

# 基于表面温敏薄膜的锥形双包层光纤温度传感器

付兴虎, 张江鹏, 方一程, 王兴国, 陈 诚, 王思文, 付广伟, 毕卫红

燕山大学信息科学与工程学院 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 提出了一种基于温敏薄膜的锥形双包层光纤(TDCF)温度传感器,其由两段普通单模光纤(SMF)之间熔接一段 TDCF 组成,呈 SMF-TDCF-SMF 结构。由于输入端 SMF 纤芯模的模场与 TDCF 纤芯模的模场极度不匹配,因此由 SMF 传输过来的光除一部分耦合进 TDCF 的纤芯中外,其余部分耦合进 TDCF 的包层中以包层模的形式向前传输。当这两束光到达输出端 SMF 时发生干涉,形成马赫-曾德尔干涉仪。在锥区涂覆一层温度敏感薄膜,使得 TDCF 纤芯模和包层模之间的光程差会随着外界温度的变化而改变,从而引起传感器干涉谱的变化,因此可以通过检测传感光谱的变化实现对温度的测量。实验研究了传感器的温度特性,结果表明:随着拉锥长度的增加,干涉光谱的自由光谱范围逐渐减小。当拉锥长度为 16 mm,温度在 32~65.3 °C 范围内时,随着温度的增加,传感器的传输光谱出现蓝移现象,温度灵敏度最高可达 -1296.78 pm/°C,且具有很好的线性度。该传感器制作简单、灵敏度高,在科学研究和工农业生产的温度测量场合具有较好的应用前景。

**关键词** 传感器; 温敏薄膜; 双包层光纤; 温度

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0810001

## Tapered Double-Cladding Fiber Temperature Sensor Based on Surface Temperature Sensitive Thin-Film

Fu Xinghu, Zhang Jiangpeng, Fang Yicheng, Wang Xingguo, Chen Cheng,  
Wang Siwen, Fu Guangwei, Bi Weihong

Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering,  
Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** A tapered double-cladding fiber (TDCF) temperature sensor based on surface temperature sensitive thin-film is presented. It consists of two sections of common single-mode fiber (SMF), and a TDCF is welded between them. The structure is SMF-TDCF-SMF. Because the mode field of the SMF core mode does not match that of the TDCF core mode, the light transmitted from SMF is partially coupled into the TDCF core, and the rest is coupled into the TDCF cladding in the form of a cladding mode. When the two beams reach output end SMF and interfere, the Mach-Zehnder interferometer can be obtained. The TDCF is coated with a layer of temperature-sensitive thin-film, so that the optical path difference between the TDCF core mode and the cladding mode will change with the external temperature, thus causing a change in the sensor interference spectrum. Therefore, temperature measurement can be achieved by detecting changes in the sensing spectrum. The temperature characteristics of the sensor are experimentally studied, and the results show that the free spectral range of the sensor decreases with the increase of tapered cone length. When the length of the tapered cone is 16 mm and the temperature is within the range of 32-65.3 °C, the transmission spectrum of the sensor is blue-shifted with the increase of temperature. The temperature sensitivity is up to -1296.78 pm/°C, and it has good linearity degree. The sensor is simple, highly sensitive, and has good prospects in temperature measurement occasions of scientific research, industrial and agricultural production.

**收稿日期:** 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-04-18

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475133,61575170,61675176,61640408)、河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(16961701D)、河北省高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014057)、燕山大学“新锐工程”人才支持计划、燕山大学大学生创新训练计划(201610216079)

