

激光与光电子学进展

基于全介质纳米圆柱孔超表面的传感特性研究

赵静¹, 王加贤^{1*}, 高丽贞¹, 邱伟彬²¹厦门工学院计算机科学与信息工程学院, 福建 厦门 361021;²华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 提出了一种由圆柱纳米孔阵列组成的全介质超表面折射率传感器, 通过平移纳米孔引入结构单元的面内对称性破坏, 非对称的介质纳米孔阵列可以实现由电四极子(EQ)激发的具有高品质因数(Q值)的准连续域束缚态(BIC)共振模式。从理论上分析了结构非对称参数与 Fano 共振的辐射 Q 值之间的关系, 证明了该模式为对称保护 BIC 模式, 并进行近场分析和多极分解, 证明了 EQ 在共振模式中占主导作用, 同时分析了结构参数对 Fano 共振的影响, 并计算了介质折射率的光谱响应, 得到结构的灵敏度可达 512 nm/RIU (折射率单元)、Q 值为 2568.7、优质因数(FOM)为 760, 所提结构在近红外范围内的高灵敏生物传感器领域具有潜在的应用价值。

关键词 全介质超表面; Fano 共振; 连续域束缚态; 折射率传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221254

Sensing Characteristics Based on All-Dielectric Nanocylindrical Hole Metasurface

Zhao Jing¹, Wang Jiaxian^{1*}, Gao Lizhen¹, Qiu Weibin²¹Computer Science and Information Engineering School, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361021, Fujian, China;²College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China

Abstract In this study, an all-dielectric metasurface refractive-index sensor consisting of an array of cylindrical nanoholes is proposed. In-plane symmetry breaking of the structural unit is introduced by translating the nanoholes, and asymmetric dielectric nanohole arrays can achieve quasi-bound states in the continuum (BIC) resonance mode with a high-quality factor (Q-factor) by electric quadrupole (EQ). The relationship between the structural asymmetry parameters and the radiative Q-factor of the Fano resonance is theoretically analyzed. It is found that the mode is a symmetry-protected BIC, and near-field analysis and multipole decomposition show that the EQ plays a dominant role in the resonance mode. In addition, the influence of structural parameters on Fano resonance is analyzed, and the spectral response of the refractive index of the medium is calculated. The sensitivity of the structure reaches up to 512 nm/RIU (refractive index unit), the Q-value is 2568.7, and the figure of merit (FOM) is 760. The proposed structure has potential applications in highly sensitive biosensors in the near-infrared range.

Key words all-dielectric metasurface; Fano resonance; bound state in the continuum; refractive index sensing

1 引言

超表面是一种人工排布的周期性亚波长结构阵列, 具有特殊的电磁特性, 例如负折射率^[1]、近零折射率^[2]、负磁导率^[3]。随着微纳加工技术的发展, 超表面广泛用于超透镜^[4]、光吸收器^[5]、生物传感器^[6-7]、光调

制器^[8]。在近红外区域, 基于金属的超表面存在固有的欧姆损耗, 使其具有较低的品质因数(Q值), 导致检测性能降低^[9-10]。而全介质超表面支持 Mie 共振, 可以提供较高的 Q 值和优质因数(FOM)^[11-13]。因此, 基于全介质超表面的高灵敏折射率传感器成为当前的研究热点。例如, 2020 年旷依琴等^[14]设计了一种工字形椭

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-04-20; 录用日期: 2022-06-15; 网络首发日期: 2022-06-25

基金项目: 福建省中青年教育科研项目(JAT210562); 厦门工学院嵌入式人工智能计算及应用科研创新团队(KYTD202003); 计算机科学与信息工程学院院级科研基金(EEKY202101)

通信作者: *wangjx@hqu.edu.cn

圆纳米盘超表面,灵敏度可达到 425 nm/RIU(折射率单元)、FOM 为 14。2020 年 Jeong 等^[15]提出了全介质空心长方体阵列组成的超表面,最大灵敏度为 161 nm/RIU、FOM 为 78。2021 年 Zhang 等^[16]提出了一种对偏振和入射角不敏感的“幸运结”形全介质纳米结构,灵敏度可达 986 nm/RIU、FOM 为 32.7。2022 年 Song 等^[17]提出了具有 2 个不对称矩形中空的硅圆柱体组成的折射率传感器,最大灵敏度为 160 nm/RIU、FOM 为 575。

