光盘上集成的液体微透镜阵列与可重构超分辨成像*

谷同凯[1)2)] 王兰兰[1)†] 国阳[1)] 蒋维涛[1)] 史永胜[1)]
杨硕[3)] 陈金菊[4)] 刘红忠[1)‡]

1) (西安交通大学机械工程学院, 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054)

2) (西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055)

3) (北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

4) (纽卡斯尔大学工学院, 纽卡斯尔 NE1 7RU)

(2022 年 11 月 23 日收到; 2023 年 2 月 12 日收到修改稿)

微透镜辅助显微镜实现超分辨成像观测, 具有免标记、无损伤、实时、定域和环境兼容性好等优势. 液体微透镜阵列具有均一、易操控的特性, 可实现无复杂机械扫描与驱动的超分辨成像. 然而, 简单高效地精确控制成像距离是微透镜实现超分辨成像的关键技术挑战. 本文利用紫外曝光技术, 实现了光盘上光刻胶微孔深度的均一性. 结合液体自组装技术, 在微孔中填充甘油液滴, 保证微透镜辅助超分辨的成像距离. 在光学显微镜下实现了对 226 nm 光栅栅线的可重构超分辨观测与 1.59 倍成像放大. 本文从液体微透镜的阿贝显微成像原理出发, 通过理论与模拟解释了液体微透镜的成像放大与超分辨特性. 由此可见, 光盘上集成的液体微透镜阵列在光学纳米测量与传感等器件中展现了巨大的应用潜力.

关键词: 液体微透镜阵列, 超分辨, 成像放大, 阿贝成像

PACS: 95.75.De, 82.56.Dj, 42.30.–d, 07.05.Pj **DOI:** 10.7498/aps.72.20222251

1 引 言

光学衍射极限导致光学显微镜的分辨率被限制在半个波长[1], 无法满足对亚微米级光学观测的需求. 利用微透镜辅助显微镜实现超分辨率的观测, 可用自然光实现免标记的超分辨率成像, 也可在成像区域内实现实时、原位的超分辨成像, 在低成本无损伤的微纳米检测方面具有重要的应用价值[2]. 微透镜界面处产生的倏逝波不断耦合聚集, 并转化为可以传输物体高频信息的传播波, 从而提升了微透镜的成像放大倍数与分辨率[3–7]. 研究者虽然对微透镜辅助超分辨检测在理论和应用上逐步进入了深入研究, 提出了超分辨率提升的方法[8–17]. 但是难以实现对微透镜的三维空间位置的操控、周期性排列以及大范围纳米结构的超分辨定位观测与追踪.

根据微透镜阵列的可操控特性, 研究者实现了扫描微透镜辅助的超分辨显微成像技术. 将微透镜固定在微探针上, 利用二维步进机控制微透镜与样品间的接触状态, 获得了样品表面任意区域的超分辨显微成像[18–20]. 但是复杂的机械部件, 限制了微透镜辅助超分辨检测的广泛应用.

液滴由于具有超光滑表面、良好的生物兼容性、可编程的实时/域操控特性, 避免了外界复杂的机械驱动设备, 在可调谐的超分辨成像方面具有

* 国家自然科学基金 (批准号: 52075433, 52011530186, 51625504, 51827805)、陕西省重点产业链项目 (批准号: 2021ZDLGY12-04) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 2016M600785, 2016BSHEDZZ126, 2018T111048) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lanlan1900@mail.xjtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: hzliu@mail.xjtu.edu.cn

© 2023 中国物理学会 Chinese Physical Society

明显的优势[16,21–23]. 但是由于液滴的表面张力等特性, 液滴容易发生流变与融合, 限制了液滴在超分辨检测中的广泛应用. 液滴填充在微孔阵列中形成的液体微透镜阵列, 避免了微液滴的流变与融合, 保证了超分辨检测时的均匀性与稳定性, 受到了广泛关注[24].

液体微透镜阵列多采用喷墨打印或液体自组装的方法制造. 由于喷墨打印技术对液体黏度、微喷嘴以及驱动控制部件有严格的要求[16,25,26], 限制了其在液体微透镜制造方面的广泛应用. 液体自组装技术不受外能场影响, 降低了模板结构等因素的影响, 可以在不规则、变尺度、大深宽比的模板微腔体中填充液体, 提高了液体微透镜阵列的生产效率[27–29]. 但是为了满足超分辨成像的条件, 需要物距接近微透镜的焦距. 满足物距条件却不依赖复杂精密的纳米驱动设备, 一般需要将液体微透镜阵列直接倒置在待测样品表面[24], 这容易引起微透镜的形貌变化, 最终影响超分辨效果.

本文在待测光栅上旋涂光刻胶并进行曝光清洗, 得到了均匀的光刻胶微孔 (微孔深度 $h_{\rm d}$ 约为 6 μm, 微孔直径 D 约为 13 μm). 甘油流经疏水处理的光刻胶微孔阵列, 得到了与待测光栅集成的液体微透镜阵列 (液高 $h = 1.176$ μm), 保证了液体微透镜阵列与待测光栅间超分辨成像时的工作距离, 避免了液体微透镜与待测样品集成时形貌变化的影响. 通过 50×/0.75 的金相显微镜观测, 在白光光源下实现了对 226 nm 栅线的超分辨成像. 通过放大 5000 倍的光学显微镜观测, 得到了液体微透镜的成像放大倍数约为 1.59.

微透镜辅助显微镜实现的超分辨成像可归因于倏逝波耦合传输[13,30]、光子纳米射流效应[17,31,32]、米氏散射[33] 以及光学回音壁模式共振[34] 等. 但是这些理论缺乏完善且统一的解释, 也无法完全通过理论解释实验中的一些现象. 本文从阿贝显微成像理论出发, 分析了液体微透镜对待测光栅的成像过程. 经过两次傅里叶变换, 并在微透镜焦平面进行低通滤波, 得到了与实验结果一致的再现像放大倍数.

因此, 与待测样品集成的液体微透镜阵列, 通过高强度聚焦与成像放大, 为无标记超分辨率光学成像提供了简单、新颖、高效的途径, 可广泛应用于近场光刻、光谱信号增强和光学纳米传感等领域.

2 工作原理与制备工艺

通过改变物光波的频谱结构, 在像平面上可以得到与物不同的像, 可以实现对物光波的处理. 液体微透镜具有低通滤波特性, 可以很好地改变衍射光波的频谱结构, 从而在像平面得到放大的像. 放大的像作为显微镜的观测物, 可使显微镜观测到原本无法观测的细节信息, 从而实现超分辨成像与观测.

液体微透镜由于本身尺寸效应导致的焦距较小. 根据高斯公式可知, 获得高分辨的放大成像, 需要待测样品在微透镜的二倍焦距以内. 同时需要控制器实现运动平台的纳米级移动, 并保证微透镜与样品间距的纳米级精度, 从而得到最为清晰且分辨率高的图像. 因此要求高精度的机械运动组件与复杂的光路系统. 简单可行的精确确定微透镜与样品间距的方法是在样品上直接制造出液体微透镜阵列.

