

基于表面等离子体共振的微位移光纤传感器

魏勇¹, 苏于东¹, 刘春兰¹, 刘璐², 朱宗达², 张永慧^{3*}

¹重庆三峡学院智能信息处理与控制重点实验室, 重庆 404100;

²哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

³重庆三峡医药高等专科学校基础医学部, 重庆 404100

摘要 为实现对微小位移的精确测量, 提高位移精度, 提出了基于表面等离子体共振的微位移光纤传感器。利用渐变折射率多模光纤中光束的传播角度随入射光位置的变化而变化的特性, 结合表面等离子体共振传感器的共振波长对共振角度变化具有很高灵敏度的特性, 实现对微小位移的精确测量。为满足共振条件, 将渐变折射率多模光纤研磨成具有合适角度的楔形, 精确控制渐变折射率多模光纤的长度, 并将光纤探针浸入到一定折射率的液体中。通过 630 nm 单模光纤将白光光源从渐变折射率多模光纤的端面耦合到光纤探针中, 搭建位移平台, 精确控制单模光纤和渐变折射率多模光纤的径向相对位置, 通过光谱仪检测共振波长随相对位置的变化规律。实验结果表明: 当光纤研磨角度为 12°, 且液体折射率为 1.350 时, 该传感器具有高达 10.32 nm·μm⁻¹ 的灵敏度, 位移分辨率高达 1.9 nm。

关键词 光纤光学; 微小位移测量; 表面等离子体共振; 渐变折射率多模光纤; 光纤研磨技术

中图分类号 TN253; O4-34

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040606

Micro-Displacement Optical Fiber Sensor Based on Surface Plasmon Resonance

Wei Yong¹, Su Yudong¹, Liu Chunlan¹, Liu Lu², Zhu Zongda², Zhang Yonghui³

¹Key Laboratory of Intelligent Information Processing and Control, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

²Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

³Basic Medicine Department, Chongqing Three Gorges Medical College, Chongqing 404100, China

Abstract In order to achieve accurate optical measurement method in micro-displacement and improve the accuracy of micro-displacement, we propose a novel micro-displacement optical fiber sensor based on surface plasmon resonance. In order to achieve precise measurement of micro-displacement, we use the characteristics that the propagation angle of the beam in the graded-index multimode fiber changes with the position of the incident light, and the resonant wavelength of the surface plasmon resonance sensor has the high sensitivity to the resonance angle variation. In order to achieve the resonance conditions, we polish the graded-index multimode fiber into a wedge with a suitable angle and precisely control the length of the graded-index multimode fiber. In addition, the fiber probe should be immersed into liquid such as water. A white light source is coupled from the end face of the graded-index multimode fiber to the fiber probe via a 630 nm single mode fiber, and an optical spectrum analyzer is employed to collect light beam and process the sensing signal. The fiber probe and single mode fiber are placed in a

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(61705025)、重庆市教委 2017 年度科学技术研究项目(KJ1710238, KJ1725391, KJ1710247)、第三批重庆市高等学校青年骨干教师资助项目(20165339)、重庆三峡学院 2016 年度重大培育科研项目(16PY13)、重庆市高校创新团队计划(CXTDX201601034)、重庆市高校市级重点实验室资助项目[(2017)3]、重庆市发展和改革委员会资助项目[(2017)1007]

作者简介: 魏勇(1987—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光纤 SPR 传感方面的研究。E-mail: weiyong198747@163.com

* 通信联系人。E-mail: 68165125@qq.com

high precision displacement platform to control the radial relative position of the fibers. The experimental results show that when the fiber polishing angle is 12° and the liquid refractive index is 1.350, the micro-displacement optical-fiber sensor has a maximum sensitivity of $10.32 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ and a minimum resolution of 1.9 nm.

