

激光与光电子学进展

先进成像

中国光学十大进展:可调谐微透镜阵列的研究进展(特邀)[‡]

孙智娟, 韩冬冬, 张永来*

吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012

摘要 微透镜阵列作为一种光学元件,凭借高分辨率、无限景深的特性可以实现高质量成像,在光通信、光传感等领域也有重要应用。近年来,光电子学、微纳技术、智能材料等学科的发展促进了对微透镜阵列进行调谐的相关研究,使得微透镜阵列突破了固定焦距的缺陷,大大提高了器件的灵活性。总结微透镜的形状调谐、折射率调谐和超透镜的调谐3个方面的最新研究进展,详细地阐述微透镜阵列的调谐原理和过程,探讨各种调谐方式的优势和不足之处,并介绍了可调谐微透镜阵列的应用前景,最后展望了可调谐微透镜阵列未来的发展趋势。

关键词 微透镜阵列; 复眼; 可调谐微透镜阵列; 集成光学元件

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232465

China's Top 10 Optical Breakthroughs: Research Progress of Tunable Microlens Arrays (Invited)

Sun Zhijuan, Han Dongdong, Zhang Yonglai*

State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering,
Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China

Abstract Microlens arrays, as an optical element, can realize high-quality imaging because of their high resolution and infinite depth of field. Additionally, they exhibit important applications in the fields of optical communication and optical sensing. In recent years, advancements in optoelectronics, micro and nanotechnology, smart materials, and other disciplines have spurred research on the tunability of microlens arrays, enabling microlens arrays to overcome the defects of fixed focal lengths. Furthermore, tunable microlens arrays greatly improve the flexibility of devices. This paper summarizes the recent research progress in three aspects, including shape tuning of microlenses, refractive index tuning, and superlens tuning; describes the principles and methodologies involved in tuning microlens arrays in detail; discusses the advantages and drawbacks of various tuning methods; introduces the application potential of tunable microlens arrays; and finally envisages their future development trends.

Key words microlens array; compound eye; tunable microlens array; integrated optical element

1 引言

微透镜阵列(MLA)是一类代表性的微纳光学器件,在很多领域具有很高的应用价值。传统的微透镜阵列的制造围绕排列方式、填充因子、透镜尺寸等几项参数,追求整体的均匀性,但它们的焦距往往都是固定

的。但是近年来,智能化产业的发展要求器件能够实现更复杂的功能,可调谐的微透镜阵列可以提升自身的灵活性,在很大程度上扩展应用范围,这也赋予了这个课题更多的研究意义。微透镜阵列应用于光学系统中,作为基本的光学单元,光传输效率、成像效果、聚焦能力是评估微透镜阵列性能最基本的依据。众多研究

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2023-12-13; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2024-02-22

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4600400)、国家自然科学基金(61935008, T2325014)

通信作者: *yonglaizhang@jlu.edu.cn

[‡] 本文为中国光学十大进展特邀综述。吉林大学张永来领衔的合作团队突破了三维复眼非平面成像和商用微型CCD/CMOS探测器失配难题,研制了质量仅为230 mg的光电集成微型复眼相机,实现了对微观目标运动轨迹的三维重构,相关成果入选了2022中国光学十大进展。详情请见“中国光学十大进展”官网。

者都曾围绕这些方面展开研究。到目前为止,比较成熟的制备方式有车削^[1-3]、自组装^[4-6]、光刻热回流^[7-8]、纳米压印^[9-11]、超快激光加工^[12-14]、喷墨打印^[15-16]等。在成熟工艺的基础上,更多具有创新性的想法被提出并实现,有效提升了加工效率和微透镜阵列的质量。Zhou 等^[17]提出了一种将单点金刚石车削(SPDT)与离子束刻蚀(IBE)相结合的微切割刻蚀方法,在碳化硅(SiC)上制备了微透镜阵列,为脆硬材料上的微透镜制备提供了解决方案。2022年,Zhang 等^[18]采用喷墨打印工艺分别在刚性和柔性衬底上制备了高填充因子的大面积图案化微透镜阵列,开辟了一条利用增材制造技术定制微光学元件的新途径。激光改性辅助刻蚀是一种减材制造微透镜阵列的常见方式,2019年,Liu 等^[19]采用干法刻蚀辅助飞秒激光加工方法成功地在凹面蓝宝石衬底上制备了厘米级尺寸的微透镜阵列,验证了脆硬材料衬底的曲面加工的可行性,并且经过PDMS转写可以直接获得曲面复眼,极大地提升了复眼的制备效率。这些研究为微透镜的发展做出了很大的贡献,实现了在不同材料(柔性聚合物、脆硬金属材料、流体等)上制备特征尺寸从毫米到纳米级别的微透镜阵列并优化了其性能。

然而,随着智能化产业的发展,生物医学检测、全景成像、智能机器人等领域对微透镜性能的要求进一步提高,单焦点微透镜无法满足智能化产业发展的要求。基于该原因,科研人员提出一种多焦点微透镜阵列策略,即依据特定排列方式,将不同焦距的微透镜组合为具有多焦点的微透镜阵列^[20-21]。多焦点微透镜阵列在一定程度上缓解了单焦点透镜的局限性,但是由于多焦点微透镜阵列是多个焦距固定的微透镜组合,无法彻底解决焦点固定的局限性以适应发展需要。因此开发动态可调谐微透镜阵列的策略受到科研人员的广泛关注。目前,微透镜的调谐策略可分为两大类:改变微透镜的形状和改变折射率。另外,超透镜/超表面的调谐主要依靠改变元原子的排布来实现。

本文探讨了主流微透镜调谐方案的原理,总结了可调谐微透镜阵列的最新研究进展,分析了不同调谐方式的优缺点、尚未解决的问题、发展趋势和应用前景,为这一研究领域的技术发展提供必要参考。

2 改变微透镜形状的调谐方式

2.1 电润湿法调谐

对于一些液体/水凝胶材料,改变单个微透镜的接触角(CA)可以有效地调节微透镜焦距。改变CA有两种常用的方法:化学方法和电学方法。化学方法改变基底的表面能进而改变CA,但是需要很长的响应时间,这限制了微透镜的应用,对比之下,电学方法基于介质电润湿法(EWOD)^[22]允许迅速修改液滴与衬底之间的CA,进而调整液滴透镜的曲率。电润湿性调谐的基本原理如图1(a)所示:液滴滴在导电的衬

底上,施加电流或电压时,电流流过液体并在液滴内部建立电场,表面活性分子在电场的作用下向基底迁移或远离基底,使水滴分别脱湿或重新沾湿表面。MLA的曲率可以通过施加的外部电压或自旋速率得到很好的控制,这种调谐方式响应时间很短,并且过程可逆,对焦距的调节范围也很大。Li 等^[23]提出了一种通过控制液-固界面处的电荷俘获行为来减小饱和接触角的方法改善了EWOD的调谐能力。

EWOD可以在各种电介质基底上制备可调谐微透镜阵列^[24-26]。Lü 等^[27]提出了基于介电润湿性的柔性凹微透镜阵列,使用感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺制备硅模板,采用涂有薄SiO₂介电层的导电硅模板作为模板电极,通过对漏电介质施加电压,微透镜的形态可以得到很好的控制。但这种将电极插入和取出液体的过程可能会影响微透镜的性能。基于EWOD的可调谐MLA主要依赖于外部电极,如圆柱形电极、针状电极等,微透镜阵列共享驱动电极不利于微透镜的独立调谐。因此Zhong 等^[28]将平面环形微电极与微透镜结合,采用喷墨打印技术将液体微透镜原位沉积在微电极上,使每个透镜对应一个电极,如图1(c)所示,这种平面电极在MLA的底部,可以向透镜提供均匀稳定的电压,实现了单透镜的独立调谐。

针对光学开关、电子显示应用领域对操控液体形状、大小和运动的需求,Zhou 等^[29]展示了电调谐的微硫磺液滴,在不同恒电位下实现了硫磺液滴的润湿与合并,如图1(e)所示。施加电压时,硫磺液滴润湿金电极表面变成椭球形,硫磺液滴的润湿性使相邻的硫磺液滴开始合并,释放电压后,硫磺液滴表现出脱湿现象,润湿状态下沉积的液滴重新变成球形液滴,实现了动态可调的微透镜。该过程为使用疏水材料制造液滴微透镜及其他潜在的电可调谐光电子器件提供了新的思路。接触角饱和度可能会限制表面润湿性的调节范围,这会影响到电润湿性器件的性能。

电润湿法调谐微透镜阵列最大的优势在于响应快,适用于快速变焦的应用。调谐过程中无须机械移动部件,因此没有摩擦、磨损或振动,这有助于提高稳定性和寿命,但是也要面对能耗高、制造复杂等挑战。

