

基于超高 Q 值回音壁模式微管腔的非接触式
电流传感器研究胡建鹏^{1,2}, 柴明钢^{1,3*}, 王梦宇^{1,2**}, 薛彩军³, 谢成峰^{1,2}, 谭庆贵⁴, 魏斌^{1,2}, 吴凌峰², 吴涛^{1,2}, 伏燕军^{1,2}¹南昌航空大学 江西省光电信息科学技术重点实验室, 江西 南昌 330063;²南昌航空大学 无损检测教育部重点实验室, 江西 南昌 330063;³南京航空航天大学 航空学院, 江苏 南京 210016;⁴中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710199

摘要 研发低功耗、微型化的电流传感器有利于实现电流状态的智能监测,在风力发电、智能电网以及电动汽车等领域有着潜在应用前景。提出一种基于回音壁模式微管腔的非接触式电流传感器。首先通过电弧放电法在薄壁石英管中制备了回音壁模式微管腔,模式谱稳定激发且规则,品质因子 Q 值达到 3.45×10^7 。其次,在微管腔中填充 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体并插入 Cu 丝,构建非接触式电流检测环境,当通入的电流强度发生改变时,与 Fe_3O_4 纳米粒子的相互作用引起微管腔的磁热效应,进而影响微管腔的折射率与体积。实验结果表明:测试电流从 0 增加到 30 mA 时,微管腔的谐振波长漂移了 0.0973 nm,谐振波长的相对漂移量与电流的平方成线性关系,灵敏度达到 $10.811 \text{ nm}/\text{A}^2$,探测极限达到 $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。所设计的电流传感器具有结构简单、灵敏度高、探测极限低、体积小、不受电磁干扰影响等优势,为微腔在非接触式电流检测中的应用提供了新路径。

关键词 传感器; 光学微腔; 微管腔; 磁热效应; 电流检测; 微腔传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230899

1 引言

电流传感器是一种检测装置,能感受到被测电流的信息,并将检测到的信息按一定规律变换成符合需要的电信号或其他所需形式的信息输出^[1],以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制等要求。随着智能电网、风力发电以及电动汽车的快速发展,对高性能电流传感器的要求日益提升,研究灵敏度高、可靠性高、稳定性高、结构简单、体积小的电流传感器显得尤为重要。光学系统具有快速响应、本质绝缘、抗电磁干扰、重量轻等优点,是电流传感以及检测领域的理想选择之一。但目前光学电流传感器内部普遍采用磁致伸缩材料,有着磁滞非线性难以克服的问题^[2],因此存在可重复性差、灵敏度低、稳定性弱等缺陷。光学微腔^[3]独特的回音壁模式(WGM)使光子几乎无损耗地在腔内持续传播,大大增强了光与物质的相互作用,具有品质因子大、模式体积小的优异特性,大大减小系统的体积,在高灵敏度传感器^[4]、微型激光器^[5]中具有广

阔的应用前景。特别地,微管腔相对传统的微球腔、微盘腔而言具有极小的管厚,表现出更强的倏逝场作用,配合其天然的微流控通道优势,在微流控检测、生化传感中具有巨大的应用潜力^[6-7]。

磁流体是一种新型超顺磁液体功能材料,由磁性 Fe_3O_4 纳米粒子组成,具有高稳定性、超顺磁性等优良特性,尤其是几乎没有固体磁性物质所具有的磁滞现象^[8]。在磁场的作用下,磁流体的折射率随外界磁场变化呈现线性变化,在光学检测与传感中有潜在应用^[9]。因此,将光学微腔与磁流体结合,并设计成相应的光学电流传感器,能将两者的优势相结合,具有重要的研究意义和实用价值。重庆大学罗曼丹等^[10]提出了硅基微环腔的非接触式电流传感器,通过在环形波导表面覆盖一层 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体制备成电流传感器。基于片上工艺的硅基微环腔易与传统 CMOS 工艺兼容,在电流幅值 0~0.5 A 范围内,半径为 15 μm 的微环腔灵敏度表现为 $5.173 \text{ nm}/\text{A}^2$,但由于微环腔制备工艺限制, Q 值仅为 9.725×10^3 ,仍有进一步优化的

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-12; 录用日期: 2023-08-07; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(62101230, 12205136, 42175130)、江西省自然科学基金(20224BAB202006, 20203BBG73039, 20232BAB212016, 20232BCJ23096, 20232ACB212008)、重点实验室基金 2021-JCJQ-LB-006(6142411512108)、江西省教育厅科技项目(GJJ200915)

通信作者: *mgchai@nchu.edu.cn; **mengyu@nchu.edu.cn

空间。

本文提出基于超高 Q 值微管腔的非接触式电流传感器,通过在微管腔管壁内填充 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体,通入的电流强度发生改变时,与磁性 Fe_3O_4 纳米粒子的相互作用引起微管腔的磁热效应,进而影响微管腔的折射率与体积,从而改变光谱中的谐振波长,通过检测微管腔输出的谐振波长漂移量可实现对电流量大小的检测。实验结果表明,微管腔谐振模式 Q 值达到 3.45×10^7 ,表现出超高 Q 值特性。腔内填充 Fe_3O_4 纳米粒子时,电流检测灵敏度达到 $10.81 \text{ nm}/\text{A}^2$,电流检测极限达到 $2.94 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。本文提出的传感器结构简单、灵敏度高,在非接触式电流检测中表现出优异特性。

