

文章编号:1007-2780(2022)05-0562-11

基于微纳光子器件的光场裸眼 3D 显示技术

夏仲文, 华鉴瑜, 陈林森, 乔 文*
(苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)

摘要:裸眼 3D 显示是“元宇宙”的入口,是可以重新定义人机交互方式的变革性技术。经过百余年的发展,裸眼 3D 显示已取得显著进步,但仍然存在视场角小、分辨率下降严重、运动视差受限和视疲劳等问题。光场裸眼 3D 显示本质上是多视角光场调控技术和方法研究。最近研究表明,微纳光子器件(衍射光栅、衍射透镜、超表面等)对光的强度、相位、偏振等参量具有灵活而精确的调控能力,有望解决裸眼 3D 显示长期存在的难题。然而,数英寸至上百英寸显示幅面的微纳光子器件在设计制备层面都面临巨大挑战。本文具体分析了基于几何光学的裸眼 3D 显示局限性,从器件设计和微纳制备两方面详细介绍了基于平面光学的光场裸眼 3D 显示最新研究进展。最后总结了裸眼 3D 显示的未来发展方向和潜在应用领域。

关键词:裸眼 3D 显示;视角调控;微纳光子器件;光场显示;微纳制造

中图分类号:TN141;TN948.57 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2022-0043

Light field glasses-free three-dimensional display technology based on micro-nano photonic devices

XIA Zhong-wen, HUA Jian-yu, CHEN Lin-sen, QIAO Wen*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Glasses-free three-dimensional (3D) display is the gateway to the “metaverse” and it is a transformative technology that can redefine the way human interact with information. After more than a hundred years’ development, glasses-free 3D display has made significant progress, but there are still a bunch of problems, such as limited field of view (FOV), severe resolution degradation, limited movement parallax and visual fatigue. Recent studies have shown that micro/nano photonic devices (diffractive gratings, diffractive lens and metasurfaces) have flexible and accurate manipulating capability on the intensity, phase, polarization and other parameters of lightwave. It is expected that nanophotonics can solve the in-

收稿日期:2022-01-30;**修订日期:**2022-03-12.

基金项目:国家十四五重点研发技术项目(No. 2021YFB3600500);国家自然科学基金面上项目(No. 61975140, No. 62075145);江苏省重点研发项目(No. BE2021010);江苏省前沿引领技术基础研究专项(No. BK20192003);江苏高校优势学科建设工程(No. PAPD)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB3600500); National Natural Science Foundation of China General Program (No. 61975140, No. 62075145); Key Research and Development Project in Jiangsu Province (No. BE2021010); Leading Technology of Jiangsu Basic Research Plan (No. BK20192003); Project of the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(No. PAPD)

*通信联系人, E-mail: wqiao@suda.edu.cn

trinsic bottleneck of glasses-free 3D display. However, micro-nano photonic devices face significant challenges at both the design and fabrication levels. In this paper, the limitations of glasses-free 3D display based on geometric optics are analyzed, and the latest research progress of glasses-free 3D display based on planar optics is introduced in detail from the aspects of device design and micro-nano fabrication. Finally, we highlight the future direction and potential applications of glasses-free 3D display.

Key words: glasses-free three-dimensional display; view manipulation; micro/nano photonic devices; light field display; micro/nano-fabrication

1 引言

视觉是人们获取世界认知的主要信息来源,人们对世界的83%认识来源于视觉信息。现实世界的物体是三维的,而传统显示器只能显示平面信息,降低了大脑的利用率。据统计,人们每天平均花费5 h在显示屏幕上。裸眼3D显示将重新定义人机交互方式,以更加自然的方式呈现信息与数据,极大提升人们的工作效率。因此,裸眼3D显示被喻为下一代显示技术,在教育、军事、医疗、娱乐、自动驾驶等方面展现了广阔的应用前景。自Charles Wheatstone首次发明立体显示装置^[1],人们对于3D显示的研究热情已持续了180多年。

一般情况下,我们将裸眼3D显示技术分为3类:全息3D显示^[2]、体3D显示和光场裸眼3D显示^[3-4]。其中,光场裸眼3D显示技术可以和现有的平板显示屏幕结合,符合个人信息终端对便携轻薄的需求。光场裸眼3D显示将连续分布的光场信息分解成多个“观察区域”,即视角(或视点)。每个视角呈现不同的视角图像。多个视角组合形成连续的3D图像。因此,光场裸眼3D显示本质上是多视角光场调控技术和方法研究^[5],其核心是如何设计“视角调制器”,实现多个视角光场精确调控,所设计的视角调制器件需考虑具备如下特性:

(1)实现多视角光场分布,这是实现具有运动视差的裸眼3D显示的基本条件。多视角光场可实现水平、垂直或任意排列分布,以实现水平视差、垂直视差、环绕视差、全视差等视差效果;

(2)为了尽可能消除串扰和鬼影的影响,视角调制器需要把出射光调制在一个限定的区域内;

(3)为了实现具有连续运动视差的大观察视

角,视角调制器需要实现出射光线较大转向角度的精确调控;

