

基于氧化锌和二硫化钼调控的银基表面等离子体共振错峰共振级联型双参量光纤传感器*

郑丽靖¹⁾ 郭鹏霄²⁾ 伊然¹⁾ 李建设¹⁾ 李曙光^{1)†}

1) (燕山大学理学院, 亚稳材料全国重点实验室, 河北省微结构材料物理重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (燕山大学信息科学与工程学院, 秦皇岛 066004)

(2026 年 4 月 1 日收到; 2026 年 5 月 6 日收到修改稿)

提出一种级联型双参量银基无芯光纤 (no-core fiber, NCF) 表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 传感器. 该传感器以两段 NCF 为基底构建双感应通道, 在其中一段 NCF 上镀制 Ag/ZnO 复合膜作为折射率检测通道, 另一段 NCF 上镀制 Ag/MoS₂/PDMS 复合膜作为温度检测通道, 两段 NCF 串联形成了一体化液体折射率与温度双参数检测的结构. 主要机制和原理是: 利用光纤表面镀银膜激发 SPR 效应, ZnO 膜既可调控 SPR 峰提升传感器对折射率的检测响应, 亦可有效地抑制 Ag 膜氧化; MoS₂ 与 PDMS 膜结合既可调控 SPR 峰将温度敏感带红移至近红外波段, 又可对 Ag 膜起到抗氧化作用. 该传感器通过 SPR 错峰共振实现了双检测带独立检测, 在 1.333—1.383 折射率范围内, 平均折射率灵敏度达 2888.255 nm/RIU; 在 0—100 °C 温度区间内, 平均温度灵敏度为 -2.2781 nm/°C. 该传感器具有使用寿命长、无通道串扰、灵敏度高、性能稳定等优点, 为 SPR 传感器的多参数高性能检测提供了新的思路和技术基础.

关键词: 表面等离子体共振, 双参数传感器, ZnO 薄膜, MoS₂ 薄膜

DOI: 10.7498/aps.75.20260458

CSTR: 32037.14.aps.75.20260458

1 引言

近年来, 随着光纤技术的不断发展, 基于表面等离子体共振 (surface plasmon resonance, SPR) 原理^[1,2]的光纤传感器得以提出并逐步发展. 该类传感器无需对检测样品进行标记, 可实现界面分子相互作用的实时监测, 在生物分子识别、环境污染检测、药物筛选等领域得到了广泛应用^[3-5]. 折射率和温度是生物医疗、化学化工、环境监测等多个领域中不可或缺的基础参数, 能够精确检测这两个参数的传感器具有广泛的应用需求.

目前, 双参数 SPR 传感器仍存在诸多亟待解决的问题, 一是大多传感器存在信号互相串扰问题, 需要通过参数补偿的方法来解决, 比如 Du

等^[6]提出了一款双通道亚碲酸盐光纤 SPR 传感器, 同时测量水域的硝酸盐和温度, 该传感器成功实现两参数同时测量, 但是存在两通道干扰问题; 二是抗氧化性较差, 限制了传感器的实际应用寿命, 比如 Li 等^[7]提出了一款同时测量折射率和温度的 SPR 传感器, 探测范围为 1.33—1.40 RIU, 最大折射率灵敏度为 4400 nm/RIU, 检测范围为 5—100 °C 时, 最大温度灵敏度为 5.4 nm/°C, 但是在折射率测量通道, 只在光纤外表面镀了一层银膜, 而银极易被氧化, 导致该传感器的使用寿命不长; 三是某个参数的感应灵敏度较低, 性能较差, 比如 Yang 等^[8]提出了一款 POF-SPR 传感器, 具有低成本、低串扰的优点, 其折射率灵敏度较高, 为 2890.536 nm/RIU, 但是其温度灵敏度为 -0.891 nm/°C, 灵敏度较低; 四是多参数测量时由

* 国家自然科学基金 (批准号: 12074331) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

于带宽有限, 导致参数的测量范围受到限制, 比如 Yin 等^[9]提出的基于 Ag/ZnO 和 Ag/TiO₂/PDMS 复合膜传感器, 温度测量范围受限, 仅为 0—50 ℃. 这些问题对于有双参数测量需求的应用场景而言存在不可忽略的影响. 因此本文解决的问题是: 在实现双参数测量且保证测量范围尽量大的基础上, 避免两通道干扰、防止光纤表面的银膜被氧化、并且使双参数都具有较大的检测灵敏度和良好的稳定性.

无芯光纤 (no-core fiber, NCF)^[10-12] 具有结构简单, 在其表面镀金属膜易于激发 SPR 效应的特点. 为解决以上问题, 本文提出一种基于 NCF 级联且 SPR 错峰共振的新型传感器, 可实现折射率与温度的双参数同步测量. 两通道表面均沉积 Ag 膜, 其中一个通道在 Ag 膜基础上沉积 ZnO 膜用于折射率检测, 另一个通道在 Ag 膜基础上沉积 MoS₂ 膜与 PDMS 用于温度检测. 本研究与 Yin 等^[9]的研究相比, 选用 MoS₂ 替代 TiO₂, 并非简单的材料替换, 从材料特性上看, MoS₂ 的有效折射率^[13-15]高于 TiO₂, 波长调制能力大幅提升, 可将温度通道的共振波长红移至近红外波段, 与折射率通道 (Ag/ZnO) 的共振波长拉开充足间距, 从材料层面解决了难以避免的通道串扰问题, 并把温度检测范围从 0—50 ℃ 拓展到 0—100 ℃; MoS₂ 作为中间层, 其极低的热光系数可忽略温度变化对自身光学参数的影响, 避免对 PDMS 的温敏响应产生干扰, 实现温度传感的特异性响应. 从制作成本看, MoS₂ 相较于 TiO₂, 具有更低的溅射时间和时间, 本实验中 MoS₂ 最佳溅射时间仅 2 min 15 s, 大大低于 TiO₂ 的溅射时间, 缩小了制作成本. 结果显示, ZnO 膜和 MoS₂ 膜都有效防止了 Ag 膜氧化, MoS₂ 的近红外调制能力与 ZnO 的可见光响应形成互补, 使两通道的共振波长分布在不同波段, 从而实现了双参数同步独立检测. 两通道级联后, 在 1.333—1.383 的折射率率范围内, 最大折射率灵敏度达 4146.1 nm/RIU; 在 0—100 ℃ 的温度范围内, 最大温度灵敏度为 -3.8433 nm/℃. 此外, 实验结果表明, 该传感器具有良好的稳定性.