2.2 力致变形的微透镜阵列

压力驱动的可变焦的柔性微透镜通常由带有微透镜阵列的弹性薄膜和液体或气体介质构成,通过中间介质将力作用于柔性微透镜,使其有规律地变形^[30]。2022年,Zhang 等^[31]对单个PDMS微球施加机械压力实现不同的成像功能。在垂直方向上挤压,微球变成平面,不能成像,实现了微透镜的成像开关功能,如图2(c)所示;在水平方向上的挤压可以将微球作为椭圆透镜,如图2(d)所示,数字“7”更加窄长。虽然文中的工作没有对压力进行量化并验证可重复性,但是为压力调谐微透镜提供了一种新思路,微透镜的不规则

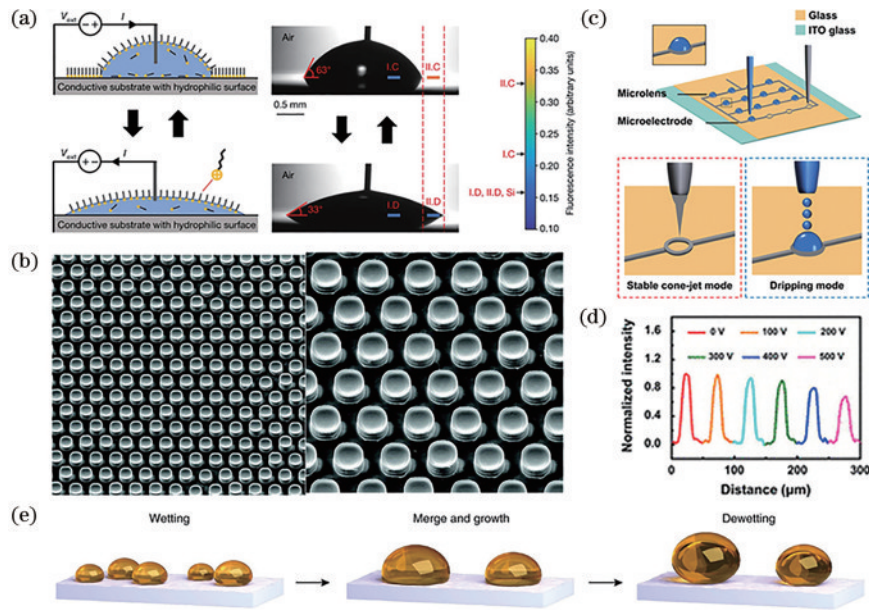


图 1 电润湿法制备可调谐微透镜阵列。(a)电润湿法(EWOD)原理示意图^[22];(b)使用EWOD在施加一定外部电压条件下制备的凹微透镜阵列SEM图像^[27];(c)利用稳定的锥形喷气打印模式打印微电极和利用电子喷气打印的滴注模式打印液滴微透镜的示意图^[28];(d)在不同电压下EWOD机制诱导的MLAs中透镜的聚焦光斑的归一化光强分布^[28];(e)硫磺液滴在金电极上的润湿、合并、生长和去润湿过程的示意图^[29]

Fig. 1 Preparation of tunable microlens array by electro-wetting method. (a) Schematic of the principle of electro-wetting method (EWOD)^[22]; (b) SEM image of a concave microlens array prepared using the EWOD under the application of a certain external voltage^[27]; (c) schematic illustration of microelectrodes printed by a stabilized conical jet printing mode and droplet microlenses printed by a droplet mode of electronic jet printing^[28]; (d) normalized light intensity distribution of the focused spot of the lens in MLAs induced by the EWOD mechanism at different voltages^[28]; (e) schematic representation of the processes of wetting, merging, growth, and de-wetting of sulfur droplets on a gold electrode^[29]

成像和成像开关的能力使其在光学快门调制、图像调制等方面具有应用潜力。实际上,气压和液压驱动是两种常见的压力驱动方式^[32-34]。在微透镜阵列的相关研究中,曲面微透镜阵列或复眼受到广泛的关注,相较于平面微透镜阵列,曲面复眼的最大优势是可以提供更大的观测视场,对三维场景进行全面的感知,对运动物体的感知也更加灵敏。由于压力驱动可以灵活地调节微透镜阵列的整体曲率,因此这种方式比较适用于仿生复眼的制备。2020年,Cao等^[35]将大面积的平面PDMS微透镜阵列和微流控通道集成,在液体压力下,PDMS微透镜阵列从平面的结构变成半球形,如图2(a)所示。通过调整注入腔体的水量可以调谐半球的曲率,实现最大视场 180° 的复眼,复眼整体的焦距可以从 3.03 mm 到无限远处。整个半球腔体作为主眼变焦可以实现调谐成像,变焦复眼结合了人类单眼和昆虫复眼的优点,对于开发先进的微光学器件有着重要的意义。此外,Li等^[36]采用空气辅助变形的办法,通过调节负压来调谐复眼的曲率,如图2(b)所示,PDMS微透镜阵列薄膜与连接了真空泵的设备相连,通过真空泵对薄膜施加负压,以此来调节主眼曲率和高度。这种负压调节一定程度上避免了气体或液体泄漏对器件的损坏,但是保持低压或真空环境的稳定也是一个挑战。Wang等^[37]提出了一种由电润湿性和液体压力共同驱动的变焦微透

镜,可以实现由负焦距 $\sim -11.15\text{ mm}$ 到正焦距 $\sim 6.02\text{ mm}$ 的大范围调谐。混合驱动微透镜阵列是一种值得借鉴的思路,然而目前相关的报道并不多见。

2.3 基于刺激响应材料的可调谐微透镜阵列

目前,对可调谐光学自适应材料的研究已经有了长足的进展,可变形智能材料如介电弹性体^[38]、刺激响应水凝胶^[39]、形状记忆聚合物^[40]等可以在pH值、电、温度等刺激下发生形变,这些材料被用于微透镜的制备,可以灵活地调节微透镜的焦距。

在早期的研究中,孙洪波和陈岐岱团队^[41]就利用飞秒激光直写制备牛血清白蛋白(BSA)微透镜和衍射光学元件,他们的研究展示了在不同pH值条件下微透镜的焦距可调性。2019年,Ma等^[42]报告了一项关于将蛋白质复眼与传统光学透镜集成形成复合复眼的研究成果。他们利用飞秒激光直写技术(FsLDW)的三维加工能力制备了高质量的蛋白复眼,这些蛋白复眼能够在变化的pH环境中膨胀和收缩,实现了可调的焦距,如图3(a)~(d)所示。另外,研究中还将pH响应的蛋白小眼与SU-8球面透镜结合,如图3(e)~(i)所示,复合复眼可以在固定视场下实现近 400% 的焦距调节。由于BSA具有出色的生物相容性,复合智能复眼在生物医学成像、生物组织检测等领域具有广泛的应用前景。

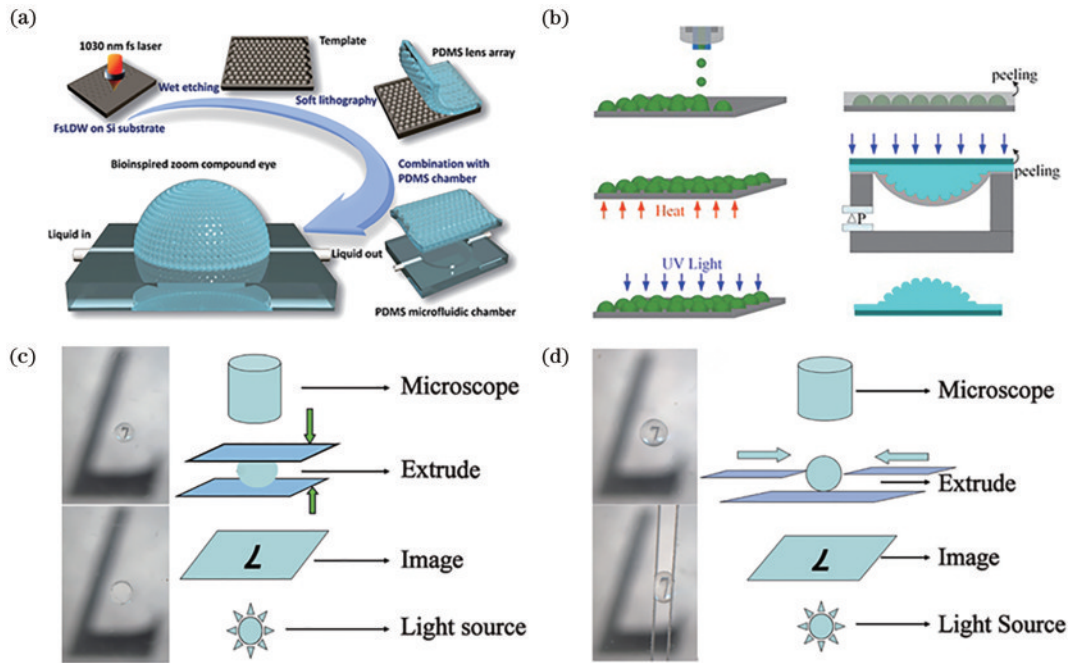


图 2 力致变形的微透镜阵列。(a)变焦复眼的制造过程示意图^[35];(b)负压人工复眼的制造过程示意图^[36];(c) PDMS 微球成像开关^[31];(d)作为椭圆透镜的 PDMS 微珠成像^[31]