为了得到更高 Q 值的共振,许多超表面设计中引入了连续域中束缚态(BIC)的概念^[18-19]。BIC 是指在连续域中仍然能保持局域性的状态,可以用相消干涉来解释。当连续调整系统参数时,BIC 共振模式与所有辐射波的耦合消失,从而具有无限长的寿命,这表明 Q 值无限高^[20-21]。实际中可通过破坏对称性产生泄漏共振使 BIC 变为准 BIC,准 BIC 共振具有类似 Fano 的形状^[22]。目前,已有许多不同的设计来实现高 Q 准 BIC 模式。例如不同厚度^[23]、长度^[24]或宽度^[25]的 2 个纳米块,不同排布的多聚体纳米块^[26-27],这些结构通常由单元内部间隙之间的近场互相耦合来实现共振,内部间隙使其对制造误差更加灵敏。而一些研究聚焦在利用单个不对称单元来实现 Fano 共振。这种单个结构^[28-29],不需要考虑单元内部子谐振器之间的耦合,相对减轻了工艺制造的难度。

提出了一种由非对称圆柱纳米孔阵列组成的全介质超表面折射率传感器,在近红外区域表现出电四极子(EQ)共振模式,利用有限元方法分析了结构的透射谱特性,从理论上分析了结构非对称参数与 Fano 共振的辐射 Q 值之间的关系,并进行近场分析和多极分解,证明了各种电磁激励在模式中的主导作用,同时优化结构参数得到更高灵敏的传感器,计算介质折射率的光谱响应,得到最大灵敏度为 512 nm/RIU、 Q 值为 2568.7、FOM 为 760。本文设计的超表面传感器装置为实现高灵敏、高折射率的微纳传感器提供了一定的理论价值。

2 结构设计

基于全介质纳米圆柱孔超表面的生物传感平台如图 1 所示。该传感器由周期性非对称纳米圆柱硅孔(折射率 $n_g = 3.5$)阵列构成,沉积在玻璃基板(折射率 $n_s = 1.45$)上。图 1(a)为超表面的传感装置示意图,图 1(b)、图 1(c)分别为超表面结构的单元以及俯视图。其中,结构的周期 $P = 1100$ nm,圆柱高 $H = 170$ nm,圆柱半径 $R = 440$ nm,圆柱空气孔的半径 $r = 220$ nm,纳米圆柱空气孔沿 $+x$ 方向平移,将平移量定义为非对称参数 Δ 。通过 Δ 打破结构面内的对称性,产生尖锐的 Fano 共振,使用有限元方法(FEM)对超表面的光谱响应进行数值模拟,其中,Floquet 周期边界条件应用于 x 、 y 方向,入射场为 x 极化平面波,沿 $-z$ 轴方向

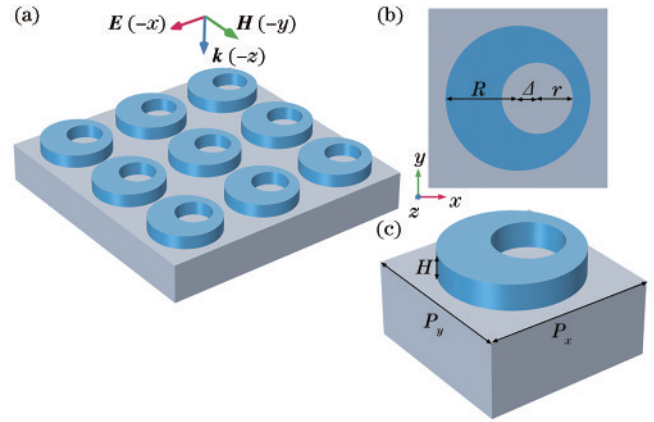


图 1 全介质超表面的结构示意图。(a)非对称纳米圆柱孔阵列示意图;(b)超表面单元结构图;(c)单元结构俯视图

Fig. 1 Schematic diagrams of the structures of an all-dielectric metasurface. (a) Schematic diagram of asymmetric nanocylindrical holes array; (b) cell structure diagram of the metasurface; (c) top view of the cell structure

传播。

此外,分析了实验制造的可行性。首先,通过使用低压物理气相沉积(LPCVD)方法,在 SiO_2 衬底上沉积 Si 膜。其次,将光刻胶旋涂在 Si 平面上并烘烤。然后,采用电子束曝光(EBL)和显影,用电感耦合等离子体(ICP)蚀刻后获得纳米孔阵列。最后,去除光刻胶并用去离子水清洗。

