

光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器

张 琦, 朱晓松, 石艺尉

复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433

摘要 提出了基于光强检测方式的空芯光纤表面等离子体共振 (SPR) 传感器。采用波长为 532 nm 的激光作为光源, 对所设计传感器的性能进行了研究, 并采用光传输模型对传感器的性能进行了理论分析, 所得理论结果与实验结果相符。传感器在线性区的最高灵敏度和最佳分辨率分别达到 $8380.3 \mu\text{W}/\text{RIU}$ 和 $5.5 \times 10^{-6} \text{RIU}$ 。相比于波长检测型空芯光纤 SPR 传感器, 所提传感器的分辨率提高了 2 个数量级, 且实验系统简单, 有利于器件的进一步小型化。

关键词 传感器; 空芯光纤; 光强检测; 表面等离子体共振

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0606001

Hollow Optical Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor Based on Light Intensity Detection

Zhang Yu, Zhu Xiaosong, Shi Yiwei

School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A hollow optical fiber surface plasmon resonance (SPR) sensor based on light intensity detection is proposed. The 532 nm laser is used as the light source, and the performance of the sensor is investigated. The performance of the sensor is theoretically analyzed based on the light transmission model. Experimental results are in agreement with theoretical results. The highest sensitivity of $8380.3 \mu\text{W}/\text{RIU}$ and the optimum resolution of $5.5 \times 10^{-6} \text{RIU}$ can be obtained by the sensor in linear region. The resolution of the proposed sensor is improved by two orders of magnitude compared to that of the hollow optical fiber SPR sensor based on wavelength detection. The experimental system is simple, and it is beneficial to miniaturization of devices.

Key words sensors; hollow optical fiber; light intensity detection; surface plasmon resonance

OCIS codes 060.2370; 240.6680; 230.7370

1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 传感技术是一种基于表面灵敏度分析的新兴检测技术。SPR 传感器可有效感应不同折射率的媒质, 操作方便且灵敏度高, 因而得到了广泛应用^[1-3]。传统的 SPR 传感器一般采用 Kretschmann-Raether 和 Otto 型结构^[4-5], 这两种传感器的内部均含有棱镜等光学器件, 致使传感器体积相对较大且操控繁琐。新型光纤 SPR 传感器具有结构简单和低损耗的特点, 因此受到了研究人员的广泛关注^[6-9]。现有的实芯光纤 SPR 传感器的结构可分为三层, 内层为纤芯, 中间层为金属膜, 外层为待分析物, 待分析物与金属膜直接接触, 从而可对待分析物进行检测。为了激发 SPR 现象, 待分析物的折射率应低于纤芯折射率, 从而使入射光能够发生全反射。常用的光纤纤芯材料是折射率为 1.46 的石英玻璃, 因此这种以石英玻璃作为纤芯材料的光纤 SPR 传感器可检测的物质折射率应小于 1.46, 可检测的折射率范围相对较小。若想检测折射率更高的物质, 就需要选择更高折射率的材料作为纤芯, 这样会增加制作难度和成本。为

收稿日期: 2016-12-23; **收到修改稿日期:** 2017-01-23

基金项目: 上海市自然科学基金 (15ZR1404100)

作者简介: 张 琦 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事空芯光纤传感方面的研究。E-mail: 15210720131@fudan.edu.cn

导师简介: 朱晓松 (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事空芯光纤应用方面的研究。E-mail: zhuxiaosong@fudan.edu.cn (通信联系人)

了解决这一问题,空芯光纤^[10-12](HF)被用于 SPR 传感技术的研究。空芯光纤 SPR 传感器适用于检测高折射率的物质,扩大了光纤 SPR 传感器的可检测范围。

