

基于金属-介质-金属多层膜结构的空芯光纤 折射率传感器

林华¹, 张娴¹, 朱晓松^{1,2*}, 石艺尉^{1,2}

¹复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433;

²复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 提出了一种新型的基于金属-介质-金属的多层膜结构的空芯光纤折射率传感器, 通过建立光学模型计算了该传感器的传输光谱。对介质膜材料分别为二氧化硅、环烯烃聚合物和碘化银时的传感器性能进行了分析。当空芯光纤内部检测液体折射率处于不同范围时, 所设计的传感器分别利用导模共振、表面等离子体共振以及波导耦合表面等离子体共振的原理进行传感。相比于传统的空芯光纤传感器, 所提的传感器不仅检测范围超大(1.3~1.64, 几乎覆盖了全部液体介质的折射率)而且品质因数提高了一倍。

关键词 光纤光学; 空芯光纤; 多层膜; 表面等离子体共振

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606006

Refractive Index Sensor Based on Hollow Optical Fiber with Metal-Dielectric-Metal Multilayered Films Structure

Lin Hua¹, Zhang Xian¹, Zhu Xiaosong^{1,2}, Shi Yiwei^{1,2}

¹School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China;

²Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE),

Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract A new kind of refractive index sensor based on a hollow optical fiber with a metal-dielectric-metal multilayered films structure is proposed and its transmission spectrum is calculated by the establishment of an optical model. The performances are analyzed for the designed sensors with SiO₂, cycloolefine polymer and AgI as the dielectric materials, respectively. When the refractive index of the detected liquid in the hollow optical fiber is in different ranges, the principles of the guided mode resonance, surface plasmon resonance (SPR) and waveguide-coupled SPR are employed for sensing by the designed sensor, respectively. Compared with the traditional hollow fiber sensors, the proposed sensor not only has a greatly extended detection range which is 1.3-1.64 and almost covers all the refractive indexes of liquids, but also its figure of merit is increased up to twice.

Key words fiber optics; hollow optical fiber; multilayered films; surface plasmon resonance

OCIS codes 060.2370; 240.6680; 230.7370

1 引 言

空芯光纤(HF)作为一种在可见光及红外波段范围内传输且损耗非常低的传输介质, 在医疗、化学传感、高能激光传输等领域有非常广泛的应用^[1-3]。空芯光纤传感器多为单层金属膜结构或介质-金属

膜结构, 具有响应速度快、操作便捷等优势, 可以实现对特定物质的定向检测^[4-7]。

表面等离子体共振 (SPR) 具有检测便捷、灵敏度高的优点^[8-10], 得到了学者们的关注。将 SPR 和 HF 有效结合, 制备出了可用于检测高折射率液体的空芯光纤 SPR 传感器。该传感器的基管材料是

收稿日期: 2017-11-27; 收到修改稿日期: 2018-01-02

作者简介: 林华(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事空芯光纤传感方面的研究。E-mail: linhua.fudan.edu.cn

导师简介: 石艺尉(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事中远红外光波导及其应用方面的研究。

E-mail: ywshi@fudan.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhuxiaosong@fudan.edu.cn

折射率约为 1.46 的石英玻璃,在基管内镀制一层银膜,当内部通有折射率高于 1.46 的待测液体时,可发生 SPR 现象,从而在可见光波段形成一个共振吸收峰,实现液体折射率的快速检测,但检测范围及检测效果还需进一步提高^[11-13]。

与传统的只有单层金属膜的 SPR 传感器相比,基于多层膜的新型实芯 SPR 传感器具有更优良的性能,同时可以通过调节膜厚来实现对共振峰位置的调节^[14-15]。然而,多层膜结构在空芯光纤传感器中的应用,尤其是在空芯光纤可见光波段的应用研究鲜有报道。Tan 等^[16]制备了外层为厚银膜的金属包层波导空芯光纤传感器,该传感器既可以检测折射率高于介质膜材料的待测液体,又可以检测折射率低于介质膜材料的待测液体。但是,由于其外层金属膜很厚,检测高折射率液体时激发的只是普通的 SPR 效应,传感性能与传统的空芯 SPR 传感器的一样,并且无法检测折射率高于但比较接近于介质膜材料的液体。为进一步提升传感器的性能,本文提出一种外层金属膜很薄的金属-介质-金属

(MIM)多层膜结构的空芯光纤折射率传感器。通过理论分析发现,该传感器在可见光波段可以实现几乎全部液体折射率范围(1.3~1.64)的检测,解决了折射率非常接近介质膜时不能检测的问题。并且在检测高折射率介质时可以激发波导耦合 SPR (WCSPR),品质因数(F_{OM})相较普通的空芯光纤 SPR 传感器有了近一倍的提升。

2 理论模型

MIM 结构的空芯光纤 SPR 传感器结构如图 1 所示,其中 n_0 、 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为液体、金属、电介质、基管的折射率。在石英玻璃的基管上镀制一层金属膜(外层银膜),金属层镀制材料选择在可见光波段传输损耗极低的银。在银表面镀制一层介质层,常用的空芯光纤的介质层材料可选择二氧化硅(SiO_2)、环烯烃聚合物(COP)和碘化银(AgI)等^[17-18]。在介质层之上,再镀制一层银膜(内层银膜),从而形成银-介质-银的多层膜结构。光纤内部空芯充有待测液体。

