

金纳米旋转椭球的光吸收和散射特性优化

夏伊丁·亚库普^{1,2}, 帕尔哈提江·吐尔孙^{1,2*}, 武盼盼^{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新疆师范大学新型光源与微纳光学重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要 针对金纳米旋转椭球在光热治疗和生物成像中的应用,利用 T 矩阵方法和介电函数尺寸修正模型,从理论上定量研究金纳米旋转椭球的共振光吸收与散射特性,对金纳米旋转椭球的尺寸参数进行优化,获得最优的短半轴与长半轴。对于光热治疗中的常用波长,在特定尺寸参数范围内优化的金纳米旋转椭球在波长 1064 nm 处具有最大的吸收特性;对于生物成像中的常用波长,在特定尺寸参数范围内优化的金纳米旋转椭球在波长 1310 nm 处具有最大的散射特性。与金纳米球壳的优化结果对比发现,金纳米旋转椭球在光热治疗和生物成像的应用中比金纳米球壳具有明显的优势。

关键词 散射; 光吸收与散射; 优化; T 矩阵方法; 光热治疗; 生物成像

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0429001

Optimization of Light Absorption and Scattering Properties of Gold Nanospheroids

Yakupu Xiayiding^{1,2}, Tuersun Paerhatijiang^{1,2*}, Wu Panpan^{1,2}

¹ School of Physics and Electronic Engineering, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

² Key Laboratory of Novel Light Source and Micro/Nano-Optics, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China

Abstract The resonant light absorption and scattering properties of gold nanospheroids were quantitatively studied for their application in photothermal therapy (PPTT) and biological imaging via the T-matrix method with a size-dependent dielectric function. The size parameters, including the minor and major semi-axes, of these Au nanospheroids were accordingly optimized; for the common wavelengths used in PPTT and biological imaging, the optimized nanospheroids exhibited the maximum absorption and scattering at 1064 nm and 1310 nm, respectively, within the range of specified size parameters. The comparison of these results with those obtained by optimized gold nanoshells demonstrated the obvious advantage of these gold nanospheroids for PPTT and biological imaging applications.

Key words scattering; light absorption and scattering; optimization; T-matrix method; photothermal therapy; biological imaging

OCIS codes 290.5825; 300.1030; 160.4236; 170.3880

1 引 言

金属纳米颗粒能表现出与体相材料不同的优异的光学特性。金属纳米颗粒与特定波长的入射光相互作用时会产生局域表面等离子共振(LSPR)现象,从而导致纳米颗粒会强烈吸收和散射入射光,同时纳米颗粒表面附近的局部电场会大幅增强。基于

这些独特的光学特性,金属纳米颗粒在生物成像^[1]、光热治疗^[2]、生物传感^[3]、光伏器件^[4]、发光二极管^[5]、表面增强拉曼散射^[6]等领域具有广泛应用。

当金纳米颗粒应用于光热治疗时,强烈的吸收特性有助于增强光热效应^[7],缩短光照时间,并能减少生物组织的光热损伤。当金纳米颗粒应用于生物成像时^[8],较强的散射特性有助于增强生物组织的

收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2019-09-22; 录用日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(11764042)、新疆维吾尔自治区“百名青年博士引进计划”项目(BS2016002)、新疆维吾尔自治区高校科研计划项目(XJEDU2016I032)、新疆师范大学新型光源与微纳光学重点实验室招标课题(XJNUSYS092017A02)

* E-mail: ptuersun@163.com

回波信号,提高成像质量。目前,在光热治疗和生物成像应用中最常用的颗粒是金纳米球壳^[9-11],一些研究人员^[12]对金纳米球壳的光吸收和散射特性的优化问题进行了研究,并给出了定量的优化结果。为了寻找比金纳米球壳的吸收和散射特性更好的纳米颗粒,本文以金纳米旋转椭球为研究对象,对颗粒的光吸收和散射特性进行研究,发现它具有更高的光吸收和散射系数。

目前,用于模拟金属纳米颗粒光学特性的理论方法有 Mie 理论、T 矩阵、离散偶极子近似(DDA)、时域有限差分(FDTD)等^[13-14]。Mie 理论是严格的解析方法,主要用于研究纳米球和纳米球壳的光学特性;T 矩阵属于半解析方法,主要用于研究旋转对称纳米颗粒(纳米棒、纳米旋转椭球等)的光学特性;DDA 和 FDTD 是典型的数值方法,可以用于研究任意形状纳米颗粒的光学特性,与 Mie 理论和 T 矩阵相比,计算速度相对较慢。研究人员主要用可见-近红外分光光度计、拉曼光谱仪、暗场显微镜等实验设备测量金属纳米颗粒的光学特性^[15-17]。

