

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于EpoCore胶裹覆的FBG传感器温度敏感性研究

李群, 陆云才, 邵剑, 王同磊, 吴鹏, 梁家碧, 李晓涵, 黄熠隼, 胡程勇, 邓传鲁

引用本文:

李群, 陆云才, 邵剑, 等. 基于EpoCore胶裹覆的FBG传感器温度敏感性研究[J]. 光电工程, 2024, 51(12): 240228.

Li Q, Lu Y C, Shao J, et al. Research on temperature sensitivity of FBG sensor based on EpoCore adhesive coated[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240228.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240228>

收稿日期: 2024-09-27; 修改日期: 2024-11-19; 录用日期: 2024-11-19

相关论文

基于保偏光纤与少模光纤的激光温度传感器

陈志萌, 黄昌清

光电工程 2024, 51(11): 240185 doi: 10.12086/oe.2024.240185

基于参考滤波器及互相关算法的碲化镓光纤温度解调方法

毕扬, 熊治富, 李佳文, 杨天宇, 刘兔兔, 万慧明, 董玉明

光电工程 2024, 51(9): 240143 doi: 10.12086/oe.2024.240143

一种光纤陀螺全温启动漂移补偿方法

姚磊善, 周一览, 赵帅, 黄腾超, 车双良

光电工程 2024, 51(5): 240033 doi: 10.12086/oe.2024.240033

Specialty optical fibers for advanced sensing applications

Huanhuan Liu, Dora Juan Juan Hu, Qizhen Sun, Lei Wei, Kaiwei Li, Changrui Liao, Bozhe Li, Cong Zhao, Xinyong Dong, Yuhan Tang, Yihong Xiao, Gerd Keiser, Perry Ping Shum

Opto-Electronic Science 2023, 2(2): 220025 doi: 10.29026/oes.2023.220025

更多相关论文见光电期刊集群网站 

 | 光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240228

CSTR: 32245.14.oe.2024.240228

基于 EpoCore 胶裹覆的 FBG 传感器温度敏感性研究

李群¹, 陆云才^{1*}, 邵剑¹, 王同磊¹, 吴鹏¹,
梁家碧¹, 李晓涵¹, 黄熠隽², 胡程勇², 邓传鲁²

¹国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏南京 211103;

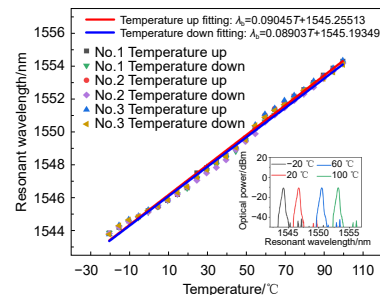
²上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

摘要: 针对光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 在温度测量应用中灵敏度低的问题, 本文提出了一种基于高热膨胀系数 EpoCore 胶裹覆 FBG 传感器的全新固化增敏方法。采用 COMSOL 软件构建 FBG 传感器模型, 并对其增敏前后的光栅栅区形变情况进行仿真, 结果表明 EpoCore 胶增敏使 FBG 传感器的形变量比增敏前提升约 10 倍。利用紫外曝光技术直接对铥锡共掺光纤进行 FBG 刻写, 并深入研究了 EpoCore 胶裹覆 FBG 传感器的固化工艺, 当以 120 °C 前烘 2 h, 紫外光照 5 h, 120 °C 后烘 3 h 时, EpoCore 胶固化增敏型 FBG 的谐振峰随温度漂移具有较好的线性度, 其温度灵敏度为 90.45 pm/°C, 相较未固化增敏的 FBG 传感器提升约 9 倍。采用该增敏型 FBG 传感器对 -20 °C、30 °C、60 °C 和 100 °C 的环境温度进行测量, 均方根差均小于 1.3 °C。与传统金属镀膜和聚合物镀膜封装方法相比, EpoCore 胶增敏效果更为显著, 这为 FBG 传感器在温度测量领域的应用提供新的思路。

关键词: 光纤布拉格光栅; EpoCore 胶; 固化增敏; 树脂套管; 温度灵敏度

中图分类号: TN253; TP212

文献标志码: A



李群, 陆云才, 邵剑, 等. 基于 EpoCore 胶裹覆的 FBG 传感器温度敏感性研究 [J]. 光电工程, 2024, 51(12): 240228

Li Q, Lu Y C, Shao J, et al. Research on temperature sensitivity of FBG sensor based on EpoCore adhesive coated [J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240228

Research on temperature sensitivity of FBG sensor based on EpoCore adhesive coated

Li Qun¹, Lu Yuncai^{1*}, Shao Jian¹, Wang Tonglei¹, Wu Peng¹, Liang Jiabi¹,
Li Xiaohan¹, Huang Yijun², Hu Chengyong², Deng Chuanlu²

¹Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103, China;

²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract: In response to the problem of low sensitivity of fiber Bragg grating (FBG) in temperature measurement applications, this paper proposes a new solidification sensitization method based on an EpoCore adhesive-coated FBG sensor with a high thermal expansion coefficient. A FBG sensor model was constructed using COMSOL software, and the deformation of the grating area before and after sensitization was simulated. The results showed that EpoCore adhesive sensitization increased the deformation of the FBG sensor by about 10 times compared to before sensitization. Using ultraviolet exposure technology to write FBG onto thulium tin co-doped optical fibers

收稿日期: 2024-09-27; 修回日期: 2024-11-19; 录用日期: 2024-11-19

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目 (J2023092)

*通信作者: 陆云才, sixhair@163.com。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

directly and conducting in-depth research on the solidification process of EpoCore-coated FBG sensors, the resonant peak of the solidified and sensitized FBG exhibits good linearity with temperature drift when baked at 120 °C for 2 hours, irradiated with ultraviolet light for 5 hours, and baked at 120 °C for 3 hours. The temperature sensitivity is 90.45 pm/°C, about 9 times higher than the unsolidified and unsensitized FBG sensor. The sensitized FBG sensor is used to measure environment temperatures of -20 °C, 30 °C, 60 °C and 100 °C, and the RMSE for these temperatures is less than 1.3 °C. Compared with traditional metal coating and polymer coating packaging methods, EpoCore adhesive has a more significant sensitization effect, which provides a new idea for the application of FBG sensors in temperature measurement.

