

非对称银膜多孔硅-氟化钙等离子体波导及其波导灵敏度特性

王芳 陈亚珂 李传强 马涛 卢颖慧 刘恒 金婵

Porous silicon – calcium fluoride plasma waveguide with asymmetric Ag film and its sensitivity characteristics

Wang Fang Chen Ya-Ke Li Chuan-Qiang Ma Tao Lu Ying-Hui Liu Heng Jin Chan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210704

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210704>

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

一种低损耗的对称双楔形太赫兹混合表面等离子体波导

A symmetrical wedge-to-wedge THz hybrid SPPs waveguide with low propagation loss

物理学报. 2020, 69(7): 074205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191666>

基于表面等离子体诱导透明的半封闭T形波导侧耦合圆盘腔的波导滤波器

Semi-closed T-shaped-disk waveguide filter based on surface-plasmon-induced transparency

物理学报. 2019, 68(23): 237301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191068>

银纳米线表面等离激元波导的能量损耗

Energy loss of surface plasmon polaritons on Ag nanowire waveguide

物理学报. 2018, 67(24): 247302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20182085>

含双挡板金属-电介质-金属波导耦合方形腔的独立调谐双重Fano共振特性

Resonance characteristics of independently tuned dual Fano of metal-dielectric-metal waveguide coupling square cavity with double baffles

物理学报. 2019, 68(10): 107302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181985>

铜锡氧化物薄膜表面等离子体损耗降低的研究

Reduction of surface plasma loss of indium tin oxide thin films by regulating substrate temperature

物理学报. 2018, 67(18): 180201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180794>

S-Ka频段电磁波在等离子体中传输特性的实验研究

Experimental study of electromagnetic wave transmission characteristics in S-Ka band in plasma

物理学报. 2018, 67(2): 025201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20170845>

非对称银膜多孔硅-氟化钙等离子体波导及其波导灵敏度特性*

王芳¹⁾²⁾ 陈亚珂¹⁾ 李传强¹⁾ 马涛^{1)3)†} 卢颖慧¹⁾ 刘恒¹⁾⁴⁾ 金婵²⁾

1) (河南师范大学电子与电气工程学院, 新乡 453007)

2) (中国科学院界面物理技术重点实验室, 上海 201800)

3) (河南师范大学, 河南省光电传感集成应用重点实验室, 新乡 453007)

4) (河南师范大学, 河南省电磁波工程院士工作站, 新乡 453007)

(2021年4月14日收到; 2021年5月19日收到修改稿)

本文研究了一种非对称银膜多孔硅-氟化钙混合等离子体波导, 并对其模式特性和波导灵敏度进行了分析. 利用有限元方法分析了波导中两个不同偏振态基模 (PM 1 和 PM 2) 的有效折射率、传输损耗、归一化有效模场面积、品质因数和波导灵敏度, 并对几何参数进行优化. 结果表明, 在中红外波长 $3.5 \mu\text{m}$ 附近, 非对称银膜多孔硅-氟化钙混合等离子体波导具有良好的模场约束能力和低损耗特性; 此时, PM 1 和 PM 2 的归一化有效模场面积分别为 0.30 和 0.52, 传输损耗分别为 $0.019 \text{ dB}/\mu\text{m}$ 和 $0.016 \text{ dB}/\mu\text{m}$, 品质因数分别为 1335.54 和 1594.99, 波导灵敏度分别为 0.080 和 0.064. 通过制造容差分析可知, 非对称银膜多孔硅-氟化钙混合等离子体波导在 $\pm 10 \text{ nm}$ 的制造容差范围内保持了良好的模式特性和传感特性. 非对称银膜多孔硅-氟化钙混合等离子体波导结构简单, 损耗小, 易于实现表面等离子体传感, 为无标记生物化学传感提供了一种可行的方案, 另外, 波导的非对称结构也可用于模式偏振态变换.

关键词: 混合等离子体波导, 表面等离子体, 传输特性, 波导灵敏度

PACS: 42.82.-m, 42.82.Et, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210704

1 引言

随着微纳米技术的高速发展, 纳米光子学取得了许多重大的突破, 尤其是表面等离子体技术, 已经成为纳米光子学领域中最活跃的研究之一. 表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPP) 中最简单的一种形式是电磁激励, 它沿着金属和介质的交界面以波状方式传播, 其振幅从界面进入金属或介质呈指数衰减^[1-3]. SPP 是由于光子与金属表面自由电子的耦合而在金属与介质界面共振产

生的横磁 (transverse magnetic, TM) 表面模^[4]. SPP 具有许多优点, 例如: 突破衍射极限, 强光场约束力, 局部场能量增强, 尺寸小以及与周围环境相互作用的敏感度高^[5,6]. 因此, 广泛应用于光子和光电器件, 例如: 耦合器^[7]、传感器^[8-10]、调制器^[11,12]、环形谐振器^[12,13]、M-Z 干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[14]、光栅耦合器^[15]、偏振转换器^[16]、光探测器^[17] 以及纳米天线^[18]. 虽然 SPP 在很多方面都有广泛的应用前景, 但实现前景的最大限制是 SPP 传输损耗高. 为了减少 SPP 的传输损耗, 可利用光增益介质、低温冷却、金属薄膜和改

* 国家自然科学基金 (批准号: 62075057)、中国科学院界面物理技术重点实验室 (批准号: CASKL-IPT2003)、河南省高等学校重点科研项目基础研究项目 (批准号: 19B510006) 和河南师范大学博士启动课题 (批准号: gd17167, 5101239170010) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: matao@htu.cn

进等离子体波导等方法来解决^[19]. 与传统的等离子体波导 (surface plasmon polaritons waveguides, SPPW) 相比, 混合表面等离子体 (hybrid plasmonic waveguides, HPW) 在损耗和约束之间提供了更好的平衡^[20], 并且与绝缘体上的硅 (silicon on insulator, SOI) 技术兼容.

目前, 传统的光学传感器体积大, 不易携带, 为使传感器小型化, 研究者提出了许多可微型化的传感结构. 由于 HPWs 与周围环境的强相互作用和局域增强效应, HPWs 为实现新型生物化学传感提供了一种可行的方案.

多孔硅 (porous silicon, PS) 具有良好的光学特性, 例如光致发光效应和反射干涉效应. 由于 PS 有较大的比表面积, 增强了光与物质的相互作用. 另外, PS 的可调孔隙率随制造参数的变化而变化^[21], 使其折射率 (refractive index, RI) 在空气和多孔硅之间可调. 由于 PS 的这些优势, 它被广泛应用于光电子学领域^[22-26]、电力工程^[27] 和传感领域^[28]. 此外, 由于氟化钙穿透性好, 宽带透过率高、环境抗性强和独特光学特性, 致使它在半导体的应用上有着悠久的传统. 并且氟化钙 (CaF₂) 红外透过率高、光谱色散低和更宽的中红外 (mid-infrared, MIR) 光谱透明窗口, 是一种很有前途的 SiO₂ 替代材料.

本文研究了一种非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导 (PS-CaF₂ HPW), 它是在氮化硅波导的顶面和一侧侧壁沉积覆盖氟化钙层和银薄膜层而形成的一种非对称波导结构. 利用有限元方法 (finite element method, FEM) 对波导中的等离子体模式进行了数值计算, 研究了波导中存在的两个

基模在中红外波长 (3.5 μm) 处的有效折射率、品质因数、有效模场面积和传输损耗特性, 并采用参数扫描方法对结构的几何尺寸参数进行了优化. 通过改变波导包层的折射率, 研究了利用等离子体模式进行传感时的波导灵敏度. 随后, 分析了非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的制造容差.