Fig. 2 Force-deformed microlens array. (a) Schematic of the fabrication process of a zoom compound eye^[35]; (b) schematic of the fabrication process of a negative-pressure artificial compound eye^[36]; (c) PDMS microspheres imaging switch^[31]; (d) imaging of PDMS microbeads as an elliptical lens^[31]

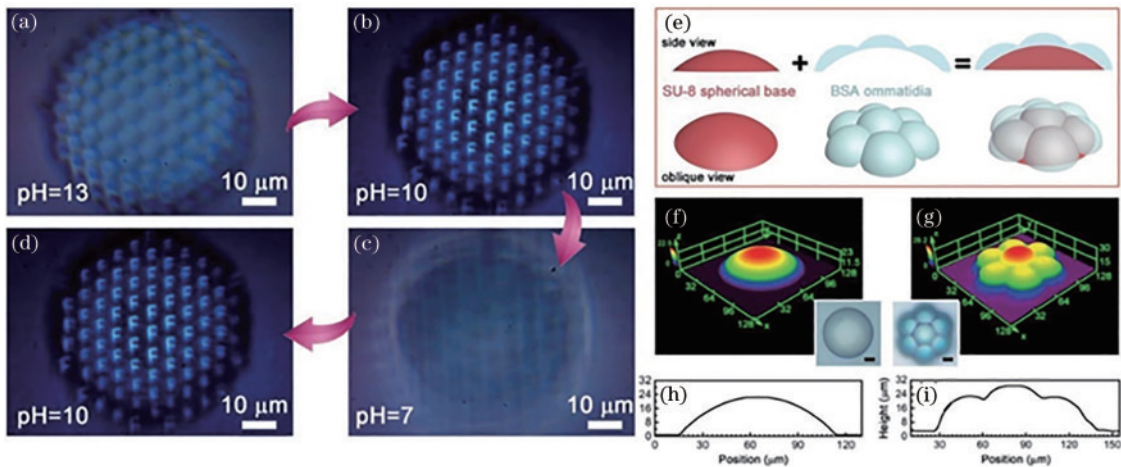


图 3 pH 响应的 BSA 复眼^[42]。(a)~(d)不同 pH 值环境下的 BSA 复眼成像;(e)基于 SU-8/BSA 的复眼的制造过程;(f)(h) SU-8 透镜的三维激光共聚焦显微图像及其截面轮廓;(g)(i)基于 SU-8/BSA 的复合眼的三维激光共聚焦显微图像和其横截面
Fig. 3 pH-responsive BSA compound eyes^[42]. (a)~(d) Imaging of BSA compound eyes in different pH environments; (e) fabrication of the SU-8/BSA-based compound eye; (f)(h) 3D laser confocal microscopic image and the cross-sectional profile of the SU-8 microlens; (g)(i) 3D laser confocal microscopic image and the cross-sectional profile of the SU-8/BSA-based composite compound eye

聚氯乙烯(PVC)凝胶具有高光学透过性、轻薄易拉伸等特点,在传感器、人工肌肉系统中有着广阔的应用前景,它可以在弱电场诱导下发生较明显的形变,可以用于制造自适应的微透镜。2019年,Lan等^[43]通过施加电压驱动 PVC 液滴微透镜发生变形,PVC 在不同电压值刺激下表现出收缩或膨胀的形态,在 100 V 的电压下,PVC 能够在 160 ms 的时间内作出响应。另外,由于

PVC 电极能够约束 PVC,对透镜的基本形状起到决定性的作用,因此电极形状设计尤为重要。Bae 等^[44]使用增塑型非离子聚氯乙烯凝胶(SPNIGel)制备了电响应的双面微透镜。SPNIGel 被压缩在两个具有环形电极的框架之间,在驱动电压的作用下,微透镜可以被调节为双凸、凹凸、双凹形状,展示出了该器件高度可逆的正负焦距调节能力。并且由于双面微透镜的表面曲率可

以独立调节,可以有效地改善像差。2023年,Yoon等^[45]模拟了人眼肌肉的调节机制,以实现眼睛在不同距离和方向上的聚焦功能,制备了电响应的PVC凝胶微透镜,解决了从前的微透镜不能自适应聚焦的问题,如

图4所示。4个独立电极构成的环形区域围绕包裹PVC凝胶,电极独立地提供刺激电压,从而实现多形态微透镜。这种自适应微透镜可以在光轴的各种径向和正交方向上进行焦点移动,进一步改善了像差。

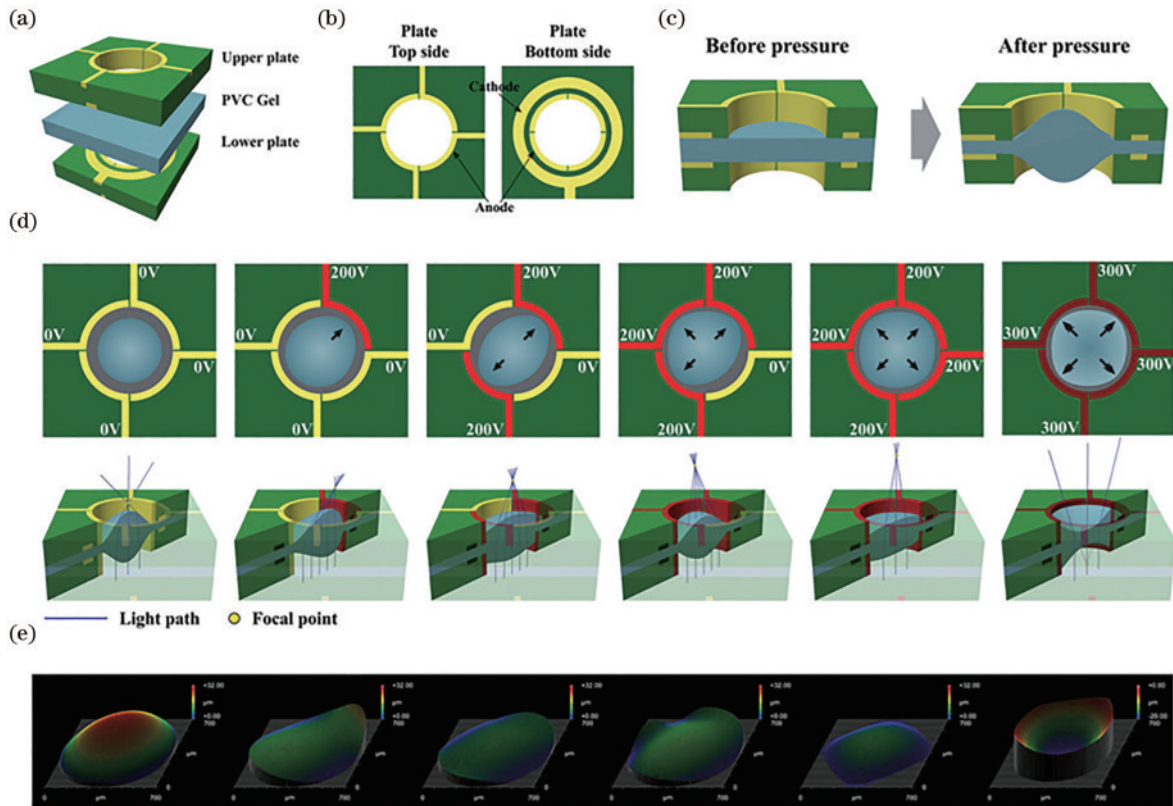


图4 基于聚氯乙烯凝胶的电可重构自适应微透镜的电控制示意图和工作机制^[45]。(a)使用PCB板的PVC凝胶透镜的组成;(b)制备的环形电极设计示意图;(c)压缩PVC凝胶以形成双凸透镜;(d)独立操作扇形电极以改变焦距和焦点时的PVC凝胶透镜的三维微观形状;(e)对图4(d)施加电场得到的双凸微透镜上侧的表面轮廓

Fig. 4 Schematic and working mechanism of electrical control of electro-reconfigurable adaptive PVC gel-based microlens^[45]. (a) Composition of PVC gel lens using PCB plates; (b) schematic of the prepared donut-shaped electrode design; (c) compression of the PVC gel to develop biconvex lens; (d) 3D micro-shape of PVC gel lens when the fan-shaped electrodes are independently operated for changing the focal length and focal point; (e) surface profile of the upper side of the biconvex microlens under an each applied electric field of Fig. 4 (d)

