

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108122

## 铌酸锂集成 MZI 型光波导大电流传感器\*

杨杜兵<sup>1,2</sup>, 张家洪<sup>1,2</sup>, 陈福深<sup>3</sup>, 赵振刚<sup>1,2</sup>, 李英娜<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学信息工程与自动化学院 昆明 650500; 2. 云南省计算机应用技术重点实验室 昆明 650500;  
3. 北京森馥科技股份有限公司 北京 102209)

**摘要:**采用集成光学技术,设计与研制出了一种用于大电流测量的集成光波导电流传感器,器件体积为 78 mm×18 mm×9 mm。对带有多环形天线和调制电极的传感器结构进行了理论分析,并利用 COMSOL Multiphysics 软件建立传感器的三维模型,仿真验证了所设计的传感器可用于脉冲大电流的测量。搭建了脉冲大电流测量实验系统,对传感器性能进行测试。结果表明,传感器测量得到的脉冲电流时域波形与 Pearson 电流互感器测量得到的脉冲电流时域波形相比,波前时间  $T_f$  和持续时间  $T_d$  的平均相对误差分别为 3.977 5% 和 5.437 5%。传感器在 100~3 300 A 的被测电流范围内,线性相关系数为 0.998 97,当信噪比为 6 dB 时,传感器最小可测电流为 66 A。

**关键词:**集成光学;马赫-曾德尔干涉仪;环形天线;电流传感器;脉冲大电流

**中图分类号:** TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Lithium niobate integrated MZI optical waveguide high current sensor

Yang Dubing<sup>1,2</sup>, Zhang Jiahong<sup>1,2</sup>, Chen Fushen<sup>3</sup>, Zhao Zhengang<sup>1,2</sup>, Li Yingna<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;  
2. Yunnan Key Laboratory of Computer Technology Application, Kunming 650500, China;  
3. Beijing Safety Test Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** Adopting integrated optical technology, an integrated optical waveguide current sensor for high current measurement is designed and developed, the size of the device is 78 mm×18 mm×9 mm. The theoretical analysis of the sensor structure with multiple loop antennas and modulation electrodes is carried out. The COMSOL Multiphysics software is used to establish a three-dimensional model of the sensor, the simulation results show that the designed sensor can be used to measure the pulse high current. The experiment system for pulse high current measurement was built to test the performance of the sensor. The results show that when the pulse current time domain waveform measured by the sensor is compared with that measured by the Pearson current transformer, the mean relative errors of the wavefront time  $T_f$  and the duration time  $T_d$  are 3.977 5% and 5.437 5%, respectively. The linear correlation coefficient is 0.998 97 in the measured current range of 100~3 300 A. When the SNR is 6 dB, the minimum measurable current of the sensor is 66 A.

**Keywords:** integrated optics; Mach-Zehnder interferometer; loop antenna; current sensor; pulse high current

## 0 引 言

随着我国电力行业的发展,传统的电力系统正在向现代电力系统转变<sup>[1-2]</sup>。在电力公司、国防军工等企业和领域存在着交流大电流、直流大电流、脉冲大电流发生装置的安全使用问题,因此大电流测量在现代电气系统中

是必不可少的<sup>[3-4]</sup>。

电流测量的传统方法有罗氏线圈、电流互感器以及电阻分流法。其中,依据法拉第电磁感应定律和安培环路定律的罗氏线圈是大电流测量的主要工具之一,优势在于与被测电流之间的电气隔离以及高频电流测量性能好<sup>[5]</sup>,应用于脉冲、交流大电流的检测。罗氏线圈能测量高达 40 kA/ $\mu$ s 的瞬态电流<sup>[6]</sup>,最先进的商业罗氏线圈灵

收稿日期:2021-06-21 Received Date: 2021-06-21

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

灵敏度为 100 mV/A, 带宽为 50 MHz<sup>[7]</sup>。但罗氏线圈通常需外接积分器来获得精确的结果, 并且运算放大器输入偏置电压引起的误差会对测量精度产生影响。电流互感器是另一种基于法拉第感应定律的电流传感器, 用于测量直流、交流和脉冲电流。相比于罗氏线圈, 电流互感器不需要外接积分器, 其输出电压与初级电流成正比, 可以通过模数转换器直接采样, 但电流互感器使用了高磁导率的磁芯, 因此存在磁饱和和铁磁谐振、带宽窄和动态范围小等问题<sup>[8]</sup>。电阻分流法依据欧姆电阻定律为电流测量提供了一种简单的方法。目前高性能的同轴分流器已广泛用于测量快速上升时间和高振幅的瞬态电流脉冲<sup>[9]</sup>, 例如文献[10]介绍了一种改进的同轴分流器 SC-300 M 结构, 可测量 220 kA 的脉冲电流。但是分流器的检测电路和被测电流之间不可避免的有电连接, 需要使用隔离放大器增加电气隔离, 这会造成传感器体积过大以及降低传感器的带宽和精度。

近几年, 基于 Faraday 磁光效应的光纤电流传感器 (fiber optic current sensor, FOCS) 已经达到了很高的成熟度。与传统电流测量技术相比, FOCS 尺寸和重量显著减小, 且有更宽的动态范围。例如, 文献[11]采用闭环调制方案提出了一种用于测量雷电流的 FOCS, 测量范围为 1~100 kA。文献[12]提出的用于脉冲大电流测量的 FOCS 最大可测电流为 200 kA, 带宽为 100 kHz。然而, 环境温度会引起光纤磁光材料的 Verdet 常数漂移, 导致传感器的测量精度容易受到环境温度的影响<sup>[13]</sup>, 并且光纤固有的线性双折射和外部应力引起的线性双折射会引起光波在传感线圈中圆偏振状态的退化, 从而影响传感器的线性度和灵敏度。虽然有研究人员提出使用法拉第镜反射法来补偿固有的双折射效应, 但磁场引起的非互易双折射性是不能被完全补偿的<sup>[14]</sup>。另外, FOCS 使用过程中需要将光纤缠绕在电缆上, 给实际测量带来不便。

