

基于对称平板波导型 SPR 液体折射率传感特性

王 帅^{1,2},傅海威^{1,2},常会敏^{1,2},尤涌涛^{1,2}

(1.西安石油大学 理学院,西安 710065;2.西安石油大学 光电油气测井与检测陕西省重点实验室,西安 710065)

摘要:表面等离子体共振(SPR)技术在外界环境折射率测量上有着广泛应用。设计了一种对称平板波导结构,利用时域有限差分法对波导结构中 SPR 效应与外界环境折射率的关系进行数值模拟,对金属材料选择以及传感区域长度进行了优化,并研究了不同阶次的模式对传感器灵敏度的影响。仿真结果表明:当外界环境折射率为 1.38 时,相较于基模条件下 4100 nm/RIU 的灵敏度,三阶模传感器的灵敏度提高到 6209 nm/RIU,最大灵敏度提高了 51%;当外界环境折射率为 1.34~1.38 时,传感器平均灵敏度从 2900 nm/RIU 提高到 4025 nm/RIU。

关键词:液体传感器;表面等离子体共振;高阶模;平板波导;金属涂覆

中图分类号:TH744 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)04-0059-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characteristics of liquid refractive index sensing based on symmetric planar waveguide SPR

WANG Shuai^{1,2}, FU Haiwei^{1,2}, CHANG Huimin^{1,2}, YOU Yongtao^{1,2}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory on Photoelectric Oil-gas Logging and Detecting, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Surface plasmon resonance (SPR) technology has been widely used in refractive index measurement in the external environment. In this paper, a symmetrical planar waveguide structure is designed. The relationship between SPR effect and the refractive index of the external environment is numerically simulated by using the finite difference time domain method. The selection of metal materials and the length of sensing area are optimized. The effects of modes of different orders on the sensitivity of the sensor are studied. The simulation results show that when the refractive index of the external environment is 1.38, compared with the sensitivity of 4100 nm/RIU under the base mode condition, the sensitivity of the third-order mode sensor is increased to 6209 nm/RIU, and the maximum sensitivity is increased by 51%. When the ambient refractive index is 1.34-1.38, the average sensor sensitivity increases from 2900 nm/RIU to 4025 nm/RIU.

Key words: liquid sensor; surface plasmon resonance; higher-order mode; plate waveguide; metal coated

0 引言

表面等离子体共振(SPR)是由金属中的等离子体振荡与光相互作用产生的共振现象^[1-2]。折射率是物质的一种重要的物理性质,也是衡量物质品质的重要指标^[3],在食品安全、医疗诊断、环境监测和生化传感等

收稿日期:2020-06-06。

基金项目:西安石油大学研究生创新实践能力培养计划(批准号:YCS18212057)资助。

作者简介:王帅(1994—),男,湖北宜昌人,西安石油大学硕士研究生,主要研究方向为模拟光纤 SPR 的液体及气体传感特性、模拟基于涡旋光的光纤布喇格光栅温度传感特性、制备及涂覆敏感材料对甲烷气体的测量,参加过国际光学会议以及陕西省科研项目。



领域对折射率的监测尤为重要^[4-5]。自 SPR 传感器被提出以来,因其高灵敏度、可实时监测和无损等特点,在诸多领域都有广泛的应用潜力。随着 SPR 传感技术的发展,人们对传感器的灵敏度、应用范围和稳定性的要求不断提高。通过对传感器结构的设计、涂覆金属材料参数的优化等方式,达到提高传感器灵敏度和稳定性的目的,传感器的应用也从检测折射率扩展到温度以及气体浓度的检测等^[6]。

2013 年,厦门大学张以亮等人^[7]设计了一款聚合物波导型 SPR 传感器,研究了波导芯层折射率、不同金属厚度等对传感器灵敏度的影响。2019 年,盛祥等人^[8]提出了一种复合膜对称结构的 SPR 传感器,通过涂覆墨烯提高传感器的稳定性和检测灵敏度。目前,

国内外已经出现了多种类型的 SPR 传感器,如棱镜型 SPR 传感器^[9-10]、光纤 SPR 传感器和波导型 SPR 传感器等^[11-13]。其中,波导型结构具有实现低成本、高集成度电子功能器件的优势^[14]。光波导 SPR 传感器结构稳定性好、体积小且可实现多通道测量,但由于此类传感器的灵敏度不高,限制了它的应用^[15]。

