



DOI: 10.12086/oe.2020.200366

## 基于非对称光子自旋—轨道相互作用的超构表面

张 飞<sup>1</sup>, 郭迎辉<sup>1,2</sup>, 蒲明博<sup>1,2</sup>, 李 雄<sup>1,2</sup>, 马晓亮<sup>1,2,3</sup>, 罗先刚<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;<sup>2</sup>中国科学院大学光电学院, 北京 100049;<sup>3</sup>中国人民解放军军事科学院国防科技创新研究院, 北京 100071

**摘要:** 光子自旋—轨道相互作用是经典光学所忽略的重要现象, 近年来研究发现该现象可通过人工亚波长结构显著增强并进行按需调控。传统超构表面仅支持对称光子自旋—轨道相互作用, 存在共轭对称性限制, 难以将不同自旋态用于多功能集成、复杂光场调控、信息加密及存储等领域。非对称光子自旋—轨道相互作用能够使左右旋圆偏振光解耦, 为突破上述理论和应用限制带来新契机。本文首先介绍了非对称光子自旋—轨道相互作用的原理及实现方法, 其次介绍非对称光子自旋—轨道相互作用的代表性应用以及特点, 最后对非对称光子自旋—轨道相互作用研究面临的挑战和未来的研究方向进行展望。

**关键词:** 超构表面; 光子自旋—轨道相互作用; 轨道角动量; 光学悬链线

**中图分类号:** TB383

**文献标志码:** A

**引用格式:** 张飞, 郭迎辉, 蒲明博, 等. 基于非对称光子自旋—轨道相互作用的超构表面[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 200366

## Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions

Zhang Fei<sup>1</sup>, Guo Yinghui<sup>1,2</sup>, Pu Mingbo<sup>1,2</sup>, Li Xiong<sup>1,2</sup>, Ma Xiaoliang<sup>1,2,3</sup>, Luo Xiangang<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>2</sup>School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>National Institute of Defense Technology Innovation, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100071, China

**Abstract:** Photonic spin-orbit interaction is an important phenomenon ignored by classical optics. In recent years, studies have found that this phenomenon can be significantly enhanced by artificial subwavelength structures and adjusted on demand. Traditional metasurfaces only support symmetric photon spin-orbit interactions, and there are limitations in conjugate symmetry, which makes it difficult to use different spin states for multifunctional integration, complex optical field regulation, information encryption, and storage. The asymmetric photon spin-orbit interaction can decouple left and right circularly polarized light, which brings new opportunities for breaking the above-mentioned theoretical and application limitations. This article first introduces the principle and realization

收稿日期: 2020-09-03; 收到修改稿日期: 2020-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61975210, 61875253); 中科院青年创新促进会(2019371); 中国博士后科学基金资助项目(2020M680153)

作者简介: 张飞(1992-), 男, 博士, 博士后, 主要从事微纳光学的研究。E-mail: zhangfei\_ns@163.com

通信作者: 罗先刚(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要从事数字光学, 悬链线光学, 微纳光刻, 亚波长电磁学, 结构功能材料及器件, 仿生光子器件及系统等研究。E-mail: lxxg@ioe.ac.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

method of asymmetric photon spin-orbit interactions, secondly introduces the representative applications and characteristics of asymmetric photon-spin-orbit interactions, and finally outlines the challenges and prospects of asymmetric photon spin-orbit interactions for future research directions.

**Keywords:** metasurface; photonic spin-orbit interaction; orbital angular momentum; optical catenary

**Citation:** Zhang F, Guo Y H, Pu M B, et al. Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200366

## 1 引言

众所周知,光子不仅携带与偏振态相关的自旋角动量(spin angular momentum, SAM),还携带了与空间相位分布相关的轨道角动量(orbit angular momentum, OAM)。物质在吸收光子的同时伴随着光子 SAM 和 OAM 向物质的动量转移。对于各向同性的均匀性介质, SAM 和 OAM 的转移过程是相互独立的。2006 年, Marrucci 等人在实验上证明了在各向异性的空间非均匀介质中会发生 SAM 到 OAM 的转换并保证动量守恒<sup>[1]</sup>。在进行了深入的研究后,发现光子的 SAM 与 OAM 的相互耦合(photonic spin-orbit interaction, PSOI)依赖于各向异性非均匀材料相互作用所产生的 Pancharatnam-Berry(PB)相位。这一相位又被称为几何相位<sup>[2]</sup>,最早于 1956 年被 Pancharatnam 发现<sup>[3]</sup>,随后被 Berry 推广到绝热量子系统中<sup>[4]</sup>。由于几何相位与工作波长无关,因此其常被用于宽带涡旋光束产生<sup>[5]</sup>和光束偏折<sup>[6]</sup>。但早期几何相位方面的研究主要基于 q-plate<sup>[1]</sup>和具有人工双折射的光栅结构<sup>[6]</sup>。

近年来,随着微细加工技术的进步和亚波长电磁学理论的发展,传统 q-plate 和光栅结构逐渐被具有强各向异性的亚波长散射体所替代。基于 PSOI 的几何相位调制所形成的几何相位超构表面已实现了诸如宽带自旋霍尔效应、超震荡透镜、彩色全息、平面透镜、涡旋光束产生器等一系列异常光学现象及平面光学器件<sup>[7-12]</sup>。然而,传统几何相位型超构表面由离散型亚波长结构构成,其工作效率和带宽会因波前采样不足受到原理性限制。2015 年,本团队将悬链线结构从力学引入微纳光学中,用于生成完美涡旋光束,悬链线光学的概念也被正式提出<sup>[13]</sup>。悬链线结构可以引入连续、无色散、精准的几何相位,相比于离散型亚波长结构,其工作效率及带宽具有明显优势。悬链线光学的历史、基本理论、功能器件以及相关应用在近期的综述论文中被详细陈述<sup>[14]</sup>。经过多年的发展,悬链线光学已成为亚波长光学和亚波长电磁学的新研究方向,或将成为工程光学 2.0 的重要部分<sup>[15]</sup>。最近几年,

一系列高性能平面器件通过类悬链线结构或准连续型结构实现,包括平面透镜、贝塞尔光束生成器、艾里光束生成器、光学全息板、波束扫描、虚拟赋形、偏振转换等<sup>[17,16-27]</sup>。2020 年,本团队提出等宽度全介质悬链线超构表面,器件工作效率及带宽得到进一步显著提升,在 9  $\mu\text{m}$ ~13  $\mu\text{m}$  波长范围内的平均衍射效率高于 90%<sup>[20]</sup>。由于悬链线结构的局部宽度和周期具有非均匀分布特性,并且高折射率介质结构的相位延迟对其宽度比较敏感,因此,为了进一步提高全介质悬链线结构的衍射效率,使其接近 100%,需要对其局部宽度进行优化,从而实现传输相位和几何相位的协同优化<sup>[14,28]</sup>。

