

激光与光电子学进展

基于远场光谱的表面等离激元耦合特性研究

陈柏逸¹, 朱啟芬¹, 高娜^{1,2*}, 李鹏岗¹, 黄凯¹, 吴雅苹¹, 康俊勇¹¹厦门大学物理科学与技术学院福建省半导体材料及应用重点实验室, 福建 厦门 361005;²厦门大学九江研究院, 江西 九江 332000

摘要 采用快速热退火方法制备了尺寸较小、密度较高的银纳米颗粒阵列,其面密度在一定区间可调控。通过实验测得银纳米颗粒阵列的远场反射和透射谱,进一步经理论数值变换,研究了所制备银纳米颗粒阵列的吸收、散射及消光特性。从谱线的变化趋势可知,当银纳米颗粒阵列的面密度不断增大、即颗粒间距逐步减小时,所产生的局域表面等离激元共振的波长发生红移;而且相邻金属纳米颗粒的耦合作用越强,波长红移越明显。该方法为分析高密度、小尺寸,特别是粒子间存在耦合的金属纳米颗粒阵列的等离激元特性提供了有效参考。

关键词 表面等离激元; 金属纳米颗粒阵列; 相互耦合; 远场光谱; 数值变换

中图分类号 O433

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222943

Properties of Surface Plasmon Coupling Based on Far-Field Spectroscopy

Chen Baiyi¹, Zhu Qifen¹, Gao Na^{1,2*}, Li Penggang¹, Huang Kai¹, Wu Yaping¹, Kang Junyong¹¹Key Laboratory of Semiconductor Materials and Applications of Fujian Province, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China;²Jiujiang Research Institute of Xiamen University, Jiujiang 332000, Jiangxi, China

Abstract In this work, we fabricate silver nanoparticle arrays with a small size, high density, and controllable surface densities in a specific range using a rapid thermal annealing method. Based on the far-field optical reflection and transmission spectra of the silver nanoparticle arrays that are experimentally measured and according to a theoretical numerical conversion, the absorption, scattering, and extinction properties of the silver nanoparticle arrays are investigated. The results show that the resonance wavelength derived from the localized surface plasmon tends to redshift with an increase in surface density of the silver nanoparticle arrays (i. e., decreased nanoparticle spacing). In addition, the redshift is more pronounced for stronger coupling interactions between neighboring nanoparticles. This method provides a helpful reference for analyzing localized surface plasmon properties, primarily for small high-density metal nanoparticle arrays with non-negligible inter-particle coupling interactions.

Key words surface plasmon; metal nanoparticle array; intercoupling; far-field optical spectrum; numerical conversion

1 引言

表面等离激元是金属与介质界面处入射光波与集体振荡的电子耦合产生的电磁波,根据所激发电磁波的传播形态,可划分为表面等离极化激元(SPP)和局域表面等离激元(LSP)。其中,LSP对光吸收、散射的增强效果尤为显著,因此在表面增强拉曼散射^[1-2]、半导体发光和探测^[3]、太阳能电池、生物化学传感应用等领域得到广泛应用^[4-6]。

设计特定尺寸和形状的金属纳米颗粒阵列,常被

用作LSP耦合增强纳米光学及半导体光电器件性能的有效方式。金属纳米颗粒阵列通过物理或化学方法直接制备在基底材料上(衬底或薄膜材料内部)^[7-9],二者所成体系激发的LSP特性(包含吸收、散射及消光)决定了纳米光学及半导体器件的关键性能。然而,由于当前技术水平的限制,直接观测金属纳米颗粒阵列的吸收、散射及消光行为仍存在一定挑战。借助散射近场光学显微方法来表征金属纳米颗粒阵列的难度较大。常规方式是先利用扫描电子显微镜(SEM)观测金属纳米颗粒的形状、尺寸大小等,再利用时域有限差

收稿日期: 2022-11-01; 修回日期: 2022-12-01; 录用日期: 2022-12-14; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 江西省自然科学基金(20212BAB202027)、中央高校基本业务费专项(20720210028)

通信作者: *ngao@xmu.edu.cn

分算法(FDTD)模拟金属纳米颗粒阵列的LSP特性^[10-11]。然而,理论仿真相当于单颗粒的周期性理想扩展,因此难以分析实验制备颗粒分布的不完美周期,以及尺寸不完全一致的金属纳米颗粒阵列;同时,仿真计算所需空间较大、耗时较长,所以FDTD更适合模拟和分析单个金属纳米颗粒的LSP特性。这些方法对存在耦合的金属纳米颗粒阵列LSP特性预测,尚缺

