

基于多模光纤光栅光谱中拐点的温度传感研究

杨强龙, 陶海岩, 徐亚萌*

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月5日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月30日

摘要

在高温传感应用中, 蓝宝石光纤光栅能够稳定传递温度变化信息, 因此备受关注和青睐。但是, 蓝宝石光纤光栅是多模光纤光栅, 其谱线较为杂乱, 当监测其反射光谱中反射峰实现传感时, 存在识别困难和反射率低等问题, 不利于温度传感应用中的有效识别和高精度探测。本文以多模光纤光栅为研究对象, 提出了一种监测多模光纤光栅光谱中拐点实现传感的新方案。从耦合模式理论出发, 研究了多模光纤光栅的耦合系数随模式阶数和圆形改性区域半径的变化规律, 发现了耦合系数的拐点, 并解释了其出现的原因, 发现该拐点只与光纤结构有关, 而与光栅的结构无关, 通过追踪多模光纤光栅光谱中的拐点实现了温度传感, 传感灵敏度为 $0.0137 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。在本文提出的传感探测方案中, 光谱中拐点的识别度高, 有利于高精度温度传感, 为多模光纤光栅温度传感提供了新的探测方案, 有望为光纤光栅的传感应用提供一个有力候选。

关键词

多模光纤光栅, 高温传感, 拐点

Study on Temperature Sensing Based on the Turning Point in a Multimode Fiber Grating Spectrum

Qianglong Yang, Haiyan Tao, Yameng Xu*

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 5th, 2024; accepted: May 23rd, 2024; published: May 30th, 2024

Abstract

In high-temperature sensing applications, sapphire fiber Bragg gratings have the ability to stably

*通讯作者。

transmit temperature variation information, and thus have received significant attention and favor. However, the sapphire fiber Bragg gratings are multimode fiber grating, and its spectrum is relatively disorderly. When monitoring the reflected peaks in the reflection spectrum for sensing, there are issues of difficult identification and low reflectivity, which is disadvantageous for effective recognition and high-precision detection in temperature sensing applications. This paper takes multimode fiber gratings as the research object and proposes a new scheme for sensing by monitoring the turning point in the spectrum of the multimode fiber grating. Starting from coupled mode theory, the variations of the coupling coefficients with the mode order and the radius of the cylindrical modified region are studied, and the turning point of the coupling coefficient is discovered and its occurrence is explained. It is found that this turning point is only related to the fiber structure and independent of the grating structure. Temperature sensing is realized by tracking the turning point in the spectrum of the multimode fiber grating, with a sensitivity of $0.0137 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. In the sensing detection scheme proposed in this paper, the turning point in the spectrum has high identifiability, which is conducive to high-precision temperature sensing. This provides a new detection scheme for temperature sensing based on multimode fiber gratings and is expected to offer a promising candidate for fiber grating sensing applications.

Keywords

Multimode Fiber Grating, High Temperature Sensing, Turning Point

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高温温度传感器在工业生产、能源领域、环保行业、航空航天、医疗领域等应用中十分关键，如监测石油探测和钢铁生产中的温度，监测太阳能集热器和风力发电机的温度，监测垃圾焚烧、烟气处理等环保领域废气和烟尘的温度，监测航天器和火箭发动机的温度，监测病患的体温和各种治疗设备的温度等。因此，高温温度传感器一直备受研究者的关注。光纤光栅因其抗电磁辐射、与光纤一体化、耐高温、体积小、灵敏度高、可实时反馈等明显优势[1][2][3]，在众多高温温度传感器中脱颖而出。

