

# 金纳米颗粒的合成及电磁增强特性的应用进展

刘莉莉

洛阳理工学院智能制造学院, 河南 洛阳

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年2月20日; 发布日期: 2026年3月4日

## 摘要

金纳米颗粒因独特的局域表面等离子共振(LSPR)效应, 在光与物质相互作用过程中展现出显著的光学信号增强、电荷转移调控及光热转换等特性, 成为光谱增强、食品安全、污染物检测等领域的研究热点。本文系统阐述了金纳米颗粒LSPR效应的物理本质与增强机理, 重点分析了颗粒尺寸、形貌、表面修饰及周围介质等关键因素对LSPR增强特性的调控规律, 全面综述了其在生物传感、光催化、生物医学诊疗及光电器件等领域的最新应用进展, 并针对当前面临的稳定性、生物相容性及规模化制备等挑战, 展望了未来的发展方向, 为金纳米颗粒LSPR效应的深入研究与实际应用提供参考。

## 关键词

光学增强, 生物传感, LSPR, 光催化, 纳米颗粒

# Advances in Near-Field Enhancement Characteristics and Applications of Gold Nanoparticles

Lili Liu

School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: December 29, 2025; accepted: February 20, 2026; published: March 4, 2026

## Abstract

Gold nanoparticles have attracted significant attention in the fields of spectral enhancement, food safety, and pollutant detection due to their unique localized surface plasmon resonance (LSPR) effects. These effects enable remarkable enhancements in optical signal transduction, charge transfer regulation, and photothermal conversion during light-matter interactions. This article systematically elaborates on the physical essence and enhancement mechanisms of the LSPR effect of gold nanoparticles. It focuses on analyzing the regulatory rules of key factors such as particle size,

**morphology, surface modification, and surrounding media on the LSPR enhancement characteristics. Furthermore, it comprehensively reviews the latest application advancements of AuNPs in areas such as biosensing, photocatalysis, biomedical diagnostics and therapeutics, and optoelectronic devices. In response to current challenges such as stability, biocompatibility, and scalable preparation, this review also outlines future development directions, providing a reference for in-depth research and practical applications of the LSPR effect of gold nanoparticles.**

## Keywords

Optical Enhancement, Biosensing, LSPR, Photocatalysis, Nanoparticles

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

金作为一种传统贵金属,在宏观尺度下呈现稳定的物理化学性质,但当尺寸缩小至 1~100 nm 范围形成金纳米颗粒时,其电子结构发生显著变化,产生了与宏观金截然不同的量子尺寸效应、表面效应及光学特性。其中,局域表面等离激元共振(Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR)效应是零维金属纳米颗粒的一个较为显著的特征,金属纳米颗粒与入射光源相互作用时,在纳米颗粒的表面会形成电子云的谐振,当电子云的谐振频率和入射光的频率一致时,就会形成 LSPR 效应[1]。

自公元四世纪莱克格斯杯通过金纳米颗粒实现独特显色效果以来,人类对金纳米颗粒光学特性的探索从未停歇。现代科技的发展使人们能够精准调控金纳米颗粒的 LSPR 特性,其带来的光学信号增强、光热转换及电荷转移调控等功能,已在生物分析、光热转化、疾病治疗等领域展现出巨大应用潜力[2]-[4]。本文基于近年来的研究成果,系统梳理金纳米颗粒 LSPR 增强特性的本质与调控规律,综述其应用进展并展望发展前景,为相关领域的研究提供理论与实践支撑。

## 2. 金纳米颗粒 LSPR 增强特性的本质与机理

### 2.1. LSPR 效应的物理本质

金属纳米颗粒表面的电子云会在入射光的照射下发生谐振,如果该谐振频率和光源的频率相等,那么就会出现强烈的谐振增强,纳米颗粒表面的电场会被增强,即发生 LSPR 现象,如图 1 所示为金属纳米颗粒 LSPR 效应原理图。与宏观金属表面的表面等离激元极化子不同,金纳米颗粒的三维受限结构使这种振荡被局限在颗粒表面及近邻区域(通常为几十至几百纳米),无法沿界面传播,因此表现出“局域化”特征。

