

# 激光与光电子学进展

## 基于平衡探测的集成光波导电场传感器研制

姜超, 张家洪\*, 李英娜, 赵振刚

昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650000

**摘要** 为了进一步提高传感系统的灵敏度, 在一片铌酸锂晶片上设计双平行非对称马赫-曾德尔干涉仪型光波导结构, 并在光波导的周围设计分段电极, 实现方向相反的电光调制, 为此研制出尺寸为  $78\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$  的集成光波导电场传感器。采用 LTspice 仿真软件设计一种跨阻抗平衡光电探测电路, 采用差分法实现对共模噪声的抑制, 从而提高电场传感器的灵敏度。实验结果表明, 传感系统时域可测电场强度范围为  $33 \sim 3000\text{ V/m}$ , 线性动态范围为  $35\text{ dB}$ , 适用于弱电场的时域测量。

**关键词** 集成光学; 非对称马赫-曾德尔干涉仪; 光波导传感器; 平衡探测; 电场测量

中图分类号 TM935

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1913001

## Development of Integrated Optical Waveguide Electric Field Sensor Based on Balance Detection

Jiang Chao, Zhang Jiahong\*, Li Yingna, Zhao Zhengang

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China

**Abstract** In order to further improve the sensitivity of the sensing system, a bi-parallel asymmetric Mach-Zehnder interferometer optical waveguide structure is designed on a lithium niobate wafer, and segmented electrodes are designed around the optical waveguide to achieve electro-optical modulation in the opposite direction. For this purpose, an integrated optical waveguide electric field sensor with a size of  $78\text{ mm} \times 14\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$  is developed. The LTspice simulation software is used to design a cross-impedance balance photoelectric detection circuit, and the difference method is used to suppress common mode noise, so as to improve the sensitivity of the electric field sensor. The experimental results show that the time-domain measurable electric field intensity range of the sensing system is  $33 \sim 3000\text{ V/m}$ , and the linear dynamic range is  $35\text{ dB}$ , which is suitable for the time-domain measurement of weak electric fields.

**Key words** integrated optics; asymmetric Mach-Zehnder interferometer; optical waveguide sensor; balance detection; electric field measurement

**OCIS codes** 130.2790; 130.3120; 130.6010; 040.5160

### 1 引言

随着电子科学技术的飞速发展, 在电子电路和

设备的电磁兼容性(EMC)测试中, 辐射源附近的电磁场检测变得越来越重要。然而 EMC 测试中的射频电场往往很微弱, 因此电场的精确测量有利于检

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-01-31; 录用日期: 2021-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61765009, 61962031, 51667011)、云南省应用基础研究项目(2018FB106)

通信作者: \*zjh\_mit@163.com

测电气和电子仪器对外部电磁的辐射与干扰,以及研究环境电场对电子设备运行的影响<sup>[1-3]</sup>。

早期使用由有源金属探测器构成的电磁波测量系统进行检测,被测电场会受到探头金属结构的干扰使测量系统对电磁噪声非常敏感<sup>[4]</sup>。基于光学原理研制的传感器基本满足电场测量的要求,即高灵敏度、宽线性动态范围、高频率响应和多方向性。相比于传统的电磁波测量系统,光学传感器具有集成度高、响应速度快、体积更小、绝缘性好、质量轻及安全性高等优点,使其快速成为电场测量的一种有效手段<sup>[5-6]</sup>。1980年,Bulmer等<sup>[7-9]</sup>基于普克尔效应的理论,利用Ti扩散技术在铌酸锂(LN)晶片上制作马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型光波导结构,并在调制器的电极上连接短偶极子天线,使调制器的输入输出分别由保偏光纤(PMF)和单模光纤(SMF)与LN器件的波导沟道耦合,可以避免引入导电引线对被测电磁场的干扰,实现了LN的集成。2010年,孙豹等<sup>[10]</sup>研制了用于测量工频电场的集成光电传感器,对电场强度范围为100~2500 V/m的工频电场进行了测量,传感系统的线性度较好。2018年,Zhang等<sup>[11]</sup>基于反射膜结构提出并设计了一种反射式光波导电场传感器,因其具有反射膜结构,所以大大缩短了传感器的长度,并增加了传感器的工作效率,该电场传感系统的时域电场强度范围为100 V/m~50 kV/m。2017年,Xiao等<sup>[12]</sup>在不同的MZI光波导上制作了两个倾斜角度分别为45°和135°的锥形天线,实现了二维电场的测量。2017年,法国Gutiérrez-Martínez团队<sup>[13]</sup>使用串联两个不平衡的MZI进行光延迟匹配,可以减小电场传感器的直流漂移。2018年,得克萨斯大学电子与计算机工程系Chung等<sup>[14]</sup>使用蝶形天线和非对称MZI组合研制了一个3 dB带宽为4.84 GHz的片上光子电磁波传感器。2019年,Li等<sup>[15]</sup>基于共路干涉(CPI)结构研制了一种温度稳定的集成光学电场传感器,其时域电场强度范围为100 V/m~27 kV/m。

2019年,李佳文等<sup>[16]</sup>研制了一种带有电极对的集成光波导工频电场传感器,该电场探测系统的时域电场强度范围为350 V/m~125 kV/m。2020年,Yang等<sup>[17]</sup>采用一种基于普克尔效应和电场调制的交直流混合电场测量方法对传感器进行了标定,得到交流电场的时域电场强度范围为1.05~150 kV/m(峰峰值),直流电场强度的最大范围为1.23~150 kV/m。2021年,Ma等<sup>[18]</sup>提出了一种基于一维光子晶体纳米束腔的集成光学电场传感器,通过设计一种三层TiO<sub>2</sub>/LN/TiO<sub>2</sub>纳米束结构提高了LN的电光调制效率。综合分析,目前集成光学电场传感器的研究热点主要集中在实现多维电场测量、抑制直流漂移、大带宽、提高温度稳定性以及采用新的材料来提高电光调制效率等方面,但如何进一步提高传感系统的灵敏度,近年来的研究很少。