1989年，美国联合技术研究中心的 Meltz 等人验证了光纤光栅的温度传感能力后[4]，光纤光栅在温度传感领域开始大放异彩。石英光纤光栅(FBG)能够检测 1000°C 以下的温度变化[5]，但在 1000°C 以上会发生软化，而蓝宝石材质的光纤具备更高的熔点(2072°C)，所以在温度高于 1200°C 的应用场景下，蓝宝石光纤光栅(SFBG)更具有潜力。2004年，加拿大通信中心 Grobnic 等人测试了 SFBG 的温度传感性能[6]，SFBG 能够在室温到 1500°C 稳定工作。在高温测试过程中，研究学者发现蓝宝石材质存在易发生高温氧化问题，对此，2022年，深圳大学的王义平等采用蓝宝石管与惰性气体对 SFBG 进行了封装，避免了蓝宝石高温氧化问题，SFBG 能在高温情况下稳定工作 20 h [7]，2024年，该团队采用氩气对 SFBG 密封封装，并退火 50 h，在高温状态下，SFBG 高温传感器稳定工作 1000 h [8]。但目前高温检测中仍然存在尚未完全解决的问题，SFBG 光谱杂乱、反射率低，其原因与刻写光栅结构有关。因飞秒激光直写法具有可控性，所以刻写 SFBG 多采用此方法[9]，但飞秒激光改性区域对蓝宝石光纤这种多模光纤(MMF)芯径而言十分有限，导致制备的光栅反射率过低，谱线杂乱[10]。目前从光栅制备的角度而言，提高光谱反射率与可识别程度的方法主要有增大 FBG 的横向折射率改性面积与 SFBG 单模化这两种手段。2022年，吉林大学的孙洪波团队在蓝宝石光纤中刻写了多条横向改性结构，并采用球形镜反射 SFBG 透射光

至反射输出端, 进一步提高了反射率, 反射率可以达到 34.1% [11]。同年, 牛津大学的 Fells 教授团队采用多层环状的结构刻写了 SFBG 单模化光栅结构, 将 SFBG 光谱压制在了 0.3 nm [12]。以上方案均是通过监测反射光谱中反射峰的漂移实现温度的传感, 所以才需要提高反射光谱中反射率。

本文以多模光纤光栅(MMFBG)为研究对象, 提出了通过观测其光谱中拐点实现传感的新方案。本文从 FBG 的耦合模式理论出发, 研究了 MMFBG 中耦合系数与模式序数和改性结构的关系, 利用高阶模式的模场能量分布特性解释了耦合系数拐点的存在原因, 得到了存在拐点的 MMFBG 光谱, 通过追踪该光谱中的拐点随温度的变化, 实现了温度传感功能。本文研究为 MMFBG 的光谱设计优化提供了理论基础, 为 MMFBG 的传感应用提供了新方案, 有望为光纤光栅的传感应用提供新思路。

2. 耦合模式理论

光纤在无折射率微扰时, 模式受到边界条件约束保持着正交性, 光纤内部的模式满足波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

其中, ε_0 为真空介电常数, μ_0 为真空磁导率, \mathbf{E} 为电场, \mathbf{P} 为极化矢量, 利用边界约束条件, 便能求出模场分布。因为光纤模式电场的横向分量 \mathbf{E}_t 远大于纵向分量 \mathbf{E}_z , 所以 \mathbf{E}_z 可以被忽略。当径向和法向分离后, 光纤模式电场可以表示为 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_t = \sum_l [a_l \cdot \exp(-i\beta_l z) + b_l \cdot \exp(i\beta_l z)] \mathbf{e}_l(r, \varphi)$, 其中, a_l 和 b_l 为第 l 个前向模式和反向模式的振幅, β_l 为第 l 个模式的传播常数, \mathbf{e}_l 为模式横向电场分布, r 为半径, φ 为角度。

在纤芯区域, 光致折射率改变导致光纤内部形成周期的微扰区域, 形成光纤光栅。折射率微扰可表示为 $\Delta n = \sigma(z) + \gamma(z) \cdot [\exp(i2\pi z/\Lambda) + \exp(-i2\pi z/\Lambda)]$, 其中 $\sigma(z)$ 为折射率直流系数, $\gamma(z)$ 为折射率交流系数, Λ 为光栅周期, z 为光传播方向。在引入折射率微扰 Δn 后, 极化矢量 \mathbf{P} 等于无微扰时的极化矢量 $\mathbf{P}_{\text{unpert}}$ 和由微扰带来的极化矢量 $\mathbf{P}_{\text{grating}}$ 两者之和, 其中 $\mathbf{P}_{\text{grating}} = 2\varepsilon_0 n_{\text{co}} \Delta n \mathbf{E}$ 。此时模式不再满足正交性的条件, 模式之间能量发生交换。将 $\mathbf{P}_{\text{grating}}$ 与 \mathbf{E}_t 带入波动方程(1), 可以得到耦合模式方程

$$\frac{\partial a_m}{\partial z} + i\beta_m a_m = -i \sum_n (\kappa_{mn} a_n + \chi_{mn} b_n), \quad (2)$$

$$\frac{\partial b_m}{\partial z} - i\beta_m b_m = +i \sum_n (\chi_{mn} a_n + \kappa_{mn} b_n), \quad (3)$$

