

周期性银纳米颗粒阵列的光学特性

万巍, 陈湛旭*, 陈泳竹, 陈耿炎, 林家勇

广东技术师范大学光电工程学院, 广东 广州 510665

摘要 利用剪裁的纳米球掩模沉积技术制备了周期性的银纳米颗粒与银纳米孔阵,并探讨了相关纳米结构的光学特性。先在玻璃基片上制备六角密排的聚苯乙烯纳米球作为掩模,然后利用电子束蒸镀银金属,在超声中去掉掩模,最终可以获得周期性的银纳米三角颗粒。若在蒸镀银金属前先对聚苯乙烯纳米球进行氧等离子体刻蚀,可以获得周期性的银纳米孔阵。测量上述银纳米颗粒与银纳米孔阵中纳米银的透射谱,对其表面等离子体共振特性进行了分析。同时,利用三维时域有限差分方法对相关纳米结构的光吸收特性进行了数值模拟,理论模拟与实验结果基本相符。

关键词 光电子学; 表面等离子体激元; 纳米球掩模; 银纳米颗粒; 银纳米孔阵

中图分类号 O484.4+1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.132501

Optical Properties of Periodic Silver Nanoparticle Arrays

Wan Wei, Chen Zhanxu*, Chen Yongzhu, Chen Gengyan, Lin Jiayong

*School of Optoelectronic Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510665, China*

Abstract Periodic silver nanoparticles and nanohole arrays were prepared through tailored nanosphere lithography, and the optical properties of the fabricated nanostructures were investigated. First, a hexagonal close-packed monolayer comprising polystyrene (PS) nanospheres was made on a glass substrates as a mask. Then, the silver film was deposited in the voids between the nanospheres using an electron beam evaporator. After deposition, the PS nanospheres were removed, affording an array of silver nanoparticles. If the PS nanospheres were tailored through reactive-ion etching prior to the silver deposition step, the nanoparticles merged with the adjacent particles and produced periodic silver nanohole arrays. A series of nanostructures were prepared, and their surface plasmon resonance characteristics were analyzed by measuring the transmission spectra. The optical properties of the related nanostructures were numerically simulated using the finite difference time domain, the results of which were consistent with those of the experiments.

Key words optoelectronics; surface plasmon polariton; nanosphere lithography; silver nanoparticles; silver nanohole arrays

OCIS codes 250.5403; 350.4238; 160.4236

1 引言

贵金属表面存在大量的自由电子,当光照射到金属表面时,金属表面的自由电子在入射光波的作用下呈周期性涨落,引发集体振荡,产生表面等离子体(SPs)^[1]。当金属表面自由电子的固有频率与入

射光波的频率相同时,入射光的能量被大量耦合进入金属纳米结构中,导致纳米结构表面的局域电磁场大幅增加,从而产生强烈的吸收峰,称为表面等离子体共振(SPR)现象^[2]。

周期性金属纳米结构对入射光感应产生 SPR 效应可以诱发许多特殊的光学现象^[3],例如金属纳

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-01-16; 录用日期: 2019-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61475038, 11504058)、广州市科技计划项目(201804010175)、广州市高校创新创业教育项目(201709T34)、广东技术师范学院自然科学基金(1721732)

* E-mail: gsczx@gpnu.edu.cn

米结构有着极强的近场增强特性,可以使许多光学过程的效率得到显著的提高,目前已经被广泛应用于发光二极管^[4-9]、生物传感^[10-11]、异常光学透射^[12-13]、光开关^[14]、拉曼增强^[15-16]等领域。此外,由于金属纳米结构的几何形状和周围的介质对于SPR特性(如SPR峰位、电场增强等)的影响很大,因此可以通过调节纳米结构的几何形状来控制SPR特性^[17-20]。常见的制备和调控金属纳米结构的技术包括电子束刻蚀^[21]、纳米压印^[22]和纳米球刻蚀^[23]等,其中纳米球刻蚀技术具有成本低、工艺简单和能够大面积制备等优点,从而受到广泛关注。