2 波导建模和数值模拟

建立非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的模型, 其三维示意图和二维截面图如图 1(a) 和图 1(b) 所示, PS-CaF₂ 混合等离子体波导由 SiO₂ 衬底上的 PS 条状波导、CaF₂ 层和 Ag 薄膜层组成. PS 条形波导的宽度和高度分别为 W_1 和 H_1 , CaF₂ 和 Ag 层的右侧壁宽度分别为 W_2 和 W_3 , 上覆盖层的厚度分别为 H_2 和 H_3 . PS, CaF₂ 和 SiO₂ 的折射率分别为 2^[29], 1.44 和 1.45. 波导上覆盖层为待测溶液, 其折射率为 n_c . 工作波长为 3.5 μm 时, Ag 的介电常数可近似为 $-86.64+8.74i$ ^[30].

为了衡量非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的模式特性、传输特性和传感性能, 通常用有效折射率 (n_{eff})、品质因数 (FOM)、传输损耗 (α)、归一化模场面积 (A) 以及波导灵敏度 (S_{wg}) 参数来进行分析.

品质因数 (FOM) 可综合衡量波导的模式特性, 计算公式如下:

$$FOM = \frac{\text{Re}(n_{\text{eff}})}{\text{Im}(n_{\text{eff}})}, \quad (1)$$

其中 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 和 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 是模式的有效折射率实部和虚部.

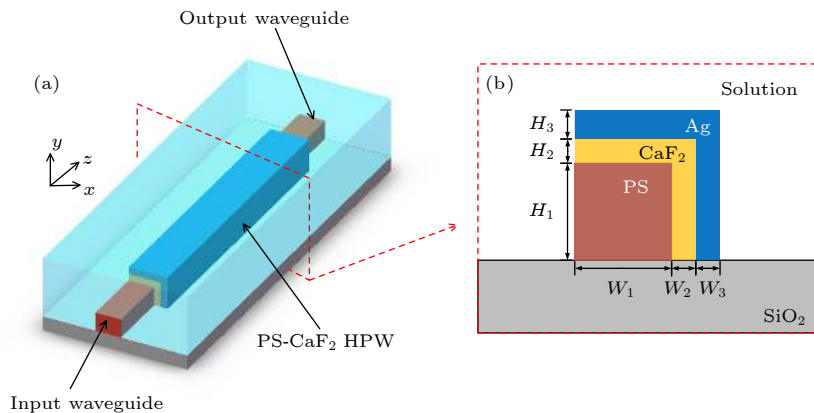


图 1 非对称银膜的 PS-CaF₂ 混合等离子体波导示意图 (a) 三维图; (b) 波导截面图

Fig. 1. Schematic diagram of Ag film coated asymmetric PS-CaF₂ hybrid plasma waveguide: (a) 3D diagram; (b) cross-sectional view.

模式的有效折射率虚部与其传输损耗 (α) 成正比:

$$\alpha = \frac{40\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ (dB}/\mu\text{m}). \quad (2)$$

有效模场面积 A_{eff} 反映了波导对模式的束缚能力, 其定义为

$$A_{\text{eff}} = \frac{W_{\text{eff}}}{\max\{W(x, y)\}} \\ = \frac{1}{\max\{W(x, y)\}} \iint W(x, y) dx dy. \quad (3)$$

通常用归一化模场面积 $A = A_{\text{eff}}/A_0$ 来描述, $A_0 = \lambda^2/4$ 表示自由空间中的衍射限制面积. (3) 式中, W_{eff} 和 $W(x, y)$ 分别是模式的总能量和能量密度.

传感性能通常用灵敏度 (sensitivity, S) 表示, 它描述了待测物质的变化与某种物理量的变化的对应关系. 灵敏度一般分为两部分: 器件灵敏度 (device sensitivity, S_{dev}) 和波导灵敏度 (waveguide sensitivity, S_{wg}). 器件灵敏度取决于器件的性能, 而波导灵敏度取决于波导结构, 因此, 本文对非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的波导灵敏度进行了分析, 其定义为 [31]

$$S_{\text{wg}} = \Delta n_{\text{eff}}/\Delta n_c, \quad (4)$$

其中 Δn_c 和 Δn_{eff} 分别是周围折射率 (n_c) 的变化量和引起的有效模式折射率的变化量.

本文采用 FEM 对非对称银膜 PS-CaF₂ 混合

等离子体波导在中红外波段的模式特性、传输特性和波导灵敏度进行了研究. 根据光场的模式分析原理, 将非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的待计算区域剖分为非均匀三角形网格, CaF₂ 和 Ag 层的最小网格值为 5 nm, 其他计算区域为 0.3 μm , 在边界上使用散射边界条件来模拟吸收边界, 并通过收敛性测试确保计算的准确性.

3 模式特性分析及参数优化

为了分析波导的中红外特性, 选取工作波长 $\lambda = 3.5 \mu\text{m}$, 并对尺寸参数 $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 进行参数化扫描. 利用 FEM 中的模式分析方法计算了非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导中存在的模式, 结果表明, 波导中存在两个不同偏振态的基模 (PM 1 和 PM 2). 当波导的尺寸参数选取 $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$ 、 $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ 和 $W_3 (= H_3) = 70 \text{ nm}$ 时, PM 1 和 PM 2 的模式分布如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 图 2 中红色箭头表示 PM 1 和 PM 2 的电场分量的方向, 因此, PM 1 和 PM 2 具有不同的偏振方向. 波导中心沿 x 方向的电场模如图 2(c) 和图 2(d) 所示, PM 1 和 PM 2 中的电场主要集中在 PS 和 CaF₂ 层.

为了分析非对称银膜对模式偏振方向的影响, 仿真了无 Ag 膜的普通波导, 其两个基模如图 2(g) 和图 2(f) 所示, 图中红色箭头表示电场方向. 对比

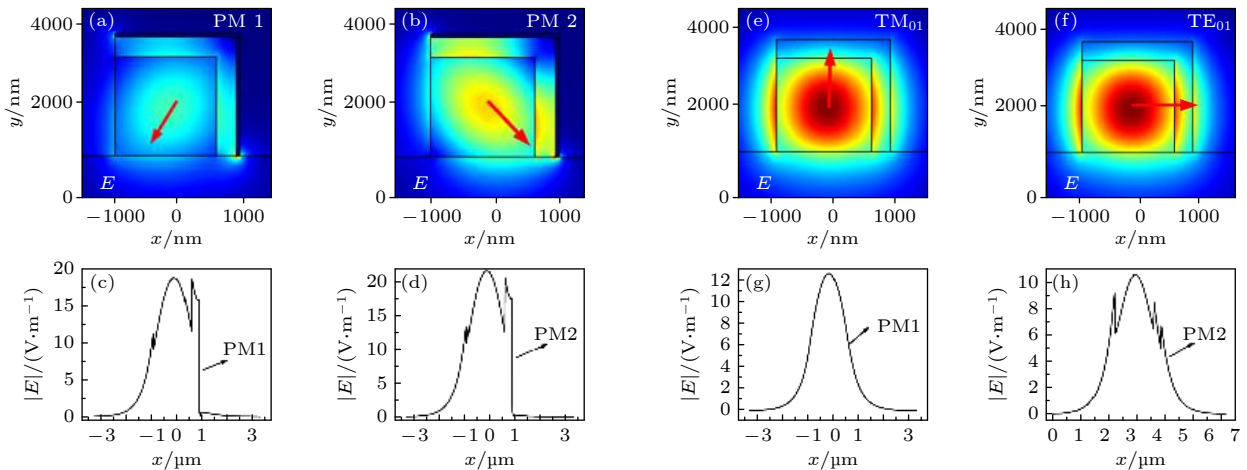


图 2 $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$, $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ 和 $W_3 (= H_3) = 70$ 时, 非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导中不同模式的模场分布图 (a) PM 1; (b) PM 2; 波导中心沿 x 方向的电场分布图 (c) PM 1; (d) PM 2; $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$ 和 $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ 时, 无银膜普通波导的模场分布图 (e) TM₀₁; (f) TE₀₁; 波导中心沿 x 方向的电场分布图 (g) TM₀₁, (h) TE₀₁

Fig. 2. Mode field distributions of (a) PM 1 and (b) PM 2; electric field distribution along the x axis of (c) PM 1 and (d) PM 2; mode field distributions of (e) TM₀₁ and (f) TE₀₁; electric field distribution along the x axis of (g) TM₀₁ and (h) TE₀₁ when $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$, $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ and $W_3 (= H_3) = 70$.

