

基于荧光强度比的毛细管液芯光纤温度传感器

张烨禹 刘婷 黄建伟 黄学智 陈明杰

Capillary liquid-core optical fiber temperature sensor based on fluorescence intensity ratio

ZHANG Ye-yu, LIU Ting, HUANG Jian-wei, HUANG Xue-zhi, CHEN Ming-jie

引用本文:

张烨禹, 刘婷, 黄建伟, 黄学智, 陈明杰. 基于荧光强度比的毛细管液芯光纤温度传感器[J]. *中国光学*, 2024, 17(3): 528–537.

doi: 10.37188/CO.2023-0160

ZHANG Ye-yu, LIU Ting, HUANG Jian-wei, HUANG Xue-zhi, CHEN Ming-jie. Capillary liquid-core optical fiber temperature sensor based on fluorescence intensity ratio[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 528-537. doi: 10.37188/CO.2023-0160

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0160>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[油气井下光纤光栅温度压力传感器](#)

Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well

中国光学 (中英文) . 2021, 14(5): 1224 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0008>

[光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展](#)

Research progress of optical fiber Fabry–Perot interferometer high temperature sensors

中国光学 (中英文) . 2022, 15(4): 609 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0219>

[高精度硅基集成光学温度传感器研究](#)

High-precision silicon-based integrated optical temperature sensor

中国光学 (中英文) . 2021, 14(6): 1355 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0054>

[光纤法珀传感器光楔式解调系统设计](#)

Design of optical wedge demodulation system for fiber Fabry–Perot sensor

中国光学 (中英文) . 2021, 14(5): 1259 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0204>

[基于氧化铟锡的十重偏芯D型光子准晶光纤的高灵敏度表面等离子体共振传感器](#)

High-sensitivity surface plasmon resonance sensor based on the ten-fold eccentric core quasi-D-shaped photonic quasi-crystal fiber coated with indium tin oxide

中国光学 (中英文) . 2022, 15(1): 101 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2021-0006>

[基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器](#)

A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber

中国光学 (中英文) . 2023, 16(1): 174 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0006>

文章编号 2097-1842(2024)03-0528-10

基于荧光强度比的毛细管液芯光纤温度传感器

张烨禹, 刘婷*, 黄建伟, 黄学智, 陈明杰
(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:针对现有光纤荧光温度传感探头制备复杂的问题,本文提出了一种制备简单、成本低廉且性能优异的基于毛细管液芯的光纤荧光温度传感器。首先将对温度敏感的罗丹明 B 和对温度不敏感的罗丹明 123 的混合溶液作为温敏材料封装在不锈钢毛细管中制备成传感探头,利用两者荧光发射峰强度的比值进行温度传感。之后对传感探头中混合溶液的浓度和毛细管的结构参数进行了优化,并对传感器的性能进行了测试,最终将其应用于实际生活温度检测中。实验结果表明:该传感器的温度响应范围为 30~70 °C, 荧光强度比与温度之间呈二次相关,拟合相关系数高达 0.9984,且具有很好的准确性、重复性和稳定性,使用时间可达 3 个月以上,能很好地应用于对日常生活中温度的检测。该光纤荧光温度传感器在实时监测和远端探测方面具有很大的潜力。

关 键 词:光纤; 温度传感器; 荧光强度比; 罗丹明

中图分类号:TN253

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2023-0160

Capillary liquid-core optical fiber temperature sensor based on fluorescence intensity ratio

ZHANG Ye-yu, LIU Ting*, HUANG Jian-wei, HUANG Xue-zhi, CHEN Ming-jie

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: liut14@hqu.edu.cn

Abstract: Aiming to the problem of the complicated preparation of existing optical fiber fluorescence temperature sensing probes, we propose a simple, cost-effective, and high-performance optical fiber fluorescence temperature sensor based on a capillary liquid core. Firstly, a mixed solution consisting of temperature-sensitive rhodamine B and temperature-insensitive rhodamine 123 was used as the temperature-sensitive material and encapsulated in a stainless-steel capillary to prepare a sensing probe. The ratio of the fluorescence emission peak intensities of the two dyes was utilized for temperature sensing. Subsequently, the sensing probe's mixed solution concentration and capillary structural parameters were optimized. Then, the performance of the sensor was tested. Finally, the sensor was applied to real-life temperature measurements. The experimental results demonstrate that the sensor has a temperature response range of 30–70 °C and that there is a quadratic correlation between the fluorescence intensity ratio and the temperature, with the fitted corre-

收稿日期:2023-09-13; 修訂日期:2023-10-09

基金项目:国家自然科学基金(No. 62075067, No. 61505057); 华侨大学中青年教师科技创新项目(No. ZQN-PY603)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075067, No. 61505057); Promotion Program for Young and Middle-aged Teacher in Science and Technology Research of Huaqiao University (No. ZQN-PY603)

tion coefficient as high as 0.9984. The sensor exhibits excellent accuracy, repeatability, and stability, with more than three months of service time. Moreover, it can be well-utilized to detect temperature in daily life. The optical fiber fluorescence temperature sensor shows significant potential for real-time monitoring and remote detection applications.

