

激光与光电子学进展

Au 纳米球壳的光热特性分析与优化

热米莱·阿卜来提^{1,2}, 帕尔哈提江·吐尔孙^{1,2*}, 郑玉霞^{1,2}, 马登攀^{1,2}, 程龙^{1,2}¹新疆师范大学物理与电子工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;²新疆矿物发光材料及其微结构重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要 为了寻找单个 Au 纳米球壳在连续激光激发下的最大表面温度变化及对应的颗粒最优尺寸, 利用 Mie 理论、介电函数尺寸修正模型和热方程定量研究了波长、内核半径和外壳厚度对单个 Au 纳米球壳光热特性的影响。首先, 通过改变 Au 纳米球壳的内核半径及外壳厚度调节共振峰的大小和位置, 并得到所需的颗粒表面温度变化情况。然后, 针对颗粒光热特性的应用, 给出近红外波段内四个典型波长 (800, 808, 820, 1064 nm) 下单位入射光强度的最大颗粒表面温度变化量 γ_{\max} 及对应的颗粒最优尺寸。最后, 给出了上述波长下单位入射光强度的颗粒表面温度变化量大于 $0.9\gamma_{\max}$ 的颗粒尺寸分布。该研究对光热治疗、等离子体辅助光催化以及颗粒制备等方面的研究具有重要意义。

关键词 散射; Mie 理论; Au 纳米球壳; 介电函数; 光热特性; 优化

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0725001

Analysis and Optimization of Au Nanoshell Photothermal Properties

Abulaiti Remilai^{1,2}, Tuersun Paerhatijiang^{1,2*}, Zheng Yuxia^{1,2}, Ma Dengpan^{1,2}, Cheng Long^{1,2}¹School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University,
Urumqi, Xinjiang 830054, China;²Key Laboratory of Mineral Luminescent Material and Microstructure of Xinjiang,
Urumqi, Xinjiang 830054, China

Abstract We quantitatively investigated the effect of wavelength, core radius, and shell thickness on the photothermal properties of a single Au nanoshell using Mie theory, a size-dependent dielectric function, and heat equation to determine the maximum surface temperature change and optimal particle size under continuous laser excitation. First, the intensity and position of the resonance peak can be adjusted by changing the core radius and shell thickness of the Au nanoshell. The required particle surface temperature variation also can be obtained. Then, the maximum particle surface temperature change per unit incident light intensity γ_{\max} at four typical wavelengths (800, 808, 820, and 1064 nm) in the near-infrared region and the corresponding optimal particle size is obtained to analyze the application of the photothermal properties of the particles. Finally, the particle size distribution with a particle surface temperature change per unit incident light intensity greater than $0.9\gamma_{\max}$ at the above wavelength is given. This research is essential for photothermal therapy, plasmonic-assisted photocatalysis, and particle synthesis.

Key words scattering; Mie theory; Au nanoshell; dielectric function; photothermal properties; optimization

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(11764042)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01A116)、新疆矿物发光材料及其微结构重点实验室招标课题(KWFG2006)

通信作者: *ptuersun@163.com

1 引言

近年来, Au 纳米颗粒因其特殊的物理性质引起了人们的广泛研究。在外部电磁场的驱动下, 颗粒的自由电子云集体相干振荡会产生局域表面等离子体共振(LSPR)特性, LSPR 的特征频率也被称为等离子体共振频率, 可通过改变颗粒大小、形状和材料进行调节。当入射光频率与共振频率相匹配时, Au 纳米颗粒的近场会大幅增强, 颗粒可以吸收更多的光能并将其转化为热能^[1-2]。因此, 在可见光或近红外光照射下, Au 纳米颗粒可作为有效的纳米热源^[3], 其光热效应在信息记录中也起着关键作用^[4]。此外, Au 纳米颗粒具有良好的生物相容性、低毒性、表面化学性质可控等特点, 在生物医学^[5-6]和生物成像^[7-8]中具有广阔的应用前景。

