

模间干涉的包层腐蚀型椭芯保偏 光纤折射率传感特性

郭璇^{1,2} 刘丰^{1,2} 徐香¹ 付兴虎^{1,2} 齐跃峰^{1,2} 谈爱玲^{1,2}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 研究了一种基于模间干涉原理的微型椭芯保偏光纤的折射率传感特性。利用氢氟酸腐蚀的方法将椭芯保偏光纤制作成折射率灵敏的传感头,传感头可以根据控制腐蚀时间灵活控制其锥区结构。详细分析了保偏光纤内基模与一阶高次模模间干涉产生的双边瓣能量分布与被测折射率的关系,深入研究了锥区半径、工作波长对折射率灵敏度的影响。研究表明,光源波长为980 nm,折射率在1.39附近时,半径为8 μm 的传感头折射率灵敏度能够达到-7.1/RIU(即归一化光强与RIU之比,其中RIU为单位折射率)。

关键词 折射率传感; 椭芯保偏光纤; 模间干涉; 折射率灵敏度; 包层腐蚀

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0706002

Refractive Index Sensing Characteristics of Cladding-Etched Elliptical Core Polarization Maintaining Fiber based on Intermodal Interference

Guo Xuan^{1,2} Liu Feng^{1,2} Xu Xiang¹ Fu Xinghu^{1,2} Qi Yuefeng^{1,2} Tan Ailing^{1,2}

¹Information Science & Engineering College, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract The refractive index sensing characteristics of the elliptical core polarization maintaining fiber(E-core PMF) based on intermodal interference are investigated. The refractive index sensor probe is composed with a section of E-core PMF that etched by hydrofluoric acid. And the taper structure of sensor probe can be controlled by erosion time conveniently. The relationship of the two-lobe intensity distribution produced by the intermodal interference between the basic mode and the first order higher mode of PMF with the analyte refractive index is analyzed comprehensively. Furthermore, the influence of the tapered area radius and the wavelength on the refractive index sensitivity is discussed deeply. The experiments demonstrate that the refractive index sensitivity of a refractive index sensor with 8 μm tapered area radius can reach -7.1/RIU, which means the ratio between the normalized value and the refractive index unit (RIU), near 1.39 refractive index, when the laser source wavelength is 980 nm.

Key words refractive index sensing; elliptical core polarization maintaining optical fiber; intermodal interference; refractive index sensitivity; cladding erosion

OCIS codes 060.2370; 300.6190; 120.4530

1 引言

折射率的测量在生物、化学、食品安全和水环境监测等领域都具有重要的意义^[1-3]。传统通过化学实验

收稿日期: 2015-01-26; 收到修改稿日期: 2015-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(61275093)、河北省科学技术研究与发展计划科技支撑项目(13273305)、河北省自然科学基金面上项目(F2013203252)、河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2014057)、河北省教育厅科学研究计划(QN2014034)、燕山大学青年教师自主研究计划课题(14LGB015)

作者简介: 郭璇(1981-),女,讲师,主要从事特种光纤和光纤传感等方面的研究。E-mail: guoxuan@ysu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: guoxuan@ysu.edu.cn

的方法进行折射率测量虽然准确度比较高,但是存在着测量过程繁琐、无法在线测量和测量周期长等突出问题。光纤传感器由于其结构简单、抗电磁干扰、耐腐蚀和灵敏度高等优点,近年来得到折射率测量领域的广泛关注^[4-5]。目前研究较多的光纤折射率传感器包括光纤光栅^[6]、表面等离子体共振^[7-8]、马赫-曾德尔干涉仪^[9]等多种结构。用上述原理实现的光纤折射率传感器各有优缺点,优点突出体现在检测灵敏度高和可以在线测量,缺点则集中在解调系统昂贵、容易受到环境温度干扰等方面。

保偏光纤传感技术自 20 世纪 80 年代开始即受到了各国的普遍重视,被广泛应用于航天、航海、通信以及工业制造等领域^[10-12]。保偏光纤模间干涉技术是利用单根保偏光纤中传输的两个低阶模式之间的干涉原理实现光纤传感测量。模间干涉技术摒弃了传统干涉仪的双臂结构,具有结构简单、解调方便和工作稳定等优点^[13-14],近年来被广泛应用于高电压和应力等光纤传感器设计中。此外保偏光纤双折射受到环境温度及振动的影响小,传感器本身具有较强的抗干扰能力。