2.1 理论模型

平面光照射光栅, 光栅衍射的各次级平面波沿着各自方向传播, 通过微透镜后, 在后焦面 (频谱面) 上形成夫琅禾费衍射图样, 视为第 1 次衍射像. 被微透镜收集的衍射次级平面波在像平面上形成光栅的像, 视为第 2 次衍射像. 成像的两个步骤就是两次傅里叶变换. 第 1 步是把光栅的空间分布 $f(x,y)$ 变为频谱面上的空间频率分布 $F(w,v)$. 第 2 步再进行一次傅里叶变换, 将空间频率还原为光场的空间分布, 如图 1 所示.

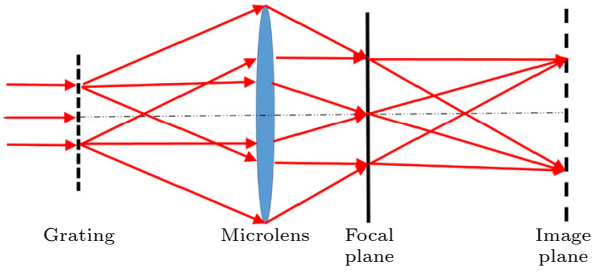

图 1 阿贝成像过程示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the Abbe imaging process.

以透射率只有 0 和 1 两个取值的一维光栅为例. 可以用傅里叶变换方法分析阿贝二次成像原理以及空间滤波特性. 为了简化分析过程, 不考虑透镜数值孔径大小的影响, 在物面 (x_0, y_0) 上, 一维光栅的透射率函数表示为

$$f(x_0)=\left[\mathrm{rect}\left(\frac{x_0}{a}\right)\otimes\frac{1}{d}\mathrm{comb}\left(\frac{x_0}{d}\right)\right]\mathrm{rect}\left(\frac{x_0}{L}\right)$$
$$=\left[\sum_{m=-\infty}^{\infty}\mathrm{rect}\left(\frac{x_0-md}{a}\right)\right]\mathrm{rect}\left(\frac{x_0}{L}\right),\quad(1)$$

其中, rect(·) 为矩形函数, a 为光栅狭缝宽度 (m), $\otimes$ 为张量积运算, d 为光栅常数 (m), comb(·) 为梳状函数, L 为光栅总宽度 (m). 因此, 透镜在频谱面上的光场正比于 $F(w)$, 且 $F(w)$ 满足:

$$F(w)=\frac{aL}{d}\mathrm{sinc}(Lw)+\sum_{i=1}^{\infty}F_i(w),\quad(2)$$

式中, 辛格函数 $\mathrm{sinc}(x)$ 为抽样函数, 满足

$$\mathrm{sinc}(x)=\sin(\pi x)/(\pi x).\quad(3)$$

频谱 w 满足:

$$w=x/(\lambda f),\quad(4)$$

式中, x 为焦平面上的位置坐标, λ 为光波波长, f 为透镜焦距.

(2) 式中, $F_i(w)$ 满足:

$$F_i(w)=\frac{aL}{d}\mathrm{sinc}\left(\frac{ia}{d}\right)\left\{\mathrm{sinc}\left[L\left(w-\frac{i}{d}\right)\right]+\mathrm{sinc}\left[L\left(w+\frac{i}{d}\right)\right]\right\},\quad(5)$$

式中, i 为光栅衍射级次.

对于特定的滤波器, 如果只允许第 i 级通过, 那么光栅在像平面上的成像为

$$f(x')=\mathrm{rect}\left(\frac{x'}{L}\right)\left[2\mathrm{sinc}\left(\frac{ia}{d}\right)\cos\left(2\pi\frac{ix'}{d}\right)\right],\quad(6)$$

式中, x' 为像平面上的坐标位置. 此时, 光栅像的结构为余弦振幅光栅型, 但周期变为物的 $1/i$, 因此光栅成像的放大倍数为 $1/i$.

对于液体微透镜来说, 孔径有限, 对光栅透过率有影响并且可以看作低通滤波器. 因此允许光栅的低频空间信息通过. 各级次的低频信息相叠加, 使得光栅最后所成的像, 周期变化, 呈现出特定的放大倍数. 光栅的像, 使得放大的细节信息能够更好地通过显微镜再次成像. 所以, 原本直接在显微镜下观测不到的细节信息, 通过微透镜的放大, 可以更好地分辨出来, 即实现了超分辨成像.

2.2 制备工艺

液体微透镜的超分辨成像, 需要通过液体微透镜观测到平常光学显微镜难以观察到的尺寸. 因此, 利用具有亚微米结构的光盘作为观测基底. 通过紫外曝光和自组装技术, 在光盘上直接制作液体微透镜阵列, 可以精确控制液体微透镜与光盘光栅之间的距离, 实现光栅在微透镜二倍焦距内, 从而保证微透镜的成像放大. 这样可避免采用纳米精度的机械控制平台以及复杂的光路系统. 具体工艺流程如图 2 所示.

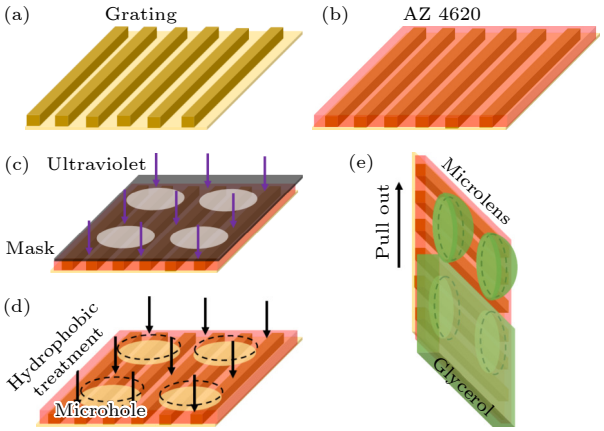

图 2 光盘上液体微透镜阵列制备的示意图 (a) 光盘光栅; (b) 旋涂光刻胶; (c) 紫外曝光; (d) 疏水处理; (e) 自组装过程

Fig. 2. Schematic diagram of the fabrication process of liquid microlens arrays on light disk grating: (a) Disk grating; (b) spin-on photoresist; (c) UV exposure; (d) hydrophobic treatment; (e) liquid self-assembly process.

剥离蓝光光盘上的塑料保护层, 获得光盘光栅模板, 其示意图见图 2(a). 首先将光盘光栅依次加入酒精和去离子水中超声振荡 10 min, 并烘干, 去除光栅上的杂质; 然后将光刻胶 AZ 4620 滴加在光盘光栅上, 以 500 r/min 的转速旋转光栅 5 s; 接着, 以 2000 r/min 的转速旋转光栅 40 s. 这样得到的光刻胶薄膜均匀, 且厚度仅有几个微米, 如图 2(b) 所示. 将旋涂有光刻胶的光栅放在掩模板下进行紫外线 (UV) 曝光处理, 如图 2(c) 所示; 接着, 用 0.5% 的氢氧化钠水溶液、无水乙醇和去离子水逐步洗去与紫外线发生反应的光刻胶, 得到均匀的光刻胶柱形微孔阵列; 用八氟环丁烷 (C_4F_8) 等离子体处理光刻胶微孔阵列, 降低光刻胶以及光栅的表面能, 得到了超疏水性表面, 如图 2(d) 所示. 最后, 将带有光刻胶微孔的光栅浸没在甘油液体中, 并用真空泵抽取周围空气, 让甘油液体在真空中存放 10 min, 去除光刻胶微孔与甘油接触面上的气体. 用步进电机将模板的移动速度保持在 0.9 mm/min. 当光栅从甘油中缓慢提拉出液面时, 球面轮廓的液滴将会存留在光刻胶微孔中, 从而形成光盘光栅上的液体微透镜阵列, 如图 2(e) 所示.