**作者简介:** 付兴虎(1981—),男,博士,副教授,主要从事特种光纤传感方面的研究。E-mail: fuxinghu@ysu.edu.cn

**Key words** sensors; temperature-sensitive thin-film; double-cladding fiber; temperature

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.2400

## 1 引 言

温度是体现物质状态的重要参数之一,其在人类生活及工业生产等多个方面具有举足轻重的作用。因此,温度检测也成为人们广泛关注的问题。光纤传感器作为一种新型传感器,相比传统的传感器具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰等优点,可在许多恶劣的环境下工作。目前常见的光纤温度传感器类型有马赫-曾德尔型<sup>[1-3]</sup>、光纤光栅型<sup>[4-6]</sup>、萨尼亚克干涉型<sup>[7-9]</sup>等。如赵月等<sup>[10]</sup>提出了一种将马赫-曾德尔干涉仪和光纤布拉格光栅(FBG)级联的温度传感器,其温度灵敏度最高为 0.4015 nm/°C;赵红霞等<sup>[11]</sup>设计了一种双锥形光纤光栅传感器,可实现温度、折射率、液位三者同时测量,温度灵敏度为 9.63 nm/°C;李涛等<sup>[12]</sup>设计了一种微结构高灵敏度光纤温度传感器,在单模光纤(SMF)上先写入 FBG,然后在光纤上涂覆一层温敏材料,其温度灵敏度为 21.37 pm/°C;Jung 等<sup>[13]</sup>设计了一种由耐高温介电材料制成的新型特种光纤传感器,这种传感器可以实现温度和折射率同时测量,其温度灵敏度为 0.063 nm/°C;Tafulo 等<sup>[14]</sup>使用化学腐蚀的方法对多模光纤进行腐蚀并制备出一种法布里-珀罗(F-P)传感器,并实现了温度测量,其灵敏度为(0.98±0.04) pm/°C。由此可见,光纤温度传感器越来越受到国内外研究者的关注,特别是利用新型光纤探索基于新原理的温度传感器成为研究热点。

双包层光纤(DCF)是一种新型特种光纤,其双包层的特殊结构使光传输特性发生奇特变化。因此,本文提出并设计了一种基于表面温敏薄膜的锥形双包层光纤(TDCF)温度传感器。首先将 DCF 熔于两根 SMF 之间,然后使用拉锥机对 DCF 进行拉锥,最后在锥区涂覆一层温敏材料即可制备成温度传感器。传统的马赫-曾德尔光纤传感器一般使用两根光纤,为了保证测量的准确性,要求两根光纤长度比较精确,否则会带来测量误差,这给实验带来一定程度的困难。而本文设计的马赫-曾德尔光纤温度传感器可在一根光纤中实现光的干涉,无需外加耦合器,通过检测干涉信号的改变即可获得被测量的信息,具有结构紧凑、制作简便、灵敏度高等优点。因此,本文对该传感器的温度特性进行了深入的理论分析和实验探究。

## 2 理论分析

基于表面温敏薄膜的 TDCF 温度传感器的结构如图 1 所示,首先将一段 DCF 与两段 SMF 无错位熔接,然后对 DCF 部分进行熔融拉锥,最后在锥区涂覆一层温敏材料。

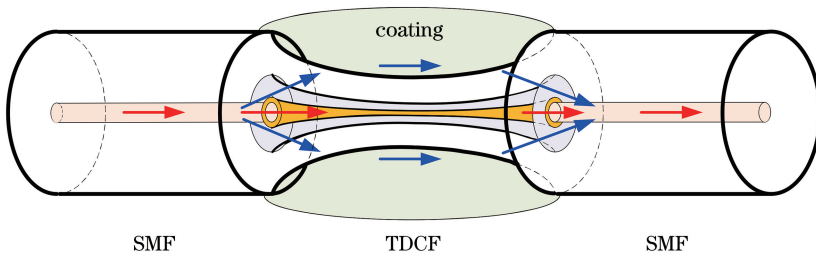


图 1 TDCF 温度传感器传感头结构

Fig. 1 Sensing probe structure of TDCF temperature sensor

由图 1 可知,光源发出的光在 SMF 的纤芯中以基模的形式向前传输,当光传至 SMF 与 TDCF 的第一个熔点处时,光会分成两路传播,一路光进入 TDCF 的纤芯中传输,另一路光进入 TDCF 的包层中并以包层模形式传输。在纤芯和包层中传输的两束光因传输介质不同,所以两路光的光程也不相同,在 TDCF 锥区部分产生光程差。当两路光传输至 SMF 与 TDCF 的第二个熔点处时,在 TDCF 的包层中以包层模形式传输的光又被重新耦合进入 SMF 的纤芯中,并与 TDCF 纤芯中的纤芯模发生干涉,形成马赫-曾德尔干涉仪。因此,该传感器的输出光光强<sup>[15]</sup>可表示为

$$I(\lambda) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为 TDCF 中传输光的波长,  $I_1$  与  $I_2$  分别为在纤芯模与包层模中传输的光的强度,  $\varphi$  为两束光传输所

形成的相位差,

$$\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^r - n_{\text{eff}}^d)L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda}, \quad (2)$$

式中  $n_{\text{eff}}^r$  和  $n_{\text{eff}}^d$  分别表示纤芯模与包层模的有效折射率,  $\Delta n_{\text{eff}}$  为纤芯模与包层模有效折射率差,  $L$  为 TDCF 长度。设  $\lambda_m$  为第  $m$  级干涉条纹的波长, 则

$$\lambda_m = \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m}. \quad (3)$$