本文通过在对称性波导结构上涂覆金膜,研究高阶模对 SPR 传感器灵敏度的影响,并且对该传感器传感区域长度进行优化,旨在提高响应灵敏度。

1 波导型 SPR 结构理论模型

图 1 为波导型 SPR 结构原理图。平板型光波导结构由波导层(折射率为 n_1)、衬底层(折射率为 n_0)和金属层(折射率为 n_2)组成。当光经过涂覆金属层的传感区域时,在满足全反射条件下,会产生表面等离子体共振现象,检测透射谱波长的漂移,就可以监测外界环境的变化。

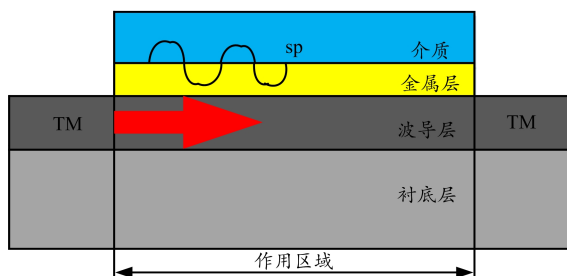


图 1 波导型 SPR 结构原理图

假设金属层介电常数和外界环境介电常数分别为 ε_m 和 ε_1 。由边界条件和麦克斯韦方程组可得表面等离子体波 (SPW) 的传播常数为^[16]:

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_1}{\varepsilon_m + \varepsilon_1}} \quad (1)$$

其中, c 为真空中的光速, ω 为光波角频率。当入射角或者波长为某一适当值时, 表面等离子体波波矢和沿着金属-介质界面的波矢相等。入射光沿着界面的波矢为:

$$K_x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta \quad (2)$$

其中, ε_0 波导介电常数, θ 为入射角。当 $k_{sp} = K_x$ 时, 即:

$$\frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_m \varepsilon_1}{\varepsilon_m + \varepsilon_1}} \quad (3)$$

当二者发生共振时, 入射光部分能量会被吸收, 在透射光谱上会出现共振峰。SPR 对被测物质敏感, 表现为被测物质折射率变化, 透射谱共振峰发生漂移, 通过检测透射谱波长变化量对环境进行实时监测。

2 结构设计和仿真

2.1 平板波导型 SPR 结构设计

本文设计了一种对称型涂覆金属薄膜的平面波导 SPR 传感器。图 2 为传感器截面图。传感器结构中, 波导层选用折射率为 1.4438 的二氧化硅材料, 厚度为 $8 \mu\text{m}$; 玻璃层选用折射率为 1.4378 的二氧化硅材料, 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$; 传感区域长度为 $200 \mu\text{m}$; 最后溅射厚度为 45 nm 金属传感层完成波导型 SPR 传感器的制作。

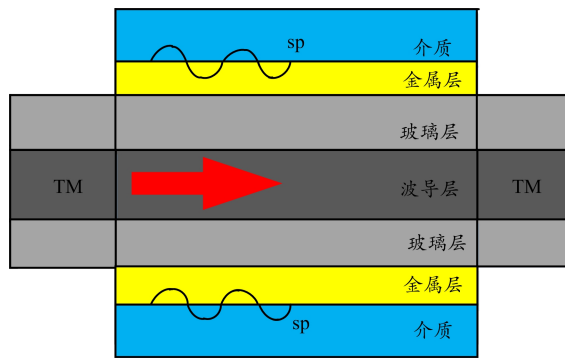


图 2 平面波导 SPR 传感器截面图

2.2 仿真与分析

2.2.1 传感器结构优化

本文对该传感器结构参数进行优化, 分析涂覆金属材料、传感区域长度对传感器性能的影响。在导模、外界环境折射率 n 、涂覆金属材料以及涂覆厚度相同时, 不同传感器区域长度的传感器透射谱如图 3 所示。可以看出, 随着传感区域长度的增大, 透射谱中共振峰深度随之增大, 反应出 SPR 效应越明显。在其它条件相同时, 涂覆不同金属材料下, 该传感器透射谱的变化如图 4 所示。涂覆金膜的传感器灵敏度最高, 银膜次之, 铜膜最差, 故本文选用金膜作为涂覆材料。