本文通过设计双平行非对称MZI型光波导结构,并在双平行非对称MZI波导的两侧设计分段电极,构成可实现相反电光调制的集成光波导电场传感器。由两个并联且响应度一致的PIN型光电二极管构成的平衡光电探测电路,实现对共模噪声的抑制,从而提高集成光波导电场传感系统的灵敏度。

## 2 电场传感系统及传感器的工作原理

### 2.1 电场传感系统

基于平衡探测的集成光波导电场传感器所组成的电场传感系统如图1所示。激光光源发射出合适功率的激光,经过保偏光纤耦合到双平行非对称MZI型电场传感器中,电场传感器探测到空间电场后被调制到光载波上,最终引起光载波的强度发生变化,传感器通过单模光纤来连接平衡光电探测器,光强的变化则体现为光探测器输出信号的变化,并由示波器提取光电探测器所输出的电信号,即可获得被测的电场信号。

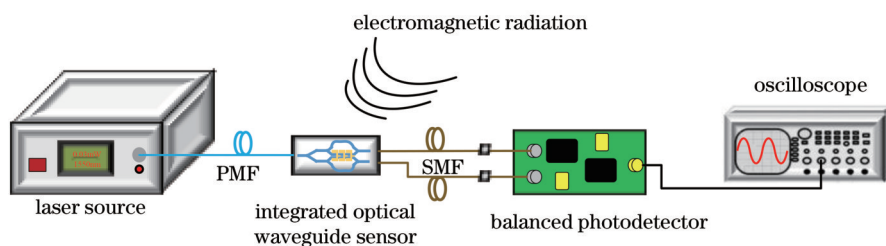


图1 电场传感系统

Fig. 1 Electric field sensing system

## 2.2 传感器的工作原理

双平行非对称 MZI 型光波导结构中电场传感器的基本结构如图 2 所示,其中  $P_{in1}$  和  $P_{in2}$  为传感器的输入功率  $P_{in}$  通过第一个左 Y 分支分成相等的功率,  $P_{out1}$  和  $P_{out2}$  为传感器输出的光功率,  $V_g$  为感应电压,  $E$  为外部电场。

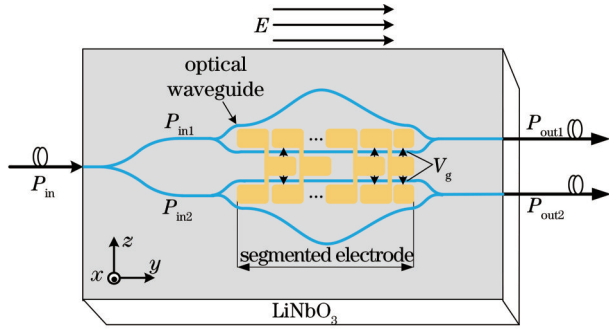


图 2 传感器的基本结构

Fig. 2 Basic structure of sensor

当空间电场的极化方向平行于 LN 中光波的传播方向时,则在两个相邻的分段电极之间形成感应电压  $V_g$ 。LN 晶体具有电光效应,  $V_g$  会导致电极中间的光波导的折射率发生变化,进而对光波导中传输的光

产生相位调制作用。最后在 MZI 光波导右 Y 分支处发生干涉而形成强度调制,即将空间电场信号的变化转换为光强度的变化<sup>[19]</sup>。由于分段电极是对称结构,因此在分段电极的上面部分与下面部分产生的感应电压是大小相等方向相反的,从而对上、下 MZI 中的光波产生相位相反的调制。根据马赫-曾德尔调制器的基本原理,当传感器接收到外部电场  $E(t)$  ( $t$  为时间) 时,传感器输出的光功率可以表示为<sup>[20]</sup>

$$P_{out1} = \frac{1}{2} \alpha P_{in1} \left\{ 1 + \beta \cos \left[ -\frac{\pi}{E_\pi} E(t) + \Delta\varphi_0 \right] \right\}, \quad (1)$$

$$P_{out2} = \frac{1}{2} \alpha P_{in2} \left\{ 1 + \beta \cos \left[ \frac{\pi}{E_\pi} E(t) + \Delta\varphi_0 \right] \right\}, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  和  $\beta$  分别为损耗系数和消光系数;  $E_\pi$  为传感器的半波电场;  $\Delta\varphi_0$  为 MZI 的光波导不对称性所产生的固有相位差。实验设计了长度差为  $\Delta L$  的非对称集成光波导 MZI, 因此在 (1) 式和 (2) 式中的  $\Delta\varphi_0$  为

$$\Delta\varphi_0 = 2\pi N \Delta L / \lambda, \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为传感器的工作波长;  $N$  为光波导的有效折射率。由 (3) 式可知, 通过控制工作波长  $\lambda$  可以使  $\Delta\varphi_0$  等于  $\pi/2$ <sup>[21]</sup>。如果  $E_\pi \gg E(t)$ , 即  $\pi E(t)/E_\pi$  值很小, 那么 (1) 式和 (2) 式变为

$$P_{out1} = \frac{1}{2} \alpha P_{in1} \left\{ 1 - \beta \sin \left[ -\frac{\pi}{E_\pi} E(t) \right] \right\} \approx \frac{1}{2} \alpha P_{in1} \left[ 1 + \beta \frac{\pi}{E_\pi} E(t) \right] \propto E(t), \quad (4)$$

$$P_{out2} = \frac{1}{2} \alpha P_{in2} \left\{ 1 - \beta \sin \left[ \frac{\pi}{E_\pi} E(t) \right] \right\} \approx \frac{1}{2} \alpha P_{in2} \left[ 1 - \beta \frac{\pi}{E_\pi} E(t) \right] \propto -E(t). \quad (5)$$

