

激光与光电子学进展

方形腔耦合直波导的 Fano 共振与传感特性研究

吴乔华, 张颖秋, 刘星, 李春雷*

东北林业大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要 设计了一种带金属挡板的直波导耦合方形腔组成的表面等离子体(SPPs)波导结构。利用有限元法分析了该结构的磁场分布、Fano共振特性以及传感特性。仿真结果表明,设计的SPPs波导结构可以形成2个Fano峰,且Fano峰的位置可以通过谐振腔的结构参数进行调节。此外,该SPPs波导结构可用于折射率传感,其最高折射率灵敏度和品质因数分别为2220 nm/RIU(折射率单元)和5542。最后,利用该结构对葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度进行了检测,其灵敏度为0.264 nm/(g·L⁻¹)。所设计的SPPs波导结构在微纳传感领域有一定应用前景。

关键词 表面等离子体; 法诺共振; 折射率传感; 浓度检测; 灵敏度

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220797

Fano Resonance and Sensing Characteristics of Square-Cavity-Coupled Straight Waveguide

Wu Qiaohua, Zhang Yingqiu, Liu Xing, Li Chunlei*

College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China

Abstract A surface plasmon polariton (SPP) waveguide structure composed of a straight waveguide with a metal baffle and square cavity is proposed. The magnetic field distribution, Fano resonance, and sensing characteristics are analyzed using the finite element method. The simulation results show that the SPP waveguide structure forms two Fano peaks, and the position of the Fano peaks can be adjusted using structural parameters. In addition, the SPP waveguide structure can be used for refractive index sensing. The maximum refractive index sensitivity and the figure of merit is 2220 nm/RIU (refractive index unit) and 5542, respectively. In glucose concentration detection, the sensitivity reaches 0.264 nm/(g·L⁻¹). The designed SPP waveguide may have potential applications in micro-nano-sensing fields.

Key words surface plasmon polaritons; Fano resonance; refractive index sensing; concentration detection; sensitivity

1 引言

表面等离子体(Surface plasmon polaritons, SPPs)是由金属表面的自由电子在入射波激励下产生的一种沿着金属与介质分界面传输的特殊电磁波。其能量在金属-介质的分界面两侧快速衰减,可以突破衍射极限^[1-2]。因此,SPPs在各种结构中的传输特性被广泛研究^[3-5]。其中,金属-介质-金属(Metal-insulator-metal, MIM)波导因其具有传输损耗低、电磁场约束强等优点而被广泛应用于微纳光子器件的设计中^[6-7]。比如:滤波器^[8]、SPPs传感器^[9-10]、慢光器件^[11]和全光开关^[12]等。

Fano共振是由局域的离散态与宽带连续态耦合形成的一种特殊的光学效应^[13-14]。由于Fano共振会呈

现出尖锐且不对称的共振光谱,因而基于Fano共振的SPPs器件在传感领域有很好的应用前景^[15-16]。目前,科研人员已经提出很多基于Fano共振的SPPs传感器^[17-20]。2020年,王梦梦等^[19]提出带存根谐振腔的直波导耦合开口方环谐振腔的SPPs传感器,产生了Fano共振,具有1125 nm/RIU(折射率单元)的折射率灵敏度和30.01的品质因数。同年,Chauhan等^[20]设计了带挡板直波导耦合圆环腔的SPPs传感器,基于Fano共振实现了折射率传感,折射率灵敏度和最高的品质因数分别为1200 nm/RIU和62.6。这两类SPPs波导结构的谐振腔分别为圆环型和方型,易于制造和集成,且其均在Fano共振的调节上取得很好的效果。设计更高折射率灵敏度和品质因数的纳米器件,能够

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-14; 网络首发日期: 2022-03-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572021DJ05)

通信作者: *licl915@163.com

进一步提升其在传感领域的应用前景。同时,已有的 SPPs 波导结构大多使用介质层宽度恒定的谐振腔,而介质层的宽度决定了波导的有效折射率,因而对透射谱以及灵敏度产生影响。

