

## 激光与光电子学进展

## Rh 纳米结构消光特性模拟与分析

江睿, 陈芳, 郑昭慧, 柯少颖, 周锦荣, 刘冠洲, 黄志伟\*

闽南师范大学物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000

**摘要** 近年来, Rh 纳米结构因在紫外波段有较强的局域表面等离子共振(LSPR)效应, 且材料的物理化学性能稳定, 引起了广泛关注。以 Rh 纳米结构为研究对象, 采用时域有限差分法系统地模拟并分析 200~400 nm 波段圆柱状 Rh 纳米阵列结构的消光特性和电场强度分布, 以此研究 Rh 纳米结构的局域表面等离子共振特性。结果表明: Rh 纳米结构的 LSPR 特性与其直径、高度、间距以及周围折射率都有极强的相关性。通过这些参数的变化可以有效调制 Rh 纳米结构的 LSPR 共振波段, 这对实现 Rh 纳米结构 LSPR 效应在紫外吸收、探测等相关领域应用具有重要参考意义。

**关键词** 光电子学; 局域表面等离子共振; Rh 纳米结构; 时域有限差分法; 消光光谱

中图分类号 O484.4+1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221634

## Simulation and Analysis of Extinction Properties of Rh Nanostructures

Jiang Rui, Chen Fang, Zheng Zhaohui, Ke Shaoying, Zhou Jinrong,

Liu Guanzhou, Huang Zhiwei\*

College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, Fujian, China

**Abstract** Recently, Rh nanostructures have attracted significant research attention because of their strong localized surface plasmon resonance (LSPR) at ultraviolet wavelengths and stable physical and chemical properties. In this study, the extinction properties and electric field intensity distribution of cylindrical Rh nanostructures in 200–400 nm wavebands are systematically simulated and analyzed using the finite-difference time-domain method to examine the LSPR of Rh nanostructures. The results show that the LSPR properties of Rh nanostructures are significantly correlated with the diameter, height, spacing, and peripheral refractive index. The LSPR resonance wavebands of Rh nanostructures can be effectively modulated by varying the structural parameters. This study provides a reference for applying the LSPR of Rh nanostructures in areas such as ultraviolet absorption and optical detectors.

**Key words** optoelectronics; localized surface plasmon resonance; Rh nanostructure; finite-difference time-domain method; extinction spectrum

## 1 引言

当金属纳米结构在一定条件下被辐射时, 入射的电磁场会导致纳米颗粒表面的自由电子发生相干振荡或激发, 这种现象被称为局域表面等离子共振(LSPR)。一般来说, LSPR 的性质依赖于金属纳米结构的大小、间距以及其周围介质环境, 因此控制金属纳米结构的形状或周围介质环境是产生局域表面等离子共振或光学响应的重要途径之一<sup>[1]</sup>。

目前, 对 LSPR 特性的研究主要采用 Au、Ag<sup>[2-4]</sup> 等贵金属, 但 Au、Ag 纳米结构 LSPR 效应通常适用于

可见光和红外光波段, 紫外光波段金属纳米结构 LSPR 效应的研究仍具有挑战。为实现紫外 LSPR 效应, 可以采用 Al<sup>[5]</sup> 或 Rh 金属纳米结构, 但 Al 在空气中容易被氧化, 其应用受到限制。Rh 的紫外 LSPR 特性直到最近才被发现, 其因在紫外波段有较强的 LSPR 效应且材料的物理化学性能稳定而引起人们的广泛关注<sup>[6]</sup>。目前关于 Rh 纳米结构紫外波段 LSPR 特性已有文献报道, Watson 等<sup>[7]</sup> 通过化学实验合成了三脚架型 Rh 纳米颗粒, 采用离散式偶极近似法计算 Rh 的吸收光谱, 发现 LSPR 会受到颗粒高度和衬底环境的影响, 并验证了 Rh 在紫外波段具有很

收稿日期: 2022-05-18; 修回日期: 2022-06-19; 录用日期: 2022-06-24; 网络首发日期: 2022-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(62004087)、福建省自然科学基金(2020J01815)、闽南师范大学校长基金(KJ2020006)

通信作者: \*zhuang@mnnu.edu.cn

好的等离子体行为;Yael 等<sup>[8-9]</sup>利用有限元法模拟立方体或正四面体 Rh 纳米颗粒,并通过控制颗粒表面的曲度和凹凸性对其近场特性和远场分布情况进行系统的数值研究;Wakita 等<sup>[11]</sup>利用了磁圆分色光谱对三角架型、立方体和正四面体在内的 Rh 纳米结构的磁光特性进行了研究,了解其在紫外区域的光学响应。

除了采用上述结构外,还可以采用圆柱形 Rh 纳米结构阵列激发紫外 LSPR 效应,分别改变底面直径和高度等参数更好地研究尺寸对 LSPR 特性的影响,但关于圆柱形 Rh 纳米结构 LSPR 效应仍缺乏系统的研究。因此,为了进一步研究 Rh 的紫外 LSPR 特性,通过时域有限差分(FDTD)法<sup>[10]</sup>系统地研究分析圆柱形 Rh 纳米结构的直径、高度、间距以及周围折射率变化对 LSPR 特性的影响,这对实现 Rh 纳米结构 LSPR 效应在紫外吸收、探测等相关领域应用具有重要参考意义。

