

doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2017.02.022

单介质层对微球透镜成像特性的影响

杜滨涛,王恬,郭明磊,夏阳,邓芸,叶永红

(南京师范大学物理科学与技术学院,江苏南京 210023)

[摘要] 利用嵌有钛酸钡(BTG)微球的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜突破衍射极限是目前实现超分辨成像的一种常规方法.本文提出在微球透镜与样品表面增加一种介质层,并研究了不同厚度的SU-8单层介质层对成像性质影响.实验发现:随着SU-8介质层厚度从0增大到270 nm,成像视场大小从10.8 μm 增加到了13.2 μm .其中SU-8厚度在160 nm左右时候,视场大小与对比度最优.此外,对于厚度为160 nm的不同材料介质层,发现SU-8介质层最能提高视场大小,而二氧化钛(TiO_2)介质层削弱了视场大小.我们认为耦合进介质层的光信息含量决定了成像质量,并通过光波干涉相消对这一现象进行了解释.这一实验研究有利于增进人们对微透镜成像原理的认识.

[关键词] 超分辨薄膜,微透镜,成像

[中图分类号] O439 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2017)02-0133-04

Influence of Single Dielectric Layer on Microscale Spherical Lens Imaging

Du Bintao, Wang Tian, Guo Minglei, Xia Yang, Deng Yun, Ye Yonghong

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Imaging by barium titanate glass (BTG) embedded in polydimethylsiloxane (PDMS) film is a common technique to achieve optical super-resolution now. We propose to deposit a dielectric layer between the microsphere lens and the object surface, and study the imaging properties with different SU-8 thicknesses. Our experimental results reveal that the field of view (FOV) increases from 10.8 μm to 13.2 μm when the film thickness increases from 0 to 270 nm. It is found that the SU-8 layer with a thickness around 160 nm can obviously increase the imaging FOV and contrast. Moreover, for different dielectric layers with the same film thickness 160 nm, the SU-8 layer can improve FOV while the TiO_2 layer cannot. We also found that the amount of light coupling into the dielectric layer decides the image quality. This phenomenon is explained by the destructive interference effect. Our findings can advance the understanding of the super-resolution imaging mechanisms in microscale lenses.

Key words: super-resolution film, microscale lenses, imaging

基于介质微透镜成像已成为突破衍射极限最为简单有效的成像方法. Wang 科研小组首先发现低折射率微球在空气中能够实现超分辨^[1]. Hao 等人^[2]在此基础上发现液体半浸没低折射率微球能够牺牲一定放大倍数产生好的成像对比度. 随后, Arash 等人^[3-4]证实高折射率微球全浸没在液体中一样能够实现超分辨. 然而, 液体的挥发性和不稳定性, 不利于对样品进行长时间观察. 同时, 液体的形状和厚度都会对放大倍数和视场产生明显影响^[5-6].

为了克服液体浸没方式的不足, 研究者提出使用透明介质层取代液体层, 制备一种超分辨成像能力的薄膜. V. N. Astratov 等人^[7]介绍了一种使用高折射率微球和微柱浸没在透明介质材料中实现超分辨成像的方法. 庞辉等人^[8]使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)完全浸没钛酸钡(BTG)微球薄膜对硅结构光栅进行了成像实验. Allen 等人^[9-11]制备了嵌入 BTG 微球的 PDMS 薄膜, 并进行了实验和分辨率分析. Arash 等人^[12]通过嵌有 BTG 微球的 PDMS 薄膜对胶质母细胞瘤进行了成像实验. Wang 等人^[13]提出了不同种提高

收稿日期:2016-10-21.

基金项目:国家自然科学基金项目(61475073、61673287)、2016年南京师范大学学生科学基金.

通讯联系人:叶永红,教授,研究方向:纳米光子学. E-mail:yeyonghong@njnu.edu.cn

超分辨薄膜成像能力的方法.

然而,微透镜超分辨薄膜成像质量并不高. 特别是受干涉环暗斑与背景光干扰,成像视场大小与对比度较差^[14-15]. 本文试图在物体与微透镜之间增加一层介质层,起到增透膜作用,使更多光能够耦合进介质层. 如此一来,在一定程度上增多了介质层中携带物体信息的光量. 增多的信息光大量折射出介质层耦合进微球,使成像完整且清晰,提高了成像质量. 实验显示,厚度 160 nm 左右的 SU-8 介质层对成像视场大小和对比度有所增强. 而折射率为 2.2 的二氧化钛(TiO₂)介质层削弱了成像视场大小,降低了成像质量.

