

聚酰亚胺涂覆的光纤宏弯温度传感器

庄志康^{1,2}, 路元刚^{1,2*}, 彭捷钦^{1,2}, 赫崇君^{1,2}¹南京航空航天大学空间光电探测与感知工信部重点实验室, 江苏 南京 211106;²南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 211106

摘要 为了提高光纤宏弯温度传感器的性能,提出了一种基于聚酰亚胺(PI)涂覆的新颖光纤宏弯温度传感器。利用基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量方法确定了传感器的光纤弯曲半径,将 PI 薄膜涂覆在 1060-XP 光纤包层外获得了新型的光纤宏弯温度传感器。该传感器的温度传感实验结果表明,PI 涂覆不仅能提升光纤的机械性能和耐热性,还可实现温度灵敏度和温度测量分辨能力的显著提高。该新颖的光纤宏弯温度传感器可实现 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的宽温测量范围,温度灵敏度为 $0.072\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$,分辨能力为 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与其他光纤宏弯温度传感器相比,所设计的传感器的温度传感性能显著提高。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 光纤宏弯; 纤芯-包层-无限涂覆层结构; 温度传感; 聚酰亚胺

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0706008

Fiber-Optic Macrobending-Based Temperature Sensor with Polyimide Coating

Zhuang Zhikang^{1,2}, Lu Yuangang^{1,2*}, Peng Jianqin^{1,2}, He Chongjun^{1,2}¹Key Laboratory of Space Photoelectric Detection and Perception of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China;²College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

Abstract In order to improve the performance of optical fiber macrobending temperature sensor, a novel optical fiber macrobending temperature sensor based on polyimide (PI) coating is proposed. The optical fiber bending radius of the sensor is determined by the optical fiber bending loss-temperature measurement method based on the core-cladding-infinite coating structure, and a new type of optical fiber macrobending temperature sensor is obtained by coating the PI film on the 1060-XP optical fiber cladding. The temperature sensing experimental results of the sensor show that PI coating can not only improve the mechanical properties and heat resistance of optical fiber, but also significantly improve the temperature sensitivity and temperature measurement resolution. The novel optical fiber macrobending temperature sensor can achieve a wide temperature measurement range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature sensitivity is $0.072\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ and the resolution is $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$. Compared with other optical fiber macrobending temperature sensors, the temperature sensing performance of the designed sensor is significantly improved.

Key words fiber optics; fiber optics sensors; fiber-optic macrobending; core-cladding-infinite coating structure; temperature sensing; polyimide coating

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-10-11; 录用日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(62175105, 61875086)

通信作者: *luyg@nuaa.edu.cn

1 引言

随着光纤宏弯损耗效应的深入研究^[1-4], 光纤宏弯传感器的应用日益广泛。因光纤具有抗电磁干扰、体积小、易弯曲以及便于敷设等优点, 故可以制成各类宏弯传感器, 如光纤宏弯温度^[5-12]、折射率^[13-14]、位移^[15]、应变^[16]、压力^[17]和裂纹^[18]传感器等, 通过直接或间接测量这些传感器中光纤的宏弯损耗可以获取待测物理量。近年来, 光纤宏弯温度传感器日益受到关注, 目前已有的光纤温度传感器, 如光纤光栅^[19]、光纤 F-P 腔^[20]、基于拉曼散射^[21]和布里渊散射^[22]的分布式光纤传感器, 通过对传感单元的耐高温处理可有效实现工作温度超过 500 °C, 某些传感器的工作温度甚至可超过 1000 °C, 但这些光纤温度传感器在不同程度上存在系统结构复杂、解调方法复杂和成本高的问题。

目前, 光纤宏弯温度传感器中的传感光纤多为对弯曲较敏感的光纤, 这类光纤的涂覆层主要为丙烯酸酯。由于丙烯酸酯涂覆层不耐高温, 长期工作温度需低于 75 °C, 所以温度传感器的工作温度范围一般为 0~80 °C。也有研究采用去除光纤涂覆层、用印度墨水^[6]及印度墨水与镍保护层^[7]作为涂覆层的方案, 但这种方案存在印度墨水在稍高的温度下容易发生皴裂和脱落的问题, 而且其采用的基于纤芯-无限包层结构的光纤弯曲损耗-温度测量模型存在测量不准确、光纤机械强度差和温度灵敏度低的问题。此外, 塑料光纤(POF)也曾被用于光纤宏弯损耗-温度测量^[10-12]以解决涂覆层机械强度不足的问题, 但其温度测量范围一般较小。

聚酰亚胺(PI)在 -200~300 °C 的温度之间具有较好的稳定性和机械特性^[23], 已被用于一些传感或通信光纤的涂覆层, 但目前鲜有弯曲敏感光纤的涂覆层采用 PI 的研究与应用报道, 而采用 PI 作为光纤宏弯温度传感器中弯曲敏感光纤的涂覆层有望提高温度测量范围。为此, 本文提出了一种基于 PI 涂覆的新颖光纤宏弯温度传感器。为了精确确定光纤宏弯温度传感器的光纤弯曲半径, 本文利用一种基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量方法, 该方法有效解决了常用的基于纤芯-包层结构的光纤弯曲损耗-温度测量模型的测温精度低和温度灵敏度低等问题。实验制备了一个基于 PI 薄膜涂覆的弯曲半径为 9.15 mm 的光纤宏弯温度传感器, 其实现了 -20~100 °C 的宽温测量, 灵敏度达到 0.072 dB/°C, 分辨能力约为 0.14 °C。与其

他光纤宏弯温度传感器相比, 所设计的光纤宏弯温度传感器的温度传感性能显著提高。本文提出的基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤宏弯温度传感器, 具有一般光纤宏弯温度传感器的结构简单、成本低、解调方便和测量速度快的优点, 因其使用了 PI 涂覆层而具有更大的温度测量范围, 还因其采用纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量方法, 可筛选出具有高温灵敏度响应的光纤弯曲半径, 从而获得更高的测温精度。