2 传感器制备和工作原理

2.1 传感器的制备和光路连接

复合膜是提升传感器灵敏度、稳定性与抗干扰能力^[16,17]的核心, 其结构设计直接影响传感器的

综合检测性能. 本文设计的复合膜具体结构和 NCF 横截面如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 两端直径为 125 μm 的多模光纤 (MMF) 用于光线传输, 如图 1(c) 所示. 以直径为 125 μm 的 NCF 为基底, 沉积 Ag/ZnO 复合膜检测葡萄糖溶液的折射率, 沉积 Ag/MoS₂/PDMS 复合膜检测温度, 把两根长度都为 2 cm 的镀膜后的 NCF 进行串联, 两端熔接上 MMF 传输光信号, 实现折射率与温度的同步测量. Ag 膜用于激发 SPR 效应, ZnO 膜和 MoS₂ 膜均可保护 Ag 膜不被氧化, 延长传感器的使用寿命, 同时可实现带宽调制与灵敏度调节, 以满足双参数同步测量的需求. 其中, PDMS 是一种常用的温敏材料^[18-20], 其固体的形态具有稳定的化学性, 当环境温度变化时, PDMS 的折射率会随之发生显著的改变.

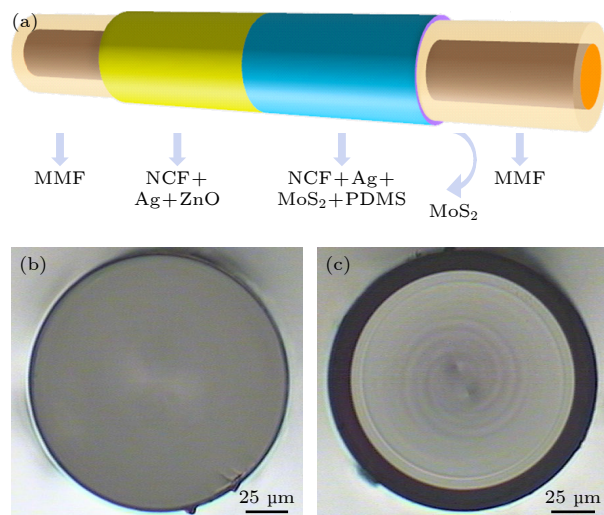


图 1 (a) 传感器结构; (b) NCF 的横截面; (c) MMF 的横截面

Fig. 1. (a) Sensor structure; (b) cross-section of NCF; (c) cross-section of MMF.

实验中使用磁控溅射仪进行物理镀膜, 具体制备流程如图 2 所示, 先把 NCF 的包层去除并用酒精轻轻擦拭, 避免杂质残留于光纤表面影响镀膜效果, 随后把处理好的 NCF 放进真空腔中. 关紧腔体门后进行真空处理, 待真空腔达到 6.6×10^{-4} Pa, 打开氩气阀, 将氩气流量调节至 40 sccm ($1 \text{ sccm} = 1 \text{ cm}^3/\text{min} @ 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}, 0^\circ\text{C}$), 使氩气进入真空腔. 随后开启直流电源, 调节溅射功率至 150 W, 此时开始在 NCF 表面溅射 Ag 膜. Ag 膜沉积完成后, 打开 ZnO 靶的射频电源, 开始沉积 ZnO 膜, 同理, 若需沉积 MoS₂ 膜, 则开启 MoS₂ 靶对应位

置的射频电源进行溅射. 最后, 关闭射频电源, 打开进气阀, 使真空腔与外界大气压平衡, 打开腔门, 取出光纤.

为观察镀膜情况, 进行了 SEM 检测. 图 3(a)、图 3(d) 和图 3(g) 分别表示基于 Ag, Ag/MoS₂ 和 Ag/ZnO 的 NCF 表面, 可以看出其表面被成功镀上了薄膜. 图 3(b), (e), (h) 分别表示基于 Ag, Ag/

MoS₂ 和 Ag/ZnO 的 NCF 放大 10000—20000 倍的表面细节图, 可以看见表面是由细小纳米晶粒紧密堆积而成的颗粒, 这是因为磁控溅射沉积的薄膜遵循岛状生长模式, 沉积原子在基底表面成核、生长并融合形成多晶结构. 因此其表面形貌由大量纳米级晶粒紧密堆积而成, 在 SEM 下呈现明显的颗粒状. 图 3(c), (f), (i) 分别表示基于 Ag, Ag/MoS₂

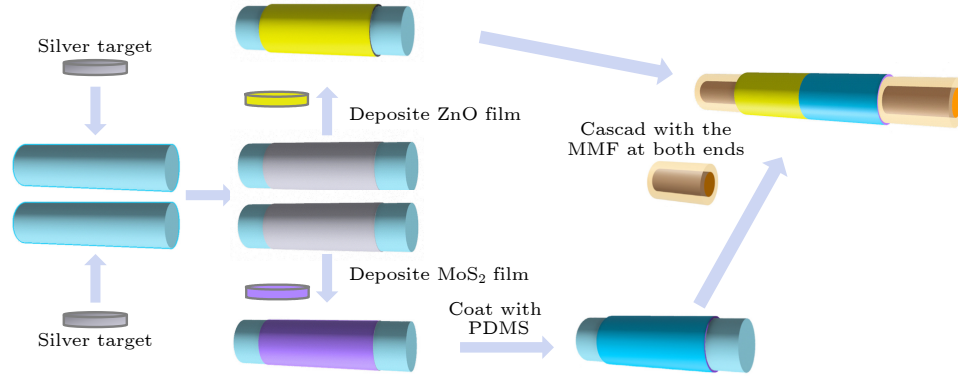


图 2 制作传感器的过程

Fig. 2. The process of fabricating the sensor.

