

doi:10.3788/gzxb20184711.1106006

单模光纤宏弯损耗的温度响应特性

彭星玲¹, 茶映鹏^{1,2}, 张华², 李玉龙²

(1 南昌工程学院 机械与电气工程学院 江西省精密驱动与控制重点实验室, 南昌 330099)

(2 南昌大学 机电工程学院 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 南昌 330031)

摘 要:为了实现光纤宏弯温度传感,对单模光纤宏弯损耗的温度响应特性进行了理论与实验研究.理论上对单模光纤宏弯损耗理论公式进行了温度修正.基于该公式模拟了波长、弯曲半径以及温度对纤芯-无限包层结构单模光纤宏弯损耗性能的影响.设计制作了一种带吸收层和镍保护层的单模光纤宏弯温度传感探头并进行了温度传感性能实验测试.结果表明:纤芯-无限包层结构单模光纤宏弯损耗对弯曲半径、波长和温度变化较为敏感,与温度之间的响应呈线性,该探头的温度分辨率为 0.4℃;通过减小弯曲半径和提高光源波长,可进一步提高其温度灵敏度和分辨率.该结构光纤可近似看作纤芯-无限包层结构光纤,用于开发光纤宏弯温度传感器.

关键词:纤芯-无限包层结构;单模光纤;宏弯损耗;温度响应;吸收层;保护层

中图分类号:TN818;TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)11-1106006-8

Temperature Response Properties of Macrobending Loss of Single-mode Fiber

PENG Xing-ling¹, CHA Ying-peng^{1,2}, ZHANG Hua², LI Yu-long²

(1 *Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive & Control, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China*)

(2 *Key Lab for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, School of Mechatronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

Abstract: In order to realize fiber-optic temperature sense based on macrobending loss properties of single-mode fiber, temperature sensing properties of macro-bend single-mode fiber were studied theoretically and experimentally. Temperature correction is made for a classical macrobending loss theoretical formula of single-mode fiber. Then simulation analysis of effects of bend radius, wavelength and temperature on bend loss of a single-mode fiber with core-infinite cladding structure is made based on the formula. After that, a single-mode fiber temperature sensor with an inner absorption layer and an outer nickel layer outside the cladding layer of the fiber is designed and made. Finally, experimental tests of temperature sensing performance of the sensor are carried out and discussed. Results show that macrobending loss of the fiber with core-infinite cladding structure is sensitive to bend radius, wavelength of light resource and temperature, and the temperature response of the sensor is linear. In addition, the proposed fiber-optic sensor shows a temperature resolution of 0.4 °C. It's worth noting that the temperature sensitivity and resolution can be increased by decreasing the bend radius and raising the wavelength of light resource. Thus such single-mode fiber can be treated as core-infinite cladding structure single-mode fiber, which can be used to develop macro-bend optical fiber sensor based on macrobending loss properties.

Key words: Core-infinite cladding structure; Single-mode fiber; Macrobending loss; Temperature

基金项目:江西省教育厅科技项目(No. GJJ171007)和江西省科技厅重点研发计划项目(No. 20171BBE50009)资助

第一作者:彭星玲(1988-),女,讲师,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email:pengxingling0223@163.com

通讯作者:张华(1964-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤智能结构、机器人与焊接自动化技术. Email:h Zhang@ncu.edu.cn

收稿日期:2018-07-05;录用日期:2018-09-06

<http://www.photon.ac.cn>

sensing; Absorption layer; Protecting layer

OCIS Codes: 060.2370; 060.2400; 060.2430; 060.2300

0 引言

光纤由于在远距离信号传输中易发生弯曲而产生损耗,从而增加传输附加损耗,被认为是光通信系统中信号传输十分不利的因素^[1].但利用光纤体积小、易弯曲和抗电磁干扰等特性,可制成各类光纤宏弯传感器,用于感测温度^[2]、位移^[3]、折射率^[4]、湿度^[5]、应变^[6]等物理量.其中,研究者较为关注的光纤宏弯温度传感器可分为四类:第一类是利用单模光纤发生宏弯曲时光在包层或涂覆层中产生的回音壁模(Whispering Gallery Mode, WGM)与纤芯导模之间的干涉作用,建立相位或波长与温度之间的关系进行温度的测量,这种传感方式能实现较高准确度的传感响应,但需要复杂的系统提取相位信息或者精确去除一部分包层,操作比较困难^[7-9];第二类是利用 WGM 与纤芯导模之间的耦合,使光纤宏弯损耗随外界参量变化发生振荡现象,通过建立共振峰值损耗和被测量之间的关系实现较大温度范围内的较低分辨力传感,或者通过建立峰值损耗附近的损耗与被测量之间的关系,在较窄温度范围内,实现较高分辨的传感,这种传感器无需对光纤进行特殊处理,常采用弯曲的塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)作为传感探头,可挠性好,容易制作较小弯曲半径的传感器,操作简单,但难以得到宏弯损耗与被测量之间的较大范围的线性输出^[10-12];第三类是对 POF 作特殊处理,如通过去除 POF 部分包层或者纤芯的厚度^[13],对 POF 传感器在高湿度环境下进行退火等热处理^[14],采用双波长自参照法对功率波动进行补偿^[15],以减少传感器的非线性误差、改善线性输出特性、提高传感器的可靠性;第四类是通过在石英光纤包层表面涂覆有效吸收层抑制 WGM,实现光纤宏弯损耗对外界响应的线性输出,这类传感器采用光强信号解调,制作简单,能够获得较大范围的线性输出,传感器分辨率可小于 0.5℃,但需要去除涂覆层、增加有效的吸收层,由于去除了涂覆层,光纤非常脆弱,在操作和使用过程中极容易断裂,需要在增加吸收层后再进行保护性封装,以提高使用寿命^[16-17].