图 2(a)、图 2(b) 和图 2(e)、图 2(f) 可以看出, 相比无 Ag 膜的波导, PM 1 和 PM 2 的电场方向偏转了 45° 角. 对比图 2(c)、图 2(d) 和图 2(g)、图 2(h) 可知, 增加 Ag 膜的等离子体波导的 PS 芯层的模式能量比普通波导高.

图 3(a)—(c) 是 PM 1 和 PM 2 的 Re 和 α 随 W_1 , W_2 和 W_3 的变化曲线图 4(a)—(c) 是 PM 1 和 PM 2 的 FOM 和 A 随 W_1 , W_2 和 W_3 的变化曲线. 从图 4(a) 可以看出, 当 $W_2 = 300$ nm, $W_3 =$

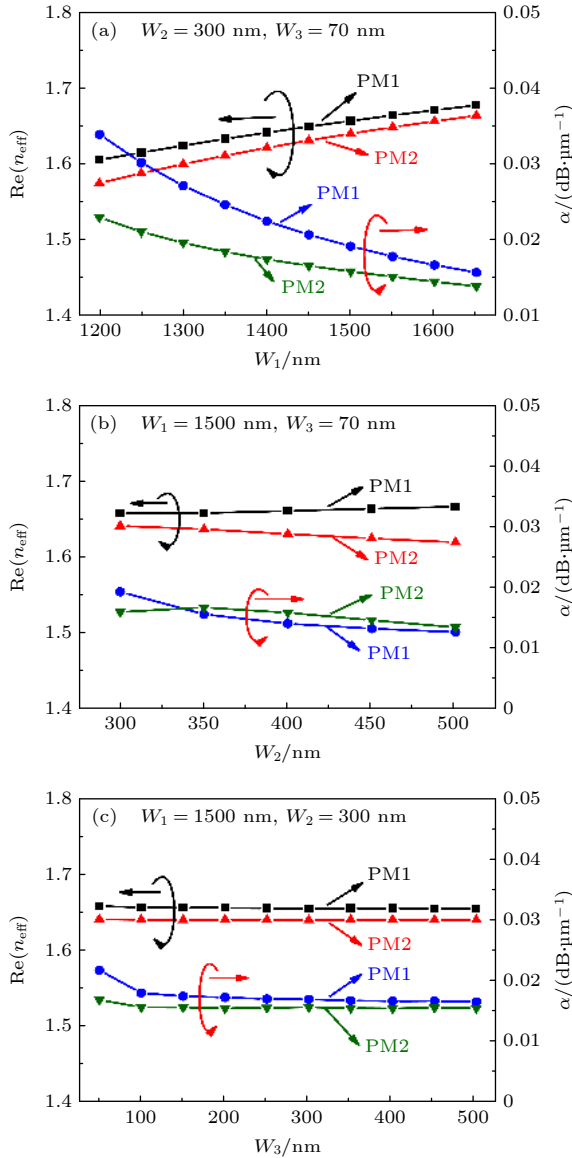


图 3 PM 1 和 PM 2 的 $Re(n_{eff})$ 和 α 随 (a) $W_1 (= H_1)$, (b) $W_2 (= H_2)$ 和 (c) $W_3 (= H_3)$ 变化的规律, $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 3. $Re(n_{eff})$ and α of the PM 1 and PM 2 with different: (a) $W_1 (= H_1)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (b) $W_2 (= H_2)$ at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (c) $W_3 (= H_3)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_1 (= H_1) = 1500$ nm.

70 nm 时, 随着 W_1 增大, FOM 和 A 都增加. 这是因为 W_1 增大, 更多的模场能量被限制在了 PS 层, 减小了模式的有效模场面积和损耗 (折射率虚部), 从而使 FOM 和 A 增大. 如图 4(b) 所示, 当 $W_1 = 1500$ nm, $W_3 = 70$ nm 时, 在 $W_2 = 350$ nm 之前, PM 2 的 A 逐渐减小而 PM 1 的 A 则是逐渐增大, 而在 $W_2 = 350$ nm 之后 PM 1 和 PM 2 的 A 几乎都保持不变. PM 1 的 FOM 在整个过程中是一直增大, 而在 $W_2 = 350$ nm 之前, PM 2 的 FOM

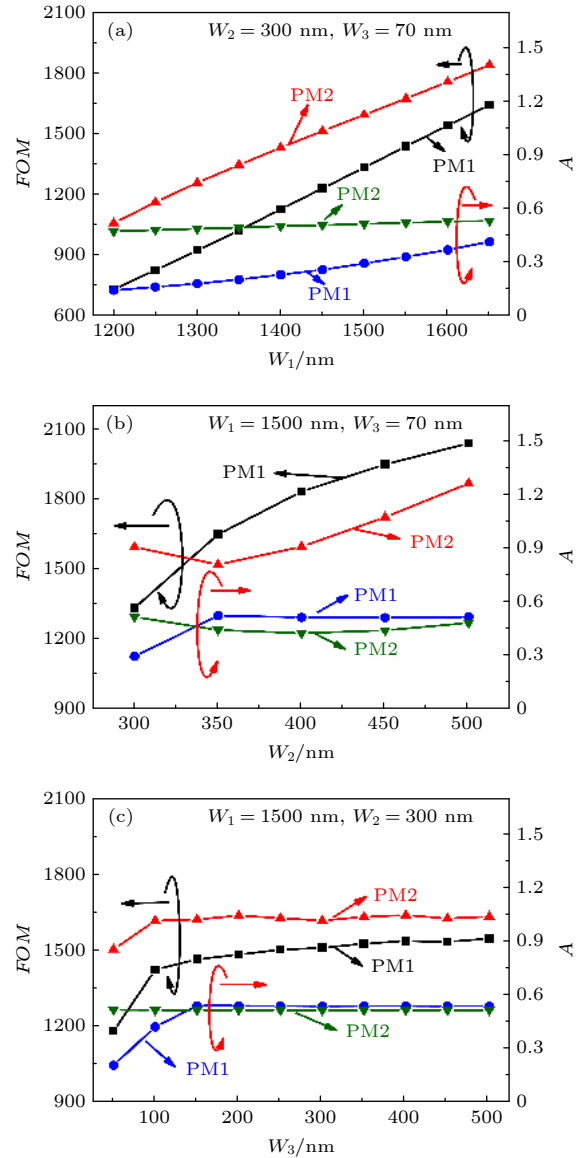


图 4 PM 1 和 PM 2 的 FOM 和 A 随 (a) $W_1 (= H_1)$, (b) $W_2 (= H_2)$ 和 (c) $W_3 (= H_3)$ 变化的规律, $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 4. FOM and A of the PM 1 and PM 2 with different: (a) $W_1 (= H_1)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (b) $W_2 (= H_2)$ at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (c) $W_3 (= H_3)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_1 (= H_1) = 1500$ nm.

先减小, 之后缓慢增大. 在图 4(c) 中, 当 $W_1 = 1500$ nm, $W_2 = 300$ nm 时, 在 $W_3 = 70$ nm 之前, PM 1 和 PM 2 的 FOM 随着增加, 而在 $W_3 = 70$ nm 之后, 则都几乎保持不变, 这与银膜厚度满足模式指数衰减要求相关. PM 2 的 A 保持一直不变的状态; 在 $W_3 = 150$ nm 之前, PM 1 的 A 呈现增长趋势, 之后基本保持不变.

