doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.03.002

背景介质对微球透镜像差和成像特性的影响

王建国[1],成　冲[1],范思瑀[1],曹玉蓉[2]

(1.南京工业职业技术大学工程技术实训中心,江苏 南京 210023)
(2.南京师范大学计算机与电子信息学院,江苏 南京 210023)

[**摘要**]　微球透镜辅助显微技术凭借其非侵入性和无需标记等特性,在生物成像、物理化学等领域具有巨大的应用潜力. 但值得注意的是,微球透镜因为其形状特征,会产生明显像差. 研究影响微球透镜像差的因素并降低其像差,对提高微球透镜辅助超分辨成像技术具有积极意义. 在本文中,我们系统研究了背景介质的折射率及其浸没程度,对微球透镜像差和成像特性的影响. 我们通过实验结果和模拟发现,随着微球透镜与背景介质的相对折射率增大,微球透镜所成图像的畸变随之增大,并且背景介质的浸没程度会明显影响微球透镜的像差. 当背景介质的浸没程度约为一半时,微球透镜的成像性能最佳,可清晰分辨周期为 250 nm 的颗粒阵列.

[**关键词**]　光学显微镜,微球透镜,超分辨成像,像差
[**中图分类号**]O439　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2026)03-0010-06

Influence of Background Medium on Aberration and Imaging Characteristics of Microsphere

Wang Jianguo[1],Cheng Chong[1],Fan Siyu[1],Cao Yurong[2]

(1.Engineering Technology Training Center,Nanjing University of Industry Technology,Nanjing 210023,China)
(2.School of Computer and Electronic Information,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

Abstract:Microsphere-assisted microscopy has great potential for applications in bio-imaging,physical chemistry,due to its non-invasive and label-free nature. However,it should be noted that microsphere lenses produce significant aberrations due to their shape characteristics. Investigation of the factors affecting the aberration of microsphere lenses and reduction of their aberration are of positive significance for the improvement of microsphere-assisted super-resolution imaging technology. Herein,we systematically investigate the effects of the refractive index of the background medium and its immersion degree on the aberration and imaging characteristics of microsphere lenses. We found that as the relative refractive index between the microsphere lens and the background medium increases,the distortion caused by the microsphere increases. And the immersion degree of the background medium significantly affects the aberration of the microsphere lens. When the microsphere is semi-immersed in the background medium,it has the least aberration and works best for imaging,allowing it to clearly identify a particle array with a spacing of 250 nm.

Key words:optical microscope,microsphere lens,super-resolution imaging,aberration

阿贝衍射极限的存在,使得常规光学显微系统的空间分辨率被限制在入射光波长的二分之一量级,从而使得传统光学显微镜远远无法满足现代科技发展的实际需求. 近年来,科研人员通过技术创新成功突破了传统光学衍射屏障,其中以受激发射损耗、光激活定位及随机光学重构显微技术为代表的荧光超分辨成像体系已取得实质性突破. 此类依赖荧光标记的显微技术已实现产业化应用,但在应对未来多样化应用场景时仍面临多重技术难题,例如简化光学系统集成复杂度、协同提升时空分辨率以及增强活体细胞动态观测的适应性等. 近年来,多种新兴超分辨技术相继问世,如结构光照明显微技术等,这些技术都有各自的优势和特色,但也存在样本形变不可逆性、样品预处理过程繁琐、图像重构伪影等单项或多项问

收稿日期:2025-04-23.
基金项目:国家自然科学基金项目(61475073,61673287)、南京工业职业技术大学引进人才科研启动基金项目(YK24-14-01).
通讯作者:曹玉蓉,博士,实验师,研究方向:超分辨成像. E-mail:06217@ njnu.edu.cn

题. 在此背景下,发展具备系统构型简洁、可实现生物样本实时动态观测的新型超分辨成像方法,已成为当前生物医学成像领域具有重要研究意义及应用价值的前沿方向.

微球透镜辅助超分辨成像技术的发展历程可追溯至 2011 年,Wang 等[1]开创性地采用直径 2~9 μm 的二氧化硅(SiO_2)微球辅助传统光学显微系统,在白光照明条件下成功分辨周期 300 nm、间隙 100 nm 的一维光栅结构. 此后,Lee 等[2]和 Darafshen 等[3]分别证实大尺寸聚苯乙烯(polystyrene,PS)和钛酸钡($BaTiO_3$ glass,BTG)微球透镜亦具有类似的超分辨能力. 微球透镜被放置于样品附近,作为近场"放大透镜",实现纳米级光学放大,从而辅助传统光学显微镜实现超分辨成像. 该技术凭借其非侵入性和无需标记等成像特性在活细胞观测、纳米材料表征等领域展现出独特优势[4-9]. 但值得注意的是,微球透镜因为其形状特征,会产生明显像差. 微球透镜成像时会出现明显的枕形畸变现象[10],即图像边缘出现明显弯曲现象,降低微球透镜的有效视场. 此外,微球透镜本身的像差会明显影响其所成图像的对比度[11]. 因此,研究影响微球透镜像差的因素并降低其像差,对提高微球透镜辅助超分辨成像技术具有积极意义.