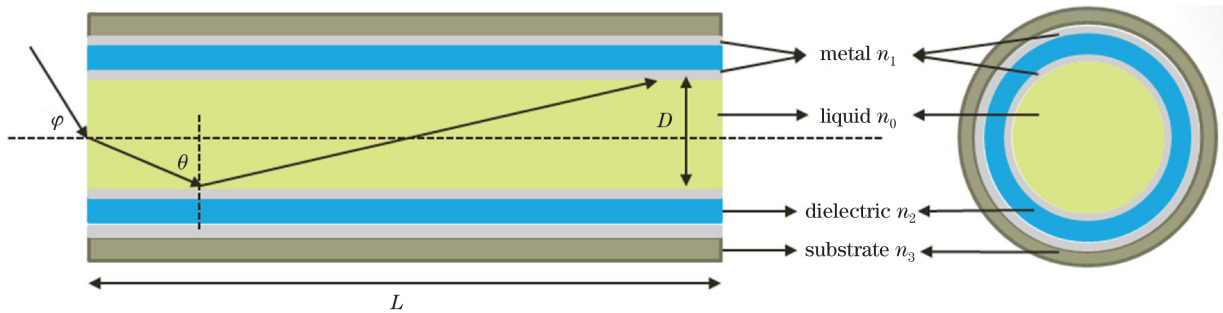


图 1 MIM 空芯光纤结构图

Fig. 1 Structural diagram of MIM hollow optical fiber

采用几何光学模型分析该结构光纤的传输损耗^[19]。 φ 为光线进入空芯光纤前入射光线与光纤子午线间的夹角, θ 为空芯光纤内部光线与垂直内壁方向所成的角度,二者之间的关系满足 Snell 定律,即

$$\sin \varphi = n_0 \cos \theta, \quad (1)$$

式中 n_0 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,即

$$P_0(\varphi) \propto \exp\left(-\frac{\varphi^2}{\varphi_0^2}\right), \quad (2)$$

式中 φ_0 和入射光的发散角有关。

光线通过传感器后的光强为

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

式中 $R(\theta)$ 为空芯光纤内表面多层膜与液体交界处 p 光的反射率; $N(\theta) = L/(D \tan \theta)$,其中 L 和 D 分别为传感器的长度和内径; $\theta_{cr} = \arcsin(n_3/n_0)$,其中 n_3 为基管材料的折射率。在计算中只考虑了入射光为 p 光的情况,在实际中可通过在入射端使用径向偏振器来近似实现。

对于金属-介质-金属结构的多层膜系统,其传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_3 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中

$$\mathbf{M}_m = \begin{pmatrix} \cos \delta_m & -\frac{i}{\eta_m} \sin \delta_m \\ -i \eta_m \sin \delta_m & \cos \delta_m \end{pmatrix}, \quad m = 1, 2, 3, \quad (5)$$

式中 δ_m 为第 m 层膜引起的光程差, η_m 为第 m 层膜的等效光学导纳。对于 p-偏振(横磁模, TM 模), 则有

$$\delta_m = k_m d_m = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_m} d_m \cos \theta_m, \quad (6)$$

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\epsilon_m} / \cos^2 \delta_m, \quad (7)$$

式中 k_m 为水平波矢大小, d_m 为第 m 层膜的厚度, ω 为角频率, c 为真空中的光速, ϵ_m 为第 m 层的介电常数, θ_m 为第 m 层膜的入射角。反射率 $R(\theta)$ 采用传输矩阵法进行计算:

$$R(\theta) = \left| \frac{(m_{11} + m_{21} \eta_s) \eta_0 - (m_{21} + m_{22} \eta_s)}{(m_{11} + m_{21} \eta_s) \eta_0 + (m_{21} + m_{22} \eta_s)} \right|^2, \quad (8)$$

式中 η_0 和 η_s 分别为待测物质和基管物质的等效光学导纳。

最终传感器的传输光谱为

$$T = \frac{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) R(\theta)^{N(\theta)} d\theta}{\int_{\theta_{cr}}^{\pi/2} P_0(\theta) d\theta}. \quad (9)$$

传感器中所镀银膜的介电常数采用 Drude 模型^[20]表示, 即

$$\epsilon(\lambda) = \epsilon_r + i\epsilon_i = 1 - \frac{\lambda^2 \lambda_c}{\lambda_p^2 (\lambda_c + i\lambda)}, \quad (10)$$

式中等离子体波长 $\lambda_p = 1.4541 \times 10^{-7}$ m, 碰撞频率对应的波长变化 $\lambda_c = 1.7614 \times 10^{-5}$ m, λ 为入射波波长。

对于波长检测型传感器, 当待测液体的折射率改变 δn 时, 共振波长改变 $\delta \lambda$, 则灵敏度计算公式为

$$S = \left| \frac{\delta \lambda}{\delta n} \right|. \quad (11)$$

除了灵敏度之外, 能综合衡量传感器性能的参数是品质因数 F_{OM} , 其计算公式为

$$F_{OM} = \frac{S \cdot D_{depth}}{\omega_{1/2}}, \quad (12)$$

式中 $\omega_{1/2}$ 为共振峰的半峰全宽, D_{depth} 为共振峰深度。

3 结果与讨论

3.1 膜厚参数优化

分别选取 SiO_2 、COP、AgI 三种常用的空芯光纤镀膜材料作为传感器结构中的介质膜材料, 在不考虑色散的情况下, 三者可见光波段的折射率分别约为 1.46, 1.51, 2.15。以 AgI 介质膜的传感器为例, 对各层膜厚进行优化。

