

基于复合相位超构表面的多功能电磁波调控(特邀)

王卓¹, 何琼^{1***}, 孙树林^{2**}, 周磊^{1*}¹复旦大学物理学系, 应用表面物理国家重点实验室, 上海市超构表面光场调控重点实验室, 上海 200433;²复旦大学光科学与工程系上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200433

摘要 从超构表面调控电磁波研究的发展历史出发, 详细介绍了基于复合相位超构表面实现高效多功能调控圆偏振电磁波的原理、设计思路和实验模拟表征, 对近期国内外在这一领域的研究进展进行简要的论述, 着力以此引导相关研究性实验教学, 并为相关领域研究人员提供指引。

关键词 超构表面; 共振相位; 传输相位; 几何相位; 复合相位; 圆偏振光; 多功能

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231991

1 引言

随着光学器件不断向着大容量、多信道、低损耗、集成化的方向发展, 多功能集成器件已成为纳米光学领域近些年研究的主流方向。例如, 通过复用不同偏振态的入射光并照射同一个器件可实现不同的功能, 这在生物探测、成像、通信等方面具有广泛的应用需求。然而, 由自然材料构成的传统光学器件是依靠体性质改变传输相位来调控电磁波, 因此无法仅用一个光学器件实现多路复用, 导致传统光学器件面临功能单一、系统复杂、体积庞大和效率低等问题, 不利于光学器件的多样化、集成化、小型化以及效率提升^[1-2]。三维超构材料概念的提出赋予了材料在局域位置处调控电磁波的能力^[3], 为实现更加复杂多样的功能器件提供了可能性。它是一种由亚波长人工微结构按照特定排列方式组成的人工三维体材料。由于可任意设计人工原子的电磁共振模式和排列方式, 超构材料调控电磁波的能力远超自然材料, 已经实现了诸如负折射、电磁隐身、光学变换、超分辨成像等众多奇异的物理现象^[4-8], 但其和传统光学器件一样仍是体块材料, 因此不可避免地存在高损耗、难制备、调控能力受限、集成度低等缺陷, 这限制了其应用潜力。

多功能集成器件的设计核心是需要有足够的自由度对电磁波本征的一些属性(如偏振态、波长等)进行独立的调控, 从而实现多功能集成。近些年, 超构表面展现出了对电磁波强大的调控能力, 为实现多功能集

成提供了良好的平台。超构表面是由一些超薄亚波长人工原子按一定排列方式在平面内排列构建而成。基于广义斯涅耳定律对每一个局域位置处人工原子的电磁特性进行设计, 使得入射波在界面处的电磁性质发生突变, 从而实现对电磁波有效的调控, 这是一类全新调控电磁波的器件^[9]。人们利用超构表面的轻薄、调控自由度大、损耗低、易共形、易集成等众多优势, 实现了一系列奇异的物理现象和功能强大的平面光学器件^[10-15], 如异常偏折器件^[9, 16-18]、表面波耦合器件^[17, 19-20]、光束聚焦器件^[21-23]、数字编码波束控制器件^[24]等。超构表面的相位调制机制主要可以分成三类: 共振相位、传输相位以及几何相位。共振相位是通过改变组成人工原子的几何尺寸使其在任意偏振入射光照射下的共振频率发生平移来实现 2π 相位覆盖。传输相位是通过电磁波在介质人工原子内部的传播积累相位, 与入射光手性无关^[25]。几何相位(PB)相对于前两种调控机制则截然不同, 除了出射光偏振态与入射光偏振态会发生翻转之外, 出射相位可以通过旋转人工原子来获得, 该相位是一种与“自旋”相关的相位调控机制, 在调控圆偏振电磁波方面展现出了强大的调控能力^[26-28], 实现了一系列奇异的手性相关的物理现象和功能性器件, 如光自旋霍尔效应、特殊光束发生器等^[27, 29-31]。以上三类超构表面的相位调制通常情况下只能对单一偏振态入射光进行调控且仅能实现单一功能。

然而, 随着应用需求的拓展和器件集成度的不断提高, 提升器件功能的集成度是十分重要的。例如, 成

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-01-29; 录用日期: 2024-01-30; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0710100, 2022YFA1404700)、国家自然科学基金面上项目(12374344)、中国博士后科学基金(2021TQ0077)

通信作者: *phzhou@fudan.edu.cn; **sls@fudan.edu.cn; ***qionghe@fudan.edu.cn

像系统中普遍存在的色差问题就可通过将共振相位和几何相位或传输相位和几何相位相复合在同一个器件内实现波长复用来解决^[32-38]。此类器件虽然消除了不同频率下的色散行为,但其功能是相同且单一的。为了将多个完全不同的功能集成在同一个器件中,研究人员发现除了波长,偏振态是电磁波非常好的一个本征属性。起初,研究人员发现通过在人工原子的两个正交方向分别对人工原子的共振频率进行设计,即可实现不同线偏振入射光照射该器件时在自由空间中完全不同的多功能的集成^[39-44]。此类器件的人工原子两个主轴方向不完全独立,导致器件的功能存在串扰并且设计相对复杂。另外一类比较常用的方案是将两个或多个具有不同功能的PB超构表面相结合构成一个器件,进而实现在不同圆偏振光照射下的不同功能^[29,45-46]。然而,当切换入射光的偏振态时,这种多套几何相位复合的超构表面的功能不能完全切换,而是相互之间会产生串扰且效率至少会降低50%,这为实际应用带来了不便。因此,迫切需要实现一种通过切换入射光偏振态就可完全切换功能的器件。最近,通过将自旋相关的几何相位与共振相位或将几何相位和传播相位相结合来解锁不同手性偏振光入射下被绑定的功能受到了广泛的关注,其为

高效、紧凑的多功能器件提供了全新的平台。自旋解耦多功能超构表面已经实现了非常多新奇的物理现象和器件,如复用全息成像^[47-49]、任意自旋轨道动量转换器^[50-51]、自旋解耦双聚焦超透镜^[52-54]、自旋解耦的波前整形和偏振转换^[55-56],以及片上表面波波前调控的多功能器件^[56-58]。

本文将简要回顾操控手性电磁波多功能器件的工作原理及应用。首先,介绍三种不同的相位调制机制,它们分别是共振相位、传播相位和几何相位,在此基础上介绍复合相位。然后,介绍结合几何相位和共振相位实现自旋解耦多功能器件的一些相关研究进展。接着介绍结合几何相位和传输相位实现自旋解耦的一些代表性研究。最后,将对本文进行简要的总结以及展望。

2 相位工作原理

复合相位通常是将与自旋相关的几何相位分别与共振相位或传输相位相结合。因此下面将详细介绍共振相位、传输相位、几何相位以及复合相位的工作原理,示意图如图1所示。其中, L 为介质柱的长, w 为介质柱的宽, θ 为旋转角, H 为介质柱的高度, Φ 为相位, I_0 为入射光, R_a 为出射的异常模式。

