

# 空芯光子带隙光纤中的表面模共振耦合效应及高温传感特性

游永<sup>1</sup>, 郭慧毅<sup>1</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 柯一礼<sup>2</sup>, 段少祥<sup>1</sup>, 王志<sup>1</sup>, 刘艳格<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>南开大学现代光学研究所天津市微尺度光学信息技术科学重点实验室, 天津 300350;

<sup>2</sup>烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074

**摘要** 提出并研究了空芯光子带隙光纤中表面模共振耦合效应和高温传感特性。实验上观测到光子带隙光纤中的表面模耦合效应,理论上诠释了该效应的产生原理。通过表面模耦合效应,对在光纤透射光谱中形成的多个共振峰进行温度和应变传感实验,观察到独特的温度和应变传感特性:共振峰在 20~150 °C 之间低温不敏感,在 150~260 °C 之间高温强度敏感。在 150~260 °C 之间的温度敏感度达到 -0.26 dB/°C,同时各处波长对温度不敏感;共振峰的强度和波长对应变不敏感。该空芯光子带隙光纤传感器解决了温度-应变之间交叉敏感的问题,可以有效实现高温环境下的强度实时检测,具有结构简单、使用方便等众多优点。

**关键词** 光纤光学; 空芯光子带隙光纤; 光纤传感器; 温度传感器

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1306005

## Surface-Mode Resonance Coupling Effect and High-Temperature Sensing Characteristics in Hollow-Core Photonic Bandgap Fibers

You Yong<sup>1</sup>, Guo Huiyi<sup>1</sup>, Li wei<sup>2</sup>, Ke Yili<sup>2</sup>, Duan Shaoxiang<sup>1</sup>, Wang Zhi<sup>1</sup>, Liu Yange<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Key Laboratory of Micro-Scale Optical Information Science and Technology, Institute of Modern optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

<sup>2</sup> Fiberhome Communication Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** Surface-mode resonance coupling effect and high-temperature sensing characteristics of hollow-core photonic bandgap fibers are proposed and studied herein. The surface-mode coupling effect in the photonic bandgap fibers was observed experimentally, and the generation principle of the effect was theoretically explained. Multiple resonance peaks were formed in the fiber transmission spectrum, were subjected to temperature- and strain-sensing experiments, and unique temperature and strain sensing characteristics were observed. The resonance peak was insensitive to low temperatures between 20 °C and 150 °C, whereas it was sensitive to high temperature between 150 °C and 260 °C. This temperature sensitivity observed between 150 °C and 260 °C reached -0.26 dB/°C. Simultaneously, the wavelength of each part was insensitive to temperature, and the intensity and wavelength of the resonance peak were insensitive to strain. The hollow-core photonic bandgap fiber sensor addressed the temperature-strain cross-sensitivity problem, effectively can realize real-time intensity detection in a high-temperature environment, and has many advantages, including a simple structure and ease of use.

**Key words** fiber optics; hollow-core photonic bandgap fiber; fiber sensing; temperature sensor

**OCIS codes** 060.2310; 060.2400; 060.2370; 050.1950

收稿日期: 2021-02-07; 修回日期: 2021-03-10; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61835006, 61775107)

通信作者: \* ygliu@nankai.edu.cn

# 1 引言

近年来,空芯光子带隙光纤(HC-PBF)在低损耗、宽带宽等方面取得了长足的进步,已经在光通信、光传感、光纤激光器等方面展现出巨大的应用潜力<sup>[1-4]</sup>。HC-PBF的包层具有周期性空气孔排列结构,通过在纤芯中引入空气缺陷,实现了一定波长的光被束缚在空气芯中传输,与传统石英光纤相比,光学非线性可以降低2~3个数量级<sup>[3]</sup>,材料吸收、色散、散射、热等效效应都大幅降低。在HC-PBF中存在两种与空气芯相关的模式:纤芯导模和表面模。纤芯导模几乎所有的能量都位于空气芯中。表面模是包层中周期性结构突然终止引入的,环绕于纤芯二氧化硅界面周围,当满足相位匹配条件时,它会与纤芯导模发生反交叉耦合,并在反交叉波长附近形成一个超模。表面模在空间上部分位于空气芯,部分位于纤芯周围界面二氧化硅材料上,造成光纤损耗急剧增大、可用带宽减小,影响光纤的稳定性和偏振特性<sup>[5]</sup>。在HC-PBF的设计制造过程中,通过细化纤芯壁厚,可以将它们转移到带隙之外<sup>[6]</sup>。但是因为表面模的特殊性质,它与纤芯导模形成的谐振峰可用于新型传感,结合HC-PBF的特性,可以制造纯光纤传感器件。

