

# 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体 光纤高灵敏度温度测量

刘海\*, 白冰冰, 张砚曾, 陈聪, 邵齐元, 王浩然

中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 通过在光子晶体光纤(PCF)包层外侧填镀金纳米膜及 PDMS 温敏薄膜,设计了一种基于表面等离子体共振(SPR)效应的高灵敏度温度传感器,具有结构简单、工艺成熟、可逆性好的优点。PDMS 的有效折射率会随温度的增加而减小,从而引起纤芯模式的损耗峰向短波方向移动。在完全匹配层边界条件下,利用全矢量有限元法分析 SPR-PCF 的损耗谱特性,实现了温度的高灵敏度精确快速测量。在 22~47 °C 的温度范围内,所提传感器的温度灵敏度可达到 -8.18 nm/°C,这种传感测量方法能拓展应用于各类安全检测和智能监测领域。

**关键词** 测量; 光子晶体光纤; 表面等离子体共振; 温度传感; 光纤传感

中图分类号 TN25

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0404003

## High-Sensitivity Temperature Measurement Based on SPR in Gold-PDMS-Coated Photonic Crystal Fiber

Liu Hai\*, Bai Bingbing, Zhang Yanzeng, Chen Cong, Shao Qiyuan, Wang Haoran

*School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology,*

*Xuzhou, Jiangsu 221116, China*

**Abstract** In this study, a high-sensitivity temperature sensor based on surface plasmon resonance (SPR) is designed by plating gold thin layer and PDMS temperature-sensitive film onto the outer layer of photonic crystal fiber (PCF). It has the advantages of a simple structure, mature process, and good reversibility. The refractive index of PDMS decreases with the increase in temperature, causing the loss peak of the core mode to move toward the short-wave direction. The full-vector finite element method is used to analyze the SPR-PCF loss spectral characteristics under the condition of a perfectly matched layer boundary, which can achieve highly sensitive and accurate temperature measurements. The temperature sensitivity of the proposed sensor has been observed to reach -8.18 nm/°C within the temperature range of 22-47 °C. Furthermore, the proposed measurement method is applicable in safety detection and intelligent monitoring fields.

**Key words** measurement; photonic crystal fiber; surface plasmon resonance; temperature sensing; fiber sensing

**OCIS codes** 120.0280; 060.2370; 120.4630

## 1 引言

光纤温度传感器在医疗卫生、环境检测和安全监测等许多领域发挥着重要作用,受到了广泛关注<sup>[1]</sup>。光子晶体光纤(PCF)由于其独特的导光特性和灵活的结构设计,已成为一种新型的传感平台。PCF 温度传感器以其结构灵活、体积小、灵敏度高和抗干扰强等优点得到了很大发展<sup>[2-4]</sup>。近年来,根

据不同测量原理或结构设计的 PCF 温度传感器不断被提出。2016 年, Liu 等<sup>[5]</sup>设计了一种基于表面等离子体共振(SPR)效应的 PCF 温度传感结构,利用表面等离子体(SPP)模与纤芯基模之间的耦合原理进行传感测量,温度灵敏度为 3080 pm/°C,分辨率达到 0.01325 °C。2017 年, Yang 等<sup>[6]</sup>设计了一种高折射率液体填充 PCF 的光纤环形激光温度传感器,利用波长调制和强度调制使温度灵敏度分别

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2019-12-08; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0205500)、国家自然科学基金(51874301)

\* E-mail: lhust\_hust@hotmail.com

达到 $-1.747 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.137 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。Du等<sup>[7]</sup>提出了一种以异丙醇为填充物的光子晶体长周期光纤光栅(PCF-LPG),在 $20 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,实现了 $1.356 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的高灵敏度温度传感。同年, Ma等<sup>[8]</sup>利用多步填充技术在包层选择性填充六个空气孔,设计了一种基于甲苯填充PCF的温度传感器,具有 $-6.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的高灵敏度。2018年, Shi等<sup>[9]</sup>提出一种以双芯光子晶体光纤Sagnac干涉仪为平台的高灵敏度温度传感器,包层空气孔全部填充乙醇溶液,最大灵敏度可达到 $16.81 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。但是这类传感器均基于PCF微小气孔结构,相关制备工艺繁琐且成本偏高。此外,温度的测量主要是通过PCF空气孔中填充液态温敏材料形成温度传感通道来实现的,这类温敏材料一般为苯类或醇类,不仅有毒、易挥发,还容易泄露或蒸发,其生物相容性和传感器可逆性均较差。传感通道位于光纤内部而不与待测环境直接接触,使得温度传导存在一定延时,从而无法实现快速精准测量。