其中 a_n 和 b_n 为第 n 个模式前向和反向传输的振幅, a_m 和 b_m 为第 m 个模式前向和反向传输的振幅, β_m 为第 m 个模式的传播常数, κ_{mn} 和 χ_{mn} 分别为第 m 个模式同第 n 个模式之间的直流和交流耦合系数, 可表示为

$$\kappa_{mn} \approx \frac{\varepsilon_0 \omega}{2 \langle \mathbf{e}_{vm}, \mathbf{h}_{vm} \rangle} \iint (\mathbf{e}_{vm} \cdot \mathbf{e}_{vn}^* + \mathbf{e}_{zm} \cdot \mathbf{e}_{zn}^*) \Delta n dS, \quad (4)$$

$$\chi_{mn} \approx \frac{\varepsilon_0 \omega}{2 \langle \mathbf{e}_{vm}, \mathbf{h}_{vm} \rangle} \iint (\mathbf{e}_{vm} \cdot \mathbf{e}_{vn}^* - \mathbf{e}_{zm} \cdot \mathbf{e}_{zn}^*) \Delta n dS, \quad (5)$$

其中, \mathbf{e}_{vm} 和 \mathbf{h}_{vm} 为第 m 个模式的电场和磁场横向分布, \mathbf{e}_{zm} 和 \mathbf{h}_{zm} 为第 m 个模式的电场和磁场纵向分布, $\langle \mathbf{e}_{vm}, \mathbf{h}_{vm} \rangle$ 为第 m 个模式的功率。将 $\mathbf{e}_{vm} = \mathbf{e}_{vm}(r, \varphi) \exp(-i\beta_m z)$, $\mathbf{e}_{vn} = \mathbf{e}_{vn}(r, \varphi) \exp(-i\beta_n z)$, $\Delta n = \sigma(z) + \gamma(z) \cdot [\exp(i2\pi z/\Lambda) + \exp(-i2\pi z/\Lambda)]$ 带入(4)和(5)式可以得到

$$\kappa_{mn} \approx \chi_{mn} \approx \frac{\varepsilon_0 \omega}{2 \langle \mathbf{e}_{vm}, \mathbf{h}_{vm} \rangle} \iint [\mathbf{e}_{vm}(r, \varphi) \cdot \mathbf{e}_{vn}^*(r, \varphi)] \left[\sigma(z) \cdot e^{-i(\beta_m - \beta_n)z} + \gamma(z) \cdot \left[e^{-i(\beta_m - \beta_n - \frac{2\pi}{\Lambda})z} + e^{-i(\beta_m - \beta_n + \frac{2\pi}{\Lambda})z} \right] \right] dS. \quad (6)$$

当满足 $(\beta_m - \beta_n - 2\pi/\Lambda) = 0$ 与 $(\beta_m + \beta_n - 2\pi/\Lambda) = 0$ 其中之一式时, 两个模式在纵向上相位匹配, 保

证了两模式在纵向上的耦合效果。横向上的耦合效果由式(6)中模式重叠积分决定,若通过设计光栅的横向局域改性结构,即可对式(6)中的模式重叠积分区域进行调控,从而获得目标耦合系数,最终实现MMFBG的光谱设计及优化。

3. MMFBG 光谱中的拐点及其传感

此处选用的多模光纤参数如下,光纤材料为二氧化硅,包层材料的折射率为 $n_{cl} = 1.472$,包层半径为 $r_{cl} = 62.5 \mu\text{m}$,纤芯材料的折射率为 $n_{co} = 1.4855$,纤芯半径为 $r_{co} = 25 \mu\text{m}$,环境为空气,折射率为 $n_s = 1$ 。