在本文中,我们系统研究了背景介质的折射率及其浸没程度对微球透镜像差和成像特性的影响. 我们通过实验和模拟发现,随着微球透镜与背景介质的相对折射率增大,微球透镜所成图像的畸变随之增大. 当使用与微球透镜的折射率相同的背景介质部分浸没微球透镜时,微球透镜的成像性能优于置于空气中的微球透镜的成像性能,并且背景介质的浸没程度会明显影响微球透镜的像差. 当背景介质的浸没程度约为一半时,微球透镜的成像性能最佳,可清晰分辨周期为 250 nm 的颗粒阵列.

1 实验装置及观测样品

图 1(a)为基于微球透镜辅助的光学超分辨成像系统架构示意图. 微球透镜对下方区域的样品进行近场放大所成图像被远场显微物镜接收并进行二次放大,从而实现超分辨成像. 实验系统基于型号为 Leica DM2700 M 的光学显微镜,配置数值孔径(numerical aperture,NA)为 0.9 的 100×物镜及型号为 Leica DFC 295 的 CCD 图像采集模块用来观察和记录图像. 采用宽带卤素光源发出的白光(中心波长 $\lambda=540$ nm)作为入射光. 观测对象包含两类特征化样品:其一为线状样品,包含具有一维周期性结构的 DVD 光盘与蓝光光碟(Blu-ray disc,BD),实验前需要先剥离其保护层. 其二为点状纳米结构,即通过重力辅助对流自组装工艺在洁净玻璃基板上制备的 250 nm 的 SiO_2 纳米颗粒阵列. 图 1(b)-(d)分别为 DVD、BD 及纳米颗粒阵列的扫描电子显微镜(SEM,JEOL JSM-5610L V)表征结果:DVD 样本呈现周期为 300 nm、线宽 430 nm 的平行条纹结构(图 1(b));BD 样本表现为 200 nm 线宽、100 nm 间距的精细一维光栅结构(图 1(c));纳米颗粒阵列显示为六角密堆积构型,相邻颗粒质心间距为 250 nm(图 1(d)). 依据经典瑞利判据,本实验使用的显微镜系统对线型结构与点状结构物体的理论分辨率分别为 $0.61\lambda/NA \approx 366$ nm 和 $0.5\lambda/NA \approx 300$ nm(计算参数:$\lambda=540$ nm,$NA=0.9$). 因此,DVD 的条纹周期超过衍射极限,而 BD 的条纹周期和纳米颗粒之间的中心距离小于衍射极限,直接使用传统光学显微镜无法分辨 BD 和纳米颗粒阵列.

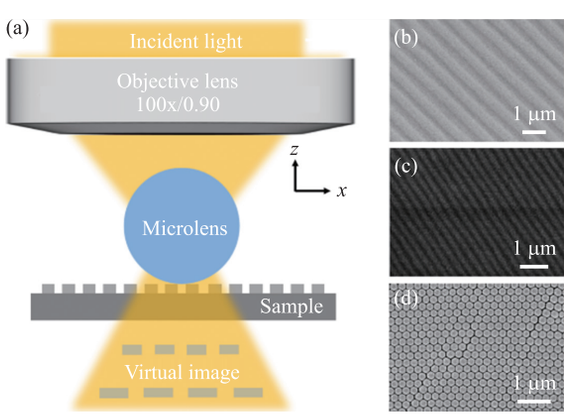


图 1 (a)实验装置示意图;(b)-(d)DVD 光盘(b)、蓝光光碟(c)和纳米颗粒阵列(d)的扫描电镜图

Fig. 1 (a)Schematic of experimental setup. (b)-(d)SEM image of(b)DVD,(c)BD,and(d)nanoparticle array