Au 纳米颗粒作为近红外激光吸收剂^[9-10]已广泛应用于光热治疗^[11]、光热催化^[12]等领域, 如: 载有光敏剂的 Au 纳米球壳可用于光热和光动力疗法^[13], 载有药物的 Au 纳米球壳可用于热化学疗法^[14], 功能化的 Au 纳米球壳可用于成像耦合光热疗法^[15]。Au 纳米球壳也可用于选择性消灭病原细菌^[16]和病毒^[17]、刺激神经元^[18]和伤口愈合^[19]等领域。因此, 对 Au 纳米球壳光热特性的研究具有重要意义。对于 Au 纳米颗粒的光热特性, 研究颗粒的温度变化规律是至关重要的。Phan 等^[20]利用瞬态生物热方程和扩展的 Mie 理论对多个分散在水中的 Au 纳米球壳光热特性进行了理论研究, 并给出 Au 纳米球壳环境温度变化与照射时间、入射光强度之间的关系。Un 等^[21]利用热方程分析了单个 Au 纳米球壳的光热特性随颗粒尺寸变化的关系, 结果表明, 颗粒表面温度随颗粒尺寸的增大非单调增加, 通过调节颗粒尺寸和入射光波长可以优化 Au 纳米球壳的光热特性。Au 纳米球壳的 LSPR 波长可调范围为 500~600 nm, 在许多生物应用, 特别是人体研究中, 更希望光谱在 650~900 nm 范围内的近红外区域内, 原因是该生物窗口中组织、血液和水具有高透射性^[22], 而 Au 纳米球壳的共振波长可以调节到该波长范围内。

本文研究了单个 Au 纳米球壳的光热特性, 并对其尺寸参数进行了优化设计。首先, 讨论单个 Au 纳米球壳的体积吸收系数和单位入射光强度下的颗粒表面温度变化量 γ 与内核半径和外壳厚度之间的关系。然后, 给出了最大颗粒表面温度变化量

γ_{\max} 和共振波长随颗粒内核半径和外壳厚度的变化情况。最后, 在四个典型入射光波长下, 对水中 Au 纳米球壳的尺寸进行优化设计。该研究为 Au 纳米球壳的制备及其在各个领域中的应用提供了理论指导。

2 理论方法

2.1 颗粒表面温度的计算

用连续波激光照射无损介电环境 ϵ_m 中的 Au 纳米球壳, 颗粒的几何模型如图 1 所示。其中, R_1 为内核半径, t 为外壳厚度, $R_2 = R_1 + t$ 为外壳半径。

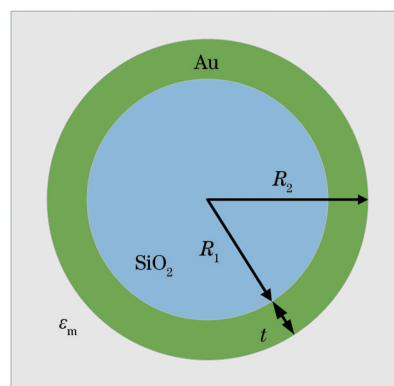


图 1 Au 纳米球壳的几何模型

Fig. 1 Geometric model of the Au nanoshell

入射光子的吸收会导致颗粒温度升高, 这种效应通过向环境传递热量使颗粒温度达到稳定状态。此时, 热方程可表示为泊松方程^[21]

$$\nabla \cdot [\kappa(\mathbf{r}) \nabla T(\mathbf{r})] = -p_{\text{abs}}(\omega, \mathbf{r}), \quad (1)$$

式中, κ 为热导率, p_{abs} 为吸收功率密度, T 为颗粒温度, ω 为入射光频率, \mathbf{r} 为颗粒在空间中的位置。只考虑单光子吸收, 忽略潜在的多光子吸收时, 光子的平均吸收功率密度可表示为

$$p_{\text{abs}}(\omega, \mathbf{r}) = \frac{\omega}{2} \epsilon_0 \epsilon''(\omega) |\mathbf{E}(\omega, \mathbf{r})|^2, \quad (2)$$

式中, \mathbf{E} 为总电场, ϵ_0 为真空介电常数, ϵ'' 为颗粒介电函数的虚部。总电场以及吸收的功率密度可通过麦克斯韦方程的 Mie 解^[21]或数值模拟得到。由于吸收功率密度 p_{abs} 一般是与空间相关的, 因此(1)式没有简单的封闭解。为了获得(1)式的近似解析解, 用体积平均值代替(1)式中在空间上不均匀的吸收功率密度, 将其表示为入射光强度 I_{inc} 和吸收截面 C_{abs} 的乘积与颗粒体积的比。Au 纳米球壳的内核 SiO₂ 在可见光和近红外波段范围内几乎不吸收入射光, 可以忽略内核产生的热量, 从而将(2)式表示为

$$\bar{p}_{\text{abs}}(\omega) = \frac{3}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)} \frac{\omega \epsilon_0}{2} \int d^3 r \epsilon'' |\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega)|^2 = I_{\text{inc}} C_{\text{abs}}(\omega) \frac{3}{4\pi(R_2^3 - R_1^3)}, \quad (3)$$

