

## 激光与光电子学进展

## 结构光束的制备(特邀)

张岩<sup>\*†</sup>, 南通<sup>†</sup>

首都师范大学物理系北京市超材料与器件重点实验室, 北京 100048

**摘要** 结构光束是指在空间和时间上“定制”的光场,其振幅、相位和偏振态在空间和时间上有着特殊的分布。近些年,结构光束的研究发展迅速,光学参量的特殊分布从特定的空间横向结构、纵向结构,发展到定制的时空结构。这种具有不同时空结构的光束为众多领域带来了突破,包括光学通信、光学传感、光学微操作、量子信息处理和超分辨率成像。因此,人们提出了许多方法,并制造了相关器件,通过调整光束的各种光学参量在空间域和时空域分布来生成结构化光束。本文主要介绍不同类型结构光束(包括空间结构光束以及时空结构光束)的制备方法,对已产生的结构光束进行了总结,并进一步讨论和展望了结构光束在未来的发展方向。

**关键词** 结构光束; 空间结构; 时空结构; 器件; 光学参量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232183

## Generations of Structured Light (Invited)

Zhang Yan<sup>\*†</sup>, Nan Tong<sup>†</sup>

Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University,  
Beijing 100048, China

**Abstract** A structural beam refers to a light field that is “customized” in both space and time, characterized by its unique distribution of amplitude, phase, and polarization state in both space and time. Recently, research on structured light beams has developed rapidly. This has led to the evolution of a special distribution of optical parameters from specific spatial transverse and longitudinal structures to customized spatiotemporal structures. This type of beam with different spatiotemporal structures has brought breakthroughs in many fields, including optical communication, optical sensing, optical micromanipulation, quantum information processing, and super-resolution imaging. Therefore, various methods have been proposed, and related devices have been manufactured to generate structured light beams by adjusting the distribution of various optical parameters of the beam in spatial and spatiotemporal domains. This study mainly introduces the preparation methods for different types of structured light beams, such as spatially structured and spatiotemporal structured beams. Therefore, it provides a comprehensive overview of the generated structured beams, along with a discussion and outlook on the future development direction of structured beams.

**Key words** structured light beam; spatial structure; spatiotemporal structure; device; optical parameter

## 1 引言

结构光束是指光的各种参量在空间和时间上具有特殊分布的光场,前者是指对光场的振幅(强度)、相位(波前)和偏振的控制,而后者是指对光场的时间和频谱的控制。早在 200 多年前,托马斯·杨的双缝干涉实验就展示了一维强度的结构光,即干涉条纹<sup>[1]</sup>。杨对条纹结构的观察证明了光的波动性质,条纹的密度和

方向都包含了重要的信息。裁剪光波的空间结构甚至时空结构,可以产生各种特殊的光束,如螺旋相位光束、贝塞尔光束、矢量光束、艾里光束、时空光束等。结构光束有诸多经典的应用,比如:利用贝塞尔光束在成像过程中可以得到更长的焦深<sup>[2]</sup>;利用涡旋光束可以在无线通信中增加更多的通道,提升通信系统的信息传输容量<sup>[3]</sup>;利用矢量光束聚焦可以得到更小的焦点<sup>[4]</sup>;等等。结构光束已经发展成为一个重要的研究

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2023-11-07; 录用日期: 2023-11-14; 网络首发日期: 2023-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(12174271)

通信作者: \*yzhang@cnu.edu.cn

<sup>†</sup>共同第一作者

领域,在光通信与数据传输<sup>[5]</sup>、光传感与测量<sup>[6]</sup>、光学操纵与操控<sup>[7]</sup>、量子信息处理<sup>[8-9]</sup>和超分辨率成像<sup>[10-11]</sup>等方面取得了许多进展。

结构光束因其结构不同,可以分为两类:空间结构光束和时空结构光束,不同类型的结构光束如图 1 所示。空间结构光束是具有空间非均匀分布/轨迹的光场,包括振幅分布型、相位分布型、偏振分布型,以及多参量混合型:振幅分布型分为横向和纵向,包括厄米高斯光束、贝塞尔光束、艾里光束、马丢光束、韦伯光束等;相位型主要是涡旋光束;而偏振分布型则主要是矢量光束,最典型的为径向偏振和角向偏振光束;而多参量混

合型则丰富了结构光束的自由度。时空结构光束因其在时空域中具有非均匀结构的独特性质,近年来成为一个重要的研究领域。本文对近些年来生成两类光束的工作进行总结和介绍:首先从无衍射光束出发介绍振幅分布型结构光束;其次介绍相位分布型结构光束,包括涡旋光束、完美涡旋光束、分数阶涡旋光束,以及复合涡旋光束;然后介绍偏振分布型结构光束,包括偏振横向非均匀分布和偏振纵向非均匀分布的结构光束;紧接着介绍多自由度结构光束;而后介绍不同时空光束。最后进行概括总结,并对结构光束在未来的发展及面临的挑战进行展望。

Structured light	Spatial structured light	Amplitude		Phase	Polarization	Multi-parameters
		Transverse	Longitudinal			
		Hermitian-Gaussian beam	Arbitrary trajectories	Vortex beam	Vector beam	Vector vortex beam
Spatiotemporal structured light	Spatiotemporal vortex		Toroidal vortex		Optical hopfion	

图 1 不同类型的结构光束

Fig. 1 Different types of structured light beams

## 2 空间结构光束

### 2.1 振幅分布

1987年,Durnin等<sup>[12-13]</sup>提出一种自由空间无衍射光束,即贝塞尔光束。理论上,该光束在无限自由空间传输时,与传输方向垂直的每个平面上光场分布相同,且电场强度的横向分布集中,在传输过程中主瓣宽度保持不变。同时,Durnin等利用一个圆形狭缝和一个会聚透镜实验证明了贝塞尔光束的无衍射传输特性。后来,随着激光技术的发展和研究人员对光束传输的深入理解,人们发现贝塞尔光束只是无衍射光束中的一种,无衍射光束还有艾里光束<sup>[14-16]</sup>、马丢光束<sup>[17-18]</sup>,以及韦伯光束<sup>[19-20]</sup>。这些无衍射光束因为自修复以及自加速特性,被应用于微粒操作、光学成像、光通信等领域。

为了实现光束传输轨道智能化、光斑多样化,人们

借助傅里叶变换系统,通过在频谱面对光场进行相位调制、振幅调制或者叠加,设计和构造这些无衍射、自加速的光束,并基于空间光调制器(SLM)和超构表面(由人工亚波长尺度天线阵列组成的二维材料)等器件实现<sup>[21-24]</sup>。1995年,Rosen等<sup>[25]</sup>利用SLM和傅里叶计算全息图实现了近轴任意焦线,所需的焦线由一系列连接的直线段表示,每个直线段由位于整个全息图的不同径向部分上的径向谐波函数实现。2004年,Zamboni-Rached<sup>[26]</sup>将一系列具有不同横向波矢分量的同阶贝塞尔光束同轴叠加,生成一种光学“冻结波”,波场的纵向强度模式可以在选定的间隔内控制,从而构造各种形状的稳定包络。这些稳定的光场可以应用于光学镊子中,它们可以在不同的位置捕获粒子或微小物体。2020年,Fan等<sup>[27]</sup>提出一种具有独立控制幅度和相位的单层电介质超透镜,实现了光场的轴向裁剪。

基于对光场复振幅的完全控制,根据优化的傅里叶谱编码方法设计和制造超透镜,从而构建具有任意预先

建立的轴向强度分布的非衍射场。图 2 展示了实验产生的具有轴向均匀和振荡强度的超小无衍射光场。

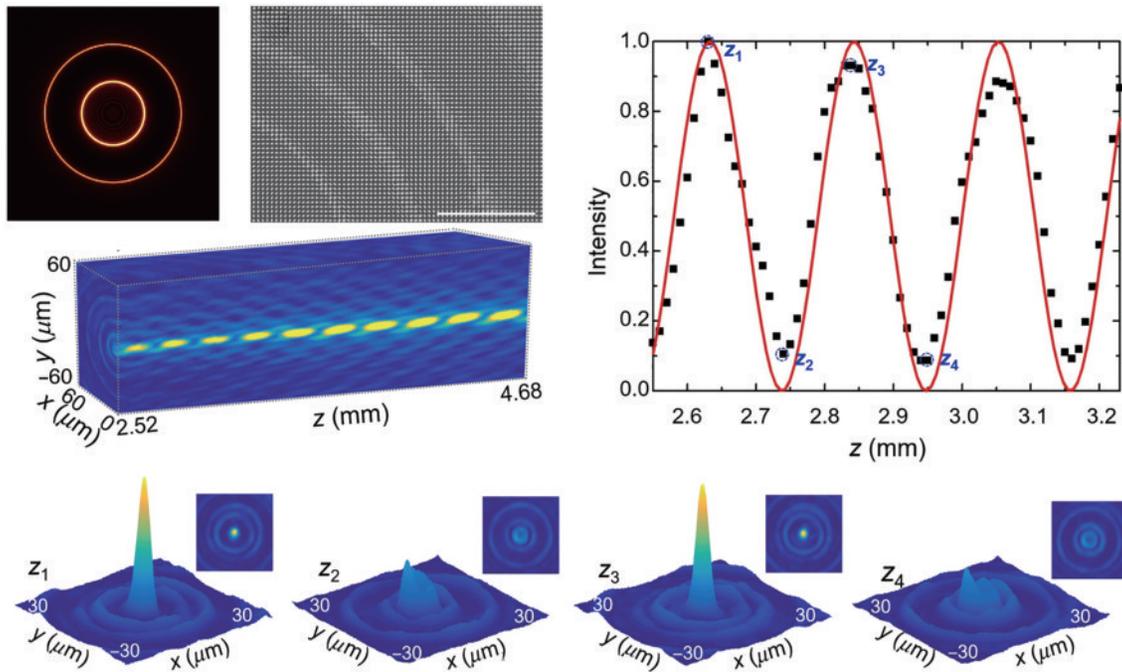


图 2 单层电介质超透镜生成具有轴向均匀和振荡强度的超小无衍射光场

Fig. 2 Generation of ultrasmall non-diffractive light fields with axially uniform and oscillating intensities using single-layer dielectric metalens

1979年, Berry等<sup>[28]</sup>以理想艾里函数的形式为无外场薛定谔方程找到了保持形状的加速解,开创性地提出自加速波包的概念。可能是由于实验制备艾里态的量子粒子很困难,或是因为艾里波本身具有无限范数,这个结果几十年来一直没有引起人们的注意。直到2007年, Siviloglou等<sup>[15]</sup>首次在光学领域实现了类艾里光束,这种光束可以长距离无衍射传播并横向加速。Siviloglou等的工作给研究人员在设计光束时提供了一个新思路,即将贝塞尔光束和艾里光束结合起来,生成一个光斑分布对称而且可以沿着弯曲轨道加速的光束。2009年, Jarutis等<sup>[29]</sup>利用传统的轴棱锥和全息图设计了一种绕传播轴旋转的零阶类贝塞尔光束,如图3(a)所示。次年,他们<sup>[30]</sup>利用SLM和轴棱镜实验证明了上述绕轴旋转的零阶类贝塞尔光束方案的可行性。使用轴棱锥和全息图创建这样的光束为精确和可控的微加工过程开辟了可能性,光束绕传播轴螺旋的能力有可能提高微加工技术的精度和多功能性。

为了将贝塞尔光束的抗衍射和自修复特性与任意轨迹传输的能力相结合,2012年, Chremmos等<sup>[31]</sup>基于光学焦散线方法,提出一种在自由空间中产生具有任意轨迹的类贝塞尔光束的方法。从自由空间中傍轴近似下光束的波动方程入手,求解预设传输轨迹在输入面的调制相位,引导射线产生任意焦曲线。曲线上的任何一点都是从输入平面上的一系列不同心的等值圆发射出的圆锥形射线束的顶点,并干涉形成沿预设路

径传播的类贝塞尔光束,原理如图3(b)所示。采用该方法, Zhao等<sup>[32-33]</sup>由预设轨迹反演设计二维相位调制函数,实现了遵循抛物线、蛇形、双曲线、双曲正割,甚至三维螺旋轨迹传输的无衍射自加速类贝塞尔光束。2016年, Wen等<sup>[34]</sup>基于叠加焦散方法和集成光学方式,通过在石英玻璃板上制造微光学结构来对入射光进行空间相位和幅度调制,实现了光束沿自由空间中任意椭圆螺旋轨迹的传输,如图3(c)所示。这些光束的轨迹可调性使其对各种应用(例如光学捕获和操纵)具有吸引力。

