

## 微透镜阵列的制备与应用研究进展

李建军<sup>1</sup>, 褚春艳<sup>1</sup>, 卢玮彤<sup>2</sup>, 张萍萍<sup>2</sup>, 杨高岭<sup>1,2</sup>, 钟海政<sup>2,3\*</sup>, 赵跃进<sup>1\*\*</sup><sup>1</sup>北京理工大学光电学院精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081;<sup>2</sup>北京理工大学材料学院低维量子结构与器件工信部重点实验室, 北京 100081;<sup>3</sup>北京理工大学深圳研究院, 深圳 518057

**摘要** 微透镜阵列是一种多功能的微光学元件, 可以对入射光进行扩散、光束整形、光线均分、光学聚焦等调制, 进而实现大视角、低像差、小畸变、高时间分辨率和无限景深等, 在光电器件和光学系统的微型化、智能化和集成化方面具有重要的应用潜力。介绍了微透镜阵列的光学原理和发展历程, 综述了喷墨打印、激光直写、丝网印刷、光刻技术、光聚合技术、热熔回流技术和化学气相沉积法等微透镜阵列制备技术, 总结了微透镜阵列在成像传感、照明光源、显示和光伏等领域的应用进展, 最后对微透镜阵列的发展方向进行了展望, 讨论了曲面微透镜、叠加复眼系统以及微透镜与新型光电材料结合等新方向的发展趋势和未来挑战。

**关键词** 光学制造; 微透镜阵列; 制备技术; 器件集成; 光学系统; 显示

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2100001

## Development of Microlens Arrays: From Fabrication to Photonic Applications

Li Jianjun<sup>1</sup>, Chu Chunyan<sup>1</sup>, Lu Weitong<sup>2</sup>, Zhang Pingping<sup>2</sup>, Yang Gaoling<sup>1,2</sup>,  
Zhong Haizheng<sup>2,3\*</sup>, Zhao Yuejin<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,  
School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> MIT Key Laboratory for Low-Dimensional Quantum Structure and Devices, School of Materials Science & Engineering,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen 518057, China

**Abstract** Microlens array is a multi-functional micro-optical element that can modulate incident light to realize beam expansion, beam shaping, light splitting, and optical focusing, and further to achieve large viewing angle, low aberration, small distortion, high time resolution, and infinite depth of field. Microlens array has important application potential in miniaturization, intelligence and integration of optoelectronic devices and optical systems. This review article first describes the design principle and development history of microlens arrays. Then the recent progress on the fabrication of microlens arrays including inkjet printing, laser direct writing, screen printing, photolithography, photopolymerization, thermal reflow, and chemical vapor deposition is reviewed. In addition, the applications of microlens arrays in the fields of imaging sensors, lighting, display, and solar cells are summarized. Finally, the future development directions are prospected, and the development trend and future challenges of curved microlens, superimposed compound eye system and the combination of microlens with new optoelectronic materials are discussed.

**Key words** optical fabrication; microlens array; fabrication technology; device integration; optical system; display  
**OCIS codes** 220.4000; 230.4000; 350.3950; 220.1010

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-05-07; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61935001)、深圳市科技创新基金(JCYJ20170817114726048)

通信作者: \*hzzhong@bit.edu.cn; \*\*yjjzhao@bit.edu.cn

## 1 引言

“微光学元件”通常指尺寸为毫米或更小的光学元件<sup>[1-2]</sup>,可推动光学系统的小型化发展,是光学领域重要的器件之一。微透镜是一种常见的微光学元件,通过设计微透镜,可对入射光进行扩散、光束整形、光线均分、光学聚焦等调制,进而实现许多传统光学元器件难以实现的特殊功能<sup>[3-4]</sup>。自20世纪以来,随着机械加工技术、自动控制技术和光学技术的发展,微透镜元件的制备工艺得到了迅速发展,微透镜元件在成像传感、照明、显示、光伏等领域中得到了广泛的应用<sup>[5-7]</sup>。

微透镜的类型多样,根据其外观形状可分为矩形孔径微透镜、六边形孔径微透镜、圆形孔径微透镜,其中以圆形孔径微透镜也就是半球形微透镜最为常见。对于半球形微透镜,根据其光学原理的不同,又可以将其分成两种:折射型微透镜和衍射型微透镜。折射型微透镜的表面光滑且连续,衍射型微透镜具有表面相位浮雕结构且面形不连续<sup>[8]</sup>。与透镜相类似,根据形貌的不同,微透镜有凸面微透镜和凹面微透镜之分。基于汇聚光束、增加光能利用等需求,研究和应用较多的是凸面微透镜,但其制备工艺与凹面微透镜相比较复杂。

微透镜阵列是指由一系列直径为十微米到几个毫米的微小透镜按一定的方式排列而成的阵列。通过调整微透镜阵列中微透镜的形状、焦距、排布结构方式、占空比等,可实现特定光学功能,提高光学系统的集成度和性能<sup>[9]</sup>。国际上已经有很多关于微透镜阵列的综述论文。2015年,北京工业大学的研究者综述了微透镜的制备、表征及应用等方面的研究进展<sup>[10]</sup>。2018年,香港理工大学深圳研究院的研究者综述了微透镜阵列的制备及应用的研究进展,并讨论了微透镜阵列制造面临的机遇和挑战<sup>[11]</sup>。西安交通大学的刘丰等<sup>[12]</sup>总结了红外微透镜阵列器件的发展及制备方法,并介绍了红外微透镜阵列器件在红外波段成像、计量、并行加工、光束匀化方面的应用。关于微透镜阵列的具体制备方法和前沿应用,近年来也有相关综述。2021年,天津工业大学的杨雪等<sup>[13]</sup>综述了微透镜阵列飞秒激光加工方法的研究进展,并分析了目前存在的问题和发展趋势。清华大学和吉林大学的研究者对小型仿生复眼的微纳制造技术进行了总结,探讨了基于微透镜阵列的仿生复眼在机器人视觉、无人机检测、医疗诊断等领域的应用前景<sup>[14]</sup>。此外,国内

外其他研究者也发表了关于液晶微透镜和复眼结构的综述论文<sup>[15-19]</sup>。

与上述综述论文不同,本文着眼于微透镜阵列的制备技术研究,首先对微透镜阵列的原理和发展历程进行简要叙述;然后重点介绍喷墨打印、激光直写、丝网印刷、光刻技术、光聚合技术、热熔回流技术和化学气相沉积法等微透镜阵列制备技术;进一步总结了微透镜阵列在成像传感、照明光源、显示、光伏等领域的应用发展现状;最后根据光学材料和光电电子技术的发展趋势,对微透镜阵列的未来发展方向进行了展望,希望能够对相关领域的研究者提供参考。

## 2 微透镜阵列的原理及发展历程

微透镜阵列的最初构想来源于仿生学中的复眼结构。人类很早就关注到自然界动物复眼的特殊结构,从20世纪初就开始系统研究复眼的视觉系统<sup>[20]</sup>。研究者发现,家蝇的复眼约由4000个小眼组成,复眼中的小眼面一般呈六角形,可充当微小的光学单元<sup>[21-23]</sup>。正是在图1(a)所示的复眼光路结构的启发下,1908年,法国的Lippmann<sup>[24]</sup>提出了微透镜阵列的概念。传统透镜只能在特定角度内实现均匀照明,而微透镜阵列可实现大角度的均匀照明,如图1(b)所示<sup>[25]</sup>。1992年,德国的Hutley等<sup>[26]</sup>证明了使用两对或多对微透镜来操纵光束可以实现空间上不同区域的光互连,如图1(c)所示,在局部透镜中,第二组透镜的侧向位移控制着光束的角度偏差。国防科技大学的Hu等<sup>[27]</sup>对自由空间光互连(FSOI)系统中的串扰进行了研究,结果表明,发射器微透镜阵列的位移显著地影响互连距离。上海大学的宋巍等<sup>[28]</sup>利用锥形微透镜光纤具有的聚焦光束特性,通过控制锥形微透镜单模光纤与环形芯光纤之间的倾斜角度和错位距离,实现了高阶涡旋光模式的激发,从而将光的耦合效率提高了13%。2019年,东北师范大学的Liu等<sup>[29]</sup>展示了微透镜阵列在光束整形方面的作用,如图1(d)所示,通过微透镜的个性化设计和不规则排列,获得了高效、均匀的光束整形效果。

基于以上分析,为了进一步了解微透镜阵列的原理,我们利用Zemax光学设计仿真软件,分别仿真了平行光(光源处于无限远处)以及具有一定发散角的点光源在普通透镜和微透镜阵列中的光路图。仿真结果如图2所示,可见微透镜阵列在光线整形和光束均分等方面的明显优势。

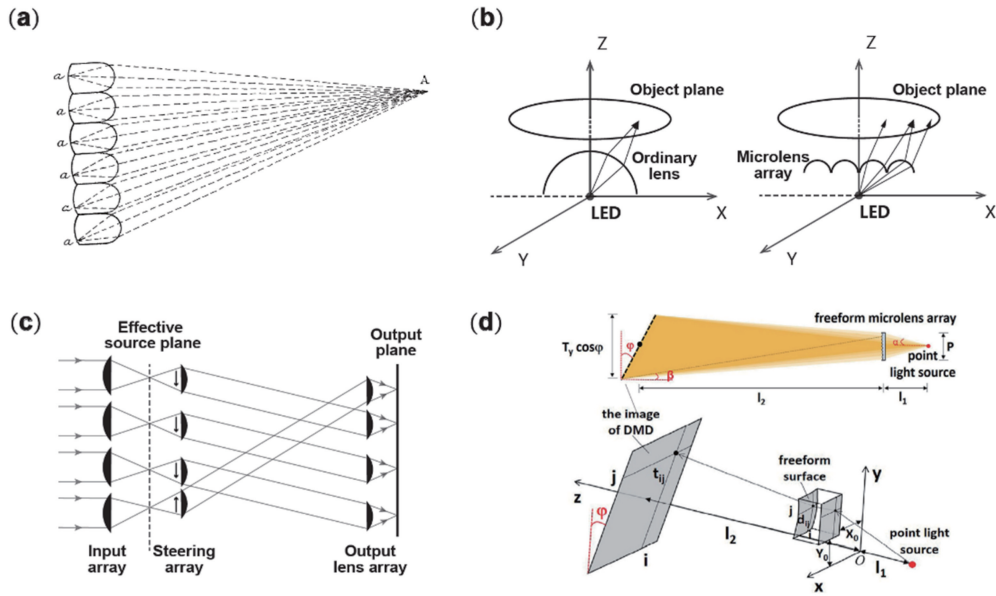


图 1 微透镜阵列的基本原理。(a)复眼光路结构<sup>[24]</sup>;(b)透镜实现均匀照明的光线示意图<sup>[25]</sup>;  
(c)一对微透镜的空间光学互连系统<sup>[26]</sup>;(d)微透镜阵列的光束整形示意图<sup>[29]</sup>

Fig. 1 Basic principles of microlens array. (a) Compound eye optical path structure<sup>[24]</sup>; (b) schematic of uniform illumination by lens<sup>[25]</sup>; (c) optical interconnection system of a pair of microlenses<sup>[26]</sup>; (d) schematic of beam shaping by microlens array<sup>[29]</sup>

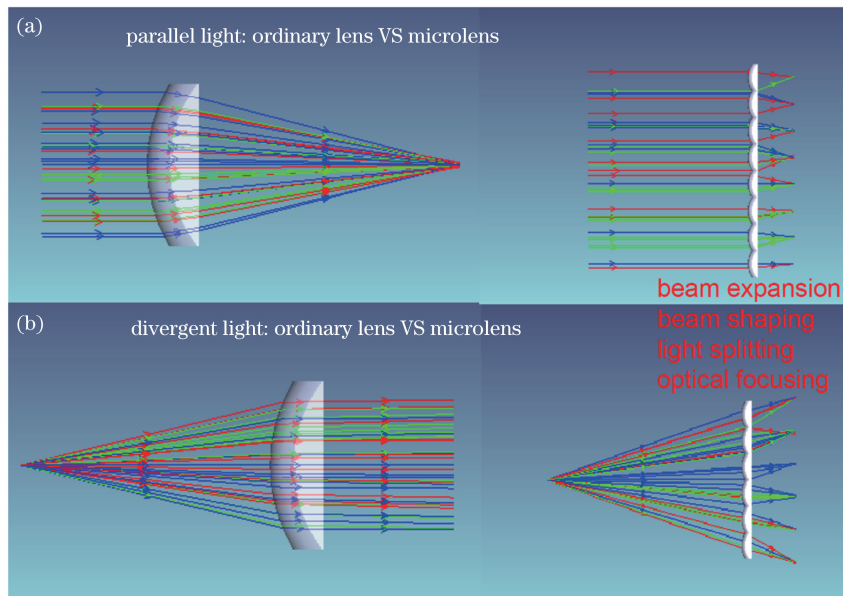


图 2 平行光以及点光源在普通透镜和微透镜阵列中的光路图。(a)平行光;(b)点光源

Fig. 2 Optical path diagrams in ordinary lens and microlens array for parallel light and point light source.

