



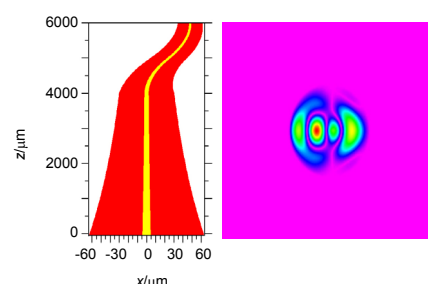
新型高灵敏度微纳光纤应变传感器

夏亮¹, 邢增善², 余健辉², 卢惠辉³, 关贺元³,
钟永春^{1,2*}, 陈哲³

¹ 光电信息与传感技术广东省普通高校重点实验室(暨南大学), 广州 510632;

² 暨南大学光电工程系, 广州 510632;

³ 广东省光纤传感与通信技术重点实验室(暨南大学), 广州 510632



摘要: 本文使用火焰熔融拉锥的方法, 通过控制火焰的高度及拉锥速度, 成功制备了具有微拱型渐变区的新微纳光纤器件。理论计算表明, 微拱型渐变区有利于激发出强度相当的高阶微纳光纤传输模式, 从而增加了传输光谱中由模间干涉导致的透射谷的深度。实验表明, 该新型微纳光纤器件透射谷深度达到 18 dB, 当轴向应变增加时, 透射谷向短波长方向移动, 轴向应变灵敏度为 $-13.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 比光纤光栅应变传感器提高一个数量级, 是传统直线型微纳光纤灵敏度的 3 倍, 线性度为 99.15%。这种具有微拱型渐变区的微纳光纤器件具有灵敏度高、机械性能好以及便于与现有光纤系统集成等优点。并且结构简单, 易于制备, 可广泛应用于各种物理、化学和生物传感和探测领域。

关键词: 火焰熔融拉锥; 光纤应变传感器; 模间干涉; Rsoft 仿真

中图分类号: TN253; TP212

文献标志码: A

High sensitivity strain micro-fiber sensor

Liang Xia¹, Zengshan Xing², Jianhui Yu², Huihui Lu³, Heyuan Guan³,
Yongchun Zhong^{1,2*} and Zhe Chen³

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou 510632, China; ²Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

³Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract: A microfiber strain sensor with arched transition region was demonstrated. By controlling the flame size and tapering speed, a novel micro fiber with arched transition region was successfully fabricated. Considerable high order propagation modes of microfiber were excited by the arched transition region, resulting in increasing the depth of valley in the transmission spectrum of microfiber. The depth of the transmission valley is up to 18dB. Furthermore, when the axial strain increased, the position of the transmission valley was blue shift, the linearity is 99.15% and the axial strain sensitivity was $-13.1 \text{ pm}/\mu\epsilon$, which was one order magnitude larger than that of traditional fiber strain sensors based on Bragg grating. This kind of microfiber with arched transition region has many advantages, such as high sensitivity, good mechanical performance, compatibility to traditional optical fiber systems, and easy to be fabricated. It can be widely used in various physical, chemical and biological sensing and detection fields.

收稿日期: 2017-08-25; 收到修改稿日期: 2017-10-08

*E-mail: ychzhong@163.com

Keywords: flame melting tapering; optical fiber strain sensor; mode-mode interference; Rsoft simulation

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.009

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(11): 1094–1100

1 引言

随着建筑行业的迅速发展,桥梁、隧道、高楼大厦、大型水电工程、石油平台等工程日益增多。同时,为了保障基础工程和人民财产的安全,对这些工程的结构健康监测就特别重要^[1]。传统的应变片电测技术由于其抗电磁干扰差、防水性差以及本身的零漂缺陷导致其不能满足这些工程结构的长期监测的要求,而光纤应变传感器具有抗电磁干扰能力强、耐腐蚀性好等优点,很好地解决了应变片不能长期监测的缺点。

传统的光纤应变传感器是基于光纤光栅的应变传感器,但是由于光纤光栅的周期很短,因此其应变灵敏度较低。使用标准单模光纤制作的光纤光栅的灵敏度仅为 $1.15 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ^[2,3],使用聚合物光纤制作的光纤光栅灵敏度可达到 $1.48 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ^[3]。由此可见,光纤光栅应变传感器的应变灵敏度有待提高。

