

基于表面等离子体共振原理的空芯光纤传感器

赵华新 蒋永翔 罗天穹 朱晓松 石艺尉

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要 设计了一种基于表面等离子体共振原理,使用空芯光纤作为光波导、外表面镀金属膜的光学材料圆柱体作为探头的新型折射率传感器。通过建立光学模型进行分析,在理论上推导出了这种传感器的传输光谱损耗公式,并针对该传感器在不同的光纤长度、探头材料、检测物质折射率等参数设置下的检测性能进行了分析,获得了各种参数对其性能的影响。由于该传感器可针对不同折射率的检测物质灵活地更换合适探头材料,相对于传统的表面等离子体共振光纤传感器,在易用性和性价比等方面具有更好的应用价值。

关键词 传感器; 光纤光学; 表面等离子体共振; 空芯光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0628001

Hollow Optical Fiber Sensor Based on Surface Plasmon Resonance

Zhao Huaxin Jiang Yongxiang Luo Tianqiong Zhu Xiaosong Shi Yiwei

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

Abstract A new kind of hollow optical fiber sensor based on surface plasmon resonance (SPR) is designed. The performance of the designed sensor is theoretically analyzed with a ray model theory. The influences of different configurations of the sensor are also analyzed. It is shown that this hollow optical fiber SPR sensor is more flexible in use than conventional fiber SPR sensors because it can change sensing probes to fit sensing medium with different refractive indexes.

Key words sensors; fiber optics; surface plasmon resonance; hollow optical fiber

OCIS codes 280.4788; 240.6680; 230.7370

1 引 言

表面等离子体共振 (SPR) 作为一种有重要价值的检测技术, 多年以来一直在国际上被深入研究并在生物和化学传感领域产生了很多应用^[1~3]。在传统的 SPR 传感器中, 一般采用 Kretschmann-Raether 结构^[4,5], 即在耦合棱镜的底面上镀上一层很薄的金属膜, 被检测物质直接与金属膜接触。p 偏振的光以不同的入射角入射到金属-棱镜界面上, 当波长和入射角满足一定条件时, 发生表面等离子体共振, 反射率降到最低。通过检测反射光强度随

入射角的变化, 即可获得反射率最低的入射角, 这个角度被称为共振角。共振角的大小与被检测物质的折射率相关, 这样通过对共振角的测量即可实现对被检测物质的折射率的测量。为了解决这种基于棱镜结构的 SPR 传感器体积较大、难以应用在远程测量的方面等缺点, 光纤 SPR 传感器近年来成为了研究热点^[6~11]。常见的光纤 SPR 传感器的结构是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, 通过对光纤中传输光的光谱测量来获得与金属膜接触的被检测物质的折射率信息。光纤

收稿日期: 2011-11-17; **收到修改稿日期**: 2011-12-31

基金项目: 国家自然科学基金 (60971014) 资助课题。

作者简介: 赵华新 (1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事空芯光纤传感器方面的研究。

E-mail: 10210720104@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)

SPR 传感器要求被检测的物质的折射率必须小于纤芯的折射率,例如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。如果需要检测一些高折射率的物质,比如说苯,必须使用其他高折射率材料制作的光纤,但这些材料的光纤一般都存在制作难度大、成本高、柔韧性小等缺点,使得使用传统结构的光纤 SPR 传感器进行高折射率物质的检测成为一个难点。此外,每根光纤 SPR 传感器的动态测量范围,也就是所能检测的物质的折射率范围,都是有限的。对于折射率超出动态测量范围的被检测物质,也只能更换整根光纤传感器。基于传统光纤 SPR 传感器所存在的这些问题,本文提出了一种新型的基于空芯光纤的 SPR 传感器。