式中, $\bar{p}_{\text{abs}}(\omega)$ 为平均吸收功率密度。对(1)式进行积分, 利用高斯定理将等式左边的体积积分转化为曲面积分, 再对半径进行积分, 得到颗粒表面($r = R_2$)的温度变化量为

$$\Delta T = T_{\text{NP}} - T_m = \frac{\bar{p}_{\text{abs}}(\omega) R_2^2}{3\kappa_m} = \frac{C_{\text{abs}}(\omega) I_{\text{inc}} R_2^2}{4\pi\kappa_m (R_2^3 - R_1^3)}, \quad (4)$$

式中, T_{NP} 为颗粒表面温度, T_m 为环境温度, κ_m 为环境的热导率。可以发现, 颗粒表面温度变化量与入射光强度成正比。由于不同实验中的温度变化量和对应的入射光强度不一样, 因此, 引入新的物理量 γ , 表示单位入射光强度下的颗粒表面温度变化量, 即 $\gamma = \Delta T / I_{\text{inc}}$, 单位为 $\text{K}/(\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2})$ 。考虑颗粒表面的温度变化, 不考虑颗粒内部的温度变化时, 可得到不包含颗粒内核的热导率。单位入射光强度的颗粒表面温度变化量可表示为

$$\gamma = \frac{C_{\text{abs}}(\omega) R_2^2}{4\pi\kappa_m (R_2^3 - R_1^3)}. \quad (5)$$

2.2 颗粒吸收截面的计算

利用双层同心球的 Mie 理论^[22] 计算单个 Au 纳米球壳的吸收截面, 可表示为

$$C_{\text{abs}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n + b_n) - |a_n|^2 - |b_n|^2], \quad (6)$$

式中, $k = 2\pi n_m / \lambda$ 为周围介质的波数, λ 为入射光在真空中的波长, n_m 为周围环境的介质折射率, a_n, b_n 分别为不同阶数的散射系数, 可通过文献^[23] 中的数值计算方法得到。计算颗粒吸收截面时需要确定颗粒的折射率 n_p , 而颗粒折射率可通过介电函数得到, 即 $n_p = \sqrt{\epsilon}$ 。Au 纳米球壳的介电函数^[24] 可表示为

$$\epsilon(\omega, L_{\text{eff}}) = \epsilon_{\text{bulk}}(\omega) + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega v_f / L_{\infty}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(v_f / L_{\infty} + A v_f / L_{\text{eff}})}, \quad (7)$$

式中, ϵ_{bulk} 为体相材料的介电函数, ω_p 为等离子体共振频率, 与入射光波长无关, v_f 为费米速率, L_{∞} 为自由电子的平均自由程, A 为接近 1 的无量纲参数, L_{eff} 为有效的自由电子平均自由程。对于 Au 纳米球壳, 不同波长处的 ϵ_{bulk} 可使用文献^[25] 中的数值, $\hbar\omega = 9.03 \text{ eV}$ ^[26], 其中, \hbar 为普朗克常数。 $v_f = 1.4 \times 10^{15} \text{ nm/s}$, $L_{\infty} = 42 \text{ nm}$, $A = 1$, $L_{\text{eff}} = t$, t 为纳米球壳外

壳厚度^[27]。

实验中 Au 纳米球壳的周围介质为水, 其在室温 (20°C) 下的折射率^[28] 可表示为

$$n_m^2 = 1 + \frac{0.5684027565\lambda^2}{\lambda^2 - 0.005101829712} + \frac{0.1726177391\lambda^2}{\lambda^2 - 0.01821153936} + \frac{0.02086189578\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02620722293} + \frac{0.1130748688\lambda^2}{\lambda^2 - 10.69792721}. \quad (8)$$