除此之外,还有针对热调谐的研究,由于甘油具有受热膨胀的性质,常常作为热调谐微透镜的主要材料^[46-47]。由于量化地控制温度变量的环境比较复杂,热调谐通常依靠电热或光热形式实现,通过调整电压、电流值以及光强和光照时间控制热量的积累。一些具有优异的光热转换能力的材料被用于开发红外响应的微透镜阵列。Jiang等^[48]制备了石墨烯基的甘油微透镜阵列,如图5(f)所示,沉积的石墨烯层将近红外激光的光能转换为热能,改变甘油液体微透镜的温度,从而引起其曲率的变化。2022年,Wang等^[49]利用氧化铟锡(ITO)薄膜在红外区的高光热转换效率,使微透镜阵列在远端近红外驱动下实现可逆的快速变焦。从图5(g)和图5(h)可以看出在光照条件下,凸微透镜变成凹微透镜。光热控制比电热控制更加操作简单并且容易实现远距离和局部的控制。基于智能材料的微透

镜阵列对刺激有精准而快速的响应,十分依赖材料自身的物理特性,或许如何提升材料对特异性刺激的响应灵敏度是研究者们面临的问题。

用于制备微透镜材料的物理化学特性使其可以对外部的刺激(热、光、电、压力等)作出响应,当微透镜膨胀或收缩时,微透镜形状的改变会导致焦距的变化,控制刺激信号的强弱就可以实现焦距的灵活变化。总的来说,改变微透镜的形状、曲率来调节焦距的方式比较灵活可控、操作简单,只需要通过调整外部刺激的强度就可以动态实时地聚焦。但是这种方式也有一定的局限性,比如,曲率调整可能具有物理限制,太强的外部刺激会对微透镜器件造成损坏,并且改变微透镜的曲率不可避免地会引起光学像差,比如球差或彗差,影响光学系统的整体性能。

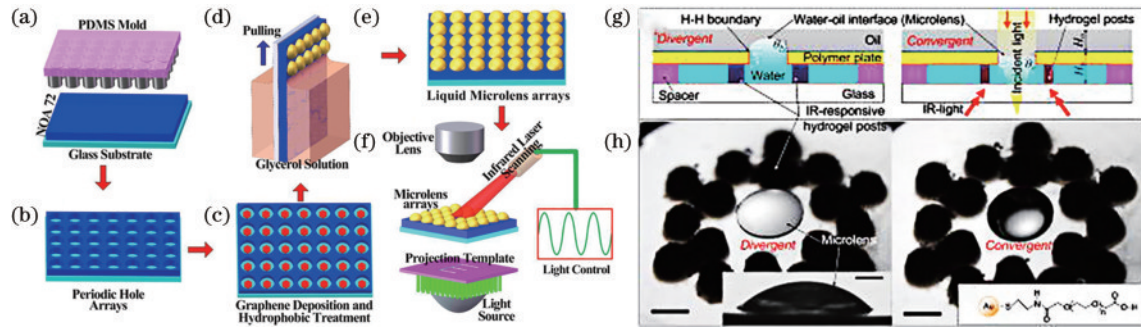


图5 热调谐微透镜阵列。(a)~(f)基于沉积石墨微片的甘油微透镜阵列的制造工艺^[48];(g)(h)红外光驱动的可调微透镜的示意图和对应的光学图像^[49]

Fig. 5 Thermally tuned microlens arrays. (a)~(f) Fabrication process of glycerol microlens arrays based on deposited graphene microsheets^[48]; (g)(h) schematic of an IR light-actuated tunable microlens and corresponding optical images^[49]

3 依赖折射率变化的调谐方式

3.1 光流体微透镜阵列

光流体微透镜阵列,即将微透镜阵列封装在流体通道中,组成光流体芯片,在微光学和流体学的协同作用下操纵光线。光流体芯片是在微米尺度上集成多功能光学元件的理想平台,在生物医学领域中,光流体微透镜可用于显微镜或内窥镜等设备,以实现生物样本的高分辨率成像。对于光流体微透镜的调谐,能够动态地调整焦距和景深,这对于细胞检测、病理诊断等工作具有重要的意义。为了稳定封装微透镜阵列和流体通道,研究者们设计多种光流体系统并进行组装和测试,以确保器件的稳定性^[40-52]。2018年 Sugioka 团队^[53]使用飞秒激光辅助刻蚀 (FLWE) 技术制备了内置玻璃微透镜的 3D 光流体系统,并通过激光加工工艺优化微透镜表面质量。这种方式实现了微透镜和流体通道一体化的制作,整个通道更加封闭,降低了流体泄漏的风险。在保持玻璃微透镜形状和折射率不变的情况下,通过将水、乙醇和蔗糖溶液等具有不同折射率的介质泵入封闭的微流控通道,实现了 50~2500 μm 的焦距调谐,如图 6(a) 所示。2023 年, Zhong 等^[54]在宽度为 200 μm 的狭窄微流控通道中精确打印微透镜,实现了焦距的三倍可调性,并将其用于观察微球和细胞的流动情况,如图 6(c) 和图 6(d) 所示,在通入液体的调节下,可以借助微透镜观察到更清晰放大的细胞图像,拓宽了光流体 MLAs 在微型化、功能化光学器件和片上实验室系统中的应用前景。由于单通道不便于折射率的调节, Liang 等^[55]制备了双通道可调光流体微透镜阵列,如图 6(b) 所示,不同流体的混合使 MLA 焦距得到更灵活的调节。分别在两个通道中通入高折射率液体和低折射率液体,调整两种液体的通入比例,可以实现焦距的动态调节,与物镜结合可以有效提高分辨率和放大率。除此之外,使用光学力操控红细胞^[56]、脂滴^[57]、叶绿素^[58]等天然微透镜的研究也有被报道,这些生物细胞在液体环境中易于维持形状和功能,因而可以用于开发生

物相容性更高的光流体显微设备。

光流体微透镜阵列在众多前沿领域有潜在的应用,但面临一些挑战:光流体微透镜的精度和稳定性会受到液体材料性质和微流控系统精度的限制;光流体微透镜会对环境因素敏感。这些都需要额外的解决方案。

3.2 液晶微透镜

液晶微透镜可以通过控制液晶分子排列的方向来调节系统的光学性能。首先,液晶 (LC) 是一种光学各向异性的材料,根据 LC 的不同物理特性, LC 可能处于众多的液晶相中的一个相,棒状向列相 (NLC) 是最常见的液晶相之一。多种制备液晶微透镜的技术曾被开发^[59-61], LC 微透镜对刺激的响应致使微透镜的焦距和偏振可调,使其受到广泛的关注。液晶微透镜折射率调节的原理^[62]如图 7 所示:外部刺激,如电场或温度变化,能够改变 LC 分子的倾斜角度,这时 LC 的空间分布会导致特定的折射率分布,整个液晶层可以被视作折射率渐变 (GRIN) 透镜。GRIN 透镜的焦距取决于 LC 层的折射率差、LC 层的厚度和半径。从调谐原理来看,液晶微透镜比其他微透镜可塑性更强。例如, Kamal 等^[63]使用按需滴墨打印制造电可调谐双焦点液晶微透镜,在没有施加电压时,微透镜的焦距在 460 μm 左右,然而,在较高电压下,由于液晶分子的重新排布,直径为 255 μm 的微透镜的焦距减小了 140 μm ,并且在整个变化过程中,液滴的表面轮廓没有发生畸变。Wu 等^[64]提出了一种高度灵活的分层调谐策略,对径向排列晶格进行了特别预设,精确操控微透镜。Perera 等^[65]在向列液晶中添加手性配体封端的金纳米粒子制备微透镜,液晶可以对不同偏振光响应,文章中使用圆偏振光调节焦距。2023 年, Xu 等^[66]提出一种基于同心圆区图案电极的可控制衍射效率的扭曲向列液晶菲涅耳波带片 (LCFZP)。LC 微透镜与其他科学方法的结合也开拓了许多新的思路,比如在双光子聚合技术^[67]和纳米压印技术^[68]的支持下也可以制备可调谐的液晶微透镜。液晶材料作为光学元件,受自身性质

