

Ag 纳米结构局域表面等离激元共振模拟与分析

赖淑妹^{1*}, 黄志伟², 王仰江¹, 陈松岩²

¹ 闽南理工学院光电与机电工程学院, 福建 石狮 362700;

² 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005

摘要 金属纳米材料因其特有的局域表面等离激元共振(LSPR)特性而广泛应用于半导体材料发光、太阳能电池、表面增强拉曼散射探测、光电化学等领域。Ag 由于其在特定波段极低的吸收损耗而被视为优秀的 LSPR 候选材料。以 Ag 纳米结构作为研究对象, 利用时域有限差分法(FDTD)对圆柱形 Ag 纳米结构的近场局域增强和远场散射特性进行了系统的模拟与分析。结果表明 Ag 纳米结构的尺寸、间距及衬底折射率均会对 LSPR 效果产生显著影响, 可以通过改变结构参数来调控 Ag 纳米结构的 LSPR 特性。

关键词 物理光学; 局域表面等离激元共振; 时域有限差分法; Ag 纳米结构

中图分类号 O484.4+1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.122601

Simulation and Analysis of Local Surface Plasmon Resonance of Ag Nanostructures

Lai Shumei^{1*}, Huang Zhiwei², Wang Yangjiang¹, Chen Songyan²

¹ College of Photonic and Mechanical-Electrical Engineering, Minnan University of Science and Technology, Shishi, Fujian 362700, China;

² Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract Metal nanomaterials are widely used in semiconductor materials luminescence, solar cells, surface enhanced Raman scattering detection, and photochemistry, etc., because of their unique local surface plasmon resonance (LSPR) characteristics. Owing to its very low absorption loss in a particular band, Ag is considered as an excellent candidate material for LSPR. In this paper, the near-field local enhancement and far-field scattering characteristics of cylindrical Ag nanostructures are systematically simulated and analyzed by finite-difference time-domain method (FDTD). The results show that the size, spacing and substrate refractive index of Ag nanostructures have significant effects on the LSPR. Furthermore, the LSPR properties of Ag nanostructures can be regulated by changing of the structural parameters.

Key words physical optics; local surface plasmon resonance; finite-difference time-domain method; Ag nanostructures

OCIS codes 260.5740; 350.5610; 290.5880; 350.5400

1 引言

金属纳米结构由于其独特的物理和化学性质, 能够突破传统光子器件的衍射极限, 在纳米尺度上传导和操控光^[1-4]。局域表面等离激元共振(LSPR)是研究金属纳米结构中光与物质相互作用的重要机

制^[5]。在光照下, 当金属纳米结构的尺寸或维度与入射光波长相当或小于入射光波长时, 金属纳米颗粒的电子云相对于核心发生偏移, 聚集在颗粒表面的正负电荷在颗粒内部形成局域恢复电场, 偏移的电子和恢复力场形成一个振荡器, 使电子云在核心周围振荡, 即产生局域表面等离激元(LSP)^[4-6]。当

收稿日期: 2018-05-10; 修回日期: 2018-06-03; 录用日期: 2018-06-08

基金项目: 闽南理工学院校级科研项目(16KJX02)、国家自然科学基金(61534005, 61474081)、工业机器人测控与模具快速制造福建省高校重点实验室项目(闽教科[2017]8号)

* E-mail: 1010173511@qq.com

LSP 的本征频率与入射光频率相同时,会产生共振现象,称为 LSPR^[6]。LSPR 是入射光与电子的相互作用,因此其性能由电子的有效质量、有效电荷及电子密度决定^[7-8],而这些因素又与金属纳米颗粒的几何形状、尺寸和周围的介电环境相关^[9-12]。此外,当金属纳米颗粒的间距减小,近邻的等离激元共振能量相互耦合,也会导致共振频率发生改变。LSPR 具有增强局域场和增强远场散射的特性,通过调控金属纳米颗粒各个参数,可以影响材料的光吸收、催化、辐射及能量转换等特性。因此,LSPR 在光电池^[13-14]、表面增强拉曼散射^[15]、LED^[16]、光电探测器^[17]、纳米天线^[5]等领域具有广阔的应用前景。

