



超表面相位调控原理及应用

李 雄, 马晓亮, 罗先刚*

中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209

摘要: 超表面是一种基于亚波长结构的功能膜层器件, 也称超表面或二维超构材料。超表面可在平面化的亚波长结构内产生异常的相位突变, 从而为包括大口径平面成像、电磁虚拟赋形、大视场全息显示等应用提供有效手段。与传统的光学器件相比, 超表面器件具有亚波长尺度相位、振幅、偏振任意调控, 轻薄、易集成、低损耗、表面可共形设计等诸多优点, 因而受到广泛关注。本文对超表面的相位调控原理进行分析, 并据此对现有的超表面进行分类, 同时介绍了各类超表面器件的特点和应用, 最后对超表面领域面临的挑战及有待进一步拓展的方向进行展望。

关键词: 超表面; 超构材料; 相位; 斯涅耳定律

中图分类号: TB383

文献标志码: A

Principles and applications of metasurfaces with phase modulation

Xiong Li, Xiaoliang Ma and Xiangang Luo*

State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China

Abstract: Metasurfaces, the equivalent two-dimensional (2D) metamaterials, are thin-film functional devices constructed by subwavelength structures. Abrupt phase changes can be obtained in the planar metasurface structures over the subwavelength scale, which provide a new avenue to enable a variety of applications, including large scale planar imaging, electromagnetic virtual shaping and holographic display with large field of view. The arbitrary modulation abilities of phase, amplitude and polarization at the subwavelength scale, also the light weight, low loss, integratable and conformable design make the metasurfaces very attractive, compared to the traditional optical devices. In this paper, we review the mechanisms of the phase modulation and classify the metasurfaces based on them. The properties and the applications of each type of metasurfaces are also detailedly discussed. The challenges faced by metasurfaces and the areas which need to be further extended are also summarized.

Keywords: metasurface; metamaterials; phase; Snell's law

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.001

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(3): 255-275

1 引言

相位是光波和电磁波的基本物理参量。传统折射型光学元件利用材料折射率的差异或面形变化来实现特定的相位分布, 从而构建相应的功能器件。而对于自然界的光学材料, 其选择范围通常受限, 因此传统

光学功能元件大多通过构建曲面面形来实现, 其器件和系统的体积重量通常较大。二十世纪末出现了基于衍射理论的二元光学^[1-2]。二元光学元件利用微电子加工工艺制备, 在一定程度上实现了光学器件的平面化, 减小了器件体积和重量; 并且其与传统折射光学元件互补的色散特性, 在包括色差补偿、球差校正等多种光学系统中具有巨大的应用前景。但二元光学器件受材料折射率等因素限制, 其厚度仍大于响应波长, 且

收稿日期: 2016-12-14; 收到修改稿日期: 2017-01-18

*E-mail: lxx@ioe.ac.cn

存在色差大、视场小等诸多限制。近年来,亚波长结构电磁调控技术由于其设计灵活,亚波长或深亚波长尺度的精确电磁调制能力,以及包括相位、振幅和偏振的多参量操控使得其在众多技术中脱颖而出,并发展出了亚波长电磁学、表面等离子体光学、超构材料学等多个新兴的领域^[3]。超构材料是典型的基于亚波长结构(也称人工原子或超原子, meta-atom)构建的人工结构材料^[4-6]。其利用所设计亚波长结构的奇异电磁响应可实现自然界不存在的电磁参数或电磁性能。目前,超构材料已经在超分辨率成像和光刻^[7-9]、电磁隐身和电磁幻象^[10-11]、高方向辐射天线^[12]等领域表现出巨大的应用价值。然而超构材料的三维加工问题以及金属损耗问题(尤其在光波段)严重影响了其应用的进一步拓展。如果能将三维超构材料压缩到二维,则有可能解决以上问题。基于这一构想,近年来形成了新兴的研究领域——超构表面^[13-16]。

通过近几年的发展,超构表面已形成相对独立的体系,同时又与表面等离子体光学、超构材料学等多个学科相互交融。回顾历史,我们会发现,利用表面结构实现电磁操控并非是一个全新的设计理念。早在20世纪40年代,Kock通过在聚苯乙烯泡沫中制备金属结构,从而在微波段实现了电磁聚焦功能^[17]。该微波透镜利用亚波长厚度的平面天线结构对电磁波的相位延迟进行调控。此外,在微波段还出现了一系列基于金属亚波长结构的平面化电磁调控器件,最典型的就是频率选择表面和反射阵列天线^[18-19]。由于加工技术等限制,光波段超构表面一直未能实现。近年来随着微纳加工技术以及金属表面等离子体(surface plasmon, SP)理论的快速发展,2005年出现了一类基于SP局域相位调制效应的新型光学超构表面器件^[20]。利用金属狭缝中SP传播常数随狭缝宽度变化的特性,可实现灵活的局域相位调节,并基于此建立了超构表面辅助的折反射定律,也称为广义折反射定律^[20-23]。2011年,哈佛大学Capasso团队利用V形天线结构构建了一种新型的超构表面,并进一步明确了广义折反射定律这一概念,引起了国际上的研究热潮^[24]。超构表面在保留了传统超构材料独特电磁特性的基础上,兼具厚度薄、易加工等优势,在轻量化平面成像、电磁吸收和虚拟赋形、大视场全息等诸多领域具有广泛的应用潜力。基于广义折反射定律设计的超构表面器件被认为是继第一代折反射光学元件和第二代衍射元件之后的第三代新型光学器件^[20,25]。

2 传输相位型超构表面

2.1 传输相位型超构表面理论

传输相位型超构表面通过电磁波在传输过程中产生的光程差来实现相位调控。假定介质的折射率为 n ,波长为 λ 的电磁波在该均匀介质中传输一定距离 d ,则电磁波积累的传输相位可表示为

$$\phi = nk_0 d, \quad (1)$$

其中 $k_0=2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢。传统的相位型光学元件大多采用曲面面形,利用厚度 d 随空间变化的特点调节电磁波的波前。对于二元光学器件,则采用离散深度的台阶实现相位调控。无论是曲面型相位元件还是二元光学元件都面临两个问题:一个是器件非平面,不利于集成和共形设计;另一个是多数光学材料折射率 n 值都不大,因此为了实现足够的相位差,势必要求厚度 d 较大。根据式(1),除了通过 d 来实现传输相位的调节,另外一个有效的方法就是对折射率 n 进行调节。通过空间变化等效折射率 n ,可在厚度 d 保持不变的情况下实现平面的相位型光学元件设计;此外,如果等效折射率 n 达到足够大,器件的厚度可有效减小。目前常用构建传输相位型超表面的方法可分为两类:一类基于表面等离子体波导理论,另一类基于介质等效折射率理论。这两种方法的区别在于对折射率的调节方式不同。

基于表面等离子体波导理论的超表面对折射率的调节主要利用表面等离子体波导(通常是金属-介质-金属(MIM)波导)中传播常数随介质宽度变化的特性^[13,20,22,26]。对于如图1所示的MIM波导,其基模的色散方程可表示为

$$\tanh\left(\frac{w\sqrt{k_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_d}}{2}\right) = \frac{-\epsilon_d \sqrt{k_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{k_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_d}}, \quad (2)$$

其中: k_0 是光在自由空间中的波矢, ϵ_m 和 ϵ_d 分别是金属和狭缝中介质的介电常数, w 是狭缝的宽度, k_{sp} 为表面等离子体传播常数。由式(2)可以得到表面等离子体的传播常数 k_{sp} 和狭缝宽度 w 有直接的关系,因而可利用狭缝宽度来调制 k_{sp} 的值,进而控制其局域的光学相位。将不同宽度的金属狭缝在界面处排列可得到特定的相位梯度,从而改写传统的斯涅耳定律^[20,27]。

基于介质等效折射率理论的超构表面则是利用两种或多种介质(通常有一种是高折射率介质)在单元结构内的比例差,实现结构对电磁折射的调制^[28-31]。

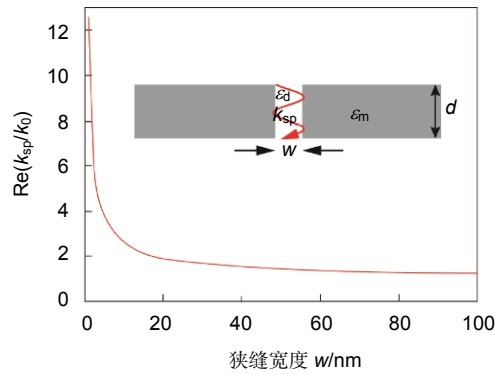


图 1 表面等离子体传播常数随狭缝宽度变化曲线. 插图为结构示意图.

Fig. 1 Dependence of propagation constant of SP in the slit on the slit width. The inset is the schematic of the structure.

2.2 传输相位型超构表面器件与应用

平面光学器件是超构表面最有前景的应用之一，是光子集成和光子芯片发展的关键。利用 MIM 波导中表面等离子体(SP)模式传播常数随狭缝宽度的变化规律，可以实现 $0\sim 2\pi$ 范围内任意梯度的相位变化。由于 SP 模式的等效折射率理论上可为无限大，其等效波长极短，因此器件厚度可远小于波长。基于 SP 色散

调控原理，获得了包括偏折器^[23,32]、聚焦/成像元件^[22,26,33-37]、SP 单向耦合器^[38-39]、涡旋光产生器^[40]等在的一系列平面微纳光子器件(图 2(a)~2(d))。基于 SP 的平面成像器件设计方法于 2005 年首次提出后^[20]，在 2008 年被斯坦福大学实验验证(图 2(c))^[36]。基于表面等离子体的超构表面器件利用 SP 局域相位的调制，使得器件结构更紧凑，易于集成到现有系统，并且设计

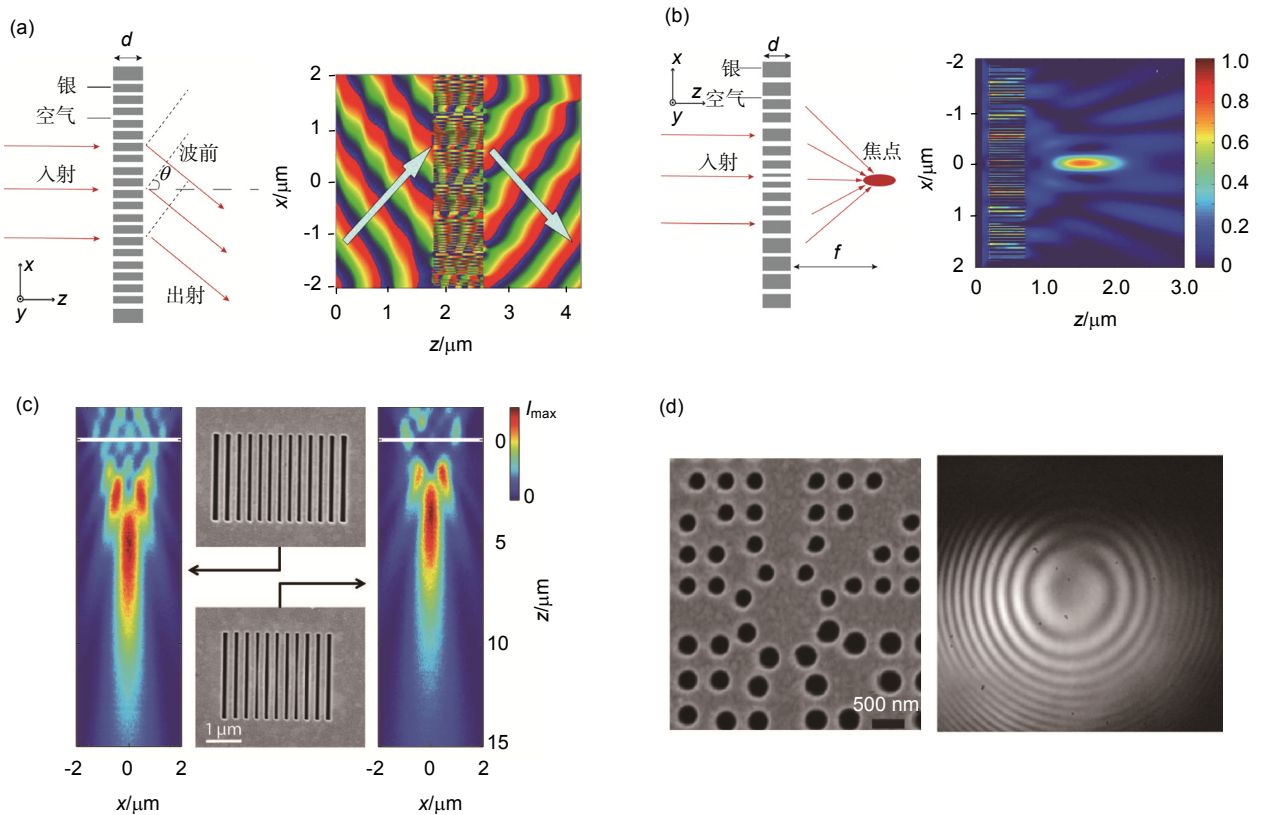


图 2 传输相位型超构表面器件. (a) 偏折器^[23]. (b) 聚焦器件设计^[22]. (c) 聚焦器件实验验证^[36]. (d) 涡旋光产生器^[40].

Fig. 2 Metasurface devices based on transmission phase modulation. (a) Deflector^[23]. (b) Lens^[22]. (c) Experimental measurement of the lens^[36]. (d) Optical vortex generator^[40].