基于光纤布拉格光栅 (fiber bragg grating, FBG) 和超磁致伸缩材料 (giant magnetostrictive materials, GMM) 的光学电流传感器主要优点在于灵敏度高并且不需要考虑光波的偏振态<sup>[15]</sup>。文献[16]提出的基于 FBG 和 GMM 的开环光纤电流传感器测量范围为 15~450 A, 灵敏度为 201  $\mu\text{V}/\text{A}$ 。文献[17]提出的基于 FBG 和磁致伸缩合金 Terfenol-D 的紧凑型光纤电流传感器可测电流高达 800 A, 灵敏度为 0.197  $\text{pm}/\text{A}$ 。但是, 由于 GMM 的磁致伸缩系数受温度影响并且光纤光栅存在温度和应变交叉敏感, 因此会导致传感器的测量精度和灵敏度受到温度影响。虽然有研究提出<sup>[18-19]</sup>了双光纤光栅传感结构进行温度补偿, 但方案仅考虑通过温度引起的 FBG 中心波长变化得到的校准参数进行温度补偿, 未考虑 GMM 的磁致伸缩系数受温度的影响, 且所述的温度补偿方案结构较为复杂, 不利于实际工程应用。

本文采用集成光学技术在铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) 晶片表面制作光波导、多环形天线和调制电极, 提出了一种 LN 集成马赫曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI) 型光波导大电流传感器。所研制的电流传感器具有体积小、结构简单、带宽宽和抗电磁干扰等特点, 可以实现脉冲大电流的时域探测。最后通过脉冲电流测量实验, 对传感器的输入输出特性进行了研究。

## 1 传感器及其系统工作原理

### 1.1 传感系统

电流传感系统示意图如图 1 所示, 光源输出的线偏振光通过保偏光纤 (polarization maintaining fiber, PMF) 输入到 LN 集成 MZI 型光波导大电流传感器, 光波导中传输的光受到载流导线上电流产生的磁场信号调制之后, 将被测电流信号加载到光波上。传感器输出光经单模光纤 (single mode fiber, SMF) 连接到光电探测器进行光电转换, 转换后的电信号由信号提取单元进行提取。

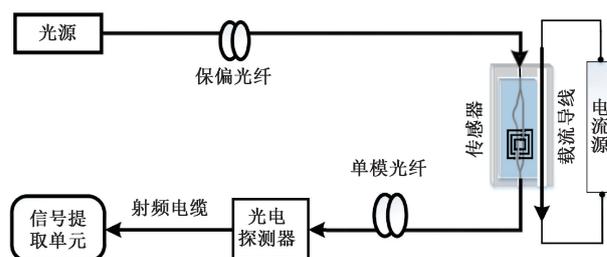


图 1 电流传感系统

Fig. 1 Current sensing system

### 1.2 传感器的工作原理

图 2 所示为 LN 集成 MZI 型光波导大电流传感器结构示意图。传感器以  $x$  切  $y$  传的 LN 晶片为衬底, 光波导、多环形天线和调制电极集成在 LN 晶片表面, 多环形天线接收载流导线产生的磁场信号后在调制电极之间形成沿  $z$  轴方向的感应电压。因为质子交换工艺制作的  $x$  切向 LN 光波导只支持 TE 模式 (沿  $z$  轴偏振), 因此根据 LN 晶体的电光效应, 通过光波导传输的光波可以被沿着  $z$  轴方向的感应电压调制。设计具有一定臂长差的非对称 MZI 型结构使波导中传播的两束光在未加电场时具有  $\pi/2$  的相位差, 从而使器件工作在线性区。设计环形天线为矩形的金属环结构, 在金属环两条相对的边上分别制作两条平行的金属调制电极。图 3 所示为多环形天线中最小环行天线的结构尺寸, 其中环形天线与调制电极的厚度均为 1  $\mu\text{m}$ 。为提高传感器的灵敏度, 设计环形天线的匝数为 6 个环, 环与环的间距均为 200  $\mu\text{m}$ 。

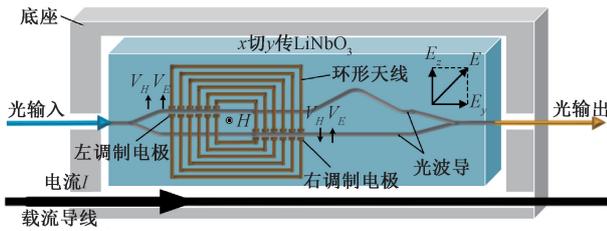


图 2 光波导大电流传感器原理结构

Fig. 2 Principle structure of the optical waveguide high current sensor

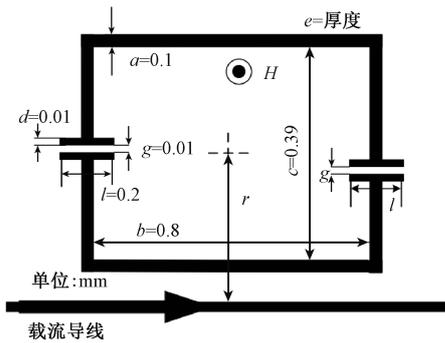


图 3 天线电极结构

Fig. 3 Antenna electrode structure

设计将载流导线固定在传感器的底座中,使载流导线上的待测电流  $I$  和环形天线始终处于同一个平面上,并且将传感器中心点与载流导线的垂直距离固定为  $r$ 。由安培环路定理可知,被测电流  $I$  感生出垂直穿过环形天线的磁场  $H$ 。若传感器中心点与载流导线的垂直距离  $r$  远小于的电磁场波长  $\lambda$  时,被测电流  $I$  产生的时变电磁场与恒定电磁场的特性近似相同<sup>[20]</sup>。因此在满足近场区 ( $r \ll \lambda$ ) 条件下,根据毕奥-萨伐尔定律,穿过环形天线的磁感应强度为:

$$B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (1)$$

式中:  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0$  为真空中的磁导率,其值为  $4\pi \times 10^{-7}$ ,  $\mu_r = 1$  是理想介质的相对磁导率;  $I$  为待测脉冲电流;  $r$  为载流导线到环形天线中心的垂直距离。

假设载流导线产生的磁场  $H$  垂直于环形天线平面,根据法拉第电磁感应定律,在磁场  $H$  的作用下,环形天线上将感生出感应电流,从而在调制电极间形成感应电压  $V_H$ :

$$V_H(\omega, t) = -\frac{d}{dt}\Phi(\omega, t) = -\frac{\omega S \mu}{2\pi r} I(\omega, t) \quad (2)$$

式中:  $\Phi$  为穿过环形天线的磁通量,  $\omega$  是磁场的角频率,  $S$  为环形天线的面积。左调制电极上的  $V_H$  沿着  $z$  轴正方向,右调制电极上的  $V_H$  沿着  $z$  轴负方向。

在载流导线产生的时变电磁场中,垂直于环形天线平面的磁场  $H$  会伴随有平行于环形天线平面的电场  $E$ 。电场  $E$  可分解为沿  $y$  方向的电场  $E_y$ ,沿  $z$  方向的电场  $E_z$ ,如图 2 所示。电场  $E_y$  不会在电极之间产生感应电压,而电场  $E_z$  将在左右调制电极间产生沿着  $z$  轴正方向上的感应电压  $V_E$ 。因此电极之间的感应电压  $V$  是磁场  $H$  和电场  $E$  共同作用的结果,即  $V = V_E \pm V_H$ 。根据 LN 晶体的电光效应,感应电压  $V$  对波导中传输的光波进行调制,经调制的光波在输出  $Y$  分支处干涉输出,将光相位变化转换成光强度变化,传感器输出光强的表达式为<sup>[21]</sup>:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \alpha P_{in} [1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \Delta\varphi_0)] \quad (3)$$

式中:  $P_{out}$  为 MZI 的  $Y$  分支输出光功率,  $\alpha$  为插入损耗引起的光衰减系数,  $P_{in}$  为输入光功率,  $\Delta\varphi_0$  为传感器的偏置相位,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  为两波导臂上产生的相移,其表达式为:

$$\varphi_1 = \pi(V_E + V_H)/V_\pi \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \pi(V_E - V_H)/V_\pi \quad (5)$$

式(4)和(5)中的  $V_\pi$  为传感器的半波电压,与传感器结构有关。由式(3)、(4)和(5)可得:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \alpha P_{in} [1 + \cos(2\pi V_H/V_\pi + \Delta\varphi_0)] \quad (6)$$

由式(6)可得,传感器输出的光强仅与磁场  $H$  产生的感应电压  $V_H$  有关,而与电场  $E$  产生的感应电压  $V_E$  无关。如果  $2\pi V_H/V_\pi \ll 1$ ,并且偏置相位  $\Delta\varphi_0 = \pi/2$ ,则式(6)可简化为:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \alpha P_{in} [1 - \sin(2\pi V_H/V_\pi)] \approx$$

$$\frac{1}{2} \alpha P_{in} (1 - 2\pi V_H/V_\pi) \propto V_H \quad (7)$$

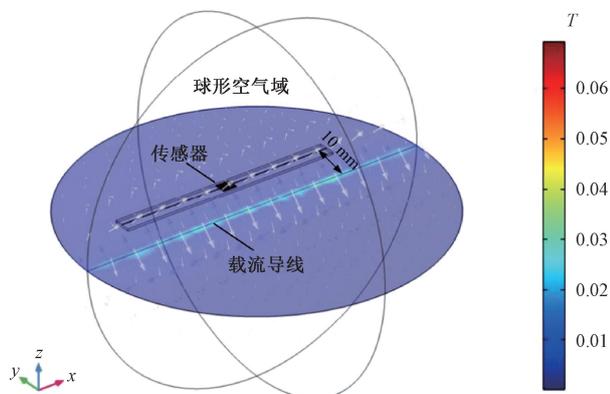
由式(7)可知,传感器输出光强正比于  $V_H$ ,又由式(2)可知,  $V_H$  与被测电流  $I$  之间成正比。因此传感器输出的光强与被测电流之间为正比关系,即可使用示波器等仪器提取光电探测器输出的电信号获得被测电流的信息。