4 波导传感特性分析

图 5(a) 和图 5(b) 反映了 n_c 变化对 PM 1 和 PM 2 的 $Re(n_{eff})$, FOM 和 A 的影响. 当 $W_1 = 1500$ nm, $W_2 = 350$ nm 和 $W_3 = 70$ nm 时, 从图 5(a) 可以看出, 随着 n_c 的增大, PM 1 和 PM 2 的 $Re(n_{eff})$ 随之增大. 对 PM 1 和 PM 2 的 $Re(n_{eff})$ 做线性拟合, 线性拟合线的斜率为波导灵敏度 S_{wg} , PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 分别为 0.080 和 0.064. 如图 5(b) 所示, 随着 n_c 的增大, PM 1 的 FOM 逐渐递减, 而 PM 1 的 A 在 n_c 小于 1.4 之前略微递减, 之后

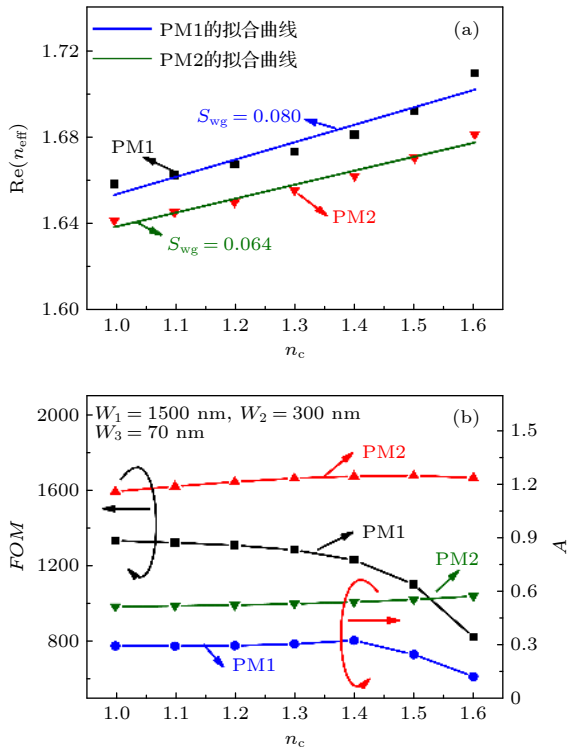


图 5 在不同的 n_c 下, PM 1 和 PM 2 的 (a) $Re(n_{eff})$, (b) FOM 和 A 的变化规律, W_1 ($= H_1$), W_2 ($= H_2$) 和 W_3 ($= H_3$) 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 5. (a) $Re(n_{eff})$ and (b) FOM and A of the PM 1 and PM 2 with different n_c as W_1 ($= H_1$) = 1500 nm, W_2 ($= H_2$) = 300 nm and W_3 ($= H_3$) = 70 nm.

则剧烈下降. PM 2 的 FOM 和 A 随着 n_c 的增大呈略微上升趋势.

图 6(a)—(c) 是非对称 Ag 膜多孔硅-氟化钙混合等离子体波导的 S_{wg} 随着 W_1 , W_2 和 W_3 的变化情况. 从图 6(a) 中可以看出, 当 $W_2 = 300$ nm 和 $W_3 = 70$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随 W_1 的增加而减小. 由于 W_1 的增加有利于更多的模式能量被限制在 PS 芯层, 从而导致 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 减小. 如图 6(b) 所示, 当 $W_1 = 1500$ nm 和 $W_3 = 70$ nm 时, PM 1 的 S_{wg} 随着 W_2 的增加而减小, 然而 PM 2 的 S_{wg} 反而增大. 这是因为模式的极化方向不同, 致使 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 呈现出相反的变化趋势. 图 6(c) 中, 当 $W_1 = 1500$ nm 和 $W_2 = 300$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随着 W_3 变化而保持不变, 说明 W_3 的变化基本不影响 S_{wg} . 因为模式的模场能量几乎都被限制在 PS 层和 CaF_2 层中 (如图 2(a) 和图 2(b) 所示). 当 $W_1 = 1500$ nm, $W_2 = 300$ nm 和 $W_3 = 70$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的波导灵敏度分别为 0.080 和 0.065.

为了分析 Ag 膜对波导灵敏度的影响, 无 Ag 膜时 S_{wg} 随着 W_1 和 W_2 的变化情况如图 6(d) 和图 6(e) 所示. 从图 6(d) 中可以看出, 当 $W_2 = 300$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随 W_1 的增加而减小, 但 PM 1 的减小幅度远小于 PM 2. 因为随着 W_1 的增大, 对于 PM 2 来说, 模场能量被更多地限制在 PS 层, 而 PM 1 的模场能量分布主要集中在 PS 层中心位置, 故 W_1 的增大对 PM 1 的影响并不大. 如图 6(f) 所示, 当 $W_1 = 1500$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随着 W_2 的增大而逐渐变小. 因为随着 W_2 的增大, 被限制在 PS 层和 CaF_2 层模场能量增加. 当 $W_1 = 1500$ nm 和 $W_2 = 300$ nm 时, PM 1 和 PM 2 的灵敏度分别为 0.115 和 0.151. 增加非对称 Ag 膜后, 波导的表面等离子体效应降低了结构的波导灵敏度, 然而, 能量分布更加集中的优势可以提高传感系统的集成度, 有利于提高传感的器件灵敏度. 这里提出的非对称 Ag 膜结构还可以实现不同偏振模式的复用和多参数传感.

温度变化对波导灵敏度的影响是传感结构必须考虑的因素, 因此, 我们分析了温度变化对波导灵敏度的影响, 如图 7(a) 所示. 在环境温度为 295 K 附近时, PS, CaF_2 , PMMA 和 Ag 的热光系数 (thermo-optical coefficient, TOC) 分别是 $2.45 \times 10^{-5}/K$, $2.8 \times 10^{-5}/K$, $-1.1 \times 10^{-4}/K$ 和 $2.13 \times 10^{-4}/K$.

