

新材料器件为全息显示带来的新机遇

彭玮婷 刘娟 李昕 薛高磊 韩剑 胡滨 王涌天

Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display

Peng Wei-Ting Liu Juan Li Xin Xue Gao-Lei Han Jian Hu Bin Wang Yong-Tian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024213 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172026

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172026>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[三维物体多重菲涅耳计算全息水印与无干扰可控重建方法](#)

Multiple Fresnel computer-generated hologram watermark of three-dimensional object and its adjustable reconstruction without interference

物理学报.2017, 66(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234202>

[空间盘绕型声学超材料的亚波长拓扑谷自旋态](#)

Subwavelength topological valley-spin states in the space-coiling acoustic metamaterials

物理学报.2017, 66(22): 228101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.228101>

[无衍射特殊光束的产生与三维表征](#)

Generation and three-dimensional characterization of complex nondiffracting optical beams

物理学报.2015, 64(24): 244203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244203>

[数字显微全息中记录参数对颗粒测量影响的数值模拟](#)

Influence of recording parameters on particle field measurement by digital holographic microscopy: a numerical investigation

物理学报.2013, 62(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204203>

[数字全息周期像的产生机理及在抑制零级衍射上的应用](#)

The production mechanism of image periodicity in digital holography and its application in zero-order noise suppression

物理学报.2013, 62(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.094207>

综述

新材料器件为全息显示带来的新机遇*

彭玮婷¹⁾ 刘娟^{1)†} 李昕¹⁾²⁾ 薛高磊¹⁾ 韩剑¹⁾³⁾ 胡滨¹⁾ 王涌天¹⁾

1) (北京理工大学光电学院, 北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081)

2) (南洋理工大学电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

3) (北京控制与电子技术研究所, 信息系统工程重点实验室, 北京 100038)

(2017年9月13日收到; 2017年10月25日收到修改稿)

三维显示是人类获取身临其境视觉信息的有效途径, 其中全息技术能够提供人眼所需的全部深度信息, 被认为是理想的三维显示方式. 然而受目前显示器件的限制, 如可刷新调制器件的时间-空间(时空)带宽积受限、海量数据云处理速率限制、图像质量不高的问题等, 全息显示技术的发展进入了瓶颈期. 为了提高显示质量、扩大时空带宽积、提升系统性能, 需要发展崭新的全息显示器件, 从根本上解决目前遇到的问题. 超颖材料、超构表面以及二维材料等诸多新材料的涌现为全息显示带来新的机遇. 超颖材料(表面)通过特殊设计, 利用远小于波长的超构单元实现对波前各向同性或各向异性的振幅与相位的特异调控, 进而将全息信息映射到超颖材料(表面)全息显示器件上, 通过调控光波实现各种显示. 发展可刷新的超构(表面、二维)材料并应用于动态全息显示中是未来的重要方向. 虽然现有的新颖器件还面临着各种问题, 但它们可为全息显示的发展提供潜在的可行性和新的视角与发展动力.

关键词: 全息显示, 新材料器件, 超颖材料与超构表面

PACS: 42.40.Jv, 81.05.Xj, 78.67.Wj

DOI: 10.7498/aps.67.20172026

1 引言

1.1 全息显示

视觉是人类获取外界信息的首要来源, 为了获得更多、更丰富的视觉信息, 研究者在显示领域投入了大量的精力, 使得显示技术成为光学领域中最重要研究方向之一, 也使得显示产业成为信息领域重要的支柱型产业. 随着信息时代的高速发展, 人们对信息显示的要求日益提升, 具有多维度的三维显示技术因其能够构建真实或者虚拟的三维场景使人身临其境, 并能广泛应用于科研教育、卫生医疗、文化娱乐、工业设计、国防军事等诸多领域, 成为目前的研究热点. 另一方面, 近年来近眼显示系统(near-eye display, NED)作为一种头戴式

显示(head-mounted display, HMD)系统^[1,2], 因其能够将虚拟场景信息与实际场景相互融合实现混合现实(mixed reality)显示成像而受到了越来越多的关注与研究. 但是目前普遍的商用化显示系统无法满足人们所需的重量轻、体积小、功能强等使用要求, 同时现有商品化的三维显示方案仅能满足人眼观察三维场景时所需的部分生理和心理深度暗示, 其中某些暗示之间的矛盾导致在长时间观看时引起视疲劳现象^[3].

全息技术是基于光波波前记录与再现的技术, 这种技术能够有效重建出目标光波的场分布而实现图像深度信息重建, 在原理上具有其他显示技术无法比拟的优势. 全息投影显示利用可刷新的光电器件作为显示调制器件, 能够有效提高系统的光能利用率; 全息三维显示通过重建目标场景图像的

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA015905)和国家自然科学基金(批准号: 61575024, 61235002, 61420106014)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: juanliu@bit.edu.cn

物光波信息,从原理上避免了人眼观察时产生深度暗示矛盾,被认为是终极的三维显示方案;另一方面,利用全息原理可以设计加工出各种轻量化和小型化的高性能光学元件,如全息光学元件,这些光学元件还具有透射率高、加工成本低、受使用环境影响小等特点.由于这些优势,全息显示技术被认为是最具潜力的一种显示技术.

全息光电元器件^[4-13]包括实现成像作用的全息元件以及实现任意波前调控的空间光调制器(spatial light modulator, SLM)等.现有的全息显示器件依然存在着诸多问题,制约了全息显示系统的性能,使其尚无法满足实际需求.一方面,全息显示质量受到可刷新调制器件的时间-空间(时空)带宽积的限制.空间光调制器能通过光写入(寻址)或电写入(寻址)^[14]方式对调制器像素单元加载数据而形成二维光学信息分布,通过对目标波前的干涉记录与衍射重建实现对入射光波的调控从而用于全息成像.传统空间光调制器像素单元尺寸相对于光波长大很多,现有的空间光调制器最小像素尺寸约为 $3.74\ \mu\text{m}$,因而视场角相对较小,导致对显示物体大小及分辨率产生一定的限制.同时,空间光调制器写入系统的性能^[15]影响图像刷新速率,目前最大刷新速率为 $60\ \text{Hz}$,从而对动态全息显示的发展带来影响.另一方面,现有全息显示器件限制了显示图像质量.作为一种色散器件,全息光学元件在全息波导显示系统中会导致耦合输入光波产生严重的色散现象,因而在实现彩色显示进行多波长配色的研究过程中,针对全敏材料的透光率不足有了多种改进方案^[13-16],但在效率、消色差效果等问题上依然难以满足要求.此外,作为成像器件的空间光调制器各像素之间存在不可调制区域,其形成的“死区”会造成固定的背景噪声^[17].对于可调制因素来说,尽管不同类型的空间光调制器具有不同的调控曲线(operating curves)^[18],但它们均无法实现同时、独立、精确地调控入射光波的振幅与相位,从而在一定程度上限制了真三维全息显示.

