

文章编号 1004-924X(2019)12-2525-09

## 阶跃折射率多模光纤包层等离子体共振传感器

苏于东<sup>1</sup>, 魏 勇<sup>1\*</sup>, 吴 萍<sup>2</sup>, 胡江西<sup>2</sup>, 刘春兰<sup>2</sup>

(1. 重庆三峡学院 智能信息处理与控制重庆市高校市级重点实验室, 重庆 404100;

2. 重庆三峡学院 物联网与智能控制技术重庆市工程研究中心, 重庆 404100)

**摘要:** 光纤表面等离子体共振 (SPR) 传感器通常以纤芯为共振基底, 需要采用腐蚀、侧抛、研磨等复杂的加工工艺将光纤包层去除, 存在倏逝波不易泄露, 传感探针制作困难的问题。本文提出一种以光纤包层为 SPR 共振基底的阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器。采用单模光纤与阶跃折射率多模光纤偏芯熔接结构, 将单模光纤纤芯中的光直接注入多模光纤包层, 并在阶跃折射率多模光纤包层外镀 50 nm 金膜。在探针传感段, 光场能量全部分布在阶跃折射率多模光纤包层中, 发生 SPR 效应充分。与传统光纤包层 SPR 传感结构相比, 该传感器能够获得更深的共振谷, 折射率测量范围为 1.333~1.385 RIU 时, 传感器的平均灵敏度可达 2 307 nm/RIU, 本文亦对传感段多模光纤纤芯直径与长度不同参数的影响进行了探究。本文提出的阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器制作简单, 有效解决了光纤包层与空气界面不易获得倏逝波的问题。

**关键词:** 光纤传感; 表面等离子体共振; 折射率传感器; 偏芯熔接; 包层传感

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20192712.2525

## Step-index multimode fiber cladding surface plasma resonance sensor

SU Yu-dong<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>1\*</sup>, WU Ping<sup>2</sup>, HU Jiang-xi<sup>2</sup>, LIU Chun-lan<sup>2</sup>

(1. Chongqing Municipal Key Laboratory of Intelligent Information Processing  
and Control of Institutions of Higher Education,

Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Internet of Things and Intelligent Control Technology,  
Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China)

\* Corresponding author, E-mail: 20160009@sanxiau.edu.cn

**Abstract:** The optical fiber Surface Plasma Resonance (SPR) sensor is usually based on the fiber core as the resonance substrate. It is necessary to remove the optical fiber cladding by adopting complex processing technologies such as etching, side polishing, grinding, etc. However, there are problems such as evanescent waves that are not easy to leak or sensor probe making them difficult to observe. In this study, a step-index multimode fiber clad SPR sensor with fiber cladding as the SPR resonant substrate is proposed. The transmitted light of a single-mode fiber is injected into step-index

收稿日期: 2019-09-29; 修订日期: 2019-10-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61705025, No. 61775044); 重庆市自然科学基金面上项目 (No. cstc2019jcyj-msxmX0431, No. cstc2018jcyjAX0817); 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目资助项目 (No. KJQN201801217); 重庆市高校创新团队 (No. CXTDX201601034); 重庆市高校市级重点实验室资助项目 (No. [2017]3); 重庆市发展和改革委员会资助项目 (No. [2017]1007)

multimode fiber cladding by core-shift welding and the 50 nm gold film is plated on the step-index multimode fiber cladding. In the probe sensing section, all the light field energy is distributed in the step-index multimode fiber cladding, the SPR effect is sufficient, and a deeper resonance valley is obtained than by using the conventional fiber cladding SPR sensing structure. When the refractive index measurement range is 1.333—1.385 RIU, the average sensitivity of the sensor can reach 2 307 nm/RIU. This study also explores the influence of different parameters on the diameter and length of the multimode fiber core in the sensing section. The step-index multimode fiber cladding SPR sensor proposed in this study is simple to fabricate and can effectively solve the evanescent wave problem making information difficult to obtain between fiber cladding and air interface.

