

激发等离激元 Fano 共振的金属类圆盘纳米结构体系

崔健, 季博宇*, 林景全

长春理工大学超快光学实验室, 吉林 长春 130022

摘要 Fano 共振效应是量子体系中分立态能级和连续态能带相互重叠, 在光谱中表现出非对称线型的共振散射现象, 最初由 U. Fano 经过严格的理论验证得到。近年来, 在表面等离激元结构体系中也陆续发现了等离激元 Fano 共振现象, 它是由结构支持的辐射模式和非辐射模式相互作用产生的。等离激元 Fano 共振具有光谱线宽较窄、辐射损耗小以及能够将入射场局限在结构表面并使近场显著增强等优势, 因此成为了纳米光子学中的研究热点。在支持 Fano 共振激发的等离激元结构中, 类圆盘结构具有较宽的辐射模式线宽, 可以和结构支持的一个或多个弱辐射模式耦合, 因此可以有效激发单一或多重等离激元 Fano 共振, 并能够实现 Fano 共振的有效调制。此外, 类圆盘纳米结构体系在拥有高度几何对称性或规则的多个个体数量条件下, 仍然可以激发高强度的等离激元 Fano 共振模式, 这进一步拓展了 Fano 共振纳米结构的设计思路。我们总结了近年来激发等离激元 Fano 共振模式的类圆盘结构组成的体系, 其中包括单一圆盘结构、异类二聚体圆盘结构和多聚体类圆盘结构等, 并对这些体系支持的 Fano 共振的产生机理和激发方式进行了详细的分析。另外, 对支持等离激元 Fano 共振的类圆盘纳米结构的应用也进行了简单的论述。

关键词 超快光学; 等离激元 Fano 共振; 金属类圆盘纳米结构; 等离激元明模式; 等离激元暗模式

中图分类号 O43

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060002

Plasmonic Fano Resonance in Metallic Disk-Like Nanostructure System

Cui Jian, Ji Boyu, Lin Jingquan

Ultrafast Optics Laboratory, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Fano resonance, theoretically explained by U. Fano, is a type of resonant scattering phenomenon in the quantum system that results from interference between discrete and continuous state energy, and gives rise to an asymmetrical line-shape. In recent years, plasmonic Fano resonance has been found in the plasmonic structure system, which is produced by the interaction between the superradiation mode and the subradiation mode supported by the structure. Because the Fano resonance has narrow frequency linewidth, weak radiative losses, and strong near-field enhancement on the surface of structures, it has attracted much attention in the field of photonics. The disk-like structure which has the ability of supporting wider superradiation linewidth can couple with one or more subradiation patterns supported by the structure to excite and modulate single or multiple Fano resonances effectively. Moreover, the disk-like nanostructured systems can still excite high-intensity plasmonic Fano resonance under the case of highly geometric symmetry or regularly multi-individual composition, which can further expand the design of Fano resonant nanostructures. In this paper, we summarized the disk-like Fano resonance nanostructure, including single disk structure, heterogeneous dimer disk structure and multipolymer disk structure, and presented the mechanism and excitation of the plasmonic Fano resonance. In addition, we also briefly discussed the applications of disk-like Fano resonance nanostructure.

Key words ultrafast optics; plasmonic Fano resonance; metallic disk-like nanostructure; plasmonic bright mode; plasmonic dark mode

OCIS codes 320.7150; 320.1590; 350.4238

收稿日期: 2017-12-13; 收到修改稿日期: 2017-12-28

作者简介: 崔健(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事等离激元 Fano 共振方面的研究。E-mail: 287018037@qq.com

导师简介: 林景全(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事超快激光方面的研究。E-mail: linjingquan@cust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: ji_boyu@yahoo.com

1 引言

从拥有异常不对称线型的 Fano 共振被发现至今,已对多个量子体系中的 Fano 共振进行了研究,如量子点体系、原子体系、光子晶体结构和玻色爱因斯坦凝聚体。近年来,随着越来越多的类量子现象在表面等离子体共振体系中被发现,纳米结构所支持的表面等离子体 Fano 共振效应引起了人们极大的兴趣^[1-14],这是因为 Fano 共振的激发机理在基础物理的范畴中是相通的,既然量子体系可以实现,那么等离子体纳米结构体系通过人为构建相应的金属纳米结构的明暗模式,并使两者相互耦合同样可以实现等离子体 Fano 共振的激发^[15-18]。激发等离子体 Fano 共振并不需要类似于量子体系的真空环境、超低温、稳定激光器和庞大装置等多项复杂条件,仅需调制几何参数与集成度。这使得量子范畴的 Fano 共振效应可以转化为亚微米或纳米量级结构体系的等离子体 Fano 共振效应,更适合实际应用。等离子体 Fano 共振是一种特殊的局域模式,拥有十分重要的潜在利用价值。首先等离子体 Fano 共振的辐射损耗较小,因此线宽较窄^[19]。同时 Fano 共振的频率和线型受周围环境介电常数和几何尺寸的影响十分明显^[20-21],因此具有很高的品质因数和很高的灵敏度^[22-24],可用于传感器件的开发。此外,支持等离子体 Fano 共振的结构对入射光能量有很好的聚焦效应^[25-26],可产生巨大的局域场增强。这些特点使 Fano 共振被广泛应用于生物传感等领域。

激发等离子体 Fano 共振的纳米结构体系有很多,其中类圆盘纳米结构体系作为最普遍且简单的结构之一(包括圆盘、不完整圆盘或圆环等组成的结构体系),已经得到了广泛研究。单一类圆盘纳米结构拥有各向同性的特点,具有稳定的共振波长,不仅可以有效激发等离子体 Fano 共振,而且不必像纳米棒体系一样需设计成不对称结构。单一纳米类圆盘支持的等离子体共振模式均独立于入射光偏振,同时其偶极明模式在光谱中的线宽较大,便于与暗模式耦合激发等离子体 Fano 共振^[27-29]。与单体类圆环结构相比,二聚体类圆盘纳米结构有更多激发等离子体 Fano 共振的方式,并且随着体系中个体数量的增加,体系引入了组成和组态等更高的自由度。特别是二聚体结构相对单体结构多了一个重要的参数,即结构体之间的距离。通过调控间隙尺寸,可以实现对 Fano 共振近场强度的有效控制。多聚体类圆盘结构在对称或不对称体系下都可以激发等

离等离子体 Fano 共振。除调节结构参数以有效控制等离子体 Fano 共振外,组态上也拥有更多参数可实现对等离子体 Fano 共振的控制,这无疑为研究者们提供了更多的选择。此外,随着近些年加工工艺的不断发展,精确控制其制造精度已成为可能,这为纳米类圆盘结构的进一步发展提供了重要的技术支撑^[24,30-31]。本文将综述性地讨论单体、二聚体和多聚体类圆盘纳米结构体系激发的等离子体 Fano 共振,同时对其实际应用进行简要论述。