1 实验

图 1 为实验示意图. 采用德国 Leica DM2500M 金相显微镜(中心照明波长为 540nm)在 100×(NA=0.9)物镜下进行观察,如图 1 所示. 实验待测样品是蓝光光碟,图 1 右上角的插图为其扫描电子显微镜(SEM)图,光碟是一种周期为 300 nm 的条纹结构. 使用前先剥离光碟保护层,暴露出金属反射层. 实验中使用了直径 20 μm 的 BTG 微球,折射率为 1.4 的 PDMS.

实验分 4 步,过程如下. 实验第一步是在实验样品表面镀一层介质或者在样品表面甩一层介质层(如果是 SU-8 介质层,需要前烘,紫外曝光与后烘处理,SU-8 胶经处理后固化并不溶于水溶液),选用不同厚度的介质层进行实验. 实验第二步将 BaTiO₃ 溶液滴在已镀过膜的样品表面,放置加热平板加热,沉积 BaTiO₃ 微球. 实验第三步在样品表面倒一层 PDMS,使用甩胶机对 PDMS 均匀旋涂. PDMS 厚度使用台阶仪测量,本实验中 PDMS 厚度一致约为 26 μm. 最后将样品放置在显微镜下进行观察即可.

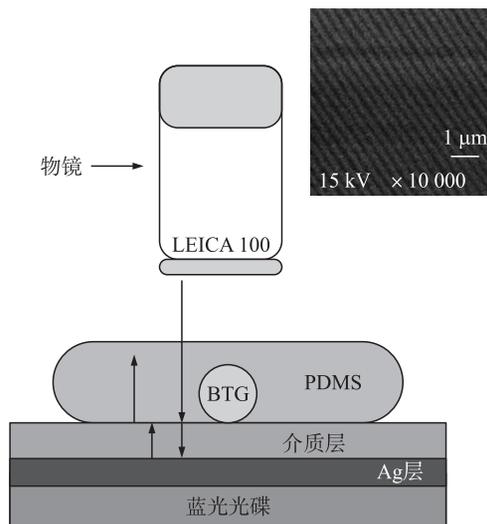


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup
插图为光碟的扫描电子显微镜图
The inset is the SEM image of the disk

2 分析和讨论

为提高成像质量,我们尝试在样品与微透镜之间生长不同厚度的 SU-8 介质层. 实验研究了厚度约为 0、80 nm、160 nm、220 nm 与 270 nm 的 SU-8 介质层对视场与放大倍数影响,通过 20 μm BTG 微球在 100×物镜下观察微球成像,实验结果如图 2 所示.

由图 2 可知,随着 SU-8 厚度增加,成像视场大小变化明显,而放大倍数变化不显著. 本文中,定义显微镜下可见的清晰图像的长度为视场大小. 视场数值大小是 100×物镜下条纹图案的长度大小. 如图 2 所示, SU-8 厚度在 160 nm 左右时候,视场明显增大. 视场由 10.8 μm 增大到 13.2 μm. 因为厚 160 nm 的 SU-8 介质层能够明显增强成像质量,所以实验又制备了厚度为 160 nm 的二氧化硅(SiO₂)、SU-8 光刻胶和二氧化钛(TiO₂)3 种不同介质层做进一步研究(其中 SiO₂, SU-8 和 TiO₂ 的折射率分别为 1.46,1.6 与 2.2). 160 nm 的不同介质层光碟成像图如图 3 所示.

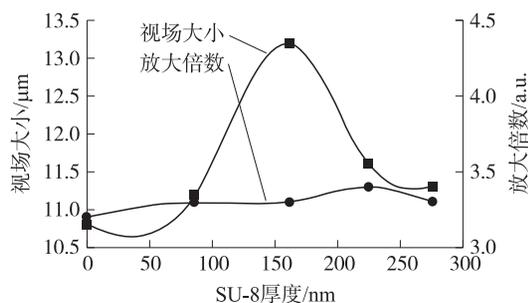


图 2 视场与放大倍数随 SU-8 介质层厚度变化曲线
Fig. 2 Field of view and magnification as a function of SU-8 film thickness

根据自然光透射公式 $T = \frac{4n_1n_2}{(n_2+n_1)^2}$ (其中 n_1 是 PDMS 折射率 1.4, n_2 是介质层折射率.), 计算可知,有 99.5% 以上光线在 PDMS 与 SU-8 界面发生透射,少量反射. 而在 SU-8 与样品界面,由于样品表面有一层薄银层,光线发生大量反射,最终与 BTG 微球表面光线干涉形成干涉环.