式中, 波长范围为 $0.182 \sim 1.129 \mu\text{m}$ 。

与 Au 纳米球不同, 可通过改变内核半径和外壳厚度调节 Au 纳米球壳吸收共振波长在近红外范围内的位置和强度。对于实际应用中的纳米颗粒, 用吸收截面衡量其光吸收能力是不合理的, 原因是不同尺寸的单纳米颗粒包含的物质的量不同。因此, 用单位体积内的吸收截面 (体积吸收系数) 衡量颗粒吸收能力^[22]。体积吸收系数 α_{abs} 可表示为

$$\alpha_{\text{abs}} = C_{\text{abs}} / V_p, \quad (9)$$

式中, V_p 为颗粒体积。

3 结果与讨论

将 Au 纳米球壳的外壳厚度固定为 10 nm , 内核半径从 10 nm 逐渐增加到 40 nm (步长为 5 nm), 得到不同内核半径 Au 纳米球壳体积吸收系数与入射光波长的关系如图 2 所示。可以发现: 随着内核半径的增加, Au 纳米球壳的共振吸收峰逐渐红移, 原因是 Au 纳米球壳的外壳厚度不变, 内核半径增大时, 电子云的平均运动距离增大、运动周期增大、振动频率减小, 导致共振频率减小、共振波长增大。当颗粒内核半径从 10 nm 增加到 15 nm 时, 体积吸收系数增大; 从 15 nm 增加到 40 nm 时, 体积吸收系数逐渐减

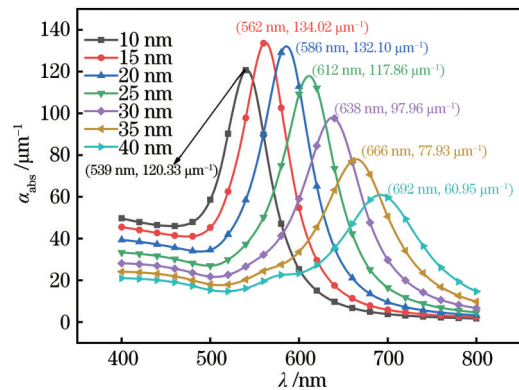


图 2 不同内核半径 Au 纳米球壳体积吸收系数与入射光波长之间的关系

Fig. 2 Relationship between the volume absorption coefficient of Au nanoshell with different core radius and the wavelength of incident light

小。当颗粒内核半径为 15 nm, 外壳厚度为 10 nm 时, 颗粒体积吸收系数最大, 达到 $134.02 \mu\text{m}^{-1}$ 。

将 Au 纳米球壳的内核半径固定为 20 nm, 外壳厚度从 5 nm 逐渐增加到 20 nm (步长为 3 nm), 得到不同外壳厚度 Au 纳米球壳体积吸收系数与入射光波长之间的变化关系如图 3 所示。可以发现: 随着外壳厚度的增加, Au 纳米球壳的共振吸收峰逐渐蓝移, 原因是当 Au 纳米球壳的内核半径不变、外壳厚度增大时, 电子云的平均运动距离减小、运动周期减小、振动频率增大, 导致共振频率增大、共振波长减小。

已有研究发现, 癌细胞温度达到 43°C 时就会被消灭^[29]。因此, 颗粒温度变化的研究对光热治疗具有重要意义。图 4 为颗粒内核半径、外壳厚度对单位入射光强度下颗粒表面温度变化系数 γ 的影响。可以发现: 当内核半径从 10 nm 增加到 40 nm 时, 颗粒共振峰逐渐红移, 对应的 γ 值也逐渐变大; 当 Au 纳米球壳内核半径为 40 nm、外壳厚度为 10 nm 时, 对应的共振波长及 γ 有最大值, 分别为 692 nm 和

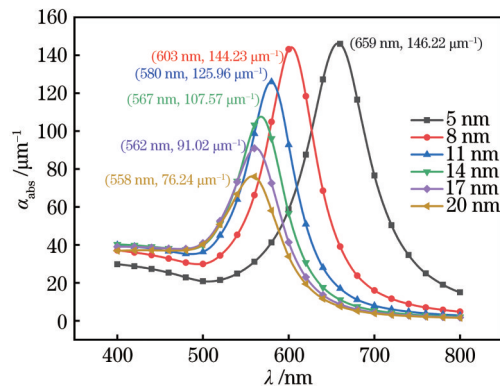


图 3 不同外壳厚度 Au 纳米球壳体积吸收系数与入射光波长之间的关系

Fig. 3 Relationship between the volume absorption coefficient of Au nanoshell with different shell thicknesses and the wavelength of incident light