当外界温度变化时, 光纤的热光效应会使纤芯模和包层模的有效折射率发生改变, 光纤热膨胀效应会使 TDCF 的几何形状发生改变, 但是光纤热膨胀系数远小于光纤热光系数, 所以温度变化带来的细微几何形变可以不考虑。同时涂覆在 TDCF 表面的温敏材料随着温度的改变也会影响纤芯模和包层模的有效折射率。由(3)式可推导出在外界温度变化时传感器第  $m$  级干涉条纹的波长漂移量为

$$\Delta\lambda_m = \frac{(\Delta n_{\text{eff}} + \Delta n)L}{m} - \frac{\Delta n_{\text{eff}}L}{m} = \frac{\Delta nL}{m}, \quad (4)$$

式中  $\Delta n$  为 TDCF 纤芯模与包层模有效折射率差值的变化量。因此, 在温度实验中可以通过检测波长漂移量  $\Delta\lambda_m$  来检测外界温度变化。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 传感器的制备

##### 3.1.1 DCF 介绍

设计的传感器采用 DCF 作为传感单元, 该光纤由石英纤芯、掺氟内包层、石英外包层构成。DCF 的纤芯直径为  $30 \mu\text{m}$ , 纤芯折射率  $n_1 = 1.467$ ; 掺氟内包层直径为  $60 \mu\text{m}$ , 内包层折射率  $n_2$  为渐变形式; 外包层直径为  $125 \mu\text{m}$ , 外包层折射率  $n_3 = 1.466$ 。  $n_1, n_3$  大致相同且大于内包层中掺氟石英折射率  $n_2$ 。 DCF 的端面与折射率分布如图 2 所示。

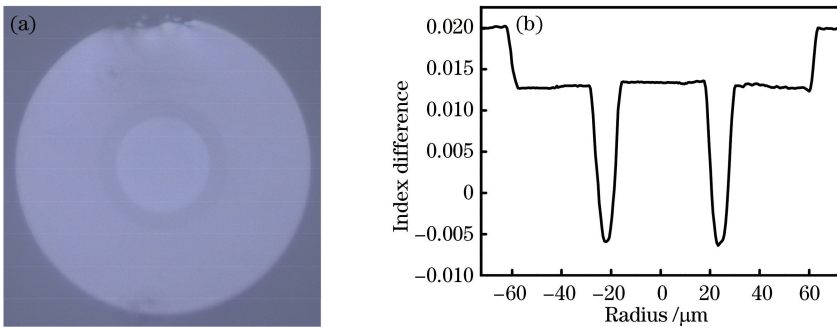


图 2 (a) DCF 端面图; (b) DCF 折射率分布图

Fig. 2 (a) Cross section of the DCF; (b) refractive index profile of the DCF

利用有限元法, 对 DCF 进行模式仿真, 得出传输模式的模场分布, 然后推导出不同模式的有效折射率。在 DCF 纤芯中传输的 4 个模式为  $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$ , 其模场分布如图 3 所示。

由模场分布图可得模式  $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}$  的有效折射率分别为 1.4665336、1.4658164、1.4648746、1.4645453。

##### 3.1.2 TDCF 传感器制备

该锥形双包层传感器采用熔融拉锥技术, 将一段固定长度为 18 mm 的 DCF 无错位熔接在两段标准 SMF 之间, 并对 DCF 进行熔融拉锥。通过改变 DCF 拉锥长度, 制备出长度分别为 13, 14, 15, 16 mm 的 TDCF 传感器。拉锥之后的 DCF 更加纤细, 为有效避免外力对传感器的损伤, 将制备好的 TDCF 传感器的锥区部分固定在洁净的载玻片上。将固定好的传感器两端分别与 ASE3700 型放大自发辐射光源和 AQ6375 型光谱分析仪 (OSA) 相连并得出在室温条件下不同拉锥长度的传感器干涉光谱, 如图 4 所示。

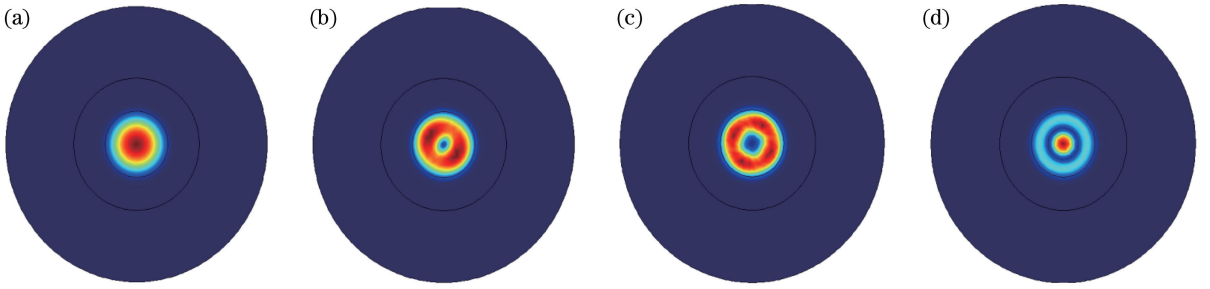


图 3 DCF 模场分布。(a)  $LP_{01}$ ; (b)  $LP_{11}$ ; (c)  $LP_{21}$ ; (d)  $LP_{02}$

Fig. 3 Mode field distribution of the DCF. (a)  $LP_{01}$ ; (b)  $LP_{11}$ ; (c)  $LP_{21}$ ; (d)  $LP_{02}$