近几十年来,随着光纤微加工技术的不断改进,将光纤进行微加工处理后得到的微纳光纤不仅保持着光纤原有的优点,还得到了更高的灵敏度、更快的响应速度和更低的能量消耗等特性^[4-7]。微纳光纤同时具备了尺寸小、倏逝场强及对外界参量响应灵敏度高等优点,因此被广泛应用于各种物理、化学及生物传感及探测领域。

微纳光纤传感器的结构主要分微纳光纤环、直线型微纳光纤传感器、马赫—曾德尔干涉仪和微纳光纤布拉格光栅等^[8-15]四种,它们应用到的传感领域主要有折射率、温度、湿度、应变、电流、磁场等。

2014年,浙江大学的 Li^[16]等使用火焰熔融拉锥技术制作了直径为 $2.5 \mu\text{m}$ 的微纳光纤,应用到应变传感领域,其实验得到的应变灵敏度为 $4.84 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。这种微纳光纤应变传感器的优点是制作简单,但是由于采用了直径缓变的直线型渐变区,所激发的微纳光纤传输模式主要为 LP₀₁ 模,高阶传输模式所占的光强比例很小,因此该结构的传输光谱中透射谷的深度很小,其深度小于 3 dB,不利于进行探测。为了得到较深的透射谷,2009年,Queen's University 的 Tian^[17]等在单模光纤上制作了马赫—曾德尔干涉结构,使用光纤熔接机在单模光纤上制作了两个直径快速变化的拉锥区,利用两个拉锥区之间的单模光纤作为传感区域,

陡峭的渐变区增大了模式转换损耗,从而激发出大量的光纤高阶传输模,并且模式强度相当,因此增大了传输光谱的透射谷深度(达到 15 dB),但是其应变灵敏度仅为 $2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。另一种增加传输光谱透射谷深度的方法是制作微纳光纤光栅,2013年,浙江大学的 Gu^[18]等人使用纳米压印技术制作了微纳光纤布拉格光栅,其透射谷深度约为 10 dB,布拉格光栅的周期性决定了其应变灵敏度与普通单模光纤光栅相当,仅为 $2.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。因此微纳光纤应变传感器的透射谷深度及灵敏度有待提高。

本文使用一种火焰熔融拉锥技术制作了一种微纳光纤,通过控制火焰高度及拉锥速度,成功制备了具有微拱型渐变区的微纳光纤,微拱型的渐变区激发了强度相当的高阶传输模式,由于传输模式的强度相当,大大提高了模间干涉的可见度,加深了传输光谱中透射谷的深度,可达到 18 dB。当增加微纳光纤之间的轴向应变时,微拱型渐变区的形状变化也导致了所激发的高阶微纳光纤模式的相位变化,从而提高了微纳光纤应变传感器的灵敏度。这种具有微拱型渐变区的微纳光纤器件具有高灵敏度、良好的机械性能以及便于与现有光纤系统集成等优点,并且结构简单,易于制备,可以广泛应用于各种物理化学和生物传感领域。

2 样品制作

本实验中使用的是标准单模光纤,它的包层直径是 $125 \mu\text{m}$,纤芯直径是 $8.3 \mu\text{m}$ 。通过火焰熔融拉锥的方式制作成微纳光纤。制作过程如下:首先,用剥线钳刮去一部分光纤的涂覆层(长度大约为 2 cm~3 cm)并将光纤的两端固定在拉锥机上。使用酒精灯作为热源,光纤受到火焰加热后呈现熔融的状态,控制拉锥的速度,使光纤缓慢拉长得到微纳光纤。由于火焰的温度梯度变化,使得火焰加热区域产生向上的气流,气流的作用使得拉锥区域形成向上的拱起;由于残余应力的原因,在微纳光纤冷却之后,形成了一个微拱型的直径渐变区,通过控制火焰的高度、拉锥的速度与步长,可以控制微拱型渐变区的形状,拉锥机的工作示意图如图 1 所示。

火焰熔融拉锥得到的微纳光纤的理论形状图如图

2(a)所示,它主要由三部分组成:1)标准光纤(即未拉伸区域);2)锥形过渡区域;3)锥腰区域(即平坦区)。

实验中,通过控制火焰的高度、拉锥的速度与步长,使得微纳光纤的部分渐变区呈微拱型。由于残余应力的影响,光纤绷直后该微拱型渐变区依然存在。把绷直后的微纳光纤放置于蔡司显微镜下测量,渐变区分成了两个部分:1)当直径从 $125\ \mu\text{m}$ ~ $60\ \mu\text{m}$ 之间变化时,渐变区的中心线呈直线(即直线型渐变区);2)当渐变区直径在 $60\ \mu\text{m}$ ~ $26.51\ \mu\text{m}$ 之间变化时,其中心线产生了横向位移,实验测得横向位移为 $36\ \mu\text{m}$ (微纳光纤的微拱型渐变区如图2(b)所示,为了突出微拱型渐变区中心线的横向位移,图2(b)的横坐标与纵坐标的比例为1:3)。微纳光纤的锥腰(即平坦区)直径为 $26.51\ \mu\text{m}$,长度为 $6\ \text{mm}$ 。