## 2 结构模型和计算方法

光照在金属纳米颗粒表面,使表面上的自由电子发生极化而产生偶极子,这些偶极子因为电磁场的变化产生共振,并且在特定的波长下产生很强的吸收和散射,即产生强烈的消光,而 LSPR 频率就是在消光系数最大值时的频率<sup>[11]</sup>,因此可以通过研究纳米颗粒的消光光谱进而分析 LSPR 峰的变化。采用 FDTD 方法<sup>[10]</sup>对 Rh 纳米颗粒的消光系数进行计算,并利用控制变量法研究圆柱状 Rh 纳米颗粒的直径、高度、间距以及周围折射率的变化与消光峰位的关系,从而研究 LSPR 共振峰的变化。

基于 FDTD 建立圆柱形 Rh 纳米结构阵列模型,其 XZ 视图示意,如图 1 所示。仿真设定 X 方向、Y 方向为周期性边界,设定 Z 方向为完美匹配层边界(PML);设定衬底为 SiO<sub>2</sub> 材料;其中,Z 方向的模拟区域上下边界分别设定在距离 SiO<sub>2</sub> 衬底表面往上

300 nm 位置,以及 SiO<sub>2</sub> 衬底表面往上 500 nm 位置,Z 方向上 PML 边界与 Rh 纳米结构的距离能够满足仿真条件。光源设定为 SiO<sub>2</sub> 衬底上方 350 nm 往下照射的平面光,入射角为 0°,波长为 200~400 nm,图 1 中,光源 Z 方向表示光的入射方向,X 方向表示光的偏振方向。设定 2 个功率监视器分别检测反射和透射光强,其中反射率监视器设定在光源上方 50 nm 确保收集的光为反射光,透射率监视器设定在 SiO<sub>2</sub> 衬底下面 100 nm 处。设定 XY 方向(Z=0)电场监视器检测 Rh 纳米颗粒周围电场变化。

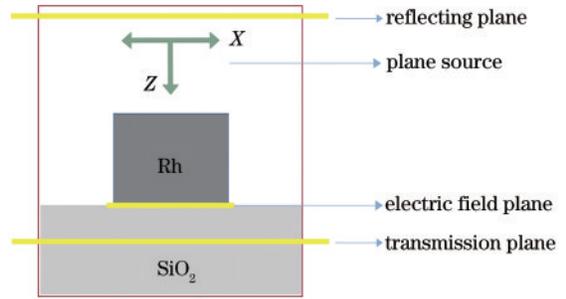


图 1 Rh 纳米结构模型横截面(XZ)视图

Fig. 1 Cross-sectional (XZ) view of Rh nanostructure model

仿真 Rh 纳米结构 LSPR 效应,Rh 金属材料的介电常数是一个重要参数<sup>[12]</sup>,金属的介电常数与其折射率的关系<sup>[13]</sup>如下:

$$\begin{cases} \epsilon' = n^2 - k^2 \\ \epsilon'' = 2nk \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$ 分别为介电常数的实部和虚部; $n$ 、 $k$ 分别为折射率实部和虚部。结合文献报道的 Rh<sup>[14]</sup>、Au<sup>[15]</sup>、Ag<sup>[16]</sup>在 200~400 nm 波长范围下的折射率,分别计算得到不同波长下 Rh、Au、Ag 的介电常数,如图 2(a)、图 2(b)所示。由图 2 可知,Rh 介电常数实部在波长范围 200~400 nm 内均为负值,且 Rh 介电常数实部绝对值在波长范围 200~400 nm 内大于 Au、Ag 材料,Rh 介电常数虚部随波长增大呈现增大趋势。

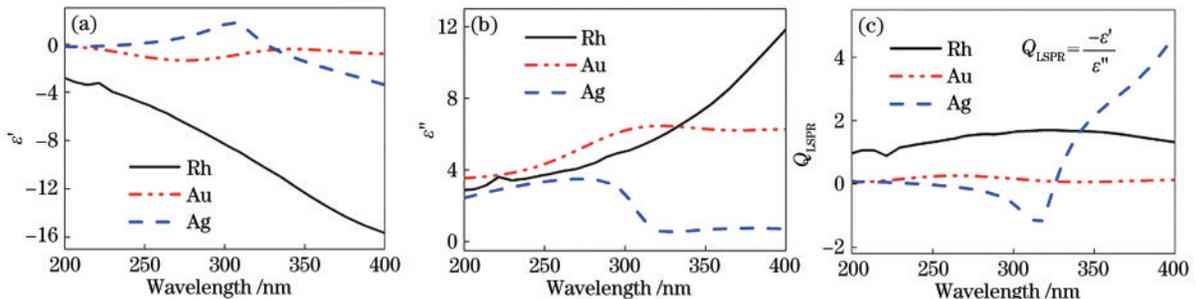


图 2 不同波长下 Rh、Au、Ag 的 LSPR 性能比较。(a) 介电常数实部; (b) 介电常数虚部; (c) LSPR 品质因子

Fig. 2 Comparison of LSPR properties of Rh, Au and Ag at different wavelengths. (a) Real part of the permittivity; (b) imaginary part of the permittivity; (c) quality factors for LSPR