利用HC-PBF独特的导光机制和灵活的微结构可设计特性,HC-PBF不但可以用于温度、应变和压力<sup>[7-8]</sup>等常规参数的传感,还可以制造成传感器件。例如,一种干涉型光纤陀螺利用HC-PBF实现<sup>[9]</sup>,与普通单模谐振光纤陀螺相比,克尔效应、法拉第效应等引起的限制因素分别降低2~3和1个数量级<sup>[10]</sup>。通过热处理,可在HC-PBF中实现光纤光栅传感器,该传感器具有对环境温度不敏感的特性<sup>[11]</sup>。利用空芯光纤的反谐振机理,在空芯光纤和布拉格光栅级联传感器中可实现温度和应变的同时测量<sup>[12]</sup>。另外,包层和纤芯中的空气孔可以选择性地填充具有不同光学、热学、电学和其他性质的各种材料,能够在更长的距离上实现更强的光与物质相互作用,可用于开发新型的可调谐器件和传感器<sup>[13-14]</sup>。当液体细胞流过HC-PBF时,通过检测光纤透射谱的变化来检测液体分析物,实现了新型生物液体的多光谱传感技术<sup>[15]</sup>。HC-PBF还可以用来检测不同的气体,如 $C_2H_2$ 、 $C_2H_6$ 、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $NH_3$ 、 $O_2$ <sup>[16-20]</sup>。但是,目前关于基于HC-PBF的表面模共振耦合效应的传感研究鲜有报道。

本文研究了HC-PBF中表面模与纤芯导模的共振耦合效应及其传感特性。首先对该HC-PBF进行了理论建模,优化纤芯壁厚,使得光纤在传输窗口内支持足够多的表面模式,详细演示了表面模和纤芯导模的共振耦合过程。实验上观测到光子带隙光纤中的表面模耦合效应,通过表面模耦合效应,对在光纤透射谱中形成的多个共振峰进行温度和应变传感实验,并观察到独特的温度和应变传感特性:共振峰在20~150℃之间低温不敏感,在150~260℃之间高温强度敏感,高温灵敏度达到-0.26 dB/℃,同时各处波长对温度不敏感;共振峰的强度和波长对应变不敏感。该传感器基于HC-PBF本身的面模效应进行传感,避免了对光纤的破坏,同时避免了温度与应变对传感器的交叉影响,具有结构简单、使用方便等优点。

## 2 原理及仿真

### 2.1 共振耦合效应

使用的7-cell空芯光子带隙光纤为烽火通信科技股份有限公司生产,该光纤的横截面结构如图1(a)所示,空气芯直径约为11.3 μm,晶格周期约为4.05 μm,由于纤芯的折射率低于包层折射率,因此它以一种全新的光子带隙导光机制将特定波段的光限制在一个由复杂玻璃微结构包围的低折射率空气芯中。图1(b)为测量的长度为5 m的光纤的透射谱,可见,该光纤在1350~1750 nm波长内导光,带隙窗口很不平滑,这是因为该光纤在带隙范围内产生了较多表面模,每个表面模与导模耦合后都会导致一个损耗峰,损耗峰越深表示与导模的耦合越强,同时损耗峰深度与光纤的长度也有关,光纤越长损耗峰越深。SM1、SM2、SM3、SM4尖峰分别是在1403 nm、1504 nm、1575 nm、1631 nm处的表面模。表面模会影响光纤的可用带宽,增大传输损耗,并增加波长附近的色散和色散斜率。表面模的形成与纤芯壁厚有直接关系,与真正的纤芯导模不同,大部分强度分布在纤芯周围的二氧化硅材料中。在一定的纤芯半径范围内,表面模和纤芯导模互相作用,导致光波沿着光纤轴向与石英玻璃显著重叠,如图1(b)插图展示的SM2、SM3和SM4波长处的实测模场图(由于光源波长的限制,未能观察到SM1模场),即纤芯传导模式被耦合到了表面模式中,进而在传输谱中表现为损耗峰。

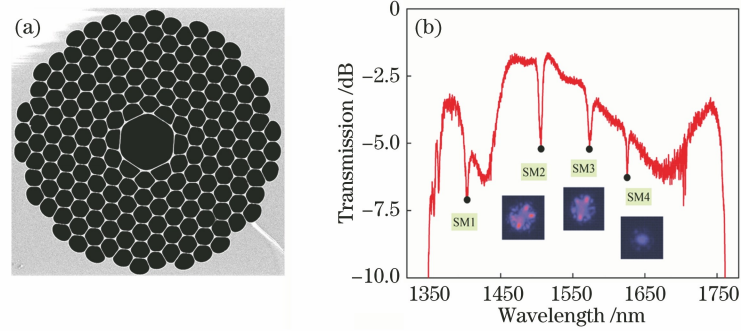


图 1 HC-PBF 结构。(a)横截面结构电镜图;(b)传输谱和表面模的模场图

Fig. 1 HC-PBF structure. (a) Electron micrograph of cross-sectional structure; (b) transmission spectrum and mode field diagrams of surface modes

