

文章编号: 1004-5929(2025)02-0180-08

## 三棱柱形 Au-Ge Janus 纳米颗粒可见太阳光谱后向散射特性理论研究

何怡屏, 阮佩, 杨乾, 罗道斌\*

(陕西科技大学, 物理与信息科学学院, 陕西西安, 710021)

**摘要:** 为获得三棱柱形 Au-Ge Janus 纳米颗粒(JNPs)在太阳光谱下的后向散射特性, 本文采用离散偶极近似(DDA)方法进行了仿真计算, 研究了颗粒等效半径、比表面积以及金属体积比例等因素对后向散射效率的调控。研究发现, 三棱柱 Au-Ge-JNPs 后向散射峰位置随着三棱柱体积的增大而红移, 且峰值强度显著增强; 通过调控 Au-Ge 金属的体积比例, 发现比例为 4:1 时, 后向散射效率峰达到最大值; 分析了可见光谱范围内三棱柱 Au-Ge-JNPs 平均后向散射效率与等效半径关系并获得了经验公式, 为 Janus 纳米颗粒后向散射特性的调控提供了结构优化设计方法。

**关键词:** 离散偶极近似; Janus 纳米颗粒; 太阳光谱; 后向散射效率

中图分类号: O436.2

文献标志码: A

doi:10.13883/j.issn1004-5929.202502004

## Theoretical study on the backscattering characteristics of visible solar spectrum of triangular prism Au-Ge Janus nanoparticles

HE Yiping, RUAN Pei, YANG Qian, LUO Daobin\*

(Shaanxi University of Science and Technology, School of Physics and Information Science, Xi'an Shaanxi, 710021, China)

**Abstract:** In order to obtain the backscattering characteristics of triangular prism Au-Ge Janus nanoparticles (JNPs) in the solar spectrum, the discrete dipole approximation (DDA) method was used to simulate and calculate the backscattering efficiency of particle size, specific surface area, metal volume ratio and other factors. The results show that the position of the backscatter peak of triangular prism Au-Ge-JNPs is redshifted with the increase of triangular prism volume, and the peak intensity increases significantly. By adjusting the volume ratio of Au-Ge metal, it was found that when the ratio was 4:1, the backscattering efficiency peak reached the maximum. The relationship between the average backscattering efficiency and the equivalent radius of triangular prism Au-Ge-JNPs in the visible spectrum was analyzed, and the empirical formula was obtained, which provided a structural optimization design method for the regulation of the backscattering characteristics of Janus nanoparticles.

**Keywords:** Discrete dipole approximation; Janus nanoparticles; Solar spectrum; Backscattering efficiency

收稿日期: (2024-07-01), 修改日期: (2024-11-06)

基金项目: 陕西省科技计划项目(2023JCYB047)

作者简介: 何怡屏(2000-)女, 硕士, 主要从事纳米颗粒光学特性研究, E-mail: 220911051@sust.edu.cn

通讯作者: 罗道斌(1980-)男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微纳光学及光电探测领域的研究, E-mail: luodaobin@sust.edu.cn

## 0 引言

金属纳米粒子因其表面等离子体性质而引起了物理学、化学和生物学的广泛兴趣。当入射光照射时,自由电荷产生振荡,这种电荷振荡被称为局域表面等离子体<sup>[1]</sup>。在共振波长处,电磁场激发局域表面等离子体体会导致强烈的光散射<sup>[2]</sup>。基于这些独特的光学特性,金属纳米颗粒在表面增强荧光<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、化学催化<sup>[5]</sup>、农业应用<sup>[6]</sup>、环境<sup>[7]</sup>和太阳能电池<sup>[8]</sup>等众多领域得到广泛应用。

锗(Ge)是一种具有高折射率的材料,拥有较小的带隙和更高的空穴和电子迁移率<sup>[9]</sup>。然而,Ge在可见光波段的表面等离子体共振特性相对较弱<sup>[10]</sup>。多用于制造晶体管<sup>[11]</sup>、太阳能电池等电子器件<sup>[12]</sup>,在半导体领域具有广泛的应用。相比之下,金(Au)纳米颗粒更适合在可见光波段展现明显的表面等离子体共振效应<sup>[13]</sup>。已有研究表明,将银纳米颗粒引入其中可以有效增强 Ge 在可见光与近红外波段的消光响应,并且可以调控增强 Ge 消光响应的频率范围<sup>[14]</sup>。因此,我们设想将 Ge 与其他具有优良表面等离子体共振性质的贵金属结合形成具有特殊不对称性的 Janus 纳米颗粒,可对其光学特性进行调控。