3 结果与讨论

3.1 共振性能分析

在不同 Δ 下的透射谱表现 Fano 共振模式,如图 2(a)所示。随着 Δ 的减小,共振峰变得越来越尖锐,当 $\Delta = 0$ nm 时,共振峰消失,意味着没有能量从束缚态泄漏到自由空间连续态,此时,对应的辐射 Q 值趋于无穷大,也证明了通过打破纳米圆柱的对称性,激发器件的 BIC 共振模式是一种对称保护型 BIC 模式。当 $\Delta = 15$ nm 时,可以观察到非常尖锐的非对称线型共振峰,即 Fano 共振,继续增加 Δ ,透射谱变得越来越宽。当 $\Delta \neq 0$ nm 时,结构单元面内对称性受到扰动,使 BIC 模式转变为可以辐射且具有高 Q 值的准 BIC 模式。平移量越小,辐射通道越窄,辐射损耗的能量越小, Q 值越大。

用经典的 Fano 公式对透射谱线进行拟合^[30]:

$$T_{\text{Fano}}(\omega) = \left| \frac{a_1 + ja_2 + b_1/(\omega - \omega_0 + j\gamma)}{a_1 + ja_2 + b_1/(\omega - \omega_0 + j\gamma)} \right|^2, \quad (1)$$

式中: ω 为谐振腔频率; ω_0 为共振峰频率; j 为虚数; a_1 、 a_2 、 b_1 为常实数; γ 为谐振腔的总衰减率,与共振谱的线宽成正比。对透射光谱中的非对称线型 Fano 共振,通常将光谱拟合到式(1),计算其辐射 Q 值。 Q 值的计算公式为 $Q = \omega_0/2\gamma$ 。当 $\Delta = 30$ nm 时,模式的透射谱曲线拟合结果如图 2(b)所示,共振波长为 1548.23 nm,

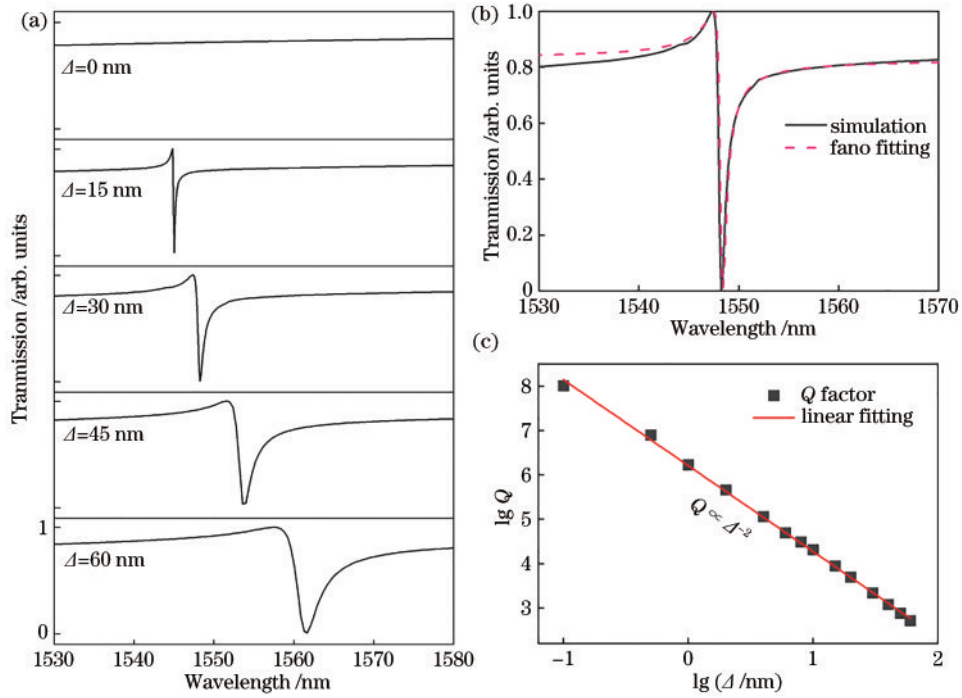


图 2 超表面透射谱分析。(a)不同非对称参数下,超表面的透射谱;(b)在 $\Delta=30$ nm时,透射谱的Fano拟合;(c)Q随着 Δ 的变化
Fig. 2 Metasurface transmission spectra analysis. (a) Transmission spectra of metasurfaces under different asymmetric parameters; (b) Fano fitting of transmission spectra at $\Delta=30$ nm; (c) Q as a function of Δ

