

# 金属纳米表面等离子激元的共振辐射增强研究

马光辉,于贺,刘宇乾,张贺,金亮,徐英添

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室,吉林 长春 130022

**摘要** 主要研究了不同结构参数对金属纳米表面等离子激元辐射增强的影响,以提高入射电磁波与金属表面自由电子的耦合效率。对 Au、Ag 纳米颗粒进行了数值模拟,比较了不同形状金属纳米颗粒的局域场增强。与其他结构相比,球形金属纳米颗粒具有更显著的局域场增强效应。通过改变球形金属纳米颗粒的各个参数进行 Purcell 分析,结果表明:沿极化方向的长轴尺寸、垂直于极化方向的短轴尺寸、环境材料的折射率以及光源距纳米颗粒的距离都会极大地改变金属纳米表面等离子激元共振辐射增强的效果,且会对共振波长的位置产生极大影响。最后对具有椭球壳结构的金属纳米颗粒进行了模拟,发现随着椭球壳内填充介质的折射率和椭球壳厚度改变,辐射强度都表现出不同程度的增强。

**关键词** 物理光学; 辐射增强; Purcell 效应; 表面等离子激元; 金属纳米颗粒; 局域场; 核壳结构

**中图分类号** O536      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.042601

## Resonance Radiation Enhancement of Metal Nanometer Surface Plasmons

Ma Guanghui, Yu He, Liu Yuqian, Zhang He, Jin Liang, Xu Yingtian

*State Key Laboratory on High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology,  
Changchun, Jilin 130022, China*

**Abstract** In this paper, the influences of different structural parameters on the radiation enhancement of metal nanometer surface plasmons are studied to increase the coupling efficiency of the incident electromagnetic wave and the free electron of metal surface. The numerical simulation of Au and Ag nanoparticles is carried out, the local field enhancement of metal nanoparticles with different shapes are compared, the spherical metal nanoparticles have more prominent local field enhancement effect compared to other structures. Therefore, Purcell analysis is carried out by the change of the parameters of spherical metal nanoparticles. The results show that the size of long axis along the polarization direction, the size of short axis perpendicular to polarization direction, refractive index of environment materials as well as the distance of nanoparticles apart from the light source can greatly change the effect of metal nanometer surface plasmons resonance radiation enhancement, and they have great influence on the location of the resonance wavelength. Finally, the metal nanoparticles with ellipsoid shell structure are simulated. It is found that as the change of refractive index of the filling medium and the nuclear shell thickness, the radiation intensities are increased in different degrees.

**Key words** physical optics; radiation enhancement; Purcell effect; surface plasmons; metal nanoparticle; local field; core-shell structure

**OCIS codes** 350.5610; 350.5400; 290.5880; 260.3910

## 1 引言

近年来,随着微纳光子学在亚波长尺寸的发展,

利用金属表面等离子激元共振耦合效应实现发光器件的荧光增强具有十分重要的意义。因此,利用金属表面的等离子体来提高各种半导体材料的发光效

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-10-23

基金项目: 吉林省重大科技成果转化项目(20130303017GX)、吉林省重点科学技术研究项目(20140204028GX)

作者简介: 马光辉(1992—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术及应用方面的研究。E-mail: 553761365@qq.com

导师简介: 徐英添(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事光电子技术及应用方面的研究。

E-mail: xyt@cust.edu.cn(通信联系人)

率成为了研究热点,如 Si 量子点、CdSe 量子点、CTe 量子点、GaN 材料、GaAs 材料、ZnO 材料等。通过改变金属纳米颗粒的形貌、结构,金属表面的等离子激元可以产生非常特殊的光电特性<sup>[1]</sup>,在亚波长光学、数据存储、太阳能电池<sup>[2]</sup>和生物光学领域具有极其重要的应用。贵金属纳米结构以其独特的表面等离子激元特性吸引着国内外的研究人员,但到目前为止,大多数的工作仍集中在合成不同的纳米结构以实现各种功能上,还没有人深入研究贵金属结构对其发光特性的影响。表面等离子激元调控自发辐射技术<sup>[3-6]</sup>的广泛应用以及提高新一代发光器件发光效率的迫切需求,加速推动了等离子激元荧光增强的相关研究。基于这一现象,许多新的光谱技术应运而生,其中以表面增强拉曼光谱、表面增强荧光光谱最为引人关注,最近的研究更是成功地将这些光谱技术应用到单分子的检测中,因此研究 Au、Ag 纳米颗粒的特异光学性质具有重要意义。本文通过时域有限差分(FDTD)法模拟计算了金属纳米颗粒的 Purcell 效应<sup>[7]</sup>,分析了不同结构 Au、Ag 纳米颗

粒在可见光波段对辐射增强因子的影响。通过改变金属纳米颗粒的结构、尺寸、材料和周围环境参数,有效控制纳米颗粒的光学特性,并调控增强峰的位置。此外,进一步研究了双金属纳米颗粒间的耦合效应,分析对比了单 Au、Ag 纳米颗粒和双 Au、Ag 纳米颗粒在可见光波段内的光学特性以及对辐射增强的影响。最后,对双纳米椭球壳结构进行了辐射增强仿真,并分析了球壳间的耦合效应对等离子体辐射增强的影响。