新材料包含超颖材料(metamaterial)、超构表面(metasurface)、二维材料(2D material)等新材料,它们的组成单元——超构原子(meta-atoms)是具有亚波长尺寸的像素单元,其单元尺度相近于光波长,甚至可达到小于 $200\ \text{nm}$ 的长度.相比于传统空间光调制器最小 $3.74\ \mu\text{m}$ 的像素单元尺度,在

其可加载信息密度、成像视场角等方面,都有着极大的改善,利用这个特性,可将新材料运用于全息显示中,能够获得更大的视场角和更高分辨率的再现像,提高显示的空间带宽积,从而提升全息显示图像的质量.同时,通过对超构原子的结构及空间位置等参数进行设计,能实现对入射光波振幅和相位信息的调控,从而在很大程度上增加了全息显示的可调控性.基于新材料在全息显示中的优良特性,研究人员提出了各种基于新材料的波前调制器件,例如利用等离子金属光栅构建彩色全息显示器件^[19].自此,以超颖材料、超构表面、二维材料等新材料为基础研制的新型全息显示器件,因其新颖的特性为全息显示带来了新的机遇与发展方向.

1.2 新材料与器件

超构表面是一种新颖的人工材料^[20-22],由特殊设计、加工而得到的特征尺寸接近或小于波长的亚波长超构原子^[23]构成,可根据附加在超构原子上的特异电磁特性对电磁波进行调控,从而实现对光波的操作.要实现这种操作,需通过对超构原子的结构参数,包括超构原子的结构、空间位置关系等进行优化设计,从而有效地实现对器件介电常数与电导率参数的控制,进而形成针对特定波长或者特定波长范围内电磁波谐振响应强度与相位延迟的操作,实现对入射光波的振幅调控和相位调控.2011年,哈佛大学Capasso等^[24]通过这种相位延迟的调控方式,获得了对入射光波波前的调制作用而实现了对入射光的方向偏折,如图1所示.此后,超构原子的这一调控特性被广泛应用于实现多种具有特殊功能的光学元器件^[25-29].

除了结构参数外,超构原子本身的材料同样影响其对电磁响应的程度.金属材料是最早用作构建超颖材料和超构表面材料,但受限于金属的损耗特性,这类超构原子转换效率较低.而通过改变金属超构原子的结构、入射光方向^[30],或改变超构原子的材质,选用电介质材料构建超构原子等^[31-34],能实现对其转换效率的提升.而相比于金属材料,电介质材料本身的电磁响应相对较弱,基于此原理的电介质材料超构原子利用重叠的电共振与磁共振模式实现亚波长量级超构原子调制单元,但部分电介质材料超构原子,例如基于波导传输模式的电介质材料超构原子往往具有较大的厚度,需要波长量级的厚度,因此在加工方面有一定的限制.

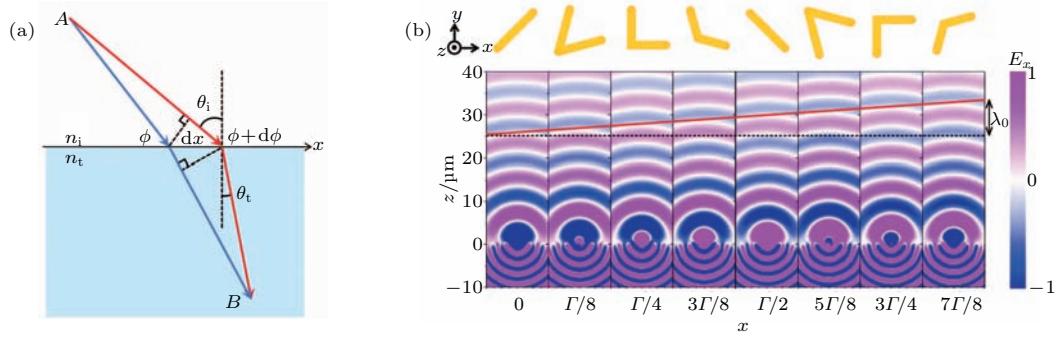


图1 新材料实现波前调制基本原理图 (a) 相位延迟原理; (b) 新材料波前调制原理示意图 [24]

Fig. 1. Schematics used to realize the wavefront control by the metamaterial: (a) Schematics of the phase delay; (b) schematics of the wavefront control [24].

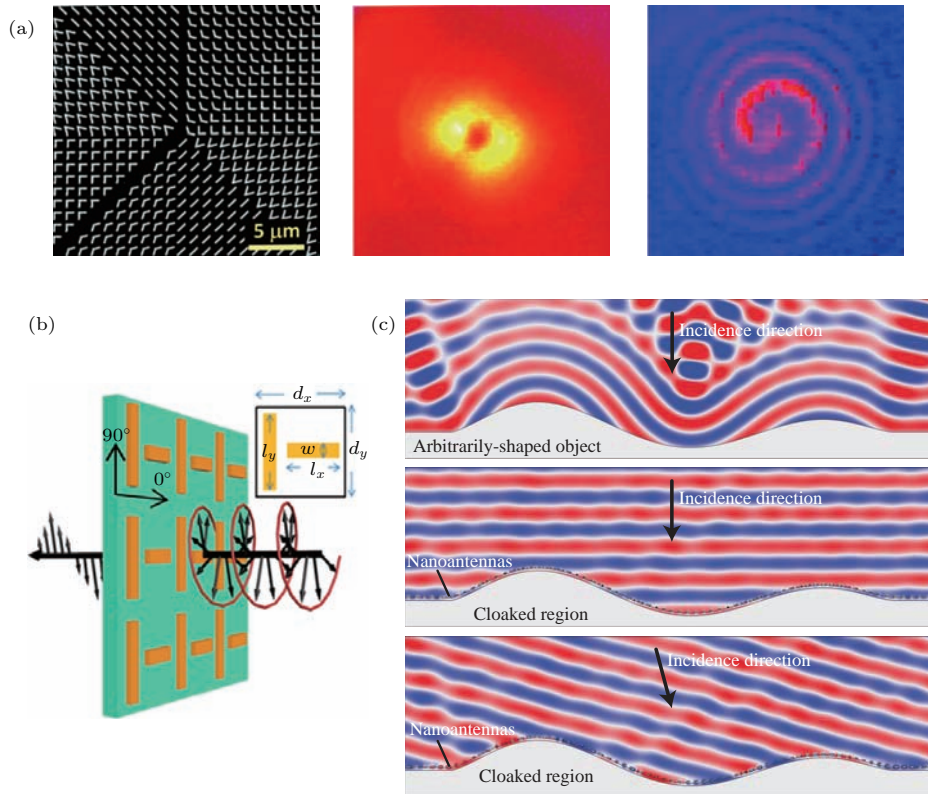


图2 新材料的几个应用 (a) 涡旋光束 [24]; (b) 1/4波片的超颖表面 [41]; (c) “隐身斗篷” [44]

Fig. 2. Some popular applications of metamaterial: (a) An optical vortex created by the metasurface [24]; (b) metasurface of quarter-wave plate [41]; (c) an ultrathin meta surface of invisibility skin cloak for visible light [44].

超颖材料往往具有多层结构, 形成三维单元分布 [20,21], 通过对超构原子的参数进行设计, 使其同时具有负磁导率以及负介电常数, 能构建出负折射率超颖材料 [20]. 这样的超颖材料被应用于实现各种传统光学无法实现的特异功能 [23-29]. 同时超构表面由单层超构原子构成, 加工更简便, 设计更灵活, 具有对光波特异调制的性质, 被广泛应用于实现异常光的调控中, 例如能产生各种不同的涡

旋光束与矢量光束 (图 2(a)) [35-38]、应用于各种光子自旋现象 [39,40]、实现各种不同的偏振转换器件 (图 2(b)) [41,42]、形成光镊以实现了对微小颗粒或细胞的操控 [43]、构建超薄的“隐身斗篷”(图 2(c)) [44]、实现不同的逻辑运算 [45] 等. 同时, 在非线条件下, 超构表面也有着不同的电磁响应特性 [46,47].