现有的空芯光纤 SPR 传感器采用的检测方式为波长检测^[13-14],这种传感器使用宽谱光源进行入射,通过检测传输光谱中共振波长的位置来测量折射率。由于传输光谱中 SPR 共振峰宽度较宽,尽管这种传感器的灵敏度较高,但其分辨率不高。为了进一步提高传感器的检测精度,采用光强检测型 SPR 传感方式^[15-16],利用单色光入射来研究传感器的输出光强与折射率之间的关系,在空芯光纤 SPR 传感器与波长检测型传感器灵敏度相当的条件,检测精度和分辨率提升了 2 个数量级。

2 结构与原理

2.1 传感器结构

所使用的空芯光纤 SPR 传感器的结构如图 1(a)所示。基管材料是石英玻璃,所镀金属膜材料为银,内部空腔为高折射率待测液体的流动空间。当宽谱光源入射时,液态介质、金属层和基管构成的三层结构将激发产生 SPR 现象,通过测量输出光的光谱,获得 SPR 共振波长与待测液体折射率之间的关系,从而计算出待测液体的折射率。如果采用光强检测的方式,入射光为单色光时可测得输出光的强度,从而获得输出光强与待测液体折射率之间的关系。图 1(b)为空芯光纤 SPR 传感器截面的扫描电子显微镜 (SEM) 照片,从图中可以看出,光纤内壁存在银膜,但是光纤基管外壁绝缘,继续增加放大倍数时,很强的荷电效应将导致难以拍出清晰的 SEM 照片。因此仅从 SEM 照片中无法准确地测量出银膜厚度,具体确定银膜厚度的方法将在下文中介绍。图 1(c)为空芯光纤 SPR 传感器与未镀银膜的光纤基管的实物照片。

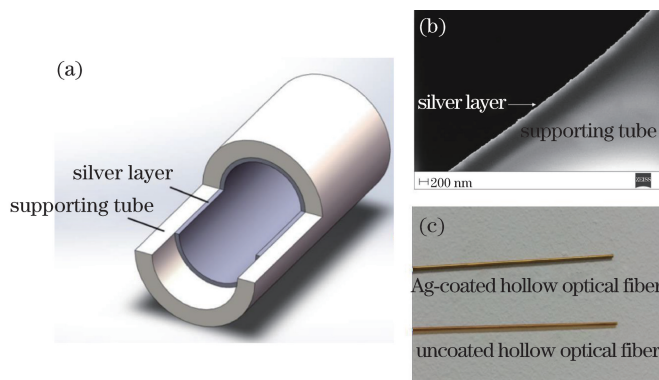


图 1 空芯光纤 SPR 传感器的(a)结构示意图和(b)SEM 照片;(c)镀银膜和未镀银膜的空芯光纤

Fig. 1 (a) Structural diagram and (b) SEM image of hollow optical fiber SPR sensor;

(c) Ag-coated and uncoated hollow optical fibers

2.2 理论模型

采用几何光学的方法建立光线传输模型,分析空芯光纤 SPR 传感器的传输光谱,并计算传输损耗^[17]。由于入射光的入射角较小,这里只考虑子午线方向光线的传输情况。空芯光纤 SPR 传感器的传输光路如图 2 所示。图中 n_0 为液体介质的折射率, n_1 为金属层介质的折射率, n_2 为光纤包层介质的折射率, D 为光纤直径, L 为光纤长度, Φ 为入射光的入射角, θ 为入射光在空芯光纤内与光纤轴线的夹角。

利用几何光学的方法进行分析,入射光耦合进光纤后在内表面发生全发射,金属的复介电性使得液体介质与金属层的交界面上会产生倏逝波,倏逝波将与金属薄膜内部的自由电子相互作用,从而激发出沿金属薄膜表面传播的表面等离子体波 (SPW),当倏逝波的波矢与表面等离子体波的波矢相匹配时,就会产生 SPR 现象。仅横磁模式的光 (p 光) 可激发 SPR。为了从理论上分析空芯光纤 SPR 传感器的性能,建立了光学传输模型。根据三层膜结构对应的菲涅耳公式,可得 p 光在空芯光纤内壁的反射系数^[18] $R_p(\theta)$ 为

$$R_p(\theta) = \left| \frac{r_{sm} + r_{mp} \exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{sm}r_{mp} \exp(2ik_{mz}d)} \right|^2, \quad (1)$$