目前,对 LSPR 效应的研究主要集中在 Au^[18]、Ag^[19]等贵金属材料上,而在众多的金属材料中,Ag 的吸收系数小,在可见光和近红外光波段吸收损耗最小,且其介电常数在可见光附近及近红外区域实部为负,被视为用来实现 LSPR 的理想材料^[20]。目前在表面等离激元材料应用方面,人们把目光集中在利用纳米材料自身的 LSPR 性质,因而关于具有 LSPR 效应的 Ag 纳米颗粒材料的研究也是当前的研究热点之一。例如,人们致力于制备不同形貌(如球状^[21]、立方体^[22]、棒状^[23]等)、不同尺寸的具有独特 LSPR 性质的 Ag 纳米结构。在 Ag 纳米材料 LSPR 应用方面,Michaels 等^[24]报道了 Ag 纳米颗粒在拉曼散射增强方面的应用;Li 等^[25]报道了 Ag 纳米颗粒在光电探测器探测增强方面的应用。

对金属 LSPR 光学性质进行研究可以采取实验的方式和理论模拟方法。采用理论模拟方法不仅能计算出金属纳米颗粒的近场、远场等光学特性,还可以对实验结果进行理论分析,能够辅助实验工作的开展。金属纳米颗粒的 LSPR 不是均匀分布于整个颗粒表面,而是局限于颗粒的某些特殊点附近,如三角形尖端、棒的两端、纳米立方体的尖端等,形成所谓“热点”,具有“天线效应”^[26]。立方体、圆柱体和三角棱柱体纳米颗粒的近场辐射增强基本相同^[27],

而圆柱体可通过改变直径或高度获得不同尺寸的纳米结构,其中直径和高度的比值对 LSPR 有重要影响。因此选择圆柱形可以较好地分析尺寸对 LSPR 的影响。本文利用时域有限差分法(FDTD)对圆柱形 Ag 纳米结构进行了系统模拟及分析,主要分析了 Ag 纳米结构的尺寸、间距及衬底折射率对 LSPR 的影响。

2 FDTD 简介与 Ag 模型建立

FDTD 是 Yee^[28]于 1966 年提出的一种用于数值求解 Maxwell 方程的模拟计算方法。FDTD 通过对电场、磁场分量在空间和时间上进行交替抽样的离散方式解决电磁场问题。由给定的电磁场初始值及边界条件,就可以利用 FDTD 逐步求得以后各个时刻空间电磁场的分布。

本文采用 FDTD Solution 软件对图 1(a)所示圆柱形 Ag 纳米结构进行模拟。分别研究 Ag 颗粒的直径 D 、高度 H 及圆柱间距 S 对 LSPR 的影响。FDTD Solution 模拟计算的模型建立过程如下。

1) 建立几何模型:从 FDTD Solution 材料中选取 SiO_2 作为衬底,衬底上选择 Ag 金属,并设置为圆柱形。

2) 设置模拟区域:对于周期型结构,在模拟区选择一个重复单元,在 z 轴方向的上边界和下边界采用完美匹配层(PML)吸收边界条件,在 x 和 y 轴方向应用周期边界条件。

3) 选择光源:选取平面波光源,波长为 200 ~ 800 nm(或 200 ~ 1000 nm),光源从 z 轴正方向入射,图 1(b)所示白色线为平面光源的位置, z 方向红色箭头为光的入射方向, x 方向蓝色箭头为光的偏振方向。

4) 设置监视器:设定两个频域功率监视器分别检测反射和透射光强,如图 1(b)中上下两条黄色实线所示。设定两个频域监视器,一个位于 Ag 颗粒与衬底的界面(xy 平面)处,另一个位于 xz 平面,

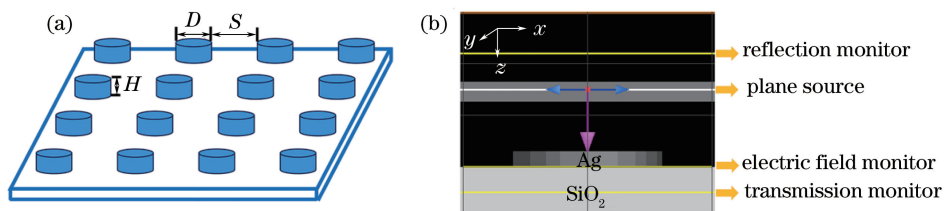


图 1 Ag 纳米结构示意图。(a)圆柱形 Ag 纳米结构;(b) FDTD Solution 仿真模型 xz 视图

Fig. 1 Schematic of the Ag nanostructures. (a) Cylindrical Ag nanostructures;