本文利用纳米球掩模刻蚀技术制备银纳米颗粒和银纳米孔阵,并对金属银纳米结构的特性进行研究。先在玻璃衬底上制备六角密排的聚苯乙烯(PS)纳米球作为掩模,然后利用电子束蒸镀银金属,在超声中去掉掩模可以获得周期性的银纳米三角颗粒。通过控制氧等离子体刻蚀时间,获得不同尺寸的PS纳米球掩模,使纳米颗粒不断增大,最终形成纳米孔阵结构,并测定这些不同银纳米结构的透射谱。通过三维时域有限差分方法(FDTD)对相关的金属纳米结构进行了模拟仿真与计算,并对其SPR特性进行了分析。理论分析与实验结果基本一致,为相关纳米结构的进一步研究提供参考。

2 实验方法

采用直径约为450 nm的自制PS纳米球作为掩模,以石英片作为衬底。先将石英衬底用浓硫酸清洗,然后用氧离子刻蚀机清洗,使其表面亲水;另将PS胶体纳米球悬浮液混合一定体积的乙醇溶液并超声约10 min。实验中,先在去离子水的表面滴入PS胶体微球溶液,然后滴入表面活性剂(十二烷基硫酸钠溶液)改变水的表面张力,使原先分散排布的PS胶体微球聚集一起,形成单层密排的纳米球薄膜,最后用石英衬底将此膜捞起,从而在衬底上形成二维六角密排的纳米球结构。

为了控制纳米金属颗粒和纳米孔阵的尺寸,可以利用氧等离子体刻蚀PS小球,氧等离子体刻蚀的时间越长PS小球的尺寸越小。实验先采用反应离子刻蚀系统(Ciric-200,聚昌科技股份有限公司,中国台湾)刻蚀PS纳米球,接着利用电子束溅射蒸镀约30 nm的银膜覆盖在含有PS小球的表面,然后在氯仿中超声去除PS小球,从而获得银金属纳米颗粒结构和孔阵结构。制作完金属纳米结构后,为了确定金属纳米结构样品的共振波长,使用紫外-可

见-近红外分光光度计(Lambda900,珀金埃尔默股份有限公司,美国)测量样品的透射谱,测量用的光源为无偏振的宽波长光源。

3 分析与讨论

图1为实验制备的单层PS微球膜的扫描电子显微镜(SEM)图。从图1可以看出,PS纳米球基本是六角密排,周期性较好。图2(a)~(d)为使用氧等离子体刻蚀纳米球时间分别为7、11、17、21 s,之后沉积30 nm银膜,然后去掉PS纳米球掩模获得的不同金属纳米结构。通过增加氧等离子体的刻蚀时间,纳米球的尺寸逐步变小,可以获得周期为450 nm的银纳米金属颗粒和纳米孔阵结构。由结果可知,开始时小球的尺寸较大,此时得到的是三角形的纳米金属颗粒,随着刻蚀的时间变长,这些纳米金属颗粒继续变大并逐渐连在一起,最后形成纳米金属孔阵结构。由图2可知,在氧等离子体刻蚀时间为7 s时得到的是纳米三角颗粒,粒子的尺寸大部分在70~140 nm,平均尺寸约为110 nm;当刻蚀时间为11 s时,获得比较大的纳米颗粒和类似“领结”的纳米颗粒,所形成的纳米孔阵轮廓的直径约为410 nm;随着刻蚀时间变长,这些纳米三角颗粒和“领结”颗粒逐渐变大,当刻蚀时间为17 s时,这些“领结”基本连在一起形成金属纳米孔阵结构,纳米孔阵的直径约为370 nm;当刻蚀时间为21 s时,纳米孔阵的孔径进一步变小,孔阵变得更加规则,平均直径约为300 nm。