$1.73 \text{ K}/(\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2})$ 。此外, 颗粒共振波长随内核半径的增加几乎呈线性增加, γ_{max} 也随内核半径的增大而增大, 但内核半径越大, γ_{max} 增大的速度越慢。

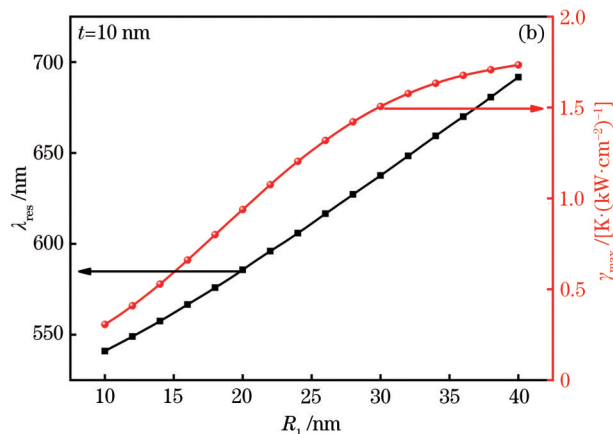
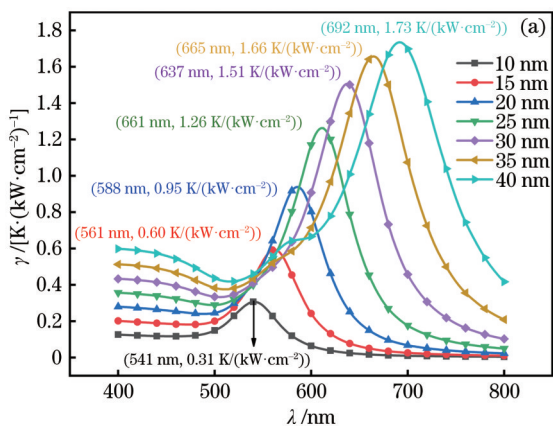


图 4 Au 纳米球壳的内核半径对 γ 的影响。(a) γ 和入射光波长之间的关系; (b) γ_{max} 和共振波长随内核半径的变化曲线

Fig. 4 Effect of the core radius of Au nanoshell on the γ . (a) Relationship between γ and the incident light wavelength; (b) change curve of γ_{max} and resonance wavelength with the core radius

不同外壳厚度 Au 纳米球壳的 γ 与入射光波长之间的关系以及 γ_{max} 和共振波长随外壳厚度的变化情况如图 5 所示。可以发现: 不同外壳厚度 Au 纳米球壳的共振吸收峰在外壳厚度从 5 nm 增加到 20 nm 的过程中逐渐蓝移, 对应的 γ 也逐渐减小; 当 Au 纳米球壳的内核半径为 20 nm、外壳厚度为 5 nm 时, 对应的共振波长以及 γ 具有最大值, 分别为 656 nm 和 $1.04 \text{ K}/(\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2})$, 如图 5(a) 所示。随着外壳厚度的增加, 颗粒共振波长逐渐减小, 外壳厚度越大, 共振波长的减小速度越慢。 γ_{max} 随着外壳厚度的增加几乎线性下降, 如图 5(b) 所示。这表

明可通过改变内核半径和外壳厚度调节共振波长, 以满足其在不同领域中的应用的需求。

针对 Au 纳米球壳光热特性在各个领域中的应用, 选取近红外波段常用的四个典型波长 (800, 808, 820, 1064 nm), 并给出 Au 纳米球壳颗粒的最优内核半径和外壳厚度, 如图 6 所示。其中, 括号里的数字分别代表最优内核半径、外壳厚度以及 γ_{max} 。可以发现: 当入射光波长从 800 nm 增加到 1064 nm 时, 对应的颗粒最优尺寸以及 γ_{max} 逐渐变大, 1064 nm 波长处的 γ_{max} 约为 800 nm 波长处的 2 倍。实验中可以按照实际需求选择所需的入射光波长

