

基于微环谐振器的非接触式电流传感器

罗曼丹, 杨庆*, 黄凌宇, 董富宁

重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030

摘要 提出一种以 Fe_3O_4 磁性纳米粒子为包层的微环谐振器的集成光波导电流传感器, 阐述了其基本原理和制备方法。被测电流所产生的交变磁场, 会使得 Fe_3O_4 纳米粒子产生能量损耗, 温度发生变化, 从而导致光波导折射率发生改变。通过监测微环输出谐振波长的漂移量可实现电流传感。为了实现宽量程、高品质的微环器件, 通过有限时域差分法对微环传感器的关键结构参数进行合理设计, 制备出不同半径下的电流传感器。理论与实验结果表明: 在测试电流幅值为 0 至 0.5 A, 频率在 0 至 60 kHz 内, 微环电流传感器的输出谐振波长漂移量与电流幅值的平方、电流频率的平方均呈正比例关系, 同时随着微环半径的减小, 传感器探测范围变大, 但灵敏度减小。该研究可为集成式微型电流传感器提供一定的理论基础, 推动了以硅基为基础的光电传感的发展。

关键词 传感器; 电流传感器; 微环谐振器; 磁热效应; 集成光学

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1228001

Non-Contact Current Sensor Based on Micro-Ring Resonator

Luo Mandan, Yang Qing*, Huang Lingyu, Dong Funing

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400030, China

Abstract In this paper, we presented the basic principle and fabrication method of an integrated optical waveguide current sensor based on a micro-ring resonator coated with Fe_3O_4 magnetic nanoparticles. In the alternating magnetic field generated by the measured current, Fe_3O_4 nanoparticles produce energy loss, and then the temperature changes. As a result, the refractive index of the waveguide varies. Current sensing can be realized by monitoring the drift in the resonance wavelength output from the micro-ring resonator. We reasonably designed the key parameters by the finite difference time domain method to obtain a wide-range and high-quality micro-ring resonator and thus prepared current sensors with different micro-ring radii. The theoretical and experimental results show that the drift in the resonance wavelength is proportional to the square of the current amplitude and frequency respectively when the measured current amplitude is 0 to 0.5 A and the frequency is 0 to 60 kHz. Besides, with the decrease in the micro-ring radius, the detection range of the sensor increases and the sensitivity drops. This paper can provide a theoretical basis for the integrated miniature current sensors and promote the development of silicon-based photoelectric sensors.

Key words sensors; current sensors; micro-ring resonator; magnetocaloric effect; integrated optics

OCIS codes 280.4788; 140.4780; 260.2110

1 引言

智能电网众多状态物理量中最为关键的是线路节点和关键设备的电压电流信息, 亟需通过先进的

传感与测量技术为智能电网的工程建设、运行调控和维护检修提供有力支持。电流测量技术可分为接触式与非接触式两种, 其中, 非接触式电流监测方法与被测线路之间无电气连接, 其具有对线路影响小、

收稿日期: 2020-12-11; 修回日期: 2021-01-13; 录用日期: 2021-01-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52077019)

* E-mail: yangqing@cqu.edu.cn

绝缘成本低、安全性高等优点,是未来电流智能化测量装置的发展方向。当前主流的非接触式电流传感器依据其原理主要分为:电磁式^[1-3]、巨磁阻式^[4-6]和光纤式^[7-9]电流传感器。其中基于线圈绕组式变压器原理的电磁式电流互感器是电网中最常用的电流传感器,工艺成熟,制造方便,然而其不能测量直流电流,应用受限。此外,为防止铁芯饱和,其设计尺寸较大,难以安装到空间有限的线路或者设备上。第二类巨磁阻式传感器的工作原理是基于巨磁阻效应,国内学者已研制出带宽为直流至 10 MHz 的宽频巨磁阻电流传感器^[10],其体积小,灵敏度高,测量范围宽,但在实际使用中,这类传感器尚未能解决电磁干扰和温度影响等问题。最后一类光纤电流传感器主要是利用磁光晶体的法拉第效应,将电信号转变为光信号。ABB(Asea Brown Boveri)公司基于光学玻璃研制了工业级光纤电流传感器,具有抗干扰强、无磁饱和现象、小型化等优点,然而光纤中固有的线性双折射以及易受环境影响的问题对其测量精度和稳定性有较大干扰,同时需要较高的封装成本才能保证传感单元的机械强度。

在智能电网与能源互联网快速发展的背景下,微型化、集成化和低成本是传感器的发展趋势,然而上述几种主流非接触式电流传感器受限于相关器件及材料特性等难以实现微型化传感。随着纳米技术的发展,光电集成器件中微环谐振器因具有成本低、体积小、Q 值高、机械稳定性高等优点,在传感器、激光器、滤波器、光调制器^[11-16]等领域具有很高的研究和应用价值。绝缘体上硅(SOI)因为具有较大的折射率差、低功耗、与传统 CMOS 工艺兼容且易于光电集成等优点,成为了研制微环谐振器的主要材料。目前,国内学者在硅基微环上集成 TiN 电阻,电流流过电阻产生的焦耳热导致微环谐振波长发生漂移^[17],故可通过检测漂移量反推电流大小,但这种方式仅适合微直流电的检测,且为接触式测量,应用范围受限。国内外对高压大电流传感器的研究有着较为成熟的理论和经验,但对于小电流传感器的研究较少,非接触式微型化小电流传感器的研究更是处于起步阶段,亟需进一步开展相关研究。

