

“热点”富集金纳米颗粒的制备及拉曼应用研究

刘莉莉¹, 朱德荣¹, 贾贵西¹, 梁 军¹, 单 锋^{2*}

¹洛阳理工学院智能制造学院, 河南 洛阳

²洛阳理工学院数学与物理教学部, 河南 洛阳

收稿日期: 2025年9月17日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月21日

摘 要

具有高光-热利用效率的三维等离子体纳米结构在各个领域展现出工业化前景, 在光-热转换、太阳能俘获等方面成为研究的热点。本文提出了一种简单的化学合成方法来制备“热点”富集金纳米颗粒, 并采用电泳沉积方法来组装大面积的“热点”富集金纳米颗粒薄膜。通过数值模拟和实验, 研究了“热点”富集金纳米颗粒薄膜的表面增强拉曼散射(SERS)测试。结果揭示了“热点”富集金纳米颗粒薄膜的局域电场光增强和光-热转换的物理过程。结果表明, 借助“热点”富集金纳米颗粒薄膜高效的光学俘获特性和超亲水表面特性, 使其在拉曼信号增强方面呈现显著效果。其中, 基于金纳米球颗粒和“热点”富集金纳米颗粒的SERS基底, 对R6G分子的极限灵敏度分别达到 10^{-10} M和 10^{-12} M。因此, “热点”富集金纳米颗粒薄膜在有机分子的拉曼痕量检测领域具有极强的竞争力。

关键词

纳米颗粒, 局域电场增强, 电泳沉积, 拉曼增强, 等离子激元

Research on the Preparation of Gold Nanoparticles Enriched with “Hot Spots” and Their Raman Applications

Lili Liu¹, Derong Zhu¹, Guixi Jia¹, Jun Liang¹, Feng Shan^{2*}

¹School of Intelligent Manufacturing, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

²Department of Mathematics and Physics, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

Received: September 17, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 21, 2025

*通讯作者。

文章引用: 刘莉莉, 朱德荣, 贾贵西, 梁军, 单锋. “热点”富集金纳米颗粒的制备及拉曼应用研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1884-1892. DOI: 10.12677/ms.2025.1510201

Abstract

Three-dimensional plasmonic nanostructures with high light-heat utilization efficiency have shown industrialization prospects in various fields and have become a research hotspot in aspects such as light-heat conversion and solar energy capture. This paper proposes a simple chemical synthesis method to prepare “hotspot”-enriched gold nanoparticles and uses electrophoretic deposition to assemble large-area “hotspot”-enriched gold nanoparticle films. Through numerical simulation and experiments, the surface-enhanced Raman scattering (SERS) testing of the “hotspot”-enriched gold nanoparticle films was studied. The results reveal the physical processes of local electric field enhancement and light-heat conversion of the “hotspot”-enriched gold nanoparticle films. The results show that, with the help of the efficient optical trapping characteristics and superhydrophilic surface characteristics of the “hotspot”-enriched gold nanoparticle films, they exhibit remarkable effects in terms of Raman signal enhancement. Among them, based on gold nanosphere particles and “hotspot”-enriched gold nanoparticles, the limit sensitivities of the SERS substrates for R6G molecules reach 10^{-10} M and 10^{-12} M, respectively. Therefore, the “hotspot”-enriched gold nanoparticle films have strong competitiveness in the field of Raman trace detection of organic molecules.

Keywords

Nanoparticles, Local Electric Field Enhancement, Electrophoretic Deposition, Raman Enhancement, Plasmon

Copyright © 2025 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

近年来,具有光俘获和光-热转换特性的三维等离子体纳米颗粒结构成为当前一个热点领域。其在光热利用[1],表面增强拉曼散射[2],太阳能增效[3],光处理[4],紫外线防护[5],隐身[6],光学催化[7]等众多方向展现出光明的应用前景。上述应用主要得益于金属纳米颗粒激发的LSPR特性。而基于该特性的金属纳米颗粒所构筑的三维薄膜结构呈现出多重物理效应[8]。一开始,三维等离子体纳米颗粒结构的LSPR特性激发增强了光子能量的吸收,在激发态下产生的“热电子”的产率可以显著提高。热电子在随后的衰减过程中会同时存在辐射衰减和非辐射衰减。其中,辐射衰减会导致强度被显著提升的光的再发射。这些再发射的光会散射到自由空间,或者被俘获至强度增强数个量级的近场体积内[9]。正是基于三维等离子体纳米颗粒结构的这一电磁增强特性,使其在表面增强拉曼散射传感领域具有极大的优势。而非辐射衰减导致的光吸收现象也是一个多重过程。光子能量可以通过电子-电子散射转化成电子能量,也可以通过振动谐振效应转化成热能[10]。因此,三维等离子体纳米颗粒结构可以将可见光和近红外光有效地转化为电子能或热能,使其在太阳能利用领域引起了广泛关注。从而契合未来可再生和环境友好型技术的发展。由于这些多重物理效应高度依赖于等离子体纳米结构的尺寸和形态特征[11],目前的研究兴趣主要集中在如何通过形态学设计方法,在宽波长范围内制备具有优良光增强特性的三维等离子体纳米颗粒结构。

