

基于磁致伸缩效应的 FBG 电流传感器

马跃辉¹, 刘兴², 王华², 孙欣², 易璐², 李路明², 彭亮², 陈龙¹, 牟成博¹, 刘云启^{1*}

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444; 2. 国网江西省电力有限公司 信息通信分公司, 南昌 330000)

摘要: 随着智能电网技术的发展, 电流参数的监测需求日益提升。提出了一种基于磁致伸缩效应的光纤布喇格光栅 (FBG) 电流传感器, 将 FBG 全部固定于磁致伸缩材料上, 使其感知通电螺线管所产生的磁场来实现电流传感。监测 FBG 的波长变化可知, FBG 电流传感器在 0~5 A 电流范围最大实现了 0.773 nm 的布喇格波长漂移量, 传感灵敏度高达 0.184 nm/A。

关键词: 磁致伸缩效应; 光纤电流传感器; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)03-0018-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.004

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Fiber Bragg grating current sensor based on magnetostrictive effect

MA Yuehui¹, LIU Xing², WANG Hua², SUN Xin², YI Lu², LI Luming²,
PENG Liang², CHEN Long¹, MOU Chengbo¹, LIU Yunqi^{1*}

(1. School of communication & Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. State Grid Jiangxi Information & Telecommunication Company, Nanchang 330000, China)

Abstract: With the development of smart grid technology, the demand for current parameter monitoring is increasing. This paper proposes a fiber Bragg grating (FBG) current sensor based on magnetostrictive effect. The FBG is completely fixed on the magnetostrictive material, so that it can sense the magnetic field generated by the energized solenoid to achieve current sensing. By monitoring the wavelength change of FBG, it can be seen that the FBG current sensor can achieve the maximum Bragg wavelength drift of 0.773 nm in the current range of 0~5 A, and the sensing sensitivity is as high as 0.184 nm/A.

Key words: magnetostrictive effect, fiber current sensor, fiber Bragg grating

0 引言

随着电网向智能化、数字化和信息化的方向发展, 电流参数的监测对保证电网系统安全和高效运行具有重要支撑作用^[1-2]。传统电磁式电流传感器在实际应用中存在响应速度低、结构复杂、动态测量范围窄和智能化升级费用高等问题, 而光纤型电流传感器因其体积小、抗电磁干扰、高动态性能、易复用和兼容通信网等优势引起了许多研究者的关注^[3-5]。

近年来, 为了提升光纤电流传感器的灵敏度, 光

收稿日期: 2021-12-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61875117) 资助。

作者简介: 马跃辉 (1997—), 男, 博士研究生, 现就读于上海大学通信与信息工程学院信息与通信工程专业, 主要研究方向为基于光纤光栅的空分复用技术在光纤通信系统中的应用、光纤光栅的传感关键技术等, 参与了多项国家项目的研究工作。

通信作者: 刘云启 (1971—), 理学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型光纤通信技术、光纤传感技术。



纤结合磁场敏感材料的设计成了该领域研究的热点。基于磁场敏感材料的光纤型电流传感器是将电流造成环境磁场变化引起的磁场敏感材料本身特性的改变量传递到光纤, 从而引起光纤中光的波长、相位或者强度发生相应变化。光纤型电流传感器中使用的磁敏材料包括超磁致伸缩材料、磁光材料和磁流体材料^[6-7]。根据磁光材料的法拉第效应, LI Y 等人^[8]提出了一种基于磁光玻璃的条状拼接结构的光纤电流传感器, 虽然采用 2 种倾斜角为 45° 的光纤电流传感器减少了磁光材料的外界磁场干扰误差, 但受限于法拉第旋转角的范围, 且该类传感器动态范围小且成本昂贵, 系统结构复杂。WANG Q 等人^[9]利用电流产生的磁场来降低磁流体材料薄膜的插入损耗, 设计了一种结合磁流体薄膜的光纤环路腔衰荡技术的光纤电流传感器, 在 0~1.2 A 的直流电流范围实现了 3 mA/μs 的灵敏度, 但磁流体材料易受环境温度影响, 长期工作

