



## 金薄膜衬底上介质-金属核壳结构的光学力调控

张佳晨 鱼卫星 肖发俊 赵建林

### Tuning optical force of dielectric/metal core-shell placed above Au film

Zhang Jia-Chen Yu Wei-Xing Xiao Fa-Jun Zhao Jian-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 184206 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200214

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200214>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

表面增强光学力与光操纵研究进展

Advances in surface-enhanced optical forces and optical manipulations

物理学报. 2019, 68(14): 144101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190606>

表面等离激元传播的调制

Modulation of propagating surface plasmons

物理学报. 2019, 68(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190802>

表面等离激元光热效应研究进展

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects

物理学报. 2019, 68(14): 144401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190476>

表面等离激元纳米聚焦研究进展

Research progress of plasmonic nanofocusing

物理学报. 2019, 68(14): 146201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190564>

表面等离激元调控化学反应

Surface plasmon mediated chemical reaction

物理学报. 2019, 68(14): 147102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190345>

等离激元能带结构与应用

Plasmonic band structures and its applications

物理学报. 2020, 69(15): 157301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200193>

## 金薄膜衬底上介质-金属核壳结构的光学力调控\*

张佳晨<sup>1)</sup> 鱼卫星<sup>2)</sup> 肖发俊<sup>1)2)†</sup> 赵建林<sup>1)</sup>

1) (西北工业大学物理科学与技术学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 西安 710129)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 中国科学院光谱成像技术重点实验室, 西安 710119)

(2020年2月13日收到; 2020年5月1日收到修改稿)

采用时域有限差分法和麦克斯韦应力张量法, 系统研究了金薄膜衬底上介质-金属核壳结构所受的光学力. 研究表明: 由于核壳结构与衬底之间强的等离激元模式杂化效应, 其所受的光学力相较于单个核壳结构实现了一个数量级的增强; 同时, 通过改变激发波长, 实现了局域电场分布的调控, 以此观察到了核壳结构光学力方向的可控反转; 进一步, 详细分析了核壳结构所受光学力随其到衬底间距、内核介质的尺寸及折射率等的变化关系, 以此丰富了光学力大小、方向和峰值波长的调控方法. 研究结果可为精确控制颗粒/金属薄膜纳米腔的尺寸提供一种新的途径, 并为调控单分子级的光与物质相互作用、研发新型纳米光子器件提供有益参考.

**关键词:** 光学力, 表面等离激元, 核壳结构, 等离激元杂化效应**PACS:** 42.50.Wk, 42.25.Fx, 62.23.St**DOI:** 10.7498/aps.69.20200214

## 1 引言

自1970年Ashkin<sup>[1]</sup>首次使用激光束俘获米氏介电粒子之后, 激光光镊逐渐成为捕获微米乃至纳米尺度介电粒子的首选工具. 此后, Svoboda和Block<sup>[2]</sup>在实验上成功捕获了金属颗粒, 并且相较于同等尺寸的介电颗粒, 捕获金属颗粒所需的激光功率更低. 目前, 光镊可以实现对物体的诱捕、旋转、牵引等<sup>[3,4]</sup>操作, 已广泛用于物理学<sup>[5-7]</sup>、生物学<sup>[8-10]</sup>、材料科学<sup>[11]</sup>等多个学科领域的研究中, 特别是凭借其非接触、操纵精度高等优点在病毒/细菌捕获<sup>[12]</sup>、药物递送<sup>[13]</sup>、微纳加工<sup>[14]</sup>等方面展现了巨大的应用价值. 然而, 由于光束衍射极限的制约, 传统远场光镊在捕获纳米尺寸物体方面存在巨

大的困难. 近期研究表明, 表面等离激元因具有亚波长和局域场增强的特性<sup>[15,16]</sup>, 成为纳米粒子无损高效捕获的首选. 2010年, Zhang等<sup>[17]</sup>利用表面等离激元的耦合, 在金纳米棒偶极天线的间隙中产生了强局域场, 以此实现了直径10 nm金纳米颗粒的捕获. 2013年Min等<sup>[18]</sup>利用聚焦的径向矢量光, 在金膜上激发了表面等离激元探针, 并通过该探针的强梯度场实现了对几十纳米至几微米尺寸粒子的稳定捕获. 2014年, Li等<sup>[19]</sup>通过打破粒子在高斯光场中位置的对称性, 分析了单个金球、银球及硅-金核壳结构的光学散射力, 并实现对等离激元纳米颗粒的超灵敏筛选. 随后, Chen等<sup>[20]</sup>通过法诺共振效应在异质金属核壳结构上施加了负的光学散射力, 并进一步通过改变颗粒尺寸调控了负光学力的峰值波长. 上述这些工作极大拓宽了

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0303800)、国家自然科学基金 (批准号: 11634010, 61675170, 11874050)、中国科学院光谱成像技术重点实验室开放基金 (批准号: LSIT201913W) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 3102019JC008, 310201911fz049) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fxxiao@nwpu.edu.cn

光学力在纳米颗粒操控中的应用, 为纳米尺度粒子的精准捕获、分离、分选提供了解决方案.