Key words fiber optics; micro-displacement measurement; surface plasmon resonance; graded-index multimode fiber; fiber grinding and polishing technology

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 240.6680

1 引言

微小位移的精确控制和测量在很多工业领域有重要作用,如显微操控、精确定位、扫描隧道显微镜、原子力显微镜等。近十年来,光纤微位移传感器发展迅速。早期的光纤微位移传感器大多利用光纤布拉格光栅^[1]、光纤 Sagnac 干涉仪^[2]、光纤 Mach-Zehnder 干涉仪^[3]、长周期光纤光栅^[4]等结构实现,但其位移分辨率通常在微米量级。现如今,微纳米加工技术对微小位移测量和控制的要求越来越高。微米量级的控制精度已远不能满足实际需求。

表面等离子体共振(SPR)技术是近现代光学研究的重大成果。SPR 对周围介质的折射率有相当高的灵敏度,因此通常被用于设计各种折射率传感器^[5-7]。另外,SPR 对入射角度也有相当高的灵敏度。基于此特性,近年来设计出一些位移传感器。例如 2011 年 Lin 等^[8]利用外差干涉法 SPR 传感技术实现对微小位移的检测。但这种基于空间光路的检测方法不仅体积巨大、操作复杂,而且精度也不高。2016 年王雁茹等^[9]提出一种基于 Otto 结构的光纤微位移传感器,虽然精度能够达到纳米量级,但受限于 Otto 结构的缺陷,这种传感器的位移测量范围极窄。

为了进一步提高微小位移的测量精度,缩小位移检测极限,本文提出了基于 Kretschmann 结构的 SPR 微位移光纤传感器。在渐变折射率多模光纤(GIMMF)上加工出 Kretschmann 结构,用 630 nm 单模光纤(SMF)将光从渐变折射率多模光纤端面

注入,其径向偏移量即为所测位移,利用渐变折射率多模光纤中光束的传播角度会随着入射光位置的变化而变化的特性,以及 SPR 传感器的共振波长对共振角度变化具有很高的灵敏度的特性,实现对微小位移的精确测量。此外,还研究了光纤研磨角度和光纤传感探针周围介质折射率对位移灵敏度的影响,以进一步提高位移灵敏度。

2 基本原理与仿真

2.1 传感器结构设计

图 1 为基于 SPR 的微位移光纤传感探针的原理示意图。一小段渐变折射率多模光纤的一端被研磨加工成楔形斜面,研磨角度为 β , 另一端大数值孔径的阶跃折射率多模光纤(SIMMF)的一端也被研磨加工成相同的楔形斜面。两段经过研磨的光纤用光纤熔接机熔接,研磨面互相平行。在渐变折射率多模光纤的研磨面上镀制一定厚度的纳米金膜,实现 Kretschmann 结构。为尽量减少光的传播模式和减小光束发散,用一段 630 nm 单模光纤将白光从渐变折射率多模光纤的端面注入,并沿着 x 方向传播。在 y 方向上,单模光纤轴线与渐变折射率多模光纤轴线具有位移量 d 。由于渐变折射率多模光纤的折射率呈抛物线分布,因此光束在渐变折射率多模光纤中以正弦曲线的轨迹传播,且具有传播周期 T 。当光束到达第 1 个研磨斜面时,会发生全反射并激发 SPR 现象,然后光束到达第 2 个研磨斜面并发生第 2 次全反射,之后光束在阶跃折射率多模光纤中传播,最后进入光谱仪(OSA)。

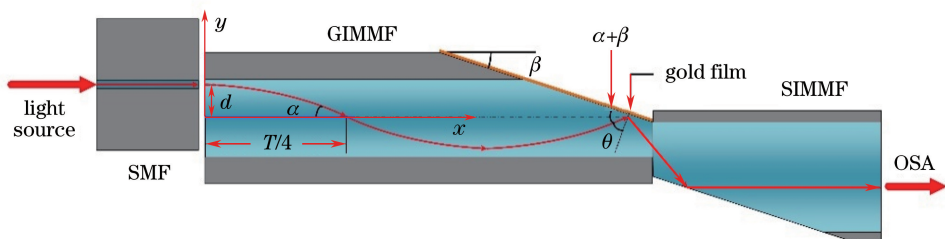


图 1 微位移光纤传感探针的原理示意图

Fig. 1 Sketch diagram of micro-displacement fiber sensing probe

在渐变折射率多模光纤中,光束的传播轨迹可以表示为

$$y = d \cdot \cos(2\pi x/T). \quad (1)$$

设光束和光纤轴线的夹角为 α 。当渐变折射率多模光纤的长度略大于 $3T/4$ 时,可以使光束与研磨面之间的夹角最大,等于 $\alpha + \beta$,因此 SPR 共振角 $\theta = 90^\circ - (\alpha + \beta)$ 。其中,夹角 α 可以表示为

$$\alpha = |\arctan(2\pi d/T)|. \quad (2)$$

由此可见,SPR 共振角会随着位移量 d 的变化而变化,且共振波长也会随之变化。通过这种光纤结构,可以巧妙地将位移量的变化转化为共振波长的移动,从而实现微小位移的测量和传感。