由 (4) 式和 (5) 式可知, 当传感器工作在线性工作区时, 传感器的输出光功率与测量的电场呈线性关系, 即电场  $E(t)$  可以通过检测传感器的输出光功率来获得, 同时所设计的带有分段电极和双平行非对称 MZI 型光波导结构的电场传感器可将两路光信号调制成一队振幅相同和相位相反的信号, 并将其作为平衡探测所需的差分信号。此外, 根据 (4) 式或 (5) 式分析得到, 若使传感器的输出与被测电场呈线性关系, 则需要满足  $\pi E(t)/E_\pi$  值很小, 由此可得传感器最大的可测电场由传感器的半波电场决定, 则  $E_\pi = \lambda / (2n_e^3 \gamma_{33} \Gamma L_r)$  与光波导的有效折射率  $n_e$ 、LN 晶体的电光系数  $\gamma_{33}$ 、电场和光场之间的重叠因子  $\Gamma$ 、分段电极长度  $L_r$  和激光器输出波长  $\lambda$  有关。因此若要测量更大的电场, 则需要设计具有更大半波电场的传感器。

## 3 平衡光电探测器的设计

设计的平衡光电探测器的原理如图 3 所示, 其中 PIN 为光电二极管, C 为电容, R 为电阻, GND 为地, P 为排针, D 为 LED, EPAD 为连接负极, VS 为电极, NC 为没有内部连接。两个并联且响应度一致的 PIN 型光电二极管可以达到差分的效果, 能够抑制信号中的共模噪声。使用的 PIN 型光电二极管的结电容  $C_D$  为 0.35 pF, 并联电阻  $R_D$  为 5 G $\Omega$ , 暗电流为 0.1 nA, 光响应度  $L_R$  为 0.85 A/W, 信号上升时间  $T_R = 0.1$  ns, 理论上光接收器的带宽  $f_{sig} = 0.35/T_R = 3.5$  GHz。实际上, 探测器的频响特性主要取决于电路的时间常数  $\tau = C_D R_L$ , 其中  $R_L$  为光电二极管的负载电阻。为了获取较高的频率特性和较大的输出电压, 在设计过程中应认真选取  $R_L$  值。

对于图 3 的电路, 选择 AD8045 型的运算放大

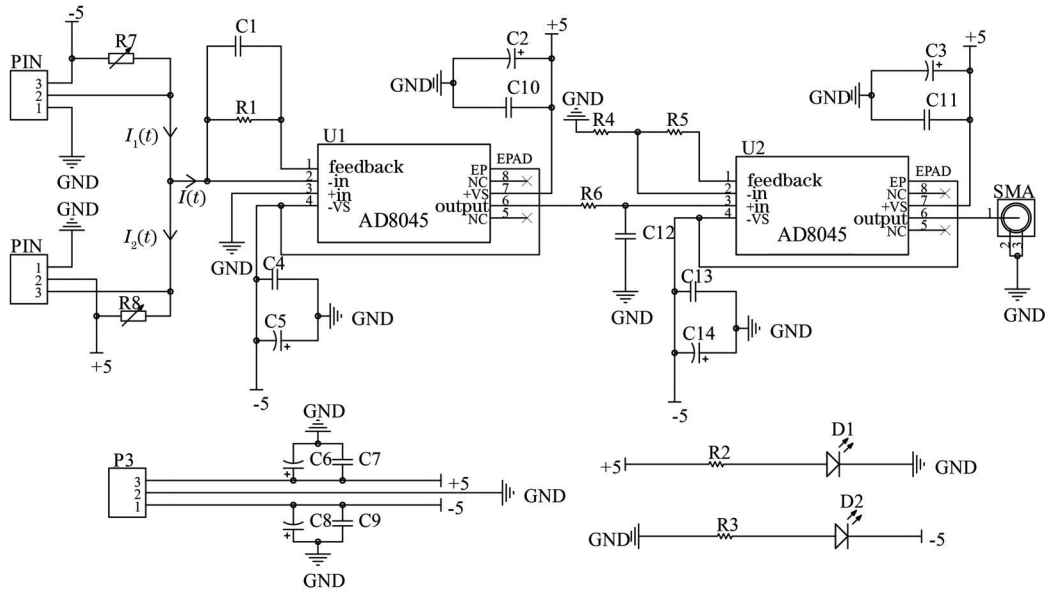


图 3 平衡光电探测器的原理

Fig. 3 Principle of balanced photodetector

器作为跨阻放大器(TIA),该器件的带宽为 1 GHz, 电流噪声为  $3 \text{ pA}/\text{Hz}^{-1/2}$ , 电压噪声为  $3 \text{ nA}/\text{Hz}^{-1/2}$ ,

摆率为  $1350 \text{ V}/\mu\text{s}$ 。为了增加电路的放大倍数, 本文设计了两级运算放大电路,其网络函数为

$$Z\left(\frac{\dot{U}}{\dot{I}}\right) = \frac{R_1(R_4 + R_5)}{R_4(1 + j\omega R_1 C_1 + j\omega R_6 C_{12} - \omega^2 R_1 R_6 C_1 C_{12})}, \quad (6)$$