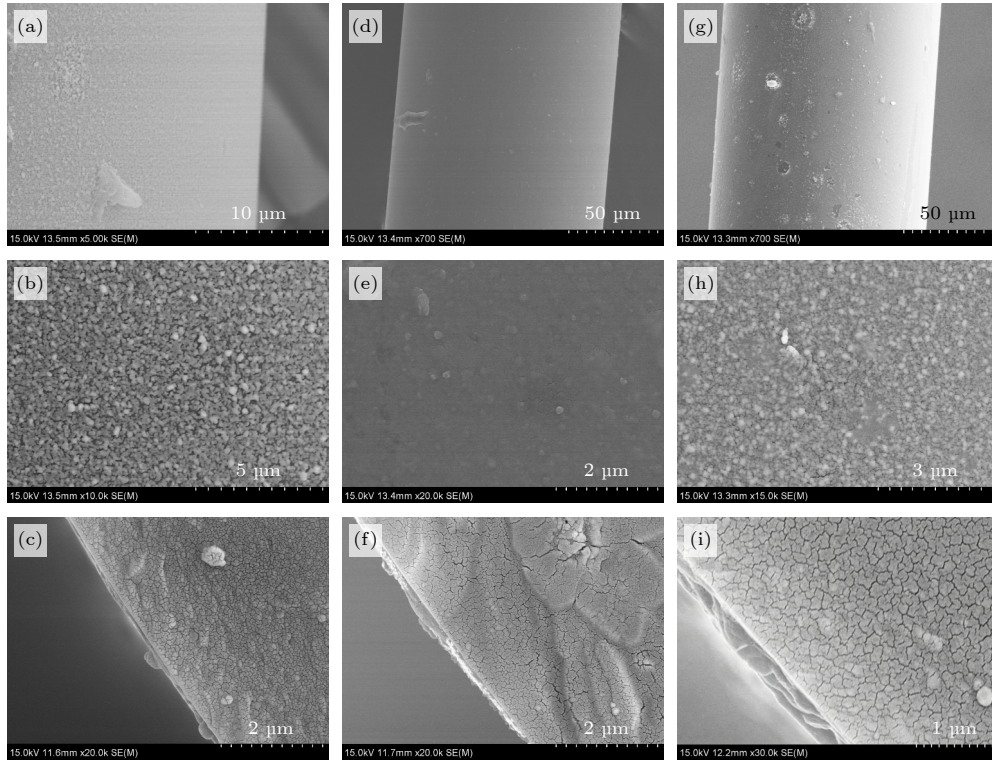


图 3 (a) 基于 Ag 膜的 NCF 放大 5000 倍; (b) 基于 Ag 膜的 NCF 放大 10000 倍; (c) 基于 Ag 膜的 NCF 横截面放大 20000 倍; (d) 基于 Ag/MoS₂ 膜的 NCF 放大 700 倍; (e) 基于 Ag/MoS₂ 膜的 NCF 放大 20000 倍; (f) 基于 Ag/MoS₂ 膜的 NCF 横截面放大 20000 倍; (g) 基于 Ag/ZnO 膜的 NCF 放大 700 倍; (h) 基于 Ag/ZnO 膜的 NCF 放大 15000 倍; (i) 基于 Ag/ZnO 膜的 NCF 横截面放大 30000 倍

Fig. 3. (a) NCF with Ag film at 5000 $\times$ magnification; (b) NCF with Ag film at 10000 $\times$ magnification; (c) cross-section of NCF with Ag film at 20000 $\times$ magnification; (d) NCF with Ag/MoS₂ film at 700 $\times$ magnification; (e) NCF with Ag/MoS₂ film at 20000 $\times$ magnification; (f) cross-section of NCF with Ag/MoS₂ film at 20000 $\times$ magnification; (g) NCF with Ag/ZnO film at 700 $\times$ magnification; (h) NCF with Ag/ZnO film at 15000 $\times$ magnification; (i) cross-section of NCF with Ag/ZnO film at 30000 $\times$ magnification.

和 Ag/ZnO 的 NCF 放大之后的横截面, 测得 Ag 膜、MoS₂ 厚度、ZnO 厚度大概为 60, 90 和 240 nm, 其中 MoS₂ 厚度和 ZnO 厚度是由复合膜厚度减去银膜厚度计算得出.

在镀有 Ag/MoS₂ 膜的 NCF 上涂覆并固化 PDMS 膜. 将固化剂和基聚合物按 1:10 的比例混合, 充分搅拌后静置 15 min, 使气泡完全消失, 即可得到 PDMS 溶液. 把镀有 Ag/MoS₂ 膜的 NCF 放在温度控制台的细窄凹槽上, 在上面滴入 PDMS 溶液, 升高温度使光纤表面的 PDMS 溶液固化. 微量 PDMS 热导率高、热容量小, 其温度响应源于 PDMS 本征热光效应, 厚度在一定范围内变化不影响折射率随温度的变化规律, 故对温度灵敏度无明显影响. 用专用切割刀将镀膜完毕的 NCF 两端界面切平整, 再用熔接机把处理好的 NCF 与提前切割好的 MMF 进行熔接, 完成传感器制备, 整体流程如图 2 所示.

为了在计算机上呈现传感器的性能效果, 进行了光路连接. 如图 4(a) 所示, 光路连接顺序从左至右依次为: 光源、MMF、传感器、MMF、光谱仪、计算机. 光从光源入射至 MMF, 把光信号传输到传感器, 在传感器处发生 SPR 效应. 传感器实物图如图 4(b) 所示, 折射率探针和温度探针长度都为 2 cm, 两端用 MMF 连接.

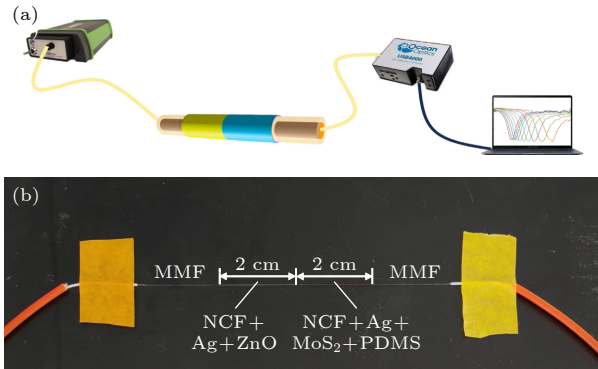


图 4 (a) 光路连接图; (b) 传感器实物图
Fig. 4. (a) The optical path connection diagram; (b) physical picture of the sensor.