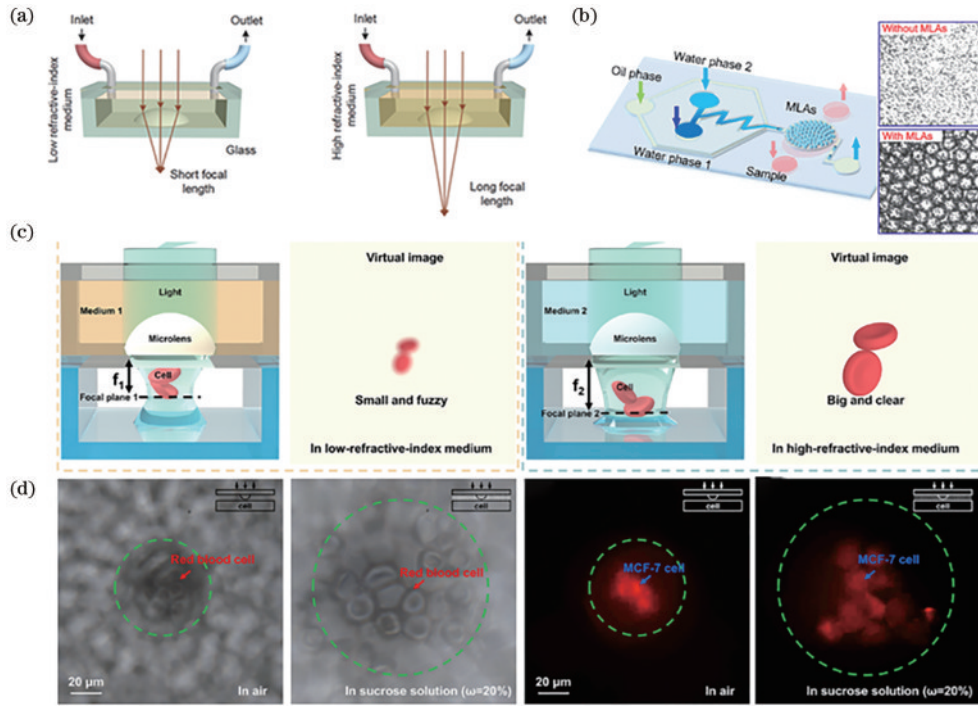


图 6 光流体微透镜。(a)光流可调微透镜概念示意图。通过在通道中填充不同的介质,改变折射率对比度来控制聚焦特性^[53]; (b)双通道光流体微透镜阵列示意图^[55]; (c)用于观察微流控通道中细胞流动的光流微透镜示意图^[54]; (d)由光流体微透镜捕获的红细胞图像和 MCF-7 细胞的荧光图像^[54]

Fig. 6 Optofluidic microlens. (a) Schematic of the concept of optofluidic tunable microlenses. The focusing characteristics are controlled by filling the channel with different media and changing the refractive index contrast^[53]; (b) schematic of the dual-channel optofluidic microlens array^[55]; (c) schematic of the optofluidic microlens used to observe the cell flow in the microfluidic channel^[54]; (d) image of erythrocyte cells and fluorescence image of MCF-7 cells captured by the optofluidic microlens^[54]

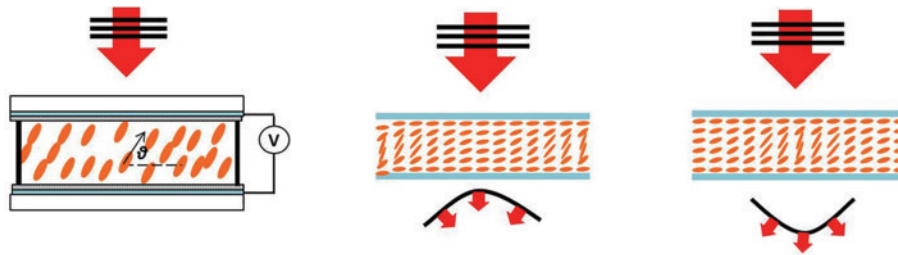


图 7 液晶微透镜折射率调节原理示意图^[62]

Fig. 7 Schematic of the principle of refractive index adjustment of a liquid crystal microlens^[62]

的影响,会导致一些光损失,从而影响成像的清晰度、成像差异等问题,这些问题有待进一步研究。

折射率调谐主要利用液晶材料、流体材料的不同折射率调谐焦距、偏振等光学参数,避免了微透镜形状的改变,可以实现高精度、低像差的调谐成像,适用于多种光学任务。但是这种调谐通常需要电子、光学和流体的集成控制系统,增加了复杂性和制造成本。

4 超透镜的调谐

随着设计和工艺水平的进步,超透镜在光学领域的基础研究中受到广泛关注^[69]。超透镜是利用人造亚波长单元结构在传统介质上进行波前调控的光学器件。其工作原理是表面大量亚波长散射体或元原

子的二维排列可以改变光波的偏振、振幅和相位。由于超透镜/超表面非常薄,它们与小型化的集成光子系统更加兼容。经过设计的超透镜可以实现宽带或多光谱的功能以及偏振控制等功能。超透镜可以在亚波长尺度上操纵入射光的相位来实现突破衍射极限的聚焦,在高分辨率显微镜、纳米光刻等应用中有重要价值。

调整超透镜元原子的形状、尺寸、排布方式可以实现对入射光波相位的不同调制,但是由于元原子的尺寸在亚波长级别,非常精确的调制是比较困难的,目前使用相变材料、二维材料辅助调谐是比较常见的方式^[70-72],其次机械驱动、微机电系统(MEMS)驱动也是一种常见的手段。Ou等^[73]将超透镜(TPAM)与扭曲

向列液晶(TNLC)集成,当施加电压时,TNLC的相变会导致不同的极化现象,TPAM在 x 偏振和 y 偏振条件下表现出了不同的聚焦性能,并且使用粒子群等算法优化各波长在不同偏振下的相位分布,使TPAM获得良好的消色差效果。整个工作方案为实现多种类型的调制(如色散调制)提供了自由度,为可调宽带超透镜的实现提供了新思路。2021年,Lin等^[74]提出了可拉伸的超透镜,如图8(a)和图8(b)所示,沿 x 轴和 y 轴方向拉伸以PDMS为衬底的超透镜时,微柱的间距 p 发生变化,表现出超透镜的焦距可调和消色差特

性。图8(c)显示了拉伸后不同 p 值超透镜的聚焦光强,可以看出明显的不同,可拉伸超透镜为未来光学透镜的设计指引了新的方向。此外,在柔性PDMS基板上集成可拉伸的超透镜为柔性光电子应用提供了可能性。Arbabi等^[75]提出的由会聚和发散的超表面透镜组成的电调谐的超表面双透镜如图8(d)所示,在外部电压作用下,两层透镜膜会有精细位移,透镜的焦距会随之发生改变。在微纳加工技术、光学设计和材料科学进步的推动下,超透镜的性能、效率和功能将会得到进一步提高和拓宽。

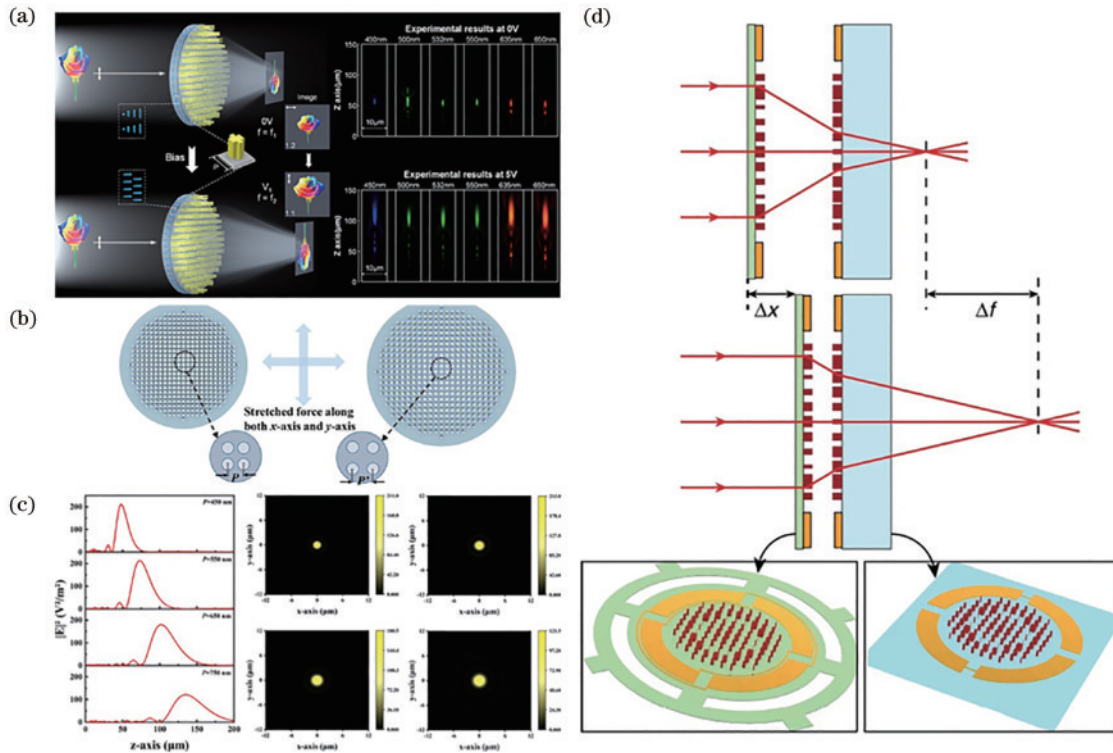


图8 可调谐超透镜。(a)电可调偏振复用消色差介电超透镜示意图^[74];(b)沿 x 轴和 y 轴方向施加拉伸力的可拉伸超透镜的示意图^[74];(c)经过拉伸后 p 值分别为450 nm、550 nm、650 nm、750 nm的超透镜沿 z 轴($x=y=0$)的透射光谱和相应的聚焦光强分布^[74];(d)由一个固定的超透镜和可移动超透镜组成的可调谐超透镜,按照设计,两个透镜距离的微小变化就会导致焦距的巨大变化^[75]