当多个颗粒(结构)聚集时, 因光的多次散射, 颗粒(结构)间会发生动量交换, 由此会产生吸引或者排斥的光学力, 即光学结合力. 近年来, 光学结合力研究的蓬勃发展, 为纳米颗粒的操控及自组装开辟了更多的途径. 2011年, Liu等<sup>[21]</sup>设计了一种由两个金平板组成的等离子纳米腔, 发现平板间电磁模式的相干耦合会引起相互吸引的光学力, 理论模型与机制极大推进了对纳米腔光学结合的研究. 2012年, Demergis和Florin<sup>[22]</sup>引入驻波势阱将金纳米球束缚在一维势阱内, 通过研究势阱内颗粒的光学结合力, 发现其对粒子的捕获效率比梯度力高20多倍, 所产生的超稳定结构可实现新型光学材料的制备. 2013年, 肖君军课题组研究了金属纳米棒二聚体<sup>[23]</sup>以及纳米盘-环结构<sup>[24]</sup>的光学结合力, 并通过引入法诺共振和高阶电磁模式, 实现了光学结合力正负方向的切换. 2017年, Simpson等<sup>[25]</sup>研究了水环境中介电纳米线间的光学结合力, 并对其进行了平移旋转等操作, 表明光学结合力可以提高对纳米粒子位置和运动的控制精度, 为光学驱动的自组装打开了大门.

值得注意的是, 凭借超平整贵金属薄膜技术的长足进步, 颗粒/介质/薄膜构成的等离子纳米腔已成为研究和调控光与物质相互作用的理想平台<sup>[26–29]</sup>, 并在增强光谱<sup>[30]</sup>、增强光电流<sup>[31]</sup>、纳米激光器<sup>[32]</sup>等方面展现了巨大应用价值. 精确控制颗粒与金属膜的间距, 不仅有助于调控其光物理效应, 更有利于提高相关器件的性能. 基于此, 本文研究金薄膜衬底上介质-金属核壳结构的光学力. 借助核壳结构丰富的等离子模式 and 尺寸与介质材质易调控等优良特性, 实现核壳结构所受光学力的方向、大小、峰值波长的精确控制. 这种通过调节核壳结构的光学力来精细控制其等离子纳米腔尺寸的思路, 可为研究增强光谱、强耦合等现象提供更为简便的实验手段.

## 2 计算模型及分析

### 2.1 模型及理论

所研究的等离子纳米腔结构如图1所示. 这里, 定义核壳结构的内核半径和折射率分别为 $R_c$ 和 $n_c$ , 外壳是厚度为 $t$ 的银, 该核壳结构放置在

厚度为150 nm金膜上方 $h$ 处. 本文采用时域有限差分软件(FDTD Solutions, Lumerical Inc.)分析该纳米腔系统的等离子响应. 仿真过程中, 激发光选取沿 $z$ 轴负方向传播、 $x$ 方向偏振的平面波, 其强度始终保持为 $I_0 = 1 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$ . 金、银材料的折射率均选用Johnson和Christy<sup>[33]</sup>获得的实验数据, 整个系统处于空气环境中(折射率为1), 并选取完美匹配层作为边界条件, 以消除在仿真边界处的非物理反射.

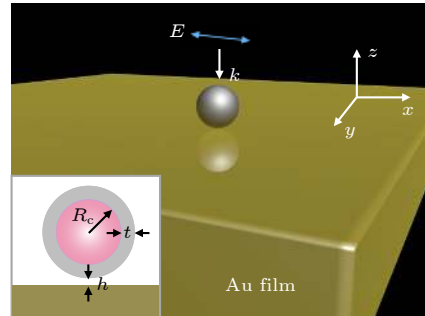


图1 金膜衬底上介质/金属核壳结构的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of a dielectric/metal core-shell placed above a gold film.

