光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021100802

低温环境下 FBG 温度传感特性研究

刘明尧，张伟伟*，宋　涵

（武汉理工大学 机电工程学院，武汉 430070）

摘　要： 在低温环境中，光纤光栅（Fiber Bragg Grating，FBG）材料的热膨胀系数和热光系数会发生改变，从而影响其温度传感特性。文章通过实验研究了裸光纤光栅传感器和黄铜管封装的光纤光栅传感器在低温下的温度传感特性。结果表明，在 80～300 K 温度范围，裸 FBG 温度传感器的灵敏度为 6.43 pm/K，线性度为 0.974，在 80～230 K 温度范围，温度与光纤光栅的中心波长呈现非线性关系；黄铜管封装的 FBG 温度传感器，在整个温度范围内灵敏度可达 26 pm/K，线性度为 0.996，较裸 FBG 温度传感器均有较大提升。对比实验表明，对光纤光栅进行封装，可以提高其温度灵敏度和线性度，改善温度传感特性。

关键词： 光纤传感；光纤光栅；低温；黄铜管封装；温度灵敏度

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0327－04

Study on Temperature Sensing Characteristics of FBG in Low Temperature Environment

LIU Mingyao，ZHANG Weiwei，SONG Han

（School of Mechanical and Electronic Engineering，Wuhan University of Technology，Wuhan 430070，CHN）

Abstract： In low temperature environment，the thermal expansion coefficient and thermal optical coefficient of fiber Bragg grating （FBG） material will change，which will affect its temperature sensing characteristics. In this paper，the temperature sensing characteristics of bare FBG sensors and brass tube-encapsulated FBG sensors were studied experimentally. The results show that in the temperature range of 80～300 K，the sensitivity of the bare FBG temperature sensor is 6.43 pm/K and the linearity is 0.974，and the relationship between temperature and fiber grating center wavelength is nonlinear in the temperature range of 80～230 K. The brass tube-encapsulated FBG temperature sensor has a sensitivity of 26 pm/K and a linearity of 0.996 in the whole temperature range，which is greatly improved compared with that of the bare FBG temperature sensor. Comparative experiments show that the encapsulating of fiber Bragg grating can not only improve its temperature sensitivity and linearity，but also improve its temperature sensing characteristics.

Key words： fiber sensing；fiber Bragg grating；low temperature；brass tube encapsulating；temperature sensitivity

0　引言

对于液态氢燃料箱、制冷剂的存储和运输容器、超导磁体支撑结构和粒子物理实验装置等，需要对其运行状况进行监测，以确保其处于健康运行状态[1-2]。采用传统电学类温度传感器，例如铂电阻温度传感器，对这些结构进行监测时，外部环境的信号很容易对传感器产生干扰，且传感器在低温下测量精度差、灵敏度低。光纤布拉格光栅（FBG）传感器作为一种光学类传感器，被广泛应用于测量结构的温度、应变、压力等参数[3-4]。相较于传统的电学类

收稿日期：2021－10－08.

* **通信作者：**张伟伟　**E-mail：**906555935@qq.com

温度传感器，FBG 传感器优势明显，其具有灵敏度高、体积小、易于嵌入结构中且不受电磁场影响等优点。

FBG 传感器虽然在航天航空、石油化工、桥梁建筑等领域有相关应用[5-7]，但由于光纤光栅在温度低于 273 K 时会出现非线性，且越接近绝对零度(0 K)越明显，导致测量准确度不高，所以现在被广泛应用于自然环境中，如工程应用领域[8-9]。为解决该问题，国内外学者对光纤光栅在低温下的传感特性进行了研究。2008 年，Guo 等[10]将不同波长的裸 FBG 放置于低温恒温容器内，研究了裸 FBG 在 123～273 K 温度范围内的温度特性，发现其温度响应是非线性的。2015 年，美国 Zaynetdinov 等[11]将涂层为聚酰亚胺的 FBG 封装到材料为聚四氟乙烯(PTFE)的结构中，发现当温度处于 4.2 K 以下时，FBG 仍然具有较高的灵敏度。2016 年，张翔等[12]采用铜管作为增敏基材，用耐高温 AB 胶将裸光栅粘贴于铜管内壁，实现 FBG 的温度增敏效果。实验结果表明，在 233～393 K 的温度范围内，铜管封装 FBG 温度传感器的灵敏度达到 0.025 nm/K 左右，相较于裸光栅具有更高的灵敏度与线性度。2017 年，丁旭东等[13]设计了一种全金属化结构，并采用超声焊接的方法将光纤光栅封装于特种铝合金基底表面。在 113～273 K 环境下，两支 FBG 温度传感器的线性度较好，相较于裸光栅温度灵敏度提高了两倍。