2 理论模型

本文提出的传感器结构如图 1 所示,图中两种结构分别为中端检测和末端检测的不同设计。空芯光纤在可见光到中红外波段均有较低的传输损耗,并且具有很好的柔韧性和安全性,在这里被用作传感器的光波导^[12~14]。由于空芯光纤不是基于全反射原理进行传输,其可以传输以任意入射角度耦合进光纤的光线,虽然入射角越大的光线传输损耗越大。这种特性保证了所设计的空芯光纤 SPR 传感器在原理上使用任意折射率的探头均可以实现 SPR 光谱的测量。传感器的探头部分为一种光学材料制作的圆柱体,侧面镀金属膜(金或银);末端检测型的设计中,其中一个端面还需要镀一层较厚的金属膜作为反射镜。探头与空芯光纤通过特定的接口连接在一起以达到密封的目的。探头材料可以根据所测量物质的折射率进行灵活的选择,针对高折射率的检测物质选择更高折射率的材料制作探头。

例如被检测物质是折射率在 1.5 左右的苯,可以选择钇铝石榴石(YAG)作为探头材料。并且该结构的传感器可以制作成一根光纤配多个探头,对于不同的检测物质只需要更换上合适的探头即可,极大地扩展了传感器的动态测量范围,在提高实用性的同时大大降低了成本。

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^[15]。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 2 是过子午线的光线在传感器内部传播的示意图。一般来说,在空芯光纤的实验系统中,探测光是通过耦合光纤入射到空芯光纤内的,而耦合光纤的出射光的强度 P_0 。随光线与子午线的夹角 φ 近似呈高斯分布^[15,16],即

$$P_0(\varphi) \propto \exp(-\varphi^2/\varphi_0^2), \quad (1)$$

式中 φ_0 为与入射光发散角相关的量,实验表明空芯光纤能够低损耗地传输耦合光纤输出的高斯分布的入射光^[16]。由于入射光中只有 p 偏振光能产生 SPR 现象,而 s 偏振光在探头内的传输基本无损耗并且在空芯光纤中的传输损耗与 p 偏振光基本相当,所以与 p 偏振光的传输损耗相比,入射光的总体传输损耗只是会在共振峰的高度上有线性的降低,总体的形状和共振峰的位置并不会会有较大的差别。因此只需要计算 p 偏振光在传感器内传输的损耗就可以充分的描述传感器的性能。在通过长度为 z 的空芯光纤后 p 偏振光的强度为

$$P(z) = \int_0^{\varphi_{\max}} P_0(\varphi) \exp\left[-\frac{1-R(\varphi)}{D \cot \varphi} z\right] \sin \varphi d\varphi, \quad (2)$$

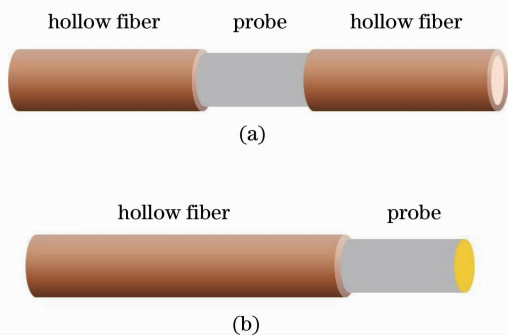
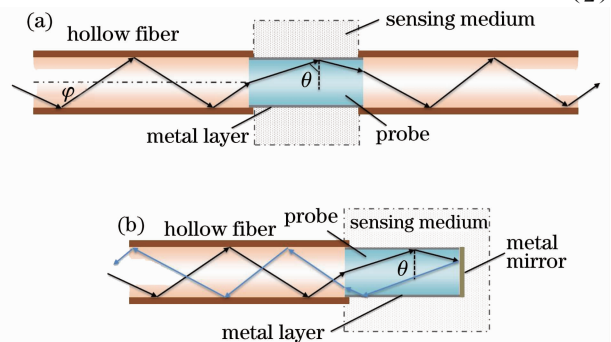


图 1 空芯光纤 SPR 传感器结构示意图。(a)中端检测型;(b)末端检测型

Fig. 1 Structure of hollow optical fiber SPR sensor.

(a) Middle sensing; (b) tip sensing

图 2 光线在空芯光纤 SPR 传感器内传播模型示意图。(a)中端检测型;(b)末端检测型

Fig. 2 Ray-transmission model in hollow optical fiber SPR sensor.