2.2 基于 MATLAB 的数值仿真

该微位移光纤传感器基于 Kretschmann 结构,其 SPR 共振光谱可以通过菲涅耳公式计算。通过菲涅耳公式得到的光束经过镀膜表面后的反射率 R 可表示为

$$R = \{ [r_{01} + r_{12} \exp(2ik_z h)] / [1 + r_{01} r_{12} \exp(2ik_z h)] \}^2, \quad (3)$$

式中: h 为金膜厚度; r_{01} 和 r_{12} 分别表示光纤-金膜界面处的反射率及金膜-外界介质界面处的反射

率,可以表示为

$$r_{ik} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_i - (\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_k}{(\epsilon_i - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_i + (\epsilon_k - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5} / \epsilon_k}; \quad (4)$$

k_z 为金膜中波矢的垂直分量,可以表示为

$$k_z = \frac{2\pi}{\lambda} (\epsilon_1 - \epsilon_0 \sin^2 \theta)^{0.5}. \quad (5)$$

利用 MATLAB 软件,可以将上述公式编程,最终得到共振曲线随位移的变化规律。

2.2.1 渐变折射率多模光纤参数的测量

在进行 MATLAB 仿真之前,首先需要确定渐变折射率多模光纤的折射率和光束传播周期。将光纤端面切平并处理干净,用光纤折射率分析仪(S14, Photon Kinetics)测量折射率分布,使用的折射率匹配液的折射率 n 为 1.4680。测量结果如图 2 所示。可以得到渐变折射率多模光纤纤芯的折射率分布可以表示为

$$n^2(r) = 1.4807^2 \times [1 - 0.025 \cdot (r/31.25)^2]. \quad (6)$$

同时,可以测得该光纤的数值孔径为 0.28。根据渐变折射率多模光纤的导光特性,可以计算出光束在光纤中传播的周期 T 约为 $1050 \mu\text{m}$ 。为了更加可靠地得到光束传播周期,将 630 nm 单模光纤

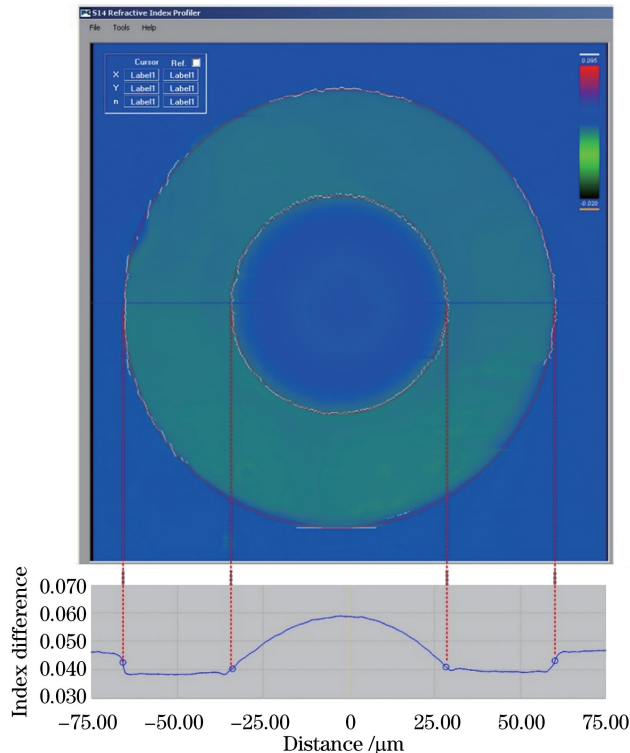


图 2 渐变折射率多模光纤折射率分布

Fig. 2 Refractive index distribution of the graded-index multimode fiber

和渐变折射率多模光纤进行错位熔接,错芯量为 $25\ \mu\text{m}$ 。然后将一束绿光耦合进单模光纤中,随后在渐变折射率多模光纤中以正弦曲线轨迹传播。在显微镜下观察光束传播轨迹并测量传播周期,如图 3 所示。可测得光束在渐变折射率多模光纤中的传播周期约为 $1075\ \mu\text{m}$,与计算值基本一致。