首先, 取核壳结构的内核半径 $R_c = 50 \text{ nm}$ , 内核材料折射率 $n_c = 3.5$ , 外壳银的厚度 $t = 20 \text{ nm}$ , 并将其放置在金薄膜上方 $h = 10 \text{ nm}$ 处. 如图2(a)所示, 这种核壳-金薄膜结构可以视为金薄膜上空腔和球的组合. 由等离子杂化理论<sup>[34]</sup>可知, 金膜上本征频率为 $\omega_c$ 的空腔模式与本征频率为 $\omega_s$ 的球模式会耦合形成两类等离子杂化模式: 一类是球与空腔的电偶极模式反向叠加后, 再与衬底上银壳的镜像电偶极模式耦合, 形成频率为 $\omega_+$ 的反对称耦合模式(反键模式); 另一类是球和空腔电偶极模式同向叠加后, 再与衬底上银壳的镜像电偶极模式耦合, 形成频率为 $\omega_-$ 的对称耦合模式(成键模式). 在数值模拟中, 对包裹核壳-金薄膜的虚拟闭合曲面上的散射光强积分后, 得到图2(b)所示的该结构的归一化散射光谱. 可以看出, 在波长540和790 nm处有两个明显的散射峰, 根据等离子杂化理论, 两散射峰分别对应反键模式 $\omega_+$ 和成键模式 $\omega_-$ . 进一步, 两模式可由图2(b)插图中的电场分布印证. 可以看出, 在金属壳内、外界面, 反键和成键模式的电场 $E_z$ 分量分别为反相和同相, 与其电荷分布相对应.

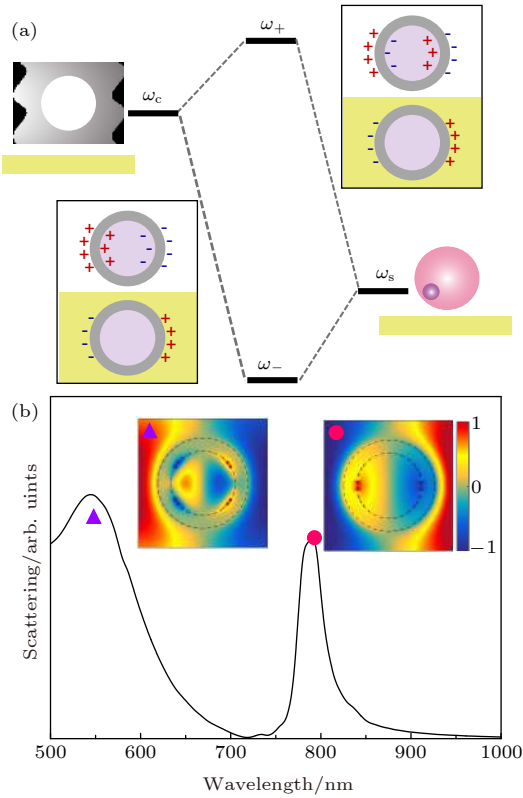


图2 核壳-金薄膜结构的等离激元杂化示意图和散射光谱 (a) 等离激元杂化示意图; (b) 散射光谱, 插图为电场分量  $E_z$  在  $xy$  平面上的分布

Fig. 2. (a) Scheme of plasmon hybridization picture of the core-shell on gold film; (b) scattering spectrum of core-shell particles on gold film. The inset of panel (b) shows the  $z$ -component of the electric field in  $xy$  plane.

## 2.2 光学力分析

其次, 采用麦克斯韦应力矩阵法 (MST) 对上述核壳结构所受的光学力进行分析, 即在包裹核壳纳米颗粒的闭合曲面  $S$  上对麦克斯韦应力张量作面积分, 可求得光学力为<sup>[35]</sup>

$$\mathbf{F} = \oint_s \langle \mathbf{T} \rangle \cdot d\mathbf{S}, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}$  为时间平均的麦克斯韦应力张量, 并且有

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \text{Re} \left[ \varepsilon \mathbf{E} \mathbf{E}^* + \mu \mathbf{H} \mathbf{H}^* - \frac{1}{2} (|\mathbf{E}|^2 + |\mathbf{H}|^2) \mathbf{I} \right], \quad (2)$$

这里,  $\varepsilon$  和  $\mu$  为环境的介电常数和磁导率,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  分别对应电场和磁场矢量,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵. 图 3(a) 中的红色实线给出了金膜衬底下核壳结构所受的纵向光学力  $F_z$ . 可以看出, 该纵向光学力  $F_z$  的幅值可达 3.5 pN, 并且比无金薄膜时的核壳结构所受纵向光学力增大一个数量级 (图 3(a) 中的黑色实线). 此外, 核壳结构受到的纵向光学力的方向