针对金纳米颗粒在光热治疗和生物成像中的应用,本文采用 T 矩阵方法定量研究金纳米旋转椭球的共振光吸收与散射特性,对金纳米旋转椭球的光吸收和散射特性进行优化,进而获得相应最优的颗粒尺寸参数。

2 理论方法

研究对象为金纳米旋转椭球,几何模型如图 1 所示, a 表示短半轴, c 表示长半轴。需注意的是,本文考虑的椭球体为扁长的旋转椭球体,即绕椭圆的长轴旋转而成的椭球体。颗粒的吸收和散射特性可以用吸收截面 C_{abs} 和散射截面 C_{sca} 描述。入射光为非偏振光,入射光的照射方向为任意方向。在实际应用中,金纳米颗粒的方位是随机分布的,因此本文考虑方位随机分布的金纳米旋转椭球的光吸收和

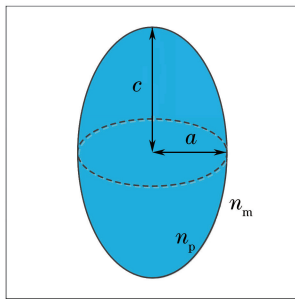


图 1 金纳米旋转椭球的几何模型

Fig. 1 Geometric model of gold nanospheroid

散射特性,计算获得的参数也是方位随机分布的统计平均值,在这种情况下,入射光的照射方向对吸收和散射特性不会产生影响。方位随机分布的金纳米旋转椭球的吸收截面和散射截面可以用 T 矩阵方法进行计算,表达式为^[18]

$$\langle C_{\text{abs}} \rangle = \langle C_{\text{ext}} \rangle - \langle C_{\text{sca}} \rangle, \quad (1)$$

$$\langle C_{\text{sca}} \rangle = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{n'=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \sum_{m'=-n'}^{n'} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 |T_{mm'n'}^{ij}|^2, \quad (2)$$

$$\langle C_{\text{ext}} \rangle = -\frac{2\pi}{k^2} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n [T_{mmnn}^{11} + T_{mmnn}^{22}]. \quad (3)$$

式中: k 为入射光在周围介质中的波数; m 、 n 、 m' 、 n' 分别为入射场和散射场展开式的项数, i 和 j 分别为 T 矩阵的行号和列号; C_{ext} 为消光截面。公式表明:每个颗粒的散射截面在均匀取向分布上的平均值与颗粒参照系中计算的 T 矩阵元绝对值的平方成正比;每个颗粒的消光截面在均匀取向分布上的平均值与粒子参照系中计算的 T 矩阵对角元素和的实部成正比。

多个金纳米旋转椭球的吸收和散射特性可以用吸收系数 μ_{abs} 和散射系数 μ_{sca} 描述, μ_{abs} 和 μ_{sca} 分别代表单位体积内所有颗粒的总吸收和散射截面。如果每个颗粒的光散射满足不相干的单次散射,并且颗粒系是单分散颗粒系,那么 μ_{abs} 和 μ_{sca} 的表达式为

$$\mu_{\text{abs}} = NC_{\text{abs}} = f \frac{C_{\text{abs}}}{V_p}, \quad (4)$$

$$\mu_{\text{sca}} = NC_{\text{sca}} = f \frac{C_{\text{sca}}}{V_p}, \quad (5)$$

式中: N 为颗粒数浓度(即单位体积内的颗粒数); f 为颗粒的体积分数(即单位体积内所有颗粒的总体积); V_p 为单个颗粒的体积。为了公平地比较吸收和散射特性,假设不同的金纳米旋转椭球颗粒系具有相同的体积分数,因此,为了比较单分散金纳米旋转椭球颗粒系的吸收和散射特性,定义了两个新的参数,分别称作体积吸收系数 α_{abs} 和体积散射系数 α_{sca} 。他们的表达式为

$$\alpha_{\text{abs}} = \frac{C_{\text{abs}}}{V_p}, \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{V_p}. \quad (7)$$