2 实验原理与准备

2.1 实验原理

微管腔电流传感器原理如图 1 所示。经锥形光纤耦合进腔内的光波满足相位匹配条件时,即与腔体的本征谐振频率相同,腔内的光信号将不断沿着谐振腔曲面全反射形成相干谐振^[11],满足

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

式中: m 为微管腔的谐振级数; λ 为谐振波长; R 为微管腔的半径; n_{eff} 为微管腔的有效折射率。

当外界环境改变引起微管腔的物理性质(如尺寸和折射率)出现改变时,谐振波长会随之而变化。

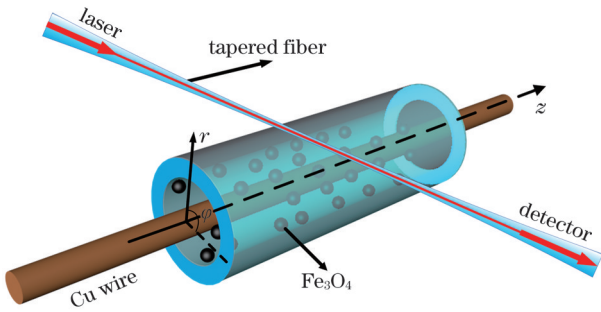


图 1 微管腔电流传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of current sensor based on microcapillary resonator

热光效应是指光介质的光学性质随着温度变化而变化。衡量微管腔的热效应的物理参数为热光系数和热膨胀系数。微管腔的主要材料为 SiO_2 且热光系数为正^[12],热光系数 dn/dT 约为 $8.57 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,热膨胀系数约为 $5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,相对热光系数而言,热膨胀系数较小,可以忽略不计。当温度变化时,微管腔的体积和折射率发生改变,谐振波长漂移。谐振波长的漂移量 $\Delta\lambda$ 与温度变化量 ΔT 的关系满足

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

根据牛顿冷却定律可推出温度的变化与加热时间的关系为^[13]

$$\Delta T = \frac{I^2 \times \rho_0 (1 + \alpha_T \times t)}{K_l \times M \times S}, \quad (3)$$

式中: ΔT 为导体内部温度与环境温度之差; I 为电流; ρ_0 为电阻率; α_T 为电阻温度系数; K_l 为综合散热系数; M 为截面周长; S 为横截面积; t 为加热时间,本实验设定内部加热时间为 90 s 。

因此,可以得出谐振波长漂移量与电流的关系为

$$\Delta\lambda = \frac{2\pi R}{m} \cdot \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \cdot \frac{I^2 \times \rho_0 (1 + \alpha_T \times t)}{K_l \times M \times S}. \quad (4)$$

为提高电流传感性能,在微管腔内加入磁性 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体。我们添加了直径在 $20 \sim 30 \text{ nm}$ 之间的具有磁性的粒子,具有量子尺寸效应、表面效应、小尺寸效应等纳米粒子的特点,并且磁性 Fe_3O_4 纳米粒子具有超顺磁性等显著特征。在交流电 I 产生的交变磁场 H 的作用下,磁性 Fe_3O_4 纳米粒子通过尼尔弛豫和布朗弛豫损耗大量吸收的电磁波的能量,并将电磁能转化为热能。根据 Rosensweig^[14] 的理论,磁性粒子在交变磁场中的功率损耗 P 的表达式为

$$P = \pi \mu_0 \chi_0 H^2 f \frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2}, \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; χ_0 为平衡磁化率; f 为待测电流频率;角频率 $\omega = 2\pi f$; τ 为系统总弛豫时间。当 $f\tau \ll 1$ 时^[15], P 可表示为

$$P = 2\pi^2 \mu_0 \chi_0 \tau f^2 (\alpha I), \quad (6)$$

式中: α 为电流到磁场的转化率。

通电流时,磁性纳米粒子温度变化为

$$\Delta T = \frac{P \Delta t}{c_p}, \quad (7)$$

式中: Δt 为加热持续时间; c_p 为磁性 Fe_3O_4 纳米粒子的比热。

由此得出谐振波长漂移量与电流的关系可以表示为

$$\Delta\lambda = \frac{dn_{\text{eff}}}{dT} \cdot \frac{4\pi^3 R \alpha^2 \mu_0 \chi_0 \tau \Delta t}{m c_p} f^2 I^2. \quad (8)$$

2.2 微管腔制备

微管腔的制备流程如图 2 所示。首先取一段熔石英毛细管,毛细管外径为 $354 \mu\text{m}$ 、内径为 $250 \mu\text{m}$,用酒精清洗后用氢氧火焰将毛细管包覆层的聚合物涂层去除。其次,将毛细管放置于光纤熔接机内,并用两端夹具固定,如图 2(a)所示。最后,对毛细管进行 $4 \sim 5$ 次电弧放电,每次放电约 1 s ,毛细管在电弧放电的作用下会发生软化,在放电处带有轻微的弧度,如图 2(b)所示,这来自于两端夹具夹持带来的横向力以及两端光纤的位置误差。通过在放电过程中旋转微管腔的角度以及多次放电保证均匀性。经过电弧处理后的毛细管表面会得到修整,这样一个高品质因子的微管腔就被制备出来了。值得注意的是,带有轻微弧度的凹陷区域由于发生了形变,不能束缚光波,