(a) Parallel light; (b) point light source

微透镜阵列的发展起源于光学系统的微型化和集成化需求。最早的微透镜阵列可以追溯到 20 世纪初法国 Lippmann<sup>[24]</sup> 提出的猫眼透镜板集成照相术,这一技术中的微透镜阵列采用机械雕刻技术制成,尺寸在毫米量级。1971 年,日本 Kabushiki Kaisha Ricoh 公司发明了阵列化的多镜头投影系

统<sup>[30]</sup>。1979 年,美国 Anderson<sup>[31]</sup> 提出使用普通透镜阵列对文档和显示器进行近距离成像,研制出一个总长度约为 8.5 cm 的特写成像系统,并论证了可以通过使用更小的镜头或增加阵列的镜头数量来提高相机速度的可行性。

20 世纪 80 年代,在微电子技术基础上,光学微

加工技术有了迅速发展,出现了一系列制作微透镜阵列的新工艺,微透镜阵列得到了快速发展,出现了直径为几  $\mu\text{m}$  甚至  $\text{nm}$  量级的微透镜阵列。其发展历程可用图 3 所示的时间轴来概括:1982 年,日本东京工业大学的 Oikawa 等<sup>[32]</sup>将平面光刻工艺和离子交换工艺相结合,在一块平板玻璃上制成了直径为 1.2 mm、焦距为 9.7 mm、有效数值孔径为 0.05 的平面微透镜阵列。该微透镜阵列具有平面自聚焦、集成性、微小性和变折射率等特点,奠定了平面微透镜的基本模式。1992 年,日本 Toshiba 公司申请了微透镜阵列制作的相关专利<sup>[33]</sup>,通过在透明基材上涂上透明树脂,然后用圆形掩模图案使其曝光并显影,从而制备得到微透镜阵列。随后,日本 Sony 公司通过将微透镜阵列和单片电荷耦合器件 (CCD) 集成,获得了具有高灵敏度和低信噪比的 CCD 器件<sup>[34]</sup>。1994 年,荷兰 Philips 研发中心成功制作出了二维大面积图像传感微透镜阵列<sup>[35]</sup>,使得微透镜阵列步入了微米量级,显著提高了传感器件的响应速度。随后,微透镜阵列的应用也随着其结构的微型化而得到进一步发展。1997 年,德国的 Grunwald 等<sup>[36]</sup>利用非球面微透镜实现了光纤耦合和准直。2002 年,美国的 Johnson<sup>[37]</sup>发明了含有复合透镜阵列的多级微透镜阵列。2002 年,日本大阪大学的 Kobayashi 等<sup>[38]</sup>采用微透镜阵列扫描器,将

微透镜阵列与二次谐波显微镜集成,提出了一种用于二次谐波显微镜的多焦点扫描技术,与典型的单焦扫描技术相比,倍频检测效率和图像采集率提高了几十倍。2005 年,华中科技大学的陈四海等<sup>[39]</sup>尝试将微透镜的基底减薄,使其能够用在曲面上,视场角有了显著提高。随后,韩国的 Jeong 等<sup>[40]</sup>基于用气压差使薄膜成球状的原理,制作了曲面微透镜,省去了对准的问题。韩国 LG 电子公司提出了使用激光微加工来制造微透镜阵列片的方法<sup>[41]</sup>,与常规的机械加工工艺相比,可以减少工序,大幅提高生产率。2011 年,中国科学院光电技术研究所的杜春雷等<sup>[42]</sup>发明了一种基于微透镜阵列的连续面形微结构成形技术,利用光源照射毛玻璃产生的散射光作为掩模图形的曝光光源,通过连续调制实现了不同物体的嵌套光刻,推动了微透镜阵列制备技术的发展。近期,为了制造高精度塑料衍射微透镜,长春理工大学的刘兴国等<sup>[43]</sup>对衍射微透镜注塑成型工艺的参数优化及误差补偿进行了讨论,建立了微结构注塑成型的误差补偿模型,使得衍射微透镜阵列的注塑成型精度得到了显著提升。综上所述,近年来微透镜阵列的制备技术得到了快速发展,已经形成了多条制备高质量微透镜阵列的技术路线,在成像传感、照明光源、显示、光伏等多个领域得到了广泛的应用。

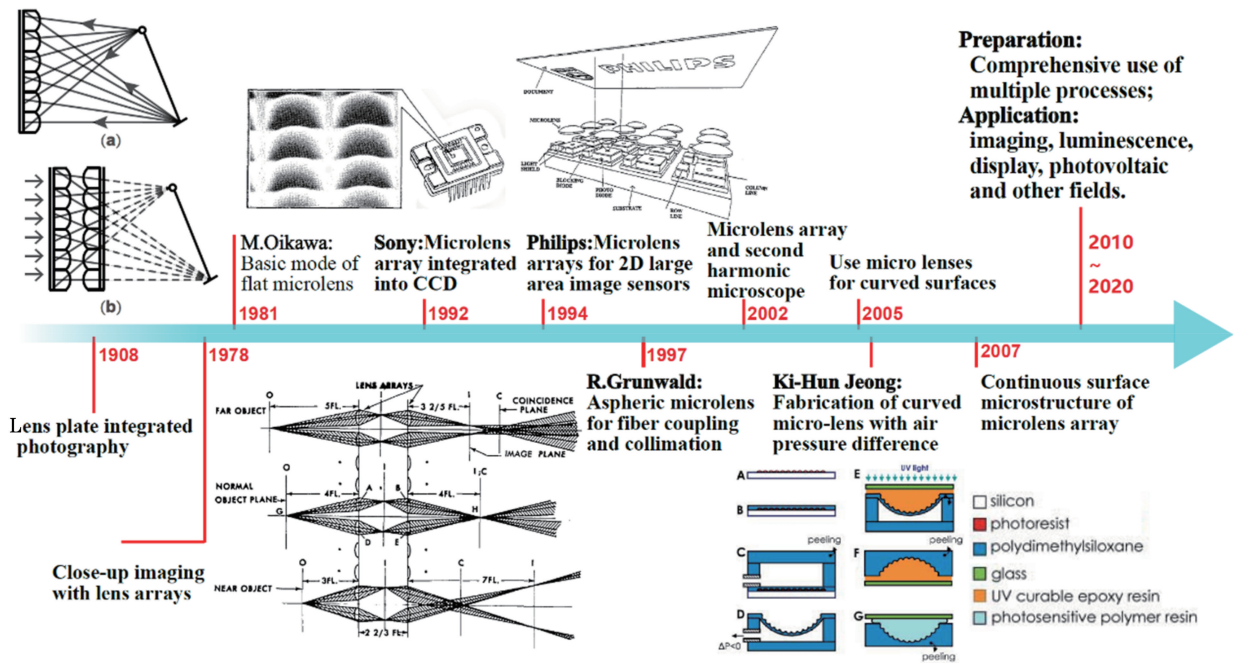


图 3 微透镜阵列的简要发展历程<sup>[24,31,34-35,40]</sup>

Fig. 3 Brief development history of microlens array<sup>[24,31,34-35,40]</sup>

随着微透镜阵列加工水平的日趋完善和成熟,其独特的光学特性正不断被发掘和利用,为设计和加工微透镜阵列光学系统提供了源源不断的动

力<sup>[44]</sup>。截至目前,已有很多种类的微透镜阵列实现了商业化应用,表1总结了应用较广泛的微透镜阵列及其主要特点<sup>[45]</sup>。

表1 常用的微透镜阵列及其主要特点<sup>[45]</sup>

Table 1 Ordinary microlens arrays and their main characteristics<sup>[45]</sup>

Microlens type	Semiconductor microlens array	Gradient index microlens array	Photosensitive glass microlens array	Melt microlens array	Diffractive optical microlens array
Preparation process	Ion beam etching	Photolithography, ion exchange	Photolithography, heat treatment	Hot melt molding	Photolithography, ion etching
Lens diameter	100 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$ –1 mm	150 $\mu\text{m}$	20 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$ –1 mm
Imaging principle	Spherical surface	Gradient refractive index	Spherical surface	Spherical surface	Diffraction
Production material	InGaAsP/InP	Optical glass	Photosensitive glass	Photoresist	Multiple materials
Application scope			Polychromatic light		
Application type	Refraction type	Refraction type	Refraction type	Refraction type	Diffraction type

### 3 微透镜阵列的制备方法

微透镜阵列的制备方法总体来说可分为直接法和间接法。直接法不需要制作三维微结构的掩模或模内件,微透镜的形状通常是在材料处于热塑性状态或液态时,由于表面张力的影响而形成的,需要控制工艺产生光滑的表面(算术平均粗糙度小于1 nm)<sup>[46-47]</sup>。并且,由于微透镜的几何形状由温度、润湿性、压力和加工时间等控制参数决定,微透镜的精度控制仍然十分困难。间接法需要用凹面微透镜来制作模具,然后通过模压成形和注射成型等复制技术来制作凸面微透镜<sup>[48]</sup>。利用间接法可以很好地控制微透镜阵列的形状,但过程比较复杂。但就应用来说,凸面和凹面微透镜阵列都有应用前景,因此制备技术主要根据应用来选择。目前较为常见的有喷墨打印、激光直写、丝网印刷、光刻技术、光聚合技术、热熔回流技术和化学气相沉积法等,本文将逐一介绍。

#### 3.1 喷墨打印技术

喷墨打印是一种制造微透镜模具或直接制造微透镜阵列的增材制造技术<sup>[49-50]</sup>,从早期的传统喷墨打印技术,到现阶段的热调谐、电调谐以及数字光处理等技术的辅助应用,此类微透镜阵列的制备技术得到了深入的研究并已广泛应用。早在1994年,美国得克萨斯大学达拉斯分校的MacFarlane等<sup>[51]</sup>提出了使用微喷射技术制备微透镜阵列的方法,微射流系统由压电陶瓷和加工的微通道组成,可直接喷墨制备微透镜阵列。随后,德国leibniz新材料研究所的Biehl等<sup>[52]</sup>利用商用按需喷墨打印系统,在玻璃衬底上制作了有机-无机混合材料微透镜。2007年,法国国家科学研究中心的Bardinal等<sup>[53]</sup>基于硅微悬臂梁探针,提出了一种利用低成本聚合物释放

技术来制造微透镜的定量方法。2013年,芬兰奥卢大学的Vilmi等<sup>[54]</sup>通过对衬底进行预图案化,进一步提高了所打印微透镜阵列的精度并优化了形状。西安交通大学的研究者报道了一种利用微滴喷射制备高数值孔径紫外光固化聚合物微透镜阵列的技术<sup>[55]</sup>。其制作方法如图4(a)所示:将预聚物通过微滴喷射到基底上,氧化锌纳米颗粒上的八氟丁烷( $\text{C}_4\text{F}_8$ )涂层导致接触角显著增大,从而增加了液滴曲率,使微液滴能以均匀的体积精确排列,凝固后制备出了表面光滑、均匀性好、重复性好、数值孔径(NA)高达0.52的高质量微透镜阵列。与之类似,其他一些基于喷墨打印的微绘图仪或微喷墨系统也常用于制备微透镜阵列<sup>[56-57]</sup>。2016年,哈尔滨工业大学的研究者报道了一种利用微喷墨和固化工艺制备聚合物复合微透镜的新技术,设计并制备了凸型和凹型两种具有夹层结构(聚二甲基硅氧烷-甘油-聚二甲基硅氧烷)的微透镜阵列,通过调节固化时间和温度可以控制凹面微透镜的直径<sup>[58]</sup>。牛津大学的研究者展示了可变焦距、与偏振无关的液晶微透镜的热可调按需喷墨打印技术<sup>[59]</sup>。近期该团队又通过使用按需喷墨印刷,将向列型液晶精确地沉积在具有500  $\mu\text{m}$ 间隙的电极之间,制造出了可电调谐的双焦点微透镜<sup>[60]</sup>。2019年,新加坡科技设计大学的Yuan等<sup>[61]</sup>提出了一种基于数字光处理的用于制作表面光滑微透镜阵列的振荡辅助印刷技术,通过设计灰度紫外图案,可实现微透镜的轮廓调控。2019年,青岛理工大学的研究者提出了一种利用电场驱动喷墨打印技术直接在基片上制备除雾微透镜阵列的简便方法,通过在同一衬底上直接印刷微透镜和导电银丝,实现了一种用于带电后去雾的微透镜阵列<sup>[62]</sup>。随着喷墨打印技术的不断发展,能够制

备的微透镜形貌不断优化,其应用也进一步拓展。2020 年,中国科学院沈阳自动化所的研究者受荷叶天然超疏水表面的生物启发,提出了一种制作防水人工复眼的新技术<sup>[63]</sup>。华中科技大学的研究者提出了通过多功能电流体打印(直写和按需打印)制备自对准微透镜阵列的方法<sup>[64]</sup>。如图 4(b)所示,多功能电流体直写通过图案控制为液滴自对准提供了可浸润的表面,而按需打印则精确地调控了液滴的体积,所制备的微透镜阵列的填充因子高达 99.3%,

光提取效率提高了 49%。近期,天津大学的研究者采用变温辅助微注射成型技术,设计了一种实用的光场微透镜阵列,获得了常规微注射成型难以达到的几何精度、表面质量和应力双折射<sup>[65]</sup>。可以看出,喷墨打印技术的优势正在被一步步开发出来并得到有效利用,推动了微透镜阵列的发展。然而,喷墨打印技术制备微透镜阵列的规模有限,不能满足一些特殊应用的需要,此外喷墨打印技术通常会受到油墨黏度的限制,难以打印高黏度的材料<sup>[66]</sup>。

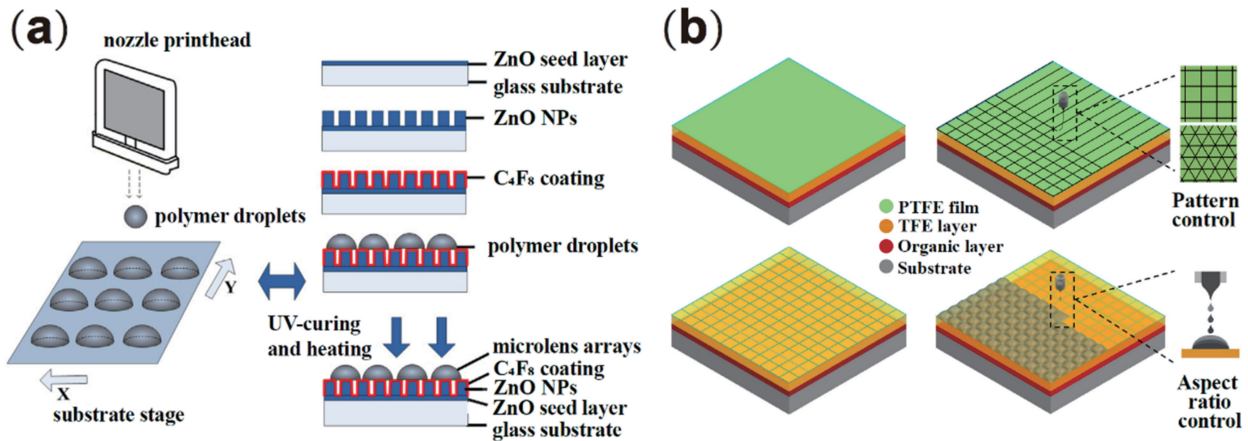


图 4 喷墨打印制备微透镜阵列。(a) 通过微滴喷射制备微透镜阵列的具体步骤<sup>[55]</sup>;