**Key words:** optical fiber sensing; surface plasmon resonance; index sensor; core-shift welding; cladding sensing

## 1 引 言

光纤表面等离子体共振 (Surface Plasma Resonance, SPR) 传感器具有尺寸小、灵敏度高、可实时在线监测等优势,广泛应用于食品安全<sup>[1]</sup>、化学分析<sup>[2]</sup>、生物医学<sup>[3-5]</sup>等领域。常规的光纤 SPR 传感器以纤芯为 SPR 共振基底,用纤芯模式激发金属膜中的等离子体实现 SPR 传感。纤芯型 SPR 传感器主要分为腐蚀型、侧抛型和研磨型。Coelho 等利用氢氟酸对包层直径为 125  $\mu\text{m}$ , 纤芯直径为 8.2  $\mu\text{m}$  的单模光纤进行腐蚀,腐蚀至光纤直径为 13  $\mu\text{m}$ ,由于腐蚀后所剩包层厚度较薄 (大约为 2  $\mu\text{m}$ ),倏逝波即从纤芯穿透包层泄露到空气中,在腐蚀区镀制纳米级金膜,传感器的折射率灵敏度达 5 100 nm/RIU<sup>[6]</sup>。陈小龙等使用轮式侧抛法对包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 105  $\mu\text{m}$  的纯石英多模光纤进行侧抛,将圆柱光纤一侧包层与一部分纤芯抛磨掉,倏逝波从纤芯表面泄露出来,在抛磨区镀制 40 nm 金膜,实现了平均灵敏度为 4 100 nm/RIU 的光纤 SPR 传感器<sup>[7]</sup>。光纤研磨法是一种常见的光纤加工方法<sup>[8-10]</sup>。2017 年,Wei 团队利用裸光纤端面研磨法,将七芯光纤端面研磨成三对对称锥角结构,每对对称锥角结构将传输光进行三次全反射,倏逝波从锥角斜面的纤芯处泄露,在锥角斜面上镀制 50 nm 传感金膜,倏逝波进入传感金膜,发生 SPR 效应。传感探针具有三对对称锥角光路,形成三个独立传感通道,可用于多通道传感<sup>[11]</sup>。

然而,通过腐蚀、侧抛、研磨等方法制作的纤

芯型光纤 SPR 传感器,其制作过程复杂,且腐蚀型、侧抛型 SPR 传感器的传感探针较为脆弱,稳定性差。近年来,以光纤包层作为 SPR 共振基底,用包层模式激发 SPR 效应的包层型 SPR 传感器被提出<sup>[12-14]</sup>。拉锥型光纤 SPR 传感器、光纤光栅型 SPR 传感器以及异质芯型光纤 SPR 传感器,是常见的以光纤包层为 SPR 共振基底的包层型 SPR 传感器。Al-Qazwini 课题组利用光纤拉锥法,将包层直径为 125  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 62.5  $\mu\text{m}$  的渐变多模光纤拉至锥区直径为 25~45  $\mu\text{m}$ ,锥区纤芯中的光进入包层,在包层和空气界面产生倏逝波,锥区光纤表面镀制 55 nm 传感金膜,得到灵敏度为 1 600~2 000 nm/RIU 的光纤 SPR 折射率传感器<sup>[15]</sup>。González-Vila 等在单模光纤纤芯中刻蚀长度为 8 mm,倾角为 10° 的倾斜布拉格光栅,通过刻蚀光栅,纤芯中的光随即散射到光纤包层中,在单模光纤包层外镀制 18 nm 的金膜,实现了灵敏度为 78 nm/RIU 的光纤折射率气体传感器<sup>[16]</sup>。异质芯型 (多模-单模-多模, MSM) 光纤 SPR 传感器是一种典型的以光纤包层作为 SPR 共振基底的光纤 SPR 传感器,它利用多模光纤纤芯中的光激发单模光纤中的包层模式,在单模光纤包层外镀制纳米级金属膜,实现光纤包层 SPR 传感。这类传感器结构简单,传感性能稳定,是近年来光纤 SPR 传感器的研究热点<sup>[17-19]</sup>。

拉锥型光纤 SPR 传感器制作难度大,探针极易折断;光纤光栅型 SPR 传感器制作过程复杂,制作所需设备昂贵;基于异质芯的包层 SPR 传感器只能实现单模光纤包层的 SPR 传感 (即中间包层 SPR 传感光纤为细芯的单模光纤,它利用多模

光纤与单模光纤的芯径不同,将多模光纤纤芯中的一部分光注入单模光纤包层),不是直接把光注入至包层中,效率有限,并且不能实现在多模光纤包层中的 SPR 传感。因此,本文提出一种以多模光纤包层为 SPR 共振基底的光纤包层型 SPR 传感器。利用光纤偏芯熔接技术,将单模光纤与一段阶跃折射率多模光纤偏芯熔接,单模纤芯中的光直接注入阶跃折射率多模光纤包层,在包层与空气界面获得倏逝波,解决了 SPR 传感器倏逝波难以获得的问题。此时在阶跃折射率多模光纤包层外镀制纳米级金膜,能够以最简单的结构和制作方法构建新型光纤包层 SPR 传感器。本传感器制作简单、结构新颖,适用于普通科研实验室对光纤 SPR 传感器的研究,推动光纤 SPR 传感器向实用化方向发展。

## 2 结构与光场研究

本文提出一种以阶跃折射率多模光纤包层为 SPR 共振基底,以阶跃折射率多模光纤中的包层模式激发 SPR 效应的光纤包层 SPR 传感器。为了验证采用本文结构,传输光是否能有效耦合进阶跃折射率多模光纤包层,对传感结构各部分光纤端面光场进行观测研究,并与异质芯型传感结构各部分光纤端面光场进行对比。