(b) xz view of simulation model in FDTD Solution

监测电场的分布情况。

3 结果分析

表面等离子体共振通常表现在远场散射增强和近场局域增强方面,因而采用消光光谱以及 Ag 纳米颗粒周围的电场强度分布来表征等离子体共振效应。当纳米颗粒中的 LSPR 被激发时,入射光便被部分消光。电子振荡越激烈,消光越强,因此光学消光光谱可以探测 LSPR 的激发。消光光谱是吸收光谱与散射光谱的总和,消光的极值波长即表面等离子体共振吸收峰的峰位。

3.1 颗粒尺寸对 LSPR 的影响

设定圆柱高度 $H=30\text{ nm}$,间距 $S=100\text{ nm}$,衬底材料为 SiO_2 。图 2(a) 所示为利用 FDTD Solution 软件模拟得到的不同 Ag 颗粒直径的消光光谱(数据已作归一化处理);图 2(b)所示为 LSPR 共振峰峰位及强度随直径变化的趋势。从图中可以看出,共振峰位随着直径的增加发生红移,且共振峰位与颗粒直径近似呈线性增加关系,直径从 40 nm 增加至 160 nm ,消光谱的峰位从 418 nm 红移至 579 nm 。这是因为粒径较大的颗粒,电子的弛豫时间较长,因此共振频率较低,导致共振波长发生红移^[29]。图 2(a)中共振峰的半峰全宽逐渐变大,因为

粒径较大的颗粒尺寸与入射光波长相当,由于迟滞效应和高阶模式的出现,其能量分布范围较宽,共振峰的半峰全宽随粒径的增大而增加^[29-30]。如图 2(a)所示, $D \geq 140\text{ nm}$ 时,消光光谱出现两个共振峰,分别对应两种不同的共振模式。图 2(c)和图 2(d)为 $D=160\text{ nm}$ 时两个共振峰(峰位为 383 nm 和 579 nm)所对应的 xz 平面电场分布,可以看出, 383 nm 共振波长下,电场增强局域在圆柱顶端,而 579 nm 共振波长下,电场增强局域在圆柱底端。如图 2(b)所示,共振峰强随直径的增加先增后减,当直径为 60 nm 时峰强达到最大;直径为 $20\sim 60\text{ nm}$ 时,峰强随直径增加而迅速增加,这是由于大的颗粒有更大的消光截面和辐射强度。直径为 $60\sim 180\text{ nm}$ 时,峰强随直径增加而近似线性减小,这是由于颗粒直径变大的同时纵横比减小,纵横比也是影响峰强的一个重要因素。此外,电场的增强也会影响共振峰的强度。图 3 分别为颗粒直径为 $40, 60, 80, 120\text{ nm}$ 时共振波长对应的电场分布。从图中可以看出,电场增强局域在圆柱的边界,且电场增强与颗粒直径相关。直径为 60 nm 的电场增强大于 $40, 80, 120\text{ nm}$ 直径的电场增强,局域电场增强可以增强光的散射作用,这可能是直径 60 nm 的共振峰强较大的原因。