3 测试结果与讨论

液体微透镜的超分辨成像效果, 需要通过液体微透镜观测到平常光学显微镜难以观察到的尺寸, 其尺寸一般为 200 nm.

通过剥离商业光盘的塑料封装层, 获得亚微米结构的光盘光栅作为基底, 其实物如图 3(a) 所示. 在光盘未进行光刻胶旋涂前, 置于 3000×放大倍数的光学显微镜中观察, 如图 3(a) 右上角所示, 光盘的精细结构不能够分辨. 通过扫描电子束显微镜 (SEM) 对其进行观测, 如图 3(b) 所示, 光栅间距约为 408 nm, 栅线宽度约为 226 nm. 因此光栅周期约为 634 nm.

3.1 形貌特性

在进行液体自组装之前, 通过共聚焦扫描显微镜 (CLSM) 对光刻胶微孔形貌进行观测, 结构如图 4(a) 所示. 由于光刻工艺的均一性, 光盘光栅上光刻胶微孔的形貌保持一致. 经过图 4(a) 中的光刻胶微孔做截面, 测量微孔的轮廓特性, 如图 4(b) 所示. 光刻胶柱形微孔的直径 D 约为 13 μm, 深度 $h_{\rm d}$ 约为 6 μm. 由于光刻胶在疏水处理时的热膨胀, 导致光刻胶微孔边缘高度有所起伏.

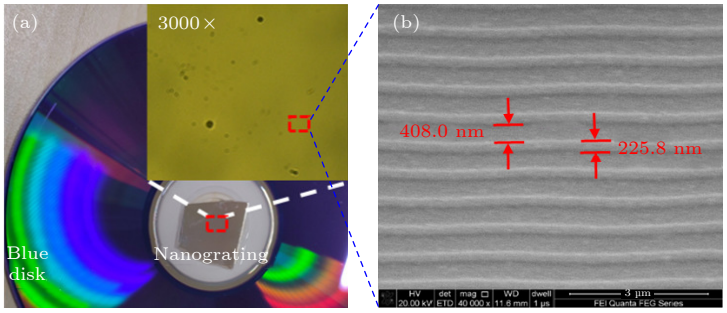

图 3 光盘及其观测结果 (a) 通过 3000×显微镜; (b) 通过扫描电子显微镜

Fig. 3. Blue disk and its observation: (a) Through 3000× microscopy; (b) through SEM.

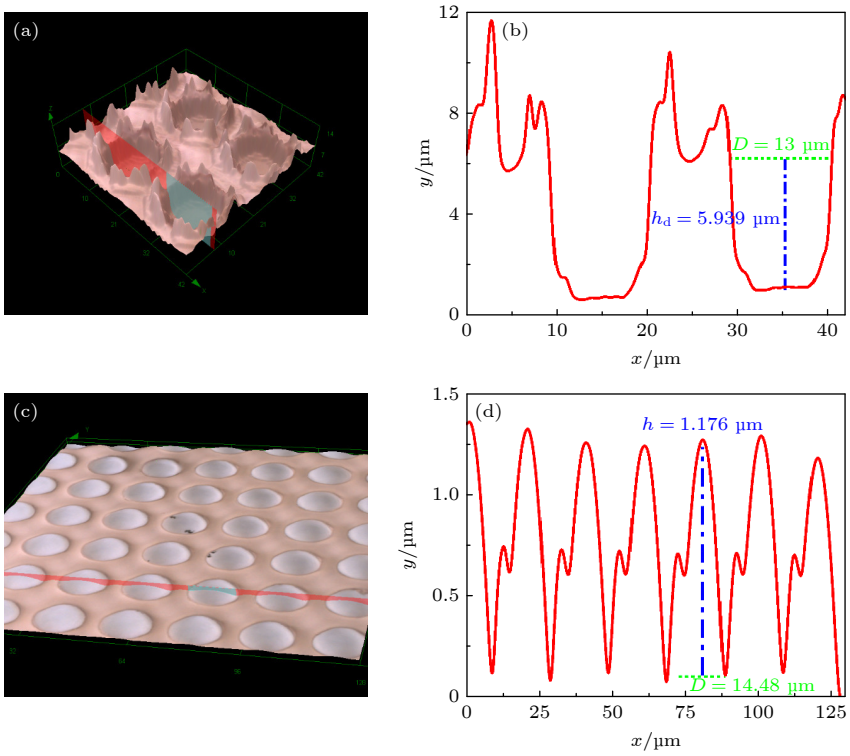

图 4 液体自组装前后模板的共聚焦扫描结果 (a) 微孔阵列; (b) 微孔轮廓和结构参数; (c) 微透镜阵列; (d) 微透镜轮廓和结构参数

Fig. 4. Observation of template before and after liquid self-assembly process through CLSM: (a) Microhole arrays; (b) profile and parameters of microholes; (c) liquid microlens arrays (LMLAs); (d) profile and parameters of microlenses.

观测液体自组装填充后的液体微透镜阵列, 发现液体微透镜均匀性好, 表面轮廓光滑, 如图 4(c) 所示. 经过图 4(c) 中的液体微透镜中心做截面, 测量液体微透镜的轮廓特性, 如图 4(d) 所示. 每个液体微透镜的液面高度 h 约为 1.176 μm. 液体的底部直径 D 约为 14.48 μm.

3.2 光学性能测试

3.2.1 超分辨成像性能

将光盘光栅上的液体微透镜阵列放置在金相显微镜的载物台. 光盘反射的光经过液体微透镜, 依次经过金相显微镜的物镜与目镜, 被传输进探测器, 进而被观测到. 成像实验装置示意图如图 5(a) 所示, 成像实验全局图如图 5(b) 所示.

选用 50×/0.75 的物镜, 上下调节载物台的位置, 可以找到光盘通过液体透镜成像后, 在显微镜上呈现出最清晰的像, 如图 5(c) 所示. 经过液体微透镜, 可以清晰地分辨出光盘上的精细结构. 且液体微透镜具有良好的均匀性. 在相同条件下, 把直接剥离的光盘光栅放置在金相显微镜下观察, 结果如图 5(d) 所示. 此时, 分辨不出光栅精细结构. 这表明液体微透镜增强了金相显微镜的分辨能力.

光盘光栅 226 nm 的栅线, 可以通过液体微透镜清晰地分辨出来, 表示通过液体微透镜在黄光 (波长约为 600 nm) 下实现了超分辨 ($R_{\rm d}$ = 226 nm < $\lambda/2$ = 300 nm).