品质因子  $Q_{LSPR}$  可用于大致比较不同材料的 LSPR 性能,且品质因子越大,材料的 LSPR 性能越好, $Q_{LSPR}$ <sup>[17]</sup>可表示为

$$Q_{LSPR} = -\epsilon' / \epsilon'', \quad (2)$$

式中: $Q_{LSPR}$  为 LSPR 的品质因子, $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$ 分别为介电常数的实部和虚部,计算的结果如图 2(c)所示。由图 2(c)

可知,在紫外区域的大部分波段中(200~341 nm)Rh 的 LSPR 品质因子最大,因此在这 3 种金属中 Rh 更适合作为紫外 LSPR 的材料。

### 3 结果及分析

#### 3.1 颗粒直径变化对 Rh 纳米结构消光谱的影响

为了研究 Rh 纳米颗粒的直径变化对消光光谱的影响,设定圆柱高度  $H=100$  nm,间距  $S=100$  nm,衬底材料为  $\text{SiO}_2$ ,改变 Rh 纳米粒子的直径  $D$ ,结果如图 3 所示。图 3(a)为不同直径下 Rh 纳米颗粒的消光光谱,可以看出消光光谱产生了 2 个共振峰。自由电子沿圆柱轴向振动的模式为纵模(LM),自由电子沿垂直于轴的方向振动的模式为横模(TM)<sup>[18]</sup>。由于纵模下自由电子的振荡恢复力小于横模下自由电子的振荡恢复力,因此纵向 LSPR 的共振频率低于横向 LSPR 的共振频率<sup>[19]</sup>,即纵模的共振波长大于横模的共振波长。由此分析可知,这 2 个共振峰分别对应纵向模式和横向模式 2 种不同的共振模式。图 3(b)、图 3(c)分别为

纵模和横模的共振峰位以及峰强随直径的变化趋势,可以看出,随着 Rh 纳米颗粒直径的增加,纵模和横模的共振峰位都呈红移趋势,且共振峰位与直径近似呈线性增加,纵模下直径与共振峰位的关系线性斜率为 1.32,横模下直径与共振峰位的关系线性斜率为 0.69,而纵模的共振峰强增加,横模的共振峰强减小。随着纳米颗粒直径的增大,电子的弛豫时间增加,共振频率减小,使共振波长发生红移。纵模的共振峰强随着直径增大逐渐增大,原因为纳米颗粒变大,消光截面和辐射强度随之增大。横模的共振峰强随着直径的增大而减小,这可能因为颗粒直径增大的同时,纵横比(高与直径之比)在变小,而纵横比是影响共振峰强的重要因素之一<sup>[20]</sup>。图 3(d)、图 3(e)分别为颗粒直径为 100 nm 时横模和纵模处共振峰位的 XY 面( $Z=0$ )电场分布图,图 3(f)为颗粒直径为 140 nm 时纵模下共振峰位的 XY 面电场分布图。可以看出,横模的电场强度比纵模的小;而同为纵模,直径为 140 nm 的电场强度大于 100 nm,这与图 3(a)消光谱峰强的变化趋势一致。