其他新材料也因其优异的电磁响应受到研究者的广泛关注. 如二维材料作为新材料的一

类, 其厚度仅为纳米量级, 在物理特性上呈现出普通三维材料所不具备的性质^[48,49]. 石墨烯是目前最受关注的二维材料之一, 它是由单层碳原子紧密堆积成二维蜂窝状晶体结构的一种新型碳质材料, 保持了近乎完美的晶体结构和优异的晶体学性质, 蕴含了丰富而新奇的物理现象^[50]. 石墨烯氧化物也是一种性能优异的新型碳材料, 其具有较高的表面积和丰富的表面官能团, 容易在水溶液中分散, 形成单个小片段, 而氧化石墨烯复合材料更是具有广泛的应用领域. 利用氧化石墨烯复合材料构建的光学器件, 能够在实现光学调控特性的同时保证器件尺寸远远小于波长, 这是传统的全息显示器件无法实现的^[51]. 此外, 处于研究前沿的拓扑绝缘体材料也被应用于新颖器件的研制中^[52]. 拓扑绝缘体是一种不同于金属和绝缘体的全新物态^[53], 其最直观的性质就是材料内部为绝缘体, 而表面却能表现出“金属”的特性. 这种内部与表面的性质差异使其能够有效地控制电磁场沿各个方向的传播, 从而实现特异电磁调控. 同样, 利用拓扑绝缘体的电磁特性, 能够制造出包括光隔离器在内的多种光学器件^[54].

由此可见, 新材料通过对纳米尺度像素单元结构及材料的设计, 能实现对入射光波前的良好控制. 而全息重建作为超构表面中一个重要的应用方向^[55-57], 能够利用对超颖材料、超构表面、二维材料等进行合理设计和构建, 获得具有良好光波调控性能的全息元器件, 从而实现传统全息光学元器件无法实现的功能与特性, 为全息显示带来新机遇和发展方向.

2 新材料全息显示

2.1 新材料全息元件

全息光学元件是利用全息的方法记录加工得到的具有一定光学功能的元件. 其相比于传统的折反射型的光学元件而言具有超薄的特性, 能够有效地减少系统体积. 然而如前文所述, 全息显示中应用的全息光学元件具有诸多问题, 因此需要设计、研制新型的全息元件以提升全息显示系统的性能指标. 利用新材料设计研制的全息元件, 能够替代传统全息光学元件, 在保留其超薄特性的前提下, 实现高效率、无色散等目标. 新材料全息元件

是通过超构原子在器件表面形成特定的相位延迟分布以实现不同的功能^[24,58,59]. 例如, 当运用超构原子在器件表面附加梯度相位时, 能够使入射光线发生偏折^[24,59], 从而实现对光线方向的控制. 这种元件与全息光栅的功能相一致, 但与传统体全息光栅器件不同的是, 这种超薄新材料器件并不具有体积效应, 从而减小了布拉格效应对显示性能的影响与制约. 类似地, 通过设计更加复杂的器件相位分布, 新材料全息元器件还能够实现超薄光学透镜^[60]等功能.

对于全息显示而言, 利用新材料的线性光学响应及电磁响应特性, 通过对光波的振幅、相位等信息进行调制, 能够有效地实现全息显示. 当超构原子间的电磁耦合较弱时, 超构原子几何旋转角度与圆偏振的正交偏振态出射光波的相位延迟成正比, 可以通过控制超构原子的空间旋转角实现全息图信息的加载. 针对超构原子结构及空间位置进行设计能够获得对入射光相位调制的结果, 根据调制结果进行优化设计, 便能实现振幅型、相位型以及复振幅型全息显示. 如图3所示, 运用超颖材料对全息图振幅及相位信息进行同时编码而实现的复振幅调制功能是传统器件无法实现的^[55,61,62], 其有效地提高了显示信息密度, 也在一定程度上提

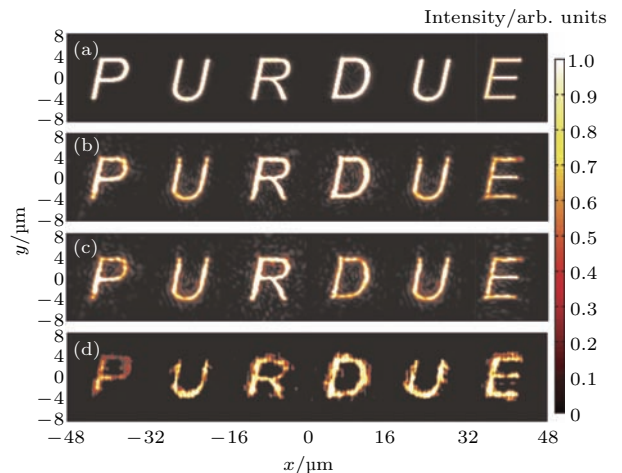


图3 (a) 新材料复振幅调制理想模拟全息像; (b), (c) 不同调制阶梯模拟像; (d) 实验再现像^[55]

Fig. 3. (a) The simulated holographic images created by an ideal metasurface hologram with smooth phase and amplitude modulations; (b), (c) the simulated holographic images created by a metasurface hologram with different level phase and amplitude modulation; (d) holographic images obtained experimentally from the fabricated samples^[55].

高了三维全息显示的真实性. 此外, 超构原子的特异结构使其具有各向异性^[63,64]或各向同性^[65,66]的电磁响应, 其中具有各向异性超构原子的超构表面与超颖材料能够对两个正交偏振态实现不同的电磁响应. 因此在这两个响应中加载不同的全息图信息, 如图 4 (a) 所示, 即可运用单一显示器件呈现不同的显示结果^[67-73]. 无论是正交线偏振光^[68-70]、圆偏振光^[71-73]还是任意正交的完全偏振态^[74], 均可以通过对超构原子的特异结构进行设计来实现这一功能.

由于光波亚波长结构尺度存在加工难度问题, 为了简化结构设计、降低加工难度, 提高波前调控准确度、提升全息图的显示质量, 通常选择简单的几何形状超构原子应用于全息显示, 同时对全息信息进行阶梯量化处理^[56]. 特别是利用全息的迂回编码技术, 可以通过控制超构原子的位置等参数实现对全息图的加载以及目标图像的重建^[75]. 值得注意的是, 超构原子尺寸远小于波长使得记录倏逝波成分信息成为可能, 因此改变再现光入射角度时即可以实现重建更多的图像信息^[76], 这是基于传统全息显示器件无法实现的, 也为大容量新颖全息显示带来可能.

相比于传统全息影像重建, 新颖材料全息显示具有自由度高、编码信息灵活等优势, 且新颖材料的亚波长结构使得再现光波无法分辨其中的细节信息, 从而避免了空间光调制器“死区”结构产生的背景噪声, 也在增大信息容量的情况下获得更大的视场角, 有助于实现高质量全息显示.

