光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022042703

基于游标效应解调的少模光纤应变传感器

王秀婷[1]，王婷婷[1*]，孙家程[1]，柯　炜[2,3]

（1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院，南京 210044；
2. 南京师范大学 计算机与电子信息学院/人工智能学院，南京 210023；
3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心，南京 210023）

摘　要： 提出并制备了一种基于游标效应的高灵敏度光纤马赫-曾德尔应变传感器。该传感器由两个自由光谱范围相近的马赫-曾德尔干涉仪并联构成。其中单个马赫-曾德尔干涉仪是由一段无芯光纤和一段少模光纤拼接在两根单模光纤之间制成的。两个马赫-曾德尔干涉仪的自由光谱范围相近而不相等，并联叠加后产生游标效应，达到增敏的效果。实验结果表明，在0～166.667 με的应变范围内，单个干涉仪的应变灵敏度为－1.90 pm/με，两个干涉仪并联叠加谱包络的应变灵敏度为12.06 pm/με。该传感系统采用并联方式实现游标效应，具有制作简单、灵活性高、灵敏度高等优点，可广泛应用于精密测量领域。

关键词： 马赫-曾德尔传感器；少模光纤；游标效应；应变

中图分类号： TN29　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0886－06

Few-mode Fiber Strain Sensor Based on Vernier Effect Demodulation

WANG Xiuting[1], WANG Tingting[1], SUN Jiacheng[1], KE Wei[2,3]

(1. School of Electron. and Information Engin., Nanjing University of Information Science and Technol., Nanjing 210044, CHN;
2. School of Computer and Electron. Information & School of Artificial Intelligence, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, CHN;
3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, CHN)

Abstract: A highly sensitive fiber optic Mach-Zehnder strain sensor based on vernier effect was proposed and prepared. The sensor consisted of two Mach-Zehnder interferometers with similar free spectral ranges connected in parallel. The single Mach-Zehnder interferometer was made by splicing a section of no-core fiber and a section of few-mode fiber between two single-mode fibers. Two Mach-Zehnder interferometers with similar but unequal free spectral ranges were superimposed in parallel to produce the vernier effect to achieve the effect of increased sensitivity. The experimental results show that the strain sensitivity of the single interferometer is －1.90 pm/με in the strain range of 0～166.667 με, and the strain sensitivity of the envelope of the superimposed spectrum of two interferometers in parallel is 12.06 pm/με in the strain range of 0～166.667 με. This sensing system adopts parallel connection to realize the vernier effect, which has the advantages of simple fabrication, high flexibility and high sensitivity, and can be widely used in the field of precision measurement.

Key words: Mach-Zehnder sensor; few-mode fiber; vernier effect; strain

收稿日期：2022－04－27.
基金项目：江苏高校优势学科Ⅲ期建设工程项目（“信息与通信工程”优势学科）.
* **通信作者：**王婷婷　**E-mail:** wtt79812@163.com

0　引言

光纤马赫-曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder Interferometer，MZI）因其结构简单、重复性好、抗电磁干扰等优良特性而备受研究人员的青睐，目前已被广泛应用于温度[1]、应变[2]、曲率[3]等物理参数的测量。MZI 是典型的双光束干涉型传感器，目前较为常用的实现模式干涉的结构有：光纤锥型结构[4-6]、花生型结构[7-8]、偏芯熔接结构[9-10]、单模-多模-单模结构[11]等。

近年来，如何进一步提高测量灵敏度成为光纤传感领域的研究热点之一。2012 年，Salceda-Delgad 等[12]通过将光纤拉锥至微纳级，大幅度提升了传感器的折射率灵敏度，然而这种拉锥结构对制作精度要求高且极其脆弱，限制了其在曲率和应变传感上的应用。在不改变原有光纤传感器的基础上，游标效应为进一步提高光纤传感器的测量灵敏度提供了很好的思路。游标效应最初应用于游标卡尺气压计中，以提升测量的精确度。在光器件传感系统中，游标效应用于放大光谱共振峰的漂移，提高光子器件的灵敏度[13]。