图 3(a) 显示没有介质层时 20 μm BTG 微透镜的成像. 由图可见,成像放大倍数为 3.2×,视场大小约

10.8 μm . 受干涉环干扰,成像中心与四周存在暗斑,成像质量不高^[14]. 图 3(b) 显示光碟与 PDMS 薄膜之间一层 160 nm 厚 SiO_2 介质层条纹成像图. 成像放大倍数约为 3.1 \times ,测量视场大小约 11.4 μm . 与图 3(a) 相比,视场有所增大. 图 3(c) 是光碟与 PDMS 薄膜之间生长 160 nm 左右厚 SU-8 介质层的成像图. 图像的放大倍数为 3.3 \times ,视场大小约 13.2 μm . 相比前两幅图,放大倍数略有增大,成像对比度与视场大小明显变好. 图 3(d) 显示 TiO_2 为介质层的微透镜成像. 放大倍数为 3.2 \times ,成像视场为 8.2 μm . 由图可见,视场大小大不如前,一定程度上影响了成像质量.

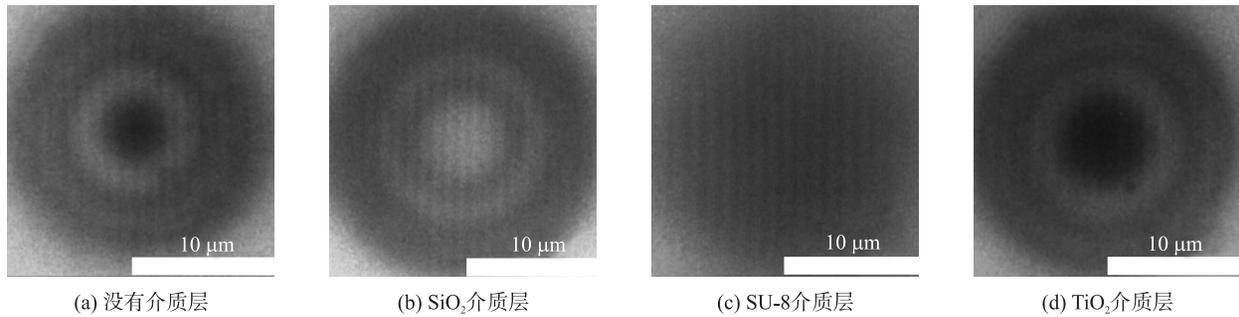


图 3 160 nm 的不同介质层光碟成像图

Fig. 3 Optical images of BD object coated by different dielectric layer of 160 nm

从以上成像图可以看出,厚度为 160 nm 的 SU-8 介质层最适于提高成像质量. 如图 1 所示,PDMS 中部分光线在介质层上表面发生反射,部分进入介质层. 如果在介质层上表面发生干涉相消,介质层相当于一层光学增透膜,可以增加耦合进介质层信息光量. 介质层一定程度消减了干涉环对成像的干扰,使可见条纹数量增加,所以视场增大. 光线在样品表面反射,携带光碟条纹信息的光量相对增加. 光线由 SU-8 到 PDMS,发生大量全反射,介质层中携带物体精细结构的倏逝波得以增强,使距离 BTG 微球与样品接触点较远位置的物体信息耦合进微球,传输到远场,视场也会得到一定程度增大. 在 PDMS 与 SU-8 界面,光线由于从低折射率到高折射率,反射时发生半波损失. 而在 SU-8 与光碟界面,由于光碟薄银层存在,反射没有半波损失. 对应薄膜干涉相消原理,光程应该满足公式: $2nd = k\lambda$, 其中 k 为整数. 因此介质层厚度应该满足公式 $d = \frac{k\lambda}{2n}$ (其中 $\lambda = 540 \text{ nm}$, $n = 1.6$, k 为整数), 计算 $d = 168.75 \text{ nm}$. 这与我们实验中 160 nm 非常接近,因此 SU-8 介质层厚度在 160 nm 左右时成像视场有所增大,成像质量有所提高. 对于厚度为 160 nm 的不同种材料,根据干涉相消原理计算折射率 $n = \frac{k\lambda}{2d}$ (其中 $\lambda = 540 \text{ nm}$, $d = 160 \text{ nm}$, k 为整数.), $n = 1.69$. 非常接近 SU-8 介质折射率 1.6,因此 3 种材料中 SU-8 成像质量最好. 此外,BTG 外表面和介质层上表面间会形成牛顿环,由于 SU-8 层起了增透膜作用,减弱了 BTG 外表面与介质层上表面间牛顿环的影响.