Keywords: fiber Bragg grating; EpoCore adhesive; solidification sensitization; resin sleeve; temperature sensitivity

1 引言

在电力设备的长期超负荷运行过程中, 多种潜在性故障和时效性老化问题将不断加剧, 甚至可能演变为设备故障^[1]。当故障发生时, 通常会伴随着电力设备的异常升温^[2]。因此, 定期对电力设备内部进行温度检测和诊断分析是确保电力系统能够稳定且安全运行的必要措施。通过精确的温度检测, 可及时发现电力设备内部潜在的过热问题, 从而预防故障发生^[3]。光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 传感器因为具有低成本、抗电磁干扰能力强和优异的高温稳定性等特点, 被广泛应用于安全检测^[4]、海洋资源勘探^[5]、声波探测^[6]和测温测压^[7-9]等领域。然而, 常规普通单模 FBG 传感器的温度灵敏度仅为 10 pm/°C^[10]左右, 难以满足复杂环境下的温度测量需求。因此, 为提高 FBG 传感器的温度灵敏度, 需要对其进行增敏处理, 以适应更为复杂和多变的应用场景。

目前, FBG 传感器的增敏方法主要有金属结构镀膜封装法^[11]和聚合物镀膜封装法^[12]。金属结构镀膜封装法操作简便, 同时增强了 FBG 传感器的耐腐蚀性。2018年, Qu 等人^[13]在 FBG 传感器上电镀一层铜, 并用磁控溅射法制备碳膜包裹在 FBG 传感器上, 实验结果表明其温度灵敏度为 21.86 pm/°C, 并且具有良好的稳定性。2023年, Li 等人^[14]采用基片型封装结构对 FBG 传感器进行封装, 使用热膨胀系数较大的铝合金作为衬底, 封装后的 FBG 传感器的温度灵敏度为 27.3 pm/°C, 但其测量范围较小 (-20~40 °C), 不适用于高温环境下的测量。尽管金属结构镀膜封装的 FBG 传感器具有操作简便和耐腐蚀等优势, 但由于金属的导电性, 限制了其在电力设备内部温度检测中的应用。聚合物镀膜封装法是通过选用热膨胀系数较大的聚合物来提高传感性能。2012年, Sengupta

等人^[15]在低温条件下对 FBG 传感器进行了聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 涂覆处理, 由于 PMMA 无法和光纤表面很好的结合, 该传感器在 -196~30 °C 的范围内温度灵敏度为 39 pm/°C。2019年, Wei 等人^[16]利用 PDMS 胶涂敷 FBG 传感器, 涂敷过的 FBG 传感器反射光谱未发生失真, 且其温度灵敏度达到 79.5 pm/°C, 但 PDMS 胶的高黏度导致固化时间较长, 存在固化不完全的问题。这会造成反射谱的谐振偏移量变小, 达不到预期的增敏效果^[17]。环氧树脂裹覆的 FBG 传感器通常用于低温条件下的测量。2018年, Umesh 等人^[18]将 4,4'-二胺-二苯基甲烷与双酚 A 型二甘油酯环氧树脂按比例混合, 制备复合材料覆层的 FBG 传感器, 在 -180~25 °C 的范围内, 其温度灵敏度系数为 48 pm/°C, 但其玻璃化转变温度在 80 °C 左右, 难以实现高温测量。2021年, Cai 等人^[19]分别使用 E51 和 GRC 20 CM 两种不同类型的环氧树脂裹覆 FBG 传感器, 在 -153~55 °C 的范围内, 实现了 63.03 pm/°C 和 69.4 pm/°C 的温度灵敏度, 然而 E51 和 GRC 20 CM 稳定性较差, 实测误差最高达 18%。为解决电力设备内部温度检测的需求, 本研究选用电阻率较高的聚合物作为增敏材料。EpoCore 胶是一种价格低廉的紫外负性光刻胶, 常用于光波导制造, 具有出色的热稳定性 (最高可达 230 °C)。它具备低光学损耗 (在 850 nm 波长下损耗仅为 ~0.2 dB/cm)、高玻璃化转变温度 (>180 °C)、高电阻率 ($\geq 10^{10} \Omega \cdot m$) 和良好的化学稳定性等特点^[20], 使其成为 FBG 传感器增敏的理想选择。

本文在前人研究的基础上, 提出采用 EpoCore 胶对裸 FBG 传感器进行增敏封装的方案。使用 COMSOL 软件仿真分析增敏前后的 FBG 传感器光栅栅区形变情况。通过紫外线照射对封装后的 FBG 传感器进行固化处理, 显著提升了其温度灵敏度。经过

温度标定实验与实际温度测试, 验证了该方案的可行性和实用性, 为 FBG 传感器温度增敏封装提供了一种全新的技术路径与思路, 具有重要的应用价值。

2 FBG 温度传感原理

光纤的纤芯上刻有光纤布拉格光栅, 纤芯由包层包裹。当光入射到光纤光栅后, 光栅具有波长选择的功能, 能够将特定波长的光反射回来, 而其他波长的光则透射通过^[21], 如图 1 所示。

用谐振波长 λ_b 来表示该特定波长, 其关系式为^[22]

$$\lambda_b = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: n_{eff} 是光纤纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。当外界温度 T 和压力 ε 发生改变时, 会引起 n_{eff} 和 Λ 的变化, 导致谐振波长 λ_b 发生偏移^[23], 封装前的裸光纤光栅的谐振波长偏移量表达式为

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b[(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\varepsilon] = \lambda_b[K_T\Delta T + K_e\varepsilon], \quad (2)$$

式中: α 为光纤的热膨胀系数, ξ 为热光系数, P_e 为弹光系数, $K_T = \alpha + \xi$ 为温度灵敏度系数, $K_e = 1 - P_e$ 为应变灵敏度系数。

在将 FBG 传感器用于温度测量时, 首先需要消除外部压力的影响, 确保 FBG 传感器仅受温度的作用^[24]。忽略式 (2) 中和外部压力相关的 K_e 项, 则式 (2) 可以表示为

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b(\alpha + \xi)\Delta T = \lambda_b K_T \Delta T. \quad (3)$$

由式 (3) 可知, 提升 FBG 传感器的温度灵敏度系数 K_T 是实现温度增敏的关键。封装后的 FBG 传感器谐振波长偏移量可以表示为^[25]

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b[(1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) + (\alpha + \xi)]\Delta T, \quad (4)$$

式中: α_s 表示的是聚合物和基底共同作用的热膨胀系数。对应的温度灵敏度系数可以表示为^[26]

$$K'_T = \frac{\Delta\lambda_b}{\Delta T} = \lambda_b[(1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) + (\alpha + \xi)]. \quad (5)$$

将式 (1) 和应变灵敏度系数表达式 $K_e = 1 - P_e$ 代入式 (5) 可得:

$$K'_T = 2n_{\text{eff}}\Lambda[K_e(\alpha_s - \alpha) + (\alpha + \xi)]. \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 当温度发生变化时, 封装材料因热胀冷缩而产生应力, 进而引起光栅栅区长度的变化。同时, 光栅区域的材料微结构也会发生相应变化而造成光栅的折射率改变, 导致 FBG 传感器的谐振波长偏移量增加, 从而提高 FBG 传感器的温度灵敏度。

