DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209935

基于 D 型光纤光斑图的折射率传感特性研究*

蔡 露[1,2],李尚文[1],王 敏[1],赵 勇[1,2,3]

(1. 东北大学秦皇岛分校控制工程学院 秦皇岛 066004; 2. 东北大学秦皇岛分校河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室 秦皇岛 066004; 3. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 100819)

摘 要:本文设计并制备了一种单模-D 型-多模光纤结构,利用光纤传导模式间的干涉以及 D 型光纤的非对称结构,获得对外界变化响应极其灵敏的光斑图,并基于纹理特征算法解调出光斑的特征值,由特征值与折射率之间的一一对应关系实现折射率传感。对传感特性的研究中,从仿真与实验的角度讨论了不同抛磨长度、抛磨深度对传感特性的影响,仿真与实验结果均表明,抛磨长度 2 mm 和抛磨深度 18 μm 参数的 D 型光纤结构折射率传感特性最佳,仿真与实验结果一致,证明了研究方法的正确性以及 D 型光纤光斑传感器进行折射率传感的可行性。实验中,能量值(EN)折射率测量灵敏度最高可达-1.86/RIU,拟合度达到 0.964,相关性值(COR)折射率检测灵敏度最高可达-0.23/RIU,拟合度达到 0.979。由于光斑检测的分辨力极高,因此,该方法为高分辨力折射率测量提供了很好的思路。

关键词: 折射率传感器;光纤光斑图;D 型光纤;纹理特征算法

中图分类号: TH741 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.4635

Research on refractive index sensing characteristics based on D-type fiber specklegram

Cai Lu[1,2], Li Shangwen[1], Wang Min[1], Zhao Yong[1,2,3]

(*1. College of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Detection Technology of Hebei Province, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 3. State Key Laboratory of Integrated Automation for Process Industry, Northeastern University, Liaoning 100819, China*)

Abstract: In this article, a single mode-D-type-multimode fiber structure is designed and fabricated. The interference among the guided modes and the asymmetrical structure of the D-type fiber can be utilized to obtain the specklegram, which is extremely sensitive to external changes, and the eigenvalues of the specklegram are demodulated based on the texture feature algorithm. The refractive index (RI) measurement could be achieved via the relationship between the eigenvalues and RIs. In the study of the RI sensing characteristics, the effects of different polishing lengths and polishing depths on the sensing characteristics are discussed from the point of view of simulation and experiment. Both the simulation and experimental results show that the D-type optical fiber structure with the parameters of polishing length 2 mm and polishing depth 18 μm has the best refractive index sensing performance. The consistence between the simulation and experiment demonstrates the correction of the research method and the feasibility of the D-type fiber specklegram sensor for RI sensing. The maximum RI sensitivity of the EN reaches -1.86/RIU, and the fitting degree reaches 0.964. The maximum RI sensitivity of the COR reaches -0.23/RIU, and the fitting degree reaches 0.979.

Keywords: refractive index sensor; fiber specklegram; D-type fiber; texture feature algorithm

收稿日期:2022-06-10 Received Date: 2022-06-10

*基金项目:国家自然科学基金(61803076)、河北省高等学校科学技术研究项目重点项目(ZD2020406)、教育部中央高校基本科研服务费(N2123011)、河北省自然科学基金(F2022501028)项目资助

0 引　　言

近年来,光纤传感器在折射率传感方面占据了重要地位,目前报道较多的光纤传感器类型有长周期光纤光栅传感器[1]、表面等离子体共振传感器(surface plasmon resonance,SPR)[2]、模式干涉[3]等。它们大多通过解调波长或光强的变化实现对外界环境参量的监测,具有结构简单,稳定性强,响应快,灵敏度高等优势。然而,这些光纤传感器大多都需要复杂的制备过程以及昂贵且体积较大的解调设备,因此,不利于实现小型化和低成本的传感器,且解调设备对波长的分辨力有限,一般的 SPR 型传感器、马赫-曾德尔干涉型传感器分辨力在 10^{-7} RIU、10^{-8} RIU 左右,在一些对分辨力的要求非常高的领域,例如重金属离子检测,生物分子检测,有毒气体痕量检测等,应用会有所限制。

因此,光纤光斑传感器(fiber specklegram sensors,FSS)应运而生,由于 FSS 可以通过相对简单且价格低廉的装置来实现参数测量,并且依然具备光纤传感器的优势,因此被认为在扩展光纤传感技术方面有一定的研究意义,近年来受到越来越多的关注[4-7]。基于模式干涉原理,光斑图样携带了大量的光纤空间状态信息,通过输出光斑图样可得到外界环境变化对光纤的影响,因此可应用于光纤传感领域[8]。

光斑检测一般基于光纤模式干涉结构,不同结构所激发的模式数不同,模场分布也不同,进而影响光斑检测的性能。Carlos 等将多模光纤弯曲成 U 形浸入液体,利用光纤弯曲时导致模式具有更复杂的空间分布的特性,探究液体折射率对多模光纤输出光斑的影响[9],但其高弯曲损耗限制了它的应用。熔融拉锥也是一种有效途径[10-11]。Gilberto 等在两个单模光纤之间熔接一段多模光纤,并将多模光纤熔融拉锥至锥区直径 30 μm。在 1.33~1.44 的低折射率范围内,最高灵敏度达 1 913 nm/RIU[12],但由于锥形光纤非常脆弱,所以传感结构的耐久性不够好。总之,光纤光斑传感器成本低廉,分辨力高,易于小型化,十分适用于折射率传感方面,但已报道的光斑检测结构中,仍存在干涉情况不够“混乱”、输出的光斑随机性不足够好、传感结构机械性能不足等问题,导致光斑图所携带的信息受限。基于以上问题,本文提出了一种适用于光斑检测,且具有良好的机械强度和折射率高敏感性的结构,即 D 型光纤结构。

D 型光纤是指因其具有被去掉的部分包层导致端面呈“D”型而命名[13],当光以不同入射角度进入 D 型多模光纤之后,由于 D 型多模光纤改变了圆对称光纤的形状,其抛磨侧面对光线反射造成光纤内的大部分光线的传输轨迹发生了很大变化,呈现了一种“混乱”的现象,这种特点恰好是光斑图检测法所希望的。以 D 型光纤为基础元件,可以实现高灵敏度的折射率传感[14-18],这是折射率传感器所需要的。

