

引用格式: SUN Xiao-ting, GONG Hua-ping, XIE Ming-yang, *et al.* Comparative Study on Same Structure Based Cascaded Mach-Zehnder Optical Fiber Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1006002

孙小婷, 龚华平, 解铭旸, 等. 基于同结构级联的马赫曾德光纤传感器对比研究[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1006002

# 基于同结构级联的马赫曾德光纤传感器对比研究

孙小婷, 龚华平, 解铭旸, 林永杰, 赵春柳

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 为了探究同结构级联传感器的级联级数对传感器灵敏度的影响, 对基于同结构二级与三级级联的马赫曾德光纤传感器进行了研究. 实验中, 分别采用放电熔接法制作了基于腰椎放大结构的和错位结构的二级级联和三级级联的 M-Z 光纤传感器. 并对二级级联结构和三级级联结构的应变传感特性进行了研究. 实验结果表明, 双腰椎放大的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.76 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 三腰椎放大的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.75 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 应变灵敏度变化为  $0.01 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ; 双错位结构的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.73 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 三错位结构的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.77 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 应变灵敏度变化为  $0.04 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . 因此, 与二级级联结构相比, 三级级联结构在灵敏度上并未有明显的提升. 该研究表明多级级联的 M-Z 传感器并不能提高灵敏度.

**关键词:** 马赫-曾德干涉仪; 腰椎放大; 错位结构; 级联结构; 应变传感

中图分类号: TP212;

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204910.1006002

## Comparative Study on Same Structure Based Cascaded Mach-Zehnder Optical Fiber Sensor

SUN Xiao-ting, GONG Hua-ping, XIE Ming-yang, LIN Yong-jie, ZHAO Chun-liu  
(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the number of cascade stages of the same structure cascade sensor on the sensitivity of the sensor, a comparative study on the same structure based two-stage and three-stage cascaded Mach-Zehnder (M-Z) optical fiber sensor was carried. In the experiment, we fabricated the two-stage cascaded and three-stage cascaded M-Z sensor based on the waist-enlarged structure and misaligned structure. In order to study the difference between the two-stage cascaded structure and three-stage cascaded structure, the strain performance was also measured. The experimental results show that the strain sensitivity of the two-stage cascaded M-Z sensor with waist-enlarged structure is  $-0.76 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , and that of the three-stage cascaded M-Z sensor is  $-0.75 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , the sensitivity change of strain is  $0.01 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . The strain sensitivity of the two-stage cascaded M-Z sensor with misaligned structure is  $-0.73 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , and that of the three-stage cascaded M-Z sensor is  $-0.77 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , the sensitivity change of strain is  $0.04 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . Therefore, the sensitivity of the three-stage cascaded structure is not improved obviously compared with the two-stage cascaded structure. The study shows that the multiple cascaded M-Z structures can not improve the sensitivity.

**Key words:** Mach-Zehnder interferometer; Waist-enlarged structure; Misaligned structure; Cascaded structure; Strain sensor

**OCIS Codes:** 060.2310; 060.2370; 060.3735; 060.2340; 060.2300

基金项目: 浙江省自然科学基金(No.LY17E040002)

第一作者: 孙小婷(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: 1343076731@qq.com

导 师: 龚华平(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感和非线性光学. Email: gonghp@163.com

收稿日期: 2020-05-25; 录用日期: 2020-09-03

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

光纤传感器是一种将待测物理量信息转变为可测光信号的新型传感检测装置.自20世纪60年代光纤问世后,这一新兴传感检测技术便得到了高速发展.光纤传感器作为传感家族的一名新成员由于其优越的性能而备受青睐,其具有体积小、质量轻、抗电磁干扰、防腐蚀、灵敏度很高、测量带宽很宽、检测电子设备与传感器可以间隔很远等优点<sup>[1-3]</sup>,可以构成传感网络.特别是其灵敏度比传统的传感器高几个数量级,光纤传感器对环境的适应能力强可以用来检测许多传统的传感器不能测量的物理量.如液位<sup>[4]</sup>、压力<sup>[5]</sup>、曲率<sup>[6]</sup>、温度<sup>[7]</sup>、折射率<sup>[8]</sup>、应变<sup>[9]</sup>、磁场强度<sup>[10]</sup>等都可以对光纤传感器的输入光信号进行调制,进而得到与待测物理量成一定函数关系的输出光信号,由此来计算待测物理量的值.光纤传感器可以用来替代传统机械式、电磁式传感器,克服传统传感器用于狭窄环境测量及恶劣环境测量时所存在的不足.