利用 Matlab 编写金纳米旋转椭球体积吸收系数 α_{abs} 和体积散射系数 α_{sca} 的计算机代码,代码需要输入的参数有入射光在真空中的波长 λ 、短半轴 a 、长半轴 c 、颗粒的折射率 n_p 、以及周围介质折射率

n_m 。计算中,周围介质为生物组织,其折射率为1.4^[19]。颗粒的折射率可由介电函数得到,即 $n_p = \epsilon^{1/2}$,颗粒的介电函数可写成^[20]

$$\epsilon(\omega, L_{eff}) = \epsilon_{bulk}(\omega) + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega v_f/l_\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(v_f/l_\infty + Av_f/L_{eff})}, \quad (8)$$

式中: ω 为入射光的频率; ϵ_{bulk} 为体相材料的介电函数; ω_p 为等离子体频率; v_f 为费米速率; l_∞ 为自由电子的平均自由程; A 为接近于1的无量纲参数; L_{eff} 为有效的自由电子的平均自由程。对于金纳米旋转椭球,不同波长处 ϵ_{bulk} 的数据来自 Johnson 公开发表的文献[21],即 $\hbar\omega_p = 9.03 \text{ eV}$ ^[22], $v_f = 1.40 \times 10^{15} \text{ nm/s}$ ^[23], $l_\infty = 42 \text{ nm}$ ^[23], $A = 1$ ^[23], $L_{eff} = R_{eff}$, R_{eff} 为颗粒的等体半径。

3 结果与讨论

图2为单个金纳米旋转椭球的长半轴对体积吸收系数 α_{abs} 光谱和体积散射系数 α_{sca} 光谱的影响。如图2(a)所示,当短半轴固定为20 nm,长半轴为40,50,60 nm时,吸收共振峰波长从635 nm 逐渐移到778 nm,而对应的共振峰强度从114.83 μm^{-1} 增

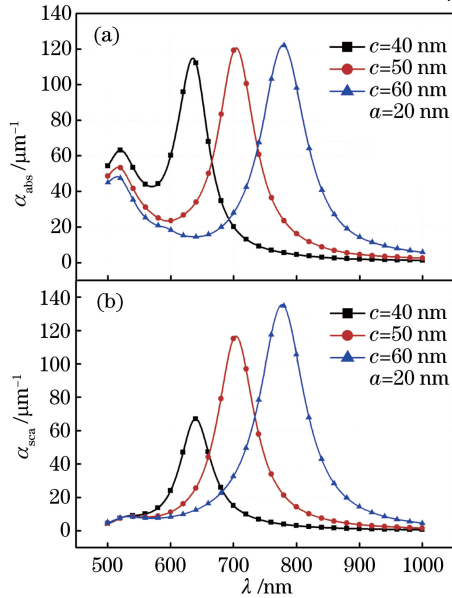


图2 金纳米旋转椭球的长半轴对体积吸收系数和体积散射系数光谱的影响。(a) 体积吸收系数 α_{abs} ; (b) 体积散射系数 α_{sca}

Fig. 2 Effect of major semi-axis on spectra of volume absorption coefficient and volume scattering coefficient of gold nanospheroids. (a) Volume absorption coefficient α_{abs} ; (b) volume scattering coefficient α_{sca}

加到122.16 μm^{-1} ,体积吸收系数光谱中出现两个共振峰,长波长处的共振峰对应偶极等离子共振,短波长处的共振峰对应四极等离子共振。如图2(b)所示,散射共振峰波长从640 nm 逐渐移至777 nm,而对应的散射共振峰强度从67.02 μm^{-1} 增加到135.50 μm^{-1} 。

图3为单个金纳米旋转椭球的短半轴对体积吸收系数 α_{abs} 光谱和体积散射系数 α_{sca} 光谱的影响。如图3(a)所示,当长半轴固定为40 nm,短半轴为10,15,20 nm时,吸收共振峰波长从635 nm 移到832 nm,而对应的共振峰强度从365.43 μm^{-1} 减小到114.83 μm^{-1} 。如图3(b)所示,散射共振峰波长从640 nm 移到832 nm,其对应的共振峰强度先增大后减小,分别为51.95,86.10,67.02 μm^{-1} 。