将光栅的性能参数 $\alpha = 0.55 \times 10^{-6}/\text{K}$, $\xi = 6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $P_e = 0.22$, $\lambda_b = 1545 \text{ nm}$ ^[27] 以及 EpoCore 胶的热膨胀系数 $\alpha_s = 6 \times 10^{-5}/\text{K}$ ^[28] 代入式 (4), 可得 $\lambda_b = 0.08223\Delta T + 1545$, 利用 MATLAB 对增敏 FBG 的谐振波长和温度变化关系进行仿真, 结果如图 2 所示, 温度灵敏度为 $82.23 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。

3 增敏 FBG 传感器仿真分析

为了更好地了解 EpoCore 胶对 FBG 传感器的增敏效果, 我们利用 COMSOL 软件构建了 FBG 仿真模型。光纤包层直径设为 $125 \mu\text{m}$, 纤芯直径为 $8 \mu\text{m}$, 有效折射率为 1.475。光栅数量设定为 120 个, 光栅周期设置为 500 nm , 整个栅区长度为 $60 \mu\text{m}$, 未增敏的 FBG 处于空气环境中, 如图 3(a) 所示; 而增敏的 FBG 外部包覆于厚度为 2 mm 的 EpoCore 胶 (其主要成分由环氧树脂构成), 其热膨胀系数设置为 $6 \times 10^{-5}/\text{K}$ ^[28], 如图 3(b) 所示。对 FBG 传感器在 60°C 下的形变情况进行仿真, 结果显示光栅栅区的位移约为 $0.0015 \mu\text{m}$, 如图 4(a) 所示; 而采用 EpoCore 胶增敏的 FBG 传感器在 60°C 下其光栅栅区相同位置处的位移增大至 $0.017 \mu\text{m}$, 形变量提升了约 10 倍, 如图 4(b) 所示, 图中颜色代表位移大小, 颜色越浅代表位移越大。

4 增敏 FBG 传感器制备及封装

本文采用紫外激光相位掩模板法制备 FBG 传感器^[29], 实验装置图如图 5 所示。所使用的光纤为实验室自制的具有光敏性的铋锡共掺石英光纤, 该光纤通过 MCVD 工艺与液相掺杂技术相结合的方式制备而成, FBG 制备时无需采用载氢操作。采用 193 nm 脉冲 ArF 准分子激光器 (MSX-250) 作为 FBG 的刻写光

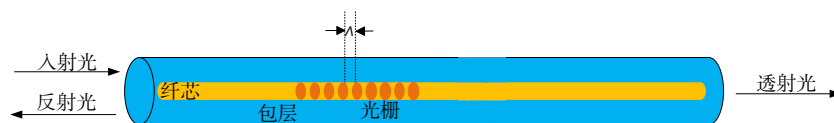


图 1 FBG 传感器原理图

Fig. 1 Principle of FBG sensor

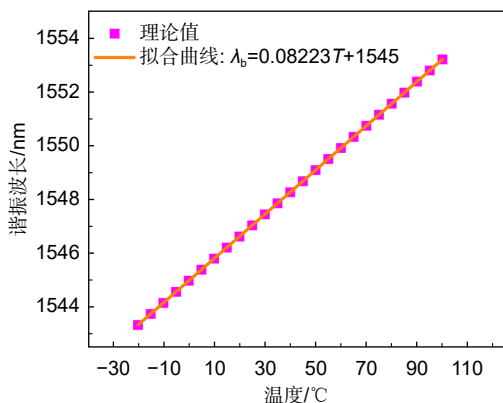


图 2 MATLAB 仿真增敏 FBG 的谐振波长和温度变化关系

Fig. 2 MATLAB simulation of the relationship between resonant wavelength and temperature changes of sensitized FBG

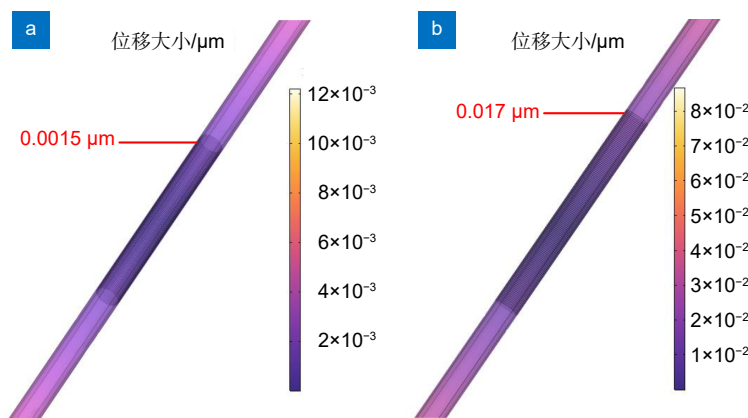


图 4 (a) 未增敏 FBG 传感器形变情况; (b) 增敏 FBG 传感器形变情况

Fig. 4 (a) Deformation of unsensitized FBG sensor; (b) Deformation of sensitized FBG sensor

源, 其单脉冲能量约为 8 mJ, 脉冲持续时间为 20 ms, 通过一个焦距为 75 mm 的圆柱形透镜聚焦, 在焦平面上形成约 (2×12) mm 的光斑。相位掩模板的周期为 (1070.03±0.02) nm, 其布拉格波长约为 1547.5 nm。调节光纤与相位板之间的距离为 3 mm, 经过 3000 个光脉冲刻写获得性能较好的 FBG。制备完成后, 对其进行退火处理, 降低光纤的内应力对测量结果的影响^[30]。

在 FBG 传感器制备完成后, 对其进行固化封装, 固化流程及参数如表 1 所示。

将制备好的 FBG 传感器进行封装, 为此我们设计并 3D 打印了树脂套管, 其主要由盖顶和盖底组成, 套管长 3 cm, 套管槽内径为 2 mm, 外径为 6 mm, 可耐受 180 °C。由于首次采用 EpoCore 胶增敏 FBG 传感器, 所以第 1 次实验参考 EpoCore 胶的相关说明进行加热固化。采用三维调整架将 FBG 精准移动到固定在加热台上的套管凹槽内, 用针管吸取 EpoCore 胶后缓慢注入树脂套管内, 加热至 120 °C 并保持 2 h, 直到 EpoCore 胶初步固化, 示意图如图 6(a) 所示。随