本文通过理论推导与实验，研究了裸光纤光栅从低温至常温环境(80～300 K)的温度传感特性。同时，针对裸 FBG 在低温环境下存在温度灵敏度较低的特性，采用黄铜管对光纤光栅进行增敏封装。实验研究了黄铜管封装光纤光栅的低温温度传感特性。实验结果显示，采用黄铜管封装的方法适用于低温环境下的测量，其温度-波长拟合曲线的线性度良好且温度灵敏度得到了较大的提升。

1 FBG 温度传感理论

根据光纤布拉格光栅耦合模理论，当宽带光源入射 FBG 时，反射光或透射光的峰值与光栅的调制周期和纤芯折射率有关。反射中心波长满足布拉格条件[14]：

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{1}$$

式中，λ_B 为反射中心波长，n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率，Λ 为光栅周期(栅距)。由式(1)可知，FBG 的反射中心波长随 n_{eff} 或 Λ 的改变而改变，而温度和应力(应变)的变化会导致光纤纤芯有效折射率和光栅周期发生改变。由光纤光栅理论可知，FBG 的反射中心波长可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha+\xi)\Delta T + (1-\rho_e)\varepsilon \tag{2}$$

其中，$\Delta\lambda_B$ 为中心波长漂移量，α 为光纤材料的热膨胀系数，ξ 为热光系数，ΔT 为温度变化，ρ_e 为光纤的弹光系数，ε 为光栅的轴向应变。对于光纤材料为纯石英的情况，在常温下，$\alpha = 0.55\times10^{-6}$/K，$\xi = 6.67\times10^{-6}$/K。

令 $K_T = (\alpha+\xi)\lambda_B$，$K_\varepsilon = (1-\rho_e)\lambda_B$，则式(2)可以表示为

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon \tag{3}$$

式中，K_T 和 K_ε 分别为温度灵敏度和应变灵敏度，若 FBG 不受轴向作用力，可以认为轴向应变 ε 为 0。由此，式(3)可以简化为

$$\Delta\lambda_B = K_T\Delta T \tag{4}$$

由于材料的热光系数和热膨胀系数会随温度的降低而变小，所以在低温下，FBG 的温度灵敏度 K_T 会降低。此外，由于裸光纤光栅在低温下进行测量时，存在温度灵敏度低、可靠性差的缺点，可以采用热膨胀系数较大的材料对其进行增敏性封装。光纤光栅经过封装后，封装材料会极大地改善光纤光栅在低温下的传感特性。封装后 FBG 温度传感器的中心波长变化与温度变化的关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(\alpha+\xi)+(1-\rho_e)(\alpha_{sub}-\alpha)]\Delta T \tag{5}$$

式中，α_{sub} 为基底的热膨胀系数。封装后的 FBG 温度灵敏度为

$$K_T = \lambda_B[(\alpha+\xi)+(1-\rho_e)(\alpha_{sub}-\alpha)] \tag{6}$$

对于普通光纤，其 $\rho_e \approx 0.22$，本文采用的基底为黄铜，其热膨胀系数为 17.8×10^{-6}/K。

2 光纤光栅低温传感实验研究

为了研究裸 FBG 和管式封装 FBG 的低温传感特性，搭建了光纤光栅低温传感实验系统，使用该系统对裸 FBG 和黄铜管封装的 FBG 在 80～300 K 下的低温特性进行了实验研究。

