

增强现实和虚拟现实显示的先进液晶器件

物理与光电工程学院 2021251124 古翱翔

摘要：液晶显示器(LCDs)和光子器件在增强现实(AR)和虚拟现实(VR)中发挥着关键作用。近期出现的高动态范围(HDR)迷你 LED 背光 LCDs 大幅提升了图像质量和亮度,并降低了 VR 显示的功耗。这种光引擎对于补偿潘凯结构的光学损耗,实现紧凑轻便的 VR 头戴设备特别具有吸引力。另一方面,高分辨率密度和高亮度的液晶微显示器(LCoS)是用于光学透明 AR 显示的理想图像源,特别是在强环境光照条件下。同时,高速 LCoS 空间光调制器为全息显示和焦平面显示开辟了新的发展方向。最后,超薄平面衍射液晶光学元件,如几何相位 LC 光栅和透镜,在 AR 和 VR 中发挥了重要作用,用于提高分辨率、扩大视场、抑制色差、创建多平面以克服眼球聚焦和调节冲突,以及动态瞳孔控制以实现匹配凯尔文视图的显示。本文将讨论这些先进液晶器件的工作原理、潜在应用和未来挑战。

关键词：液晶显示器, 增强现实, 虚拟现实, 相控阵, 全息显示, 液晶平面光学器件

1 引言

1.1 液晶显示设备发展历程

液晶显示器(LCD)和有机发光二极管(OLED)显示已经成为当今主导的显示技术。经过数十年的广泛研究和开发,以及制造技术的大量投资,这些显示技术广泛应用于从智能手表到 AR/VR 头戴设备等各种场合。LCD 技术经历了从最初的动态散射原理、彩色电视、便携式电脑到薄膜晶体管(TFT)LCD 等一系列发展历程¹。与此同时,OLED 技术也从小分子到聚合物材料不断发展,在亮度、效率、响应速度和对比度等方面不断优化²。此外,新兴的微型 LED 和迷你 LED 技术也开始引起关注,为未来 AR/VR 显示系统带来新的选择³。

1.2 AR/VR 技术对显示设备的需求

显示设备已经广泛应用于我们的日常生活中,从智能手表到 AR/VR 头戴设备应有尽有⁴。与此同时,AR 和 VR 技术有望彻底改变人们感知和交互数字信息的方式,成为下一代显示技术的前景所在⁵⁻⁷。自 20 世纪 90 年代以来,AR 和 VR 就经历了第一次发展高潮,掀开了显示和信息平台演化的新纪元。在过去的几十年里,先进的液晶(LC)材料和功能器件等新兴技术极大地重塑了 AR/VR 显示系统,使这种先进的信息技术真正融入人们的生活。这些新型显示平台与液晶光学器件相互促进,产生了许多令人瞩目的 AR/VR 就绪设备。

2 AR 和 VR 显示系统

最近,针对下一代显示技术的开发已经不再局限于仅仅放置在观众面前的平板显示,而是旨在彻底改变用户与周围环境互动的方式。一端是 VR 显示,它有效地扩展了视野(FoV),隔绝了整个环境光,提供完全沉浸式的虚拟环境。另一端是 AR 显示,它追求高质量的透视效果,通过叠加数字内容来丰富现实世界⁴。凭借这种全新的视觉体验,AR/VR 显示展现了广泛吸引力的应用前景,包括但不限于医疗保健、教育、工程、制造和娱乐⁵⁻⁷。

对于 VR 系统,来自 2-3 英寸显示模块的发射光通过精心设计的放大镜(通常 2 英寸口径、35-45mm 焦距)产生足够 FoV 的虚拟图像。眼箱定义了可以观看整个图像 FoV 而不会发生遮蔽的区域,其大小通常与 FoV 相关,由于基本的 Etendue 守恒。由于 VR 提供了沉浸式体验的虚拟图像,3D 虚拟物体具有深度线索是一项重要特征。向左右眼显示不同图像可以形成收敛线索。但固定的图像平面通常与预期 3D 图像的实际深度不匹配,导致了焦散冲突(VAC)^{8,9}。VR 显示的感知分辨率可以通过角分辨率进行评估,由显示面板总分辨率除以 FoV 得到。为了达到人眼视觉分辨率¹⁰,通常将 60 像素每度(ppd)作为一个常见目标。