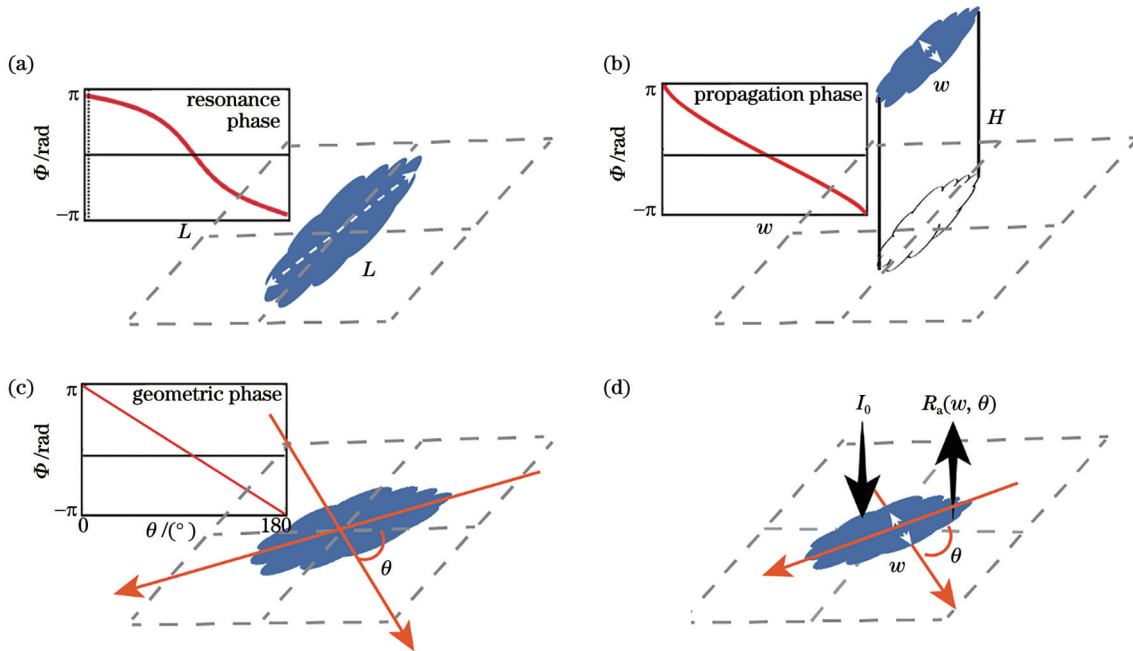


图1 相位示意图。(a)通过改变几何尺寸调节共振频率移动,实现 2π 相位覆盖;(b)通过改变介质柱几何尺寸改变等效折射率,实现 2π 相位覆盖;(c)通过旋转人工原子获得偏振依赖的几何相位;(d)通过将共振相位或传输相位与几何相位相结合实现复合相位

Fig. 1 Schematics of phase. (a) Resonance phase is modulated by changing geometric size to achieve 2π phase coverage; (b) geometric size of dielectric rods is altered to change the effective refractive index and achieve 2π phase coverage; (c) artificial atom is rotated to obtain polarization dependent geometric phase; (d) composite phase obtained by combining resonance phase or propagation phase with geometric phase

2.1 共振相位

2011—2012年,哈佛大学和复旦大学相继提出了

超构表面的概念,这是一类全新调控电磁波的器件。超构表面通常是基于广义斯涅耳定律进行设计:

$$n_{(t,r)} \sin \theta_{(t,r)} - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (1)$$

式中: $n_{(t,r)}$ 和 n_i 分别为透射/反射端与入射端的折射率; $\theta_{(t,r)}$ 表示异常透射/反射角; θ_i 表示入射角; λ_0 表示真空波长; $\frac{d\Phi}{dx}$ 为相位梯度, x 为长度。从式(1)可知, 组成超构表面的一系列人工原子可被看作一系列分离的次波源, 如图 2(a) 中插图所示。在早期超构表面的研究中, 研究人员通过调整人工原子几何参数设计的共振模式, 使得不同单元的共振频率位置发生偏移, 进而实现不同局域位置处的相位 Φ_{res} , 因此被称为共振相位超构表面, 如图 1(a) 所示。Yu 等^[9] 通过 8 个大小不同的 V 型天线阵列实现了异常透射, 组成该器件的人工原子是一系列典型的电共振人工原子, 其在线偏振激励下将在金属结构上激励起对称和反对称的电共振模式, 如图 2(a) 所示。Sun 等^[17-18] 利用一系列大小不同的金属结构/介质/金属构型的人工原子在近场和远场分别实现了高效的异常反射以及表面激发, 如图 2(b)、(c) 所示。组成该器件的人工原子的顶层金属 H 形结构与金属背板在线偏振入射光激励下可形成反向电流, 进而形成磁共振, 这是典型的磁共振人工原子, 其反射相位可连续覆盖 2π 。此外, 电和磁共振不仅存在于金属结构中, 组成全介质超构表面的人工原子中也有丰富的电共振、磁共振、Mi 共振模式被广泛应用到调制光场中^[59-61]。

2.2 传输相位

高效率、低损耗的光学器件具有广泛的应用前景, 因此备受研究人员的关注。早期的超构表面设计均是基于金属材料, 但随着光学器件被推向光频, 金属天然的损耗是无法避免的, 这极大地限制了器件的绝对效率。因此, 全介质超构表面成为了人们研究的热点^[62]。为了更加清楚地展示传播相位, 可将图 1(b) 中所示的单个人工原子视为一个介质波导, 因此其出射相位应满足:

$$\Phi_{prop} = \frac{2\pi}{\lambda_d} \cdot n_{eff} \cdot H, \quad (2)$$

式中: λ_d 表示介质中的波长; n_{eff} 表示等效折射率。从式(2)中可以看出: 可以通过改变 n_{eff} 或介质柱高度 H 来调控传输相位。传统光学器件通常的设计思路是保持折射率不变, 通过改变器件的几何外形来实现波前调控。对于超构表面器件, 同样也可以通过改变介质柱的高度来调控传输相位, 但在局域位置处制备不同高度的人工原子是十分具有挑战性的。因此, 通常的设计方案是固定高度 H , 通过调节人工原子的横截面来改变等效折射率实现 2π 相位覆盖。此类设计方案通常需要较高的介质柱来实现, 进而给样品的加工带来了巨大的挑战, 如图 2(d) 所示。因此, 很多高折射率的材料, 如 TiO_2 、高阻硅等, 被用来制备全介质超构表面。

2.3 几何相位

通过改变几何尺寸调控共振相位和传输相位时,

不可避免地会导致幅值的波动, 进而会导致器件的效率下降。几何相位超构表面的相位调制机制天然具有高效特性, 也就是说在调控相位的同时不会使其振幅发生改变。Pancharatnam^[63] 指出如果使各向异性的微结构以 z 轴为转轴旋转 θ 角度时, 出射的异常模式的相位将获得一个与旋转角度相关的附加相位因子 $\exp(i2\theta)$ 。这种附加相位后来被 Berry^[64] 在其文章中称为几何相位, 其大小相当于连接庞加莱球南极和北极的经线在旋转过程中扫过的面积对应的立体角的大小^[65]。该相位取决于入射光的偏振态与散射体的旋转角度, 因此 PB 相位天然具有简化设计、宽带和易制备等特性。

这里借助琼斯矩阵的方法分析 PB 人工原子的电磁特性, 定量讨论 PB 超构表面的工作原理。如图 1(c) 所示, 一束沿法向入射的光照射在一个由亚波长人工原子周期性排列组成的阵列上^[26]。假设这些人工原子均具有镜面对称性, 将其两个正交主轴标记为 $\{\hat{u}, \hat{v}\}$ 。所研究系统的透射/反射特性可以通过两个琼斯矩阵 $\mathbf{T}(0)$ 、 $\mathbf{R}(0)$ 很好地描述:

$$\mathbf{T}(0) = \begin{pmatrix} t_{uu} & t_{uv} \\ t_{vu} & t_{vv} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}(0) = \begin{pmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{vu} & r_{vv} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: t_{uu} 、 t_{uv} 、 t_{vu} 、 t_{vv} 、 r_{uu} 、 r_{uv} 、 r_{vu} 、 r_{vv} 为具有不同散射通道的透射与反射系数。由于人工原子具有镜面对称性, 因此 $t_{uv} = t_{vu} = r_{uv} = r_{vu} = 0$ 。为了方便后面的分析, 将线偏振基 $\{\hat{u}, \hat{v}\}$ 变换到圆偏振基, 同时对其进行旋转 ϕ 角操作并对式(3)进行化简, 得到由单位矩阵 $\hat{\mathbf{I}}$ 和三个泡利矩阵 $(\hat{\sigma}_1, \hat{\sigma}_2, \hat{\sigma}_3)$ 组成的矩阵形式:

$$\mathbf{T}(\phi) = \frac{1}{2}(t_{uu} + t_{vv})\hat{\mathbf{I}} + \frac{1}{2}(t_{uu} - t_{vv}) \times [\exp(-i2\phi)\hat{\sigma}_+ + \exp(i2\phi)\hat{\sigma}_-], \quad (4)$$