本文提出了一种基于椭芯保偏光纤(E-core PMF)模间干涉的包层腐蚀型折射率传感方案,通过氢氟酸腐蚀的方法在椭芯光纤上制作折射率传感头,利用检测模间干涉输出的两个边瓣的光强对液体折射率进行测量。该方案具有结构简单、解调容易等突出优点。理论研究了被测折射率与模间干涉双边瓣输出光强比的变化关系,并分析了包层厚度、光源波长对折射率灵敏度的影响,建立了实验系统并对理论计算和分析结果进行了验证。

2 椭芯光纤中模间干涉的基本原理

根据光波导理论,选择合适的工作波长和激励方式时,能够在光纤中只传输 LP_{01} 基模和 LP_{11} 一阶高次偏振模,其他高阶模式则被截止。理论上,普通阶跃圆芯光纤也存在模间干涉现象,但是因为模式耦合问题,普通圆芯光纤(PMF)难以获得稳定的模间干涉输出,所以在实际传感器设计中主要以保偏光纤作为传感光纤。实验中采用加拿大 IVG 公司生产的一种椭芯保偏光纤,其物理参数为:纤芯长轴半径为 $3 \mu\text{m}$,短轴半径为 $1 \mu\text{m}$,包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 。纤芯的折射率为 $n_{co} = 1.47$,包层折射率为 $n_{cl} = 1.456$ 。

根据上述参数建立有限元计算模型后,仿真计算得到椭芯光纤中 LP_{01}^x 、 LP_{01}^y 、 LP_{11}^x 和 LP_{11}^y 四个模式的模场分布如图 1 所示。从图 1 可以看出:对于椭芯保偏光纤,其基模 LP_{01} 呈单光斑形式,而一阶高次模 LP_{11} 则呈两个对称光斑形式,不同偏振方向模式的电场方向有所不同。若通过偏振器控制入射光源的偏振方向,可以使得保偏光纤内只传输一个偏振方向的两个模式(LP_{01}^x 和 LP_{11}^x 或 LP_{01}^y 和 LP_{11}^y)。

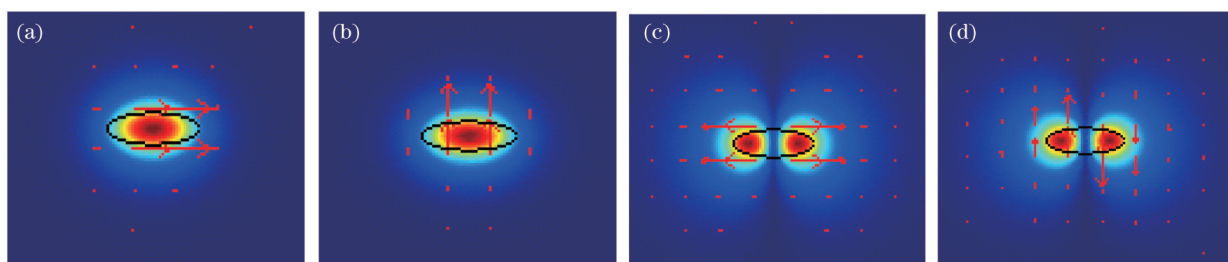


图 1 椭芯保偏光纤中低阶模的模场分布图。(a) LP_{01}^x ; (b) LP_{01}^y ; (c) LP_{11}^x ; (d) LP_{11}^y

Fig.1 Low order modes pattern distributions of E-core PMF. (a) LP_{01}^x ; (b) LP_{01}^y ; (c) LP_{11}^x ; (d) LP_{11}^y

当一个偏振方向上的两个偏振模在光纤中传输时,将发生如图 2 所示的干涉现象,即两个模式在光纤输出端干涉后的合成光强呈双强度边瓣的分布形式。

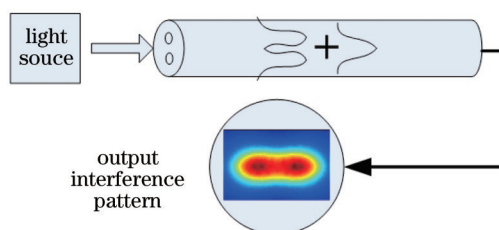


图 2 偏振模式干涉示意图

Fig.2 Schematic diagram of two modes interference

当光纤所处外界环境发生变化时,会改变光纤中两个模式之间的相位差,从而引起干涉输出双边瓣能量分布的变化。两个模式在光纤中传输后的输出光强 I 可以表示为^[15]

$$I = |E(x,y)|^2 = E_{01}(x,y)^2 + E_{11}(x,y)^2 + 2E_{01}(x,y)E_{11}(x,y)\cos\Delta\phi, \quad (1)$$

