

# 横向激励下金属纳米棒聚合体的 Fano 共振

刘菲\*, 张楷亮

天津理工大学电气电子工程学院薄膜电子与通信器件天津市重点实验室, 天津 300384

**摘要** 设计了玻璃基底上的边对边型纳米棒聚合物周期性阵列结构, 研究其磁共振机理, 并用以实现 Fano 型共振。在横向激励下, 即外加电场垂直于纳米棒长轴时, 平面型纳米棒三聚体可实现单次 Fano 共振, 而金属-绝缘体-金属型(MIM)纳米棒聚合物可实现双 Fano 共振。采用有限元法模拟分析了聚合物阵列在可见光至近红外波段内的近场电磁分布和远场消光谱, 研究了其共振峰的特性与实现机理。分析表明, 纳米棒局域表面等离激元共振模式的近场耦合与叠加, 激发其磁表面等离激元(MSPs), 从而得到 Fano 型共振。尤其 MIM 纳米棒的引入, 为双乃至多次 Fano 共振的实现提供更多可能。所设计纳米棒聚合物阵列的 Fano 共振损耗小, 品质高, 其带宽仅为 30~50 nm, 有望应用于多波长生化传感检测、光开关等器件中。

**关键词** 光电子学; 纳米棒; 双 Fano 共振; 横向激励; 金属-绝缘体-金属

**中图分类号** O484.4

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.012501

## Fano Resonances in Metallic Nanorod Oligomer with Transverse Excitation

Liu Fei\*, Zhang Kailiang

*Tianjin Key Laboratory of Film Electronic & Communication Devices, School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

**Abstract** The periodic arrays of edge-to-edge nanorod oligomer on glass substrate are designed to investigate the magnetic resonances and to realize the Fano resonances. With the transverse excitation, that is, the polarized electric field of the incident light is perpendicular to the long axis of the nanorods, the planar symmetric nanorod trimer can obtain a single Fano resonance, while the metal-insulator-metal (MIM) nanorod oligomer can obtain double Fano resonances. The near field electromagnetic distributions and far field extinction spectra of the nanorod arrays are analyzed in visible to the near-infrared regions using finite element method. And the characteristics of its resonance peaks and its realization mechanism are studied. The analysis shows that the near field coupling and superposition of the localized surface plasmon resonance mode of nanorods excite its magnetic surface plasmons (MSPs) to obtain the Fano resonances. In particular, the introduction of MIM nanorods provides more possibilities for the realization of double or even multiple Fano resonances. The Fano resonances of designed nanorod oligomer arrays have the advantages of low resonant loss and high quality with the bandwidth of 30 to 50 nm, which can be potentially used in multi-wavelength biosensor, optical switch and other devices.

**Key words** optoelectronics; nanorod; double Fano resonances; transverse excitation; metal-insulator-metal

**OCIS codes** 250.5403; 240.6680; 260.3910

## 1 引言

金属纳米结构的局域表面等离激元共振(LSPR)效应大大促进了纳米尺度上光信号的处理

和传输方面的发展, 被广泛用于传感器、滤波器、天线、波导等各种光学器件的设计与制备<sup>[1-6]</sup>。局域表面等离激元(LSP)共振模式有明态和暗态之分, LSPR 明模具有较大偶极矩, 能被入射光场直接激

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-07-12; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 天津市教委科研计划项目(2017KJ252)

\* E-mail: feiliu@tju.edu.cn

发,从而其辐射阻尼大,共振峰谱线被展宽;LSPR暗模的偶极矩趋于零,与入射光场耦合较弱,故而无辐射损耗,其损耗主要为金属自身的吸光损耗,因而共振峰具有窄带特性。LSPs共振明模与暗模的干涉叠加,使得金属纳米结构的吸收谱、散射谱和消光谱呈现不对称线型,即Fano共振<sup>[7-8]</sup>。在金属纳米结构中,由LSPs而非入射光场激发的磁表面等离子(MSP)是较常见的一种LSPR暗模。LSPR明模与暗模之间的相消干涉决定了Fano共振线型,Fano共振谱线带宽窄且陡峭,从而很好地提高了共振品质。因此,Fano共振在传感、滤波、开关等光学器件中具有有良好的应用前景。