根据几何相位原理可知,经几何相位型超构表面调制后,左旋和右旋圆偏振光(left-handed and right-handed circularly polarized light, LCPL and RCPL)对应的出射光场将呈现出共轭对称关系,比如由几何相位型超构表面得到的涡旋光呈现出互补的拓扑荷<sup>[13]</sup>,产生的全息像表现出中心对称等<sup>[29]</sup>。因此,尽管超构表面单元结构的效率可接近 100%,但 PSOI 的对称性也将极大地阻碍多功能器件的性能。为了实现手性成像,传统方法是通过交错排布两组亚波长结构阵列分别调制 LCPL 和 RCPL<sup>[30]</sup>,但这会造成器件能量利用率减半、背景噪声显著增强等原理性问题。2016 年,本团队发现利用变宽度牛眼光栅可生成非对称拓扑荷的涡旋光束,这预示着 PSOI 的对称性可以被打破<sup>[8]</sup>。2017 年,本团队通过复合自旋相关的几何相位和自旋无关的传输相位,打破了 PSOI 的对称性,从而实现 LCPL 和 RCPL 的任意独立调控<sup>[31-32]</sup>。至此,非对称 PSOI 的概念被正式提出,这意味着圆偏振复用超构表面面临的效率低、噪声大等诸多原理性问题得以解决,同时也为多功能器件、复杂光场调控等打开新篇章。

本文将对自 2017 年以来关于非对称 PSOI 的代表性研究进行归纳总结。首先介绍非对称 PSOI 的原理及实现方法,其次介绍非对称 PSOI 的代表性应用以及特点,最后对非对称 PSOI 研究面临的挑战和进一步拓展的方向进行展望。

## 2 非对称 PSOI 原理及实现方法

非对称 PSOI 的物理思想是同一超构表面采用两种具有不同自旋相关性的相位调控机理。通过两者的复合既可打破原有的对称性，又可保留自旋相关性。相位型超构表面的相位调控机理主要可以分为四种，即几何相位、传输相位、电路型相位以及迂回相位。前三种相位的物理机制已在之前综述论文中进行了详细介绍<sup>[33]</sup>，其中电路型相位主要用于描述微波波段。而迂回相位携带在某个衍射级次中，表现出宽带无色散特性，其中具有代表性的工作是暨南大学李向平教授课题组提出的基于“双原子”超构表面的矢量全息术<sup>[34-35]</sup>。实现非对称 PSOI 的主要方案是复合自旋相关的几何相位和自旋无关的传输相位。在此基于琼斯矩阵理论重点介绍基于几何相位和传输相位复合的非对称 PSOI 的基本原理。

假如各向异性结构对应  $u-v$  坐标系，整个超构表面对应为  $x-y$  坐标系，两坐标系的夹角为  $\theta$ 。根据以上假设，各向异性超构表面的琼斯矩阵可表示为

$$\mathbf{J} = \mathbf{R}(-\theta) \begin{bmatrix} t_u & 0 \\ 0 & t_v \end{bmatrix} \mathbf{R}(\theta), \quad (1)$$

其中： $t_u$  和  $t_v$  分别表示各向异性结构沿其快慢轴方向的复振幅， $\mathbf{R}(\theta)$  为旋转矩阵：

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

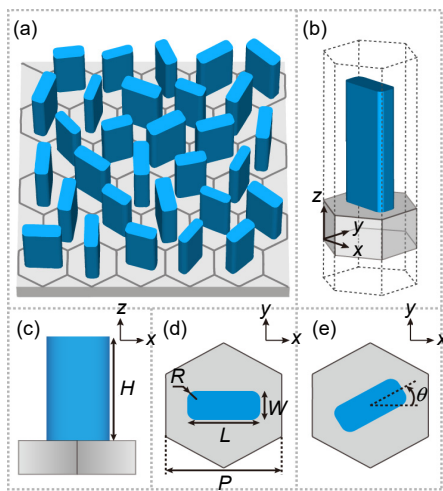


图 1 实现非对称 PSOI 的单元结构设计<sup>[31]</sup>。(a)~(e) 超构表面及单元结构示意图；(f) 针对工作长 532 nm 单元结构仿真结果，纳米柱材料为二氧化钛(TiO<sub>2</sub>)，基底材料为二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)；(g) 针对工作波长 10.6 μm 单元结构仿真结果，纳米柱材料为硅(Si)，基底材料为氟化钡(BaF<sub>2</sub>)

Fig. 1 Unit element design for achieving asymmetric PSOI<sup>[31]</sup>. (a)~(e) Schematic diagrams of metasurfaces and unit elements; (f) Simulated results of unit elements at the wavelength of 532 nm. The materials of nanofins and substrate are titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) and quartz (SiO<sub>2</sub>), respectively; (g) Simulated results of unit elements at the wavelength of 10.6 μm. The materials of nanofins and substrate are silicon (Si) and barium fluoride (BaF<sub>2</sub>), respectively

然后将其带入式(1)，化简后可得：

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} t_u \cos^2\theta + t_v \sin^2\theta & (t_u - t_v)\sin\theta\cos\theta \\ (t_u - t_v)\sin\theta\cos\theta & t_u \sin^2\theta + t_v \cos^2\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

为了便于分析，在此假设各向异性结构振幅为 1，且沿其快慢轴方向引入的相位延迟为  $\beta \pm \delta/2$ ，那么对应的复振幅表示为  $t_u = \exp(i\beta - i\delta/2)$  和  $t_v = \exp(i\beta + i\delta/2)$ 。为了实现 LCPL 和 RCPL 波前(分别记为  $\varphi_1(x,y)$  和  $\varphi_2(x,y)$ ) 的独立调控，超构表面需要同时满足  $\mathbf{J}(x,y)|L = \exp[i\varphi_1(x,y)]|R$  和  $\mathbf{J}(x,y)|R = \exp[i\varphi_2(x,y)]|L$ 。因此，超构表面的琼斯矩阵需要满足：