LSPR 效应的直接表现为金纳米颗粒在特定波长下出现强特征吸收峰,球形金纳米颗粒吸收峰位于 520 nm 附近[5],星状形貌的金纳米颗粒吸收峰位于 600 nm 附近,并且可以根据尖端尺寸进行调控[6]。这种特征吸收不仅使金纳米颗粒溶液呈现丰富色彩(从橙红到紫红),更重要的是在共振波长下,颗粒表面可形成强度比入射光高 1~3 个数量级的增强电磁场,为光与物质的相互作用提供了独特平台。

### 2.2. LSPR 增强特性的核心机理

金纳米颗粒的 LSPR 增强特性主要通过三种机制实现,分别对应不同的应用场景:

(1) 局域电磁场增强机制:这是 LSPR 最基本的增强机理。在共振条件下,颗粒表面自由电子的集体

振荡形成强烈的偶极矩，使颗粒近表面区域的电磁场强度显著提升[7]。这种增强电磁场可有效提高周围分子的光吸收截面，如在表面增强拉曼散射(SERS)中，目标分子吸附于金纳米颗粒表面后，拉曼信号可被放大  $10^5\sim 10^{12}$  倍，实现痕量检测。

(2) 热电子注入机制：LSPR 激发后，处于高能态的“热电子”可通过界面电荷转移过程注入到相邻的半导体或催化剂中，从而调控光催化反应的电荷动力学过程[8]。例如，在  $\text{CdS}/\text{Au}@\text{ReS}_x$  光催化体系中，Au 纳米颗粒的 LSPR 效应起到诱导，加速光生电子从 CdS 向  $\text{ReS}_x$  的转移，使析氢速率提升至  $8.6 \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ，较 CdS/Au 体系提高 4.7 倍。

(3) 光热转换机制：LSPR 激发的自由电子通过与晶格振动耦合，将吸收的光能高效转化为热能，使颗粒及周围环境温度升高[9]。金纳米颗粒对近红外光的强吸收特性(生物组织窗口)使其在光热治疗中表现突出，近红外光照射下可精准升高病变组织温度，实现肿瘤细胞的选择性杀伤。

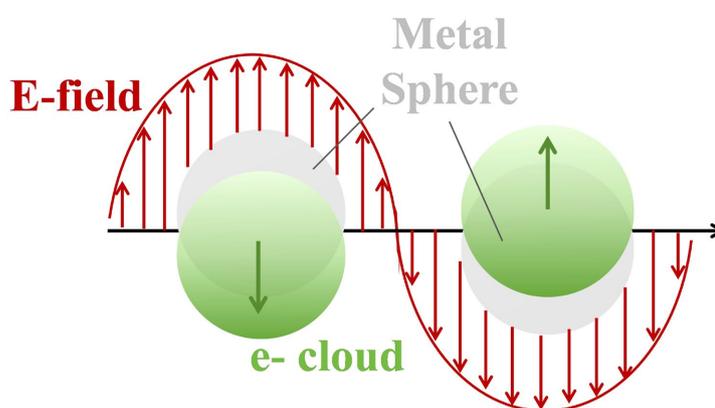


Figure 1. Schematic diagram of the LSPR effect in metal nanoparticles [1]

图 1. 金属纳米颗粒 LSPR 效应原理图[1]

### 3. LSPR 增强特性的关键调控因素

金纳米颗粒的 LSPR 增强特性具有高度可调性，其共振峰位、强度及增强效果主要受颗粒自身结构与外部环境因素的共同调控，精准控制这些因素是实现其功能化应用的核心前提。化学合成金纳米颗粒的方法通常有种子生长法和一步法，二者对金纳米颗粒的单分散性具有一定的影响，具体如下：

(1) 成核生长机制差异。一步法的成核与生长过程易重叠，依赖反应条件的精准控制实现短暂分离；种子生长法的成核与生长完全独立，从机制上保障了单分散性的可控性。

(2) 单分散性水平差异。一步法适合制备球形颗粒，在最优条件下可获得中等至良好的单分散性(CV 3%~8%)；种子生长法可实现超高单分散性(CV < 3%)，尤其适合各向异性颗粒的合成。