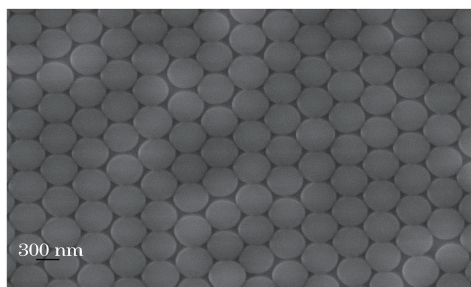


图1 直径为450 nm的聚苯乙烯纳米球的扫描电镜图
Fig. 1 SEM image of polystyrene spheres with diameter of 450 nm

图3是对应样品的透射谱。对于足够薄的金属纳米结构而言,其透射率的波谷对应的是SPs的共振吸收位置^[24-26]。如图3所示,当氧等离子体刻蚀时间为7 s时,得到的结构主要是纳米金属颗粒,在610 nm附近有一个比较宽的谷,可以认为在此处金属颗粒引起的吸收最大,即由金属银颗粒的局域等离子体(LSPR)谐振吸收引起的。该谷比较宽,一般认为是金属纳米颗粒的大小不一所致。当氧等

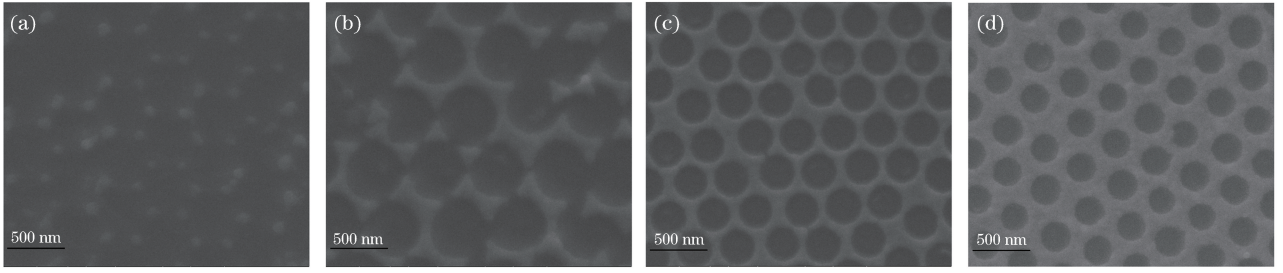


图2 不同氧等离子体刻蚀时间制备的金属银纳米结构扫描电镜图。(a)刻蚀时间为7 s获得的纳米三角颗粒;(b)刻蚀时间为11 s获得的比较大的纳米颗粒和类似“领结”的纳米颗粒;(c)刻蚀时间为17 s获得的粗糙纳米孔阵结构;(d)刻蚀时间为21 s获得的规则纳米孔阵结构

Fig. 2 SEM images of metal silver nanostructures prepared by oxygen plasma etching for different times. (a) Triangle nanoparticles array prepared by etching for 7 s; (b) connected “bow-tie” nanoparticles and triangle large nanoparticle array prepared by etching for 11 s; (c) rough nanohole array prepared by etching for 17 s; (d) ordered nanohole array prepared by etching for 21 s

离子体刻蚀时间为11 s时,得到的结构仍然以大金属颗粒为主,但已经有了孔阵的雏形,如图3所示,在690 nm附近有一个谷,所以该结构的金属吸收应该在690 nm附近。随着刻蚀时间增加,所得纳米颗粒变大,金属银颗粒的LSPR谐振吸收峰向长波长移动^[27]。当氧等离子体刻蚀时间为17 s时,纳米结构已经形成粗糙的孔阵结构,由图3可以看出,在590 nm附近有一个吸收峰,所以该结构的金属等离子体吸收波长应该在600 nm附近。而当氧等离子体刻蚀时间为21 s时,则形成了比较规则的孔阵结构,该结构的透射率在波长为620 nm附近有一个比较明显的SPR吸收峰。

下面讨论波长为620 nm的SPR吸收峰的物理起源。当氧等离子体刻蚀时间为21 s时,由于周期性金属孔阵已经形成,入射光被周期性的纳米结构散射,使得入射光波矢获得动量的补偿,进而转化为表面等离子体激元(SPP)模式。对于具有二维周期性纳米结构的金属薄膜,所激发SPP模式的波矢可以表示为^[28-31]

$$\mathbf{k}_{\text{sp}} = \mathbf{k}_x \pm m\mathbf{G}_x \pm n\mathbf{G}_y, \quad (1)$$