2 结果与讨论

首先,DVD 被用作观测样品. 图 2(a)-(c)和 2(d)分别为通过完全浸没在 PDMS 中的 SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜和完全浸没在 SU-8 试剂的 BTG 微球辅助显微镜所观察到的 DVD 图像. 微球透镜的直径均为 10 μm. 相对折射率(relative refractive index,RRI)定义为微球透镜折射率(n_1)与背景介质折射率(n_2)之间的比值,即 $RRI=n_1/n_2$. 如图 2(a)-(c)所示,图像的畸变程度随微球透镜与背景介质之间的相对折射率 RRI 的变化而变化. 当聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane,PDMS)被用作背景介质时,因为

其折射率十分接近 SiO_2 微球透镜的折射率(RRI=1.04),所以微球透镜对物体无放大作用(图 2(a)). 当 PS(RRI=1.14)和 BTG(RRI=1.36)微球透镜被 PDMS 完全浸没时,均可以对 DVD 进行放大成像. 但值得注意的是,此时微球透镜边缘与中心对样品所成图像的放大率存在差异,表现为边缘图像弯曲,即畸变现象. 如图 2(b)和 2(c)所示,PS 和 BTG 微球透镜所成图像边缘与中心的放大率差值比率(the difference ratio of lateral magnification between the center and edge regions,DMCE),分别约为 21.3%和 50.8%. 当我们换用折射率与 PS 微球相同的 SU-8 试剂全浸没上述三种微球透镜时,结果表明被 SU-8 试剂完全浸没的 SiO_2 和 PS 微球透镜均无法对物体进行放大成像,仅 BTG(RRI=1.19)微球透镜可对物体形成放大的虚像,DMCE 约为 36.9%(图 2(d)). 在几何光学中,成像畸变定义为实际成像放大率与理想成像放大率的差异,即成像畸变 Distortion rate=$[(\beta_2-\beta_1)/\beta_2]\times100\%$. 其中,$\beta_1$ 为理想成像放大率,β_2 为实际成像放大率. 如图 2(e)-(h)所示,我们使用 ZEMAX 软件模拟了直径为 10 μm 的 SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜完全浸没在 PDMS 或 SU-8 胶中的畸变率. 在模拟中,SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜的折射率分别设置为 1.46、1.60 和 1.90,PDMS 和 SU-8 试剂的折射率分别设置 1.4 和 1.6,物体的高度和物体与微球之间的距离分别设置为 4.0 和 0.03 μm. 如图 2(e)-(g)所示,完全浸没在 PDMS 的 SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜,模拟所得的图像畸变率分别约为 0.59%、13.40%和 46.55%. 当 BTG 微球透镜完全浸没在 SU-8 试剂中时,图像模拟畸变率约为 29.43%(图 2(h)). 结果显示,随着微球透镜与背景介质之间的相对折射率 RRI 增大,图像畸变率随之变大.

当 PS 微球透镜完全浸没在 SU-8 试剂(RRI=1.0)中时,PS 微球透镜对样品无放大作用,如图 3(a)所示. 将 SU-8 试剂以 2000 rpm 的转速旋涂在直径为 20、30 和 50 μm 的 PS 微球透镜周围时,部分浸没在 SU-8 试

