光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20240730002

基于片式封装微纳光纤的布里渊散射特性研究

耿豪键[1]，张立欣[1,2,3*]，张　磊[1]，李　炫[1]，李永倩[1,2,3]

（1. 华北电力大学 电子与通信工程系，保定 071003；2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室，保定 071003；
3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，保定 071003）

摘　要： 为实现高灵敏度的温度传感测量，提出一种基于片式封装的微纳光纤温度传感结构。分析不同纤径微纳光纤的光场能量分布及其布里渊散射谱，并依据多种声学模式的特性，利用有限元仿真得到微纳光纤在不同声波模式下的温度灵敏度；对封装结构与材料进行设计与分析，选择片式结构及PMMA材料封装，仿真得到封装后的微纳光纤的温度灵敏度最高为4.83 MHz/℃，相较于未封装时灵敏度提高了约363%，证明片式封装可有效提升微纳光纤的温度灵敏度。

关键词： 微纳光纤；片式封装；布里渊散射特性；有限元分析

中图分类号： TN253；TN212　**文章编号：** 1001－5868(2025)01－0043－06

Brillouin Scattering Characteristics of Chip-Sscale Packaged Micro/Nano Fibers

GENG Haojian[1], ZHANG Lixin[1,2,3], ZHANG Lei[1], LI Xuan[1], LI Yongqian[1,2,3]

(1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN; 3. Baoding Key Laboratory of Optical fiber sensing and optical communication technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: To achieve highly sensitive temperature sensing, this paper proposes a micro/nano fiber temperature-sensing structure based on chip packaging. The optical field energy distribution of micro/nano fibers with different diameters and their Brillouin scattering spectra are analyzed. Based on the characteristics of various acoustic modes, the temperature sensitivity of micro/nano fibers under different acoustic wave modes are obtained using finite element simulation. The packaging structure and materials are designed and analyzed, with a chip-scale structure and PMMA chosen for packaging. The simulation shows that the maximum temperature sensitivity of the packaged micro/nano fibers is 4.83 MHz/℃, which is approximately 363% higher than that of the unwrapped fibers, demonstrating that chip packaging can effectively enhance the temperature sensitivity of micro/nano fibers.

Key words: micro/nano fibers; chip packaging; Brillouin scattering characteristics; finite element analysis

收稿日期：2024－07－30.

基金项目：国家自然科学基金项目(62205105)；河北省自然科学基金项目(F2019502112)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(2023MS111，2022MS079)；河北省省级科技计划项目(SZX2020034).

*通信作者：张立欣

0 引言

布里渊散射是一种非弹性散射，在光纤中传输时可以感知温度、应变等物理量。基于布里渊散射的光纤传感技术具有高灵敏度、高空间分辨率、长距离传感等独特优势，在光纤传感领域得到了广泛关注[1-2]，已成为大型电力设施结构健康监测[3]、油气管道[4]和海底电缆故障点定位[5]等领域安全检测的关键技术。

近年来，随着光纤传感技术的不断发展，光纤作为传输介质和传感元件，用于实现信号传输及物理量测量的特性，已展现出巨大潜力。微纳光纤（Micro/Nano Fiber，MNF）作为新兴的波导结构，凭借其微米至纳米级的直径、独特的声光学耦合特性和倏逝场特性[6]，为光纤中受激布里渊散射效应提供了新型研究场景。与标准单模光纤相比，微纳光纤的光声传输特性迥异，其纤细的直径大大增加了光声重叠区域，进而呈现出远超传统波导的布里渊增益[7]。微纳光纤极易受到污染和折断损坏，因此在实际应用中，对微纳光纤进行保护并设计增敏结构，提高其在各个场景下的适应性和灵敏度在工程应用领域具有重要意义。

目前常见的光纤封装形式[8]主要有嵌入式封装、衬底封装、毛细管封装、片式封装等，其中片式封装具有结构简单、易于制作且便于固定在结构表面等优点，在传感监测领域应用广泛。针对各传感介质的特性，设计制造专用的片式封装结构需采用增材制造技术，该技术具有先进的加工能力和个性化的定制生产自由形状的特点。常用的增材制造材料包括ABS材料、聚碳酸酯材料、聚酰胺材料、聚乳酸材料等，但目前针对微纳光纤的封装材料和结构以及其布里渊散射特性[9-10]未被广泛分析研究。

