

基于表面等离激元光镊的新型纳米热源研究

沈军峰¹ 张翠娇¹ 张聿全¹ 王 健¹ 方 晖¹ 闵长俊¹ 袁小聪²

(¹南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300071)
(²深圳大学光电工程学院微纳光学研究所, 广东 深圳 518060)

摘要 针对纳米尺度热现象研究的需求,基于表面等离激元光镊对金纳米颗粒的动态操控能力,设计了一种实时、动态、可控的纳米热源。利用有限元法对光镊系统中金纳米颗粒的光热效应与表面等离激元电磁场强度的关系进行了模拟,阐明了由于表面等离激元和局域表面等离激元的耦合作用导致的电磁场能量聚集和增强,以及同时实现的金属纳米颗粒的光热效应;分析了在该光镊系统捕获金属颗粒过程中颗粒所产生的热效应,并由此得到了实时控制纳米热源热功率的方法。在理论研究的基础上设计实验并证实了该光镊系统中金纳米颗粒基于光热效应的加热能力。结合表面等离激元光镊系统对纳米热源的精确定位操控能力,该系统为纳米尺度热现象的研究提供了灵活而可靠的手段。

关键词 表面光学;表面等离基元学;表面等离激元光镊;金纳米颗粒;纳米热源

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0924001

Study on Novel Nano-Heating Source Based on Plasmonic Nanotweezers

Shen Junfeng¹ Zhang Cuijiao¹ Zhang Yuquan¹ Wang Jian¹ Fang Hui¹
Min Changjun¹ Yuan Xiaocong²

¹*Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering,
Nankai University, Tianjin 300071, China*

²*Institute of Micro and Nano Optics, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University,
Shenzhen, Guangdong 518060, China*

Abstract To meet demands of researches on nanoscale photothermal effect, a real-time dynamic controllable nano-heating source is demonstrated, which is based on the robust dynamic manipulation of gold nanoparticles by plasmonic nanotweezers. Based on finite element method, the relationship between photothermal effect of gold nanoparticles and the strength of surface plasmon polariton electromagnetic field is elaborated by numerical simulations. The confinement and enhancement of electromagnetic field induced by hybridization of surface plasmon polariton and localized surface plasmon polariton with the nanotweezer system is explained and then the photothermal effect during the progress of nanoparticle capturing are analyzed. Further, the methods to real-time control of its power are delivered. To validate the heating ability of gold nanoparticles in the plasmonic nanotweezers, experiments are implemented. Integrated with plasmonic nanotweezers, the precise manipulation of metal nano-heating source supports a reliable and flexible method for the research of nanoscale thermal effect.

Key words optics at surfaces; plasmonics; plasmonic nanotweezers; gold nanoparticles; nano-heating source

OCIS codes 240.6680; 120.6810; 160.4760

1 引言

表面等离激元(SPP)光学揭示了电磁波与金属

纳米结构上传导电子之间相互共振作用的过程,是研究纳米尺度下光与物质相互作用的重要途径之

收稿日期: 2014-03-10; **收到修改稿日期**: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61138003,61036013)、国家自然科学基金青年项目(11204141)、国家自然科学基金面上项目(61377052)、天津市科委重点项目(11JCZDJC15200,12JCYBJC31000)、教育部博士点基金(20130031110036)

作者简介: 沈军峰(1984—),男,博士研究生,主要从事表面等离激元方面的研究。E-mail: junfengs@126.com

导师简介: 袁小聪(1963—),男,博士,教授,主要从事微纳光学方面的研究。E-mail: xcyuan@szu.edu.cn(通信联系人)

—^[1-2]。金属纳米结构可以通过与光的耦合作用将光场局域到纳米结构周围,从而形成亚波长尺度的电磁场增强区域^[3-6]。近年来,国内外对金属纳米结构中表面等离激元场增强和场局域的独特光学特性的广泛重视极大地推动了超材料、表面增强拉曼光谱技术、超分辨生物成像和高灵敏生物传感等众多相关领域的研究工作^[7-11]。金属纳米结构的光热效应与表面等离激元的场特性密切相关,其光吸收特性导致的光致热效应也得到了充分关注^[12-15]。鉴于金属纳米颗粒作为纳米热源在光热消毒、光热治疗工作中的良好应用前景,国内外生物医学和纳米科技等领域的科研人员已经展开了与之对应的研究工作^[16-18]。然而目前对于金属纳米热源的实时、动态操控的实现还没有提出精确而有效的手段,因此针对金属纳米结构光热效应的实时、动态调控的研究亟需进行深入的探索。

