光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024012701

波长调制型 PMMA 光波导 SPR 传感器敏感单元设计

于永浩，周声超，张美玲，张　荣，孔　梅*

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘　要： 光波导表面等离激元共振(SPR)传感器具有尺寸小、免标记、易集成等优点。文章设计了一种基于波长调制方法的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)脊型波导 SPR 传感器，并对其关键参数进行了优化。结果表明，该敏感单元在待测液折射率为 1.33～1.45 的范围内能够稳定工作，在高折射率检测区，传感器展现出了高达 10 220 nm/RIU 的灵敏度和 173 RIU^{-1} 的高品质因数。

关键词： 表面等离激元共振；折射率传感；聚甲基丙烯酸甲酯；光波导传感器

中图分类号： TN252；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)03－0406－04

Design of Wavelength Modulation PMMA Optical Waveguide SPR Sensing Structure for Refractive Index Sensing

YU Yonghao, ZHOU Shengchao, ZHANG Meiling, ZHANG Rong, KONG Mei

(School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, CHN)

Abstract: Optical-waveguide surface plasmon resonance (SPR) sensors are characterized by small sizes, label-free detection capabilities, and ease of integration. In this study, we designed a poly(methyl methacrylate) (PMMA) ridge waveguide SPR sensor sensitive unit based on a wavelength modulation method and optimized its key parameters. Our analysis results showed that the sensor could operate stably within a liquid-refractive-index testing range of 1.33～1.45. In the high-refractive-index detection region, the sensor exhibited a sensitivity of up to 10 220 nm/RIU and a high quality factor of 173 RIU^{-1}.

Key words: surface plasmon resonance; refractive index sensing; PMMA; optical waveguide sensor

0　引言

表面等离激元共振(SPR)传感器具有尺寸小、免标记、灵敏度高等优点，在生物传感领域具有广阔的前景[1]。然而目前的 SPR 传感器大多基于传统的棱镜耦合方式，其体积大、结构复杂且易受环境干扰[2]。与传统 SPR 传感器相比较，波导耦合式 SPR 传感器体积小、集成度好且可以与微流控技术相结合，可以适应片上实验室(Lab on A Chip)的发展需要[3]。传统的用于制备光波导的无机材料(如 Si、SiO_2 等)往往需要昂贵的加工设备，工艺复杂，成本相对较高[4]，而聚合物材料成本低、工艺简单且机械性能强，近几年来愈发受到研究者们的关注。目前常见的聚合物光波导 SPR 传感器多采用基于强度调制的检测手段，这种检测方法易受光源波动和光路扰动干扰，且由于需要保证光波导的单模传输，波导端面面积较小，不易与光纤进行对接耦合[5-6]。与此相比，波长调制法可以使用多模光波导，性能稳定，易于集成，具有良好的市场应用前景[7]。

本文设计了一种基于波长调制法的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光波导 SPR 传感器。PMMA 是一种具有卓越光学性能的大分子聚合物，在可见光波

收稿日期：2024－01－27.

基金项目：基于表面等离激元谐振(SPR)的光纤微流控生物传感技术研究项目(KYC-HK-XM-2021-023).

* 通信作者：孔　梅

段的透光率超过 90%[8]。采用 PMMA 作为光波导 SPR 传感器的波导芯层材料，对传感器的关键参数进行了优化，实现了优异的传感性能。

1　脊型波导 SPR 传感器敏感单元设计

本文所提出的 PMMA 脊型波导 SPR 传感器结构示意图如图 1 所示。整个传感器结构在石英玻璃片上进行设计。选择厚度为 w、高度为 h 的光敏聚合物 PMMA 作为波导芯层，其折射率在可见光波长下约为 1.488。在 PMMA 的表面有一层厚度为 t、长度为 L 的金膜作为传感区域。当光波导中导模的传播常数与表面等离激元波(SPW)的波矢 k_{sp} 满足相位匹配条件时，导模的倏逝波会与 SPW 相耦合[9]，并激发 SPR 现象。此时，入射光能量会耦合到表面等离激元波中，波导出射光强度在共振波长处明显衰减。由于表面等离激元波的传播常数会受周边介质介电常数的影响，任何能够改变外部环境介电常数的因素都可以通过 SPR 现象进行检测。

光波导 SPR 折射率传感器的传感效果会受到多个参数的影响，包括波导芯层的厚度和宽度、介质的折射率、金属薄膜的种类和厚度等。为了使脊型 PMMA 波导的 SPR 传感器达到最好的传感效果，实验利用有限元数值计算，对这些要素的影响进行详细分析，以取得优化的传感性能和方便加工和使用的传感器结构。