不再支持回音壁模式,而在凹陷区域下端约 300 μm 处由于热致表面修饰作用,足以去除毛细管表面的杂质,提高管壁外侧的表面质量,形成高品质因子的回音壁模式。

由于微管腔的回音壁模式通常是被束缚在管壁内部的,直接用光照射激发回音壁模式的耦合效率会非常低,通常采用的是微纳光纤波导耦合的方式。为验证微纳光纤波导耦合方案的可行性,在商业有限元软件 COMSOL 中,建立了微纳光纤波导耦合微管腔的系统仿真模型^[16]。所采用的微管腔尺寸较大,半径为 177 μm ,超过了普通计算机的计算范围。为了保证计算的准确度,降低计算复杂度以及耗费时间,将半径缩

小至 1/10 即 17.7 μm ,微纳光纤直径设为 1.2 μm 。另外,根据式(1)可知当微管腔谐振波长不变时,谐振级数与半径大小成正比,半径减小时只是影响相同谐振波长下的谐振级数。仿真结果如图 3 所示,从透射谱中得到的结果可以看出,微管腔中的谐振模式可以很好地被激发,通过合适的微纳光纤可以实现良好的耦合。从图 3(b)可以看出,微管腔在谐振波长为 1541.61 nm 的波长点上,波导内几乎所有的光都耦合进入了微腔,而从图 3(a)展示的对应该电场分布图可以看出,能量也几乎全部通过微纳光纤耦合进入微管腔内部,集中在微管腔外壁内侧。仿真结果定性验证了微纳光纤波导耦合微管腔方案的可行性。

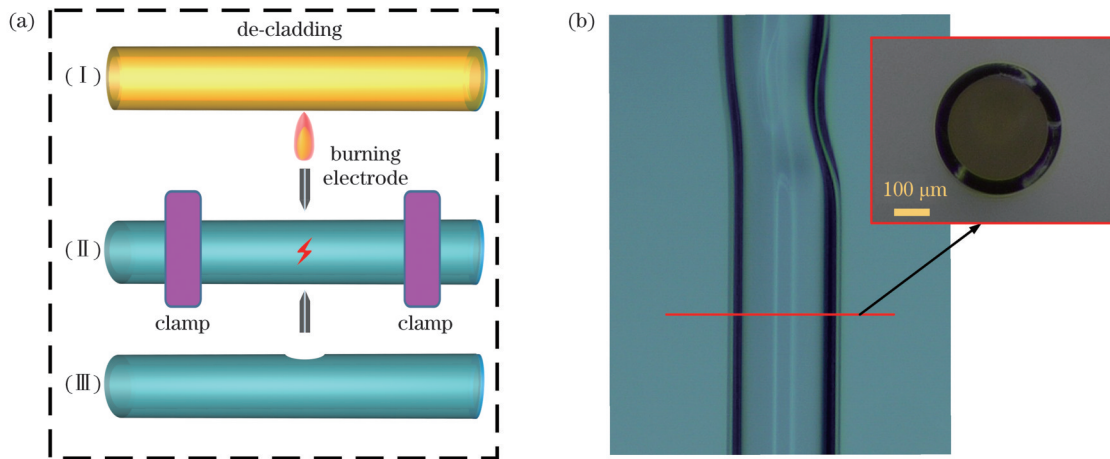


图 2 微管腔的制备流程。(a)制备流程图;(b)微管腔的光学显微照片

Fig. 2 Preparation process of microcapillary resonator. (a) Schematic of preparation process; (b) optical micrograph of microcapillary resonator

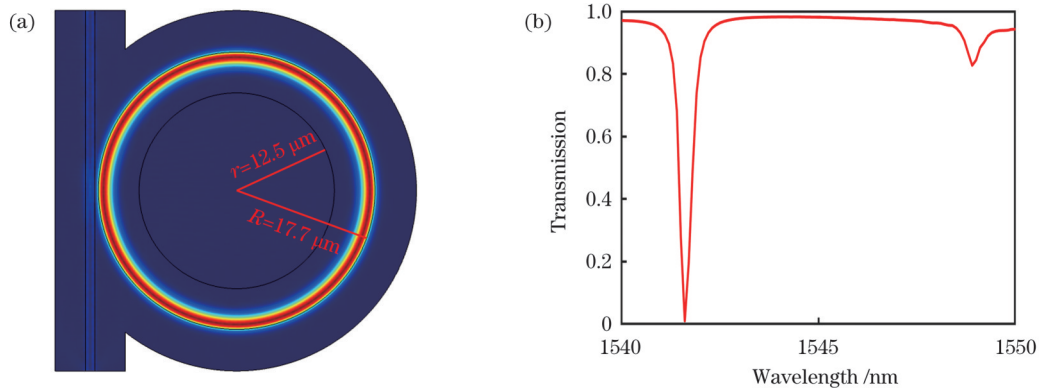


图 3 微纳光纤波导耦合微管腔仿真结果。(a)电场分布图;(b)仿真透射谱

Fig. 3 Simulation result of microcapillary resonator coupled by micro-nano fiber waveguide. (a) Electric field distribution; (b) simulated transmission spectrum

3 实验结果

搭建了微管腔电流传感器实验装置系统,如图 4 所示,用以测试微管腔的电流传感特性。实验中采用热拉法制备了微纳光纤波导,微纳光纤的锥腰直径为 2 μm 。使用信号发生器驱动 1550 nm 波段的可调谐激光器(TL),激光器的扫频范围由信号发生器的电压幅值决定。激光器发出的激光经过偏振控制