表面等离激元光镊是基于径向偏振光入射到金属纳米薄膜结构的一种突破衍射极限的新型光镊系统^[19-21]。对于传统激光光镊而言,由于衍射极限的存在,聚焦光斑的大小直接限制了对衍射极限尺寸以下颗粒的稳定捕获与操纵。与传统光镊相比,由于径向偏振光紧聚焦激发的表面等离激元将电磁场局域到亚波长尺寸,得到了更小、更强的聚焦场,从而为光镊系统提供了更大的电磁场梯度分布和更小的光阱尺寸,使得该光镊系统对于纳米尺度的颗粒操控有着无可比拟的优势。由于表面等离激元的非辐射特性^[22],其能量局域在金属纳米结构附近的近场范围内,而且不通过辐射传播到远场。因而该光镊系统对处于其作用范围内的纳米颗粒,尤其是金属纳米颗粒没有传播方向上的散射力^[23-24]。相比于传统激光光镊由于散射力过大而不易捕获金属颗粒,该光镊系统更适合于捕获、操控散射能力较强的金属纳米颗粒。

基于表面等离激元光镊系统对金属纳米颗粒的稳定捕获和动态操控能力,本文提出了利用该光镊系统对金属纳米颗粒进行操控以构建可控纳米热源的方法。位于电磁场中的金属纳米颗粒可以产生局域表面等离激元(LSP),并与金属膜上的表面等离激元耦合,进而加强了电磁场的局域性和增强能力。其局域场分布为纳米热源操控提供了更高的稳健性。考虑到金属纳米颗粒的光吸收特性,在水溶液中的金属纳米颗粒与光场相互作用时会作为纳米热源存在。由于周围液态环境和金属纳米颗粒热传导能力的差异,处于耦合场中的金属纳米颗粒对周围

水环境的加热会导致颗粒周围纳米蒸气气泡的产生。类似的光热效应研究工作证实了金属纳米颗粒作为纳米热源的可行性^[16]。在此本文利用金属纳米颗粒加热其周围水溶液产生水蒸气这一现象,结合表面等离激元对周围环境变化的敏感性,通过验证表面等离激元共振角的变化证实了纳米颗粒作为热源的加热能力。

2 理论分析

表面等离激元光镊系统的结构示意图如图1所示。在高数值孔径(NA)物镜紧聚焦条件下,波长532 nm的径向偏振光(Quantum MPC6000)可以在厚度为45 nm的银膜(FIB蒸镀)表面激发表面等离激元,并通过相干叠加形成超衍射极限的电磁场虚拟探针^[25-27]。该虚拟探针具有很强的电磁场梯度分布,可以有效地捕捉纳米尺度的金属颗粒。光镊中表面等离激元场主要为纵向场分量,纵向场可以有效地极化被捕捉的直径100 nm的金颗粒(BBI Solutions, 10^{-6} M)并在颗粒周围形成能量高度聚集的局域表面等离激元,从而产生光致热效应。金属纳米颗粒在表面等离激元光镊中的受力分析、捕捉操控过程,已经在之前的工作中详细阐述^[23-24]。本文利用有限元法对动态纳米热源结构中的电磁场分布和金属纳米颗粒的光致热效应加以分析。