为了探索表面模的形成过程和对导模的影响,对图 1 中的光纤进行理论建模分析。HC-PBF 的带隙范围与晶格周期有关,表面模的数量与纤芯壁厚密切相关,优化特定参数可以使光纤模型尽可能接近真实光纤。图 2(a)是光纤模型的整体横截面结构,在纤芯中去除 7 个空气孔,形成了 7-cell 空芯光子带隙光纤。图 2(b)是纤芯区域的结构,该光纤模

型对应的结构参数分别为,晶格周期  $\Lambda = 4.05 \mu\text{m}$ ,纤芯壁厚  $T = 218 \text{ nm}$ ,包层壁厚  $t = 81 \text{ nm}$ ,包层晶格直径  $d = 3.97 \mu\text{m}$ ,包层空气孔圆化角直径  $d_c = 0.3\Lambda$ ,纤芯圆化角直径  $D_c = 0.1\Lambda$ 。仿真由商业化有限元软件 COMSOL Multiphysics 完成,光纤的背景材料为纯二氧化硅,不同波长下的折射率由 Sellmeier 方程确定。

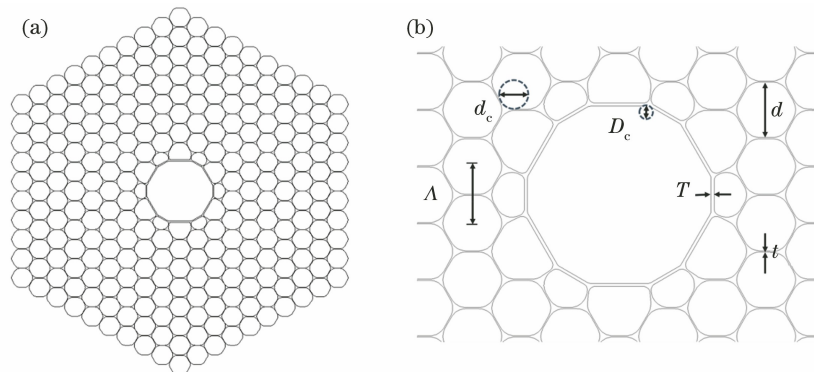


图 2 模拟的 7-cell 空芯光子带隙光纤结构。(a)横截面结构;(b)纤芯周边结构及结构参数  
Fig. 2 Simulated 7-cell HC-PBF structure. (a) Cross-section structure; (b) core surrounding structure and structural parameters

图 3(a)为仿真模型的纤芯导模与表面模在耦合区的色散曲线。平行四边形区域表示带隙窗口,大约在 1350~1750 nm 波长导光,与实际模型的带隙宽度一致。在带隙范围内,存在 4 个表面模与基模发生交叉耦合,4 条圆点线是对应的 4 个表面模有效折射率随波长的变化曲线,三角线是基模的有效折射率随波长的变化曲线,可以看出,基模色散曲线被表面模多次折断,所以在传输谱中表现出多个损耗峰。在交叉之前,表面模并未干扰基模,随着波长的移动,两种模式的有效折射率越来越接近,并最终发生模式耦合,在交叉点之后,原有的表面模变成了基模,原有基模变成表面模,两种模式的有效折射

率差异变得显著,光纤的损耗也随之下降。图 3(b)为带隙范围内基模的总损耗(包括限制损耗和散射损耗)的变化趋势,表面模的干扰使得基模的损耗急剧增大,形成损耗峰。图 3(c)为通过扫描波长得到的基模与表面模在耦合区域的模场变化,其中图 3(b)中的序号 a~e 分别对应图 3(c)中的 a~e 模场图。在 1580 nm 波长处,基模没有受到表面模影响,因此模场比较纯净;1615 nm 波长处,表面模与基模的有效折射率相等,两者完全耦合,模场上显示出部分位于空气芯,部分位于纤芯界面石英玻璃中;在 1650 nm 波长处,基模摆脱表面模影响,模场再次纯净。