2 原理

目前, 本文使用的单模光纤宏弯损耗-温度测量模型主要是基于纤芯-无限包层结构的光纤弯曲损耗模型^[6-7], 使用此模型需要在实验中去掉光纤涂覆层, 添加吸收层, 利用该模型测温存在测温范围小和温度灵敏度低等问题, 因此该模型具有较大的局限性。本文提出的光纤宏弯温度传感器包含涂覆层, 所以实验中需采用基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量模型。带涂覆层的光纤弯曲状态如图 1 所示, 其中 n_1 、 n_2 和 n_3 分别为纤芯、包层和涂覆层的折射率, WGM (Whispering Gallery Mode) 为出现的回音壁模式。

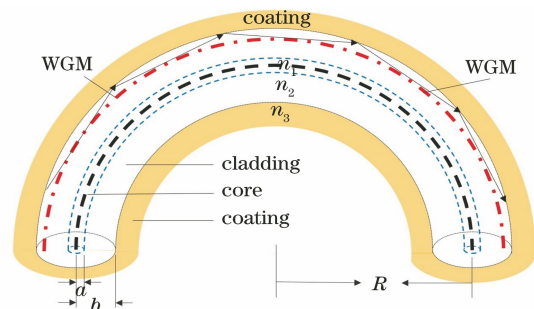


图 1 带涂覆层的光纤弯曲状态示意图

Fig. 1 Schematic of bending state of fiber-optic with coating

图 1 中 a 和 b 分别为光纤纤芯和包层的半径 (一般分别为 $4.5 \mu\text{m}$ 和 $62.5 \mu\text{m}$), R 为光纤的弯曲半径, 涂覆层的厚度约为 $200 \mu\text{m}$ (图 1 中涂覆层的厚度为示意画法, 非按尺寸比例绘制)。在保证弯曲模型一定精度的前提下, 涂覆层的厚度被视为无限大, 这可使泄漏到涂覆层的光不会再返回纤芯中, 此时需要利用基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量方法来确定温度与光纤宏弯损耗之间的关系。当传感光纤发生宏弯时, 由纤芯导模辐射出的辐射模会在包层-涂覆层和涂覆层-空气界面发生反射, 该辐射模沿着光纤弯曲路径传播,

即形成 WGM^[4]。当 WGM 沿着弯曲路径回到纤芯时,其会与纤芯导模发生耦合。由于 WGM 与纤芯导模之间的相位差会随着弯曲半径或环境温度等物理量的变化而变化,对应的宏弯损耗随着弯曲半径或环境温度的改变周期性地出现极大值和极小值,从而表现出宏弯损耗振荡的现象。

文献[5]的研究表明,当环境温度变化时,由于热膨胀效应和热光效应,光纤的宏弯损耗随之变化。热膨胀效应是指温度的变化使光纤的尺寸发生变化,包括纤芯半径、包层半径、弯曲半径和光纤弯曲长度。实际应用中,光纤环部分需要在径向封装固定。热膨胀效应所引起的弯曲半径改变较小,因此可以忽略。当光纤的热膨胀系数(TEC)为 φ 、光纤的弯曲长度为 L 和温度改变 ΔT 时,热膨胀效应所导致的光纤纤芯半径、包层半径和光纤环轴心弯曲长度变化可以表示为

$$\begin{cases} a(T) = a_0(1 + \varphi \cdot \Delta T) \\ b(T) = b_0(1 + \varphi \cdot \Delta T) \\ L(T) = L_0(1 + \varphi \cdot \Delta T) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: a_0 、 b_0 和 L_0 分别表示初始温度下的光纤纤芯半径、包层半径和光纤环轴心弯曲长度值。

热光效应是指温度的变化会导致光纤材料的折射率发生变化。分别用 n_q ($q=1,2,3$) 表示纤芯、包层和涂覆层的折射率, κ_q ($q=1,2,3$) 表示纤芯、包层和涂覆层的热光系数(TOC)。当温度变化 ΔT 时,热光效应所导致的折射率变化可以表示为

$$\begin{cases} n_1(T) = n_1(T_0)(1 + \kappa_1 \cdot \Delta T) \\ n_2(T) = n_2(T_0)(1 + \kappa_2 \cdot \Delta T) \\ n_3(T) = n_3(T_0)(1 + \kappa_3 \cdot \Delta T) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $n_q(T_0)$ 表示处于初始温度 T_0 下纤芯、包层和涂覆层的折射率。

纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗系数 2α 的计算公式^[3]为

$$2\alpha = \frac{2U^2}{\beta V^2 K_1^2(aW)} \int_0^\infty \frac{\exp[-a(W^2 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}}]}{(W^2 + \zeta^2)^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{A_i[X_2(0, \zeta)]}{B_i[X_2(a, \zeta)]} \cdot \frac{\sqrt{x_2} \cdot \sqrt{x_3}}{x_2 \cos^2 \theta + x_3 \sin^2 \theta} d\zeta, \quad (3)$$

其中

$$X_q(x, \zeta) = \left(\frac{R}{2k^2 n_q^2} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\beta^2 + \zeta^2 - k^2 n_q^2 \left(1 + \frac{2x}{R} \right) \right], \quad (4)$$

$$x_q = \left(\frac{2k^2 n_q^2}{R} \right)^{\frac{2}{3}} [-X_q(b, \zeta)], (q=1,2,3), \quad (5)$$

$$\theta(\zeta) = \frac{2}{3} [-X_2(b, \zeta)]^{\frac{3}{2}} + \frac{\pi}{4}, \quad (6)$$

式中: U 、 W 、 V 和 β 分别表示归一化横向相位常数、归一化横向衰减常数、归一化频率和纵向传播常数; ζ 表示 y 方向傅里叶变换的共轭变量; A_i 和 B_i 分别表示第一类和第二类艾里函数; K_1 表示贝塞尔函数; k 表示光波在真空中的波数。