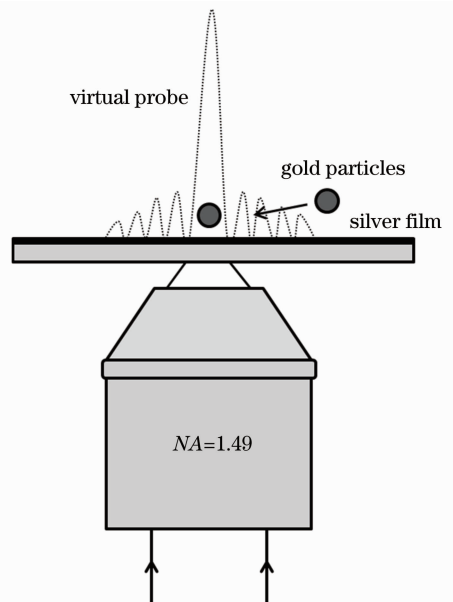


图1 表面等离激元光镊结构示意图

Fig. 1 Schematic of the plasmonic nanotweezers

根据理 Richards-Wolf 矢量衍射理论^[28-30],径向偏振光在银膜表面激发的表面等离激元的纵向分量为

$$\mathbf{E}_z(r, \varphi, z) = i2\mathbf{A} \int_0^{\theta_{\max}} d\theta [\cos^{1/2}(\theta) P(\theta) t_p(\theta) \sin^2 \theta J_0(k_{\text{sp}} r) \exp(izk_z)], \quad (1)$$

式中 \mathbf{A} 为与振幅有关的 z 向矢量, θ_{\max} 为紧聚焦所能提供的最大入射角, $t_p(\theta)$ 入射角为 θ 时的透射率, $J_0(x)$ 为第一类零阶贝塞尔函数, k_{sp} 和 k_z 分别为表面等离激元在横向和纵向的波矢, $P(\theta)$ 为相应的切趾函数。 k_{sp} 由金属膜表面激发表面等离激元的波矢匹配条件^[22] 决定:

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_D \epsilon_M}{\epsilon_D + \epsilon_M}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{match}}} \sin \theta_{\text{sp}}, \quad (2)$$

式中 ω 为入射光的频率, c 为真空中的光速, ϵ_D 为周围环境的介电常数, ϵ_M 为金属膜的介电常数, ϵ_{match} 为匹配层的介电常数, θ_{sp} 为表面等离激元的共振角。

依据实际实验条件, 给定利用有限元法进行模拟所需的参数如下: 入射光源为波长 532 nm 的径向偏振光, 银膜厚度为 45 nm, 最小网格精度为 0.1 nm, 有金颗粒存在时, 直径 100 nm 的金纳米颗

粒位于银膜上方 2 nm 处。在银膜表面, 由于表面等离激元相干叠加形成具有零阶贝塞尔函数分布的电磁场, 如图 2(a) 所示。其中由中心亮斑形成的电磁场虚拟探针的振幅半峰全宽为 184 nm, 约为激发波长的 1/3。在表面等离激元光镊的作用下金纳米颗粒被捕捉到电磁场的虚拟探针中心。在表面等离激元和局域表面等离激元的耦合作用下, 电磁场的能量局域到金纳米颗粒和银膜之间几十纳米的范围内。在模拟金颗粒距银膜表面 2 nm 处的电磁场的分布情况的基础上, 对金纳米颗粒的光热效应进行了定量计算。图 2(b) 是电磁场在颗粒与膜之间距银膜表面 1 nm 处的横向切面图。对比图 2(a) 和 (b) 可以发现, 由于金属膜表面等离激元与颗粒局域表面等离激元的耦合作用, 电磁场的振幅半峰全宽从 184 nm 收缩到了约 20 nm, 同时电场增强约 75 倍。

