

# 基于非对称纳米颗粒阵列的垂直与平行表面晶格共振

侯浩杰<sup>1</sup>, 刘钧妍<sup>1,2</sup>, 肖博文<sup>2</sup>, 朱明琦<sup>2</sup>, 李孟春<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 在贵金属纳米颗粒阵列中所形成的表面晶格共振能够有效抑制体系辐射损耗、提高共振品质因子、增大局域场强,已被广泛用于设计高性能微纳光子器件。实现垂直与平行表面晶格共振的同时激发对阵列结构光学响应的调制及应用具有重要意义。本文设计了由 L-形纳米天线构成的阵列结构,计算了成键模式和反成键模式与瑞利异常耦合的光学响应,获得了在消光谱上能够同时形成上述两种表面晶格共振的结论。结果表明,其成键与反成键局域共振模式都可以实现与瑞利异常的耦合,从而激发垂直与平行表面晶格共振。这些特性使得这种非对称纳米颗粒阵列在微纳光子器件的设计方面具有重要的应用价值。

**关键词** 光电子学; 表面等离子体光子学; 表面等离激元共振; 时域有限差分法; 表面晶格共振; 非对称纳米颗粒  
**中图分类号** O539      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP56.152501

## Formation of Orthogonal and Parallel Surface-Lattice Resonances with Asymmetric Nanoparticle Array

Hou Haojie<sup>1</sup>, Liu Junyan<sup>1,2</sup>, Xiao Bowen<sup>2</sup>, Zhu Mingqi<sup>2</sup>, Li Mengchun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of the Ministry of Education, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Surface-lattice resonances generated by using noble-metallic nanoparticle arrays can effectively suppress radiation loss, thereby improving the resonance quality factor and increasing localized field intensity. Surface-lattice resonances have been widely used for designing high-performance micro-nano photonic devices. Realizing the simultaneous excitation of orthogonal and parallel surface-lattice resonances is crucial for manipulating the collective responses of nanoparticle arrays, which is also useful for practical applications. Herein, we design an array structure composed of L-shaped nanoantennas. Furthermore, we investigate the optical response caused by the coupling between the Rayleigh anomaly and bonding/antibonding modes. We find that the two kinds of surface-lattice resonances can be excited simultaneously in extinction spectra. Calculation results reveal that the bonding/antibonding modes can be used to couple with Rayleigh anomaly, thereby leading to the formation of orthogonal and parallel surface-lattice resonances. These properties make asymmetric nanoparticle arrays become promising platforms for designing micro-nano photonic devices.

**Key words** optoelectronics; surface plasma photonics; surface plasmon resonance; finite-difference time-domain method; surface lattice resonance; asymmetric nanoparticles

**OCIS codes** 250.5403; 240.6380; 350.4238

## 1 引言

贵金属纳米结构的局域表面等离激元共振

(LSPRs)能够将入射场能量很好地局限在纳米结构表面,形成较大的局域场增强<sup>[1]</sup>,提高了纳米尺度上光与物质的相互作用,同时对外界环境的变化非常

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-03-07

基金项目: 山西省国际合作基金(17101952)

\* E-mail: limmc163@163.com

敏感<sup>[2]</sup>。这些特性引起了人们对 LSPRs 研究的极大关注。贵金属纳米结构已被用来设计高灵敏度生化传感器<sup>[3-4]</sup>、纳米光源<sup>[5]</sup>、光开关<sup>[6-7]</sup>等微纳光子器件。由于 LSPRs 具有较大的辐射损耗,会造成共振品质因子的降低,弱化局域场增强,进而影响基于贵金属纳米结构的微纳光子器件的性能,故如何抑制 LSPRs 的辐射损耗是表面等离激元光子学中的一重要研究内容。一方面,通过对贵金属纳米结构的设计形成表面等离激元 Fano 共振<sup>[8-10]</sup>,能够激发起弱辐射暗态,从而抑制体系辐射损耗,但单个纳米结构的共振品质因子很难超过 20。另一方面,对于贵金属纳米颗粒阵列结构,当纳米颗粒的 LSPRs 与阵列的瑞利异常形成耦合时,能够产生表面晶格共振(SLRs)<sup>[11-13]</sup>,入射场能量可以更好地局限在阵列结构中,从而有效抑制体系辐射损耗,其共振品质因子可以达到几百,局域场强也能得到进一步的提高<sup>[14-16]</sup>。这些特性使得 SLRs 在表面等离激元激光、增强非线性效应<sup>[17]</sup>、传感<sup>[18-19]</sup>等方面获得了广泛的应用。