### 2.1 传感结构与光场研究

图 1(a)为传统异质芯型光纤 SPR 传感器结构图。它由两段纤芯直径为  $105\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$  的大芯径阶跃折射率多模光纤(图中 M1, M2),中间对芯熔接一段纤芯直径为  $9\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$  的单模光纤构成。传感段单模光纤长  $20\ \text{mm}$ ,其包层表面镀制  $50\ \text{nm}$  传感金膜,该传感金膜由等离子溅射仪(ETD-2000, YLBT)镀制。图 1(b)为阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器结构图。它由单模光纤偏芯熔接一段纤芯直径为  $40\ \mu\text{m}$ ,包层直径为  $125\ \mu\text{m}$  的阶跃折射率多模光纤(图中 M3),M3 再对芯熔接一段大芯径阶跃折射率多模光纤(图中 M4)构成。M3 长  $20\ \text{mm}$ ,其包层表面同样镀制有  $50\ \text{nm}$  传感金膜。这里选取  $36\ \mu\text{m}$  为两光纤纤芯的偏移距离,也为偏芯熔接距离<sup>[20]</sup>。具体做法是:使用带有网格线的光纤熔接机,显示器界面上,单位网格线间距约为  $18\ \mu\text{m}$ 。在进行偏芯熔接时,调整光纤熔接机

到手动模式,上移左光纤,使之上边缘与右光纤上边缘实际偏移  $36\ \mu\text{m}$ (两个网格线的距离),调整合适的熔接强度以及熔接电流,选择放电熔接选项,两光纤随即偏芯熔接在一起,这样单模光纤中的光即可注入多模光纤包层中。

图 1(a)中, A 点所示插图 of M1 光纤通光后,在显微镜下观察到的光纤端面光场图; B 点所示插图 of M1 光纤对芯熔接单模光纤后,单模光纤端面光场图; C 点所示插图 of M1 光纤对芯熔接单模光纤,单模光纤再对芯熔接 M2 光纤, M2 光纤的端面光场图。图 1(b)中 A, B, C 三点插图也对应这三点的端面光场图。这些插图均为多次实验测试结果,所选图片具有代表性。对比观察图 1(a)、图 1(b)中 B 点光纤端面光场图可知:图 1(a)中 M1 对芯熔接单模光纤后,整个单模光纤端面都有光场分布,在单模光纤包层与空气界面存在倏逝波;图 1(b)中单模光纤偏芯熔接 M3 后,整个 M3 端面只有包层中有光场分布,在 M3 包层与空气界面存在倏逝波,即图 1(b)中 B 点光场全部集中在 M3 包层中。因此,相比于传统异质芯型光纤 SPR 传感结构,本传感结构中,传感段光纤光场可全部用于发生 SPR 效应。

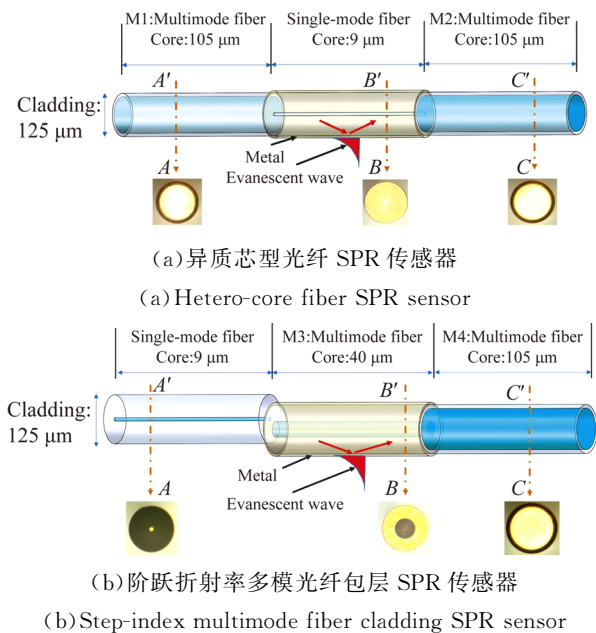


图 1 异质芯与阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器的光场

Fig. 1 Light fields of hetero-core fiber SPR sensor and step-index multimode fiber cladding SPR sensor

## 2.2 实验装置搭建

传感器性能测试系统如图 2 所示。卤素光源 (HL-2000, Ocean Optics) 发出的光由单模光纤引出, 传输到 SPR 传感探头处。传感探头固定在两端密封的反应池中, 发生 SPR 效应后传输光经大芯径阶跃折射率多模光纤接入光谱仪 (USB2000+, Ocean Optics), 对它进行数据采集, 并在计算机中处理采集后的光谱。微量注射泵控制反应池中测试溶液的注入与排出。反应池中的测试溶液由丙三醇与蒸馏水混合制成, 并由阿贝折射仪 (GDA-2S, Gold) 进行折射率标定。实验中, 测试溶液的折射率分别为 1.333, 1.345, 1.355, 1.365, 1.375 和 1.385。