简单,被认为是有望替代传统折射型器件的技术手段^[35,37]。此外,利用SP的反对称模式在整个可见光波段具有接近线性的色散曲线,可用来选择性地散射SP波,实现彩色滤波和显示^[41]。此类等离子体滤波器件除了有较高的效率,还具有接近衍射极限的空间分辨率,可应用于高分辨显示和超光谱成像^[42-44]。

色差问题是困扰平面光学器件应用的一大难题。2016年,利用SP波导材料色散与结构色散的相互补偿,在1000~2000 nm甚至更宽的连续宽波段范围内构建了无色差的平面器件(见图3(a))^[32]。Aieta等人提出一种硅基的消色差平面器件,由于其利用介质的谐振特性,在1300 nm、1550 nm和1800 nm三个离散波长长实现了消色差的平面聚焦(见图3(b))^[45]。

另一种构建传输型相位超构表面器件的方法是基于折射率的空间调制。该方法采用周期介质柱或孔结

构,利用不同占空比排列介质柱/孔对应等效折射率的差异,同样可实现传输相位的调节,从而构建相关的平面光学器件^[28-31]。图3(c)为采用硅柱结构设计的超构表面聚焦透镜,利用不同半径下对应的等效折射率差异实现相应的传输相位调控^[31]。

3 电路型相位超构表面

3.1 电路型相位超构表面理论

本节针对透射式和反射式两种电路型相位超构表面的特点,对其相位调控原理分别进行介绍。图4(a)为透射式单层超构表面的示意图。假定电磁波从介电常数和磁导率分别为 ϵ_1 和 μ_1 的材料沿垂直方向入射,穿过超构表面进入介电常数为 ϵ_2 和 μ_2 的介质。各层中沿正方向和反方向的电场分量,分别表示为 A_i 和 B_i 。将超构表面等效为一个导纳为 Y_s 的阻抗层。

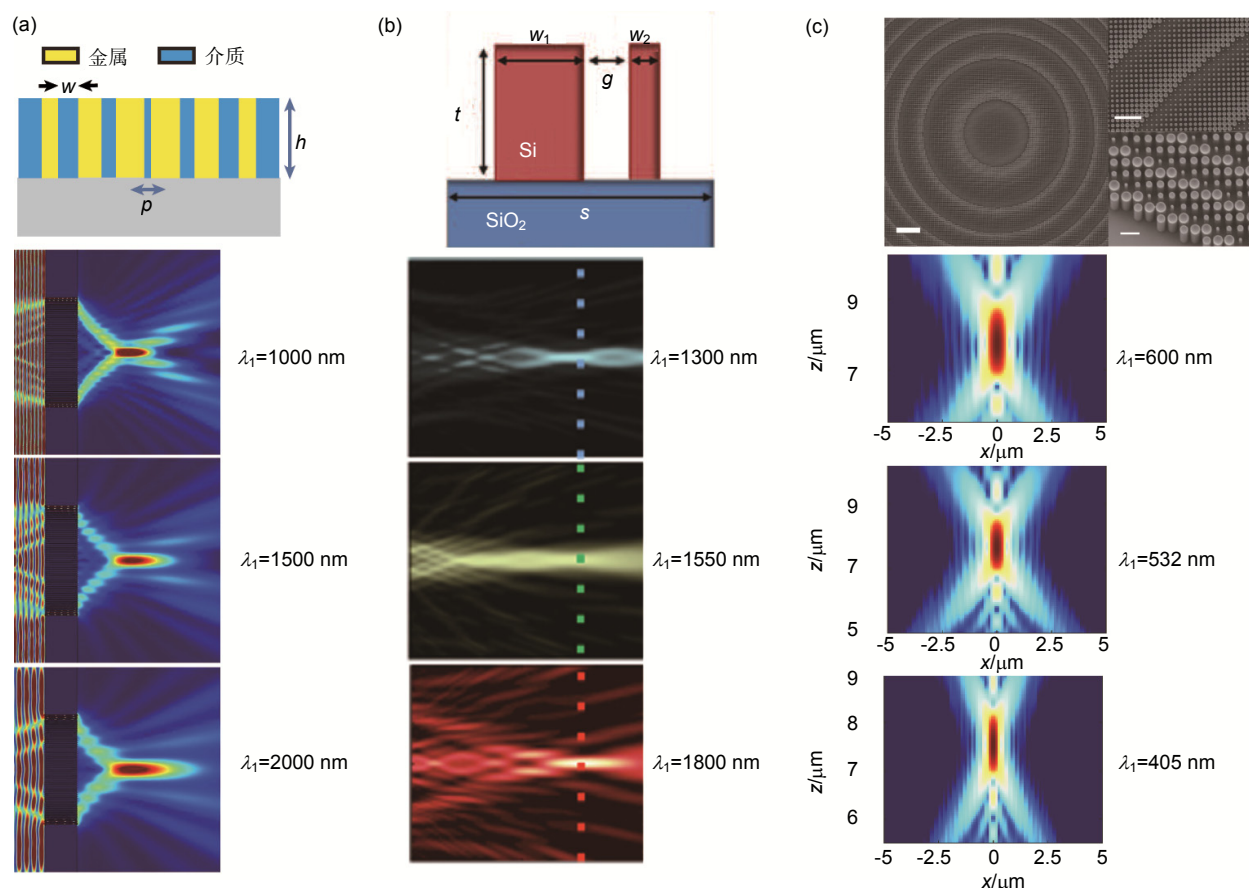


图3 (a) SP波导型消色差超构表面结构及不同波长下的聚焦特性^[32]。(b) 介质型消色差超构表面结构及不同波长下的聚焦特性^[45]。(c) 等效折射率调制型超构表面及不同波长下的聚焦特性^[31]。

Fig. 3 (a) Achromatic metasurface based on SP waveguide and its focusing properties at different wavelengths^[32]. (b) Achromatic dielectric metasurface and its focusing properties at different wavelengths^[45]. (c) Metasurface based on modulation of effective refractive index and its focusing properties at different wavelengths^[31].

此时，边界条件为

$$\begin{cases} A_1 + B_1 = A_2, \\ Y_1(A_1 - B_1) = Y_2 A_2 + Y_s A_2, \end{cases} \quad (3)$$

其中： Y_1 和 Y_2 分别为入射介质和出射介质的等效导纳。将透、反射系数定义代入式(3)，可得透射式电路型超构表面的透射相位和反射相位分别为

$$\begin{aligned} \phi_t &= \arg\left(\frac{2}{2 + Y_s/Y_0}\right), \\ \phi_r &= \arg\left(\frac{-Y_s/Y_0}{2 + Y_s/Y_0}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $Y_0 = \sqrt{\epsilon_0/\mu_0} = 1/377 \text{ S}$ 为自由空间的导纳。

反射式超构表面的示意图如图 4(b)所示，由超构表面、中间介质层和底层金属反射平面组成，中间介质层的介电常数为 ϵ_2 和 μ_2 。同样定义各层中沿正方向和反方向的电场分量分别表示为 A_i 和 B_i ，超构表面的等效导纳为 Y_s 。此时边界条件可表示为

$$\begin{cases} A_1 + B_1 = A_2 + B_2, \\ Y_1(A_1 - B_1) = Y_2(A_2 - B_2) + Y_s(A_2 + B_2), \end{cases} \quad (5)$$

其中 $Y_2 = \sqrt{\epsilon_2} Y_0$ 为介质层的导纳。假定电磁波从自由空间入射，即 $Y_1 = Y_0$ 。可得超构表面的反射相位为

$$\phi_r = \arg\left(\frac{B_1}{A_1}\right) = \arg\left(\frac{(1 - \sqrt{\epsilon_2} - Y_s/Y_0) - (1 + \sqrt{\epsilon_2} - Y_s/Y_0)e^{2ikd}}{(1 + \sqrt{\epsilon_2} + Y_s/Y_0) - (1 - \sqrt{\epsilon_2} + Y_s/Y_0)e^{2ikd}}\right), \quad (6)$$

其中： k 为介质层中的波矢， d 为中间介质层厚度。

下面以一种典型的“工”字形超构表面单元结构为例，对其电路型相位调控原理进行分析。

图 5(a)为“工”字超表面的单元结构，自上而下包含三层：超构表面层、中间介质层和金属反射层。当 y 方向偏振的电磁波沿 $-z$ 方向垂直入射到结构表面，根据等效电路理论，在工字的两个金属横臂之间形成等效电容 C ，而 y 方向直金属臂在电场的作用下产生等效电感 L ，因此该结构可视为由等效电感 L 以及等效电容 C 串联的 LC 电路，其对应的表面阻抗可表示为 $Z_s = i\omega L + 1/(i\omega C)$ ^[46-47]。而当电场方向为 x 方向时，由于没有激发电磁谐振，该表面结构可透过全部入射

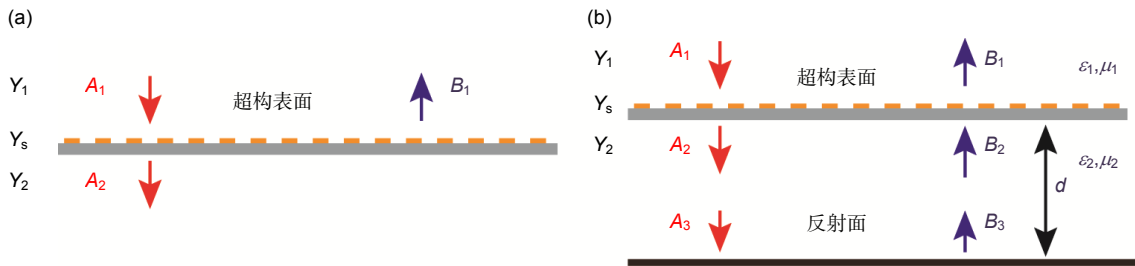


图 4 (a) 透射型超构表面等效电路模型图。(b) 反射型超构表面等效电路模型。

Fig. 4 Schematic of the equivalent circuit for (a) transmissive metasurfaces, and (b) reflective metasurfaces.

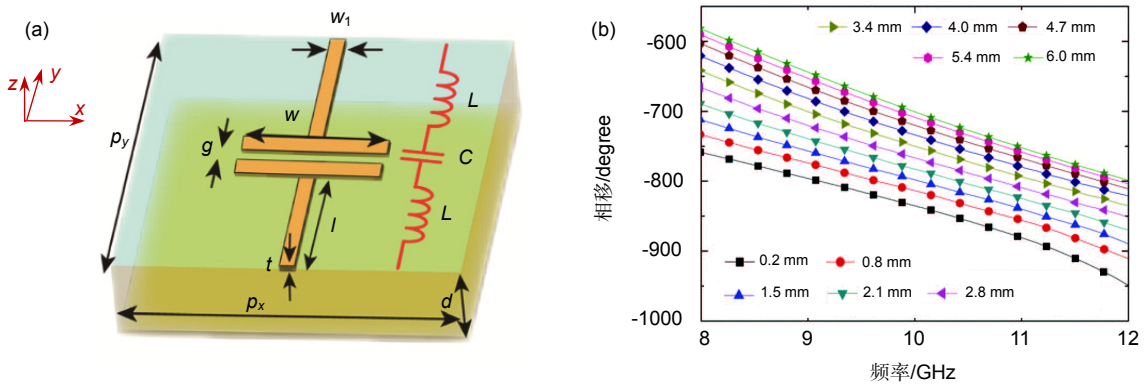


图 5 (a) 亚波长结构及等效电路模型。(b) 不同间隙宽度 g 对应的相位延迟， $p_x=5.2 \text{ mm}$ ， $p_y=7.4 \text{ mm}$ ， $w=2 \text{ mm}$ ， $w_1=0.1 \text{ mm}$ ， $t=0.035 \text{ mm}$ ，介质基底折射率为 1.58， $d=6 \text{ mm}$ ^[46]。

Fig. 5 (a) Equivalent circuit of subwavelength structure. (b) Dependence of phase shift on the gap g , $p_x=5.2 \text{ mm}$ ， $p_y=7.4 \text{ mm}$ ， $w=2 \text{ mm}$ ， $w_1=0.1 \text{ mm}$ ， $t=0.035 \text{ mm}$ ，the refraction index $n_d=1.58$ ， $d=6 \text{ mm}$ ^[46]。

电磁波,等效阻抗为无穷大。改变“工”字的结构参数,其等效电感和电容值会产生相应变化,从而改变结构表面的等效导纳 Y_s (或等效阻抗 Z_s)。反射相位随结构参数的变化规律如式(6)^[46]。图 5(b)为介质厚度 $d=6$ mm,仅改变周期工字金属横臂之间间隙 g 的情况下,反射相位谱的变化。在 8~12 GHz 区间内,不同间隙 g 对应的相位差近似呈线性变化,因而其可用于实现宽带相位调制。值得强调的是,这种反射式的超表面结构由于金属反射面的存在,在改变结构几何参数的过程中,其反射电磁波的振幅基本不变,在微波段金属损耗可忽略,反射效率接近 100%,因此是一种高效率、宽带的超表面器件。

3.2 电路型相位超构表面器件与应用

根据电路型相位调控原理,通过对超构表面的等效阻抗进行调节,其透射相位和反射相位可被调制,从而可构建相关的电路型超构表面器件^[48-50]。2013年,密歇根大学采用谐振电路型结构构建了一种典型的透射式超表面器件。当 y 偏振的电磁波入射到结构上,会在结构中同时激发电/磁谐振。该结构能够实现 2π 范围内透射相位的调节,实验证实其在微波段透射效率可达到 80%以上(图 6(a)和 6(b))^[48]。然而这种透射式超构表面的电/磁谐振金属结构沿 z 向排布,制备在介

质内部,这对于太赫兹及光波段器件的实现,加工难度较大。

近年来提出了一种基于多层结构的透射式电路型超表面器件,在红外波段有效地实现光束偏折(图 6(c)和 6(d))^[49-50]。这种多层超表面结构克服了单层结构调节相位能力有限的缺陷,同时兼顾了加工的可实现性。但由于多层金属结构的引入,会带来更大的电磁能量损耗,其效率通常不高。

反射式电路型超构表面可有效解决透射式电路型超表面存在的效率和加工难题。金属反射面的引入,可以将能量完全反射,从而使得能量利用率在微波段达到近 100%。近年来基于反射式的电路型超表面结构发展了包括宽带电磁偏折器^[46,51-53]、宽带电磁吸收器^[54-55]、宽带偏振转化器^[47,56-57]、定向表面波耦合器^[58]、平面聚焦/成像器件^[59]和全息器件^[60-61]在内的一系列高效的平面光学器件,见图 7。研究表明,利用亚波长结构的等效阻抗色散调制,可将金属的 Drude 色散模式转化为 Lorentz 色散,从而在宽频段范围内(20~45 THz)实现宽带红外电磁吸收^[54],以及在微波段^[47]和太赫兹波段^[62]实现相对带宽高达 3:1 的偏振转化器。将谐振电路的色散调控拓展到二维,偏振转化器的相对带宽可进一步展宽至 5:1,如图 8 所示^[56]。

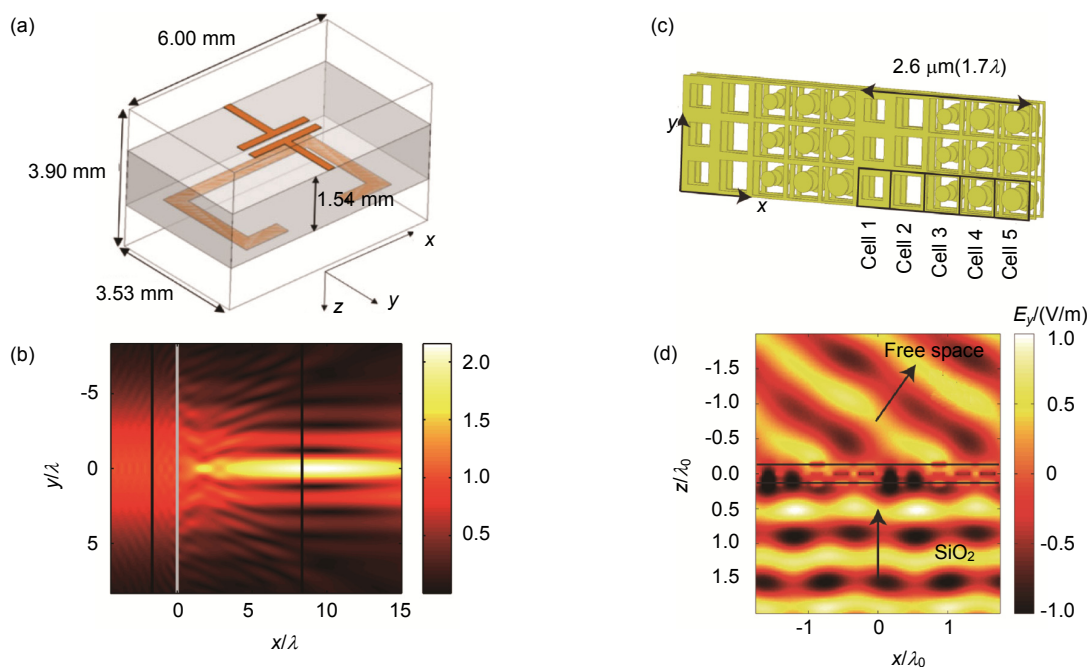


图 6 双层透射式电路型相位超构表面单元结构(a)及其光束整形(b)^[48]。三层透射式电路型相位超构表面结构(c)及其电磁偏折(d)^[50]。

Fig. 6 (a) Unit cell of double layered transmissive metasurface based on circuit-type phase modulation. (b) Beam shaping by the double layered transmissive metasurface^[48]. (c) Schematic of triple layered transmissive metasurface based on circuit-type phase. (d) Beam deflection by the triple layered transmissive metasurface^[50].

