

镀银空芯光纤表面等离子体共振传感器的研究

蒋永翔 刘炳红 朱晓松 石艺尉

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要 提出了一种新型的基于镀银空芯光纤结构的表面等离子体共振(SPR)传感器。建立了光学模型对传感器内的光传播进行分析,在理论上推导出了传输光谱公式。制作了不同银膜厚度的空芯光纤 SPR 传感器,搭建了实验系统对内芯充入不同折射率的液体介质的传感器传输光谱进行了测量,获得了相应的 SPR 光谱。通过理论计算和实验测量对传感器的灵敏度特性和测量准确性进行了分析讨论。结果表明该传感器是一种灵敏度较高的、能实时检测待测高折射率液体介质的 SPR 传感器,它在一定范围内能够很好地弥补传统光纤表面等离子体共振传感器的不足,并且开拓了空芯光纤的一个新的应用领域。

关键词 传感器;表面等离子体共振;空芯光纤;波导

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0223004

Study of Silver Coated Hollow-Core Fiber Surface Plasmon Resonance Sensor

Jiang Yongxiang Liu Binghong Zhu Xiaosong Shi Yiwei

(School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A new kind of surface plasmon resonance (SPR) sensor based on hollow-core fiber structure is proposed. The performance of the designed sensor is theoretically analyzed with a ray model theory. Sensors with different silver film thicknesses are fabricated. An online testing system is set up and the SPR spectra of liquids filled in the fiber core with different refractive indices are obtained with the sensors of different silver layer thicknesses. Sensitivity and detection accuracy of the sensors are investigated both theoretically and experimentally. The designed sensor is a kind of fiber SPR sensor with high sensitivity, which can detect the high refractive index liquid medium in real time. It can make up the deficiency of the conventional fiber SPR sensor in a certain range and open up a new application field for hollow-core fiber.

Key words sensors; surface plasmon resonance; hollow-core fiber; waveguides

OCIS codes 240.6680; 060.2370; 230.7370

1 引 言

表面等离子体共振(SPR)是一种新兴的生物化学检测技术^[1]。当光入射到金属-介质界面时,若波长和入射角满足一定条件,表面等离子波与消逝波将发生共振,入射光被吸收,使反射光的能量急剧下降,在光谱上出现共振峰。对于波长检测型 SPR 传感器来说,共振峰的位置与被检测物质的折射率相关。SPR 传感技术与传统的检测方法相比,具有检

测实时快速、无需标记样品、分析复杂体系时间短、检测过程方便快捷、灵敏度高等优点,因此在各领域得到了广泛的应用^[2-3]。

传统的 SPR 传感器,一般采用 Kretschmann-Raether 结构^[4-5],但是这种类型的传感器由于有棱镜等光学器件,存在体积较大、难以应用在远程测量方面等缺点。因此,近年来光纤 SPR 传感器成为了研究热点^[6-9]。常用的光纤 SPR 传感器的结构是

收稿日期: 2013-08-19; 收到修改稿日期: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61201062)

作者简介: 蒋永翔(1990—),男,硕士研究生,主要从事空芯光纤传感方面的研究。E-mail: 12210720081@fudan.edu.cn

导师简介: 朱晓松(1976—),男,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)

把光纤上的一小段包层去除,然后在纤芯表面镀上一层薄金属膜,通过测光谱来检测与金属膜接触的被检测物质。这种光纤 SPR 传感器要求被检测物质的折射率必须小于纤芯的折射率,而一般所用的光纤纤芯材料为石英玻璃,那么被检测物质的折射率应该小于 1.45,而无法检测高折射率的物质,具有局限性。如果要检测高折射率的物质,则需要使用更高折射率物质作为纤芯材料的光纤,而这一类光纤存在制作成本高、难度大、柔韧性小等缺点,所以用传统的光纤 SPR 传感器检测高折射率物质成为一个难点。