因此,本文提出了一种基于 D 型光纤的单模-D 型-多模光纤结构的光斑传感器,基于纹理特征算法的图像处理方法分析了 D 型光纤光斑的特性,并通过仿真探究不同抛磨长度、抛磨深度对传感特性的影响,结果表明,抛磨长度 2 mm 和抛磨深度 18 μm 的参数最佳。之后搭建 D 型光纤的制备系统,制备不同抛磨长度和深度的 D 型光纤,并对其进行折射率传感探究,实验结果表明,光纤光斑图中所提取的特征值可以很好地体现出环境折射率的变化,实验结果与仿真结果相一致,且具备良好的线性拟合效果,证明了 D 型光纤光斑传感器进行折射率传感的可行性。

1 理论分析

1.1 D 型光纤光斑

光纤散斑是一种颗粒状的图案,当相干光传输进光纤时,光纤中激发了多个传播模式,这些模式之间会发生耦合和干涉。以多模光纤作为光传输介质进行分析,复振幅的空间分布 $A(x,y)$ 为:

$$A(x,y)=\sum_{m=0}^{M-1}a_m(x,y)\exp[\mathrm{j}\phi_m(x,y)] \tag{1}$$

其中,a_m 和 ϕ_m 分别是 x-y 投影平面上 m-th 模的振幅和相位分布,光斑强度 $I(x,y)$ 为:

$$I(x,y)=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{M-1}a_m a_n\exp[\mathrm{j}(\phi_m-\phi_n)] \tag{2}$$

根据式(2),可以看出散斑场同时包含 M 个模的振幅和相位信息[19],所以,光纤内外任何扰动都有可能造成光纤内每个模式的传播常数发生变化,相位之间存在差异,同时,模式传输的任何改变都会引起斑点图的变化。

当光纤改变时会引起不同传播模式间的模功率传输改变,且由于光纤状态改变会引起传输损耗改变。这样,模态干涉会相应变化,引起光斑图的变化。这也就解释了为什么光斑图可以代表光纤的一些信息。此外,受到外界环境的干扰时,模式干涉和模式耦合也导致模态功率分布产生变化。因此用式(3)计算模的功率变化 ΔP_m:

$$\Delta P_m=\sum_{n=0}^{M-1}h_{mn}(P_m-P_n) \tag{3}$$

其中,p_m 和 p_n 分别是第 m 模式和第 n 模式的初始功率,与初始光纤状态有关,h_{mn} 为耦合系数[8]。

对于 D 型光纤而言,从全反射原理分析光线传输,当入射光线在子午面上时,以一定入射角度 θ 入射的光线

的总光程用式(4)表示[20]。

$$L_c = nL(1 - \sin^2\theta/n^2)^{-1/2} \tag{4}$$

式中:L 为光纤长度,n 为光纤纤芯折射率。则以 0°入射的光线和以 θ 角度入射的光线之间的光程差,即模间色散可以表示为:

$$\Delta L_c = nL[(1 - \sin^2\theta/n^2)^{-1/2} - 1] \tag{5}$$

由式(5)可以看出,具有不同入射角的光线有不同的光程,所以它们在出射时不会发生相干增强的现象。相反,有相同入射角的光线会发生相干增强的现象。在 D 型多模光纤中,抛磨面导致一条光线被多次反射后随即形成了上述所说的"混沌"状态。因此在光纤不同端面处,以相同入射角 θ 入射的光线其光程差别很大,任何斜入射光线在光纤输出端面不再具有同相位的相干增强性质。

光在光纤中传输时,由于全反射原理,大部分能量被束缚在纤芯内,只有一小部分能量进入到包层以及光纤之外的环境中,即为光纤的倏逝场。当 D 型光纤抛磨深度越深,从纤芯溢出的能量也就越多,也就是说倏逝场强度增大,作用于外界环境也更加强烈。由于 D 型光纤结构具有被抛磨掉的包层,其纤芯比常规光纤更接近外部环境,所以 D 型面处的倏逝波更容易受到外界环境折射率变化的影响,可以激发出大量普通多模光纤不能支持的模式,模式之间的耦合更加强烈,光斑图样将更具随机性且所包含的信息更加丰富,可以提升传感系统的性能。

1.2 光斑图样处理方法

对于光纤光斑解调技术而言,解调方式的选取对于建立光斑图与外界变化之间的关系至关重要。本文采用的是基于纹理特征算法的图像处理方法,不需要参考图像,且准确识别出变化过快或者过大的外界扰动造成的光斑图差异,利用从光斑图中得到的灰度共生矩阵的统计特征值就可表示外界环境变化对光纤状态的影响,在灵敏度和动态范围上相比于其他方法都有所提高。

要建立图像的纹理与外界环境之间的关系,就需要根据灰度图像中像素之间的关系构建灰度共生矩阵(gray level co-occurrence matrix, GLCM),进而建立与纹理之间的关系。GLCM 是一个二维方阵,其大小取决于灰度图中的灰度级,通过计算在某一空间位置关系中,以特定距离、特定角度下选取的像素对可出现的频率来描述图像的纹理[21]。一般无法直接从矩阵中看出图像的某些特性,而是基于矩阵得到几种数值特征和统计量,如角二阶距(energy, EN)和相关性(correlation, COR)[22]。

角二阶距的定义如式(6)所示。

$$EN = \sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L} p(i,j)^2 \tag{6}$$

其中,L 为灰度共生矩阵的行列数;$p(i,j)$ 为第 i 行,第 j 列的共生矩阵元素值。角二阶距是对图像纹理的灰度变化稳定程度的度量,反映了图像灰度分布的均匀程度以及纹理的粗细度。能量值大,表示纹理变化规则、稳定;反之,能量值小,纹理变化不规则。

相关性的定义如式(7)所示。

$$COR = \sum_{i=1}^{L}\sum_{j=1}^{L} (i - \mu_x)(j - \mu_y)p(i,j)/\sigma_x\sigma_y \tag{7}$$

其中,μ_x,μ_y,σ_x,σ_y 分别是灰度共生矩阵行列方向上的均值和方差。它表征灰度共生矩阵在行列方向上的相似程度,反映局部灰度的相关性。矩阵元素数值差别大,相关性小;数值差别小,相关性大。

基于以上理论,将获取的光斑图样转换为灰度图像,然后进行图像均衡处理,确定了灰度级、距离和角度之后,得到一个灰度共生矩阵,归一化后,在得到的灰度函数上求取参数 COR 和 EN 值。