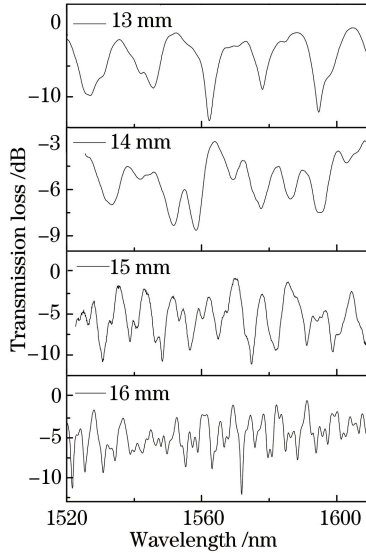


图 4 不同 TDCF 长度的传感器的传输光谱

Fig. 4 Transmission spectra of the sensors with different TDCF lengths

由图 4 可知,随着 TDCF 长度的增加,干涉光谱周期增加,自由光谱范围(FSR)逐渐减小。自由光谱范围表达式为

$$R_{FS} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{eff} L}, \quad (5)$$

式中  $\Delta n_{eff}$  为基模与高阶模有效折射率差,  $L$  为 TDCF 长度。由(5)式可知,对于同一种光纤制备的光纤马赫-曾德尔干涉仪,干涉光谱的自由光谱范围随着 TDCF 的长度增加而减小。

### 3.2 温度传感实验

以上 4 种不同长度的传感器传输光谱均含有一个以上周期且传输光谱对比度大致相同,但 TDCF 长度为 16 mm 的传感器的包层和纤芯相对更细,更容易受到涂覆在表层的温敏材料的影响,其温度灵敏度更高,因此选取 TDCF 长度为 16 mm 的传感器进行温度实验。实验的温度增敏材料选用溧阳市康达化工有限公司生产的南大 705 硅橡胶,该胶在常温下可以吸收空气中的水汽固化,还具有热光系数高、耐老化、防潮、电绝缘和抗电弧等优点,储存期长,性能稳定,可耐  $-60 \sim 200$  °C 温差。在传感器的表面涂覆一层温敏材料,待温敏材料完全固化后,将传感器置于温度箱中,传感器的两端分别接在光源和光谱仪上。温度实验系统如图 5 所示。

实验过程中需不断调节预定温度,当温度达到预定值 10 min 后进行实验数据记录。该实验温度变化范围为  $32.0 \sim 65.3$  °C,干涉谱随温度的变化如图 6 所示。

由图 6 可知,干涉谱线随着温度升高向短波方向漂移,即发生蓝移现象。为了更加直观地观察传输光谱与温度的关系,选取图中箭头标注的波谷进行分析,得到波长漂移与温度关系如图 7 所示,其中  $R^2$  为拟合