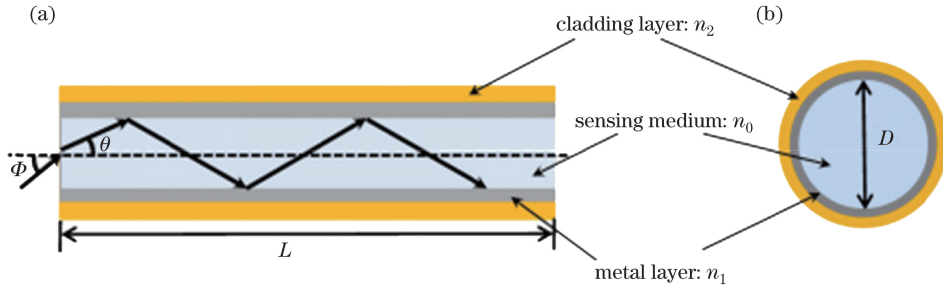


图 2 空芯光纤 SPR 传感器的传输光路。(a)横截面;(b)纵截面

Fig. 2 Transmission light path of hollow optical fiber SPR sensor. (a) Cross section; (b) longitudinal section

其中

$$r_{sm} = \frac{k_{sz}\epsilon_m - k_{mz}\epsilon_s}{k_{sz}\epsilon_m + k_{mz}\epsilon_s}, \quad (2)$$

$$r_{mp} = \frac{k_{mz}\epsilon_p - k_{pz}\epsilon_m}{k_{mz}\epsilon_p + k_{pz}\epsilon_m}, \quad (3)$$

$$k_{jz} = \left(\epsilon_j \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 \right)^{1/2}, \quad j = s, m, p, \quad (4)$$

$$k_x = \sqrt{\epsilon_s} \frac{\omega}{c} \sin \theta, \quad (5)$$

式中 r_{sm} 、 r_{mp} 分别为液体介质-银膜和银膜-基管界面的反射系数; d 为银膜的厚度; k_{sz} 、 k_{mz} 、 k_{pz} 分别为液体介质、银膜和基管中垂直于管壁方向的入射光波矢分量; k_x 为平行于管壁方向的入射光波矢分量; ϵ_s 、 ϵ_m 、 ϵ_p 分别为液体介质、银膜和基管的介电常数; ω 为入射光的频率; c 为真空中的光速。

入射光的强度 $P_0(\theta)$ 和相位 φ 近似呈高斯分布^[17], 即

$$P_0(\theta) \propto \exp(-\varphi^2/\varphi_0^2), \quad (6)$$

式中 φ_0 为入射光的发散角。输出光的强度为

$$P = \int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) R_p(\theta)^{N(\theta)} d\theta, \quad (7)$$

其中

$$N(\theta) = \frac{L}{D \tan \theta}, \quad (8)$$

$$\theta_{cr} = \arcsin(n_p/n_s), \quad (9)$$

式中 θ_{cr} 为临界全反射角, $N(\theta)$ 为光在光纤中的反射次数, n_p 为基管材料的折射率, n_s 为液体介质的折射率。

将输出光的强度归一化后可得

$$T = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) R_p(\theta)^{N(\theta)} d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) d\theta}. \quad (10)$$

