

同心椭圆柱-纳米管结构的双重Fano共振研究

张兴坊 刘凤收 闫昕 梁兰菊 韦德全

Double Fano resonance in gold nanotube embedded with a concentric elliptical cylinder

Zhang Xing-Fang Liu Feng-Shou Yan Xin Liang Lan-Ju Wei De-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 067301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182249

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182249>

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

[D3h和D4h等离激元超分子的Fano共振光谱的子集合分解解释](#)

Subgroup decomposition analyses of D3h and D4h plasmonic metamolecule Fano resonance spectrum

物理学报. 2016, 73(5): 057302 <https://doi.org/10.7498/aps.65.057302>

[柱状磁光颗粒的局域表面等离激元共振及尺寸效应](#)

Localized surface plasmon resonance and the size effects of magneto-optic rods

物理学报. 2016, 73(11): 114202 <https://doi.org/10.7498/aps.65.114202>

[纳米银六角阵列在掺氧氮化硅中的局域表面等离激元共振特性仿真](#)

Simulation of localized surface plasmon resonance of hexagonal Ag nanoarrays and amorphous oxidized silicon nitride

物理学报. 2015, 72(17): 177301 <https://doi.org/10.7498/aps.64.177301>

[后退火处理对铟锡氧化物表面等离激元共振特性的影响](#)

Effect of annealing treatment on characteristics of surface plasmon resonance for indium tin oxide

物理学报. 2018, 75(17): 177802 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180435>

[碳纳米管光学天线的有效波长和谐振特性](#)

Effective wavelength and resonance characteristics of carbon nanotube optical antenna

物理学报. 2016, 73(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.65.097801>

同心椭圆柱-纳米管结构的双重 Fano 共振研究*

张兴坊^{1)2)†} 刘凤收¹⁾ 闫昕¹⁾²⁾ 梁兰菊¹⁾²⁾ 韦德全¹⁾¹⁾ (枣庄学院光电工程学院, 枣庄 277160)²⁾ (山东省光电信息处理与显示实验室, 枣庄 277160)

(2018 年 12 月 22 日收到; 2019 年 1 月 16 日收到修改稿)

提出了一种同心椭圆柱-纳米管复合结构, 该结构由金纳米管中内嵌椭圆形金柱构成, 利用时域有限差分法分析了尺寸参数、周围环境及纳米管内核材料对该结构光学性质的影响. 结果表明, 调节椭圆柱芯的旋转角度可产生双重偶极-偶极 Fano 共振, 其主要是由椭圆柱芯的纵向或横向偶极共振模式与纳米管的偶极成键和反成键模式杂化形成的超辐射成键模式和亚辐射成键模式之间的相互作用产生的, 且共振特性可通过调节复合结构的尺寸参数控制, 随椭圆柱长轴或短轴的增大而红移, 随纳米管外径的增大或整体尺寸的减小而蓝移, 当纳米管内径增大时高频 Fano 共振随着红移, 而低频 Fano 共振先蓝移再红移, 同时其对外界环境的变化不敏感, 但对纳米管内核材料变化有着较好的响应. 利用等离激元杂化理论对该现象进行了解释. 这些结果可为构造其他类型的多波段 Fano 共振二维或三维纳米结构提供一种新的方式.

关键词: 局域表面等离激元, Fano 共振, 纳米管, 时域有限差分法**PACS:** 73.20.Mf, 78.67.-n, 78.68.+m**DOI:** 10.7498/aps.68.20182249

1 引言

金属纳米结构在特定频率入射光作用下产生的局域表面等离激元共振现象, 具有对入射光极大的吸收和散射及在金属表面形成局域场增强等特性, 在生化传感、生物医疗、纳米光子器件等方面得到了广泛应用^[1-3]. 研究表明, 该现象与纳米结构的结构参数、排列方式、材料组成及外界环境等因素有关. 当条件合适时, 纳米结构的局域表面等离激元共振之间还可相互作用产生 Fano 共振效应, 在光谱中展现出独特的非对称线型. 目前, 研究者们已在多种金属纳米结构中发现了 Fano 共振现象, 如纳米环盘腔^[4-6]、纳米多层球壳^[7-10]、异质或非对称纳米颗粒对^[11-14]、纳米颗粒低聚体^[15]、破缺纳米结构^[16]等, 同时发现周围环境的不对称也

会导致 Fano 共振的产生^[17].

