

科学技术进步奖公示内容

一、项目名称：拉曼光谱探头及配套表面增强拉曼散射传感薄膜研发关键技术与应用

二、提名者及提名意见（包含提名等级）：

该项目面向我国在食品检测、生物医学检测、纺织品检测领域的重大需求，响应面向国家重大需求、面向人民生命健康战略，致力于微型拉曼光谱探头及配套表面增强拉曼散射（Surface-enhanced Raman scattering, SERS）薄膜基底研发关键技术与生物/化学传感应用。针对常规的拉曼光谱检测灵敏度低、环境适应性差等问题，发明设计了高信噪比、高对焦及可在高低温环境下检测的微型拉曼光谱探头，基于该微型拉曼光谱探头、光谱共焦位移传感器的峰值提取方法、软件及系统，开发了 2 款小型的手持式拉曼光谱仪和 1 款便携式拉曼光谱仪，均已通过“国家安全防范报警系统产品质量监督检验中心（上海）”和“公安部安全防范报警系统产品质量监督检验测试中心”的检验及“CE 认证”；同时，本项目成果研究采用磁控溅射物理法、清洁的化学合成法技术，开发了 Ta-Ag、Mo-Ag、Au-Ag、PVDF@Au 薄膜 SERS 基底，这些薄膜具备 SERS 传感的纳米“针尖结构”和“间隙结构”，实现了 400 nm-800 nm 可调范围的局部表面等离子体共振，产生拉曼散射光谱信号的指数倍数放大效应；结合本成果发明设计的拉曼光谱仪设备，完成了生物/化学分子及细菌的超灵敏 SERS 光学检测应用，最终形成拉曼光谱探头及配套 SERS 薄膜基底材料研发关键技术，取得了显著的经济社会效益。提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介：

本项目成果源于国家自然科学基金项目、陕西省科技计划项目等 5 项重要课题，属于微型拉曼光谱检测设备及表面增强拉曼散射（Surface-enhanced Raman scattering, SERS）功能传感材料技术领域。

主要技术内容：

本项目面向我国在食品检测、生物医学检测、纺织品检测领域的重大需求，响应面向国家重大需求、面向人民生命健康战略，致力于

微型拉曼光谱探头及配套表面增强拉曼散射（Surface-enhanced Raman scattering, SERS）薄膜基底研发关键技术与生物/化学传感应用。针对常规的拉曼光谱检测灵敏度低、环境适应性差等问题，发明设计了高信噪比、高对焦及可在高低温环境下检测的微型拉曼光谱探头，基于该微型拉曼光谱探头、光谱共焦位移传感器的峰值提取方法、软件及系统，开发了 2 款小型的手持式拉曼光谱仪（型号分别为 ATR6500、ATR6600）和 1 款便携式拉曼光谱仪（型号为 ATR3000），均已通过“国家安全防范报警系统产品质量监督检验中心（上海）”和“公安部安全防范报警系统产品质量监督检验测试中心”的检验及“CE 认证”；同时，本项目成果研究采用磁控溅射物理法、清洁的化学合成法技术，开发了 Ta-Ag、Mo-Ag、Au-Ag、PVDF@Au 薄膜 SERS 基底，这些薄膜具备 SERS 传感的纳米“针尖结构”和“间隙结构”，实现了 400 nm-800 nm 可调范围的局部表面等离子体共振，产生拉曼散射光谱信号的指数倍数放大效应；结合本成果发明设计的拉曼光谱仪设备，完成了生物/化学分子及细菌的超灵敏 SERS 光学检测应用，最终形成拉曼光谱探头及配套 SERS 薄膜基底材料研发关键技术，主要创新内容：

（1）研究微型拉曼光谱检测探头及光谱共焦位移传感器的峰值提取算法及软件系统，实现光谱漂移及强度波动抑制，提高检测光谱的信噪比，开发了 2 款小型的手持式拉曼光谱仪和 1 款便携式拉曼光谱仪