Janus 纳米颗粒(JNPs)<sup>[15]</sup>是指将两种或多种化学差异的复合材料整合到一个结构系统中。诺贝尔奖获得者 Pierre Gilles de Gennes 在题为“软物质<sup>[16]</sup>”的演讲中提出了“Janus 粒子”作为各向异性纳米材料的概念。JNPs 的研究备受关注,它的不对称结构能够整合不同的功能特性并实现更多的协同作用<sup>[15]</sup>。与单相金属纳米颗粒相比,JNPs 具有更多可能性。可用于成像传感<sup>[17]</sup>、生物医学<sup>[18]</sup>、太阳能电池<sup>[19]</sup>和光电子器件<sup>[20]</sup>等领域。研究 JNPs 的后向散射特性具有重要意义,有研究表明,Au-Ag 合金纳米球壳在生物成像中的应用取决于其后向散射特性,因为具有强后向散射特性的纳米颗粒有助于增强生物组织的回波信号,从而提高成像质量<sup>[21]</sup>。

由于三棱柱形纳米颗粒具有多个尖端和棱边,这些尖端或边缘处的局部电场增强能够使散射光的强度增大,从而增强颗粒的后向散射信号。尖端附近产生的局域场增强对拉曼信号也具有显著的增强作用,其拉曼信号强度可大幅度提高数个数量级<sup>[22, 23]</sup>。因此,本文选用三棱柱形 Au-Ge-JNPs 进行研究,通过结构优化设计三棱柱形 JNPs

获得高后向散射效率。

目前对金属纳米颗粒的研究多借助于数值计算方法,如时域有限差分法(FDTD)<sup>[24]</sup>、离散偶极近似法(DDA)、有限元法(FEM)等。与其它数值计算方法相比,DDA 具有更广泛的适用范围,并且不受颗粒形状的限制。在计算光与纳米颗粒的相互作用时具有明显优势,因此被广泛视为重要的研究工具之一。

## 1 理论和方法

本文基于离散偶极近似(Discrete Dipole Approximation,简称 DDA)法,利用 DDSCAT7.3 软件包进行模拟计算,DDA 是用于计算任意几何形状粒子和周期性结构的散射及吸收的一种方法。它将任意形状的散射体近似为大量可极化的点偶极子。在外界电磁场作用下,这些点偶极子会发生极化并生成电偶极矩,彼此之间也会相互影响。通过计算每个偶极子的响应并将其叠加在一起,可以观察到目标物在入射电磁场下所展现的光学特性。

DDSCAT 7.3 计算了选定方向上的散射,并报告了散射矩阵的元素。散射方向通过角度  $\theta$  和  $\varphi$  来指定。 $\theta$  和  $\varphi$  为相对于实验框架(入射光束在  $x$  方向的框架)的散射方向。角度  $\theta_s$  仅为散射角,入射光束与散射光束之间的角度  $\theta_s = 0^\circ$  为前向散射,  $\theta_s = 180^\circ$  为后向散射。在散射平面内,散射方向由  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  指定,因此:

$$n_s = x_{LF} \cos\theta + y_{LF} \sin\theta \cos\varphi + z_{LF} \sin\theta \sin\varphi \quad (1)$$

任意方向的散射用四个振幅函数  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  和  $S_4$  来描述,他们都是  $\theta_s$  和  $\varphi_s$  的函数,形成一个四元矩阵  $\begin{pmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{pmatrix}$ ,通过计算获得散射振幅矩阵的元素。

根据  $f_m(\theta_s, \varphi_s)$  计算偶极子阵列的散射特性,其中指数  $l = 1, 2$  表示入射偏振态,  $m = 1, 2$  表示散射偏振态,  $\theta_s$  和  $\varphi_s$  指定散射方向。入射偏振态  $l = 1, 2$  对应于偏振态  $e_{01}$ 、 $e_{02}$ ,且:

$$e_{02} = k_0 \times e_{01} = x_{LF} \times e_{01} \quad (2)$$

用于计算散射振幅矩阵元素的 4 个方程:

$$S_1 = -i[f_{21}(b \cos\varphi_s - a \sin\varphi_s) + f_{22}(d \cos\varphi_s - c \sin\varphi_s)] \quad (3-a)$$

$$S_2 = -i[f_{11}(a \cos\varphi_s + b \sin\varphi_s) + f_{12}(c \cos\varphi_s + d \sin\varphi_s)] \quad (3-b)$$

$$S_3 = i[f_{11}(b\cos\varphi_s - a\sin\varphi_s) + f_{12}(d\cos\varphi_s - c\sin\varphi_s)] \quad (3-c)$$

$$S_4 = i[f_{21}(a\cos\varphi_s + b\sin\varphi_s) + f_{22}(\cos\varphi_s + d\sin\varphi_s)] \quad (3-d)$$

