

激光与光电子学进展

利用超表面探测光子轨道角动量的研究进展

钱文日^{**}, 张永梅^{*}

南京航空航天大学物理学院, 江苏 南京 211106

摘要 电磁波具有线性动量、自旋角动量和轨道角动量。涡旋光束携带的轨道角动量在现代光学技术中具有巨大的应用潜力,在经典通信、量子通信、光学操纵以及旋转探测等领域具有重要的应用价值。近年来,国内外学者提出了多种探测光束轨道角动量的技术,如衍射光栅法、干涉测量法、多普勒分析法、超表面法。相比其他方法,超表面法具有效率高、光操纵性强等优点。主要介绍了几种利用超表面测量光束轨道角动量的方法及其研究进展、发展现状。

关键词 探测器; 超表面; 轨道角动量; 涡旋光束

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2300004

Research Progress of Detecting Orbital Angular Momentum States of Photons Through Metasurfaces

Qian Wenri^{**}, Zhang Yongmei^{*}*College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China*

Abstract Electromagnetic waves have linear momentum, orbital angular momentum, and spin angular momentum. The orbital angular momentum carried via vortex beams has considerable application potential in contemporary optical technology and has important application value in the fields of classical communication, quantum communication, optical manipulation, and rotation detection. Recently, domestic and foreign researchers proposed various techniques for detecting beam orbital angular momentum, including diffraction grating, interferometry, Doppler analysis, and metasurface methods. Compared with other methods, the metasurface method has the advantages of high efficiency and strong light manipulation. This paper primarily introduces several methods for measuring beam orbital angular momentum using metasurfaces, as well as their research progress and development status.

Key words detectors; metasurfaces; orbital angular momentum; vortex beam

1 引 言

电磁波在传播过程中同时携带线性动量和角动量,这两者都可以通过麦克斯韦电磁理论得到证明。电磁波的线性动量与其坡印亭矢量相关。自旋角动量(SAM)及轨道角动量(OAM)构成了光子的角动量。光子的角动量是一种量子力学描述,在经典领域和量子领域都得到了人们的广泛关注及应用。SAM通常被称为圆极化,左旋圆极化(LCP)和右旋圆极化(RCP)光中每个光子的SAM分别为 \hbar 和 $-\hbar$,反映了电磁波的极化特性。与SAM不同,OAM通常被视为一种光学涡旋,反映了光子的轨道旋转,与其空间分布相关。1992年,Allen等^[1]对OAM的研究表明,在拉盖

尔-高斯(LG)光束中,每个光子具有的OAM为 $l\hbar$ 。其中, l 为模式的阶数(整数),也被称为拓扑电荷(TC)。常见的涡旋光束还有贝塞尔光束、贝塞尔-高斯光束^[2-3]和超几何高斯光束^[4]。

随着对OAM与物质相互作用研究的不断深入,OAM在光镊^[5-6]、微型机器的光驱^[7]、原子捕获和引导^[8-9]、光子纠缠^[10]、旋转探测、显微镜^[11]等方向中得到了普遍应用。在射频(RF)领域,OAM可以通过创建多重传播子通道提高无线电通信的频谱效率^[12-16],越发成熟的光子OAM探测技术在目标识别^[17]和雷达^[18-22]等领域中也具有广阔的应用前景。当前OAM的主要探测手段有干涉法^[23-28]、多普勒分析法^[29]、超表面法^[30-32]以及衍射光栅法^[33-61]等。干涉法通过引入一

收稿日期: 2021-09-24; 修回日期: 2021-11-16; 录用日期: 2021-11-23

基金项目: 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划(xcxjh20210804)、南京航空航天大学本科教学建设项目(2021JG0846A)

通信作者: *zymzym@nuaa.edu.cn; **qwrkfc@163.com

个特定的参考光束与待测涡旋光束发生干涉,然后通过观察干涉条纹的形态特征判断涡旋光束的 OAM^[23-25]或利用 Mach-Zehnder 干涉仪将不同奇偶性角量子数的涡旋光束分离以测量 OAM^[26-28],这种方法能分离叠加态的 OAM,但系统结构复杂,光路对准困难。多普勒分析法利用了光的旋转多普勒效应,对于具有螺旋波前的涡旋光束,可将其横向的旋转等效为纵向的平移,使涡旋光束的频移可以反映出光束的旋转特性^[29],测出频移即可测得 OAM,但无法测得 SAM。衍射光栅法利用经过特殊构造的衍射光栅观察涡旋光束远场衍射的形态特征,进而测量 OAM,这种检测方法效率高,无需对准光路,但测量结果不够准确。

相较于上述方法,超表面具有效率高和光操纵性强的优点,对于 OAM 的产生和检测都有着极高的应用价值。超表面起源于频率选择表面(FSSs)^[62],由各种几何形状和方向的人造亚波长散射体组成,在设计超紧凑散射体的几何形状和方向中有着高度可行性。相比传统的 FSSs,超表面有更大的应用空间。超表面

通过散射体的相位突变局部改变波的特性。通过改变波的几何形状或方向,散射体可以覆盖 2π 范围内的相移,在光的相位控制中有着广泛应用^[63-65]。因此,利用超表面可以形成任意波束,从而进行光束 OAM 的测量。随着多功能超表面的不断发展,应用于光子 OAM 产生和探测的超表面越来越多^[66-69],功能也更加丰富。本文主要总结了当前几种超表面的设计结构和特点,回顾了国内外利用超表面探测光束 OAM 研究的进展及发展现状。

2 用于光子 OAM 探测的超表面

2.1 全息超表面

2018 年,Chen 等^[70]基于全息概念用单个超表面检测多重 OAM 光束,其原理如图 1(a)所示,模拟的远场聚焦图案如图 1(b)所示。超表面将入射波转换成多个波,其中只有一个波是高斯波,且高斯波的辐射方向可以根据入射 OAM 的阶数区分,因此可通过定位高斯波确定入射光束的 OAM。