式中 $E_{01}(x,y)$ 和 $E_{11}(x,y)$ 是 LP_{01} 模和 LP_{11} 模的电场分布函数, $\Delta\phi$ 是两个模式的相位差,由模式传播常数与光纤长度决定,如(2)式所示:

$$\Delta\phi = \Delta\beta L = (\beta_{01} - \beta_{11})L = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{\text{eff}01} - n_{\text{eff}11})L, \quad (2)$$

式中 $n_{\text{eff}01}$ 和 $n_{\text{eff}11}$ 是两个模式的有效折射率,图3是同一偏振方向上 LP_{01} 模和 LP_{11} 模相位差 $\Delta\phi$ 从0变化到 π 时输出光强的分布形式。

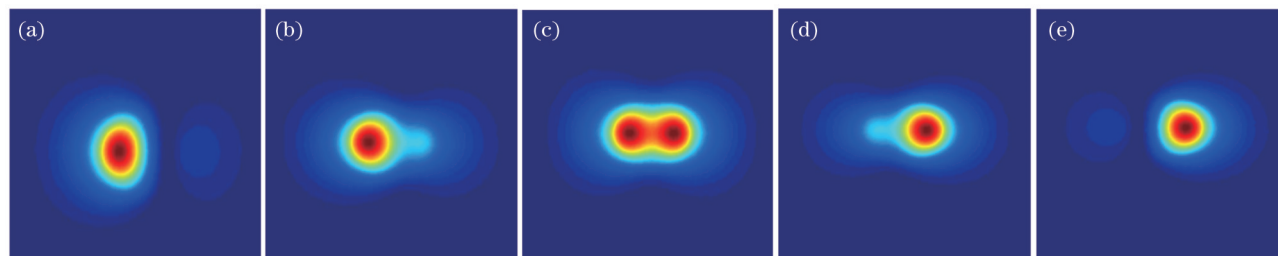


图3 相位差 $\Delta\phi$ 从0~ π 变化时,输出光强的分布。(a) 0; (b) $\frac{\pi}{3}$; (c) $\frac{\pi}{2}$; (d) $\frac{2\pi}{3}$; (e) π

Fig.3 Output intensity energy distributions with different $\Delta\phi$. (a) 0; (b) $\frac{\pi}{3}$; (c) $\frac{\pi}{2}$; (d) $\frac{2\pi}{3}$; (e) π

从图3可以看出,当模间相位差为0时,两个光斑中左边瓣能量较强,随着相位差增大,右边瓣能量逐渐增加,同时左边瓣能量降低。在相位差为 $\pi/2$ 时,两个边瓣能量相同;当相位由 $\pi/2$ 向 π 增加时,左边瓣能量减小右边瓣能量增加。据此,若能探测两个边瓣的能量变化,即可实现对引起模间相位差变化的外界物理量的传感测量。

根据(2)式可知,若能够采取某种方式调制 $n_{\text{eff}01}$ 或 $n_{\text{eff}11}$,就能够改变两个模式间的相位差,从而实现对引起模有效折射率变化的物理量进行测量。对保偏光纤进行拉锥、包层腐蚀等处理,都能有效地改变一阶高次模式的有效折射率,从而用来设计光纤折射率传感器。本文即采取对光纤包层进行腐蚀的方法来增强光纤外部折射率对模式有效折射率的作用,实现对液体折射率的测量。

3 基于模间干涉的光纤折射率传感方案及分析

在上述关于保偏光纤模间干涉特性分析的基础上,设计了一种结构简单、解调容易的高灵敏度液体折射率传感方案,并对其工作原理和影响折射率传感灵敏度的几个关键因素进行了深入分析,建立实验系统对基于模间干涉的光纤折射率传感器进行了研究。