器(PC)调节偏振状态后进入锥形光纤。调整位置使锥形光纤与微管腔保持接触的状态,以提高锥形光纤与微管腔耦合时的稳定性。经锥形光纤输出的光通过光电探测器(PD)把光信号转换为电信号,系统中的光电探测器为 InGaAs 材料的高速探测器,带宽为 150 MHz。最后,激发出的 WGM 谐振信号呈现在示波器上。为构建非接触式电流检测环境,在微管腔内插入 80 μm 的铜丝,电阻阻值为 16.67 Ω ,连

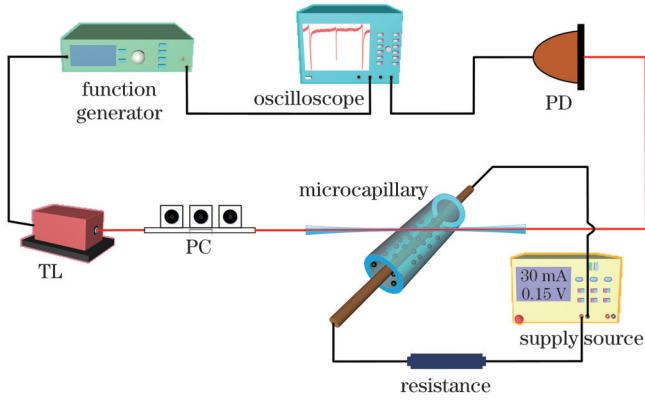


图 4 微管腔电流传感器实验装置图

Fig. 4 Experimental schematic diagram based on microcapillary resonator current sensor

接电路并开启电流源,每次以相同的间隔提升电流值,在示波器上观察并记录谐振波长及谐振波长漂

移情况。

图 5 展示了示波器中观察到的微管腔中激发的回音壁模式,可以看出,激发的模式非常干净规则,且排列整齐。具体地,对应的谐振波长分别为 1550.3111、1550.2889、1550.2659、1550.2425、1550.2202 nm,由理论分析谐振模式谱说明^[17],这几个回音壁模式是微管腔的前 5 阶轴向模式($q=0\sim 4$)。这是由于电弧放电作用在管壁外侧形成凸起结构,在轴向上形成了稳定的回音壁模式,图 5(c)给出了这 5 阶轴向模式的电场分布图。通过计算半高全宽得到了前 3 阶模式的品质因子 Q 值,分别为 3.45×10^7 , 9.02×10^6 , 6.05×10^6 。微管腔展现出极高的 Q 值特性,而作为对比,传统使用氢氟酸腐蚀制备的微管腔的 Q 值只有 $10^3\sim 10^4$ 量级^[18]。测量得出微管腔的轴向自由光谱范围(FSR)约为 0.023 nm,仅相当于角向 FSR 的 1% 左右,极易实现全调谐。