由温度变化引起的光纤尺寸及材料折射率变化会影响到与之相关的归一化横向相位常数、归一化横向衰减常数、归一化频率和纵向传播常数,使得两种模式回到纤芯中发生相干耦合,导致相位发生变化,损耗也随之变化。将(1)式和(2)式代入(3)式,可得不同温度 T 下光纤的宏弯损耗系数,表达式为

$$2\alpha(T) = \frac{2U(T)^2}{\beta(T)V(T)^2 K_1^2[a(T)W(T)]} \int_0^\infty \frac{\exp\{-a(T)[W(T)^2 + \zeta^2]^{\frac{1}{2}}\}}{[W(T)^2 + \zeta^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{A_i[X_2(0, \zeta)]}{B_i[X_2(a, \zeta)]} \cdot \frac{\sqrt{x_2(T)} \cdot \sqrt{x_3(T)}}{x_2(T)\cos^2 \theta(T) + x_3(T)\sin^2 \theta(T)} d\zeta. \quad (7)$$

对于普通单模光纤而言,其宏弯损耗 L_s 的计算公式为

$$L_s = 10 \cdot \lg[\exp(2\alpha \cdot L)]. \quad (8)$$

(8)式表示长度为 L 的光纤的弯曲损耗。当弯曲半径为 R 、弯曲圈数为 σ 时, $L = 2\pi R\sigma$ 。将随温度 T 变化的宏弯损耗系数 $2\alpha(T)$ 代入(8)式,可得到光纤的宏弯损耗与温度的关系。通过研究不同弯曲半径下温度-损耗的变化规律来选择合适的弯曲半径,可确定光纤宏弯温度传感器的光纤弯曲半径。

3 弯曲半径确定的数值计算

利用光纤宏弯损耗系数来计算温度,要求传感光纤的损耗对弯曲敏感。已知 1060-XP 光纤具有较大的宏弯损耗系数^[24],当弯曲半径较大时,其仍具有较高的损耗,因此适用于制作光纤宏弯传感器。当温度为 20 °C 时,1060-XP 光纤在 1550 nm 波长下的参数如表 1 所示。

表 1 1060-XP 光纤的参数

Table 1 Parameters of 1060-XP optical fiber

Parameter	Core	Cladding	Coating(PD)
Radius/ μm	2.9	62.5	100.0
Refractive index	1.46313	1.45642	1.62000
TEC/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ^[25]	5.5×10^{-7}	5.5×10^{-7}	—
TOC/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ^[25]	1.1×10^{-5}	1.0×10^{-5}	$\sim 4.0 \times 10^{-4}$

将表 1 的参数代入(7)式和(8)式,得到不同温

度(-20, 20, 60, 100 °C)下 1060-XP 光纤的弯曲损耗随弯曲半径变化的曲线,如图 2 所示。从图 2 可以看到,随着弯曲半径的逐渐减小,从纤芯泄漏出的光会穿过纤芯-包层界面并沿着包层-涂覆层界面传播,即出现 WGM。WGM 与基模的相干耦合会使光纤的宏弯损耗发生振荡,图 2 中三处弯曲损耗峰所对应的弯曲半径分别为 7.7, 9.1, 10.9 mm。当温度从 -20 °C 升高至 100 °C 时,三个弯曲损耗峰的峰值呈下降趋势,即温度越高,损耗越小,其中 7.7 mm 弯曲半径所对应的峰值损耗下降最多,10.9 mm 弯曲半径所对应的峰值损耗下降最少。

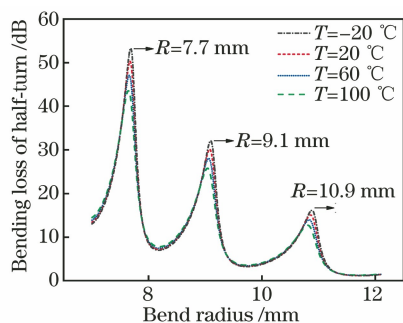


图 2 不同温度下光纤弯曲损耗随弯曲半径变化的曲线
Fig. 2 Curves of fiber-optic bending loss with bending radius at different temperatures

损耗下降越多,说明损耗对温度的变化越灵敏,由此可知 7.7 mm 弯曲半径所对应的弯曲损耗对温度变化最灵敏。此外可以看出,在温度传感实验中,基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤宏弯损耗模型对光纤弯曲半径的选择会有一些的限制,传感器的弯曲半径应局限于损耗峰值附近。

图 2 中三个损耗峰的局部放大图如图 3 所示。由于受到 WGM 的影响,损耗峰右侧的光纤弯曲半径越小,弯曲损耗越大。由图 3 可知,损耗峰值在随着温度的升高而降低的同时,峰值点所对应的光纤弯曲半径也在偏移并减小,偏移量约为 0.05 ~ 0.10 mm。此外,每个损耗峰右侧的斜率绝对值均大于左侧,因此选择右侧一定范围内的弯曲半径进行温度传感实验,就可以获得更高的温度灵敏度。对于光纤弯曲半径的选择:当弯曲半径较小时,尽管可获得较高的温度灵敏度,但会带来光纤损耗较大和测量过程中信噪比较低的问题;当弯曲半径较大时,光纤损耗对温度的变化不敏感,从而直接导致测量精度较低。本文综合考虑了上述因素,选择图 3(b)中峰值位置所对应的 9.1 mm 右侧区域作为弯曲半径选取区域,下面将进一步确定其最佳弯曲半径。

