

用于测量工频高电压的直波导电压传感器

姜一真 杨德伟 张芳杰

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 介绍了一种用于测量工频电压的以Y切Z传钛扩散LiNbO₃基底直波导作为敏感元件的光学电压传感器,直波导电压传感器利用Pockels效应,将直波导的固有相位差调整至接近 $\pi/2$,在不需加1/4波片的条件下实现工频电压的线性传感。利用直波导可以直接耦合进光纤的特性,全部器件采用光纤连接,大大减少了光路空间,提高了光路的稳定性。分析了这种电压传感器的工作原理与输入输出特性,并对100~3000 V的工频电压进行了测量。初步研究了其温度特性,在-40℃~60℃的温度范围内,变比误差达到5.29%。根据理论与测量分析,这种电压传感器可以用于工频高电压的测量。

关键词 光学器件;集成光学;光学电压传感器;Y切LiNbO₃波导;工频电压

中图分类号 TM451 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.022301

A Straight Waveguide Optical Voltage Sensor for Measurement of Power Frequency Voltage

Jiang Yizhen Yang Dewei Zhang Fangjie

*School Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University,
Beijing 100191, China*

Abstract A straight waveguide optical voltage sensor for measurement of power frequency voltage based on Y-cut LiNbO₃ waveguide is proposed. Using the Pockels effect of LiNbO₃ crystal and adjusting the optical bias to $\pi/2$, linear result can be achieved. Making use of the waveguide's distinguishing feature that optical fiber can couple with waveguide directly, all optical devices are connected with optical fiber so that the optical path is simplified. Both the sensor's principles and the output/input characteristics are analyzed. The power frequency voltage in the range of 100~3000 V is measured by using this sensor. The temperature dependence is researched preliminarily, and in the range of -40℃~60℃, transformer ratio is 5.29%. The measurement results show that this kind of voltage sensor is suitable for measurements of high frequency voltage.

Key words optical devices; integrated optics; optical voltage sensor; Y-cut LiNbO₃ waveguide; power frequency voltage

OCIS Codes 230.3120; 230.7370; 280.4788

1 引言

光学电压传感器利用光学材料(晶体)的特定物理性质来敏感电压,并且可直接输出数字信号,与传统的电压传感器相比具有较大的优势,不但电气绝缘性好,而且还具有体积小、自重轻、抗电磁干扰能力强、测量频带宽、动态范围大等一系列优点,具有很好的发展前景^[1-2]。

目前,块状晶型(BGO、BSO、LiNbO₃晶体等)光学电压传感器属于比较成熟的方案,但其需要光学透镜系统和光学准直,增加了制作的复杂性和难度,光学系统的粘接封装也比较困难^[3]。关于集成光学型电压传感器的研究早已在国内外展开,主要集中在马赫-曾德尔(M-Z)干涉型光学电压传感器,其敏感电压的波导中铌酸锂晶体切向一般为X切Y型,电光系数 γ_{33} 比较大,灵敏度比较高,但对温度十分敏感,所以此类

收稿日期: 2013-08-20; 收到修改稿日期: 2013-10-23; 网络出版日期: 2013-12-14

作者简介: 姜一真(1988—),女,硕士研究生,主要从事集成光学传感技术方面的研究。E-mail: rushan_jiang@126.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

光学电压传感器的温度稳定性很差,难以在电力系统中得到应用。 Y 切 LiNbO_3 晶体具有较好的温度稳定性,经过多次退火处理的铌酸锂晶体在 Y 切方向上的电光系数 γ_{22} 随温度漂移仅为 0.6% ($25\text{ }^\circ\text{C}\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$)^[4]。因此它比 X 切 Y 传型波导更适合应用于传感领域。

本文提出的直波导电压传感器,敏感元件采用 Y 切 Z 传 LiNbO_3 直波导。将波导的固有相位差调整至接近 $\pi/2$,可在不需要附加 $1/4$ 波片的条件下实现电压的线性传感。这种设计简化了光学电压传感器结构,降低了成本并避免了 $1/4$ 波片的温度效应带来的影响^[5-6]。

2 直波导电压传感器

2.1 直波导电压传感器结构

本文提出的双光路补偿的直波导电压传感器的光路系统设计如图 1 所示,选用器件包括半导体激光器(中心波长 1310 nm)、集成光学起偏器、直波导和偏振分束器,所有器件全部采用保偏光纤连接^[7]。最后,偏振分束器输出的两路互补光经光电探测器(PFTM911)至信号处理单元。