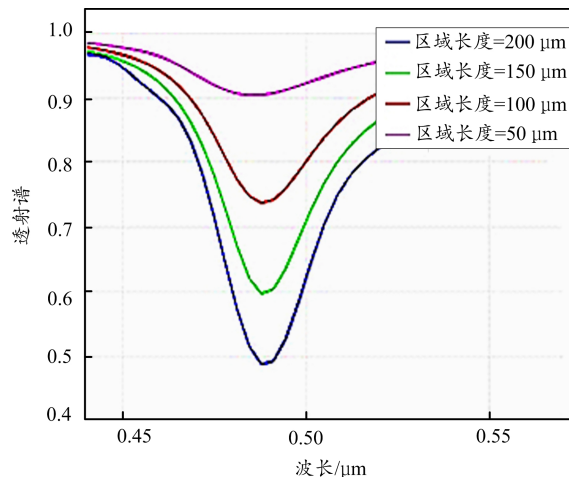


图 3 不同传感区域长度的传感器透射谱

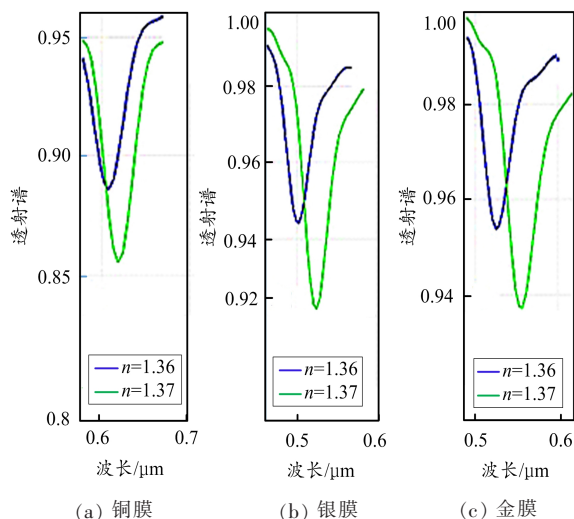


图4 不同金属材料下传感器的透射谱

2.2.2 基模条件下仿真分析

本文在此传感器模型下涂覆 45 nm 的金膜,波导选择基模,外界环境折射率在 1.34~1.38 范围内变化,传感区域长度为 200 μm ,扫描波长范围为 350~750 nm,得到透射谱随外界环境变化的关系如图 5 所示。当外界环境折射率从 1.34 变化为 1.38,透射谱的共振波长随之发生了漂移,根据波长漂移量与折射率变化量可得到此传感器的灵敏度。图 6 为 SPR 传感器共振波长与折射率关系图。可以看出,当外界环境折射率从 1.34 变化至 1.38 时,共振波长漂移了约 116 nm;对折射率与共振波长进行二次曲线拟合,波长与外界环境折射率之间满足二次关系式 $y=52067-78700x+3000x^2$,曲线上每点的斜率代表该折射率下传感器的灵敏度,该传感器的平均灵敏度为 2900 nm/RIU。当外界环境折射率为 1.38 时,传感器的灵敏度为 4100 nm/RIU。