拉曼光谱检测技术是一种很好的生物分子及浓度的监测方法。针对之前常用拉曼探头无法适应长距离光纤以及高温环境，本成果通过隔热段、激光发射光路和信号收集光路设计，以及激光发射光路的部分和信号收集光路的部分平行设置、反射镜与二相色滤光片均呈 45°角平行相对设置，设计制造出的拉曼光谱探头能够有效适应高温探测环境，体积更微型化，检测速度也大大提高。同时，设计研发了光谱共焦位移传感器的峰值提取算法及软件系统，包括：预设包括滤波窗口、滤波多项式次数以及高斯拟合数据算法等，以上独特的设计为复杂、长距离环境下的拉曼光谱检测提供了便利。基于微型拉曼光谱检测探头、光谱共焦位移传感器的峰值提取算法及软件系统等核心技术，开发了 2 款小型的手持式拉曼光谱仪和 1 款便携式拉曼光谱仪。

（2）开发了手持式拉曼光谱仪配套的纳米 SERS 传感薄膜基底材

料，将拉曼光谱信号的强度通过局部表面等离子体共振效应进一步放大 10^7 倍以上，提高手持式拉曼光谱检测的灵敏度

本成果采用真空条件下的磁控溅射制备技术，通过调控银、钼元素沉积速率，构建出一种超稳定的、清洁的 Ta-Ag、Mo-Ag 薄膜材料，作为一种结构独特的含银纳米薄膜，由于其特殊的分级结构、较大的比表面积、良好的表面等离子体性能以及优异的表面清洁度，因而在 SERS 传感领域有着广泛的应用。发明使用无机的双氧水作为“清洁”还原剂，无机硝酸银作为反应调控剂，在低温下进行各相异性生长，制备出一种表面分布有致密的单晶“纳米针尖”结构的毛丹状 Au@Ag 合金纳米 SERS 薄膜，通过针尖结构密度的调控，实现了 400 nm-780 nm 可调范围的局部表面等离子体共振，进而匹配手持式拉曼光谱探头 780 nm 激发光波长，实现了对生物/化学分子、细菌等的快速和原位 SERS 光谱检测。

(3)发明了灵敏度高、环境适应性强且耐高低温的 Ta/Ag、Mo/Ag、Au/Ag 等系列 SERS 薄膜基底，改善了 SERS 检测系统中传感薄膜基底材料与手持式拉曼光谱检测仪的兼容性和稳定性

Ag 纳米结构光学截面更大、成本低，但 Ag 微纳薄膜化学稳定性、生物相容性较差，阻碍了 Ag 微纳薄膜在 SERS 生化分析方面的应用。本成果揭示了 Ta 原子掺杂对 Ag 纳米薄膜微观结构的调控规律，创建了表面纳米结构可控的 Ta/Ag、Mo/Ag、Au/Ag 双金属薄膜 SERS 基底，解决了纳米 SERS 基底“热点”密度较低的问题，提高复杂服役状态下 SERS 传感薄膜基底材料与手持式拉曼光谱检测仪器的兼容性和稳定性。

四、 客观评价：

1. 验收意见

(1) 国家自然科学基金项目“基于周期性阵列结构 SERS 基底的 LSPR/SPPS 耦合增强机制研究”批准号：(11847140)按有关规定已审核完毕，准予结题；该基金资助的学术论文《Ta@Ag Porous Array with High Stability and Biocompatibility for SERS Sensing of Bacteria》，从 Web of Science 输入 Ta, Ag, SERS 三个关键词语对近 10 年的 SCI 期刊论文进行检索，共检索到 5

篇论文，其中 1 篇属于本项目的研究成果且引用率最高，目前被引 39 次，该论文也是最早报道 Ta@Ag 微纳多孔薄膜 SERS 基底的论文，Ta@Ag 微纳多孔薄膜具有极佳的化学稳定性、生物相容性，且可以充分利用 Ag 纳米结构较大的光学截面和电学特性实现 SERS 传感功能。（见附件评价证明部分图 1）

（2）陕西省自然科学基金基础研究项目“毛细管 SERS 传感器对肺癌呼气标志物的信号放大及定量分析研究”，项目编号（2019JQ-490），“腐蚀细菌生物膜纳米尺度环境中菌群信号分子的光学原位表征方法” 项目编号：（2022JQ-364），按照陕西省自然科学基金基础研究计划结题项目评价指标和有关规定，经审查，符合结题要求，通过验收。