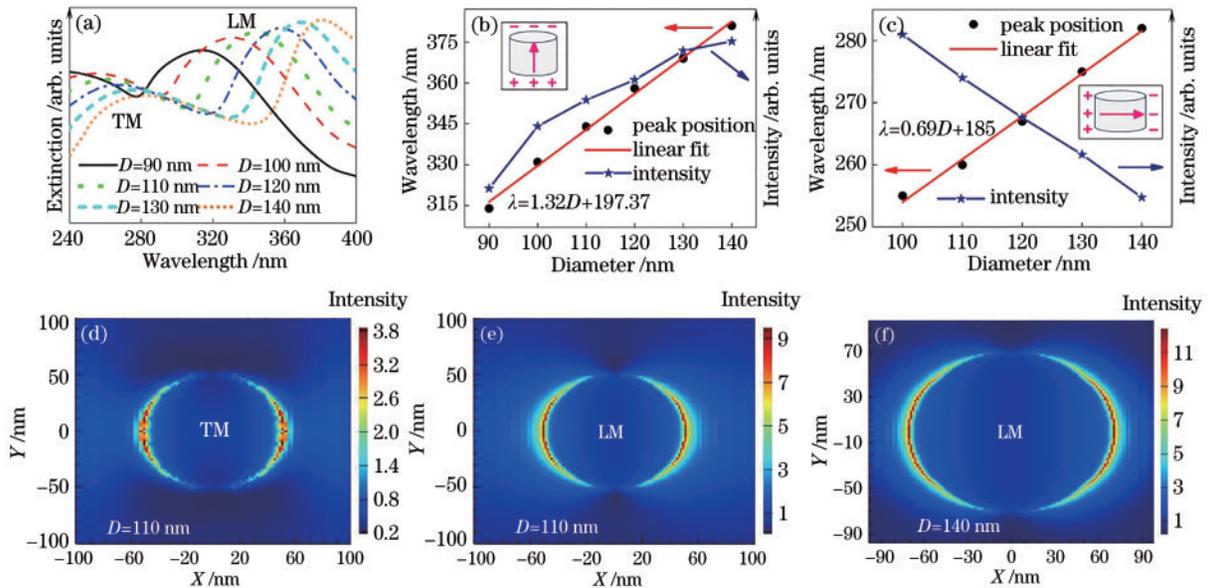


图 3 不同直径下 Rh 纳米颗粒 LSPR 效应的仿真结果。(a)消光光谱;(b)纵模下共振峰的变化趋势;(c)横模下共振峰的变化趋势;(d)横模下直径为 100 nm 的 XY 面电场分布;(e)纵模下直径为 100 nm 的 XY 面电场分布;(f)纵模下直径为 140 nm 的 XY 面电场分布

Fig. 3 Simulation results of LSPR effect of Rh nanoparticles with different diameters. (a) Extinction spectra; (b) variation trend of formant under the longitudinal mode; (c) variation trend of formant under the transverse mode; (d) electric field distribution in the XY plane with a diameter of 100 nm under the transverse mode; (e) electric field distribution in the XY plane with a diameter of 100 nm under the longitudinal mode; (f) electric field distribution in the XY plane with a diameter of 140 nm under the longitudinal mode

#### 3.2 颗粒高度变化对 Rh 纳米结构消光谱的影响

为了研究 Rh 纳米颗粒的高度变化对消光光谱的影响,设定圆柱间距  $S=100$  nm、直径  $D=130$  nm、衬底材料为  $\text{SiO}_2$ ,只改变 Rh 纳米粒子的高度  $H$ ,结果如图 4 所示。其中,图 4(a)为不同高度下 Rh 纳米颗粒的

消光光谱。图 4(b)、图 4(c)分别为纵模和横模的共振峰位以及峰强随高度的变化趋势。随着 Rh 纳米颗粒高度的增加,纵模处共振峰位呈红移趋势,且共振波长与颗粒的高度呈线性增加的关系,拟合可得纵模处高度与共振峰位的关系线性斜率为 0.6,同时纵模的共

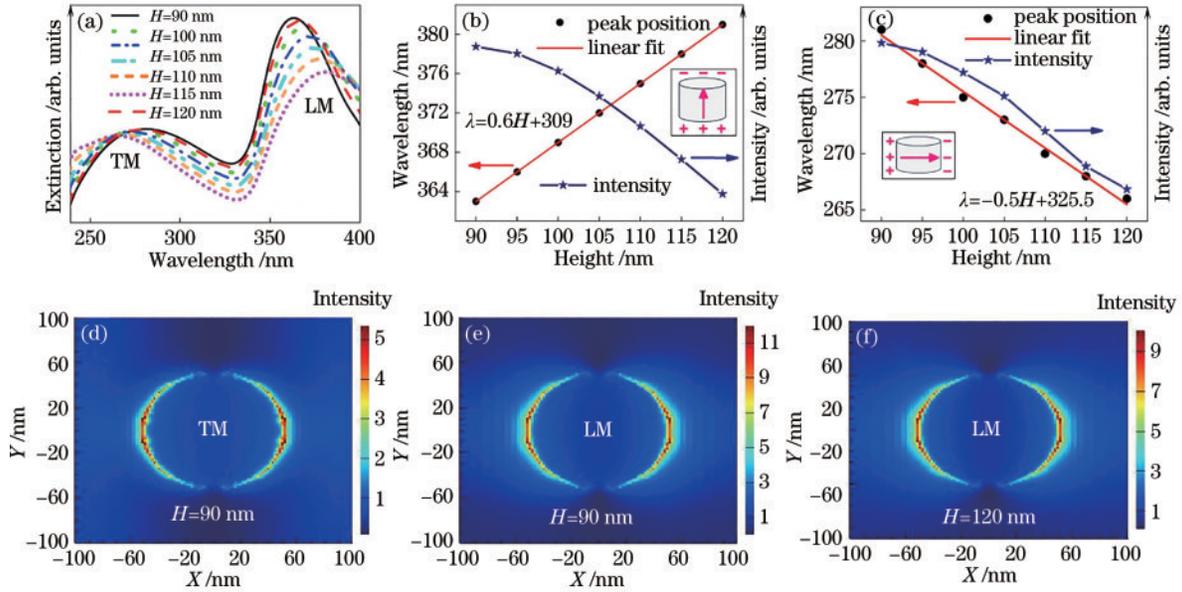


图 4 不同高度下 Rh 纳米颗粒 LSPR 效应的仿真结果。(a) 消光光谱; (b) 纵模下共振峰的变化趋势; (c) 横模下共振峰的变化趋势; (d) 横模下高度为 90 nm 的 XY 面电场分布; (e) 纵模下高度为 90 nm 的 XY 面电场分布; (f) 纵模下高度为 120 nm 的 XY 面电场分布