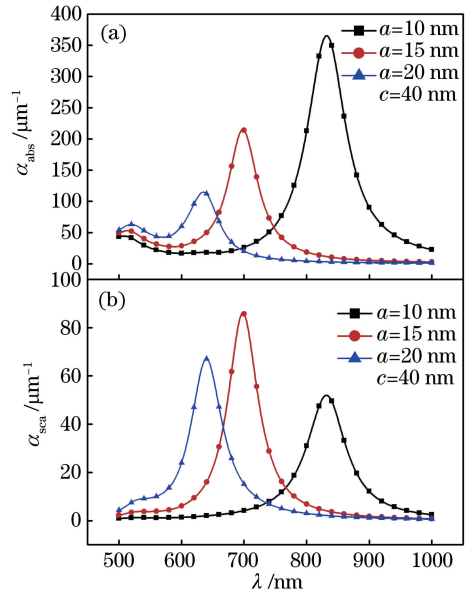


图3 金纳米旋转椭球的短半轴对体积吸收系数和体积散射系数光谱的影响。(a) 体积吸收系数 α_{abs} ; (b) 体积散射系数 α_{sca}

Fig. 3 Effect of minor semi-axis on spectra of volume absorption coefficient and volume scattering coefficient of gold nanospheroids. (a) Volume absorption coefficient α_{abs} ; (b) volume scattering coefficient α_{sca}

由以上分析可知,通过改变金纳米旋转椭球的尺寸参数,可以将共振波长从可见光波段调控到近红外波段,因此,在某一特定波长处能找到金纳米旋转椭球的最优尺寸。接下来将计算金纳米旋转椭球在光热治疗和生物成像中几种典型波长处的最优尺寸参数。

3.1 吸收特性优化

金纳米颗粒应用于光热治疗时,需要具有较强

的吸收特性。下面将定量研究金纳米旋转椭球尺寸的改变对吸收共振峰位置和强度的影响。

图 4 为单个金纳米旋转椭球的吸收共振峰位置和强度随短半轴变化的曲线。当长半轴固定为 50 nm,短半轴从 10 nm 逐渐增加到 25 nm 时,图 4(a)的吸收共振峰位置和图 4(b)的吸收共振峰强度逐渐减小。图 5 为单个金纳米旋转椭球的吸收共振峰位置和强度随长半轴变化的曲线。当短半轴固定为 10 nm,长半轴从 15 nm 逐渐增加到 45 nm 时,图 5(a)的吸收共振峰位置和图 5(b)的吸收共振峰强度逐渐增大。

对于金纳米旋转椭球在光热治疗中的应用,本

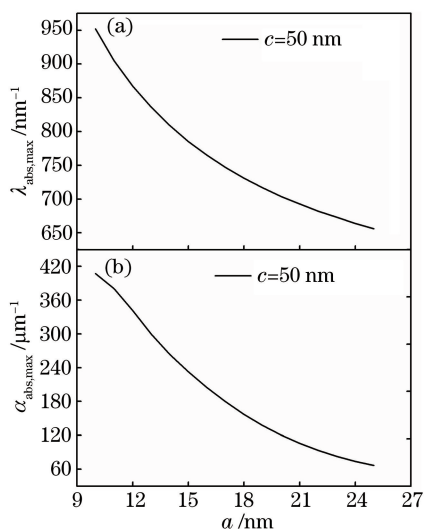


图 4 金纳米旋转椭球吸收共振峰位置和强度随短半轴的变化。(a)吸收共振峰位置;(b)吸收共振峰强度

Fig. 4 Position and intensity of absorption resonance peak of gold nanospheroids varying with minor semi-axis. (a) Position of absorption resonance peak; (b) intensity of absorption resonance peak

文选择 4 种经典波长,即 800,808,820,1064 nm,根据这 4 种波长处的体积吸收系数最大值,可以获得金纳米旋转椭球对应的最优尺寸参数。图 6 为当入射光波长为 800 nm 时,单个金纳米旋转椭球体积吸收系数随尺寸参数的变化情况。为了节省理论计算时间,首先取尺寸步长为 1 nm,获得最优的吸收系数和尺寸参数 ($a = 9 \text{ nm}, c = 34 \text{ nm}, \alpha_{\text{abs,max}} = 356.44 \mu\text{m}^{-1}$),如图 6(a)所示;然后在此优化结果周围选取较小的尺寸范围,取尺寸步长为 0.1 nm,从而获得更为精确的最优吸收系数和尺寸参数 ($a = 8.4 \text{ nm}, c = 32.1 \text{ nm}, \alpha_{\text{abs,max}} = 358.45 \mu\text{m}^{-1}$),如图 6(b)所示。