分别在波长 600, 740 和 810 nm 处发生反转. 特别地, 当激发波长处于散射峰 540 和 790 nm 时, 出现负  $F_z$  的峰值, 意味着核壳结构受到金膜的吸引力, 趋向金膜移动; 而当激发波长为 670 和 830 nm 时, 出现正  $F_z$  的峰值, 意味着核壳结构受到金薄膜的排斥力, 趋向远离金薄膜. 为解释光学力方向的反转机制, 进一步分析了  $F_z$  的正、负峰值波长处  $xz$  平面上结构周围的电场强度增强因子  $EF$  的分布 (如图 3(b)–(e) 所示), 即局域场与入射场的光强比  $EF = |E_{\text{loc}}/E_{\text{in}}|^2$ . 由图 3(b) 和图 3(d) 可知, 在共振波长为 540 和 790 nm 处, 核壳颗粒与金薄膜耦合强烈, 局域场被束缚在两者的间隙处. 由于梯度力指向光强最大处, 由此产生了负的  $F_z$ , 使得核壳结构向金薄膜移动. 相反, 如图 3(c) 和图 3(e) 所示, 当激发光波长远离共振波长时, 核壳结构与金薄膜耦合减弱, 局域场分布在核壳结构的上半侧, 此时产生正的  $F_z$ , 使核壳结构远离金薄膜. 值得注意的是, 在波长为 790 nm 处核壳结构所受纵向光学力是波长为 540 nm 时的 5 倍左右. 这是因

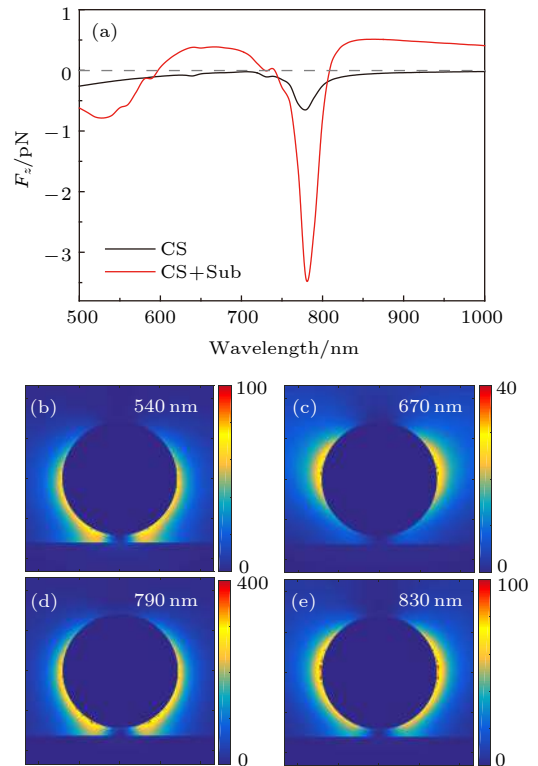


图3 (a) 核壳结构所受的纵向光学力  $F_z$ ; 波长为 (b) 540, (c) 670, (d) 790 和 (e) 830 nm 时核壳结构周围电场强度增强因子  $EF$  的分布

Fig. 3. (a) Longitudinal optical force  $F_z$  exerted on the core-shell on gold film. The electric-field intensity enhancement factor map of the core-shell on gold film at wavelengths of (b) 540, (c) 670, (d) 790, and (e) 830 nm, respectively.



为在波长为 790 nm 时, 核壳结构的共振类型为成键模式, 银壳内、外为同向电偶极模式的叠加, 产生了更强的净偶极矩. 由此, 核壳结构在金薄膜上诱导出更多的镜像电荷, 使间隙处的局域场增大, 产生更强的纵向光学力.

### 2.3 金膜衬底与核壳结构间距对光学力的影响

核壳结构与金膜衬底间的模式耦合会影响核壳结构所受的光学力, 而模式间隙是决定等离激元模式耦合强弱的一个关键因素. 为此, 进一步保持核壳颗粒尺寸及材料不变, 分析金膜衬底与核壳结构间距对核壳结构纵向光学力的影响. 如图 4(a) 所示, 当间距  $h$  由 6 nm 增加到 50 nm 时, 核壳结构与金膜的耦合减弱, 其受到衬底的屏蔽效应也随之减弱, 导致表面等离激元共振的回复力增强, 促使散射光谱中反键模式和成键模式的峰位发生轻

