

激光与光电子学进展

基于荧光强度比技术的强抗干扰柔性荧光光纤
温度传感器杨安平^{1,2,3,4}, 周鸿猷^{1,2,3,4}, 方婕^{1,2,3,4}, 苏斯杰^{1,2,3,4}, 宋向阳^{1,2,3}, 黄梓琪⁴, 甘久林^{1,2,3,4*}¹华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510641;²广东省特种光纤材料与器件工程技术研究开发中心, 广东 广州 510641;³广东省光纤激光材料与应用技术重点实验室, 广东 广州 510641;⁴华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510641

摘要 为提高接触式柔性光纤温度传感器的稳定性和抗干扰性,提出了一种基于荧光强度比技术解调方法的上转换荧光纳米粒子掺杂的柔性荧光光纤温度传感器。稀土离子掺杂的复合柔性光纤受激发射出稳定荧光,依靠上转换纳米粒子热耦合能级对温度的依赖特性,热耦合能级对应的中心荧光峰的强度随着温度的变化而变化。所提柔性光纤温度传感器将掺杂 Er³⁺ 的热耦合能级对应的中心荧光峰强度的比值作为温度的表征值,且其温度响应表现为热增强型,即荧光强度随着温度的升高而增强。实验结果表明柔性光纤温度传感器表现出强稳定性和强抗干扰性,同时具备良好的柔性和变形能力、高灵敏度和可重复性,最大绝对灵敏度为 0.0038 °C⁻¹、最大相对灵敏度为 1.29 %/°C。

关键词 荧光强度比技术; 热耦合能级; 柔性光纤温度传感器; 抗干扰性

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231041

Strong Interference-Resistant Flexible Fluorescent Fiber Optic
Temperature Sensor Based on Fluorescence Intensity Ratio TechnologyYang Anping^{1,2,3,4}, Zhou Hongyou^{1,2,3,4}, Fang Jie^{1,2,3,4}, Su Sijie^{1,2,3,4}, Song Xiangyang^{1,2,3},
Huang Ziqi⁴, Gan Jiulin^{1,2,3,4*}¹State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology,
Guangzhou 510641, Guangdong, China;²Guangdong Engineering Technology Research and Development Center of Special Optical Fiber Materials and
Devices, Guangzhou 510641, Guangdong, China;³Guangdong Provincial Key Laboratory of Fiber Laser Materials and Applied Techniques, Guangzhou 510641,
Guangdong, China;⁴School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641,
Guangdong, China

Abstract A flexible fluorescent fiber temperature sensor doped with upconversion fluorescent nanoparticles based on fluorescence intensity ratio (FIR) technology is proposed to improve the stability and anti-interference of contact flexible fiber temperature sensor. The composite flexible fiber doped with rare earth ions emits stable fluorescence when excited, and the intensity of the central fluorescence peak corresponding to the thermal coupling energy level of upconversion nanoparticles follows the changes of temperature. The proposed flexible fiber temperature sensor mainly uses the ratio of the center fluorescence peak intensity corresponding to the thermal coupling energy level of the doped Er³⁺ after FIR treatment as the characterization value. Its temperature response is thermally enhanced which means the fluorescence intensity is enhanced with the increase of temperature. The experimental results show that the proposed sensor exhibits high stability and strong anti-interference, as well as good flexibility and deformation capability, high sensitivity and

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-05-26; 网络首发日期: 2023-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(62075064,62235014)、广东省自然科学基金(2021B1515020095)、中央高校基本科研业务费专项资金(2022ZYGXZR003)

通信作者: *msgan@scut.edu.cn

repeatability. The maximum absolute sensitivity and the maximum relative sensitivity are $0.0038\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ and $1.29\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively.

Key words fluorescence intensity ratio technology; thermal coupling energy level; flexible optical fiber temperature sensor; anti-interference ability

1 引言

温度是反映某种化学或物理现象的 7 个基本物理量之一,在人类生活、科研和工业生产中发挥着非常重要的作用^[1],有效的温度测量对科学、生物医学和工业等许多领域的发展都至关重要^[2]。

传统的接触式测温响应慢,或者大多含有电学元件,无法保障绝对的电气安全,且电磁干扰大、耐化学性低^[3],难以在腐蚀性、高电磁辐射或水下等特殊环境中工作。光学温度传感器的基本原理是检测发光材料与被测系统相互作用而引起的光学参数的变化^[4],其中质量好、成本低的光纤温度传感器更是具有体积小、防水性好和抗电磁干扰的独特优势。

光纤式温度传感器按照不同的解调参数,可分为相位调制型^[5-7]、波长调制型^[8]、光强调制型^[9-10]等。传统石英光纤改进后的高灵敏度温度传感器经过弹性体封装后^[11-12]虽然保证了一定的机械性能,但是其本质还是刚性和易脆的,无法适应复杂多变的环境。而在调制过程中,如何消除其他信号的串扰,将单独的表征信号解调出来对传感器的实际应用是非常重要的。基于荧光强度调制的荧光强度比(FIR)技术凭借其不受激发光源功率波动、荧光损失等非温度因素干扰^[13]的优势,最大限度地保障了传感器的稳定性、准确性和可靠性,因此开发基于 FIR 技术的抗干扰型光纤温度传感器是具有意义和前景的。