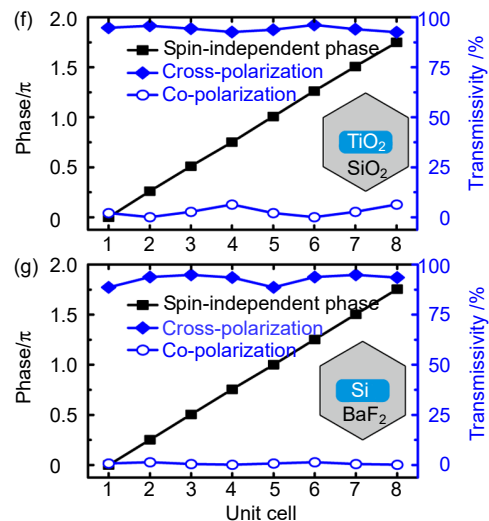
$$\mathbf{J}(x,y) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1(x,y)} + e^{i\varphi_2(x,y)} & ie^{i\varphi_2(x,y)} - ie^{i\varphi_1(x,y)} \\ ie^{i\varphi_2(x,y)} - ie^{i\varphi_1(x,y)} & -e^{i\varphi_1(x,y)} - e^{i\varphi_2(x,y)} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

基于式(4)中的本征值和本征向量，不难得出各向异性亚波长结构的主轴朝向  $\theta$  以及沿主轴方向的传输相位  $\beta$  应该满足：

$$\theta(x,y) = \frac{1}{4} [\varphi_1(x,y) - \varphi_2(x,y)], \quad (5)$$

$$\beta(x,y) = \frac{1}{2} [\varphi_1(x,y) + \varphi_2(x,y)]. \quad (6)$$

在优化设计过程中，单元结构需要满足三个条件：可独立调控传输相位和几何相位，单元结构极化转换效率高，传输相位能覆盖需要的范围。为了实现高效的非对称 PSOI，传输相位  $\beta$  应覆盖整个  $[0 \sim 2\pi]$  范围，且两个主轴之间的相位差应满足  $\delta = \pi$ 。图 1 为实现非对称 PSOI 最常用的结构形式之一。最后，根据式(5)



和式(6), 选用传输相位匹配的单元结构填充到对应的位置, 并予以相应的旋转角度, 即可实现非对称 PSOI, 完成多功能器件的设计。

### 3 非对称 PSOI 应用

非对称 PSOI 的应用大体上可以分为三类: 其一, 手性切换功能器件, 即在 LCPL 和 RCPL 入射时实现不同的功能; 其二, 矢量光场调控, 即通过独立调控出射场的 LCPL 和 RCPL 分量, 实现全新的矢量光场; 其三, PSOI 的多态切换, 即同一超构表面在外界不同激励下实现对称、非对称以及弱 PSOI 等多种状态。

#### 3.1 手性切换功能器件

非对称 PSOI 能允许 LCPL 和 RCPL 被高效任意独立调控, 这意味着额外的偏振自由度能够将超构表面的信息容量增加为原有的两倍。本团队在提出非对称 PSOI 概念时<sup>[31]</sup>, 已提出实现非对称全息显示、非对称涡旋光生成、偏振成像等功能器件的方法, 并在后续的研究中得到了广泛应用。

光学全息在数据存储、彩色显示、防伪等领域具有重要应用前景。图 2(a)~2(d)展示了本团队<sup>[31]</sup>和哈佛大学 Capasso 教授团队<sup>[36]</sup>的同期工作, 即非对称 PSOI 在全息显示方面的应用。两个工作的原理和结构形式

基本一致, 其设计方法是采用 Gerchberg-Saxton (GS) 算法计算两幅全息像对应的相位分布, 然后根据式(5)和式(6)得到传输相位和几何相位的组合方式。从图 2(a)~2(d)可知, 基于非对称 PSOI 设计的全息板, 可以在 LCPL 和 RCPL 入射时产生完全不同的全息像, 因此可以将其信息容量提高至原有的两倍。相反, 基于对称 PSOI 的传统方法若要在 LCPL 和 RCPL 产生不同的全息像, 则需要牺牲一半的像空间(例如只探测右侧像空间), 这意味其信息容量并没有得到提升。

此外, 基于非对称 PSOI 设计的涡旋光束生成器可以在 LCPL 和 RCPL 入射下产生任意独立拓扑荷的涡旋光束<sup>[31]</sup>, 这是传统相位板和传统超构表面无法实现的。图 2(e)~2(f)为生成非对称拓扑荷涡旋光束( $\sigma=-1$  时,  $l_1=6$ ;  $\sigma=1$  时,  $l_1=-4$ )的仿真结果。通过干涉作用, 涡旋光束的拓扑荷可以直接得到。干涉图案类似于旋转的花瓣, 其中拓扑荷的模由花瓣数决定, 而符号由旋转方向决定。哈佛大学 Capasso 教授团队进行了相关的实验验证, 如图 2(g)~2(h)所示, 并探索了椭圆偏振入射下的出射光场<sup>[37]</sup>。

国内外其它单位在基于非对称 PSOI 的理论和手性切换功能器件方面也开展了相关研究。例如, 武汉大学的郑国兴研究团队利用传输相位和几何相位的复合实现了任意偏振态的相位调控<sup>[38]</sup>, 并进一步结合集

