

# 基于微纳光学元件的增强现实技术

廖启明, 杨静育, 王涌天, 黄玲玲\*

北京理工大学光电学院, 北京 100081

**摘要** 增强现实显示器件作为一种可穿戴式的智能设备, 通过将虚拟信息叠加在真实视野上, 两种信息相互补充叠加, 显著增强对真实世界的体验, 对器件体积和质量的要求非常严格。微纳光学元件是指厚度及特征尺寸在纳米或微米量级的光学元件, 在拥有强大的光场调控能力的前提下为缩减系统的尺寸和体积提供了新的途径。首先回顾几类典型微纳光学元件的原理和调控方式, 随后讨论微纳光学元件在增强现实器件的技术路径和应用, 并展望未来的发展。

**关键词** 微纳光学; 增强现实; 亚波长光栅; 超表面

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011003

## Augmented Reality Technology Based on Micro- and Nano-Optical Elements

Liao Qiming, Yang Jingyu, Wang Yongtian, Huang Lingling\*

School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Augmented reality display devices, as a wearable smart device, significantly enhance the experience of the real world by superimposing virtual information on the real field of view, and therefore have very strict requirements for device size and weight. Micro- and nano-optical elements, which are optical elements with thickness or size of the nanometer or micron scale, provide new ways to reduce the size and volume of systems while possessing powerful optical field modulation capabilities. This paper first reviews the principles and modulation of several types of typical micro- and nano-optical elements, and then discusses the technical paths and applications of micro- and nano-optical elements in augmented reality devices and looks into future developments.

**Key words** micro- and nano-optics; augmented reality; subwavelength grating; metasurface

## 1 引言

二十一世纪是信息时代, 在民用和军用的各个领域如何及时、准确、全面地获取信息是非常重要的。增强现实(AR)技术是一种将真实世界信息与虚拟世界信息叠加显示的技术<sup>[1]</sup>, 真实世界的信息与电脑图像通过可穿戴式显示设备如智能眼镜等进入人眼。这些设备可以在不影响使用者观察外界实时环境的基础上辅助使用者获取和处理更多的信息, 提高对信息的处理效率<sup>[2]</sup>。在医学领域, AR可以帮助医生在进行手术的同时将患者的各项数据实时显示, 可以保证医生手术时的专注度, 缩短手术时间。在教育领域, AR显示设备可以作为辅助教学用具, 通过将图像化的知识和讲解配合, 提高学生的学习积极性。除此以外, 在许多领域 AR 都有很高的应用价值。

AR 显示系统的关键技术在于光学组合器的选择, 目前主流的方案包括: 分束棱镜、自由曲面和光波导等。其中使用分束棱镜的代表就是谷歌公司发布的 Project Glass, 这种智能眼镜可以将计算机生成的图像和数据直接投影到人眼里, 此方案体积小, 但可获取的视场范围也较小, 并且由于棱镜本身的体积较大, 较难不遮挡视线。而使用自由曲面的代表产品则有 Epson BT300。关于自由曲面的设计方法是基于几何光学的, 在优化较好的前提下, 可以保证产品的对比度、分辨率、视场和色彩等参数, 但随着视场的增大, 镜片的设计曲率也增大, 这会导致整个系统的体积和质量大幅上升。光波导技术利用波导传输原理可以实现传统光学较难实现的出瞳, 索尼公司就发布了使用体全息光栅波导的 SmartEyeglasses 眼镜<sup>[3]</sup>, 极大地简化了光学系统。

收稿日期: 2022-07-20; 修回日期: 2022-08-30; 录用日期: 2022-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20140)

通信作者: \*huanglingling@bit.edu.cn

微纳光学主要研究在微纳尺度下光与物质的相互作用及其应用,研究波段覆盖紫外、可见和红外波段。由于微纳结构可以在纳米或微米量级的特征尺寸下调控光场,并且具有强大的光场调控能力,因此可以大大简化光学系统的复杂程度,减小 AR 系统的尺寸和体积。将微纳光学元件应用到 AR 显示设备中有望能够解决目前 AR 发展中遇到的如设备质量大、光路元件复杂、元件遮挡视野等问题,在 AR 领域具有非常大的应用潜力。

## 2 微纳光学元件

近年来,随着纳米光学、材料科学、光刻工艺等理论和加工手段的发展,微纳光学元件得到了广泛的关注,周期性或准周期排列的微纳结构可以实现许多独

特的光学响应。为了便于分析当前微纳元件在增强现实中的应用,将微纳结构分为三类:亚波长光栅、光子晶体和超表面。

### 2.1 亚波长光栅

亚波长光栅结构是一种人工设计的周期性微纳结构,当入射光作用到周期性微纳结构表面时,能量会被重新分配至不同的衍射级次,从而可以改变光波的反射、透射等。亚波长光栅的典型结构<sup>[4-5]</sup>如图 1 所示,当调整亚波长光栅结构中的占空比和几何形貌时,可以实现对其等效折射率的调节,从而实现各种不同的功能。由于亚波长光栅的特征尺寸小于波长,其光谱特性和偏振特性与折射元件不同,因此具有很大的应用前景,在 AR 器件方面可被应用于光波导耦合器<sup>[6]</sup>、滤波器、图像传导等。