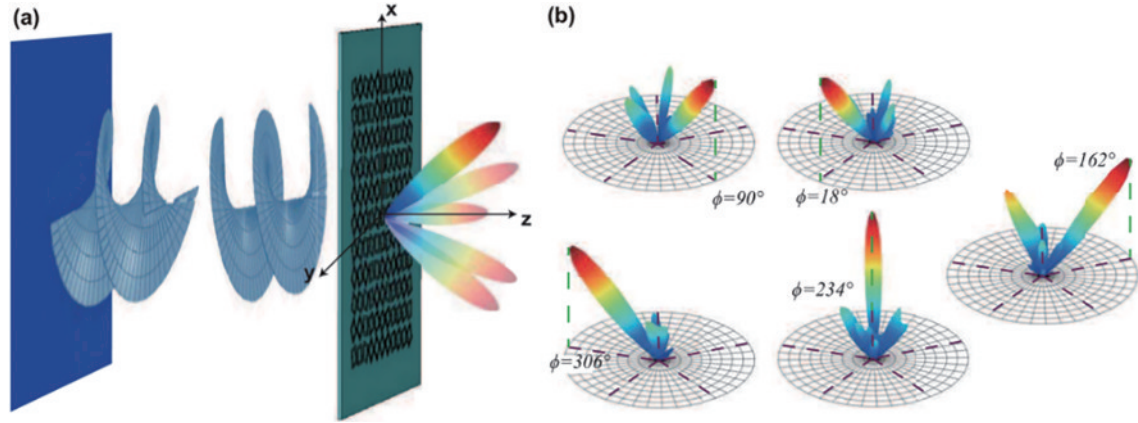


图 1 单个超表面检测多重 OAM 光束的原理。(a)检测原理;(b)模拟的远场聚焦图案^[70]

Fig. 1 Principle of multiple OAM-beam detection through single metasurface. (a) Detection principle; (b) far-field focus pattern obtained by simulation^[70]

对于超表面叉形光栅,透射函数可表示为

$$t(\mathbf{r}_1, \phi) = \sum_m A_m \exp[j(L_m \phi + k_{xm} x + k_{ym} y)], \quad (1)$$

式中: \mathbf{r}_1 为波的径向位置; ϕ 为方位角; A_m 为第 m 个波在所有透射波中的比重; L_m 为对应的 OAM 阶数; k_{xm} 与 k_{ym} 为第 m 个波在 x 和 y 方向的波数。通过傅里叶变换得到具有 l_0 阶 OAM 入射光束的超表面远场响应,可表示为

$$E = F(E_{in} \cdot t) = \sum_m A_m F[E_{OAM(l_m + l_0)}(k_{xm}, k_{ym})], \quad (2)$$

式中: F 为傅里叶变换; E_{in} 为带有 l_0 阶 OAM 的入射波; $E_{OAM(l_m + l_0)}(k_{xm}, k_{ym})$ 为 OAM 阶数为 $l_0 + l_m$ 的透射波。光束穿过超表面后,在空间位置 (k_{xm}, k_{ym}) 观察到多个具有 $l_m + l_0$ 阶 OAM 的波。当 $l_m + l_0 = 0$ 时,该光束为高斯波,其光轴为 (k_{xm}, k_{ym}) 。具有 OAM 的波在

其光轴上有一个奇点。因此,通过探测 (k_{xm}, k_{ym}) 处的场强就能识别高斯光束,即识别出 M ,进而确定入射 OAM 的阶数 l_0 。在此基础上通过增加额外的相位项 α_m 改进透射函数,以降低图 1(b)中的旁瓣干扰。改进后的透射函数可表示为

$$t_{mod}(\mathbf{r}_1, \phi) = \sum_m \exp[j(L_m \phi + k_{xm} x + k_{ym} y + \alpha_m)]. \quad (3)$$

式(3)中,额外的相位项虽然无法改进所有阶数为 l_0 的波,但在 $l_0 = \pm 1, \pm 2$ 时,期望位置的强度有所增强,同时降低了旁瓣干扰。此外, $l_0 = 0$ 时期望位置的强度有所减小。

2018 年,Ou 等^[71]提出了一种基于全息超表面的 OAM 检测方法,通过干涉全息技术和基于高对比度介质纳米圆柱的透射超表面设计了多通道拓扑电荷解析器件。该器件将入射光分为 5 个不同 OAM 值的聚焦涡旋光束,在焦平面上产生相应的环形点,实现了从