2.2 传感器 SPR 错峰共振的工作原理

本文提出的传感器基于 SPR 原理工作. 在光纤表面沉积银膜后, 光在光纤中传输时, 入射角 θ 满足 (1) 式的条件^[21], 激发产生的消逝波可穿透金属薄膜到达金属与待测分析物的界面, 激发

金属表面自由电子形成表面等离子体波 (surface plasmon wave, SPW)^[22,23]. 当消逝波与 SPW 的波矢满足匹配条件时, 会发生 SPR 现象, 此时透射光谱中会出现明显的共振谷. 由于共振条件与分析物的折射率密切相关, 当分析物折射率发生变化时, 会导致 SPW 的有效折射率改变. 通过监测其共振波长的偏移量, 从而计算出对应检测参数的灵敏度. 折射率和温度的灵敏度计算公式^[24,25] 如 (2) 式和 (3) 式所示:

$$n_s = n_f \sin \theta \sqrt{\epsilon_m / (\epsilon_m - n_f^2 \sin^2 \theta)}, \quad (1)$$

$$S(\lambda, n) = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} (\text{nm/RIU}), \quad (2)$$

$$S(\lambda, T) = \frac{\Delta \lambda}{\Delta T} (\text{nm/}^\circ\text{C}), \quad (3)$$

其中 n_s 是分析物的折射率; n_f 是 NCF 的折射率; ϵ_m 是金属介电常数; $\Delta \lambda$ 是共振波长偏移量; Δn 是折射率变化量; ΔT 是温度变化量.

ZnO 是宽禁带半导体, 能让可见光和近红外光绝大部分透过, 不会引入额外的光学损耗, 保证 SPW 在 Ag/ZnO 界面高效传播. 折射率检测的核心痛点是温度波动会干扰共振峰偏移, 而 ZnO 的热光系数极低, 温度变化时自身光学参数几乎不变, 能有效避免温度对折射率检测的干扰, 实现折射率的特异性响应. 同时, ZnO 具有较高有效折射率, 有利于增强倏逝波^[26,27] 的穿透效果, 从而增强 SPR 耦合.

要想同时检测这两个参量且保证两通道之间不发生干扰, 意味着要将温度通道的 SPR 谷尽量向近红外波段调制, 拉开两通道 SPR 谷之间的距离. 图 5 给出了 MoS₂, TiO₂ 和 ZnO 的有效折射率, MoS₂ 的有效折射率^[28] 比 TiO₂ 和 ZnO 的有效折射率^[29,30] 高很多, 具有高有效折射率的 MoS₂ 与金属纳米结构复合时, 金属的局域增强电场与 MoS₂ 耦合, 大幅提升近红外光吸收与共振强度, 拓展响应波长至近红外长波. MoS₂ 膜不仅对 SPR 峰的调制效果更为显著, 同时, 其热稳定性极强, 在常规温度检测范围内, 自身的光学、结构参数无明显变化, 不会对 PDMS 的热响应产生干扰, 确保共振峰偏移完全由温度变化引起. 我们使用了折射率比 TiO₂ 更低的 ZnO 为折射率探针镀膜也是为了使 SPR 峰位于波长较短的可见光波段, 形成与温度检测探针的错峰共振, 实现双参量独立检测.

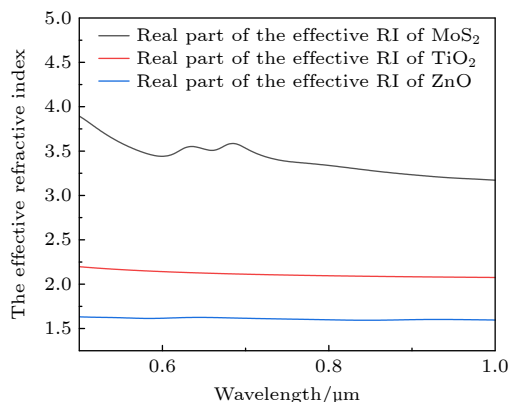
图 5 MoS₂, TiO₂ 和 ZnO 的有效折射率

Fig. 5. The effective refractive index of MoS₂, TiO₂ and ZnO.

所以, 为在后续实验中通过级联两个感应通道实现双参数同步测量, 并尽可能扩大测量范围, 最终选择 Ag/ZnO 镀膜组合用于折射率测量, Ag/MoS₂/PDMS 镀膜组合用于温度测量. PDMS 的折射率与温度之间的关系为^[31]

$$n_{\text{PDMS}} = -4.5 \times 10^{-4} \cdot T + 1.4176. \quad (4)$$

当环境温度升高时, PDMS 折射率降低, 根据 SPR 传感原理, 共振波长满足波矢匹配条件, 与待测介质折射率呈正相关关系, 为满足 SPR 波矢匹配, 激发等离子体共振所需的人射光波长随之减小, 表现为共振波长向短波方向移动. 因此, 通过监测 SPR 共振波长的位移, 可实现对温度变化的传感检测.

3 结果与讨论

3.1 Ag 膜沉积时间和探针长度的选择

Ag 膜厚度影响 SPR 传感器性能. 如图 6(a) 的实验结果表明, 镀膜时间在 50—65 s 内, 随沉积时间延长, 共振波谷红移, 源于 Ag 膜增厚使 SPW 的损耗降低、有效波长增大, 需更长入射波长满足相位匹配. 计算得 $t = 50, 55, 60, 65$ s 时 FWHM 分别为 73.3, 50.1, 67.3 和 57.9 nm, $t = 55$ s 时 FWHM 最小, 检测精度最高. 进一步考察探针长度 L 影响, 如图 6(b) 所示: 固定 $n = 1.333$ 时, $L = 1, 2, 3$ cm 对应 FWHM 为 50.5, 54.8, 63.4 nm, 共振波长不变但深度变化: $L = 1$ cm 时 FWHM 最小但耦合弱; $L = 3$ cm 时谷最深但 FWHM 最大, 所以 $L = 2$ cm 综合表现最优. 改变折射率 $n = 1.373$ 重复实验, 得 FWHM 分别为 60.7, 64.9,

70.3 nm, 结论一致. 综上, 最佳工艺参数为: 镀银时间 55 s, 探针长度 2 cm. 接下来, 探究 ZnO 膜与 MoS₂ 膜的最佳厚度.