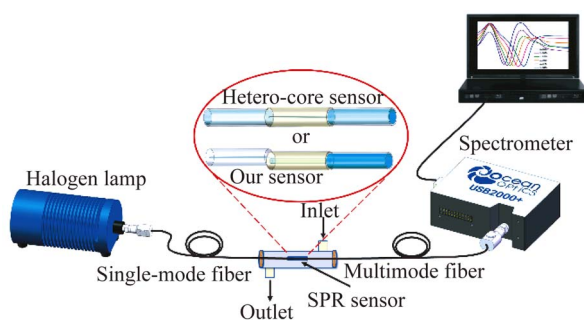


图 2 等离子体共振传感实验装置

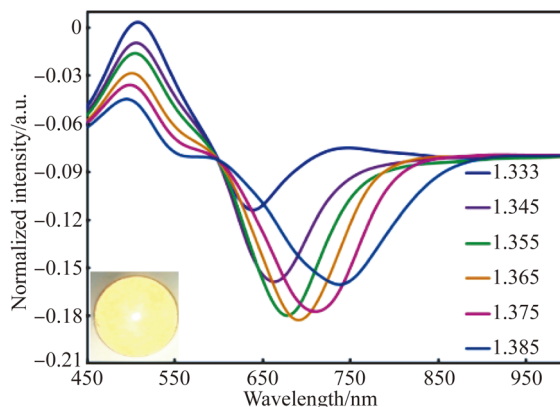
Fig. 2 Experimental setup of SPR sensor

## 3 实验结果

按照图 2 所示的实验装置系统, 对传统异质芯型光纤 SPR 传感器与本文所设计传感器进行传感灵敏度、SPR 共振半峰宽以及 SPR 共振谷深度的对比探究。实验结果如图 3 所示。

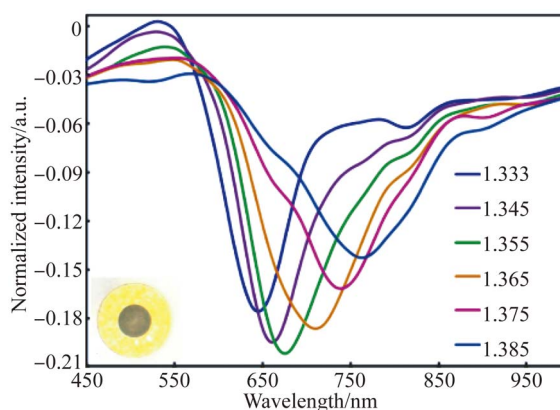
图 3(b) 中 SPR 共振谷深度大于图 3(a) 中 SPR 共振谷深度, 异质芯型 SPR 传感器的原始共振谷深为  $-0.18$ , 而阶跃折射率多模光纤 SPR 传感器的原始共振谷深为  $-0.20$ , 即阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器的共振谷深度比传统异质芯型光纤 SPR 传感器更深。这是因为阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器中, 传感段 M3 光纤光场能量全部集中在光纤包层中, 相比于传统异质芯型光纤 SPR 传感器, 有更多的倏逝波与金

膜相作用, 倏逝波渗透到金膜的深度更深, SPR 效应更强, SPR 共振谷深度也就更深。



(a) 异质芯型光纤 SPR 传感器

(a) Hetero-core fiber SPR sensor



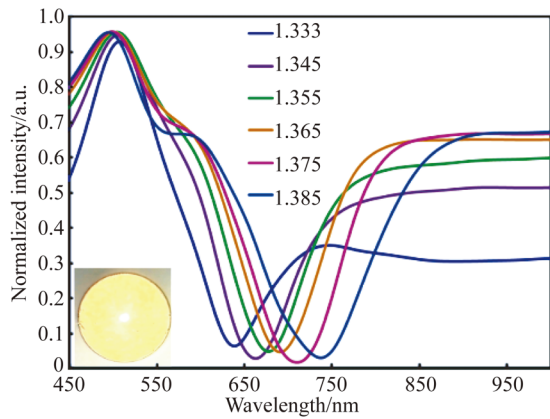
(b) 阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器

(b) Step-index multimode fiber cladding SPR sensor

图 3 两种 SPR 传感器实验测试数据

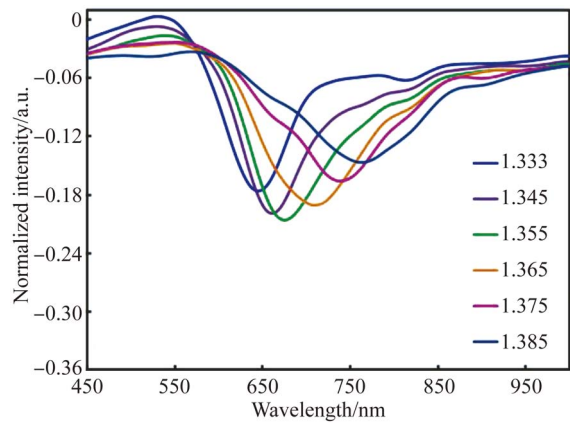
Fig. 3 Testing data of two SPR sensors

图 4 为对两传感器实验测试数据再次归一化的结果, 使测试曲线的最大值与最小值在 0 到 1 之间。从图 4 看出, 传统异质芯型光纤 SPR 传感器的共振波长从  $634 \sim 738$  nm, 共  $104$  nm, 对应的平均灵敏度为  $2\ 000$  nm/RIU, SPR 共振谷半峰宽最小为  $65$  nm; 本文所设计传感器的共振波长从  $645 \sim 765$  nm, 共  $120$  nm, 对应的平均灵敏度为  $2\ 307$  nm/RIU, SPR 共振谷半高宽最小为  $60$  nm。本文所设计传感器的平均灵敏度更高, 并且 SPR 共振谷半高宽也较传统异质芯型光纤 SPR 传感器更窄。



