

文章编号 1004-924X(2016)10-2377-07

温度自动补偿超磁致伸缩材料 布拉格光栅光纤电流传感器

杨玉强*, 杨群, 葛伟, 张换男

(哈尔滨理工大学应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 基于超磁致伸缩材料, 提出了一种传感光纤光栅(S-FBG)和参考光纤光栅(A-FBG)相结合的温度自动补偿全光纤交流电流传感器。此传感器将传感光纤光栅和参考光纤光栅级联呈"十字形"后粘贴在超磁致伸缩材料上, 然后将其置于聚磁回路狭缝内; 同时控制传感光纤光栅的径向与磁场方向相同, 而参考光纤光栅的径向与磁场方向相反。最后, 将S-FBG的中心波长置于A-FBG反射谱的边带上, 通过检测两光纤光栅级联反射光强的变化实现了电流测量及温度自动补偿。选用3 dB谱宽分别为0.23 nm和0.08 nm的A-FBG和S-FBG进行了实验测试, 结果表明: 有效安匝电流为1.0~138.2 A时, 该传感器可实现线性测量, 线性度为0.996 3, 测量灵敏度为16.0 mV/A, 最小可测有效安匝电流为1.0 A。

关键词: 光纤电流传感器; 光纤布拉格光栅; 超磁致伸缩材料; 温度补偿

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162410.2377

Temperature compensated GMM-FBG current sensor

YANG Yu-qiang*, YANG Qun, GE Wei, ZHANG Huan-nan

(*Institute of Application Science, Harbin University of Science and
Technology, Harbin 150080, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yuqiangy110@sina.com*

Abstract: Based on Giant Magnetostrictive Materials(GMMs), a novel GMM-FBG (Fiber Brager Grating) current sensor with automatic temperature compensation is proposed by combing a sensing fiber Bragg grating (S-FBG) and an auxiliary fiber Bragg grating (A-FBG). The sensor cascades the S-FBG and the A-FBG and pasts them crossly on the GMM bars, then puts them into a magnetic circuit consisted of the ferrites. The radial direction of S-FBG is controlled the same as the direction of magnetic field, and that of the A-FBG is opposite with the former. Finally, the center wavelength of S-FBG is placed in the side-band of A-FBG spectrum, and current measurement and temperature compensation are implemented by detecting the optical intensity variation of cascaded gratings. The experiments are performed by the A-FBG and S-FBG with the 3 dB band width of 0.23 nm and 0.08 nm. The experimental results show that when the ampere-turns-current varies from 1 A to 138.2 A, the sensor can

收稿日期: 2016-05-23; 修订日期: 2016-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61378029, No. 11574065, No. 51672062, No. 51575149, No. 61378003); 黑龙江省哈尔滨市青年基金资助项目(No. 2015RAYXJ004); 哈尔滨市科技创新人才项目(No. 2016QQXJ108, No. 2016RAQXJ082)

realize the linear measurement, and the goodness of fit is 0.996 3, the sensing sensitivity in the linear range is 16.0 mV/A and the minimum effective ampere-turn is 1.0 A.

Key words: optical fiber current sensor; Fiber Bragg Grating(FBG); Giant Magnetostrictive Material (GMM); temperature compensation

1 引言

随着电力系统电流等级的逐年提高,基于电磁感应原理的传统电磁式电流互感器无论从安全生产还是精确计量方面都难以再满足现阶段的行业需求。所以探索新的传感方式实现高等级电流检测成为了研究热点,特别是光纤电流传感技术是热点中的焦点^[1-17]。

光纤电流传感器不但具有体积小、重量轻的优点,而且不受电磁干扰的影响,更难能可贵的是其本质绝缘、无易燃易爆等安全问题。根据实现途径,光纤电流传感器主要分为基于 Faraday 效应和基于超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Material, GMM)两种类型。基于 Faraday 效应的光纤电流传感器具有绝缘性好、测量范围大的优点,但存在光纤 Verdet 常数偏低和光纤双折射难以克服的问题^[18-20]。基于 GMM 的光学电流传感器是电流传感技术的新尝试,它将 GMM 材料的超磁致伸缩和宽频相应特性与光纤器件有机结合,应用潜能巨大,特别是将 GMM 与光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)相结合的 GMM-FBG 电流传感器。