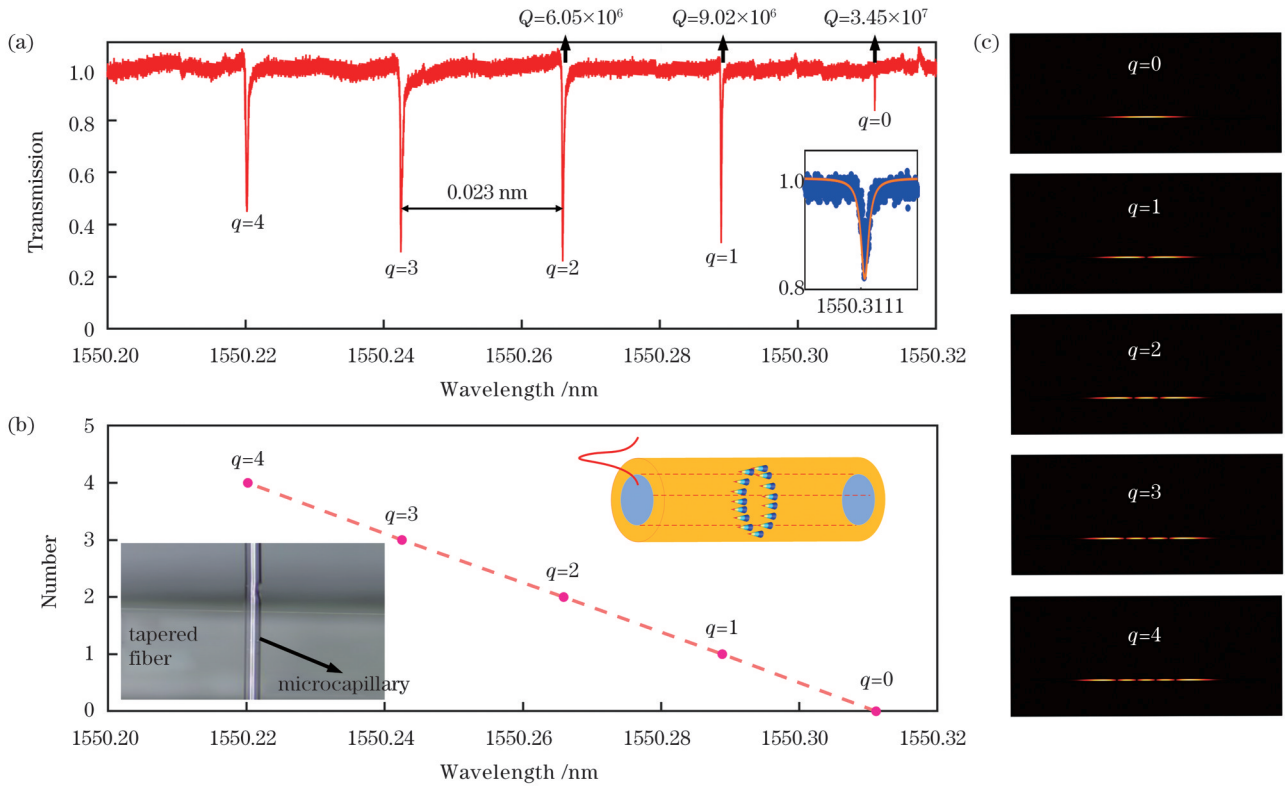


图 5 微管腔的谐振谱。(a)透射谱,插图为第一阶轴向模式的洛伦兹拟合曲线;(b)理论分析结果;(c)对应的前 5 阶轴向模式电场分布图

Fig. 5 Resonance spectrum of microcapillary resonator. (a) Transmission spectrum, where inset shows Lorentz fit curve of $q=0$;

(b) theoretical analysis result; (c) corresponding electric distributions of the first five axial modes

为测试微管腔的电流传感特性,将 $80 \mu\text{m}$ 铜丝置于微管腔中心,再将铜丝与线路连接后通电,不断改变电流源的电流值来观察微管腔的响应变化。值得说明的是,在插入铜丝后微管腔的谐振峰发生了些许变化。原因是在插入铜丝前后,需将微管腔移出实验台,然后将铜丝插入微管腔中,再使用精密平移台将微管腔重新移回实验台。插入铜丝虽然不会影响微管腔的结

构,但是实验使用的微管腔是经过电弧放电处理的,插入铜丝的过程或多或少会影响微管腔的形状,在将插入铜丝后的微管腔重新移回实验台后也无法保证耦合微管腔的轴向位置为之前的同一位置。此外,微纳光纤的空间位置、微纳光纤与微管腔的耦合角度、激光器的功率噪声等因素也都会影响谐振峰的位置,因此,插入铜丝前后的传输光谱出现了差异。

首先,对空心的微管腔进行测试,电流间隔步长为 20 mA,每次持续时间为 90 s,记录并处理数据。图 6(a)展示了电流变化时谐振波长出现的波长漂移情况,当电流从 0 增大到 300 mA 时,图中标记的微管腔回音壁模式的谐振波长从 1550.2111 nm 增加到 1550.3504 nm,谐振波长漂移了 0.1393 nm。根据式(4)可知,谐振波长的相对漂移量与电流的平方成比例。将该比例定义为微管腔电流传感的灵敏度 S_{mr} 。图 6(b)展示出拟合曲线与实验数据,计算拟合得到灵敏度 $S_{mr}=1.547 \text{ nm}/\text{A}^2$ 。检测极限定义为最小可检测电流的变化,正比于 $1/S_{mr}Q$ 。另外,分辨率 σ 定义为 $\sigma=S_{mr}/Q$ 。检测电流探测极限为 $1.874 \times 10^{-8} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。

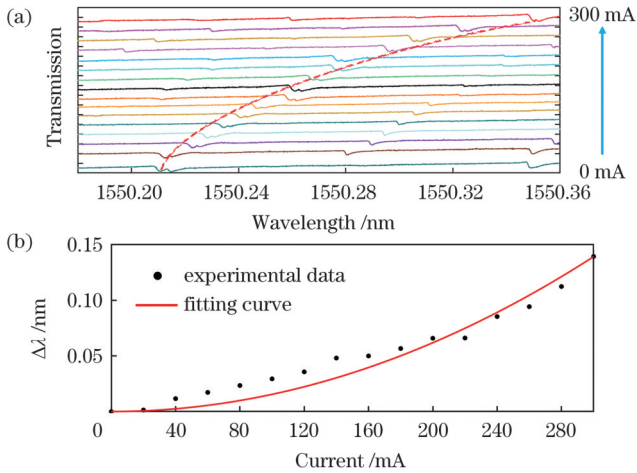


图 6 空心微管腔电流响应特性。(a)透射谱随电流变化;(b)谐振波长漂移与电流的关系曲线

Fig. 6 Current response characteristics of hollow microcapillary resonator. (a) Transmittance curves under different currents; (b) resonant wavelength shift as function of current

为提高微管腔对电流响应的灵敏度,首先在微管腔中注入了 50% 的磁性纳米粒子 Fe_3O_4 。根据理论可知添加 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体后谐振波长的相对偏移量与电流呈二次曲线关系。为将磁性纳米粒子注入到微管腔内,先将纳米粒子涂敷到铜丝上,然后将铜丝塞入微管腔内。加入 50% 的纳米颗粒后,对微管腔电流传感性能进行测试。图 7(a)展示了电流变化时谐振波长出现的波长漂移情况,当电流从 0 增大到 160 mA 时,图中标记的微管腔回音壁模式的谐振波长从 1550.1959 nm 增加到 1550.2993 nm,谐振波长漂移了 0.1034 nm。由图 7(b)所示实验数据的二次拟合曲线,得到谐振波长的相对漂移量与电流的二次关系系数为 $4.039 \text{ nm}/\text{A}^2$,即注入 50% 的磁性纳米粒子后微管腔电流传感的灵敏度 $S_{mr}=4.039 \text{ nm}/\text{A}^2$,同时电流检测极限为 $7.176 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。可以看出,注入 50% 的磁性纳米粒子后微管腔电流传感灵敏度得到加强,且电流检测极限精度更低。