2019 年，陆晨旭等[14]在两根单模光纤（SMF）之间熔接一段少模光纤（FMF）形成单个 MZI，通过串联两个 MZI 构成级联结构的游标效应光纤传感器（两个 MZI 中少模光纤的长度为 100 cm 左右），用于静态压力和温度的测量。2019 年，Wang 等[15]在两根多模光纤之间熔接一段空心光纤，制成了一种基于并联游标效应的温度 MZI 传感器。2021 年，Fang 等[16]将光纤 Sagnac 干涉仪（Fiber Sagnac Interferometer，FSI）和偏振模干涉仪（Polarization Mode Interferometer，PMI）级联，制成可以产生游标效应的温度和应变传感器。与单个的 PMI 相比，级联传感器的温度和应变灵敏度提高了约 11.34 倍。上述传感器均为级联结构，两部分干涉仪无法分别制作，容易发生干扰。另外，级联型无法灵活改变参考干涉仪长度，调整灵敏度放大系数。

因此，本文介绍了一种基于游标效应解调的光纤应变传感器，由两个基于单模-无芯-少模-单模结构的马赫-曾德尔干涉仪（SNFS-MZI）并联构成。由于两个 SNFS-MZI 的自由光谱范围（Free Spectral Range，FSR）相近而不相等，传感器产生游标效应实现增敏。对单个 SNFS-MZI 和并联 SNFS-MZI 的应变响应特性进行了理论分析和实验验证。

1　基本原理

1.1　传感器结构以及理论分析

将一段无芯光纤（NCF）与 FMF 对芯熔接，然后将这一结构嵌入到输入输出 SMF 中，构成如图 1 所示的 SNFS-MZI 干涉结构。光经过输入 SMF 的纤芯到达第一个熔接点时，由于芯径不匹配等原因，激发出 NCF 中的高阶模。当 NCF 中的光到达第二个熔接点时，激发出下一段 FMF 纤芯中的基模和高阶模。最后，当光到达 FMF 与输出 SMF 的出射端面时，基模和高阶模将重新耦合并从 SMF 输出。

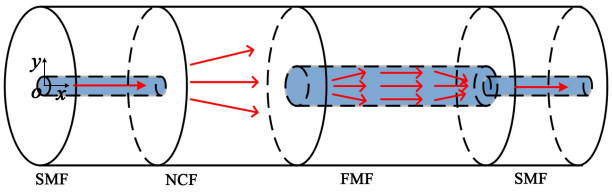
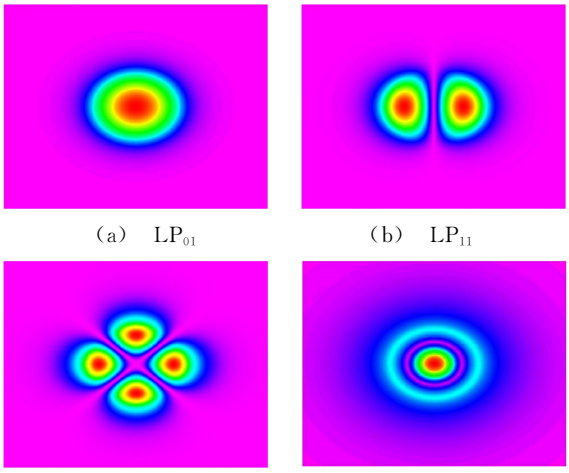


图 1　SNFS-MZI 结构示意图

采用多物理场仿真软件对 FMF 进行建模分析，得到 LP_{01}，LP_{11}，LP_{21}，LP_{02} 的有效折射率分别为 1.448 10，1.446 76，1.445 09，1.444 66，其模场分布如图 2 所示。



（a）　LP_{01}　　（b）　LP_{11}

（c）　LP_{21}　　（d）　LP_{02}

图 2　FMF 模场分布

利用光束传播法对 NCF 内光场分布进行仿真，仿真结果如图 3 所示。光在 SMF 中传播时光场的归一化能量为 1。当光从 SMF 传输进入 NCF 中时，由于模场失配激发出高阶模，各阶模式的光互相耦合产生多模干涉效应。在传输距离上光场呈周期性变化，自映像点也周期性出现。每个自映像点的间隔约为 15 000 μm，为了增强干涉能量，提高传感性能，实验中选取 NCF 的长度为 1.5 cm。