式中: $\dot{U}$ 为电压向量; $\dot{I}$ 为电流向量; $R_1$ 值为  $374 \Omega$ ; $R_4$ 值为  $243 \Omega$ ; $R_5$ 值为  $73.2 \Omega$ ; $R_6$ 值为  $121 \Omega$ ; $C_1$ 值为  $1.5 \text{ pF}$ ; $C_{12}$ 值为  $5.7 \text{ pF}$ 。通常幅频波特图使用分贝(dB)来表示对数模,即  $Z_{\text{dB}} = 20 \lg [|Z(j\omega)|]$ ,其中  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ 为频率。当最大的  $Z_{\text{dB}}$  值下降 3 dB 时,将其代入(6)式可以得到放大电路的 3 dB 带宽  $\Delta f = 366 \text{ MHz}$ 。通过 LTspice 软件的频域分析功能可以得到电路的幅频特性,特性曲线如图 4 所示。从图 4 可以看到,当幅值下降

3 dB 时,带宽为  $366.69 \text{ MHz}$ ,此时电路的跨阻增益  $A = 51.92 \text{ dB}$ 。

根据跨阻抗放大器的基本原理,放大电路总的噪声可以表示为<sup>[22]</sup>

$$U_{\text{noC}} = \sqrt{U_{\text{noD}}^2 + U_{\text{noe}}^2 + U_{\text{noi}}^2 + U_{\text{noR}}^2}, \quad (7)$$

式中: $U_{\text{noD}}$ 为 PIN 管的噪声; $U_{\text{noe}}$ 为放大器的电压噪声; $U_{\text{noi}}$ 为放大器的电流噪声; $U_{\text{noR}}$ 为电阻的热噪声。通过 LTspice 软件的噪声分析功能可以得出电路的输出电压噪声谱密度,曲线如图 5 所示。

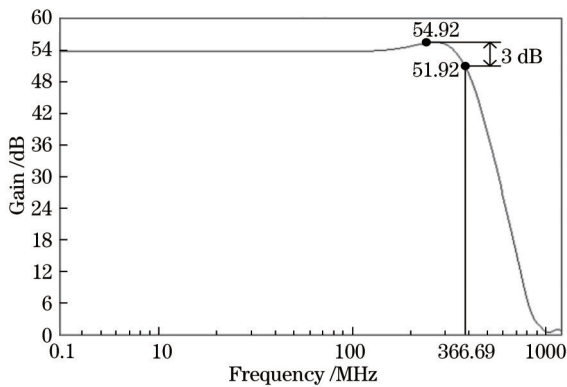


图 4 幅频特性图

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic graph

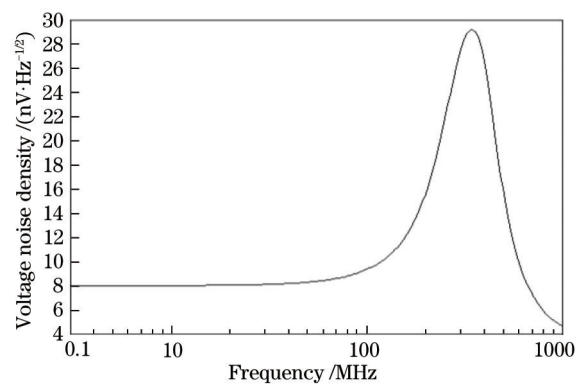


图 5 电压噪声谱密度曲线

Fig. 5 Voltage noise spectral density curve

在通频带内对电压噪声谱密度进行积分可以得到  $U_{noC}=0.26\text{ mV}$ 。综上设计的光电探测器满足所需的大带宽和低噪声的要求。

传感器输出的光信号  $P_{out1}$  和  $P_{out2}$  经过跨阻增益为  $A$  的光电探测器后转换为电信号, 输出电压  $U_{out}$  为

$$U_{out}(t) = A(P_{out1}L_{R1} - P_{out2}L_{R2}) = \frac{1}{2} A\alpha\beta L_R P_{in} \sin\left[\frac{\pi}{E_\pi} E(t)\right] \approx \frac{A\alpha\beta L_R P_{in} \pi E(t)}{2E_\pi}, \quad (8)$$

式中:  $L_{R1}$  与  $L_{R2}$  分别为平衡探测过程中两个光电二极管的响应度。设光响度  $L_R=L_{R1}=L_{R2}$ , 电路只接收单路光信号, 则输出电压  $U_{out}$  为

$$U_{out}(t) = AL_R P_{out} = \frac{1}{4} A\alpha L_R P_{in} \left\{ 1 - \beta \sin\left[\frac{\pi}{E_\pi} E(t)\right] \right\} \approx \frac{1}{4} A\alpha L_R P_{in} - \frac{A\alpha\beta L_R P_{in} \pi E(t)}{4E_\pi}. \quad (9)$$

对比(8)式和(9)式可知, 平衡探测过程消除了信号中的直流分量, 抑制了共模信号, 并且输出电压信号的幅度提高了 6 dB, 从而提高了传感器的灵敏度。

一般情况下, 当系统输出信号的信噪比  $R_{SN}=20\lg[U_{so}/U_{no}]=0$  ( $U_{so}$  和  $U_{no}$  分别为信号和噪声电压的“有效值”)时, 所对应的输入电场为系统的最小可测电场, 即集成光波导电场测量系统最小可测电场的理论值主要由测量系统的噪声决定。对于所设计的光波导电场传感系统的噪声  $U_{no}$ , 其主要由激光器的相对强度噪声(RIN)在平衡光电探测器输出端引起的电压噪声  $U_{noL}$ 、平衡光电探测器的噪声  $U_{noC}$  和示波器的噪声  $U_{noO}$  三部分构成。相对强度噪声和  $U_{noL}$  可表示为

$$R_{RIN} = \frac{10\lg[\langle \Delta P_{RIN}^2 \rangle / \langle P \rangle^2]}{\Delta f}, \quad (10)$$

$$U_{noL} = AL_R \Delta P_{RIN}, \quad (11)$$

式中:  $\langle \Delta P_{RIN}^2 \rangle$  为噪声功率的均方值;  $\langle P \rangle^2$  为平均功率的平方值。当激光器的  $R_{RIN}=-140\text{ dB/Hz}$  时, 平衡光电探测器输出端所引起的电压噪声  $U_{noL}=0.15\text{ mV}$ 。根据(7)式可得  $U_{noC}=0.26\text{ mV}$ , 示波器的底噪  $U_{noO}=1.52\text{ mV}$ 。由此可得传感系统噪声的理论计算值  $U_{no}=U_{noL}+U_{noC}+U_{noO}=1.93\text{ mV}$ 。