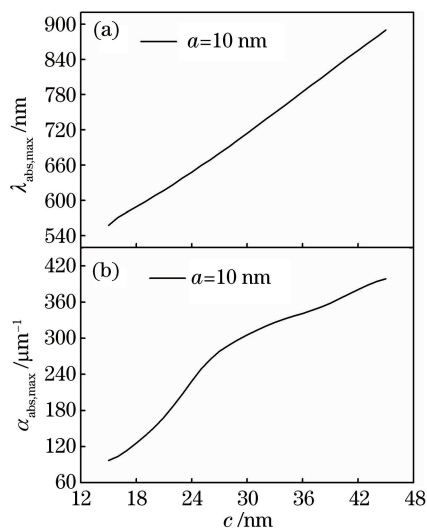


图 5 金纳米旋转椭球吸收共振峰位置和强度随长半轴的变化。(a)吸收共振峰位置;(b)吸收共振峰强度

Fig. 5 Position and intensity of absorption resonance peak of gold nanospheroids varying with major semi-axis. (a) Position of absorption resonance peak; (b) intensity of absorption resonance peak

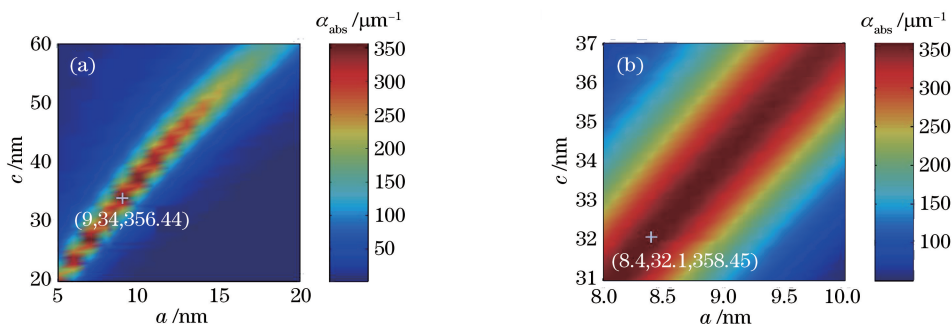


图 6 金纳米旋转椭球体积吸收系数随短半轴和长半轴的变化(入射光波长为 800 nm)。

(a)尺寸步长为 1 nm;(b)尺寸步长为 0.1 nm

Fig. 6 Volume absorption coefficient of gold nanospheroids at wavelength of 800 nm varying with minor semi-axis and major semi-axis. (a) Step size of 1 nm; (b) step size of 0.1 nm

表 1 为单个金纳米旋转椭球在光热治疗中 4 种典型波长(800, 808, 820, 1064 nm)处的吸收特性和尺寸参数优化结果。从表 1 可知,随着入射波长的增大,体积吸收系数最大值增大,最优短

半轴参数逐渐减小,而最优长半轴参数逐渐增大。以此得出,金纳米旋转椭球在光热治疗中具有最优的体积吸收特性,为光热治疗提供了最优的尺寸。

表 1 金纳米旋转椭球的体系吸收系数 $\alpha_{\text{abs,max}}$ 、短半轴 a_{opt} 以及长半轴 c_{opt} 的优化结果

Table 1 Optimization results of volume absorption coefficient $\alpha_{\text{abs,max}}$, minor semi-axis a_{opt} , and major semi-axis c_{opt} of gold nanospheroids

λ / nm	$\alpha_{\text{abs,max}} / \mu\text{m}^{-1}$	$a_{\text{opt}} / \text{nm}$	$c_{\text{opt}} / \text{nm}$
800	358.45	8.4	32.1
808	362.90	8.3	32.3
820	370.49	8.3	33.2
1064	454.32	7.9	48.5

为了比较金纳米旋转椭球与金纳米球壳的吸收特性优化结果,采用 Mie 散射理论对金纳米球壳的吸收特性进行优化。表 2 为在光热治疗中的 4 种典型波长处,金纳米旋转椭球与金纳米球壳的优化结

果对比。从表 2 可知,金纳米旋转椭球的最大体积吸收系数是金纳米球壳的 3 倍以上。因而金纳米旋转椭球相比金纳米球壳,在光热治疗应用中具有明显的优势。

表 2 金纳米旋转椭球与金纳米球壳的吸收特性优化结果

Table 2 Optimized results of absorption characteristics of gold nanospheroids and gold nanoshells