## 2 金属表面等离子激元和 Purcell 因子

金属表面等离子激元(SPs)是存在于金属表面的一种电磁波,其表面电磁场的强度最大,而在垂直于表面方向上呈指数形式衰减。随着表面等离子激元的激发,表面电磁场的强度急剧增强<sup>[8]</sup>。表面等离子激元的出现提供了一种在纳米尺度下处理光的方式。表面等离子激元通常可以分为两大模式:表面等离子体激元和局域表面等离子体(LSPs)<sup>[9-11]</sup>共振,如图 1 所示。

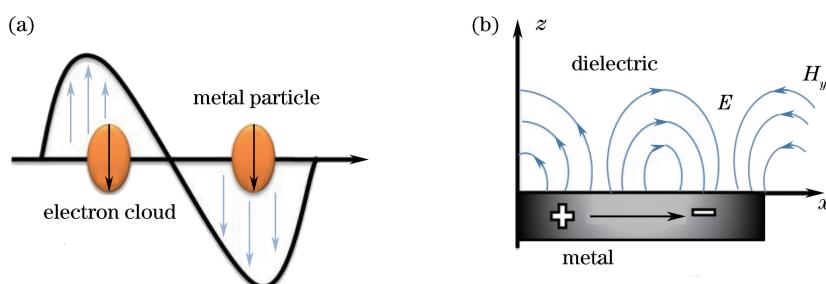


图 1 (a)局域表面等离子体振荡图;(b)传播表面等离子体图

Fig. 1 (a) Localized surface plasmon oscillation; (b) spreading surface plasmon

本研究通过 Purcell 效应提高电偶极的辐射跃迁率来增强发光辐射<sup>[12-13]</sup>。将偶极子的辐射功率视为本征半导体中的辐射跃迁率,将引入的金属纳米颗粒视为缺陷。在只有偶极子的情况下,6 个方向上距离原点为 1 μm 的面上的功率流积分和为

$$\Gamma_{\text{free}} = \sum_{i=\pm x, \pm y, \pm z} P_{0i} dS_i, \quad (1)$$

式中  $P_{0i}$  为未加入金属颗粒时的功率,  $S_i$  为距原点为 1 μm 的面的面积。加入纳米金属椭球颗粒后,在 6 个方向上距离原点为 1 μm 的面上的功率流积分和为:

$$\Gamma_{\text{enhanced}} = \sum_{i=\pm x, \pm y, \pm z} \iint P_i dS_i, \quad (2)$$

式中  $P_i$  为加入金属颗粒后的功率。(2)式表明了电偶极子附近引入的金属纳米椭球颗粒在空间中的辐射能力,所以 Purcell 因子可以表示为

$$F_p = \frac{\Gamma_{\text{enhanced}}}{\Gamma_{\text{free}}} \quad (3)$$

这里将 Purcell 因子定义为辐射增强的效果,即增强后的辐射效果与真空中辐射效果之比。

## 3 金属纳米颗粒辐射增强的数值模拟

### 3.1 不同形状金属纳米颗粒的近场辐射增强

采用偶极子源作为入射光源,光波范围为 350~850 nm,沿 z 轴方向入射,网格尺寸为 2 nm,计算的截面取完美匹配层(PML)的边界吸收条件<sup>[14]</sup>,模拟用 Au、Ag 的介电常数均采用 Palik 实验所得的介电常数,如图 2 所示。

模拟得到的图 3 是等高、等底面积的球体、立方体、圆柱体和三角棱柱体 Au 纳米颗粒的光场分布。在图 3 中可以观察到金属纳米颗粒的近场增强效

应,球体结构的表面光场明显增强,而立方体、圆柱体和三角棱柱体只在顶尖处表现出近场增强效应。当 Au 纳米颗粒被入射光激发时,因内部自由电子的协同振荡而产生了局域表面等离子体共振,纳米结构表面的局域电磁场被极大地增强,满足表面等离子体共振条件的光被极大地吸收和散射,因此消光效率更高,产生的电场更强。球体纳米颗粒产生的辐射增强主要是由于电偶极的局域表面等离子激元模式能够高效地与自由传播的光场耦合。当金属微结构的表面等离子体共振频率与发光体的发射频率相匹配时,更容易产生辐射跃迁,从而导致发光体的辐射增强。此外,表面等离共振被局限在微小的金属结构附近,无法在界面上传播,因此远离金属表

面的电场分布越来越弱<sup>[15-16]</sup>。

不同结构的 Au、Ag 纳米颗粒的 Purcell 效应的仿真结果如图 4 所示。可以发现,球体纳米颗粒对辐射增强具有显著作用,而立方体、圆柱体和三角棱柱体纳米颗粒的近场辐射增强基本相同,球体纳米颗粒的 Purcell 因子比其他形状纳米颗粒增大了 3.5 倍。这主要是因为尖锐的金属纳米结构的尖端会对表面等离子激元产生极强的局域效应以及更强的局域场,进而产生辐射增强的效果。与其他结构相比,球体的表面弯曲度大,这样就会产生更强的局域场。由此可见,针对椭球形金属纳米颗粒辐射增强因素的研究对半导体器件的制作具有重要意义。