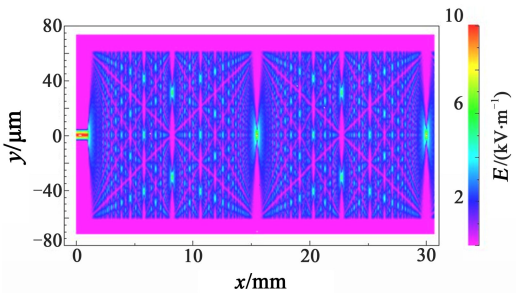


图 3 NCF 内的 xyz 平面内的强度分布模拟图

在 FMF 纤芯中，各高阶模之间干涉强度较低，因此忽略高阶模的模间干涉，干涉仪的输出光强可以近似表示为

$$I = I_1 + \sum_m I_{\text{core}}^m + \sum_m 2\sqrt{I_1 I_{\text{core}}^m} \times \cos\frac{2\pi(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^{\text{core},m})L}{\lambda} \tag{1}$$

式中，I_1 和 I_{core}^m 分别为 FMF 纤芯内基模和高阶模的光强；n_{eff}^1 和 $n_{\text{eff}}^{\text{core},m}$ 分别为 FMF 纤芯内基模和高阶模的有效折射率；λ 为自由空间光波长；L 为 FMF 长度。$\Delta\varphi$ 为 FMF 纤芯中基模和高阶模的相位差，即

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi(n_{\text{eff}}^1 - n_{\text{eff}}^{\text{core},m})L}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \tag{2}$$

式中，Δn_{eff} 为 FMF 纤芯中基模和高阶模的有效折射率差值。当 FMF 纤芯中基模和高阶模的相位差满足 $\Delta\varphi = (2j+1)\pi$，会在特定的波长处产生极小值，该波长可以表示为

$$\lambda_j = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{(2j+1)} \tag{3}$$

此外，在研究游标效应时，单个 SNFS-MZI 的 FSR 是一个很重要的参量，FSR_{MZI} 为

$$FSR_{\text{MZI}} = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}}L} \tag{4}$$

由上式可知，FSR_{MZI} 随着长度的增加而减少。当应变施加到传感结构上，光纤材料的弹光效应会使得光纤模式有效折射率差以及光纤长度发生改变。应变导致干涉谱波长的漂移可以表示为[17-18]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -(1+2\nu+p_e)\varepsilon \tag{5}$$

式中，ν 为光纤材料的泊松比，p_e 为光纤材料的有效弹光系数，ε 表示光纤的微应变。

1.2 基于并联游标效应的增敏解调原理

在视作 Δn_{eff} 不变的情况下，并联 SNFS-MZI 的叠加谱透射光强可以表示为[20]

$$I_{\text{out}} = I_s + I_r = A + B\cos\frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}(L_s - L_r)}{\lambda} \tag{6}$$

式中，I_s 为马赫-曾德尔传感干涉仪的透射光强，I_r 为马赫-曾德尔参考干涉仪的透射光强；L_s 为马赫-曾德尔传感干涉仪中 FMF 的长度，L_r 为马赫-曾德尔参考干涉仪中 FMF 的长度；A 为常数，B 为包络的振幅。

由于两个 SNFS-MZI 的光程差相近，叠加谱中包含高频精细谱和低频精细谱。高频精细谱由 $\frac{|\Delta n_{\text{eff}}(L_s+L_r)|}{\lambda}$ 的频率分量决定，低频包络由 $\frac{|\Delta n_{\text{eff}}(L_s-L_r)|}{\lambda}$ 的频率分量决定[21]。叠加谱包络的自由光谱范围为

$$FSR_{\text{envelope}} = \frac{FSR_s \cdot FSR_r}{|FSR_s - FSR_r|} \tag{7}$$

对于并联 SNFS-MZI 做传感应用时，保持马赫-曾德尔参考干涉仪不施加外界影响。当马赫-曾德尔传感干涉仪的透射谱随外界环境变化而移动时，叠加谱包络随之移动，移动量约为马赫-曾德尔传感干涉仪的 M 倍。游标效应的灵敏度放大系数 M 为[21]

$$M = \frac{FSR_r}{FSR_r - FSR_s} = \frac{L_s}{L_s - L_r} \tag{8}$$

灵敏度放大系数的正负体现在漂移方向上。$L_s > L_r$ 时，灵敏度放大系数 M 为正数，透射谱漂移方向表现为与马赫-曾德尔传感干涉仪相同；$L_s < L_r$ 时，灵敏度放大系数 M 为负数，透射谱漂移方向表现为与马赫-曾德尔传感干涉仪相反。由式(8)可知，通过控制两个马赫-曾德尔传感干涉仪和马赫-曾德尔参考干涉仪中 FMF 的长度，可以灵活调整游标效应的灵敏度放大系数。