对应的 Q 值为 2200。

还研究了辐射 Q 值与非对称参数之间的关系。当结构的对称性被破坏时,连续态与束缚态相互作用并泄漏出去,激发超高 Q Fano 共振。通过计算不同非对称参数 Δ 下超表面的 Q 值,可以证明模式是对称保护 BIC 模式。在图 2(c)中,观察到 Δ 和共振模式 Q 值满足 $Q \propto \Delta^{-2}$ 的二次逆关系,即对称保护 BIC 的基本条件^[22]。

此外,为了直观显示对应透射率最低值的电磁激

发模式,在共振波长位置处,单元结构的近场分布示意图如图 3 所示。场模式被归一化为入射电磁场,最大场增强可达 120 倍。在共振波长处, xoy 平面内场分布是一个电四极子的位移电流分布,如图 3(a)所示。图 3(b)、图 3(c)显示了结构单元在 yoz 平面、 xoz 平面中的归一化磁场分布,其中磁场方向沿 x 轴、 y 轴反转,可以分别认为是 2 个电偶极子(ED)。这种由连续体中的 EQ-BIC 激发的 Fano 共振表现出 EQ 特性,也表现出 BIC 特性。

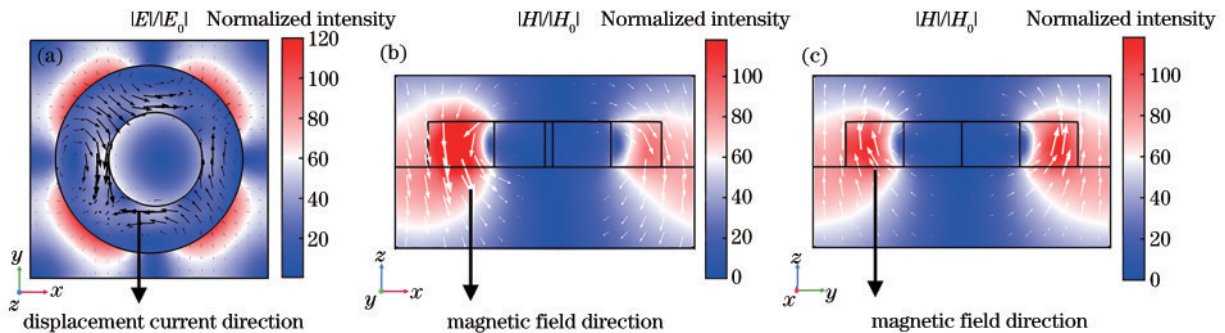


图 3 在 $\Delta=30$ nm共振波长处的归一化场分布。(a) xoy 平面的电场分布;(b) xoz 平面的磁场分布;(c) yoz 平面的磁场分布
Fig. 3 Normalized field distribution at resonant wavelength with $\Delta=30$ nm. (a) Electric field distribution in the xoy plane; (b) magnetic field distribution in the xoz plane; (c) magnetic field distribution in the yoz plane

为了研究 Fano 共振的特性,采用笛卡儿坐标系的多极子分解方法,计算了在 $\Delta=30$ nm 时每个多极子对共振响应的贡献。由于高阶多极子贡献很小,只考虑电偶极子 \mathbf{P} 、磁偶极子 \mathbf{M} 、环形偶极子 \mathbf{T} 、电四极子 $\mathbf{Q}^{(e)}$ 和磁四极子 $\mathbf{Q}^{(m)}$ 。多极矩^[31-32]定义为

$$\mathbf{P} = \frac{1}{i\omega} \int \mathbf{j} d^3 \mathbf{r}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2c} \int (\mathbf{r} \times \mathbf{j}) d^3 \mathbf{r}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \frac{1}{10c} \int [(\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \mathbf{r} - 2r^2 \mathbf{j}] d^3 \mathbf{r}, \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_{\alpha,\beta}^{(e)} = \frac{1}{2i\omega} \int \left[(\mathbf{r}_\alpha \mathbf{j}_\beta + \mathbf{r}_\beta \mathbf{j}_\alpha) - \frac{2}{3} \delta_{\alpha,\beta} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{j}) \right] d^3 \mathbf{r}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_{\alpha,\beta}^{(m)} = \frac{1}{3c} \int [(\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\alpha \mathbf{r}_\beta + (\mathbf{r} \times \mathbf{j})_\beta \mathbf{r}_\alpha] d^3 \mathbf{r}, \quad (6)$$