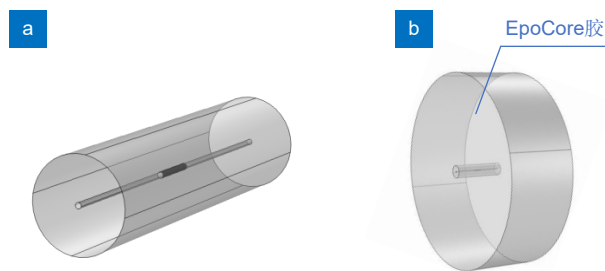


图 3 (a) FBG 模型; (b) EpoCore 胶增敏 FBG 模型

Fig. 3 (a) FBG model; (b) EpoCore adhesive sensitizing FBG model

后, 将树脂套管置于紫外线固化机中, 进行 1 h 的紫外照射, 促使 EpoCore 胶发生交联反应。紫外照射完成后, 再以 120 °C 温度后烘 1 h, 直至胶体完全固化, 树脂套管封装后的 EpoCore 胶增敏型 FBG 实物如图 6(b) 所示。

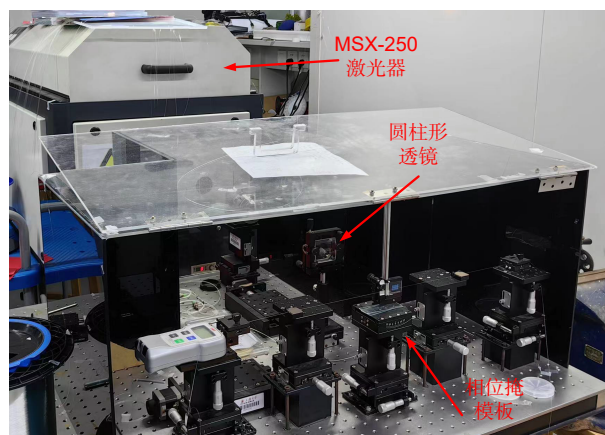


图 5 FBG 传感器制备装置图

Fig. 5 FBG sensor preparation device

表 1 固化流程及参数

Table 1 Solidification process and parameters

	前烘	紫外固化	后烘
第1次	120 °C, 2 h	1 h	120 °C, 1 h
第2次	/	4 h	120 °C, 2 h

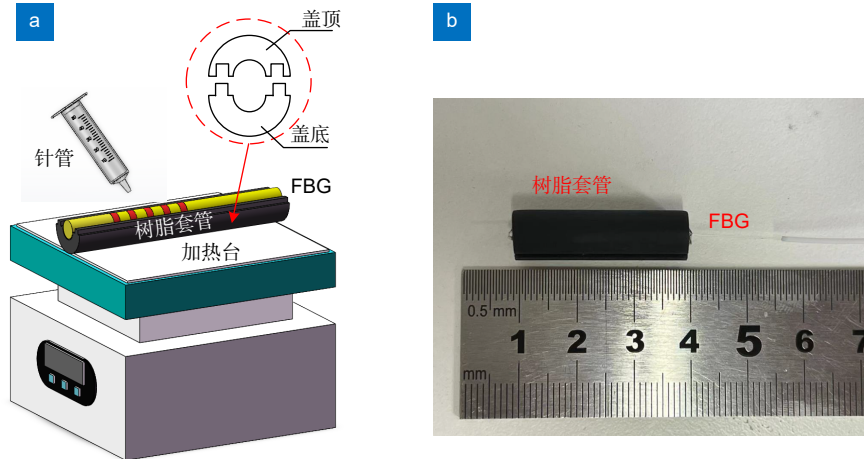


图 6 (a) FBG 传感器封装加热示意图; (b) 固化封装后的实物图

Fig. 6 (a) Diagram of packaging and heating FBG sensor; (b) Physical photo of solidification and packaging

对第 1 次固化的 FBG 传感器进行测试。将增敏的 FBG 传感器的一端连接光纤解调仪 (Si155, Micron Optics), 并将其置于温控箱内, 实验装置图如图 7 所示。设置温控箱的温度从 -20 °C 开始, 以 5 °C 为间隔逐步升温至 100 °C, 然后再以相同的温度间隔降温至 -20 °C, 连续测试 5 d, 其谐振波长随温度变化的实验结果如图 8(a) 所示。分别对升温 and 降温的 5 组数据进行拟合, 升温的温度灵敏度为 87.13 pm/°C, 降温为 88.13 pm/°C, 其线性拟合度均超过 0.994。然而,

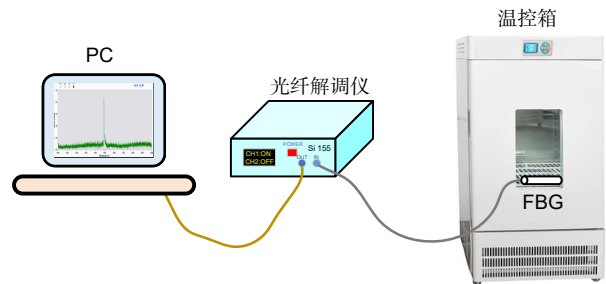


图 7 FBG 传感器温度标定装置图

Fig. 7 Temperature calibration device of FBG sensor

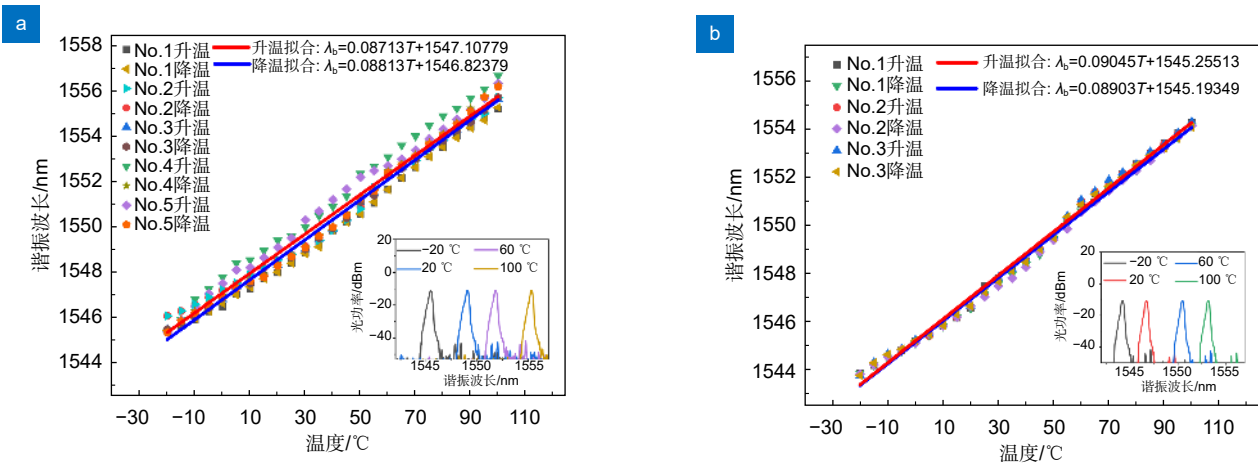


图 8 (a) 第 1 次固化后的 FBG 传感器温度标定; (b) 第 2 次固化后的 FBG 传感器温度标定

Fig. 8 (a) Temperature calibration of FBG sensor after the first solidification; (b) Temperature calibration of FBG sensor after the second solidification