一般而言,在外界光场的激励下,贵金属纳米颗粒在 LSPRs 处将形成与入射场偏振方向相同的偶极矩,其散射场垂直于入射场偏振,产生的 SLRs 通常仅取决于垂直于入射场偏振方向上的周期<sup>[20-21]</sup>,改变平行于入射场偏振方向的周期不会对光学响应造成很大的影响。这种情况下,所形成的 SLRs 被称为垂直表面晶格共振<sup>[22-25]</sup>。反之,当阵列结构中形成的 SLRs 仅取决于平行于入射场偏振方向上的周期时,能够激发起平行表面晶格共振<sup>[26-27]</sup>。平行 SLRs 目前只在纳米棒阵列、较大纳米颗粒阵列等<sup>[28]</sup>结构中观察到,其物理机制仍然有待进一步研究。设计贵金属纳米颗粒阵列结构以实现垂直与平行表面晶格共振的同时激发,将对 SLRs 的调控及应用具有非常重要的意义。

本文采用了非对称纳米颗粒阵列来同时激发垂直与平行表面晶格共振。相比于对称的纳米颗粒,非对称纳米结构在 LSPRs 处不仅可以形成平行于入射场偏振方向的偶极矩,同时由于电荷转移效应,还可以产生垂直于入射场偏振方向的偶极矩<sup>[29]</sup>。这一特性使得 LSPRs 与两个正交方向上瑞利异常发生耦合成为可能,进而同时激发垂直与平行 SLRs。本文计算了 L-形纳米天线阵列的光学响应。结果表明,成键与反成键 LSPRs 都可以同时激发垂直与平行 SLRs;通过改变阵列周

期,还可以有效调整其光学响应。这些特性使得非对称纳米颗粒阵列在微纳光子器件的设计方面具有重要的应用价值。

## 2 计算方法

采用时域有限差分法(FDTD)对所设计的 L-形金纳米棒以及纳米棒阵列结构进行计算,从而获得该结构的近场和远场光学响应。单个 L-形纳米棒和纳米棒阵列采用的光源分别为全场散射光源和平面光源,光传播方向均沿  $z$  轴,偏振方向沿  $x$  轴,纳米棒阵列在  $x$  和  $y$  方向上均使用了周期性边界条件。对于实际制备的样品,纳米颗粒需要放置于基底之上,这会影响体系的光学响应。大量研究表明,为了更好地激发表面晶格共振,需要满足折射率匹配条件,即纳米颗粒所处环境的介质折射率与基底折射率基本一致,否则将弱化局域共振与瑞利异常的耦合,不能激发表面晶格共振<sup>[12]</sup>。故本文假设周围环境折射率均为 1.33,从而可更好地讨论其他结构参数对表面晶格共振的影响。金的介电常数取自文献<sup>[30]</sup>。网格精度为  $3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ ,近场分布截取自 L-形金纳米棒的中截面。

## 3 分析与讨论

### 3.1 单个 L-形金纳米棒光学特性

在研究纳米棒阵列结构之前,首先计算单个 L-形纳米棒的光学响应。图 1(a)为 L-形纳米棒的结构示意图。由图 1(b)可知,L-形纳米棒散射光谱中产生了两个共振峰,分别位于 815 nm 和 1357 nm 处。根据等离激元杂化理论可知,L-形纳米棒的光学响应是由两个臂之间的等离激元杂化形成的,两个共振分别对应反成键和成键偶极子模式。图 1(c)~(d)所示的两个共振峰位处的近场增强特性验证了这一结果。图 1(e)~(g)分别为不同纳米棒长度、宽度和厚度对应的散射谱。从图中可以看出,随着纳米棒长度的增加、宽度和厚度的减小,两个共振产生红移。文献<sup>[17]</sup>中的结果表明,只有当局域共振处于瑞利异常短波波段时,两者才能产生较好的耦合从而形成表面晶格共振;当局域共振与瑞利异常之间的能量间隔逐渐加大时,所产生的表面晶格共振品质因子更高。基于这一结果,设定纳米棒结构参数分别为长度  $L_1 = L_2 = 170 \text{ nm}$ ,宽度  $W = 40 \text{ nm}$ ,厚度  $H = 60 \text{ nm}$ ,改变阵列周期,以更好地产生表面晶格共振。

