

## 激光与光电子学进展

## 基于 C3 对称性破缺的多重法诺共振与光学传感

张景朝<sup>1</sup>, 罗晓清<sup>1\*</sup>, 徐晓峰<sup>1</sup>, 骆又麟<sup>1</sup>, 朱卫华<sup>1</sup>, 陈志勇<sup>1</sup>, 王新林<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>南华大学电气工程学院超快微纳技术与激光先进制造湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001;<sup>2</sup>南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001

**摘要** 数值研究了由同心 C3 型孔和圆环孔单元结构组成的复合超表面在近红外波段内的表面等离子体三重法诺共振效应与光学传感现象。研究表明,通过改变 C3 单元结构的对称性破缺不仅能够诱导产生可调的多重法诺共振效应,还能构建基于该效应的自参考光学传感。此外,通过改变圆环单元结构的内半径能够实现基于法诺凹陷深度的辐射监测传感。该研究为设计紧凑、可调谐的法诺共振光子器件提供了新的视角,同时可将周期性亚波长金属纳米结构扩展至生物传感和光通信领域的相关应用。

**关键词** 光电子学; 表面等离子体光子学; 表面等离子体; 光学传感和传感器

中图分类号 O431

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220540

## Multiple Fano Resonances and Optical Sensing Based on C3-Symmetry-Breaking

Zhang Jingzhao<sup>1</sup>, Luo Xiaoqing<sup>1\*</sup>, Xu Xiaofeng<sup>1</sup>, Luo Youlin<sup>1</sup>, Zhu Weihua<sup>1</sup>, Chen Zhiyong<sup>1</sup>, Wang Xinlin<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>Hunan Province Key Laboratory for Ultra-Fast Micro/Nano Technology and Advanced Laser Manufacture, School of Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China;<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China

**Abstract** In this study, we numerically investigate surface plasmonic triple Fano resonances and optical sensing in the near-infrared band using a hybrid metasurface consisting of concentric C3-hole and circular-ring-aperture unit cells. The results reveal that by changing the symmetry breaking of the C3 unit cells, we can not only induce a tunable multi Fano resonance effect but also enable self-reference optical sensing. In addition, a radiation monitoring sensing capability, which depends on the depth of the Fano dips, can be realized by varying the inner radius of the circular-ring-aperture unit cells. Our results provide a new perspective for the design of compact and tunable Fano resonance photonic devices and enable the incorporation of periodic subwavelength metal nanostructures into relevant biosensing and optical communication applications.

**Key words** optoelectronics; surface plasmonics; surface plasmons; optical sensing and sensors

## 1 引言

表面等离子体<sup>[1]</sup>是入射光与金属亚波长纳米结构发生相互作用时产生的,金属结构表面的自由电子会被入射光激发进而产生集体振荡,从而可以有效改善结构周围的电磁场分布情况。正是由于表面等离子体具有亚波长、高强度局域场增强的特点,可以用来设计

小型的可高度集成的光学器件,如光学传感器<sup>[2]</sup>、可调谐滤波器<sup>[3]</sup>、干涉仪<sup>[4]</sup>等。超构材料是由金属或介电材料构成的二维或三维结构,可在纳米尺度上精确调控光与物质相互作用<sup>[5-6]</sup>。二维光学超构材料具有亚波长周期性单元结构,亦称超表面,由于其具有超轻、超薄、易于集成等特点,引起了人们广泛的研究兴趣。在超表面中,通过调整谐振单元结构的几何参数,如形

录用日期: 2022-02-21; 收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-03-03; 网络首发日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(12104214)、湖南省自然科学基金(2020JJ5466)、超快微纳技术与激光先进制造湖南省重点实验室项目(2018TP1041)、湖南省教育委员会基金(19C1585)

通信作者: \*xqluophys@gmail.com; \*\*wxi\_ly000@aliyun.com

状、尺寸以及复合单元结构之间的几何参数,能够实现 对光频电磁波的调控,包括光束转换<sup>[7-8]</sup>、超透镜<sup>[9]</sup>、二次谐波增强<sup>[10]</sup>等。

法诺共振是在光与物质相互作用系统中被广泛研究的一种光学干涉现象。金属纳米结构中的法诺共振效应可由具有窄线宽的等离子体共振模式(暗模)和具有宽线宽的等离子体共振模式(亮模)的干涉相互作用产生。由于法诺共振具有非对称的窄光谱线型<sup>[11]</sup>和强的场增强效应<sup>[12]</sup>,在激光器<sup>[13-14]</sup>、光学开关<sup>[15-17]</sup>、光学滤波器<sup>[18-19]</sup>和光学传感<sup>[20-23]</sup>等领域展示出广阔的应用前景。然而,多重法诺共振效应显著不同于单一法诺共振效应,因为其光谱图中包含多个波长下可同时调控的特性。这不仅有利于在多个波长下同时实现较大的局域场增强,还有助于基于多重法诺共振效应的纳米传感器在高度集成电路、多元件生物传感<sup>[24-26]</sup>中的应用。但是在多重法诺共振中共振峰谐振频率的精确调控较难实现。此外,超表面在不稳定或复杂的周围环境情况下,基于等离子体多重法诺共振中以单个共振峰为参考信号的自参考光学传感的研究还相对较少,仍需进一步研究。