## 2 传感器的有限元分析

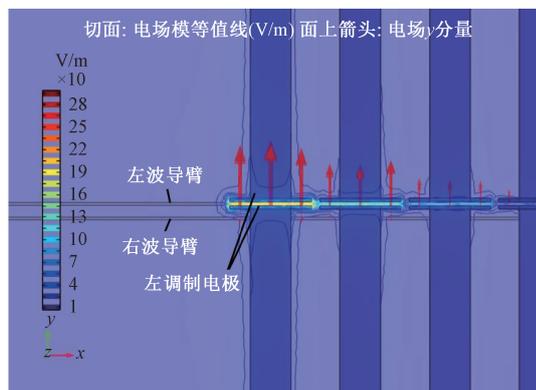
### 2.1 模型建立

采用 COMSOL Multiphysics 仿真软件建立传感器结构的三维有限元模型,如图 4 所示。传感器模型由 LN 晶片、光波导、环形天线和调制电极组成。设置球形空气域作为三维模型的求解域,并在球形空气域最外层添加磁场模块的无限元域,无限元域是用来表示无界限几何的虚拟域。根据目前微光学制作工艺技术, LN 晶片设置为  $50 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  的长方体,波导结构是半径  $3 \mu\text{m}$

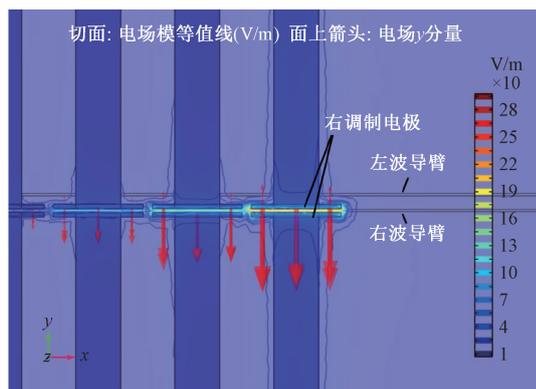
的半圆柱体。根据实际的物理过程,物理场选择电磁场模块下的磁场。利用磁场模块添加电流作为载流导线上的被测电流,方向为  $x$  轴正方向。



(a) 传感器三维仿真模型  
(a) The 3D simulation model of the sensor



(b) 左边天线电极局部图  
(b) Partial diagram of the left antenna electrode



(c) 右边天线电极局部图  
(c) Partial diagram of the right antenna electrode

图4 传感器仿真图

Fig.4 Sensor simulation diagram

理论上,传感器中心点与载流导线的垂直距离  $r$  越小,穿过环形天线的磁场越大,调制电极间的感应电压也就越大,从而对光波导中传输的光波调制效果越好。注

意到实际封装后的集成光波导传感器中心点与其侧边的垂直距离为  $9\text{ mm}$ <sup>[22]</sup>,同时考虑到传感器外侧存在一定的厚度,因此仿真中设置  $r$  为  $10\text{ mm}$ 。在  $3\text{ Hz}\sim 3\text{ GHz}$  的电磁波频率范围内,传感器中心点与载流导线的距离  $10\text{ mm}$  远小于最小波长  $10\text{ cm}$ 。因此,在  $3\text{ GHz}$  的频率范围内,被测电流  $I$  与其产生的磁场  $H$  之间满足式(1)。

由于 LN 晶片的尺寸远大于天线和电极的尺寸,为确保有限元仿真的精度,有限元网络选择用户划分网络。波导和天线电极部分采用最小单元为  $0.013$  的自由四面体网络, LN 晶片选择细化网络,无限元域层选择扫掠网络,划分后的总网络数目为  $1\ 703\ 298$  个单元。

2.2 仿真结果分析

在仿真软件中创建双指数脉冲电流的解析函数,解析函数为:  $I(t) = I_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ 。选择了波前时间  $T_f$  为  $5.55\ \mu\text{s}$ ,持续时间  $T_d$  为  $21.12\ \mu\text{s}$  的双指数脉冲电流函数,其波前衰减系数  $\alpha = 7.714 \times 10^4$ ,波尾衰减系数  $\beta = 2.489 \times 10^5$ ,波形校正系数  $k = 2.33$ ,并设置电流峰值  $I_0 = 500\text{ A}$ 。将电场探针分别放置在左、右调制电极间的波导中心位置处测量 12 对调制电极之间的  $y$  分量电场强度,该电场即为加载至左、右波导臂上的电场。左边 6 个调制电极间波导臂上的  $y$  分量电场强度之和为  $E_{1y}$ ,右边 6 个调制电极间波导臂上的  $y$  分量电场强度之和为  $E_{2y}$ 。由式(7)可知,传感器的输出光强与两波导臂中的调制电压之差有关,所以这里取电场强度差  $\Delta E = (E_{1y} - E_{2y})$  作为传感器的调制信号,仿真结果如图 5 所示。

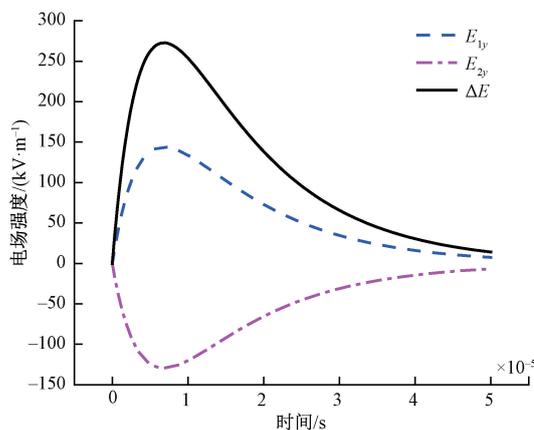


图5 脉冲电流的仿真结果

Fig.5 Simulation results of pulse current

由图 5 可以看出,  $E_{1y}$  和  $E_{2y}$  大小不一样,方向相反,这是因为  $E_{1y} = E_H + E_E$ ,  $E_{2y} = -E_H + E_E$ ,其中  $E_H$  为磁场在电极间产生的  $y$  方向电场强度,  $E_E$  为电场在电极间产生的  $y$  方向电场强度。同时,从图 5 的仿真数据中得到  $E_{1y}$  脉冲时域波形的波前时间  $T_f = 4.9\ \mu\text{s}$ ,持续时间  $T_d = 21.83\ \mu\text{s}$ ;  $E_{2y}$  脉冲时域波形的波前时间  $T_f = 4.88\ \mu\text{s}$ ,持