近几年来, 纳米管状结构由于其表面等离激元共振简单易控、宽波段可调及拥有更多表面积等特点引起了人们的关注^[18,19]. 并且, 通过将纳米管截面变形^[20]、破缺^[21]或多层构建^[22]等方式, 还可产生新的光学性质. Fano 共振现象在纳米管状结构中也有报道, 如采用内核偏离纳米管对称中心破坏其结构对称性的方法, 不仅可以激发高阶 Fano 共振^[23,24], 还导致纳米管二聚体的 Fano 共振谷变深^[25], 或采用各向异性内核破坏其材料色散对称性方式产生异常 Fano 共振^[26,27]等. 本文提出了一种金属纳米管中内嵌椭圆形柱芯的同心复合结构, 无需内核偏离对称中心, 仅利用椭圆柱芯长短轴向的改变就可实现双重偶极-偶极 Fano 共振, 并应用时域有限差分 (finite difference time domain, FDTD) 法进行仿真研究, 分析了结构参数、周围环境及内

* 国家自然科学基金 (批准号: 61701434)、山东省自然科学基金 (批准号: ZR2017MF005, ZR2018LF001)、山东省高等学校科技计划 (批准号: J17KA087) 和枣庄市光电信息功能材料与微纳器件重点实验室资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zxf4114@126.com

核材料对 Fano 共振的影响. 研究结果可为特定纳米光子学方面的研究提供有价值的理论指导.

2 理论模型

纳米管中内嵌椭圆形柱芯的同心复合结构模型示意图见图 1. 复合结构在 z 方向上为无限长, 椭圆柱芯的长短轴分别为 a , b , 其长轴与 x 轴的夹角为 θ , 纳米管的内外半径分别为 r , R , 且两者同心. 柱芯、纳米管内核材料、壳层金属及周围环境的介电常数分别为 ε_1 , ε_2 , ε_3 和 ε_4 . 光沿 x 轴正向入射, 偏振方向沿 y 轴. 纳米管复合结构的光学性质采用 FDTD 方法^[20,28] 模拟得到. 在本文中, 椭圆柱芯和纳米管壳层材料均选为金, 其介电常数取自于实验结果^[29]. FDTD 模拟区的大小为 $3000 \text{ nm} \times 3000 \text{ nm}$, 网格精度为 1 nm , 并设置完全匹配层边界条件以避免反射引起的误差. 在二维情况下, 散射或吸收截面的定义为每单位长度的总散射或总吸收功率 (W/m) 与入射强度 (W/m^2) 之比, 此截面具有长度量纲.

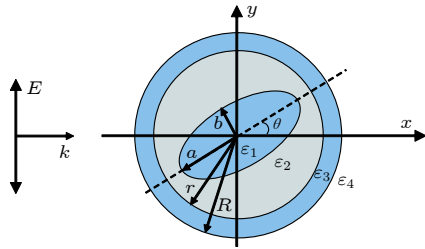


图 1 椭圆柱芯-纳米管同心复合结构模型示意图

Fig. 1. Geometrical structure of Au elliptical cylinder-nanotube concentric nanostructure.

3 结果与讨论

首先分析椭圆柱芯的旋转角度对纳米管复合结构光学性质的影响. 图 2 给出了 θ 分别为 0° , 25° , 45° , 65° 和 90° 时该结构的散射光谱 (实线) 和吸收光谱 (虚线). 其中, 金纳米管的内核材料和外界环境分别为 SiO_2 ($\varepsilon_2 = 2.04$) 和空气 ($\varepsilon_4 = 1$), 内外半径分别为 75 nm 和 55 nm , 椭圆柱芯的长短轴分别为 45 nm 和 25 nm . 由图 2 可见, 当 θ 为 0° 时, 复合结构在约 798 和 813 nm 处出现吸收峰和散射峰, 并且散射峰具有明显的不对称性; 当 θ 增大到 25° 时, 复合结构的吸收峰和散射峰位置不变, 但强度变小, 同时在长波长 1100 nm 附近出现了明显的吸收峰和较小的散射峰; 随着角度的进一

步增大, 短波长处的吸收和散射峰逐渐减小, 在 $\theta = 90^\circ$ 时消失, 而长波长处的吸收和散射峰逐渐增大, 且散射峰也呈现出了明显的不对称性, 其位置也几乎不变.

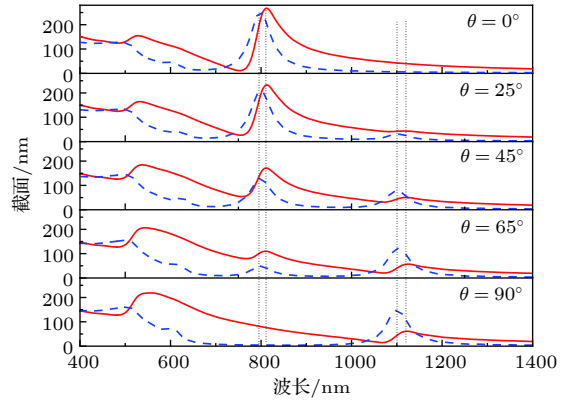


图 2 金纳米管复合结构的吸收 (虚线)、散射 (实线) 光谱与椭圆柱芯旋转角度的关系

Fig. 2. Relationship between absorption (dotted line) and scattering (solid line) spectra of gold nanotube composite structure and rotation direction of the elliptical cylinder core.