最后,为进一步增加微管腔电流传感灵敏度,在微

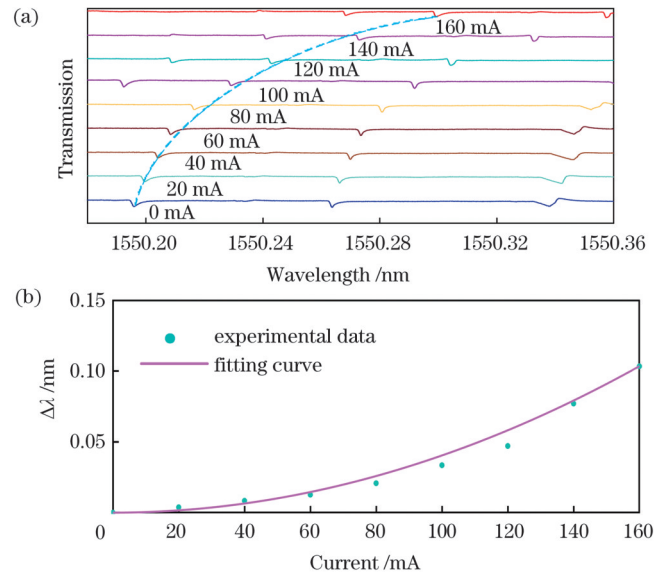


图 7 注入 50% 纳米粒子微管腔电流响应特性。(a)透射谱随电流变化;(b)谐振波长漂移与电流的关系曲线

Fig. 7 Current response characteristics of microcapillary resonator with 50% nanoparticles. (a) Transmittance curves under different currents; (b) resonant wavelength shift as function of current

管腔中注入 100% 的磁性纳米粒子。在填充磁性纳米粒子后,表征了微管腔电流传感性能。图 8(a)展示了当电流从 0 增加到 30 mA 的谐振波长变化。当填充纳米粒子后,谐振波长的漂移随电流变化非常快,谐振波长共漂移了 0.0973 nm。图 8(b)给出了实验数据的二次拟合结果,灵敏度计算为 $S_{mr}=10.811 \text{ nm}/\text{A}^2$,同时电流检测极限为 $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。灵敏度和电流检测极限相对于空心微管腔提升了将近一个数量级,相较于注入 50% 纳米粒子的微管腔也有明显的提

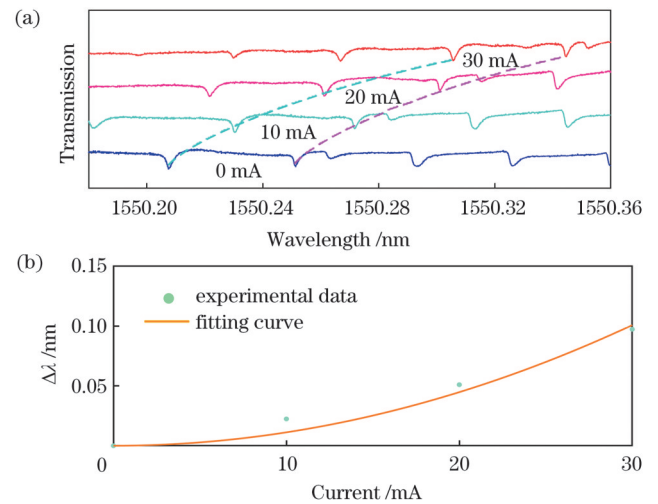


图 8 注入 100% 纳米粒子微管腔电流响应特性。(a)透射谱随电流变化;(b)谐振波长漂移与电流的关系曲线

Fig. 8 Current response characteristics of microcapillary resonator with 100% nanoparticles. (a) Transmittance curves under different currents; (b) resonant wavelength shift as function of current

升。由此证明了注入磁性纳米粒子的微管腔显著的电流传感作用。

由上述实验可知,微管腔电流传感器的灵敏度和电流检测极限都相对于普通的空心微管腔提升了一个数量级,性能显著提升,为光学微腔电流传感提供了一个可行的方案。空心微管腔的灵敏度 $S_{mr} = 1.547 \text{ nm/A}^2$,灵敏度较低;注入 50% 的磁性纳米粒子后灵敏度达到 4.039 nm/A^2 ,而注入 100% 的磁性纳米粒子后灵敏度达到 10.811 nm/A^2 ,电流检测极限达到 $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$ 。几种情况下谐振波长相对偏移量与电流的关系曲线对比如图 9 所示。

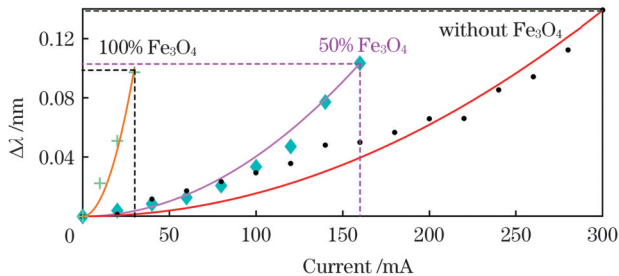


图 9 空心微管腔、注入 50% 和 100% Fe_3O_4 的微管腔谐振波长漂移与电流关系对比

Fig. 9 Comparison of relationship between resonant wavelength shift and current among hollow microcapillary resonator, microcapillary resonator with 50% nanoparticles, and microcapillary resonator with 100% nanoparticles