对这四类光纤宏弯温度传感器而言,光纤的宏弯损耗取决于光纤结构、弯曲尺寸和光源波长,而温度变化会引起光纤结构(如纤芯和包层折射率、纤芯和包层尺寸等)和弯曲尺寸发生变化,从而改变光纤宏弯损耗.预测温度变化引起的光纤宏弯损耗是研发光纤宏弯温度传感器的理论基础,而目前计算单模光纤宏弯损耗的理论公式很少考虑温度对宏弯损耗的影响^[18-20].本文在 MARCUSE D^[18]建立的经典的单模光纤宏弯损耗理论公式基础上,考虑温度对光纤结构参量的影响,对单模光纤宏弯损耗理论公式进行了温度修正和温度传感性能的理论分析,模拟了不同温度、弯曲半径和波长条件下,光纤的温度相关宏弯损耗变化.设计了一种带内吸收层和外保护层的单模光纤宏弯温度传感器和比例功率测量系统,该光纤传感器的内表面采用印度墨水涂覆形成内吸收层,外表面采用化学镀-电镀镍过程形成外保护层,从而既可改善传感性能,也能实现传感器的有效保护,搭建的功率测量系统可提高宏弯损耗测量的准确性.

1 单模光纤宏弯温度传感理论分析

温度变化容易引起光纤宏弯损耗的改变,温度对单模光纤宏弯损耗的影响主要来自两个方面:光纤折射率的变化(热光效应),弯曲半径、弯曲长度和光纤纤芯尺寸的变化(热膨胀效应).

温度使光纤的弯曲长度发生了变化,假设光纤的热膨胀系数为 α ,则光纤弯曲长度随温度变化表示为 $L(T) = L_0(1 + \alpha\Delta T)$,弯曲半径变化为 $R(T) = R_0(1 + \alpha\Delta T)$.光纤纤芯半径随温度变化表示为 $a(T) = a_0(1 + \alpha\Delta T)$.由于光纤本身的热膨胀系数 α 很小,以石英光纤为例,约为 $5.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,造成纤芯半径、弯曲半径和弯曲长度的变化很小,从而引起光纤宏弯损耗的变化不明显,故引起光纤宏弯损耗随环境温度变化的主要因素是纤芯和包层折射率的变化.

当外界温度变化时,纤芯和包层折射率随温度的变化表示为^[21]

$$\begin{cases} n_1(T) = n_1(T_0) \left[1 + \int_{T_0}^T \frac{dn_1}{n_1 dT} dT \right] \\ n_2(T) = n_2(T_0) \left[1 + \int_{T_0}^T \frac{dn_2}{n_2 dT} dT \right] \end{cases} \quad (1)$$

设 $\xi_1 = \frac{dn_1}{n_1 dT}$ 和 $\xi_2 = \frac{dn_2}{n_2 dT}$ 分别为光纤纤芯和包层的热光系数,即折射率的温度系数,则折射率随温度的

变化为

$$\begin{cases} n_1(T) = n_1(T_0)(1 + \xi_1 \Delta T) \\ n_2(T) = n_2(T_0)(1 + \xi_2 \Delta T) \end{cases} \quad (2)$$

根据 MARCUSE D 的理论公式^[18],纤芯-无限包层结构单模光纤宏弯损耗系数为

$$2\alpha_0 = \frac{\sqrt{\pi} \kappa^2 \exp \left[\left(-\frac{2}{3} \gamma^3 / \beta_0^2 \right) R \right]}{2\gamma^{3/2} V^2 \sqrt{R} K_{-1}(\gamma a) K_{+1}(\gamma a)} \quad (3)$$

如果考虑弯曲应力引起的弹光效应修正,以及温度变化引起的相应参量变化, $2\alpha_0$ 变为

$$2\alpha(T) = \frac{\sqrt{\pi} [\kappa(T)]^2 \exp \left[\left(-\frac{2}{3} [\gamma(T)]^3 / [\beta_0(T)]^2 \right) R_{\text{eff}} \right]}{2[\gamma(T)]^{3/2} [V(T)]^2 \sqrt{R_{\text{eff}}} K_{-1}[a\gamma(T)] K_{+1}[a\gamma(T)]} \quad (4)$$

式中, R 为弯曲半径, $R_{\text{eff}} = \eta R$, η 称为弯曲半径的弹光修正系数, λ 为光源波长, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间波数, $\kappa(T) = \sqrt{[n_1(T)]^2 k^2 - \beta_0^2}$, $\gamma(T) = \sqrt{\beta_0^2 - [n_2(T)]^2 k^2}$,归一化频率 $V(T) = ak \sqrt{[n_1(T)]^2 - [n_2(T)]^2}$,基模传播常量 $\beta_0(T) = \sqrt{[kn_1(T)]^2 - \frac{2.27645V(T) - 0.306 [V(T)]^2 - 0.992}{a^2}}$, $K_{\pm 1}[a\gamma(T)]$ 为贝塞尔函数。