3.2.2 成像放大

调节显微镜的数值孔径与放大倍率, 以量化微透镜成像的放大倍数. 当显微镜放大倍率调至 5000 倍时, 得到光盘通过液体微透镜成像放大的结果, 如图 6(a) 所示. 微孔直径即蓝线长度 D = 16.4 μm. 图 6(b) 表示图 6(a) 中蓝线处的像素与灰度关系. 灰度表示成像的光强分布. 图 6(a) 中蓝线对应的像素数为 408 个, 蓝线中心位置附近存在一个灰度极大值点 (零极值点) 为 (202, 153.87). 零极值点右侧第一极大值点 (右一极值点) 为 (227, 151.8). 零极值点左侧第一极大值 (左一极值点) 为 (177, 149.55). 依次定义, 可以计算出左二极值点为 (160, 139.31), 右二极值点为 (252, 138.29),

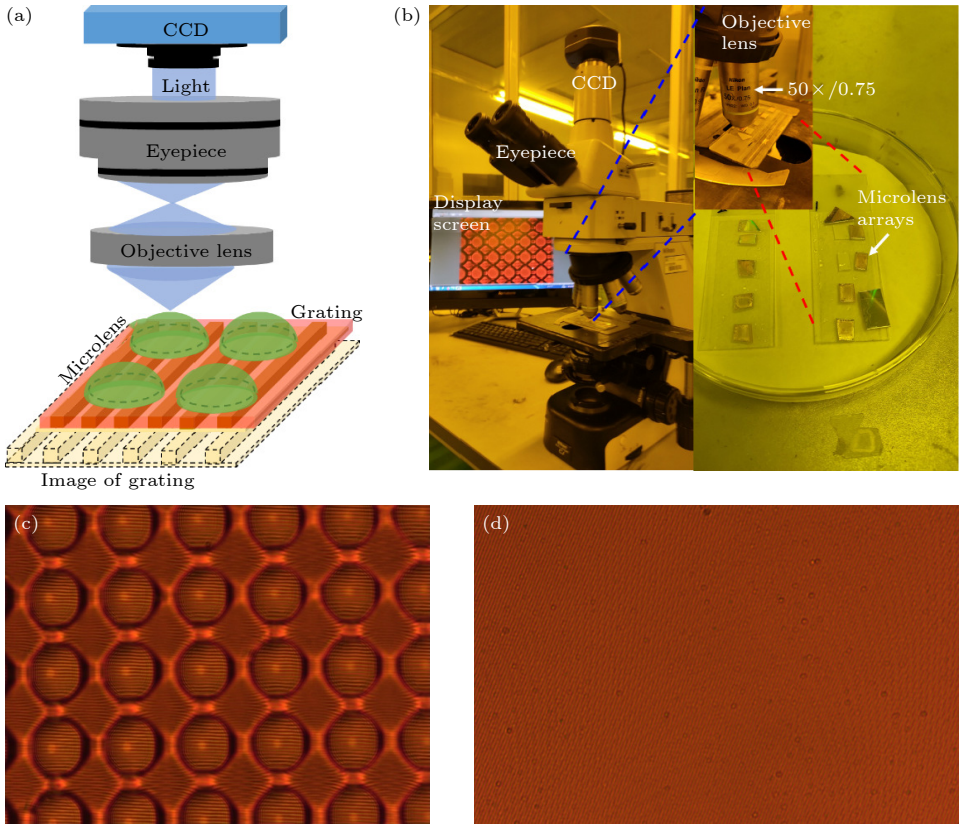

图 5 光盘光栅的金相显微镜观测 (a) 成像示意图; (b) 实验全局图; (c) 通过微透镜阵列; (d) 未通过微透镜阵列

Fig. 5. Observation of blue disk gratings through metalloscope: (a) Schematic diagram of experiment; (b) figure of experimental equipment; (c) through LMLAs; (d) not through LMLAs.

右三极值点为 (271, 120.32). 通过计算可以发现, 零极值点距离左右第一极值点所占的像素数均为 25 个. 左二极值点距离左一极值点所占的像素数为 17 个. 右二极值点距离右一极值点所占像素数为 25 个. 右三极值点距离右二极值点所占像素数为 19 个. 这些数据表明微透镜中心区域成像均一性较好, 这主要是微透镜成像时边缘的场曲畸变等像差导致的成像均一性降低. 同时微透镜右侧均一性 (非均一性首次出现在右三极值点) 较左侧均一性 (非均一性首次出现在左二极值点) 好, 这主要归因于微透镜入射的光束偏右, 微透镜右侧成像对比度明显, 更利于均一性好的成像观测与灰度提取.

减少微透镜场曲、畸变、对比度等对成像特性的影响, 应优先选取微透镜成像零极值点分别与左右第一极值点间的距离作为光盘光栅成像后的周期. 因此, 成像后的周期为 $25 \times 16.4\ \mu\text{m} \div 408 = 1004.9$ nm. 这与通过 SEM 观测的结果相比增大到了原来的约 $1004.9 \div 633.8 = 1.59$ 倍. 即放大倍数 M 约为 1.59.

3.3 可重构超分辨成像

对液体微透镜施加电热驱动可以实现可重构超分辨成像, 如图 7 所示.

将纳米结构上的液体微透镜阵列黏附在 ITO 导电玻璃上. 利用导电胶带把黏附有液体微透镜阵列的 ITO 玻璃与直流电源连接, 然后把液体微透镜放置在 5000×光学显微镜下.

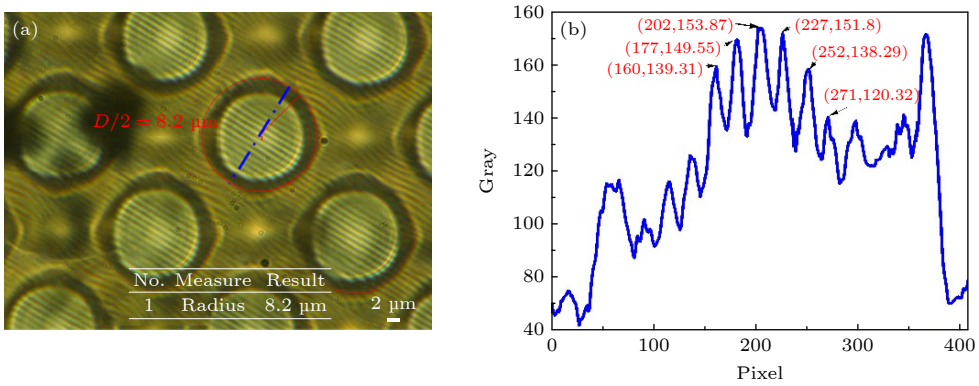

图 6 光盘光栅透过微透镜在 5000×光学显微镜下的观测 (a) 通过微透镜阵列成像; (b) 在 (a) 图中蓝线对应的灰度分布

Fig. 6. Observation of blue disk gratings through 5000× microscope: (a) Image grating through LMLAs; (b) the grayscale of blue line in (a).

