

微区域角分辨光谱测量系统

吴祖伟 高云 朱鹏飞 章文卓 王磊

Micro-area angle-resolved spectroscopy measurement system

WU Zu-wei, GAO Yun, ZHU Peng-fei, ZHANG Wen-zhuo, WANG Lei

引用本文:

吴祖伟, 高云, 朱鹏飞, 章文卓, 王磊. 微区域角分辨光谱测量系统[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 277–287. doi: 10.37188/CO.2025–0148

WU Zu-wei, GAO Yun, ZHU Peng-fei, ZHANG Wen-zhuo, WANG Lei. Micro-area angle-resolved spectroscopy measurement system[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 277–287. doi: 10.37188/CO.2025–0148

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0148>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

通过磁表面等离子激元的多重相干提高灵敏度

Improving sensitivity by multi-coherence of magnetic surface plasmons

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 458 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0009>

基于干涉条纹成像的测角系统设计及其离轴测量精度

Design of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging and its off-axis measurement accuracy

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1397 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0049>

基于非连通金属介质金属波导耦合D形谐振腔的多法诺共振传感器

Multi-Fano resonances sensing based on a non-through metal-insulator-metal waveguide coupling D-shaped cavity

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1484 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2025–0017>

基于数字微镜区域翻转的强光干扰抑制技术

Intense light interference suppression technology based on regional flipping of digital micromirror device

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1409 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0095>

腔衰荡光谱仪器腔镜微缺陷散射模型

Scattering model for micro-defects on cavity mirrors in cavity ring-down spectroscopy instruments

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1143 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0094>

激光暗荧光光谱电场测量微扰计算与实验

Calculation and experiment of tiny perturbations in electric field measurement for the laser-induced fluorescence-dip spectroscopy method

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1351 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0037>

文章编号 2097-1842(2026)02-0277-11

微区域角分辨光谱测量系统

吴祖伟^{1,2}, 高云^{2,3}, 朱鹏飞², 章文卓^{1,2*}, 王磊^{2*}

(1. 泉州工艺美术职业学院 陶瓷工程学院, 福建 泉州 362500;

2. 厦门大学 萨本栋微米纳米科学技术研究院, 福建 厦门 361102;

3. 安庆师范大学 智能感知与计算高等学校重点实验室, 安徽 安庆 246133)

摘要:为研究表面等离激元纳米结构的微区域光学响应, 本文研制了一套基于同轴转臂的微区域角分辨光谱测量系统。该系统设计了一种基于有限共轭构型的微区域远程激发与收集光路模型, 实现了以 32 μm 直径的微区域光斑入射; 搭建了基于同轴转臂的角分辨机械系统, 实现了 6.9° 至 90° 的大范围定向角度激发。性能测试表明, 系统稳定性高, 最小角度分辨率达 0.12°。通过对一维光栅和二维周期纳米结构的反射光谱采集实验, 进一步验证了系统的可靠性, 证明了微区域光斑所带来的优势, 为微纳结构的角分辨光谱表征提供了有效的技术手段。

关键词:微区域光斑; 角分辨光谱测量; 谱学仪器; 表面等离激元

中图分类号: O433.1

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2025-0148

CSTR: 32171.14.CO.2025-0148

Micro-area angle-resolved spectroscopy measurement system

WU Zu-wei^{1,2}, GAO Yun^{2,3}, ZHU Peng-fei², ZHANG Wen-zhuo^{1,2*}, WANG Lei^{2*}

(1. School of Ceramic Engineering, Quanzhou Arts and Crafts Vocational College, Quanzhou 362500, China;

2. Pen-Tung Sah Institute of Micro-Nano Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

3. University Key Laboratory of Intelligent Perception and Computing, Anqing Normal University,
Anqing 246133, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangwzxmu@163.com; wanglei33@xmu.edu.cn

Abstract: To study the optical response of micro-area in surface plasmon nanostructures, we develop a micro-area angle-resolved spectroscopy measurement system based on a coaxial rotating arm. The system adopts a micro-area remote excitation and collection optical path model based on a finite conjugate configuration, enabling an incident micro-area spot with a diameter of 32 μm . In addition, an angle-resolved mechanical system based on a coaxial rotating arm is constructed, realizing large-range directional angular excitation from 6.9° to 90°. Performance tests show that the system exhibits high stability, with a minimum angular res-

收稿日期: 2025-11-28; 修订日期: 2025-12-18

基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目(科技类)(No. JAT241360); 安徽省教育厅青年科学项目(No. 2025AHGXZK40354); 厦门市产学研项目(No. 2024CXY0110)

Supported by Fujian Province Young and Middle-Aged Teachers Education Research Project (Science and Technology) (No. JAT241360); Youth Scientific Research Project (Natural Science) of the Education Department of Anhui Province (No. 2025AHGXZK40354); Xiamen Industry-University-Research Project (No. 2024CXY0110)

olution of 0.12° . Through the reflection spectrum collection experiments on one-dimensional gratings and two-dimensional periodic nanostructures, the reliability of the system is further verified. The results demonstrate the advantages of the micro-area spot, which provide an effective technical means for the angle-resolved spectroscopy characterization of micro and nanostructures.

Key words: micro-area light spot; angle-resolved spectroscopy measurement; spectroscopic instrument; surface plasmons

1 引言

表面等离子激元(Surface Plasmons, SPs)是一种存在于金属与电介质界面的集体电荷振荡,能够被特定频率的光激发,也可以被描述成为一种准粒子,具有神奇的光学性质和强烈的共振效应。正是因为这些奇特的现象,其被广泛应用在表面增强和针尖增强拉曼光谱^[1-7]、纳米尺度的光场调控^[8]、完美吸收^[9]、突破衍射极限的高分辨光学成像^[10]以及单分子水平的生物传感检测领域^[11]。在进行 SPs 相关研究时,通常需要将光照射在金属与介质界面上实现 SPs 的有效激发。不同的 SPs 结构有不同的共振波长与共振角度,在测量过程中具有很强的定向特性,需要具备角分辨能力的仪器才能完成相应的测试,且当测量系统拥有更大的测量角度范围时,将促进更多关于 SPs 结构的应用研究。此外,相关研究表明,SPs 阵列结构的近场与远场响应均存在最合适的阵列尺寸,为 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ ^[12]。因此,理想的角分辨光谱测量系统应在具备大角度测量范围的条件兼具有同量级的空间分辨率,以降低在测量过程中空间平均效应的影响^[13]。