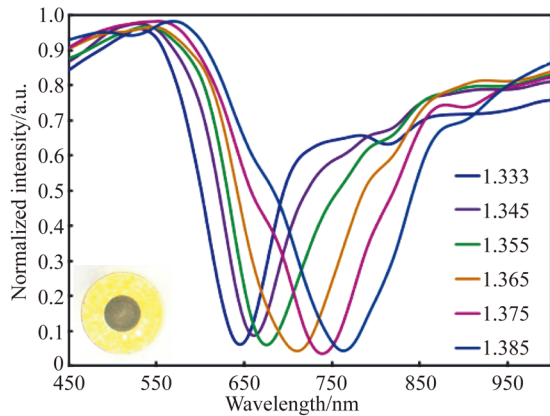
(a)异质芯型光纤 SPR 传感器

(a)Hetero-core fiber SPR sensor



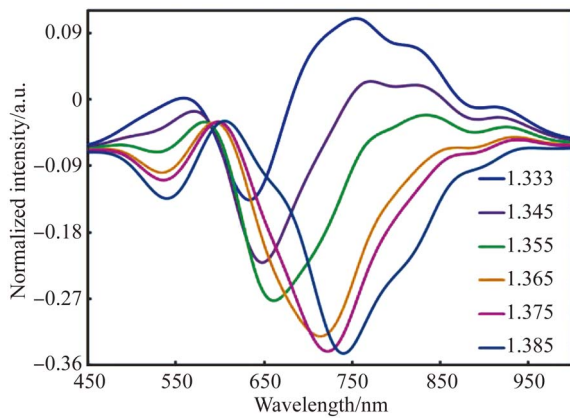
(a)纤芯直径为 40 μm

(a)Core diameter is 40 μm



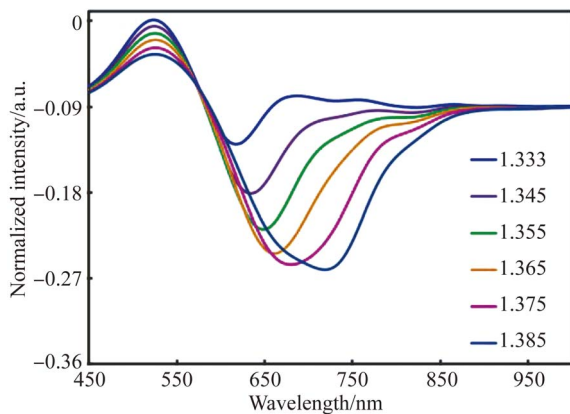
(b)阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器

(b)Step-index multimode fiber cladding SPR sensor



(b)纤芯直径为 50 μm

(b)Core diameter is 50 μm



(c)纤芯直径为 60 μm

(c)Core diameter is 60 μm

图 4 两种 SPR 传感器实验测试数据再次归一化的结果

Fig. 4 Renormalized data of two SPR sensors

### 4 讨论

本文提出一种阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器,传感段 M3 光纤的纤芯直径、长度以及所镀金膜厚度均会影响传感器灵敏度、SPR 共振谷深度等参数。这里金膜厚度选择本领域内公认的 50 nm。

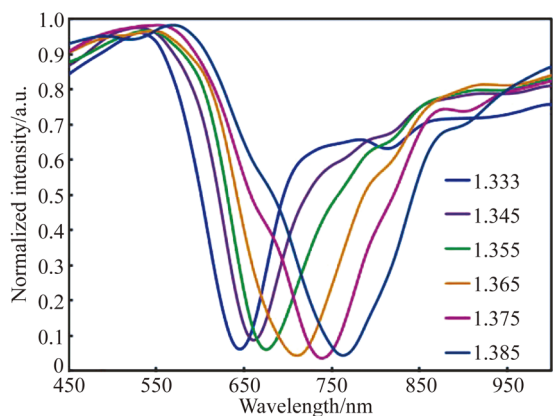
#### 4.1 不同芯径 M3 对传感器性能的影响

实验装置仍以图 2 所示实验测试装置,对 M3 长度为 20 mm,所镀金膜厚度为 50 nm,纤芯直径分别为 40,50 和 60 μm 进行折射率传感实验。实验结果如图 5 所示。