为了保证探测器的稳定性和可靠性, 需要降低噪声, 提高其抗干扰能力。设计的 PCB(Printed Circuit Board)板采用的是贴片(SMT)元件, 在元器件的布局过程中尽可能按照信号流的走向进行放置, 保证其排列方式可以使元件之间的连接线最小化, 减小其分布参数。为了降低感应噪声, 设计布线过程中尽量减少回路环的面积。地线和电源线需尽量加粗以减小环路电阻, 并且降低耦合噪声的拾取。设计的 PCB 如图 6(a) 所示, 尺寸为  $50\text{ mm} \times 35\text{ mm}$ 。最终制作的光电探测电路实物如图 6(b) 所示。

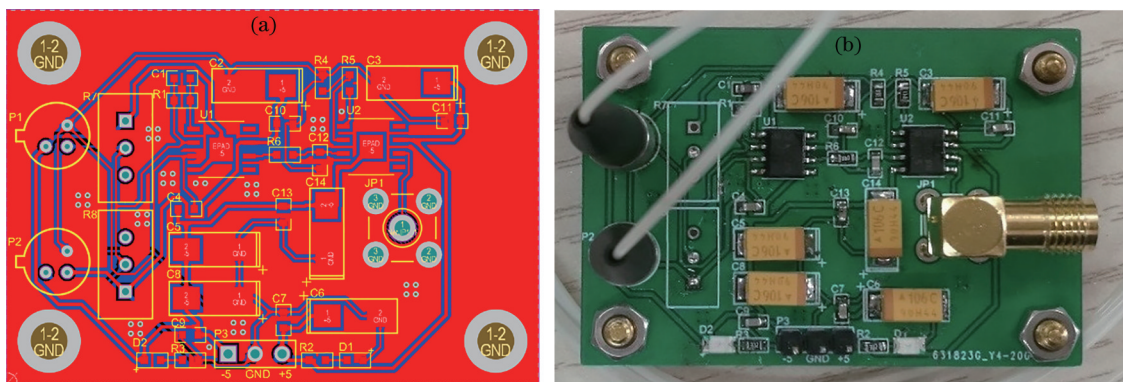


图 6 平衡光电探测器。(a) 电路 PCB; (b) 实物电路

Fig. 6 Balanced photodetector. (a) PCB of circuit; (b) physical circuit

### 4 电场传感器的制作

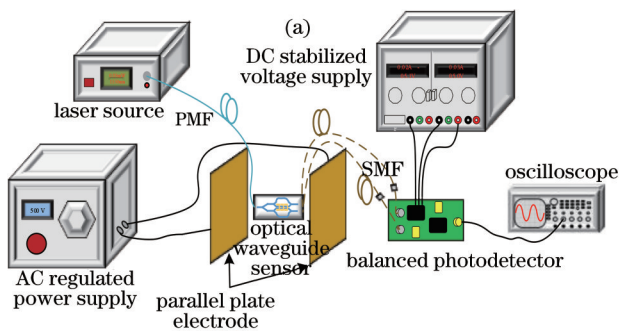
在  $x$  切  $y$  向传播的 LN 基片上使用镀膜和光刻等工艺技术来制作双平行非对称 MZI 型光波导结构。进一步通过光刻等工艺技术在 MZI 光波导周

围使用金来制作金属分段电极, 电极总长为  $3000\ \mu\text{m}$ , 宽为  $100\ \mu\text{m}$ , 电极间距为  $10\ \mu\text{m}$ , 共 10 段。避免金属电极对光吸收造成传输损耗, 在制作电极之前, 采用磁控溅射法在波导的表面上沉积厚度为  $500\text{ nm}$  的  $\text{SiO}_2$  缓冲层。传感器的输入光波导和输

出光波导分别由保偏光纤和单模光纤耦合。由于 LN 基片与光纤之间的应力不同,为了防止光纤连接被损坏,需提高传感器的机械强度,将其固定封装在一个尺寸为 78 mm×14 mm×7.5 mm 的聚丙烯封装盒中,如图 7 所示。此外,将传感器封装在密闭盒子中还可以避免湿度和粉尘等外界环境因素对测量结果的影响。测试得到传感器的插入损耗约为 18.2 dB,由于本文设计的波导结构为双平行非对称 MZI 结构,具有一个输入端和两个输出端,较典型的仅有一个输入端和一个输出端的 MZI 结



图 7 封装后的传感器  
Fig. 7 Packaged sensor



构,器件的耦合附加损耗增加了一半,约为 3 dB。因此,器件的插入损耗主要来自片上损耗,并且主要取决于片上两个非对称 MZI 的弯曲波导所引起的弯曲损耗。由于弯曲损耗主要由弯曲程度决定,因此为了减小器件的插入损耗,在对器件整体尺寸要求较低的情况下,可考虑通过增大 S 型余弦弯曲波导的弯曲长度与弯曲高度的比来减小波导弯曲的程度,从而起到减小损耗的效果。