2.2 非线性新颖材料全息显示

非线性超颖材料与非线性超构表面同样具有特异的波前调制特性, 而利用这种非线性效应能够实现全息图像的多图重建. 超构原子的非线性特异电磁特性同样能引入特定的相位延迟, 与线性响应不同的是, 超构原子的非线性效应能够在两个正交偏振态的高次谐波中引入不同的相位延迟. 根据这一特性, 能够实现如图 4 (b) 所示的线性通道和两个非线性通道中显示重建出不同的全息图像^[77,78]. 此外, 利用多层的非线性超颖材料也能够进一步提高全息信息的写入密度, 在不同的偏振态方向显示不同的图像^[79]. 相比于利用传统显示器件的全息显示而言, 通过这些复用方式, 非线性新颖超颖材料和非线性新颖超构表面全息显示的信息密度有显著的提升. 但受限于非线性变换能

量的衰减, 非线性调控目前仍然存在效率不够高的问题.

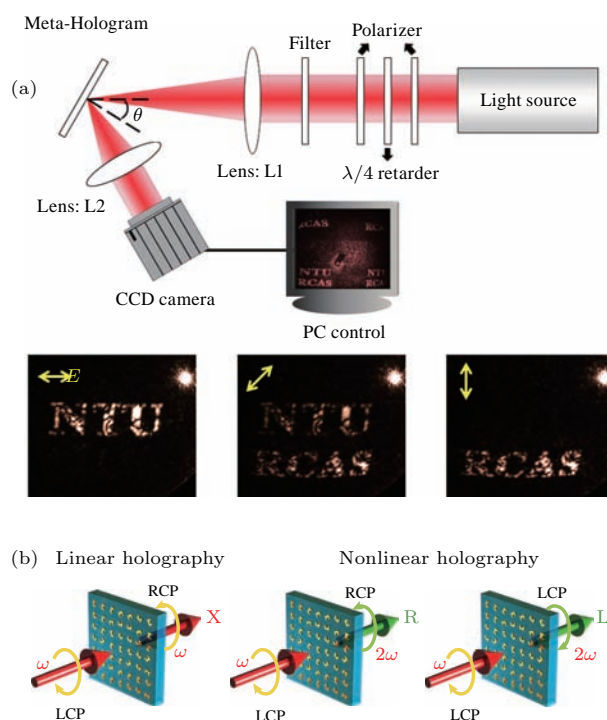


图 4 (a) 利用新颖材料线性特性实现不同线偏振光入射实现不同全息显示^[69]; (b) 利用新颖材料非线性特性实现线性通道和两个非线性通道中显示重建出不同的全息图像^[77]

Fig. 4. (a) Results of different holographic display obtained using linearity of the metamaterial^[69]; (b) results of different holographic display obtained using nonlinearity of the metamaterial^[77].

2.3 彩色全息显示

与传统显示器件相同, 新颖材料器件也是色散器件, 能够对不同入射光产生不同的电磁响应. 借鉴于传统显示器件实现二维、三维彩色显示的技术, 利用新颖材料全息显示器件的各种调控方式, 如图 5 所示, 同样也可以实现彩色图像的重建. 利用彩色显示中的像素分离法, 可使新颖材料全息显示器件上不同像素单元控制不同波长(颜色)入射光, 合并实现一个彩色的全息像素, 从而实现彩色图像的重建^[80,81]. 但由于一个彩色像素中包含多个子波前控制单元, 因此无法保证彩色像素依然远小于波长. 而运用新颖材料全息显示器件的各向异性调控特性, 通过优化设计调控单元参数获得在两个正交偏振方向上对不同波长产生不同的响应, 即可以实现双色全息图像显示^[67,68]. 此外, 通过运用全息显示中复合彩色全息编码方法, 能实现将红绿蓝三色通道的全息图信息编码到同一幅全息图上. 因而,

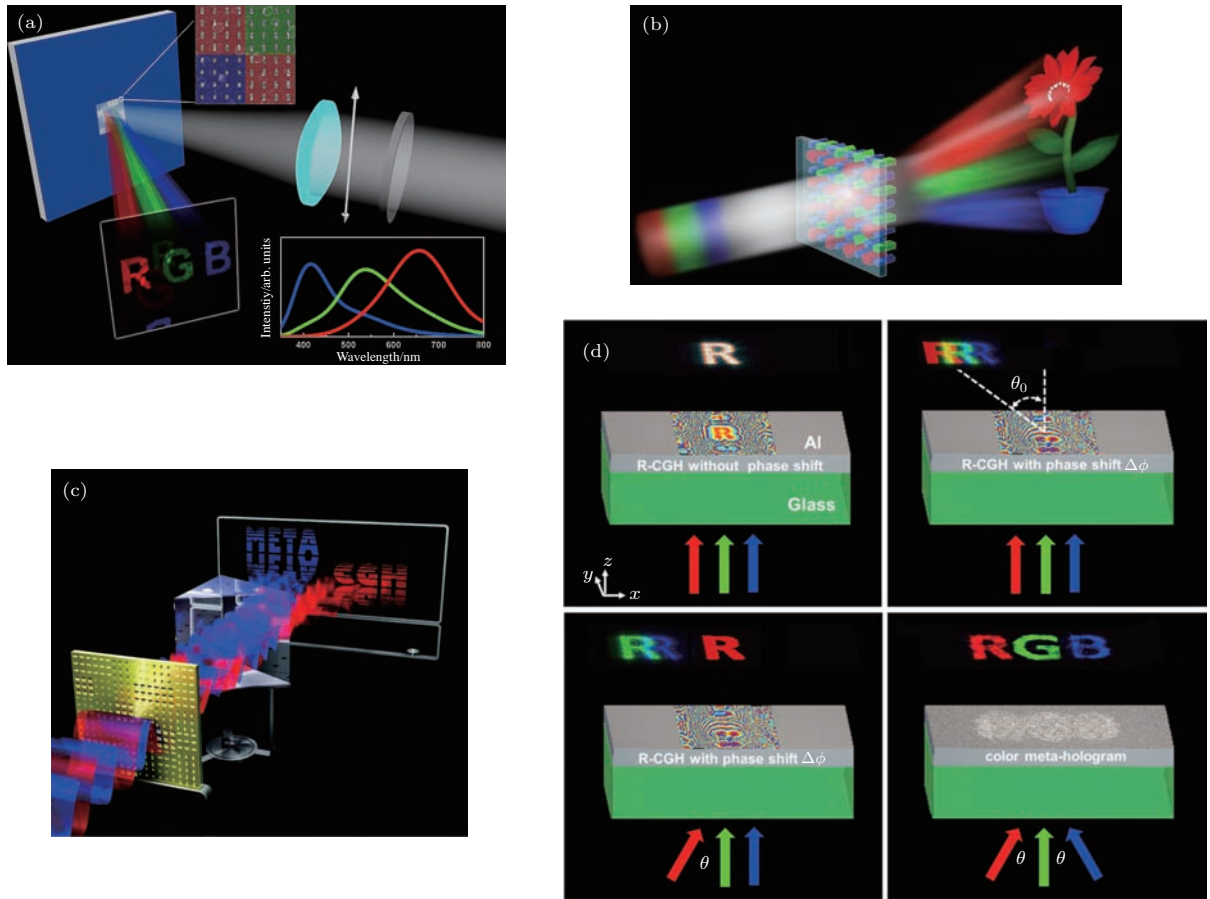


图5 不同方法获得新材料彩色全息图 (a), (b) 像素分离法^[80,81]; (c) 偏振控制法^[67]; (d) 复合彩色全息编码方法^[82]
 Fig. 5. The different ways to get the full-color metamaterial hologram: (a), (b) Pixel separation^[80,81]; (c) polarization control^[67]; (d) wavelength-multiplexed holographic coding method^[82].

