

文章编号: 1672-8785(2025)04-0042-07

等离激元结构在不同参量下的粒子捕获性能研究

董程涛¹ 武京治^{1,2} 安 玉³ 王艳红^{1,2*}

(1. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 山西智能微波光电创新中心, 山西 太原 030051;

3. 中国人民解放军 31619 部队, 江苏 南京 210000)

摘 要: 研究了双纳米孔(Double Nanohole, DNH)结构在不同激光功率下对纳米粒子捕获性能的影响, 并分析了粒子的捕获回归特性。通过时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方法对 DNH 结构进行了仿真。结果表明, 在 852 nm 的入射波长下, 该结构的透射特性达到峰值, 激发出较强的等离激元效应, 使局域电场分布增强 150 倍左右。采用聚焦离子束技术制备了 DNH 结构, 并在不同激光功率下对 20 nm 金粒子进行捕获。实验结果表明, 粒子捕获的电压跳变信号差值与激光功率呈正相关, 且入射功率为 6 mW 时粒子的捕获状态最稳定。此外, 通过对 20 nm 金粒子进行粒子回归特性分析, 验证了 DNH 结构的高效捕获效率。综合仿真和实验结果, 本研究为设计高效且低热损伤的光镊系统提供了理论和实验依据。

关键词: 等离激元效应; 双纳米孔; 粒子捕获

中图分类号: TP212 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.04.006

Study on Particle Capture Performance of Plasmonic Structures Under Different Parameters

DONG Cheng-tao¹, WU Jing-zhi^{1,2}, AN Yu³, WANG Yan-hong^{1,2*}

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Innovation Center for Intelligent Microwave & Photoelectrics, Taiyuan 030051, China;

3. Unit 31619 of PLA, Nanjing 210000, China)

Abstract: The effect of the double nanohole (DNH) structure on the nanoparticle capture performance under different laser powers is studied, and the capture and rebound characteristics of the particles are analyzed. The DNH structure is simulated by the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that at an incident wavelength of 852 nm, the transmission characteristics of the structure reach a peak, stimulating strong plasmonic effects, which enhanced the local electric field distribution by about 150 times. The DNH

收稿日期: 2024-12-02

基金项目: 国防科技创新特区项目(02-ZT-008)

作者简介: 董程涛(1997-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事无损检测方面的研究。

*通讯作者: E-mail: wanyanhong@nuc.edu.cn

structure is prepared by focused ion beam technology, and 20 nm gold particles are captured under different laser powers. The experimental results demonstrate a positive correlation between the voltage jump signal difference (indicative of particle trapping) and laser power, with the most stable trapping state achieved at 6 mW incident power. In addition, the high capture efficiency of the DNH structure is verified by analyzing the particle rebound characteristics of 20 nm gold particles. Combining the simulation and experimental results, this study provides a theoretical and experimental basis for the design of efficient and low-thermal-damage optical tweezers systems.

Key words: plasmonic effect; double nanohole; particle capture

0 引言

光镊是一种利用光的辐射压力来捕获和操控微小粒子的技术,其核心原理是基于光与物质微粒之间动量传递的力学效应^[1]。该技术的突破性发展使其在多个学科领域中取得了显著进展,尤其是在单分子生物物理学中得到了广泛应用。例如,光镊技术被用来验证肌球蛋白分子运作的基本机制和肌肉收缩的过程^[2],并在蛋白质-核酸相互作用,蛋白质/RNA 折叠以及分子马达的力、位移、扭矩和角度的测量中发挥了重要作用^[3]。此外,旋转光镊通过自旋角动量的传递,为活细胞机械特性的研究提供了独特的工具^[4]。尽管光镊技术在诸多领域展现了强大的功能,但其仍存在一定的局限性。传统光镊主要通过激光束产生的辐射压力和梯度力捕获粒子,但这种操作方式可能会引发被捕获粒子的热效应,甚至导致热损伤^[5-6]。此外,在微纳米尺度上,光学捕获效率受光的衍射极限限制,导致激光聚焦无法在亚波长尺度上生成足够强的梯度力^[7],从而制约了其在高精度操控中的应用。