$$\mathbf{R}(\phi) = \frac{1}{2}(r_{uu} + r_{vv})\hat{\mathbf{I}} + \frac{1}{2}(r_{uu} - r_{vv}) \times [\exp(-i2\phi)\hat{\sigma}_+ + \exp(i2\phi)\hat{\sigma}_-], \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}(\phi)$ 为旋转操作后人工原子的透射系数矩阵; $\mathbf{R}(\phi)$ 为旋转操作后人工原子的反射系数矩阵; $\hat{\sigma}_{\pm} = (\hat{\sigma}_1 \pm i\hat{\sigma}_2)/2$ 表示两个不同的自旋算符, 其满足 $\hat{\sigma}_{\pm}|\pm\rangle = 0$ 和 $\hat{\sigma}_{\pm}|\mp\rangle = 1|\pm\rangle$, $|\pm\rangle$ 分别表示自旋向上 (\hat{e}_+) 和自旋向下 (\hat{e}_-)。在式(4)和式(5)中, 前两项的自旋态没有发生反转且不增加任何附加相位, 而等式的后面两项不仅自旋态发生了反转, 而且增加了额外的相位 $\exp(\pm i2\phi)$ 。这一与旋转角相关的附加相位即为几何相位。根据式(4)、(5), 可以看出共有 4 个模式出射, 其效率可分别表示为

$$\begin{cases} R_n \equiv |(r_{uu} + r_{vv})|^2/4 \\ R_a \equiv |(r_{uu} - r_{vv})|^2/4 \\ T_a \equiv |(t_{uu} - t_{vv})|^2/4 \\ T_n \equiv |(t_{uu} + t_{vv})|^2/4 \end{cases}, \quad (6)$$

式中:下标 a 和 n 分别表示异常和正常模式。显然,如果要实现一个效率为 100% 的 PB 器件,就必须对正常模式进行抑制。全反射器件 PB 单元的电磁特性满足 $T_a = T_n = R_a = 0$, 即可得到实现 100% 效率的理论条件:

$$r_{uu} + r_{vv} = 0. \quad (7)$$

对于透射式器件,则应该满足

$$\begin{cases} r_{uu} = r_{vv} = 0 \\ |t_{uu}| = |t_{vv}| = 1 \\ \arg(t_{uu}) = \arg(t_{vv}) \pm \pi \end{cases}, \quad (8)$$

即可以实现 100% 效率的透射式 PB 超构表面。近些年,在近场以及远场的调控中,几何相位超构表面已经展现出了非常强的调控能力,例如可实现光子自旋霍尔效应^[66-67]、涡旋光^[28]、全息^[27]、表面波激发^[20]等。

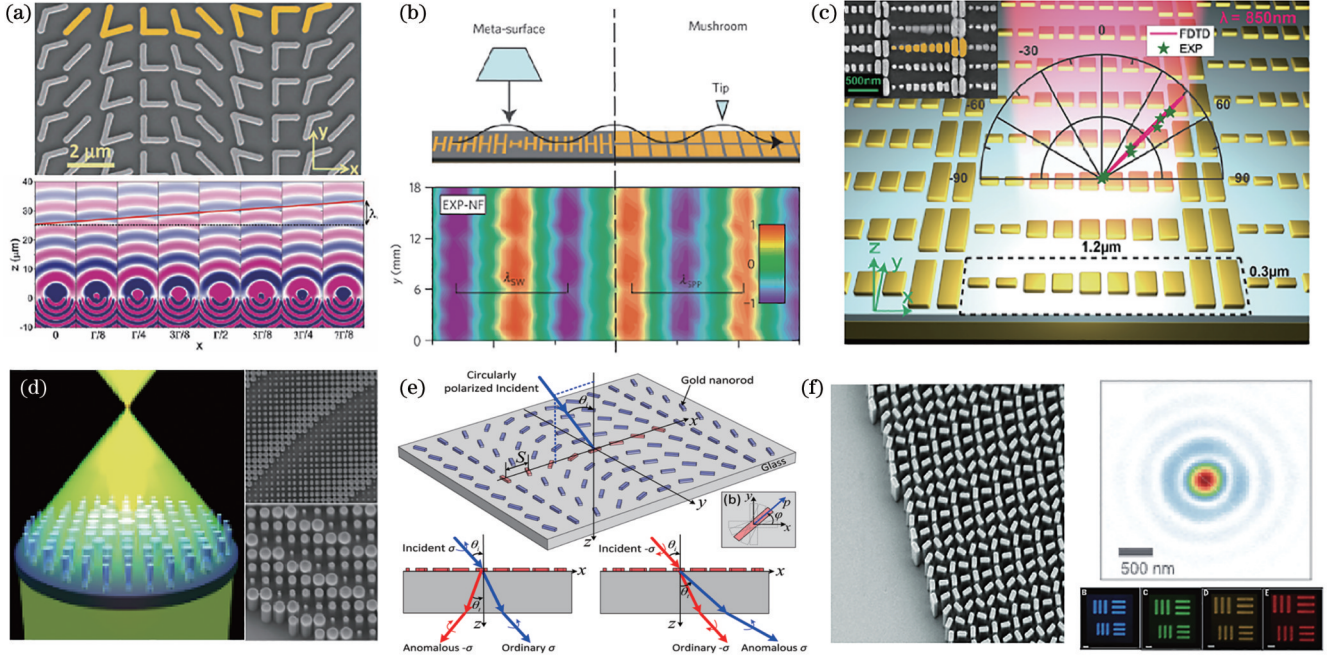


图 2 单功能超构表面。(a) V 形天线组成的共振相位超构表面 SEM 样品照片以及不同共振相位次波源辐射波前^[9]; (b) 高效表面波耦合器示意图以及近场测试结果^[17]; (c) 由大小不同的纳米金棒构成的异常偏折器远场实验测试结果以及样品照片^[18]; (d) 通过改变 TiO₂ 介质柱的直径来调控传输相位实现偏振不敏感的超透镜的 SEM 照片与示意图^[62]; (e) 由单层金属纳米棒旋转构成的几何相位超构表面在近红外波段实现光子自旋霍尔效应示意图^[67]; (f) 工作在可见光波段的高效全介质超构透镜的样品照片以及在不同波段的成像质量表征^[23]

Fig. 2 Single-function metasurface. (a) SEM images of a resonant phase metasurface consisting of V-shaped antennas and wavefronts for sub-wave sources with different resonance phases^[9]; (b) schematic of an efficient meta-coupler and near-field test results^[17]; (c) far-field experimental test results of an anomalous deflector consisting of gold nanorods of different sizes and its sample images^[18]; (d) SEM photos and schematic diagram of polarization-insensitive meta-lens achieved by modulating propagation phase by varying diameter of TiO₂ dielectric rods^[62]; (e) schematic diagram of a geometric phase metasurface consisting of a single metal layer of rotating metal nanorods to realize photonic spin Hall effect in near infrared band^[67]; (f) photo of highly efficient all-dielectric meta-lens sample operating in visible band and characterization of imaging quality in different wave bands^[23]

2.4 复合相位

从上面讲述几何相位的部分可知,由旋转带来的附加相位 Φ_σ 与圆偏振态入射光满足 $\Phi_\sigma = 2\sigma\theta$, 其中 σ 为圆偏振光的偏振态。显然,当左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)分别入射到几何相位超构表面上时,二者感受到的相位是相反的,这导致所产生的功能是绑定的。当 LCP 入射产生光波聚焦时,RCP 入射到同一个器件上后光波发散,也就是说几何相位是与偏振光手性相关的。因此,研究人员将与自旋相关的几何相位与自旋无关的共振相位或传输相位相结合,构成了复合相位,不同旋光入射时的相位分布应满足

$$\begin{cases} \Phi_{\text{tot}}^+ = \Phi_{\text{res/prop}} + \Phi_{\text{PB}} \\ \Phi_{\text{tot}}^- = \Phi_{\text{res/prop}} - \Phi_{\text{PB}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: Φ_{tot}^+ 为左旋光目标相位分布; Φ_{tot}^- 为右旋光目标相位分布; $\Phi_{\text{res/prop}}$ 为共振相位分布或传输相位分布; Φ_{PB} 为几何相位分布。此时,有两个独立的自由度即可将 LCP 和 RCP 的功能进行解耦,实现不同的功能,如图 1(d) 所示。