乏一定的可行性和有效性。

2 基本原理与实验制备

前期研究中^[12]提出了运用金属纳米颗粒阵列远场光谱(透射谱和反射谱)间接推导其LSP光学行为的数值变换方法,对金属纳米颗粒阵列的LSP特征进行描述:

$$\begin{cases} C_{\text{abs}} = \frac{n_2}{\rho} \times \frac{1 - T - R}{T} \\ C_{\text{scat}} = \frac{2n_1 n_2 k^2}{3\pi\rho^2} \left[\frac{(n_1 - n_2)}{2n_1} \times \frac{1 - T - R}{T} + \frac{R}{T} - \frac{(n_1 - n_2)^2}{4n_1 n_2} \right], \\ C_{\text{ext}} = C_{\text{abs}} + C_{\text{scat}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_{abs} 、 C_{scat} 、 C_{ext} 分别为金属纳米颗粒的吸收截面、散射截面及消光截面; T 、 R 分别为金属纳米颗粒阵列的透射率和反射率; n_1 、 n_2 分别为衬底与空气介质的折射率; ρ 、 k 分别为金属纳米颗粒阵列的密度和入射光波矢量。

由式(1)可知,当所处的介电环境确定时(n_1 和 n_2 数值一定),测得所制备金属纳米颗粒阵列的远场透射和反射谱特征,便可进一步预测表征金属纳米颗粒阵列LSP特性的吸收、散射及消光行为。该方法突破了当前仿真难以分析实验制备颗粒分布的不完美周期和尺寸不完全一致的金属纳米颗粒阵列的难题,而且极大地简化常规的测试与分析过程^[12]。从实验角度出发,验证了所提理论与实验结果的一致性和可靠性。

2.1 实验方法

对金属纳米颗粒阵列的LSP特性研究而言,控制阵列中颗粒的尺寸和密度起着关键作用^[13-14]。必须先获得不同尺寸和密度的金属纳米阵列才能观测LSP特性的吸收、散射及消光谱的变化规律。尤其对颗粒间相互耦合增强的阵列而言,颗粒间距不能太大,阵列的密度要高。理论上可以设计半球形、半埋式球形、球形共3种金属纳米颗粒结构,但实际制备中考虑到半埋式球形颗粒在不同介质界面才能观测、制备难度较大,球形纳米颗粒需要分离式先行制备、后续转移面临结构不稳定、不规则等难题。因此,选择半球形结构的金属纳米颗粒阵列为研究对象,这也是当前研究中较为常用的结构之一。

本实验主要包括样品制备与表征分析两部分。制备密度可控且尺寸特征一定的金属纳米颗粒阵列是实验制备的重要环节,过程中包括衬底选择、清洗及镀膜、高温热退火处理;表征则涉及样品表面形貌观测、光谱测试分析等。

实验中以石英作为衬底,使用丙酮、乙醇溶液及去离子水对样品进行超声清洗,由氮气吹干或在100℃电热台上烘干备用。通过美国Denton公司生产的磁

控溅射镀膜系统(EXPLORER-14)对银靶材进行电子轰击,从而在石英衬底上沉积成膜。之后,在北京东之星公司生产的快速退火炉(Rapid thermal annealing, RTA-300)中氮气氛围下热退火处理,通过改变退火温度实现不同密度的银纳米颗粒阵列结构。在表征阶段,首先利用德国卡尔ZEISS公司生产型号为Sigma-HD的SEM观测所制备样品的表面基本形貌,随后借助美国PerkinElmer公司的紫外-可见-近红外分光光度计(Cary 5000)测试样品的光学反射与透射谱。最终获得相关数据后进行归一化处理,以便对不同沉积厚度下、不同密度金属纳米颗粒阵列的光学特性进行对比分析。

2.2 银纳米颗粒阵列制备

实验中银薄膜的沉积厚度分别控制为4、6、8 nm。为了尽可能地避免银颗粒在空气中发生氧化反应,实验选择氮气氛围进行退火处理,同时在运输样品时利用大型真空封口机进行真空包装,不接触硫化物、碘化物等,最大程度上避免银颗粒发生明显变性现象。在450℃氮气氛围下快速热退火处理后,得到银纳米颗粒阵列,如图1所示。通过SEM观测发现,图1(a)中厚度为4 nm的银薄膜退火后形成的颗粒形状和尺寸较为规则,直径约为30 nm,银纳米颗粒阵列的密度约为 $2.56 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。图1(b)中厚度为6 nm的银薄膜退火后形成的颗粒尺寸有所增大,但少部分金属颗粒间相互黏连合并,阵列密度显著降低。图1(c)中厚度为8 nm的银薄膜形成的银纳米颗粒阵列,可见颗粒形状非均匀、不规则,且相互黏连合并现象更为严重。同时,薄膜厚度小于4 nm时,不能有效形成完整连续的薄膜,即退火处理后形状不规则;而薄膜厚度大于8 nm时,由于厚度过大,相邻颗粒间的黏附过于严重,无法通过退火形成规则的金属颗粒,其形状也存在不规则的现象,课题组的前序工作中也针对Au颗粒进行过类似讨论^[15]。经过初步摸索后,选择厚度为4、6 nm的银薄膜样品,通过改变退火条件以调控银纳