图3为带有拱型渐变区的微纳光纤应变传感实验装置图,实验装置中使用Fianium公司生产的高功率超连续谱光源作为光源(型号:S450-4;工作波长: $400\ \text{nm}$ ~ $2000\ \text{nm}$),使用日本横河公司的光谱分析仪

3 光纤传输光谱与仿真分析

图3为带有拱型渐变区的微纳光纤应变传感实验装置图,实验装置中使用Fianium公司生产的高功率超连续谱光源作为光源(型号:S450-4;工作波长: $400\ \text{nm}$ ~ $2000\ \text{nm}$),使用日本横河公司的光谱分析仪

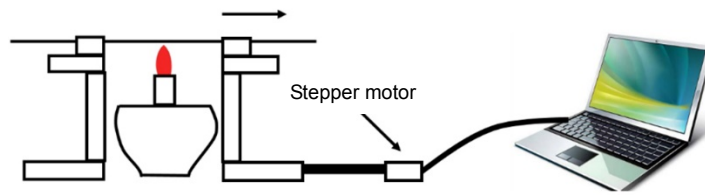


图1 火焰熔融拉锥形成微纳光纤的工作示意图。

Fig. 1 The sketch of the micro-fiber formed by flame melting tapering.

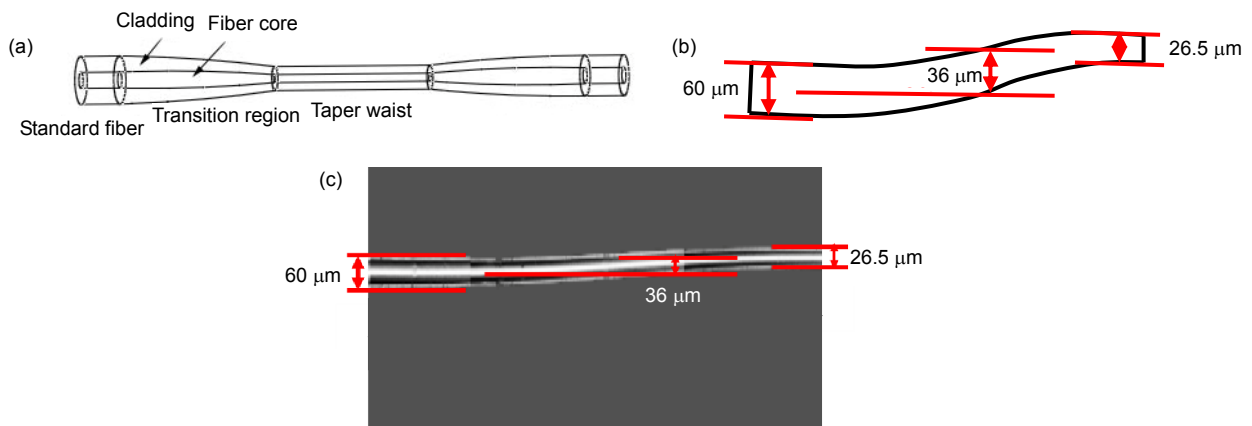


图2 (a) 微纳光纤的示意图。(b) 在蔡司显微镜下微纳光纤微拱型渐变区形貌。

(c) 微拱型渐变区示意图。

Fig. 2 (a) The sketch of micro-fiber. (b) Microscope image of the arched transition region. (c) The sketch of arched transition region.

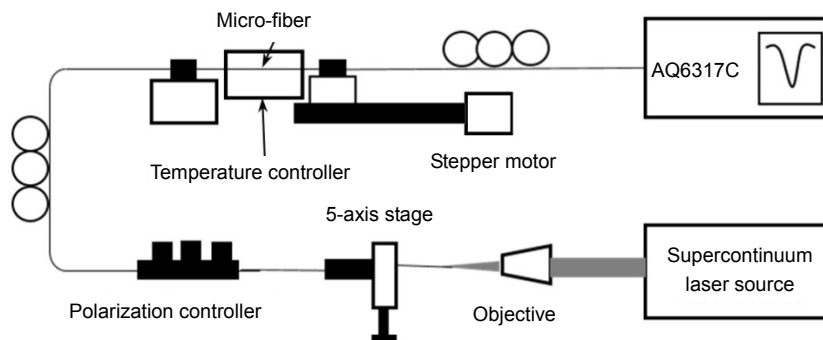


图3 带有拱型渐变区的微纳光纤应变传感实验装置图。

Fig. 3 The strain sensing device diagram of arched micro-fiber.