(a) Middle sensing; (b) tip sensing

式中 $R(\varphi)$ 为 p 偏振光在空芯光纤内壁的反射系数, D 为空芯光纤内径, φ_{\max} 为最大入射角度。对于光在探头内的传输, 可看作光线在探头侧壁的金属膜界面上的多次反射的结果, 设进入探头的入射光强度随角度 θ 的分布为 $P_1(\theta)$, 则经过探头后 p 偏振光的光强为

$$P_{\text{out}_p} = \int_{\theta_{\text{cr}}}^{\pi/2} P_1(\theta) R_p^{N_{\text{ref}}(\theta)} d\theta, \quad (3)$$

式中 R_p 为金属膜界面上 p 偏振光的反射系数, 其计算公式见参考文献[17], θ_{cr} 为界面上的临界全反射角, 有

$$\theta_{\text{cr}} = \arcsin(n_s/n_p), \quad (4)$$

$$N_{\text{ref}}(\theta) = \frac{L}{D' \tan \theta}, \quad (5)$$

式中 $N_{\text{ref}}(\theta)$ 为光线在探头内的反射次数, L 和 D' 是探头的长度和直径, n_s 和 n_p 分别为被检测物质和探头材料的折射率。结合(2)式和(3)式可知强度为 P_0 入射 p 偏振光在经过整个传感器之后, 输出的光强为

$$P_{\text{out}} = \int_{\theta_{\min}}^{\pi/2} R_p^{N_{\text{ref}}(\theta)} P_0(\varphi) \exp\left[-\frac{1-R(\varphi)}{D \cot \varphi} z\right] \times \sin \varphi \frac{n_p \sin \theta}{\sqrt{(1-n_p^2 \cos^2 \theta)}} d\theta, \quad (6)$$

式中角度 φ 由菲涅耳公式给出:

$$\varphi = \arcsin(n_p \cos \theta), \quad (7)$$

而

$$\theta_{\min} = \max\{\theta_{\text{cr}}, \arccos[\sin(\varphi_{\max}/n_p)]\}. \quad (8)$$

对于图 2 中的两种结构的空芯光纤传感器, 在应用(6)式进行计算时, 光纤长度 z 和探头长度 L 这两个参数的值的选取略有不同。对于图 2(a)所示的中端检测型的传感器, z 为两段空芯光纤的总长度, L 为探头长度。而对于图 2(b)所示的末端检测型的传感器, z 取值为空芯光纤长度的两倍, L 取值为探头长度的两倍。这里忽略了探头与空芯光纤连接处端面上光的反射, 因为这些反射最大的影响是降低了对检测有用的透射光的强度, 而对于光谱的形状影响不大, 并且可以通过在探头端面镀增透膜的方法来解决。此外, 对于末端检测型的传感器, 还忽略了探头端面金属反射镜的折射率差异带来的影响。

根据(6)式, 最终整个传感器中 p 偏振光的传输损耗为

$$f_{\text{Att}} = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = -10 \lg \frac{P_{\text{out}}}{\int_0^{\varphi_{\max}} P_0(\varphi) \sin \varphi d\varphi}. \quad (9)$$

除了前面提到的忽略了端面反射外, (9)式的计算中主要的近似就是只考虑了过子午光线的传输损耗, 且实验表明对于空芯光纤来说, 在波长远远小于光纤内径的可见光到中红外波段, 这种理论近似的计算结果与实验结果有很好的符合^[15,16]。此外计算空芯光纤损耗时还忽略了银膜粗糙度的影响, 如果考虑粗糙度的话会整体提高传输损耗, 但不会影响 SPR 吸收峰的形状和位置。

对于波长检测型的光纤 SPR 传感器, 需要测量的是共振波长 λ_{res} , 它与被检测物质的折射率 n_s 有关, 所需要满足的共振条件为

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_p \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{mr}} n_s^2}{\epsilon_{\text{mr}} + n_s^2}}, \quad (10)$$

式中 ϵ_{mr} 是金属膜的介电常数的实部。(10)式适用于半边无限等离子体的情况, 但一般情况下, 对于光纤 SPR 传感器中的三层介质结构(棱镜、金属膜和介质)也符合得很好。共振波长是通过传感器的传输光谱进行测量获得的, 传输损耗谱中在 λ_{res} 处会有一个尖锐的峰。当被检测物质的折射率改变了 δn_s 的时候, 共振波长也将移动 $\delta \lambda_{\text{res}}$, 它们的比值被定义为 SPR 传感器的灵敏度, 即

$$S_n = \frac{\delta \lambda_{\text{res}}}{\delta n_s}. \quad (11)$$

除了灵敏度之外, 共振波长处的峰的半峰全宽(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。半峰全宽越大, 越难以准确的确定共振波长的位置, 从而降低传感器的测量精度。