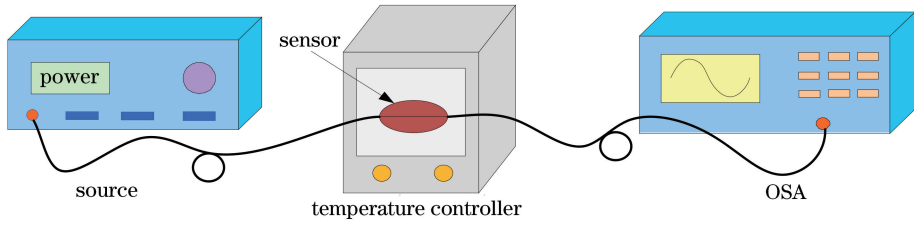


图 5 温度传感实验系统

Fig. 5 Schematic of temperature sensing experiment system

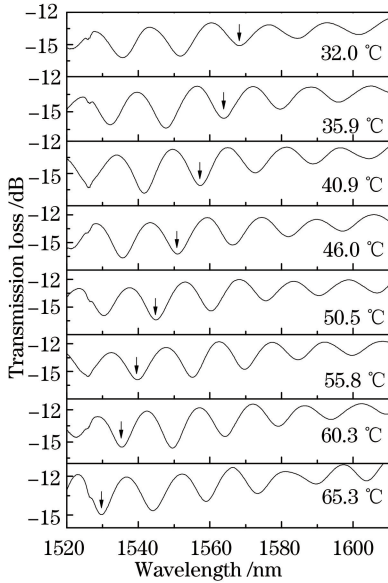


图 6 传感器在不同温度下的传输光谱

Fig. 6 Transmission spectra of the sensor at different temperatures

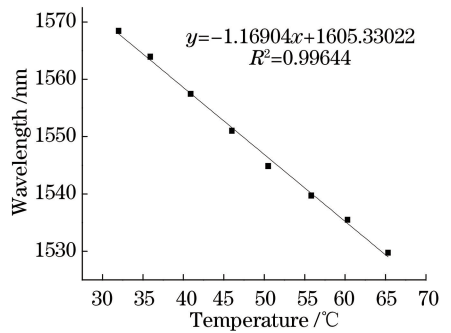


图 7 波长漂移与温度变化之间的关系

Fig. 7 Relationship between wavelength shift and temperature changing

曲线的线性度。

由图 7 可知,该传感器的温度灵敏度为  $-1169.04 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,并且波长的漂移与温度变化之间具有很好的线性度。波长随温度变化产生漂移的原因有两方面:一方面是在拉锥过程中,光纤的热光系数会发生改变,随着温度升高纤芯模和包层模的有效折射率均会提高,但纤芯模有效折射率的变化量小于包层模有效折射率的变化量。另一方面是涂覆在 TDCF 表面的温敏材料的热光系数远高于光纤自身的热光系数,因此温度变化时,包层模有效折射率的增加量远高于纤芯模有效折射率的增加量。故  $\Delta n_{\text{eff}}$  随温度升高会变小, $\Delta n$  为负值。根据(4)式可知,随着温度升高干涉谱线向短波方向漂移。

对该传感器进行重复温度实验,并对实验进行改进。在之前温度实验中使用胶带固定传感器,在升温过程中,胶带受热之后黏性大大下降,传感器发生弯曲对温度测量带来误差。实验将传感器的两端用 AB 胶固定,相比于之前使用胶带的固定方法,这一方法使传感器更加稳定。进行三次重复实验得出温度灵敏度如图 8 所示。

改进实验后,升温实验温度灵敏度分别为  $-1273.93, -1281.72, -1296.78 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ;降温实验的温度灵敏度分别为  $-1181.53, -1178.39, -1115.79 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。理论上升温实验与降温实验的温度灵敏度应大致相同。降温实验温度灵敏度略低于升温实验温度灵敏度,主要原因在于在降温过程中,温度箱达到预设温度后开始记录数据并以预设温度作为实际温度进行数据处理,但是传感器上涂覆的硅橡胶并没有使温度降到预设值,因此温度灵敏度比理论值小。

为了突出这种基于表面温敏薄膜的 TDCF 温度传感器的高灵敏度特性,对未涂覆温敏材料的 TDCF 长度为  $16 \text{ mm}$  的传感器进行了温度实验,其干涉谱随温度的变化如图 9(a)所示。

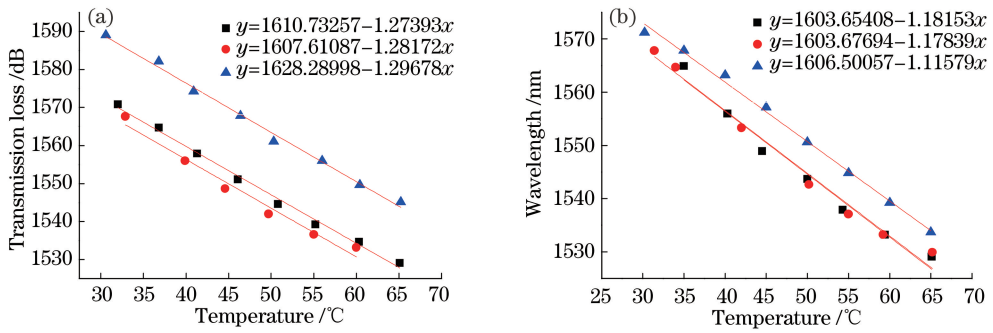


图 8 改进后的实验结果。(a)升温;(b)降温

Fig. 8 Experimental results after improvement. (a) Temperature rise; (b) temperature drop