Zhou 等^[14]基于 8-羟基芘-1,3,6-三磺酸(HPTS)的两个敏感激发带(405 nm 和 450 nm)设计了一种使用双激发和 FIR 检测来监测信号的传感器,利用 HPTS 和离子树脂制成敏感微球嵌入到水凝胶光纤中,得到的柔性光波导可以在深层组织里导光,且可以用来探测 pH、温度和神经递质。这种水凝胶包覆光纤探针的方法虽然有很好的生物相容性,但是对温度的测量范围较窄,灵敏度也有待改进,且光稳定性差。Wang 等^[15]报道了基于 Mn^{2+} 的 FIR 温度计,通过控制合成气氛条件,在 N_2 和 O_2 的合成气氛下,使 Mn^{2+} 形成了具有弱晶场的 $[\text{MnO}_4]$ 四面体和具有强晶场的 $[\text{MnO}_6]$ 八面体。根据不同晶场 Mn^{2+} 对温度的不同依赖性,通过 FIR 技术设计了 Mn^{2+} 掺杂材料的 FIR 温度传感器,但存在稳定性低、应用范围窄等局限。

稀土(RE)离子掺杂的荧光材料具有独特的光学和物理化学性质,发射/吸收带窄、衰减时间长、光稳定性好。它包括下转换(DC)、上转换(UC)和双模发光材料^[2],其中 UC 发光材料具有局域低毒性、激发光波

长、能量低、穿透性弱等诸多优势,对生物体的伤害较小,适用于生物医学温度传感,成为研究的热点。Guo 等^[16]在可拉伸聚合物基光纤(SPOFs)中加入热敏 UC 纳米颗粒(UCNPs, $\text{NaYF}_4:\text{Yb}, \text{Er}@\text{NaYF}_4$ 核/壳)制备得到了光纤温度传感器,主要展现了传感器的可拉伸性,但是与大多数研究的感温材料一样,由于温度升高引起发光猝灭,在高温下难以检测到发射强度。

本文将 RE 掺杂 UC 发光纳米粒子 $\text{NaYF}_4@40\%\text{Yb}, 4\%\text{Er}$ (物质的量分数)混合到热塑性有机硅材料中,制备了一种光稳定性好、灵敏度和分辨率高的柔性荧光测温光纤。基于 FIR 技术的信号处理获得了强抗干扰的柔性光纤温度传感器,工作时表现为热增强型发光,相较于传统光学测温技术和其他同类温度传感器,其适用性和实用性更好。该温度传感器除了具备良好的可拉伸弯曲变形的基础性能外,抗干扰性更强、稳定性更好、成本更低且兼具生物相容性,弥补了传统接触式温度传感器的各种不足。

2 传感器结构及工作原理

2.1 传感器的结构及制备流程

RE 纳米粒子掺杂复合柔性光纤的制备过程如图 1(a)所示。将分散在环己烷中的油溶性热敏 UC 纳米颗粒 $\text{NaYF}_4@40\%\text{Yb}, 4\%\text{Er}$ (尺寸为 30~40 nm) 均匀混合到高折射率的聚甲基硅氧烷(OE)前驱体溶液中,经过真空除净气泡后,注射到合适尺寸的聚四氟乙烯管模具中成形。为了方便柔性光纤与其他器件的连接,同时插入 300/330 μm 和 105/125 μm 的石英光纤作为尾纤进行光耦合和发射收集,即取用直径为 10 cm 的小于聚四氟乙烯套管的石英光纤,一端剥去长度为 1 cm 的聚酰亚胺涂覆层,为了保证石英光纤和柔性光纤更好地连接,降低耦合损耗,利用光纤切割刀切平光纤尾端。将处理好的石英尾纤平稳地插入聚四氟乙烯套管中,热固化和脱模后得到纤芯,再使用旋转涂覆的方法在纤芯上均匀包覆上一层低折射率的聚二甲基硅氧烷(PDMS)前驱体溶液,进行热固化作为包层,得到具有典型芯包结构的复合柔性光纤传感器。该制备流程简单、成本低廉。

传感器实物图如图 1(b)所示,在黑暗的环境下通入 980 nm 激发光能看到传感区域发出明显的 UC 荧光。受益于光纤的芯包结构和有机硅弹性体的高度透明特点,传感器即使在大程度弯曲下依然有良好的导光效果,如图 1(c)所示,说明其具有优良的柔性和变形性,基本满足与人体或者物体所有表面紧密贴附的要求,应用场景丰富。

