



·新型激光技术专题·

基于马赫-曾德干涉的全光纤双参量传感器*

李筱薇, 谭建昌, 冯国英

(四川大学 电子信息学院, 激光微纳工程研究所, 成都 610065)

摘要: 提出一种基于 S 形-错位结构的全光纤马赫-曾德干涉仪(MZI)双参量传感器。该传感结构是采用单模光纤在光纤熔接机中通过简单的放电和熔接等步骤制备而成。顺时针扭转时,传感器的传输光谱向短波长方向偏移;逆时针扭转,向长波长方向偏移。对传感器的实验研究结果表明,该传感器在光纤横截面上顺时针和逆时针两个旋转方向上的扭曲传感灵敏度分别为 $-223 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$, $140 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$,且可实现扭转方向的判别,在一定应变范围内的应变灵敏度为 $0.145\times 10^6 \text{ dB}/\varepsilon$ (这里 ε 为应变),且温度交叉灵敏度极小,可忽略不计。因此,这种基于单模光纤的纤芯-包层 MZI 双参量传感器具有传感灵敏度高,体积小巧,工艺简单,成本低廉且可判别扭转方向的优点,有望成为众多双参量测量操作中良好的候选仪器之一。

关键词: 全光纤; 扭曲传感; 方向可判别; 应变传感; 温度交叉灵敏度低; 双参量传感器
中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210498

All-fiber dual-parameter sensor based on Mach-Zehnder interference

Li Xiaowei, Tan Jiachang, Feng Guoying

(Institute of Laser Micro-Nano Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes an all-fiber Mach-Zehnder Interference (MZI) dual-parameter sensor based on S-shaped-dislocation structure. The sensor is prepared by using fusion splicer through simple discharge and fusion splicing steps, with pieces of single-mode fibers. When the rotator is twisting clockwise, the transmission spectrum of the sensor shifts to the short wavelength direction; when it is twisting counterclockwise, the transmission spectrum shifts to the different direction. The sensor's torsion experimental results show that the torsion direction can be distinguished, and the torsion sensitivity in the clockwise and counterclockwise rotation directions on the fiber cross-section is $-223 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$, $140 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$, respectively. The strain sensitivity within a certain strain range is $0.145\times 10^6 \text{ dB}/\varepsilon$ (where ε is strain), and the temperature cross sensitivity is extremely small and can be ignored. Therefore, this dual-parameter sensor based on the SMF core-cladding MZI interferometer has the advantages of high sensing sensitivity, small size, simple process, low cost, and distinguishable torsion direction. It is expected to become a good candidate instruments in many dual-parameter measurement operations.

Key words: all optical fiber; twist sensing; distinguishable rotating direction; strain sensing; low temperature cross sensitivity; dual-parameter sensor

光纤扭曲传感和应变传感是大型建筑结构、飞机机翼形变、地质灾害等领域的健康监测中有极大的应用前景。传统电传感器因尺寸较大且易受电磁干扰限制了其应用范围。光纤传感器由于其具有结构紧凑、耐高温高压、抗腐蚀、抗电磁干扰,且具有灵敏度高、易复用等优点^[1-3],在多参量传感方面具有广泛的应用前景。

干涉型传感器是利用双光束或多光束干涉,光束间光程不同存在相位差,实现对环境参量变化的监测传感。根据相位干涉原理,可分为光纤 Michelson 干涉仪(MI)、光纤 Sagnac 干涉仪(SI)、光纤 Febry-Perot 干涉仪(FPI)和光

* 收稿日期:2021-10-10; 修订日期:2021-11-10

基金项目:等离子体物理重点实验室基金项目(6142A04200210);国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金项目(U1730141)