3 多功能超构表面的应用

最近,研究人员发现将与自旋相关的几何相位和与自旋无关的共振相位或传输相位分别结合,即可解

锁不同手性光入射到器件上时被绑定的功能,下面将简要介绍其发展现状。

基于之前对几何相位超构表面的琼斯矩阵分析,假设一系列人工原子已满足高效调控圆偏振光的条件方程[式(7)和(8)],那么散射波应只包含异常的透射或反射模式,它们的复振幅可以表示为

$$\begin{cases} \tilde{r}_a = \frac{r_{uu} - r_{vv}}{2} \exp(i\sigma 2\theta) = \sqrt{R_a} \exp(i\Phi_{tot}^\sigma) \\ \tilde{t}_a = \frac{t_{uu} - t_{vv}}{2} \exp(i\sigma 2\theta) = \sqrt{T_a} \exp(i\Phi_{tot}^\sigma) \end{cases}, \quad (10)$$

式中: Φ_{tot}^σ 为反射相位和透射相位,满足

$$\Phi_{tot}^\sigma = \sigma \cdot 2\theta + \Phi_{res/prop}^\sigma \quad (11)$$

Φ_{tot}^σ 由两部分组成:一部分是与入射光自旋态相关的几何相位, θ 表示人工原子的旋转角;另一部分是与自旋无关的共振相位 Φ_{res} 或传输相位 Φ_{prop} 。 $\sigma = \pm 1$ 表示圆偏振光的偏振态($\sigma = +1$ 代表LCP, $\sigma = -1$ 代表RCP)。因此,只要人工原子的共振相位或者传输相位可以覆盖 2π ,按照所需功能 Φ_{tot}^σ 进行人工原子排列即可解锁左旋圆偏振光和右旋圆偏振光的功能。将不同手性的光照射在同一个器件,即可实现完全不同的两个功能。下面将从双全息成像、多功能表面波耦合器以及特殊光束等三个方面进行介绍。

合器以及特殊光束等三个方面进行介绍。

3.1 多功能成像

2017年, Capasso教授团队^[47]提出,仅通过排列一系列具有双折射性质的全介质波片并分别赋予两个正交偏振态入射光(线偏振、圆偏振或椭圆偏振)独立的相位分布,即可实现当不同偏振态入射光照射时产生不同的功能的想法,如图3(a)所示。为了验证他们的想法,该团队在可见光波段($\lambda = 532 \text{ nm}$),针对圆偏振入射光设计了一系列各向异性的TiO₂椭圆柱人工原子,利用传输相位以及几何相位来构造超构表面器件。当不同手性光照射时在远场分别呈现猫和狗的全息图案,第一次在实验上实现了双功能集成。2020年, Huo等^[68]将复合相位超构表面应用到了傅里叶光学成像系统中。作者通过设计TiO₂介质柱的大小以及旋转角实现相位解锁,左旋光和右旋光入射时分别产生聚焦和一阶涡旋光,分别在成像面实现明视野成像和相称成像,用来提取物体的不同形态信息,这为生物成像和显微镜领域提供了新的视野,如图3(b)所示。同年, Fan等^[69]指出通过相邻人工原子间的干涉以及复合相位可分别实现不同旋光入射时的振幅解绑,并在可见

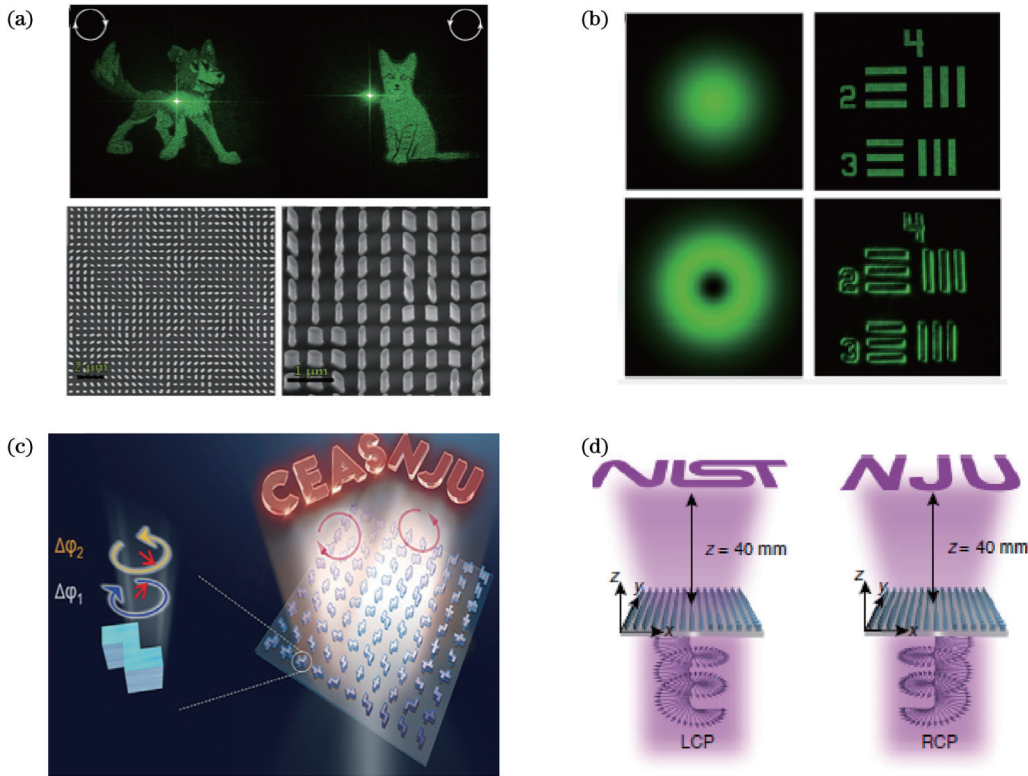


图 3 多功能成像。(a)基于全介质复合相位超构表面实现手性全息测试结果及其样品照片^[47];(b)基于复合相位超构表面实现明暗场成像的实验结果^[68];(c)通过设计非镜面对称的手性人工原子实现自旋解耦的手性全息成像器件示意图^[70];(d)深紫外双全息成像示意图^[48]

Fig. 3 Multifunctional imaging. (a) Experimental results of chiral holography based on an all-dielectric composite phase metasurface and its sample photos^[47]; (b) experimental results of bright- and dark-field imaging based on a composite phase metasurface^[68]; (c) schematic diagram of a chiral holographic imaging device with spin decoupling achieved by designing non-mirror symmetric chiral meta-atoms^[70]; (d) schematic diagram of deep-ultraviolet dual holographic imaging^[48]

光波段通过实验实现了高质量的灰度成像,当不同旋光入射到该器件上时,成像面呈现图案相同但明暗不同或明暗相同但图案不同的全息成像。2021年,Chen等^[70]提出了一种由手性人工原子构造的复合相位超构表面。之前的研究中人工原子均具有镜面对称性,使得基于传输相位实现相位全覆盖时,不可避免地会有一些圆偏振转化效率较低的原子,因此导致成像质量下降。如图3(c)所示,该器件由一系列具有非镜面对称性的手性人工原子构成,每个组成器件的原子的圆偏振转化效率可几乎保持不变且很高,进而提升成像质量。在近红外波段对比了不同复合相位超构表面实现自旋解耦全息成像的成像质量。Zhang等^[48]将复合相位超构表面缩小到了芯片级尺寸,在深紫外波段基于高深宽比Damascene光刻技术制备了一系列HfO₂双功能介质超构表面,实现高数值孔径的聚焦、自加速光束以及双全息成像等,如图3(d)所示。

