

# 基于贵金属劈裂纳米环阵列的多重表面晶格共振

张春琳<sup>1</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 侯浩杰<sup>2</sup>, 李孟春<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>山西省高速公路信息监控中心, 山西 太原 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024;

<sup>3</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 基于贵金属纳米颗粒阵列的多重表面晶格共振能够在多个波段同时抑制体系的辐射损耗, 提高共振品质因子, 增大局域场强。提出一种采用贵金属劈裂纳米环阵列产生多重表面晶格共振的方法。由于劈裂纳米环磁偶极共振的等效偶极矩垂直于纸面, 能够同时向平面的  $x$  和  $y$  方向散射电磁波, 这使得磁偶极共振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, 在劈裂纳米环构成的阵列结构中, 磁偶极共振能够与两个周期方向上瑞利异常形成耦合, 从而产生表面晶格共振。当阵列周期不同时, 能够同时激起两个表面晶格共振; 利用劈裂纳米环的电四极共振也可得到类似的光学响应。这些特性使得贵金属劈裂纳米环阵列在微纳光子器件的设计方面将具有重要的应用价值。

**关键词** 表面光学; 表面等离子激元共振; 时域有限差分(FDTD)法; 表面晶格共振; 劈裂纳米环

中图分类号 O539

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.202420

## Multiple Surface Lattice Resonances Generated with Noble Metallic Split-Ring Resonator Arrays

Zhang Chunlin<sup>1</sup>, Liu Jie<sup>2</sup>, Hou Haojie<sup>2</sup>, Li Mengchun<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Shanxi Expressway Information Monitoring Center, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>3</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Multiple surface lattice resonances generated with noble metallic nanoparticle array can be used to suppress radiative losses around several spectral positions, enlarge the resonance quality factor, and enhance the localized near-field intensity. This study proposed a method to generate multiple surface lattice resonances with noble metallic split-ring resonator arrays. It shows that for the magnetic dipole resonance, the generated equivalent magnetic dipole is oriented perpendicular to the paper plane, and the scattering fields are propagating along  $x$  and  $y$  directions, which makes it possible to realize the coupling between the magnetic dipole mode and the Rayleigh anomaly along both directions. The calculation results indeed reveal that the coupling between the magnetic dipole mode and the Rayleigh anomaly leads to the formation of a sharp surface lattice resonance, and double surface lattice resonances are generated when the lattice spacing are different with each other. Furthermore, the similar optical response can be obtained with electric quadrupole resonance of the split-ring resonator. These properties make split-ring resonator arrays promise for the design of micro/nano photonic devices.

**Key words** optics at surface; localized surface plasmon resonances; finite-difference time-domain (FDTD) method; surface lattice resonance; split-ring resonators

**OCIS codes** 350.3950; 240.6380; 250.5403

收稿日期: 2019-04-18; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-07-02

基金项目: 山西省重点研发计划(国际合作)项目(2015081025)

\* E-mail: limmc163@163.com

# 1 引言

纳米技术在提高光器件性能方面具有重要作用<sup>[1]</sup>,由贵金属纳米颗粒产生的局域表面等离子共振在新型微纳光子器件的设计方面具有广泛应用,但其辐射损耗制约了器件的性能<sup>[2]</sup>。为解决上述问题,将贵金属纳米颗粒构成阵列结构,其中纳米颗粒的局域表面等离子共振与阵列的瑞利异常形成耦合,从而产生表面晶格共振<sup>[3-4]</sup>。作为一种表面波模式,表面晶格共振可将入射光场能量更好地局限在阵列结构中,从而有效抑制体系辐射损耗,其共振品质因子可达几百<sup>[5]</sup>,相对于局域共振,其局域场强显著提高。上述特性使表面晶格共振在非线性光学效应<sup>[6]</sup>、表面等离子激元激光<sup>[7-8]</sup>、信息存储<sup>[9]</sup>、表面增强荧光效应<sup>[10-12]</sup>等方面得到广泛应用。