因此,本文提出了一种由同心 C3 型孔和圆环孔单元结构组成的复合超表面结构,并以此实现了具有可调控的多重法诺效应和自参考光学传感现象。当近红外波段窄的电偶极共振模式( $D_{CS}$ )和宽的电偶极共振模式( $D_{CRA}$ )存在光谱重叠时,两者通过偶极相互作用能够在复合超表面结构中产生三重法诺共振现象。与此同时,多模干涉耦合模理论分析与数值仿真结果吻合较好。通过调整 C3 对称性孔的几何参数,引入 C3 对称性破缺,不仅能够实现单一(双重)法诺共振与双(三)重法诺共振之间的调控,还可以实现以其中一个法诺共振峰为

参考信号的自参考光学传感。此外,通过改变圆环的内半径可实现单一法诺共振、双重法诺共振与三重法诺共振之间的调控,其中法诺共振的谷深和谷宽分别呈正弦函数和指数函数变化。基于此特性,在复合超表面结构中可构建基于法诺凹陷深度的辐射监测传感。总之,基于多重法诺共振峰谐振频率的精确调控为设计紧凑、可调谐的法诺共振器件提供了一个新的视角,也拓宽了亚波长纳米结构在生物传感器和光通信领域<sup>[27]</sup>的应用。

## 2 结构与模型

如图 1(a)所示,本文设计了一种新型的复合超表面,它是由同心的 C3 对称性结构和圆环孔单元结构的周期性孔阵列组成。基底采用石英材料,其中基底的厚度设置为 225 nm。与此同时,因为 Ag 在可见光和近红外区域具有较低吸收损耗的特性,选用 Ag 作为金属薄膜,其厚度为 50 nm。沿 Y 轴正向传播的线偏振入射脉冲光场从石英衬底一侧垂直照射于 Ag 膜,且入射光的初始偏振沿 X 轴方向。图 1(b)是 X-Z 平面上单元结构的放大截面图;其中  $P_x$  和  $P_z$  分别表示沿 X 轴方向和 Z 轴方向上的阵列周期大小;灰色部分是 Ag 膜,白色部分是空气; $R_1$  和  $R_2$  分别是圆环结构的内外半径; $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  分别代表 C3 结构中三个臂的长度。采用三维时域有限差分方法对复合超表面进行数值模拟。根据数值稳定性条件,设置时间步长为 8.3 as,网格大小为 5 nm。Ag 膜的介电常数用修正的 Drude 模型来描述,石英的介电常数设为 2.25。入射光为调制超短高斯脉冲,中心波长为 1550 nm,脉冲中心时刻为 16 fs,脉宽为 5 fs。将单元结构的 X 轴方向和 Z 轴方向设置为周期性边界条件,使用完全匹配层作为 Y 轴方向的吸收边界条件。

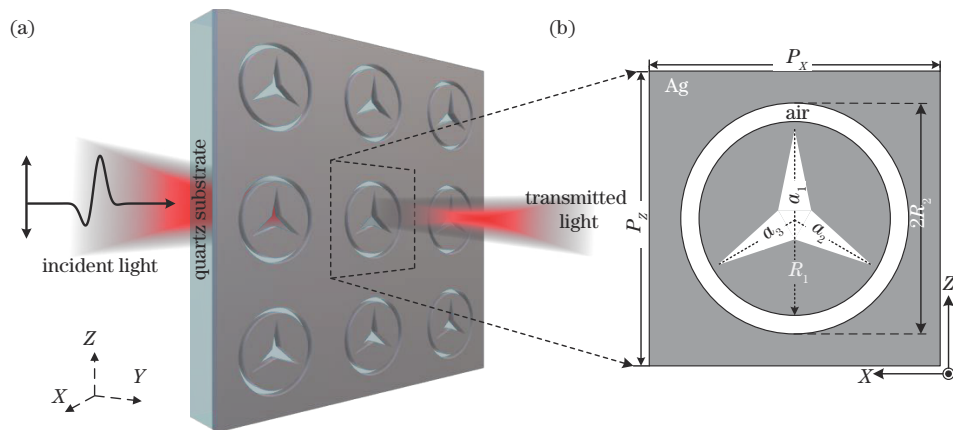


图 1 结构示意图。(a)复合超表面结构示意图;(b)X-Z平面上复合超表面单元结构的放大截面图

Fig. 1 Schematic diagram of structure. (a) Schematic diagram of hybrid metasurface structure; (b) enlarged cross-sectional view of hybrid metasurface unit cell in X-Z plane

## 3 结果与讨论

### 3.1 近红外区域的等离子体法诺共振

在入射光的偏振沿 X 轴方向的条件下,分别研究

单个 C3 型对称结构、单个圆环结构与圆环-C3 复合结构的透射光谱,如图 2 所示,其中 C3 型结构的臂长  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  均为 150 nm,圆环内外半径  $R_1$  与  $R_2$  分别为 175 nm 与 200 nm。如图 2(a)所示,单个 C3 型结构仅