Object	Parameter	Value			
		$\lambda = 800 \text{ nm}$	$\lambda = 808 \text{ nm}$	$\lambda = 820 \text{ nm}$	$\lambda = 1064 \text{ nm}$
Gold nanospheroid	$\alpha_{\text{abs,max}} / \mu\text{m}^{-1}$	358.45	362.90	370.49	454.32
	$a_{\text{opt}} / \text{nm}$	8.4	8.3	8.3	7.9
	$c_{\text{opt}} / \text{nm}$	32.1	32.3	33.2	48.5
Gold nanoshell	$\alpha_{\text{abs,max}} / \mu\text{m}^{-1}$	112.03	109.64	106.28	59.68
	$R_{1,\text{opt}} / \text{nm}$	29.2	29.3	30.5	46.0
	$t_{\text{opt}} / \text{nm}$	3.8	3.7	3.7	3.0

3.2 散射特性优化

金纳米颗粒应用于生物成像时,需要具有较强的散射特性。下面将定量研究金纳米旋转椭球的尺寸变化对其散射共振峰位置和强度的影响。

图 7 为单个金纳米旋转椭球的散射共振峰位置和强度随短半轴变化的曲线。当长半轴固定为 60 nm,短半轴从 15 nm 逐渐增加到 40 nm 时,图 7(a)的散射共振峰位置和图 7(b)的散射共振峰强度逐渐减小。图 8 为单个金纳米旋转椭球的散射共振峰位置和强度随长半轴变化的曲线。当短半轴固定为 15 nm,长半轴从 20 nm 逐渐增加到 60 nm 时,图 8(a)的散射共振峰位置和图 8(b)的散射共振峰强度逐渐增大。

对于金纳米旋转椭球在生物成像中的应用,本文选择 4 种经典波长,即 830, 840, 900, 1310 nm。根据这 4 种波长处的体积散射系数最大值,可以获得金纳米旋转椭球对应的最优尺寸参数。图 9 为当入射光波长为 830 nm 时,单个金纳米旋转椭球体积散射系数随尺寸参数的变化情况。为了节省理论

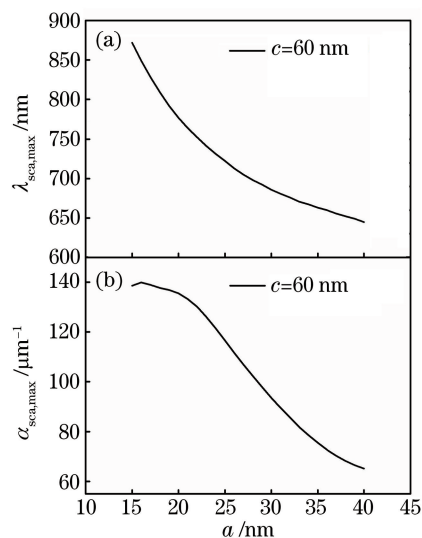


图 7 金纳米旋转椭球散射共振峰位置和强度随短半轴的变化。(a)散射共振峰位置;(b)散射共振峰强度
Fig. 7 Position and intensity of scattering resonance peak of gold nanospheroids varying with minor semi-axis. (a) Position of scattering resonance peak; (b) intensity of scattering resonance peak

计算时间,进行两次优化的方法,首先取尺寸步长为 1 nm,获得最优的散射系数和尺寸参数($a=20$ nm, $c=67$ nm, $\alpha_{sca,max}=147.37 \mu\text{m}^{-1}$),如图 9(a)所示;然后在此优化结果范围内选取较小的尺寸范围,取尺寸步长为 0.1 nm,从而获得更为精确的最优散射系数和尺寸参数($a=19.9$ nm, $c=67.1$ nm, $\alpha_{sca,max}=147.62 \mu\text{m}^{-1}$),如图 9(b)所示。

表 3 为单个金纳米旋转椭球在生物成像中的 4 种典型波长(830,840,900,1310 nm)处的散射特性和尺寸参数优化结果。从表 3 可知,随着入射波长的增大,体积散射系数最大值增加,最优短半轴参数先减小后增大,而最优长半轴参数逐渐增大。以此可以得出,金纳米旋转椭球在生物成像中具有最优的体积散射特性,为生物成像提供了最优的尺寸。

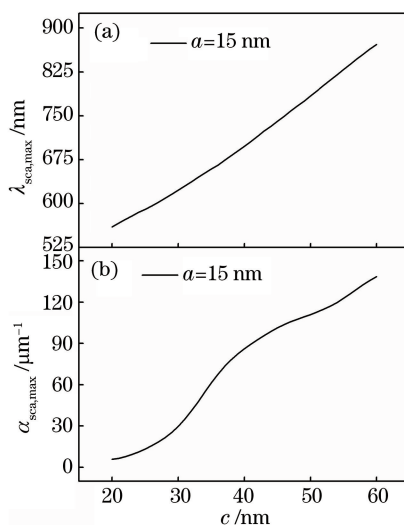


图 8 金纳米旋转椭球散射共振峰位置和强度随长半轴的变化。(a)散射共振峰位置;(b)散射共振峰强度
Fig. 8 Position and intensity of scattering resonance peak of gold nanospheroids varying with major semi-axis.
(a) Position of scattering resonance peak; (b) intensity of scattering resonance peak