那么长度为 L 的光纤宏弯损耗表示为

$$L_s = 10 \log_{10} \exp [2\alpha(T)L] = \frac{4.343 \sqrt{\pi} [\kappa(T)]^2 \exp \left\{ \left\{ -\frac{2}{3} [\gamma(T)]^3 / [\beta_0(T)]^2 \right\} R_{\text{eff}} \right\} L}{[\gamma(T)]^{3/2} [V(T)]^2 \sqrt{R_{\text{eff}}} K_{-1}[a\gamma(T)] K_{+1}[a\gamma(T)]} \quad (5)$$

式(5)专门用于计算纤芯-无限包层结构的单模光纤宏弯温度相关损耗,公式具有计算简单、准确性高和应用方便的特点,为了更清楚地显示单模光纤宏弯损耗与温度变化之间的关系,根据式(5)模拟分析了不同温度、弯曲半径和波长条件下,弯曲圈数为 1 圈的 1 060XP 光纤的温度相关宏弯损耗。其中室温下,波长为 1 550 nm 时,1 060XP 光纤纤芯和包层的折射率分别为 1.463 13 和 1.456 42,热光系数分别约为 $1.1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 和 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, η 为 1.298^[22]。模拟结果如图 1~3 所示。

从图 1 可以看出,在波长为 1 550 nm, $T = 0^\circ\text{C}$ 和 $T = 100^\circ\text{C}$ 时,1 060XP 光纤的宏弯损耗随弯曲半径的变化趋势相同,都随着弯曲半径增大而减小,波长和弯曲半径相同时,温度为 0°C 时宏弯损耗要大

于 100°C 时的宏弯损耗,且弯曲半径越大时,宏弯损耗差值越小。由图 2 可知,在波长为 1 500 nm,弯曲半径分别为 7 mm、10 mm、13 mm 和 15 mm 时,1 060XP 光纤宏弯损耗随着温度增加都逐渐减小,呈线性变化;弯曲半径为 7 mm 时,光纤宏弯损耗随温度增加减小的最多,灵敏度高达 $0.087 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,相应的残差较小,最大残差仅 0.11 dB;弯曲半径为 15 mm 时,光纤宏弯损耗随温度增加减小的最少,灵敏度仅为 $0.0024 \text{ dB}/^\circ\text{C}$,同时残差也很小,最大残差仅 0.01 dB。从图 3 可以看出,在波长为 1 600 nm 时,1 060XP 光纤宏弯损耗对温度的响应也是呈线性的,灵敏度与弯曲半径有关,在 $R = 7 \text{ mm}$ 时最大, $R = 10 \text{ mm}$ 时其次, $R = 13 \text{ mm}$ 时更小, $R = 15 \text{ mm}$ 时最小。结合图 2 和图 3 可知,1 060XP 光纤宏弯损耗对温度变化比较敏感,其敏感程度还与弯曲半径和波长有关,在相同弯曲半径处,在波长为 1 600 nm 时,1 060XP 光纤宏弯损耗随温度的变化明显大于波长为 1 500 nm 时的变化,波长越长、弯曲半径越小时,温度引起的光纤宏弯损耗变化越明显。