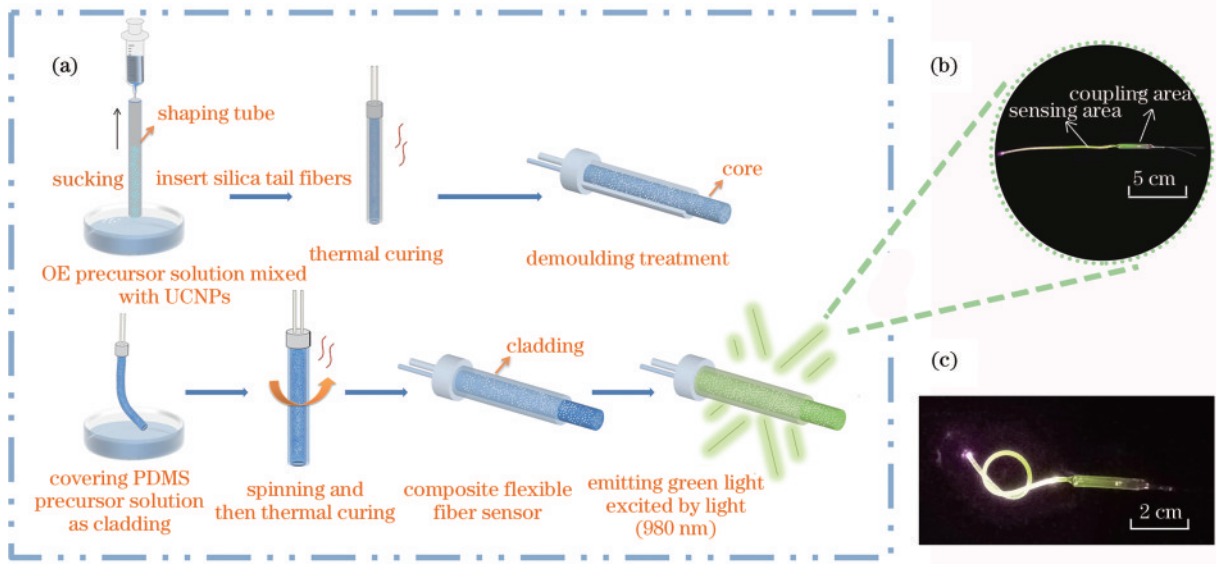


图1 传感器示意图。(a)复合柔性荧光温度传感光纤的制备流程图;(b)传感器实物图;(c)柔性传感器在大程度弯曲下的导光效果
Fig. 1 Schematic of the sensor. (a) Fabrication of the composite flexible fluorescent temperature sensing fiber; (b) the fiber sensor; (c) light conduction effect of the flexible sensor under a large degree of bending

2.2 荧光测温原理

RE离子掺杂材料具有温度依赖性,温度的变化会对RE离子的荧光强度产生影响,表现为猝灭或者增强,导致RE离子荧光光谱中相应发射峰的相对强度发生变化。光学测温大程度上依赖于发光中心的选择,通常选择Ln³⁺作为荧光粉的发光中心,因其具有丰富的4f构型能级。RE发光材料优异发光性能的根本原因是RE离子4f轨道上电子的跃迁,大多数RE离

子的f-f跃迁受周围环境的影响较小^[3]。

图2(a)为掺杂UC纳米粒子(UCNPs, NaYF₄: Yb,Er)的原理图,其核壳结构清晰,主要由活性核和惰性稀土壳层两部分组成,Yb³⁺为敏化剂,Er³⁺为激活剂,通过Yb³⁺向Er³⁺的能量转移实现热敏可见发射,惰性外壳作为保护层提高了UC效率^[16]。图2(b)为该纳米粒子的透射电镜图,其形貌均匀,呈现纯六方相结构,粒子尺寸为30~40 nm。

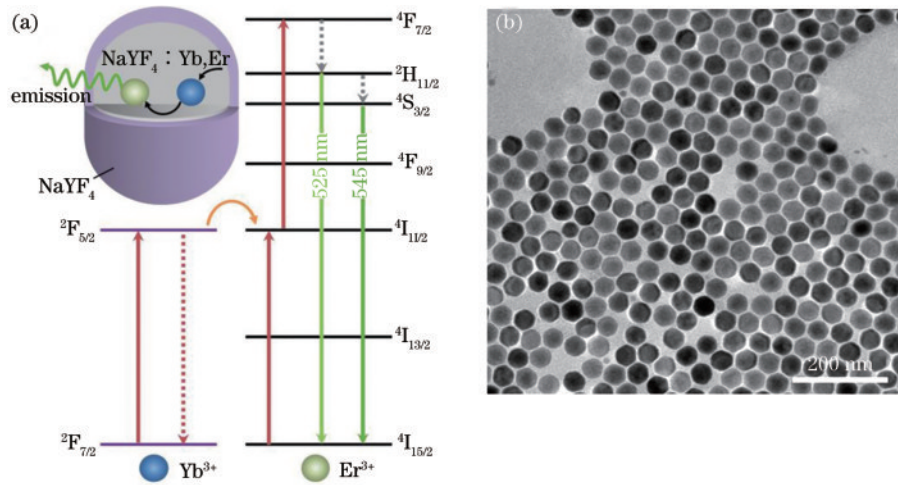


图2 UCNPs的能级图和构型图。(a) UCNPs的原理图^[16];(b) UCNPs的透射电镜图
Fig. 2 Energy level and conformation of UCNPs. (a) Schematic of UCNPs^[16]; (b) transmission electron microscope of UCNPs

图3为掺杂UCNPs的复合柔性光纤传感器在不同温度下的发射光谱,可以非常直观地看到随着温度从0℃升至118℃,发射荧光峰表现出明显的热增强型行为。与Guo等^[16]报道的同类热猝灭型光纤传感器温度响应的特点不同,热增强型温度传感器可以更方便地采集到荧光强度信号,提供更大的温度测量范围。