非对称型的金属纳米结构已被广泛研究并应用于Fano共振的实现。基于金属纳米结构的LSPR效应,2008年,张翔课题组首先提出了“墓碑”状的纳米棒聚合体的Fano共振谱线<sup>[9]</sup>。同年,莱斯大学的Nordlander课题组则实验验证了中心非对称的同心圆环/圆柱腔结构,通过圆环与圆柱的各级LSPs耦合可以实现Fano共振<sup>[10]</sup>。另外,非对称的介质环境也可实现Fano共振,比如基于玻璃基底的银纳米立方体在空气中的消光谱呈现Fano谱型,原因是玻璃基底与空气环境的不等介电常数<sup>[11]</sup>。

更进一步地,多重Fano共振可用于多波长传感及滤波,能够使得器件的应用更加灵活。在U型的两个金属开口环中嵌入纳米棒,通过开口环与纳米棒的LSPs耦合,其消光谱可呈现双Fano共振谱线,其共振峰的强度和位置取决于两个开口环与金属棒的间距<sup>[12]</sup>。金属纳米颗粒的聚合体也被引入多重Fano共振的研究中,比如金属纳米开口环七聚体理论上能够得到三次Fano共振谱线,其共振峰的位置和强度取决于开口环的个数和排列方式<sup>[13]</sup>。除此之外,金属-绝缘体-金属(MIM)型纳米柱聚合体也引起众多关注,通过同一平面内纳米柱LSPR模式的近场耦合

以及各个MIM纳米柱内两层纳米柱的反向电流振荡来实现多次Fano共振谱<sup>[14-15]</sup>。

在可见光到近红外波段,基于金属纳米结构LSPR效应的Fano共振,尤其是多重Fano共振,对不同结构的Fano共振机理、光谱特性及应用都有很大的研究空间。基于此,本文设计了玻璃基底上的边对边型纳米棒聚合体周期性阵列结构,利用不同平面内的LSPR近场模式耦合,得到双Fano共振;并且本文研究发现,与国内外已发表的研究成果不同,当激励电场垂直于纳米棒长轴时,对称型纳米棒聚合体结构也可产生Fano共振。

## 2 计算模型与方法

首先,设计了一种基于玻璃基底的平面型纳米棒三聚体周期性阵列,纳米棒三聚体作为结构单元,由三个尺寸完全相同的纳米棒边对边排列构成,其 $x$ - $y$ 平面的结构示意图如图1(a)所示。其中,三个纳米棒的长度 $l$ 均为140 nm,宽度 $w$ 均为40 nm,纳米棒在 $z$ 轴方向的厚度 $t$ 均为20 nm;相邻纳米棒的间距分别为 $g_1$ 和 $g_2$ ,且 $g_1 = g_2 = 10$  nm。纳米棒的材料为金(Au),其介电常数参考文献<sup>[16]</sup>。周期性的纳米棒三聚体放置在玻璃基底上,其周围环境为空气。玻璃基底和空气的介电常数分别设置为2.10和1.0<sup>[17]</sup>。纳米棒三聚体沿 $x$ 和 $y$ 轴的周期(中心到中心) $p_x$ 和 $p_y$ 分别为280 nm。平面光沿 $z$ 轴入射,其偏振电场 $E_y$ 垂直于纳米棒长轴。采用有限元法(FEM)对纳米棒阵列进行仿真分析。FEM作为模拟电磁场的主要数值计算方法之一,以变分法为基础,将数学物理问题进行离散化处理,最终归结为代数方程组的求解。FEM不仅计算精度高,而且能够适应各种复杂形状,因此,对于求解区域边界形状复杂的问题特别有优势。在垂直于入射光方向的入射端和出射端设置完美匹配层,在纳米

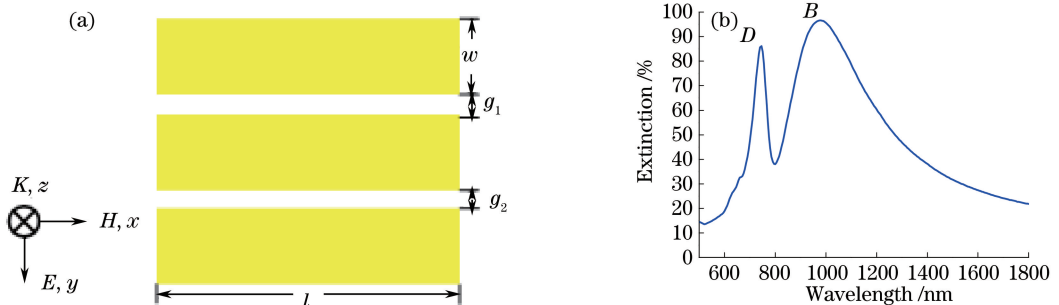


图1 (a)纳米棒三聚体 $x$ - $y$ 平面的结构示意图;(b)纳米棒三聚体阵列的消光谱

Fig. 1 (a) Sketch of the designed nanorod trimer on  $x$ - $y$  plane; (b) extinction spectrum of the nanorod trimer array

