

基于SERS分析的FDTD模拟研究

叶 铮, 江鸣舰, 刘子奇

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年5月29日

摘 要

表面增强拉曼散射(SERS)是一种强大的分析技术,可以增强拉曼散射产生的固有弱拉曼信号。以福美双为探针分子,采用三种不同生长时间的银纳米薄膜作为基底进行SERS检测。通过建立基底的物理模型,定义模拟区域,设置光源和监视器几个步骤搭建FDTD计算模型,并利用FDTD模拟来分析SERS增强机理。基于实验和仿真结果表明,当银纳米薄膜的生长时间为60 min时,展现出最佳的SERS活性。根据基底微观结构的FDTD模拟电场分布,可以发现纳米结构之间小于10 nm的超小纳米间隙可以激发大量的热点,从而放大拉曼信号。

关键词

表面增强拉曼散射, FDTD模拟, SERS基底, 热点分布, 纳米间隙

FDTD Simulation Research Based on SERS Analysis

Zheng Ye, Mingjian Jiang, Ziqi Liu

School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 29th, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

Surface-enhanced Raman scattering (SERS) is a powerful analytical technique that enhances inherently weak Raman signals generated by Raman scattering. Using thiram as a probe molecule, three kinds of silver nanofilms with different growth times were used as the substrate for SERS detection. The FDTD calculation model is constructed by establishing the physical model of the base, defining the simulation area, and setting up the light source and the monitor. FDTD simulation was used to analyze the SERS enhancement mechanism. Based on the experimental and simulation results, the

best SERS activity was displayed when the growth time of silver nanofilms was 60 min. According to the FDTD simulation of the electric field distribution of the substrate microstructure, it can be found that the ultra-small nanogaps less than 10 nm between the nanostructures can excite a large number of hot spots, thus amplifying the Raman signal.

Keywords

Surface-Enhanced Raman Scattering, FDTD Simulation, SERS Substrate, Hot Spot Distribution, Nanogap

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

当特定频率的激光照射到样品表面时,入射光的光子与样品分子之间会发生非弹性散射。在这个过程中,光子与分子进行能量交换,使得散射光的频率相较于入射光频率发生变化。通过光谱仪对这些频率变化的散射光进行分析,就能获取样品分子振动和转动方面的信息,进而用于研究分子结构[1][2]。不过,拉曼散射是一个相对较弱的过程,产生的信号比较微弱,光谱仪在检测时可能难以捕捉到信号或者信号强度很低,这就限制了它在一些样品检测中的应用。表面增强拉曼散射(SERS)是基于拉曼散射发展起来的一种分析技术。其增强原理主要基于两个方面:电磁增强和化学增强[3][4]。电磁增强:当金属材料表面存在粗糙结构或金属纳米颗粒时,在入射光的作用下,这些结构的表面会激发局部表面等离子体,当等离子体激元的频率与入射光频率匹配时,就会产生表面等离子体共振[5],从而极大地增强表面附近的电磁场强度。一般在纳米间隙结构(间隙在 10 nm 以内)[6]可以产生强烈的表面共振等离子体激元耦合,形成强的表面局部增强电磁场,即所谓的“热点”。使得位于这些区域的探针分子的拉曼信号得到显著放大,这是 SERS 增强的主要来源。相比于半导体,贵金属纳米颗粒尤其是银,有着更强烈的电磁增强效果[7]。化学增强:当用适当波长的激光照射时,粒子中的电子会以电荷转移的状态被激发。电子跃迁会改变样品中分子的有效极化,被探测分子与等离子体纳米结构会产生强烈相互作用,包括分子重排、表面结合、化学吸附和表面复合物的形成等,这种伴随电荷转移的增强也称为电荷转移增强[8]。SERS 是一种强大的技术,可增强微弱拉曼散射产生的固有弱拉曼信号[9]。

为了研究纳米材料的电磁场分布及其在 SERS 中的应用,数值模拟方法具有重要的价值[10]。近年来,SERS 技术因其超高灵敏度在分析检测领域受到广泛关注,但仍面临一些关键问题。例如,如何优化基底结构以实现光与信号的更好匹配,以及如何提高基底的稳定性和检测灵敏度。时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方法是一种用于计算电动力学模型的数值工具,近年来被广泛用于研究 SERS 增强的原理[11]。通过 FDTD 仿真模拟分析,可以深入理解 SERS 的增强机理,并对基底结构进行优化设计,从而提升检测的均匀性和灵敏度[12]。