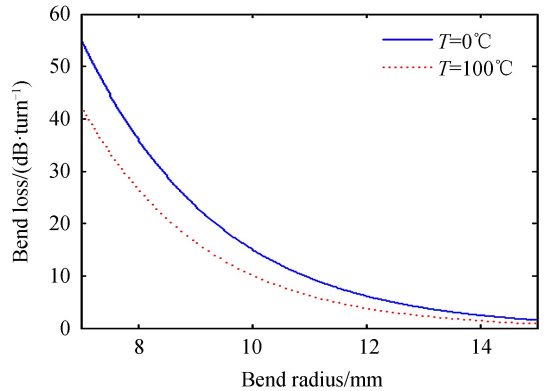


图 1 波长为 1 550 nm 时光纤宏弯损耗随弯曲半径变化关系

Fig.1 Bend loss response of the fiber at wavelength 1 550 nm versus bend radius

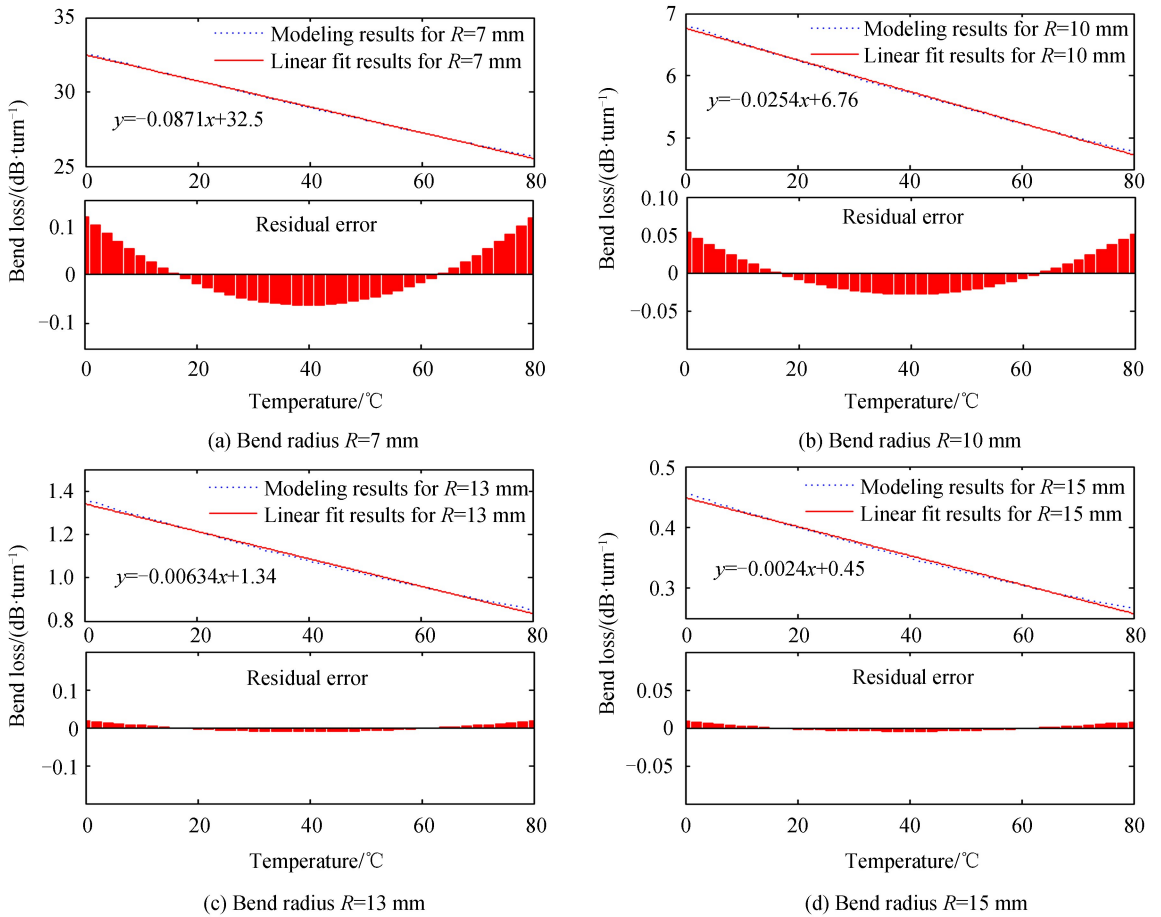
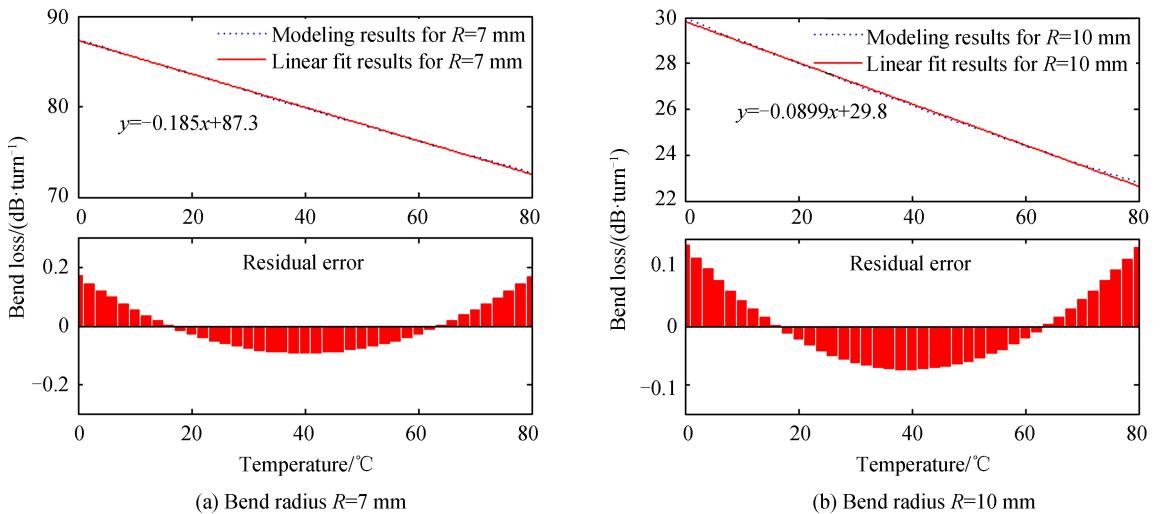


图2 波长为 1 500 nm 时光纤宏弯损耗随温度变化关系曲线

Fig.2 Bend loss response of the fiber at different bend radius versus temperature at wavelength of 1 500 nm

由于纤芯-无限包层结构光纤能够有效抑制 WGM 的形成,从而抑制 WGM 与纤芯导模的耦合引起的光纤宏弯损耗随弯曲半径或者温度变化的振荡现象.因此该结构光纤宏弯损耗随着弯曲半径增加而单调减小,并且波长和弯曲半径固定时,光纤的温度相关宏弯损耗仅取决于纤芯和包层的热光系数,而纤芯和包层具有正的热光系数,且纤芯的热光系数大于包层的热光系数,热引起纤芯和包层折射率的差值随着温度增加是线性增加的,从而导致宏弯损耗随温度的增加而线性减小.综上分析,纤芯-无限包层结构的 1 060XP 光纤宏弯损耗对温度的响应是呈线性的,非常适合用于研发光纤宏弯温度传感器,并且通过减小弯曲半径或者增加光源波长可增强宏弯损耗对温度的响应.