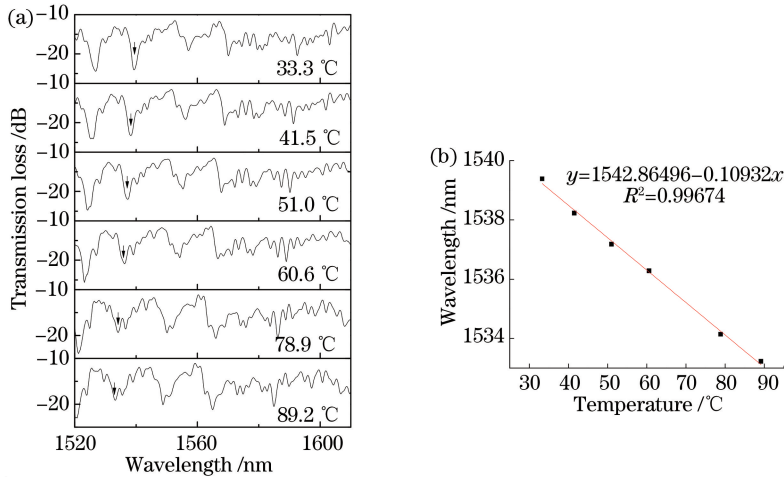


图 9 (a)未涂覆温敏材料的传感器在不同温度下的传输光谱;(b)波长漂移与温度变化之间的关系

Fig. 9 (a) Transmission spectra of the sensor without temperature sensitive material coating at different temperatures; (b) relationship between wavelength shift and temperature changing

由图 9(a)可知,干涉谱线随着温度升高向短波方向漂移,即发生蓝移现象。为了更加直观地观察传输光谱与温度的关系,选取图中波长为 1535 nm 附近的波谷进行分析,得到波长漂移与温度的关系,如图 9(b)所示,由图可知未涂胶的传感器温度灵敏度为  $-109.32 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。未涂胶传感器温度灵敏度为负值的主要原因是:DCF 内包层由于氟的掺入,其热光系数低于纤芯与外包层。拉锥过程中随着光纤结构的不断变化及不同材料之间的融合,内嵌于该掺氟包层且结构尺寸较小的纤芯更易受其影响,使纤芯热光系数有一定程度降低。因此,随着温度升高,纤芯模有效折射率的增加量小于包层模有效折射率增加量,  $\Delta n$  为负值,即传输光谱向短波方向漂移,发生蓝移。

对 DCF 拉锥时,减小锥区长度,使锥区光纤直径与文中实验用的 16 mm 长 TDCF 锥区一致。此时,所用 DCF 长度为 10 mm,拉锥后的 TDCF 长度为 14 mm。图 10 为不同锥区长度的光纤锥区直径。

由图 10 可见,拉锥后的 TDCF 长度为 14 mm 和 16 mm 的锥区直径几乎相等。对 TDCF 长度为 14 mm 的传感器涂覆温敏材料后进行温度实验,干涉谱随温度的变化如图 11 所示。

由图 11 可知,干涉谱线随着温度升高向短波方向漂移,即发生蓝移现象。为了更加直观地观察传输光谱与温度的关系,选取图中箭头标注波谷进行分析,得到波长漂移与温度关系如图 12 所示。

由图 12 可知,该传感器的温度灵敏度为  $-1141.73 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,并且波长的漂移与温度变化之间具有很好的线性度。根据(4)式可知锥区长度  $L$  减小时,波长漂移量  $\Delta\lambda_m$  减小。因此,TDCF 长度为 14 mm 的传感器的温度灵敏度低于 TDCF 长度为 16 mm 的传感器的温度灵敏度。

传感器的温度测量范围并不局限于  $32 \sim 65.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验所选用光源为 ASE3700 型放大自发辐射光源,工作波长范围为  $1520 \sim 1610 \text{ nm}$ 。该传感器温度灵敏度较高,使得温度升高时波长漂移量也较大,超出

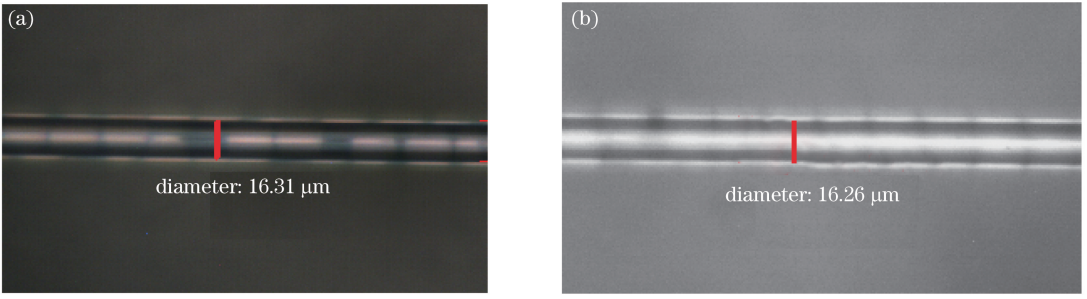


图 10 不同锥区长度的光纤锥区直径。(a) TDCF 长度为 16 mm;(b) TDCF 长度为 14 mm  
 Fig. 10 Diameters of fiber tapers with different taper lengths. (a) Length of TDCF is 16 mm;  
 (b) length of TDCF is 14 mm

