系, 北京 100191)

摘要 光学电压传感器是重要的电压传感仪器,因其具有独特的优势,得到了越来越广泛的应用。提出并实现了一种新型准互易反射式集成光学电压传感器,采用基于钛扩散技术制作的 Y 切 Z 传铌酸锂直波导作为电场敏感元件;采用全数字闭环负反馈检测技术和数字滤波技术处理信号,使其具有较大的动态范围和较好的线性度,同时可分离信号中的交直流信号,方便进行温补与交流电压的测量。搭建的实验光路互易性良好,在 1.4~4600 V 的工频交流电压下,系统测量的最大非线性误差仅为 0.35%,80~4600 V 的测量变比误差小于 1%。

关键词 传感器;光学电压传感器;准互易反射式;Y 切铌酸锂;数字闭环负反馈;方波调制

中图分类号 TM451 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0205002

Quasi-Reciprocal Reflective Digital Closed-Loop Optical Voltage Sensor

Liu Xijing Yang Dewei Yu Jia Zhang Fangjie

(College of Optical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Optical voltage sensor is an important voltage sensing instrument which has been widely applied because of its unique advantages. We have proposed and accomplished a new type of quasi-reciprocal reflection type integrated optical voltage sensor, using Y-cut LiNbO₃ waveguide based on Ti-diffused technique as the electric field sensor. All digital closed-loop negative feedback detection technology and digital filtering technology have been used to improve the dynamic range and linearity, the alternating current (AC) and direct current (DC) voltage which is benefit to temperature compensation and AC signal measurement are separated. The reciprocity of light path is good. Under the power-frequency voltage of 1.4~4600 V, the nonlinear error of measurement is less than 0.35% and transformation ratio error is less than 1% as AC voltage changing from 80~4600 V.

Key words sensors; optic voltage sensor; quasi-reciprocal reflective; Y-cut LiNbO₃; digital closed-loop negative feedback; square-wave modulation

OCIS codes 280.4788; 130.3730; 130.6010; 230.3120

1 引 言

光学电压传感器是近十几年来发展起来的一种新型电压测量设备^[1],根据传感头结构可分为块状晶体型和集成光学型^[2-3]。集成光学电压传感器一般应用铌酸锂基底光波导敏感电压,根据晶体切向可分为两类,较常见为基于 X 切 Y 传铌酸锂波导的马赫-曾德尔(M-Z)型集成光学电压传感器^[4-5],其体积小,灵敏度高,但温度稳定性差,且目前很难测

量几百千伏的高压,常用于高频测量。另一类已报道的用 Y 切 Z 传铌酸锂直波导传感电场^[6],较 X 切向,Y 切铌酸锂晶体有很好的温度稳定性^[7],但电场测量结果与波导的 TE 与 TM 模(TE 模和 TM 模分别指光波中的电场分量和磁场分量)固有偏置相关是这种传感器目前最大的问题,因此它的电场敏感系数同样受温度影响较大。本文针对上述常见问题,提出了一种新型集成光学电压传感器,应用 Y

收稿日期: 2013-08-09; 收到修改稿日期: 2013-09-13

作者简介: 刘汐敬(1989—),女,硕士研究生,主要从事集成光学传感方面的研究。E-mail: liu_xijing@163.com

导师简介: 杨德伟(1957—),男,硕士,研究员,主要从事集成光学、光纤传感和光电子技术等方面的研究。

E-mail: dewei yang@buaa.edu.cn

切铌酸锂直波导敏感电场,其具有好的温度稳定性;应用准互易反射式光路结构^[8],可直接应用于目前已成熟的光纤陀螺信号处理技术^[9],有效分离交直流信号,交流信号用于交变电压测量,直流信号可用于温补,测量信号滤除了直流影响,克服了电压测量结果与波导固有偏置相关的问题,使系统获得较大的动态范围和较好的稳定性。