本文分析微纳光纤的布里渊散射特性，并提出一种新型增敏结构的片式封装微纳光纤传感器。仿真分析了不同纤径微纳光纤的模场分布及其布里渊散射特性，并对片式封装的结构参数及材料进行了有限元仿真分析，对比了微纳光纤在封装前后的布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）变化量，分析了封装后的温度传感特性。

1 微纳光纤的布里渊散射特性

1.1 微纳光纤的光场特性

微纳光纤是一种纤芯直径在波长甚至亚波长量级的导波结构，通常由单模光纤在高温下通过物理拉伸方法制备。微纳光纤结构如图1所示，由锥形区域和腰部区域组成，两端为单模光纤。微纳光纤直径一般小于12 μm，纤芯对光的束缚能力较弱，导致光场传输并不完全在纤芯内部发生，还有更多的光能量以倏逝场的形式存在于光纤表面，这种倏逝场的存在使得微纳光纤对外界环境的变化极为敏感。

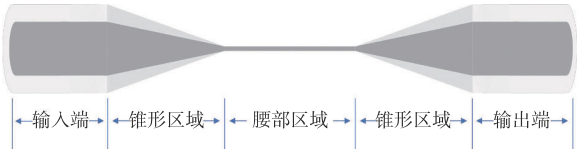


图1 微纳光纤结构示意图

由于微纳光纤纤芯和包层的折射率差较大，不能采用弱导近似方法，需使用柱对称介质麦克斯韦方程组计算。假设泵浦光在微纳光纤传输过程中无损耗，麦克斯韦方程组可简化为亥姆霍兹方程：

$$\left(\nabla^2 + n^2k^2\right)E = 0 \tag{1}$$

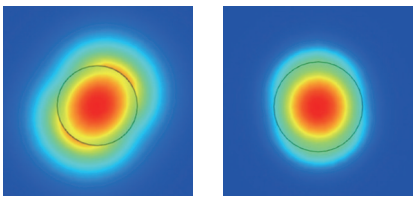
根据亥姆霍兹方程建立xOy平面内的传输方程为：

$$\left(\nabla_t^{\ 2} + n^2k^2 - \beta^2\right)E = 0 \tag{2}$$

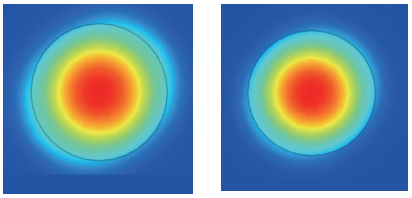
式中，n为折射率，k为波矢，β为传播常数。

通过有限元分析软件仿真不同直径微纳光纤的光场能量分布，图2（a）～（d）分别表示当入射光波长为1 550 nm时，微纳光纤的腰区直径D分别为1 μm，1.5 μm，2 μm和2.5 μm的基模光场分布。

从图2可以看出，对于直径为1 μm的微纳光纤，其光场能量不仅覆盖了光纤的内部区域，而且



（a）$D = 1$ μm （b）$D = 1.5$ μm



（c）$D = 2$ μm （d）$D = 2.5$ μm

图2 不同直径微纳光纤的基模光场能量分布图

还有一部分能量以倏逝场的形式沿着光纤表面进行传输，并与周围的空气发生交互。而对于直径为 2.5 μm 的微纳光纤，其光场能量则主要集中在光纤内部，同时也有极小部分能量以倏逝波的形式在微纳光纤表面进行传输。综合不同直径的微纳光纤光场能量分布图可以看出，当入射光波长为 1 550 nm 时，随着 MNF 的直径逐渐减小，光场能量分布从大部分光场能量被束缚在光纤内部进行传播，仅有小部分能量泄露到光纤外，演变至泄露到光纤外的能量逐渐增加，且大部分能量以倏逝场形式沿着光纤表面传播。

1.2　微纳光纤的布里渊散射特性

光纤中的布里渊散射谱是不同声模进行布里渊散射的总和，可表示为：

$$s(\nu)=g_{\mathrm{B}}\frac{\left(\Delta\nu_{\mathrm{B}}/2\right)^{2}}{\left(\nu-\nu_{\mathrm{B}}\right)^{2}+\left(\Delta\nu_{\mathrm{B}}/2\right)^{2}} \tag{3}$$

式中，g_{B} 为布里渊增益系数，υ_{B} 为布里渊频移，$\Delta\upsilon_{\mathrm{B}}$ 布里渊增益谱线宽。

对于标准单模光纤，其布里渊增益谱是布里渊频移处于 10.8 GHz 左右的单峰结构；而在微纳光纤中，由于边界移动效应和电致伸缩效应的作用，微纳光纤的布里渊散射谱呈现出多峰结构[7]。