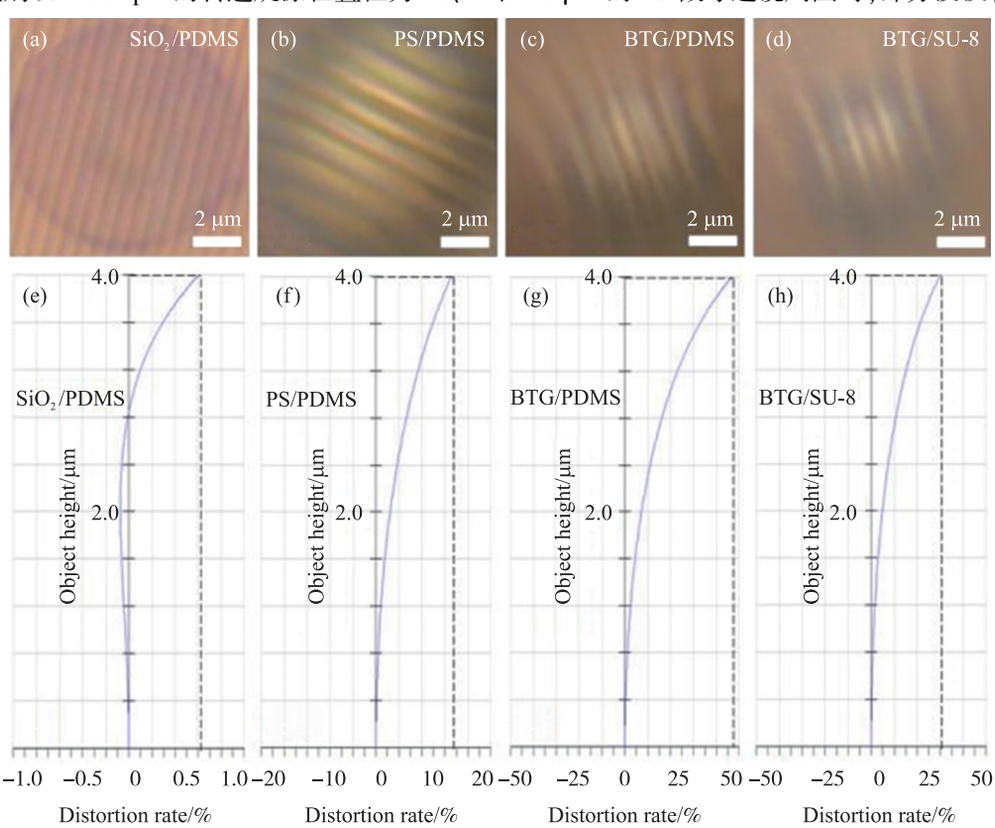


图 2　(a-c)通过完全浸没在 PDMS 中的 SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜所观察到的 DVD 图像;(d)通过完全浸没在 SU-8 试剂的 BTG 微球透镜所观察到的 DVD 图像;微球直径为 10 μm;(e-g)完全浸没在 PDMS 中的 SiO_2、PS 和 BTG 微球透镜的图像畸变率模拟结果;(d)完全浸没在 SU-8 试剂中的 BTG 微球透镜的图像畸变率模拟结果.

Fig. 2　(a-c) Images of the DVD observed by SiO_2, PS and BTG microspheres fully immersed in PDMS. (d) Images of the DVD observed through BTG microspheres fully immersed in SU-8 resist. The diameter of these microspheres is 10 μm. (e-g) Simulated image distortion rates of SiO_2, PS and BTG microspheres fully immersed in PDMS. (h) Simulated image distortion rate of a BTG microsphere fully immersed in SU-8 resist.

剂中的 PS 微球透镜可观察到 DVD 的放大图像,且所成的放大图像没有明显的畸变现象存在. 图 3(b)-(d)分别是通过直径为 20、30 和 50 μm 的 PS 微球透镜观察到的 DVD 图像. 在实验过程中,我们观察到了 DVD 的泰伯(Talbot)图像,即周期性结构的自成像特性. 图 3(e)-(g)为通过直径为 10 μm 的 PS 微球透镜在不同像面所观察到的 DVD 图像. 图 3(e)-(g)分别为 0、1/2 和 1 泰伯图像.

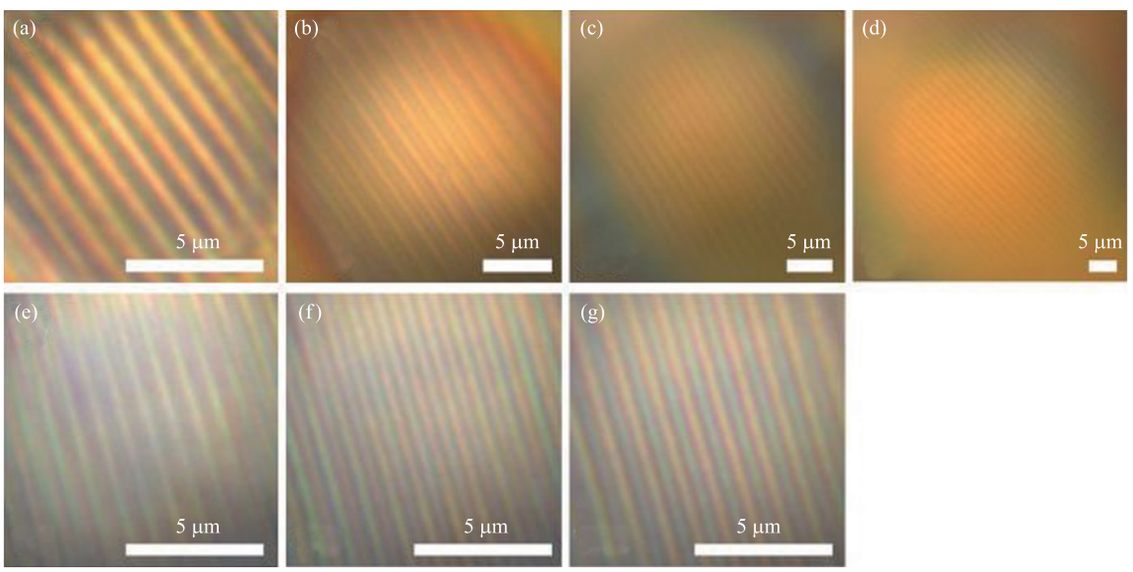


图 3 (a)通过全浸没在 SU-8 试剂中的 PS 微球透镜所观察到的 DVD 图像;(b-d)通过直径为 20、30 和 50 μm 的 PS 微球透镜观察到的 DVD 图像;(e-g)通过直径为 10 μm 的 PS 微球透镜在不同像面所观察到的 DVD 图像.