通过此前报道可知,随着模式数增大,EN 值基本呈递减趋势。说明模式数越大,图像相同灰度值的颗粒分布越不均匀[23]。随着模式数的增多,传感器的灵敏度会提高。依据模式数与光斑图像灰度共生矩阵特征值 EN 和 COR 的线性关系,可以定性分析光斑图像的特征值来反映折射率变化,实现光纤的 RI 传感。

2 仿真与实验分析

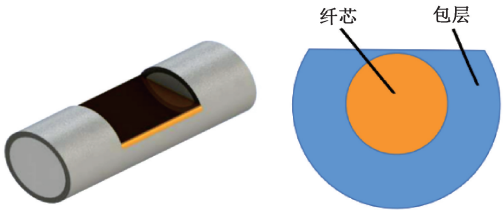
2.1 D 型光纤光斑传感器的仿真分析

1)D 型光纤抛磨深度的分析

D 型光纤是指因其具有被去掉的部分包层导致端面呈"D"型而命名,其整体结构和 D 型部分横截面结构如图 1(a)和(b)所示,图 1(c)所示为 D 型光纤内光传播路径。D 型光纤抛磨面的影响使得传导模的路径复杂多样,光斑正是由多种模式混合叠加而形成,因此 D 型光纤这种状态使得其应用在光纤传感领域上,比等长度的普通圆柱形多模光纤输出的光斑更具有随机性,且由于倏逝场泄露,检测时对外界环境更加敏感,更具传感优势。

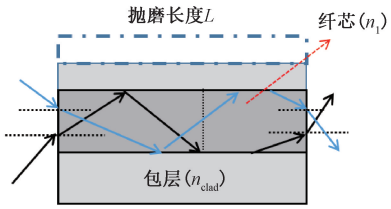
光纤传输光的必要条件是在纤芯和包层之间发生全反射,D 型光纤由于具有被抛磨的侧面,倏逝场泄露到外界环境中,因此外界环境的折射率也会对光纤内光的传输造成影响。本文设计了基于 D 型光纤的复合结构,即单模-D 型-多模光纤结构,如图 2 所示。

为了探究 D 型光纤的参数对传感特性的影响,本文基于光束传播法,对抛磨长度与抛磨深度做了仿真分析。仿真采用的 D 型光纤为多模光纤制备而成,其纤芯直径为 105 μm,包层直径为 125 μm,外部环境折射率范围选取 1.333~1.365,磨削深度和抛磨截面长度分别表示为 d 和 L。对于光斑解调法来说,考虑到模式激发数、传感器成本等方面,可见光波段的光较为适合。相较于光纤中常见的红外波段,可见光在光纤中能够激发出更多传导



(a) 三维示意图
(a) 3D schematic diagram

(b) 截面示意图
(b) Schematic cross section



(c) 光线在D型光纤中传播示意图
(c) Schematic diagram of light propagation in D-type fiber

图 1　D 型光纤示意图

Fig. 1　D-type fiber schematic diagram

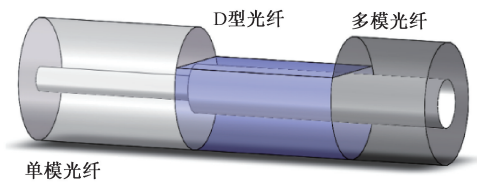


图 2　在不同抛磨深度仿真获得的光斑图样

Fig. 2　Specklegram obtained by simulation at different polishing depths

模式,有利于提升光斑检测的灵敏度。相较于紫外波段,可见光波段的损耗更小,更适合在空气中传输。并且,可见光探测的 CMOS 相机价格远低于近红外相机。关于可见光波长的选择,主要考虑到光的相干性对光斑图样纹理清晰度的影响。在可见光波段常见激光光源有半导体激光器、氩离子激光器和氦氖激光器,其中氦氖激光器输出连续光,工作稳定,且相干性更高,能够使光斑纹理更加清晰,因此选择氦氖激光器,其输出光波长为 632.8 nm。仿真中同样选择 632.8 nm 作为输入光波长。

首先研究不同抛磨深度对输出光斑特性的影响,控制抛磨长度 2 mm 不变,改变 D 型光纤抛磨深度,分别为 10 μm、15 μm、18 μm、21 μm、30 μm。仿真在相同折射率下不同抛磨深度的输出光斑,如图 3 所示。

可以看出,输出光斑确实受抛磨深度的影响,当外部环境折射率相同时,随着 D 型光纤磨削深度的增大,光斑明显更加分散,分布更加不均匀,当抛磨深度为 18 μm 时,对光斑形变及分布造成的影响最大。随着 D 型磨削深度的增大,高阶模损耗的将会越来越多,且随着折射率的增加,光线传输受外界影响更强烈,任意抛磨深度的 D 型光纤产生的光斑图样都会产生更大程度的变化。对获

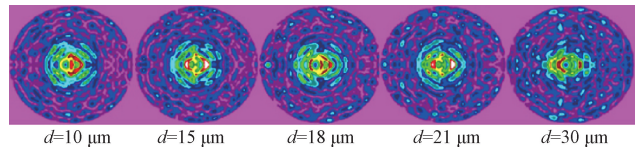
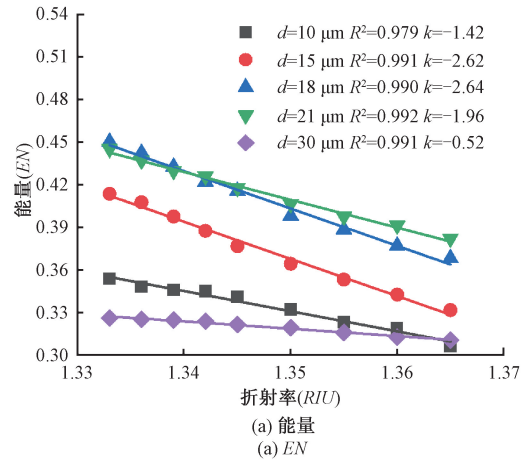