2.1 实验系统搭建

实验系统由计算机、解调仪、低温恒温系统组成，如图 1 所示。解调仪为武汉理工大学自主研制的四通道光纤光栅波长解调仪，采样频率为 4 000 Hz。低温恒温系统由控温仪(TESK301)、真空泵、液氮恒温

器组成(由北京锦正茂科技有限责任公司研发,具有高精度单回路的低温温度控制系统,可以实现 70～600 K 的温度控制,分辨率为 0.01 K)。光纤光栅低温传感实验系统通过控温仪记录热电偶输出,并通过波长解调仪读取 FBG 中心波长。

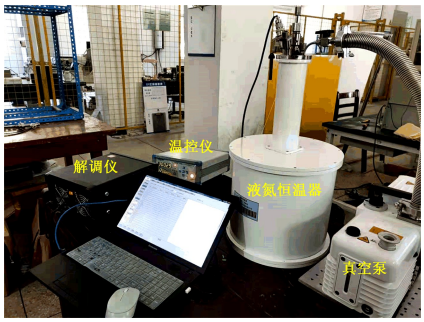


图 1　光纤光栅低温传感实验平台

实验时,首先将 FBG 固定于低温恒温系统的工作台上,并在液氮恒温器顶部注入液氮。在热传导的作用下,工作台的温度会逐渐降至 77 K。此时,可以通过控温仪设定热电阻的输出温度,同时控制温度的上升。真空泵的作用是将液氮恒温器腔体内抽为真空状态,通过真空隔热可以减少腔体内外的热交换,从而减弱外界环境对传感器的干扰。本文低温传感实验温度范围为 80～300 K,温度间隔为 10 K,每当温度上升至设定温度时,保温 8～10 min,并记录对应温度点的光纤光栅中心波长。

2.2　裸光纤光栅传感器低温实验

裸光纤光栅传感器低温传感实验首先选取了三根不同波长的裸 FBG,标号为 1＃,2＃,3＃,具体参数如表 1 所示。

表 1　FBG 参数表

中心波长/nm	光纤直径/μm	栅区长度/mm	反射率	边模抑制比/dB
1 547(1＃)	125	3	＞90%	＞5
1 550(2＃)				
1 554(3＃)				

实验时,把裸 FBG 粘贴于工作台表面,使两者紧密接触,确保温度可以快速从工作台传递到 FBG,如图 2 所示。

实验记录了裸 FBG 在 23 个温度测点的中心波长,可以得到传感器的输入(温度)/输出(中心波长)关系,采用最小二乘法拟合实验数据,拟合曲线如图 3 所示。拟合直线沿坐标轴从下至上依次为 1＃,2＃,3＃号 FBG,拟合直线方程的线性度和灵敏度如表 2 所示。可以看出,其线性度较差,且实际温度灵敏度仅为理论温度灵敏度的 0.6 倍左右。考虑是由于低温导致了光纤光栅热膨胀系数和热光系数的降低,引起了温度灵敏度的下降。为了验证,对测量数据重新进行了分段线性拟合,图 4 所示为 1＃FBG 的温度-波长分段拟合曲线。