近年来,全光纤马赫曾德干涉仪传感器由于其具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰能力强、易于制造等优点,得到广泛的研究,它在许多领域有潜在的应用前景<sup>[11]</sup>.目前,基于马赫曾德的级联结构得到了越来越多的关注与研究.例如,基于双腰椎放大结构M-Z干涉仪级联的曲率传感器<sup>[12]</sup>,基于多个拉锥的单模光纤-多模光纤-单模光纤(Single-mode fiber-Multi-mode fiber-Single-mode fiber, SMS)结构的光纤折射率传感器<sup>[13]</sup>,由单模光纤构成的基于花生形结构和错位结构的光纤M-Z传感器<sup>[14]</sup>,双球型光纤传感器用于对温度的测量<sup>[15]</sup>等.此外,已经报道了许多花生型<sup>[16]</sup>,球型<sup>[17]</sup>结构的马赫曾德干涉仪.然而,这些研究都是集中在采用不同的结构级联,而对于三级级联结构和二级级联结构之间的关联并没有涉及.特别是对于同结构级联来说,多级级联结构能否提高灵敏度仍然是一个问题.

本文主要进行了同结构二级级联和三级级联的对比研究,其中利用游标效应的多级级联结构不在本文的研究范围.以两种M-Z结构为例,采用自动模式来制作腰椎放大结构,采用手动模式来制作错位结构.然后对腰椎放大结构和错位结构的三级级联做了研究,同时对应变传感特性进行了测量,并与二级级联做出了对比.结果表明,与二级级联结构相比,三级级联结构在灵敏度上并未有明显的提升.这说明多个结构级联的M-Z传感器并不能提高灵敏度.

## 1 传感器原理

传统的马赫曾德干涉仪往往通过一个光学系统来实现,它通常包含两个耦合器,一个将光分成两路,另一个将分成两路的光进行耦合.由于两路光经过不同的光程,因此在耦合后会产生干涉.而全光纤的马赫曾德干涉仪通常是使用两个特殊的熔接结构(如腰椎放大熔接,错位熔接,花生型熔接等)替代了传统马赫曾德光纤干涉仪中耦合器的作用.

因此,对于单个的马赫-曾德传感器,它的输出光强可以表示为

$$I = I_{\text{core}} + I_{\text{clad}} + 2\sqrt{I_{\text{core}}I_{\text{clad}}} \cos\Phi \quad (1)$$

式中, $I_{\text{core}}$ 和 $I_{\text{clad}}$ 分别表示为纤芯光强以及干涉时对应阶数的包层光强.如果把不同阶数的包层模式分开,那么包层光与纤芯光干涉时,它们的相位差可表示为

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})L = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}L}{\lambda} \quad (2)$$

式中, $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别表示光纤中纤芯有效折射率以及 $m$ 阶包层模式对应的包层有效折射率, $\Delta n_{\text{eff}}$ 为纤芯有效折射率和 $m$ 阶包层模式对应的包层有效折射率的差值, $L$ 为干涉仪干涉长度.当外界物理量发生变化时,通常会引引起有效折射率差与干涉长度的变化,从而影响光程差的值.因此本质上所有对于物理量的测量都是通过改变光程差从而改变干涉相位的.

由式(2)可知,当相位差为 $\Phi = (2m+1)\pi$ 时,产生干涉波谷, $m$ 是常数.因此干涉波谷可以表示为

$$\lambda_m = 2\Delta n_{\text{eff}}L/(2m+1) \quad (3)$$

对于一个波长确定的波谷,由于它的 $m$ 值是固定的.