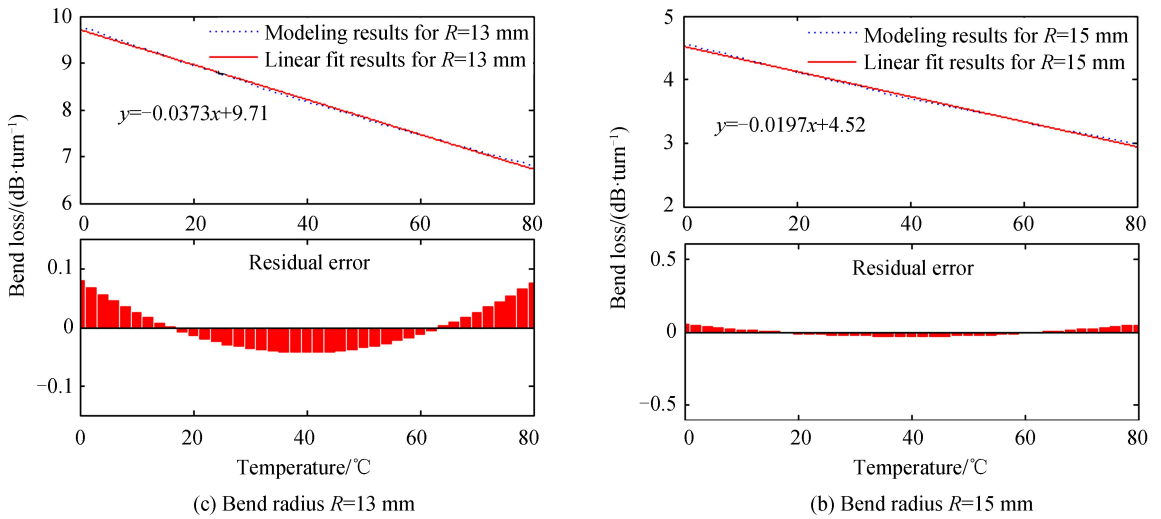


图3 波长为 1 600 nm 时光纤宏弯损耗随温度变化关系曲线
Fig.3 Bend loss response of the fiber versus temperature at wavelength of 1 600 nm

2 单模光纤宏弯温度传感实验研究

2.1 带保护层 U 型弯曲光纤的制作

根据上节的模拟结果可知,纤芯-无限包层结构单模光纤的宏弯损耗与温度之间呈线性关系.实际应用中光纤包层的尺寸是有限的,通常其直径为 125 μm,远远达不到无限厚.而在光纤包层表面涂覆上有效吸收层后,由于从纤芯辐射出的光极少在包层-吸收层界面发生反射,进入吸收层后基本都被吸收了,带有吸收层的光纤可以看成纤芯-无限包层结构.吸收层材料一般为印度墨水、黑色哑光漆、丙烯酸涂料等材料,它们虽然是较好的吸收层,但机械性能较差,对光纤起不到有效的保护作用.

本文采用 1 060XP 光纤,去除覆层后,在包层表面用微型毛笔涂抹印度墨水,待印度墨水在空气中晾干后,测得吸收层的厚度约为 22.5 μm.然后将光纤进行敏化、活化预处理和化学镀-电镀镍过程^[29],从而获得光纤的内吸收层和外镍保护层.其中,敏化液配方为氯化亚锡(SnCl₂·2H₂O, 10 g/l)和盐酸(HCl, 40 ml/l),常温下敏化 15 min.活化液配方为氯化钯(PdCl₂, 0.2~0.5 g/l),盐酸(HCl, 5 ml/l),常温下活化 20 min.采用的化学镀镍配方为硫酸镍(25g/l),次亚磷酸钠(20 g/l),丙酸(20 ml/l),硼酸(20 g/l),温度 80 °C,时间 2 h.电镀镍时将化学镀镍后的光纤浸入电镀溶液中作为阴极,镍板作为阳极,在直流电的作用下,光纤表面就会沉积出镍镀层.电镀镍配方为硫酸镍(NiSO₄·7H₂O, 280 g/l)、氯化镍(NiCl₂·6H₂O, 50 g/l)、硼酸(H₃BO₃, 35 g/l)、十二烷基硫酸钠(C₁₂H₂₅SO₄Na, 0.5 g/l).