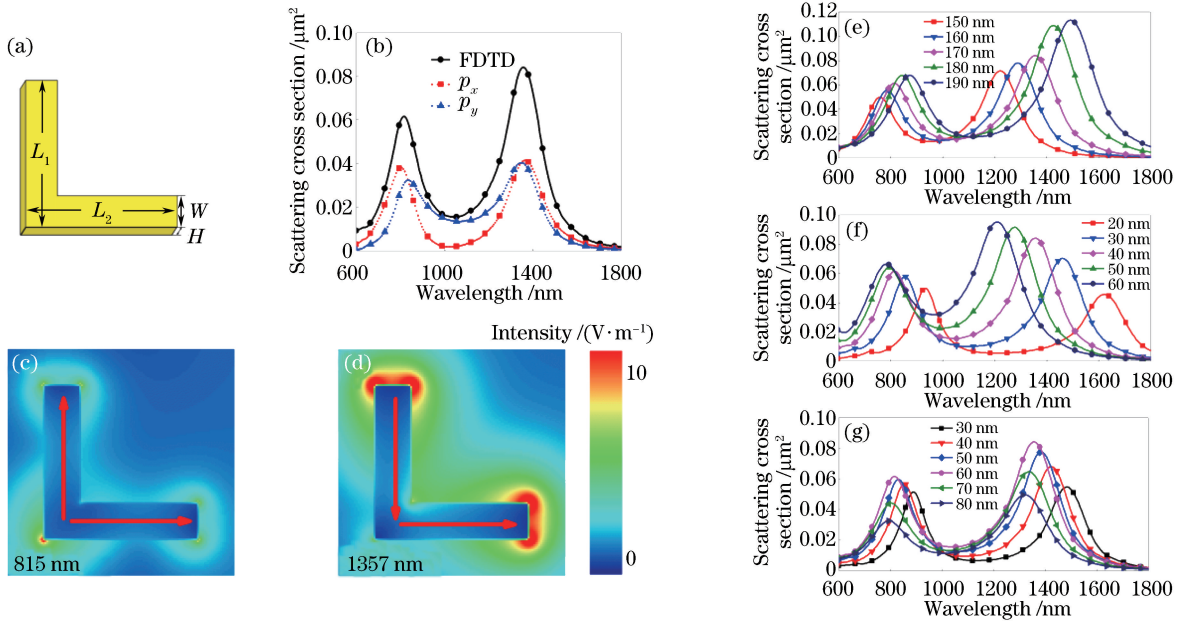


图 1 单个 L-形金纳米棒的光学响应。(a) L-形金纳米棒结构示意图；(b) 纳米棒散射谱(实线)以及  $x$  和  $y$  方向电偶极散射的贡献(虚线)；(c) 反成键及(d) 成键局域共振模式近场分布特性；(e) 散射光谱随纳米棒长度变化的关系；(f) 散射光谱随纳米棒宽度变化的关系；(g) 散射光谱随纳米棒厚度变化的关系

Fig. 1 Optical responses of single L-shaped gold nanorod. (a) Schematic of L-shaped gold nanorod; (b) scattering spectrum of nanorod (solid line) and contribution of electric dipole scattering in  $x$  and  $y$  directions (dashed line); near-field distribution characteristics of (c) anti-bonding and (d) bonding localized surface plasmon resonances; (e) variation in scattering spectrum with length of nanorod; (f) variation in scattering spectrum with width of nanorod; (g) variation in scattering spectrum with thickness of nanorod