2 实验结果和讨论

2.1 传感器制作与包络提取

根据式(7)，(8)可知，包络的 FSR 由马赫-曾德尔传感干涉仪的 FSR 和灵敏度放大系数决定。为了在有限的光源扫描范围内获得较高的灵敏度放大系数，单个 SNFS-MZI 的 FMF 长度应相对较长。同时考虑到条纹对比度，FMF 的长度不能过长。根据上述原因，马赫-曾德尔传感干涉仪和马赫-曾德尔参考干涉仪中 FMF 长度分别控制在 25.8 和 30.5 cm 左右。为了方便起见，我们把马赫-曾德尔传感干涉仪和马赫-曾德尔参考干涉仪分别称为

SNFS-MZI$_S$ 和 SNFS-MZI$_R$。根据选择的两个 MZI 的长度，设计的灵敏度放大系数为 −5.5。对确定好结构的 SNFS-MZI 进行制作。SNFS-MZI$_S$ 和 SNFS-MZI$_R$ 是在输入输出单模光纤之间依次熔接一段 1.5 cm 的 NCF 和一段固定长度的 FMF 制成。实验中使用的熔接机型号为 FSM-60S，选用的光纤分别为康宁公司生产的 SMF 和长飞公司生产的 FMF 和 NCF。其中，SMF 的纤芯直径为 8.2 μm，包层直径为 125 μm；NCF 的包层直径为 125 μm；FMF 的纤芯直径为 19 μm，包层直径为 125 μm。实验中采用手动熔接，熔接时在 x 和 y 轴方向上将两段光纤对齐，使之轴向对称。将制作好的 SNFS-MZI$_R$ 固定在带有凹槽的亚克力板上，增强 SNFS-MZI$_S$ 的稳定性。

并联传感系统如图 4 所示，SNFS-MZI$_S$ 和 SNFS-MZI$_R$ 通过两个 3 dB 光纤耦合器并联连接。传感系统由光纤传感分析仪 SM125（Optical Sensing Interrogator，Micron Optics）、光纤隔离器、SMF 跳线和两个 3 dB 耦合器组成。其中 SM125 内置大带宽扫描激光光源，光源的波长范围为 1 510～1 590 nm，波长分辨率为 1 pm。

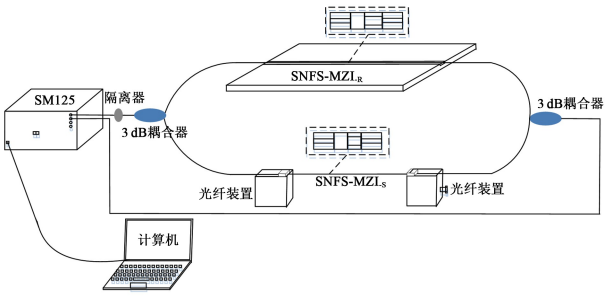
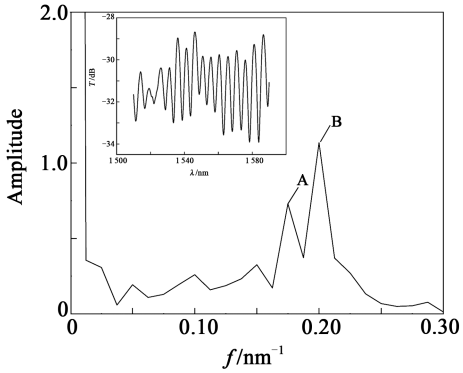
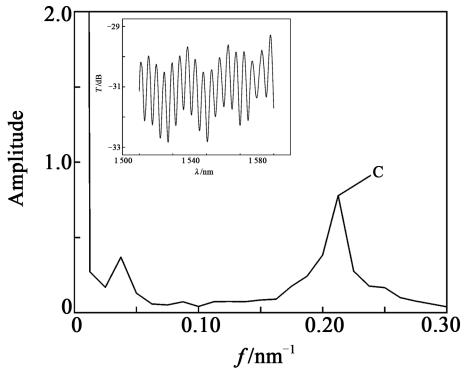