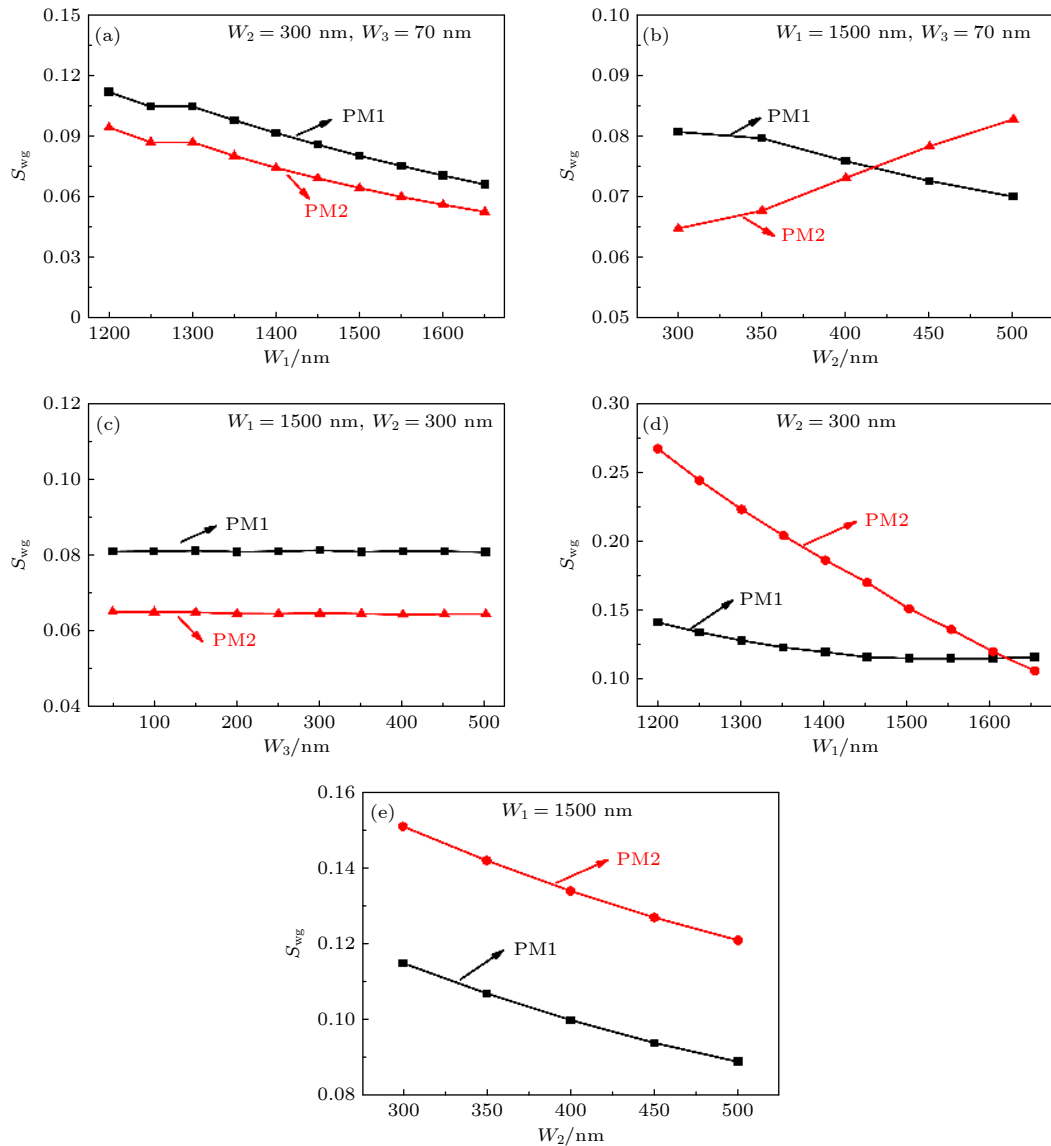


图 6 非对称 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随 (a) $W_1 (= H_1)$, (b) $W_2 (= H_2)$ 和 (c) $W_3 (= H_3)$ 的变化规律, $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm; 无 Ag 膜波导的 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随 (d) $W_1 (= H_1)$ 和 (e) $W_2 (= H_2)$ 的变化规律, $W_1 (= H_1)$ 和 $W_2 (= H_2)$ 分别取 1500 nm 和 300 nm

Fig. 6. with an asymmetric Ag film of S_{wg} of the PM 1 and PM 2 in the PS-CaF₂HPW with an asymmetric Ag films with different: (a) $W_1 (= H_1)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (b) $W_2 (= H_2)$ at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (c) $W_3 (= H_3)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_1 (= H_1) = 1500$ nm. Without an asymmetric Ag film of S_{wg} of the PM 1 and PM 2 in the waveguide without an asymmetric Ag film of with different (d) $W_1 (= H_1)$ at $W_2 (= H_2) = 300$ nm; (b) $W_2 (= H_2)$ at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm.

当温度变化时, 波导的 S_{wg} 基本不变化. 由图 7(b) 和图 7(c) 可知, 温度变化对 α , FOM 和 A 的影响也不大, 几乎不发生变化. 从图 7 可以看出, 波导的性能受温度影响较小.

5 波导制备方法与容差分析

本文提出了制备非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的可行方案, 流程图如图 8 所示: 首先,

在 SiO₂ 衬底上使用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术在超高真空下外延生长 PS 层, 并用传统的深紫外线光刻刻蚀 PS 层; 其次, 利用分子束外延技术在超高真空条件下外延生长非对称 CaF₂ 层; 再利用真空蒸发法沉积不对称 Ag 膜; 最后, 利用固态水等离子体刻蚀法刻蚀掉多余的 PS 和 CaF₂ 部分.

尺寸容差对非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导的影响是波导实际应用必须考虑的问题, 因

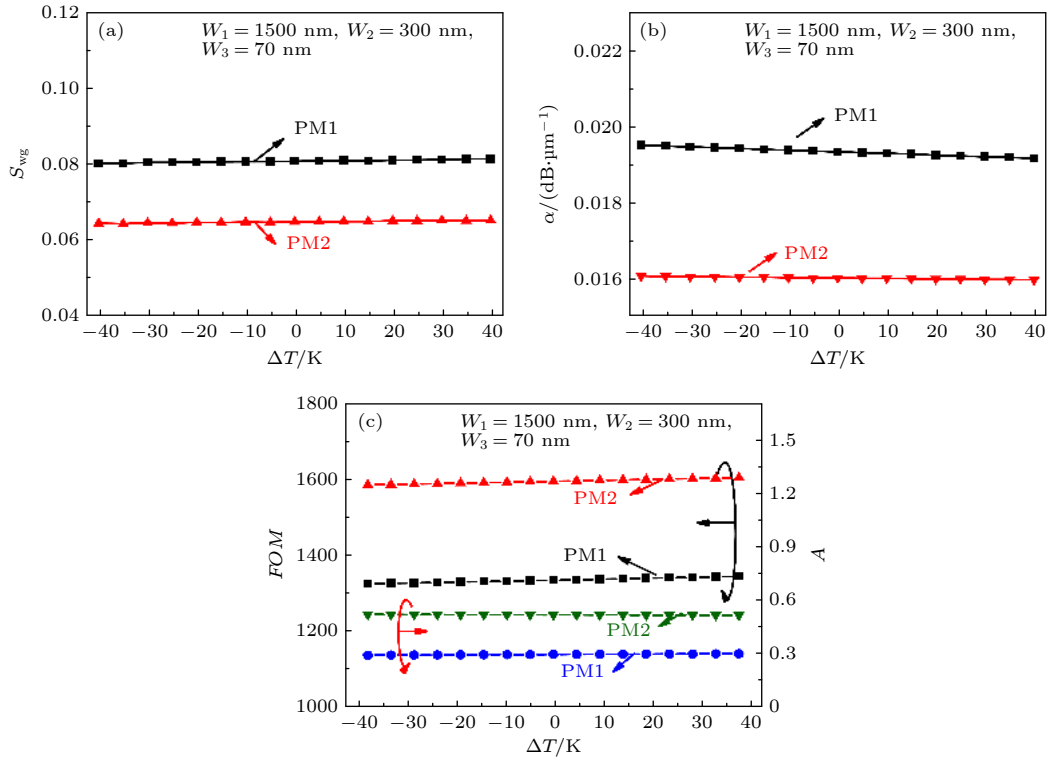


图 7 $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$, $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ 和 $W_3 (= H_3) = 70 \text{ nm}$ 时, 在不同的 ΔT 下 (a) $\text{Re}(n_{\text{eff}})$, (b) α , (c) FOM 和 A 的变化规律

Fig. 7. (a) $\text{Re}(n_{\text{eff}})$, (b) α , (c) FOM and A with different ΔT as $W_1 (= H_1) = 1500 \text{ nm}$, $W_2 (= H_2) = 300 \text{ nm}$ and $W_3 (= H_3) = 70 \text{ nm}$.