通过将编码信息映射到新材料全息器件上, 即能够在成像区域显示彩色图像^[82], 并可以通过多色通道叠加^[82,83]实现彩色全息图的合成.

2.4 高效率全息显示

目前, 衍射效率低是限制超颖材料、超构表面和二维材料在波前调制应用中的主要问题. 由于透

射式金属超构原子本身损耗特性的限制, 转换效率通常较低, 为了提高调控效率, 研究者对超构原子的结构、材质等方向进行改进, 从而实现高效率全息显示. 利用图6(a)中的金属-介质-金属的反射式结构, 能通过构建金属微纳天线与金属反射层法布里-珀罗谐振腔以增加出射光强度, 从而将全息图的衍射效率提高到80%^[30].

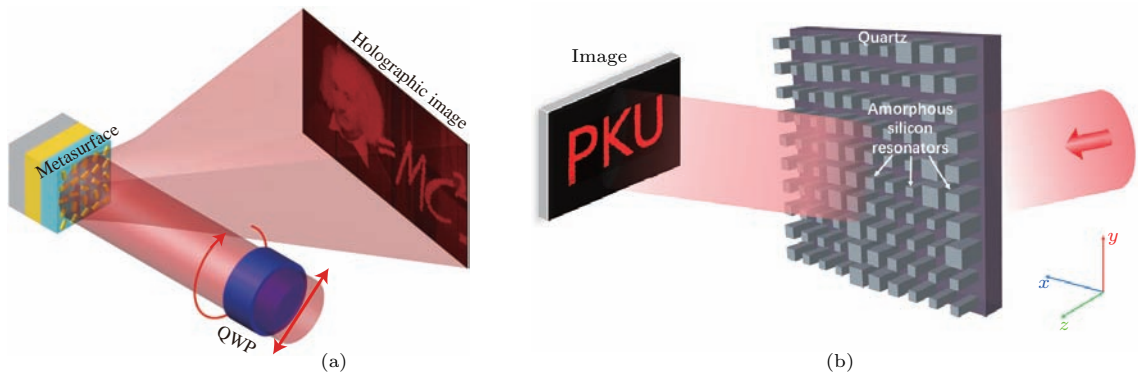


图6 (a) 金属反射式结构高效率全息显示^[30]; (b) 电介质材料高效率全息显示^[84]
 Fig. 6. (a) High efficiency metallic reflective nano-structure hologram^[30]; (b) high efficiency dielectric metasurface hologram^[84].

此外, 运用电介质材料超构原子也能构建高衍射效率全息图. 采用图 6 (b) 所示的非晶硅纳米方柱阵列构建超颖表面全息图, 可获得 75%—93% 的衍射效率 [84], 运用多晶硅纳米圆柱片设计的灰阶全息图能达到超过 90% 的衍射效率 [34]. 同样, 运用 TiO₂ 材料纳米单元对全息图信息进行编码, 能将衍射效率提升到 78%—82% 甚至更高 [32], 并可实现可见光波段全息显示.

2.5 动态全息显示

尽管新材料具有优异的电磁调控特性, 但受到加工能力的限制, 主要的研究工作都在静态显示中展开. 随着技术的发展进步, 研究者们也开始将目光放到动态新颖全息显示器件的研制上 [85], 为新材料器件突破时间带宽积限制提供了方向. 超构原子的电磁响应特性往往受到外界的影响, 特别是金属材料的超构原子在外加电场的情况下即

可实现调控性能的调谐 [86]. 运用附着石墨烯等二维导电材料也同样能通过控制超构原子周围的外界电场实现改变超构原子的电磁特性 [87,88], 也可通过构建石墨烯-硅混合二极管控制入射波的通断 [89]. 此外, 通过分析基底特性对超构原子电磁调控特性的影响, 利用辅助电磁场也可以实现改变超构表面全息显示器件加载的信息 [90]. 这些方法主要利用整体调控的方式实现器件调制特性的改变, 因而较难实现对每个超构原子精确而独立的调控. 通过运用动态超构原子构建的动态波前调控器件 [91] 及其相类似的通过微机电系统对超构原子的谐振结构进行控制 [92,93], 利用微流系统控制液态金属-空气结构超构原子的开口谐振腔参数 [94], 以及运用电路控制二极管超构原子加载不同全息图信息 [95] 等方法, 都能有效地实现动态调控信息的加载, 也能运用在实现单像素信息的刷写中. 然而受到技术的限制, 目前这类器件仅能实现对微波、太赫兹等长波长电磁波的调控.

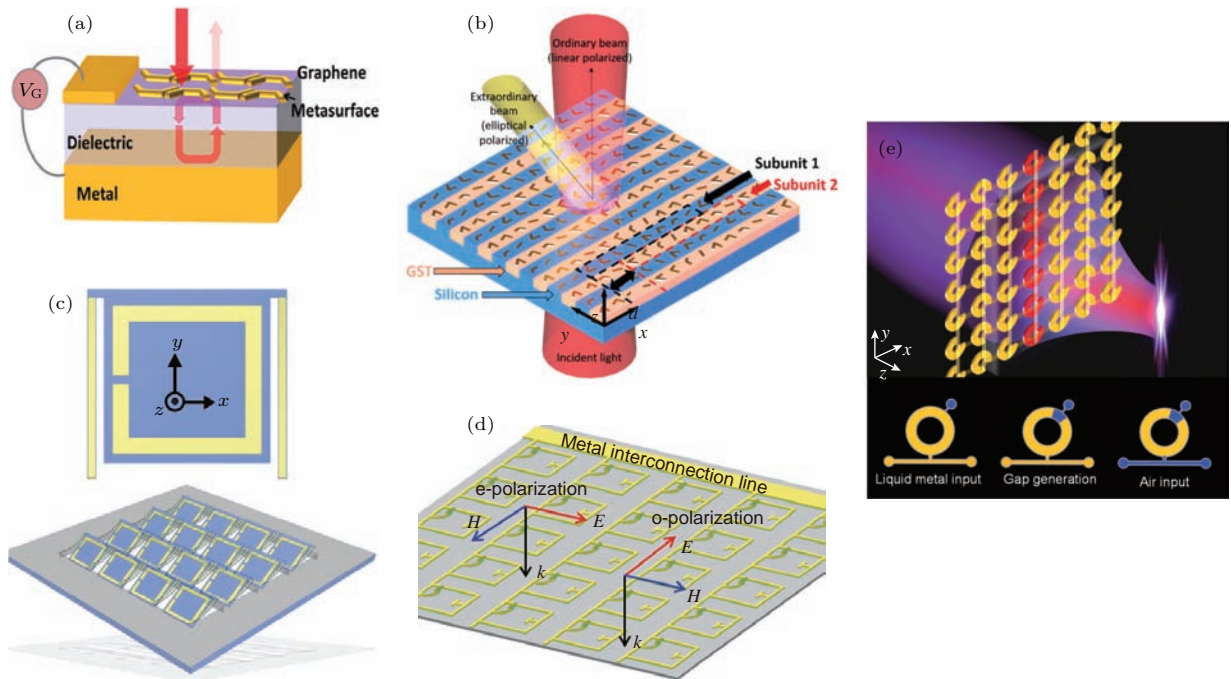


图 7 多种动态新材料全息元件 (a) 外界电场控制附着石墨烯超构原子改变超原子的电磁特性 [87]; (b) 辅助电磁场控制基底特性改变加载信息 [90]; (c) 动态超构原子构建的动态波前调控器件 [91]; (d) 微机电系统控制超构原子的谐振结构 [93]; (e) 微流系统控制液态金属-空气结构超构原子 [94]