为了突破光的衍射极限,并降低捕获所需的激光功率,表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)技术成为一种重要的解决方案^[8]。该技术通过在金属纳米结构表面激发局部等离子体共振模式,显著增强局部电磁场强度,使光的能量在极小空间范围内高度集中^[9-10]。这种强局域化的电磁场不仅能够突破衍射极限,还能够显著提高光学梯度力,从而大幅提升捕获效率,同时有效降低对激光功率的需求^[5]。因此,SPR 技术在纳米光子学^[11]、

纳米材料合成^[12]和生物传感^[13]等领域展现出了广阔的应用潜力。

在本研究中,结合等离子体纳米结构的优势,采用 FDTD 方法仿真并制作了一种基于 DNH 的纳米粒子捕获结构。该结构能够在亚波长尺度上产生强大的电磁场梯度,将光局限在极小的体积范围内,从而有效地增强对纳米粒子的捕获能力。通过数值分析与实验相结合,系统地探讨了 DNH 结构在不同激光功率下的捕获性能,并研究了其对 20 nm 金粒子的捕获效率及稳定性。

1 结构仿真与制作

金具有优异的光学特性,其纳米结构在光激发下能够产生 SPR,显著增强结构附近的局域电磁场强度^[14]。而且金纳米结构的等离激元共振频率可以通过调整其几何形状或周围介质的折射率来调控^[15]。本文设计了一种 DNH 结构,通过优化结构参数增强两孔的边缘等离激元效应和孔间的耦合作用,从而进一步提升了局域电场强度。这种增强效应不仅满足了捕获小尺寸粒子的需求,还显著降低了对高激光功率的依赖,减少了系统的热效应。

在本研究中,采用 FDTD 方法对该结构的光学性质进行数值分析。使用 Johnson and Christy 数据库中的光学常数来定义金材料的光学特性。使用全场散射场(Total-Field Scattered-Field, TFSF)光源作为激励光源,垂直入射到 DNH 结构上:沿结构尖端方向偏振,振幅归一化为 1。环境介质的折射率为水的折射率(1.33)。图 1 为 DNH 结构的示意图。在以 SiO₂ 为基底的 100 nm 金层上刻蚀一个 DNH,

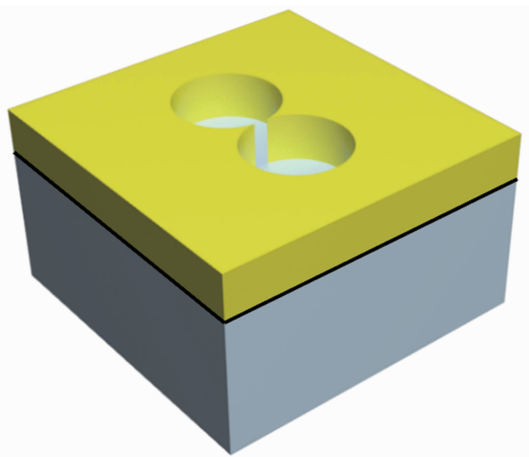


图 1 DNH 结构的示意图

圆孔的半径为 110 nm，两个孔相交处的尖端距离为 30 nm。

DNH 结构的透射特性曲线如图 2 所示。可以看出，在 852 nm 波长附近有较高的透射率。进一步根据实验条件分析了入射波长为 852 nm 时的电场分布特性。设定金层和 SiO₂ 层相切平面的中心为坐标原点。分别设置两个监视器：当 $z=100$ nm 时，放置 XY 平面监视器；当 $y=0$ nm 时，放置 XZ 平面监视器。计算结果如图 3 所示。可以看出，DNH 结构在尖端处形成高度局域化的“热点”，产生等离激元效应，使局域电场强度增强 150 倍左右。这种强局域化的电磁场效应有助于在低激光功率下捕获小直径的纳米颗粒，从而显著降低激光对纳米结构及被捕获生物分子的热损伤风险。