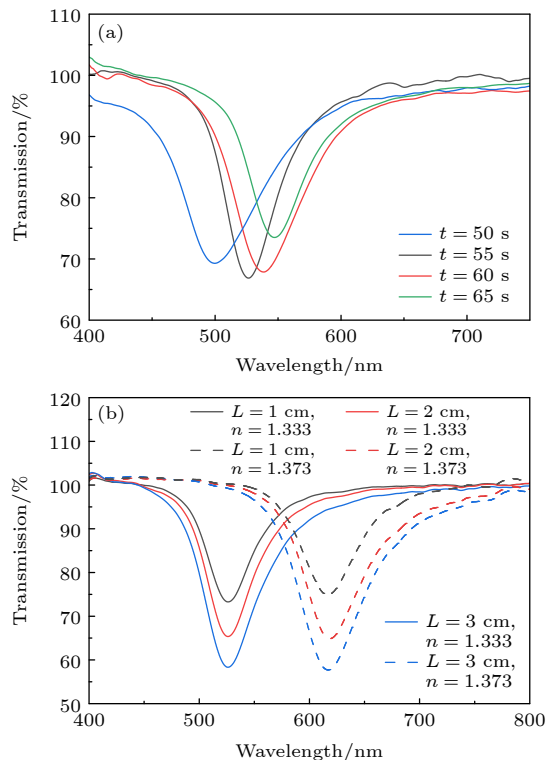


图 6 (a) 不同镀膜时间下, 只沉积银膜的透射谱; (b) 不同探针长度 L 的共振谷效果

Fig. 6. (a) Transmission spectra of the Ag-only film under different deposition times; (b) resonance dip performance at different probe lengths L .

3.2 ZnO 和 MoS₂ 沉积时间的选择

本实验通过镀膜时间调控膜厚. 固定镀银时间 55 s, ZnO 沉积时间分别为 3 min, 3 min 15 s 和 3 min 30 s. 折射率测试结果如图 7 显示, 随沉积时间延长, 共振波长红移. 折射率从 1.333 增至 1.42 时, 三种沉积时间对应的共振波长跨度分别为 314.4, 323.5 和 361.0 nm. 为增大级联双参数同步测量的总范围, 应使 Ag/ZnO 探针在折射率检测时的共振波长尽量处于短波段, 从而为温度测量预留更多波长空间. 因此, 选择 ZnO 最佳沉积时间为 3 min.

探究了 2 min, 2 min 15 s 和 2 min 30 s 溅射时间下 Ag/MoS₂ 传感器的 RI 测试结果, 如图 8 所示. 随着镀膜时间的延长, 共振波长发生红移, 当溶液折射率 $n = 1.333$ 时, 三种不同溅射时间下共振波长从 604.0 nm 红移到 705.6 nm. 实验结果

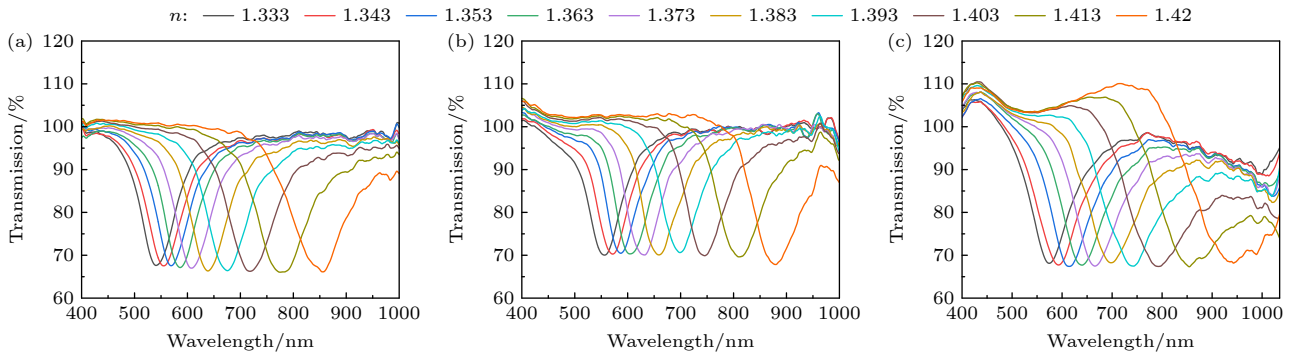


图 7 基于 Ag/ZnO 传感器的测试结果 (a) 3 min; (b) 3 min 15 s; (c) 3 min 30 s

Fig. 7. Test results based on Ag/ZnO sensor: (a) 3 min; (b) 3 min 15 s; (c) 3 min 30 s.

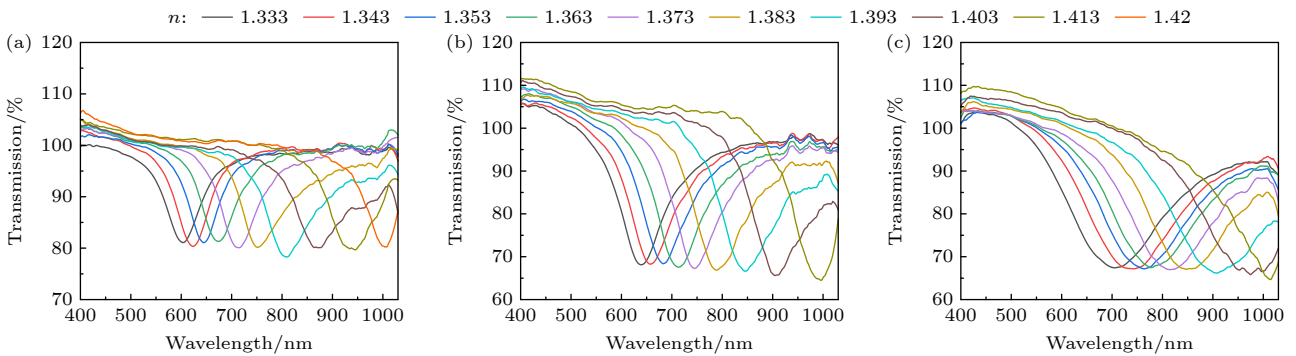
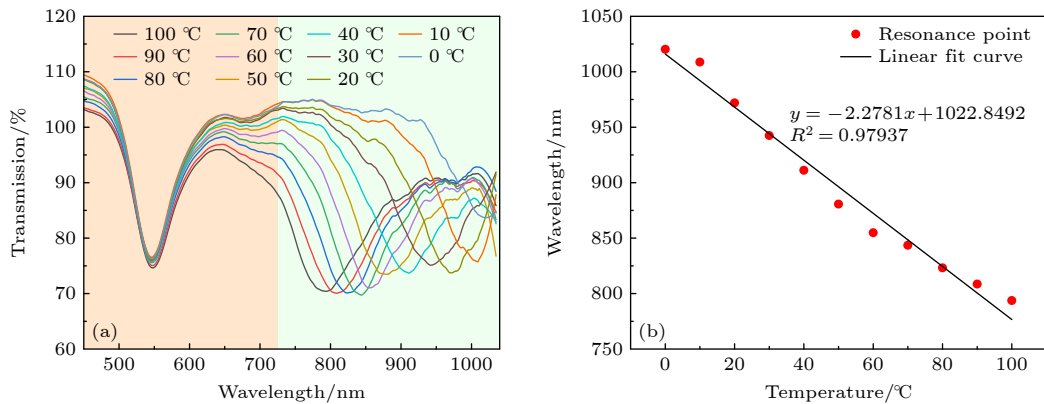
图 8 基于 Ag/ MoS₂ 传感器的测试结果 (a) 2 min; (b) 2 min 15 s; (c) 2 min 30 sFig. 8. Measured results of the Ag/MoS₂-based sensor: (a) 2 min; (b) 2 min 15 s; (c) 2 min 30 s.