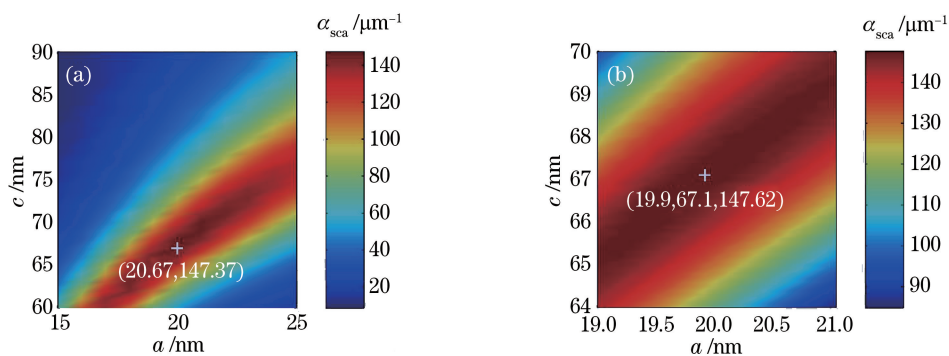


图 9 金纳米旋转椭球体积散射系数随短半轴和长半轴的变化(入射光波长为 830 nm)。
(a)尺寸步长为 1 nm;(b)尺寸步长为 0.1 nm

Fig. 9 Volume scattering coefficient of gold nanospheroids at wavelength of 830 nm varying with minor semi-axis and major semi-axis. (a) Step size of 1 nm; (b) step size of 0.1 nm

表 3 金纳米旋转椭球的体系散射系数 $\alpha_{sca,max}$ 、短半轴 a_{opt} 以及长半轴 c_{opt} 的优化结果

Table 3 Optimization results of volume scattering coefficient $\alpha_{sca,max}$, minor semi-axis a_{opt} , and major semi-axis c_{opt} of gold nanospheroids

λ / nm	$\alpha_{sca,max} / \mu\text{m}^{-1}$	a_{opt} / nm	c_{opt} / nm
830	147.62	19.9	67.1
840	150.98	19.8	68.2
900	165.92	19.3	74.9
1310	191.59	19.6	128.4

为了比较金纳米旋转椭球与金纳米球壳的散射特性优化结果,本文采用 Mie 散射理论对金纳米球壳的散射特性进行优化。表 4 为在生物成像中的 4 种典型波长处,金纳米旋转椭球与金纳米球壳优

化结果的对比。从表 4 可知,金纳米旋转椭球的最大体积散射系数是金纳米球壳的 2 倍以上,因此金纳米旋转椭球相比金纳米球壳,在生物成像应用中具有明显的优势。

表 4 金纳米旋转椭球与金纳米球壳的散射特性优化结果

Table 4 Optimized results of scattering characteristics of gold nanospheroids and gold nanoshells

Object	Parameter	Value			
		$\lambda=1310$ nm	$\lambda=830$ nm	$\lambda=840$ nm	$\lambda=900$ nm
Gold Nanospheroid	$\alpha_{\text{sca,max}}/\mu\text{m}^{-1}$	147.62	150.98	165.92	191.59
	a_{opt}/nm	19.9	19.8	19.3	19.6
	c_{opt}/nm	67.1	68.2	74.9	128.4
Gold nanoshell	$\alpha_{\text{sca,max}}/\mu\text{m}^{-1}$	59.24	58.05	51.05	23.01
	$R_{1,\text{opt}}/\text{nm}$	54.4	55.6	62.5	111.3
	t_{opt}/nm	10.1	10	9.4	7.8