2 集成光学电压传感器

2.1 传感头设计

由于泡克尔斯效应,外加电场会使晶体的折射率发生线性改变。因为 LiNbO₃ 晶体沿 Y 轴方向加电场产生光折射率变化所利用的 γ_{22} 随温度变化非常小(125 °C 变化 0.6%^[7]),所以采用 Y 切 Z 传 LiNbO₃ 制作成集成光波导传感头。

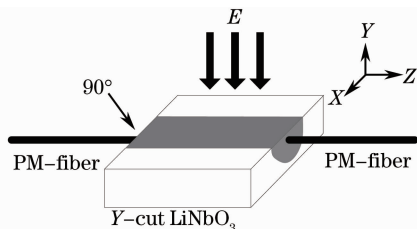


图 1 传感头结构

Fig. 1 Structure of sensing head

敏感电场的传感头结构如图 1 所示,Y 切 Z 传钛扩散铌酸锂直波导一端直接与保偏(PM)光纤对轴耦合,另一端的偏振轴与保偏光纤的偏振轴 90°

对轴耦合。工作时光波沿 Z 轴方向传输,待测电压通过平行板电极加在 Y 轴方向,信号光进入波导时存在两个正交偏振模式,TE 模——偏振方向沿 X 方向,TM 模——偏振分量沿 Y 方向,外加电场对两个模式在波导中单程传输产生的相位差值为^[10]:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{22} E l = \frac{2\pi l}{\lambda d} n_0^3 \gamma_{22} U, \quad (1)$$

式中 δ 为 TE 模与 TM 模产生的单程相位差值, λ 为光源的工作波长, n_0 为晶体未加电场时的折射率, γ_{22} 为线性电光系数, l 和 d 分别是晶体在通光方向的长度及两电极之间的距离, E 为波导所加电场, U 为待测电压。

2.2 准互易反射式光路

图 2 为光学电压传感器光路结构图,超辐射发光二极管(SLD)光源发出的偏振光经环形器到达起偏器后变为线偏振光,经 45°对轴熔接后线偏振光均分为具有两个正交偏振模式的光信号,经相位调制器对光信号的相位进行调制后,两正交偏振模式分别沿保偏延时光纤的快慢轴传输,法拉第旋光器使两正交偏振模式分别旋转 45°,光信号经保偏光纤 A 段入射到铌酸锂直波导敏感电压,之后光信号由 90°对轴入射到保偏光纤 B 段,经反射镜反射后再次经过铌酸锂直波导,泡克尔斯相移加倍,使测量光信号产生双倍的电光效应,之后经过法拉第旋光器,光信号的两正交偏振模式同时再次旋转 45°,与来时的传播轴发生互换,之后光信号依次经保偏延时光纤和相位调制器后,在起偏器处发生干涉。

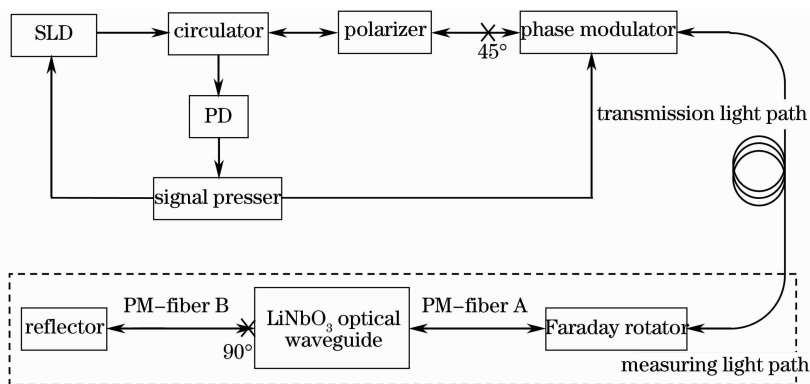


图 2 光学电压传感器光路图

Fig. 2 Light path diagram of optical voltage sensor

光路的互易性结构要求光的两正交偏振模式在光路中来回传输时所经历的光程相同。光路系统在传输光路部分,由于非互易器件法拉第旋光器的引入,使得参与干涉的两正交偏振模式在保偏延时光纤往返两次通过后发生传输偏振轴互换,即正向传