(4)在个人信息终端中,视角调制器还需要有尽可能高的光利用率;

(5)为了满足便携要求,视角调制器的整体重量和外形也是需要考虑的要点之一;

(6)视角调制器件还可对每个视角光强形状和光强进行调控,可改变裸眼3D显示的信息密度分布,消除信息总量受限情况下,分辨率与视场角之间的矛盾。

光场裸眼3D显示又可称为自由立体3D显示,从原理可分为基于几何光学和基于微纳光学^[6]的3D显示。基于几何光学的3D显示,最具代表的是视差屏障、柱透镜阵列、微透镜阵列(集成成像技术)和多层液晶屏的压缩光场显示。视差屏障和柱透镜阵列最先与平板显示屏幕结合应用在3D移动电子设备领域^[7-10]。为了提高显示质量,可以在系统中加入孔径光阑,通过降低孔径比来减少串扰,但是这种做法是以牺牲光利用率为代价的^[11-13]。基于微透镜阵列的3D显示,即集成成像3D显示技术,通过记录和再现来自3D物体的光线来实现3D显示^[14-15]。基于微透镜阵列的3D显示可以提供全视差图像。最近,有人提出了一种仿生复眼的结构来提高集成成像3D显示效果,这种仿生复眼结构可以在水平28°、垂直22°的视角范围内实现集成成像3D显示^[16]。在另一项工作中,有人提出了一种可以提高分辨率和视场角的集成成像3D显示系统^[17]。该系统可以在水平方向提供像素密度高达63.5 ppi的3D图像显示,水平和垂直视角分别为32.8°和26.5°。更进一步的,通过3组定向背光和高刷新率显示屏幕,可实现具有120°宽视角的时分复用集成成像3D显示^[18]。基于多层液晶屏的压缩光场显示最早由Lanman和Wetzstein等人提

出^[19-22],他们采用多个LCD屏幕层来调制3D物体的出射光线方向,可以给观察者提供单眼聚焦和双眼调焦信息,同时降低视觉疲劳和减轻头晕症状^[23]。然而,它的视场角受限于显示面板的尺寸。此外,基于多层液晶屏的压缩光场显示也面临着景深-系统复杂程度(液晶显示屏的层数)的制约难题。概括来说,基于几何光学的自由立体3D显示具有低成本,易与现有2D显示面板结合的优点。然而,由于分辨率、视场角、景深和外形尺寸之间的相互制约关系,基于几何光学的自由立体3D显示任重道远^[24]。如何消除这些因素之间制约影响,以提供更逼真的立体显示,是下一代3D显示技术的重要研究方向。

快速发展的微纳光子器件因其出众的光调控能力,在诸多领域受到广泛关注^[25-29]。在裸眼3D显示领域,纳米光栅、衍射透镜、超表面等平面光学元件可以以像素为单位调制3D物体的光场信息。通过适当的设计,微纳光学元件在光强度、相位和偏振等方面提供了卓越的光调控能力。因此,基于平面光学的裸眼3D显示展现出了极大的优点:低串扰、较小的辐辏调节矛盾、较高的光利用效率和较大的视场角。基于其优异的视角调制灵活性,基于微纳光子器件的光场裸眼3D显示正在成为“下一代3D显示技术”。

2 光场理论

2.1 光场

人眼能看见现实世界的物体是因为人眼接收到来自物体的光线。光线的合集就是“光场”^[30]。“光场”这一术语最早在1936年由Alexander Gershun提出,指的是空间中光的辐射能的分布。学术界普遍认为 Parry Moon 在 1981 年提出的“Photic Field”才是当前学术界所研究的“光场”^[31]。

2.2 全光函数

对于空间中包含颜色信息的光场,我们用七维全光函数 $L(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 来表示。其中, (x, y, z) 表示空间位置, (θ, φ) 表示空间角度, λ 表示波长, t 表示时间^[32-33]。全光函数表达了在任意时刻从空间任意点覆盖任意波长范围的可见光锥,描述了所有可能场景的环境映射关系,被广泛用于图像的采集、处理等领域。

传统显示屏不携带角度信息。只能呈现光场中 (x, y) 两个维度随时间 t 变化的平面图像信息。由平面图像可使观察者获得仿射、遮挡、光照阴影、纹理、先验知识等由心理感知的深度信息,不能营造出真实的3D效果。