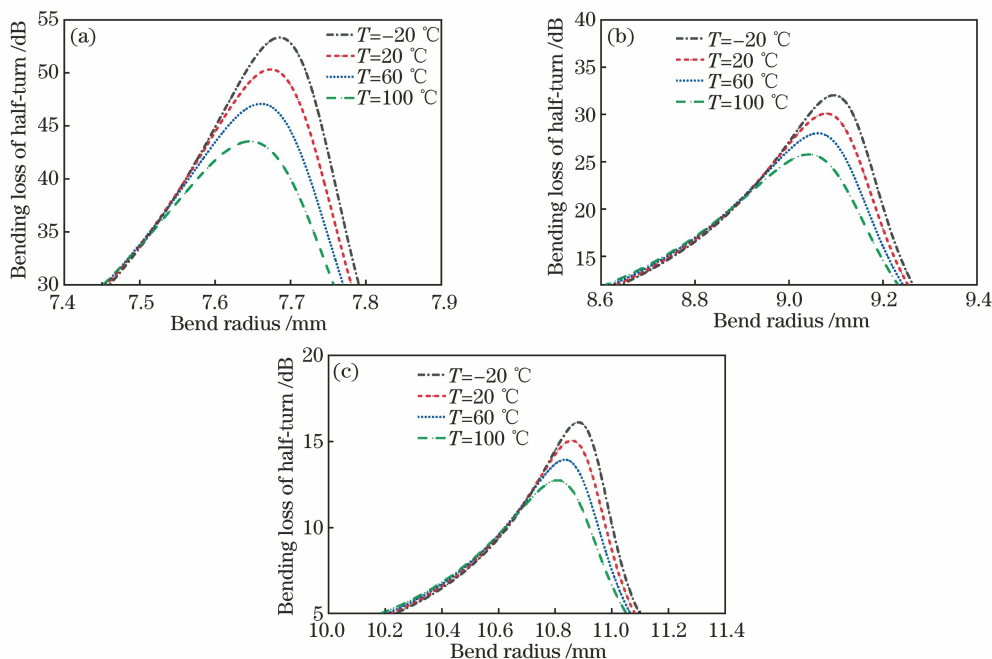


图 3 图 2 中三个损耗峰的峰值局部放大图。(a)弯曲半径为 7.7 mm;(b)弯曲半径为 9.1 mm;(c)弯曲半径为 10.9 mm
Fig. 3 Local magnification of three loss peaks in Fig. 2. (a) Bending radius is 7.7 mm; (b) bending radius is 9.1 mm; (c) bending radius is 10.9 mm

由图 3(b)可知,比 9.1 mm 稍大的弯曲半径变化就会引起较大的弯曲损耗改变,故计算选用的弯

曲半径间隔较小,间隔为 0.01 mm。将不同的光纤弯曲半径(9.14, 9.15, 9.16, 9.17 mm)代入(7)式和

(8)式,得到了 4 组不同弯曲半径下光纤弯曲损耗随温度变化的曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出:弯曲半径越大,损耗越小;半径每增加 0.01 mm,损耗

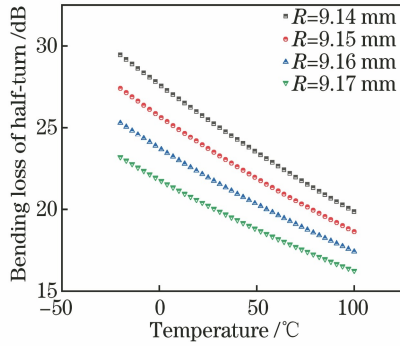
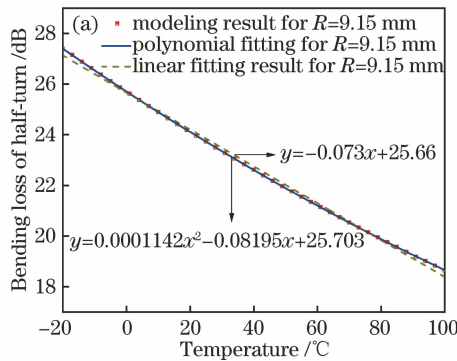


图 4 光纤在不同弯曲半径下弯曲损耗随温度变化的曲线
Fig. 4 Curves of fiber bending loss with temperature at different bending radii



平均下降 1.7 dB;当半径越小时,在 $-20 \sim 100$ °C 的温度区间损耗变化越大,温度灵敏度越高;当弯曲半径为 9.14 mm 时,温度灵敏度约为 $0.08 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。

选择 $R=9.15 \text{ mm}$ 的仿真结果进行拟合分析,9.15 mm 弯曲半径下的弯曲损耗随温度变化的曲线拟合结果,如图 5 所示。从图 5(a)拟合结果来看,尽管拟合线性度高达 0.997,但图 5(b)表明最大残差为 0.283 dB。考虑到残差所带来的较大温度误差,应对其进行高阶拟合。相比之下二阶多项式拟合可以更好地匹配仿真结果,拟合公式 $y = 0.0001142x^2 - 0.08195x + 25.703$ 。与线性拟合残差相比,二阶拟合的最大残差仅为 0.015 dB,这说明利用二阶多项式函数来描述弯曲损耗随温度变化的关系,误差相对更小。

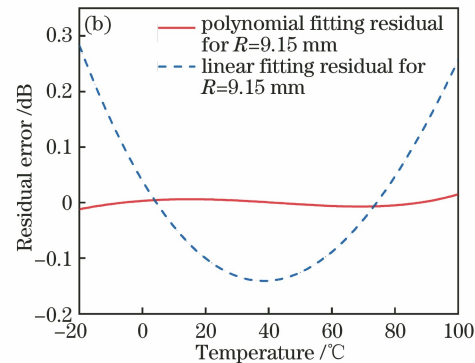


图 5 9.15 mm 弯曲半径下损耗随温度变化的曲线拟合结果。(a)线性拟合与多项式的拟合曲线;
(b)两种拟合方式的拟合残差

Fig. 5 Curve fitting results of loss with temperature at 9.15 mm bending radius. (a) Linear fitting and polynomial fitting curves; (b) fitting residuals of two fitting methods