输时在快轴的偏振模式反向时转变为在慢轴传输,反之亦然。因此,两正交偏振模式经过相同的光程。在测量光路部分,保偏光纤 A 段快轴中传输的偏振模式经 90°耦合点进入到保偏光纤 B 段后由慢轴传输,在 A 段慢轴中传输的光信号由 B 段的快轴传

输,光信号经反射镜返回后亦然,所以保偏光纤 A 段与 B 段应采用等长的相同光纤,可使由 A、B 两段造成的光相位差互补,两正交偏振模式都经过相同的光程,使光路接近互易。波导不加载待测电压时,其间传输的 TE 模与 TM 模之间固有相位差约为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级^[6],对光路互易性造成的影响很小。

整个光路中,除了法拉第旋光器与铌酸锂直波导等非互易光学器件外,光信号的两正交偏振模式在整个光路中经历了相同的光程,构成了光纤传导的准互易反射式光路。此种光路结构可使两正交偏振模式干涉时相位差较小,因此可以采用具有短相干长度的宽谱 SLD 光源,以降低反射光与信号光的干涉,使偏振噪声、瑞利背向散射噪声等降到最低。

2.3 信号检测原理

本系统中,信号处理电路部分应用全数字闭环负反馈检测技术^[11],具有较大的动态范围和较好的线性度,同时采用数字滤波技术,可有效地分离信号中的交直流信号,方便进行温补和交变电压的测量,对信号进行高效的检测和控制。

干涉信号通过环形器传输到光电二极管进行光电转换,光电二极管接收到的干涉信号与直波导产生的 TE 模-TM 模相位差值的关系式为

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha I_{\text{in}} \{1 - \cos[\varphi(t) - \varphi(t - \tau) + 2\delta]\}, \quad (2)$$

式中 α 是光路总损耗, I_{in} 为光源的输出功率, δ 为 TE 模与 TM 模产生的单程相位差值, $\varphi(t)$ 和 $\varphi(t - \tau)$ 为相位调制器的调制相位, τ 为光来回两次通过相位调制器的渡越时间。

为了提高互感器对小信号的响应灵敏度,通过集成光学相位调制器在正反两路光信号进入相位调制器时分别引入 $\varphi(t - \tau)$ 和 $\varphi(t)$ 的光相位差,使得最终干涉的这两束正交偏振光波之间的相位偏置:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) = \pm \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

使(2)式的余弦响应变为正弦响应,正弦函数在零相位附近的响应灵敏度最高,且近似为线性响应,输出信号能分辨测量电压的正负,这种相位调制技术称为方波调制。

由 Y 切 Z 传铌酸锂晶体的泡克尔斯电光效应所产生的单程相移(1)式以及横向调制下铌酸锂晶体的半波电压 U_{π} 公式:

$$U_{\pi} = \frac{\lambda d}{2n_0^3 \gamma_{22} l}. \quad (4)$$

可计算出当 $\varphi(t) - \varphi(t - \tau) = \frac{\pi}{2}$ 时,干涉信号光强和待测电压之间的关系:

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2} \alpha I_{\text{in}} \left[1 + \sin\left(2\pi \frac{U}{U_{\pi}}\right)\right] \approx \frac{1}{2} \alpha I_{\text{in}} \left(1 + 2\pi \frac{U}{U_{\pi}}\right), \quad (5)$$

式中 U_{π} 是电光晶体的半波电压, U 为待测高压。

闭环检测方案的原理是:在方波调制的基础上引入阶梯波反馈,在参与干涉的两正交线偏振光波之间引入一个与泡克尔斯相移 2δ 大小相等、方向相反的相位差,用来抵消泡克尔斯相移,使系统始终工作在零相位附近,提高了系统的检测灵敏度和动态范围。