式中: \mathbf{k}_{sp} 为所激发的表面等离子体波矢;入射光波矢在 x 方向的分量为 $\mathbf{k}_x = \mathbf{k}_0 \sin \theta$, \mathbf{k}_0 为入射光在真空中的波矢, θ 为入射角; \mathbf{G}_x 和 \mathbf{G}_y 分别为周期性金属孔阵的倒格矢; m 和 n 分别为整数。当金属的厚度足够薄,所激发的等离子体模式满足耦合方程^[25]

$$\tanh(S_2 t) = -\frac{\epsilon_m S_2 (\epsilon_{d1} S_3 + \epsilon_{d2} S_1)}{\epsilon_{d1} \epsilon_{d2} S_2 + \epsilon_m^2 S_1 S_3}, \quad (2)$$

式中: S_1 、 S_2 、 S_3 分别满足 $S_1^2 = k_x^2 - \epsilon_{d1} k_0^2$, $S_2^2 = k_x^2 - \epsilon_m k_0^2$, $S_3^2 = k_x^2 - \epsilon_{d2} k_0^2$,其中 \mathbf{k}_x 为 \mathbf{k}_{sp} 的倒格矢空间在传播平面上的分量, k_0 为真空中的波数; t 为

金属膜的厚度; ϵ_m 为金属介电常数; ϵ_{d1} 为金属上表面介质的介电常数; ϵ_{d2} 为金属下表面介质的介电常数。对于本实验的样品, $\epsilon_{d1} = 1$ (空气), $\epsilon_{d2} = 2.25$ (玻璃)。根据Drude模型,可以计算得到 $m, n = \pm 1, 0$ 和 $m, n = 0, \pm 1$ 垂直入射时,所激发的SPs波长约为700 nm,与实验获得的620 nm略有差异。Murray等^[27]已经证明,周期纳米孔阵的光学共振主要由入射光SPP模式引起。单个金属纳米孔阵具有LSPR特性,因此周期性的金属纳米结构的光学吸收主要是由SPP和LSP共振吸收引起^[24],从而导致理论计算与实验略有差别。分别测量所得纳米金属结构的透射率,如图3所示,图中分别为纳米三角颗粒、类“领结”的纳米颗粒、“粗糙”纳米孔阵和“规则”纳米孔阵的透射率。此外,从图3的透射谱可以看出,纳米颗粒与纳米孔阵的光学共振没有关联,纳米颗粒主要为LSP共振吸收,当纳米颗粒变大时共振波长红移,例如从610 nm移动到690 nm

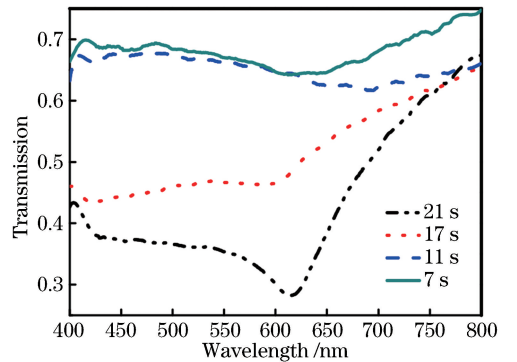


图3 不同氧等离子体刻蚀时间制备的纳米银结构的透射率
Fig. 3 Optical transmission spectra of metalsilver nanostructures prepared by oxygen plasma etching for different times

左右;而形成孔阵时,光学共振主要是 SPP 模式,共振波长蓝移到 620 nm 左右。因此,对于由纳米颗粒变为金属纳米孔阵的物理过程,其主导的共振模式由 LSP 变为 SPP,对应的共振波长是非连续的,是一个突然转变的过程。