当两个能级的能级差为200~2000 cm⁻¹时,在热激发下,两个能级达到热平衡,两个能级的电子符合玻尔兹曼分布,被称为热耦合能级,两个热耦合能级的跃迁FIR满足

$$F_{\text{FIR}} = B \exp\left[-\Delta E / (kT)\right] = I_U / I_L, \quad (1)$$

式中:B为拟合常数;ΔE为热耦合能级差;k为玻尔兹

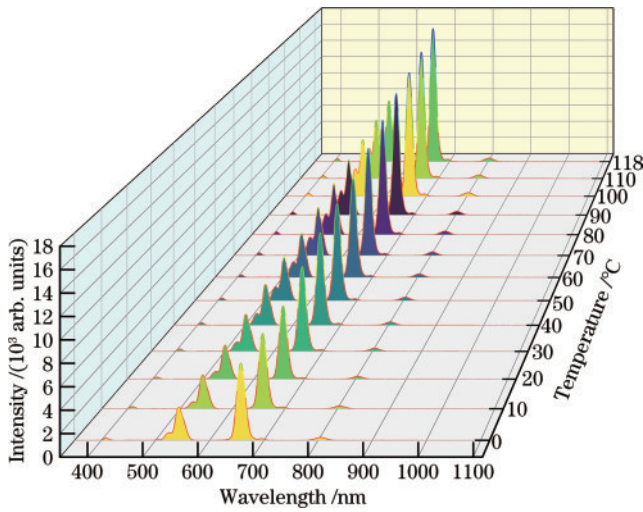


图3 复合柔性光纤传感器在不同温度下的发射光谱

Fig. 3 Emission spectra of composite flexible fiber sensor at different temperatures

曼常数; T 为温度; I_U 、 I_L 分别为上、下热耦合能级中心发射峰强度。可以看出, 跃迁 FIR 与系数 B 及温度 T

直接相关^[17], 因此可以用 FIR 表征温度。图 4 为荧光测温过程示意图, 通过改变温度, 相邻的上下热耦合能级 (I_U 和 I_L) 的 FIR [满足式 (1)] 会随之发生规律性的变化^[4]。通过对不同温度下的响应进行处理, 可以确定 FIR 和温度之间的函数关系。

绝对灵敏度 (S_a) 和相对灵敏度 (S_r) 是传感器温度变化响应至关重要的性能指标, 二者定义不同, S_a 为单位温度变化对应的 FIR 的变化量, S_r 为单位温度变化对应的 FIR 与自身变化值的比值, 分别表示为

$$S_a = dF_{\text{FIR}}/dT, \quad (2)$$

$$S_r = \left| dF_{\text{FIR}} / (F_{\text{FIR}} \cdot dT) \right| \times 100\%。 \quad (3)$$

所提光纤荧光测温依赖掺杂无机荧光材料 Er^{3+} 的 ${}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 热耦合能级, ${}^2\text{H}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{S}_{3/2}$ 分别对应中心波长为 523 nm 和 544 nm 的发射带, 对发射峰中心波长左右宽 10 nm 的发射带积分获得发射峰强度, 即对 518~528 nm 和 539~549 nm 区段发射强度积分得到发射峰强度 I_{523} 和 I_{544} , 则 FIR 为 I_{523} 和 I_{544} 的比值, 可以用来表征温度。

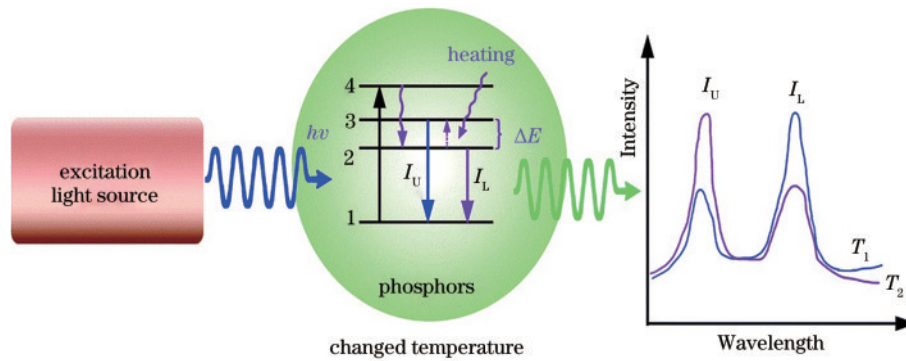


图4 FIR 荧光测温过程示意图^[4]

Fig. 4 FIR fluorescence temperature measurement process^[4]

3 传感器特性分析

3.1 性能测试与分析

根据荧光材料的激发光谱, 选用 980 nm 的激光光源, 使用的测试仪器为荧光光谱仪 (FLS920, Edinburgh Instruments, 英国), 测量范围为 400~800 nm, 扫描步长为 2 nm; 同时, 为创造恒温条件, 将传感光纤和热敏电阻一起放置在一个金属加热块内部, 利用比例积分微分控制器 (PID) 控制温度, 控制精度为 0.1 °C [热敏电阻: 10 K-3950-120-1%, 精度在 ±0.1 °C 范围内, 领际 (上海) 精密机械有限公司, 上海]。

根据式 (1) 对柔性荧光光纤温度传感器在 10~118 °C 的温度响应进行拟合, 得到 FIR 与温度的关系如图 5(a) 所示。进一步发现 30~100 °C 区间的线性相关度高, 如图 5(b) 所示, 其中: x 和 y 为图中横纵坐标参数; R^2 为决定系数, 表示拟合程度。 R^2 越接近 1 表示拟