本文通过 SERS 实验和 FDTD 仿真模拟,对 SERS 基底的表面增强原理进行了探讨。利用福美双作为探针分子,以三种不同生长时间的银纳米薄膜作为 SERS 基底。在激光照射下,获得了它们的拉曼光谱图,记录福美双特征峰位置的峰强度并进行比较,以评估它们的 SERS 活性。根据 FDTD 模拟的电场分布,对它们的微观结构和热点分布做出分析和研究,以揭示 SERS 增强的机理。这些研究结果将对 SERS 基底的优化和设计提供重要的理论支撑,在目标物质的超灵敏检测领域具有重要价值。

2. 实验方法及 FDTD 模拟计算

2.1. 实验方法

SERS 检测原理(图 1): 通过金属纳米结构表面局域等离子体共振(LSPR)效应显著增强拉曼信号。当福美双分子吸附在银纳米薄膜表面时,入射激光激发金属纳米结构的局域电磁场,使分子拉曼信号增强。根据有关文献报道,纳米结构之间小于 10 nm 的纳米间隙时能够产生大量的热点,即电磁场高度集中的区域[13]。这些间隙通过耦合效应进一步放大大局域电场,从而大幅提升拉曼信号的强度。银纳米薄膜作为基底具有良好的贴合性和柔韧性,能够与目标物分子充分接触,确保目标物分子能够有效吸附在纳米间隙附近。银纳米薄膜的高灵敏检测使其成为理想的 SERS 基底材料。

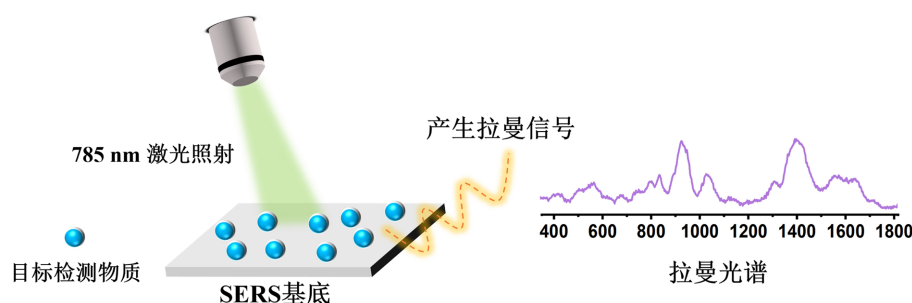


Figure 1. Schematic diagram of SERS detection

图 1. SERS 检测原理图

SERS 基底的制备: 利用种子介导的生长法制备银纳米薄膜作为 SERS 基底, 首先对氧化铝薄膜进行清洗以去除其表面杂质、油脂等, 获得干净的氧化铝层。再对氧化铝薄膜表面进行改性处理后得到图 2(a)所示的具有功能化的薄膜。随后, 将具有功能化的氧化铝薄膜放入银纳米颗粒溶胶中, 薄膜表面可以吸附带有负电荷的银纳米颗粒。吸附完毕后得到图 2(b)所示的自组装银纳米薄膜。最后将自组装后的银纳米薄膜放入生长溶液中浸泡, 随着生长时间的增加, 银纳米颗粒不断生长、聚集, 最终获得较为致密的银纳米薄膜, 如图 2(c)所示。通过不同的生长时间, 得到不同致密度的银纳米薄膜, 将它们作为 SERS 基底。

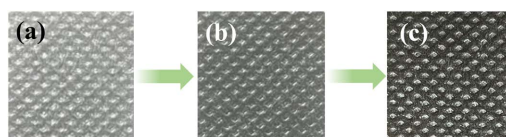


Figure 2. Physical diagram of SERS substrate preparation process

图 2. SERS 基底制备过程的实物图

SERS 检测方法: 选择福美双作为 SERS 检测的目标物质。首先, 配制得到浓度为 10^{-7} M 的福美双溶液, 滴加到 SERS 基底上, 并在室温下干燥 30 分钟。随后, 在 785 nm 入射激光照射下, SERS 基底表面的拉曼信号增强。为了评估银纳米薄膜的 SERS 活性, 在拉曼光谱仪上采集 $300\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼光谱。激光波长、累积时间、物镜放大倍数、激光功率和激光直径分别设置为 785 nm、10 s、50 倍、10 mW 和 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2. FDTD 计算方法