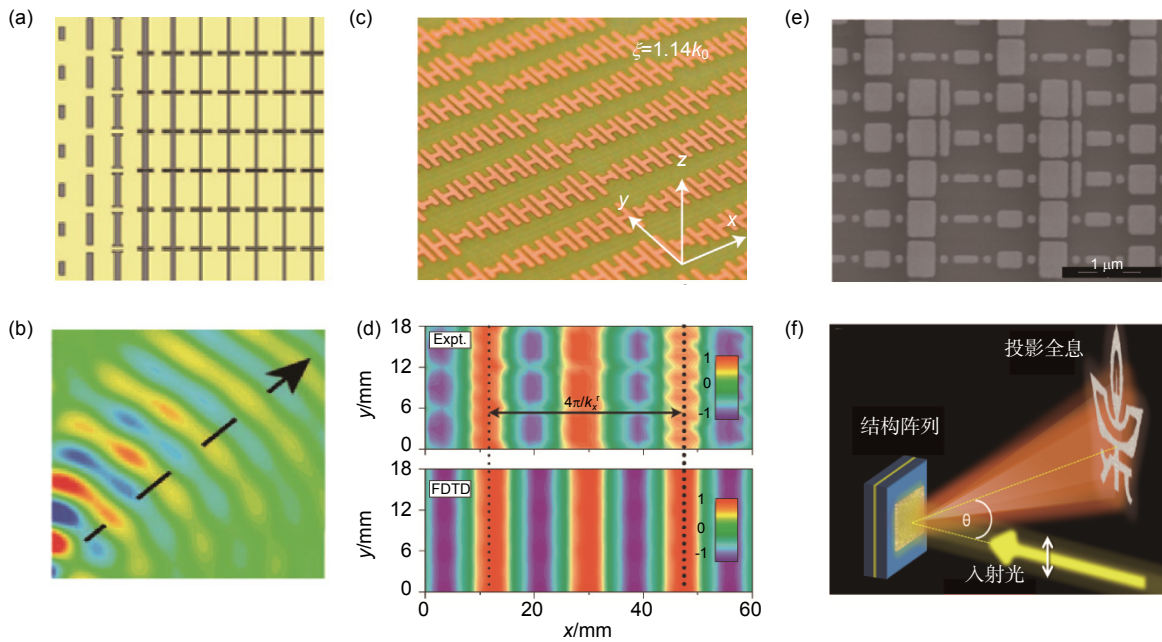


图 7 反射式电路型相位超构表面器件. 偏折器件结构(a)和场分布(b)^[46]. 表面波定向耦合器件结构(c)和场分布(d)^[58]. 全息器件结构(e)和全息效果图(f)^[61].

Fig. 7 Reflective metasurface devices based on circuit-type phase modulation. (a) Schematic of the deflector and (b) its field distribution^[46]. (c) Picture of directional coupler of surface wave. (d) Field distributions on surface of the coupler^[58]. (e) SEM image of metasurface hologram. (f) Schematic of holographic projection^[61].

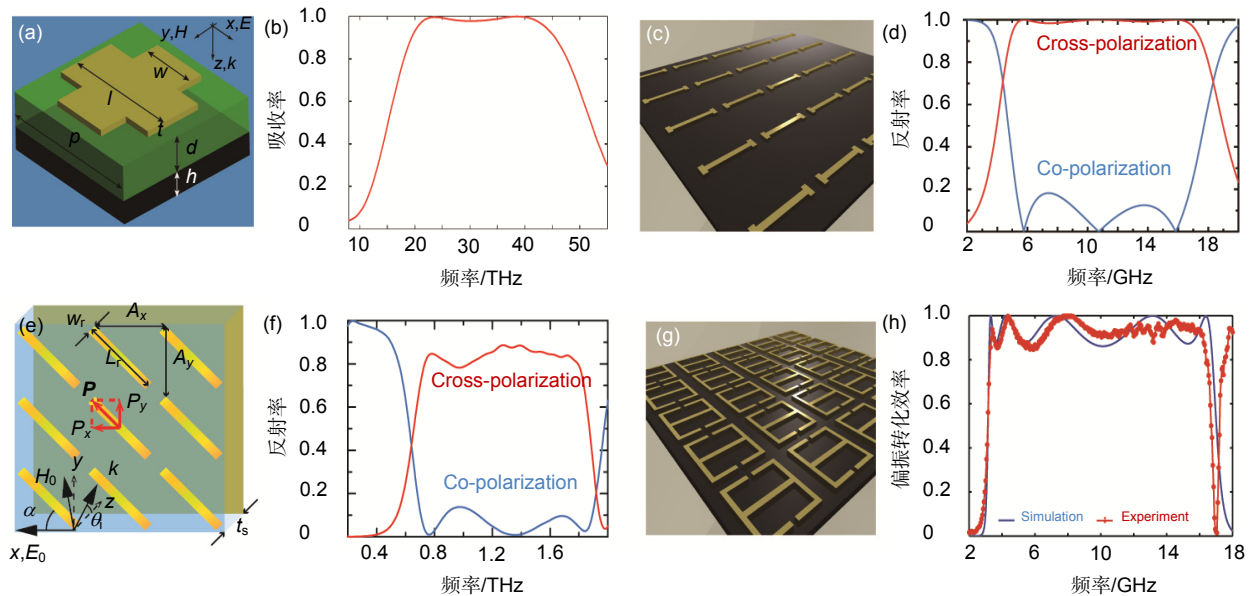


图 8 基于色散调控宽带电路型相位超构表面器件. 宽带吸收器件单元结构(a)和吸收谱(b)^[54]. 微波段一维色散调控偏振转化器件结构(c)和反射谱(d)^[47]. 太赫兹波段一维色散调控偏振转化器件结构(e)和反射谱(f)^[62]. 二维色散调控偏振转化器件结构(g)和反射谱(h)^[56].

Fig. 8 Broadband metasurface devices based on circuit-type phase modulation through dispersion engineering. (a) Unit cell of broadband absorber. (b) Absorption spectrum of the broadband absorber^[54]. (c) Broadband microwave polarization transformer through one dimensional dispersion engineering and (d) its reflection spectrum^[47]. (e) Broadband THz polarization transformer through one dimensional dispersion engineering and (f) its reflection spectrum^[62]. (g) Broadband polarization transformer through two dimensional dispersion engineering and (h) its reflection spectrum^[56].

4 几何相位型超构表面

4.1 几何相位型超构表面理论

1984 年, 英国 Berry 教授首次提出几何相位的概念。Berry 研究发现, 当一个绝热物理系统从初态沿着某一路径(一定的参数空间或者态空间)演变一个周期并回到初始状态时, 其最终态与初始态并不等效, 而需要增加一个额外的相位因子^[63]。该相位因子只与系统演变的几何路径相关, 因此被称为几何相位。几何相位的利用最早出现在微波系统中^[64]。1956 年, 印度拉曼研究所 Pancharatnam 教授研究得到电磁波在偏振态转化过程中会产生一个额外的相位^[65]。某一偏振态的电磁波, 沿庞加莱球表面某一路径演变并回到初态, 其终态与初始态相差一个相位因子, 其值等于演变路径测地线所围闭合环路立体角的一半。图 9 为采用庞加莱球描述电磁波偏振态及几何相位的示意图。在一个单位半径的球面上, 其表面的每一个点都对应了一种对应的偏振态。当光波的偏振态从庞加莱球的北极经赤道和南极重新返回北极后, 光波的相位变化为闭合路径对应立体角的一半。

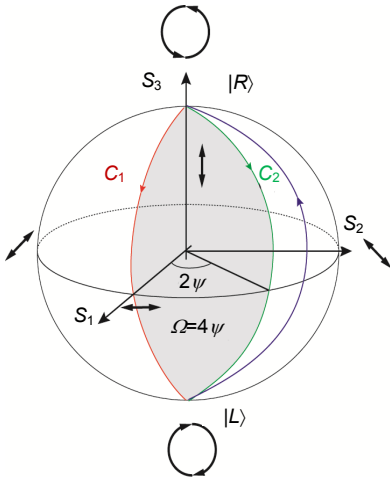


图 9 几何相位的庞加莱球表示。

Fig. 9 Illustration of the principle of geometric phase by use of the Poincaré sphere.

为了便于理解, 电磁波在超构表面中的传输过程和几何相位的产生可通过琼斯矩阵来描述

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\zeta \begin{bmatrix} E_{xin} \\ E_{yin} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: E_{xout} 和 E_{yout} 分别为出射电磁波的 x 和 y 偏振分量, E_{xin} 和 E_{yin} 为入射电磁波的 x 和 y 偏振分量, \mathbf{J}_ζ 为琼斯矩阵:

$$\mathbf{J}_\zeta = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

对于各向异性超构表面, 假定其局域坐标系的主轴方向分别为 u 和 v , 坐标轴 u 与 x 轴的夹角为 ζ , 如图 10 所示。

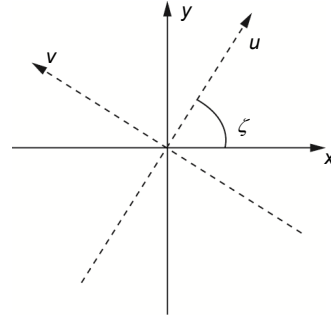


图 10 各向异性材料所在的局域坐标系。

Fig. 10 Localized coordinate system of the anisotropic materials.

假设两个主轴方向的透射复振幅分别为 t_u 和 t_v , 推导可得此时^[66]

$$\mathbf{J}_\zeta = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \zeta + t_v \sin^2 \zeta & (t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta \\ (t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta & t_u \sin^2 \zeta + t_v \cos^2 \zeta \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对于 x 偏振电磁波入射, 对应的输出电磁波为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_\zeta \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \zeta + t_v \sin^2 \zeta \\ (t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

从式(10)可以发现, 电磁波在与各向异性超构表面相互作用后, 出射电磁场除了含原有偏振态电磁波外, 还激发产生了正交偏振的电磁分量, 振幅为 $(t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta$ 。假定各向异性超构表面绕 z 轴旋转 $\pm 90^\circ$, 此时坐标轴 u 与 x 的夹角 ζ 为 $\zeta \pm \pi/2$, 根据式(10)得到 x 偏振电磁波入射条件下的输出电场为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_u \sin^2 \zeta + t_v \cos^2 \zeta \\ -(t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta \end{bmatrix}, \quad (11)$$

此时, 正交偏振电磁波振幅与式(10)相等, 相位相差 π 。

对于圆偏振电磁波入射情况, 经各向异性超构表面后的输出电场表达式为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} &= \frac{\mathbf{J}_\zeta}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} t_u \cos^2 \zeta + t_v \sin^2 \zeta & (t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta \\ (t_u - t_v) \sin \zeta \cos \zeta & t_u \sin^2 \zeta + t_v \cos^2 \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((t_u + t_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (t_u - t_v) e^{2i\sigma\zeta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right), \quad (12) \end{aligned}$$

其中 $\sigma = \pm 1$ ，对应于右旋和左旋圆偏振态。左(右)旋圆偏振入射电磁波在与各向异性超构表面结构相互作用后，出射电磁场除了含有复振幅为 $(t_u + t_v) / 2\sqrt{2}$ 的原有主偏振态电磁波外，还产生了复振幅为 $(t_u - t_v) \cdot e^{2i\sigma\zeta} / 2\sqrt{2}$ 的正交偏振态(右(左)旋偏振)电磁波，且正交偏振态电磁波携带了 $2\sigma\zeta$ 的附加几何相位。

同理，对于反射型超构表面，只需将复振幅透射系数 t_u 、 t_v 用复振幅反射系数 r_u 、 r_v 来替代，便得到输出电场的表达式为

$$\begin{bmatrix} E_{xout} \\ E_{yout} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left((r_u + r_v) \begin{bmatrix} 1 \\ i\sigma \end{bmatrix} + (r_u - r_v) e^{2i\sigma\zeta} \begin{bmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{bmatrix} \right). \quad (13)$$

指向角空间变化的矩形金属柱或其互补结构是构建几何相位型超构表面器件的典型单元结构(图 11(a))。该结构对于不同的偏振态具有各向异性，即 t_u 和 t_v 不相等。因此，当圆偏振电磁波入射到结构表面，根据式(12)，与结构相互作用后透过的电磁波除了含有主偏振电磁波以外，还会激发具有正交偏振态的电磁波。并且正交偏振态电磁波会产生与结构指向角相关的相位突变，相位突变值为 2ζ ($\sigma=1$)，见图 11(b)。

4.2 几何相位型超构表面器件与应用

利用几何相位的调控原理，除得到包括电磁偏转器^[67]、平面成像透镜^[68-71]、定向表面波耦合器^[72-73]在内的简单平面光学器件外(图 12)，还实现了诸如超振

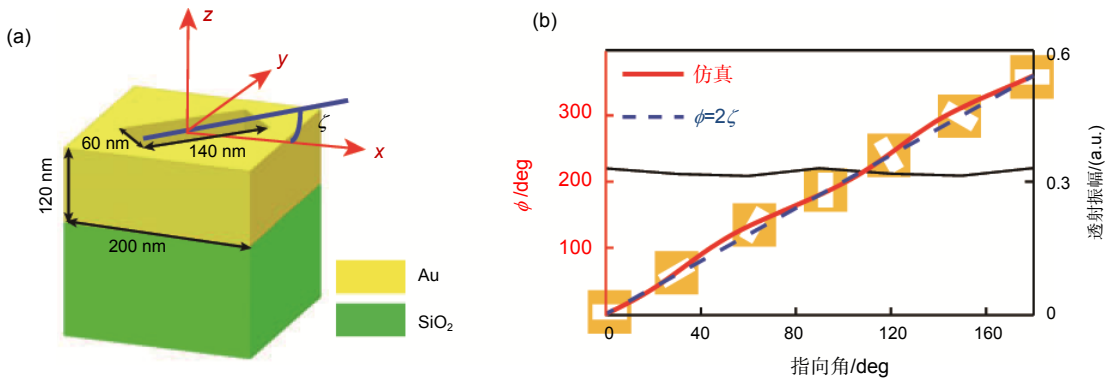


图 11 (a) 金属矩形狭缝结构. (b) 几何相位透射效率调控.