Fig. 4 Simulation results of LSPR effect of Rh nanoparticles at different heights. (a) Extinction spectra; (b) variation trend of formant under the longitudinal mode; (c) variation trend of formant under the the transverse mode; (d) electric field distribution in the XY plane with a height of 90 nm under the transverse mode; (e) electric field distribution in the XY plane with a height of 90 nm under the longitudinal mode; (f) electric field distribution in the XY plane with a height of 120 nm under the longitudinal mode

振峰强减小,而横模处共振峰位发生蓝移,横模的共振波长与颗粒高度近似呈线性减小的关系,拟合可得横模下高度与共振峰位的关系线性斜率为 $-0.5$ ,同时共振峰强发生微弱的减小。这是因为随着纳米颗粒高度的增加,纵向的电荷积累越来越少<sup>[20]</sup>,导致纵模的共振频率越来越小,共振波长越来越大,同时纵模的共振峰强逐渐减弱。随着纳米颗粒的高度变大,横模的电荷积累越来越多,导致横模的共振频率越来越大,共振波长越来越小,同时横模的共振峰强逐渐减弱。

此外,通过比较可知,纵模下共振峰位随高度的变化比随直径的变化曲线斜率小,原因可能为当改变直径时,X、Y两维度尺寸均发生了改变;而改变高度时,只改变Z方向一个维度尺寸,因此改变直径的影响较大。图4(d)、图4(e)分别为颗粒高度为90 nm时,横模和纵模共振峰位的XY面电场分布图,图4(f)为颗粒高度为120 nm时,纵模下共振峰位波长下的XY面( $Z=0$ )电场分布图。其中,横模的电场强度比纵模的小,并且颗粒高度为120 nm对应的电场强度低于颗粒高度为90 nm,与图4(a)消光谱峰强变化趋势一致。

### 3.3 颗粒间距变化对 Rh 纳米结构消光谱的影响

为了研究 Rh 纳米颗粒的间距变化对消光光谱的影响,设定圆柱高度  $H=100$  nm,直径  $D=130$  nm,衬底材料为  $\text{SiO}_2$ ,只改变 Rh 纳米粒子的间距  $S$ ,结果如图5所示。图5(a)为不同间距下 Rh 纳米颗粒的消光光谱,随着颗粒间距从 90 nm 增加到 120 nm,无论纵模

或横模下共振峰强的变化都很微小,原因为颗粒间距影响下的消光光谱趋于单粒子的消光光谱,颗粒间距的变化并不会影响共振峰强<sup>[21]</sup>。图5(b)、图5(c)分别为纵模和横模的共振峰位随间距的变化趋势,可以看出纵模的共振峰位以近线性趋势从 363 nm 红移至 388 nm,横模的共振峰位以近线性趋势从 262 nm 红移至 297 nm,拟合可得纵模下间距与共振峰位的关系线性斜率为 0.82,横模下间距与共振峰位的关系线性斜率为 1.17。在纵向模式中,以 2 个相邻的纳米颗粒为例,2 个不同电极的电荷互相吸引,间距增加,减弱了 2 种粒子的吸引力,自由电子的恢复力减小,从而减小了共振频率,导致共振波长的增大<sup>[22]</sup>,如图6所示。在横向模式中,由于 2 个相同电极的电荷互相排斥,间距增加,减弱了 2 种粒子的排斥力,自由电子的恢复力也减小,从而减小了共振频率,导致共振波长的增大。总之,随着 Rh 纳米颗粒间距在 90~120 nm 范围内的增加,无论纵模或横模,共振峰位均呈红移趋势,并且共振峰位与颗粒的间距近似为线性增加的关系,共振峰强均发生微弱的变化。

图5(d)、图5(e)分别为颗粒间距为 100 nm 时,横模和纵模共振峰位的 XY 面电场分布,图5(f)为颗粒间距为 120 nm 时,纵模下共振峰位的 XY 面电场分布图。可以看出,横模的电场强度比纵模的小,当颗粒的间距增大时,纵模处颗粒表面的电场强度变化不大。