图 4　应变测量装置图

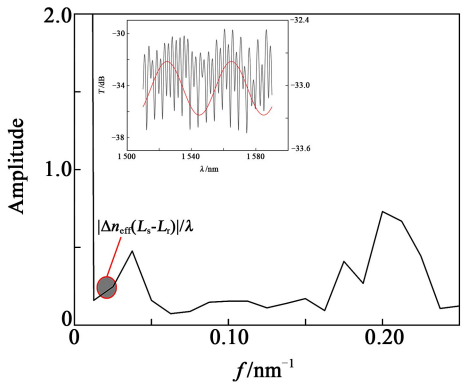
图 5(a)，(b)为 SNFS-MZI$_S$ 和 SNFS-MZI$_R$ 的透射谱和空间频谱图。从透射谱图中可以得到两个 MZI 的 FSR 分别约为 5.535 和 4.6 nm。从空间频谱



(a)　SNFS-MZI$_S$ 的空间频谱，插图为相应的透射谱



(b)　SNFS-MZI$_R$ 的空间频谱，插图为相应的透射谱



(c)　并联 SNFS-MZI 的空间频谱，插图为相应的透射谱，插图中红色曲线表示提取的包络

图 5　单个 SNFS-MZI、并联 SNFS-MZI 的空间频谱及透射谱

图中可以看出，A，B 峰的空间频率为 0.174 99 和 0.199 99 nm^{-1}，经计算 A 峰是由 LP$_{01}$ 模式和 LP$_{11}$ 模式干涉产生的，B 峰是由 LP$_{01}$ 模式和 LP$_{21}$ 模式干涉产生的。C 峰的空间频率为 0.212 49 nm^{-1}，经计算 C 峰是由 LP$_{01}$ 模式和 LP$_{11}$ 模式干涉产生的。由于高阶模之间的干涉强度较小，干涉条纹主要由基模和高阶模干涉形成。选择叠加光谱的带通滤波频率范围为 0.021～0.029 nm^{-1}，对包络进行提取，提取的包络如图 5(c)插图中的红色曲线所示。

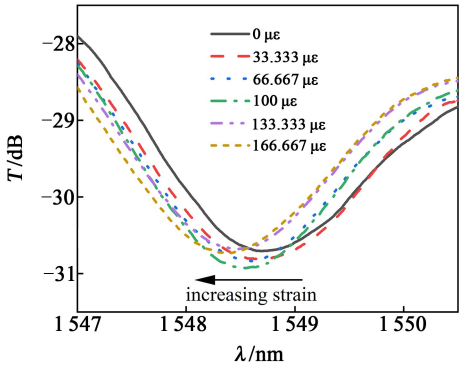
2.2　应变测量

应变测量装置如图 4 所示。进行应变实验时，控制室温在 30 ℃的条件下，将 SNFS-MZI$_S$ 固定于微位移平台上。平台间的距离为 30 cm，通过旋转微调旋钮，使平台往外移动，步长为 10 μm，SNFS-MZI$_S$ 产生的对应应变量为 33.333 με，记录不同应变下的干涉光谱。首先，测试 SNFS-MZI$_R$ 的应变灵敏度，然后连接 SNFS-MZI$_R$ 实现并联 SNFS-MZI 的应变灵敏度测试。

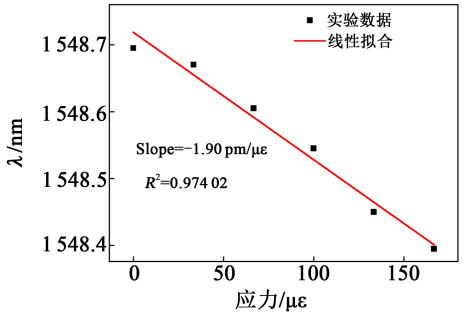
图 6 为 SNFS-MZI$_S$ 受应变后的光谱漂移情况及应变灵敏度拟合图。可以看出，SNFS-MZI$_S$ 的透射