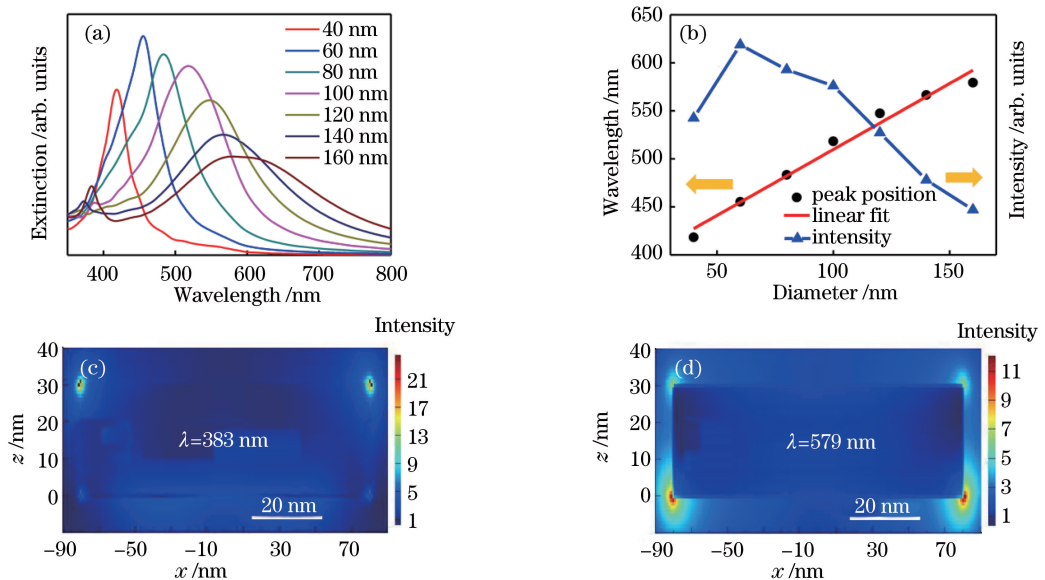


图 2 (a)不同直径 Ag 纳米颗粒的消光光谱;(b)共振峰位及峰强随直径的变化趋势;直径为 160 nm 的圆柱在波长 (c) 383 nm 和(d) 579 nm 处对应的 xz 平面电场分布

Fig. 2 (a) Extinction spectra of Ag nanostructures with different diameters; (b) variation trend of the resonance position and the resonance intensity with diameter; electric field distributions of 160 nm cylindrical nanostructures on the xz plane at (c) 383 nm and (d) 579 nm

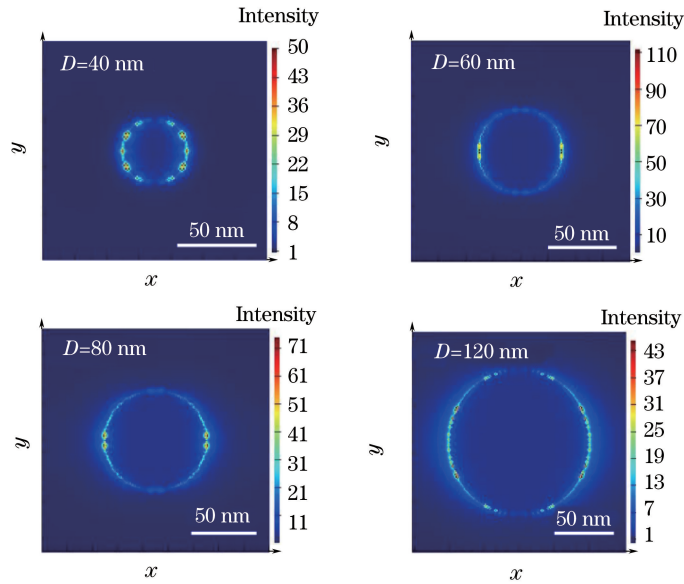


图 3 Ag 颗粒直径分别为 40,60,80,120 nm 时的界面电场分布

Fig. 3 Electric field distributions at the interface for Ag nanostructures with diameters of 40, 60, 80, and 120 nm

圆柱状纳米颗粒的等离激元共振吸收峰分裂成两个峰,分别对应自由电子沿圆柱轴向的振动(纵向 LSPR)和垂直于轴向的振动(横向 LSPR)^[31],如图 4(a)所示。纵向模式的电荷积累比较多,电子的振荡恢复力与电荷积累量成正比,因此纵向 LSPR 的振动频率较快(共振波长较短),而横向 LSPR 的振动较慢(共振波长较长)。图 4(b)所示为不同高度的 Ag 颗粒的消光光谱,图 4(c)为共振峰位及峰强随高度的变化趋势。设定颗粒直径 $D=120$ nm,间距 $S=$

100 nm,衬底材料为 SiO_2 。可以看出,随着纵横比(高与直径的比)的增加,纵向共振峰的位置向红端移动,共振波长近似线性增加,原因在于纵向的电荷积累越来越少。同时,纵模共振峰强随纵横比增加逐渐增加,当高为 100 nm 时达到最大值,而后共振峰强度逐渐下降,如图 4(b)所示。横模随着纵横比增加共振峰发生蓝移,并且强度逐渐减弱,当高度大于等于 60 nm 时,共振峰消失。通过调节纵横比,可以准确调节圆柱状纳米颗粒纵向共振峰的位置。