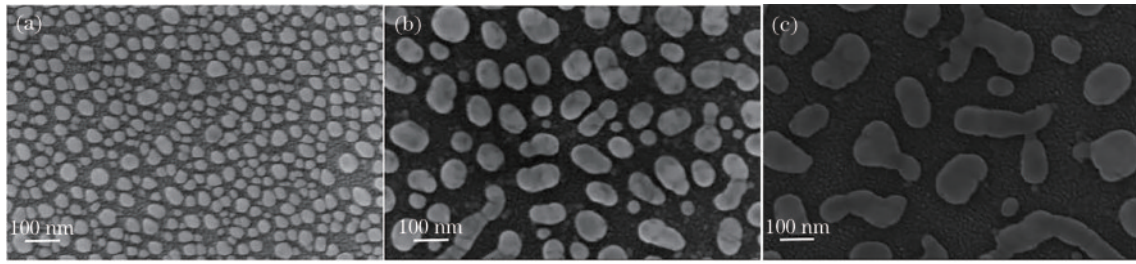


图1 经 450 °C 退火后的银纳米颗粒阵列 SEM 观测图。(a)银薄膜厚度为 4 nm;(b)银薄膜厚度为 6 nm;(c)银薄膜厚度为 8 nm
Fig. 1 SEM images of silver nanoparticle arrays after thermal annealing at 450 °C. (a) Thick silver film is 4 nm; (b) thick silver film is 6 nm; (c) thick silver film is 8 nm

米颗粒阵列的密度。

将银薄膜沉积厚度为 4 nm 和 6 nm 的样品,在 450、500、550 °C 条件下快速热退火,获得银纳米颗粒阵列结构,如图 2 所示。在一定范围内退火温度的改变对银纳米颗粒阵列的整体影响较小,厚度为 4 nm 和

6 nm 的薄膜所形成银纳米颗粒阵列都较为规则且具有良好的形态,如图 2(a)~图 2(f)所示。特别是厚度为 6 nm 的银薄膜,随着退火温度的逐步升高,所制成银纳米颗粒的局域粘附合并现象有了很大程度的改善。

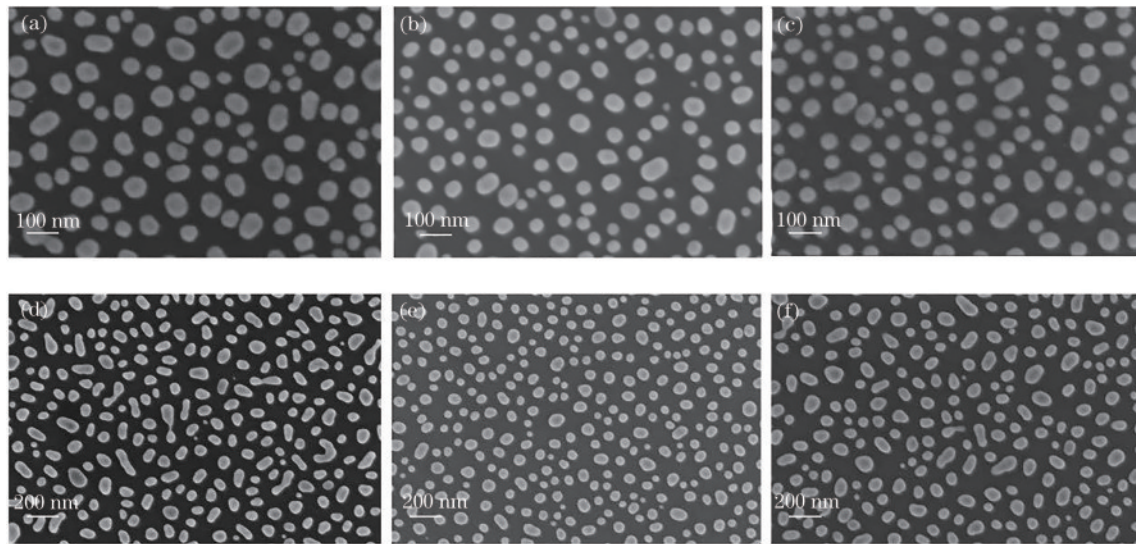


图2 不同沉积厚度的银薄膜经不同温度退火后形成银纳米颗粒阵列的 SEM 观测图。(a)4 nm、450 °C;(b)4 nm、500 °C;(c)4 nm、550 °C;(d)6 nm、450 °C;(e)6 nm、500 °C;(f)6 nm、550 °C