对于 AR 系统,来自小于 1 英寸的微显示模块的发射光产生重叠于现实世界的虚拟内容。比如一种典型的光学 see-through AR 系统,采用光学合束器。通过各种光学架构,从自由空间合束器^{7,11}、全内反射(TIR)非球面合束器^{12,13} 到带有衍射或反射合束器的波导⁴,上述参数的定义保持不变。但 VAC 问题在 AR 中比 VR 更为关键,因为 AR 显示的图像直接叠加在现实世界之上,具有正确的深度线索。与 2-3 英寸的显示面板相比,AR 的光源更小,这导致了视野和眼箱大小之间的矛盾,尤其对于眼镜式 AR 系统而言。为满足上述要求,先进的液晶器件凭借其独特的光学性能和光电响应,广泛应用于 AR/VR 显示的各个关键部件,从光源到光学元件。

3 液晶显示器在 VR 中的应用

LCD 由两个主要部分组成:背光单元和液晶面板。背光单元为液晶面板提供均匀照明,每个像素的透过率由薄膜晶体管(TFT)控制。在过去的五十年里,背光单元和液晶面板都经历了巨大的发展和显著改进¹⁴⁻¹⁶。

然而,在 VR 系统中,由于出现了许多新的要求,直接使用传统 LCD 作为光源会存在一些问题。为了阐明这些问题,我们将重点介绍直视显示设备和 VR 系统之间的关键差异,并提出挑战及其潜在解决方案。

在 VR 头戴设备中,通过放大镜在用户面前形成放大的虚拟图像,产生沉浸式体验。这种投影过程要求显示面板的分辨率密度远高于直视显示。人眼视觉的分辨率为 1 弧分钟¹⁷,因此典型的 VR 头戴设备需要 6K 分辨率显示¹⁸。为实现紧凑的外形尺寸,这种 6K x 6K

分辨率需要集成在 2-3 英寸的面板上,导致微显示面板达到 2000 PPI。此外,由于眼睛快速移动,运动模糊在近眼系统中变得更加严重和明显⁵,尤其是在视频游戏中¹⁹。

针对这些挑战,LCD 在 VR 头戴设备中作为光源存在几个主要问题:

1)高分辨率密度导致的低孔径比;

2)为抑制运动模糊需要的高帧率($\geq 120\text{Hz}$)和低占空比($\leq 20\%$),对液晶响应时间提出了更高要求;

3)在紧凑的 VR 系统中,由于多次部分反射造成的光损耗,需要大幅提高显示模块的亮度(约 800-1200 尼特)。通过优化背光单元的指向性和结合空间调光技术,可以显著提高 LCD 在 VR 系统中的光效。

4 LCoS 器件在 AR/VR 中的应用

与传统的透射式 TFT-LCD 不同,反射式 LCoS 面板结合了液晶的电光效应和高性能硅 CMOS 电子设备,提供了高填充因子($>90\%$)、高分辨率、紧凑外形和高帧率²⁰。由于出色的光调制能力,振幅调制和相位调制 LCoS 器件都是 AR/VR 应用的重要光源^{21,22}。特别是与其他相位调制器(如 MEMS^{23,24})相比,相位调制 LCoS 器件(也称为空间光调制器 SLM)在多级相位调制、低驱动电压和相对低成本方面脱颖而出²⁵。因此,大多数全息显示 AR/VR 应用都采用 SLM 实现。

典型的反射式 LCoS 器件由 CMOS 硅背板、像素化铝反射层、液晶层和 ITO 覆盖玻璃基板组成。当入射光穿过液晶层时,可以得到电压依赖的相位延迟(用于振幅调制器)或相位变化(用于相位调制器)²⁶⁻²⁸。对于振幅调制 LCoS,LED 发射未偏振光,s 偏振光(s 波)被反射,p 偏振光(p 波)通过偏光分束器(PBS)。来自 LCoS 的调制 p 波被 PBS 反射到近眼光学系统的投射光路上。当 LCoS 用作相位调制 SLM 时,通过空间控制波前,SLM 可应用于全息成像的近眼显示²⁹。