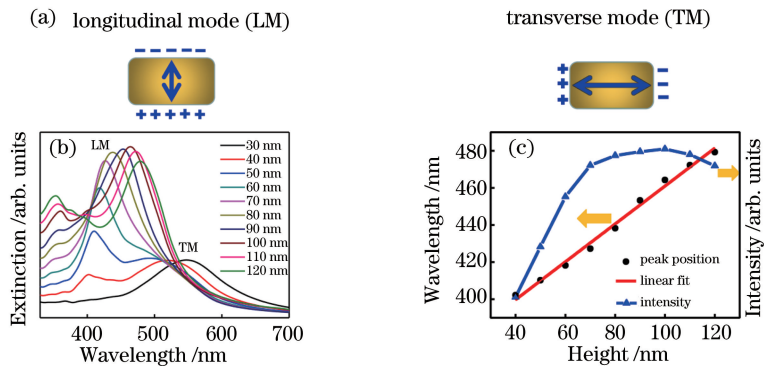


图 4 (a) Ag 纳米颗粒纵模与横模电子分布图;(b)不同高度 Ag 纳米颗粒的消光光谱;(c)共振峰位及峰强随高度的变化
Fig. 4 (a) Electron distributions of longitudinal mode and transverse mode of Ag nanostructures; (b) extinction spectra of Ag nanostructures with different heights; (c) variation of the resonance position and the resonance intensity with height

3.2 颗粒间距对 LSPR 的影响

颗粒间距的变化会同时影响 Ag 纳米颗粒 LSPR 的近场局域特性和远场散射特性。当颗粒间距较小时,颗粒之间的电磁场会发生耦合。图 5(a)

所示为不同颗粒间距的 Ag 颗粒的消光光谱,设定颗粒直径 $D=120$ nm,高度 $H=30$ nm,衬底材料为 SiO_2 。从图 5(a)和图 5(b)可以看出,对于远场散射而言,随着颗粒间距的减小,由于偶极子间的相

相互作用,共振峰发生蓝移,并且谱宽变大^[32]。同时,当颗粒间距增加时,耦合减弱,共振峰半峰全宽减小,对光的选择性更好。此外,如图 5(b)所示,峰强随间距的增加先增大,当间距为 250 nm 时达到最

大值,而后开始减小。对于近场局域而言,图 6 所示为颗粒间距对界面电场分布的影响。由图 6 可知,随着颗粒间距的增大,电场强度先逐渐增大而后缓慢减小,在间距为 250 nm 时得到相对较优的值。

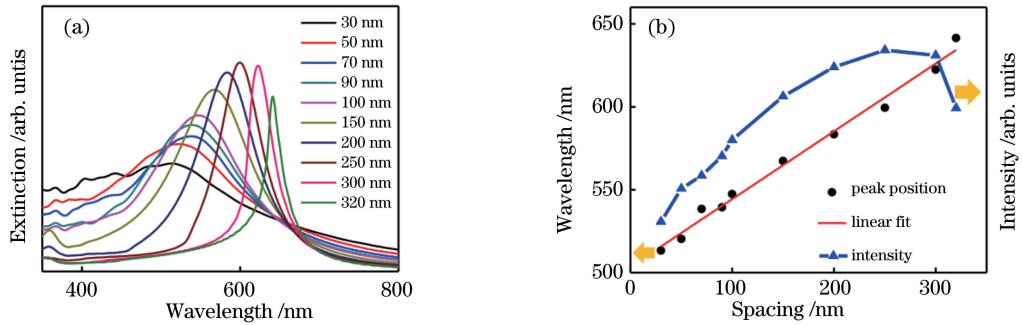


图 5 (a)不同间距 Ag 纳米颗粒的消光光谱;(b)共振峰位及峰强随间距的变化

Fig. 5 (a) Extinction spectra of Ag nanostructures with different spacings; (b) variation of the resonance position and the resonance intensity with spacing

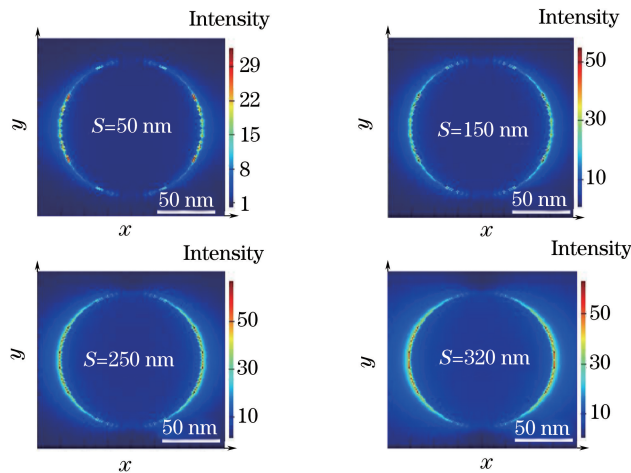


图 6 间距分别为 50,150,250,320 nm 时的界面电场分布图

Fig. 6 Electric field distributions at the interface for Ag nanostructures with spacing of 50, 150, 250, and 320 nm