将介质膜厚度暂定为 200 nm, 内部分别加入折射率为 1.52(高于基管折射率)和 1.37(低于基管折射率)的待测液体, 传感器长度取为 5 cm, 光纤内径为 0.7 mm, 光源发散角取为 7° 。改变内层银膜厚度, 将厚度从 10 nm 逐步调整到 60 nm, 当待测液体折射率为 1.52 时, 其理论计算的传输光谱如图 2 所示。从图中可以看出, 虽然银膜厚度在 10~60 nm 波段内都有共振峰出现, 但当内层银膜厚度较薄时, 银膜厚度对共振峰的位置影响较大, 且出现的峰值的半峰全宽较大。随着膜厚的增加, 其峰宽逐渐变窄, 在厚度超过 30 nm 后, 共振峰深度变浅, 并且共振波长的位置不再变化。当待测液体折射率为 1.37 时, 情况与之类似。根据品质因数的公式, 采用峰的深度与半峰全宽的比值作为衡量共振峰品质的标准, 通过计算可以得出, 膜厚在 40 nm 时比值达到最大, 因此选取 40 nm 作为传感器的内层银膜厚度。

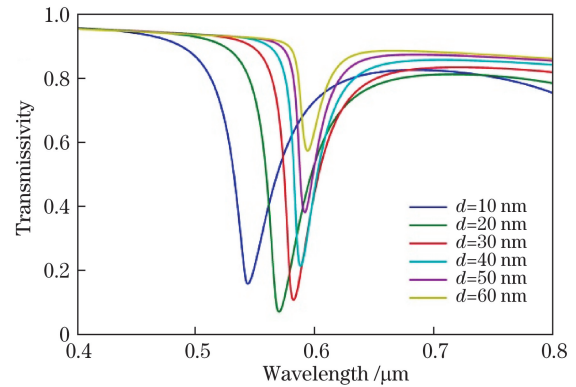


图 2 不同内层银膜厚度下传感器的传输光谱
Fig. 2 Transmission spectra of sensor under different inner Ag layer thicknesses

在确定好内层银膜厚度后, 改变外层银膜厚度, 其传感器的传输光谱如图 3 所示。从图中可以看出, 当通入不同折射率液体时, 外层银膜厚度对传感器的影响是不同的。当通入高折射率液体时, 外层银膜越厚其峰越宽, 共振峰深度没有太大变化, 因此对于高折射率液体, 银膜越薄越好。但当通入低折射率液体时, 外层银膜越厚其峰越窄, 且共振峰深度越深, 因此对于低折射率液体, 外层银膜越厚越好。在外层银膜厚度的选择上, 为了制作能够在全范围内进行测量的传感器, 将外层银膜厚度定为 30 nm, 此时通入不同折射率液体, 所得到的共振峰的品质均适中。

最后分析中间介质膜的厚度对传感器性能的影响, 图 4(a) 所示为不同 AgI 膜厚情况下的传输光

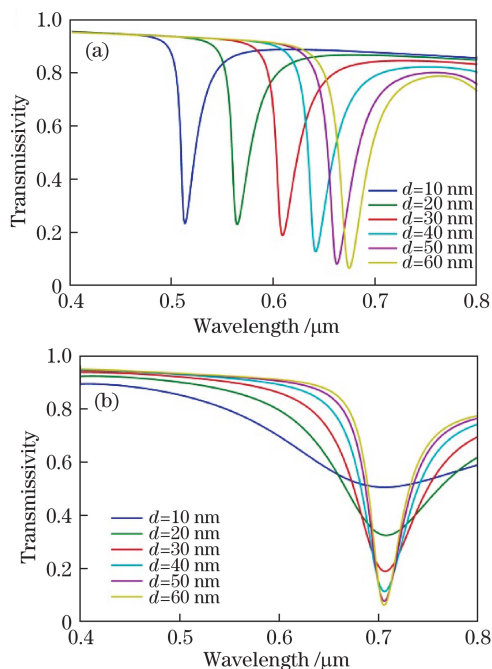


图3 不同待测液体下传感器的传输光谱随外层银膜厚度的变化曲线。(a)折射率为1.52;(b)折射率为1.37

Fig. 3 Transmission spectra of sensor versus outer Ag layer thickness under different liquids to be measured.

(a) Refractive index of 1.52; (b) refractive index of 1.37 谱。可以发现,随着膜厚的增加,可见光波段出现的共振峰个数逐渐增多,这是因为随着膜厚的增加,在薄膜内一阶导膜耦合 SPR 共振峰基础上,更高阶导膜耦合 SPR 的共振峰也逐渐出现在可见光波段。这些共振峰的峰值深度及半峰全宽的变化也起伏不定,很难从一个数值上来判定最优结果。图4(b)所示为不同膜厚下传感器灵敏度的变化。可以发现,随着膜厚的增加,灵敏度大致存在先增大后减小再增大再减小的波动趋势。其原因在于当膜厚小于200 nm时,在可见光波段出现的共振峰为一阶峰,当介质膜厚度为300 nm时,移入可见光范围的峰为二阶峰,随着介质膜厚度的增加,可见光范围内共振峰的阶数将逐渐增加。采用同阶共振峰时,随着膜厚的增加,共振波长逐渐增大,灵敏度也随之增加,但峰阶数越高,其灵敏度就越低,故会出现灵敏度的波动。而绝大多数检测液体在800 nm以上的红外波段都会出现吸收带,因此对于空芯光纤传感器,基本上只能在400~800 nm的光谱范围内进行测量。为了保证灵敏度最优,应该选择将一阶峰放入可见光范围内,此时膜厚为200 nm,可以保证光谱范围内基本只出现一个共振峰,减少干扰。此外,为了保证全折射率范围的测量,在200 nm附近对膜厚进行一定调整,确保进行全折射率范围内的测