在应变测量时,当传感器的应变发生变化时,除了由于弹光效应导致的纤芯-包层的折射率差变化外,干涉长度本身也会由于应变变长.当发生应变时,式(3)可以写为

$$\Delta\lambda_m = \frac{2(\Delta n_{\text{eff}} + k\Delta\epsilon)(1 + \Delta\epsilon)L}{2m + 1} = \frac{2L\Delta n}{2m + 1} + \frac{2L\Delta n\Delta\epsilon}{2m + 1} + \frac{2Lk\Delta\epsilon}{2m + 1} + \frac{2Lk\Delta\epsilon^2}{2m + 1} \quad (4)$$

由于 $\Delta\epsilon^2$ 远小于1,式(4)可以近似表示为

$$\Delta\lambda_m \cong \frac{2\Delta n_{\text{eff}}L}{2m + 1} + \frac{2L\Delta n_{\text{eff}}\Delta\epsilon}{2m + 1} + \frac{2kL\Delta\epsilon}{2m + 1} \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),消去 $(2m+1)$ 项,式(5)可以写成

$$\Delta\lambda_m = \lambda_m + \lambda_m\Delta\epsilon + \frac{k\Delta\epsilon}{\Delta n}\lambda_m \quad (6)$$

则传感器的应变灵敏度可以表示为

$$\frac{\Delta\lambda_m}{\Delta\epsilon} = \lambda_m \left( 1 + \frac{k}{\Delta n_{\text{eff}}} \right) \quad (7)$$

式中, $k = -0.1649 \times 10^{-9} \mu\epsilon^{-1}$ 是应变-折射率系数<sup>[18]</sup>,是一个常数, $L$ 是传感器的长度, $\Delta\epsilon$ 是应变.从式(7)可以看出,对于单个MZI,其灵敏度是一个确定的值,仅仅与 $\Delta n_{\text{eff}}$ 有关,即与纤芯模和包层模的有效折射率差有关.对于两个腰椎放大结构的MZI级联结构来说,其灵敏度与每个MZI的 $\Delta n_{\text{eff}}$ 有关,即与第一个MZI的 $\Delta n_{\text{eff}}^1$ ,第二个MZI的 $\Delta n_{\text{eff}}^2$ 的和或差( $\Delta n_{\text{eff}}^1 \pm \Delta n_{\text{eff}}^2$ )有关.当式(7)中的 $\Delta n_{\text{eff}}$ 项是两者之差时,其灵敏度就会增大,是两者之和时,其灵敏度会减小.但是因为 $k$ 值很小,所以 $\Delta n_{\text{eff}}$ 不论是两者和还是差对灵敏度的影响都很小,因此其灵敏度的变化很小.

## 2 传感器制作和实验装置

### 2.1 传感器的制作

腰椎放大结构的M-Z光纤传感器的制作过程如下:首先将两段处理好的端面平整的光纤放入熔接机(Fujikura FSM-60S),在自动模式下,两段光纤自动移至屏幕正中间并对齐,选择设置好的腰椎放大程序,然后点击放电按钮,一个腰椎放大结构就完成了.然后留出一定的长度 $L$ ,用同样的方式再熔接两个腰椎放大结构,如图1所示的三腰椎放大光纤传感器就制作完毕了.为了制作出完美的腰椎放大结构,熔接机的熔接参数设置如下:放电功率设置为标准,放电时间设置为1 800 ms,光纤端面间隔设置为15  $\mu\text{m}$ ,重叠量设置为150  $\mu\text{m}$ .此验证实验中,制作了三个双腰椎放大结构的光纤传感器,双腰椎放大结构之间的距离 $L$ 分别为2 cm和3 cm.为了方便起见,分别命名为MZI1和MZI2.三个腰椎放大结构之间的距离分别为2 cm和3 cm,整个级联长度为5 cm,命名为MZI3.

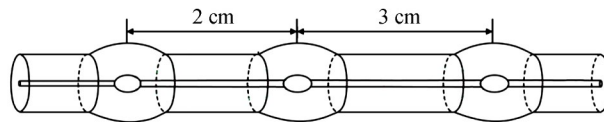


图1 三腰椎放大结构的M-Z光纤传感器示意图

Fig.1 The schematic diagram of the three-stage cascaded M-Z sensor with waist-enlarged structure

错位结构的M-Z光纤传感器的制作过程如下:熔接模式选择普通的SMS熔接模式,放电功率设置为标准+5,放电时间设置为1 500 ms,光纤端面间隔设置为10  $\mu\text{m}$ ,重叠量设置为15  $\mu\text{m}$ ,错位量约4  $\mu\text{m}$ .将两段处理好的端面平整的光纤放入熔接机(Fujikura FSM-60S),使用手动马达驱动方式,将两段光纤在X视场上下错开固定长度,Y视场保持对齐.然后回到主界面按下ARC放电键,等待熔接机自动熔接,这样一个错位结构就完成了.然后留出一定的长度 $L$ ,再重复上述步骤两次,三个错位结构M-Z干涉仪就完成了,三个错位结构之间的距离 $L$ 分别为2 cm和3 cm,如图2所示.此验证实验中,制作了三个双错位结构的光纤传感器,两个错位结构之间的距离 $L$ 分别2 cm和3 cm.为了方便起见,分别将其命名为MZI1和MZI2.三个错位结构之间的距离分别为2 cm和3 cm,整个级联长度为5 cm,命名为MZI3.