3 结果与讨论

根据上述的理论, 应用(9)式针对各种结构参数设置的空芯光纤 SPR 传感器的传输损耗谱进行了计算分析。所采用结构参数: 探头金属膜材料为金, 厚度为 40 nm, 空芯光纤内径和探头的直径为 2 mm, 探头的长度 L 如果不做特别说明的话为 4 cm, 即实际探头长度对于中端和末端检测型两种结构来说分别为 4 cm 和 2 cm。空芯光纤采用的是内壁只镀了银膜而未镀介质膜的结构。所选择的探头材料为熔融石英(fused silica)、氟化钙(CaF_2)和 YAG, 三种材料的色散公式分别为^[18]

$$\begin{aligned} \text{石英玻璃: } n^2 &= 1 + \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \\ &\frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{CaF}_2: n^2 = 1 + \frac{0.5675888\lambda^2}{\lambda^2 - 0.050263605^2} + \frac{0.4710914\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1003909^2} + \frac{3.8484723\lambda^2}{\lambda^2 - 34.649040^2}, \quad (13)$$

$$\text{YAG}: n^2 = 1 + \frac{2.293\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1095^2} + \frac{3.705\lambda^2}{\lambda^2 - 17.825^2}, \quad (14)$$

根据以上色散公式计算的三种材料的折射率如图 3 所示。

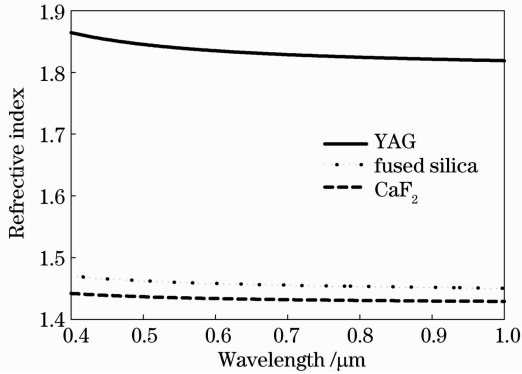


图 3 YAG、熔融石英、CaF₂ 三种材料的折射率

Fig. 3 Refractive indexes of YAG, fused silica and CaF₂ in the visible and near-infrared region

图 4 显示的是在空芯光纤长度为 50 cm, 探头长度 4 cm 的参数下, 采用三种不同材料探头的传感器的传输损耗谱, 被检测介质的折射率为 1.333 (水在 550 nm 附近的折射率)。从图 4 中可以看出, 被检测介质的折射率与探头材料折射率之间的差距越小, 共振波长越大, 并且共振峰的高度也越高, 能抵抗更强的噪声和额外损耗, 易于检测。折射率最高的 YAG 探头的共振峰已经很低, 很可能因受到噪声较大的干扰而难以检测。当然, 和传统的光纤 SPR 传感器一样, 当检测介质的折射率与探头折射率过于接近的时候, 共振峰的半峰全宽会大大增加, 并且高度也会下降, 不利于检测。因此折射率差既不能太大, 也不能太小, 在一定的范围内时才是传感器的最优检测区间。

SPR 传感器要求检测介质的折射率必须小于棱镜的折射率, 对于光纤 SPR 传感器则是必须小于纤芯的折射率。因此对于传统的光纤 SPR 传感器来说, 每根传感器只能适应折射率在一小段范围内的检测需求, 当介质折射率超出范围时必须更换一整根其他纤芯材料的光纤传感器。空芯光纤 SPR 传感器则灵活得多, 在介质折射率超出检测范围时, 只需要更换其他材料的探头即可。图 5 显示的就是当介质折射率分别为 1.333、1.500 (苯的折射率) 和