对于基于 LCoS 的近眼显示系统,主要需求是广阔的视野和高分辨率。这两个因素是相互关联的。在无放大的近眼系统中,视野等于最大衍射角的两倍,眼箱等于所用 SLM 的大小。在正常入射情况下,二进制光栅的最大衍射角为

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2p_o} \right)$$

其中有

- θ_{max} 为最大衍射角
- λ 为入射光波长
- p_o 为光栅的像素间距

如果将像素间距降低到 $1\mu\text{m}$, 视野可扩大到约 37° 。对于给定像素数, 视野与一维眼箱之间存在权衡, 服从

$$\sin\left(\frac{\text{FOV}}{2}\right) = \lambda \frac{N}{2}$$

其中 N 为一维像素数³⁰。为满足 AR/VR 的要求, 需要超高分辨率(如 25,400 PPI 对应 $1\mu\text{m}$ 像素间距)的 LCoS 面板。

实现超高分辨率 LCoS 面板的主要挑战在于 CMOS 背板和边缘场效应(FFE)。新的 LCoS 制造工艺需要支持更小的特征尺寸, 以容纳足够的晶体管。同时, 由于 CMOS 背板的电压摆幅有限, 需要更大介电各向异性的液晶材料以降低所需驱动电压。对于 FFE 问题, 可以通过减小单元间隙、采用高 Δn 液晶、优化电极结构等方法来抑制。尽管经过多年的努力, 实现用于宽视野全息显示的超高分辨率相位调制器仍是一个巨大挑战。

LCoS 在 AR/VR 中的应用涉及光源、成像光学和功能元件等多个层面。在 AR 显示中, LCoS 可提供高亮度($>50\text{K}$ 尼特)并已经趋于成熟, 被广泛应用于微显示光源。而在 VR 系统中, 相位调制 LCoS(SLM)则可用于实现全息成像, 提供具有正确深度线索的 3D 视觉体验。未来, LCoS 器件有望在进一步提高分辨率和性能的同时, 为 AR/VR 显示系统带来更多创新应用。

5 液晶平面光学元件在 AR/VR 中的应用

除了作为显示或 SLM 来调制图像外, 液晶还展现出一些其他吸引人的特性, 如聚合性和可光图案化特性^{31,32}。这些性质可用于创造新的光子器件, 称为液晶平面光学元件或液晶光学元件(LCOE)³³⁻³⁵, 具有超薄外形、接近 100% 的效率、强极化选择性和可切换能力。这些 LCOE 在 AR/VR 显示中展现出广阔的应用前景。下面我们将分别讨论透射型和反射型 LCOE。

5.1 透射型液晶平面光学元件: 波片、衍射光栅、透镜

在透射型 LCOE 中, 我们关注几何相位光学元件, 其相位延迟取决于液晶的排列。这是透射型光学元件能够在极薄层中实现锐利相位调制的主要原因。作为衍射光学元件, 这类器件工作在 Raman-Nath 模式下, 被视为“薄”光学元件(如表面起伏光栅), 其衍射效率可以在最佳厚度下达到最大值。这种透射型 LCOE 将表现出强极化选择性, 可分别用作波片、光栅和透镜。

作为一种各向异性光学材料, 液晶可为偏振光引入相位延迟³⁶, 因此是无源(聚合物)和有源(液晶电池)波片的理想候选。有源 LC 波片可通过施加电压在开/关状态间切换。Lu 等人³⁷ 提出了一种使用有源液晶波片实现多平面近眼显示的方法。在该系统中, LC 基有

源半波片与被动 LC 透镜配合工作,因为 LC 透镜对偏振状态敏感,切换有源波片的偏振态可改变光学功率。如果被动 LC 透镜被偏振选择性衍射光栅取代,则焦平面调制将转变为输出光束角度移动,如³⁸。这种紧凑的光束定向有潜力应用于瞳孔定向³⁹ 和聚焦成像⁴⁰ 等 AR/VR 系统。