式中： \mathbf{j} 为电流密度； \mathbf{r} 为位置矢量； c 为光速； ω 为角频率； $\alpha=x, y, z; \beta=x, y, z$ 。多极动量的散射功率可用下列公式进行计算：

$$I_P = \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{P}|^2, \quad (7)$$

$$I_M = \frac{2\omega^4}{3c^3} |\mathbf{M}|^2, \quad (8)$$

$$I_T = \frac{2\omega^6}{3c^5} |\mathbf{T}|^2, \quad (9)$$

$$I_{Q^{(e)}} = \frac{\omega^6}{5c^5} \sum |\mathbf{Q}_{\alpha,\beta}^{(e)}|^2, \quad (10)$$

$$I_{Q^{(m)}} = \frac{\omega^6}{40c^5} \sum |\mathbf{Q}_{\alpha,\beta}^{(m)}|^2, \quad (11)$$

如图 4 所示,在共振波长处,EQ 对远场辐射的贡献占主要,多极子分解的结果与图 3 中的近场分布情况一致,图 4 中 $\lg P_s$ 为散射功率。

3.2 结构参数对传输性能的影响

分析了结构参数变化对透射谱的影响,如图 5 所示。由图 5 可知,共振波长对超表面圆柱半径 R 更敏感。超表面的共振透射谱随着超表面周期 P 的增加,

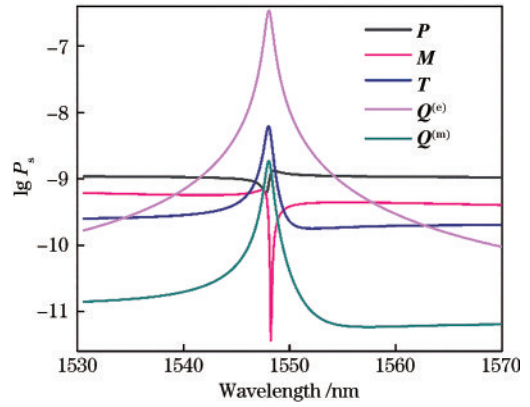


图 4 电偶极子 \mathbf{P} 、磁偶极子 \mathbf{M} 、环形偶极子 \mathbf{T} 、电四极子 $\mathbf{Q}^{(e)}$ 和磁四极子 $\mathbf{Q}^{(m)}$ 的远场散射贡献
Fig. 4 Far-field scattering contributions of electric dipole \mathbf{P} , magnetic dipole \mathbf{M} , toroidal dipole \mathbf{T} , electric quadrupole $\mathbf{Q}^{(e)}$, and magnetic quadrupole $\mathbf{Q}^{(m)}$

有一定的红移。随着圆柱高度和半径的增加,共振也出现红移现象。而随着纳米圆柱孔的半径增加,共振出现明显的蓝移。可以用硅超表面的有效折射率来解释,随着纳米圆柱孔的半径增加,硅超表面的有效折射率降低,共振腔中光与物质的相互作用逐渐减小,导致共振位置发生蓝移,而随着周期、圆柱的高度和半径增加,硅超表面的有效折射率增加,共振腔中光与物质的