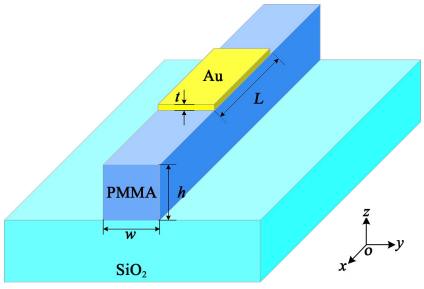


图 1　脊型波导 SPR 传感器结构示意图

2　传感器敏感单元参数的优化

2.1　金膜厚度对传感性能的影响

首先通过控制变量法对不同金膜厚度的光波导 SPR 传感器进行模拟。波导芯层宽度和厚度固定为 5 μm，传感长度为 1 mm，计算金膜厚度从 35 nm 以 5 nm 为步长依次变化到 50 nm 时谐振峰随金膜厚度的变化规律。待测介质的折射率取 1.39 和 1.4 两种情况，以显示金膜厚度对传感性能的影响。图 2 给出了相应的计算结果。从图中可以看出，随着金属薄膜厚度的增加，谐振峰向长波方向(红移)移动，且谐振峰深度会随着金膜厚度的增加而减小。这是由于当金膜变厚时，其对倏逝波的阻挡也会增强，这削弱了倏逝波与 SPW 的耦合效应。

此外，随着金膜厚度的增加，脊型波导 SPR 传感器的灵敏度会略微提高，但影响并不明显。当金膜厚度从 35 nm 增加到 60 nm 时，灵敏度仅从 2 500 nm/RIU 增加到了 3 000 nm/RIU。相比之下，金膜厚度对传感器的半峰全宽的影响更加显著。当金膜厚度为 35 nm 时，SPR 传感器的半峰宽仅为 37 nm，说明较薄的金膜可以带来更高的品质因数(灵敏度和半峰全宽的比值)，而高品质因数有利于 SPR 传感器的传感精度。然而，较薄的金膜吸收损耗也会很高，当金膜厚度为 35 nm 时，在共振波长处的吸收损耗可达到−55 dB/mm，这种较高的损耗会使输出光功率过低，可能导致谐振峰底部在光谱仪上淹没在噪声中。除此之外，太薄的金膜还会增加金膜沉积的难度。因此，综合考虑传感器的灵敏度、半峰宽及加工工艺的可行性，金膜的最佳厚度选取范围应在 45～55 nm 之间。

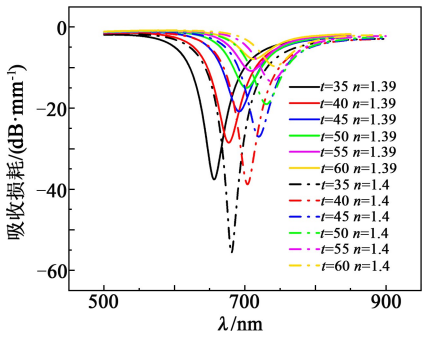


图 2　不同金膜厚度的波导 SPR 传感器透射谱

2.2　波导芯层参数对传感性能的影响

2.2.1　波导芯层宽度

分析波导芯层宽度的影响时，设金膜厚度为 50 nm，波导层厚度为 5 μm，待测介质折射率为 1.4，计算当波导芯层宽度从 4 μm 变化到 10 μm 时透射光谱的变化规律。模拟结果如图 3 所示，当波导宽度由 4 μm 逐渐增长到 10 μm 时，脊型波导 SPR 传感器的透射谱几乎完全重合，这意味着波导芯层宽度对光波导 SPR 传感器透射光谱的半峰宽和共振位置几乎没有影响，不会引起脊型波导 SPR 传感器性能的变化。虽然过大的波导芯层宽度可能会引起波导内模式增多，导致半峰宽增加，但是过窄

的波导芯层宽度也会增大工艺难度。因此，在波导的制备过程中可以根据具体情况适当调整波导宽度。后续分析中将脊型波导芯层宽度始终设为 5 μm。

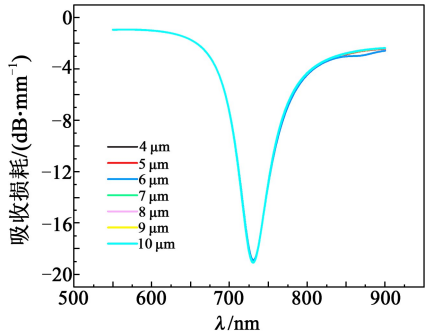


图 3 不同波导芯层宽度的波导 SPR 传感器透射谱

2.2.2 波导芯层厚度

设待测介质折射率为 1.40，传感长度为 1 mm。计算了波导芯层厚度从 4 μm 变化至 10 μm 时传感器的吸收谱，如图 4 所示。图中结果表明，随着波导芯层厚度的增加，传感器的吸收损耗逐渐减少。当波导芯层厚度为 10 μm 时，吸收损耗降到－4 dB/mm。这是因为随着波导芯层厚度的增加，导模的泄露减少，进入金属的倏逝波强度减弱，进而降低了共振波长处的吸收损耗。