棒聚合体单元四周设置周期性边界,以模拟阵列结构。纳米棒聚合体阵列的消光谱可通过  $E = 100 - T$  计算得到,其中  $E$  表示消光率, $T$  表示透射率。

### 3 结果与讨论

平面型纳米棒三聚体周期性阵列的消光谱如图 1(b)所示。在 500~1800 nm 波长范围内呈现两个共振峰,其消光强度分别为 86%和 96%。相较于长波长处共振峰,短波长处共振峰的半峰全宽

(FWHM)仅为 50 nm,且呈现 Fano 共振谱线。对于一个纳米颗粒周期阵列,设纳米颗粒的半径为  $r$ ,若其间距(边到边) $d \geq 2r$ ,那么颗粒间的 LSPs 模式耦合程度较弱可忽略不计<sup>[18]</sup>。同样地,对于所设计的纳米棒三聚体阵列,其消光谱的共振波长也主要取决于单个纳米棒三聚体。图 2(a)~(c)分别给出了 745、800 和 1050 nm 处纳米棒三聚体中心处  $x$ - $y$  平面的电场分布,并标注了归一化的电场幅度,其中,箭头表示了其周围电场线分布情况。

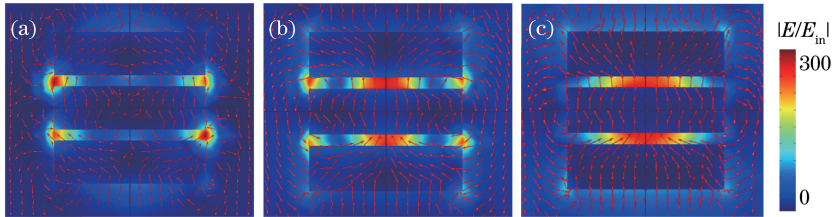


图 2 纳米棒三聚体中心处  $x$ - $y$  平面的电场分布。(a)共振峰 745 nm 处;(b)波谷 800 nm 处;(c)波长 1050 nm 处  
Fig. 2 Electric field distributions at the center of nanorod trimer in  $x$ - $y$  plane. (a) Resonance peak at 745 nm; (b) resonance dip at 800 nm; (c) wavelength at 1050 nm

入射电场偏振方向垂直于纳米棒长轴,且相邻纳米棒的间隔仅为 10 nm,因此,相邻纳米棒之间由于 LSPs 模式的强耦合而呈现高电场强度。在 745 nm 处,电场主要集中在纳米棒的尖角部位,在 800 nm 处,电场集中在尖角部和中部,在 1050 nm 处,电场则主要集中在中部。由于纳米棒对称分布,因此其电场分布也是对称的。在 745 nm 和 800 nm 处,在相邻纳米棒中电流反向,以纳米棒中部为中心呈现两个方向相反的环状电流,从而激发暗态 MSP 模式,记为  $D$  模<sup>[19]</sup>;而在 1050 nm 处三聚体中的电流同向,几乎与入射电场方向平行,即明态 LSP 模式,记为  $B$  模。需要注意的是,三聚体中纳米棒的尺寸完全相同,组装聚合方式也是对称的。因此可

以看出,对称型的纳米棒三聚体结构呈现 Fano 共振线型,本质在于 MSP 和 LSP 模式的干涉叠加,由此也可推测出,结构的非对称性不是 Fano 共振的必要条件。

更进一步地,将 MIM 型纳米棒引入图 1(a)所示的纳米棒三聚体中,在三聚体的尺寸、激励源均不变条件下,研究其多重 Fano 共振谱实现的可能性。图 3(a)为 MIM 型纳米棒聚合体结构  $y$ - $z$  平面的结构示意图。在底层三聚体的中心纳米棒之上,加入同尺寸的金纳米棒,两层纳米棒之间为厚度  $s = 10$  nm 的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )。图 3(b)为 MIM 型纳米棒聚合体阵列的消光谱。