为了实现非接触式集成化电流传感器,本文提出并研究一种以四氧化三铁(Fe_3O_4)磁性纳米粒子为上包层的微环光波导电流传感器。 Fe_3O_4 磁性纳米粒子在交流电流产生的磁场下产生能量损耗,导致温度发生变化,进而导致微环谐振器的有效折射率发生改变,可通过监测微环输出谐振波长的漂移

量,来测量电流信息。通过仿真优化器件的关键参数,研制出三种不同微环半径下的传感器,实验结果表明,所设计的微环电流传感器,在测试电流幅值为 0 至 0.5 A,频率在 0 至 60 kHz 内,其输出谐振波长漂移量分别与电流幅值的平方、电流频率的平方呈正比例关系,其线性相关系数大于 0.99,同时通过对比分析指出了半径参数对传感器传感特性的影响规律。本文提出的传感器结构简单、灵敏度高,推动了硅基片上的光电传感的发展,可以利用标准互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺进行批量化生产,成本低,在宽频电流非接触式检测方面将发挥重要作用。

2 电流传感器的测量原理

基于 SOI 微环电流传感器的基本结构如图 1 所示。硅基微环谐振器由一条直波导与一个环形波导组成,输入光通过光栅耦合器进入直波导中传输,以隐失波的形式耦合进入环形波导并产生谐振,非谐振波长的光通过另一侧光栅耦合器输出。为了利用磁热效应实现电流的监测,在环形波导表面覆盖一层 Fe_3O_4 磁性纳米粒子。

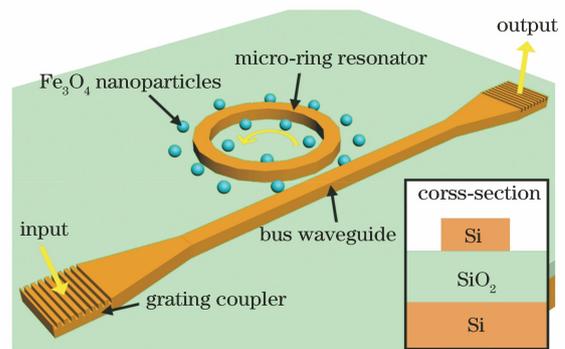


图 1 硅基微环电流传感器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of silicon-based micro-ring current sensor

当光进入环形波导中传播时,若绕微环传播一周所发生的光程差是传播光波长的整数倍,则传播光因发生谐振而得到加强,该谐振点的波长值便是谐振波长,它满足

$$2\pi n_{\text{eff}}R = m\lambda_m, \quad (1)$$

式中: λ_m 为谐振波长, m 为谐振级数, R 为微环半径, n_{eff} 为波导的有效折射率。由(1)式可知,当微环半径不变,有效折射率发生改变时,微环谐振波长将会发生漂移。

其次,对于 SOI 材料,硅具有良好的热光系数^[18],其有效折射率随温度的变化情况可近似为线

性关系,在 300~600 K 的温度下,硅在 1550 nm 波长处的热光系数为 $dn_{\text{eff}}/dT = 1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,且热响应速率达到亚毫秒量级,满足光网络对器件的调制速率。而二氧化硅的折射率随温度的变化很慢,其改变量可忽略不计。同时,硅与二氧化硅的热导率分别为 $149 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $1.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,二氧化硅远小于硅的热导率^[19],可以有效减小热量的向下传递,降低损耗。另一方面,由于热膨胀效应,微环波导的半径、高度等也将发生改变,但由于硅材料的热膨胀系数为 $3.75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,比热光系数小两个数量级^[20],故本文没有考虑由热膨胀引起的谐振波长漂移。因此,当温度改变时,微环的有效折射率也将改变,进而导致谐振波长发生漂移,谐振波长的漂移量 $\Delta\lambda$ 与温度变化量 ΔT 的关系满足

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi R}{m} \Delta n_{\text{eff}} = \frac{2\pi R}{m} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \Delta T. \quad (2)$$

Fe_3O_4 磁性纳米粒子是目前常用的铁磁性物质之一,其颗粒直径一般在 10~100 nm 之间。当磁性纳米粒子的粒径小于其超顺磁性临界尺寸时,粒子进入超顺磁性状态,无矫顽力和剩磁^[21]。此时超顺磁纳米粒子具有极高的磁化率,对外磁场具有敏感的反应能力,同时粒子在磁场施加前及磁场撤销后不会发生聚集,能够随磁场的变化而瞬间改变。在待测交流电 I 产生交变磁场 H 的作用下,超顺磁 Fe_3O_4 纳米粒子通过尼尔弛豫和布朗弛豫损耗大量吸收电磁波的能量,并将电磁能转化为热能。根据 Rosensweig 的理论^[22],磁性粒子在交变磁场中的功率损耗 P 的表达式为

$$P = \pi\mu_0\chi_0 H^2 f \frac{2\pi f\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2}, \quad (3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, χ_0 为平衡磁化率, f 为待测电流的频率, τ 为系统总弛豫时间。当 $f\tau \ll 1$