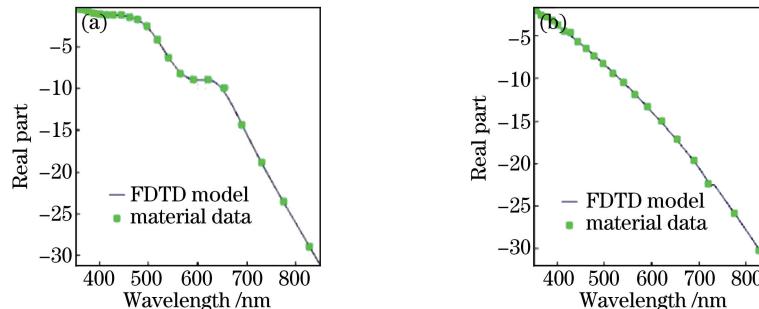


图 2 Palik 实验中纳米颗粒介电常数实部的拟合图。(a) Au 纳米颗粒;(b) Ag 纳米颗粒

Fig. 2 Fitted curves of dielectric constant of nanoparticles in Palik experiment.

(a) Au nanoparticles; (b) Ag nanoparticles

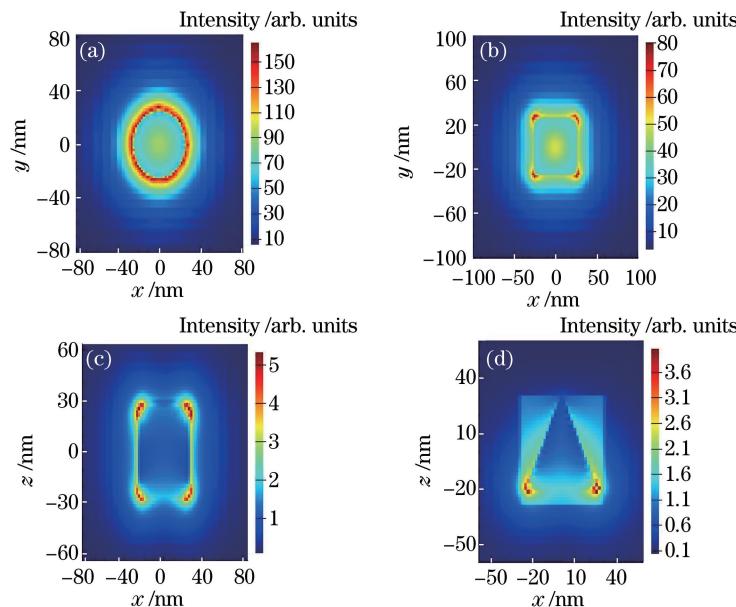


图 3 (a)球体、(b)立方体、(c)圆柱体和(d)三角棱柱体 Au 纳米颗粒的光场分布图

Fig. 3 Optical field distributions of (a) sphere, (b) cubic, (c) cylindrical and  
(d) pyramid prism-shaped Au nanoparticles

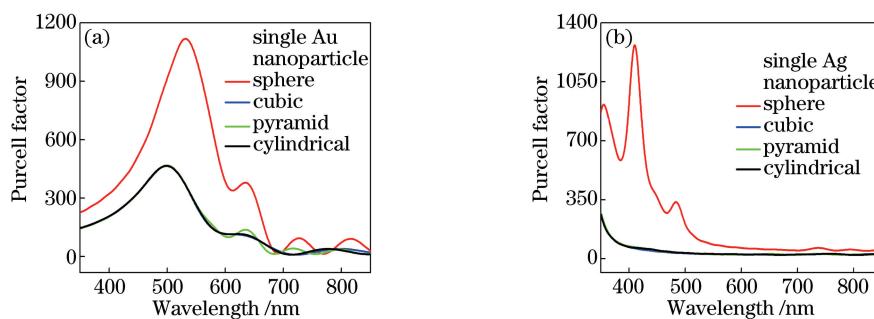


图 4 不同形状单纳米颗粒的 Purcell 因子。(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 单 Ag 纳米颗粒

Fig. 4 Purcell factors of single nanoparticles with different shapes. (a) Single Au nanoparticle; (b) single Ag nanoparticle

### 3.2 椭球形金属纳米颗粒辐射增强效应的数值模拟

纳米颗粒的仿真模型及共振电场分布分别如图 5、6 所示。在图 5 中,  $L$  为 Au、Ag 纳米颗粒椭球的长轴,  $R$  为短轴的半径,  $d$  为偶极子间的距离。从图 6 中可以看到金属纳米颗粒表面会对表面等离子激元产生极强的局域效应及更强的局域场。由于局域表面等离子体的共振现象, 入射光作用于金属纳米颗粒时会引起金属中自由电子的集体振荡, 这种振荡会受到金属纳米结构的限制。当入射光频率与自由电子的振荡频率相同时, 消光效率会大幅增加, 在相应的波段会出现局域表面等离子共振峰, 进而产

生辐射增强的效果。

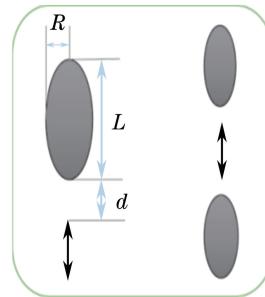


图 5 单、双金属纳米颗粒的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of single and bimetallic nanoparticles