与单一的表面晶格共振相比,多重表面晶格共振能够在多个波段同时抑制体系辐射损耗,对多波长相关微纳光子器件的设计具有重要意义。例如, Odom 教授课题组利用多重表面晶格共振实现多模表面等离子激元激光<sup>[13]</sup>。除此之外,多重表面晶格共振在多个波段能够同时增大局域场强,对表面增强拉曼(SERS)散射具有重要意义<sup>[14-15]</sup>。目前科研人员已设计出非对称纳米颗粒二聚体阵列<sup>[16]</sup>、重叠阵列之间的杂化耦合<sup>[17]</sup>、纳米颗粒超晶格<sup>[18]</sup>等体系,以产生多重表面晶格共振。但上述体系的光学响应仅依赖于单个周期结构中纳米颗粒之间的耦合,这对样品的制备和器件的集成提出更高的要求。因此研究用单个纳米颗粒阵列结构<sup>[19]</sup>形成的多重表面晶格共振对实际应用具有重要价值。

本文提出一种采用贵金属劈裂纳米环阵列产生多重表面晶格共振的方法。在外界光场的激发下,劈裂环谐振器中能够形成环形的传导电流,从而产生磁共振模式<sup>[20]</sup>。这一独特的性质使其在片上集成太赫兹波器件<sup>[21]</sup>、平面超构透镜<sup>[22]</sup>、新型波导器件<sup>[23]</sup>、高灵敏度传感器<sup>[24]</sup>、滤波器<sup>[25]</sup>等方面得到应用。但上述研究只关注单个劈裂环谐振器的响应,未涉及劈裂环局域共振模式与阵列的瑞利异常耦合效应。由于劈裂纳米环磁偶极共振的等效偶极矩垂直于纸面,能够同时向平面的两个方向( $x$ 、 $y$  方向)散射电磁波<sup>[20]</sup>,而磁偶极共振能够与两个周期方向上的瑞利异常形成耦合,从而产生表面晶格共振。若阵列周期不同,磁偶极共振能够同时激发起两个表面晶格共振。此外,利用劈裂纳米环的电四极共振模式之间的耦合也

可得到类似的光学响应。上述结果表明贵金属劈裂纳米环阵列产生的多重表面晶格共振,可用于高灵敏度生化传感、纳米激光器等新型光子器件的设计。

## 2 计算方法

采用时域有限差分(FDTD)法计算单个贵金属劈裂纳米环的局域表面等离子共振、阵列结构的表面晶格共振特性。其中单个纳米颗粒和阵列结构采用的光源分别为全场散射场和平面波光源,计算中保持入射场偏振方向沿  $x$  轴,光传播方向沿  $z$  轴,网格精度设置为  $3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm} \times 3 \text{ nm}$ 。对单个贵金属劈裂纳米环,各个方向上皆采用完美匹配层(PML)边界条件来模拟开放边界;对阵列结构,在  $x$ 、 $y$  方向上采用周期性边界条件以实现纳米颗粒之间的耦合。计算中设周围环境折射率为 1.50,纳米环材料为金,其介电常数取自文献<sup>[20]</sup>的实验测量结果。

## 3 结果与讨论

### 3.1 单个金劈裂纳米环光学特性

图 1(a)给出  $x$  偏振情况下单个金纳米环的散射光谱,其中纳米环边长  $L = 180 \text{ nm}$ ,宽度  $W = 70 \text{ nm}$ ,厚度  $H = 60 \text{ nm}$ 。在散射光谱中能够观察到两个明显的共振峰,分别位于  $849 \text{ nm}$  和  $1780 \text{ nm}$ 。图 1(b)、(c)给出这两个共振模式处的近场分布情况,分别对应劈裂纳米环的电四极和磁偶极共振模式。

对于一些结构简单并具有高度对称性的纳米颗粒(例如纳米球、纳米盘),在外界光场的作用下只能激发起电偶极共振,其电偶极矩与入射场偏振方向平行,故其散射场与入射场偏振方向垂直。然而图 1 所示的劈裂纳米环共振模式近场散射特性与电偶极共振具有很大的不同,例如在磁偶极共振处可形成一个等效垂直于纸面的磁偶极子(图 1(c)),其散射场能够同时垂直和平行于入射场偏振方向<sup>[26]</sup>,电四极共振也具有类似的特性(图 1(b))。