其中,

$$\begin{cases} a = e_{01} \cdot y_{LF} \\ b = e_{01} \cdot z_{LF} \\ c = e_{02} \cdot y_{LF} \\ d = e_{02} \cdot z_{LF} \end{cases} \quad (4)$$

引入四个 Stokes 参数 ( $I, Q, U, V$ ) 来描述入射和散射辐射, 用与入射和散射辐射的 Stokes 参数有关的  $4 \times 4$  Mueller 矩阵  $S_{ij}$  来描述有限对象的散射特性,

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

其中  $S_{11}$  表示散射强度:

$$S_{11} = (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2)/2 \quad (6)$$

微分散射截面可直接从 Mueller 矩阵元素中获得,

$$\begin{aligned} dC_{xa}/d\Omega &= \frac{1}{2k^2} (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2) \\ &= S_{11}/k^2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$Q_{bk} = C_{bk}/\pi\alpha_{eff}^2 \quad (8)$$

$$\alpha_{eff} = (3V/4\pi)1/3 \quad (9)$$

其中,  $C_{xa}$  是散射截面,  $Q_{bk}$  为后向散射效率,  $C_{bk}$  为后向散射截面,  $\alpha_{eff}$  表示等效半径,  $V$  为纳米颗粒的体积。

## 2 结果与讨论

本节中, 详细讨论了三棱柱形 Au-Ge-JNPs 不同等效半径、比表面积以及金属体积比对后向散射效率和前后向散射强度的影响。图 1 是三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的示意图, 入射光为  $AM=1.5$  的太阳光, 沿  $x$  轴正方向照射, 图 2 为  $390 \sim 760$  nm 的太阳光谱辐射分布曲线图。通过程序 DDSCAT 7.3 计算了三棱柱形的 JNPs 的后向散射效率, 设定三棱柱 Au-Ge-JNPs 高为  $L$ , 侧面为边长为  $a$  的等边三角形, 整体被介电常数  $\epsilon=1.00$  的空气介质包围, 其中 Au 和 Ge 的折射率数据来自参考文献<sup>[30, 31]</sup>。

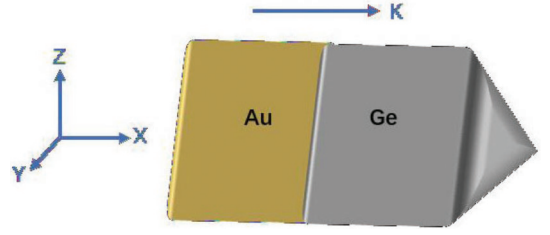


图 1 三棱柱形 Au-Ge Janus 纳米颗粒

Fig. 1 Trigonal Au-Ge Janus nanoparticles

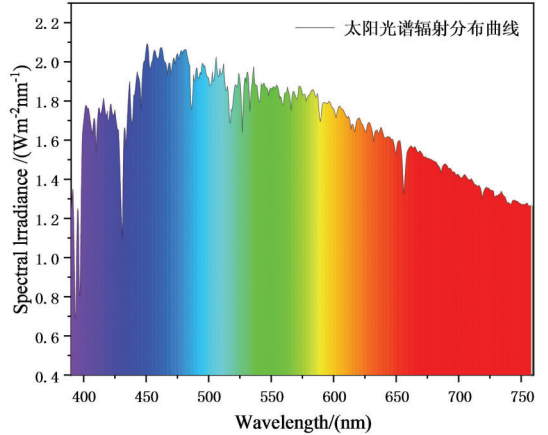


图 2 太阳光谱辐射分布曲线图

Fig. 2 Solar Spectral Radiation Distribution Curve

### 2.1 尺寸参数的影响

为了研究具有不同尺寸参数的纳米颗粒对后向散射效率的影响, 本节通过设置纳米颗粒不同的等效半径以及比表面积来进行讨论, 给出了三棱柱形 Au-Ge-JNPs 在不同情况下的后向散射效率, 以及前后向散射强度。