本文以圆形和正方形作为谐振腔的内外侧,设计了一种特殊方形腔耦合直波导的结构,基于 Fano 共振,实现了极高折射率灵敏度和高品质因数的折射率传感。首先,利用结构的透射谱和场分布,分析了 Fano 共振产生的物理机制;然后,利用有限元法进行仿真,分别讨论了结构参数和介质折射率对 Fano 共振峰位置的影响;最后,研究了该波导结构的折射率传感性能以及其在葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度检测上的应用。提出的 SPPs 波导结构有较好的调谐能力,同时兼具高的折射率灵敏度和品质因数,在光子传感器中有着潜在的应用。

2 模型设计与理论分析

所设计的 SPPs 波导结构如图 1 所示,它由中间带有金属挡板的 MIM 波导与正上方的方形腔耦合而成。该 SPPs 波导结构简单、易于制造^[3]:一般采用气相沉积法将 Ag 沉积到硅基底上,形成足够厚的 Ag 层;再利用电子束刻蚀法在 Ag 层上刻蚀出左右 2 个直波导和相应的方形腔。其中,方形腔的内侧是半径为 R 的圆,外侧是边长为 $2R+2d$ 的正方形。耦合距离、挡板宽度以及 MIM 波导宽度分别用 g 、 a 和 w 表示,其中 g 、 a 的值均设置为 10 nm, w 的取值固定为 50 nm。图中灰色和白色部分分别代表银和介质,介质的介电常数为 $\epsilon_i = 1$,银的介电常数 ϵ_m 可由 Drude 模型^[9]表示为

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon_\infty = 3.7$ 为无穷远处的相对介电常数; $\omega_p = 9.1 \text{ eV}$ 为等离子体频率; $\gamma = 0.018 \text{ eV}$ 为金属银的损耗; ω 为入射波的角频率, i 为虚数单位。

此外,由于 w 取值固定为 50 nm,所以只有基模

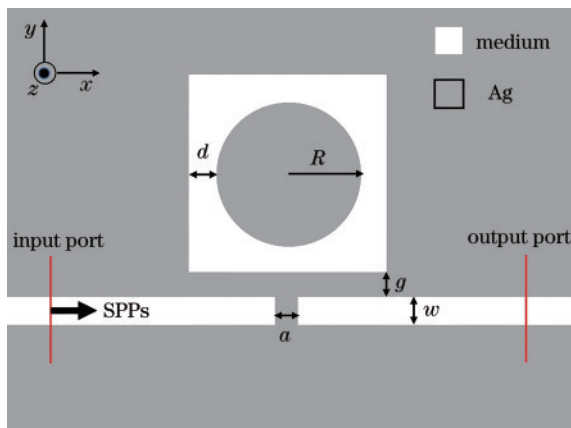


图 1 耦合特殊方形腔的 MIM 波导结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MIM waveguide coupled with special square cavity

(TM_0) 可以在 MIM 波导中存在并传输。这种情况下, SPPs 在波导中的色散关系^[21]可以表示为

$$\epsilon_i \sqrt{\beta^2 - \epsilon_m k_0^2} + \epsilon_m \sqrt{\beta^2 - \epsilon_i k_0^2} \tanh\left(\frac{\sqrt{\beta^2 - \epsilon_i k_0^2}}{2} w\right) = 0, \quad (2)$$

式中: β 为 SPPs 的传播常数; k_0 为波在真空中的波矢量。

当入射 SPPs 沿着 x 轴在直波导中传输时,部分 SPPs 可以耦合进入上方的方形腔中传输并产生相移,相移数值^[22-23]表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_{\text{eff}} L_{\text{eff}}, \quad (3)$$

式中: L_{eff} 为谐振腔的有效长度; $n_{\text{eff}} = \text{Re}\left(\frac{\beta}{k_0}\right)$ 为有效折射率的实部; λ_0 为入射光在真空中的波长。

