

## 利用超表面的涡旋光束产生进展 (特邀)

吕浩然, 白毅华, 叶紫微, 董 森, 杨元杰\*

(电子科技大学 物理学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 涡旋光束因为携带轨道角动量, 在光通信、粒子操纵及量子信息等领域都具有重要的应用前景。目前有很多方法可用于产生涡旋光束, 如利用螺旋相位板、模式转换、空间光调制器等。然而, 传统的方法需要搭建体积相对较大的光学系统, 限制了其在集成光学等领域中的应用。不同于传统方法中通过传输效应来获得相位变化, 超表面可以通过纳米结构使入射光产生相位突变, 在纳米尺度上独立控制动态或几何相位以产生涡旋。超表面具有强大光控制能力的同时, 还具有体积小、易于集成等特点, 因此成为了产生涡旋光的理想方法。文中在介绍产生涡旋光束基本原理的基础上, 回顾了近年来利用超表面产生涡旋光束的研究进展。首先介绍了利用动力学相位、Pancharatnam-Berry (P-B) 相位以及混合相位产生光学涡旋的方法。随后, 对利用全息与编码超表面产生涡旋及通过多路复用产生多个涡旋等不同方法进行了综述。最后, 对基于超表面产生涡旋的一些亟待解决的问题和应用前景作了简单总结与讨论。

**关键词:** 光学涡旋; 轨道角动量; 超表面; 产生方法

**中图分类号:** O436      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210283

## Generation of optical vortex beams via metasurfaces (*Invited*)

Lv Haoran, Bai Yihua, Ye Ziwei, Dong Miao, Yang Yuanjie\*

(College of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Optical vortex beams, carrying orbital angular momentum, possess tremendous advanced applications ranging from optical communication, micromanipulation and nonlinear optics to quantum information. Various methods have been proposed to generate optical vortices, such as spiral phase plate (SPP), mode converter and spatial light modulator (SLM). However, changing phase by accumulating propagation distance restrains the applications in integrated optics. Owing to the salient properties that metasurface is small-sized and easy to be integrated, it is expected to be an ideal optical vortices generator with excellent ability of regulating light field. The basic principles of generating vortex beams and recent progress in the use of metasurfaces were introduced in this article. First, methods of using dynamic phase, Pancharatnam-Berry (P-B) phase and hybrid phase to generate optical vortices were introduced. Subsequently, holography and encoding metasurfaces and multiplexing metasurfaces were reviewed to generate multiple vortices. Finally, based on the generation of optical vortices via metasurfaces, some potential applications and problems were briefly summarized and discussed.

**Key words:** optical vortices; orbital angular momentum; metasurface; generation methods

收稿日期: 2021-04-30; 修订日期: 2021-07-13

基金项目: 国家自然科学基金 (11874102); 四川省科技计划项目 (2020JDR0006); 中央高校业务费 (ZYGX2019J102)

作者简介: 吕浩然, 博士生, 主要研究方向为涡旋光束的产生及其应用。

通讯作者: 杨元杰, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为光场调控及光镊等。

## 0 引言

涡旋是自然界中普遍存在的现象,从海洋环流到台风涡旋,甚至银河系中的螺旋星系都有涡旋的身影。涡旋不仅在宏观物质中得以体现,其结构性在电磁和光场中都表现出独特性质。在波场中,空间中某位置处波场性质的数学量是不确定或急剧变化的,就称之为奇点。涡旋光束是一种具有特殊横向空间分布的光束,在其光束中心存在着一个相位奇点,奇点处光强为零,光场强度呈圆环状分布<sup>[1]</sup>。光作为电磁波的一种形式,具有能量和动量,涡旋光能同时携带自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM) 和轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM)<sup>[2]</sup>。其中, SAM

与光的偏振状态相关,圆偏振光能携带 SAM,其中每个光子携带 $\pm\hbar$ 的 SAM; 涡旋光能携带 OAM,其值与光波相位相关。相位是光的一个重要特性,早在 20 世纪 70 年代, Berry 等人就提出相位位错和涡旋等概念<sup>[3]</sup>。1989 年, Couillet 等人提出了光学涡旋<sup>[4]</sup>。直到 1992 年, Allen 等人发现具有螺旋相位因子  $\exp(il\psi)$  的光束携带 OAM,并且每个光子携带的 OAM 值为  $l\hbar$ ,其中  $l$  为拓扑荷数,  $\psi$  为方位角。如图 1(a) 所示,如果光波具有 OAM,则波矢量围绕  $z$  轴旋转,每旋转一周光场相位改变  $2\pi l$  倍,从而产生螺旋相位波前, $l$  的正负影响相位变化方向<sup>[5]</sup>。常见的涡旋光束有 Laguerre- Gaussian(LG) 光束<sup>[6]</sup>、Bessel 光束<sup>[7]</sup>、完美涡旋光束<sup>[8]</sup>以及反常涡旋光束<sup>[9]</sup>等。

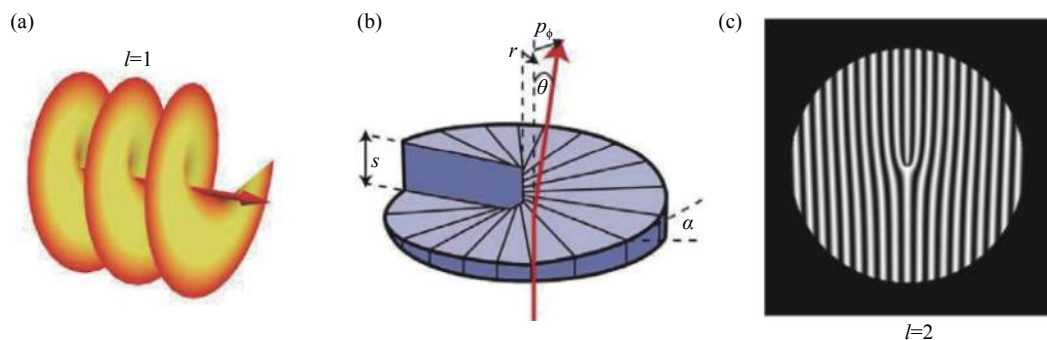


图 1 (a) 涡旋光的相位结构; (b) 螺旋相位板; (c) 叉形衍射光栅

Fig.1 (a) Spiral phase of optical vortices; (b) A spiral phase plate; (c) A fork-shaped diffraction grating

由于涡旋光所有 OAM 模式都是正交的,且理论上模式数目有无穷多个,因此 OAM 也可以作为多路复用自由度应用于光通信中,从而提高通信容量和频谱效率<sup>[10-11]</sup>。涡旋光的复用通信容量现已远超传统技术,达到 Tbit 数量级,具有良好的应用价值。此外, Ashkin 创造性地利用聚焦光束作为光镊成功捕获微粒,在 2018 年获得诺贝尔物理学奖。在一定条件下,涡旋光的角动量可以传递给微粒,使微粒产生运动,因此涡旋光被广泛应用于微操纵<sup>[12-13]</sup>。其中光致旋转对微粒进行角向操作,加强了微粒转动的可控性,又被称为“光扳手”<sup>[14]</sup>。将光镊和光致旋转相结合,在三维操作微粒的基础上增加了角向维度操作,是操控微粒的有效手段。

除此以外, Zeillinger 等研究了携带轨道角动量的电磁场模式的纠缠,这些模式可以描述无限维度的离散希尔伯特空间,因此对量子信息领域中两个多维纠缠态及涉及许多正交量子态的研究具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。

Stav 等人使用介电超表面使自旋和轨道角动量光子之间产生纠缠,利用光子自旋轨道相互作用产生了单光子的四个贝尔态,证明了超表面相互作用的两个光子之间的非局域相关性<sup>[17]</sup>。Lavery 等人对旋转物体散射光的轨道角动量进行分析,从而得到与其旋转频率和轨道角动量乘积成正比的频移,这种频移的倍增增强可应用于地面和天文环境中对旋转天体的远距离探测<sup>[18]</sup>。2017 年, Gauthier 等产生了携带 OAM 的极紫外飞秒涡旋光束,从基本物理学的角度解释了诸如高度非线性的光物质相互作用中的角动量守恒等关键问题<sup>[19]</sup>。Kong 等将波混频应用于高谐波光源,在极紫外波长产生具有最小中心强度的一阶涡旋光束,其分辨率可能达到纳米甚至埃,为光刻开辟了道路<sup>[20]</sup>。

自光学涡旋被提出以来,各类产生涡旋光的方法

相继发展起来。目前主要分有源与无源两类<sup>[21]</sup>。其中,有源法主要利用激光腔直接输出相位涡旋光<sup>[22]</sup>。基于该方法产生的光束具有良好的质量,但有源法通常需要较高的泵浦光功率或特殊设计的元件,效率相对较低,也不易产生高阶涡旋光。相对的,无源法主要指在腔外通过光学器件将一般光束转换成涡旋光束,这种方法具有简单、灵活、可控性强、实现方式多样等特点,目前已成为相位涡旋光束产生的主流方法。例如,螺旋相位板利用累积传播效应使入射光束附加一个螺旋相位因子,直接有效地产生涡旋光束<sup>[23]</sup>,如图 1(b)所示。然而,在光学波长下,该方法对精确度有极高要求,通常用许多不连续的阶梯来近似螺旋表面,导致生成光束质量降低。更重要的是,螺旋相位板仅局限于产生特定拓扑荷的涡旋光束。衍射光学元件是另一种常用产生涡旋光束的方法。利用倾斜平面波和涡旋光束形成干涉图样(叉状光栅图样)作为全息图记录在胶片上,如图 1(c)所示, $l$  叉形错位对应于  $l$  拓扑荷值。当叉形光栅全息图再次被平面波照射时就可以重建目标涡旋光束<sup>[24]</sup>。涡旋光束在不同衍射级以共轭的形式出现,因此不能得到单一模式的涡旋光束。除此以外,使用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)实现上述全息图的制作可以极大地简化实验过程,提高实验效率。SLM 是用于调节光学特性(相位、幅度和偏振等)的电光设备。入射光通过玻璃基板、透明电极和取向膜到达液晶分子,每个像素由相应电极的电压控制。因此,只需要将全息图编码到计算机中就可以操纵光束的波前。与仅产生特定相位分布的静态光学元件相比,SLM 可以实时调节相位分布<sup>[25]</sup>,产生的涡旋光束质量受 SLM 像素影响。此外,常见产生方法还有柱面镜的模式转换法<sup>[26]</sup>,微环谐振腔<sup>[27]</sup>等。