合得越好, 数据越可靠, 充分说明本传感器温度传感的可靠性。

通过式 (2) 和式 (3) 计算本温度传感器的绝对灵敏度和相对灵敏度, 发现在测量温度范围内, 温度最高时绝对灵敏度最大, $S_a = 0.0038 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, 温度最低时相对灵敏度最大, $S_r = 1.29 \text{ } \%/^\circ\text{C}$, 如图 5(c) 所示。

通过短时间内设置不同温度变化梯度来检验本传感器温度检测的滞后情况, 如图 5(d) 所示, 不论是在保温区段还是升温或者降温区段, 传感器检测到的温度与热敏电阻的温度都能较好地吻合, 说明本传感器可以对温度做到较为准确的实时测量且响应迅速。

稳定性和分辨率也是影响传感器实际应用的十分重要的性能指标。为进一步验证本传感器的性能是否满足实际应用, 观察传感器在 36 °C 恒温条件下 FIR 的波动情况, 如图 6(a) 所示, 其中, σ 为数据的标准差。所有数据稳定在较小区间内, 不确定度为 0.003, 误差

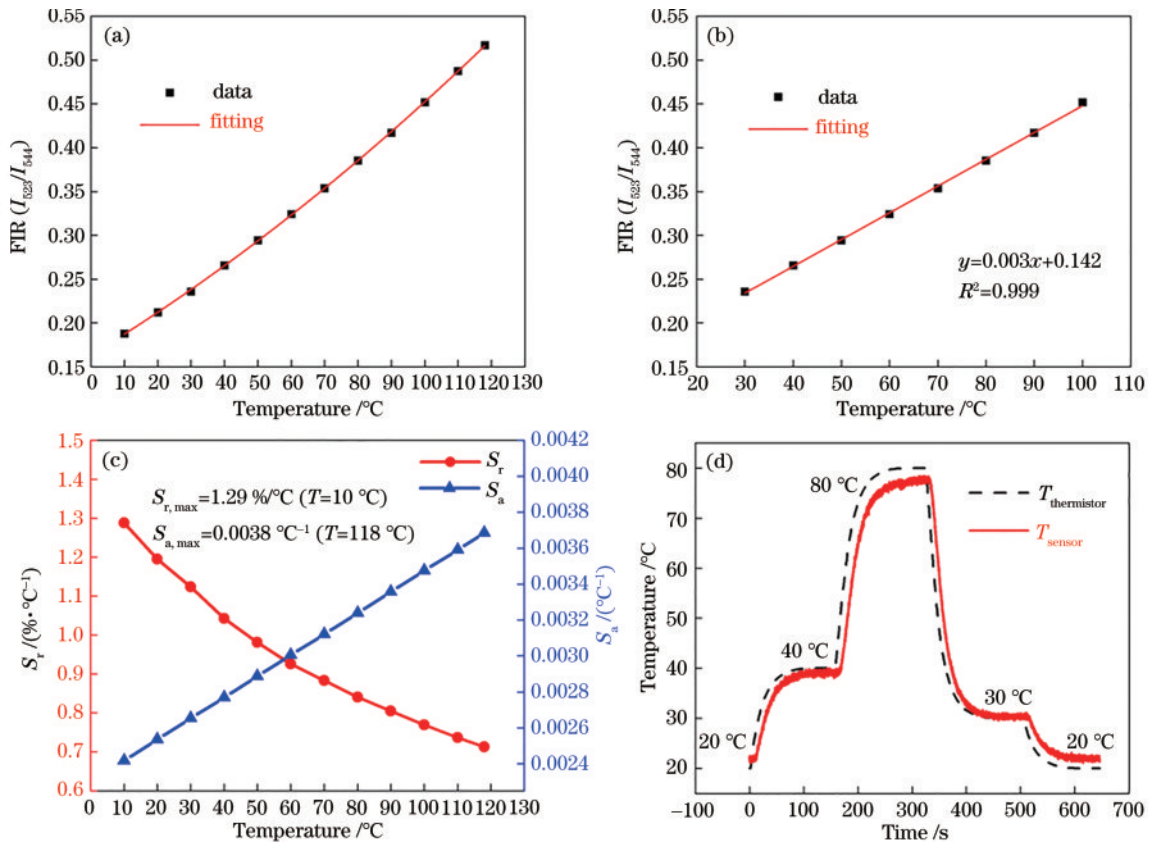


图 5 温度变化时柔性光纤传感器的性能。(a)温度与 FIR 的非直线拟合;(b)30~100 °C 温度和 FIR 的线性拟合;(c)传感器的灵敏度曲线;(d)传感器的检测温度和实际温度的实时匹配情况
 Fig. 5 Performance of flexible fiber sensor under temperature change. (a) Nonlinear fitting curve for temperature and FIR; (b) linear fitting curve of temperature and FIR from 30 °C to 100 °C; (c) sensitivity curves of the sensor; (d) real-time matching of the sensor between detected temperature and actual temperature