5.2 反射型液晶平面光学元件:反射镜、衍射光栅、透镜

在反射型 LCOE 中,反射机制基于所使用的胆固醇液晶(CLC)的布拉格反射⁴¹⁻⁴³。因此,这种类型的衍射光学元件被称为“厚”光学元件(如布拉格体积光栅)。这种反射型 LCOE 的效率与器件厚度密切相关。为建立布拉格反射,液晶层的最小厚度约为十个螺距。此外,通过在向列相液晶中掺入手性掺杂剂,可以获得螺旋 CLC 结构⁴⁴。为了容纳宽视角和宽带特性,我们可以应用更复杂的结构,如多层和梯度螺距^{45,46}。

CLC 反射器具有简单的结构,但可用于 VR 和 AR 的各种应用。在 VR 的潘尼透镜结构中,CLC 反射器可替代 1/4 波片和反射性偏振器,得到更简单的结构。此外,通过使用 CLC 反射器在正交圆偏振态中编码两幅图像,可实现视网膜级分辨率的聚焦显示⁴⁷。利用极化选择性,CLC 反射器还可在 AR 系统中产生两条光路。Chen 等人⁴⁸ 演示了一种双深度 AR 系统,使用两个串联的 CLC 反射器产生不同的二向色,每条路径对应一个图像深度。

反射型 LC 衍射光栅(又称偏振体积光栅,PVG)可通过在 CLC 反射器中引入线性变化相位来实现。这种线性相位变化可通过表面取向^{49-51,51} 产生。与 CLC 反射器相比,PVG 具有更复杂的结构,其中光致定向层上的偶氮化合物沿水平轴呈正弦分布。布拉格面仍然是连接 LC 短轴的线,但有倾斜角(α)。PVG 的底部 LC 倾向于遵循正弦分布图案,但 CLC 的螺旋轴倾斜(约 25°)以降低自由能,从而产生从底部到顶部的过渡区域。当入射光满足布拉格条件时,衍射角是倾斜角的两倍,衍射效率最高⁵²。

最近几年,反射型 LC 衍射光耦合器(如 PVG)也广泛研究和应用于实验室级波导 AR 原型⁵³。在深入 PVG 波导结构之前,我们简要介绍衍射波导 AR 的基本工作原理。如图 14a 所示,波导架构有衍射输入和输出耦合器,用于将图像从光源传递到人眼。大 Etendue 有利于瞳孔扩展(EPE)过程。实际上,视野仍然是一个瓶颈,并且 EPE 预期应在水平和垂直方向上都是二维的,以考虑眼箱扩展。实际视野由波导折射率(n_g)和耦合器提供的角带宽共同决定。高 n_g 波导和宽角响应的耦合器有利于扩大视野。

相比于 SRG,PVG 具有更小的折射率调制,但由于 LC 取向的空间变化、强圆偏振响应、薄膜形式和易制造等特点,PVG 为波导 AR 提供了另一种选择。为获得均匀的光输出,可使用具有空间变化取向的偏振管理层。它还提供了额外的自由度来控制 TIR 光的偏振状态。

展望未来,基于 PVG 的波导 AR 有望进一步提高性能和降低成本,成为一种更实用的 AR 显示解决方案。

6 结论与展望

AR/VR 技术与先进液晶器件的结合已成为新一代显示和信息平台的重要发展方向,在各种应用领域展现出广阔前景。为实现可穿戴 AR/VR 头戴设备的紧凑外形和高图像质量,先进的液晶器件在光源、成像光学和功能光学元件等方面发挥着关键作用。本文将这些先进液晶器件划分为三大类:HDR 液晶显示器、LCoS(包括振幅调制和相位调制)、以及平面液晶光学元件。

尽管 VR 头戴设备用 LCD 存在由于小孔径比和织构线阻挡光线而导致的低透过率问题,但通过实现指向性背光和空间调光技术,仍有望实现兼容 VR 的高性能显示。同时,LCoS SLM 提供了无与伦比的相位调制,可实现超越传统显示的全息视觉体验。进一步的器件工程和制造工艺改进,有望进一步提高 LCD 和 LCoS SLM 在 AR/VR 应用中的性能。