(b) 形态可编程自对准微透镜阵列的制作工艺<sup>[64]</sup>

Fig. 4 Fabricating of microlens array by inkjet printing. (a) Specific steps for preparing microlens array by droplet jetting<sup>[55]</sup>; (b) fabrication process of morphological programmable self-aligning microlens array<sup>[64]</sup>

### 3.2 激光直写技术

最早的微透镜阵列制备通常使用间接方法来实现,尽管一直在尝试简化其加工步骤<sup>[67-68]</sup>,但掩模或模具的制备限制了微透镜制作的效率。随着小部件定制化趋势的发展,这一问题尤为严重。激光直写技术可以通过调节激光脉冲的能量直接实现微透镜结构,逐渐受到研究者的青睐。1993 年,法国波尔多第一大学的 Mihailov 等<sup>[69]</sup>通过掺杂的无定形聚四氟乙烯(PTFE)的准分子激光烧蚀技术以及聚合物熔化退火技术制造出了折射型微透镜阵列。1998 年,美国迈阿密大学的 Wang 等<sup>[70]</sup>提出了一种在光束敏感玻璃上激光直写灰度掩模并进一步刻蚀的制作技术,实现了 16 个相位级衍射微透镜和微透镜阵列,聚焦效率约为 94%。随着激光技术的进一步发展,2009 年,美国密苏里科技大学的研究者利用飞秒激光微细加工技术制作出了嵌入光敏福特蓝玻璃的具有高填充因子的平凸、柱面和球面微透镜阵列<sup>[71]</sup>。2010 年,西安交通大学的研究者采用飞秒激光原位辐照和氢氟酸刻蚀工艺,在几小时内制备出直径小于 100  $\mu\text{m}$  的大面积密排矩形和六角形凹面微透镜阵列<sup>[72]</sup>;随后他们进一步改进制备技术,在

激光直写的基础上引入了固化工艺<sup>[73]</sup>,实现了更加快速的单步制备微透镜阵列的方法<sup>[74]</sup>。2016 年,西班牙巴塞罗那大学的 Florian 等<sup>[75]</sup>利用激光直写和光固化技术,通过调整激光脉冲能量来控制微透镜的几何形状和大小,实现了焦距为 7~50  $\mu\text{m}$  的微透镜阵列。近年来,随着激光器的优化改良,激光直写技术更加广泛地应用于微透镜阵列的制备。近年来陆续出现了许多采用不同类型的激光脉冲制备微透镜阵列的研究,加工材料也发展为硫卤化物玻璃<sup>[76]</sup>、二氧化硅<sup>[77-78]</sup>和聚合物材料<sup>[79]</sup>等。2020 年,德国耶拿的 Schmidt 等<sup>[80]</sup>展示了一种新颖的短脉冲 CO<sub>2</sub> 激光系统,与普通的振镜扫描系统相结合,可以在几十秒内完成硼硅酸盐、纯碱石灰和熔融二氧化硅等玻璃的消融,产生不同直径和阵列间距的微透镜。华中科技大学的研究者采用飞秒激光直写技术制备了填充因子为 100% 的微透镜阵列<sup>[81]</sup>。该阵列由直径为 9  $\mu\text{m}$  的周期性六边形平凸微透镜单元组成,每个微透镜的聚焦效率为 92%,与 CCD 相机结合,实现了斜入射平面光束和涡旋光束的波前探测。

### 3.3 丝网印刷技术

普通的喷墨打印或者激光直写技术虽然简易可

控,但一般来说打印头数量有限,加工耗时,而且微透镜阵列的规模受到喷墨打印装置的限制。低成本、大面积、简单控制的微透镜阵列制造仍然面临一些技术难题。丝网印刷通过使用刀片或刮板将墨水转移到基板上,可以实现较好的转移,是一种便捷、高效、低成本的微透镜阵列制备技术。1990年,英国 ZED 仪器公司的 Zollman 等<sup>[82]</sup>发明了一种用于制备丝网的方法和设备,利用激光雕刻装置对含有填充漆涂层的穿孔丝网进行图案化处理,可用于丝网印刷。随后丝网印刷技术的逐步发展,2012年,美国南达科他矿业理工学院的 Blumenthal 等<sup>[83]</sup>利用图案化直写和丝网印刷技术转换油墨,实现了高

分辨聚合物结构的制备。2016年,福州大学的研究者发明了一种大面积微透镜阵列的丝网印刷制作方法,通过对金属板进行设计,制作出网板,然后将配制好的 UV 树脂涂覆到网板上,静置并采用紫外固化的方法即可得到微透镜阵列<sup>[84]</sup>。随后,他们又进一步改进了丝网印刷制作大规模聚合物微透镜阵列的方法<sup>[85]</sup>,如图 5 所示,通过改变回流时间和开孔尺寸来控制微透镜阵列的直径、高度和相邻两个微透镜之间的距离。同时,采用倒置回流结构,并对 UV 树脂的黏度和基材的表面润湿性进行优化,有效地提高了微透镜阵列的数值孔径<sup>[86]</sup>,是大规模制备微透镜阵列的可借鉴方案。

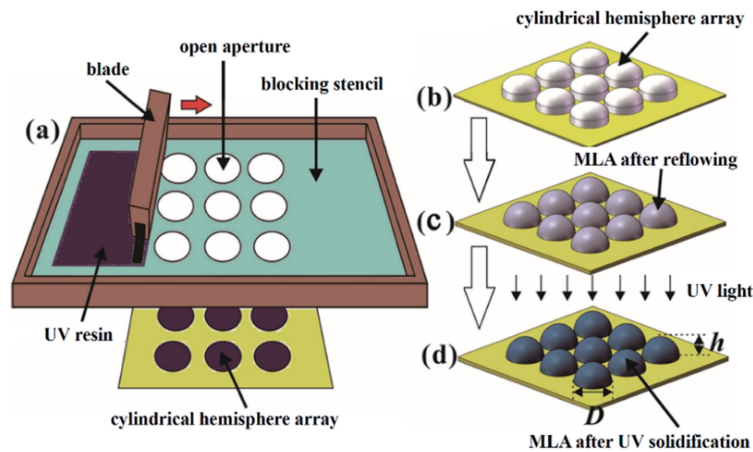


图 5 丝网印刷微透镜阵列的工艺示意图<sup>[85]</sup>。(a)丝网印刷工艺方案;(b)采用丝网印刷制备微柱形半球阵列;(c)微柱形半球阵列回流形成微透镜阵列;(d)微透镜阵列在紫外光下固化

Fig. 5 Schematic of manufacturing process of screen-printed microlens array<sup>[85]</sup>. (a) Scheme of screen printing process; (b) micro-cylindrical hemisphere array fabricated using screen printing; (c) microlens arrays formed by refluxing micro-cylindrical hemisphere array; (d) microlens arrays solidified under UV light

### 3.4 光刻技术

虽然各种印刷技术为制造微透镜阵列提供了广泛的思路,但高填充率的大面积微光学元件的高效制造仍然具有挑战性。在过去的几十年里,光刻技术被证明是一种很有效的手段,可以在透明材料(如二氧化硅玻璃)中制造微结构,配合光刻胶、掩模版等辅助材料,可以直接制备微透镜阵列或模具<sup>[87-88]</sup>。2001年,英国卢瑟福·阿普顿实验室提出了一种利用重铬酸盐明胶(DCG)和酶制作折射微透镜阵列的新技术,用酶溶液代替传统的水-异丙醇显影剂来显影光学曝光的重铬酸盐明胶,大大提高了表面浮雕深度<sup>[89]</sup>。次年,美国哈佛大学的研究者也介绍了利用灰度掩模投影光刻技术在光刻胶中制作微结构阵列的方法,并且使用这些三维微结构阵列作为母版,通过在其上浇铸透明弹性体,复制得到了互补的微透镜阵列<sup>[90]</sup>。基于光刻技术的基本原理,四川大学的研究者将进一步灰度掩模调制光刻技术与新型酶

刻卤化银明胶相结合,在明胶薄膜上成功制作了消色差球面微透镜阵列<sup>[91]</sup>。2009年,研究者利用多次曝光双光束干涉技术制作了基于 SU-8 光刻胶的微透镜阵列<sup>[92]</sup>,在  $0^\circ$  和  $60^\circ$  两次曝光条件下制备了椭圆形微透镜,并且通过改变两次曝光之间的旋转角或剂量比,实现了微透镜的椭圆度可控<sup>[93]</sup>。Kang 等<sup>[94]</sup>使用漫射式扩散光刻技术制作了形状可控的微透镜阵列。2012年,法国图卢兹大学的研究者报道了一种适用于垂直腔面发射激光器有源光束整形的聚合物可调谐微透镜阵列的 SU-8 光刻胶双曝光制作方法,实现了快速、低成本和晶片规模的集成技术<sup>[95]</sup>。2014年,西安交通大学的研究者提出了一种通过预测和调整紫外光分布来制备高质量非球面微透镜阵列和双焦微透镜阵列的有效工艺,通过控制气隙和曝光时间,优化了填充因子和曲率<sup>[96]</sup>。随后,研究者在光刻技术制备微透镜阵列的超长焦距调控<sup>[97]</sup>、快速高效制备<sup>[98]</sup>以及形貌调控<sup>[99]</sup>等方面

也进行了相应的研究。2019 年,清华大学的研究者为了在硬质材料上制作纳米微透镜阵列,提出了一种将飞秒激光改性与离子束刻蚀相结合的技术,通过控制曝光剂量和刻蚀时间,实现了焦距为 60~100  $\mu\text{m}$  的微透镜<sup>[100]</sup>。随后,东南大学的研究者展示了大焦数和精准轮廓的球面透镜形状折射硅微透镜阵列的制作<sup>[101]</sup>。2020 年,吉林大学的刘墨南等<sup>[102]</sup>提供了一种激光埋种辅助刻蚀的技术,利用相位调制得到的多个焦点替代单个焦点进行曝光,实现了对微凹透镜阵列的并行加工。基于光刻技术,研究者又发展出一些新颖的制备方法。其中有代表性的是合肥工业大学的研究工作<sup>[103]</sup>,研究者基于光刻的方法制备了聚乙烯醇(PVA)的低驱动电压液晶凸面微透镜阵列,在 0~0.6 V 的电压范围内,焦距可从 -4.5 cm 调到无限远处。随后他们又通过更改微孔的半径或微孔中聚乙烯醇溶液的体积来调整微透镜的曲率并增大微透镜阵列的填充因子<sup>[104]</sup>。近年来,随着准分子、极紫外等先进光刻技术的发展,微透镜阵列的光刻制备工艺也必将进一步提升,有望获得更高精度的尺寸自由定制的微透镜阵列。

### 3.5 光聚合技术

光聚合技术是利用光固化预聚物将液滴转化为固体微透镜,这是一种能够在不同衬底上快速、大规模、低成本制造微透镜阵列的方法<sup>[49,105]</sup>。1996 年,法国国家科学研究中心的 Lazare 等<sup>[106]</sup>首次用紫外准分子激光辐照聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),制作了微透镜。1999 年,日本防卫大学的 Okamoto 等<sup>[107]</sup>报道了利用紫外光固化聚合物的收缩效应制作微透镜阵列的方法,制作出了直径为 0.2~2 mm 的微透镜阵列。随后,美国朗讯技术公司的

Chandross 等<sup>[108]</sup>发明了通过多个电极调谐可固化液滴以获得不同参数的微透镜阵列的方法。2007 年,Chang 等<sup>[109]</sup>报道了一种基于软辊冲压工艺的快速制作紫外光固化聚合物微透镜阵列的创新技术,基板上的图案在通过滚动区时受紫外光辐射固化,该方法在连续快速批量生产微透镜阵列方面具有很大潜力。随后在此基础上出现了不少相关的研究。2008 年,美国威斯康星大学麦迪逊分校的 Zeng 等<sup>[110]</sup>报道了用液相光聚合和模塑法制备的聚二甲基硅氧烷(PDMS)微透镜阵列。2010 年,法国米鲁兹大学的 Soppera 等<sup>[111]</sup>基于空间控制的光聚合,提出了一种在光纤末端实现聚合物微组件的技术。2011 年,Huang 等<sup>[112]</sup>提出了一种利用液晶/光聚合物共混物相分离法制备微透镜阵列的技术。2012 年,韩国首尔大学的 Kang 等<sup>[113]</sup>通过将可光固化的聚合物液滴直接转移到靶衬底上来制备形状可控的微透镜阵列。同年,立陶宛维尔纽斯大学的 Žukauskas 等<sup>[114]</sup>将飞秒激光直写光致聚合物应用于制造锥形微透镜及其紧密堆积的阵列。2015 年,天津大学的 Dai 等<sup>[115]</sup>通过基于调幅空间调制器的无掩模光刻系统研究了液晶-聚合物复合材料中的光聚合诱导相分离,优化了曝光条件和材料,在液晶-聚合物复合材料中实现了二维液晶阵列。2017 年,上海理工大学的 Zhang 等<sup>[116]</sup>通过热控制光敏凝胶的表面张力和空气-光敏凝胶界面上的压差,在硅模具微孔下方制备了紫外光固化的光敏凝胶膜,然后通过紫外(UV)光固化凹面界面,制备出了凹面微透镜阵列。如图 6 所示,光固化的微透镜阵列具有较高的机械强度和热强度,适合作为凸模微透镜阵列进一步生产母模。通过设定适当的温度,可以很好地控制微透镜的曲率。

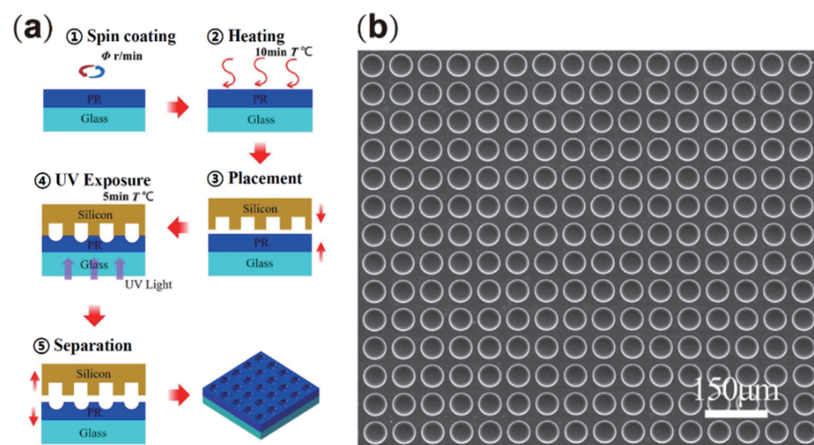


图 6 光聚合技术制备微透镜阵列。(a) 光固化方法制造微透镜的过程;(b) 凹形微透镜阵列的电镜扫描(SEM)图像<sup>[116]</sup>

Fig. 6 Fabricating of microlens array by photocuring method. (a) Process for manufacturing microlens by photocuring method; (b) SEM image of concave microlens array<sup>[116]</sup>



