

基于偏芯紫外曝光的光纤矢量弯曲传感器

禹大宽¹, 乔学光², 王向宇¹, 张立松³

(1.西北工业大学 物理科学与技术学院 陕西省光信息技术重点实验室, 陕西 西安 710072;
2.西北大学 物理学院, 陕西 西安 710069;
3.西安石油大学 理学院 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要:提出并制作了一种基于偏芯紫外曝光的光纤矢量弯曲传感器。该传感器在已经制作好的迈克尔逊干涉结构上,利用偏芯曝光技术,使得光纤包层折射率的径向圆对称性发生变化,赋予干涉结构特殊的弯曲特性。同时分析了这种偏芯曝光技术包层模式非对称性的耦合的原理。实验监测了不同径向上,激发的包层模式的弯曲损耗。结果表明这种偏芯紫外曝光的迈克尔逊干涉结构具有一定的矢量弯曲的特性。在不同径向上,具有不同的弯曲灵敏度,且在受曝光一侧具有较高弯曲灵敏度,曲率灵敏度达到了 $5.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。在未受曝光一侧具有较低弯曲灵敏度,曲率灵敏度为 $-1.31 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。由于该传感器具有这种矢量弯曲的特性,可以很好地应用在油气田勘探开发、地震波矢量检测等领域。

关键词:光纤传感器;迈克尔逊干涉;矢量弯曲;偏芯紫外曝光

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2758(2020)06-1235-05

矢量弯曲测量在旋转导向钻井、地震波矢量检测、油管健康监测等领域有着巨大的应用潜力,也是石油勘探领域的热门技术之一。光纤光栅(fiber Bragg grating, FBG)作为一种特殊的光纤传感结构,在矢量弯曲测量中扮演着十分重要的角色^[1-3]。Kong等^[4]在偏芯光纤上刻栅,提出了一种基于偏芯FBG级联结构(cascaded eccentric core fiber Bragg gratings, ECFBGs),实现了对弯曲方向的测量。Villatoro等^[5]在三芯光纤上写栅,利用三芯结构的不对称性以及超模的高灵敏度,实现对小弯曲角高敏感测量,同时能够识别多种弯曲方向。Yang等^[6]研制了一种基于包层光纤光栅(cladding fiber Bragg grating, CFBG)的光纤弯曲传感器,它表现出对弯曲方向的高度相关性。在上述几种具有代表性的基于FBG的矢量弯曲传感器中,可以通过解调方式的差异分为波长解调型和强度解调型。对于波长解调型传感器,由于受制于FBG波长解调的灵敏度,都存在着弯曲灵敏度较低的问题^[7-9]。对于强度解调型传感器,大多都需要使用特殊结构载纤,或者特殊的

加工工艺,使得制造困难、成本高^[10-12]。因此制作一种加工工艺简单、灵敏度高的矢量弯曲传感器成为该领域的研究热点。鉴于此,本文提出利用纤芯失配结构的高灵敏度以及光纤波导非对称性加工的方向特异性,来实现矢量弯曲传感,以保证该传感器具有加工简单、灵敏度高等优点。

本文设计并制作了一种单模光纤-细芯光纤-单模光纤(single mode fiber-thin core fiber-single mode fiber, STS)的光纤干涉结构。为了使这种结构具有矢量弯曲的特性,利用偏芯曝光工艺对这一干涉结构的折射率进行修饰性加工。偏芯曝光技术对传统紫外写栅设备进行微调,使得纤芯曝光区域偏离光纤轴线,从而实现了对光纤折射率分布的非圆对称性修饰。使得单模光纤-细芯光纤-单模光纤干涉型光纤波导结构的折射率分布发生变化,在不同径向上,具有不同的弯曲损耗量。且在受曝光一侧具有较高的弯曲损耗,在未受曝光一侧具有较低的弯曲损耗。基于偏芯紫外曝光的光纤矢量弯曲传感器具有这种矢量弯曲的特性,可以很好地应用在油