5次升温和降温的谐振波长存在较大偏差, 即在不同时间测得的同一温度下的谐振波长偏移量存在较大差异, 例如, 60 °C 下的升温和降温的谐振波长与其拟合数据最大偏移量分别为 0.77 nm 和 0.44 nm。存在这种谐振波长较大偏移量主要原因在于极有可能是紫外照射时间不足, 导致 EpoCore 胶的交联反应未完全进行。

由此, 我们进行第 2 次紫外光照和温度固化实验。将 FBG 样品继续进行紫外光照 4 h, 再以 120 °C 加热 2 h。对传感器进行连续 3 d 的温度测试, 实验结果如图 8(b) 所示。图中表明, 升温的温度灵敏度为 90.45 pm/°C, 降温的温度灵敏度为 89.03 pm/°C, 该实验值与仿真值相近。线性拟合度均超过 0.996, 而且升温和降温的拟合曲线几乎重叠。产生温度灵敏度变化差异的主要原因是 FBG 传感器对于温度和应力应变的交叉敏感因素^[31]。在温度变化时, FBG 不仅因 EpoCore 胶热胀冷缩产生的应力使传感器温度灵敏度产生显著变化, 同时受到自身内应力的影响而使谐振波长发生轻微的偏移^[30]。升温过程的温度灵敏度与

降温过程的温度灵敏度相差不超过 1.6%, 总体而言误差较小, 具有较好的一致性。并且, 不同时间测得同一温度下的谐振波长偏移量变小, 例如, 60 °C 下的升温和降温的谐振波长与其拟合数据最大偏移量分别为 0.41 nm 和 0.36 nm。由此表明, 当 EpoCore 胶的固化工艺参数为 120 °C 前烘 2 h, 紫外光照 5 h, 120 °C 后烘 3 h 时, 其固化效果较好。

进一步地对未增敏的 FBG 进行温度实验, 其谐振波长漂移情况如图 9 所示。由图得知, 未增敏的 FBG 传感器升温和降温的温度灵敏度分别为 9.89 pm/°C 和 10.01 pm/°C。对比得知, EpoCore 胶增敏后的 FBG 传感器其温度灵敏度提高约 9 倍。将 EpoCore 胶的温度灵敏度提升情况与其他环氧树脂胶或聚合物作对比, 如表 2 所示。从表 2 可以直观看出, EpoCore 胶增敏 FBG 传感器的灵敏度提升效果显著。

为了直观展示 EpoCore 胶产生的应变对传感器性能的影响, 本文比较了 FBG 传感器在 25 °C 下不同阶段的谐振波长变化, 如图 10 所示。从图中可以看出, 随着 EpoCore 胶滴加后的固化反应进

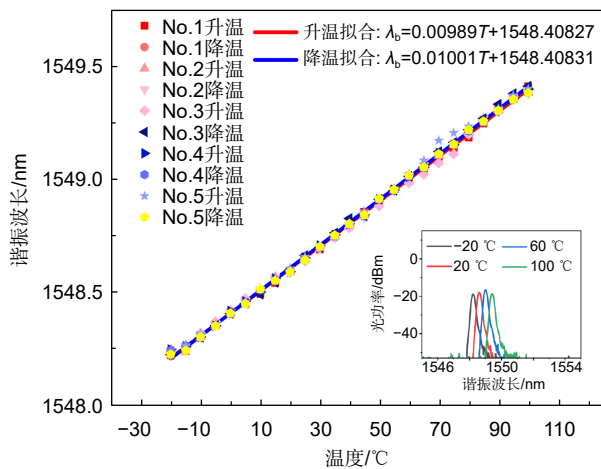


图 9 未增敏的 FBG 传感器温度标定

Fig. 9 Temperature calibration of unsensitized FBG sensor

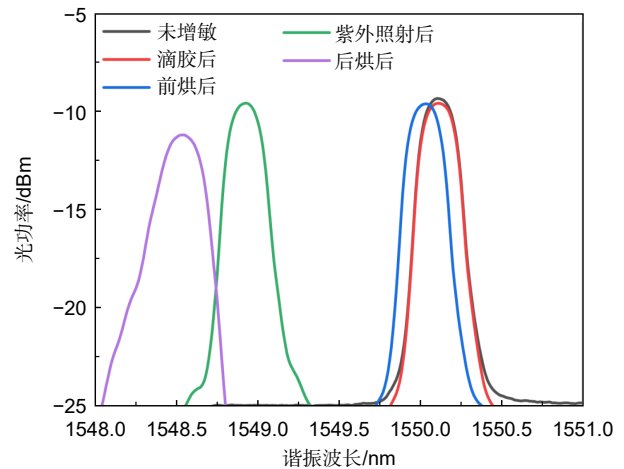


图 10 FBG 传感器不同阶段的谐振波长情况

Fig. 10 Resonance wavelength of FBG sensor at different stages

表 2 不同材料的温度灵敏度对比

Table 2 Comparison of temperature sensitivity of different materials

材料类型	温度灵敏度/(pm/°C)	材料特点
EpoCore	90.49	热稳定性可达230 °C, 玻璃化转变温度大于180 °C, 热膨胀系数为 6×10^{-5} /K
双酚A型二甘油酯 ^[19]	48	适用于-180~25 °C的FBG传感器增敏。热稳定性为200 °C, 玻璃化转变温度只有80 °C, 热膨胀系数为 4.5×10^{-5} /K左右
E51 ^[19]	63.03	适用于-153~55 °C的FBG传感器增敏。玻璃化转变温度小于120 °C, 热膨胀系数为 5×10^{-5} /K左右
GRC 20 CM ^[19]	69.4	适用于-153~55 °C的FBG传感器增敏。玻璃化转变温度小于150 °C, 热膨胀系数为 5×10^{-5} /K左右
PMMA ^[19]	39	适用于-196~30 °C的FBG传感器增敏。玻璃化转变温度在105 °C左右, 热膨胀系数为 6.1×10^{-5} /K, 但不能与光纤表面很好结合
PDMS ^[19]	79.5	热膨胀系数大, 为 1.2×10^{-4} /K, 但黏度高, 弹性模量较小, 为1 MPa

行, FBG 传感器的谐振波长逐渐减小 (未增敏时为 1550.1131 nm, 前烘后为 1550.0271 nm, 紫外照射后为 1548.9251 nm, 后烘后为 1548.3501 nm)。这是因为 EpoCore 胶对光栅施加的应变逐步增大。特别是紫外照射引发的交联反应, 对 EpoCore 胶的固化效果影响最大。