裸眼3D显示重建光场函数,不仅可以提供心理立体视觉,同时还能提供单眼调焦、辐辏调节、双目视差和移动视差等生理感知的深度信息,如图1所示。

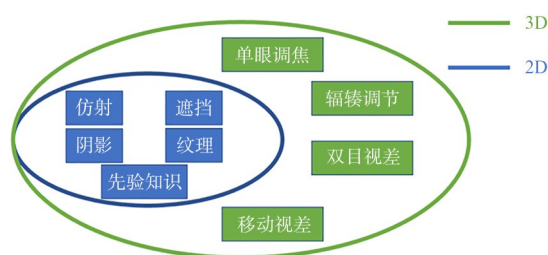


图1 2D和3D提供的视觉信息范畴

Fig. 1 Visual information category offered by 2D and 3D display

2.3 四维光场

全光函数是七维的,高数据量对光场记录和再现都是一项巨大挑战。因此,通常会引入一些条件来降低光场函数的维度。美国斯坦福大学 Marc Levoy 将全光函数简化,提出基于 (x, y, u, v) 的四维光场模型。两个不共面的平面 (x, y) 和 (u, v) , 如果一条光线与这两个平面各有一个交点,则该光线便可以用这两个交点唯一表示。双平面模型并不能完备地表示三维空间中的所有光线,与两平面平行的光线就不能被该模型所表示出来,但该光线并不会进入到人眼,所以该模型仍可以完备地表达人眼接收到的光线。基于 (x, y, u, v) 的四维光场模型被广泛应用于集成成像三维显示的机理研究,如图2所示。

四维光场函数的参数组合并不是唯一的,不同参数组合其对应的光场模型也各不相同。在研究当中,如果只考虑光线在三维空间中传播,不考虑光线颜色(波长)的变化,那么,在任一时刻的光线可以用3个空间位置坐标 (x, y, z) 和两个角度坐标 (θ, φ) 来表示。因此,全光函数便由七维参量变成五维参量 $(x, y, z, \theta, \varphi)$ ^[34]。如果忽略光线在空间中传播时的衰减,则全光函数可以用两

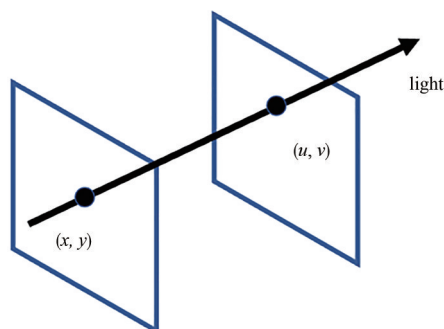


图2 四维光场模型

Fig. 2 Four-dimensional light field model

个相互平行的平面进行表征,全光函数便可降至四维 (x, y, θ, φ) 。基于微纳光子器件的裸眼3D显示常常采用逐像素调控的策略,通过四维甚至五维结构参量调控单个像素 (x, y) 出射光线的空间角度信息 (θ, φ) ,从而重建 (x, y, θ, φ) 光场函数。

3 基于微纳光子器件的裸眼3D显示

3.1 基于纳米光栅的裸眼3D显示

纳米光栅是一种特殊的光学元件,它可以同时将入射光调控至多个指定方向,已广泛用于光谱仪、光波导和激光谐振腔^[35-39]。Fattal等人将纳米光栅波导引入3D显示,提出了基于周期性纳米光栅的宽视角指向型背光设计,实现了90°视场角、64视点的全视差3D显示效果。该技术开启了基于微纳光子器件的裸眼3D显示研究序幕^[40]。

在此基础上,苏州大学万文强等人设计了变周期变取向的纳米光栅阵列,提出了全息抽样3D显示技术^[41],如图3(a)所示。视角调制器调制光场相位信息,平面显示面板提供可刷新的光场振幅信息。值得注意的是,位相板上每个像素的周期和方向都不相同,成会聚光束,而不是基于几何光学的3D显示中的准平行光束。因此,目标视点的发散角 (1.02°) 接近衍射极限 (0.94°) ,显著减少了视点串扰和鬼影。研究人员进一步展示了基于超构光栅的全息采样3D显示系统。视角调制器上的超构光栅分别对R、G、B波长进行设计,用来重建每个采样视点处波前信息,同时保持正确的白平衡。通过将视角调制器、液晶

显示面板和彩色滤光片结合,实现了12.7~81.28 cm (5~32 in)的动态全彩3D显示^[42]。此外,为了解决3D显示系统长期以来固有的辐辏调节矛盾,还提出了基于像素化纳米光栅的超多视点显示(SMV)方法,间隔 0.9° 的视点分布为单个人眼的调焦过程提供了深度信息^[43]。基于纳米光栅的3D显示具有串扰小、辐辏调节矛盾小、视点排列可设计和视场角大的优势。

3.2 基于衍射透镜的裸眼3D显示

近期,衍射透镜也广泛引起了研究人员的广泛兴趣^[44-45]。衍射透镜的聚焦效率可以与传统的几何透镜相当,甚至超过几何透镜。研究表明,具有近似连续相位延迟的闪耀或多级衍射透镜可显著提高光利用率^[46],同时多级衍射或多焦点衍射可解决宽波段下色散问题^[47-48]。多级衍射透镜还可将光束聚焦在5~1 200 mm的超大范围内^[49]。此外,由于特征尺寸在几个到几百个微米的范围内,衍射透镜易于低成本、大面积的批量制造。