为了验证上述实验,利用 FDTD 模拟实验样品的透射、反射从而计算样品 SPs 的吸收情况。由于中间结构(例如类“领结”的纳米颗粒和“粗糙”纳米孔阵)包含的纳米颗粒种类比较多,模拟起来比较困难,主要模拟纳米三角颗粒(氧等离子体刻蚀 7 s)和“规则”纳米孔阵(氧等离子体刻蚀 21 s)的情况,模拟结果如图 4 所示。由图 4 可知,实验所得金属纳米颗粒和孔阵的透射率的谷和其模拟计算所得的吸收峰基本一致,因此可以认为实验所得透射率的谷对应的就是该结构的 SPs 共振频率。例如,对于金属纳米颗粒,模拟计算所得的透射率的谷和吸收峰大约为 600 nm,这与实验所得在 610 nm 之间有一个比较宽的谷基本一致,实验的谷比模拟的谷要宽和平坦些,这是实验制备的金属纳米颗粒尺寸大小不一致所致,从而使得谱线变宽。而对于“规则”纳米孔阵,模拟所得的透过率的谷在 600 nm 左右,而实验所得透过率的谷在 620 nm 左右,在实验误差范围内也是吻合的。此外,从计算所得的吸收谱线来看,纳米三角颗粒的 SPs 吸收比纳米孔阵结构的 SPs 吸收要强得多。

图 5 为模拟计算纳米三角颗粒和“规则”纳米孔阵金属结构在共振峰位波长的一个晶胞尺寸的电场

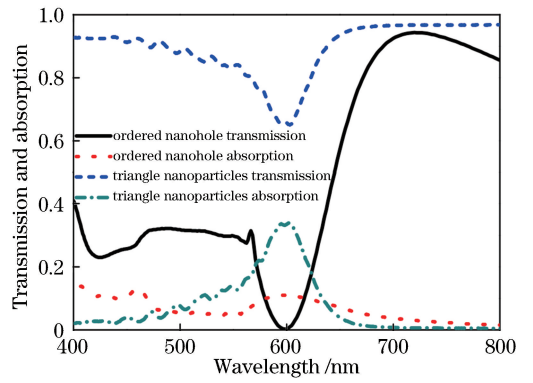


图 4 模拟计算纳米三角颗粒和“规则”纳米孔阵金属结构的透过率和吸收率谱线

Fig. 4 Simulated transmission and absorption spectra of triangle nanoparticle array and ordered nanohole array

分布,图中用色度条表示其电场的大小。其中,图 5 (a)为纳米三角颗粒阵列表面电场分布,由图可知,在纳米颗粒的尖端上,电场得到极大增强,电场增强达到 500 左右。图 5(b)是“规则”纳米孔阵金属结构表面电场分布,电场增强位置位于圆孔边缘,增强强度约为 50。增强位置集中于圆孔边缘,并不是均匀分布,而是集中在圆孔 x 方向的两端,这是入射光沿 x 方向激发造成的,说明在电场偏振方向上金属孔的边缘聚集了大量的电荷。对于金属纳米孔阵结构,会同时激发表面等离激元和局域表面等离激元^[24],因此根据(2)式计算出来的 SPs 波长与实验结果略有差异。此外,由图 5 可知,纳米颗粒的电场强度远大于纳米孔阵激发的电场强度,这与图 4 结果一致。