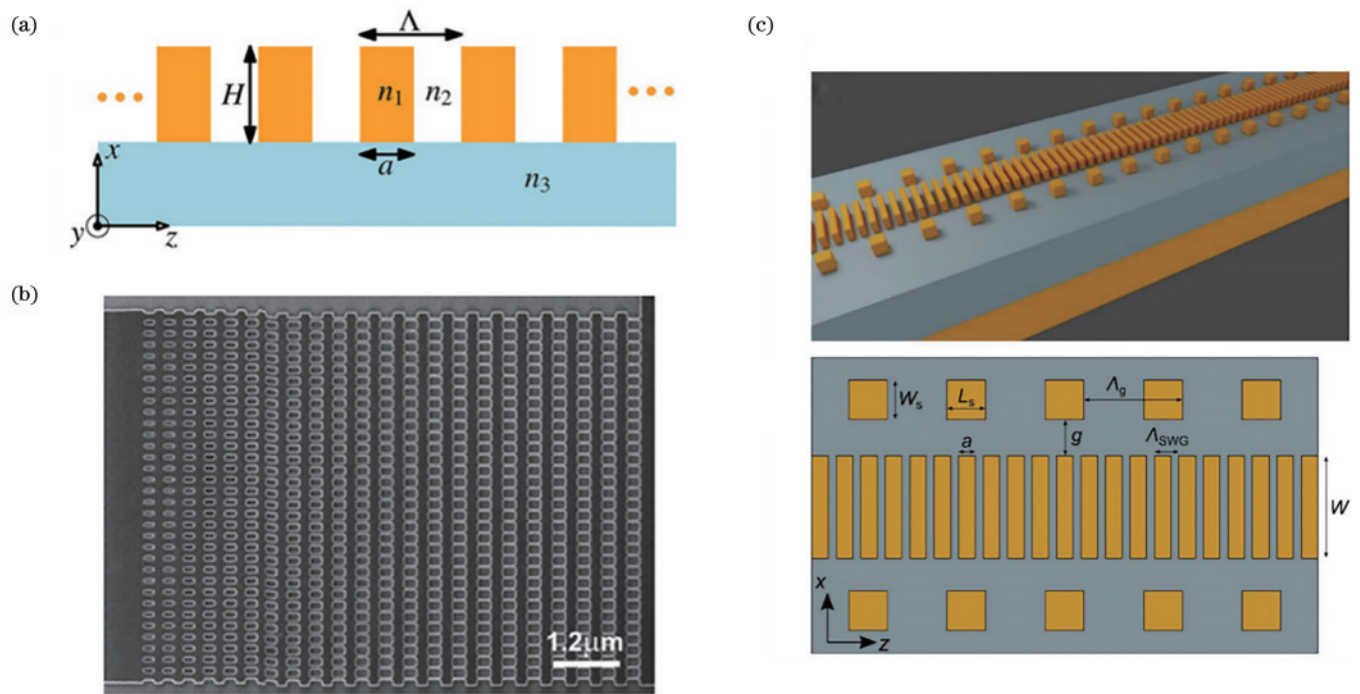


图 1 亚波长光栅<sup>[4-5]</sup>

Fig. 1 Subwavelength grating<sup>[4-5]</sup>

### 2.2 光子晶体

光子晶体一般指两种不同介电常数材料所组成的周期性结构<sup>[7-8]</sup>,在波长和周期尺寸满足一定条件时,光子在其中传播会形成光子能带和光子禁带,处于光子禁带中的频率将无法通过,而处于光子能带中的频率将可以传播。光子晶体可以分为一维、二维和三维光子晶体,它们的介电常数分别在一维、二维和三维空间上周期性排列。其中三维光子晶体由于在空间第三个维度也周期性排列,因此能产生全方向的完全禁带,具有更加普遍的实用性。

光子禁带主要和光子晶体的内部结构和材料有关,通常介电常数的变化越大,带隙出现的可能性也越大,当光波的频率处于禁带时,光波的传播会完全禁

止,这对调控光场的传播有着非常重要的意义。图 2(a)为一维光子晶体调控光场示意图,通过一维光子晶体,可以发生布拉格反射现象<sup>[9]</sup>。图 2(b)和图 2(c)展示了两种二维光子晶体的典型结构,图 2(b)中的结构可以对入射光的 TE 和 TM 模式分别进行调控<sup>[10]</sup>,图 2(c)中的结构则可以在设计波段内实现高效率的吸收,可以用作太阳能电池的吸收层<sup>[11]</sup>。图 2(d)展示了一种可以用于操控纠缠双光子对的轨道角动量的三维光子晶体<sup>[12]</sup>。除此以外,光子晶体还可以应用于如无损反射镜、无阈值激光器、光子晶体偏振器等方面。但对于显示系统,主要需要二维或者三维的光学器件在三维空间内对光场进行调控,而二维光子晶体进行面外调控时,难以进行空间光调制,三维光子晶体

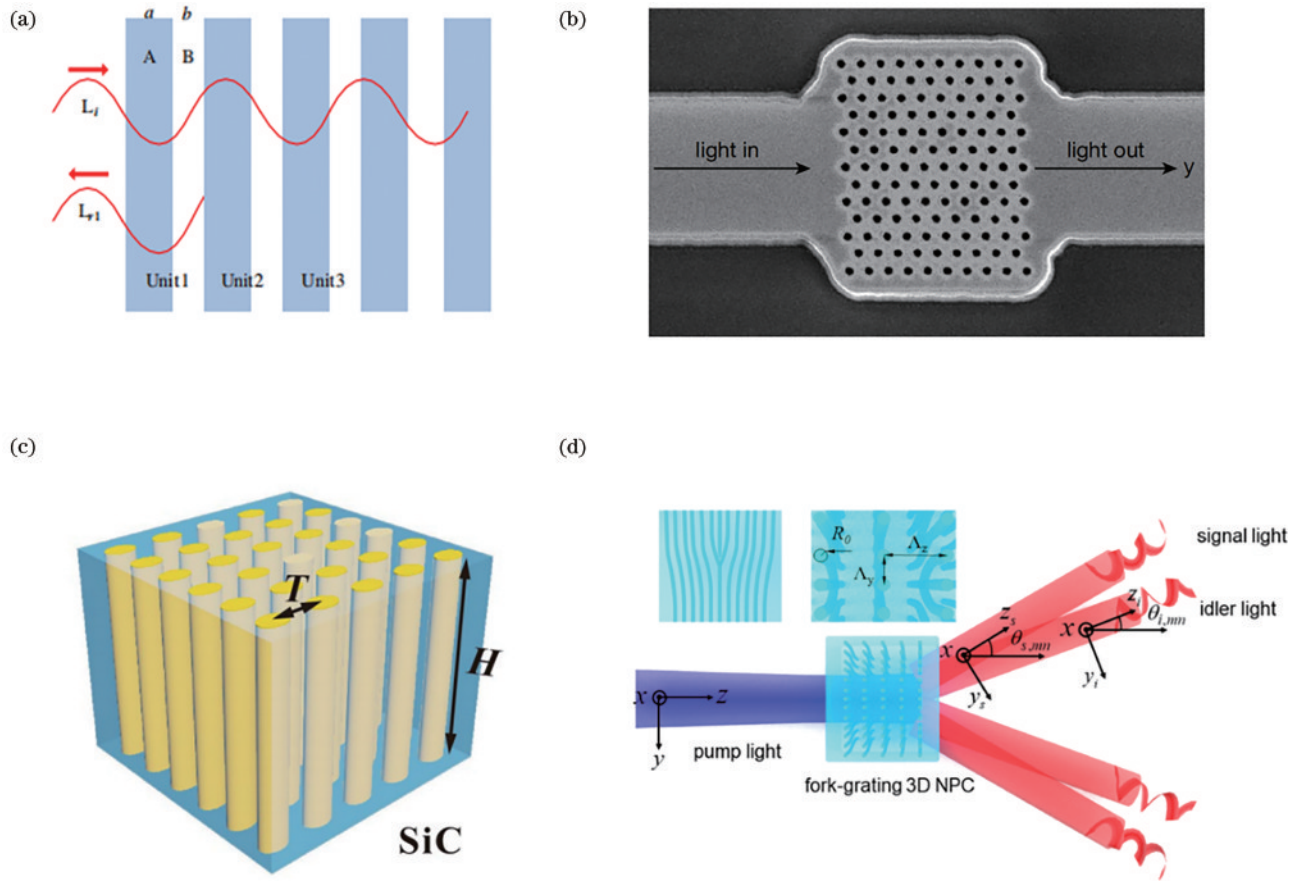


图 2 光子晶体。(a)一维光子晶体<sup>[9]</sup>;(b)(c)二维光子晶体<sup>[10-11]</sup>;(d)三维光子晶体<sup>[12]</sup>

Fig. 2 Photonic crystals. (a) One-dimensional photonic crystal<sup>[9]</sup>; (b) (c) two-dimensional photonic crystals<sup>[10-11]</sup>; (d) three-dimensional photonic crystal<sup>[12]</sup>

的加工工艺复杂,制备较为困难,也制约了其在增强现实器件应用方面的发展。

### 2.3 超表面

超表面作为一种亚波长天线构成的周期性或随机性排列的二维阵列,是一种新颖的人工材料。通过精心设计天线的材料、几何形状、特征尺寸、周期大小等,超表面可以在亚波长尺度上完成对光场的振幅、相位和偏振等不同物理量的自由调控<sup>[13-18]</sup>。与传统光学器件依赖传播过程中的光程积累来实现光场调制不同,超表面利用亚波长天线对入射光场的响应来提供相位、振幅等参量的突变,因此可以在微米级甚至纳米级的厚度上对光场进行调制,大大减小了器件的尺寸,提高光学系统的紧凑性。

对超表面的研究起始于 2011 年哈佛大学的 Capasso 课题组,他们<sup>[19]</sup>首次利用 V 形金天线调制入射光波的波前,产生了异常折/反射,如图 3(a)所示。之后得益于超表面的设计灵活度和功能多样性,超表面在许多领域如全息显示<sup>[22-25]</sup>、偏振调控<sup>[26-29]</sup>、超透镜<sup>[30-34]</sup>、光束整形<sup>[35-36]</sup>都有着巨大的应用潜力。