小,表现出良好的稳定性。

此外,为测试本传感器的精度,令温控系统从 40 °C 上升到 45 °C,步长设定为 0.5 °C,保温时间设定为

30 s。温度传感器在该过程中的响应情况如图 6(b)所示,FIR 曲线呈现明显的阶梯上升趋势,说明该传感器具有高分辨率。

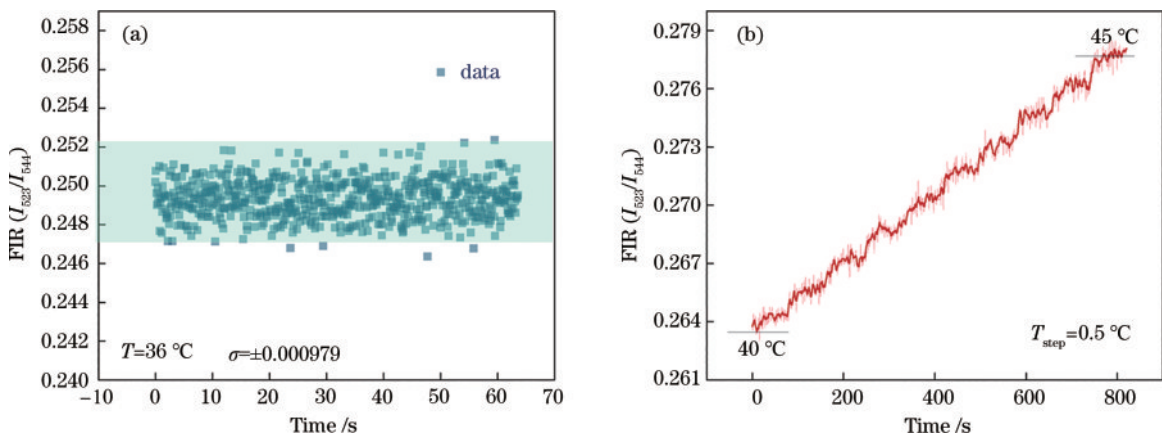


图 6 柔性光纤温度传感器在恒温下 FIR 值的波动和对温度的分辨率。(a)温度传感器在 36 °C 恒温条件下输出数据的波动情况;(b)传感器在温度梯度为 0.5 °C,每阶段保温 30 s 的条件下从 40 °C 升温至 45 °C 的过程响应情况
 Fig. 6 FIR values fluctuation and temperature resolution of the sensor at constant temperature. (a) Fluctuation of the sensor output under constant temperature of 36 °C; (b) FIR response from 40 °C to 45 °C with a temperature gradient of 0.5 °C and the temperature is held for 30 s at each stage

设置 36~66 °C 的温度区间,在该区间内不断升温降温,让柔性光纤传感器工作 41 个循环过程,如图 7 所

示,传感器的 FIR 响应在每个循环的表现基本一致,具有良好的可重复性和稳定性。

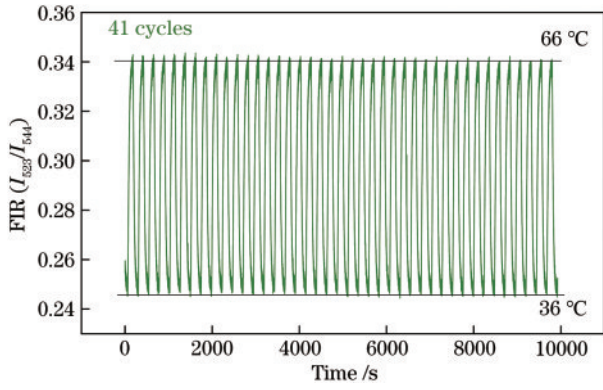


图 7 传感器的可重复性

Fig. 7 Repeatability of the sensor

3.2 抗干扰性能测试与分析

在实际应用场景中,传感器通常会面临各种复杂的外界环境因素干扰,如与待测物贴附而产生的弯曲、受到外力的影响(压力或拉力)而产生的形变等。为此设计不同的抗干扰实验用来模拟传感器在实际应用中会遇到的外界影响,以表征传感器的抗干扰稳定性。

抗弯曲干扰性:如图 8(a)所示,将传感器弯曲到

半径 r 分别为 10、20、30、40、50 mm,最大弯曲角度大于人体任意皮肤曲面贴敷角度,并与平坦条件下的状态进行对比,在 40 °C 恒温的条件下,观察传感器的响应,其波动幅度在 0.260 到 0.266 之间,实验结果表明,传感器受弯曲影响不大。

抗压干扰性:分别对传感器施加 150~750 Pa 的压强以测试传感器的抗压能力,此压强选择范围涵盖了一般触摸或者接触物体表面时人的手指所能接受且不会损坏表皮的情况。以 10 °C/step 的温度梯度从 30 °C 升温至 70 °C,如图 8(b)所示,在测试的压强范围内,压力对传感器的信号干扰微乎其微,传感器表现出十分强的抗干扰能力。

抗风吹扰动性:以不同频率的风吹动正常室温下的光纤传感器,同时保持吹动距离和位置,测试传感器对风的抗干扰能力,结果如图 9(a)所示。风势必会引起环境温度的变化,0~60 s 的吹动频率为每 6 s 一次,60~120 s 为每 2 s 一次,120~180 s 为每 1 s 一次。随着吹动频率的增加,FIR 数据表现出下降趋势,说明传感器表面温度有所下降,且与频率的升高