图 4 为 U 型弯曲光纤电镀镍示意图,将化学镀镍后的光纤放入试管中形成 U 型弯曲,然后在试管中加入电镀镍溶液,采用小电流密度 5~30 mA/cm² 进行电镀约 20 h,直至形成刚性的 U 型弯曲光纤,然后将光

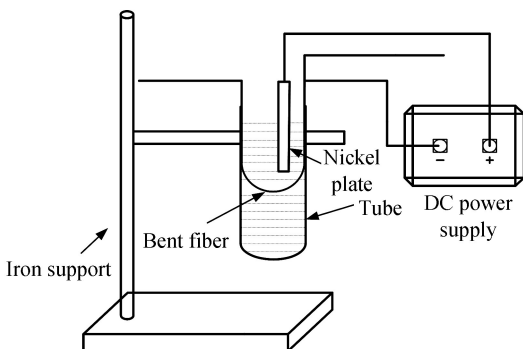


图4 U型弯曲光纤电镀镍示意图
Fig.4 Sketch of the electroplating nickel process for the U-shaped fiber



图5 保护后 U 型弯曲光纤
Fig.5 The U-shaped fiber with the inner India ink layer and outer nickel coating

纤取出,放入烧杯中继续电镀,以形成均匀的较厚镀层,此时 U 型弯曲光纤的弯曲直径约为 21.1 mm,镀镍层由两部分组成,微米级的化学镀镍层和毫米级的电镀镍,其中化学镀镍层的主要成分是镍磷合金,电镀镍层的成分是镍,化学镀-电镀过程形成的镍层厚度为 0.43 mm,如图 5 所示.由于印度墨水层的主要成分是纳米级的炭黑,在光波长 1 500~1 600 nm 范围内,对光的吸收率高达 99%^[17],从纤芯辐射出的光在印度墨水层几乎被完全吸收,带内吸收层和外镍涂覆层的宏弯光纤可近似看成是纤芯-无限包层结构光纤.由于镍保护层的热膨胀系数高于光纤,热膨胀系数不同而引起的热应力会改变纤芯和包层的折射率,从而改变光纤的宏弯损耗.根据本课题组的研究^[24],这种热应力引起的光纤折射率变化是线性的,可以进行修正,因此镍涂覆层在这里主要起到保护光纤的作用.

2.2 光纤宏弯温度传感实验

实验装置如图 6,包括可调谐激光器(Agilent 81960A)、分光器、弯曲光纤、参考直光纤、干式恒温器(JX-20)和光功率计(EXFO FOT-300).可调谐激光器为单模光纤提供单色光,分光器将光源发出的单色光分成功率相同的两束光,两个光功率计分别测量通过弯曲光纤和相同的参考直光纤的光功率,从而可测得弯曲光纤的输出功率和输入功率,根据输出功率与输入功率的变化,可以得到光纤的宏弯损耗.测量光纤的宏弯损耗时,采用这种比例功率测量机制可以避免光源功率的波动引起的测量误差,使得宏弯损耗的测量更为准确.采用干式恒温器加热光纤能够提供稳定的温度变化,可以避免水温箱加热温度升高时水流的波动对光纤的影响.

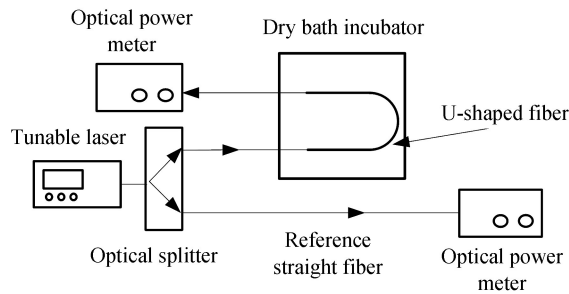


图 6 光纤宏弯温度传感装置示意图
Fig.6 Sketch of macro-bend fiber temperature sensor system

由于 1060XP 光纤宏弯损耗对温度变化较为敏感,而且弯曲半径越小、波长越大时,其宏弯损耗越大,为了对理论进行验证,采用两组温度实验;一组选用弯曲直径为 24.6 mm 仅涂覆印度墨水层的裸弯曲光纤半环进行温度传感实验,光源波长为 1 550 nm;另一组选用 2.1 节获得的弯曲直径为 21.1 mm、带内吸收层和外金属保护层的 U 型弯曲光纤进行温度传感实验,光源波长为 1 590 nm.实验时将弯曲光纤置于干式恒温器中,调节干式恒温器的温度至 0℃,同时 U 型光纤的一头接入可调谐激光器,另一头接入光功率计,记录功率数据.每分钟记录数据,每个温度值保持 5 min,然后增加温度,功率取平均值.通过比较输入和输出两个光功率计的差值可以得到不同温度时,光纤的宏弯损耗值(dB).

根据实验测量结果、最小二乘法线性拟合结果和改进公式模拟的结果得到的光纤宏弯损耗对温度的响应曲线如图 7 所示.从图中 7(a)可以看出, $R=12.3$ mm 时,温度从 0℃增加到 80℃时,仅涂覆印度墨水层的光纤宏弯损耗对温度的响应呈线性,其线性度为 0.997,温度灵敏度为 0.06 45 dB/℃,实验结果与根据推导的公式模拟的结果存在一定的误差,其中最大误差为 16.4%.从图中 7(b)可以看出,其他条件不变而进一步增加温度时,损耗降低幅度变化很小,线性拟合后其线性度降为 0.992,灵敏度降为 0.005 98 dB/℃,理论与实验值误差增大,最大误差为 23.7%.图 7(a)与(b)的结果差异在于印度墨水层温度稳定性能较差,实验中发现温度超过 85℃后,裸光纤表面的吸收层开始变软,与光纤的结合力变差,从而影响温度传感效果.而图 7(a)与(b)中的宏弯损耗理论测量结果与模拟结果的误差产生的原因主要是由于吸收层为手工涂覆,存在一定的不均性,对于从纤芯泄露的光达不到 100%的吸收,以及光纤半环的弯曲尺寸难以精确控制,且半环为非刚性固定,在测量过程中易产生尺寸漂移,而光纤宏弯损耗对弯曲尺寸是较为敏感的.由图 7(c)可知, $R=10.55$ mm 时,带内吸收层和外金属保护层的 U 型弯曲光纤宏弯损耗对温度的响应呈线性,满足 $y = 9.559 + 0.024 82x$,其线性度为 0.997,温度灵敏度为 0.024 82 dB/℃,由于采用的光功率计的分辨力为