4 实验结果与讨论

4.1 PI 涂覆的光纤宏弯传感器制备

制备宏弯温度传感器的传感光纤为 1060-XP 光纤,其原涂覆层的材料为丙烯酸树脂,长期工作温度需低于 75 °C,因此不适用于较高的温度环境。此外,实验中发现弯曲的传感光纤静止不动,光纤的弯曲损耗仍有较大波动,原因在于带原涂覆层的弯曲光纤并不是完美的纤芯-包层-无限涂覆层结构^[4]。由于实际涂覆层的厚度有限且不止一层,而 WGM 大部分处于包层与最内圈涂覆层界面,还有小部分存在于涂覆层-空气界面,当外界空气处于流动状态时,这一小部分 WGM 在模式耦合过程中便会导致光功率的波动,从而降低弯曲损耗的测量精度。基于上述原因,本文选用 PI 薄膜来替代原有涂覆层,在薄膜厚度与原涂覆层直径一致的基础上,实现无

限涂覆层的效果。PI 作为近年来比较热门的聚合物材料^[26]而受到广泛关注,它主要是由二元酐和二元胺合成,可以根据实际用途进行各种组合以获得不同性能。当将 PI 用作光纤涂覆层时,其不仅能够增强传感器的机械性能,而且可显著提升光纤耐热性能。

当光纤弯曲半径为 9.1 mm 时,计算可得弯曲外圈周长为 5.7 cm,适当增加余量至 7.5 cm,全部涂覆 PI 薄膜。光纤温度传感器的制备流程如图 6 所示,其中 PI 膜^[26-27]是将热固性聚酰胺酸溶液(PAA)经高温热亚胺化制备合成的。在此之前需要制备玻璃模具,玻璃经过粘合形成 $80 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 大小的凹槽,将去除涂覆层的裸纤部分固定在长方形凹槽中,倒入适量的 PAA 溶液使其充满整个凹槽,并用高温胶带封住两端,由于溶液十分黏稠,不用担心渗漏。

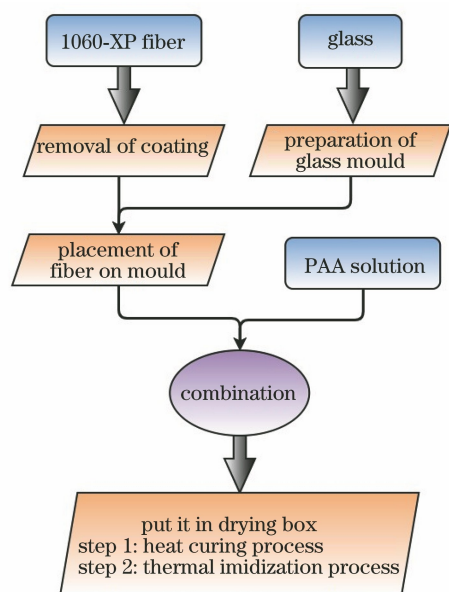


图 6 光纤温度传感器的制备流程

Fig. 6 Preparation process of fiber-optic temperature sensor

之后将带有样品的模具放入干燥箱中,第一阶段设置 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 并干燥 4 h ,目的是缓慢蒸发溶剂,排空溶液中的气泡。由于溶液固含量为 20% ,故加热结束后可以获得厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的初始薄膜(此阶段为溶液的热固化)。为了保证 PI 薄膜的厚度均匀性,在较长的低温干燥时间(温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,时间为 4 h)下消除溶液中的微气泡,之后将干燥后的初始薄膜裁剪成含有裸纤部分的窄条(宽约为 1 mm),以避免片状薄膜具有较大的收缩应力而导致不平整。第二阶段为高温亚胺化过程,设置初始温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,每升温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 1 h ,升温间隔时间为 10 min ,最高热处理温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (高于此温度原涂覆层就会碳化变黑),之后便制备出图 7 的光纤宏弯温度传感器样品。

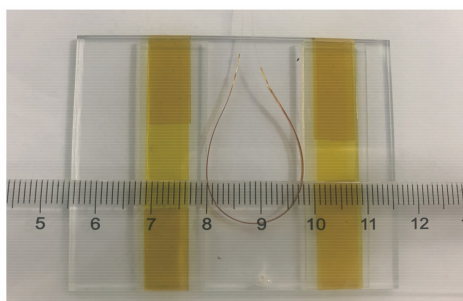


图 7 聚酰亚胺涂覆的 1060-XP 光纤传感器

Fig. 7 1060-XP fiber-optic sensor with polyimide coating

内置光纤由于去除了原涂覆层,故在制备过程中很好地被 PI 薄膜包裹。在制备过程中由于光纤

测温区域的两侧光纤保留了原涂覆层,裸纤与基板底部之间的距离为 $37.5\text{ }\mu\text{m}$,两侧光纤原涂覆层的直径可认为是相同尺寸,这可保障内置光纤在 PI 薄膜内厚度方向的位置误差为 μm 量级,PI 薄膜弯曲成半径为 10 mm 量级的圆环状后,相应的内置光纤在圆环径向的位置偏差可忽略。在圆环状 PI 薄膜中,内置光纤在轴向的位置偏差经测量最大约为 $100\text{ }\mu\text{m}$,但由于轴向偏差不会影响测温区域的光纤弯曲半径,因此其对弯曲损耗的影响也可以忽略。

从外观来观察样品,薄膜与裸纤部分结合紧密,裸纤部分可以随意弯曲而不发生断裂,说明 PI 薄膜能够很好地保护光纤。其次相对于原来的双层涂覆,PI 涂覆层只有一层且表面相对粗糙,可抑制涂覆层-空气界面产生 WGM,使其只存在于包层-涂覆层界面,因此尽管涂覆层的厚度有限,但仍可以将其视作理想的纤芯-包层-无限涂覆层模型。