Key words: optical fiber; temperature sensor; fluorescence intensity ratio; rhodamine

1 引言

温度是一种可以反映物质冷热程度的重要物理量, 在工业制造、农业生产、日常生活和生物医疗等领域都至关重要, 因此温度的检测一直是传感领域非常重要的部分。传统的温度传感器主要是基于热膨胀、热电偶、热电阻、热电容的热电式温度传感器和半导体温度传感器^[1-5]。虽然发展时间长、技术成熟, 但是容易受到强电场和强磁场的影响。此外, 由于传统温度传感器的传感元件大多含有电气元件, 难以保证绝对的电气安全, 对于易燃易爆和腐蚀性等特殊环境无法应用。光纤温度传感器利用光纤传光过程中本征光学参数的变化或光纤中引入的敏感材料的光学参数的变化来实现温度传感。它可在恶劣环境下正常工作, 具有抗电磁干扰能力强、响应快、可远端探测和实时监测等优点, 能够弥补传统温度传感器的不足, 拓宽温度传感的应用场合。目前主要的光纤温度传感器有光纤光栅温度传感器、分布式光纤温度传感器、弯曲损耗型光纤温度传感器、干涉型光纤温度传感器和光纤荧光温度传感器。光纤光栅温度传感器^[6]主要是利用封装的光纤布拉格光栅的布拉格波长对温度敏感的特性, 并使用光纤光栅解调仪测出其反射光谱来实现对外界温度的检测, 具有精度高、重复性和稳定性好的优点, 但光纤布拉格光栅制备复杂, 价格昂贵。分布式光纤温度传感器^[7]主要是基于光纤散射原理, 结合光时域反射技术测量得到各个散射点的温度变化, 具有实时监测和多点探测的优点, 但其对解调设备要求高。弯曲损耗型光纤温度传感器^[8]主要是利用光纤弯曲损耗和温度之间的关系来推导出外界环境的温度, 具有解调方便的优点, 但其测量精度低、使用寿命短。干涉型光纤温度传感器^[9]通过改变干涉仪的干涉条纹来测量外界温度, 其结构灵巧, 温度分辨率高, 但存在较大的噪声干扰。光纤荧光温度传感器是利用温敏

材料的荧光光谱与温度之间的关系来实现温度测量, 相比于其它光纤温度传感器, 其具有制备简单、结构灵活和解调方便的优点。

荧光是一种光致发光的冷发光现象, 荧光物质在吸收光子后能级由基态跃迁至激发态, 处于激发态的荧光分子是不稳定的, 随后会产生弛豫现象, 能级由激发态回到基态, 这个过程发出的能量即荧光。光纤荧光温度传感技术通过将光纤与对温度敏感的荧光物质结合制备成传感探头实现温度传感。对温度敏感的荧光物质主要有稀土金属离子、量子点和有机染料三种。光纤荧光温度传感探头的制备方法主要有掺杂法、修饰法、特种光纤法和封装法。掺杂法主要是将荧光物质掺杂到玻璃、有机聚合物或凝胶等物质中制备成传感探头^[10-13], 是最常用的制备方法, 其拥有较好的稳定性和较高的灵敏度, 但是制备过程复杂, 对设备要求高, 效率低, 大部分需要在高温条件下进行制备。修饰法主要分为物理沉积和化学键修饰^[14-15], 前者是将荧光物质涂抹在光纤端面或者侧表面, 后者是将荧光物质通过化学反应固定在光纤表面, 这类方法对设备要求低, 制备简单, 但是存在着荧光物质不稳定, 容易从修饰的表面脱落的不足。特种光纤探头主要是将荧光物质嵌入光子晶体光纤等具有特殊结构的光纤中实现荧光传感^[16-17]。这种传感器的灵敏度高, 在分布式传感领域有独特的优势, 但其存在着成本高、对光纤参数要求高、操作难度大的不足。封装法则将荧光物质直接封装在容器中, 再与传光光纤结合构成探头, 其制备过程简单、对设备要求低、成本低廉, 弥补了其他方法的不足。目前已报道的封装法制备的探头多是将固体温敏材料封装在毛细管或其他封装材料中^[18-19]。其灵活性差且不稳定。综上所述, 发展一种制备简单、成本低廉且性能稳定的光纤传感探头对光纤荧光温度传感器的发展具有重要意义。

光纤荧光温度传感器中荧光测温的方法主要分为荧光强度法、荧光寿命法、荧光发射峰位移

法和荧光强度比法。荧光强度法是直接利用荧光物质的发光强度随温度的变化进行传感^[20-21], 方法简单, 但是容易受到光源、环境和荧光物质自身稳定性的影响, 可靠性低。荧光寿命法是利用荧光物质的发光寿命随温度变化进行传感^[22-23], 这种方法响应快, 精度高, 但存在着对检测设备要求高和荧光物质老化造成精度下降的缺点。荧光发射峰位移法是利用荧光物质随温度变化导致发射峰波长产生偏移进行温度传感^[24-25], 具有良好的重复性和抗干扰性, 但是灵敏度低。相较于前三种方法, 荧光强度比法是采用两个波段的荧光强度的比值对温度进行传感^[26-28], 拥有自我校准的能力, 可以克服光源和环境等不稳定因素造成的影响, 是非常实用的测量技术, 自被开发以来逐步成为最常用的荧光温度测量方法。

本文提出了将两种罗丹明染料构成的混合溶液封装在不锈钢毛细管中的光纤荧光温度探头制备方法。利用不锈钢毛细管优秀的密封性和避光性, 结合强度比法的荧光信号处理方法, 可在无需重新标定的情况下对不同环境的气液固样品进行温度检测, 拥有很好的灵敏度、准确性、重复利用性和稳定性。在日常应用中能够实现对样品温度的实时监测和远端探测, 有望在生活、工业和农业中普及, 甚至在生物和医学领域也有很好的应用前景。

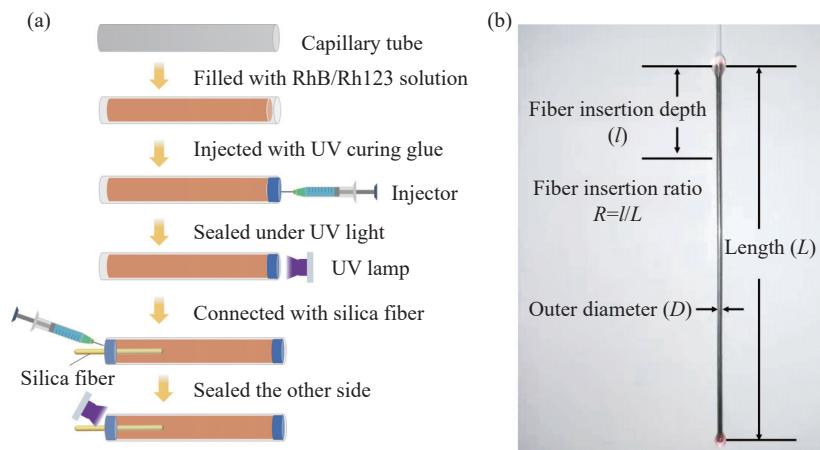


图 1 传感探头的制备。(a)制备流程图;(b)实物及结构参数

Fig. 1 Preparation of sensing probe. (a) Preparation flow chart; (b) sensing probe and its parameters