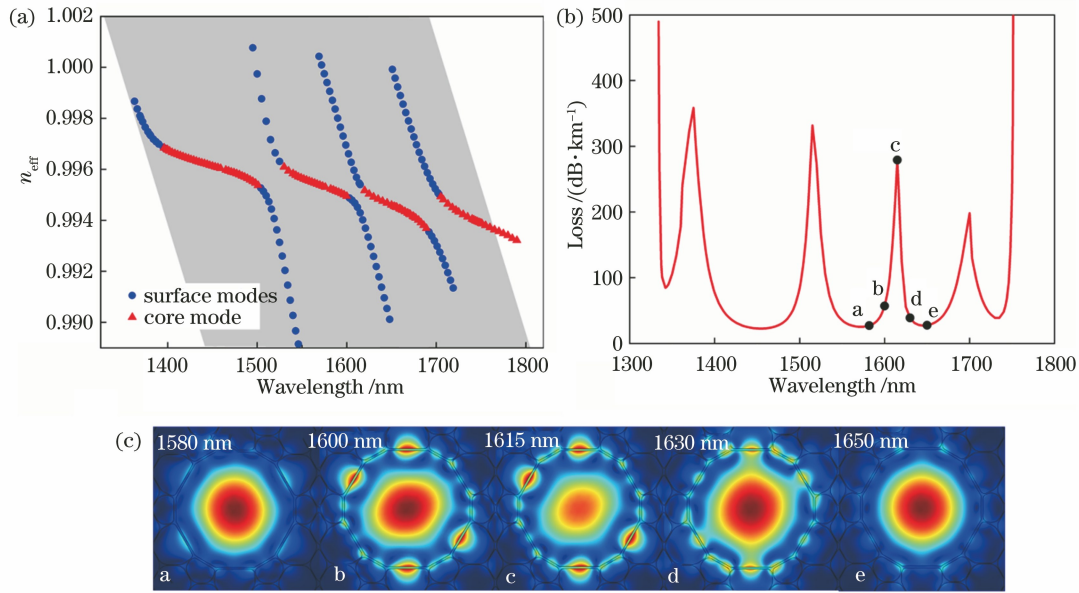


图 3 光子带隙光纤的理论模拟结果。(a)基模与表面模的有效折射率色散曲线;(b)光纤的损耗与波长的关系;(c)几个典型波长处的光纤模场

Fig. 3 Theoretical simulation results of the photonic bandgap fiber. (a) Effective refractive index dispersion curves of the fundamental mode and surface modes; (b) relationship between loss and wavelength; (c) fiber mode field at several typical wavelengths

HC-PBF 的损耗主要包括限制损耗和散射损耗。散射损耗主要是纤芯壁玻璃微观密度波动造成光波散射引起的损耗,它是 HC-PBF 的主要损耗来源,可通过优化纤芯壁厚、增大纤芯半径来减小光波与玻璃表面的重叠区域<sup>[21]</sup>。2020 年,有学者提出如果将二氧化硅玻璃纤维在高压下制造,可以减少玻璃中大的空隙数量和减小空隙平均大小,这些空隙会导致光散射,并将信号损失减少 50% 以上<sup>[22]</sup>。表面散射损耗(SSL)的计算公式<sup>[23]</sup>为

$$L_{ss}[\text{dB/km}] = \eta F \left( \frac{\lambda[\mu\text{m}]}{\lambda_0} \right)^{-3}, \quad (1)$$

式中:波长  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$  处的经验校准因子  $\eta = 300$ ,该值是当前的光纤拉制工艺决定的,随着工艺的提升,校准因子可进一步降低; $F$  为纤芯与玻璃边界之间的光功率重叠因子,与散射损耗成正比。 $F$  的计算公式<sup>[6]</sup>为

$$F = \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\oint_{\text{hole perimeters}} dl |E|^2}{\int_{\text{cross-section}} dA |E \times H^*|}, \quad (2)$$

式中: $E$  和  $H$  分别为导模的电场强度和磁场强度; $l$  为纤芯内空气与玻璃界面。

限制损耗(CL)由模式的有效折射率的虚部  $\text{Im}(n_{eff})$  得到<sup>[24]</sup>,表达式为

$$L_c[\text{dB/km}] = \frac{40\pi \text{Im}(n_{eff}) \times 10^3}{\ln(10)\lambda[\text{m}]}. \quad (3)$$

