

离焦对表面等离子激元共振显微成像的影响

霍童^{1,4}, 王靓安², 王雪^{1,3}, 孙晓娟^{1,3}, 孙旭晴^{1,3}, 刘虹遥¹, 黄尚永⁴, 余辉^{2**}, 路鑫超^{1*}, 黄成军^{1,3***}¹中国科学院微电子研究所健康电子研发中心, 北京 100029;²上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200240;³中国科学院大学, 北京 100049;⁴北京建筑大学理学院, 北京 102616

摘要 表面等离子激元共振显微成像 (SPRM) 技术具有高灵敏度、快速实时等优点, 已经被广泛应用于纳米检测、生物医学和环境监测等领域中。由于倏逝场的界面传输特性, 故 SPRM 具有特殊的点扩散函数, 可从中提取出丰富的待测物信息。然而, 离焦成像会影响成像特征, 导致无法准确获取待测物信息。因此, 定量研究离焦对 SPRM 的影响至关重要。通过仿真计算与实验, 定量研究了离焦对 SPRM 的影响, 并实现了单个聚苯乙烯颗粒的 SPRM 成像。所提方法可用于 SPRM 离焦状态的快速判断, 并反推出准确的离焦偏移量, 实现快速对焦, 改善 SPRM 技术在长时程观测中的性能。

关键词 表面光学; 表面等离子激元共振显微成像; 单纳米颗粒; 离焦; 干涉条纹; 定量分析

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2324001

Effect of Defocus on Surface Plasmon Resonance Microscopy

Huo Tong^{1,4}, Wang Liang², Wang Xue^{1,3}, Sun Xiaojuan^{1,3}, Sun Xuqing^{1,3}, Liu Hongyao¹, Huang Shangyong⁴, Yu Hui^{2**}, Lu Xinchao^{1*}, Huang Chengjun^{1,3***}¹Health Electronics Center, Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;²School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;⁴School of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China

Abstract Due to the high sensitivity and real-time detection, surface plasmon resonance microscopy (SPRM) has been widely used in nano-detection, biomedicine, and environmental monitoring. As the evanescent wave propagates along the interface, a special point spread function of SPRM is formed, from which rich information of the analyte can be retrieved. However, the defocus can affect the imaging pattern, which hinders the acquisition of accurate analyte information. As a result, the quantitative study on the effect of defocus on SPRM is crucial. This study quantitatively analyzes the effect of defocus on SPRM both theoretically and experimentally, and realizes the SPRM imaging of single polystyrene nanoparticles. The proposed method can be used to rapidly judge the defocus status of SPRM, retrieve the accurate defocus displacement to achieve fast re-focusing, and improve the SPRM performance in long-term observation.

Key words optics at surfaces; surface plasmon resonance microscopy; single nanoparticle; defocus; interference fringe; quantitative analysis

1 引言

表面等离子激元 (SPPs) 是一种由金属表面自由电子集体振荡而产生的沿金属-介质界面传播的倏逝

波^[1], 具有局域电磁场显著增强的效应。采用 SPPs 作为光源的检测技术, 如表面等离子激元共振 (SPR) 具有高灵敏、免标记和实时定量分析等优势^[2], 故被广泛应用于纳米检测^[3-6]、环境监测^[7]和生物医学^[8-14]等领域中。

收稿日期: 2022-03-31; 修回日期: 2022-05-03; 录用日期: 2022-06-07

基金项目: 中国科学院科研装备研制项目 (YJKYYQ20190056)、2020 年北京高等学校高水平人才交叉培养“实培计划”项目、北京市自然科学基金 (4192063, 4182073)、广州市科技计划 (201604020005)、广东省科技计划 (2016A040403086)、清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放课题 (18K07ESPCT)