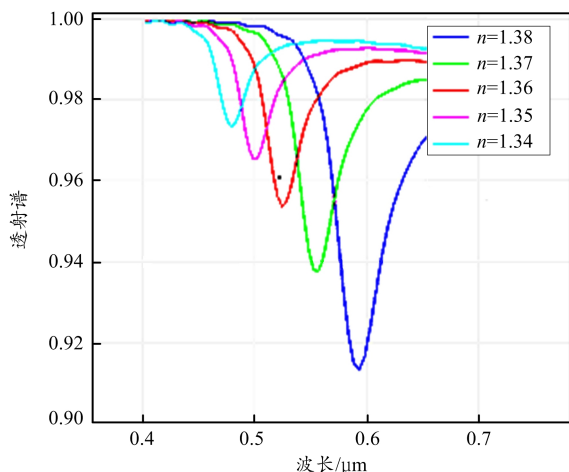


图5 基模波导 SPR 传感器透射谱

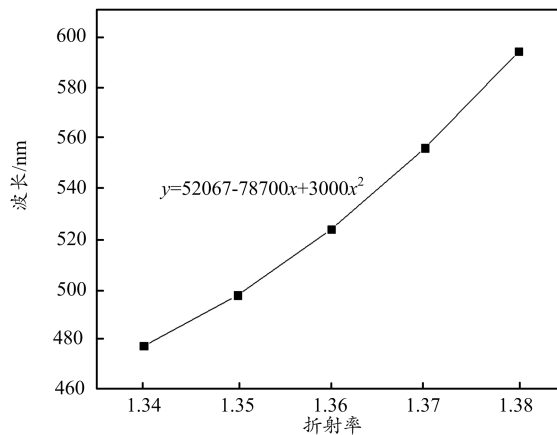


图6 共振波长与折射率关系图

2.2.3 一阶、二阶和三阶导模条件下仿真分析

本文探究高阶模条件下传感器性能的改变。上述涂覆金属膜的种类、金属膜层厚度、传感器区域长度、外界环境折射率变化以及扫描波长范围都不改变。依次在一阶、二阶和三阶导模条件下对传感器进行仿真分析。

①一阶导模仿真。当外界环境折射率从 1.34 变化至 1.38 时,共振波长漂移了 123 nm,对折射率与共振波长进行二次曲线拟合,波长与外界环境折射率之间满足二次关系式 $y=63757.2-96035.71429x+36428.57143x^2$,该传感器的平均灵敏度为 3075 nm/RIU。当外界环境折射率为 1.38 时,传感器的灵敏度为 4507 nm/RIU。

②二阶导模仿真。当外界环境折射率从 1.34 变化至 1.38 时,共振波长漂移了约 134 nm,对折射率与共振波长进行二次曲线拟合,波长与外界环境折射率之间满足二次关系式 $y=6869.6-103547.14286x+39285.71429x^2$,该传感器的平均灵敏度为 3350 nm/RIU。当外界环境折射率为 1.38 时,传感器的灵敏度为 4881 nm/RIU。

③三阶导模仿真。当外界环境折射率从 1.34 变化至 1.38 时,共振波长漂移了约 161 nm,对折射率与共振波长进行二次曲线拟合,波长与外界环境折射率之间满足二次关系式 $y=98185.6-147562.85714x+55714.28571x^2$,该传感器的平均灵敏度为 4025 nm/RIU。当外界环境折射率为 1.38 时,传感器的灵敏度为 6209 nm/RIU。

本文对比上述 4 种不同导模条件下 SPR 传感器灵敏度的变化可知,随着导模阶次提高,传感器灵敏度也随之提升,且外界环境折射率越大,灵敏度提升越明显,如图 7 所示。图 8 为外界环境折射率为 1.36