2 到 -2 的拓扑电荷检测,如图 2 所示。对于更大拓扑电荷的探测,则需要更大的超表面和更多的通道。相较于以往的全息超表面,该超表面的转化效率可达到

70%~85%,具有亚波长厚度和偏振不敏感性,可应用于生物医学纳米芯片、光学捕获系统和量子密钥分配等集成光学系统。

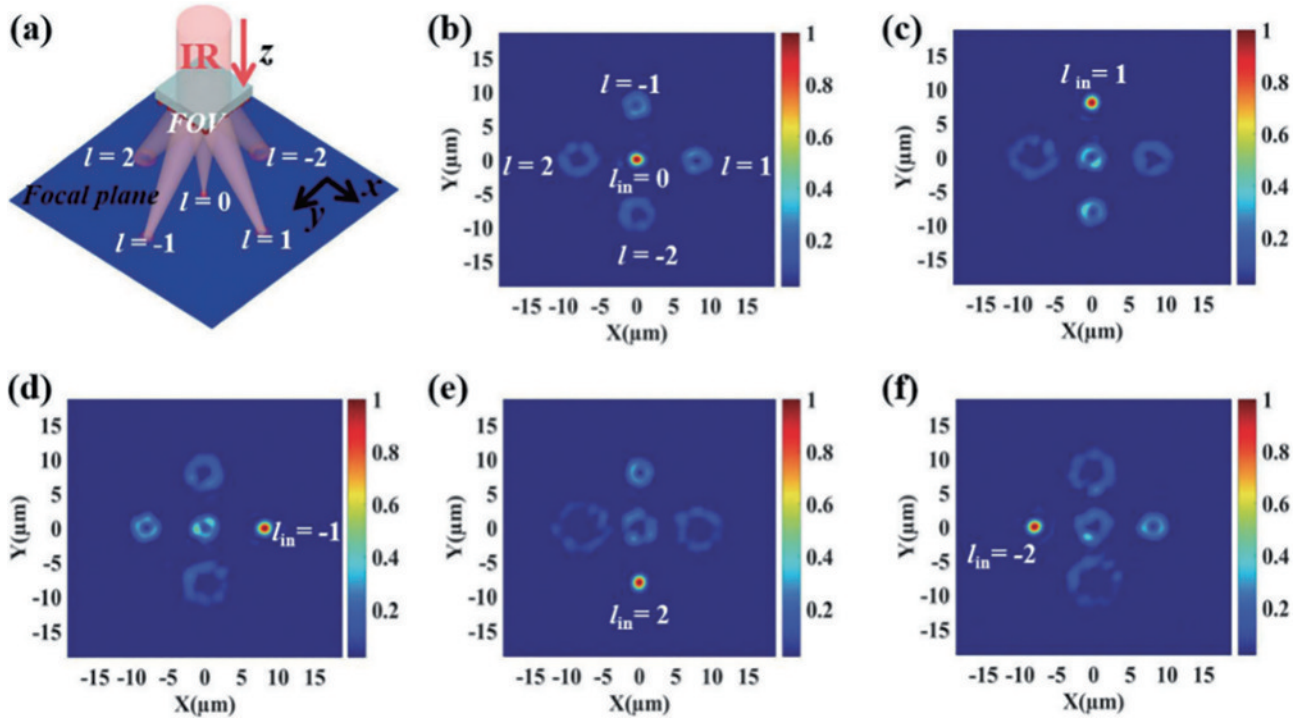


图 2 超表面的工作原理。(a)工作原理;(b)~(f)拓扑电荷分别为 0、1、-1、2 和 -2 时焦平面上的强度分布^[71]

Fig. 2 Working principle of metasurfaces. (a) Working principle; (b)~(f) intensity distribution on the focal plane when topological charges are 0, 1, -1, 2, and -2, respectively^[71]

为了扩大测量范围,2019 年,Wang 等^[72]设计了芯片尺度的多通道全息超表面光栅,可同时产生 6 个带有不同拓扑电荷的衍射光束,如图 3(a)所示。将衍射光束与作为参考的高斯波进行干涉即可产生干涉条纹,如图 3(b)~图 3(g)所示。其中,条纹中错位的数量为光束的拓扑电荷,错位方向则反映拓扑电荷的符号。这种超表面光栅能将入射涡旋光束的高斯

波或 OAM 状态转换为多通道的 OAM 状态,总转换效率高达 82%。除了产生 6 束 OAM 光束干涉的设计外,该方案还可以扩展到用多束干涉光产生更多的 OAM 光束。此外,超表面光栅可用于检测入射光束的整数或分数 OAM 状态,且串扰小于 18 dB,为大容量光通信系统提供了 OAM 光束产生和探测的集成平台。

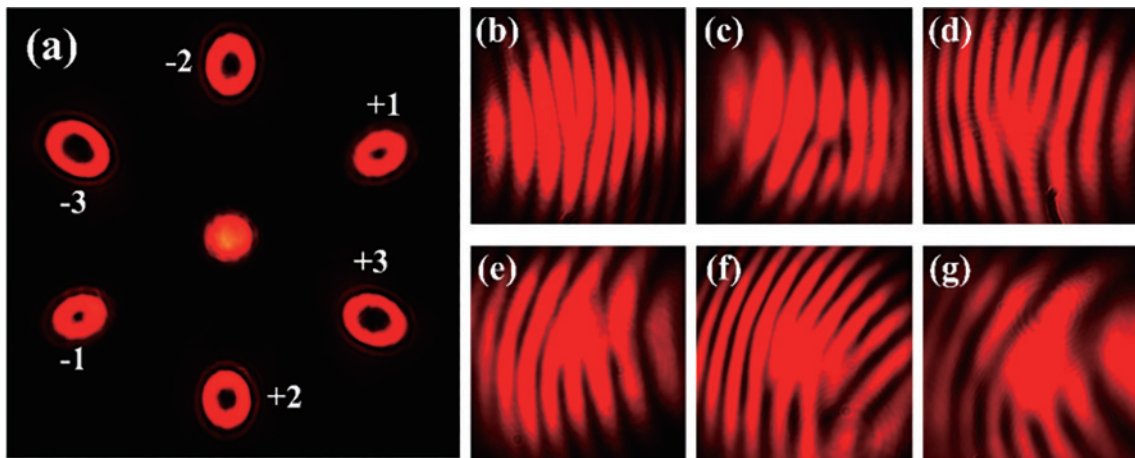


图 3 衍射光束。(a)带有不同拓扑电荷的衍射光束;(b)~(g)分别带有 1、-1、2、-2、3 和 -3 拓扑电荷的干涉图样^[72]

Fig. 3 Diffracted beam. (a) Diffracted beams with different topological charges; (b)~(g) interference patterns with 1, -1, 2, -2, 3 and -3 topological charges, respectively^[72]

2.2 利用动量变换的自旋解耦超表面

光子的 SAM 和 OAM 具有固有的正交性,可进一步发展量子信息、光通信和信息处理技术。2021 年,Guo 等^[73]利用一个基于复合相位超表面的光子动量变换(PMT)进行涡旋识别。不同涡旋波通过 PMT 可以转换成横截面上具有不同方位坐标的聚焦图案,因此可以通过单次测量确定一个来自大范围模式空间的 OAM。此外,自旋控制双功能的 PMT 可同时进行 SAM 和 OAM 的分选,该分选通过一个融合几何相位和传输相位的自旋解耦超表面实现,可以检测具有相位和极化奇异性的矢量涡旋以及具有一定间隔的叠加涡旋。在可见波段几个波长处获得的实验结果与数值模拟表现出很好的一致性。该方法具有器件尺寸小、光学结构简单和涡旋识别能力强等优点,为集成高维光学和量子系统的发展奠定了基础。