谱随应变量增加产生蓝移，且峰值波长的漂移与应变的变化呈现良好的线性关系，应变灵敏度为−1.90 pm/με。由式(5)可知，当光纤发生拉伸应变，即 ε 为正值时，透射谱向着短波长方向产生漂移。

由于灵敏度放大系数为负数，因此随着应变量的增加，包络的透射谱漂移方向与 SNFS-MZI$_S$ 相反，包络产生红移。如图 7(a)所示，随着应变量的增加，包络在 1 544 nm 附近波谷处产生红移，应变灵敏度为 12.06 pm/με，灵敏度放大系数约为−6.3，与理论放大值基本一致。

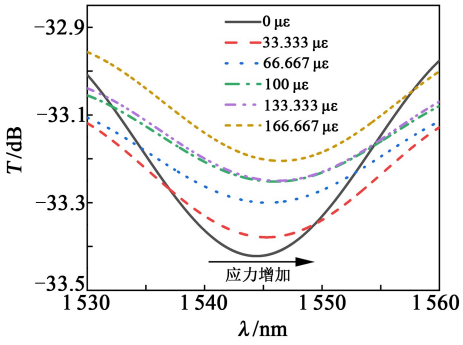


(a) SNFS-MZI$_S$ 在不同应变下的透射谱

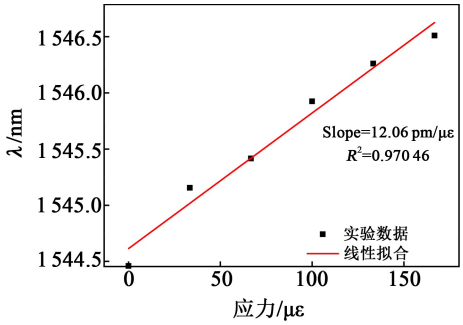


(b) SNFS-MZI$_S$ 应变灵敏度拟合

图 6 在不同应变下 SNFS-MZI$_S$ 的实验结果



(a) 包络在不同应变下的透射谱



(b) 包络的应变灵敏度拟合

图 7 不同应变下包络的实验结果

3 结论

提出并制备了一种基于游标效应的马赫-曾德尔应变传感器，它是由两个 MZI 并联构成。单个 MZI 是由单模光纤、无芯光纤、少模光纤熔接形成。当 SNFS-MZI$_S$ 和 SNFS-MZI$_R$ 的 FSR 相差较小时，并联 SNFS-MZI 会产生游标效应，大幅度提高应变测量灵敏度。实验结果表明：SNFS-MZI$_S$ 的应变灵敏度为−1.90 pm/με，包络的应变灵敏度为 12.06 pm/με，灵敏度放大系数为−5.5。该传感器具有灵敏度高、制作成本低、结构简单等优点。

参考文献：

[1] 孙家程，王婷婷，戴 洋，等. 基于无芯光纤的多参数测量传感器[J]. 物理学报，2021，70(6)：214-221.
Sun Jiacheng，Wang Tingting，Dai Yang，et al. Multi-parameter measurement sensor based on no-core fiber[J]. Acta Phys. Sin.，2021，70(6)：214-221.

[2] Zhang G，Ge Q，Wang H S，et al. Simultaneous temperature and strain measurement using TCF based Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt. Fiber Technol.，2021，67：102687.

[3] Xu S S，Chen H L，Feng W L. Fiber-optic curvature and temperature sensor based on the lateral offset spliced SMF-FCF-SMF interference structure[J]. Opt. Laser Technol.，2021，141：107174.

[4] Liao Y C，Liu B，Liu J，et al. High temperature (up to 950 ℃) sensor based on micro taper in-line fiber Mach-Zehnder interferometer (invited)[J]. Appl. Sci.，2019，9(12)：2394.

[5] 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.
Fu Guangwei，Li Xinfeng，Li Yunpu，et al. Temperature insensitive curvature sensor of photonic crystal fiber based on core-offset splicing and waist-enlarged fiber taper[J]. Acta Opt. Sin.，2016，36(11)：1106007.

[6] Dong L G，Gang T T，Bian C，et al. A high sensitivity optical fiber strain sensor based on hollow core tapering[J]. Opt. Fiber Technol.，2020，56：102179.