当上述纳米颗粒构成阵列结构,单个纳米颗粒不同的近场散射特性会引起不同的阵列结构光学响应。已有大量研究结果表明在对称纳米颗粒构成的阵列结构中,其电偶极共振与瑞利异常形成耦合能够产生垂直于表面晶格的共振<sup>[27]</sup>。电偶极共振的散射场与入射场偏振垂直形成表面晶格共振,其仅

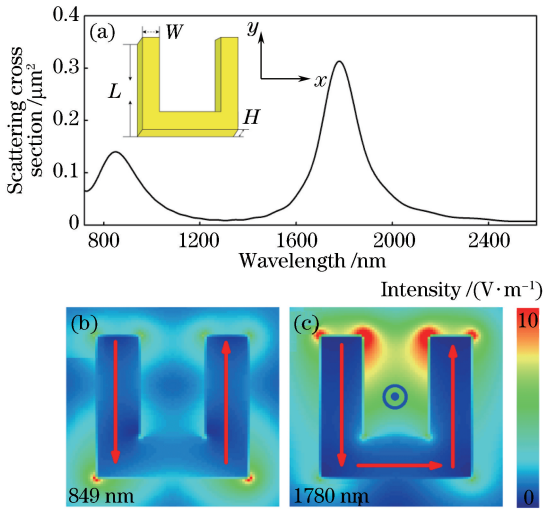


图1  $x$  偏振垂直入射情况下单个金劈裂纳米环的光学响应。(a) 劈裂纳米环散射光谱(插图为劈裂纳米环的结构示意图);(b) 电四极和(c) 磁偶极共振模式近场分布特性

Fig. 1 Optical responses of a single gold split-ring resonator under  $x$ -polarized incidence that propagating along the  $z$ -axis. (a) Scattering spectrum of the split-ring resonator, and the inset denotes a schematic view of the split-ring resonator; near-field distributions at the center cross section of (b) electric quadrupole and (c) magnetic dipole resonances

受垂直于入射场偏振方向上周期的调制,而平行于入射场偏振方向上的周期对其影响很小。对于劈裂纳米环的磁偶极和电四极共振,其散射场能够同时垂直和平行于入射场偏振方向,构成的阵列结构中所激发的表面晶格共振可受到  $x$ 、 $y$  方向的周期调制,从而产生模式劈裂,进而形成多重表面晶格共振。

### 3.2 磁偶极共振与多重表面晶格共振

为验证上述推测,图 2(a) 给出在劈裂纳米环构成阵列结构中, $x$  方向上的周期  $P_x$  分别为 1300 nm 和 1328 nm 时的消光谱线,其中  $y$  方向周期保持不变(周期为 1300 nm),单个纳米环的结构参数与图 1 一致。由图 2(a) 可知,当  $x$  方向上周期为 1300 nm 时(圆形标注实线),在波长为 1800 nm 附近出现一个具有较大展宽的共振峰,其峰位和线形不会随着阵列周期的变化而改变,由已报道的研究结果可知,这一共振峰由劈裂纳米环的局域模式磁偶极共振造成<sup>[3-5]</sup>。除此之外,在波长为 1972 nm 处出现一个尖锐的共振峰,表明系统激发了表面晶格共振。由于  $x$  方向周期与入射场偏振方向平行,

所以在对称纳米颗粒构成的阵列结构中,改变该方向的周期对表面晶格共振的影响很小。对于由劈裂纳米环构成的阵列结构,当  $x$  方向周期增大到 1328 nm 时(正方形标注实线),原来单一的表面晶格共振模式劈裂为两个尖锐的共振模式。这一现象表明,在劈裂纳米环阵列结构中,其表面晶格共振可受到平行于入射场偏振方向的周期调制。

为更清晰地展现阵列的周期对其光学响应的影响,图 2(b) 给出计算所得保持  $y$  方向周期  $P_y$  为 1300 nm 时,阵列消光谱线随  $x$  方向周期的变化关系。由于劈裂纳米环的磁偶极共振与阵列瑞利异常耦合形成表面晶格共振,所以在局域共振的长波波段出现具有较大品质因子的共振模式。在垂直入射情况下,阵列结构中瑞利异常波长可表示为<sup>[11]</sup>

$$\lambda_{(i,j)} = n \sqrt{\frac{i^2}{P_x^2} + \frac{j^2}{P_y^2}}, \quad (1)$$

式中: $(i, j)$  分别为  $x$  和  $y$  方向的衍射阶数; $n$  为外部环境折射率; $P_x$  和  $P_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的阵列周期。