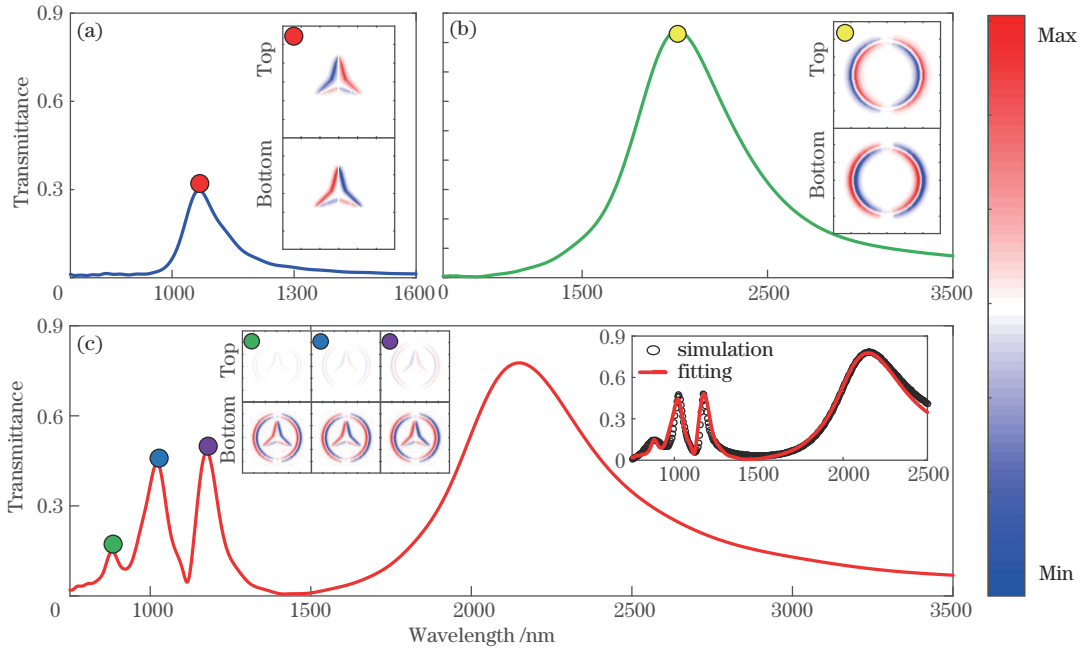


图 2 三种不同结构:(a)单个C3型结构、(b)单个圆环结构和(c)复合超表面结构在入射光偏振方向沿X轴方向的透射光谱图  
Fig. 2 Transmission spectra of three different structures: (a) Individual C3 unit cells, (b) individual circular-ring-aperture unit cells, and (c) hybrid metasurface structure when polarization of incident light is along X-direction

在 1068 nm 处呈现一个非对称线型的法诺共振峰,峰的右侧斜率要小于左侧,这是由于在入射光X偏振方向下所激发出的电偶极( $D_{C3}$ )和电四极( $Q_{C3}$ )模式杂化相互作用产生具有选择性激发的反键态( $D_{C3}-Q_{C3}$ )<sup>[28]</sup>。同时,如图 2(a)的插图所示,给出了C3型结构在相关波长处的电荷分布,上方的面板为Ag/空气界面处的电荷分布,下方的面板为Ag/石英界面处的电荷分布。如上所述的模式杂化相互作用也可以从图 2(a)插图中的电荷分布中得到证实。为简单起见,可将反成键模式视为有效电偶极模式  $D_{C3}$ 。如图 2(b)所示,单个圆环结构在 2010 nm 处呈现一个非对称的共振峰,即电偶极( $D_{CRA}$ )共振模式,这也可以通过图 2(b)右侧插图的电荷分布来证实。当透射光谱中的两个电偶极模之间存在光谱重叠时,近红外波段的窄的电偶极( $D_{C3}$ )和宽的电偶极( $D_{CRA}$ )的相互作用,导致在复合超表面的透射光谱中出现 3 处明显的法诺凹陷,这表明三重法诺共振效应的产生。复合超表面的透射光谱如图 2(c)所示,在近红外波段的 879、1021、1177、2142 nm 处出现了 4 个共振峰。其中,879 nm 处的共振峰为两种结构之间相互作用新产生的法诺共振峰;1021 nm 处的共振峰对应于单个C3结构所激发的模式;1177 nm 处的共振峰的出现主要是由于窄的电偶极( $D_{C3}$ )和宽的电偶极( $D_{CRA}$ )相互作用过程中所激发一个暗模引起的,其强度已经大于原有模式的峰值;2142 nm 处的共振峰对应于单个圆环结构所激发的模式。所以为了探索等离子体法诺共振的物理机制,本文使用多模干涉耦合模理论,使其能够从理论分析的角度来解释系统中不同的模式间产生的多法诺共振。

在本文结构中,一种法诺共振源于C3结构自身共振模式之间的相互作用,另一种法诺共振源于C3结构与圆环共振模式间的相互作用。因此,分别改变C3结构和圆环结构参数能够实现多重法诺共振现象之间的调控<sup>[29]</sup>。