时^[23], (3) 式可以简化为

$$P = 2\pi^2\mu_0\chi_0\tau f^2(\alpha I), \quad (4)$$

式中: α 为电流到磁场的转化率。

在加热的初期,磁性纳米粒子的温度变化为

$$\Delta T = \frac{P\Delta t}{c}, \quad (5)$$

式中: Δt 为交变磁场作用时间, c 为磁性纳米粒子的比热。

最后联立(1)~(5)式,谐振波长的漂移与电流的关系满足

$$\Delta\lambda = \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \cdot \frac{4\pi^3 R\alpha^2\mu_0\chi_0\tau\Delta t}{mc} f^2 I^2. \quad (6)$$

由(6)式可知,谐振波长位移与待测电流的幅值与频率平方均呈正比例关系。

3 传感器设计及制备

3.1 关键参数设计

本文选用 SOITEC 公司的 SOI 晶圆片作为制备电流传感器的材料平台,其中芯层硅厚度为 220 nm,衬底下包层二氧化硅的厚度为 $2 \mu\text{m}$;采用全刻蚀的条形波导结构。因此,传感器波导结构关键结构参数中只需对波导宽度、直波导和环形波导的耦合间距以及微环半径进行设计即可。

为了优化器件的关键结构参数,获取宽量程、低损耗的微环器件,本研究基于 Lumerical FDTD Solutions 软件,采用 3D 建模方法对微环谐振器结构进行了建模仿真,模拟分析结构参数与输出光谱性能的影响。图 2(a)和图 2(b)为所搭建的微环谐振器模型,其中波导高度为 220 nm,设置硅的折射率为 3.477,二氧化硅的折射率为 1.44,同时波导的入射光模式为 TE 模式;图 2(c)为微环谐振器的输出谱线图。

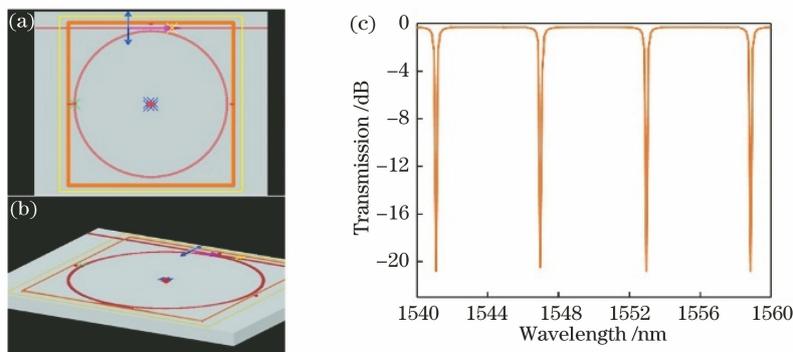


图 2 微环谐振器的仿真模型和输出谱线。(a)(b)仿真模型;(c)输出谱线

Fig. 2 Simulation models and transmission spectrum of micro-ring resonator.

(a)(b) Simulation models; (c) transmission spectrum

首先,在器件波导宽度的选择上,考虑到对高阶模传输的限制,宽度不宜超过 600 nm;当宽度小于 400 nm 时,无法形成稳定传输的单模,增加了波导的实际传输损耗,影响传感性能。综合以上两点考量,波导宽度设为 500 nm。

其次,当直波导和环形波导的耦合间距设置为 100 nm 时,微环谐振器最接近于临界耦合状态,光波在传输过程中泄露的能量比较少,大部分能量都被约束在芯层硅波导结构中,谐振峰的品质因子 Q 最大^[24-25]。品质因子 Q 定义为 $Q = \lambda_{res} / \omega_{FWHM}$,其中 λ_{res} 为谐振波长, ω_{FWHM} 为谐振峰的半峰全宽,表征了谐振峰相对于中心波长的锐度。

最后,当微环半径固定时,对应不同的谐振级数,微环谐振器存在一系列的谐振波长,传输光谱上相邻两个谐振峰之间的波长间隔称为自由光谱宽度 (FSR, R_{FS}),在不计色散的情况下,可以得到

$$R_{FS} = \lambda^2 / (2\pi R n_{eff}) \quad (7)$$

由(7)式可知:自由光谱宽度与微环半径成反比,如果微环半径过大,将会导致自由谱宽过小,限制微环谐振器传感器的工作范围,所以微环半径不宜过大;而如果半径过小,虽然理论上可以提高自由光谱宽度,但同时也会引起波导弯曲损耗显著增大。因此,为了获取适合的微环半径参数,仿真中将微环半径设置为 2~30 μm ,模拟出不同微环半径下微环谐振器的传输特性。图 3 显示了仿真中微环的自由光谱宽度及品质因子随微环半径的变化情况,由图