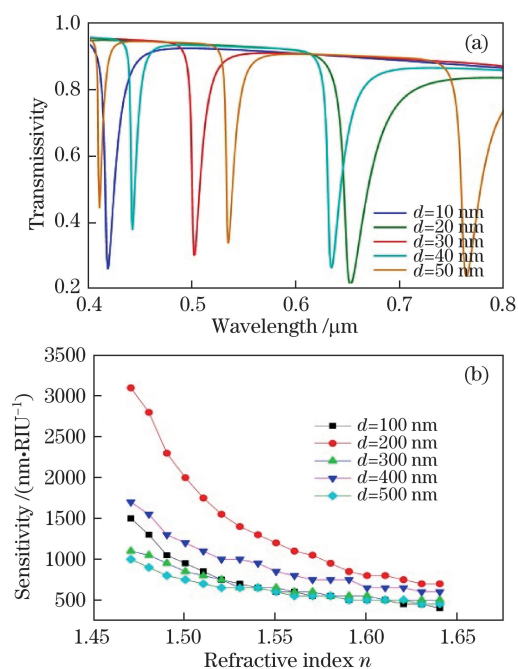


图4 介质层厚度对传感器性能的影响。

(a)归一化光谱;(b)灵敏度

Fig. 4 Effect of medium layer thickness on sensor performances.

(a) Normalized spectra; (b) sensitivity

量时产生的一阶峰都能出现在可见光范围内。经计算分析可知,当膜厚为170~175 nm时,在可见光范围内均可实现对折射率为1.47~1.64的液体的折射率测量,最终确定AgI最优膜厚为175 nm。当介质变为SiO₂和COP时,优化方法和AgI类似,在此不再赘述。优化后,得到SiO₂和COP的最优膜厚分别为300 nm和250 nm。在后面的分析中,如果不特别说明,计算参数均为内层银膜厚度40 nm,外层银膜厚度30 nm,AgI、COP、SiO₂厚度分别为175,250,300 nm,传感器长度5 cm,光纤内径0.7 mm,光源发散角7°。

3.2 传感器性能分析

3.2.1 高折射率检测

在对膜厚参数进行优化后,先分析待测液体折射率为1.47~1.64,即高于管壁材料折射率情况下的传感器性能。首先对传输光谱中的共振峰进行电场分析,可以发现不同传感器的共振峰产生的原因有所不同,采用Essential Macleod软件计算了几个具有代表性的多层膜共振时的电场分布,如图5所示,其中横轴为光学厚度,而非实际的物理厚度,从左至右依次为纤芯(待测液体)、内层银膜、介质膜、外层银膜、管壁,其中管壁厚度和纤芯设为无限厚。当介质膜为AgI时,由于待测液体折射率一直小于介质膜折射率且大于基底折射率,只存在一种电场,

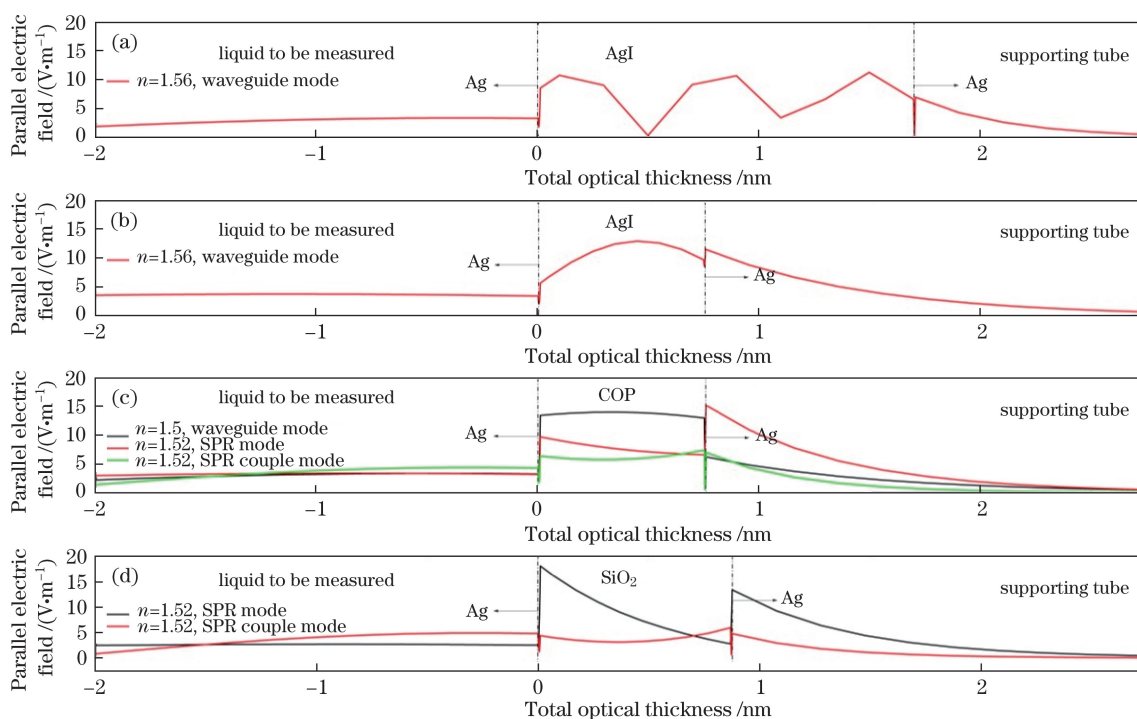


图 5 高折射率下不同介质膜共振时的平行电场分布。(a)较厚 AgI;(b)薄 AgI;(c) COP;(d) SiO₂

Fig. 5 Parallel electric field distributions at resonance for different dielectric films with a high refractive index.