图 9 (a) 液体折射率不变, 温度变化的透射光谱; (b) 温度与共振波长的拟合曲线

Fig. 9. (a) Transmission spectra under varying temperatures with constant external refractive index; (b) fitting curve of temperature versus resonance wavelength.

表明, MoS₂ 膜对共振波长的调制幅度远大于 ZnO 膜. 由于实验中用的海洋光谱仪最大测量波长仅为 1100 nm, 超过该波长范围的信号无法观测. 从共振谷深度和 FWHM 来看, 选择 MoS₂ 膜的最佳沉积时间为 2 min 15 s.

3.3 级联后的实验结果和重复性测试

确定各类薄膜的最佳镀膜时间和探针长度后,

按照图 4 的原理对两个传感探针进行级联并连接光路, 结果如图 9 所示, 首先控制折射率不变, 将温度从 100 °C 依次降至 0 °C, 可以明显地观察到折射率检测区和温度检测区, 两通道不会发生干扰. 随着温度升高, 共振波长蓝移, 温度通道的平均灵敏度为 -2.2781 nm/°C, 线性拟合得到 $R^2=0.97937$, 拟合效果良好.

把无水葡萄糖溶解在去离子水里, 用搅拌机快

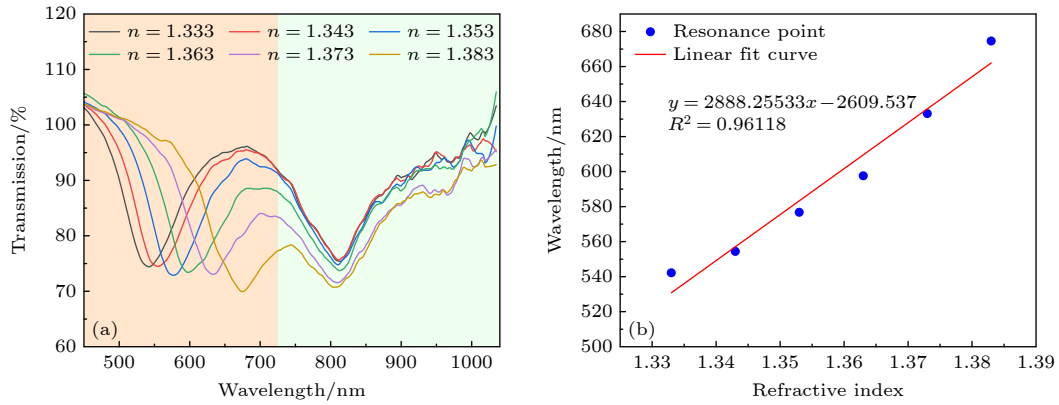


图 10 (a) 温度不变, 外部溶液折射率变化的透射光谱; (b) 折射率与共振波长的拟合曲线

Fig. 10. (a) Transmission spectra under varying external solution refractive index with constant temperature; (b) fitting curve of refractive index versus resonance wavelength.

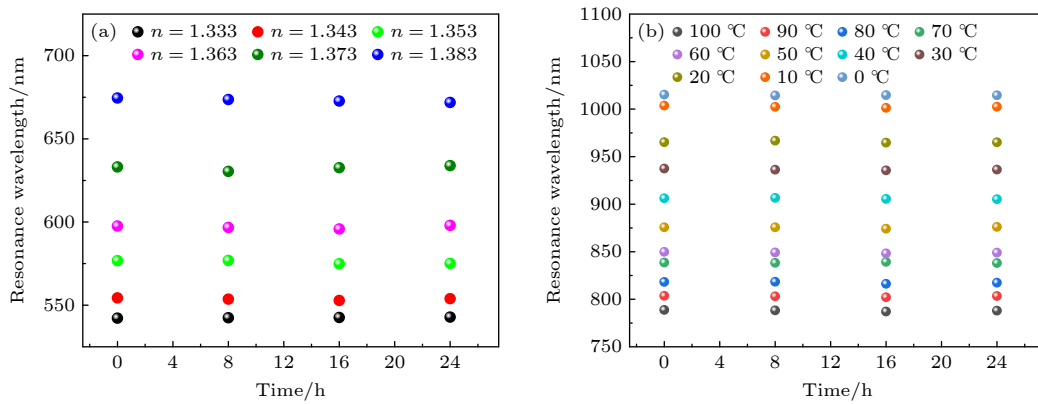


图 11 重复性检测结果

Fig. 11. Repeatability test results.

表 1 不同传感器的性能

Table 1. The performance of different sensors.

Structures	RI	$S_{RI}/(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	$T/^{\circ}\text{C}$	$S_T/(\text{nm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1})$
wedge-shaped fiber ^[32]	1.33—1.38	2607.8	30—45	−4.013
Double-side-polished MMF ^[33]	1.330—1.365	2418	25—75	−2.144
S-shaped optical fiber ^[34]	1.333—1.380	1068.59	30—150	−0.713
D-shaped no core fiber ^[35]	1.34—1.39	265.502	25—80	−0.0861
This work	1.333—1.383	2888.255	0—100	−2.2781

速搅拌溶解, 调配出不同折射率的葡萄糖溶液. 固定温度, 改变外部液体折射率. 用滴管依次将不同折射率的葡萄糖溶液滴加至传感器表面, 计算机实时显示透射光谱. 待信号稳定后保存图像, 立即用去离子水清洗并吹干, 再滴加下一浓度溶液. 结果如图 10 所示: 折射率在 $n = 1.333$ — 1.383 范围内递增, 共振波长随之红移. 折射率平均灵敏度为 2888.255 nm/RIU , 线性拟合 $R^2 = 0.96118$, 拟合效果良好.