Fig. 11 (a) Schematic of the rectangular metallic slit. (b) Geometric phase and transmittance modulation as functions of the orientation angle.

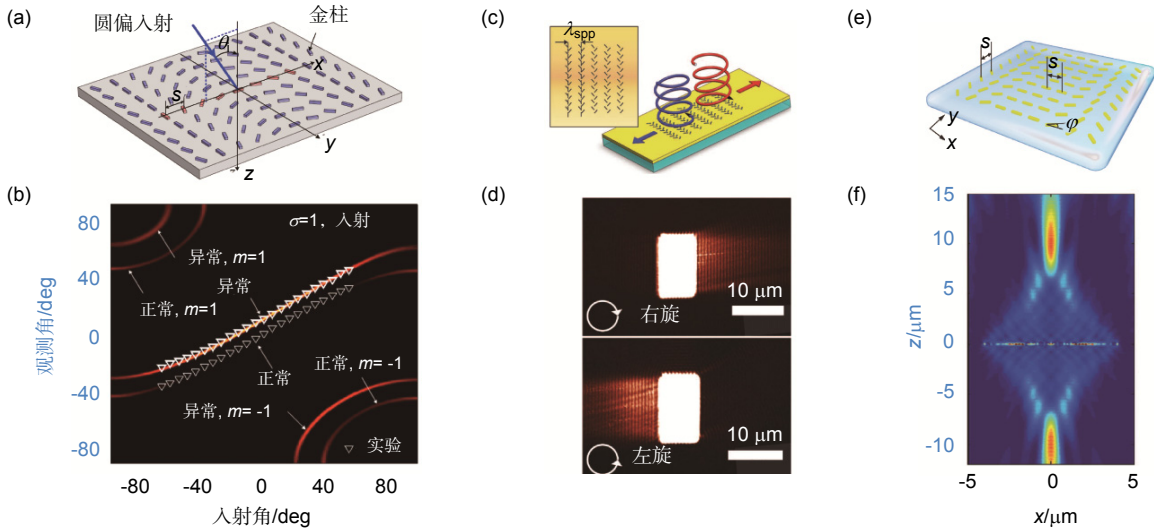


图 12 基于几何相位超构表面器件. 偏折器件结构(a)和偏折角与入射角关系(b)^[67]. 表面波定向耦合器件结构(c)和耦合场分布(d)^[73]. 聚焦器件结构(e)和聚焦场分布(f)^[71].

Fig. 12 Metasurface devices based on geometric phase modulation. (a) Schematic of deflector. (b) Dependence of deflective angle on the incident angle^[67]. (c) Schematic of directional coupler. (d) Field distributions on surface of the coupler^[73]. (e) Schematic of metasurface lens. (f) Field distribution in the metasurface lens^[71].

荡透镜^[74]、涡旋光束产生器^[67,75-78]、涡旋光分束器^[79-80]、全息器件^[81-86]在内的一系列复杂相位分布的平面光学器件(图13)。

相比于其他类型的超构表面,基于几何相位原理的超构表面器件最大的优势在于其相位调控是宽带消

色差的,因此器件可宽带工作。利用这一宽带调控特性,并结合空间频谱平移,可实现彩色三维的全息成像,见图14^[81]。该技术相比于其他超构表面彩色全息技术^[87-89],可有效避免不同颜色之间的串扰,从而提高成像的质量。

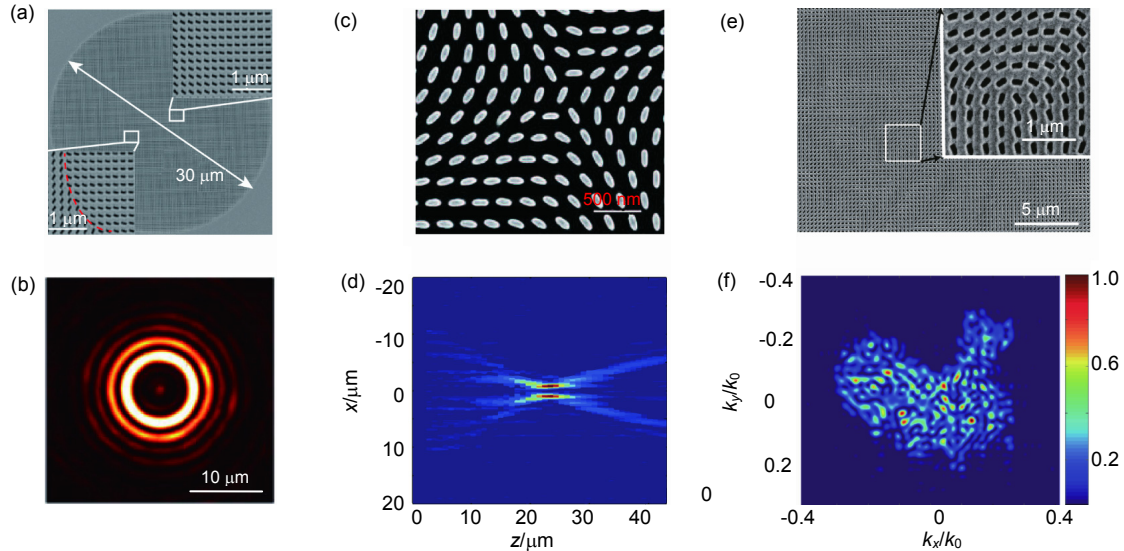


图13 基于几何相位复杂光场超构表面器件。超振荡透镜结构 SEM 图(a)和聚焦场分布(b)^[74]。聚焦涡旋光产生器结构 SEM 图(c)和场分布(d)^[77]。全息器件结构 SEM 图(e)和全息场成像场分布(f)^[86]。

Fig. 13 Metasurface devices for complex optical field generation based on geometric phase modulation. (a) SEM image of superoscillatory lens. (b) Field distribution at the focal plane ^[74]. (c) SEM image of optical vortex lens. (d) Meso-field distribution of the optical vortex lens ^[77]. (e) SEM image of meta-hologram. (f) Far-field light-intensity distribution of the holographic image ^[86].

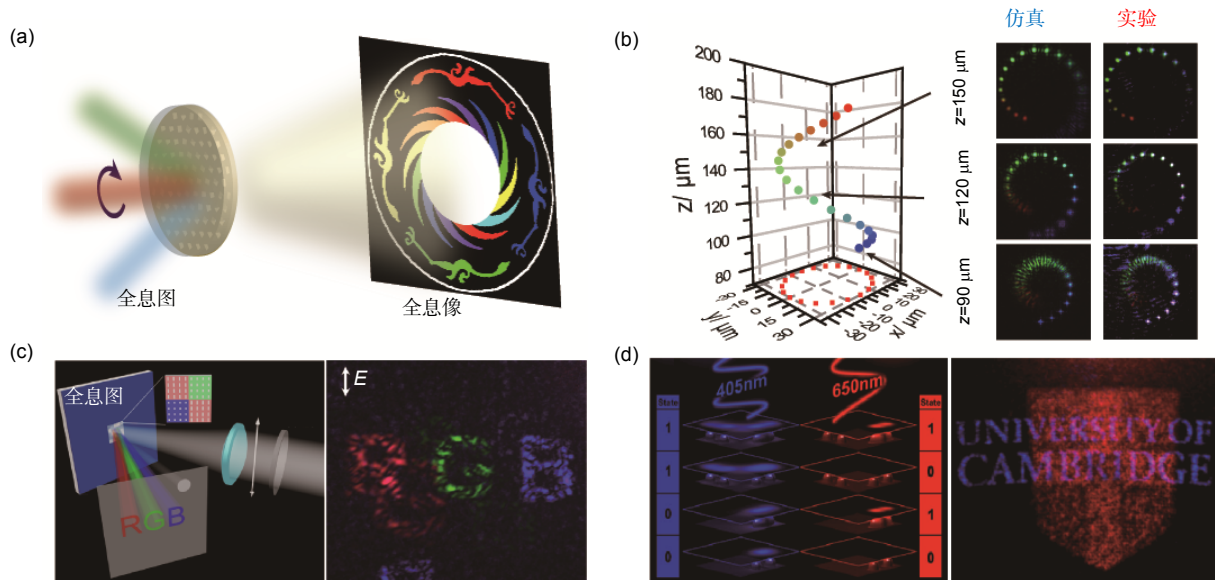


图14 超构表面彩色全息器件。(a) 基于几何相位彩色全息成像原理。(b) 3D 彩色全息成像^[81]。(c) 基于 SP 谐振型彩色全息成像方案和成像结果^[87]。(d) 基于散射振幅型彩色全息成像方案和成像结果^[88]。

Fig. 14 Metasurface devices for multicolor holographic imaging. (a) Schematic of multicolor meta-holographic imaging based on geometric phase and (b) its 3D multicolor holographic image ^[81]. (c) Schematic of multicolor meta-holographic imaging based on SP resonance ^[87] and its multicolor holographic image ^[87]. (d) Schematic of multicolor meta-holographic imaging based on amplitude modulation and its multicolor holographic image ^[88].

值得指出的是,通常该类器件通过相位的离散化来构建,相位的离散过程会带来器件性能的降低,如低频处工作带宽变窄,器件对应指标下降等。为解决这一问题,悬链线光学的概念近来被提出^[66]。通过严格的理论推导,得到曲线各点切向导数沿坐标轴方向连续线性变化的悬链线结构可实现宽带连续的几何相位调控,见图 15。采用单个悬链线超构单元,便可实现宽带的光自旋霍尔效应^[90]。悬链线是自然界中普遍存在的一种曲线形式,是描述一条两端固定的柔性链条在自身重力作用下呈现的弧线形式。Robert Hooke 称其为建筑学中“真正的数学和机械形式”(“true mathematical and mechanical form”)^[91]。目前悬链线及其变形结构已经被用于包括电磁偏折器^[92-94]、平面透镜^[90]、涡旋光束和聚焦涡旋光束产生器件^[66]、高阶贝塞尔光束产生器件^[95]等在内的一系列超薄、轻量化的平面光学器件,见图 16。悬链线光学器件被认为有望成为下一代集成光子学的核心^[96-97]。

需要指出的是,几何相位超构表面的消色差特性是指相位的消色差,即不同波长下其产生的突变相位是恒定的,而对于功能器件,色差仍然存在。针对这一问题,目前发展了一种多光谱的技术,可以在离散

的波长处实现消色差器件甚至色差可控器件^[69-70,76]。基于几何相位的超构表面相比于其他类型的超构表面,最大的特点在于其异常相位的产生不依赖于器件的厚度,以及相位的宽带消色差,但其缺点也同样明显,即能量利用率较低。对于超薄的超构表面透射器件,其理论的能量利用率极限为 25%^[98],目前报道的相关器件,其效率值通常不超过 10%。因此,如何提高几何相位型超构表面的能量利用率成为近年来的研究热点。根据式(12),对于几何相位型超构表面器件,除了产生振幅为 $0.5|t_o - t_i|$ 正交偏振的异常光束外,同时还存在振幅为 $0.5|t_o + t_i|$ 、偏振态与入射偏振一致的正常透射光束。设计一种更为复杂的表面结构,以提高器件的设计自由度,从而对 t_o 和 t_i 进行调节,可提高器件的能量利用率^[99-100]。新加坡国立大学 Ding 等人基于该方法,在小于 $\lambda/1000$ 的器件厚度下,在微波波段实现了 24.7% 的能量利用率^[100]。此外,将相干照明技术引入到超构表面器件中,利用正常光相干相消,异常光相干相长的原理,可以使得器件的能量利用率提高近两倍,从而可突破 25% 的理论极限值;并且通过两束相干光相位差的实时调节还可实现输出能量的动态调控,如图 17 所示^[93]。

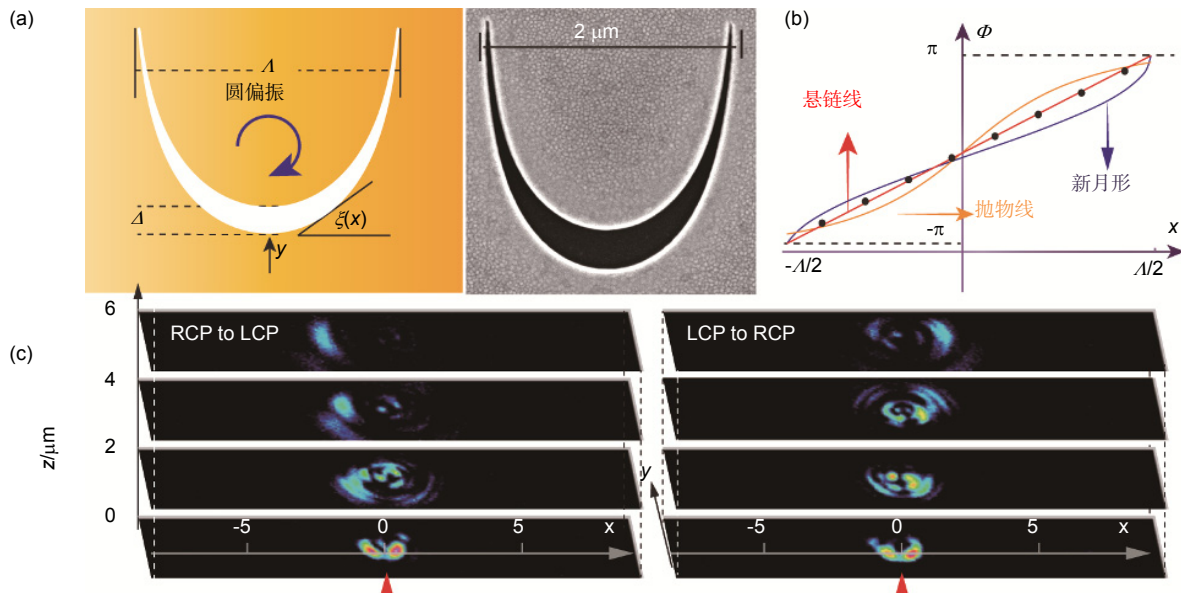


图 15 (a) 悬链线超构单元示意图和 SEM 图. (b) 悬链线相位调控特性. (c) 悬链线超构单元产生光自旋霍尔效应^[90].