联系方式:李筱薇, 550701221@qq.com。

通信作者:冯国英, guoing_feng@scu.edu.cn。

纤 Mach-Zehnder 干涉仪 (MZI)。目前, 光纤传感主要是基于长周期光纤光栅 (LPGs)^[4-5], 纤芯不匹配或错位^[6-7], 光子晶体光纤 (PCF)^[8-9] 等结构。Rao 等人^[10] 提出了基于超长周期光纤光栅 (ULPFG) 扭曲传感器, 扭曲灵敏度约为 $0.2244 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$, 可以同时确定扭曲方向。Bai 等人^[11] 提出了一种基于 MZI 的旋转方向判别的扭曲传感器, 通过 CO_2 激光诱导永久螺旋型光纤纤芯和包层之间的两个耦合点处的畸变, 该传感器能够扭曲传感并可同时确定其旋转方向。Zhou 等人^[12] 实现了一种应变和温度的同时测量的新型在线 MZI, 其应变灵敏度和温度灵敏度分别为 $-0.023 \times 10^6 \text{ dB}/\varepsilon$ 和 $51 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。Ramanathan 团队^[13] 采用基于两个连续级联的螺旋长周期光纤光栅的方法, 实现了扭转、应变和温度的同时测量, 且测量精度分别约为 1.2° 和 0.8°C 。Liu 等人^[14] 在单模光纤上制备一对离轴扭曲变形微结构, 实现了同时测量定向扭转和应变, 指示波谷的响应一致性有待提高。与上述结构相比, 采用常规的单模光纤 (SMF) 在熔接机中熔接制备, 制作过程简单, 高效, 可重复且机械强度较强。

本文提出并实现了一种全光纤的 S 形-错位 (SSMS arc-shaped misaligned mode sensor) MZI 双参量传感器。该 SSMS 传感器可实现在外界应变和扭曲传感, 并根据光谱移动判别其扭转方向 (顺时针或逆时针), 且传感响应可重复可逆, 温度交叉灵敏度极低。

1 基本原理

1.1 理论模型

入射光从传感器左端光纤传播到 S 形结构时, 部分在纤芯中传播的光会进入包层并激发高阶模式, 剩余的光继续在 SMF 中向前传播, 当两束光传输到错位结构时, 包层传输的光重新耦合进光纤, 由于包层光与纤芯光的传播路径不同存在相位差, 因而发生干涉, 形成干涉光谱。

根据上述分析, 纤芯模式和包层模式发生干涉后, 输出光的总强度可表示为

$$I = I_{\text{co}} + I_{\text{cl}} + 2\sqrt{I_{\text{co}}I_{\text{cl}}}\cos\phi \quad (1)$$

式中: I_{co} 为纤芯模式的光强; I_{cl} 为包层模式的光强。纤芯模式与包层模式之间的相位差 ϕ 可以表示为

$$\phi = 2\pi(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})L/\lambda \quad (2)$$

式中: λ 表示入射光的波长; L 为干涉区域的长度; $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 分别为基模和包层模的有效折射率。

基于式(1), 当 $\phi = (2m+1)\pi$ 时即得到干涉光谱中波谷处的波长

$$\lambda = \frac{2(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl}})L}{2m+1}, \quad m = 0, 1, 2, \dots (m \text{ is an integer}) \quad (3)$$

干涉光的强度和波长与光纤 MZI 中光纤长度、纤芯和包层的有效折射率等参量有关。在传输过程中, 纤芯中传输光的相位则不会受到外界环境折射率的影响, 包层中传输光的相位会受到外界环境折射率的影响, 而。因此, 当传感器的外界环境的参量发生变化时, 干涉光的强度和波长会发生变化, 影响传输的干涉光谱、发生改变。

1.2 仿真分析

使用 Rsoft 软件的光束传播方法 (BPM) 模块对传感结构进行仿真, 分析该 SSMS 传感器在光传输过程中的模式激发及模间干涉的情况。具体的仿真参数如下, 纤芯和包层的直径分别为 $6 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$, 相应的折射率为 1.45 和 1.47。

图 1 为 1064 nm 的输入波长处沿 MZI 的归一化的传输光场。传输光经过 S 形结构时会激发出包层高阶模, 随后光在纤芯与包层中传输一段距离后经过错位结构重新耦合进纤芯, 由于纤芯模与包层模之间存在相位差, 因此发生 MZ 干涉。由仿真结果可以发现, 在 S 形结构处和错位结构处, LP_{01} 模与 LP_{02} 模、 LP_{11} 模之间进行能量交换, 干涉现象主要由 LP_{01} 模和 LP_{11} 模产生。