通信作者: *luxinchao@ime.ac.cn; **hui.yu@sjtu.edu.cn; ***huangchengjun@ime.ac.cn

SPR 显微成像 (SPRM) 技术进一步结合了 SPR 和显微成像的优势,使 SPR 的检测灵敏度和分辨率得到了极大的提升,将 SPR 从集群分析发展成单颗粒、单分子水平的数字化检测技术。基于 SPRM 的独特优势,研究者已经实现了对单纳米颗粒^[3]、单病毒^[8-9]、脱氧核糖核酸 (DNA) 单分子^[10]、单细胞^[11-13] 和单个石墨烯片^[4] 等纳米级样品的无标记快速成像分析,并发展出了电化学成像^[15-16]、单分子传感^[17-18] 等领域中的前沿技术。单颗粒、单分子的 SPRM 图像具有特殊的条纹形态特征,是由样品引起的 SPPs 局域场增强,以及 SPP 散射波和反射光在远场的干涉形成^[9, 19],进而形成了特殊的点扩散函数^[20]。SPRM 的特征图案中包含了单颗粒、单分子的大量信息,通过直接对干涉图案亮度或条纹分布的分析,可以定量检测粒径^[21]、折射率^[22] 和界面过程^[23]。另一种更准确的方法是基于干涉成像的原理进行图像重建,以直接获取样品的幅值和相位信息^[24-25]。然而,由于使用的大数值孔径油浸物镜景深非常小,故物平面的细微变化就会产生离焦成像,从而导致在不同批次的实验中或在长时程的检测中,以上分析结果会产生较大的失真^[22, 25]。

在前期工作中,本团队对 SPRM 的离焦成像进行了初步研究^[25],发现离焦图像是由散射波与反射波的相对相位变化决定的,并提出了利用全息重建方法进行图像的数字重聚焦,以消除离焦的干扰,但其效果会受到孪生像的干扰和离焦距离未知的限制。针对此问题,本团队还发展了基于深度学习技术的离焦图像重建算法^[26],实现了离焦焦距的自动分析和离焦图像的自动聚焦,但其定量分析效果较差,且深度学习图像处理所用时间较长,故不利于实时反馈离焦距离来进行物理调焦。以上两种方法都未对干涉条纹的分布细节进行量化的分析,而是将其作为整体图案来进行重建。因此,本文通过仿真计算与实验验证对不同离焦位置处单个聚苯乙烯颗粒的 SPRM 条纹图案进行了定量分析,发现条纹极大值间距随离焦量线性变化,故可以将条纹极大值间距作为离焦量快速定量分析的特征参数,为 SPRM 自动聚焦校准提供依据。

2 理论仿真

SPRM 将金属界面处的 SPPs 近场分布经过金-介质结构耦合到远场进行成像,故首先建立仿真成像系统,以对金膜界面处的 SPPs 近场分布进行仿真计算。使用 Lumerical 公司的 FDTD Solutions 软件进行建模仿真^[27],基于 Kretschmann 耦合方式激发 SPPs,建立基底/金膜/空气三层结构,基底介电常数为 $\epsilon_s = 3.1648$,金膜介电常数为 $\epsilon_{Au} = -10.8097 + 0.7896i$,空气介电常数为 $\epsilon_d = 1$ 。设置波长为 633 nm 的总场散射场源 (TSTF) 平面波以 36.5° 角斜入射至基底-金膜界面,激发 SPPs。选取半径为 $r = 100$ nm 的聚苯乙烯颗粒放置在金膜-空气界面上,颗粒折射率为 $n = 1.59$,设定颗粒中心坐标为 $(r, 0, 0)$ 。取金膜界面位置为 $z = 0$ nm,设定探测平面位置为 $z = 5$ nm,设定边界条件为

完美匹配层 (PML),将网格大小设置为 $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ 。仿真模型如图 1 所示,在满足入射光与激发 SPPs 波矢匹配的条件下,可激发 SPPs。模式匹配条件为 $k_x = \sqrt{\epsilon_s} k_0 \sin \theta = k_{SPP}$,其中 k_0 为入射光波数, k_x 为高折射率基底-金界面处 x 方向波矢分量, θ 为 SPP 激发角, $k_{SPP} = k_0 \sqrt{\epsilon_{Au} \epsilon_d / (\epsilon_{Au} + \epsilon_d)}$ 为 SPPs 波数。计算得到入射角度为 36.5° ,满足 SPPs 激发的波矢匹配条件,进而可激发 SPPs。