值得一提的是,微管腔的壁厚也会极大地影响微管腔 WGM 与管内物质的相互作用,当壁厚小于 $3 \mu\text{m}$ 时,微管腔 WGM 将开始往管壁内侧集中,将增强 WGM 与管内 Fe_3O_4 磁性纳米粒子的相互作用,进而增强微管腔传感性能。实际实验中,降低微管腔壁厚的方法通常有氢氟酸腐蚀法和内部增压法两种。氢氟酸腐蚀法会影响微管腔的表面质量,大大降低微管腔的品质因子^[18]。内部增压法是在电弧放电时增加微管腔的内压以压缩壁厚,这种方法可以在保证微管腔品质因子的基础上降低微管腔的壁厚,但是会改变微管腔的形状,形成微泡结构,大大增加微管腔的半径,而且会很大程度上影响谐振模式谱的特性^[19]。

我们提出的微管腔电流传感器灵敏度达到 10.811 nm/A^2 ,电流检测极限达到 $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$,相较于硅基微环腔的电流传感器灵敏度提升了一倍,电流检测极限提升了三个数量级。微管腔具有超高 Q 值特性和良好的谐振模式谱,其高灵敏度和低电流检测极限表明了微管腔在电流传感器中的应用价值,在风力发电、智能电网以及电动汽车等领域有着潜在应用前景。

4 结 论

本文研究了一种基于超高 Q 值回音壁模式微管腔的非接触式电流传感器。回音壁模式微管腔中,模式

谱稳定且规则,品质因子 Q 值达到 3.45×10^7 。通过在微管腔中填充 Fe_3O_4 纳米粒子磁流体,电流传感灵敏度最高可达 10.811 nm/A^2 ,电流检测极限达到 $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$,具有极佳的电流传感检测性能。提出的微管腔非接触式电流传感器具有灵敏度高、精度高、信号线性度好、响应快等优点,并且传感器结构简单、体积小、功耗低、不受电磁干扰,为微腔在非接触式电流检测中的应用提供了新路径。研究成果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,为电力工业和消费电子领域的电流传感提供了新的途径。

参 考 文 献

- [1] Ioppolo T, Ötügen V, Ayaz U. Development of whispering gallery mode polymeric micro-optical electric field sensors[J]. Journal of Visualized Experiments, 2013, 71: 50199.
- [2] Huang D, Srinivasan S, Bowers J E. Compact Tb doped fiber optic current sensor with high sensitivity[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 29993-29999.
- [3] Vahala K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839-846.
- [4] 叶思放, 方云团. 基于 Parity-Time 对称耦合微腔的血糖传感器[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310002.
Ye S F, Fang Y T. Blood glucose sensor based on parity-time symmetry coupled cavities[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310002.
- [5] 樊碳润, 肖金龙, 杨跃德, 等. 回音壁微腔激光器电老化试验及寿命分析[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0601001.
Fan Y R, Xiao J L, Yang Y D, et al. Electrical aging test and lifetime analysis of whispering-gallery-mode micro-cavity lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0601001.
- [6] Wan H D, Chen J J, Wan C, et al. Optofluidic microcapillary biosensor for label-free, low glucose concentration detection[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(8): 3929-3937.
- [7] Ren L Q, Wu X, Li M, et al. Ultrasensitive label-free coupled optofluidic ring laser sensor[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3873-3875.
- [8] 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 Letters, 2013, 103(15): 3285-3287.
- [9] Deng M, Huang C, Liu D H, et al. All fiber magnetic field sensor with ferrofluid-filled tapered microstructured optical fiber interferometer[J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20668-20674.
- [10] 罗曼丹, 杨庆, 黄凌宇, 等. 基于微环谐振器的非接触式电流传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1228001.
Luo M D, Yang Q, Huang L Y, et al. Non-contact current sensor based on micro-ring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1228001.
- [11] Foreman M R, Swaim J D, Vollmer F. Whispering gallery mode sensors[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(2): 168-240.
- [12] 商成龙, 唐军, 皮海龙, 等. 高 Q 值光学微球腔的温度系数研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302005.
Shang C L, Tang J, Pi H L, et al. Temperature coefficient of high- Q microsphere cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0302005.
- [13] Ge K, Niu B, Liu F Y, et al. Electrically tunable WGM lasing in a metal-dielectric core-shell hybrid microcavity[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(23): 232201.
- [14] Rosensweig R E. Heating magnetic fluid with alternating magnetic field[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 370-374.

- [15] Habib A H, Ondeck C L, Chaudhary P, et al. Evaluation of iron-cobalt/ferrite core-shell nanoparticles for cancer radiotherapy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(7): 07A307.
- [16] Fan H B, Fan H W, Fan H L. Multiple Fano resonance refractive index sensor based on a plasmonic metal-insulator-metal based Taiji resonator[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 39(1): 32-39.
- [17] Wang M Y, Meng L J, Jin X Y, et al. Selective excitation of whispering-gallery modes and Fano resonance in a high-Q microcapillary resonator with cleaned-up spectrum[J]. *Applied Physics Express*, 2019, 12(6): 062003.
- [18] Zamora V, Diez A, Andrés M V, et al. Refractometric sensor based on whispering-gallery modes of thin capillaries[J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 12011-12016.
- [19] Liao J, Wu X, Liu L Y, et al. Fano resonance and improved sensing performance in a spectral-simplified optofluidic microbubble resonator by introducing selective modal losses[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8574-8580.