#### 2.1.1 等效半径的影响

为了探究等效半径对纳米颗粒的影响, 本小节模拟计算了在可见光  $390 \sim 760$  nm 范围下, 高  $L$  为  $100$  nm, 等效半径分别为  $10$  nm、 $20$  nm、 $30$  nm、 $40$  nm 和  $50$  nm 的三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率, 几何参数见表 1, 计算结果如图 3 所示。

表 1 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 随等效半径变化的参数

Table 1 Parameters of trigonal Au-Ge-JNPs as a function of equivalent radius

$\alpha_{eff}/(nm)$	$V/(nm)$	$a/(nm)$
10	4188.79	9.84
20	3351.32	27.82
30	113097.33	51.11
40	268082.57	78.68
50	523598.78	109.96

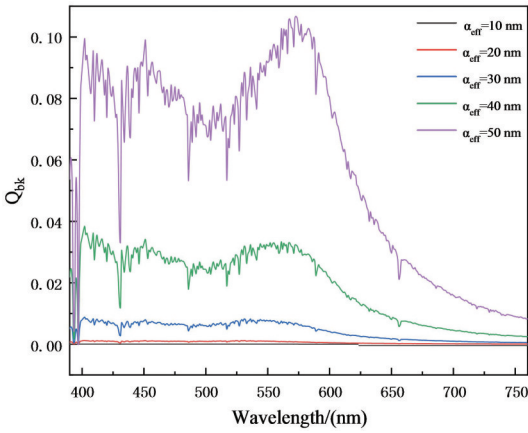


图 3 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率

Fig. 3 Backscattering efficiency of trigonal Au-Ge-JNPs

如图 3 所示,后向散射共振峰波长分别为 547 nm、547 nm、547 nm、569 nm 和 577 nm,可以看出,随着等效半径的增大,后向散射效率峰值逐渐增强,且散射峰出现红移现象。在等效半径为 50 nm 时后向散射效率最大,峰的位置在 577 nm 处。由于太阳光谱的影响,在 430 nm 处,后向散射出现急剧下降的现象,且出现多个峰值的情况,这反映了在特定波长下,太阳光对纳米颗粒的后向散射产生影响。随着纳米颗粒尺寸的增加,在颗粒的特定部位发生强烈的电荷集聚和振荡效应,产生了由极化电荷振荡产生的电共振和由颗粒内部激发的圆形位移电流产生的磁共振,从而出现多极等离子体共振峰的现象,这也导致了共振峰值的增强。

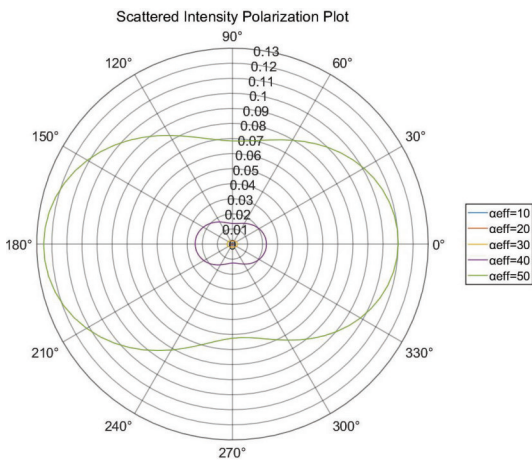


图 4 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 前后向散射强度极化图

Fig. 4 Polarization of the forward and backward scattering intensity of trigonal Au-Ge-JNPs

根据计算结果,进一步对不同等效半径下的三棱柱形 Au-Ge-JNPs 在其后向散射共振波长处的散射强度进行了分析,分析结果如图 4 所示。研究发现,随着三棱柱等效半径的增大,其前后向散射强度在逐渐增强,且后向散射强度稍大于前向散射强度,后向散射强度由最初的  $2.29 \times 10^{-6}$  增大为  $1.25 \times 10^{-1}$ 。由此可见,通过改变颗粒尺寸,可以实现可见光区域的强后向散射。

### 2.1.2 比表面积的影响

为了探究比表面积对纳米颗粒的影响,本小节模拟计算了在纳米颗粒的体积恒定为  $V = 433012 \text{ nm}^3$  时,在可见光波长为 390~760 nm 下的三棱柱形的 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率以及前后向散射强度,详细参数见表 2,计算结果如图 5 所示。

表 2 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 随比表面积变化的参数

Table 2 Parameters for the variation of trigonal Au-Ge-JNPs with specific surface area

$S/(\text{nm}^{-1})$	$a/(\text{nm})$	$L/(\text{nm})$
0.089282	100	100
0.088034	105	90.70
0.087185	110	82.64
0.086697	115	75.61
0.086537	120	69.44