(3) 操作难度与单分散性稳定性差异。一步法操作简单，但单分散性对反应条件敏感，批次间重复性较差；种子生长法操作繁琐，但单分散性更稳定，批次间差异小。

#### 3.1. 颗粒尺寸与形貌

尺寸是调控 LSPR 特性的基础参数。对于球形金纳米颗粒，其表面的 LSPR 吸收峰会随着颗粒尺寸的增加而往长波方向移动，即红移。在这一过程中，金纳米颗粒溶液的颜色也会发生变化。这源于电子振荡区域扩大导致的振荡频率降低。同时，金纳米颗粒表面的也会出现离域效应，尺寸越大，该效应越强，在聚集体中可产生更强的近红外区光学响应。

形貌对 LSPR 特性的调控更为显著，不同形貌的金纳米颗粒(如棒状、片状、星状、核壳结构)因表面

电子振荡模式的差异,可表现出多重 LSPR 吸收峰[10]-[12],如图 2 所示为不同形貌的金纳米颗粒形貌示意图及吸收光谱曲线。例如,一维纳米棒结构因较高的长径比,而出现两种谐振模式(横向和纵向),通常来说位于可见光区域的为横向共振峰,纵向共振峰则可通过调控长径比在 500~1500 nm 范围内连续可调,使其在近红外光应用领域具有独特优势;星状金纳米颗粒因尖端的“避雷针效应”,在尖端区域可形成极强的局域电磁场,显著提升 SERS 检测灵敏度[13]。

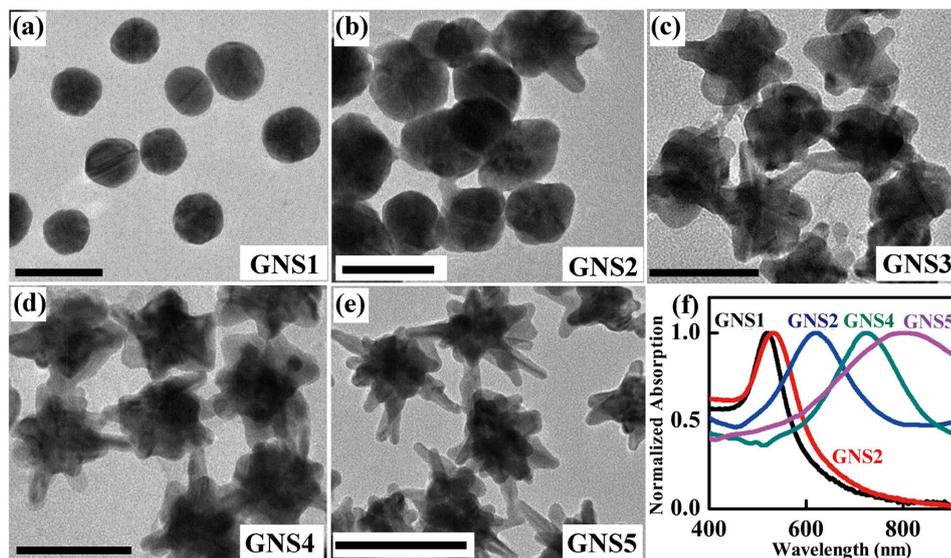


Figure 2. TEM images and absorption spectra of gold nanoparticles with different morphologies [1]  
图 2. 不同形貌的金纳米颗粒 TEM 形貌图及吸收光谱[1]

### 3.2. 表面修饰与组成

金纳米颗粒的表面化学状态直接影响其分散稳定性与 LSPR 特性。未修饰的金纳米颗粒易发生团聚,导致 LSPR 峰宽化与强度下降,而通过表面包覆配体(如柠檬酸盐、PVP、聚乙二醇)或无机壳层(如二氧化硅),可通过空间位阻或静电排斥作用维持颗粒分散性,同时改变颗粒表面的介电环境。例如,薄层二氧化硅包覆的金纳米颗粒不仅稳定性提升,其表面还可进一步修饰蛋白、核酸等生物分子,拓展在生物检测中的应用[14]-[16]。

构建核壳结构或合金结构是调控 LSPR 特性的有效手段。如 Au@ReS<sub>x</sub> 核壳结构中,Au 核的 LSPR 效应可诱导电子向 ReS<sub>x</sub> 壳层转移,形成缺电子的 Au<sup>δ+</sup>物质,加速界面电荷转移动力学;Au-Pt 合金纳米颗粒则可通过调节两种金属的比例,实现 LSPR 峰位的精准调控,同时结合两种金属的催化活性,提升光催化性能。