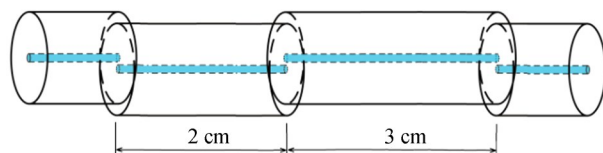


图2 三错位结构的M-Z光纤传感器示意图

Fig.2 The schematic diagram of the three-stage cascaded M-Z sensor with misaligned structure

## 2.2 光谱对比分析

理论上两个MZI级联结构的干涉光谱不仅包含单个MZI的干涉波峰/波谷,同时也包含由两个MZI的光程和或差产生的新波峰/波谷,这些新波峰/波谷的灵敏度可能会与其他的波峰/波谷不一样,通过实验对其进行了研究.

如图3(a)所示,将两组双腰椎放大结构的叠加光谱图的数值进行线性转化、相加,最后再转化回对数dB坐标.将处理好后的数据绘制成图,并与三腰椎放大结构的光谱图进行比较.将两组错位结构进行如上述的相同处理,然后与三错位结构的光谱图进行比较,如图3(b)所示.黑色线为MZI3,红色线为MZI1和MZI2的叠加.

从图中可以看到三腰椎放大级联结构的光谱图并不简单等于几个双腰椎放大结构的叠加,说明在光传输过程中存在其他的包层模式.此外,如图3(a)中MZI1和MZI2的叠加光谱在A处有一个波谷,在B处有一个波谷,而在这两个波谷之间,对于三级级联的腰椎放大结构的MZI3多出来了一个波谷C.在其他波段处也有同样的情况.故可以推断出三级级联比二级级联要多出一些参与干涉的模式.三级错位级联结构的传感器也具有同样的现象,如图3(b).

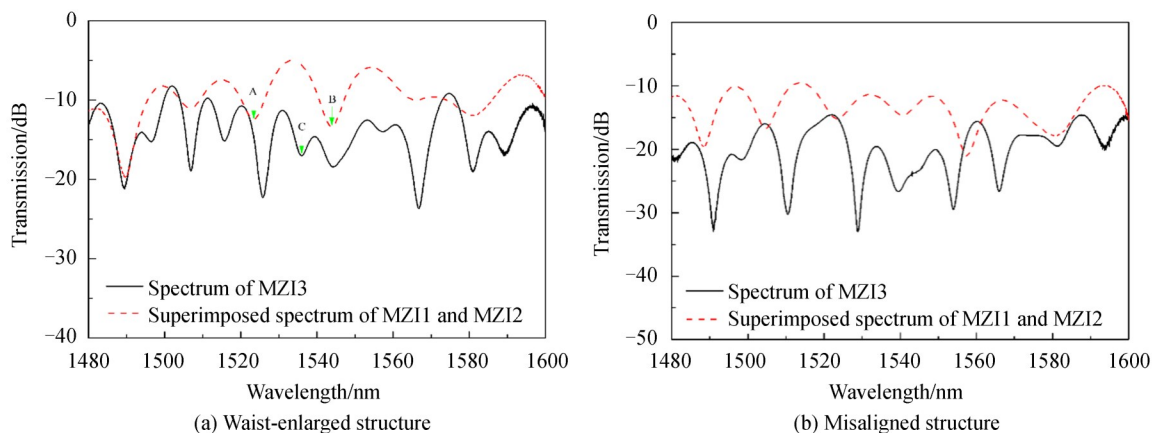


图3 两个二级级联结构的叠加光谱图和三级级联结构的光谱

Fig.3 Superposition spectra of two two-stage cascaded structures and spectra of three-stage cascade structures

