基于电子动态调控的飞秒激光加工多层次SERS基底

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41401.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于电子动态调控的飞秒激光加工多层次SERS基底。 导读

近期，北京理工大学姜澜院士团队在Light: Advanced Manufacturing发表了题为Curvature-optimised multilevel SERS substrates formed by femtosecond laser shaping based on electrons dynamics control的研究论文。

该研究提出了一种基于电子动态调控原理的飞秒激光表面拉曼散射柔性传感基底加工方法，通过耦合预应变诱导及化学沉积方法，构建了具有多层次跨尺度微纳复合结构的SERS基底（毫米级微透镜—微米级褶皱—纳米级Ag颗粒），实现了从宏观到介观，再到微观的多层次电磁场耦合。该方法创新性地采用时域整形飞秒激光双脉冲，通过精确调控脉冲延时，实现了对熔融石英材料内部改性深度的纳米级控制，进而通过湿法刻蚀制备出曲率连续可调的微透镜阵列模板。这项工作为下一代高性能、可定制化SERS柔性基底的设计与制备提供了重要的光学方法支撑，推动了微纳光子学与传感技术的交叉融合。

表面增强拉曼散射（Surface-Enhanced Raman Scattering, SERS）技术是一种能够将吸附于特定纳米结构表面的分子拉曼信号强度提升数百万至亿万倍的光学检测手段。其增强机制主要源于局域表面等离子体共振所产生的高度局域化电磁场（即热点），以及分子与基底之间的电荷转移效应。该技术不仅保留了传统拉曼光谱的分子指纹识别能力，更具备了单分子水平检测的潜力，因此在痕量生化分析、环境监测、食品安全、生物医学诊断及防伪加密等领域展现出革命性的应用前景。

SERS性能的核心取决于基底的材料与结构。早期研究集中于金、银等贵金属纳米颗粒的溶胶体系，而近年来的发展重点已转向可控、有序、可重复的固态微纳结构基底。通过设计周期性纳米阵列、多级复合结构等微纳形貌，可有效调控热点的空间分布与电磁场耦合强度，从而提升检测灵敏度、均匀性与稳定性。

该研究团队提出了一种基于电子动态调控原理的整形飞秒激光加工曲率优化多层次SERS基底的方法，加工路线如图1所示。微透镜的曲率调节通过调控时域整形飞秒激光双脉冲的脉冲延时和化学辅助刻蚀的时间实现。预应变辅助以及化学沉积的方法可以在不同曲率的微透镜表面修饰褶皱/银纳米颗粒形貌，构成多层次的微纳复合结构。与单一的微纳结构相比，该结构具有更多维有序密集的热点排布，有助于提高表面拉曼散射信号的强度和均匀性。