由测试曲线可看出,M3 芯径为 50 μm 时,所产生的 SPR 共振谷深度相对较深,原始共振谷深为 -0.35。

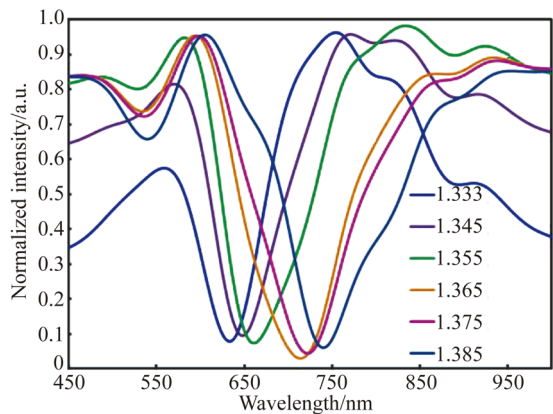
图 5 三种不同 M3 芯径的 SPR 传感器实验测试曲线  
Fig. 5 Testing data of proposed SPR sensor with sensing fiber in different core diameters

这里对测试曲线再进行归一化处理,结果如图 6 所示。



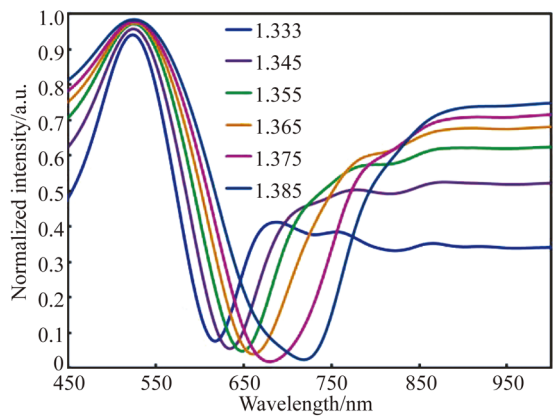
(a) 纤芯直径为 40 μm

(a) Core diameter is 40 μm



(b) 纤芯直径为 50 μm

(b) Core diameter is 50 μm



(c) 纤芯直径为 60 μm

(c) Core diameter is 60 μm

图 6 三种不同 M3 芯径的 SPR 传感器测试结果再次归一化曲线

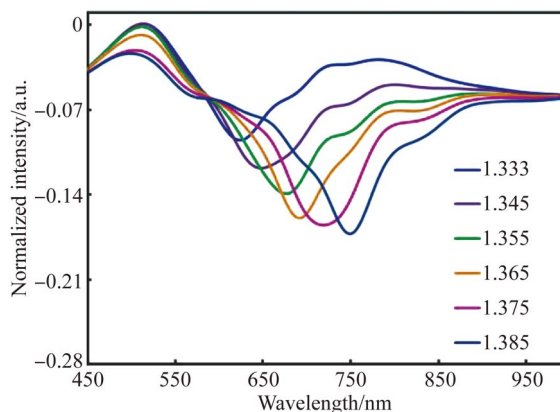
Fig. 6 Renormalized data of SPR sensor with sensing fiber in different core diameters

由图 6 可看出, M3 纤芯直径为 40 μm 时, 共

振波长从 645~765 nm, 共 120 nm, 对应的平均灵敏度为 2 307 nm/RIU; 纤芯直径为 50 μm 时, 共振波长从 633~741 nm, 共 108 nm, 对应的平均灵敏度为 2 076 nm/RIU; 纤芯直径为 60 μm 时, 共振波长从 623~723 nm, 共 100 nm, 对应的平均灵敏度为 1 923 nm/RIU。随着 M3 纤芯直径的增加, 共振波长向短波长方向移动, 传感器灵敏度降低, 纤芯直径为 40 μm 时, 传感器的平均灵敏度最大, 达到 2 307 nm/RIU。

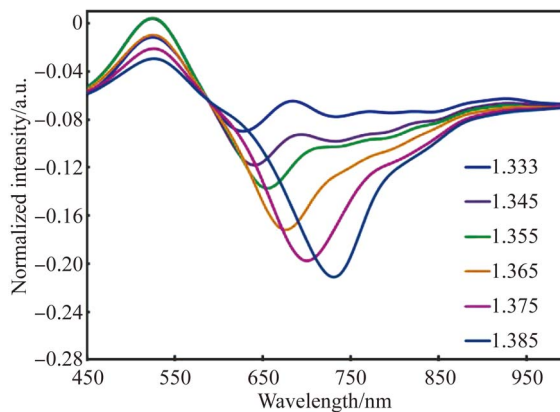
#### 4.2 不同长度 M3 对传感器性能的影响

最后, 对不同长度的 M3 进行折射率传感测试实验。测试时, 固定 M3 纤芯直径为 40 μm, 所镀金膜厚度为 50 nm, 长度分别为 10, 20 和 30 mm。实验结果如图 7 所示。由图 7 可看出, 随着 M3 长度的增加, SPR 共振谷深度亦增加。