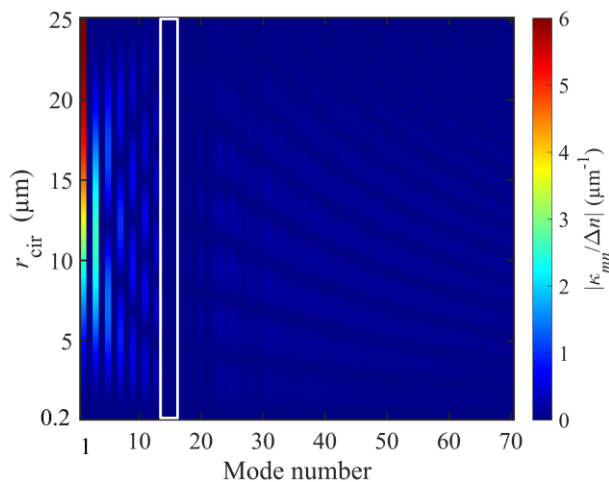


Figure 1. Variation of the coupling coefficients between the $\text{HE}_{1,1}$ and $\text{HE}_{1,m}/\text{EH}_{1,m}$ modes in MMF with the radius r_{cir} of the circular modified region

图 1. MMF 中 $\text{HE}_{1,1}$ 和 $\text{HE}_{1,m}/\text{EH}_{1,m}$ 模式的耦合系数随圆形改性区域半径 r_{cir} 的变化

FBG 激发源常采用单模光纤(SMF)输入,SMF 到 MMF 的激发过程中,MMF 中多个模式分摊了能量。在实际应用中,一般利用模式扰动器可实现 MMF 单模激发工作[13],所以此处只考虑 $\text{HE}_{1,1}$ 同 $\text{HE}_{1,m}/\text{EH}_{1,m}$ 的耦合系数。我们从圆形局域改性结构出发,在相位匹配时,利用公式(4)分析耦合系数分布特性。 $\text{HE}_{1,1}$ 模式与各模式的耦合系数随圆形局域改性结构半径 r_{cir} 的变化如图 1 所示,此时圆形局域改性结构的半径从 $0.2 \mu\text{m}$ 变化到 $25 \mu\text{m}$,步长为 $0.05 \mu\text{m}$ 。由图可以看出,当模式序号 $N < 14$,且为偶数时,为 $\text{HE}_{1,1}$ 模式和 $\text{EH}_{1,m}$ 模式耦合,耦合系数几乎为零,仅当 N 为奇数时,即 $\text{HE}_{1,1}$ 和 $\text{HE}_{1,m}$ 模式耦合,此时耦合系数不为零。随着圆形局域改性结构半径 r_{cir} 的增大,除了 $\text{HE}_{1,1}$ 模式的自耦合系数, $\text{HE}_{1,1}$ 模式与其它模式的耦合系数出现极大值极小值交替出现的现象。但是,当 N 较大时,即从 $\text{HE}_{1,1}$ 模式和 $\text{HE}_{1,8}(N = 14)$ 模式耦合开始,它们的耦合系数与之前的耦合系数相比,急剧变化,几乎下降为 0,并且不随着圆形局域改性结构的半径而变化,由图 1 白色框区域标出。这可利用 MMF 中模式分布特点进行解释。MMF 中不同模式的场分布如图 2(a)所示,可以看出较低阶模式($\text{HE}_{1,1}, \text{HE}_{1,2}, \text{HE}_{1,3}$)的场几乎全部集中在纤芯区域,而较高阶模式($\text{HE}_{1,9}, \text{HE}_{1,10}$)的场主要集中在包层,也有部分能量存在于纤芯中,只有 $\text{HE}_{1,8}$ 模式的场几乎全部处于包层区域,纤芯中模式能量几乎没有,该结论可由图 2(b)所示的 MMF 中不同模式在纤芯区域的功率限制因子所验证。因此,场处于纤芯区域的 $\text{HE}_{1,1}$ 模式和场处于包层区域的 $\text{HE}_{1,8}$ 模式之间的场重叠近乎为 0,因此耦合系数也几乎为 0。不同圆形区域改性结构半径下,模式耦合系数可取得的最大值如图 2(c)所示,可见,即使改性半径任取,耦合系数的最小值仍出