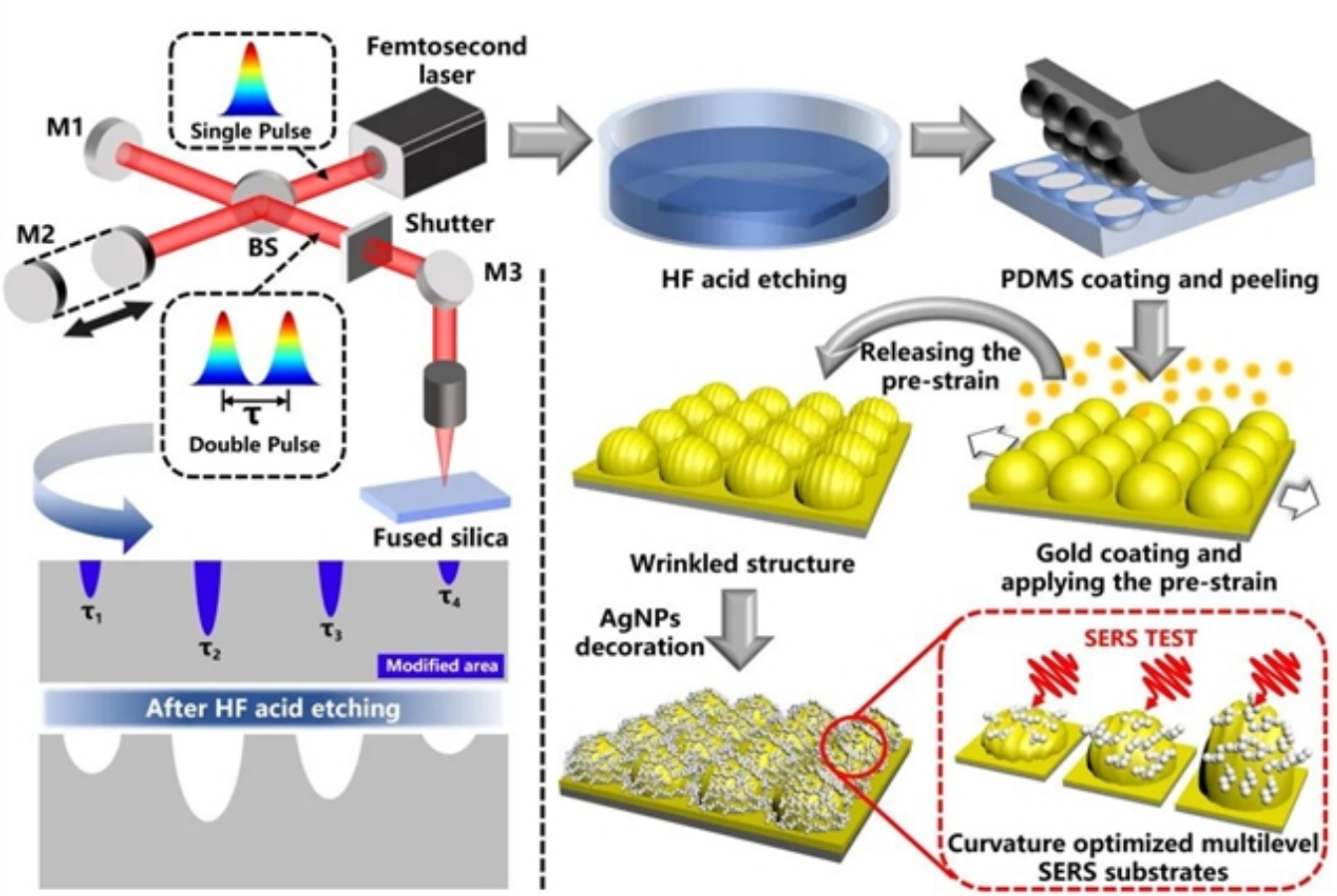


图1：曲率优化的多层次表面拉曼散射增强基底加工路线图

时域整形飞秒激光具有很强的加工灵活性，该团队通过调控飞秒激光双脉冲之间的时间间隔，有效调控材料在超快时间尺度内的电子能量吸收过程，从而实现改性深度的纳米级精度控制。通过飞秒激光辅助化学刻蚀的方法得到的微透镜曲率调节范围可连续跨越近30倍，实现了微透镜形貌尺寸的连续可调。