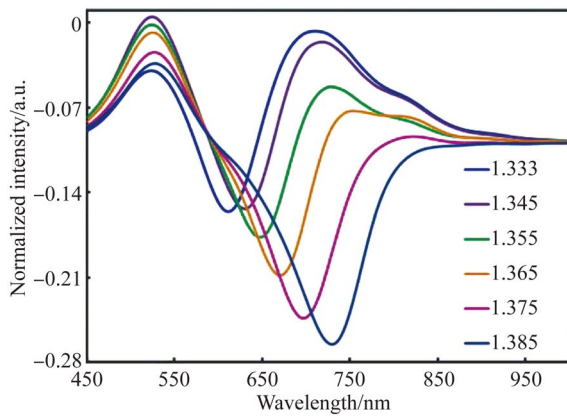
(a) M3 长度为 10 mm

(a) M3 length is 10 mm



(b) M3 长度为 20 mm

(b) M3 length is 20 mm

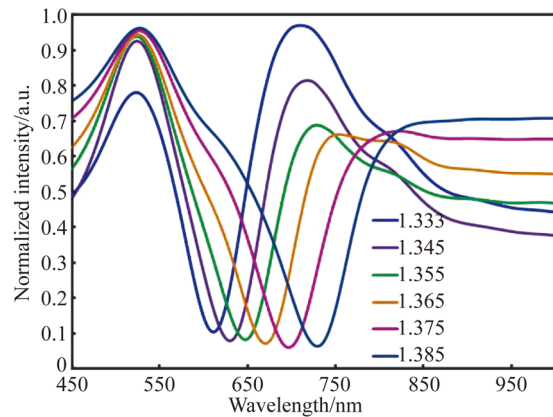


(c)M3 长度为 30 mm

(c)M3 length is 30 mm

图 7 三种不同 M3 长度的 SPR 传感器实验测试曲线

Fig. 7 Testing data of SPR sensor with sensing fiber in different lengths



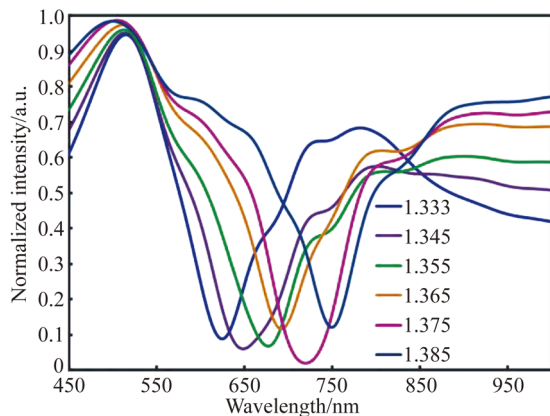
(c)M3 长度为 30 mm

(c)M3 length is 30 mm

图 8 三种不同 M3 长度的 SPR 传感器实验测试曲线再次归一化结果

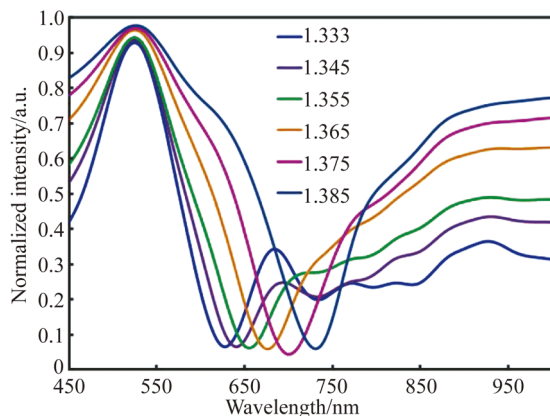
Fig. 8 Renormalized data of SPR sensor with sensing fiber in different lengths

对测试数据再次进行归一化处理,结果如图 8 所示。



(a)M3 长度为 10 mm

(a)M3 length is 10 mm



(b)M3 长度为 20 mm

(b)M3 length is 20 mm

从图 8 可看出,M3 长度为 10 mm 时,曲线共振波长从 622~750 nm,共 128 nm,平均灵敏度为 2 461 nm/RIU;M3 长度为 20 mm 时,曲线共振波长从 633~733 nm,共 100 nm,平均灵敏度为 1 923 nm/RIU;M3 长度为 30 mm 时,曲线共振波长从 612~731 nm,共 119 nm,平均灵敏度为 2 288 nm/RIU。由此可知,M3 长度为 10 mm 时,传感器平均灵敏度最大。

不同长度的 M3 光纤对于传感器灵敏度的影响还是较大的,但还需考虑不同长度的 M3 光纤对传感器测试曲线共振谷深度的影响,因此传感光纤长度选择 3 cm 为宜。

### 5 结 论

本文设计并制作了一种阶跃折射率多模光纤包层 SPR 传感器,利用偏芯熔接技术,将单模光纤偏芯熔接一段阶跃折射率多模光纤,光纤经偏芯熔接后,光从单模光纤纤芯耦合进阶跃折射率多模光纤包层中,光在阶跃折射率多模光纤包层中传输时,倏逝波完全泄露到包层和空气界面,这时在阶跃折射率多模光纤包层表面镀制 50 nm 金膜,即可构建新型光纤 SPR 传感器。然后,通过实验比较了传统异质芯型 SPR 传感器与本传感器的传感性能。结果表明,与传统异质芯型光纤 SPR 传感器相比,本传感器的灵敏度更高,SPR 共振谷深度更深,SPR 共振谷半高宽更窄。最后,优化了所设计