Fig. 2 SEM images of silver nanoparticle arrays formed from silver films with different deposition thickness after annealing at different temperatures. (a) 4 nm, 450 °C; (b) 4 nm, 500 °C; (c) 4 nm, 550 °C; (d) 6 nm, 450 °C; (e) 6 nm, 500 °C; (f) 6 nm, 550 °C

2.3 银纳米颗粒阵列的密度分析与统计

对厚度为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜经 450 °C 退火后的样本进行测量与统计,得到颗粒的平均直径分别为 32.4 nm 和 77.3 nm,可见沉积薄膜厚度对金属纳米颗粒的尺寸影响较大。同时,对不同退火温度条件下所成银纳米颗粒阵列的平均尺寸进行统计,结果如图 3(a)所示,与上文 SEM 观测一致,当退火温度从 450 °C 逐渐升高到 550 °C 时,所制备银纳米颗粒的直径几乎保持不变。进一步利用采样法分别选取 20 个边长为 200 nm 的正方形单元区域,对每个单元内颗粒密度取平均值后估测整体的金属纳米颗粒面密度。由图 3(b)可知,退火温度与银纳米颗粒阵列的密度并不具有线性关系。其中,厚度为 6 nm 的银薄膜经退火后形成的银纳米颗粒阵列密度区间随温度变化的起伏不

大;而厚度为 4 nm 的银薄膜经 500 °C 退火后的颗粒密度达到 $1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的峰值,密度区间的弹性可控范围更大。同时,也探究了不同条件下颗粒间隙的变化情况,发现厚度分别为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜经 450 °C 退火后所形成的颗粒平均间隙分别为 28.331 nm 和 42.140 nm。类似地,经 500 °C 退火处理后,厚度分别为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜形成的颗粒平均间隙分别为 27.838 nm 和 40.926 nm;经 550 °C 退火处理后,厚度分别为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜形成的颗粒平均间隙分别为 27.612 nm 和 41.331 nm,如图 3(c)所示。由图 3(c)可知,不同退火温度下相同薄膜厚度的颗粒平均间隙大小基本接近,而相对较厚的薄膜退火后金属纳米颗粒的尺寸较大,所形成颗粒的平均间隙也会增大。

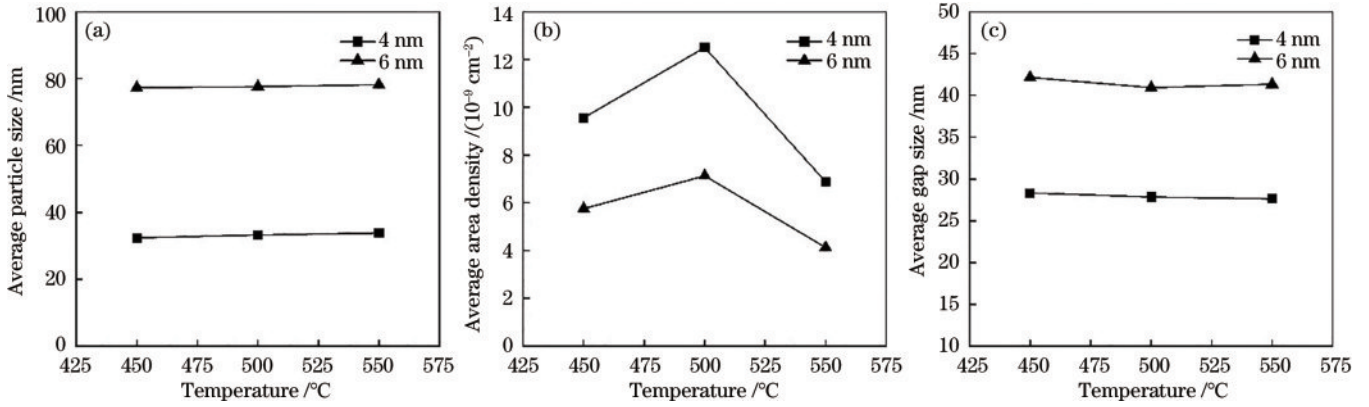


图3 厚度为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜随退火温度改变所形成的银纳米颗粒。(a)平均粒径;(b)平均密度分布;(c)平均间隙距离
Fig. 3 Silver nanoparticle arrays with 4 nm and 6 nm thick silver deposition films under controllable annealing temperature. (a) Average particle size; (b) average density distribution; (c) average gap size