### 3.3. 周围介质与颗粒间距

金纳米颗粒周围介质的折射率直接影响 LSPR 峰位,折射率增大时,共振峰向长波长方向红移,这一特性是 LSPR 传感的核心原理。例如,当金纳米颗粒与目标生物分子结合后,周围介质折射率发生变化,通过检测 LSPR 峰位偏移即可实现对目标分子的定量分析。

颗粒间的电磁耦合作用对 LSPR 增强效果影响显著。颗粒之间的距离越小,特别是小到亚波长尺寸时,颗粒之间的耦合效应更加强烈,在较小的空间内会形成热点效应,电磁场增强效应大幅提升[17][18]。如金纳米颗粒自组装形成的阵列结构,其 LSPR 杂化效应可实现对可见光和红外波段光学特性的协同调

制,应用于隐身材料领域。但当颗粒发生失控团聚时,LSPR峰宽化且强度减弱,导致其功能失效,因此维持适宜的颗粒间距是保证LSPR增强特性的关键。

## 4. LSPR 增强特性的应用进展

金纳米颗粒的LSPR增强特性为多个领域的技术突破提供了可能,随着纳米合成技术的快速发展,金纳米颗粒在光电探测、光学催化、食品安全和材料分析等方面均有较为明显的发展。

### 4.1. 生物传感领域

生物传感器借助金纳米颗粒的LSPR特性,展现出了一些优势,如响应迅速、操作便捷、灵敏度高<sup>[19][20]</sup>。已成为痕量生物分子检测的重要工具。其检测原理主要分为两种:一是利用目标分子结合引起的LSPR峰位偏移进行定量分析,可用于检测肿瘤标志物、病原体、核酸等生物标志物;二是基于LSPR的电磁场增强效应提升检测信号,如SERS传感器,通过将目标分子吸附于金纳米颗粒表面的“热点”区域,实现对痕量分子的高灵敏检测。

LSPR位移检测与SERS检测的核心原理有着本质区别:LSPR位移检测的核心逻辑是“折射率驱动的光谱位移”。即当入射光频率匹配金属纳米颗粒表面自由电子的集体振荡频率时,会形成特征吸收峰;若纳米颗粒表面修饰的特异性识别元件与目标生物分子结合,会改变颗粒表面的局部折射率,进而导致特征吸收峰发生红移或蓝移,通过监测位移量的大小即可实现目标分子的定量分析。而SERS检测的核心逻辑是“电磁场增强的指纹信号放大”。即金属纳米颗粒表面的等离子体激元会在入射光激发下形成强局域电磁场,使吸附在颗粒表面的分子拉曼散射信号被放大 $10^6\sim 10^{14}$ 倍;不同生物分子的化学键振动模式不同,会产生独一无二的拉曼指纹图谱,据此可实现目标分子的定性定量分析。

将从灵敏度、特异性、操作复杂度、抗干扰能力、检测速度和成本等六个维度对比LSPR位移检测与SERS检测的优劣:

(1) 灵敏度。LSPR位移检测的灵敏度处于中等水平,其检测限通常在nM级别,灵敏度高低高度依赖金属纳米颗粒的尺寸均一性和分子结合引发的折射率变化幅度,当目标分子浓度过低时,折射率变化微弱,难以被常规紫外-可见分光光度计捕捉。而SERS检测则具备超高灵敏度,依托金属纳米颗粒尖端或间隙处的“热点”电磁场增强效应,检测限可达到fM甚至aM级别,能够实现单分子级别的痕量检测,特别适合肿瘤早期标志物、微量病毒核酸等低浓度生物分子的检测需求。

(2) 特异性。LSPR位移检测的特异性完全由表面修饰的识别元件(如抗体、适配体)决定,其信号本身不具备分子特异性——不同生物分子结合后可能引发相似的局部折射率变化,容易因非特异性吸附产生假阳性结果,无法区分结构相似的分子。而SERS检测的特异性则源于其独特的拉曼指纹识别特性,不同生物分子的拉曼谱图在峰位、峰形和强度上存在显著差异,不仅能区分不同种类的分子,还能精准识别同分异构体、修饰位点不同的蛋白质或碱基序列差异的核酸片段,特异性远高于LSPR位移检测。