使用SLM生成艾里光束的现有方法存在的问题,包括操作带宽窄、成本高、衍射效率低和积分能力有限等。超构表面的出现为光场调控提供了一个新手段,可根据需要进行灵活设计。2016年, He等<sup>[35]</sup>设计并制作了C形阵列的环形艾里全息超构表面器件,通过同时调节太赫兹光波的振幅和相位,生成自聚焦的环形艾里光束。利用太赫兹全息成像系统和 $z$ 扫描的实验测量方法,对所生成的太赫兹环形艾里光束光场进行相干探测。图4(a)显示了所设计的全息超构表面样品,插图为样品局部的光学显微镜图,图4(b)为用于表征所生成的环形艾里光场的强度分布的实验装置。图4(c)展示了0.8 THz光谱分量在样品出射面处的光强分布,可以看出,中心环的强度最大,其外面包围着两个强度较弱的同心圆环。为了研究艾里光束的传播特性,提取了传播方向上0.8 THz艾里光束沿 $x-z$ 截面

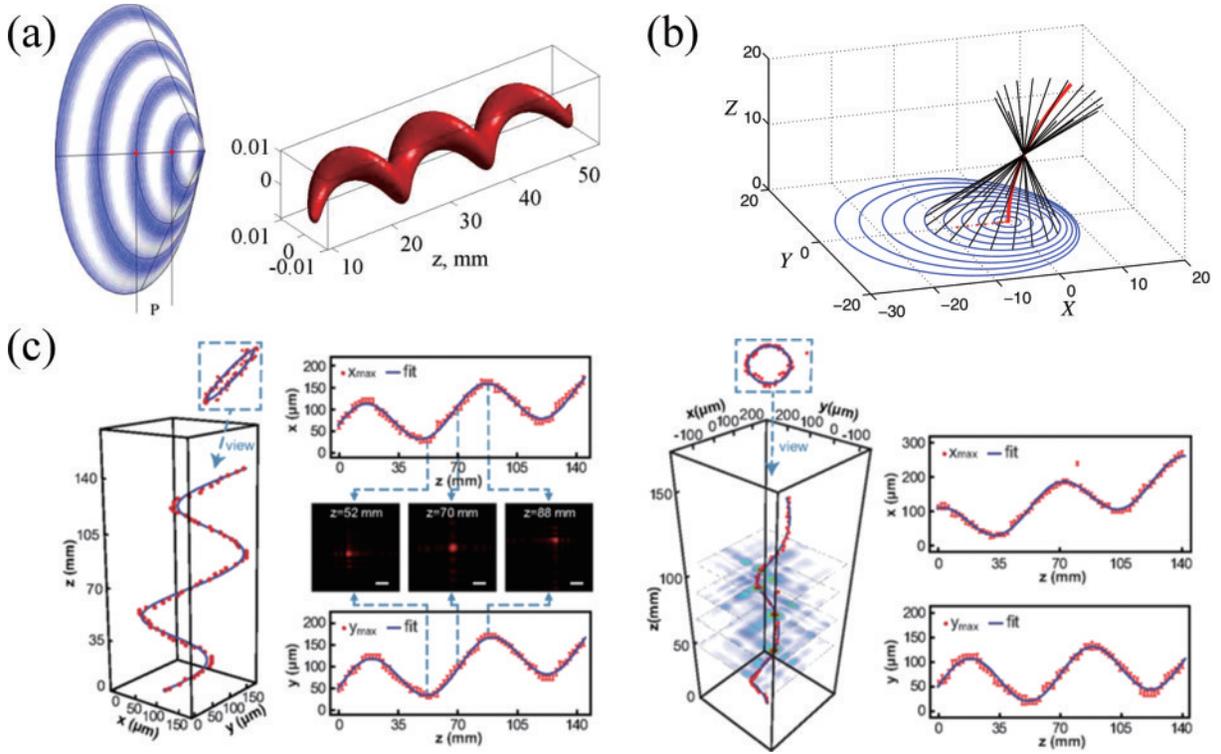


图3 类贝塞尔光束的生成。(a)具有周期 $P$ 的衍射光学元件以及衍射光学元件后面的零阶类贝塞尔光束的轨迹;(b)输入平面上扩展的圆发出的光线在指定的焦曲线上相交;(c)二维正弦光束和基于一维正弦光束的螺旋光束的实现  
 Fig. 3 Generation of Bessel-like beam. (a) Diffractive optical element with the period  $P$  and the track of the zero-order Bessel beam peak behind the diffractive optical element; (b) rays emitted from expanding circles on the input plane intersect on the specified focal curve; (c) realization of a 2D sine beam and a helical beam based on the 1D sine beam

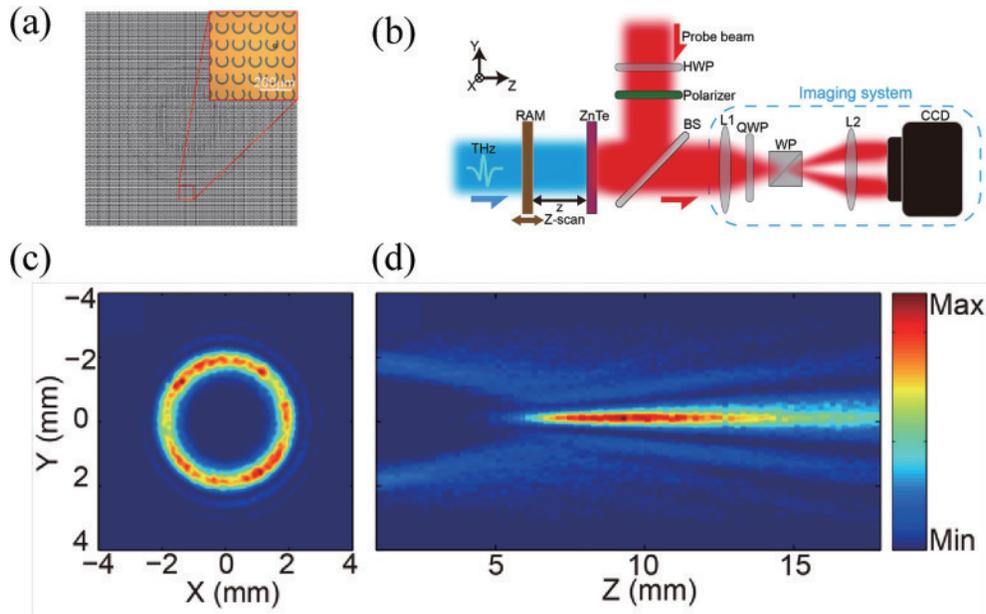


图4 太赫兹环形艾里光束的产生和表征。(a)设计的环形艾里元全息图,插图部分为显微镜下光学图像;(b)用于表征所生成的环艾里场的强度分布的实验装置;(c)实验上获得的样品出射面0.8 THz光谱分量强度分布图;(d)实验中太赫兹环形艾里光束在 $x-z$ 平面上传播的垂直视图  
 Fig. 4 Generation and characterization of terahertz ring-Airy beam. (a) Designed ring-Airy meta-hologram with a partial optical image in the inset; (b) experimental setup for characterizing the intensity distribution of the generated ring-Airy field; (c) experimental intensity distributions on the initial plane at a frequency of 0.8 THz; (d) vertical view of the THz ring-Airy beam propagation on the  $x-z$  plane from the experiment

的纵向振幅,如图 4(d)所示。不难发现,随着传播距离的增大,艾里光束光环的半径逐渐减小并最终会焦于一点,表现出良好的自聚焦效应。

虽然基于超构表面的方法提高了带宽和集成能力,但仍存在诸如超短工作距离和对光束参数的控制有限等局限性。2021 年, Wen 等<sup>[36]</sup>基于合成相位方法设计了超构表面生成自加速艾里光束,如图 5(a)所示,通过将三次相位分布和菲涅耳全息透镜的相位集成到单个超构表面中,增加自由度,从而能够有效地控制光束参数,包括焦距、光束宽度和传播距离,使

其适用于高分辨率成像和光学操作应用。同年,该课题组使用介电质超构表面在 550~710 nm 的宽带光谱范围内生成具有预定义任意轨迹的单个类贝塞尔光束以及携带轨道角动量(OAM)的类贝塞尔涡旋光束<sup>[37]</sup>,同时通过将单个加速类贝塞尔光束的相位与达曼光栅的相位叠加,生成了类贝塞尔光束阵列,这些光束有非线性抛物线和余弦振荡轨迹,如图 5(b)所示,数值孔径高达 0.79,使类贝塞尔光束的宽度降至接近衍射极限的尺度即 234 nm,丰富了自加速光束的多样性。

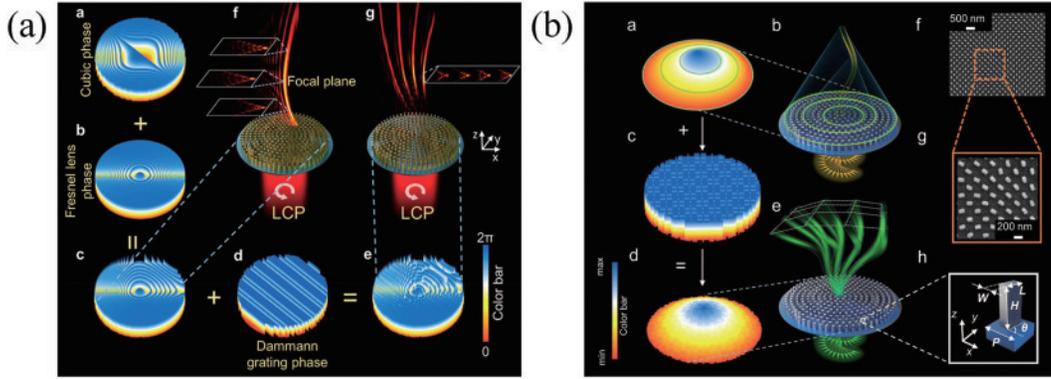


图 5 基于合成相位方法生成单个和阵列自加速光束。(a)产生二维艾里光束的简单和合成相位分布和合成相位全介电超构表面原理图;(b)叠加相位分布,用于产生单余弦振荡类贝塞尔光束的全介电超构表面,以及此类光束的阵列示意图

Fig. 5 Generation of single and array self-accelerating beams based on synthetic phase method. (a) Schematics of simple and synthetic phase profiles and synthetic-phase all-dielectric metasurfaces for generating twodimensional Airy optical beams; (b) schematics of added phase profiles, all-dielectric metasurfaces used to generate a single cosine-oscillation Bessel-like beam, and an array of such beams

除了对纵向传输轨迹的调控,对光束横向平面结构的塑造也是一个有趣的研究方向。厄米-高斯(HG)光束和拉盖尔-高斯(LG)光束分别是自由空间近轴波动方程在笛卡儿坐标系和圆柱坐标系下的精确解。它们形成了两个完整的正交模式基,在这些正交模式下任何近轴光场都可以扩展,此外它们是稳定激光谐振器中的自然谐振模式<sup>[38]</sup>。作为HG和LG光束之间的连续过渡,因斯-高斯(IG)光束在椭圆坐标下形成了自由空间近轴波动方程的精确正交解族<sup>[39]</sup>。这3种高斯模式构成了高斯家族模式,如图 6(a)所示,它们具有多种横向模式,这使其在生物工程、粒子操纵和量子纠缠等领域的应用中具有独特性<sup>[40-43]</sup>。2015年, Ren 等<sup>[44]</sup>利用基于数字微镜器件(DMD)和超像素法编码的全息图直接生成了任意模式的HG光束。图 6(b)展示了DMD用于控制HG光束的动态旋转结果,模式旋转通过连续加载相应的二值化全息图实现,DMD的高速切换能力使模式按照可控方式旋转。同年, Ren 等<sup>[45]</sup>使用DMD实验生成了不同模式的IG光束。实验中,DMD的快速切换能力使得实时观测IG光场随着光束椭圆度 $\epsilon$ 的变化成为可能,这也直观地反映了3种高斯模式光束之间的关系,如图 6(c)所示。在自由空间中直接产生高阶LG光束的方法有几种,但大多都

基于宏观光学元件,如q板<sup>[46-47]</sup>、SLM<sup>[48]</sup>和螺旋相位板(SPP)<sup>[49]</sup>。因此,用于光学集成的LG模式发生器的小型化对于各种实际应用来说是迫切的。2017年, Wang 等<sup>[50]</sup>利用由一系列不同取向角的矩形纳米孔组成的金属超表面产生具有非零径向指数的宽带高阶LG模式,实现了径向模式指数为10的LG模式,如图 6(d)所示。2021年, Mao 等<sup>[51]</sup>设计并实现了一个元转换器,将平面波光束在不同衍射角度下转换成不同阶的LG模式。宽带下的实验转换效果如图 6(e)所示,不同于以往一次只能产生一种LG模式,这项工作提出通过控制径向和角向阶数来操纵LG波束的方法,这为将通信通道扩展维度(即径向阶数)和解复用不同模式铺平了道路。