续时间  $T_d = 22.42 \mu\text{s}$ ;  $\Delta E$  脉冲时域波形的波前时间  $T_r = 4.8 \mu\text{s}$ , 持续时间  $T_d = 21.95 \mu\text{s}$ 。从图 5 的仿真数据来看, 仿真得到的脉冲电流时域波形与双指数脉冲电流时域波形吻合度较好。

仿真中设置峰峰值为 50 A 的正弦交流电为被测电流, 频率范围设置为 1~10 MHz, 且 1~100 kHz 频率范围内的步长设置为 10 kHz, 100 kHz~10 MHz 频率范围内的步长设置为 100 kHz。使用电场探针探测 12 对调制电极间的  $y$  分量电场强度, 取电场强度差  $\Delta E$  为传感器的仿真结果, 仿真结果如图 6 所示。从图中可以得到在 1 kHz~7.4 MHz 的频率范围内  $\Delta E$  波动在  $\pm 6$  dB 之内, 得到传感器的带宽为 7.4 MHz。由于 8/20  $\mu\text{s}$  雷电脉冲电流的能量频谱主要集中在 10~183.17 kHz, 因此传感器的带宽覆盖了雷电流的频谱范围, 即所设计的传感器能够对 8/20  $\mu\text{s}$  的脉冲电流时域波形进行测量。

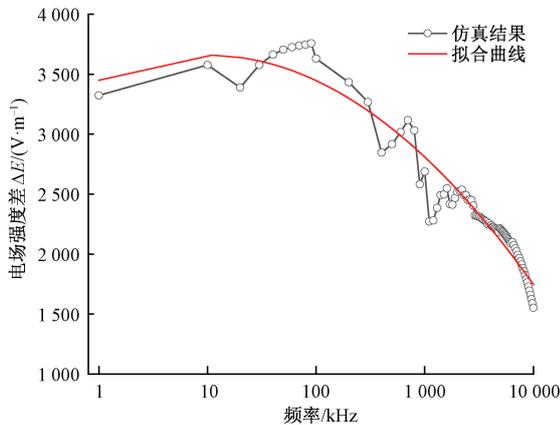


图 6 传感器频率响应图

Fig. 6 Sensor frequency response diagram

### 3 电流传感器制作

传感器的制备主要分为光波导跟天线电极两个部分的制作。利用退火质子交换工艺, 将切割好的  $x$  切  $y$  传 LN 晶片进行清洗以及烘干, 使用磁控溅射仪在 LN 晶片上制作厚度为 80 nm 金属铬阻挡层, 利用旋涂机在 LN 晶片样品上涂上一层光刻胶。在光刻机的操作台上, 把晶片紧贴在掩膜版的下方, 通过曝光和显影形成作为质子交换的波导通道。将交换温度设定在 250℃~300℃ 之间, 用质子在苯甲酸中与少量锂和苯甲酸酯交换 4.5 h, 再使用腐蚀液去除质子交换后的样品表面的阻挡层。完成样品的清洗之后, 将晶片放置在 350℃ 的高温环境中退火 5 h, 完成 6  $\mu\text{m}$  宽度的光波导制作。天线电极用超声剥离法制成, 长为 200  $\mu\text{m}$ 、宽为 10  $\mu\text{m}$ 、间距为 10  $\mu\text{m}$  的电极对共 12 对, 6 个环形天线的环间距均为 200  $\mu\text{m}$ 。

用天线电极掩膜板重复波导制作的光刻过程, 先在晶片表面涂上一层光刻胶, 再利用光刻法精确的将天线电极图案制作到直波导的两侧。考虑到天线电极和 LN 晶片的附着性, 先在样品表面镀一层薄的铬层, 然后在铬层上镀一层金作为天线和电极, 再根据需求将天线和电极加厚至 1  $\mu\text{m}$ , 最后将样品在丙酮中超声剥离不需要的部分, 完成天线电极的制作。

为增强稳定性, 将传感器芯片封装在聚丙烯绝缘腔内, 如图 7 所示为封装后的传感器照片。可以看到, 传感器实际尺寸为 78 mm×18 mm×9 mm, 输入输出的光波导分别与 PMF 和 SMF 耦合, 设计制作的塑料底座尺寸为 120 mm×40 mm×12 mm, 测试了传感器的插入损耗约为 9.98 dB。