2. 国内外学术评价

本项目累计发表论文 42 篇，被 Chemical Reviews, Advanced Materials, Sensors and Actuators B: Chemical, Analytical Chemistry 等期刊正面多次引用，领域内著名学者上海交通大学樊春海教授（中国科学院院士）、厦门大学李剑锋教授（国家杰出青年基金获得者）、南京大学龙亿涛教授（国家杰出青年基金获得者）、加州大学 Phillip B. Messersmith 教授对本研究的结论进行了正面引用评价。本项目成果中代表性的 3 篇论文累计被引用 261 次，其中 1 篇为高被引论文。（见附件评价证明部分图 2、3）

3. 比赛获奖

2025 年 7 月，成果“表面清洁态含银微纳薄膜的关键制备技术与生物光学传感应用”获陕西高等学校科技进步二等奖；本项目成果被授予第三届国际合作高峰论坛“最具投资价值奖”；在第七届“创客中国”陕西省咸阳市中小企业创新创业区域赛暨秦创原科技成果转化先行区科技项目路演赛中荣获创客组优胜奖 1 项。荣获 2022 年中国大学生机械工程创新创业大赛：“明石杯”微纳传感技术与智能应用赛一等奖 1 项，获得第六届中国“互联网+”大学生创新创业大赛银奖 1 项，获得西安交通大学第三十一届“腾飞杯”创新创业大赛一等奖 1 项，获得 2021 年度西安工程大学研究生创新成果大赛一等奖、2023 年度西安工程大学研究生创新成果大赛三等奖各 1 项，并入选陕西省研究生创新成果展，培育优秀硕士学位论文 2 项（见附件获奖证明部分）。

4. 第三方权威检测机构评价

基于该微型拉曼光谱探头、光谱共焦位移传感器的峰值提取算法、软件及系统，本项目成果开发了开发了 2 款小型的手持式拉曼光谱仪（型号分别为 ATR6500、ATR6600）和 1 款便携式拉曼光谱仪（型号为 ATR3000），均已通过“国家安全防范报警系统产品质量监督检验中心（上海）”和“公安部

安全防范报警系统产品质量监督检验测试中心”的检验及 CE 认证，检测依据为“GA/T 1067-2013 基于拉曼光谱技术的液态物品安全检查设备通用技术要求（参照）”；判定依据为“GA/T1067-2013 基于拉曼光谱技术的液态物品安全检查设备通用技术要求（参照）”；

检测结论如下：由奥谱天成(厦门)光电有限公司委托的 ATR6500、ATR6600 、ATR3000 型拉曼光谱识别仪样品，经本中心检测的项目分别共计 32、31、33 项。所测项目的检测结果符合 GA/T 1067-2013 基于拉曼光谱技术的液态物品安全检查设备通用技术要求（参照）。其中：光谱漂移 $\leq 1\text{cm}^{-1}$ （10-40℃），强度波动 $<\pm 2\%$ ；耐高温（最高 300℃）、耐腐蚀（316L 不锈钢+哈氏合金探头）设计，可直接接触危险介质；制冷型 CCD 探测器，检测限低至 0.1%；光纤探头最长可达 100 米（定制）；支持 SERS 增强技术，灵敏度进一步提升，满足严苛质检需求。相关检测证明及参数见附件。

五、 应用情况：

本团队从 2010 年起就开始“拉曼光谱探头及配套表面增强拉曼散射传感薄膜关键技术研究及应用”，累计发表论文 42 篇，与朝日集团有限公司、江苏康乃馨纺织集团开展了多项合作课题，为材料表面纳米功能化设计及制备积累了丰富的实践经验。本项目“表面清洁态含银微纳薄膜的关键制备技术与生物光学传感应用”已获得 8 件国家发明专利、其中《一种银钽复合材料构建的有序多孔阵列及其制备方法》、《一种制备可抑制杀菌活性的 Ta₂O₅@Ag 双相微纳结构的方法》、《超稳定的银钽复合材料表面增强拉曼散射基底及制备方法》和《一种基于 Ta@Ag 微纳界面的活性病原菌原位检测方法》4 件发明专利已实现成果转化和产业化应用。