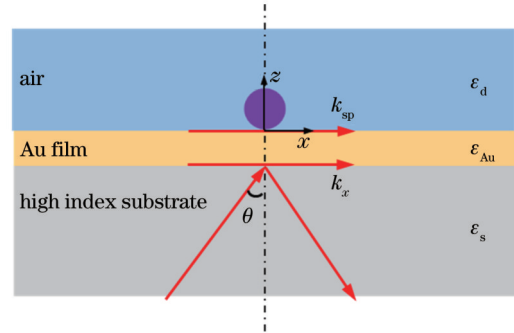


图 1 基于 Kretschmann 耦合方式激发 SPPs 的仿真模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of simulation model of SPPs excitation based on Kretschmann configuration

仿真得到的半径为 $r = 100$ nm 的单个聚苯乙烯颗粒在金膜-空气界面引起的 SPPs 场分布如图 2(a) 所示。可以看出,仿真图像中包含颗粒中心局域场增强和 SPPs 散射引起的干涉条纹。当 SPPs 沿界面传播,并与金属-介质界面处纳米颗粒相互作用时,纳米颗粒引起沿界面传输的 SPPs 散射与激发 SPPs 产生干涉,从而产生明暗相间的同心抛物线形干涉条纹。从文献^[22]中分析可知,干涉条纹周期为 SPPs 的半波长。由此可知,激发波长、基底折射率、金属介电常数和界面处介质的介电常数均会影响干涉条纹的周期。此外,文献^[28]研究表明,干涉条纹还受到纳米颗粒材料、尺寸与形状的影响。

如图 2(b) 所示,基于 $4f$ 成像系统,进一步计算离焦对 SPPs 的影响,其中 Δz 为离焦量, z_1 和 z_2 分别为加入离焦量后物平面到透镜等效面的距离。将仿真得到的如图 2(a) 所示的金膜/空气界面附近的 SPPs 场分布作为物平面,该物平面位于对焦平面 z_0 处,经过 L1 (焦距为 $f_1 = 1.8$ mm) 与 L2 (焦距为 $f_2 = 350$ mm) 两个透镜组成的 $4f$ 系统,在像平面处得到远场成像。使用角谱法近似成像过程,物平面光波 H 与反射波 R 一同传播至像平面处,在 Matlab 软件中对成像结果进行了计算。让物平面的 SPPs 散射与反射波的相位沿 z 轴改变,可得到像平面处的频域复振幅分布,经傅里叶逆变换后可得到像平面处的空间成像 $O(r, z)$ ^[25],其表达式为

$$O(r, z) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left[|H(r, z_0)|^2 R(r, z_0) \right] M \times \exp \left[-i \sqrt{(nk_0)^2 - k_x^2 - k_y^2} (z - z_0) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中: $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶逆变换函数; $\mathcal{F}(\cdot)$ 为傅里叶变

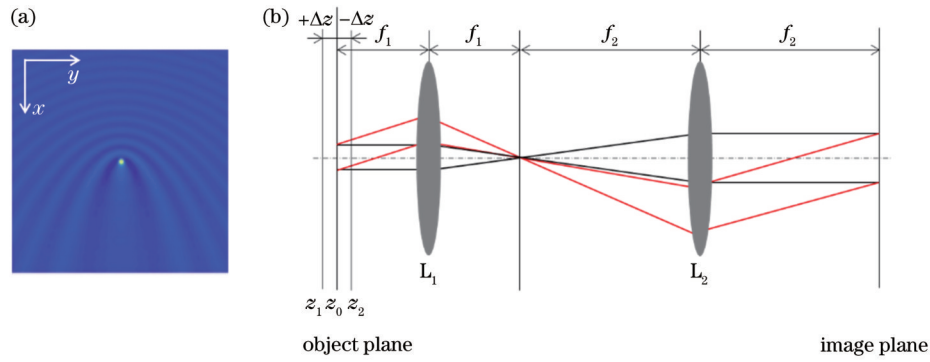


图 2 仿真图像和成像系统示意图。(a)金膜界面处的 SPPs 近场分布仿真结果;(b) SPRM 4f 成像系统示意图

Fig. 2 Simulation result and schematic diagram of imaging system. (a) Simulation result of near-field distribution of SPPs at Au-air interface; (b) schematic diagram of SPRM 4f imaging system