稳定性差。超磁致伸缩材料特有的磁致伸缩效应对磁场有较高的响应速度和稳定性。光纤布喇格光栅(FBG)对外界环境的感知能够实现应力、温度等参数的传感测量,因此,在电流产生的磁场环境下,利用FBG感知超磁致伸缩材料的应变从而制备光纤电流传感器已成为电流传感器领域重要的一部分。SAT-PATHI D等人^[10]使用超磁致伸缩材料 Terfenol-D 并结合 FBG 实现了 10~1000 A 电流范围的交流电流监测,但该设计需要 2 个探测支路,系统复杂,线性区为 100~1000 A,并且可测相移量较小,仅为 30°,相移量的相干检测增加了测量的难度。ZHAO H 等人^[11]在超磁致伸缩材料薄膜上粘贴 2 个初始波长相同的 FBG,并将其放置在具有相同磁场偏置但方向相反的磁路中,在-170~170 A 的电流范围检测到 2 个 FBG 的波长差产生的线性偏移量为-0.3~0.3 nm,但该设计中 2 个相同尺寸的超磁致伸缩材料和相同初始波长的 FBG 对器件的精度提出了更高的要求。DANTE A 等人^[12]首先将 Terfenol-D 材料内置于 2 个环形材料的中心从而形成电流感应环,然后将 FBG 固定在 Terfenol-D 材料上以监测电流,该传感结构在 50~400 A 的电流范围灵敏度最大仅为 0.366 pm/A,但其设计复杂且成本较高。为了进一步提升基于 FBG 电流传感器的灵敏度,简化系统结构,本文设计一种基于超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的 FBG 电流传感器。

1 传感理论分析

1.1 螺线管产生的电流与磁场的关系

本文通过监测通电螺线管中磁场的变化来反应电流值,因此使用多层螺线管来产生足够大的磁场,其轴向磁场强度可以看作是多个单位单层螺线管在轴上磁场强度的叠加。设电流为 I ,螺线管长度为 l ,螺线管的外半径为 r_0 ,内半径为 r_1 ,每层单位长度上的匝数为 n_1 ,单位厚度上的层数为 n_2 ,则多层螺线管轴线上距螺线管轴向中心为 z 的任意点的轴向磁场强度^[13]为

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 n_1 n_2 I \times \left\{ \left(\frac{l}{2} + z \right) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{l}{2} + z \right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} + z \right)^2}} + \left(\frac{l}{2} - z \right) \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{l}{2} - z \right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} - z \right)^2}} \right\} \quad (1)$$

其中, μ_0 是真空磁导率。当 $z=0$ 时,螺线管轴线中心的轴向磁场强度为

$$B_0 = \frac{1}{2} \mu_0 n_1 n_2 l I \ln \frac{r_0 + \sqrt{r_0^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} \right)^2}} = K_i I \quad (2)$$

分析式(1)和式(2)可知,在螺线管的长度和匝数保持不变时,螺线管内部磁场和电流的线性系数 K_i 为常数,因此可以通过调节电流大小控制中心磁场的磁场强度。

实验中使用的螺线管是由直径为 1.1 cm 的漆包铜线均匀绕在一个长度为 12 cm 的空心绝缘圆柱上形成的,其内径和外径分别为 2.2 cm 和 8.0 cm,螺线管共 29 层。实验时将高斯计的探针放置在螺线管中心区域,在 0~5 A 的电流范围以 0.5 A 的步长间隔增大电流,得到通电螺线管中部位置磁场与电流的关系,如图 1 所示。可以看出,随着电流增大,磁场强度变大,线性度为 0.745 mT/A。