Fig. 7. A variety of dynamically reconfigurable metamaterial holographic elements: (a) The external electric field controls the electromagnetic properties of optical antennas on graphene [87]; (b) tunable wave plate based on active plasmonic metasurfaces [90]; (c) dynamic wavefront regulatory devices working by the reconfigurable metamaterials [91]; (d) tunable multiband terahertz metamaterials using a reconfigurable electric split-ring resonator array [93]; (e) tunable metamaterial with split ring in the array altered by changing the metal filling fraction [94].

2.6 新材料全息显示元件

在运用其他新颖材料方面,最近的研究利用氧化石墨烯材料与拓扑绝缘体材料实现了全息图像的重建.基于氧化石墨烯材料的全息图(图8(a))是利用甩膜的方法在玻璃衬底上制备一层氧化石

墨烯薄膜,然后利用并行多焦点阵列飞秒激光直写系统在制备的氧化石墨烯薄膜上进行全息图加工.在此过程中,超小聚焦的飞秒激光光束会将氧化石墨烯还原以使折射率发生变化,从而实现全息信息加载.通过这种方式再现的全息三维图像的视场角能够达到 52° [51].

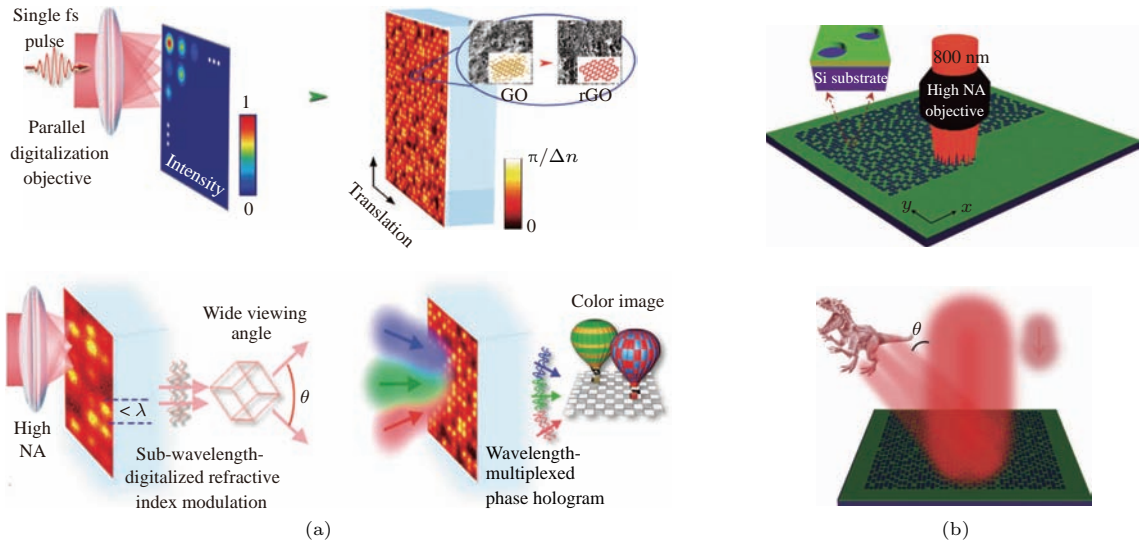


图8 (a) 利用氧化石墨烯材料实现大视场角彩色三维全息显示 [51]; (b) 利用拓扑绝缘体实现全息三维显示 [52]
 Fig. 8. (a) rGO holograms for 3D images with wide viewing angles and color images [51]; (b) hologram for 3D images based on a topological insulator material [52].

此外,利用拓扑绝缘体内部与表面折射率不同的特性,也能实现表面电磁场分布的控制作用,从而实现如图8(b)所示的全息显示信息的表达.全息图制作过程中利用了原子层沉积的方法制备 Sb_2Te_3 拓扑绝缘体薄膜,后通过多焦点阵列激光直写系统实现全息图刻写,最后运用红绿蓝三色参考光分别成功再现全息图像 [52].

复振幅全息显示等传统器件无法完成的任务.目前新颖材料器件依旧存在一定问题,例如设计、加工较为复杂,部分元器件效率较低,实现动态显示难度大等.但是,可以预见的是,随着加工技术的不断提升,新颖材料全息显示元器件将得到进一步完善,推动全息显示的发展,从而使全息显示早日得到广泛的应用.

3 结 论

随着全息显示技术的发展与更迭,以超颖材料、超构表面和二维材料为代表的新颖结构材料为全息显示带来了新的发展机遇.新颖材料全息元件与显示器件的纳米调制单元以及其构成的超薄结构突破了传统器件对全息显示性能的制约.新颖材料全息元件在实现特殊光学元件的偏折、会聚和发散等功能时能够在具有超薄厚度的同时消除色差、扩大视场角,而将新颖材料器件应用于全息显示中,能够有效地避免传统显示器件像素结构对成像质量的影响,扩大传统全息显示空间光调制器件的空间带宽积限制,还能够实现诸如高显示密度、

参考文献

- [1] Cakmakci O, Rolland J 2006 *J. Disp. Technol.* **2** 199
- [2] Li H, Zhang X, Shi G, Qu H, Wu Y, Zhang J 2013 *Opt. Eng.* **52** 110901
- [3] Iizuka K 2006 *Opt. Photon. News* **7** 42
- [4] Ma X, Liu J, Zhang Z, Li X, Jia J, Hu B, Wang Y 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 010901
- [5] Haln J, Kim H, Lim Y, Park G, Lee B 2008 *Opt. Express* **16** 12372
- [6] Yaraş F, Kang H, Onural L 2011 *Opt. Express* **19** 9147
- [7] Liu Y, Pang X, Jiang S, Dong J 2013 *Opt. Express* **21** 12068
- [8] Han J, Liu J, Yao X, Wang Y 2015 *Opt. Express* **23** 3534