3 结果分析与讨论

对所制备密度可控的银纳米颗粒阵列进一步表征分析,测得远场反射与透射谱,如图 4 所示。由图 4(a)、图 4(b)可知,当银纳米颗粒阵列的面密度分别达到 6.88×10^9 、 9.56×10^9 、 $1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,反映 LSP 共振波长的反射与透射极值波长分别为 446、447、455 nm,与现有文献中报道的银纳米颗粒可见光区域 LSP 共振波长相一致^[16]。

随着银纳米颗粒阵列密度的逐步增加,其激发 LSP 共振波长逐渐红移,并伴随更高的共振强度。银颗粒阵列面密度从 $4.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 增加到 $7.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,也表现出谷值波长随密度增大而红移的趋势,如图 4(c)、图 4(d)所示,银纳米颗粒的 LSP 振荡与介电界面之间的干涉行为,使得谱线呈显著非对称 Fano 线型^[17]。

将上述不同密度银纳米颗粒阵列的远场反射与透射值代入式(1),可获得经数值变换后的表征 LSP 特

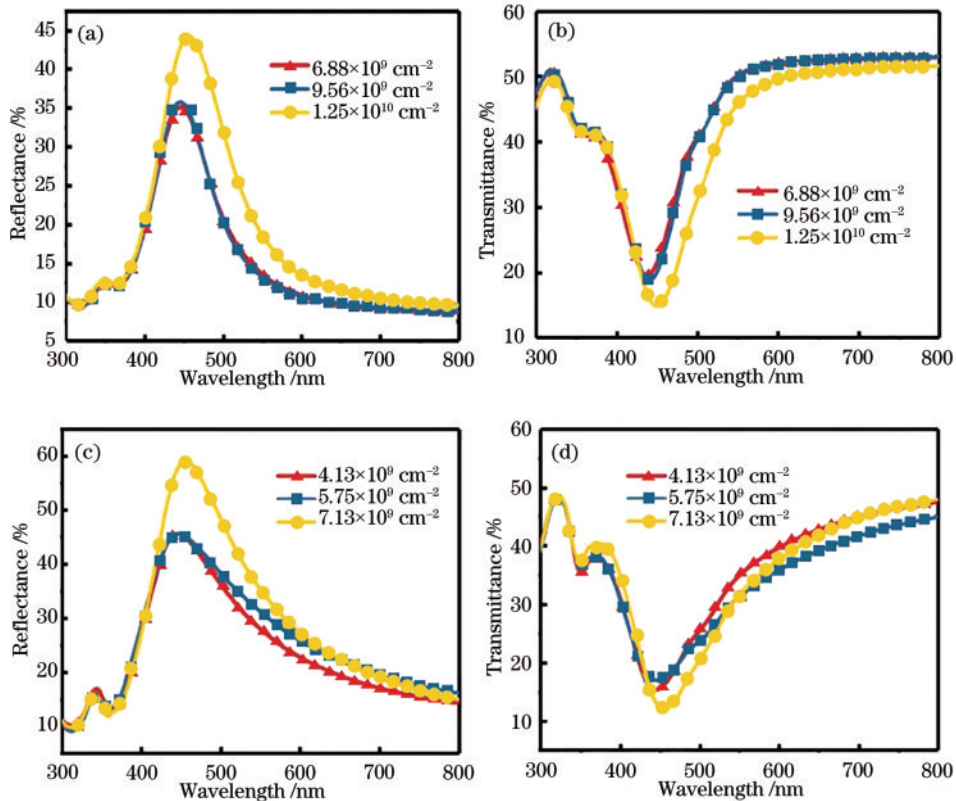


图4 不同厚度的银薄膜退火后形成的银纳米颗粒阵列的反射与透射测试谱。(a)4 nm 下的反射率;(b)4 nm 下的透射率;
(c)6 nm 下的反射率;(d)6 nm 下的透射率

Fig. 4 Measured reflectance and transmittance of the silver nanoparticle arrays formed after annealing of silver films with different thicknesses. (a) Reflectance at 4 nm; (b) transmittance at 4 nm; (c) reflectance at 6 nm; (d) transmittance at 6 nm