利用(10)式可计算出宽谱光的传输光谱, 也可计算出单色光入射时的光强。

光强检测型空芯光纤传感器将波长固定的单色光作为入射光, 可得到在固定波长下不同折射率 n_s 的待测液体与输出光强 P 之间的关系。当待测液体的折射率改变 δn_s 时, 输出光光强改变 δP , 则传感器灵敏度为

$$S_n = \frac{\delta P}{\delta n_s}. \quad (11)$$

输出光强的误差决定了传感器的检测精度, 测量的输出光强的标准差 σ 与灵敏度 S_n 的比值即为传感器的分辨率, 即

$$R_n = \sigma/S_n. \quad (12)$$

3 光纤制备及系统搭建

3.1 光纤制备

空芯光纤 SPR 传感器的主要部件为内壁镀金属膜的空芯光纤,采用液相镀膜法,并利用银氨溶液与葡萄糖还原液之间的银镜反应在基管内壁上沉积银膜^[14]。镀膜过程对环境较为敏感,在操作过程中需对温度、时间和流速等各参数进行精准控制,以提高所镀银膜的质量。通过此方法镀制的银膜厚度可以达到几个纳米。实验中使用的基管材料为石英玻璃,空芯光纤内径为 $700\ \mu\text{m}$,银膜镀制时间为 $30\ \text{s}$ 。从中挑选一根内壁光滑通亮、性能较好且长度为 $5\ \text{cm}$ 的光纤用于实验,将理论仿真得到的对应光谱的共振波长与实验测得的共振波长相比较,从而得到实际银膜的厚度。

3.2 系统搭建

实验中搭建的两套实验装置如图 3 所示,图 3(a)中所示的系统采用宽谱光源卤钨灯和光谱仪来测量 SPR 传输光谱。卤钨灯发出的宽谱光通过多模光纤(MMF)耦合进入空芯光纤 SPR 传感器中,再通过耦合光纤导入光谱仪中(HORIBA IHR550,Horiba Scientific 公司,日本),从而得到传输光谱。待测液体在蠕动泵的作用下通过两个专门制作的液路光路耦合接口器件泵入和泵出空芯光纤,待测液体为在 $400\sim 800\ \text{nm}$ 波段透明的不同浓度的甲基苯基硅油-煤油混合液。阿贝折射仪测得实验中所配溶液的折射率范围为 $1.542\sim 1.582$ 。

图 3(b)中的实验系统用于强度检测。该系统与图 3(a)中光谱测量系统的区别在于将光源更换成了波长为 $532\ \text{nm}$ 的单色激光。单色激光经光纤传输,采用光功率计(OPHIR-NOVA II,OPHIR 公司,以色列)测量输出光强。

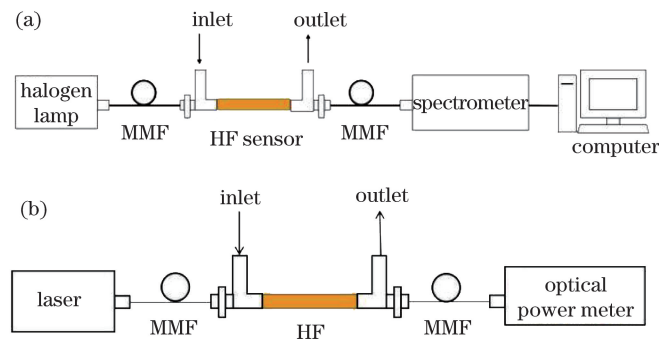


图 3 实验装置示意图。(a)光谱测量;(b)光强测量

Fig. 3 Diagrams of experimental setup. (a) Spectrum measurement; (b) light intensity measurement