## 5 电场测量实验

为了测试由设计的光波导电场传感器构成的传感系统的性能参数,对其进行了工频电场测试实验,实验搭建的电路如图 8 所示,其中 DC 为直流电,AC 为交流电。从图 8 可以看到,交流调压电源与平行平板的电极相连,设置交流调压电源的输出可以形成不同强度的电场,电场传感器放在平板电极中心区域的感应电场中并完成电场调制。传感器的输入连接光源,两路输出连接平衡光电探测器,经过平衡光电探测器完成光电转换后,电信号传入示波器中以观察电场的时域波形。

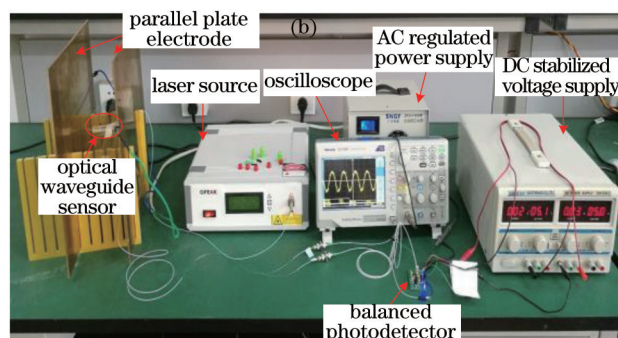


图 8 工频电场测量。(a)测量系统框图;(b)测量系统实物图

Fig. 8 Power frequency electric field measurement. (a) Block diagram of measurement system; (b) physical drawing of measurement system

中华人民共和国国家标准 GB/T 12720-1991<sup>[23]</sup>中对用于标定光电场强仪的平行板有明确规定,当平行板之间的距离  $d$  不小于探头侧面尺寸的 1.5 倍、平板的任一边缘距探头的边缘不小于  $2d$ ,以及平行板与最近地面(墙和地等)之间的距离大于  $2d$  时,平板电极间所产生的电场可以看作均匀强度的电场。实验测试系统中使用的平板电极的边长为 0.35 m 正方形铜板,平板电极之间的距离为 0.12 m,平板电极与最近地面的距离大于 0.24 m,均符合中华人民共和国国家标准的规定。调节交流调压电源的输出以形成不同强度的电场,当工频

电场的场强分别为 0, 25, 33, 85, 3000, 3285 V/m 时,传感系统输出的电压波形如图 9 所示。

从图 9(a)可以看到,当电场强度为 0 时,使用示波器抓取传感系统的输出噪声电压  $U_{no}$  值为 2.88 mV,大于理论的  $U_{no}=1.93$  mV,经过分析主要是由光纤的模式噪声、色散以及系统周围的电磁干扰导致的。根据工程上的要求,当传感系统输出电压信号的信噪比为 6 dB 时,所对应的输入电场为传感系统所能探测的最小电场,即取系统输出信号的  $U_{so}$  为 5.76 mV 所对应的输入电场为传感器的最小可测电场。从图 9(c)可以看到,当电场强度为