基于以上研究基础,本文设计了一种高灵敏度SPR-PCF快速温度传感装置。首先采用化学气相沉积方法<sup>[10]</sup>在仅含有单层六边形空气孔的PCF包层外侧镀一层金纳米薄膜,这相比于在包层空气孔内壁镀膜的工艺,难度得到了极大的降低。然后引入聚二甲基硅氧烷(PDMS)这种温敏透明有机材料,PDMS具有无毒、不易挥发、生物相容性好等优点<sup>[11-14]</sup>。通过结合PDMS和SPR技术可以实现高灵敏度的光纤温度传感测量。将经固化处理<sup>[1,15]</sup>的PDMS材料直接涂覆在SPR-PCF包层外侧,有效地减少了制备工序,降低了制备难度。涂覆的温敏材料层直接与待测环境接触,能迅速感知待测环境温度,实现快速检测。PCF纤芯能量转移到包层会引起SPR效应,达到耦合条件时纤芯基模的限制损耗会发生突变,且峰值位置与温敏材料的折射率有直接关联。本文基于温敏材料折射率与温度的线性关系,分析不同温度条件下损耗峰的漂移,直接建立温度与损耗峰漂移的线性关系,实现了对温度的准确测量,研究结果表明本文的SPR-PCF传感结构具有较高的温度灵敏度。

## 2 理论方法

先在PCF包层外侧涂覆金纳米薄膜及温敏材料PDMS薄膜,构成SPR温度检测环形通道;然后通过分析SPR限制损耗峰的波长漂移,实现对温度的传感测量。本文的温度测量系统共分为4个部

分,如图1(a)所示。宽带光源(BBS)发射的激光经由耦合器(3-dB coupler)分光,再利用偏振控制器(PC环)滤除X偏振方向的光波,光通过SPR-PCF后,利用光谱分析仪(OSA)得到待测温度的光谱响应特性。其中SPR-PCF是最重要的传感单元,其截面结构如图1(b)所示, $d_1$ 为第一层和第三层空气孔直径, $d_2$ 为第二层空气孔的直径, $t_1$ 、 $t_2$ 分别为金纳米薄膜和PDMS薄膜的厚度, $r_{\text{si}}$ 为PCF半径, $\Lambda$ 为空气孔之间的距离。SPR-PCF共分为4部分:内层是由二氧化硅和不均匀六边形空气孔组成,空气孔的存在降低了二氧化硅的有效折射率,从而保证纤芯基模与SPP模可发生相位匹配;金纳米薄膜与PDMS纳米薄膜位于PCF外侧,用于组成环形传感通道。

SPR-PCF传感器利用全反射的倏逝波来激发金属表面的等离子体波,使之与光纤基模发生共振,从而实现传感。当入射光波在PCF纤芯内传输时,光在包层和金纳米薄膜之间的界面处发生全反射,由于金属薄膜的厚度小于倏逝波的穿透深度,全反射的倏逝波将穿透金属薄膜到达金纳米薄膜与温敏材料的接触面,从而激发出表面等离子体波。当纤芯导模沿接触面方向的波矢分量与SPP模的波矢在同波长下大小相等时,SPR效应就会产生。PCF纤芯导模沿金属表面的波矢分量为

$$k_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_0(\omega)} \sin \theta, \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为入射光的角频率, $\epsilon_0(\omega)$ 为PCF纤芯的介电常数, $c$ 为光在真空中的传播速度, $\theta$ 为入射光与PCF截面的夹角。处于金纳米薄膜与温敏介质之间的SPP本征波矢的大小为

$$k_{\text{spp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2(\omega)}{\epsilon_1 + \epsilon_2(\omega)}}, \quad (2)$$