2022年, Chen 等<sup>[52]</sup>将生成多边形光束的k空间相位与菲涅耳全息透镜的相位相结合,并将其编码在全介质超构表面上,生成了具有多个自加速通道曲率比较大和横向尺寸小的针状场多边形光束,适用于高分辨率生物显微镜成像、活样本的光学镊子和激光处理等应用。2023年, 兰燕平等<sup>[53]</sup>从几何光学焦散角度出发,利用谱相位调制原理,生成任意无衍射结构光,如图 7所示。利用驻相近似和焦散线原理建立调制相位与目标光场横截面分布轨迹之间的数学模型,进而提

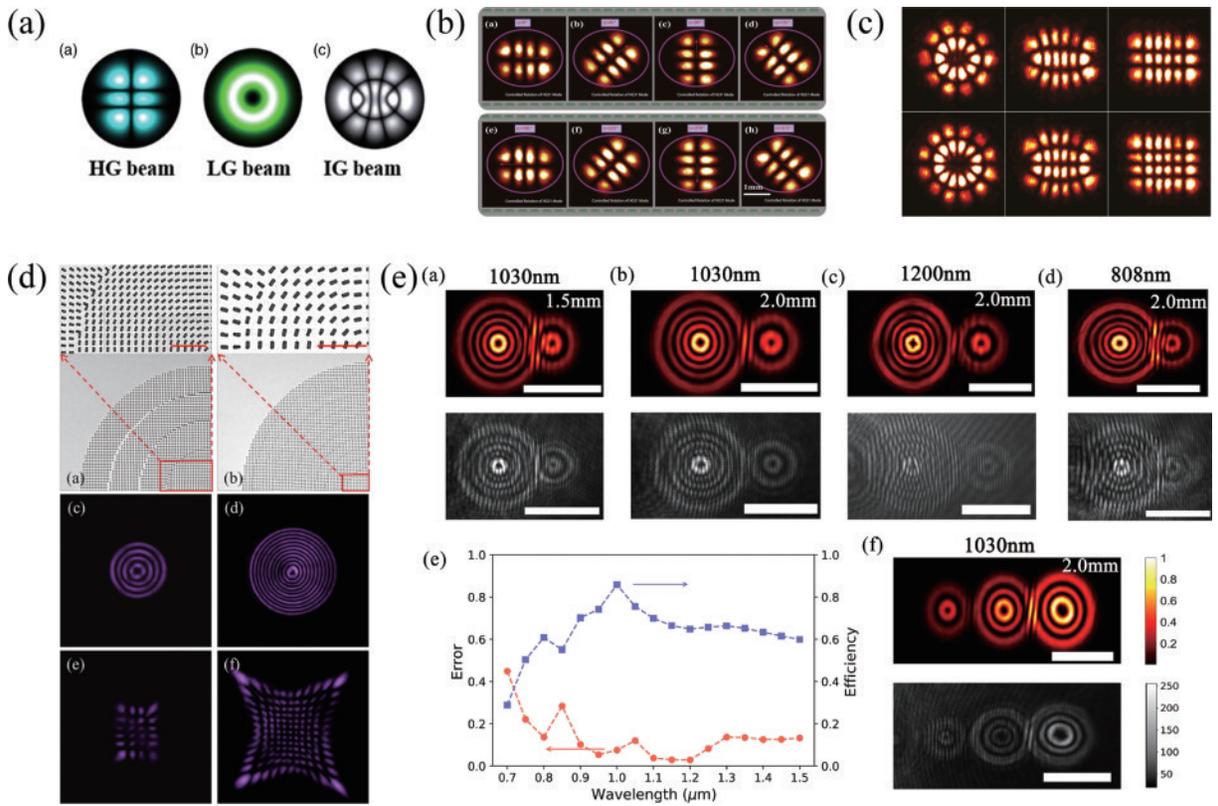


图 6 不同横向高斯模式光束生成。(a)高斯家族模式；(b) HG31 模式的受控旋转；(c)不同椭圆度的 IG 模式；(d)  $p=3$  和  $p=10$  的 LG 光束和对应的 HG 模式强度分布；(e)元转换器在宽带下的实验表现  
 Fig. 6 Generation of different transverse Gaussian modes. (a) Gaussian family of modes; (b) controlled rotation of HG31 mode; (c) the IG modes with different ellipticity; (d) intensity distributions of the LG beams with  $p=3$  and  $p=10$  and corresponding HG modes; (e) experimental results: broadband performance of meta-converters

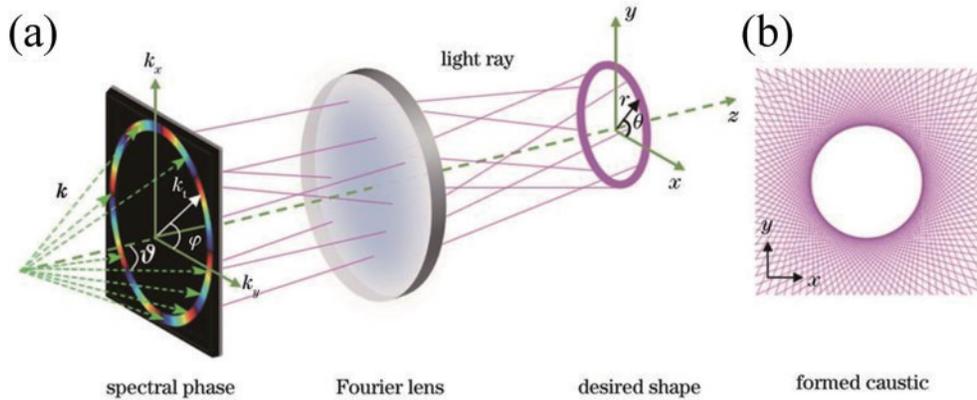


图 7 谱相位调制产生无衍射光束示意图。(a)谱相位调制方法；(b)具有特定形状分布的焦散线  
 Fig. 7 Schematic diagrams of generating non-diffracting beams via spectral phase modulation. (a) Spectral phase modulation; (b) caustics with specific structure

出一种相位叠加的改进算法,实现任意无衍射结构光的定制。该方法打破了经典的无衍射光束始终由波动方程的解构造的局限性,构造的无衍射光束极大地丰富了结构光束系列,并有可能应用于光学微加工、操纵和波前控制。

### 2.2 相位分布

相位是描述光场性质的重要物理量,相位函数决定了光束的波前结构,利用相位性质来命名光束是一

种常见的方法,例如平面波和球面波指波前结构分别为平面和球面的光束。通过对光束的相位进行调控,可以改变光束的场分布。相位奇点因其特殊的空间结构和强度特征而被长期关注。1989年,Coulet等<sup>[54]</sup>在研究激光模式时引入“光学涡旋”这一概念来描述此类奇异点。作为亥姆霍兹方程本征解,具有螺旋波前和相位结构的涡旋光束,展现了不同于传统球面波和平面波的强度分布及动力学特性。1992年,Allen等<sup>[55]</sup>的

研究表明,涡旋光束的光子携带了 OAM,该 OAM 可以转移给微观粒子,驱动粒子转动,被形象地称为光学扳手。此外,涡旋光束 OAM 还可以作为信息的载体,从而应用于光通信领域。由于理论上涡旋光束的 OAM 具有无限的取值,因此这种信息编码方式能够极大地提高信息的容量。在过去的几十年里,各种各样的技术被提出来产生涡旋光束,包括传统光学元件<sup>[56-62]</sup>、数字设备<sup>[63-64]</sup>、光子筛<sup>[65-66]</sup>,以及最近的超构表面<sup>[67-70]</sup>。

自 1992 年光学涡旋光束产生后,各种方法相继发展,如图 8 所示<sup>[39]</sup>。1993 年,Beijersbergen 等<sup>[57]</sup>通过两

个称为模式转换器的柱面透镜实验产生这样的光束,通过在水平和垂直方向之间引入古伊相移可以直接将厄米高斯模式转换为任意阶的拉盖尔高斯模式,反之亦然。随着 Barnett 等<sup>[71]</sup>在 1994 年又证明了 OAM 只依赖于螺旋相位  $\exp(i\ell\varphi)$ ,简化了 OAM 的产生方式,只需要对光束的波前进行调制,让其具有  $\exp(i\ell\varphi)$  相位分布即可。同年,同样是 Beijersbergen 等<sup>[58]</sup>利用 SPP 产生螺旋波前激光束。2002 年,Biener 等<sup>[72]</sup>首次用几何相位随空间呈现螺旋变化的光学器件给光束加载螺旋波前,通过全息方式设计了具有双折射功能的亚波长周期性结构,从而产生 OAM 光束。

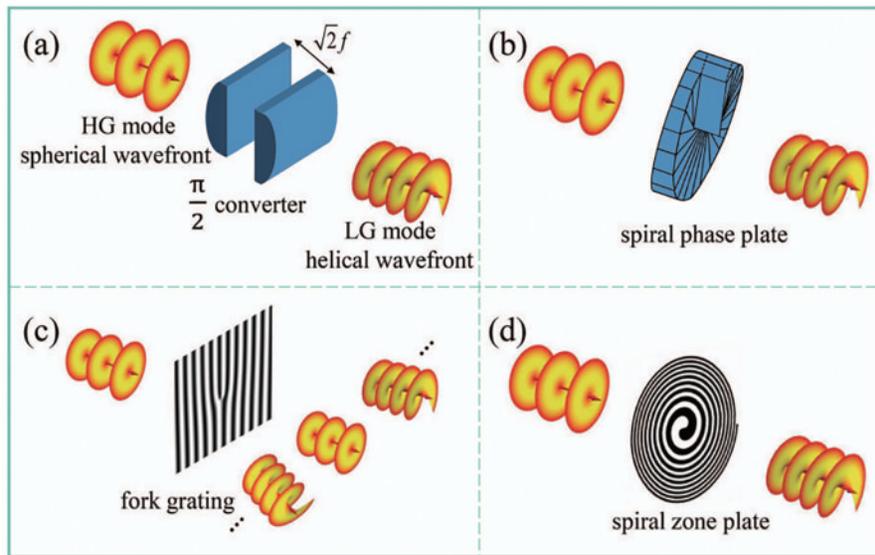


图 8 不同方法产生涡旋光束。(a)  $\pi/2$  转换器;(b) SPP;(c) 叉形光栅全息图;(d) 螺旋波带板

Fig. 8 Different methods to generate vortex beams. (a)  $\pi/2$  converter; (b) SPP; (c) fork grating hologram; (d) spiral zone plate

在传统方法中,通过传播效应来改变相位产生光学涡旋的器件体积庞大,限制了集成光学的进一步发展,因此必须使用更小尺寸的元件来为微型尺度的基于 OAM 的应用产生光学涡旋光束。超构表面彻底改变了光操纵的概念,入射光可以通过超薄超构表面赋予空间变化的突变相变,而不是通过传播效应获得所需的相变,为超薄光学器件的构建铺平了道路。2011 年,Yu 等<sup>[73]</sup>提出了反射和折射的广义定律,通过亚波长金属纳米天线在界面引入相位不连续生成了涡旋光束。近些年来,涡旋光束的研究如井喷一般,不再局限于普通涡旋光束,开始追求涡旋光束的可调性。

2013 年,He 等<sup>[74]</sup>利用 V 形天线结构,设计了超薄涡旋相位板,实现了具有不同拓扑电荷的太赫兹光学涡旋。基于表面等离子体共振效应,设计了 8 个互补的 V 形狭缝天线,实现了透射交叉偏振光的  $2\pi$  相移覆盖。图 9(a) 为天线在  $x$ - $y$  平面上的设计示意图,图 9(b) 为 8 个天线的示意图。每个天线单元由两个等效的矩形狭缝组成,单元周期为  $200\ \mu\text{m}$ 。通过调整狭缝长度( $h$ )、狭缝间夹角( $\theta$ ),以及 V 形天线平分线与  $y$  轴夹角( $\beta$ ),可以实现散射场的相位调制。计算出不同

阶数的涡旋相位板所需的相位分布,并将相位值 8 量化,根据相位分布选取天线填充在对应的位置。图 9(c)、(d) 分别为拓扑荷数  $l$  为 2 和 3 时的天线排布,图 9(e)、(f) 为对应的实验结果,图 9(g)、(h) 为理论模拟结果,与实验结果一致。