为了探究纳米管复合结构的光学性质与椭圆柱芯旋转角度的关系, 对比分析了相同参数的金纳米管、复合结构、金椭圆柱芯的散射谱, 并仿真了每个结构在相关频率处的电荷图, 结果分别如图 3(a)—(c) 所示. 从图 3(a) 金纳米管的散射谱和电荷分布可见, 金纳米管中可激发出两个偶极共振模式, 分别为高频率的反成键 (antibonding) 模式 $|\omega_+ \rangle$ 和低频率的成键 (bonding) 模式 $|\omega_- \rangle$, 相应共振波长处于 400 和 670 nm 附近. 当 $\theta = 90^\circ$ 时, $|\omega_+ \rangle$ 和 $|\omega_- \rangle$ 模式将分别与椭圆柱芯的纵向偶极共振模式 $|\omega_1 \rangle$ (见图 3(c), 共振波长 572 nm) 杂化, 形成偶极成键模式 $|\omega_{+1}^- \rangle$ 和 $|\omega_{-1}^- \rangle$, 如图 3(b) 所示. 其中, $|\omega_{+1}^- \rangle$ 模式频率较高, 易于与入射光耦合形成宽谱, 为超辐射模式, $|\omega_{-1}^- \rangle$ 模式频率较低, 不易与入射光耦合, 为窄线宽的亚辐射模式. 类似的杂化过程同样被发现存在于纳米环盘腔^[4]、纳米多层球壳^[8] 等结构. $|\omega_{+1}^- \rangle$ 和 $|\omega_{-1}^- \rangle$ 模式之间相互耦合在长波长 1100 nm 附近形成低频偶极-偶极 Fano 共振, 在散射谱中呈现非对称线型. 当 $\theta = 0^\circ$ 时, $|\omega_+ \rangle$ 和 $|\omega_- \rangle$ 模式与椭圆柱芯的横向偶极共振模式 $|\omega_s \rangle$ (共振波长 530 nm) 杂化, 形成超辐射模式 $|\omega_{+s}^- \rangle$ 和亚辐射模式 $|\omega_{-s}^- \rangle$, 两者耦合在 800 nm 附近形成高频偶极-偶极 Fano 共振. 当 $\theta \neq 0^\circ$ 或 90° 时, 椭圆柱

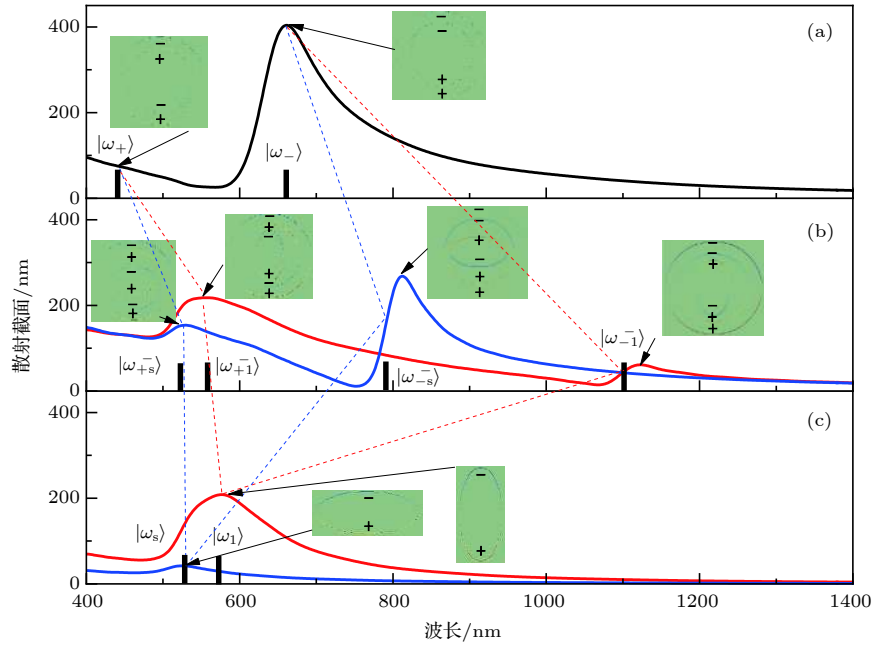


图3 金纳米管复合结构的等离激元共振杂化示意图 (a) SiO_2 核-金壳; (b) 复合结构; (c) 金椭圆柱分别在 $\theta = 0^\circ$ 和 90° 时的散射光谱; 插图分别为共振时各个结构的电荷分布图

Fig. 3. Plasmon hybridization in a nanotube composite structure. Scattering spectra for (a) SiO_2 -core Au-shell nanotube in vacuum, (b) composite structure and (c) Au elliptical cylinder embedded in SiO_2 . Inset shows the surface charge distributions at the corresponding resonance energies.

芯的 $|\omega_s\rangle$ 和 $|\omega_l\rangle$ 模式均被激发, 因此光谱中出现双重 Fano 共振. 夹角 θ 越大, 激发出的 $|\omega_l\rangle$ 模式强度也越大, 导致低频 Fano 共振强度逐渐增大, 高频 Fano 共振强度逐渐减弱.