基于多模干涉耦合模理论,进一步探究本文方案中多法诺共振的物理机制。已知多模干涉耦合模理论适用于多个模式相互作用,考虑到多个模式所对应的各个相位问题,可以得到透射率简化公式<sup>[30-31]</sup>为

$$T = \sum_{n=1}^N \frac{2\exp(i\varphi_n)}{-i(\omega - \omega_n)\tau_n + 2 + \frac{\tau_n}{\tau_{n0}}}, \quad (1)$$

式中: $\omega_n$ 和 $\tau_{n0}$ 分别是第 $n$ 个共振模式的共振频率和内部损耗的衰减时间; $\varphi_n$ 是第 $n$ 个谐振模式的输出端口和输入端口之间的相位差。将上式拟合到复合结构在近红外波段的透射光谱上,得到与数值模拟透射光谱图几乎重合的多模干涉耦合模理论曲线,如图 2(c)右侧插图所示。其中,圆环-C3型对称性复合结构谐振系统的相关参数: $N=4$ ,每一个模式的相位差分别为 $\varphi_1 = -0.1\pi$ 、 $\varphi_2 = 0.26\pi$ 、 $\varphi_3 = 0.6\pi$ 、 $\varphi_4 = 0.38\pi$ ;衰减时间分别为 $\tau_1 = 40$  fs、 $\tau_2 = 210$  fs、 $\tau_3 = 415$  fs、 $\tau_4 = 285$  fs;频率分别为 $\omega_1 = 3.41 \times 10^{14}$  rad/s、 $\omega_2 = 2.94 \times 10^{14}$  rad/s、 $\omega_3 = 2.55 \times 10^{14}$  rad/s、 $\omega_4 = 1.40 \times 10^{14}$  rad/s;内损耗衰减时间分别为 $\tau_{10} = 357.07$  fs、 $\tau_{20} = 460.64$  fs、 $\tau_{30} = 924.60$  fs、 $\tau_{40} = 154.60$  fs。由此可知,多模干涉耦合模理论能够从理论上证明圆环结构和C3对称性结构之间相互作用产生的是三重法诺共振。

### 3.2 调节圆环-C3 结构非对称性破缺诱导可调的多重法诺共振

考虑圆环-C3 型复合超表面中具有不同几何构型的单元结构来探索可设计的等离子体法诺共振。如图 3 所示,在入射光偏振方向沿 X 轴正方向的条件,单独改变  $a_2$  的长度使其从 100 nm 增加至 160 nm,设置采样间距为 15 nm。从图 3 中看出,最左和最右的共振

峰并没有发生明显的变化,而中间两个共振峰发生明显的简并。由于该结构是镜像对称的,所以改变  $a_3$  会得到和  $a_2$  相同的结果,所以通过调节  $a_2, a_3$  两个臂长都可以实现双重和三重法诺共振之间的切换。

如图 4 所示,设置  $a_2, a_3$  的长度分别为 100、130、160 nm,单独改变  $a_1$  的长度使其从 100 nm 增加至 160 nm 且间隔为 10 nm。从图 4 中能够看出,随着  $a_1$  的

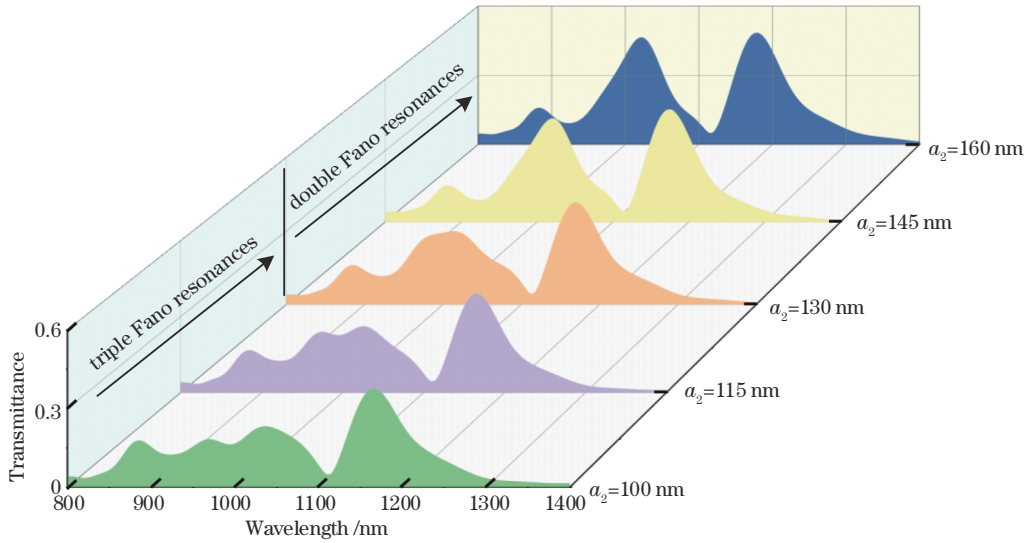


图 3 当入射光偏振方向沿 X 轴时不同的  $a_2$  取值(100~160 nm)对法诺共振峰的影响所对应的透射光谱图

Fig. 3 Transmission spectra corresponding to influence of different values of  $a_2$  (100–160 nm) on Fano resonances when polarization of incident light is along X-direction.