3.1 基于模间干涉的光纤折射率传感方案

不同于应力和温度等物理量的测量,液体折射率因为难以直接在光纤上有效调制光纤的物理特性或光学特性,所以需要对光纤包层进行预处理以获得理想的折射率响应特性。图4是基于椭芯光纤模间干涉的折射率传感测量方案。在图4中,通过氢氟酸腐蚀方法将椭芯光纤包层腐蚀掉一部分,以增强被测溶液折射率对光纤内传输模式的调制效应。

在图4中,激光器发出的光经光纤偏振器变成线偏振光后进入椭芯光纤中激发出 LP_{01} 和 LP_{11} 两个线性偏振模,当这两个模式经过置于被测溶液中的传感头时,模的有效折射率将受到调制,从而引起光纤输出端两个干涉输出边瓣产生类似于图3所示的分布变化,用光电探测器对两个输出边瓣的光强进行探测和处理后,即可以获得被测溶液的折射率。

3.2 被测溶液折射率与模间干涉响应特性分析

在实验系统中,激光器工作波长为980 nm,腐蚀后光纤半径 $r = 8 \mu\text{m}$,腐蚀区长度为2 cm,椭芯光纤采用 y 方向的偏振模式。在信号处理过程中,为了分析方便,剔除光源功率波动对实验结果的影响,定义归一化光强 δI 为

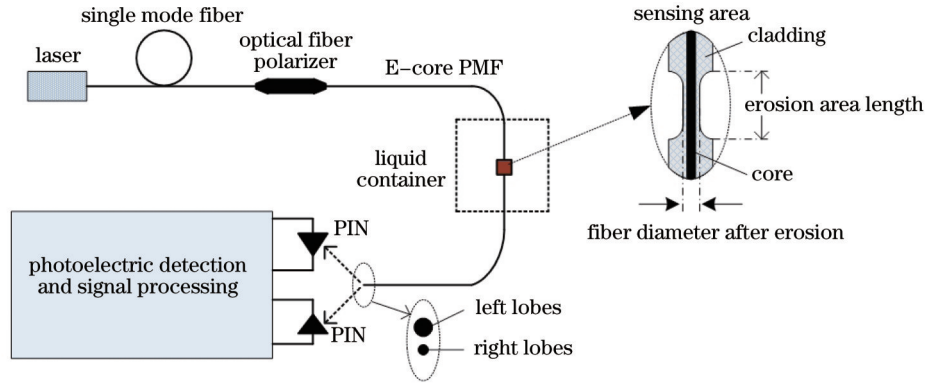


图4 折射率传感系统示意图

Fig.4 Refractive index sensing system diagram

$$\delta I = \frac{I_{\text{Left}} - I_{\text{Right}}}{I_{\text{Left}} + I_{\text{Right}}}, \quad (3)$$

式中 I_{Right} 和 I_{Left} 分别为右边瓣和左边瓣的光强,这一比值能够有效表征两个光斑能量交换情况。根据上述定义,仿真分析了当被测折射率从 1.33 增加至 1.41 时, LP_{01}^y 和 LP_{11}^y 的有效折射率及归一化光强的变化情况。表 1 给出了不同被测折射率与有效折射率及归一化光强的计算结果。图 5 是通过分析计算得到的当折射率为 1.35、1.37、1.39、1.41 时,远场干涉光斑的三维分布图。

从表 1 的数据分析和图 5 中干涉光强光斑分布的变化可以看出:当被测溶液折射率增加时, LP_{01}^y 模的有效折射率不变,而 LP_{11}^y 模的有效折射率随之增加。这主要是由于基模的能量位于纤芯不易受到外界环境折射率的影响,而一阶高次模容易受到外部溶液折射率的影响。当有效折射率差变化时, $\Delta\phi$ 也随之变化,同时 LP_{01}^y 和 LP_{11}^y 模的电场能量也受到影响,所以在图 5 中看到了两个干涉边瓣能量的交换;随着折射率的增加,干涉光强本身的绝对值逐渐减小,这主要是由于外部被测溶液的折射率增大,光纤损耗增加。

表 1 不同被测溶液折射率与有效折射率及归一化光强数据

Table 1 Data of effective refractive indexes and normalized intensity values under different analyte refractive indexes