除了前面提到的传统产生涡旋光的方法之外,利用更小尺度、更易集成的超材料<sup>[28-32]</sup>与超表面<sup>[33-34]</sup>结构产生涡旋光引起了人们的重视。超表面是一种二维超材料,与传统的光学元件相比,具有亚波长或波长级别的厚度,这使得它们能够集成到紧凑的器件中。它利用周期性或非周期性排列的亚波长单元结构变化调控光场的振幅、相位和偏振等参量<sup>[35-38]</sup>,从而任意塑造光波面,改变光的传输方向,影响光的偏振态,能主动控制和增强非线性响应。超表面引入光

学特性的突变效应减少了光场调控对传播效应的依赖,一般由少层纳米结构<sup>[39]</sup>、纳米天线<sup>[40-41]</sup>和金属孔<sup>[42-43]</sup>等不同结构组成。制作上可以借助于电子束刻蚀、离子束刻蚀、纳米压印等微纳刻蚀技术完成,厚度的降低可大大降低材料的损耗以提高器件效率。无论哪种情况,超表面都是通过光和纳米结构之间的相互作用实现光场性质的改变,最重要的是它提供了一个额外的光场调控自由度。光学超表面因其在纳米尺度上有强大的控制能力,以及更薄、更轻、易于集成等特点受到了广泛的关注。

文中综述了基于超表面的涡旋研究,介绍了超表面调控相位的机理以及超表面产生涡旋光的不同方法,最后对涡旋光的进一步研究和发展做出展望。

## 1 超表面对相位的调控与涡旋的产生

超表面具有纳米级的光操纵能力,与其他方法相比,用超表面产生涡旋具有结构紧凑、厚度较薄、易于控制和集成的优点。通过精心设计,可以在离超表面较远的地方得到光涡旋,也称之为非局域涡旋。超表面纳米结构的尺寸、形状改变以及各向异性纳米结构的旋转可以使透射场具有额外的相位延迟。超表面对相位的调控可以简要分为动力学相位(Dynamic phase)和几何相位(Geometric phase)两类<sup>[44]</sup>,或更详细地划分为几何相位、共振相位与传输相位三类<sup>[45]</sup>,文中采用简要划分。

### 1.1 利用动力学相位产生涡旋

累积传播效应产生的相位变化依赖于传播距离与给定介质的折射率。利用超薄亚波长纳米结构(也称为超表面)沿界面引入不连续相位(Phase discontinuity)时,可以根据广义斯涅尔定律控制反射和折射<sup>[35]</sup>:

$$\begin{cases} \sin(\theta_t) n_t - \sin(\theta_i) n_i = \lambda \frac{\nabla\phi}{2\pi} \\ \sin(\theta_r) n_i - \sin(\theta_i) n_i = \lambda \frac{\nabla\phi}{2\pi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta_t$ 、 $\theta_i$ 、 $\theta_r$ 分别为折射角、入射角、反射角; $n_t$ 和 $n_i$ 分别为介质在透射侧和入射侧的折射率; $\nabla\phi$ 为沿着界面的相位梯度变化。这种相位不连续性可以通过亚波长尺度的金属纳米天线、散射体或薄膜来实现。通过激发不同几何形状谐振器的局部等离子共振,散射场会引导或延迟激发场,从而导致相位不连

续的调谐。由于单个纳米天线产生的非方向性散射电场,这种调谐被限制在  $0\sim\pi$  范围内<sup>[40-41,46]</sup>。通过使用多层超表面、具有多重独立共振的散射体或耦合天线共振,能够在不改变偏振的情况下将相位调谐扩展到整个  $2\pi$  范围<sup>[47-49]</sup>。与传统的相位积累效应相比,这种突变相位由可忽略厚度的谐振腔引入。对界面的相位剖面进行设计,可以通过超表面产生带有螺旋相位波前的涡旋光束。

图 2(a) 为排布在八个扇形区域不同尺寸的纳米单元<sup>[47]</sup>,单元由在银膜上圆孔中填充介电材料组成。通过改变纳米孔半径激发谐振散射场和波导模式,从而实现可覆盖  $2\pi$  范围的相位调谐,对称的几何结构保证了对激发偏振场的不敏感性。由于在光频率上有明显的欧姆损耗和吸收,因此这种装置转换的涡旋光束的传输功率很低。此外,与自由空间阻抗的失配导致背反射,降低了转换效率<sup>[48-50]</sup>。为了高效率的产

生涡旋,可以用较厚的高折射率介质材料代替金属<sup>[51-54]</sup>。图 2(b) 为一个偏振无关的硅超表面,通过对硅纳米盘电偶极共振和磁偶极共振的重叠得到高效的惠更斯超表面,所需的  $2\pi$  范围相位变化可以通过改变纳米磁盘阵列的晶格间距实现<sup>[55]</sup>。

由上述超表面产生的涡旋光束在传播过程中通常携带固定的轨道角动量。但是近期出现了一些例外情况,涡旋光束的拓扑电荷会随光束的传播而变化。特殊的费马螺旋使局域拓扑电荷在长距离传播过程中发生变化<sup>[56]</sup>,相位的变化由传播距离控制。根据标量衍射理论,金属螺旋结构在距离物平面  $z$  处的透射场可以近似写为:

$$u(x,y,z) = \iint u(x_0,y_0,z) \frac{e^{ik\rho}}{\rho} \cos\theta dx_0 dy_0 \quad (2)$$

式中:  $u(x_0, y_0, z)$  为螺旋狭缝后传输场的振幅;  $\cos\theta = z/\rho$  为倾斜因子;  $\rho = [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^{1/2}$  为物体点到观

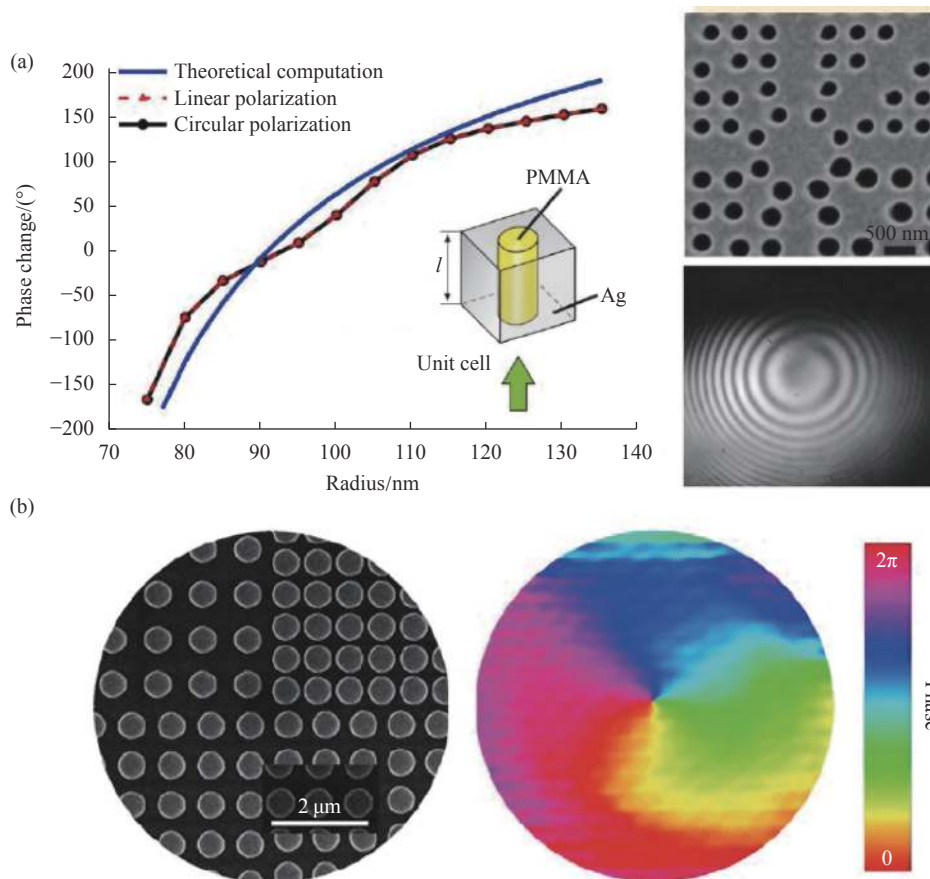


图 2 (a) 不同尺寸纳米单元组成超表面涡旋发生器及干涉图样<sup>[47]</sup>; (b) 硅超表面的 SEM 图像和物体表面光束的重构相位<sup>[55]</sup>

Fig.2 (a) Vortex generator composed of nano units with different sizes and interference patterns; (b) SEM image of the silicon metasurface and reconstructed phase of the beam of object surface



测点的距离,对于沿传播轴的观测点,可以根据螺旋轨迹进行简化。由于相邻两物点到观测点的相位差与传播距离有关,观测点周围光场的相位差必然与传播距离有关,并直接影响光涡旋。类似的,采用轨道半径满足  $r=r_0+l\lambda_{SPP}\phi$  的阿基米德螺旋缝也可以实现随传播距离变化的光涡旋<sup>[57]</sup>,螺旋缝产生的涡旋光束仍与传播距离有关,拓扑电荷的值随传播距离的增大而减小,通过调节螺线几何结构和传播距离的大小可以控制拓扑电荷的值。