目前,主流的角分辨光谱测量技术主要分为两类。第一类是基于宏观转臂的角分辨光谱测量系统^[14-15],通过机械结构与准直光路联用,实现超 80° 的角度覆盖,常用于大尺寸均匀样品的测量。然而,机械结构的长工作距离,易造成准直光路的发散,毫米级的激发光斑严重限制了测量系统的空间分辨率,进而使测量结果易受到宏观平均效应的影响。第二类是基于显微镜后傅立叶平面(Back Fourier Plane, BFP)成像原理的角分辨光谱测量系统^[16-18],通过 BFP 的特性实现光的定向激发与收集,能够将光斑压缩至微米尺度,完成更加微观的测量任务。但其收集角度受物镜的数值孔

径(Numerical Aperture, NA)严格限制(通常 $<60^\circ$),故无法实现更大角度区间的探测,限制了应用场景。尽管可以使用如更换超高 NA 物镜等折中尝试,但通常会降低测量效率,并提高实验成本。

由此可见,两类系统在角度范围与空间分辨率之间各有权衡,迫使研究人员在面对复杂样品时,不得不预先选择信息维度,或是进行繁琐的互补性实验。本文旨在突破这一物理与技术上的限制条件,研制了一款兼具微区域光斑特性与大角度测量范围的同轴转臂式角分辨光谱测量系统。其核心创新在于将显微光路与高精度同轴扫描机械系统进行一体化融合,打破传统仪器之间的性能冲突。具体而言,本研究工作包括:(1)设计了一种微区域远程激发与收集光路模型,将入射光斑直径缩小至 $32\ \mu\text{m}$,提升了空间分辨率;(2)设计并搭建了基于同轴转臂的角分辨机械系统,实现了 6.9° 至 90° 的大角度范围激发与信号收集,并完成与光机械的结合;(3)开发了集成化的控制系统与软件。

2 系统设计与实现

本系统采用模块化设计,主要由光路模块、机械模块、电路与软件控制模块等组成。通过多模块的协同,实现仪器的稳定运转。

2.1 光路模块

本研究融合宏观转臂与显微光路的优势,提出了一种基于同轴转臂的微区域有限共轭光路模型。其核心设计思想在于:摒弃了传统平行光入射的方式,利用有限共轭的光学构型,在长工作距离下将激发光斑高效聚焦至微米尺度,从而提高入射光斑的光强,增强了激发效率,并通过同轴光路的设计,保证该微区域光斑在大角度扫描运动时的稳定性。如图 1 所示,其激发与收集光路以同旋转轴配置的方式集成于转臂之内。具体来

说, 该光学系统由光源、光纤、光纤准直器、偏振片、消色差双胶合透镜、单倍物镜以及光谱仪组成。其中, 在激发光路中, 光源用于提供稳定的功率输出与稳定连续的光谱; 光纤承担着光传输的任务; 光纤准直器起到防止光线发散的作用; 偏振片将光转化为特定的偏振态, 以实现 SPs 的有效激发; 消色差双胶合透镜用于 NA 的匹配, 将准直光聚焦在物镜成像面上, 防止在长工作距离传

输过程中光斑的不断扩散; 单倍物镜将投射在其成像面上的光斑以单倍放大倍率聚焦在样品表面, 最终以有限共轭的光学构型, 实现激发光斑的微区域化。收集光路则为激发光路的逆过程, 当光经过样品的反射后, 依次通过各个光学元件后耦合进收集光纤, 到达光谱仪, 完成光谱信号的采集。

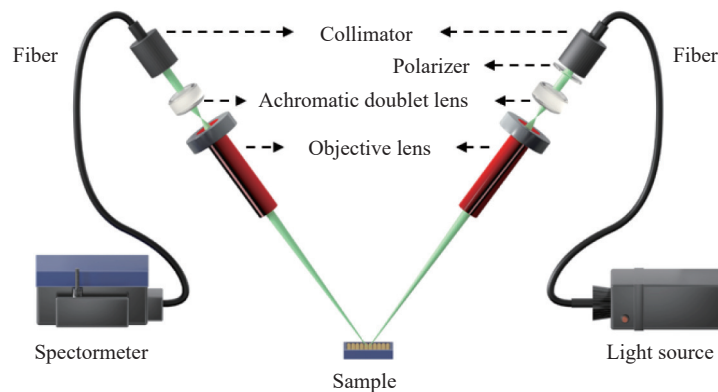


图 1 微区域有限共轭光路模型示意图

Fig. 1 Schematic of a finite-conjugate optical path model for a micro-area

基于上述光路模型, 本文完成了光学元件的选型, 具体型号如表 1 所示。由于后续光路将搭载在转臂式机械系统中, 因此在选型过程中, 本文充分考虑了机械系统可能带来的干涉问题, 选取了长焦距的物镜, 为机械系统的设计提供了更大的空间。

表 1 光学系统型号表

Tab. 1 Optical system specifications

Items	Designation
Light source	HDL-II
Fiber for excitation	50 μm silica fiber
Fiber for collection	1000 μm silica fiber
Collimator	F239SMA-A
Polarizer	HC12N
Achromatic doublet lens	63-718
Objective lens	InfiniStix
Spectrometer	Andor Shamrock 303i

为在设计阶段验证光学系统的可行性, 本文利用 Zemax OpticalStudio 软件进行了序列模式下的光线追迹仿真。严格依据实际选型的光学元件

参数建立仿真模型。评价时, 设置 0° 、 0.707° 、 1° 三个倾斜视场以模拟实际使用工况, 通过分析点列图 (Spot Diagrams), 将光斑的均方根半径 (RMS Radius) 和几何半径 (GEO Radius) 作为核心评价指标, 量化系统光斑的尺寸。仿真设置与结果如图 2 和表 2 所示。由于单倍物镜厂商未提供包括黑盒在内的 Zemax 仿真文件, 因此使用理想近轴面代替单倍物镜对完整系统进行模拟, 并通过 ISNA 操作数进行优化。仿真结果表明, 三个视场下的均方根半径接近, 均小于 $20 \mu\text{m}$ 。虽然视场的离轴畸变导致光斑的半径变大, 但当前的仿真结果足以验证光路的可行性。

在实物搭建阶段, 为抑制光学系统装配中不可避免的像差与杂散光, 获得边界清晰、尺寸更小的激发光斑, 本文在激发物镜的成像面处增设了一个直径为 $20 \mu\text{m}$ 的小孔光阑。该光阑能够有效滤除偏离主光路的光线, 优化最终光斑质量, 系统实物如图 3(a) 所示。为准确表征实际光斑尺寸, 本文利用显微镜头与工业相机采集了聚焦处的光斑图像 (图 3(b)), 并采用数字图像处理技术进行分析。通过光斑分割 (图 3c(I)) 与标定计算 (图 3c(III)), 测得光斑直径约为 $32 \mu\text{m}$ (图 3c