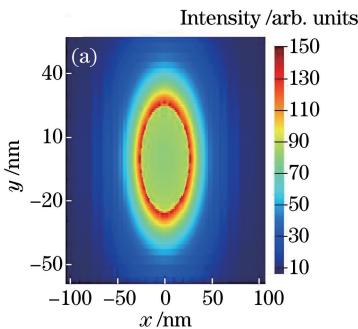


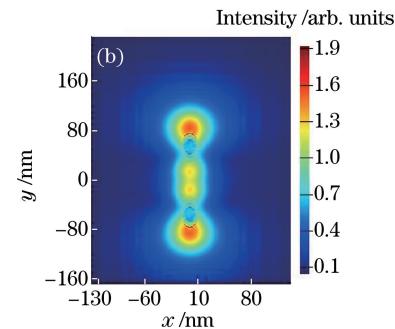
图 6 金属纳米颗粒的共振电场分布图。(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 双 Au 纳米颗粒

Fig. 6 Resonance electric field distributions of metal nanoparticle. (a) Single Au nanoparticle; (b) double Au nanoparticles

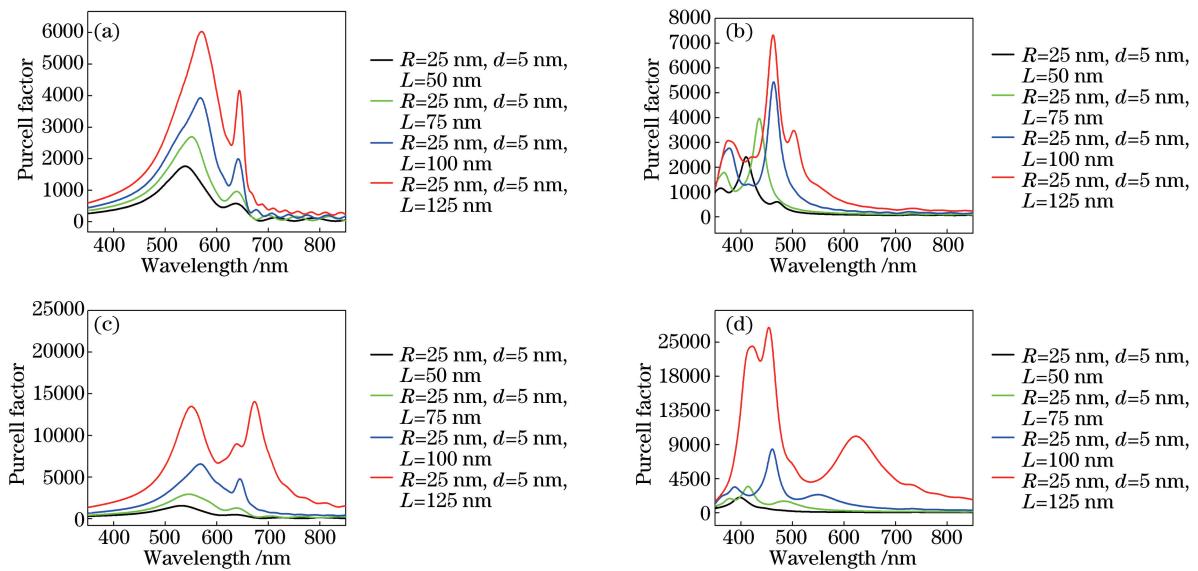
#### 3.2.1 长轴 $L$ 对辐射增强的影响

图 7 为  $R = 25$  nm、 $d = 5$  nm 条件下,  $L$  对单、双金属纳米椭球形颗粒 Purcell 因子的影响。

由图 7(a)、(b) 可知: 单 Au 纳米颗粒的共振波长在 550 nm 左右, 单 Ag 纳米颗粒的共振波长在 450 nm 左右; 随着  $L$  增加, 金属纳米颗粒的 Purcell 因子逐渐变大, 增强峰覆盖的波长范围变宽, 这一现象是由极化长度的改变引起的。正如天线理论所述: 天线辐射的电场方向就是天线的极化方向, 当来