最后, 进行传感器稳定性的检测, 每隔 8 h 重

新测试一次, 共检测 4 次, 效果如图 11 所示. 4 次测量最大的共振波长误差为 3.483 nm , 标准差为 1.491 nm , 误差较小, 处于可接受范围内. 这一结果表明, 在 Ag 膜表面沉积 ZnO 膜和 MoS_2 膜确实起到了防止 Ag 膜被氧化的作用, 保护层的加入有效延长了传感器的使用寿命.

将本文提出的传感器与其他传感器进行性能对比, 如表 1 所列. 本文提出的传感器具有较宽的可测量参数范围, 在折射率与温度感应灵敏度方面均表现出更优的性能. 这是因为本文采用 ZnO 膜

与 MoS₂ 膜对共振波长进行调制, 不仅使传感器两个测量参数对应的 SPR 峰实现错峰共振, 而且具有更宽的测量范围和更高的灵敏度.

4 结 论

本文提出一种基于 Ag/ZnO 和 Ag/MoS₂/PDMS 复合膜的 SPR 传感器, 用于折射率与温度的同步测量, 该传感器具有以下三个优点: 1) 复合膜的加入可有效防止 Ag 膜氧化, 延长传感器的使用寿命, 保证了传感器的稳定性; 2) ZnO 膜与 MoS₂ 膜的加入成功实现共振波长的调控, 并在一定程度上拓宽了共振波长范围, 为双参数的 SPR 共振谷预留了充足的波长空间, 成功避免了两通道串扰; 3) 在 1.333—1.383 的折射率范围内, Ag/ZnO 复合膜将折射率平均灵敏度提升至 2888.255 nm/RIU, 在 0—100 °C 的温度范围内, 传感器的平均温度灵敏度为 -2.2781 nm/°C. 本文提出的传感器使用寿命长、无通道串扰问题、灵敏度高, 稳定性良好, 为多参数测量传感器的设计与研发提供了参考与方向. 在实际生活中, 该传感器可应用于水环境监测, 同步检测水体折射率与温度, 快速反馈水体污染物浓度及水温变化, 助力水资源环境的实时管控与治理; 也可应用于生化实验场景中, 实时追踪反应过程中溶液折射率与温度的动态变化, 为研究和条件优化提供可靠的监测方法.

参考文献

- [1] Jing J Y, Liu K, Jiang J F, Xu T H, Wang S, Ma J Y, Zhang Z, Zhang W L, Liu T G 2022 *Photonics Res.* **10** 126
- [2] Shanmugam K, Senthil R, Das T K 2025 *Results Phys.* **76** 108409
- [3] Drozd M, Kobylska E, Żmieńko M, Chudy M 2024 *Talanta* **274** 125914
- [4] Swami S, Kayenat F, Wajid S 2024 *Microchem. J.* **197** 109792
- [5] Li C, Wang Y, Hou J Q, Wang H M, Luo J T, Fu C, Ren F J, Zhang J K, Ong H L, Lu C Z, Xiao H, Chen X, Tao R, Chen Y Z, Fu Y Q, Wu Q, Li X J 2025 *J. Environ. Chem. Eng.* **13** 119827
- [6] Du Y H, Su Y D, Wang W, Zhou J, Zou Q S, Dai S X, Zhang P Q 2025 *Opt. Commun.* **597** 132591
- [7] Li D F, Chen L, Huo T L, Gao T C, Wang M L, Li S G 2026 *Infrared Phys. Technol.* **152** 106249
- [8] Yang Z T, Wei L Z, Xu Z H, Zhao F L, Han S J, Jia S L 2025 *Opt. Fiber Technol.* **95** 104385
- [9] Yin Z Y, Jing X L, Li K F, Zhang Z B 2024 *Opt. Laser Technol.* **174** 110579
- [10] Li C, Ning T G, Zhang C, Li J, Wen X D, Pei L, Gao X K, Lin H 2016 *Sensors Actuators, A* **245** 49
- [11] Gibson B C, Dower P M 2007 *Opt. Commun.* **279** 303
- [12] Fu J Q, Pu S L, Hao Z J, Zhang C C, Liu W N, Duan S M, Han S F 2024 *Opt. Laser Technol.* **174** 110550
- [13] Gautam P, Sorensen Christopher M 2020 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **242** 106757
- [14] Praveena S, Melwin G, Babu P R, Senthilnathan K 2025 *Curr. Appl. Phys.* **77** 46
- [15] Ahmad H, Lim H S, MatJafri M Z, Ge Y Q, Zhang H, Tiu Z C 2019 *Infrared Phys. Technol.* **102** 103002
- [16] Guo P X, Du H J, Li J S, Yin Z Y, Li Y X, Li H W, Zhang L, Li S G 2025 *Measurement* **251** 117331
- [17] Zhang Z, Liu Q, Qi Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060703 (in Chinese) [张喆, 柳倩, 祁志美 2013 物理学报 **62** 060703]
- [18] Öztürk A, Bayrakçeken Y A 2017 *Int. J. Hydrogen Energy* **42** 6250
- [19] Han G H, Zhan Y R, Lai Y L, Xu L Y, Guo Y, Zhang J, Yu J Y, Shi J J, 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 095212 (in Chinese) [韩乾翰, 张亚容, 赖玉玲, 徐利云, 郭颖, 张菁, 俞建勇, 石建军 2021 物理学报 **70** 095212]
- [20] Lin S Y, Wang F, Qu Y C, Han X P, Zhang Y D 2024 *Sens. Actuators, A* **376** 115653
- [21] Lin W B, Jaffrezic-Renault N, Gagnaire A, Gagnaire H 2000 *Sens. Actuators, A* **84** 198
- [22] Paliwal A, Sharma A, Tomar M, Gupta V 2015 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **22** 3529
- [23] Aljbar N A, Mahdi B R, Khalid A H, Attallah A H, Abdulwahid F S, Haider A J 2025 *Plasmonics* **20** 605
- [24] Du H L, Li B, Zhu A S, Zhao Y, Wang Q 2025 *J. Lightwave Technol.* **43** 3331
- [25] Teng C X, Shao P, Min R, Deng H C, Chen M, Deng S J, Hu X H, Marques C, Yuan L B 2023 *Opt. Lett.* **48** 235
- [26] Anderson G P, Golden J P, Cao L K, Wijesuriya D, Shriver-Lake L C, Ligler F S 1994 *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.* **13** 358
- [27] Twomey C F, Biagi G, Ruth A A, Ali F, Di F A, O'Faolain L, Walsh A J 2025 *Photoacoustics* **46** 100782
- [28] Islam K M, Synowicki R, Ismael T, Oguntoye I, Grinalds N, Escarra M D 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000180
- [29] Sarkar S, Gupta V, Kumar M, Schubert J, Probst P T, Joseph J, König T A F 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 13752
- [30] Stelling C, Singh C R, Karg M, König T A F, Thelakkat M, Retsch M 2017 *Sci. Rep.* **7** 42530
- [31] Malitson I H 1965 *J. Opt. Soc. Am.* **55** 1205
- [32] Dong D, Pu S L, Lv X L, Zhou P, Zhang H, Liu W N, Zhang C C, Huang S Y, Xu T F, Wu M J 2025 *Opt. Fiber Technol.* **95** 104432
- [33] Zhou Pan, Pu S L, Lv X L, Dong D, Zhang H, Liu W N, Zhang C C, Wu M J 2026 *IEEE Sens. J.* **26** 3872
- [34] Su Y D, Du Y H, Wang W, Xu L L, Dai S X, Zhang P Q 2024 *Opt. Laser Technol.* **179** 111385
- [35] Liu Y X, Zhang W H, Tong Z R, Wang X, Liu D Y, Wang M H, Yu H Z 2024 *Opt. Mater.* **148** 114933