此外,两个共振峰处的近场分布反映了另外一个非常重要的光学特性,即在外界光场的激励下,上述反成键和成键共振模式不仅具有沿着入射场偏振方向上的等效电偶极( $x$  轴),同时由于电荷转移效应,这两个共振还具有垂直于入射场偏振方向上的等效电偶极( $y$  轴)。图 1(b)中虚线  $p_x$  和  $p_y$  给出了利用近场分布计算得到的两个方向上电偶极对整体散射谱的贡献,该结果再次表明,上述共振同时具有较强的、相互正交的电偶极的贡献。

对于结构对称的贵金属纳米颗粒,在外界光场激发下一般只能形成与入射场偏振方向相同的电偶极矩,从而使其散射场垂直于入射场偏振。故在对称纳米颗粒构成的阵列结构中,局域等离激元共振与瑞利异常形成耦合能够产生表面晶格共振,但其共振仅受垂直于入射场偏振方向上周期的调制,平行于入射场偏振方向上的周期对表面晶格共振的影响很小,一般被称为垂直表面晶格共振。然而,对于上述讨论的 L-形纳米棒,其散射场可以同时垂直和平行于入射场偏振方向,故在这种由非对称纳米颗粒构成的阵列结构中,两种局域共振模式与瑞利异常耦合,不仅可以形成垂直表面晶格共振,还有望形

成平行表面晶格共振,这些光学响应可以利用两个方向上的周期实现调制。

### 3.2 成键局域等离激元共振与多重表面晶格共振

为了验证上述推测,计算了由 L-形金纳米棒构成阵列结构的光学响应。图 2(a)为具有不同周期阵列结构的消光谱,图中的纳米棒结构参数与图 1 保持一致。当两个方向上阵列周期均为 1120 nm 时,消光谱在约 1515 nm 处出现了一个尖锐的共振峰,表明系统激发了表面晶格共振。对于对称纳米颗粒构成的阵列结构,改变平行于入射场偏振方向上的周期对表面晶格共振的影响很小。然而,对这种由 L-形金纳米棒构成的阵列,保持  $y$  方向阵列周期不变,当  $x$  方向上周期增大到 1150 nm 时,在 1499 nm 和 1542 nm 出现了明显的两个尖锐的共振峰,即原来的单一的表面晶格共振产生了劈裂,其光学响应受到两个方向上周期的调制。除此之外,在图 2(a)中 1060 nm 附近也观察到明显的共振,这是由  $(\pm 1, \pm 1)$  阶瑞利异常造成。

为了更清晰地展现这种阵列结构的光学响应,进一步固定  $y$  方向周期为 1120 nm 不变, $x$  方向周期以 2 nm 的间隔从 1080 nm 变化到 1160 nm,并



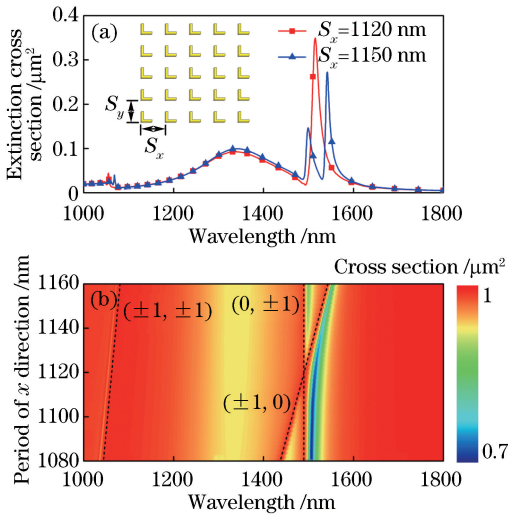


图2 L-形纳米颗粒阵列的光学响应。(a)垂直入射情况下,当 $x$ 方向周期为1120 nm和1150 nm时L-形纳米颗粒阵列的消光谱,其中 $y$ 方向周期固定为1120 nm(插图:L-形金纳米颗粒阵列结构示意图);(b)阵列透射谱随 $x$ 方向周期变化关系

Fig. 2 Optical responses of L-shaped nanoparticle array. (a) Extinction spectrum of L-shaped nanoparticle array under normal incidence when periods in  $x$  direction are 1120 nm and 1150 nm and period in  $y$  direction is fixed at 1120 nm (inset represents diagram of L-shaped nanoparticle array); (b) transmission spectrum of L-shaped nanoparticle array versus period in  $x$  direction