式中: $\epsilon_1$ 为金纳米薄膜的介电常数, $\epsilon_2(\omega)$ 为金属薄膜上待测物的介电常数。当满足相位匹配条件 $k_x = k_{\text{spp}}$ 时,纤芯倏逝波将与激发于金纳米薄膜表面的SPP模相互耦合,纤芯的部分能量转移到金纳米薄膜表面导致纤芯基模的限制损耗增大而形成损耗峰。其限制损耗(单位: dB/cm)的计算式为

$$\alpha = \frac{40\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda \ln 10} \times 10^4, \quad (3)$$

式中: $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为各光场模式有效折射率的虚部。通过测量损耗峰所对应的波长漂移,得出金纳米膜上温敏材料PDMS的折射率与损耗峰值波长的关系,实现对温度的精准测量。

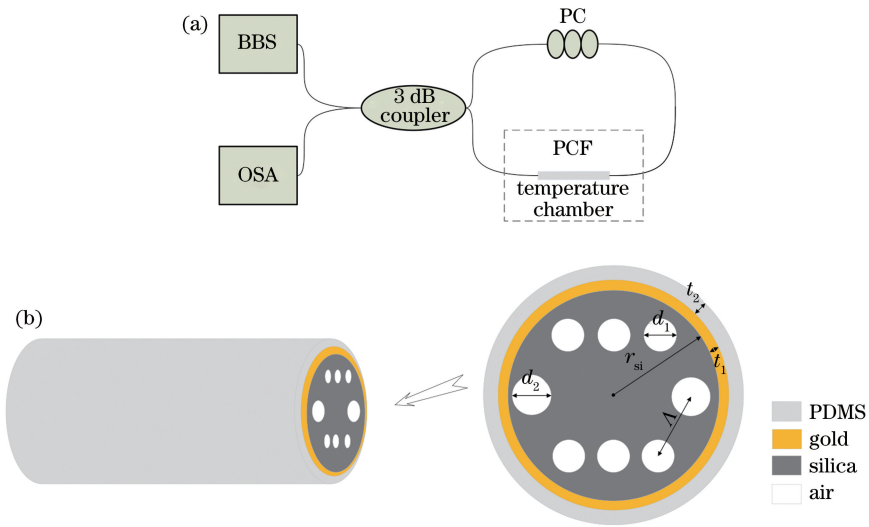


图 1 SPR-PCF 传感器。(a)温度系统结构图；(b) PCF 截面结构

Fig. 1 SPR-PCF sensor. (a) Structure diagram of temperature system; (b) cross section of PCF

### 3 结果与分析

选取的结构模型的晶格周期  $\Lambda = 3 \mu\text{m}$ ，水平位置第一层和第三层空气孔直径  $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ ，中间一层大空气孔直径  $d_2 = 1.5d_1$ ，SPR 通道的半径  $r_{\text{Au}} = 4 \mu\text{m}$ ，金纳米薄膜厚度  $t_1 = 0.04 \mu\text{m}$ ，PDMS 薄膜厚度  $t_2 = 1.1 \mu\text{m}$ 。金的介电常数可由 Drude 模型<sup>[16]</sup>给出，具体表达式为

$$\epsilon_{\text{Au}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_p^2 / (\omega^2 + i\omega\omega_{\tau}), \quad (4)$$