这一结构中所用的直波导结构如图 2 所示,直波导的输入保偏光纤与输出保偏光纤分别与直波导的快慢轴呈 45° 对准耦合。

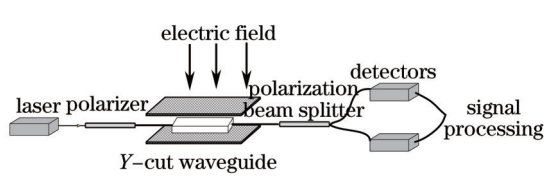


图1 直波导电压传感器光路系统设计

Fig.1 Optical path system of waveguide voltage sensor

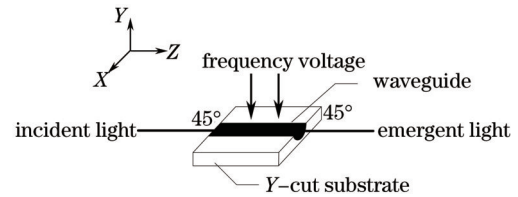


图2 直波导结构图

Fig.2 Waveguide structure

2.2 直波导电压传感器工作原理

直波导电压传感器利用 LiNbO_3 晶体的 Pockels 效应。Pockels 效应是指某些晶体在外加电场作用下其折射率发生变化的现象,这种折射率的变化将使沿某一方向入射的偏振光产生相位延迟,且相位延迟量与外加电场强度成正比。利用这种变化,可以借助于偏振光干涉的办法将偏振光对应的相位变化转换为光强变化,由此可以敏感待测电压(电场),实现对外加电压(电场)的测量^[8]。

本文中采用的敏感元件为 Y 切 Z 传 LiNbO_3 直波导,光沿 Z 方向传播,待测电场沿 Y 方向。如图 1、图 2 所示,激光器产生的具有特定波长的线偏振光(偏振方向与 X 轴成 45°)进入直波导。此时,入射光束分成两个固有模式传播,电场分量 TE 模,其偏振方向沿 X 方向,磁场分量 TM 模,其偏振方向沿 Y 方向。直波导中传播的 TE 、 TM 模的相速发生不同的变化,波导输出光变成椭圆偏振态。波导输出端 TE 、 TM 模偏振方向与偏振分束器尾纤的快慢轴成 45° 对准。输出光通过偏振分束器,可以获得两个互补的干涉光。这两束干涉光通过光电探测器转换为电压信号,进行信号处理^[9]。

外电场作用于 Y 轴方向,根据折射率椭球与 LiNbO_3 晶体的线性电光张量表达式,可以推导出 LiNbO_3 直波导在平行于 Y 轴的外电场作用下的主折射率为:

$$\begin{cases} n'_x \approx n_{\text{TE}} + \frac{1}{2}n_o^3 r_{22} E_y \\ n'_y \approx n_{\text{TM}} - \frac{1}{2}n_o^3 r_{22} E_y \\ n'_z \approx n_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 r_{22} 和 E_y 分别是 Y 切 Z 传直波导的电光系数和外加的电场, n_o 和 n_e 表示铌酸锂晶体 o 光和 e 光的折射率, n_{TE} 和 n_{TM} 是在不存在 Y 方向电场时, TE 和 TM 模的折射率。

根据横向电光效应,在 Y 方向加电场, z 方向通光时,沿 X' 和 Y' 方向的两个正交光出射时产生的相位差为

$$\delta'_y = \frac{2\pi}{\lambda_o} (n'_x - n'_y) l = \frac{2\pi l}{\lambda_o d} n_o^3 r_{22} U + \frac{2\pi}{\lambda_o} (n_{\text{TE}} - n_{\text{TM}}) l = \varphi_E + \varphi_o, \quad (2)$$

式中 U 为电极板两端电压, d 为施加电压的平行电极间距, l 为直波导长度, λ_0 为波导所通光的波长。从(2)式可以看出, 两正交光出射时产生的相位差包括两部分, 一部分是由外加电压产生的相位延迟 φ_E , 另一部分是由波导本身 TE 模式和 TM 模式的折射率之间的差值产生的直波导固有相位差 φ_0 。

根据(2)式可以计算出, 横向调制下 LiNbO₃ 直波导的半波电压公式为

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

由(2)式和(3)式得 Y 切 Z 传 LiNbO₃ 波导中产生的相位延迟为

$$\delta = \frac{\pi U}{U_\pi} + \varphi_0. \quad (4)$$

严格来讲, (1)式中的两个 n_0 应该分别是 n_{TE} 和 n_{TM} , (2)式中的 n_0 应该是 $(n_{TE}^3 + n_{TM}^3)/2$; 但是, n_{TE} 和 n_{TM} 之间的差别非常小, 与固有相位差有关的要素 $n_{TE} - n_{TM}$ 不可被忽略, 而在进行和运算时, 它们之间的差值可以忽略。