气田勘探开发、地震波矢量检测等领域。

1 传感器结构与原理

实验中,通过在单模光纤中间熔接一段细芯光纤(thin core fiber, TCF),形成单模光纤-细芯光纤-单模光纤的迈克尔逊干涉结构,如图 1a)所示。选取的细芯光纤包层直径为 0.125 mm,纤芯直径为 4.65×10^{-3} mm,为了保证包层模式的稳定激发,细芯光纤的长度约为 20 mm。细芯光纤-单模光纤结构显微图如图 1b)所示。为了增强曝光后包层折射率的变化,对细芯光纤进行了载氢处理,以提高紫外曝光的效率^[13]。载氢的环境为密闭容器内氢气填充、10 MPa 压强、60℃ 恒温条件下,持续放置 15 天以上。

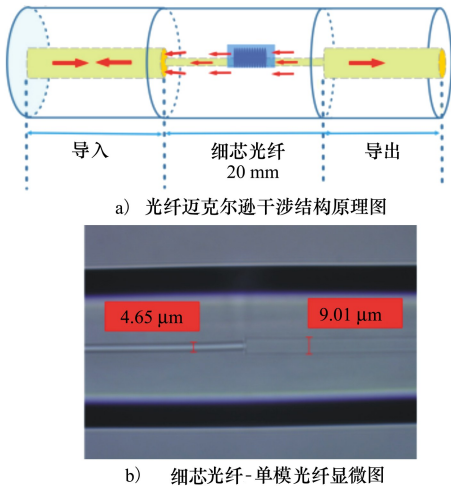


图 1 单模光纤-细芯光纤-单模光纤结构示意图

紫外偏芯曝光的实验装置如图 2 所示。采用 193 nm ArF 紫外准分子激光器(ALEX 公司)作为曝光光源,能量设置为每个脉冲 25 J,曝光频率设置为 500 Hz,曝光时长约为 120 s。曝光光束经过柱面镜聚焦成较窄的线光束后,经过相位掩模板聚焦在预定的光纤写栅区域,去掉涂覆层的光纤紧贴在相位掩模板后方,进行曝光刻蚀。对偏芯距离的控制是偏芯曝光技术的关键。借助光屏处的衍射图样来完成偏芯距离的控制。为了使偏芯曝光技术具有较好的重复性和一致性,曝光过程中,选取-1 级(也可选取+1 级条纹)衍射亮纹即将消失的位置来确定偏芯距离,曝光后,光纤应该继续保持平直,曝光引起的光纤内部预应力变化需要 12 h 以上的释放^[14],以

达到比较稳定的状态。

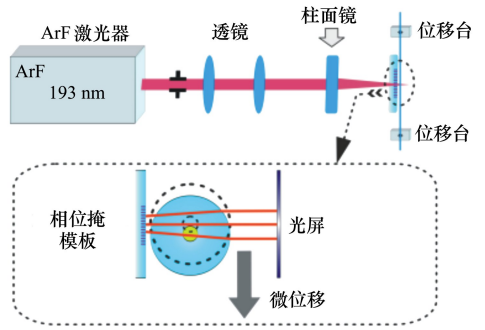


图 2 紫外偏芯曝光装置示意图

实验所用的单模光纤-细芯光纤-单模光纤结构是一种基于纤芯失配的结构,如图 1a)所示。沿光源传播方向上,在单模光纤-细芯光纤界面,由于纤芯失配,部分单模光纤的基模模式耦合进入细芯光纤的包层,形成包层模式。在细芯光纤-单模光纤界面,细芯光纤的基模模式和包层模式在该界面反射,又在单模光纤-细芯光纤界面耦合进入单模光纤纤芯,形成反射光路有差异(一条光臂只在纤芯基模传播,另一条光臂在一段包层中传播)的迈克尔逊干涉结构。

反射光谱图样如图 3 所示。从图中可以看出反射光谱中有十分明显的模间干涉现象出现^[15]。由于干涉光谱光强较大,FBG 谐振峰的谱线几乎被掩盖。1 556 nm 附近的 FBG 谐振峰可以勉强分辨。FBG 的形成机理与迈克尔逊干涉结构有本质的不同。因此 FBG 结构不会干扰迈克尔逊干涉结构的传感性能^[16]。在实验结果部分也得到了很好的验证。