式中： $\omega = 2\pi c / \lambda$  为入射光角频率， $\epsilon_{\infty} = 9.75$  为无穷大频率介电常数， $\omega_{\tau} = 1.45 \times 10^{14} \text{ rad/s}$  为碰撞频率， $\omega_p = 1.36 \times 10^{16} \text{ rad/s}$  为金的等离子体共振频率。PDMS 是一种高热光系数的温敏材料，有效折射率 RI 随温度变化<sup>[17-19]</sup>，变化关系为

$$n_{\text{PDMS}} = n_0 - \gamma \Delta T, \quad (5)$$

式中： $n_0 = 1.4204$  为 PDMS 在  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下的有效折射率， $\gamma = -4.66 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  为热光系数， $\Delta T$  为温度变化量。此外，光纤基底材料为石英玻璃，其折射率与通光波长 ( $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ) 的关系式可以根据 Sellmeier 方程<sup>[20]</sup>给出，具体表达式为

$$n^2 = 1 + \sum \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - A_i}, \quad (6)$$

式中： $\lambda$  为波长， $A_i$  为色散系数，下标  $i = 1, 2, 3$ 。

#### 3.1 结构参数对传感特性的影响

SPR-PCF 传感器的结构参数对输出光谱谐振波长有很大的影响，研究与分析不同结构参数对传感特性的影响，对提高传感器的性能具有重要的意义<sup>[21]</sup>。主要的影响因素包括金纳米薄膜的厚

度  $t_1$ 、PDMS 厚度  $t_2$ 、晶格周期  $\Lambda$ ，以及小空气孔直径  $d_1$ 。如图 2(a) 所示，在保持其他参数不变的情况下，金纳米薄膜分别取 30, 35, 40 nm 时，SPR 峰发生红移，波峰值逐渐减小。金纳米薄膜厚度改变引起 SPP 模有效折射率改变，而纤芯模的有效折射率不变，导致两折射率交点位置即 SPP 模损耗峰对应的波长发生移动。金属纳米薄膜的厚度会影响倏逝波和 SPP 模的衰减速度<sup>[22-23]</sup>。金纳米薄膜过厚会使 SPR 峰值减小，半峰全宽变大；金纳米薄膜过薄会使薄膜处倏逝场的能量减弱，限制损耗增大，不利于实际应用。金纳米薄膜厚度亦会对传感器的灵敏度及线性度产生影响，如图 3(a) 所示，随着金纳米薄膜厚度增加，灵敏度和峰值漂移的线性度逐渐增加。综合考虑损耗峰值大小，同时为了获得良好的灵敏度线性度，金纳米薄膜厚度被确定为 40 nm。

同理，分析了  $t_2$ 、 $\Lambda$ 、 $d_1$  对 SPR-PCF 传感特性的影响，具体结果如表 1 所示。图 2(b) 和图 3(b) 表明，增大 PDMS 厚度  $t_2$ ，纤芯基模损耗峰发生蓝移，峰值增大，但对灵敏度及线性度的影响较小。从图 2(c) 和图 3(c) 可以看出，晶格周期  $\Lambda$  对纤芯基模损耗峰的峰值有很大影响，呈现负相关的趋势，虽然  $\Lambda$  越小，灵敏度越高，但此时限制损耗过大，不具有实际应用价值。同样，如图 2(d) 和图 3(d) 所示，减少  $d_1$ ，纤芯基模的限制损耗峰明显增大并向短波方向移动，同时灵敏度逐渐减小，线性度逐渐增大。综合考虑优化比较，最终确定的 SPR-PCF 结构参数如表 2 所示。