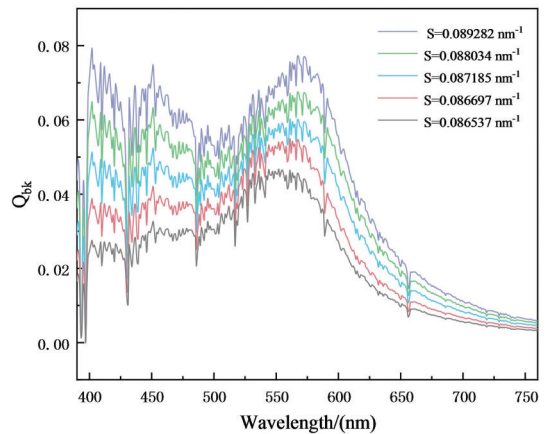


图 5 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率

Fig. 5 Backscattering efficiency of trigonal Au-Ge-JNPs

结果表明,随着三棱柱比表面积的增大,后向散射效率峰出现红移现象。在比表面积为  $S = 0.089282 \text{ nm}^{-1}$  时后向散射效率增强效果最好。随着尺寸的减小,颗粒的比表面积增大,颗粒中位于表面上的原子占比增大,颗粒具有高的表面能,导致散射效应加著,从而影响散射峰的位置和强度。通过调节纳米颗粒的比表面积,可以控制后

向散射共振峰位置和强度。

根据模拟结果,对三棱柱形的 Au-Ge-JNPs 的前后向散射强度进行了分析,比较了在入射波长为 568 nm 时,三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的散射强度,结果如图 6 所示。

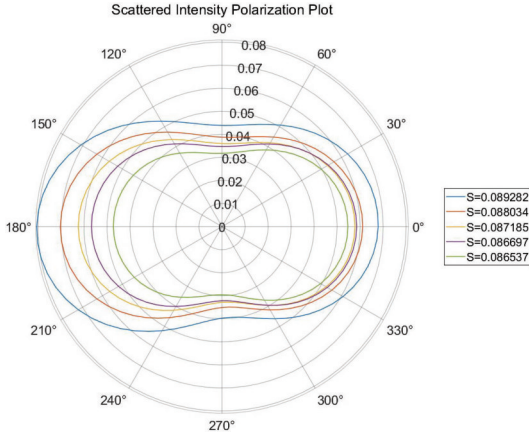


图 6 三棱柱形 Au-Ge-JNPs 前后向散射强度极化图

Fig. 6 Polarization of the forward and backward scattering intensity of trigonal Au-Ge-JNPs

从图 6 中可以看出,在同一波长下,随着三棱柱比表面积增大,其前后向散射强度逐渐增强,且由前向散射为主导改变为后向散射为主导,后向散射强度由最初的  $4.7239 \times 10^{-2}$  增大为  $8.0523 \times 10^{-2}$ 。通过对比有效半径、比表面积对 Au-Ge-JNPs 的后向散射的影响发现,当等效半径增大,边长  $a$  增大,Au-Ge 间的接触面也随之增大,后向散射效率以及后向散射强度都会逐渐增强。而当体积  $V$  一定时,增大三棱柱边长  $a$ ,其后向散射效率和后向散射强度反而会减小。这表明 Au-Ge 间的接触面对后向散射效率的影响不可忽视,由于 JNPs 的非对称性,光的散射具有方向性。当金属间接触面增大时,这种非对称性变得更加显著,导致散射方向的变化,更多的光反射回入射方向,纳米颗粒的后向散射效率增强。

## 2.2 金属体积比例的影响

本节研究了金和锗不同体积比对后向散射效率以及前后向散射强度的影响,保持纳米颗粒的体积为  $V=433012 \text{ nm}^3$ ,设置长为 100 nm,三角形边长为 100 nm,改变金和锗在纳米颗粒中的比例,分别将金和锗的占比设置为 1:4、2:3、3:2 和 4:1,在可见光 390~760 nm 范围下,探究对后向散射的影响,结果如图 7 所示。