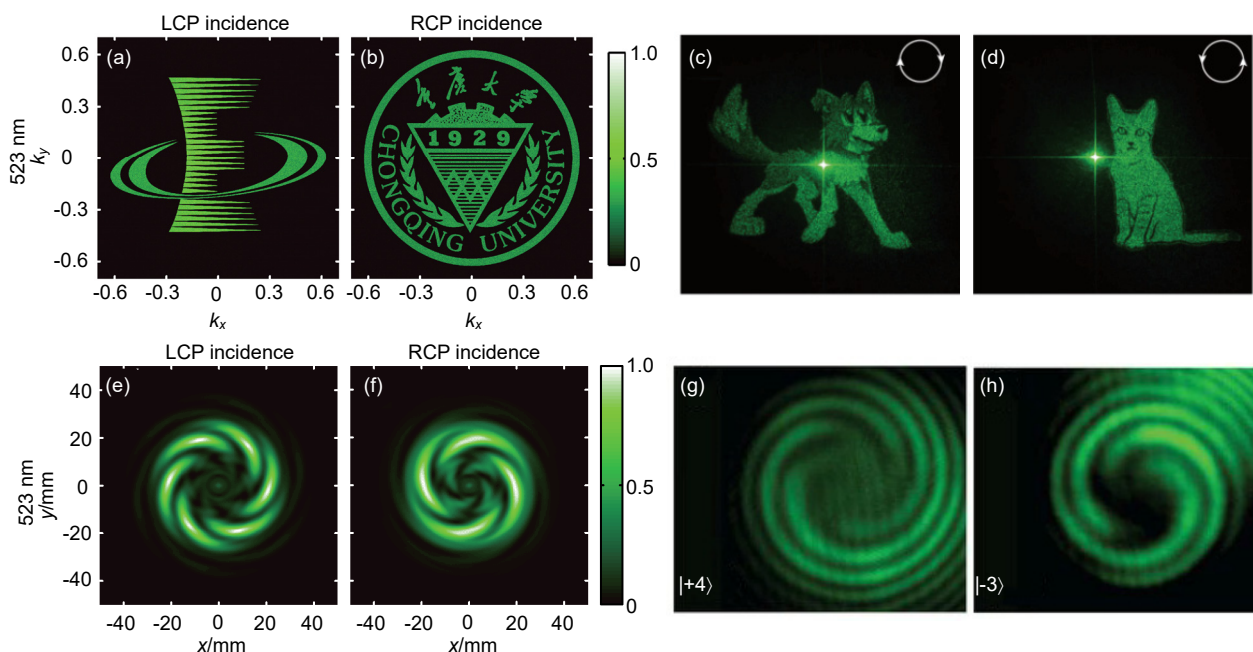


图 2 基于非对称 PSOI 的(a)~(d)全息和(e)~(h)OAM 产生。

(a),(b)和(e),(f)为本团队工作<sup>[31]</sup>; (c),(d)和(g),(h)为哈佛大学团队同期工作<sup>[37]</sup>

Fig. 2 Optical hologram and OAM generation based on asymmetric PSOI.

(a),(b) and (e),(f) Our work <sup>[31]</sup>; (c),(d) and (g),(h) Concurrent work of Harvard university<sup>[37]</sup>

成单元设计实现纳米印刷灰度图显示和圆偏振复用全息<sup>[39]</sup>；北京大学龚旗煌院士的研究团队基于非对称 PSOI 超构表面实现了类似 Rochon 棱镜的偏振分束器件<sup>[40]</sup>；南京大学徐挺研究团队利用具有非对称 PSOI 的超构表面结合 4-F 成像系统实现了手性切换的边缘成像和普通成像<sup>[41]</sup>。此外，该团队还先后在可见光波段<sup>[42]</sup>和紫外光波段<sup>[43]</sup>实现了手性切换控制的自加速光束产生和圆偏振独立全息。中国科学院西安光学精密机械研究所的研究人员利用非对称 PSOI 实现了手性切换的纵向聚焦和横向偏折<sup>[44]</sup>。

类似于非对称 PSOI，通过调控具有高折射率的矩形介质纳米柱可以实现对正交线偏振的独立调控。2015 年，加州理工大学 Andrei Faraon 教授提出一种全介质超构表面，可实现对两正交线偏振光波前的任意独立调控<sup>[45]</sup>。在此基础上，通过选择交叉偏振中满足特定相位的单元结构可以实现  $x-x$ 、 $y-y$  和  $x-y$  三个信道的独立相位调控。基于上述原理，北京理工王涌天教授课题组实现了三个信道的独立全息<sup>[46]</sup>和不同偏振的矢量全息<sup>[47]</sup>，有望实现信息加密。哈尔滨工业大学张框等人基于类似的原理在微波段先后实现了手性可切换全息<sup>[48]</sup>、能量可控的圆偏振路由器<sup>[49]</sup>，随后又实现了 L-L、R-R、L-R 和 R-L 的全偏振态独立相位调控<sup>[50]</sup>。

2017 年，本团队基于非对称 PSOI 提出了一种利用单层超构表面同时实现圆偏振不对称传输和任意波前调控的方法<sup>[32]</sup>。其基本原理为：利用由旋向相差  $\pi/4$ 、传输相位相差  $\pi/2$  纳米柱组成超级单元(如图 3(a)所示)，通过非对称 PSOI 实现自旋选择的干涉相消或相长，并通过纳米柱的空间旋转同时实现任意波前的调控。如图 3(b)所示，实验测得的圆偏振光消光比约 10:1，不对称参数为 0.69，相对带宽达到 30%。以上结果是之前公开报道单层结构的四倍以上，并与三维超材料的性能相当。如图 3(c)所示，基于该方法设计的超构表面，可以通过单层结构同时实现偏振滤波和任意波前调控。器件的多功能性和易制备特性使其有望替代手性光谱仪、手性成像等系统中的部分级联光学元件，从而显著降低光学系统的体积、重量、成本和能量损失，为实现轻量化、集成化和平面化系统提供有效途径。

### 3.2 矢量光场调控

在过去的几十年里，圆柱矢量光束特别是径向偏振光，由于其在聚焦和成像中的独特性质而受到了学术界和产业界的广泛关注。然而，传统的光学透镜组存在的体积大、效率低等缺点，严重限制了径向偏振光的发展和应用。超构表面的出现为解决上述问题带