目前,对 GMM-FBG 的研究主要集中在电流和温度的交叉敏感问题上。2000 年, Mora 等人将辅助 FBG 粘贴在与 GMM 材料具有相同热膨胀系数的 Monel 400 合金上实现了电流和温度的同时测量^[21]。2003 年, Chiang 等人将单根 FBG 粘贴在 GMM 和 Monel 400 两种金属上实现了温度自动补偿^[22]。2006 年, Reilly 等人通过反馈控制静态工作点的方式实现了与温度无关的交流电流测量^[23]。2013 年, Zhao 等人提出了双磁路系统,利用双磁路内两 FBG 应变相反的特点解决了电流和温度的交叉敏感问题^[24]。

本文提出了一种将 GMM 传感光纤光栅(S-FBG)和参考光纤光栅(A-FBG)相结合的 GMM-FBG 交流电流传感器。此传感器将 S-FBG 与 A-FBG 级联后呈“十字形”粘贴在 GMM 材料上置

于聚磁回路狭缝内,且 S-FBG 和 A-FBG 的径向分别与磁场方向平行和垂直,实现了对 S-FBG 的选择性调制。将 S-FBG 的中心波长置于 A-FBG 的光谱边带上,采用强度解调的方式实现了电流测量及温度自动补偿。

2 传感器原理

GMM-FBGs 电流传感器的原理如图 1 所示,传感光栅(S-FBG)和参考光栅(A-FBG)经两耦合器串联后呈“十字形”粘贴在 GMM 棒上置于聚磁回路内,聚磁回路将通电螺线管产生的磁场加载到 GMM 棒上,利用 GMM 材料的磁滞伸缩特性将电流信号转化为 FBG 的波长信号,实现电流信号到波长信号的调制。如图 2 磁力线仿真结果所示, S-FBG 的径向与磁场方向相同,而 A-FBG 的径向与磁场方向垂直。根据磁致伸缩原理, S-FBG 受磁场的调制作用,其波长随磁场的变化而变化; A-FBG 不受磁场的调制作用,其波长不随磁场的变化而变化。此外,如图 1(c)所示, S-FBG 的谱宽明显小于 A-FBG 且其中心波长位于 A-FBG 光谱的边带上。当两 FBG 的波长产生相对移动时,经两 FBG 的光强就会产生变化,本传感器通过探测此变化实现电流测量。由于两 FBG 对温度的响应相同且处于相同温度环境下,因此,温度变化不会使两 FBG 产生波长漂移,即不会改变经两 FBG 后的光强。

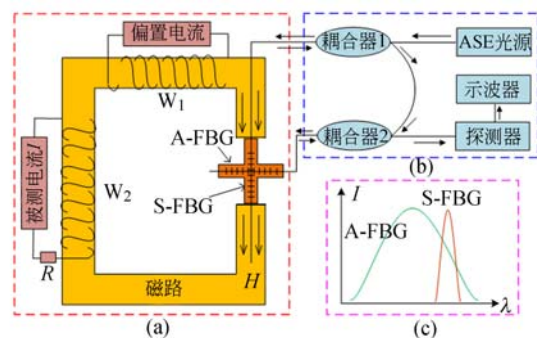


图 1 GMM-FBGs 电流传感器原理图

Fig. 1 Schematic map of GMM-FBGs current sensor

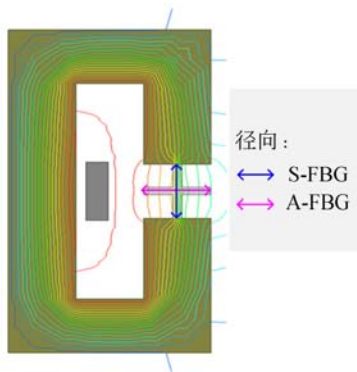


图 2 磁路磁力线仿真

Fig. 2 Magnetic force line in magnetic circuit

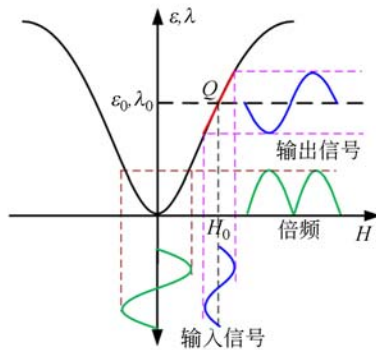


图 3 FBG 应变和波长随磁场的变化关系

Fig. 3 Strain and wavelength versus magnetic field

在磁场作用下, S-FBG 中心波长的变化 $\Delta\lambda_{\text{SFBG}}$ 可表示为:

$$\Delta\lambda_{\text{SFBG}} = (1 - P_e)\lambda_0 \epsilon, \quad (1)$$

其中: P_e 为弹光系数, ϵ 为 GMM 材料的应变。 ϵ 与所加磁场 H 的关系可表示为:

$$\epsilon = A_1 H^2 + A_2 H^4, \quad (2)$$

其中: A_1 和 A_2 为常数。由于 ϵ 为 H 的偶函数, 因此输出信号会出现倍频现象, 如图 3 所示。为了消除倍频现象, 这里给磁路加载了偏置电流 I_0 (在 GMM 材料处产生偏置磁场 H_0), 使 GMM 材料的静态工作点由原点移动到点 $Q(H_0, \lambda_0, \epsilon_0)$, ϵ_0 为偏置磁场 H_0 引起的 GMM 材料的应变, 对应 S-FBG 的中心波长 λ_0 。

在线性范围内, FBG 应变 ϵ 与被测电流 I 的关系可表示为:

$$\epsilon = k_1 H = \alpha k_1 I, \quad (3)$$

其中: k_1 为曲线斜率, 与 GMM 材料的磁致特性有关; α 为电流到磁场的转化率, 与磁路导磁性能有关。

将式(3)代入式(1)得:

$$\Delta\lambda_{\text{SFBG}} = (1 - P_e)\lambda_0 \alpha k_1 I. \quad (4)$$

式(4)表明: S-FBG 的中心波长随被测电流在一定范围内呈线性变化, 变化斜率与 GMM 材料的磁致特性及磁路导磁性能有关。

如图 1 所示, ASE 光源发出的宽带光经 S-FBG 和 A-FBG 反射后由光电探测器接收, 实现光信号到电信号的转化。由于 S-FBG 的谱宽明显小于 A-FBG, 当 S-FBG 置于 A-FBG 的边带上时, 光电探测器的输出电压为:

$$\Delta U = \beta k_2 (\Delta\lambda_H + \Delta\lambda_T), \quad (5)$$

其中: k_2 为 A-FBG 边带的斜率, β 为光电探测器的光电转化系数, $\Delta\lambda_H$ 和 $\Delta\lambda_T$ 分别为磁场和温度变化引起的 S-FBG 和 A-FBG 中心波长的相对变化。由于 S-FBG 和 A-FBG 具有相同的温度响应且处于相同的温度环境下, 因此 $\Delta\lambda_T = 0$ 。由于 A-FBG 对磁场不响应, 因此 $\Delta\lambda_H = \Delta\lambda_{\text{SFBG}}$ 。将以上关系及式(4)代入式(5)得:

$$\Delta U = (1 - P_e) k_1 k_2 \alpha \beta \lambda_0 I. \quad (6)$$

式(6)表明: 此传感器的输出电压与电流成正比, 而与环境温度无关; 电流测量灵敏度与 GMM 材料的磁致伸缩曲线斜率 k_1 和 A-FBG 边带斜率 k_2 呈正比, 同时受光纤的弹光系数 P_e 、磁路的导磁特性参数 α 、光电探测器性能参数 β 的影响。

3 实验及仿真分析

本实验选用的 A-FBG 和 S-FBG 的 3 dB 谱宽分别为 0.23 nm 和 0.08 nm。当传感器处于静态工作点时两 FBGs 的反射谱如图 4 所示, 两

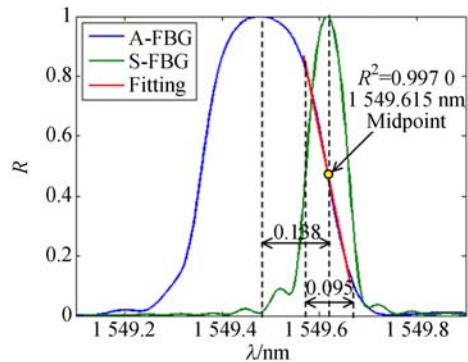
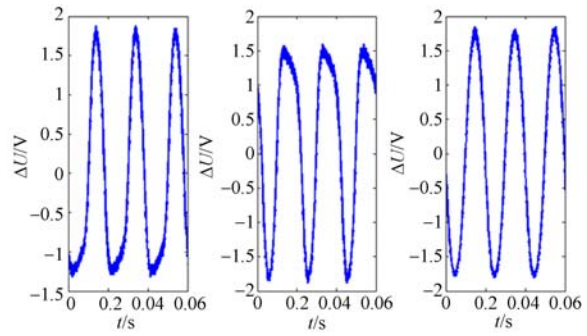