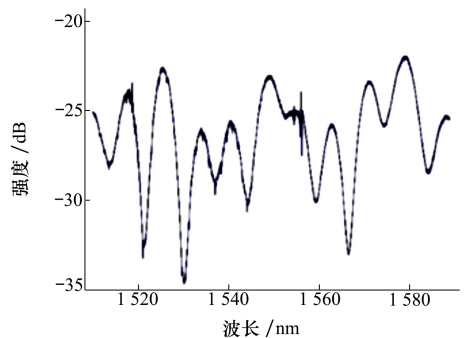


图 3 偏芯曝光后的反射光谱图样

该迈克尔逊干涉光纤传感结构因为偏芯曝光技术的存在,赋予了其非圆对称性。即处在光纤一侧

的栅区经过紫外的曝光,相较包层其他区域其折射率有微小的增加,使得细芯光纤的近轴包层区域传播的光波波面发生干扰,在光谱图样上呈现出相位有差异的干涉图样,这也反映在图 3 的反射光谱图样上。所以当光纤发生弯曲时,紫外曝光一侧的方位角上的弯曲灵敏度将会高于其余方位角上的灵敏度,从而表现出矢量弯曲的特性。

2 实验结果与分析

矢量弯曲测试的实验装置如图 4 所示。采用 MOI 公司 SM125 型光纤光栅解调仪(optical sensing interrogator, OSI) 作为传感器反射信号解调设备。为了准确地测量曲率,采用定制的曲率板进行曲率测试装置实验。为保证干涉光谱的包层模式不产生

跳变,仅使用了如下曲率: $0\text{ m}^{-1}, 0.25\text{ m}^{-1}, 0.5\text{ m}^{-1}, 1.0\text{ m}^{-1}, 1.4\text{ m}^{-1}$ 。标记曝光光束的照射方向为 90° 方位角,偏芯的方向为 0° 方位角,向内弯折,每隔 15° 方位角,记录一组光谱信息,共记录 12 组。

矢量弯曲测试的实验结果,如图 5 所示。图 5a)~5d) 分别为绘制的 $0^\circ, 90^\circ, -90^\circ$ 和 180° 方位角上的光谱图样。对于 1566.535 nm 处的包层模式波谷,从 0° 方位角的光谱变化图中可以看出,随着曲率的增加,干涉光谱出现明显的蓝移现象。这是由于该段光纤材料被挤压,从而增加了包层材料的折射率,光波的相位出现延迟。波谷处检测到的光强也有显著的下降,表明干涉强度有所增加,干涉对比度有较为明显的提升。在 90° 方位角上,随着曲率的增加, 1566.535 nm 波谷处检测到的光强也有所增加,说明干涉对比度降低,同样的波长也有蓝移现象,这与传统圆对称迈克尔逊干涉结构的变化基本相同。对于 -90° 方位角和 180° 方位角上光谱的变化,他们与 0° 方位角上的光谱变化存在显著的差异,与 90° 方位角上的光谱变化趋势基本相同。可以认为该型传感器经过偏芯曝光的处理,被赋予了一定的矢量弯曲特性。达到了矢量弯曲测量的设计初衷。