4 结 论

采用 T 矩阵方法和介电函数的尺寸修正模型,从理论上定量研究金纳米旋转椭球的共振光吸收和散射特性,并对金纳米旋转椭球的尺寸参数进行优化设计,最终比较了金纳米旋转椭球与金纳米球壳的吸收和散射特性优化的结果。研究表明:通过改变金纳米旋转椭球的短半轴与长半轴参数,可以在可见-近红外波长范围内调节吸收和散射共振峰的位置和强度;金纳米旋转椭球的最大吸收系数是金纳米球壳的 3 倍以上;金纳米旋转椭球的最大散射系数是金纳米球壳的 2 倍以上。因此,金纳米旋转椭球在光热治疗和生物成像的应用中比金纳米球壳具有明显的优势,可作为理想的光热治疗剂和造影剂。

参 考 文 献

- [1] Špringer T, Chadtová Song X, Ermini M L, et al. Functional gold nanoparticles for optical affinity biosensing [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2017, 409(16): 4087-4097.
- [2] Liang G H, Xing D. Progress in organic nanomaterials for laser-induced photothermal therapy of tumor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207020.
梁国海, 邢达. 用于肿瘤光热治疗的有机纳米材料研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207020.
- [3] Kaya S I, Kurbanoglu S, Ozkan S A. Nanomaterials-based nanosensors for the simultaneous electrochemical determination of biologically important compounds: ascorbic acid, uric acid, and dopamine [J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2019, 49(2): 101-125.
- [4] Starowicz Z, Kędra A, Berent K, et al. Influence of Ag nanoparticles microstructure on their optical and plasmonic properties for photovoltaic applications[J]. *Solar Energy*, 2017, 158: 610-616.
- [5] Pan J Y, Chen J, Zhao D W, et al. Surface plasmon-enhanced quantum dot light-emitting diodes by incorporating gold nanoparticles[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): A33-A43.
- [6] Yang D, Nie Z Q, Zhai A P, et al. Surface-enhanced Raman scattering performances of GO/AuNRs composite substrates excited by radially polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0630003.
杨东, 聂仲泉, 翟爱平, 等. 径向偏振光激发氧化石墨烯/金纳米棒复合基底的表面增强拉曼散射性能[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0630003.
- [7] Xia H W, Gao Y J, Yin L, et al. Light-triggered covalent coupling of gold nanoparticles for photothermal cancer therapy [J]. *ChemBio Chem*, 2019, 20(5): 667-671.
- [8] Suzuka H, Mimura A, Inaoka Y, et al. Magnetic nanoparticles in macrophages and cancer cells exhibit different signal behavior on magnetic particle imaging [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(11): 6857-6865.
- [9] Wang H, Zhao R F, Li Y Y, et al. Aspect ratios of gold nanoshell capsules mediated melanoma ablation by synergistic photothermal therapy and chemotherapy [J]. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2016, 12(2): 439-448.
- [10] Guan Q Q, Wang C N, Wu D, et al. Cerasome-based gold-nanoshell encapsulating L-menthol for ultrasound contrast imaging and photothermal therapy of cancer[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(1): 015101.
- [11] Coughlin A J, Ananta J S, Deng N F, et al.

- Gadolinium-conjugated gold nanoshells for multimodal diagnostic imaging and photothermal cancer therapy[J]. *Small*, 2014, 10(3): 556-565.
- [12] Tuersun P, Han X E. Optimal dimensions of gold nanoshells for light backscattering and absorption based applications [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 146: 468-474.
- [13] Myroshnychenko V, Rodríguez-Fernández J, Pastoriza-Santos I, et al. Modelling the optical response of gold nanoparticles[J]. *Chemical Society Reviews*, 2008, 37(9): 1792-1805.
- [14] Khlebtsov N G. T-matrix method in plasmonics: an overview [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 123: 184-217.
- [15] Barnes L. Comparing experiment and theory in plasmonics [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(11): 114002.
- [16] McCall S L, Platzman P M, Wolff P A. Surface enhanced Raman scattering [J]. *Physics Letters A*, 1980, 77(5): 381-383.
- [17] Anderson L J E, Mayer K M, Fraleigh R D, et al. Quantitative measurements of individual gold nanoparticle scattering cross sections[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(25): 11127-11132.
- [18] Mishchenko M I. Light scattering by size-shape distributions of randomly oriented axially symmetric particles of a size comparable to a wavelength [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(24): 4652-4666.
- [19] Lin A W H, Lewinski N A, West J L, et al. Optically tunable nanoparticle contrast agents for early cancer detection: model-based analysis of gold nanoshells[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2005, 10(6): 064035.
- [20] Kreibig U, Vollmer M. *Optical properties of metal clusters*[M]. Berlin: Springer, 1995: 297-337.
- [21] Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370-4379.
- [22] Rakić A D, Djurišić 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.
- [23] 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.