现在 $HE_{1,1}$ 模式和 $HE_{1,8}$ 模式之间。

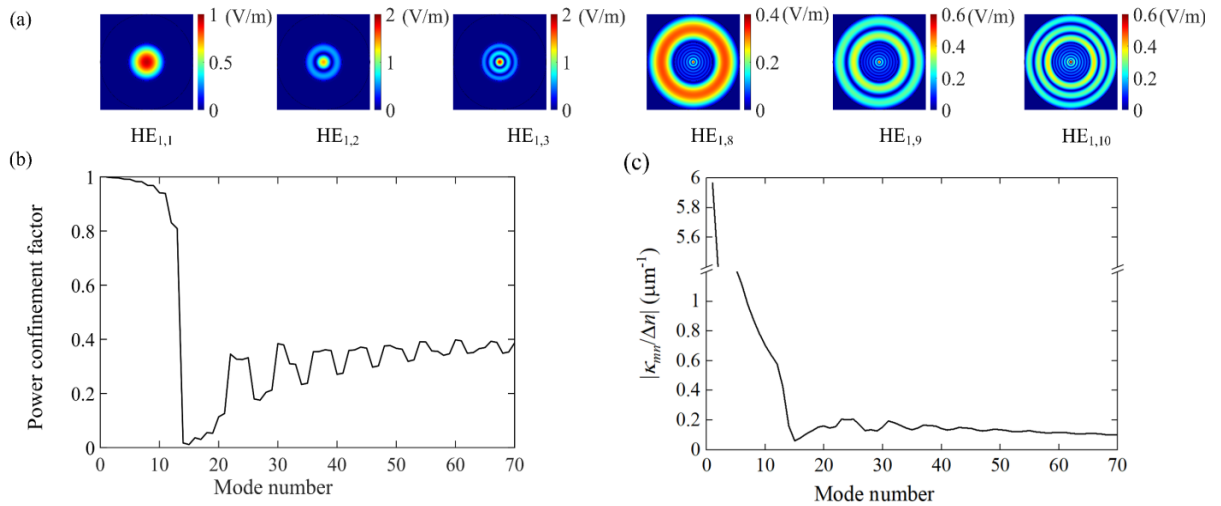


Figure 2. (a) Mode field distribution of $HE_{1,m}(m = 1, 2, 3, 8, 9, 10)$, (b) Power confinement factor for different modes in the fibercore region, (c) Maximum values of the coupling coefficients between $HE_{1,1}$ and each modes for different radius of the circular modified region structure

图 2. (a) $HE_{1,m}(m=1, 2, 3, 8, 9, 10)$ 模式场分布图, (b) 不同模式在纤芯区域的功率限制因子, (c) 不同圆形区域结构改性半径下, $HE_{1,1}$ 和各个模式耦合系数的最大值

为了进一步说明包层的约束作用, 我们计算了无包层多模光纤耦合系数随圆形局域改性结构半径的变化, 其余光纤参数与前述光纤一致, 结果如图 3 所示。从图 3 中可以观察到耦合因子未出现如图 1 中白色框标注的极小值区域, 说明了在圆形改性结构下包层的存在才会让耦合系数出现极小值区域, 以下称出现极小值的最低阶模式位置为拐点。

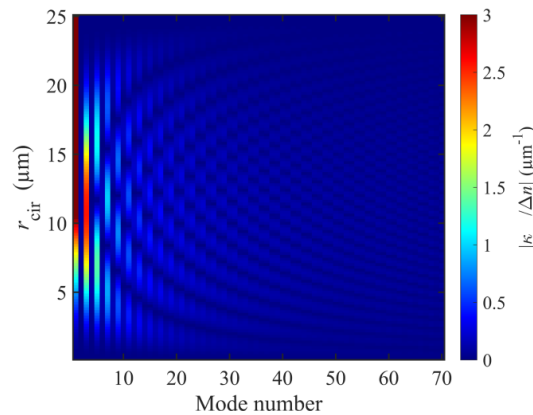


Figure 3. Variation of the coupling coefficient with the radius (r_{cir}) of the circular localized modified structure for an uncoated MMF

图 3. 无包层 MMF 的耦合系数随圆形局域改性结构半径(r_{cir})的变化

由于拐点只与光纤本身有关, 而与圆形局域改性结构无关, 我们进一步研究光纤和拐点之间的联系, 此时固定圆形局域改性结构半径为 $2.25 \mu m$ 。首先, 研究了耦合系数随多模光纤包层折射率的变化, 此时包层半径保持为 $62.5 \mu m$, 包层折射率从 1.4 变化到 1.48, 步长为 0.02, 结果如图 4(a)所示。可见, 随外