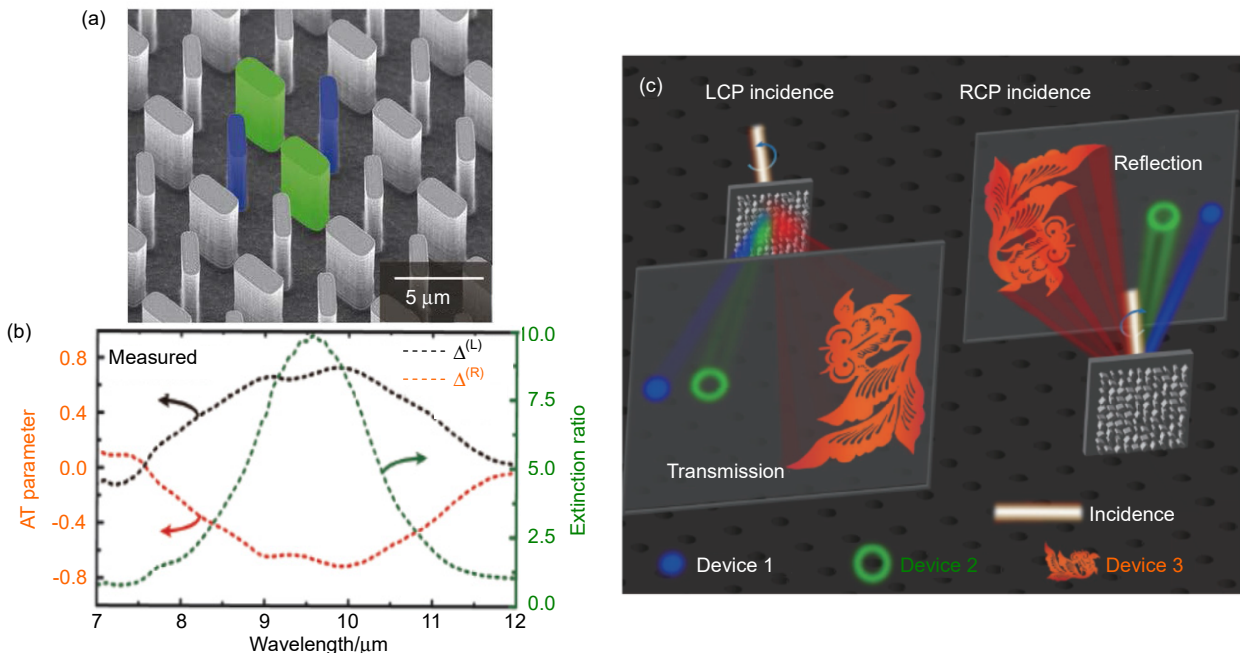


图 3 非对称 PSOI 实现圆偏振不对称传输和波前调控<sup>[32]</sup>。(a) 超构表面电镜图；(b) 测试不对称参数和消光比；(c) 圆偏振不对称传输超构表面波前调控效果示意图

Fig. 3 Simultaneous circular asymmetric transmission and wavefront manipulation enabled by asymmetric PSOI<sup>[32]</sup>. (a) Scanning electron microscope image of the metasurface; (b) Measured asymmetric parameter and extinction ratio; (c) Schematic diagram of wavelength manipulation by the metasurface with circular asymmetric transmission effect

来了新的契机。例如，重庆大学喻洪麟课题组提出的一种基于非对称 PSOI 的全介质矢量光束生成与调控器件<sup>[51]</sup>。在线偏振光入射下，利用非对称 PSOI 对线偏振光的左右旋分量进行独立调控，最后通过自旋重组同时实现偏振转换和波前调控，为矢量光束生成调控器的设计提供新自由度。在波长为 532 nm 处，该课题组设计的超透镜(数值孔径  $NA=0.9$ )实现了超越衍射极限聚焦焦斑，在粒子加速和超分辨率成像方面具有潜在的应用价值。

在多路偏振调控方面，2019 年天津大学张伟利教授课题组利用非对称 PSOI 的圆偏振独立调控能力在大赫兹波段实现了自旋解耦的非对称偏振产生，即正入射的线偏振光经超构表面后所产生的同偏振和交叉偏振光分别沿不同的方向偏折<sup>[52]</sup>。南京大学王牧教授课题组基于超构表面的非对称 PSOI，通过改变元胞中结构单元的几何尺寸与排列方式，成功实现了多路径偏振态任意组合的同步输出<sup>[53]</sup>。该设计方案克服了了几何相位型超构表面无法同时产生不同偏振态的瓶颈，并实验实现了类似于量子通信中基于通信协议的密钥分发过程。近期，哈佛大学 Capasso 教授课题组利用复合了传输相位和几何相位的准连续型超构表面，并结合拓扑优化技术实现了在不同入射角下的偏振态的连续变化<sup>[24]</sup>。

最近，本课题组利用超构表面的非对称 PSOI 同时实现了聚焦和差分功能，从而实现了基于单片超构表面的全光边缘探测<sup>[54]</sup>。如图 4 所示，具体原理为：利用非对称 PSOI 使得线偏振光的两个正交圆偏振分量产生有一定横向偏移的两个图像；在图像重叠区，左右旋圆偏振可组合成为线偏振光，因此经线偏振片

滤波后便得到目标的边缘信息。相比同类研究<sup>[41,55]</sup>，该方案摆脱了对传统 4-F 光学系统的依赖，可以实现更加紧凑的边缘探测系统。

### 3.3 对称与非对称 PSOI 切换

非对称 PSOI 可以实现 LCPL 和 RCPL 的任意独立调控，通过利用偏振自由度有效提升信息容量，但难以提升信息安全性。可调谐超构表面可以显著提升信息安全性。基于传输相位的可调谐超构表面存在设计复杂、功能单一等问题，难以实现多个波前的任意独立调控<sup>[56-58]</sup>。基于几何相位的可调谐超构表面设计相对简单，但可调谐 PSOI 通常只有“开”和“关”两种状态，且只有“开”的状态能贡献于光束调控<sup>[59-63]</sup>。因此，若要实现不同的功能，则需交错排布多种单元结构，使得只有部分单元结构具有积极贡献，导致器件的信息保真度和效率存在原理性限制。

近期，本团队提出了一种基于相变材料和亚波长“多原子”结构的多态波前独立调控方法，从原理上解决了上述问题<sup>[64]</sup>。首先设计出一种可独立调控几何相位和传输相位的多原子相变单元，再通过两者的复合极大地降低可调超构表面的设计难度，并且每个单元结构对所有功能均有积极作用。作为方法验证，在相变材料  $Ge_2Se_2Te_3$ (GST)处于非晶态、半结晶态和结晶态时，分别实现了对称、非对称和弱 PSOI。该方法也可以直接拓展至易失性相变材料(如二氧化钒)，实现多态 PSOI 的动态切换。如图 5 所示，在相变前或过度相变后，只能得到诱导性或无用信息，而无法直接获取编码在半结晶态中的信息。该研究为动态可重构波前调控超构表面的设计提供了新方案，并在光存储、光加密以及信息安全工程领域有较大的应用潜力。

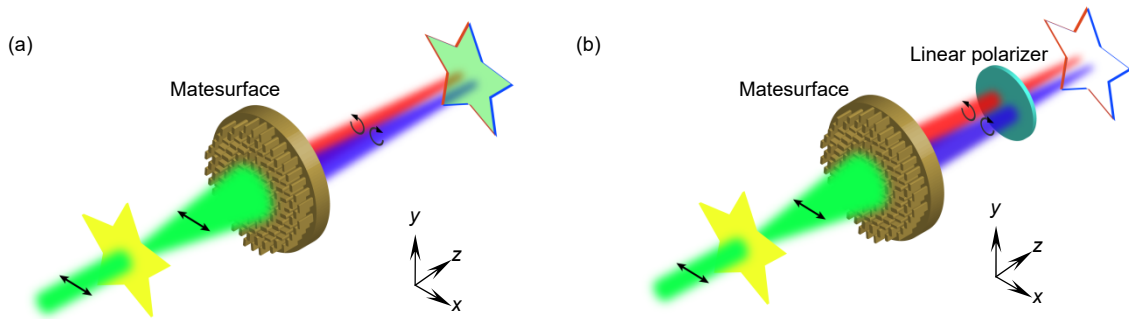


图 4 非对称 PSOI 实现全光边缘探测<sup>[54]</sup>。(a) 单层超构表面将 LCPL 和 RCPL 分量对应的图像沿 x 方向分离；(b) 一个线偏振片被用于滤除 LCPL 和 RCPL 图像重叠部分实现边缘探测