5 温度测试与结果分析

为了验证增敏 FBG 传感器的精确性和稳定性, 用光纤光栅测温系统进行温度测试。光纤光栅测温系统的示意图和实物图分别如图 11(a) 和图 11(b) 所示, 该系统由宽带光源、环形器、1×16 分路盒及 FBGA (fiber Bragg grating interrogation analyzer) (FBGA-IRS, BaySpec) 组成。宽带光经环形器后, 由 1×16 分路盒分成 16 路光通道, 每路光通道接不同谐振波长的 FBG 传感器 (可同时实现 16 点的温度测量), 由 FBG 传感器作用后的反射光再经环形器传输至 FBGA, FBGA 对其光学信号进行记录与解调^[32], 并将数据送至 PC 进行显示。

将增敏型 FBG 传感器放入温控箱中进行第 1 次温度测试, 温控箱温度分别设置为 30 °C 和 60 °C, 并在每个温度条件下分别采集 5 组数据, 采集的数据记录在表 3 中。计算可得, 30 °C 下温度测量平均值为 31.34 °C, 最大测量误差为 1.4 °C; 而 60 °C 下温

度测量为 60.12 °C, 最大测量误差为 0.2 °C。造成这种温度测量误差不一致的原因, 可能是光纤光栅测温系统中 FBGA 与温度标定时所使用的光纤解调仪之间的谐振波长存在轻微差异。

进一步验证增敏型 FBG 传感器的测量稳定性, 进行第 2 次温度测试。将温控箱温度分别设定为 -20 °C、30 °C、60 °C 和 100 °C, 涵盖增敏型 FBG 传感器的整个温度探测范围。每个温度分别采集 12 组数据, 采集间隔为 10 min, 实验结果如图 12 所示。-20 °C 和 30 °C 下测量的均方根差 (root mean square error, RMSE) 较高, 为 1.12 °C 和 1.3 °C, 而 60 °C 和 100 °C 下分别为 0.1 °C 和 0.05 °C, 显示出较高的测量稳定性。在 -20 °C 和 30 °C 时, RMSE 略高的主要原因是低温环境下温控箱内部风速较低, 热对流效率不足, 导致温度分布不均匀, 从而影响了测量精度。而在高温环境 (如 60 °C 和 100 °C) 下, 较高的风速促进了热对流, 使热量更快均匀地分布于整个温控箱内部, 从而降低了温度梯度, 显著提高了测量的稳定性^[33]。总体而言, 采用 EpoCore 胶固化增敏的 FBG 传感器测量误差较小, 且数据稳定性较高。

6 结论

本文针对 FBG 传感器温度灵敏度低的问题, 采用 EpoCore 胶对其进行增敏固化。利用 COMSOL 软

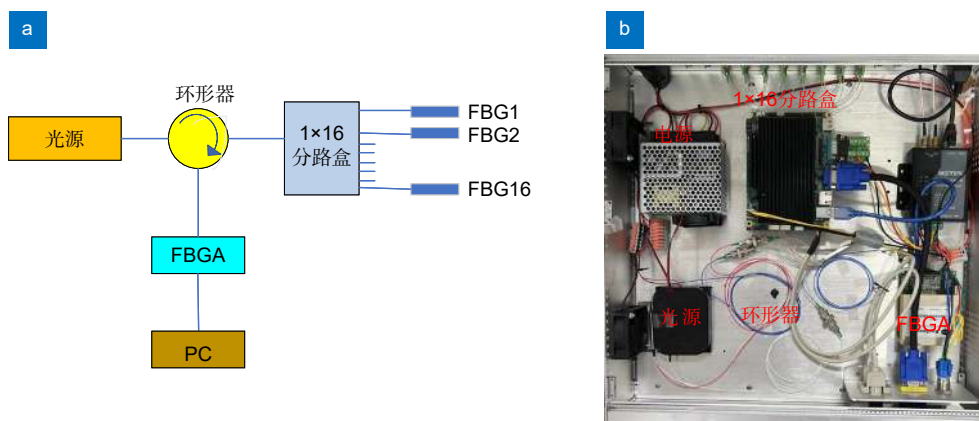


图 11 (a) 光纤光栅测温系统示意图; (b) 光纤光栅测温系统实物图

Fig. 11 (a) Diagram of fiber grating temperature measurement system; (b) Physical photo of fiber grating temperature measurement system

表 3 温度测量结果 (单位: °C)

Table 3 The first temperature measurement results (Unit: °C)

	1	2	3	4	5	平均值	最大测量误差
30	31.4	31.3	31.4	31.3	31.3	31.34	1.4
60	60.2	60.2	60.1	60.2	59.9	60.12	0.2

件仿真分析了 FBG 传感器增敏前后的光栅栅区形变情况。仿真结果显示, EpoCore 胶增敏使 FBG 传感器的形变量提升了约 10 倍。通过紫外线照射对 EpoCore 胶进行增敏固化, 并对增敏后的 FBG 传感器温度灵敏度进行了研究。对比增敏前后的温度灵敏度, 结果显示增敏处理使其灵敏度提升了约 9 倍。测量结果表明, 当 EpoCore 胶的固化工艺参数为 120 °C 前烘 2 h, 紫外光照 5 h, 120 °C 后烘 3 h 时, 增敏的 FBG 传感器温度灵敏度高且稳定性好。升温过程中的温度灵敏度为 90.45 pm/°C, 降温过程为 89.03 pm/°C, 曲线拟合度均超过 0.996。此外, 在 -20 °C、30 °C、60 °C 和 100 °C 的环境温度下进行测量, 均方根差均小于 1.3 °C, 验证了增敏后 FBG 传感器的精确性和稳定性。本文制备的增敏型 FBG 传感器组件均为绝缘材料, 在电力设备内部温度检测领域中具有广泛的应用前景。