### 3.6 热熔回流技术

由于数字微镜设备的分辨率和光刻工艺复杂流程的限制,获得高质量的微透镜非常困难。为了获得高质量微透镜,一种常见且有效的方法是引入热熔回流工艺,该工艺作为一种简单、低成本的方法,在微透镜制造中得到了广泛的应用<sup>[117-119]</sup>。2004年,南洋理工大学的 He 等<sup>[120]</sup>利用样品反向回流技术在混合溶胶-凝胶玻璃中制作了旋转双曲面微透镜阵列。2008年, Hsieh 等<sup>[121]</sup>报道了基于热熔回流工艺的微透镜阵列制作技术,该技术可以很好地控制微透镜阵列的均匀性和曲率半径。2013年,他们通过多次复制将微透镜从平面基片转移到球面上,形成了高填充因子的微透镜,将所制备的曲面微透镜阵列与图像传感器相结合,可以清晰地显示不同距离物体的图像<sup>[122]</sup>。2015年,英国思克莱德大学的 Wang 等<sup>[123]</sup>展示了一种新的热回流技术,通过控制曝光剂量并采用合适的回流结构,可以灵活而精确地调节微透镜的最终轮廓,从而制造出更复杂的非球面透镜。2017年,中国科学技术大学的 Huang 等<sup>[124]</sup>利用各层光刻胶的不同玻璃化转变温度,在两步热回流工艺中,将预制的层状微结构依次回流到弯曲衬底和仿生复眼小孔中,实现了仿生复眼阵列的柔性制造,并将该方法进行改进,使得回流过程稳定,更易控制<sup>[125]</sup>。该方法通过基于数字微镜器件的光刻,对复杂形状进行预建模,用 PDMS 溶液覆盖、加热并回流,可以得到圆柱形微透镜阵列<sup>[126]</sup>以及非球面微透镜阵列<sup>[127]</sup>,还可用于制作可伸缩聚合物材料紧密堆积微透镜阵列<sup>[128]</sup>。在微透镜阵列的制备方法中,热熔回流法是应用较为广泛的,因为它与标准的半导体工艺兼容,透镜曲率可以通过适当调节温度来控制<sup>[129]</sup>。但是,这种方法有以下缺点:大部分聚合物在红外波段都有很高的吸收,这阻碍了该技术在红外光学的应用;同时,该技术不适合制备亚微米甚至纳米尺度的微透镜阵列,很难实现高分辨率。

### 3.7 化学气相沉积法

化学气相沉积技术作为一种重要的材料制备工艺,在贵金属薄膜和涂层的微结构加工方面有广泛的应用<sup>[130]</sup>,可以用于制备微透镜阵列。早在1990年,日本丰桥技术科学大学的 Kubo 等<sup>[131]</sup>就已经使用激光化学气相沉积法制备出了微透镜。他们利用 CO<sub>2</sub> 激光器加热石英表面,并诱导 SiH<sub>4</sub> 和 NO 源气体进行热反应,从而使氧化硅沉积的厚度达到透镜中心所需的球状厚度分布。1996年,吉林大学的 Wang 等<sup>[132]</sup>对利用准分子激光化学气相沉积(EL-CVD)技术制作微透镜的过程进行了理论分析,并

与平面凸透镜所需的圆弧进行了比较,数值计算结果表明,准分子激光化学气相沉积技术可制备具有良好性能的微透镜,这对于化学气相沉积技术制备微透镜阵列有了进一步的推动。2004年,日本姬路工业大学的 Watanabe 等<sup>[133]</sup>使用聚焦离子束化学气相沉积制成了三维微透镜模具,制作的模具表面光滑,可用于纳米压印制备高质量微透镜阵列。2010年, Lin 等<sup>[134]</sup>对金属有机化学气相沉积的微透镜进行图案化处理,在蓝宝石衬底上生长了氮化镓(GaN)。2017年,澳大利亚国立大学的 Zuo 等<sup>[135]</sup>提出了一种基于 CMOS 技术的高封装密度凸微透镜阵列的制备方法,他们采用电子束光刻技术和等离子体刻蚀技术,通过加氢非晶硅的化学气相沉积方法,制备了直径从几微米到几百纳米的大面积致密硅透镜阵列。以上研究结果表明,化学气相沉积方法为制造大规模、小型化光学成像探测器及硅基微透镜阵列提供了一种较好的解决方案。

### 3.8 其他加工方法

对于自由设计给定面形的微透镜,以上方法大多无法实现,采用传统机械方法配合先进的光学和控制技术,不失为一项很好的补充<sup>[136-138]</sup>。北京理工大学先进加工实验室的周天丰等<sup>[17]</sup>研究了光学微透镜阵列模压成形技术。模压成形作为一种高效、高精度、低成本微透镜阵列加工方式,具有其他加工方式不可比拟的优点,应用前景广阔。早在2005年,俄亥俄州立大学的 Yi 等<sup>[139]</sup>提出了利用多轴超精密机床慢刀伺服设计和制作微透镜阵列的方法。随后他们又不断发展了机械车削加工和模压成型制备不同材料和不同类型的微透镜阵列的方法<sup>[140-145]</sup>。此外, Liu 等<sup>[146-155]</sup>在机械车削、模压成形、辅助压印等加工微透镜阵列方面开展了许多有特色的研究工作。近期,日本京都大学的 Tokuhiko 等<sup>[156]</sup>用硅单晶模具制作了焦距约为 25 μm 的锗微透镜阵列。深圳大学的 Li 等<sup>[157]</sup>利用微细电火花加工技术在碳化钨(WC)基片上制作了微孔阵列,借助精密玻璃成型机,利用非接触式微压印技术制作了可控的光学玻璃微透镜阵列。半导体单晶在较低温度下的塑性变形将为纳米压印技术制造微光学器件提供良好的条件,有望进一步发展。除了物理机械方法,采用化学刻蚀的方法也可以制备出优良微透镜阵列。2007年,厦门大学的研究者报道了一种有效的电化学刻蚀技术,在 n 型砷化镓(n-GaAs)半导体材料上大规模制备出了衍射微透镜阵列<sup>[158]</sup>。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所的研究者利用飞秒激光微细加工技术在熔融石英玻璃芯片中实现了微透镜和微流体通道的集成<sup>[159]</sup>。

除此之外,其他一些新颖的制备方法也值得关注。2018年,中国科学技术大学的研究者基于热膨胀系数相差很大的两种材料,通过改变加工温度来控制热膨胀过程,成功制作了不同焦距的圆柱形聚合物微透镜阵列<sup>[160]</sup>。2019年,哈尔滨工程大学的张馨月等<sup>[161]</sup>发明了一种制备曲面微透镜阵列薄膜的方法,如图7所示,以表面张力以及气体的热膨胀为驱动力,通过调控实验气体的流速、温度以及聚合

物种类,实现了微透镜阵列的参数调控。2020年,合肥工业大学的研究者报道了一种基于选择性润湿表面的可调焦距微透镜阵列制备方法<sup>[162]</sup>。如图8所示,利用光刻技术在玻璃基板上制备疏水性微孔阵列层,这种图案疏水层具有选择润湿性,由于表面张力,液滴阵列可轻易实现自组装。通过刮刀涂布方法可以获得具有良好均匀性的大尺寸平凸透镜阵列,可通过液体量控制焦距。

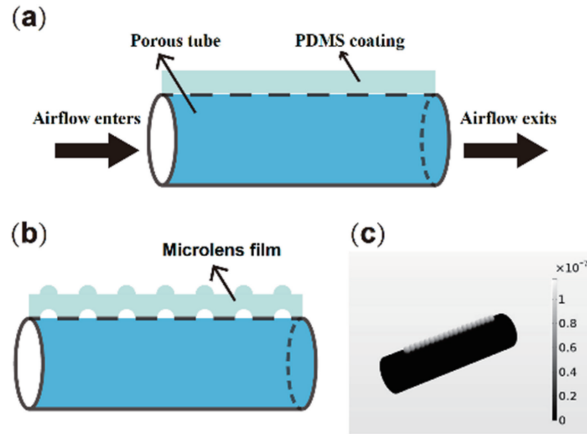


图7 制备曲面微透镜阵列薄膜的方法<sup>[161]</sup>。(a)微透镜薄膜制备前示意图;

(b)制备结果示意图;(c)曲面微透镜阵列薄膜的仿真模拟结果

Fig. 7 Method for preparing curved microlens array film<sup>[161]</sup>. (a) Schematic of microlens film before preparation; (b) schematic of preparation result; (c) simulated result of curved microlens array film

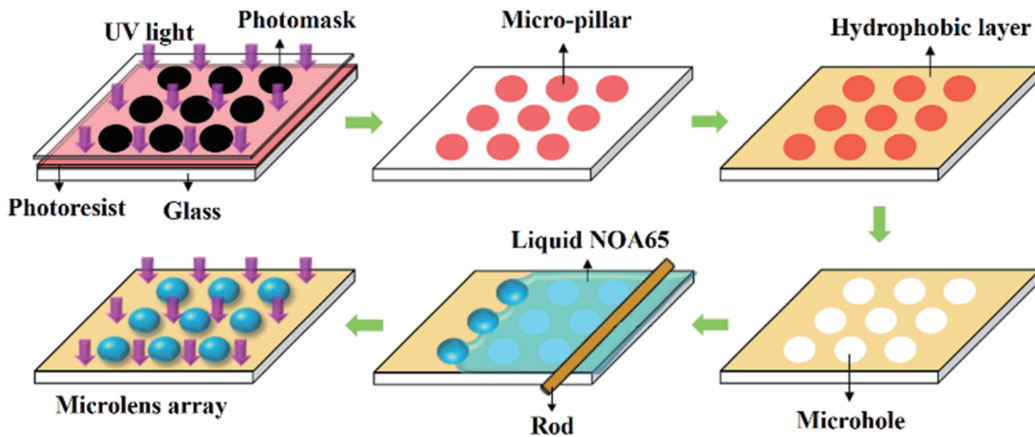
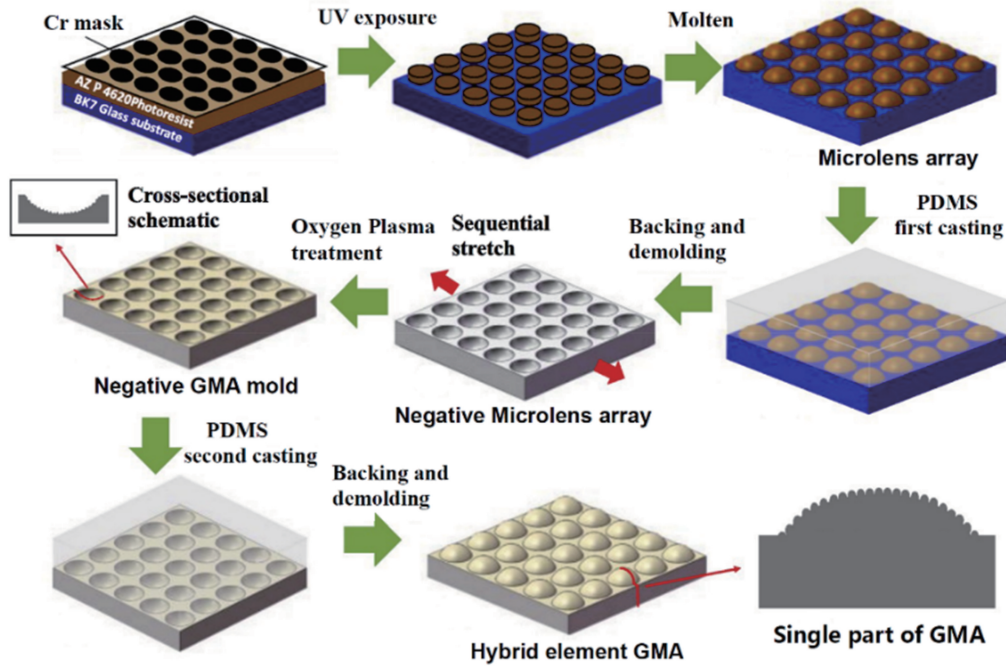


图8 基于自组装的微透镜阵列的制备流程图<sup>[162]</sup>

Fig. 8 Flow chart for preparing microlens array based on self-assembly<sup>[162]</sup>

根据应用需求,还可以将以上方法择优组合,合理搭配发展出一些新颖实用的微透镜阵列制备方法<sup>[163-165]</sup>。如图9所示,上海理工大学的研究者结合光刻、模压成形、自组装等技术,采用热熔法对聚二甲基硅氧烷微透镜阵列进行了两次复制,利用氧等离子体在拉伸微透镜阵列表面制作了槽密度为886 line/mm的自组装光栅<sup>[166]</sup>。最具代表性的工作是:近期中国科学院长春光学精密机械研究所的

研究者将光刻技术、热压技术、软光刻技术和气辅变形技术相结合,首先在聚合物上获得不同焦距的微透镜阵列,然后将平面结构转换为曲面结构,快速、准确地制备出了人工复眼<sup>[167]</sup>。总之,微透镜阵列的制备方法丰富多样,以上所总结的方法各有优劣,合理利用其优势制备高质量的微透镜阵列对于实际应用至关重要。

图 9 两次复制制备光栅微透镜阵列的流程<sup>[166]</sup>Fig. 9 Flow chart for preparing grating microlens array by two replications<sup>[166]</sup>

