

基于保偏光纤螺旋长周期光栅的高灵敏度光纤电流传感器

申绘欣, 姜晨, 刘云启*

(上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要: 由于对电流检测大都采用原始的电磁式技术, 存在频率窄、磁饱和和动态范围小等电磁式电流传感器一直无法解决的问题, 提出了一种基于二氧化碳激光写入保偏光纤(PMF)螺旋长周期光栅(HLPG)的高灵敏度光纤电流传感器。通过从偏振光的3个参数重点研究了椭圆偏振光在光栅中传输时影响其法拉第偏转角度的关键因素。实验结果表明: 该光栅的电流灵敏度高达 $9.22^\circ/\text{A}$ ($0.427^\circ/\text{mT}$)。该传感器具有结构紧凑、制作简单、操作方便和电流灵敏度高等优点。

关键词: 保偏光纤; 螺旋长周期光栅; 法拉第效应; 电流传感

中图分类号: TM452+.94; TN256 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2019)10-0001-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



High sensitivity fiber current sensor based on helical long-period gratings written in polarization-maintaining fiber

SHEN Huixin, JIANG Chen, LIU Yunqi*

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Because the original electromagnetic current technology is mostly used for current detection, there are some problems that cannot be solved by electromagnetic current sensor such as narrow frequency, magnetic saturation and small dynamic range. A high sensitivity current sensor based on carbon dioxide laser writing polarization maintaining fiber (PMF) helical long-period grating (HLPG) is proposed. The key factors affecting Faraday deflection angle of elliptically polarized light propagating in gratings are studied from three parameters of polarized light. The experimental results show that the current sensitivity of the HLPG is as high as $9.22^\circ/\text{A}$ ($0.427^\circ/\text{mT}$). The sensor has the advantages of compactness, simple fabrication, easy operation and high current sensitivity.

Key words: polarization-maintaining fiber; helical long-period grating; Faraday effect; current sensing

0 引言

作为光纤的衍生元器件, 光纤电流传感器具有绝缘性好、灵敏度高、精度高、抗电磁干扰小和重量轻等优点^[1]。随着光纤光栅技术的发展和成熟, 基于长周期光栅的光纤电流传感器在国内外出现越来越多的研究报道。将长周期光纤光栅和磁性材料(镀金属薄膜、磁致伸缩材料以及磁流体)相结合是人们研究的

重点^[2-4]。但是, 应用最广泛的却是法拉第效应^[5]。通过研究发现, 目前大部分关于光纤电流传感器的研究内容主要有2种: 基于法拉第效应和基于长周期光纤光栅, 而将这两者结合起来的研究少之又少。

本文提出一种基于二氧化碳激光写入保偏光纤(PMF)螺旋长周期光栅(HLPG)的高灵敏度光纤电流传感器。

1 PMF-HLPG 制备及电流传感实验

1.1 PMF-HLPG 制备

本文使用二氧化碳激光作为写入光源, 通过定点区域加热来刻写长周期光栅, 并结合光纤旋转制备出 HLPG^[6]。PMF-HLPG 结构示意图如图1所示。首先, 将 PMF 放置在控制平台上, 呈一条直线, 左边一端用

收稿日期: 2019-03-09。

基金项目: 国家自然科学基金(61875117)资助。

作者简介: 申绘欣(1995-), 男, 硕士, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。本科期间参与过校级科技创新项目《基于WLAN的CBTC车地通信系统研究》, 多次获得过国家励志奖学金; 硕士期间参与过国家自然科学基金项目的研究, 多次获得研究生学业奖学金。

* 通信作者: 刘云启(E-mail: yqliu@shu.edu.cn)。



旋转夹具夹紧,另一端用控制平台上的固定装置把光纤放置在凹槽中以保持直线状态。然后,在二氧化碳激光加热的条件下,利用旋转夹具可对光纤实现任意圈数和角度的旋转。同时,控制平台可以水平移动。