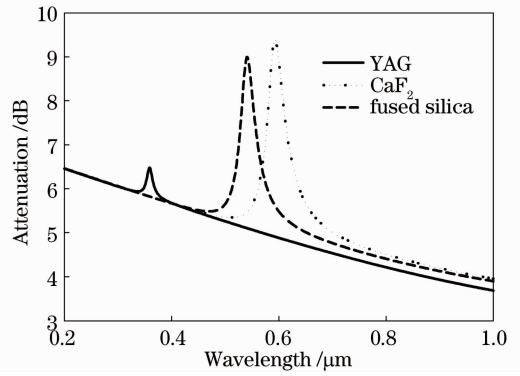


图 4 被检测介质折射率 1.333, 探头材料分别为 YAG、CaF₂、熔融石英时传感器的传输损耗

Fig. 4 Loss spectra of SPR sensors with different probe materials. Probe materials are YAG, CaF₂ and fused silica. Refractive index of sensed media is 1.333

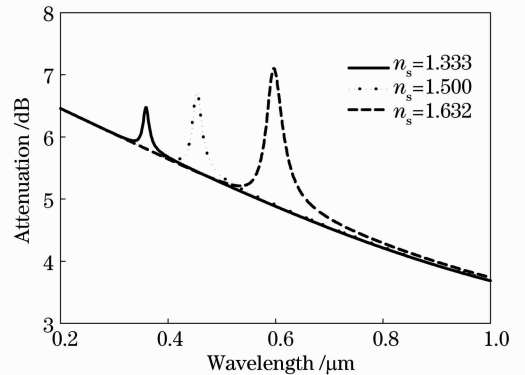


图 5 YAG 探头的传感器在检测物质折射率分别为 1.333、1.500 和 1.632 时的损耗光谱

Fig. 5 Loss spectra of sensor with YAG probe at different sensed medium. Refractive indices of sensed medium are 1.333, 1.500 and 1.632

1.632 (二硫化碳的折射率), 探头材料为 YAG 时的传感器损耗谱, 空芯光纤长度为 50 cm。从图中可以看出, 虽然对于较低的 1.333 折射率来说, YAG 探头的效果不好, 但对于熔融石英探头和氟化钙探头所不能检测的两个高折射率介质, 它是非常好的选择。

图 6 是传感器的空芯光纤长度分别为 20、50、100 cm 时的传输损耗, 探头材料为熔融石英, 检测介质的折射率为 1.333。从图中可以看出, 空芯光纤长度的加长会带来传输损耗的整体增加, 使得共振峰的相对高度降低, 当共振峰高度降低到一定程度时将会受到噪声的较大干扰而难以从光谱上准确的判断共振波长的位置, 使得传感器难以正常工作。但从图上可以看出, 在所接的空芯光纤长度为 1 m

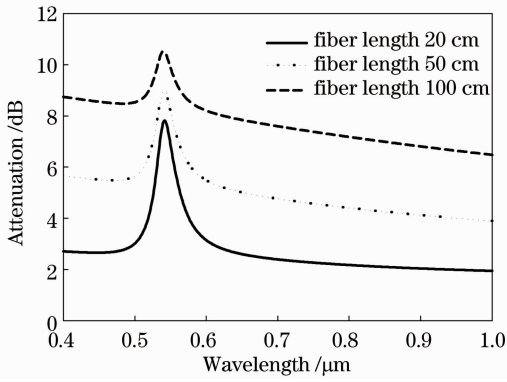


图 6 空芯光纤长度分别为 20、50、100 cm 时传感器的传输损耗

Fig. 6 Loss spectra of sensors with different lengths of hollow optical fibers. Lengths of hollow optical fibers are 20 cm, 50 cm and 100 cm

时,共振峰仍然足够明显,能够满足检测要求,这个长度对于一般的检测仪器来说已经足够。对于确实需要较长的空芯光纤的情况,可以通过采用内壁镀介质膜的空芯光纤来改善。首先需要确定传感器的共振波长变动的范围,然后选择以该波长范围为目标波长的金属/介质膜的空芯光纤作为传感器的传输光纤。这样,空芯光纤在该范围内的损耗会大大低于计算中所用到的只镀金属膜的空芯光纤,光纤长度的增加所带来的基本传输损耗在该波段会很小,从而降低了光纤长度对传感器性能的影响。