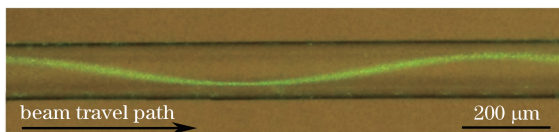


图 3 渐变折射率多模光纤光束传播轨迹

Fig. 3 Beam path in the graded-index multimode fiber

2.2.2 金膜厚度对共振曲线的影响

结合(2)~(6)式,通过 MATLAB 仿真得到不同金膜厚度下的 SPR 透射光谱,如图 4 所示。当金膜厚度小于 $50\ \text{nm}$ 时,产生的 SPR 共振谷的半峰全宽太大,而当金膜厚度大于 $50\ \text{nm}$ 时,虽然 SPR 共振谷的半峰全宽变小,但共振谷的深度也开始变浅。因此,当金膜厚度为 $50\ \text{nm}$ 时,产生的 SPR 现象最明

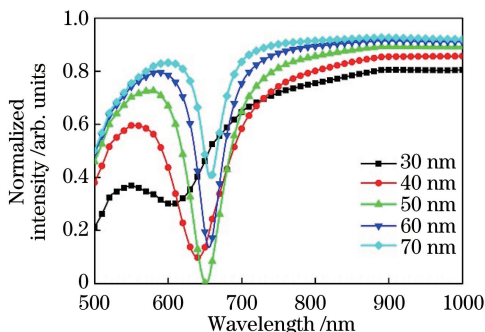


图 4 不同金膜厚度下的 SPR 透射光谱

Fig. 4 SPR transmission spectra under different thicknesses of gold film

显,在随后的实验中,选择镀制 $50\ \text{nm}$ 厚度的金膜。

2.2.3 微位移仿真

随后,对于不同位移量 d 进行数值仿真。结合(2)~(6)式,分别仿真当 $d=0, 5, 10, 15, 20, 25\ \mu\text{m}$ 时的共振光谱并得到相应的共振波长。当光纤研磨角为 12° 、外界液体折射率 n 为 1.333 时,得到的仿真结果如图 5 所示。

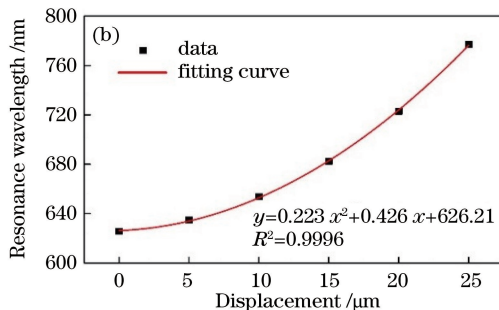
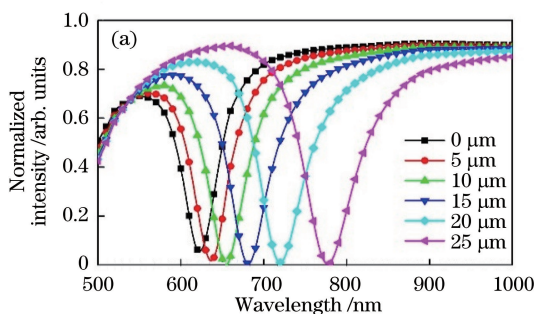


图 5 (a) 仿真所得不同位移量产生不同的 SPR 共振光谱; (b) SPR 共振波长随位移量的变化

Fig. 5 (a) SPR transmission spectra under different displacements by simulation;