当 $\Delta\varphi = 2m\pi$ 时(谐振阶数 $m = 1, 2, \dots$),耦合进入谐振腔的 SPPs 满足谐振条件,谐振波长 λ_{res} 为

$$\lambda_{\text{res}} = \frac{L_{\text{eff}} n_{\text{eff}}}{m}. \quad (4)$$

式(4)表明了谐振波长与有效折射率以及谐振腔的有效长度呈正相关,与谐振阶数呈负相关,这为后续传输特性研究提供了理论支撑。

采用有限元法对所设计的 SPPs 波导结构的传输特性进行数值仿真。在模拟区域的各个边界均设立完美匹配层作为边界条件,厚度为 60 nm。同时仿真区域采用非均匀和极端细化的网格划分,提高结果的收敛性和准确性。定义透射率 $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$, P_{out} 、 P_{in} 分别为输出端的出射功率和输入端的入射功率。

3 分析与讨论

3.1 Fano 峰的形成机制

设计的 SPPs 波导结构的透射谱如图 2(a) 所示,其中 SPPs 波导结构中的各个结构参数分别设置为 $R = 180 \text{ nm}$, $g = 10 \text{ nm}$, $a = 10 \text{ nm}$, $d = 20 \text{ nm}$ 。从图 2 中可知,透射谱中出现了 2 条尖锐的 Fano 峰(FR1, FR2),对应的谐振波长分别为 $\lambda_{\text{res1}} = 1362 \text{ nm}$ 、 $\lambda_{\text{res2}} = 2222 \text{ nm}$ 。为分析 Fano 共振峰的形成原因,图 2(b) 分别给出了带金属挡板直波导的透射谱和直波导耦合方形腔结构的透射谱。图 2(b) 中:实线对应了带金属挡板直波导的透射谱,其在整个入射波段中保持稳定的低透射率,是一个连续态模式;虚线对应了直波导耦合方形腔结构的透射谱,在 $\lambda = 1390 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 2240 \text{ nm}$ 附近形成 2 个极窄的透射谷,其他位置保持很高的透射率,形成了局部的离散态模式。对于同时具有金属挡板和方形腔的 SPPs 波导结构,这 2 种模式相互耦合,在 1362 nm 和 2222 nm 处形成 2 个尖锐的 Fano 峰。为了更好地理解形成 Fano 共振峰的物理机制,图 3(a)~图 3(c) 分别为入射波长 λ 为 1344 nm、1362 nm、2222 nm 时的磁场分

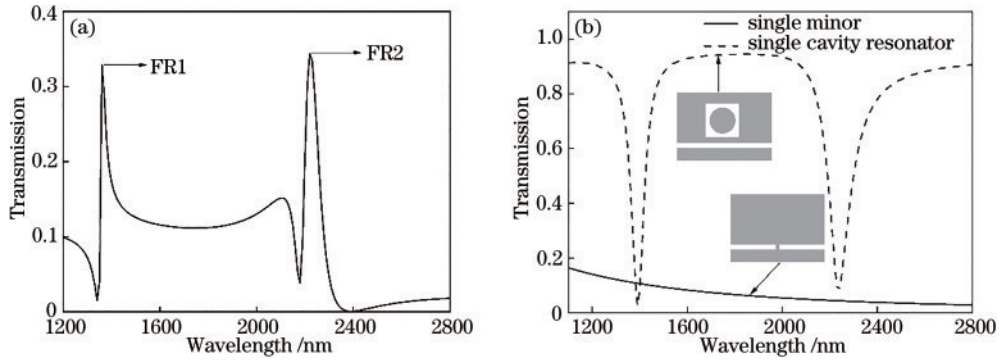


图2 SPPs波导结构的透射谱。(a)挡板和方形腔同时存在;(b)只有挡板和只有方形腔

Fig. 2 Transmission spectra of SPPs waveguide structure. (a) Both baffle and square cavity exist; (b) single baffle and single square cavity