(3) 操作复杂度。LSPR位移检测的操作简便性突出,属于免标记检测技术,无需对目标分子或纳米颗粒进行额外修饰,只需将识别元件直接固定在纳米颗粒表面,信号读取仅需实验室常规的紫外-可见分光光度计,实验步骤少,对操作人员的专业门槛要求较低。而SERS检测的操作复杂度相对较高,分为标记型和无标记型两类:标记型检测需要先制备修饰有拉曼报告分子的SERS探针,探针的制备、修饰和纯化步骤繁琐;无标记型检测则对SERS活性基底的增强性能和形貌均一性要求极高,且信号读取需要使用拉曼光谱仪,仪器的操作和调试难度更大。

(4) 抗干扰能力。LSPR位移检测的抗干扰能力较弱,生物样品中的复杂基质(如血清中的蛋白质、多糖、脂质等)会改变溶液的整体折射率,直接干扰LSPR特征吸收峰的位移信号;同时,金属纳米颗粒在

复杂基质中易发生团聚,进一步降低信号的稳定性和准确性,因此检测前往往需要对样品进行离心、纯化等预处理。而 SERS 检测的抗干扰能力处于中等水平,其拉曼指纹峰能够有效区分目标分子与基质干扰物的信号,但生物样品中存在的强荧光物质(如血红蛋白、黄素蛋白、维生素等)会产生较强的荧光背景,掩盖微弱的拉曼信号,通常需要通过选择近红外激发波长或使用荧光淬灭剂来缓解这一问题。

(5) 检测速度。LSPR 位移检测的检测速度更快,局部折射率的变化与生物分子的结合过程同步发生,因此可以实时监测生物分子的动态结合过程,比如抗原-抗体的结合速率、解离速率等动力学参数,信号采集时间通常仅为秒级,适合快速检测场景。而 SERS 检测的检测速度相对较慢,拉曼光谱的信号采集时间一般需要分钟级,尤其是无标记型检测,后续还需要对谱图进行基线校正、特征峰识别和数据拟合,数据分析过程耗时更久,难以满足实时监测的需求。

(6) 成本。LSPR 位移检测的成本优势明显,紫外-可见分光光度计是实验室常规设备,购置和维护成本低廉;金属纳米颗粒的制备工艺成熟,表面修饰过程简单,无需昂贵的标记试剂,批量检测的成本可控。而 SERS 检测的成本则相对较高,拉曼光谱仪(尤其是共聚焦拉曼显微镜)的设备价格昂贵,小型化拉曼设备的检测性能又受限;同时,高性能 SERS 活性基底(如纳米星、核壳结构纳米颗粒、纳米阵列等)的制备过程复杂,且基底的重复性较差,进一步推高了批量应用的成本。

## 4.2. 光催化领域

金纳米颗粒的 LSPR 效应通过热电子注入、局域电磁场增强及光热效应三种途径提升光催化性能,为解决传统光催化剂效率低的问题提供了新方案[21]-[23]。在光催化析氢反应中,金纳米颗粒的 LSPR 效应可显著加速界面电荷转移,如 CdS/Au<sub>0.5</sub>@ReS<sub>x</sub> 光催化剂的析氢速率达 8.6 mmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,表观量子效率为 35.9%,较 CdS/Au 体系提升 4.7 倍。

在有机合成反应中,金纳米颗粒的 LSPR 光热效应可在温和条件下提高反应速率和选择性。例如,在苯甲醇氧化反应中,金纳米颗粒在可见光照射下通过 LSPR 效应产生的局部高温,使反应转化率提升 3 倍以上,且产物选择性达 98%。此外,金纳米颗粒的 LSPR 效应还可增强光催化剂对太阳光的吸收范围,将波段范围拓宽在更大的区域内,覆盖近红外至紫外波段,增强太阳能的转换效率。