## 2.3 实验装置

应变测量的实验装置如图4所示,整个传感系统分别由宽带光源(波长范围为1460~1620 nm)、M-Z光纤传感器、平移台、以及光谱仪(OSA, AQ6370C,最大分辨极限为0.02 nm)组成.将传感器平置于平移台的两个夹具之间,两平移台之间的初始距离为130 mm,开始时光纤传感器保持自然拉直状态,将一侧的夹具固定,通过旋转另一侧夹具的旋钮来调节两平移台之间的距离,从而改变被夹具夹住的光纤传感器的状

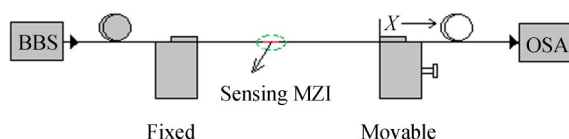


图4 应变测量的实验装置示意图

Fig.4 Schematic diagram of the experimental device of strain

态.当夹具远离时,光纤传感器被进一步拉伸从而产生应变,平移台旋钮的最小位移距离为0.01 mm,实验中每次移动4小格即0.04 mm,相当于应变每次增加308  $\mu\epsilon$ .同时为减少误差,室内气温保持在25  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3 腰椎放大结构多级级联的结果对比

#### 3.1 二级级联结构的实验结果

2 cm的双腰椎放大结构级联的光谱图与3 cm的几乎一致,灵敏度也相同,选取长度为3 cm的双腰椎放大结构级联的光谱图做描述,其透射光谱如图5(a)所示.为了更加准确比较传感器的性能,选取1562 nm处的光谱图进行局部放大去分析其性能.从透射谱中可看出,随着传感器被拉伸,所选择的波谷的波长有规律的向着短波的方向漂移.整个过程中,传感器被拉伸了0.28 mm,波谷的波长由1563.2 nm向左漂移至1561.3 nm,漂移量为1.9 nm,波长随着应变的变化均匀地移动.

将漂移后的各个波谷量记录,并与应变量一一对应,通过最小二乘法的线性拟合,可以得到波长与应变量的对应关系.如图5(b)所示,3 cm双腰椎放大级联所选波谷对应变的灵敏度为 $-0.76 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ,拟合优度判定系数为0.991,表示波长与应变之间线性度很好.

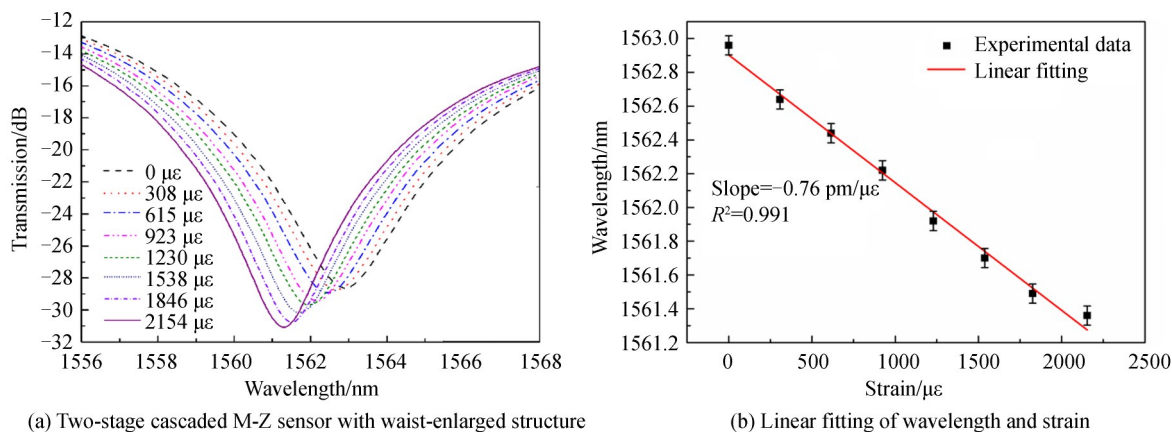


图5 双腰椎放大结构的M-Z光纤传感器的局部放大光谱和波长与应变的线性拟合

Fig.5 Local amplification spectra and linear fitting of wavelength and strain of the two-stage cascaded M-Z sensor with waist-enlarged structure

#### 3.2 三级级联结构的实验结果

三腰椎放大结构级联的传感器应变测量的透射光谱如图6(a)所示.为了更加准确比较传感器的性能,选取1502 nm处的光谱图进行局部放大去分析其性能.从透射谱中可看出,随着传感器被拉伸,光谱有规律