早期设计超表面时通常使用金属作为天线材料,通过物理场仿真等手段对天线的结构尺寸等参数进行设计,针对单一工作波长或某一工作波段挑选合适的

天线对光场的振幅和相位进行调制。但由于金属材料本身的限制,金属超表面的效率和工作波段都非常局限。为了解决这一问题,研究人员提出了全介质超表面。全介质超表面可以将入射光的能量局域在结构内部,从而获得较高的工作效率和较低的损耗。

目前常见的超表面的相位调制手段包括传播相位、几何相位、拓扑相位、多种相位调制结合等。基于传播相位设计的超表面天线的自由度取决于横截面尺寸等几何参数。例如:对于矩形柱天线,可以将长度、宽度、高度作为自由度;对于椭球柱天线,可以将长轴和短轴的长度作为自由度。通过改变设计参数,可以计算并得到一个拥有不同相位延迟和传输强度的结构单元库。如果数据库能够覆盖全相移(0~2π),则可以根据预先计算的相位分布图进行超表面设计。如图 3(b)所示,Feng 等<sup>[20]</sup>根据传播相位的设计方法设计了一个红绿蓝三色消色差超透镜,该超透镜可以用于成像等领域。而基于几何相位设计的超表面则通过改变相同微纳单元结构的平面内取向角来实现全相位控制,这种相位调制方法引入的相位突变仅与单元结构的平面朝向有关,如图 3(c)所示,Zhu 等<sup>[21]</sup>通过利用几何相位的设计方法,实现了对可见光波段的宽带光子自旋霍尔效应的调控。

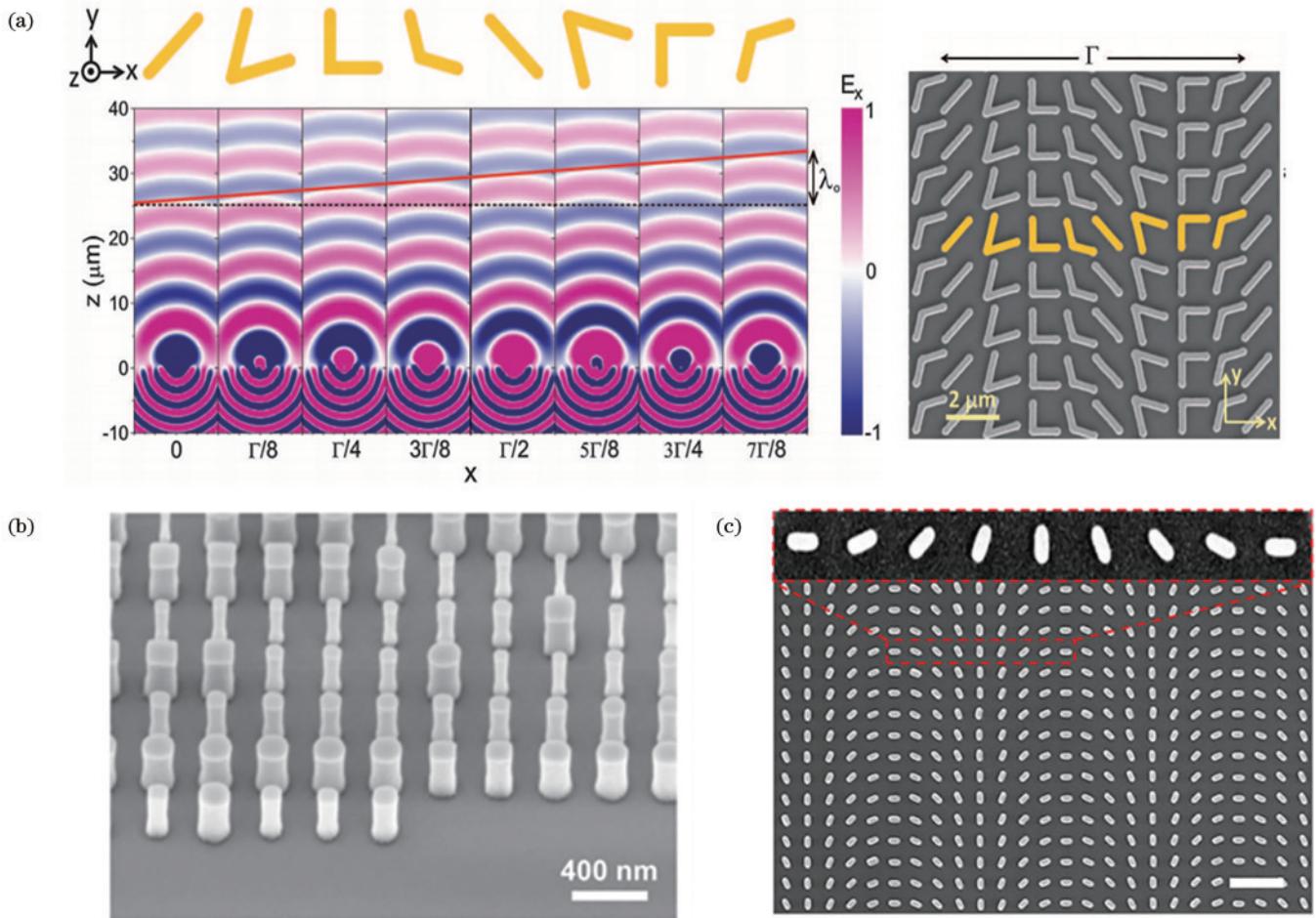


图 3 超表面。(a)金属天线超表面<sup>[19]</sup>;(b)传播相位超表面<sup>[20]</sup>;(c)几何相位超表面<sup>[21]</sup>

Fig. 3 Metasurfaces. (a) Metal antenna metasurface<sup>[19]</sup>; (b) propagation phase metasurface<sup>[20]</sup>; (c) geometric phase metasurface<sup>[21]</sup>

### 3 微纳光学元件在 AR 中的应用

#### 3.1 亚波长光栅波导耦合器

目前消费领域 AR 发展的一大方向是使用光波导技术进行图像传输,简单来说即利用波导介质的全反射条件,以极低的损耗来传输图像光场,具有对外界环

境光线透过率高、体积小、质量轻等优点。而如何将光线以全反射条件耦合入波导进行传输后再破坏全反射条件将在波导中传输的光线耦出是光波导技术中较为关键的一环。目前主流的做法是采用光栅波导耦合器控制光线的输入和输出,其中较为常见表面浮雕式光栅、体全息光栅、液晶偏振体光栅等<sup>[7]</sup>,如图 4 所示。

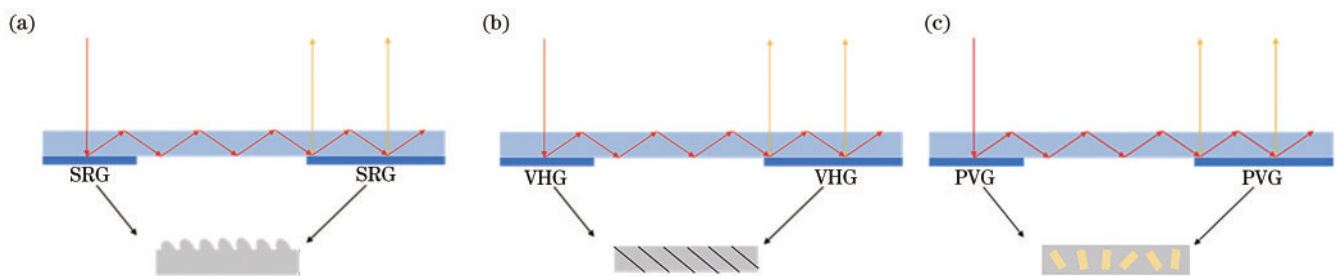


图 4 光栅波导耦合器示意图。(a)表面浮雕式光栅;(b)体全息光栅;(c)液晶偏振体光栅

Fig. 4 Schematic of grating waveguide coupler. (a) Surface relief grating; (b) volume holographic grating; (c) liquid crystal polarization volume grating