空芯光纤(HF)^[10-15]作为一种光波导,由于其采用空气作为传输介质,其对光的吸收小,且空芯光纤芯径较大,散热效率高,使得空芯光纤具有较大的功率阈值,可以传输较大功率的激光。采用空气也避开了实芯光纤中引入过渡金属离子和 OH⁻ 离子及其他杂质,大大减少了吸收损耗,所以其在可见光中红外波段均有较低的传输损耗。空芯光纤还具有很好的柔韧性和安全性,在很多领域都有运用。

传统的空芯光纤为了使其在可见到近红外有较低的传输损耗,内壁所镀的金属膜厚度需要超过光波的趋肤深度,一般为几百纳米。如果将金属膜降低为小于趋肤深度的几十纳米,将折射率高于管壁材料的液态介质充入空芯光纤,此时由介质-金属薄膜-管壁构成的三层结构将满足激发 SPR 现象的条件,相应的 SPR 光谱可以通过测量该光纤的传输光谱获得。据此本文提出一种新型的空芯光纤 SPR 传感器,使用熔融石英作为基管材料,在其内壁镀上几十纳米厚度的银膜,将折射率高于熔融石英的待测液体介质注入光纤内部,将宽谱光源导入该光纤,通过测量输出光谱便可以获得相应的 SPR 光谱,进而检测出待测液体介质的折射率信息。文献[16-17]提出过类似的采用在光纤内部空芯中注入待测介质进行检测的光纤 SPR 传感器,但是其使用的空芯光纤更类似于空芯的通信光纤,其空芯孔径只有几个微米,在其内壁镀金属膜十分困难,并且需要在光纤的导波层刻制光栅,故相关研究只是停留在理论阶段。本文提出的 SPR 传感器所用的空芯光纤构造更加简单,在应用中更加容易实现。这种 SPR 传感器和传统的光纤 SPR 传感器相比虽然有不足的地方,例如无法检测在待测波段具有较高吸收的液体,在远程传感方面不如传统光纤 SPR 传感器方便,镀膜的精度不如离子束溅射方式的精度高,但是它适合检测高折射率的物质,在这

一点上能够弥补传统光纤 SPR 传感器的不足。并且该种新结构的 SPR 传感器为空芯光纤这种已经成熟应用在能量传输领域的特种光纤开拓了一个非常有实用价值的应用领域。

2 理论计算

2.1 理论模型

为了分析所设计的空芯光纤 SPR 传感器的传输光谱,采用几何光学的方法建立光线传播模型来计算传输损耗^[18]。对于空芯光纤来说,在入射光的入射角比较小的情况下,可以用过子午线光线的传输损耗来近似入射光的损耗。图 1 是通过子午线的光线在光纤 SPR 传感器内部传播的示意图。

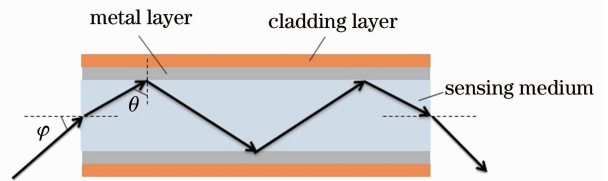


图 1 空芯光纤 SPR 传感器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor

图 1 中 φ 为进入空芯光纤 SPR 传感器前入射光线与光纤子午线的夹角, θ 是在空芯光纤内部光线和垂直内壁方向所成的角度。二者间的关系满足 Snell 定律,即

$$\sin \varphi = n_s \cos \theta, \quad (1)$$

式中 n_s 为待测物质的折射率。

一般来说,通过耦合光纤入射到空芯光纤内的入射光的强度 P_0 与 φ 近似呈高斯分布^[18]:

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

式中 φ_0 和入射光的发散角有关。由于入射光中只有 p 偏振的部分才能产生 SPR 现象,因此只计算 p 光在传感器内传输的损耗。通过空芯光纤 SPR 传感器后 p 光的强度为

$$P = \int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) R_p(\theta) N(\theta) d\theta, \quad (3)$$