(ANDO AQ6317C)测量微纳光纤的传输光谱；实验中，微纳光纤一端用环氧树脂固定在固定台上，另一端用环氧树脂固定在电控平移台上，平移台平移精度小于 $0.1 \mu\text{m}$ ，通过电控平移台在微纳光纤轴向的移动改变微纳光纤的轴向应变。微纳光纤被置于管式温控炉内，控制微纳光纤的温度。

室温下，图 2(b)中的微纳光纤样品在预置绷直状态下(即轴向应变为 0)，其传输光谱如图 4 所示。传输光谱呈现两个主要的透射谷，位置分别为 1246.4 nm

和 1505.4 nm 。其中波长为 1246.4 nm 的透射谷深度为 18 dB ，远大于具有直线型渐变区的微纳光纤器件^[16]。

使用 Rsoft 软件的 BeamPROP 组件，通过有限差分光束传播法，可计算出渐变区的形貌对所激发的高阶微纳光纤传输模式的影响。图 5(a)为直线型渐变区示意图，计算中假设单模光纤包层直径为 $125 \mu\text{m}$ ，纤芯直径为 $8.3 \mu\text{m}$ ，渐变区的直径为指数衰减，渐变区中心线与原单模光纤中心线成一条直线，微纳光纤平坦区直径为 $26.51 \mu\text{m}$ ，渐变区长度为 6 mm ；当输入

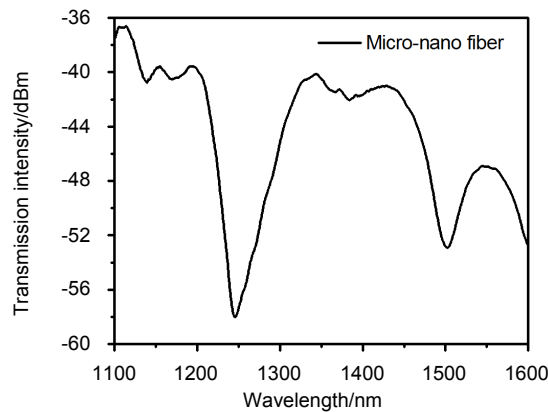


图 4 拱形渐变区的微纳光纤的透射光谱图。

Fig. 4 The transmitted spectrum of arched micro-fiber.