先将 RhB 和 Rh123 以一定的浓度配比混合得到温敏溶液, 利用毛细效应将温敏溶液吸入不锈钢毛细管中形成液芯的传感探头。然后用紫外固化胶涂覆在不锈钢毛细管的一端, 利用紫外灯照射 10 min, 完成固化, 再将纤芯、包层和保

2 传感探头和传感系统

2.1 传感原理

荧光强度比法是利用两个不同波长的荧光强度的比值对温度的变化进行传感的技术。这种技术的优点在于光源功率变化、荧光物质的自淬灭等因素造成的荧光损失对比值影响不大, 具有一定的自我校准能力, 从而可以大幅延长传感器的使用寿命。在高温下, 罗丹明 B(RhB)分子中的二乙氨基基团会发生大幅度转动, 破坏刚性较差的杂氧蒽环, 导致荧光强度下降, 而当温度恢复常温时, 荧光强度能够恢复至原来的水平^[29-31]。而罗丹明 123(Rh123)对温度的变化不敏感^[32], 二者的发射峰相差较大, 不会造成信号的串扰。因此, 选择 RhB 作为对温度敏感的物质, Rh123 作为对温度不敏感的物质, 将两者的混合溶液作为温敏溶液进行毛细管液芯传感探头的制备。

Rh123 和 RhB 均可以被 405 nm 的光源激发, 分别产生发射峰值波长为 525 nm 和 585 nm 的荧光。因此荧光强度比选用波长为 525 nm 和 585 nm 的荧光强度进行计算, 计算公式为 $S=I_{585}/I_{525}$ 。

2.2 传感探头的制备

传感探头的制备过程如图 1(a)所示。

护层直径分别为 105 μm、125 μm 和 0.9 mm 的商用多模石英光纤(MMF105/125, 首量科技)用光纤切割刀处理得到平整端面。将此光纤插入不锈钢毛细管未经封装的一端, 最后用紫外固化胶对其进行封装, 用紫外灯照射 10 min 完成固

化。制备的传感探头如图1(b)所示。该制备方法简单、快速、成本低,对设备要求低、操作难度低,而且采用紫外固化胶封装能够很好地防止温敏溶液随着时间推移挥发导致浓度变化的问题。

2.3 传感系统的搭建

光纤荧光温度传感器的整体结构如图2所示,由405 nm小型光纤耦合半导体激光器、105/125 μm 的2×1光纤耦合器、不锈钢毛细管液芯传感探头、500 nm长通滤光片(FEL0500, Thorlabs)、聚焦透镜(AC254-030-A-ML, Thorlabs)和光纤光谱仪(HR4000, Ocean Optics)组成。405 nm小型半导体激光器发出激光,通过光纤耦合器将光传输至液芯传感探头中产生荧光,光纤端面收集的荧光再通过光纤耦合器传回,经过500 nm长通滤光片将激发光滤除后由透镜聚焦进入光纤,荧光被传输至光纤光谱仪进行信号处理,最终在电脑上得到光谱信号。其中气体测温实验在电热恒温鼓风干燥箱(DGG-9030B, 森信)中进行,液体测温实验采用水浴锅对水的温度进行控制,固体表面测温实验在恒温加热平台(STC-803-II, 格美)上进行。

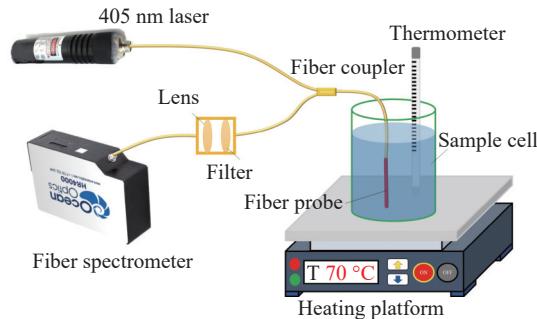


图2 光纤温度传感器系统

Fig. 2 Optical fiber temperature sensing system

3 传感器的优化与性能测试

3.1 温敏溶液的浓度优化

为了得到更高的灵敏度,对RhB和Rh123的浓度进行优化。分别称取0.01 g的RhB和Rh123固体,倒入20 mL去离子水后摇匀,制备得到0.5 g/L的母液,加入去离子水稀释后分别得到0.3 g/L、0.1 g/L、0.08 g/L、0.05 g/L的溶液,再用不锈钢毛细管分别吸入这些溶液制备成传感探头,在常温下对它们的光谱进行测量,结果如图3(a)~3(b)(彩图见期刊电子版)所示。