式中 $N(\theta)$ 是光线在传感器内的反射次数, θ_{cr} 是界面上的临界全反射角,分别表示为

$$N(\theta) = \frac{L}{D \tan \theta}, \quad (4)$$

$$\theta_{cr} = \arcsin(n_p/n_s), \quad (5)$$

式中 L 和 D 是传感器的长度和直径,为基管材料的折射率。而 $R_p(\theta)$ 为 p 光在空芯光纤内壁的反射系数^[19],可以由三层膜结构模型对应的 Fresnel 公式

求得

$$R_p(\theta) = \left| \frac{r_{sm} + r_{mp} \exp(2ik_{mz}d)}{1 + r_{sm}r_{mp} \exp(2ik_{mz}d)} \right|^2, \quad (6)$$

式中

$$r_{sm} = \frac{k_{sz}\epsilon_m - k_{mz}\epsilon_s}{k_{sz}\epsilon_m + k_{mz}\epsilon_s}, \quad (7)$$

$$r_{mp} = \frac{k_{mz}\epsilon_p - k_{pz}\epsilon_m}{k_{mz}\epsilon_p + k_{pz}\epsilon_m}, \quad (8)$$

$$k_{jz} = \left(\epsilon_j \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 \right)^{1/2}, \quad j = s, m, p \quad (9)$$

$$k_x = \sqrt{\epsilon_s} \frac{\omega}{c} \sin \theta, \quad (10)$$

式中 k_{sz} , k_{mz} , k_{pz} 分别是待测物质、金属膜、基管材料中垂直于管壁方向的入射光的波矢分量; k_x 为平行于管壁方向的入射光的波矢分量; ϵ_s , ϵ_m , ϵ_p 分别为待测物质、金属膜、基管材料的介电常数; d 为金属膜厚度; ω 为入射光振动频率; c 为光速。

而整个传感器的传输表达式为

$$T = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) R_p(\theta)^{N(\theta)} d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) d\theta}. \quad (11)$$

如果只考虑 p 光(即 TM 模), (11) 式计算得到的就是空芯光纤 SPR 传感器的传输光谱, 或称为 SPR 光谱, SPR 现象在光谱中表现为一个低传输率的峰。空芯光纤 SPR 传感器为波长测量型 SPR 传感器, 需要测量的是共振波长 λ_{res} , 即传感器的 SPR 光谱中共振峰的峰位所对应的波长, 其与待测物质折射率相关。而当待测物质折射率改变了 δn_s 的时候, 共振波长改变了 $\delta \lambda_{res}$, 传感器的灵敏度为

$$S_n = \delta \lambda_{res} / \delta n_s. \quad (12)$$

除了灵敏度之外, SPR 峰的半峰全宽(FWHM)也是影响传感器性能的一个重要因素, 它将决定共振波长的精确度, 一般来说精确度与 FWHM 的呈反比关系。

2.2 材料色散

实验中采用的基管材料为熔融石英, 其在可见光范围的色散采用 Sellmeier 公式表示, 即

$$n^2 = 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - (0.0684043)^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - (0.1162414)^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - (9.896161)^2}, \quad (13)$$

式中 λ 单位为 μm 。制作的光纤传感器中所镀的金属膜为银膜, 银的介电常数采用 Drude 模型来表示, 即

$$\epsilon(\lambda) = \epsilon_r + i\epsilon_i = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)}, \quad (14)$$

式中 $\lambda_p = 1.4541 \times 10^{-7} \text{ m}$, $\lambda_c = 1.7614 \times 10^{-5} \text{ m}$ ^[7]。

3 实验

3.1 空芯光纤 SPR 传感器的制作

进行实验前要先制作空芯光纤 SPR 传感器, 即制作合适的空芯光纤。实验中所使用的是在石英玻璃基管内壁镀银膜的空芯光纤, 使用的镀银方法为液相镀膜法^[10-12], 镀膜装置如图 2 所示。一般制作传能用的空芯光纤时银膜厚度为几百个纳米, 镀膜工艺和参数较易控制, 而制作 SPR 传感器需要银膜厚度控制在几十个纳米数量级, 必须很好地控制和优化镀膜时的温度、液体流速、成膜时间等参数, 才能获得质量好的银膜。实际制作中成膜厚度和镀膜时间的关系为经验公式, 受环境因素影响较大, 故银膜具体厚度无法直接精确获得, 要通过实验与理论光谱数据的比较才能得出。