Analyte refractive index	Effective refractive index of LP_{01}^y	Effective refractive index of LP_{11}^y	Normalized intensity
1.33	1.461787	1.457140	0.53
1.35	1.461787	1.457140	0.48
1.37	1.461787	1.457141	0.42
1.39	1.461787	1.457142	0.29
1.41	1.461787	1.457143	0.17

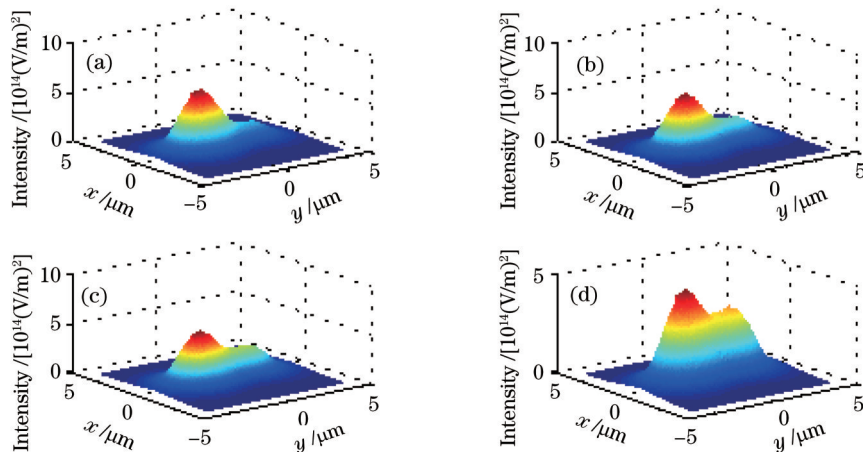


图 5 不同折射率条件下模间干涉光强分布。(a) 1.35; (b) 1.37; (c) 1.39; (d) 1.41

Fig.5 Intermodal interference intensity distributions with different refractive indexes. (a) 1.35; (b) 1.37; (c) 1.39; (d) 1.41

图6是计算得到的被测溶液折射率与归一化光强之间的关系曲线。从图6中可以看出:随着折射率的增加,归一化光强值单调递减。当折射率大于1.37后,斜率明显增加,说明该传感器在1.37~14.1的范围内灵敏度较高。将图6曲线拟合后可得到折射率与光强归一化值的关系为

$$\delta I = 26302.4n^4 - 143945.1n^3 + 295329.5n^2 - 269226.4n + 92013.7. \quad (4)$$

定义归一化光强对折射率的导数为折射率传感器的灵敏度,则其与折射率的关系曲线如图7所示。从图7中可以看出:当折射率小于1.35时灵敏度增大,但绝对值逐渐减小,折射率在1.36~1.39之间时灵敏度绝对值单调增加,而后又迅速减小。在折射率为1.39时灵敏度绝对值最大,能够达到7.1/RIU,RIU为单位折射率。

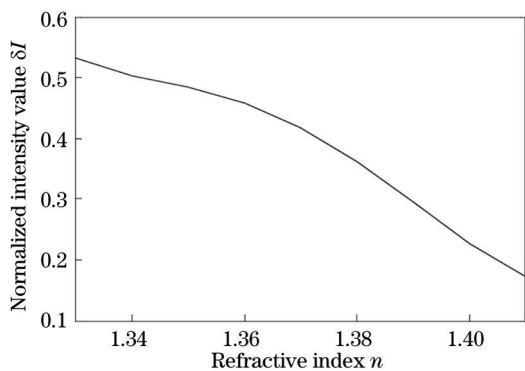


图6 折射率与归一化光强的关系

Fig.6 Normalized intensity values with different refractive indexes

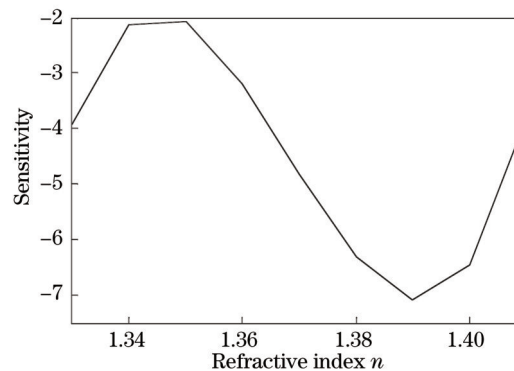


图7 折射率与检测灵敏度的关系

Fig.7 Sensitivity versus refractive index

3.3 传感区腐蚀后半径与折射率灵敏度分析

传感区腐蚀后的光纤半径直接影响光纤纤芯传输模式的限制程度。包层半径越小,对纤芯模式的限制能力越弱,也就越容易受到外部折射率的影响,对于传感器而言其测量灵敏度也就越高。图8是改变传感区腐蚀半径时仿真得到的折射率与归一化光强之间的关系。