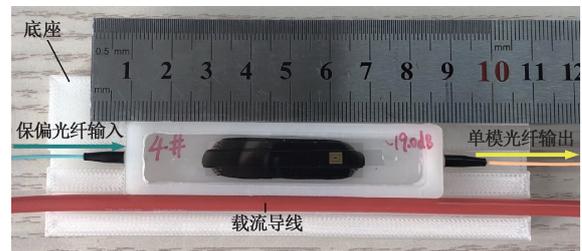


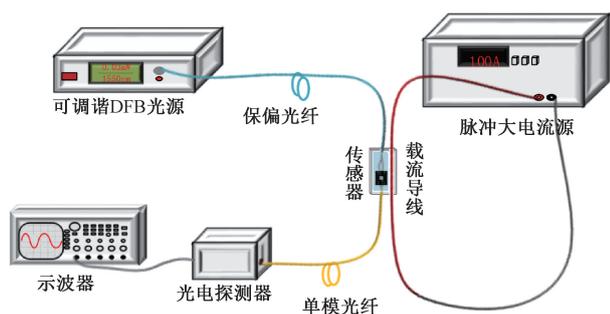
图 7 封装后的传感器照片

Fig. 7 The photograph of the packaged sensor

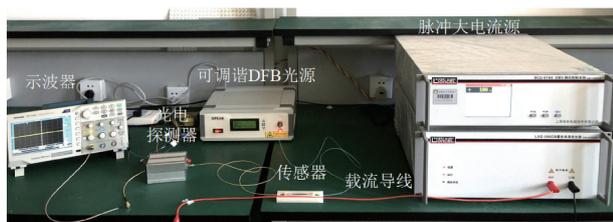
### 4 脉冲大电流测量实验

如图 8 所示搭建了脉冲大电流测量实验系统, 对 LN 集成 MZI 型光波导大电流传感器的性能进行了测试。载流导线上的电流由脉冲电流源 (LSG-506 CB) 提供, 短路放电可产生 8/20  $\mu\text{s}$  脉冲电流, 电流峰值范围是 50~3 300 A。调节电流源可输出不同峰值的脉冲电流。载流导线固定在传感器的底座中, 其产生的磁场信号被传感器接收并完成光调制, 传感器中心点与载流导线的垂直距离为 10 mm。传感器输入通过 PMF 连接到可调谐分布式反馈 (distributed feedback, DFB) 光源 (调谐范围: 1 529.55~1 561.01 nm), 输出端通过 SMF 连接到波长响应范围为 1 100~1 650 nm、带宽为 200 MHz 的光电探测器进行光电转换后将电信号送入到带宽为 200 MHz、采样率为 2.0 GS/s 的示波器中观察脉冲电流的时域波形。

选取脉冲电流分别为 100、1 000、2 000、3 300 A 时, 传感器测量到的脉冲电流时域波形如图 9 左边波形所示。考虑到一般情况下, 大多使用 Pearson 电流互感器测量脉冲电流源的原信号经过载流导线后的脉冲电流波形作为原信号波形。因此, 为了对比本文使用 Pearson 电流互感器测量了当脉冲电流峰值分别为 100、1 000、2 000 和 3 300 A 时, 脉冲电流源的原信号经过载流导线后的脉



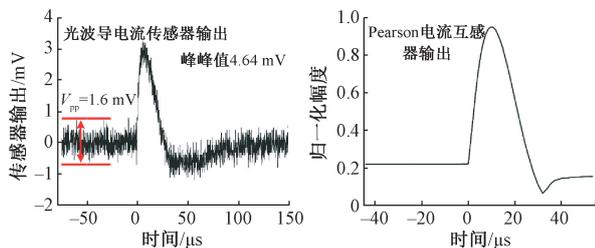
(a) 测量系统框图  
(a) Block diagram of the measurement system



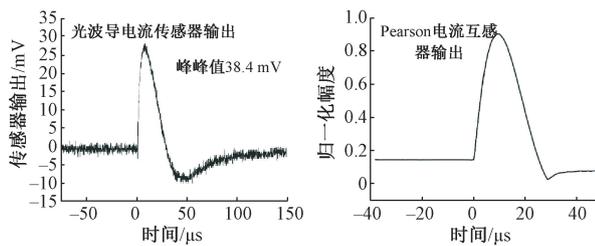
(b) 测量实物图  
(b) Measurement photo

图8 脉冲大电流测量系统

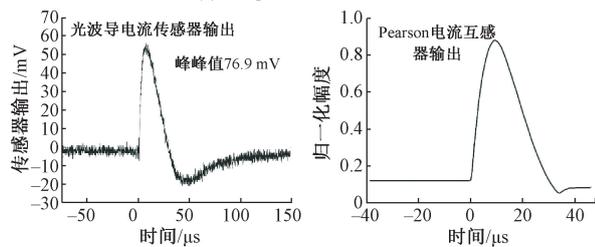
Fig. 8 Pulse high current measurement system



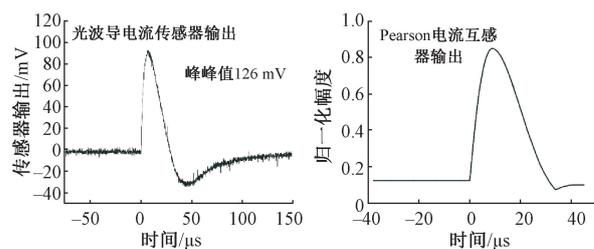
(a) 脉冲电流为 100 A  
(a) The pulse current is 100 A



(b) 脉冲电流为 1000 A  
(b) The pulse current is 1000 A



(c) 脉冲电流为 2000 A  
(c) The pulse current is 2000 A



(d) 脉冲电流为 3300 A  
(d) The pulse current is 3300 A

图9 不同脉冲电流下光波导电流传感器和 Pearson 电流互感器的输出波形

Fig. 9 Output waveforms of optical waveguide current sensor and Pearson current transformer under different pulse currents

冲电流时域波形如图9右边波形所示。将光波导电流传感器测量得到的脉冲电流时域波形的  $T_f$  和  $T_d$  与 Pearson 电流互感器测量得到的脉冲电流时域波形的  $T_f$  和  $T_d$  进行对比,结果如表1所示。