从偏振光学的角度看, 外电压作用下的直波导实质上是一个可变的相位延迟器, 电压传感器的原理则是通过测量此可变的相位延迟来获得待测电压的值。假设忽略各器件的插入损耗, 根据琼斯矩阵计算法可推导出两束从偏振分束器输出的两束互补光的光功率 P_{o1} 和 P_{o2} 的表达式^[10]:

$$\begin{cases} P_{o1} = \frac{P_{in}}{2}(1 + \cos \delta) \\ P_{o2} = \frac{P_{in}}{2}(1 - \cos \delta) \end{cases}, \quad (5)$$

式中 P_{in} 是进入传感器的光强, δ 是波导产生的相位延迟。将(4)式代入(5)式, 得

$$\begin{cases} P_{o1} = \frac{P_{in}}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi U}{U_\pi} + \varphi_0 \right) \right] \\ P_{o2} = \frac{P_{in}}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi U}{U_\pi} + \varphi_0 \right) \right] \end{cases}. \quad (6)$$

为使传感器具有线性响应特性, 晶体型的电压传感器会通过利用 1/4 波片引入的相位延迟来平移电压传感器的静态工作点。从(6)式可以看出, 在该设计中, 通过调整直波导的固有相位差 $\varphi_0 = m\pi/2$ (其中 m 为奇数), 即可得到线性响应。由于直波导的固有相位差会随着外界环境的变化而发生变化, 因此, 设 $\Delta\varphi_0$ 为 φ_0 偏离 $\pi/2$ 的部分, 即 $\Delta\varphi_0 = \varphi_0 - \pi/2$ 。则根据(5)式, 可得

$$\begin{cases} P_{out1} = \frac{1}{2} P_{in} \left[1 + \sin \left(\frac{\pi U}{U_\pi} + \Delta\varphi_0 \right) \right] \\ P_{out2} = \frac{1}{2} P_{in} \left[1 - \sin \left(\frac{\pi U}{U_\pi} + \Delta\varphi_0 \right) \right] \end{cases}. \quad (7)$$

当 $\pi U \ll U_\pi$ 时, 满足线性响应, 通过示波器显示输出的电压信号, 可以分析待测电压信息。

3 实验研究

3.1 常温下传感器输入输出特性实验

按照图 1 搭建实验光路系统, 进行实验研究。使用直波导电压传感器测量工频交流(AC)电压的实验装置如图 3 所示, 使用 220 V 的工频交流电源接至变压器输入端, 变压器输出电压范围为 0~5000 V, 变压器的输出端分别接在平行板电极的两块极板上, 直波导放在平行板电极的中央, X 方向与两块极板平行。GB/T 12720-1991 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 $2d$ 。满足上述条件时, 电极间电场的变化将均匀地保持在 U/d 的 $\pm 0.5\%$ 之内^[11]。此处实验所用圆形电极板^[12]直径为 140 mm, 间距为 6 mm; 波导长度为 49 mm。

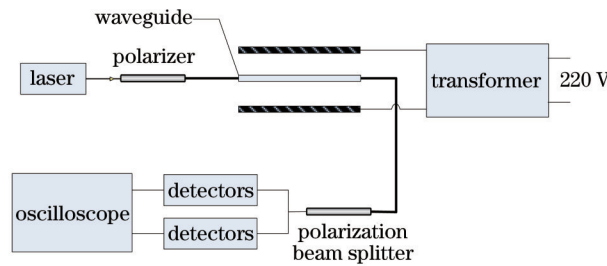


图3 直波导电压传感器测量工频交流电压的实验装置图

Fig.3 Experimental setup of straight waveguide voltage sensor for measurement of power frequency voltage

将传感器放在常温室内进行实验,图4分别给出了在500,1500,2500 V工频电压下,示波器采集到的电压传感器的输出电压波形,上面的曲线是通路1的输出电压波形,下面的曲线是通路2的输出电压波形。可以看出,两路输出反相,电压幅值随外加电压值增加而增加。此处采用6 mm间距电极板进行实验,可以通过改变电极板的间距来获得更大的动态测量范围。