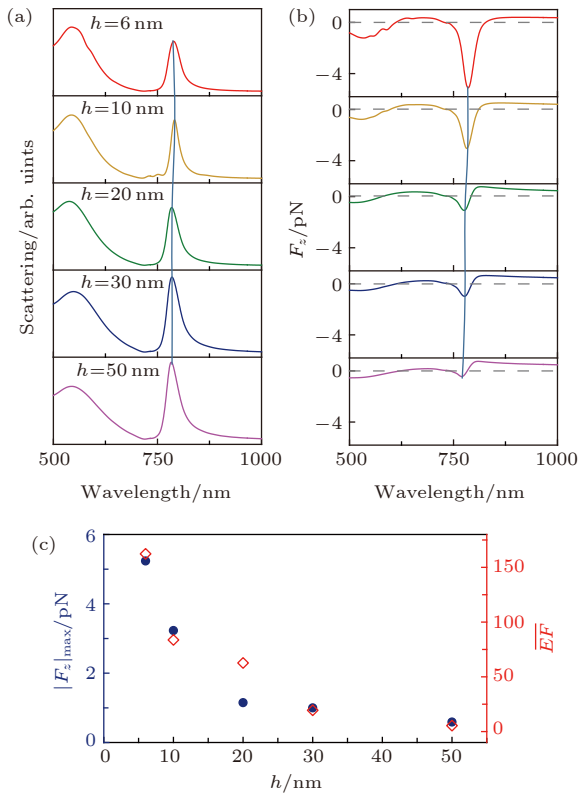


图 4 核壳-金膜结构的 (a) 散射光谱、(b) 光学力谱和 (c) 纵向光学力幅值及间隙的平均电场强度增强因子随结构间隙  $h$  的变化

Fig. 4. (a) Scattering spectra of the core-shell on gold film; (b) longitudinal optical force spectra of the core-shell on gold film; (c) maximum longitudinal optical force and the average electric-field intensity enhancement factor as a function of gap size for the core-shell on gold film.

微蓝移. 相应地, 结构共振峰的蓝移也使得  $F_z$  的幅值峰位出现了蓝移, 如图 4(b) 所示. 此外, 随着  $h$  的增大, 反键模式散射强度相对于成键模式的散射强度减弱. 这是由于核壳结构与金膜耦合的减弱, 导致衬底上诱导的镜像电荷减少. 由此, 反键模式的净偶极矩减弱, 而成键模式的净偶极矩增强, 带来了对应光谱峰强度的变化. 如图 4(c) 中红色菱形所示, 核壳结构与衬底耦合减弱, 也使得结构间隙内的平均电场强度增强因子  $\overline{EF}$  (即间隙内总  $EF$  与间隙面积比) 减弱, 造成纵向光学力  $F_z$  的幅值  $|F_z|_{\max}$  随间隙  $h$  增加而显著减弱 (图 4(c) 中蓝色圆点).

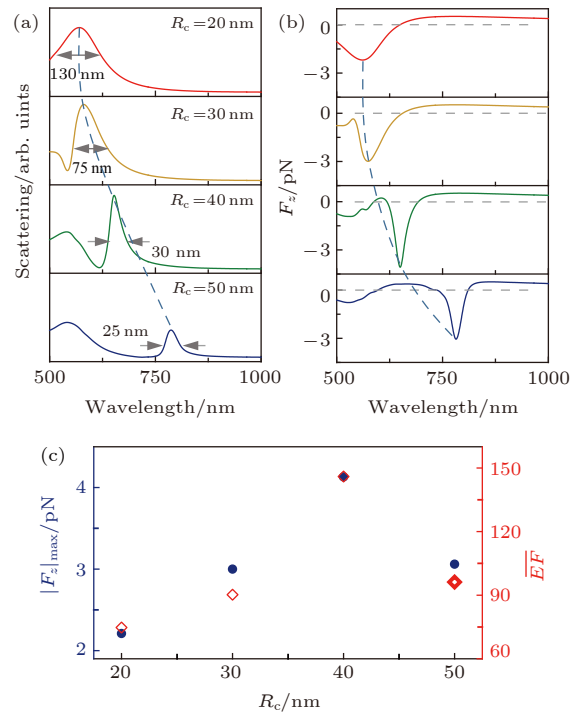


图 5 核壳-金膜结构的 (a) 散射光谱、(b) 纵向光学力谱和 (c) 纵向光学力幅值以及间隙内平均电场强度增强因子随内核尺寸  $R_c$  的变化

Fig. 5. (a) Scattering spectra of the core-shell on gold film; (b) longitudinal optical force spectra of the core-shell on gold film; (c) maximum longitudinal optical force as well as the average electric-field intensity enhancement factor as a function of dielectric core radius for the core-shell on gold film.