PMT 是一种光学变换,将不同 OAM 模式转化为旋转分布的聚焦图案,可表示为

$$\Phi(\varphi - \Delta\varphi) = \Phi(\varphi) + l\varphi, \quad (4)$$

式中: $\Phi(\varphi)$ 为超表面的相位; φ 为超表面的方位角; $\Delta\varphi$ 为方位角对应的旋转角度。假设二次相位系数 $l_0 = -l/\Delta\varphi$,则 PMT 超表面的相位可表示为

$$\Phi(\varphi) = l_0\varphi^2/2, \quad (5)$$

将 $\Phi(\varphi)$ 与 OAM 光束的相位累加,得到

$$\Phi(\varphi) + l\varphi = \frac{l_0}{2}\left(\varphi + \frac{l}{l_0}\right)^2 - \frac{l^2}{2l_0} = \Phi(\varphi') - \frac{l^2}{2l_0}, \quad (6)$$

式中, φ' 为新的方位角。忽略式(6)等号右侧与方位角无关的项可以发现,OAM 通过 PMT 超表面的旋转只与模式有关,即 $\varphi_i = -l/l_0$ 。

基于自旋解耦超表面,通过自旋控制和 PMT 可

以同时进行 SAM 和 OAM 分选。具有不同 SAM 的涡旋光束被转换成焦平面上屏幕中两个部分的聚焦图案,且方位旋转依赖于拓扑电荷,如图 4 所示。其中, $\sigma = 1$ 和 $\sigma = -1$ 分别对应自旋向上和向下的涡旋光束。相比全息超表面,自旋解耦超表面通过一次探测就能得到一个多模光束的所有自旋和 OAM,不需要改变参数多次测量,但其测量多模光束时受相机分辨率的影响较大,目前仅能识别间隔大于 4 的 OAM 叠加模式^[74]。

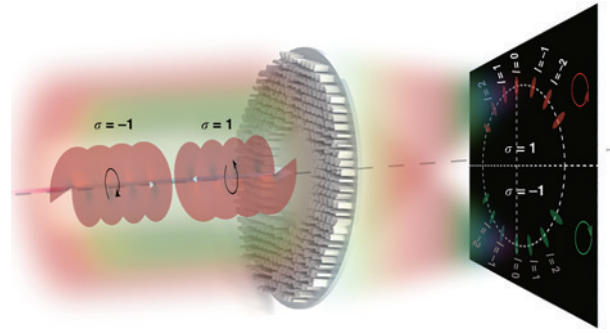


图 4 自旋解耦超表面的示意图^[73]

Fig. 4 Schematic diagram of the spin decoupling metasurface^[73]

2.3 利用自干涉的等离子体超表面

2016 年,Chen 等^[75]设计了一种用 v 型金等离子体天线组成的超表面。线偏振 OAM 光束从超表面入射后会产生三束光,其中一束是具有相同极化和拓扑电荷的寻常光束,另外两束是具有相同拓扑电荷且交叉极化的异常光束(相对于寻常光束倾斜)以角度 (θ, ξ) 和 (θ', ξ') 出射,如图 5(a)所示。其中: θ 和 θ' 为球坐标系的方位角; ξ 和 ξ' 为极角。超表面的金等离子体设计如图 5(b)所示。

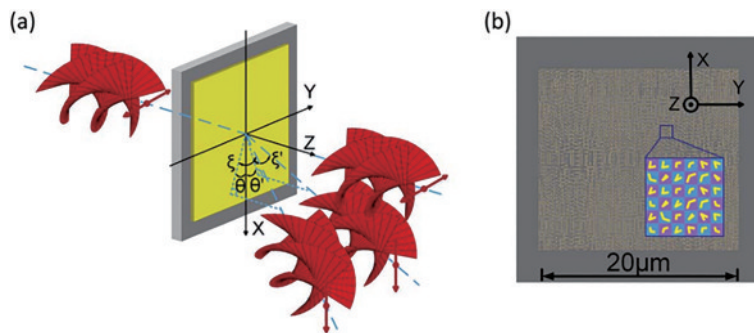


图 5 v 型金等离子体超表面的结构。(a)超表面自干涉的示意图;(b)超表面设计的示意图^[75]

Fig. 5 Structure of v-type gold plasmonic metasurface. (a) Schematic diagram of metasurface self-interference; (b) schematic diagram of metasurface design^[75]

利用两个异常光束的近场干涉图可以检测光束的拓扑电荷。设入射的 y 方向偏振高斯涡旋光束^[75]为

$$U_{in}(r, \varphi, z) = \left(\frac{r}{w}\right)^{|l|} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp(il\varphi) \exp(ikz) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中: (r, φ) 为二维极坐标; w 为基本高斯波($l=0$)的横截周长; k 为真空中的波数; $\exp(il\varphi)$ 为涡旋光束的螺旋相位。将超表面放置于 $z=0$ 处,则透射的两个异常光束将变为 x 方向的极化波,可表示为

$$U(x, y, 0) = A \left(\frac{r}{w} \right)^{|l|} \exp \left(-\frac{r^2}{w^2} \right) \exp(i l \varphi) \exp(i k z) \times \exp[i\psi(x, y)] \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$U'(x, y, 0) = A \left(\frac{r}{w} \right)^{|l|} \exp \left(-\frac{r^2}{w^2} \right) \exp(i l \varphi) \exp(i k z) \times \exp[i\psi'(x, y)] \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中: A 为散射系数; ψ 和 ψ' 为极化波对应的相位分布, 与光束散射出射的角度有关, 可表示为

$$\psi(x, y) = kx \cos \xi \cos \theta + ky \cos \xi \sin \theta, \quad (10)$$

$$\psi'(x, y) = kx \cos \xi' \cos \theta' + ky \cos \xi' \sin \theta'. \quad (11)$$

利用傅里叶变换得到 $z = z_0$ 处的衍射场 U_d ^[76] 为

$$U_d(x, y, z_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Sigma} [U(u, v, 0) + U'(u, v, 0)] \times \frac{\exp(i k r_0)}{r_0} \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_0) ds, \quad (12)$$

