

超低温下FBG温度传感器封装设计与性能分析

李航驹, 廖帮全*, 侯晓敏, 贺克勉

天津工业大学物理科学与技术学院, 天津

收稿日期: 2026年5月13日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月13日

摘要

随着航空航天、超导技术及大型低温工程等领域的快速发展, 超低温环境下的精确温度测量需求愈发迫切。传统电学式温度传感器易受电磁干扰、难以实现多点分布式测量, 应用受限。光纤布拉格光栅(FBG)传感器具有本质抗电磁干扰、体积小、耐腐蚀等优势, 是极端环境测量的理想选择, 但在低于100 K的超低温条件下, 其温度灵敏度显著衰减, 制约了实际应用。本研究针对上述核心挑战, 提出6063型毛细铝管与E-200耐低温环氧树脂协同封装方案, 设计 1.5×0.2 mm、 1.5×0.25 mm两种规格对比实验; 采用 2×2 熔锥型3 dB光纤耦合器实现低成本、稳定的反射式FBG传感。在 -190°C 至 0°C 温区, 借助多孔真空硅控温与热电偶标定开展三次升温循环实验。结果表明: 两种封装FBG线性拟合度均达0.97以上, 温度灵敏度分别为裸FBG的2.5倍、3倍以上, 其中 1.5×0.25 mm规格因更强的热膨胀驱动力与更均匀的应力分布, 灵敏度更优。本研究显著提升了FBG传感器在超低温环境下的综合传感性能, 为其在超低温工程中的实际部署提供了理论与技术支持。

关键词

光纤传感, 光纤布拉格光栅, 超低温, 温度传感器

Encapsulation Design and Performance Analysis of FBG Temperature Sensors under Ultra-Low Temperature

Hangju Li, Bangquan Liao*, Xiaomin Hou, Kemian He

School of Physical Science and Technology, Tiangong University, Tianjin

Received: May 13, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 13, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李航驹, 廖帮全, 侯晓敏, 贺克勉. 超低温下 FBG 温度传感器封装设计与性能分析[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 659-667. DOI: 10.12677/jsta.2026.144064

Abstract

With the rapid development of aerospace, superconducting technology and large-scale cryogenic engineering, the demand for precise temperature measurement in ultra-low temperature environments has become increasingly urgent. Traditional electrical temperature sensors are susceptible to electromagnetic interference and difficult to achieve multi-point distributed measurement, which limits their applications. Fiber Bragg Grating (FBG) sensors feature inherent anti-electromagnetic interference, small size and corrosion resistance, making them ideal for extreme environment measurements. However, their temperature sensitivity decreases significantly at ultra-low temperatures below 100 K, restricting practical applications. To address these core challenges, this study proposes a collaborative encapsulation scheme using 6063-type capillary aluminum tubes and E-200 cryogenic-resistant epoxy resin, and designs comparative experiments with two specifications (1.5×0.2 mm and 1.5×0.25 mm). A 2×2 fused-taper 3 dB fiber coupler is adopted to realize low-cost and stable reflective FBG sensing. Three heating cycle experiments are conducted in the temperature range of -190°C to 0°C , with porous vacuum silicon for temperature control and thermocouples for calibration. The results show that both encapsulated FBGs exhibit a linear fitting degree above 0.97, with temperature sensitivities 2.5 times and 3 times higher than that of the bare FBG, respectively. The 1.5×0.25 mm specification delivers superior sensitivity due to stronger thermal expansion driving force and more uniform stress distribution. This study significantly improves the comprehensive sensing performance of FBG sensors in ultra-low temperature environments, providing theoretical and technical support for their practical deployment in cryogenic engineering.

Keywords

Optical Fiber Sensing, Fiber Bragg Grating, Ultra-Low Temperature, Temperature Sensor

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着航空航天[1]、超导技术[2]以及大型低温工程[3]等领域的迅猛发展,对超低温环境下的精确温度测量需求日益迫切。传统的电学式温度传感器(如铂电阻、热电偶)在超低温条件下易受电磁干扰和引线电阻影响,且难以实现多点分布式测量,其应用受到严重限制[4]。光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种新型的光纤传感元件,凭借其本质抗电磁干扰、体积小、质量轻、耐腐蚀、易于实现准分布式测量等显著优势,被视为实现极端环境下安全、可靠、多参数感知的理想技术之一[5]。因此,深入研究 FBG 在超低温环境下的温度传感特性,对推动尖端装备的智能化监测与安全运行具有重要的理论意义和工程价值。