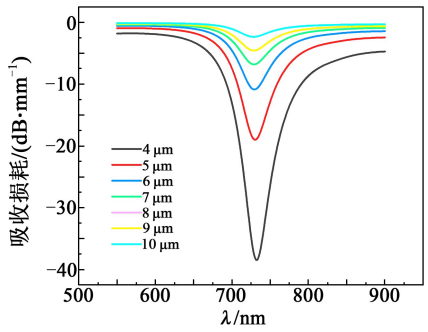
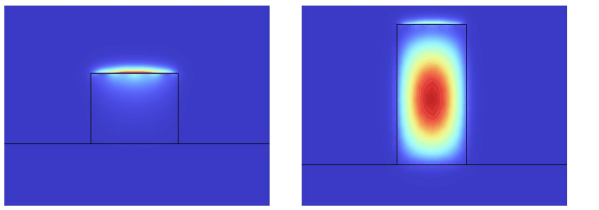


图 4 不同波导芯层厚度的波导 SPR 传感器透射谱

从图 4 中还可以看到，随波导芯层变厚的同时，共振波长表现出了轻微的蓝移，但计算结果表明传感器的灵敏度保持不变。同时，随着厚度的增加，半峰宽稍有增长，但随着厚度进一步增大，半峰宽扩大的趋势逐步放缓。因此，随着波导芯层变厚，脊型波导 SPR 传感器的品质因数会逐步下降。

虽然图 4 显示更薄的波导芯层厚度对应更深且尖锐的吸收峰，但过小的波导芯层厚度会导致折射率的检测范围减小。如图 5 所示，当待测液折射率为 1.42 时，不同厚度脊型波导 SPR 传感器在共振波长处的电场模。从图 5(a)中可以看出，当波导芯层厚度为 4 μm、共振波长为 774 nm 时，由于 SPR 现象过强，共振波长处的入射光完全集中到了金膜附近，此时传感波导的有效折射率实部为 1.489 8，大于波导芯层 1.488 的折射率，此时波导中不存在导模，无法实现折射率检测。当共振波长为 804 nm 时，10 μm 厚度的脊型波导 SPR 传感器在共振波长处的电场模，如图 5(b)所示，此时波导的有效折射率实部为 1.485 7，小于波导芯层折射率，因此可以实现对折射率为 1.42 的待测物的检测。从以上的分析中可以得知，当波导芯层厚度增加的时候，脊型波导 SPR 传感器的检测范围会明显提升。因此在实际应用中，可以根据想要检测的待测液折射率范围来设计不同波导芯层厚度。



(a) 厚度为 4 μm，共振波长为 774 nm (b) 厚度为 10 μm，共振波长为 804 nm

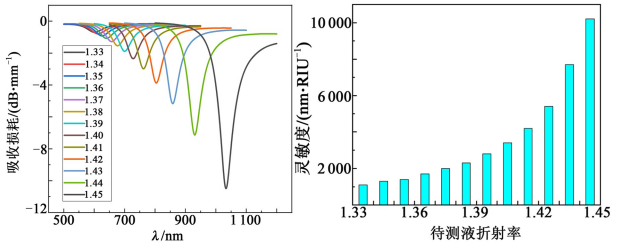
图 5 分析物折射率为 1.42 时不同厚度脊型波导 SPR 传感器的横截面电场分布

2.3 不同折射率区间的传感性能

通过上述优化，选定脊型 PMMA 波导芯层厚度和宽度都为 10 μm，金膜厚度为 50 nm，对此参数的光波导 SPR 传感器计算待测液折射率从 1.33 变化到 1.45 时传感器的传感性能。图 6(a)为不同分析物折射率下的透射谱，随着待测液折射率的不断提高，波导 SPR 传感器的共振峰位置发生了明显的偏移，此外，随着样品折射率的上升，透射谱的偏移变得更加明显。在图 6(b)展示的共振波长与待测液折射率之间的关系曲线中，可以看到当待测液折射率从 1.33 提高到 1.34 时，传感器的灵敏度为 1 100 nm/RIU。随着待测液折射率的增加，传感器的灵敏度不断增长，当折射率从 1.44 升至 1.45 时，其灵敏度已提升至 10 200 nm/RIU。