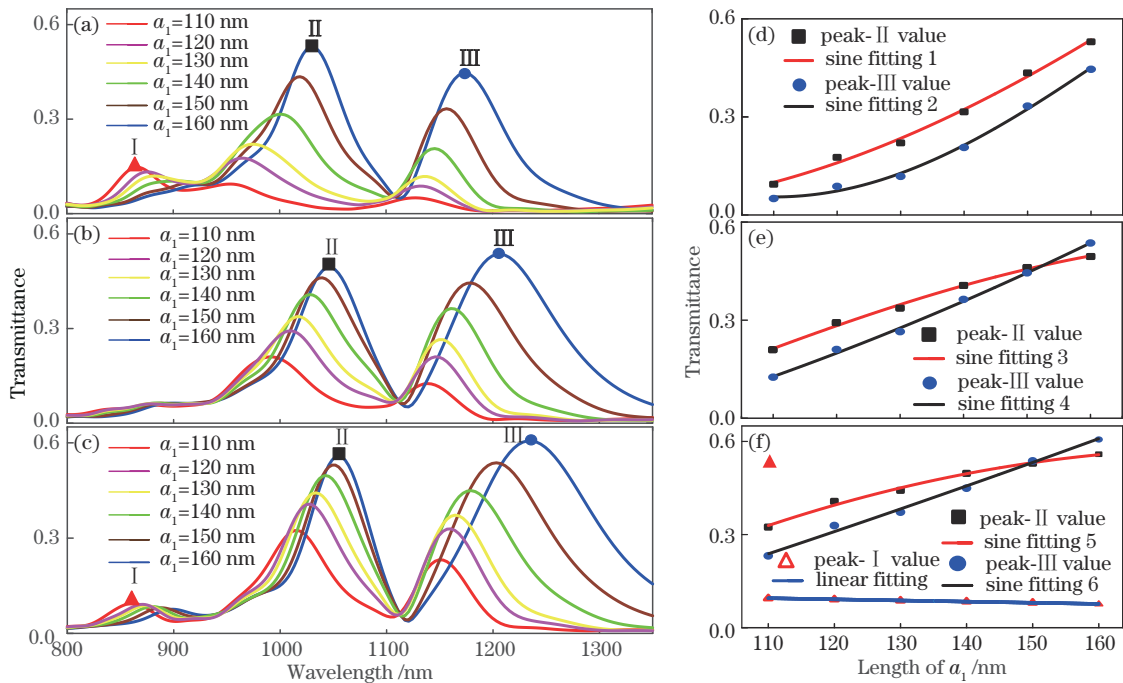


图 4 在入射光偏振方向沿 X 轴方向下  $a_2$  和  $a_3$  同时分别取(a) 100 nm、(b) 130 nm、(c) 160 nm 时,不同的  $a_1$  取值所对应的透射光谱。

(d)、(e)和(f)分别表示峰-I、峰-II和峰-III的透射率峰值随  $a_1$  变化分别进行 sine 函数和线性拟合

Fig. 4 Transmission spectra corresponding to different values of  $a_1$  when  $a_2$  and  $a_3$  are set as (a) 100 nm, (b) 130 nm, and (c) 160 nm, respectively, under polarization of incident light along X-direction. (d), (e), and (f) indicate transmittance of peak-I, peak-II, and peak-III with different  $a_1$  varies as sine and linear functions, respectively

长度逐渐增加,近红外波段的所有共振峰都发生了红移,但是对比图 4(a)、4(b)、4(c)在共振峰-I 又有一些差别。图 4(a)中,随着  $a_1$  长度的增加,共振峰-I 有一个从有到无的过程。而图 4(b)中,共振峰-I 直接消失在透射谱图中。到图 4(c)中,共振峰-I 再次出现,并且随着  $a_1$  长度的增加,共振峰-I 开始红移,但是透射强度变化不大。当  $a_2$  和  $a_3$  的长度固定为 100 nm 时,共振峰-II 与共振峰-III 的幅值随  $a_1$  长度变化的曲线,如图 4(d)所示。此时,系统工作在 C3 对称性破缺的情况下。如图 4(d)的方形点与圆形点曲线所示,由于共振峰-II 与共振峰-III 是类电偶极共振模式,所以它们的幅值均呈 sine 曲线[分别正比于  $\sin(0.0125 a_1)$  和  $\sin(0.0286 a_1)$ ]变化趋势<sup>[32]</sup>。因此,在 C3 对称性破缺的情况下,共振峰-III 的光学传感特性优于共振峰-II。同理,当  $a_2$  和  $a_3$  的长度固定为 130 nm 时,如图 4(e)所示,共振峰-II 与共振峰-III 的幅值也呈 sine 曲线[分别正比于  $\sin(0.0162 a_1)$  和  $\sin(0.0025 a_1)$ ]变化趋势。然而,仅当  $a_1=130$  nm 时,系统工作在 C3 对称性情况,其余部分系统工作在 C3 对称性破缺的情况。因此,在此类 C3 对称性破缺情况下,共振峰-II 的光学传感特性优于共振峰-III。当  $a_2$  和  $a_3$  的长度固定为 160 nm 时,