Fig. 15 (a) Schematic and the SEM image of the catenary aperture. (b) Phase distributions of the catenary (red), parabola (orange), crescent (blue), and discrete antennas (black dot) for LCP illumination. (c) Angular Spin Hall effect observed in a single catenary aperture^[90].

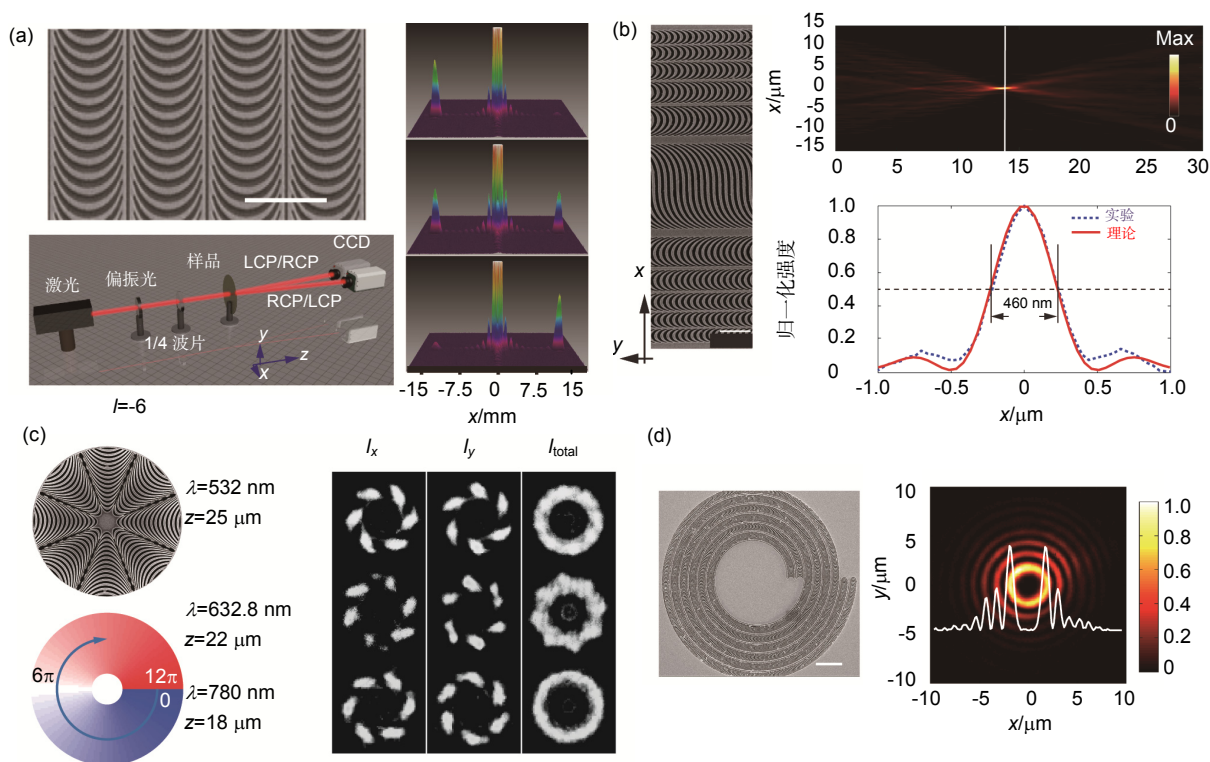


图 16 悬链线器件. (a) 悬链线偏折器^[94]. (b) 悬链线平面透镜^[90]. (c) 悬链线涡旋光产生器^[66]. (d) 悬链线贝塞尔光束产生器^[95].

Fig. 16 Catenary devices. (a) Catenary deflector^[94]. (b) Catenary lens^[90]. (c) Catenary optical vortex generator^[66]. (d) Catenary Bessel beam generator^[95].

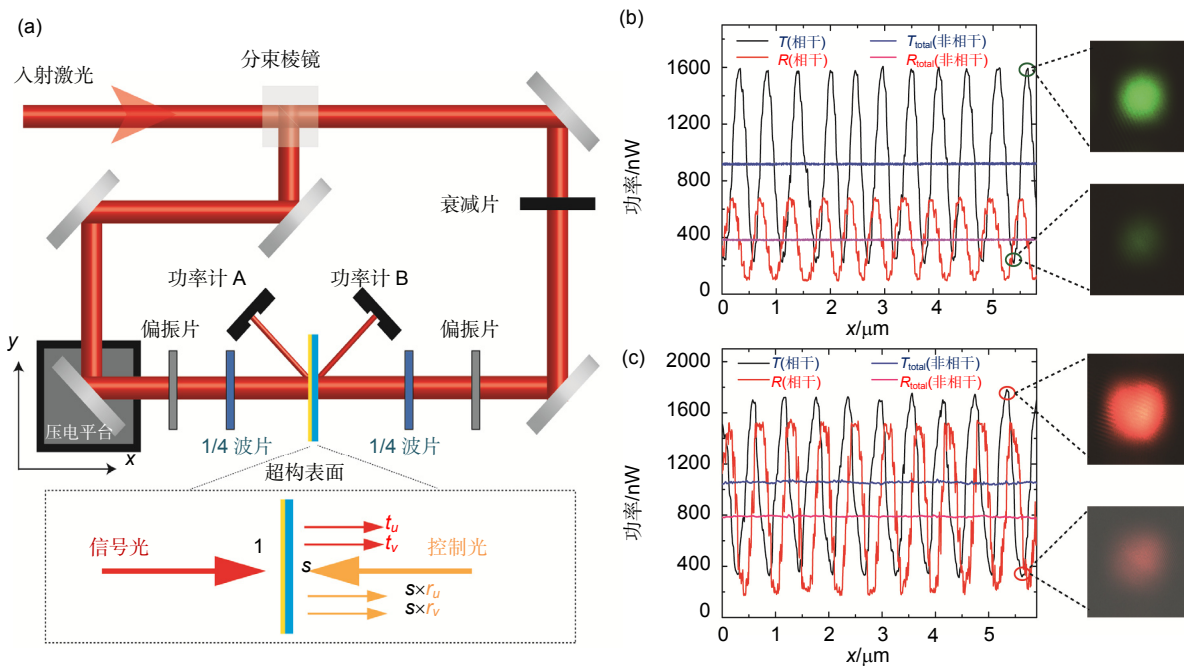


图 17 相干照明提高超构表面能量利用率^[94]. (a) 相干照明光路图. (b), (c) 532 nm 波长(b)和 632.8 nm 波长(c)入射, 相干与非相干照明情况对比.

Fig. 17 Efficiency enhancement by coherent illumination^[94]. (a) Experimental configuration of coherent illumination. Measured results of the abnormal transmission and reflection at (b) $\lambda=532$ nm and (c) $\lambda=632.8$ nm.

目前提高几何相位型超构表面器件效率最常用的方法为设计反射式^[93,101-104]和介质型几何相位超构表面^[105-111],这两种方法可使器件的能量利用率达到80%以上。

图18(a)和18(b)分别为利用反射式几何相位型超构表面构建的全息器件^[102]、平面虚拟赋形器件^[101]和电磁幻象器件^[104]。虚拟赋形和电磁幻象技术被认为是新一代电磁隐身的替代性技术^[112]。平面虚拟赋形技术通过在平面内设计空间非均匀的亚波长结构,对入射电磁波引入梯度相位,将其散射到非威胁方向,从而缩减雷达散射截面(RCS)。由于该技术无需改变目标的实体外形,相比于电磁幻象技术^[104],在工作带宽和器件平面化方面更具优势。

为了摆脱金属型超构表面的损耗问题,Hasman等人提出了一种纯介质型的几何相位超构表面,其在GaAs基片表面制作离散的、空间旋转的光栅结构,在10.6 μm 波长实现了高效的光学器件^[105,110],见图19(a)。

近年来,基于硅(Si)纳米柱和二氧化钛(TiO_2)纳米柱结构的介质型几何相位超构表面被用于实现包括高效平面透镜^[108-109,111]、贝塞尔光束产生器^[109]、全息器件^[107]等在内的各种平面光学器件,见图19(b)和19(c)。

介质型几何相位超构表面可以在透射的工作模式下保持较高的能量利用率,但其机理是利用具有一定厚度的介质激发电磁波在厚度方向的谐振,从而对式(12)中 t_u 和 t_r 进行优化调节,因此介质柱单元的深宽比通常较高,对加工制备提出了较高的要求。目前制备的方法主要有对 Si 和 GaAs 材料的干法刻蚀^[105,111]和 TiO_2 材料的保形生长^[108]两类。

5 多种相位融合型超构表面

前面几部分分别介绍了几种典型的超构表面相位调控原理和其对应的超构表面器件,然而还存在一些超构表面器件并非基于单一的相位调控,而是融合了两种或以上的相位调控原理。

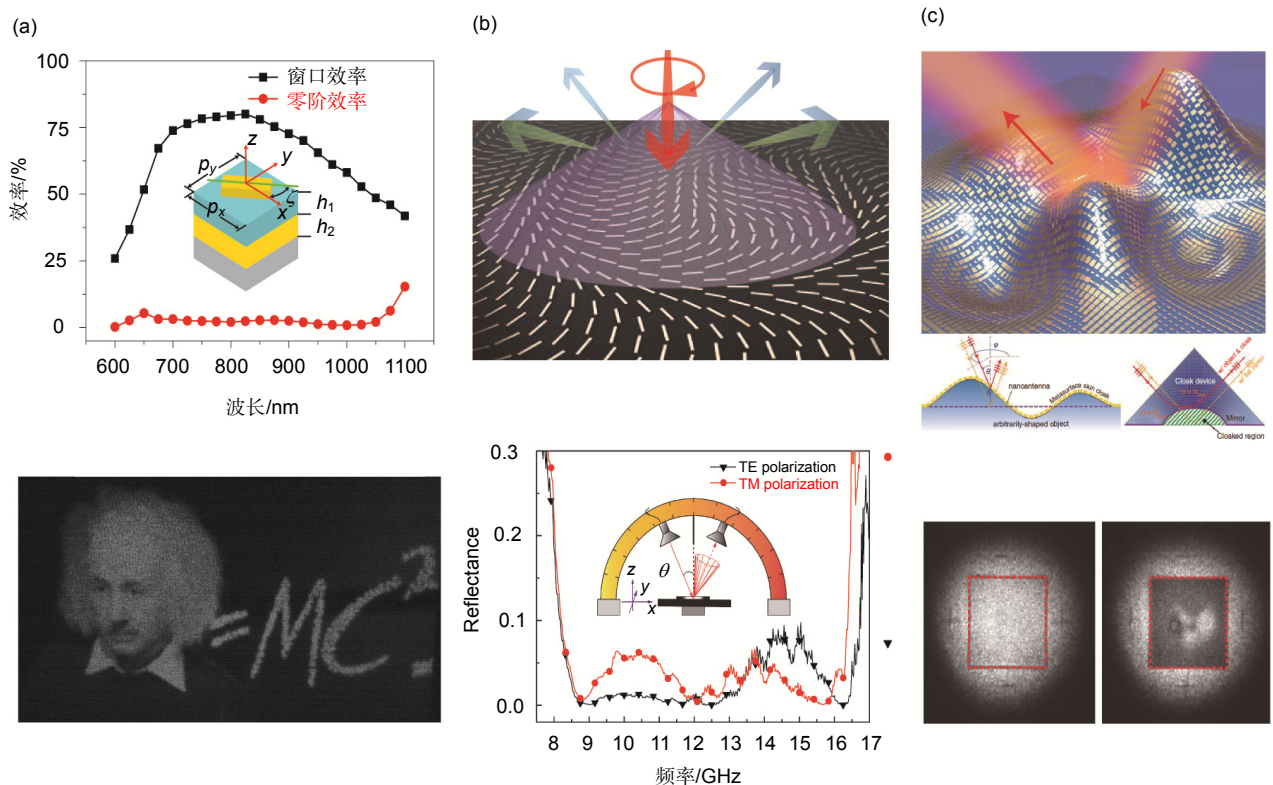


图18 反射式几何相位型超构表面器件。(a) 全息器件效率谱及成像结果^[102]。(b) 平面虚拟赋形器件及其反射谱^[101]。(c) 电磁幻象器件及其隐身效果^[104]。

Fig. 18 Reflective metasurface devices based on geometric phase modulation. (a) Efficiency spectrum of the holographic device and the holographic image^[102]. (b) Schematic of virtual shaping by planar metasurface and the measurement results of the reflectance spectra for TE and TM polarization illuminations^[101]. (c) Schematic of electromagnetic illusion by metasurface and the optical reflection images when the metasurface cloak is "on" and "off"^[104].