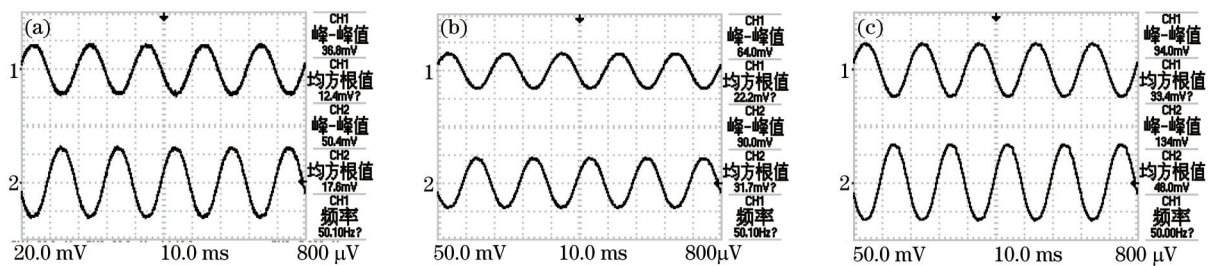


图4 传感器在各电压下的系统输出波形。(a) 500 V; (b) 1500 V; (c) 2500 V

Fig.4 Output signals of different input ac voltage. (a) 500 V; (b) 1500 V; (c) 2500 V

图5给出了该传感系统在工频电压下的输入输出特性。从图中可以看出,从100 V至3000 V,传感系统两路输出的线性度良好。根据最大非线性误差计算公式 $\sigma = \Delta Y_{\max} / Y \times 100\%$ (其中 ΔY_{\max} 为传感器输出值与拟合直线间的最大偏差, Y 为满量程输出),得到两路输出 σ 分别为3.47%和5.21%^[13]。由于两路的损耗并不一样,所以两路输出拟合直线的斜率会有差别。

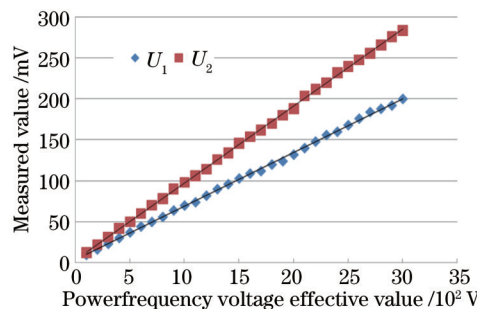


图5 传感器输入输出特性曲线

Fig.5 Input/output characteristics

3.2 全温下直波导电压传感器测量实验

3.2.1 全温下传感器各项参数测量实验

采用如图3所示实验装置,两极板间不加电压,根据(2)式,认为输出的两束正交光产生的相位差为直波导的固有相位差。根据(2)式可得,直波导固有相位差计算公式为

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{\frac{1}{(I_{o1}/I_{o2}) + 1}} \quad (8)$$

在-40 °C~60 °C范围内,每隔10 °C保温30 min,测量偏振分束器两路输出光功率,经过计算即可得到直波导的固有相位差随温度的变化曲线与两路输出光功率总和随温度变化曲线,如图6、图7所示。

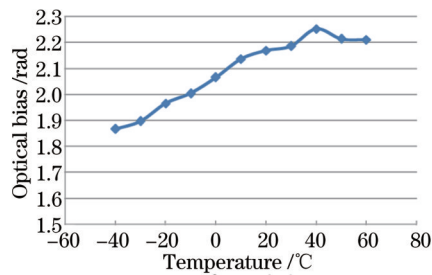


图6 直波导固有相位差随温度变化曲线

Fig.6 Temperature dependence of optical bias

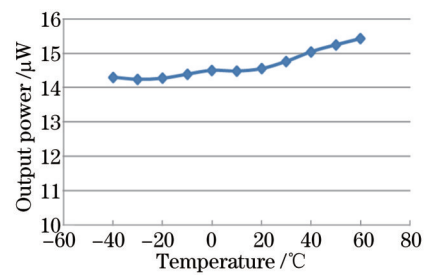


图7 传感器两路输出功率总和曲线

Fig.7 Temperature dependence of output power

从图6可以看出,直波导的固有相位差随温度变化比较明显, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 趋近于线性递增, $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 趋于平稳,但在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,固有相位差偏离趋势线比较明显。从图7可以看出,传感器输出功率变化比较小,输出功率随温度的升高而变大,即损耗变小。

3.2.2 全温下传感器输入输出特性实验

在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 30 min ,并对 1000 V , 2000 V 工频电压进行了测量,输出电压结果,所得结果如图8所示。