3 实验结果与分析

3.1 传感头的封装

经多次反复实验,得知测量光路部分在密闭无风、温度均匀恒定的环境中,且保偏光纤 A、B 两段受环境应力相同时,光路输出较稳定。据此设计的传感头封装结构如图 3 所示,制作材料为聚砜,封装方形边长为 10 cm,中间圆形直径为 9.5 cm,分别按照各器件的尺寸设计了放置反射镜,波导和法拉第旋光器的凹槽位置,使各处光纤处在同一平面内从而减少光纤的不均匀受力。

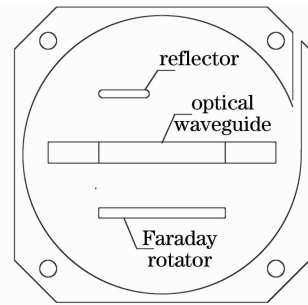


图 3 传感头封装设计

Fig. 3 Packaging design of the sensing head

3.2 准互易光路的构建

本系统的光信号采用方波调制,当驱动光源,直波导不加载待测电压时,用示波器可测量光信号通过光路后两正交偏振模式产生的零漂相位差。当光路呈理想互易性时,干涉信号不产生相位差,经方波调制后呈现下尖图形,如图 4 上方所示。如果光路互易性差,则干涉后的光信号存在 $\Delta\varphi$ 的相位差,调制后信号在示波器上显示带尖端的方波图形,如图 4 下方所示。因此可以用此方法判断光路互易性好坏。

按照图 2 搭建光路,因为保偏光纤 A 和 B 段不可能达到理想的一致性和均匀性,同时在切割时也

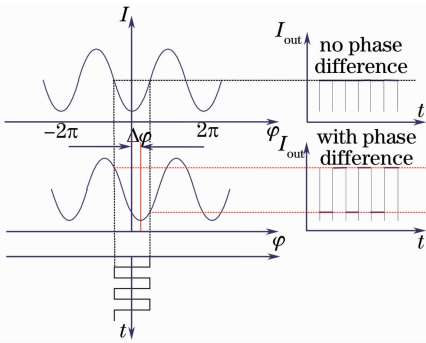


图 4 方波调制检测相位差

Fig. 4 Square wave modulation test phase difference

不可能理想地达到长度完全相同,所以 A、B 两段保偏光纤等长时一般不能达到较好的互易性。根据图 4 分析对某段光纤加热的现象,调整 A、B 段达到最佳相对长度^[12]使光路达到最好互易性的结果如图 5 所示,可以看出实验光路具有较好的光路互易性,可以用于电压的测量。

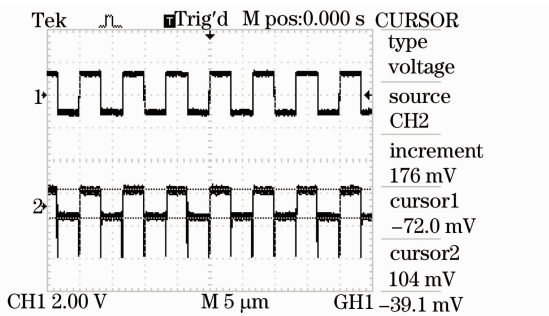


图 5 实验光路互易性

Fig. 5 Reciprocity of light path

3.3 电压测量

国标 GB/T12720-1991 中对平行板标定系统的尺寸进行了规定:平行板间距 d 应不小于 1.5 倍探头的侧面尺寸;探头的边缘距底板的任一边缘不小于 $2d$;平行板与最近的地面之间的距离应大于 $2d$ 。满足上述条件时,电极间电场的变化将在均匀值 U/d 的 0.5% 之内^[13]。

按照上述标准制作了平行板电极,电极将工频交流(AC)电压加载在铌酸锂直波导的 x 轴方向。平板电极为圆形,如图 6 所示:直径 12 cm,两极板间距 1.2 cm,使用变压器调节平行板间的电压值,封装好的传感头放入两极板之间固定。两极板间加载 800 V 工频交流电压时通过软件采集的输出结果如图 7 所示,图 7 中横坐标为采样时间,纵坐标为采样时刻的系统输出值(与被测电压值比例相关),证明本系统能够无失真地检测出被测电压的幅值和频率。