## 2.2 温度对光纤损耗影响的理论研究

HC-PBF 由高折射率的石英材料和低折射率的空气孔周期排列而成,当环境温度发生变化时,石英材料的折射率会随热光效应改变,同时光纤结构参数由于热膨胀系数不匹配也会改变,这些变化会对 HC-PBF 导模特性产生影响,因此仿真温度对光纤损耗的影响。使用图 2 中的光纤结构,该光纤模型参数模拟了图 1 中的实际光纤结构,两者具有相似的带隙宽度和表面模特性,因此这里模拟温度对光纤特性的影响,可以在一定程度上反映出真实环境下温度对该光纤的影响。光纤截面结构参数<sup>[25]</sup>在不同温度下可以被描述为

$$A(T) = A_0 \times [1 + \alpha_{\text{therm}} \times (T - T_0)], \quad (4)$$

式中: $T$  和  $T_0$  分别为实际温度和室温(298.15 K); $A(T)$  和  $A_0$  分别为光纤在实际温度和室温下的结构参数(包括晶格周期,纤芯/包层壁厚等);石英材料的热膨胀系数  $\alpha_{\text{therm}} = 5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 。

温度升高会造成光纤结构整体变大,对于 HC-PBF 而言,光纤结构整体变大,会导致带隙窗口向长波长漂移,对于本文中的仿真模型,晶格周期为  $4.05 \mu\text{m}$ ,根据(4)式计算,当温度由  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  加温至  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时,光纤结构整体增大 1.000151 倍,也即 HC-PBF 的晶格周期在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  时为  $4.050613 \mu\text{m}$ ,根据仿真经验,该晶格周期的变化幅度基本不会导致带隙窗口的漂移,也即温度不会导致 HC-PBF 带

隙窗口的明显变化。

不同温度下,石英材料的本征折射率<sup>[25]</sup>可以被描述为

$$n(T) = n_0 + n_{\text{therm}} \times (T - T_0), \quad (5)$$

式中: $n(T)$ 和 $n_0$ 分别为石英在实际温度及室温下的折射率;光纤材料的热光折射率系数 $n_{\text{therm}} = 1.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ,与应力和变形无关。

图 4 为该光纤模型在不同温度下,表面散射损耗和限制损耗的变化趋势。其中限制损耗非常小,可忽略不计,所以表面散射损耗的变化可以表征光纤总体损耗变化。显然,随着温度的升高,表面散射损耗与温度呈指数函数关系,对应的拟合方程为 $y = 24.88 + 0.44e^{\frac{x}{312.80}}$ 。这是因为纤芯玻璃表面在高温环境下会更加粗糙,表面散射损耗增大。从图 4 可以看出,当温度低于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,表面散射损耗变化很小,随着温度的升高,表面散射损耗变化幅度越来越大,导致光纤总体损耗也越来越大。

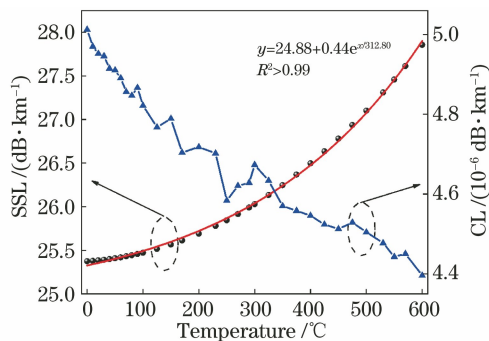


图 4 理论计算得到的表面散射损耗和限制损耗与温度的变化关系

Fig. 4 Relationship between surface scattering loss, confinement loss and temperature by theoretical calculation

### 3 实验结果

图 5 是基于 HC-PBF 的传感实验装置示意图。来自超连续光源(SCS,光谱范围为 $470 \sim 2400 \text{ nm}$ )的光通过夹在两段单模光纤(SMF)之间的 $5 \text{ m}$ 长 HC-PBF。对光纤进行温度、应变测量,最终在分辨率为 $0.02 \text{ nm}$ 的光谱分析仪(OSA)中观察光纤的光谱变化。通过将光纤环置于恒温平台,进行温度实验测试,恒温台加热范围为 $20 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过将光纤置于等强度梁,独立进行应变实验。