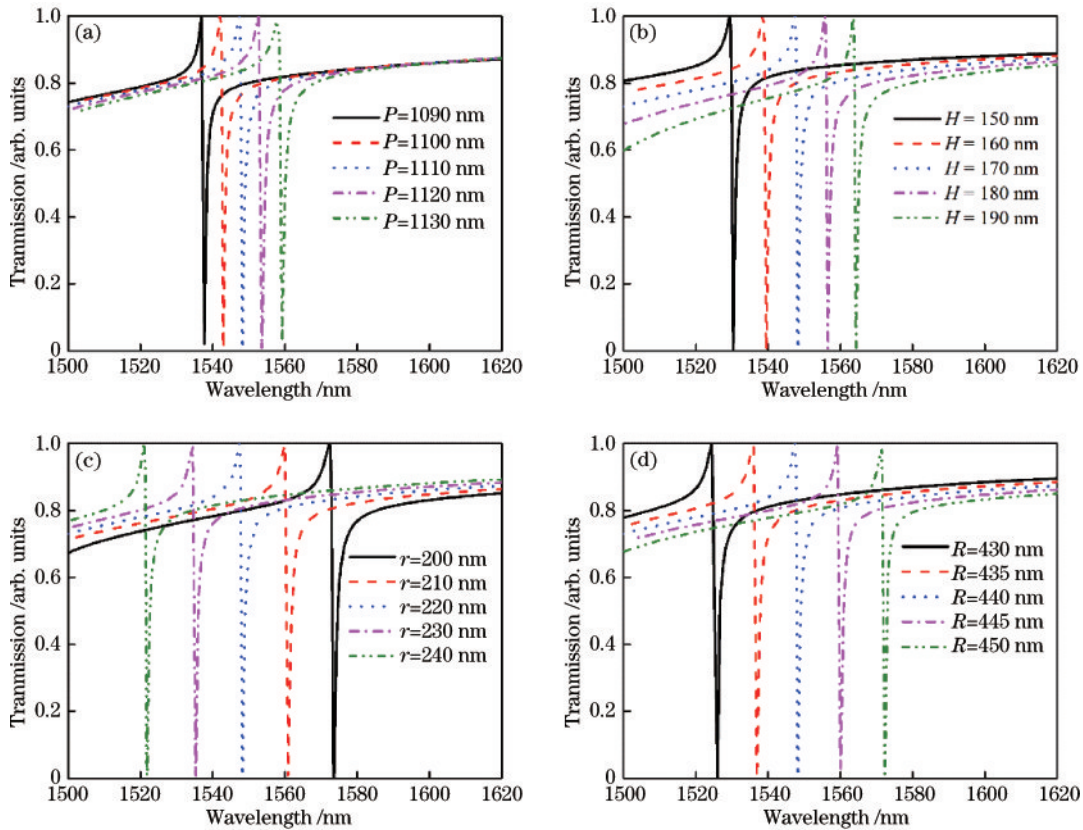


图 5 结构参数对透射谱的影响。(a)周期 P ; (b)圆柱高度 H ; (c)圆柱孔半径 r ; (d)圆柱半径 R

Fig. 5 Influence of structural parameters on transmission spectra. (a) Period P ; (b) cylinder height H ; (c) cylinder hole radius r ; (d) cylinder radius R

相互作用逐渐增大,导致共振位置发生红移^[33]。

3.3 折射率传感特性分析

传感器的灵敏度越高,越容易探测出传感器周围介电性质的微小变化。敏感度可表示为^[34] $S = \Delta\lambda/\Delta n$, $\Delta\lambda$ 为共振波长的变化量, Δn 为周围环境的变化引起的折射率变化量,单位为 RIU。传感器的 FOM 可表征传感器的整体性能,更高的 FOM 说明传感器的性能更优异。FOM 可表示为^[35] $f_{\text{FOM}} = S/f_{\text{FWHM}}$, f_{FWHM} 为 Fano 共振线半峰处的宽度, S 为传感器的灵敏

度。高灵敏度的传感器意味着更多的光场从器件中泄漏,而高 Q 值(即窄线宽)则需要传感器具有较强的束缚能力,因此灵敏度与 Q 值之间相互制约,影响 FOM。

选取优化之后的结构参数为 $P=1110\text{ nm}$ 、 $R=440\text{ nm}$ 、 $H=170\text{ nm}$ 、 $r=220\text{ nm}$,分析物厚度为 340 nm 时的传感性能,如图 6 所示。当折射率从 1.31 以 0.02 的步长增加到 1.39 时,透射谱出现明显的红移,对应的灵敏度为 512 nm/RIU 、 Q 值为 2568.7、FOM 为 760,与先前提出的一些结构^[14-15,30]相比在传感性能上具有一定优势。