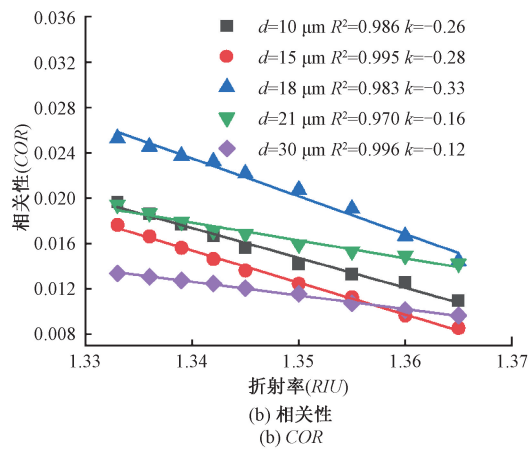
图 3　单模光纤-D 型光纤-多模光纤复合结构示意图

Fig. 3　Schematic diagram of composite structure of single mode fiber-D-type fiber-multimode fiber

取到的光斑图样利用灰度共生矩阵算法进行处理,得到每幅光斑图所对应的特征值 *EN* 和 *COR*,绘制不同折射率与特征值之间的特性曲线,结果如图 4 所示。



(a) 能量
(a) *EN*



(b) 相关性
(b) *COR*

图 4　不同抛磨深度下 D 型光纤 *EN* 和 *COR* 随折射率变化示意图

Fig. 4　Schematic diagram of the variation of EN and COR with refractive index of D-type fiber at different polishing depths

传感器灵敏度的定义为:输出变化量与输入变化量之比,或者说单位输入下所得到的输出。本文利用光斑解调方法检测液体折射率,输入量即折射率,输出量即通过解调算法所得到的光斑图特征值 *EN* 或 *COR*。图 4 中标注的拟合曲线斜率 *k* 就是不同抛磨深度的 D 型光纤结构的灵敏度数值。由于 *EN* 和 *COR* 是无量纲数,因此,最终得到的灵敏度单位是/RIU。

由图 4 可以看出,随着折射率的增加,特征值 *EN* 和 *COR* 呈现递减的趋势,且具有良好的线性拟合趋势。折射率较小时特征值较大,这表明光斑图中存在大量块状或条状的相同颜色的色块,分布较均匀,模式激发情况也较弱,折射率的增大使得光纤中激励的模式数量也在变多,光斑图样也更加不均匀和复杂,相关程度较低。将 5 组实验的灵敏度结果绘制成图 5 所示。

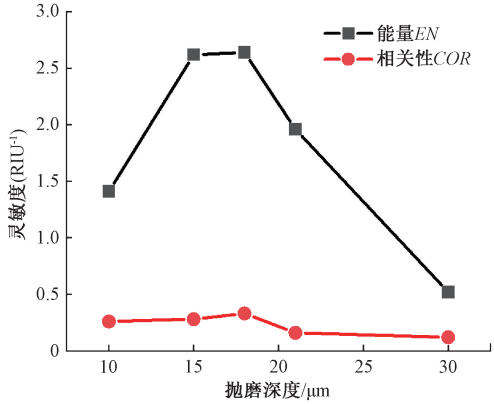


图 5 仿真结果中单模-D 型-多模光纤结构折射率灵敏度随抛磨深度变化

Fig. 5 Refractive index sensitivity of single mode-D-type-multimode fiber structure varies with polishing depth in simulation results

通过 5 组对比可以看出,随着抛磨深度的增加,光纤内传输光与外界接触,倏逝场作用更强烈,灵敏度也在不断增加,但同时抛磨越深,传输光泄露的越多,损耗也在不断增大。当达到一定值后,损耗量大于倏逝场作用,导致灵敏度开始呈下降趋势,当抛磨深度为 18 μm 的 D 型光纤传感效果最佳,其 EN 值拟合优度达到 0.982,灵敏度达-2.64/RIU,COR 值拟合优度达到 0.984,灵敏度达-0.33/RIU。

2) D 型光纤抛磨长度的分析

考虑到暴露光纤段长度不同,传感特性也不同,本节对抛磨长度做了探究,为了更全面的探究 D 型光纤长度这一参量的影响,将抛磨长度变化区间选取为从几毫米到几厘米的范围。保持 D 型光纤抛磨深度不变,仿真不同抛磨长度下的 D 型光纤,结果如图 6 所示。

可以看出,不同抛磨长度产生的光斑图形状各异,且抛磨长度越长,光斑分布的均匀性和复杂性逐渐变弱,相似程度越来越低,且光能量逐步向光圈外部扩散。这可能是由于,随着 D 型光纤抛磨长度的增加,与外部环境的作用面积变大,光在 D 型光纤中经历的路程变长,倏逝场增强,高阶模式有效折射率减小,甚至有部分高阶模式截止。因此,耦合回多模光纤后,各模式能量重新分配,有更多光能量耦合向高阶模式,包层中能量更强,表现为光斑图中的能量向包层扩散。

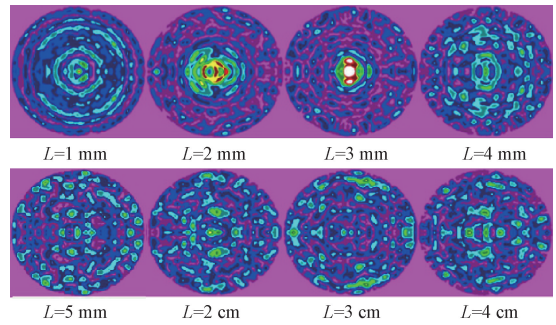


图 6 在不同抛磨长度下仿真获得的光斑图样

Fig. 6 Specklegram obtained by simulation at different polishing lengths

当环境折射率改变时,对 D 型光纤内模式激发情况的影响也是不同的,可以通过分析光斑图样之间的变化反映外界折射率的变化。对不同折射率条件下获取的光斑图样,利用灰度共生矩阵算法进行处理,结果如图 7 所示。