可以看出不同半径下获得的自由光谱宽度随着半径的增大而减小,从 1550 nm 附近共振的测量结果中提取的谐振器品质因子随着半径的增大而增大。最后确定的微环半径大小 R 分别为 5, 10, 15 μm ,此数值相对适中,能够兼顾微环弯曲环绕时散射损耗和自由光谱宽度。

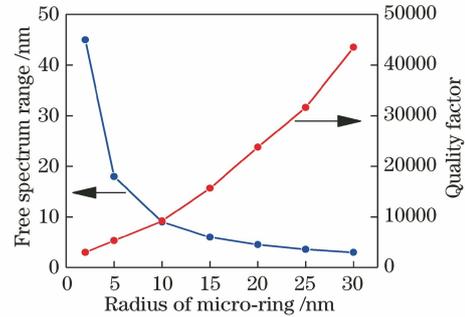


图 3 自由光谱宽度及品质因子随微环半径的变化情况

Fig. 3 Change of FSR and quality factor with the radius of micro-ring

3.2 样品制备

选用尺寸为 1.4 cm × 1.4 cm 的 SOI 晶片,制备上述设计的硅基微环谐振器,将晶片清洗后旋涂电子束光刻胶 (PMMA),利用光刻机 (SUSS MA6) 将掩模板的图案转移至晶片的光刻胶上,经显影、后烘后通过等离子体反应刻蚀技术进行硅波导的刻蚀,最后采用丙酮和乙醇去除多余光刻胶,获得硅波导微环谐振器结构,随后采用同样的方式制备光栅耦合器结构。图 4 分别显示了半径为 5, 10, 15 μm

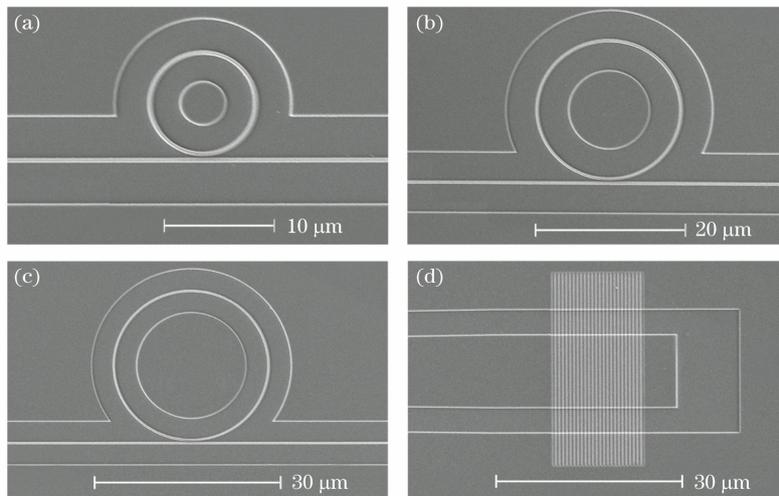


图 4 三种半径下硅基微环谐振器及耦合光栅的扫描电镜图。(a)硅基微环谐振器,半径为 5 μm ;

(b)硅基微环谐振器,半径为 10 μm ;(c)硅基微环谐振器,半径为 15 μm ;(d)光栅耦合器

Fig. 4 SEM of the micro-ring resonators with three radii and the grating coupler. (a) Silicon based micro-ring resonator with radius of 5 μm ; (b) silicon based micro-ring resonator with radius of 10 μm ; (c) silicon based micro-ring resonator with radius of 15 μm ; (d) grating coupler

时硅基微环谐振器和光栅耦合器的扫描电镜图。随后,为了使 Fe_3O_4 纳米粒子较为均匀地附着在硅基微环谐振器表面,在显微镜 (KEYENCE VHX-600K) 下通过孔径为 100 nm 的薄片将 Fe_3O_4 磁性纳米粒子覆盖在硅基微环谐振器表面,并通过光学黏合剂 (Norland NOA71) 在紫外线下固定,获得以 Fe_3O_4 纳米粒子为上包层的微环谐振电流传感单元。图 5 为以 Fe_3O_4 纳米粒子为上包层的微环谐振器的显微镜图,由图可以看出纳米粒子较为均匀地涂覆在硅基微环谐振器表面。

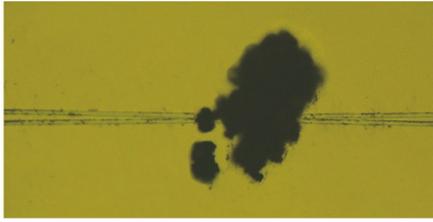


图 5 以 Fe_3O_4 纳米粒子为包层的微环谐振器的显微镜图

Fig. 5 A micrograph of the micro-ring resonator coated with Fe_3O_4 magnetic nanoparticles