(b) resonance wavelength as a function of displacement

由图 5 可见,当位移量逐渐增大时,SPR 共振光谱逐渐红移,相应的共振波长往长波长移动。对共振谷进行二次方拟合,可以得到共振波长 λ (单位为 nm) 与位移 d (单位为 μm) 的函数关系为

$$\lambda = 0.223 \cdot d^2 + 0.426 \cdot d + 626.21. \quad (7)$$

(7)式的拟合度 R^2 为 0.9996 。对(7)式求导,可以得到灵敏度 S (单位为 $\text{nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 正比于位移,可以表示为

$$S = 0.446 \cdot d + 0.426. \quad (8)$$

当位移量在 $25\ \mu\text{m}$ 左右(即最大量程附近)时,灵敏度最高,可以达到 $11.58\ \text{nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,当光谱仪的分辨率为 $0.02\ \text{nm}$ 时,相应的位移分辨率为 $1.7\ \text{nm}$ 。

3 探针制备与实验结果

本文提出的微位移光纤传感探针的具体加工步

骤如下。

1) 光纤研磨。利用光纤研磨技术对渐变折射率多模光纤和阶跃折射率多模光纤进行研磨,两光纤的包层直径均为 $125\ \mu\text{m}$ 。首先用粗砂纸研磨外形,研磨角度为 12° 。在光纤研磨过程中,通过 CCD 实时监测光纤研磨程度,当光纤尖端被研磨到约 $55\ \mu\text{m}$ 时,停止研磨。然后换用抛光砂纸对研磨面抛光 $2\ \text{h}$,使研磨面足够光滑。

2) 光纤熔接。利用光纤熔融焊接机(FSM-100P)将 2 根研磨抛光后的光纤熔融焊接。在熔接过程中,需要将 2 根光纤旋转,使 2 个研磨面互相平行。然后调节熔接电流和熔接时间,保证 2 根光纤能够成功熔接,同时在熔接过程中不发生变形。熔接完成后,用光纤切割刀切割光纤,使留下的渐变折射率多模光纤的长度为 $850\ \mu\text{m}$,如图

6(a)所示。

3) 镀制金膜。将上述光纤探针放在等离子体

溅射仪(JS-1600)中镀制厚度为 50 nm 的金膜。镀膜方法和具体流程参考文献[10]。

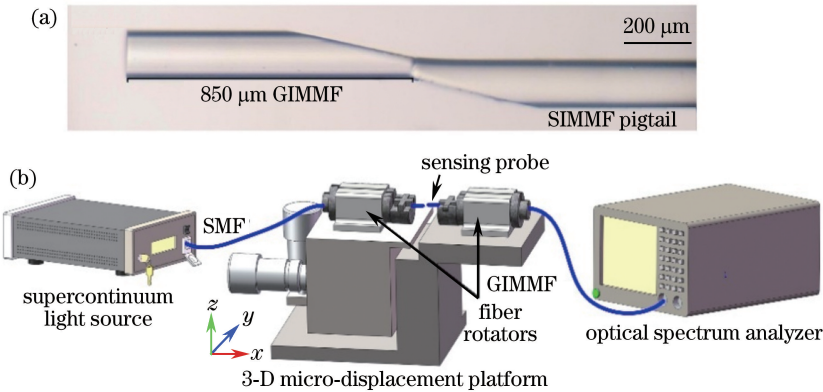


图 6 (a) 微位移光纤传感探针的显微镜照片;(b)微位移实验系统示意图

Fig. 6 (a) Image of the fiber sensing probe; (b) sketch diagram of the experiment system

镀完全膜后,光纤传感探针已经基本加工完成。将光纤传感探针固定在三维位移平台(Thorlabs 公司生产,型号 MBT621D/M,精度为 $1 \mu\text{m}$)上,如图 6(b)所示。并将渐变折射率多模光纤的研磨斜面严格朝上,即 z 方向。然后将 630 nm 单模光纤也固定到三维位移平台上,调整单模光纤的位置使其端面正对渐变折射率光纤的端面,并使两端面之间的距离足够小(约 $10 \mu\text{m}$)。然后,将 1 个白光光源(NKT Photonic 公司生产,型号 SuperK compact,