4 结果与讨论

采用图 3(a)所示的实验系统测量充入不同折射率的待测液体时传感器的 SPR 光谱,所获得的归一化传输光谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当光纤内壁银膜厚度一定时,随着液体介质折射率的增大,光谱中的 SPR 共振峰向短波长方向移动,即发生蓝移。测量图 4 中各个光谱中的 SPR 共振峰对应的共振波长,其与待测液体折射率之间的关系如图 5 中蓝色方块所示。采用指数型函数对这些共振波长的实验数据进行曲线拟合,所得结果如图 5 中蓝色实线所示,获得拟合方程为 $\lambda_{\text{res}} = 516.44697 + 11.21877 \times 10^{12} e^n$,相关系数为 0.98196 。为获得空芯光纤中实际银膜的厚度,选取不同的银膜厚度参数,采用(10)式计算理论传输光谱并测量其共振波长,将计算结果与实验结果相比较以确定银膜厚度。图 5 中的红色圆点为银膜厚度为 $27\ \text{nm}$ 时的理论计算结果,红色虚线为该理论结果的指数型曲线拟合结果,拟合方程 $\lambda_{\text{res}} = 391.58338 + 6.47186 \times 10^{12} e^n$,相关系数为 0.99602 。由图 5 可以看出,理论结果与实验结果基本符合,并且具有相同的变化趋势,但由于理论计算中未考虑各种材料的色散,因此存在一定的偏差^[19]。据此可确定传感器的实际银膜厚度约为 $27\ \text{nm}$,在后续的长度检测实验中,相对应的理论结果的计算均认为银膜厚度为 $27\ \text{nm}$ 。

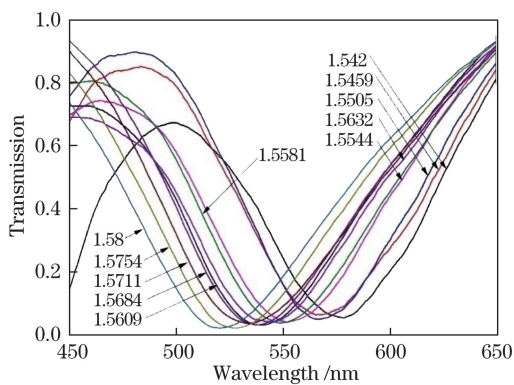


图 4 归一化传输光谱图

Fig. 4 Normalized transmission spectrum

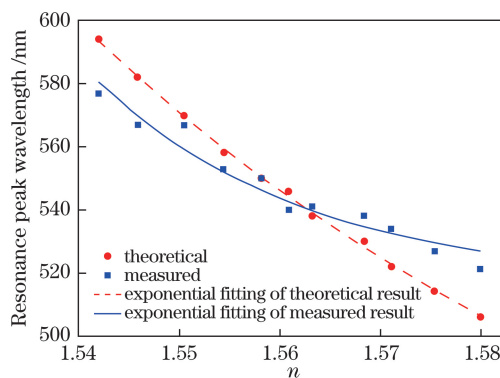


图 5 SPR 共振峰波长与待测液体折射率的关系

Fig. 5 Relationship between SPR resonance peak wavelength and refractive index of measured liquid

所配溶液对应的理论传输光谱如图 6(a)所示。当入射光的波长为 532 nm,图 6(a)中虚线与光谱的交点即为不同折射率的待测液体对应的理论输出光强。图 6(b)为理论输出光强随折射率的变化,当入射光波长为 532 nm 时,输出光强先随折射率的增大而减弱,当折射率持续增大到一定数值(约为 1.575)后,输出光强转为随折射率的增大而增强。实际上,在该曲线中前期光强下降的阶段,图 6(a)中交点基本位于其光谱中 SPR 共振峰的左侧下降沿;随着折射率的增大,交点向下移动到共振峰的底部并继续沿着共振峰的右侧上升沿向上移动。这个交点移动的过程对应图 6(b)中理论输出光强先下降后上升的曲线。