##### 3.1.1 表面浮雕式光栅(SRG)

表面浮雕式光栅(SRG)是目前比较常见的波导耦合光栅<sup>[37]</sup>,起步较早,在 20 世纪 90 年代就已经得到广泛研究。Gurwich 等<sup>[38-39]</sup>首先发表了基于衍射

耦合元件的波导显示系统及波导耦合光栅的具体设计与制备内容。SRG 耦合的光波导工作示意如图 4(a)所示,由于光栅结构的特征尺寸通常在亚波长尺度,因此整个光栅的厚度通常在微米级或纳米

级,所以可以直接加工制备于光波导的表面,从而减小整个 AR 系统的体积,并且加工在光波导介质的表面也可以避免外界真实视野的遮挡,更有利于实际使用。

SRG 的生产依托于半导体微纳加工工艺,受益于半导体行业的发展,目前 SRG 的加工手段比较成熟,并且新的设计和加工工艺也在不断被提出。Ahn 等<sup>[40]</sup>应用双光子干涉光刻技术加工了一种高精度 SRG,如图 5(a)所示。Shramkova 等<sup>[41]</sup>提出了一种如图 5(b)所

示的 U 形光栅结构,这种结构可以拓展水平方向的视场。Lee 等<sup>[42]</sup>提出了一种深槽型的光栅,如图 5(c)所示,可以抑制零级衍射光,提高效率。虽然市面上许多 AR 产品都使用了 SRG,但由于 AR 眼镜的设计需要,SRG 需要在考虑光栅衍射效率的情况下优化成像效果,所以 SRG 的设计难度依然较高,并且对加工的高精度要求也导致成本提高,因此目前世界上仅有少数的厂家可以设计和量产高质量的用作 AR 眼镜的光波导耦合器的 SRG。

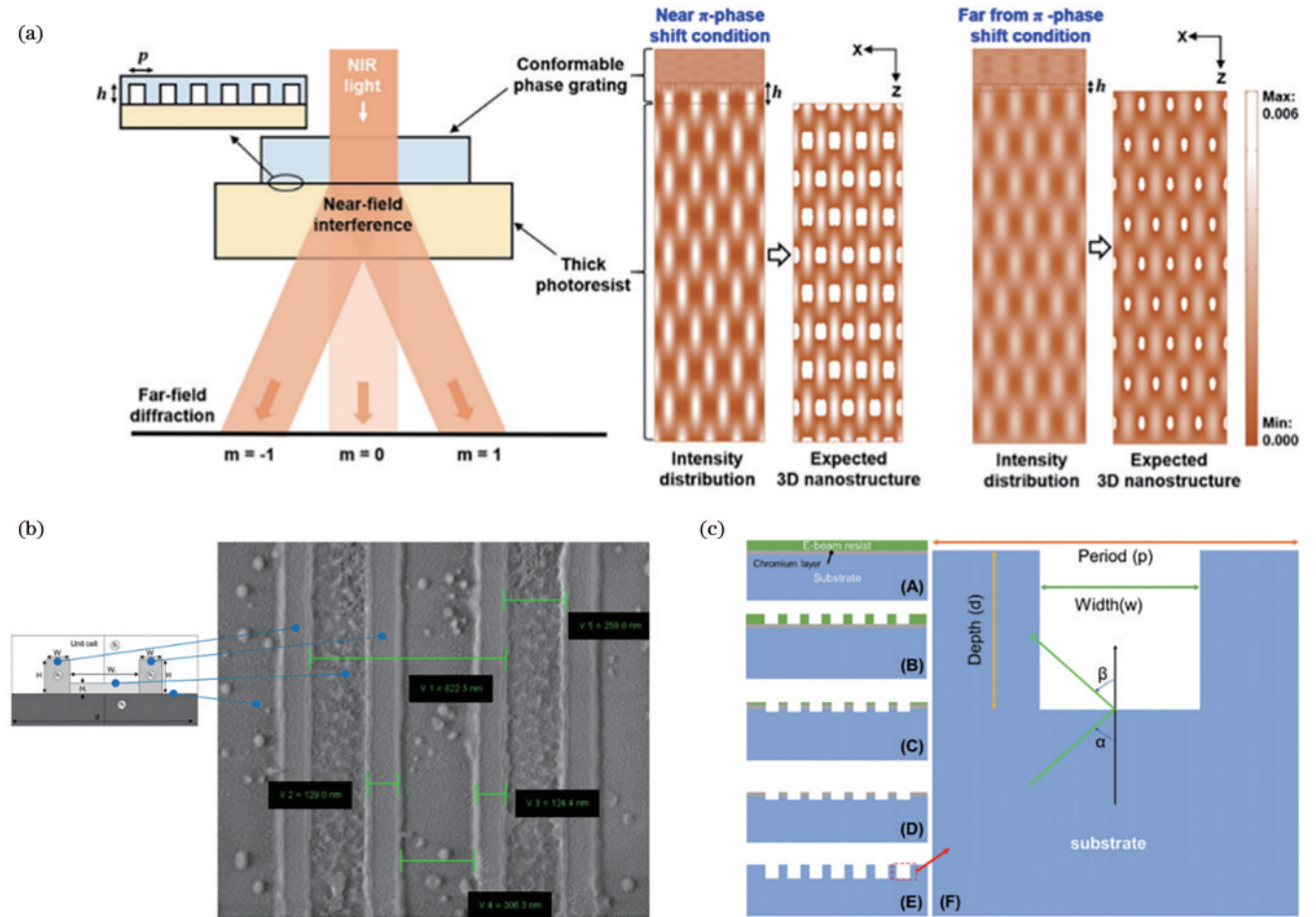


图 5 表面浮雕光栅应用于 AR 显示。(a) 双光子干涉加工<sup>[40]</sup>; (b) U 形光栅<sup>[41]</sup>; (c) 深槽光栅<sup>[42]</sup>

Fig. 5 Surface relief gratings applied to AR displays. (a) Two-photon interference processing<sup>[40]</sup>; (b) U-shaped grating<sup>[41]</sup>; (c) deep-slot grating<sup>[42]</sup>

### 3.1.2 体全息光栅(VHG)

使用体全息光栅(VHG)的光波导工作原理和使用 SRG 的光波导基本相同,但是相较于 SRG, VHG 因独特的衍射特性和工艺成本近年来受到广泛的关注。VHG 的衍射特性主要体现为布拉格体效应。区别于平面光栅, VHG 在厚度方向上也存在一定的周期性折射率调制,这种厚度方向上的调制为光栅引入了一定的选择性,从而使光栅的衍射能量能够集中于某一特定的衍射级次(+1 级或-1 级),即布拉格衍射。VHG 的加工则依靠全息干涉曝光工艺,即两束相干的激光发生干涉,将干涉结果记录在具有一定厚度的感

光材料内,从而实现所需要的二维周期性光栅。因此 VHG 的加工难点在于感光材料的选择,理论上具有一定厚度的全息记录材料都可以作为 VHG 的加工材料。但加工 VHG 的材料时依然存在着噪声颗粒较大影响成像质量、环境适应性不高等问题。目前研究的方向渐渐转向了光聚合物(photopolymer)材料,这种材料在制备条件和环境稳定性上都有一定的优势。

目前已有大量的 VHG 研究工作被报道。2009 年, Mukawa 等<sup>[6]</sup>报道一种使用了 VHG 的全彩眼镜,如图 6(a)所示,可以实现超过 85% 的透光率和 16° 的视场角,并且 NTSC 色域可以达 120%。2013 年, Piao