六、 主要知识产权和标准规范等目录：（限 10 条，所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2024 年 12 月 31 日之前。填写论文专著时请注意按原文中英文填写）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家（地区）	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种拉曼光谱探头	中国	ZL 2022 1142802 9.0	20230725 15	第 6168605 号	奥谱天成（厦门）光电有限公司	刘鸿飞；蔡梦福；蔡群鹏

2	发明专利	光谱共焦位移传感器的峰值提取方法及系统、介质	中国	ZL 2023 1033009 7.1	20230711	第 6129748 号	奥谱天成（厦门）光电有限公司	刘鸿飞；黄晓晓；熊康
3	发明专利	超稳定的银钼复合材料表面增强拉曼散射基底及制备方法	中国	ZL2018 1079918 2.1	20191011	第 3554098 号	西安交通大学	宋忠孝；陈东圳；赵永席；黄剑；井津域；李莎
4	发明专利	一种银钼复合材料构建的有序多孔阵列及其制备方法	中国	ZL2018 1079763 2.3	20191011	第 3554097 号	西安交通大学	宋忠孝；陈东圳；井津域；黄剑；杨波；钱旦
5	发明专利	一种清洁的仿生毛胆状纳米结构的制备方法	中国	ZL2020 1026609 2.3	20230203	第 5727744 号	西安工程大学	陈东圳；任研伟；贺辛亥；张亮；陈彤善
6	发明专利	一种改善 Ag 微纳薄膜生物相容性	中国	ZL2019 1106682 9.0	20210813	第 4612160 号	西安交通大学	宋忠孝；陈东圳；朱晓东；钱旦

		的方法 及其膜 的应用						
7	发明专利	一种基 于 Ta@Ag 微纳界 面的活 性病原 菌原位 检测方 法	中国	ZL2019 1047059 6.4	20211109	第 4781259 号	西安工 程大学	陈东圳; 张萌; 张 宇; 付 涛; 贺辛 亥; 宋忠 孝
8	发明专利	一种制 备可抑 制杀菌 活性的 Ta ₂ O ₅ @ Ag 双相 微纳结 构的方 法	中国	ZL2019 1081427 9.X	20210831	第 4647354 号	西安工 程大学	陈东圳; 付涛; 张萌; 张 宇; 贺辛 亥; 宋忠 孝
9	发明专利	一种金 @纤维 仿谷穗 结构柔 性 SERS 基底的 制备方 法	中国	ZL 2020 1026519 9.6	20230228	第 5756858 号	西安工 程大学	陈东圳; 张亮; 贺 辛亥; 任 研伟; 陈 彤善
10	发明专利	一种非 对称的 拉曼光 谱基线	中国	ZL 2023115 88058.8	20240202	第 6678255 号	奥谱天 成（厦 门）光 电有限	刘鸿飞; 黄晓晓; 熊康

		校正方 法、装置 及储存 介质					公司	
--	--	--------------------------	--	--	--	--	----	--

承诺：上述知识产权无争议且为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意，有关知情证明材料均存档备查。

七、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	陈东圳	副教授	无	西安工程大学	西安工程大学	开发了系列 SERS 基底材料；开发了相关软件系统；完成了专利 3、4、5、6、7、8、9
2	刘鸿飞	教授级高工	董事长	奥谱天成（厦门）光电股份有限公司	奥谱天成（厦门）光电股份有限公司	开发了拉曼光谱探头及设备；完成了专利 1、专利 2、专利 10
3	黄剑	讲师	无	西安石油大学	西安石油大学	开发了相关软件系统
4	宋忠孝	教授	无	西安交通大学	西安交通大学	开发了相关 SERS 基底材料
5	贺辛亥	教授	无	西安工程大学	西安工程大学	开发了相关 SERS 基底材料
6	付涛	副教授	无	西安交通大学	西安交通大学	完成了生物医用相关检测
7	张萌	中级	无	西安交通大学	西安交通大学	完成了生物医用相关检测