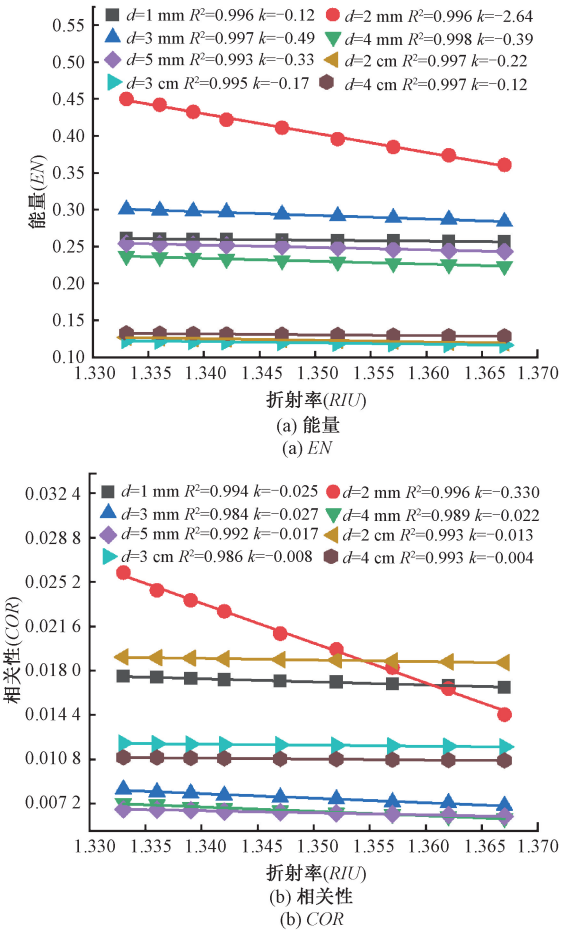


图 7 不同抛磨长度下 D 型光纤 EN 和 COR 随折射率变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the variation of EN and COR with refractive index of D-type fiber at different polishing lengths

图 7 中 D 型光纤长度依次为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm、2 cm、3 cm、4 cm,可以看出,随着外界环境折射率的增加,特征值 *EN* 和 *COR* 呈现递减的趋势,且具有良好的线性拟合趋势。随着折射率的增加,光斑图样的更具有随机性,产生更大程度的变化。8 组实验结果绘制如图 8 所示。

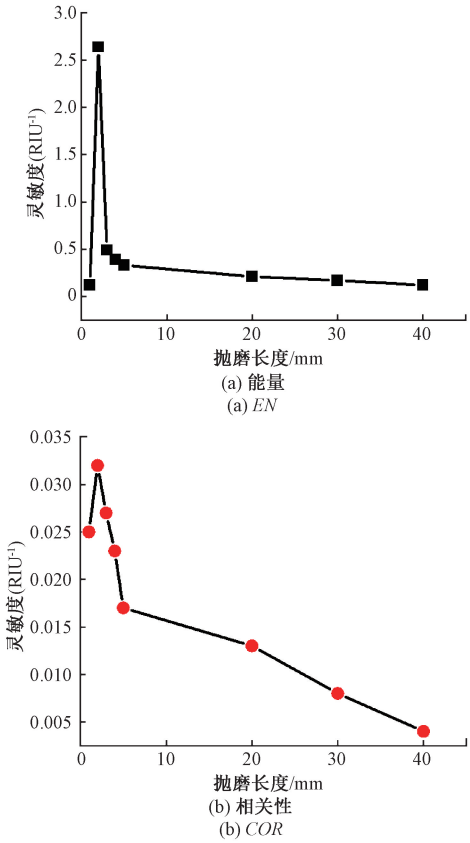


图 8　仿真结果中单模-D 型-多模光纤结构折射率灵敏度随抛磨长度变化

Fig. 8　Refractive index sensitivity of single mode-D-type-multimode fiber structure varies with polishing length in simulation results

由图 8 可知,随着 D 型光纤长度的增加,抛磨面与外界环境作用面积增大,倏逝场作用更强烈,灵敏度也在不断增加,但同时 D 型光纤长度越长,传输光泄露的也更多,损耗也在不断增大。当 D 型光纤长度达到一定值后,灵敏度开始呈下降趋势,当 D 型光纤长度为 2 mm 时,*EN* 值突变表明有局部图像均匀程度受抛磨长度变化影响产生较大改变,但此时 D 型光纤内倏逝场强度与损耗强度达到了一个最佳状态,此时系统的灵敏度最高,其 EN 值拟合优度达到 0.982,灵敏度达-2.64/RIU,*COR* 值拟合优度达到 0.984,灵敏度达-0.33/RIU。

2.2　D 型光纤光斑传感器的实验分析

1)D 型光纤的制备

本文选取阶跃型多模光纤进行抛磨处理,搭建的 D 型光纤抛磨设备如图 9 所示。在一个 V 型架子上固定好研磨机(DUOMAO,RS555),其顶端接一个磨砂轮,利用磨砂轮对光纤的横截面进行抛磨。研磨时间决定了抛磨深度,磨砂轮的尺寸及移动范围决定了抛磨长度,可根据实际要求更换磨砂轮的尺寸及粗糙度。此外,根据要求的抛磨效果,可自由调节小型研磨机的转速,调节范围为 0~4 000 r/min。用三维位移平台夹持光纤,通过调节位移旋钮控制光纤松紧程度,使其保持在一个水平面上,将抛磨砂轮放置在光纤上方,使砂轮下方恰好与光纤横截面相接触。制备的 D 型光纤侧抛效果如图 10 所示。从显微图片可知,D 型光纤表面粗糙度变化尺度是小于光波长量级或与之相当的,因此可视为一些能够引起线性散射损耗的微小粒子。粒子的大小会影响该结构的插入损耗,造成光功率的变化,这个变化是与入射光功率成正比的,但并不会改变各模式的相位。

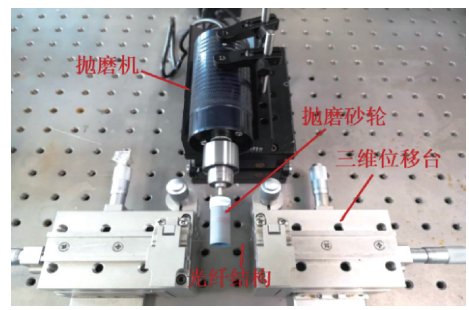
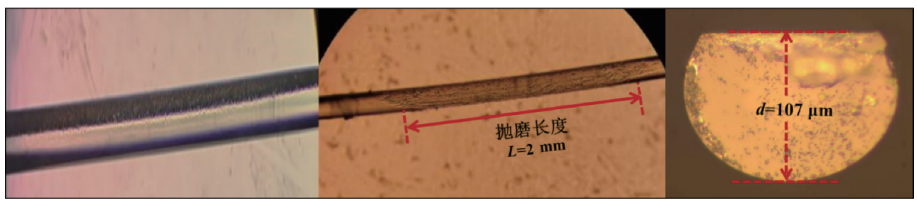