Fig. 8 Tunable superlens. (a) Schematic of an electrically tunable polarization-multiplexed achromatic dielectric superlens^[74]; (b) schematic of a stretchable superlens with a stretching force applied along the x -axis and y -axis directions^[74]; (c) transmission spectra and the corresponding focusing intensity distributions along the z -axis ($x=y=0$) of superlenses with p -values of 450 nm, 550 nm, 650 nm, and 750 nm, respectively, after stretching^[74]; (d) a tunable superlens consisting of a fixed superlens and a tunable superlens consisting of a movable superlens, where, as designed, a small change in the distance between the two lenses leads to a large change in the focal length^[75]

5 可调谐微透镜阵列的应用

可调谐微透镜阵列是新兴加工技术和传统光学器件结合的产物,应用前景非常广泛。可调谐微透镜代替传统微透镜在诸多领域发挥作用的同时,能够进一步提升系统性能。

在成像系统中,可调谐微透镜阵列可用于自适应光学成像,实现实时像差矫正^[76-77]和多焦点成像^[78-79]的功能。光场相机^[80]能够比传统相机捕捉更多的光信

息,包括来自不同方向和位置的光线。微透镜将从不同角度捕捉的光线分配到图像传感器上,通过分析子图像信息,可以计算出场景的空间位置、调整景深及创建3D图像。Chen等^[81]在2020年将镜头、可调液晶微透镜阵列和CMOS传感器集成在一起,制备了全光场相机,微透镜阵列的可调谐性使相机可以在大景深范围内聚焦。2022年,该团队^[82]又将基于电可调谐液晶的光场相机用于全聚焦偏振成像,如图9(a)所示。该相机可以在几十毫秒的时间内切换偏振状态,便于获

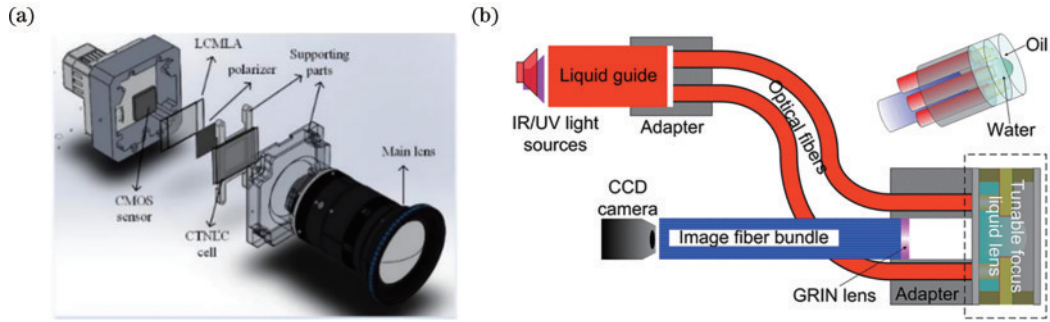


图 9 微透镜阵列在成像系统中的应用。(a)相机主要功能结构配置示意图^[82];(b)内窥镜原型的示意图和三维示意图,内窥镜末端集成了液体可调焦微型透镜,并通过红外光驱动^[84]

Fig. 9 Microlens arrays in imaging systems. (a) Schematic of the key functional structure configuration of the camera^[82]; (b) schematic and 3D schematic of a prototype endoscope with a liquid tunable-focus microlens integrated at its end and actuated through IR light^[84]

取特征目标增强或减弱的光信号。光场相机在生物识别、自动检测等领域有潜在的应用价值。在医疗成像应用中,微透镜阵列可以用于调整成像设备的焦距,以获得更清晰的医学图像。将它们应用于医学内窥镜^[83]等医疗设备可以拓展景深和视场,改善临床诊断。例如,2011年,Zeng等^[84]报告了在远端集成可调焦液体微透镜并通过红外(IR)光驱动的原型光纤内窥镜,如图9(b)所示。Kwon等^[85]报告了一种利用固体浸没式的微透镜阵列(siMLAs)进行3D生物医学成像的光场相机(LFC),并获取了牙体模型的深度图。

在图像显示领域,2D显示技术经过多年的发展已经十分成熟,制造过程相对简单。它可以对多种格式的内容如图像、视频和文本等都有很好的兼容性。然而2D显示无法传达深度信息,限制其辅助人们感知空间关系的能力。3D显示技术的诞生可以弥补2D显示技术的不足,准确地表现场景的空间信息和深度信息,

有效地改善视觉效果。随着3D显示技术发展而兴起的产业如3D电影、VR等显著地提高了娱乐价值,在科学研究领域,3D显示器可以将图像信息更完善地呈现出来,有助于理解和分析。但是3D显示技术作为一种新兴技术也必然存在某些缺陷,如制造成本高、技术复杂等,3D显示器的能耗较大,且容易造成视觉疲劳。微透镜阵列自身可以用于显示技术中,用于提高显示分辨率,在3D显示中,微透镜阵列中的单元透镜采集不同角度的图像信息以呈现3D空间信息,是3D显示技术中重要的光学部件^[86-89]。2D和3D显示技术都有各自的优势和缺陷,基于可调微透镜阵列的2D/3D显示转换技术可以让使用者可以按照需求选择2D或3D的显示方式。液晶材料广泛应用于显示制造行业,可调谐的液晶微透镜实现2D/3D显示转换的相关研究也取得了一定的进展^[70, 90-92]。2D/3D显示转换原理^[90]如图10(a)所示:当未施加电压时,液晶微滴中液晶取

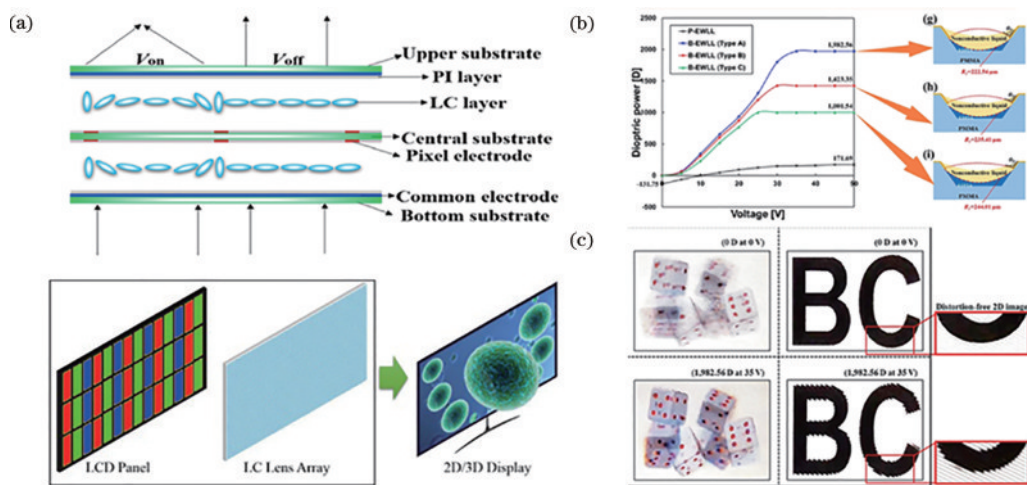


图 10 基于液晶微透镜的2D/3D显示转换。(a)液晶微透镜实现2D/3D显示转换示意图^[90];(b)双凸透镜屈光度随电压变化的测量结果^[93];(c)3D场景和2D图片在2D/3D显示模式下的显示效果^[93]

Fig. 10 2D/3D display conversion based on liquid crystal microlenses. (a) Schematic of liquid crystal microlens realizing 2D/3D display conversion^[90]; (b) measurement results of biconvex lens refractive error with voltage change^[93]; (c) 3D scene and 2D picture display effect in 2D/3D display mode^[93]

向是随机的,因此入射光没有聚焦,此时是 2D 模式;当施加电压时,像素点发出的光会被微透镜阵列聚焦到特定的焦面,转化为 3D 模式。电润湿法微透镜具有高透过率和快速驱动的特点。2018 年,Sim 等^[93]提出了基于双层电润湿微透镜的显示模式转换方法,可以观察到良好的三维图像和自然的运动视差,并且在没有外部电压时观察到无失真的二维图像。光流体技术可以满足微透镜在生物医学检测领域的应用需求,Yuan 等^[94]使用光流体微透镜阵列芯片,在通道内通入空气或液体,借助折射率的匹配与失配,实现 2D/3D 的转换。

6 总 结

可调谐微透镜能够调谐焦距和拓展景深,是微透镜阵列朝智能化方向进一步发展的结果,在光场成像、2D/3D 显示转换等方面有广泛的应用。从微透镜阵列和超透镜的调谐原理、应用等方面对可调谐微透镜阵列做了介绍,总结了近几年国内外的研究进展。