探头的尺寸对共振吸收峰的高度是有影响的,从(5)式可以看出,探头越长越细,光线在探头内反射的次数越多,共振峰的高度也就越高。图 7 显示的是 CaF₂ 探头传感器在探头长度为 1~5 cm 时损耗谱的变化,检测介质折射率 1.333,光纤长度 1 m。图中可以看出探头长度对共振峰位置没有影响,共振峰的高度随着探头长度的增加而增大。因此,探头长度的增加能够提高传感器的灵敏度,不过也会带来容易损坏、加工难度大等问题,具体选择的时候需要全面考虑。

对于波长检测型的 SPR 传感器来说,(11)式中的灵敏度是代表其性能的重要指标。图 8 显示的是在检测介质的折射率从 1.36 变为 1.37 时(乙醇在 589 nm 处的折射率为 1.3611),熔融石英和 CaF₂ 两种探头材料的传感器的光谱变化情况,光纤长度 1 m。熔融石英的谱线中,共振波长从 616.2 nm 移动到了 653.8 nm,而 CaF₂ 探头的共振波长从 700.5 nm 移动到了 760.4 nm。根据(11)式计算,两个传感器的灵敏度分别为 3760 nm·RIU⁻¹ 和 5990 nm·RIU⁻¹,说明对于折射率在 1.36 附近的检测 CaF₂ 探头传感器具有

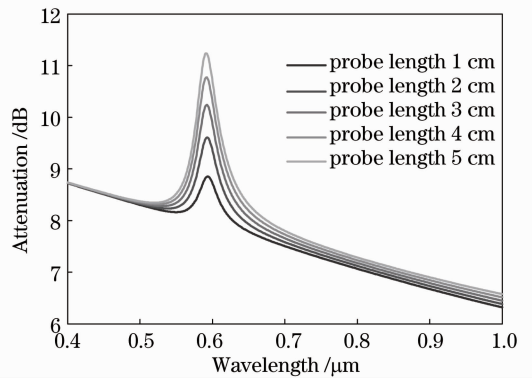


图 7 CaF₂ 探头长度分别为 1、2、3、4、5 cm 时传感器的传输损耗

Fig. 7 Loss spectra of sensors with different lengths of CaF₂ probes. Lengths of probes are 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm and 5 cm

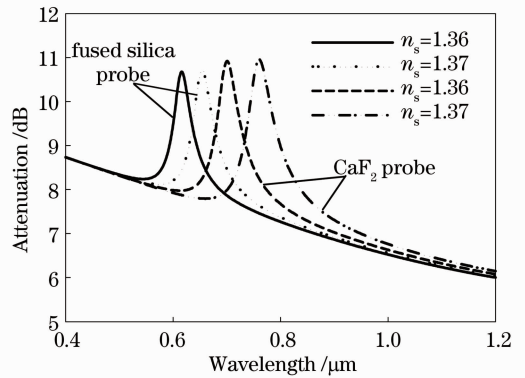


图 8 探头材料为熔融石英和 CaF₂ 时,损耗光谱随检测介质折射率从 1.36 变为 1.37 的移动

Fig. 8 Variation of loss spectra of sensors while refractive indexes of sensed medium change from 1.36 to 1.37. Probe materials are fused silica and CaF₂

更高的检测灵敏度,这主要是因为 CaF₂ 与检测介质的折射率差更小。如果能够选择一种折射率比 CaF₂ 更小的材料制作探头,传感器将获得更好的灵敏度。图 9 给出了在检测介质折射率为 1.36 时,探头材料与检测介质的折射率之差从 0.04 变化到 0.22 时,传感器灵敏度 S_n 和 SPR 峰的 FWHM 的变化情况。从图中可以看出,随着折射率差的逐渐减小,灵敏度近似的呈指数上升,通过选择和检测介质折射率较为接近的探头材料,可以极大地增加传感器的检测灵敏度。不过与此同时,共振峰的位置会逐渐向长波长的近红外区域移动,峰的 FWHM 也会逐渐增大,为准确判断峰位增加了难度,造成传感器的检测精度和信噪比减小。因此,在选择探头折射率时,需要综合考虑检测灵敏度和检测精度两方面的