随着科技的发展,已有多种方法成功制备三维金属纳米颗粒薄膜,包括磁控溅射法、化学气相沉积法、模板法、化学组装法、电泳沉积法等。借助磁控溅射和化学气相沉积法制备的三维金属纳米颗粒薄膜等离子体结构在结构均匀性方面具有重要的优势,但工艺复杂,仪器成本较高。模板法的薄膜虽然均

匀且致密,但是纳米颗粒的形貌无法控制,只能借助模板的形貌。化学自组装技术得到的薄膜成本低廉,工艺简单,但是无法得到致密的纳米颗粒薄膜,颗粒之间无法形成耦合效应,所以电磁增强效果不够强。综合考虑工艺的低廉经济性和时间节约性,电泳沉积法制备的三维金属纳米颗粒薄膜等离子体结构具有更加广阔的工业化前景,不仅成本低,工艺简单,而且薄膜致密性非常好。若想制备具有优异 SERS 传感性能的三维金属纳米颗粒薄膜等离子体结构,保证金属纳米颗粒表面强烈的电磁增强特性是非常重要的。而纳米颗粒表面的电磁增强特性强烈依赖于其形态结构。具有尖端结构的金属纳米颗粒会在其表面形成热点效应,从而得到更大的电磁增强。当前,随着化学合成技术的快速发展,多种形态的金属纳米颗粒均被成功合成,如纳米球,纳米立方体,纳米棒,纳米三角板,纳米片,纳米花等[12]-[16]。Tian 小组[17]研究了金纳米颗粒的形貌对 SERS 增强特性的影响。他们选择了球形,三角板和星形三种不同形貌的金属纳米颗粒进行拉曼测试研究。当选择 R6G 染料为分析物时,金纳米星 SERS 基底得到的拉曼光谱强度最大,三角板次之,纳米球最小。Qian 团队[18]研究了不同枝状长度的金纳米星颗粒的 SERS 基底。在保持其它实验条件相同的条件下,结果表明 SERS 基底的表面增强因子与金纳米颗粒的表面枝状长度成正比。然而,相比于单个金属纳米颗粒表面形成的局域场增强特性,颗粒之间的耦合效应形成的热点具有更强的电磁场增强[19]。而“热点”富集的金属纳米颗粒之间因耦合效应所形成的热点具有更高的强度。同时基于“热点”富集的金属纳米颗粒的三维薄膜结构可以提供更多数量的热点。这一结构在光热转化和 SERS 传感方面的应用具有重要的意义。

本文提出了一种基于“热点”富集金纳米星颗粒制备的三维薄膜。采用多步化学合成法制备了产率几乎为 100%的“热点”富集金纳米星颗粒。在此基础上,我们借助电泳沉积技术在 ITO 玻璃基底上制备了亲水性的“热点”富集金纳米星三维薄膜结构。在沉积过程中,选择合适的电压值可以避免“热点”富集金纳米星颗粒出现团聚现象。理论分析表明,该三维结构表现出强烈的近场局域增强特性。正是基于该结构独特的光学特性,使其在 SERS 增强方面具有极其重要的应用价值。

2. 实验部分

2.1. 化学试剂

抗坏血酸(AA,纯度 >99.5%)、硝酸银(AgNO_3 ,纯度 99.9%)、柠檬酸钠($\geq 99.9\%$)和氯金酸三水合物($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$,纯度 >99.9%)购自美国西格玛-奥德里奇公司。盐酸(HCl ,纯度 >98.0%)购自中国国药集团化学试剂有限公司。实验全程使用密理博(Millipore,美国) Milli-Q 设备制备的超纯水(电阻率 >18.2 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$)。所有材料均未经进一步纯化直接使用。