如图 4(f)所示,共振峰-II 与共振峰-III 的幅值也呈 sine 曲线[分别正比于  $\sin(0.001 a_1)$  和  $\sin(0.0014 a_1)$ ]变化趋势。值得注意的是,当  $a_1=160$  nm 时,系统工作在 C3 对称性情况,其余部分系统工作在 C3 对称性破缺的情况。此时,共振峰-III 的光学传感特性优于共振峰-II。有趣的是,在此过程中,共振峰-I 的幅值竟对  $a_1$  的长度变化不敏感。因此,在此类 C3 对称性破缺的情况下,共振峰-I 可与共振峰-II 和共振峰-III 的自参考光学传感<sup>[33]</sup>对应。简而言之,通过改变 C3 型孔结构中  $a_1$  的长度,能够实现不同 C3 对称性破缺情况下呈 sine 曲线变化的光学传感及自参考光学传感特性。

如图 5(a)、5(b)所示,讨论圆环内半径大小对透射谱的影响。设置圆环内半径  $R_1$  从 160 nm 到 190 nm 的范围内变化,间隔为 5 nm,其他参数(如外半径、C3 结构臂长、单元结构周期)保持不变。如图 5(a)示出了随着圆环内半径的不断增大,圆环-C3 型复合超表面透射率的变化趋势。随着  $R_1$  增加至 170 nm 时,原位于 827 nm 处和 854 nm 处的两个共振峰发生了模式的简并,变为了一个共振峰。简并形成的新的共振峰继续红移与 910 nm 处的共振峰发生简并,在内半径为 190 nm 的时候变为在 1049 nm 处的一个共振峰。透射

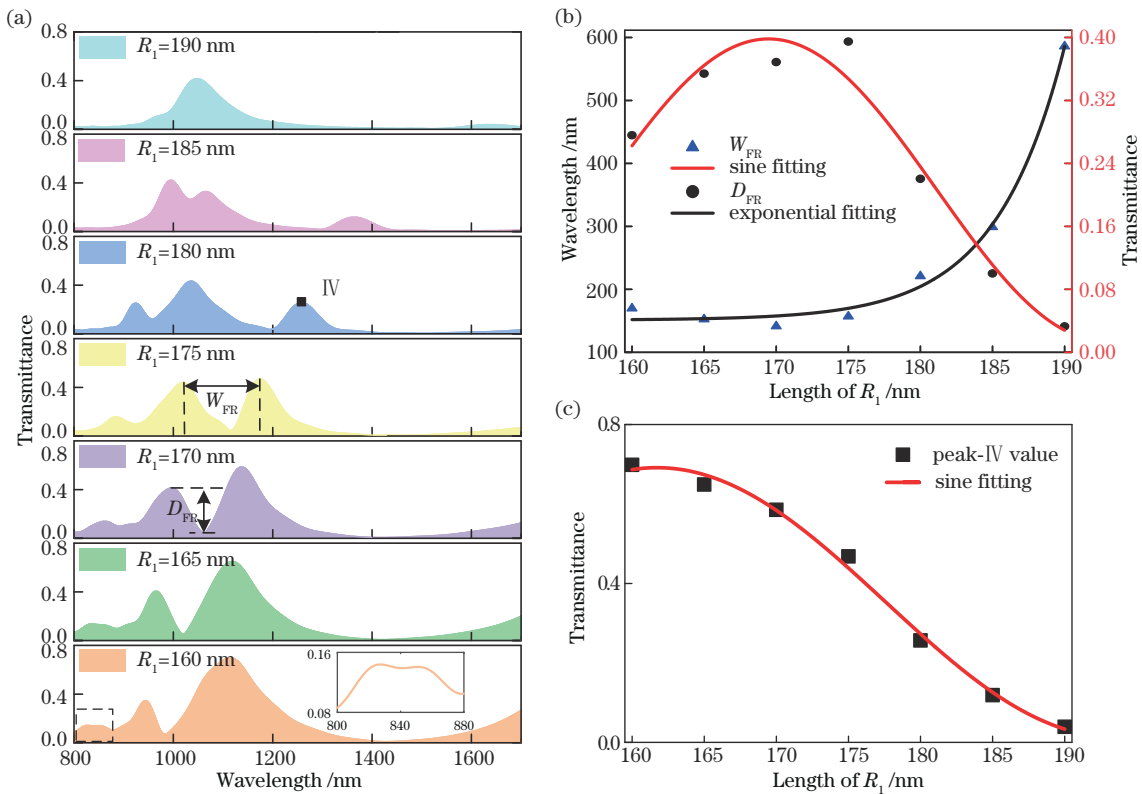


图 5 复合超表面在近红外波段可设计的等等离子体法诺共振。(a) 在入射光偏振方向沿 X 轴方向下,不同的内半径  $R_1$  所对应的透射光谱;(b) 法诺共振谷宽  $W_{FR}$  和谷深  $D_{FR}$  随圆环内半径变化及其 sine 和指数函数拟合曲线;(c) 峰-IV 的峰值随内半径变化及 sine 拟合曲线