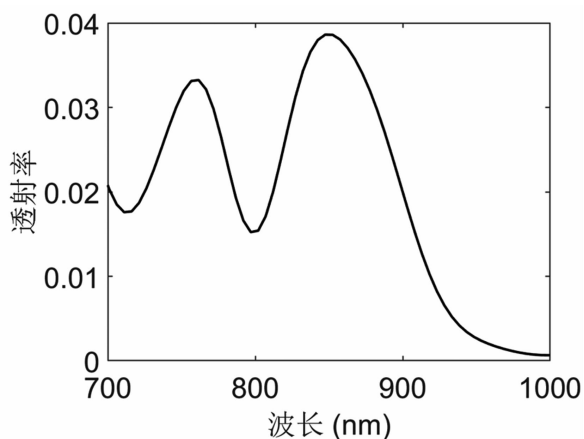


图 2 DNH 结构的透射特性曲线

基于仿真结果，利用聚焦离子束(Focused Ion Beam, FIB)技术对 DNH 结构进行了纳米加工。首先在 1 mm 厚的 SiO₂ 基底上，通过磁控溅射沉积一层 3 nm 厚的 Ti (作为金层的黏附层)，然后溅射 100 nm 厚的金。划片清洁后装载到 FIB 设备的样品台上，并调整样品角度，使其表面与离子束束流垂直。导入结构参数，图案水平间距和垂直间距均为 50 μ m，离子束采用 Ga 作为离子源，电流设置为 10 pA，加速电压设为 30 kV。在非关键区域进行刻蚀测试以确保焦点准确和束流稳定，然后加载设计参数，开始刻蚀，并控制每个孔的直径和加工深度一致。最后使用低功率的等离子清洁去除残留的加工污染物，完成后处理。

图 4 展示了通过 100 倍光学显微镜观察到的结构标记线。在标记线上，每隔 50 μ m 设置一个交叉标记点，以确定 DNH 结构的位置。图中白色圆圈标注的区域为双孔的刻蚀位置，其放大图为 DNH 结构的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图像，显示刻蚀质量良好且结构参数均匀。

2 实验系统与捕获性能分析

图 5 为光镊装置系统的示意图。对 852 nm 激光进行准直、扩束后，通过二向色镜将其照射到 100 倍油浸显微镜物镜上；利用图 4 中的标记符号定位 DNH 位置，调整位移台使入射激光聚焦到 DNH 结构上；光信号通过反射镜传送至雪崩光电探测器(Avalanche Photodiode, APD)；将光信息转换为电信号，并通过采集卡传送到计算机端。通过控制 TL4000 Series 设备的 LD 开关来开启或关闭激光。

为了深入理解光学捕获系统中粒子行为与激光功率之间的关系，通过调节激光电流来改变激光功率，粒子在光场中的运动变化通常会产生跳变电压信号。实验所用 THORLABS-DBR852PN 激光器的电流值为 220 mA、230 mA、240 mA、250 mA 时所对应的激光功率分别为 22.66 mW、24 mW、25.33 mW、

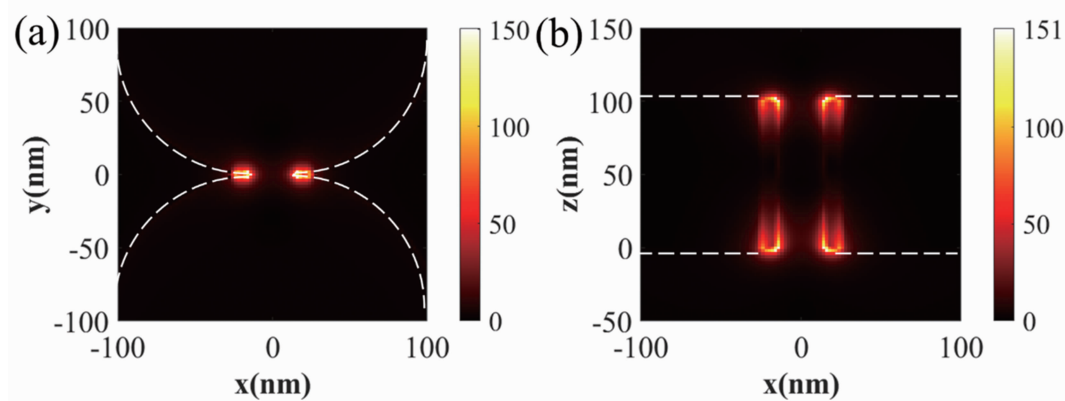


图 3 DNH 结构在入射波长为 852 nm 时的电场分布图: (a) XY 平面电场分布($z=100$ nm); (b) XZ 平面电场分布($y=0$ nm)