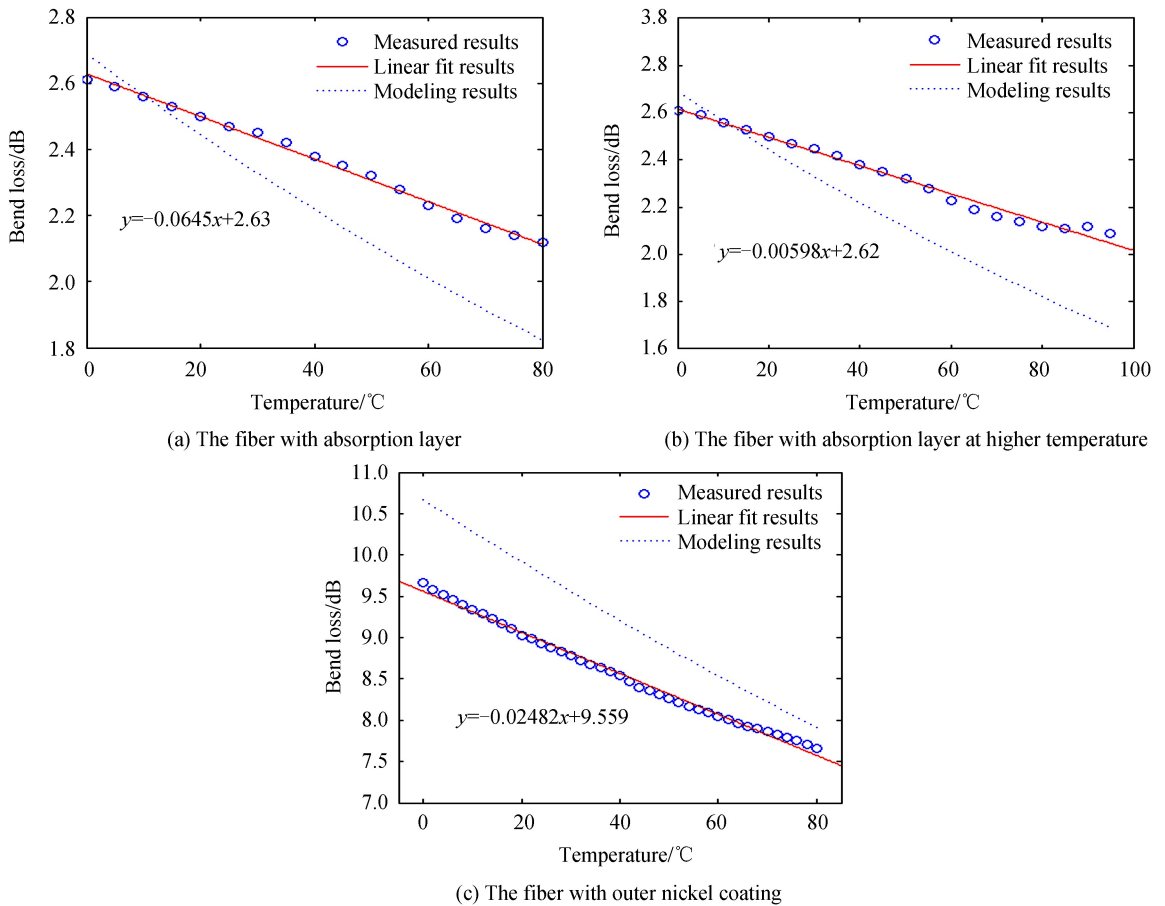


图7 光纤宏弯损耗对温度的响应曲线

Fig.7 Bend loss response of the fiber versus temperature

0.01 dB,该光纤宏弯传感器的温度分辨力约为 0.4°C.图 7(c)中实验结果与模拟的结果存在一定的误差,其中最大误差为 9.6%.误差产生的原因:(1)弯曲尺寸存在误差;(2)吸收层从纤芯泄露的光达不到 100%的吸收;(3)镍层厚度达 0.43 mm,存在一定的热应力影响光纤的温度传感特性.

图 7 的实验结果表明:印度墨水层较好地抑制了 WGM,镍涂覆层对光纤宏弯温度传感性能的影响很小,带内吸收层和外镍层的 1060XP 光纤能够实现线性温度传感,这与之前无限包层结构光纤宏弯损耗温度传感性能的分析是一致的.