与标准单模光纤不同，当 MNF 直径发生改变时，会影响表面声波和混合的横向和纵向声波布里渊散射的边界条件。针对此特性仿真了微纳光纤直径分别为 1 ～ 1.6 μm 时的布里渊增益谱，如图 3 所示。可以看出，随着光纤直径的增加，声波增益模式逐渐趋于密集，并最终收敛在 11 GHz 附近，且增益谱在直径为 1 μm 时为多峰增益结构，在直径为 1.6 μm 时转化为双峰增益结构。这是因为对于不同的表面声模和由横向与纵向声模组成的混合声模，辐射压力和电致伸缩所形成的光学力对每一个散射峰的总布里渊增益峰值的贡献表现出不同程度的相长和相消，从而生成具有不同峰值的布里渊散射峰，并随着光纤直径的变化而变化。

如图 4 所示为各个声波模式的布里渊频率和布里渊增益与微纳光纤直径的关系图。其中，符号 Gm（m = 1, 2, …, 6）分别表示频率依次由低到高的不同声学模式对应的布里渊增益峰。从图中可以看出，随着微纳光纤直径的增大，表面声模和混合声模的布里渊增益值都在变化。G2 和 G3 的布里渊增益值逐渐减小，直至趋近于 0 $\mathrm{W^{-1}m^{-1}}$，而 G5 和

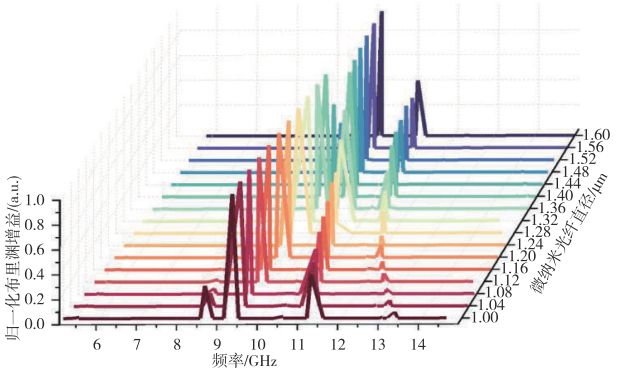
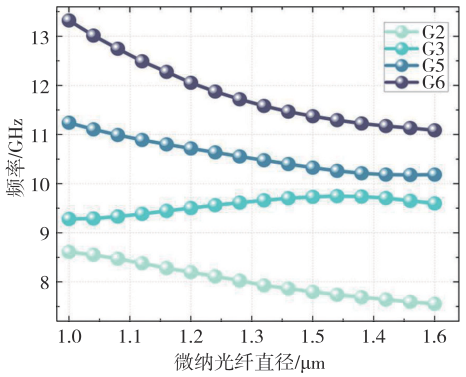
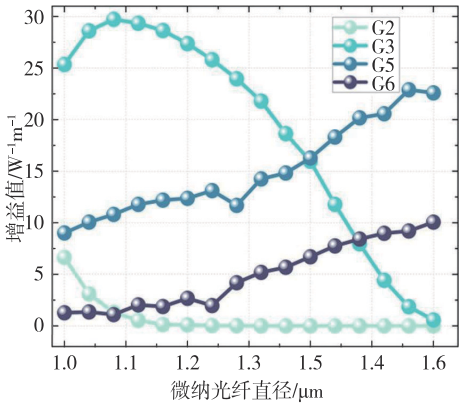


图 3　微纳光纤在直径为 1 ～ 1.6 μm 时的布里渊增益谱

G6 的布里渊增益值逐渐增大，分别达到 22.61 $\mathrm{W^{-1}m^{-1}}$ 和 10.08 $\mathrm{W^{-1}m^{-1}}$，且不同声学模式所产生的布里渊增益谱所处频率越来越趋近于 11 GHz。这意味着，微纳光纤的声光耦合作用与普通单模光纤不同。布里渊散射谱不仅是单个纵向声波的特征，还是由边界移动效应和电致伸缩效应共同引起剪切和纵向位移的强耦合，从而导致光与混合声模和表面声模产生相互作用的结果。



