

文章编号: 1002-1582(2026)01-0007-05

基于斜入射光反射差技术的成像系统设计及应用

宋超, 李慧敏, 张浩, 赵昆, 苗昕扬, 詹洪磊*

(中国石油大学(北京)新能源与材料学院, 北京 102249)

摘 要: 研究提出一种基于斜入射光反射差(OIRD)技术的新型快速成像系统, 应用于表界面物理化学动态过程的高分辨率实时监测。系统包含光源、光路系统、样品台和检测系统四个部分, 在此基础上融合信号处理技术, 实时输出OIRD图像, 实现微米级尺寸的横向分辨率。将OIRD成像系统应用于盐溶液沉积晶体形貌分析、油水乳状液表征、以及表面活性剂液滴蒸发过程中的马兰戈尼涡流, 实现了固体表面静态表征和液体体系动态过程监测, 为表面成像、界面反应、多相体系演化等提供了非标记、高时空分辨的原位表征工具。

关 键 词: 应用光学; 斜入射光反射差; 快速成像; 表面表征; 动态过程; 原位检测

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Design and application of an imaging system based on oblique incidence reflectivity difference technology

SONG Chao, LI Huimin, ZHANG Hao, ZHAO Kun, MIAO Xinyang, ZHAN Honglei*

(College of New Energy and Materials, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: This study proposes a novel rapid imaging system based on Oblique-Incidence Reflectance Difference (OIRD) technology, designed for high-resolution real-time monitoring of physicochemical dynamic processes at surfaces and interfaces. The system comprises four main components: a light source, an optical path system, a sample stage, and a detection system. By integrating signal processing techniques, it enables real-time output of OIRD images and achieves lateral resolution at the micrometer scale. The OIRD imaging system has been applied to analyze crystal morphology in salt solution deposition, characterize oil-in-water emulsions, and investigate Marangoni vortices during surfactant droplet evaporation. It demonstrates capabilities for both static characterization of solid surfaces and dynamic monitoring of liquid systems, thereby offering an unlabeled, in situ characterization tool with high spatiotemporal resolution for surface imaging, interfacial reactions, and the evolution of multiphase systems.

Keywords: applied optics; oblique-incidence reflectivity difference; high-speed imaging; surface characterization; dynamic processes; in situ monitoring

0 引 言

实现对表界面微纳尺度动态物理化学过程进行高时空分辨、非标记、原位实时成像, 是推动能源开发、生物传感及界面科学等领域发展的关键挑战^[1-3]。本研究开发的基于斜入射光反射差

(Oblique-Incidence Reflectivity Difference, OIRD)技术的显微快速成像系统, 正是为满足这一需求提供了一种有效的解决方案。

OIRD技术作为一种新兴的光学界面传感手段, 凭借其非标记、无损、无需荧光标记、设备简易及适用于固液界面等独特优势, 近年来受到

收稿日期: 2025-08-19; 收到修改稿日期: 2025-10-30

作者简介: 宋超(1997—), 男, 博士研究生, 从事光学技术分析研究。18810423153@163.com

詹洪磊(1991—), 男, 副教授, 博士, 从事油气光学研究。

* 通讯作者: zhanhl@cup.edu.cn

广泛关注。该技术通过探测 p 与 s 偏振光反射系数的差异，对表面介电特性的变化极为敏感，已成功应用于分子束外延生长、生物分子相互作用及表界面反应等多个过程的灵敏检测^[4-7]。有研究利用 OIRD 技术对聚苯乙烯薄膜的还原过程进行实时点扫描成像，成功将细菌的电荷传递信息转化为光学信号，从而实现了对外电子传递电流空间分布的测量，并进一步区分与量化了单个细菌的直接电子传递（DET）和介导电子传递（MET）电流^[8]。另有研究借助 OIRD 技术定量分析了油水界面分子氢键密度的分布状态，原位表征了纳米级界面厚度与介电性质的变化，从实验角度揭示了界面不饱和度的分子分布机制^[9]。OIRD 技术还被应用于原位、实时监测开放液面下含蜡原油的蜡成核、生长及结晶过程，首次在自然冷却的开放环境中实现了对蜡出现温度（WAT）与结晶动力学速率的非接触同步检测^[10]。此外，该技术在岩石形貌分析、储层矿物介电特性表征等领域也展现出广泛的应用潜力^[11,12]。