2 Fano 共振的激发原理及类圆盘结构体系分析

光谱辐射作为一种早期解决物理学问题的重要工具在 Fano 共振现象中起到了举足轻重的作用。Fano 共振现象最早是由意大利物理学家 Ugo Fano 通过理论研究和分析得到的^[32]。Fano 共振“奇怪的谱线形状”最初在原子系统的吸收光谱中出现,原子中电子的组态可以分为连续能态和分立能态,Fano 共振就是相同能级下原子所激发的分立态能级和连续态能带相互作用的结果。相比洛伦兹对称线型,Fano 共振表现为明显的非对称线型,遵循以下公式:

$$F(E) = A \frac{(b+q)^2}{b^2+1}, \quad (1)$$

式中:Fano 共振因子 q 代表谱线的形态参数,可以调节谱线的不对称程度; A 为振幅; $b = (E - E_0) / \Gamma$, E_0 为共振能量, Γ 为共振线宽。(1)式同样适用于等离子体 Fano 共振系统,可以解释很多纳米结构激发的等离子体 Fano 共振现象,量子体系中的连续态能带和分立态能级分别由等离子体体系中的明模式和暗模式代替。为了更加清晰地理解等离子体 Fano 共振的激发过程,可利用图 1(a)~1(c)所示 Fano 共振激发原理示意图,并结合如下表达式分析^[33]: $|I\rangle \rightarrow |B\rangle$ 和 $|I\rangle \rightarrow |B\rangle \rightarrow |D\rangle \rightarrow |B\rangle$, 其中 $|I\rangle$ 为入射光场, $|B\rangle$ 为明模式, $|D\rangle$ 为暗模式,如图 1(b)所示。该过程可以简单叙述如下:入射光场直接激发明模式,暗模式无法被入射光场直接激发,因此暗模式是由明模式通过近场相互作用间接激发产生,如图 1(a)所示。最终 Fano 共振是由明模式与暗模式的耦合而来,其特殊的线型就源于 $|I\rangle \rightarrow |B\rangle$ 和 $|I\rangle \rightarrow |B\rangle \rightarrow |D\rangle \rightarrow |B\rangle$ 过程中的明模式相位移动总累积差 π ,如图 1(c)所示,在耦合时发生相消干涉取消了明模式的效果,最终在散射谱线和消光谱线中由于暗模式的作用呈现出非对称洛伦兹线型。

金属纳米等离子激元结构体系中的 Fano 共振特性也可以用弹簧振子模型来解释^[34]。这个描述中有一个确定频率的驱动力给予受力振子系统,如图 1(d)所示,使其在 $\omega_- = 1$ 附近产生具有洛伦兹线型的明显增强的共振峰,而在 $\omega_+ = 1.2$ 附近出现非对称共振峰。在外力与弹簧振子 c_2 的间接相互作用过程

中,弹簧振子 c_2 的本征频率振荡和驱动力振荡产生了相消干涉,使弹簧振子 c_1 的振幅归零。当两个弹簧振子以 ω_2 频率耦合时,在弹簧振子 c_1 上会有两个反相位的力共同作用,导致在 $\omega_+ = 1.2$ 附近形成非对称线型[图 1(e)]。弹簧振子系统直观地表现出了 Fano 共振中共振相消的基本特点。

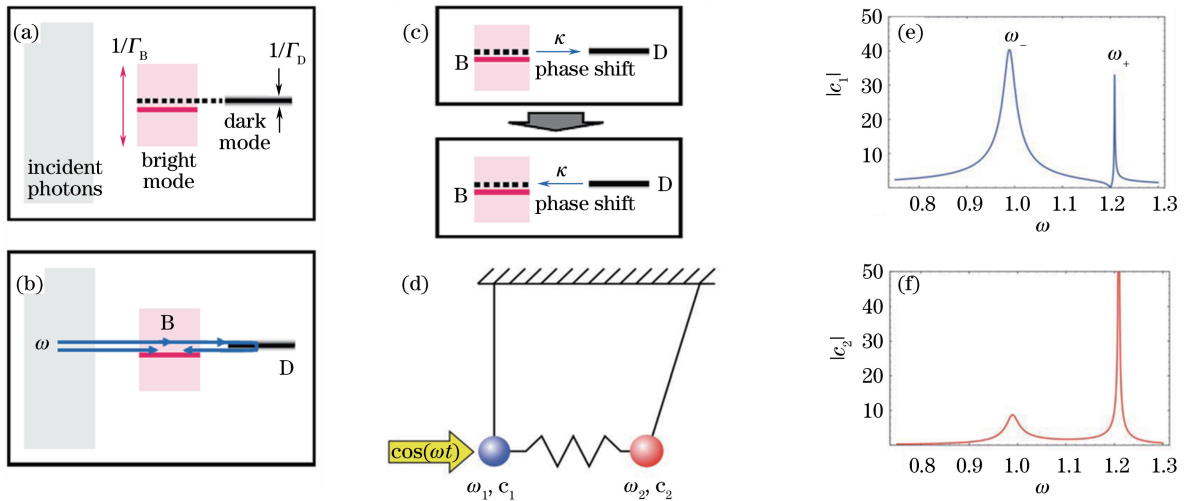


图 1 (a)支持等离子激元 Fano 共振的过程图。明模式由入射光辐照直接激发,而暗模式并不能被入射光直接激发,当明暗模式相互重叠时激发等离子激元 Fano 共振;(b)入射光频率 ω 激发明模式的两个过程,伴随能量衰减;(c)通过近场耦合,明暗模式之间伴随能量传递,耦合常数为 κ ^[33];(d)外力驱动弹簧振子系统示意图(受外力作用时弹簧振子 c_1 与其耦合弹簧振子 c_2 的共振关系);(e)受到外力作用时,弹簧振子 c_1 (振幅为 $|c_1|$) 在 $\omega_- = 1$ 和 $\omega_+ = 1.2$ 时分别表现为对称和非对称线型;(f)耦合弹簧振子 c_2 (振幅为 $|c_2|$) 只呈现对称线型^[34]

Fig. 1 (a) Frequency diagram for a system supporting Fano-like interference. There exist a bright mode, which can couple to the incident light, and a dark mode, which does not couple to the incident light; (b) the excitation of bright mode at ω can occur by two paths with degenerate energies; (c) energy transfer between the bright and dark modes takes place by nearfield coupling, with coupling constant κ ^[33]; (d) schematic view of the external force driven spring oscillator system (the coupling relationship between spring oscillators c_1 and c_2); (e) the resonant dependence of the amplitude of forced oscillator $|c_1|$ (there are two resonances in the system, the forced oscillator exhibits resonances with symmetric and asymmetric profiles near the eigenfrequencies $\omega_- = 1$ and $\omega_+ = 1.2$, respectively); (f) the coupled spring oscillator $|c_2|$ responds only with symmetric resonant profiles^[34]

2.1 单体金属纳米类圆盘结构等离子激元 Fano 共振

等离子激元 Fano 共振通常由两个或多个模式相互干涉而来,所以单体金属纳米类圆盘结构需要同时激发不同模式。单一金属类圆盘纳米结构的不对称性,使其在入射光垂直照射下只能激发等离子激元明模式。而改变结构参数,令结构产生迟滞效应或内部电磁模式之间发生杂化,即可产生等离子激元暗模式。通过与圆盘等离子激元明模式耦合即可激发等离子激元 Fano 共振。Wan 课题组研究了单体银纳米圆盘所支持的 Fano 共振^[35],如图 2(a)所示,展示了非对称等离子激元 Fano 共振线型源于纳米圆盘结构支持的偶极明模式和圆盘在 z 方向上大的高度带来的迟滞效应产生的四极暗模式在空间和频率上

发生相消干涉,通过调控纳米圆盘的直径和高度可有效控制 Fano 共振光谱位置和近场强度。同时,定量分析了等离子激元 Fano 共振谱线的演化,发现相应 Fano 共振频率处的高非辐射欧姆损耗,这不利于 Fano 共振的实际应用。为了克服上述缺点,Cai 研究组将介电材料做成圆盘结构并放置在均匀介质中^[36],不仅可以有效降低欧姆损耗,而且无需利用迟滞效应就可以在很薄的硅纳米盘上,通过圆盘内部电磁模式之间杂化形成等离子激元暗模式来有效激发等离子激元 Fano 共振,如图 2(b)所示。此外,通过改变纳米圆盘的直径可以引入多个亚辐射高阶等离子激元模式,激发多重等离子激元 Fano 共振效应。