等<sup>[43]</sup>使用光聚合物材料制作了 VHG, 如图 6(b) 所示, 通过设计能够使红绿蓝三色均匀显示。2015 年, Zhang 等<sup>[44]</sup>提出了一种内耦合面全息和外耦合面全息组成的高效的消色差全息波导显示系统, 如图 6(c) 所示, 与之前的工作相比, 提高了效率, 并且减小了多次曝光造成的损失。如图 6(d) 所示, Shen 等<sup>[45]</sup>系统地分析了光栅斜角、光栅周期和有效折射率等参数对 VHG 性能的影响, 并且在不计成本和不考虑光学设计的前

提下扩大视场角, 得到了理论上的最大视场角。大量的研究证实: VHG 的高效率单极次衍射更容易实现, 并且 VHG 对外界的实际光场透明度较高, 符合 AR 设备的需求, 但 VHG 的响应带宽较窄, 会带来视场角较小等问题, 这需要结合实际使用情况进行特定的优化和设计。相较于 SRG, VHG 因较为简单的制备工艺和较低的制造成本成为了未来 AR 设备中非常具有潜力的波导耦合器件。

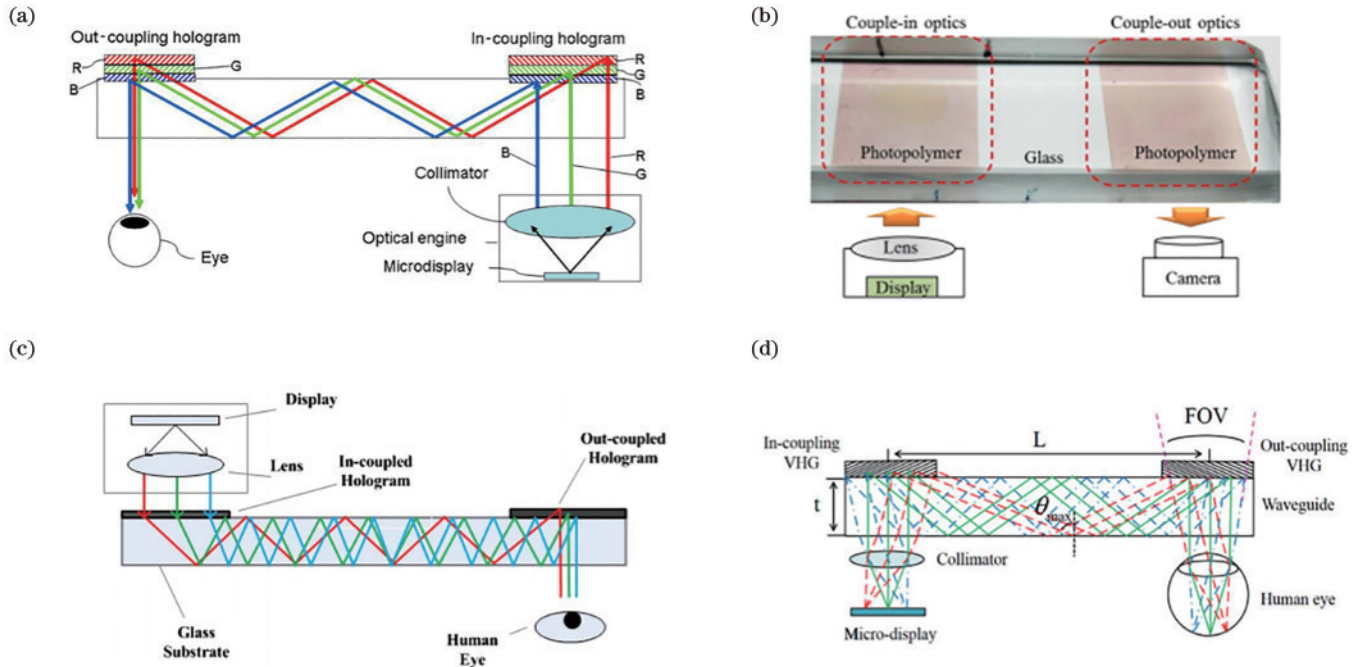


图 6 体全息光栅应用于 AR 显示。(a) 全彩 AR 显示<sup>[6]</sup>; (b) 光聚合物材料体全息光栅<sup>[43]</sup>; (c) 高效率消色差显示<sup>[44]</sup>; (d) 大视场角<sup>[45]</sup>  
Fig. 6 Volume holographic gratings applied to AR displays. (a) Full color AR display<sup>[6]</sup>; (b) photopolymer volume holographic grating<sup>[43]</sup>; (c) high efficiency achromatic display<sup>[44]</sup>; (d) large field of view<sup>[45]</sup>

### 3.1.3 液晶偏振体光栅(PVG)

液晶偏振体光栅(PVG)使用了几何相位的原理, 相较于上述两种波导耦合器件, 具有衍射效率高、衍射角大、响应带宽宽、偏振选择性强和制造工艺简单等优点<sup>[46]</sup>, 因此也是用作 AR 显示波导耦合器件的优秀选择之一。

2018 年, Weng 等<sup>[47]</sup>提出了一种应用于彩色 AR 显示的 PVG 器件, 如图 7(a) 所示, 在蓝色(457 nm)、绿色(532 nm)和红色(630 nm)的波长处实现了超过 80% 的衍射效率, 并进行了彩色成像的实验。2019 年, Yin 等<sup>[48]</sup>提出了一种基于柔性基底的 PVG, 如图 7(b) 所示, 并以此设计了一套紧凑的增强现实显示的光学系统。2020 年, Yin 等<sup>[49]</sup>又提出了一种具有大视场角的 PVG, 如图 7(c) 所示, 可以将角带宽从 18° 扩展到 54° 并且能保持 80% 以上的平均效率和 95% 以上的峰值效率。PVG 以更为简单的加工方式和连续的相位调制成为了 AR 显示领域的重要发展方向。

## 3.2 超表面近眼显示

相较于亚波长光栅, 超表面调控光场的自由度更

广并且体积更小, 因此使用超表面制造 AR 器件有着得天独厚的优势。但基于超表面的近眼显示系统也存在色差、视角小、成像质量低等问题。近年来, 大量的研究表明基于超表面的近眼显示系统是完全可行的, 并且随着越来越多新的设计和材料被提出, 超表面的缺点正在逐渐被克服。随着 AR 近眼显示器件的体积朝着更小的方向发展, 超表面有着巨大的发挥空间。

超表面在 AR 近眼显示系统中可以替代传统光学的多种器件, 如传统光学透镜、反射镜等<sup>[54]</sup>。2018 年, Lee 等<sup>[50]</sup>提出了一种具有高数值孔径的超透镜, 并将其用于 AR 显示, 如图 8(a) 所示, 此设计中的超透镜是基于几何相位进行设计的, 保证了宽带效应, 并且基于纳米压印的加工方式也证实大面积超表面加工的可行性, 这种基于超透镜的目镜可以获得比传统的光学系统更宽的视场角, 并且可以实现全彩 AR 成像, 开辟了超表面应用于 AR 显示系统的先河。2018 年, Avayu 等<sup>[51]</sup>设计了一个超薄的超表面 AR 眼镜, 如图 8(b) 所示。该设计通过三层超表面实现, 每层超表面只响应一个特定波长的光, 其余可见光谱的光不受影响, 通过