1060-XP 光纤的工作温度范围为 $-55\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,本文的实际测量温度为 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本文制备的光纤温度传感器包含三段:作为温度传感探头的中间段为涂覆 PI 的 1060-XP 光纤,因 PI 涂覆层的工作温度范围为 $-200\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$,所以该温度传感探头段能可靠地工作在 $-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内而不受损;温度传感探头两端的光纤段为保留原涂覆层的 1060-XP 光纤,其为光信号传输段。本文制作的光纤温度传感器,其中间段的光纤(涂覆 PI)长度约为 1.5 倍的弯曲测温探头长度(本文的传感器弯曲长度为 57 mm ,中间段光纤长度为 75 mm),这可以避免两段光信号传输段的光纤处于测温环境,能有效避免两段光信号传输段的光纤受损。

4.2 光纤宏弯温度传感实验

传感实验装置如图 8 所示,装置主要包括 NKT 激光器(波长为 1550 nm)、隔离器、 1×2 耦合器、弯曲传感光纤、参考光纤、铝制温控平台、光功率计以及贴片式热电偶温度计。实验采用功率比值测量的方法,从激光器输出功率约为 5 mW 的光经耦合器分成功率相同的两束光,分别进入传感臂和参考臂中,使用功率计来测量两臂的输出光功率。根据输出功率与输入功率的变化关系便可求出光纤的宏弯损耗,这种测量机制可避免因光源波动而导致实验存在误差。实际上,分光比为 $50:50$ 的耦合器所输出的两束光的功率只是相近,并不完全相同,若想得到更准确的弯曲损耗结果,则需要对参考臂测得的光功率进行比例系数的修正。

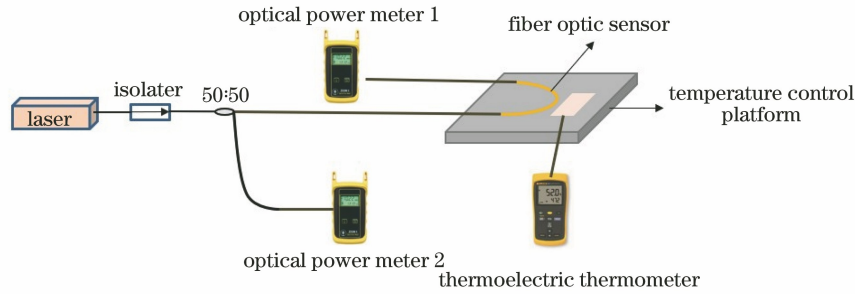


图 8 光纤宏弯温度传感装置示意图

Fig. 8 Schematic of fiber-optic macrobending temperature sensor

假设耦合器出射的两束光的功率分别为 P_1 (传感臂) 和 P_2 (参考臂), 两者之间的功率比例系数 $\mu = P_2/P_1$, 功率 P_1 经过带有弯曲损耗的光纤环之后的功率为 P_3 。那么实际弯曲损耗 L_s 应为

$$L_s = 10 \cdot \lg\left(\frac{P_3}{P_1}\right) = 10 \cdot \lg\left(\mu \cdot \frac{P_3}{P_2}\right) \quad (9)$$

在测量过程中, 由于光纤环的弯曲半径为 9.1 mm, 所以即便是细微的振动都有可能造成半径的改变, 从而影响测量结果的准确性, 因此需要对固定光纤环的夹具进行设计。本文采用的方法是用一块 2 mm 厚的玻璃作为基板, 用两块 1 mm 厚的载玻片固定基板, 即形成 1 mm 深的凹槽, 两载玻片之间的间隙即为光纤环的直径, 将光纤固定并用高温

胶水粘合即可固定弯曲半径。玻璃的主要成分为二氧化硅, 其热膨胀系数比较小, 故夹具的热膨胀效应对光纤弯曲半径改变的影响可以忽略。

实验前将功率计分别接入耦合器出射的两端, 每改变一次激光器的输出功率, 都记录下出射两端的光功率并计算比值, 多次测量取平均值求得 P_2 与 P_1 之间的比例系数 $\mu = 1.2$ 。实验过程中将热电偶贴片和固定光纤的夹具放置在温控平台上, 用游标卡尺测得此时光纤的弯曲半径为 9.15 mm, 之后用隔热罩将其密封, 保证内部温度在升温过程中均匀稳定。自 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 起每增加 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 待温度稳定后记录功率数据, 通过(9)式即可求出各温度点所对应的弯曲损耗值。实验测量结果和拟合结果如图 9 所示。

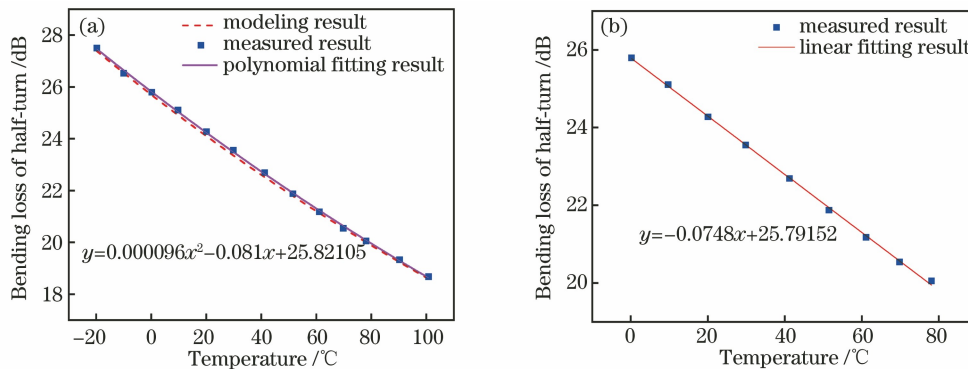
图 9 9.15 mm 弯曲半径下光纤宏弯损耗随温度变化的曲线。(a)温度范围为 $-20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$; (b)温度范围为 $0\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$

Fig. 9 Curve of fiber-optic macrobending loss with temperature at 9.15 mm bending radius.