此外,新兴的液晶平面光学元件展现出优异的光学特性,具有超薄外形和高效率。这些先进的液晶器件在系统地改善 AR/VR 显示的图像质量和外形尺寸方面发挥着关键作用。

总的来说,液晶技术正在引领 AR/VR 显示系统的发展。随着材料、器件和系统集成的不断进步,这些先进液晶器件必将为未来的沉浸式显示带来更多创新应用。

参考文献

1. Schadt, M. Milestone in the history of field-effect liquid crystal displays and materials. *Japanese Journal of Applied Physics* **48**, 3 (2009)
2. Kim, S. u. a. Low-power flexible organic light-emitting diode display device. *Advanced Materials* **23**, 3511–3516 (2011)
3. Wu, T. u. a. Mini-LED and micro-LED: promising candidates for the next generation display technology. *Applied sciences* **8**, 1557 (2018)
4. Kresz, B. C. *Optical Architectures for Augmented, Virtual, and Mixed-Reality Headsets*. (SPIE Press, 2020).
5. Desai, P. R. & others. A review paper on oculars rft-a virtual reality headset. *International Journal of Engineering Trends and Technology* **13**, 175–179 (2014)
6. Yin, K. & others. Virtual reality and augmented reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Journal of Physics: Photonics* **3**, 22010 (2021)
7. Xiong, J. H. & others. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Light: Science & Applications* **10**, 216 (2021)

8. Hoffman, D. M. & others. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue. *J. Vis.* **8**, 33 (2008)
9. Kamida, G. Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays. *IEEE Trans. on Control. Graph.* **32**, 1912–1931 (2016)
10. Yanoff, M. & Duker, J. S. *Ophthalmology*. (Elsevier Health Sciences, Amsterdam, 2018).
11. Cheng, D. W. & others. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook. *Light: Ark.* **2**, 350–369 (2021)
12. Cheng, D. W. & others. Design of an optical see-through head-mounted display with a low-number and large field of view using a freeform prism. *Appl. Opt.* **48**, 2655–2668 (2009)
13. Wang, Y. T., Cheng, D. W. & Xu, C. Proc. Optical Design and Fabrication. in *Optical Design and Fabrication* (OSA, 2017).
14. Schadt, M. Milestone in the history of field-effect liquid crystal displays and materials. *Jpn. J. Appl. Phys.* **48**, 36001 (2009)
15. Yeh, P. R. & Gu, C. *Optics of Liquid Crystal Displays*. (Riboken: John Wiley & Sons, 2010).
16. Hsiang, E. & others. Prospects and challenges of mini-LED, OLED, and micro-LED displays. *J. Soc. for Disp.* **29**, 446–465 (2021)
17. Ciurch, C. A. & others. Human photoreceptor topography. *J. Comp. Neurol.* **292**, 497–523 (1990)
18. Gayron, H. C. & others. Gap affordance judgments in mixed reality: testing the role of display weight and field of view. *Front. Virtual Real.* **2**, 654–656 (2021)
19. Petri, A. F. & others. Proc. SPIE 10396, Applications of Digital Image Processing Xi. in (SPIE, California, 2017).
20. Zhang, Z. C., You, Z. & Chu, D. P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices. *Light: Sci. Appl.* **3**, 213 (2014)
21. Huang, Y. & al. Liquid-crystal-on-silicon for augmented reality displays. *Appl. Sci.* **28**, 2366 (2018)
22. Mizmone, A., Georgiou, A. & Kollin, J. S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality. *ACM Trans. Graph.* **36**, 85 (2017)
23. Stahl, R. & al. Modular sub-wavelength diffractive light modulator for high-definition holographic displays. *J. Phys.: Conf. Ser.* **415**, 12657 (2013)
24. Petersen, K. K. Micromachiral light modulator array fabricated on silicon. *Appl. Phys. Lett.* **31**, 521–523 (1971)