#### 3.1 温度响应特性

首先研究了该 HC-PBF 的温度传感特性,由于光波在空气芯中传输,避免了石英玻璃因为温度过高产生热光效应的影响,因此普遍认为 HC-PBF 具

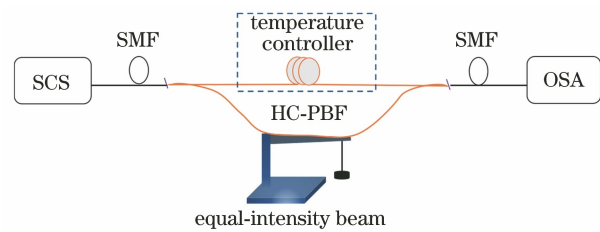


图 5 HC-PBF 的传感实验装置

Fig. 5 Sensing experimental device of HC-PBF

有温度不敏感性<sup>[26]</sup>,但是这些实验测试的温度范围均在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内,并没有测试它的高温敏感性。这里将 $5 \text{ m}$ 长 7-cell 空芯光子带隙光纤环绕成直径为 $25 \text{ cm}$ 的环形,将光纤环置于恒温平台上。为使光纤能够充分均匀受热,使用铜扣将光纤压实紧贴于平台上。将恒温平台从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐步加热到 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,每次加温 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,同时观察光谱变化,并记录相应数据。如图 6 所示,该光纤的温敏变化可以分为两部分,图 6(a)显示了在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内的光谱变化,可以发现当温度在 $30, 50, 70, 90 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,光谱没有发现肉眼可见的变化,对于 4 个表面模 SM1、SM2、SM3、SM4,也没有明显变化,因此进一步验证了 HC-PBF 在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内对温度不敏感的特性。如图 6(b)所示,当光纤加热到 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,光谱开始发生明显变化,随着温度的升高,传输谱向下移动,损耗增大。从图 6 也可以看出,表面模对应的共振峰波长位置始终没有变化,根据图 3(a)可知,SM1、SM2、SM3、SM4 的位置是由表面模和基模的有效折射率色散曲线的交叉耦合决定的,在加热过程中,共振峰波长位置不变,意味着表面模与基模的谐振耦合位置没有变化,同时带隙窗口始终没有明显变化。这与上述理论分析一致:由于热膨胀,光纤结构变化幅度过小,不会引起带隙窗口的明显漂移。

为了得到 HC-PBF 准确的温度敏感度,如图 7 所示,采集了 SM2、SM3、SM4 在不同温度下的峰谷强度值,对峰值位置进行线性拟合,绘制它们与温度的关系。由于 SM1 位于具有高损耗的带隙边缘区域,其数值受到干扰较大,所以没有展示 SM1 的变化趋势。图 7 中左半部分区域是 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以内的低温区,右半部分区域是 $150 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温区,由于设备限制, $260 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后多个波长光谱达到饱和,所以这里并未绘制 $260 \text{ }^\circ\text{C}$ 之后的曲线走势。表面模在低温区和高温区具有明显不同的线性关系,在低温区,SM2、SM3、SM4 的拟合曲线近乎水平直线,说明它们对温度不敏感,在高温区,SM2、SM3、SM4 具有高敏感性,拟合曲线具有显著的线性关系。其中

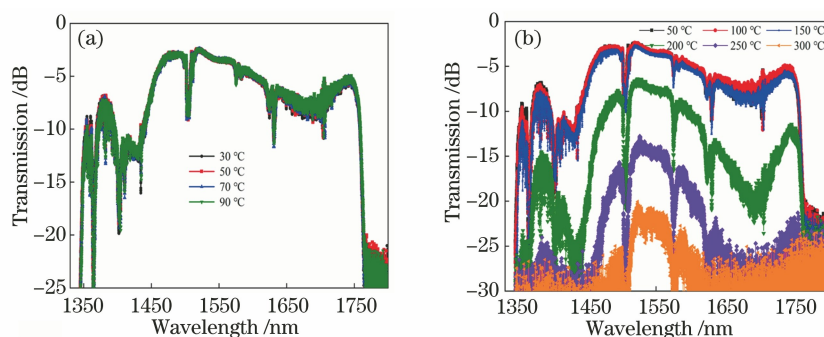


图 6 不同温度下该光纤的光谱变化。(a) 100 °C 以内;(b) 300 °C 以内

Fig. 6 Spectrum change of fiber under different temperatures. (a) Within 100 °C; (b) within 300 °C

SM2 的灵敏度为  $-0.26 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , SM3 的灵敏度为  $-0.25 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , SM4 的灵敏度为  $-0.27 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , 它们的线性拟合度均大于 0.97。因此用表面模耦合峰的平均灵敏度表示 HC-PBF 的温度灵敏度, 为  $-0.26 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ 。

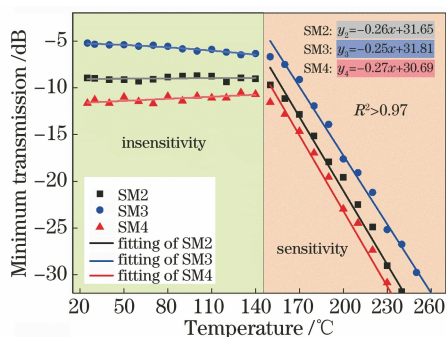


图 7 表面模损耗峰与温度的变化关系

Fig. 7 Relationship between the loss peak of the surface mode and temperature

结合理论分析可知,图 6(b)中的损耗峰衰减是光纤的表面散射损耗增大造成的。图 4 理论计算显示,在温度为  $0 \sim 600 \text{ }^\circ\text{C}$  时,损耗和温度具有指数函数关系,且在  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  内,损耗变化幅度非常小,这与实验中低温区 SM 温度灵敏度近乎呈水平线性关系