Research on dual-parameter fiber optic sensor based on silver surface plasmon resonance off-peak resonance regulated by metal oxides and sulfides*

ZHENG Lijing¹⁾ GUO Pengxiao²⁾ YI Ran¹⁾ LI Jianshe¹⁾ LI Shuguang^{1)†}

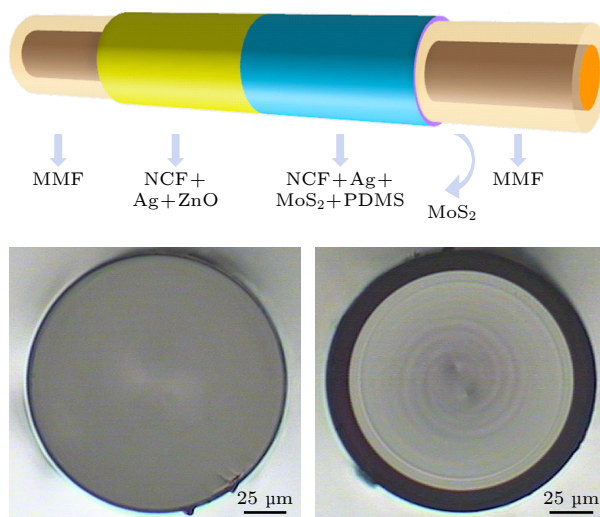
1) (State Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, Key Laboratory for Microstructural Material Physics of Hebei Province, School of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 1 April 2026; revised manuscript received 6 May 2026)

Abstract

This paper proposes a cascaded dual-parameter silver-based no-core fiber (NCF) surface plasmon resonance (SPR) sensor for simultaneous and independent detection of liquid refractive index (RI) and temperature. The sensor uses two segments of NCF as the sensing substrate and constructs two independent sensing channels in series, forming an integrated dual-parameter detection structure. Specifically, an Ag/ZnO composite film is deposited on one NCF segment for RI detection, while an Ag/MoS₂/PDMS composite film is deposited on the other for temperature detection. The working principle is based on the SPR effect excited by the Ag film on the NCF surface. In the Ag/ZnO composite film, the ZnO thin film not only regulates the shape of the SPR resonance peak, significantly improves the sensor's response sensitivity to RI changes but also acts as a protective barrier to effectively inhibit the oxidation of the Ag film. In the Ag/MoS₂/PDMS composite film, MoS₂ and PDMS synergistically regulate the position of the SPR resonance peak, red-shift the temperature-sensitive band to the near-infrared region, and provide good anti-oxidation protection for the Ag film, thereby extending the sensor's service life. In addition, the sensor ensures the independent operation of the two detection channels through a staggered SPR resonance design, avoiding channel crosstalk. With the RI range of 1.333—1.383, the average RI sensitivity of the sensor reaches 2888.255 nm/RIU; in the temperature range of 0—100 °C, the average temperature sensitivity is -2.2781 nm/°C. In summary, the sensor offers significant advantages such as long service life, no channel crosstalk, high sensitivity, and stable performance, offering a new concept and technical basis for multi-parameter, high-performance SPR sensors.



Keywords: surface plasmon resonance, dual-parameter sensor, ZnO film, MoS₂ film

DOI: 10.7498/aps.75.20260458

CSTR: 32037.14.aps.75.20260458

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12074331).

† Corresponding author. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

基于氧化锌和二硫化钼调控的银基表面等离子体共振错峰共振级联型双参量光纤传感器

郑丽靖 郭鹏霄 伊然 李建设 李曙光

Research on dual-parameter fiber optic sensor based on silver surface plasmon resonance off-peak resonance regulated by metal oxides and sulfides

ZHENG Lijing GUO Pengxiao YI Ran LI Jianshe LI Shuguang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 170402 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260458

CSTR: 32037.14.aps.75.20260458

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260458>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于紫磷增敏的即插即用式双通道光纤表面等离子体共振折射率计

Violet phosphorus-enhanced plug-and-play double-lane fiber optic surface plasmon resonance refractometer

物理学报. 2023, 72(21): 214206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231110>

基于石墨烯的Au纳米颗粒增强染料随机激光

Dye random laser enhanced by graphene-based Au nanoparticles

物理学报. 2022, 71(3): 034206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211613>

InSb光栅耦合的太赫兹表面等离子体共振生化传感方法的实验研究

Experimental study of InSb grating-coupled terahertz surface plasmon resonance biochemical sensing method

物理学报. 2026, 75(13): 034206 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260191>

金属纳米颗粒双圆环阵列的表面格点共振效应

Surface lattice resonance effect of double-ring array of metallic nano-particles

物理学报. 2023, 72(10): 104201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230199>

单层MoS₂薄膜的NaCl双辅助生长方法

Growth of monolayer MoS₂ films dual-assisted by NaCl

物理学报. 2022, 71(12): 128104 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220273>

基于Fano共振的金属-绝缘体-金属-石墨烯纳米管混合结构动态可调折射率传感器

Dynamically tunable refractive index sensor based on Fano resonance with metal-insulator-metal-graphene nanotube hybrid structure

物理学报. 2022, 71(17): 178101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220652>