（a）布里渊频率与光纤直径的关系



（b）布里渊增益与光纤直径的关系

图 4　各个声波模式与微纳光纤直径的变化关系

参考常用的MNF基本参数，设置仿真参数如表1所示，对直径为1 μm微纳光纤的布里渊频移及温度灵敏度进行仿真。

表1 MNF基本参数

折射率n	杨氏模量E/GPa	泊松比μ	密度ρ/(kg·m^{-3})
1.4435	72.6840	0.1750	2200.1704

在D = 1 μm的MNF中，提取其主导声波模式，通过仿真得到其在20～50 ℃温度变化范围内的布里渊频移变化量，布里渊频移变化量与温度的关系曲线如图5所示。从图中可以发现，布里渊频移与温度呈线性关系，G2，G3，G5，G6声波模式的温度灵敏度分别为0.787 MHz/℃，1.043 MHz/℃，1.101 MHz/℃，1.330 MHz/℃。因此，在微纳光纤直径为1 μm时，G6声波模式灵敏度最高，为1.330 MHz/℃。

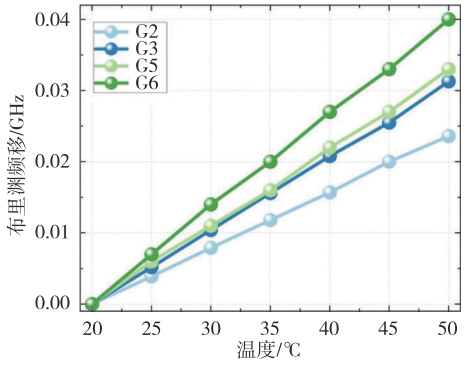


图5 主要声波模式与温度变化的关系

2 微纳光纤与片式封装结构的传感特性分析

2.1 片式封装结构

工字型片式封装结构示意图如图6所示，A为MNF段，B为片式结构，H_1和H_2表示基片宽度。

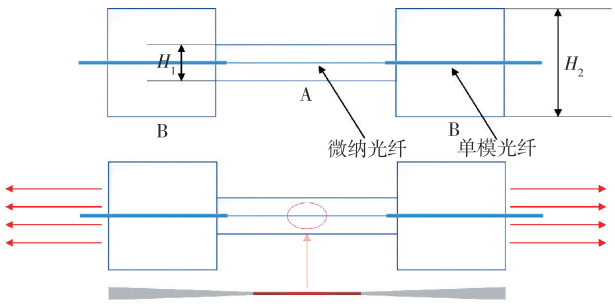


图6 工字型结构示意图

光纤通过有机胶粘贴在基片上，若B段两端受到外界的轴向载荷时，传感总应变为：

$$\varepsilon=\frac{(\Delta A+\Delta B)}{(A+B)} \tag{4}$$

式中，ΔA为A段变化量，ΔB为B段变化量。

当$H_1<H_2$时，即为典型的工字型封装结构，此时整个片式封装为增敏结构，当$H_1>H_2$时，片式封装为减敏结构。增敏后的布里渊频移可表示为：

$$\nu_B(T)=\frac{2n\left[T,\varepsilon(T)\right]}{\lambda}\cdot\sqrt{\frac{\left\{1-\mu\left[T,\varepsilon(T)\right]\right\}E\left[T,\varepsilon(T)\right]}{\left\{1+\mu\left[T,\varepsilon(T)\right]\right\}\left\{1-2\mu\left[T,\varepsilon(T)\right]\right\}\rho\left[T,\varepsilon(T)\right]}} \tag{5}$$

式中，n为折射率，E为介质的杨氏模量，μ为泊松比，ρ为介质密度。

依据公式(4)可知，当光纤粘贴到基片并受到外界的轴向载荷时，传感总应变随之增大，形成增敏结构。在通用工字型结构基础上，改进增加了回型镂空结构的光纤封装结构，如图7所示。本结构会在原有工字型结构基础上增加更大的轴向载荷，使得传感总应变量增大，进一步增加了传感灵敏度。

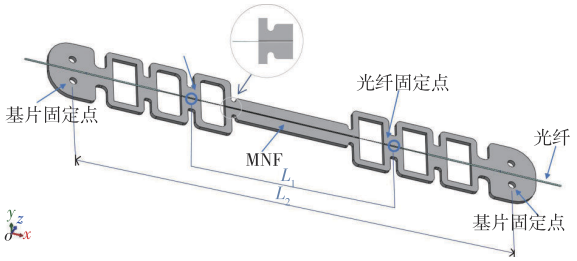


图7 改进型放大镂空结构的片式结构模型示意图

2.2 片式封装后的布里渊散射特性分析

在三维建模软件中创建片式封装结构的模型，导入至有限元分析软件对应变结构和温度膨胀等特性进行仿真分析。设计基片为三回型镂空式结构，片式封装的厚度为1.5 mm，选择聚酰亚胺(Polyimide，PI)、工程塑料(Poly Lactic Acid，PLA)、聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate，PMMA)三种材料进行对比。针对不同材料，基于三镂空回型结构，使用有限元软件进行仿真分析，对这三种材料施加1～10 N的连续载荷，记录封装结构所产生的最大应变如表2所示。