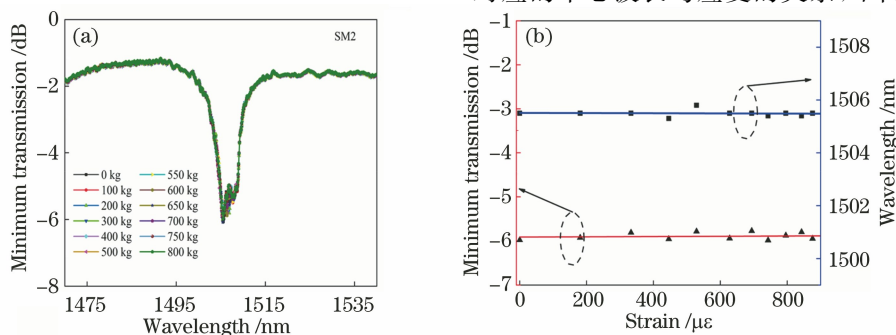


图 8 应变响应特性。(a) SM2 的光谱在不同应变条件下的变化;(b) 最小传输谱和中心谐振波长与应变的关系

Fig. 8 Characteristics of strain response. (a) Change of spectra of SM2 under different strain conditions; (b) minimum transmission spectrum and the center resonance wavelength varying with strain

基本一致。由于条件限制,只能演示温度在  $260 \text{ }^\circ\text{C}$  以内的变化关系,因此可将图 7 中高温区的温度灵敏度看作在  $150 \sim 260 \text{ }^\circ\text{C}$  内的线性关系,因为由图 4 可知,随着温度的进一步升高,HC-PBF 的温度灵敏度会变得更大,损耗与温度表现出指数函数关系。

### 3.2 应变响应特性

通过等强度梁测试应变<sup>[27]</sup>。将该 HC-PBF 平行粘到强度梁表面,光纤全段用紫外胶固定,且施加适当的预应力,以确保光纤与梁有良好的相切性;之后,分别换用不同的砝码悬于强度梁下,逐步增加砝码数量,悬臂梁在砝码的拉力下会逐渐变形,悬臂梁上的光纤也会随悬臂梁发生形变;测量光纤的形变长度,并转换为对应的应变单位。测试过程中温度始终保持在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 8(a)为不同应变下 SM2 对应的光谱变化,提取光谱中表面模谐振耦合峰的峰谷值并进行线性拟合,如图 8(b)中三角形线所示,拟合线近似一条水平直线,不同应力下的最小传输谱值均在  $-5.9 \text{ dB}$  附近波动,认为该波动更可能是测量误差引起的,相对 HC-PBF 的高温灵敏度  $-0.26 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  而言,可以认为 HC-PBF 的光传输强度对应变不敏感。同时在图 8(b)中也绘制了 SM2 对应的中心波长与应变的关系,不同应力下,中心波

长均在 1505.5 nm 附近,由于设备误差,有微小波动,拟合线近似一条水平直线,所以中心波长在不同的应变条件下没有发生漂移。

### 3.3 讨论

温度-应变交叉敏感性一直是光纤传感器面临的主要问题。对于传统固芯光纤传感器而言,光波在纤芯的实芯材料中传输,材料的折射率容易受到温度、应变、弯曲等多个参数的影响,进而影响光纤传感器的敏感性,有研究者通过参数解调消除温度-应变交叉敏感问题,但这需要对数据进行后处理,影响了传感器的实时可用性。在空芯光子带隙光纤中,由于光波在纤芯的空气孔中传输,当外界环境变化时,纤芯中光波的传播常数并不容易发生变化,在本课题组的实验中已经验证了利用空芯光子带隙光纤制作的传感器可以有效解决温度-应变对光纤传感器的交叉影响,实现高温环境下的强度实时检测,且具有结构简单、使用方便等众多优点。