## 4.3. 生物医学诊疗领域

金纳米颗粒的 LSPR 特性使其在生物医学领域实现了“诊断-治疗-监测”一体化应用。在生物成像方面,金纳米颗粒作为造影剂,其强烈的 LSPR 散射信号可增强生物组织的成像对比度,帮助医生清晰观察组织器官的结构与功能,如金纳米星因尖端的强散射特性,在单细胞成像中表现出优异性能[24]-[26]。

在肿瘤治疗中,光热治疗是 LSPR 效应最典型的应用。在近红外波长的光源照射下,金纳米颗粒在 LSPR 效应下会将吸收的光能转化成焦耳热,使肿瘤区域温度升高至 42℃~45℃,尽可能的消灭肿瘤细胞,而选择性的对正常细胞带来较小伤害。研究表明,细胞膜包裹的金纳米颗粒可通过靶向识别作用富集于肿瘤部位,显著提升光热治疗效果,在兔子皮肤肿瘤模型中已实现完全消融且无复发的效果。此外,金纳米颗粒还可作为药物载体,通过 LSPR 光响应实现药物的可控释放,提高药物疗效并降低副作用。

## 4.4. 光电器件领域

金纳米颗粒的 LSPR 效应可增强光电转换效率,在有机光电器件、柔性显示等领域展现出巨大潜力[27]-[29]。在有机光晶体管中,将萘烯-AuNPs 集成到 PTCDI-C8 器件中,在 660 nm 光照下的外量子效率(EQE)达 453%,较传统器件提升 5 倍以上,这源于 AuNPs 的 LSPR 效应增强了光吸收并促进了电荷分

离。

在柔性显示技术中,吡啶-AuNPs 体系因 LSPR 效应在可见光区(400~600 nm)具有与量子点相当的光吸收强度,且无光漂白问题,可作为量子点的替代材料,提升显示器件的稳定性与使用寿命。此外,基于金纳米颗粒 LSPR 效应的自修复纳米涂层,在紫外光照射下可触发表面分子重构,使涂层断裂强度恢复至初始值的 80%,为柔性电子器件的防护提供了新方案。如表 1 所示,我们对比了不同形貌/尺寸金纳米颗粒在传感灵敏度、光热转换效率等方面的数值。

**Table 1.** Values of gold nanoparticles with different morphologies/sizes in terms of sensing sensitivity, photothermal conversion efficiency

**表 1.** 不同形貌/尺寸金纳米颗粒在传感灵敏度、光热转换效率等方面的数值

金纳米颗粒形貌	尺寸范围	传感灵敏度(检测限 LOD)	光热转换效率( $\eta$ )
金纳米球	5~10 nm	10~50 pM (小分子/离子检测)	20%~35%
		50~200 pM (生物分子检测)	
	20~50 nm	0.5~2 nM (小分子/离子检测)	35%~45%
		25 nM (生物分子检测)	
金纳米棒	直径 5~10 nm	5~20 pM (核酸检测)	40%~55%
	长径比 2~5	10~30 pM (蛋白检测)	
	直径 5~10 nm	2~8 pM (核酸检测)	55%~70%
	长径比 8~15	5~15 pM (蛋白检测)	
金纳米星	粒径 20~40 nm	0.1~1 pM (核酸检测)	45%~60%
	尖端长度 5~10 nm	0.5~2 pM (肿瘤标志物检测)	
金纳米笼	粒径 30~60 nm	1~5 pM (小分子检测)	60%~80%
	壁厚 5~10 nm	3~10 pM (细胞因子检测)	
金纳米片	厚度 1~5 nm	5~15 pM (重金属离子检测)	30%~45%
	横向尺寸 50~100 nm	10~25 pM (酶活性检测)	

## 5. 面临的挑战与未来展望

### 5.1. 主要挑战

尽管金纳米颗粒的 LSPR 效应研究取得了显著进展,但在实际应用中仍面临诸多挑战:一是稳定性问题,金纳米颗粒在复杂环境(如高盐、强酸强碱)中易发生团聚、氧化或溶解,导致 LSPR 特性衰减,如偶氮苯修饰的金纳米颗粒在 50 次光异构化循环后,量子产率下降达 40%;二是生物相容性问题,部分表面修饰分子(如硫醇基)可能引发炎症反应,长期生物安全性仍需验证;三是规模化制备与成本问题,大规模制备过程中难以保证颗粒尺寸、形貌的均一性,且金的高成本限制了其普及应用;四是光穿透深度限制,现有紫外光响应体系在生物组织中的穿透深度不足 10  $\mu\text{m}$ ,制约了其在深层组织治疗中的应用。