换函数; k_y 为界面处 y 方向的波矢分量; M 为空间频率域的滤波器。

对于离焦计算,改变式(1)中 z_0 获得不同离焦量,

可以得到像平面在不同离焦量时的成像结果。当离焦量从 $-3.0 \mu\text{m}$ 变化至 $3.0 \mu\text{m}$, 单次变化量为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,不同离焦量时的成像结果如图 3 所示。

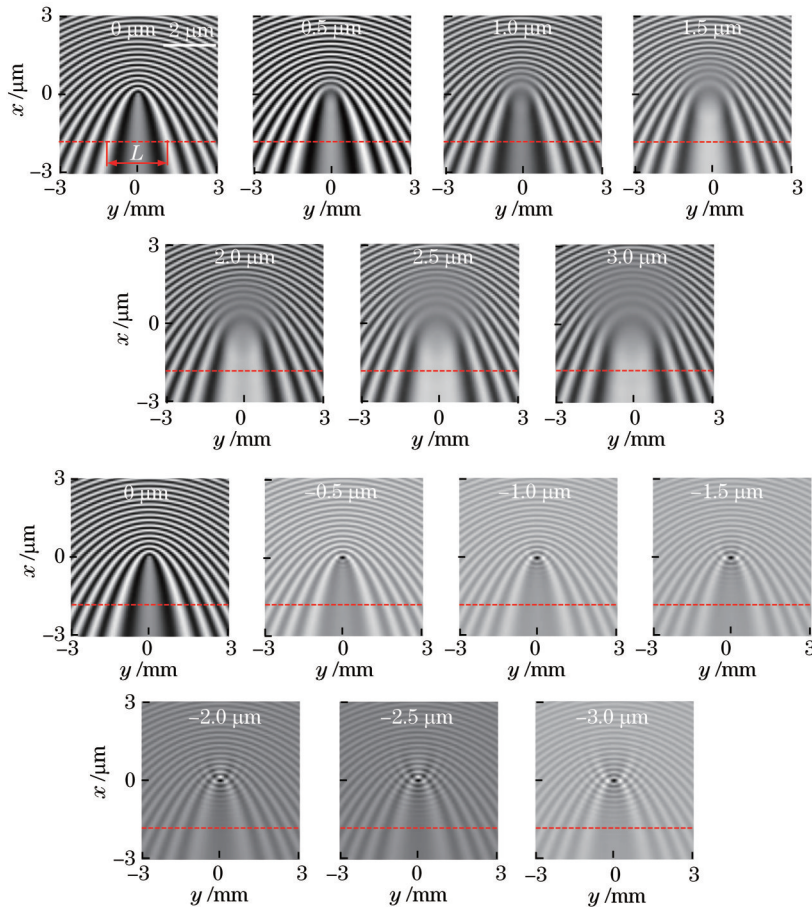


图 3 不同离焦量下 SPRM 的仿真结果

Fig. 3 Simulation results of SPRM under different defocus

3 样品制备及实验装置

实验选取半径为 100 nm 的聚苯乙烯颗粒来实现 SPRM 的成像及离焦测量。为了获得单个纳米颗粒成像,需将纳米颗粒单分散地制备在镀金膜盖玻片上,盖

玻片上金膜厚度为 50 nm。为了减少颗粒团簇,先将聚苯乙烯纳米颗粒溶液(质量分数为 2.5%)用乙醇稀释至合适质量浓度($1.79 \times 10^{-3} \text{ mg/mL}$)。将镀金膜盖玻片放在加热台上,加热至 $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 预热 10 min, 用滴管取一滴纳米颗粒溶液并滴在预热盖玻片上,溶液