另外,在金属类圆盘纳米结构中引入缺陷可以

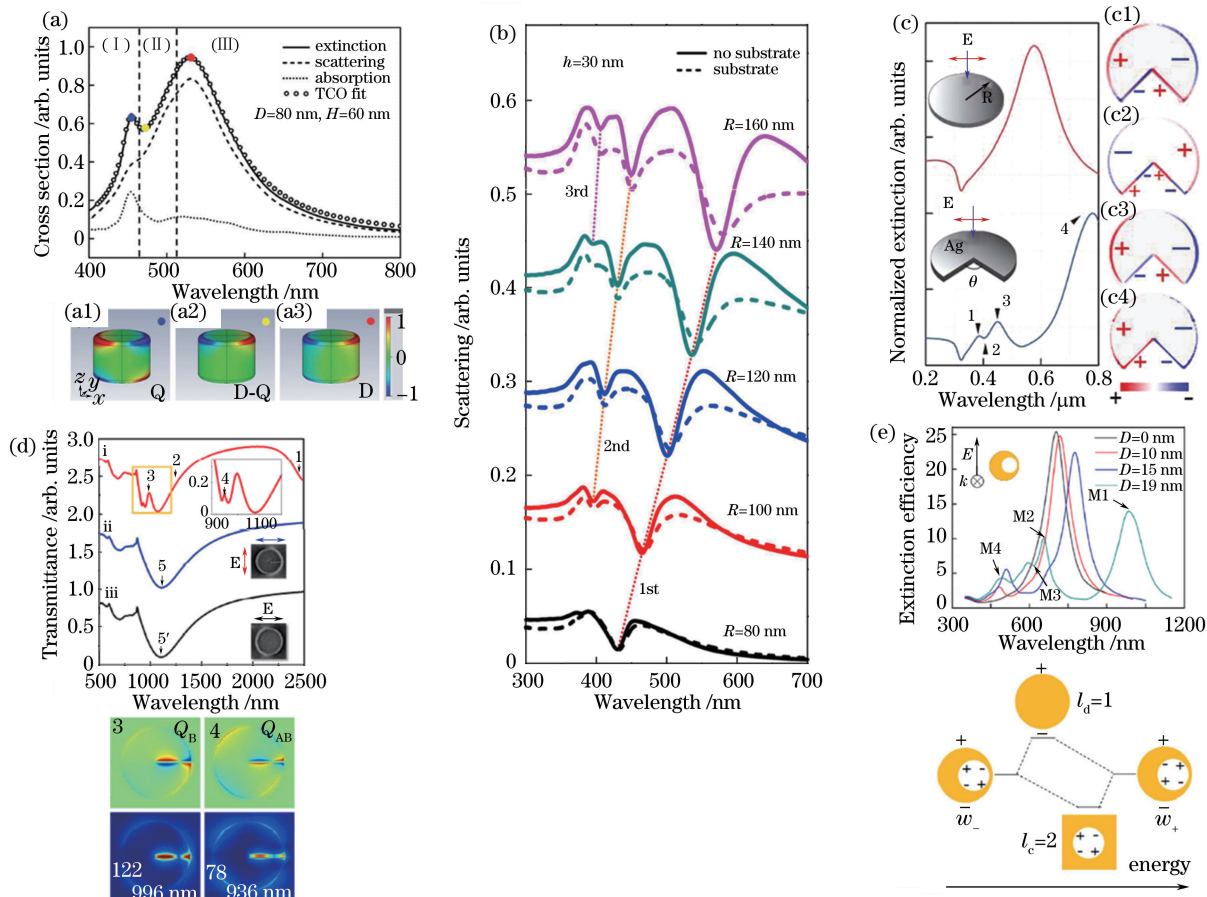


图2 单体类圆盘激发等离激元 Fano 共振。(a) 单体银纳米圆盘激发所得等离激元 Fano 共振的消光、散射、吸收谱线及(a1)~(a3)所示空间近场分布图像^[35]；(b) 硅圆盘随着直径的改变得到多重等离激元 Fano 共振^[36]；(c) 完整银纳米圆盘(红线)和带有楔形缺口银纳米圆盘(蓝线)在正入射下的消光谱线(圆盘半径 80 nm, 厚度 30 nm, 切角 $\theta = 90^\circ$)，(c1)~(c4) 近场电荷分布图像与消光谱线上数字点一一对应(红色和蓝色区域分别代表正负电荷^[37])；(d) 完整圆盘与狭缝圆盘在不同入射光偏振照射下得到的透射谱线和近场分布图像^[38]；(e) 正入射辐射下，随圆环内腔移动量 D 的增大得到的消光谱线；下图中显示等离激元 Fano 共振源于外环的等离激元偶极模式($l_d=1$)与内腔的等离激元四极模式($l_c=2$)的杂化耦合^[39]

Fig. 2 Plasmonic Fano resonance excited by monomer disk-like nanostructure. (a) Simulation of the extinction (solid line), scattering (dashed line), and absorption spectra (dot line) for a silver nanodisk that exhibits typical Fano-like resonance. (a1)-(a3) Simulation of the surface charge distribution^[35]；(b) the silicon disk obtained multiple Fano resonance with the change of its diameter^[36]；(c) normalized extinction spectra (left) of a symmetric Ag (red) and symmetry broken (blue) nanodisks under normal incidence. The radius and thickness for both nanodisks are 80 nm and 30 nm, respectively, the slice angle is 90° ；(c1)-(c4) edge charge distributions for the modes denoted on the extinction curve, calculated as the divergence of the simulated electric field. The red and blue colors represent the positive and negative charge, respectively^[37]；(d) the calculated transmittance spectra and near field enhancement distributions of split and perfect disks with different incident polarizations^[38]；(e) the extinction spectra of rings with various offsets D under normal incidence. The lower diagram illustrates hybridization between the dipole plasmon of the disk ($l_d=1$) and the quadrupole plasmon of the cavity ($l_c=2$)^[39]

破坏结构的对称性,那么在一定的偏振角度下,缺陷处会激发等离激元暗模式,通过与整体结构所激发的等离激元明模式相互耦合就可以产生等离激元 Fano 共振。方哲宇课题组在纳米盘结构中引入一个楔形缺口来支持 Fano 共振^[37],如图 2(c)所示。

这个结构所支持的 Fano 共振源于圆盘提供的等离激元偶极明模式和缺口楔形区域所支持的等离激元四极暗模式的耦合,通过控制盘的直径和楔形缺口的角度可以有效调控 Fano 共振的峰位和凹陷深度。与此结构类似,Zhang 研究组在圆盘结构中引

入一个狭缝,如图 2(d)所示^[38],由狭缝支持的等离子元暗模式和圆盘支持的明模式相互耦合得到了等离子元 Fano 共振。该结构通过改变圆盘的直径大小和狭缝长度有效调控等离子元 Fano 共振,并有效增强了等离子元 Fano 共振对应波长的二次谐波强度。

第三种实现单体类圆环结构 Fano 共振激发的方式,是将金属类圆盘纳米结构内部挖空,使整体结构呈现圆环形。该结构的外环支持的等离子元明模式和内腔支持的等离子元暗模式耦合即可激发等离子元 Fano 共振。He 课题组在金圆盘中引入一个真空圆盘腔使整体结构成为环形结构,如图 2(e)所示。当内腔中心和圆环中心的相对移动达到 19 nm 时,发现 M3 位置处激发等离子元 Fano 共振效应^[39],此等离子元 Fano 共振是由圆环的等离子元偶极明模式和内腔所支持的等离子元四极暗模式相互耦合形成。

单体结构支持表面等离子元 Fano 共振突出的优势是其结构形态简单,便于加工。完整单体圆盘纳米结构由于结构对称性不受入射光偏振的影响,主要通过对结构厚度和整体尺寸大小来调控等离子元 Fano 共振模式;缺陷单体圆盘纳米结构由于其不对称性较易受到入射光偏振的影响,可以通过入射光偏振来调控等离子元 Fano 共振^[40]。虽然单体结构具有形态简单的特点,但是单体结构的自由度较低,可调节的参数较少,限制了其对等离子元 Fano 共振的激发和调制能力。