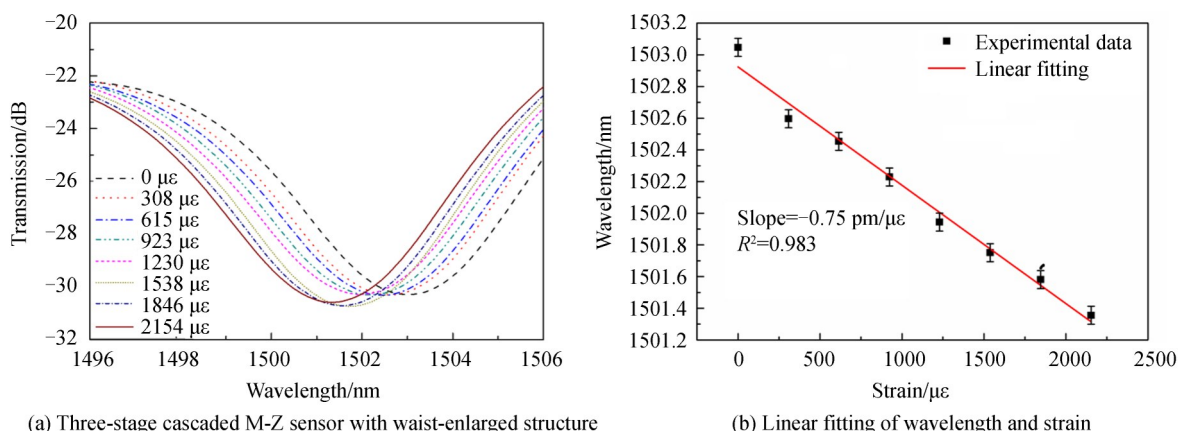


图6 三腰椎放大结构的M-Z光纤传感器的局部放大光谱和波长与应变的线性拟合

Fig.6 Local amplification spectra and linear fitting of wavelength and strain of the three-stage cascaded M-Z sensor with waist-enlarged structure

的向着短波的方向漂移. 整个过程中, 传感器被拉伸了 0.28 mm, 波谷波长由 1 503.2 nm 向左漂移至 1 501.356 nm, 漂移量为 1.844 nm, 规律性非常好. 如图 6(b) 所示, 三腰椎放大级联所选波谷对应变的灵敏度为  $-0.75 \text{ nm}/\mu\epsilon$ , 拟合优度判定系数为 0.983, 表示波长与应变之间线性度很好. 二级级联的 MZI 的灵敏度 ( $-0.76 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ) 和三级级联的 MZI 的灵敏度 ( $-0.75 \text{ nm}/\mu\epsilon$ ) 近似相等, 与式 (7) 理论分析结论相一致.

## 4 错位结构多级级联的结果对比

### 4.1 二级级联结构的实验结果

2 cm 双错位结构级联的光谱图与 3 cm 的几乎一致, 灵敏度也相同, 选取长度为 3 cm 的双错位结构级联的光谱图做描述, 其透射光谱如图 7(a) 所示. 为了更加准确比较传感器的性能, 选取 1 521 nm 处的光谱图进行局部放大去分析其性能. 从图中可以看出, 在整个拉伸过程中, 所选波谷的波长从 1 522.9 nm 向左漂移到了 1 521.4 nm, 漂移量为 1.5 nm.

将漂移后的各个波谷量记录, 并与应变变量一一对应, 通过最小二乘法的线性拟合, 可以得到波长与应变量的对应关系. 如图 7(b) 所示, 所选波谷对应变的灵敏度为  $-0.73 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 拟合优度判定系数为 0.975, 表示波长与应变之间线性度很好.