2.2. 性能表征

金种子、金纳米球和“热点”富集金纳米星的形貌特征通过透射电子显微镜(TEM,美国飞利浦 Tecnai T20)进行表征。“热点”富集金纳米星颗粒三维薄膜的结构特征通过扫描电子显微镜(SEM,德国蔡司 Ultra Plus)进行表征。消光光谱通过光纤光谱仪(NOVA,上海复享科技有限公司,中国)进行表征。拉曼光谱通过激光共聚焦拉曼显微光谱仪(LCRMS,法国 LabRAM HR 紫外-可见,LabRAM HR UV-Visible)进行表征。LCRMS 的激光波长和功率分别为 514 nm 和 1.2 mW。聚焦激光的工作物镜为 50 倍。LCRMS 工作时的积分时间为 10 s。采用浸泡的方式使 R6G 均匀吸附在“热点”富集金纳米星三维薄膜基底的表面。

2.3. 合成方法

本文采用两步法合成“热点”富集金纳米星颗粒,如图 1 所示。第一步先是合成“热点”富集金纳

米星颗粒种子溶液。第二步为金纳米星颗粒的生长过程。具体过程如下：

种子合成：配制 15 mL 质量分数为 1% 的柠檬酸钠溶液和 100 mL 浓度为 1 mM 的氯金酸三水合物溶液，在搅拌器上快速搅拌 30 分钟。然后将氯金酸三水合物溶液加热至沸腾。最后，在快速搅拌的同时，将柠檬酸钠溶液快速加入其中。继续加热 15 分钟使二者充分反应。冷却后即可作为制备金纳米星颗粒的种子溶液。

“热点”富集金纳米星的合成：将 100 mL 浓度为 0.25 mM/L 的氯金酸四水合物($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)溶液与 100 μL 浓度为 1 M/L 的盐酸(HCl)在 700 转/分钟的搅拌速度下充分混合。然后加入 1 mL 种子溶液，继续搅拌 5 分钟。随后，同时将 500 μL 浓度为 100 mM 的抗坏血酸(AA)溶液和 1 mL 浓度为 0.01 mM 的硝酸银(AgNO_3)溶液加入到上述混合液中。我们可以明显看到溶液颜色从亮金色变为蓝色。整个反应过程持续 30 秒。为了进行颗粒形貌的对比，在合成金纳米星的实验最后一步不再加入硝酸银溶液，从而得到了球形金纳米颗粒。

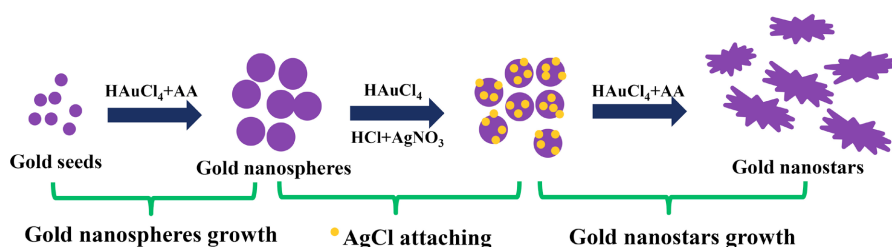


Figure 1. Schematic diagram of the synthesis process of “hot spot” enriched gold nanostar particles

图 1. “热点”富集金纳米星颗粒合成过程示意图

“热点”富集金纳米星颗粒三维薄膜的制备：将成功制备的“热点”富集金纳米星颗粒在 4500 rpm 的转速下离心 20 min。然后将沉淀物分散到 30 mL 的水中超声 15 min。选择两块 ITO 玻璃分别作为导电阴极和阳极，使它们的 ITO 表面面对面放置，两个电极之间的距离大概 3 mm。在电泳沉积过程中，电源的直流工作电压固定为 10 V。经过 30 分钟的电泳沉积，我们可以在 ITO 玻璃上看到均匀分布的“热点”富集金纳米星颗粒薄膜。在薄膜制备过程中，沉积时间对薄膜的致密性有着重要的影响，当电压一定时，沉积时间较短，得到的薄膜致密性便会不足，从而影响颗粒之间的耦合效应，导致电磁增强效果较差，进一步影响拉曼信号的强度。如果沉积时间过长，颗粒薄膜的致密性会加强，但是薄膜的厚度会增加，导致拉曼信号在薄膜内部散射，拉曼信号无法被有效的采集，也会导致拉曼信号的降低。