2.2 二聚体金属类圆盘纳米结构等离子元 Fano 共振

在单体类圆盘纳米结构中激发的等离子元共振模式较为单一,而当两个类圆盘结构组成二聚体时,两个子部分支持的等离子元模式之间会产生不同的耦合,产生更丰富的物理现象^[41-42]。最简单的类圆盘二聚体体系由两个圆盘构成,但材料和大小相同的二聚体圆盘不能耦合得到新的等离子元暗模式,只会使原有等离子元明模式强度提升。类圆盘二聚体纳米结构取用不同材料和不同尺寸时,结构对称性被破坏,满足等离子元暗模式的激发条件进而可以形成等离子元 Fano 共振。Bachelier 研究组从理论方面研究了大小尺寸相同的金银纳米二聚体圆球结构激发的等离子元 Fano 共振,如图 3(a)所示^[43]。该 Fano 共振线型是在金纳米圆球的吸收谱线中观察到的,由银圆球的局域表面等离子元模式作为弱辐射暗模式和金圆球通过带间跃迁产生的连续态作为明模式相互耦合产生,并且可以通过调节结构尺

寸参数和入射光偏振来有效控制等离子元 Fano 共振。当金纳米圆球半径和银纳米圆球半径满足 $R_{Ag} \approx 2R_{Au} + d$ 时(R_{Ag} 为银圆球半径, R_{Au} 为金圆球半径, d 为两圆球的间距)可以得到效果最优的 Fano 共振,而且该等离子元 Fano 共振近场耦合强度对入射光偏振方向十分敏感,利用旋转偏振方向可以有效地调制 Fano 共振的线型。其中最突出的问题是随着银圆球的增大,其偶极等离子元共振强度显著增强,导致谱线中 Fano 共振线型的相对弱化很难被观测到。Pena-Rodriguez 等^[44]在此基础上继续开展了对圆形金银二聚体结构的研究,发现当两者的半径 $R_{Au}:R_{Ag} = 3:1$ 时可以激发强度最大的 Fano 共振,如图 3(b)所示,而且该 Fano 共振只能在入射光偏振平行于金银圆形二聚体中心连线时激发,利用简单的光学技术可以探测到该等离子元 Fano 共振。特别的是该 Fano 共振在介质折射率小于 1.5 时的灵敏度是一般表面等离子元灵敏度的 2 倍,因此该体系有望进一步提升等离子元传感器件的性能。

除使用不同材料可以使类圆盘二聚体结构激发等离子元 Fano 共振外,通过破坏同一材料类圆盘二聚体结构对称性,同样可以实现二聚体结构体系的等离子元 Fano 共振激发。以类圆盘二聚体中的环盘结构为例,环盘结构由金属纳米环和金属纳米圆盘组成,主要组态有两种,分别是圆盘存在于环内部和圆盘存在于环外部。圆盘存在于环内部的组态形成的 Fano 共振是由整体结构的反键偶极等离子元明模式和外环等离子元暗模式相互耦合所致,可以有效地将入射电磁场局域在环盘间隙之中形成若干较强的局域场增强点。Hao 课题组最早对同心环盘二聚体的共振模式进行了详细研究^[45],如图 3(c)所示,当环盘二聚体结构保持中心对称时,结构体系在光谱中呈现两个杂化耦合共振模式,分别是短波的反键偶极模式和长波的正键偶极模式。该研究成果为后续分析该结构支持的 Fano 共振奠定了基础。后续 Hao 等^[5,24]继续研究了环盘二聚体结构,他们发现当圆盘和环的中心轴线发生偏移或外环均匀性被破坏时,可以在正入射下激发环的等离子元四极暗模式,之后与整体结构的等离子元明模式相互耦合得到等离子元 Fano 共振[图 3(d)],同时在 Fano 共振频率处的近场强度有了很大的提高。Li 研究组在上述研究基础之上,进一步对环盘结构引入双对称破坏^[20],如图 3(e)所示,令内腔中心相对外环中心偏移,同时令圆盘中心相对内腔中心偏移,使得

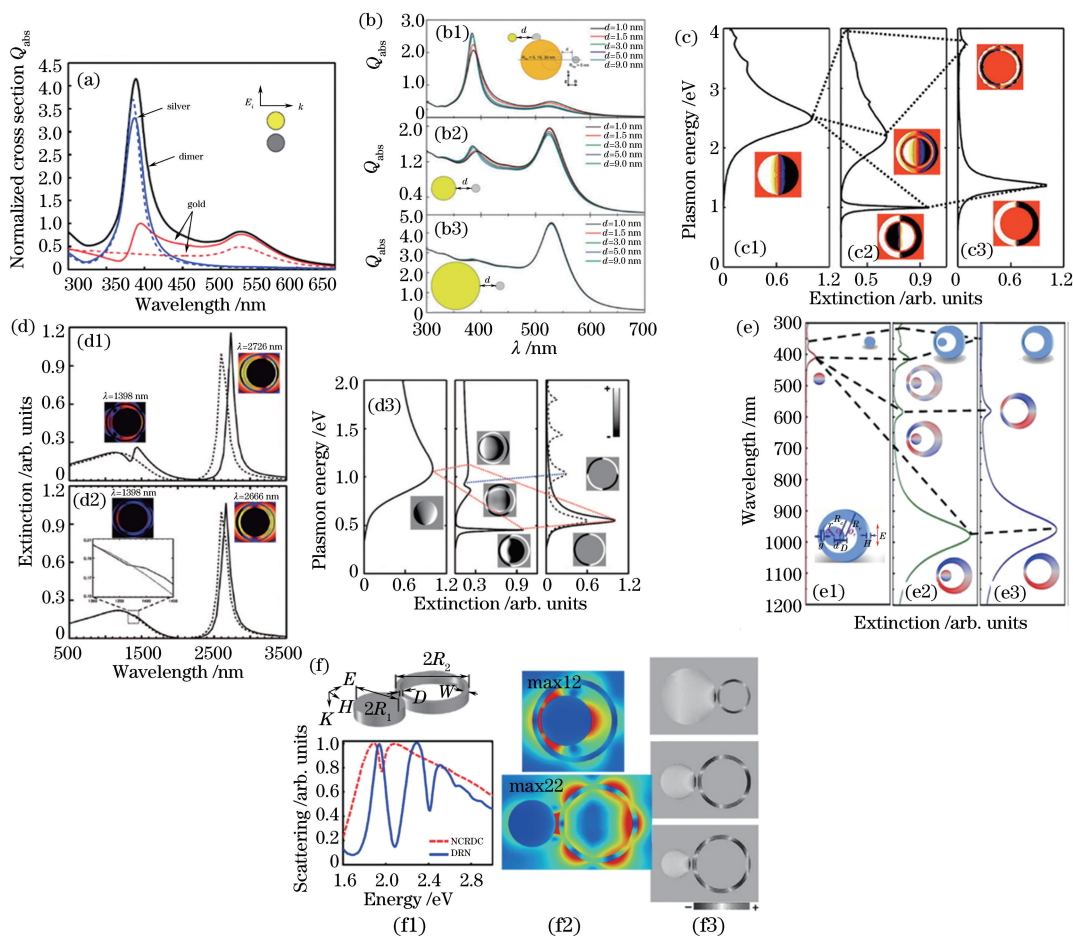


图3 二聚体类圆盘激发等离激元 Fano 共振。(a) 金银圆球二聚体纳米结构吸收谱线^[43](虚线和实线分别对应单一或二聚体吸收谱线);(b) 金银圆球二聚体纳米结构半径比 $R_{\text{Au}}:R_{\text{Ag}}$ 分别为(b1) 1:1、(b2) 3:1、(b3) 6:1时,不同间隙非偏振光照射下得到的消光谱线^[44];(c) 同心环盘结构等离激元杂化图像^[45]。(c1)单一圆盘结构的消光谱线;(c2)同心环盘结构的相互作用图像;(c3)单一圆环结构的消光谱线;(d)同心银环盘结构(虚线)和非同心银环盘结构(实线)的消光谱线,以及非对称环盘结构模式杂化图^[5,24](插图对应共振波长处结构表面的电场分布);(e)双对称破坏环盘结构模式杂化图像^[20]。(e1)单一纳米圆盘消光谱线;(e2)环盘结构消光谱线;(e3)非对称纳米环消光谱线;(f1)非同心环盘结构及外部组合环盘结构散射谱线;(f2)非同心环盘结构与外部组合环盘结构中 Fano 共振峰位处的电场分布图像;(f3)外部组合环盘结构不同等离激元 Fano 共振下的电荷分布图像^[46]

