

# 基于消色差超构光栅的 AR 显示光波导

何书宸<sup>1,2</sup>, 魏志伟<sup>1,2</sup>, 葛睿<sup>1,2</sup>, 陈玉萍<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;

<sup>2</sup>上海交通大学物理与天文学院, 上海 200240

**摘要** 增强现实(AR)技术将计算机生成的虚拟信息融入现实世界,可为使用者提供沉浸式的体验,被认为是下一代显示技术,但依旧存在一些问题。针对 AR 显示系统中色差、色彩均匀性、光场均匀性等问题,设计一种基于消色差超构光栅的光波导解决方案。仿真超构光栅的耦合响应,在单层超构光栅的情况下,实现了三种波长光(473, 532, 620 nm)相同角度入射和相同角度出射,消除了色差。采用双层超构光栅,在实现消色差的基础上,进一步实现了对不同波长光的强度比例可调和耦合效率可调,改善了色彩均匀度,有望用于扩瞳。所提基于消色差超构光栅的 AR 显示光波导设计有望为头戴式 AR 显示设备提供全新设计思路。

**关键词** 增强现实; 超构光栅; 消色差; 色彩均匀性

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011016

## Augmented Reality Display Optical Waveguide Based on Achromatic Metagrating

He Shuchen<sup>1,2</sup>, Wei Zhiwei<sup>1,2</sup>, Ge Rui<sup>1,2</sup>, Chen Yuping<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup>School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** Augmented reality (AR) technology integrates computer-generated virtual information into the real world, providing users with an immersive experience. AR technology is considered next-generation display technology; however, there are issues. In this paper, an optical waveguide design based on achromatic metagratings is proposed to solve the problems of chromatic aberration, color uniformity, and light field uniformity in the AR display system. The coupling response of metagratings is simulated. In the case of a single-layer metagrating, the light with three wavelengths (473, 532, and 620 nm) is incident and emitted at the same angle, eliminating chromatic aberration. Based on this, we designed a double-layer metagrating. With the double-layer metagrating, the intensity ratio and coupling efficiency of light with different wavelengths can be adjusted, and color uniformity can be improved, which is expected to be used for pupil expansion. The proposed AR display optical waveguide design based on achromatic metagratings will offer a new design idea for AR head-mounted displays.

**Key words** augmented reality; metagrating; achromatism; color uniformity

## 1 引言

超表面作为新型亚波长人工微结构平面光学器件,可以在厚度与波长相当或小于光波长情况下,通过调控结构的几何形状、尺寸、排列、朝向产生突变的相位、振幅和偏振,从而对光波波前进行任意整形,具有前所未有的灵活性<sup>[1-9]</sup>,这是基于微型光散射体的几何

相位<sup>[10-11]</sup>、耦合模式<sup>[12-13]</sup>或偶极共振<sup>[14-16]</sup>实现的。通过二维散射体的特殊排列,研究人员制备了各种功能的超表面,包括聚焦、偏振控制和光束转向<sup>[17-22]</sup>等。超表面具备取代传统透镜和镜面的能力,因此也有望用于增强现实(AR)显示。

AR 是一种将计算机生成的虚拟信息融入现实世界的技术,可为使用者提供沉浸式的体验,其中的关键

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-26; 录用日期: 2022-08-31

基金项目: 国家重点科技攻关项目(2019YFB203501)、国家自然科学基金(12134009, 91950107)、上海交通大学前瞻基金(21X010200828)