自 1978 年 Hill 等人发现光纤布拉格光栅(FBG)以来[6],基于二氧化硅的 FBG 传感器已在多个领域得到广泛应用。与传统的电子传感器相比,FBG 传感器具有本质抗电磁干扰、耐腐蚀、适于恶劣环境等显著优势,因此在多种工业测量场景中成为可靠选择[7]。

目前,针对极端低温环境下光纤布拉格光栅(FBG)传感器的温度检测研究已取得显著进展。早在上世纪 90 年代,美国研究人员便尝试将 FBG 封装于铝(Al)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚四氟乙烯(Teflon)等高热膨胀系数材料的基底中,显著提升了其在低温下的灵敏度[8]。Lupi 等人进一步对光栅进行了铜、

锌、铅的表面金属化封装,并与裸光栅进行了对比实验,结果发现在 -268.8°C 至 -233°C 的极低温区间,金属化 FBG 的温度灵敏度显著提高。Vivekanand Mishra 等人则通过在 FBG 表面镀覆钢、铜、铝以及聚甲基丙烯酸甲酯,在 -233°C 至 27°C 的宽低温范围内开展实验,并将测试结果与理论模型仿真进行对比,验证了封装对性能的增强效果[9]。

本研究旨在针对光纤布拉格光栅在超低温环境下应用时所面临的核心挑战——温度灵敏度显著衰减问题,开展系统的实验研究与分析。通过设计一种新颖的传感器封装结构,并对其进行全面的性能表征,以期显著提升 FBG 传感器在超低温条件下的综合传感性能。此外通过采用 2×2 光纤耦合器实现反射式光纤光栅传感,以扩展传感器应用场景,为传感器在超低温工程中的实际部署提供更灵活的信号处理与应用方案。

2. FBG 温度传感原理

光纤布拉格光栅是在掺铈(光敏)单模光纤的纤芯中,通过特定方法写入的、具有均匀周期性折射率调制的结构。其核心工作原理是满足光的能量守恒与动量守恒(相位匹配)条件,由此产生的波长选择性反射现象,即为布拉格光栅条件:

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

式中 λ_B 为 Bragg 中心波长、 Λ 为光栅周期、 n_{eff} 为纤芯有效折射率。

光纤布拉格光栅的反射波长对外界环境变化(如温度与应变)极为敏感。当温度及应力等参量变化时,光栅周期 Λ 与纤芯有效折射率 n_{eff} 均会发生改变。这一方面源于材料本身的热膨胀效应,另一方面则因为:纤芯的热膨胀会受到外包层的抑制,从而在纤芯内部产生等效的压缩应力。该应力通过弹光效应导致折射率发生变化,同时也会影响热光系数[10]。因此,忽略其他参量的影响,仅考虑外界轴向应力 ε_z 和温度 T 对 FBG 的影响,此时其关系可表述为[11]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_{ei})\varepsilon_z + (\gamma + \alpha)\Delta T \quad (2)$$

式中: P_{ei} 是 FBG 应变灵敏度系数,对于石英光纤一般为 0.22; α 是光纤材料的热膨胀系数,通常为 $d = 0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; γ 是热 - 光系数(即折射率随温度的变化率),一般为 $6.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

如图 1 所示该系统由宽带光源、3 dB 光纤耦合器、FBG 与光谱仪组成。宽带光源输出的宽谱光经光纤传输至耦合器,随后入射至包含 FBG 的传感光纤中;满足布拉格匹配条件的特定波长光被 FBG 反射,沿原光路返回并经耦合器导入光谱仪,其余波长光则继续透射传输。光谱仪通过检测反射光的中心波长偏移量,实现对温度、应变等物理量的高精度解调与监测。