从上述模拟可以发现 LSPR 峰位随直径、间距的变化均呈现线性变化。为了比较两个参数的影响,提取曲线斜率,得到直径对峰位的影响线性斜率为 1.362,间距对峰位的影响线性斜率为 0.409。由此可见,尺寸变化对共振峰位的影响较间距大。

为了验证此结果,如图 7 所示,选取直径 $D = 120$ nm,间距 $S = 100$ nm,高 $H = 30$ nm 作为参考数据,同时改变直径和间距。将直径增大 20%,同时间距缩小 16%,在直径 $D = 144$ nm,间距 $S = 84$ nm,高 $H = 30$ nm 参数下进行模拟,结果峰位发生红移,这与直径增大时峰位移动的趋势一致,说明直径影响较大。将直径减小 16%,同时间距增大 20%,在直径 $D = 100$ nm,间距 $S = 120$ nm,高 $H = 30$ nm 参数下进行模拟,结果峰位发生蓝移,这也与

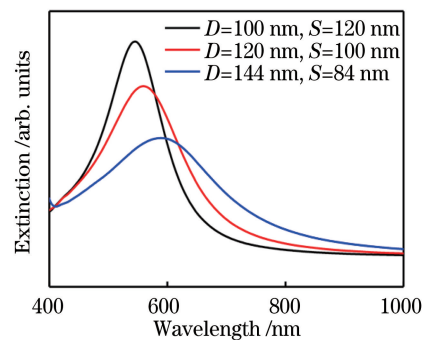


图 7 直径和间距对峰位的影响对比

Fig. 7 Comparison of the influence on peak position resulted from diameter and spacing

直径减小时峰位移动的趋势一致,再次验证了直径影响较大。

3.3 周围介电常数对 LSPR 的影响

周围介电环境会显著影响 LSPR 效应,一方面,周围介质的介电常数决定了纳米颗粒附近的入射光波长,会改变纳米颗粒表面电场分布;另一方面,会发生介质的极化。衬底折射率对 Ag 纳米颗粒 LSPR 的影响如图 8(a)所示,设定颗粒直径 $D = 120 \text{ nm}$,高度 $H = 30 \text{ nm}$,间距 $S = 100 \text{ nm}$ 。考虑到实际应用中 Ag 纳米颗粒一般不是直接生长在衬底上,生长 Ag 纳米颗粒时一般都会在衬底表面先生长一层氧化物钝化层,且常见氧化物的折射率大都小于 2.5。综合考虑消光强度及实际应用,选择折射率范围为 $1 \sim 2.5$ 。从图 8(b)可以看出,随着衬底折射率增加,共振峰发生红移,且共振波长与衬底折射率近似呈线性关系,折射率每变化 0.01,波长会增加 2.11 nm,这与 Mock 等^[33]的结果相同。在 LSPR

激发过程中,电荷的积累会在纳米颗粒附近产生电场,这个电场会诱导介电介质发生极化,导致衬底与颗粒界面处产生电荷累积,这在一定程度上抵消了纳米颗粒表面的电荷量。衬底的介电常数越大,极化效果越强,对纳米颗粒 LSPR 效应的影响也就越大。纳米颗粒表面电荷量的减少,降低了电子振荡的恢复力,LSPR 频率下降,因此共振波长红移。除此之外,当衬底折射率增加到 2 时,消光光谱出现了两个峰,这说明介质环境能改变颗粒中电荷的分布。颗粒间距对界面电场分布的影响如图 9 所示,增大衬底折射率时,电场强度随之增强,当衬底折射率大于 1.5 时,界面电场增强趋于稳定。这说明衬底折射率的增大有利于近场局域特性的增强,而消光强度的降低可能来源于衬底折射率增大导致的反射峰强度增加。