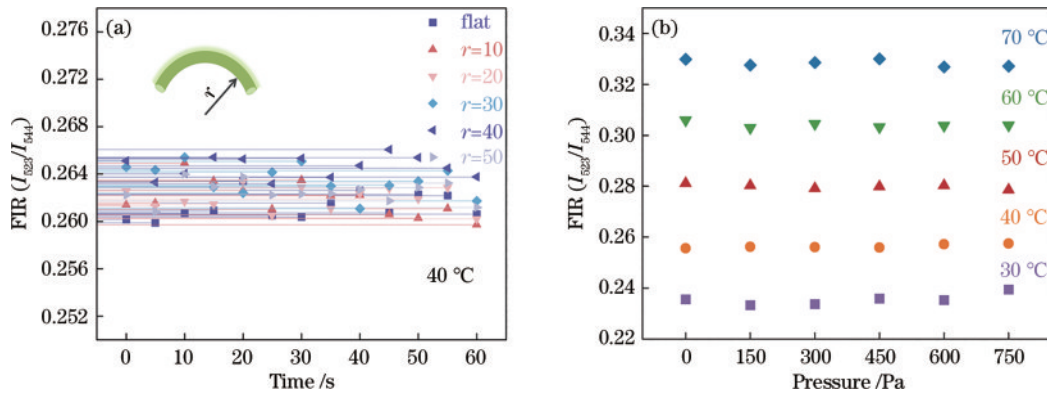


图 8 传感器的抗弯曲干扰性和抗压干扰性。(a)传感器在不同弯曲半径下的响应情况;(b)传感器在不同压强下的温度响应情况
Fig. 8 Bending interference resistance and pressure interference resistance of the sensor. (a) Response of sensor under different bending radius; (b) response of the sensor under different pressures

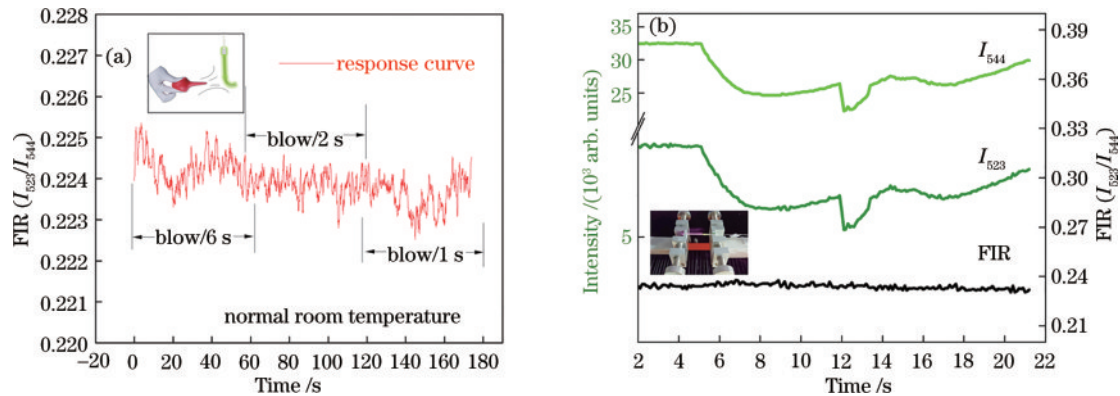


图 9 柔性荧光光纤温度传感器的抗风吹干扰测试和抗拉伸干扰测试结果。(a)恒室温、不同吹动频率下传感器 FIR 的响应结果,插图为测试方法;(b)恒室温下传感器被拉伸至 120% 过程中 FIR 的响应波动情况,插图为拉伸过程中传感器的状态
Fig. 9 Wind-blown and stretching interference test results of flexible optical fiber sensor. (a) FIR response of different blowing frequency at constant room temperature, the inset shows the test method; (b) FIR value fluctuation of the sensor in the whole process of 120% stretching at constant room temperature, the inset shows the state of the sensor during stretching process

表现出一定的对应关系。传感器可以一定程度上检测到气流的流动,有望被应用于呼吸和重症监护系统中。

抗拉伸干扰性:在室温环境下,将柔性光纤温度传感器以 0.5 mm/s 的速度拉伸至 120% 的长度,观察整个拉伸过程中 FIR 的波动情况,如图 9(b) 所示。拉伸过程中光纤纤芯不可避免地随着轴向拉伸应变的增大而减小,导致透射激发光的能量密度增大,荧光强度增强,但是 FIR 曲线却十分平稳,展现出良好的稳定性和抗拉伸干扰性。