除了远场产生可变拓扑荷的涡旋光外,在金属表面刻蚀螺线结构也被广泛应用于产生等离激元涡旋<sup>[58-59]</sup>。当光入射金属表面的结构时,可以激发局域在金属与电介质界面的沿界面传播的表面等离体极化激元 (Surface Plasmonic Polaritons, SPP)。远离金属表面后,表面等离激元就像倏逝波一样迅速衰减。结构激发的等离涡旋可以看作所有 SPP 场的叠加场,该涡旋场由于 SPP 场的局域性而成为局域场。获得等离激元涡旋更直接的方法是利用圆偏振光照射圆形纳米缝,光子的自旋角动量将与纳米缝耦合成为轨道角动量。光子自旋角动量与轨道角动量的耦合被定义为光自旋霍尔效应<sup>[60-61]</sup>。纳米缝可以为特定的单孔或双孔,孔结构可以是简单的圆形、矩形甚至  $z$  形等<sup>[62-63]</sup>。

若要获得高阶等离激元涡旋,需要引入更多的附加相位。一种方法是调整螺线轨迹起始和结束之间的间隙  $l_{spp}$  引入附加相位<sup>[58]</sup>,  $l$  为附加拓扑荷数,  $\lambda_{spp}$  为 SPP 的波长。需要指出的是,任何一个带较大拓扑荷  $l$  的螺线产生的高阶等离涡旋都存在缺陷。这是由于 SPP 场在沿金属表面传播过程中衰减,而传播距离取决于金属的吸收,  $l$  的值越大,缺陷越明显。可以用分段螺旋代替整个螺旋对此进行改进,从而改善生成的高阶等离激元涡旋<sup>[64-66]</sup>。此外,可以通过纳米孔引入几何相位项,从而改变涡旋光束的拓扑荷<sup>[67]</sup>。值得注意的是,当引入的几何相位过大时,传输场涡旋光束会发生畸变,适当增大圆轨迹的半径可以解决这一问题。

## 1.2 利用 Pancharatnam-Berry 相位产生涡旋

除了以上提到的动力学相位外,还可以引入 Pancharatnam-Berry (P-B) 相位,即通过旋转尺寸相同的各向异性结构单元来产生几何相位<sup>[68-69]</sup>,任意不同

旋转角度的纳米天线产生的散射波相位差等于它们旋转角度差的 2 倍。利用 P-B 相位产生涡旋的优点是它不依赖于结构的尺寸、固有的材料色散或结构共振,只通过旋转各向异性纳米结构单元的光轴来控制。考虑垂直入射下沿光轴旋转的纳米天线,其传输系数可用琼斯矩阵表示:

$$T = \begin{pmatrix} a_x \cos^2 \alpha + a_y \sin^2 \alpha e^{j\delta} & (a_x - a_y e^{j\delta}) \sin \alpha \cos \alpha \\ (a_x - a_y e^{j\delta}) \sin \alpha \cos \alpha & a_x \sin^2 \alpha + a_y \cos^2 \alpha e^{j\delta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:  $a_x$  和  $a_y$  为光场沿两个主轴方向的振幅分量;  $\delta$  为两分量的相位差;  $\alpha$  表示快轴方向与  $x$  轴方向的夹角。对于给定的入射光  $(i_1, i_2)$ , 利用偏振基转换<sup>[70]</sup>可以得到圆偏振基下的透射场  $t_c$ :

$$t_c = \frac{A}{2} \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} + \frac{B}{2} i_2 e^{-j2\alpha} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{B}{2} i_1 e^{j2\alpha} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中:  $A=a_x+a_y e^{j\delta}$ ;  $B=a_x-a_y e^{j\delta}$ 。利用 P-B 相位超表面调控光场的过程可以用上述公式来描述。

第一项表示与入射偏振相同的偏振状态,第二项表示左旋圆偏振态,第三项表示右旋圆偏振态,三者振幅的幅度是不同的。其中,后两项存在附加相位  $e^{\pm j2\alpha}$ , 这种相位即结构旋转引起的几何相位。通过对各向异性纳米天线的转角  $\alpha$  从 0 旋转到  $\pi$ , 入射光的交叉偏振光相移从  $0 \sim 2\pi$  进行调谐。此外,由于每个单元的几何形状不变,散射振幅也保持不变。利用这种附加相位控制透射光的波前便可以得到相应的涡旋光束。图 3 为 Karimi E 等人基于 P-B 相位在可见光照明下设计的产生涡旋光束的超表面结构<sup>[71]</sup>。等离纳米天线的取向角沿着同心圆环旋转  $2\pi$ , 赋予交叉偏振光从  $0 \sim 4\pi$  的相位变化,从而产生二阶的光学涡旋。此外,产生的拓扑荷与入射光偏振状态相关,左旋和右旋圆偏振入射光所产生光学涡旋的拓扑电荷分别为  $l=+2$  和  $l=-2$ 。通过所产生的光学涡旋分别与平面波、球面波的干涉验证了涡旋光的拓扑荷值。

各向异性纳米孔的旋转不仅可以使相位绕光轴发生角向变化以产生涡旋,还可以实现更加灵活的相位响应。图 4 为利用矩形孔旋转实现不同相位叠加得到超表面,它可以生成完美涡旋光束,环状光强的大小不受涡旋光拓扑荷的影响<sup>[72]</sup>。图 4(a) 为超表面结构对应叠加后的相位剖面与制得样品的 SEM 图,所得透射场的强度与涡旋干涉图样分别如图 4(b) 和

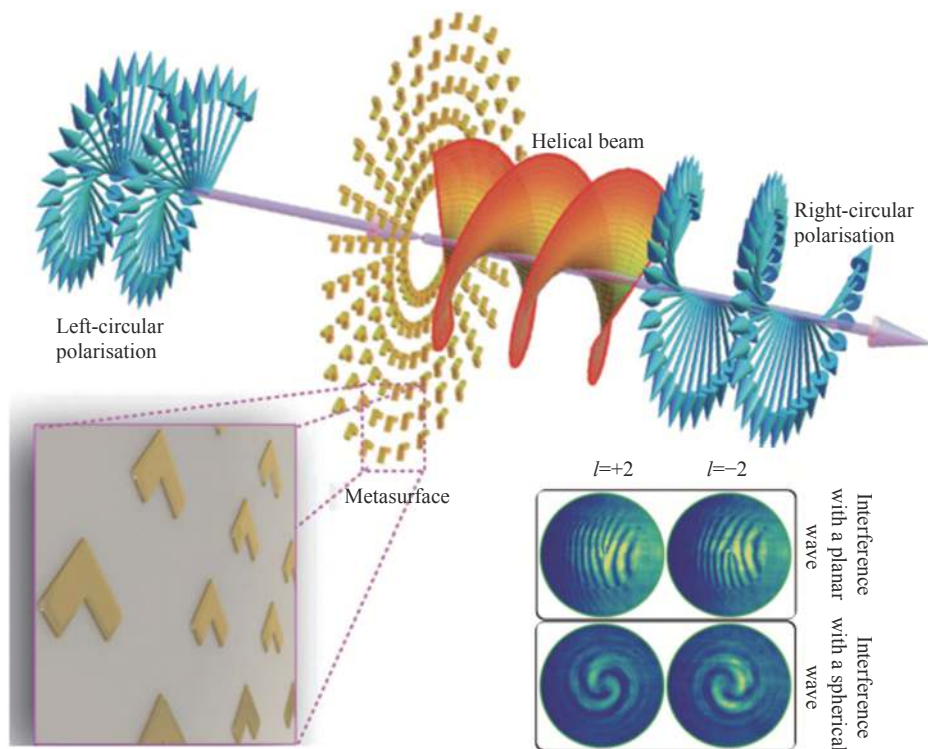


图 3 等离子超表面的自旋-轨道耦合示意图 (插图: 涡旋光与平面波、球面波干涉图<sup>[71]</sup>)

Fig.3 Schematic of the spin-orbit coupling through a plasmonic metasurface (Inset: interference pattern of the generated vortex beams with planar or spherical waves<sup>[71]</sup>)

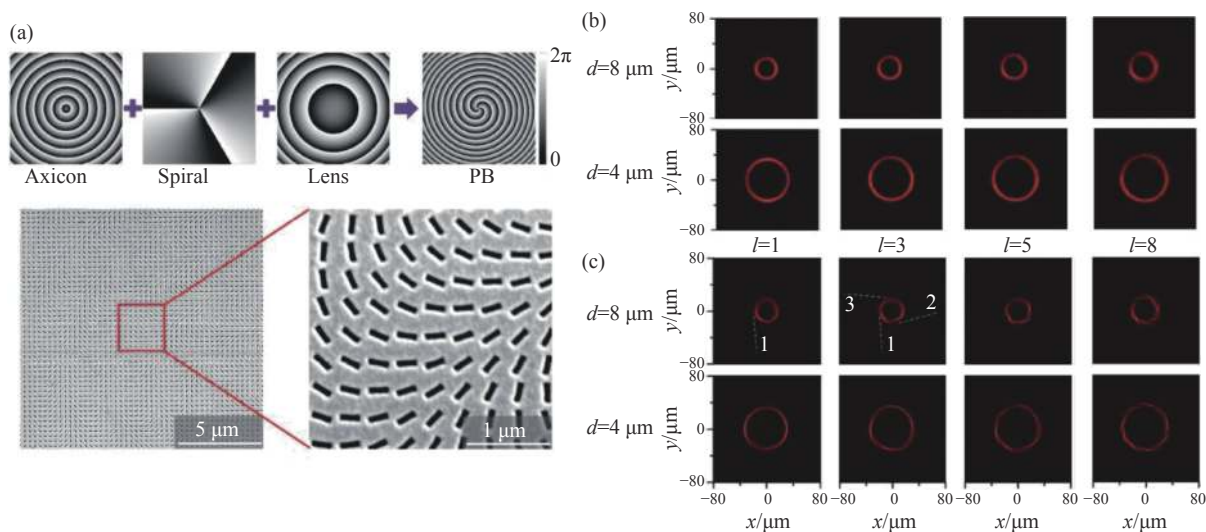


图 4 (a) 超表面结构对应的叠加后的相位剖面与制得样品的 SEM 图; 所得透射场的 (b) 强度与 (c) 涡旋干涉图样<sup>[72]</sup>

Fig.4 (a) Phase profile of the metasurface and corresponding scanning electron microscope image; (b) Intensity and (c) interference pattern of the transmitted field<sup>[72]</sup>