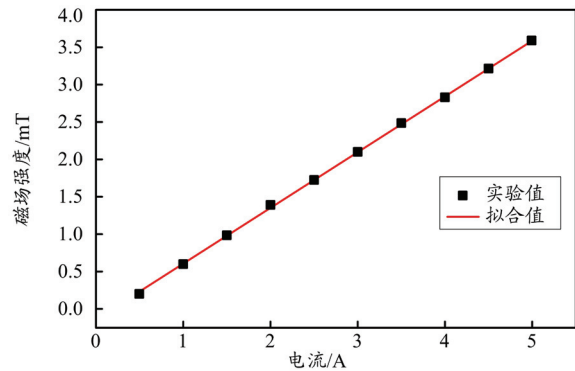


图 1 通电螺线管中磁场与电流关系

1.2 电流传感原理

超磁致伸缩材料 Terfenol-D 具有高的磁致伸缩系数,在外加磁场 B 的作用下,超磁致伸缩材料将产生伸缩量 ΔL ,同时超磁致伸缩材料会形成轴向应力 ε ^[14],如式(3)所示。

$$\varepsilon = K_g B \quad (3)$$

其中, K_g 是磁致伸缩系数,可定义为 $K_g = \Delta L / L_g$, L_g 为磁致伸缩材料的初始长度。

在超磁致伸缩材料伸缩时产生的应力 ε 会传递给粘附在上面的 FBG,从而对光栅产生一个横向的拉伸和压缩作用,造成光纤光栅谐振波长产生一定的偏移^[4],如式(4)所示。

$$\Delta \lambda = \lambda_{rs} (1 - P_e) \varepsilon \quad (4)$$

其中, P_e 为光纤有效弹光系数, λ_{rs} 为 FBG 的谐振波

长。将式(2)、式(3)代入到式(4)可得到FBG波长偏移量与螺线管电流的关系式为

$$\Delta\lambda=\lambda_{rs}(1-P_e)K_gK_gI \quad (5)$$

由式(5)可知,螺线管电流与FBG谐振波长的偏移量为线性关系。因此,通过检测超磁致伸缩材料上固定的FBG波长漂移量就可以反映螺线管电流的变化。

2 传感器设计

本文采用193 nm准分子激光器,通过相位掩模法在普通单模光纤(Corning,SMF-28)中制备FBG,其长度为10 mm,3 dB带宽为0.4 nm,反射率为99%,谐振波长为1548.28 nm。传感器结构示意图如图2所示,使用胶水将FBG的光栅两端固定到尺寸为2 mm×5 mm×20 mm的Terfenol-D材料方棒上,再用少量胶水将栅区也粘附在材料上,以保证超磁致伸缩材料形成的应力全部传递到FBG。

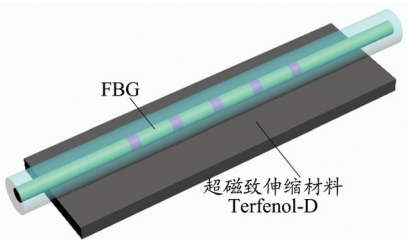


图2 FBG电流传感器结构示意图

电流传感实验装置如图3所示,由直流电流源、通电螺线管、FBG波长解调仪(MOI,SM125)和FBG电流传感器组成。其中,直流电流源可经手动调节向外输出0~5 A的稳定电流。实验时,将制备的FBG电流传感器放置到螺线管的中间位置,并将传感器两端的光纤固定到2个平台上,让传感器在螺线管中保持水平状态以避免与内部磁场产生角度,并能感应到均匀且最大的内部磁场;FBG一端通过光纤跳线连接解调仪实时监测FBG的反射光谱,并记录FBG谐振波长。