图 2(b) 中两条虚线给出在  $x$ 、 $y$  方向瑞利异常波长随周期的变化情况,其中垂直于偏振方向上的

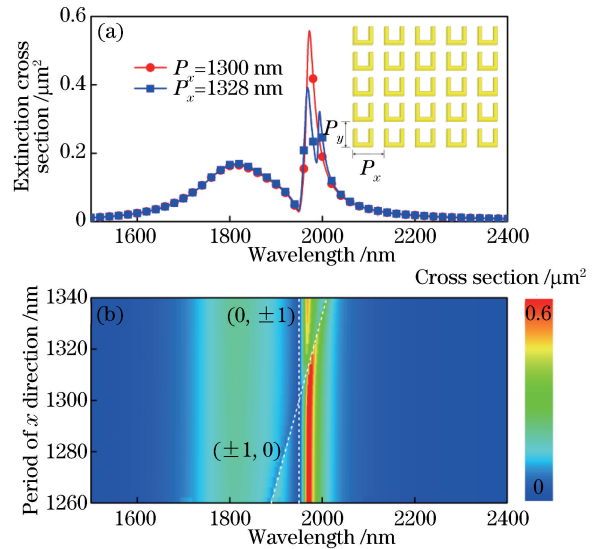


图2 劈裂纳米环阵列的光学响应。(a)  $y$  方向周期保持为 1300 nm 时  $x$  偏振垂直入射情况的消光谱;(b) 消光谱随  $x$  方向周期变化关系

Fig. 2 Optical response of split-ring resonator arrays. (a) Extinction spectra of perpendicular incidence of  $x$  polarization when the period along the  $y$ -axis is 1300 nm; (b) relation of extinction spectrum with periodic change along  $x$  direction

(0, ±1)阶瑞利异常波长保持不变,平行于偏振方向上的(±1, 0)阶瑞利异常随  $x$  方向周期的增大逐渐红移。当  $x$ 、 $y$  方向阵列周期相等且上述瑞利异常的波长一致时,只能激发起单一的表面晶格共振;然而当  $x$ 、 $y$  方向阵列周期、瑞利异常的波长不同时,表面晶格共振即会劈裂为两个共振模式。

为进一步明确表面晶格共振产生劈裂的内在机制,图 3 给出图 2(a)中三个表面晶格共振峰位处的近场分布特性,其中  $A(E)$  为阵列结构中截面处电场振幅分布,  $E_x$ 、 $E_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的电场强度分量。由电场振幅分布图可知,三个共振纳米环缺口处均具有较强的近场增强,与单个劈裂纳米环磁偶极共振(图 1(c))一致,表明系统激发了劈裂纳米环的局域共振模式;除此之外,在近场分布中能够观察到明显的表面波,表明阵列瑞利异常也参与这三个共振峰的产生,形成的表面晶格共振由局域模式磁偶极共振与阵列瑞利异常耦合所造成。

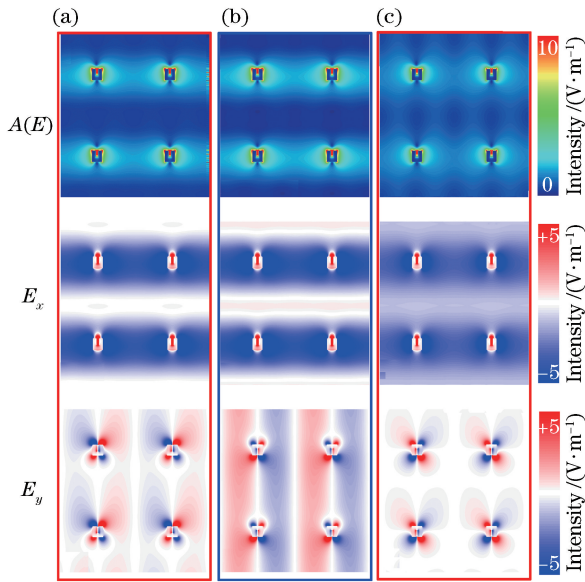


图 3 不同波长处的电场振幅分布及  $x$  方向和  $y$  方向的电场强度分量。(a) 1972 nm; (b) 1968 nm; (c) 1995 nm