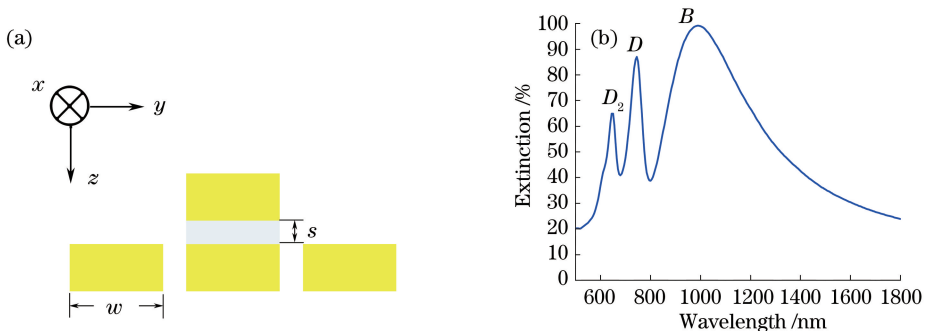


图 3 (a) MIM 型纳米棒聚合体  $y$ - $z$  平面的结构示意图;(b) MIM 型纳米棒聚合体的消光谱  
Fig. 3 (a) Sketch of the designed MIM nanorod oligomer in  $y$ - $z$  plane; (b) extinction spectrum of the MIM nanorod oligomer array

可以看出, MIM 型纳米棒聚合体的消光谱中, 长波长处两个共振峰的共振波长和消光强度与图 1(b) 中纳米棒三聚体阵列的两个共振峰基本相同, 电场分布也相同, 因此, 同样记为  $D$  模和  $B$  模。除此之外, MIM 型纳米棒聚合体在 650 nm 处也出现一个共振峰, 其带宽仅为 30 nm, 消光强度为 65%。

图 4(a) 和 (b) 分别给出了该共振峰处底层纳米棒三聚体中心和上层纳米棒中心处  $x$ - $y$  平面的电场分布, 并标注了归一化的电场幅度, 其中, 箭头表

示了其周围电场线分布情况。可以看出, 在中间 MIM 纳米棒对的 4 个尖角处, 电场强度最大, 且纳米棒内电场大致平行于入射电场方向, 但底层和上层的电场反向。这说明, 横向激励在 MIM 纳米棒对的底层和上层诱导出反向电流振荡, 从而激发磁振荡模式, 记为  $D_2$  模。另外, 利用平面内具有不等间距的纳米棒三聚体得到了双次 Fano 共振<sup>[17]</sup>, MIM 型纳米棒聚合体与之比较, 其两个 Fano 共振峰的强度更大。

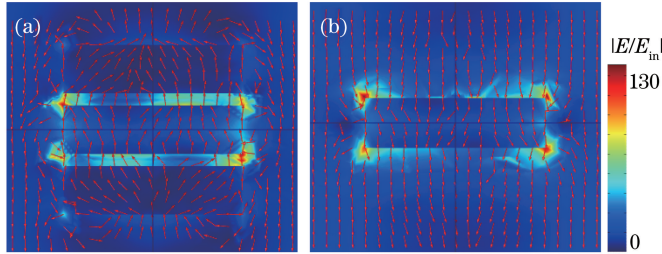


图 4 MIM 型纳米棒聚合体  $x$ - $y$  平面的电场分布。(a) 底层纳米棒三聚体中心; (b) 上层纳米棒中心

Fig. 4 Electric field distributions of the MIM nanorod oligomer in  $x$ - $y$  plane.

(a) At the center of the bottom nanorod trimer; (b) at the center of the top nanorod

此外, 本文所设计的纳米棒聚合体结构, 其 Fano 共振本质上来源于不同平面内的 LSPs 近场耦合, 因此, 金纳米棒的纵横比 (AR) 以及相邻纳米棒的间距, 均会对 Fano 共振的强度与波长产生一定的影响。图 5(a) 给出了纳米棒纵横比对 MIM 型纳米棒聚合体消光谱的影响, 其中保持纳米棒的宽度  $w = 40$  nm 不变。可以看出, 暗模  $D$  与  $D_2$  的共振波长均随着 AR

的增大而发生红移。但相比较而言, 平面型纳米棒三聚体的近场耦合所得到的磁振荡, 即  $D$  模的消光强度受共振波长的影响更显著。图 5(b) 给出了 MIM 结构介质层厚度  $s$  对 MIM 型纳米棒聚合体消光谱的影响。随着  $s$  的增大, 上下两层金纳米棒的近场耦合逐渐变弱, 因此,  $D_2$  模逐渐减小并发生蓝移, 而  $D$  模与  $B$  模几乎没有变化。