做出了透射谱随 $x$ 方向周期变化图,如图2(b)所示。从图中可以更加直观地看出,局域等离子共振与阵列瑞利异常的耦合特性。在1350 nm附近出现的具有很宽展的共振对应于纳米棒的成键共振模式,共振峰位不随周期的变化而变化。在长波段出现了尖锐的共振峰,这是由成键共振模式与阵列瑞利异常耦合形成的表面晶格共振。阵列结构中瑞利异常波长<sup>[17]</sup>满足

$$k_{\text{out}}^2 = k_{\text{in}}^2 \sin^2 \theta_{\text{in}} + m_1^2 (2\pi/S_x)^2 + m_2^2 (2\pi/S_y)^2 + 2k_{\text{in}} \sin \theta_{\text{in}} m_1 (2\pi/S_x), \quad (1)$$

式中: $k_{\text{in}}$ 和 $k_{\text{out}}$ 表示入射和散射波数; $m_1$ 、 $m_2$ 表示衍射阶数; $\theta_{\text{in}}$ 为入射光与垂直方向的角度; $S_x$ 和 $S_y$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向的周期。图2(b)中虚线表示两个周期方向上瑞利异常波长随周期的变化,垂直于偏振方向上的 $(0, \pm 1)$ 阶瑞利异常波长不变,平行于偏振方向上的 $(\pm 1, 0)$ 阶瑞利异常随对应周期的增大逐渐红移。当两个方向上阵列周期相等时,只能激发单一的表面晶格共振;一旦两者长度不同,上述表面晶格共振即会劈裂为两个表面晶格共振。

为了进一步明确产生上述表面晶格共振的原因以及出现劈裂的内在机制,计算了图2(a)中三个相应共振峰位处近场分布特性,如图3所示。图3(a)~(c)分别对应波长为1515, 1498, 1542 nm的电场增强以及在 $x$ 分量( $E_x$ )和 $y$ 分量( $E_y$ )的场强分布情况。从三个不同共振位置处的电场分布图可以看出,L-形纳米棒的共振最大强度位于纳米棒末端,与成键局域等离子共振一致,表明这些表面晶格共振是由成键局域等离子共振与瑞利异常耦合形成。

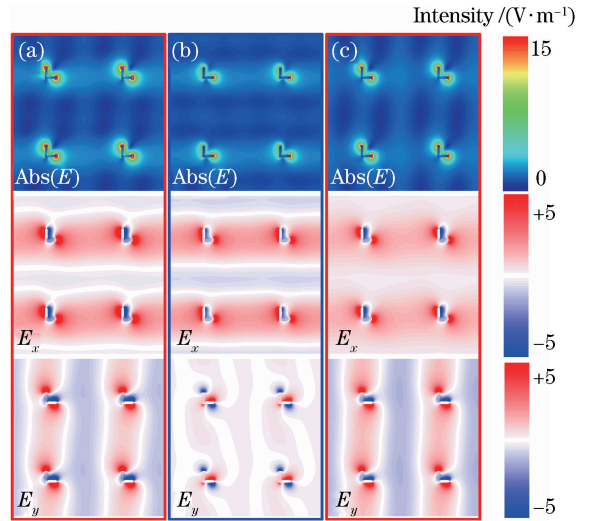


图3 不同波长处的电场强度分布(上)以及在 $x$ 方向(中)和 $y$ 方向(下)电场分量分布情况。(a)波长为1515 nm;(b)波长为1498 nm;(c)波长为1542 nm  
Fig. 3 Electric field intensity distributions (upper) and field component distributions in  $x$  (middle) and  $y$  (lower) directions at different wavelengths. (a) Wavelength of 1515 nm; (b) wavelength of 1498 nm; (c) wavelength of 1542 nm