影响。在实际中,在可见光到近红外波段有许多的具有不同折射率的光学材料,包括各种晶体材料以及各种型号的特种玻璃。这些材料基本上都可以用来制作空芯光纤 SPR 传感器的探头,这样对于各种不同折射率的检测介质来说,都可以找到适合的探头材料使传感器获得最优的检测能力和灵敏度。

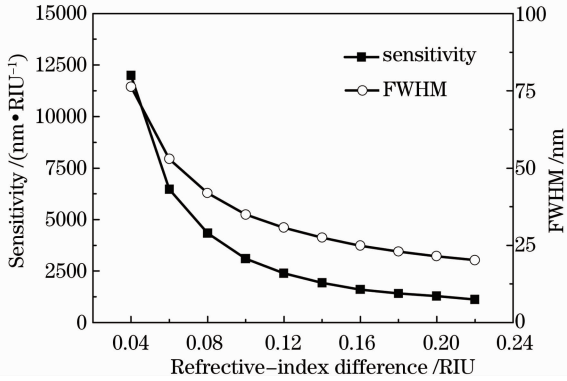


图9 传感器灵敏度和 SPR 峰的半峰全宽随探头和检测介质之间折射率之差的变化曲线

Fig.9 Sensitivity of the sensor and FWHM of the SPR peak at different refractive-index differences between probes and sensed media

4 结 论

设计了一种基于表面等离子体共振原理,使用空芯光纤作为光波导、外表面镀金属膜的光学材料圆柱体作为探头的新型折射率传感器。建立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损耗公式,并针对几种探头材料在不同的传感器结构参数和不同的检测介质折射率情况下计算了相应的传输光谱。对于不同的检测介质折射率,该传感器可以简便灵活的选择并更换合适的探头材料,获得最优的检测灵敏度,相对于传统的光纤 SPR 传感器,在易用性、测量范围和性价比等方面具有更好的应用价值。

参 考 文 献

- 1 J. Homola, S. S. Yee, G. Gauglitz. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. *Sensors Actuators B*, 1999, **54**(1-2): 3~15
- 2 S. R. Chand, B. D. Gupta. Fabrication and characterization of a surface plasmon resonance based fiber-optic sensor for bittering component-naringin [J]. *Sensors Actuators B*, 2006, **115**(1): 344~348
- 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

- 4 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 A. Otto. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. *Z. Physik*, 1968, **216**(4): 398~410
- 5 Hong Xiaogang, Xu Wendong, Zhao Chengqiang *et al.*. Optimal design of surface plasmon resonance films structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2164~2169
- 洪小刚,徐文东,赵成强等.表面等离子体共振膜系结构优化设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2164~2169
- 6 D. Monzon-Hernandez, J. Villatoro, D. Talavera *et al.*. Optical-fiber surface-plasmon resonance sensor with multiple resonance peaks[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(6): 1216~1220
- 7 Y. Chen, R. S. Zheng, Y. H. Lu *et al.*. Fiber-optic surface plasmon resonant sensor with low-index anti-oxidation coating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(10): 100605
- 8 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
- 9 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**(2): 227~237
- 10 Shuai Binbin, Xia Li, Zhang Yating *et al.*. Principle and study progress of surface plasmon resonance sensors based on gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 100502
- 帅彬彬,夏 历,张雅婷等.基于光栅的表面等离子体共振传感器的原理及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(10): 100502
- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 Zhou Jiaqi, Shi Yiwei. A study on effective path length ratio for waveguide absorption cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0223001
- 周佳琦,石艺尉.波导式吸收腔的有效光程率研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0223001
- 15 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
- 16 C. H. Yang, H. Hua, W. Tan *et al.*. Loss spectrum measurement for infrared hollow fiber based on the Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(13): 2504~2509
- 17 A. K. Sharma, B. D. Gupta. Theoretical model of a fiber optic remote sensor based on surface plasmon resonance for temperature detection[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2006, **12**(1): 87~100
- 18 M. J. Weber. Handbook of Optical Materials[M]. CRC Press, 2003