3.2 多功能表面波耦合器

复合的超构表面不仅可以调控传输波在远场实现功能解耦,也被应用到一些功能集成的片上器件的设计中。表面波是局域在金属和空气交界面处的电磁本征模式,其波矢大于真空中波矢,因此具有局域场增强和亚波长的特性,同时也意味着传输波无法直接激励表面波,需要借助一个耦合器来完成激发,传统的耦合器有低效庞大的棱镜和光栅等。随着研究人员的不断探索,表面波激发效率低的问题通过高效的几何相位超构表面设计得到了解决。但是,调控表面波波前的功能器件的功能仍然是单一且绑定的。此类器件只能工作于单一圆偏振下,例如:当左旋光入射到器件上并在本征区形成表面波会聚的现象时,右旋圆偏振光入射时本征区另一侧一定是发散的。针对这一问题,Li等^[58]基于金属/介质/金属构型的人工原子,在高效理论的指导下设计了一系列顶层金属结构为圆弧工字形的人工原子,并通过调节人工原子的开口角以及旋转角来同时调控局域位置处人工原子的共振相位以及几何相位。为了验证高效复合相位超构表面的概念,该团队通过微波实验同时实现了近场以及远场功能的独立调控,在近场实现表面波聚焦,在远场实现高效异常反射,如图4(a)所示。随后,该设计理念被拓展到了太赫兹波段,在片上实现了不同手性的传输波照射时表面波被高效(60%)激发,当传输波转化成表面波后进一步对其波前进行了调控,在激发区左右不同区域实现不同的功能,实现了高效的近场双功能器件^[56],如图4(b)所示。2019年,Yin等^[71]利用耶路撒冷十字金属结构以及共振和几何相位在太赫兹波段实现了不同手性光入射下表面波的激发与在远场的异常偏折。2020年,Meng等^[72]将这一设计拓展到了近红外波段,对于左旋圆偏振光和右旋圆偏振光实现远场异常偏折和表面波激发,如图4(c)所示。最近,Chen等^[57]将片上多功能器件拓展到了近红外波段,并实现了激发器

件与片上光学波导的互联,如图4(d)所示。不同手性的传输波转化为表面波后,经过波前整形后高效耦合到片上光波导中,这为片上光子器件提供了良好的平台。

3.3 多功能波前调控器件

超透镜以及特殊光场(如贝塞尔光束、艾里光束)的发生器一直以来都是超构表面领域的研究热点,它们是由一系列深度亚波长的人工原子在二维平面内排列组成,可以使得入射光在自由空间中聚焦或干涉,进而形成一些特殊光束,这为微型光学系统、生物探测以及成像提供了良好的功能平台。然而,大多数操控圆偏振入射光器件的设计策略只针对单一偏振态(左旋圆偏振光或右旋圆偏振光),无法通过同一个器件产生具有不同波前的光束,这限制了光学器件不断小型化以及高集成度的应用需求。例如产生涡旋光的光学元器件在经典和量子光学中都有广泛的应用,但通常基于纯几何相位超构表面产生涡旋光时,当入射偏振态从左旋圆偏振态切换到右旋圆偏振态时,其轨道角动量只能进行翻转,无法产生不同阶数的涡旋光,这限制了通信系统的通信容量。针对这一问题,2017年Capasso教授团队^[50]将传输相位和几何相位相结合,实现了当入射光偏振态从左旋圆偏振光切换到右旋圆偏振光时,产生涡旋光的阶数由4阶到3阶的转变,产生两个独立的涡旋光,进而极大地提升了光通信器件的通信能力,如图5(a)所示。2019年,Xu等^[73]展示了一种由一系列几何尺寸与旋转角不同的金属十字结构组成的反射式超构表面,分别对左旋圆偏振入射光以及右旋圆偏振入射光实现的功能进行解耦,并在微波波段进行了实验验证。当被不同圆偏振光分别照射时,该器件具有独立波前控制能力,可实现高效异常偏折和聚焦功能。2019年,Tian等^[52]通过结合几何相位和传输相位,对双功能器件的功能进行了进一步拓展,并给出了双聚焦器件的相位分布。基于TiO₂介质柱,在可见光工作波长在532 nm的波段给出了相应的器件设计,该器件可以在传播方向不同位置处产生聚焦现象,通过改变入射光的偏振态可以动态调节双焦点出现的位置、高度以及相应焦点的强度,器件的模拟效率为72%。同年,Fan等^[55]介绍了一种超薄、低成本以及易集成的全介质超构表面,其在可见光波段范围内可以产生一种具有非衍射与自加速特性的艾里光束。当切换入射光的偏振态时,可以生成两束具有不同加速方向的艾里光束。然而,此种方法产生的非衍射光束的偏振态是均一的。2020年,Jin等^[53]通过在40 nm厚的银膜上刻出一系列开口角度均为60°的V型人工原子,通过改变V型人工原子的臂长以及旋转角度,分别调控局域位置处的共振相位和几何相位,在近红外波段通过实验实现了双焦点的产生,不同手性旋光入射时在自由空间中不同位置实现了聚焦功能,如图5(b)所示。2020年,

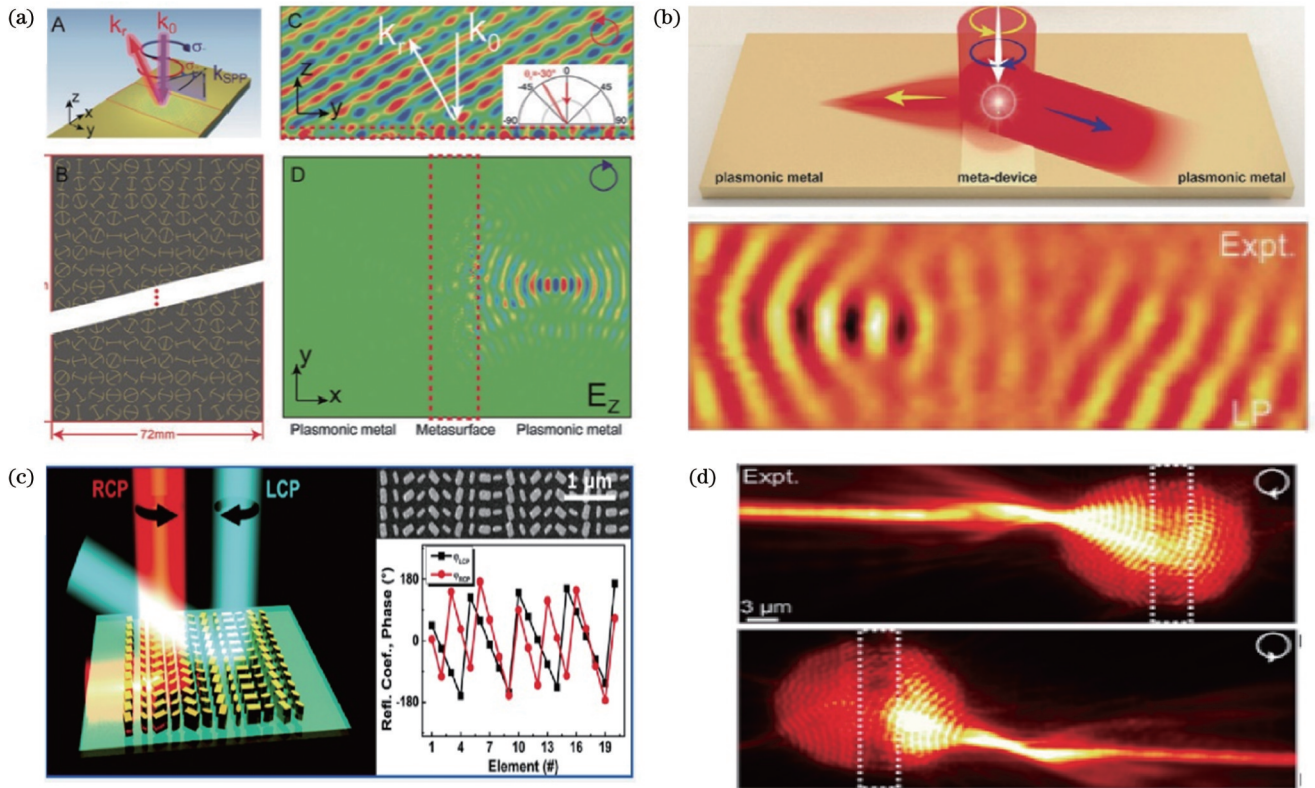


图 4 多功能表面波耦合器。(a)微波高效近远场自旋解耦器件示意图以及实验测试结构^[58]；(b)太赫兹高效的近场调控双功能器件示意图以及在近场实现表面波聚焦与偏折实验测试结果^[56]；(c)在 850~950 nm 波段实现近远场双功能集成^[72]；(d)光波段高效近场双功能器件与片上光波导高效耦合^[57]