时域有限差分算法的核心在于把问题的变量空间离散化, 在空间上建立矩形差分网格, 称之为 Yee

元胞[14], 如图 3 所示, 即 FDTD 是建立在 Yee 氏网格基础上的一种时域迭代算法。在 Yee 元胞中, 任意一个坐标平面内, 每个磁场分量都被四个电场分量环绕, 同时还需满足有四个磁场分量对任意一个电场分量进行环绕。Yee 元胞中同一种场分量刚好相差一个空间步长, 当时间步长为电磁波传播一个空间步长的一半时, 可以在时间域上对电场和磁场交替求解。

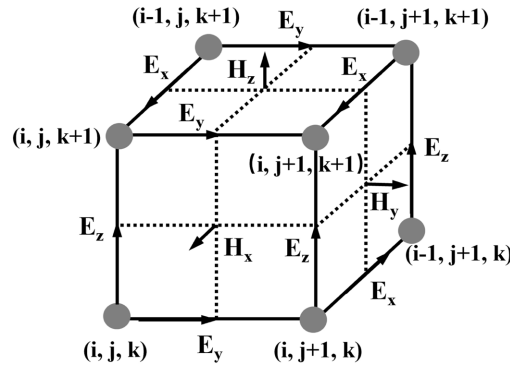


Figure 3. Schematic diagram of the Yee cell in the 3D cartesian coordinate system

图 3. 三维直角坐标系中的 Yee 元胞示意图

根据 Maxwell 方程组的微分形式, $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 的微分方程可以写成:

$$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \vec{J}_m \quad (2)$$

式中, μ 是磁导率, ϵ 是介质介电系数, σ_m 是导磁率, σ 是介质电导率。

在直角坐标系中将上面两个式子展开, 两组标量方程可以被得到, 如下所示:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{cases} \quad (4)$$

以上六个偏微分方程是 FDTD 算法的基础。

令 $F(x, y, z, t)$ 代表 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 在直角坐标系中的任意分量, 取其在时间和空间中的离散形式:

$$F(x, y, z, t) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F^n(i, j, k) \quad (5)$$

然后采用偏导数一阶中心差分公式, 即可得到空间和时间分量的如下近似方程组:

$$\begin{aligned}
\left. \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial x} \right|_{x=i\Delta x} &\approx \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} \\
\left. \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial y} \right|_{y=j\Delta y} &\approx \frac{F^n(i, j+1/2, k) - F^n(i, j-1/2, k)}{\Delta y} \\
\left. \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial z} \right|_{z=k\Delta z} &\approx \frac{F^n(i, j, k+1/2) - F^n(i, j, k-1/2)}{\Delta z} \\
\left. \frac{\partial F(x, y, z, t)}{\partial t} \right|_{t=n\Delta t} &\approx \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{6}$$

其中, Δx 、 Δy 、 Δz 代表空间离散间隔, Δt 为时间离散间隔, n 为时间间隔数。并利用以下平均值近似:

$$\partial F^{n+1/2}(x, y, z, t) = \frac{F^{n+1}(i, j, k) + F^n(i, j, k)}{2} \tag{7}$$

2.3. FDTD 计算模型及搭建

1) 建立物理模型。可以通过绘制几何模型结构再导入 FDTD 中, 也可以通过导入实际 SERS 基底的表面微观结构图像来建立二维模型, 因薄膜作为 SERS 基底主要是为了观察其表面的二维结构。因此, 本文通过导入实际基底的扫描电子显微镜(SEM)图像来构建二维模型。此外, 还需对材料属性进行设置, 比如介电常数和反射率等。银的介电常数是根据 Johnson 和 Christy 报道的测试数据确定的。