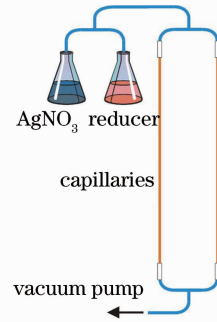


图 2 液相镀膜法镀银装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the liquid phase coating method for silver plating

实验中制作了两根不同银膜厚度的空芯光纤, 其镀制银膜的时间分别为 30 s 和 40 s, 而空芯光纤基管材料为熔融石英, 内径为 $700 \mu\text{m}$, 作为空芯光纤 SPR 传感器时截取长度为 5 cm。由理论分析可知, 光纤长度变化对共振峰的位置没有影响, 而光纤长度增加只会增加整体的传输损耗, 从而增加谷宽, 对共振峰位置的判断难度增大, 而光纤长度很短的时候, 谷的深度会大大减小。此外, 液相镀膜法制作的银膜厚度在光纤的径向上会有渐变, 选择较短的长度可以减小整根光纤长度上银膜厚度的不均匀性。实验中选取 5 cm 是综合考虑了共振峰深度、宽度, 以及能够很好地与耦合器固定连接的情况下选择的结果。

3.2 实验系统

搭建的用于测量 SPR 光谱的实验系统如图 3 所示。实验中光源选用的是卤素钨灯,其发出的光通过多模光纤(MMF)耦合进入空芯光纤 SPR 传感器,从传感器输出的光再通过 MMF 导入光谱仪(Horiba Jobin Yvon iHR550),经过光谱仪的检测获得相应的 SPR 光谱。由于光谱仪的探测器探测范围所限,实验中测量的光谱范围为 400~800 nm。空芯光纤 SPR 传感器是内径为 700 μm 的空芯光

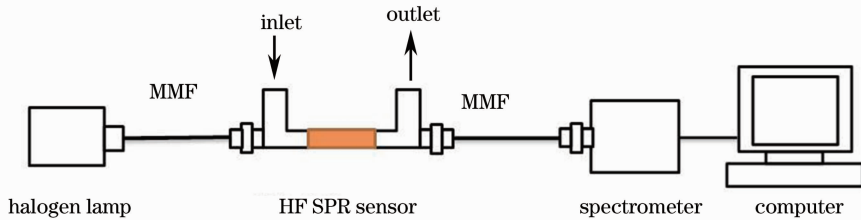


图 3 实验系统图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

4 结果与讨论

实验前制作了两根不同银膜厚度的空芯光纤作为空芯光纤 SPR 传感器,采用上述实验系统对 5 组不同折射率的液体进行了检测。图 4 为不同待测液体折射率对应的归一化透射谱图。图 4(a)和(b)所用的是不同银膜厚度的空芯光纤 SPR 传感器,其银膜成膜时间分别为 30 s 和 40 s,待测的 5 组液体在 589 nm 处的折射率分别为 1.5107, 1.5315, 1.5441, 1.5504 和 1.5783(使用阿贝折射仪测得)。