表1 光波导电流传感器和 Pearson 电流互感器测量的脉冲电流时域波形参数对比

Table 1 Comparison of time domain waveform parameters of pulse current measured with the optical waveguide current sensor and Pearson current transformer

电流峰值 /A	Pearson 电流互感器输出/ $\mu$ s		光波导电流传感器输出/ $\mu$ s		相对误差/%	
	$T_f$	$T_d$	$T_f$	$T_d$	$T_f$	$T_d$
100	7.54	18.96	7.13	18.53	5.44	2.27
1000	7.34	19.08	6.87	20.18	6.40	5.77
2000	7.21	20.97	7.13	19.94	1.11	4.91
3300	7.09	22.38	6.88	20.41	2.96	8.80

由表1可知,当电流峰值为100、1000、2000、3300 A时,光波导电流传感器与 Pearson 电流互感器测量得到的脉冲电流时域波形相比,波前时间  $T_f$  和持续时间  $T_d$  的平均相对误差分别为3.9775%和5.4375%,波形吻合较好。

从图9中左边波形可以看到,当脉冲电流为100 A时,传感系统输出信号峰值为4.64 mV,噪声为1.6 mV,信噪比为9.25 dB。调节电流源产生步长为250 A、脉冲电流范围为100~3300 A的脉冲电流进行测试实验,得出被测电流与传感器输出电压的拟合曲线( $y = 0.03736x + 0.7414$ )如图10所示,拟合线性相关系数为0.99897。进一步可得当信号幅度高于噪声6 dB时,系统输出为3.2 mV,带入拟合曲线计算得到传感器最小可测电流  $I_{min}$  为66 A。

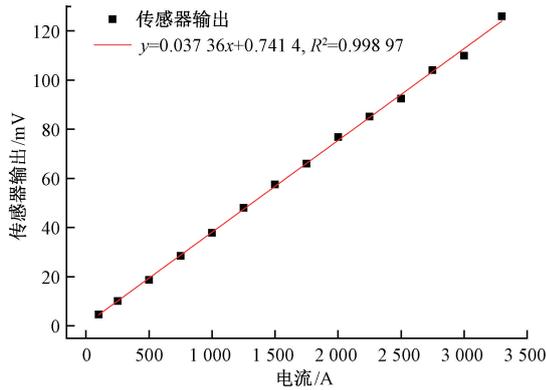


图 10 传感器输入输出特性曲线

Fig. 10 Input output characteristic curves of the sensor

根据图 10 得出传感器系统的输入输出特性曲线,将传感系统的输出电压值视为因变量带入特性曲线,可求出各电压值对应的脉冲电流测量值,进一步根据式(8)计算得出测量结果的均方根误差。均方根误差  $\sigma$  可以表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{M,i} - I_{T,i})^2} \quad (8)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, n$  为测试数据的次数,  $I_{M,i}$  为脉冲电流测量值,  $I_{T,i}$  为脉冲电流的真实值。将  $n=14$  以及各脉冲电流的测量值和真实值代入式(8)中,计算得出均方根误差  $\sigma=30.97617$ 。分析误差产生的主要原因是在均方根误差计算中视电流源输出值为真值,但是电流源实际产生的短路电流峰值存在  $\pm 10\%$  的误差。除此之外,测量系统中使用的可调谐 DFB 光源输出光功率不稳定和光电探测器的噪声也会使测量结果存在误差。为了提高测量的准确度,可以采用输出光功率更加稳定的光源和噪声更小的光电探测器。

## 5 结 论

本文提出的电流传感器由 LN 晶片、多环形天线、调制电极和非对称 MZI 光波导构成,设计的天线电极结构可抵消电极间电场产生的感应电压,使得最终的调制电压仅与电流产生的磁场有关。研制的 LN 集成 MZI 型光波导电流传感器体积为  $78 \text{ mm} \times 18 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。在仿真软件中使用双指数脉冲电流和正弦交流电分别对传感器的时域特性和频域响应进行了仿真,得到脉冲电流波形的波前时间  $T_f=4.8 \mu\text{s}$ ,持续时间  $T_d=21.95 \mu\text{s}$ ,以及传感器的带宽为  $7.4 \text{ MHz}$ 。最后,搭建了脉冲大电流测量实验系统,实验结果表明,光波导电流传感器与 Pearson 电

流互感器测量得到的脉冲电流时域波形相比,波前时间  $T_f$  和持续时间  $T_d$  的平均相对误差分别为  $3.9775\%$  和  $5.4375\%$ ,波形吻合较好。传感器在  $100 \sim 3300 \text{ A}$  的电流范围内,线性相关系数为  $0.99897$ ,当信噪比为  $6 \text{ dB}$  时,传感器最小可测电流为  $66 \text{ A}$ 。该传感器为无源器件,具有结构简单、体积小、绝缘性能好、响应时间快以及带宽宽等优点,为大电流非接触式测量提供了一种新的技术手段。

## 参考文献

- [1] VACLAV G, PAVEL R, JAN B. DC current sensor using switching-mode excited in-situ current transformer [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 500: 166370-166370.
- [2] CHEN Y, HUANG Q, KHAWAJA A H, et al. A novel non-invasion magnetic sensor array based measurement method of large current [J]. Measurement, 2019, 139: 78-84.
- [3] MUUROI C, OPROIU M, VOLMER M, et al. Low field optimization of a non-contacting high-sensitivity GMR-based DC/AC current sensor [J]. Sensors, 2021, 21(7): 2564.
- [4] 鲁文帅, 尤睿, 周扬, 等. 基于单片 TMR 磁传感器的非侵入电流监测微系统 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 1-9.  
LU W SH, YOU R, ZHOU Y, et al. Non-invasive current monitoring microsystem based on a single TMR sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 1-9.
- [5] 陈昌鑫, 郭文超, 冉召会, 等. 罗氏线圈与隧道磁阻复合的电流测试方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 151-158.  
CHEN CH X, GUO W CH, RAN ZH H, et al. Research on the current measurement technology of the combination of Rogowski coil and tunnel magnetoresistance sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 151-158.
- [6] METWALLY I A. Design of different self-integrating and differentiating rogowski coils for measuring large-magnitude fast impulse currents [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2303-2313.