通信作者: \*ypchen@sju.edu.cn

技术是能够将生成的图像漂浮到真实场景中所需的位置。为此,人们提出了各种透明目镜进行近眼显示,如基于球面镜、自由曲面光学、衍射光学元件和全息光学元件的目镜<sup>[23-35]</sup>。为了实现全彩显示,消除显示过程中的色彩,提高视觉体验,消色差光波导也受到了广泛关注。无论是利用半透半反镜阵列作为耦出结构的几何波导<sup>[36]</sup>或是多路复用的光聚合物全息光学元件<sup>[36-37]</sup>,在成本控制、加工难度等都颇具挑战。超透镜作为超表面的一种,可用于消色差<sup>[37-43]</sup>,同时超表面也有望实现消色差的超构光栅<sup>[38-39]</sup>,原理与消色差超透镜相同,然而目前,消色差超构光栅仍处于起步阶段<sup>[36]</sup>。

本文设计了一种消色差超构光栅,提出一种全新的消色差衍射光波导方案,在出瞳时没有高衍射级次,消除了高衍射级引起的鬼像。在理论模拟中,证实所提超构光栅可使不同波长的光以相同角度入射和相同角度出射,克服了对于传统的 AR 显示光波导中采用的耦出光栅,当不同波长的光以相同角度入射,出射角往往不同的局限性。在进一步的研究中,通过调控亚波长二维表面几何结构,可以改变不同波长的耦合效率,进而实现三种波长光出射强度相近,实现了较好的色彩均匀度,有望实现大尺寸的扩瞳。超构光栅凭借优良调控性能,在 AR 光波导和显示中具有巨大的发展前景,为下一代头戴式 AR 显示设备提供全新设计思路。

## 2 结构原理

消色差超构光栅原理与超透镜原理相同<sup>[36,38-39]</sup>,将

亚波长谐振器密集排列,利用共振引入突变相移,使得塑造任意的散射波前成为可能。考虑平行光经过超表面,再到特定位置,总共积累的相位  $\varphi_i(r, \lambda)$  由两部分构成:

$$\varphi_i(r, \lambda) = \varphi_m(r, \lambda) + \varphi_p(r, \lambda), \quad (1)$$

式中:  $\varphi_m(r, \lambda)$  表示经过超表面上  $r$  处,由于超表面引起的相移,不同超表面结构引起的不同共振特性和不同相移。 $\varphi_p(r, \lambda)$  表示传播相位之和,可表示为

$$\varphi_p(r, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} l(r, \lambda), \quad (2)$$

式中:  $l(r)$  表示超表面与特定位置之间的总光程。通过调控超表面的结构,有

$$\varphi_m(r, \lambda) = -\frac{2\pi}{\lambda} l(r, \lambda), \quad (3)$$

从而使得不同波长入射光经过超表面后的出射方向相同,消除了传统耦出光栅引起的色散。

超构光栅结构如图 1 所示。其中单层超构光栅结构如图 1(a) 所示,单层超构光栅结构单元为耦合矩形介质谐振器。结构单元沿  $X$  方向周期性重复排列,形成超构光栅,通过调节矩形宽度  $W_1$  和  $W_2$ 、两矩形间距  $W_4$ 、结构单元总长度  $W_3$ 、高度  $H_1$ ,从而调节超构光栅的光响应,实现消色差。应注意图 1 中衬底和光栅结构为同一种材料,但设置了不同的颜色,以获得更好的立体观感效果。光波导结构示意图如图 2 所示,其中大面积阴影部分代表波导内填充的大折射率材料(折射率  $n_c \geq 1.41$ ),以实现波导内光场全反射( $n_0 = 1$ )。光波导耦入部分采用平行光垂直入射  $45^\circ$