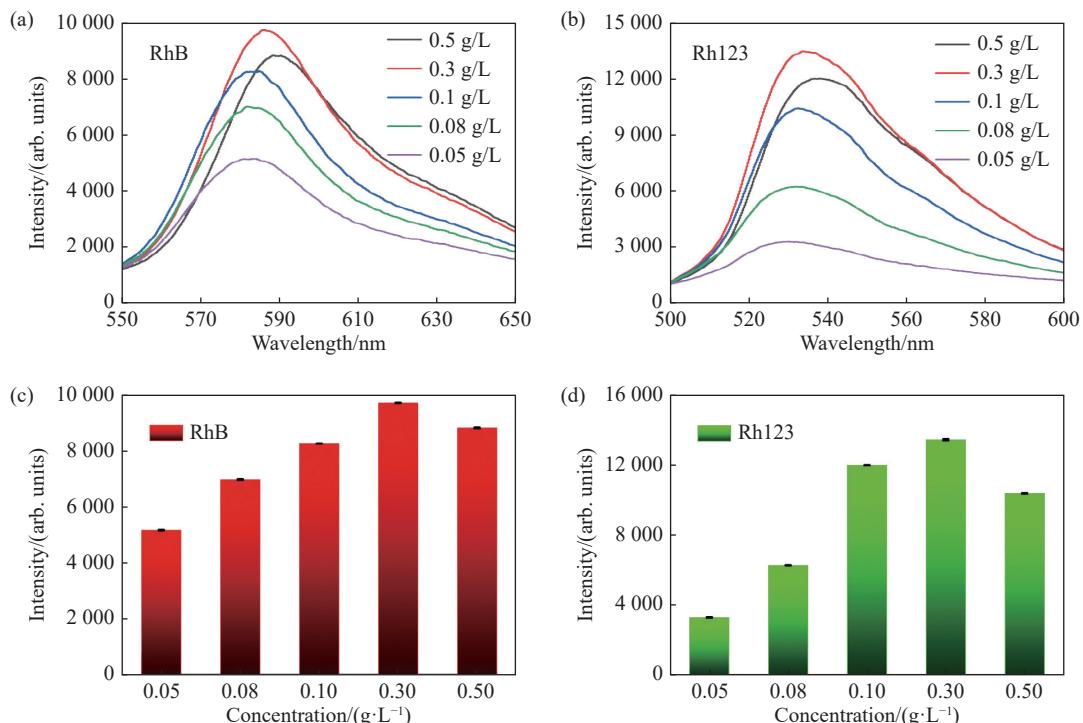


图3 罗丹明溶液的浓度优化。(a)罗丹明B和(b)罗丹明123的荧光光谱;(c)罗丹明B和(d)罗丹明123的浓度优化

Fig. 3 Concentration optimization of rhodamines. Fluorescence spectra of (a) rhodamine B and (b) rhodamine 123; concentration optimization of (c) rhodamine B and (d) rhodamine 123

由图3(c)~3(d)(彩图见期刊电子版)可以看出,两种罗丹明染料均是在0.3 g/L时荧光强度达到最大。其主要原因是发光单体数量决定荧光强度,浓度越高发光单体数量越多,因此荧光强度随着浓度的增加而增大,而单体数量饱和后浓度进一步增加时,发光单体容易形成二聚体和多聚体,能量在分子间传递和消耗导致荧光强度随之下降^[33]。为了得到更高的灵敏度,最终选择RhB与Rh123的浓度配比为0.3 g/L:0.05 g/L的混合溶液作为温敏溶液进行光纤温度传感探头的制备。

3.2 探头结构参数的优化

为了确定温度变化趋势对传感器的影响,采用长度为80 mm、内径和外径分别为0.9 mm和1.1 mm、光纤浸入深度为1/4的一根探头先后进行温度上升检测和温度下降检测的实验。在优化

实验中所使用的温度控制平台均为水浴锅,由于RhB在温度过高时会分解,影响传感探头的性能,因此温度检测范围为30~70 °C,每隔4 °C记录一次光谱,其结果分别如图4(a)~4(b)(彩图见期刊电子版)所示。可见Rh123和RhB的峰值波长随温度的改变并没有发生明显的偏移,分别为525 nm和585 nm。由荧光强度比计算公式 $S=I_{585}/I_{525}$ 得到不同温度下的荧光强度比如图4(c)(彩图见期刊电子版)所示。所有数据均由三根独立探头获得并计算平均值和标准偏差所得。可见在温度上升和温度下降时测得的荧光强度比变化不大。表明该传感器对温度的检测不受温度变化趋势的影响。因此,后续实验均只需关注温度本身与荧光强度比之间的关系。此外,很小的误差表明制备的不同探头具有很好的重复性。

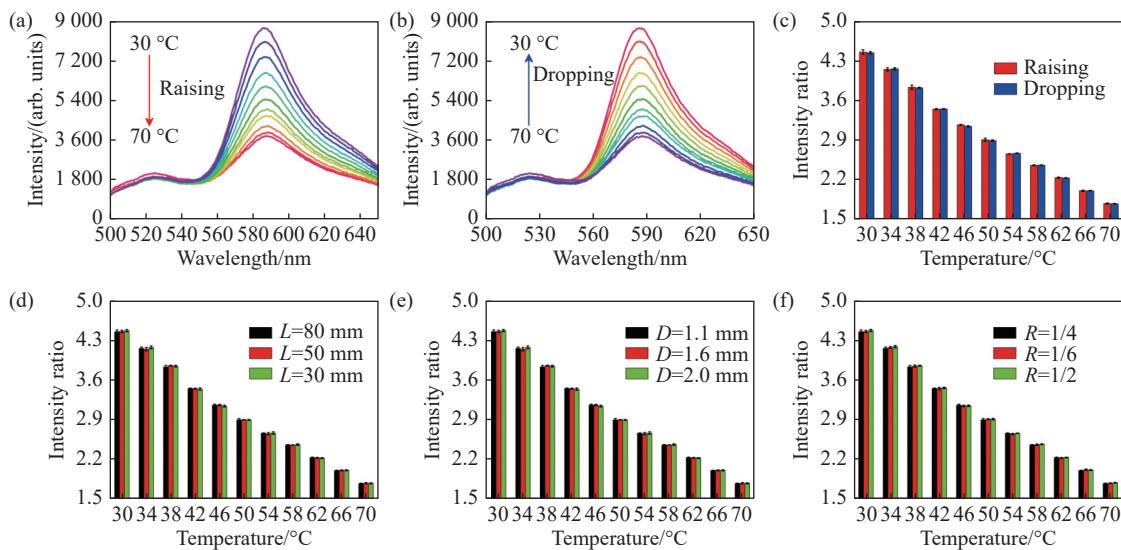


图4 传感探头结构参数的优化。(a)温度上升光谱;(b)温度下降光谱;(c)温升温降的信号对比;(d)长度的优化;(e)外径的优化;(f)光纤浸入深度比的优化

Fig. 4 Structure parameter optimization of sensing probe. Spectra of temperature (a) raising and (b) dropping; (c) comparison of temperature raising and dropping; optimization of (d) length, (e) outer diameter and (f) fiber insertion ratio