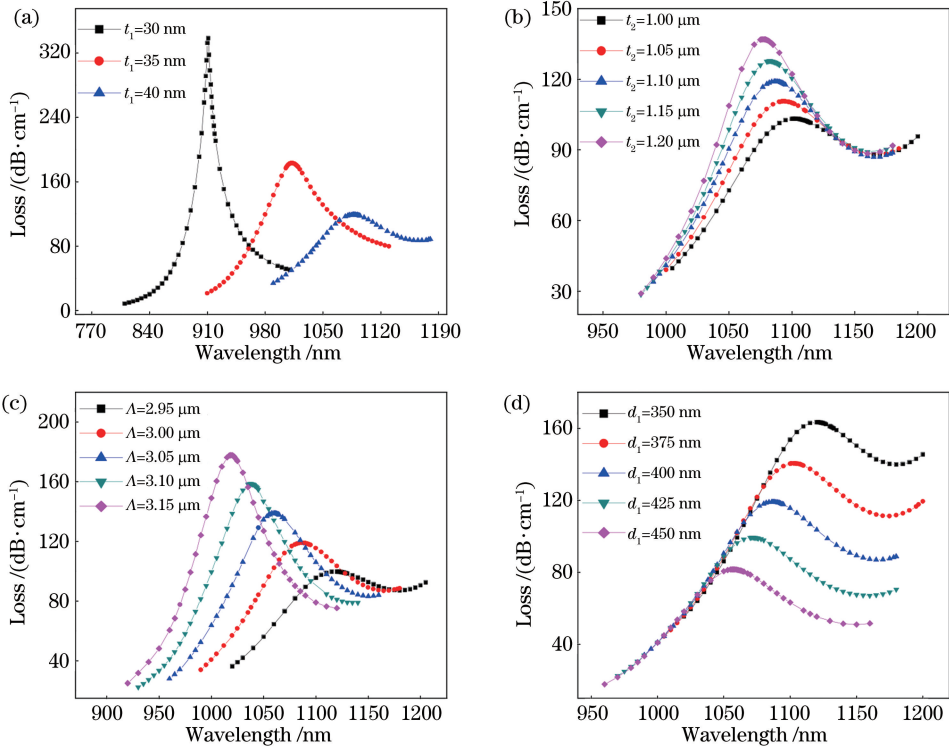


图 2 基模损耗峰随不同参数的变化关系。(a)  $t_1$ ; (b)  $t_2$ ; (c)  $\Lambda$ ; (d)  $d_1$

Fig. 2 Relationship between fundamental mode loss peak and different parameters.

(a)  $t_1$ ; (b)  $t_2$ ; (c)  $\Lambda$ ; (d)  $d_1$

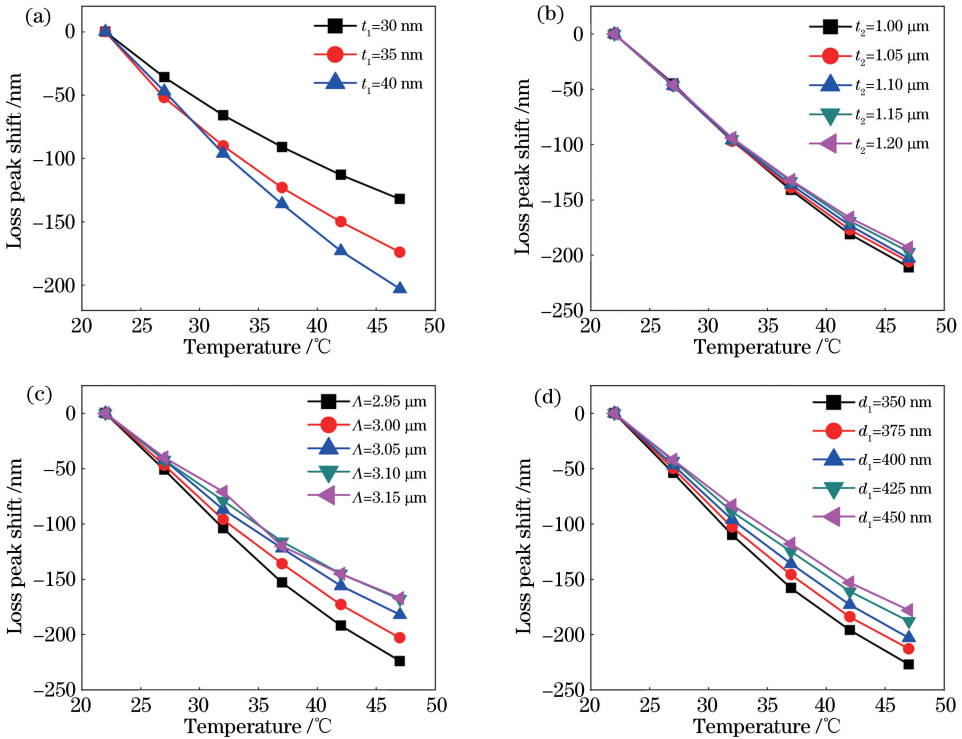


图 3 不同参数条件下基模损耗峰随温度的变化关系。(a)  $t_1$ ; (b)  $t_2$ ; (c)  $\Lambda$ ; (d)  $d_1$

Fig. 3 Relationship between fundamental mode loss peak and temperature under different parameters.