波长范围 $450 \sim 2400 \text{ nm}$) 连接到单模光纤,用光谱仪(Yokogawa 公司生产,型号 AQ6373,波长范围 $350 \sim 1200 \text{ nm}$,分辨率 0.02 nm) 连接多模光纤尾纤收集光谱并处理光谱信号。将光纤探针浸入到水滴中(折射率 n 为 1.333)。调节三维位移平台使单模光纤在 z 方向上移动,位移量为 d 。分别测得当位移量 $d = 0, 5, 10, 15, 20, 25 \mu\text{m}$ 时的共振光谱,并得到相应的共振波长,如图 7(a)所示。图 7(b)为重复测量 10 次得到的共振波长-位移拟合曲线。

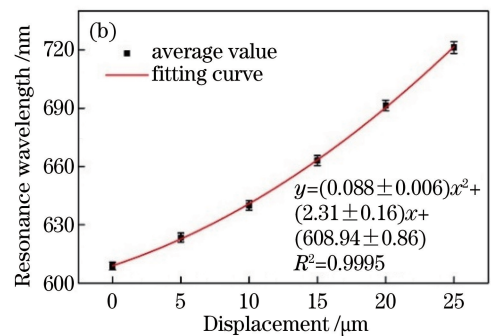
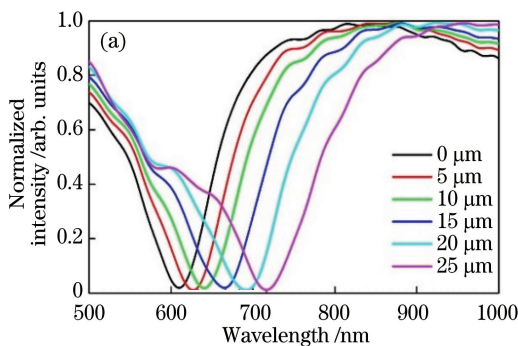


图 7 (a) 实验所得不同位移量产生不同的 SPR 共振光谱;(b)SPR 共振波长随位移量的变化

Fig. 7 (a) SPR transmission spectra under different displacements by experiment;

(b) resonance wavelength as the function of displacement

由图 7 可见,当位移量逐渐增大时,SPR 共振光谱逐渐红移,相应的共振波长往长波长方向移动。这种规律和仿真结果是一致的。采用二次方拟合,可以得到共振波长与位移的函数关系为

$$\lambda = (0.088 \pm 0.006) \cdot d^2 + (2.31 \pm 0.16) \cdot d + (608.94 \pm 0.86). \quad (9)$$

(9)式拟合度 R^2 为 0.9995。当位移量在 $25 \mu\text{m}$ 左右(即最大量程附近)时,灵敏度最高,可以达到 $6.71 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,当光谱仪的分辨率为 0.02 nm 时,

相应的位移分辨率为 3.0 nm 。相比于仿真结果,实验所得的灵敏度和分辨率约为仿真结果的一半,这是由于渐变折射率光纤中存在色散效应与仿真所假设的无色散不一致造成的。总的来说,该传感器的位移分辨率已经达到很高水平。

4 分析与讨论

对于本文提出的位移传感器,光纤研磨角和液体的折射率是两个可以控制的变量。为了研究其对

该传感器性能的影响,需要用控制变量法进行实验。首先固定光纤研磨角为 12° ,将液体折射率 n 更换为 1.350,再次测得相同位移量下的共振曲线,并得到共振波长。然后制备光纤研磨角度为 9° 的传感探针,分别在液体折射率 n 为 1.333 和 1.350 下测得相应的共

振曲线,并得到共振波长。同时也利用 MATLAB 对相应条件下的共振曲线进行仿真,并计算仿真所得的共振波长。实验光谱如图 8(a)、图 8(b)和图 8(c)所示,仿真及实验的共振波长对比如图 8(d)所示,其中 S 代表仿真数据,E 代表实验数据。