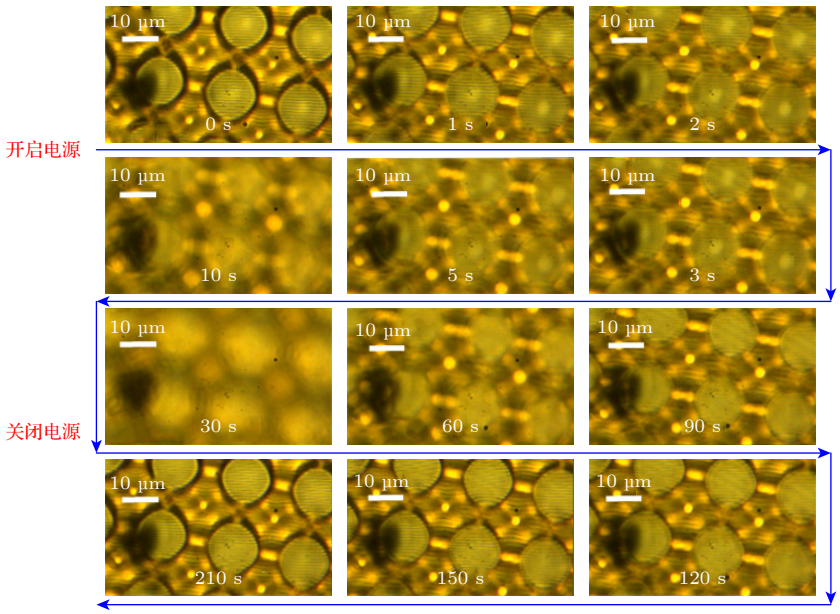

图 7 液体微透镜阵列对光盘光栅的可重构超分辨成像

Fig. 7. Reconstructable super-resolution imaging of optical disk gratings by LMLA.

当直流电源施加 5 V 驱动电压和 0.69 A 的直流电流, 由于电热导致液体界面张力变化, 引起微透镜的形状逐渐改变. 因此纳米结构经过液体微透镜的超分辨成像越来越模糊, 直至完全看不出精细结构, 成像结果如图 7 所示. 在 30 s 时关闭电源, 液体微透镜形状将逐渐恢复. 纳米结构的超分辨成像越来越清楚. 直至 210 s 时, 出现清晰的精细结构图像, 液体微透镜恢复到初始状态. 由于液体热传输与散热较慢, 因此导致液体微透镜的超分辨成像恢复过程较长.

4 模拟结果与分析

基于目前成像机理的不统一, 从传统的傅里叶变换与光学滤波生成图像的阿贝显微理论出发, 建立微透镜的超分辨成像模型, 解释微透镜的超分辨成像过程.

4.1 成像过程模拟

利用共聚焦显微镜观测得出的光盘上液体微透镜的参数, 可以计算出液体微透镜的半径 R、焦距 f 和物距 u, 结果如下:

$$R = \left(D^2/4 + h^2\right)/(2h) = 22.9\ \mu\text{m}, \tag{7}$$

$$f = R/(n-1) = 48.4\ \mu\text{m}, \tag{8}$$

$$u = h + h_\text{d} - R = -15.8\ \mu\text{m}. \tag{9}$$

通过 (7) 式—(9) 式中的结构参数, 可以构建光盘光栅通过液体微透镜阿贝成像的系统模型, 利用 Matlab 对其成像过程进行仿真, 验证液体透镜对光盘的直接成像放大的有效性.

设置总采样点数 S 为 145, 选取 10 个采样点对应 1 μm. 设置物面尺寸 L_0 等于微透镜尺寸为 14.5 μm. 选取周期采样数为 6, 栅距采样数为 4, 并构建用于成像的物光栅, 如图 8(a) 所示. 构建的光栅与实验成像的光盘光栅具有相同的周期和栅距, 可以表示实际的成像物. 经过物光栅后, 光波衍射至微透镜平面, 由于衍射光的叠加, 在微透镜边缘出现了振铃效应, 如图 8(b) 所示. 根据信息光学理论可知, 对于 sinc 函数, 经傅里叶变换后为

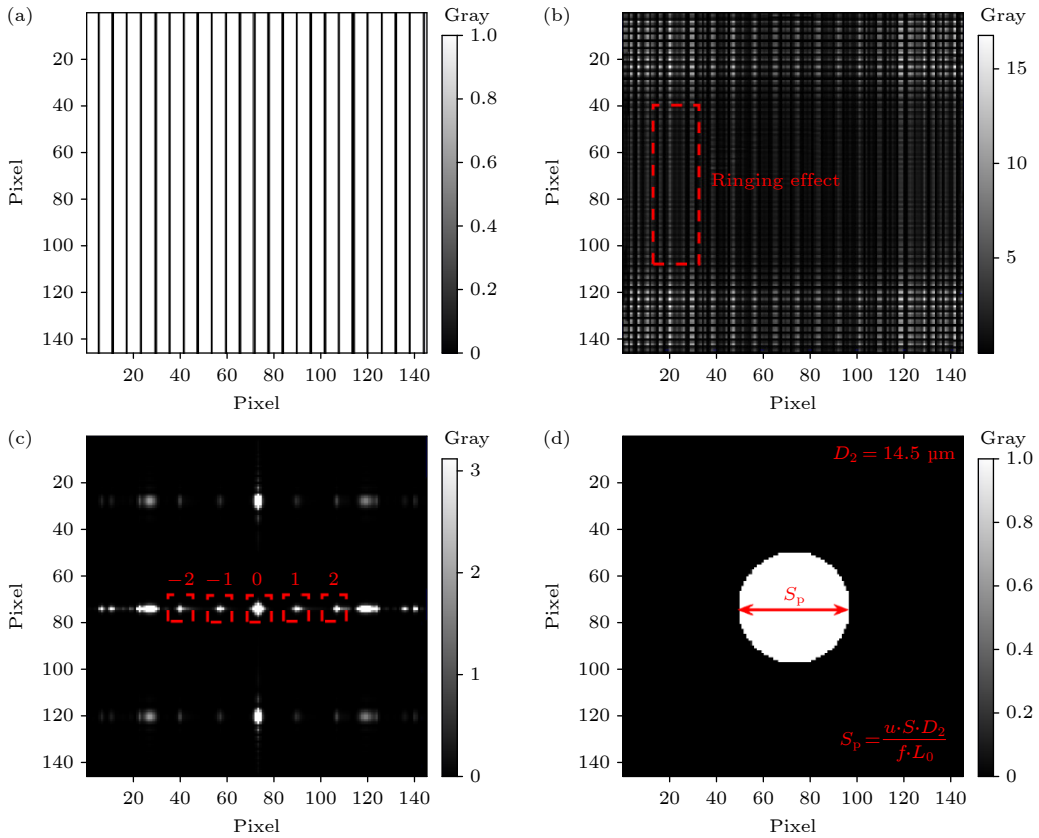

图 8 光盘上液体微透镜成像过程的模拟 (a) 设置物光栅; (b) 微透镜所在平面光强分布; (c) 微透镜焦平面光强分布; (d) 匹配滤波器

Fig. 8. Simulation of imaging process of liquid microlens on blue disk: (a) Set gratings; (b) light intensity of microlens surface; (c) light intensity of microlens focal plane; (d) light wave filter.

矩形窗函数. 因此具有接近窗函数的滤波器, 傅里叶逆变换后, 空域函数形式接近 sinc 函数, sinc 函数两边的余波将产生相互叠加振荡, 使滤波图像产生“振铃”. 因此, 频域滤波器具有陡峭的变化, 会使滤波图像的灰度剧烈变化而产生的振荡, 就好像钟被敲击后产生的空气振荡. 微透镜作为滤波器, 其边缘光透过性会产生剧烈变化, 因此会在再现图像边缘出现振铃效应.