如图3(a)所示,当阵列两个方向上的周期相同时, $(0, \pm 1)$ 和 $(\pm 1, 0)$ 阶瑞利异常波长相同,故只能形成单一的表面晶格共振。此时尽管入射场偏振沿 $x$ 方向,但由于L-形纳米棒能够同时产生两个正交方向上的等效偶极矩,故成键局域共振模式与上述瑞利异常都可形成耦合,从而近场分布在两个方向上产生了明显的表面波。当 $x$ 方向上阵列周期增大到1150 nm时,如图3(b)和图3(c)所示, $(0, \pm 1)$ 和 $(\pm 1, 0)$ 阶瑞利异常波长不同,它们与成键局域共振模式的耦合分别产生了两个新的表面晶格共振,近场分布也表明其形成的表面波主要分别沿 $y$ 方向和 $x$ 方向传播,表明其可以归属为对应的垂直和平行表面晶格共振。

### 3.3 反成键局域等离激元共振与多重表面晶格共振

接下来研究 L-形纳米棒反成键局域等离激元共振在阵列中的耦合情况。图 4(a) 为不同周期阵列的消光谱。当  $x$  和  $y$  方向周期均为 690 nm 时, 光谱在 934 nm 处出现了尖锐的共振峰, 表明激发了表面晶格共振。保持  $y$  方向周期不变,  $x$  方向周期为 670 nm 时, 原来单一的表面晶格共振峰发生了劈裂, 在 894 nm 和 927 nm 出现了两个明显的尖峰, 表明阵列中反成键局域等离激元共振耦合也会受到两个方向周期的调制。和图 2(a) 类似, 在图 4(a) 中 640 nm 附近也出现了明显的共振, 同样是由  $(\pm 1, \pm 1)$  阶瑞利异常造成。

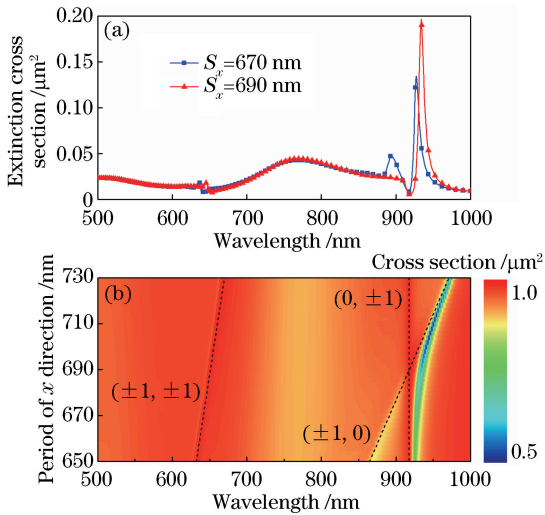


图 4 L-形纳米颗粒阵列的光学响应。(a) 垂直入射情况下,  $x$  方向周期为 670 nm 和 690 nm 时 L-形纳米颗粒阵列的消光谱,  $y$  方向周期固定为 690 nm; (b) 阵列透射谱随  $x$  方向周期变化关系

Fig. 4 Optical responses of L-shaped nanoparticle array. (a) Extinction spectrum of L-shaped nanoparticle array under normal incidence when periods in  $x$  direction are 670 nm and 690 nm and period in  $y$  direction is fixed at 690 nm; (b) transmission spectrum of L-shaped nanoparticle array versus period in  $x$  direction

为了更好地展现光学响应随周期的变化关系, 固定  $y$  方向周期为 690 nm,  $x$  方向周期以 2 nm 的间隔从 650 nm 变化到 730 nm, 透射谱如图 4(b) 所示。可以看出, 垂直于偏振方向上的  $(0, \pm 1)$  阶瑞利异常波长不变, 平行于偏振方向上的  $(\pm 1, 0)$  阶瑞利异常随对应的  $x$  方向周期的增大逐渐红移, 这与成键共振耦合的情况相同。