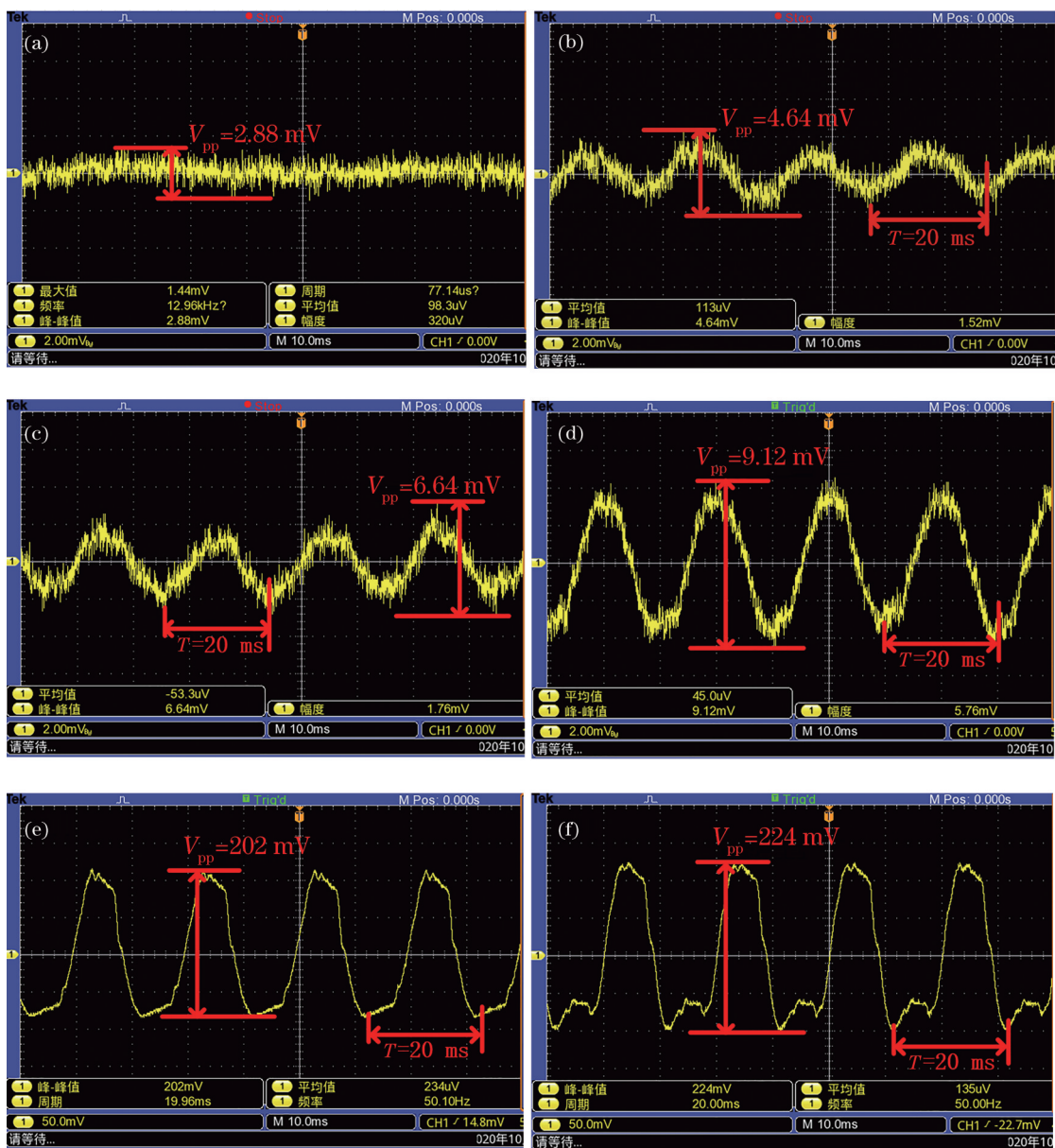


图 9 不同场强下传感器平衡探测的输出波形。(a) 0; (b) 25 V/m; (c) 33 V/m; (d) 85 V/m; (e) 3000 V/m; (f) 3285 V/m

Fig. 9 Output waveform of sensor balance detection under different field intensities. (a) 0; (b) 25 V/m; (c) 33 V/m; (d) 85 V/m; (e) 3000 V/m; (f) 3285 V/m

33 V/m时,信号的输出电压为 6.64 mV 且大于  $U_{so}$ , 因此传感系统的最小可测电场强度为 33 V/m。从图 9(e) 可以看到,当电场强度为 3000 V/m 时,输出的电压波形已经开始发生畸变;当电场强度为 3285 V/m 时,输出的电压波形发生强烈畸变,故传感系统的最大可测电场强度为 3000 V/m。综上所述可知,探测器的线性动态范围为 35 dB。

在相同的实验环境下,不同场强下传感器单路探测的输出波形如图 10 所示。从图 10(a) 可以看到,当电场强度为 0 时,使用示波器抓取传感系统的输出噪

声电压  $U_{no}$  值为 3.68 mV。同样当传感系统输出电压信号的信噪比为 6 dB 时,所对应的输入电场为传感系统所能探测的最小电场,即取系统输出信号的  $U_{so}$  为 7.52 mV 所对应的输入电场为传感器的最小可测电场。从图 10(b) 可以看到,当电场强度为 92 V/m 时,信号的输出电压为 7.52 mV 且大于  $U_{so}$ , 可得在单路情况下传感系统的最小可测电场强度为 92 V/m。综上所述可知,基于平衡探测的集成光波导电场传感器所构成的传感系统,其最小可测电场强度比单路电场传感系统小 59 V/m,灵敏度提高约为 64.1%。

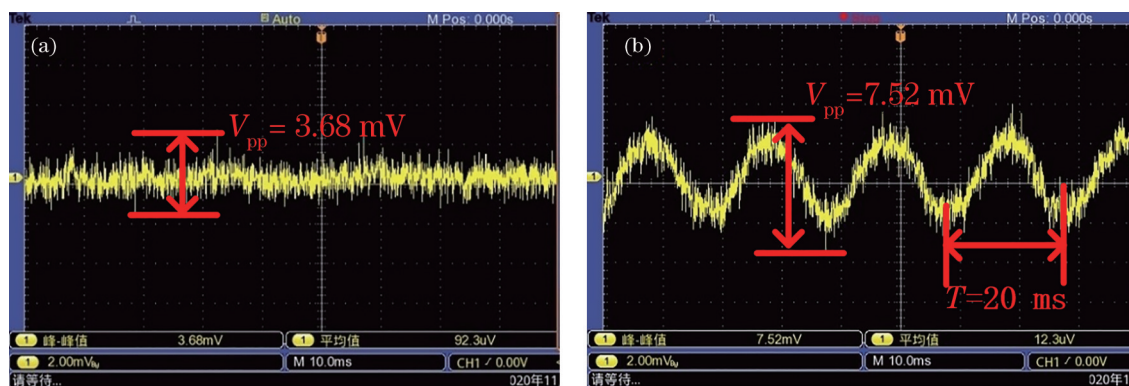


图 10 不同场强下传感器单路探测的输出波形。(a)0;(b)92 V/m

Fig. 10 Output waveform of single-channel sensor detection under different field intensities. (a) 0; (b) 92 V/m

综上所述,现将基于平衡探测的集成光波导电场传感器的测试结果与其他类型的传感器进行对比,结果如表 1 所示。

从表 1 可以看到,本文研制的铌酸锂传感器的体积与现有的铌酸锂 MZI 型、铌酸锂 AMZI (Asymmetric MZI) 型和铌酸锂 CPI (Common

Path Interferometer, CPI) 型光波导电场传感器相比,差别较小,但灵敏度提高了一个数量级;与 LN 块状晶体型光学传感器相比,研制的铌酸锂传感器的体积有所偏大,但灵敏度提高了两个数量级,而且还有控制工作点的优势。

表 1 不同类型传感器的测量结果

Table 1 Measurement results of different types of sensors

Sensor	Size / (mm×mm×mm)	Time domain measurement range / (kV·m <sup>-1</sup> )	Operating point control
MZI <sup>[10]</sup>	60.0×6.0×0.5	0.100–2.500	No
CPI <sup>[15]</sup>	180.0×40.0×11.3	0.100–27.000	No
Asymmetric MZI <sup>[11]</sup>	80.0×18.0×7.5	0.350–125.000	With
LN massive crystal <sup>[17]</sup>	33.0×4.0×3.0	1.050–150.000	No
This paper	78.0×14.0×7.5	0.033–3.000	With