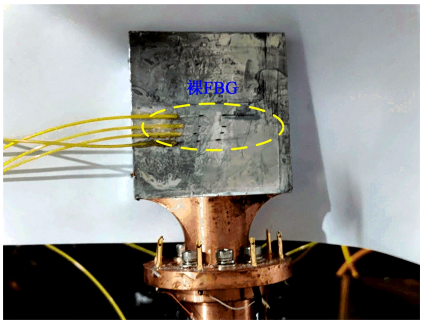


图 2　低温工作台及裸光纤光栅

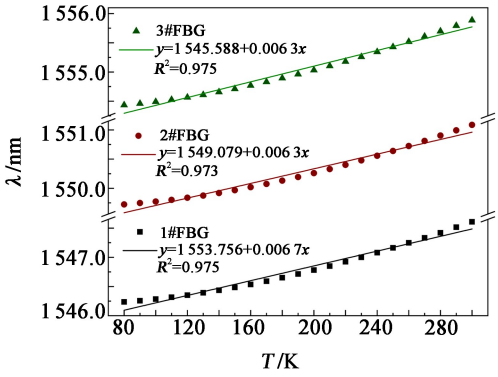


图 3　1＃,2＃,3＃裸光纤光栅低温温度-波长拟合曲线

表 2　裸 FBG 在 80～300 K 下的拟合直线线性度、温度灵敏度、理论温度灵敏度

中心波长/nm	线性度	温度灵敏度/(pm·K^{-1})	理论温度灵敏度/(pm·K^{-1})
1 547(1＃)	0.975	6.7	11.17
1 550(2＃)	0.973	6.3	11.19
1 554(3＃)	0.975	6.3	11.22

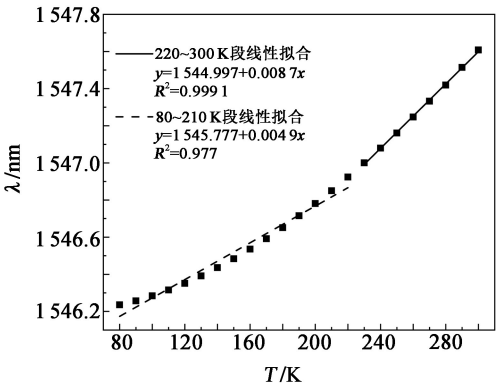


图 4　1＃FBG 裸光纤光栅分段拟合曲线

可以发现,在 230～300 K 温度范围内,拟合直线的线性度为 0.999 1,而在更低的温度 80～220 K 内的线性度仅为 0.977,非线性较为明显。两者的

温度灵敏度分别为 8.7 和 4.9 pm/K，低温段产生了一定程度的降低。同样，对 2＃和 3＃裸 FBG 用相同的方法进行分段拟合处理，发现其具有相同的性质，如表 3 所示。所以，可以认为低温下光纤热膨胀系数和热光系数的降低，导致裸 FBG 拟合直线的线性度差、温度灵敏度低。

表 3　2＃，3＃裸 FBG 的分段线性拟合线性度、温度灵敏度

FBG	线性度		温度灵敏度/(pm·K^{-1})	
	230～300 K	80～220 K	230～300 K	80～220 K
2＃	0.999 3	0.976	8.7	4.9
3＃	0.999 7	0.981	9	5.4

2.3　黄铜管封装传感器低温实验

由裸光纤光栅低温实验可知，裸 FBG 在低温下具有较低的温度灵敏度，此外，裸光纤材料为二氧化硅，直径仅有 125 μm，在低温环境下进行传感测量时极易由于外力产生折断。黄铜热膨胀系数大，作为基材可以起到温度增敏的作用，且其导热性良好，可以实现对温度的快速响应。同时，管式封装的方法可以使光纤免受外力的冲击，起到保护光纤的作用。所以，本文采用黄铜管对裸 FBG 进行保护性增敏封装。为避免封装工艺影响传感器的温度响应，选用内径与裸光纤直径接近的黄铜毛细管，其内径为 0.2 mm，外径为 0.5 mm，长度为 30 mm。

为确保光纤光栅紧密封装于黄铜管中，采用的封装材料为改性的 862 环氧树脂胶，性能见表 4。该环氧树脂胶具有优秀的耐低温性能，并具有优秀的机械性能，不易在低温下发生脆化、断裂，同时可以与金属紧密结合，适用于低温环境下的封装。

表 4　改性环氧树脂性能表[15]

参数	拉伸强度/MPa (77 K)	弯曲模量/GPa (77 K)	断裂韧性/(MPa·m$^{1/2}$)	断裂延伸率 (77 K)/%
改性 862 环氧树脂	102.9	6.77	2.33	1.64