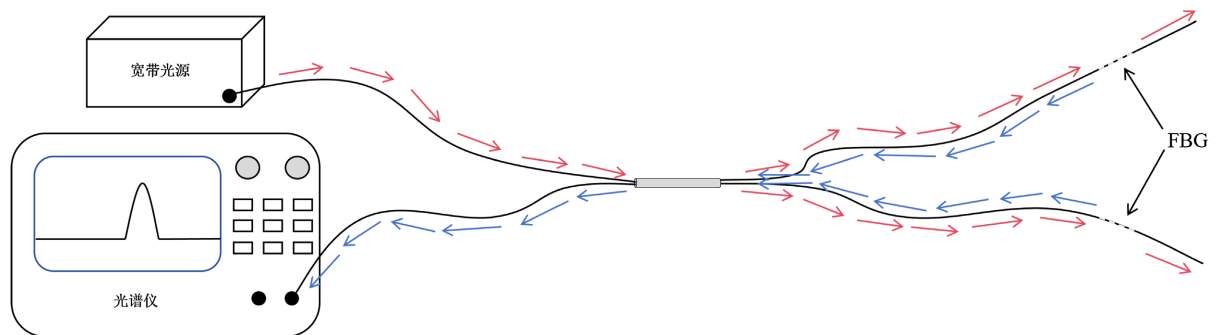


Figure 1. Schematic of reflective FBG sensing with a 2×2 fiber coupler

图 1. 利用 2×2 光纤耦合器实现反射式光纤布拉格光栅传感原理图

3. 模具设计及实验装置

3.1. 光栅准备

本研究采用 2×2 熔锥型 3 dB 光纤耦合器实现反射式光纤光栅传感。传统的光纤环形器实现光纤光栅传感价格昂贵, 如图 2 所示, 2×1 熔锥型 3 dB 光纤耦合器形成的光谱不平滑, 如图 3 所示, 利用两根中心波长分别为 1550 nm 和 1560 nm 的布拉格光栅及 2×2 熔锥型 3 dB 光纤耦合器可实现低成本且稳定的反射式光纤光栅传感, 这主要是源于 2×2 熔锥型 3 dB 耦合器在通信波段的分光比具有良好的波长平坦性, 不会出现某一波长被过度衰减的情况, 确保两束反射光的强度稳定, 光谱基线平滑。