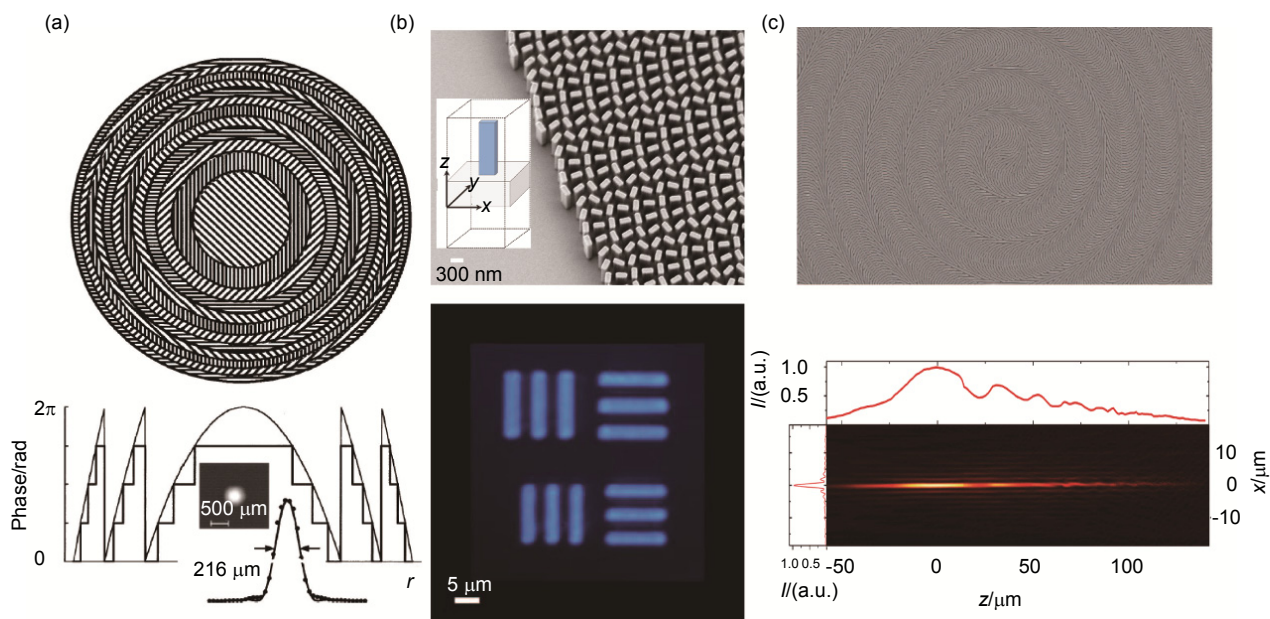


图 19 介质型几何相位超构表面. (a) GaAs 材料红外透镜^[110]. (b) TiO₂ 透镜^[108]. (c) Si 材料贝塞尔光束产生器^[109].
Fig. 19 Dielectric metasurface devices. (a) GaAs infrared lens^[110]. (b) TiO₂ lens^[108]. (c) Silicon Bessel beam generator^[109].

以 2011 年 Capasso 团队所提出的 V 形天线结构为例^[24], 其设计原理融合了电路型相位和几何相位的调控。如图 20(a)所示为八台阶相位的 V 形天线电磁偏折器件, 其由两组沿 z 轴进行 90° 旋转的亚波长结构组成。每一组结构通过调节结构臂长和两臂夹角等参数来调节其等效电路参数, 从而实现电路型相位的调控; 而两组之间通过旋转 90° 来实现 π 的附加几何相位。这一原理在几何相位的琼斯矩阵描述中已经介绍。基于 V 形天线结构同样可获得异常的电磁偏折, 见图 20(b) 和 20(c)^[24,113]。

V 形天线超构表面自 Capasso 团队提出以来得到

了广泛的研究, 其金属结构^[24,113-118]、互补狭缝结构^[119-120]、双层结构^[121], 以及变形的 C 形结构^[122-123]可在一系列相位调制型器件构建中发挥作用, 见图 21。

除了电路型相位和几何相位联合调控外, 另一类线宽和转角同时变化的介质矩形(或椭圆形)柱超构表面结构的工作原理本质上可理解为传输型相位和几何相位的同时调控^[111,124]。前面已经介绍, 介质柱线宽的变化可以对等效折射率进行调控, 从而实现传输相位的调控; 而通过介质柱的旋转则可实现对几何相位的调控。基于这一原理除了可以构建包括涡旋光产生器在内的各种平面光学器件外(图 22(a)), 还可以在同一

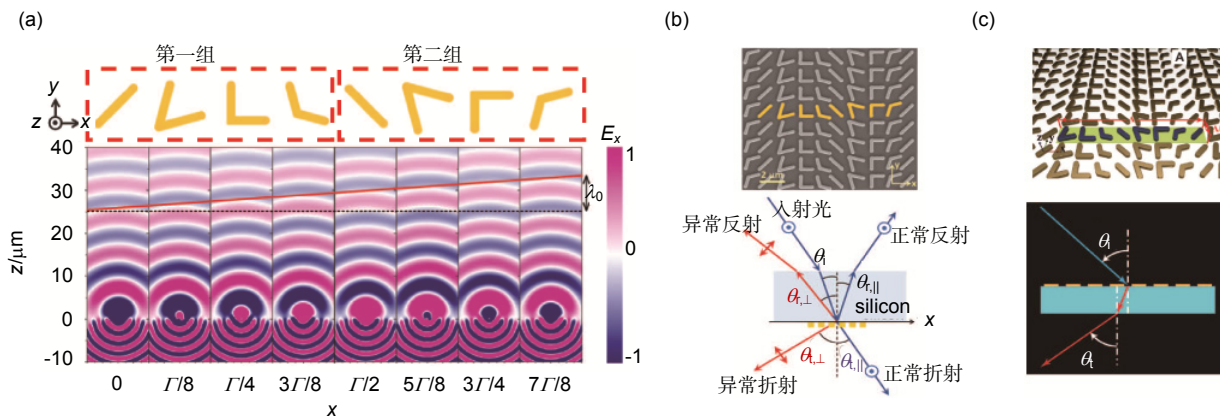


图 20 V 形天线相位调控. (a) 单元结构散射相位^[24]. (b) 可见光波段异常偏折^[24]. (c) 近红外波段异常偏折^[113].
Fig. 20 Phase modulation by V-shaped antennas. (a) Scattering phase of the antennas^[24]. (b) Deflector in visible light^[24]. (c) Deflector in near infrared^[113].

超构表面内独立地操控两种相位从而实现全息图像的切换(图 22(b))。

此外,最近还出现了另一种传输相位和几何相位

同时调控的超构表面,如图 23(a)。该结构利用 SPP 狭缝波导的传输相位与圆环在圆偏振光入射下几何相位的调控可以构建整数或分数的涡旋光束(图 23)^[125]。

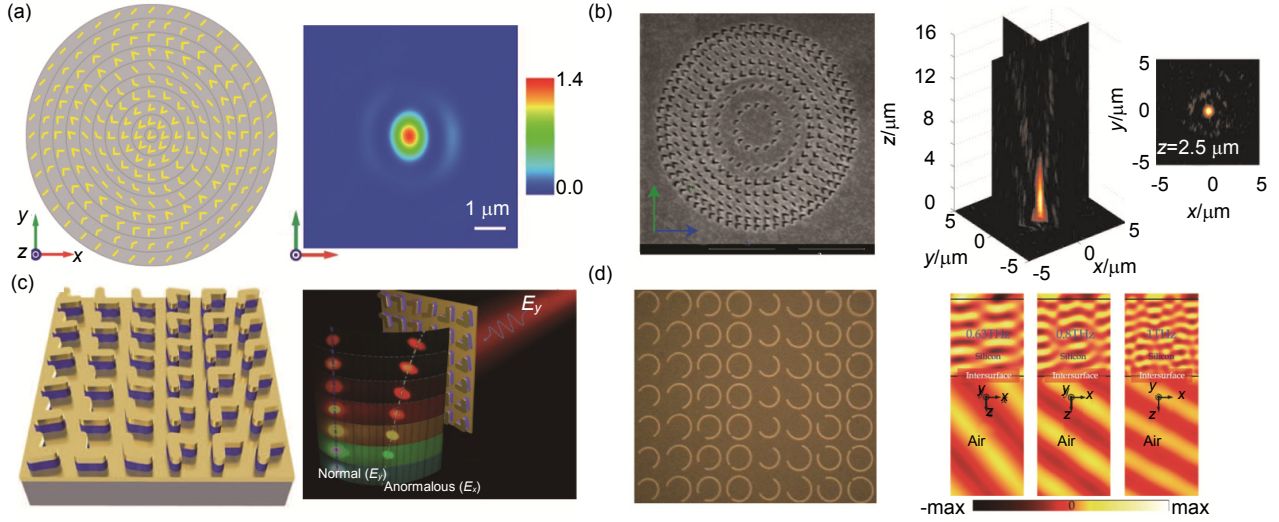


图 21 V形天线超构表面器件。(a) V形金属结构聚焦透镜^[116]。(b) V形狭缝结构聚焦透镜^[119]。(c) 双层V形结构偏折器^[121]。(d) V形变形结构(C形结构)偏折器^[123]。

Fig. 21 Metasurface devices based on V-shaped antennas. (a) Lens based on V-shaped metallic particles^[116]. (b) Lens based on V-shaped metallic slits^[119]. (c) Deflector based on double layered V-shaped structures^[121]. (d) Deflector based on C-shaped structures^[123].

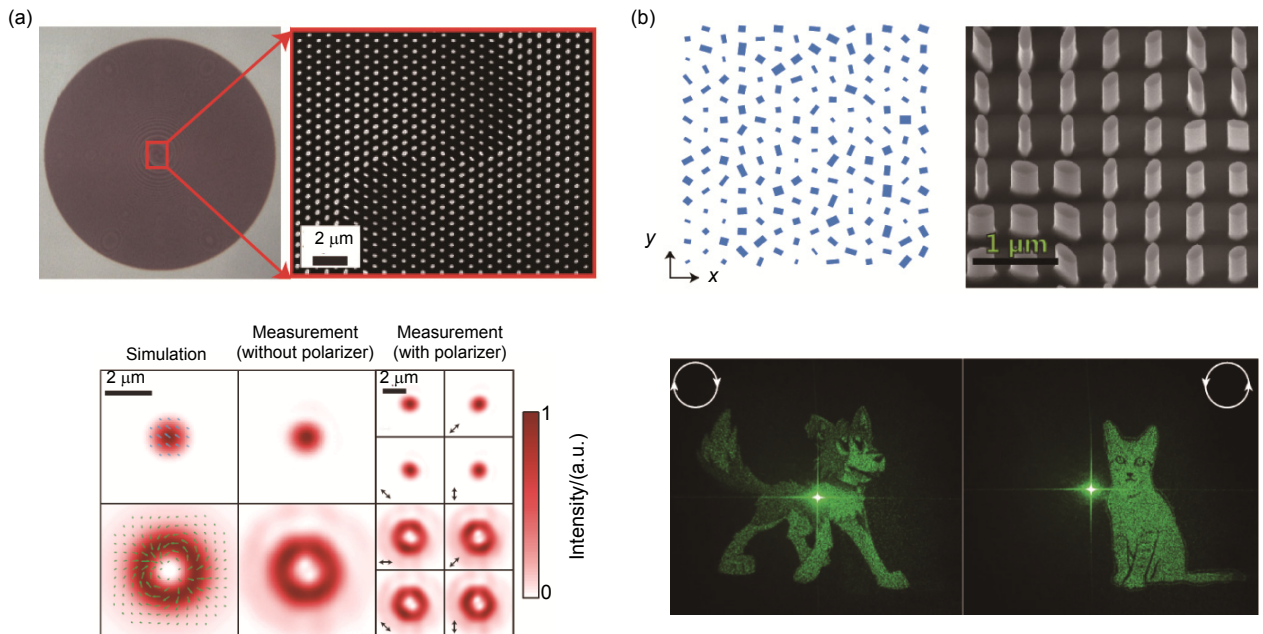


图 22 传输相位和几何相位同时调控型介质超构表面器件。(a) 涡旋光束产生其结构及其远场分布^[111]。(b) 可切换全息结构和光场图^[124]。

Fig. 22 Dielectric metasurface devices based on the merge of transmission phase and geometric phase modulations. (a) Optical vortex generator and its far-field distribution^[111]. (b) Polarization-switchable hologram and its holographic image^[124].

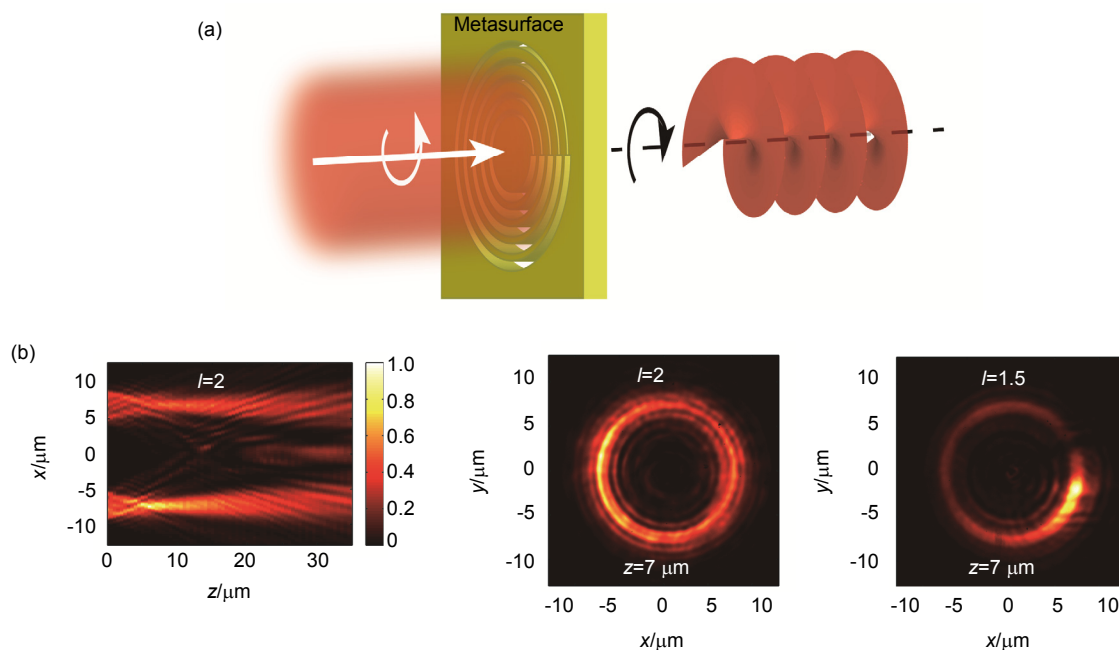


图 23 传输相位和几何相位同时调控型金属超构表面器件. (a) 涡旋光束产生结构示意图. (b) 产生的拓扑荷 $l=2$ 和 $l=1.5$ 涡旋光束场分布^[125].

Fig. 23 Metallic metasurface devices based on the merge of transmission phase and geometric phase modulations. (a) Schematic of the generation of optical vortex. (b) Field distribution of optical vortex for topological charge $l=2$ and $l=1.5$ ^[125].