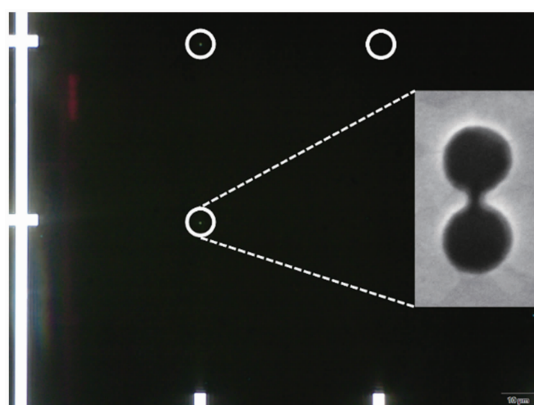


图 4 DNH 结构的实物图

26.66 mW。激光经光纤和准直扩束后,通过光路中加入的衰减片,最终到达芯片结构时会有部分功率损耗。实际功率分别为 5.665 mW、6 mW、6.33 mW 和 6.66 mW。

当溶液中的粒子在布朗运动下游离并进入外加电场时,粒子将沿着电场增强的方向迁移,并被 DNH 结构产生的等离激元效应所束缚。图 6 展示了不同激光功率下的粒子捕获信号。在 20 nm 金粒子的捕获过程中,由于介电负载效应,粒子通过孔径的传输信号除了透射率增强之外,还出现了离散增强现象。捕获态的强度波动反映了 DNH 捕获势中的热激发,导致粒子在捕获势内发生随机运动。

如图 7 所示,随着功率从 5.7 mW 增加到 6.7 mW,电压跳变的中位数(红线)逐渐升高。这表明捕获粒子时的电压跳变差值信号与功率呈正相关。随着激光功率的增大,金粒子与光

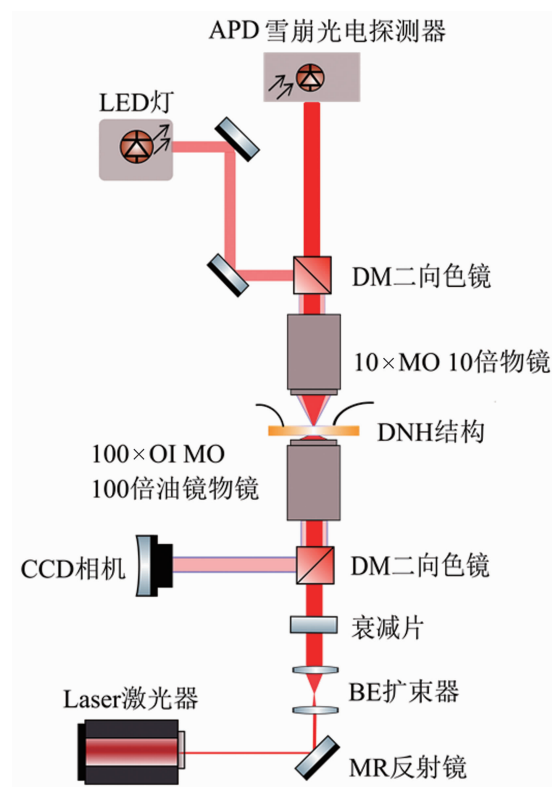


图 5 光镊装置系统的示意图

场的相互作用增强,因此功率大小与 DNH 结构的捕获力呈正相关。通过进一步分析捕获信号的标准差,发现当激光的入射功率为 6 mW 时,捕获信号的标准差值小于其他功率下的标准差值,表明粒子捕获在 6 mW 功率下相对稳定,数据的离散程度和波动性小。这是由于粒子在低功率情况下被捕获时,DNH 所产生的势阱较小,不足以完全稳定束缚住金粒子。随着激光功率的增加,光束对粒子施加的力增