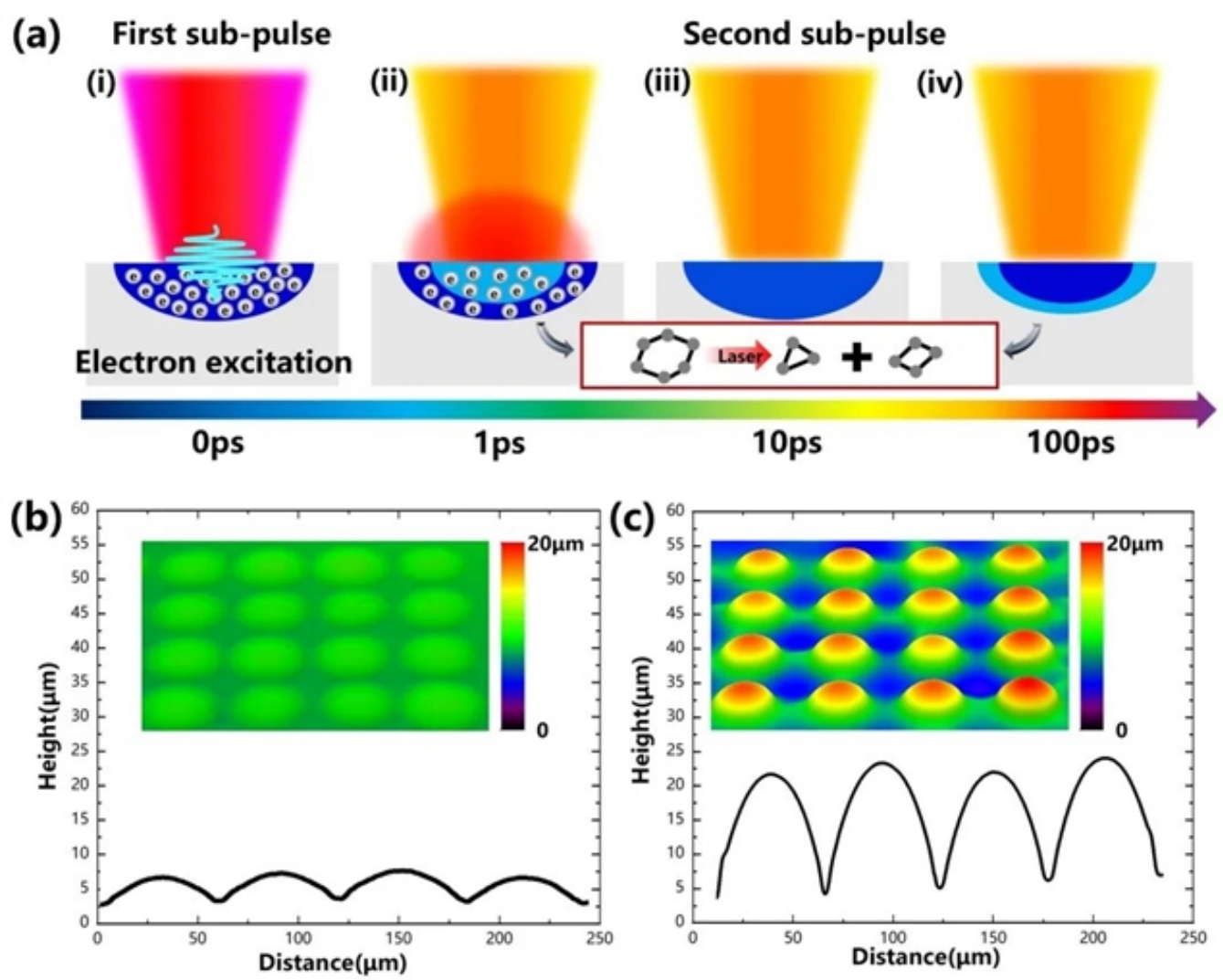


图2：时域整形飞秒激光加工不同曲率微透镜的原理示意图与共聚焦表征图

表面拉曼散射增强效果与基底表面受激局部电场强度的4次方呈正比，因此可以通过FDTD（finite-difference time-domain method）模拟的方法分析不同结构的局部电场增强情况，进而比较具有不同结构基底的增强效果。模拟和实验显示，随着基底的曲率和结构的复杂度的提高，局部电场强度和拉曼光谱强度都有明显的提高。曲率优化和结构优化的方法分别提高了8.7倍和15.8倍。所制备的SERS检测基底可以达到的最低检测极限为1×10-11M，增强因子为1.22×107，相对标准偏差为3.9%-6.9%。该工作首次研究了基底曲率对表面受激局部电场的影响，基底曲率增高可以促进表面电荷累积从而增强微透镜间的广域电场和纳米颗粒之间局域电场的耦合，从而提高基底表面整体的电场强度。