光利用率是裸眼3D显示系统中的一个关键参数。纳米衍射光栅的1级衍射效率理论上约为40%^[50]。在基于多级衍射器件的裸眼3D显示系统中,视角调制器精确调控准直射光的相位,并形成会聚视点。使用像素化多级衍射透镜形成视角调制器具有以下优点:首先,衍射透镜将衍射效率从纳米光栅的25%提高到60%,甚至更高,目前基于灰度衍射透镜制备的视角调制器可以将光效提高到82%^[51],如图3(b)所示。其次,通过视点之间的相对位置关系计算视角调制器上的每个像素结构参数。精确计算的非周期性微纳结构可以提高多角度光场调控精度,极大降低串扰和鬼影的影响。此外,利用多级衍射光学结构单元还可调制每个视角的光场分布。研究表明,垂直扩展的视角光场分布可扩展3D显示系统的垂直可视角度^[52]。

3.3 基于超表面的3D显示

超材料是由纳米结构组成的人造材料。它具有许多传统材料不具有的性质,例如负折射率、完美吸收和隐形斗篷等^[53-58]。作为一类特殊的超材料,超表面可以利用单层金属或介电纳米结构产生可控的相位改变,实现亚波长尺度的波前调控。超材料已用在超透镜^[59-60]、全息图^[61-62]、

光谱仪^[63-64]和涡旋光束发生器^[65-66]等光学元件中。与传统的几何光学元件和衍射光学元件相比,超表面具有宽波段、任意波前设计和亚波长尺寸像素等优点。

超表面具有精准操控光场的能力。2013年,像素化金属纳米柱组成的等离子体超表面在可见光和近红外范围内实现了计算全息图的重建^[67]。超表面全息图的像素大小仅为 500 nm,远小于空间光调制器或衍射光学元件生成的全息图像素,视场角可达 40°。研究工作者还提出了一种使用氮化硅的偏振不敏感宽波段消色差超

透镜,实现了 60×60 个超透镜矩阵,在白光照射下展示了宽波段消色差的集成成像立体图像^[68]。其中单个消色差超透镜的直径为 14 μm,平均聚焦效率为 47%。

为了解决空间分辨率、角分辨率和视场角之间的矛盾关系,人们还提出了一种基于二维超构光栅的信息密度渐变裸眼 3D 显示技术^[69]。由二维超构光栅形成的点、线、面混合视角可调控视角密度。把基于二维超构光栅的视角调制器件和 LCD 面板结合,可实现视场角高达 160°的动态彩色 3D 显示系统,如图 3(c)所示。

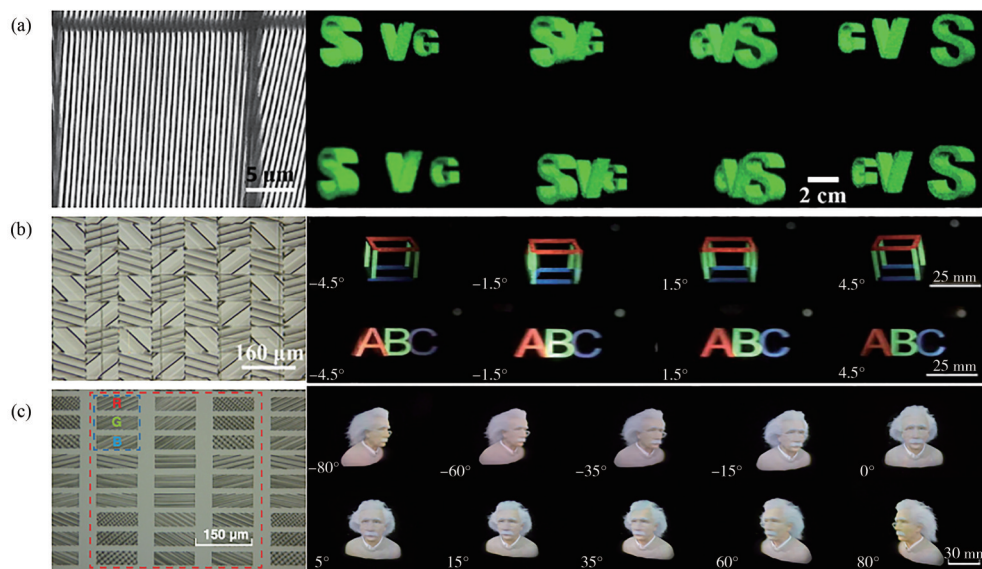


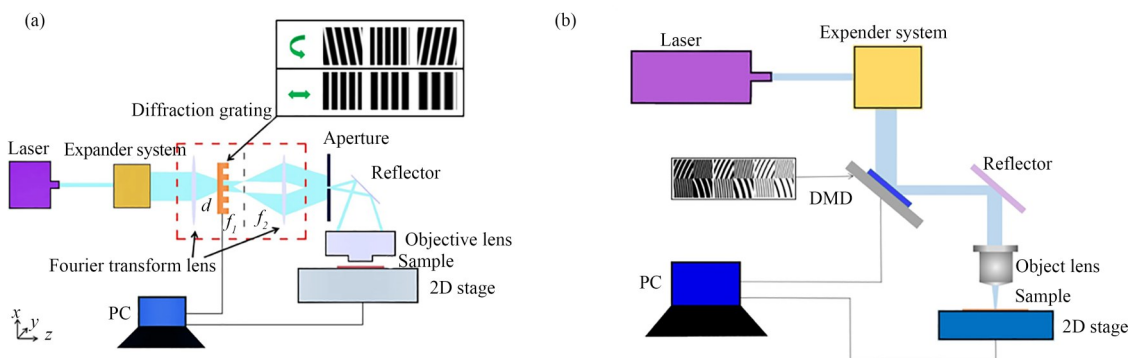
图 3 (a)基于纳米光栅的 3D 显示^[69]; (b)基于像素化灰度衍射透镜的 3D 显示^[51]; (c)基于二维超构光栅的 3D 显示^[69]。
Fig. 3 (a) 3D display based on nano-gratings^[69]; (b) 3D display based on pixelated blazed diffraction gratings^[51]; (c) 3D display based on 2D-metagratings^[69].