图 4 静态工作点 S-FBG 和 A-FBG 的光谱

Fig. 4 Spectra of S-FBG and A-FBG at quiescent point respectively

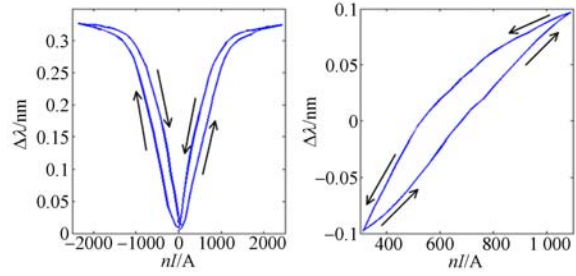
FBGs 的中心波长分别为 1 549. 477 nm 和 1 549. 615 nm, 间隔为 0. 138 nm, 此时 A-FBG 的中心波长处于 S-FBG 反射谱线性区的中心。S-FBG 反射谱线性区的线性度为 0. 997 0, 谱宽为 0. 095 nm。实验中所用螺线管 W_1 和 W_2 的匝数分别为 235 和 470, 珐琅电阻 R 为 5 Ω , 螺线管 W_1 的阻值为 1 Ω , 螺线管 W_2 的阻值为 2 Ω 。

传感器静态工作点的选取既要考虑 S-FBG 中心波长随电流的变化关系, 又要考虑 S-FBG 与 A-FBG 光谱的相互关系。当传感器处于最佳静态工作点时, S-FBG 的中心波长位于 λ - I 曲线线性区的中心, 同时位于 A-FBG 反射谱边带的中心。为了确定最佳静态工作点对应的偏置电流 I_0 , 实验给出了 S-FBG 波长随螺线管安匝电流 nI ($n=470$) 的变化曲线, 如图 5 所示。安匝电流在 0~262 A 变化较为缓慢, 呈非线性; 安匝电流在 262~1 138 A, S-FBG 的波长近似呈线性变化, 线性度为 $R^2=0. 998 4$, 对应的波长变化约为 220 pm, 测量灵敏度为 0. 25 pm/A; 安匝电流大于 1 138 A 时, S-FBG 中心波长呈非线性变化, 且变化缓慢, 此时磁路接近饱和状态。由图 5 还可以看出, 线性区中心对应的安匝电流为 700 A, 因此传感器最佳静态工作点的安匝电流为 700 A。图 6 给出了不同偏置电流情况下且被测交流电流有效值为 130 A 时, 示波器的输出波形。从图中可以看出, 当偏置电流偏小时 ($nI_0=600$ A), 示波器输出波形的下边沿失真; 当偏置电流偏大时 ($nI_0=800$ A), 示波器输出波形的上边沿失真; 当偏置电流最佳时 ($nI_0=700$ A), 示波器输出波形的上下边沿都不失真。此外, 图 6(a) 和图 6(b) 中波形的失真部分都有前沿变形较小, 后延变形严重的特



(a) $nI_0=600$ A (b) $nI_0=800$ A (c) $nI_0=700$ A
图 6 不同偏置电流情况下输出的电压波形

Fig. 6 Output voltage waveforms for different bias currents



(a) $nI_0=0$ (b) $nI_0=700$ A
图 7 超磁致伸缩材料的磁滞回线

Fig. 7 Magnetic hysteresis loops of giant magnetostrictive material

点, 这是由磁滞伸缩材料的磁滞现象造成的。如图 7 所示, 磁滞回线上升沿的线性度明显好于下降沿, 从而造成了图 6(a) 和图 6(b) 中波形的失真部分都有前沿变形较小的现象。

图 8 为两 FBG 中心波长随温度的变化曲线。当温度由 26~39 $^{\circ}\text{C}$ 逐渐增加时, 两 FBG 的中心波长逐渐增大, 且增大的幅值相同。此结果证明