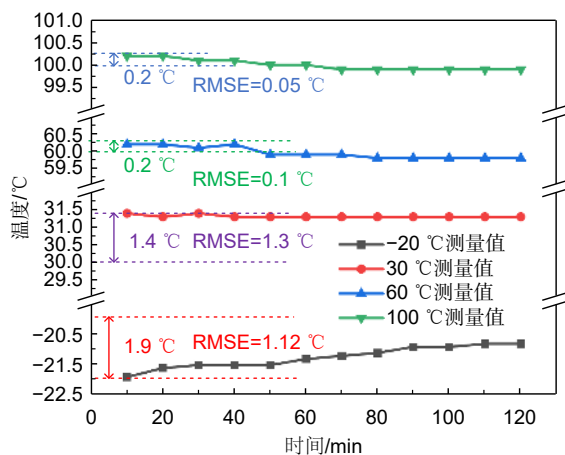


图 12 FBG 温度稳定性测量结果

Fig. 12 The measurement result of temperature stability

参考文献

- [1] Song D G. Research on abnormal operation and accident handling strategies of power equipment[J]. *China Plant Eng*, 2017, (20): 192-193.
宋大高. 电力设备异常运行及事故处理策略研究[J]. *中国设备工程*, 2017, (20): 192-193.
- [2] Jiang X M. Research on thermal fault diagnosis method of substation equipment based on deep learning[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
<https://doi.org/10.27010/d.cnki.gdbnu.2022.000519>.
蒋熙铭. 基于深度学习的变电设备热故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
<https://doi.org/10.27010/d.cnki.gdbnu.2022.000519>.
- [3] Yang F, Zhang L, Li C H, et al. High precision temperature monitoring of substation equipment based on NaErF₄@NaYF₄ upconversion material[J]. *J Synth Cryst*, 2024, 53 (8): 1434-1442.
- [4] Chen D Y, Zhao Q, Zheng Y, et al. Recent progress in lithium-ion battery safety monitoring based on fiber bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2023, 23 (12): 5609.
- [5] Riza M A, Go Y I, Harun S W, et al. FBG sensors for environmental and biochemical applications—a review[J]. *IEEE Sens J*, 2020, 20 (14): 7614-7627.
- [6] Shi L, Tu X H, Shan Z Y, et al. Research on acoustic sensing of fiber Bragg grating based on edge filter detection[J]. *Study Opt Commun*, 2023, (2): 40-44.
石磊, 涂兴华, 单正友, 等. 基于边缘滤波法检测的光纤光栅声传感研究[J]. *光通信研究*, 2023, (2): 40-44.
- [7] Zhang Y J, Gao H C, Zhang L T, et al. Embedded gold-plated fiber Bragg grating temperature and stress sensors encapsulated in capillary copper tube[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48 (3): 200195.
张燕君, 高海川, 张龙图, 等. 毛细铜管封装的内嵌式镀金光纤布拉格光栅温度和应力传感器[J]. *光电工程*, 2021, 48 (3): 200195.
- [8] Yao G Z, Yin Y M, Li Y Q, et al. Summary of research on high precision fiber grating wavelength demodulation method[J]. *Study Opt Commun*, 2021, (4): 41-49.
姚国珍, 尹伊萌, 李永倩, 等. 高精度光纤光栅波长解调方法研究综述[J]. *光通信研究*, 2021, (4): 41-49.
- [9] Ding C, Dai S, Huang Y L. Study on fiber Bragg grating pressure sensors[J]. *Study Opt Commun*, 2010, (6): 46-47.
丁超, 代森, 黄勇林. 光纤布拉格光栅压力传感器的研究[J]. *光通信研究*, 2010, (6): 46-47.
- [10] Nandi S, K C, Srinivas T, et al. Investigation on FBG based optical sensor for pressure and temperature measurement in civil application[J]. *Optoelectron Lett*, 2024, 20 (9): 531-536.
- [11] Ramalingam R, Atrey M D. Theoretical analysis and coating thickness determination of a dual layer metal coated FBG sensor for sensitivity enhancement at cryogenic temperatures[J]. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng*, 2017, 278: 012075.
- [12] Dang W J, Li Z R, Dan J X, et al. High sensitivity fiber Bragg grating (FBG) sensor based on hollow core silica tube (HCST) sensitization for gas pressure and temperature discrimination[J]. *Opt Fiber Technol*, 2023, 75: 103202.
- [13] Qu Y P, Wang W J, Peng J K, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor based on metalized optical fiber grating for marine temperature monitoring[C]//2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks, Wuzhen, China, 2017: 1-3.
<https://doi.org/10.1109/ICOCN.2017.8121293>.
- [14] Hong L, Wang J Y, Cai J X, et al. Substrate-type sensitized FBG temperature sensor[J]. *Sens Rev*, 2023, 43 (2): 83-91.
- [15] Sengupt D, Shankar M S, Reddy P S, et al. An improved low temperature sensing using PMMA coated FBG[C]//2011 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, Shanghai, China, 2011: 1-5.
<https://doi.org/10.1117/12.904606>.
- [16] Wei H W, Xu N. High sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Opt Commun Technol*, 2019, 43 (5): 1-4.
- [17] Nedoma J, Fajkus M, Bednarek L, et al. Encapsulation of FBG sensor into the PDMS and its effect on spectral and