(II)), 验证了本系统能够实现微区域激发的设计目标。



图 2 系统的光路模型

Fig. 2 Optical path model of the proposed system

表 2 点列图数据
Tab. 2 Spot diagram data

视场	RMS Radius/ μm	GEO Radius/ μm
0°	13.556	29.153
0.707°	13.566	30.743
1°	13.578	31.582

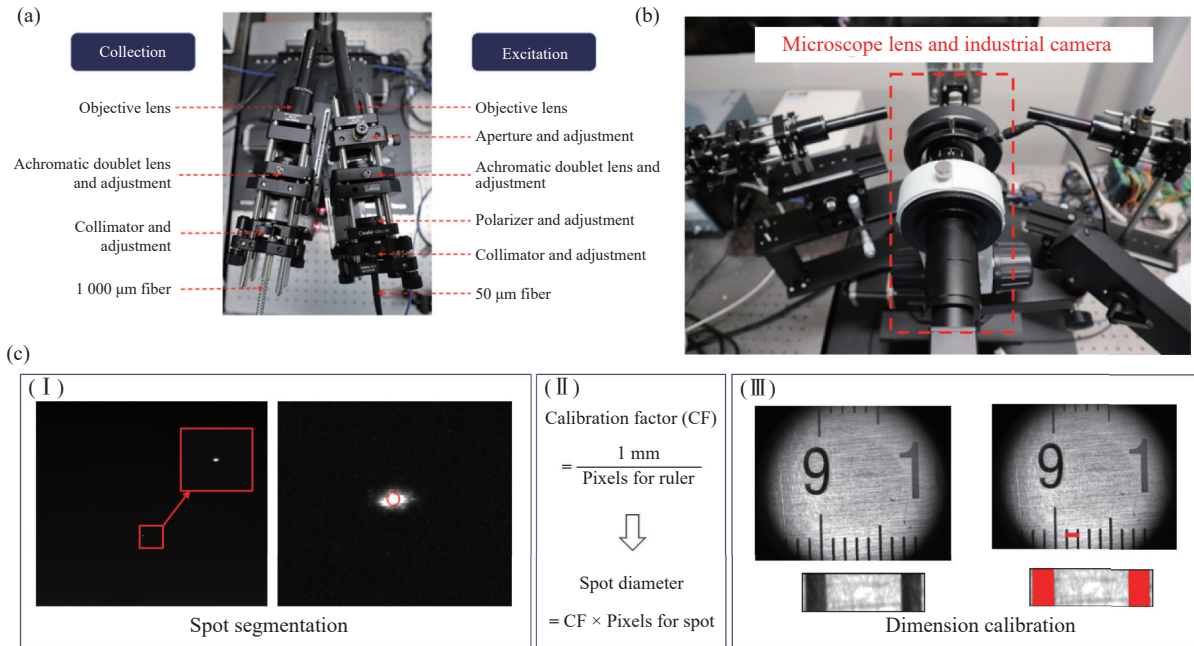


图 3 光斑测量。(a) 光学系统实物; (b) 图像采集模块; (c) 数字图像处理过程

Fig. 3 Experimental spot measurement. (a) Optical system; (b) image acquisition module; (c) digital image processing workflow

2.2 机械模块

为确保光学系统实现定向激发与信号收集的功能, 本文遵循同轴原则、可调原则以及角度最大化原则对机械系统进行了总体设计与搭建。机械系统由转臂模块、旋转与传动模块、调节模块、样品台模块、校准模块等几部分组成。机械系统总体设计方案如图 4 所示。

2.2.1 转臂、旋转与传动模块

转臂模块是实现角度扫描的核心, 其主要挑战在于保证两转臂在旋转过程中的高同轴度。对此, 本系统通过对中心轴的设计和精密加工, 将各个轴段的同轴度误差限制在 $1 \mu\text{m}$ 以内, 并使用 P2 级别的高精密轴保证轴承内外圈的同轴度误差, 通过过盈配合将转臂与轴承外圈进行装配, 保证旋转的准确性。进一步的, 本系统选取匠星光电型号为 M-2-MRH-200 的 360° 电动旋转台作

为转臂模块的驱动装置, 并配合如图 4(a) 所示的传动模块, 利用滚珠螺栓的特性, 避免传动过程的径向错位。

2.2.2 调节模块

调节机构如图 4(b) 所示。为确保光路能够在其正确的位置上, 调节机构的设计充分考虑了光路模块安装至机械系统时可能存在的来自于 4 个方向的位置误差, 分别是: 水平方向的旋转误差、竖直方向的俯仰误差、竖直方向的平移误差以及转臂沿轴心方向的移动误差。因此, 在系统的设计过程中, 使用索雷博光电 PY003/M、XRNV1 两种微调机构减小水平和竖直方向上的安装误差, 并通过滑块设计减小沿轴心方向上的位置误差。

2.2.3 校准模块

校准模块用于确保两条光路的光轴通过同

一旋转轴的轴心, 这是信号实现稳定收集的关键。如图 4(d) 所示, 本文设计了特殊的校准治具, 将校准治具嵌于中心轴上端, 并在治具上端半圆柱面的垂直平面上通过精密加工的方式在平面中部打上小孔, 将其视作系统的轴心(光学基准),