需要指出的是对于同一样品,人为增加曝光强度示数值 I 并不意味着能提高成像质量. 为此实验比较了不同曝光强度下的同一组样品,显微镜曝光大小分别为 6.3 与 6.5. 显而易见,图 4(b) 相比图 4(a) 图案

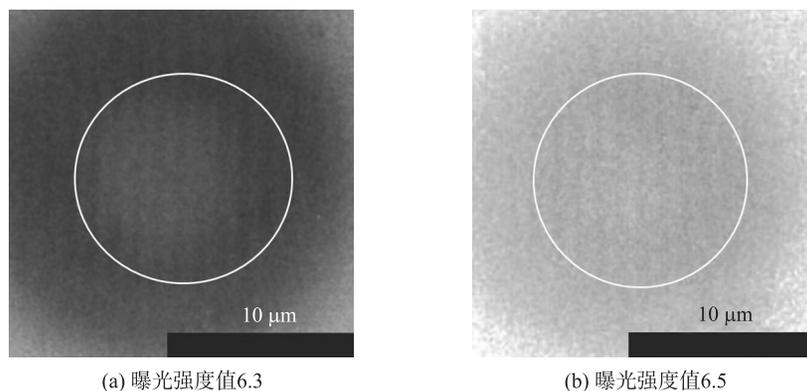


图 4 不同曝光强度下同一样品成像图

Fig. 4 Optical images of a same Blu-ray Disk object under different value of I

中心条纹(白色圆圈内)对比度变好^[16],说明示数值 I 增大有助于成像质量提高,但图案四周(白色圆圈内)因背景光过强而受到干扰,视场大小随之缩减. 因为携带图案信息的光线透射出介质层,小部分耦合进微球,大部分将成为背景光^[17-18]. 如果人为提高或者增大曝光强度 I ,透射出的条纹光信息增强,背景光也随之增大,实验证明背景光过强就会干扰条纹成像,降低成像质量^[17].

简言之,透射出的有效光中成为背景光的部分如果有细微增大,就会大幅干扰条纹信息成像. 本文通过介质层减少牛顿环与背景光干扰,能有效提高成像质量.

3 结论

本文研究了不同厚度的 SU-8 单层介质层对成像性质影响,实验发现:随着 SU-8 介质层从 0 增大到 270 nm,成像放大倍数变化不大,成像视场大小从 10.8 μm 达到了 13.2 μm . 其中 SU-8 厚度在 160 nm 左右时候,视场达到最大值. 对于厚度为 160 nm 的不同材料介质层,发现 SU-8 介质层最能提高视场大小,而二氧化钛介质层削弱了视场大小. 厚度为 160 nm 的 SU-8 介质层与文中其他介质层相比,起到了一层增透膜作用,使介质层内携带物体信息的光量相对增加. 介质层中光线由介质层到 PDMS 发生大量全反射,介质层中携带物体精细结构的倏逝波一定程度增强,使距离 BTG 微球与样品接触点较远位置的物体信息得以耦合进微球,传输到远场,视场得到一定程度增大. 同时,介质层一定程度消减了干涉环对成像的干扰,也使视场增大. 使成像完整且清晰,提高了成像质量.