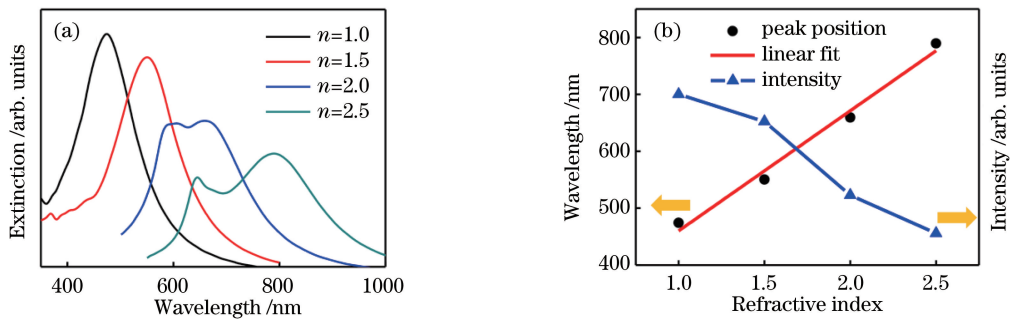


图 8 (a)不同衬底折射率条件下 Ag 纳米颗粒的消光光谱;(b)共振峰位及峰强随衬底折射率的变化

Fig. 8 (a) Extinction spectra of Ag nanostructures with different substrate refractive indices; (b) variation of the resonance position and the resonance intensity with substrate refractive index

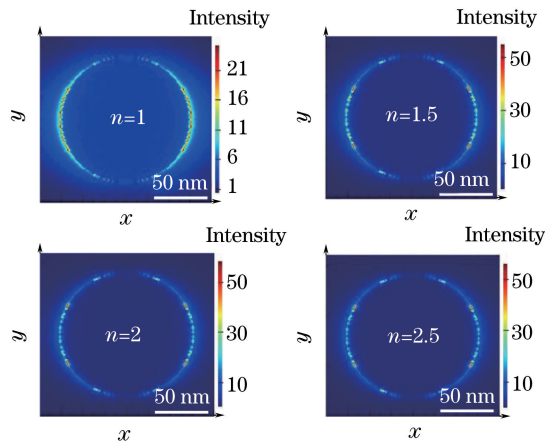


图 9 衬底折射率分别为 1, 1.5, 2 和 2.5 时的界面电场分布

Fig. 9 Electric field distributions at the interface for Ag nanostructures with substrate refractive index of 1, 1.5, 2 and 2.5

4 结 论

基于时域有限差分法设计并计算了 Ag 纳米颗

粒的局域表面等离子激元特性,研究了 Ag 颗粒大小、颗粒高度、颗粒间距及介质环境对消光光谱的影响。结果显示圆柱状颗粒直径增加时,共振峰位波长呈

近似线性增大,共振峰强度先增后减;Ag 纳米颗粒高度增加时,纵模共振峰的位置向红端移动,且峰强先增加后逐渐减弱,横模则逐渐减弱至消失;Ag 纳米颗粒间距减小时,共振峰发生蓝移,谱宽变大,峰强则先增加后逐渐减弱;Ag 纳米颗粒周围介质的介电常数增大时,共振峰不断红移。通过调节以上参数可以准确调节圆柱状纳米颗粒共振峰的位置,对 Ag 纳米结构 LSPR 特性的调控具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Zang Y, He X, Li J, *et al.* Band edge emission enhancement by quadrupole surface plasmon-exciton coupling using direct-contact Ag/ZnO nanospheres [J]. *Nanoscale*, 2013, 5(2): 574-580.
- [2] Li T, Chen J, Zhu S N. Manipulating surface plasmon propagation: from beam modulation to near-field holography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(5): 050002.
李涛, 陈绩, 祝世宁. 表面等离激元的传播操控: 从波束调制到近场全息 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(5): 050002.
- [3] Zhang B X, Chen S F, Fu L, *et al.* Dynamic patterning of microparticles via surface plasmon excitation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0610001.
张兵心, 陈淑芬, 付雷, 等. 基于表面等离子体激发的光学操控技术 [J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0610001.
- [4] Brongersma M L, Kik P G. *Surface plasmon nanophotonics* [M]. New York: Springer, 2007.
- [5] Baldassarre L, Sakat E, Frigerio J, *et al.* Mid-infrared plasmon-enhanced spectroscopy with germanium antennas on silicon substrates [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(11): 7225-7231.
- [6] Willets K A, van Duyne R P. Localized surface plasmon resonance spectroscopy and sensing [J]. *Annual Review of Physical Chemistry*, 2007, 58: 267-297.
- [7] Samarelli A, Frigerio J, Sakat E, *et al.* Fabrication of mid-infrared plasmonic antennas based on heavily doped germanium thin films [J]. *Thin Solid Films*, 2016, 602: 52-55.
- [8] Agrawal A, Johns R W, Milliron D J. Control of localized surface plasmon resonances in metal oxide nanocrystals [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2017, 47: 1-31.
- [9] Cao J, Sun T, Grattan K T V. Gold nanorod-based localized surface plasmon resonance biosensors: a review [J]. *Sensors and Actuators B*, 2014, 195: 332-351.
- [10] Catchpole K R, Polman A. Design principles for particle plasmon enhanced solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(19): 191113.
- [11] Wiley B J, Im S H, Li Z Y, *et al.* Maneuvering the surface plasmon resonance of silver nanostructures through shape-controlled synthesis [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(32): 15666-15675.
- [12] 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.
- [13] Islam K, Alnuaimi A, Battal E, *et al.* Effect of gold nanoparticles size on light scattering for thin film amorphous-silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2014, 103: 263-268.
- [14] Shan H Y, Zu S, Fang Z Y. 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. 表面等离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.
- [15] Fan W, Lee Y H, Pedireddy S, *et al.* Graphene oxide and shape-controlled silver nanoparticle hybrids for ultrasensitive single-particle surface-enhanced Raman scattering (SERS) sensing [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4843-4851.
- [16] Huang K, Gao N, Wang C, *et al.* Top-and bottom-emission-enhanced electroluminescence of deep-UV light-emitting diodes induced by localised surface plasmons [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4380.
- [17] Bao G, Li D, Sun X, *et al.* Enhanced spectral response of an AlGaIn-based solar-blind ultraviolet photodetector with Al nanoparticles [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24286-24293.
- [18] Jia R, Lin G, Zhao D, *et al.* Sandwich-structured Cu₂O photodetectors enhanced by localized surface plasmon resonances [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 332: 340-345.
- [19] Bai Y, Gao C, Yin Y. Fully alloyed Ag/Au nanorods with tunable surface plasmon resonance and high chemical stability [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(39):