性的吸收、散射及消光行为。当银纳米颗粒阵列面密度分别调控为 6.88×10^9 、 9.56×10^9 、 $1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,归一化吸收谱中银颗粒的 LSP 共振吸收峰波长为 434、439、447 nm,如图 5(a)所示。图 5(b)中颗粒阵列面密度为 $4.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $5.75 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,吸收峰波长都为 443 nm,当阵列面密度增大至 $7.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,吸收峰值则红移至 452 nm。图 5(c)的归一化散射谱中厚度为 4 nm 的银薄膜退火形成的密度为 6.88×10^9 、 9.56×10^9 、 $1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,散射谱波长峰值分别为 439、441、452 nm。对沉积厚度为 6 nm

的银薄膜而言,当退火后阵列面密度达到 $4.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 和 $5.75 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,其波长峰值都为 446 nm,当阵列面密度增大至 $7.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,波长峰值则红移至 455 nm,如图 5(d)所示。随着银纳米颗粒阵列面密度的增大,表征 LSP 特性的光学共振波长逐步红移,该结果与理论模拟研究的预测趋势相符^[12]。实验数据分析过程中还发现所制备的高密度、小尺寸银纳米颗粒阵列的吸收谱强度明显强于散射谱,随着颗粒平均尺寸的增加,散射截面的强度有所提升,但与吸收截面的强度相比整体上仍较弱。

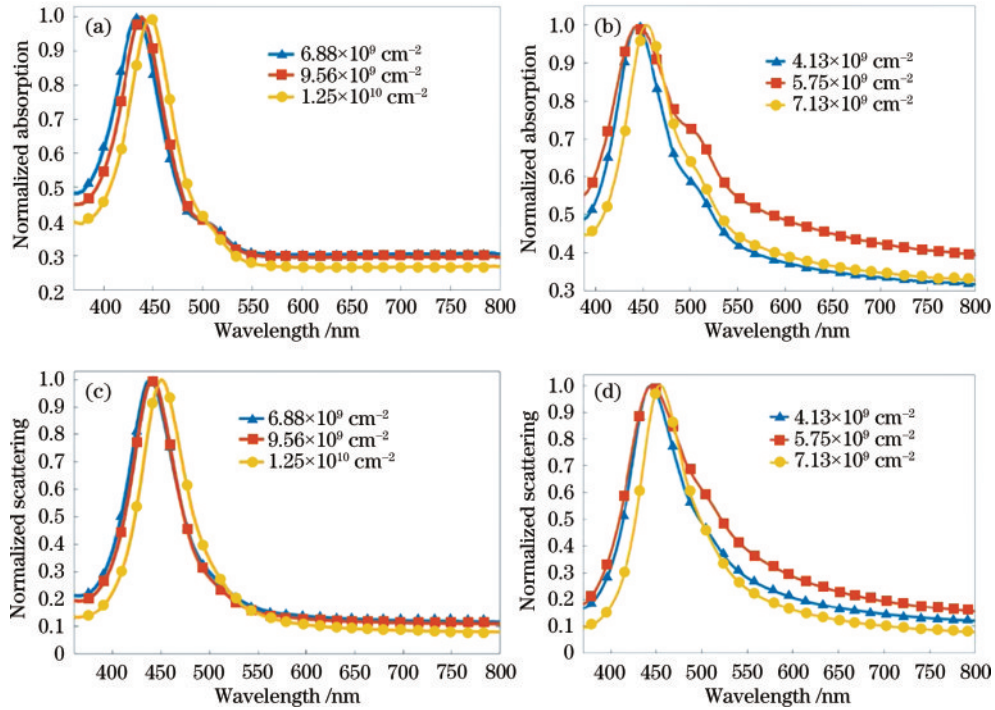


图 5 不同厚度的银薄膜退火后形成的银纳米颗粒阵列经远场数值变换计算得到的归一化吸收和散射谱。(a)4 nm 下的归一化吸收谱;(b)6 nm 下的归一化吸收谱;(c)4 nm 下的归一化散射谱;(d)6 nm 下的归一化散射谱

Fig. 5 Normalized absorption and scattering spectra of silver nanoparticles arrays formed after annealing of silver thin films with different thicknesses calculated by far field numerical transformation. (a) Normalized absorption spectrum at 4 nm; (b) normalized absorption spectrum at 6 nm; (c) normalized scattering spectrum at 4 nm; (d) normalized scattering spectrum at 6 nm

通常在发生 LSP 共振时,金属纳米颗粒对光有较强的散射和吸收作用,二者的贡献比取决于金属颗粒的尺寸大小。当金属颗粒尺寸较小时,吸收行为占主导;当粒径较大时,散射行为占主导。具体计算了所制备银纳米颗粒阵列的吸收截面和散射截面分别在消光截面中的占比情况,如表 1 所示。统计发现,沉积厚度