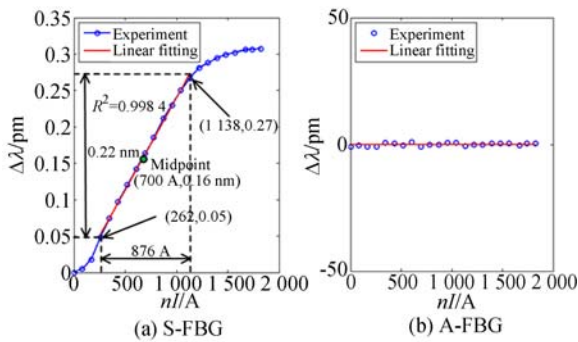


图 5 S-FBG 和 A-FBG 波长随电流的变化曲线

Fig. 5 Wavelengths of S-FBG and A-FBG versus applied current respectively

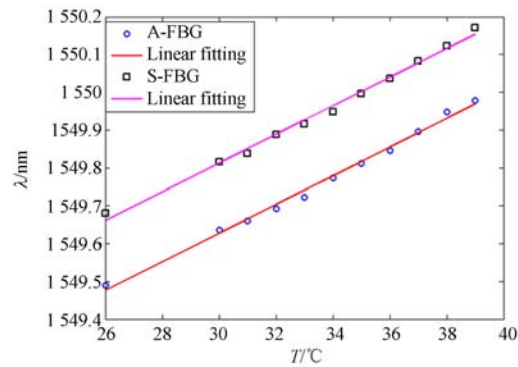


图 8 S-FBG 和 A-FBG 对温度的响应曲线

Fig. 8 Response curves of S-FBG and A-FBG to temperature

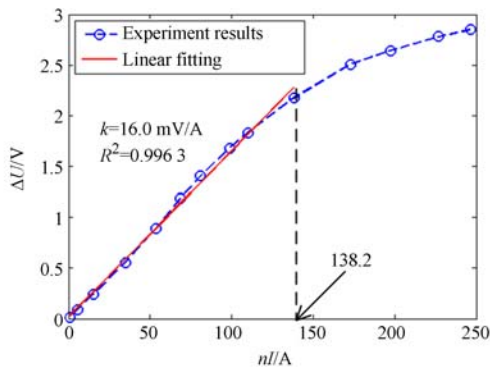
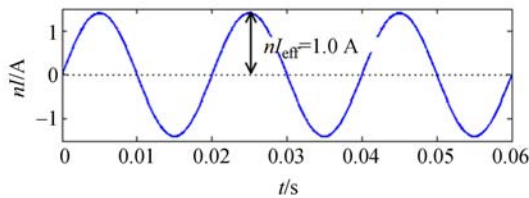
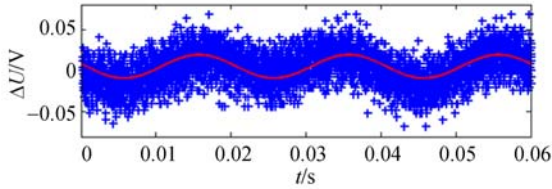


图 9 当 $nI_0 = 700$ A 时, 输出电压随输入电流的变化
Fig. 9 Output voltage versus input current for $nI_0 = 700$ A



(a) 输入电流信号
(a) Input current signals



(b) 输出电压信号
(b) Output voltage signals

图 10 最小可测交流电流及其输出电压波形
Fig. 10 Waveforms of minimum input current and its output voltage

两 FBG 对温度具有相同的响应。即使两光栅的温度响应略有差异也不会对交流电流的测量灵敏度产生影响, 因为相对于被测交流信号, 温度为缓变信号, 它只会使示波器的输出交流信号上下移动, 而不会改变输出交流信号的峰峰值。

最佳偏置电流条件下 ($nI_0 = 700$ A), 示波器输出电压随被测交流电流的变化曲线如图 9 所示。当交流有效安匝电流 nI_{eff} 在 $1.0 \sim 138.2$ A 内变化时, 示波器输出电压随被测电流近似呈线性变化, 线性拟合度为 0.9963, 电流测量灵敏度为 16.0 mV/A。

图 10 为该交流电流传感器的最小可测有效

安匝电流及其输出电压信号。对比图 10 中的两图可知, 输入的电流信号与输出的电压信号之间的相位差为 π , 这是由于传感光栅位于辅助光栅的下降沿造成的。此外, 尽管被测有效安匝电流 1.0 A 的输出波形噪声较大, 但是通过拟合的方式仍然可以还原出正弦输出信号, 因此, 该交流电流传感器的最小可测安匝电流为 1.0 A。