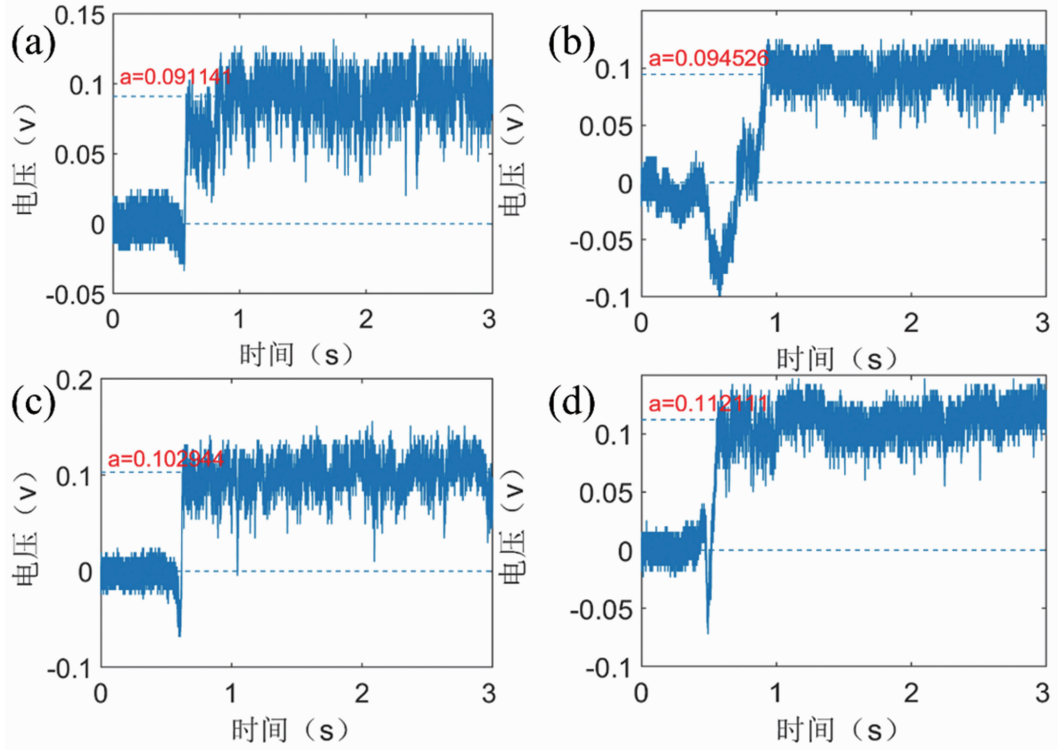


图 6 不同激光功率下捕获金粒子的电压跳变信号：(a)~(d)分别对应激光功率为 5.665 mW、6 mW、6.33 mW、6.66 mW 时的信号

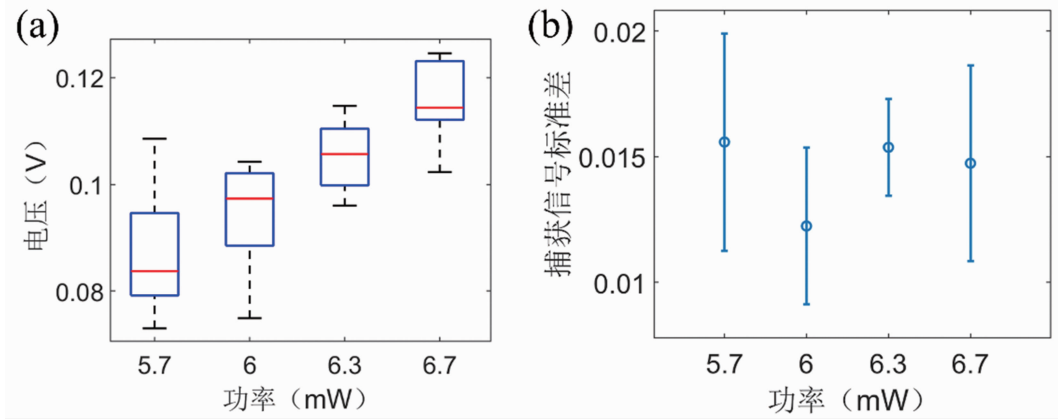


图 7 不同功率下的粒子捕获信号分析图：(a)多次捕获粒子的电压跳变箱线图；(b)捕获信号标准差

大，但局部热效应也增强，导致粒子的扩散行为和运动随机性增大，从而造成信号的不稳定。

为了进一步明确 DNH 结构的捕获性能，基于粒子在非均匀电场中的极化势能变化推导出光与非线性介质的相互作用关系^[16]：

$$\Delta U = \frac{\alpha}{2} \cdot n_b \cdot \Delta |E|^2 \quad (1)$$

式中， ΔU 表示介质中由电场强度变化引起的

能量变化； $\Delta |E|$ 表示电场强度的变化量，由 $\Delta |E|^2 = \Delta P / A$ 得到； ΔP 为透过光功率变化 (mW)； A 为 DNH 结构 XY 平面的面积； n_b 表示环境介质的折射率，这里为水的折射率； α 为极化率，表示粒子在外加电场作用下被极化的能力^[16]。

$$\alpha = 4\pi\epsilon_0 r^3 \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad (2)$$