- temperature characteristics[J]. *Adv Electr Electron Eng*, 2016, **14** (4): 460–466.
- [18] Sampath U, Kim D, Kim H, et al. Polymer-coated FBG sensor for simultaneous temperature and strain monitoring in composite materials under cryogenic conditions[J]. *Appl Opt*, 2018, **57** (3): 492–497.
- [19] Cai Z J, Song H, Zhang Z Y, et al. Cryogenic temperature characteristics of thermosetting epoxy resins coated FBG sensors[C]//2021 IEEE Sensors Applications Symposium, Sundsvall, Sweden, 2021: 1–5.
<https://doi.org/10.1109/SAS51076.2021.9530153>.
- [20] Micro Resist Technology GmbH. EpoCore/EpoClad datasheet[EB/OL]. [2016]. <http://www.microresist.de>.
- [21] Jia Z A, Shi X Y, Yu D K, et al. Research on sensitization method for fiber Bragg grating temperature sensing[J]. *Infrared*, 2023, **44** (11): 31–35.
贾振安, 史小宇, 禹大宽, 等. 光纤光栅温度传感增敏方法研究[J]. *红外*, 2023, **44** (11): 31–35.
- [22] Irawan D, Ramadhan K, Saktioto T, et al. An optimum design of high sensitivity PMMA-coated FBG sensor for temperature measurement[J]. *TELKOMNIKA (Telecommun Comput Electron Control)*, 2023, **21** (2): 382–389.
- [23] Chen J L, Wang J H, Li X Y, et al. Monitoring of temperature and cure-induced strain gradient in laminated composite plate with FBG sensors[J]. *Compos Struct*, 2020, **242**: 112168.
- [24] Liang Z H, Wang X, Ma Y L, et al. Dual-FBG arrays hybrid measurement technology for mechanical strain, temperature, and thermal strain on composite materials[J]. *Phys Scr*, 2023, **98** (11): 115515.
- [25] Liu M Y, Zhang W W, Song H. Study on temperature sensing characteristics of fbg in low temperature environment[J]. *Semicond Optoelectron*, 2022, **43** (2): 327–331.
刘明尧, 张伟伟, 宋涵. 低温环境下 FBG 温度传感特性研究[J]. *半导体光电*, 2022, **43** (2): 327–331.
- [26] Cai Y, Zhang B B, Wang J Y, et al. Research on a bimetallic-sensitized FBG temperature sensor[J]. *Rev Sci Instrum*, 2023, **94** (3): 035010.
- [27] Han X X, Yuan L, Fan L L, et al. The influence of thermal expansion coefficient of FBG packaging material on temperature sensing accuracy[J]. *Semicond Optoelectron*, 2019, **40** (3): 375–379.
韩笑笑, 员琳, 樊琳琳, 等. FBG 封装材料热膨胀系数对温度传感精度的影响[J]. *半导体光电*, 2019, **40** (3): 375–379.
- [28] Meyer J, Nedjalkov A, Kelb C, et al. Manufacturing and characterization of femtosecond laser-inscribed Bragg grating in polymer waveguide operation in an IR-A wavelength range[J]. *Sensors*, 2020, **20** (1): 249.
- [29] Gu H C, Yao G F, Huang J B, et al. Fabrication of weak fiber Bragg grating with conventional fiber based on phase mask[J]. *Laser Technol*, 2022, **46** (2): 149–154.
顾宏灿, 姚高飞, 黄俊斌, 等. 基于相位掩模板的常规光纤制备弱反射光栅[J]. *激光技术*, 2022, **46** (2): 149–154.
- [30] Wang J J, He L, Gu L W, et al. Improvement of the effect of internal stress in optical fibers on attenuation of low loss single-mode optical fibers[J]. *Opt Fiber Electr Cable Their Appl*, 2020, (1): 31–32,35.
王建江, 何霖, 顾灵卫, 等. 光纤内应力对低损耗单模光纤衰减影响的改善[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2020, (1): 31–32,35.
- [31] Zhang D P, Zheng Y, Wang J, et al. Investigation of cross-sensitivity of fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *J Atmos Environ Opt*, 2016, **11** (3): 226–233.
张登攀, 郑艳, 王璠, 等. FBG 温度传感器交叉敏感问题的研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2016, **11** (3): 226–233.
- [32] Xiao Z X. Demodulation of fiber Bragg grating based on FBGA and research on strain monitoring[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2019.
<https://doi.org/10.27790/d.cnki.gahgy.2019.000678>.
肖正兴. 基于 FBGA 的光纤光栅解调及应变监测研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
<https://doi.org/10.27790/d.cnki.gahgy.2019.000678>.
- [33] Guo J M, Wu X D, Lin S T, et al. Parameter optimization on convective heat transfer of cold plate for cold storage temperature control box based on multi-parameter coupling[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2021, **37** (19): 228–235.
郭嘉明, 吴旭东, 林诗涛, 等. 基于多参数耦合的蓄冷温控箱冷板对流换热参数优化[J]. *农业工程学报*, 2021, **37** (19): 228–235.

作者简介



李群 (1967-), 男, 博士, 研究员, 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院副院长、国家电网首席专家, 主要从事光纤传感技术, 电力设备状态监测、电力系统运行优化等研究工作, 负责国家“863”自然科学基金、省部级项目 30 项, 作为第一完成人获国家级奖 2 项、省部级奖 27 项。

E-mail: qun_li@sina.com



【通信作者】陆云才 (1982-), 男, 硕士, 正高级工程师, 现就职于国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 主要从事光纤传感技术、电力设备状态监测等研究工作。

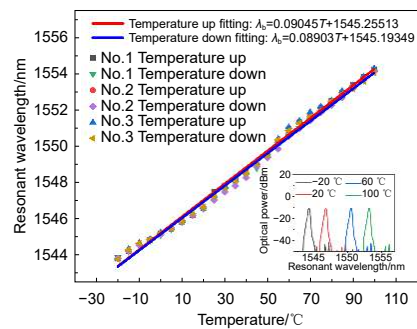
E-mail: sixhair@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on temperature sensitivity of FBG sensor based on EpoCore adhesive coated

Li Qun¹, Lu Yuncai^{1*}, Shao Jian¹, Wang Tonglei¹, Wu Peng¹, Liang Jiabi¹, Li Xiaohan¹,
Huang Yijun², Hu Chengyong², Deng Chuanlu²



Temperature calibration of FBG sensor after the second solidification

Overview: The temperature detection inside power equipment requires high-temperature sensitivity to prevent faults promptly. Fiber Bragg grating (FBG) sensors are widely used in temperature detection due to their low cost, strong resistance to electromagnetic interference, and excellent high-temperature stability. However, the temperature sensitivity of conventional single-mode FBG sensors is only around 10 pm/°C, which makes it challenging to meet the temperature measurement requirements in complex environments. Therefore, to improve the temperature sensitivity of FBG sensors, it is necessary to perform sensitization processing to adapt to more complex and diverse application scenarios. Currently, the sensitization methods for FBG sensors mainly include the metal structure coating method and polymer coating packaging methods. The metal structure coating packaging method is easy to operate and enhances the corrosion resistance of FBG sensors. However, due to the good conductivity of metals, their application in temperature detection inside power equipment is limited. This study aimed to meet the demand for temperature detection inside power equipment and selected polymers with high electrical resistivity as sensitizing materials. Based on the advantages of low optical loss, high resistivity, and good chemical stability of EpoCore adhesive, EpoCore adhesive is used for the solidification and sensitization of the FBG sensors. The FBG sensor model was constructed by COMSOL software, and the deformation of the grating region before and after the sensitization was simulated. The simulation results show that the deformation of FBG sensor is improved by about 10 times by EpoCore adhesive sensitization. The FBG sensor was prepared using the UV laser phase mask method, and the completed FBG sensor was placed inside a resin sleeve made by 3D printing. Conducting in-depth research on the solidification process of EpoCore-coated FBG sensors, the resonant peak of the solidified and sensitized FBG exhibits good linearity with temperature drift when baked at 120 °C for 2 hours, irradiated with ultraviolet light for 5 hours, and baked at 120 °C for 3 hours. The temperature sensitivity is 90.45 pm/°C, about 9 times higher than the unsensitized FBG sensor. In addition, temperature tests conducted using a fiber grating temperature measurement system at -20 °C, 30 °C, 60 °C, and 100 °C, and the RMSE for these temperatures is less than 1.3 °C, which are verified the accuracy and stability of the sensitized FBG sensor. This article uses EpoCore adhesive to solidify and enhance the sensitivity of FBG sensors, and its effect is significantly better than traditional metal coating packaging and polymer coating packaging methods, providing a new idea for applying FBG sensors in the field of temperature measurement.

Li Q, Lu Y C, Shao J, et al. Research on temperature sensitivity of FBG sensor based on EpoCore adhesive coated[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(12): 240228; DOI: 10.12086/oe.2024.240228

Foundation item: Project supported by Funding State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Technology Project (J2023092)

¹Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211103, China; ²Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

* E-mail: sixhair@163.com