(a)  $t_1$ ; (b)  $t_2$ ; (c)  $\Lambda$ ; (d)  $d_1$



表 1 不同参数对损耗峰、灵敏度和线性度的影响

Table 1 Influence of different parameters on loss peak, sensitivity, and linearity

Parameter	Available range	Loss	Spectral shift	Sensitivity	Linearity
$t_1/\text{nm}$	30–40	Decrease	Red shift	Increase	Decrease
$t_2/\mu\text{m}$	1.00–1.20	Increase	Blue shift	Decrease	Decrease
$\Delta/\mu\text{m}$	2.95–3.20	Increase	Blue shift	Decrease	Decrease
$d_1/\text{nm}$	350–450	Decrease	Blue shift	Decrease	Increase

表 2 SPR-PCF 结构优化参数

Table 2 Optimization parameters of SPR-PCF structure

Parameter	$t_1/\text{nm}$	$t_2/\mu\text{m}$	$\Delta/\mu\text{m}$	$d_1/\text{nm}$
Value	40	1.10	3.00	400

### 3.2 结果与分析

结合有限元法(FEM)<sup>[24]</sup>与完美匹配层(PML)边界条件<sup>[25]</sup>分析本文结构的温度灵敏度和线性度传感特性。不失一般性,本文研究 X 偏振方向,在常温  $T=22\text{ }^\circ\text{C}$ ,PDMS 材料折射率为 1.4204 时, X 偏振方向上不同模式的有效折射率情况如图 4 所示。仿真结果表明:在特定波长条件下,纤芯导模沿接触面方向的波矢分量  $k_x$  与 SPP 的波矢大小  $k_{\text{spp}}$  相等,纤芯倏逝波与激发于金纳米薄膜表面的 SPP 相互耦合,纤芯的部分能量转移到金纳米薄膜表面,导致纤芯基模的限制损耗增大从而形成损耗峰。如图 4 所示,SPP 模的有效折射率实部曲线与基模的相交,交点处基模的限制损耗达到最大值,交点处发生模式耦合,两种模式同时存在,对应的波长为谐振波长。

当待测环境温度升高时,PDMS 折射率随之降低,即其介电常数  $\epsilon_2(\omega)$  降低,依据(1)式和(2)式可知,除入射光波角频率  $\omega$  以外其他均为常数,要达到相位匹配条件,需增大入射光波角频率  $\omega$ ,从而使相位匹配波长减小,纤芯基模的限制损耗峰在 22~47  $^\circ\text{C}$  温度范围内随着温度的升高发生蓝移,如图 5

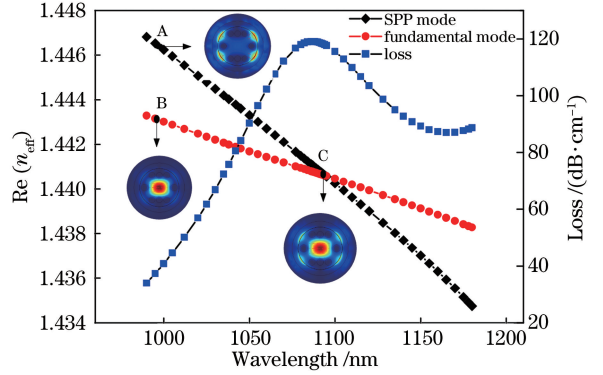


图 4 基模的有效折射率实部、损耗曲线以及 SPP 模有效折射率实部随波长的变化(插图 A 为 SPP 模场分布, B、C 分别为基模和耦合时基模的模场分布)

Fig. 4 Variation of refractive index and loss of fundamental mode, and refractive index of SPP mode with wavelength (Illustration A shows the SPP mode field, and illustration B, C shows mode field of fundamental mode and fundamental mode in coupling time)