迅速蒸发,使颗粒在团簇前即固定在金膜表面。

SPRM 成像装置的原理图如图 4 所示。使用 He-Ne 激光器输出波长为 633 nm 的 p 线偏光,采用物镜耦合的 Kretschmann 结构在金-空气界面处激发 SPPs。为了实现宽场成像,入射光经薄膜分束器反射,会聚在油浸物镜(APON100×HOTIRF)焦平面上,以平行光斜射入至金-空气界面上,调节一维移动平台改变入射角,电荷耦合器件(CCD)探测到的反射光斑随角度发生变化,当反射光斑强度最弱时,即实现了 SPPs 激发,激发角度约为 36.8° 。此时,激发的 SPPs 与纳米颗粒相互作用,产生了颗粒附近局域场增强和抛物线形同心条纹的特征图案。单个聚苯乙烯颗粒引起的 SPPs 场分布经芯片反向耦合至远场被物镜收集,再透过双色镜与管镜传输至 CCD 进行快速成像,此时观察到成像

中颗粒与干涉条纹均达到最亮,成像对比度最佳。由于实验得到的 CCD 原始成像包含反射背景光和 CCD 暗噪声等,故实验中采集多次图像取平均并去除反射背景光与 CCD 暗噪声,以改善成像对比度。在实验中,样品放置在 xyz 移动平台上,精确调节 z 轴, z 轴移动平台为压电位移台,移动精度为 100 nm。将样品位于对焦平面(图 4 中 z_0 平面)来实现 SPRM 成像。为了研究离焦对成像的影响,精确控制物平面沿 z 轴与 z_0 平面的偏移量,采集对应的 CCD 图像,并从图像中提取条纹信息来进行定量分析。由于实验中采用平行光入射,调节 z 轴离焦量时,激发角不变,且波矢匹配条件中其他参数(入射光波长、金属介电常数、介质介电常数和折射率基底折射率等)均不随离焦调节而改变,故调节离焦参数不会改变 SPPs 激发条件。

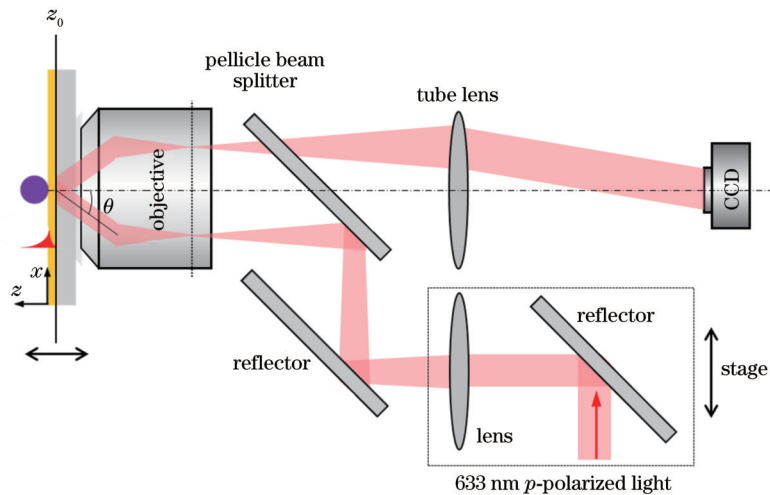


图 4 SPRM 光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of light path of SPRM

4 结果与分析

半径为 100 nm 的单个聚苯乙烯颗粒在不同离焦面上的 SPRM 成像结果如图 5 所示,此时离焦偏移量从 $-3.0 \mu\text{m}$ 变化至 $3.0 \mu\text{m}$, 单次变化量为 $0.5 \mu\text{m}$ 。当偏移量为正值时,颗粒的局域场增强区域由亮点扩散至亮斑,且同心抛物线形条纹也会相应扩大并呈现 U 状。当偏移量为负值时,颗粒的局域场增强区域几乎没有变化,强度随着偏移量绝对值的变大而相应变弱,同心抛物线形条纹由 U 形变为 X 形。该变化趋势与图 3 的计算结果一致,并与前期研究结果^[25]一致。为了定量研究离焦引起 SPRM 图像条纹的变化,在成像图中沿 y 方向截取条纹极大值间距 L (如图 5 中虚线所示)的一维强度分布。为了保证所有离焦图像中的最大值位置都可清晰辨认,取离焦量为 0 时颗粒亮点处的 CCD 像素值为原点,从原点沿 x 轴向下每隔 5 pixel 沿 y 方向从 $-3.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 范围内取强度曲线,然后使用 Origin 中 Savitzky-Golay 滤波器对曲线数据进行平滑处理。依次对不同离焦量时提取的所有数据进行平滑处理,寻找所有离焦量下强度曲线中干涉条