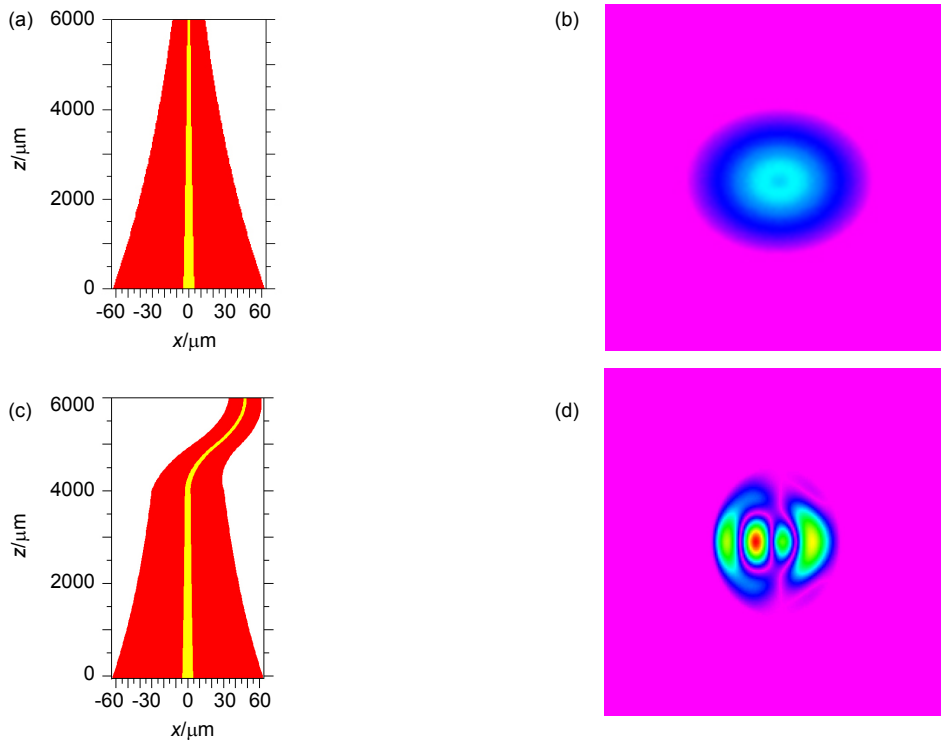


图 5 (a) 直线型渐变区示意图。(b) 直线型渐变区末端输出模场强度图。(c) 微拱型渐变区示意图。(d) 微拱型渐变区末端输出模场强度图。

Fig. 5 (a) The sketch of linear transition region. (b) The output mode filed of linear transition region. (c) The sketch of arched transition region. (d) The output mode filed of arched transition region.

波长为 1246.4 nm,输入模式为单模光纤基模时,在渐变区末端的输出模场如图 5(b)所示。计算表明,直线型渐变区激发了直径为 26.51 μm 的微纳光纤的 LP01 模及 LP02 模,两个模式的光强比例为 97.81:1.64。由此可见,直线型渐变区有利于单模光纤传输基模向微纳光纤 LP01 模的转变,大大减小了 LP02 模的光强,从而抑制了模间干涉的产生,减小了透射谷的深度。

图 5(c)为微拱型渐变区示意图,微拱型渐变区分为两个部分,光纤直径从 125 μm 下降到 60 μm 的部分与直线型渐变区一致,光纤直径从 60 μm 下降到 26.51 μm 的部分中,其中心线相对于原来的单模光纤中心线有 48 μm 的横向错位;当输入波长为 1246.4 nm,输入模式为单模光纤基模时,在渐变区末端的输出模场如图 5(d)所示。计算表明微拱型渐变区激发了微纳光纤的 LP01、LP02、LP03、LP11、LP12 及 LP21 等模式,各个模式的光强比例为 10.15: 9: 9.7: 21.65: 25.86: 11.15。由此可见,微拱型渐变区有利于微纳光纤高阶传输模式的激发,并使得所激发的高阶传输模式光强相当,从而增加了透射谷的深度,有利于制作基于模间干涉的光纤传感器件。实验测得具有微拱型渐变区的微纳光纤透射光谱在波长为 1246.4 nm 处的透射谷深度大至 18 dB,远大于以前工作中直线型渐变区微纳光纤的透射谷深度,与理论相符。

4 应变传感实验

在应变传感实验中,利用电控平移台使微纳光纤一端在轴向产生微位移,从而改变微纳光纤轴向应变,电控平移台的移动步长为 1.5 μm 。微纳光纤的拉锥区长度(包括渐变区和平坦区)为 18 mm,光纤两个固定点之间的距离为 30 mm。由于标准光纤的直径为

125 μm ,远大于微纳光纤的直径(26.5 μm),忽略标准光纤的轴向应变,利用相对位移量公式 $\Delta\varepsilon = \Delta l / l$, (其中 $\Delta l = 1.5 \mu\text{m}$, $l = 18000 \mu\text{m}$),可计算得到平移台平移一个步长所对应的微纳光纤轴向应变量为 $\Delta\varepsilon = 83 \mu\varepsilon$ 。

实验制作了两个带有不同微拱型渐变区的微纳光纤样品,其中样品 1 的渐变区形状如图 2(b)所示,微纳光纤直径为 26.51 μm ,其微拱型渐变区的横向错位为 36 μm ;样品 2 的微纳光纤直径为 16.45 μm ,拱型渐变区的横向错位为 15 μm 。

图 6 给出了室温下,在 1150 nm~1350 nm 范围内,样品 1 的透射光谱随应变量的变化。随着应变量的增大,微纳光纤透射谷向短波长方向移动,如图 6(a)所示。反之,随着应变量减小,微纳光纤透射谷向长波长方向移动,如图 6(b)所示。