Fig. 4 Optical edge detection enabled by asymmetric PSOI<sup>[54]</sup>. (a) The monolithic metasurface for LCPL and RCPL imaging with opposite shift along the x-axis; (b) A linear polarizer is applied to eliminate the overlapped region of LCPL and RCPL images for edge detection

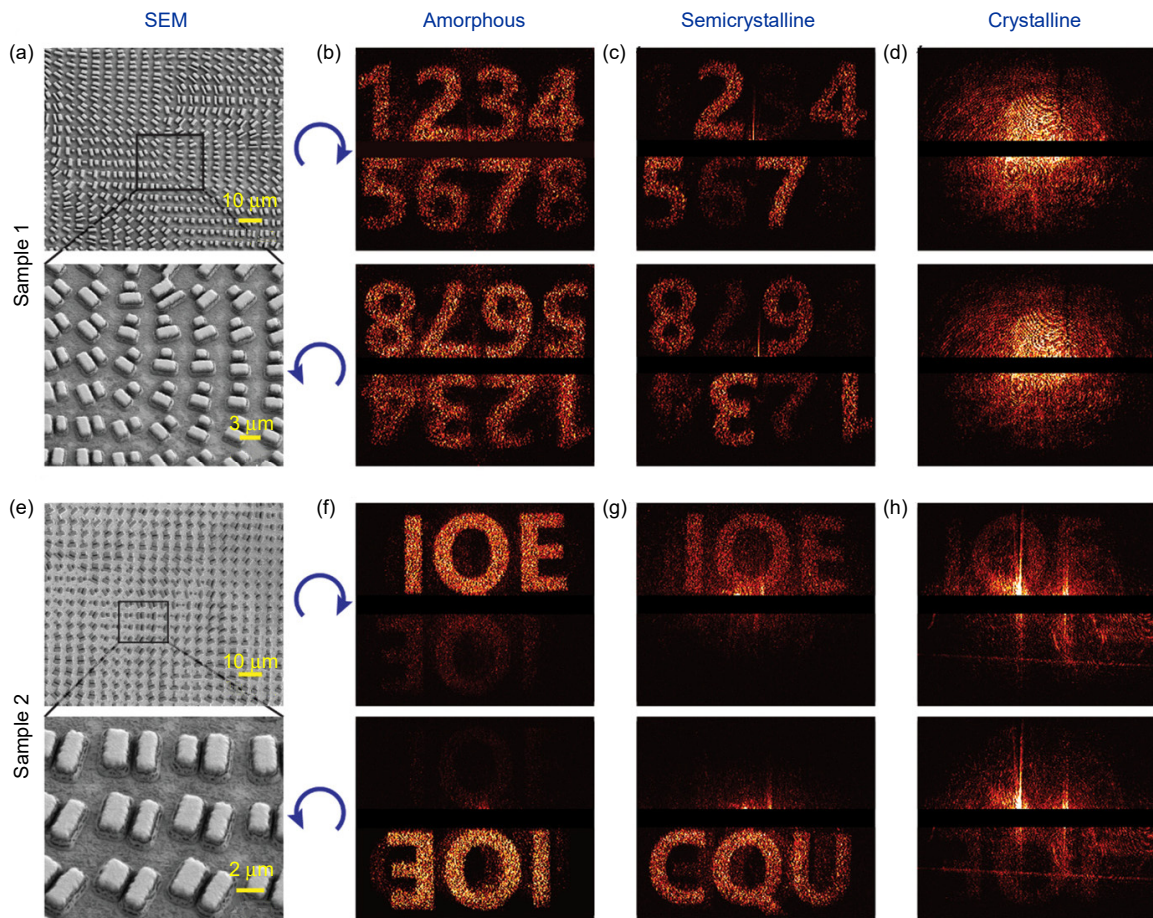


图 5 多态可切换 PSOI 用于全息加密<sup>[64]</sup>。(a)和(e) 两个全息超构表面样品的电镜图；(b)~(d)和(f)~(h) 分别为 GST 处于不同状态时，两个器件在 RCPL(上)和 LCPL(下)入射下产生的衍射图案

Fig. 5 Holographic encryption enabled by multistate switchable PSOI<sup>[64]</sup>. (a),(e) Scanning electron microscope images of two metasurfaces; (b)~(d) and (f)~(h) Diffraction patterns generated by two devices at different states of GST under the illumination of RCPL (top) and LCPL (bottom)

## 4 未来发展趋势

基于超构表面的非对称光子自旋—轨道相互作用在短短的几年时间里得到了国内外的广泛研究，并涌现出了一系列的功能器件和全新应用，如超构表面全息器件、涡旋光产生器、偏振调控器、偏振路由器、矢量光束产生器、全光边缘探测器等。与传统器件相比，这类器件不仅尺寸更紧凑，而且具有多功能、单片式等特点，有望推动集成光学的发展。随着研究的不断深入，基于超构表面的非对称光子自旋—轨道相互作用将在未来的偏振光学和成像探测等方面发挥重要作用。

目前关于非对称光子自旋—轨道相互作用的研究主要集中于单波长或者窄带范围，虽然部分器件也具

有一定的工作带宽，但其性能仍然随着工作波长远离中心波长而显著下降。宽带非对称光子自旋—轨道相互作用在偏振成像、生命探测等领域具有重要应用前景，也将是未来的研究重点之一。多态可切换光子自旋—轨道相互作用的研究刚刚起步，仅实现了对称、非对称和弱耦合三种状态的切换。未来可基于该原理设计更多的功能性器件，同时探索可调谐超构表面中光子角动量更多耦合形式的实现机理、方法和材料等。

## 参考文献

- [1] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, **96**(16): 163905.
- [2] Anandan J. The geometric phase[J]. *Nature*, 1992, **360**(6402): 307–313.