然而，传统 OIRD 技术受限于单点测量或逐点扫描模式，数据通量低、采集速率不足，虽可精准记录时间维度变化，却难以捕捉动态过程中空间异质性及快速演化特征，如蒸发对流涡旋、结晶成核前沿或流体界面波动等瞬态现象。这种“以时间换空间”的测量模式制约了 OIRD 在快速、非均相界面过程研究中的进一步应用。值得注意的是，其他表面检测技术如表面等离子共振（SPR）^[13]和椭圆偏技术^[14]，通过与显微成像融合已发展出 SPR 显微术^[15]与成像椭圆偏术^[16]，显著提升了空间成像与高通量表征能力。基于此，为满足界面动态过程研究对高时空分辨成像的迫切需求，本研究在传统 OIRD 技术基础上，创新性地融合显微光学设计与高速信号采集方案，成功设计并研制出显微 OIRD 快速成像系统，为实现表界面动态过程的高帧率、高分辨率原位表征提供了有效手段。

1 OIRD 成像系统基本原理

OIRD 技术的核心原理基于对 p 偏振光和 s 偏振光反射率差异变化的测量，以此获取样品表面的特性信息。根据菲涅尔定律，在固定入射角条件下，偏振光的反射率取决于样品表面的介电常数及其厚度。由于样品表面成分、结构或密度的变化会直接改变其介电常数，因此，通过监测 s 和 p 偏振光反射率的相对变化量，OIRD 技术能够实现样品表面成分、结构、密度等物理参数的实

时检测^[17,18]。

OIRD 检测系统采用经偏振调制的激光光源，其 p 偏振分量与 s 偏振分量在时域上交替入射样品表面。当双偏振光与表面相互作用时，介电常数的空间分布差异导致反射系数产生位置依赖性变化。通过精确测定样品表面不同区域 p 偏振光与 s 偏振光反射系数的相对变化值，即可构建表面介电常数分布的定量图谱。

设定被测样本某一处非动态位置为基准位置，该位置对 p 和 s 偏振光的反射率分别用 r_{p0} 和 r_{s0} 表示，其他位置处的反射率分别用 r_p 和 r_s 来表示。根据菲涅尔定律能够得到如下关系式

$$r_{p0} = |r_{p0}| e^{i\phi_{p0}}, r_{s0} = |r_{s0}| e^{i\phi_{s0}} \quad (1)$$

$$r_p = |r_p| e^{i\phi_p}, r_s = |r_s| e^{i\phi_s} \quad (2)$$

通过计算可得到 p 和 s 偏振光反射率的变化率，基于此，定义斜入射光反射差为 p 和 s 偏振光反射率的变化率的差值，用 $\Delta p - \Delta s$ 表示，则

$$\Delta p - \Delta s = \frac{r_p - r_{p0}}{r_{p0}} - \frac{r_s - r_{s0}}{r_{s0}} = \frac{\delta r_p}{r_{p0}} - \frac{\delta r_s}{r_{s0}} \quad (3)$$

I_{DC} 为直流信号， I_Ω 和 $I_{2\Omega}$ 分别为基频信号和倍频信号，根据矩阵光学理论，用传输矩阵可以得到探测器最终接收的光强

$$I = I_{DC} + I_\Omega + I_{2\Omega} \quad (4)$$

2 OIRD 成像系统的建立过程

OIRD 成像系统按照功能分为光源、光路系统、样品台和检测系统和信号与处理系统五个部分，如图 1 所示，光源部分可分为激光光源和衰减片两部分，设备采用的是波长为 632.8nm 的 He-Ne 激光器。

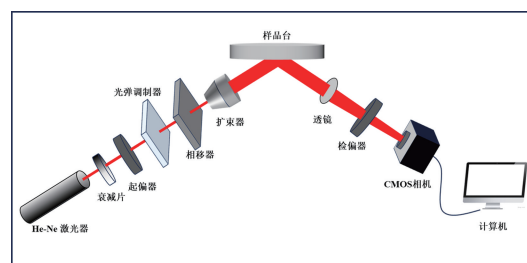


图 1 OIRD 快速成像系统示意图

光学调制组件包含核心功能单元：起偏器将其透光轴严格对准入射平面，将入射激光调制为线性 p 偏振态；光弹调制器（PEM）以 50kHz 基频对光束施加周期性应力双折射调制，实现 s 偏振态与 p 偏振态的时分交替切换；扩束系统将高斯光束准直扩束为均匀面阵光斑，确保完整覆盖 CMOS 成像靶面； $\lambda/4$ 波片在正交偏振分量间引入相位延迟；光束通过透镜组被引导并以布鲁斯特角（58°）