- [ 7 ] ZHANG W, ZHANG Z, WANG F, et al. High-bandwidth low-inductance current shunt for wide-bandgap devices dynamic characterization [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(4):4522-4531.
- [ 8 ] ZINKERNAGEL J. A current-to-voltage converter for 5 A to 5 V and 30 Hz to 30 kHz [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2002, 49(1):144-150.
- [ 9 ] ZIEGLER S, WOODWARD R C, IU H C, et al. Current sensing techniques: A review [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4):354-376.
- [ 10 ] LENNER M, FRANK A, YANG L, et al. Long-term reliability of fiber-optic current sensors [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(2):823-832.
- [ 11 ] 黄瑞涛,段艳涛,石立华,等. 用于测量雷电流的全光纤电流传感器 [ J ]. 光电工程, 2019, 46(5):44-50.  
HUANG R T, DUAN Y T, SHI L H, et al. All-fiber optical current transformer for measuring lightning current [ J ]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(5):44-50.
- [ 12 ] YE W, DONG Z, REN R, et al. Application research on fiber-optic current sensor in large pulse current measurement [ J ]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1507:072015.
- [ 13 ] HUANG Y, XIA L, PANG F, et al. Self-compensative fiber optic current sensor [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 39(7):2187-2193.
- [ 14 ] KARABULUT D, MIAZIN A, GUSAROV A, et al. Effect of Faraday mirror imperfections in a fiber optic current sensor dedicated to ITER [ J ]. Fusion Engineering and Design, 2019, 138:48-52.
- [ 15 ] DANTE A, DAVID J, CARVALHO C C, et al. A compact FBG-based magnetostrictive optical current sensor with reduced mass of terfenol-D [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(17):1461-1464.
- [ 16 ] DAVID J, DANTE A, BACURAU R M, et al. Fiber-optic current sensor based on FBG and optimized magnetostrictive composite [ J ]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(24):1987-1990.
- [ 17 ] DANTE A, DAVID J, CREMONEZI A O, et al. Fiber-optic current sensor based on FBG and terfenol-D with magnetic flux concentration for enhanced sensitivity and linearity [ J ]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(7):3572-3578.
- [ 18 ] HAN J, HU H, HUI W, et al. Temperature-compensated magnetostrictive current sensor based on the configuration of dual fiber bragg gratings [ J ]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(22):4910-4915.
- [ 19 ] 张伟超, 来永宝, 赵洪, 等. GMM-FBG 光纤电流传感器结构优化及温补模型 [ J ]. 电机与控制学报, 2019, 23(6):104-111.  
ZHANG W CH, LAI Y B, ZHAO H, et al. Structural optimization and temperature characteristic analysis of GMM-FBG fiber current sensor [ J ]. Electric Machines and Control, 2019, 23(6):104-111.
- [ 20 ] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2000.  
FENG C ZH, MA X K. An introduction to engineering electromagnetic fields [ M ]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [ 21 ] KUWABARA N, TAJIMA K. Development and analysis of electric field sensor using LiNbO<sub>3</sub> optical modulator [ J ]. IEEE Trans. Electromagn. Compt, 1992, 34(4):391-396.
- [ 22 ] 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.  
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, 48(9):0913001.

### 作者简介



杨杜兵, 2019 年于湖南工学院获得工学学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为集成光波导电流传感器。  
E-mail: 20192204018@stu.kust.edu.cn

**Yang Dubing** received his B. Sc. degree in 2019 from Hunan Institute of Technology. Now, he is a master student at Kunming University of Science and Technology. His

main research interest is integrated optical waveguide current sensor.



**张家洪** (通信作者), 2010 年于云南师范大学物理系获得理学学士学位, 2016 年于电子科技大学获得光学工程博士学位, 现为昆明理工大学信息工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为集成光波导电磁场传感器、微波光子技术等。

E-mail: zjh\_mit@163.com

**Zhang Jiahong** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Department of Physics, Yunnan Normal University, received his Ph. D. degree in optical engineering in 2016 from University of Electronic Science and Technology of China. Now, he is an associate professor in the Faculty of Information. Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology. His main research interest includes integrated optical waveguide electromagnetic field sensor, and microwave photonic technology.



**陈福深**, 1968 年于成都电讯工程学院获得学士学位, 1981 年于成都电讯工程学院获得硕士学位, 1988 至 1990 年在英国伦敦大学从事高速集成电光调制器的研究工作。1997 年晋升为教授, 2001 年成为光学工程专业博导。主要研究方向为光纤通信、光波导理论、光电子学和集成光学。

E-mail: fschen@uestc.edu.cn

**Chen Fushen** received his B. Sc. degree in 1968 and M. Sc. degree in 1981 both from Chengdu Telecommunication Engineering College. From 1988 to 1990, he worked at University College London on high speed integrated electro-optical modulators. In 1997 he was promoted to a professor, and in 2001 he became a doctoral supervisor in optical engineering. His main research interest includes optical fiber communication, optical waveguide theory, optoelectronics and integrated optics.