式中: \mathbf{n} 为单位向量, 方向垂直于超表面向内; $\mathbf{r}_0 =$

$(x - u, y - v, -z)$ 为位移矢量。通过 U_d 可以描述两束光的干涉图像并揭示 OAM 光束的特性。

图 6(a) 为 $z = 50 \mu\text{m}$ 处的干涉图, 所有干涉图的尺寸均为 $60 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 。可以发现, 干涉图的形式依赖于入射 OAM 光束的拓扑电荷: 在 $l = 1$ 处, 干涉产生四个亮点; 随着拓扑电荷的增加, 内部会出现两个亮点并逐渐分离, 同时上述四个点会背向中心扭曲并减弱; 当拓扑电荷符号发生变化时, 扭曲方向相反。令 $R_0 = w / (\sqrt{|l|/2})$, 内部亮点的间距与拓扑电荷在 $R_0 = 8 \mu\text{m}$ 、不同 z 值时的关系曲线如图 6(b) 所示。在 $z = 50 \mu\text{m}$ 时, R_0 取不同数值对应的曲线如图 6(c) 所示。可以发现: 当 R_0 发生变化时, 通过测量内部亮点的间距区分拓扑电荷依然具有很高的准确性; 对于拓扑电荷较大的 OAM, 随着内部亮点缓慢减弱, 需要用更灵敏的探测器进行测量。这种方法相比其他超表面较为复杂, 但能在不阻塞光路的情况下检测 OAM, 在光纤和集成设备上有着巨大的应用潜力。

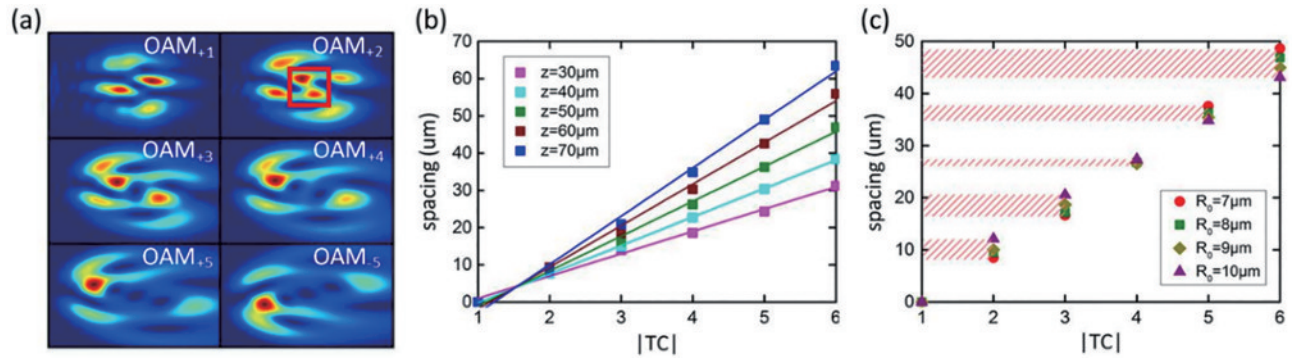


图 6 等离子体超表面的仿真结果。(a) 不同 OAM 光束产生的干涉图; (b) 不同 z 值时内部点间距与拓扑电荷的关系; (c) 不同 R_0 时内部点间距与拓扑电荷的关系^[75]

Fig. 6 Simulation results of the plasmonic metasurface. (a) Interferograms generated by beams with different OAM; (b) relationship between internal point spacing and topological charge at different z values; (c) relationship between internal point spacing and topological charge at different R_0 ^[75]

为了探测或利用 OAM 态, OAM 的转换也成为相关领域重要的研究课题。2019 年, Zhang 等^[77] 利用焦

散面和突变理论设计超薄铝等离子体超表面, 如图 7 所示。该超表面采用电子束蒸发技术在玻璃基板上沉

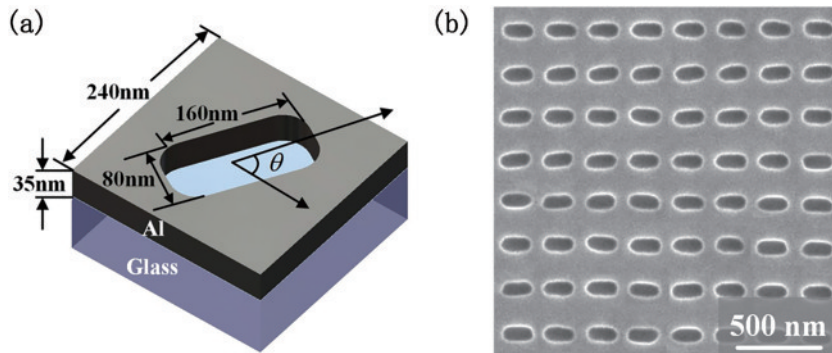


图 7 铝超表面的结构。(a) 纳米狭缝天线的单元胞; (b) 均匀的纳米狭缝阵列^[77]

Fig. 7 Structure of an aluminum metasurface. (a) Unit cell of nanoslit antenna; (b) homogeneous nanoslit array^[77]

积了厚度为 35 nm 的铝膜,然后用聚焦离子束将纳米狭缝阵列蚀刻在铝层中。该超表面包含 500×500 个单元,在指定的旋转角度下,纳米狭缝尺寸为 $160 \text{ nm} \times 80 \text{ nm}$ 。该设计可在 $-1 \sim 2.5$ 之间任意整数或分数拓扑电荷的 OAM 转换,且易于集成到光学芯片中。这将推进光涡旋在分数阶 OAM 纠缠的量子信息处理以及 OAM 多路通信中的应用。

2.4 超薄超表面中 SAM 到 OAM 的转换

利用 SAM 和 OAM 之间的耦合可以更快地控制 OAM 状态,且这种方法比传统方案更简单。2014 年, Bouchard 等^[78]基于等离子体纳米天线设计并制作了一个超薄的 SAM 到 OAM 转换器,能在可见光波长范围内工作并将自旋转换为任意 OAM 值。纳米天线排列在光束横截面上,具有明确的几何形状以产生具有整数或半整数拓扑电荷 q 的光束。该超表面的功能可用圆偏振为基的矩阵表示为

$$\nu_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-2i\alpha) \\ \exp(2i\alpha) & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中: $|L\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |R\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ 对应于左旋和右旋偏振态;