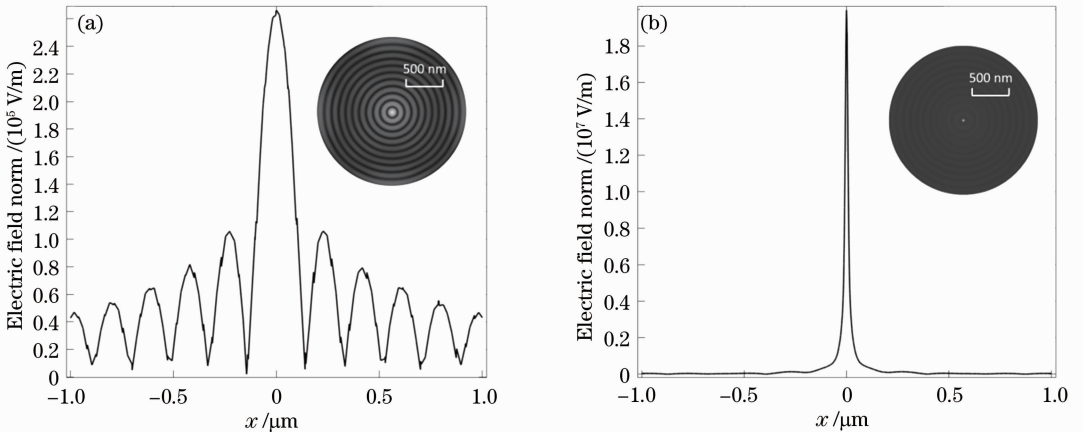


图 2 (a) 银膜表面激发的表面等离激元电磁场分布; (b) 银膜上表面等离激元与金颗粒的局域表面等离激元耦合后的电磁场分布(二维切面图是银膜上方 1 nm 处的横向电磁场分布)

Fig. 2 (a) Distribution of the electromagnetic field of surface plasmon polariton; (b) distribution of hybridized field generated by SPP in silver film and localized surface plasmon polariton of gold nanoparticles (the slice is transverse electromagnetic field distribution on cross sections at 1 nm above silver film)

在稳态条件下, 热传导由下述方程决定^[31]:

$$\nabla \cdot [\kappa(r) \nabla T(r)] = -p(r), \quad (3)$$

式中 $T(r)$ 是由功率密度为 $p(r)$ 的热源产生的温度场分布, $\kappa(r)$ 是与位置有关的热导率。

由于此处热源是由金纳米颗粒光吸收引起的焦耳效应^[31], 因此

$$p(r) = \frac{\omega}{2} \text{Im}[\epsilon_M(\omega)] |\mathbf{E}(r)|^2, \quad (4)$$

式中 ω 为入射光的频率, 金属介电常数是由电磁场

频率决定的, $\text{Im}[\epsilon_M(\omega)]$ 是金纳米颗粒在频率 ω 下的介电常数虚部, $\mathbf{E}(r)$ 是电磁场的振幅。

在光镊系统中, 金颗粒被稳定地捕获在金属膜附近。针对这种情况, 设定金颗粒距离金属膜表面 2 nm 进行分析。依据模拟结果给出的光镊系统中银膜-金纳米颗粒结构的电磁场分布, 对该光镊系统捕捉金属纳米颗粒过程中的光热效应进行了研究。

如图 3 所示,随着颗粒在光镊系统中横向位置的变化,金纳米颗粒的热功率与电磁场强度变化趋势保持一致。在虚拟探针中心位置,即颗粒稳定捕捉的位置,获得最大的热功率。在入射光功率为 2 mW 时,金属纳米颗粒的热功率为 $3.97 \mu\text{W}$ 。

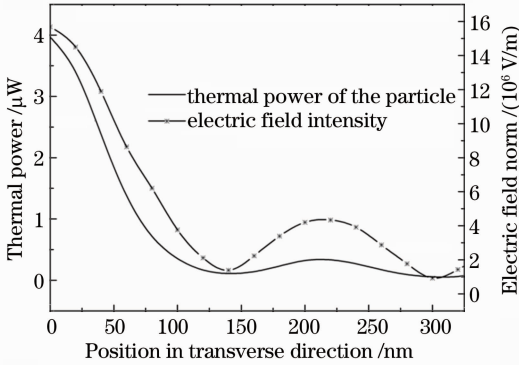


图 3 金纳米颗粒在银膜表面不同位置处 SPP 与 LSP 耦合场的电磁场强度与其热功率随其所处的横向位置的变化

Fig. 3 Charging of strength of hybridized SPP and LSP and thermal power versus transverse position when gold nanoparticles locate at different positions over silver film

对于不同大小的金属纳米颗粒而言,由于颗粒大小的改变将导致金属纳米颗粒共振频率的红移或者蓝移,从而影响确定入射波长条件下颗粒的吸收截面。为了明确颗粒大小对纳米热源光热转换能力的影响,在相同模拟条件下通过改变颗粒的大小对其变化规律进行了分析,结果如图 4 所示。