界折射率增大，耦合系数出现拐点的模式阶数越小，而且耦合系数的拐点与后续的较高值之间的对比度明显增加。耦合系数随包层半径的变化如图 4(b)所示，此时包层折射率取 1.472，包层半径从 30 μm 变化到 65 μm ，变化步长为 5 μm 。可见，随着包层半径的减小，耦合系数的拐点区域范围逐渐变窄，当包层半径从 45 μm 继续变小时，耦合系数的拐点值开始增大，直至半径为 30 μm 时拐点消失。为了让拐点更易于被观察到，拐点值需要尽量接近于 0，并且与非拐点区域值的对比度高，拐点区域范围也应该尽量大，因此，包层折射率应该尽量选大，包层半径也应该取较大值。

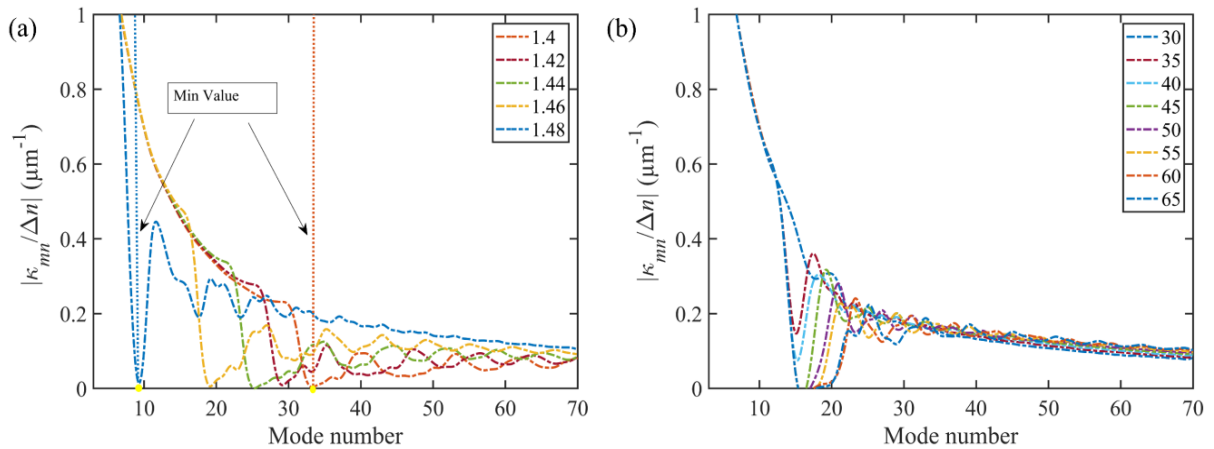


Figure 4. (a) Variation of the MMF coupling coefficient with the refractive index of the coating. (b) Variation of the MMF coupling coefficient with the radius of the coating

图 4. (a) MMF 耦合系数随包层折射率的变化，(b) MMF 耦合系数随包层半径的变化

根据上述研究结果，选取多模光纤的包层半径为 62.5 μm ，包层折射率为 1.472，圆形局域改性结构半径为 2.25 μm ，折射率微扰为 $\Delta n_{\text{max}} = 2.4\text{e-}3$ ，此时 MMFBG 的光谱图如图 5(a)所示。可以看出，在 $\text{HE}_{1,x}$ 模式附近，出现恒小值区域，且变化较为缓慢，宽度较宽，与左右两侧对比度高，非常明显，易于被观察。当不仅仅利用 $\text{HE}_{1,1}$ 模式作为激发源，采用 SMF 激发 MMF 中 $\text{HE}_{1,1-5}$ 多个模式作为激发源，激发功率占比分别为 20%，31%，24.8%，14.5%和 8%，此时得出的 MMFBG 光谱如图 5(b)所示，取局域范围 1.54~1.555 μm 内谱线包络谱的最低点为拐点，可见拐点仍可被观察到。