## 4 微透镜阵列的应用

微透镜阵列具有制备方法多样、简易高效等优势且自身具备优良的光学特性,被广泛应用于成像传感、照明光源、显示和太阳能光伏等领域。

### 4.1 成像传感领域

在许多近距离成像系统中,微透镜阵列具有重要的作用。1994年,在英国德蒙福特大学的 Davies 等<sup>[168]</sup>提出的相机系统中,就已使用多个透镜阵列优化成像效果。2002年,美国伊利诺伊大学香槟分校 Stevens 等<sup>[169]</sup>介绍了一种基于集成成像技术的三维成像系统,利用各种规格不同的微透镜实现了基于整体摄影的三维成像。随后发展出基于单晶硅的高性能半球形电子眼摄像机系统,如图 10(a)所示<sup>[170]</sup>。近期,美国加州大学伯克利分校的 Kuo 等<sup>[171]</sup>介绍了一种芯片上的宽视野荧光显微镜,其结构和图像重构过程如图 10(b)所示,它含有一个离传统图像传感器几毫米远的随机微透镜漫射器,系统可工作于需要便携式显微镜的野外环境下,在荧光信号的活体监测和生物有机体的三维跟踪等方面也有着广泛的应用。此外,微透镜阵列还可用于生物指纹采集<sup>[172]</sup>、静脉成像增强<sup>[173]</sup>等特殊领域,发挥透镜成像系统小型化的潜力。近年来,微透镜阵列广泛应用于图像传感器产品中,通过控制入射光在相应传感器上的传播,从而提高采集效率,减少光的串扰<sup>[174-176]</sup>。2019年,美国 VisEra 科技公司发

明了一种带移位微透镜阵列的图像传感器<sup>[177]</sup>,微透镜阵列和传感器阵列含有排列成多个宏像素的光电元件,每个宏像素中的第一微透镜和第二微透镜具有附加偏移,从而增强了传感器的灵敏度并增大了工作区域。北京理工大学的研究者提出了一种基于微透镜阵列的快照成像光谱仪的设计,微透镜阵列被安装在旋转支架上,可绕光轴 360° 旋转,可最大限度地提高光谱分辨率,最终分辨率可达 10 nm<sup>[178]</sup>。随后,天津大学的谢洪波等<sup>[179]</sup>发明了基于微透镜阵列进行视场切换的中红外成像光学系统,如图 10(c)所示,该系统包括视场分割光楔组、一次成像物镜、视场切换微透镜阵列和二次成像物镜。视场分割光楔组将大视场等分为  $n$  段小视场,并转换成相同视场角,实现了视场切换并将工作区域扩展到了中红外波段。2020年,韩国光州科学技术的 Kang 等<sup>[180]</sup>介绍了一种由微米级发光二极管、光电探测器、无线供电模块和微透镜阵列组成的贴片式组织血氧仪,优化后的微透镜阵列极大地提高了光的穿透深度。最新的一些研究成果也很好体现了微透镜在成像传感方面的应用价值和潜力,比如利用微透镜阵列可进行色差的校正<sup>[181]</sup>、成像像差的补偿<sup>[182]</sup>以及积分成像质量的优化<sup>[183]</sup>,还可用于超分辨率可见光成像<sup>[184]</sup>以及中红外和远红外领域的成像和传感<sup>[185]</sup>。长春理工大学的安岩等<sup>[186]</sup>基于微透镜阵列形式设计了新型大视场激光通信接收光学系统,将微透镜阵列很好地应用在通信领域。

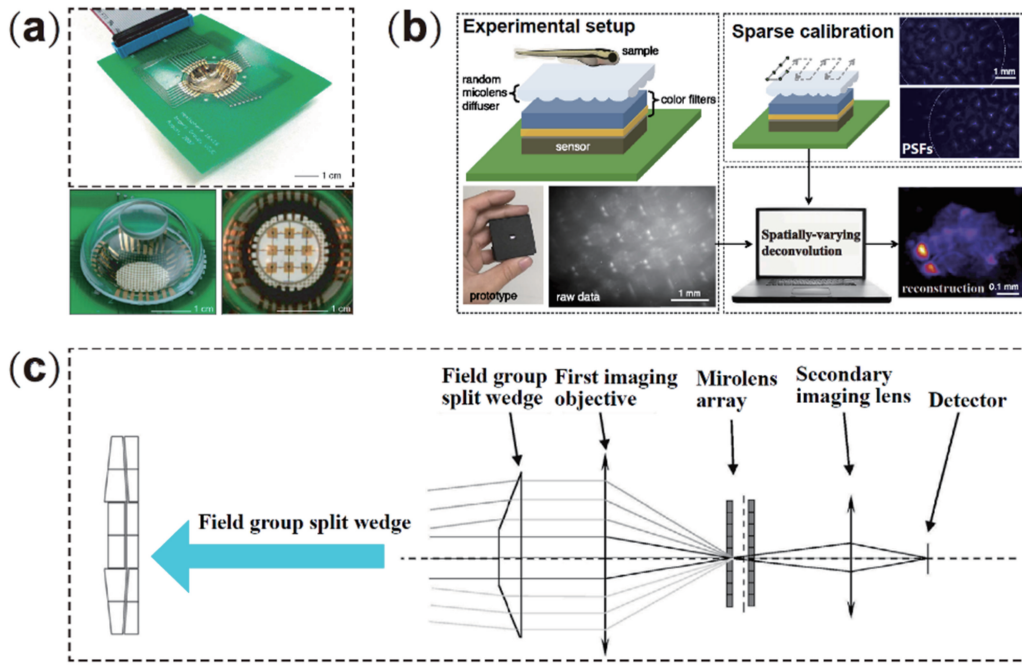


图 10 微透镜阵列成像应用实例。(a)基于单晶硅的高性能半球形电子眼摄像机<sup>[170]</sup>;

(b)带有随机微透镜漫射器的片上荧光显微镜<sup>[171]</sup>; (c)基于微透镜阵列进行视场切换的中红外成像光学系统<sup>[179]</sup>

Fig. 10 Application examples of microlens array imaging. (a) High-performance hemispherical electronic eye camera based on single crystal silicon<sup>[170]</sup>; (b) on-chip fluorescence microscope with random microlens diffuser<sup>[171]</sup>; (c) mid-infrared imaging optical system with field switching based on microlens array<sup>[179]</sup>

## 4.2 照明光源领域

在照明光源中,发光二极管(LED)节能环保,是产生平行光束的高效点光源。2006年,韩国科学技术的Chang等<sup>[187]</sup>开发出了一种用于发光二极管背光系统的微透镜阵列漫射器,如图11(a)所示,微透镜阵列的使用显著增强了LED背光系统的颜色混合特性,辐射角扩展至 $150^\circ$ 。有机发光二极管(OLED)是面光源器件,具有色彩品质好等优点。然而,低输出耦合效率是限制OLED发展的重要挑

战。微透镜阵列可以提高OLED整体发射效率。韩国庆熙大学的Suh等<sup>[188]</sup>制备了半球高度为 $1.0\sim 1.2\ \mu\text{m}$ 的随机分布微透镜阵列,器件外量子效率提高了28.5%。2017年,美国爱荷华州立大学的Peer等<sup>[189]</sup>研究了微透镜阵列在有机发光二极管中的光管理,OLED空气玻璃侧上的外部聚合物微透镜阵列可产生大于100%的实验和理论增强,而不会干扰内部有源层。近期的一些关于微透镜阵列在发光光源方面的研究<sup>[190-191]</sup>,利用集成光学技术

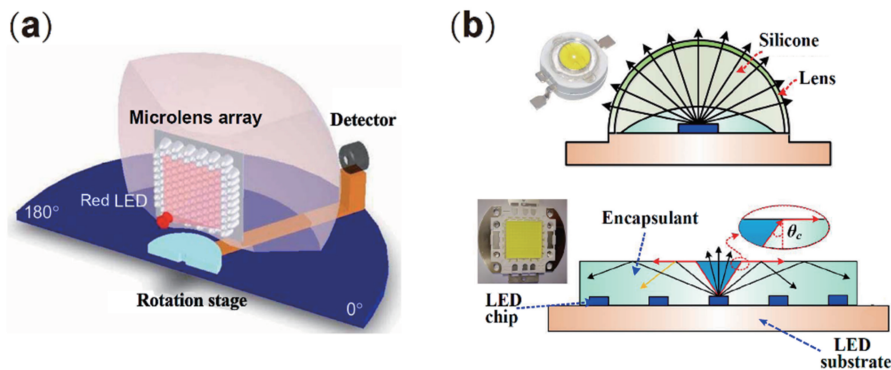


图 11 微透镜阵列在LED中的应用。(a)用于LED背光的微透镜阵列漫射器<sup>[187]</sup>;

(b)光在单芯片LEDs和COB-LEDs中的传播<sup>[194]</sup>

Fig. 11 Applications of microlens array in LED. (a) Microlens array diffuser for LED backlighting<sup>[187]</sup>; (b) light propagation in single chip LEDs and COB-LEDs<sup>[194]</sup>

来增强量子发射器光学特性,这些光学特性有利于进一步发展光纤耦合单光子源。此外,2018年,深圳市微阵技术有限公司发明了一种基于曲面微透镜阵列的LED路灯<sup>[192]</sup>,曲面微透镜阵列对光线起到很好的均化作用。2020年,同济大学的研究者将微透镜阵列应用于掺铈-氧硅酸钇闪烁体表面,提高了光提取效率并控制了光输出的方向性<sup>[193]</sup>。与参考样品相比,采用最佳参数的微透镜阵列,发射角度提高了3.26倍。另一方面,华中科技大学的研究者在传统的板上芯片式发光二极管(COB-LED)封装层上制备了微透镜阵列,减少了封装剂-空气界面的全内反射<sup>[194]</sup>。与传统的平板封装层相比,优化后的微透镜阵列使蓝光和白光LED的光效率分别提高了50.9%和9.31%,光在带半球透镜的单片LED和带扁平封装层的COB-LED中的传播如图11(b)所示。

### 4.3 显示领域

微透镜阵列凭借其特殊的光操控能力,在集成光学设备、全彩色显示等领域中也显示出很有前景的应用<sup>[195-196]</sup>,一般透镜的固有角度依赖性限制了它们在宽视角显示设备中的性能,微透镜阵列可以解决这一问题。1996年,Philips (New York)公司

发明了带有微透镜的显示设备<sup>[197]</sup>。2006年,美国普林斯顿大学的Möller等<sup>[198]</sup>发明了一种用于增强显示强度的微透镜阵列。2014年,中国科学院的研究者直接喷墨打印出了角度无关的光子晶体微透镜<sup>[199]</sup>。如图12所示,当掺入荧光分子时,光子晶体圆顶的荧光强度提高了40倍以上,可实现0~180°的宽视角,对于制造大型、柔性、宽视角显示器具有重要意义。随后,北京蚁视科技有限公司发明了基于微透镜阵列的近眼显示系统<sup>[200]</sup>,利用微透镜的光调制特性实现了近眼显示。美国NVIDIA公司设计了一种近眼微透镜阵列显示器<sup>[201]</sup>,通过改变显示器发出的光,可以模拟观察者聚焦物体时所产生的光场,进一步缩短了观察距离。2020年,中国科学技术大学的闫占军等<sup>[202]</sup>提出了将二维矩形条带装箱问题(2DR-SPP)用于随机微透镜阵列激光扫描显示扩展屏的结构设计,最终获得了发散角在70°以上、均匀性在70%以上、光能利用率在90%以上的消散斑激光扫描显示扩展屏,该结构可应用于机载和车载激光扫描显示系统。近期的研究也显示出微透镜阵列对虚拟现实产业发展的重要作用<sup>[203]</sup>。

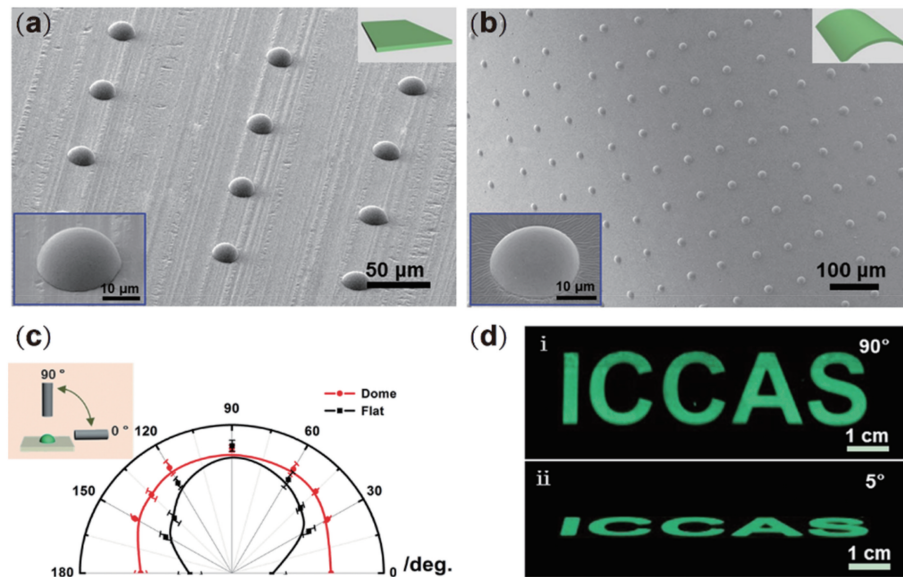


图 12 用于宽视角显示的喷墨打印角度无关的光子晶体微透镜阵列<sup>[199]</sup>。(a)平整铝箔和(b)弯曲PDMS表面上的喷墨打印光子晶体;(c)荧光分子掺杂的光子晶体和平坦点的归一化荧光强度与检测角度的关系;(d)荧光光子晶体的顶视和侧视图的荧光图像

Fig. 12 Photonic crystal microlens array used for wide viewing angle display with angle-independent inkjet printing<sup>[199]</sup>. Inkjet printing photonic crystals on (a) flat Al foil and (b) curved PDMS surface; (c) normalized fluorescent intensity of fluorescence molecule doped photonic crystal domes and flat dots versus detection angle; (d) top-view and side-view fluorescence images of fluorescent photonic crystals

### 4.4 光伏领域

近年来,有机太阳能电池发展迅猛,性能方面可轻易超越薄膜非晶硅基电池,使用新型低带隙聚合

物的串联太阳能电池,其功率转换效率已从十几年前的4%左右很快提高到17.3%<sup>[204]</sup>。但受限于有机吸收剂的厚度等因素,有超过一半的人射太阳光