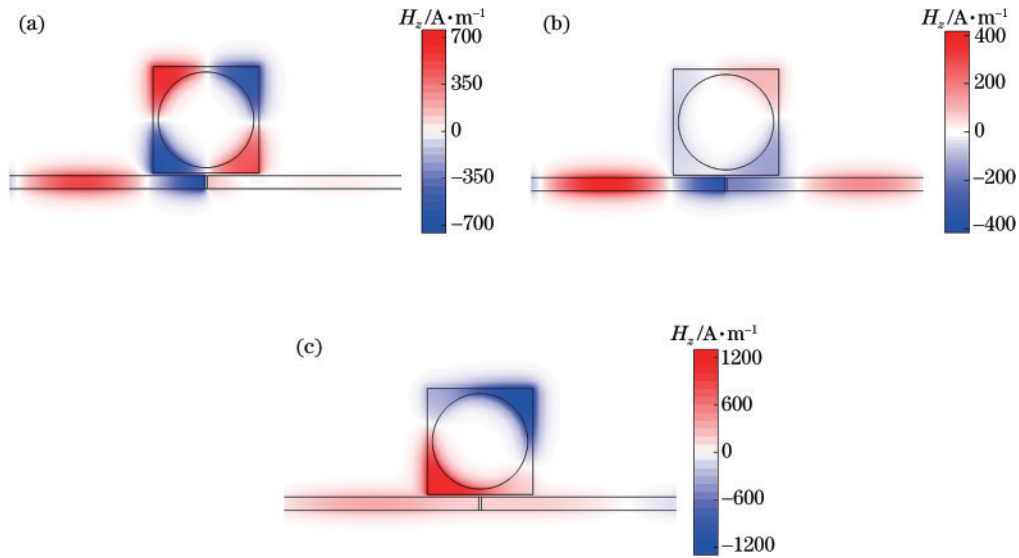


图3 不同入射波长下的SPPs波导磁场分布图。(a)波谷处 $\lambda=1344$ nm的磁场分布;(b) FR1处 $\lambda=1362$ nm的磁场分布;(c) FR2处 $\lambda=2222$ nm的磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of SPPs waveguide at different incident wavelengths. (a) Magnetic field distribution at valley $\lambda=1344$ nm; (b) magnetic field distribution at FR1 $\lambda=1362$ nm; (c) magnetic field distribution at FR2 $\lambda=2222$ nm

量 H_z 的分布图。从图3中可知,当入射波长为1344 nm时,SPPs被限制在方形腔内,几乎无法耦合进入右侧直波导,因而传输到输出端的能量很低,形成Fano共振谷;当入射波长为1362 nm或2222 nm时,左侧直波导中的SPPs通过方形腔耦合进入右侧直波导。因此,透射谱中1362 nm与2222 nm处出现2个Fano共振峰。

3.2 Fano共振的调节及传感应用

首先,研究了方形腔的尺寸对Fano共振的影响。将方形腔的内半径 R 分别取160 nm、180 nm、200 nm、220 nm,其他参数保持不变,不同 R 下的透射谱如图4(a)所示。可以看到,随着 R 增大,2个Fano峰均出现明显红移,且FR2的红移幅度比FR1大。根据式(4)可知,由于增大方形腔内半径导致了方形腔的有效长度提高进而使得谐振波长增大,Fano共振峰红移。图4(b)给出了2个Fano峰处的谐振波长 λ_{res1} 、 λ_{res2} 与半径 R 的线性拟合图。可以看出,随着 R 从160 nm增加到220 nm,谐振波长 λ_{res1} 、 λ_{res2} 分别增加了440 nm、696 nm。同时谐振波长与半径呈现很好的线性关系,