纹最大值均为最明显的像素点,即原点向下移动 55 pixel 处定为虚线位置,选取虚线截取的一维强度分布提取条纹极大值间距 L 。

利用 Image J 软件得到在不同离焦偏移量成像时,所截取的条纹极大值间距 L 的一维强度分布,如图 6 (a) 所示。将实验采集的像素点转化为长度,并对曲线进行平滑处理和归一化处理,取最内侧干涉条纹强度最大位置测量条纹极大值间距进而得到距离 L 。可以看出,离焦偏移量与 L 值间呈单调递增趋势。图 6 (b) 显示了所提方法对图 3 仿真图像进行归一化后的分析结果。为了便于比较,将每条曲线在竖直方向上移动,相邻曲线间隔强度值为 1。将实验与仿真得到的离焦量与 L 的关系进行比较,并分别进行线性拟合,得到

$$L_{\text{Exp}} = 24.467x + 237.053, \quad (2)$$

$$L_{\text{Sim}} = 29.971x + 226.258, \quad (3)$$

式中: L_{Exp} 为实验得到的干涉条纹极大值间距,拟合相关系数为 $R^2=0.973$; L_{Sim} 为仿真得到的干涉条纹极大值间距,拟合相关系数为 $R^2=0.982$; x 为离焦偏移量。从图 7 可以发现,实验与仿真结果基本一致。