结果表明,Au-Ge-JNPs 的后向散射还取决于

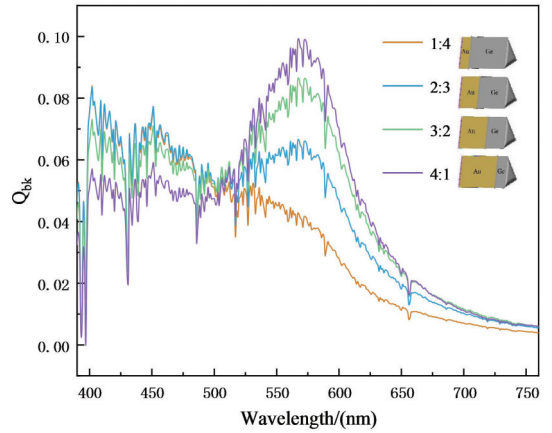


图 7 不同比例组成的三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率

Fig. 7 Backward scattering efficiencies of trigonal Au-Ge-JNPs with different proportions of composition

纳米颗粒的金属构成比例。随着金占比的增大,在入射光波长为 516~672 nm 中,Au:Ge 为 4:1 比例关系的纳米颗粒后向散射效率最大。然而,其整体变化并不是单调的增大或减小,可以看出,后向散射效率有多个不同的变化阶段。例如在图 7 中,当入射光波长范围为 400~505 nm 间时,Au:Ge 比例为 4:1 的效率最低,而当波长范围为 516~672 nm 间时 Au:Ge 比例为 4:1 的效率最高,超过 672 nm 后又逐渐降低,这种现象表明其中涉及多个物理机制。

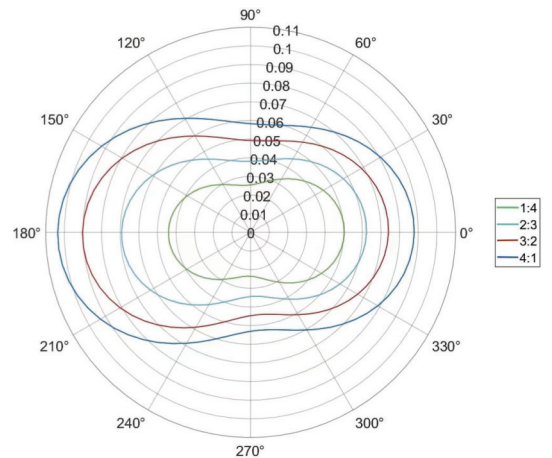


图 8 不同金属比例组成的三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的前后向散射强度极化图

Fig. 8 Polarization of backward and forward scattering intensities of trigonal Au-Ge-JNPs composed of different metal ratios

根据上述模拟结果,在共振峰波长 566 nm

处,对不同金属比例的三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的前后向散射的散射强度进行了分析,结果如图 8 所示。从所得结果可以看出,当 Au : Ge 体积比为 1 : 4 时,前向散射占主导,而当 Au : Ge 体积比为 4 : 1 时,变为后向散射主导,且散射强度增强了 2.35 倍。因此认为 Au 在 Au-Ge-JNPs 中占比越大对其散射强度的增强越明显。

当锗(Ge)与金(Au)结合形成金-锗 Au-Ge-JNPs 时,形成了新的电子结构,增强了纳米颗粒对光的散射,Au-Ge-JNPs 的后向散射效率也得到了提升。这是因为 Au 独特的光学性质,金是一种具有高反射率和强散射能力的金属,高反射率意味着更多的光能在纳米颗粒表面反射,从而增加后向散射的可能性,导致后向散射强度增大。Janus 结构使得 Au 和 Ge 之间形成界面,这种界面可以增加金属之间的相互作用。因此,金在 Au-Ge-JNPs 中的比例越高,上述效应越明显,后向散射效率和强度也得到增强。

### 2.3 可见太阳光谱范围内平均后向散射效率

平均后向散射效率通常指的是从入射光在遇到散射介质后,被散射回原方向或接近原方向的光散射的辐射量与入射辐射量的比值。反映了光在遇到物体后被散射的程度,是衡量物体对光的散射能力的一个指标,较高的后向散射效率表示大部分的散射光能够集中在接近入射方向的范围内,反之则说明物体或颗粒在后向方向上的散射较弱。本节研究了在可见光波长为 390~760 nm 范围下,金属体积比为 1 : 1 的三棱柱 Au-Ge-JNPs 的等效半径对平均后向散射的影响,详细参数见表 3。

表 3 平均后向散射效率与等效半径的参数

Table 3 Parameters of average backscattering efficiency and equivalent radius

$Q_{bk}$	$\alpha_{eff}/(nm)$
0.00037	10
0.000737	20
0.005323	30
0.023519	40
0.07228	50