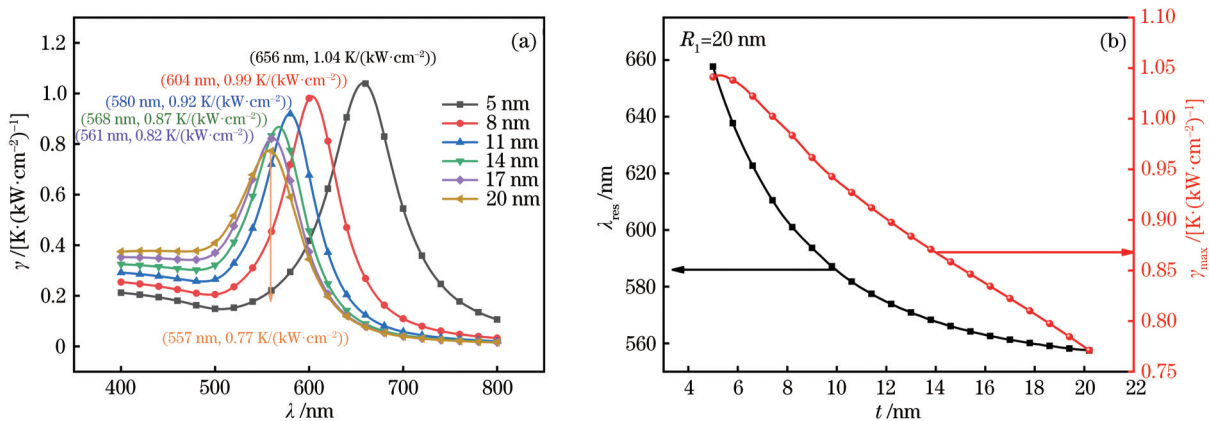


图 5 Au 纳米球壳的外壳厚度对 γ 的影响。(a) γ 与入射光波长之间的关系；(b) γ_{\max} 和共振波长随外壳厚度变化曲线
Fig. 5 Effect of the shell thickness of Au nanoshell on γ . (a) Relationship between γ and the incident light wavelength; (b) change curve of γ_{\max} and resonance wavelength with the shell thickness

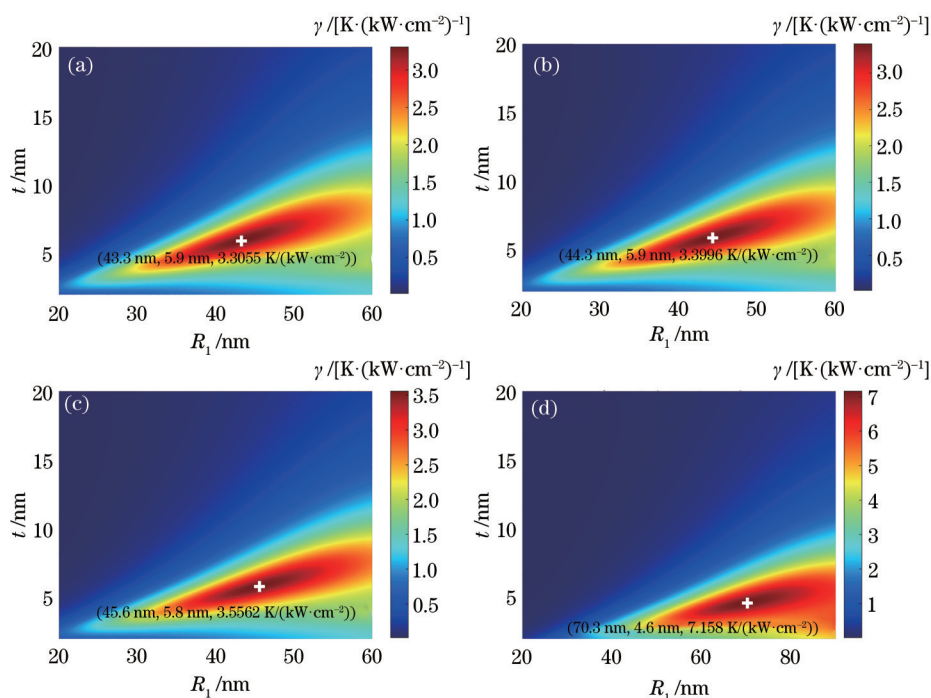


图 6 Au 纳米球壳在四个典型波长下的颗粒最优内核半径和外壳厚度及对应的 γ_{\max} 。

(a) 800 nm; (b) 808 nm; (c) 820 nm; (d) 1064 nm

Fig. 6 Optimal core radius and shell thickness of Au nanoshell under four typical wavelengths and the corresponding γ_{\max} .