上述方法生成的涡旋光束存在一个共同局限,即产生的漩涡的中心暗空的大小强烈依赖于它的拓扑电荷。事实上,在许多与捕获和操纵小粒子有关的光学涡流应用中,人们希望同时提供一个大的拓扑电荷和一个小的暗空心。2013 年,Ostrovsky 等<sup>[75]</sup>引入了完美涡旋光束的概念,其暗空心半径不取决于拓扑电荷,并用液晶 SLM 生成了这样的涡旋光束。而后研究人员基于几何相位元件、傅里叶变换光学系统或紧密聚焦结构获得这种光束。2016 年,Fu 等<sup>[76]</sup>用一种全息光栅,生成了一个完美的光学涡旋阵列,该研究证明了完美光学涡旋阵列中每个点的衍射阶数和拓扑电荷的可控性。2017 年,Liu 等<sup>[77]</sup>设计了平面的 Pancharatnam-Berry(PB)相元来取代传统光学元件来产生完美涡旋光束,如图 10 所示。PB 相元方案为生成完美的涡旋光束、减小系统的占用体积,以及实现光学通信和显微

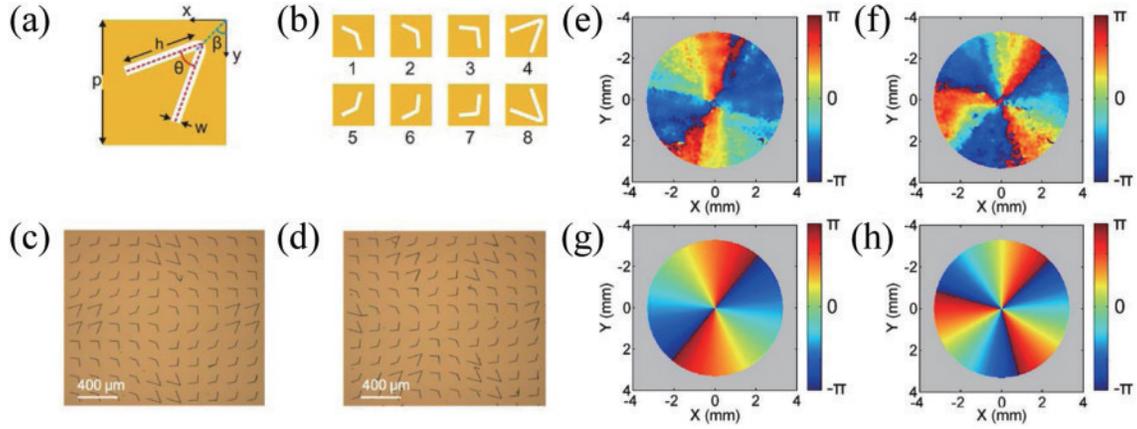


图9 利用超构表面在太赫兹波段生成不同阶数的涡旋光束。(a)互补的V形天线相位调制单元;(b)8种互补的V形天线结构,相移从 $-3\pi/4$ 到 $\pi$ ,相移间隔为 $\pi/4$ ;(c)(d)  $l=2$ 和 $l=3$ 时的涡旋相位板的中心部分照片;(e)(f)  $l=2$ 和 $l=3$ 时的实测涡旋相位分布;(g)(h)  $l=2$ 和 $l=3$ 时的模拟涡旋相位分布

Fig. 9 Generation of vortex beams with different orders in the terahertz range using metasurfaces. (a) A complementary V-shaped antenna phase modulation unit; (b) eight kinds of complementary V-shaped antenna structures corresponding to phase shifts from  $-3\pi/4$  to  $\pi$  with a  $\pi/4$  interval; (c) (d) the photographs of the central parts of two designed VPPs with  $l=2$  and  $l=3$ ; (e) (f) the measured vortex phase distributions with  $l=2$  and  $l=3$ ; (g) (h) the simulated vortex phase distributions with  $l=2$  and  $l=3$

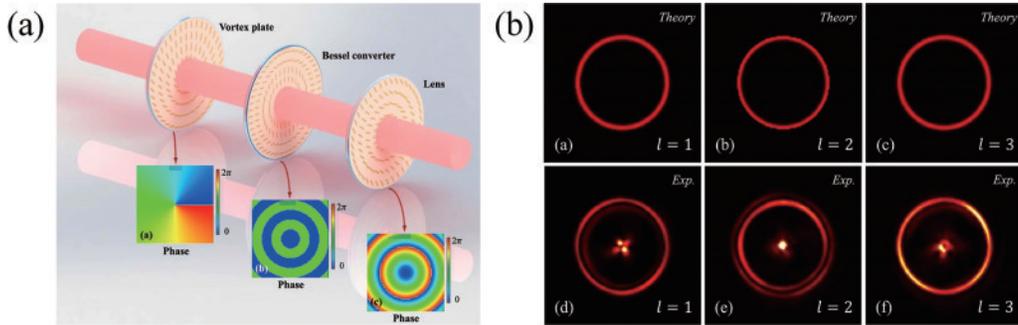


图10 用于产生完美涡旋光束的PB相元系统以及实验产生的完美涡旋光束

Fig. 10 PB phase element system for generating perfect vortex beams and experimental generation of perfect vortex beams

操纵系统的集成提供了更紧凑、更稳定的解决方案。

除了整数阶OAM光束外,分数阶拓扑电荷的涡旋光束在过去十年中也引起了人们的兴趣<sup>[78-86]</sup>。作为整数涡旋光束不可或缺的补充,分数涡旋光束具有独特的物理性质,例如径向缺口强度分布、由交替电荷涡旋链组成的复杂相结构,以及更复杂的OAM调制维度。近年来,分数涡旋光束被广泛用于光镊中复杂的微粒操纵、通信能力提高、图像的可控边缘增强和量子纠缠。

2018年,Yang等<sup>[87]</sup>通过一个简单的螺旋狭缝生成了可以纵向控制的分数贝塞尔高斯光束。平面波进入费马螺旋狭缝后产生分数贝塞尔高斯光束,如图11(a)所示,不同位置的透射光经过不同的光路,形成涡旋光束,其中,拓扑荷数 $l$ 随着传播距离 $z$ 的增加从整数阶变为分数阶。这种使用简单的螺旋狭缝纵向控制OAM的方法为光学捕获、量子通信和密集数据通信中的应用开辟了可能性。PB相位的局限是它只影响交叉偏振场,使同偏振部分处于未调制状态。2021年,Zhang等<sup>[88]</sup>提出一种非交错超构表面的范式转换视

角,具有5个金属层和4个基底,占据同偏振和交叉偏振通道并调制几何相位和传播相位。通过调整照射特定表面的入射光的偏振态生成了不同的整数和分数高斯涡旋光束,增强超构表面的信息容量,如图11(b)所示。分数涡旋除了具有圆形结构外,还可以通过坐标变换方法实现椭圆结构。2018年,Li等<sup>[89]</sup>通过SLM产生分数阶椭圆涡旋光束,图11(c)为相位掩模的生成过程。可控的分数椭圆形完美涡旋具有多种模式,可以控制间隙的数量和位置,如图11(d)所示,为特定应用设计光场提供了额外的灵活性。

除了平面生成单个涡旋光束外,研究人员还对复合涡旋光束进行了研究。2017年,Yang等<sup>[90]</sup>提出了OAM选模原理,它揭示了旋转对称结构的对称性与产生涡旋场的OAM的对应关系,并设计了一种旋转对称结构的电子筛,生成同心电子涡旋光束。这种电子筛可以生成具有3个亮环( $l$ 为 $-11, 44$ 和 $55$ )的复合涡束,如图12(a)所示。2022年,Ming等<sup>[91]</sup>实验证明了一个单一的超构表面可生成复合涡旋光束,利用具有空间变化方向的金属纳米棒组成的几何超构表面实现

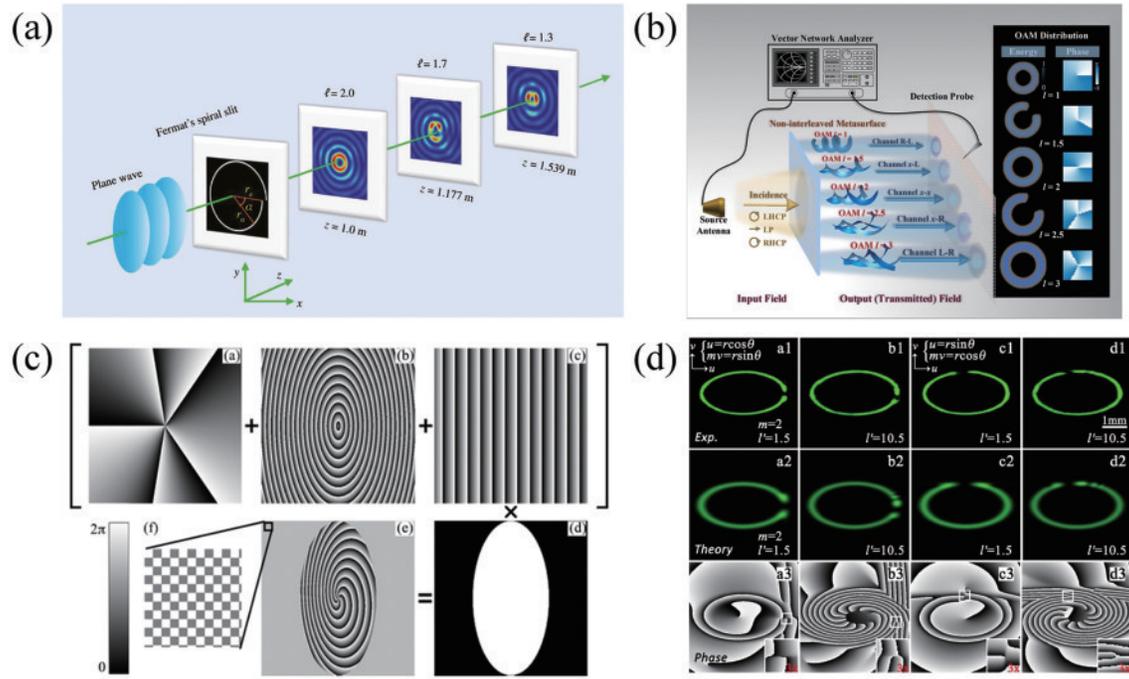


图 11 分数阶涡旋光束的产生。(a)用于实现反常贝塞尔涡旋光束的螺旋狭缝的几何形状和符号；(b)基于超构表面偏振调制的携带整数和分数阶模式的通用高斯涡旋光束生成原理示意图；(c)相位掩模的生成；(d)具有不同间隙位置的分数阶椭圆完美光学涡旋模式

Fig. 11 Generation of fractional order vortex beam. (a) Geometry and notation of the spiral slit for achieving an anomalous Bessel vortex beam; (b) schematic principle for metasurface-based versatile generation of OAM carrying integer and fractional modes engineered by polarization modulation; (c) generation of the phase mask; (d) fractional elliptic perfect optical vortex modes with different gap positions

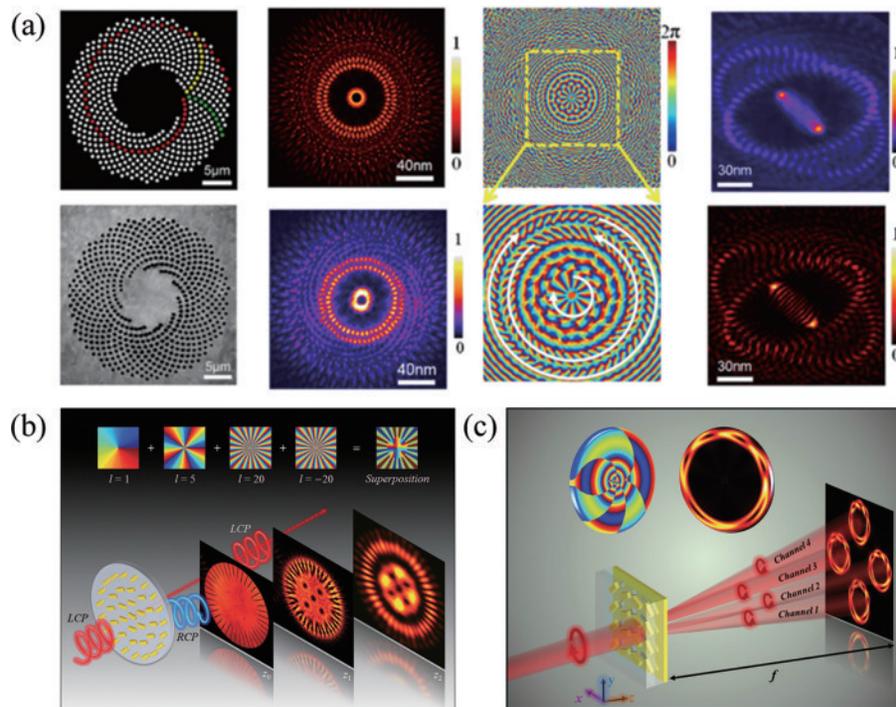


图 12 复合涡旋光束的产生。(a)同心电子涡旋束的产生及其拓扑电荷的测量；(b)使用单个超构表面生成复合涡旋光束的方法示意图；(c)在单个超构表面的多个通道中叠加嫁接完美涡旋光束的方法示意图