(a) Thick AgI; (b) thin AgI; (c) COP; (d) SiO₂

即 WCSPR,如图 5(a)、(b)所示,其中 n 为待测液体的折射率。入射光激发了介质膜波导中的导模,并在外层银膜和管壁的界面上激发了表面等离子体波(SPP),此电场在管壁中以指数形式衰减。

利用(9)~(12)式分别计算了三种传感器在高折射率情况下共振波长、灵敏度和 F_{OM} 随待测液体折射率变化的情况,结果如图 6 所示。计算时各参数如下:内层银膜厚度为 40 nm,外层银膜厚度为 30 nm,AgI、COP、SiO₂厚度分别为 175,250,300 nm。当介质膜为 SiO₂时,介质膜折射率与管壁折射率相等。由于待测液体折射率一直大于介质膜折射率和管壁折射率,入射光会同时激发内层银膜与介质膜界面上的 SPP 以及外层银膜与管壁界面上的 SPP,电场分布如图 5(d)中的黑线所示。该 SPR 对应于图 6(a)所示 SiO₂光谱中波长较长的共振峰,当 SiO₂介质膜的厚度逐渐增大至无穷大时,共振波长在光谱中的位置也基本保持不变,与普通的待测液体-银膜-SiO₂三层体系下激发的 SPR 共振峰的位置基本一致。除此之外,由于介质膜较薄,两层银膜表面的 SPP 相互耦合,形成另一种 SPR 模式,电场如图 5(d)中红线所示,其对应的共振峰为图 6(a)所示 SiO₂光谱中波长较短的共振峰。随着 SiO₂介质膜厚度的逐渐增大,相互耦合会逐渐减弱,该共振峰

强度会逐渐减小,直至消失。

当介质膜为 COP 时,待测液体折射率虽然一直大于基底折射率,但 COP 膜厚度不同,待测液体折射率与 COP 膜折射率可能存在不同的大小关系。当待测液体折射率大于 COP 时,情况与 SiO₂相同,有普通 SPR 模式和耦合 SPR 模式,电场如图 5(c)中红色和绿色实线所示,共振峰分别对应图 6(a)所示红色光谱的长波和短波。而当待测液体折射率小于 COP 时,情况与 AgI 相同,只发生导模耦合型 SPR 现象。

图 6(a)所示为液体折射率为 1.56 时的传输光谱,可以发现,对于 AgI,只有一个 WCSPR 的峰;对于 COP 和 SiO₂,有两个共振峰,普通 SPR 的峰在可见光范围长波长区域内,其灵敏度较高,耦合 SPR 的峰在光谱的短波长区域内,灵敏度较低,和图 5 内电场分析的结果一致。从图 6(b)中可以看出,对于 SiO₂,当液体折射率大于 1.52 时,其 SPR 峰位于检测光谱波段,且灵敏度非常高,可以实现 1.52~1.57 范围的高灵敏度测量。但当折射率为 1.47~1.51 时,SPR 峰已经移到红外区,可见光谱范围内只剩下耦合 SPR 模式的共振峰在 450~550 nm 之间移动,并且与折射率为 1.59~1.64 时的 SPR 共振峰发生了重合。因此,若要对检测的折射

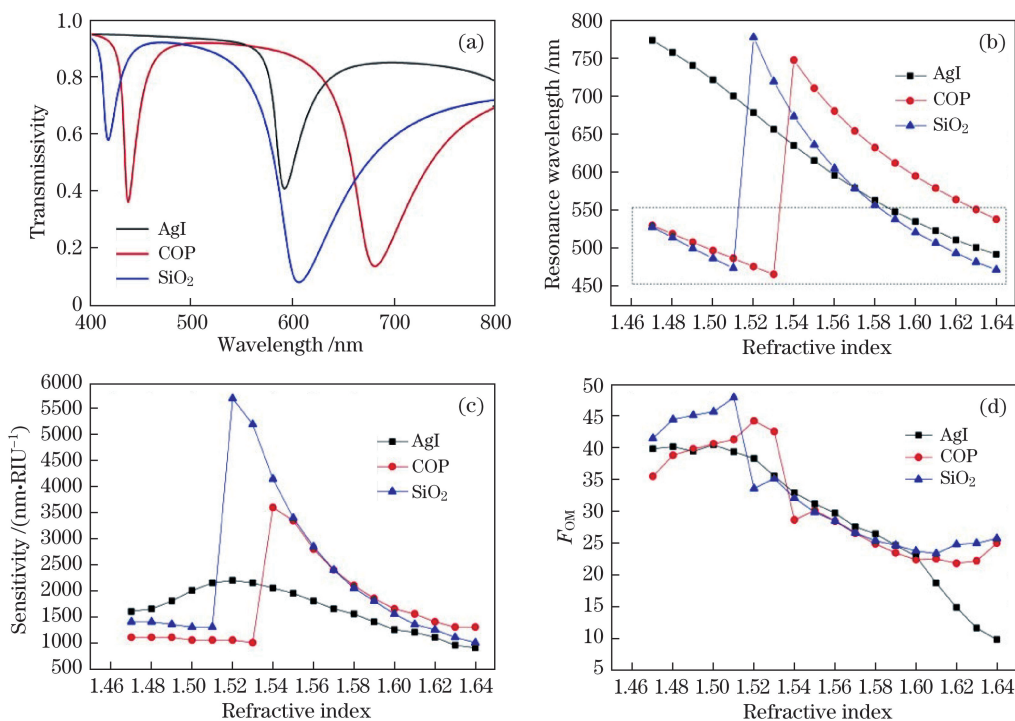


图 6 高折射率下三种介质膜的传感器性能比较。(a)归一化光谱;(b)共振波长;(c)灵敏度;(d)品质因数
Fig. 6 Performance comparison among sensors with three kinds of dielectric films with a high refractive index.