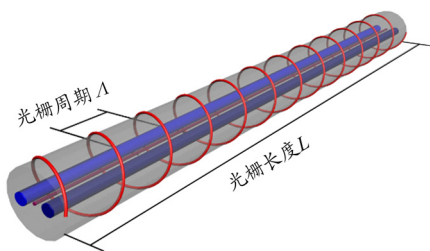


图1 PMF-HLPG结构示意图

实验中所用光纤为长飞公司生产的熊猫型 PMF (PM1550, 125/13, YOFC)。由于光纤快慢轴的有效折射率不同,根据相位匹配条件可知,当偏振光沿着不同的方向(相对于应力轴)入射时,其对应的谐振峰波长也不同。PMF-HLPG 的透射光谱图如图 2 所示。光栅周期为 480 μm ,光栅长度为 2.4 cm。在 1460~1640 nm 波长范围内,光栅主要有 2 个谐振峰,分别对应于 1486.8 nm 处(慢轴)和 1550 nm 处(快轴),偏振相关损耗(PDL)的峰值与传输光谱的峰值一一对应且高达 10 dB。

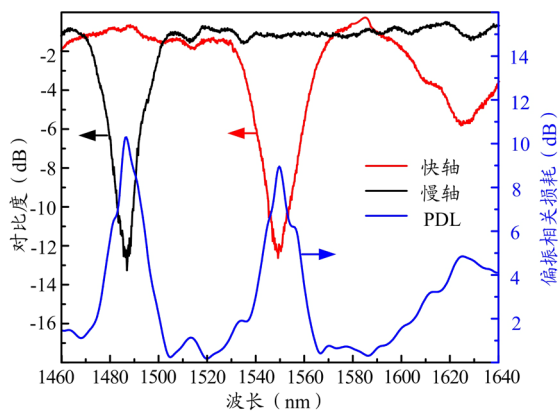


图2 PMF-HLPG的光谱图

1.2 电流传感原理

本文通过电流传感实验装置(如图3所示)实现对 HLPG 的电流传感特性研究。光源采用波长可调谐激光器(8160B,波长范围为 1460~1640 nm),它可以输出不同波长和功率的单波长线偏振激光。偏振控制器用来改变输入偏振光的偏振态,它主要由一系列偏振波片组成,包括线偏振波片、1/4 波片和 1/2 波片。我们通过改变某个波片之间的相对角度差,可以输出线偏振光或者椭圆偏振光,也可以控制偏振光的方位角 β 和椭圆度 χ 。螺线管由长度为 30.4 cm 的铜丝缠绕而成,最中心的磁场强度为 216 GS/A。直流电源的最大

输出电流为 5 A。把待测的传感光纤光栅样品放入螺线管中,通过施加外接电流提供磁场,利用偏振分析仪来分析偏振光经过传感样品后的法拉第偏转角度,从而实现了对电流大小的检测。

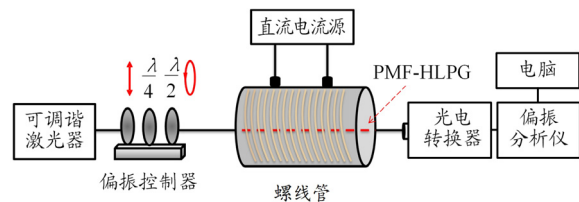


图3 电流传感实验装置

2 PMF-HLPG 的电流传感特性

本文首先使用可调谐激光器输出 1550 nm 的单波长激光,并利用偏振控制器依次调节输入椭圆偏振光的椭圆度。不同偏振光椭圆度下,法拉第偏转角度与椭圆度的关系如图4所示。当外加电流为 5 A 时,我们改变椭圆偏振光的初始椭圆度从 $-40^\circ \sim -44.2^\circ$,可以看出随着椭圆度增大(此时偏振态趋于正圆),法拉第偏转角度逐渐增大并呈现出非线性的增长,其法拉第偏转角度与椭圆度的关系为指数型,指数拟合度为 0.997。