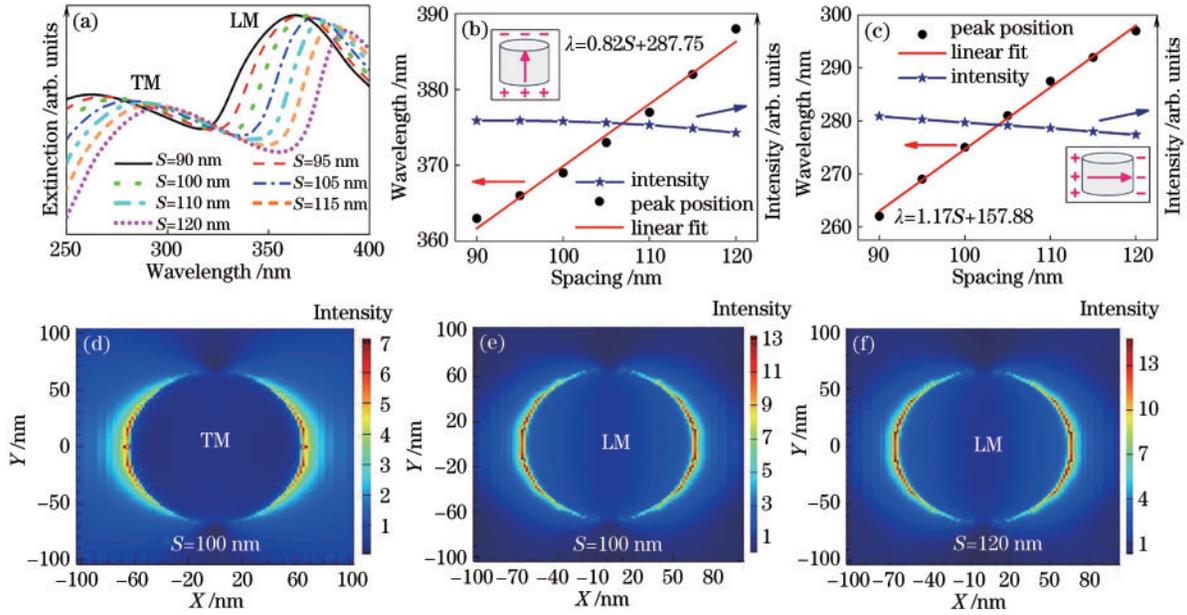


图 5 不同间距下 Rh 纳米颗粒 LSPR 效应的仿真结果。(a) 消光光谱;(b) 纵模下共振峰位的变化趋势;(c) 横模下共振峰的变化趋势;(d) 横模下间距为 100 nm 的 XY 面电场分布;(e) 纵模下间距为 100 nm 的 XY 面电场分布;(f) 纵模下间距为 120 nm 的 XY 面电场分布

Fig. 5 Simulation results of LSPR effect of Rh nanoparticles at different spacing. (a) Extinction spectra; (b) variation trend of formant under the longitudinal mode; (c) variation trend of formant under the transverse mode; (d) electric field distribution in the XY plane with a spacing of 100 nm under the transverse mode; (e) electric field distribution in the XY plane with a spacing of 100 nm under the longitudinal mode; (f) electric field distribution in the XY plane with a spacing of 120 nm under the longitudinal mode

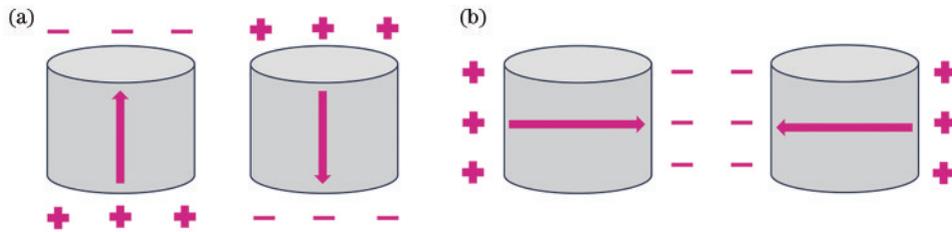


图 6 一对 Rh 纳米颗粒之间的电子分布图。(a) 纵向模式;(b) 横向模式

Fig. 6 Electron distribution between a pair of Rh nanoparticles. (a) Longitudinal mode; (b) transverse mode

### 3.4 周围折射率 $n$ 对 Rh 纳米结构消光光谱的影响

为了研究 Rh 纳米颗粒周围介电常数的变化对消光光谱的影响,设定圆柱间距  $S=100$  nm,直径  $D=130$  nm,高度  $H=100$  nm,图 7(a)、图 7(b) 分别为只改变衬底的折射率  $n_1$  时,Rh 纳米颗粒的消光光谱。由图 7(a) 可知,横模的共振峰随衬底折射率的变化不明显,而由图 7(b) 可知,随着衬底折射率从 1 增加至 1.6,纵模处的共振峰位从 273 nm 增至 388 nm,且衬底折射率与共振峰位的关系线性斜率为 195.36,共振峰峰强呈减小趋势。原因在于当金属衬底折射率(介电常数)增大,会使纳米颗粒表面激发更多的极化电荷,在纳米颗粒内的自由电子振荡的库仑力会和更多的极化电荷所产生的吸引力形成平衡,从而减小纳米颗粒内部自由电子振荡的恢复力,导致 LSPR 共振频率减小,即共振波长发生红移<sup>[23]</sup>。图 7(c)、图 7(d) 分别为纵模下衬

底折射率  $n_1=1, 1.6$  时,纵模处共振峰位的 XY 面( $Z=0$ ) 电场分布图,可以看出,衬底折射率  $n_1=1.6$  的电场强度大于  $n_1=1$  的电场强度,这说明衬底折射率的增大有利于近场局域特性的增强,而消光峰强没有随之增大可能是衬底折射率增大导致反射增强所致。