Fig. 3 (a) Images of the DVD observed by a PS microsphere fully immersed in SU-8 resist. (b-d) Images of DVD observed by 20, 30 and 50 μm diameter PS microsphere. (e-g) Images of DVD observed by a 10-μm-diameter PS microsphere at various optical focal image positions.

为了探究背景介质的浸没程度对微球透镜成像特性的影响,我们将 SU-8 试剂分别以 6 000、4 000 和 2 500 rpm 的转速旋涂在直径为 10 μm 的 PS 微球周围,得到三种不同浸没程度的微透镜 A、B 和 C(h/D=0.74、0.50、0.24,D 和 h 分别为微球透镜的直径和微球透镜露出背景介质的高度). 图 4(a)为这三种微透镜的结构示意图,右上角的插图分别为微透镜 A、B 和 C 的 SEM 图像. 如图 4(a)所示,为了研究这三种微透镜的超分辨率成像特性,我们使用小于衍射极限的 BD 作为观测样品. 图 4(b)-(j)展示了微透镜 A、B、C 在不同焦平面采集的 BD 图像结果,各显微图像均未呈现显著畸变特征. 右上方标注的 Z 值表征物镜焦平面与微透镜几何中心的空间间距,微透镜中心位置定义为 $Z=0$ 参照基准. 具体而言,图 4(b)-(d)呈现微透镜 A 辅助显微成像系统在变焦过程中的样品形貌演化规律:当 Z 值达到 4 μm 时,成像系统首次可分辨清晰 BD 图像,如图 4(b)所示. 随着 Z 值递增,图像放大率呈现正相关增长趋势. 在 $Z=5$ μm 参数条件下,获得最佳成像质量(图像放大倍率 $M=2.9\times$),如图 4(c)所示. 此后,继续增大 Z 值,虽能提升放大率但会导致图像对比度劣化. 对比度的计算公式为$(I_{max}-I_{min})/(I_{max}+I_{min})$,其中 I_{max} 和 I_{min} 分别为最大和最小光强. 当 Z 值超过 9 μm 临界阈值后,样品形貌特征无法清晰辨识. 实验结果显示,Z 值在 4~9 μm 区间变化时,放大倍率 M 由 2.3×线性增长至 3.4×. 微透镜 B 的成像特性如图 4(e)-(g)所示:Z 值在 3~11 μm 范围内调控时,可实现 4.1×最优放大倍率($Z=5$ μm),其放大倍率 M 动态范围扩展至 3.3×-5.2×. 图 4(h)-(j)定量表征了微透镜 C 的光学特性,当 Z 值从 4 μm 增至 9 μm 时,放大倍率 M 由 2.0×增大至 2.9×,并在 $Z=6$ μm 时获得峰值分辨率($M=2.6\times$). 相较而言,采用半浸没式的微透镜 B 实施辅助成像时,其所成图像的对比度高于另外两种浸没程度的微透镜. 此外,值得注意的是,当 BD 用作观测样品时,并未观察到泰伯效应,我们猜测这是由于蓝光光碟的周期仅为 300 nm,小于衍射极限,所以难以观察到泰伯图像.

为了进一步探究不同浸没程度的微透镜的超分辨成像性能,我们用周期更小的样品,即直径为 250 nm 的颗粒阵列,作为观测样品. 实验结果显示,微透镜 A、B 和 C 均可分辨该纳米颗粒阵列,图像对比度分别为 0.32、0.54 和 0.41,微透镜 B 所成图像的对比度最高,如图 5(a)所示. 此外,我们还使用在空气中的 PS 微球辅助显微镜观察纳米颗粒阵列,发现不可分辨纳米颗粒阵列,如图 5(b)所示. 为了验证这一结果,我