采用的高磁性 Fe_3O_4 纳米粒子直径为 18 nm,利用综合物性测量系统 (PPMS DynaCool-9T) 对该样品进行磁性能测试,其在室温下的饱和磁化强度为 $66.57 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。由于在后续实验中交流电流产生的磁场强度均低于饱和磁化强度,因此磁性纳米粒子在磁场中的磁化过程,均属于不饱和磁化。

4 传感器试验与分析

4.1 实验测试系统的搭建

为了测试所制备的微环传感器的电流传感特性,搭建了如图 6 所示的交流电流测试平台。首先是电路部分:以任意波形发生器 (Tektronix AFG 3011) 和功率放大器 (AE Techron 7548) 组合作为电流信号源。由于亥姆霍兹线圈不仅能够产生均匀、稳定的磁场,且是敞开式的结构,方便物体的移动,因此,选用亥姆霍兹线圈连接电流信号源并形成回路,产生稳定交变磁场,同时将传感器芯片放置于亥姆霍兹线圈最中心的位置。实验中所用亥姆霍兹线圈的内直径为 10 cm,外直径为 14 cm,两线圈间距为 8 cm,单线圈匝数为 300 N。亥姆霍兹线圈轴线上任意一点的磁场为两个线圈产生的磁场之和,其最中心位置的磁场强度为

$$H = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 NI}{r_0}, \quad (8)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, N 为线圈匝数, I 为流过线圈的待测电流, r_0 为线圈半径。由 (8) 式可知,亥姆霍兹线圈中心处的磁场强度与电流的大小呈正比例关系。采用罗氏线圈 (Pearson Model 110A) 测量输入电流的实际大小,并将所测信号输出至示波器 (Tektronix TDS 2024C)。其中,罗氏线圈的灵敏度为 0.1 V/A ,测量频率为 $1 \text{ Hz} \sim 20 \text{ MHz}$,其最大有效电流为 65 A。

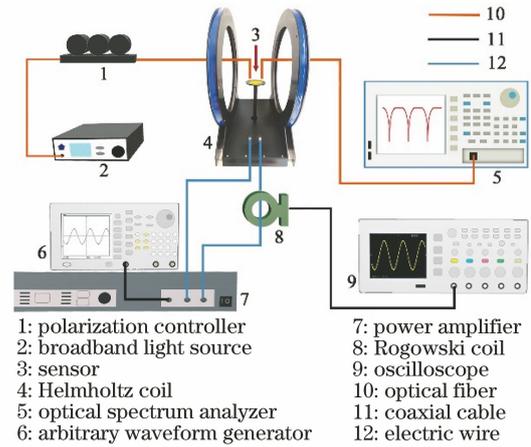


图 6 测试系统结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of test system structure

其次是光路部分。输入光由放大自发辐射 (ASE) 宽带光源发出,经偏振控制器进行模式分离后进入单模锥形透镜光纤,与光栅垂直耦合进入光波导芯片结构中,并与微环谐振器有效耦合产生谐振,然后以相同的方式耦合输出至光谱分析仪 (OSA, Yokogawa AQ6370D) 中,得到输出透射光谱的响应情况。其中:宽带光源的输出光谱范围为 $1510 \sim 1610 \text{ nm}$,输出功率为 10 mW ;单模锥形透镜光纤的锥形角度为 75° ,减小传输光的耦合透射面积,以实现与光栅的高效耦合;光谱分析仪的探测光谱范围为 $600 \sim 1700 \text{ nm}$,精度为 0.01 nm ,光信号功率范围为 $-90 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$ 。

在进行传感性能测试前,需获取微加工制备的传感单元结构的传输特性,以研究微加工工艺、光路耦合等带来的损耗。图 7 显示了微环半径分别为 $5, 10, 15 \mu\text{m}$ 时含有 Fe_3O_4 纳米粒子包层的电流传感器在无电流作用下的透射光谱。测试结果表明:样品输出光谱的自由光谱宽度分别为 $16.8, 8.56, 5.12 \text{ nm}$,随着微环半径增大而减小;品质因子分别是 $2725, 6542, 9725$,随微环半径增大而增大; 1550 nm 附近谐振谱的消光比 (ER, E_R) 分别为 $9.7 \text{ dB}, 13.9 \text{ dB}, 11.5 \text{ dB}$ 。而图 3 的仿真结果中对应的自由光谱宽度分别为 $18, 9.6 \text{ nm}$,其与实验测

量的数据误差分别为 6.7%、4.9% 和 14.7%，误差较小，在实验误差允许范围内。而仿真中品质因子分别是 5300, 9200, 15700，其与实验测量的数据误差分别为 48.6%，28.9%，38.1%，可以明显看出品

质因子误差较大，其原因可能是 Fe_3O_4 纳米粒子包层导致光信号在光波导微环结构中传输时产生了较大的能量损耗，同时波导侧壁过多毛刺、光栅耦合器不够平整等工艺技术问题也对通光效果产生了影响。