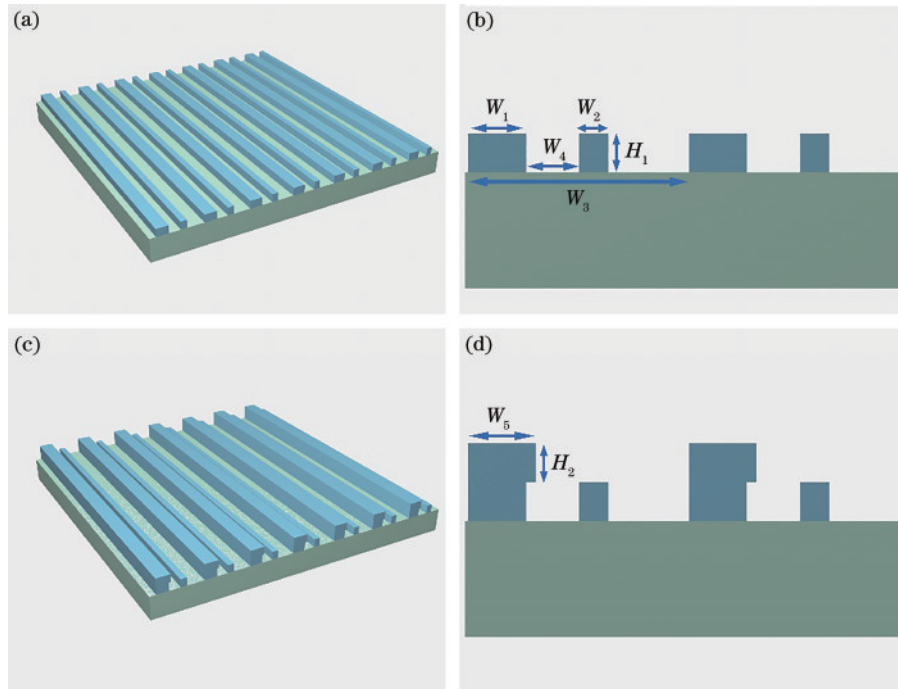


图 1 超构光栅结构示意图。(a)(c)单层和双层超构光栅结构示意图;(b)(d)单层和双层超构光栅结构单元的截面图

Fig. 1 Structure of metagrating. (a)(c) Structure of single-layer and double-layer metagratings; (b)(d) cross section of the structural elements of the single-layer and double-layer metagratings



图 2 光波导结构示意图

Fig. 2 Structure of optical waveguide

切角的波导,保证三种波长的光皆在波导中以 45°全反射,最后在耦出端经超构光栅耦出。

### 3 仿真结果

#### 3.1 单层超构光栅仿真结果

利用时域有限差分(FDTD)法对结构进行优化,设计消色差超构光栅。仿真条件如下:仿真维度设置为二维;考虑光源为平面波光源,包含三种待测波长,分别为 620 nm 红光、532 nm 绿光、473 nm 蓝光,偏振态为 p 偏振;波导与超构光栅使用相同的材料 PIXNIL ST2,对应波长的折射率分别为 1.872、1.895、1.924。平行光从波导中以 45°斜入射具有 300 个结构单元的超构光栅,然后出射到空气中,结构单元沿 X 方向重复排列,第一个结构单元左边缘 X 设置为 0,上边缘 Y 设置为 0。边界条件均设置为完美匹配层。固定  $W_1 = 210$  nm、 $W_2 = 100$  nm、 $W_4 = 40$  nm、 $H_1 = 400$  nm,改变结构单元的周期  $W_3$ 。

图 3 展示了超构光栅结构单元周期分别为 368, 378, 388, 398 nm 时距离超构光栅 18 mm 处 ( $Y = -18$  mm, 模拟 AR 近眼显示部分到人眼的距离),沿 X 方向的三种波长光的光场分布。图 3 蓝色、绿色、红色虚线分别对应周期为 368 nm 时蓝光、绿光、红光的光场分布,蓝色、绿色、红色实线分别对应周期为 378 nm 时蓝光、绿光、红光的光场分布,蓝色、绿色、红色点线对应周期为 388 nm 时蓝光、绿光、红光的光场分布,蓝色、绿色、红色点虚线对应周期为 398 nm 时蓝光、绿光、红光的光场分布。周期为 398 nm 时,蓝光、绿光、红光波峰明显