图 4(c) 所示。可以看出, 环状光强的半径不随拓扑荷的变化而改变。

### 1.3 利用混合相位产生涡旋

纳米结构的动力学相位和几何相位相结合为相

位调制提供了更大的自由度。几何相位的宽带特性被用来补偿金属和介电纳米结构耦合共振的色散, 使器件能够在宽光谱范围内工作。在设计全波控制的混合超表面时, 单次或局部谐振不足以改变相位, 除

了调整多个谐振腔或相邻散射体间的耦合强度外,还可以引入几何相位。

图 5(a) 展示了一种 V 形金属纳米天线,该天线通过改变结构的臂长、两臂的张角产生  $0\sim\pi$  的相位变化并旋转结构实现了  $2\pi$  的相位覆盖。如图 5(b) 所示,四种不同的 V 形纳米天线排布在八个扇形区域组成超表面,利用单元旋转引入几何相移,相位绕光轴实现了完整的  $2\pi$  相位变化,这是第一个被实验证明的纳米结构<sup>[35]</sup>。该超表面引入螺旋状相移,从而使正入射的线性偏振光产生  $l=1$  的涡旋光束。涡旋光束在远场呈环形强度分布,暗中空区域对应相位奇点。与共轴的高斯光束干涉,显示出涡旋光束的螺旋波前,产生螺旋干涉图;与倾斜的高斯光束干涉时则产生一个错位的干涉条纹。类似的,在不同扇形区域内布置覆盖  $2\pi$  倍数相位变化的纳米结构就会产生高阶涡旋光束。如图 5(c) 和图 5(d) 所示,不同角度、不同长度

的 V 形天线按不同排序分为三组,对相移的调控分别覆盖  $2\pi$ 、 $4\pi$ 、 $6\pi$ 。在七个扇形区域排列形成超表面,可以得到拓扑荷分别为 1、2 和 3 的涡旋光<sup>[73]</sup>。

相位梯度超表面能方便地将不同轨道角动量传递到光束中,为研究复杂动量耦合的影响提供了便利。2017 年, Capasso 等人提出了一种实现任意自旋到轨道角动量转换的方法<sup>[74]</sup>。超表面通过同时控制结构快轴的方向角和相移来实现这一功能,结构如图 6(a) 所示。之后他们利用这种方法设计了一种能分别将左右旋圆偏振光转换为携带不同 OAM 值光学涡旋的超表面,并进行了实验验证。

同样是利用不同相位的结合,在超表面中将等离子体延迟相位与几何相位相结合,为产生高纯度的涡旋光束提供了一种新途径<sup>[75]</sup>。如图 6(b) 所示,超表面由在银膜上刻蚀的多个周期性圆环构成,其半径定义为  $R_n = R_1 + (n-1)P$ ,其中  $n$  和  $P$  表示孔径的数目和周

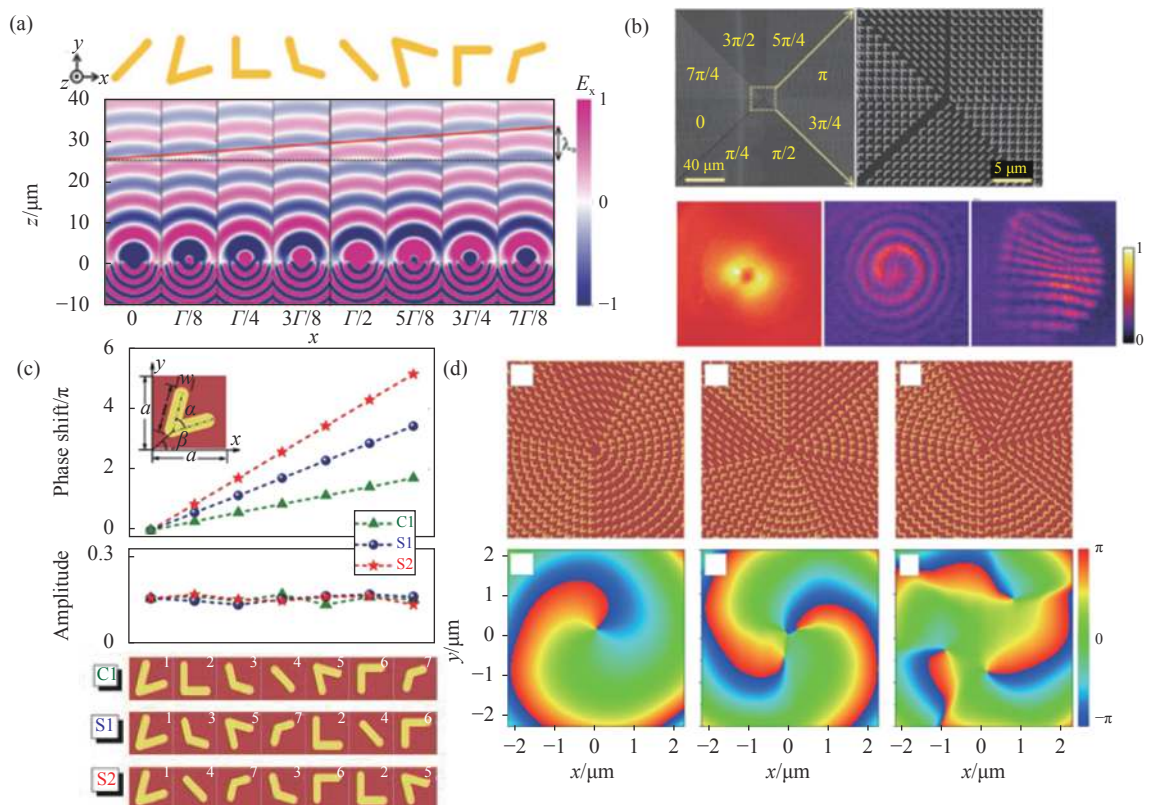


图 5 (a) V 型光学纳米天线的相位调控能力<sup>[35]</sup>; (b) 八种 V 型纳米天线组成超表面涡旋发生器与透射光干涉图样<sup>[35]</sup>; (c) 三组 V 型天线交叉偏振中的相移和幅值; (d) V 型纳米天线组成的高阶涡旋发生器<sup>[73]</sup>

Fig.5 (a) Phase control ability of V-shaped optical antennas<sup>[35]</sup>; (b) Metasurface vortex generator composed of 8 V-shaped antennas and the interference patterns<sup>[35]</sup>; (c) Phase shift and amplitude in cross polarization of 3 group V-shaped antennas; (d) High-order vortex generator composed of V-shaped antennas<sup>[73]</sup>



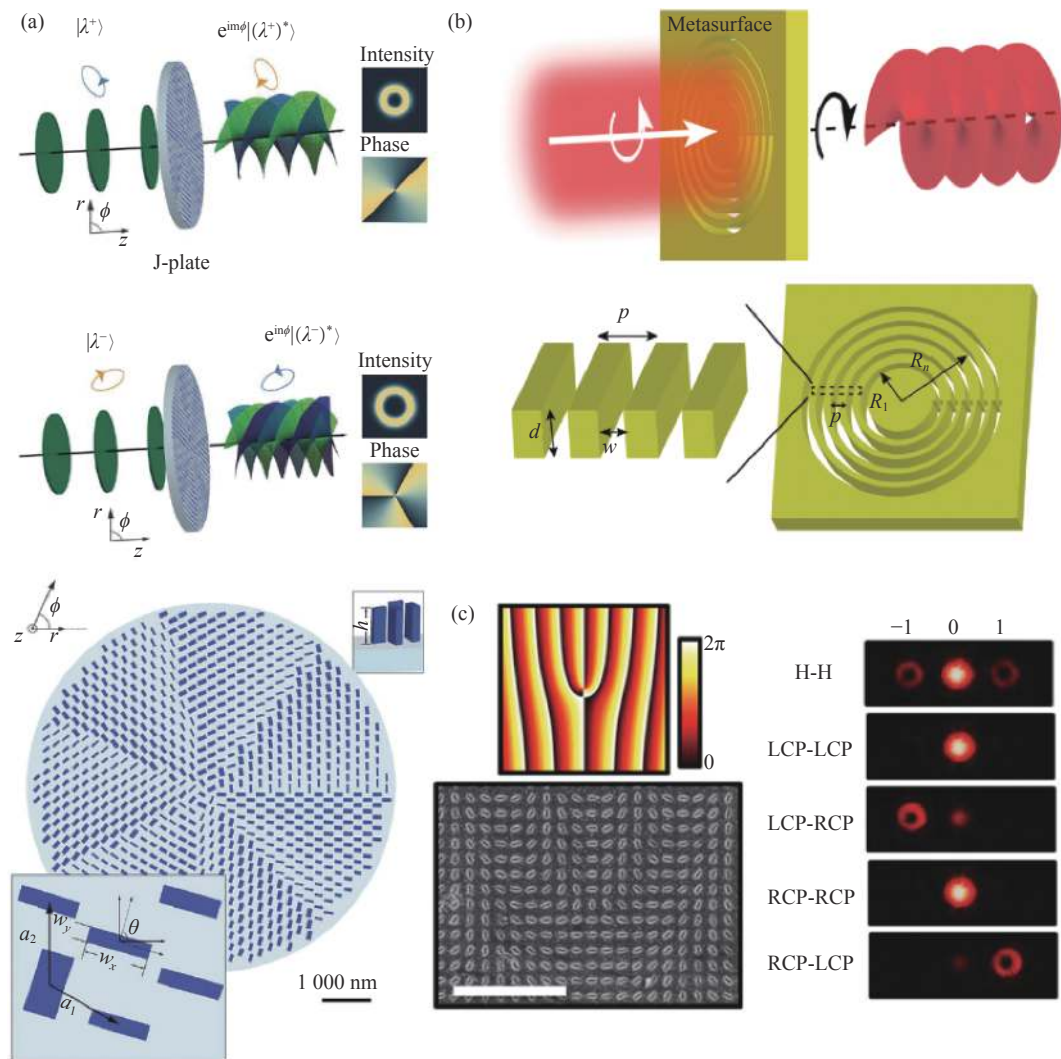


图 6 (a) 任意自旋轨道角动量转换的概念与结构示意图<sup>[74]</sup>; (b) 周期性圆环超表面功能与结构示意图<sup>[75]</sup>; (c) 超表面叉形光栅相位分布、SEM 图和产生的光学涡旋<sup>[78]</sup>