Fig. 12 Generation of composite vortex beam. (a) Generation of concentric electron vortex beams and the measurement of their topological charges; (b) schematic of the approach for composite vortex beams generation using a single metasurface; (c) schematic of the approach for the superposition of grafted perfect vortex beams in multiple channels with a single metasurface

具有不同圆偏振组合的多个涡旋光束的叠加,通过控制初始相位、振幅系数和入射偏振态,可以得到不同的复合涡旋光束,如图 12(b)所示。同年,Ahmed 等<sup>[92]</sup>通过嫁接光学涡旋光束的两个或多个螺旋相位轮廓,生成了一种多通道嫁接涡旋光束,如图 12(c)所示。这些研究无需复杂的光学系统,促进了集成光子学的发展。

### 2.3 偏振分布

偏振作为光场的基本属性之一,在光与物质相互作用中扮演着极为重要的角色。近年来,与均匀偏振光束相比具有独特特性的矢量光束引起了人们的广泛关注。

1972 年,Pohl 等<sup>[93-94]</sup>分别实验获得两种柱对称矢

量光场:径向偏振光和角向偏振光,如图 13(a)所示。随后 30 年间,理论实验发展缓慢。2000 年,Youngworth 等<sup>[95]</sup>发现紧聚焦柱矢量光场的强电场分量,即径向偏振光束可以被聚焦,在焦平面上产生强的纵向和非传播电场,从而产生比均匀偏振光束更锐利的焦斑。图 13(b)为径向偏振光紧聚焦光场中的径向分量光强和偏振态分布图,图 13(c)为径向偏振光紧聚焦光场中的纵向分量光强和偏振态分布图。另一方面,角向偏振光束可以被聚焦成一个空心的暗斑。这些奇特的特性对于许多应用都有帮助,例如粒子加速<sup>[96]</sup>、单分子成像<sup>[97]</sup>、近场光学<sup>[98]</sup>、信息编码<sup>[99-100]</sup>和非线性光学<sup>[101-102]</sup>,还适用于粒子的光学捕获和操纵<sup>[103]</sup>。

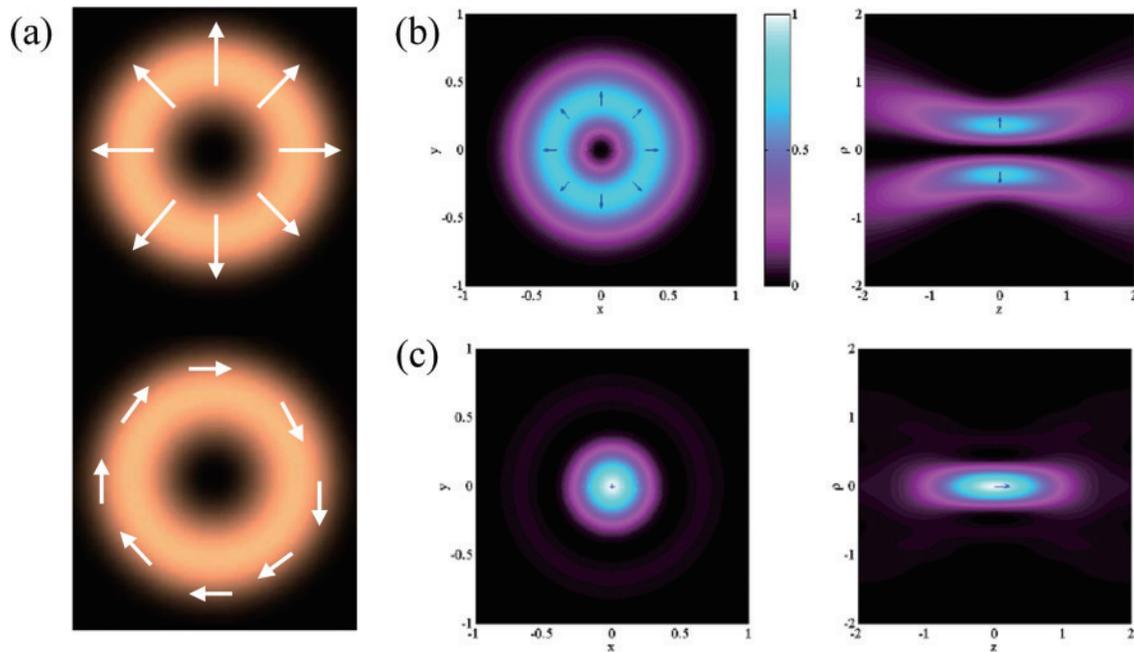


图 13 柱对称矢量光场及紧聚焦特性。(a)径向偏振光和角向偏振光;(b)径向偏振光紧聚焦光场中的径向分量光强和偏振态分布图;(c)径向偏振光紧聚焦光场中的纵向分量光强和偏振态分布图

Fig. 13 Cylindrically symmetric vector light field and tight focusing characteristics. (a) Radial polarized light and azimuthally polarized light; (b) radial component light intensity and polarization state distribution diagram in a tightly focused light field of radially polarized light; (c) radial polarized light in a tightly focused light field longitudinal component light intensity and polarization distribution diagram

产生矢量光束的方法可分为直接和间接两种。直接的方式是使用特殊设计或改进的激光谐振器输出新型激光<sup>[96,104-105]</sup>。间接方法是利用特殊设计的光学元件对传统激光器的输出光束进行波前重构<sup>[106-110]</sup>。虽然利用 SLM 可以有效地调控光束的振幅和相位分布,但是产生任意矢量光束仍然是一个挑战。2007 年,Wang 等<sup>[111]</sup>基于 SLM 和  $4f$  系统生成了任意矢量光束,如图 14(a)所示,利用 SLM 将常规光场分成两部分,同时携带空间变化的相位分布。利用  $1/4$  波片将两个不同路径的光束分别转换成左右圆偏振光,再利用光栅将两部分合成重构,生成任意矢量光束。图 14(b)为利用这一方法在不同初相位下生成的单模矢量光束。这种任意矢量光束方法有一个特征,即场截面上所有位

置处的偏振态都是线性的,创建的向量场基于右旋和左旋两个正交的圆偏振场(位于庞加莱球的南北两极)作为基向量,是一种局部线偏振向量场(位于庞加莱球的赤道),图 14(c)给出了庞加莱球和球上不同处的偏振态。2010 年,Wang 等<sup>[112]</sup>基于庞加莱球的思想,实现了一种具有混合偏振态的新型向量场。这种新型的向量场比局部线偏振的向量场更一般。此工作中实验装置与之前<sup>[111]</sup>类似,唯一区别是将  $1/4$  波片替换为半波片,通过改变两个半波片的方向可以实现不同对正交的线偏振基向量,从而构筑更一般的向量场分布。图 14(d)展示了 4 对正交线偏振基向量的混合偏振向量场,可以看到,线偏光和圆偏光混合出现在一个平面上。

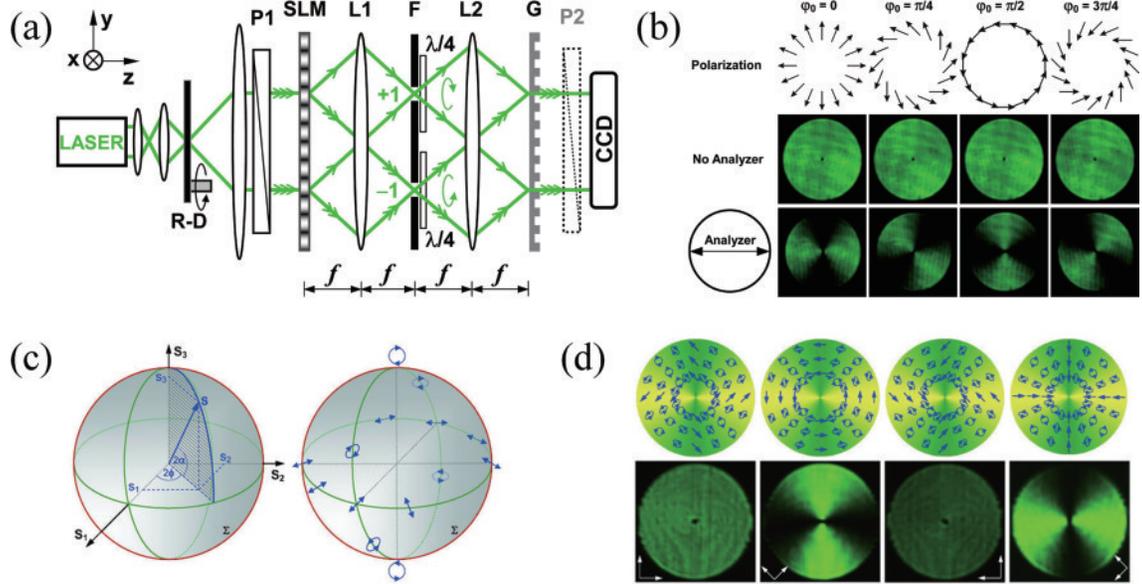


图 14 基于 SLM 生成矢量光束。(a) 实验装置示意图; (b) 不同初相位下生成的单模矢量光束; (c) 庞加莱球  $\Sigma$  和球上不同处的偏振态; (d) 实验生成的 4 个不同矢量场

Fig. 14 Generating vector beam based on SLM. (a) Schematic of experimental setup; (b) generated single-mode vector beams under different initial phases; (c) Poincaré sphere  $\Sigma$  and different states of polarization on Poincaré sphere; (d) the experimentally generated four different vector fields

2011 年, Milione 等<sup>[113]</sup>给出了矢量涡旋光束高阶偏振态的高阶庞加莱球和斯托克斯参数表示, 其中, 包括径向和角向偏振圆柱矢量光束。高阶庞加莱球是通过将平面波偏振自旋角动量的琼斯向量基自然地扩展到包含高维 OAM 的总光学角动量来构造的, 如图 15(a)、(b) 所示。后来, 研究人员用不同的方法实验生成了高阶庞加莱球矢量光束。标准的庞加莱球仅能描述标量偏振光场, 高阶庞加莱球可以表示矢量光场, 但是每一点的椭圆率相同, 仅仅是偏振椭圆的取向不同, 并不能描述杂化偏振。同时高阶庞加莱球交换南北极的拓扑荷数, 会得到完全不同的偏振, 因此必须用两个球才能完备描述。2015 年, Ren 等<sup>[114]</sup>提出了一种广义庞加莱球 (G 球) 和广义斯托克斯参数的几何表示, 统一了各种向量场的描述符。G 球如图 15(c) 所示, 与标准庞加莱球不同, G 球的径向维数不用于描述部分偏振场。将基本的琼斯向量基扩展到具有连续变化的椭圆度和高维 OAM 的一般向量基, 构造了 G 球。G 球中不同球壳的南北两极分别表示具有不同椭圆度和相反 OAM 的一对不同正交向量基, 高阶庞加莱球就是 G 球的两个特殊球壳。图 15(d) 为实验生成的 G 球中描述的矢量场。G 球可以表征和分析具有不断变化的椭圆度 (自旋角动量) 和更高维 OAM 的矢量场。G 球为描述各种矢量场提供了一个统一的框架, 增强了我们对各种光学系统中偏振特性的理解和控制。

以往对矢量光束的研究主要集中在横向的偏振分布上, 然而, 在一定的空间自由度下, 传播方向也是构建非均匀偏振分布的重要维度。近些年来, 在自由空

间中传播的具有纵向偏振变化的矢量光束引起了人们的广泛关注, 与传统矢量光束在横向偏振分布不均匀的情况相比, 对偏振的纵向分布进行控制的矢量光束在体积激光加工、纵向检测和体内微操作等领域的应用拓展了新的维度。

因为贝塞尔光束具有无衍射传输特性, 研究人员首先想到对其进行偏振纵向调制。2015 年, Moreno 等<sup>[115]</sup>制备了偏振态随传播距离变化的无衍射贝塞尔光束, 如图 16(a) 所示, 准直的光进入一个周期为  $d$  的径向衍射光栅, 所有的光线都以相同的角度  $\theta$  衍射, 平面  $z$  上的焦点主要是由半径为  $r$  的射线产生的。当入射光为线偏振时, 经过半波片的部分光线偏振态发生变化, 如图 16(b) 所示,  $45^\circ$  的线偏振光经过半波片后, 偏振态变为  $-45^\circ$ , 而未经过波片的部分偏振态保持不变, 不同偏振的光在  $z$  轴的不同位置聚焦, 形成了偏振态沿  $z$  轴的变化。图 16(c) 采用同样的思想, 线偏振光经过一个线性径向延迟后, 偏振状态将沿着线焦点连续变化。实验装置如图 16(d) 所示, 利用分屏的 SLM 与  $4f$  系统, 将两个正交偏振分量附加在 SLM 上的不同相位图进行单路调制。  $45^\circ$  线偏振光束照明 SLM 的一半, 只有平行于液晶定向器的偏振分量可以被调制, 光束通过透镜和镜子反射到 SLM 的另一半上。由于  $1/4$  波片的作用, 初始偏振发生反转。未调制偏振分量将通过 SLM 的另一半, 并经历与第一个通道不同的相位调制, 图 16(e) 为实验生成的偏振态随传播距离变化的无衍射贝塞尔光束。然而, 这种在传播过程中产生具有不同偏振态的无衍射贝塞尔光束的方法, 在光轴的不同位置的偏振是均匀的。2016 年, Davis 等<sup>[116]</sup>