下面分析椭圆柱芯的尺寸参数对这两个 Fano 共振的影响. 图 4 给出了 $\theta = 45^\circ$, $b = 25$ nm, 椭圆柱芯长轴 a 从 25 nm 增大到 50 nm 时复合结构散射光谱和峰值波长处的电场分布. 从图 4 可以看出, 随着长轴的增大, 低频和高频 Fano 共振均红移, 且低频 Fano 共振移动速度更快, 当长轴 a 分别为 25, 35, 45 和 50 nm 时, 对应的峰位分别为 770, 888 nm, 1118 和 1386 nm, 同时光谱强度变小; 当 $a = 50$ nm 时低频 Fano 共振几乎不可见, 而高频 Fano 共振强度变化较小. 而且, 从电场分布可见, 低频和高频 Fano 共振峰波长时的电场分布均呈现出较好的纵向和横向偶极子振动模式, 随着长轴的增大, 低频共振峰波长处的电场逐渐增大, 从 $a = 35$ nm 时的 10.8 增大到 $a = 50$ nm 时的 12.4, 而高频处的电场变化不大, 约为 7. 这是因为随着椭圆柱芯长轴的增大, 其与纳米管金属壳层之间的距离减小, 导致纳米管的 $|\omega_- \rangle$ 模式与椭圆柱芯 $|\omega_l \rangle$ 模式杂化增强, 引起成键模式 $|\omega_{-l} \rangle$ 红移, 距离越短, 杂化越强, 红移速度也越快^[3]. 同时, 长轴

增大对 $|\omega_{+l} \rangle$ 模式的影响较小, 其强度和峰位几乎不变^[8], 且其辐射强度随着波长的增大而减小, 导致低频 Fano 共振光谱强度变小. 而长轴变化对 $|\omega_s \rangle$ 模式影响也较小, 使得高频 Fano 共振几乎无变化. 另外, 从图 4 还可以看出, 当 Fano 共振时复合结构的电场主要分布于纳米管介质层内. 可见, 在这两个 Fano 共振处, 辐射衰减均可以被有效地抑制, 在纳米管内部形成较大的局域场增强.

图 5 给出了椭圆柱芯短轴 b 分别为 25, 35, 45 和 50 nm 时纳米管复合结构的散射光谱, 其中, $\theta = 45^\circ$, $a = 45$ nm. 由图 5 可见, 随着短轴的增大, 高频和低频 Fano 共振均红移, 分别由 $b = 25$ nm 时的 813 nm 和 1118 nm 移动到 $b = 50$ nm 时的 1645 nm 和 1364 nm, 高频 Fano 共振移动速度更快, 同时光谱强度均变小, 当 $b = 45$ nm 时两个 Fano 共振合并. 此现象的出现是因为椭圆柱芯 $|\omega_s \rangle$ 模式与纳米管的 $|\omega_- \rangle$ 模式杂化随着短轴的增大而增强, 引起成键模式 $|\omega_{-s} \rangle$ 红移强度变小, 当 $b = 45$ nm 时椭圆柱芯的形状变成对称性更好的圆柱体, 此时 $|\omega_l \rangle$ 和 $|\omega_s \rangle$ 模式频率相等, 只产生一个 Fano 共振. 而低频 Fano 共振具有明显的红移, 可能是因为此时椭圆柱芯截面积较大, 受到了相位延迟效应的影响.

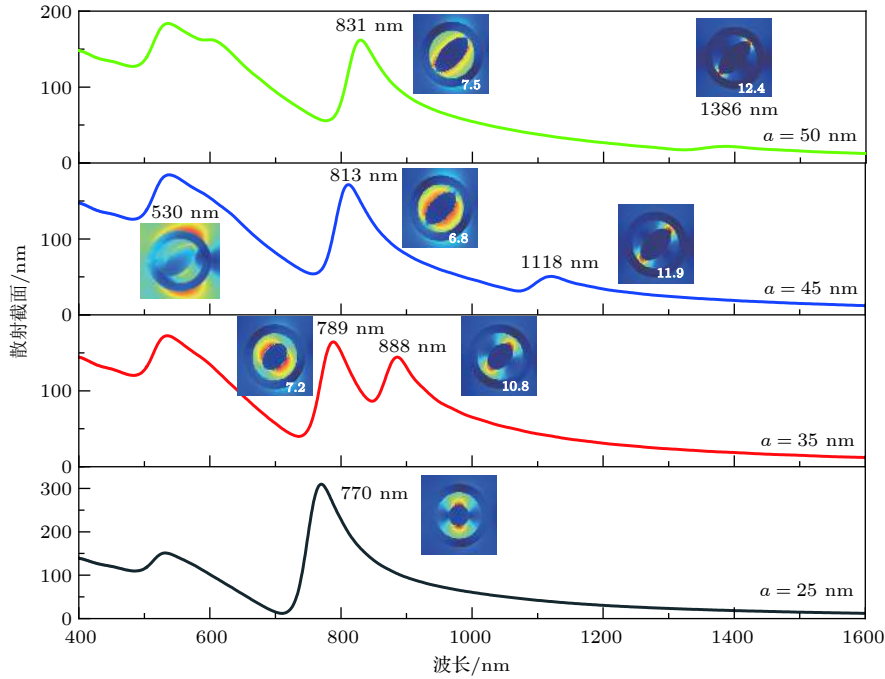


图 4 复合结构的散射谱随椭圆芯长轴的变化 (内插图复合结构在峰值波长的电场分布)