Fig. 3 Electric field amplitude distribution and the components of electric field intensity in  $x$  and  $y$  directions at different wavelengths. (a) 1972 nm; (b) 1968 nm; (c) 1995 nm

当  $x$ 、 $y$  方向阵列周期皆为 1300 nm 时,图 3(a)给出波长为 1972 nm 附近的单一表面晶格共振近场分布特性,此时(0, ±1)和(±1, 0)阶瑞利异常波长相同,只形成单一的表面晶格共振。然而其近场分布表明此时不仅能够形成垂直于入射场偏振方向的表面波,也能形成平行于入射场偏振方向的表面波,与

劈裂纳米环磁偶极共振形成磁偶极矩垂直于纸面这一特性一致,即磁偶极共振能够同时与  $x$ 、 $y$  方向的瑞利异常耦合,从而形成表面晶格共振。如图 2(a)所示,当增大  $x$  方向周期为 1328 nm 时,表面晶格共振劈裂为两个新的共振模式,在图 3(b)、(c)中对应近场分布可观察到沿  $x$ 、 $y$  方向传播的表面波,进一步证明在劈裂纳米环构成的阵列结构中,所形成的表面晶格共振能够受到  $x$ 、 $y$  方向的周期调制。

上述结果仅改变  $x$  方向周期,但磁偶极共振等效偶极矩方向垂直于阵列平面,可同时向  $x$  和  $y$  方向散射电磁场,故改变  $y$  方向周期时也可引起模式劈裂,在光谱中同样可观察到双重表面晶格共振。这对表面晶格共振的调制和实际应用具有重要的意义。

### 3.3 电四极共振与多重表面晶格共振

与磁偶极共振类似,劈裂纳米环的电四极共振同样可向  $x$ 、 $y$  方向散射电磁场,使阵列结构中  $x$ 、 $y$  方向相邻纳米环之间的耦合成为可能。图 4(a)给出劈裂纳米环结构参数不变,  $y$  方向周期为 720 nm,改变  $x$  方向周期时阵列的消光谱线。当  $x$  方向周期同样为 720 nm 时(圆形标注实线),在波长为 850 nm 处出现具有较大展宽的局域共振模式,其峰位和线形不会随阵列周期的变化而改变,对应于劈裂纳米环的电四极共振。同时在波长为 1095 nm 处出现一个尖锐的共振峰,根据(1)式可知,此时对应的瑞利异常波长出现在 1080 nm 附近。由图 1 可知,此时瑞利异常同时出现在电四极共振长波波段和磁偶极共振短波波段。根据文献[5]可知,只有当瑞利异常位于局域共振长波波段时,两者才能产生耦合,故波长为 1095 nm 处的共振峰是电四极共振与瑞利异常耦合形成表面晶格共振共同作用的结果。当  $x$  方向周期增大到 752 nm (三角形标注实线),局域共振模式变化很小,其表面晶格共振峰发生劈裂,在光谱中形成两个明显的尖峰。计算结果表明劈裂纳米环阵列电四极共振之间的耦合也会受到  $x$ 、 $y$  方向的周期调制。

为更好地展现其表面晶格共振与周期的变化关系,固定  $y$  方向周期为 720 nm,  $x$  方向周期以 2 nm 的间隔从 680 nm 变化到 760 nm,其消光谱线如图 4(b)所示。与磁偶极共振耦合情况类似,垂直于偏振方向上的(0, ±1)阶瑞利异常波长不变,而平行于偏振方向上的(±1, 0)阶瑞利异常随  $x$  方向周期的增大逐渐红移。在瑞利异常长波波段能够观察到表面晶格共振,并且当  $x$ 、 $y$  方向周期不同时,可同时形成两个表面晶格共振。