(a) Normalized spectra; (b) resonance wavelength; (c) sensitivity; (d) F_{OM}

率进行定标,则需要事先明确待测液体折射率位于哪个范围,故一般情况下只能测量 1.47~1.57 或 1.52~1.64 范围内的折射率,而无法实现全范围测量。而 COP 虽然基本没有重合,但也存在共振波长的突变。如图 6(c)所示,在折射率较高的范围内, SiO₂和 COP 的灵敏度要高于 AgI 的灵敏度,与传统的空芯光纤 SPR 传感器相当^[10]。但是在折射率较低的范围,随着 SPR 共振原理发生改变,前两者的灵敏度大幅下降,并且低于 AgI 的灵敏度。对于 AgI 作为介质的传感器,其优势在于灵敏度比较稳定,同时不存在共振波长的跳变和重合,可以实现 1.47~1.64 全范围的测量。就品质因数来说,在 1.47~1.60 的范围内,相比于传统的空芯光纤 SPR 传感器,其品质因数都在 20 以上,提升了近一倍。此外,可以通过调节介质膜厚和选择介质膜的折射率,实现在一定范围内高灵敏度的测量或者是全范围内液体折射率测量,更具灵活性。

3.2.2 低折射率检测

当纤芯通入折射率小于基管折射率的液体时,无法激发 SPR 现象,但会激发介质膜中的导模,产生导模共振,在传感器的传输光谱中同样表现为一个共振吸收峰。对发生共振时三种不同介质多层膜结构中的电场分布进行分析,结果如图 7 所示。可

以看出,对于 AgI、SiO₂和 COP 来说,导模共振的情况基本一致,此时激发的都是一阶导模,能量主要在两层银膜之间的介质膜中进行传输。根据计算分析可知,在此最佳介质膜厚度下,在测量的可见光谱范围内有且仅有一阶导模的共振峰存在,非常有利于检测。

图 8 所示为三种不同介质膜的传感器在低折射率检测时的性能分析比较。图 8(a)所示为待测液体折射率为 1.40 时的传输光谱,此时光谱中只有一个共振峰,来自于二阶导模共振,其中 COP 峰值出现在左侧,这是因为优化膜厚下 SiO₂膜厚比 COP 膜厚更厚。从图 8(b)~(d)中可以看出,相对 SPR,导模共振对内部待测液体折射率的变化不够敏感,因此灵敏度比高折射率检测时有所下降。而介质膜折射率越高,越多的能量被束缚在介质膜内,对外部折射率的敏感度越低,因此传感器的灵敏度也越小,图 8 中 SiO₂、COP、AgI 的折射率依次增大,而灵敏度依次减小,品质因数的情况和灵敏度类似。相比较而言, SiO₂更适用于低范围的测量。

图 9 所示为采用三种不同介质膜的 MIM 空芯光纤传感器在 1.3~1.64 的全部折射率范围内的性能比较。结合之前的分析可知,三种传感器各具优势。对于不同种类的介质膜,通入不同折射率的待

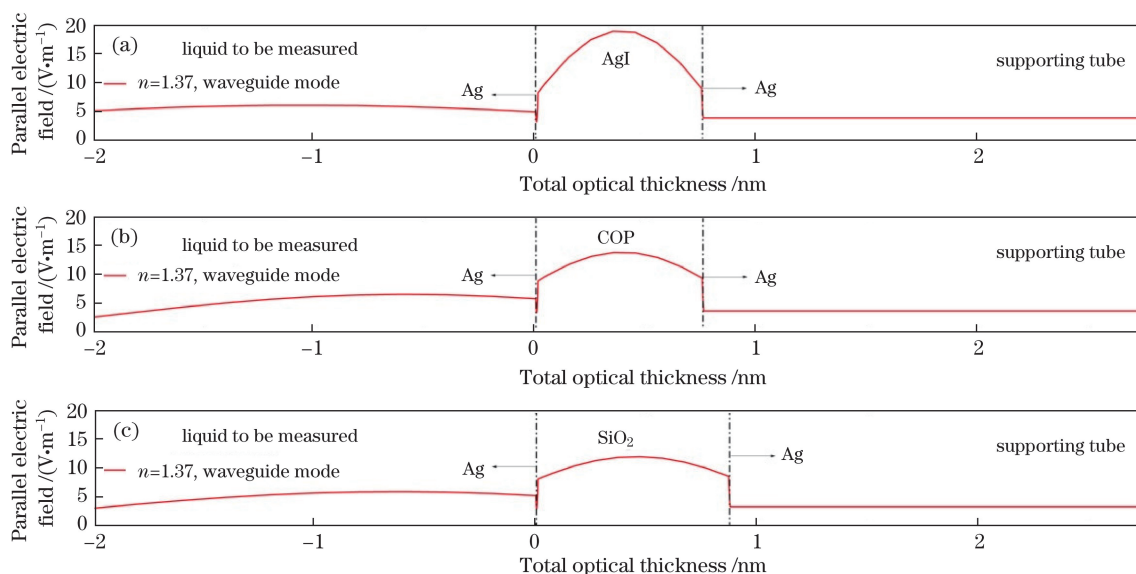


图 7 低折射率下不同介质膜共振时的平行电场分布。(a) AgI; (b) COP; (c) SiO₂

Fig. 7 Parallel electric field distributions at resonance for different dielectric films with a low refractive index.