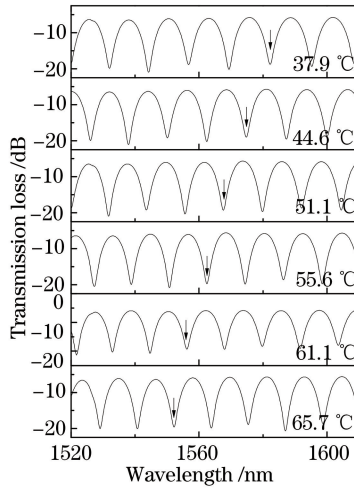


图 11 传感器在不同温度下的传输光谱

Fig. 11 Transmission spectra of the sensor at different temperatures

光源的工作波长范围,在光谱仪上无法显示。因此,如果要增大传感器的温度测量范围,需选用带宽较大的光源。同时,在增大温度测量范围时还要考虑温敏材料的温度承受范围。

为了对该传感器有更深一步的了解,对该传感器的传输光谱进行了快速傅里叶变换(FFT),其频谱如图 13 所示。

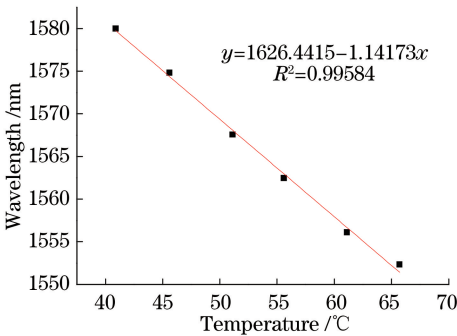


图 12 波长漂移与温度变化之间的关系

Fig. 12 Relationship between wavelength shift and temperature changing

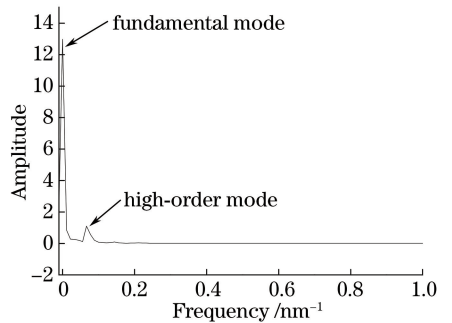


图 13 传输光谱的 FFT 频谱

Fig. 13 FFT frequency spectrum of transmission spectrum

由图 13 可知,傅里叶频谱中仅有两个规则的波峰,并无其他模式对于干涉光谱的干扰,因此该传感器的传输光谱非常平滑。对傅里叶频谱进行数据分析可知该传输光是由一个有效折射率与  $LP_{01}$  模相差 0.009998 的包层模和  $LP_{01}$  模相互干涉产生的。

将涂覆温敏材料的 TDCF 温度传感器温度特性与三包层特种光纤传感器、 $PbO-GeO_2-SiO_2$  光纤传感

器、光子晶体光纤传感器的温度特性进行比较。各类型传感器的温度灵敏度如表 1 所示。

表 1 不同类型光纤温度传感器的温度灵敏度

Table 1 Temperature sensitivity of temperature sensors with different fiber types

Sensor	Sensitivity / (pm · °C <sup>-1</sup> )
TDCF sensor coating temperature sensitive material	-1296.78
Triple cladding quartz specialty fiber sensor <sup>[16]</sup>	73.74
PbO-GeO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> fiber sensor <sup>[17]</sup>	17.30
Core-offset splicing photonic crystal fiber sensor <sup>[18]</sup>	1.63

对比多种类型光纤温度传感器的温度灵敏度可见,这种基于表面温敏薄膜的 TDCF 温度传感器具有更高的温度灵敏度。

## 4 结 论

提出了一种基于表面温敏薄膜的 TDCF 温度传感器,其制作方法为:将 DCF 与两段 SMF 无错位熔接后进行拉锥,然后在锥区涂覆一层温敏材料。对 TDCF 长度为 16 mm 的传感器涂覆温敏材料并进行温度实验,实验结果表明:在 32~65.3 °C 温度范围内,该传感器的温度灵敏度为 -1296.78 pm/°C,波长漂移与温度变化呈良好的线性关系。该传感器具有较高的温度灵敏度,可在多个领域实施温度检测。对该传感器可以采用不同直径规格的不锈钢管进行封装,具体方法为:将传感器置于不锈钢管中,用 353ND 胶将不锈钢管两端封住,通过微调节架使 TDCF 预张,然后对不锈钢管两端加热固化,完成封装。封装后的 TDCF 温度传感器有望实现工程使用。