3. 结果与讨论

“热点”富集金纳米星颗粒的合成包括金种子的合成和金纳米星颗粒的生长两个过程。因此，性能良好的金种子对“热点”富集金纳米星颗粒的制备至关重要。 $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 在沸腾状态下与柠檬酸钠发生化学反应，从而生长成“热点”富集金种子颗粒。金种子溶液呈酒红色，如图 2(a)的插图所示。首先对金种子溶液的光学特征进行了测试。如图 2(a)所示为金种子溶液的消光谱，是采用光纤光谱仪测试得到的。我们从消光谱曲线可以看出，波长在 450 nm 之前都非常平稳，随后出现了快速上升。当波长达到 520 nm 时出现了最大的峰值。然后消光谱的曲线发生了快速的下降，直到波长 800 nm 时，曲线变得比较平稳。为了更加直观地观察金种子颗粒的形态特征，我们采用 TEM 进一步测试了形貌图像，如图 2(b)所示。从 TEM 图像可以清晰地看出，金种子呈球形结构。金种子颗粒具有良好的分散性。颗粒的尺寸分布较为均匀，大小位于 10~20 nm 之间。较大尺寸的颗粒极少，这说明我们合成的金种子具有较高的品质。这将给金纳米星颗粒提供坚实的基础保障。

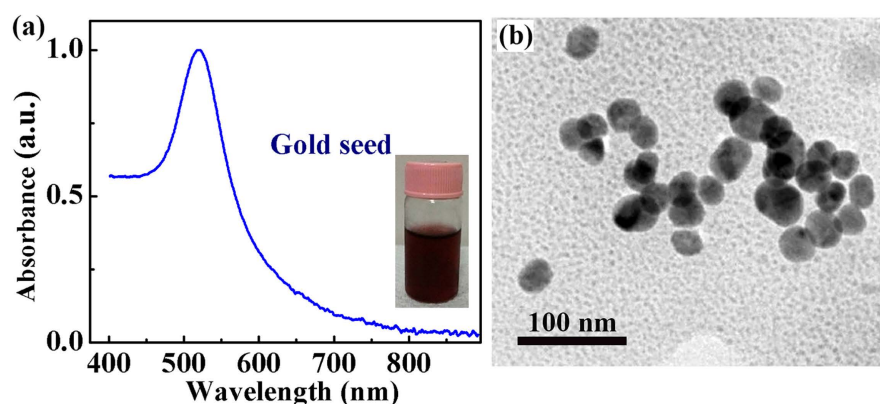


Figure 2. (a) Absorbance spectrum of the gold seed solution, (b) TEM image of the gold seed particles
图 2. (a) 金种子溶液的吸收谱, (b) 金种子颗粒的 TEM 图像

从图 1 的“热点”富集金纳米星合成示意图可以看出,“热点”富集金纳米星颗粒表面之所以能够长出尖端树枝,氯化银起到了重要作用。因为金种子的表面一旦吸附有氯化银沉淀,那么该位置便不再继续生长。与之相反,没有氯化银吸附的位置继续生长,从而获得了多尖端树枝状的“热点”富集金纳米星颗粒。正如在“热点”富集金纳米星颗粒的合成步骤中所述,作为对比,我们在“热点”富集金纳米星颗粒合成过程中不加入硝酸银溶液,金种子颗粒的表面均匀生长,最终获得尺寸更大的球形金纳米颗粒。如图 3(a)和图 3(b)所示分别为金纳米球和金纳米星颗粒的 TEM 图片。从图中可以看出,二者均具有良好的颗粒分散性。图 3(a)中颗粒的形貌以球形为主,出现了极少数的非球形颗粒。而图 3(b)中颗粒的表面均出现了枝状结构,“热点”富集金纳米星颗粒的产率接近 100%,而且尺寸的均匀性良好。不同形貌的金纳米颗粒必然具有不同的光学特性。我们随后借助光谱仪测试了两种纳米颗粒溶液的消光谱,如图 3(c)所示。从图中可以清晰地看出,金纳米球颗粒的消光谱与金种子颗粒的消光谱曲线类似,谐振峰的位置在 520 nm 附近。而“热点”富集金纳米星颗粒消光谱的谐振峰发生了明显的红移,达到 750 nm 左右。另外一个明显的区别在于消光谱半高宽的宽度。与金纳米球颗粒相比,“热点”富集金纳米星颗粒消光谱具有更大的半高宽。由此可见,金属纳米颗粒形貌对其光学特性具有重要的影响,这在它们的实际应用中具有重要的参考价值。