- [9] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, Nakano S, Yoshida T, Kuwahara M, Aiki K, Ogawa M 2008 *SID Symposium Digest of Technical Papers* **39** 89
- [10] Zeng C, Gao H Y, Liu J C, Yu Y J, Yao Q X, Liu P, Zheng H D, Zeng Z X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124215 (in Chinese) [曾超, 高洪跃, 刘吉成, 于瀛洁, 姚秋香, 刘攀, 郑华东, 曾震湘 2015 物理学报 **64** 124215]
- [11] Xia J, Chang C L, Lei W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124213 (in Chinese) [夏军, 常琛亮, 雷威 2015 物理学报 **64** 124213]
- [12] Brown R, Stahl K, Wood R 2014 *US Patent* 8 903 207
- [13] Shi R, Liu J, Zhao H, Wu Z, Lu Y, Chen Y, Xie J, Wang Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 4703
- [14] Goodman J 2005 *Introduction to Fourier Optics* (Greenwood Village: Roberts & Company Publishers) p184
- [15] Zhang N, Liu J, Han J, Li X, Yang F, Wang X, Hu B, Wang Y 2015 *Appl. Opt.* **54** 3645
- [16] Li X, Chen C, Gao H, He Z, Xiong Y, Li H, Hu W, Ye Z, He G, Lu J, Su Y 2014 *J. Disp. Technol.* **10** 438
- [17] Zhang H, Xie J, Wang Y 2009 *Appl. Opt.* **48** 5834
- [18] de La Tocraye J L D B, Dupont L 1997 *Appl. Opt.* **36** 1730
- [19] Ozaki M, Kato J, Kawata S 2011 *Science* **332** 218
- [20] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [21] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R 2014 *Nat. Photon.* **8** 889
- [22] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139
- [23] Soukoulis C M, Wegener M 2011 *Nat. Photon.* **5** 523
- [24] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [25] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [26] Ergin T, Stenger N, Brenner P, Pendry J B, Wegener M 2010 *Science* **328** 337
- [27] Lai Y, Ng J, Chen H, Han D, Xiao J, Zhang Z, Chan C 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 253902
- [28] Gao W, Lawrence M, Yang B, Fang F, Béri B, Li J, Zhang S 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 037402
- [29] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, Decker M, Bade K, Sail V, Freymann G V, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 1513
- [30] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, Li G, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [31] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 937
- [32] Devlin R, Khorasaninejad M, Chen W, Oh J, Capasso F 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113** 10473
- [33] Shalaev M, Sun J, Tsukernik A, Pandey A, Nikolskiy K, Litchinitser N M 2015 *Nano Lett.* **15** 6261
- [34] Wang L, Kruk S, Tang H, Li T, Kravchenko I, Neshev D N, Kivshar Y S 2016 *Optica* **3** 1504
- [35] Pu M, Li X, Ma X, Wang Y, Zhao Z, Wang C, Hu C, Gao P, Huang C, Ren H, Li X, Qin F, Yang J, Gu M, Hong M, Luo X 2015 *Sci. Adv.* **1** e1500396
- [36] Zeng J, Li L, Yang X, Gao J 2016 *Nano Lett.* **16** 3101
- [37] Chen H, Ling X H, He W G, Li Q G, Yi X N 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 044203 (in Chinese) [陈欢, 凌晓辉, 何武光, 李钱光, 易煦农 2017 物理学报 **66** 044203]
- [38] Yi X N, Li Y, Liu Y C, Ling X H, Zhang Z Y, Luo H L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094203 (in Chinese) [易煦农, 李瑛, 刘亚超, 凌晓辉, 张志友, 罗海陆 2014 物理学报 **63** 094203]
- [39] Yin X, Ye Z, Rho J, Wang Y, Zhang X 2013 *Science* **339** 1405
- [40] Zhang H, Kang M, Zhang X, Guo W, Lü C, Li Y, Zhang W, Han J 2017 *Adv. Mater.* **29** 1604252
- [41] Chen W, Tymchenko M, Gopalan P, Ye X, Wu Y, Zheng M, Murray C B, Alu A, Kagan C R 2015 *Nano Lett.* **15** 5254
- [42] Wang D, Zhang L, Gu Y, Mehmood M Q, Gong Y, Srivastava A, Jian L, Venkatesan T, Qiu C, Hong M 2015 *Sci. Rep.* **5** 15020
- [43] Pfeiffer C, Grbic A 2015 *Phys. Rev. B* **91** 115408
- [44] Ni X, Wong Z, Mrejen M, Wang Y, Zhang X 2015 *Science* **349** 1310
- [45] Papaioannou M, Plum E, Valente J, Rogers E, Zheludev N 2016 *Light Sci. Appl.* **5** e16070
- [46] Chen S, Zeuner F, Weismann M, Reineke B, Li G, Valev V, Cheah K, Panoiu N, Zentgraf T, Zhang S 2016 *Adv. Mater.* **28** 2992
- [47] Li G, Chen S, Pholchai N, Reineke B, Wong P, Pun E, Cheah K, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Mater.* **14** 607
- [48] Bhimanapati G, Lin Z, Meunier V, Jung Y, Cha J, Das S, Xiao D, Son Y, Strano M S, Cooper V, Liang L, Louie S, Ringe E, Zhou W, Kim S, Naik R, Sumpter B, Terrones H, Xia F, Wang Y, Zhu J, Akinwande D, Alem N, Schuller J, Schaak R, Terrones M, Robinson J 2015 *ACS Nano* **9** 11509
- [49] Butler S, Hoolen S, Cao L, Cui Y, Gupta J, Gutiérrez H, Heinz T, Hong S, Huang J, Ismach A, Johnston-Halperin E, Kuno M, Plashnitsa V, Robinson R, Ruoff R, Salahuddin S, Shan J, Li S, Spencer M, Terrones M, Windl W, Goldberger J 2013 *ACS Nano* **7** 2898
- [50] Novoselov K, Fal'ko V, Colombo L, Gellert P, Schwab M, Kim K 2012 *Nature* **490** 192
- [51] Li X, Ren H, Chen X, Liu J, Li Q, Li C, Xue G, Jia J, Cao L, Sahu A, Hu B, Wang Y, Jin G, Gu M 2015 *Nat. Commun.* **6** 6984
- [52] Yue Z, Xue G, Liu J, Wang Y, Gu M 2017 *Nat. Commun.* **8** 15354
- [53] Hasan M, Kane C 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 3045
- [54] Lu L, Joannopoulos J, Soljačić M 2014 *Nat. Photon.* **8** 821
- [55] Ni X, Kildishev A, Shalaev V 2013 *Nat. Commun.* **4** 2807
- [56] Huang K, Liu H, Garcia-Vidal F, Hong M, Luk'yanchuk B, Ten J, Qiu C 2015 *Nat. Commun.* **6** 7059
- [57] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, Zhang H, Chen S, Bai B, Tan Q, Jin G, Cheah K, Qiu C, Li J, Zentgraf T, Zhang S 2013 *Nat. Commun.* **4** 2808
- [58] Sun S, He Q, Xiao S, Xue Q, Li X, Zhou L 2015 *Nat. Mater.* **11** 3292
- [59] Zhang X, Tian Z, Yue W, Gu J, Zhang S, Han J, Zhang W 2013 *Adv. Mater.* **25** 4567