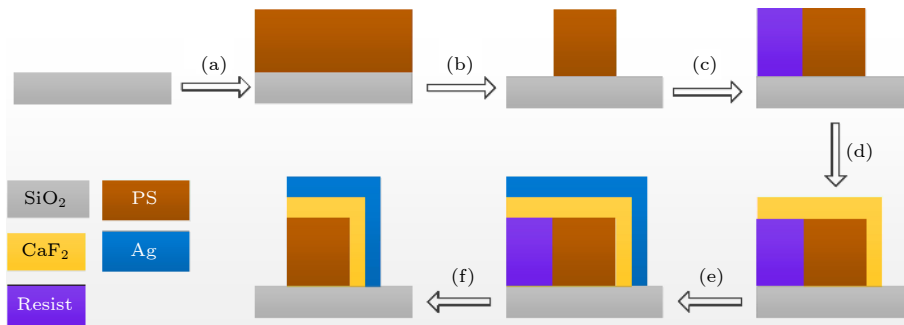


图 8 制造流程 (a) 在 SiO_2 衬底上外延生长 PS 层; (b) 电子束光刻使其成型; (c) 涂上抗蚀剂; (d) 在 PS 上外延生长 CaF_2 层; (e) 倾斜沉积金属 Ag 层; (f) 电子束光刻使其成型, 并清除抗蚀剂

Fig. 8. (a) Grow PS on a SiO_2 substrate; (b) pattern the resist through E-beam lithography; (c) it is coated with a resist; (d) grow CaF_2 layers epitaxially on a PS layer; (e) oblique deposition of metal Ag; (f) electron beam lithography moulds it and removes the resist.

此需要讨论尺寸容差对非对称银膜 PS- CaF_2 混合等离子体波导性能的影响. 本文设计的非对称银膜 PS- CaF_2 混合等离子体波导部分覆盖 CaF_2 和 Ag 薄膜, 在制造过程中要求较大的对准容差. 尺寸容差对非对称银膜 PS- CaF_2 混合等离子体波导性能的影响如图 9—图 11 所示. 根据前文的参数优化, 在下面的仿真过程中, $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别为 1500 nm , 300 nm 和 70 nm . 此时, PM 1 和 PM 2 的 FOM 分别是 1335.45

和 1594.99 ; A 分别为 0.30 , 0.52 ; S_{wg} 分别为 0.080 , 0.064 . 在 $\pm 10 \text{ nm}$ 的容差范围内, 研究了 ΔW_1 , ΔH_1 , ΔW_2 , ΔH_2 , ΔW_3 和 ΔH_3 对 FOM , A 和 S_{wg} 的影响.

不同尺寸容差下, FOM 的变化 (ΔFOM) 如图 9(a)—(c) 所示. 在图 9(a) 中, ΔW_1 和 ΔH_1 的变化对 ΔFOM 的影响较小, 变化幅度小于 20.7 和 16.5 . 然而, 因为银膜厚度与欧姆损耗紧密相关, ΔW_3 和 ΔH_3 的变化对 ΔFOM 有明显的影响.

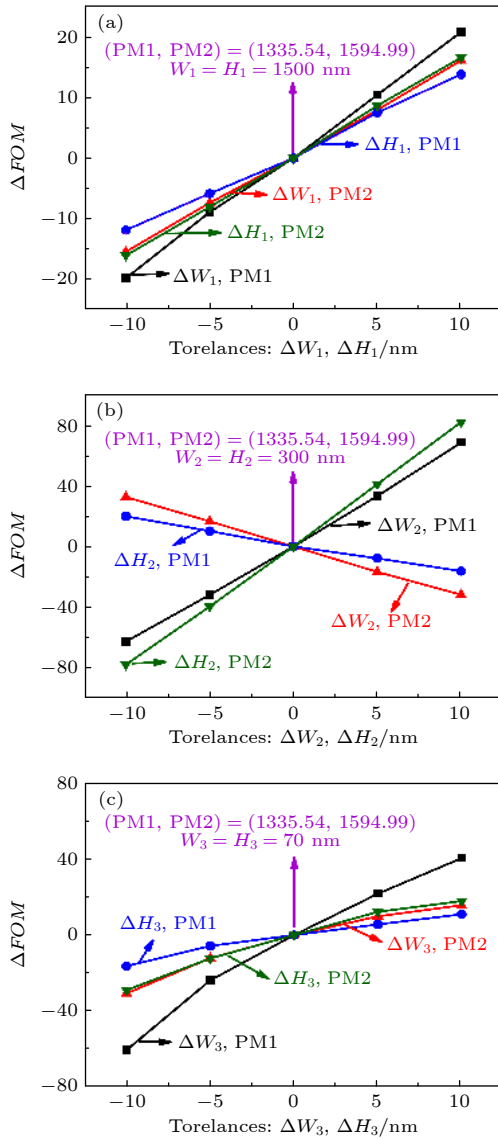


图9 不同的尺寸容差下, PM 1 和 PM 2 的 FOM 的变化 (ΔFOM) 随 (a) ΔW_1 和 ΔH_1 , (b) ΔW_2 和 ΔH_2 ; (c) ΔW_3 和 ΔH_3 的变化规律, $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 9. The changes of FOM (ΔFOM) for the PM 1 and PM 2 with different dimensional tolerances: (a) ΔW_1 and ΔH_1 at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (b) ΔW_2 and ΔH_2 at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (c) ΔW_3 and ΔH_3 at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_2 (= H_2) = 300$ nm.

对于 PM 1 来说, ΔW_1 (ΔW_2 或 ΔW_3) 的影响比 ΔH_1 (ΔH_2 或 ΔH_3) 大对于 PM 2 来说 ΔW_1 (或 ΔW_3) 和 ΔH_1 (或 ΔH_3) 对 ΔFOM 的影响基本一样. 由于极化方向的不同, ΔW_2 (或 ΔH_2) 对 PM 1 和 PM 2 的 ΔFOM 有相反的影响, 如图 9(b) 所示. 由图 9 可知, 不同尺寸容差对 FOM 的影响小于 80.

不同尺寸容差下, A 的变化 (ΔA) 如图 10(a)–

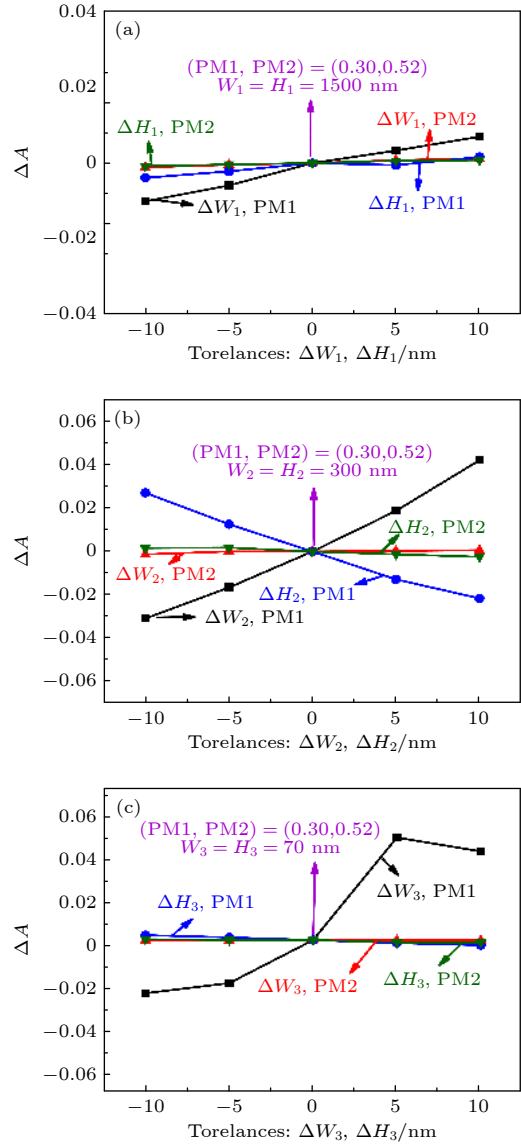


图 10 在不同的尺寸容差下, PM 1 和 PM 2 的 A 的变化 (ΔA) 随 (a) ΔW_1 和 ΔH_1 , (b) ΔW_2 和 ΔH_2 , (c) ΔW_3 和 ΔH_3 的变化规律. $W_1 (= H_1)$, $W_2 (= H_2)$ 和 $W_3 (= H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 10. The changes of A (ΔA) for the PM 1 and PM 2 with different dimensional tolerances: (a) ΔW_1 and ΔH_1 at $W_2 (= H_2) = 300$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; (b) ΔW_2 and ΔH_2 at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_3 (= H_3) = 70$ nm; and (c) ΔW_3 and ΔH_3 at $W_1 (= H_1) = 1500$ nm and $W_2 (= H_2) = 300$ nm.