[7] 孙明明，王剑锋，金永兴，等. 基于错位和花生形结构的全光纤马赫-曾德干涉仪的研究[J]. 光谱学与光谱分析，2016，36(5)：1560-1564.
Sun Mingming，Wang Jianfeng，Jin Yongxing，et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometer based on lateral-offset and peanut shape structure[J]. Spectrosc Spect. Anal.，2016，36(5)：1560-

1564.

[8] Bian J C, Lang T T, Kong W, et al. A polarization maintaining fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and strain[J]. Optik, 2016, 127(20): 10090-10095.

[9] Gao S, Ji C K, Ning Q Y, et al. High-sensitive Mach-Zehnder interferometric temperature fiber-optic sensor based on core offset splicing technique[J]. Opt. Fiber Technol., 2020, 56: 102202.

[10] 王　旗，邹　辉，韦　玮. 基于偏芯熔接光纤的应力与折射率传感[J]. 光学学报，2017，37(10)：1006005.
Wang Qi, Zou Hui, Wei Wei. Strain and refractive index sensor based on core-offset splicing fibers[J]. Acta Opt. Sin., 2017, 37(10): 1006005.

[11] 陶武强，王　解，江　超，等. 基于 SMS 结构的多功能光纤传感[J]. 激光杂志，2020，41(12)：13-17.
Tao Wuqiang, Wang Jie, Jiang Chao, et al. Multifunctional fiber sensor based on SMS structure[J]. Laser J., 2020, 41(12): 13-17.

[12] Salceda-Delgado G, Monzon-Hernandez D, Martinez-Rios A, et al. Optical microfiber mode interferometer for temperature-independent refractometric sensing[J]. Opt. Lett., 2012, 3: 1974-1976.

[13] Jin L, Li M Y, He J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect[J]. Opt. Commun., 2011, 284(1): 156-159.

[14] 陆晨旭. 基于特殊少模光纤干涉仪的传感机理及应用研究[D]. 厦门：厦门大学，2019.
Lu Chenxu. Investigation of the sensing characteristics of a specially designed few-mode fibre based interferometer and their applications in fibre optic sensing[D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.

[15] Wang Z R, Huang L, Liu C, et al. Sensitivity-enhanced fiber temperature sensor based on vernier effect and dual in-line Mach-Zehnder interferometers[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(18): 7983-7987.

[16] 方莎莎，吴许强，张　刚，等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J]. 中国激光，2021，48(1)：123-132.
Fang Shasha, Wu Xuqiang, Zhang Gang, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect[J]. Chin. J. Lasers, 2021, 48(1): 123-132.

[17] 吕　鹏，李恩邦，王　玮，等. 光纤多模干涉应变传感器的数值模拟及实验研究[J]. 传感技术学报，2008，21(12)：1990-1994.
Lv Peng, Li Enbang, Wang Wei, et al. Numerical simulation and experimental study of all-fiber multimode-interference-based strain sensors[J]. Chinese J. Sensors and Actuators, 2008, 21(12): 1990-1994.

[18] 于丽霞，金　源，刘　吉，等. 强电磁环境下光纤测速系统设计[J]. 兵器装备工程学报，2020，41(8)：234-238.
Yu Lixia, Jin Yuan, Liu Ji, et al. Design of optical fiber velocity measurement system under strong electromagnetic environment[J]. J. of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(8): 234-238.

[19] 杨　易，徐　贲，刘亚铭，等. 基于游标效应的增敏型光纤法布里-珀罗干涉仪温度传感器[J]. 物理学报，2017，66(9)：094205.
Yang Yi, Xu Ben, Liu Yaming, et al. Sensitivity-enhanced temperature sensor with fiber optic Fabry-Perot interferometer based on vernier effect[J]. Acta Phys. Sin., 2017, 66(9): 094205.

[20] Zhu H H, Yue Y H, Wang Y J, et al. High-sensitivity optical sensors based on cascaded reflective MZIs and microring resonators[J]. Opt. Express, 2017, 25: 28612-28618.

[21] Quan M R, Tian J J, Yao Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and vernier effect[J]. Opt. Lett., 2015, 40: 4891-4894.

作者简介：

王秀婷(1998—)，女，安徽省滁州市人，硕士研究生，主要研究方向为光纤传感；

王婷婷(1979—)，女，江苏省南通市人，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光信号处理。