(a) Temperature range is $-20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$; (b) temperature range is $0\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$

在 $-20\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间下, 考虑到残差的影响, 实验测量结果较适用于二阶多项式的拟合。从图 9(a) 可以看出, 测量结果及其二阶多项式拟合曲线与仿真结果基本匹配, 最大测量误差约为 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$, 平均温度灵敏度达到 $0.072\text{ dB}/^\circ\text{C}$, 与理论值较为接近。由于采用的光功率计的分辨能力为 0.01 dB , 理论上该传感器的温度分辨能力可达 $0.14\text{ }^\circ\text{C}$ 。与目前光纤宏弯温度传感器的最好性能参数相比, 本文所制备的传感器的测温范围更广, 温

度灵敏度可提升 3 倍以上, 温度分辨能力提升 2 倍。如图 9(b) 所示, 当温度测量范围较小时, 在 $0\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内测量得到曲线的拟合线性度大于 0.999, 此时仿真计算结果与其线性拟合残差减小, 为此无需用多项式拟合, 线性拟合可使解调温度的过程更简便。

考虑到聚酰亚胺可作为湿敏材料, 故其用于制备湿度传感器, 如文献[28]中利用聚酰亚胺材料制备 FBG(Fiber Bragg Grating)湿度传感器。根据文

献[28]可知,聚酰亚胺材料因相对湿度变化引起的光纤长度变化量为 $1.14 \mu\text{m}/\%$ 。按照该值,本文设计的光纤宏弯温度传感器(弯曲半径为 9.15 mm ,弯曲长度为 57 mm)在 $40\% \sim 70\%$ 的相对湿度范围内,因聚酰亚胺材料湿敏膨胀引起的光纤弯曲长度变化量为 $34.2 \mu\text{m}$ 。利用(8)式计算得出由 PI 湿敏膨胀导致的弯曲损耗为 0.0063 dB ,对应的温度测量误差为 $0.09 \text{ }^\circ\text{C}$,相比本文温度传感器 $0.14 \text{ }^\circ\text{C}$ 的分辨能力,该环境湿度变化所导致的温度测量误差可以忽略。

此外,在约 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境温度下对传感器进行功率稳定性测试,结果如图 10 所示。

当弯曲半径为 9.15 mm 、温度为 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (实际温度为 $89.85 \text{ }^\circ\text{C}$) 时,对所制备的传感器进行了 2 h 的稳定性测试,每隔 5 min 记录一组数据。从图 10 来看,弯曲损耗稳定在 19.5 dB 上下,平均值为 19.489 dB ,与图 9 中 $90.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 下的 19.51 dB 相接

表 2 不同光纤宏弯温度传感器的参数对比

Table 2 Comparison of parameters of different fiber-optic macro-bend temperature sensors

Fiber option	Range / $^\circ\text{C}$	Sensitivity /($\text{dB} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Resolution / $^\circ\text{C}$	Linear regression coefficient
SMF:1060-XP ^[6]	0-75.0	0.01200	<1.00	—
SMF:1060-XP ^[7]	0-80.0	0.02300	0.50	>0.997
Multimode POF ^[10]	27.2-50.2	0.01290	0.30	>0.990
Multimode POF ^[12]	25.0-67.0	0.00382	—	0.995
SMF:1060-XP (this paper)	-20.0-100.0	0.07200	0.14	>0.999(0-80 $^\circ\text{C}$), >0.997(-20-100 $^\circ\text{C}$)

本文制备的基于 1060-XP 光纤的宏弯温度传感器,与文献[6]相比增加了 PI 涂覆层,这有效增强了传感光纤的机械强度,且不同于文献[7]的镀镍保护层,PI 涂覆的 1060-XP 光纤可灵活调整弯曲半径以适应不同的测温需求。以上实验结果证明,本文制备的光纤宏弯温度传感器可以获得比较理想的纤芯-包层-无限涂覆层结构,聚酰亚胺涂覆层消除了涂覆层-空气界面的回音壁模式,使回音壁模式只存在于包层-涂覆层界面,使得测温结果更准确,同时实现了测温范围的增大和测温光纤机械强度的增强。此外,该光纤宏弯温度传感器的制备方式简单,可以微调传感器的弯曲半径、入射波长以及 PI 的折射率等参数,能够用来制备满足不同性能指标的光纤宏弯温度传感器。

5 结 论

本文提出了一种基于 PI 涂覆的新颖光纤宏弯温度传感器,利用基于纤芯-包层-无限涂覆层结构的光纤弯曲损耗-温度测量方法确定了光纤弯曲半

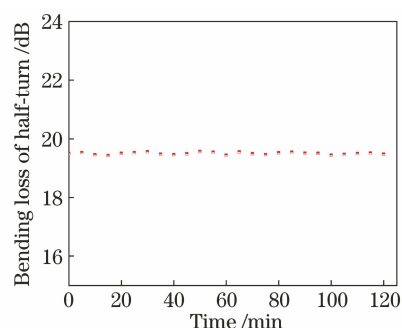


图 10 9.15 mm 弯曲半径和 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度下传感器的稳定性测试结果

Fig. 10 Stability test results of sensor at 9.15 mm bending radius and $90 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature

径。25 组数据的均方根误差约为 0.0379 dB ,温度偏差约为 $0.53 \text{ }^\circ\text{C}$,总体来看该温度传感器具有良好的重复性与稳定性。将本文提出的传感器与已有的其他光纤宏弯温度传感器进行性能参数对比,结果如表 2 所示。