Fig.6 (a) Schematic of the arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion<sup>[74]</sup>; (b) Schematic of the structure and function of periodic-rings metasurface<sup>[75]</sup>; (c) Phase distribution, SEM image and generated optical vortices of a metasurface fork-shaped grating<sup>[78]</sup>

期, 环形孔可以看作是一组空间方向变化的纳米缝的二维扩展。当圆偏振光正入射在这种非均匀、各向异性的超表面上时, 旋向相反的透射光具有特定的相位分布。这项工作克服了不连续的相位分布在散射场中引入相位噪声, 降低涡旋光束纯度的问题。此外, 还可以通过混合相位来实现更为复杂的功能, 比如高效地产生艾里涡旋光束<sup>[76-77]</sup>, 在单个超薄元件上根据不同 SAM 产生和分裂涡旋光束<sup>[78-80]</sup>等。P-B 相位沿界面形成相位梯度, 表现为光子自旋霍尔动量偏移<sup>[81-85]</sup>。以超表面叉形光栅为例, 如图 6(c) 所示, 这种超表面叉形光栅在分裂自旋的同时能够产生光涡旋, H 表示入射或透射的激光器具有水平偏振, LCP

和 RCP 为入射或透射光束的偏振态<sup>[78]</sup>。

## 2 混合方法设计超表面产生涡旋

### 2.1 全息与编码超表面产生涡旋

全息术最早是在 1948 年提出的, 最初的目的是提高电子显微镜的分辨率<sup>[86]</sup>。传统的振幅全息图依靠物光和相干参考光束记录干涉图案, 由于具有波前整形和光记录/重建的重要功能, 数据存储和信息加密等应用随之出现。在经典的方法中, 由于大量的入射功率被散射或反射, 转换效率较低, 限制了实际应用。通过将干涉图样的强度转化为相位变化, 相位全息图提供了一个相对较高的衍射效率, 可以大幅提高



重建图像的亮度<sup>[87]</sup>。对全息所需的相位和振幅分布进行数值计算,然后编码到空间光调制器中<sup>[88]</sup>,传统空间光调制器可实现的最小全息图像像素大小在微米量级,是可见光波长的几倍。但它们的固有限制,如高阶衍射和双像问题,仍然是难以避免的。虽然使用先进的纳米制造技术可以实现更小的像素尺寸,但成本较高的限制仍然存在。因此,亚波长超表面成为高分辨率、高效率全息的更好选择。

利用超表面调节光的相位和振幅能力,结合计算生成全息图的技术,能够用于存储和恢复信息<sup>[89-91]</sup>。与传统的计算生成全息图相比,超表面全息图可以高效地将信息编码在极薄的超表面结构上。涡旋光束与高斯光束或平面波干涉的条纹携带涡旋光束的相位信息,被广泛用于产生涡旋光束。类似的,利用开放孔径的叉形光栅可以产生携带任意轨道角动量的涡旋光<sup>[92]</sup>,如图 7(a)所示。左侧结构由两侧周期为  $\Lambda$  的倾斜光栅(倾角  $\gamma$ ) 和变化直径 ( $d_q$ ) 的圆孔组成,右

侧为超表面相位编码,  $\tau$  为相邻两个相位奇点之间的空间距离,  $\varphi$  为圆孔的角度坐标,从 0 逆时针增大到  $2\pi$ 。将具有规则分布奇点的相位剖面编码到叉形光栅中,当平面波通过叉形光栅时,逐渐变化的孔径会产生连续的涡旋光束。图 7(b) 为在以玻璃为基底的金膜上刻蚀交叉形状狭缝的一种超表面,由于入射光为  $45^\circ$  线偏振,等离激元同时受到水平和垂直狭缝的激发,在远场中同时出现水平和垂直方向的全息图案。利用这种超表面可在两个对称的衍射角上同时产生涡旋光束和艾里光束的全息图样,近似于光栅的  $\pm 1$  衍射级<sup>[93]</sup>。此外,涡旋光束与高斯光束同轴干涉形成的螺旋条纹也可以编码成超表面全息图,用来产生涡旋光束。如图 7(c) 所示,结构为低折射率氮化硅纳米线阵列组成的螺旋条纹全息图,通过改变占空比可以实现  $2\pi$  的相位全覆盖,在波长为 633 nm 时产生拓扑电荷为 1 的光学涡旋光束<sup>[94]</sup>。

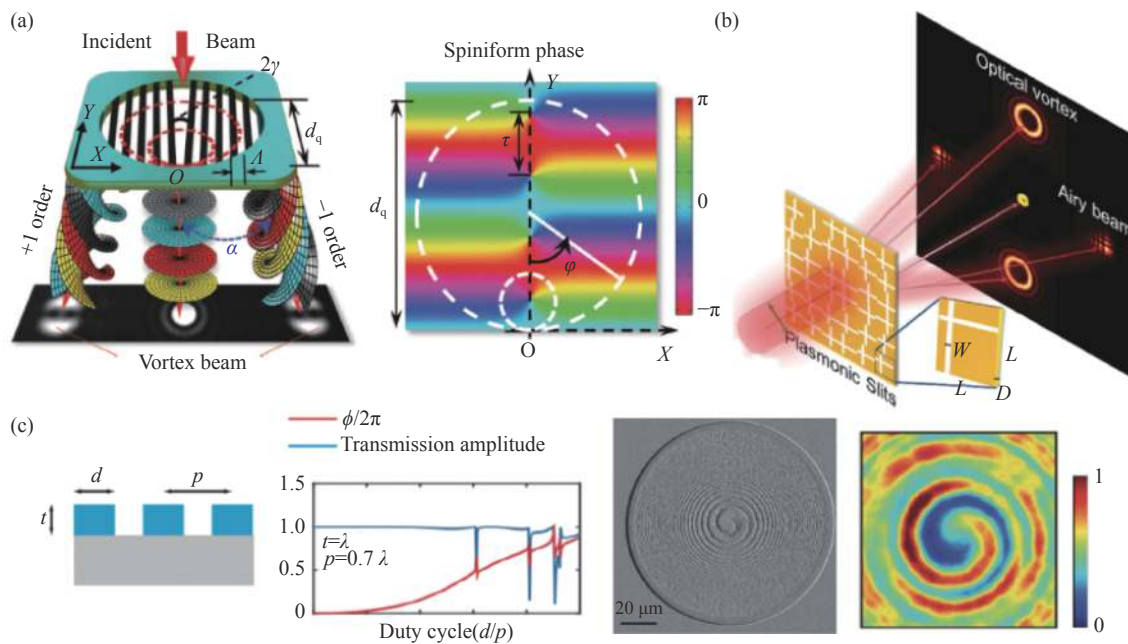


图 7 (a) 涡旋发生器结构示意图与相位编码<sup>[92]</sup>; (b) 超表面全息原理图<sup>[93]</sup>; (c) 全息超表面涡旋发生器的结构示意图、SEM 图与透射场相位<sup>[94]</sup>  
 Fig.7 (a) Schematic and phase coding of vortex generator<sup>[92]</sup>; (b) Schematic of a metasurface hologram<sup>[93]</sup>; (c) Structure, SEM image and phase of the hologram metasurface vortex generator<sup>[94]</sup>

## 2.2 多路复用超表面产生涡旋

随着现代光子学的发展,在实现超表面单功能取得巨大成就后,人们对能够独立控制相位、振幅和偏振的超小型、多功能和集成光学器件的需求越来越

高,研究者开始关注能够实现多功能的超表面集成设计。多路复用是指将多个信号组合成一个信号,最初是电信和计算机网络中的一个概念。在光超表面平台中,多路复用表示由不同信息通道组成的光通

信<sup>[95]</sup>。通过对纳米结构阵列的精心设计,可以将不同的信息多路复用到不同的通道中,或将不同的功能集成在一起,聚焦、成像、全息等都可作为功能实现。

光学涡旋晶格,也被称为光学涡旋阵列,因为具有一些独特的性质而受到广泛关注。例如,光学涡旋晶格的位移已经应用于小角度旋转和小线性位移的测量、波前几何结构的重建和三维扫描干涉测量。此外,涡旋晶格在微光机械泵的操作、微光刻、相位奇异阵列的非线性传播和量子处理等方面也有应用。利用全息原理可以获得多波束阵列的相位和幅值信息,将其编码到空间方向和几何结构中,可以同时操纵光场的相位和振幅,如图 8(a) 所示。利用超表面产生光学涡旋阵列时涡旋焦点的准塔尔博特效应,能够进一步增加涡旋光的数量<sup>[96]</sup>。此外,利用全息图编码