(a) AgI; (b) COP; (c) SiO₂

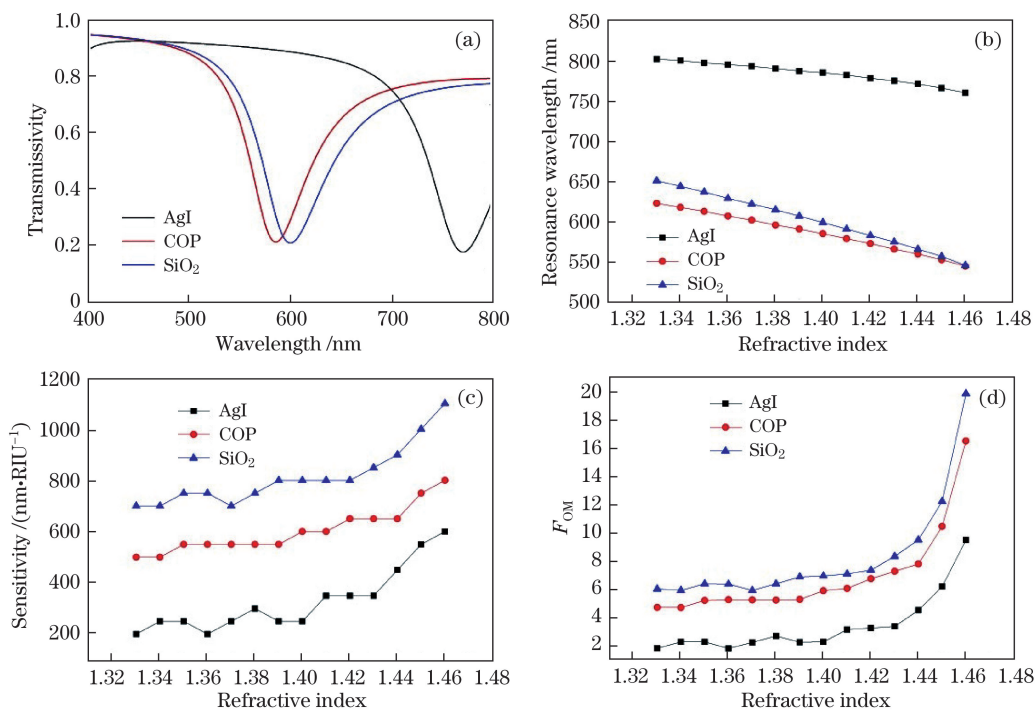


图 8 低折射率下传感器性能分析。(a)归一化光谱;(b)共振波长;(c)灵敏度;(d)品质因数

Fig. 8 Performance analysis of sensor with a low refractive index.

(a) Normalized spectra; (b) resonance wavelength; (c) sensitivity; (d) F_{OM}

测液体时产生共振峰的机理不同,但在传输光谱中均表现为一个吸收峰,对于波长检测型的传感方式来说,其在检测解调过程中并无差别。由于共振波长存在重合,无法实现同一个传感器在折射率 1.3~1.64 范围内的全范围测量,需事先知道待测液体折射率的大致范围才能选择合适的传感器。对于介质

膜为 AgI 的传感器,其检测范围分为 1.3~1.46 和 1.47~1.64 两部分,只需知道待测液体折射率位于哪一部分即可实现该范围的稳定检测,尤其在 1.47~1.51 附近具有较高的灵敏度,填补了传统的单层银膜空芯光纤 SPR 传感器以及外层为厚银膜的金属包层波导空芯光纤传感器在此范围内无法检

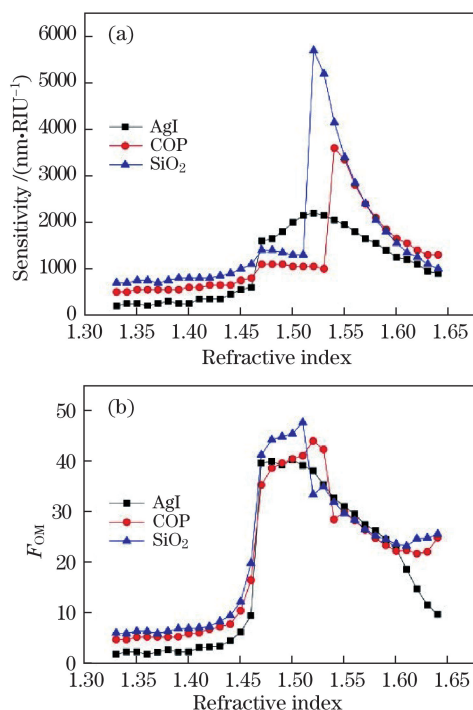


图9 传感器在全部折射率范围内的性能比较。
(a)灵敏度;(b)品质因数

Fig. 9 Performance comparison for sensors in all refractive index range. (a) Sensitivity; (b) F_{om}