### 2.4 不同内核尺寸对核壳所受光学力的影响

保持核壳颗粒的半径为 70 nm, 核壳结构距离金膜衬底  $h = 10$  nm, 分析不同内核尺寸对核壳结构的散射光谱及光学力的影响. 由图 5(a) 的散射光谱可以看出, 当介质核的半径  $R_c$  从 50 nm 减小

到 20 nm 时, 成键模式的散射峰位逐渐蓝移, 并且与反键模式峰位的间距减小. 由等离子元杂化理论可知, 当内核尺寸减小, 银壳内、外层间的耦合作用减弱, 从而导致图 5(a) 中散射峰位的变化. 并且, 由于内核尺寸的减小, 银壳的损耗随其厚度增加而增大<sup>[36]</sup>, 谱线的半高全宽也从 25 nm 增加到 130 nm. 由图 5(b) 可知, 伴随着成键模式散射峰位的蓝移, 该模式对应的纵向光学力幅值的峰位也发生蓝移. 需要指出的是, 纵向光学力  $F_z$  的幅值  $|F_z|_{\max}$  取决于壳外的局域场<sup>[37]</sup>. 由图 5(c) 可以看出, 随着介质核半径的增大,  $|F_z|_{\max}$  (蓝色圆点) 与间隙内的平均电场强度增强因子 (红色菱形) 表现出了相同的变化趋势.

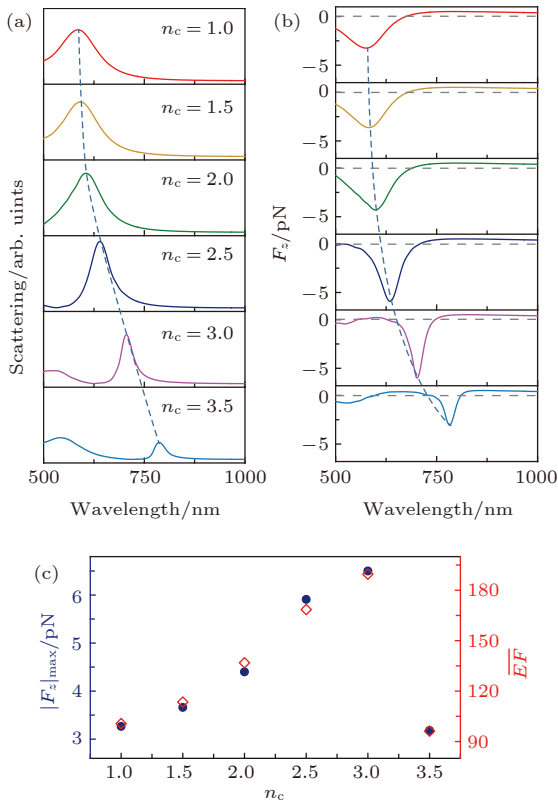


图 6 核壳-金膜结构的 (a) 散射光谱、(b) 光学力谱和 (c) 纵向光学力幅值及间隙的平均电场强度增强因子随内核折射率  $n_c$  的变化

Fig. 6. (a) Scattering spectra of the core-shell on gold film; (b) longitudinal optical force spectra of the core-shell on gold film; (c) maximum longitudinal optical force and the average electric-field intensity enhancement factor as a function of index for the core-shell on gold film.

### 2.5 不同内核折射率对核壳所受光学力的影响

最后, 保持内核半径  $R_c = 50$  nm, 银壳厚度

$t = 20$  nm, 核壳与金膜衬底间距  $h = 10$  nm, 分析内核的折射率对核壳的散射光谱及光学力的影响. 从图 6(a) 的散射光谱可知, 当内核的折射率从 3.5 降到 1 时, 成键和反键模式的峰位均出现蓝移. 特别地, 成键模式的峰位从波长 790 nm 蓝移至 590 nm. 这是由于随着内核的折射率减小, 其产生的屏蔽效应减弱, 银壳内表面产生的感应电荷数目增加, 模式的回复力增大, 从而导致成反键模式峰位的蓝移. 如图 6(b) 所示, 与成键模式的频移相对应, 内核的折射率减小将导致颗粒所受纵向光学力幅值峰位的蓝移. 为此, 进一步分析了内核折射率对核壳的光学力大小的影响. 由图 6(c) 可知, 纵向光学力幅值  $|F_z|_{\max}$  (蓝色圆点) 随内核折射率的增大呈现出先增大后减小的趋势. 进而得到了不同内核折射率情况下间隙内平均电场强度增强因子 (图 6(c) 中红色菱形). 可以看出, 随着内核折射率的增大,  $|F_z|_{\max}$  和  $EF$  有着相同的变化趋势. 由此可知, 核壳结构所受光学力大小的变化, 源于折射率的增大引起核壳外局域场的改变, 导致了梯度力的改变.