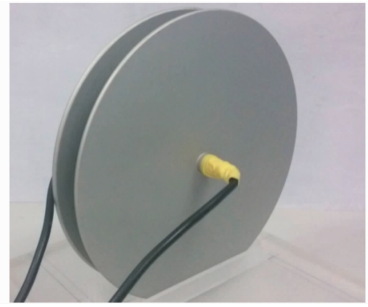


图 6 平行平板电极

Fig. 6 Parallel-plate electrodes

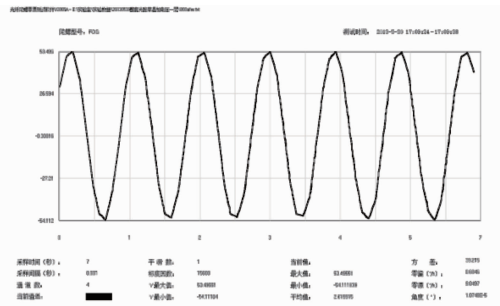


图 7 800 V 工频交流电压输出

Fig. 7 Output of 800 V power frequency AC voltage

系统输出的信号可分为两部分:不加被测电压时的固有直流偏置和由交变电场产生的相位差值。采集软件输出的数据首先通过滑动平均处理,消除由交变电场产生的相位差值量(滑动数取交变电场一个周期采样点个数的整数倍),得到光路输出的固有直流偏置量,再用原始信号减去固有偏置量,得到只由交变电场产生的相位差值,与被测电压线性相关,即实验结果中的测量值。

对系统在常温下的小信号电压测量情况作了分析,图 8 结果表明本系统在测量电压小于 1.4 V 时已无法分辨,可判断其小值电压的分辨率约为 1.5 V。要提高传感器的分辨率,需要降低光路及电路的噪声水平,提高传感器的信噪比,优化光路结构,进一步抑制偏振误差,提高传感器的检测灵敏度。

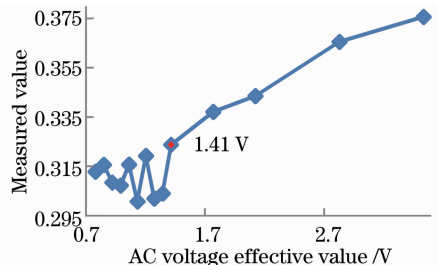


图 8 小电压测量

Fig. 8 Small voltage measurement

对有效值 1.4~4600 V 电压的测量结果进行线性拟合,结果如图 9(a)所示,传感器的数字输出与模拟输入电压之间存在良好的线性关系,最大非线性误差为 0.35%,利用最小二乘拟合方法可得变比为 20.1613 V⁻¹。从相对误差的分布情况可以看出

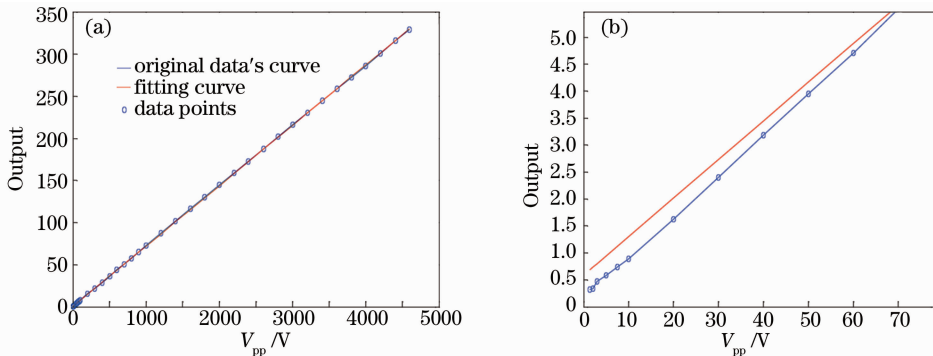


图 9 输出值的线性拟合。(a) 1.4~4600 V 拟合结果; (b) 1.4~70 V 拟合结果

Fig. 9 Output linear fitting. (a) Fitting result of 1.4~4600 V; (b) fitting result of 1.4~70 V