Fig. 3 Plasmonic Fano resonance excited by dimer disk-like structure. (a) Normalized absorption cross sections of the silver and gold nanoparticles. The dashed and solid lines correspond to the case of isolated particles or particles within the dimer, respectively^[43]; (b) simulated optical extinction spectra (using unpolarized light) for the Au:Ag heterodimers with $R_{\text{Au}}:R_{\text{Ag}}$ ratios of (b1) 1:1, (b2) 3:1, and (b3) 6:1, and different interparticle separations^[44]; (c) hybridization diagram illustrating the nature of the plasmon resonances in concentric ring-disk structures^[45]. (c1) shows the extinction spectra for individual disks as a function of energy. (c2) shows the spectra for the interacting system. (c3) shows the extinction spectra for the rings; (d) extinction spectra for Ag concentric ring/disk cavity (dashed lines) and nonconcentric ring/disk cavity (solid lines)^[5,24]. The offset parameters are (d1) 30 nm (disk) and (d2) 15 nm (ring), respectively. Insets: electric field enhancements on the top surfaces at the resonance wavelengths; (e) plasmon hybridization diagram for the disk ring with double symmetry breaking^[20]. Extinction spectra for (e1) the individual nanodisk, (e2) the disk-ring nanostructure, and (e3) the asymmetric nanoring; (f1) shows scattering spectra of the nonconcentric ring/disk cavity (NCRDC) and disk-ring nanostructure (DRN) with the same nanodisks and nanorings; (f2) shows distributions of electric field amplitudes at the Fano dips of hexapolar resonance modes in the middle section of the NCRDC and DRN, respectively; (f3) shows induced top surface charges at the Fano dips of quadrupolar, hexapolar, and octupolar modes, respectively^[46]

环在垂直辐照下支持多个高阶等离子激元暗模式并与圆盘所激发的偶极明模式相互耦合得到了多重等离子激元 Fano 共振模式。圆盘存在于环外部的组态形成的等离子激元 Fano 共振,是由圆盘激发的偶极明模式和其间接激发的环等离子激元暗模式耦合得到。Zhang 研究组发现对于圆盘置于环外部的二聚体结构,如图 3(f)所示,在环盘间隙处可以得到明显的近场增强^[46],并且与圆盘在环内部相比,此结构具有更高的近场强度增强。另一方面,该组态可以通过圆盘的等离子激元偶极明模式更有效地激发圆环结构的高阶等离子激元暗模式,从而更方便地激发多重等离子激元 Fano 共振。随后该研究组通过改变该结构的尺寸参数实现了对多极 Fano 共振的峰位和强度的有效调制^[47],同时研究发现高阶等离子激元 Fano 共振的品质因数 Q 更高。

通过对上述二聚体类圆盘纳米结构的详细研究,发现二聚体类圆盘纳米结构利用结构不对称性激发等离子激元 Fano 共振的途径比单体结构更加丰富,如组成二聚体结构的个体选取不同的材料,改变二聚体个体的相对尺寸,改变二聚体中个体间的相对位置等。相对于单体结构单纯通过引入缺陷来激发等离子激元 Fano 共振,二聚体类圆盘纳米结构体系引入了组成和组态等更高的激发自由度,这为等离子激元 Fano 共振结构设计提供了更多的思路。特别是二聚体结构比单体结构多一个重要的参数,即结构体之间的距离,通过调控间隙尺寸,可以有效控制 Fano 共振的近场强度。

2.3 多聚体金属类圆盘纳米结构等离子激元 Fano 共振

将包含三个或三个以上金属类圆盘粒子的体系结构统称为多聚体金属类圆盘纳米结构。多聚体类圆盘纳米结构体系可以形成更多的等离子激元共振模式耦合,进而可以产生更加丰富的物理现象,因此在近些年也受到了广泛的关注。多聚体类圆盘纳米结构产生 Fano 共振的机制可以归结为以下三种。第一种,不对称多聚体类圆盘纳米结构在特定入射光偏振态辐照下,各部分支持的不同等离子激元共振模式之间相互耦合,激发多重等离子激元 Fano 共振。图 4(a)所示为三个金纳米圆盘组成的类石门结构体系^[26],入射光偏振与结构的对称轴垂直,支持的两个等离子激元 Fano 共振模式都是由整体结构激发的等离子激元偶极明模式和暗模式耦合的结果。激发短波等离子激元 Fano 共振的等离子激元暗模式源于底部两个小圆盘极矩相反且大圆盘形成了非辐射的四极模式;激发长波等离子激元 Fano 共振的等离子激元

暗模式源于大圆盘与下部两个圆盘的极矩相反。

第二种,对称多聚体类圆盘纳米结构等离子激元 Fano 共振源于整体对称结构支持的确定波长下等离子激元明、暗模式的耦合,其等离子激元 Fano 共振谱线独立于入射光偏振,且可以通过入射光偏振有效控制结构间隙处的激发热点。对于金属类圆盘四聚体纳米结构,Rahmani 课题组利用有 D_{3h} 对称性的圆盘四聚体结构在反射谱线中激发等离子激元 Fano 共振线型^[48],该 Fano 共振是由 640 nm 处的亚辐射暗模式和峰值 780 nm 处的超辐射明模式耦合而来,如图 4(b)所示。为了更清晰地理解其等离子激元 Fano 共振的成因,图 4(b2)和图 4(b3)展示了上述两个波长模式的表面电荷分布。图 4(b2)所示为 640 nm 处的电荷分布图像,可以看到圆盘 A 和 B 的电荷分布相反,圆盘 C 和 D 的电荷分布相反,整体结构对远场表现出非辐射状态,属于暗模式;图 4(b3)所示为 780 nm 处的电荷分布图像,可以看到四个圆盘的电荷分布状态一致,对远场呈现出一种超辐射状态,属于明模式。因此,该结构下的等离子激元 Fano 共振是由以上等离子激元明、暗模式相互作用而来,同时 D_{3h} 对称的圆盘四聚体有高度结构对称性,该结构支持的等离子激元 Fano 共振谱线独立于入射光偏振,但是可以通过入射光偏振来调控间隙热点的位置。此外,该研究组利用十字对称排布的圆盘五聚体结构来激发 Fano 共振^[49],如图 4(c)所示,在反射谱线中同样得到了等离子激元 Fano 共振。图 4(c2)为 665 nm 处电荷分布状态,可以看到中心 A, E, C 三个圆盘的电荷极矩与圆盘 B 和 D 的电荷极矩反向,导致整体呈现一种弱辐射暗模式状态,同时与整体五聚体所支持的等离子激元偶极明模式相互耦合激发了等离子激元 Fano 共振。当对称多聚体类圆盘纳米结构体系由七个圆盘构成时^[50],如图 4(d)所示,整体结构同样可以在拥有高对称度条件下激发等离子激元 Fano 共振模式,该 Fano 共振是由七聚体圆盘支持的同相位振荡偶极子辐射模式和中心三圆盘与上下部四圆盘异相振荡的亚辐射暗模式相互作用得到,实验中通过改变圆盘的大小,证明了 Fano 共振光谱对几何结构的高度依赖性。在此基础上,Liu 研究组利用有 D_{2h} 对称性的圆环七聚体,有效地激发了多重等离子激元 Fano 共振模式^[51]。根据等离子激元杂化理论,该圆环七聚体可以看作外围六聚体和内部圆环的杂化,也可看作中心五聚体和上下二聚体的杂化,两者得到的结果一致。文中以六聚体和单一体杂化为例进行说明,圆环六聚体