照射于样品表面。通过更换不同焦距的透镜组,系统成像视场可以在约 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 至 $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的范围内变化。样品反射光束经由一个焦距为 150mm 的准直透镜收集,随后通过检偏器导入CMOS探测器。透镜组最终将光束以布鲁斯特角(58°)照射于样品表面。通过调整光路中的透镜组,成像视场可以在约 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 至 $6\text{mm}\times 6\text{mm}$ 的范围内变化,样品反射光束经等焦距(150mm)准直透镜收集后,通过检偏器导入CMOS探测器。

本系统采用500万像素、60Hz的CMOS相机^[19]作为探测器。其曝光时间远长于PEM的调制周期,使得相机采集的每帧图像实质上是调制光强的时间积分结果,直接对应于直流分量 I_{DC} 的空间分布。随后,通过数字图像处理技术对以 I_{DC} 为主的序列图像进行分析,提取由表面变化引起的光强波动,最终实现高速OIRD成像,突破了传统点扫描的速率限制。

3 OIRD成像系统的应用

3.1 对固体沉积物的表征

本文对盐溶液液滴的气化过程以及气化后的沉积图案进行表征。本实验所使用的NaCl与KCl溶液浓度均为 0.1mol/L ,液滴沉积实验在 25°C 、常压下进行。图2(a)是NaCl液滴气化开始50s时捕捉的图像,图像显示液滴呈椭圆形或泪滴形,表明基底表面性质与蒸发动力学共同调控初始形态;沉积边缘清晰但存在微不规则性,反映溶质在蒸发初期快速固定边界的行为。图2(b)是NaCl液滴气化后的沉积图案,图案呈现出较为规则的圆形轮廓,沉积物质基本保持了液滴原有边界范围,图案内部布满了复杂的晶体结构,有的呈现出细长的针状,有的则是较为规则的块状,针状晶体相互交错,块状晶体则零星地分布在针状晶体之间,针状晶体的排列具有一定的方向性,从图案中心向四周呈放射状或不规则的交织状分布,显示出晶体生长的过程。图2(c)是KCl液滴气化开始50s时捕捉的图像,呈现类椭圆形结构,与图2(b)相似。图2(d)是KCl液滴气化2600s时捕捉的图像,气化已经结束,为显示细节将其局部放大,沉积图案表现为高度不规则块状形貌,显示短时蒸发引发溶质快速沉积导致的形态失稳;边缘轮廓显著崎岖并伴随尖角化条纹,指示方向性结晶生长主导过程。整体图案呈非均匀分布,局部深色斑块对应溶质富集或致密结晶微区。

本系统动态过程监测能力,弥补了传统SEM

受限真空环境和电子束损伤仅提供静态图像的不足,支持实时原位观测可追踪如液滴蒸发过程中晶体成核、定向生长等动态演变,为研究相变动力学提供了新视角,在生物界面实时监测细胞膜蛋白动态分布、柔性电子器件中表征应力诱导的聚合物薄膜微裂纹扩展、以及催化材料表面活性位点氧化还原态动态追踪等领域,其高效、无损且适用于绝缘体样品的特性,为更广泛的表面与界面过程研究提供了强有力的表征工具。