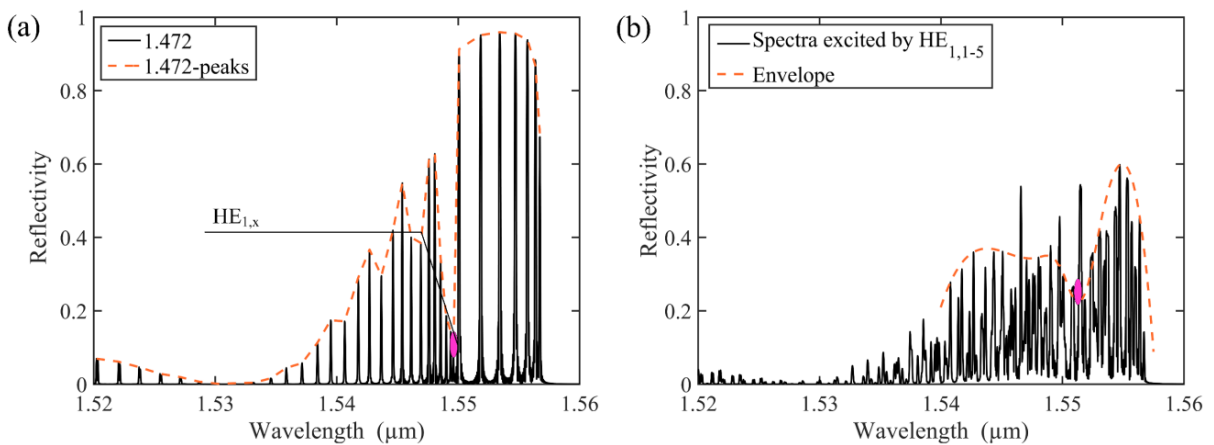


Figure 5. MMFBG spectra under circular localized modified structure. (a) $\text{HE}_{1,1}$ mode excited, (b) $\text{HE}_{1,1-5}$ modes excited. The pink markers indicate the turning points

图 5. 圆形局域改性结构下的 MMFBG 光谱。(a) $\text{HE}_{1,1}$ 模式激发，(b) $\text{HE}_{1,1-5}$ 模式激发。粉红色标记为拐点

通过观测 MMFBG 光谱中的拐点可易于实现温度传感。上述 MMFBG 在不同温度下的谱线包络如图 6 所示, 此时温度从 25℃变化到 325℃的谱线的变化步长为 50℃。可以看出, 通过观测谱线的包络凹陷处即拐点位置, 就可利用 MMFBG 杂乱的光谱监测温度变化。温度和拐点波长位置的关系如图 7 所示, 它们之间的变化斜率即为温度传感灵敏度, 经计算得出为 0.0137 nm/℃。

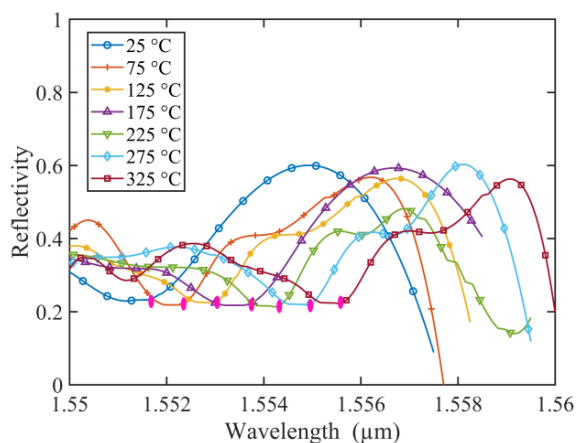


Figure 6. Spectral envelopes of the MMFBG under different temperatures with $HE_{1,1-5}$ modes excited. The pink markers indicate the positions of the turning points

图 6. $HE_{1,1-5}$ 模式激发下, 不同温度下的 MMFBG 光谱包络。图中粉红色标记为拐点位置

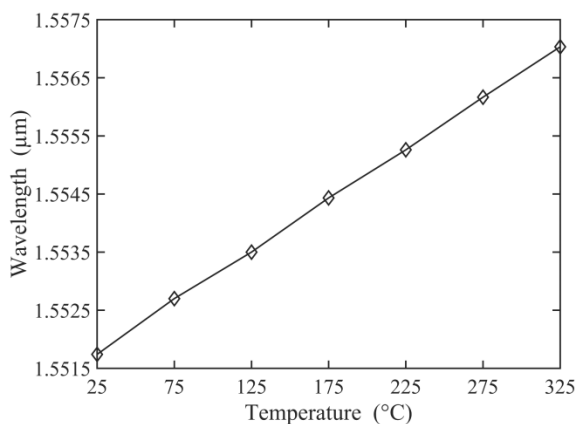


Figure 7. Relationship between the wavelength of the turning point position and temperature