4 基于微纳光子器件的视角调制器的制造难题

高效高精度微纳制造是微纳光电子器件与产业的共性技术难题。为了能高效制备像素化纳米结构,人们提出并搭建了纳米光场光刻系统^[70],如图 4(a)所示。它由两个傅里叶变换透镜和一个二元光学元件组成。通过双光束干涉光刻方法,一次曝光,形成像素尺寸为几十微米的纳米光栅像素。写入速度为 20 mm²/min,比串行写入的电子束光刻系统快得多。此外,所制备纳米结构的周期控制精可达 1 nm 以内。该纳米光场光刻系统可实现一维纳米结构、二维纳米结

构和非周期性纳米结构阵列制备。使用纳米光场光刻系统,可解决 250 nm 线宽,81.28 cm (32 in) 幅面的像素化纳米光栅阵列制备难题。

复杂浮雕型微米结构亦极具挑战。激光灰度直写可用于大幅面灰度微纳结构的高效制备。激光直写系统主要包含激光器、空间光调制器和微缩投影物镜,如图 4(b)所示。空间光调制器加载设计好的结构图形,结构图像的刷新速度与样品载物台的同步移动。微缩投影物镜将空间光调制器上的结构图像缩小 5~50 倍,投影至光刻胶上。灰度激光直写系统写入效率可达 25 mm²/min,制备 40 mm²幅面大小的 4 台阶微纳结构密排等视角调制器件仅需 30 min。

图4 (a)纳米光栅光刻系统^[70]; (b)灰度激光直写系统^[50]。Fig. 4 (a)Nano-grating lithography system^[70]; (b)Grayscale laser direct writing system^[50].

5 结论及展望

微纳光子器件为逐像素操控光束提供了可能性。与基于微透镜阵列的3D显示架构中区域化光场调控策略相比,逐像素光场调控有以下优势:首先,可以将视点自由排列成水平的直线、带有弧度的曲线或全视差平面矩阵等任意样式,为人们根据实际使用需求设计视点分布提供了可能。其次,当区域像素成像或显示时,很多像素被白白浪费。尤其在大视场角下,分辨率下降严重。在像素化光场调控方式中,每个像素都被利用到,保证了较高的分辨率。第三,微纳光子元件具有大偏折角度光线调控能力,可实现具有运动视差的超大视场角。第四,每个视角光强分布可从高斯分布调整到超高斯分布,显著减少视点间串扰和鬼影。第五,视点可设计为点、线、面等形状,用于信息密度变化的裸眼3D显示,解决分辨率和视场角之间的矛盾。第六,采用紧密视点排列方式可在少量视点情况下实现超多视点,并消除由于辐辏调节矛盾引起的视疲劳。第七,多台阶结构,如闪耀光栅、多级衍射透镜和超表面等器件设计方法的引入,可以有效提高光利用率,减少色差,提高分辨率,和扩展景深。第八,微纳光子器件体积小且轻薄,与便携式电子产品形态兼容。

本文主要讨论了基于微纳光子器件的光场裸眼3D显示现状。介绍了基于几何光学的裸眼3D显示面临的难点与挑战,从器件设计和微纳制备两方面详细介绍了基于平面光学的光场裸眼3D显示最新研究进展。基于纳米光栅和衍射透镜的3D显示具有高光效、大视场角、低串扰和消色差的优点。基于超表面的3D显示采用纳米结构

的各向异性排列的方式,具有高度的设计灵活性。值得注意的是,基于二维超构光栅的视角调制器件,可以在160°超大视场角下实现信息密度渐变的裸眼3D显示。

综上所述,基于微纳光子器件的3D显示系统具有质轻体薄、灵活设计、视场角大等优点。有望突破基于几何光学的光场裸眼3D显示局限性,实现在便携式电子产品中的应用。

从系统层面来说,仍有一些方法可以用来进一步提升显示性能。采用时分复用的方式,在牺牲刷新率的情况下,可有效提高空间带宽积。单用户使用应用中,人眼追踪技术可有效保证高分辨率^[71-73]。信息密度渐变的方法优化了信息密度的分布方式,实现了扩大视场角的目的^[74-76]。此外,借助软件优化,可以将深度学习算法与硬件结合,进行图像预校准^[77]。