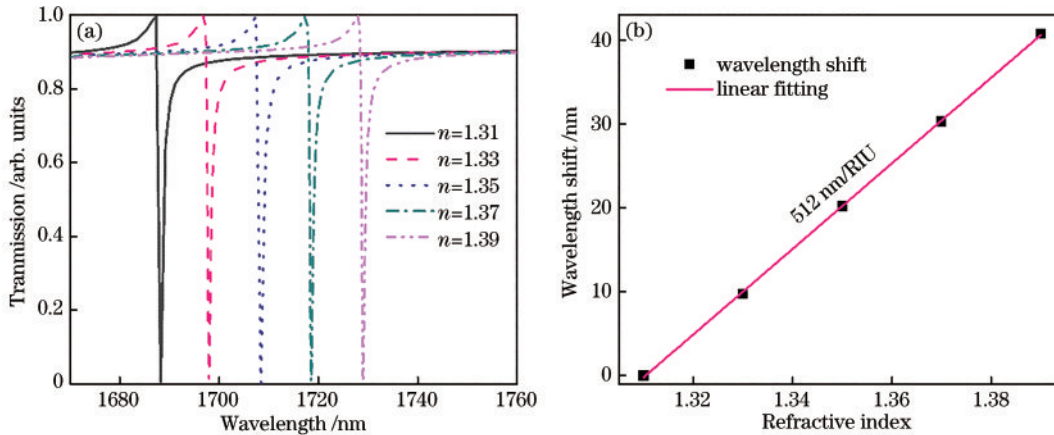


图 6 传感性能分析。(a)不同分析物折射率的透射谱变化;(b)不同分析物折射率下波长的偏移量
Fig. 6 Analysis of sensing performances. (a) Variation of transmission spectra for different analyte refractive indices; (b) wavelength shift for different analyte refractive indices

4 结 论

提出了一种具有 Fano 共振的全介质超表面折射率传感平台,通过平移圆柱纳米孔,打破超表面平面内的对称性,可以激发 EQ 共振模式。随着结构非对称参数的减小, Q 值遵循二次逆规律,从理论证明了该模式受对称保护 BIC 控制,近场分布和多极分解的计算结果,可以证明 Fano 共振模式主要由 EQ 贡献。分析超表面对传感性能的影响可知,该传感器的最大灵敏度可达 512 nm/RIU 、 Q 值为 2568.7、FOM 为 760。通过降低非对称参数,可以获得更高的 Q 值并进一步改善 FOM。此外,通过改变不同的结构参数可以调整 Fano 共振,使其更加适合传感应用,与其他复杂的纳米结构相比,所提超表面结构更简单、更具有实用性,为生化传感平台提供了一定的理论参考价值。

参 考 文 献

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. Science, 2001, 292(5514): 77-79.
- [2] Kinsey N, DeVault C, Boltasseva A, et al. Near-zero-index materials for photonics[J]. Nature Reviews Materials, 2019, 4(12): 742-760.
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [4] Chen W T, Zhu A Y, Sanjeev V, et al. A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible[J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 220-226.
- [5] Lu H C, Guo X W, Zhang J, et al. Asymmetric metasurface structures for light absorption enhancement in thin film silicon solar cell[J]. Journal of Optics, 2019, 21(4): 045901.
- [6] Chen T, Li S Y, Sun H. Metamaterials application in sensing[J]. Sensors, 2012, 12(3): 2742-2765.
- [7] 陈颖, 张敏, 丁志欣, 等. 基于全介质超表面的微流体折射率传感器[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0613001. Chen Y, Zhang M, Ding Z X, et al. Microfluidic refractive index sensor based on all-dielectric metasurfaces [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0613001.
- [8] Neira A D, Wurtz G A, Ginzburg P, et al. Ultrafast all-optical modulation with hyperbolic metamaterial integrated in Si photonic circuitry[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10987-10994.
- [9] Liu N, Mesch M, Weiss T, et al. Infrared perfect absorber and its application as plasmonic sensor[J]. Nano Letters, 2010, 10(7): 2342-2348.
- [10] Ding C F, Jiang L K, Wu L, et al. Dual-band ultrasensitive THz sensing utilizing high quality Fano and quadrupole resonances in metamaterials[J]. Optics