3 结论

本文从理论和实验上分析了温度对单模光纤宏弯损耗性能的影响,对单模光纤宏弯损耗理论公式进行了温度修正,并进行了模拟分析.设计了一种带内吸收层和外金属保护层的光纤温度传感器.最后进行了光纤宏弯损耗温度响应特性的测试.研究表明:该结构的光纤温度传感器宏弯损耗与温度之间输出呈线性关系,分辨率为 0.4°C,并且镍层不仅能形成稳定的弯曲光纤,还能够为光纤提供机械和环境保护,可近似看成纤芯-无限包层结构光纤.由于无限包层结构单模光纤宏弯损耗是随着弯曲半径减小和波长增加而增大的,通过减小弯曲半径或增加波长,可以提高传感器的温度灵敏度.但印度墨水层不耐高温,在温度超过 85°C 时,开始变软、与光纤的结合力变差从而影响温度传感效果.因此,这种结构的光纤传感器适用于温度不高的环境.若要提高光纤传感器的耐高温特性,需进一步探索吸光率高且耐高温的涂层.

参考文献

[1] ZHANG Ying, ZHAO Jun-xue, WU Jun, *et al.* Bendind characteristics analysis of eccentric core optical fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 0306002.
张颖,赵俊雪,吴俊,等. 偏芯光纤弯曲特性分析[J]. *光子学报*, 2017, **46**(3): 0306002.

[2] PAKDEEVANICH P. Optical fiber sensor based on a polymer optical fiber macro-bend to study thermal expansion of

- metals[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, **1027**(1): 012007.
- [3] ZHAO J, BAO T, KUNDU T. Widerange fiber displacement sensor based on bending loss[J]. *Journal of Sensors*, 2016, **2016**: 1-5.
- [4] TANG Jie-yuan, ZHANG Quan-quan, ZENG Yang-fu, *et al.* Optical fiber measurement system for thickness of water film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 88-93.
唐洁媛,张俊俊,曾央夫,等. 基于 U 型弯曲光纤模间干涉的折射率传感[J]. *光子学报*. 2015, **44**(5): 88-93.
- [5] LEAL-JUNIOR A, FRIZERA A, PONTES M J, *et al.* Dynamic mechanical characterization with respect to temperature, humidity, frequency and strain in mPOFs made of different materials[J]. *Optical Materials Express*, 2018, **8**(4): 804-815.
- [6] CHENG Lin, LI Ya-ming, MA Yu-ming, *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*, 2018, **272**: 53-61.
- [7] NAM S H, YIN S Z. High-temperature sensing using whispering gallery mode resonance in bent optical fiber[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(11): 2391-2393.
- [8] KUMAR S, SWAMINATHAN S. Design of liquid temperature sensor based on bending loss phenomenon of plastic optic fiber and electro-optic effect of Mach-Zehnder interferometer[C]. *Optical Sensing and Detection IV*, International Society for Optics and Photonics, 2016, **9899**: 98991Z.
- [9] GONG Zhen-feng, CHEN Ke, ZHOU Xin-lei, *et al.* Temperature-compensated refractive index sensor based on bent-fiber interference[J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, **36**: 6-9.
- [10] RAIKARU S, LALASANGI A S, KULKAMI 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.
- [11] KWANG-TAEK K, JI-HOON K, KYU-JUNG C, *et al.* Fiber-optic temperature sensor based on bending loss of thermally expanded core fiber[J]. *Korean Journal of Optics and Photonics*, 2010, **21**(1): 12-15.
- [12] MORALED A T, GARCIA 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.
- [13] CHEN Tao, XIE Zhong, LI Zhi-hong, *et al.* Study on the monotonicity of bending loss of polymer optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(10): 2032-2037.
- [14] 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.
- [15] TAPETADO A, PINZON 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.
- [16] RAJAN G, MATHEW J, SEMENOVA Y, *et al.* Evaluation of the performance of a novel low-cost macro-bend fiber-based temperature sensor [C]. *Fiber Optic Sensors and Applications UI*, the International Society for Optical Engineering, 2009, 7316: 731610.
- [17] 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*, 2010, **163**(1): 88-95.
- [18] MARCUSE D. Curvature loss formula for optical fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, (3): 216-220.
- [19] 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.
- [20] YE C, KOPONEN J, AALLOS V, *et al.* On the measurement of fundamental mode bend loss in large-mode-area optical fibers[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(4): 928-934.
- [21] FROSZ M H, ROTH P, GÜNENDI M C, *et al.* Analytical formulation for the bend loss in single-ring hollow-core photonic crystal fibers[J]. *Photonics Research*, 2017, **5**(2): 88-91.
- [22] WANG P, 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.
- [23] LI Yu-long, ZHANG Hua, FENG Yan, *et al.* Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, **15**(4): 391-397.
- [24] PENG Xing-ling, ZHANG Hua, LI Yu-long. Thermal stress and the associated photoelastic effect of the metal coated fiber loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(11): 1106004.
彭星玲, 张华 李玉龙. 金属镀层光纤环的热应力及其引起的弹光效应[J]. *光学学报*, 2014, **34**(11): 1106004.

Foundation item: Science Funding in Education Department of Jiangxi Province (No.GJJ171007), Key Development Projects in Department of Science and Technology of Jiangxi Province(No.20171BBE50009)

引用格式: PENG Xing-ling, CHA Ying-peng, ZHANG Hua, *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