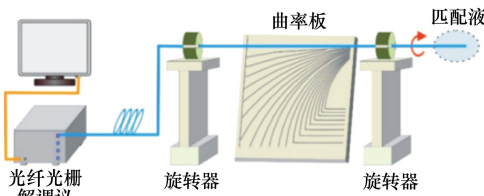


图 4 矢量弯曲测试实验装置示意图

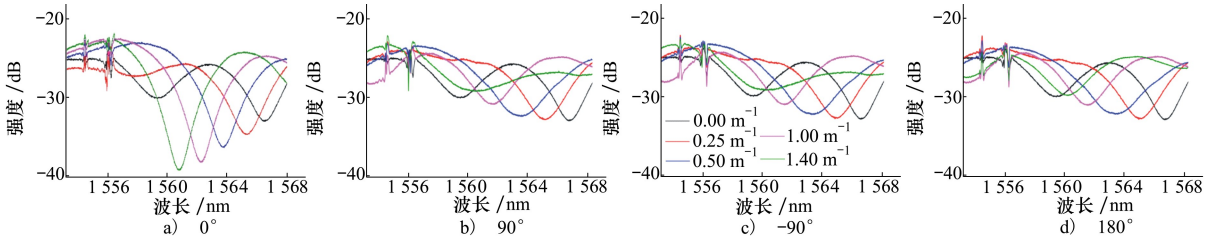
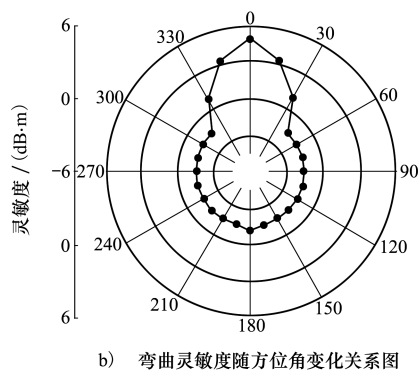
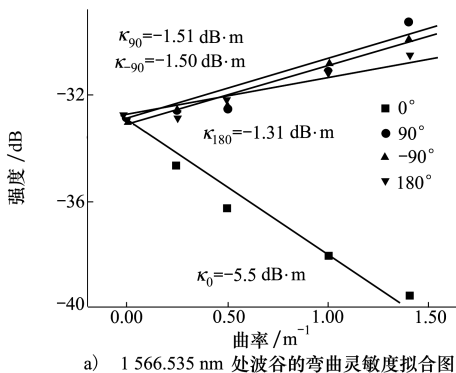


图 5 矢量弯曲测试的光谱变化图

为了更加客观地反映该传感器的矢量弯曲特性,绘制了所测得的所有方位角与弯曲灵敏度之间

的变化关系,如图 6a) 所示。



a) 1566.535 nm 处波谷的弯曲灵敏度拟合图

b) 弯曲灵敏度随方位角变化关系图

图 6 传感器的矢量弯曲特性

可以得到 0° 方位角附近的弯曲灵敏度最大, 为 $5.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。其他方位角上的弯曲灵敏度为 $-1.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 左右。在 180° 方位角上的弯曲灵敏度最小, 为 $-1.31 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。从图 6b) 中可以明显看出该型传感器的弯曲灵敏度与弯曲的方向息息相关。因此, 该传感结构的矢量弯曲特性, 在油气的勘探开发、地震波矢量检测等领域有很好的应用前景。

3 结 论

设计并制作了一种基于偏芯紫外曝光的光纤矢量弯曲传感器。利用偏芯紫外曝光技术, 赋予干涉

结构特殊的弯曲特性。分析了该偏芯曝光技术对包层模式非对称性耦合的原理, 并进行了传感器的矢量弯曲测试。矢量弯曲实验的结果表明, 该偏芯紫外曝光的迈克尔逊干涉结构具有一定的矢量弯曲的特性。在不同径向上, 曲率灵敏度有明显差异。在偏芯曝光一侧曲率灵敏度达到了 $5.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。对侧的曲率灵敏度仅为 $-1.31 \text{ dB} \cdot \text{m}$ 。其他方位角上的曲率灵敏度为 $-1.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$, 鉴于该传感器可以通过检测反射光干涉模式的波长和强度变化, 来解算来袭地震波的强度, 可以很好的应用在油气田勘探开发、地震波矢量检测等领域。

参考文献:

- [1] QIAO Xueguang, SHAO Zhihua, BAO Weijia, et al. Fiber Bragg Grating Sensors for the Oil Industry[J]. Sensors, 2017, 17(3): 1-34
- [2] MARTINEZ-RIOS A, TORRES-GOMEZ I, ANZUETO-SANCHEZ G, et al. Asymmetric Mode Coupling in Arc-Induced Long-Period Fiber Gratings[J]. Optics Communications, 2016, 364: 37-43
- [3] PIOTR Kisaa, DAMINA Harasim, JANUSU Mrocicka. Temperature-Insensitive Simultaneous Rotation and Displacement (Bending) Sensor Based on Tilted Fiber Bragg Grating[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29922-29929
- [4] KONG Jing, ZHOU Ai. Zhou, CHENG Cheng. Two-Axis Bending Sensor Based on Cascaded Eccentric Core Fiber Bragg Gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(11): 1237-1240
- [5] VILLATOR J, NEWKIRK A V, ANTONIOLOPEZ E, et al. Ultrasensitive Vector Bending Sensor Based on Multicore Optical Fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(4): 832-835
- [6] YANG Tingting, QIAO Xueguang, RONG Qiangzhou, et al. Orientation-Dependent Displacement Sensor Using an Inner Cladding Fiber Bragg Grating[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1-7
- [7] DONG Xiaoyi, ZHANG Hao, LIU Bo, et al. Tilted Fiber Bragg Gratings: Principle and Sensing Applications[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 6-30
- [8] ZHANG Hailiang, WU Zhifang, SHUM Perryng, et al. Fiber Bragg Gratings in Heterogeneous Multicore Fiber for Directional Bending Sensing[J]. Journal of Optics, 2016, 18(8): 085705
- [9] BARRERA David, GASULLA Ivana, SALES Salvador. Multipoint Two-Dimensional Curvature Optical Fiber Sensor Based on a Nontwisted Homogeneous Four-Core Fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2445-2450
- [10] FENG Diyi, QIAO Xueguang, ALBERT Jacques. Off-Axis Ultraviolet-Written Fiber Bragg Gratings for Directional Bending Measurements[J]. Optics Letters, 2016, 41(6): 1201-1204
- [11] ZHAO Yunhe, WANG Changle, YIN Guolu, et al. Simultaneous Directional Curvature and Temperature Sensor Based on a Tilted Few-Mode Fiber Bragg Grating[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1671-1678
- [12] SAFFARI Pouneh, ALLSOP Thomas, ADEBAYO Adedotum, et al. Long Period Grating in Multicore Optical Fiber: an Ultrasensitive Vector Bending Sensor for Low Curvatures[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3508-3511
- [13] RONG Qiangzhou, QIAO Xueguang, GUO Tuan, et al. Orientation-Dependant Inclinator Based on Intermodal Coupling of Two-LP-Modes in a Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17576-17585
- [14] TONG Zhengrong, GUO Yang, YANG Xiufeng, et al. Simultaneous Measurement of Temperature and Refractive Index Using a Fiber Bragg Grating and a Multimode Fiber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 130(134): 4053-4056
- [15] GU Bobo, YIN Mingjie, ZHANG Aping, et al. Optical Fiber Relative Humidity Sensor Based on FBG Incorporated Thin-Core Fiber Modal Interferometer[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4140-4146

- [16] CAO Ye, LIU Huiying, TONG Zhengrong, 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

An Optical Fiber Sensor for Oriented Bending Based on Eccentric UV Exposure

YU Dakuan¹, QIAO Xueguang², WANG Xiangyu¹, ZHANG Lisong³

1. Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Physics, Northwest University, Xi'an 710069, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

Abstract: The optical fiber sensor for oriented bending based on eccentric UV exposure is fabricated. With the eccentric UV exposure on the ready-made Michelson interference fiber structure, the optical sensor gives the oriented bending characteristics by changing the radial circular symmetry of fiber cladding refractive indexes. The principle of the asymmetric process of the eccentric exposure to cladding mode are analyzed. The bending loss of the excited cladding mode in different radial directions is detected. The experimental results show that the Michelson interference has some oriented bending characteristics in the eccentric UV exposure process. There are different bending sensitivity in different radial directions. Furthermore, the bending sensitivity is higher on the exposed side and the curvature sensitivity is $5.5 \text{ dB} \cdot \text{m}$. On the opposite side, the bending sensitivity is lower and the curvature sensitivity is $-1.31 \text{ dB} \cdot \text{m}$. With these oriented bending characteristics, the optical sensor can be applied to oil and gas exploration and development and to oriented seismic wave vector detection.

Keywords: optical fiber sensor; Michelson interference; oriented bending; eccentric UV exposure