然而,仍然存在两大瓶颈阻碍着基于微纳光子器件的光场裸眼3D显示走向实际应用。一方面,具有高准直度和高均匀性的指向型背光系统仍有待开发^[78-82]。像素化纳米光栅波导为侧入式准直照明提供了解决途径^[83]。此外,基于纳米波导的照明单元还被设计为时间复用的变角度准直照明,为大视角全息显示提供照明方案。其系统厚度 $<10\text{ cm}$ ^[84]。尽管如此,超薄准直背光源的设计和制造仍然是一项艰巨的任务。

另一方面,微纳制造技术仍是一大挑战。大尺寸的复杂微纳结构、高深宽比的多台阶结构、微纳结构的高保真批量复制无一不是棘手的难题^[85-89]。但我们仍相信会有更多的微纳加工方法不断迭代,满足裸眼3D显示需求。

机遇伴随着挑战。理想情况下,裸眼3D显示

所需平板屏幕的分辨率要大于 50K。MicroLED 和 NanoLED 显示可以有效地扩展空间带宽积, 提供信息冗余, 并从根本上解决 3D 显示中分辨

率下降的问题。我们认为, 通信技术、平板显示技术、微纳制备方法的进步将会共同引领 3D 显示产业的创新和发展^[90-91]。

参 考 文 献:

- [1] WHEATSTONE C. Contributions to the physiology of vision. Part the first. On some remarkable, and hitherto un-observed, phenomena of binocular vision [J]. *Philosophical Transactions*, 1838, 128: 371-394.
- [2] FRATZ M, SEYLER T, BERTZ A, *et al.* Digital holography in production: an overview [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(2): 283-295,.
- [3] GENG J. Three-dimensional display technologies [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [4] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2: 28.
- [5] DODGSON N A. Autostereoscopic 3D displays [J]. *Computer*, 2005, 38(8): 31-36.
- [6] MA Q G CAO L C, HE Z H, *et al.* Progress of three-dimensional light-field display [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111001.
- [7] HUANG T Q, HAN B X, ZHANG X R, *et al.* High-performance autostereoscopic display based on the lenticular tracking method [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20421-20434.
- [8] KIM S U, KIM J, SUH J H, *et al.* Concept of active parallax barrier on polarizing interlayer for near-viewing autostereoscopic displays [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25010-25018.
- [9] LV G J, ZHAO B C, WU F, *et al.* Autostereoscopic 3D display with high brightness and low crosstalk [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2792-2795.
- [10] YOON S K, KHYM S, KIM H W, *et al.* Variable parallax barrier spacing in autostereoscopic displays [J]. *Optics Communications*, 2016, 370: 319-326.
- [11] LV G J, WANG Q H, ZHAO W X, *et al.* Glasses-free three-dimensional display based on microsphere-lens array [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(3): 292-295.
- [12] 王琼华, 潘冬冬, 李大海, 等. 狭缝光栅自由立体显示器的立体图像串扰度[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 1058-1061. 2010. 07. 027.
WANG Q H, PAN D D, LI D H, *et al.* Stereoscopic image crosstalk factor for auto-stereoscopic display based on parallax barrier [J]. *Journal of Optoelectronics•Laser*, 2010, 21(7): 1058-1061.
- [13] LIANG H W, AN S Z, WANG J H, *et al.* Optimizing time-multiplexing auto-stereoscopic displays with a genetic algorithm [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(8): 695-699.
- [14] MARTÍNEZ-CORRAL M, JAVIDI B. Fundamentals of 3D imaging and displays: a tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(3): 512-566.
- [15] JAVIDI B, CARNICER A, ARAI J, *et al.* Roadmap on 3D integral imaging: sensing, processing, and display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32266-32293.
- [16] ZHAO Z F, LIU J, ZHANG Z Q, *et al.* Bionic-compound-eye structure for realizing a compact integral imaging 3D display in a cell phone with enhanced performance [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1491-1494.
- [17] WATANABE H, OKAICHI N, SASAKI H, *et al.* Pixel-density and viewing-angle enhanced integral 3D display with parallel projection of multiple UHD elemental images [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24731-24746.
- [18] LIU B Y, SANG X Z, YU X B, *et al.* Time-multiplexed light field display with 120-degree wide viewing angle [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35728-35739.
- [19] LANMAN D, WETZSTEIN G, HIRSCH M, *et al.* Polarization fields: dynamic light field display using multi-layer LCDs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 186.
- [20] WETZSTEIN G, LANMAN D, HEIDRICH W, *et al.* Layered 3D: tomographic image synthesis for attenuation-based light field and high dynamic range displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 95.
- [21] WETZSTEIN G, LANMAN D, HIRSCH M, *et al.* Tensor displays: compressive light field synthesis using multi-