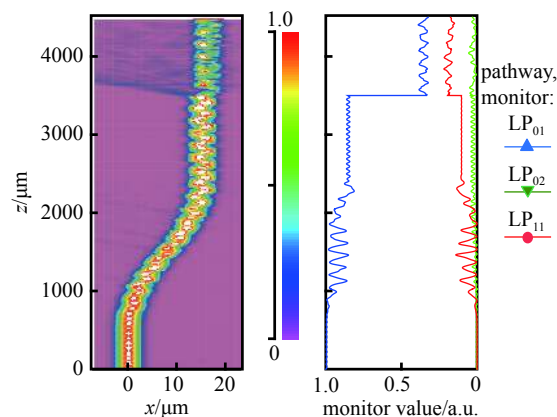


Fig. 1 Light field distribution and normalized energy distribution of MZI propagation at 1064 nm

图 1 MZI 在 1064 nm 波长处的传播的光场分布和归一化能量分布

2 传感器制作与实验研究

2.1 传感器制备

本文提出的 SSMS 结构光纤传感器采用商用单模光纤 (Corning HI-1060) 经熔接机 (Signal fire X) 电弧放电制备, 其模场直径为 $(6.2 \pm 0.3) \mu\text{m}$ @1060 nm, 制备方法简单, 且可重复性高。制备过程如下: 使用熔接机 (Signal fire X) 手动错位熔接两段单模光纤, 并在错位熔接点一段距离前多次进行放电操作, 制备 S 形结构。熔接机中单模光纤熔接程序的相关参数如下: 除尘电压 120 mV, 除尘时间 200 ms, 为 150 ms; 光纤预熔电压 10 mV, 预熔时间为 180 ms; 熔接电压为 940 mV, 熔接时间为 3000 ms。两结构的中心距离 L 为 $7000 \mu\text{m}$ 。显微镜下的 SSMS 传感器微结构如图 2 所示。

2.2 传感器实验

为了验证上述的理论分析和实验仿真的结果, 我们利用这一结构进行了多参量的传感实验, 下列实验均在恒温 (20 °C) 恒湿的超净光学实验室中进行。入射宽谱光源的有效波长范围为 1040 nm 至 1140 nm (ASE-1064), 使用光谱分析仪 (OSA, YOKOGAWA AQ6370C) 记录传输光谱, 最大分辨率为 0.02 nm。

2.2.1 扭曲实验

将制作好的传感器连接至图 3 所示扭曲传感实验装置, 进行扭曲特性测试实验。首先, 将传感部分同轴放置在旋转器和固定平台上 (传感器居中)。然后将右端的光纤固定, 另一端通过旋转器沿顺 (逆) 时针方向旋转。顺时针方向如图 3(a) 所示, 相反方向为逆时针。最后, 以 10° 为增量扭转旋转器, 对应于 0.775 rad/cm 的扭转率, 旋转的角度范围为 -90° 到 90° 。扭转率为单位光纤长度的扭转角^[10], 其中 L 是被扭转光纤的长度 (258 mm), β 是通过旋转器对光纤施加扭转的角度, 其大小可直接通过旋转器读数。图 3(b) 为传感器实验装置的实物图。

图 4 所示为扭曲传感实验的传输光谱。图 4(a) 展示了在顺时针方向上, 随着扭转率从 0 rad/cm 增加到 4.55 rad/cm , 透射光谱的指示波谷发生明显蓝移。图 4(b) 为在逆时针方向上, 当扭转率从 0 rad/cm 增加到 -4.55 rad/cm , 透射光谱的指示波谷出现明显红移, 且与顺时针施加扭转时的光谱变化方向相反, 因此该传感器能够实现扭转方向的判别。