图 9　光纤抛磨设备

Fig. 9　Optical fiber polishing equipment



(a) 侧视图
(a) Sideview
(b) 俯视图
(b) Topview
(c) 截面图
(c) Sectional view

图 10　所制备的 D 型光纤侧抛效果展示图

Fig. 10　Prepared D-type optical fiber side throwing effect display diagram

2)不同抛磨深度 D 型光纤折射率传感实验

D 型光纤的折射率传感原理主要是以 D 型光纤抛磨面作为检测区域,用待测溶液将其完全覆盖,当光线在 D 型光纤内传输时,会有部分光以倏逝场的形式泄露出去作用于外界环境。所以当外界环境的折射率改变时,会对光纤内模式的相位差造成影响,因此导致叠加生成的光斑图产生差异,利用这些差异就可探究其传感特性。

在传感测试中,采用输出光波长为 632.8 nm 的氦氖激光器,经准直透镜(Thorlabs,PAF2S-7A)将光耦合进光纤中。用不同浓度的 NaCl 待测液浸泡 D 型光纤,通过 CMOS 相机(MER-031-860U3C)获取不同浓度下的光斑图样。部分光斑图示意如图 11 所示。光斑图效果可知,利用现有磨砂轮制备的 D 型光纤可输出清晰的光斑图,证明这种方法制备的 D 型光纤其表面粗糙度能够满足基本传光要求。从图像对比可以看出,在低折射率时,光斑图有很多聚集在一起的大块亮斑,且光斑大多集中于圆形中心,这表明局部比较均匀,体现在特征值上的 EN 值较大。而随着折射率的增大,输出光斑的局部变化增大,独立亮斑面积也在减少,图像更加复杂和不均匀,光斑数目也有所增多,外圈出现亮斑,证明高阶模式也逐步占主导地位。

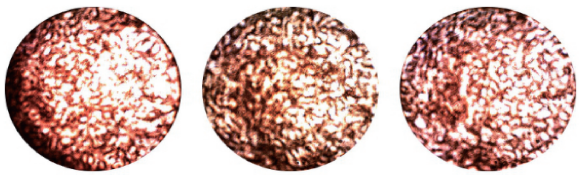


图 11 不同折射率 n 条件下的光斑图

Fig. 11 Speckle diagrams under different refractive index n conditions

接下来实验探究 D 型光纤抛磨长度和抛磨深度对传感特性的影响。保持抛磨长度 2 mm 不变,探究不同抛磨深度下的 D 型光纤,部分光斑图如图 12 所示。可以看出,随着抛磨深度的增加,光斑图分布逐渐不均匀,相似程度越来越低。光斑亮度在减少,光斑数目有所增多,但过度的抛磨造成光斑高阶模损耗过大,光斑外圈逐渐变暗,光斑数目也有所减少。对不同折射率下的光斑图进行特征值的提取,并对其进行拟合,实验结果如图 13 所示。

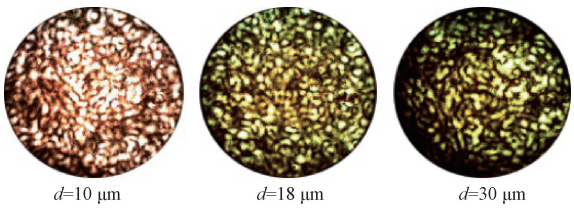


图 12 不同抛磨深度的 D 型光纤输出光斑图

Fig. 12 Specklegram obtained by simulation at different polishing depths

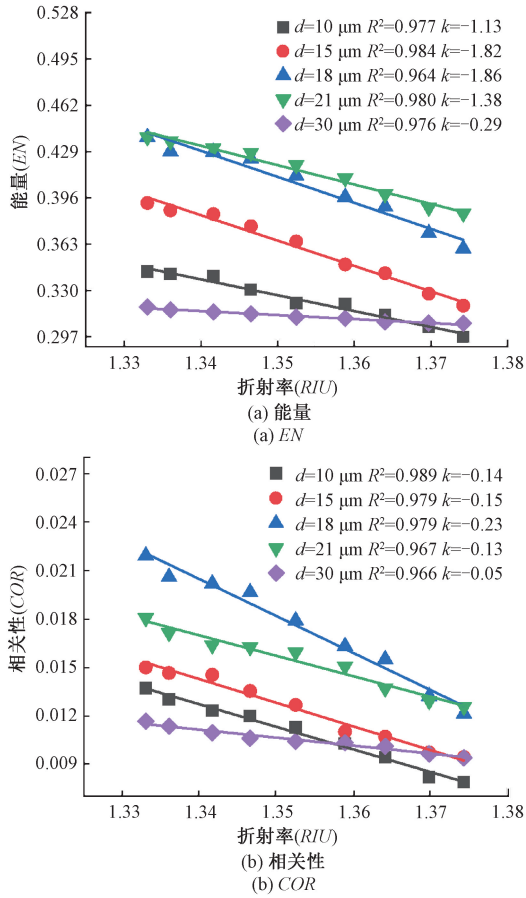


图 13 不同抛磨深度下 D 型光纤 *EN* 和 *COR* 随折射率变化示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the variation of *EN* and *COR* with refractive index of D-type fiber at different polishing depths

5 组实验抛磨深度分别为 10、15、18、21、30 μm。从结果可以看出,特征值 *EN* 和 *COR* 在各自动态范围内具有比较好的线性度,随折射率的增加且呈现递减趋势。将特征值 *EN* 和 *COR* 的灵敏度绘制成图 14 所示。随着抛磨深

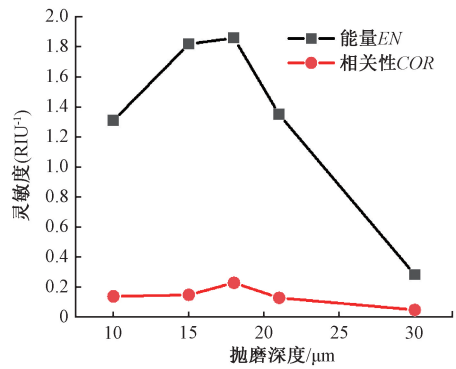


图 14 实验结果中单模-D 型-多模光纤结构折射率灵敏度随抛磨深度变化

Fig. 14 Variation of RI sensitivity of single mode-D-type-multimode fiber structure with polishing depth in experimental results

度的增加,灵敏度呈现先增加后降低的趋势,与仿真结果相匹配,当抛磨深度为 18 μm 时,D 型光纤的传感效果最好,*EN* 值拟合优度达到 0.964,灵敏度达-1.86/RIU,*COR* 值拟合优度达到 0.979,灵敏度达-0.23/RIU。