通过调整光路在水平方向上的旋转位置, 使入射光斑经过小孔或在其竖直法线上, 再通过调节竖直方向的位置, 确保两条光轴通过同一旋转轴的轴心。

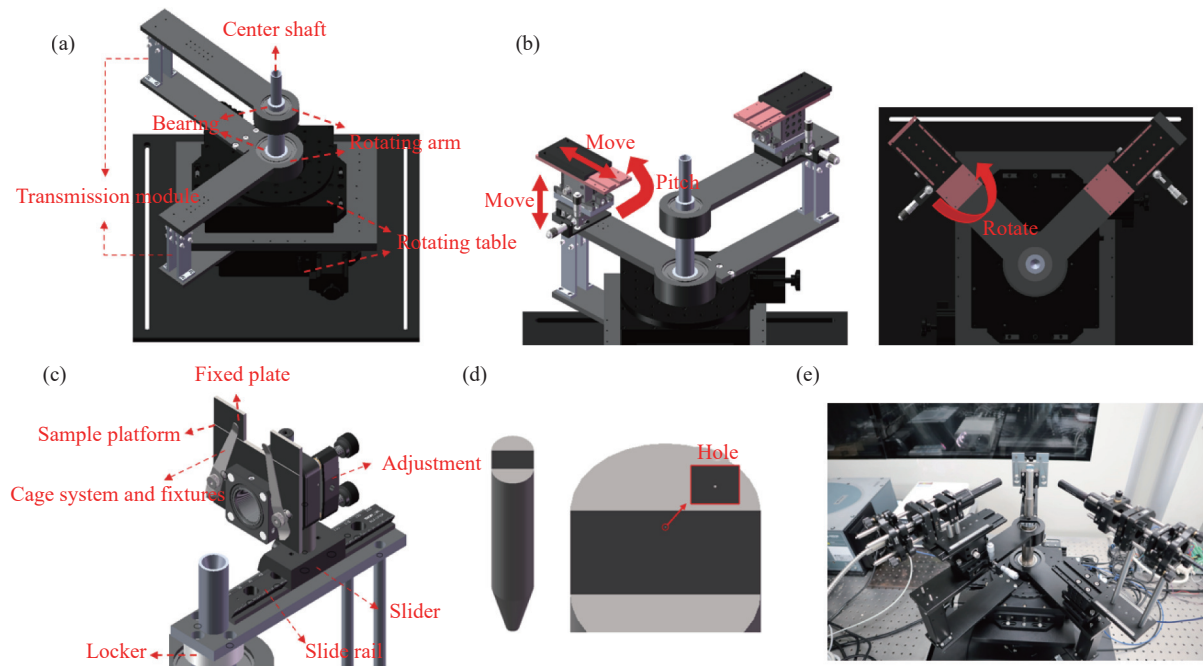


图 4 机械系统。(a) 转臂、旋转与传动模块; (b) 调节模块; (c) 样品台模块; (d) 校准模块; (e) 系统实物图

Fig. 4 Mechanical system. (a) Rotating arm, rotation and transmission module; (b) adjustment module; (c) sample stage module; (d) calibration module; (e) system photograph

2.2.4 样品台模块

样品台如图 4(c) 所示, 采用笼式系统的构型, 设置有夹具、滑块和滑轨, 保证了样品能够在特定场合下切入和切出, 提升了实验操作的灵活性。

由于机械系统各个部件的尺寸会影响系统的旋转角度范围。当光机械、传动机构、调节机构等模块的几何尺寸确定时, 调整旋臂的长度能够在一定程度上消除两臂在几何空间中可能发生的机械干涉。最终, 经过优化配置机械系统, 可实现 6.9° 至 90° 的大范围角度扫描测量, 满足大多数角分辨光谱测量的应用需求。

2.3 电路与软件控制模块

为实现角分辨光谱测量流程的自动化与精准控制, 本研究设计了集成化的控制电路与软件系统。该模块负责协调机械运动与光谱采集, 是连接用户操作与硬件执行的核心枢纽。

本文基于雷赛智能的 DMC1000B 运动控制

卡搭建了控制电路。该控制卡以 PCIe 接口与上位机完成通信, 通过输出高精度的脉冲指令, 使旋转台的步进电机旋转, 进而实现角度的精确控制。上位机控制软件基于 C# 语言开发, 通过调用运动控制卡的动态链接库 (Dynamic Link Library, DLL) 与光谱仪的软件开发工具包 (Soft Development Kit, SDK) 实现转臂的角度控制和光谱的采集控制。最终, 基于上述集成方案, 构建了完整的自动测量系统, 具体的框架如图 5(a) 所示。系统由运动控制子系统 (解析用户输入的角度序列, 生成相应的电机控制指令)、光谱采集子系统 (在指定角度触发光谱仪, 完成原始光谱数据的获取)、数据处理与显示子系统 (负责对采集到的原始光谱数据进行实时显示、清除与拟合)、人机操作子系统 (提供图形化的操作界面, 允许用户设置测量参数, 并一键启动自动化测量流程) 等四部分组成。

在测量时,用户仅需在人机操作界面(图 5(b))设定参数并启动程序。软件将自动执行以下流程:驱动转臂旋转至目标角度、触发光谱仪采集、接收并保存光谱数据和循环至下一角度,直至完成全部序列的测量。这套软硬件集成方案,将复杂的手动操作转化为高效、可靠的自动化过程,保证了测量数据的一致性与准确性。

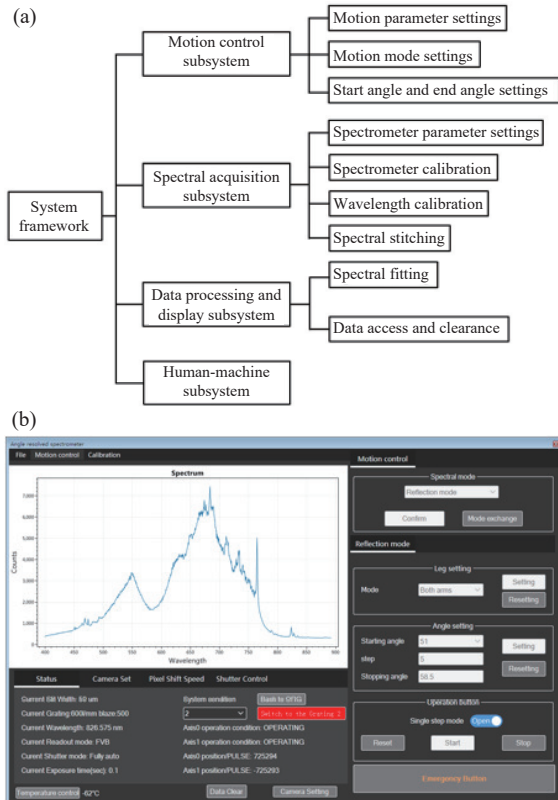


图 5 系统框架。(a) 各模块功能框架;(b) 人机操作界面
Fig. 5 System Framework. (a) Functional framework of each module; (b) human-machine interface

3 系统性能表征与应用验证

完成仪器的设计与制造后,需要通过实验对仪器的性能展开研究。本文对所搭建的仪器进行了稳定性测试和角分辨率测试,并在此基础上,通过对一维金属光栅与金属表面二维周期纳米结构样品的测试,验证了系统的整体性能。

3.1 系统稳定性测试

系统的稳定性决定了仪器在长期测量过程中的可靠性。因此,本文分别对光源输出稳定性与系统信号收集稳定性进行了量化测试。为了能够精准评估系统的性能,本文引入变异系数(Coefficient of Variation, CV)作为整体评价指标,即多次测量结果的标准差(Standard Deviation, SD)与平均值(Mean)的百分比。该比值越小,表明相对波动越小,系统越稳定。