Fig. 4. Scattering spectra of nanotube composite structure as a function of the semimajor axis a . Inset shows electric field distributions corresponding to each peak in the scattering spectra, the numbers in white indicate the maximum electric field enhancements.

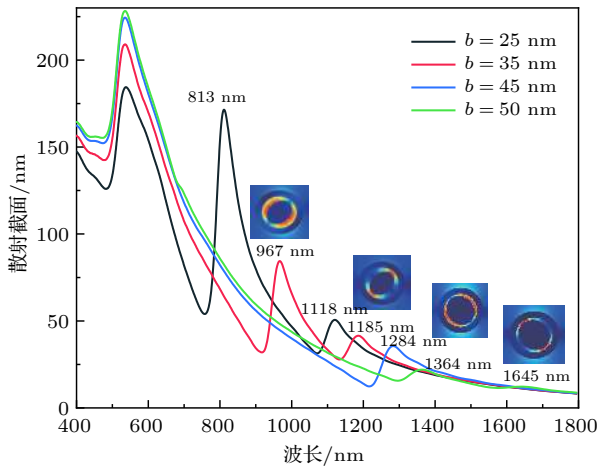


图 5 金纳米管复合结构的散射谱随椭圆芯短轴的变化 (内插图为 $b = 35, 50$ nm 时复合结构在峰值波长的电场分布)

Fig. 5. Scattering spectra of nanotube composite structure as a function of the semiminor axis b . Inset shows electric field distributions corresponding to scattering spectral peak for $b = 35$ and 50 nm.

纳米管内外径的变化同样影响着 Fano 共振, 图 6(a) 给出了当内径 $r = 55$ nm、外径 R 分别为 60, 75 和 90 nm 时的散射光谱. 该图中 Fano 共振随着外径的增大单调蓝移, 且光谱强度逐渐增大. 这是由于纳米管外径的增大不仅引起参与振动的电子数增多和辐射强度增大, 还将导致 $|\omega_- \rangle$ 模式蓝

移 [20], 使得成键模式 $|\omega_{-s} \rangle$ 和 $|\omega_{-l} \rangle$ 的频率增大, 且越靠近短波长处, $|\omega_{+s} \rangle$ 和 $|\omega_{+l} \rangle$ 模式的辐射强度越大. 图 6(b) 给出了 $R = 75$ nm, 内径 r 由 50 nm 增大到 70 nm 时的散射光谱. 由图 6(b) 可见, 随着内径的增大, 高频 Fano 共振单调红移, 且内径越大, 红移速度越快; 而低频 Fano 共振先蓝移再红移. 该现象产生的原因是因为内径的变化不仅影响着 $|\omega_- \rangle$ 模式的频率, 还影响着椭圆柱芯和纳米管之间的杂化强度. 对于高频 Fano 共振, 当内径增大时, $|\omega_- \rangle$ 模式频率降低, 导致 $|\omega_{-s} \rangle$ 和 $|\omega_{-l} \rangle$ 模式均红移, 同时椭圆柱芯和纳米管壳层之间的距离增大, 杂化强度减弱又引起 $|\omega_{-s} \rangle$ 和 $|\omega_{-l} \rangle$ 模式蓝移, 但是椭圆柱芯短轴和纳米管壳层之间的距离相对较大, 杂化强度减弱程度相对较小, 对光谱的蓝移效果小于红移效果, 因而单调红移; 对于低频 Fano 共振, 其长轴与纳米管壳层之间的距离相对较小, 杂化强度较大, 随着内径的增大, 当杂化强度减弱引起的蓝移效果大于 $|\omega_- \rangle$ 模式频率降低引起的红移效果时蓝移, 但当距离足够大时, $|\omega_- \rangle$ 模式频率降低对光谱的影响占主导地位时红移.