为了分析探头的结构参数对传感器灵敏度的影响,对探头的长度(L)、毛细管外径(D)和光纤浸入深度比(R)这些结构参数进行了温度检测实验。由于石英光纤保护层直径为0.9 mm,为了让光纤与毛细管的连接更牢靠,毛细管内径统一选为0.9 mm。首先,采用探头长度分别为80 mm、50 mm和30 mm,而外径均为1.1 mm,光纤浸入深度比均为1/4的探头进行温度检测实验,结果如图4(d)(彩图见期刊电子版)所示。可见,不同长度的探头在不同温度下的荧光强度比差别不

大。这主要是由于光纤端面的光作用距离不大造成的。其次,采用外径分别为1.1 mm、1.6 mm和2.0 mm,长度均为80 mm,光纤浸入深度比均为1/4的探头进行实验,结果如图4(e)(彩图见期刊电子版)所示。可见探头的外径对温敏特性的影响也不大。这主要是由于毛细管材料为不锈钢,其避光性使得外径大小对信号影响不大。最后,采用光纤浸入深度比分别为1/2、1/4和1/6,光纤长度均为80 mm,外径均为1.1 mm的探头进行实验,结果如图4(f)(彩图见期刊电子版)所示。表

明石英光纤的浸入深度比对传感器温敏特性的影响也不大, 这也是由于光纤端面的光作用距离不大造成的。以上实验结果表明, 探头的结构参数对传感器的性能影响不大, 因此可根据应用需求选择不同结构参数的探头, 采用具有良好避光性能的材料制备传感探头也能得到类似的效果。本文采用长度为 80 mm、内径和外径分别为 0.9 mm 和 1.1 mm、石英光纤浸入深度比为 1/4 的探头进行后续的实验。

3.3 传感器在不同环境下的温度响应

为了进一步确定该传感器在不同环境下的温度响应情况, 分别在气体、液体和固体环境下进行了温度检测实验。气体温控平台采用恒温鼓风

干燥箱, 液体温控平台采用水浴锅, 固体温控平台采用恒温加热平台, 温度检测范围为 30~70 °C, 每隔 4 °C 记录一次光谱。传感器在气体、液体和固体环境下的温度检测结果如图 5(a)~5(c)(彩图见期刊电子版)所示, 它们在不同温度下的荧光强度比如图 5(d)(彩图见期刊电子版)所示。可以看出在不同环境中, 相同温度下的荧光强度比差异不大。以上结果可以说明该传感器在不同环境下测温无需重新标定, 表现出了良好的通用性。这主要是由于不锈钢毛细管对管内的温敏溶液有着很好的密封保护作用, 可以避免荧光被外界吸收和荧光损失造成的信号差异问题。

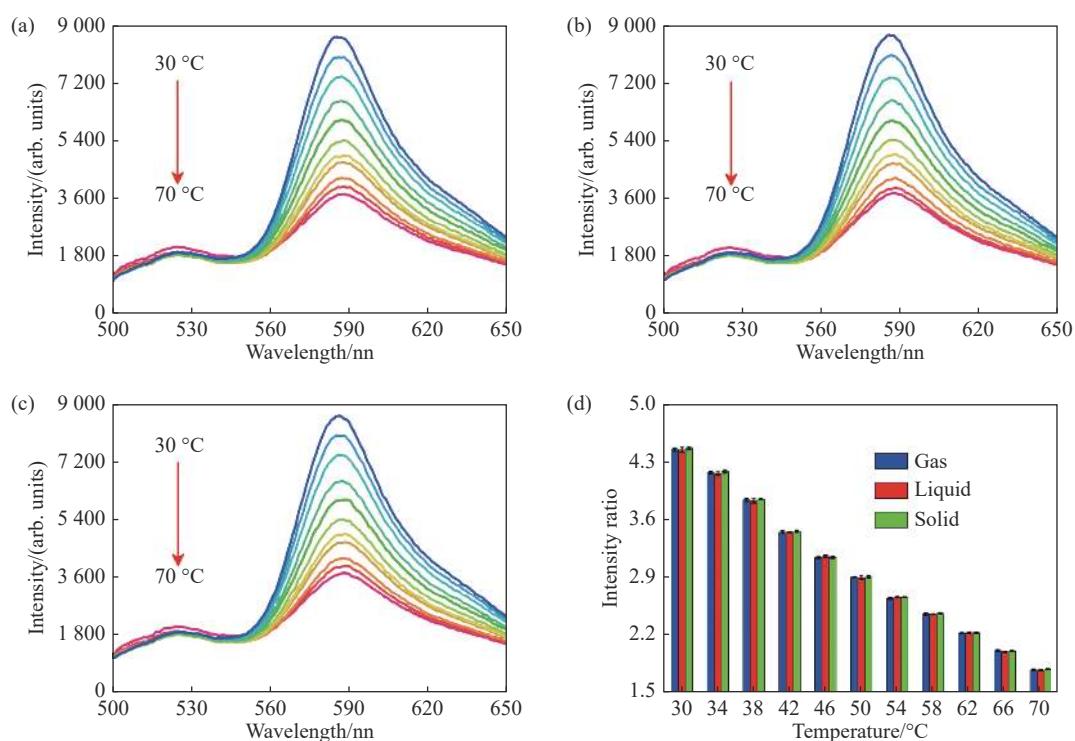


图 5 传感器在不同环境下的温度响应。(a) 气体, (b) 液体和(c) 固体环境下的温度响应光谱; (d) 不同环境下的荧光强度比

Fig. 5 Response of the sensor to temperature under different environments. Spectra of temperature response in (a) gas, (b) liquid and (c) solid environments; (d) intensity ratios under different environments