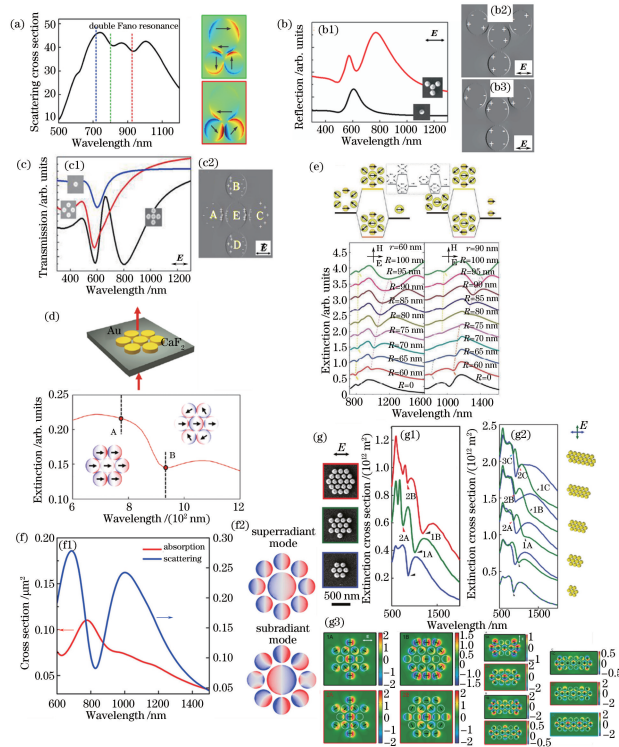


图4 多聚体类圆盘激发等离激元 Fano 共振。(a)圆盘三聚体纳米结构在平面光正入射下得到的散射谱线及等离激元 Fano 共振处结构表面电场分布的 E_z 分量图像^[26];(b1)单一圆盘及圆盘四聚体纳米结构的反射谱;(b2) 640 nm 和(b3) 780 nm 处的电荷分布图像^[48];(c1)单一圆盘、圆盘四聚体及圆盘五聚体在正入射辐照下得到的透射谱线;(c2)等离激元 Fano 共振峰位处的电荷分布图像^[49];(d)由七个金纳米圆盘组成的七聚体结构的消光谱线^[50]。谱线内部近场分布图像分别对应超辐射模式图像(A)和等离激元 Fano 共振波长图像(B);(e) D_{2h} 对称的圆环七聚体结构等离激元 Fano 共振模式杂化图像。该结构的等离激元暗模式由圆盘六聚体(圆盘五聚体)的 B_{3u} 模式和单圆盘(圆盘二聚体)的偶极模式相互作用得到,后与整体圆盘七聚体等离激元明模式耦合得到等离激元 Fano 共振^[51];(f1)模拟计算圆盘九聚体纳米结构在垂直辐照下的散射谱线(蓝色)及吸收谱线(红色)^[52];(f2)超辐射模式($\lambda=1000$ nm)和弱辐射模式($\lambda=780$ nm)下的电荷分布图像^[52];(g1)环形集群类结构(绿线和红线)和七聚体结构(蓝线)在正入射下得到的消光谱线,黑框中为长波等离激元 Fano 共振处电场分布(1A 和 1B),红框中为短波等离激元 Fano 共振处电场分布(2A 和 2B);(g2)水平延长集群结构和七聚体结构在不同偏振正入射下得到的消光谱线(水平偏振为蓝线,垂直偏振为绿线);(g3)集群结构在正入射下等离激元 Fano 共振处的近场分布图像^[53]

Fig. 4 Plasmonic Fano resonance excited by polymer disk-like structure. (a) Scattering spectrum of the trimer at normal incidence of plane wave. Illustration of spatial distributions of E_z component on the top surface of the trimer excited at 800 nm and 916 nm wavelengths, corresponding to two subradiant modes^[26]; (b1) simulated spectra of the monomer and quadramer at normal incidence; calculated charge distribution of the quadramer at wavelengths of (b2) 640 nm and (b3) 780 nm by FDTD simulation^[48]; (c1) simulated transmission spectra of monomers, quadramers and pentamers at normal incidence; (c2) calculated charge distribution of the pentamers structure at a wavelength of 665 nm^[49]; (d) numerically calculated extinction spectrum (below) of a heptamer structure consisting of seven gold disks (up). The insets display the charge density distribution of the superradiant mode A and in the Fano minimum B^[50]; (e) plasmon hybridization schemes of plasmonic heptamers with D_{2h} symmetry for x -polarization, where only dipole resonances are considered. The interactions between the B_{3u} bonding mode of the hexamer (the pentamer) and dipole mode of the central ring (the dimer) lead to the generation of four kinds of hybridized dark subradiant resonances^[51]; (f) simulated scattering (blue) and absorption (red) spectra of a plasmonic nonamer consisting of a gold disk surrounded by eight gold disks^[52]; (g1) shows the simulated extinction spectra of the clusters (green and red curves) compared to the spectra of a heptamer (blue curves), with simulated electric near-field distributions of the fundamental dark modes (black boxes) and the second-order dark modes (red boxes); (g2) shows the simulated extinction spectra of the elongated oligomers for horizontal (blue curves) and vertical (green curves) incident polarization; (g3) shows the simulated near-field distributions of the elongated oligomers for vertical polarization at the spectral positions^[53]

的 B_{3n} 正键共振模式和中心圆环的偶极模式杂化,形成了图 4(e)左侧所示极矩分布状态,不同圆环表面等离子体振荡极矩相反,故形成的两个杂化共振模式均为弱辐射暗模式,并与圆环七聚体的等离子体偶极明模式相互作用得到了多重等离子体 Fano 共振。对于圆盘九聚体纳米结构体系,方哲宇研究组使用八个较小的圆盘环绕中心单一圆盘结构激发等离子体 Fano 共振^[52],该 Fano 共振是由九聚体圆盘支持的同相位振荡的偶极子辐射模式和中心圆盘与上下部六圆盘异相振荡的亚辐射暗模式相互作用得到,如图 4(f)所示。同时,发现散射谱线中 Fano 共振峰位与吸收谱线中的共振峰位对应(吸收与散射峰位的微弱偏移源于模式之间的耦合作用),说明等离子体 Fano 共振峰位处具有较强的吸收入射光的能力,可产生大量的热电子^[54]。

第三种,增大组成结构体系的粒子数量,使整体结构形成大集群体系,从而更易产生高阶等离子体暗模式,激发多重等离子体 Fano 共振。Daniel 研究组对大集群圆盘组成的有向型结构进行了详细研究^[53],如图 4(g)所示。在环型多聚体的外部均匀增加颗粒数量或者沿一个方向增加颗粒数量,都可以有效激发多重等离子体 Fano 共振模式。从图 4(g)中的环形多聚体近场分布可知,多重等离子体 Fano 共振是由多聚体结构支持的超辐射模式和多种亚辐射模式相互作用得到的,长波 Fano 共振[图 4(g)-1A 和 1B]的等离子体暗模式是由中心圆盘的偶极矩与所有外围圆盘的极矩相反形成的,亚辐射模式和整体结构支持的超辐射模式耦合激发了等离子体 Fano 共振;从短波 Fano 共振峰[图 4(g)-2A 和 2B]的近场分布图像可以看出,最外层与中心圆盘的极矩一致却与中间层圆盘极矩相反,因此构成了新的亚辐射模式状态,并与整体偶极模式耦合激发了短波等离子体 Fano 共振模式。同理,沿确定方向增多的多聚体结构也是在相同的原理下激发了多重等离子体 Fano 共振。上述结果表明控制组成结构的颗粒数量和排列位置可有效激发多重等离子体 Fano 共振,这为等离子体超分子结构的研究开启了新的大门,并且可以用于多波段表面增强拉曼散射。

综上所述,从拥有高度对称性的多聚体类圆盘结构可以看出,并不是只有非对称结构才能激发等离子体 Fano 共振模式,对称结构在垂直辐照下通过模式间的杂化同样可以有效激发等离子体 Fano 共振。同时,随着组成金属纳米结构体系的类圆盘粒子数量有规律增多和定向排布形成的特定结构,