3)不同抛磨长度 D 型光纤折射率传感实验

本节探究抛磨长度的影响。由仿真探究可知,抛磨长度过长灵敏度反而降低,因此本文只选取了抛磨长度分别为 1、2、3、4、5 mm 的 5 个长度 D 型光纤做实验探究,保持抛磨深度 18 μm 不变,部分光斑图示意如图 15 所示。从光斑图变化可以看出,随着抛磨长度的不断增加,光斑的分布更加的混乱,图像之间的相似程度也在降低。且抛磨长度的增加导致了光斑亮度减弱,外圈亮度也呈现了先变亮后逐渐变暗的趋势,但很明显 2 mm 时光斑数目最多。对不同抛磨长度产生的光斑图进行解调,实验结果如图 16 所示。

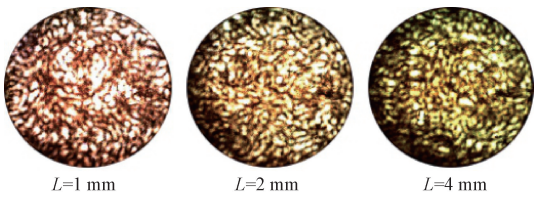
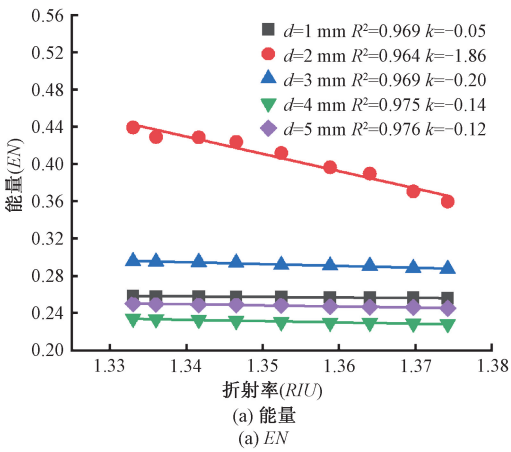


图 15　不同抛磨长度的 D 型光纤输出光斑图

Fig. 15　Specklegram obtained by simulation at different polishing lengths

从图 16 中可以看出,不同抛磨长度的 D 型光纤的拟合优度比较接近,特征值随着折射率的增大呈现递减趋势。将特征值灵敏度绘制成图 17 所示。由图 17 可知,随着 D 型光纤抛磨长度的增加,特征值 EN 和 COR 对折射率的灵敏度呈现先增加后减小的趋势,与仿真结果相匹配。在动态范围 1.333~1.375 范围内,2 mm 长的 D 型光纤效果最佳,EN 值拟合优度达到 0.964,灵敏度达-1.86/RIU,COR 值拟合优度达到 0.979,灵敏度达-0.23/RIU。



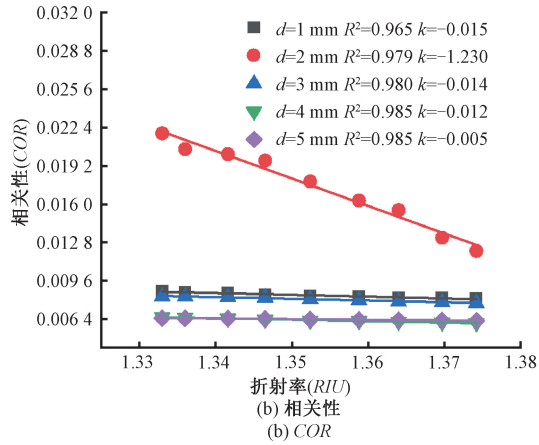


图 16　不同抛磨长度下 D 型光纤 *EN* 和 *COR* 随折射率变化示意图

Fig. 16　Schematic diagram of the variation of *EN* and *COR* with refractive index of D-type fiber at different polishing lengths

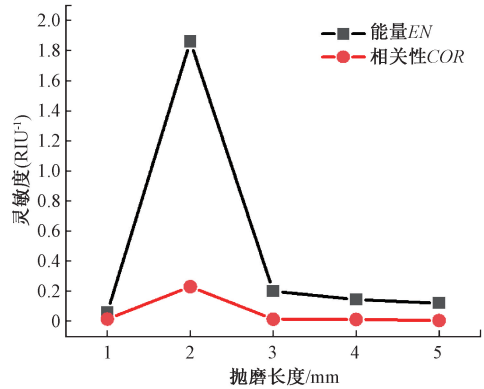


图 17　实验结果中单模-D 型-多模光纤结构折射率灵敏度随抛磨长度变化

Fig. 17　Variation of refractive index sensitivity of single mode-D-type-multimode fiber structure with polishing length in experimental results

实验结果表明,相比于现有报道文献采用数值计算归一化强度内积(normalized intensity inner product constant, NIPC)方法[24],本文在线性度和动态范围上有所提高。NIPC 方法由于不能接受过快过大的变化,因此线性度较差,传感曲线大多只存在部分线性关系[25-27]。在分辨力方面,一般的基于光谱解调方式的 SPR 传感器分辨力可达 10^{-7} RIU,而本文提出的基于 D 型光纤光斑的传感器分辨力具有更高的分辨力,可达 10^{-11} RIU。因此,基于 D 型光纤光斑的传感器具有更好的灵敏度与分辨力,可实现超低浓度检测。

在实验中,特征参数 EN 和 COR 均随着折射率的增加而减小,说明模间干涉导致输出光斑图样局部纹理变

化越来越大,激发模式数量越多,叠加效果越复杂,输出光斑图样更加随机,纹理特性更加明显。理论上,随着外界折射率的增大,光纤中模式的相位变化也会叠加,而光斑图又是所有模式相位变化的叠加,所以相位变化的越多,叠加的越多、越复杂,导致最终得到的光斑图越不均匀、越复杂,相似程度越低。所以,与整体均匀程度成正比的能量参数 EN 呈递减趋势,反映图像相似程度的相关性参数 COR 也呈现递减趋势。一般情况下,外界的微小扰动会导致光斑亮斑的位置发生一点改变,但对光斑纹理特性影响不大,因此利用光斑纹理特性进行传感的方法具有比较好的适应性。

3 结 论

本文提出了一种基于 D 型光纤光斑的折射率传感方法,利用一种纹理特征算法对光斑图像进行特征值提取,通过特征值与折射率之间的线性关系可解调出折射率变化量。对 D 型光纤抛磨长度和抛磨深度两个参数进行了仿真分析,分析不同结构参数对传感特性的影响,仿真结果表明抛磨长度 2 mm、抛磨深度 18 μm 的 D 型光纤结构灵敏度最优。同时,搭建了制备 D 型光纤的实验装置,抛磨不同长度和深度的 D 型光纤,制备基于 D 型光纤的传感结构并对其做折射率特性探究,实验结果证明了解调出来的特征值与折射率变化有着很好的线性拟合关系,最优参数与仿真结果相一致。实验结果表明,EN 值的折射率灵敏度最高可达 -1.86/RIU,拟合度达到 0.964,COR 值的折射率灵敏度最高可达 -0.23/RIU,拟合度达到 0.979。本文所提出的方法为后续光纤光斑传感器应用于生物传感检测提供了一个很好的基础。

参考文献

[1] ZHU C, GERALD R E, HUANG J. Progress towards sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020,69(11):8639-8655.