由于低温下热胀冷缩效应会引起光纤收缩，实验采用整体封装工艺对黄铜管进行封装，如图 5 所示。封装时，首先用剥线钳剥除 FBG 栅区部位的涂覆层，并用无水乙醇擦拭干净。然后用超声波清洗机清洗黄铜管，置于烘箱内烘干。最后，把光纤插入黄铜管内，灌入环氧树脂胶，放置于烘箱内，并以 90 ℃/2 h，110 ℃/2 h，150 ℃/6 h 的固化时间进行加热固化。



图 5　黄铜管封装 FBG 结构示意图

把封装好的 FBG 温度传感器固定于液氮恒温器的工作台上，并在其表面涂覆导热膏，以增加导热性，如图 6 所示。

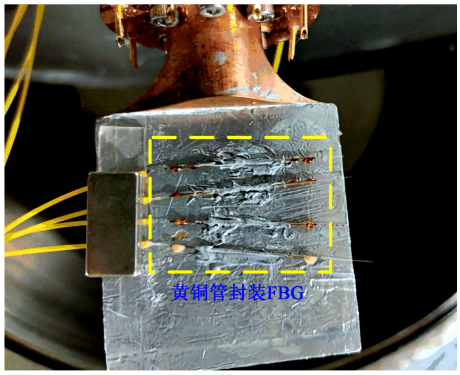


图 6　低温工作台及黄铜管封装光纤光栅

对实验数据进行线性拟合，黄铜管封装的 FBG 温度-中心波长拟合曲线如图 7 所示。

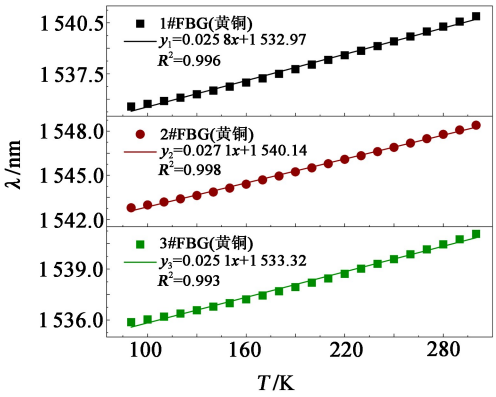


图 7　1＃，2＃，3＃FBG(黄铜)90～300 K 温度范围温度-波长拟合曲线

可以看出，用黄铜管封装的三个 FBG 温度传感器，在 80～300 K 整个温度范围内具有良好的线性特性，相较于裸 FBG，平均线性度提升了约 0.022，达到了 0.996；平均灵敏度为 26 pm/K，是裸 FBG 的 4 倍，温度增敏效果明显。

根据式(6)可以得到封装后三个 FBG 传感器的温度灵敏度理论值，分别为 0.031 9，0.032 0，0.031 9 nm/K。实验值与理论值存在一定的偏差。该偏差产生的原因主要有：1)黄铜材料的热膨胀系数在低温下有所降低，造成实验值比理论值小；2)裸光纤光栅与黄铜管之间通过环氧树脂进行连接，由于三者的热膨胀系数不同，在温度发生变化时粘结层与金属管和传感器之间会产生界面相对滑移，造成应变传递不完全。同时，由于应变分布不均，三者的受力情况复杂，会导致热膨胀系数的非线性变化，

从而对 FBG 的温度灵敏度产生影响。

3　结论

本文实验研究了 80～300 K 温度范围内，裸 FBG 温度传感器和黄铜管封装的 FBG 温度传感器的低温传感特性。实验结果表明：在该温度范围，对于未封装的裸 FBG 温度传感器，其线性度较差，且温度灵敏度较低。通过分段拟合，确定低温下光纤热膨胀系数和热光系数的降低，是造成其灵敏度低、线性度差的原因。对于采用黄铜管封装的 FBG 温度传感器，无论是平均线性度还是平均灵敏度均优于裸 FBG，其线性度比裸 FBG 大 0.22，灵敏度是裸 FBG 的 4 倍。此外，环氧树脂对黄铜管封装的 FBG 温度传感器的灵敏度有一定影响，在低温状态下通过选取合适的封装材料、选用合理的封装技术可以改善传感器的性能。本文为低温下光纤光栅温度传感器的研究提供了参考。

参考文献：

[1] Nakano A, Shimazaki T, Sekiya M, et al. Research and development of liquid hydrogen (LH2) temperature monitoring system for marine applications[J]. Inter. J. of Hydrogen Energy, 2021,46(29): 15649-15659.