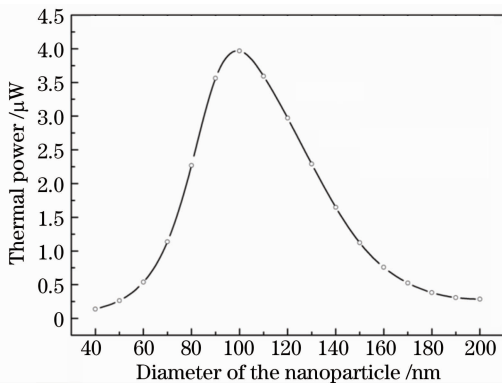


图 4 金纳米颗粒热功率与颗粒尺寸的关系

Fig. 4 Relationship between thermal power of gold nanoparticles and particle size

随着颗粒直径的增大,金纳米颗粒的热功率随之变化,并在颗粒直径为 100 nm 左右时达到最大;之后随着颗粒直径的进一步增大,其热功率逐渐降低。该结果与 Kawata 等^[32]关于金纳米颗粒的吸收

截面随颗粒直径变化的研究结果一致。

就理论而言,如(3)式所示,金属纳米颗粒的热功率可以通过调节入射光功率来控制,然而受到实际应用的限制,入射光功率不能无限制的增加,以免引起所研究的生物样品的结构损伤。另外,金属纳米颗粒的热吸收功率还与金属颗粒与金属膜之间的距离、颗粒大小有关。结合入射场输入功率的调节与金属颗粒和膜之间垫层厚度的控制以及颗粒大小的选择^[33],可以有效实现对纳米热源热功率的精确控制。

3 实验验证

为证实基于表面等离子激元光镊的纳米热源的可靠性,本文设计了纳米热源加热去离子水并在水中形成纳米蒸气气泡的光致热效应实验。

依据表面等离子激元激发的波矢匹配条件,银膜表面接触物质的介电常数和表面等离子激元共振角存在由(2)式决定的函数关系。因此,表面等离子激元被激发时,满足共振角的入射光耦合进银膜形成表面等离子激元,在反射光斑中产生对应能量耦合位置的暗环;而未被耦合的激光被银膜反射形成高反射光。通过观测反射光的强度分布,可以发现随着去离子水被加热成水蒸气,折射率从 1.33(液态)变为 1.0057(气态)左右,从而影响了表面等离子激元激发的波矢匹配条件,使得反射光斑上暗环的位置发生改变。对于入射波长为 532 nm 的径向偏振光,空气中表面等离子激元的激发共振角为 44° ,而水环境条件下激发共振角为 74.8° 。因此,随着表面等离子激元激发环境由空气到水的改变,暗环会从光斑上向外移动。由于数值孔径为 1.49 的物镜(Olympus, 100 \times)能提供最大为 79.37° 的入射角,因此水环境条件下暗环会移到光斑边缘。如图 5 所示,箭头所指的地方即为暗环所在的位置,图 5(a)为未滴加去离子水时,光镊系统在空气-银膜界面激发表面等离子激元所对应的暗环分布情况。在滴加含有 100 nm 金颗粒的去离子水之后,由于介电常数的改变,表面等离子激元共振角增大到 74.8° ,因此暗环的位置移动到反射光斑的边缘,如图 5(b)所示。当金属纳米颗粒被捕捉到虚拟探针中心之后,在入射光功率为 20 mW 的条件下加热 2 min,可以发现暗环又基本回到之前系统在空气中时所对应的位置,如图 5(c)所示,说明此时去离子水已被加热成水蒸气并引起了折射率的变化。根据相应的入射光功率的模拟结果,在入射光功率为 20 mW 时,金颗

粒的热功率分别为 $39.68 \mu\text{W}$ 。为了进一步确认纳米气泡的产生过程是由金纳米颗粒的光热效应引起的,对未加入金属纳米颗粒的去离子水在相同系统中、相同条件下激光加热 2 min,结果如图 5(d)所