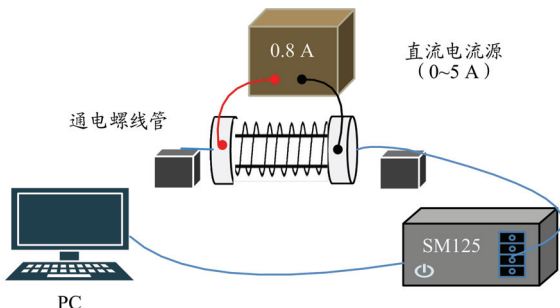


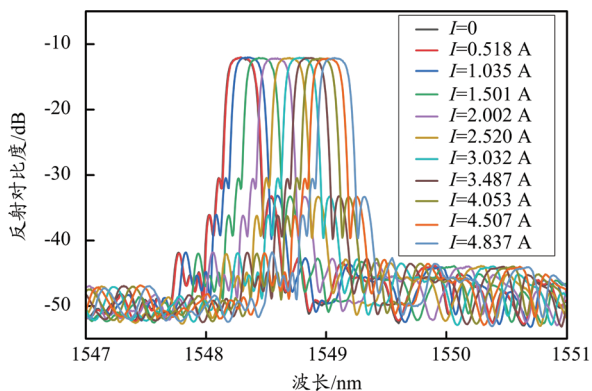
图3 FBG电流传感实验装置示意图

3 实验结果分析

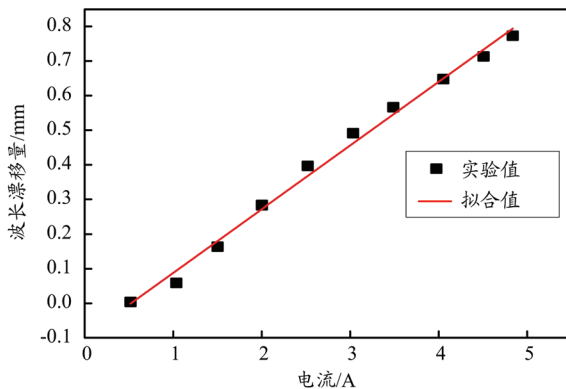
3.1 电流传感

电流传感实验中,本文利用直流电流源的开关在

螺线管上快速接入电流,以避免螺线管长时间通电发热引起的温度影响;同时,将一个热电偶内置于螺线管内监测螺线管通电前后的温度变化。由于通电时间较短,螺线管内的温度基本不变。实验得到FBG反射光谱对电流变化的响应情况如图4(a)所示,当直流电流源的电流从0增大到5 A,电流传感器的中心波长逐渐往长波方向偏移。超磁致伸缩材料对螺线管产生磁场的高响应速度,保证了FBG波长的变化可快速反映电流的改变。图4(b)为FBG的中心波长漂移量与电流的关系图,当电流从0~5 A变化时,波长的变化是线性的,最大的波长漂移量为0.773 nm,线性拟合度可达99.3%,电流传感灵敏度为0.184 nm/A。



(a) 不同电流下FBG的反射光谱



(b) FBG的中心波长漂移量与电流的关系

图4 FBG特性与电流的关系

为了研究FBG电流传感器的稳定性,本文使用相同的实验装置以72 h为间隔分别进行了3次测量,3次测量中电流与FBG波长漂移的关系如图5所示。可以看出,3次的测量数据基本一致,体现了该电流传感器具有良好的重复性与可靠性。

3.2 温度响应

本文进一步评估了环境温度起伏对FBG电流传

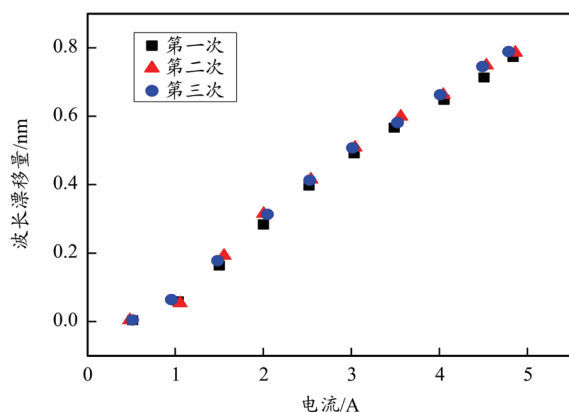
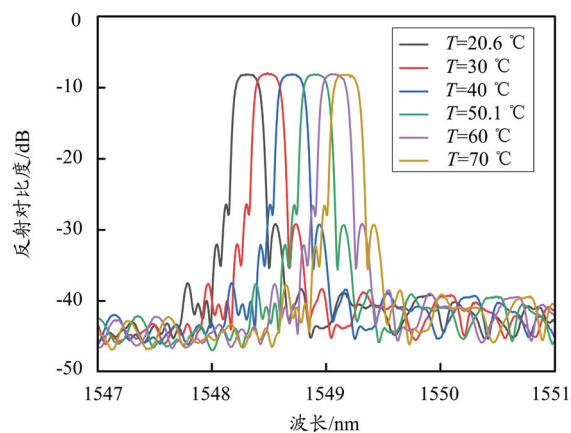
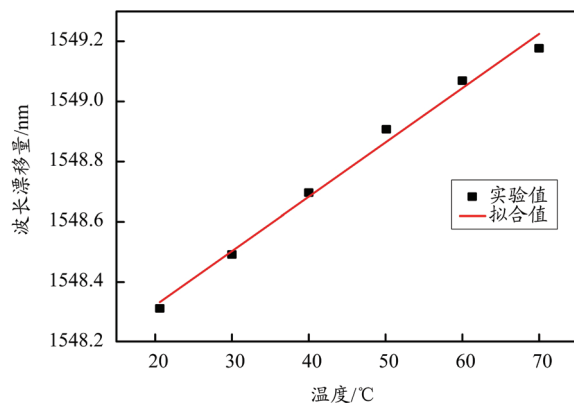