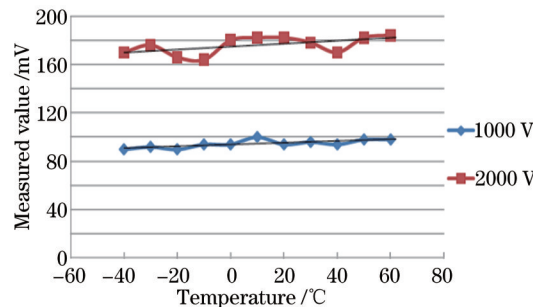


图8 传感器输出电压随温度变化曲线

Fig.8 Temperature dependence of output voltage

经计算,在不同温度下,测量 1000 V , 2000 V 工频电压的变比误差分别为 5.29% 和 5.69% 。从图8可以看出,对于同一输入电压值,传感器输出有增大的趋势,一方面是由于温度升高,系统的损耗变小,另一方面,由于温度变化,直波导固有相位差发生变化,线性区发生移动,输出也会发生变化。除了温度的影响,外界的其他波动因素也会对传感器的输出产生影响,例如震动等。

4 结 论

理论分析和实验结果表明,直波导电压传感器可以用于 $100\sim 3000\text{ V}$ 的工频电压的测量,常温下最大非线性误差为 0.347% 。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,变比误差达到 5.29% 。根据目前的实验结果,直波导的固有相位差与温度存在一定的关系,这影响整个测量系统的稳定性,需要进一步的实验研究与分析,确定其与温度的关系,并对温度进行补偿,以加强其稳定性。

参考文献

- Li Kaicheng, Jiang Dechang. Several optical sensing methods used in high voltage measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(6): 40-42.
李开成, 江德长. 高压测量的几种光学传感方法[J]. 高压电器, 2000, 36(6): 40-42.
- Li Yan, Zhang Min, Feng Xiujuan, *et al.*. Modeling of optical circuit and analysis of polarization errors for the reflective optical voltage sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1536-1541.
李彦, 章敏, 冯秀娟, 等. 反射式光学电压互感器光路建模及偏振误差分析[J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1536-1541.
- Lou Feng-wei, Zheng Shengxuan, Zhao Xintai. Present situation and development for the optical fiber voltage transformer[J]. J Transducer Technology, 2002, 21(5): 5-7.
娄风伟, 郑绳植, 赵鑫泰. 光纤电压互感器的现状及发展[J]. 传感器技术, 2002, 21(5): 5-7.
- P Gorski, K Bondarczuk, W Kucharczyk. Temperature dependence of the electrooptic coefficients r_{22} and m_{22} in LiNbO_3

- [J]. Opto-Electronics Review, 1999, 12(4): 459-461.
- 5 Li Changsheng. Optical voltage sensor using angular optical biasing in lithium niobate crystal[J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1493-1497.
李长胜. 基于LiNbO₃晶体自身角度光偏置的光学电压传感器[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1493-1497.
- 6 Li Jing, Cao Maoyong, Yu Daoyin. Fiber-optic voltage sensor based on phase modulation[J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2005, 18(3): 584-588.
李晶, 曹茂永, 郁道银. 一种基于位相调制的光纤电压传感器[J]. 传感技术学报, 2005, 18(3): 584-588.
- 7 Farnoosh Rahmatian, Nicolas A F Jaeger. High accuracy optical electric field and voltage sensors[C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, 1: 411-414.
- 8 Huo Guangyu, Zhang Guoqing, Yu Wenbin, *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.
霍光宇, 张国庆, 于文斌, 等. 光学电压互感器中双光路不平衡及微弱信号检测的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 31-35.
- 9 Osamu Ogawa, Tomohiro Sowa, Shinichi Ichizono. A guide-wave optical electric field sensor with improved temperature stability[J]. J Lithwave Technology, 1999, 17(5): 823-830.
- 10 Li Zhiqian, Wang Zhibin, Wu Zhaoxia. Study on an optical voltage sensor based on polarization modulation[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2002, 23(5): 492-494.
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.
- 11 Quantities and Units of the National Standardization Technical Committee. Measurement of Power-Frequency Electric Fields, GB/T 12720-91[S]. Beijing: China Standard Press, 1991. 1-10.
全国量和单位标准化技术委员会. GB/T 12720-91工频电场测量[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991. 1-10.
- 12 Li Yan, Zhang Min, Feng Xiujuan, *et al.*. Digital closed-loop signal processing system for the quasi-reciprocal optical voltage sensor[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2011m 48(7): 32-36.
李彦, 章敏, 冯秀娟, 等. 准互易光学电压互感器数字闭环信号处理方法[J]. 电测与仪表, 2011, 48(7): 32-36.
- 13 Li Jing. Design of new optical fiber current sensor in deep mine[J]. Sensor World, 2011, 17(9): 12-14.
李静. 新型光纤电流传感器在煤矿中的应用研究[J]. 传感器世界, 2011, 17(9): 12-14.