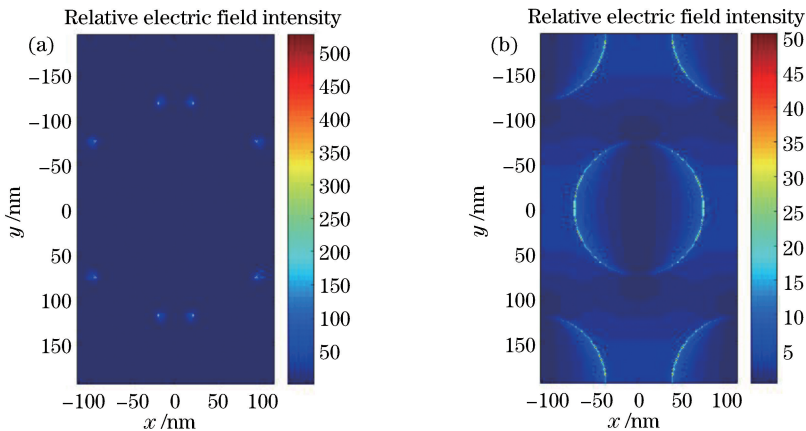


图 5 模拟计算所得共振峰位波长处的与玻璃衬底接触 x - y 平面的金属纳米结构的电场分布图。

(a) 纳米三角颗粒阵列表面电场分布; (b) 纳米孔阵金属结构表面电场分布

Fig. 5 Simulated electric field distributions of metal nanostructures with x - y plane contacting glass substrate at resonant wavelength. (a) Electric field distribution of triangle nanoparticle array; (b) electric field distribution of nanohole array of metal structure

4 结 论

利用尺寸可控的纳米球掩模刻蚀技术,制备了周期性的纳米三角颗粒和纳米孔阵结构。由于不同的纳米结构会激发不同的等离子体模式,因此表现出不同的光学特性。实验研究了周期性金属纳米颗粒、随着纳米颗粒逐步变大最后形成金属纳米孔阵等纳米结构的透射谱,结果表明,其共振波长是非连续的,是一个突然转变的过程。利用 3D-FDTD 对相关金属纳米结构进行模拟仿真与计算,分析了相关金属纳米结构的 SPR 特性,该研究是相关纳米结构应用前的特性分析,可促进其在相关领域的应用。

参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Wang K, Yang G, Long H, *et al.* Fabrication and optical properties of Au nanoparticle array [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6): 3862-3867.
王凯, 杨光, 龙华, 等. 金纳米颗粒的有序制备及其光学特性 [J]. *物理学报*, 2008, 57(6): 3862-3867.
- [3] Xu D H, Hu Q, Peng R W, *et al.* Plasmonic propagation and spectral splitting in nanostructured metal wires [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(9): 097803.
徐地虎, 胡青, 彭茹雯, 等. 金属微结构纳米线中等离激元传播和分光特性 [J]. *物理学报*, 2015, 64(9): 097803.
- [4] Son K R, Lee B R, Jang M H, *et al.* Enhanced light emission from AlGaIn/GaN multiple quantum wells using the localized surface plasmon effect by aluminum nanoring patterns [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(1): 30.
- [5] Zhang C, Tang N, Shang L L, *et al.* Local surface plasmon enhanced polarization and internal quantum efficiency of deep ultraviolet emissions from AlGaIn-based quantum wells [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2358.
- [6] Shin H W, Son K R, Kim T G. Localized surface plasmon-enhanced light emission using platinum nanorings in deep ultraviolet-emitting AlGaIn quantum wells [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 88-91.
- [7] Wang J X, Yan J C, Guo Y N, *et al.* Recent progress of research on III-nitride deep ultraviolet light-emitting diode [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2015, 45(6): 067303.
王军喜, 闫建昌, 郭亚楠, 等. 氮化物深紫外 LED 研究新进展 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45(6): 067303.
- [8] Lee I H, Jang L W, Polyakov A Y. Performance enhancement of GaN-based light emitting diodes by the interaction with localized surface plasmons [J]. *Nano Energy*, 2015, 13: 140-173.
- [9] Hong S H, Kim J J, Kang J W, *et al.* Enhanced optical output of InGaIn/GaN near-ultraviolet light-emitting diodes by localized surface plasmon of colloidal silver nanoparticles [J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(38): 385204.
- [10] Shen Y, Zhou J H, Liu T R, *et al.* Plasmonic gold mushroom arrays with refractive index sensing figures of merit approaching the theoretical limit [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2381.
- [11] Mayer K M, Hafner J H. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3828-3857.
- [12] Li D, Qin L, Xiong X, *et al.* Exchange of electric and magnetic resonances in multilayered metal/dielectric nanoplates [J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 22942-22949.
- [13] Bao Y J, Peng R W, Shu D J, *et al.* Role of interference between localized and propagating surface waves on the extraordinary optical transmission through a subwavelength-aperture array [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(8): 087401.
- [14] Ahmad H, Ruslan N E, Ali Z A, *et al.* Ag-nanoparticle as a Q switched device for tunable C-band fiber laser [J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 85-90.
- [15] Lee S J, Baik J M, Moskovits M. Polarization-dependent surface-enhanced Raman scattering from a silver-nanoparticle-decorated single silver nanowire [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(10): 3244-3247.
- [16] Jeong D H, Zhang Y X, Moskovits M. Polarized surface enhanced Raman scattering from aligned silver nanowire rafts [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2004, 108(34): 12724-12728.
- [17] Serrano A, Rodríguez de la Fuente O, García M A. Extended and localized surface plasmons in annealed Au films on glass substrates [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(7): 074303.
- [18] Zhou Z T, Yang L, Yao J, *et al.* Fabrication of multilayer metal-dielectric nanoparticles and their