2) 定义模拟区域。设置模拟区域, 模拟区域应大于模型的大小。设置模拟时间, 模拟时间需要确保仿真结果的收敛性。设置网格精度, 网格的精度决定结果的准确性。在本文中, 模拟区域设置为 $1200 \times 1000 \times 200 \text{ nm}^3$, 网格尺寸选择 0.5 nm 。将 x 、 y 和 z 方向的边界设置为完美匹配层(PML)。

3) 光源和监视器设置。选择光源, 光源主要包括偶极子光源、高斯波光源、平面波光源、全场散射场光源和模式光源。本文选择全场散射场(TFSF)光源, 光源沿负 z 方向传播, 沿 y 方向偏振。

4) 运行与结果分析。在运行之前要检查 FDTD 仿真模拟所需要的内存, 根据仿真结果进一步修改参数, 优化计算模型。

3. 结果与分析

3.1. 实验结果分析

通过不同的生长时间得到 3 种 SERS 基底。由于银纳米颗粒的生长时间不同, 基底表面的形貌也有所不同, 这就导致了它们的 SERS 性能差异。在 785 nm 的激光照射下, 在吸附有福美双探针分子的三种 SERS 基底分别产生了不同强度的拉曼信号。可以清楚地识别出福美双在 565 cm^{-1} 、 930 cm^{-1} 、 1147 cm^{-1} 、 1383 cm^{-1} 和 1543 cm^{-1} 处的特征峰[15]。最高特征峰出现在 1383 cm^{-1} 处, 这是因为原子内部的 C-H 摆动[16]。如图 4 所示, 生长时间为 60 min 时得到的 SERS 基底, 所产生的拉曼特征峰强度是明显高于其他两种基底的。而生长时间为 20 min 时得到的 SERS 基底, 所产生的拉曼特征峰却并不明显, 远远小于其他两种基底。此外, 在表 1 中记录了 3 种基底在福美双所有特征峰处的峰值强度, 对它们做了一个直观性的比较。生长时间为 60 min 时得到的基底, 其 SERS 强度几乎是生长时间为 40 min 的 1.5 倍, 以及生长时间为 20 min 的 3.5 倍。SERS 的强度大小与 SERS 基底的微观结构密不可分, 下面通过 FDTD 仿真模拟结果来揭示它们的 SERS 增强机理。

在实际应用中, 重复性和稳定性是 SERS 检测中至关重要的参数。分别使用同一时间做出的 10 批生长 60 min 后的银纳米薄膜作为 SERS 基底。对它们分别进行拉曼测试, 浓度为 10^{-7} M 的福美双的拉曼光

谱如图 5(a)所示。通过绘制每个批次在福美双特征峰 1383 cm^{-1} 处强度的直方图, 计算出 SERS 强度的平均值为 4540.99, 相对标准偏差(RSD)为 3.57% (图 5(b))。可见, 生长 60 min 后的银纳米薄膜具有出色的批次间重复性, 这也说明了制备方法的优越性以及薄膜表面稳定的高 SERS 活性。

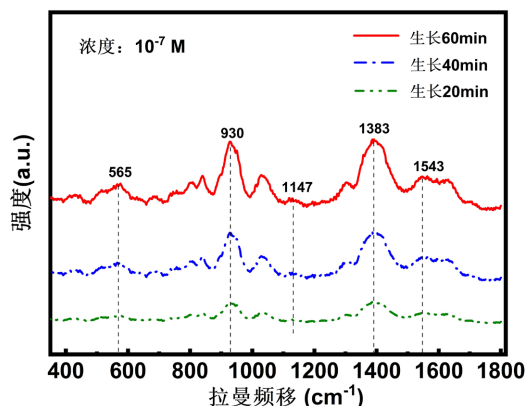


Figure 4. Raman spectra of SERS substrates obtained at different growth times

图 4. 不同生长时间得到的 SERS 基底的拉曼光谱图

Table 1. Comparison of peak intensities of different SERS substrates at different characteristic peak positions