6 振幅相位融合型超构表面

振幅型光学器件相对于相位型器件效率通常较低,但振幅调制的引入可以提高器件设计的调节自由度,从而提高器件的性能。

构造振幅调控和相位调控相结合的超构表面器件最简单的方式是在相位调控的基础上引入二阶振幅调控。该方法的基本思路是利用计算全息算法得到全息图的相位和振幅分布,再将振幅分布设定阈值从而进行二阶离散化。可以将振幅分布离散化为 1 和 0,即振幅值为 1 处为透射结构,为 0 处为不透明金属膜^[126],如图 24(a);也可以将振幅分布离散化为 1 和 0.5,即振幅值为 0.5 处的结构透射率是 1 处的一半,如图 24(b)^[128]。

另外,在线偏振入射的条件下,C 形结构在旋转过程中可以实现连续的振幅调制和二阶的相位调制;进一步调节 C 形结构的尺寸则可实现振幅和相位的完全调控^[127],如图 24(c)。

7 总结与展望

超构表面可在亚波长尺度内实现对相位、振幅和

偏振等的灵活设计,并且兼具超构材料无法比拟的平面化和低损耗的优点,它的出现为减轻传统光学系统负荷以及实现光学系统集成化提供了有效的技术途径。在诸多特定的应用环境下,将平面的超构表面器件引入到光学系统中替代传统的曲面元件,可以有效降低系统的复杂度,提高光学系统的可靠性,促进集成光学系统和空间光学系统的发展。超构表面的理论、加工测试及应用研究在近年来得到了飞速发展,本文在这一背景下对现有的超构表面技术进行了整理和介绍。超构表面的研究仍在不断拓展之中,新的超构表面理论和应用也相继提出,如非线性超构表面^[129-131]、动态可调超构表面^[132]等。正因为如此,超构表面领域还存在很多机遇和挑战值得进一步研究。

1) 大口径超构表面器件加工

大面积超构表面的加工对于现有的加工技术来说,仍然是巨大的挑战,尤其在光波段,由于结构的特征尺寸通常为几十到几百纳米量级,目前广泛采用的是聚焦离子束刻蚀(FIB)和电子束光刻(EBL)等方法。而这两种方法的加工区域往往受限,对于 FIB 技术来说加工区域通常只有几十微米,而采用 EBL 来加工纳米量级的小特征尺寸图形,加工区域通常也只有亚毫

米量级；并且这两种技术加工成本都较为昂贵。近来一些新的加工技术的引入，如表面等离子体光刻^[133-134]、纳米压印技术^[135]等，有望解决光波段超构表面器件的大面积加工问题。

2) 色差问题

超构表面作为一种衍射型光学元件，色差问题是

阻碍它进一步实用化的主要障碍之一。尽管多光谱技术^[45,69-70,76]、色差补偿技术^[32,136]等方法在一定程度上提供了解决的手段，然而高效宽带消色差超构表面器件的设计仍是需要深入研究的重要课题。

3) 光波段智能动态调控超构表面

智能化动态可调的电磁器件是下一代新型智能电

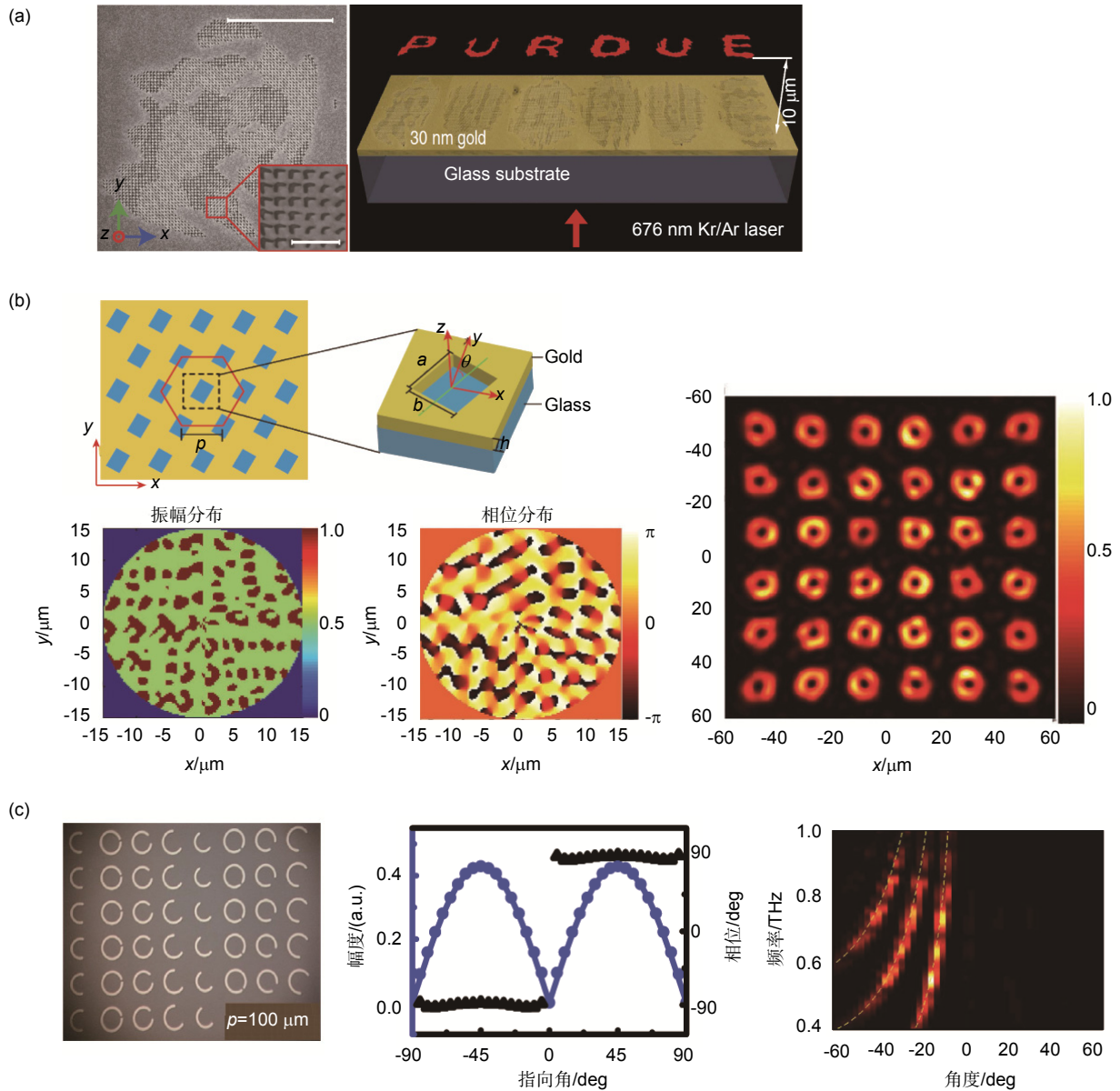


图 24 振幅和相位同时调控超构表面器件. (a) 二阶振幅加相位型超构表面及其全息成像，振幅“1”，“0”离散化^[126]. (b) 二阶振幅加相位型超构表面及涡旋光分束，振幅“1”，“0.5”离散化^[128]. (c) 二阶相位加振幅调控型超构表面及其多级衍射^[127].

Fig. 24 Metasurface devices based on the merge of amplitude and phase modulations. (a) Meta-hologram based on phase and two-level amplitude modulations and its holographic image, “1” and “0” discretization for amplitude^[126]. (b) Metasurface optical vortex beam splitter based on phase and two-level amplitude modulations and its field distribution, “1” and “0.5” discretization for amplitude^[128]. (c) Metasurface based on amplitude and two-level phase modulations and its multi-order diffraction^[127].

磁系统的关键之一,在激光雷达和光学相控等领域具有潜在的应用前景。目前在微波段已发展了基于PIN二极管、变容二极管等有源元件的电磁超构表面器件,可实现每个结构单元的独立调控。而在光波段,虽然也提出了多种动态调控方法,如机械调控^[13,137-138]、材料相变调控^[139-141]、电调控^[142-144]、光强调控^[145-146]和磁场调控^[147-148]等,但要实现每个结构单元的独立调控仍存在较大的困难。

基金项目

国家重点基础研究发展计划 973 课题 (2013CBA01700); 国家自然科学基金项目(61675207)。

参考文献

- Lee S H. Diffractive and miniaturized optics[M]. San Diego, California: Society of Photo Optical, 1994.
- 金国藩, 严瑛白, 邹敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- Luo Xiangang. Sub-wavelength electromagnetics[M]. Beijing: Science Press, 2017.
罗先刚. 亚波长电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77-79.
- Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 788-792.
- Guo Yinghui, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Advances of dispersion-engineered metamaterials[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 3-22.
郭迎辉, 蒲明博, 马晓亮, 等. 电磁超构材料色散调控研究进展[J]. *光电工程*, 2017, **44**(1): 3-22.
- Luo Xiangang, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(23): 4780-4782.
- Gao Ping, Yao Na, Wang Changtao, et al. Enhancing aspect profile of half-pitch 32 nm and 22 nm lithography with plasmonic cavity lens[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(9): 093110.
- Luo Xiangang, Ishihara T. Subwavelength photolithography based on surface-plasmon polariton resonance[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(14): 3055-3065.
- Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780-1782.
- Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977-980.
- Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P, et al. A metamaterial for directive emission[J]. *Physical Review Letters*, 2002, **89**(21): 213902.
- Luo Xiangang, Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, et al. Taming the electromagnetic boundaries via metasurfaces: from theory and fabrication to functional devices[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, **2015**: 204127.
- Pu Mingbo, Ma Xiaoliang, Li Xiong, et al. Merging plasmonics and metamaterials by two-dimensional subwavelength structures [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017. DOI: 10.1039/c7tc00440k.
- Yu Nanfang, Capasso Federico. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, **13**(2): 139-150.
- Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces[J]. *Science*, 2013, **339**(6125): 1232009.
- Kock W E. Metallic delay lenses[J]. *Bell System Technical Journal*, 1948, **27**(1): 58-82.
- Berry D, Malech R, Kennedy W. The reflectarray antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, **11**(6): 645-651.
- Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- Luo Xiangang. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(9): 594201.
- Zhao Zeyu, Pu Mingbo, Wang Yanqin, et al. The generalized laws of refraction and reflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(2): 129-139.
赵泽宇, 蒲明博, 王彦钦, 等. 广义折反射定律[J]. *光电工程*, 2017, **44**(2): 129-139.
- Luo Xiangang, Xu Ting, Du Chunlei, et al. Metal membrane lens including Nano seam: China, CN200710177752.5[P]. 2008-04-09.
罗先刚, 徐挺, 杜春雷, 等. 一种包含纳米缝的金属膜透镜: 中国, CN200710177752.5[P]. 2008-04-09.
- Xu Ting, Wang Changtao, Du Chunlei, et al. Plasmonic beam deflector[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4753-4759.
- Yu Nanfang, 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.
- Wang Dacheng, Zhang Lingchao, Gu Yinghong, et al. Switchable ultrathin quarter-wave plate in terahertz using active phase-change metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15020.
- Xu Ting, Du Chunlei, Wang Changtao, et al. Subwavelength imaging by metallic slab lens with nanoslits[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(20): 201501.
- Wang Dacheng, Huang Qin, Qiu Chengwei, et al. Selective excitation of resonances in gammadion metamaterials for terahertz wave manipulation[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, **58**(8): 084201.
- West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(21): 26212-26221.
- Lalanne Philippe, Astilean Simion, Chavel Pierre, et al. Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional echelette gratings[J]. *Optics Letters*, 1998, **23**(14): 1081-1083.
- Shen Yue, Luo Xiangang. Efficient bending and focusing of light beam with all-dielectric subwavelength structures[J]. *Optics Communications*, 2016, **366**: 174-178.
- Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carnes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(11): 7229-7234.
- Li Yang, Li Xiong, Pu Mingbo, et al. Achromatic flat optical components via compensation between structure and material dispersions[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19885.
- Verslegers L, Catrysse P B, Yu Zongfu, et al. Planar metallic nanoscale slit lenses for angle compensation[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(7): 071112.

- 34 Ishii S, Shalaev V M, Kildishev A V. Holey-metal lenses: sieving single modes with proper phases[J]. *Nano Letters*, 2013, **13**(1): 159–163.
- 35 Lin Ling, Goh X M, McGuinness L P, *et al.* Plasmonic lenses formed by two-dimensional nanometric cross-shaped aperture arrays for fresnel-region focusing[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(5): 1936–1940.
- 36 Verslegers L, Catrysse P B, Yu Zongfu, *et al.* Planar lenses based on nanoscale slit arrays in a metallic film[J]. *Nano Letters*, 2009, **9**(1): 235–238.
- 37 Goh X M, Lin L, Roberts A. Planar focusing elements using spatially varying near-resonant aperture arrays[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11683–11688.
- 38 Xu Ting, Fang Liang, Zeng Beibei, *et al.* Subwavelength nanolithography based on unidirectional excitation of surface plasmons[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, **11**(8): 085003.
- 39 Xu Ting, Zhao Yanhui, Gan Dachun, *et al.* Directional excitation of surface plasmons with subwavelength slits[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(10): 101501.
- 40 Sun Jingbo, Wang Xi, Xu Tianbo, *et al.* Spinning light on the nanoscale[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2726–2729.
- 41 Xu Ting, Wu Y K, Luo Xiangang, *et al.* Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**: 59.
- 42 Gu Yinghong, Zhang Lei, Yang J K W, *et al.* Color generation via subwavelength plasmonic nanostructures[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(15): 6409–6419.
- 43 Dionne J A, Baldi A, Baum B, *et al.* Localized fields, global impact: Industrial applications of resonant plasmonic materials[J]. *MRS Bulletin*, 2015, **40**(12): 1138–1145.
- 44 Li Xiong, Yang Lanying, Hu Chenggang, *et al.* Tunable bandwidth of band-stop filter by metamaterial cell coupling in optical frequency[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(6): 5283–5289.
- 45 Aieta F, Kats M A, Genevet P, *et al.* Multiwavelength achromatic metasurfaces by dispersive phase compensation[J]. *Science*, 2015, **347**(6228): 1342–1345.
- 46 Pu Mingbo, Chen Po, Wang Changtao, *et al.* Broadband anomalous reflection based on gradient low-Q meta-surface[J]. *AIP Advances*, 2013, **3**(5): 052136.
- 47 Pu Mingbo, Chen Po, Wang Yanqin, *et al.* Anisotropic meta-mirror for achromatic electromagnetic polarization manipulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **102**(13): 131906.
- 48 Pfeiffer C, Grbic A. Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **110**(19): 197401.
- 49 Pfeiffer C, Grbic A. Millimeter-wave transmitarrays for wavefront and polarization control[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, **61**(12): 4407–4417.
- 50 Pfeiffer C, Emani N K, Shaltout A M, *et al.* Efficient light bending with isotropic metamaterial Huygens' surfaces[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2491–2497.
- 51 Sun Shulin, Yang Kuangyu, Wang C M, *et al.* High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(12): 6223–6229.
- 52 Pors A, Albrektsen O, Radko I P, *et al.* Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 2155.
- 53 Pors A, Bozhevolnyi S I. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(22): 27438–27451.
- 54 Feng Qin, Pu Mingbo, Hu Chenggang, *et al.* Engineering the dispersion of metamaterial surface for broadband infrared absorption[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(11): 2133–2135.
- 55 Pu Mingbo, Hu Chenggang, Wang Min, *et al.* Design principles for infrared wide-angle perfect absorber based on plasmonic structure[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17413–17420.
- 56 Guo Yinghui, Wang Yanqin, Pu Mingbo, *et al.* Dispersion management of anisotropic metamirror for super-octave bandwidth polarization conversion[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8434.
- 57 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Achromatic polarization manipulation by dispersion management of anisotropic meta-mirror with dual-metasurface[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(21): 27566–27575.
- 58 Sun Shulin, He Qiong, Xiao Shiyi, *et al.* Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, **11**(5): 426–431.
- 59 Li Xin, Xiao Shiyi, Cai Bengeng, *et al.* Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(23): 4940–4942.
- 60 Chen Weiting, Yang Kuangyu, Wang C M, *et al.* High-efficiency broadband meta-hologram with polarization-controlled dual images[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(1): 225–230.
- 61 Yifat Y, Eitan M, Iluz Z, *et al.* Highly efficient and broadband wide-angle holography using patch-dipole nanoantenna reflectarrays[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2485–2490.
- 62 Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. *Science*, 2013, **340**(6138): 1304–1307.
- 63 Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, **392**(1802): 45–57.
- 64 Sichak W, Levine D J. Microwave high-speed continuous phase shifter[J]. *Proceedings of the IRE*, 1955, **43**(11): 1661–1663.
- 65 Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, 1956, **44**(5): 247–262.
- 66 Pu Mingbo, Li Xiong, Ma Xiaoliang, *et al.* Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- 67 Huang Lingling, Chen Xianzhong, Mühlenbernd H, *et al.* Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(11): 5750–5755.
- 68 Chen Xianzhong, Huang Lingling, Mühlenbernd H, *et al.* Reversible three-dimensional focusing of visible light with ultrathin plasmonic flat lens[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, **1**(7): 517–521.
- 69 Chen Xianzhong, Chen Ming, Mehmood M Q, *et al.* Longitudinal multifoci metalens for circularly polarized light[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(9): 1201–1206.
- 70 Zhao Zeyu, Pu Mingbo, Gao Hui, *et al.* Multispectral optical metasurfaces enabled by achromatic phase transition[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15781.
- 71 Chen Xianzhong, Huang Lingling, Mühlenbernd H, *et al.* Dual-polarity plasmonic metalens for visible light[J]. *Nature Communications*, 2012, **3**: 1198.
- 72 Huang Lingling, Chen Xianzhong, Bai Benfeng, *et al.* Helicity dependent directional surface plasmon polariton excitation using a metasurface with interfacial phase discontinuity[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, **2**(3): e70.
- 73 Lin Jiao, Mueller J P B, Wang Qian, *et al.* Polariza-