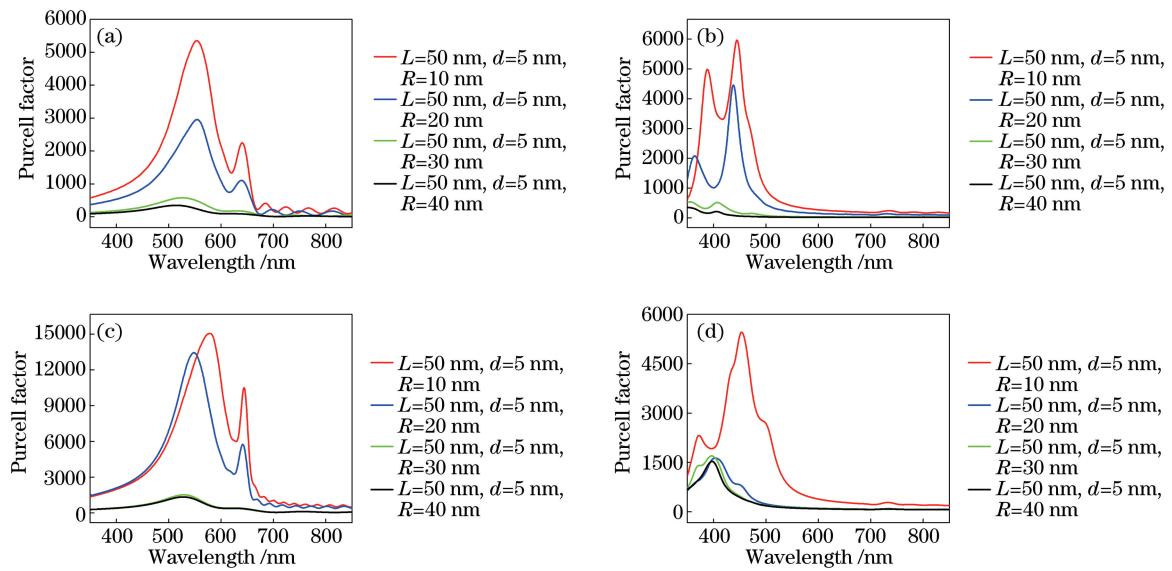
波的极化方向与接收天线的极化方向一致时, 在接收过程中通常会产生极化增强, 反之, 则产生极化减小。 $L$  与偶极子极化方向相同, 因此  $L$  越大, 辐射增强越大。由图 7(c)、(d) 可知, 双金属纳米颗粒比单金属纳米颗粒的辐射增强提高了 3 倍, 这是由于金属纳米颗粒相互靠近时, 颗粒间通过电磁近场相互作用形成耦合, 改变了电磁能流的空间分布, 颗粒间的局域场被放大增强, 因此获得了更好的增强效果。

图 7 不同  $L$  下单、双金属纳米颗粒对应的 Purcell 因子。

(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 单 Ag 纳米颗粒; (c) 双 Au 纳米颗粒; (d) 双 Ag 纳米颗粒

Fig. 7 Purcell factors corresponding to single and double metal nanoparticles with different length of long axis.

(a) Single Au nanoparticle; (b) single Ag nanoparticle; (c) double Au nanoparticles; (d) double Ag nanoparticles

图 8 不同  $R$  下单、双金属纳米颗粒对应的 Purcell 因子。

(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 单 Ag 纳米颗粒; (c) 双 Au 纳米颗粒; (d) 双 Ag 纳米颗粒

Fig. 8 Purcell factors corresponding to single and double metal nanoparticles with different length of short axis.

(a) Single Au nanoparticle; (b) single Ag nanoparticle; (c) double Au nanoparticles; (d) double Ag nanoparticles

### 3.2.2 短轴 $R$ 对辐射增强的影响

图 8 为  $L = 50 \text{ nm}$ 、 $d = 5 \text{ nm}$  条件下,  $R$  对单、双金属椭球形纳米颗粒 Purcell 因子的影响。

由图 8 可知, 随着短轴半径  $R$  增加, 单、双金属纳米颗粒的 Purcell 因子均逐渐减小, 且增强峰覆盖的波长范围变窄。这时将球形纳米颗粒置于一般介质中, 电介质处于电中性。当有外场作用时, 即用光

照射这一模型时, 外部介质中的分子将会出现极化, 在电介质表面就会产生束缚电荷, 这一层束缚电荷会与纳米颗粒相互作用, 即在纳米颗粒内部出现电场, 由于  $R$  与偶极子的极化方向垂直, 因此形成了去极化场。因此,  $R$  越大, 去极化电场的强度越大, 等离子体振动频率越小, 因此辐射增强越小。当来波的极化方向与接收天线的极化方向不一致时, 在

接收过程中通常会产生极化损失,导致波长范围变窄。

### 3.2.3 环境材料折射率 $n$ 对辐射增强的影响

图 9 为  $L=50$  nm、 $R=25$  nm、 $d=5$  nm 条件下,  $n$  对单、双金属纳米椭球 Purcell 因子的影响。

由图 9 可知,随着环境材料折射率  $n$  增加,金属纳米颗粒的共振波长发生红移,这是因为环境材料的改变引起了表面等离子体共振波长位置的变化,

同样也证明了局域表面等离子激元可以有效改变分子所处的介电局域电磁场的环境,使局域表面等离子激元与入射光波产生共振耦合,从而造成辐射增强。因此,想要增强激发过程,就必须使金属表面等离子激元的共振峰与分子的吸收带及激发光波长在光频率空间重合。而表面等离子激元的共振频率是受周围介质影响的,在引入分子过程中要尽量降低其对周围介质折射率或电荷的影响。