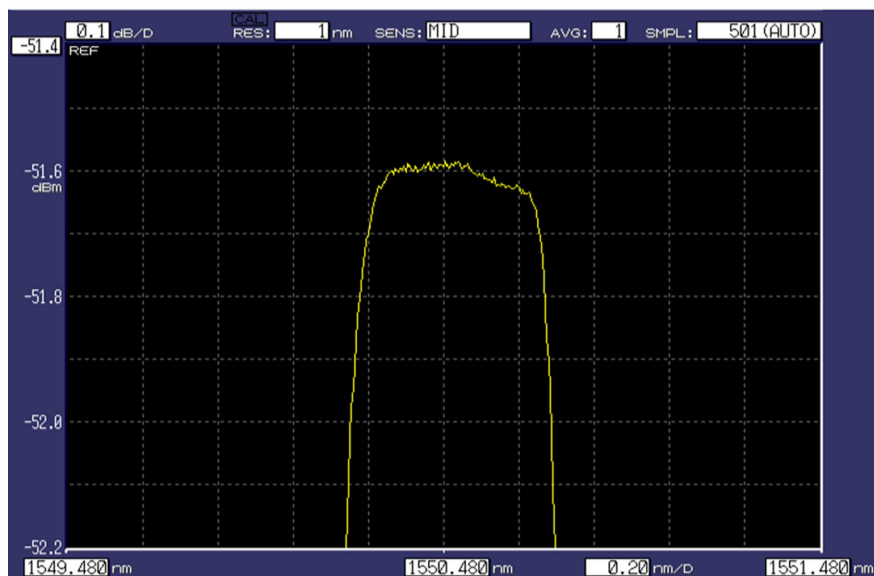


Figure 2. Spectrum of 2×1 3 dB fiber coupler

图 2. 2×1 型 3 dB 耦合器形成的光谱图

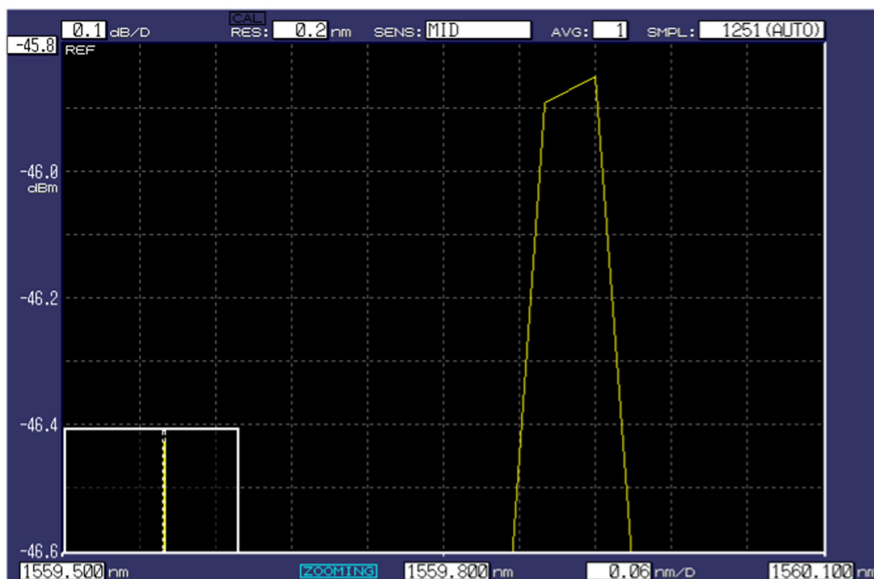


Figure 3. Spectrum of 2×2 3 dB fiber coupler

图 3. 2×2 型 3 dB 耦合器形成的光谱图

3.2. 模具设计及实验流程

本文选取中心波长为 1550 nm 的光纤布拉格光栅, 将其分别嵌入两种不同尺寸的 6063 型铝合金管中, 两种铝合金管尺寸分别为 (1.5 mm × 0.2 mm × 3 cm)、(1.5 mm × 0.25 mm × 3 cm), 并灌注耐低温环氧树脂结构胶, 封装形成一体化的 FBG 温度传感器; 同时, 将中心波长为 1560 nm 的 FBG 置入紫铜管(尺寸: 3 mm × 0.2 mm × 5 cm)内, 并在紫铜管两端填充环氧树脂并施加预应力, 以保证 FBG 处于悬空且无机械应力状态, 以确保光谱仪的检测出的波形更加稳定。为减缓温度变化速率、减小热传导影响, 采用多孔真空硅材料作为隔热介质, 整体封装结构与流程见图 4。将两段封装后的 FBG 传感器与热电偶探头共同置于多孔真空硅(尺寸: 5 cm × 5 cm × 2.8 mm)内部。为获取 FBG 反射峰波长随温度的变化关系, 将整个组件缓慢浸入真空保温盒的液氮中, 使其迅速与低温环境达到热平衡; 待温度稳定后, 再将组件移置于真空保温盒中高于液氮但低于盒高的铝质平台中, 该平台并未直接浸入液氮, 而是悬置于液氮上方, 因此其温度高于液氮温度, 但远低于室温。组件与平台接触后, 热量通过固体接触导热由平台传递至组件, 换热强度远弱于组件直接浸没在液氮中。组件从 77 K 开始, 通过与平台的接触导热缓慢吸热, 温度平稳上升, 可有效避免剧烈温度波动与热冲击。基于此, 连续记录升温过程中 FBG 反射峰波长的偏移情况。

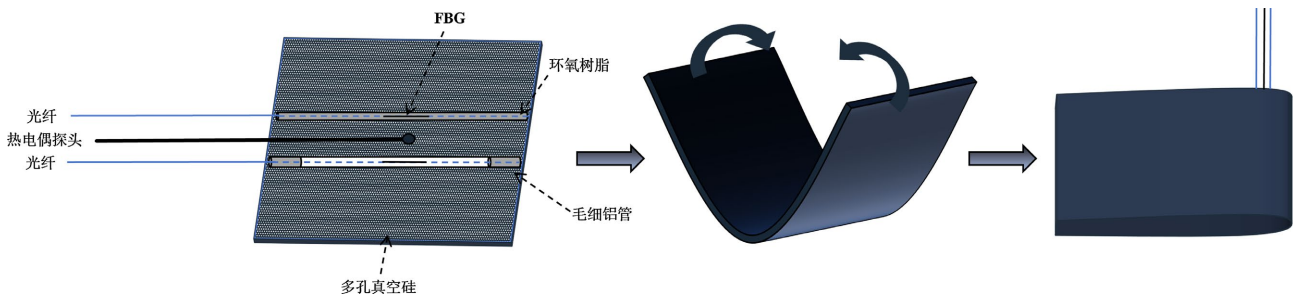


Figure 4. Packaged dual FBG sensors and thermocouple probes in porous vacuum silicon

图 4. 两段封装后的 FBG 传感器与热电偶探头置于多孔真空硅中

4. 结果与讨论

低温光纤传感器相比电子传感器的一个重要优势是在极低温环境下具备优异的性能稳定性, 无低温漂移或失效风险。图 5 显示了在超低温环境下 FBG 温度传感器的实验室原型。封装后 FBG 的热光系数并没有改变, 但 FBG 和铝合金管封装在一起, 铝合金管的热膨胀系数很大, 当温度发生变化时, 铝合金管膨胀, FBG 会受到拉应力, 长度发生变化, 增大了中心波长的漂移, 起到温度增敏的作用。实验过程中, 首先将三根封装完成的 FBG 传感探头分别进行三次连续升温循环, 利用光谱仪同步记录各探头的波长漂移数据, 最后对每组数据进行线性拟合, 得到波长 - 温度响应曲线图。