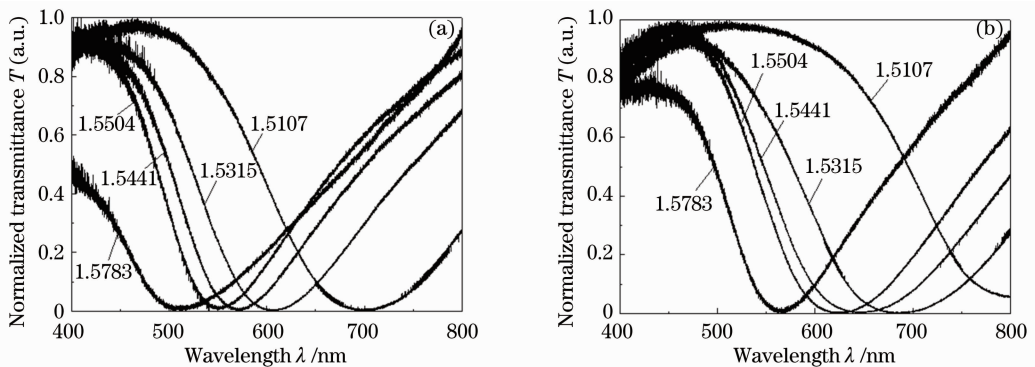


图 4 空芯光纤 SPR 传感器归一化传输光谱。(a)空芯光纤内壁银膜成膜时间为 30 s; (b)空芯光纤内壁银膜成膜时间为 40 s

Fig. 4 Normalized transmittance spectra of HF SPR sensor. (a) Silver layer coating time of 30 s; (b) silver layer coating time of 40 s

通过比较实测与理论所得的透射谱,对比共振峰的位置,可以得出所镀银膜的确切厚度。图 5(a)中的实线为用成膜时间 40 s 的空芯光纤传感器检测折射率为 1.5783 和 1.5315 的待测物质对应的透

射谱,它的基管材料为熔融石英,传感器长度为 5 cm。传感器两端连接有专门制作的液路光路耦合器件,两端的耦合器件分别连接有软管,通过蠕动泵来导入导出待测液体,达到在线检测的目的。待测液体使用的是以不同比例混合的甲基苯基硅油和煤油,这两种液体在 400~800 nm 波段吸收很小,几乎可以忽略,不同比例的混合溶液在 589 nm 处的折射率由 1.5107 一直变化到 1.5783。

当空芯光纤 SPR 传感器内壁的银膜厚度一定时,共振波长随着折射率的增大而减小。而使用不同银膜厚度的传感器检测相同折射率的液体,银膜越厚,则共振波长越大。被待测物质的折射率与传感器基管材料折射率之间的差距越小,共振波长越大,理论上可以探测所有折射率比基管材料大的液体,但实际上还受到光源波长范围和光谱仪探测范围的限制,如图 4(b)中所示,当待测物质折射率为 1.5107 时其共振峰的位置已经无法准确判断。

射谱,而虚线为膜厚为 57 nm 所对应的理论透射谱,可以看出二者共振峰位置对应得很好,为了更直观地观察,将待测物质折射率和共振波长作图如图 5(b)所示,这样便可以得出所用的两组传感器所

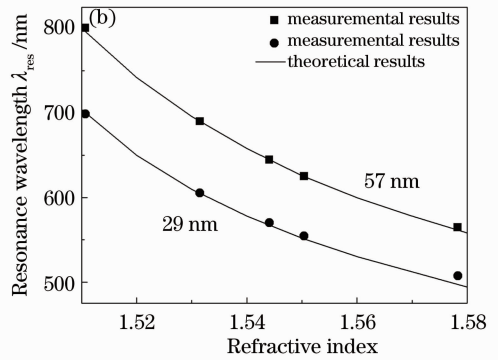
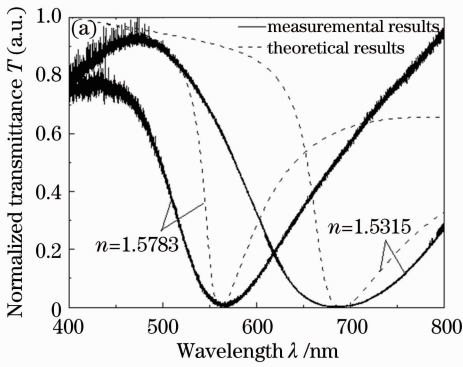


图 5 (a) 实测与理论所得传输光谱对比; (b) 共振波长与待测物质折射率的关系图

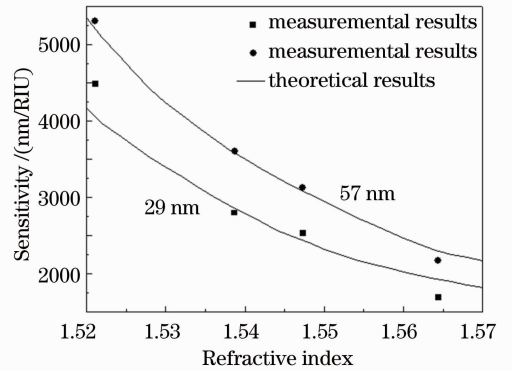
Fig. 5 (a) Comparison of experimental and theoretical transmission spectra; (b) resonance wavelength versus refractive index of analyte