王帅,傅海威,常会敏,等:基于对称平板波导型 SPR 液体折射率传感特性

时不同阶次导模传感器透射谱图。可以看出,随着导模阶次增大,共振峰深度也随之增大。

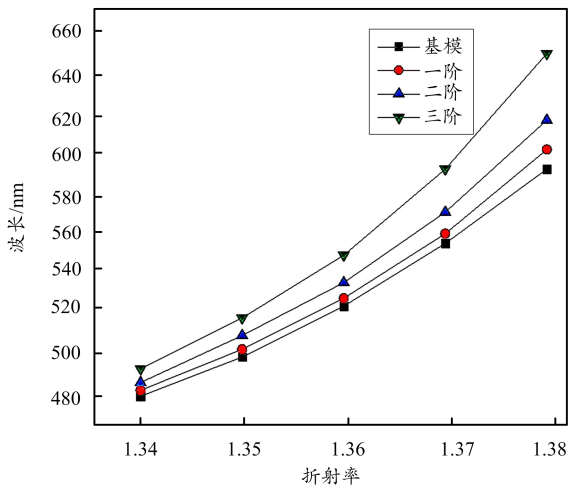


图7 不同阶导模共振波长与折射率关系图

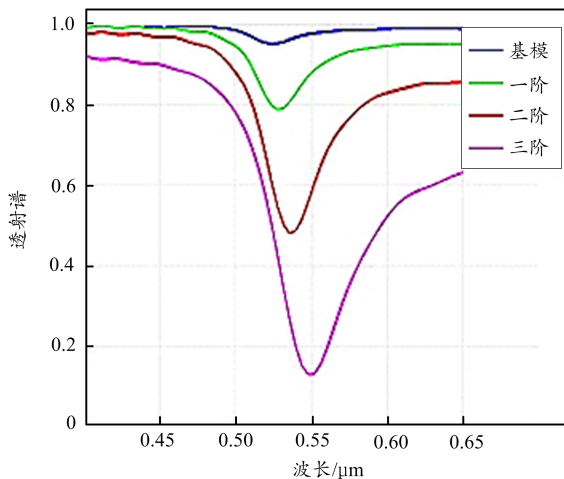


图8 不同阶导模在同一折射率下的透射谱

3 结束语

本文模拟了一种对称型平面波导结构 SPR 传感器,分析了高阶导模对该传感器性能的影响,并且对该传感器的结构参数进行了优化。模拟结果表明,在传感器上涂覆金膜,其灵敏度最高。当传感区域长度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 、外界环境折射率在 $1.34\sim 1.38$ 范围内时,本传感器在基模条件下最大响应灵敏度为 4100 nm/RIU ,平均灵敏度为 2900 nm/RIU ;在三阶导模条件下最大响应灵敏度为 6209 nm/RIU ,平均灵敏度为 4025 nm/RIU 。相较于基模,后者最大响应灵敏度提高 51% ,平均灵

敏度提高 38.7% 。因此,在相同条件下,传感器的灵敏度随导模阶次的提高而增加,且高阶导模的 SPR 效应更明显。

参考文献:

- [1] OTTO A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection[J]. Zeitschrift Fur Physik, 1968, 216(4): 398–410.
- [2] LI Z H, CHEN T, ZHANG Z G, et al. Highly sensitive surface plasmon resonance sensor utilizing a long period grating with photosensitive cladding[J]. Applied Optics, 2016, 55(6): 1470–1480.
- [3] 齐晓岩,吕尊仁,杨叶,等. 基于 MATLAB 的表面等离子体共振可视化界面仿真[J]. 实验科学与技术, 2014, 12(3): 6–9.
- [4] 傅海威,闫旭,李辉栋,等. 基于纤芯失配型马赫曾德尔光纤折射率和温度同时测量传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 58–63.
- [5] 陈小龙. 侧边抛磨光纤表面等离子体共振传感器的研制及折射率传感特性研究[D]. 广州:暨南大学, 2014.
- [6] FU H, JIANG Y, DING J, et al. Zinc oxide nanoparticle incorporated graphene oxide as sensing coating for interferometric optical microfiber for ammonia gas detection [J]. Sensors and Actuators B-chemical, 2018, 254: 239–247.
- [7] 张以亮,汪建斌,黄晓亮,等. 聚合物波导型表面等离子体共振传感器的特性研究[J]. 发光学报, 2013, 34(7): 23–34.
- [8] 盛祥,刘谨,杨海马,等. 基于银膜-石墨烯复合膜对称结构的 SPR 传感器研究[J]. 传感技术学报, 2019(11): 72–89.
- [9] FU Y L, YUAN Y F, CHEN B X. Studies on surface plasma resonance sensor[J]. Laser Journal, 2006, 27(3): 73–74.
- [10] WU Y C, YUAN Y F. Research of a novel principle on sea-water salinity measurement based on refractive index change [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(2): 199–202.
- [11] YANASEA Y, ARAKIB A, SUZUKI H. Development of an optical fiber SPR sensor for living cell activation[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, 25(5): 1244–1247.
- [12] SRIVASTAVA S K, VERMA R, GUPTA B D. Surface plasmon resonance based fiber optic sensor for the detection of low water content in ethanol[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 153(1): 194–198.
- [13] AKOWUAH E K, GORMAN T, HAXHA S. Dual channel planar waveguide surface plasmon resonance biosensor for an aqueous environment[J]. Opt. Exp., 2010, 18(24): 24412–24422.
- [14] KRENN J R, GALLER N, DITBACHER H, et al. Waveguide integrated SPR sensing on an all-organic platform [C]//SPIE. Proceedings of Conference on photonic crystal fibers V. New York: SPIE, 2011: 1–6.
- [15] XIAO P P, WANG X P, SUN J J, et al. Biosensor based on hollow-core metal-cladding waveguide [J]. Sensors and Actuators A, 2012, 183: 22–27.
- [16] 张子华,刘超,孙祺,等. 棱镜表面等离子体共振传感器理论仿真研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19): 4651–4652.