图 6 是将三组数据进行拟合得到的曲线图。设三组数据的线性拟合优度、数据的横纵坐标、温度灵敏度分别为 R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 、 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 、 x_3 、 y_3 、 K_{T1} 、 K_{T2} 、 K_{T3} , 可以得到如下的拟合公式:

$$y_1 = 1549.71 + 0.01945x_1 \quad (3)$$

$$y_2 = 1549.75 + 0.01787x_2 \quad (4)$$

$$y_3 = 1549.74 + 0.0184x_3 \quad (5)$$

三条直线的线性拟合度分别为 $R_1^2 = 0.998$, $R_2^2 = 0.978$, $R_3^2 = 0.991$, FBG 的温度灵敏度可以通过直线斜率获得: $K_{T1} = 19.45$ pm/K, $K_{T2} = 17.87$ pm/K, $K_{T3} = 18.4$ pm/K, 裸 FBG 数据的线性拟合度表现优异, 得益于其包裹在多孔真空硅结构中, 温度灵敏度较单独裸光栅显著提升, 约为裸光栅的 1.7 倍;

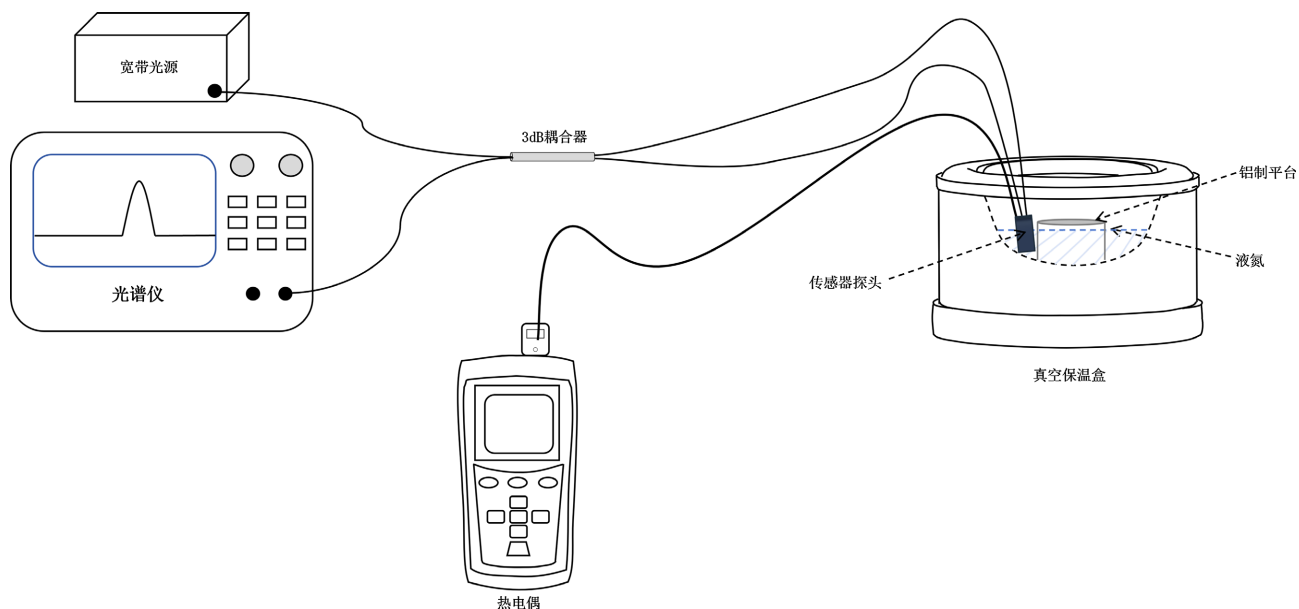


Figure 5. Schematic of FBG temperature sensing experiment at ultra-low temperature