接着, 光波经过微透镜聚焦, 相当于物光栅经过微孔的夫琅禾费衍射, 因此在微透镜后焦面上出现明暗相间的衍射光斑, 中心的亮斑点相当于 0 级衍射光斑, 与其相邻的光斑相当于 ±1级衍射光斑, 稍远些的光斑相当于 ±2 级衍射光斑. 其他衍射级次依次类推, 如图 8(c) 所示. 利用直径为 D_2 的圆形滤波片进行滤波, 则滤波器直径对应的采样点数 $S_{\rm p}=\dfrac{D_2}{D_{\rm f}}S=\dfrac{u\cdot S\cdot D_2}{f\cdot L_0}$, 如图 8(d) 所示.

若未滤波, 像平面处的再现像如图 9(a) 所示. 振铃效应导致再现像的周期不明显, 且成像对比度较差. 低通滤波的再现像, 如图 9(b) 所示. 亮条纹只在边缘处存在较小的振铃效应, 成像对比度显著增大. 光栅周期相对所构建的物光栅有所增大.

分别对图 9(a) 和图 9(b) 截取剖线, 剖线经过再现像的像素中心点且沿再现像的 x 轴方向, 结果如图 9(c) 和图 9(d) 所示. 利用 Matlab 计算出剖线上的灰度分布, 灰度分布反映了光强分布. 光强的周期表示了光栅再现像的周期. 对于未滤波的光栅再现像, 由于通光孔径大, 引起的振铃效应导致高频信息丢失. 剖线上周期不明显, 再现像质量较低, 如图 9(c) 所示. 对于低通滤波的光栅再现像, 周期明显, 如图 9(d) 所示. 中心附近的光强极值点为 (75, 2.412), 其右侧与其紧相邻的极值点为 (84, 2.307). 所以蓝光光盘再现像的周期 $d'=x_1-x_2=84-75=9$. 液体微透镜对光栅成像的成像放大率为 0.9 μm ÷ 0.6 μm = 1.5. 其中, 为了简化仿真运算, 采用 0.6 μm 表示光盘光栅的周期. 模拟所得放大倍数与实验所得放大倍率 1.59 出入不大.

4.2 超分辨特性模拟

微透镜所成图像是其点扩散函数与物体强度或者复振幅分布函数的卷积, 以此可以对微透镜的分辨率进行估计. 利用时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 对液体微透镜的衍射聚焦特性进行分析. 如图 10(a) 所示, 选用入射光波长 $\lambda=400$—700 nm、光强 $I_0=1$ W/m^2 的平面光波沿 x 轴入射至微透镜. 设置微孔的直径为 14.5 μm, 液面高度 $h=1.176$ μm, 微孔深度 $h_{\rm d}=6$ μm. 仿

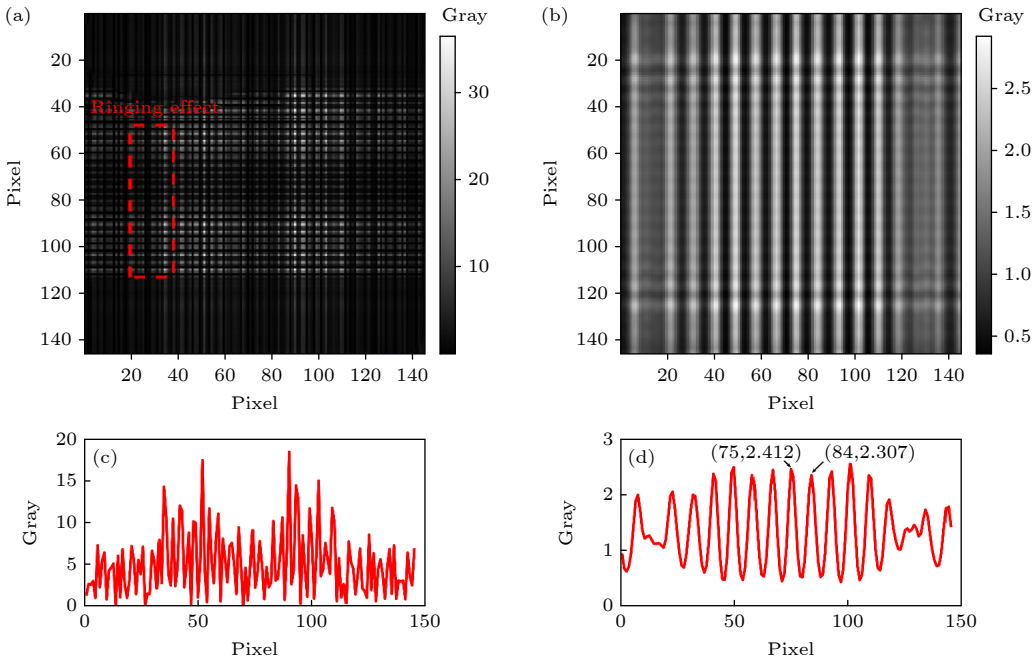

图 9 光盘光栅再现像与剖线 (a) 未用滤波器的再现像; (b) 用滤波器的再现像; (c) 图 (a) 中心横向截线上灰度分布; (d) 图 (b) 中心横向截线上灰度分布

Fig. 9. Reconstructed images of blue disk gratings and their section lines: (a) Reconstructed image without filter; (b) reconstructed image with filter; (c) section line of (a); (d) section line of (b).

真边界选取理想匹配层吸收边界条件 (PML). 经过微透镜的衍射聚焦, 光波在微透镜后聚焦形成光子纳米射流 (photonic nanojets, PNJ), 聚焦光强显著增强, 如图 10(b) 所示.

在 PNJ 中心分别沿着 x, y 轴的方向取截线, 计算出截线上的光强分布, 结果分别如图 10(c) 和图 10(d) 所示. 通过图 10(c) 可知, 光强最大处的横坐标约为 $x_{\rm m}=53.5$ μm. 仿真时设置微透镜曲面中心坐标为 (0, 0), 因此微透镜的后焦距约为 $f_{\rm b}=x_{\rm m}-R=30.6$ μm 小于理论焦距 48.4 μm, 这主要是因为倏逝波在微透镜的球面处耦合传输, 并转化为可以用来传输高频信息的传输光波, 因此使得微透镜的焦距缩短. 依据 Wang 等[4] 的理论, 球形微透镜对光聚焦增强效应可表示为

$$\frac{I_{\max}}{I_0}=\frac{27n^4}{(4-n^2)^3}\cdot\frac{n^2}{2n(n-\sqrt{2})+2}=20.7, \quad (10)$$

其中 $n=1.473$ 为甘油液体的折射率. 图 10(c) 的仿真结果表明, 微透镜对光聚焦的增强为 $I_{\max}/I_0=53.011$, 该值为理论值的两倍多, 因此微透镜表现出了更强的聚焦特性, 更有利于超分辨成像. 这主要是因为微透镜液面较低, 表面较平坦. 因此微透镜的像差相对较小, 大量光线可以聚焦在微透镜后焦点.

通过图 10(d) 可知, 光强最大值衰减至其一半时的 y 值为 ±0.85 μm. 因此微透镜聚焦的半高宽 (full width at half maxima, FWHM)$\Delta y=1.7$ μm. 微透镜聚焦的半高宽相当于平行光经过微透镜衍射后的艾里斑, 可以用来衡量分辨率特性. 依据 Wang 等[4] 的理论, 球形透镜对光聚焦的 FWHM 可表示为

$$w=r\sqrt{(4-n^2)^3/(27n^4)}=1.59\ \mu\text{m}, \quad (11)$$

其中, $r=7.25$ μm 为微孔的半径. 微透镜焦面 PNJ 的尺寸大于正球形的理论值, 因此分辨率低于正球形的分辨率. 这主要是因为液体微透镜的表面较平坦, 球面入射角较小. 因此, 较少的倏逝波可以用于成像, 这不利于成像放大和超分辨.