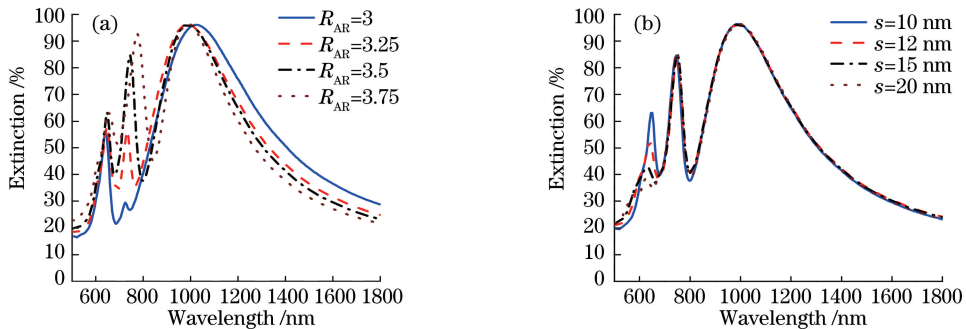


图 5 (a) 纳米棒纵横比对 MIM 型纳米棒聚合体消光谱的影响; (b) MIM 介质层厚度对 MIM 型纳米棒聚合体消光谱的影响

Fig. 5 (a) Effect of aspect ratio of nanorod on extinction spectra of the MIM nanorod oligomer array;

(b) effect of insulator layer thickness on extinction spectra of the MIM nanorod oligomer array

## 4 结 论

设计了玻璃基底上的边对边型纳米棒聚合体周期性阵列, 即平面型三聚体和 MIM 型聚合体。已有的研究工作表明, 激励电场平行于长轴, 更容易激发纳米棒的沿长轴方向的 LSP 共振模式, 且在相邻

纳米棒上产生反向电流及暗态磁振荡模式, 从而实现 Fano 共振。而本文结果表明, 在横向激励下, 即外加电场垂直于纳米棒长轴时, 纳米棒聚合体也可实现 Fano 型共振。Fano 共振来源于纳米棒 LSPR 模式的近场耦合与叠加, 尤其横向激励也可激发 MIM 纳米棒的磁振荡模式, 从而利用不同层内的磁

振荡得到双 Fano 共振。Fano 共振大大提高了 LSPs 共振品质,其带宽仅为 30~50 nm,有望应用于生物分子的多波长传感检测、光开关等。

## 参 考 文 献

- [1] Si G Y, Zhao Y H, Leong E, *et al.* Liquid-crystal-enabled active plasmonics: a review[J]. *Materials*, 2014, 7(2): 1296-1317.
- [2] Liu F, Wong M M K, Chiu S K, *et al.* Effects of nanoparticle size and cell type on high sensitivity cell detection using a localized surface plasmon resonance biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2014, 55: 141-148.
- [3] Jiang S F, Kong F M, Li K, *et al.* Study of far-field directivity of optical dipole antenna[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 045203.  
蒋双凤, 孔凡敏, 李康, 等. 光偶极天线的远场方向性研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 045203.
- [4] Haes A J, Zou S L, Schatz G C, *et al.* Nanoscale optical biosensor: short range distance dependence of the localized surface plasmon resonance of noble metal nanoparticles[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(22): 6961-6968.
- [5] Guo Q B, Liu X F, Qiu J R. 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. 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.
- [6] Liu F F, Zhang X P. Sensors based on metallic photonic structures integrated onto end facets of fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020001.  
刘飞飞, 张新平. 光纤端面集成金属光子结构传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020001.
- [7] 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.  
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.
- [8] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, *et al.* The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 707-715.
- [9] Zhang S, Genov D A, Wang Y, *et al.* Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 047401.
- [10] Hao F, 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.
- [11] 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.
- [12] Wang J Q, Fan C Z, He J N, *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.
- [13] 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.
- [14] Verre R, Yang Z J, Shegai T, *et al.* Optical magnetism and plasmonic Fano resonances in metal-insulator-metal oligomers[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1952-1958.
- [15] Yang J, Rahmani M, Teng J H, *et al.* Magnetic-electric interference in metal-dielectric-metal oligomers: generation of magneto-electric Fano resonance[J]. *Optical Materials Express*, 2012, 2(10): 1407-1415.
- [16] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370.
- [17] Liu F, Jin J. Double Fano resonances in plasmon coupling nanorods[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(5): 055004.
- [18] Romero I, Aizpurua J, Bryant G W, *et al.* Plasmons in nearly touching metallic nanoparticles: singular response in the limit of touching dimers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 9988-9999.
- [19] Chang W S, Lassiter J B, Swanglap P, *et al.* A plasmonic Fano switch[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4977-4982.