表 1. 不同 SERS 基底在不同特征峰位置的峰强度比较

特征峰位置	565 cm^{-1}	930 cm^{-1}	1147 cm^{-1}	1383 cm^{-1}	1543 cm^{-1}
生长 60 min	1711.76	4428.21	662.27	4588.68	2192.37
生长 40 min	1201.45	3000.65	443.99	3101.08	1543.18
生长 20 min	509.37	1255.34	200.19	1299.52	683.71

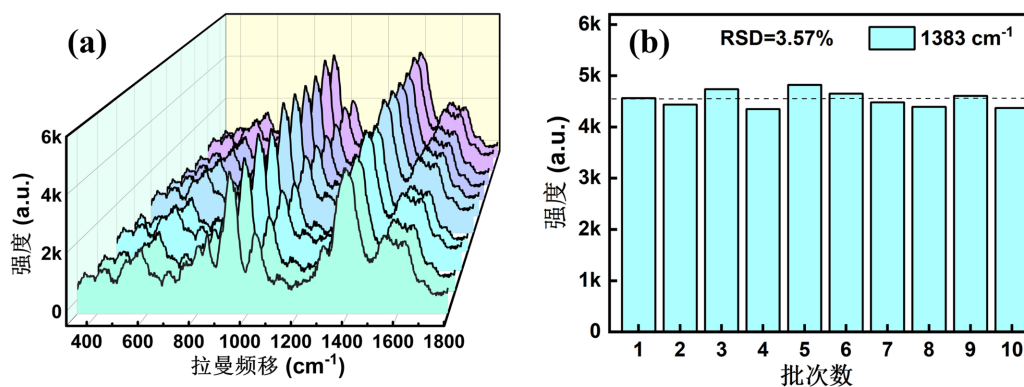


Figure 5. Reproducibility assessment: (a) Raman spectra of thiram (10^{-7} M) from 10 batches of silver thin films grown for 60 minutes; (b) Histogram of characteristic peak intensity at 1383 cm^{-1}

图 5. 重复性考察: (a) 来自 10 批生长 60 min 的银薄膜的福美双拉曼光谱图; (b) 1383 cm^{-1} 处特征峰强度的直方图

3.2. FDTD 仿真模拟结果分析

银纳米颗粒的尺寸在 30~100 nm 范围内, 因此模拟网格尺寸选择 0.5nm, 可以高精度地模拟电场分布。三种 SERS 基底的 SEM 图像和 FDTD 仿真结果分别如图 6~8 所示。从 SEM 图片中可以看出, 随着生长时间的增加, 银纳米颗粒数量逐渐增加。生长时间为 40 min 时, 纤维表面基本被银纳米颗粒全部覆盖了。而生长时间达到 60 min 时, 薄膜致密度继续增加, 银纳米颗粒粒径进一步增大, 呈现具有棱角的

石块状，同时产生了很多狭小的纳米间隙。由于金属纳米颗粒表面的等离子体共振效应会产生强烈的电磁场，使得位于这些区域的探针分子的拉曼信号得到显著放大。根据它们的 SEM 图像，通过 FDTD 仿真模拟了三种 SERS 基底的电场分布，电场强度高即图中的红色区域被称之为热点。结合三种 SERS 基底的 SEM 图像和 FDTD 模拟电场分布来看，可以发现“热点”主要集中在纳米结构之间小于 10 nm 的纳米间隙处。其中，生长时间 60 min 得到的 SERS 基底表面产生了最多的热点。其主要原因是它表面高致密度、大粒径的银纳米颗粒的分布，使得基底表面产生了大量的超小纳米间隙。这也可以从图 8 中看出，热点分布大多集中在这些超小纳米间隙处，而大量的热点分布使得其具有优越的 SERS 活性。这证实了 SERS 检测的实验结果。在生长时间为 20 min 时，其表面的银纳米颗粒稀疏，颗粒间距大，狭缝很少，只有很小一部分区域产生了热点，这是导致其 SERS 活性最低的原因。而对于生长时间为 40 min 时的 SERS 基底，虽然产生了较多的银纳米颗粒，但致密度仍然不是很高。大部分颗粒的形貌为球形，颗粒间的狭缝数量仍然没有得到有效增加。因此其表面的银纳米颗粒需要进一步生长才能够提高 SERS 活性。