径,将 PI 薄膜涂覆在 1060-XP 光纤包层外获得了新型的光纤宏弯温度传感器。在弯曲半径为 9.15 mm 下,该传感器实现了 $-20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的宽温测量范围,灵敏度达到 $0.072 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,分辨能力约为 $0.14 \text{ }^\circ\text{C}$ 。与已有的光纤宏弯温度传感器相比,所设计的传感器的测温范围与温度灵敏度都有显著提升,PI 涂覆不仅可以使传感器耐受更高温度,还可以有效保护光纤,使其在小弯曲半径下正常工作。涂覆层结构的改变消除了光纤与空气界面所产生的小部分 WGM,使测量结果更准确。

参 考 文 献

- [1] Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(3): 216-220.
- [2] Renner H. Bending losses of coated single-mode fibers: a simple approach [J]. Journal of Lightwave Technology, 1992, 10(5): 544-551.
- [3] Faustini L, Martini G. Bend loss in single-mode fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997,

- 15(4): 671-679.
- [4] Wang Q, Farrell G, Freir T. Theoretical and experimental investigations of macro-bend losses for standard single mode fibers [J]. *Optics Express*, 2005, 13(12): 4476-4484.
- [5] Peng X L, Cha Y P, Zhang H, et al. Temperature response properties of macrobending loss of single-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(11): 1106006.
彭星玲, 茶映鹏, 张华, 等. 单模光纤宏弯损耗的温度响应特性 [J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 1106006.
- [6] Rajan G, Semenova Y, Mathew J, et al. Experimental analysis and demonstration of a low cost fibre optic temperature sensor system for engineering applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 163(1): 88-95.
- [7] 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.
- [8] Nam S H, Yin S Z. High-temperature sensing using whispering gallery mode resonance in bent optical fibers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(11): 2391-2393.
- [9] Raikar U S, Lalasangi A S, Kulkarni V K, et al. Temperature dependence of bending loss in single mode communication fiber: effect of fiber buffer coating [J]. *Optics Communications*, 2007, 273(2): 402-406.
- [10] Moraleda A T, García C V, Zaballa J Z, et al. A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend [J]. *Sensors*, 2013, 13(10): 13076-13089.
- [11] Leal-Junior A, Frizera A, Marques C, et al. Polymer-optical-fiber-based sensor system for simultaneous measurement of angle and temperature [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(7): 1717-1723.
- [12] Tapetado A, Pinzón P J, Zubia J, et al. Polymer optical fiber temperature sensor with dual-wavelength compensation of power fluctuations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(13): 2716-2723.
- [13] Wang P F, Semenova Y, Wu Q, et al. Macrobending single-mode fiber-based refractometer [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(31): 6044-6049.
- [14] Wang P F, Semenova Y, Li Y, et al. A macrobending singlemode fiber refractive index sensor for low refractive index liquids [J]. *Photonics Letters of Poland*, 2010, 2(2): 67-69.
- [15] Zheng Y, Xiao W, Zhu Z W. Research on an optical fiber linear displacement sensor based on bending loss for use over large range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1206002.
郑勇, 肖旺, 朱正伟. 一种大量程光纤弯曲损耗型线性位移传感器研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1206002.
- [16] Xiao D, Wan S P, Yin X, et al. Pulse acquisition system based on curved optical fiber sensor head [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0506003.
肖登, 万生鹏, 尹玺, 等. 基于弯曲光纤传感头的脉搏采集系统 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0506003.
- [17] Nguyen N Q, Gupta N. Power modulation based fiber-optic loop-sensor having a dual measurement range [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(3): 033502.
- [18] Cheng L, Li Y M, Ma Y M, et al. The sensing principle of a new type of crack sensor based on linear macro-bending loss of an optical fiber and its experimental investigation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 272: 53-61.
- [19] Her S C, Lin W N. Simultaneous measurement of temperature and mechanical strain using a fiber Bragg grating sensor [J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4223.
- [20] Hu B Y, Wen F R, Cheng Y S, et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure based on cascaded Fabry-Perot interferometer [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(19): 1906006.
胡白燕, 文富荣, 程永山, 等. 基于级联腔法布里-珀罗干涉仪的温度和压力同时测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(19): 1906006.
- [21] Wang Q S, Wang W J, Guo X, et al. Error correction method for distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 170602.
王青山, 王伟杰, 郭旭, 等. 分布式拉曼光纤温度传感器的误差修正方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 170602.
- [22] Lee H, Noda K, Mizuno Y, et al. Distributed temperature sensing based on slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry with over 10 km measurement range [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(5): 276-278.
- [23] Song X F. Research and progress of polyimide [J]. *Fiber Composites*, 2007, 24(3): 33-37.
宋晓峰. 聚酰亚胺的研究与进展 [J]. *纤维复合材料*, 2007, 24(3): 33-37.
- [24] Peng X L, Zhang H, Li Y L. Simulation study on influencing factors of macrobending loss of optical fiber [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(10): 1132-1136.
彭星玲, 张华, 李玉龙. 光纤宏弯损耗性能影响因素

- 的仿真研究[J]. 激光与红外, 2014, 44(10): 1132-1136.
- [25] Wang P F, Rajan G, Semenova Y, et al. Temperature dependence of a macrobending edge filter based on a high-bend loss fiber [J]. Optics Letters, 2008, 33(21): 2470-2472.
- [26] Bai W, Yang M H, Dai J X, et al. Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements[J]. Optics Express, 2016, 24(4): 3230-3237.
- [27] Gu S J. Development and performance research of fluorinated polyimides coated fiber Bragg grating humidity sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 25-30.
- 谷守杰. 含氟聚酰亚胺涂覆的光纤光栅湿度传感器开发及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 25-30.
- [28] Xing X K, Jiang X, Liu F F, et al. Research on FBG humidity sensor based on polyimide material[J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress. [2021-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210816.1529.040.html>.
- 邢心魁, 蒋雪, 刘凡凡, 等. 基于聚酰亚胺材料的 FBG 湿度传感器研究 [J/OL]. 激光与光电子学进展. [2021-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210816.1529.040.html>.