[2] MENG H, SHEN W, ZHANG G, et al. Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 150(1): 226-229.

[3] GARG R, TRIPATHI S M, THYAGARAJAN K, et al. Long period fiber grating based temperature-compensated high performance sensor for bio-chemical sensing applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176: 1121-1127.

[4] LI G, LIU Y, QIN Q, et al. Deep learning based optical curvature sensor through specklegram detection of multimode fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149:107873.

[5] WEI M, TANG G, LIU J, et al. Neural network based perturbation-location fiber specklegram sensing system towards applications with limited number of training samples[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(19):6315-6326.

[6] XU F, ZHU R Z, WAN S J, et al. Magnetic field sensing based on multimode fiber specklegrams[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(11): 3614-3619.

[7] XU F, ZHU R Z, WAN S J, et al. Magnetic field sensing based on multimode fiber specklegrams[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 30(7):10443.

[8] EFENDIOGLU H S. A review of fiber-optic modal modulated sensors: Specklegram and modal power distribution sensing[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 2055-2064.

[9] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, COBO A, et al. Optical fiber strain sensor with extended dynamic range based on specklegrams[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 203: 341-345.

[10] LOMER M, RODRIGUEZ-C L, REVILLA P, et al. Speckle POF sensor for detecting vital signs of patients[C]. 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9157: 91572I.

[11] RODRIGUEZ C L, LOMER M, LOPEZ H J M. Fiber specklegram-multiplexed sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 33(12): 2591-2597.

[12] KLOKOC P, LUJO I, BOSILJEVAC M, et al. Optical sensor system for vibration measuring[C]. 2008 50th International Symposium ELMAR, IEEE, 2008, 2: 625-628.

[13] 李宏伟. D 型光子晶体光纤表面等离子体传感机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2019.
LI H W. Research on surface plasmon sensing mechanism of D-type photonic crystal fiber [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

[14] QUERO G, CRESCITELLI A, Paladino D, et al. Evanescent wave long-period fiber grating within D-shaped optical fibers for high sensitivity refractive index detection[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 152(2): 196-205.

[15] 廖国珍, 张军, 蔡祥, 等. 基于石墨烯的全光纤温度传感器的研究[J]. 光学学报, 2013 (7): 19-25.
LIAO G ZH, ZHANG J, CAI X, et al. Research on graphene-based all-fiber temperature sensor [J]. Journal

of Optics, 2013 (7): 19-25.
[16] DONG H, CHEN L, ZHOU J, et al. Coreless side-polished fiber: A novel fiber structure for multimode interference and highly sensitive refractive index sensors[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 5352-5365.
[17] 谢庆利. 基于侧抛光子晶体光纤的表面等离子体共振传感器特性研究[D]. 深圳:深圳大学, 2017.
XIE Q L. Characteristics of surface plasmon resonance sensor based on side polished photonic crystal fiber [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
[18] GUO Y, LI J, WANG X, et al. Highly sensitive sensor based on D-shaped microstructure fiber with hollow core[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 123: 105922.
[19] RODRIGUEZ C L, LOMER M, LOPEZ H J M. Common frequency suppression method for fiber specklegram perimeter sensors [C]. International Conference on Optical Fiber Sensors. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9634: 96343R.
[20] LIU Y. Investigation of an image processing method of step-index multimode fiber specklegram and its application on lateral displacement sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2018,46: 48-53.
[21] 刘欢欢. 基于多模光纤光斑检测的模式分析和光谱分析研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
LIU H H. Research on mode analysis and spectral analysis based on multimode fiber spot detection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
[22] HARALICK R M. Statistical and structural approaches to texture[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(5): 786-804.
[23] 朱开强. 基于多模光纤光斑检测的模式分析和光谱分析研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
ZHU K Q. Research on mode analysis and spectral analysis based on multimode fiber spot detection [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
[24] KINGSLEY S A. Fiber systems for passive or semipassive fiber-optic sensors [J]. Electronics Letters, 1978, 14(14): 419-422.
[25] 秦齐, 刘艳, 刘欢欢, 等. 图像处理在光纤光斑微位移传感中的应用[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 254-260.
QI Q, LIU Y, LIU H H, et al. Application of image processing in optical fiber spot micro-displacement sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 254-260.
[26] FENG F, CHEN W, CHEN D, et al. In-situ ultrasensitive label-free DNA hybridization detection using optical fiber specklegram [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2018, 272: 160-165.
[27] WANG J J, YAN S, XU F. Speckle-based fiber sensor for temperature measurement [C]. 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), IEEE, 2017: 1-3.

作者简介

蔡露(通信作者),分别于 2013 年和 2018 年获东北大学学士和博士学位,现为东北大学秦皇岛分校讲师,主要研究方向为光纤传感与光电检测技术。
E-mail: cai_rourou@163.com

Cai Lu (Corresponding author) received her B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Northeastern University in 2013 and 2018, respectively. She is currently a lecturer at the Northeastern University at Qinhuangdao. Her main research interests include optical fiber sensing and opto-electronic measurement.

赵勇,分别在 1998 和 2001 年获哈尔滨工业大学硕士和博士学位,现为东北大学教授。主要研究方向为光纤传感器、光纤光栅传感器、新型传感器材料与原理、光电检测技术。
E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn

Zhao Yong received M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Harbin Institute of Technology in 1998 and 2001, respectively. He is currently a professor at Northeastern University. His research interests include the development of fiber-optic sensors and device, fiber Bragg grating sensors, novel sensor materials and principles, and optical measurement technologies.