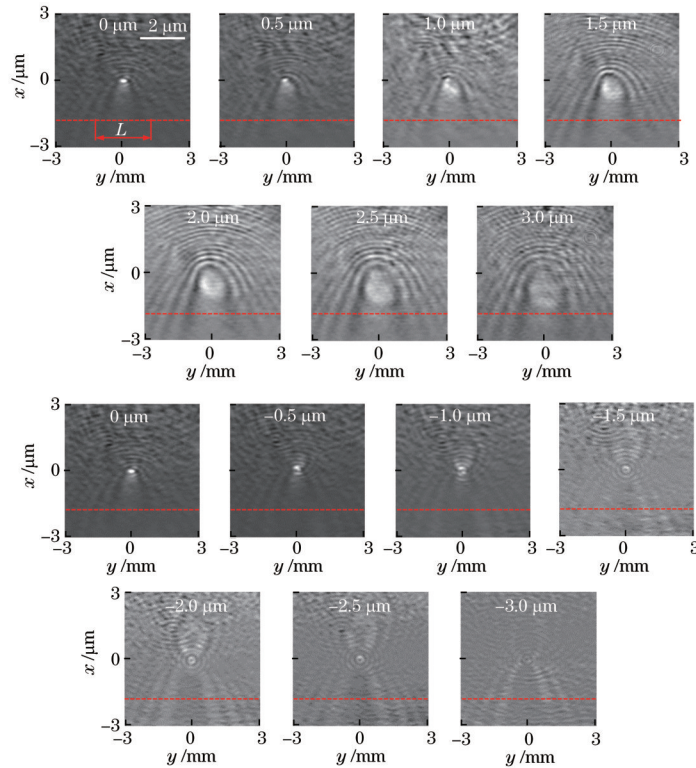


图 5 不同离焦量下 SPRM 的实验结果

Fig. 5 Experimental results of SPRM under different defocus

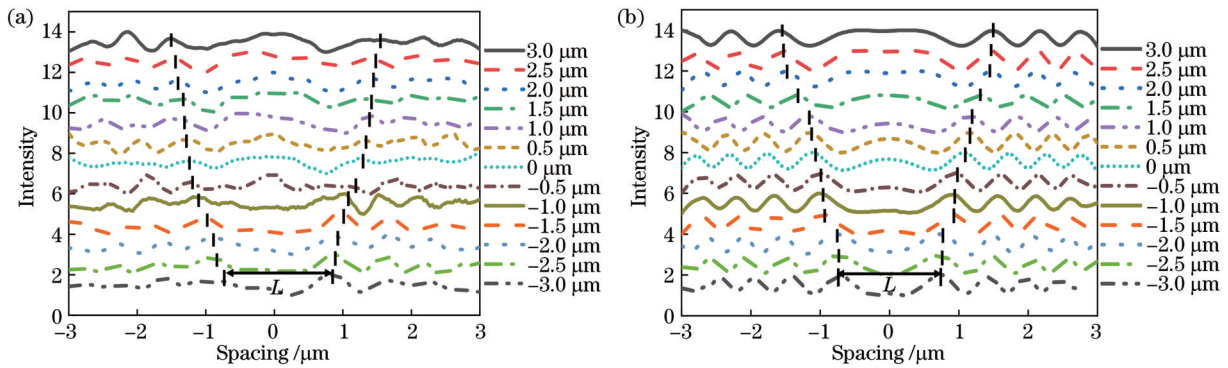


图 6 SPRM 图像一维场分布提取的条纹极大值间距结果。(a)实验结果;(b)仿真结果

Fig. 6 Maximum fringe spacing extracted from one-dimensional field distribution of SPRM image. (a) Experimental result; (b) simulated result

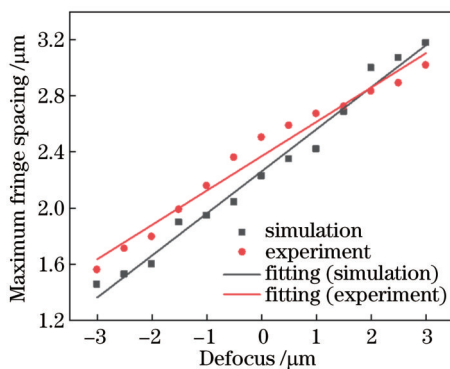


图 7 实验与仿真中不同离焦量引起的条纹极大值间距变化比较
Fig. 7 Comparison of maximum fringe spacing induced by defocus between experiment and simulation

5 结 论

通过理论和实验研究了离焦对 SPRM 的影响,发现了离焦量改变与极大值间距变化呈线性关系。利用所提研究方法,可以快速判断 SPRM 是否处于离焦状态,并可反推出准确的离焦量来进行对焦调节,进而得到理想的 SPRM 成像结果。本研究将有助于提高 SPRM 的可重复性,并可推广到长时程监测中。

参 考 文 献

[1] 童廉明, 徐红星. 表面等离子激元: 机理、应用与展望[J]. 物理, 2012, 41(9): 582-588.
Tong L M, Xu H X. Surface plasmons: mechanisms, applications and perspectives[J]. Physics, 2012, 41(9):