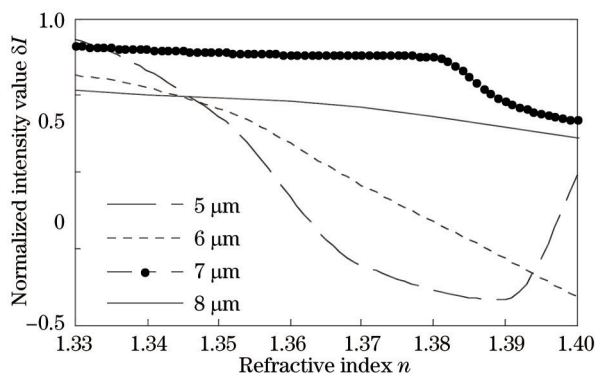


图8 不同半径时折射率与归一化光强的关系

Fig.8 Relationship between normalized intensity values and refractive indexes with different radii

从图8可以看出:当光纤腐蚀至半径为5 μm时,灵敏度最高,输出的归一化强度值变化最快。经过计算在折射率为1.39附近时,能够达到82.1/RIU。半径由5 μm向8 μm增加的过程中,归一化光强的变化逐渐趋于平缓,说明腐蚀后光纤半径越小折射率灵敏度越高。此外,当折射率达到1.39以后,腐蚀后半径为5 μm的光纤对折射率的响应出现了非线性,这是由于此时两个模式的相位差 $\Delta\phi$ 超过了 π 相位造成的。需要补充说明的是:两个模式在光纤传输过程中累积的静态相位差与光源波长和光纤长度有直接关系,所以静态情况下不同波长在光纤输出端形成的干涉输出边瓣分布的初始值也是不同的,导致归一化光强初始值的不同。在实际传感器设计过程中,可以根据灵敏度和测量范围的需要选择不同的光纤半径,但是半径过细也同时带来了传感器制作困难和机械强度低等实际问题。

3.4 光源波长与折射率灵敏度分析

根据模间干涉理论,保偏光纤能够在较宽的光谱范围内实现双模传输^[13],但是不同的工作波长其模间干

涉响应特性也会有所不同。为了研究光源波长对传感器灵敏度的影响,以传感区腐蚀后光纤半径为 $8\ \mu\text{m}$ 的光纤为例,分别对光源波长为 960、980、1000 nm 时归一化光强与折射率间的关系进行了仿真计算,图 9 是得到的仿真曲线图。

从图 9 中可以看出:随着光源波长的增加,归一化强度的斜率增大,说明当波长增加时,传感器的折射率灵敏度会相应地提高。这一现象产生的原因可以解释为:当波长增大时,在光纤中传输的一阶高次模更容易通过腐蚀区泄露出光纤,从而使得模间干涉对被测溶液的折射率变化响应更加敏感。在实际传感器设计过程中,可以综合考虑测量灵敏度的需求和光学器件成本等因素,选择满足光纤双模工作的光源。

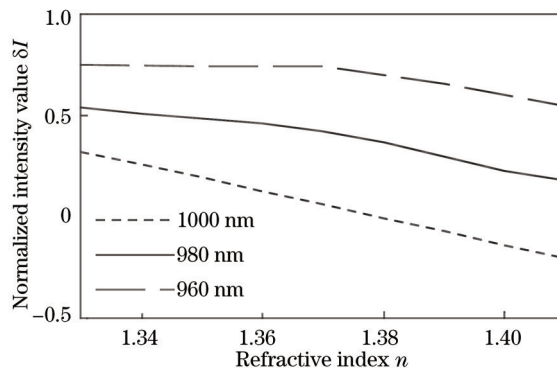


图 9 波长为 960, 980, 1000 nm 时,折射率与归一化强度的关系

Fig.9 Relationship between refractive indexes and the normalized intensity values with the wavelengths as 960, 980, 1000 nm