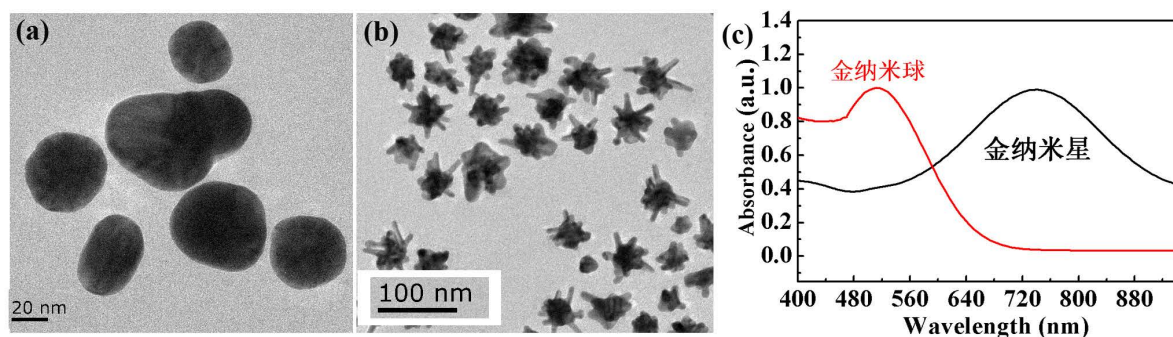


Figure 3. (a) TEM images of gold nanospheres and (b) “hotspot”-enriched gold nanostar particles, (c) absorption spectra of gold nanosphere and “hotspot”-enriched gold nanostar particle solutions

图 3. (a) 金纳米球和(b) “热点”富集金纳米星颗粒的 TEM 图片, (c) 金纳米球和“热点”富集金纳米星颗粒溶液的吸收谱

三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜的均匀性对 SERS 信号稳定性的检测具有重要的影响。我们采用电

泳沉积法制备三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜，如图 4(a)所示为电泳沉积法的示意图。我们选择直流稳压电源作为电泳沉积法的供电装置。选择合适的电压进行电泳沉积实验，不仅能够获得均匀的三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜，而且还能够保证“热点”富集金纳米颗粒的形貌保持不变。如图 4(b)所示为电泳沉积法组装“热点”富集金纳米颗粒薄膜的实验装置及制备的薄膜样品图片。实验过程中选择的电压为 10 V，基底为 ITO 玻璃。使用导电铜胶带与 ITO 玻璃相连，并将铜胶带固定在烧杯口的边缘位置。随后用鳄鱼夹紧紧的夹住铜胶带，红色代表阳极，黑色代表阴极。ITO 玻璃基底竖直放入分散性良好的金纳米星颗粒溶液，经过 30 min 的电泳沉积，在阴极的 ITO 玻璃表面沉积了“热点”富集金纳米颗粒薄膜。如图 4(c)所示为沉积有金纳米颗粒的薄膜结构图片。从图中可以看出“热点”富集金纳米颗粒具有良好的均匀性，说明我们所采用的电压是合适的。这为我们后续三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜 SERS 基底的拉曼信号稳定性测试带来极大的益处。而判断金纳米颗粒的形貌是否发生了变化，还需要借助微观电镜进行测试表征。

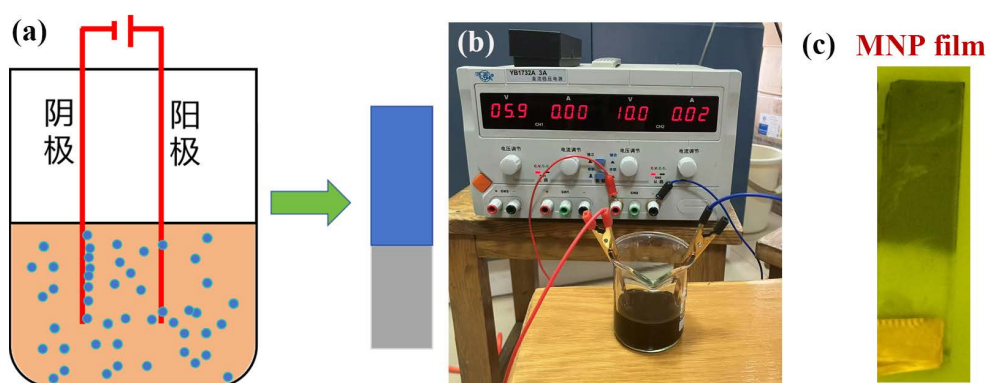


Figure 4. (a) Schematic diagram of the electrophoretic deposition method. (b) Experimental setup for assembling a gold nanoparticle film with “hot spots” enriched by the electrophoretic deposition method. (c) Photograph of the gold nanoparticle film assembled by the electrophoretic deposition method
图 4. (a) 电泳沉积法结构示意图。(b) 电泳沉积法组装“热点”富集金纳米颗粒薄膜的实验装置。(c) 电泳沉积法组装的金纳米颗粒薄膜实物图