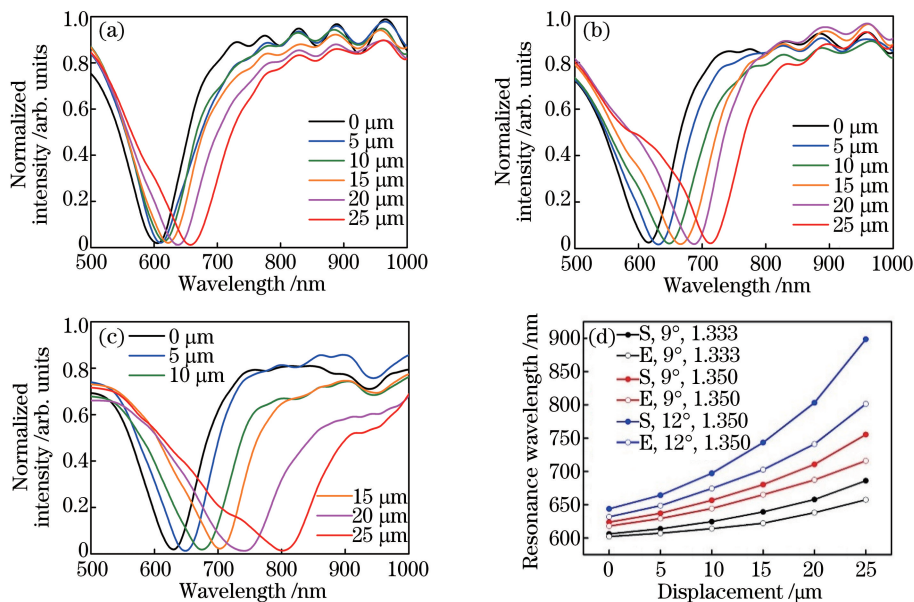


图 8 (a)~(c)不同研磨角 β 和液体折射率 n 下的光谱变化;(d)仿真与实验的共振波长比较

Fig. 8 (a)~(c) Spectra change under different fiber polishing angles β and different refractive indexes of liquid; (d) comparison between simulated (S) and experimental (E) results of resonance wavelength

由图 8 可见,当光纤研磨角相同时,液体折射率越高,该传感器的位移灵敏度和分辨率也越高。当液体折射率相同时,光纤研磨角越大,传感器的位移灵敏度和分辨率也越高。虽然进一步增大研磨角和液体折射率将提高灵敏度,但光谱质量同时也将急剧下降。最终确定,当光纤研磨角为 12° 、液体折射率为 1.350 时,实验测得的结果最理想。在该条件下,重复测量 10 次得到共振波长与位移的关系,如图 9 所示。采用二次方拟合,可以得到共振波长与位移的函数关系为

$$\lambda = (0.168 \pm 0.012) \cdot d^2 + (2.48 \pm 0.28) \cdot d + (630.52 \pm 1.27) \quad (11)$$

(11)式的拟合度 R^2 为 0.9990。当位移量在 $25 \mu\text{m}$ 左右时,灵敏度最高,可以达到 $10.32 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,当光谱仪的分辨率为 0.02 nm 时,相应的位移分辨率为 1.9 nm 。

表 1 给出了该传感器与其他各类主流的光纤微位移传感器的参数比较,可以看到,提出的微位移传感器在位移分辨率上有很大的提高,综合性能良好,表中 FBG 为布拉格光纤光栅,LPFG 为长周期光纤光栅,FI 为光纤干涉仪,M-Z 为马赫-曾德尔。

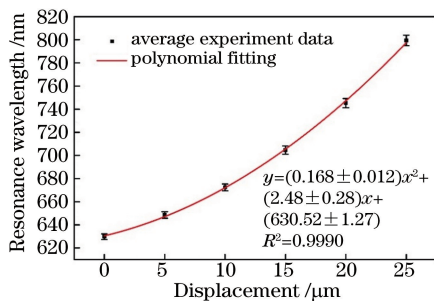


图 9 光纤研磨角为 12° 、液体折射率为 1.350 时的共振波长-位移拟合曲线

Fig. 9 Resonance wavelength as a function of displacement when $\beta=12^\circ$ and $n=1.350$