[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, 218(2): 1-6.
- [2] HAO X, KUANG C, LIU X, et al. Microsphere based microscope with optical super-resolution capability[J]. Applied physics letters. 2011, 99: 203102(1-3).
- [3] DARAFSHEH A, WALSH G F, DAL NEGRO L, et al. Optical super-resolution by high-index liquid-immersed microspheres[J]. Applied physics letters, 2012, 101: 141128(1-4).
- [4] DARAFSHEH A, FIDDIY M A, ASTRATOV V N. Super-resolution imaging by high-index microspheres immersed in a liquid[C]// JAWORSKI M, MARCINIAK M. International Conference on Transparent Optical Networks-ICTON. Coventry, England, 2012, paper TU.A6.5.
- [5] HAO X, KUANG C, LI Y, et al. Hydrophilic microsphere based mesoscopic-lens microscope(MMM)[J]. Optics communication, 2012, 285(20): 4 130-4 133.
- [6] DU B, YE Y, HOU J, et al. Sub-wavelength image stitching with removable microsphere-embedded thin film[J]. Applied physics a materials science and processing, 2016, 122(1): 1-6.
- [7] ASTRATOV V N, DARAFSHEH A. Methods and systems for super-resolution optical imaging using high-index of refraction microspheres and microcylinders[P]. US patent application 2014/0355108 A1 published on 2014-12-04, related to U.S. Provisional application 61/656,710 filed on 2010-06-07.
- [8] 庞辉, 杜春蕾, 邱琪, 等. 介质微球超分辨成像薄膜[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0426004(1-4).
- [9] ALLEN K W, FARAHI N, LI Y, et al. Super-resolution imaging by arrays of high-index spheres embedded in transparent matrices[C]//IEEE Proc of Aerospace and Electronics Conference (NAECON). Dayton, June 24-27, 2014.
- [10] ALLEN K W. Waveguide, photodetector and imaging applications of microspherical photonics[D]. Charlotte: University of North Carolina, 2014: 98-122.
- [11] ALLEN K W, FARAHI N, LI Y, et al. Super-resolution microscopy by movable thin-films with embedded microspheres: resolution analysis[J]. Annalen der physik, 2015, 527(7/8): 513-522.
- [12] 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.
- [13] WANG Z. Improvements in and Relating to Lenses. PCT/GB2014/052578[P]. 2014-8-22.
- [14] GUO M, YE Y, HOU J, et al. Experimental far-field imaging properties of high refractive index microsphere lens[J]. Photonics research, 2015, 3(6): 339-342.

(下转第 143 页)

J Appl Phys, 2005, 98:011101-1-011101-10.

- [3] KOGELBAUER I, HEINE E. Adaptation of soil physical measurement techniques for the delineation of mud and lakebed sediments at neusiedler see[J]. Sensors, 2013, 13:17 067-17 083.
- [4] FEVILLET P C, TODOROV Y, STEED R. Extremely sub-wavelength THz metal-dielectric wire microcavities[J]. Opt Express, 2012, 20:29 121-29 130.
- [5] TODOROV Y, TOSETTO L, TEISSIER J, et al. Optical properties of metal-dielectric-metal microcavities in the THz frequency range[J]. Opt Express, 2010, 18:13 886-13 907.
- [6] FEVILLET P C, TODOROV Y, VASANELLI A, et al. Strong near field enhancement in THz nano-antenna arrays[J]. Scientific reports, 2013(3):299-308.
- [7] WANG X D, YE Y H, ZHANG C. Tunable figure of merit for a negative-index metamaterial with a sandwich configuration[J]. Opt Lett, 2009, 34:3 568-3 570.
- [8] CHEN K, WEN Q Y, ZHANG H B. Study on the broadband terahertz metamaterial absorber[J]. Electronic components and materials, 2011, 30:56-59.
- [9] LANDY N I, SAJUYIGBE S. Perfect metamaterial absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100:1 586-1 594.

[责任编辑:顾晓天]

(上接第 136 页)

- [15] LEE S, LI L, WANG Z, et al. Immersed transparent microsphere magnifying sub-diffraction-limited objects[J]. Applied optics, 2013, 52(30):7 265-7 270.
- [16] HAO X, LIU X, KUANG C, et al. Far-field super-resolution imaging using near-field illumination by micro-fiber[J]. Applied physics letters, 2013, 102(1):1-4.
- [17] HAO X, KUANG C, LI Y, et al. Evanescent-wave-induced frequency shift for optical superresolution imaging[J]. Optics letters, 2013, 38(14):2 455-2 458.
- [18] HAO X, KUANG C, GU Z, Y, et al. From microscopy to nanoscopy via visible light[J]. Light-science and application, 2013, 10 (e108):1-10.

[责任编辑:顾晓天]