### 3 结论

本文提出了一种调控金薄膜上介质-金属核壳结构所受光学力的方法. 结合等离子元杂化理论和局域场的变化, 分析了核壳结构的光学力方向、峰值波长和大小. 分析表明, 通过改变激发光波长, 可使局域场集中于核壳结构上方或结构间隙中, 以此可实现光学力由正到负的方向变化; 减小结构间隙、增大内核直径和折射率, 可导致成键模式的红移, 以此带来最大纵向光学力幅值的红移; 同时, 上述参数的变化会影响局域场的强度, 进而造成光学力幅值的改变. 本工作可为核壳结构/金薄膜纳米腔间隙的精确调控提供一种新的解决方案, 并有望进一步促进其在增强光谱、非线性光学和传感等方面的应用.

### 参考文献

- [1] Ashkin A 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 156
- [2] Svoboda K, Block S M 1994 *Opt. Lett.* **19** 930
- [3] Gong L P, Zhang X H, Gu B, Zhu Z Q, Rui G H, He J, Zhan Q W, Cui Y P 2019 *Nanophotonics* **8** 1117
- [4] Li H, Cao Y Y, Zhou L M, Xu X H, Zhu T T, Shi Y Z, Qiu C W, Ding W Q 2020 *Adv. Opt. Photonics* **12** 288

- [5] Tong L M, Miljkovic V D, Johansson P, Käll M 2011 *Nano Lett.* **11** 4505
- [6] Huang J, Yang Y 2015 *Nanomaterials* **5** 1048
- [7] Lu J S, Yang H B, Zhou L N, Yang Y Q, Luo S, Li Q, Qiu M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 043601
- [8] Bezryadina A S, Preece D C, Chen J C, Chen Z G 2016 *Light-Sci. Appl.* **5** e16158
- [9] Xin H B, Li Y C, Xu D K, Zhang Y L, Chen C H, Li B J 2017 *Small* **13** 1603418
- [10] Dhakal K R, Lakshminarayanan V 2018 *Prog. Opt.* **63** 1
- [11] Marago O M, Jones P H, Gucciardi P G, Volpe G, Ferrari A C 2013 *Nat. Nanotechnol.* **8** 807
- [12] Juan M L, Righini M, Quidant R 2011 *Nat. Photonics* **5** 349
- [13] Liu X S, Wu Y, Xu X H, Li Y C, Zhang Y, Li B J 2019 *Small* **19** 05209
- [14] Li Y M, Gong L, Li D, Liu W W, Zhong M C, Zhou Z H, Wang Z Q, Yao K 2015 *Chin. J. Las.* **42** 0101001 (in Chinese) [李银妹, 龚雷, 李迪, 刘伟伟, 钟敏成, 周金华, 王自强, 姚焜 2015 *中国激光* **42** 0101001]
- [15] Tong L M, Xu H X 2012 *Physics* **41** 582 (in Chinese) [童廉明, 徐红星 2012 *物理* **41** 582]
- [16] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [17] Zhang W H, Huang L N, Santschi C, Martin O J 2010 *Nano Lett.* **10** 1006
- [18] Min C J, Shen Z, Shen J F, Zhang Y Q, Fang H, Yuan G H, Du L P, Zhu S W, Lei T, Yuan X C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2891
- [19] Li Z P, Zhang S P, Tong L M, Wang P J, Dong B, Xu H X 2014 *ACS Nano* **8** 701
- [20] Chen H J, Liu S Y, Zi J, Lin Z F 2015 *ACS Nano* **9** 1926
- [21] Liu H, Ng J, Wang S B, Lin Z F, Hang Z H, Chan C T, Zhu S N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 087401
- [22] Demergis V, Florin E L 2012 *Nano Lett.* **12** 5756
- [23] Zhang Q, Xiao J J, Zhang X M, Yao Y, Liu H 2013 *Opt. Express* **21** 6601
- [24] Zhang Q, Xiao J J 2013 *Opt. Lett.* **38** 4240
- [25] Simpson S H, Zemánek P, Maragò O M, Jones P H, Hanna S 2017 *Nano Lett.* **17** 3485
- [26] Li G C, Zhang Y L, Lei D Y 2016 *Nanoscale* **8** 7119
- [27] Xiao F J, Ren Y X, Shang W Y, Zhu W R, Han L, Lu H, Mei T, Premaratne M, Zhao J L 2018 *Opt. Lett.* **43** 3413
- [28] Zhang Q, Li G C, Lo T W, Lei D Y 2018 *J. Opt.* **20** 024010
- [29] Ho K H W, Shang A, Shi F H, Lo T W, Yeung P H, Yu Y S, Zhang X M, Wong K, Lei D Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1800383
- [30] Li G C, Zhang Q, Maier S A, Lei D Y 2018 *Nanophotonics* **7** 1865
- [31] Wu Z Q, Yang J L, Manjumath N K, Zhang Y J, Feng S R, Lu Y H, Wu J H, Zhao W W, Qiu C Y, Li J F, Lin S S 2018 *Adv. Mater.* **30** 1706527
- [32] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, Ma R M, Gladden C, Dai L, Bartal G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629
- [33] Johnson P B, Christy R W 1972 *Phys. Rev. B* **6** 4370
- [34] Prodan E, Radloff C, Halas N J, Nordlander P 2003 *Science* **302** 419
- [35] Saleh A A E, Dionne J A 2012 *Nano Lett.* **12** 5581
- [36] Xiao F J, Wang G L, Gan X T, Shang W Y, Cao S Y, Zhu W R, Mei T, Premaratne M, Zhao J L 2019 *Photonics Res.* **7** 00001
- [37] Xiao F J, Zhang J C, Yu W X, Zhu W R, Mei T, Premaratne M, Zhao J L 2020 *Opt. Express* **28** 3000