- [60] Khorasaninejad M, Aieta F, Kanhaiya P, Kats M A, Genevet P, Rousso D, Capasso F 2015 *Nano Lett.* **15** 5358
- [61] Wang Q, Zhang X, Xu Y, Gu J, Li Y, Tian Z, Singh R, Zhang S, Han J, Zhang W 2016 *Sci. Rep.* **6** 32867
- [62] Liu L, Zhang X, Kenney M, Su X, Xu N, Ouyang C, Shi Y, Han J, Zhang W, Zhang S 2014 *Adv. Mater.* **26** 5031
- [63] Wan X, Shen X, Luo Y, Cui T J 2014 *Laser Photon. Rev.* **8** 757
- [64] Aieta F, Genevet P, Yu N, Kats M, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Nano Lett.* **12** 1702
- [65] Chong K, Wang L, Staude I, James A, Dominguez J, Liu S, Subramania G, Decker M, Neshev D, Brener I, Kivshar Y 2016 *ACS Photon.* **3** 514
- [66] Arbabi A, Horie Y, Ball A, Bagheri M, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 8069
- [67] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, Setzpfandt F, Eilenberger F, Kley E, Lederer F, Tunnermann A, Pertsch T 2012 *Adv. Mater.* **24** 6300
- [68] Montelongo Y, Tenorio-Pearl J, Williams C, Zhang S, Milne W, Wilkinson D 2014 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **111** 12679
- [69] Chen W, Yang K, Wang C, Huang Y, Sun G, Chiang I, Liao C, Hsu W, Lin H, Sun S, Zhou L, Liu A, Tsai D 2014 *Nano Lett.* **14** 225
- [70] Xu Q, Zhang X, Xu Y, Ouyang C, Tian Z, Gu J, Li J, Zhang S, Han J, Zhang W 2017 *Laser Photon. Rev.* **11** 1600212
- [71] Huang L, Mühlenbernd H, Li X, Song X, Bai B, Wang Y, Zentgraf T 2015 *Adv. Mater.* **27** 6444
- [72] Desiatov B, Mazurski N, Fainman Y, Levy U 2015 *Opt. Express* **23** 22611
- [73] Wen D, Yue F, Li G, Zheng G, Chan K, Chen S, Chen M, Li K, Wong P, Cheah K W, Pun E, Zhang S, Chen X 2015 *Nat. Commun.* **6** 8241
- [74] Mueller J, Rubin N, Devlin R, Groever B, Capasso F 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 113901
- [75] Khorasaninejad M, Ambrosio A, Kanhaiya P, Capasso F 2016 *Science Adv.* **2** e1501258
- [76] Zhang X, Jin J, Pu M, Li X, Ma X, Gao P, Zhao Z, Wang Y, Wang C, Luo X 2017 *Nanoscale* **9** 1409
- [77] Ye W, Zeuner F, Li X, Reineke B, He S, Qiu C, Liu J, Wang Y, Zhang S, Zentgraf T 2016 *Nat. Commun.* **7** 11930
- [78] Ye W, Li X, Liu J, Zhang S 2016 *Opt. Express* **24** 25805
- [79] Almeida E, Bitton O, Prior Y 2016 *Nat. Commun.* **7** 12533
- [80] Huang Y, Chen W, Tsai W, Wu P, Wang C, Sun G, Tsai D 2015 *Nano Lett.* **15** 3122
- [81] Wang B, Dong F, Li Q, Yang D, Sun C, Chen J, Song Z, Xu L, Chu W, Xiao Y, Gong Q, Li Y 2016 *Nano Lett.* **16** 5235
- [82] Wan W, Gao J, Yang X 2016 *ACS Nano* **10** 10671
- [83] Li X, Chen L, Li Y, Zhang X, Pu M, Zhao Z, Ma X, Wang Y, Hong M, Luo X 2016 *Science Adv.* **2** e1601102
- [84] Li Q, Dong F, Wang B, Gan F, Chen J, Sun C, Song Z, Xu L, Chu W, Xiao Y, Gong Q, Li Y 2016 *Opt. Express* **24** 16309
- [85] Shrekenhamer D, Montoya J, Krishna S, Padilla W 2013 *Adv. Opt. Mater.* **1** 905
- [86] Karl N, Reichel K, Chen H, Taylor A J, Brener I, Benz A, Reno J, Mendis R, Mittleman D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091115
- [87] Yao Y, Shankar R, Kats M, Song Y, Kong J, Loncar M, Capasso F 2014 *Nano Lett.* **14** 6526
- [88] Wang Z, Hu B, Li B, Liu W, Li X, Liu J, Wang Y 2016 *Mater. Res. Express* **3** 115011
- [89] Li Q, Tian Z, Zhang X, Singh R, Du L, Gu J, Han J, Zhang W 2015 *Nat. Commun.* **6** 7082
- [90] Li T, Huang L, Liu J, Wang Y, Zentgraf T 2017 *Opt. Express* **25** 4216
- [91] Tao H, Strikwerda A, Fan K, Padilla W, Zhang X, Averitt R D 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 147401
- [92] Zhu W, Liu A, Zhang X, Tsai D, Bourouina T, Teng J, Zhang X, Guo H, Tanoto H, Mei T, Lo G, Kwong D 2011 *Adv. Mater.* **23** 1792
- [93] Ma F, Lin Y, Zhang X, Lee C 2014 *Light Sci. Appl.* **3** e171
- [94] Zhu W, Song Q, Yan L, Zhang W, Wu P, Chin L, Cai H, Tsai D, Shen Z, Deng T, Ting S, Gu Y, Lo G, Kwong D, Yang Z, Huang R, Liu A, Zheludev N 2015 *Adv. Mater.* **27** 4739
- [95] Li L, Cui T, Ji W, Liu S, Ding J, Wan X, Li Y, Jiang M, Qiu C, Zhang S 2017 *Nat. Commun.* **8** 197

REVIEW

Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display*

Peng Wei-Ting¹⁾ Liu Juan^{1)†} Li Xin¹⁾²⁾ Xue Gao-Lei¹⁾ Han Jian¹⁾³⁾
Hu Bin¹⁾ Wang Yong-Tian¹⁾

1) (*Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

2) (*School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore*)

3) (*Key Laboratory of Information System and Technology, Beijing Institute of Control and Electronic Technology, Beijing 100038, China*)

(Received 13 September 2017; revised manuscript received 25 October 2017)

Abstract

Three-dimensional (3D) display is one of the effective ways to obtain visual information feeling like actual environment. Since holographic technique can provide full depth information for human eyes, it is considered to be an ideal 3D display technique. However, it is limited by the features of display elements and devices, such as the time-space (time and space) bandwidth product, massive data processing speed and low image quality and so on. To improve the display quality, expand the time-space bandwidth product, improve the performance of the system, and overcome the limitation, optical elements and devices made from novel materials are introduced, such as metamaterials, metasurfaces and two-dimensional (2D) materials, and thus bringing new challenges and opportunities to holographic display. Meta-atom structure whose unit size is much less than wavelength is designed and fabricated specially, and it can realize the isotropical or anisotropical manipulation of the amplitude and phase of the light wave. By encoding the meta-atom structures into the hologram, the 2D or 3D images can be achieved. The development of a refreshable metamaterials and their applications in dynamic holographic display will be one of the most important topics in the future. Though the 2D or 3D holographic displays based on the elements and devices made from novel materials still have some basic problems, it is expected that they would bring new impetus and promising perspective for the future display market.

Keywords: holographic display, elements and devices of novel material, metamaterials and metasurfaces

PACS: 42.40.Jv, 81.05.Xj, 78.67.Wj

DOI: [10.7498/aps.67.20172026](https://doi.org/10.7498/aps.67.20172026)

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA015905) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61575024, 61235002, 61420106014).

† Corresponding author. E-mail: juanliu@bit.edu.cn