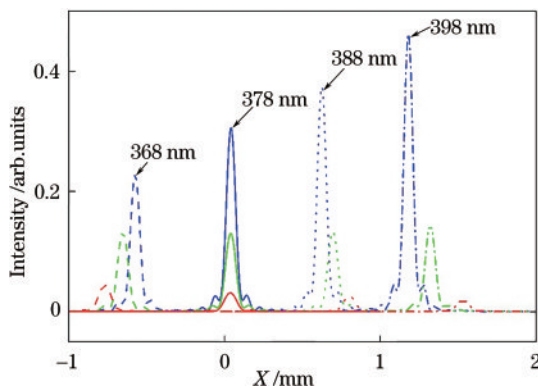


图 3 不同周期  $W_3$  下距超构光栅 18 mm 远处的光场分布

Fig. 3 Light field distribution at 18 mm away from the metagrating under different period  $W_3$

分离,成像在  $X > 1$  mm 处,且蓝光、绿光、红光距离  $X = 0$  mm 处越来越远;周期为 388 nm 时,蓝光、绿光、红光波峰依旧分离,但相互之间的差距有所减小,成像在  $0 \text{ mm} < X < 1 \text{ mm}$  范围;周期为 378 nm 时,蓝光、绿光、红光波峰位置重合,实现了消色差,成像在  $X = 0$  mm 附近;当继续减小周期至 368 nm 时,蓝光、绿光、红光波峰分离,成像在  $-1 \text{ mm} < X < 0$  mm 范围,由于超构光栅沿 X 方向的最小位置为 0 mm,所以此处入射光与出射光在法线同侧,实现了反常折射。同时耦出光栅如果存在高衍射级,容易导致鬼像,本结构可实现只有一个衍射级次,消除了高衍射级引起的鬼像。在周期为 378 nm、45°斜入射的情况下,473 nm 蓝光、532 nm 绿光和 620 nm 红光均可实现 0°附近出射,远场分布如图 4 所示。图 4 中的插图为 0°附近的放大图,通过虚线可以发现,三种波长的光波峰在 0°附近重合,实现了消色差。

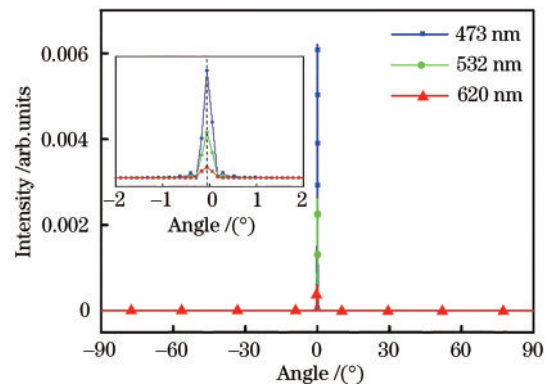


图 4 周期  $W_3$  为 378 nm 时远场强度分布

Fig. 4 Far-field intensity distribution at  $W_3$  of 378 nm

#### 3.2 双层超构光栅仿真结果

不同波长的光耦合效率可能差别巨大,导致人眼看到的不同波长的光强弱不一,色彩均匀度差,影响使用者的视觉体验。单层超构光栅虽然可以实现消色差,但蓝光、红光、绿光的强度差别依旧较大,蓝光明显强于绿光和红光,色彩均匀度有待提高。因此,提出一种双层超构光栅,在实现消色差的同时还可以实现色彩均匀度的改善,如图 1(c)所示,在单层超构光栅的基础上增加一层,矩形宽度为  $W_5$ ,高度为  $H_2$ 。固定  $W_1 = 210$  nm、 $W_2 = 100$  nm、 $W_4 = 40$  nm、 $H_1 = 400$  nm,通过改变第二层矩形的宽度  $W_5$ ,改变超构光栅对不同波长光的响应,从而改变不同波长光的光强比例,改善色彩均匀度。第一层结构参数与消色差时参数一致,第二层矩形高度  $H_2$  为 400 nm,左边缘与下方第一层矩形对齐。宽度  $W_5$  分别为 249, 219, 209, 150 nm 时的光场分布如图 5 所示。 $W_5$  为 249 nm 时,蓝光明显强于红光,红光略强于绿光,三种波长光波峰位置重合,很好地消除了色差; $W_5$  为 219 nm 时,蓝光强于红光,红光与绿光光场分布基本重合,色彩均匀度较