$\alpha(\varphi) = q\varphi$ 。对于左旋偏振光,有 $\nu_\alpha |L\rangle = \exp(2i\alpha) |R\rangle$ 。当圆偏振光穿过该超表面时,输出光束的偏振改变了旋向性, OAM 每光子的变化值为 $\pm 2q\hbar$ 。实验结果表明, q 的取值范围在 $\pm 1/2$ 到 $\pm 25/2$ 之间时,转换效率为 $(8.6 \pm 0.4)\%$ 。超薄器件是可集成的,因此适合应用于量子通信、量子计算和纳米尺度传感。超平面的设计及其扫描电子显微镜 (SEM) 图像如图 8 所示。

实验光路如图 9(a) 所示。其中: M 为反射镜; L 为透镜; HWP 为半波片; QWP 为 $1/4$ 波片; BS 为分束器; PBS 为偏振光分束器。图 9(b) 中原点处的中心零场是由螺旋波前光束的相位奇点引起的。球面参考波和带有 OAM 的光束干涉会产生一个螺旋图案,若将输入偏振态从左圆偏振转换为右圆偏振,不会改变强度分布,但会改变 OAM 值的符号,即不会影响螺旋数,但会反转干涉图样中缠绕螺旋的扭转方向。该方法具有光路搭建简单、使用方便且检测结果直观的特点,但仍存在一定的局限性,如无法实现携带多模 OAM 光束的检测。

为了实现 SAM 到 OAM 的转换, 2019 年, Ding 等^[79]设计了一种双螺旋度解耦编码超表面,该超表面

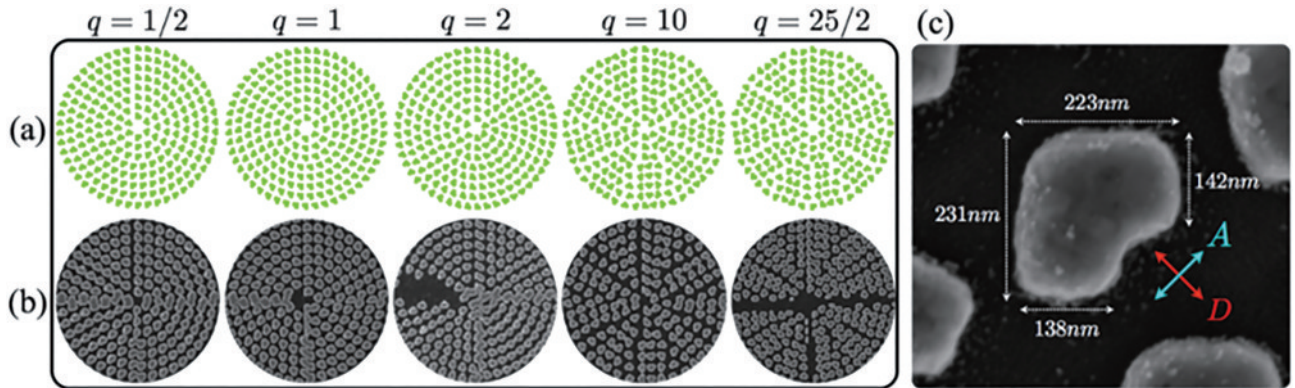


图 8 超薄超表面的结构。(a)超表面上纳米天线的空间布置;(b)超表面的 SEM 图像;(c)单个 L 形纳米天线的 SEM 图像^[78]
Fig. 8 Structure of ultrathin metasurfaces. (a) Spatial arrangement of nanoantennas on the metasurface; (b) SEM image of the metasurface; (c) SEM image of a single L-shaped nanoantenna^[78]

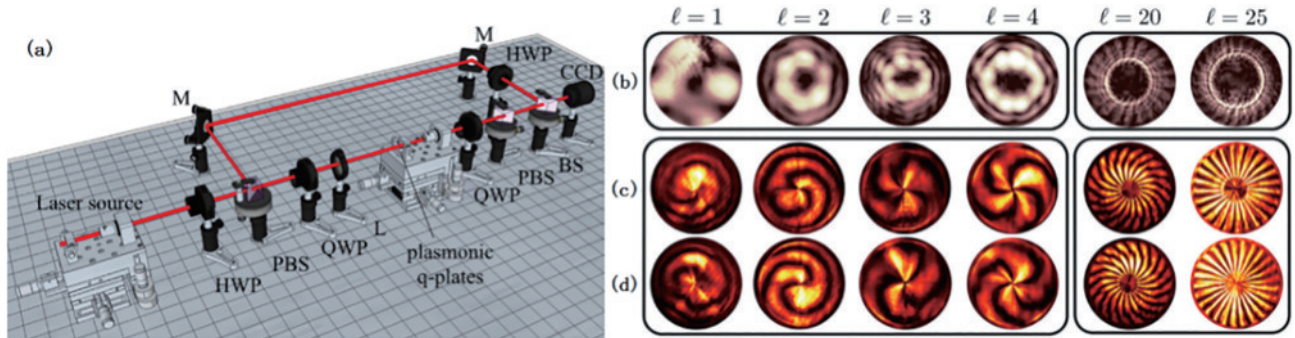


图 9 实验结果。(a)实验步骤;(b)透射光的强度截面;(c)左圆偏振光的输出光束与球面波的干涉图样;(d)右圆偏振光的输出光束与球面波的干涉图样^[78]
Fig. 9 Experimental results. (a) Experimental procedure; (b) intensity cross section of transmitted light; (c) interference pattern of output beam of left circularly polarized light and spherical wave; (d) interference pattern of output beam of right circularly polarized light and spherical wave^[78]

可对两个正交螺旋的 OAM 涡旋光束进行转换,如图 10 所示。可以发现:对于 LCP 入射,反射光束在法线方向上的 OAM 为 2,在 $-x$ 方向上的 OAM 为 0;对于 RCP 入射时,会反射出两束 OAM 为 1(-1) 的涡旋光束。多个设计实例表明,该编码元表面能根据螺旋

携带所需的 OAM 模式,显著提高超表面的信息容量,且模拟结果与微波实验结果的吻合度较好。该超表面提供了一种高效率、螺旋选择性地裁剪波阵面的新途径,在无线通信等实际应用中具有广阔的应用前景。