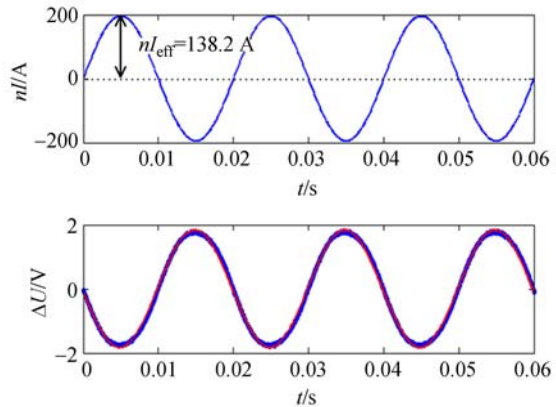


图 11 线性响应范围内最大被测交流电流及其输出电压波形

Fig. 11 Waveforms of maximum input current in linear range and its output voltage

线性测量范围内的最大有效安匝电流为 138.2 A (见图 9), 该电流及其输出波形如图 11 所示。由图 11 可知, 正弦拟合曲线与示波器输出电压曲线吻合得较好, 只是在波形顶端略有差异。为了能够更加清晰地看出两者之间的差异, 本文将波形顶端进行了放大, 结果如图 12 所示。图 12 表明: 传感器输出波形的上升沿与拟合曲线吻合得较好, 而下降沿则拟合较差, 导致两波形的峰值略有差异, 其值为 0.04 V, 据此可计算出此峰

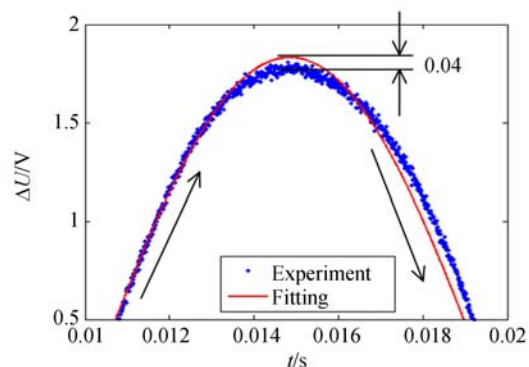


图 12 输出波形顶端放大图

Fig. 12 Enlargement of top of output waveform

值误差为 2.2%。上述波形畸变是 GMM 材料的磁滞现象造成的。因为磁滞回线上升沿和下降沿的线性度不同,上升沿的线性度明显优于下降沿。由于磁滞现象随被测电流的增大而增大,因此有效安匝电流在线性变化范围内,磁滞现象引起的畸变峰值误差小于 2.2%。

4 结 论

本文提出了一种温度自动补偿型 GMM-FBG

全光纤交流电流传感器。此传感器将 S-FBG 与 A-FBG 串联后呈“十字形”粘贴在 GMM 材料上置于磁路狭缝内,两 FBG 的径向分别与磁场方向平行和垂直。通过控制两 FBG 在磁路中的方向实现对 S-FBG 的选择性调制。最后,将 S-FBG 的中心波长置于 A-FBG 反射谱的边带上,采用强度解调的方式实现电流测量和温度补偿。实验结果表明:有效安匝电流在 1.0~138.2 A,该传感器可实现线性测量,线性度为 0.996 3,测量精度为 16.0 mV/A,最小可测安匝电流为 1.0 A。

参考文献:

- [1] YANG M H, DAI J X, ZHOU C M, *et al.*. Optical fiber magnetic field sensors with TbDyFe magnetostrictive thin films as sensing materials[J]. *Optics Express*, 2009, 17(23):20777-20782.
- [2] ZHENG J, DONG X Y, ZU P, *et al.*. Intensity-modulated magnetic field sensor based on magnetic fluid and optical fiber gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(18):183511-1-4.
- [3] WANG T Y, LUO C M, ZHENG S G. A fiber-optic current sensor based on a differentiating Sagnac interferometer [J]. *Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(3):705-708.
- [4] WANG Q, XIA J, LIU X, *et al.*. A novel current sensor based on magnetic fluid and fiber loop cavity ring-down technology[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11):6192-6198.
- [5] ZHENG J, DONG X Y, ZU P, *et al.*. Magnetic field sensor using tilted fiber gating interacting with magnetic fluid[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15):17863-17868.
- [6] LIN W, MIAO Y P, ZHANG H, *et al.*. Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects[J]. *Applied Physics Letter*, 2013, 103:151101.
- [7] 易本顺,刘延冰,阮芳. 光学电流传感器现场运行性能分析[J]. 中国电机工程学报. 1997, 17(2):138-140.
YI B SH, LIU Y B, RUAN F. Field performance analysis of optical current transducer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(2):138-140. (in Chinese)
- [8] 李超,徐启峰. 采用晶体劈和成像检测模式的光学电流传感器设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1):74-81.
- [9] 王鹏,张贵新,朱小梅,等. 直线型线圈电流传感器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27):44-49.
- [10] 陈攀,孙才新,米彦,等. 一种用于绝缘子泄漏电流在线监测的宽频带微电流传感器的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24):144-148.
CHEN P, SUN C X, MI Y, *et al.*. Research of broad bandwidth micro-current sensor character for insulator leakage current monitoring system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(24):144-148. (in Chinese)
- [11] 张艳,陈金玲,张明明,等. 一种新型传感结构的光学直流电流传感器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3):121-127.
ZHANG Y, CHEN J L, ZHANG M M, *et al.*. Optics direct current sensor with novel sensing structure[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(3):121-127. (in Chinese)
- [12] 王夏霄,秦祎,王野,等. 光纤电流传感器的延迟光纤偏振串音误差[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11):2930-2936.
WANG X X, QIN Y, WANG Y, *et al.*. Errors of fiber delay line polarization crosstalk for all fiber optical current sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11):2930-2936. (in Chinese)
- [13] 李长云,李庆民,李贞,等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报,

- 2010, 30(19):127-132.
- LI CH Y, LI Q M, LI ZH, *et al.*. Transfer characteristics of current transformers with DC bias [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(19): 127-132. (in Chinese)
- [14] 万代, 钟力生, 于钦学, 等. 直线型、螺线管嵌套型及多光路反射式光纤电流传感器结构设计与仿真[J]. *高电压技术*, 2013, 39(11):2678-2685.
- WAN D, ZHONG L SH, YU Q X, *et al.*. Structure design and simulation study on line, solenoids nested and multiple-reflection optical channels type optical fiber current sensor[J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(11):2678-2685. (in Chinese)
- [15] 周王民, 魏志武, 李文博, 等. 温度不敏感光纤光栅大电流传感器[J]. *高电压技术*, 2009, 35(9): 2133-2137.
- ZHOU W M, WEI ZH W, LI W B, *et al.*. Novel fiber Bragg grating large current sensor insensitive to temperature[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9):2133-2137. (in Chinese)
- [16] 余有龙, 叶红安, 刘治国, 等. 光纤光栅电流传感器[J]. *光学学报*, 2001, 21(5):586-588.
- YU Y L, YE H A, LIU ZH G, *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(5):586-588. (in Chinese)
- [17] 李建中, 李泽仁, 张登洪, 等. 基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5):1649-1655.
- LI J ZH, LI Z R, ZHANG D H, *et al.*. Open-loop detection of fiber optic current transducer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1649-1655. (in Chinese)
- [18] 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.
- [19] DUANNI H, SUDHARSANAN S, BOWERS J E. Compact Tb doped fiber optic current sensor with high sensitivity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23):29993-29999.
- [20] ASEEL M, VISHUN K, AHMED S S, *et al.*. Magnetic-field sensor based on whispering-gallery modes in a photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid magnetic-field sensor [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21):4983-4986.
- [21] MORA J, DIEZ A, CRUZ J L, *et al.*. A magnetostrictive sensor interrogated by fiber gratings for DC-current and temperature discrimination [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(12):1680-1682.
- [22] KIN S C, RAMESH K, VIPUL R. Temperature-compensated fiber-Bragg-grating based magnetostrictive sensor for dc and ac currents[J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(7):1906-1909.
- [23] DEBORAH R, WILLSHIRE A J, GRZEGORZ F, *et al.*. A fiber-bragg-grating-based sensor for simultaneous AC current and temperature measurement[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, 6(6): 1539-1542.
- [24] ZHAO H, SUN F F, YANG Y Q, *et al.*. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor[J]. *Optics Communications*, 2013, 308:64-69.

作者简介:



杨玉强(1977—),男,山东平原人,教授,研究生导师,2002年于东北师范大学获得学士学位,2004年,2009年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事自由空间激光通信和光纤传感技术方面的研究。E-mail: yu-qiayang110@sina.com



杨群(1991—),女,陕西西安人,硕士研究生,2014年于哈尔滨理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: yangqun136@163.com