- Communications, 2015, 350: 103-107.
- [11] Jahani S, Jacob Z. All-dielectric metamaterials[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(1): 23-36.
- [12] Bi K, Wang Q M, Xu J C, et al. All-dielectric metamaterial fabrication techniques[J]. Advanced Optical Materials, 2021, 9(1): 2001474.
- [13] 包益宁, 刘秀红, 胡劲华, 等. 基于凹型谐振光栅的高性能光学折射率传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0913001.
Bao Y N, Liu X H, Hu J H, et al. High-performance optical refractive index sensor based on concave resonant grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0913001.
- [14] 旷依琴, 李刚, 闫竹青, 等. 工字形椭圆纳米结构的吸收及其折射率敏感特性研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1424001.
Kuang Y Q, Li G, Yan Z Q, et al. Absorption and refractive index sensitivity of the I-shaped elliptical nanostructures[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1424001.
- [15] Jeong J, Goldflam M D, Campione S, et al. High quality factor toroidal resonances in dielectric metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2020, 7(7): 1699-1707.
- [16] Zhang Y H, Liang Z Z, Meng D J, et al. All-dielectric refractive index sensor based on Fano resonance with high sensitivity in the mid-infrared region[J]. Results in Physics, 2021, 24: 104129.
- [17] Song S Z, Yu S L, Li H, et al. Ultra-high Q -factor toroidal dipole resonance and magnetic dipole quasi-bound state in the continuum in an all-dielectric hollow metasurface[J]. Laser Physics, 2022, 32(2): 025403.
- [18] Marinica D C, Borisov A G, Shabanov S V. Bound states in the continuum in photonics[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(18): 183902.
- [19] Hsu C W, Zhen B, Stone A D, et al. Bound states in the continuum[J]. Nature Reviews Materials, 2016, 1: 16048.
- [20] Koshelev K, Lepeshov S, Liu M K, et al. Asymmetric metasurfaces with high- Q resonances governed by bound states in the continuum[J]. Physical Review Letters, 2018, 121(19): 193903.
- [21] Bogdanov A A, Koshelev K L, Kapitanova P V, et al. Bound states in the continuum and Fano resonances in the strong mode coupling regime[J]. Advanced Photonics, 2019, 1(1): 016001.
- [22] Li S Y, Zhou C B, Liu T T, et al. Symmetry-protected bound states in the continuum supported by all-dielectric metasurfaces[J]. Physical Review A, 2019, 100(6): 063803.
- [23] Wang W D, Zheng L, Xiong L, et al. High Q -factor multiple Fano resonances for high-sensitivity sensing in all-dielectric metamaterials[J]. OSA Continuum, 2019, 2(10): 2818-2825.
- [24] Long X Y, Zhang M, Xie Z W, et al. Sharp Fano resonance induced by all-dielectric asymmetric metasurface[J]. Optics Communications, 2020, 459: 124942.
- [25] Peng C Y, Feng C H, Xia J, et al. Near-infrared Fano resonance in asymmetric silicon metagratings[J]. Journal of Optics, 2020, 22(9): 095102.
- [26] Kupriianov A S, Xu Y, Sayanskiy A, et al. Metasurface engineering through bound states in the continuum[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(1): 014024.
- [27] Wang Y L, Han Z H, Du Y, et al. Ultrasensitive terahertz sensing with high- Q toroidal dipole resonance governed by bound states in the continuum in all-dielectric metasurface[J]. Nanophotonics, 2021, 10(4): 1295-1307.
- [28] Campione S, Liu S, Basilio L I, et al. Broken symmetry dielectric resonators for high quality factor fano metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2016, 3(12): 2362-2367.
- [29] Cui C C, Zhou C B, Yuan S, et al. Multiple Fano resonances in symmetry-breaking silicon metasurface for manipulating light emission[J]. ACS Photonics, 2018, 5(10): 4074-4080.
- [30] Yang L, Yu S L, Li H, et al. Multiple Fano resonances excitation on all-dielectric nanohole arrays metasurfaces[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 14905-14916.
- [31] Alaee R, Rockstuhl C, Fernandez-Corbaton I. An electromagnetic multipole expansion beyond the long-wavelength approximation[J]. Optics Communications, 2018, 407: 17-21.
- [32] Song D F, Wang H, Deng M, et al. Toroidal dipole Fano resonances supported by lattice-perturbed dielectric nanohole arrays in the near-infrared region[J]. Applied Optics, 2021, 60(12): 3458-3463.
- [33] Zhou C B, Liu G Q, Ban G X, et al. Tunable Fano resonator using multilayer graphene in the near-infrared region[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(10): 101904.
- [34] Zhong Y J, Du L H, Liu Q, et al. All-silicon terahertz metasurface with sharp Fano resonance and its sensing applications[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(2): 4600210.
- [35] Maksimov D N, Gerasimov V S, Romano S, et al. Refractive index sensing with optical bound states in the continuum[J]. Optics Express, 2020, 28(26): 38907-38916.