FR1与FR2的线性相关系数均高达0.99999。因此,通过改变方形腔的尺寸可以精准调节Fano峰的位置。

然后,研究了介质折射率对Fano共振的影响。图5(a)给出了不同介质折射率下的透射谱,其中介质折射率 n 分别取1.0、1.05、1.1、1.15、1.2,其他参数保持不变。从图5(a)中可知,随着介质折射率的增加,透射谱中的FR1、FR2均出现红移,且FR2的红移幅度较大。根据式(2)~式(4)以及上述的分析可知,随着介质折射率增加,谐振腔的有效折射率会增大进而使得谐振波长增大,Fano峰红移。图5(b)给出了2个Fano峰的谐振波长与介质折射率之间的线性拟合关系。可以看到,谐振波长 λ_{res1} 、 λ_{res2} 均与介质折射率 n 都有很好的线性关系,FR1、FR2的线性相关系数分别为0.99996、0.99999。这一性质可用于折射率传感。灵敏度(S)作为评价传感性能的重要指标,其定义为 $S = \Delta\lambda / \Delta n^{[24]}$,其中 Δn 、 $\Delta\lambda$ 分别为折射率改变量和相对应的谐振波长改变量。因此,FR1、FR2的折射率灵敏度可以用图5(b)中拟合直线的斜率表示,分别为

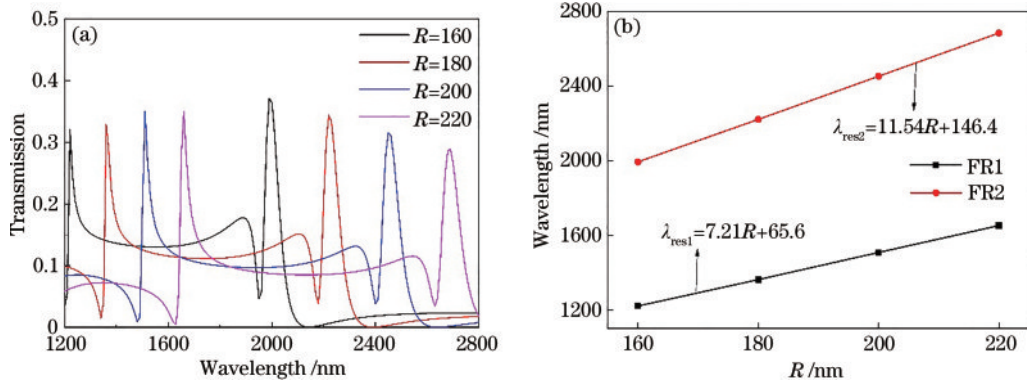


图 4 半径 R 对透射谱及谐振波长的影响。(a) 不同半径 R 下的透射谱; (b) FR1、FR2 的谐振波长与 R 值的线性拟合
Fig. 4 Transmission spectra and resonance wavelengths with different radii R . (a) Transmission spectra for different radii R ; (b) linear fitting relationship between Fano resonance wavelengths of FR1、FR2 and R value

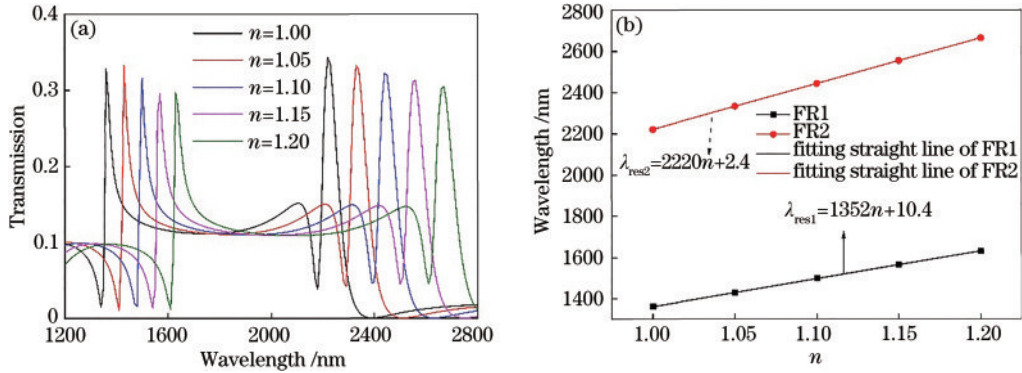


图 5 介质折射率对透射谱及谐振波长的影响。(a) 不同介质折射率下的透射谱。(b) FR1、FR2 的谐振波长与介质折射率的线性拟合
Fig. 5 Transmission spectra and resonance wavelengths with different refractive indices of medium. (a) Transmission spectra for different refractive indices of medium; (b) linear fitting relationship between Fano resonance wavelengths and refractive index of medium