- tion-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons[J]. *Science*, 2013, **340**(6130): 331–334.
- 74 Tang Dongliang, Wang Changtao, Zhao Zeyu, *et al.* Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **9**(6): 713–719.
- 75 Jin Jinjin, Luo Jun, Zhang Xiaohu, *et al.* Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24286.
- 76 Yang Kunpeng, Pu Mingbo, Li Xiong, *et al.* Wavelength-selective orbital angular momentum generation based on a plasmonic metasurface[J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(24): 12267–12271.
- 77 Ma Xiaoliang, Pu Mingbo, Li Xiong, *et al.* A planar chiral meta-surface for optical vortex generation and focusing[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10365.
- 78 Brasselet Etienne, Gervinskas Gediminas, Seniutinas Gediminas, *et al.* Topological Shaping of Light by Closed-Path Nanoslits[J]. *Physical Review Letters*, 2013, **111**(19): 193901.
- 79 Li Yang, Li Xiong, Chen Lianwei, *et al.* Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5**(2): 1600502. doi: 10.1002/adom.201600502.
- 80 Ren Haoran, Li Xiangping, Zhang Qiming, *et al.* On-chip non-interference angular momentum multiplexing of broadband light[J]. *Science*, 2016, **352**(6287): 805–809.
- 81 Li Xiong, Chen Lianwei, Li Yang, *et al.* Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11): e1601102.
- 82 Zhang Xiaohu, Jin Jinjin, Pu Mingbo, *et al.* Ultrahigh-capacity dynamic holographic displays *via* anisotropic nanoholes[J]. *Nanoscale*, 2017, **9**(4): 1409–1415.
- 83 Huang Lingling, Mühlenbernd Holger, Li Xiaowei, *et al.* Broadband hybrid holographic multiplexing with geometric metasurfaces[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(41): 6444–6449.
- 84 Huang Lingling, Chen Xianzhong, Mühlenbernd Holger, *et al.* Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2808.
- 85 Wen Dandan, Yue Fuyong, Li Guixin, *et al.* Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 8241.
- 86 Zhang Xiaohu, Jin Jinjin, Wang Yanqin, *et al.* Metasurface-based broadband hologram with high tolerance to fabrication errors[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19856.
- 87 Huang Yaowei, Chen Weiting, Tsai W Y, *et al.* Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram[J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(5): 3122–3127.
- 88 Montelongo Y, Tenorio-Pearl J O, Williams C, *et al.* Plasmonic nanoparticle scattering for color holograms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(35): 12679–12683.
- 89 Ozaki M, Kato J I, Kawata S. Surface-plasmon holography with white-light illumination[J]. *Science*, 2011, **332**(6026): 218–220.
- 90 Luo Xiangang, Pu Mingbo, Li Xiong, *et al.* Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**: e16276.
- 91 Heyman J. Hooke's cubico-parabolical conoid[J]. *Notes and Records of the Royal Society*, 1998, **52**(1): 39–50.
- 92 Wang Yanqin, Pu Mingbo, Zhang Zuojun, *et al.* Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 17733.
- 93 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.* Scattering engineering in continuously shaped metasurface: an approach for electromagnetic illusion[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30154.
- 94 Li Xiong, Pu Mingbo, Wang Yanqin, *et al.* Dynamic control of the extraordinary optical scattering in semicontinuous 2D metamaterials[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, **4**(5): 659–663.
- 95 Li Xiong, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, *et al.* Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- 96 Sun Hongbo. The mystical interlinks: mechanics, religion or optics?[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, **59**(1): 614202.
- 97 Hong Minghui. Metasurface wave in planar Nano-photonics[J]. *Science Bulletin*, 2016, **61**(2): 112–113.
- 98 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.
- 99 Kang Ming, Feng Tianhua, Wang Huitian, *et al.* Wave front engineering from an array of thin aperture antennas[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(14): 15882–15890.
- 100 Ding Xumin, Monticone F, Zhang Kuang, *et al.* Ultrathin pancharatnam–berry metasurface with maximal cross-polarization efficiency[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(7): 1195–1200.
- 101 Pu Mingbo, Zhao Zeyu, Wang Yanqin, *et al.* Spatially and spectrally engineered spin-orbit interaction for achromatic virtual shaping[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9822.
- 102 Zheng Guoxing, Mühlenbernd H, Kenney M, *et al.* Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(4): 308–312.
- 103 Maguid E, Yulevich I, Veksler D, *et al.* Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array[J]. *Science*, 2016, **352**(6290): 1202–1206.
- 104 Ni Xingjie, Wong Z J, Mrejen M, *et al.* An ultrathin invisibility skin cloak for visible light[J]. *Science*, 2015, **349**(6254): 1310–1314.
- 105 Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, *et al.* Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(5): 285–287.
- 106 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.
- 107 Levy U, Kim H C, Tsai C H, *et al.* Near-infrared demonstration of computer-generated holograms implemented by using subwavelength gratings with space-variant orientation[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(16): 2089–2091.
- 108 Khorasaninejad M, Chen Weiting, Devlin R C, *et al.* Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, **352**(6290): 1190–1194.
- 109 Lin Dianmin, Fan Pengyu, Hasman E, *et al.* Dielectric gradient metasurface optical elements[J]. *Science*, 2014, **345**(6194): 298–302.
- 110 Hasman E, Kleiner V, Biener G, *et al.* Polarization dependent focusing lens by use of quantized Pancharatnam–berry phase diffractive optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(3):

- 328–330.
- 111 Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, *et al.* Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(11): 937–943.
- 112 Deng Yongbo, Liu Zhenyu, Liu Yongmin, *et al.* Inverse design of dielectric resonator cloaking based on topology optimization[J]. *Plasmonics*, 2016. doi: 10.1007/s11468-016-0438-4.
- 113 Ni Xingjie, Emani N K, Kildishev A V, *et al.* Broadband light bending with plasmonic nanoantennas[J]. *Science*, 2012, **335**(6067): 427.
- 114 Jiao Jiao, Li Xiong, Huang Xiaoping, *et al.* Improvement of focusing efficiency of plasmonic planar lens by oil immersion[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(3): 539–545.
- 115 Yin Xiaobo, Ye Ziliang, Rho J, *et al.* Photonic spin hall effect at metasurfaces[J]. *Science*, 2013, **339**(6126): 1405–1407.
- 116 Lin Jing, Wu Shibin, Li Xiong, *et al.* Design and numerical analyses of ultrathin plasmonic lens for subwavelength focusing by phase discontinuities of nanoantenna arrays[J]. *Applied Physics Express*, 2013, **6**(2): 022004.
- 117 Genevet P, Yu Nanfang, Aieta F, *et al.* Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(1): 013101.
- 118 Aieta F, Genevet P, Yu Nanfang, *et al.* Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities[J]. *Nano Letters*, 2012, **12**(3): 1702–1706.
- 119 Ni Xingjie, Ishii S, Kildishev A V, *et al.* Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, **2**(4): e72.
- 120 Hu Dan, Wang Xinke, Feng Shengfei, *et al.* Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Advanced Optical Materials*, 2013, **1**(2): 186–191.
- 121 Qin Fei, Ding Lu, Zhang Lei, *et al.* Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(1): e1501168.
- 122 Wang Qiu, Zhang Xueqian, Xu Yuehong, *et al.* A broadband metasurface-based terahertz flat-lens array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, **3**(6): 779–785.
- 123 Zhang Xueqian, Tian Zhen, Yue Weisheng, *et al.* Broadband terahertz wave deflection based on C-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Advanced Materials*, 2013, **25**(33): 4567–4572.
- 124 Mueller J P B, Rubin N A, Devlin R C, *et al.* Metasurface polarization optics: independent phase control of arbitrary orthogonal states of polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2017, **118**(11): 113901.
- 125 Guo Yinghui, Pu Mingbo, Zhao Zeyu, *et al.* Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(11): 2022–2029.
- 126 Ni Xingjie, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light[J]. *Nature Communications*, 2013, **4**: 2807.
- 127 Liu Lixiang, Zhang Xueqian, Kenney M, *et al.* Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. *Advanced Materials*, 2014, **26**(29): 5031–5036.
- 128 Jin Jinjin, Pu Mingbo, Wang Yanqin, *et al.* Multi-channel vortex beam generation by simultaneous amplitude and phase modulation with two-dimensional metamaterial[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, **2**(2): 1600201.
- 129 Lee J, Tymchenko M, Argyropoulos C, *et al.* Giant nonlinear response from plasmonic metasurfaces coupled to intersubband transitions[J]. *Nature*, 2014, **511**(7507): 65–69.
- 130 Almeida E, Shalem G, Prior Y. Subwavelength nonlinear phase control and anomalous phase matching in plasmonic metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 10367.
- 131 Ye Weimin, Zeuner F, Li Xin, *et al.* Spin and wavelength multiplexed nonlinear metasurface holography[J]. *Nature Communications*, 2016, **7**: 11930.
- 132 Ma Xiaoliang, Pan Wenbo, Huang Cheng, *et al.* An active metamaterial for polarization manipulating[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, **2**(10): 945–949.
- 133 Luo Jun, Zeng Bo, Wang Changtao, *et al.* Fabrication of anisotropically arrayed Nano-slots metasurfaces using reflective plasmonic lithography[J]. *Nanoscale*, 2015, **7**(44): 18805–18812.
- 134 Luo Xiangang, Yan Lianshan. Surface plasmon polaritons and its applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(2): 590–595.
- 135 Lin Dianmin, Tao Hu, Trevino J, *et al.* Direct transfer of subwavelength plasmonic nanostructures on bioactive silk films[J]. *Advanced Materials*, 2012, **24**(45): 6088–6093.
- 136 Khorasaninejad M, Shi Z, Zhu A Y, *et al.* Achromatic metalens over 60 nm bandwidth in the visible and metalens with reverse chromatic dispersion[J]. *Nano Letters*, 2017, **17**(3): 1819–1824.
- 137 Ee H S, Agarwal R. Tunable metasurface and flat optical zoom lens on a stretchable substrate[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(4): 2818–2823.
- 138 Li Xiong, Feng Qin, Luo Xiangang, *et al.* Frequency Controllable Metamaterial Absorber by an Added Dielectric Layer[C]//AIP conference proceedings, Malaysia, 2011, **1328**: 318–320.
- 139 Chen Yiguo, Li Xiong, Luo Xiangang, *et al.* Tunable near-infrared plasmonic perfect absorber based on phase-change materials[J]. *Photonics Research*, 2015, **3**(3): 54–57.
- 140 Chen Y G, Kao T S, Ng B, *et al.* Hybrid phase-change plasmonic crystals for active tuning of lattice resonances[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13691–13698.
- 141 Kats M A, Sharma D, Lin Jiao, *et al.* Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(22): 221101.
- 142 Yao Yu, Shankar R, Kats M A, *et al.* Electrically tunable metasurface perfect absorbers for ultrathin mid-infrared optical modulators[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(11): 6526–6532.
- 143 Chen H T, Padilla W J, Zide J M O, *et al.* Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, **444**(7119): 597–600.
- 144 Chen H T, Padilla W J, Cich M J, *et al.* A metamaterial solid-state terahertz phase modulator[J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3): 148–151.
- 145 Shen Nianhai, Massaouti M, Gokkavas M, *et al.* Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime[J]. *Physical Review Letters*, 2011, **106**(3): 037403.
- 146 Large N, Abb M, Aizpurua J, *et al.* Photoconductively loaded plasmonic nanoantenna as building block for ultracompact optical switches[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(5): 1741–1746.
- 147 Tsakmakidis K L, Wartak M S, Cook J J H, *et al.* Negative-permeability electromagnetically induced transparent and magnetically active metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2010, **81**(19): 195128.
- 148 Temnov V V, Armelles G, Woggon U, *et al.* Active magneto-plasmonics in hybrid metal-ferromagnet structures[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 107–111.