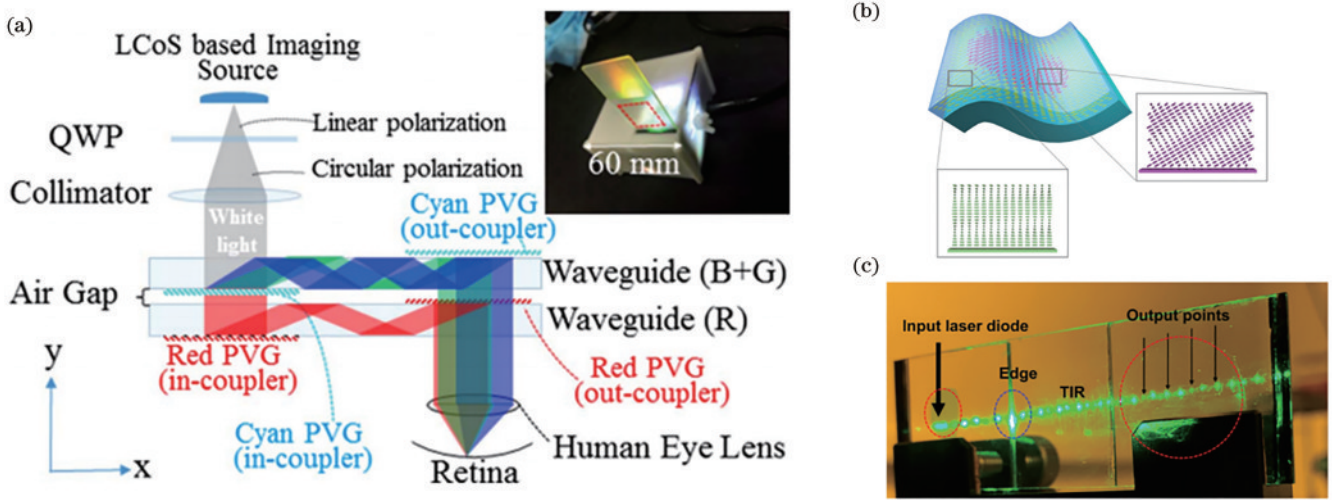


图 7 液晶偏振体光栅应用于 AR 显示。(a) 彩色波导显示<sup>[47]</sup>; (b) 柔性 PVG<sup>[48]</sup>; (c) 大视场角<sup>[49]</sup>  
 Fig. 7 Liquid crystal polarization volume gratings applied to AR displays. (a) Color waveguide display<sup>[47]</sup>; (b) flexible PVG<sup>[48]</sup>; (c) large field of view<sup>[49]</sup>

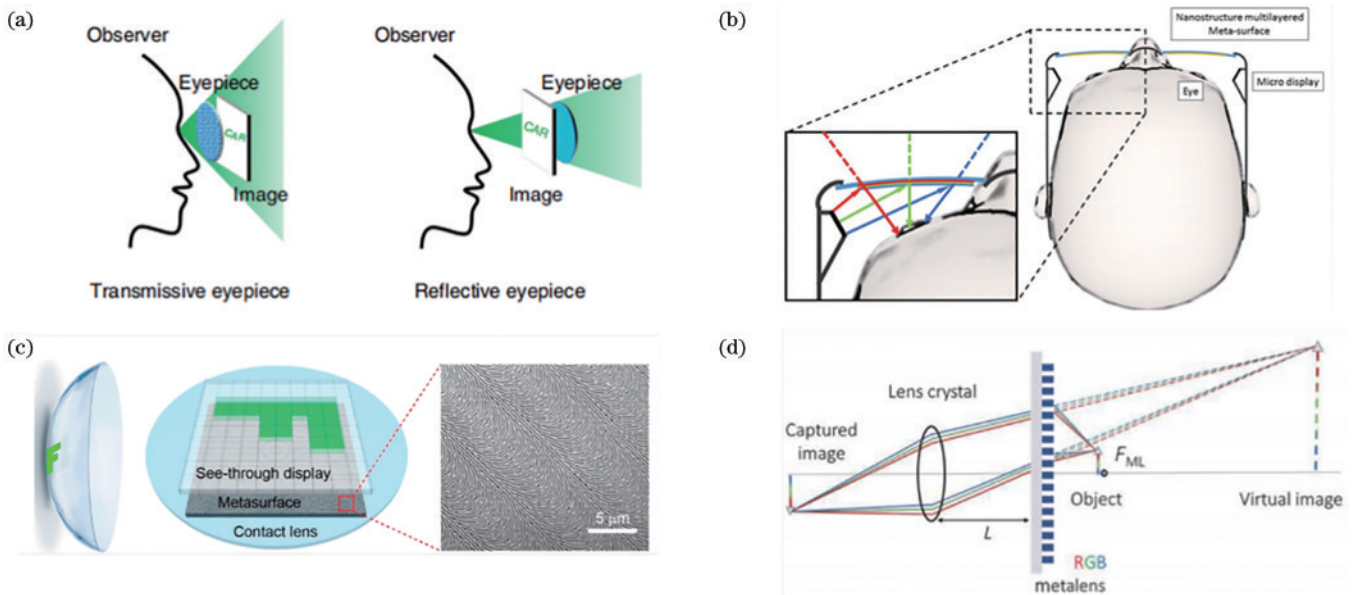


图 8 超表面近眼显示。(a) 扩大视场角方案<sup>[50]</sup>; (b) 减小色差方案<sup>[51]</sup>; (c) 隐形眼镜集成式 AR 显示<sup>[52]</sup>; (d) 大面积消色差超透镜<sup>[53]</sup>  
 Fig. 8 Near eye display based on metasurface. (a) Expanded field of view scheme<sup>[50]</sup>; (b) reduced chromatic aberration scheme<sup>[51]</sup>; (c) contact lens integrated AR display<sup>[52]</sup>; (d) large achromatic metalens<sup>[53]</sup>

三种颜色的组合可以将显示器上的全彩内容反射至人眼,同时元件为透明元件,可以直接获取外界的真实信息。这种分层超表面的设计可以降低系统的色差,使彩色的图像更为清晰,且系统整体和普通眼镜类似。2019年,Lan等<sup>[52]</sup>将超表面和透明显示器相结合并集成于隐形眼镜上,这种隐形眼镜显示器可以直接在视网膜上成像,如图8(c)所示,这种方案不会遮挡佩戴者的视线,对真实环境的图像有着较好的透过率,并且通过设计超表面的相位分布可以直接将虚拟信息投影到人眼。相对于传统眼镜式的AR,隐形眼镜式设计系统尺寸更小,更易于佩戴。2021年,Li等<sup>[53]</sup>提出了一种大面积消色差超透镜用于VR/AR显示,如图8(d)

所示,此设计将正向设计与逆向设计相结合,提出了色散区域控制的设计方法,并加工了毫米级别的超透镜,可以实现高分辨率的彩色成像,为设计和加工大面积消色差透镜提供了新的方案。

此外,关于超表面全息的研究工作也可被用于AR显示领域。相较于传统的全息技术<sup>[61]</sup>,超表面可以在较小的体积尺寸上实现对基于波长或者偏振等的不同信道的多种调控,调控手段灵活,大大增加了信息容量,更有利于AR显示中对虚拟信息的记录。2021年,Song等<sup>[55]</sup>提出了一种可以实现大视场角的超表面近眼显示器,如图9(a)所示,3D图像由惠更斯超表面全息生成,通过分光镜将超表面全息图像和实际场景

共同传入相机。除了记录单幅全息图像外,超表面还可以通过多种复用方式如波长复用、偏振复用等来加载更多的信息,从而扩大 AR 显示中的虚拟信息容量。2019 年,Wei 等<sup>[56]</sup>提出了一种双波长全息,如图 9(b)所示,通过空间复用的结构排布方式可以在近场实现结构色的同时在远场生成红绿两色的全息图。2022 年,Shi 等<sup>[57]</sup>提出了一种结合迂回相位和几何相位的结