接下来分析纳米管复合结构整体尺寸与 Fano 共振的关系. 图 7 给出了纳米结构整体尺寸变为原来的 0.5, 1.0 和 1.5 倍时的散射光谱. 由图 7

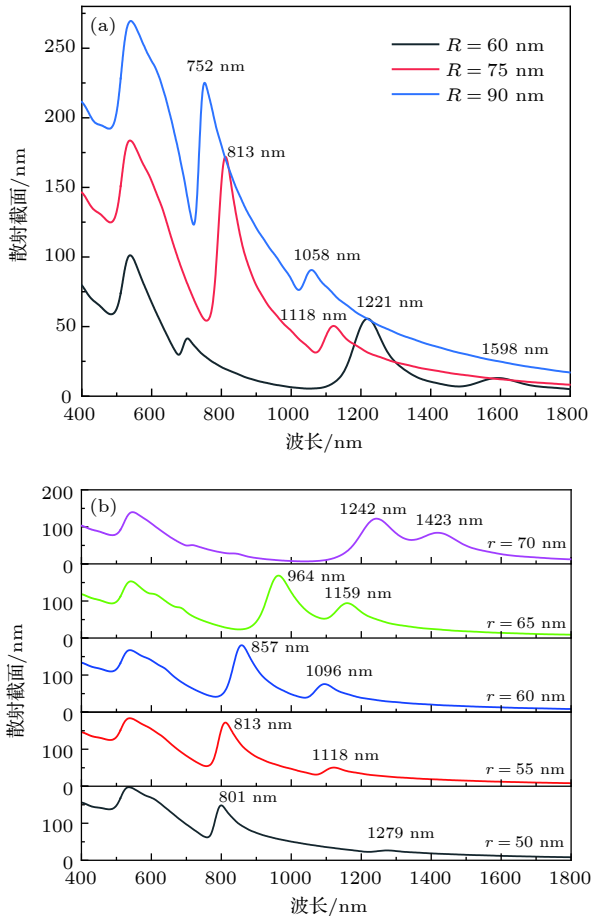


图 6 散射谱随纳米管 (a) 外径和 (b) 内径的变化

Fig. 6. Scattering spectra of composite structure with different (a) R and (b) r .

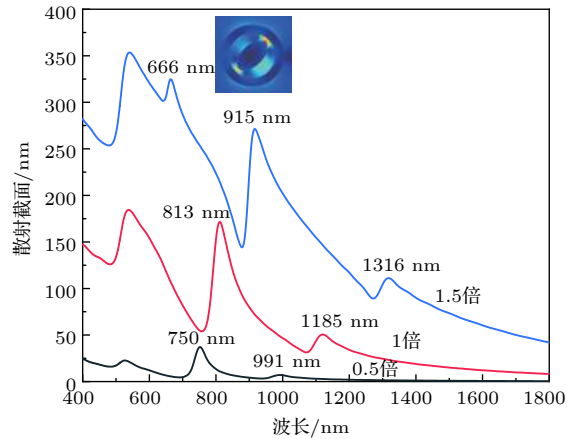


图 7 金纳米管复合结构的散射谱随整体尺寸的变化

Fig. 7. Scattering spectra of nanotube composite structure scaled to different sizes.

可见, 当纳米结构整体尺寸增大时, Fano 共振随之红移, 且光谱强度增大, 当 1.5 倍时在约 660 nm 处还激发出了四阶 Fano 共振. 纳米结构整体尺寸的增大使得参与振动的电子增多, 纳米管 $|\omega_+ \rangle$,

$|\omega_- \rangle$ 模式和椭圆柱芯偶极共振模式的偶极矩增大, 进而导致超辐射模式 $|\omega_{+s} \rangle$ 和 $|\omega_{-s} \rangle$ 的净偶极矩均增大, 辐射强度增大, 相互叠加引起 Fano 共振强度增大 [30]. 同时由于尺寸的增大引起了相位延迟效应, 共振峰随之红移, 并激发高阶共振.

最后, 分析复合结构内核材料和外界环境变化对 Fano 共振的影响. 图 8(a) 给出了外界环境介电常数 ε_4 从 1 增大到 3, 金纳米管内外半径分别为 75 nm 和 55 nm, 椭圆柱芯的长短轴分别为 45 nm 和 25 nm, θ 为 45° , 内核材料 $\varepsilon_2 = 2.04$ 时的散射光谱. 可以看到, 当外界环境变化时, Fano 共振峰轻微红移. 这是由于外界环境折射率变大时, 金纳米管外壳表面感应电荷减少, $|\omega_- \rangle$ 模式频率降低引起成键模式 $|\omega_{-s} \rangle$ 和 $|\omega_{-1} \rangle$ 红移 [3,20]. 图 8(b) 给出了内核材料折射率变化时处于空气 ($\varepsilon_4 = 1$) 中的金纳米管复合结构散射光谱. 由图 8(b) 可见, 当金纳米管内核介电常数 ε_2 从 1 增大到 4 时, 高频 Fano 共振峰从约 661 nm 处红移至 1067 nm, 移