为了进一步分析干涉光谱的波长偏移的具体情况, 对不同指示波谷的波长偏移量进行线性拟合, 如图 5 所

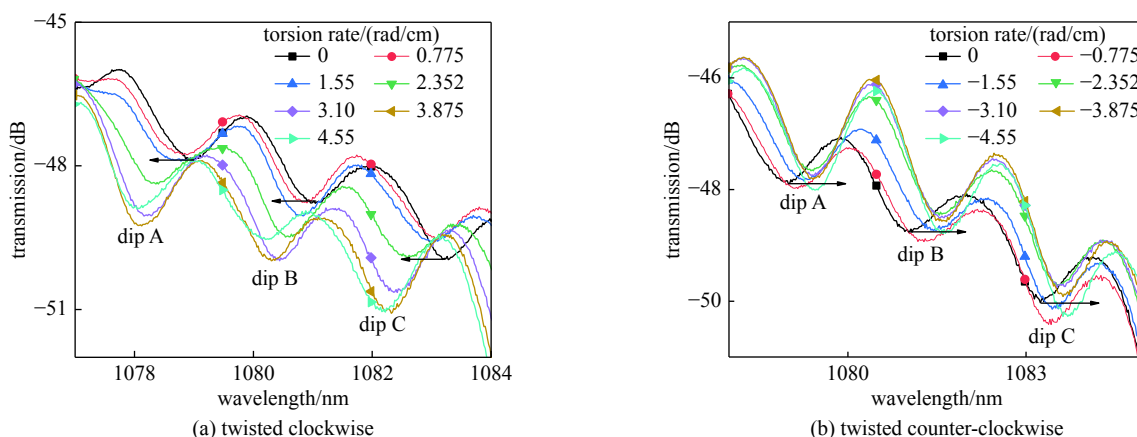


Fig. 4 Interference spectral response of the twisted fiber

图 4 扭转时的干涉光谱响应

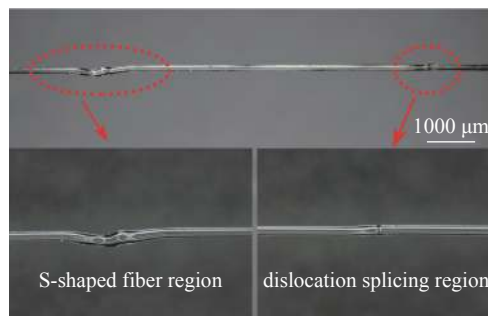
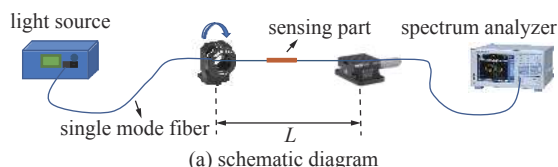


Fig. 2 Optical micrograph of the prepared S-shaped-dislocation micro-fiber structure

图 2 制备出的 S 形-错位微光纤结构的光学显微图



(a) schematic diagram



(b) actual device

Fig. 3 Device for measuring the twisting characteristics of the sensor

图 3 传感器扭曲特性测量装置

示。不同指示波谷 (Dip A, Dip B, Dip C) 在顺时针 (逆时针) 的扭曲灵敏度不同, 通过拟合结果可知该传感器在顺时针扭转时的最大扭转灵敏度约为 $-223 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$, 逆时针扭转的最大扭转灵敏度约为 $140 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1})$ 。

2.2.2 应变实验

将制作好的传感器连接至图 6 所示应变传感实验装置, 进行应变特性测试实验。实验过程如下, 将光纤两端固定在两个共线平台, 通过控制右端平移台的千分尺旋钮改变两个平台之间的距离, 向光纤施加轴向应变, 千分尺分辨率 $1 \mu\text{m}$ 。设 ε 为施加到光纤上的轴向应变, 则 $\varepsilon = \Delta D/D$, 其中 ΔD 为千分尺每次移动的长度, D 为两个平台初始的距离 ($D=212 \text{ mm}$)。平移台的单位步长改变量为 $2 \mu\text{m}$, 对应单位应变量为 9.4×10^{-6} , 平移台总位移量为 $20 \mu\text{m}$, 即施加在光纤上的总应变为 9.4×10^{-5} 。

图 7 展示了不同指示波谷 Dip 1 和 Dip 2 在不同应变条件下的传输光谱及二次拟合。在 $(0 \sim 94.2) \times 10^{-6}$ 的应变范围内, 随着施加的轴向应变增加, 指示波谷的强度逐渐增强。由图 7(b) 可知该结构的最大应变传感灵敏度为 $0.145 \times 10^6 \text{ dB}/\varepsilon$ 。

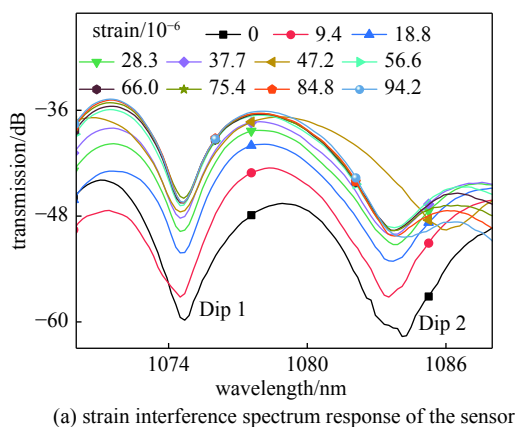


Fig. 7 Strain interference spectrum response of the sensor and the fitting curve of the indicating dip intensity under different strain conditions