构,将单元结构加工在了光波导上,实现了 RGB 三色入射下的不同全息图,如图 9(c)所示,并给出了在真实环境背景下的全息图显示结果。2018 年,Zhao 等<sup>[58]</sup>提出了一种偏振复用方案,将不同偏振通道的多个独立的目标相位分布集成于一个超表面上,如图 9(d)所示,该方法获得的矢量全息图可以在 12 个不同的偏振通道中获得 7 种组合,极大地提高了信息容量。

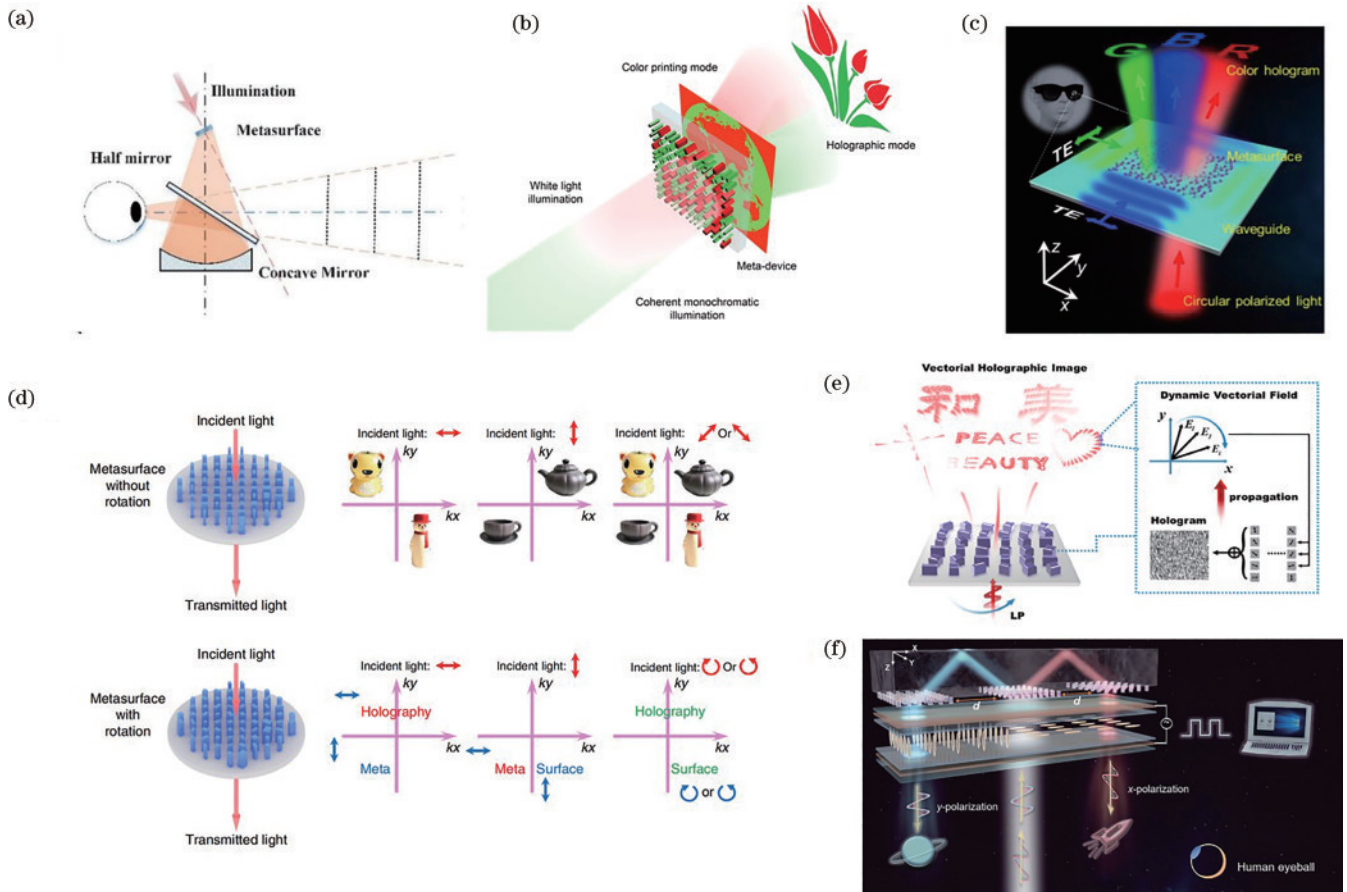


图 9 超表面全息。(a)3D 全息显示<sup>[55]</sup>;(b)双波长全息<sup>[56]</sup>;(c)片上全息复用<sup>[57]</sup>;(d)偏振复用全息<sup>[58]</sup>;(e)偏振动态调控<sup>[59]</sup>;(f)液晶动态调控<sup>[60]</sup>

Fig. 9 Metasurface holography. (a) 3D holographic display<sup>[55]</sup>; (b) dual-wavelength holography<sup>[56]</sup>; (c) on-chip holographic multiplexing<sup>[57]</sup>; (d) polarization multiplexing holography<sup>[58]</sup>; (e) polarization dynamic modulation<sup>[59]</sup>; (f) liquid crystal dynamic modulation<sup>[60]</sup>

除了通过增加信道来获得更高的信息容量,超表面还可以通过多种方式实现动态可调,为 AR 显示系统中虚拟信息的动态显示提供了可能的解决方案。2021 年,Zhang 等<sup>[59]</sup>通过超表面的共振响应和几何相位来同时调控光场的振幅、相位和偏振,如图 9(e)所示,该方法可以精确调控每一帧的空间相位和偏振分布,从而通过偏振旋转来实现动态可调。2022 年,Tang 等<sup>[60]</sup>提出了一种液晶驱动的超表面动态 AR 显示,如图 9(f)所示,通过调整液晶层上施加的电压,可以实现两个通道不同虚拟信息的显示,这种集成的系统可以主动切换两幅独立编码的全息图像,为 AR 眼镜的小型化、智能动态显示等提供了可行的途径。

随着对使用超表面进行 AR 显示的研究逐渐深

入,当前仍存在一些挑战:首先,亟需进一步提升超表面的信息容量及动态可调性能,通常超表面全息记录的虚拟信息是固定的,即使有复用方式和动态调控,但信息容量仍然较少且调谐性能还有待提升;其次,亟需解决显示色差问题,使用超透镜等代替传统光学透镜应用于 AR 显示系统时需要克服色差来实现全彩显示,随着超透镜技术的发展,消色差的方案也被不断提出,但仍然需要研究宽谱段、高效率、大面积、易加工的消色差超透镜;再者,大面积超表面的加工成本仍然较高,而纳米压印等技术的发展则有望解决这一问题。

## 4 结束语

AR 设备被认为是继手机之后的新一代移动信息



技术应用终端,随着信息时代的发展,这种可以同时获取现实信息和虚拟信息的设备必将渐渐成为主流发展方向。而微纳光学的持续发展为 AR 显示系统的发展提供了有力保证,从基于亚波长光栅的波导耦合器到基于超表面的集成式近眼显示系统,这些微纳光学元件让 AR 设备的体积更小,质量更轻,佩戴更舒适。

尽管微纳光学元件的发展为 AR 设备提供了多种解决方案,但需要面对微纳光学元件的设计难度大、加工成本高等问题。随着加工材料的多样化,加工条件的精细化,这些问题都有望得到解决,最终实现结构轻薄、功能多样的 AR 显示系统。