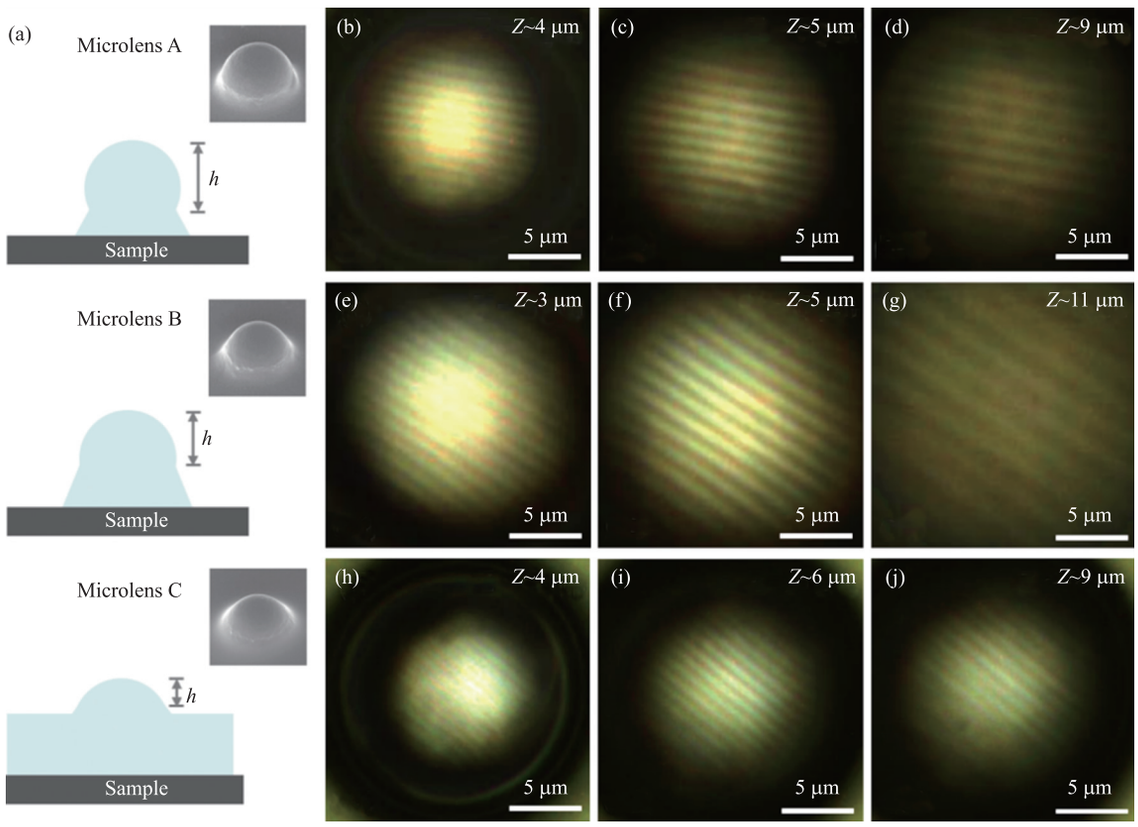


图 4　(a)微透镜 A、B 和 C 的结构示意图及扫描电镜图,右上角的插图为其对应的 SEM 图像;(b)-(j)微透镜 A、B 和 C 辅助光学显微镜在不同像面观察到的蓝光光碟图像.

Fig. 4　(a)Schematic of microscale lens with three structures. Top right corner is the SEM image of these microlenses. (b)-(j)Images of the BD observed by microlens A, B, and C at various optical focal image positions.

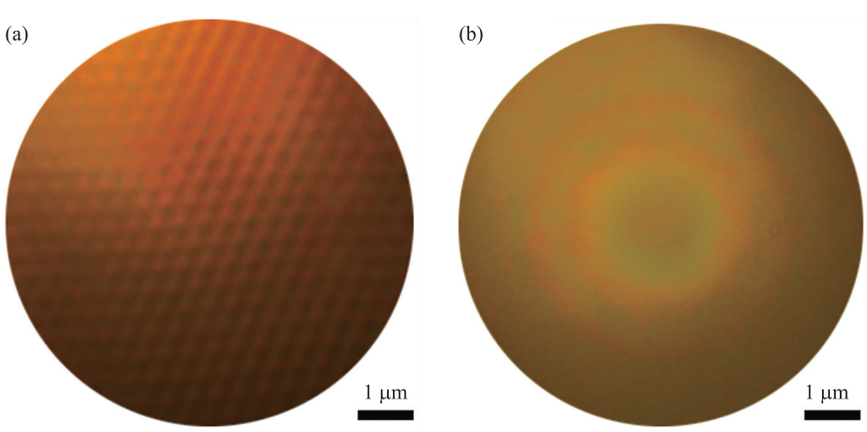


图 5　(a)微透镜 B 和(b)PS 微球观察纳米颗粒阵列所得图像

Fig. 5　Image of the nanoparticle array observed by(a)microlens B and(b)PS microsphere

们还通过与微透镜 A、B 和 C 结构相近的其他尺寸的微透镜对样品进行了观测,发现均为在 h/D ≈ 0.5 时,样品图像的对比度最高.