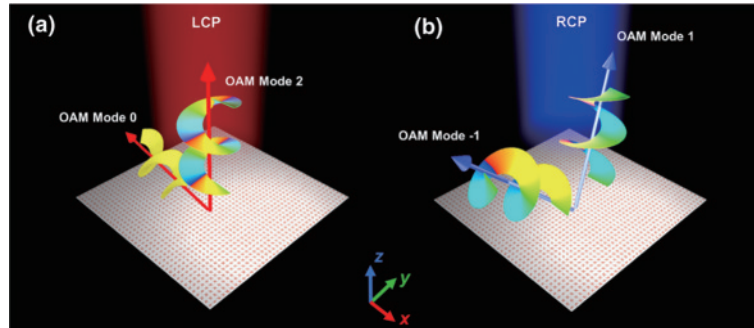


图 10 基于螺旋度的双功能反射超表面。(a) LCP 入射;(b) RCP 入射^[79]

Fig. 10 Bifunctional reflective metasurface based on helicity. (a) LCP incidence; (b) RCP incidence^[79]

3 结 论

涡旋光束的 OAM 有着很高的应用价值,在光通信、光操纵、量子信息系统等诸多领域都有重要的应用。随着人们对光子 OAM 以及超表面研究的不断深入,越来越多基于超表面产生或探测光子 OAM 的新应用、新技术被不断发掘出来,探测方法更加集成化、小型化,超表面的转化效率越来越高,功能也越发多样。介绍了利用超表面测量光子 OAM 态的国内外进展,这些方法均可方便快捷地测出光子的 OAM 态且各具特色,为光子 OAM 的进一步应用提供了重要基础。但各种类型的超表面对 OAM 的探测都受制于探测器的灵敏程度,对涡旋光束 OAM 态的大小或重 OAM 态都存在一定的限制,利用超表面识别全角动量仍有很大的困难。因此,设计构造能方便探测多模叠加的大范围 OAM 态涡旋光束超表面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Volke-Sepulveda K, Garcés-Chávez V, Chávez-Cerda S, et al. Orbital angular momentum of a high-order Bessel light beam[J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2002, 4(2): S82-S89.
- [3] Vasara A, Turunen J, Friberg A T. Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics and Image Science*, 1989, 6(11): 1748-1754.
- [4] Kotlyar V V, Skidanov R V, Khonina S N, et al. Hypergeometric modes[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(7): 742-744.
- [5] Curtis J E, Grier D G. Structure of optical vortices[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(13): 133901.
- [6] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, et al. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(23): 231110.
- [7] Knöner G, Parkin S, Nieminen T A, et al. Integrated optomechanical microelements[J]. *Optics Express*, 2007, 15(9): 5521-5530.
- [8] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, et al. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4713-4716.
- [9] Marzo A, Caleap M, Drinkwater B W. Acoustic virtual vortices with tunable orbital angular momentum for trapping of Mie particles[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(4): 044301.
- [10] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [11] Yan L, Gregg P, Karimi E, et al. Q-plate enabled spectrally diverse orbital-angular-momentum conversion for stimulated emission depletion microscopy[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 900-903.
- [12] Mohammadi S M, Daldorff L K S, Bergman J E S, et al. Orbital angular momentum in radio: a system study [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 565-572.
- [13] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, et al. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033001.
- [14] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [15] Yan Y, Xie G D, Lavery M P J, et al. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Communications*,

- 2014, 5: 4876.
- [16] Hui X N, Zheng S L, Chen Y L, et al. Multiplexed millimeter wave communication with dual orbital angular momentum (OAM) mode antennas[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10148.
- [17] Uribe-Patarroyo N, Fraine A, Simon D S, et al. Object identification using correlated orbital angular momentum states[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(4): 043601.
- [18] Liu K, Cheng Y Q, Yang Z C, et al. Orbital-angular-momentum-based electromagnetic vortex imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 711-714.
- [19] Lin M T, Gao Y, Liu P G, et al. Improved OAM-based radar targets detection using uniform concentric circular arrays[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, 2016: 1852659.
- [20] Lin M T, Gao Y, Liu P G, et al. Super-resolution orbital angular momentum based radar targets detection [J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(13): 1168-1170.
- [21] Bu X X, Zhang Z, Chen L Y, et al. Implementation of vortex electromagnetic waves high-resolution synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(5): 764-767.
- [22] Bu X X, Zhang Z, Liang X D, et al. A novel scheme for MIMO-SAR systems using rotational orbital angular momentum[J]. *Sensors*, 2018, 18(10): 3511.
- [23] Basistiy I V, Bazhenov V Y, Soskin M S, et al. Optics of light beams with screw dislocations[J]. *Optics Communications*, 1993, 103(5/6): 422-428.
- [24] Harris M, Hill C A, Tapster P R, et al. Laser modes with helical wave fronts[J]. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1994, 49(4): 3119-3122.
- [25] Soskin M S, Gorshkov V N, Vasnetsov M V, et al. Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices[J]. *Physical Review A*, 1997, 56(5): 4064-4075.
- [26] Leach J, Courtial J, Skeldon K, et al. Interferometric methods to measure orbital and spin, or the total angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(1): 013601.
- [27] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(25): 257901.
- [28] Wei H Q, Xue X, Leach J, et al. Simplified measurement of the orbital angular momentum of single photons[J]. *Optics Communications*, 2003, 223(1/2/3): 117-122.
- [29] Vasnetsov M V, Torres J P, Petrov D V, et al. Observation of the orbital angular momentum spectrum of a light beam[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2285-2287.
- [30] Jin J J, Luo J, Zhang X H, et al. Generation and detection of orbital angular momentum via metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24286.
- [31] Liu J P, Min C J, Lei T, et al. Generation and detection of broadband multi-channel orbital angular momentum by micrometer-scale meta-reflectarray[J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 212-218.
- [32] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature Materials*, 2014, 13(2): 139-150.
- [33] Fu S Y, Wang T L, Gao Y, et al. Diagnostics of the topological charge of optical vortex by a phase-diffractive element[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(8): 80501-80505.
- [34] Alperin S N, Niederriter R D, Gopinath J T, et al. Quantitative measurement of the orbital angular momentum of light with a single, stationary lens[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5019-5022.
- [35] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [36] Chaitanya N A, Jabir M V, Samanta G K. Efficient nonlinear generation of high power, higher order, ultrafast “perfect” vortices in green[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1348-1351.
- [37] Dai K J, Gao C Q, Zhong L, et al. Measuring OAM states of light beams with gradually-changing-period gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 562-565.
- [38] Denisenko V, Shvedov V, Desyatnikov A S, et al. Determination of topological charges of polychromatic optical vortices[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 23374-23379.
- [39] Denisenko V G, Soskin M S, Vasnetsov M V. Transformation of Laguerre-Gaussian modes carrying optical vortices and their orbital angular momentum by cylindrical lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4607: 54-58.
- [40] Emile O, Emile J. Young’s double-slit interference pattern from a twisted beam[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(1): 487-491.
- [41] Fu D Z, Chen D X, Liu R F, et al. Probing the topological charge of a vortex beam with dynamic angular double slits[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(5): 788-791.
- [42] Fu S Y, Wang T L, Zhang S K, et al. Integrating 5×5 Dammann gratings to detect orbital angular momentum states of beams with the range of -24 to $+24$ [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1514-1517.
- [43] Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, et al. Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6240-6248.
- [44] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [45] Ii G G, Courtial J, Vasnetsov M, et al. Increasing the data density of free-space optical communications using orbital angular momentum[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5550: 367-373.
- [46] Hickmann J M, Fonseca E J S, Soares W C, et al. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light’s orbital angular momentum [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 053904.
- [47] Lavery M P J, Berkhout G C G, Courtial J, et al. Measurement of the light orbital angular momentum spectrum using an optical geometric transformation[J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(6): 064006.
- [48] Lavery M P J, Robertson D J, Berkhout G C G, et al.