(c) 所示. 在图 10(a) 中, ΔW_1 (或 ΔH_1) 对于 PM 2 的 A 几乎没有影响; 而对于 PM 1 来说, A 都随 ΔW_1 (或 ΔH_1) 增大而增加, 但 ΔW_1 的影响更明显. 在图 10(b) 中, ΔW_2 (或 ΔH_2) 对 PM 2 的 A 没有明显影响; 而对 ΔW_2 和 ΔH_2 对 PM 1 的 A 的影响呈现相反的趋势. 如图 10(c) 所示, ΔW_3 (或 ΔH_3) 对 PM 2 的 A 几乎没有影响; 然而 ΔW_3 和

ΔH_3 对 PM 1 的 A 有不同的影响, A 先随 ΔW_3 增大而增大然后几乎不变, ΔH_3 对 A 几乎没影响. 总的来说, 不同尺寸容差对 A 的影响都小于 0.06.

不同尺寸容差, S_{wg} 的变化 (ΔS_{wg}) 如图 11(a)–(c) 所示. 在图 11(a) 中, ΔW_1 (或 ΔH_1) 对 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 的影响趋势基本相同. PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 随着 ΔW_1 增大逐渐减小. ΔH_1 对 PM 1 和

PM 2 的 S_{wg} 的影响比 ΔW_1 小. 从图 11(b) 可知, 对于 PM 1 和 PM 2, ΔW_2 对 S_{wg} 的影响与 ΔH_2 相反. 也就是说, 随 ΔW_2 的增大, PM 1 的 S_{wg} 逐渐增大而 PM 2 的 S_{wg} 逐渐减小. 然而随着 ΔH_2 的增大, PM 2 的 S_{wg} 逐渐增大而 PM 1 的 S_{wg} 却逐渐减小. 从图 11(c) 上可以看出, ΔW_3 对 PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} 都几乎没有影响; ΔH_3 对 PM 2 的 S_{wg} 也没有明显影响, 而只对 PM 1 的 S_{wg} 有影响. 由以上可知, 不同尺寸容差对 S_{wg} 的影响都小于 0.001.

6 结 论

本文研究了一种能够实现低损耗传输的非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导. 利用有限元分析法 (FEM) 对波导中存在的两种模式 (PM 1 和 PM 2) 的几何参数进行了研究和优化. 在中红外波长 3.5 μm 附近, 当 $W_1 = 1500 \text{ nm}$, $W_2 = 300 \text{ nm}$ 和 $W_3 = 70 \text{ nm}$ 时, PM 1 和 PM 2 的归一化有效模场面积分别为 0.30 和 0.52, 传输损耗分别为 0.019 dB/ μm 和 0.016 dB/ μm , 品质因数分别为 1335.54, 1594.99, 以及波导灵敏度分别为 0.080 和 0.064. 制造容差分析表明非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导具有良好的制造误差容忍度. 非对称银膜 PS-CaF₂ 混合等离子体波导在传输性能和降低损耗等方面都具有优势, 为实现无标记生物化学传感开辟了新的途径, 并且为实现模式的偏振转换提供了一种新的波导结构.

参考文献

- [1] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nat. Photonics* **2** 496
- [2] Burstein E, Chen W P, Chen Y J, Hartstein A 1974 *J. Vac. Sci. Technol.* **11** 1004
- [3] Garcia de Abajo F J, Saenz J J 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 233901
- [4] Yang L K, Li P, Wang H C, Li Z P 2018 *Chin. Phys. B.* **27** 094216
- [5] Zhang H F, Cao D, Tao F, Yang X H, Wang Y, Yan X N, Bai L H 2010 *Chin. Phys. B.* **19** 027301
- [6] Gong P Q, Li X G, Zhou X, Zhang Y A, Chen N, Wang S K, Zhang S Q, Zhao Y 2021 *Opt. Laser Technol.* **139** 106981
- [7] Smith C L, Thilsted A H, Garcia-Ortiz C E, Radko I P, Marie R, Jeppesen C, Vannahme C, Bozhevolnyi S I, Kristensen A 2014 *Nano Lett.* **14** 1659
- [8] Kumari B, Barh A, Varshney R K, Pal B P 2016 *Sens. Actuators, B* **236** 759
- [9] Kumari B, Varshney R K, Pal B P 2018 *Sens. Actuators, B*

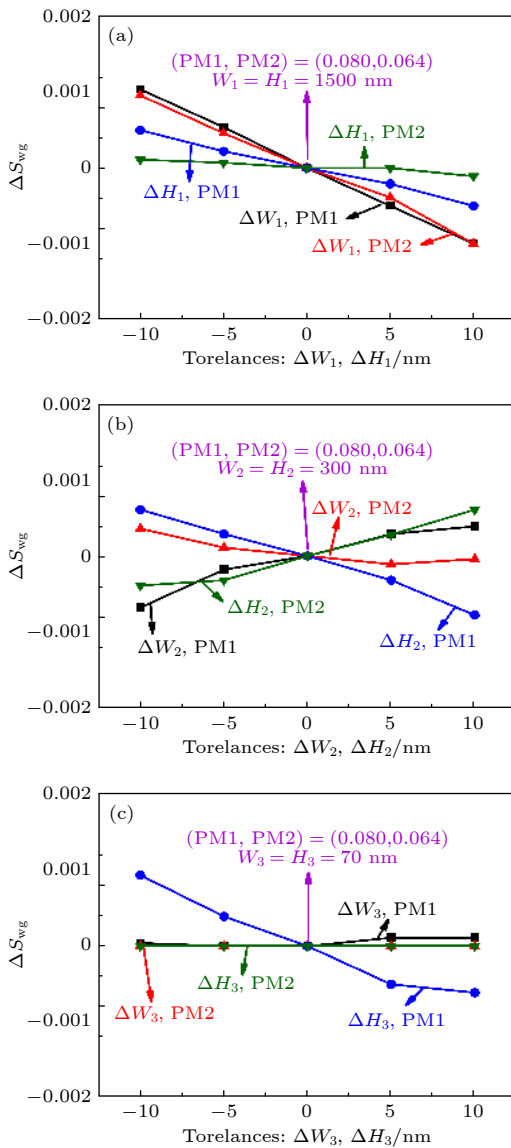


图 11 不同的尺寸容差, PM 1 和 PM 2 的 S_{wg} (ΔS_{wg}) 随 (a) ΔW_1 和 ΔH_1 , (b) ΔW_2 和 ΔH_2 , (c) ΔW_3 和 ΔH_3 的变化规律. $W_1(=H_1)$, $W_2(=H_2)$ 和 $W_3(=H_3)$ 分别取 1500 nm, 300 nm 和 70 nm

Fig. 11. The changes of S_{wg} (ΔS_{wg}) for the PM 1 and PM 2 with different dimensional tolerances: (a) ΔW_1 and ΔH_1 at $W_2(=H_2) = 300 \text{ nm}$ and $W_3(=H_3) = 70 \text{ nm}$; (b) ΔW_2 and ΔH_2 at $W_1(=H_1) = 1500 \text{ nm}$ and $W_3(=H_3) = 70 \text{ nm}$; (c) ΔW_3 and ΔH_3 at $W_1(=H_1) = 1500 \text{ nm}$ and $W_2(=H_2) = 300 \text{ nm}$.