# Tuning optical force of dielectric/metal core-shell placed above Au film\*

Zhang Jia-Chen<sup>1)</sup> Yu Wei-Xing<sup>2)</sup> Xiao Fa-Jun<sup>1)2)†</sup> Zhao Jian-Lin<sup>1)</sup>

1) (*Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China*)

2) (*CAS Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China*)

( Received 13 February 2020; revised manuscript received 1 May 2020 )

## Abstract

Manipulating the core-shell structure with the optical force has been extensively studied, giving birth to applications such as particle sorting, biomarkers and drug delivery. Tailoring the optical force exerted on the core-shell above the metallic film remains unexplored, despite the obvious benefits for both fundamental research and applications including strong coupling, surface enhanced spectroscopy, nanolaser, and nanoscale sensing. In this work, we systematically investigate the optical force exerted on a dielectric/metal core-shell above a gold film by utilizing the Maxwell stress tensor formalism. It is found that at the present gold substrate, the optical force on the core-shell can be one order of magnitude larger than that on the individual core-shell due to the strong coupling between the core-shell and the gold film. Interestingly, the direction of the optical force can be reversed from positive to negative by distributing the local field from the upside of core-shell to the structure gap through changing the excitation wavelength. Furthermore, we demonstrate that the magnitude and peak wavelength of the optical force can be well controlled by altering the structure gap, the size and refractive index of the core. More specifically, it is found that the coupling strength between the core-shell and the gold film decreases with the gap size increasing. As a result, we observe the blue shift of bonding mode and the decrease of local field in the gap, which leads the force peak wavelength to be blue-shifted and the force peak magnitude to decrease, respectively. Also, by increasing the radius and refractive index of the core, a red shift of force peak is accompanied with the red shift of the bonding mode. In addition, the force peak magnitude follows the same trend as the total local field enhancement factor when the radius and refractive index of the core change. We hope that our results open the way to control the cavity size of particle on film structure, which would be beneficial for tailoring the light matter interaction even down to single molecular level and promises to have the applications in novel functional photonic devices.

**Keywords:** optical force, surface plasmons, core-shell structure, plasmon hybridization

**PACS:** 42.50.Wk, 42.25.Fx, 62.23.St

**DOI:** [10.7498/aps.69.20200214](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200214)

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0303800), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11634010, 61675170, 11874050), the Open Research Fund of CAS Key Laboratory of Spectral Imaging Technology, China (Grant No. LSIT201913W), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant Nos. 3102019JC008, 310201911fz049).

† Corresponding author. E-mail: [fjxiao@nwpu.edu.cn](mailto:fjxiao@nwpu.edu.cn)