对应的银膜厚度分别为 29 nm 和 57 nm, 其理论曲线与实测点对应得很好, 可认为以此得出的银膜厚度是可信的。

光纤 SPR 传感器的一个重要性能指标为传感器灵敏度, 其直接决定了传感器的分辨率。实验中所使用的光纤传感器类型为波长检测型, 其灵敏度定义为待测物质单位折射率 (RIU) 变化所对应的共振波长的变化。

从图 6 可以看出, 传感器灵敏度与待测物质折射率的关系, 其理论结果与实验结果略有差别, 这是因为实验数据点较少, 数据点所对应的折射率之间的间隔较大, 而处理数据时通过相邻两数据点计算所得的灵敏度作为平均折射率处的灵敏度, 这便会造成一定的误差, 所以理论结果与实验结果稍微有所差异。通过分析可以知道, 待测物质的折射率与传感器基管材料折射率之间的差距越小, 其检测灵敏度越高。而对于不同银膜厚度的传感器, 银膜厚度相对较厚的在同一检测点其灵敏度更高, 所以需要更高的灵敏度的传感器, 可以适当增加银膜的厚度。从图中可以看出, 空芯光纤 SPR 传感器其灵敏最高能达到 6000 nm/RIU 左右, 而平均也能达到 3000 nm/RIU 左右。而已有的光纤 SPR 传感器根据构造的不同其灵敏度也不同, 大部分的光纤 SPR 传感器其灵敏度为 1500~5000 nm/RIU, 光纤光栅 SPR 传感器的灵敏度相对较低, 而锥形光纤 SPR 传感器的灵敏度则相对高一些, 有些甚至能达到 15000 nm/RIU^[20]。本文所提出的空芯光纤 SPR 传感器的灵敏度相比已有的光纤 SPR 传感器, 其灵敏度还是在较高水平。

除了灵敏度之外, 共振峰的 FWHM 也是影响性能的一个重要因素, 它将决定共振波长的精确度。


 图 6 传感器灵敏度与待测物质折射率的关系图
 Fig. 6 Sensitivity versus refractive index of analyte

FWHM 越大, 越难以准确地确定共振波长的位置, 从而降低传感器的精确度和信噪比。通过理论计算发现光源发散角 φ_0 不仅会影响共振峰的位置, 还会影响 FWHM 的值, 如图 7(a) 所示。取银膜厚度为 57 nm, 待测物质折射率为 1.5783, 理论曲线分别对应 φ_0 为 3.6° 和 9.6° 。由图可以看出, φ_0 越小则 FWHM 越小。所以为了得到更小的 FWHM 值, 可以选用发散角较小的光源。

由于光源发散角对 FWHM 会有影响, 所以实测了实验中所使用的光源的发散角, 发现其具有色散特性, 波长越大发散角越小, 近似呈线性关系, 实验数据如图 7(b) 所示。通过线性拟合, 得到二者之间的关系式为

$$\varphi_0(\lambda) = -0.01\lambda + 12.76. \quad (15)$$

将(15)式的光源发散角代入到(11)式中计算各待测介质对应的 SPR 光谱的 FWHM, 理论结果用实线显示在图 8 中, 相应的实验结果用实心方块表示, 图 8(a) 和 (b) 分别为银膜厚度为 29 nm 和 57 nm 的结果, 可以看出, 采用了实测的光源发散角后, 实验的 FWHM 值还是比理论值大, 而造成实验值偏