Fig. 4 Multifunctional meta-couplers. (a) Schematic diagram of an efficient microwave near- and far-field spin decoupling device and test structure^[58]; (b) schematic diagram of an efficient terahertz near-field bifunctional device and experimental test results of surface wave focusing and deflection in different regions^[56]; (c) near- and far-field bifunctional integration in 850–950 nm band^[72]; (d) efficient coupling between a near-field bifunctional device in optical band and an on-chip optical waveguide^[57]

Xu 等^[74]充分利用频率和波矢自由度,进一步拓展了复合相位超构表面的功能数量,如图 5(c)所示。他们将共振相位与几何相位相结合,利用金属十字与双开口金属人工原子面内复合以及层间复合,当用不同频率不同手性的圆偏振光照射同一个器件时,在其各自的频率下产生聚焦、涡旋光以及全息等功能,并通过微波实验进行验证,且不同的功能之间的互扰可忽略不计。2023 年, Wang 等^[75]给出了设计高效双功能器件的理论指导,指出在设计高效的双功能器件时需要满足两个条件:一方面需要人工原子具有较高的圆偏振转化效率,另一方面组成器件的人工原子需要有足够的相位覆盖能力。因此,对于全介质高效多功能超构表面来说,人工原子具有大的高深宽比是至关重要的。该团队基于 20:1 的高深宽比人工原子在太赫兹波段通过实验实现了效率为 81% 的双功能器件,如图 5(d)所示。

以上的器件均对不同手性入射光在远场实现的功能进行了解耦,但其所产生的光场均无矢量性且效率普遍偏低。2020 年 Xu 等^[76]提出了一种产生柱极化和角向极化的矢量非衍射贝塞尔光束发生器,如图 5(e)

所示。该器件的设计原理是同时使用了传输相位以及几何相位来解耦不同手性光的功能并且在同一区域形成拓扑荷数相反的一阶贝塞尔光束,通过这两束角动量方向相反的光束的干涉即可形成柱极化分布和角向极化分布的 0 阶贝塞尔光束。因此,当两个正交线偏振光照射该器件时,即可产生不同偏振态分布的矢量贝塞尔光束。2020 年, Wang 等^[77]建立了一种通用设计策略,用于设计高效的反射式矢量多功能器件,以产生具有不同波前和偏振分布的复杂矢量光场,如图 5(f)所示。通过探索人工原子在控制光偏振方面的能力,并结合两种不同的相位调制机制(共振相位和几何相位),使得当不同圆偏振光照射时可以产生具有不同拓扑荷的涡旋光场且偏振态分布分别为柱极化和角向极化。

4 结 论

本文主要对近些年基于超构表面对圆极化电磁波任意、高效、多功能调控器件的研究进展进行了一个简单的回顾。目前,基于自旋解耦复合相位超构表面的多功能器件还仅停留在实验室阶段,未来可将其与其

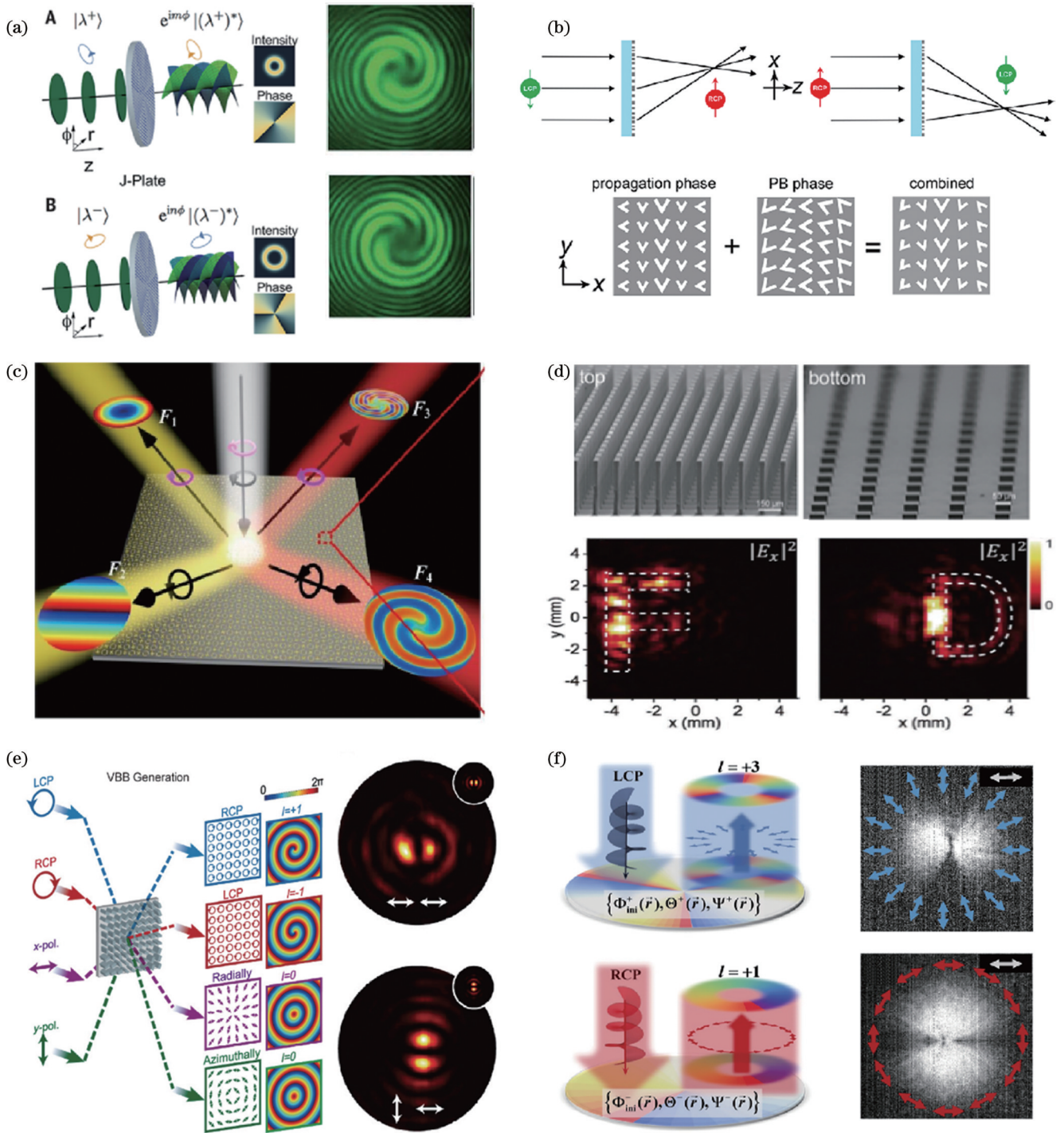


图 5 多功能波前调控器件。(a)将具有不同手性的入射光转化成具有不同阶数涡旋光的器件示意图和测试结果^[50]；(b)由 V 形纳米孔阵列组成的透射式双焦点自旋解耦示意图^[53]；(c)基于双层复合相位超构表面实现不同频率不同功能的反射式自旋解耦器件^[74]；(d)基于高深宽比(20:1)的高效人工原子利用复合相位实现高效自旋解耦的透射式太赫兹双全息^[75]；(e)太赫兹全介质透射式自旋解耦的矢量贝塞尔光束发生器示意图及其测试结果^[76]；(f)近红外反射式矢量自旋解耦不同阶数矢量光器件以及柱极化和角向极化矢量涡旋光的测试结果^[77]