本文利用电泳沉积法成功制备了金纳米球和“热点”富集金纳米星颗粒薄膜。但是在沉积过程中，保持金纳米颗粒的形貌以及薄膜的均匀性是非常重要的。接下来借助 SEM 对薄膜的表面特性进行测试，结果如图 5(a)和图 5(b)所示。整体上来看，两种金纳米颗粒薄膜均保持了良好的均匀性，这说明我们选择的沉积电压和时间都是合适的。另外，从图中还可以看出它们的形貌特征也很好，薄膜沉积的前后颗粒的形貌并没有发生改变。如图 5(a)所示，可以在薄膜中清晰的看到球形金纳米颗粒。而图 5(b)中“热点”富集金纳米星颗粒的形貌也能够辨别出来。只不过“热点”富集金纳米星颗粒的表面具有枝状结构，它们互相靠近时会镶嵌的更加紧密，使得薄膜看起来更加紧凑。在相互靠近的颗粒之间间隙区域内会形成很多“热点”。这些“热点”结构的电场强度要远大于其它区域，在 SERS 检测领域都将发挥着重要作用。更重要的是，三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜内的每一个颗粒都会与周围的颗粒形成多个“热点”结构，那么整个“热点”富集金纳米颗粒薄膜就会提供足够数量的“热点”结构。这一特点将在后续基于“热点”富集金纳米颗粒薄膜的 SERS 应用方面提供极大的利好。我们在实验过程中发现三维金纳米颗粒薄膜结构具有超亲水特性，而裸露的 ITO 玻璃却具有疏水特性。为了定量的研究这一特性，我们测量了它们的接触角，其中三维金纳米星颗粒结构和裸露 ITO 玻璃的接触角分别为 16°和 65°，该结果在课题组之前的成果中有详细报道[20]。

金纳米颗粒表面的局域电场增强特性的重要应用是 SERS。在金纳米结构表面的有机分子拉曼光谱

信号被局域电场极大的增强。在图 5 中已知纳米颗粒之间的间隙区域内局域电场强度大于单个纳米颗粒表面的局域电场强度。而我们制备的三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜是由大量相互靠近的金纳米颗粒组成，颗粒之间形成了大量的 gap 结构。在入射光的激励下，gap 区域内的电场因热点效应而被极大的增强。因此，三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜结构非常适用于作为 SERS 基底进行有机分子的拉曼信号检测。如图 6(a)所示，我们基于金纳米球颗粒薄膜结构测试了 R6G 分子的拉曼信号。从图中可以看出随着 R6G 分子浓度的减小，R6G 分子的极限浓度为 10^{-10} M。在相同的测试条件下又测试了三维“热点”富集金纳米星颗粒结构作为 SERS 基底的拉曼光谱特性。从图中发现了同样的规律，即拉曼光谱信号的强度与 R6G 分子的浓度成正比。然而，三维“热点”富集金纳米星颗粒 SERS 基底测试 R6G 分子拉曼信号的最低测试浓度为 10^{-12} M。结果表明“热点”富集金纳米星颗粒比金纳米球颗粒组成的三维 SERS 基底具有更强的局域电磁场增强特性。

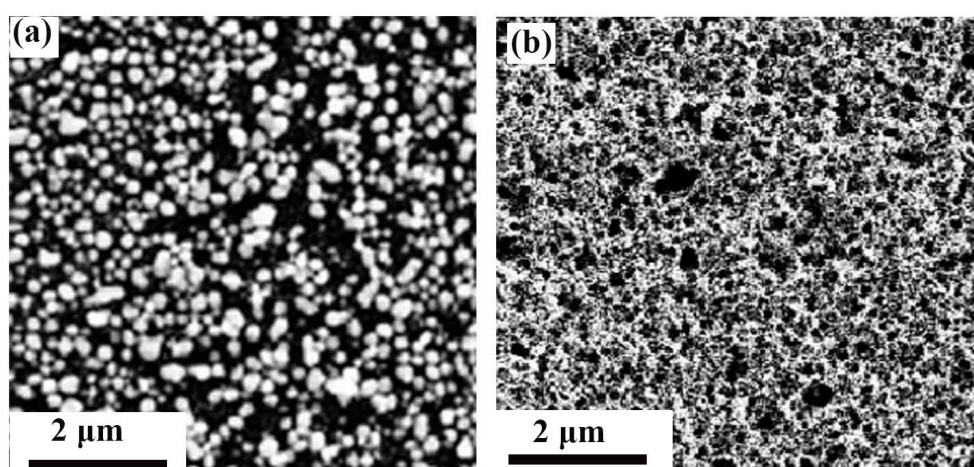


Figure 5. SEM images of (a) gold nanosphere particle film and (b) “hot spot” enriched gold nanostar particle film
图 5. (a) 金纳米球颗粒薄膜和(b) “热点”富集金纳米星颗粒薄膜的 SEM 图片