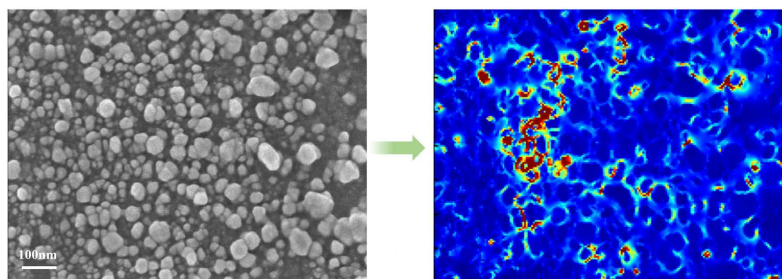


Figure 6. SEM image and FDTD simulated electric field distribution of SERS substrate obtained with a growth time of 20 minutes

图 6. 生长时间为 20 min 所得到的 SERS 基底的 SEM 图和 FDTD 模拟电场分布图

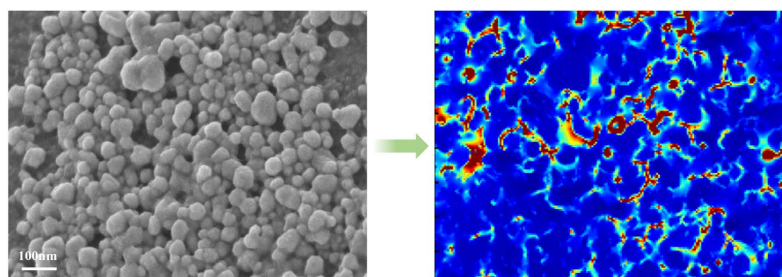


Figure 7. SEM image and FDTD simulated electric field distribution of SERS substrate obtained with a growth time of 40 minutes

图 7. 生长时间为 40 min 所得到的 SERS 基底的 SEM 图和 FDTD 模拟电场分布图

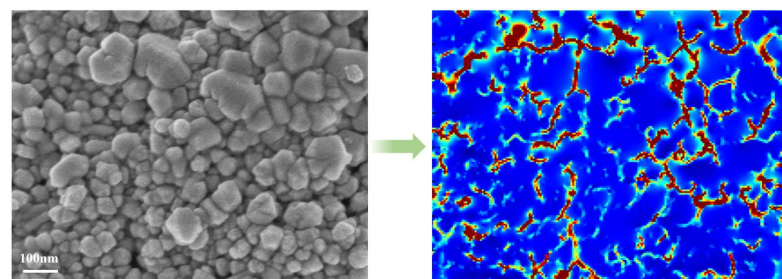


Figure 8. SEM image and FDTD simulated electric field distribution of SERS substrate obtained with a growth time of 60 minutes

图 8. 生长时间为 60 min 所得到的 SERS 基底的 SEM 图和 FDTD 模拟电场分布图

4. 结论

本文通过种子介导生长法制备银纳米薄膜作为 SERS 基底, 以福美双作为探针分子来评估基底的 SERS 活性。并将银纳米薄膜的 SEM 图像作为基底结构模型, 利用 FDTD 仿真模拟基底表面的电场分布情况。从 SERS 检测的实验结果中发现, 生长时间为 60 min 的银纳米薄膜作为基底展现出最佳的 SERS 活性, 而生长时间为 20 min 的银纳米薄膜所展现的 SERS 活性最差。结合它们的基底表面微观结构和 FDTD 模拟电场分布进行分析, 观察到生长时间为 60 min 的银纳米薄膜表面产生了数量最多的热点, 热点大多分布在纳米结构之间的纳米间隙处。特别地, 小于 10 nm 的超小纳米间隙可以产生强烈的等离子体共振效应, 激发高强度的热点, 从而放大拉曼信号。这是生长时间为 60 min 的银纳米薄膜展现优越 SERS 活性的原因。