## 4 结 论

研究了空芯光子带隙光纤中的纤芯导模与表面模的谐振耦合效应及其温度和应变响应特性。构建空芯光子带隙光纤模型,理论上分析和演示了表面模和芯模的共振耦合过程,研究了温度对光纤损耗的影响。实验上观测到光子带隙光纤中的表面模耦合效应,通过表面模耦合效应,对在光纤透射光谱中形成的多个共振峰进行温度和应变传感实验,并观察到独特的温度和应变传感特性:共振峰在 20~150 °C 之间低温不敏感,在 150~260 °C 之间高温强度敏感,高温灵敏度达到 -0.26 dB/°C,同时各处波长对温度不敏感;共振峰的强度和波长对应变不敏感。该传感器基于空芯光子带隙光纤本身的表面模效应进行传感,避免了对光纤的破坏,同时避免了温度与应变对传感器的交叉影响,具有结构简单、使用方便等众多优点,可实现高温环境下的实时检测,具有较好的工程应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, et al. Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 279-284.
- [2] Yang F, Gyger F, Thévenaz L. Intense Brillouin amplification in gas using hollow-core waveguides[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(11): 700-708.
- [3] Peng X, Mielke M, Booth T. High average power, high energy 1.55  $\mu\text{m}$  ultra-short pulse laser beam delivery using large mode area hollow core photonic band-gap fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 923-932.
- [4] Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 315-340.
- [5] Poletti F, Broderick N G R, Richardson D J, et al. The effect of core asymmetries on the polarization properties of hollow core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(22): 9115-9124.
- [6] Amezcua-Correa R, Broderick N G R, Petrovich M N, et al. Optimizing the usable bandwidth and loss through core design in realistic hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(17): 7974-7985.
- [7] Aref S H, Amezcua-Correa R, Carvalho J P, et al. Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement [J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18669-18675.
- [8] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, et al. Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0405003.  
李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0405003.
- [9] Digonnet M, Blin S, Kim H K, et al. Sensitivity and stability of an air-core fibre-optic gyroscope [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(10): 3089-3097.
- [10] Ying D, Demokan M S, Zhang X, et al. Analysis of Kerr effect in resonator fiber optic gyros with triangular wave phase modulation [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 529-535.
- [11] Wang Y P, Jin W, Ju J, et al. Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2784-2790.
- [12] Tan Z, Liao C R, Liu S, et al. Simultaneous measurement sensors of temperature and strain based on hollow core fiber and fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206007.  
谭展, 廖常锐, 刘申, 等. 基于空芯光纤和光纤布拉格光栅的温度应变同时测量传感器[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206007.
- [13] Jin W, Cao Y, Yang F, et al. Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6767.
- [14] Yang F, Jin W, Lin Y C, et al. Hollow-core microstructured optical fiber gas sensors[J]. *Journal*

- of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3413-3424.
- [15] Ermatov T, Noskov R E, Machnev A A, et al. Multispectral sensing of biological liquids with hollow-core microstructured optical fibres[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 173.
- [16] Munzke D, Böhm M, Reich O. Gaseous oxygen detection using hollow-core fiber-based linear cavity ring-down spectroscopy [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2524-2529.
- [17] Lee K S, Lee Y K, Jang S H. A novel grating modulation technique for photonic bandgap fiber gas sensors [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(10): 624-626.
- [18] Cubillas A M, Silva-Lopez M, Lazaro J M, et al. Methane detection at 1670-nm band using a hollow-core photonic bandgap fiber and a multiline algorithm [J]. Optics Express, 2007, 15(26): 17570-17576.
- [19] Lehmann H, Bartelt H, Willsch R, et al. In-line gas sensor based on a photonic bandgap fiber with laser-drilled lateral microchannels [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(11): 2926-2931.
- [20] Lim S D, Ma K, Jeong J H, et al. *In situ* gas sensing using a remotely detectable probe with replaceable insert[J]. Optics Express, 2012, 20(2): 1727-1732.
- [21] Song J M, Sun K, Xu X B. Scattering loss analysis and structure optimization of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1105003.
- 宋镜明, 孙康, 徐小斌. 空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1105003.
- [22] Yang Y J, Homma O, Urata S, et al. Topological pruning enables ultra-low Rayleigh scattering in pressure-quenched silica glass[J]. Npj Computational Materials, 2020, 6: 139.
- [23] Chen X, Hu X W, Yang L Y, et al. Double negative curvature anti-resonance hollow core fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(14): 19548-19554.
- [24] White T P, Kuhlmeier B T, McPhedran R C, et al. Multipole method for microstructured optical fibers I formulation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(10): 2322-2330.
- [25] Zhao H, Chen M, Li G. Temperature dependence of birefringence in polarization-maintaining photonic crystal fibres[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(6): 558-563.
- 赵红, 陈檬, 李港. Temperature dependence of birefringence in polarization-maintaining photonic crystal fibres[J]. 中国物理 B: 英文版, 2012, 21(6): 558-563.
- [26] Fokoua E N, Petrovich M N, Bradley T, et al. How to make the propagation time through an optical fiber fully insensitive to temperature variations [J]. Optica, 2017, 4(6): 659-668.
- [27] Liu Y G, Liu B, Feng X H, et al. High-birefringence fiber loop mirrors and their applications as sensors[J]. Applied Optics, 2005, 44(12): 2382-2390.