图 7(a)是样品 1 透射谷位置随应变变量变化的关系曲线,图中黑色方块给出的是应变增加时透射谷位置与应变量的变化关系,红色圆圈给出的是当应变减小时,透射谷位置与应变量的变化关系。由图可知,随着应变量的变化,透射谷的位置变化有很好的重复性。图中黑色实线为应变增加时的线性拟合曲线,红色虚线为应变减小时的线性拟合曲线,其应变灵敏度为 -13.1 pm/ $\mu\varepsilon$,线性度分别为 99.15%和 99.21%。该微纳光纤器件的应变传感响应重复性好、线性度高,并且其应变灵敏度比传统光纤光栅传感器提高了一个数量级,是传统微纳光纤应变传感器的 3 倍。

图 7(b)是样品 2 透射谷位置随应变变量变化的关系曲线,图中黑色方块给出的是应变增加时透射谷位置与应变量的变化关系,红色圆圈给出的是当应变减小时,透射谷位置与应变量的变化关系。由图可知,

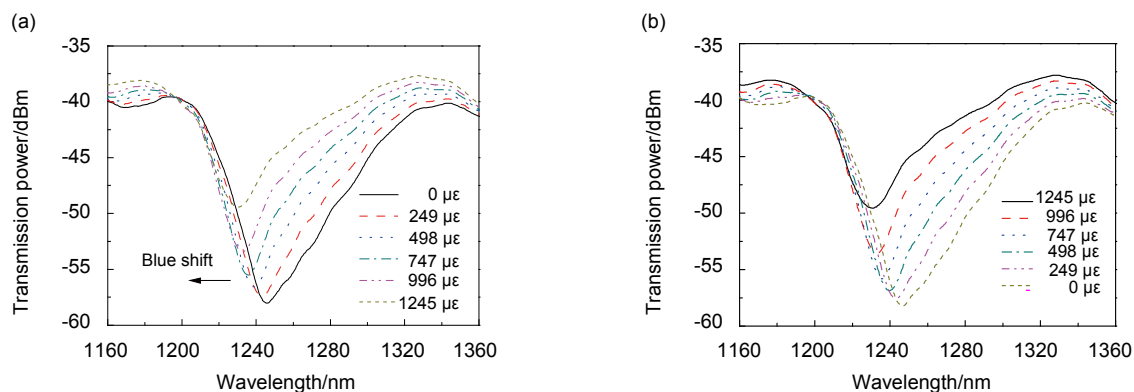


图 6 微纳光纤的透射光谱随应变量的变化。(a) 应变增加。(b) 应变减小。

Fig. 6 The spectra of the microfiber at different strains. (a) Strain increasing. (b) Strain decreasing.

随着应变量的变化,透射谷的位置变化有很好的重复性。图中黑色实线为线性拟合曲线,其应变灵敏度为 $-9.0 \text{ pm}/\mu\epsilon$,线性度分别为 99.73%和 99.55%。

微纳光纤的应变灵敏度受到微拱型渐变区形状的影响,当渐变区横向错位减小(即弯曲度降低)时,微纳光纤的应变灵敏度下降。

具有拱型渐变区的微纳光纤各模式之间的干涉所形成的透射谷可以简化成两种模式之间的干涉过程,根据干涉的原理,其干涉强度可由下式计算得到:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi_{\text{总}}), \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi_{\text{总}}$ 是两个传输模式之间的相位差,这个相位差受两个因素的影响,一个是微纳光纤的直径和平坦区的长度,另一个是拱型渐变区的形状。

$$\Delta\phi_{\text{总}} = \Delta\phi_{\text{平坦区}} + \Delta\phi_{\text{微拱型渐变区}}. \quad (2)$$

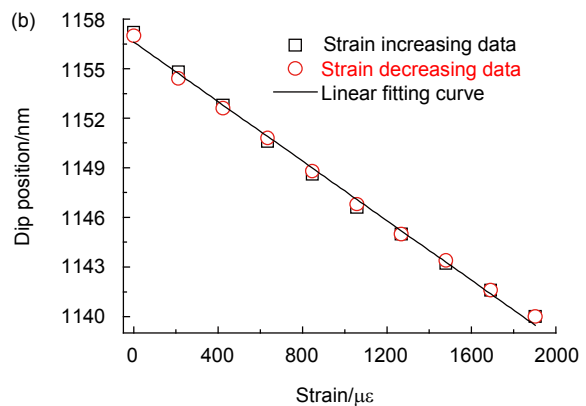
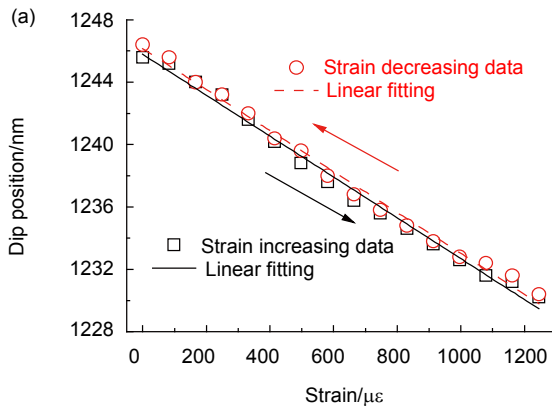