对于光源稳定性测试,通过建立光源与光功率探测头之间的直接联系完成测量,如图 6(a)所示。实验以 40 分钟为一个测试周期,每分钟记录 1 次光功率数据,共进行三个周期的测试,测试结果如图 7(a)所示。经计算,三个周期的平均 CV 值为 0.21%。

对于信号收集稳定性测试,需要将激发与收集光路接入测试模块,如图 6(b)所示。在 7.5° 至 60° 的角度范围内,以 1.5° 为步长进行扫描,测量反射的光功率值,并重复 5 次以评估重复性,测试结果如图 7(b)所示,所检测到的平均 CV 值为 0.33%。

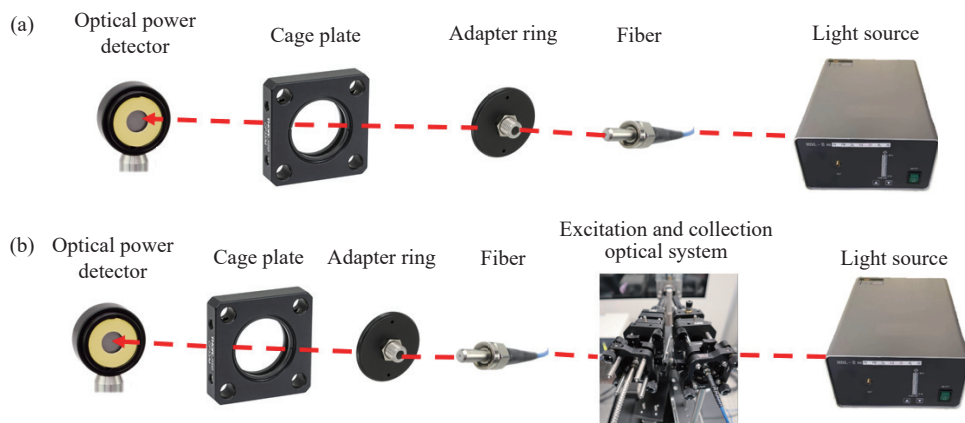


图 6 光功率测试模块。(a) 光源稳定性测试模块;(b) 信号收集稳定性测试模块

Fig. 6 Optical power testing module. (a) Light source stability testing module; (b) signal collection stability testing module

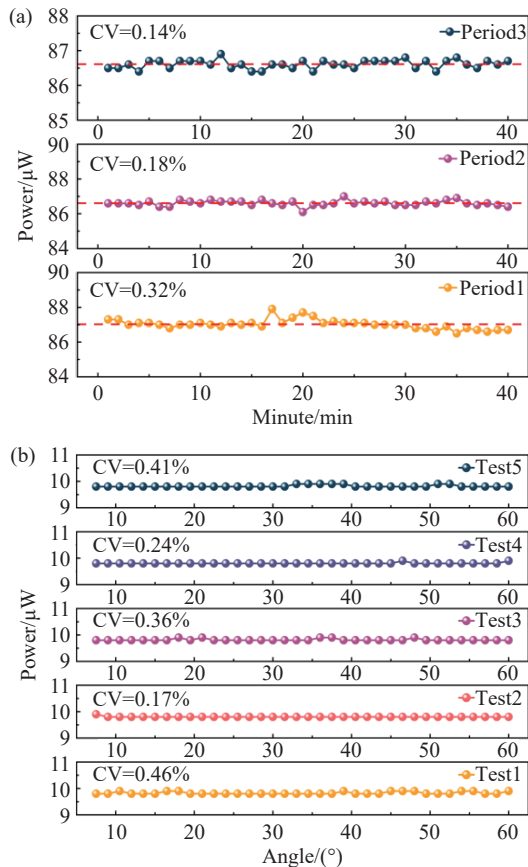


图 7 系统的稳定性测试结果。(a) 光源稳定性; (b) 信号收集稳定性

Fig. 7 Stability test results of the system. (a) Light source stability; (b) signal collection stability

以上数据表明, 系统在光源输出与信号收集方面的信号波动较小, 有较高的稳定性, 能够满足实验需求。

3.2 系统角分辨率的实验测定

系统的角分辨率决定了仪器测量的上限。对于本系统而言, 系统的角分辨率 θ_{sys} 是光路模块的有效角分辨率 θ_{opt} 与机械模块的有效角分辨率 θ_{mech} 共同作用的结果:

$$\theta_{sys} = \max(\theta_{opt}, \theta_{mech}) \quad (1)$$

光路模块的有效角分辨率 θ_{opt} 决定了系统的分辨极限。因此, 本文基于如图 8(a) 所示的点扩散函数(Point spread function, PSF)概念与几何投影原理, 计算了光路部分的有效角分辨率 θ_{opt} , 计算公式如下:

$$\theta_{opt} = \arctan\left(\frac{R}{f}\right) \quad (2)$$

其中, R 代表物镜所能够分辨的最小尺寸, f 代

表物镜的焦距。物镜的焦距可根据式 (3) 计算得到:

$$f = M \times WD \quad (3)$$

由物镜参数可知, 放大倍率 $M=1$, 工作距离 $WD=94 \text{ mm}$ 。经计算, 可得物镜的实际焦距为 94 mm 。鉴于物镜为双远心结构, 物方焦距与像方焦距大小一致。进一步, 已知物镜的分辨率为 165 lp/mm , 因此, 根据瑞利判据^[19], 光路能够分辨的最小尺寸 $R=1/(2 \times 165)$, 即 $3 \mu\text{m}$ 左右。代入式 (2), 可得有效角分辨率 θ_{opt} 为 0.002° 。