八、 主要完成单位及创新推广贡献：

主要完成单位：（依次列写单位名称）

排 名	完成单位	创新推广贡献
-----	------	--------

1	西安工程大学	开发了相关 SERS 基底材料，贡献率 30%
2	奥谱天成（厦门）光电股份有限公司	开发了拉曼光谱探头及设备，贡献率 30%
3	西安石油大学	开发了相关软件系统，贡献率 20%
4	西安交通大学	完成了生物医用相关检测，贡献率 20%

九、完成人合作关系说明：（合作方式包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。下表中的“项目排名”指在本次报奖中的完成人排序。）

第一完成人与刘鸿飞高级工程师 2016 年开始合作，完成了拉曼光谱及 SERS 检测的多项研究开发，一起获得了第七届“创客中国”陕西省咸阳市中小企业创新创业区域赛暨秦创原科技成果转化先行区科技项目路演赛中荣获创客组优胜奖。

第一完成人与黄剑博士在合作完成了专利：超稳定的银钽复合材料表面增强拉曼散射基底及制备方法，专利号 ZL201810797632.3

宋忠孝教授是第一完成人的导师，指导第一完成人发表了多篇论文，申请了多项专利；（Ta@Ag Porous Array with High Stability and Biocompatibility for SERS Sensing of Bacteria, ACS Applied Materials & Interfaces, 2020 年 12 卷 20138–20144 页）、（一种基于 Ta@Ag 微纳界面的活性病原菌原位检测方法，ZL201910470596.4）、（一种制备可抑制杀菌活性的 Ta₂O₅@Ag 双相微纳结构的方法，ZL201910814279.X）。

第一完成人与贺辛亥教授在 ACS Applied Materials & Interfaces 期刊合作发表了论文，共同申请了多项专利；（Ta@Ag Porous Array with High Stability and Biocompatibility for SERS Sensing of Bacteria, ACS Applied Materials & Interfaces, 2020 年 12 卷 20138–20144 页）。

第一完成人与付涛副教授在 ACS Applied Materials & Interfaces 期刊上合作发表了论文; (Ta@Ag Porous Array with High Stability and Biocompatibility for SERS Sensing of Bacteria, ACS Applied Materials & Interfaces, 2020 年 12 卷 20138–20144 页)。合作完成了专利: 一种基于 Ta@Ag 微纳界面的活性病原菌原位检测方法, 专利号, ZL 201910470596.4

第一完成人与张萌博士共同发表了论文, 申请了多项专利; (一种基于 Ta@Ag 微纳界面的活性病原菌原位检测方法, ZL 201910470596.4)、(一种制备可抑制杀菌活性的 Ta₂O₅@Ag 双相微纳结构的方法, ZL201910814279.X)。

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作起始时间	合作完成时间	合作成果名称
1	共同获奖	陈东圳/1、刘鸿飞/2	2016 年 9 月	2024 年 12 月	在第七届秦创原科技成果转化先行区科技项目优胜奖
2	共同知识产权	陈东圳/1、黄剑/3	2014 年 9 月	2024 年 12 月	超稳定的银钼复合材料表面增强拉曼散射基底及制备方法
3	共同知识产权	陈东圳/1、宋忠孝/4	2014 年 9 月	2024 年 12 月	超稳定的银钼复合材料表面增强拉曼散射基底及制备方法
4	共同知识产权	陈东圳/1、贺辛亥/6	2014 年 9 月	2024 年 12 月	一种金@纤维仿谷穗结构柔性 SERS 基底

					的制备方法
5	共同 知识 产权	陈东圳/1、付涛/5	2014 年 9 月	2024 年 12 月	一 种 基 于 Ta@Ag 微 纳 界面的活性病 原菌原位检测 方法
6	共同 知识 产权	陈东圳/1、张萌/7	2014 年 9 月	2024 年 12 月	一种制备可抑 制杀菌活性的 Ta ₂ O ₅ @Ag 双 相微纳结构的 方法