图 5. 光纤布拉格光栅超低温环境下温度传感实验示意图

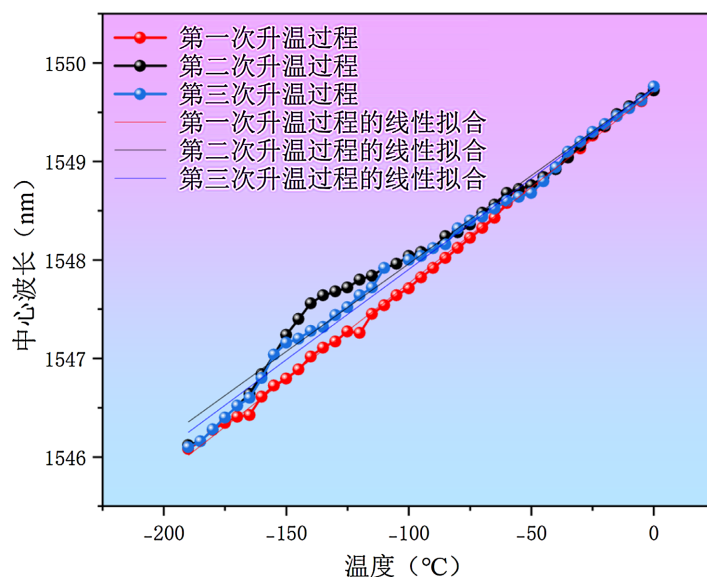


Figure 6. Fitted curve of experimental data of bare FBG

图 6. 裸 FBG 实验数据拟合曲线图

且可在液氮温区至常温温区范围内稳定开展测温工作。不过，多孔真空硅在低温环境下易发生结构形变，导致系统整体测量误差相对较大。

图 7 是将三组数据进行拟合得到的曲线图。设三组数据的线性拟合优度、数据的横纵坐标、温度灵敏度分别为 R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 、 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 、 x_3 、 y_3 、 K_{T1} 、 K_{T2} 、 K_{T3} ，可以得到如下的拟合公式：

$$y_1 = 1549.32 + 0.02594x_1 \quad (6)$$

$$y_2 = 1549.22 + 0.02531x_2 \quad (7)$$

$$y_3 = 1549.35 + 0.027x_3 \quad (8)$$

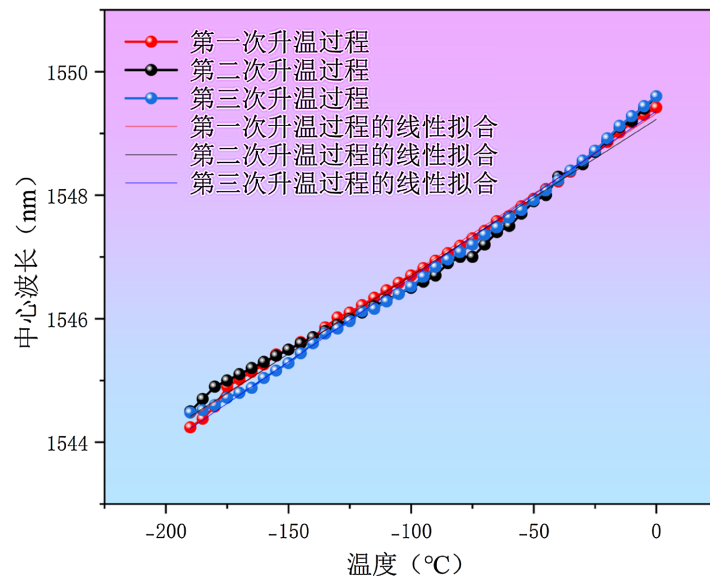


Figure 7. Fitted curve of FBG packaged by 1.5×0.2 mm aluminum capillary tube

图 7. 毛细铝管(1.5×0.2 mm)封装 FBG 实验数据拟合图

三条直线的线性拟合度分别为 $R_1^2 = 0.997$, $R_2^2 = 0.984$, $R_3^2 = 0.994$, FBG 的温度灵敏度可以通过直线斜率获得: $K_{T1} = 25.94$ pm/K, $K_{T2} = 25.31$ pm/K, $K_{T3} = 27$ pm/K, 毛细铝管(1.5×0.2 mm)封装 FBG 与裸 FBG 相比, 其温度灵敏度约为裸 FBG 的 2.5 倍、多孔真空硅包裹 FBG 的 1.4 倍, 增敏效果显著; 同时, 该封装 FBG 可在液氮温区至常温温区稳定测温, 系统整体测量误差也相对较小。