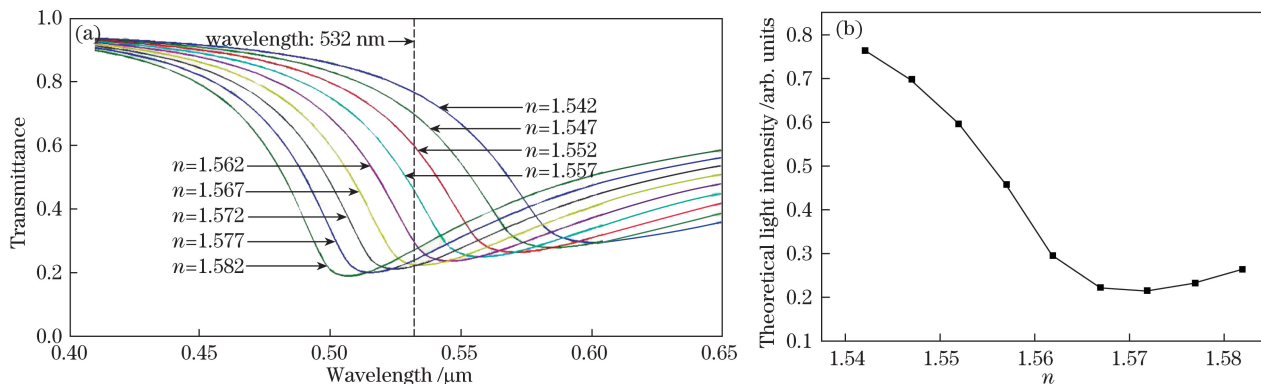


图 6 (a)理论传输光谱图;(b)理论输出光强与折射率的关系

Fig. 6 (a) Theoretical transmission spectrum; (b) relationship between theoretical output light intensity and refractive index

首先用光功率计对入射光强进行测量,测量时间为 2 min,每隔 5 s 进行一次读数,24 次读数的均值为 0.85 mW,标准差为 $3.4 \times 10^{-7} \mu\text{W}$,即入射光强可认为是 0.85 mW。使用图 3(b)所示的实验系统,用光功率计测量空芯光纤传感器充入不同折射率液体时的输出光强,数据测量方式与入射光强的测量方式相同,所得不同折射率下实测输出光强与标准差如表 1 所示。由表 1 可知,该输出光强的标准差范围为 0.032 ~ 0.091 μW ,说明光源输出强度的误差比传感器系统误差小 5 个数量级,即光源噪声对系统分辨率性能的影响较小。此外,对于激光器长期工作时输出强度的漂移,可在实验系统中加入分光器,用另一个光功率计对光源功率进行实时监测,并采用差分方法消除光源功率的漂移。

表 1 不同折射率下实测输出光强与标准差

Table 1 Measured results of output light intensity and standard deviation under different refractive indexes

n	1.542	1.547	1.552	1.557	1.562	1.567	1.572	1.577	1.582
Light intensity / μW	238.773	228.386	199.701	163.236	122.998	73.442	51.608	48.205	56.400
Standard deviation / μW	0.048	0.062	0.050	0.046	0.070	0.046	0.091	0.036	0.032

根据表 1 中的数据得到实测的输出光强与折射率的关系,将其与理论结果进行对比,如图 7(a)所示,可以看出理论结果与实测结果的变化趋势相符。当折射率范围为 1.55~1.57 时,输出光强与折射率近似呈线性关系,可将这段线性区域作为传感器的主要检测区域。线性工作区之外的其他折射率范围为非线性工作区,该范围内的输出光强与折射率呈非线性关系,难以正确地进行拟合定标,并且传感器灵敏度较低,因此非线性工作区不适合作为传感器的检测区域。将线性区域内的数据进行线性拟合,得到实测线性拟合结果如图 7(b)中所示,拟合方程为 $P = 13208.9221 - 8380.3n$,相关系数为 0.99748。该结果表明传感器在该线性工作区域内可检测的折射率范围为 1.55~1.57,灵敏度可达到 $8380.3 \mu\text{W}/\text{RIU}$ 。根据表 1 中的光强标准差数据,利用(12)式计算得到传感器的分辨率如表 2 所示,分辨率范围在 $(5.5 \sim 8.4) \times 10^{-6}$ RIU 之间,最高达到 5.489×10^{-6} RIU。前期研究的波长检测型空芯光纤 SPR 传感器在银膜厚度为 29 nm 时的分辨率为 $(1.4 \sim 5.1) \times 10^{-4}$ RIU^[13],表明该实验中采用强度检测的方式可使传感器的分辨率提高 2 个数量级,大幅提高了检测精度。不同结构的 SPR 传感器分辨率也不同,最新研究结果表明,D 型光纤 SPR 传感器的分辨率可达到 6.53×10^{-5} RIU^[20],基于 CCD 检测仪的 SPR 传感器在共振波长为 600 nm 处的分辨率可达到 9.62×10^{-6} RIU^[21]。光强检测型光纤传感器的分辨率大致为 $2.5 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-7}$ RIU^[22]。所提出的空芯光纤 SPR 传感器相比已有的 SPR 传感器,分辨率较高。