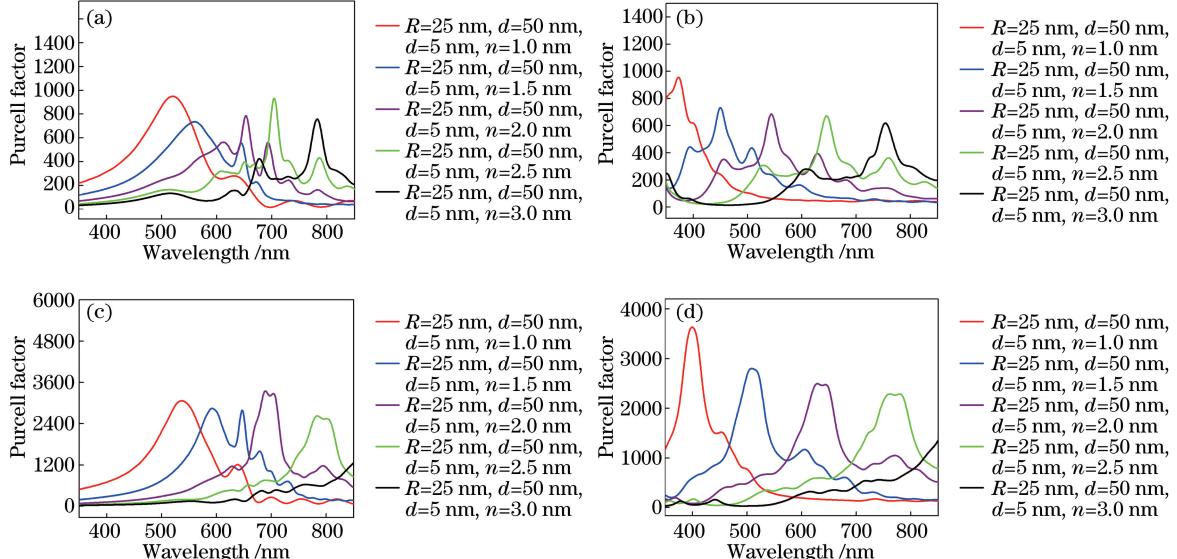


图 9 不同  $n$  下单、双金属纳米颗粒对应的 Purcell 因子。

(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 单 Ag 纳米颗粒; (c) 双 Au 纳米颗粒; (d) 双 Ag 纳米颗粒

Fig. 9 Purcell factors corresponding to single and double metal nanoparticles at different refractive indices of environmental material. (a) Single Au nanoparticle; (b) single Ag nanoparticle; (c) double Au nanoparticles; (d) double Ag nanoparticles

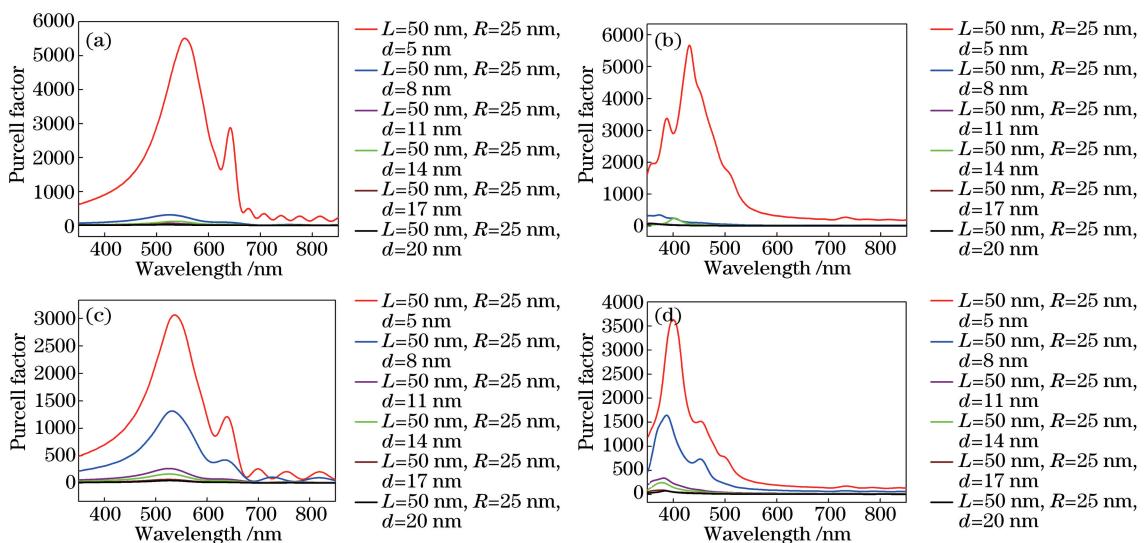


图 10 不同  $d$  下单、双金属纳米颗粒对应的 Purcell 因子。

(a) 单 Au 纳米颗粒; (b) 单 Ag 纳米颗粒; (c) 双 Au 纳米颗粒; (d) 双 Ag 纳米颗粒

Fig. 10 Purcell factors corresponding to single and double metal nanoparticles at different distances.

(a) Single Au nanoparticle; (b) single Ag nanoparticle; (c) double Au nanoparticles; (d) double Ag nanoparticles

### 3.2.4 距离 $d$ 对辐射增强的影响

图 10 为  $L = 50 \text{ nm}$ 、 $R = 25 \text{ nm}$  条件下,  $d$  对单、双金属纳米椭球形颗粒 Purcell 因子的影响。

图 10 表明, 随着距离  $d$  增加, Purcell 因子急剧下降。这是由于金属表面存在的自由振动电子与外来光子相互作用, 产生了沿金属表面传播的电子疏密波。其产生的原理为: 在由两种半无限大、各向同性介质构成的界面上, 介质的介电常数是正实数, 金属的介电常数是实部为负数的复数。根据 Maxwell 方程, 结合边界条件和材料特性可以计算出表面等离子体的场分布和色散特性。通常, 表面等离子激元在介质分界面以外的介质中传播时呈指数形式衰减, 因此在利用光源与纳米颗粒之间的距离对光学辐射过程进行调控时,  $d$  的选择尤为重要。