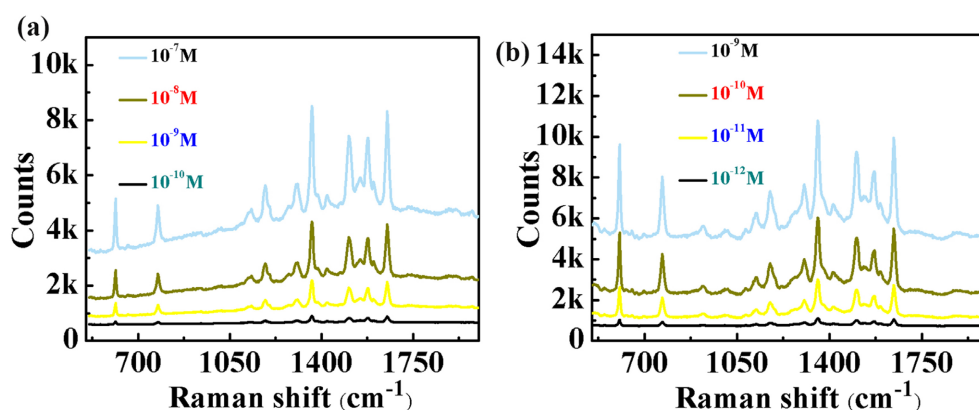


Figure 6. (a) SERS signal testing of R6G molecules on the gold nanosphere particle film. (b) SERS signal testing of R6G molecules on the “hot spot”-enriched gold nanostar particle film

图 6. (a) 金纳米球颗粒薄膜 R6G 分子的 SERS 信号测试。(b) “热点”富集金纳米星颗粒薄膜 R6G 分子的 SERS 信号测试

4. 结论

综上所述，我们提出了一种简单、易操作、成本低且适宜大规模制备三维“热点”富集金纳米薄膜

结构的方法。首先,采用多步化学合成法制备了产率几乎为 100%的“热点”富集金纳米星颗粒。随后借助电泳沉积技术在 ITO 玻璃基底上制备了“热点”富集金纳米星三维薄膜结构。通过选择合适电压值和沉积时间,获得了均匀性良好的三维“热点”富集金纳米结构 SERS 基底。“热点”富集金纳米星颗粒尖端的热点效应具有更强的光增强特性。在拉曼光谱信号实验测试方面,三维“热点”富集金纳米颗粒薄膜结构展现出优异的近场光学增强特性。基于“热点”富集金纳米星颗粒的 SERS 基底对 R6G 分子具有更高的极限灵敏度,其极限灵敏度达到 10^{-12} M。本文介绍的三维“热点”富集金纳米结构在化学合成和电泳沉积过程都非常简单,良好的经济性,不依赖于复杂的设备,使其表现出极具竞争力的工业前景。