此外，脊型波导 SPR 传感器的半峰宽在待测液折射率增加的过程中先是增大然后又减小，传感器的品质因数也不断提升，最高值达到了 173 RIU^{-1}，这表明脊型 PMMA 波导 SPR 传感器在检测高折射率的液体时表现出极佳的性能。然而，在待测液折射率较低的情况下，10 μm 厚的脊型波导 SPR 传感器敏感单元表现出的吸收损耗相对较低，仅为 0.7 dB/mm，这可能不利于敏感单元对低折射率样品的检测。因此，在实际应用中，为了提升对各种折射率范

围内样品的检测能力，可以根据待测液体的具体折射率需求来设计相应厚度的波导芯层，从而优化脊型波导 SPR 传感器的性能。



（a）透射光谱　　（b）灵敏度随待测液折射率的变化规律

图 6　不同折射率区间的透射光谱

3　加工工艺考虑

考虑到 PMMA 的材料性质以及传感器的波导尺寸和表面镀金需求，设想可以用光刻法完成传感器的加工。首先在石英玻璃片上使用多层旋涂法制备 5 μm 厚的 PMMA 薄膜，接着使用磁控溅射法在 PMMA 上方沉积厚度为 50 nm 的金膜；随后在金膜上旋涂 AZ4620 光刻胶，使用光刻技术将光刻胶制备成 5 μm 宽度，并用去金溶液将未被光刻胶覆盖的金膜区域去除，得到宽度为 5 μm、厚度为 50 nm 的金属薄膜；以光刻胶为保护层使用干法刻蚀将 PMMA 薄膜刻蚀成脊型，完成 PMMA 脊型波导的制备；最后使用激光雕刻法对金膜进行加工，去除多余长度，完成脊型 PMMA 波导 SPR 传感器敏感单元敏感单元的制备，制备完毕的脊型 PMMA 波导 SPR 传感器敏感单元宽为 5 μm，长度为 1 mm，体积较小，便于片上集成。如果想要使用硅基集成，也可用化学气相沉积法在硅片上沉积二氧化硅下包层，再完成敏感单元的工艺制备。

4　结论

本文设计了一种基于大分子聚合物 PMMA 的脊型波导 SPR 传感器，并对波导参数进行了分析和优化。结果表明，波导芯层厚度的变化会引起光波导 SPR 传感器的吸收损耗和检测范围的变化。波导芯层厚度减小可以增加谐振峰深度，适合检测低折射率的待测样品；波导芯层厚度增加可以加大传感器的检测范围，适合检测高折射率的待测样品。波导芯层宽度对传感器的传感性能无显著影响，可以根据工艺条件适当调整波导宽度。金膜厚度会对光波导 SPR 传感器的传感效果产生显著影响，在制备时需对其严格控制。

所设计的波长调制型 PMMA 光波导传感器具有小型化和易集成的特点，在检测高折射率样品时体现出了很好的传感性能。同时，其检测范围较大，能够检测传感折射率在 1.33～1.45 之间的溶液；较大的波导端面也减小了光波导与纤芯的对接耦合难度，使得该传感器具有良好实用性和性能优势。

参考文献：

[1] Xu Y, Bai P, Zhou X, et al. Optical refractive index sensors with plasmonic and photonic structures: Promising and inconvenient truth[J]. Adv. Opt. Mater., 2019, 7(9): 1801433.

[2] 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.

[3] Ji L, Sun X, He G, et al. Surface plasmon resonance refractive index sensor based on ultraviolet bleached polymer waveguide[J]. Sens. Actuators, B, 2017, 244: 373-379.

[4] Yang S, Ji L, Zhao S, et al. Parametric study on the bimetallic cladding silica waveguide surface plasmon resonance sensor[J]. Opt. Quantum Electron., 2023, 55(8): 737.

[5] Ji L, Wei W, Li G, et al. Refractive index sensor based on metal-clad planar polymer waveguide operating at 850 nm[J]. Photonic Sensors, 2020, 11(4): 448-456.

[6] Ji L, Yang S Q, Shi R, et al. Polymer waveguide coupled surface plasmon refractive index sensor: A theoretical study [J]. Photonic Sensors, 2020, 10(4): 353-363.

[7] 张孟策. 基于光纤表面等离子体共振技术的传感器研究[D]. 北京：北京理工大学，2017.
Zhang Mengce. Research on sensors based on fiber optic surface plasmon resonance technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.

[8] 郭瑞强. 光透光率韧性有机玻璃的制备与研究[D]. 河北：河北工业大学，2005.
Guo Ruiqiang. Preparation and study of organic glass with high light transmittance and toughness [D]. Hebei: Hebei University of Technology, 2005.

[9] Homola J, Koudela I, Yee S S. Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: Sensitivity comparison[J]. Sens. Actuators, B, 1999, 54(1/2): 16-24.

作者简介：

于永浩(1997—)，男，硕士研究生，主要研究方向为光波导表面等离激元共振传感器；

孔　梅(1967—)，女，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为导波光学器件物理和应用，光学传感技术等。