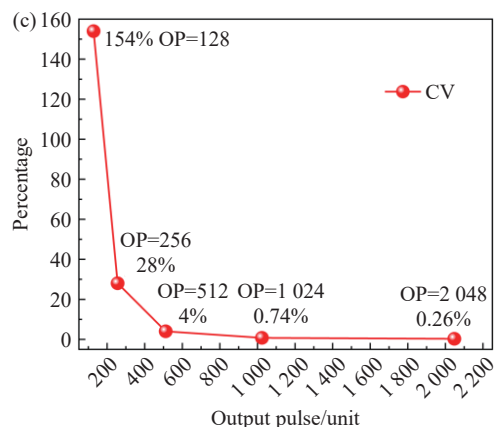
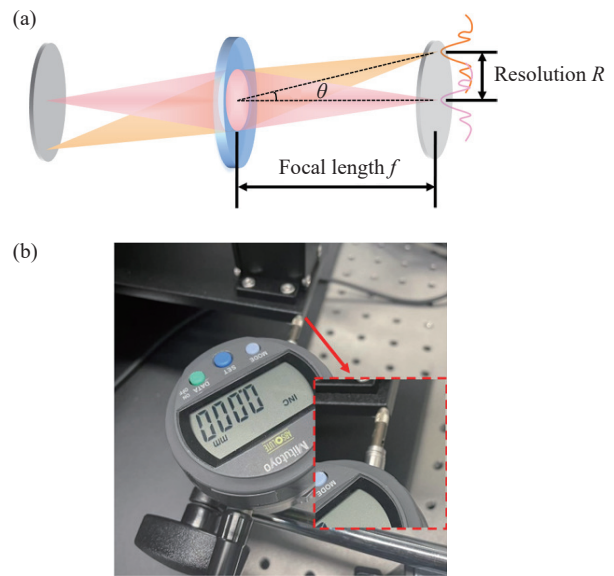


图 8 角分辨率测试。(a) 理论模型; (b) 测试模块; (c) CV 曲线

Fig. 8 Angular resolution testing. (a) Theoretical model; (b) testing module; (c) CV curve

机械模块的有效角分辨率 θ_{mech} 是光学分辨能力落地的必要执行保障, 由电动转台决定。当

系统驱动器处在理想的高细分模式时,单脉冲能够控制的最小角度分辨率为 0.00006° 。但在实际应用过程中,机械系统会受到负载、传动摩擦等因素的影响,导致单脉冲的控制精度无法达到理论值,进而影响 θ_{mech} 。

为精确测量系统的有效角分辨率,本文设计了如下实验:使用日本三丰 Mitutoyo 543-394B 千分表垂直顶住转臂最外侧边缘(测试模块如图 8(b)所示),通过测量转臂最外侧点的线性位移来反演角位移。实验时,通过对旋转台输出特定数量的脉冲信号,驱动转臂进行单向微动,记录千分表读数后返回初始位置并回零,该过程在每个脉冲数下均重复 10 次。同样的,引入 CV 值(位移标准差/平均位移)作为步进运动稳定性的评价指标。CV 值越小表明步进重复性越好,运动越稳定。测试结果如图 8(c)所示,当单次输出脉冲(Output pulse, OP)为 128 时, CV 值高达 154%,表明步进运动极不稳定,存在显著的随机误差;当脉冲输出增加到 2048 次时, CV 值显著降低并稳定在 0.26%,且可从图中的趋势可知,脉冲输出越大越趋于稳定。此时, $\theta_{\text{mech}}=0.12^\circ$

综上所述,机械模块的有效角分辨率 θ_{mech} 远大于光路模块的有效角分辨率 θ_{opt} ,因此,可视系统的角分辨率 θ_{sys} 为 0.12° 。该角度增量能够确保仪器实现可靠的角分辨光谱测量。

3.3 系统的可靠性实验验证

为验证本系统测量的可靠性,本文选用周期性纳米结构——一维光栅作为标准样品进行测试。当入射光满足波矢匹配条件时,可在金属与电介质界面产生表面等离子激元共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)效应。在反射光谱上表现为明显的吸收峰,其峰位与入射角度和波长

之间存在明确的对应关系。通过将测试结果与理论数值模拟结果进行对比,即可验证仪器的可靠性。

实验样品为使用聚焦离子束(Focus Ion Beam, FIB)光刻技术制备的金表面、银表面一维光栅,光栅周期为 570 nm,深度约为 100 nm。根据光栅衍射理论,可以得到入射角 θ 与入射光波长 λ 之间的关系如下:

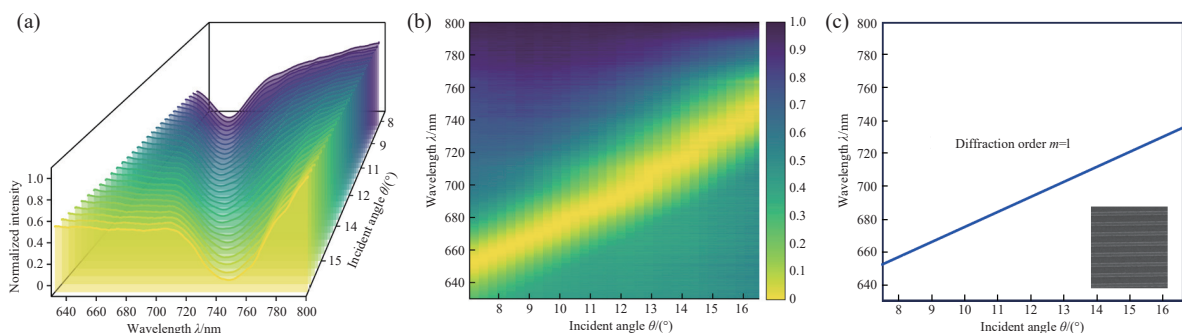
$$\sin \theta = \sqrt{\frac{\epsilon_a \epsilon_m}{\epsilon_a + \epsilon_m}} - m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (4)$$

$$\sin \theta = -\sqrt{\frac{\epsilon_a \epsilon_m}{\epsilon_a + \epsilon_m}} - m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (5)$$

其中 m 代表衍射级次(当 $m>0$ 时,使用式(4)进行计算;当 $m<0$ 时,使用式(5)进行计算), Λ 代表光栅周期, ϵ_m 和 ϵ_a 分别为金属和介质的介电常数。在本实验中,介质为空气($\epsilon_a=1$),而金、银的介电常数可以根据 Drude 模型^[20] 计算得到。

实验时,系统激发角度从 7.2° 增大至 16.5° , 单次步进为 0.3° 。由于光源不同特征谱线在不同波长下的强度值差异较大,为消除其对反射谱形的影响,实验同时采集了金膜和银膜(非光栅部分)的反射光谱作为参考,将光栅结构的角分辨反射光谱与对应金属膜的参考光谱相除,消除不同波长强度差异带来的影响,并进行归一化处理。

最终的实验结果与理论计算结果如图 9 所示。使用本仪器测试所得到的角分辨反射光谱表征结果与理论数值模拟表现出高度的相似性,各衍射级次下的吸收峰位置与理论预测结果吻合,证明了本系统测量结果的准确性和可靠性。