### 5.2. 未来展望

针对上述挑战,未来的研究方向可聚焦于以下几点:一是开发新型稳定化策略,如设计化学交联的纳米凝胶配体或引入强配位作用的配体(如 NHC 配体),提升金纳米颗粒在复杂环境中的稳定性;二是优化表面修饰技术,通过引入羟基化聚合物链等生物相容性分子,降低细胞毒性,推动临床转化;三是发

展精准规模化制备技术,结合微流控芯片与人工智能辅助设计,实现颗粒参数的精准调控与低成本生产;四是构建多刺激响应体系,如光-热-磁多响应金纳米颗粒,实现靶向导航与协同治疗,突破光穿透深度限制;五是拓展跨领域应用,如在量子信息、环境监测等领域开发基于 LSPR 效应的新型功能器件。

## 6. 结论

在入射光的作用下,金纳米颗粒表面的 LSPR 特性具有高度可调性,通过精准调控颗粒尺寸、形貌、表面修饰及周围环境等因素,可实现对其光学、电学及热学性能的定制化设计。近年来,基于 LSPR 增强特性的应用已从基础研究逐步向实际应用推进,在生物传感、光催化、生物医学等领域取得了突破性进展。尽管目前仍面临稳定性、生物相容性及规模化制备等挑战,但随着材料合成技术、表征方法及功能设计策略的创新,金纳米颗粒的 LSPR 效应必将在更多领域展现出不可替代的应用价值,推动纳米科技的快速发展。

## 参考文献

- [1] 单锋. 表面等离激元纳米结构的局域场增强特性[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2018.
- [2] 张丹丹, 吴琪, 曲广波, 等. 单细胞水生生物金属纳米颗粒的定量分析[J]. 化学进展, 2022, 34(11): 2331-2339.
- [3] 郭彩霞, 马小杰, 王博. 金属有机框架基复合材料的制备及其光热性能研究[J]. 化学学报, 2021, 79(8): 967-985.
- [4] 毛振南. 仿生纳米颗粒用于脑肿瘤的光热治疗[J]. 安徽化工, 2024, 50(6): 64-68.
- [5] 罗道斌, 韩香娥, 段璐杰. 温度变化环境中 Au 纳米球光学性质的研究[J]. 光子学报, 2017, 46(6): 113-119.
- [6] 续丽辉, 朱兴忠, 徐娟, 等. 金纳米星的合成与应用[J]. 材料导报, 2025, 39(6): 156-170.
- [7] 李梦君, 方晖. 金属纳米球-纳米圆盘结构中表面等离激元共振模式的电磁场增强研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1098-1103.
- [8] 丁涛, 李斯坦, 刘音奇, 等. 基于金属纳米颗粒的热等离激元学及其应用[J]. 光学学报, 2024, 44(19): 83-98.
- [9] 杨敏. 基于金纳米棒的纳米复合物的制备和光热性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2020.
- [10] 胡青. 不同形貌贵金属纳米颗粒的合成及其 SERS 研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2021.
- [11] Esporrín-Ubieto, D., Fraire, J.C., Sánchez-deAlcázar, D. and Sánchez, S. (2025) Engineered Plasmonic and Fluorescent Nanomaterials for Biosensing, Motion, Imaging, and Therapeutic Applications. *Advanced Materials*, **37**, Article 2502171. <https://doi.org/10.1002/adma.202502171>
- [12] Yang, F., Cao, W., Zheng, G., Qiu, L., Nie, Z. and Li, Y. (2025) Plasmonic Metasurfaces: Light-Matter Interactions, Fabrication, Applications and Future Outlooks. *Progress in Materials Science*, **154**, Article 101508. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2025.101508>
- [13] 赖宇明. 金纳米星的制备及对塑化剂的快速检测[J]. 现代化工, 2021, 41(4): 234-237.
- [14] 张克辉, 饶红红, 罗明月, 等. 四丁基溴化磷存在下基于金纳米颗粒抗聚集的 Cr<sup>3+</sup>比色检测[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 78-86.
- [15] Zhang, J., Yan, C., Xie, L., Ding, Q., He, X., Liu, J., *et al.* (2025) Multivalent Aptamer-Linked Tetrahedron DNA Assisted Catalytic Hairpin Assembly for Accurate SERS Assay of Cancer-Derived Exosomes in Clinical Blood. *Biosensors and Bioelectronics*, **282**, Article 117497. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2025.117497>
- [16] Cucuiet, V., Maniu, D., Astilean, S., de la Chapelle, M.L. and Focsan, M. (2025) SERS Detection of DNA Hybridization on a Graphene Oxide Plasmonic Nanoplatfrom: Influence of DNA Sequence Length. *Applied Physics Letters*, **127**, Article 063701. <https://doi.org/10.1063/5.0288224>
- [17] 胡子懿. 基于金纳米颗粒二聚体等离子体荧光增强效应的 miRNA 检测[J]. 广东化工, 2025, 52(5): 136-139.
- [18] Gellner, M., Steinigeweg, D., Ichilmann, S., Salehi, M., Schütz, M., Kömpe, K., *et al.* (2011) 3D Self-Assembled Plasmonic Superstructures of Gold Nanospheres: Synthesis and Characterization at the Single-Particle Level. *Small*, **7**, 3445-3451. <https://doi.org/10.1002/sml.201102009>
- [19] 白向茹, 谭金龙, 罗伟, 等. 基于功能化金纳米颗粒的表面增强拉曼光谱检测 Ag<sup>+</sup> [J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 318-324.
- [20] Yuan, W., Gao, K., Li, D., Li, S., Xia, F., Wang, M., *et al.* (2025) Plasmonic Coupling-Engineered MXene/Au