- 582-588.
- [2] 王畅, 王雪, 孙旭晴, 等. 基于物镜耦合的波长-角度共同调制表面等离子共振传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1724001.
Wang C, Wang X, Sun X Q, et al. Objective-coupled wavelength and angle co-modulated surface plasmon resonance sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1724001.
- [3] Sun X Q, Liu H Y, Jiang L W, et al. Detecting a single nanoparticle by imaging the localized enhancement and interference of surface plasmon polaritons[J]. Optics Letters, 2019, 44(23): 5707-5710.
- [4] 智婷, 陶涛, 刘斌, 等. 表面等离子体半导体纳米激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701010.
Zhi T, Tao T, Liu B, et al. Surface plasmon semiconductor nanolaser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701010.
- [5] 荣升, 刘洪双, 钟莹, 等. 基于光力捕获金纳米立方体的拉曼光谱增强[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1730003.
Rong S, Liu H S, Zhong Y, et al. Enhancement of Raman spectra based on optical trapping of gold nanocubes[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1730003.
- [6] 袁洪瑞, 钟莹, 刘海涛. 金纳米球-银纳米线耦合结构量子点荧光自发辐射增强及表面等离子体传导[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1013001.
Yuan H R, Zhong Y, Liu H T. Enhancement of spontaneous emission and surface plasmon polariton propagation of quantum dots fluorescence in a coupling structure of gold nanosphere and silver nanowire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1013001.
- [7] Xie Z B, Kuai Y, Liu J G, et al. *In situ* quantitative observation of hygroscopic growth of single nanoparticle aerosol by surface plasmon resonance microscopy[J]. Analytical Chemistry, 2020, 92(16): 11062-11071.
- [8] 曹媛琛, 倪海彬, 倪波, 等. 自组装银纳米环等离子体生物传感器的制备与光学性质[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0313001.
Cao A C, Ni H B, Ni B, et al. Preparation and optical properties of self-assembled plasmonic biosensor based on silver nanoring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0313001.
- [9] Sun X Q, Liu H Y, Yang Y, et al. Imaging to single virus by using surface plasmon polariton scattering[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10244: 1024425.
- [10] Yu H, Shan X N, Wang S P, et al. Plasmonic imaging and detection of single DNA molecules[J]. ACS Nano, 2014, 8(4): 3427-3433.
- [11] Homola J, Dostálek J, Chen S F, et al. Spectral surface plasmon resonance biosensor for detection of staphylococcal enterotoxin B in milk[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 75(1/2): 61-69.
- [12] Zhou X L, Yang Y Z, Wang S P, et al. Surface plasmon resonance microscopy: from single-molecule sensing to single-cell imaging[J]. Angewandte Chemie, 2020, 59(5): 1776-1785.
- [13] Wang W, Yang Y Z, Wang S P, et al. Label-free measuring and mapping of binding kinetics of membrane proteins in single living cells[J]. Nature Chemistry, 2012, 4(10): 846-853.
- [14] Yang Y T, Shen G X, Wang H, et al. Interferometric plasmonic imaging and detection of single exosomes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(41): 10275-10280.
- [15] Shan X N, Patel U, Wang S P, et al. Imaging local electrochemical current via surface plasmon resonance[J]. Science, 2010, 327(5971): 1363-1366.
- [16] Shan X N, Díez-Pérez I, Wang L J, et al. Imaging the electrocatalytic activity of single nanoparticles[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(10): 668-672.
- [17] Zeng Q, Zhou X Y, Yang Y T, et al. Dynamic single-molecule sensing by actively tuning binding kinetics for ultrasensitive biomarker detection[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(10): e2120379119.
- [18] Jing W W, Wang Y, Yang Y Z, et al. Time-resolved digital immunoassay for rapid and sensitive quantitation of procalcitonin with plasmonic imaging[J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 8609-8617.
- [19] Yu H, Shan X N, Wang S P, et al. Molecular scale origin of surface plasmon resonance biosensors[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(18): 8992-8997.
- [20] Jiang Y Y, Wang W. Point spread function of objective-based surface plasmon resonance microscopy[J]. Analytical Chemistry, 2018, 90(15): 9650-9656.
- [21] Qian C, Wu G, Jiang D, et al. Identification of nanoparticles via plasmonic scattering interferometry[J]. Angewandte Chemie, 2019, 58(13): 4217-4220.
- [22] Wang C, Sun X Q, Wei R X, et al. Influence of refractive index to plasmonic interferometric imaging[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 4800207.
- [23] 冯鹏, 唐锋, 王向朝, 等. 双孔点衍射干涉成像系统波像差检测技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0904002.
Feng P, Tang F, Wang X Z, et al. Dual-hole point diffraction interferometer for measuring the wavefront aberration of an imaging system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0904002.
- [24] Yu H, Shan X N, Wang S P, et al. Achieving high spatial resolution surface plasmon resonance microscopy with image reconstruction[J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(5): 2704-2707.
- [25] Yang Y T, Zhai C H, Zeng Q, et al. Quantitative amplitude and phase imaging with interferometric plasmonic microscopy[J]. ACS Nano, 2019, 13(11): 13595-13601.
- [26] Xu Y, Wang X, Zhai C H, et al. A single-shot autofocus approach for surface plasmon resonance microscopy[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(4): 2433-2439.
- [27] Lumerical Solutions Inc[EB/OL]. [2021-03-05]. <http://lumerical.com/>.
- [28] Sun X J, Wang X, Wang C, et al. Effects of nanoparticle sizes, shapes, and permittivity on plasmonic imaging[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 6051-6060.