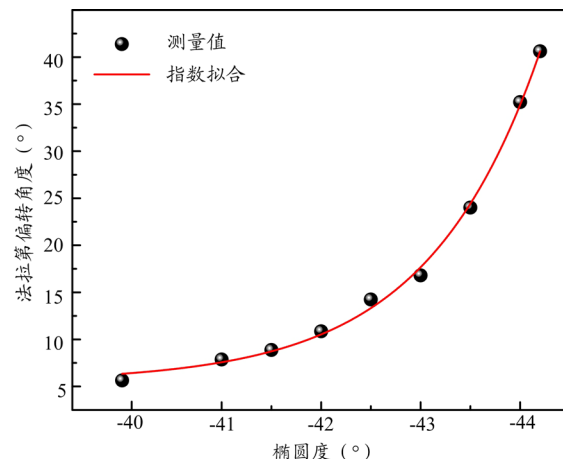
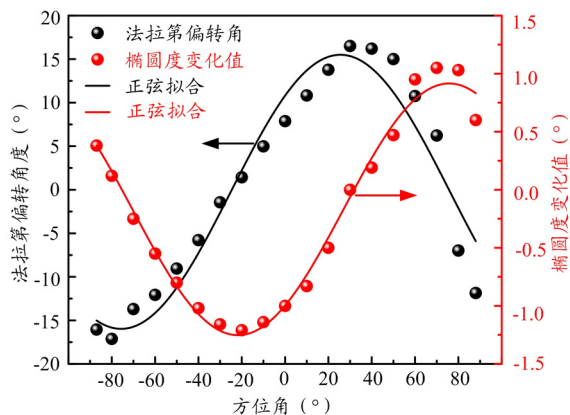
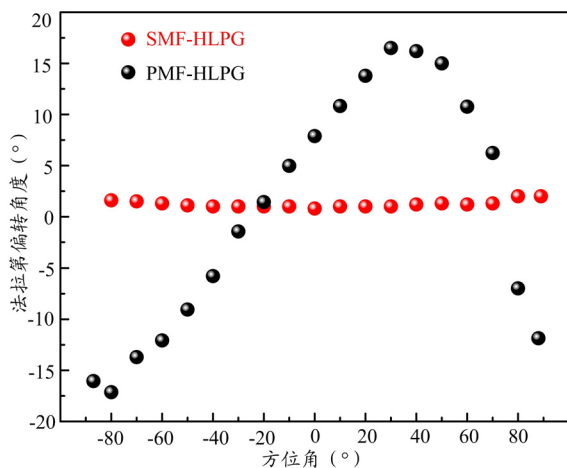


图4 法拉第偏转角度与椭圆度的关系

为了研究法拉第偏转角度与方位角的关系,我们输入不同方位角的椭圆偏振光($-90^\circ \sim 90^\circ$),同时控制初始椭圆度为 -43° 观察其方位角和椭圆度的变化对法拉第偏转角度的影响,其数据结果如图5所示。从图5(a)中可得出3个规律:①法拉第偏转角度、椭圆度变化量和方位角之间都为正弦函数关系,其正弦拟合度分别为 0.929、0.981;②法拉第偏转角度和椭圆变化量之间存在着导数关系,两者关系函数之间的相对



(a) 法拉第偏转角度、椭圆度变化值与方位角的关系



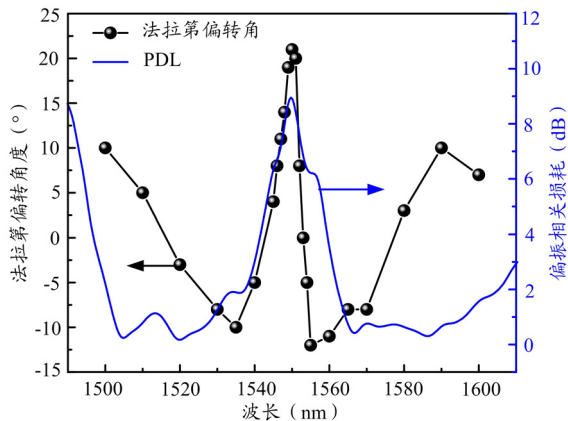
(b) 不同光栅的法拉第偏转角度与方位角的灵敏关系对比

图5 法拉第偏转角度与方位角的关系

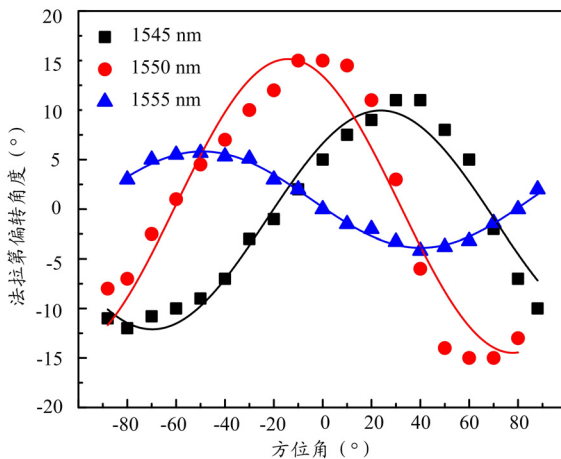
相位差为 $\pi/4$, 当椭圆变化量为 0 时, 法拉第偏转角度达到极值; ③函数关系的周期为 π , 也就是说法拉第偏转角度的极值正好为 $\pi/2$, 这与光栅内部快慢轴的相位差一致。由图 5(b) 可知, 由于单模光纤(SMF)-HLPG 内部的相对各向同性以及较小的 PDL, 法拉第偏转角度并没有明显的变化。这是本文使用 PMF-HLPG 作为传感元件的主要原因。同时, 为了排除实验结果的偶然性, 我们也做了关于法拉第偏转角度关系的重复性实验, 发现当椭圆偏振光的椭圆度为 -43° 、外加电流为 5 A 时, 法拉第偏转角度最大值为 15° 。