参考文献

- [1] Pu, H., Ouyang, Q. and Sun, D. (2024) Special Chemical Reactions Combined with SERS Techniques for Improving Detection of Trace and Raman-Inactive Food Contaminants: Principles and Applications. *Trends in Food Science & Technology*, **147**, Article 104416. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104416>
- [2] Wang, L., Wang, X., Cheng, L., Ding, S., Wang, G., Choo, J., et al. (2021) Sers-Based Test Strips: Principles, Designs and Applications. *Biosensors and Bioelectronics*, **189**, Article 113360. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2021.113360>
- [3] Wu, Y., Sun, T., Shao, M., Ji, C., Li, C., Zhang, C., et al. (2024) Pyroelectrically Driven Charge Transfer and Its Advantages on SERS and Self-Cleaning Property. *Laser & Photonics Reviews*, **19**, Article 2401152. <https://doi.org/10.1002/lpor.202401152>
- [4] Shao, M., Ji, C., Tan, J., Du, B., Zhao, X., Yu, J., et al. (2023) Ferroelectrically Modulate the Fermi Level of Graphene Oxide to Enhance SERS Response. *Opto-Electronic Advances*, **6**, 230094-230094. <https://doi.org/10.29026/oea.2023.230094>
- [5] Meyer, S.A., Le Ru, E.C. and Etchegoin, P.G. (2011) Combining Surface Plasmon Resonance (SPR) Spectroscopy with Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS). *Analytical Chemistry*, **83**, 2337-2344.
- [6] Roa, S., Burgos, M.J.C. and Pedano, M.L. (2024) Exploring the Potential of Branched Submicron Channels-Based Structures in Ultra-Thin Ag Films for SERS Molecular Sensing. *Surfaces and Interfaces*, **44**, Article 103756. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.103756>
- [7] Zhou, H., Yang, D., Ivleva, N.P., Mircescu, N.E., Niessner, R. and Haisch, C. (2014) SERS Detection of Bacteria in Water by in Situ Coating with Ag Nanoparticles. *Analytical Chemistry*, **86**, 1525-1533. <https://doi.org/10.1021/ac402935p>
- [8] Wang, R., Ma, J., Dai, X., Gao, Y., Gu, C. and Jiang, T. (2023) Highly Active SERS Chip with Both Structure-Ameliorated Chemical Enhancement and Nanocavity-Mediated Electromagnetic Enhancement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **374**, Article 132782. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132782>
- [9] 王世强, 金艳, 姜慧芸, 等. 光子晶体-等离子体激元杂化表面增强拉曼光谱基底的制备及环境污染物的检测[J]. 分析实验室, 2025, 37(3): 1-9.
- [10] Sun, Q., Zhang, Q.Y., Zhou, N., Zhang, L.Y., Hu, Q. and Ma, C.Y. (2021) FDTD Simulation of Ag-Decorated ZnO Nanorods for Optimization of 3D SERS Substrates. *Applied Surface Science*, **565**, Article 150524. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150524>
- [11] Zeng, Z., Liu, Y. and Wei, J. (2016) Recent Advances in Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS): Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Method for SERS and Sensing Applications. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **75**, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.06.009>
- [12] Cui, S., Han, D., Chen, G., Yu, Y. and Peng, L. (2025) FDTD Simulation for Optimization of 3d Two-Layered Au Nanocone SERS Substrates. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, **38**, e70048. <https://doi.org/10.1002/jnm.70048>
- [13] Moghaddam, M.H., Sharma, S., Park, D. and Kim, D.S. (2025) Tuning 1D Plasmonic Gap at Nanometer Scale for Advanced SERS Detection. *Advanced Optical Materials*, **13**, Article 2403021. <https://doi.org/10.1002/adom.202403021>
- [14] 周豪杰. 复杂目标 FDTD 网格生成及剖分优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [15] Liu, H., Zhao, P., Xiu, W., Zhang, L., Zhu, P., Ge, S., et al. (2022) SERS Paper Slip Based on 3D Dendritic Gold Nanomaterials Coupling with Urchin-Like Nanoparticles for Rapid Detection of Thiram. *Sensors and Actuators B: Chemical*,

355, Article 131264. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.131264>

- [16] Luo, W., Chen, M., Hao, N., Huang, X., Zhao, X., Zhu, Y., *et al.* (2019) *In Situ* Synthesis of Gold Nanoparticles on Pseudo-Paper Films as Flexible SERS Substrate for Sensitive Detection of Surface Organic Residues. *Talanta*, **197**, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.099>