示。暗环位置并未发生改变表明金属膜-去离子水界面附近的液相环境介电常数没有发生变化,这表明金颗粒的光热效应是产生纳米气泡的关键。

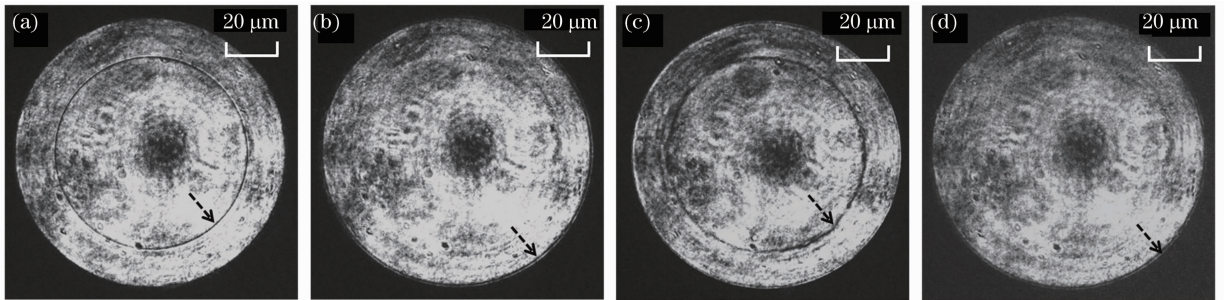


图 5 (a)银膜上表面为空气时产生的暗环分布;(b)滴加水溶液之后暗环分布;(c)对溶液中金颗粒加热 2 min 之后的暗环分布;(d)对没有金颗粒的溶液加热 2 min 之后的暗环分布

Fig. 5 (a) Distribution of dark ring when the surrounding environment is air; (b) distribution of dark ring after adding deionized water; (c) distribution of dark ring after heating gold nanoparticles for 2 min in the solution; (d) distribution of dark ring after heating the solution without gold nanoparticles for 2 min

在此必须注意到,整个纳米热源系统是基于表面等离子光镊系统的。由于光镊系统对金属纳米颗粒的动态操控能力和扫描定位能力,这样,纳米热源同样具备了原位加热能力和定位寻址加热能力。

4 结 论

表面等离子光镊系统可以实现对金属纳米颗粒的稳定捕捉、定位和扫描等操控。理论分析和实验验证结果表明整合光镊系统的实时、动态操控能力和金属纳米颗粒的光热效应,可以在实时条件下实现动态或者原位的纳米热源控制。这为实现光热传感、光热治疗的定量研究提供了可靠而灵活的手段,对纳米尺度热现象的研究工作有着重要的意义,在纳米制造和纳米加工等领域有着广泛的应用前景,其稳定、高效的光能转换能力在光热、光伏等应用领域也有着重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Y Wang, E W Plummer, K Kempa. Foundations of plasmonics [J]. *Advances in Physics*, 2011, 60(5): 799–898.
- 2 Peng Yang, Hou Jing, Huang Zhihe, *et al.*. Using surface plasmon resonance to control the reflection index of mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0124001.
彭 杨, 侯 静, 黄值河, 等. 表面等离子体共振控制镜面反射率[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0124001.
- 3 Zhang Xiaoyang, Zhang Tong, Hu A, *et al.*. Controllable plasmonic antennas with ultra narrow bandwidth based on silver nano-flags [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 153118.
- 4 Luo Tingjun, Wan Lingyu, Huang Jiqin, *et al.*. Shape optimization and analysis of sensing properties of localized surface plasmon resonances for triangle metal nanoparticles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0524002.

- 罗庭军, 万玲玉, 黄继钦, 等. 三角形金属纳米结构的局域表面等离子共振传感特性与优化分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0524002.
- 5 Xiaoyang Zhang, Anming Hu, Tong Zhang, *et al.*. Self-assembly of large-scale and ultrathin silver nanoplate films with tunable plasmon resonance properties [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(11): 9082–9092.
- 6 Huang Pinbo, Zou Wendong, Guo Fei, *et al.*. Analysis of surface plasmon polaritons standing wave field induced by interference Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1024003.
黄频波, 邹文栋, 郭 斐, 等. 干涉高斯光诱导的表面等离子体驻波场的分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1024003.
- 7 Zhang Shuang, Genov Dentcho A, Wang Yuan, *et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101(4): 47401.
- 8 Du Luping, Lei Danguan, Yuan Guanghui, *et al.*. Mapping plasmonic near-field profiles and interferences by surface-enhanced Raman scattering [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3064.
- 9 K J Moh, X C Yuan, J Bu, *et al.*. Radial polarization induced surface plasmon virtual probe for two-photon fluorescence microscopy [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(7): 971–973.
- 10 Wang Yijia, Zhang Chonglei, Wang Rong, *et al.*. Extracting phase information of surface plasmon resonance imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0524001.
王弋嘉, 张崇磊, 王 蓉, 等. 表面等离子体共振成像系统相位提取[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0524001.
- 11 M E Stewart, C R Anderton, L B Thompson, *et al.*. Nanostructured plasmonic sensors [J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(2): 494–521.
- 12 Xiong Xiang, Jiang Shangchi, Hu Yuhui, *et al.*. Structured metal film as a perfect absorber [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(29): 3994–4000.
- 13 Xi Chen, Yiting Chen, Min Yan, *et al.*. Nanosecond photothermal effects in plasmonic nanostructures [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(3): 2550–2557.
- 14 O Govorov Alexander, H Richardson Hugh. Generating heat with metal nanoparticles [J]. *Nano Today*, 2007, 2(1): 30–38.
- 15 Wang Kai, Schonbrun Ethan, Steinvurzel Paul, *et al.*. Trapping and rotating nanoparticles using a plasmonic nano-tweezer with an