3.4 传感器的标定与性能测试

从图 5 可以看出, 荧光强度比对温度的响应呈现出一定的规律, 且在不同环境下的信号差异不大。为了得到统一的荧光强度比与温度之间的定量关系, 对图 5(d)中的单个温度下的所有荧光强度比取平均值进行标定, 得到的拟合曲线如图 6(a)所示, 可见荧光强度比与温度之间的拟合曲

线呈二次相关, 其关系式为 $y=0.00046x^2-0.1127x+7.419$ ($R^2=0.9984$)。由于二次项系数很小, 因此在 30~70 °C 的温度范围内, 传感器的灵敏度约为 $-0.1127 / ^\circ\text{C}$ 。依据此定量关系式可由测量得到的荧光强度比反推出待测温度, 从而实现温度的检测。

在实际应用前, 需对该传感器的性能进行测

试。首先,采用恒温鼓风干燥箱作为气体样品、水浴锅作为液体样品、恒温加热平台作为固体样品,对传感器在不同环境下的检测准确性进行测试。区别于标定所用的温度,选择40 °C和60 °C进行准确性实验。用水银温度计的读数作为参考,用拟合曲线公式对测量的荧光强度比进行计算得到计算温度值,结果如图6(b)(彩图见期刊电子版)所示。可见,计算值和实际温度的差异不大。表明温度传感器在不同环境下都具有良好的准确性。其次,为了验证传感器的重复使用性,将两个水浴锅的温度分别固定在40 °C和60 °C,将

探头交替浸入两个水浴锅中进行实时监测,每次时间间隔为1 s,在每种温度中监测5次,再利用拟合曲线将每次的荧光强度比计算成温度,结果如图6(c)(彩图见期刊电子版)所示。可见,传感器在多次重复使用时信号差异不大,表明其具有良好的重复利用性。最后,为了测试传感器的稳定性,分别在传感探头制备后七天、一个月、两个月和三个月时进行温度检测实验,如图6(d)(彩图见期刊电子版)所示。可见不同时间下的传感探头对相同温度的响应差异不大,均能够保持初始的传感器性能,表现出良好的准确性和稳定性。

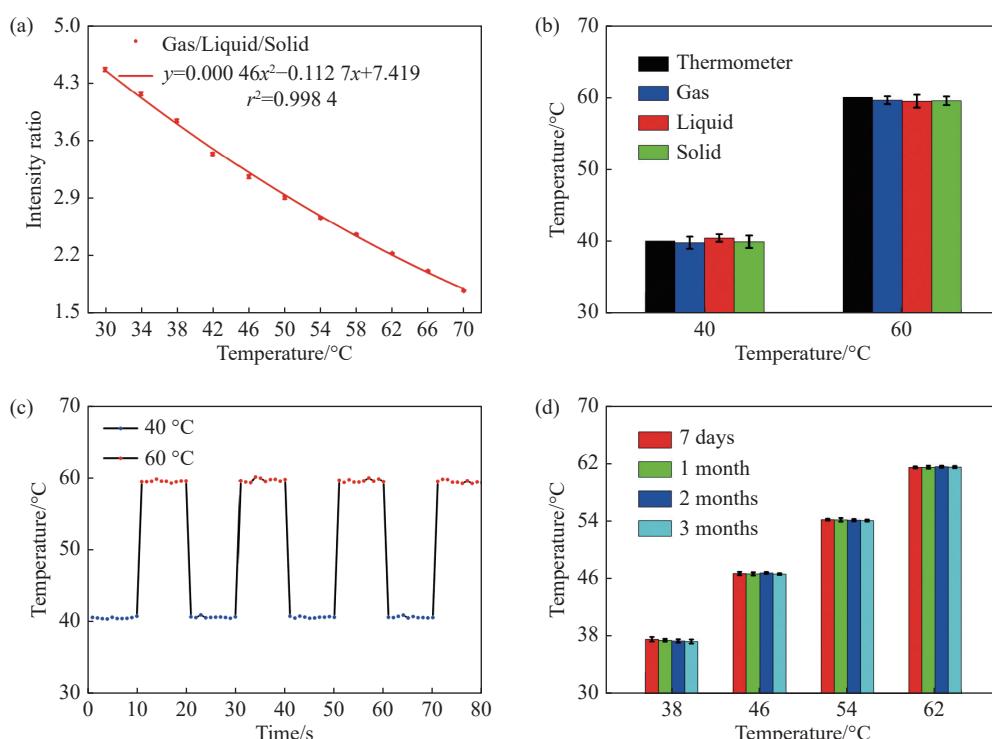


图6 光纤温度传感器的性能测试。(a)标定曲线;(b)准确性、(c)重复性、(d)稳定性测试结果

Fig. 6 Performance evaluation of the optical fiber temperature sensor. (a) Calibration curve, (b) accuracy, (c) repeatability and (d) stability test results

4 实际应用

传感器的性能测试结果表明其可以应用于不同环境下的温度检测,且拟合曲线无需重新标定,有望在实际生活中进行较为广泛的应用。选择日常生活中的室外温度、热水自然冷却和暖手宝加热过程分别进行检测。以厦门夏季上午九点的温度进行测试,将传感探头直接伸出窗外,测量三次得到的计算结果为(30.52±0.14) °C,用温度计三

次测量的结果为(30.41±0.02) °C,两者差异不大。对于热水自然冷却过程,将传感探头和温度计同时置于烧杯的热水中,水温从70 °C自然冷却降低至40.4 °C,每隔150 s记录一次光谱,通过拟合曲线计算得到的温度与温度计读数得到的结果如图7(a)(彩图见期刊电子版)所示。可见它们的数据吻合很好。对于暖手宝加热过程,将传感探头和温度计同时置于暖手宝内部,暖手宝的温度从30 °C开始上升直到自动断电停止加热,间隔40 s记录光谱。由于暖手宝升温较快,而实验所