之前研究表明,微球透镜的超分辨能力与其光子纳米喷流束腰尺寸呈负相关关系[12]. 光子纳米喷流是微球透镜会聚入射光后,在其下方形成的窄而高强度的光束,其束腰宽度越小,微球透镜的成像性能越优. 图 6 呈现了微球透镜光子纳米喷流物理特性与超分辨成像性能的关联性研究. 我们通过 COMSOL Multiphysics 软件构建有限元模型,系统对比了三种微透镜(微透镜 A、B 和 C)的光场分布特性. 数值仿真参数设定为:PS 微球透镜的直径为 10 μm、折射率为 $n=1.60$,SU-8 试剂的折射率为 1.60,入射平面波波长 $\lambda=540$ nm,网格精度为 8 nm. 图 6(a)-(c)分别为微透镜 A、B 和 C 的光强空间分布,测得其光子纳米

喷流束腰半高全宽分别为 327 nm(微透镜 A)、298 nm(微透镜 B)、356 nm(微透镜 C),其中半浸没结构的微透镜 B 表现出最优束腰约束特性. 同时,微透镜 A、B 和 C 最大光强值依次为 20.38、24.07 和 21.89,微透镜 B 的光场增强效应显著优于另外两种结构的微透镜,更能提高样品的散射信号[13-14],因而其所成图像的对比度最高.

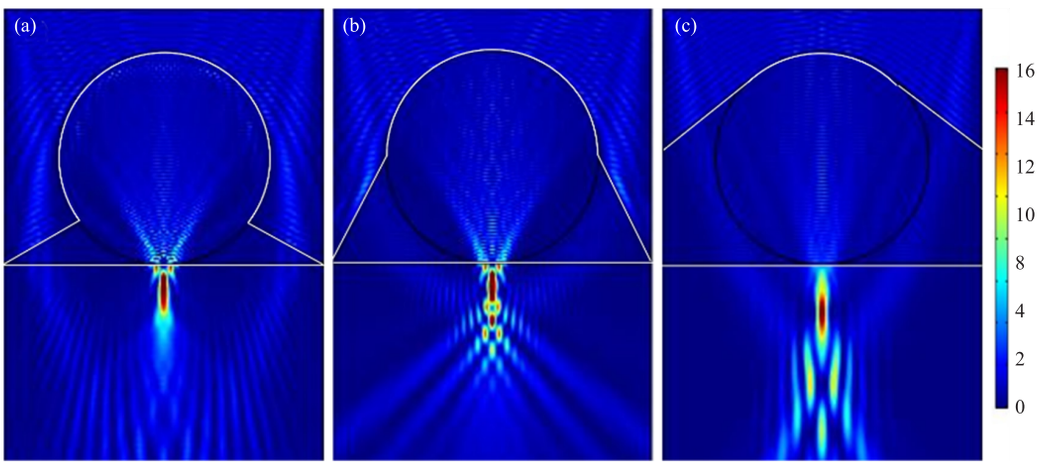


图 6　(a)微透镜 A、(b)微透镜 B 和(c)微透镜 C 的光强分布图

Fig. 6　Intensity distribution of(a)microlens A,(b)microlens B and(c)microlens C

3　结论

本文系统研究了背景介质的折射率及其浸没程度对微球透镜像差和成像特性的影响. 随着微球透镜与背景介质的相对折射率增大,微球透镜所成图像的畸变随之增大. 此外,背景介质的浸没程度会明显影响微球透镜的像差. 当背景介质的浸没程度约为一半时,微球透镜的成像性能最佳,可清晰分辨周期为 250 nm 的颗粒阵列.

[参考文献]

[1] Wang Z,Guo W,Li L,et al. Optical virtual imaging at 50 nm lateral resolution with a white-light nanoscope[J]. Nature Communication,2011,2:218.

[2] Lee S,Li L,Wang Z. Optical resonances in microsphere photonic nanojets[J]. Journal of Optics,2014,16(1):015704.

[3] Darafsheh A,Guardiola C,Palovcak A,et al. Optical super-resolution imaging by high-index microspheres embedded in elastomers[J]. Optics Letters,2015,40(1):5-8.

[4] Wang F,Liu L,Yu H,et al. Scanning superlens microscopy for non-invasive large field-of-view visible light nanoscale imaging [J]. Nature Communication,2016,7:13748.