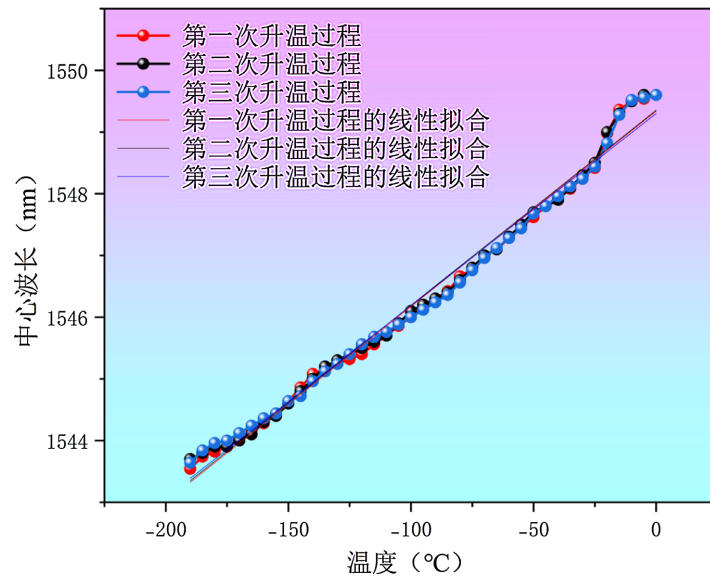


Figure 8. Fitted curve of FBG packaged by 1.5×0.25 mm aluminum capillary tube

图 8. 毛细铝管(1.5×0.25 mm)封装 FBG 实验数据拟合图

图 8 是将三组数据进行拟合得到的曲线图。设三组数据的线性拟合优度、数据的横纵坐标、温度灵敏度分别为 R_1^2 、 R_2^2 、 R_3^2 、 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 、 x_3 、 y_3 、 K_{T1} 、 K_{T2} 、 K_{T3} , 可以得到如下的拟合公式:

$$y_1 = 1549.33 + 0.03166x_1 \quad (9)$$

$$y_2 = 1549.35 + 0.0316x_2 \quad (10)$$

$$y_3 = 1549.3 + 0.03113x_3 \quad (11)$$

三条直线的线性拟合度分别为 $R_1^2 = 0.997$ ， $R_2^2 = 0.984$ ， $R_3^2 = 0.994$ ，FBG 的温度灵敏度可以通过直线斜率获得： $K_{T1} = 31.66 \text{ pm/K}$ ， $K_{T2} = 31.6 \text{ pm/K}$ ， $K_{T3} = 31.13 \text{ pm/K}$ 。

Table 1. Key performance comparison of differently packaged FBG sensors
表 1. 不同封装 FBG 传感器关键性能对比

传感器类型	平均灵敏度(pm/°C)	平均线性度(R ²)	三次实验标准差
裸 FBG	18.57	0.976	0.80
1.5 × 0.2 mm 铝管封装 FBG	26.08	0.986	0.85
1.5 × 0.25 mm 铝管封装 FBG	31.46	0.991	0.29

两种不同尺寸的毛细铝管封装 FBG 均展现出高线性拟合度与良好重复性，三次升温的同温度波长偏差均处于可接受范围，且均可在液氮温区至常温温区稳定实现温度传感。当温度逐渐升高时，毛细铝管、环氧树脂与光纤三者间的热膨胀系数差异会在封装结构内部累积热失配内应力；在温度升高到-20℃左右时封装结构内部的残余热应力被释放，进而引发 FBG 产生显著的轴向应变突变，最终表现为中心波长漂移速率的增大。对比来看，1.5 × 0.25 mm 尺寸毛细铝管封装 FBG 的温度灵敏度要优于 1.5 × 0.2 mm 尺寸毛细铝管封装的 FBG，源于两方面关键因素一是铝管热膨胀的机械力差异，0.25 mm 壁厚铝管的横截面积更大，温度升高时热膨胀产生的机械驱动力更强，通过环氧树脂传递给 FBG 的拉伸应变更显著；二是应力分布均匀性差异，壁厚更大的铝管在温度变化时形变更均匀，避免了局部应力集中，环氧树脂粘接层的应力分布也更均衡，减少了应变传递损耗，使铝管热膨胀与环氧树脂的应力传递形成叠加效应，见表 1。

5. 结论

本文聚焦超低温环境下 FBG 温度传感特性，针对裸 FBG 低温灵敏度低、易脆化的核心问题，通过封装方案优化、实验系统搭建与性能测试，完成了 FBG 温度传感技术的系统性研究，为超低温温度精准监测提供了技术支撑。