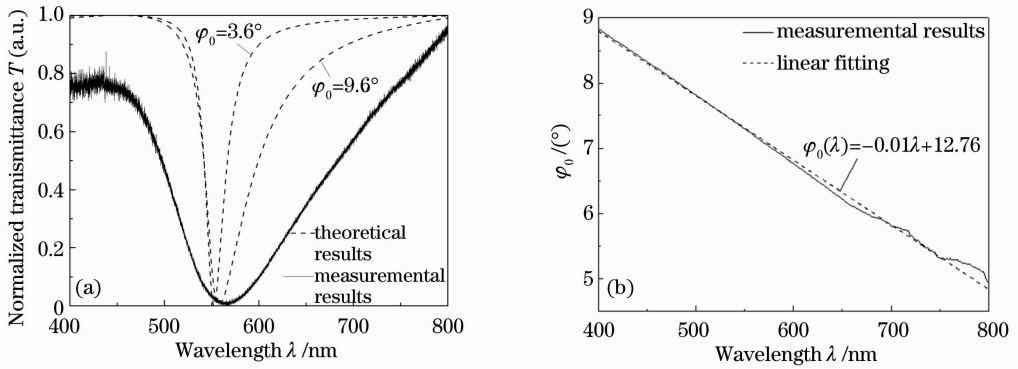


图 7 (a)归一化传输谱对光源发散角影响；(b)光源波长与其发散角关系

Fig. 7 (a) Normalized transmittance spectra versus scattering angle of light source; (b) scattering angle of light source versus wavelength

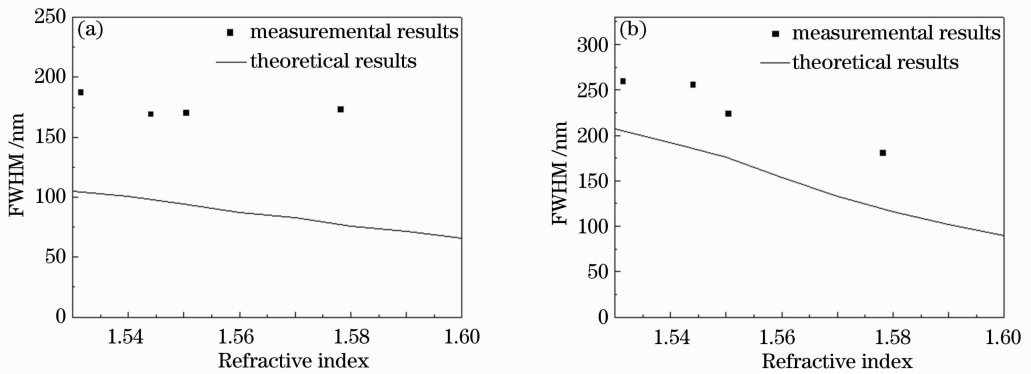


图 8 共振峰 FWHM 和待测物质折射率关系图。(a)空芯光纤银膜厚度为 29 nm；(b)空芯光纤银膜厚度为 57 nm

Fig. 8 FWHM of SPR peak versus refractive index of analyte. (a) Silver layer thickness of 29 nm; (b) silver layer thickness of 57 nm

大的一个主要原因应该是传感器内部所镀的银膜厚度不均匀造成的。之前已经阐述了镀制银膜所用的是液相镀膜法,其原理为化学反应,与粒子束溅射等物理镀膜方式不同;当镀制比较薄的银膜时,由于成膜时间很短,会造成膜厚分布不均匀,而膜厚不均匀反映在实验结果上就是看到的每一个共振峰实际上都是由许多不同膜厚对应的不同位置的共振峰叠加而成,这就解释了为什么实验所测得的共振峰 FWHM 比理论值大。而且从图 8(a)和(b)的对比可以看出,银膜厚度为 57 nm 时理论值和实验值的差值要比厚度为 29 nm 时小,这是因为在一定的镀膜厚度以内时,液相镀膜法所镀银膜的均匀性会随着银膜厚度的增加而提高。

5 结 论

将空芯光纤技术与表面等离子体共振技术相结合,提出了一种新型的基于空芯光纤结构的 SPR 传感器,并建立光学模型对传感器内的光传播进行了分析,在理论上推导出了传输光谱损耗公式,并通过