PMF-HLPG 中偏振光输入波长对法拉第偏转角度的影响如图 6 所示。从图 6(a) 中的数据可以看出, 法拉第偏转角度和波长的依赖关系基本上一致, 并且在中心波长(1550 nm)处呈现一个峰值(最大值)。我们将法拉第偏转角度关系与 PDL 进行对比, 发现二者随着波长的变化其趋势基本保持一致, 这从侧面反映出法拉第偏转角度与光栅的 PDL 有关。从图 6(b) 中

可知, 随着输入波长从 1545 nm 调整到 1555 nm, 法拉第偏转角度与方位角的正弦依赖关系使其相位值向左漂移, 而且在 1550 nm(谐振峰处)其振幅值最大, 即输入波长不仅改变了法拉第偏转角度的大小, 同时还影响着其最大值处所对应的方位角。



(a) 法拉第偏转角度和波长的依赖关系与 PDL 对比

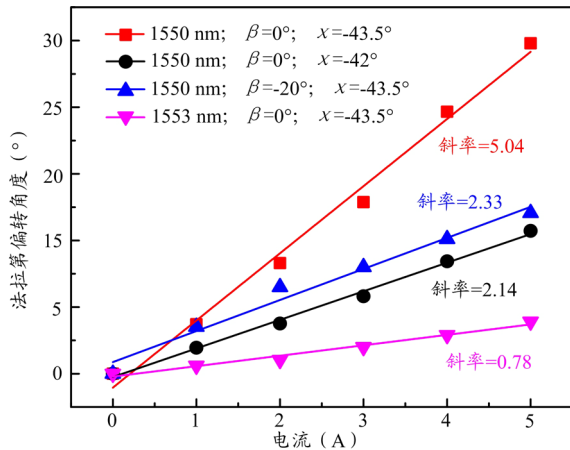


(b) 不同输入波长下法拉第偏转角度与方位角的关系对比

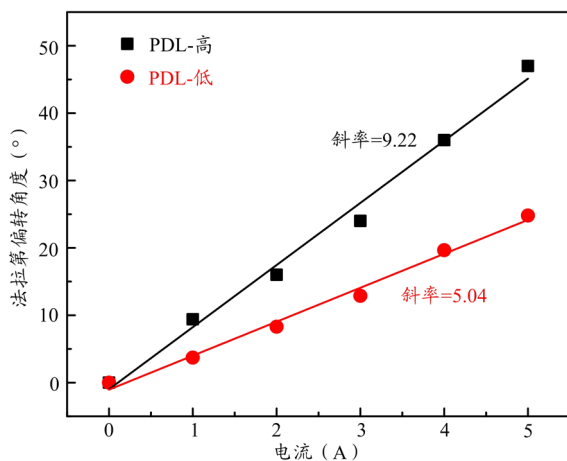
图6 法拉第偏转角度与波长的关系

由于椭圆偏振光中影响其法拉第偏转角度的参数主要有椭圆度、方位角和输入波长, 因此可利用控制变量法依次改变偏振光中的某个参数。在不同参数下法拉第偏转角度与电流的关系如图 7(a) 所示。其关系具有良好的线性度, 电流灵敏度从高到低分别为: $5.04^\circ/\text{A}$ 、 $2.33^\circ/\text{A}$ 、 $2.14^\circ/\text{A}$ 和 $0.78^\circ/\text{A}$ 。当偏振光参数为 1550 nm(谐振峰处)、初始方位角在极值处且椭圆度较大时, 此电流灵敏度最大为 $5.04^\circ/\text{A}$; 随着偏振光中参数的改变(非谐振峰、非极值和椭圆度减小), 其电流灵敏度也逐渐变小。因此, 本文可以利用此特性实现对电流传感的实时控制和调节, 并根据电流的强弱来动态调节电流传感的灵敏度和量程。