Research of Non-Contact Current Sensor Based on Ultra-High Q -Factor Whispering-Gallery Mode Microcapillary Resonator

Hu Jianpeng^{1,2}, Chai Minggang^{1,3*}, Wang Mengyu^{1,2**}, Xue Caijun³, Xie Chengfeng^{1,2},
Tan Qinggui⁴, Wei Bin^{1,2}, Wu Lingfeng², Wu Tao^{1,2}, Fu Yanjun^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

²Key Laboratory of Nondestructive Test (Ministry of Education), Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

³College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

⁴China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710199, Shaanxi, China

Abstract

Objective Current sensors are widely used in modern power electronic systems due to their advantages including high sensitivity, great precision, excellent stability, etc. In the electric power industry, they are extremely important in power measurement, electrical protection and control systems. However, due to the low sensitivity of current transformers, Roche coils and Hall sensors, optical systems seem ideal for current sensing because of their resistance to electro-magnetic interference and fast response. In addition, the problems of miniaturization, process simplicity and high sensitivity of current sensors have not yet been solved. Non-contact current sensors based on whispering-gallery mode (WGM) optical microcavities have the advantages of simplified structure, high sensitivity, low detection limit and small size. The sensor designed has the potential in realizing the intelligent monitoring of the current status for practical applications in the fields of wind power generation, smart grids as well as electric vehicles.

Methods A section of thin-walled quartz tube is intercepted to prepare a whispering-gallery mode microcapillary cavity by the method of arc discharge. The microcapillary cavity has a tiny curvature with a surface nanoscale axial photonic structure, which is able to bind more optical modes and improve the storage time of the optical modes, so that the microcapillary cavity with ultra-high quality (Q) factor is prepared. A tapered fiber with a waist diameter of 2 μm is prepared for excitation of whispering-gallery modes in the microcapillary cavity using the heat-and-pull technique. Subsequently, we propose a non-contact current sensor based on the ultra-high Q -factor microcapillary cavity. The copper wire with the diameter of 80 μm is put in the center of the microcapillary cavity, and 50% Fe_3O_4 and 100% Fe_3O_4 are filled into the microcapillary cavity, respectively, for comparative study. Subsequently, the optical instrument is adjusted to make the microcapillary cavity coupled with the tapered optical fiber and the measurement circuit is connected. The time interval is set as 90 s. The resonant wavelength shift of the microcapillary cavity with the change of the current can be observed and recorded by the oscilloscope. Finally, the sensitiveness of the microcapillary cavity and its detection limit for the three cases, i. e., the hollow microcapillary cavity, the microcapillary cavity with 50% Fe_3O_4 , and the microcapillary cavity with 100% Fe_3O_4 , are compared.

Results and Discussions The resonance spectrum of the microcapillary cavity is measured using the experimental device, and the highest Q -factor of 3.45×10^7 is obtained by Lorentz fitting (Fig. 5). The hollow microcapillary cavity is tested by setting the current interval to 20 mA. Firstly, when the current is increased from 0 to 300 mA, the resonant wavelength is shifted by 0.1393 nm, and the sensitivity is calculated to be 1.547 nm/A² with a current detection limit of 1.874×10^{-8} A²/nm (Fig. 6). Secondly, by adding 50% magnetic nanoparticles of Fe_3O_4 into the microcapillary cavity, the resonant wavelength is shifted by 0.1034 nm, with a sensitivity of 4.039 nm/A² and a current detection limit of 7.176×10^{-9} A²/nm when the current is increased from 0 to 160 mA, showing an enhanced sensitivity and a higher precision of detection limit (Fig. 7). Finally, by increasing the magnetic nanoparticles in the microcapillary cavity to 100%, when the current is increased from 0 to 30 mA, the resonant wavelength is shifted by 0.0973 nm, the sensitivity is 10.811 nm/A², and the current detection limit is 2.94×10^{-9} A²/nm. The sensor sensitivity and current detection limit

show nearly one order of magnitude improvement with respect to the hollow microcapillary cavity, and also have a significant enhancement in comparison with the case of 50% nanoparticles.

Conclusions A non-contact current sensor based on ultra-high Q -factor whispering-gallery mode microcapillary cavity is investigated. The mode spectrum of microcapillary cavity is stably excited and regular, and the highest Q -factor value reaches 3.45×10^7 . By filling the microcapillary cavity with Fe_3O_4 nanoparticle magnetic fluids, the current sensing sensitivity can reach up to $10.811 \text{ nm}/\text{A}^2$, and the current detection limit reaches $2.936 \times 10^{-9} \text{ A}^2/\text{nm}$, showing a very high current sensing detection performance. The proposed microcapillary cavity non-contact current sensor has the advantages of high sensitivity, high precision, good signal linearity and fast response. The sensor has a simple structure, small size, and low power consumption, and it is not subject to electromagnetic interference, which provides a new path for the application of microcavity in non-contact current detection. It can be applied to the condition assessment of equipment such as smart transformers, switchgear circuit breakers and insulating devices, etc. It can be used for online monitoring of partial discharges, harmonic currents, faults and leakage currents, etc. It provides a new path for current sensing in the power industry and consumer electronics.

Key words sensors; optical microresonator; microcapillary resonator; magneto-caloric effect; current detection; microresonator sensing