配合不同偏振入射光的辐照可以有效且规律性地激发高阶等离子体暗模式,进而在光谱中激发多重等离子体 Fano 共振,这是单体和二聚体类圆盘纳米结构不具备的性质。这种大集群纳米结构体系产生的具有较大调制深度且共振频率可调的多重等离子体 Fano 共振效应,不仅可以在多个波段同时控制光谱,还有利于实现可控的谱线整形,这对多波段传感具有十分重要的意义。

2.4 类圆盘纳米结构等离子体 Fano 共振的应用

纳米结构激发的等离子体 Fano 共振具有特殊的线型,利用等离子体 Fano 共振光谱线宽较窄、共振频率极大地依赖于介电环境,以及能够将入射电磁场很好地局限在结构表面并使近场显著增强等特性,等离子体 Fano 共振效应在传感、表面增强光谱、光开关等方面发挥了十分重要的作用。

Yanik 课题组利用等离子体 Fano 共振辐射损耗较小、频率极大地依赖于电介质环境的特点,通过提高蒸发(LIFE)纳米刻蚀技术,大面积高效率地得到极其统一的纳米圆孔阵列结构,利用该圆盘孔阵列中的迟滞效应与入射光辐射模式耦合产生了等离子体 Fano 共振^[23]。该结构阵列的品质因数可达 162。依赖其极其灵敏的生物传感特性,实现了蛋白质分子的肉眼检测,这对高性能等离子体传感的发展具有重要的推动作用。近期,方哲宇研究组在 MoS_2 分子层上放置单一金纳米圆盘,使用该结构体系来激发 Fano 共振^[55],该 Fano 共振源于 MoS_2 的激子与金纳米圆盘等离子体偶极模式的耦合。该体系对局部介电环境十分敏感,通过改变作用的门电压可以有效调控 Fano 共振。该研究成果为纳米级超薄光电仪器的设计奠定了基础。

Ye 研究组利用等离子体 Fano 共振能够很好地聚焦入射电磁场能量的特性,在圆盘七聚体纳米结构中激发了等离子体 Fano 共振^[25],并在圆盘之间产生巨大的近场增强,通过改变圆盘的直径、圆盘间隙及入射光波长,有效控制圆盘七聚体表面的热点分布及近场强度,这为增强相应频率的光谱学信号提供了帮助。当 Fano 共振的波长和短波峰波长分别与入射光波长和斯托克斯波长相适应时,可以得到强度最大的表面增强拉曼光谱^[26]。Zhang 研究组在圆盘结构中构造狭缝^[31],利用圆盘的偶极模式和狭缝的四极模式杂化耦合成功激发了线宽较窄的等离子体 Fano 共振,并在狭缝中得到了巨大的局域场增强,同时有效增强了二次谐波的强度。方哲宇研究组设计了圆盘七聚体置于双层石墨烯之间组

成三明治结构作为光探测器^[56],利用圆盘七聚体纳米结构激发的等离激元 Fano 共振吸收入射光并产生大量的热电子,配合石墨烯可以直接输送热电子进入导带的能力,此种复合结构光探测器对可见光和近红外光子的转化效率比单纯的石墨烯探测器提高了 8 倍。同年,该研究组基于圆盘九聚体与单层石墨烯组合结构^[52],利用圆盘九聚体支持的等离激元 Fano 共振在结构表面产生的热电子实现了对石墨烯的有效电掺杂过程,并通过改变圆盘九聚体的直径和入射光的参数对此过程进行有效控制,为多种光学开关和光探测器提供了设计思路。

除上述等离激元 Fano 共振的典型应用外,根据等离激元 Fano 共振对入射光偏振敏感的特点,Zu 等^[57]设计了带有一定旋转角度的六个椭圆盘环绕中心单圆盘的七聚体类圆盘纳米结构,该结构在左旋偏振光和右旋偏振光下得到的等离激元 Fano 共振的手性响应达到了 30%,同时发现手性特征受等离激元 Fano 共振强度的影响十分明显,并且会影响结构表面的近场强度分布,该结果为设计和分析手性等离激元 Fano 共振纳米结构体系提供了很好的平台。此外,Chang 研究组利用七个圆盘环绕一个半圆盘组成的八聚体偏振旋转液晶装置,在外加低电压的情况下控制入射光的偏振,可以有效调控 Fano 共振的激发与消失,实现了 Fano 共振和非 Fano 共振之间的完美转化^[58]。这一特征为等离激元开关提供了新的设计思路。

3 结束语

着重介绍了金属纳米类圆盘结构体系激发的 Fano 共振,分别对单体、二聚体和多聚体类圆盘纳米结构支持的 Fano 共振的产生机理和激发方式进行详细描述。单一类圆盘结构除偶极模式可以被直接激发外,通过迟滞效应、电磁模式杂化和对称性破坏引入等离激元暗模式,并与等离激元偶极明模式耦合形成等离激元 Fano 共振;二聚体类圆盘结构的等离激元 Fano 共振主要源于分别激发的明暗模式的相互作用或整体激发的明暗模式的耦合;多聚体类圆盘结构较为复杂,两个或多个结构之间形成明模式或者暗模式,这些模式之间再发生耦合作用,最终激发等离激元 Fano 共振。同时,金属纳米类圆盘结构激发的 Fano 共振对于构成结构的颗粒数量、结构的组成和组态、结构体系整体或个体的几何参数和电介质环境等均十分敏感,利用这些参数可有效调控 Fano 共振的线型和结构的近场特征。随

着人们对等离激元 Fano 共振的研究深入,纳米结构等离激元 Fano 共振在谐振器、表面增强拉曼散射、纳米天线、慢光传输和光催化等方面将发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Sarrazin M, Vigneron J P. Bounded modes to the rescue of optical transmission [J]. *Europhysics News*, 2007, 38(3): 27-31.
- [2] Tribelsky M I, Flach S, Miroschnichenko A E, *et al.* Light scattering by a finite obstacle and Fano resonances[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(4): 043903.
- [3] Miroschnichenko A E, Flach S, Gorbach A V, *et al.* Fano resonances: a discovery that was not made 100 years ago[J]. *Optics & Photonics News*, 2008, 19(12): 48.
- [4] Li M J, Li X M. Group theory of Fano resonance spectra in system of C_{3v} and C_{4v} metallic nanoparticles-thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1024001.
李梦君, 李小明. C_{3v} 和 C_{4v} 金属纳米多颗粒-薄膜系统的 Fano 共振光谱的群论[J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1024001.
- [5] Feng H, Sonnefraud Y, van Dorpe P, *et al.* Symmetry breaking in plasmonic nanocavities: subradiant LSPR sensing and a tunable Fano resonance[J]. *Nano Letters*, 2008, 8(11): 3983-3988.
- [6] Khan A D. Enhanced plasmonic Fano-like resonances in multilayered nanoellipsoid[J]. *Applied Physics A*, 2016, 122(4): 1-7.
- [7] Panaro S, Nazir A, Razzari L, *et al.* Plasmonic moon: a Fano-like approach for squeezing the magnetic field in the infrared [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(9): 6128-6134.
- [8] Yang Y M, Wang W Y, Boulesbaa A, *et al.* Nonlinear Fano-resonant dielectric metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(11): 7388-7393.
- [9] Katie E, Hopkins B, Staude I, *et al.* Observation of Fano resonances in all-dielectric nanoparticle oligomers[J]. *Small*, 2014, 10(10): 1985-1990.
- [10] Yang D J, Yang Z J, Li Y Y, *et al.* Tunable Fano resonance in rod-ring plasmonic nanocavities [J]. *Plasmonics*, 2014, 10(2): 263-269.
- [11] Nordlander P, Oubre C, Prodan E, *et al.* Plasmon hybridization in nanoparticle dimers [J]. *Nano Letters*, 2004, 4(5): 899-903.