### 3.3 双金属纳米椭球壳的增强效应

受填充介质材料和椭球壳厚度的影响, 金属纳米椭球壳会展现出独特的电磁特性<sup>[17]</sup>。对于双金属椭球壳, 由于球壳间的耦合效应使这种填充的影响更加明显。图 11 为双金属纳米椭球壳结构示意。

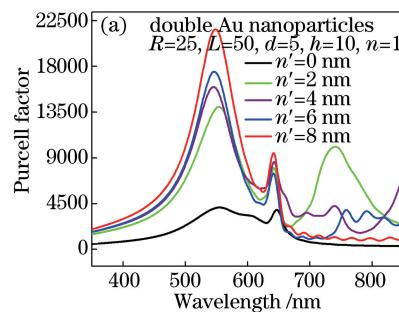


图 11 双金属纳米椭球壳的仿真模型

Fig. 11 Simulation model of bimetallic nanometer ellipsoid shell

#### 3.3.1 填充材料对辐射增强的影响

图 12 为  $L = 50 \text{ nm}$ 、 $R = 25 \text{ nm}$ 、 $D = 5 \text{ nm}$ 、 $h = 10 \text{ nm}$ 、 $n = 1$  时, 不同填充材料的折射率  $n'$  对双金属纳米椭球壳 Purcell 因子的影响。图中  $n' = 0$  代表实心金属纳米椭球。

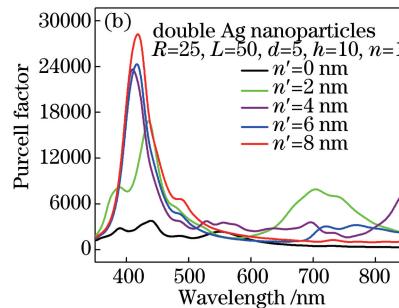


图 12 双金属纳米椭球壳的填充材料对 Purcell 因子的影响。(a) 双 Au 纳米椭球壳; (b) 双 Ag 纳米椭球壳

Fig. 12 Effect of filling material of bimetallic nanometer ellipsoid shell on Purcell factor.

(a) Double Au nanometer ellipsoid shell; (b) double Ag nanometer ellipsoid shell

由图 12 可知, 随着填充材料折射率增加, Purcell 因子的强度逐渐变大, 填充电介质后金属纳米椭球壳要比实心金属纳米颗粒更容易发生共振, 且共振的效果更好。这是因为置于不同电介质中的纳米微粒在界面处的场强会增强, 从而导致整个体系的介电性都增强。其作用机理是: 在介质和纳米微粒折射率相差很大的界面处会出现折射率边界, 使得微粒表面和内部的场强增强。此时, 表面等离子共振波长不但与环境材料有关, 还与填充材料有关。

#### 3.3.2 椭球壳厚度对辐射增强的影响

图 13 为  $L = 50 \text{ nm}$ 、 $R = 25 \text{ nm}$ 、 $D = 5 \text{ nm}$ 、 $n = 1$ ,  $n' = 2$  时, 金属纳米椭球壳的厚度  $h$  对双金属纳米椭球壳 Purcell 因子的影响。图中  $h = 0$  代表实心金属纳米椭球。

由图 13 可知, 越薄的金属纳米椭球壳越容易获得好的共振效果和更高的增强因子, 而且当椭球壳较薄时, 表面等离子激元共振波长受环境材料和填充材料的影响更明显。由于表面等离子激元在金属中传播时呈指数形式衰减, 随着椭球壳厚度增加, 它将逐渐无法穿透球壳, 填充材料对其 Purcell 因子的影响也越来越小, 所以金属纳米椭球壳的增强曲线随着椭球壳厚度增加而逐渐趋向于实心金属纳米椭球的增强曲线。

图 13 为  $L = 50 \text{ nm}$ 、 $R = 25 \text{ nm}$ 、 $D = 5 \text{ nm}$ 、 $n = 1$ ,  $n' = 2$  时, 金属纳米椭球壳的厚度  $h$  对双金属纳米椭球壳 Purcell 因子的影响。

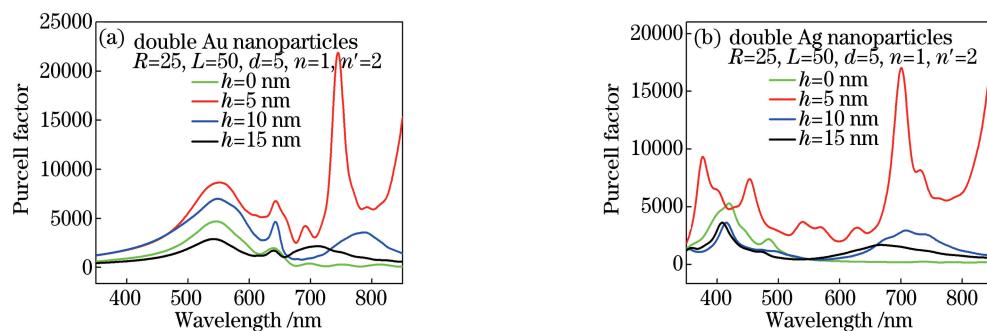


图 13 椭球壳厚度对双金属纳米椭球壳 Purcell 因子的影响。(a) 双 Au 纳米椭球壳;(b) 双 Ag 纳米椭球壳

Fig. 13 Effect of ellipsoidal shell thickness on Purcell factor of double metal nanometer ellipsoidal shell.