255 3409

- [10] Mortensen N A, Bozhevolnyi S I, Alù A 2019 *Nanophotonics* **8** 1315
- [11] Nedeljkovic M, Stankovic S, Mitchell C J, Khokhar A Z, Reynolds S A, Thomson D J, Gardes F Y, Littlejohns C G, Reed G T, Mashanovich G Z 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 1352
- [12] Shen L, Healy N, Mitchell C J, Penades J S, Nedeljkovic M, Mashanovich G Z, Peacock A C 2015 *Opt. Lett.* **40** 268
- [13] Cheng Z Z, Chen X, Wong C Y, Xu K, Tsang H K 2012 *IEEE Photonics J.* **4** 1510
- [14] Shankar R, Bulu I, Lončar M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 051108
- [15] El Shamy R S, Swillam M A, Khalil D A 2019 *J. Lightwave Technol.* **37** 4394
- [16] Alonso-Ramos C, Nedeljkovic M, Benedikovic D, Penades J S, Littlejohns C G, Khokhar A Z, Perez-Galacho D, Vivien L, Cheben P, Mashanovich G Z 2016 *Opt. Lett.* **41** 4324
- [17] Hassan K, Leroy F, Colas-des-Francis G, Weeber J C 2014 *Opt. Lett.* **39** 697
- [18] Dai D X, He S L 2009 *Opt. Express* **17** 16646
- [19] Mai W J, Wang Y L, Zhang Y Y, Cui L N, Yu L 2017 *Chin. Phys. B.* **34** 024204
- [20] Wang Z B, Yin S J, Duan X N, Deng Y P, Dong W, Kong X R 2020 *Chin. J. Las.* **47** 0313001 (in Chinese) [王志斌, 尹少杰, 段晓宁, 邓玉萍, 董伟, 孔祥瑞 2020 *中国激光* **47** 0313001]
- [21] Heo J H, Shin D H, Kim S, Jang M H, Lee M H, Seo S W, Choi S H, Im S H 2017 *J. Chem. Eng. Jpn.* **323** 153
- [22] Hwang K W, Park S H 2015 *Mater. Res. Innovations* **19** S8
- [23] Chen F, Lv H, Pang Z, Zhang J, Hou Y, Gu Y, Yang H, Yang G 2019 *IEEE Sens. J.* **19** 8441
- [24] Olenych I B, Monastyrskii L S, Aksimentyeva O I, Orovčík L, Salamakha M Y 2019 *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **673** 32
- [25] Sun P, Hu M, Liu B, Sun F Y, Xun L J 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 057303 (in Chinese) [孙鹏, 胡明, 刘博, 孙凤云, 许路加 2011 *物理学报* **60** 057303]
- [26] Chen Y, Fan H Q, Lu B 2014 *Acta. Phys. Sin.* **63** 244207 (in Chinese) [陈颖, 范卉青, 卢波 2014 *物理学报* **63** 244207]
- [27] Chan K C, Tso C Y, Hussain A, Chao C Y H 2019 *Appl. Therm. Eng.* **161** 114112
- [28] Gan F L, Wang B D, Jin Z H, Xie L L, Dai Z D, Zhou T X, Jiang X 2021 *Sci. Total. Environ.* **768** 144529
- [29] Girault P, Azuelos P, Lorrain N, Poffo L, Lemaitre J, Pirasteh P, Hardy I, Thual M, Guendouz M, Charrier J 2017 *Opt. Mater.* **72** 596
- [30] Palik E D 1985 *Academic Press* **39** 1
- [31] Ciminelli C, Campanella C M, Dell'Olio F, Campanella C E, Armenise M N 2013 *Prog. Quantum Electron.* **37** 51

Porous silicon - calcium fluoride plasma waveguide with asymmetric Ag film and its sensitivity characteristics*

Wang Fang¹⁾²⁾ Chen Ya-Ke¹⁾ Li Chuan-Qiang¹⁾ Ma Tao^{1)3)†}

Lu Ying-Hui¹⁾ Liu Heng¹⁾⁴⁾ Jin Chan²⁾

1) (*College of Electronic and Electrical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

2) (*Key Laboratory of Interfacial Physics Technology Project, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

3) (*Key Laboratory Optoelectronic Sensing Integrated Application of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

4) (*Academician Workstation of Electromagnetic Wave Engineering of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China*)

(Received 14 April 2021; revised manuscript received 19 May 2021)

Abstract

In this paper, a porous silicon-calcium fluoride hybrid plasmonic waveguide (PS-CaF₂ HPW) with an asymmetric silver film is studied. The PS-CaF₂ HPW is composed of a PS strip waveguide deposited with asymmetric CaF₂ and Ag thin film layers on an SiO₂ substrate. In the mid-infrared (MIR) region, the mode characteristics and waveguide sensitivity of the mode in the PS-CaF₂ HPW are simulated by using the finite element method (FEM). The results show that there are two fundamental modes (PM 1 and PM 2) with different polarization states in the PS-CaF₂ HPW. The real part of the effective refractive index ($\text{Re}(n_{\text{eff}})$), transmission loss (α), normalized effective mode field area (A), quality factor (FOM) and sensitivity (S_{wg}) for each of the PM 1 and the PM 2 are studied and optimized. Moreover, the effect of temperature on the performances of the PS-CaF₂ HPW is also analyzed. Firstly, the mode field distributions calculated by the FEM indicate that the mode field energy for each of the PM 1 and PM 2 in the PS-CaF₂ HPW is mostly restricted to the PS layer and CaF₂ layer. Comparing with conventional dielectric waveguides, the mode field energy of the PS-CaF₂ HPW is well confined in the PS layer and CaF₂ layer. The geometric parameters of the PS-CaF₂ HPW are optimized by changing the geometric parameters (W_1 , W_2 , and W_3). When $W_1 = 1500$ nm, $W_2 = 300$ nm, $W_3 = 70$ nm, and the operating wavelength is ~ 3.5 μm , α and FOM are 0.019 dB/ μm and 1594.99 for the PM 1, and α and FOM are 0.016 dB/ μm and 1335.54 for the PM 2, respectively. Secondly, the waveguide sensitivity of the PS-CaF₂ HPW is analyzed. The results show that the size of PS layer has a great influence on the waveguide sensitivity. The waveguide sensitivity decreases with the size of the PS layer increasing. In addition, the PS-CaF₂ HPW has good temperature resistance. Moreover, temperature has almost no effect on $\text{Re}(n_{\text{eff}})$, nor α nor A nor FOM nor S_{wg} in a temperature range from -40 K to 40 K. Finally, the fabrication tolerances of the PS-CaF₂ HPW are demonstrated, and the good properties are maintained in a size tolerance range from -10 nm to 10 nm. With the advantages in propagation property and loss reduction, the PS-CaF₂ HPW provides a feasible label-free biochemical sensing scheme and a method of polarization control devices.

Keywords: hybrid plasmonic waveguide, surface plasmon polaritons, propagation property, waveguide sensitivity

PACS: 42.82.-m, 42.82.Et, 42.68.Ay

DOI: 10.7498/aps.70.20210704

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62075057), Key Laboratory of Interfacial Physics Technology Project, Chinese Academy of Sciences (Grant No. CASKL-IPT2003), Basic Research Project of Key Scientific Research Projects of Higher Education Institutions of Henan Province, China (Grant No. 19B510006), and the Ph. D. Program of Henan Normal University (HNU), China (Grant Nos. gd17167, 5101239170010).

† Corresponding author. E-mail: matao@htu.cn