- Nanocomposites for High-Performance Saturable Absorption in Ultrafast Fiber Lasers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **17**, 49897-49909. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c11525>
- [21] 帅锦涛. 手性螺旋金纳米颗粒@SiO<sub>2</sub>核壳结构的设计合成及其在CO<sub>2</sub>光催化还原应用研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都大学, 2025.
- [22] Bayles, A., Tian, S., Zhou, J., Yuan, L., Yuan, Y., Jacobson, C.R., *et al.* (2022) Al@TiO<sub>2</sub> Core-Shell Nanoparticles for Plasmonic Photocatalysis. *ACS Nano*, **16**, 5839-5850. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10995>
- [23] Liu, Y., Huang, S., Huang, X. and Ma, D. (2024) Enhanced Photocatalysis of Metal/Covalent Organic Frameworks by Plasmonic Nanoparticles and Homo/Hetero-Junctions. *Materials Horizons*, **11**, 1611-1637. <https://doi.org/10.1039/d3mh01645e>
- [24] 周青, 陆峰. 基于金纳米颗粒为基底的表面增强拉曼光谱快速鉴别人肝癌细胞与正常肝细胞[J]. 现代肿瘤医学, 2023, 31(3): 423-427.
- [25] Kim, M., Lee, J.H. and Nam, J.M. (2019) Plasmonic Photothermal Nanoparticles for Biomedical Applications. *Advanced Science*, **6**, Article 1900471. <https://doi.org/10.1002/advs.201900471>
- [26] Lapotko, D. (2011) Plasmonic Nanobubbles as Tunable Cellular Probes for Cancer Theranostics. *Cancers*, **3**, 802-840. <https://doi.org/10.3390/cancers3010802>
- [27] 胡浩. 金纳米颗粒增强WS<sub>2</sub>光电探测器性能研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [28] Duan, Y., Li, J., Wang, B., Li, Q., Wu, Z., Mao, J., *et al.* (2025) Enhanced Light Harvesting in Lead-Free Cs<sub>2</sub>AgBiBr<sub>6</sub> Double Perovskite Solar Cells with Plasmonic Ag Nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry C*, **13**, 4974-4982. <https://doi.org/10.1039/d4tc05218h>
- [29] Mohammadi, M.R., Khamsehchi, M. and Li, Y. (2026) Plasmonic Enhancement in Dye-Sensitized Solar Cells Using MPA-Capped Ag Nanoparticles: Modeling and Experimental Validation. *Applied Surface Science*, **723**, Article 165556. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.165556>