(a) Double Au nanometer ellipsoid shell; (b) double Ag nanometer ellipsoid shell

## 4 结 论

对不同结构参数金属纳米椭球的辐射增强进行模拟计算后发现:当沿极化方向的长轴尺寸增加时,辐射的增强倍数变大,增强峰覆盖的波长范围变宽;当垂直于极化方向的短轴尺寸增加时,Purcell 因子的增强倍数变小,增强峰覆盖的波长范围变窄。此外,在相同的参数下,双金属纳米颗粒的辐射增强为单金属纳米颗粒的 3 倍。当环境材料折射率逐渐增大时,金属纳米颗粒的共振波长发生红移,这一现象可以调控增强峰的位置。随着偶极子光源与金属纳米颗粒之间的距离增加,Purcell 因子增强倍数呈指数衰减。因此,在利用光源与纳米颗粒之间的距离对光学辐射过程进行调控时,应选择适当的距离以有效增加辐射增强的效果。最后,通过对双金属纳米椭球壳结构进行辐射增强模拟计算后发现,椭球壳填充介质折射率  $n'$  和椭球壳厚度  $h$  的改变,对辐射强度具有不同程度的影响:随着填充材料折射率增加,Purcell 因子逐渐变大;而金属纳米球椭壳的增强曲线随着椭球壳厚度的增加逐渐趋向于实心金属纳米椭球的增强曲线。

## 参 考 文 献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [2] Lu H D, Tie S N, Liu J, et al. Absorption enhancement of crystalline silicon thin film solar cell using nano binary silver grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080401.  
卢辉东, 铁生年, 刘杰, 等. 银纳米光栅增加晶体硅薄膜太阳能电池光吸收的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080401.
- [3] Hutter E, Cha S, Liu J F, et al. Role of substrate metal in gold nanoparticle enhanced surface plasmon resonance imaging[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2016, 105(1): 8-12.
- [4] Ono A, Shiroshita N, Kikawada M, et al. Enhanced photoelectron emission from aluminum thin film by surface plasmon resonance under deep-ultraviolet excitation[J]. Journal of Physics D, 2015, 48(18): 184005.
- [5] Ma S B, Liu Q, Qian X C, et al. Controllability study of surface plasmon resonance spectra of aluminium nanoparticles [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0931001.  
马守宝, 刘琼, 钱晓晨, 等. 铝纳米颗粒表面等离子体共振峰可控性研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0931001.
- [6] Guo Q B, Liu X F, Qiu J R. Research progress of ultrafast nonlinear optics and applications of nanostructures with localized plasmon resonance[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0703005.  
郭强兵, 刘小峰, 邱建荣. 局域表面等离子体纳米结构的超快非线性光学及其应用研究进展 [J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0703005.
- [7] Purcell E M. Spontaneous emission probabilities at radio frequencies [M]//Burstein E, Weisbuch C. Confined Electrons and Photons: New Physics and Applications. New York: Plenum Press, 1995: 839-839.
- [8] Zhang X, Wu Y, Tong X, et al. Study of surface plasmon polaritons waveguide of silver nanowire[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0124001.  
张旭, 吴禹, 全旋, 等. 银纳米线表面等离子体激元导光的研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0124001.
- [9] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and applications[M]. Boston: Springer, 2007.
- [10] Dou X J, Min C J, Zhang Y Q, et al. Surface

- plasmon polaritons optical tweezers technology [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1026004.
- 豆秀婕, 闵长俊, 张聿全, 等. 表面等离激元光镊技术[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026004.
- [11] le Ru E C, Etchegoin P G. Principles of surface-enhanced Raman spectroscopy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [12] Salski B, Celuch M, Gwarek W. FDTD for nanoscale and optical problems[J]. IEEE Microwave Magazine, 2010, 11(2): 50-59.
- [13] Chuang W H, Wang J Y, Yang C C, et al. Numerical study on quantum efficiency enhancement of a light-emitting diode based on surface plasmon coupling with a quantum well[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(16): 1339-1341.
- [14] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Journal of Computational Physics, 1994, 114(2): 185-200.
- [15] Dong J, Zheng H, Zhang Z, et al. Surface enhanced fluorescence by plasmonic nanostructures [M]// Geddes C D. Reviews in Plasmonics 2015. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [16] Gao H, Teng J, Chua S J, et al. Enhancement of GaAs/InGaAs quantum well emission by disordered gold nanoparticle arrays [J]. Applied Physics A, 2014, 115(2): 487-490.
- [17] Tam F, Chen A L, Kundu J, et al. Mesoscopic nanoshells: Geometry-dependent plasmon resonances beyond the quasistatic limit[J]. Journal of Chemical Physics, 2007, 127(20): 204703.