表 1 各类光纤位移传感器参数比较

Table 1 Performance comparison of optical fiber micro-displacement sensors

Sensor type	Sensitivity	Travel	Resolution
FBG ^[1]	$20.11 \text{ pm} \cdot \text{mm}^{-1}$	0-100 mm	1.00 mm
LPFG ^[4]	$0.22 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-140 μm	$0.09 \mu\text{m}$
SagnacFI ^[2]	$0.26\% \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-380 μm	$0.45 \mu\text{m}$
M-Z FI ^[3]	$-1.89 \text{ dB} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-13 μm	$0.05 \mu\text{m}$
Modal FI ^[11]	$0.10 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-30 μm	$0.20 \mu\text{m}$
Fiber bundle ^[12]	$60.00 \text{ mV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-12 mm	15.00 mm
Otto-type SPR ^[9]	$31.45 \text{ nm} \cdot \text{nm}^{-1}$	0-10 nm	0.60 pm
Proposed sensor	$10.32 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	0-25 μm	2.00 nm

5 结 论

根据现代工业以及高精密仪器对微小位移的精确测量和控制的要求,提出了基于表面等离子体共振的微位移光纤传感器。分别通过理论仿真和实验测试验证了该传感器的传感性能。并研究分析了不同光纤研磨角和不同液体折射率对传感器性能的影响。实验结果表明:利用表面等离子体共振技术,结合渐变折射率多模光纤中光束以正弦曲线传播的性质,可以很大程度提高位移灵敏度,从而提高位移分辨率。利用这种方法实现的位移分辨率可以达到纳米精度,比其他种类的光纤微位移传感器提高了几十甚至几百倍。

通过增大光纤研磨角度,增大液体折射率,可以进一步提高该传感器的位移分辨率。当光纤研磨角为 12° 、液体折射率为1.350时,该传感器具有高达 $10.32 \text{ nm} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 的位移灵敏度。由于光谱仪的波长分辨率为 0.02 nm ,该传感器的位移分辨率高达 1.9 nm 。该微位移传感器的提出了一种高精度微小位移的光学测量方法,在微小位移测量以及微纳米加工等工业领域有很重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Guo Y X, Xiong L, Kong J Y, *et al.* Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58.
郭永兴, 熊丽, 孔建益, 等. 滑动式光纤布拉格光栅位移传感器[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 50-58.
- [2] Bravo M, Pinto A M R, Lopez-Amo M, *et al.* High precision micro-displacement fiber sensor through a suspended-core Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 202-204.
- [3] Shen C Y, Chu J L, Lu Y F, *et al.* High sensitive micro-displacement sensor based on MZ interferometer by a bowknot type taper [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 62-65.
- [4] Qi L, Zhao C L, Wang Y, *et al.* Compact micro-displacement sensor with high sensitivity based on a long-period fiber grating with an air-cavity[J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3193-3200.
- [5] Wang W H, Xiong Z Y, Shi W Q, *et al.* Fiber-optic surface plasmon resonance sensing technology [J].

Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090008.

王文华, 熊正焯, 师文庆, 等. 光纤表面等离子体共振传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 090008.

- [6] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0606001.

张巧, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0606001.

- [7] Hu X, Liu H G, Liu B. Directional excitation of surface plasmons based on asymmetric single-slit structure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 1113001.

胡玄, 刘会刚, 刘波. 基于非对称单缝结构的表面等离子体定向激发[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1113001.

- [8] Lin J Y, Chen K H, Chen J H. Measurement of small displacement based on surface plasmon resonance heterodyne interferometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 811-815.

- [9] Wang Y R, Zhao C L, Kang J. Fiber SPR micro-displacement sensor based on Otto structure [J]. *Optical Communication Technology*, 2016, 40(4): 30-32.

王雁茹, 赵春柳, 康娟. 基于 Otto 结构的光纤 SPR 微位移传感器[J]. *光通信技术*, 2016, 40(4): 30-32.

- [10] Liu P K, Li Y, Wei Y, *et al.* Coating optimization and SPR wedge probe with single mode fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10z): 57-63.

刘佩坤, 李彦, 魏勇, 等. 镀膜优化与单模光纤劈尖表面等离子体共振传感探针[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10z): 57-63.

- [11] Luo H, Li X, Zou W, *et al.* Temperature-insensitive microdisplacement sensor based on locally bent microfiber taper modal interferometer [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(3): 772-778.

- [12] Prella C, Lamarque F, Revel P. Reflective optical sensor for long-range and high-resolution displacements [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 127(1): 139-146.