式中， ϵ_p 和 ϵ_m 分别为粒子和介质的介电常数；

r 为粒子的半径。根据 APD 测量电压跳变值 ΔV , 通过响应度将其转换为光功率变化 ΔP 。经过计算, 不同功率下的势能大小在 10^{-19} J 左右。

为了表征 DNH 结构对 20 nm 金粒子的捕获性能, 我们通过实验分析了粒子捕获态的回归特性。当金粒子处于激光与结构相互作用产生的光势阱中时, 限时关闭激光辐射, 分别使粒子处于游离态 5 s、8 s、11 s、14 s, 然后重新开启激光并观察粒子回归势阱的分布时间。图 8 所示为不同激光关闭时长下的 30 次实验结果。随着激光关闭时长的增加, 粒子回归时长的均值呈现递增趋势。5 s 时粒子回归时间均值是 1.56 s, 14 s 时粒子回归时间均值是 12 s。可以看出, 激光关闭时长越长, 粒子在溶液中的布朗运动范围越大, 回归到等离激元结构所产生的光势阱时间越长。同时, 数据的离散程度也随时间的增加而增大, 误差条逐渐增长, 尤其是在激光关闭 14 s 时更为显著。这是由于激光长时间遮挡引入粒子动力学的不稳定性, 短时间内粒子仍处在光势阱附近, 激光再次打开后产生的捕获力大于粒子所在环境的温度梯度力, 粒子在短时间内能够被捕获。反之, 当粒子不规则运动时长增长时, 粒子所处位置的捕获力小于光镊热效应作用到粒子上的力, 或者是粒子游离到势阱范围外, 增加了捕获粒子所需的时间。但是由 DNH 结构组成的光镊系统能够继续捕获到粒子, 证明了该系统