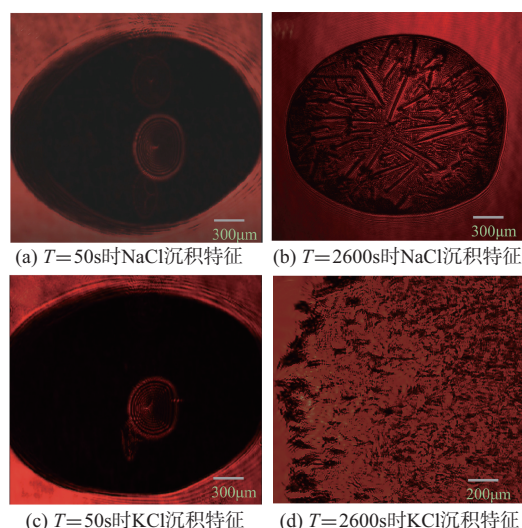


图2 OIRD成像系统得到的盐溶液液滴沉积状态

3.2 对油水乳状液表面的表征

既往对乳状液的微观表征常受限其动态不稳定性及电子显微镜在液态样本观测中的固有困难。本研究油水乳状液由原油与去离子水按体积比制备,通过实验室搅拌器进行乳化,搅拌速率为 300rpm ,搅拌时间30与50分钟,成功制备了含水率分别为50%和30%的油水乳状液,并利用OIRD快速成像系统进行观测,结果见图3,乳化与观测过程均在 25°C 的恒温环境下进行。在30%含水率条件下搅拌30分钟所对应的图3(a)中,液滴分布呈现显著非均质性,聚集现象明显,稳定的界面膜尚未有效形成,体系流动性较高;当搅拌时间延长至50分钟对应的图3(b)显示,液滴分布均匀性有所改善,界面膜覆盖率显著增加,液滴间界限趋于清晰。对于含水率50%的体系,搅拌30分钟对应的图3(c),受较高原油含量影响,体系反光性能相对较弱,但其表面初步形成均质化分布,液滴尺寸分布相对集中,形态接近球形;继续搅拌至50分钟对应的图3(d)则观察到,乳状液表面分散高度均匀,液滴间发生接触与挤压形成紧密堆积结构,分散相与连续相间界面清晰可辨,液滴尺寸主要分布于 100 至 $350\mu\text{m}$ 区间。综上,该OIRD成像系统能够精确表征乳状液

表面的微米级微观结构, 清晰捕捉液滴的形状、尺寸等形态学特征及其拓扑关系, 为深入解析乳状液的微观特性提供了丰富的结构信息。

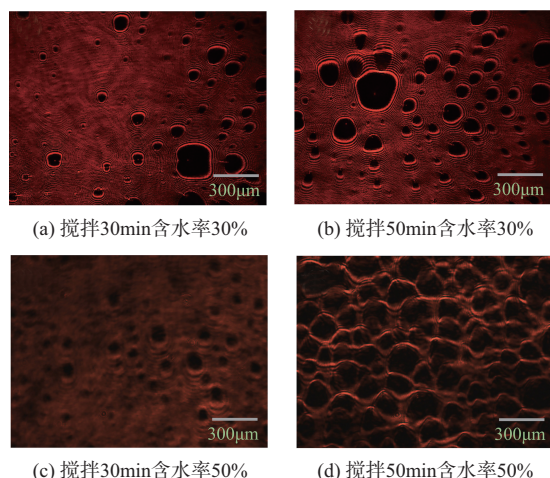


图3 OIRD系统观测油水乳状液表面

OIRD技术的非侵入性与对液体原位检测的优势, 未来可应用于实时监测深海输油管道中水合物界面生长以预警堵塞风险, 在生物医药领域实现无标记追踪脂质体药物胞吞过程等。