表 2　连续载荷下各材料应变响应数据

负载/N	$\varepsilon_{PI}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{PLA}/\mu\varepsilon$	$\varepsilon_{PMMA}/\mu\varepsilon$
1	2.267	5.882	6.482
2	4.535	11.354	12.960
3	6.803	18.140	19.443
4	9.071	24.760	25.921
5	11.340	32.110	32.410
6	13.600	37.564	38.890
7	15.870	44.675	45.378
8	18.140	51.012	51.850
9	20.410	57.659	58.330
10	22.670	63.551	64.826

对三种材料的应变响应数据进行线性拟合，拟合结果如图 8 所示，在载荷为 1～10 N 情况下，PI 材料应变从 2.267 με 增长至 22.67 με，拟合曲线斜率为 2.267 2；PLA 材料应变从 5.882 με 增长至 63.551 με，拟合曲线斜率为 6.481 9；PMMA 材料应变从 26.482 με 增长至 64.826 με，拟合曲线斜率为 6.519 8。三种材料的应变灵敏度分别为 2.267 2 N/με，6.481 9 N/με 和 6.519 8 N/με。其中，PI 材料的应变响应最低，PMMA 与 PLA 的应变响应近乎相同。

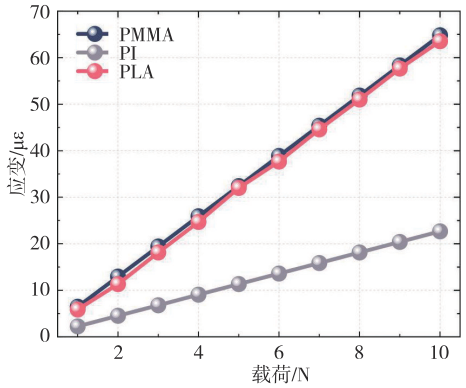
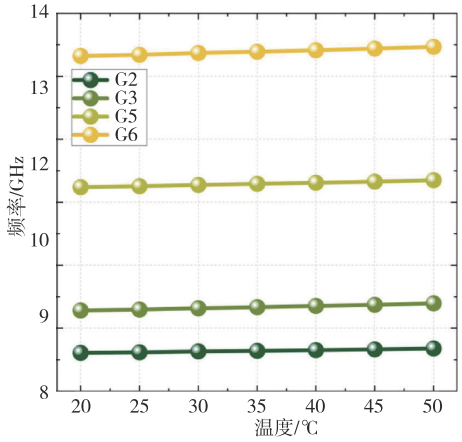


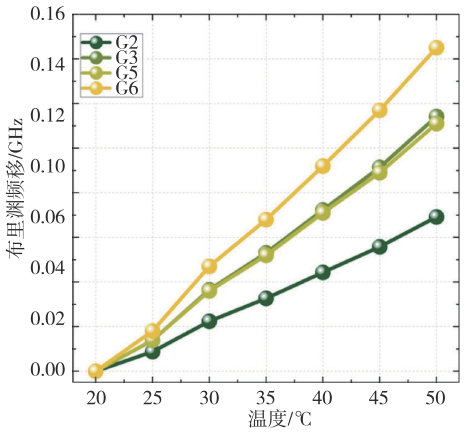
图 8　PMMA，PI 和 PLA 材料的应变响应曲线

当封装结构的应变为 $\Delta L_2/L_2$ 时，光纤受到的应变近似为 $\Delta L_2/L_1$。温度变化造成的热膨胀效应会引起材料形变，光纤和封装材料的热膨胀系数差会导致封装结构对光纤产生额外的横向力，对 MNF 形成额外的应变，可进一步提升微纳光纤的温度灵敏度。由于 PMMA 的热膨胀系数约为 8.3×10^{-5} /℃，PLA 的热膨胀系数约为 6.6×10^{-5} /℃，SiO_2 的热膨胀系数约为 5.5×10^{-7} /℃，三者之间存在巨大的失配，考虑传感器整体受热情况，选取 PMMA 作为基片材料。