通量未被吸收<sup>[205]</sup>。2014 年,美国爱荷华州立大学的 Peer 等<sup>[206]</sup>在原本双光子晶体结构的顶层玻璃上制作了聚合物微透镜阵列,波导模和表面等离子体激元模可增强长波长吸收。次年,Chen 等<sup>[207]</sup>研究了微透镜阵列尺寸对光伏器件性能提升的影响,将微透镜阵列置于与活性层相对的衬底侧,适用于大部分类型的太阳能电池。2020 年,英国格拉斯哥大学的 Alsaigh 等<sup>[208]</sup>设计了可替换的多层小透镜阵列结构,增强了光捕获和太阳能收集。该方法可以将内部集成捕光结构和不集成捕光结构的太阳能电池板的光收集性能分别提高 7.18% 和 159.93%。上述研究结果表明,微透镜阵列是一种提高太阳能电池转换效率的有效手段,在多种类型的太阳能电池中具有应用前景。

#### 4.5 其他应用

微透镜阵列还有许多其他方面的应用以及很

多未被完全开发的应用领域。2015 年,中国科学院深圳先进技术研究所的研究者介绍了一种紧凑型多光谱微透镜阵列,并描述了它在辅助色弱方面的应用<sup>[209]</sup>。2017 年,中国科学院的研究者通过实验证明了由空间可变亚波长光栅形成的超薄平面微透镜阵列可以通过调制入射光的偏振来实现聚焦特性<sup>[210]</sup>。2020 年,德国达姆施塔特工业大学的 Schäffner 等<sup>[211]</sup>提出了一种新颖的基于微透镜阵列的可单独控制的光镊平台。最近,西安交通大学电子科学与工程学院的 Bian 等<sup>[212]</sup>利用飞秒激光诱导相变、结构改性和化学各向同性刻蚀等技术,在透明光学玻璃基板上制备了水下拒油的具有超强自洁能力的微透镜阵列,如图 13 所示,该发明解决了微透镜阵列在实际应用中容易被污染的问题,可广泛应用于水下光学探测、生物监测等领域。

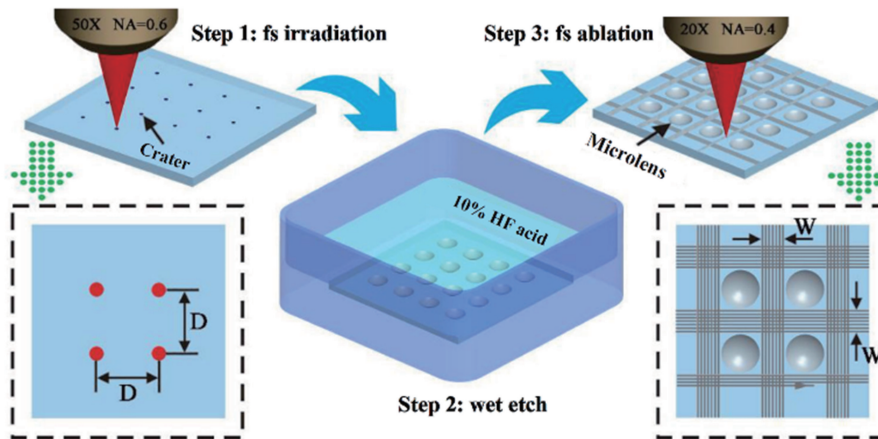


图 13 具有自洁能力的水下抗油污微透镜阵列的制备工艺<sup>[212]</sup>

Fig. 13 Preparation process of underwater oil-resistant microlens array with self-cleaning ability<sup>[212]</sup>

## 5 总结与展望

简单介绍了微透镜阵列的集成原理并回顾了其发展历程,着重介绍了微透镜阵列的制备方法。在常用的制备技术中,喷墨打印、热熔回流和化学气相沉积技术是成本较低、普遍适用的经济方法;激光直写和丝网印刷技术能够实现大规模微透镜阵列的快速制备,但加工精度有所限制;光刻和光聚合技术用以制备高精度微透镜阵列,但成本较高且工艺繁琐;机械加工和化学刻蚀方法作为特定需求的补充手段,也能快速实现微透镜阵列的制备。随后总结了微透镜阵列在成像传感、发光、显示和光伏等领域中的应用,微透镜及其阵列在各个领域中发挥着重要的作用,未来微透镜阵列的发展趋势必然是微型化、智能化和集成化。根据上述总结,从微透镜阵列的应用需求出发,对未来发展进行了展望,具体如下。

1) 目前平面微透镜阵列的研究较多,应用广泛,但关于在球面或自由曲面上制备大规模微透镜阵列的课题有待进一步探索,需要考虑阵列的合理排布、光学串扰等多重问题,开展针对自由曲面微透镜阵列的光学理论研究,从而指导其制备工艺并发掘其应用潜力。

2) 微透镜阵列发源于自然复眼系统,但就目前发展来看,仍需进一步完善。可考虑对叠加复眼系统进行分析研究<sup>[14]</sup>,设计出多层甚至叠加的微透镜阵列,实现更大视场、更好成像性能和更紧凑结构的微型人工复眼相机,其必将在先进成像、机器视觉等方面有长足发展。

3) 量子点、钙钛矿、共轭聚合物等新型溶液加工半导体材料的发展为微透镜阵列的制备提供了新的材料选择<sup>[213-215]</sup>,如何将上述新型光电材料与微透镜结合,实现更高性能的器件及应用系统也是需要

关注的重点前沿课题。

总之,微透镜阵列的制备需要结合材料和微纳制造工艺,如何结合材料和制备技术仍是未来关注的重点方向。尽管国内在微透镜阵列的制备应用方面已具备一定的研究基础,但缺乏系统的工程研究和产业化开发,这方面亟待进一步加强。

### 参 考 文 献

- [1] Nishizawa K, Oikawa M. Micro-optics research activities in Japan[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1751: 54-65.
- [2] Borrelli N F. Microoptics technology[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2005: 11-22.
- [3] Jahns J, Cox J A, Moharam M G. Diffractive optics and micro-optics: introduction to the feature issue [J]. Applied Optics, 1997, 36(20): 4633.
- [4] Suleski T J, Kolste R D T. Fabrication trends for free-space microoptics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 633.
- [5] Schreiber P, Dannberg P, Hofer B, et al. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5876: 58760K.
- [6] Arai J, Kawai H, Okano F. Microlens arrays for integral imaging system[J]. Applied Optics, 2006, 45(36): 9066-9078.
- [7] Ryoo H, Kang D W, Hahn J W. Analysis of the effective reflectance of digital micromirror devices and process parameters for maskless photolithography[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(3): 235-239.
- [8] Rossi M, Kunz R E, Herzig H P. Refractive and diffractive properties of planar micro-optical elements[J]. Applied Optics, 1995, 34(26): 5996-6007.
- [9] Du C L, Chen B, Qiu C K, et al. Microlens array and application systems [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4231: 153-157.
- [10] Hou T, Zheng C, Bai S, et al. Fabrication, characterization, and applications of microlenses[J]. Applied Optics, 2015, 54(24): 7366-7376.
- [11] Yuan W, Li L H, Lee W B, et al. Fabrication of microlens array and its application: a review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 1-9.
- [12] Liu F, Zhang F, Bian H, et al. Development and preparation of refractive infrared microlens array device [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071607.  
刘丰, 张帆, 边浩, 等. 折射型红外微透镜阵列器件的发展及制备[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071607.
- [13] Yang X, Sun H L, Yue D M, et al. Research progress of femtosecond laser fabrication of microlens array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500005.  
杨雪, 孙会来, 岳端木, 等. 飞秒激光制备微透镜阵列的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500005.
- [14] Zhu L, Zhang Y L, Sun H B. Miniaturising artificial compound eyes based on advanced micromanofabrication techniques [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 7(2): 1-17.
- [15] Tang X G, Tong W, Lu R G, et al. Recent development in tunable liquid crystal microlens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(4): 040002.  
唐雄贵, 童伟, 陆荣国, 等. 可调液晶微透镜研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 040002.
- [16] Wang J G. Research progress of liquid crystal microlens array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010005.  
王建国. 液晶微透镜阵列研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010005.
- [17] Zhou T F, Xie J Q, Liang Z Q, et al. Advances and prospects of molding for optical microlens array [J]. Chinese Optics, 2017, 10(5): 603-618, 703.  
周天丰, 解加庆, 梁志强, 等. 光学微透镜阵列模压成形研究进展与展望 [J]. 中国光学, 2017, 10(5): 603-618, 703.
- [18] Zhu L, Gao Y Y, Hu X Y, et al. Progress in femtosecond laser fabrication of artificial compound eye [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(12): 1254-1267.  
朱琳, 高圆圆, 胡昕宇, 等. 飞秒激光仿生复眼制造进展 [J]. 科学通报, 2019, 64(12): 1254-1267.
- [19] Wang W H, Qi L M. Light management with patterned micro- and nanostructure arrays for photocatalysis, photovoltaics, and optoelectronic and optical devices [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(25): 1807275.
- [20] Land M F. Visual acuity in insects [J]. Annual Review of Entomology, 1997, 42(1): 147-177.
- [21] Horridge G A. The separation of visual axes in apposition compound eyes [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 1978, 285(1003): 1-59.
- [22] Land M F. The optics of animal eyes [J]. Contemporary Physics, 1988, 29(5): 435-455.
- [23] Land M F. Variations in the structure and design of

- compound eyes [M] // Stavenga D G, Hardie R C. Facets of vision. Heidelberg: Springer, 1989: 90-111.
- [24] Lippmann G. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief [J]. Journal De Physique Théorique et Appliquée, 1908, 7(1): 821-825.
- [25] Wang B. Research the application of microlens array in the LED light source [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013: 21-25.  
王彬. 微透镜阵列在LED光源中的应用研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013: 21-25.
- [26] Hutley M C, Savander P, Schrader M. The use of microlenses for making spatially variant optical interconnections [J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1992, 1(6): 337-346.
- [27] Hu W H, Li X J, Yang J K, et al. Crosstalk analysis of aligned and misaligned free-space optical interconnect systems [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(2): 200-205.
- [28] Song W, Liu H H, Pang F F, et al. Excitation of high-order optical vortex modes by tilting tapered and lensed single mode fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0906001.  
宋巍, 刘丹丹, 庞拂飞, 等. 倾斜锥形微透镜单模光纤激发高阶涡旋光模式 [J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0906001.
- [29] Liu Z Y, Liu H, Lu Z F, et al. A beam homogenizer for digital micromirror device lithography system based on random freeform microlenses [J]. Optics Communications, 2019, 443: 211-215.
- [30] Koizumi Y. Electrophotographic developing apparatus: US3595208 [P]. 1971-07-27.
- [31] Anderson R H. Close-up imaging of documents and displays with lens arrays [J]. Applied Optics, 1979, 18(4): 477-484.
- [32] Oikawa M, Iga K. Distributed-index planar microlens [J]. Applied Optics, 1982, 21(6): 1052-1056.
- [33] Hamada H. Microlens array: US5453876 [P]. 1992-04-15.
- [34] Deguchi M, Maruyama T, Yamasaki F, et al. Microlens design using simulation program for CCD image sensor [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1992, 38(3): 583-589.
- [35] van Berkel C, McGarvey B P, Clarke J A. Microlens arrays for 2D large area image sensors [J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1994, 3(2): 177-182.
- [36] Grunwald R, Woggon S, Ehlert R, et al. Thin-film microlens arrays with non-spherical elements [J]. Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A, 1997, 6(6): 663-671.
- [37] Johnson K C. Multi-stage microlens array: US6424404 [P]. 2002-07-23.
- [38] Kobayashi M, Fujita K, Kaneko T, et al. Second-harmonic-generation microscope with a microlens array scanner [J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1324-1326.
- [39] Chen S H, Pan F, Fu X C, et al. Fabrication of flexible optical sensor based on MOEMS process [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(z1): 64-66.  
陈四海, 潘峰, 付小朝, 等. 基于MOEMS工艺制作柔性光学传感器 [J]. 半导体光电, 2005, 26(z1): 64-66.
- [40] Jeong K H, Kim J, Lee L P. Biologically inspired artificial compound eyes [J]. Science, 2006, 312(5773): 557-561.
- [41] Wu C X, Quan H, Lin T Y, et al. Microlens array sheet and manufacturing method thereof: CN1834696A [P]. 2006-03-29.  
吴昌勋, 权赫, 林泰宜, 等. 微透镜阵列片及其制造方法: CN1834696A [P]. 2006-03-29.
- [42] Du C L, Dong X C, Liu Q, et al. Continuous surface micro-structure forming method based on microlens array: CN101126897B [P]. 2011-06-29.  
杜春雷, 董小春, 刘强, 等. 一种基于微透镜阵列的连续面形微结构成形方法: CN101126897B [P]. 2011-06-29.
- [43] Liu X G, Huo F R, Xue C X. Parameter optimization and error compensation of diffraction microlens injection molding process [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 052204.  
刘兴国, 霍富荣, 薛常喜. 衍射微透镜注塑成型工艺参数优化及误差补偿 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 052204.
- [44] Yang G G. Micro-optics and system [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008.  
杨国光. 微光学与系统 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008.
- [45] Xu Q. Research on array optics and microlens array technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1997.  
许乔. 阵列光学及微透镜阵列技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [46] Syms R R A, Yeatman E M, Bright V M, et al. Surface tension-powered self-assembly of microstructures: the state-of-the-art [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(4):