测的空白,但其在小于 1.46 的低折射率范围内的灵敏度较低。介质膜为 COP 的传感器检测范围与 AgI 时的相同,但其在高折射率范围内存在共振波长跳变,性能不如 AgI 时的,低折射率范围性能略差于 SiO₂ 时的。而介质膜为 SiO₂ 的传感器在 1.3~1.46 低折射率范围内具有最佳的检测效果,但在高折射率检测范围仅限于 1.52~1.57,在 1.47~1.52 以及高于 1.57 的部分存在共振波长位置重叠的问题,难以在不事先知道待测液体折射率具体范围的情况下实现检测。

综上所述,内层银膜和外层银膜的优化结果分别为 40 nm 和 30 nm。对于折射率为 1.3~1.46 的待测液体,选用介质膜为 SiO₂ 的传感器,优化介质膜厚度为 300 nm,可获得检测范围内的最佳性能;对于折射率为 1.47~1.64 的待测液体,可以选用介质膜为 AgI 的传感器,优化介质膜厚度为 175 nm,可确保其在整个检测范围内无共振波长的重叠,并获得较好的检测效果。

4 结 论

对 MIM 型多层膜空芯光纤传感器进行了理论分析,建立光学模型对采用 AgI、COP、SiO₂ 三种不同介质膜材料的传感器进行了参数优化和性能分

析。通过分析共振条件下膜层内的电场分布,揭示了在不同检测折射率情况下,传感器传输光谱中共振峰的三种产生机理。结果表明,该 MIM 多层膜空芯光纤传感器相比于单层银膜空芯光纤 SPR 传感器以及外层为厚银膜的金属包层波导空芯光纤传感器,具有检测范围大,可覆盖 1.3~1.64 折射率全范围检测的优点。此外,可以根据实际需求,通过调节介质膜的膜厚来实现特定范围内的高灵敏度检测、低折射率和高折射率的全范围检测等,具有更高的灵活性和实用价值。

参 考 文 献

- [1] Harrington J A. A review of IR transmitting, hollow waveguides[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2000, 19(3): 211-227.
- [2] Ito K, Katagiri T, Matsuura Y. Analysis of transmission properties of terahertz hollow-core optical fiber by using time-domain spectroscopy and application for remote spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(1): 60-65.
- [3] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, *et al.* Hollow-core anti-resonant fiber and its use for propagation of high power ultrashort pulse[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201012.
高寿飞, 汪滢莹, 刘小路, 等. 空芯反谐振光纤及其高功率超短脉冲传输[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201012.
- [4] Shi Y W, Zhou Z Y, Tang X L, *et al.* Design and fabrication of infrared hollow fibers for spectroscopic gas sensing[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2009, 28(2): 111-114.
石艺尉, 周志云, 汤晓黎, 等. 吸收式气敏传感空芯光纤的设计和制备[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(2): 111-114.
- [5] Feng Q L, Jiang M, Wang X F, *et al.* High sensitivity ammonia gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers reference gas cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 0305001.
冯巧玲, 姜萌, 王学锋, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体参考腔的高灵敏度氨气检测[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0305001.
- [6] Zhou J Q, Lu W J, Yao Z R, *et al.* Optimization of hollow waveguides as absorption cells for spectroscopic gas sensing[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(3): 301-306.
- [7] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0405003.

- 李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405003.
- [8] 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.
- [9] Kretschmann E, Raether H. Notizen: Radiative decay of nonradiative surface plasmons excited by light[J]. Zeitschrift für Naturforschung A, 1968, 23(12): 2135-2136.
- [10] Lü J T, Wang C M, Zhu C H, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber transverse-stress sensor based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828002.
吕健滔, 王春明, 朱晟昇, 等. 基于表面等离子体共振的双芯光子晶体光纤横向应力传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828002.
- [11] 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.
- [12] Jiang Y X, Liu B H, Zhu X S, *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的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223004.
- [13] Zhang Y, Zhu X S, Shi Y W. Hollow optical fiber surface plasmon resonance sensor based on light intensity detection[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0606001.
张珂, 朱晓松, 石艺尉. 光强检测型空芯光纤表面等离子体共振传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0606001.
- [14] Jae H A, Tae Y S, Won M K, *et al.* Fiber-optic waveguide coupled surface plasmon resonance sensor[J]. Optics Express, 2012, 20(19): 21729-21738.
- [15] Sekkat Z, Hayashi S, Nesterenko D V, *et al.* Plasmonic coupled modes in metal-dielectric multilayer structures: Fano resonance and giant field enhancement[J]. Optics Express, 2016, 18(24): 20080-20088.
- [16] Tan X J, Zhu X S, Shi Y W. Hollow fiber sensor based on metal-cladding waveguide with extended detection range[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 16996-17003.
- [17] Li Y Q, Tan Z Y, Cao J C, *et al.* Fabrication and characterization of big-bore flexible dielectric-coated metallic terahertz waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 36(1): 0106003.
李怡卿, 谭智勇, 曹俊诚, 等. 大口径柔性介质金属膜太赫兹波导的制作与特性[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0106003.
- [18] Zeng X, Liu B H, He Y J, *et al.* Fabrication of low-loss AgI/Ag hollow fibers for laser light delivery in the near infrared region[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0306001.
曾璇, 刘炳红, 何宇婧, 等. 近红外低损耗 AgI/Ag 空芯光纤的制作[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0306001.
- [19] Miyagi M, Kawakami S. Design theory of dielectric-coated circular metallic waveguides for infrared transmission[J]. Journal of Lightwave Technology, 1984, 2(2): 116-126.
- [20] 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.