[2] Yoo J W, Hong S B, Kim M S. Refrigerant leakage detection in residential air conditioner with limited sensor installations [J]. Inter. J. of Refrigeration, 2017, 78: 157-165.

[3] Dong N, Wang S, Lan J, et al. Pressure and temperature sensor based on graphene diaphragm and fiber Bragg gratings [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 33(5): 431-434.

[4] Mansoursamaei M, Malakzadeh A. Simultaneous measurement of temperature and strain using a single fiber bragg grating on a tilted cantilever beam[J]. Optical Review, 2021(7): 1-6.

[5] Mao M. FBG temperature sensor for avionics display system [J]. Advances in Aerospace Science and Applications, 2019, 9(1): 11-21.

[6] 陈　常，陈贤雷，王海荣，等. 石油储罐光纤光栅感温检测装置设计[J]. 中国设备工程，2020(1)：156-158.
Chen C, Chen X L, Wang H R, et al. Design of fiber Bragg grating temperature sensing device for oil storage tank[J]. China Plant Engineering, 2020(1): 156-158.

[7] 李俊鑫，赖志华，强小俊，等. 应用光纤光栅传感技术监测铁路钢桥螺栓断裂脱落的模型试验研究[J]. 铁道建筑，2020，60(1)：40-43.
Li J X, Lai Z H, Qiang X J, et al. Model test on monitoring for bolts fracture and dropping in railway steel bridge based on fiber Bragg grating sensor technology[J]. Railway Engineering, 2020, 60(1): 40-43.

[8] Ferreira M S, Vieira J, Frias C, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature using fiber Bragg grating sensors embedded in hybrid composite laminates[J]. Measurement Science & Technol., 2011, 22(4): 45206.

[9] Li X, Li Y, Wen Z. 300 m optic fiber Bragg grating temperature sensing system for seawater measurement[J]. J. of Physics, 2011, 276: 12130.

[10] Guo Z, Zhang J, Guo X, et al. Performance of the fiber Bragg grating sensors at cryogenic temperatures[J]. Proc. SPIE, 2008, 6932: 6932N-1-6.

[11] Zaynetdinov M, See E M, Geist B, et al. A fiber Bragg grating temperature sensor for 2～400 K[J]. IEEE Sensors J., 2015, 15(3): 1908-1912.

[12] 张　翔，谭跃刚，陈宜炀，等. 管式封装 FBG 大量程温度传感器及其特性研究[J]. 现代机械，2016(6)：9-11.
Zhang X, Tan Y, Chen Y, et al. Design of the tube packaged FBG large-range temperature sensor and its characteristics[J]. Modern Machinery, 2016(6): 9-11.

[13] 丁旭东，张钰民，夏嘉斌，等. 金属化封装光纤光栅传感器超低温特性研究[J]. 激光与红外，2017，47(6)：773-777.
Ding X D, Zhang Y M, Xia J B, et al. Study on ultralow temperature characteristics of metallic packaging FBG sensor [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6): 773-777.

[14] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. Appl. Phys. Lett., 1978, 32(10): 647-649.

[15] 胡　娟. 超支化聚硅氧烷增韧环氧树脂及液氧相容性研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2020.
Hu J. Study on hyperbranched polysiloxane toughened epoxy resin and liquid oxygen compatibility[D]. Wuhan: Wuhan University of Technol., 2020.

作者简介：

刘明尧(1963－)，男，教授，博士生导师，主要从事数控机床状态监测、机器人技术、机电一体化技术、光纤光栅传感等方面的研究；

张伟伟(1996－)，男，硕士研究生，主要从事光纤光栅传感器方面的研究；

宋　涵(1988－)，男，博士，副教授，2016 年于华中科技大学获得博士学位，主要研究方向为基于微纳敏感材料/结构的光纤气体传感技术。