## 参 考 文 献

- [1] Cao Y, Zhao C, Tong Z R. All fiber sensor based on Mach-Zehnder interferometer for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. Optoelectronics Letters, 2015, 11(6): 438-443.
- [2] Rong Q Z, Qiao X G, Wang R H, *et al.* High-sensitive fiber-optic refractometer based on a core-diameter-mismatch Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(7): 2501-2505.
- [3] Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng, *et al.* Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 1-9.  
范林勇, 江微微, 赵瑞峰, 等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 1-9.
- [4] Huang Y, Zhou Z, Zhang Y N, *et al.* A Temperature self-compensated LPFG sensor for large strain measurements at high temperature[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2010, 59(11): 2997-3004.
- [5] Huang Rui, Cai Haiwen, Qu Ronghui, *et al.* Separately measurement of strain and temperature using a single fiber Bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 232-235.  
黄锐, 蔡海文, 瞿荣辉, 等. 一种同时测量温度和应变的光纤光栅传感器[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 232-235.
- [6] Yang Xiufeng, Zhang Chunyu, Tong Zhengrong, *et al.* Experimental research of temperature sensing properties of a novel fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0405005.  
杨秀峰, 张春雨, 童峥嵘, 等. 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0405005.
- [7] Ruan J. Fiber temperature sensor employed SMP fiber structure and a long period fiber grating based on a Sagnac loop[J]. Optik, 2015, 126(24): 5044-5046.
- [8] Shao L Y, Luo Y, Zhang Z Y, *et al.* Sensitivity-enhanced temperature sensor with cascaded fiber optic Sagnac interferometers based on Vernier-effect[J]. Optics Communications, 2015, 336: 73-76.
- [9] Wu Tiesheng, Wang Li, Wang Zhe, *et al.* A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1114002.  
伍铁生, 王丽, 王哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1114002.
- [10] Zhao Yue, Cao Ye, Tong Zhengrong, *et al.* Simultaneous measurement of dual-parameter based on optical fiber magnetic field sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 45(12): 1206004.  
赵月, 曹晔, 童峥嵘, 等. 可双参量同时测量的光纤磁场传感器[J]. 光学学报, 2016, 45(12): 1206004.
- [11] Zhao Hongxia, Cheng Peihong, Ding Zhiqun, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and



- liquid level based on biconical fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1010005.
- 赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010005.
- [12] Li Tao, Dai Yutang, Zhao Qiancheng, *et al.* A new type of high sensitivity optical fiber temperature sensor with microstructure[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(4): 625-630.  
李 涛, 戴玉堂, 赵前程. 一种新型微结构高灵敏度光纤温度传感器[J]. 光电子 • 激光, 2014, 25(4): 625-630.
- [13] Jung I W, Park B, Provine J, *et al.* Highly sensitive monolithic silicon photonic crystal fiber tip sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(9): 1367-1374.
- [14] Tafulo P A R, Jorge P A S, Santos J L, *et al.* Fabry-Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement[J]. Optics Communications, 2012, 285(6): 1159-1162.
- [15] Zhao Na, Fu Haiwei, Shao Min, *et al.* Research on high sensitivity temperature sensor based on Mach-Zehnder interferometer with waist-enlarged fiber bitapers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1722-1726.  
赵 娜, 傅海威, 邵 敏, 等. 基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1722-1726.
- [16] Fu Xinghu, Xie Haiyang, Yang Chuanqing, *et al.* Research on the temperature sensing characteristics of triple cladding quartz specialty fiber based on cladding mode resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 167-175.  
付兴虎, 谢海洋, 杨传庆, 等. 基于包层模谐振的三包层石英特种光纤温度传感特性[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 167-175.
- [17] Watekar P R, Ju S, Han W T. Enhanced sensitivity of the FBG temperature sensor based on the PbO-GeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> glass optical fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(18): 2697-2700.
- [18] Fu Guangwei, Li Qifeng, Li Yunpu, *et al.* Temperature insensitive curvature sensor of photonic crystal fiber based on core-offset splicing and waist-enlarged fiber taper[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106007.  
付广伟, 李颀峰, 李昀璞, 等. 温度不敏感的错位熔接-粗锥型光子晶体光纤曲率传感器[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106007.