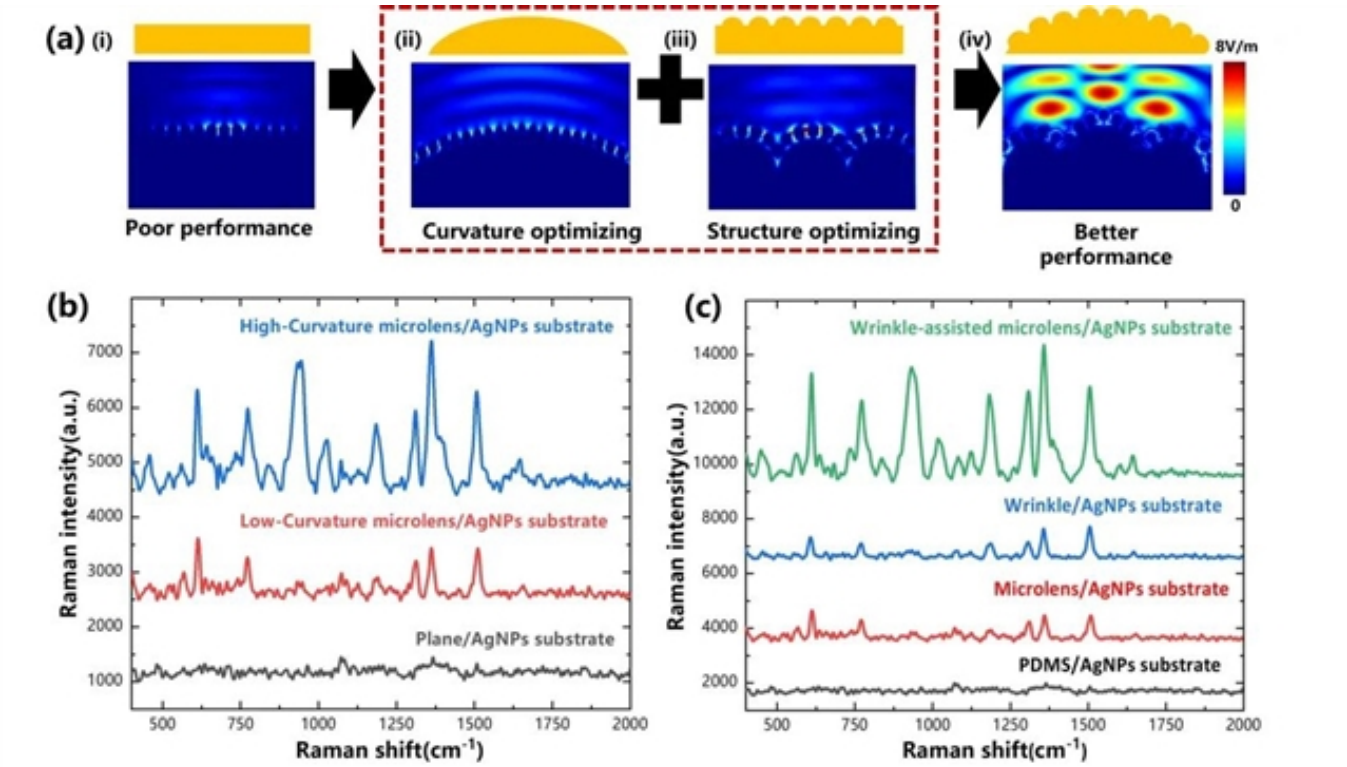


图3： 曲率优化的多层次SERS基底受激局部电场FDTD模拟及表面拉曼散射测试曲线

在应用层面，该研究团队提出了原位直接检测与溶液辅助提取检测两种SERS应用模式，分别适用于现场快速筛查与实验室高精度分析。在常见蔬菜水果表面福美双农药残留检测中，两种方法均表现出优异的灵敏度和可靠性，尤其是原位检测模式，展现了该柔性基底在农产品表面快速、无损检测中的实用潜力。