Fig. 5 Multifunctional wavefront modulation devices. (a) Schematic diagram and test results of a device converting incident light with different chirality into vortex light with different orders^[50]; (b) schematic diagram of transmissive bifocal spin decoupling consisting of V-shaped nanopore arrays^[53]; (c) reflective spin decoupling device based on a two-layer composite phase metasurface realizing different functions at different frequencies^[74]; (d) efficient spin decoupling holography in terahertz band achieved using composite phase based on efficient meta-atoms with a high aspect ratio (20:1)^[75]; (e) schematic diagram of a terahertz all-dielectric transmissive spin decoupling vector Bessel beam generator and its test results^[76]; (f) near-infrared reflective vector spin decoupling optical device for different orders and test results for rod and angular polarization vector vortex light^[77]

他领域的研究工作相融合,以解决一些瓶颈问题,例如通过在片上将不同手性的入射光引导到不同区域进行生物监测。迄今为止,大多数极化复用器件只能实现被动和静态功能。因此,对不同偏振态入射波进行主动可调谐操作的多功能器件的研究在未来的实际应用中将扮演着重要的角色。希望这篇综述可以帮助读者加深对复合相位超构表面的理解,并为他们将来设计更多功能强大的设备提供有用的指导。

参 考 文 献

- [1] Yu Y Z, Dou W B. Generation of pseudo-Bessel beams at THz frequencies by use of binary axicons[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 888-893.
- [2] Squires A D, Constable E, Lewis R A. 3D printed terahertz diffraction gratings and lenses[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(1): 72-80.
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [4] Liu Y M, Zhang X. Metamaterials: a new Frontier of science and technology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2011, 40(5): 2494-2507.
- [5] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [6] Leonhardt U. Optical conformal mapping[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1777-1780.
- [7] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, 312(5781): 1780-1782.
- [8] Lai Y, Ng J, Chen H Y, et al. Illusion optics: the optical transformation of an object into another object[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 253902.
- [9] 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.
- [10] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [11] Glybovski S B, Tretyakov S A, Belov P A, et al. Metasurfaces: from microwaves to visible[J]. *Physics Reports*, 2016, 634: 1-72.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] He Q, Sun S L, Xiao S Y, et al. High-efficiency metasurfaces: principles, realizations, and applications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(19): 1800415.
- [15] Sun S L, He Q, Hao J M, et al. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, 11(2): 380.
- [16] Xu H X, Ma S J, Ling X H, et al. Deterministic approach to achieve broadband polarization-independent diffusive scatterings based on metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1691-1702.
- [17] Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 426-431.
- [18] Sun S L, Yang K Y, Wang C M, et al. High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient meta-surfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [19] Sun W J, He Q, Sun S L, et al. High-efficiency surface plasmon meta-couplers: concept and microwave-regime realizations[J]. *Light, Science & Applications*, 2016, 5(1): e16003.
- [20] Duan J W, Guo H J, Dong S H, et al. High-efficiency chirality-modulated spoof surface plasmon meta-coupler[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1354.
- [21] Aieta F, Genevet P, Kats M A, et al. Aberration-free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [22] Li X, Xiao S Y, Cai B G, et al. Flat metasurfaces to focus electromagnetic waves in reflection geometry[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 4940-4942.
- [23] Khorasaninejad M, Chen W T, Devlin R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1190-1194.
- [24] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [25] Ren H R, Fang X Y, Jang J, et al. Complex-amplitude metasurface-based orbital angular momentum holography in momentum space[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(11): 948-955.
- [26] Luo W J, Xiao S Y, He Q, et al. Photonic spin Hall effect with nearly 100% efficiency[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(8): 1102-1108.
- [27] Zheng G X, Mühlenbernd H, Kenney M, et al. Metasurface holograms reaching 80% efficiency[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(4): 308-312.
- [28] Luo W J, Sun S L, Xu H X, et al. Transmissive ultrathin Pancharatnam-Berry metasurfaces with nearly 100% efficiency[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(4): 044033.
- [29] Wen D D, Yue F Y, Li G X, et al. Helicity multiplexed broadband metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8241.
- [30] Wang Z, Dong S H, Luo W J, et al. High-efficiency generation of Bessel beams with transmissive metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(19): 191901.
- [31] Jia M, Wang Z, Li H T, et al. Efficient manipulations of circularly polarized terahertz waves with transmissive metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 16.
- [32] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible[J]. *Nature Nanotechnology*, 2018, 13(3): 227-232.
- [33] Lin R J, Su V C, Wang S M, et al. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 227-231.
- [34] 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.
- [35] Presutti F, Monticone F. Focusing on bandwidth: achromatic metalens limits[C]//2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 10-15, 2020, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [36] Wang S M, Wu P C, Su V C, et al. Broadband achromatic optical metasurface devices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 187.
- [37] Balli F, Sultan M, Lami S K, et al. A hybrid achromatic metalens[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 3892.
- [38] Wang Y J, Chen Q M, Yang W H, et al. High-efficiency broadband achromatic metalens for near-IR biological imaging window[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5560.
- [39] Cai T, Wang G M, Tang S W, et al. High-efficiency and full-space manipulation of electromagnetic wave fronts with metasurfaces[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(3): 034033.