用的水银温度计的温度变化响应速度过慢, 无法准确监测暖手宝的温度, 因此水银温度计只记录了起始温度和终止温度。通过拟合曲线计算得到的温度和温度计测得的温度如图 7(b)所示。可见, 传感器响应速度快且起始温度和终止温度与

水银温度计检测结果的差异很小。这些实验结果表明本文提出的光纤荧光温度传感器不仅可以很好地应用于日常生活中气液固样品的检测, 而且可以实现实时监测和远端探测。

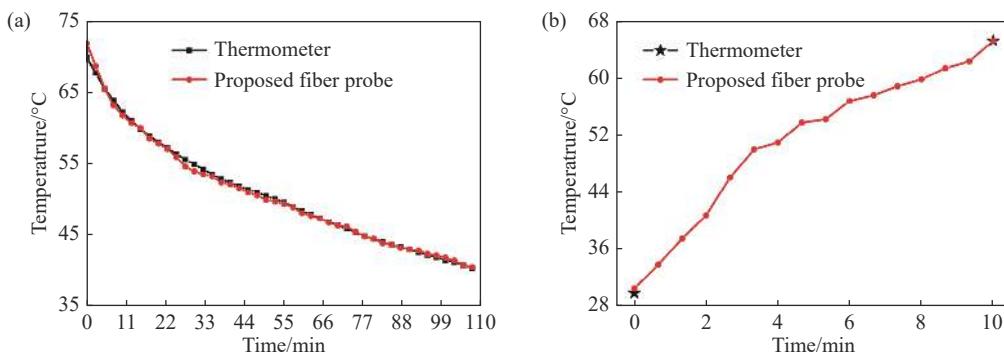


图 7 传感器在实际生活中的应用测试。(a)热水自然降温; (b)暖手宝的加热过程

Fig. 7 Practical application test for the sensor. (a) Natural cooling of hot water; (b) heating process of hand warmer

5 结 论

本文提出了一种基于不锈钢毛细管封装双罗丹明混合染料制备传感探头的方法, 制备过程简单、时间短、对操作人员要求低、对设备的需求低、制备材料容易获得且价格低廉, 拥有很高的经济效益。传感探头与传光光纤结合后拥有良好的密封性、抗干扰性、稳定性和重复利用性, 可以满足包括恶劣环境在内的很多场合的温度检测需求。对探头长度、外径和光纤浸入深度比结构参数进行了实验研究, 发现封装材料的参数对传感性能影响不大, 降低了传感探头的制备难度。在气体、液体和固体环境下进行温度检测。结果表现出很小的差异, 因此可避免重复标定, 拥有良

好的通用性。荧光强度比与温度之间的拟合曲线呈二次相关, 相关系数 R^2 为 0.9984, 可实现的温度检测范围为 30~70 °C。值得注意的是, 检测的温度范围可根据所使用的荧光染料进行调节。此外, 通过对传感器的其它性能进行实验研究发现, 在不同环境下的测量温度与温度计读数误差都小于 1 °C, 反复的升温与降温后仍能保持准确性, 长时间使用后仍能保证很好的稳定性。在实际生活中, 对室外的温度、热水自然冷却和暖手宝的加热过程进行检测, 传感器测量温度与温度计的读数高度吻合, 表明传感器具有很好的实用性。该传感探头制备简单、小型轻便、经济实用、同时具有良好的准确性、重复性和稳定性, 且可实现实时监测和远端探测, 有望应用于多种领域的温度检测。

参考文献:

- [1] SHIMADA K, TAKASHIMA H, WANG R P, et al.. Capacitance temperature sensor using ferroelectric ($\text{Sr}_{0.95}\text{Ca}_{0.05}$) TiO_3 perovskite[J]. *Ferroelectrics*, 2006, 331(1): 141-145.
- [2] 薛光辉, 柴敬轩. 热电偶传感器温控系统误差研究[J]. *中国测试*, 2019, 45(9): 100-104.
- [3] XUE G H, CHAI J X. Temperature control error research based on thermocouple sensor[J]. *China Measurement & Testing Technology*, 2019, 45(9): 100-104. (in Chinese).
- [4] LEE J M, CHO I T, LEE J H, et al.. Enhancement of temperature sensitivity for metal-insulator-semiconductor temperature sensors by using $\text{Bi}_2\text{Mg}_{2/3}\text{Nb}_{4/3}\text{O}_7$ film[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(8R): 080206.
- [5] BANG J, LEE W S, PARK B, et al.. Highly sensitive temperature sensor: ligand-treated Ag nanocrystal thin films on PDMS with thermal expansion strategy[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(32): 1903047.
- [6] LEE Y T, CHOI W J, CHAE Y C. Resistor-based temperature sensors: a technical review[J]. *IDEC Journal of*