### 参 考 文 献

- [1] 黄进, 韩冬奇, 陈毅能, 等. 混合现实中的人机交互综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 869-880.  
Huang J, Han D Q, Chen Y N, et al. A survey on human-computer interaction in mixed reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 869-880.
- [2] 孔祥旭, 薛常喜. 基于双图像生成器的双焦面抬头显示系统光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1422003.  
Kong X X, Xue C X. Optical design of dual-focal-plane head-up display based on dual picture generation units[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1422003.
- [3] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. 8.4: *distinguished paper*: a full color eyewear display using holographic planar waveguides[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39(1): 89-92.
- [4] Sánchez-Postigo A, Ginel-Moreno P, Ortega-Moñux A, et al. Building high-performance integrated optical devices using subwavelength grating metamaterials-INVITED[J]. EPJ Web of Conferences, 2021, 255: 01001.
- [5] Halir R, Bock P J, Cheben P, et al. Waveguide sub-wavelength structures: a review of principles and applications [J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(1): 25-49.
- [6] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. Journal of the Society for Information Display, 2009, 17(3): 185.
- [7] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [8] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [9] Zhao J, Li X, Zhong L, et al. Calculation of photonic band-gap of one dimensional photonic crystal[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 183: 012018.
- [10] Chow E, Lin S Y, Johnson S G, et al. Three-dimensional control of light in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. Nature, 2000, 407(6807): 983-986.
- [11] Zhou L, Xu Y W, Tan S Y, et al. Simulation of amorphous silicon carbide photonic crystal absorption layer for solar cells[J]. Crystals, 2022, 12(5): 665.
- [12] Xu C, Huang S T, Yu Q, et al. Manipulating the orbital-angular-momentum correlation of entangled two-photon states in three-dimensional nonlinear photonic crystals[J]. Physical Review A, 2021, 104(6): 063716.
- [13] Zhang L, Mei S T, Huang K, et al. Advances in full control of electromagnetic waves with metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(6): 818-833.
- [14] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [15] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Metasurfaces: fundamentals and applications of metasurfaces[J]. Small Methods, 2017, 1(4): 20170041.
- [16] Ding F, Pors A, Bozhevolnyi S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. Reports on Progress in Physics, 2018, 81(2): 026401.
- [17] Chen S Q, Li Z, Yue B Z, et al. Phase manipulation of electromagnetic waves with metasurfaces and its applications in nanophotonics[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(13): 1800104.
- [18] Sung J, Lee G Y, Lee B. Progresses in the practical metasurface for holography and lens[J]. Nanophotonics, 2019, 8(10): 1701-1718.
- [19] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [20] Feng W B, Zhang J C, Wu Q F, et al. RGB achromatic metalens doublet for digital imaging[J]. Nano Letters, 2022, 22(10): 3969-3975.
- [21] Zhu W, Yang R S, Geng G Z, et al. Titanium dioxide metasurface manipulating high-efficiency and broadband photonic spin Hall effect in visible regime[J]. Nanophotonics, 2020, 9(14): 4327-4335.
- [22] Li X, Zhao R Z, Wei Q S, et al. Code division multiplexing inspired dynamic metasurface holography[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(35): 2103326.
- [23] Wan W W, Gao J, Yang X D. Metasurface holograms for holographic imaging[J]. Advanced Optical Materials, 2017, 5(21): 1700541.
- [24] Bao Y J, Yan J H, Yang X G, et al. Point-source geometric metasurface holography[J]. Nano Letters, 2021, 21(5): 2332-2338.
- [25] Xiong B, Xu Y H, Wang J N, et al. Realizing colorful holographic mimicry by metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2021, 33(21): e2005864.
- [26] Zhang T Y, Huang L L, Li X W, et al. High-efficiency broadband polarization converter based on  $\Omega$ -shaped metasurface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(45): 454001.
- [27] Zhao R Z, Huang L L, Tang C C, et al. Nanoscale polarization manipulation and encryption based on dielectric metasurfaces[J]. Advanced Optical Materials, 2018, 6(19): 1800490.
- [28] Xu Y H, Li Q, Zhang X Q, et al. Spin-decoupled multifunctional metasurface for asymmetric polarization generation[J]. ACS Photonics, 2019, 6(11): 2933-2941.
- [29] Mo W C, Wei X L, Wang K J, et al. Ultrathin flexible terahertz polarization converter based on metasurfaces[J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13621-13627.

- [30] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [31] 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.
- [32] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [33] 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.
- [34] Zhao M X, Chen M K, Zhuang Z P, et al. Phase characterisation of metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 52.
- [35] Lei S W, Zhang X, Zhu S Q, et al. Generation of Airy beam arrays in real and K spaces based on a dielectric metasurface[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12): 18781-18790.
- [36] Lin Z M, Li X W, Zhao R Z, et al. High-efficiency Bessel beam array generation by Huygens metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1079-1085.
- [37] Amitai Y, Friesem A A, Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(16): 3405-3416.
- [38] Gurwich I, Weiss V, Eisen L, et al. Design and experiments of planar optical light guides for virtual image displays[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, 5182: 212-221.
- [39] Eisen L, Golub M A, Friesem A A. Total internal reflection diffraction grating in conical mounting[J]. *Optics Communications*, 2006, 261(1): 13-18.
- [40] Ahn J, Park J. Optimal design of surface relief grating for high-resolution two-photon interference lithography[J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2022, 5(6): 2200080.
- [41] Shramkova O V, Drazic V, Varghese B, et al. High-uniformity dielectric U-shaped surface relief grating coupler for AR headsets[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2021, 11802: 118020D.
- [42] Lee H, Poutous M K, Brooks C. Surface-relief gratings with anti-reflective nanostructures for panchromatic astronomical low/medium/high resolution spectroscopic surveys[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2020, 11451: 1145140.
- [43] Piao J G, Li G, Piao M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(3): 242-248.
- [44] Zhang N N, Liu J, Han J, et al. Improved holographic waveguide display system[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3645-3649.
- [45] Shen Z W, Zhang Y N, Weng Y S, et al. Characterization and optimization of field of view in a holographic waveguide display[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 7000911.
- [46] Weng Y S, Xu D M, Zhang Y N, et al. Polarization volume grating with high efficiency and large diffraction angle[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17746-17759.
- [47] Weng Y S, Zhang Y N, Cui J Y, et al. Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5773-5776.
- [48] Yin K, Lee J, He Z Q, et al. Stretchable, flexible, and adherable polarization volume grating film for waveguide-based augmented reality displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(1): 232-237.
- [49] Yin K, Lin H Y, Wu S T. Chirped polarization volume grating for wide FOV and high-efficiency waveguide-based AR displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(4): 368-374.
- [50] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4562.
- [51] Avayu O, Ditcovski R, Ellenbogen T. Ultrathin full color visor with large field of view based on multilayered metasurface design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10676: 1067612.
- [52] Lan S F, Zhang X Y, Taghinejad M, et al. Metasurfaces for near-eye augmented reality[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(4): 864-870.
- [53] Li Z Y, Lin P, Huang Y W, et al. Meta-optics achieves RGB-achromatic focusing for virtual reality[J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabe4458.
- [54] 巴鹏飞, 李青芝, 伍景军, 等. 介质超透镜自动设计技术及软件研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0722001. Ba P F, Li Q Z, Wu J J, et al. Automatic design technology and software of dielectric metalens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0722001.
- [55] Song W T, Liang X N, Li S Q, et al. 3D holographic displays: large-scale Huygens' metasurfaces for holographic 3D near-eye displays[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(9): 2170047.
- [56] Wei Q S, Sain B, Wang Y T, et al. Simultaneous spectral and spatial modulation for color printing and holography using all-dielectric metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8964-8971.
- [57] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing light[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2270027.
- [58] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, et al. Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 95.
- [59] Zhang S F, Huang L L, Li X, et al. Dynamic display of full-stokes vectorial holography based on metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(6): 1746-1753.
- [60] Tang J, Wan S, Shi Y Y, et al. Dynamic augmented reality display by layer-folded metasurface via electrical-driven liquid crystal[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(12): 2270045.
- [61] 许富洋, 杨鑫, 姚建云, 等. 高分辨率多视点动态全息 3D 显示[J]. *中国激光*, 2021, 48(1): 0109001. Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multiview dynamic holographic 3D display[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(1): 0109001.