- [40] Zhuang Y Q, Wang G M, Cai T, et al. Design of bifunctional metasurface based on independent control of transmission and reflection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3594-3603.
- [41] Li X M, Chen J, Xi X, et al. Broadband trifunctional metasurface and its application in a lens antenna[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 23244-23257.
- [42] Ding F, Deshpande R, Bozhevolnyi S I. Bifunctional gap-plasmon metasurfaces for visible light: polarization-controlled unidirectional surface plasmon excitation and beam steering at normal incidence[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 7(4): 17178.
- [43] Pors A, Nielsen M G, Bernardin T, et al. Efficient unidirectional polarization-controlled excitation of surface plasmon polaritons[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(8): e197.
- [44] Cai T, Tang S W, Wang G M, et al. High-performance bifunctional metasurfaces in transmission and reflection geometries[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600506.
- [45] Maguid E, Yulevich I, Veksler D, et al. Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array[J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1202-1206.
- [46] Wen D D, Chen S M, Yue F Y, et al. Metasurface device with helicity-dependent functionality[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(2): 321-327.
- [47] Balthasar Mueller J P, 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.
- [48] Zhang C, Divitt S, Fan Q B, et al. Low-loss metasurface optics down to the deep ultraviolet region[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 55.
- [49] Wang Y, Yao Z Y, Cui Z J, et al. Orbital angular momentum multiplexing holography based on multiple polarization channel metasurface[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(23): 4339-4349.
- [50] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [51] Yuan Y Y, Zhang K, Ratni B, et al. Independent phase modulation for quadruplex polarization channels enabled by chirality-assisted geometric-phase metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4186.
- [52] Tian S N, Guo H M, Hu J B, et al. Dielectric longitudinal bifocal metalens with adjustable intensity and high focusing efficiency[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 680-688.
- [53] Jin R C, Tang L L, Li J Q, et al. Experimental demonstration of multidimensional and multifunctional metalenses based on photonic spin Hall effect[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(2): 512-518.
- [54] Zheng C L, Li J, Yue Z, et al. All-dielectric trifunctional metasurface capable of independent amplitude and phase modulation[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2200051.
- [55] Fan Q B, Zhu W Q, Liang Y Z, et al. Broadband generation of photonic spin-controlled arbitrary accelerating light beams in the visible[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(2): 1158-1165.
- [56] Wang Z, Li S Q, Zhang X Q, et al. Excite spoof surface plasmons with tailored wavefronts using high-efficiency terahertz metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2020, 7(19): 2000982.
- [57] Chen Y Z, Zheng X Y, Zhang X Y, et al. Efficient meta-couplers squeezing propagating light into on-chip subwavelength devices in a controllable way[J]. *Nano Letters*, 2023, 23(8): 3326-3333.
- [58] Li S Q, Wang Z, Dong S H, et al. Helicity-delinked manipulations on surface waves and propagating waves by metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3473-3481.
- [59] Ma Z J, Hanham S M, Albella P, et al. Terahertz all-dielectric magnetic mirror metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1010-1018.
- [60] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(6): 813-820.
- [61] Headland D, Carrasco E, Nirantar S, et al. Dielectric resonator reflectarray as high-efficiency nonuniform terahertz metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1019-1026.
- [62] Khorasaninejad M, Zhu A Y, Roques-Carmes C, et al. Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths[J]. *Nano Letters*, 2016, 16(11): 7229-7234.
- [63] Pancharatnam S. Generalized theory of interference, and its applications[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences: Section A*, 1956, 44(5): 247-262.
- [64] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical and Physical Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [65] 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.
- [66] Shitrit N, Bretner I, Gorodetski Y, et al. Optical spin Hall effects in plasmonic chains[J]. *Nano Letters*, 2011, 11(5): 2038-2042.
- [67] Huang L L, Chen X Z, Mühlenbernd H, et al. Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [68] Huo P C, Zhang C, Zhu W Q, et al. Photonic spin-multiplexing metasurface for switchable spiral phase contrast imaging[J]. *Nano Letters*, 2020, 20(4): 2791-2798.
- [69] Fan Q B, Liu M Z, Zhang C, et al. Independent amplitude control of arbitrary orthogonal states of polarization via dielectric metasurfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(26): 267402.
- [70] Chen C, Gao S L, Song W G, et al. Metasurfaces with planar chiral meta-atoms for spin light manipulation[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(4): 1815-1821.
- [71] Yin L Z, Huang T J, Han F Y, et al. High-efficiency terahertz spin-decoupled meta-coupler for spoof surface plasmon excitation and beam steering[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18928-18939.
- [72] Meng C, Tang S W, Ding F, et al. Optical gap-surface plasmon metasurfaces for spin-controlled surface plasmon excitation and anomalous beam steering[J]. *ACS Photonics*, 2020, 7(7): 1849-1856.
- [73] Xu H X, Han L, Li Y, et al. Completely spin-decoupled dual-phase hybrid metasurfaces for arbitrary wavefront control[J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(1): 211-220.
- [74] Xu H X, Hu G W, Jiang M H, et al. Multiplexed metasurfaces: wavevector and frequency multiplexing performed by a spin-decoupled multichannel metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(1): 2070005.
- [75] Wang Z, Yao Y, Pan W K, et al. Bifunctional manipulation of terahertz waves with high-efficiency transmissive dielectric metasurfaces[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(4): 2205499.
- [76] Xu Y H, Zhang H F, Li Q, et al. Generation of terahertz vector beams using dielectric metasurfaces via spin-decoupled phase control[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(10): 3393-3402.
- [77] Wang D Y, Liu T, Zhou Y J, et al. High-efficiency metadevices for bifunctional generations of vectorial optical fields[J]. *Nanophotonics*, 2020, 10(1): 685-695.

Multifunctional Manipulation of Electromagnetic Waves Based on Composite-Phase Metasurfaces (Invited)

Wang Zhuo¹, He Qiong^{1***}, Sun Shulin^{2**}, Zhou Lei^{1*}

¹*Department of Physics, State Key Laboratory of Surface Physics, Shanghai Key Laboratory of Metasurface Light Field Manipulation, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

²*Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Optical Manufacturing, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China*

Abstract

Significance Multifunctional integrated devices have become the mainstream of nanophotonics research in recent years as optical devices continue to evolve towards high capacity, multichannel, low loss and integration. Additionally, the arbitrary manipulation of circularly polarized (CP) electromagnetic (EM) waves is significant for a wide range of applications such as chiral molecule manipulation, imaging, and optical communication. However, conventional optical devices composed of natural materials cannot realize multiplexing with only one optical device because they rely on the body properties to change the propagation phase so as to modulate electromagnetic waves. As a result, conventional optical devices are not conducive to the diversification, integration, miniaturization, and efficiency improvement of optical devices due to the single function, system complexity, large size, and low efficiency.

Progress In recent years, metasurfaces consisting of a series of ultra-thin subwavelength artificial atoms arranged in a specific manner in the plane have demonstrated powerful modulation of electromagnetic waves, providing a good platform for realizing multifunctional integration. Researchers have discovered a series of exotic physical phenomena and powerful planar optical devices by exploiting the advantages of metasurfaces, such as lightness and thinness, large degree of modulation freedom, low loss, and easy conformality and integration. The mechanisms for modulating the phase of EM waves based on metasurfaces can be classified into three main types including resonant phase, geometric phase, and propagation phase. The resonant phase modulation mechanism is usually achieved by changing the geometry of the constituent artificial atoms to shift their resonant frequencies under arbitrarily polarized incident light. The propagation phase is realized by accumulating the phase of an EM wave as it propagates within the artificial atoms of the medium. The geometric phase is achieved by rotating the artificial atoms to change the phase of the outgoing light, while the polarization state of the outgoing light is opposite to the circular polarization state of the incident light. Among them, the resonance phase and the propagation phase do not depend on the polarization state of the incident light, while the geometric phase relies on the CP light. Typically, the three types of metasurfaces realize a single function, and it is vital to extend the integration of device functions as the application and device integration requirements continue to increase. By changing the geometry of the two orthogonal directions of the artificial atoms and employing the resonance phase or propagation phase to design the resonance frequency of the artificial atoms, researchers can realize multifunctional integration of different lines of polarized incident light under irradiation from the device, which can be completely different in free space. This type of device is complicated by the fact that the two main axes of artificial atoms are not completely independent, resulting in crosstalk and complex design. Due to the strong controllability of CP waves, geometric phase metasurfaces have caught enormous research interest. However, these meta-devices exhibit locked functionalities under illuminations of CP light with different chirality. Meanwhile, such metasurfaces for modulating CP light are also employed to achieve multifunctional integration. This is yielded by combining several sets of geometric phases with different functions in the same device, and thus several different functions are formed in free space under irradiation from the same CP light, which is referred to as a “merge phase metasurface”. However, as it does not fully decouple different chirality of light, there is still function binding and low efficiency. More recently, researchers have found that the combination of the spin-dependent geometric phase with the resonance or propagation phase can unlock the fixed function. Such metasurfaces often referred to as composite phase metasurfaces have been adopted to further improve device performance and integration in response to the growing demand for integrated optics applications. Starting from the three different phase mechanisms for electromagnetic wave manipulation by metasurfaces, we present a brief overview of resonant phase metasurfaces, geometric phase metasurfaces, propagation phase metasurfaces, and composite phase metasurfaces, with their operating principles, design strategies, and experimental implementations included, and recent research advances in this field briefly discussed.

Conclusions and Prospects Finally, we study spin-decoupled composite phase metasurfaces. Today's multifunctional devices are still at the laboratory stage, but in the future, they can be integrated with research in other fields to solve some bottlenecks, such as directing incident light of different chirality to different regions on a chip for biomonitoring. Additionally, most polarization multiplexing devices to date can only perform passive and static functions. Therefore, the study of multifunctional devices with active tunable operation of incident waves of different polarization states will play a vital role in future practical applications. We hope that this brief review will help readers deepen their understanding of geometric phase metasurfaces and composite phase metasurfaces, and provide guidance for designing their components in the future.

Key words metasurfaces; resonance phase; propagation phase; geometric phase; composite phase; circularly polarized light; multifunction