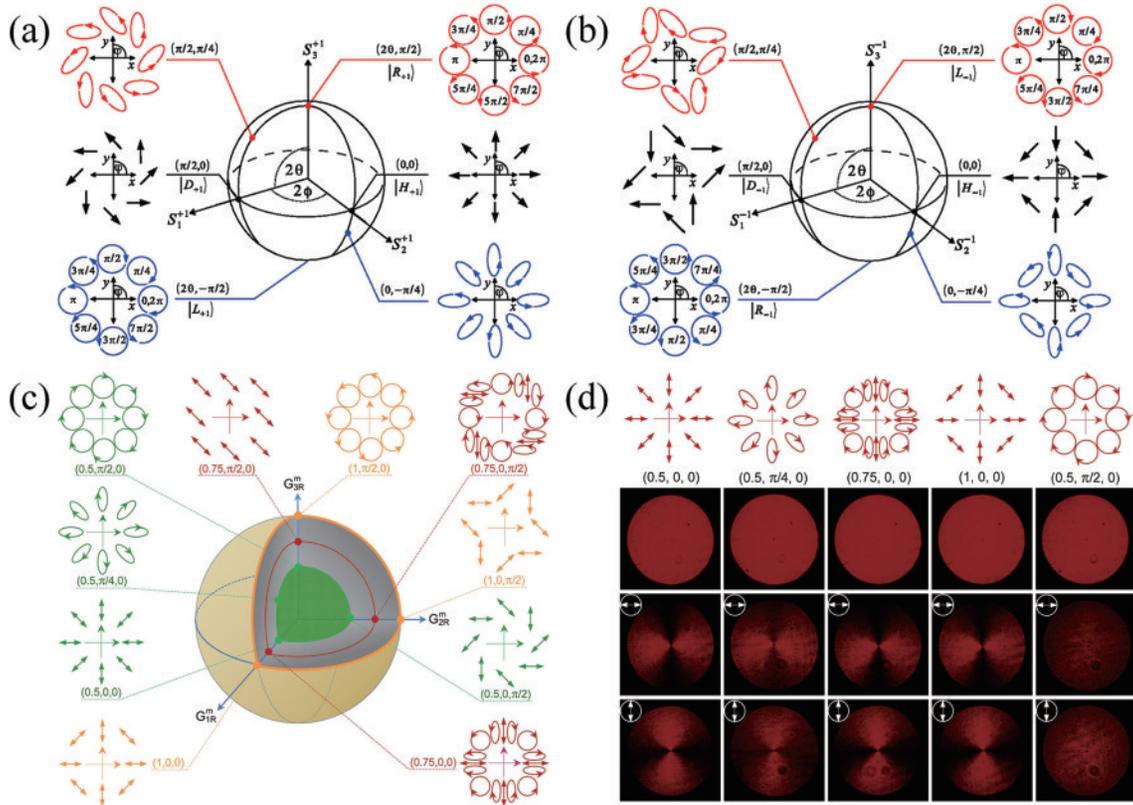


图 15 高阶庞加莱球和广义庞加莱球。(a)  $|\ell| \neq |\sigma|, \ell = +1$  的高阶庞加莱球; (b)  $|\ell| = |\sigma|, \ell = -1$  的高阶庞加莱球; (c)  $m=1$  时的广义庞加莱球; (d) 实验生成广义庞加莱球中描述的矢量场

Fig. 15 Higher-order Poincaré sphere and generalized Poincaré sphere. (a) Higher-order Poincaré sphere representation for  $|\ell| \neq |\sigma|, \ell = +1$ ; (b) higher-order Poincaré sphere representation for  $|\ell| = |\sigma|, \ell = -1$ ; (c) G sphere for  $m=1$ ; (d) experimentally generated vector fields described in the G sphere

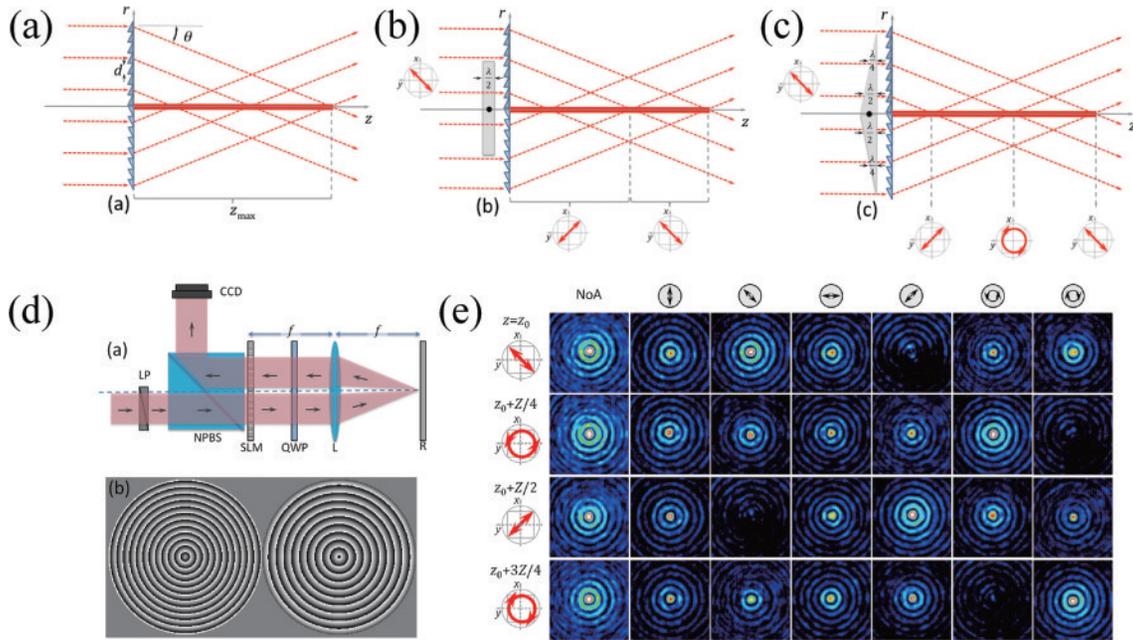


图 16 偏振随传播距离变化的无衍射贝塞尔光束的产生。(a) 轴棱锥的线聚焦; (b) 沿传播距离产生两个线性正交偏振态; (c) 偏振随传播距离连续变化的线聚焦; (d) 实验装置示意图; (e) 实验生成偏振随传播距离变化的无衍射贝塞尔光束

Fig. 16 Generation of nondiffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance. (a) Line focus with an axicon; (b) producing two linear orthogonal polarization states along the propagation distance; (c) line focus with continuous variation of the state of polarization along the propagation distance; (d) schematic of experimental setup; (e) experimental generation of nondiffracting Bessel beams with polarization variation along propagation distance

在之前的实验装置基础上进一步生成了在自由空间中传播过程中偏振分布可变化的高阶矢量贝塞尔光束。通过在两个偏振分量上加入不同的螺旋相位和径向相位,实现了具有可变拓扑荷和纵向偏振的矢量贝塞尔光束。同年,Fu等<sup>[117]</sup>提出了另一种实验装置,通过级联 SLM 的方法在自由空间中的贝塞尔重叠区产生具有空间偏振、沿光轴振荡的贝塞尔型矢量光束。其中,第一个全息轴锥镜产生一个正常的线偏振贝塞尔光束,第二个全息轴锥镜将其转换为空间振荡偏振光束。

然而,Moreno等产生的光束在其无衍射区域的轴向强度并不均匀。为了进一步拓展具有偏振纵向变化

的准贝塞尔光束的应用,需要改进其轴向强度分布。2016年,Li等<sup>[118]</sup>基于频谱调制方法,通过调控两个正交偏振分量的纵向振幅关系,生成了一种均匀轴向强度但偏振纵向变化的无衍射光束,其偏振态随传输可以沿着庞加莱球上任意轨迹变化。图 17(a)为准贝塞尔光束轴向强度分布的重构示意图。次年,Li等<sup>[119]</sup>在之前的研究基础上提出了一个广义模型,用于产生偏振态沿传播方向变化的矢量贝塞尔-高斯光束。通过设计两个正交偏振分量纵向变化的 PB 相位,创建了零阶和高阶矢量贝塞尔-高斯光束。2018年,Li等<sup>[120]</sup>通过两个共传播的光学冻结波的叠加,在厘米的空间间隔内纵向改变偏振状态,如图 17(b)所示。

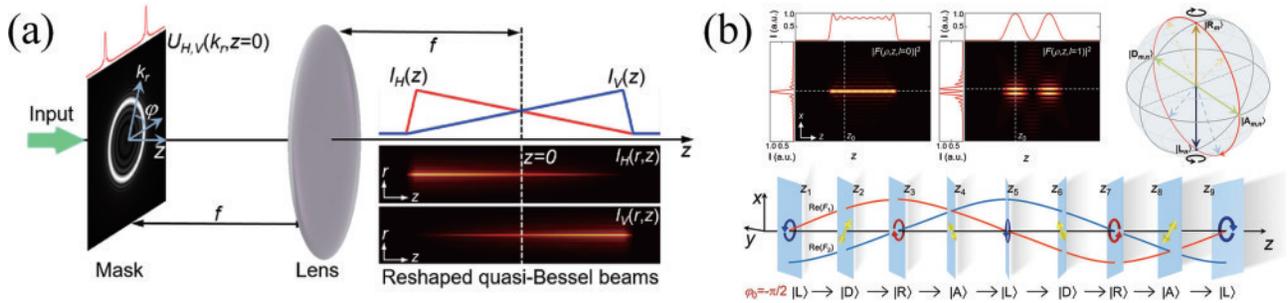


图 17 轴向强度均匀且偏振纵向变化的无衍射光束的产生。(a)重塑准贝塞尔光束的轴向强度分布的示意图;(b)构造偏振振荡光束的示意图

Fig. 17 Generation of nondiffracting beams with axial uniform intensity and polarization variation along the longitudinal axis. (a) Schematic of reshaping the axial intensity distributions of quasi-Bessel beams; (b) illustration of constructing polarization oscillating beams

除了利用 SLM 和空间掩模的方法,还可以用超构表面生成偏振随传播变化的结构光束。2019年,Zang等<sup>[121]</sup>提出并证明了一种超构透镜可以生成具有多个偏振旋转多焦点光束,如图 18(a)所示,利用 PB 相位原理,采取空间取向不同的硅柱,将单个焦点所需的透镜聚焦相位与偏振旋转相位叠加,而后拓展为多个焦点,制成不同偏振旋转方向的多焦超透镜,入射线偏振光的偏振轴在每个焦点处旋转。利用超构透镜的独特性质,证明了太赫兹偏振相关成像,为偏振相关成像开辟了一条新的途径。为了生成预先设计好的焦曲线和偏振分布,2021年,Wang等<sup>[122]</sup>利用金纳米棒结构实验证明了一种超透镜可以将光聚焦成具有预定偏振分布的任意形状的焦曲线,如图 18(b)所示。超构透镜的设计包括两个部分:焦曲线设计和偏振控制。从具有沿任意轨迹离散焦点的透镜出发,通过增加焦点的密度可以将其扩展为连续焦点曲线。此外,焦曲线上各点的偏振方向相对于入射光束的偏振方向可以任意旋转。该金属透镜可用于活细胞的光学捕获和操纵,从而对三维结构进行详细研究。

2022年,Li等<sup>[123]</sup>通过长焦深和多焦点超透镜完成正交圆偏振太赫兹波的相干叠加,并通过初始相位设计引入它们在传播方向上变化的相位差,从而获得多个平面上的连续变化或独立设计的矢量偏振分布,如

图 18(c)所示。同年,Zhang等<sup>[124]</sup>提出了产生任意三维矢量光场的一般概念,其中,自由空间中输出光的偏振态在横向和纵向上都发生变化。基于非对称光子自旋轨道相互作用的单层超构表面,在均匀标量光场(如线性偏振)的照射下,实验演示了纵向变化的柱状矢量光场,其中,输出光的偏振分布在角向偏振和径向偏振态之间连续且周期性地切换。2023年,Li等<sup>[125]</sup>利用超构表面生成了沿传播路径偏振变化的结构光束。超构表面可以将入射的线偏振太赫兹波分解成两个正交的圆偏振太赫兹波,它们具有不同的相位延迟。这两个圆偏振分量进一步复合,在  $z$  轴上的一定区域( $>1$  cm)内形成线偏振太赫兹波,如图 18(d)所示。两个圆偏振分量之间的相位差随着传播距离的变化而变化,从而导致组合的线偏振太赫兹电场持续旋转,实现了在超过 1 cm 的传播距离内对太赫兹波偏振态的纵向连续操纵,可应用于介质折射率传感。