4 实验研究

为了对基于模间干涉的光纤折射率传感器可行性进行验证,设计实现了一套如图 4 所示的实验系统。实验过程中,在一段椭圆芯保偏光纤上通过氢氟酸腐蚀的方法制作出直径为 $16.14\ \mu\text{m}$,长度为 2 cm 的传感区(腐蚀时间为 40 min),图 10 为显微镜下观察到的制作完成的腐蚀区。腐蚀区制作完成后,将椭圆芯光纤绷直固定在塑料 V 型槽中以防止在实验过程中传感区细光纤发生断裂,如图 11 所示。

实验中,光源波长为 980 nm,用甘油溶液配制了不同折射率的被测溶液(甘油溶液质量分数为 10%~50%,对应折射率范围为 1.3414~1.4148),每次测量后用蒸馏水清洗,并用脱脂药棉将传感区的残余液体吸干。

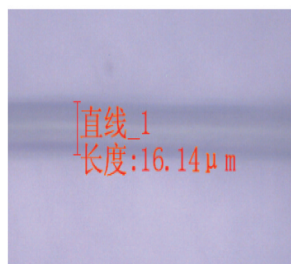


图 10 椭圆芯腐蚀到 $16.14\ \mu\text{m}$ 时的示意图

Fig.10 Schematic diagram of the elliptical core etched to $16.14\ \mu\text{m}$

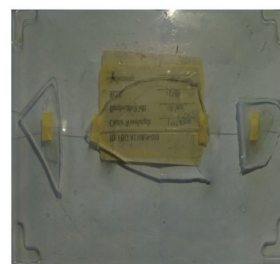


图 11 锥形传感头

Fig.11 Processing part of elliptical core taper region

在图 4 所示的信号处理系统中,通过光电探测、滤波放大等电子处理环节,最后获得的检测系统输出电压与归一化光强之间关系为

$$U_o = 10V \cdot \frac{I_{\text{Left}} - I_{\text{Right}}}{I_{\text{Left}} + I_{\text{Right}}} = 10V \cdot \delta I . \quad (5)$$

图 12 是对实验数据进行整理后得到的传感系统输出电压与被测溶液折射率之间的曲线关系图(实验中分别对 1.3316、1.3564、1.3816、1.3965、1.4148 等 5 种折射率的溶液进行了测试)。从图 12 的实验结果可以看出:1) 随着被测溶液折射率的增加,信号处理系统的输出电压也逐渐减小,这同图 6 中归一化光强与折射率变化仿真结果的趋势是基本吻合的;2) 在实验过程中因为所制作的折射率传感头传感区光纤半径和腐蚀长度与理论模型有一定误差,导致最终的实验结果与理论分析存在一定的偏差,但是仍然能够证明基于模间

干涉原理的包层腐蚀型椭芯保偏光纤折射率传感方案的可行性。为了保证传感头的一致性,在实际传感器设计过程中可以设计专门用于腐蚀的模具来保证腐蚀区长度的统一,同时需要根据氢氟酸浓度精确控制腐蚀时间。另外,稳定的光源波长也是保证系统长期稳定性的必要条件。