1352 nm/RIU、2220 nm/RIU。此外,品质因数(FOM)也是评价传感性能的另一重要指标。FOM的定义为 $f_{FOM} = \Delta T / (T \Delta n)^{[25]}$, 其中 ΔT 表示透射率改变量。当 SPPs 波导结构的结构参数分别设置为 $R=180$ nm, $d=20$ nm, $g=a=10$ nm 时,初始折射率为 $n=1$, 折射率变化量 $\Delta n=0.05$, 不同波长下 f_{FOM} 的值如图 6 所示, 可以看到在入射波长为 2390 nm 时, f_{FOM} 达到最大值 5542。该 SPPs 波导结构的灵敏度和品质因数与其他文献的

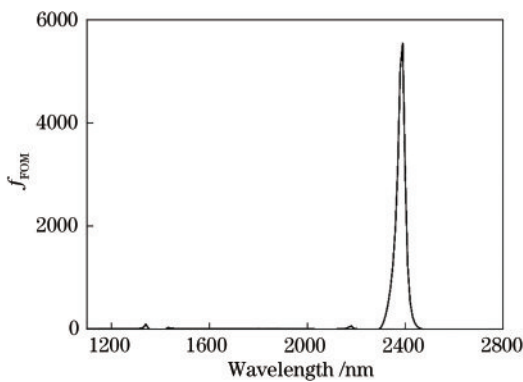


图 6 SPPs 波导结构在不同入射波长下的 f_{FOM}
Fig. 6 f_{FOM} of the SPPs waveguide structure under different wavelengths

对比如表 1 所示^[17-18, 26-30]。由表 1 可知,设计的 SPPs 波导结构兼具高的灵敏度与品质因数,传感性能优越。

表 1 与其他参考文献的折射率灵敏度 f_{FOM} 对比表
Table 1 Comparison of refractive index sensitivity and f_{FOM} with other references

Reference	$S / (\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$	f_{FOM}	Year
[17]	1510	38400	2020
[27]	1261.67	—	2020
[26]	2162	52.73	2021
[18]	2713	53.36	2021
[28]	1250	8868	2021
[29]	2100	189.97	2021
[30]	1650	117.8	2021
This paper	2220	5542	2022

此外,该 SPPs 波导结构也可以用于生物传感,比如葡萄糖溶液中葡萄糖质量浓度的检测。葡萄糖溶液的折射率与其葡萄糖的质量浓度呈线性关系,其关系式^[26-27]为

$$n_{\text{glucose}} = 0.00011889C + 1.33230545, \quad (5)$$

式中: C 为葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度; n_{glucose} 为葡

葡萄糖溶液的折射率。

将葡萄糖溶液作为 SPPs 波导结构中的介质,其质量浓度以 $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的增长幅度从 $0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,相应的溶液折射率根据式(5)可知, n_{glucose} 以 0.00594 的步长从 1.33231 增加到 1.35608,将不同葡萄糖质量浓度下的溶液充入 SPPs 波导中并进行仿真。仿真结果如图 7(a)所示,随着葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度的升高, Fano 峰出现红移,谐振波长增大。