图 7 传感器的应变干涉光谱响应及不同应变条件下指示波谷强度的拟合曲线

2.2.3 温度交叉灵敏度实验

为保证实验结果的准确性以及严谨性, 以上传感实验均在恒温恒湿的超净光学实验室完成的, 实验室的温度的变化量控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的范围内, 因而温度不会对实验造成太大影响。但是在实际应用中, 外界环境的温度是变化的, 因此, 我们需要对传感器的温度交叉灵敏度进行测量。

将传感器连接至图 8 所示的温度传感测量装置。传感器水平放置在加热台上并覆盖石英舟, 以 60°C 为升温间隔, 温度范围为 25°C 到 325°C 。到达预设采样温度后, 待温度稳定 5 min 后再记录传输光谱, 避免采集光谱数据时引入较大的环境温度误差。

如图 9 所示, 随着外界环境温度的增加, 谷 1 与谷 2 特征波长的波长偏移量很小, 响应波谷 (Dip 1, Dip 2) 的温度交叉温度灵敏度分别为 $0.137 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $0.130 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 可近似为零。因此该传感器的温度交叉灵敏度可忽略。也可以通过加额外的温度传感器或监测指示波谷更精确的排除实验过程中温度交叉灵敏度的影响。

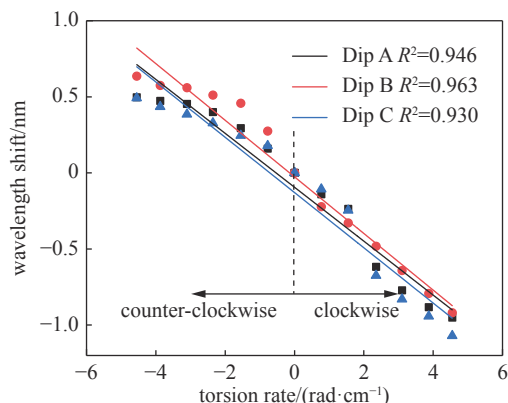


Fig. 5 Linear fitting of different indicating dips

图 5 不同指示波谷偏移量线性拟合

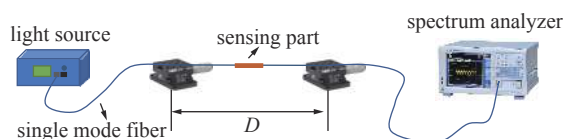
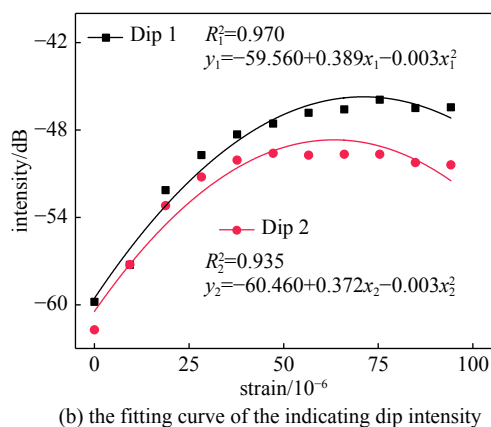


Fig. 6 Device for measuring the strain characteristics of the sensor

图 6 传感器的应变特性的测量装置



(b) the fitting curve of the indicating dip intensity

Fig. 8 Measuring device for temperature cross-sensing

图 8 温度交叉传感的测量装置

3 结 论

本文采用基于相位干涉的 Mach-Zehnder 干涉仪, 提出并实现了一种全光纤 S 形-错位结构的在线型 MZI 传感器, 用于扭曲和应变的双参量传感测量。该传感器通过基模和高阶模式之间的模式干涉, 建立传感器与外界环境参量之间的联系, 可实现应变和扭曲的双参数传感测量。理论和实验结果表明, 该传感器在 $(0\sim 94.2)\times 10^{-6}$ 的应变范围内的应变响应最高可达约 0.145×10^6 dB/ ε , 顺时针(逆时针)扭转时的最大扭曲灵敏度分别约为 -223 pm/(rad·cm⁻¹) 和 140 pm/(rad·cm⁻¹), 且可判别扭转方向。其温度交叉灵敏度极小可忽略不计, 在易受温度影响的环境中测量传感参量时, 可以有效避免环境温度变化引起的实验测量误差。