可调谐微透镜弥补了传统微透镜的缺陷,并拓宽了微透镜的应用领域,但是仍然存在亟待解决的问题。1) 制造高精度和可重复性的可调谐微透镜对其实际应用至关重要。制造工艺应允许在保持微透镜的光学性能的同时整合可调谐元件。开发能够生产大规模可调谐微透镜阵列的高产量和一致性的制造技术是一个关键的挑战。2) 可调谐微透镜应该能够对输入信号或控制参数的变化作出快速响应。实现快速的调谐速度和动态响应对于实时应用是必要的。克服与可调谐微透镜的响应时间和速度有关的限制是一个积极研究的领域。3) 可调谐微透镜应表现出长期的稳定性和耐久性,以承受反复的驱动和复杂的环境条件。确保可调谐元件不会随着时间的推移而退化或失去功能。4) 可调谐微透镜需要与现有的光学系统和技术兼容,实现无缝集成。解决兼容性问题,如与其他部件的机械或光学对准。5) 实现多种方式的共同调谐,单一的调谐方式仍然存在限制,多重响应的可调谐微透镜将被用以应对更复杂的光学任务。

为了应对上述挑战,需要材料科学、光学、微纳加工技术等专业的综合性研究。材料、制造工艺和执行机制方面的进展对实现实用和高效的可调谐微透镜技术至关重要。研究者们应积极推进可调谐微透镜阵列的发展,探索微透镜阵列在智能化应用中的潜力。

参 考 文 献

- [1] Mukaida M, Yan J W. Ductile machining of single-crystal silicon for microlens arrays by ultraprecision diamond turning using a slow tool servo[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, 115: 2-14.
- [2] Zhang L, Naples N J, Zhou W C, et al. Fabrication of infrared hexagonal microlens array by novel diamond turning method and precision glass molding[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(6): 065004.
- [3] Huang W H, Nagayama K, Yan J W. Fabrication of microlens arrays on single-crystal CaF₂ by ultraprecision diamond turning[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 321: 118133.
- [4] Peng L N, Sheng B, Wang D, et al. Soft mold of microlens arrays fabricated by surface self-assembly[J]. *Optical Materials*, 2020, 99: 109602.
- [5] Xu R Z, Zhou T F, Cheung R. Fabrication of SiC concave microlens array mold based on microspheres self-assembly[J]. *Microelectronic Engineering*, 2021, 236: 111481.
- [6] Xu M, Li S H, Li J, et al. Fabrication of a bionic compound eye on a curved surface by using a self-assembly technique[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30750-30759.
- [7] Yang B, Zhou J Y. Fabrication of a high-fill-factor microlens array using different thermal reflow process[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11052: 110521J.
- [8] Gong S S, Qiu J F, Li M J. A facile method for fabricating microlens array with diverse morphologies at general thermal reflow conditions[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2022, 61(10): 100902.
- [9] Xiong H, Wang L J, Wang Z Y. Chalcogenide microlens arrays fabricated using hot embossing with soft PDMS stamps[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 521: 119542.
- [10] Li L H, Zhou J. Evaluation of warpage and residual stress of precision glass micro-optics heated by carbide-bonded graphene coating in hot embossing process[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 363.
- [11] Li J Z, Gong F, Wang X, et al. Study on filling capacity of optical glass in a novel rapid hot embossing process[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(7): 3404.
- [12] Liu X Q, Yu L, Chen Q D, et al. Sapphire concave microlens arrays for high-fluence pulsed laser homogenization [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(20): 1615-1618.
- [13] Qin B, Li X W, Yao Z L, et al. Fabrication of microlenses with continuously variable numerical aperture through a temporally shaped femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 4596-4606.
- [14] Zhang B, Wang Z, Tan D Z, et al. Ultrafast laser-induced self-organized nanostructuring in transparent dielectrics: fundamentals and applications[J]. *Photonix*, 2023, 4(1): 24.
- [15] Zhu X Y, Xu Q, Hu Y J, et al. Flexible biconvex microlens array fabrication using combined inkjet-printing and imprint-lithography method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 118-124.
- [16] Magazine R, van Bochove B, Borandeh S, et al. 3D inkjet-printing of photo-crosslinkable resins for microlens fabrication[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 50: 102534.
- [17] Zhou T F, Xu R Z, Ruan B S, et al. Study on new method and mechanism of microcutting-etching of

- microlens array on 6H-SiC mold by combining single point diamond turning with ion beam etching[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 278: 116510.
- [18] Zhang Q S, Schambach M, Schliske S, et al. Fabrication of microlens arrays with high quality and high fill factor by inkjet printing[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(14): 2200677.
- [19] Liu X Q, Yang S N, Yu L, et al. Rapid engraving of artificial compound eyes from curved sapphire substrate [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(18): 1900037.
- [20] Bae S I, Kim K, Yang S, et al. Multifocal microlens arrays using multilayer photolithography[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9082-9088.
- [21] Luan S Y, Cao H, Deng H F, et al. Artificial hyper compound eyes enable variable-focus imaging on both curved and flat surfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(40): 46112-46121.
- [22] Li J, Ha N S, Liu T L, et al. Ionic-surfactant-mediated electro-dewetting for digital microfluidics[J]. *Nature*, 2019, 572(7770): 507-510.
- [23] Li X M, Tian H M, Shao J Y, et al. Decreasing the saturated contact angle in electrowetting-on-dielectrics by controlling the charge trapping at liquid-solid interfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18): 2994-3002.
- [24] Zhao P P, Li Y, Zappe H. Accelerated electrowetting-based tunable fluidic lenses[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15733-15746.
- [25] Wang D Y, Hu D G, Zhou Y W, et al. Design and fabrication of a focus-tunable liquid cylindrical lens based on electrowetting[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 47430-47439.
- [26] Van Grinsven K L, Ousati Ashtiani A, Jiang H R. Flexible electrowetting-on-dielectric microlens array sheet [J]. *Micromachines*, 2019, 10(7): 464.
- [27] Lü G W, Tian H M, Shao J Y, et al. Facile fabrication of flexible concave microlens arrays with a well-controlled curvature[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2021, 5(21): 7759-7766.
- [28] Zhong Y, Yu H B, Zhou P L, et al. *In situ* electrohydrodynamic jet printing-based fabrication of tunable microlens arrays[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(33): 39550-39560.
- [29] Zhou G M, Yang A K, Wang Y F, et al. Electrotunable liquid sulfur microdroplets[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 606.
- [30] 郭凯, 彭旷, 王文峰, 等. 光学胶膜液体可变焦微透镜阵列[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7): 20210958.
Guo K, Peng K, Wang W F, et al. Optical film liquid variable focus microlens array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20210958.
- [31] Zhang Z G, Chu F Q, Wang X, et al. Microfluidic fabrication of a PDMS microlens for imaging tunability [J]. *Langmuir*, 2022, 38(13): 4059-4064.
- [32] Chang C Y, Yang S Y, Huang L S, et al. Fabrication of plastic microlens array using gas-assisted micro-hot-embossing with a silicon mold[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, 48(2): 163-173.
- [33] Hocheng H, Wen T T, Yang S Y. Replication of microlens arrays by gas-assisted hot embossing[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2008, 23(3): 261-268.
- [34] Choi S T, Son B S, Seo G W, et al. Opto-mechanical analysis of nonlinear elastomer membrane deformation under hydraulic pressure for variable-focus liquid-filled microlenses[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 6133-6146.
- [35] Cao J J, Hou Z S, Tian Z N, et al. Bioinspired zoom compound eyes enable variable-focus imaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(9): 10107-10117.
- [36] Li J, Wang W J, Fu Z L, et al. Fabrication of a dual-focus artificial compound eye with improved imaging based on modified microprinting and air-assisted deformation[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(10): D125-D130.
- [37] Wang J H, Tang W P, Li L Y, et al. Hybrid driving variable-focus optofluidic lens[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35203-35215.
- [38] Lu T Q, Ma C, Wang T J. Mechanics of dielectric elastomer structures: a review[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2020, 38: 100752.
- [39] Koetting M C, Peters J T, Steichen S D, et al. Stimulus-responsive hydrogels: theory, modern advances, and applications[J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2015, 93: 1-49.
- [40] Dayyoub T, Maksimkin A V, Filippova O V, et al. Shape memory polymers as smart materials: a review[J]. *Polymers*, 2022, 14(17): 3511.
- [41] Sun Y L, Dong W F, Yang R Z, et al. Dynamically tunable protein microlenses[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(7): 1558-1562.
- [42] Ma Z C, Hu X Y, Zhang Y L, et al. Smart compound eyes enable tunable imaging[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(38): 1903340.
- [43] Lan C P, Zhou Z W, Ren H W, et al. Fast-response microlens array fabricated using polyvinyl chloride gel[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2019, 283: 155-159.
- [44] Bae J W, Choi D S, Yun I H, et al. Electrically adaptive and shape-changeable invertible microlens[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(8): 10397-10408.
- [45] Yoon J U, Han D H, Oh S J, et al. Electro-reconfigurable adaptive microlens with simultaneous multidirectional focal adjustment and zooming[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(8): 2201988.
- [46] Jiang W, Liu H Z, Zhu S Y, et al. Efficient electrothermal actuation of liquid microlens arrays with low voltages[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(104): 102149-102154.
- [47] Gu T K, Liu H Z, Wang L L, et al. Varifocal liquid microlens in scaffold microstructures under electrothermal actuation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 341: 113584.