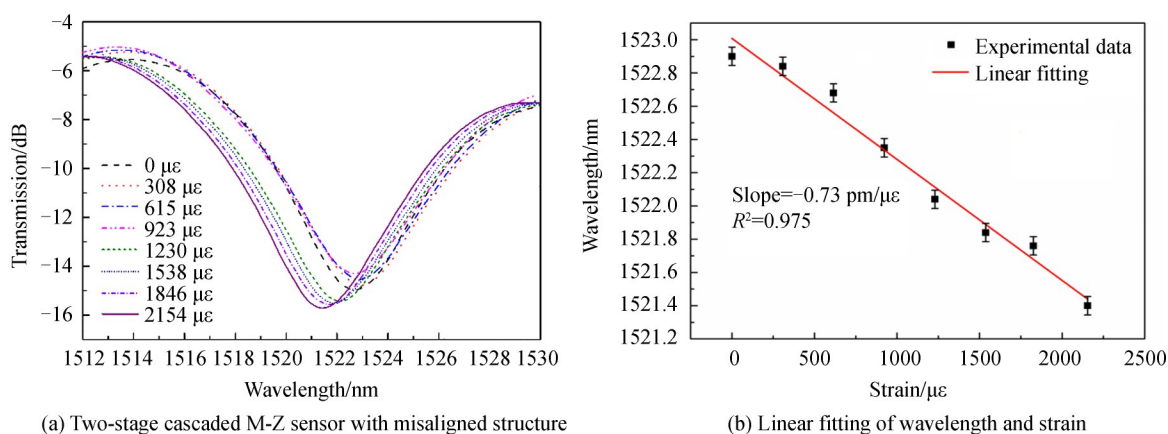


图 7 双错位结构的 M-Z 光纤传感器的局部放大光谱和波长与应变的线性拟合

Fig. 7 Local amplification spectra and linear fitting of wavelength and strain of the two-stage cascaded M-Z sensor with misaligned structure

### 4.2 三级级联结构的实验结果

三错位级联结构的传感器应变测量的透射光谱如图 8(a) 所示. 为了更加准确比较传感器的性能, 选择

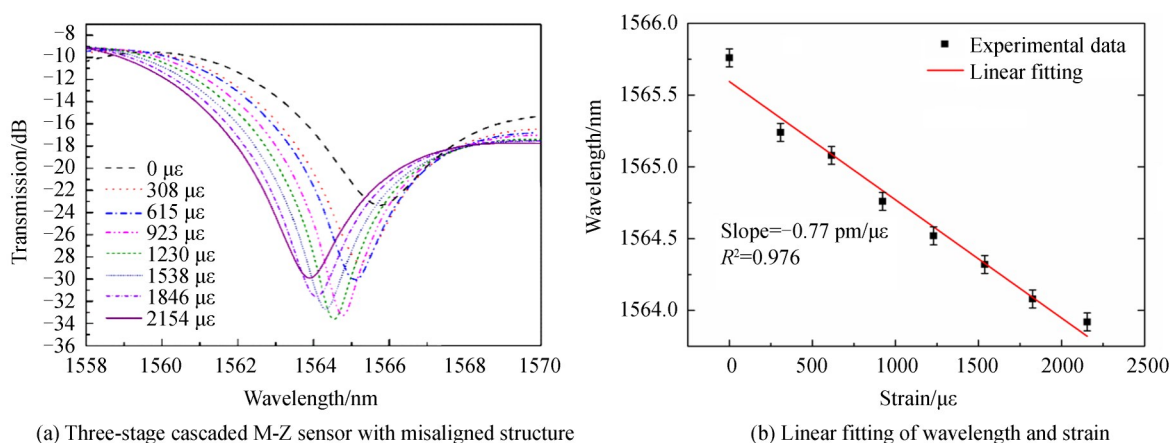


图 8 三错位结构的 M-Z 光纤传感器的局部放大光谱图和波长与应变的线性拟合

Fig. 8 Local amplification spectra and linear fitting of wavelength and strain of the three-stage cascaded M-Z sensor with misaligned structure

1 509.2 nm 处光谱图进行局部放大,并进行分析.从透射谱中可看出,随着传感器被拉伸,光谱有规律的向着波长小的方向漂移.整个过程中,应变共增加了 2 054  $\mu\epsilon$ ,波谷波长由 1 553.45 nm 向左漂移至 1 550.59 nm,漂移量为 1.84 nm,规律性非常好.如图 8(b)所示三错位结构级联所选波谷对应变的灵敏度为  $-0.77 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,拟合优度判定系数为 0.976,表示波长与应变之间线性度很好.对于错位结构的 MZI 来说,二级级联的 MZI 的灵敏度 ( $-0.73 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ) 和三级级联的 MZI 的灵敏度 ( $-0.77 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ) 近似相等,与式(7)理论分析结论相一致.