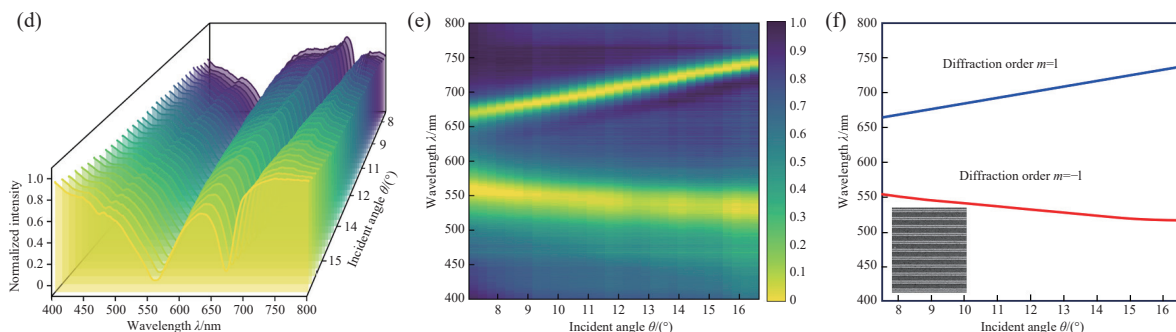


图 9 (a) 银表面一维光栅角分辨光谱图; (b) 银表面一维光栅角分辨强度图; (c) 银表面一维光栅理论数值模拟结果; (d) 金表面一维光栅角分辨光谱图; (e) 金表面一维光栅角分辨强度图; (f) 金表面一维光栅理论数值模拟结果

Fig. 9 (a) Angle-resolved spectra of one-dimension grating on silver; (b) angle-resolved intensity of one-dimension grating on silver; (c) theoretical numerical simulation results of one-dimension grating on silver; (d) angle-resolved spectra of one-dimension grating on gold; (e) angle-resolved intensity of one-dimension grating on gold; (f) theoretical numerical simulation results of one-dimension grating on gold

3.4 系统的微区域表征能力测试

为充分验证本系统微区域光斑的测量性能, 展现其降低平均效应的能力。本文完成了同类型仪器的对比实验, 具体实验如下: 使用本仪器(系统激发光斑尺寸为 $32\ \mu\text{m}$)与 RC2 型椭圆偏振光谱仪(系统激发光斑尺寸约为 $300\ \mu\text{m}$)对同一金表面二维周期纳米结构样品进行角分辨反射光谱的采集, 入射角度为 $51^\circ\sim 75^\circ$, 步长为 3° , 通过对光谱数据的二次处理, 验证系统在性能上的提升。

由于二维周期纳米结构阵列被广泛应用在表面等离激元共振传感领域中, 而传感性能的品质因子 (Figure of Merit, FOM) [21] 可以通过 (6) 计算得到:

$$FOM = \frac{S}{FWHM}, \quad (6)$$

其中, S 代表传感器的灵敏度, 由电场强度决定; $FWHM$ 代表谱峰半高全宽, 反映了 SPs 结构能够分辨出的最小折射率变化值。因此, 通过测定

$FWHM$ 的数值即可评估待测样品的折射率分辨能力, 也能量化本系统微区域光斑所带来的优势。

具体的, 如图 10(a) 与图 10(b) 所示, 两者在相同的角度下均探测到了基于局域表面等离激元共振 (Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 效应产生的吸收峰, 且各角度下的峰位置基本一致。通过对比分析可知, 本系统所测得的光谱信号对比度更高, 光谱线性更加清晰锐利, 且在不同波长下的光谱强度更为均衡, 也从侧面印证了本系统具有比商用仪器更高的稳定性。

进一步的, 本文对所得到的光谱数据进行了 $FWHM$ 计算, 计算结果如图 10(c) 所示。结果表明, 本系统所测得的各个角度下的 $FWHM$ 值均小于 RC2 型光谱型椭圆偏仪。这一差异源自于两者入射光斑尺寸的巨大差异。光斑越大, 更大的结构覆盖范围将掩盖掉结构的部分本征特性, 所测得的光谱信号更倾向于空间平均信号, 这将导致 $FWHM$ 的数值变大。

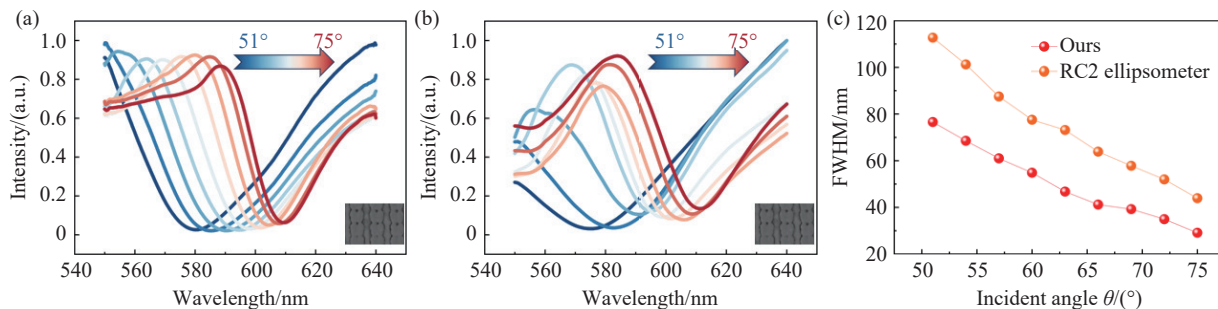


图 10 反射光谱测量结果。(a) 本系统测量结果; (b) 椭圆仪测量结果; (c) FWHM 的变化曲线

Fig. 10 Reflectance spectrum measurement results. (a) Measurement results of the proposed system; (b) measurement results of the ellipsometer; (c) FWHM variation curve

当激发角度向掠角增大时,光斑也将被不断地拉伸,其覆盖区域远大于微纳结构本身,从而引入了大量来自于平整金膜的反射信号,影响测量结果。最终,本仪器所测定的 FWHM 数值比 RC2 型光谱型椭偏仪降低约 33%,能够更加真实地反映对应待测样品的本征属性,为表面等离子共振传感领域提供一种更有效的测量方法。

4 结 论

本文成功研制了一台兼具大测量角度范围与微区域光斑的角分辨光谱测量系统。构思了一种基于有限共轭的光路模型,提升了光斑的空间分辨率(32 μm)。设计了基于同轴转臂的角分辨光谱机械系统,使系统能够在高度同轴的情况下实现大角度范围的运转(6.9°–90°)。完成了从光机设计、软硬件集成到性能表征的全流程工作。系