为具体确定溶液中葡萄糖的质量浓度与谐振波长

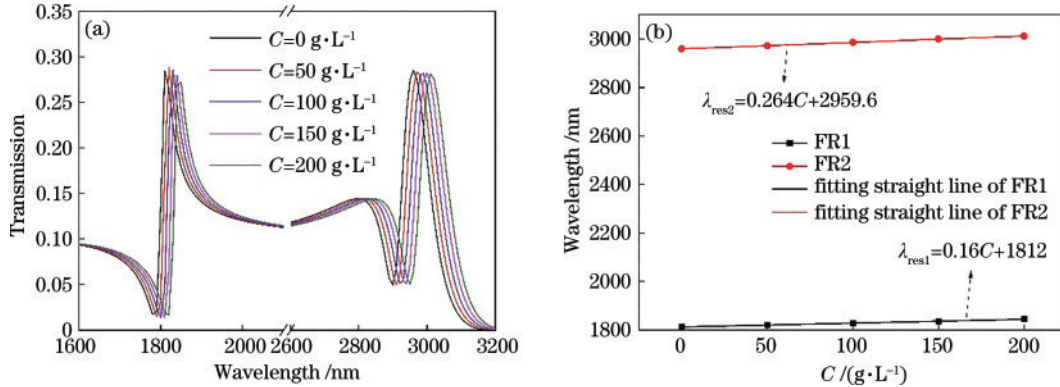


图 7 溶液中葡萄糖的质量浓度对透射谱及谐振波长的影响。(a)不同葡萄糖质量浓度下的透射谱($R=180 \text{ nm}$, $d=20 \text{ nm}$, $g=a=10 \text{ nm}$); (b)FR1、FR2的谐振波长与溶液中葡萄糖质量浓度的线性拟合

Fig. 7 Transmission spectra and resonance wavelengths with different mass concentrations of glucose in glucose solution.

(a) Transmission spectra for different mass concentrations of glucose in glucose solution ($R=180 \text{ nm}$, $d=20 \text{ nm}$, $g=a=10 \text{ nm}$);
(b) linear fitting relationship between Fano resonance wavelengths and mass concentrations of glucose in glucose solution

4 结 论

综上,提出了一种带金属挡板的直波导耦合方形腔组成的 SPPs 波导结构。该结构可以激发双重 Fano 共振, Fano 峰的谐振波长可以通过改变方形腔内半径 R 实现精准调节,这为适用于不同的传感及滤波需求提供了可行性。在折射率传感方面,设计的 SPPs 波导结构兼备高的灵敏度和品质因数,同时谐振波长与介质折射率之间的线性相关系数达到了 0.99999,表现出极佳的传感性能。在生物传感领域,该 SPPs 波导结构可用于葡萄糖溶液中葡萄糖质量浓度的检测,灵敏度为 $0.264 \text{ nm}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$ 且线性相关系数达到了 0.99997。

参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Haddouche I, Cherbi L. Comparison of finite element and transfer matrix methods for numerical investigation of surface plasmon waveguides[J]. Optics Communications, 2017, 382: 132-137.
- [3] 王鸣宇, 梁润青, 苏杨, 等. 类 H 型腔耦合 MIM 波导的 Fano 共振及传感特性[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2124002.
Wang M Y, Luan R Q, Su Y, et al. Fano resonance and

之间的关系,对谐振波长与葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度 C 进行线性拟合,线性拟合结果如图 7(b)所示,葡萄糖的质量浓度每增加 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, FR1 与 FR2 处的谐振波长分别增加约 0.16 nm 、 0.264 nm ,且谐振波长与 SPPs 波导结构中葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度呈良好的线性关系,FR1、FR2 的线性相关系数分别为 0.99985、0.99997。

因此,可以将待测葡萄糖溶液作为 SPPs 波导的介质,根据 FR1、FR2 的谐振波长确定葡萄糖溶液中葡萄糖的质量浓度,实现溶液中葡萄糖质量浓度的检测。

sensing characteristics of MIM waveguide with H-shaped cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2124002.

- [4] 向天宇, 雷涛, 沈钊阳, 等. 基于平面环偶极子超材料的 Fano 共振[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0916001.
Xiang T Y, Lei T, Shen Z Y, et al. Fano resonances in planar toroidal metamaterials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0916001.
- [5] 赵静, 王加贤, 邱伟彬, 等. 基于 Fano 共振的石墨烯超材料传感特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0524001.
Zhao J, Wang J X, Qiu W B, et al. Investigation of sensing characteristic of graphene metamaterial based on Fano resonance[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0524001.
- [6] 肖功利, 徐俊林, 杨宏艳, 等. 内嵌矩形金属块纳米圆盘结构等离子体多通道波分复用器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206006.
Xiao G L, Xu J L, Yang H Y, et al. A plasmon multi-channel wavelength-division multiplexer constructed with a nanodisk structure embedded in a rectangular metal block[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206006.
- [7] 陈颖, 罗佩, 田亚宁, 等. 含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0924002.
Chen Y, Luo P, Tian Y N, et al. Fano resonance slow