进一步分析折射的影响,图 8(a)、图 8(b) 为衬底仍为  $\text{SiO}_2$ ,环境折射率  $n_2$  对 Rh 纳米颗粒的消光光谱的影响。可以看出,当环境折射率从 1 变化至 1.5 时,纵模的共振峰发生线性红移,环境折射率与共振峰位的关系线性斜率为 64.7,且峰强增大。这说明了 LSPR 纵模对环境折射率的变化也具有良好的灵敏度,但对横模处的共振峰无明显变化规律。此外,与只改变衬底折射率参数不同,环境折射率增大时,衬底与周围环境的相对折射率差反而减小,这可能是造成二者峰强变化趋势不一样的原因。

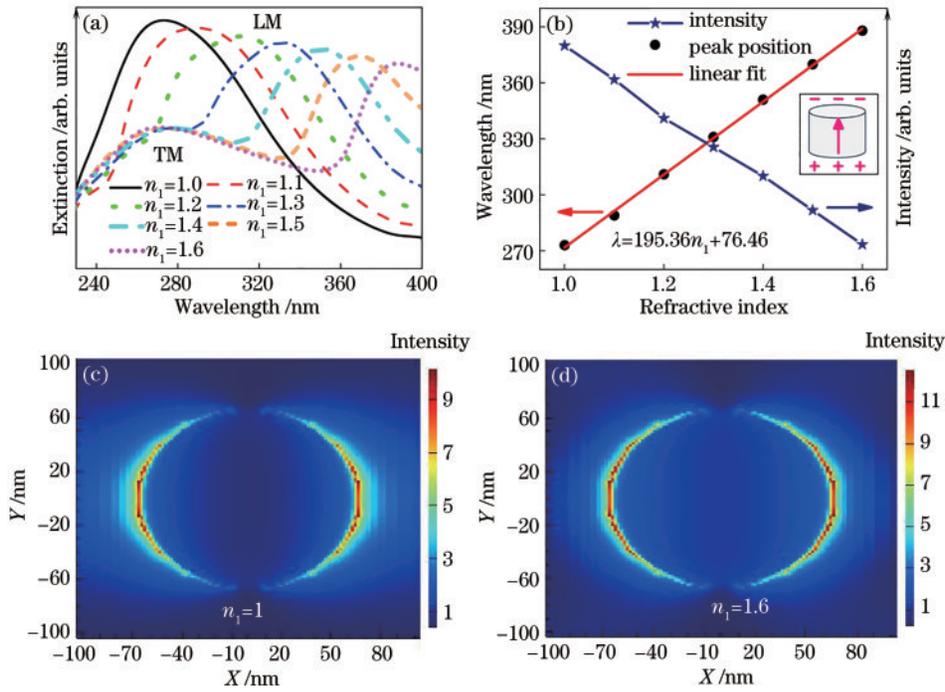


图 7 不同衬底折射率下 Rh 纳米颗粒 LSPR 效应的仿真结果。(a) 消光光谱; (b) 纵模下共振峰的变化趋势; (c) 纵模下衬底折射率为 1 的 XY 面电场分布; (d) 纵模下衬底折射率为 1.6 的 XY 面电场分布

Fig. 7 Simulation results of LSPR effect of Rh nanoparticles with different substrate refractive indices. (a) Extinction spectra; (b) variation trend of formant under the longitudinal mode; (c) electric field distribution in XY plane of substrate with refractive index of 1 under the longitudinal mode; (d) electric field distribution in XY plane of substrate with refractive index of 1.6 under the longitudinal mode

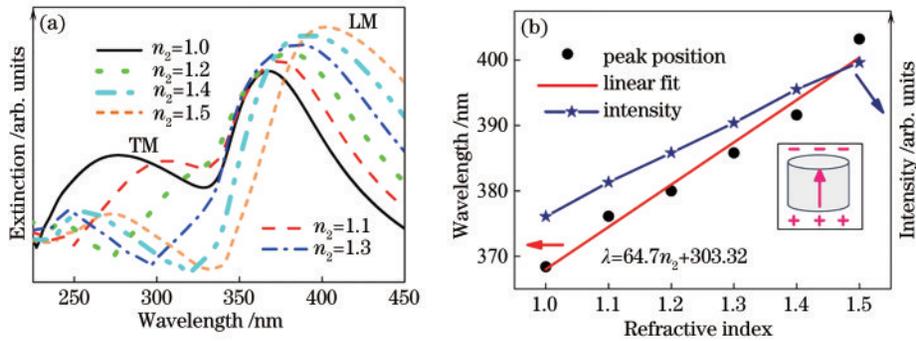


图 8 不同环境折射率下 Rh 纳米颗粒 LSPR 效应的仿真结果。(a) 消光光谱; (b) 纵模下共振峰的变化趋势

Fig. 8 Simulation results of LSPR effect of Rh nanoparticles under different environmental refractive indices. (a) Extinction spectra; (b) variation trend of formant under the longitudinal mode