(a)所示。温度传感器的灵敏度是一个重要的参数,其计算式为

$$S(\lambda) = \frac{\Delta\lambda_{\text{peak}}}{\Delta T}, \quad (7)$$

式中: $\Delta T$  为温度的变化量, $\Delta\lambda_{\text{peak}}$  为损耗峰峰值对应波长在温度变化  $\Delta T$  时的漂移量,根据(7)式,可得所提结构的温度灵敏度为  $-8.18\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。温度分

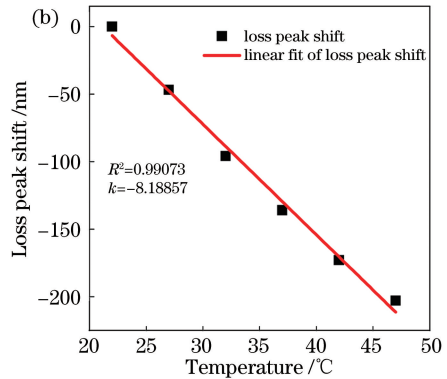
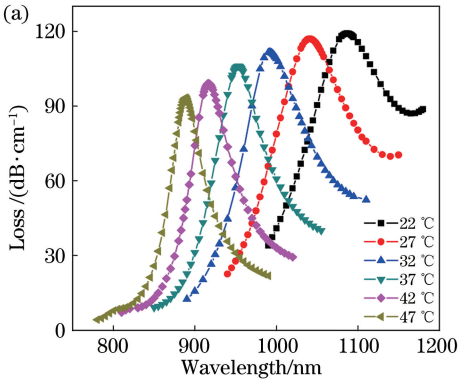


图 5 基模的温度特性曲线。(a)基模损耗曲线;(b)基模损耗峰值漂移量

Fig. 5 Temperature characteristic curves of the fundamental mode. (a) Fundamental mode loss; (b) loss peak shift of fundamental mode

辨率是温度传感器的另一重要参数,它决定着传感器所能检测到的最小温度变化量。其计算式为

$$R = \frac{\Delta T \Delta \lambda_{\min}}{\Delta \lambda_{\text{peak}}}, \quad (8)$$

表 3 PCF 温度传感器的性能比较

Table 3 Characteristic comparison of PCF temperature sensors

Type	Year	Sensitivity / (nm·°C <sup>-1</sup> )	Resolution / °C	Sensitization method
SPR	2015	0.5	0.02	Chloroform & ethanol
SPR	2016	3.08	0.01325	Anhydrous ethanol
Directional coupling	2017	-6.02	0.00332	Toluene
Proposed	2019	-8.18	0.0123	PDMS

## 4 结 论

本文提出了一种基于 SPR 效应的 PCF 温度传感器,具有结构简单、工艺难度低、灵敏度高的优点。相比于在 PCF 气孔中填充一般性温敏材料,在光纤外层镀膜形成环形传感通道更容易实现温度的实时精准测量。采用有限元法对所提结构的温度传感特性进行了分析,结果表明在保持良好线性度情况下传感器的温度灵敏度和分辨率分别为-8.18 nm/°C 和 0.0123 °C,所提传感器具有很高的实用性。

### 参 考 文 献

[1] Wang Y, Huang Q, Zhu W J, et al. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1910-1917.

[2] Zhong X Y, Wang Y P, Liao C R, et al. Temperature-insensitivity gas pressure sensor based on inflated long period fiber grating inscribed in photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (8): 1791-1794.

[3] Yadav T K, Narayanaswamy R, Abu Bakar M H, et al. Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and its application to protein sensing [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22802-22807.

[4] Du H F, Sun X Y, Hu Y W, et al. High sensitive refractive index sensor based on cladding etched photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(2): 126-134.

[5] Liu C, Wang F M, Lü J, et al. A highly temperature-sensitive photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 378-382.