对片式封装后腰区纤径为 1 μm 的 MNF 在 20～50 ℃温度范围内进行仿真，MNF 主要声波模式中较强的模式布里渊频移变化如图 9 所示。可以看出，各声波模式对温度都具有良好的依赖性，G2 声波模式的 BFS 由 8.610 GHz 变化至 8.679 GHz，温度传感灵敏度约为 2.31 MHz/℃。G3 声波模式从 9.282 GHz 变化至 9.369 GHz，G5 声波模式从 11.241 GHz 变化至 11.351 GHz，两者的 BFS 变化相似，随着温度的升高而线性变化，温度传感灵敏度约为 3.67 MHz/℃，同时 G6 声波模式 BFS 变化最为明显，从 13.323 GHz 变化至 13.468 GHz，温度系数约为 4.83 MHz/℃。相比未封装时 MNF 的温度灵敏度 1.330 MHz/℃，片式封装后的温度灵敏度提高了约 363%，这证明片式封装可有效提升温度灵敏度。



（a）不同温度下的布里渊频移



（b）不同温度下的布里渊频移变化量

图 9　主要声波模式与温度变化的关系曲线

4　结论

本文设计并仿真了一种片式封装的微纳光纤温度传感器，首先对 MNF 的布里渊散射特性进行

分析，得到了MNF不同纤径下的光场能量分布及其布里渊增益谱，并根据多种声学模式的特性求出MNF在不同模式下的温度传感灵敏度，最高约为1.330 MHz/℃。同时对片式封装进行结构设计，选取PMMA作为封装材料，通过热膨胀效应差使得应变集中在MNF腰区，仿真得到经片式封装后MNF的温度灵敏度增加到4.83 MHz/℃，较未封装时提升了约363%，可实现高灵敏度的温度传感。此研究成果可为后续基于微纳光纤实现高灵敏温度传感提供理论依据和仿真参考。

参考文献：

[1] Youn J, Song K, Martin-Lopez S, et al. Brillouin expanded time-domain analysis based on dual optical frequency combs [J]. Light-Science & Applications, 2024, 13: 149.

[2] Wang X, Deng W, Wen K, et al. Bending-loss-resistant Brillouin optical time-domain analysis based on thin-diameter fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(13): 829-832.

[3] 刘云鹏，黎晏霖，李 欢，等. 基于布里渊光时域峰值边沿分析的变压器绕组局部热点检测[J]. 电工技术学报，2024，39(11)：3486-3498.
Liu Yunpeng, Li Yanlin, Li Huan, et al. Local hot spot detection of transformer windings based on Brillouin optical time domain peak edge analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(11): 3486-3498.

[4] 钱振东，黄 卫，关永胜，等. BOTDA在沥青混凝土铺装层裂缝监测中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2008，38(5)：799-803.
Qian Zhendong, Huang Wei, Guan Yongsheng, et al. Application of BOTDA on cracking monitoring for asphalt concrete pavement [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2008, 38(5): 799-803.

[5] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展[J]. 物理学报，2017，66(7)：139-157.
Rao Yunjiang. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 139-157.

[6] 童利民. 微纳光纤技术：近期研究进展[J]. 光学学报，2022，42(17)：108-120.
Tong Limin. Recent Progress in Optical Micro/Nanofiber Technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 108-120.

[7] Beugnot J, Lebrun S, Pauliat G, et al. Brillouin light scattering from surface acoustic waves in a subwavelength-diameter optical fibre [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5242.

[8] 李振乾. 温度增敏金属化封装光纤光栅传感器研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.
Li Zhenqian. Research on temperature sensitivity enhancing and metallized packaging of fiber b ragg grating [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

[9] Gao S, Wang H, Baker C, et al. Monitoring local temperature and longitudinal strain along a nonuniform As (2) Se (3) -PMMA tapered fiber by Brillouin gain-profile tracing [J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29655-29664.

[10] Liu Y, Gu Y, Ning Y, et al. Temperature and strain sensitivities of surface and hybrid acoustic wave Brillouin scattering in optical microfibers [J]. Chinese Physics B, 2022, 31(9): 094208.

作者简介：

耿豪键(1998—)，男，天津市人，硕士研究生，主要从事分布式光纤传感方向的研究；

张立欣(1989—)，女，河北省石家庄市人，博士，研究方向为分布式光纤传感及其在电路系统中的应用。