另外,本文制备了不同 PDL 大小的 PMF-HLPG 如图 7(b)所示。其偏振光椭圆度均为 -43.5° ,其余参数(方位角和输入波长)均为各自最佳值。实验所得的电流灵敏度分别为 $9.22^\circ/\text{A}$ (PDL-高)和 $5.04^\circ/\text{A}$ (PDL-低),其灵敏度大约相差 2 倍。



(a) 不同偏振光参数下,PMF-HLPG 的电流灵敏度



(b) 不同 PDL 的 PMF-HLPG 电流灵敏度对比

图 7 PMF-HLPG 的电流灵敏度

表 1 不同类型光纤电流传感器特性比较

传感元件	灵敏度 ($^\circ/\text{mT}$)	备注	参考文献
PMF-HLPG	0.427	@1550 nm; $L=2.4$ cm	本文
扭转 SMF	0.122	@633 nm; $L=61$ cm	文献[7]
扭转掺杂 CdSe 光纤	0.285	@633 nm; $L=71$ cm	文献[8]
扭转光子晶体光纤	0.02	@632.8 nm; $L=7.6$ cm	文献[9]

由于电流大小本身容易受到螺旋管圈数、长度以及磁场强度的影响,为了统一比较最小磁场强度下对电流(磁场)的最小检测单位,本文把文献中的实验结果数据做了归一化处理,归一化后的磁场灵敏度如表 1 所示。 L 为传感器件在磁场中的有效长度。可以看出,本文中的 PMF-HLPG 其电流灵敏度高达 $9.22^\circ/\text{A}$ ($0.427^\circ/\text{mT}$),比文献[7-9]中的灵敏度高很多。

3 结束语

本文提出了一种基于 PMF-HLPG 的高灵敏度光纤电流传感器。实验结果表明:椭圆偏振光在 PMF-HLPG 中传输时,影响其法拉第偏转角度的关键因素有输入激光的椭圆度、方位角以及激光波长。椭圆偏振光在 PMF-HLPG 中最高法拉第偏转角度能达到大约 50° ,其电流灵敏度高达 $9.22^\circ/\text{A}$ ($0.427^\circ/\text{mT}$)。因此,本文制备的 PMF-HLPG 在高灵敏度和智能化的光纤电流传感器中具有很大的潜在应用。

参考文献:

- [1] ASCORBE J, CORRES J M. Magnetic Field Sensors Based on Optical Fiber[J]. Fiber Optic Sensors, 2016, 21(1): 269-299.
- [2] GAO L, ZHU T, DENG M, et al. Long-Period Fiber Grating Within D-Shaped Fiber Using Magnetic Fluid for Magnetic-Field Detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(6): 2095-2104.
- [3] CHIANG C C, CHEN Z J. A Novel Optical Fiber Magnetic Sensor Based on Electroforming Long-Period Fiber Grating [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(19): 3331-3336.
- [4] ZHANG P, TANG M, GAO F, et al. An Ultra-Sensitive Magnetic Field Sensor Based on Extrinsic Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and Terfenol-D [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(15): 3332-3337.
- [5] STAMPER J A, HIPIN B H. Faraday-Rotation Measurements of Megagauss Magnetic Fields in Laser-Produced Plasmas[J]. Physical Review Letters, 1975, 34(3): 138-141.
- [6] JIANG C, LIU Y Q, ZHAO Y H, et al. Helical Long-Period Gratings Inscribed in Polarization-Maintaining Fibers by CO_2 -laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(3): 889-896.
- [7] JU S M, SU-AH K, Watekar P R, et al. Faraday Effect of Twisted Single Mode Fiber upon Changing the Effective Length under Magnetic Field [C]//15th Opto-Electronics and Communications Conference, July 5-9, 2010, Sapporo, Japan. Piscataway, IEEE: NJ, 2010: 356-357.
- [8] WATEKAR P R, JU S M, SU-Ah K, et al. Development of a Highly Sensitive Compact Sized Optical Fiber Current Sensor [J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17096-17105.
- [9] BERAVAL R, WONG G K L, Xi X M, et al. Current Sensing using Circularly Birefringent Twisted Solid-Core Photonic Crystal Fiber [J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1672-1675.