[6] Yang X C, Lu Y, Liu B L, et al. Fiber ring laser temperature sensor based on liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17

式中: $\Delta \lambda_{\min}$ 为光谱仪的最小分辨率,一般取 0.1 nm。计算得到所提结构的温度分辨率为 0.0123 °C。与现有的结构比较,具有明显的优势,各 PCF 温度传感器的性能对比如表 3 所示。

(21): 6948-6952.

[7] Du C, Wang Q, Zhao Y, et al. Highly sensitive temperature sensor based on an isopropanol-filled photonic crystal fiber long period grating [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 12-15.

[8] Ma J, Yu H H, Jiang X, et al. High-performance temperature sensing using a selectively filled solid-core photonic crystal fiber with a central air-bore [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9406-9415.

[9] Shi M, Li S G, Chen H L. A high-sensitivity temperature sensor based on Sagnac interferometer employing photonic crystal fiber fully filled with ethanol [J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 94.

[10] Sazio P J A, Amezcua-Correa A, Finlayson C E, et al. Microstructured optical fibers as high-pressure microfluidic reactors [J]. *Science*, 2006, 311(5767): 1583-1586.

[11] He C Y, Fang J B, Zhang Y N, et al. High performance all-fiber temperature sensor based on coreless side-polished fiber wrapped with polydimethylsiloxane [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (8): 9686-9699.

[12] Geng Y F, Wang L N, Tan X L, et al. A compact four-wave mixing-based temperature fiber sensor with partially filled photonic crystal fiber [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(8): 2956-2961.

[13] Jeong S W, Bolortuya S, Eadi S B, et al. Fabrication of superhydrophobic surfaces based on PDMS coated hydrothermal grown ZnO on PET fabrics [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(1): 102-113.

[14] Velazquez-Gonzalez J S, Monzon-Hernandez D, Martinez-Pinon F, et al. Surface plasmon resonance-based optical fiber embedded in PDMS for temperature sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(2): 126-131.

[15] Cai D K, Neyer A. Cost-effective and reliable sealing method for PDMS (polydimethylsiloxane)-based

- microfluidic devices with various substrates [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(4/5): 855-864.
- [16] Hassani A, Skorobogatiy M. Design criteria for microstructured-optical-fiber-based surface-plasmon-resonance sensors[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(6): 1423-1429.
- [17] Zhang X Y, Yu Y S, Zhu C C, et al. Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 7-10.
- [18] Park C S, Joo K I, Kang S W, et al. A PDMS-coated optical fiber Bragg grating sensor for enhancing temperature sensitivity [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(4): 329-334.
- [19] Hernández-Romano I, Cruz-García M A, Moreno-Hernández C, et al. Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5654-5661.
- [20] Akowuah E K, Gorman T, Ademgil H, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for biosensing applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1403-1410.
- [21] Wang Q, Ding Y, Tan C, et al. Dual resonance temperature sensor of a long-period grating written in a liquid-filled photonic crystal fiber [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2018, 24(1): 84-92.
- 王晴, 丁毅, 谭策, 等. 液体填充光子晶体光纤长周期光栅双谐振温度传感器的设计与优化[J]. *量子光学学报*, 2018, 24(1): 84-92.
- [22] Steel M J, Osgood R M. Elliptical-hole photonic crystal fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(4): 229-231.
- [23] Zhu C H, Tan C, Wang Y, et al. Photonic crystal fiber high sensitivity magnetic field and temperature sensor based on surface plasma resonance effect and defect coupling[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 0310001.
- 朱晟昇, 谭策, 王琰, 等. 基于 SPR 效应和缺陷耦合的光子晶体光纤高灵敏度磁场与温度传感器[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0310001.
- [24] Zhu H X, Ye T, Zhang K F. Study on high sensitivity pressure sensing characteristics of photonic crystal fiber [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(4): 511-516.
- 朱虹茜, 叶涛, 张克非. 光子晶体光纤高灵敏度压力传感特性研究[J]. *激光技术*, 2019, 43(4): 511-516.
- [25] Saitoh K, Koshiba M. Full-vectorial imaginary-distance beam propagation method based on a finite element scheme: application to photonic crystal fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(7): 927-933.