进一步计算了图 4(a) 中三个共振峰处的近场

分布, 如图 5 所示。其中图 5(a)~(c) 分别对应波长为 934, 894, 927 nm 的电场强度图, 以及分别在  $x$  和  $y$  方向分量的场强分布。由图 5(a) 可知, 当阵列两个方向上的周期相同时,  $(0, \pm 1)$  和  $(\pm 1, 0)$  阶瑞利异常波长相同, 只能形成单个表面晶格共振。从近场分布也可以看到, 在两个方向上产生了明显的表面波。当  $x$  方向上阵列周期变化到 670 nm 时, 如图 5(b) 和图 5(c) 所示,  $(\pm 1, 0)$  和  $(0, \pm 1)$  阶瑞利异常与反成键局域共振模式的耦合分别产生了两个新的表面晶格共振。近场分布也表明, 形成的表面波主要沿着  $x$  方向和  $y$  方向传播, 可以归属为对应的平行和垂直表面晶格共振。这些结果表明, 在 L-形纳米棒构成阵列中, 成键和反成键局域表面等离激元共振模式与瑞利异常都可形成耦合, 从而产生表面晶格共振。此外, 由于结构的非对称性, 在平行和垂直于入射场偏振方向上可同时形成等效偶极矩, 故在阵列中可与两个正交方向上的瑞利异常产生耦合, 进而激发平行与垂直表面晶格共振, 这些特性对多重表面晶格共振的产生和调制具有重要意义。

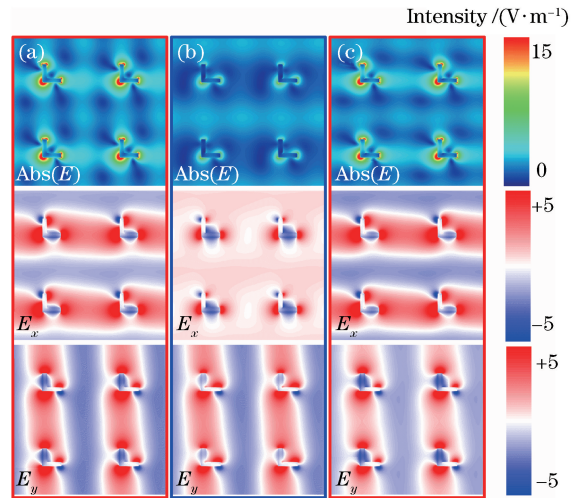


图 5 不同波长处的电场强度分布(上)以及在  $x$  方向(中)和  $y$  方向(下)电场分量分布情况。(a) 波长为 934 nm; (b) 波长为 894 nm; (c) 波长为 927 nm

Fig. 5 Electric field intensity distributions (upper) and field component distributions in  $x$  (middle) and  $y$  (lower) directions at different wavelengths. (a) Wavelength of 934 nm; (b) wavelength of 894 nm; (c) wavelength of 927 nm

在实际应用中, 本文所设计样品可以采用电子束曝光或离子束刻蚀的方法制备。大量文献研究结果表明, FDTD 计算结果与实验符合很好<sup>[11-13]</sup>。本文计算结果对实际应用具有重要的参考意义。