图 7. 拐点位置波长与温度的变化关系

4. 结语

在光纤温度传感领域, 蓝宝石光纤能够荷载更高的温度, 但是由于蓝宝石光纤属于多模光纤, 内部的模式极多, 导致在传感应用中反射谱的识别度低。本文以 MMFBG 为研究对象, 从耦合模式理论出发, 通过分析圆形改性结构的耦合系数特性, 发现了耦合系数存在拐点, 并通过功率限制因子分析出该拐点与光纤的结构有关, 而与改性区域无关的原因, 更进一步验证了多模式激发源对 MMFBG 光谱中拐点近乎无影响, 拐点在光谱中具备较高的识别程度, 通过追踪该拐点实现了温度传感, 传感灵敏度为 0.0137 nm/℃。本文提出的分析方法与规律同样适用于 SFBG 结构设计, 在极端温度领域具有重

要理论指导意义。

参考文献

- [1] Guo, Y., Zhou, W. and Xiong, L. (2021) A FIBER Bragg Grating Sensor for Positive and Negative Displacement Measurement. *IEEE Sensors Journal*, **21**, 21564-21571. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3101809>
- [2] Chryssis, A.N., Lee, S.M., Lee, S.B., Saini, S.S., *et al.* (2005) High Sensitivity Evanescent Field Fiber Bragg Grating Sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 1253-1255. <https://doi.org/10.1109/LPT.2005.846953>
- [3] Hill, K.O., Fujii, Y., Johnson, D.C. and Kawasaki, B.S. (1978) Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication. *Applied Physics Letters*, **32**, 647-649. <https://doi.org/10.1063/1.89881>
- [4] Meltz, G., Morey, W.W. and Glenn, W.H. (1989) Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method. *Optics Letters*, **14**, 823-825. <https://doi.org/10.1364/OL.14.000823>
- [5] Zhang, C., Yang, Y., Wang, C., Liao, C., *et al.* (2016) Femtosecond-Laser-Inscribed Sampled Fiber Bragg Grating with Ultrahigh Thermal Stability. *Optics Express*, **24**, 3981-3988. <https://doi.org/10.1364/OE.24.003981>
- [6] Grobncic, D., Mihailov, S.J., Smelser, C.W. and Ding, H. (2004) Sapphire Fiber Bragg Grating Sensor Made Using Femtosecond Laser Radiation for Ultrahigh Temperature Applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, **16**, 2505-2507. <https://doi.org/10.1109/LPT.2004.834920>
- [7] He, J., Xu, X., Du, B., Xu, B., *et al.* (2022) Stabilized Ultra-High-Temperature Sensors Based on Inert Gas-Sealed Sapphire Fiber Bragg Gratings. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 12359-12366. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c24589>
- [8] Xu, X., Tan, Q., Li, Z., Wu, J., *et al.* (2024) Sapphire Fiber Bragg Gratings Demodulated with Cross-Correlation Algorithm for Long-Term High Temperature Measurement. *IEEE Sensors Journal*, **54**, 7905-7911. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3358294>
- [9] Jia, Y., Wang, S. and Chen, F. (2020) Femtosecond Laser Direct Writing of Flexibly Configured Waveguide Geometries in Optical Crystals: Fabrication and Application. *Opto-Electronic Advances*, **3**, 190012-190042. <https://doi.org/10.29026/oea.2020.190042>
- [10] Yang, S., Hu, D. and Wang, A. (2017) Point-by-Point Fabrication and Characterization of Sapphire Fiber Bragg Gratings. *Optics Letters*, **42**, 4219-4222. <https://doi.org/10.1364/OL.42.004219>
- [11] Guo, Q., Zhang, Z., Zheng, Z., Pan, X., *et al.* (2022) Parallel-Integrated Sapphire Fiber Bragg Gratings Probe Sensor for High Temperature Sensing. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 5703-5708. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3149508>
- [12] Wang, M., Salter, P.S., Payne, F.P., Shipley, A., *et al.* (2022) Single-Mode Sapphire Fiber Bragg Grating. *Optics Express*, **30**, 15482-15494. <https://doi.org/10.1364/OE.446664>
- [13] Schmid, M.J. and Müller, M.S. (2015) Measuring Bragg Gratings in Multimode Optical Fibers. *Optics Express*, **23**, 8087-8094. <https://doi.org/10.1364/OE.23.008087>