- Integrated Circuits and Systems*, 2021, 7(1): 24-29.
- [6] YANG Z R, YUAN W H, YU CH Y. Hollow core Bragg fiber-based sensor for simultaneous measurement of curvature and temperature[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 7956.
- [7] PENG G L, HE J, YANG SH P, et al.. Application of the fiber-optic distributed temperature sensing for monitoring the liquid level of producing oil wells[J]. *Measurement*, 2014, 58: 130-137.
- [8] ROMAN M, ZHU CH, O'MALLEY R J, et al.. Distributed fiber-optic sensing with low bending loss based on thin-core fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7672-7680.
- [9] MILIOU A. In-fiber interferometric-based sensors: overview and recent advances[J]. *Photonics*, 2021, 8(7): 265.
- [10] ZHANG Y, LIU ZH, LI Y, et al.. Electrospun fibers embedded with microcrystal for optical temperature sensing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 855: 157410.
- [11] YANG K, XU R, MENG Q Y, et al.. Er³⁺/Yb³⁺ co-doped TeO₂-ZnO-ZnF₂-La₂O₃ glass with a high fluorescence intensity ratio for an all-fiber temperature sensor[J]. *Journal of Luminescence*, 2020, 222: 117145.
- [12] KHLAIFI H, ZRELLI A, EZZEDINE T. Optical fiber sensors in border detection application: temperature, strain and pressure distinguished detection using fiber Bragg grating and fluorescence intensity ratio[J]. *Optik*, 2021, 229: 166257.
- [13] 李爱武, 单天奇, 国旗, 等. 光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展[J]. *中国光学（中英文）*, 2022, 15(4): 609-624.
- LI A W, SHAN T Q, GUO Q, et al.. Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 609-624. (in Chinese).
- [14] ZHANG H, YE J T, WANG X L, et al.. Highly reliable all-fiber temperature sensor based on the fluorescence intensity ratio (FIR) technique in Er³⁺/Yb³⁺ co-doped NaYF₄ phosphors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(48): 15269-15275.
- [15] REN X T, GAO J, SHI H N, et al.. A flexible and portable all-fiber temperature sensor based on the upconversion luminescence of octahedral NaBi(WO₄)₂: Er³⁺/Yb³⁺ phosphors[J]. *Dalton Transactions*, 2021, 50(3): 917-925.
- [16] ZHANG M, LI A ZH, YU J B, et al.. In-fiber temperature sensor based on green up-conversion luminescence in an Er³⁺-Yb³⁺ co-doped tellurite glass microsphere[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3214-3217.
- [17] MAI Y F, LI B Y, ZHOU G Y, et al.. Research on temperature sensor using rhodamine6G film coated microstructure optical fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(1): 202-207.
- [18] LI H, ZHANG Y D, SHAO L, et al.. Luminescence probe for temperature sensor based on fluorescence intensity ratio[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 1077-1083.
- [19] JIANG X F, LIN CH, HUANG Y Q, et al.. Hybrid fiber optic sensor, based on the Fabry-Perot interference, assisted with fluorescent material for the simultaneous measurement of temperature and pressure[J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(5): 1097.
- [20] ZHAO F, KIM J. The Effect of temperature on photoluminescence enhancement of quantum dots in brain slices[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2017, 17(4): 2606-2609.
- [21] SUN S S, ZHANG J H, Wang ZH, et al.. Anomalous thermally-activated NIR emission of ESIPT modulated Nd-complexes for optical fiber sensing devices[J]. *Chemical Communications*, 2018, 54(49): 6304-6307.
- [22] 王玉田, 胡俏丽, 石军彦. 基于荧光机理的光纤温度测量仪[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 655-659.
- WANG Y T, HU Q L, SHI J Y. Optical fiber thermometer based on fluorescence mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 655-659. (in Chinese).
- [23] ZHAO Y T, PANG CH L, WEN ZH, et al.. A microfiber temperature sensor based on fluorescence lifetime[J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 231-236.
- [24] WU J, YIN X J, WANG W Y, et al.. All-fiber reflecting temperature probe based on the simplified hollow-core photonic crystal fiber filled with aqueous quantum dot solution[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(5): 974-978.
- [25] ZHAO Y, TONG R J, CHEN M Q, et al.. Fluorescence temperature sensor based on GQDs solution encapsulated in hollow core fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(18): 1544-1547.
- [26] 曹江敏, 李发光, 戴乐荣, 等. 同步监测氧气和温度的新型便携式传感器[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0628004.
- CAO H M, LI F G, DAI L R, et al.. Novel portable sensor for simultaneous monitoring of oxygen and temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0628004. (in Chinese).
- [27] KUMAR R, BINETTI L, NGUYEN T H, et al.. Optical fibre thermometry using ratiometric green emission of an

- upconverting nanoparticle-polydimethylsiloxane composite[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*, 2020, 312: 112083.
- [28] 李淑雅, 魏超, 赵晗, 等. 检测汞离子的比色-荧光双通道探针的设计合成及应用[J]. 分析化学, 2023, 51(2): 204-210.
LI SH Y, WEI CH, ZHAO H, et al.. Synthesis and application of colorimetric and fluorescent dual mode probe for detection of mercury ion[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(2): 204-210. (in Chinese).
- [29] 侯淑华, 李仕琦, 汤立军. 新型水溶性罗丹明类荧光探针的合成及其对游离3价金属离子的识别[J]. 应用化学, 2022, 39(2): 241-246.
HOU SH H, LI SH Q, TANG L J. Synthesis of a novel water-soluble rhodamine-based fluorescent probe and its selective detection of free trivalent ions[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(2): 241-246. (in Chinese).
- [30] 陈阳, 赵杰, 张嘉惠, 等. 罗丹明B-锆基金属有机框架复合材料高选择性荧光检测铁离子[J]. 分析化学, 2021, 49(4): 642-651.
CHEN Y, ZHAO J, ZHANG J H, et al.. Integration of rhodamine b into zirconium-based metal-organic framework for selective detection of ferric ion[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 49(4): 642-651. (in Chinese).
- [31] PANCHUK-VOLOSHINA N, HAUGLAND R P, BISHOP-STEWART J, et al.. Alexa dyes, a series of new fluorescent dyes that yield exceptionally bright, photostable conjugates[J]. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 1999, 47(9): 1179-1788.
- [32] ZHANG T T, WANG ZH J, XIANG H J, et al.. Biocompatible superparamagnetic europium-doped iron oxide nanoparticle clusters as multifunctional nanoprobes for multimodal *in vivo* imaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(29): 33850-33861.
- [33] BARRANCO A, GROENING P. Fluorescent plasma nanocomposite thin films containing nonaggregated rhodamine 6G laser dye molecules[J]. *Langmuir*, 2006, 22(16): 6719-6722.

作者简介:

刘婷(1987—),女,湖北随州人,副教授,硕士生导师,2014年于清华大学获得博士学位,现为华侨大学机电与自动化学院副教授,主要从事光纤光谱传感及精密测量技术的研究。E-mail: liut14@hqu.edu.cn