- 387-417.
- [47] Moore S, Gomez J, Lek D, et al. Experimental study of polymer microlens fabrication using partial-filling hot embossing technique[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 162: 57-62.
- [48] Yang H, Chao C K, Wei M K, et al. High fill-factor microlens array mold insert fabrication using a thermal reflow process [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14 (8): 1197-1204.
- [49] Surdo S, Diaspro A, Duocastella M. Microlens fabrication by replica molding of frozen laser-printed droplets[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 418: 554-558.
- [50] Wang L, Luo Y, Liu Z Z, et al. Fabrication of microlens array with controllable high NA and tailored optical characteristics using confined ink-jetting [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 442: 417-422.
- [51] MacFarlane D L, Narayan V, Tatum J A, et al. Microjet fabrication of microlens arrays[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6 (9): 1112-1114.
- [52] Biehl S, Danzebrink R, Oliveira P, et al. Refractive microlens fabrication by ink-jet process[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 1998, 13(1/2/3): 177-182.
- [53] Bardinal V, Daran E, Leichlé T, et al. Fabrication and characterization of microlens arrays using a cantilever-based spotter[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6900-6907.
- [54] Vilmi P, Myllylä R, Fabritius T. Inkjet printed microlens array on patterned substrate [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8613: 861317.
- [55] Luo Y, Wang L, Ding Y C, et al. Direct fabrication of microlens arrays with high numerical aperture by ink-jetting on nanotextured surface [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 279: 36-40.
- [56] Zang Z G, Tang X S, Liu X M, et al. Fabrication of high quality and low cost microlenses on a glass substrate by direct printing technique[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(33): 7868-7871.
- [57] Zhu X Y, Zhu L, Chen H J, et al. Fabrication of multi-scale micro-lens arrays on hydrophobic surfaces using a drop-on-demand droplet generator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2015, 66: 156-165.
- [58] Xia Z H, Li Y, Su X Y, et al. Fabrication of polymer compound microlens by lens-on-lens microstructures [J]. *Current Applied Physics*, 2017, 17(1): 110-114.
- [59] Parry E, Bolis S, Elston S J, et al. Drop-on-demand inkjet printing of thermally tunable liquid crystal microlenses [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(3): 1700774.
- [60] 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.
- [61] Yuan C, Kowsari K, Panjwani S, et al. Ultrafast three-dimensional printing of optically smooth microlens arrays by oscillation-assisted digital light processing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40662-40668.
- [62] Zhu X Y, Li Z H, Hu Y J, et al. Facile fabrication of defogging microlens arrays using electric field-driven jet printing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 123: 105943.
- [63] Zhou P L, Yu H B, Zhong Y, et al. Fabrication of waterproof artificial compound eyes with variable field of view based on the bioinspiration from natural hierarchical micro-nanostructures [J]. *Nano-Micro Letters*, 2020, 12(1): 1-16.
- [64] Li H Y, Duan Y Q, Shao Z L, et al. Morphology-programmable self-aligned microlens array for light extraction via electrohydrodynamic printing [J]. *Organic Electronics*, 2020, 87: 105969.
- [65] Zhang H Y, Zhang N, Han W, et al. Precision replication of microlens arrays using variotherm-assisted microinjection moulding [J]. *Precision Engineering*, 2021, 67: 248-261.
- [66] Du Z H, Yu X H, Han Y C. Inkjet printing of viscoelastic polymer inks [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2018, 29(3): 399-404.
- [67] Jung H, Jeong K H. Monolithic polymer microlens arrays with high numerical aperture and high packing density [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(4): 2160-2165.
- [68] Feng W Q, Li L X, Du X, et al. Single-step fabrication of high-density microdroplet arrays of low-surface-tension liquids[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(16): 3202-3208.
- [69] Mihailov S, Lazare S. Fabrication of refractive microlens arrays by excimer laser ablation of amorphous Teflon [J]. *Applied Optics*, 1993, 32 (31): 6211-6218.
- [70] Wang M R, Su H. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication[J]. *Applied Optics*, 1998, 37 (32): 7568-7576.
- [71] Lin C H, Jiang L, Chai Y H, et al. Fabrication of microlens arrays in photosensitive glass by

- femtosecond laser direct writing [J]. *Applied Physics A*, 2009, 97(4): 751-757.
- [72] Chen F, Liu H W, Yang Q, et al. Maskless fabrication of concave microlens arrays on silica glasses by a femtosecond-laser-enhanced local wet etching method[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20334-20343.
- [73] Chen F, Yang Q, Qu P B, et al. Micronano manufacturing method of compound eye structure micro lens array: CN102759763A[P]. 2012-10-31. 陈烽, 杨青, 瞿谱波, 等. 一种复眼结构微透镜阵列的微纳制备方法: CN102759763A[P]. 2012-10-31.
- [74] Yong J L, Chen F, Yang Q, et al. Rapid fabrication of large-area concave microlens arrays on PDMS by a femtosecond laser[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(19): 9382-9385.
- [75] Florian C, Piazza S, Diaspro A, et al. Direct laser printing of tailored polymeric microlenses[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(27): 17028-17032.
- [76] Kadan V, Blonskyi I, Shynkarenko Y, et al. Single-pulse femtosecond laser fabrication of concave microlens- and micromirror arrays in chalcogenide glass[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 283-289.
- [77] Luo Z, Duan J A, Guo C L. Femtosecond laser one-step direct-writing cylindrical microlens array on fused silica [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2358-2361.
- [78] Fan H, Cao X W, Wang L, et al. Control of diameter and numerical aperture of microlens by a single ultra-short laser pulse [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5149-5152.
- [79] Ou Y, Li S, Qian J W, et al. Fabrication of large-area microwells on polydimethylsiloxane films by femtosecond laser ablation [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106330.
- [80] Schmidt T, Conrad D. Micro lens arrays made by CO<sub>2</sub>-laser radiation [J]. *Proceedings of SPIE*, 11478: 1147806.
- [81] Huang Y, Qin Y L, Tu P, et al. High fill factor microlens array fabrication using direct laser writing and its application in wavefront detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(16): 4460-4463.
- [82] Zollman P M, Pollard B T, Birch A D. Method and apparatus for preparing a screen printing screen: US4944826[P]. 1990-07-31.
- [83] Blumenthal T, Meruga J, Stanley May P, et al. Patterned direct-write and screen-printing of NIR-to-visible upconverting inks for security applications [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(18): 185305.
- [84] Zhou X T, Guo T L, Zhang Y A, et al. Screen-printing manufacture method for large-area microlens array: CN105572773A[P]. 2016-05-11. 周雄图, 郭太良, 张永爱, 等. 一种大面积微透镜阵列的丝网印刷制作方法: CN105572773A[P]. 2016-05-11.
- [85] Zhou X T, Peng Y Y, Peng R, et al. Fabrication of large-scale microlens arrays based on screen printing for integral imaging 3D display [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24248-24255.
- [86] Wang W W, Chen G X, Weng Y L, et al. Large-scale microlens arrays on flexible substrate with improved numerical aperture for curved integral imaging 3D display [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11741.
- [87] Marcinkevicius A, Juodkakis S, Watanabe M, et al. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(5): 277-279.
- [88] He S G, Chen F, Liu K Y, et al. Fabrication of three-dimensional helical microchannels with arbitrary length and uniform diameter inside fused silica [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3825-3827.
- [89] Yao J, Cui Z, Gao F H, et al. Refractive micro lens array made of dichromate gelatin with gray-tone photolithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57/58: 729-735.
- [90] Wu M H, Park C, Whitesides G M. Fabrication of arrays of microlenses with controlled profiles using gray-scale microlens projection photolithography [J]. *Langmuir*, 2002, 18(24): 9312-9318.
- [91] Zhu J H, Jin C W, Duan X Y, et al. One-step fabrication of achromatic spherical microlens array on enzyme etched gelatin film [J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(4/5/6): 1096-1098.
- [92] Wu C Y, Chiang T H, Lai N D, et al. Fabrication of microlens arrays based on the mass transport effect of SU-8 photoresist using a multiexposure two-beam interference technique [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(13): 2473-2479.
- [93] Do D B, Lai N D, Wu C Y, et al. Fabrication of ellipticity-controlled microlens arrays by controlling the parameters of the multiple-exposure two-beam interference technique [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(4): 579-585.
- [94] Kang J M, Wei M K, Lin H Y, et al. Shape-controlled microlens arrays fabricated by diffuser lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, 87(5/6/7/8): 1420-1423.

- [95] Reig B, Bardinal V, Camps T, et al. Polymer tunable microlens arrays suitable for VCSEL beam control [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8428: 84280N.
- [96] Wang L L, Jiang W T, Liu H Z, et al. Adjusting light distribution for generating microlens arrays with a controllable profile and fill factor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(12): 125012.
- [97] Bian R, Xiong Y, Chen X Y, et al. Ultralong focal length microlens array fabricated based on SU-8 photoresist[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5088-5093.
- [98] Deng Z F, Yang Q, Chen F, et al. Fabrication of large-area concave microlens array on silicon by femtosecond laser micromachining [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1928-1931.
- [99] Huang S Z, Li M J, Shen L G, et al. A simple method for shape modulation in microlens array fabrication via spin-coating process[J]. *Microsystem Technologies*, 2018, 24(4): 1885-1889.
- [100] Liu X Q, Yu L, Yang S N, et al. Optical nanofabrication of concave microlens arrays [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(5): 1800272.
- [101] Zhou X J, Song A G, Wang S, et al. Fabrication of refractive silicon microlens array with a large focal number and accurate lens profile[J]. *Microsystem Technologies*, 2020, 26(4): 1159-1166.
- [102] Liu M N, Yang H, Sun H B. Concave microlens arrays through an etching-assisted laser seeding method[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2020, 50(8): 20-27.  
刘墨南, 杨罕, 孙洪波. 激光埋种辅助刻蚀制备微凹透镜阵列[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2020, 50(8): 20-27.
- [103] Li Z B, Lu H B, Ding Y S, et al. Low voltage liquid crystal microlens array based on polyvinyl alcohol convex induced vertical alignment[J]. *Liquid Crystals*, 2021, 48(2): 248-254.
- [104] Li Z B, Xu M, Lu H B, et al. A polyvinyl alcohol microlens array with controlled curvature on discontinuous hydrophobic surface [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2020, 319: 114372.
- [105] Hu C N, Hsieh H T, Su G D J. Fabrication of microlens arrays by a rolling process with soft polydimethylsiloxane molds [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(6): 065013.
- [106] Lazare S, Lopez J, Turlet J M, et al. Microlenses fabricated by ultraviolet excimer laser irradiation of poly(methyl methacrylate) followed by styrene diffusion[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(22): 4471-4475.
- [107] Okamoto T, Mori M W, Karasawa T, et al. Ultraviolet-cured polymer microlens arrays [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(14): 2991-2996.
- [108] Chandross E A, Kroupenkine T N, Yang S. Solidifiable tunable liquid microlens: US6936196 [P]. 2005-08-30.
- [109] Chang C Y, Yang S Y, Chu M H. Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process [J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(2): 355-361.
- [110] Zeng X F, Jiang H R. Polydimethylsiloxane microlens arrays fabricated through liquid-phase photopolymerization and molding [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2008, 17(5): 1210-1217.
- [111] Soppera O, Jradi S, Lougnot D J. Fabrication of microlenses and optical waveguides by self-guiding photopolymerization [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7716: 771608.
- [112] Huang L C, Lin T C, Huang C C, et al. Photopolymerized self-assembly microlens arrays based on phase separation[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(6): 2812-2816.
- [113] Kang D, Pang C, Kim S M, et al. Shape-controllable microlens arrays via direct transfer of photocurable polymer droplets [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(13): 1709-1715.
- [114] Žukauskas A, Malinauskas M, Reinhardt C, et al. Closely packed hexagonal conical microlens array fabricated by direct laser photopolymerization [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 4995-5003.
- [115] Dai H T, Chen L, Zhang B, et al. Optically isotropic, electrically tunable liquid crystal droplet arrays formed by photopolymerization-induced phase separation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2723-2726.
- [116] Zhang D W, Xu Q, Fang C L, et al. Fabrication of a microlens array with controlled curvature by thermally curving photosensitive gel film beneath microholes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(19): 16604-16609.
- [117] Eisenberg N P, Klebanov M, Lyubin V, et al. Infrared microlens arrays based on chalcogenide photoresist, fabricated by thermal reflow process [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2000, 2(2): 147-152.
- [118] Huang S Z, Li M J, Shen L G, et al. Fabrication of high quality aspheric microlens array by dose-

- modulated lithography and surface thermal reflow [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 298-303.
- [119] Lin C P, Yang H, Chao C K. Hexagonal microlens array modeling and fabrication using a thermal reflow process [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2003, 13(5): 775-781.
- [120] He M, Yuan X C, Bu J. Sample-inverted reflow technique for fabrication of a revolved-hyperboloid microlens array in hybrid solgel glass [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(17): 2004-2006.
- [121] Hsieh H T, Su G D J. A fabrication technique for microlens array with high fill-factor and small radius of curvature [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6883: 68830Z.
- [122] Cherng Y S, Su G D J. Fabrication of gapless microlenses on spherical surface by multi-replication process [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8841: 88410U.
- [123] Wang M, Yu W, Wang T, et al. A novel thermal reflow method for the fabrication of microlenses with an ultrahigh focal number [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(44): 35311-35316.
- [124] Huang S Z, Li M J, Shen L G, et al. Flexible fabrication of biomimetic compound eye array via two-step thermal reflow of simply pre-modeled hierarchic microstructures [J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 213-218.
- [125] Qiu J F, Li M J, Zhu J J, et al. Fabrication of microlens array with well-defined shape by spatially constrained thermal reflow [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(8): 085015.
- [126] Qiu J F, Li M J, Ye H C, et al. Fabrication of high fill factor cylindrical microlens array with isolated thermal reflow [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25): 7296-7302.
- [127] Zhu J J, Li M J, Qiu J F, et al. Fabrication of high fill-factor aspheric microlens array by dose-modulated lithography and low temperature thermal reflow [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(4): 1235-1241.
- [128] Wang Y Y, Shi C Y, Liu C Y, et al. Fabrication and characterization of a polymeric curved compound eye [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(5): 055008.
- [129] Toshiyoshi H, Su G D J, LaCosse J, et al. A surface micromachined optical scanner array using photoresist lenses fabricated by a thermal reflow process [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(7): 1700-1708.
- [130] Guo Z J. Chemical vapor deposition technology and material preparation [J]. *Low Carbon World*, 2017(27): 288-289.  
郭展郡. 化学气相沉积技术与材料制备 [J]. *低碳世界*, 2017(27): 288-289.
- [131] Kubo M, Hanabusa M. Fabrication of microlenses by laser chemical vapor deposition [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(18): 2755-2759.
- [132] Wang Q Y, Zhang Y S, Gao D S. Theoretical study on the fabrication of a microlens using the excimer laser chemical vapor deposition technique [J]. *Thin Solid Films*, 1996, 287(1/2): 243-246.
- [133] Watanabe K, Morita T, Kometani R, et al. Nanoimprint using three-dimensional microlens mold made by focused-ion-beam chemical vapor deposition [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2004, 22(1): 22-26.
- [134] Lin H C, Liu H H, Lee G Y, et al. Effects of lens shape on GaN grown on microlens patterned sapphire substrates by metallorganic chemical vapor deposition [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2010, 157(3): H304-H307.
- [135] Zuo H J, Choi D Y, Gai X, et al. CMOS compatible fabrication of micro, nano convex silicon lens arrays by conformal chemical vapor deposition [J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3069-3076.
- [136] Yan J W, Zhang Z Y, Kuriyagawa T, et al. Fabricating micro-structured surface by using single-crystalline diamond endmill [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 51(9/10/11/12): 957-964.
- [137] McCall B, Tkaczyk T S. Rapid fabrication of miniature lens arrays by four-axis single point diamond machining [J]. *Optics Express*, 2013, 21(3): 3557-3572.
- [138] Chen C C, Huang C Y, Cheng Y C, et al. Ultra-precision diamond milling of aspheric microlens array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8769: 87693Q.
- [139] Yi A Y, Li L. Design and fabrication of a microlens array by use of a slow tool servo [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1707-1709.
- [140] Huang C N, Li L, Yi A Y. Design and fabrication of a micro Alvarez lens array with a variable focal length [J]. *Microsystem Technologies*, 2009, 15(4): 559-563.
- [141] Li L K, He P, Wang F, et al. A hybrid polymer - glass achromatic microlens array fabricated by compression molding [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(5): 055407.