- 14875-14880.
- [20] West P R, Ishii S, Naik G V, *et al.* Searching for better plasmonic materials [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 795-808.
- [21] Liang H, Wang W, Huang Y, *et al.* Controlled synthesis of uniform silver nanospheres [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(16): 7427-7431.
- [22] Wiley B J, Chen Y, McLellan J M, *et al.* Synthesis and optical properties of silver nanobars and nanorice [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(4): 1032-1036.
- [23] Zhang J, Langille M R, Mirkin C A. Synthesis of silver nanorods by low energy excitation of spherical plasmonic seeds [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(6): 2495-2498.
- [24] Michaels A M, Jiang J, Brus L. Ag nanocrystal junctions as the site for surface-enhanced Raman scattering of single rhodamine 6G molecules [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2000, 104(50): 11965-11971.
- [25] Li D, Sun X, Song H, *et al.* Realization of a high-performance GaN UV detector by nanoplasmonic enhancement [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(6): 845-849.
- [26] Yi M F, Zhu Z S, Li L L. Electric field properties of coupled structure based on silver nanocube and silver film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0720003.
易明芳, 祝祖送, 李伶俐. 纳米银立方体与银膜耦合结构的电场特性 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 0720003.
- [27] Ma G H, Yu H, Liu Y Q, *et al.* Resonance radiation enhancement of metal nanometer surface plasmons [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 042601.
马光辉, 于贺, 刘宇乾, 等. 金属纳米表面等离子激元的共振辐射增强研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 042601.
- [28] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [29] Link S, El-Sayed M A. Spectral properties and relaxation dynamics of surface plasmon electronic oscillations in gold and silver nanodots and nanorods [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1999, 103(40): 8410-8426.
- [30] Yang X C, Liu H X, Li L L, *et al.* Review on influence factors of surface plasmon resonance for noble metal nanoparticles [J]. *Functional Materials*, 2010, 2(41): 341-345.
杨修春, 刘会欣, 李玲玲, 等. 影响贵金属纳米颗粒表面等离子体共振因素评述 [J]. *功能材料*, 2010, 2(41): 341-345.
- [31] García M A. Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications [J]. *Journal of Physics D*, 2011, 44(28): 283001.
- [32] Rechberger W, Hohenau A, Leitner A, *et al.* Optical properties of two interacting gold nanoparticles [J]. *Optics Communications*, 2003, 220(1): 137-141.
- [33] Mock J J, Smith D R, Schultz S. Local refractive index dependence of plasmon resonance spectra from individual nanoparticles [J]. *Nano Letters*, 2003, 3(4): 485-491.