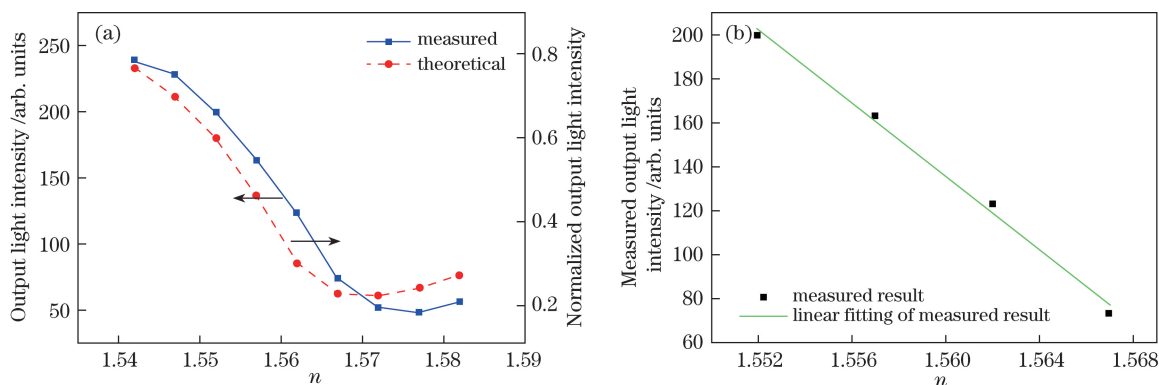


图 7 (a)理论及实测的输出光强与折射率的关系;(b)实测线性拟合图

Fig. 7 (a) Variation in theoretical and measured output light intensity and refractive index;
(b) linear fitting of measured result

表 2 传感器分辨率

Table 2 Sensor resolution

n	1.552	1.557	1.562	1.567
Standard deviation / μW	0.050	0.046	0.070	0.046
$R_n / (10^{-6} \text{ RIU})$	6.0	5.5	8.4	5.5

采用的传感器结构对应的液体折射率检测范围为 1.55~1.57,此外,针对不同的光纤结构,如不同的光纤内镀银膜厚度,传感器的线性检测区域会发生变化,银膜越厚,共振波长越大,即发生红移,将更利于检测高折射率的液体。通过改变入射光的波长,也可改变传感器的检测范围,采用更大波长的激光器作为入射光,将更利于检测低折射率的液体。虽然这两种方法都可以有效地改变传感器的检测范围,但是对应传感器的灵敏度和分辨率不会有太大变化。

5 结 论

研究了一种新型基于光强检测的空芯光纤 SPR 传感器。基于几何光学模型理论分析了传感器的性能;将波长为 532 nm 的激光作为单色光源并搭建了实验系统,对传感器的灵敏度和分辨率等性能进行了实验测量;得到理论结果与实验结果基本相符。在线性工作区域,传感器的灵敏度达到 $8380.3 \mu\text{W}/\text{RIU}$,分辨率达到 5.5×10^{-6} RIU。相比于波长检测型空芯光纤传感器,光强检测型空芯光纤 SPR 传感器的检测范围虽然

有所减小,但其分辨率提高了2个数量级。在待测液体折射率变化范围较小的生物化学传感领域,所设计的光强检测型传感器具有更好的性能和适用性。此外,可根据实际需要通过对检测光波长和空芯光纤结构参数等方式来调整传感器的检测范围,以满足不同的需求。