统的稳定性测试与角分辨率测试结果表明,系统具备较高的稳定性,最小角度分辨率为 0.12°。通过对一维金属光栅与二维金属纳米结构的测量实验,进一步验证了系统在测量上的可靠性及其在微区域光谱探测中的优势。

需要指出的是,系统在实现上述性能的同时也存在一定的适用边界:首先,为兼顾微区光斑与大角度扫描,光路复杂度提升,导致光通量有所降低,更适用于线性光学或高反射率样品的表征,对高功率激发的非线性过程存在限制。其次,在接近 90°的掠入射条件下,光束在样品表面的投影光斑明显拉长,可能影响微区定位的准确性,且信号收集效率下降,数据信噪比相应降低。在后续的研究中,将更聚焦于优化光路的传输效率,进一步拓展本仪器在极端光学条件与更丰富材料体系的应用边界。

参考文献:

- [1] ITOH T, PROCHÁZKA M, DONG ZH CH, *et al.* Toward a new era of SERS and TERS at the nanometer scale: from fundamentals to innovative applications[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(4): 1552-1634.
- [2] MINAMIMOTO H, MURAKOSHI K. Surface-enhanced Raman scattering as a probe for exotic electronic excitations induced by localized surface plasmons[J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2020, 22: 186-194.
- [3] 葛梅兰, 王与焱, 李海滨, 等. 拉曼光谱技术在脑胶质瘤检测中的应用研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(5): 995-1013.
GE M L, WANG Y Y, LI H B, *et al.* Application of Raman spectroscopy in the detection of brain glioma[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 995-1013. (in Chinese).
- [4] 陈韶云, 张行颖, 刘奔, 等. 表面增强拉曼光谱基底的种类及其应用进展[J]. *分析化学*, 2024, 52(7): 910-924.
CHEN SH Y, ZHANG X Y, LIU B, *et al.* Classification and application of surface-enhanced Raman spectroscopy substrates[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024, 52(7): 910-924. (in Chinese).
- [5] 林海丹, 宋程程, 穆铭, 等. 基于苯并三唑功能化银/泡沫镍基底的表面增强拉曼光谱峰偏移策略检测痕量铜离子[J]. *分析化学*, 2025, 53(9): 1566-1575.
LIN H D, SONG CH CH, MU M, *et al.* Detection of trace copper ions on benzotriazole functionalized Silver/Nickel foam based on surface-enhanced Raman scattering peak shifting strategy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2025, 53(9): 1566-1575. (in Chinese).
- [6] MENG ZH D, TIAN ZH Q, YI J. Rapid theoretical method for inverse design on a tip-enhanced Raman spectroscopy (TERS) probe[J]. *Optics Express*, 2023, 31(10): 15474-15483.
- [7] VERMA P. Tip-enhanced Raman spectroscopy: technique and recent advances[J]. *Chemical Reviews*, 2017, 117(9): 6447-6466.
- [8] SINEV I, KOMISSARENKO F, IORSH I, *et al.* Steering of guided light with dielectric nanoantennas[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(3): 680-686.
- [9] 王晓坤, 李周, 梁国龙. 基于金属-介质-金属的可调谐窄带完美吸收的研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2024, 17(2): 263-270.
WANG X K, LI ZH, LIANG G L. Tunable narrow-band perfect absorber based on metal-dielectric-metal[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(2): 263-270. (in Chinese).
- [10] HUO ZH CH, CHEN B, WANG ZH, *et al.* Enhanced plasmonic scattering imaging via deep learning-based super-

- resolution reconstruction for exosome imaging[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2024, 416(29): 6773-6787.
- [11] PHILIP A, KUMAR A R. The performance enhancement of surface Plasmon resonance optical sensors using nanomaterials: a review[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2022, 458: 214424.
- [12] YAN S, MA H, BAO Y F, *et al.*. Optical responses of metallic plasmonic arrays under the localized excitation[J]. *Nano Research*, 2024, 17(3): 1571-1577.
- [13] CRUT A, MAIOLI P, DEL FATTI N, *et al.*. Optical absorption and scattering spectroscopies of single nano-objects[J]. *Chemical Society Reviews*, 2014, 43(11): 3921-3956.
- [14] LIU Z W, WU J N, CAI CH, *et al.*. Flexible hyperspectral surface Plasmon resonance microscopy[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 6475.
- [15] TU SH H, RUAN D G, TZENG S D, *et al.*. Optical properties of InGaN/GaN multiquantum wells light-emitting diode with one-dimensional Au nanoparticle grating[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2014, 8(1): 84097.
- [16] MEYER S A, AUGUIÉ B, LE RU E C, *et al.*. Combined SPR and SERS microscopy in the kretschmann configuration[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2012, 116(3): 1000-1007.
- [17] SHEGAI T, MILJKOVIC V D, BAO K, *et al.*. Unidirectional broadband light emission from supported plasmonic nanowires[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 706-711.
- [18] DOMINGUEZ D, ALHUSAIN M, ALHARBI N, *et al.*. Fourier plane imaging microscopy for detection of plasmonic crystals with periods beyond the optical diffraction limit[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(6): 1337-1344.
- [19] 胡鹏涛, 高若谦, 葛明锋, 等. 流动相单分子免疫检测系统的设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(5): 1055-1065.
HU P T, GAO R Q, GE M F, *et al.*. Design of flow-phase single-molecule immunoassay detection system[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 1055-1065. (in Chinese).
- [20] ORDAL M A, BELL R J, ALEXANDER R W, *et al.*. Optical properties of fourteen metals in the infrared and far infrared: Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Mo, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, V, and W[J]. *Applied Optics*, 1985, 24(24): 4493-4499.
- [21] ZHAO X L, CHANG X Y, LIU Y L, *et al.*. Multi-Fano resonances sensing based on a non-through metal-insulator-metal waveguide coupling D-shaped cavity[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1484-1494.

作者简介:



吴祖伟(1997—), 男, 福建泉州人, 助教, 2024年于厦门大学获得硕士学位, 主要从事机器视觉与光学测量方面的研究。E-mail: wuzuwei97@126.com



章文卓(2000—), 女, 福建三明人, 助教, 2024年于厦门大学获得硕士学位, 主要从事机器视觉与数字电路方面的研究。E-mail: zhangwzxm@163.com



王磊(1977—), 男, 安徽合肥人, 教授, 博士生导师, 2007年于合肥工业大学获得博士学位, 主要从事机器视觉、智能制造、图像处理和光谱仪器方面的研究。E-mail: wanglei33@xmu.edu.cn