## 4 结 论

综上所述,提出了一种采用非对称纳米颗粒阵列同时激发垂直与平行 SLRs 的方法。由于结构的非对称性,L-形贵金属纳米天线的局域共振模式同时具有垂直和平行于入射场偏振方向上的等效偶极矩分量,从而使其 LSPRs 与两个正交方向上的瑞利异常产生耦合成为可能。计算结果表明,L-形贵金属纳米天线的成键与反成键 LSPRs 能够同时实现与两个周期方向上瑞利异常的耦合,从而同时激发起垂直与平行 SLRs。此外,所形成的垂直与平行 SLRs 的共振峰位、品质因子等可以通过调整阵列周期得到有效控制。这些特性使得非对称纳米颗粒阵列在高灵敏度生化传感、纳米激光器等方面具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Kelly K L, Coronado E, Zhao L L, *et al.* The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(3): 668-677.
- [2] Atwater H A, Polman A. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 205-213.
- [3] Fu Y H, Zhang J B, Yu Y F, *et al.* Generating and manipulating higher order Fano resonances in dual-disk ring plasmonic nanostructures [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(6): 5130-5137.
- [4] Guo T. Review on plasmonic optical fiber grating biosensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328006.  
郭团. 等离子体共振光纤光栅生物传感器综述 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328006.
- [5] Kessentini S, Barchiesi D, D'Andrea C, *et al.* Gold dimer nanoantenna with slanted gap for tunable LSPR and improved SERS [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(6): 3209-3219.
- [6] Shi Z D, Zhao H F, Liu J L, *et al.* Design of a metallic waveguide all-optical switch based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0213001.  
石振东, 赵海发, 刘建龙, 等. 基于表面等离子激元的金属波导全光开关设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0213001.
- [7] Lin R, Qian W C, Shang Y P, *et al.* Dual-channel all-optical switch based on plasmonic demultiplexer structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 022401.  
林蓉, 钱文超, 商云鹏, 等. 基于表面等离子激元解复用器结构的双通道全光开关 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 022401.
- [8] Liu F, Zhang K L. Fano resonances in metallic nanorod oligomer with transverse excitation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(1): 012501.  
刘菲, 张楷亮. 横向激励下金属纳米棒聚合体的 Fano 共振 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(1): 012501.
- [9] 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.
- [10] Liu R, Shi J H, Plum E, *et al.* Tuning Fano resonances in a planar metamaterial [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 154101.  
刘冉, 史金辉, Plum E, 等. 基于平面超材料的 Fano 谐振可调谐研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(15): 154101.
- [11] Guo R, Hakala T K, Törmä P. Geometry dependence of surface lattice resonances in plasmonic nanoparticle arrays [J]. *Physical Review B*, 2017, 95(15): 155423.
- [12] Auguie B, Barnes W L. Collective resonances in gold nanoparticle arrays [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(14): 143902.
- [13] Gao H, McMahon J M, Lee M H, *et al.* Rayleigh anomaly-surface plasmon polariton resonances in palladium and gold subwavelength hole arrays [J]. *Optics Express*, 2009, 17(4): 2334-2340.
- [14] Zou S L, Janel N, Schatz G C. Silver nanoparticle array structures that produce remarkably narrow plasmon lineshapes [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 120(23): 10871-10875.
- [15] Zou S L, Schatz G C. Narrow plasmonic/photonic extinction and scattering line shapes for one and two dimensional silver nanoparticle arrays [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 121(24): 12606-12612.
- [16] Chu Y Z, Schonbrun E, Yang T, *et al.* Experimental observation of narrow surface plasmon resonances in gold nanoparticle arrays [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(18): 181108.

- [17] Vecchi G, Giannini V, Gómez Rivas J. Shaping the fluorescent emission by lattice resonances in plasmonic crystals of nanoantennas [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(14): 146807.
- [18] Kravets V G, Schedin F, Kabashin A V, *et al.* Sensitivity of collective plasmon modes of gold nanoresonators to local environment [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(7): 956-958.
- [19] Kravets V G, Schedin F, Grigorenko A N. Extremely narrow plasmon resonances based on diffraction coupling of localized plasmons in arrays of metallic nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(8): 087403.
- [20] Baur S, Sanders S, Manjavacas A. Hybridization of lattice resonances [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 1618-1629.
- [21] Wang D Q, Yang A K, Hryn A J, *et al.* Superlattice plasmons in hierarchical Au nanoparticle arrays [J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(12): 1789-1794.
- [22] Humphrey A D, Meinzer N, Starkey T A, *et al.* Surface lattice resonances in plasmonic arrays of asymmetric disc dimers [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 634-639.
- [23] Lee S C, Brueck S R J. Plasmonic interference in superstructured metal photonic crystals [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(10): 2396-2401.
- [24] Wang D Q, Yang A K, Wang W J, *et al.* Band-edge engineering for controlled multi-modal nanolasing in plasmonic superlattices [J]. *Nature Nanotechnology*, 2017, 12(9): 889-894.
- [25] Vecchi G, Giannini V, Gómez Rivas J. Surface modes in plasmonic crystals induced by diffractive coupling of nanoantennas [J]. *Physical Review B*, 2009, 80(20): 201401(R).
- [26] Lin L H, Zheng Y B. Multiple plasmonic-photonic couplings in the Au nanobeaker arrays: enhanced robustness and wavelength tunability [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2060-2063.
- [27] Lin L H, Zheng Y B. Engineering of parallel plasmonic-photonic interactions for on-chip refractive index sensors [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(28): 12205-12214.
- [28] Vitrey A, Aigouy L, Prieto P, *et al.* Parallel collective resonances in arrays of gold nanorods [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 2079-2085.
- [29] Liu S D, Qi X, Zhai W C, *et al.* Polarization state-based refractive index sensing with plasmonic nanostructures [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(47): 20171-20179.
- [30] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals [J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.