上述方法大多是在空间上构造入射波形的两个正交偏振分量,从而在组合光束的偏振态中引入纵向偏振调制。这种技术的关键是假设入射偏振是事先已知的,如果入射光偏振发生变化,光学装置的原本功能就会丧失。2021年,Dorrah等<sup>[126]</sup>证明了一种形状双折射可以在不预先知道入射偏振的情况下沿传播方向赋予任意偏振。通过将入射波形转换为具有不同偏振态的

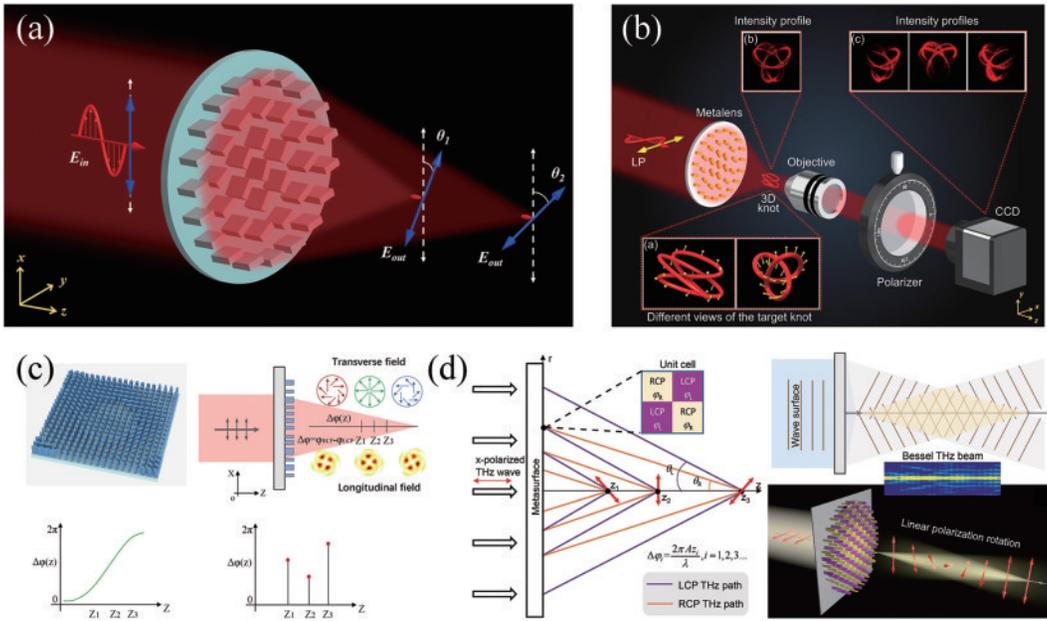


图 18 超构表面生成偏振随传播变化的结构光束。(a)具有偏振旋转多焦点超透镜示意图;(b)三维空间中具有自定义焦曲线和偏振分布的超透镜示意图;(c)基于超构表面的三维矢量光束生成示意图;(d)利用超构表面生成沿传播路径偏振变化的结构光束示意图

Fig. 18 Generation of structured light beams with polarization variation along propagation using metasurfaces. (a) Schematic of the multi-foci metalens with polarization-rotated focal points; (b) schematic of the metalens with customized focal curve and polarization profile in 3D space; (c) 3D vector beam generation based on metasurface; (d) schematic of structured light beams with polarization variation along the propagation path generated using metasurfaces

铅笔状光束的集合,这些光束沿光轴跳动,从而在光传播时局部地随意改变所产生的偏振,如图 19 所示。超构表面由具有亚波长间隔阵列结构双折射的介电纳米

柱组成。通过控制器件的组成和排列,超构表面可以将入射波形根据琼斯微积分和双相位全息转换为任意的输出。

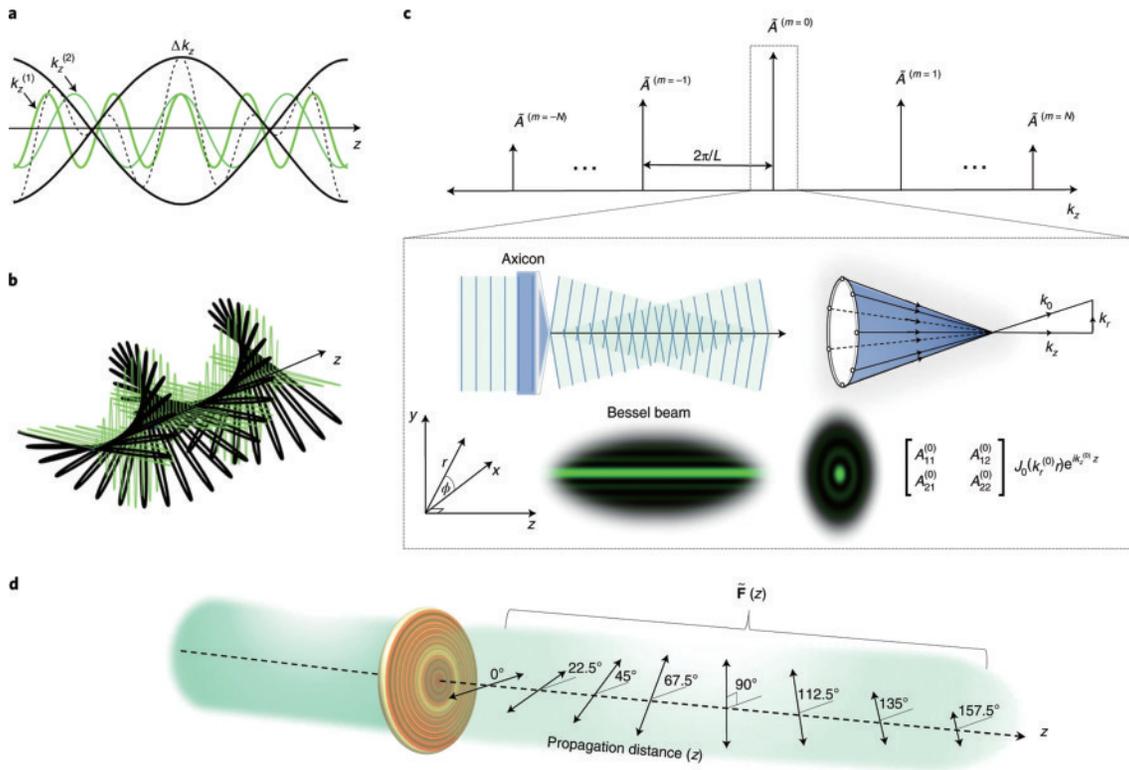


图 19 偏振纵向可变元件的概念示意图

Fig. 19 Concept of longitudinally variable polarization elements

### 2.4 多自由度调控的结构光束

除了对振幅、相位、偏振进行单独调控生成结构光束,近年来,对光的多个自由度同时调控生成复杂结构光束也引起了研究人员的兴趣。2018年,Guo等<sup>[127]</sup>利用交叉金属天线单层超构表面,对波长为400 μm的入射波的振幅和偏振同时调制,生成了径向偏振洛伦兹光束。产生径向偏振洛伦兹光束的方案如图20(a)所示,图中显示了一个交叉天线,长臂和短臂的长度分别为 $L$ 和 $W$ ,宽度分别为 $D_1$ 和 $D_2$ , $\theta$ 表示长臂相对于 $x$ 轴的方向角。当采用圆偏振光照明时,两臂的共振具有 $\pi/2$ 的相位差。同时,通过调整臂长和臂宽,沿着两条

臂共振的s模式和p模式的透过率也可以调节。这种方法相对简单,为在太赫兹波段生成复杂结构光场开辟了可能性。2016年,Liu等<sup>[128]</sup>使用非均匀双折射q板和SPP的组合在混合阶庞加莱球上产生了任意矢量涡旋光束。他们用q板将均匀偏振光束转换成矢量光束,矢量光束经过螺旋相板后转化为携带涡旋的矢量光束,即矢量涡旋光束。南北极分别为拓扑荷数是 $l$ 和 $m$ 的正交圆偏振本征态,点 $|H_{m,l}\rangle$ 和 $|V_{m,l}\rangle$ 分别表示水平和垂直偏振基。图20(b)显示了 $l=0$ 和 $m=2$ 对应的4个点的偏振和强度分布、实验装置,以及生成矢量涡旋光束的示意图。

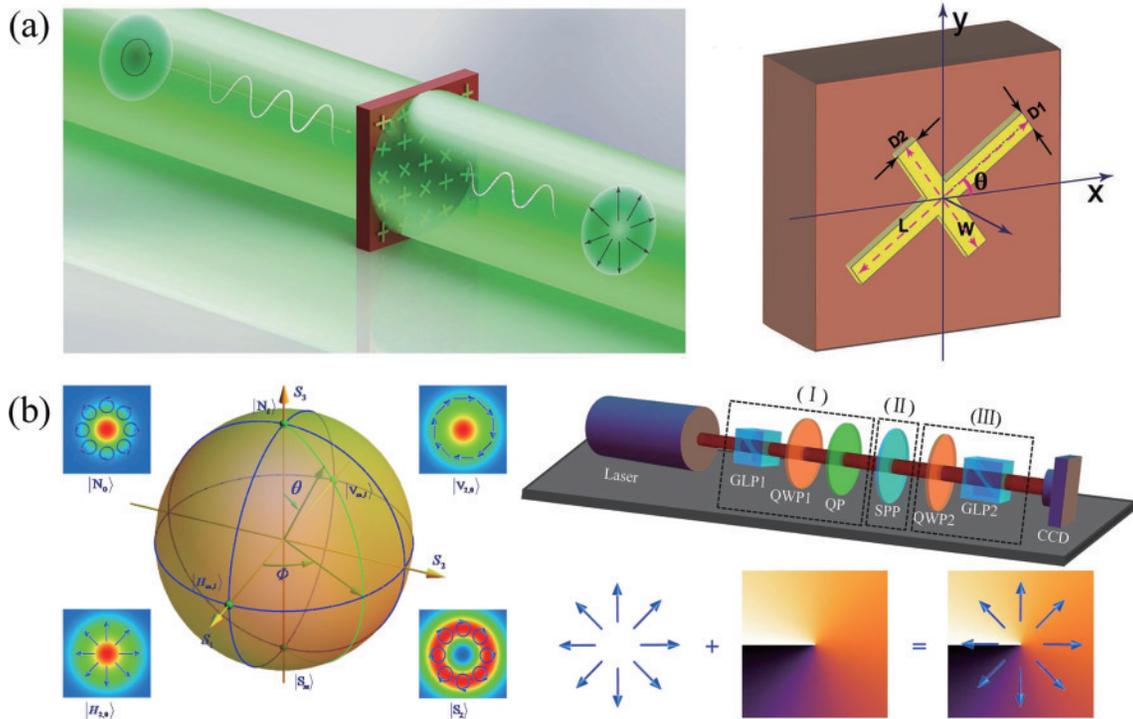


图 20 径向偏振洛伦兹光束和矢量涡旋光束的生成。(a)右旋圆偏振均匀平面波转化为径向偏振洛伦兹光束的原理示意图以及单元交叉天线示意图;(b)混合阶庞加莱球示意图,生成混合阶庞加莱球上任意矢量涡旋光束的实验装置以及生成矢量涡旋光束的示意图

Fig. 20 Generation of radially polarized Lorentz beams and vector vortex beams. (a) Schematic principle for converting a right circularly polarized uniform plane wave to a radially polarized Lorentz wave and schematic view of cross antenna in each unit; (b) schematic illustration of the hybrid-order Poincaré sphere, experimental setup to generate arbitrary vector vortex beams on the hybrid-order Poincaré sphere and schematic illustration of generating a vector vortex beam

2019年,Bao等<sup>[129]</sup>使用单层介电超构表面生成具有恒定环形强度分布、任意相位和偏振分布的完美矢量涡旋光束,提出了一种双纳米块单元,单元由两个相同的晶体硅纳米块组成,具有不同的位置和旋转角度,如图21(a)所示。在线偏振斜入射下,对双纳米块单元的4个几何参数进行调谐,可用于光的振幅、相位和偏振独立控制。采用遗传算法对任意振幅、相位和偏振状态下的几何参数进行求解。2021,Liu等<sup>[130]</sup>通过单层介电超构表面宽带生成了完美庞加莱光束。通过