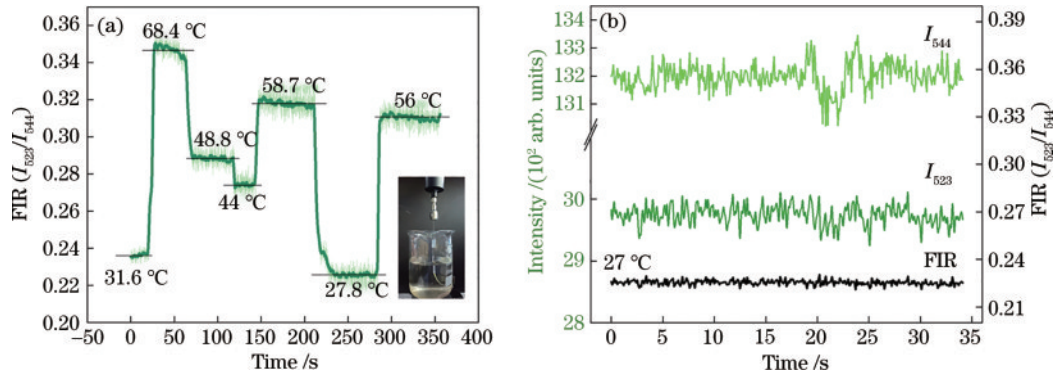


图 10 传感器的水下测温实验和抗干扰情况。(a) 传感器不同水温下的温度响应,插图为水下测温方式;(b) 传感器在水下干扰状态下的响应过程

Fig. 10 Underwater temperature response test and anti-interference of the sensor. (a) Temperature sensing under different water temperature gradients, the inset shows the test method under the water; (b) sensor response under constant temperature water bath perturbation

4 结 论

制备了一种基于 FIR 解调方法的具有强抗干扰性且发光稳定的 UCNP 掺杂柔性荧光光纤温度传感器,该传感器与同类传感器相比,在弯曲、压强、应变、风吹、水下各种扰动环境下都表现出稳定的感温性能。此外本温度传感器是基于 RE 离子热耦合能级的荧光式传感器,因此直观性更好、可靠性高,且在 30~100 °C 范围内与温度呈高度线性相关,最大绝对灵敏度为 0.0038 °C⁻¹,最大相对灵敏度达 1.29 %/°C。传感器同时具备成本低、可重复性好、结构简单等优点,可应用场景丰富,不仅可以用于医疗健康监测,在人机界面优化、软体机器人等方向都大有可为,具有广阔的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Zhang H, You J J, Wang J H, et al. Highly luminescent carbon dots as temperature sensors and "off-on" sensing of Hg²⁺ and biothiols[J]. *Dyes and Pigments*, 2020, 173: 107950.
- [2] Starzyk B, Jimenez G L, Kochanowicz M, et al. Investigation of thermal sensing in fluorindate Yb³⁺/Er³⁺ co-doped optical fiber[J]. *Materials*, 2023, 16(6): 2139.
- [3] Zhao Y, Wang X S, Zhang Y, et al. Optical temperature sensing of up-conversion luminescent materials: fundamentals and progress[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 817: 152691.
- [4] Wang X F, Liu Q, Bu Y Y, et al. Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(105): 86219-86236.
- [5] He Q, Zhang Q C. A flexible temperature sensing finger using optical fiber grating for soft robot application[J]. *Optoelectronics Letters*, 2021, 17(7): 400-406.
- [6] Zhou T Y, Fang W X, Lu G G, et al. Temperature response of a fiber end-face integrated lithium niobate crystal probe based on pyroelectric and thermo-optic effects via polarization state modulation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109206.
- [7] Liu H J, Zhou C M, Pang Y D, et al. High-resolution optical fiber temperature sensor based on draw tower grating array[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2846.
- [8] Gao X K, Xu J, Xie C J, et al. Strain-insensitive temperature sensor based on few-mode fiber and photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 6834007.
- [9] Peng X L, Cha Y P, Zhang H, et al. Light intensity modulation temperature sensor based on U-shaped bent single-mode fiber[J]. *Optik*, 2017, 130: 813-817.
- [10] Feng W L, Niu S Y. Intensity-modulated liquid-level and temperature sensor based on cascaded air bubble and fiber Bragg grating interferometer[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 354: 114300.
- [11] 孙丹丹, 杨润. 基于纳米材料封装的干涉型微纳光纤温

- 度传感器[J]. 量子光学学报, 2021, 27(3): 227-234.
- Sun D D, Yang R. The optical microfiber interferential temperature sensor based on nanomaterial encapsulation [J]. Journal of Quantum Optics, 2021, 27(3): 227-234.
- [12] 徐廷廷, 杨玉强, 杨文龙, 等. 基于 PDMS 膜封装空芯光纤的级联双腔温度传感器[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0806004.
- Xu T T, Yang Y Q, Yang W L, et al. Cascaded double-cavity temperature sensor based on hollow fibers encapsulated by PDMS membrane[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0806004.
- [13] 吴艳芳. 基于 FIR 技术的稀土掺杂复合氧化物温度传感特性研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- Wu Y F. The research on temperature sensing based on FIR technique of rare-earth doped composite oxide materials[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [14] Zhou B Q, Fan K K, Li T F, et al. A biocompatible hydrogel-coated fiber-optic probe for monitoring pH dynamics in mammalian brains *in vivo*[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2023, 380: 133334.
- [15] Wang Q A, Liao M, Mu Z F, et al. Ratiometric optical thermometer with high sensitivity based on site-selective occupancy of Mn^{2+} ions in $Li_5Zn_8Al_5Ge_9O_{36}$ under controllable synthesis atmosphere[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2020, 124(1): 886-895.
- [16] Guo J J, Zhou B Q, Yang C X, et al. Stretchable and temperature-sensitive polymer optical fibers for wearable health monitoring[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(33): 1902898.
- [17] Wang Q, Liao M, Lin Q M, et al. A review on fluorescence intensity ratio thermometer based on rare-earth and transition metal ions doped inorganic luminescent materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 850: 156744.