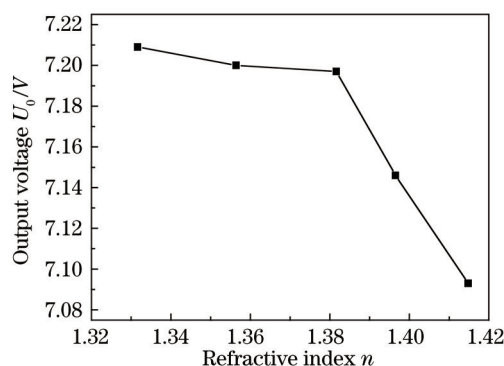


图 12 电压值与被测折射率的关系

Fig.12 Relationship of output voltages and different analyte refractive indexes

5 结 论

提出并验证了一种基于模间干涉原理的包层腐蚀型椭芯保偏光纤折射率传感方案,对传感原理和光源波长、腐蚀区光纤半径等影响折射率传感灵敏度的几个关键因素进行了深入的理论分析,并建立传感实验系统,对该传感方案的可行性进行了验证。实验结果表明:通过将椭芯保偏光纤包层进行腐蚀的方法去掉一部分包层后,光纤内传输的基模与一阶高次模的相位差会受到传感区折射率的调制,从而引起模间干涉输出光强分布的规律性变化,实现折射率传感的目的;且随着被测折射率的增加归一化强度逐渐减小,在折射率大于 1.38 以后灵敏度急剧增加,到 1.39 时能达到 7.1/RIU;锥区半径减小和波长增加时,传感头对外部折射率灵敏也相应增加。该折射率传感方案具有结构灵活、稳定性好、检测系统简单等优点,是一种新颖的光纤折射率传感方法。该传感器可以广泛地用于水质检验、生物溶液浓度检测等相关领域中,实现对相关领域折射率参量的快速、在线测量。

参 考 文 献

- 1 Felipe Beltrán-Mejía, Claudécir R Biazoli, Cristiano M B Cordeiro. Tapered GRIN fiber microsensor[J]. Opt Express, 2014, 22(25): 30432-30441.
- 2 K Misiakos, I Raptis, E Makarona, *et al.*. All-silicon monolithic Mach-Zehnder interferometer as a refractive index and biochemical sensor[J]. Opt Express, 2014, 22(22): 26803-26813.
- 3 Chen Yaofei, Han Qun, He Yang, *et al.*. Study of single mode-multimode-single mode refractive index sensor based on no core fiber[J]. Chinese J lasers, 2013, 40(9): 0905001.
陈耀飞, 韩 群, 何 洋, 等. 基于无芯光纤的单模-多模-单模折射率传感器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905001.
- 4 Haibo Wu, Hui Huang, Min Bai, *et al.*. An ultra-low detection-limit optofluidic biosensor based on all glass Fabry-Perot cavity[J]. Opt Express, 2014, 22(6): 31977-31983.
- 5 Simon Pevec, Denis Donlagic. Miniature fiber-optic sensor for simultaneous measurement of pressure and refractive index[J]. Opt Lett, 2014, 39(21): 6221-6224.
- 6 X Fang, C R Liao, D N Wang. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. Opt Lett, 2011, 35(7): 1007-1009.
- 7 Chen Xiaolong, Luo Yunhan, Xu Mengyun, *et al.*. Refractive index and temperature sensing based on surface plasmon resonance fabricated on a side-polished fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206005.
陈小龙, 罗云瀚, 徐梦云, 等. 基于侧边抛磨光纤表面等离子体共振的折射率和温度传感研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0206005.
- 8 P Bhatia, B D Gupta. Surface-plasmon-resonance-based fiber-optic refractive index sensor: Sensitivity enhancement[J]. Appl Opt, 2011, 50(14): 2032-2036.

- 9 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505008.
毕卫红, 申 远, 刘 强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505008.
- 10 Shun Wang, Ping Lu, Lili Mao, *et al.*. Cascaded interferometers structure based on dual-pass Mach-Zehnder interferometer and Sagnac interferometer for dual-parameter sensing[J]. Opt Express, 2015, 23(2): 674-680.
- 11 Yi Yang, Zinan Wang, Zhengbin Li. Optically compensated dual-polarization interferometric fiber-optic gyroscope[J]. Opt Lett, 2012, 37(14): 2841-2843.
- 12 Chen Xinwei, Zhang Hongxia, Jia Dagong, *et al.*. Implementation of distributed polarization maintaining fiber polarization coupling pressure sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1467-1472.
陈信伟, 张红霞, 贾大功, 等. 分布式保偏光纤偏振耦合应力传感系统的实现[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1467-1472.
- 13 Liu Feng, Bi Weihong, Guo Xuan. Optical voltage transducer based on modular interference in highly elliptical-core polarization-maintaining fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 219-223.
刘 丰, 毕卫红, 郭 璇. 基于椭芯保偏光纤模间干涉的光学电压互感器[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 219-223.
- 14 Lu Xin, Bi Weihong, Ma Shuo, *et al.*. Optical voltage transducer based on two-hole photonic crystal fiber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105003.
芦 鑫, 毕卫红, 麻 硕, 等. 双孔光子晶体光纤光学电压传感方案研究[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1105003.
- 15 Feng Liu, Delan cao, Xuan Guo, *et al.*. Intermodal interference of LP_{01} and LP_{11} modes in panda fibers[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(6): 060602.

栏目编辑: 王晓琰