- [142] Zhou W C, Zhang L, Yi A Y. Design and fabrication of a compound-eye system using precision molded chalcogenide glass freeform microlens arrays[J]. *Optik*, 2018, 171: 294-303.
- [143] Zhu Z W, To S, Zhang S J. Large-scale fabrication of micro-lens array by novel end-fly-cutting-servo diamond machining[J]. *Optics Express*, 2015, 23(16): 20593-20604.
- [144] Zhang L, Zhou L Y, Zhou W C, et al. Design, fabrication and testing of a compact large-field-of-view infrared compound eye imaging system by precision glass molding[J]. *Precision Engineering*, 2020, 66: 87-98.
- [145] Zhang L, Yi A Y. Manufacturing of a microlens array mold by a two-step method combining microindentation and precision polishing [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(23): 6945-6952.
- [146] Liu X H, Zhou T F, Zhang L, et al. Fabrication of spherical microlens array by combining lapping on silicon wafer and rapid surface molding[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(7): 075008.
- [147] Liu X H, Zhou T F, Zhang L, et al. 3D fabrication of spherical microlens arrays on concave and convex silica surfaces [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(1): 361-370.
- [148] Liu X H, Zhou T F, Zhou W C, et al. Modeling and experiment of concave microlens array on silicon wafer by grinding-polishing process with diamond slurry [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11383: 1138309.
- [149] 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.
- [150] Chang C Y, Yang S Y, Sheh J L. A roller embossing process for rapid fabrication of microlens arrays on glass substrates [J]. *Microsystem Technologies*, 2006, 12(8): 754-759.
- [151] Huang P H, Huang T C, Sun Y T, et al. Fabrication of large area resin microlens arrays using gas-assisted ultraviolet embossing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3041-3048.
- [152] 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.
- [153] Huang P H, Yang S Y. Complete reversal imprinting for fabricating microlens arrays with faithful shape replication [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2009, 27(6): 2781-2785.
- [154] Wu J T, Chang W Y, Yang S Y. Fabrication of a nano/micro hybrid lens using gas-assisted hot embossing with an anodic aluminum oxide (AAO) template [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(7): 075023.
- [155] Wu J T, Yang S Y. A gasbag-roller-assisted UV imprinting technique for fabrication of a microlens array on a PMMA substrate [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(8): 085038.
- [156] Tokuhiko K, Okano M, Hachinohe S, et al. Low temperature deformation mechanism of semiconductor single crystal and molding of Ge microlens array by direct electrical heating[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045214.
- [157] Li K S, Huang X F, Chen Q, et al. Flexible fabrication of optical glass micro-lens array by using contactless hot embossing process [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57: 469-476.
- [158] Zhang L, Ma X Z, Zhuang J L, et al. Microfabrication of a diffractive microlens array on n-GaAs by an efficient electrochemical method[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(22): 3912-3918.
- [159] Qiao L L, He F, Wang C, et al. A microfluidic chip integrated with a microoptical lens fabricated by femtosecond laser micromachining [J]. *Applied Physics A*, 2011, 102(1): 179-183.
- [160] Hu Y, Xiong Y, Chen X Y, et al. Controllable long focal length microlens based on thermal expansion [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4277-4282.
- [161] Zhang X Y, Cheng H G, Zhu X, et al. A method for preparing curved microlens array film: CN109490994A[P]. 2019-03-19.  
张馨月, 程皓鸽, 朱旭, 等. 一种制备曲面微透镜阵列薄膜的方法: CN109490994A[P]. 2019-03-19.
- [162] Xu M, Zhou Z W, Wang Z, et al. Self-assembled microlens array with controllable focal length formed on a selective wetting surface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(6): 7826-7832.
- [163] Cheng Y S, Su G D J. Fabrication of polydimethylsiloxane microlens array on spherical surface using multi-replication process[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(1): 015016.
- [164] Sun H, Wang X, Xiong Y, et al. Fabrication of microlens based on overplating in electroforming [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(5): 055007.

- [165] Fang F Y, Tao X L, Chen X, et al. Microlens fabrication by replica molding of electrohydrodynamic printing liquid mold [J]. *Micromachines*, 2020, 11(2): 161.
- [166] Shi J, Huang Y S, Peng L N, et al. Grating/microlens arrays fabricated by hot-melting, self-assembly and replication [J]. *Optical Materials*, 2020, 104: 109733.
- [167] Lian G G, Liu Y S, Tao K K, et al. Fabrication and characterization of curved compound eyes based on multifocal microlenses [J]. *Micromachines*, 2020, 11(9): 854.
- [168] Davies N A, McCormick M, Brewin M. Design and analysis of an image transfer system using microlens arrays [J]. *Optical Engineering*. 1994, 33(11): 3624-3633.
- [169] Stevens R F, Harvey T G. Lens arrays for a three-dimensional imaging system [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(4): S17-S21.
- [170] Ko H C, Stoykovich M P, Song J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics [J]. *Nature*, 2008, 454(7205): 748-753.
- [171] Kuo G, Liu F L, Grossrubatscher I, et al. On-chip fluorescence microscopy with a random microlens diffuser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8384-8399.
- [172] Yang T C, Liu Y H, Mu Q Q, et al. Compact compound-eye imaging module based on the phase diffractive microlens array for biometric fingerprint capturing [J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7513-7522.
- [173] Di S, Jin J. Binocular microlens imaging system based on micro fabrication technology and its application in vein-enhanced display [J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2019, 13(1): 30-40.
- [174] Tsukamoto A, Kamisaka W, Senda H, et al. High sensitivity pixel technology for a 1/4-inch PAL 430 k pixel IT-CCD [C] // *Proceedings of Custom Integrated Circuits Conference*, May 5-8, 1996, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 1996: 39-42.
- [175] Baillie D A, Gendler J E. Zero-space microlenses for CMOS image sensors: optical modeling and lithographic process development [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5377: 953-959.
- [176] Huo Y J, Fesenmaier C C, Catrysse P B. Microlens performance limits in sub-2 $\mu\text{m}$  pixel CMOS image sensors [J]. *Optics Express*. 2010, 18(6): 5861-5872.
- [177] Kuo W C, Lin K F, Wu T L, et al. Image sensor with shifted microlens array: US10347678 [P]. 2019-07-09.
- [178] Zhang Z X, Chang J, Ren H X, et al. Snapshot imaging spectrometer based on a microlens array [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011101.
- [179] Xie H B, Zhao M, Yang L, et al. Medium-infrared imaging optical system based on micro-lens array for switching field of view: CN110308553A [P]. 2021-03-02.  
谢洪波, 赵满, 杨磊, 等. 基于微透镜阵列进行视场切换的中红外成像光学系统: CN110308553A [P]. 2021-03-02.
- [180] Kang M H, Lee G J, Lee J H, et al. Thin patch type tissue oximeter with deep light penetration depth by integrating micro lens array (MLA) [C] // *2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-2.
- [181] Duan F, Zhu W L, Han Y J, et al. Chromatically multi-focal optics based on micro-lens array design [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 24123-24135.
- [182] Gu T K, Wang L L, Mao M, et al. Bilayer liquid-filled compound microlens arrays: a way to compensate aberration [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(16): 163101.
- [183] 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.
- [184] Banerji S, Meem M, Majumder A, et al. Super-resolution imaging with an achromatic multi-level diffractive microlens array [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(22): 6158-6161.
- [185] Zhang F, Yang Q, Bian H, et al. Fabrication of ZnSe microlens array for a wide infrared spectral region [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(20): 1327-1330.
- [186] An Y, Dong K Y, Li X, et al. Design of laser communication optical system with microlens array based on  $3 \times 3$  optical matrix [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(22): 2206003.  
安岩, 董科研, 李响, 等. 基于  $3 \times 3$  光学矩阵的微透镜阵列激光通信光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2020, 40(22): 2206003.
- [187] Chang S I, Yoon J B, Kim H K, et al. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(20): 3016-3018.
- [188] Suh M C, Pyo B, Lim B W, et al. Preparation of randomly distributed micro-lens arrays fabricated

- from porous polymer film and their application as a light extraction component[J]. *Organic Electronics*, 2016, 38: 316-322.
- [189] Peer A, Biswas R, Park J M, et al. Light management in perovskite solar cells and organic LEDs with microlens arrays[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 10704-10709.
- [190] Fischbach S, Schlehahn A, Thoma A, et al. Single quantum dot with microlens and 3D-printed micro-objective as integrated bright single-photon source[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(6): 1327-1332.
- [191] Kim Y H, Lee H, Kang S M, et al. Long-term stable microlens array-integrated quantum dot/siloxane film for thin white backlight units[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(10): 10261-10269.
- [192] Jiang Q A, Chen L. LED street lamp based on curved surface microlens array: CN208687462U [P]. 2019-04-02.  
姜勤安, 陈磊. 一种基于曲面微透镜阵列的LED路灯: CN208687462U [P]. 2019-04-02.
- [193] Yuan D, Liu B, Zhu Z C, et al. Directional control and enhancement of light output of scintillators by using microlens arrays [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(26): 29473-29480.
- [194] Yu X J, Xiang L Y, Zhou S L, et al. Realization of microlens array on flat encapsulant layer for enhancing light efficiency of COB-LEDs[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(20): 1315-1318.
- [195] Wang J X, Zhang Y Z, Wang S T, et al. Bioinspired colloidal photonic crystals with controllable wettability [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2011, 44(6): 405-415.
- [196] Peng Y Y, Peng R, Chu Z H, et al. Fabrication of micro-lens arrays based on ink-jet printing and photolithographic hole templates for integral imaging 3-D display [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(8): 822-827.
- [197] Neijzen J H M. Picture display device with microlens array and beam refracting element array on each side or opposite reflector: US5731857 [P]. 1996-10-31.
- [198] Möller S, Forrest S R. Micro-lens arrays for display intensity enhancement: US6984934 [P]. 2006-01-10.
- [199] Kuang M X, Wang J X, Bao B, et al. Inkjet printing patterned photonic crystal domes for wide viewing-angle displays by controlling the sliding three phase contact line [J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(1): 34-38.
- [200] Tan Z. Next-to-eye displayer based on microlens array: CN105717640A [P]. 2018-03-30.  
覃政. 基于微透镜阵列的近眼显示器: CN105717640A [P]. 2018-03-30.
- [201] Luebke D P, Lanman D, Fox T F, et al. Near-eye microlens array displays: US9841537 [P]. 2017-12-12.
- [202] Yan Z J, Du C L, Zhang H J. Design of a random microlens array extended screen for laser scanning display[J]. *Electronics Optics & Control*, 2020, 27(2): 98-102.  
闫占军, 杜春雷, 张海军. 激光扫描显示用随机微透镜阵列扩散屏设计[J]. *电光与控制*, 2020, 27(2): 98-102.
- [203] Ratcliff J, Supikov A, Alfaro S, et al. ThinVR: VR displays with wide FOV in a compact form factor [C] // ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies, August 17, 2020, Virtual Event, USA. New York: ACM, 2020: 1-2.
- [204] Meng L X, Zhang Y M, Wan X J, et al. Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency [J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1094-1098.
- [205] Moulé A J, Meerholz K. Interference method for the determination of the complex refractive index of thin polymer layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6): 061901.
- [206] Peer A, Biswas R. Nanophotonic organic solar cell architecture for advanced light trapping with dual photonic crystals[J]. *ACS Photonics*. 2014, 1(9): 840-847.
- [207] Chen Y Q, Elshobaki M, Gebhardt R, et al. Reducing optical losses in organic solar cells using microlens arrays: theoretical and experimental investigation of microlens dimensions[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2015, 17(5): 3723-3730.
- [208] Alsaigh R E, Bauer R, Lavery M P J. Multi-layer light trapping structures for enhanced solar collection [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31714-31728.
- [209] Di S, Jin J, Tang G R, et al. The fabrication of a multi-spectral lens array and its application in assisting color blindness[J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2016, 10(1): 14-23.
- [210] Jin J J, Zhang X H, Gao P, et al. Ultrathin planar microlens arrays based on geometric metasurface [J]. *Annalen Der Physik*, 2018, 530(2): 1700326.
- [211] Schäffner D, Preuschoff T, Ristok S, et al. Arrays of individually controllable optical tweezers based on

- 3D-printed microlens arrays [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8640-8645.
- [212] Bian H, Liang J, Li M J, et al. Bioinspired underwater superoleophobic microlens array with remarkable oil-repellent and self-cleaning ability[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 687.
- [213] Zhou Q C, Bai Z L, Lu L, et al. Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 313-328.  
周青超, 柏泽龙, 鲁路, 等. 白光 LED 远程荧光粉技术研究进展与展望[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 313-328.
- [214] Ji H L, Zhou Q C, Pan J, et al. Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 666-680.  
季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 666-680.
- [215] Zhu X X, Ge Y, Li J J, et al. Research progress of quantum dot enhanced silicon-based photodetectors [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 62-74.  
朱晓秀, 葛咏, 李建军, 等. 量子点增强硅基探测成像器件的研究进展[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 62-74.