- [48] Jiang W, Liu H Z, Li R, et al. Tunable liquid microlens arrays actuated by infrared light-responsive graphene microsheets[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(8): 085006.
- [49] Wang L L, Li R, Peng N M, et al. ITO-activated reconfigurable micro-lens array for dynamic reversible focusing and collimation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 347: 113879.
- [50] Zhang W, Li H, Zou Y C, et al. Design and fabrication of a tunable optofluidic microlens driven by an encircled thermo-pneumatic actuator[J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1189.
- [51] 吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. *发光学报*, 2015, 36(6): 718-723.
Wu W T, Liang Z C, Zhang L. Optofluidic varifocal microlens[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(6): 718-723.
- [52] Chen Q M, Li T H, Li Z H, et al. Optofluidic tunable lenses for in-plane light manipulation[J]. *Micromachines*, 2018, 9(3): 97.
- [53] Hu Y L, Rao S L, Wu S Z, et al. All-glass 3D optofluidic microchip with built-in tunable microlens fabricated by femtosecond laser-assisted etching[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(9): 1701299.
- [54] Zhong Y, Yu H B, Wen Y D, et al. Novel optofluidic imaging system integrated with tunable microlens arrays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(9): 11994-12004.
- [55] Liang L, Hu X J, Shi Y, et al. Tunable and dynamic optofluidic microlens arrays based on droplets[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(43): 14938-14946.
- [56] Chen X X, Li H, Wu T L, et al. Optical-force-controlled red-blood-cell microlenses for subwavelength trapping and imaging[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(5): 2995-3004.
- [57] Chen X X, Wu T L, Gong Z Y, et al. Lipid droplets as endogenous intracellular microlenses[J]. *Light, Science & Applications*, 2021, 10(1): 242.
- [58] 李姮, 陈熙熙, 张焱, 等. 可变焦叶绿体光学微透镜[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0411003.
Li H, Chen X X, Zhang Y, et al. Chloroplast optical microlens with variable focus[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0411003.
- [59] Ruiz U, Provenzano C, Pagliusi P, et al. Single-step polarization holographic method for programmable microlens arrays[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4958-4960.
- [60] Wu D, Wang J N, Niu L G, et al. Bioinspired fabrication of high-quality 3D artificial compound eyes by voxel-modulation femtosecond laser writing for distortion-free wide-field-of-view imaging[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(8): 751-758.
- [61] Jürgensen N, Fritz B, Mertens A, et al. A single-step hot embossing process for integration of microlens arrays in biodegradable substrates for improved light extraction of light-emitting devices[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(2): 1900933.
- [62] Xu S, Li Y, Liu Y F, et al. Fast-response liquid crystal microlens[J]. *Micromachines*, 2014, 5(2): 300-324.
- [63] Kamal W, Lin J D, Elston S J, et al. Electrically tunable printed bifocal liquid crystal microlens arrays[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(16): 2000578.
- [64] Wu J B, Wu S B, Cao H M, et al. Electrically tunable microlens array enabled by polymer-stabilized smectic hierarchical architectures[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(20): 2201015.
- [65] Perera K, Nematy A, Mann E K, et al. Converging microlens array using nematic liquid crystals doped with chiral nanoparticles[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(3): 4574-4582.
- [66] Xu M, Zhang L D, Bian Z Y, et al. Electrically controllable liquid crystal paraxial Fresnel zone plate based on concentric zones patterned electrode[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109348.
- [67] He Z Q, Lee Y H, Chanda D, et al. Adaptive liquid crystal microlens array enabled by two-photon polymerization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 21184-21193.
- [68] He Z Q, Lee Y H, Chen R, et al. Switchable Pancharatnam-Berry microlens array with nano-imprinted liquid crystal alignment[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5062-5065.
- [69] Li T, Chen C, Xiao X J, et al. Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens[J]. *Photonics Insights*, 2023, 2(1): R01.
- [70] Li R, Zhang H L, Chu F, et al. Compact integral imaging 2D/3D compatible display based on liquid crystal micro-lens array[J]. *Liquid Crystals*, 2022, 49(4): 512-522.
- [71] Zhang M, Dong P, Wang Y, et al. Tunable terahertz wavefront modulation based on phase change materials embedded in metasurface[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(20): 3592.
- [72] Zhang D Q, Pan G M, Jin Z W, et al. Tunable dielectric metasurfaces by structuring the phase-change material[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 4312-4326.
- [73] Ou X N, Zeng T B, Zhang Y, et al. Tunable polarization-multiplexed achromatic dielectric metalens [J]. *Nano Letters*, 2022, 22(24): 10049-10056.
- [74] Lin P, Lin Y S, Lin J, et al. Stretchable metalens with tunable focal length and achromatic characteristics[J]. *Results in Physics*, 2021, 31: 105005.
- [75] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. MEMS-tunable dielectric metasurface lens[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 812.
- [76] Zhao P P, Sauter D, Zappe H. Tunable fluidic lens with a dynamic high-order aberration control[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(18): 5302-5311.
- [77] 潘志达, 苏晓琴, 周岩, 等. 层叠微透镜阵列扫描成像系统的动态像差[J]. *光学学报*, 2023, 43(19): 1911002.
Pan Z D, Su X Q, Zhou Y, et al. Dynamic aberrations of scanning imaging system with cascaded microlens arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(19): 1911002.
- [78] Hsieh P Y, Chou P Y, Lin H A, et al. Long working

- range light field microscope with fast scanning multifocal liquid crystal microlens array[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10981-10996.
- [79] 李恒, 邵永红, 王岩, 等. 基于微透镜阵列和振镜扫描的光谱分辨多焦点多光子显微技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1240-1244.
Li H, Shao Y H, Wang Y, et al. Spectrally resolved multifocal multiphoton microscopy using microlens array and galvo mirror scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1240-1244.
- [80] Zhang S, Sheng H, Yang D, et al. Micro-lens-based matching for scene recovery in lenslet cameras[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(3): 1060-1075.
- [81] Chen M C, He W D, Wei D, et al. Depth-of-field-extended plenoptic camera based on tunable multi-focus liquid-crystal microlens array[J]. *Sensors*, 2020, 20(15): 4142.
- [82] Chen M C, Li Z X, Ye M, et al. All-in-focus polarimetric imaging based on an integrated plenoptic camera with a key electrically tunable LC device[J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 192.
- [83] Umer T M, Inman A, Lapid B, et al. Three-dimensional light-field microendoscopy with a GRIN lens array[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(2): 590-607.
- [84] Zeng X F, Smith C T, Gould J C, et al. Fiber endoscopes utilizing liquid tunable-focus microlenses actuated through infrared light[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2011, 20(3): 583-593.
- [85] Kwon J M, Bae S I, Kim T, et al. Solid immersion microlens arrays-based light-field camera for 3D *in vivo* imaging[EB/OL]. (2022-03-18) [2023-11-09]. <http://arxiv.org/abs/2203.09684>.
- [86] Peng Y Y, Zhou X T, Zhang Y A, et al. Fabrication of a micro-lens array for improving depth-of-field of integral imaging 3D display[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(29): 9104-9107.
- [87] Zhao N Q, Liu J, Zhao Z F. High performance integral imaging 3D display using quarter-overlapped microlens arrays[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4240-4243.
- [88] Xu M, Xue Y Y, Li J, et al. Large-area and rapid fabrication of a microlens array on a flexible substrate for an integral imaging 3D display[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(7): 10219-10227.
- [89] 余文涛, 张汉乐, 邓欢, 等. 基于全息光学元件的增强现实 3D 显示系统[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1009001.
Yu W T, Zhang H L, Deng H, et al. Augmented reality three-dimensional display system based on holographic optical element[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1009001.
- [90] Tian L L, Chu F, Zhao W X, et al. Fast responsive 2D/3D switchable display using a liquid crystal microlens array[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5870-5873.
- [91] Li Q, Zhong F Y, Deng H, et al. Depth-enhanced 2D/3D switchable integral imaging display by using n -layer focusing control units[J]. *Liquid Crystals*, 2022, 49(10): 1367-1375.
- [92] Tian L L, Chu F, Zhang Y X, et al. Switchable 2D/3D display based on a liquid crystal lens array and the rotating specimen shooting method[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(15): 3664-3667.
- [93] Sim J H, Kim J, Kim C, et al. Novel biconvex structure electrowetting liquid lenticular lens for 2D/3D convertible display[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 15416.
- [94] Yuan R Y, Ma X L, Chu F, et al. Optofluidic lenticular lens array for a 2D/3D switchable display[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 37418-37428.