图5 FBG中心波长漂移量与电流的关系(3次测量值)

传感器的影响。将FBG电流传感器放置到温度控制箱中,并将一个热电偶固定在电流传感器附近监测环境温度,得到的结果如图6所示。可以看出,在温度 T 为20~70℃范围,随着温度的升高,FBG的波长发生红移,温度灵敏度为0.0180 nm/℃。



(a) FBG电流传感器随温度变化的反射光谱



(b) FBG波长漂移量与温度的关系

图6 FBG电流传感器性能与温度的关系

4 结束语

本文提出了一种基于超磁致伸缩材料的FBG电流传感器,通过磁致伸缩材料在通电螺线管磁场作用下的伸缩对FBG产生拉力作用从而改变光栅波长,在0~5 A的电流范围,所提传感器的最大电流传感灵敏度达0.184 nm/A,印证了本文设计的FBG电流传感器的可行性和应用潜力。

参考文献:

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
- [2] 张东霞,姚良忠,马文媛.中外智能电网发展战略[J].中国电机工程学报,2013,33(31):1-14.
- [3] LIU Y, CHIANG K S, CHU P L. Multiplexing of temperature-compensated fiber Bragg grating magnetostrictive sensors with a dual-wavelength pulse laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(2): 572-574.
- [4] 周东平,董毅.全光纤电流传感器中电流传感光纤的抗干扰研究[J].光学学报,2017,37(10):76-81.
- [5] YANG Q, SUN S P, SIMA W, et al. Progress of advanced voltage/current sensing techniques for smart grid [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 349-367.
- [6] LIU C, SHRN T, WU H B, et al. Applications of magneto-strictive, magneto-optical, magnetic fluid materials in optical fiber current sensors and optical fiber magnetic field sensors: A review [J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102634-1-102634-4.
- [7] KUROSAWA K. Development of fiber-optic current sensing technique and its applications in electric power systems [J]. Photonic Sensors, 2014, 4(1): 12-20.
- [8] LI Y, WAN J, ZHANG W, et al. Analysis of antimagnetic interference properties and structural optimization of magneto-optical glass current sensors[J]. Applied Optics, 2020(59): 1123-1129.
- [9] 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 Sensor Journal, 2015, 15: 6192-6198.
- [10] SATPATHI D, MOORE J A, ENNIS M G. Design of a terfenol-D based fiber-optic current transducer [J]. IEEE Sensor Journal, 2005, 5: 1057-1065.
- [11] ZHAO H, SUN F, YANG Y, et al. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor [J]. Optics Communication, 2013, 308: 64-69.
- [12] DANTE A, LOPEZ J U, COSENZA 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.
- [13] 杨志勇,许友安,蔡伟,等.磁光调制方位传递系统中螺线管近轴区磁场影响分析[J].光学学报,2019,39(7):328-337.
- [14] WANG L, WANG B W, WANG Z H, et al. Magneto-thermo-mechanical characterization of giant magnetostrictive materials [J]. Rare Metals, 2013, 32: 486-489.