4 结 论

提出并实现了一种新型的准互易反射式集成光学电压传感器。采用基于钛扩散技术的 Y 切 Z 传铌酸锂直波导作为电场敏感元件;通过反射式光路结构,使得光信号产生双倍的光电效应,提高了电压测量的灵敏度;光路的准互易结构设计提高了光路结构的抗干扰能力;信号处理系统采用全数字闭环负反馈检测技术,使其具有较大的动态范围和较好的线性度,采用数字滤波技术,可分离信号中的交直流信号,便于交流电压的测量;最后通过搭建实验光路对工频交变电压进行实际测量,证明了本系统的可行性,并取得了较好的实验结果。后续工作可研究系统随温度漂移特性,设计温度补偿系统提高测量精度和动态范围,完善系统性能。

参 考 文 献

- 1 T Yoshino. Optical fiber sensors for electric power industry[J]. SPIE, 1987, 0798: 258-265.
- 2 S A Kingsley, S Sriram. Parallel-plate integrated optic high-voltage sensor[J]. Electron Lett, 1995, 31(13): 1096-1097.
- 3 S S Lee, S W Ahn, M C Oh, *et al.*. Integrated optical high-voltage sensors based on a polymeric Y-brach digital optical switch[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(7): 921-923.
- 4 Chen Weiyuan, Zeng Rong, Liang Xidong, *et al.*. Design of an electro-optic integrated electric field sensor [J]. J Tsinghua University, 2006, 46(10): 1641-1644.
陈未远, 曾 嵘, 梁曦东, 等. 光电集成电场传感器的设计[J]. 清华大学学报, 2006, 46(10): 1641-1644.
- 5 Sun Bao, Chen Fushen. Integrated optical E-field sensor for measurements of power frequency electric field [J].

当电极板加载电压大于 80 V 时,测量的变比误差小于 1%,说明此传感器有很高的测量精度。图 9(b)为电压有效值在 1.4~70 V 时的局部放大图,可知在被测电压小于 80 V 时,传感器具有小量偏差。

Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 202-204.

孙 豹, 陈福深. 用于测量工频强电场的集成光学电场传感器 [J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 202-204.

6 O Ogawa, T Sowa, S Ichizono. A guided-wave optical electric field sensor with improved temperature stability[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 823-830.

7 P Gorski, K Bondarczuk, W Kucharczyk. Temperature dependence of the electrooptic coefficients r_{22} and m_{22} in LiNbO₃ [J]. Opto-Electronics Review, 2004, 12(4): 459-461.

8 C X Zhang, X J Feng, S Liang, *et al.*. Quasi-reciprocal reflective optical voltage sensor based on Pockels effect with digital closed-loop detection technique[J]. Optics Communications, 2010, 283(20): 3878-3883.

9 X J Feng, C X Zhang, S Liang, *et al.*. A novel digital active homodyne demodulation scheme based on square wave phase modulation for interferometric fiber-optic sensors[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(1): 20-23.

10 Li Jiaye, Zhu Baoliang, Wei Guanghui. Crystallographic Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1989. 58-60.

李家泽, 朱宝亮, 魏光辉. 晶体光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989. 58-60.

11 Feng Xiujuan. Investigation on Principle and Technique of Optical Voltage Sensing[D]. Beijing: Beihang University, 2012. 53-58.

冯秀娟. 光学电压传感机理及技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012. 53-58.

12 Liu Xijing, Yang Dewei, Yu Jia. Quasi-reciprocal reflective optical circuit compensation technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(9): 41-45.

刘汐敬, 杨德伟, 于 佳. 准互易反射式光路补偿技术[J]. 光电工程, 2013, 40(9): 41-45.

13 GB/T12720-1991. Measurement of Power-Frequency Electric Fields[S]. Beijing: China Standard Press, 1991. 1-10.

GB/T12720-1991. 工频电场测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991. 1-10.

栏目编辑: 韩 峰