该传感器具有 μm 级的紧凑尺寸, 可有效应用于小空间的多参量传感。且该传感器易于复用到光纤传感器网络, 在实际应用中可极大地减少所需传感器的数量和重量, 可有效应用于小空间的多参量传感, 为多参量传感的研究和应用开辟了新的可能性。

参考文献:

- [1] Fu Guangwei, Li Yunpu, Li Qifeng, et al. Temperature insensitive vector bending sensor based on asymmetrical cascading SMF-PCF-SMF structure[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, 9: 7103114.
- [2] He Wei, Fang Yitao, Zhu Lianqing, et al. Optical fiber interference sensor based on fiber ending micro-groove fabricated by femtosecond laser[J]. *Optik*, 2018, 158: 1295-1301.
- [3] Zhang Wen, Hao Jiaqi, Dong Mingli, et al. A dual-parameter sensor for strain and temperature measurement featuring cascaded LPFG-FP structure[J]. *Optik*, 2018, 171: 632-641.
- [4] Lin C Y, Wang L A, Chern G W. Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors[J]. *J Lightw Technol*, 2001, 19(8): 1159-1168.
- [5] Wang Yiping, Wang Ming, Huang Xiaoqin. In fiber Bragg grating twist sensor based on analysis of polarization dependent loss[J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 11913-11920.
- [6] Yu Fangda, Xue Peng, Zheng Jie. Enhancement of refractive index sensitivity by bending a core-offset in-line fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sens J*, 2019, 19(9): 3328-3334.
- [7] Tian Zhaobing, Yam S S H, Loock H P. Single-mode fiber refractive index sensor based on core-offset attenuators[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2008, 20(16): 1387-1389.
- [8] Wang Qi, Kong Lingxin, Dang Yunli, et al. High sensitivity refractive index sensor based on splicing points tapered SMF-PCF-SMF structure Mach-Zehnder mode interferometer[J]. *Sens Actuators B:Chem*, 2016, 225: 213-220.
- [9] Zheng Jiarong, Yan Peiguang, Yu Yongqin, et al. Temperature and index insensitive strain sensor based on a photonic crystal fiber in line Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt Commun*, 2013, 297: 7-11.
- [10] Rao Yunjiang, Zhu Tao, Mo Qiuju. Highly sensitive fiber-optic torsion sensor based on an ultra-long-period fiber grating[J]. *Opt Commun*, 2006, 266(1): 187-190.
- [11] Bai Zhiyong, Deng Mi, Liu Shen, et al. Torsion sensor with rotation direction discrimination based on a pre-twisted in-fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics J*, 2017, 9: 7103708.
- [12] Zhou Jiangtao, Liao Changrui, Wang Yiping, et al. Simultaneous measurement of strain and temperature by employing fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt Express*, 2014, 22(2): 1680-1686.
- [13] Subramanian R, Chengliang Z, Hua Z, et al. Torsion, strain, and temperature sensor based on helical long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30: 327-330.
- [14] Liu Y, Deng H, Yuan L. Directional torsion and strain discrimination based on Mach-Zehnder interferometer with off-axis twisted deformations[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 120: 105754.

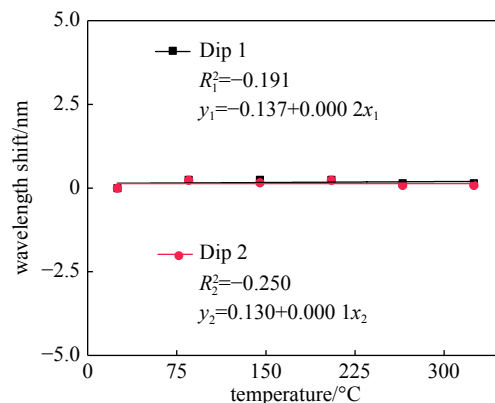


Fig. 9 Wavelength shift of response interference spectrum
图 9 响应干涉光谱的波长偏移量