- [3] Chyba T H, Wang L J, Mandel L, *et al.* Measurement of the Pancharatnam phase for a light beam[J]. *Optics Letters*, 1988, **13**(7): 562–564.
- [4] Berry M V. Quantal phase factors accompanying adiabatic changes[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1984, **392**(1802): 45–57.
- [5] Biener G, Niv A, Kleiner V, *et al.* Formation of helical beams by use of Pancharatnam-Berry phase optical elements[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(21): 1875–1877.
- [6] 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.
- [7] Luo X G, Pu M B, Li X, *et al.* Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**(6): e16276.
- [8] Guo Y H, Pu M B, Zhao Z Y, *et al.* Merging geometric phase and plasmon retardation phase in continuously shaped metasurfaces for arbitrary orbital angular momentum generation[J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(11): 2022–2029.
- [9] Tang D L, Wang C T, Zhao Z Y, *et al.* Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, **9**(6): 713–719.
- [10] Li Z, Zhang T, Wang Y Q, *et al.* Achromatic broadband super-resolution imaging by super-oscillatory metasurface[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, **12**(10): 1800064.
- [11] Li X, Chen L W, Li Y, *et al.* Multicolor 3D meta-holography by broadband plasmonic modulation[J]. *Science Advances*, 2016, **2**(11): e1601102.
- [12] Pu M B, Li X, Guo Y H, *et al.* Nanoapertures with ordered rotations: symmetry transformation and wide-angle flat lensing[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(25): 31471–31477.
- [13] Pu M B, Li X, Ma X L, *et al.* Catenary optics for achromatic generation of perfect optical angular momentum[J]. *Science Advances*, 2015, **1**(9): e1500396.
- [14] Luo X G, Pu M B, Guo Y H, *et al.* Catenary functions meet electromagnetic waves: opportunities and promises[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, doi: 10.1002/adom.202001194.
- [15] Luo X G. *Engineering Optics 2.0: A Revolution in Optical Theories, Materials, Devices and Systems*[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [16] Li X, Pu M B, Zhao Z Y, *et al.* Catenary nanostructures as compact Bessel beam generators[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20524.
- [17] Wang Y Q, Pu M B, Zhang Z J, *et al.* Quasi-continuous metasurface for ultra-broadband and polarization-controlled electromagnetic beam deflection[J]. *Scientific Reports*, 2016, **5**: 17733.
- [18] Guo Y H, Yan L S, Pan W, *et al.* Scattering engineering in continuously shaped metasurface: an approach for electromagnetic illusion[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30154.
- [19] Guo Y H, Huang Y J, Li X, *et al.* Polarization-controlled broadband accelerating beams generation by single catenary-shaped metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(18): 1900503.
- [20] Zhang F, Zeng Q Y, Pu M B, *et al.* Broadband and high-efficiency accelerating beam generation by dielectric catenary metasurfaces[J]. *Nanophotonics*, 2020, **9**(9): 2829–2837.
- [21] Liu K P, Guo Y H, Pu M B, *et al.* Wide field-of-view and broadband terahertz beam steering based on gap Plasmon geodesic antennas[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 41642.
- [22] Tan X H. Anomalous scattering-induced circular dichroism in continuously shaped metasurface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(1): 87–91.
- [23] Wang D P, Hwang Y, Dai Y M, *et al.* Broadband high-efficiency chiral splitters and holograms from dielectric nanoarc metasurfaces[J]. *Small*, 2019, **15**(20): 1900483.
- [24] Shi Z J, Zhu A Y, Li Z Y, *et al.* Continuous angle-tunable birefringence with freeform metasurfaces for arbitrary polarization conversion[J]. *Science Advances*, 2020, **6**(23): eaba3367.
- [25] Sell D, Yang J J, Doshay S, *et al.* Large-angle, multifunctional metagratings based on freeform multimode geometries[J]. *Nano Letters*, 2017, **17**(6): 3752–3757.
- [26] Dai C W, Yan C, Zeng Q Y, *et al.* A method of designing new Bessel beam generator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, **47**(6): 190190.  
代成伟, 闫超, 曾庆玉, 等. 一种新型贝塞尔光束器件的设计方法[J]. *光电工程*, 2020, **47**(6): 190190.
- [27] Li Y F, Ma H, Wang J F, *et al.* High-efficiency tri-band quasi-continuous phase gradient metamaterials based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40727.
- [28] Luo X G. *Catenary Optics*[M]. Singapore: Springer, 2019.
- [29] Zhang X H, Li X, Jin J J, *et al.* Polarization-independent broadband meta-holograms via polarization-dependent nanoholes[J]. *Nanoscale*, 2018, **10**(19): 9304–9310.
- [30] Khorasaninejad M, Chen W T, Zhu A Y, *et al.* Multispectral Chiral Imaging with a metalens[J]. *Nano Letters*, 2016, **16**(7): 4595–4600.
- [31] Zhang F, Pu M B, Luo J, *et al.* Symmetry breaking of photonic spin-orbit interactions in metasurfaces[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 319–325.
- [32] Zhang F, Pu M B, Li X, *et al.* All-dielectric metasurfaces for simultaneous giant circular asymmetric transmission and wavefront shaping based on asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(47): 1704295.
- [33] Li X, Ma X L, Luo X G. Principles and applications of metasurfaces with phase modulation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(3): 255–275.  
李雄, 马晓亮, 罗先刚. 超表面相位调控原理及应用[J]. *光电工程*, 2017, **44**(3): 255–275.
- [34] Deng Z L, Deng J H, Zhuang X, *et al.* Diatomic metasurface for vectorial holography[J]. *Nano Letters*, 2018, **18**(5): 2885–2892.
- [35] Deng Z L, Jin M K, Ye X, *et al.* Full-color complex-amplitude vectorial holograms based on multi-freedom metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30**(21): 1910610.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Wu L, Tao J, Zheng G X. Controlling phase of arbitrary polarizations using both the geometric phase and the propagation phase[J]. *Physical Review B*, 2018, **97**(24): 245426.
- [39] Li Z L, Chen C, Guan Z Q, *et al.* Three-channel metasurfaces for simultaneous meta-holography and meta-nanoprinting: a single-cell design approach[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, **14**(6): 2000032.
- [40] Wang B, Dong F L, Feng H, *et al.* Rochon-prism-like planar circularly polarized beam splitters based on dielectric metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(5): 1660–1664.



- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Li S Q, Li X Y, Wang G X, *et al.* Multidimensional manipulation of photonic spin hall effect with a single-layer dielectric metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(5): 1801365.
- [45] Arbabi A, Horie Y, Bagheri M, *et al.* Dielectric metasurfaces for complete control of phase and polarization with subwavelength spatial resolution and high transmission[J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, **10**(11): 937–943.
- [46] Zhou H Q, Sain B, Wang Y T, *et al.* Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(5): 5553–5559.
- [47] Zhao R Z, Sain B, Wei Q S, *et al.* Multichannel vectorial holographic display and encryption[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **7**: 95.
- [48] Zhang K, Yuan Y Y, Ding X M, *et al.* High-efficiency metalenses with switchable functionalities in microwave region[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(31): 28423–28430.
- [49] Yuan Y Y, Sun S, Chen Y, *et al.* A fully phase-modulated metasurface as an energy-controllable circular polarization router[J]. *Advanced Science*, 2020, **7**(18): 2001437.
- [50] 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**(1): 4186.
- [51] Chen J Y, Zhang F, Zhang M, *et al.* Radially polarized Bessel lens based on all-dielectric metasurface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(11): 180124.  
陈俊妍, 张飞, 张明, 等. 基于介质超表面的径向偏振贝塞尔透镜[J]. *光电工程*, 2018, **45**(11): 180124.
- [52] Xu Y H, Li Q, Zhang X Q, *et al.* Spin-decoupled multifunctional metasurface for asymmetric polarization generation[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(11): 2933–2941.
- [53] Gao Y J, Xiong X, Wang Z H, *et al.* Simultaneous generation of arbitrary assembly of polarization states with geometric-scaling-induced phase modulation[J]. *Physical Review X*, 2020, **10**(3): 031035.
- [54] He Q, Zhang F, Pu M B, *et al.* Monolithic metasurface spatial differentiator enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Nanophotonics*, 2020, doi: 10.1515/nanoph-2020-0366.
- [55] Zhou J X, Qian H L, Chen C F, *et al.* Optical edge detection based on high-efficiency dielectric metasurface[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(23): 11137–11140.
- [56] De Galarreta C R, Alexeev A M, Au Y Y, *et al.* Nonvolatile reconfigurable phase-change metadevices for beam steering in the near infrared[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(10): 1704993.
- [57] Chu C H, Tseng M L, Chen J, *et al.* Active dielectric metasurface based on phase-change medium[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, **10**(6): 986–994.
- [58] Chen Y G, Li X, Sonnefraud Y, *et al.* Engineering the phase front of light with phase-change material based planar lenses[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8660.
- [59] Choi C, Lee S Y, Mun S E, *et al.* Metasurface with nanostructured Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> as a platform for broadband-operating wavefront switch[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(12): 1900171.
- [60] Li J X, Kamin S, Zheng G X, *et al.* Addressable metasurfaces for dynamic holography and optical information encryption[J]. *Science Advances*, 2018, **4**(6): eaar6768.
- [61] Yin X H, Steinle T, Huang L L, *et al.* Beam switching and bifocal zoom lensing using active plasmonic metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, **6**(7): e17016.
- [62] Zhang M, Pu M B, Zhang F, *et al.* Plasmonic metasurfaces for switchable photonic spin-orbit interactions based on phase change materials[J]. *Advanced Science*, 2018, **5**(10): 1800835.
- [63] Nemati A, Wang Q, Hong M H, *et al.* Tunable and reconfigurable metasurfaces and metadevices[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2018, **1**(5): 180009.
- [64] Zhang F, Xie X, Pu M B, *et al.* Multistate switching of photonic angular momentum coupling in phase-change metadevices[J]. *Advanced Materials*, 2020, **32**(39): 1908194.

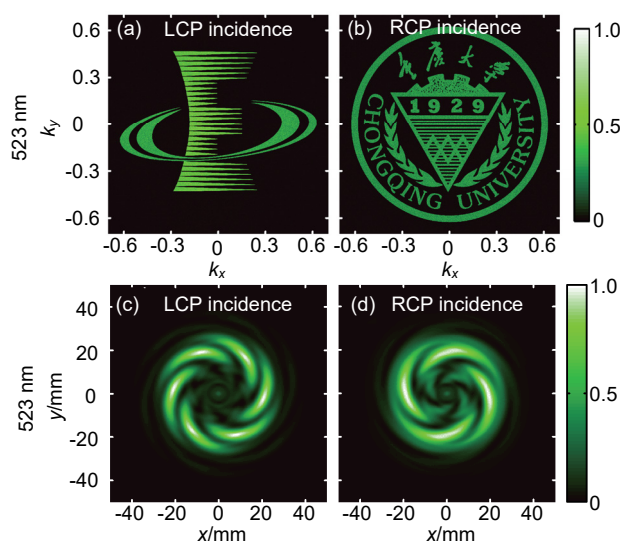
# Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions

Zhang Fei<sup>1</sup>, Guo Yinghui<sup>1,2</sup>, Pu Mingbo<sup>1,2</sup>, Li Xiong<sup>1,2</sup>, Ma Xiaoliang<sup>1,2,3</sup>, Luo Xiangang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>National Institute of Defense Technology Innovation, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 100071, China



Optical hologram and OAM generation based on asymmetric PSOI

**Overview:** It is well known that photons carry not only polarization-dependent spin angular momentum but also space-dependent orbit angular momentum. Photonic spin-orbit interaction, which describes the coupling between spin and orbital angular momenta during the propagation of light, is an important phenomenon ignored by classical optics. In recent years, it has been found that this phenomenon can be significantly enhanced by artificial subwavelength structures and adjusted on demand. Traditional metasurfaces only support symmetric photon spin-orbit interactions, and there are limitations in conjugate symmetry, which makes it difficult to use different spin states for multifunctional integration, complex optical field regulation, information encryption, and storage. For example, orbit angular momentum beams generated by traditional metasurfaces mentioned above are always in pairs with opposite topological charges, and holographic images for two opposite spins are usually central symmetric. This conjugate symmetry causes fundamental limitations in energy efficiency and information fidelity for spin-selective multifunctional devices. The asymmetric photon spin-orbit interaction can decouple left and right circularly polarized light, which brings new opportunities for breaking the above-mentioned theoretical and application limitations. This review first introduces the principle and realization method of asymmetric photon spin-orbit interactions. Then, some representative applications and characteristics of asymmetric photon-spin-orbit interactions are introduced. For example, the first monolayer all-dielectric metasurface, simultaneously exhibiting the wavefront manipulation ability and giant circular asymmetric transmission more than four times greater than the previously reported monolayer metasurfaces, was experimentally demonstrated by asymmetric photon spin-orbit interactions. Furthermore, a monolithic metasurface spatial differentiator without 4-F systems was also experimentally demonstrated based on asymmetric photonic spin-orbit interactions, enabling edge detection systems with higher integration level and compactness. Finally, the challenges and prospects for future research directions of asymmetric photon spin-orbit interactions are outlined.

**Citation:** Zhang F, Guo Y H, Pu M B, *et al.* Metasurfaces enabled by asymmetric photonic spin-orbit interactions[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200366

Supported by National Natural Science Foundation of China (61975210, 61875253), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (2019371), and China Postdoctoral Science Foundation (2020M680153)

\* E-mail: [lxx@ioe.ac.cn](mailto:lxx@ioe.ac.cn)