- layer displays with directional backlighting [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 80.
- [22] LANMAN D, HIRSCH M, KIM Y, *et al.* Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3D displays using low-rank light field factorization [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 163.
- [23] MAIMONE A, WETZSTEIN G, HIRSCH M, *et al.* Focus 3D: compressive accommodation display [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(5): 153.
- [24] 乔文,周冯斌,陈林森. 距离移动电子设备有多远? 裸眼3D显示现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303002.
- QIAO W, ZHOU F B, CHEN L S. Towards application of mobile devices: the status and future of glasses-free 3D display [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303002. (in Chinese)
- [25] CHEN Z G, SEGEV M. Highlighting photonics: looking into the next decade [J]. *eLight*, 2021, 1: 2.
- [26] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1: 3.
- [27] GENEVET P, CAPASSO F, AIETA F, *et al.* Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4(1): 139-152.
- [28] ZHANG Y, FANG F Z. Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays [J]. *Precision Engineering*, 2019, 60: 482-496.
- [29] TABIRYAN N V, ROBERTS D E, LIAO Z, *et al.* Advances in transparent planar optics: enabling large aperture, ultrathin lenses [J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(5): 2001692.
- [30] GERSHUN A. The light field [J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1939, 18(1/4): 51-151.
- [31] MOON P, SPENCER D E. *The Photoc Field* [M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [32] ADELSON E H, BERGEN J R. The plenoptic function and the elements of early vision [M]//LANDY F M, MOVSHON J A. *Computational Models of Visual Processing*. Cambridge: MIT Press, 1991: 3-20.
- [33] MCMILLAN L, BISHOP G. Plenoptic modeling: an image-based rendering system [C]//*Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. Los Angeles: ACM Press, 1995: 39-46.
- [34] LEVOY M, HANRAHAN P. Light field rendering [C]//*Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New Orleans: ACM, 1996: 31-42.
- [35] GÖRRN P, LEHNHARDT M, KOWALSKY W, *et al.* Elastically tunable self-organized organic lasers [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(7): 869-872.
- [36] LIU Z Y, CUI Q Y, HUANG Z H, *et al.* Transparent colored display enabled by flat glass waveguide and nanoimprinted multilayer gratings [J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(6): 1418-1424.
- [37] ZHANG L Z, SUN G T, BAI J, *et al.* Realizing dynamic diffraction gratings based on light-direct writing of responsive 2D ordered patterns [J]. *ACS Materials Letters*, 2020, 2(9): 1135-1141.
- [38] ZOLA R S, BISOYI H K, WANG H, *et al.* Dynamic control of light direction enabled by stimuli-responsive liquid crystal gratings [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(7): 1806172.
- [39] CAO Y Y, WANG P X, D'ACIERNO F, *et al.* Tunable diffraction gratings from biosourced lyotropic liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(19): 1907376.
- [40] ORCUTT M. MIT technology review[EB/OL]. [2013-09-21]. <https://www.technologyreview.com/innovator/david-fattal>.
- [41] WAN W Q, QIAO W, HUANG W B, *et al.* Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1114-1122.
- [42] WAN W Q, QIAO W, PU D L, *et al.* Holographic sampling display based on metagratings [J]. *iScience*, 2020, 23(1): 100773.
- [43] WAN W Q, QIAO W, PU D L, *et al.* Super multi-view display based on pixelated nanogratings under an illumination of a point light source [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106258.
- [44] HUANG K, QIN F, LIU H, *et al.* Planar diffractive lenses: fundamentals, functionalities, and applications [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(26): 1704556.
- [45] BANERJI S, MEEM M, MAJUMDER A, *et al.* Imaging with flat optics: metalenses or diffractive lenses? [J].

- Optica*, 2019, 6(6): 805-810.
- [46] FLEMING M B, HUTLEY M C. Blazed diffractive optics [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4635-4643.
 - [47] SWEENEY D W, SOMMARGREN G E. Harmonic diffractive lenses [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2469-2475.
 - [48] FAKLIS D, MORRIS G M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2462-2468,.
 - [49] BANERJI S, MEEM M, MAJUMDER A, *et al.* Extreme-depth-of-focus imaging with a flat lens [J]. *Optica*, 2020, 7(3): 214-217.
 - [50] ZHOU F, HUA J Y, SHI J C, *et al.* Pixelated blazed gratings for high brightness multiview holographic 3D display [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(5): 283-286.
 - [51] ZHOU F B, ZHOU F, CHEN Y, *et al.* Vector light field display based on an intertwined flat lens with large depth of focus [J]. *Optica*, 2022, 9(3): 288-294.
 - [52] HUA J Y, YI D H, QIAO W, *et al.* Multiview holographic 3D display based on blazed Fresnel DOE [J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125829.
 - [53] JIANG Q, JIN G F, CAO L C. When metasurface meets hologram: principle and advances [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(3): 518-576.
 - [54] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
 - [55] VALENTINE J, ZHANG S, ZENTGRAF T, *et al.* Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index [J]. *Nature*, 2008, 455(7211): 376-379.
 - [56] ZHOU Y, QIN Z, LIANG Z Z, *et al.* Ultra-broadband metamaterial absorbers from long to very long infrared regime [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 138.
 - [57] QIAN Q Y, SUN T, YAN Y, *et al.* Large-area wide-incident-angle metasurface perfect absorber in total visible band based on coupled Mie resonances [J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(13): 1700064.
 - [58] ERGIN T, STENGER N, BRENNER P, *et al.* Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths [J]. *Science*, 2010, 328(5976): 337-339.
 - [59] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
 - [60] CHEN W T, ZHU A Y, SANJEEV V, *et al.* A broadband achromatic metalens for focusing and imaging in the visible [J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 220-226.
 - [61] HUANG L L, ZHANG S, ZENTGRAF T. Metasurface holography: from fundamentals to applications [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 1169-1190.
 - [62] ZHENG G X, MÜHLENBERND H, KENNEY M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
 - [63] FARAJI-DANA M, ARBABI E, ARBABI A, *et al.* Compact folded metasurface spectrometer [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4196.
 - [64] ZHU A Y, CHEN W T, KHORASANINEJAD M, *et al.* Ultra-compact visible chiral spectrometer with metalenses [J]. *APL Photonics*, 2017, 2(3): 036103.
 - [65] ZHANG Y C, LIU W W, GAO J, *et al.* Generating focused 3D perfect vortex beams by plasmonic metasurfaces [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701228.
 - [66] YUE F Y, WEN D D, XIN J T, *et al.* Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1558-1563.
 - [67] HUANG L L, CHEN X Z, MÜHLENBERND H, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nature Communications*, 2013, 4(1): 2808.
 - [68] FAN Z B, QIU H Y, ZHANG H L, *et al.* A broadband achromatic metalens array for integral imaging in the visible [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 67.
 - [69] HUA J Y, HUA E K, ZHOU F B, *et al.* Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-