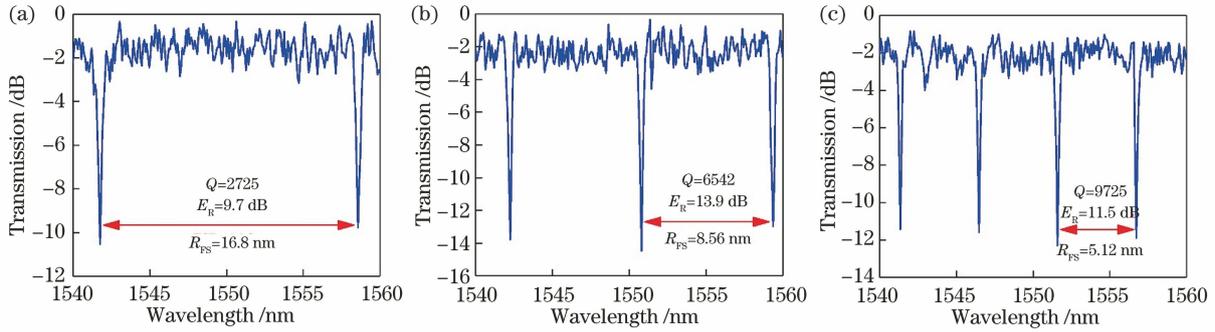


图 7 不同半径的传感器的输出光谱图。(a)半径为 5 μm ；(b)半径为 10 μm ；(c)半径为 15 μm

Fig. 7 Transmission spectra of sensors with different radii. (a) Radius of 5 μm ; (b) radius of 10 μm ; (c) radius of 15 μm

4.2 传感器实验测试与分析

为了减小温度和湿度等外界环境对硅基电流传感器的性能影响，在恒温恒湿环境下对该传感器进行测试。为保证光谱仪可以检测到稳定的光谱，在每组测试过程中，均在通电相同时间后进行光谱记录，由于这段时间较短，可以将环境温度视为常数，故器件温度的变化可认为是仅由电流引起。

受功率放大器输出频率的限制，频率只能设定为 1 Hz~60 kHz。当输入电流的频率为 60 kHz 时，微环半径为 5 μm 的电流传感器在不同电流幅值下的透射光谱如图 8 所示。图中显示电流幅值分别为 0, 0.3, 0.5 A 时的输出响应光谱，从图中可以看出，随着电流幅值的增大，谐振波向长波长方向显著漂移。这可以解释为在交流电产生的磁场下，磁性纳米粒子将电磁能转化为热能，硅基微环谐振器温度升高，导致波导折射率变大，谐振波长发生右移。在相同的实验环境下，对在没有添加 Fe_3O_4 磁

性纳米粒子上包层的微环谐振器进行了测验，在改变输入电流大小或者频率时，没有观察到输出谐振波长漂移，因此谐振波长漂移仅与磁性纳米粒子层有关。

为了研究不同半径下传感器对电流幅值的响应情况，将输入电流频率保持 60 kHz 恒定，从 0 到 0.5 A 等梯度增大输入电流，不同半径下传感器的输出谐振波长漂移量随电流幅值平方的关系如图 9 所示。从测试结果来看，当交流电流幅值在 0~0.5 A 范围内时，微环半径分别为 5, 10, 15 μm 的传感器的谐振波长漂移量均与交流电幅值平方呈正比例关系，通过数据拟合可以得到灵敏度分别为 1.696, 3.391, 5.173 $\text{nm} \cdot \text{A}^{-2}$ ，其拟合线性相关系数 (R^2) 分别为 0.9944, 0.9958, 0.9974，线性度良好。这表明微环半径越大，电流传感器的幅值灵敏度越高，且幅值灵敏度与微环半径近似呈正比例

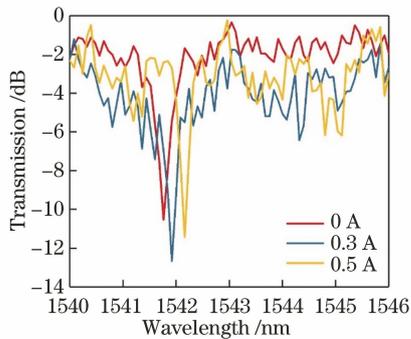


图 8 半径为 5 μm 时传感器输出响应谱线随电流幅值的变化情况

Fig. 8 Change of the response spectra of the sensor with the current amplitude when the radius is 5 μm

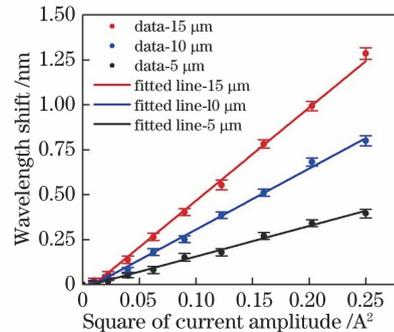


图 9 不同半径下谐振波长漂移量随电流幅值的变化情况及其线性拟合

Fig. 9 Variation of resonance wavelength drift with square of current amplitude and its linear fitting under different radii