- integrated heat sink [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 469.
- 16 Fang Zheyu, Zhen Yurong, Neumann Oara, *et al.*. Evolution of light-induced vapor generation at a liquid-immersed metallic nanoparticle [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(4): 1736–1742.
- 17 O'Neal D Patrick, Hirsch Leon R, Halas Naomi J, *et al.*. Photo-thermal tumor ablation in mice using near infrared-absorbing nanoparticles [J]. *Cancer Letters*, 2004, 209(2): 171–176.
- 18 I Elsayed, X Huang, M Elsayed. Selective laser photo-thermal therapy of epithelial carcinoma using anti-EGFR antibody conjugated gold nanoparticles [J]. *Cancer Letters*, 2006, 239(1): 129–135.
- 19 Righini Maurizio, Volpe Giovanni, Girard Christian, *et al.*. Surface plasmon optical tweezers: tunable optical manipulation in the femtonewton range [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(18): 186804.
- 20 Volpe Giovanni, Quidant Romain, Badenes Gonçal, *et al.*. Surface plasmon radiation forces [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(23): 238101.
- 21 Zhang Bingxin, Chen Shufen, Fu Lei, *et al.*. Dynamic patterning of microparticles via surface plasmon excitation [J]. *Chinese J 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.
- 22 H Raether. *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988. 1–11.
- 23 Min Changjun, Shen Zhe, Shen Junfeng, *et al.*. Focused plasmonic trapping of metallic particles [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2891.
- 24 Shen Junfeng, Wang Jian, Zhang Cuijiao, *et al.*. Dynamic plasmonic tweezers enabled single-particle-film-system gap-mode surface-enhanced Raman scattering [J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 103(19): 191119.
- 25 Guo Lijiao, Min Changjun, Wei Shibiao, *et al.*. Polarization and amplitude hybrid modulation of longitudinally polarized subwavelength-sized optical needle [J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(5): 052601.
- 26 Zhan Qiwen. Evanescent Bessel beam generation via surface plasmon resonance excitation by a radially polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(11): 1726–1728.
- 27 Chen Weibin, Zhan Qiwen. Realization of an evanescent Bessel beam via surface plasmon interference excited by a radially polarized beam [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(6): 722–724.
- 28 E Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. I. an integral representation of the image field [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1959, 253(1274): 349–357.
- 29 B Richards, E Wolf. Electromagnetic diffraction in optical systems. II. structure of the image field in an aplanatic system [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1959, 253(1274): 358–379.
- 30 K S Brown, T G Youngworth. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams [J]. *Opt Express*, 2000, 7(2): 77–87.
- 31 Abajo Guillaume Baffou, Romain Quidant, F Javier Garcade. Nanoscale control of optical heating in complex plasmonic systems [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(2): 709–716.
- 32 Kawata Satoshi. *Near-Field Optics and Surface Plasmon Polaritons* [M]. Berlin: Springer, 2001. 105–109.
- 33 T Hill Ryan, J Mock Jack, Urzhumov Yaroslav, *et al.*. Leveraging nanoscale plasmonic modes to achieve reproducible enhancement of light [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(10): 4150–4154.

栏目编辑: 史敏