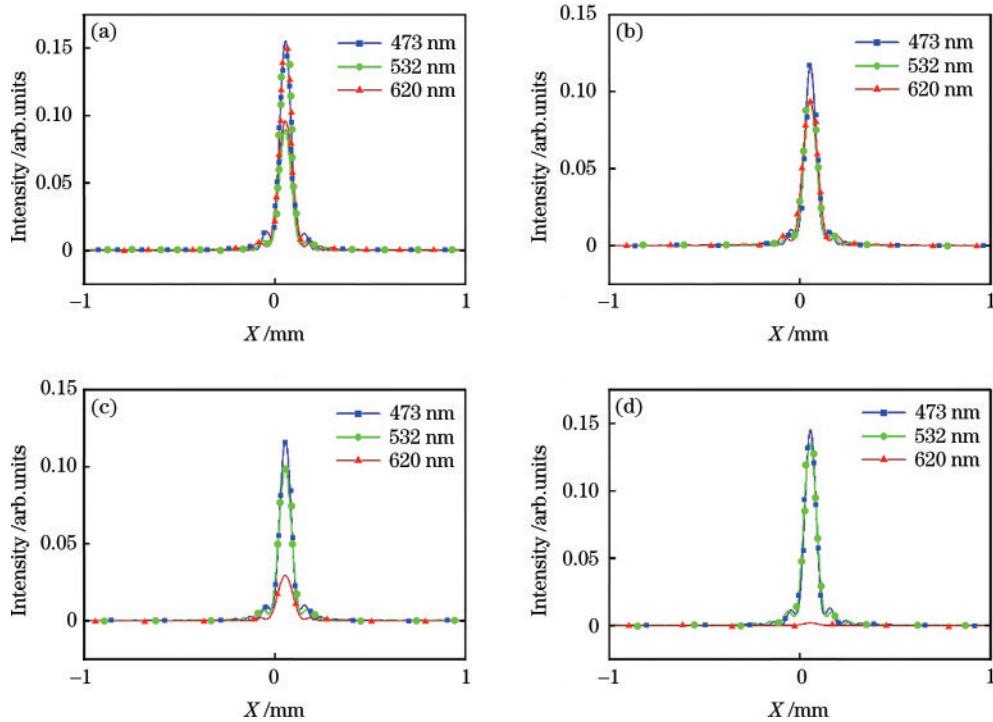


图 5 双层超构光栅在不同矩形宽度  $W_5$  下的光场分布。(a)~(d) 宽度  $W_5$  分别为 249, 219, 209, 150 nm 时的光场分布  
Fig. 5 Light field distribution of double-layer metagratings at different rectangular width  $W_5$ . (a)–(d) Light field distribution at  $W_5$  of 249, 219, 209, 150 nm, respectively

好, 三种波长光波峰位置重合;  $W_5$  为 209 nm 时, 蓝光略强于绿光, 明显强于红光, 三种波长光波峰位置重合;  $W_5$  为 150 nm 时, 蓝光略强于绿光, 红光强度基本为 0。