## 6 结 论

本文通过在一片 LN 晶片上制备双平行非对称 MZI 型光波导结构,并在双平行非对称 MZI 波导的两侧设计分段电极,实现方向相反的电光调制功能。采用集成光学的制作工艺研制尺寸为 78 mm×14 mm×7.5 mm 的集成光波导电场传感器。为了探测传感器输出的两路光信号,设计并制作一种跨阻抗平衡光电探测电路并搭建工频电场测量系统,对电场传感系统的性能进行测试,得到电场传感器时域线性最小和最大可测电场强度分别为 33 V/m 和 3000 V/m,探测器的线性动态范围为 35 dB。该传感器为无源器件,具有体积小和灵敏度高的优点,为探测微弱信号的领域提供一种新的有效手段。

## 参 考 文 献

- [1] Wu P, Jiang Y S, Xu Z Q, et al. Experimental research on CCD imaging equipment in intensive
- [2] Wang H, Zhuang C J, Zeng R, et al. Transient voltage measurements for overhead transmission lines and substations by metal-free and contactless integrated electro-optic field sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 571-579.
- [3] Zhang J H, Yang D B, Zhang C S, et al. A single chip LiNbO<sub>3</sub> photonic 2D electric field sensor using two perpendicular electrodes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(23): 1501-1504.
- [4] Xiao D P, Ma Q C, Xie Y T, et al. A power-frequency electric field sensor for portable measurement[J]. Sensors, 2018, 18(4): E1053.
- [5] Zhang J H, Chen F S, Liu B. Integrated photonic electric field sensor operating more than 26 GHz[J].

electromagnetic-pulse environment[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0611002.

吴平,姜云升,徐志谦,等. CCD 成像设备在强电磁脉冲环境下的效应实验研究[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0611002.



- IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(10): 1009-1012.
- [6] Zhang C L, Cai C, Liu K, et al. Ultracompact refractive index sensor based on integrated optical waveguide trench coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2413001.  
张成龙, 蔡宸, 刘克, 等. 基于集成光波导沟槽耦合器的超紧凑折射率传感器[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2413001.
- [7] Bulmer C H, Burns W K, Moeller R P. Linear interferometric waveguide modulator for electromagnetic-field detection[J]. Optics Letters, 1980, 5(5): 176-178.
- [8] Bulmer C, Sheem S, Moeller R, et al. Fabrication of flip-chip optical couplers between single-mode fibers and LiNbO<sub>3</sub> channel waveguides[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1981, 4(4): 350-355.
- [9] Bulmer C, Burns W. Linear interferometric modulators in Ti: LiNbO<sub>3</sub>[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(4): 512-521.
- [10] Sun B, Chen F S. Integrated optical E-field sensor for measurements of power frequency electric field[J]. 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.
- [11] Zhang J H, Wan X R, Li Y N, et al. An integrated electro-optic magnetic field sensor based on reflected Mach-Zehnder interferometer[J]. Optik, 2018, 157: 315-318.
- [12] Xiao K, Jin X F, Jin X D, et al. A two-dimensional LiNbO<sub>3</sub> photonic E-field sensor using inclined dipole antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2203-2206.
- [13] Gutiérrez-Martínez C, Santos-Aguilar J, Meza-Pérez J, et al. Novel electric field sensing scheme using integrated optics LiNbO<sub>3</sub> unbalanced Mach-Zehnder interferometers and optical delay-modulation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(1): 27-33.
- [14] Chung C J, Xu X C, Pan Z Y, et al. Silicon-based hybrid integrated photonic chip for K<sub>w</sub> band electromagnetic wave sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(9): 1568-1575.
- [15] Li Z Y, Yuan H W, Cui Y, et al. Measurement of distorted power-frequency electric field with integrated optical sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(4): 1132-1139.
- [16] Li J W, Zhang J H, Xu X P, et al. Integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer power frequency intensive electric field sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0913001.  
李佳文, 张家洪, 许晓平, 等. 集成马赫曾德型光波导工频强电场传感器[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0913001.
- [17] Yang Q, Liu R, He Y, et al. AC/DC hybrid electric field measurement method based on Pockels effect and electric field modulation[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(5): 055004.
- [18] Ma X Y, Zhuang C J, Zeng R, et al. Large-dynamic-range athermal lithium niobate on insulator/TiO<sub>2</sub> nanobeam electric field sensor[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(10): 105101.
- [19] Geng J, Zhu X J, Zhang G A, et al. Bandwidth tunable microfiber-assisted Mach-Zehnder interferometer based on tapered-drawing fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0306004.  
耿健, 朱晓军, 章国安, 等. 基于光纤布拉格光栅拉锥的带宽可调微光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0306004.
- [20] Hong G L, Zhou Y B, Yan W, et al. Field-widening technology of Mach-Zehnder interferometer in Doppler wind lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0628001.  
洪光烈, 周艳波, 严韦, 等. 多普勒测风激光雷达中马赫-曾德尔干涉仪的视场展宽技术研究[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0628001.
- [21] Zhang J H, Luo C, Zhao Z G. Design and application of integrated optics sensor for measurement of intense pulsed electric field[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4): 1440-1448.
- [22] Zhang Z M, Chen F. Noise analysis of opto-electronic detection amplifier[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012, 27(3): 37-40.  
张正茂, 陈峰. 光电探测放大器的噪声分析[J]. 光电技术应用, 2012, 27(3): 37-40.
- [23] State bureau of quality and technical supervision of the People's Republic of China. National standard (recommended) of the People's Republic of China: measurement of power-frequency electric fields: GB/T 12720—1991[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.  
国家技术监督局. 中华人民共和国推荐性国家标准: 工频电场测量: GB/T 12720—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.