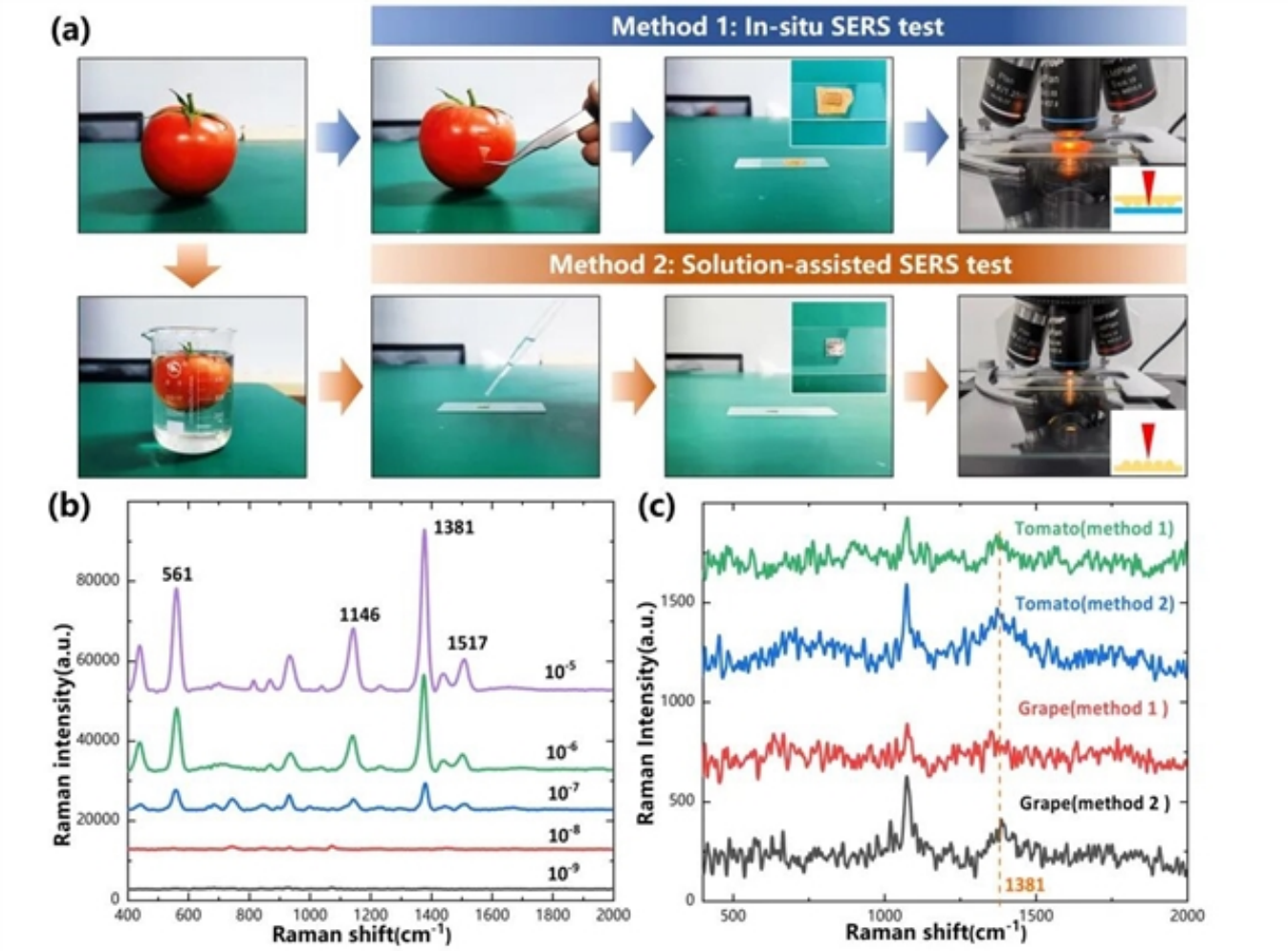


图4：原位/溶液辅助检测农药残留流程图及拉曼光谱曲线

总结与展望

该研究通过基于电子动态调控原理的飞秒激光时域整形方法，成功制备了曲率优化多层次SERS基底。这一技术路径不仅展现了飞秒激光微加工在跨尺度功能表面制造中的独特优势，也为高性能光学传感界面的结构-性能一体化设计提供了有力工具。科学的意义，不仅在于揭示未知，更在于为世界赋予新的感知维度。相信在不远的将来，具有高灵敏度的SERS传感基底将静默地延伸人类的感知，将不可见转化为可见，将微量转化为显著，在食品安全、环境监控、生命健康等领域，默默构筑起一道由光与结构共同守护的感知防线。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.027

作者：姜澜等 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发