在实际运用中, 为了提高观看体验, 往往需要扩瞳, 但随着光逐渐从波导中耦出, 剩余的光越来越弱, 容易导致佩戴 AR 设备者观察到越边缘的地方光越弱, 光场均匀性不好, 因此往往需要调节耦出效率。通过调节所设计超构光栅的高度, 可以调节超构光栅的透射率, 有望实现扩瞳, 改善光场均匀性。固定  $W_1 = 210$  nm,  $W_2 = 100$  nm,  $W_4 = 40$  nm,  $H_1 = 400$  nm, 第二层矩形宽度  $W_5$  为 219 nm 时, 高度  $H_2$  分别为 0, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 nm 时三种波长光的透射率如图 6 所示。当  $H_2$  从 0 nm 变为 50 nm, 蓝光透射率增大, 50 nm 到 250 nm, 透射率有变小的趋势, 250 nm 到 400 nm, 透射率有增加的趋势; 当  $H_2$  从 0 nm 变为 100 nm, 绿光透射率呈现减小趋势, 100 nm 到 250 nm, 透射率基本不变, 250 nm 到 400 nm, 透射率有增加的趋势; 当  $H_2$  从 0 nm 变为 50 nm, 红光透射率呈现减小趋势, 100 nm 到 250 nm, 透射率呈现增加趋势, 250 nm 到 300 nm, 透射率基本不变, 300 nm 到 400 nm, 透射率呈现减小趋势。可见超构光栅的透射率, 即耦出效率可调, 在实际运用中可以通过改变高度  $H_2$  调节耦合效率, 提高不同位置的光场均匀度, 有望用于扩瞳。

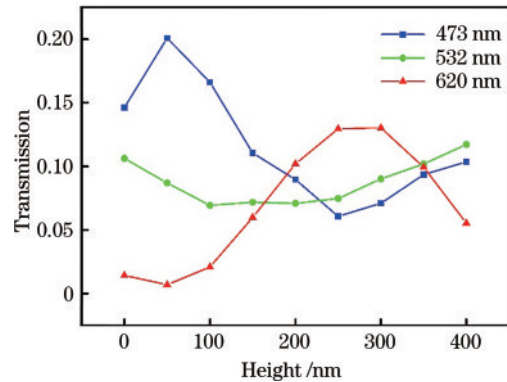


图 6 双层超构光栅矩形高度  $H_2$  与透射率的关系  
Fig. 6 Relationship between rectangular height  $H_2$  and transmittance of double-layer metagrating

## 4 结 论

理论上提出了一种基于消色差超构光栅的 AR 显示光波导设计方案, 通过单层波导即可实现对三个波长光的消色差, 同时不存在高衍射级, 可提高色彩均匀性, 证明了耦出效率可调。波导耦入端采用几何光学设计, 耦出端使用超构光栅, 平行光垂直入射  $45^\circ$  切角的波导, 经过全反射后  $45^\circ$  斜入射超构光栅,  $0^\circ$  附近出射, 通过单层波导实现了三个波长光 (473, 532, 620 nm) 消色差; 同时不存在高衍射级, 消除了高衍射级引起的鬼像。另外, 通过设计双层超构光栅, 实现了对不同波长光的光强比例调节, 并在第二层高度为

400 nm、宽度为 219 nm 时,明显地改善色彩均匀度。通过改变超构光栅高度,实现了耦出效率可调,超构光栅可用于改善不同位置的光场均匀性,有望用于扩瞳。随着 AR 技术在各个领域中的广泛应用,降低功耗与成本、提高视觉体验与成像质量尤为重要。这里所做的研究在一定程度上揭示了 AR 波导与显示的发展方向,相较于传统的波导显示方案,具有不可比拟的优越性,为下一代头戴式 AR 显示设备提供全新设计思路。与此同时,随着超表面加工制造工艺与计算仿真手段的发展与突破,加工大尺寸、高精度、普适且可控的超表面光学元件变得可能,超构材料在光场调控中所具备的优势也将进一步得到凸显,有望实现 AR 显示技术的轻量化与市场化。