尽管如此, 微透镜依旧能将入射光波进行超聚焦至微纳米尺度. 因此, 根据光路可逆理论, 携带精细结构高频信息的倏逝波, 经过微透镜耦合至远场传输, 进而能够观测到超分辨的细节.

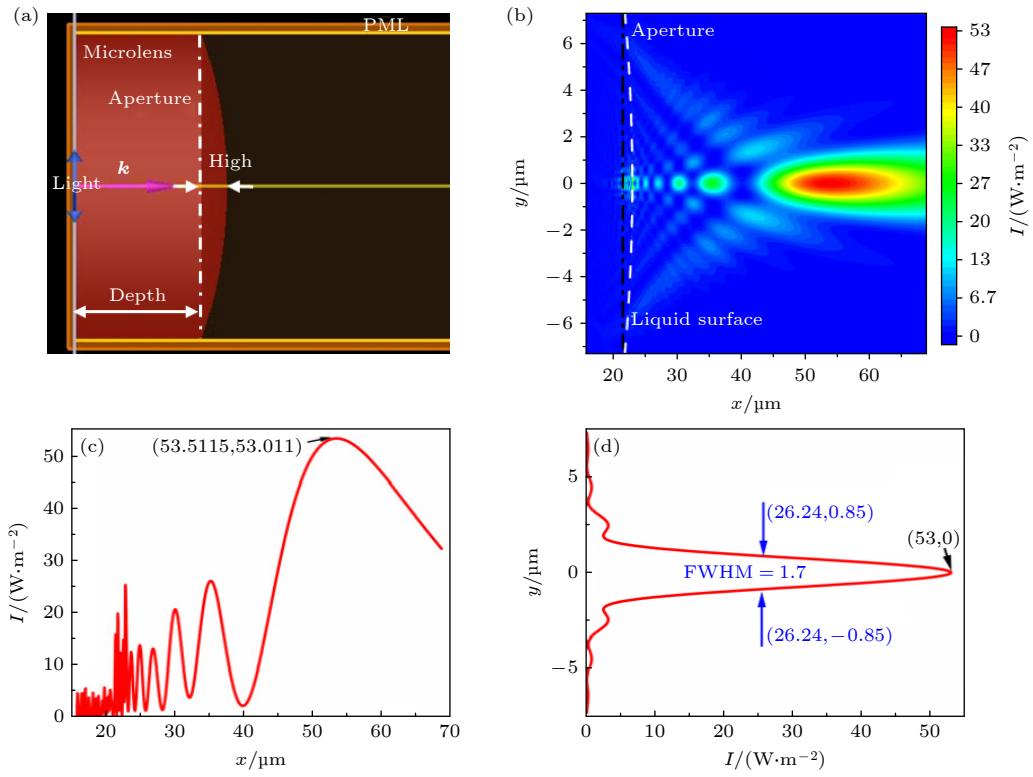

图 10 微透镜聚焦的 FDTD 模型与结果 (a) FDTD 模型; (b) xy 平面光强分布; (c) $y=0$ 时 x 方向上的光强分布; (d) $x=53.5$ μm 处 y 方向上的光强分布

Fig. 10. FDTD model and results of microlens focusing: (a) FDTD modeling; (b) light intensity in xy plane; (c) light intensity at $y=0$ μm; (d) light intensity at $x=53.5$ μm.

5 结 论

本文通过紫外曝光、液体自组装等一体化成型技术, 制备了与待测光栅集成的液体微透镜阵列, 保证了液体微透镜阵列与待测光栅间超分辨成像时的工作距离, 避免了液体微透镜与待测样品集成时形貌变化的影响. 实验表明: 液体微透镜可以辅助显微镜实现对 226 nm 光栅栅线的超分辨观测, 并实现 1.59 倍的成像放大. 利用简单的电热驱动装置, 可以实现微透镜的可重构超分辨成像. 通过阿贝显微成像理论, 验证了微透镜成像放大的过程. 通过光子纳米射流理论, 分析了微透镜辅助显微镜的超分辨特性. 总体来说, 本文研究的液体微透镜阵列可以应用在实时、定域、免标记、无污染、可主动操控的光学超分辨成像与亚微米检测等领域.

参考文献

[1] Ling J Z, Wang Y C, Liu X, Wang X R 2021 *Opt. Lett.* **46** 1265

[2] Chen L W, Zhou Y, Li Y, Hong M H 2019 *Appl. Phys. Rev.* **6** 021304

[3] Hüser L, Pahl T, Künne M, Lehmann P 2022 *J. Opt. Microsyst.* **2** 044501

[4] Wang Z B, Guo W, Li L, Luk'yanchuk B S, Khan A, Liu Z, Chun Z C, Hong M H 2011 *Nat. Commun.* **2** 218

[5] Zhou R, Wu M X, Shen F, Hong M H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 140702 (in Chinese) [周锐, 吴梦雪, 沈飞, 洪明辉 2017 物理学报 **66** 140702]

[6] Song Y, Yang X B, Yan B, Wang C, Sun J M, Xiong D X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 134201 (in Chinese) [宋扬, 杨西斌, 闫冰, 王驰, 孙建美, 熊大曦 2020 物理学报 **69** 134201]

[7] Wang J G, Yang S L, Ye Y H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 214209 (in Chinese) [王建国, 杨松林, 叶永红 2018 物理学报 **67** 214209]

[8] Darafsheh A 2022 *J. Appl. Phys.* **131** 031102

[9] Pei Y, Zang J J, Yang S L, Wang J G, Cao Y Y, Ye Y H 2021 *ACS Appl. Nano Mater.* **4** 11281

[10] Yang S L, Ye Y H, Shi Q F, Zhang J Y 2020 *J. Phys. Chem. C* **124** 25951

[11] Gu G Q, Zhang P C, Chen S H, Zhang Y, Yang H 2021 *Photonics. Res.* **9** 1157

[12] Zhang P P, Yan B, Gu G Q, Yu Z T, Chen X, Wang Z B, Yang H 2022 *Sensor. Actuat. B-Chem.* **357** 131401

[13] Kwon S, Park J, Kim K, Cho Y, Lee M 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 32

[14] Gu G Q, Song J, Ming C, Xiao P, Liang H D, Qu J L 2018 *Nanoscale* **10** 14182

[15] Xie Y, Cai D, Pan J, Zhou N, Guo X, Wang P, Tong L 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2102269

[16] Su S J, Liang J S, Li X J, Xin W W, Chen L, Yin P H, Wang Z Z, Ye X S, Xiao J P, Wang D 2021 *Adv. Mater. Technol-US.* **6** 2100449

[17] Darafsheh A 2021 *J. Phys. Photonics.* **3** 022001

[18] Wang F F, Liu L Q, Yu H B, Wen Y D, Yu P, Liu Z, Wang Y C, Li W J 2016 *Nat. Commun.* **7** 13748