参 考 文 献

- [1] Couture M, Zhao S S, Masson J F. Modern surface plasmon resonance for bioanalytics and biophysics[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(27): 11190-11216.
- [2] Wang Bin, Jing Zhenguo, Peng Wei, *et al.* Phase difference signal processing technology in surface plasmon resonance sensing system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608009.
王 斌, 荆振国, 彭 伟, 等. 相位表面等离子体共振传感器系统中的相差信号处理技术[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608009.
- [3] Zhang Pengcheng, Lü Min, Chen Xiao, *et al.* Study and fabrication of surface-plasmon-resonance fiber optic sensor with tapered probe[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305005.
张鹏程, 吕 敏, 陈 笑, 等. 光纤表面等离子体共振传感器锥型探头的研制[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305005.
- [4] Kretschmann E, Raether H. Notizen: Radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light[J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1968, 23(12): 2135-2136.
- [5] Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 1968, 216(4): 398-410.
- [6] Jorgenson R C, Yee S S. Control of the dynamic range and sensitivity of a surface plasmon resonance based fiber optic sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1994, 43(1/3): 44-48.
- [7] Sharma A K, Gupta B D. On the performance of different bimetallic combinations in surface plasmon resonance based fiber optic sensors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(9): 093111.
- [8] Guan Chunying, Yuan Libo, Shi Jinhui. Microstructured-fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0206003.
关春颖, 苑立波, 史金辉. 微孔光纤表面等离子体共振传感器特性分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0206003.
- [9] Trouillet A, Ronot-Trioli C, Veillas C, *et al.* Chemical sensing by surface plasmon resonance in a multimode optical fibre[J]. *Pure and Applied Optics*, 1996, 5(2): 227-237.
- [10] Zhu Xiaosong, Zhou Zhiyun, Shi Yiwei. Flexible infrared hollow fiber used in endoscopic laser light delivery[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2123-2127.
朱晓松, 周志云, 石艺尉. 内窥镜的红外激光传输用柔性空芯光纤的研制[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2123-2127.
- [11] Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.* Hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0628001.
赵华新, 蒋永翔, 罗天穹, 等. 基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0628001.
- [12] Gu Bo, Chen Yubin, Wang Zefeng. Red, green and blue laser emissions from H₂-filled hollow-core fiber by stimulated Raman scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0806005.
顾 博, 陈育斌, 王泽峰. 基于空芯光纤中氢气级联 SRS 的红绿蓝色激光[J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0806005.
- [13] Liu B H, Jiang Y X, Zhu X S, *et al.* Hollow fiber surface plasmon resonance sensor for the detection of liquid with high refractive index[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32349-32357.
- [14] Jiang Yongxiang, Liu Binghong, Zhu Xiaosong, *et al.* Study of silver coated hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0223004.
蒋永翔, 刘炳红, 朱晓松, 等. 镀银空芯光纤表面等离子体共振传感器的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0223004.
- [15] Ho H P, Wu S Y, Yang M, *et al.* Application of white light-emitting diode to surface plasmon resonance sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2001, 80(2): 89-94.
- [16] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: Review[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 1999, 54(1/2): 3-15.
- [17] Matsuura Y, Saito M, Miyagi M, *et al.* Loss characteristics of circular hollow waveguides for incoherent infrared light[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1989, 6(3): 423-427.
- [18] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light[M]. Amsterdam: Elsevier, 1980.

-
- [19] Chen P, He Y J, Zhu X S, *et al.* Surface plasmon resonance sensor based on ethylene tetra-fluoro-ethylene hollow fiber[J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 27917-27929.
- [20] Chen Y Z, Xie Q L, Li X J, *et al.* Experimental realization of D-shaped photonic crystal fiber SPR sensor[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 50(2): 025101.
- [21] Chen Z L, Liu L, He Y H, *et al.* Resolution enhancement of surface plasmon resonance sensors with spectral interrogation: Resonant wavelength considerations[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 884-891.
- [22] Lee B, Roh S, Park J. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2009, 15(3): 209-221.