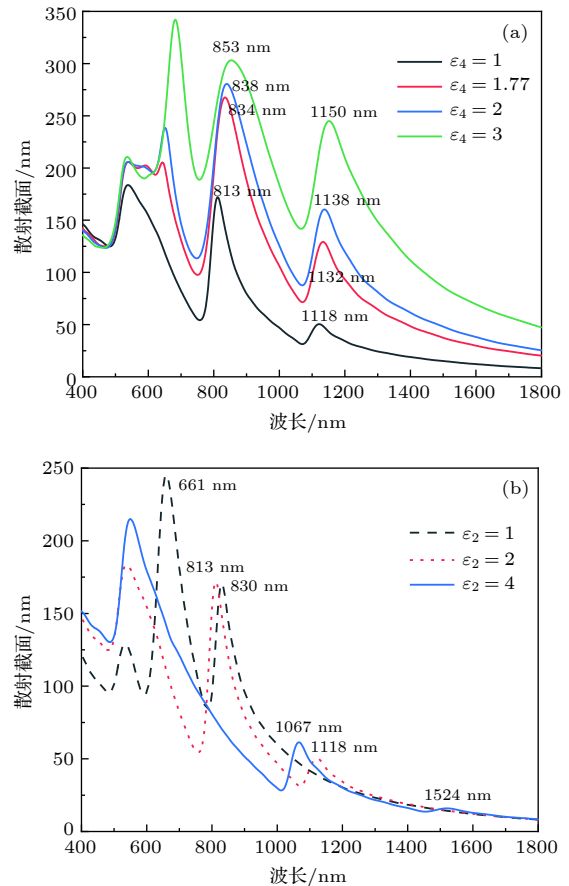
图 8 散射谱随 (a) 外界环境 ε_4 和 (b) 纳米管内核材料 ε_2 的变化

Fig. 8. Scattering spectra of composite structure with different (a) ε_4 and (b) ε_2 .

动了 406 nm, 低频 Fano 共振从 830 nm 移动至 1524 nm, 移动范围达 694 nm. 说明此纳米管复合结构对管内环境有着较强的敏感性, 但对外界环境的变化基本无反应, 可以用作特殊作用的折射率传感器件^[31].

4 结 论

采用 FDTD 方法, 研究了椭圆柱芯-金纳米管同心复合结构的光学性质, 分析了结构尺寸参数、内核材料和外界环境折射率及椭圆柱芯旋转方向对 Fano 共振特性的影响. 结果表明, 通过对椭圆柱芯长短轴旋转角度的控制, 可激发出双重偶极-偶极 Fano 共振, 其中的超辐射(亚辐射)模式由椭圆柱芯的偶极共振模式与纳米管的偶极反成键(成键)模式杂化形成, 两者之间的耦合引起 Fano 共振. 高频或低频 Fano 共振受柱芯短轴或长轴影响较大, 均随长轴或短轴的增大而红移且光谱强度变小, 随纳米管外径增大或整体尺寸减小而蓝移, 当纳米管的内径变大时, 高频 Fano 共振单调红移, 低频 Fano 共振则先蓝移再红移, 同时发现两个 Fano 共振对外界环境的变化不敏感, 但却随纳米管内核材料折射率的增大而快速红移, 敏感度分别达 406 nm/RIU 和 694 nm/RIU. 该结构具有的双波段 Fano 共振可调的特点, 可为构造其他类型的多波段 Fano 共振二维或三维纳米结构提供一种新的方式.

参考文献

- [1] Liang H Y, Wei H, Xu H X 2016 *Front. Phys.* **11** 117301
- [2] Chen W, Hu H, Jiang W, Xu Y, Zhang S, Xu H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 107403
- [3] Halas N J, Lal S, Chang W S, Nordlander P 2011 *Chem. Rev.* **111** 3913
- [4] Hao F, Nordlander P, Sonnefraud Y, Dorpe P V, Maier S A 2009 *ACS Nano* **3** 643
- [5] Li J, Liu T, Zheng H, Dong J, He E, Gao W, Han Q, Wang C, Wu Y 2014 *Plasmonics* **9** 1439
- [6] Sonnefraud Y, Verellen N, Sobhani H, Vandenbosch G A E, Dorpe P, Nordlander P, Moshchalkov V V, Maier S A 2010 *ACS Nano* **4** 1664
- [7] Sanchoparramon J, Jelovina D 2014 *Nanoscale* **6** 13555
- [8] Ho J F, Boris L, Zhang J B 2012 *Appl. Phys. A* **107** 133
- [9] Pena-Rodriguez O, Rivera A, Campoy-Quiles M, Pal U 2012 *Nanoscale* **5** 209
- [10] Zhou H, Gao D, Gao L 2018 *Plasmonics* **13** 623
- [11] Shao L, Fang C, Chen H, Man Y C, Wang J, Lin H Q 2012 *Nano Lett.* **12** 1424
- [12] Li J, Gu Y, Gong Q 2010 *Opt. Express* **18** 17684
- [13] Ci X, Wu B, Song M, Liu Y, Chen G, Wu E, Zeng H 2014 *Appl. Phys. A* **117** 955
- [14] Yang Z J, Hao Z H, Lin H Q, Wang Q Q 2014 *Nanoscale* **6** 4985
- [15] Cui Y, Zhou J, Tamma V A, Park W 2012 *ACS Nano* **6** 2385
- [16] Fang Z, Cai J, Yan Z, Nordlander P, Halas N J, Zhu X 2011 *Nano Lett.* **11** 4475
- [17] Zhang S, Bao K, Halas N J, Xu H, Nordlander P 2011 *Nano Lett.* **11** 1657
- [18] Velichko E A, Nosich A I 2013 *Opt. Lett.* **38** 4978
- [19] Yu H Q, Jiang S M, Wu D J 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 153101
- [20] Cong C, Wu D J, Liu X J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 046102 (in Chinese) [丛超, 吴大建, 刘晓峻 2011 物理学报 **60** 046102]
- [21] Xu H, Li H, Liu Z, Xie S, Fu S, Zhou X 2012 *Opt. Commun.* **285** 3202
- [22] Zhu J, Li J J, Zhao J W 2013 *J. Phys. Chem. C* **117** 584
- [23] Zhang J, Zayats A 2013 *Opt. Express* **21** 8426
- [24] Wu D J, Yu H Q, Jiang S M, Wu X W, Liu X J 2014 *Sci. China* **57** 1063
- [25] Wu D, Jiang S, Cheng Y 2012 *Opt. Express* **20** 26559
- [26] Chen H L, Gao L 2013 *Opt. Express* **21** 23619
- [27] Gao D, Gao L, Novitsky A, Novitsky A, Chen H, Boris L 2015 *Opt. Lett.* **40** 4162
- [28] Taflov A, Hagness S 2000 *Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method* (Vol.2)(Boston: Artech House) pp75–85
- [29] Johnson P B, Christy R W 1972 *Phys. Rev. B* **6** 4370
- [30] Mukherjee S, Sobhani H, Lassiter J B, Bardhan R, Nordlander P, Halas N J 2010 *Nano Lett.* **10** 2694
- [31] Pan T T, Cao W, Deng C S, Wang M, Xia W, Hao H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157301 (in Chinese) [潘庭婷, 曹文, 邓彩松, 王鸣, 夏巍, 郝辉 2018 物理学报 **67** 157301]