### 参 考 文 献

- [1] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6125): 1232009.
- [2] Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2016, 79(7): 076401.
- [3] 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.
- [4] Li Z H, Cheng C F, Liu H P, et al. Experimental generation of Kagome lattices using metasurface of integrated convex lens[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 012201.
- [5] Huang J X, Fu T, Li H O, et al. A reconfigurable terahertz polarization converter based on metal-graphene hybrid metasurface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(1): 013102.
- [6] Li L, Yuan Q, Chen R, et al. Chromatic dispersion manipulation based on metasurface devices in the mid-infrared region[J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(8): 082401.
- [7] Jia Y C, Ren Y Y, Zhao X J, et al. Surface lattice resonances in dielectric metasurfaces for enhanced light-matter interaction[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(6): 060013.
- [8] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, et al. Ultrafast control of slow light in THz electromagnetically induced transparency metasurfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(7): 073602.
- [9] Shi Y Y, Wan C W, Dai C J, et al. Augmented reality enabled by on-chip meta-holography multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2100638.
- [10] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1141-1143.
- [11] Lin D M, Fan P Y, Hasman E, et al. Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 298-302.
- [12] 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.
- [13] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.
- [14] Monticone F, Estakhri N M, Alù A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(20): 203903.
- [15] Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(19): 197401.
- [16] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [17] Chen X Z, Huang L L, Mühlenbernd H, et al. Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1198.
- [18] Yin X B, Ye Z L, Rho J, et al. Photonic spin Hall effect at metasurfaces[J]. *Science*, 2013, 339(6126): 1405-1407.
- [19] Ni X J, Wong Z J, Mrejen M, et al. An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, 349(6254): 1310-1314.
- [20] Estakhri N M, Alù A. Recent progress in gradient metasurfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 33(2): A21-A30.
- [21] Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. *Small Methods*, 2017, 1(4): 1600064.
- [22] Li K, Rao Y, Chase C, et al. Monolithic high-contrast metastructure for beam-shaping VCSELs[J]. *Optica*, 2018, 5(1): 10-13.
- [23] Azuma R, Baillet Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(6): 34-47.
- [24] Ohta Y, Tamura H. Mixed reality: merging real and virtual worlds[M]. Heidelberg: Springer, 1999.
- [25] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12954.
- [26] Lee S, Jang C, Moon S, et al. Additive light field displays: realization of augmented reality with holographic optical elements[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 60.
- [27] Hong K, Yeom J, Jang C, et al. Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 127-130.
- [28] Hong J Y, Park S G, Lee C K, et al. See-through multi-projection three-dimensional display using transparent anisotropic diffuser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14138-14151.
- [29] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2098-2100.
- [30] Jang C, Bang K, Moon S, et al. Retinal 3D: augmented

- reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 190.
- [31] Lee S, Lee B, Cho J, et al. Analysis and implementation of hologram lenses for see-through head-mounted display[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 82-85.
- [32] Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2006, 14(5): 467-475.
- [33] Hong J Y, Lee C K, Lee S, et al. See-through optical combiner for augmented reality head-mounted display: index-matched anisotropic crystal lens[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 2753.
- [34] Wang Q W, Cheng D W, Hou Q C, et al. Stray light and tolerance analysis of an ultrathin waveguide display [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8354-8362.
- [35] Utsugi T, Sasaki M, Ono K, et al. Volume holographic waveguide using multiplex recording for head-mounted display[J]. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2020, 8(4): 238-244.
- [36] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 216.
- [37] 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.
- [38] Aieta F, Kats M A, Genevet P, et al. Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation [J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1342-1345.
- [39] Arbabi E, Arbabi A, Kamali S M, et al. Controlling the sign of chromatic dispersion in diffractive optics with dielectric metasurfaces[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 625-632.
- [40] Chen B H, Wu P C, Su V C, et al. GaN metalens for pixel-level full-color routing at visible light[J]. *Nano Letters*, 2017, 17(10): 6345-6352.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Lee G Y, Hong J Y, Hwang S, et al. Metasurface eyepiece for augmented reality[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4562.