的二元相位达曼涡旋光栅可以实现能量分布均匀的大容量轨道角动量的多路复用<sup>[97]</sup>。达曼涡旋光栅可以产生多个轨道角动量通道,利用它可以将高斯光束衍射并编码到不同轨道角动量;将多束高斯光束在零阶上组合成具有多个轨道角动量态的涡旋光束;也可以使涡旋光束发生衍射,将其转换回高斯光束,如图 8(b) 所示<sup>[98]</sup>。除了上文提到的基于全息与达曼涡旋光栅的多路复用外,还有对光的轨道角动量进行分离以进一步提高分离效率的分模多路复用<sup>[99]</sup>、动量分析法等<sup>[100]</sup>。此外,在雷达应用领域开发的共享孔径相控天线阵列也被应用于超表面的设计中<sup>[101]</sup>。将共享孔径概念与自旋-轨道角动量耦合产生的几何相位相结合,可以实现光子自旋控制的多功能超表面。如图 9(a) 所示,共享孔径超表面一般可以通过分割

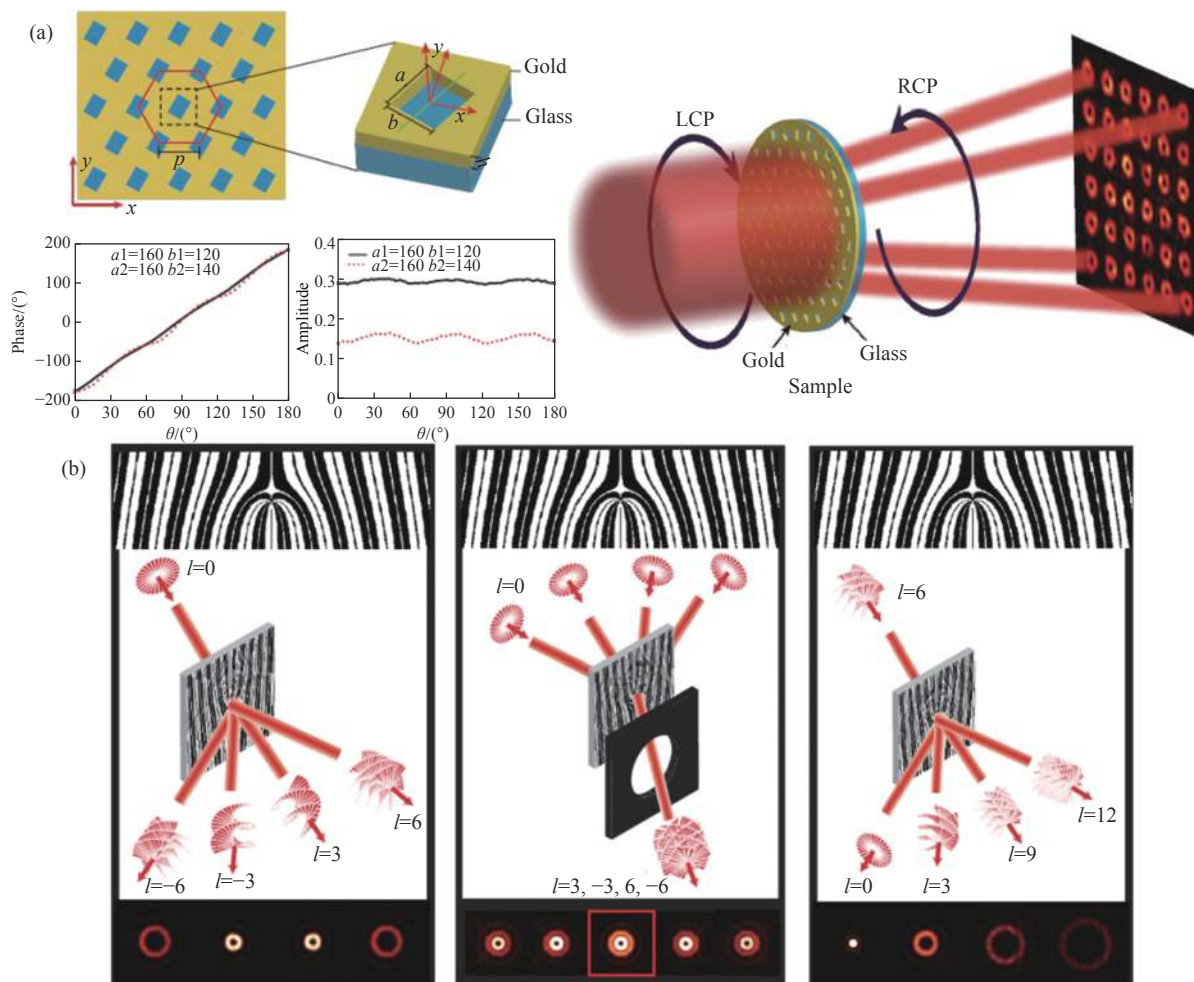


图 8 (a) 超表面单元结构与产生多路涡旋光束示意图<sup>[96]</sup>; (b) 基于达曼光旋涡光栅涡旋光束 OAM 自由空间光通信的组合与分解示意图<sup>[98]</sup>  
 Fig.8 (a) Schematic of metasurface units and the generation of multiple vortex beams<sup>[96]</sup>; (b) Schematic of OAM-based free-space optical communications using the Damman optical vortex grating for multiplexing/demultiplexing<sup>[98]</sup>

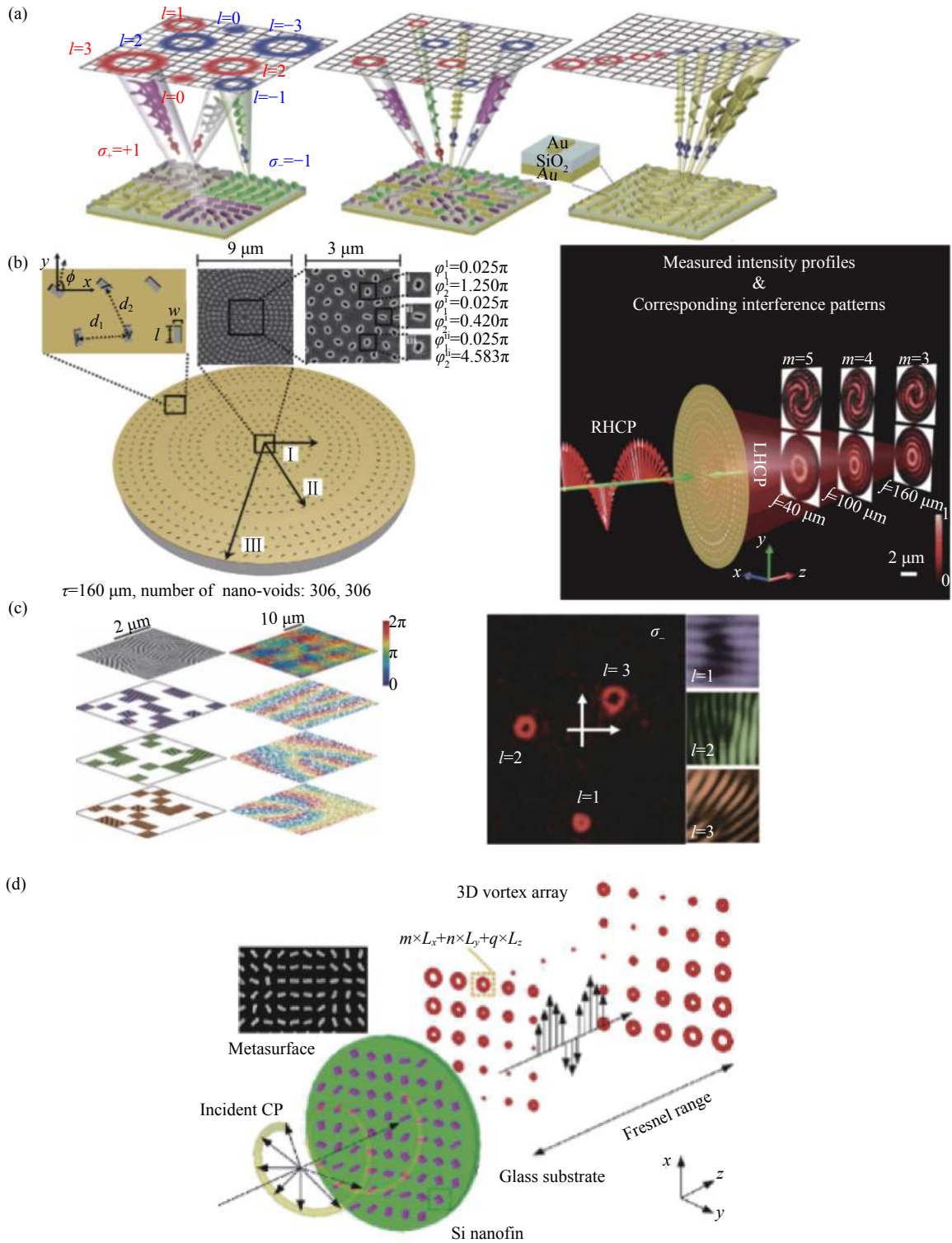


图 9 (a) 共享孔径概念示意图, 分割、交错和谐波响应几何相位超表面的远场强度分布<sup>[101]</sup>; (b) 分区域涡旋发生器强度分布和相应的干涉图样<sup>[102]</sup>; (c) 多通道交错相位超表面的 SEM 图与实验结果<sup>[103]</sup>; (d) 基于介电超表面的三维涡旋阵列的产生和重建<sup>[107]</sup>

Fig.9 (a) Shared-aperture phased antenna array. Far-field intensity distribution of segmented, interleaved, and harmonic-response metasurfaces<sup>[101]</sup>; (b) Intensity distribution and interference pattern of segmented vortex generator<sup>[102]</sup>; (c) SEM image of the metasurface and experimental results of multichannel interleaved phase<sup>[103]</sup>; (d) Generation and reconstruction of the 3D vortex array based on a dielectric metasurface<sup>[107]</sup>