对模拟结果进行统计平均,我们得出了一个经验公式,该公式揭示了等效半径和平均后向散射效率的关系。通过这个公式,能够有效地预测在等效半径确定的情况下的平均后向散射效率。

$$Q_{bk} = 0.0003\alpha_{eff}^4 - 0.0016\alpha_{eff}^3 + 0.0037\alpha_{eff}^2 - 0.0044\alpha_{eff} + 0.0024 \quad (10)$$

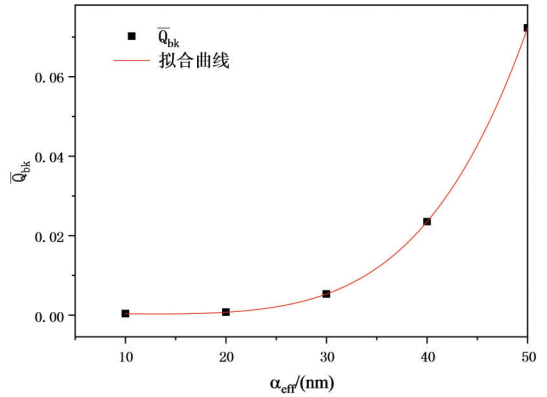


图 9 经验公式拟合曲线图

Fig.9 Empirical formula fitting curves

其中,  $Q_{bk}$  表示平均后向散射效率,  $\alpha_{eff}$  表示等效半径,该公式的相关系数  $R^2 = 1$ ,如图 9 所示,该公式很好地拟合了等效半径和平均后向散射效率之间的关系。表明能够通过改变纳米颗粒等效半径和体积比,来实现对后向散射的调控。值得注意的是,尽管这个经验公式在当前条件下表现出良好的一致性,但在实际应用时需要结合具体情况进行调整和验证。

### 3 结论

本文利用 DDA 方法研究了可见光太阳光谱下,三棱柱形 Au-Ge-JNPs 的后向散射效率以及前后向散射强度。研究了等效半径和比表面积与后向散射效率之间的关系,并且找到了一种针对增强后向散射效率的 Au-Ge-JNPs 结构的最优设计,即边长及高为 100 nm,Au : Ge 的体积比为 4 : 1 时,在入射光波长为 566 nm 处,Au-Ge-JNPs 的后向散射效率以及散射强度最强。通过对可见光后向散射效率的统计平均拟合,得到了关于等效半径和平均后向散射效率的经验公式,为 Au-Ge-JNPs 后向散射应用的结构优化设计提供一种思路。

### 参考文献

[1] Petryayeva E, Krull U J. Localized surface plasmon resonance: Nanostructures, bioassays and biosensing—A review[J]. Analytica Chimica Acta, 2011, 706(1):8-24.

[2] Ammari H, Millien P, Ruiz M, et al. Mathematical Analysis of Plasmonic Nanoparticles: The Scalar Case[J]. Archive for Rational Mechanics and Anal-