关系。

此外,动态范围是电流传感器的重要指标,由自由光谱范围决定,即最大谐振波长漂移量为自由光谱范围。根据(6)式及图 7、图 9 的实验结果,可知当电流频率为 60 kHz 时,理论上微环半径为 5,10,15 μm 的传感器的最大交流幅值分别约为 3.149,1.592,0.997 A,即电流幅值的测量范围随着微环半径的减小而增大。

另一方面,为了研究不同半径下传感器对电流频率的响应情况,图 10 示出了在电流幅值为 0.4 A,电流频率在 0~60 kHz 范围内改变时,传感器的输出谐振波长漂移量随电流频率平方的关系。结果表明,当电流频率在 0~60 kHz 范围内,微环半径分别为 5,10,15 μm 的传感器的谐振波长的漂移量均与电流频率的平方呈正比例关系,数据拟合后可得传感器灵敏度分别为 7.412×10^{-5} , 1.426×10^{-4} , $2.119 \times 10^{-4} \text{ nm} \cdot \text{kHz}^{-2}$,其拟合曲线的相关系数(R^2)分别为 0.9941,0.9980,0.9979,线性度良好。因此,微环半径越大,电流传感器的频率灵敏度越高,同时频率灵敏度与微环半径近似呈正比例关系。根据(6)式及图 7、图 10 的实验结果,可知当电流幅值为 0.4 A 时,理论上微环半径为 5,10,15 μm 的传感器的最大交流频率范围分别约为 476.102,245.006,155.442 kHz,即微环半径越小,所测电流频率范围越大。

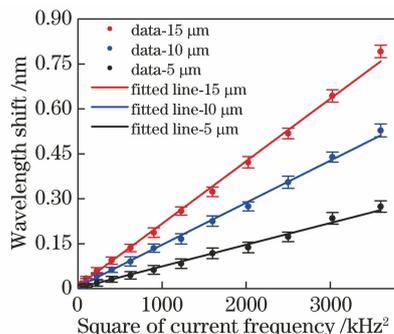


图 10 不同半径下谐振波长漂移量随电流频率的变化情况及其线性拟合

Fig. 10 Variation of resonance wavelength drift with square of current frequency and its linear fitting under different radii

本文所提传感器的性能也受磁性纳米粒子的限制,可以通过改变粒径大小、采用具有更高升温速率以及升温功率的磁热纳米粒子来改进^[26-27]。

此外,温度稳定性是实际应用中的一个关键参数。当本文所述传感器应用于智能电网室内电力设备的状态监测时,如开关柜、断路器、熔断器等设备,

由于室内温度变化较小,温度变化对电流传感的扰动暂可忽略。但当所述传感器应用于户外电力设备的状态监测时,由于户外环境温度变化大,会导致传感器参数不稳定,影响电流传感系统的精度与准确度,故需对其进行温度补偿,以尽可能地抵消周围环境温度的影响。目前可采用非对称马赫-曾德尔干涉结构的方法,通过选择合适的臂长以及波导宽度来抵消两个干涉臂的温度依赖性^[28-29],也可集成相同的热接触良好的参考微环,利用传感微环谐振波长漂移量与参考微环漂移量的差值作为待测电流引起的漂移量,进而实现温度补偿,但这不可避免地会使系统变得更加复杂。

5 结 论

提出并研究了一种基于硅基微环谐振器与超顺磁性纳米粒子的新型非接触式电流传感器。在微环谐振器上涂覆 Fe_3O_4 磁性纳米粒子薄层,在待测交流电产生的磁场下, Fe_3O_4 磁性纳米粒子将电磁能转化为热能,硅基微环谐振器温度升高,导致波导折射率变大,故可通过监测微环输出谐振波长的漂移量来测量电流值。实验制备并测试了微环谐振器半径分别为 5,10,15 μm 时传感器的传感特性,结果表明,在测试电流幅值为 0 至 0.5 A,频率在 0 至 60 kHz 测量范围内,传感器的输出谐振波长漂移量与电流幅值平方及频率平方均呈正比例关系,其线性相关系数大于 0.99。同时,微环谐振器半径越小,所测电流范围越大,但灵敏度减小,应用时可以根据具体需求选择不同半径参数的微环传感器。本文提出的传感器结构简单,尺寸微型化,具有较高灵敏度,在智能电网中具有一定的应用前景,可应用于智能变压器、开关柜、断路器和绝缘装置等设备的状态评估,可对局部放电、谐波电流、故障和泄漏电流等进行在线监测。

参 考 文 献

- [1] Li S T, Li J Y. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective [J]. High Voltage, 2017, 2(2): 82-91.
- [2] Haji M M, Vahidi B, Hosseini S H, et al. Current transformer saturation detection using Gaussian mixture models [J]. Journal of Applied Research and Technology, 2013, 11(1): 79-87.
- [3] Zare A R, Iravani R, Pasand M S, et al. An accurate current transformer model based on Preisach theory for the analysis of electromagnetic transients [J].

- IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 233-242.
- [4] Ouyang Y, He J, Hu J, et al. A current sensor based on the giant magnetoresistance effect: design and potential smart grid applications [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(11): 15520-15541.
- [5] Dogaru T, Smith S T. Giant magnetoresistance-based eddy-current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(5): 3831-3838.
- [6] Xie F, Weiss R, Weigel R, et al. Giant magnetoresistive based galvanically isolated voltage measurement [C] // 2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS), September 24-26, 2014, Aachen, Germany. New York: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [7] Zhou D P, Dong Y. Anti-interference of current sensing fiber in all-fiber current sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006002.
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): 1006002.
- [8] Sun S Q, Chu F H. Temperature compensation of fiber Bragg grating current sensor based on optimized neural network algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1006001.
孙诗晴, 初凤红. 基于优化神经网络算法的光纤布拉格光栅电流传感器的温度补偿[J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1006001.
- [9] Yu J, Wang X X, Zhang C X, et al. Online monitoring and controlling technique of loop gain of fiber optic current sensors [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1010003.
于佳, 王夏霄, 张春熹, 等. 光纤电流传感器环路增益在线监测及控制技术[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1010003.
- [10] Hu J, Zhao S, Ouyang Y, et al. High performance current sensors based on giant magnetoresistance effect and practical applications in smart grids [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2278-2286.
胡军, 赵帅, 欧阳勇, 等. 基于巨磁阻效应的高性能电流传感器及其在智能电网的量测应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2278-2286.
- [11] Zhang F L, Zhai S, Pan J, et al. Three-dimensional multi-microring resonance filter based on Sagnac-like interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1113003.
张福领, 翟珊, 潘俊, 等. 类 Sagnac 干涉仪结构的三维多微环谐振滤波器[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1113003.
- [12] Hu Y J, Wang S X, Wang D W, et al. Research progress of mid-infrared micro-ring resonator and its application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 230004.
胡玉洁, 王书晓, 汪大伟, 等. 中红外微环谐振器及应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 230004.
- [13] Hodaei H, Miri M A, Heinrich M, et al. Parity-time-symmetric microring lasers [J]. Science, 2014, 346(6212): 975-978.
- [14] Liu C J, Sang C L, Wu X S, et al. One-dimensional photonic crystal groove microring resonators and its sensing characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2413002.
刘春娟, 桑常林, 吴小所, 等. 一维光子晶体槽型微环谐振器及其传感特性[J]. 光学学报, 2020, 40(24): 2413002.
- [15] Xu Q F, Schmidt B, Pradhan S, et al. Micrometre-scale silicon electro-optic modulator [J]. Nature, 2005, 435(7040): 325-327.
- [16] Wu D N, Wu Y D, Wang Y, et al. Research on tunable filter based on micro-ring resonators [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0123002.
吴丹宁, 吴远大, 王玥, 等. 基于微环谐振腔的可调谐滤波器的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0123002.
- [17] Wei B, Zhao C Y, Wang G C, et al. Ultra-sensitive silicon photonic current sensor using a ring resonator [J]. Journal of Optics, 2016, 18(8): 085802.
- [18] Cocorullo G, Corte F G D, Rendina I, et al. Temperature dependence of the thermo-optic coefficient in crystalline silicon between room temperature and 550 K at the wavelength of 1523 nm [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(22): 3338-3340.
- [19] Asheghi M, Touzelbaev M N, Goodson K E, et al. Temperature-dependent thermal conductivity of single-crystal silicon layers in SOI substrates [J]. Journal of Heat Transfer, 1998, 120(1): 30-36.
- [20] Okada Y, Tokumaru Y. Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(2): 314-320.
- [21] Zhang S X, Zhao X L, Niu H Y, et al. Superparamagnetic Fe₃O₄ nanoparticles as catalysts for the catalytic oxidation of phenolic and aniline compounds [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1/2/3): 560-566.
- [22] Rosensweig R E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 370-374.
- [23] Habib A H, Ondeck C L, Chaudhary P, et al. Evaluation of iron-cobalt/ferrite core-shell

- nanoparticles for cancer thermotherapy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 07A307.
- [24] Azuelos P, Girault P, Lorrain N, et al. Optimization of porous silicon waveguide design for micro-ring resonator sensing applications[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(8): 085301.
- [25] Xu Q F, Lipson M. All-optical logic based on silicon micro-ring resonators[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 924-929.
- [26] Dutta P, Pal S, Seehra M S, et al. Size dependence of magnetic parameters and surface disorder in magnetite nanoparticles [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(7): 07B501.
- [27] Maenosono S, Saita S. Theoretical assessment of FePt nanoparticles as heating elements for magnetic hyperthermia[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(6): 1638-1642.
- [28] Guha B, Gondarenko A, Lipson M, et al. Minimizing temperature sensitivity of silicon Mach-Zehnder interferometers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 1879-1887.
- [29] Dwivedi S, D'Heer H, Bogaerts W, et al. A compact all-silicon temperature insensitive filter for WDM and bio-sensing applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(22): 2167-2170.