(Segmented)、交错 (Interleaved) 和谐波响应 (harmonic response) 的方法实现。

其中,利用分割方法可以设计一种沿纵向产生多个焦点的超薄透镜,在多聚焦设计中加入光学涡旋的相位阵列,就可以实现具有多个焦平面的纳米聚焦光学旋涡发生器,如图 9(b) 所示<sup>[102]</sup>。左侧为设计的多聚焦涡旋超表面的示意图,它分为 I, II, III 三个区域,不同区域纳米孔按不同的相位函数排布;右侧为右旋圆偏振光照射后的强度分布和相应的干涉图样。在分割方法中,孔径在空间上被分割为由不同相位函数构成的子阵列,这便导致了低角度分辨率和高噪声等问题。

为了提高角度分辨率,可以采用交错的方法,其中多个期望的相位剖面交错在整个孔径内。每个相位分布与不同的子阵列相关联,经过细化过程以实现足够的带宽、足够的信噪比和所需的功能。虽然随机细化过程会影响辐射剖面的信噪比,导致该方法受到散斑噪声的影响,但交叉超表面在多功能生成中的灵活性使其具有吸引力和实用性。多通道光学涡旋被提出以扩展几何相位机制的特殊信息容量和极化螺旋度控制,这是利用二维结构通过刻印光学天线图案直接实现的,如图 9(c) 所示<sup>[103]</sup>。用超全息图代替部分光学涡旋,可以同时实现多通道光学涡旋的超全息图叠加。通过不断改变入射光的螺旋度,可以实现沿水平方向的两通道偏振相关全息图像和沿垂直方向的两通道 OAM 叠加的连续控制<sup>[104]</sup>。多功能超表面是通过交错多个不同的光学元件制成的,多功能波前整形可以在一个共享的孔径内完成<sup>[105]</sup>。

为了提高信噪比,可以采用谐波响应方法,利用相位函数的谐波阶来产生多个波前,从而实现可忽略的噪声和较高的信息容量。通过施加线性梯度和光学涡旋的相位剖面,可以在特定设计的衍射角度下将转换后的高纯度涡旋光束与未转换和其他不需要的光束元件分离<sup>[106]</sup>。同时具有相位和振幅调制的多通道光学涡旋,以及高复杂度连续极化控制的多通道 OAM 叠加也被提出<sup>[80]</sup>。通过控制入射光的螺旋度,可以对四个通道中的 OAM 进行任意叠加。一种三维立体涡旋阵列进一步提高了信息容量,其拓扑电荷具有在纵向传播方向上同轴束剖面序列的独立可控,可以在每个横断面中呈现二维衍射级次,如图 9(d) 所

示<sup>[107]</sup>。每一个纳米结构作为衍射元的一个像素,可以在圆偏振光正入射的情况下产生所需的连续局部相位剖面。

### 3 总结与展望

先进的纳米制造技术使得平面相位单元能够在微米和纳米尺度上对波前进行调制,文中回顾了超表面对相位的调控作用及基于超表面产生涡旋光的不同方法。首先,简单介绍了超表面对动力学相位、几何相位的调控,基于金属或介电共振纳米结构的超表面提供了极好的灵活性。通过共振调谐或偏振转换独立调控动态与几何相位,或同时调制两种相位提供螺旋波前,从而产生涡旋光束。接着介绍了超表面产生涡旋光的几种方法,包括利用不同技术对相位和偏振同时调控产生涡旋的方法,以及涡旋相关的多路复用超表面。

然而,每种方法都有其自身的局限性。对于几何相位超表面,产生的涡旋光纯度对材料和结构的二色性和延迟性非常敏感。特别是高阶涡旋的产生,无论调控的是动态、几何或混合相位,由于衍射效应,离散单元构成的超表面产生的光束都存在纯度低的特点。采用厘米级螺旋相位板和高分辨率空间光调制器技术已经实现了携带数百轨道角动量的涡旋光束,而采用电子束光刻或离子束光刻技术制备的超表面由于生产能力低、成本高,不适合高阶涡旋的产生。利用飞秒激光 3D 打印技术制作的涡旋超表面连接了纳米尺度和宏观尺度,有望解决这一挑战。超表面是一个新兴且发展迅速的研究领域,超表面与光涡旋的结合,促进了光通信和光计算集成的发展,随着深亚波长纳米结构的发展,将对现代光子学、量子光学及相关技术产生深刻的影响。

#### 参考文献:

- [1] Gbur G J. Singular Optics[M]. US: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [2] Yao M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. *Adv Opt Photon*, 2011, 3: 161.
- [3] Nye J F, Berry M V. Dislocations in wave trains [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1974, 336(1605): 165-190.
- [4] Couillet P, Gil G, Rocca F. Optical vortices [J]. *Opt Commun*,

- 1989, 73(5): 403-408.
- [5] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys Rev A*, 1992, 45: 8185.
- [6] Beijersbergen M W, Allen L, Vanderveen H, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular-momentum [J]. *Opt Commun*, 1993, 96(1-3): 123.
- [7] Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon [J]. *Opt Commun*, 2000, 177(1-6): 297-301.
- [8] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(4): 534-536.
- [9] Yang Y J, Dong Y, Zhao C L, et al. Generation and propagation of an anomalous vortex beam [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(24): 5418-5421.
- [10] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [11] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nat Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [12] Zhang H, Li X Z, Ma H X, et al. Grafted optical vortex with controllable orbital angular momentum distribution [J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22930.
- [13] Grier D G. A Revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [14] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, et al. Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles [J]. *Nature*, 1998, 394(6691): 348-350.
- [15] Yang Y J, Zhao Q, Liu L L, et al. Manipulation of orbital-angular-momentum spectrum using pinhole plates [J]. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 064007.
- [16] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons [J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [17] Stav T, Faerman A, Maguid E, et al. Quantum entanglement of the spin and orbital angular momentum of photons using metamaterials [J]. *Science*, 2018, 361(6407): 1101-1103.
- [18] Lavery M, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light’s orbital angular momentum [J]. *Science*, 2013, 341(6145): 537-540.
- [19] Gauthier D, Ribic P R, Adhikary G, et al. Tunable orbital angular momentum in high-harmonic generation [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14971.
- [20] Kong F, Zhang C, Bouchard F, et al. Controlling the orbital angular momentum of high harmonic vortices [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14970.
- [21] Guo Zhongyi, Gong Chaofan, Liu Hongjun, et al. Research advances of orbital angular momentum based optical communication technology [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(3): 90-123. (in Chinese)
- [22] Wang T, Wang F, Shi F, et al. Generation of femtosecond optical vortex beams in all-fiber mode-locked fiber laser using mode selective coupler [J]. *J Lightwave Technol*, 2017, 35(11): 2161-2166.
- [23] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. *Opt Commun*, 1994, 112(5-6): 321-327.
- [24] Bazhenov V, Vasnetsov M, Soskin M. Laser beams with screw dislocations in their wavefronts [J]. *Jetp Letter*, 1990, 52: 429-431.
- [25] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 25697-25706.
- [26] Padgett M J, Allen L. Orbital angular momentum exchange in cylindrical-lens mode converters [J]. *J Opt B: Quantum Semiclass Opt*, 2002, 4(2): S17-S19.
- [27] Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [28] Marqués R, Martel J, Mesa F, et al. A new 2D isotropic left-handed metamaterial design: Theory and experiment [J]. *Microw Opt Techn Let*, 2002, 35(5): 405-408.
- [29] Holloway C L, Kuester E F, Baker-Jarvis J, et al. A double negative (DNG) composite medium composed of magnetodielectric spherical particles embedded in a matrix [J]. *IEEE T Antenn and Propag*, 2003, 51(10): 2596-2603.
- [30] Sihvola A. Metamaterials in electromagnetics [J]. *Metamaterials*, 2007, 1(1): 2-11.
- [31] Shamonina E, Solymar L. Metamaterials: How the subject started [J]. *Metamaterials*, 2007, 1(1): 12-18.
- [32] Lapine M, Tretyakov S. Contemporary notes on metamaterials [J]. *Iet Microw Antenna P*, 2007, 1(1): 3-11.
- [33] Holloway C L, Kuester E F, O’Hara A J, et al. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials [J]. *IEEE Antenn and Propag M*, 2012, 54(2): 10-35.
- [34] Chen H T, Taylor A J, Yu N. A review of metasurfaces: Physics and applications [J]. *Rep Prog Phys*, 2016, 79(7): 076401.
- [35] Yu N F, Patrice G, Kats M, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction

- [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333.
- [36] Ni X J, Emani N K, Kildishev A V, et al. Broadband light bending with plasmonic nanoantennas [J]. *Science*, 2012, 335(6067): 427.
- [37] Sun S, He Q, Xiao S, et al. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. *Nat Mater*, 2012, 11(5): 426-431.
- [38] Aieta F, Genevet P, Yu N, et al. Out-of-plane reflection and refraction of light by anisotropic optical antenna metasurfaces with phase discontinuities [J]. *Nano Lett*, 2012, 12(3): 1702-1706.
- [39] Cheng H, Liu Z, Chen S, et al. Emergent functionality and controllability in few-layer metasurfaces [J]. *Adv Mater*, 2015, 27(36): 5410-5421.
- [40] Novotny L, Hulst N V. Antennas for light [J]. *Nat Photon*, 2011, 5(2): 83-90.
- [41] Bharadwaj P, Deutsch B, Novotny L. Optical Antennas [J]. *Adv Opt Photon*, 2009, 1(3): 438-483.
- [42] Lin J, Mueller J P B, Wang Q, et al. Polarization-controlled tunable directional coupling of surface plasmon polaritons [J]. *Science*, 2013, 340(6130): 331-334.
- [43] Walther B, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Spatial and spectral light shaping with metamaterials [J]. *Adv Mater*, 2012, 24(47): 6300-6304.
- [44] Wang X W, Nie Z Q, Liang Y, et al. Recent advances on optical vortex generation [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(9): 1533-1556.
- [45] Chen S Q, Li Z, Zhang Y B, et al. Phase manipulation of electromagnetic waves with metasurfaces and its applications in nanophotonics [J]. *Adv Optical Mater*, 2018, 6: 1800104.
- [46] Arbabi A, Faraon A. Fundamental limits of ultrathin metasurfaces [J]. *A Sci Rep*, 2017, 7: 43722.
- [47] Sun J, Wang X, Xu T, et al. Spinning light on the nanoscale [J]. *Nano Lett*, 2014, 14: 2726.
- [48] Kim M, Wong A M H, Eleftheriades G V. Optical Huygens' metasurfaces with independent control of the magnitude and phase of the local reflection coefficients [J]. *Phys Rev X*, 2014, 4: 41042.
- [49] Monticone F, Estakhri N M, Alù A. Full control of nanoscale optical transmission with a composite metascreen [J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 203903.
- [50] Decker M, Staude I, Falkner M, et al. High-efficiency dielectric Huygens' surface [J]. *Adv Opt Mater*, 2015, 3: 813.
- [51] Zhao Q, Zhou J, Zhang F, et al. Mie resonance-based dielectric metamaterials [J]. *Mater Today*, 2009, 12: 60.
- [52] Zhou L, Withayachumnankul W, Shah C M, et al. Dielectric resonator nanoantennas at visible frequencies [J]. *Opt Express*, 2013, 21: 1344.
- [53] Arbabi A, Horie Y, Ball A J, et al. Subwavelength-thick lenses with high numerical apertures and large efficiency based on high-contrast transmit arrays [J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 7069.
- [54] Genevet P, Capasso F, Aieta F, et al. Recent advances in planar optics: from plasmonic to dielectric metasurfaces [J]. *Optica*, 2017, 4: 139-152.
- [55] Chong K E, Staude I, James A, et al. Polarization-independent silicon metadevices for efficient optical wavefront control [J]. *Nano Lett*, 2015, 15: 5369-5374.
- [56] Yang Y J, Zhu X, Zeng J, et al. Anomalous Bessel vortex beam: Modulating orbital angular momentum with propagation [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7: 677-682.
- [57] Wang H, Liu L, Zhou C, et al. Vortex beam generation with variable topological charge based on a spiral slit [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(2): 317-324.
- [58] Zhang J R, Guo Z Y, Li R Z, et al. Circular polarization analyzer based on the combined coaxial Archimedes' spiral structure [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(6): 1255-1261.
- [59] Tomoki O, Shintaro M. Study of surface plasmon chirality induced by Archimedes' spiral grooves [J]. *Opt Express*, 2006, 14(13): 6285-6290.
- [60] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. Hall effect of light [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(8): 083901.
- [61] Li G X, Kang M, Chen S M, et al. Spin-enabled plasmonic metasurfaces for manipulating orbital angular momentum of light [J]. *Nano Lett*, 2013, 13(9): 4148-4151.
- [62] Moon S W, Jeong H D, Lee S, et al. Compensation of spin-orbit interaction using the geometric phase of distributed nanoslits for polarization-independent plasmonic vortex generation [J]. *Opt Express*, 2019, 27(14): 19119-19129.
- [63] Chen C F, Ku C T, Tai Y H, et al. Creating optical near-field orbital angular momentum in a gold metasurface [J]. *Nano Lett*, 2015, 15: 2746-2750.
- [64] Tang B, Zhang B, Ding J. Generating a plasmonic vortex field with arbitrary topological charges and positions by meta-nanoslits [J]. *Appl Optics*, 2019, 58(4): 833-840.
- [65] Tan Q L, Guo Q H, Liu H C, et al. Controlling plasmonic orbital angular momentum by combining geometric and dynamic phase [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(15): 4944-4949.
- [66] Kim H, Park J, Cho S W, et al. Synthesis and dynamic switching of surface plasmon vortices with plasmonic vortex lens [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(2): 529-536.
- [67] Lee S, Kim S, Kwon H, et al. Spin-direction control of high-order plasmonic vortex with double-ring distributed nanoslits



- [J]. *IEEE Photonic Tech Lett*, 2015, 27(7): 705-708.
- [68] Pancharatnam S. Generalized theory of interference and its applications [J]. *Indian Acad Sci*, 1956, 44(6): 398-417.
- [69] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes [J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1984, 392(1802): 45-57.
- [70] Teng S Y, Zhang Q, Wang H, et al. Conversion between polarization states based on a metasurface [J]. *Photonics Res*, 2019, 7(3): 246.
- [71] Karimi E, Schulz S A, Leon I D, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light Sci Appl*, 2014, 3: e167.
- [72] Zhang Y C, Liu W W, Gao J, et al. Generating focused 3D perfect vortex beams by plasmonic metasurfaces [J]. *Adv Optical Mater*, 2018, 6(4): 1701228.
- [73] Li Z W, Hao J M, Huang L R, et al. Manipulating the wavefront of light by plasmonic metasurfaces operating in high order modes [J]. *Opt Express*, 2016, 24(8): 8788-8796.
- [74] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light [J]. *Science*, 2017, 358: 896-901.
- [75] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y. Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3: 2022-2099.
- [76] Zhou J, Liu Y, Ke Y, et al. Generation of Airy vortex and Airy vector beams based on the modulation of dynamic and geometric phase [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 3193.
- [77] Fan Q, Wang D, Huo P, et al. Autofocusing Airy beams generated by all-dielectric metasurface for visible light [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 9285.
- [78] Chen S, Cai Y, Li G, et al. Geometric metasurface fork gratings for vortex-beam generation and manipulation [J]. *Laser Photon Rev*, 2016, 10: 322.
- [79] Zhang L, Liu S, Li L, et al. Spin-controlled multiple pencil beams and vortex beams with different polarizations generated by Pancharatnam-Berry coding metasurfaces [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9: 36447.
- [80] Yue F, Wen D, Zhang C, et al. Multichannel polarization controllable superpositions of orbital angular momentum states [J]. *Adv Mater*, 2017, 29: 1603838.
- [81] Bliokh K Y. Geometrical optics of beams with vortices: Berry phase and orbital angular momentum Hall effect [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 43901.
- [82] Xiao S, Wang J, Liu F, et al. Spin-dependent optics with metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2017, 6: 215.
- [83] Ling X, Zhou X, Huang K, et al. Recent advances in the spin Hall effect of light [J]. *Rep Prog Phys*, 2017, 80: 664011.
- [84] Shitrit N, Yulevich I, Maguid E, et al. Spin-optical metamaterial route to spin-controlled photonics [J]. *Science*, 2013, 340: 724.
- [85] Ling X, Zhou X, Yi X, et al. Giant photonics spin Hall effect in momentum space in a structured metamaterial with spatially varying birefringence [J]. *Light Sci Appl*, 2015, 4: e290.
- [86] Gabor D. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, 161: 117.
- [87] Cathey W. Phase holograms, phase-only holograms, and kinoforms [J]. *Appl Opt*, 1970, 9: 1478.
- [88] Huang K, Gao H, Cao G, et al. Design of diffractive phase element for modulating the electric field at the out-of-focus plane in a lens system [J]. *Appl Opt*, 2012, 51: 5149.
- [89] Huang L, Chen X, Mühlenbernd H, et al. Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface [J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 2808.
- [90] Genevet P, Capasso F. Holographic optical metasurfaces: a review of current progress [J]. *Rep Prog Phys*, 2015, 78: 24401.
- [91] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light [J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 2807.
- [92] Huang K, Liu H, Restuccia S, et al. Spiniform phase-encoded metagratings entangling arbitrary rational-order orbital angular momentum [J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 17156.
- [93] Min C, Liu J, Lei T, et al. Plasmonic nano-slits assisted polarization selective detour phase meta-hologram [J]. *Laser Photon Rev*, 2016, 10: 978.
- [94] Zhan A, Colburn S, Trivedi R, et al. Low-contrast dielectric metasurface optics [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3: 209.
- [95] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. *Adv Opt Photonics*, 2015, 7: 66-106.
- [96] Jin J J, Pu M B, Wang Y Q, et al. Multi-channel vortex beam generation by simultaneous amplitude and phase modulation with two-dimensional metamaterial [J]. *Adv Mater Technol*, 2017, 2: 1600201.
- [97] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex gratings [J]. *Opt Lett*, 2010, 35: 3495.
- [98] Lei T, Zhang M, Li Y R, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings [J]. *Light Sci Appl*, 2015, 4: e257.
- [99] Chen S Q, Liu W W, Li Z C, et al. Metasurface empowered optical multiplexing and multifunction [J]. *Adv Mater*, 2019,

- 32(3): 1805912.
- [100] Liu W W, Li Z C, Cheng H, et al. Momentum analysis for metasurfaces [J]. *Phys Rev Appl*, 2017, 8: 014012.
- [101] Maguid E, Yulevich I, Veksler D, et al. Photonic spin-controlled multifunctional shared-aperture antenna array [J]. *Science*, 2016, 352(6290): 1202.
- [102] Mehmood M Q, Mei S, Hussain S, et al. Visible - frequency metasurface for structuring and spatially multiplexing optical vortices [J]. *Adv Mater*, 2016, 28: 2533.
- [103] Maguid E, Yulevich I, Yannai M, et al. Multifunctional interleaved geometric-phase dielectric metasurfaces [J]. *Light Sci Appl*, 2017, 6: e17027.
- [104] Zhang C, Yue F, Wen D, et al. Multichannel metasurface for simultaneous control of holograms and twisted light beams [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4: 1906.
- [105] Lin D, Holsteen A L, Maguid E, et al. Photonic multitasking interleaved Si nanoantenna phased array [J]. *Nano Lett*, 2016, 16: 7671.
- [106] Zeng J, Li L, Yang X, et al. Generating and separating twisted light by gradient-rotation split-ring antenna metasurfaces [J]. *Nano Lett*, 2016, 16: 3101.
- [107] Huang L L, Song X, Reineke B, et al. Volumetric generation of optical vortices with metasurfaces [J]. *ACS Photonics*, 2017, 4: 338-346.