参考文献

- [1] Gao, M., Peh, C.K., Phan, H.T., Zhu, L. and Ho, G.W. (2018) Solar Absorber Gel: Localized Macro-Nano Heat Channeling for Efficient Plasmonic Au Nanoflowers Photothermic Vaporization and Triboelectric Generation. *Advanced Energy Materials*, **8**, Article ID: 1800711. <https://doi.org/10.1002/aenm.201800711>
- [2] Zhang, P., Jin, Y. and Fang, J. (2023) Triangular Au Nanoparticle Arrays Based on Flexible Materials as Temperature-Sensitive SERS Substrates. *Optical Materials*, **146**, Article ID: 114556. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114556>
- [3] Ashrafi-Peyman, Z., Jafarholi, A. and Moshfegh, A.Z. (2024) An Elliptical Nanoantenna Array Plasmonic Metasurface for Efficient Solar Energy Harvesting. *Nanoscale*, **16**, 3591-3605. <https://doi.org/10.1039/d3nr05657k>
- [4] Babicheva, V.E. (2023) Optical Processes behind Plasmonic Applications. *Nanomaterials*, **13**, Article 1270. <https://doi.org/10.3390/nano13071270>
- [5] Castilla, M., Schuermans, S., Gérard, D., Martin, J., Maurer, T., Hananel, U., *et al.* (2022) Colloidal Synthesis of Crystalline Aluminum Nanoparticles for UV Plasmonics. *ACS Photonics*, **9**, 880-887. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c01615>
- [6] Khan, M.I., Ghosh, S., Baxter, R. and Kim, A.D. (2020) Modeling Broadband Cloaking Using 3D Nano-Assembled Plasmonic Meta-Structures. *Optics Express*, **28**, Article ID: 22732. <https://doi.org/10.1364/oe.395840>
- [7] Wang, Y., Fang, L., Gong, M. and Deng, Z. (2019) Chemically Modified Nanofoci Unifying Plasmonics and Catalysis. *Chemical Science*, **10**, 5929-5934. <https://doi.org/10.1039/c9sc00403c>
- [8] Qiu, J. and Wei, W.D. (2014) Surface Plasmon-Mediated Photothermal Chemistry. *The Journal of Physical Chemistry C*, **118**, 20735-20749. <https://doi.org/10.1021/jp5042553>
- [9] Zimbone, M., Messina, E., Compagnini, G., Fragalà, M.E. and Calcagno, L. (2015) Resonant Depolarized Dynamic Light Scattering of Silver Nanoplatelets. *Journal of Nanoparticle Research*, **17**, Article No. 402. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-3188-x>
- [10] Chen, H., Shao, L., Ming, T., Sun, Z., Zhao, C., Yang, B., *et al.* (2010) Understanding the Photothermal Conversion Efficiency of Gold Nanocrystals. *Small*, **6**, 2272-2280. <https://doi.org/10.1002/smll.201001109>
- [11] Gentile, A., Ruffino, F. and Grimaldi, M. (2016) Complex-Morphology Metal-Based Nanostructures: Fabrication, Characterization, and Applications. *Nanomaterials*, **6**, Article 110. <https://doi.org/10.3390/nano6060110>
- [12] Kozanoglu, D., Apaydin, D.H., Cirpan, A. and Esenturk, E.N. (2013) Power Conversion Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells by Addition of Gold Nanostars, Nanorods, and Nanospheres. *Organic Electronics*, **14**, 1720-1727. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.04.008>
- [13] Klinkova, A., Thérien-Aubin, H., Ahmed, A., Nykypanchuk, D., Choueiri, R.M., Gagnon, B., *et al.* (2014) Structural and Optical Properties of Self-Assembled Chains of Plasmonic Nanocubes. *Nano Letters*, **14**, 6314-6321. <https://doi.org/10.1021/nl502746h>
- [14] Liu, S., Huang, L., Li, J., Wang, C., Li, Q., Xu, H., *et al.* (2013) Simultaneous Excitation and Emission Enhancement of Fluorescence Assisted by Double Plasmon Modes of Gold Nanorods. *The Journal of Physical Chemistry C*, **117**, 10636-10642. <https://doi.org/10.1021/jp4001626>
- [15] Qian, H., Anwer, S., Bharath, G., Iqbal, S. and Chen, L. (2018) Nanoporous Ag-Au Bimetallic Triangular Nanoprisms Synthesized by Galvanic Replacement for Plasmonic Applications. *Journal of Nanomaterials*, **2018**, Article ID: 1263942. <https://doi.org/10.1155/2018/1263942>
- [16] Brancato, A., Condorelli, M., Salemi, L., Scardaci, V., Fragalà, M., Barcellona, M., *et al.* (2023) Ag Nanoflowers as Single-Particle, Multi-Wavelength SERS Active Platforms. *Surfaces and Interfaces*, **40**, Article ID: 103157. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103157>
- [17] Tian, F., Bonnier, F., Casey, A., Shanahan, A.E. and Byrne, H.J. (2014) Surface Enhanced Raman Scattering with Gold Nanoparticles: Effect of Particle Shape. *Anal. Methods*, **6**, 9116-9123. <https://doi.org/10.1039/c4ay02112f>

-
- [18] Su, Q., Ma, X., Dong, J., Jiang, C. and Qian, W. (2011) A Reproducible SERS Substrate Based on Electrostatically Assisted Aptes-Functionalized Surface-Assembly of Gold Nanostars. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **3**, 1873-1879. <https://doi.org/10.1021/am200057f>
- [19] Li, G., Zhang, Y., Jiang, J., Luo, Y. and Lei, D.Y. (2017) Metal-Substrate-Mediated Plasmon Hybridization in a Nanoparticle Dimer for Photoluminescence Line-Width Shrinking and Intensity Enhancement. *ACS Nano*, **11**, 3067-3080. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00048>
- [20] Shan, F., Huang, J., Zhu, Y. and Wei, G. (2024) Photo-Thermal Conversion and Raman Sensing Properties of Three-Dimensional Gold Nanostructure. *Molecules*, **29**, Article 4287. <https://doi.org/10.3390/molecules29184287>