- optical properties[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 188104.
- 周振婷, 杨理, 姚洁, 等. 多层金属纳米点阵的制备及其光学性质的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 188104.
- [19] Li R, Zhu Y B, Di Y, *et al.* Fabrication of ordered Au nanoparticles array and its optical absorption properties[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(19): 198101.
- 李烧, 朱亚彬, 狄月, 等. 有序金纳米颗粒阵列的制备及光吸收特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(19): 198101.
- [20] Kelf T A, Sugawara Y, Cole R M, *et al.* Localized and delocalized plasmons in metallic nanovoids [J]. *Physical Review B*, 2006, 74(24): 245415.
- [21] Wierer J J, Krames M R, Epler J E, *et al.* InGaN/GaN quantum-well heterostructure light-emitting diodes employing photonic crystal structures [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(19): 3885-3887.
- [22] Chang S J, Shen C F, Chen W S, *et al.* Nitride-based light emitting diodes with indium tin oxide electrode patterned by imprint lithography [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(1): 013504.
- [23] Kong L Q, Zhang C J, Huang S L. Effect of Cr position and metal deposition direction on two-dimensional Ag nanoparticle array structure during nanosphere lithography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 036102.
- 孔令琦, 张春婧, 黄胜利. 铬过渡层位置及金属沉积角度对纳米球刻蚀法制备二维银纳米点阵结构的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(3): 036102.
- [24] Parsons J, Hendry E, Burrows C P, *et al.* Localized surface-plasmon resonances in periodic nondiffracting metallic nanoparticle and nanohole arrays [J]. *Physical Review B*, 2009, 79(7): 073412.
- [25] Braun J, Gompf B, Kobiela G, *et al.* How holes can obscure the view: suppressed transmission through an ultrathin metal film by a subwavelength hole array [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(20): 203901.
- [26] Chen Z X, Wan W, Zhang B J, *et al.* Enhanced light emission from InGaN/GaN quantum wells by using surface plasmonic resonances of silver nanoparticle array[J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(12): 128504.
- [27] Murray W A, Astilean S, Barnes W L. Transition from localized surface plasmon resonance to extended surface plasmon-polariton as metallic nanoparticles merge to form a periodic hole array [J]. *Physical Review B*, 2004, 69(16): 165407.
- [28] Gordon R, Brolo A G, Sinton D, *et al.* Resonant optical transmission through hole-arrays in metal films: physics and applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2009, 4(2): 311-335.
- [29] Xiong C, Zhang B, Kang X N, *et al.* Diffracted transmission effects of GaN and polymer two-dimensional square-lattice photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23684-23689.
- [30] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, *et al.* Surface plasmon polaritons and their role in the enhanced transmission of light through periodic arrays of subwavelength holes in a metal film [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(10): 107401.
- [31] Mochizuki Y, Fujii M, Hayashi S, *et al.* Enhancement of photoluminescence from silicon nanocrystals by metal nanostructures made by nanosphere lithography [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(1): 013517.