图 7 透射谷位置与应变量的变化关系曲线。(a) 样品 1(直径 $26.51 \mu\text{m}$, 微拱型渐变区横向错位 $36 \mu\text{m}$)。 (b) 样品 2(直径 $16.54 \mu\text{m}$, 微拱型渐变区横向错位 $15 \mu\text{m}$)。

Fig. 7 The relationship of the dip position and strain. (a) Sample 1 (diameter of micro-fiber $26.51 \mu\text{m}$, offset of transition $36 \mu\text{m}$). (b) Sample 2 (diameter of micro-fiber $16.54 \mu\text{m}$, offset of transition $15 \mu\text{m}$).

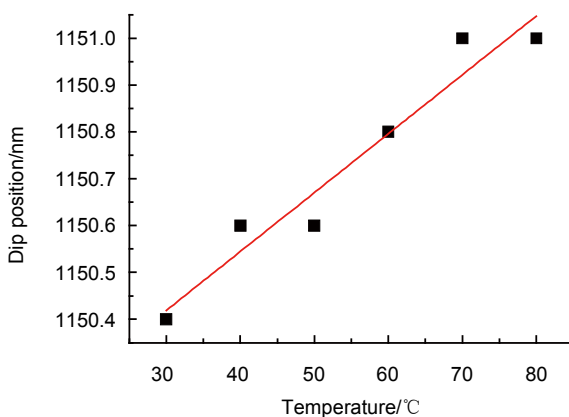


图 8 透射谷位置与温度的变化关系曲线。

Fig. 8 The relationship of the dip position and strain.

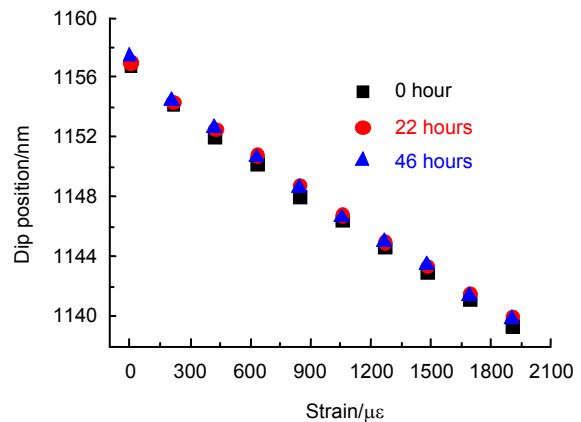


图 9 不同时间测量的透射谷位置与应变量的变化关系曲线。

Fig. 9 Repeatability of the relationship of the dip position and strain.

与直线型渐变区的微纳光纤器件相比,微拱型渐变区的形状变化增加了不同传输模式之间的相位差变化。微拱型渐变区的形状变化对总相位差变化的贡献大大增大了微纳光纤传感器的应变灵敏度。使其应变灵敏度比传统微纳光纤应变传感器提高了 3 倍。当微拱型渐变区的横向错位量增加时,应变的增加更多地作用在微拱型渐变区的形状变化上,提高了 $\Delta\phi_{\text{微拱型渐变区}}$ 的变化率,从而使得传感器的应变灵敏度提高。

5 温度对传感器的影响及传感器可重复性分析

为了测量温度对传感器的影响,测量了样品 2 在应变恒定为 $634.38 \mu\epsilon$ 时,透射谷位置随温度的变化(温

度变化范围 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$),如图 8 所示。图 8 中红色直线是线性拟合曲线,随着温度的增加,透射谷位置产生红移,温度灵敏度为 $12.57\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度为 92.857% 。

图 9 给出了传感器在持续负载及室温条件下 48 h 内三次测量的透射谷位置与应变量变化关系曲线。由图可知,传感器的应变响应曲线并没有产生很大的变化,表现出很好的可重复性。但是由于测量系统的不稳定,使得测量结果产生误差,误差范围在 0.6 nm 之内。