为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜所形成的银纳米颗粒阵列的吸收截面占消光截面比例明显大于散射截面相应占比,表明制得的银纳米颗粒阵列的光吸收更强,与其高密度、小尺寸的总体特征相符合。同时,随着薄膜厚度从 4 nm 增加至 6 nm,所形成的银纳米颗粒的平均尺寸逐步增加,散射截面所占比例也在增大。对吸收和散

表 1 不同厚度的银薄膜经不同退火温度的吸收与散射分别在消光中的占比

Table 1 Proportions of the absorption and scattering intensity to the extinction intensity of silver films with different thicknesses at different temperatures

Silver film thickness /nm	Thermal annealing at 450 °C		Thermal annealing at 500 °C		Thermal annealing at 550 °C	
	Absorption proportion /%	Scattering proportion /%	Absorption proportion /%	Scattering proportion /%	Absorption proportion /%	Scattering proportion /%
4	99.977	0.023	99.973	0.027	99.982	0.018
6	99.973	0.027	99.957	0.043	99.973	0.027

射截面进行求和处理,得到不同密度银纳米颗粒阵列的消光特性,如图 6 所示。由图 6 可知,经远场数值变换计算得到的银纳米颗粒的消光峰与吸收峰位置一致,充分证实了银纳米颗粒尺寸较小时,散射截面影响较小,吸收截面对消光截面起主要作用。具体计算了所制备银纳米颗粒阵列的吸收截面和散射截面分别在消光截面中的占比情况,如表 1 所示。统计发现,沉积

厚度为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜所形成银纳米颗粒阵列的吸收截面所占消光截面比例明显大于散射截面相应占比,表明制得的银纳米颗粒阵列的光吸收更强,这与其高密度、小尺寸的总体特征相符合。同时,随着薄膜厚度从 4 nm 增加至 6 nm,所形成银颗粒的平均尺寸逐步增加,散射截面所占比例也在增大。

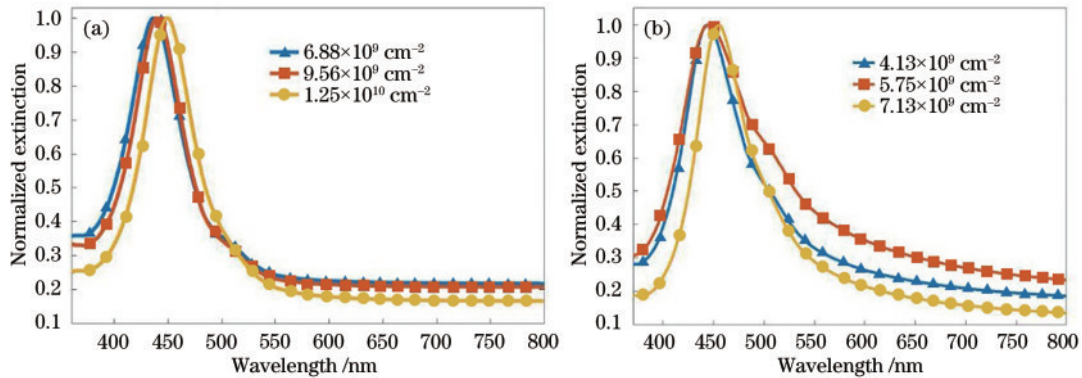


图 6 不同厚度的银薄膜退火形成的银纳米颗粒阵列经数值变换后归一化消光谱。(a) 4 nm; (b) 6 nm

Fig. 6 Normalized extinction spectra of silver nanoparticle arrays formed by annealing silver thin films with different thicknesses after numerical transformation. (a) 4 nm; (b) 6 nm

结果表明,厚度为 4 nm 和 6 nm 的银薄膜退火后所得纳米颗粒阵列随着金属纳米颗粒间距的减小,即颗粒面密度的增加,其消逝波长峰值逐渐红移,表明相邻银纳米颗粒间的耦合作用明显增强。当阵列面密度分别为 6.88×10^9 、 9.56×10^9 、 $1.25 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 时,LSP 共振波长分别为 434、439、447 nm。当面密度从 $4.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 增加至 $7.13 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时,即对应沉积厚度为 6 nm 的样品,其 LSP 共振波长从 443 nm 红移至 452 nm。但实际制备较小尺寸的单银纳米颗粒较难实现,仅对比扫描电镜观测、FDTD 仿真的单颗粒吸收、散射及消光行为,发现模拟尺寸接近 32 nm 的银颗粒吸收峰值为 431 nm,与消光峰值波长吻合;同时,单颗粒的 LSP 共振波长短于阵列结构激发 LSP 的共振波长,间接表明当面密度增大时,有耦合作用的银纳米颗粒阵列的 LSP 共振波长将发生红移。