(a) 800 nm; (b) 808 nm; (c) 820 nm; (d) 1064 nm

及对应的最优尺寸,如 30 K 的颗粒表面温度变化可以选用 800 nm 的激光器及对应的最优尺寸,并通过调整入射光强度(约 9 kW/cm²)得到颗粒表面的温度变化。

上述分析中只给出了四个典型波长激发下一组 Au 纳米球壳的最优尺寸,但在实验中制备出与优化结果一样的纳米颗粒有一定难度。因此,给出 γ 大于 $0.9\gamma_{\max}$ 的颗粒尺寸分布,如表 1 所示。其中,

表 1 Au 纳米球壳在四个典型波长下的尺寸分布 ($\gamma > 0.9\gamma_{\max}$)

Table 1 Size distribution of Au nanoshell at four typical wavelengths ($\gamma > 0.9\gamma_{\max}$) unit: nm

λ	$[R_{\min}, R_{\max}]$	$R_{\text{mean}} \pm \sigma_R$	$[t_{\min}, t_{\max}]$	$t_{\text{mean}} \pm \sigma_t$
800	[36.7, 51.3]	44.4 ± 3.7	[4.8, 7.4]	6.1 ± 0.7
808	[37.3, 52.2]	45.3 ± 3.7	[4.8, 7.3]	6.0 ± 0.7
820	[38.3, 53.6]	46.5 ± 3.8	[4.7, 7.1]	5.9 ± 0.6
1064	[59.0, 84.5]	72.5 ± 6.4	[3.7, 5.7]	4.7 ± 0.5

R_{\min} 、 R_{\max} 分别为 Au 纳米球壳的最小、最大内核半径, R_{mean} 为平均内核半径, σ_R 为内核半径的标准差, t_{\min} 、 t_{\max} 分别为 Au 纳米球壳的最小、最大外壳厚度, t_{mean} 为平均外壳厚度, σ_t 为外壳厚度的标准差。可以发现: 四个波长对应的颗粒内核半径分布远大于颗粒外壳厚度分布; 入射光波长分别为 800, 808, 820 nm 时, 颗粒尺寸分布范围相差不大; 波长为 1064 nm 时, Au 纳米球壳的尺寸分布较宽, 该结论为实验上制备纳米颗粒提供了理论指导。

4 结 论

研究了 Au 纳米球壳在可见-近红外波段范围内的吸收特性及单位入射光强度下的颗粒表面温度变化。结果表明: 对颗粒吸收特性而言, Au 纳米球壳在共振波长处的体积吸收系数随内核半径的增大先增大后减小, 随外壳厚度的增大而减小; 对颗粒光热特性而言, γ_{\max} 随内核半径的增大逐渐变大, 但变大速度越来越慢, 随外壳厚度的增加几乎呈线性下降。仿真分析了近红外波段范围内四个典型波长下颗粒的 γ_{\max} 及对应的最优尺寸, 结果表明: 波长为 800, 808, 820 nm 时的颗粒最优尺寸几乎相同, 对于 1064 nm 的入射光, Au 纳米球壳的 γ_{\max} 最大, 为 7.158 K/(kW·cm⁻²), 对应的最优内核半径和外壳厚度分别为 70.3 nm 和 4.5 nm。最后, 给出了上述波长下 $\gamma > 0.9\gamma_{\max}$ 的颗粒内核半径及外壳厚度的最大值、最小值、平均值及标准差。这些结果为 Au 纳米球壳在实验上的制备及其在各个领域中的应用提供了理论指导, 并为下一步研究非球型颗粒的光热特性提供了研究思路。