[5] Bezryadina A,Li J,Zhao J,et al. Localized plasmonic structured illumination microscopy with an optically trapped microlens [J]. Nanoscale,2017,9(39):14907-14912.

[6] Huser L,Lrhmann P. Microsphere-assisted interferometry with high numerical apertures for 3D topography measurements[J]. Applied Optics,2020,59:1695-1702.

[7] Xie Y,Cai D,Pan J,et al. Chalcogenide microsphere-assisted optical super-resolution imaging[J]. Advanced Optical Materials,2022,10:2102269.

[8] Zhong Y,Yu H,Zhou P. Patterned microsphere-lens projection lithography using an electrohydrodynamic-jet printing-assisted assembly[J]. Photonics Research,2024,12(7):1502-1512.

[9] Bekirov A R,Fedyanin A A,Wang Z. Dielectric microparticles for enhanced optical imaging:an FDTD analysis of contrast and resolution[J]. Journal of the Optical Society of America A,2025,42(1):45-50.

[10] Darafsheh A,Walsh D F,Dal Negro L,et al. Optical super-resolution by high-index liquid-immersed microspheres[J]. Applied Physics Letters,2012,101(14):141128.

(下转第 22 页)

[10] Tong Y,Yang W. Numerical analysis and experimental study on the thermoelectric characteristics of the Al-Si alloy used for building energy storage tile[J]. Renew Energy,2022(200):1447-1457.
[11] Cui X,Ma W,Zheng Y,et al. Thermal analysis of radiative cooling coating on the rear surface of photovoltaic tile[J]. Solar Energy,2022(248):210-220.
[12] Alim M A,Tao Z,Saeed N,et al. Effect of reflective coating on thermal and electrical performances of solar roof tiles[J]. Energy Conversion and Management,2022(270):116251.
[13] Huang Y C,Chan C C,Wang S J,et al. Development of building integrated photovoltaic(BIPV)system with PV ceramic tile and its application for building façade[J]. Energy Procedia,2014(61):1874-1878.
[14] Lukasik J,Wajs J. Experimental and numerical study of thermal and electrical potential of BIPV/T collector in the form of air-cooled photovoltaic roof tile[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2024(227):125554.
[15] Wajs J,Golabek A,Bochniak R,et al. Air-cooled photovoltaic roof tile as an example of the BIPVT system:an experimental study on the energy and exergy performance[J]. Energy,2020(197):117255.
[16] Ghani F,Duke M,Carson J K. Effect of flow distribution on the photovoltaic performance of a building integrated photovoltaic/thermal(BIPV/T)collector[J]. Solar Energy,2012(86):1518-1530.
[17] 国际电工委员会. 光伏系统性能—第 2 部分:性能评估方法:IEC TS 61724-2[S]. Geneva:IEC,2016.
[18] 孙贺江,冯连元,何卫兵,等. 飞机后设备舱自然对流换热的实验与模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(8):863-868.
[19] Sun C,Lu Y,Ju X. Experimental and numerical study to optimize building integrated photovoltaic(BIPV)roof structure[J]. Energy and Buildings,2024,309:114070.
[20] 柯清. 基于田口法实木椅类家具结构稳健设计研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
[21] Erfani T,Erfani R. An evolutionary approach to solve a system of multiple interrelated agent problems[J]. Applied Soft Computing,2015,37:40-47.
[22] Radhakrishnan J,Sridhar S,Zuber M,et al. Design optimization of a Contra-Rotating VAWT:a comprehensive study using Taguchi method and CFD[J]. Energy Conversion and Management,2023,298:117766.
[23] Fatahian H,Mishra R,Jackson F F,et al. Design optimization of an innovative deflector with bleed jets to enhance the performance of dual Savonius turbines using CFD-Taguchi method[J]. Energy Conversion and Management,2023,296:117655.

[责任编辑:杜忆忱]

(上接第 15 页)

[11] Guo H,Han Y,Weng X,et al. Near-field focusing of the dielectric microsphere with wavelength scale radius[J]. Optical Express,2013,21(2):2434-2443.
[12] Yang H,Trouillon R,Huszka G,et al. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet[J]. Nano Letter,2016,16(8):4862-4870.
[13] Darafsheh A. Photonic nanojets and their applications[J]. Journal of Physics:Photonics,2021,3:022001.
[14] Yang S,Taflove A,Backman V. Experimental confirmation at visible light wavelengths of the backscattering enhancement phenomenon of the photonic nanojet[J]. Optical Express,2011,19(8):7084-7093.

[责任编辑:杜忆忱]