3.3 对SDS液滴气化过程中马兰戈尼效应的表征

利用OIRD快速成像系统对浓度为0.6mmol/L的阴离子表面活性剂SDS溶液的蒸发过程中出现的马兰戈尼效应^[20]进行实时监测。

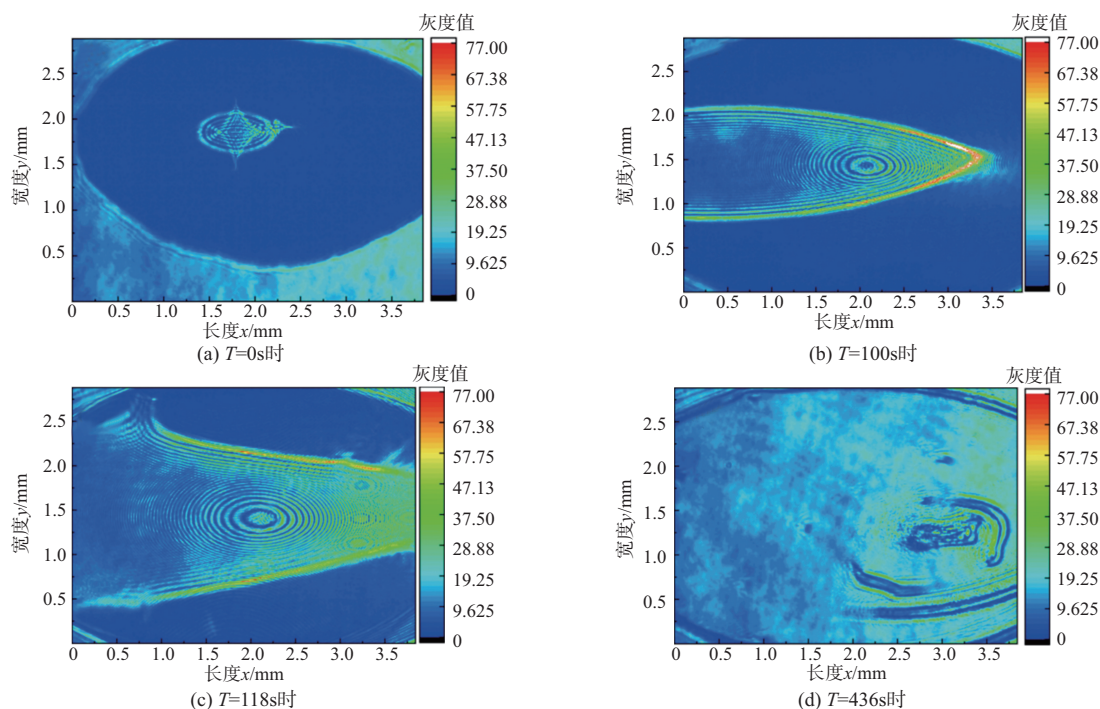


图4 SDS溶液液滴蒸发过程中马兰戈尼效应的OIRD动态观测图

总体而言, 图中通过灰度值的变化清晰地展示了SDS溶液在蒸发过程中, 由于表面张力差异引发的马兰戈尼效应, 该效应导致溶液内部形成对流,

在图4(a)中, 灰度值对应的是光强信号直流分量, 体现介电常数与表面微观起伏的变化。溶液刚刚开始蒸发, 整体分布相对较为均匀, 但在中心区域可以观察到一些细微厚度差异, 这可能是由于溶液内部的初始不均匀性或表面张力微小差异导致的, 此时, 马兰戈尼效应开始体现。随着蒸发的进行, 如图4(b)所示, 溶液表面开始出现明显的浓度或厚度梯度。在溶液的前沿, 可以看到颜色较亮的区域, 表明此处溶液较薄或浓度较低; 而在中心区域, 颜色较暗, 说明溶液较厚或浓度较高。这种分布是由于蒸发导致溶液表面不同区域的表面张力出现差异, 表面张力较低的区域会吸引周围液体向其流动, 形成对流, 即马兰戈尼效应。这种对流使得溶液从中心向边缘流动, 补充因蒸发而减少的液体。到图4(c)时, 蒸发进一步加剧, 马兰戈尼效应更加明显。溶液前沿进一步向外扩展, 同时内部的浓度或厚度梯度更加显著, 形成了规则的环形波纹结构。在图4(d)中, 蒸发接近尾声, 溶液的分布发生了较大变化。中心区域由于持续的蒸发和对流作用, 形成了较为复杂的结构, 而溶液前沿的扩展速度减缓。此时, 马兰戈尼效应仍然存在, 但由于溶液量的减少, 对流强度可能有所减弱, 整体分布趋于不稳定, 出现了不规则的斑块和纹理。

从而影响了溶液的浓度或厚度分布, 并随着蒸发的进行呈现出不同的形态特征。OIRD快速成像系统以其高分辨率和实时监测能力, 还可用于实时监测

新型功能材料制备过程中类似由表面张力差异引发的物质输运现象,助力优化材料合成工艺,提升材料性能;在生物医学方面,能帮助观察生物溶液或细胞培养液中的表面张力驱动流动,为理解生物分子相互作用、细胞生理过程等提供新视角。

4 结 论

本研究设计并搭建了基于斜入射光反射差(OIRD)技术的快速成像系统。该系统结合显微成像技术与信号处理技术,实现了60Hz帧率下的快速成像,单次成像即可覆盖 36mm^2 的区域,而传统扫描方式需耗时10分钟,同时具备微米级横向分辨率。系统应用于:盐溶液结晶形貌分析、油水乳状液微观结构观察、以及表面活性剂液滴蒸发过程中马兰戈尼涡流的动态捕获。该非标记、高时空分辨成像技术为能源开发、生物传感、界面科学及材料合成等领域的动态过程研究提供了强有力的工具。未来工作将聚焦于通过集成大视场物镜来扩大成像面积,并探索开发多波段OIRD成像系统,以及实现对基频与倍频信号的同步测量,以增强其对不同材料的表征能力。

参考文献:

- [1] Wang K, Guo L, Xu C, et al. Analysis of the current development status and application prospects of coal reservoir micro-structure characterisation technology[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 221:115939.
- [2] Wu X, Zhu C, Wang Y, et al. Micro/nano lasers for biomolecular sensing and cellular analysis[J]. *Photonic Sensors*, 2024, 15:250123.
- [3] Huang H, Wang C, Liu G. Tailoring the interface structures of micro-nano materials for electrochemical and biomedical applications: a review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1035:181532.
- [4] Zhu X D, Wicklein S, Gunkel F, et al. In situ optical characterization of LaAlO_3 epitaxy on $\text{SrTiO}_3(001)$ [J]. *Europophys Letters*, 2015, 109(3):59902.
- [5] Li M, Li X, Ji D, et al. Label-free OIRD detection of protein microarrays on high dielectric constant substrate with enhanced intrinsic sensitivity[J]. *Talanta*, 2024, 276:126201.
- [6] Li X, Wu S, Feng Z, et al. Label-free and real-time optical detection of affinity binding of the antibody on adherent live cells[J]. *Analytical Chemistry*, 2024, 96(3):9.
- [7] Song C, Jin W J, Leng W X, et al. Nanoscale probing of salt-modulated HPAM oil - water interface adsorption: Stability mechanism of interface films[J]. *Results in Engineering*, 2025, 27:105707.
- [8] Qian S, Wang C, Fang C, et al. Disentangling extracellular current of electroactive bacteria with oblique-incidence reflection difference imaging[J]. *Nature Communications*, 2025, 16:7032.
- [9] Meng Z, Zheng H, Qin F, et al. Mechanistic study of the effect of hydrocarbon unsaturation on the distribution state of water molecules at the oil-water interface by oblique incident reflectance difference technique[J]. *Energy*, 2023, 276:127658.
- [10] Qing M, Liu J, Huang Q, et al. In situ probing of wax precipitation of waxy oil using oblique-incidence reflectivity difference at open bulk surface[J]. *Fuel*, 2022, 316:123436.
- [11] Zhan H L, Wang J, Zhao K, et al. Real-time detection of dielectric anisotropy or isotropy in unconventional oil-gas reservoir rocks supported by the oblique-incidence reflectivity difference technique[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):39306.
- [12] Wang J, Zhan H L, He L P, et al. Evaluation of simulated reservoirs by using the oblique-incidence reflectivity difference technique[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2016, 59(11):114221.
- [13] 赵静涛, 张振兴, 孙响, 等. 基于光纤SPR的表面增强荧光特性研究[J]. *光学技术*, 2024, 50(04):508—512.
Zhao Jingtao, Zhang Zhenxing, Sun Xiang, et al. Research on surface enhanced fluorescence characteristics based on fiber SPR[J]. *Optical Technology*, 2024, 50(04):508—512.
- [14] 吴传超, 苏宏锦, 张治祥, 等. 基于傅里叶红外光谱分光的椭圆薄膜测量技术[J]. *光学技术*, 2025, 51(02):252-256.
Wu Chuanchao, Su Hongjin, Zhang Zhixiang, et al. Elliptical thin film measurement technology based on Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Optical Technology*, 2025, 51(02):252—256.
- [15] Wang Q, Zhang X R, Li Q, et al. Anti-allergic drug screening in single living mast cells by means of a novel surface plasmon resonance imaging system[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 404:135286.
- [16] 张裕, 连洁, 魏铭洋, 等. 椭圆成像技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10):11—22.
Zhang Yu, Lian Jie, Wei Mingyang, et al. Research progress on ellipsoidal imaging technology[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2022, 59(10):11—22.
- [17] 刘爽. 用斜入射光反射差法无标记研究蛋白相互作用的动力学过程[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
Liu Shuang. Study on the dynamic process of protein interaction with the method of oblique incidence light reflection difference without label[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [18] 孟昭晖. 基于斜入射光反射差技术的油水界面分子团簇结构的调控机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
Meng Zhaohui. Research on the control mechanism of molecular cluster structure at oil water interface based on oblique incident light reflection difference technology[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2023.
- [19] 漆艳菊, 赵南京, 张小玲, 等. 基于前向光散射的水体悬浮颗粒物粒度双CMOS测量技术研究[J]. *光学技术*, 2022, 48(06):696—702.
Qi Yanju, Zhao Nanjing, Zhang Xiaoling, et al. Research on dual CMOS measurement technology for particle size of suspended particles in water based on forward light scattering[J]. *Optical Technology*, 2022, 48(06):696—702.
- [20] 魏振林, 王鸿飞, 陈亚亮, 等. 基于Marangoni效应的微气泡/液滴操控[J]. *化学进展*, 2024, 36(10):1541—1558.
Wei Zhenlin, Wang Hongfei, Chen Yaliang, et al. Micro bubble/droplet manipulation based on Marangoni effect[J]. *Advances in Chemistry*, 2024, 36(10):1541—1558.