- light characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupled ring cavity with metallic double-slit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0924002.
- [8] Gong Y K, Liu X M, Wang L R. High-channel-count plasmonic filter with the metal-insulator-metal Fibonacci-sequence gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 285-287.
- [9] Chen Z, Yu L, Wang L L, et al. A refractive index nanosensor based on fano resonance in the plasmonic waveguide system[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(16): 1695-1698.
- [10] Lu H, Liu X M, Mao D, et al. Plasmonic nanosensor based on Fano resonance in waveguide-coupled resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3780-3782.
- [11] Li D C, Du K, Liang S H, et al. Wide band dispersionless slow light in hetero-MIM plasmonic waveguide[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22432-22437.
- [12] Lu H, Liu X M, Wang L R, et al. Ultrafast all-optical switching in nanoplasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 2910-2915.
- [13] Limonov M F, Rybin M V, Poddubny A N, et al. Fano resonances in photonics[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(9): 543-554.
- [14] Fan S H, Suh W, Joannopoulos J D. Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20(3): 569-572.
- [15] Chen Z, Yu L, Wang L L, et al. Sharp asymmetric line shapes in a plasmonic waveguide system and its application in nanosensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3250-3253.
- [16] Ma S B, Liu Q, Qian X C, et al. Controllability study of surface plasmon resonance spectra of aluminium nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0931001.
- [17] Liu X, Li J N, Chen J F, et al. Fano resonance based on D-shaped waveguide structure and its application for human hemoglobin detection[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(21): 6424-6430.
- [18] Al Mahmud R, Faruque M O, Sagor R H. A highly sensitive plasmonic refractive index sensor based on triangular resonator[J]. *Optics Communications*, 2021, 483: 126634.
- [19] 王梦梦, 韵力宇, 王一飞, 等. 基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052401.
- Wang M M, Yun L Y, Wang Y F, et al. Plasma refractive index nanosensor based on fano resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052401.
- [20] Chauhan D, Adhikari R, Saini R K, et al. Subwavelength plasmonic liquid sensor using Fano resonance in a ring resonator structure[J]. *Optik*, 2020, 223: 165545.
- [21] Chen Z, Song X K, Jiao R Z, et al. Tunable electromagnetically induced transparency in plasmonic system and its application in nanosensor and spectral splitting[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 4801408.
- [22] Jankovic N, Cselyuszka N. Multiple fano-like MIM plasmonic structure based on triangular resonator for refractive index sensing[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 287.
- [23] Hu F F, Yi H X, Zhou Z P. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4848-4855.
- [24] Zhu J H, Huang X G, Mei X. High-resolution plasmonic refractive-index sensor based on a metal-insulator-metal structure[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(5): 054205.
- [25] Becker J, Trügler A, Jakob A, et al. The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing[J]. *Plasmonics*, 2010, 5(2): 161-167.
- [26] Xu D J, Yan S B, Yang X Y, et al. A nanoscale structure based on a ring with matchstick-shape cavity for glucose concentration and temperature detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4442-4450.
- [27] Zhu J, Li N. MIM waveguide structure consisting of a semicircular resonant cavity coupled with a key-shaped resonant cavity[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19978-19987.
- [28] Hu F, Chen F, Zhang H F, et al. Sensor based on multiple Fano resonances in MIM waveguide resonator system with silver nanorod-defect[J]. *Optik*, 2021, 229: 166237.
- [29] Qi Y P, Ding J H, Zhang T, et al. Tunable Fano resonance in plasmonic MIM waveguide with P-shaped resonator for refractive index sensing[J]. *Europhysics Letters*, 2021, 134(6): 67001.
- [30] Zhou C, Huo Y P, Guo Y Y, et al. Tunable multiple fano resonances and stable plasmonic band-stop filter based on a metal-insulator-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2021, 16(5): 1735-1743.