参 考 文 献

- [1] Stockman M I. Nanoplasmonics: past, present, and glimpse into future[J]. Optics Express, 2011, 19(22): 22029-22106.
- [2] Boulais E, Lachaine R, Hatef A, et al. Plasmonics for pulsed-laser cell nanosurgery: fundamentals and applications[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews, 2013, 17: 26-49.
- [3] Qin Z, Bischof J C. Thermophysical and biological responses of gold nanoparticle laser heating[J]. Chemical Society Reviews, 2012, 41(3): 1191-1217.
- [4] Dai Q F, Ouyang M, Yuan W G, et al. Encoding random hot spots of a volume gold nanorod assembly for ultralow energy memory[J]. Advanced Materials, 2017, 29(35): 1701918.
- [5] Kumar A, Kim S, Nam J M. Plasmonically engineered nanoprobe for biomedical applications[J]. Journal of the American Chemical Society, 2016, 138(44): 14509-14525.
- [6] Chen W, Zhang S, Yu Y, et al. Structural-engineering rationales of gold nanoparticles for cancer theranostics[J]. Advanced Materials, 2016, 28(39): 8567-8585.
- [7] Yakupu X, Tuersun P, Wu P P. Optimization of light absorption and scattering properties of gold nanospheroids[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0429001.
夏伊丁·亚库普, 帕尔哈提江·吐尔孙, 武盼盼. 金纳米旋转椭球的光吸收和散射特性优化[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0429001.
- [8] Wu P P, Tuersun P, Abulaiti R, et al. Optimization of light absorption and backscattering characteristics of Au-Ag alloy nanoshells[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1129001.
武盼盼, 帕尔哈提江·吐尔孙, 热米莱·阿卜来提, 等. Au-Ag 合金纳米球壳光吸收和后向散射特性的优化[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1129001.
- [9] Hirsch L R, Stafford R J, Bankson J A, et al. Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(23): 13549-13554.
- [10] James W D, Hirsch L R, West J L, et al. Application of INAA to the build-up and clearance of gold nanoshells in clinical studies in mice[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007, 271(2): 455-459.
- [11] Li Z, Qian W N, Wei S M, et al. Application of photothermal conversion nanomaterials in tumor photothermal therapy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 170005.
李治, 千维娜, 魏思敏, 等. 光热转换纳米材料在肿瘤光热治疗中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 170005.
- [12] Dubi Y, Un I W, Sivan Y. Thermal effects-an alternative mechanism for plasmon-assisted photocatalysis [J]. Chemical Science, 2020, 11(19): 5017-5027.
- [13] Lin J, Wang S, Huang P, et al. Photosensitizer-loaded gold vesicles with strong plasmonic coupling effect for imaging-guided photothermal/photodynamic therapy[J]. ACS Nano, 2013, 7(6): 5320-5329.

- [14] Zhang X W, Liu Y P, Luo L Y, et al. A chemophotothermal synergetic antitumor drug delivery system: gold nanoshell coated wedelolactone liposome [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, 101: 505-512.
- [15] Muñoz-Ortiz T, Hu J, Ortgies D H, et al. Molecular imaging of infarcted heart by biofunctionalized gold nanoshells[J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2021, 10(10): e2002186.
- [16] Ray P C, Khan S A, Singh A K, et al. Nanomaterials for targeted detection and photothermal killing of bacteria[J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(8): 3193-3209.
- [17] Nazari M, Xi M, Lerch S, et al. Plasmonic enhancement of selective photonic virus inactivation [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 11951.
- [18] Borzenkov M, Chirico G, Collini M, et al. Gold nanoparticles for tissue engineering[M]//Dasgupta N, Ranjan S, Lichtfouse E. *Environmental nanotechnology. Environmental chemistry for a sustainable world*. Cham: Springer, 2018, 14: 343-390.
- [19] Parani M, Lokhande G, Singh A, et al. Engineered nanomaterials for infection control and healing acute and chronic wounds[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(16): 10049-10069.
- [20] Phan A D, Nga D T, Viet N A. Theoretical model for plasmonic photothermal response of gold nanostructures solutions[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 108-111.
- [21] Un I W, Sivan Y. Size-dependence of the photothermal response of a single metal nanosphere [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 126(17): 173103.
- [22] Weissleder R. A clearer vision for in vivo imaging[J]. *Nature Biotechnology*, 2001, 19(4): 316-317.
- [23] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and scattering of light by small particles*[M]. New York: Wiley, 1998.
- [24] Tuersun P. *Optical properties of gold nanoparticles and measurement of its size and concentration by light extinction method*[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. 帕尔哈提江·吐尔孙. Au 纳米颗粒光学特性及粒径浓度消光法测量 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [25] Yakubovsky D I, Arsenin A V, Stebunov Y V, et al. Optical constants and structural properties of thin gold films[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25574-25587.
- [26] Rakic A D, Djuricic A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [27] Averitt R D, Westcott S L, Halas N J. Linear optical properties of gold nanoshells[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1999, 16(10): 1824-1832.
- [28] Daimon M, Masumura A. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3811-3820.
- [29] Duong V T T, Phan A D, Lien N T H, et al. Near-infrared photothermal response of plasmonic gold-coated nanoparticles in tissues[J]. *Physica Status Solidi A*, 2018, 215(5): 1700564.