Double Fano resonance in gold nanotube embedded with a concentric elliptical cylinder^{*}

Zhang Xing-Fang^{1)2)†} Liu Feng-Shou¹⁾ Yan Xin¹⁾²⁾ Liang Lan-Ju¹⁾²⁾ Wei De-Quan¹⁾

1) (*School of Opt-Electronic Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, China*)

2) (*Laboratory of Optoelectronic Information Processing and Display of Shandong, Zaozhuang 277160, China*)

(Received 22 December 2018; revised manuscript received 16 January 2019)

Abstract

Optical properties of the concentric composite nanostructure composed of gold nanotube around the center gold elliptical core are investigated based on the finite difference time domain method. According to the simulated absorption and scattering spectra, electric field distributions and charge distributions, we can generate double dipole-dipole Fano resonances by adjusting the angle between the elliptical cylinder core and the linearly polarized excitation light, which is due mainly to the interference between the subradiant dipole mode and the superradiant dipole mode. The narrow, low-energy subradiant mode originates from the symmetric hybridization between the longitudinal or transverse dipole mode of the elliptical cylinder core and the dipole bonding mode of the nanotube, and the broad, high-energy superradiant mode originates from the symmetric hybridization between the core's dipole mode and the nanotube's dipole antibonding mode. Moreover, the intensities and spectral positions of the two Fano resonances can be manipulated by modifying the geometric parameters of the composite structure. By increasing the semiminor axis of elliptical core, the high-energy Fano resonance red-shifts faster than the low-energy Fano resonance due to the increase of the interaction coupling between the transverse dipole mode of the core and the dipole mode of the nanotube, and becomes weaker in the scattering spectrum because of the reduced radiation intensity of the superradiant dipole mode. When the semimajor axis is changed, a similar phenomenon occurs in the low-energy Fano resonance. In addition, the two Fano resonances red-shift when outer radius of the nanotube increases, but the shift of low-frequency and high-frequency Fano resonance are inconsistent as the inner radius of the nanotube changes. The high-frequency Fano resonance red-shifts monotonically while the low-frequency Fano resonance first blue-shifts and then red-shifts with the increase of inner radius of nanotube because the red shift of the dipole bonding nanotube mode competes with the spectral shifts induced by the diminishing hybridization between elliptical core and nanotube mode. It can also be concluded that the dipole-dipole Fano resonances become apparent and higher order Fano resonance occurs when the composite nanostructure is scaled to a larger size due to the increased radiative damping. With the core and nanotube size fixed, Fano resonance is insensitive to the change of the external environment, but has a good response to the nuclear material of the nanotube.

Keywords: surface plasmon polariton, Fano resonance, nanotube, finite difference time domain

PACS: 73.20.Mf, 78.67.-n, 78.68.+m

DOI: 10.7498/aps.68.20182249

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61701434), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant Nos. ZR2017MF005, ZR2018LF001), the Project of Shandong Province Higher Education Science and Technology Program, China (Grant No. J17KA087), and the Key Laboratory of Optoelectronic Information Functional Materials and Micronano Devices in Zaozhuang, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zxf4114@126.com