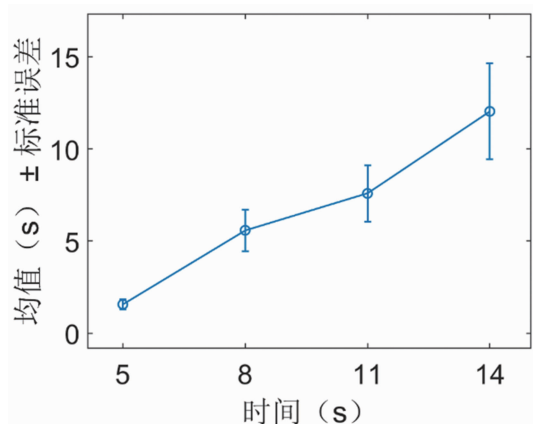


图 8 不同遮挡时长下的粒子回归时间特性

高效捕获的可靠性。

3 结束语

本文采用 FDTD 方法对 DNH 结构进行了仿真分析。结果表明, 在 852 nm 波长下, DNH 结构具有较高的透射特性, 且所激励的等离体共振模式能够将电场强度增强至 150 倍左右。实验结果表明, DNH 结构所捕获纳米粒子的极化效应与激光功率线性相关, 且在激光功率为 6 mW 时, 捕获粒子的稳定性最强。通过粒子回归时间特性分析, 进一步验证 DNH 结构能够高效捕获位于光势阱附近的粒子。未来将重点优化 DNH 结构以进一步提高捕获效率, 并探索其在更复杂生物系统中的应用。本研究为低功率捕获小尺寸纳米粒子的结构设计和实验系统提供了参考, 并为生物传感、纳米光子等领域提供了高效的粒子操控解决方案。

参考文献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, **11**(5): 288–290.
- [2] Swank D M, Bartoo M L, Knowles A F, et al. Alternative exon-encoded regions of Drosophila myosin heavy chain modulate ATPase rates and actin sliding velocity [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2001, **276**(18): 15117–15124.
- [3] Bustamante C J, Chemla Y R, Liu S, et al. Optical tweezers in single-molecule biophysics [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2021, **1**(1): 25.
- [4] Watson M L, Brown D L, Stilgoe A B, et al. Rotational optical tweezers for active microrheometry within living cells [J]. *Optica*, 2022, **9**(9): 1066–1072.
- [5] Chiba H, Kodama K, Okada K, et al. Gap Effect on Electric Field Enhancement and Photothermal Conversion in Gold Nanostructures [J]. *Micromachines*, 2022, **13**(5): 801.

-
- [6] Blázquez-Castro A. Optical tweezers: Phototoxicity and thermal stress in cells and biomolecules [J]. *Micromachines*, 2019, **10**(8): 507.
- [7] Crozier K B. Quo vadis, plasmonic optical tweezers [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, **8**(1): 35.
- [8] Crozier K B. Plasmonic Nanotweezers: What's Next [J]. *ACS Photonics*, 2024, **11**(2): 321–333.
- [9] Liu Z, Kuang T, Xiong W, et al. Self-feedback induced bistability in dual-beam intracavity optical tweezers [J]. *Optics Letters*, 2021, **46**(21): 5328–5331.
- [10] Kotsifaki D G, Kandyla M, Lagoudakis P G. Plasmon enhanced optical tweezers with gold-coated black silicon [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 26275.
- [11] Wang Y, Wu J, Moradi S, et al. Generating and detecting high-frequency liquid-based sound resonances with nanoplasmonics [J]. *Nano Letters*, 2019, **19**(10): 7050–7053.
- [12] Koya A N, Cunha J, Guo T L, et al. Novel plasmonic nanocavities for optical trapping-assisted biosensing applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, **8**(7): 1901481.
- [13] Kaushik N K, Kaushik N, Linh N N, et al. Plasma and nanomaterials: Fabrication and biomedical applications [J]. *Nanomaterials*, 2019, **9**(1): 98.
- [14] Gromann S, Friedrich D, Karolak M, et al. Non-classical optical properties of mesoscopic gold [J]. *Physical Review Letters*, 2019, **122**(24): 246802.
- [15] Shokova M A, Bochenkov V E. Impact of Optical Cavity on Refractive Index Sensitivity of Gold Nanohole Arrays [J]. *Biosensors*, 2023, **13**(12): 1038.
- [16] Novotny L, Hecht B. Principles of Nano-Optics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
-
- (上接第 41 页)
- [14] Jiankai X, Bo S. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization [J]. *Journal of Supercomputing*, 2022, **79**(7): 7305–7336.
- [15] Pérez-armenta C, Ortega-Moñux A, Luque-gonzález M J, et al. Polarization-independent multimode interference coupler with anisotropy-engineered bricked metamaterial [J]. *Photonics Research*, 2022, **10**(4): 57–65.
- [16] K. S A, Sanjay H. A modified genetic algorithm and weighted principal component analysis based feature selection and extraction strategy in agriculture [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2021, **232**: 107460.
- [17] Mirjalili S, Lewis A. The Whale Optimization Algorithm [J]. *Advances in Engineering Software*, 2016, **95**: 51–67.
-