- [12] Chen Y, Luo P, Tian Y N, *et al.* Fano resonance slow light characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupled cavity with metallic double-slit [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0924002.
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.
- [13] Alemayehu N K, Ji B Y, Lin J Q, *et al.* Controlling optical field enhancement of a nanoring dimer for plasmon-based application [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055007.
- [14] Guo Q B, Liu X F, Qiu J R, *et al.* Research progress of ultrafast nonlinear optics and applications of nanostructures with localized plasmon resonance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703005.
郭强兵, 刘小峰, 邱建荣, 等. 局域表面等离子体纳米结构的超快非线性光学及其应用研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703005.
- [15] Zhang S, Genov D A, Wang Y, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 047401.
- [16] Verellen N, Sonnefraud Y, Sobhani H, *et al.* Fano resonances in individual coherent plasmonic nanocavities [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(4): 1663-1667.
- [17] Huang Y H, Xue B P. Research of multiple Fano resonances in plasmonic octamer clusters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 062401.
黄运欢, 薛保平. 等离子体八聚体中多重法诺共振现象的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 062401.
- [18] Huang Y H, Yin L Y, Cai D J, *et al.* Modulation of Fano resonance in plasmonic quadrumer clusters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 022401.
黄运欢, 殷丽艳, 蔡东进, 等. 等离子体四聚体中法诺共振的调制 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 022401.
- [19] Arif E C, Hatice A. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(11): 9989-9995.
- [20] Li J, Liu T Z, Zheng H, *et al.* Higher order Fano resonances and electric field enhancements in disk-ring plasmonic nanostructures with double symmetry breaking [J]. *Plasmonics*, 2014, 9(6): 1439-1445.
- [21] Wang J, Fan C, He J, *et al.* Double Fano resonances due to interplay of electric and magnetic plasmon modes in planar plasmonic structure with high sensing sensitivity [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2236-2244.
- [22] Wu C, Khanikaev A B, Adato R, *et al.* Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(1): 69-75.
- [23] Yanik A A, Cetin A E, Huang M, *et al.* Seeing protein monolayers with naked eye through plasmonic Fano resonances [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(29): 11784-11789.
- [24] Hao F, Nordlander P, Sonnefraud Y, *et al.* Tunability of subradiant dipolar and Fano-type plasmon resonances in metallic ring/disk cavities: implications for nanoscale optical sensing [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(3): 643-652.
- [25] Ye J, Wen F, Sobhani H, *et al.* Plasmonic nanoclusters: near field properties of the Fano resonance interrogated with SERS [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(3): 1660-1667.
- [26] He J, Fan C, Ding P, *et al.* Near-field engineering of Fano resonances in plasmonic assembly for maximizing CARS enhancements [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20777.
- [27] Gersten J. Disk plasma oscillations [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 1982, 77(12): 6285-6288.
- [28] Melchior P, Kilbane D, Vesseur E J, *et al.* Photoelectron imaging of modal interference in plasmonic whispering gallery cavities [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 31619-31626.
- [29] Yang J, Sun Q, Yu H, *et al.* Spatial evolution of the near-field distribution on planar gold nanoparticles with the excitation wavelength across dipole and quadrupole modes [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 187-193.
- [30] Yannick S, Verellen N, Sobhani H, *et al.* Experimental realization of subradiant, superradiant, and Fano Resonances in ring/disk plasmonic nanocavities [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(3): 1664-1670.
- [31] Zhang Q, Wen X L, Li G, *et al.* Multiple magnetic mode-based Fano resonance in split-ring resonator/disk nanocavities [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(12): 11071-11078.
- [32] Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts [J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1866-1878.

- [33] Jonathan A F, Kui B, Chi H W, *et al.* Fano-like interference in self-assembled plasmonic quadrumer clusters [J]. *Nano Letters*, 2010, 10 (11): 4680-4685.
- [34] Miroschnichenko A E, Sergej F, Yuri S K, *et al.* Fano resonances in nanoscale structures [J]. *Review of Modern Physics*, 2010, 82(3): 2257-2298.
- [35] Wan W, Zheng W, Chen Y F, *et al.* From Fano-like interference to superscattering with a single metallic nanodisk [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(15): 9093-9102.
- [36] Cai D J, Huang Y H, Wang W J, *et al.* Fano resonances generated in a single dielectric homogeneous nanoparticle with high structural symmetry [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2015, 119(8): 4252-4260.
- [37] Fang Z Y, Cai J Y, Nordlander P, *et al.* Removing a wedge from a metallic nanodisk reveals a Fano resonance [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(10): 4475-4479.
- [38] Zhang S, Li G C, Chen Y Q, *et al.* Pronounced Fano resonance in single gold split nanodisks with 15-nm split gaps for intensive second harmonic generation [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11105-11114.
- [39] He J, Fan C Z, Wang J Q, *et al.* A giant localized field enhancement and high sensitivity in an asymmetric ring by exhibiting Fano resonance [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(2): 025007.
- [40] Wang H, Wu Y P, Lassiter B, *et al.* Symmetry breaking in individual plasmonic nanoparticles [J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103 (29): 10856-10860.
- [41] Shang W Y, Xiao F J, Zhu W R, *et al.* Fano resonance with high local field enhancement under azimuthally polarized excitation [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1049.
- [42] Shu J, Gao W L, Xu Q F, *et al.* Fano resonance in concentric ring apertures [J]. *Lasers & Electro-Optics*, 2013, 21(9): 11101-11106.
- [43] Bachelier G, Russier-Antoine I, Benichou E, *et al.* Fano profiles induced by near-field coupling in heterogeneous dimers of gold and silver nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101 (19): 197401.
- [44] Pena-Rodriguez O, Pal U, Campoyquiles M, *et al.* Enhanced Fano resonance in asymmetrical Au:Ag heterodimers [J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2011, 115(14): 6410-6414.
- [45] Hao F, Nordlander P, Burnett M T, *et al.* Enhanced tenability and linewidth sharpening of plasmon resonances in hybridized metallic ring/disk nanocavities [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(24): 245417.
- [46] Zhang Y, Jia T Q, Zhang H M, *et al.* Fano resonances in disk-ring plasmonic nanostructure: strong interaction between bright dipolar and dark multipolar mode [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4919-4921.
- [47] Zhang Q, Xiao J J. Multiple reversals of optical binding force in plasmonic disk-ring nanostructures with dipole-multipole Fano resonances [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4240-4243.
- [48] Rahmani M, Tahmasebi T, Lin Y, *et al.* Influence of plasmon destructive interferences on optical properties of gold planar quadrumers [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(24): 245204.
- [49] Rahmani M, Lukiyanchuk B, Nguyen T T V, *et al.* Generation of pronounced Fano resonances and tuning of subwavelength spatial light distribution in plasmonic pentamers. [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 19(6): 4949-4956.
- [50] Lassiter J B, Sobhani H, Fan J A, *et al.* Fano resonances in plasmonic nanoclusters: geometrical and chemical tunability [J]. *Nano Letters*, 2010, 10 (8): 3184-3189.
- [51] Liu S D, Yang Z, Liu R P, *et al.* Multiple Fano resonances in plasmonic heptamer clusters composed of split nanorings [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(7): 6260-6271.
- [52] Fang Z Y, Wang Y M, Liu Z, *et al.* Plasmon-induced doping of graphene [J]. *ACS Nano*, 2012, 6 (11): 10222-10228.
- [53] Dregely D, Hentschel M, Giessen H, *et al.* Excitation and tuning of higher-order Fano resonances in plasmonic oligomer clusters [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(10): 8202-8211.
- [54] Shan H Y, Zu S, Fang Z Y, *et al.* Research progress in ultrafast dynamics of plasmonic hot electrons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030002.
单杭永, 祖帅, 方哲宇, 等. 表面等离子激元热电子超快动力学研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030002.
- [55] Li B W, Zu S, Fang Z Y, *et al.* Single nanoparticle plasmonic electro-optic modulator based on MoS₂ monolayers [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(10): 9720-

- 9727.
- [56] Fang Z Y, Liu Z, Wang Y M, *et al.* Graphene-antenna sandwich photodetector [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3808-3813.
- [57] Zu S, Bao Y J, Fang Z Y, *et al.* Planar plasmonic chiral nanostructures [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(7): 3900-3905.
- [58] Chang W S, Lassiter J B, Swanglap P, *et al.* A plasmonic Fano switch [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4977-4982.