实验与理论计算结果的对比分析了空芯光纤 SPR 传感器的各个性能,结果表明该传感器是一种灵敏度较高的、能实时检测待测高折射率液体介质的 SPR 传感器。由于传统的光纤 SPR 检测器无法检测高折射率物质,而空芯光纤 SPR 检测器则能检测折射率高于它基管材料的物质,所以在对高折射率物质的检测这方面弥补了传统光纤 SPR 传感器的不足。而且通过某些方法来降低基管材料的折射率,可以实现较低折射率物质的检测,从而有效地扩展了空芯光纤 SPR 传感器的检测范围。该研究也为空芯光纤在检测领域开拓了一个新的应用方向。

参 考 文 献

- 1 J Homola, S S Yee and, G Gauglitz. Surface plasmon resonance sensors; review [J]. Sensors and Actuators B-Chemical, 1999, 54(1-2): 3-15.
- 2 B Liedberg, C Nylander, I Lundstrom. Surface plasmons resonance for gas detection and biosensing [J]. Sensors and Actuators, 1983, 4: 299-304.
- 3 Yang Yudong, Xu Jinghua, Yang Linmei, et al.. Optical properties of gold nanorod and its application in biological imaging and photothermal therapy [J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2010, 47(7): 071702.
- 杨玉东, 徐菁华, 杨林梅, 等. 金纳米棒的光学性质及其在生物医学成像和光热疗法中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 071702.
- 4 E Kretschmann, H Raether Radiative. Decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. Naturforscher, 1968, 23: 2135—2136.
- 5 A Otto. Excitation of surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection [J]. Z Physik, 1968, 216: 398—410.
- 6 R C Jorgenson, S S Yee. 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 A K Sharma, B D Gupta. On the performance of different bimetallic combinations in surface plasmon resonance based fiber optic sensors [J]. J Appl Phys, 2007, 101(9): 093111.
- 8 A Trouillet, C Ronot-Trioli, C Veillas, *et al.*. Chemical sensing by surface plasmon resonance in a multimode optical fibre [J]. Pure Appl Opt, 1996, 5: 227—237.
- 9 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特性分析[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0206003.
- 10 K R Sui, Y W Shi, X L Tang, *et al.*. Optical properties of AgI/Ag infrared hollow fiber in the visible wavelength region [J]. Opt Lett, 2008, 33(4): 318—320.
- 11 N Croitoru, A Inberg, M Ben-David, *et al.*. Broad band and low loss mid-IR flexible hollow waveguides [J]. Opt Express, 2004, 12(7): 1341—1352.
- 12 B S Sun, X Zeng, K Iwai, *et al.*. Experimental investigation on liquid-phase fabrication techniques for multilayer infrared hollow fiber [J]. Opt Fiber Technol, 2011, 17(4): 281—285.
- 13 J A Harrington. A review of IR transmitting, hollow waveguides [J]. Fiber Integr Opt, 2000, 19(3): 211—227.
- 14 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.
- 15 Zhao Huaxin, Jiang Yongxiang, Luo Tianqiong, *et al.*. Study of hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 240—245.
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): 240—245.
- 16 G Nemova, R Kashyap. Modeling of plasmon-polariton refractive-index hollow core fiber sensors assisted by a fiber Bragg grating [J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(10): 3789—3796.
- 17 Li Xia, Yating Zhang, Chi Zhou, *et al.*. Numerical analysis of plasmon polariton refractive index fiber sensors with hollow core and a long period grating [J]. Opt Commun, 2011, 284(12): 2835—2838.
- 18 Y Matsuura, M Saito, M Miyagi, *et al.*. Loss characteristics of circular hollow waveguides for incoherent infrared light [J]. J Opt Soc Am A, 1989, 6(3): 423—427.
- 19 K Kurihara, K Suzuki. Theoretical understanding of an absorption-based surface plasmon resonance sensor based on Kretschmann's theory [J]. Anal Chem, 2002, 74(3): 696—701.
- 20 Byoung-ho Lee, Sookyoung Roh, Junghyun Park. Current status of micro- and nano-structured optical fiber sensors [J]. Opt Fiber Technol, 2009, 15(3): 209—221.

栏目编辑：王晓琰