6 结 论

本文使用火焰熔融拉锥的方法,通过控制火焰的高度及拉锥速度,成功制备了具有微拱型渐变区的新型微纳光纤器件。理论计算表明,微拱型渐变区有利于激发出强度相当的高阶微纳光纤传输模式,从而增加了传输光谱中由模间干涉导致的透射谷的深度。实验表明,该新型微纳光纤器件透射谷深度达到 18 dB 。当轴向应变量增加时,透射谷向短波长方向移动,轴向应变灵敏度可达到 $-13.1\text{ pm}/\mu\text{e}$,比光纤光栅应变传感器提高一个数量级,是传统直线型微纳光纤灵敏度的 3 倍,并且其线性度为 99.15% 。实验还表明,随着微拱型渐变区的横向错位量增加,传感器的应变灵敏度增加。传感器的温度灵敏度仅为 $12.57\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,线性度为 92.857% 。传感器在持续负载及室温条件下,48 h 内应变响应曲线表现出很好的可重复性,系统测量误差为 0.6 nm 。这种具有微拱型渐变区的微纳光纤器件具有灵敏度高、机械性能好以及便于与现有光纤系统集成等优点。而且它结构简单,易于制备,可广泛应用于各种物理、化学和生物传感和探测领域。

基金项目

国家自然科学基金项目(61275046, 61475066, 61405075, 61401176, 61505069, 61575084);广东省自然科学基金项目(2017A030313359, 2014A030313377, 2014A030310205, 2015A030306046, 2015A030313320, 2016A030311019, 2016A030313079, 2016A030310098);广东省科技计划项目(2012A032300016, 2014B010120002, 2014B010117002, 2015A020213006, 2015B010125007, 2016B010111003, 2016A010101017, 2017A010101013)。

参考文献

- 1 黄尚廉,陈伟民,饶云江,等. 光纤应变传感器及其在结构健康监测中的应用[C]// 第八届敏感元件与传感器学术会议论文集, 2003: 1-4.
- 2 Alwis L, Sun T, Grattan K T V. [INVITED] Developments in optical fibre sensors for industrial applications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, **78**: 62-66.
- 3 Liu H B, Liu H Y, Peng G D, et al. Strain and temperature sensor using a combination of polymer and silica fibre Bragg gratings[J]. *Optics Communications*, 2003, **219**(1-6): 139-142.
- 4 Tong Limin, Zi Fei, Guo Xin, et al. Optical microfibers and nanofibers: a tutorial[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(23): 4641-4647.
- 5 Brambilla G, Xu Fei, Horak P, et al. Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, **1**(1): 107-161.
- 6 Brambilla G. Optical fibre nanowires and microwires: a review[J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(4): 043001.
- 7 Wu P, Mei Z. Optical microfibers and nanofibers fabrication, properties and applications[C]// *International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks*, IEEE, 2012: 2728-2730.
- 8 Zhang Lei, Wang Pan, Xiao Yao, et al. Ultra-sensitive microfiber absorption detection in a microfluidic chip[J]. *Lab on A Chip*, 2011, **11**(21): 3720-3724.
- 9 Xu Fei, Horak P, Brambilla G. Optical microfiber coil resonator refractometric sensor[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(12): 7888-7893.
- 10 Guo Xin, Tong Limin. Supported microfiber loops for optical sensing[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(19): 14429-14434.
- 11 Guo Xin, Li Yuhang, Jiang Xiaoshun, et al. Demonstration of critical coupling in microfiber loops wrapped around a copper rod[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(7): 073512.
- 12 Wu Pinghui, Sui Chenghua, Ye Biqing. Modelling nanofiber Mach-Zehnder interferometers for refractive index sensors[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, **56**(21): 2335-2339.
- 13 Sulaiman A, Harun S W, Aryanfar I, et al. DC current sensing capability of microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Electronics Letters*, 2012, **48**(15): 943-945.
- 14 Yang Hongzhou, Ali M M, Islam M R, et al. Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, **228**: 62-68.
- 15 Fang X, Liao C R, Wang D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(7): 1007-1009.
- 16 Li Wei, Hu Zhifang, Li Xiyuan, et al. High-sensitivity microfiber strain and force sensors[J]. *Optics Communications*, 2014, **314**: 28-30.
- 17 Tian Zhaobing, Yam S S H. In-line abrupt taper optical fiber mach-zehnder interferometric strain sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, **21**(3): 161-163.
- 18 Gu Fuxing, Yu Huakang, Fang Wei, et al. Nanoimprinted polymer micro/nanofiber bragg gratings for high-sensitivity strain sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(1): 22-24.