- Refractive elements for the measurement of the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2110-2115.
- [49] Li Y J, Deng J, Li J P, et al. Sensitive orbital angular momentum (OAM) monitoring by using gradually changing-period phase grating in OAM-multiplexing optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 7902306.
- [50] Liu R F, Long J L, Wang F R, et al. Characterizing the phase profile of a vortex beam with angular-double-slit interference[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(12): 125712.
- [51] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z M, et al. Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2781.
- [52] Moreno I, Davis J A, Pascoguin B M, et al. Vortex sensing diffraction gratings[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2927-2929.
- [53] Serna J, Encinas-Sanz F, Nemeş G. Complete spatial characterization of a pulsed doughnut-type beam by use of spherical optics and a cylindrical lens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1726-1733.
- [54] Soares W C, Vidal I, Caetano D P, et al. Measuring orbital angular momentum of a photon using the diffraction reciprocal lattice of a triangular slit[C]// *Frontiers in Optics 2008/Laser Science XXIV/Plasmonics and Metamaterials/Optical Fabrication and Testing*, October 19-23, 2008, Rochester, New York. Washington, D.C.: OSA, 2008: FTThO2.
- [55] Stahl C, Gbur G. Analytic calculation of vortex diffraction by a triangular aperture[J]. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 2016, 33(6): 1175-1180.
- [56] Sztul H I, Alfano R R. Double-slit interference with Laguerre-Gaussian beams[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 999-1001.
- [57] Vaity P, Banerji J, Singh R P. Measuring the topological charge of an optical vortex by using a tilted convex lens [J]. *Physics Letters A*, 2013, 377(15): 1154-1156.
- [58] Liu Y X, Tao H, Pu J X, et al. Detecting the topological charge of vortex beams using an annular triangle aperture [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(7): 1233-1236.
- [59] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex gratings[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3495-3497.
- [60] Zheng S, Wang J. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40781.
- [61] Zhu J, Zhang P, Fu D Z, et al. Probing the fractional topological charge of a vortex light beam by using dynamic angular double slits[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(5): 187.
- [62] Munk B A. *Frequency selective surfaces: theory and design*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- [63] Li J X, Yuan Y Y, Wu Q, et al. Dual-band independent phase control based on high efficiency metasurface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(10): 100501.
- [64] Wang H Y, Zhang Z Y, Zhao K, et al. Independent phase manipulation of co-and cross-polarizations with all-dielectric metasurface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 053601.
- [65] Zhang X Y, Guan C Y, Wang K D, et al. Multi-focus optical fiber lens based on all-dielectric metasurface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(5): 050601.
- [66] Ren H R, Briere G, Fang X Y, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2986.
- [67] 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.
- [68] Genevet P, Yu N F, Aieta F, et al. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 013101.
- [69] Yu N F, Genevet P, Aieta F, et al. Flat optics: controlling wavefronts with optical antenna metasurfaces [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(3): 4700423.
- [70] Chen M L N, Jiang L J, Sha W. Detection of orbital angular momentum with metasurface at microwave band [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(1): 110-113.
- [71] Ou K, Li G H, Li T X, et al. High efficiency focusing vortex generation and detection with polarization-insensitive dielectric metasurfaces[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(40): 19154-19161.
- [72] Wang J G, Shao Z K, Wen Y H, et al. All-dielectric metasurface grating for on-chip multi-channel orbital angular momentum generation and detection[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18794-18802.
- [73] Guo Y H, Zhang S C, Pu M B, et al. Spin-decoupled metasurface for simultaneous detection of spin and orbital angular momenta via momentum transformation[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 63.
- [74] 张世聪. 基于自旋解耦超构表面的涡旋光束检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学, 2021.
Zhang S C. Research on vortex beam detection technology based on spin decoupled metasurface[D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [75] Chen X L, Zhou H L, Liu M, et al. Measurement of orbital angular momentum by self-interference using a plasmonic metasurface[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 4800308.
- [76] Goodman J W. *Introduction to Fourier optics*[M]. Colorado: Roberts' Press, 2005.
- [77] Zhang Y C, Yang X D, Gao J. Orbital angular momentum transformation of optical vortex with aluminum metasurfaces[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9133.
- [78] Bouchard F, de Leon I, Schulz S A, et al. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in ultra-thin metasurfaces with arbitrary topological charges[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(10): 101905.
- [79] Ding G W, Chen K, Luo X Y, et al. Dual-helicity decoupled coding metasurface for independent spin-to-orbital angular momentum conversion[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(4): 044043.