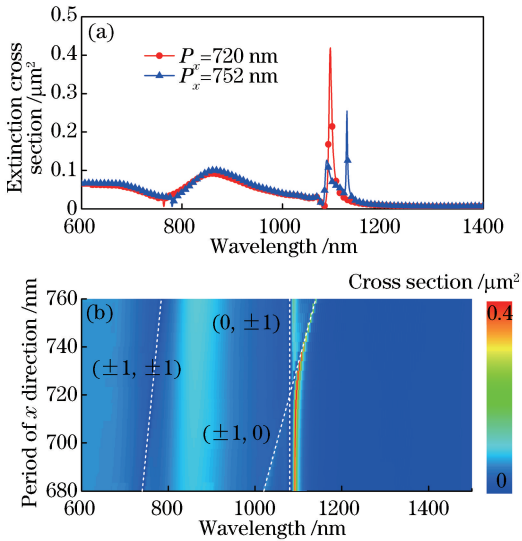


图4 劈裂纳米环阵列的光学响应。(a)  $y$  方向周期保持为 720 nm 时  $x$  偏振垂直入射情况消光谱;(b)消光谱随  $x$  方向周期变化关系

Fig. 4 Optical response of split-ring resonator arrays. (a) Extinction spectra of perpendicular incidence of  $x$  polarization when the period along the  $y$ -axis is 720 nm; (b) relation of extinction spectrum with periodic change along  $x$  direction

进一步计算图 4(a)中三个表面晶格共振处的近场分布,结果如图 5 所示。当  $x$ 、 $y$  方向阵列周期皆为 720 nm 时,图 5(a)给出波长为 1095 nm 附近的单一表面晶格共振近场分布特性,此时  $(0, \pm 1)$  和  $(\pm 1, 0)$  阶瑞利异常波长相同,只形成单一的表面晶格共振。对阵列中单个劈裂纳米环,四个边角处均形成较强的局域场,表明对应的位置有电荷的聚集,这一现象与图 1(b)的近场分布一致,故电四极共振在阵列结构中得以激发。除此之外,近场分布中存在明显的表面波,表明阵列瑞利异常也参与这一共振模式的产生。然而与磁偶极共振类似,其近场分布表明此时不仅能够形成垂直于入射场偏振方向的表面波,也能形成平行于入射场偏振方向的表面波,这表明劈裂纳米环的电四极共振同样能够同时与  $x$ 、 $y$  方向的瑞利异常耦合,从而形成表面晶格共振。如图 4(a)所示,当  $x$  方向周期增大到 752 nm 时,表面晶格共振劈裂为两个新的模式,在图 5(b)、(c)中对应近场分布能够观察到沿  $x$ 、 $y$  方向传播的表面波。

## 4 结 论

提出一种采用贵金属劈裂纳米环阵列产生多重表面晶格共振的方法。在劈裂纳米环构成的阵列结

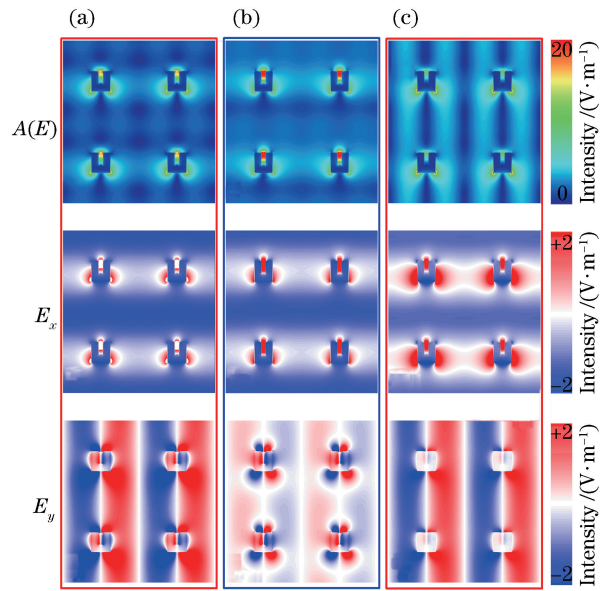


图5 不同波长处的电场振幅分布及  $x$  方向和  $y$  方向的电场强度分量。(a) 1095 nm;(b) 1088 nm;(c) 1128 nm

Fig. 5 Electric field amplitude distribution and the components of electric field intensity in  $x$  and  $y$  directions at different wavelengths. (a) 1095 nm; (b) 1088 nm; (c) 1128 nm