首先，设计了 6063 型毛细铝管(1.5 × 0.2 mm、1.5 × 0.25 mm 两种规格)与 E-200 耐低温环氧树脂的协同封装方案：铝管利用高热膨胀系数实现机械增敏，环氧树脂保障低温下的牢固粘接与高效应变传递，同时为 FBG 提供机械防护，避免超低温冷热循环冲击导致的断裂失效。明确了封装工艺流程，包括铝管裁剪打磨、清洗密封、环氧树脂配比灌注与固化，确保封装结构的一致性与可靠性。

其次，搭建了-190℃至 0℃超低温实验平台，以液氮为冷源，采用多孔真空硅调控温度变化速率、热电偶同步标定温度，有效避免热冲击对实验结果的干扰；通过三次升温循环实验，系统采集不同温度下 FBG 的中心波长数据，借助线性拟合分析传感性能。

实验结果表明：两种规格封装 FBG 均表现出优异的线性响应与良好重复性，同温度下波长偏差处于可接受范围；1.5 × 0.2 mm 规格封装 FBG 的温度灵敏度约为裸 FBG 的 2.5 倍，1.5 × 0.25 mm 规格因铝管横截面积更大、热膨胀机械驱动力更强、应力分布更均匀，灵敏度更优，进一步验证了封装结构参数对传感性能的调控作用；两类封装均能在液氮温区至常温区稳定工作，测量误差主要源于多孔真空硅的低温结构形变。

本研究提出的封装结构、传感系统设计及信号处理方案，有效解决了 FBG 传感器在超低温环境下的

核心应用难题，为航空航天、超导技术、大型低温工程等领域的精确温度监测提供了高性能、灵活可行的技术方案，具有重要的工程应用价值。

参考文献

- [1] Hegde, G., Asokan, S. and Hegde, G. (2022) Fiber Bragg Grating Sensors for Aerospace Applications: A Review. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, **11**, 257-275. <https://doi.org/10.1007/s41683-022-00101-z>
- [2] Sedov, E., Sedova, I., Arakelian, S., Eramo, G. and Kavokin, A. (2020) Hybrid Optical Fiber for Light-Induced Superconductivity. *Scientific Reports*, **10**, Article No. 8131. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64970-w>
- [3] 朱超杰, 刘砚涛, 刘洋, 等. 光纤布拉格光栅在火箭低温贮箱共底结构在线监测应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(8): 1-9.
- [4] De Miguel-Soto, V., Leandro, D., Lopez-Aldaba, A., Beato-López, J., Pérez-Landazábal, J., Auguste, J., *et al.* (2017) Study of Optical Fiber Sensors for Cryogenic Temperature Measurements. *Sensors*, **17**, Article 2773. <https://doi.org/10.3390/s17122773>
- [5] 陈继宣, 龚华平, 张在宣. 光纤传感器的工程应用及发展趋势[J]. 光通信技术, 2009, 33(10): 38-40.
- [6] Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki, B.S. (1978) Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication. *Applied Physics Letters*, **32**, 647-649. <https://doi.org/10.1063/1.89881>
- [7] Sahota, J.K., Gupta, N. and Dhawan, D. (2020) Fiber Bragg Grating Sensors for Monitoring of Physical Parameters: A Comprehensive Review. *Optical Engineering*, **59**, Article ID: 060901. <https://doi.org/10.1117/1.oe.59.6.060901>
- [8] Liu, S., Li, H., Song, M., Dai, B. and Sun, Z. (2018) Impacts on the Solidification of Water on Plate Surface for Cold Energy Storage Using Ice Slurry. *Applied Energy*, **227**, 284-293. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.012>
- [9] Lupi, C., Felli, F., Brotzu, A., Caponero, M.A. and Paolozzi, A. (2008) Improving FBG Sensor Sensitivity at Cryogenic Temperature by Metal Coating. *IEEE Sensors Journal*, **8**, 1299-1304. <https://doi.org/10.1109/jsen.2008.926943>
- [10] Brown, D.C. and Hoffman, H.J. (2001) Thermal, Stress, and Thermo-Optic Effects in High Average Power Double-Clad Silica Fiber Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **37**, 207-217. <https://doi.org/10.1109/3.903070>
- [11] Cheng, X.S., Qiu, W.W., Wu, W.X., *et al.* (2011) High-Sensitivity Temperature Sensor Based on Bragg Grating in BDK-Doped Photosensitive Polymer Optical Fiber. *Chinese Optics Letters*, **9**, Article ID: 020602.