## 4 结 论

基于时域有限差分法设计并研究了圆柱状 Rh 纳米颗粒的直径、高度、间距以及介质环境对纳米粒子光学非线性的消光特性的影响。结果显示,随着圆柱状 Rh 纳米颗粒直径的增加,纵模和横模的共振峰位都发生红移,纵模的共振峰强度增加,横模的共振峰强度减小。随着圆柱状 Rh 纳米颗粒高度的增加,纵模处共振峰位发生红移,且共振峰强减小,而横模处共振峰位发生蓝移,且共振峰强减小。随着圆柱状 Rh 颗粒间距的增加,纵模和横模的共振峰位均红移,共振峰强均减少。随着颗粒的衬底折射率增加,共振峰位发生红移,

共振峰强减小。随着颗粒周围折射率增加,共振峰位发生红移,共振峰强增强。通过这些参数的变化可以有效调制 Rh 纳米结构的 LSPR 共振波段,这对 Rh 纳米结构 LSPR 效应的应用具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

[1] Wakita T, Yao H. Optical and magneto-optical properties of rhodium nanostructures with different morphologies: insight into the absorption bump in the UV region[J]. Chemical Physics Letters, 2021, 779: 138866.  
 [2] 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.

- 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.
- [3] 郑玉霞, 帕尔哈提江·吐尔孙, 热米莱·阿卜来提, 等. 基于消光法反演单分散 Au-Ag 合金纳米球的粒径和浓度[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 0729001. Zheng Y X, Tuersun P, Abulaiti R, et al. Particle size and concentration of monodisperse Au-Ag alloy nanospheres retrieved by light extinction method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0729001.
- [4] 汤桦, 李强, 张启凡, 等. 领结型纳米银金属阵列对氮化镓基发光二极管光提取效率的影响[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2123001. Tang H, Li Q, Zhang Q F, et al. Effect of bow tie type silver metal array structure on light extraction efficiency of GaN-based light emitting diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2123001.
- [5] 叶伟. Al 纳米结构的 FDTD 模拟研究及其在紫外波段的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 26-40. Ye W. FDTD simulation of Al nanostructures and their applications in the ultraviolet range[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 26-40.
- [6] Gutiérrez Y, Ortiz D, Saiz J, et al. Plasmonics in the ultraviolet with aluminum, gallium, magnesium and rhodium[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(1): 64.
- [7] Watson A M, Zhang X, de la Osa R A, et al. Rhodium nanoparticles for ultraviolet plasmonics[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(2): 1095-1100.
- [8] Gutiérrez Y, González F, Moreno F. The UV plasmonic behavior of rhodium tetrahedrons: a numerical analysis[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(19): 3947.
- [9] Gutiérrez Y, Ortiz D, Saiz J M, et al. The UV plasmonic behavior of distorted rhodium nanocubes[J]. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 2017, 7(12): 425.
- [10] Yee K E. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [11] 陈雪. Al 纳米颗粒的局域表面等离子体共振效应及其在深紫外 LED 上的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2013: 34. Chen X. Local surface plasmon effect of Al nanoparticles and its application in deep ultraviolet LED[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013: 34.
- [12] 童川. 谐振腔法测量材料介电常数的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013. Tong C. Study on measuring the dielectric constant of the material by using resonant cavity method[D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [13] 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010: 1619. Li J Z. Handbook of optics[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 2010: 1619.
- [14] Palik E D. Handbook of optical constants of solids, volume 1[M]. New York: Academic Press, 1985.
- [15] Ciesielski A, Skowronski L, Trzcinski M, et al. Evidence of germanium segregation in gold thin films[J]. *Surface Science*, 2018, 674: 73-78.
- [16] Ciesielski A, Skowronski L, Trzcinski M, et al. Controlling the optical parameters of self-assembled silver films with wetting layers and annealing[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 421: 349-356.
- [17] West P R, Ishii S, Naik G V, et al. Searching for better plasmonic materials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 795-808.
- [18] Garcia M A. Surface plasmons in metallic nanoparticles: fundamentals and applications[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(28): 283001.
- [19] 于杰, 张俊喜, 张立德, 等. 基于 Ag 纳米棒阵列的表面等离子体共振增强型偏振器[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0723001. Yu J, Zhang J X, Zhang L D, et al. Surface plasmonic micropolarizers based on Ag nanorod arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0723001.
- [20] 赖淑妹, 黄志伟, 王仰江, 等. Ag 纳米结构局域表面等离子体共振模拟与分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 122601. Lai S M, Huang Z W, Wang Y J, et al. Simulation and analysis of local surface plasmon resonance of Ag nanostructures[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 122601.
- [21] 包广宏. 局域表面等离子体共振增强 AlGaIn 基 MSM 型日盲紫外探测器[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015: 31. Bao G H. Localized surface plasmons enhanced AlGaIn-based MSM solar-blind ultraviolet photodetector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015: 31.
- [22] Rechberger W, Hohenau A, Leitner A, et al. Optical properties of two interacting gold nanoparticles[J]. *Optics Communications*, 2003, 220(1/2/3): 137-141.
- [23] 彭浩程. Al 纳米颗粒 LSPR 近场增强与远场特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2020: 44. Peng H C. Study on the near-field enhancement and far-field properties of LSPR of Al nanoparticles[D]. Nanjing: Nanjing University, 2020: 44.