构中,磁偶极共振能够与两个周期方向的瑞利异常形成耦合,从而产生表面晶格共振。当阵列周期不同时,能够同时激发起两个表面晶格共振。此外,利用劈裂纳米环的电四极共振模式之间的耦合可得到类似的光学响应。这些结果表明贵金属劈裂纳米环阵列可产生多重表面晶格共振,对高灵敏度生化传感、纳米激光器等新型光子器件的设计具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] Liu A. Research progress of photonics and optoelectronics [J]. Optical Communication Technology, 2013, 37(9): 51-53.  
刘安. 光子学和光电子学及其研究进展[J]. 光通信技术, 2013, 37(9): 51-53.
- [2] MAIER S A. Plasmonics: fundamentals and applications[M]. New York: Springer, 2007.
- [3] Wang W J, Ramezani M, Väkeväinen A I, *et al.* The rich photonic world of plasmonic nanoparticle arrays[J]. Materials Today, 2018, 21(3): 303-314.
- [4] 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.

- [5] Auguie B, Barnes W L. Collective resonances in gold nanoparticle arrays [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(14): 143902.
- [6] Hooper D C, Kuppe C, Wang D Q, *et al.* Second harmonic spectroscopy of surface lattice resonances [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(1): 165-172.
- [7] Guo R, Nečada M, Hakala T K, *et al.* Lasing at K points of a honeycomb plasmonic lattice[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(1): 013901.
- [8] Michaeli L, Keren-Zur S, Avayu O, *et al.* Nonlinear surface lattice resonance in plasmonic nanoparticle arrays[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(24): 243904.
- [9] Esposito M, Todisco F, Bakhti S, *et al.* Symmetry breaking in oligomer surface plasmon lattice resonances[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(3): 1922-1930.
- [10] Zakharko Y, Graf A, Zaumseil J. Plasmonic crystals for strong light-matter coupling in carbon nanotubes [J]. *Nano Letters*, 2016, 16(10): 6504-6510.
- [11] 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.
- [12] Lü G W, Shen H M, Cheng Y Q, *et al.* Advances in localized surface plasmon enhanced fluorescence[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(33): 3169-3179.  
吕国伟, 沈红明, 程宇清, 等. 局域表面等离激元增强荧光研究进展[J]. *科学通报*, 2015, 60(33): 3169-3179.
- [13] 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.
- [14] Lai S M, Huang Z W, Wang Y J, *et al.* Simulation and analysis of local surface plasmon resonance of Ag nanostructures [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 122601.  
赖淑妹, 黄志伟, 王仰江, 等. Ag 纳米结构局域表面等离激元共振模拟与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 122601.
- [15] Cui J, Ji B Y, Lin J Q. Plasmonic Fano resonance in metallic disk-like nanostructure system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060002.  
崔健, 季博宇, 林景全. 激发等离激元 Fano 共振的金属类圆盘纳米结构体系[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060002.
- [16] 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.
- [17] Baur S, Sanders S, Manjavacas A. Hybridization of lattice resonances [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(2): 1618-1629.
- [18] 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.
- [19] Pan T T, Cao W, Wang M. Optical properties of multi-hole periodic silver film array structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0104001.  
潘庭婷, 曹文, 王鸣. 多圆孔周期性银膜阵列结构的光学特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0104001.
- [20] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [21] Zhang T, Zhang Y X, Yang Z Q, *et al.* Efficient THz on-chip absorption based on destructive interference between complementary meta-atom pairs [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(6): 1013-1016.
- [22] Wang J C, Ma J, Shu Z Q, *et al.* Terahertz metalens for multifocusing bidirectional arrangement in different dimensions [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 4600311.
- [23] Ren Y H, Li K, Wang F W, *et al.* A broadband magnetic coupling microstrip to waveguide transition using complementary split ring resonators[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17347-17353.
- [24] Chuma E L, Iano Y, Fontgalland G, *et al.* Microwave sensor for liquid dielectric characterization based on metamaterial complementary split ring resonator[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 9978-9983.
- [25] Luo X H, Cheng X, Han J A, *et al.* Compact dual-band bandpass filter using defected SRR and irregular SIR[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(8): 463-465.
- [26] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [27] Vitrey A, Aigouy L, Prieto P, *et al.* Parallel collective resonances in arrays of gold nanorods[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 2079-2085.