Fig. 5 Designability of near-infrared plasmonic Fano resonances in hybrid metasurface. (a) Transmission spectra corresponding to different inner radius ( $R_1$ ) under direction of incident light polarization along X-direction; (b) variation of width ( $W_{FR}$ ) and depth ( $D_{FR}$ ) of Fano resonance with inner radius, as well as their sine and exponential functions fitting; (c) values of peak-IV versus inner radius and their sine fitting

谱中所有的峰随着圆环内半径的增加都发生了红移,其中峰-IV最为明显。为了更好地展示法诺共振的变化,图 5(b)示出了不同圆环内半径的法诺共振的谷宽  $W_{FR}$  和谷深  $D_{FR}$ ,以及分别采用 sine 和指数函数对谷宽  $W_{FR}$  和谷深  $D_{FR}$  进行拟合的曲线,从图 5(b)可以看出,调控圆环的内半径,法诺谷宽  $W_{FR}$  和谷深  $D_{FR}$  分别按照 sine 函数和指数函数曲线拟合。通过此特性能够更加精确地调控法诺共振峰,也可以被认为是对法诺凹陷深度的辐射传感监测。如图 5(c)所示,随着圆环内半径从 160 nm 增加至 190 nm,共振峰-IV 的透射强度按 sine 函数衰减。基于该特性可以实现峰-IV 模式移动等离子体传感<sup>[34]</sup>,可以应用于单个粒子的检测以及光通信等领域。由此可知,在整个圆环内半径增加的过程中,能够实现该复合超表面结构的透射谱在近红外区间的共振峰数量的调控。因此,通过调整圆环-C3 型复合超表面中 C3 对称性结构臂长以及圆环内半径等结构参数,不仅可以实现对共振峰与谷的强度、位置的变化量的调控,还能实现多重法诺共振模式数量的调控。

## 4 结 论

研究了由同心 C3 型孔和圆环孔单元结构组成的复合超表面在近红外波段内的表面等离子体多重法诺共振效应与光学传感现象。结果表明,当入射光偏振方向沿 X 轴方向时,单独的 C3(圆环)单元结构构成的超表面可诱导产生一个有效的电偶极共振模式  $D_{C3}$  ( $D_{CRA}$ )。当  $D_{C3}$  和  $D_{CRA}$  在近红外波段存在光谱重叠时,两者通过偶极相互作用能够在复合超表面结构中产生三重法诺共振现象。同时,多模干涉耦合模理论分析与数值仿真结果吻合较好。在此基础上,仅改变 C3 单元结构参数  $a_2$  的长度,可以实现双重法诺与三重法诺共振现象之间的调控。接着,将  $a_2$  和  $a_3$  的长度同时分别固定为 100、130、160 nm,通过改变  $a_1$  的长度,可以实现单法诺与双重法诺共振现象之间的转换。尤其当  $a_2$ 、 $a_3$  的长度固定为 160 nm 时,共振峰-II 和共振峰-III 的透射率对  $a_1$  的长度变化都是正弦函数变化,而通过改变  $a_1$  的长度,共振峰-I 的透射率未发生明显变化。基于此特性,可以构建具有自参考特性的等离子体光学传感。此外,在复合超表面中固定 C3 单元结构参数和入射光偏振方向,通过改变圆环的内半径可实现单一法诺共振与双重法诺共振、三重法诺共振之间的调控。而且,由于法诺谷宽  $W_{FR}$  和谷深  $D_{FR}$  分别呈正弦函数和指数函数变化,在复合超表面结构中可实现对法诺凹陷深度的辐射监测传感<sup>[35]</sup>。总之,该研究为设计紧凑、可调谐的法诺共振器件提供了一个新的视角,也拓宽了亚波长纳米结构在生物传感器和光通信领域的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X P, Ma X M, Dou F, et al. A biosensor based on metallic photonic crystals for the detection of specific bioreactions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(22): 4219-4227.
- [2] Kravets V G, Kabashin A V, Barnes W L, et al. Plasmonic surface lattice resonances: a review of properties and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(12): 5912-5951.
- [3] Liu L L, Li Z, Xu B Z, et al. Fishbone-like high-efficiency low-pass plasmonic filter based on double-layered conformal surface plasmons[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(2): 439-444.
- [4] Gan C H, Gbur G. Spatial coherence conversion with surface plasmons using a three-slit interferometer[J]. *Plasmonics*, 2008, 3(4): 111-117.
- [5] Arbabi A, Arbabi E, Horie Y, et al. Planar metasurface retroreflector[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 415-420.
- [6] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 523-530.
- [7] Shao L D, Zhu W R. Tri-band metasurface for multi-mode vector beam conversion[C]//2020 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications, July 29-31, 2020, Suzhou, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [8] 郭姣艳, 李文宇, 孙然, 等. 基于双箭头超表面宽带太赫兹涡旋光束的产生[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2014003. Guo J Y, Li W Y, Sun R, et al. Generation of broadband terahertz vortex beam based on double-arrow metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2014003.
- [9] Mollaei M S M, Simovski C. Dual-metasurface superlens: a comprehensive study[J]. *Physical Review B*, 2019, 100(20): 205426.
- [10] Butet J, Martin O J F. Fano resonances in the nonlinear optical response of coupled plasmonic nanostructures[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 29693-29707.
- [11] Lim W X, Singh R. Universal behaviour of high-Q Fano resonances in metamaterials: terahertz to near-infrared regime[J]. *Nano Convergence*, 2018, 5(1): 5.
- [12] Campione S, Guclu C, Ragan R, et al. Enhanced magnetic and electric fields via Fano resonances in metasurfaces of circular clusters of plasmonic nanoparticles[J]. *ACS Photonics*, 2014, 1(3): 254-260.
- [13] Mork J, Chen Y, Heuck M. Photonic crystal Fano laser: terahertz modulation and ultrashort pulse generation[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(16): 163901.
- [14] Yu Y, Xue W Q, Semenova E, et al. Demonstration of a self-pulsing photonic crystal Fano laser[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(2): 81-84.
- [15] Heuck M, Kristensen P T, Elesin Y, et al. Improved switching using Fano resonances in photonic crystal structures[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2466-2468.