4 结 论

利用磁控溅射镀膜技术和快速热退火方法,改变退火温度和沉积厚度等工艺参量,制备了尺寸较小、密度较高且在一定区间可控的银纳米颗粒阵列。测试远场光学反射和透射谱可知,当银纳米颗粒阵列的面密度增大时,反映 LSP 特性的共振波长红移,且随着共振强度的增加而增大,这主要是金属纳米颗粒间距减小、等离子激元的耦合增强导致的。经远场光学行为数值变换得到表征 LSP 特性的归一化吸收、散射及消光谱,所观测到的银纳米颗粒阵列 LSP 波长变化规律与先前采用的理论预测结果一致,这证明了所提理论方法的可行性和有效性。同时,该方法弥补了采用

FDTD 理论难以模拟实际获得金属纳米颗粒阵列的不足,为从实验上更方便、快捷地分析金属纳米颗粒阵列的 LSP 特性提供了有效路径。

参 考 文 献

- [1] Chong N S, Donthula K, Davies R A, et al. Significance of chemical enhancement effects in surface-enhanced Raman scattering (SERS) signals of aniline and aminobiphenyl isomers[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2015, 81: 22-31.
- [2] Fateixa S, Daniel-da-Silva A L, Nogueira H I S, et al. Raman signal enhancement dependence on the gel strength of Ag/hydrogels used as SERS substrates[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(19): 10384-10392.
- [3] Zhang W, Xu J, Ye W, et al. High-performance AlGaIn metal-semiconductor-metal solar-blind ultraviolet photodetectors by localized surface plasmon enhancement [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(2): 021112.
- [4] Beck F J, Polman A, Catchpole K R. Tunable light trapping for solar cells using localized surface plasmons [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(11): 114310.
- [5] Ihara M, Ikenouchi S, Taniguchi K, et al. Photoabsorption-enhanced dye-sensitized solar cells using localized surface plasmon of gold nanoparticles with 16-mercapto hexadecanoic acid[C]//2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, June 19-24, 2011, Seattle, WA, USA. New York: IEEE Press, 2011: 881-885.
- [6] Lee K L, Hsu H Y, You M L, et al. Highly sensitive aluminum-based biosensors using tailorable Fano resonances in capped nanostructures[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44104.

- [7] Bi N, Hu M H, Zhu H Y, et al. Determination of 6-thioguanine based on localized surface plasmon resonance of gold nanoparticle[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013, 107: 24-30.
- [8] Thioune N, Lidgi-Guigui N, Cottat M, et al. Study of gold nanorods-protein interaction by localized surface plasmon resonance spectroscopy[J]. *Gold Bulletin*, 2013, 46(4): 275-281.
- [9] Bezares F J, Caldwell J D, Glembocki O, et al. The role of propagating and localized surface plasmons for SERS enhancement in periodic nanostructures[J]. *Plasmonics*, 2012, 7(1): 143-150.
- [10] Kaneta A, Fujimoto R, Hashimoto T, et al. Instrumentation for dual-probe scanning near-field optical microscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(8): 083709.
- [11] Vasconcelos T L, Archanjo B S, Fragneaud B, et al. Tuning localized surface plasmon resonance in scanning near-field optical microscopy probes[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 6297-6304.
- [12] Zhu Q F, Li P G, Gao N, et al. Deducing localized surface plasmon properties through analysis of the far-field optical spectra[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(1): 015108.
- [13] Sun Q C, Ding Y C, Goodman S M, et al. Copper plasmonics and catalysis: role of electron-phonon interactions in dephasing localized surface plasmons[J]. *Nanoscale*, 2014, 6(21): 12450-12457.
- [14] Ellens A, Andres H, ter Heerdt M L H, et al. Spectral-line-broadening study of the trivalent lanthanide-ion series. II. The variation of the electron-phonon coupling strength through the series[J]. *Physical Review B*, 1997, 55(1): 180-186.
- [15] 张会均, 黄凯, 高娜, 等. 不同衬底上 Au 纳米颗粒制备及其光学特性[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2013, 52(3): 316-320.
Zhang H J, Huang K, Gao N, et al. The preparation and optical properties of Au nanoparticles on different substrates[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2013, 52(3): 316-320.
- [16] 周榆. 银纳米颗粒的可控制备与性能研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018: 316-320.
Zhou Y. The controllable preparation and properties of silver nanoparticles[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018: 316-320.
- [17] 王鹤. 金属纳米颗粒局域表面等离子激元与界面之间的 Fano 干涉行为研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018: 37-42.
Wang H. Investigation of Fano interference between the localized surface plasmon scattering and the interface reflection[D]. Xiamen: Xiamen University, 2018: 37-42.