## 5 结论

本文对腰椎放大结构和错位结构的三级级联 M-Z 进行了研究,同时对应变传感特性进行了研究,并与二级级联做出了对比.实验中,采用自动熔接模式制作了双腰椎放大结构的 M-Z 光纤传感器和三腰椎放大结构的 M-Z 光纤传感器;采用手动模式制作了双错位结构的 M-Z 光纤传感器和三错位结构的 M-Z 光纤传感器.实验结果表明,双腰椎放大的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.76 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,三腰椎放大的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.75 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ;双错位结构的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.73 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,三错位结构的 M-Z 光纤传感器的应变灵敏度为  $-0.77 \text{ pm}/\mu\epsilon$ .因此,与二级级联结构相比,三级级联结构在灵敏度上并未有明显的提升,说明多级级联的 M-Z 传感器并不能有效提高灵敏度.

### 参考文献

- [1] ZHANG Yun-shan, ZHANG Wei-gang, CHEN Lei, *et al.* High sensitivity optical fiber liquid level sensor based on a compact MMF-HCF-FBG structure[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, **29**(5): 055104.
- [2] GAO Han, HU Hai-feng, ZHAO Yong, *et al.* Highly-sensitive optical fiber temperature sensors based on PDMS/silica hybrid fiber structures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, **284**: 22-27.
- [3] GONG Jia-qi, SHEN Chang-yu, XIAO Yi-ke, *et al.* High sensitivity fiber temperature sensor based PDMS film on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optical Fiber Technol.* 2019, **53**: 1-4.
- [4] XIE Ming-yang, GONG Hua-ping, ZHANG Jun, *et al.* An optical fiber liquid level sensor realized by cascading two spherical-shape structures[J]. *Optik*, 2019, **191**: 10-14.
- [5] YU Xiu-juan, BU Dan, CHEN Xue-feng, *et al.* Lateral stress sensor based on an in-fiber Mach - Zehnder interferometer and fourier analysis[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, **8**(2):1-10.
- [6] SUN Hao, YANG Shen, ZAHNG Xiao-lei, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optical fiber Mach - Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2015, **340**:39-43.
- [7] CHEN Xin-ying, CHEN Hao, WU Rui, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and transversal loading by using a modified fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(7): 2776 - 2781.
- [8] HARRIS J, LU P, LAROCQUE H, *et al.* In-fiber Mach - Zehnder interferometric refractive index sensors with guided and leaky modes[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2015, **206**:246-251.
- [9] YANG Rui, YU Yong-sen, CHEN Chao, *et al.* S-tapered fiber sensors for highly sensitive measurement of refractive index and axial strain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(19): 3126-3132.
- [10] ZHENG Yang-zi, DONG Xin-yong, YANG Run-guang, *et al.* Magnetic field sensor with optical fiber bitaper-based interferometer coated by magnetic fluid[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, **14**(9):3148-3151.
- [11] ZHAO Yong, LI Xue-gang, CAI Lu. A highly sensitive Mach-Zehnder interferometric refractive index sensor based on core-offset single mode fiber[J]. *Sensors Actuators A Physics*. 2015, **223**:119-124.
- [12] DONG Shan-dong, DONG Bo, YU Chang-yuan, *et al.* High sensitivity optical fiber curvature sensor based on cascaded fiber interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36** (4): 1125-1130.
- [13] ZHAO Yong, CAI Lu, HU Hai-feng. Fiber-optic refractive index sensor based on multi-tapered SMS fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(11): 6348-6353.
- [14] GAO Ye, LIU Hui-ying, TONG Zheng-rong, *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a Mach-Zehnder interferometer cascaded with a fiber Bragg grating[J]. *Optics Communications*, 2015, **342**: 180-183.
- [15] CAO Zhi-gang, ZHANG Zhao, JI Xiao-hun, *et al.* Strain-insensitive and high temperature fiber sensor based on a Mach-Zehnder modal interferometer[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**: 24-27.
- [16] SUN Ming-ming, JIN Yong-xing, DONG Xin-yong. All-fiber Mach-Zehnder interferometer for liquid level measurement [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(7): 3984-3988.
- [17] YUAN Shuo, TONG Zheng-rong, ZHAO Jun-fa, *et al.* High temperature fiber sensor based on spherical-shape structures with high sensitivity[J]. *Optics Communications*, 2014, **12**(1): 154-157.
- [18] GONG Hua-ping, YANG Xiao, NI Kai, *et al.* An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer[J]. *IEEE Photonics Letters*, 2014, **26**(1):22-24.