传感器的结构参数,得到在传感段阶跃多模光纤的纤芯直径为 40  $\mu\text{m}$ 、长度为 10 mm 时,传感器的平均灵敏度可达 2 461 nm/RIU。该传感结构制作简单,稳定性好,有效避免了腐蚀、侧抛、研磨等去除

包层的复杂工艺,无需采用拉锥、刻蚀光栅等较难技术,降低了传感探针的制作难度,更容易获得传感所需倏逝波。所提传感器具有良好的折射率灵敏度,在生物化学传感领域有一定的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] SHRIVASTAVA A M, MISHRA S K, GUPTA B D. Fiber optic SPR sensor for the detection of melamine using molecular imprinting [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 212: 404-410.
- [2] SHRIVASTAVA A M, GUPTA B D. Ion-imprinted nanoparticles for the concurrent estimation of Pb(II) and Cu(II) ions over a two-channel surface plasmon resonance-based fiber optic platform [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(1): 1-8.
- [3] YUAN Y Q, YANG X, GONG D, *et al.*. Investigation for terminal reflection optical fiber SPR glucose sensor and glucose sensitive membrane with immobilized GODs [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3884-3898.
- [4] CAO S Q, SHAO Y, WANG Y, *et al.*. Highly sensitive surface plasmon resonance biosensor based on a low-index polymer optical fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 3988-3994.
- [5] TAN T N, KIEU T L T, WON J Y, *et al.*. Integration of a microfluidic polymerase chain reaction device and surface plasmon resonance fiber sensor into an inline all-in-one platform for pathogenic bacteria detection [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2017, 242: 1-8.
- [6] COELHO L, ALMEIDA J M M M D, SANTOS J L, *et al.*. Sensing structure based on surface plasmon resonance in chemically etched single mode optical fibers [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(2): 319-327.
- [7] 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.  
CHEN X L, LUO Y H, XU M Y, *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. (in Chinese)
- [8] 刘佩坤,李彦,魏勇,等. 反射式双芯光纤锥角结构表面等离子体共振传感器 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 205-209.  
LIU P K, LI Y, WEI Y, *et al.*. Twin-core fiber SPR sensor with cone angle structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 205-209. (in Chinese)
- [9] LIU Z, WEI Y, ZHANG Y, *et al.*. Twin-core fiber SPR sensor [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2826-2829.
- [10] LIU Z, WEI Y, ZHANG Y, *et al.*. Distributed fiber surface plasmon resonance sensor based on the incident angle adjusting method [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(19): 4452-4455.
- [11] WEI Y, SU Y D, LIU C L, *et al.*. Segmented detection SPR sensor based on seven-core fiber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21841-21850.
- [12] WANG Y, HUANG Q, ZHU W, *et al.*. Novel optical fiber SPR temperature sensor based on MMF-PCF-MMF structure and gold-PDMS film [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1910-1917.
- [13] SEKI A, NARITA K, WATANABE K. Refractive index measurement in sucrose solution and beverage using surface plasmon resonance sensor based on hetero-core structured fiber optic [J]. *Procedia Chemistry*, 2016, 20: 115-117.
- [14] 郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.  
GUO T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006. (in Chinese)
- [15] AL-QAZWINI Y, NOOR A S M, YAACOB M H, *et al.*. Experimental realization and performance evaluation of refractive index SPR sensor based on unmasked short tapered multimode-fiber operating in aqueous environments [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 236: 38-43.
- [16] GONZÁLEZ-VILA Á, ANDREAS I, LOYEZ M, *et al.*. Surface plasmon resonance sensing in gaseous media with optical fiber gratings [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2308-2311.
- [17] SEKI A, NARITA K, WATANABE K. Refractive index measurement in sucrose solution and beverage using surface plasmon resonance sensor based on hetero-core structured fiber optic [J]. *Procedia Chemistry*, 2016, 20: 115-117.
- [18] AI H, NISHIYAMA M, IGAWA H, *et al.*. A surface plasmon resonance hydrogen sensor using Au/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/Pd multi-layers on hetero-core optical fiber

structures [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2013, 185(8): 53-58.

- [19] GOH L S, KUMEKAWA N, WATANABE K, *et al.*. Hetero-core spliced optical fiber SPR sensor system for soil gravity water monitoring in agricul-

tural environments [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 110-117.

- [20] WEI Y, HU J, WU P, *et al.*. Optical fiber cladding SPR sensor based on core-shift welding technology [J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1202-1214.

#### 作者简介:



苏于东(1994—),男,重庆人,硕士研究生,2017年于重庆三峡学院获得学士学位,主要从事光纤 SPR 传感方面的研究。E-mail: suyudong9320@163.com

#### 通讯作者:



魏 勇(1987—),男,内蒙古包头人,博士,副教授,硕士生导师,2013年、2016年于哈尔滨工程大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光纤 SPR 传感技术、光纤光镊技术等方面的研究。E-mail: 20160009@sanxiau.edu.cn