[19] Wang S Y, Zhang D X, Zhang H J, Han X, Xu R 2015 *Microsc. Res. Techniq.* **78** 1128

[20] Zhang T Y, Yu H B, Li P, Wang X D, Wang F F, Shi J L, Liu Z, Yu P, Yang W G, Wang Y C, Liu L Q 2020 *ACS Appl. Mater. Inter.* **12** 48093

[21] Chen X X, Wu T L, Gong Z Y, Guo J H, Liu X S, Zhang Y, Li Y C, Ferraro P, Li B J 2021 *Light Sci. Appl.* **12** 242

[22] Li H, Chen X X, Zhang Y, Li Y C, Li B J 2022 *Acta. Opt. Sin.* **42** 0411003 (in Chinese) [李姮, 张熙熙, 张垚, 李宇超, 李宝军 2022 光学学报 **42** 0411003]

[23] Jia B L, Wang F F, Chan H Y, Zhang G L, Li W J 2019 *Microsyst. Nanoeng.* **5** 13

[24] Gu T K, Wang L L, Li R, Dong Y Z, Zhang Y J, Jia M C, Jiang W T, Liu H Z 2018 *Opt. Commun.* **428** 89

[25] Zhang H C, Qi T Y, Zhu X Y, Zhou L J, Li Z H, Zhang Y F, Yang W C, Yang J J, Peng Z L, Zhang G M, Wang F, Guo P F, Lan H B 2021 *ACS Appl. Mater. Inter.* **13** 36295

[26] Wang L, Luo Y, Liu Z Z, Feng X M, Lu B H 2018 *Appl. Surf. Sci.* **442** 417

[27] Wang L L, Liu H Z, Jiang W T, Li R, Li F, Yang Z B, Yin L, Shi Y S, Chen B D 2015 *J. Mater. Chem. C* **3** 5896

[28] Wang L L, Li F, Liu H Z, Jiang W T, Niu D, Li R, Yin L, Shi Y S, Chen B D 2015 *ACS Appl. Mater. Inter.* **7** 21416

[29] Xu M, Zhou Z W, Wang Z, Lu H B 2020 *ACS Appl. Mater. Inter.* **12** 7826

[30] Chen X X, Wu T L, Gong Z Y, Li Y C, Zhang Y, Li B J 2020 *Photonics. Res.* **8** 225

[31] Yang H, Trouillon R, Huszka G, Gijs M A 2016 *Nano. Lett.* **16** 4862

[32] Ye R, Xu C, Tang F, Shang Q Q, Fan Y, Li J J, Ye Y H, Zuo C 2022 *Infrared Laser Eng.* **51** 20220086 (in Chinese) [叶燃, 许楚, 汤芬, 尚晴晴, 范瑶, 李加基, 叶永红, 左超 2022 红外与激光工程 **51** 20220086]

[33] Duan Y, Barbastathis G, Zhang B 2013 *Opt. Lett.* **38** 2988

[34] Zhou S, Deng Y B, Zhou W C, Yu M X, Urbach H P, Wu Y H 2017 *Appl. Phys. B* **123** 236

Realization of reconfigurable super-resolution imaging by liquid microlens arrays integrated on light disk*

Gu Tong-Kai [1)2)] Wang Lan-Lan [1)†] Guo Yang [1)] Jiang Wei-Tao [1)]
Shi Yong-Sheng [1)] Yang Shuo [3)] Chen Jin-Ju [4)] Liu Hong-Zhong [1)‡]

1) (*State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710054, *China*)

2) (*School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *China*)

3) (*Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing* 100076, *China*)

4) (*School of Engineering, Newcastle University, Newcastle, NE*1 7*RU*, *United Kingdom*)

(Received 23 November 2022; revised manuscript received 12 February 2023)

Abstract

The microlens-assisted microscope realizes super-resolution imaging and observation, and has the advantages of no marking, no damage, real-time, localization, and good environmental compatibility. Liquid microlens arrays with uniformity and easy manipulation can realize super-resolution imaging without complicated mechanical scanning and driving. However, simply and efficiently controlling the imaging distance is a key technical challenge to the realization of super-resolution imaging of microlens. In this paper, the uniform depths of photoresist microholes on light disk are fabricated by ultraviolet exposure technology. Using liquid self-assembly technology, the microholes are filled with glycerol droplets, and thus ensuring the near-field imaging distance of the microlens. The reconfigurable super-resolution of 226-nm-wide grating line and the imaging magnification of 1.59 times are observed under the optical microscope. At present, the theory of super-resolution imaging based on microlens is not unified and perfect. In this paper, the Abbe imaging principle is used to explain the imaging magnification and super-resolution characteristics. Therefore, the liquid microlens arrays integrated on the light disk show great potential application in optical nanometer measurements and sensing devices.

Keywords: liquid microlens arrays, super resolution, imaging magnification, Abbe imaging.

PACS: 95.75.De, 82.56.Dj, 42.30.–d, 07.05.Pj **DOI:** 10.7498/aps.72.20222251

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52075433, 52011530186, 51625504, 51827805), the Key Research and Development Program of Shaanxi Province, China (Grant No. 2021ZDLGY12-04), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of High Education, China (Grant Nos. 2016M600785, 2016BSHEDZZ126, 2018T111048).

† Corresponding author. E-mail: lanlan1900@mail.xjtu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: hzliu@mail.xjtu.edu.cn

物理学报 Acta Physica Sinica
Chinese Physical Society
Institute of Physics, CAS

光盘上集成的液体微透镜阵列与可重构超分辨成像

谷同凯 王兰兰 国阳 蒋维涛 史永胜 杨硕 陈金菊 刘红忠

Realization of reconfigurable super-resolution imaging by liquid microlens arrays integrated on light disk

Gu Tong-Kai Wang Lan-Lan Guo Yang Jiang Wei-Tao Shi Yong-Sheng Yang Shuo Chen Jin-Ju Liu Hong-Zhong

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica, 72, 099501 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222251
在线阅读 View online: https://doi.org/10.7498/aps.72.20222251
当期内容 View table of contents: http://wulixb.iphy.ac.cn

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

高对比度目标的电磁逆散射超分辨成像
Super-resolution imaging of high-contrast target in elctromagnetic inverse scattering
物理学报. 2018, 67(14): 144101 https://doi.org/10.7498/aps.67.20180266

基于一体化微球物镜的超分辨成像系统
Super-resolution imaging system based on integrated microsphere objective lens
物理学报. 2020, 69(13): 134201 https://doi.org/10.7498/aps.69.20191994

基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像
Far-field super-resolution imaging based on wideband stereo-metalens
物理学报. 2018, 67(9): 094101 https://doi.org/10.7498/aps.67.20172608

受激辐射损耗超分辨显微成像系统研究的新进展
New advances in the research of stimulated emission depletion super-resolution microscopy
物理学报. 2020, 69(10): 108702 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200168

基于分形谐振器的远场超分辨率扫描成像
Far-field super-resolution scanning imaging based on fractal resonator
物理学报. 2019, 68(24): 244102 https://doi.org/10.7498/aps.68.20190620

一种用于线粒体受激辐射损耗超分辨成像的新型探针
Study on a novel probe for stimulated emission depletion Super-resolution Imaging of Mitochondria
物理学报. 2020, 69(16): 168702 https://doi.org/10.7498/aps.69.20200171