- ysis, 2017, 224(2):597-658.
- [3] 郭澍,王明利. 核壳结构在表面增强荧光中的研究进展[J]. 光散射学报, 2023, 35(4):339-351. (Guo S, Wang M L. Research progress of core-shell structure in surface enhanced fluorescence[J]. The Journal of Light Scattering, 2023, 35(4):339-351.)
- [4] Sengul A B, Asmatulu E. Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles; a review[J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, 18(5):1659-1683.
- [5] Yuan J, Liu L, Gan T, et al. Continuous Flow-Electrochemical Coupling Technology for Metal Nanoparticle Synthesis; Applications for Catalysis[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(3):2796-2805.
- [6] Santás-Miguel V, Arias-Estévez M, Rodríguez-Seijo A, et al. Use of metal nanoparticles in agriculture. A review on the effects on plant germination[J]. Environmental Pollution, 2023, 334:122222
- [7] Saravanan A, Kumar P S, Karishma S, et al. A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications [J]. Chemosphere, 2021, 264:128580.
- [8] 肖亮,朱群志. 嵌入金属纳米颗粒提高晶硅薄膜太阳能电池吸收率[J]. 光散射学报, 2020, 32(3):266-273. (Xiao L, Zhu Z Q. Embedding Metal Nanoparticles to Increase the Absorption Rate of Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells[J]. The Journal of Light Scattering, 2020, 32(3):266-273.)
- [9] Stavarache I, Teodorescu V S, Prepelita P, et al. Ge nanoparticles in SiO<sub>2</sub> for near infrared photodetectors with high performance [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):10286.
- [10] Ma C, Yan J, Huang Y, et al. Directional Scattering in a Germanium Nanosphere in the Visible Light Region[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(24):1700761.
- [11] Behrle R, Smoliner J, Wind L, et al. Bias-tunable temperature coefficient of resistance in Ge transistors[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(9):093510.
- [12] Carolan D. Recent advances in germanium nanocrystals: Synthesis, optical properties and applications[J]. Progress in Materials Science, 2017, 90:128-158.
- [13] Amendola V, Pilot R, Frasconi M, et al. Surface plasmon resonance in gold nanoparticles: a review[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2017, 29(20):203002.
- [14] 齐功民,狄增峰,任伟. 局域表面等离子体增强锗的光电响应特性[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2018, 24(2):207-216. (Qi G M, Di Z F, Ren W. Photoelectric-response enhancement of local surface-plasmon in Ge[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2018, 24(2):207-216.)
- [15] Yan L L, Yang X B, Zhang Y Q, et al. Porous Janus materials with unique asymmetries and functionality[J]. Materials Today, 2021, 51:626-647.
- [16] de Gennes P G. Soft Matter (Nobel lecture)[J]. Angewandte Chemie International Edition in English, 1992, 31(7):842-845.
- [17] Yi Y, Sanchez L, Gao Y, et al. Janus particles for biological imaging and sensing [J]. The Analyst, 2016, 141(12):3526-3539.
- [18] Wang Y H, Zhao P X, Zhang SH, et al. Application of Janus Particles in Point-of-Care Testing[J]. Biosensors, 2022, 12(9):689.
- [19] Alam M, Waheed H S, Ullah H, et al. Optoelectronics properties of JanusSnSSe monolayer for solar cells applications[J]. Physica B: Condensed Matter, 2022, 625:413487.
- [20] Vu T V, Hoi B D, Kartamyshev A I, et al. Induced out-of-plane piezoelectricity and giant Rashba spin splitting in Janus WSi<sub>3</sub>H (Z = N, P, As) monolayers toward next-generation electronic devices[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135(7):074301.
- [21] 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):208-216. (Wu P P, Yeersun P, Abolaiti R, et al. Optimization of Light Absorption and Backscattering Characteristics of Au-Ag Alloy Nanoshells[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11):208-216.)
- [22] Logsdail A J, Johnston R L. Predicting the Optical Properties of Core-Shell and Janus Segregated Au-M Nanoparticles (M = Ag, Pd)[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2012, 116(44):23616-23628.
- [23] 曹艺,赵虎林,孙萌涛. 针尖增强拉曼散射原理及在科研和教学方面的进展[J]. 光散射学报, 2023, 35(3):189-205. (Cao Y, Zhao H L, Sun M T. Principle of Tip-Enhanced Raman Spectroscopy and Advances in Scientific Research and Teaching Education[J]. The Journal of Light Scattering, 2023, 35(3):189-205.)
- [24] Teixeira F L, Sarris C D, Zhang Y, et al. Finite-

- difference time-domain methods [J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3(1):75.
- [25] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for periodic targets: theory and tests[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, image science, and vision*, 2008, 25(11):2693-2703.
- [26] Yurkin M A, Hoekstra A G. The discrete dipole approximation: an overview and recent developments[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 106(1):558-589.
- [27] 程蒙蒙,张卫纯,尹小刚,等. 钴纳米结构光学性质的离散偶极近似分析[J]. *光散射学报*, 2016, 28(3):275-280+292. (Cheng M M, Zhang W C, Yin X G, et al. The Optical Properties Analysis of Cobalt Nanostructures Based on Discrete Dipole Approximation[J]. *The Journal of Light Scattering*, 2016, 28(3):275-280+292.)
- [28] Grand J, Le Ru E C. Practical Implementation of Accurate Finite-Element Calculations for Electromagnetic Scattering by Nanoparticles[J]. *Plasmonics*, 2020, 15(1):109-121.
- [29] 朱启龙,李福,郭涛,等. 基于有限元分析制备的金膜-银纳米线基底在变压器油中糠醛检测中的应用[J]. *光散射学报*, 2024, 36(1):72-76. (Zhu Q L, Li F, Guo T, et al. Application of gold film-silver nanowire substrate prepared based on finite element analysis in furfural detection in transformer oil [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2024, 36(1):72-76.)
- [30] Aspnes D E, Studna A A. Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, and InSb from 1.5 to 6.0 eV[J]. *Physical Review B*. 1983, 27(2):985-1009.
- [31] Johnson P B, Christy R W. Optical Constants of the Noble Metals[J]. *Physical Review B*. 1972, 6(12):4370-4379.