- [16] Yu Y, Heuck M, Hu H, et al. Fano resonance control in a photonic crystal structure and its application to ultrafast switching[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(6): 061117.
- [17] Nozaki K, Shinya A, Matsuo S, et al. Ultralow-energy and high-contrast all-optical switch involving Fano resonance based on coupled photonic crystal nanocavities [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11877-11888.
- [18] Shuai Y C, Zhao D Y, Singh Chadha A, et al. Coupled double-layer Fano resonance photonic crystal filters with lattice-displacement[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(24): 241106.
- [19] Shuai Y C, Zhao D Y, Tian Z B, et al. Double-layer Fano resonance photonic crystal filters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(21): 24582-24589.
- [20] Hu J H, Liu X H, Zhao J J, et al. Investigation of Fano resonance in compound resonant waveguide gratings for optical sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(3): 030502.
- [21] Chen Z, Cao X Y, Song X K, et al. Side-coupled cavity-induced Fano resonance and its application in nanosensor [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 307-313.
- [22] 马娇, 李锦屏, 吴小所, 等. 基于光子晶体狭缝纳米梁腔法诺共振的传感特性[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2413002.  
Ma J, Li J P, Wu X S, et al. Sensing characteristics based on Fano resonance of photonic crystal slot nanobeam cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2413002.
- [23] Ghodsi F, Dashti H, Ahmadi-Shokouh J. Design of a multilayer nano-antenna as a hyperbolic metamaterial with Fano response for optical sensing[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(6): 316.
- [24] Guo X D, Hu H, Zhu X, et al. Higher order Fano graphene metamaterials for nanoscale optical sensing[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(39): 14998-15004.
- [25] Shen Z, Du M Y. High-performance refractive index sensing system based on multiple Fano resonances in polarization-insensitive metasurface with nanorings[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28287-28296.
- [26] Farmani A, Mir A, Bazgir M, et al. Highly sensitive nano-scale plasmonic biosensor utilizing Fano resonance metasurface in THz range: numerical study[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2018, 104: 233-240.
- [27] Ou J, Luo X Q, Luo Y L, et al. Near-infrared dual-wavelength plasmonic switching and digital metasurface unveiled by plasmonic Fano resonance[J]. *Nanophotonics*, 2020, 10(2): 947-957.
- [28] Zhang S P, Bao K, Halas N J, et al. Substrate-induced Fano resonances of a plasmonic nanocube: a route to increased-sensitivity localized surface plasmon resonance sensors revealed[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(4): 1657-1663.
- [29] Yi J J, Luo X Q, Ou J, et al. Near- and mid-infrared plasmonic Fano resonances induced by different geometric configurations in subwavelength nanostructures[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2020, 124: 114345.
- [30] Li S L, Wang Y L, Jiao R Z, et al. Fano resonances based on multimode and degenerate mode interference in plasmonic resonator system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3525-3533.
- [31] Xu X F, Luo X Q, Zhang J Z, et al. Near-infrared plasmonic sensing and digital metasurface via double Fano resonances[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5879-5895.
- [32] Petschulat J, Cialla D, Janunts N, et al. Doubly resonant optical nanoantenna arrays for polarization resolved measurements of surface-enhanced Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4184-4197.
- [33] Wang Y J, Sun C W, Li H Y, et al. Self-reference plasmonic sensors based on double Fano resonances[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(31): 11085-11092.
- [34] Luo Y L, Luo X Q, Yi J J, et al. Whispering-gallery mode resonance-assisted plasmonic sensing and switching in subwavelength nanostructures[J]. *Journal of Materials Science*, 2021, 56(7): 4716-4726.
- [35] Chen W, Hu H T, Jiang W, et al. Ultrasensitive nanosensors based on localized surface plasmon resonances: from theory to applications[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(10): 107403.