25. Haist, T. & Olsen, W. Holography using pixelated spatial light modulators—part I: theory and basic considerations. *J. Micro/Nanofluid. MEMS* **14**, 41310 (2018)
26. Cuypers, D., De Smet, H. & Van Calster, A. VAN LCOS microdisplays a decade of technological evolution. *J. Disp. Technol.* **7**, 127–134 (2011)
27. Wu, S. T. & Wu, C. Mixed-mode twisted nematic liquid crystal cells for reflective displays. *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1455–1457 (1996)
28. Yang, Q. & al. Fast-response liquid crystal phase modulators with an excellent photostability. *Physica* **10**, 765 (2020)
29. Christmas, J. & Gilliers, N. Displays based on dynamic phase-only holography. *Appl. Sci.* **88**, 685 (2018)
30. Chang, C. L. & al. Toward the next-generation VR/AR optics a review of holographic near-eye displays from a human-centric perspective. *Optica* **7**, 1563–1578 (2020)
31. Chen, P. & al. Liquid-crystal-mediated geometric phase from transmissive to broadband reflectance planar optics. *Adv. Mater.* **32**, 1903665 (2020)
32. Beckerman, J., Netyk, S. & Varbachat, P. J. M. Liquid-crystal photonic applications. *Optical Eng.* **50**, 81202 (2011)
33. Oh, C. & Escuti, M. I. Achromatic diffraction from polarization gratings with high efficiency. *Opt. Lett.* **33**, 2287–2289 (2008)
34. Zhu, T. & al. Pancharatnam-Berry optical elements for head-up and near-eye displays. *J. Optical Soc. Am. B* **36**, D52–D65 (2019)
35. Taibran, N. V. & al. Thin waveguide lenses of switchable focal length—new generation in optics. *Opt. Express* **23**, 25783–25794 (2015)
36. Wu, S. T., Oh, C. & Escuti, D. Refrindex measurements of liquid crystals. *Appl. Opt.* **23**, 3911–3915 (1984)
37. Lu, L., McEidowney, C. & Saatink, P. Focus adjusting Pancharatnam Berry phase liquid crystal lenses in a head-mounted display. (2019)
38. Kim, J. & al. Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings. in *Proc. SPIE 2003, Advanced Wavefront Control Methods, Devices, and Applications* Bd. 709302 (SPE, California, 2008).
39. Zou, J. Y., Li, L. S. & Wu, S. T. Gas-matched pupil steering Maxwellian-view augmented reality display with large angle diffractive liquid crystal lenses. *Adv. Photon. Res.* **3**, 2010362 (2022)

40. Tan, G. J. & al. Foveated imaging for near-eye displays. *Opt. Express* **26**, 25076–25085 (2018)
41. Kobashi, J., Yoshida, H. & Ozaki, M. Planar optics with patterned chiral liquid crystals. *Nat. Photonics* **10**, 389–392 (2016)
42. Kobashi, J., Yoshida, H. & Ozaki, M. Polychromatic optical vortex generation from patterned cholesteric liquid crystals. *Phys. Rev. Lett.* **116**, 253903 (2016)
43. Chen, P. & al. Chirality invertible superstructure mediated active planar optics. *Nat. Commun.* **10**, 2518 (2019)
44. Liu, S., W., D. & al. Stag reflection from cholesteric liquid crystals. *Phys. Rev. E* **51**, 1191–1198 (1995)
45. Marou, M. Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band. *Adv. Mater.* **24**, 620–6276 (2012)
46. White, T. J. & al. Photoinduced broadening of cholesteric liquid crystal reflectors. *J. Appl. Phys.* **107**, 73110 (2010)
47. Boec, D. J., Lub, J. & Mol, G. N. Wide-band reflective polarizers from cholesteric polymer networks with a pitch gradient. *Nature* **378**, 467–469 (1995)
48. Yi, K. & al. Forward imaging by polarization multiplexing for coherent near-eye displays. *J. Soc. Inf. Disp.* **30**, 381–386 (2022)
49. Chen, Q. M. & al. Multi-plane augmented reality display based on cholesteric liquid crystal reflective films. *Opt. Express* **29**, 12039–12047 (2019)
50. Yin, K. & al. Patterning liquid-crystal alignment for ultrathin flat optics. *ACS Omega* **5**, 31485–31489 (2021)
51. Chignoux, V. G., Zeuzkov, V. M. & Nuck, H. S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications*. (Hoboken: John Wiley & Sons, 2008).
52. Chignoux, V., Kurdekova, A. & Guo, Q. Patterned photalignment in thin films: physics and applications. *Optics* **11**, 84 (2021)
53. Nys, L. & al. Third chiral liquid crystal gratings for efficient large-angle diffraction. *Adv. Optical Mater.* **7**, 1901364 (2019)