- scale 2D-metagrating complex [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 213.
- [70] WAN W Q, QIAO W, HUANG W B, *et al.* Efficient fabrication method of nano-grating for 3D holographic display with full parallax views [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6203-6212.
- [71] TING C H, CHANG Y C, CHEN C H, *et al.* Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922-7928.
- [72] HWANG Y S, BRUDER F K, FÄCKE T, *et al.* Time-sequential autostereoscopic 3-D display with a novel directional backlight system based on volume-holographic optical elements [J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9820-9838.
- [73] XIA X X, ZHANG X Y, ZHANG L, *et al.* Time-multiplexed multi-view three-dimensional display with projector array and steering screen [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15528-15538.
- [74] PHILLIPS D B, SUN M J, TAYLOR J M, *et al.* Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1601782.
- [75] YOO C, XIONG J H, MOON S, *et al.* Foveated display system based on a doublet geometric phase lens [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23690-23702.
- [76] CHANG C L, CUI W, GAO L. Foveated holographic near-eye 3D display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1345-1356.
- [77] ZENG T J, ZHU Y M, LAM E Y. Deep learning for digital holography: a review [J]. *Optics Express*, 2021, 29(24): 40572-40593.
- [78] FAN H, ZHOU Y G, WANG J H, *et al.* Full resolution, low crosstalk, and wide viewing angle auto-stereoscopic display with a hybrid spatial-temporal control using free-form surface backlight unit [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(7): 620-624.
- [79] YOON H, OH S G, KANG D S, *et al.* Arrays of *Lucius* micropisms for directional allocation of light and autostereoscopic three-dimensional displays [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 455.
- [80] KREBS P, LIANG H W, FAN H, *et al.* Homogeneous free-form directional backlight for 3D display [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 112-117.
- [81] ZHAN L L, LI M G, XU B, *et al.* Directional backlight 3D display system with wide-dynamic-range view zone, high brightness and switchable 2D/3D [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(12): 1710-1714.
- [82] TENG T C, TSENG L W. Design of a bidirectional backlight using a pair of stacked light guide plates for large dual-view and 3D displays [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 509-516.
- [83] ZHANG Y L, YI D H, QIAO W, *et al.* Directional backlight module based on pixelated nano-gratings [J]. *Optics Communications*, 2020, 459: 125034.
- [84] AN J, WON K, KIM Y, *et al.* Slim-panel holographic video display [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5568.
- [85] QIAO W, HUANG W B, LIU Y H, *et al.* Toward scalable flexible nanomanufacturing for photonic structures and devices [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(47): 10353-10380.
- [86] WU X M, QIAO W, ZHU M, *et al.* Roll-to-plate additive manufacturing [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21833-21843.
- [87] CHEN Y F. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications; a review [J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 135: 57-72.
- [88] MANFRINATO V R, ZHANG L H, SU D, *et al.* Resolution limits of electron-beam lithography toward the atomic scale [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(4): 1555-1558.
- [89] MANFRINATO V R, WEN J G, ZHANG L H, *et al.* Determining the resolution limits of electron-beam lithography: direct measurement of the point-spread function [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(8): 4406-4412.
- [90] HUANG Y G, HSIANG E L, DENG M Y, *et al.* Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 105.
- [91] LIU Z J, LIN C H, HYUN B R, *et al.* Micro-light-emitting diodes with quantum dots in display technology [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 83.

作者简介:



夏仲文(1998—),男,浙江宁波人,博士研究生,2020年于湘潭大学获得学士学位,主要从事新型显示及裸眼3D显示方面的研究。E-mail:zhongwensummer@163.com



乔文(1984—),女,江西南昌人,博士研究生,教授,2013年于美国加州大学圣迭戈分校获得博士学位,主要从事微纳制造、微纳光学等方面的研究。E-mail:wqiao@suda.edu.cn