改变入射光的自旋角动量,具有高空间采样分辨率的超构表面器件可以产生具有任意OAM的自旋复用完美涡旋光束,如图21(b)所示。通过两个完美涡旋光束的空间叠加,可以产生不同的完美庞加莱光束,其总角动量用混合阶庞加莱球来描述。基于纯相位调制的原理,所设计的二氧化钛型超构表面,对于一对正交圆偏振光,可以提供两种不同的相位分布并集成多种传统光学元件的功能,能够直接产生混合阶庞加莱球上对应的任意状态的完美庞加莱光束。

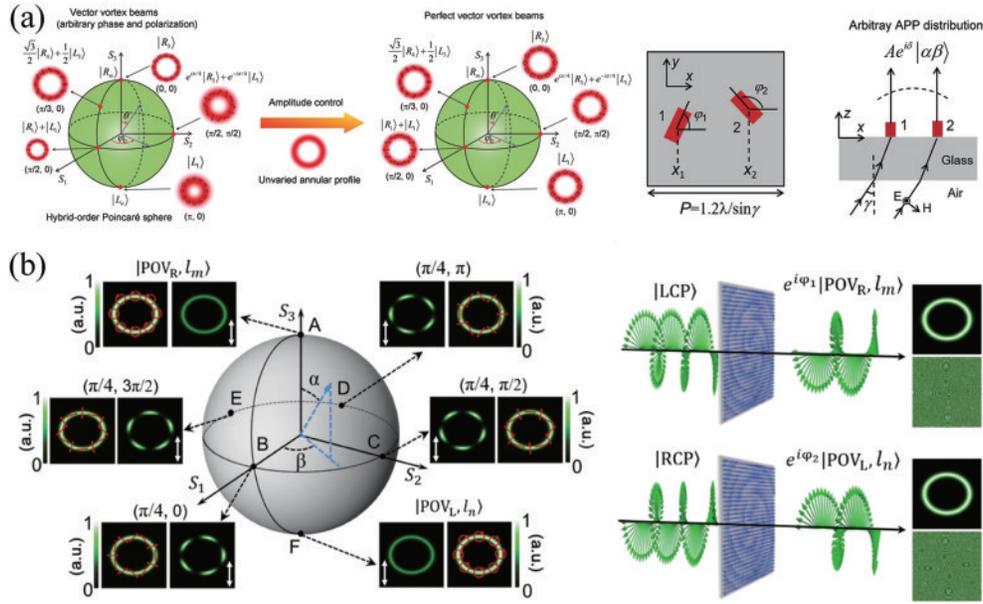


图 21 完美矢量涡旋光束和完美庞加莱光束的生成。(a)使用单层超构表面生成完美矢量涡旋光束;(b)通过介电超构表面生成广义完美庞加莱光束的原理图

Fig. 21 Generation of perfect vector vortex beams and perfect Poincaré beams. (a) Generation of perfect vector vortex beams using a single-layer metasurface; (b) principle of generation of generalized perfect Poincaré beams via dielectric metasurface

### 3 时空光束

光的时间整形在材料制造和超精密测量等领域发挥了重要作用。例如,锁定光脉冲的载波包络相位可以产生频率梳,这是一种用于超精密测量的强大工具<sup>[131]</sup>。另一方面,利用一般对称下的几何变换来揭示光的“隐藏”自由度的最新进展,光的空间塑造也引起了越来越多的关注,以适应不同目的任意定制光图案<sup>[132]</sup>。当时间整形遇到具有复杂时空不可分离性控制的空间整形时,时空结构光就发挥了作用,为光子科学和应用注入了新的活力。例如,环形时空不可分离脉冲的产生有望激发物质和自由空间中新形式的多极矩<sup>[133]</sup>。超快涡旋或矢量脉冲可用于制造螺旋微米或纳米结构以生产手性功能材料<sup>[134]</sup>。因此,在拓扑结构日益复杂的时空域中雕刻光代表了基础物理学和应用光学的最前沿。在过去的几年里,实验提出并演示了各种时空光束<sup>[135-140]</sup>。然而,由于光具有超高的速度,调整光束的时空结构并不容易。这里,我们简单介绍几种时空光束。

2019年,Rego等<sup>[141]</sup>从理论上预测并通过实验生成了具有一种称为光自扭矩的新特性的光束,在这种光束中,OAM含量随着脉冲本身的时间变化极快。该特性为创建结构光束开辟了新的途径,并为控制光与物质的相互作用提供了新的自由度,即自扭矩。图 22(a)为制备具有时变 OAM 的极紫外光束的示意图。将两个波长相同(800 nm)但 OAM 值不同的红外脉冲共线聚焦在氙气靶(HHG 介质)上,产生具有自扭矩的谐波光束。自扭矩 HHG 光束可以用于在阿秒时

间尺度和纳米空间尺度上操纵激光物质。

波传播中时间反转的概念,已在声学、水波和微波等低频现象中证明。但是,由于频率更高,对光学的要求不同,因为无法同时控制二维空间、时间/频率和偏振作为完全独立的自由度,将这些技术扩展到光学领域一直具有挑战性。2020年,Mounaix等<sup>[142]</sup>将具有两个正交偏振的全波长激光器输出的光通过脉冲整形器传播,从而在空间和光谱/时间域之间重新分布,在空间和时间的每个点生成具有任意振幅、相位和偏振的任意矢量时空光束。为了使用光谱脉冲整形器生成时空光束,采用特殊的多平面光转换系统来实现一维光斑阵列和一组二维厄米高斯模式之间的一维到二维空间转换<sup>[143-144]</sup>。这种一维到二维的转换可以被认为是一种查找表,即允许传统的多端口光谱脉冲整形器从一维列表中进行选择,该列表选择二维输出空间分量(厄密-高斯模式)。通过这种方式,三维光束可以映射到传统 SLM 的二维表面上,并生成任意矢量时空光束,原理如图 22(b)所示。

光学涡旋光束具有螺旋相位的零强度相位奇点。近年来,在时空中出现了具有相位奇点的光学涡旋。这种光涡旋称为时空光学涡旋。与涡旋光束的纵向 OAM 不同,时空涡旋具有横向 OAM,即 OAM 矢量垂直于光束传播方向。由于横向 OAM 较为复杂,对它的研究很少见。2020年,Chong等<sup>[145]</sup>生成了一种具有可控横向 OAM 的时空光学涡旋。由于 SLM 的  $x$ - $y$  平面实际上是  $k_x$ - $\lambda$  平面,因此在 SLM 上加载拓扑电荷为  $l$  的光涡旋光束的螺旋相位全息图等于在  $k_x$ - $\omega$  平面上施加拓扑电荷为  $-l$  的光涡旋光束的螺旋相位。然后

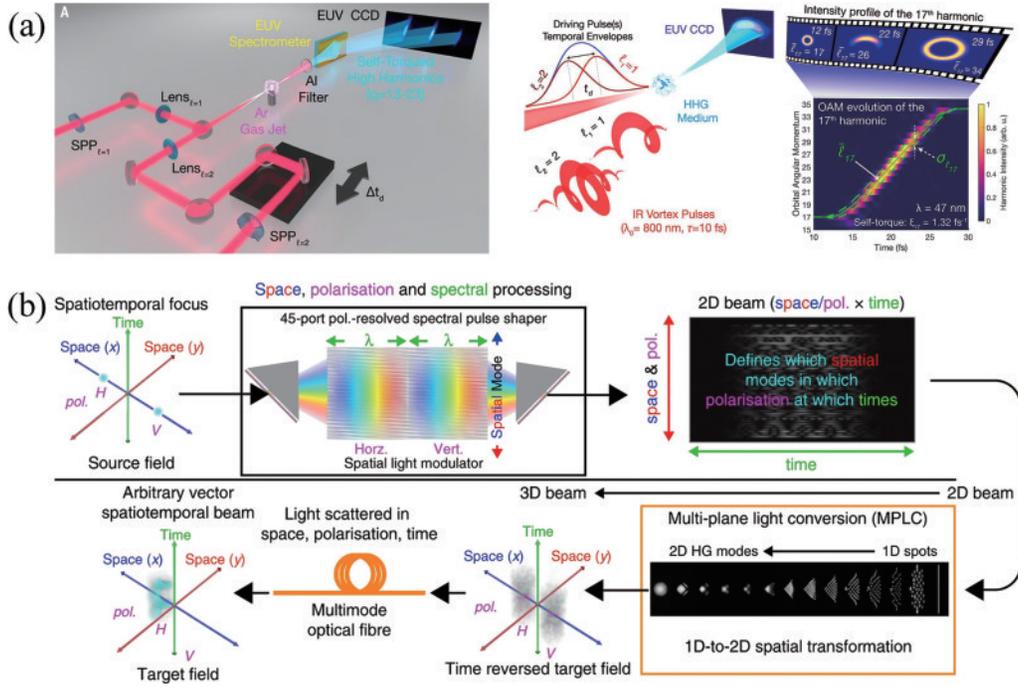


图 22 时变 OAM 和矢量时空光束的产生。(a)自扭矩产生和测量光束的实验方案;(b)将输入矢量时空场映射到任意矢量时空输出场的装置简化示意图

Fig. 22 Generation of time-varying OAM and vector spatiotemporal beams. (a) Experimental scheme for generating and measuring light beams with a self-torque; (b) simplified schematic of a device capable of mapping an input vector spatiotemporal field onto an arbitrary vector spatiotemporal output field

通过柱面透镜和衍射光栅的二维傅里叶变换将  $k_x-\omega$  平面上的光涡旋光束转换为  $x-t$  平面上的光涡旋光束,如图 23(a)所示。因此,成功地产生了具有横向 OAM 的时空光学涡旋光束。同年,该团队通过在空间频率平

面上引入一种更复杂的相位调制,成功地在一个波包中嵌入了两个具有不同横向 OAM 的时空涡旋,生成了一种具有时变横向 OAM 的波包<sup>[146]</sup>,如图 23(b)所示。这种波包内 OAM 的超快切换和调制可能被用于

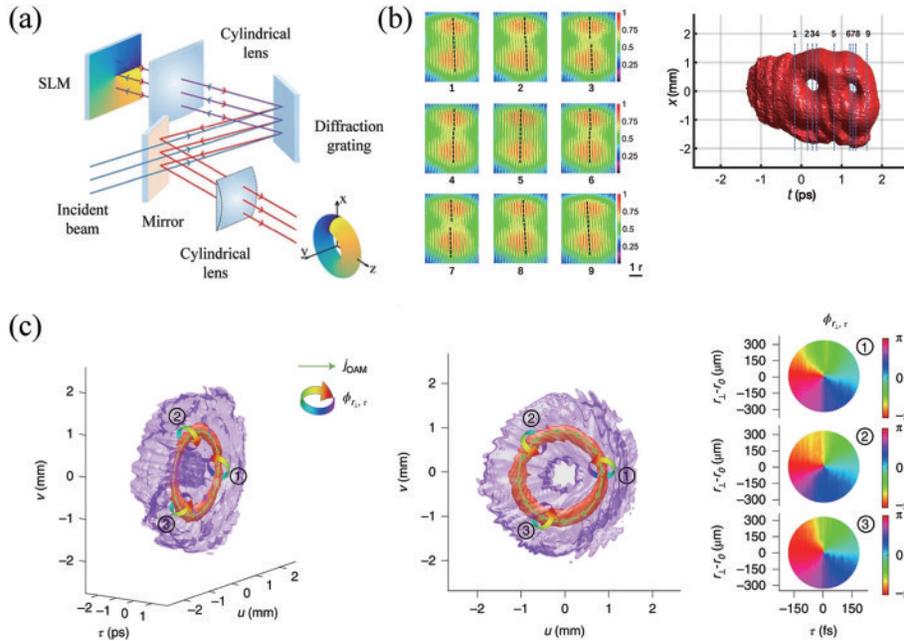


图 23 时空光学涡旋光束的产生。(a)产生时空光学涡旋的实验示意图;(b)时变 OAM 的超快时空波包的生成;(c)实验生成的光学涡环的强度和相位信息

Fig. 23 Generation of spatiotemporal optical vortex beams. (a) Experimental schematic for generating spatiotemporal optical vortices; (b) generation of ultrafast spatiotemporal wave packet embedded with time-varying OAM; (c) intensity and phase information of an experimentally generated photonic toroidal vortex

高速光通信和纳米结构的超快操作。2022 年,该团队<sup>[147]</sup>基于麦克斯韦方程组和光学保角变换,首次在理论上完整推导并在实验上实现了优美的光学涡环结构,如图 23(c)所示。光子环形涡旋的研究可以深入了解自然界中环形涡旋的行为,并在光与物质相互作用、光学操纵、光子对称性和拓扑,以及量子信息中找到应用。

与基于单波长的结构光不同,由于多个梳状线频率上承载的各种空间模式的时间相关干涉,时空光束和脉冲可以表现出独特的动态空间特性。这可以被视为生成具有可定制属性的动态光分布的“工具包”。

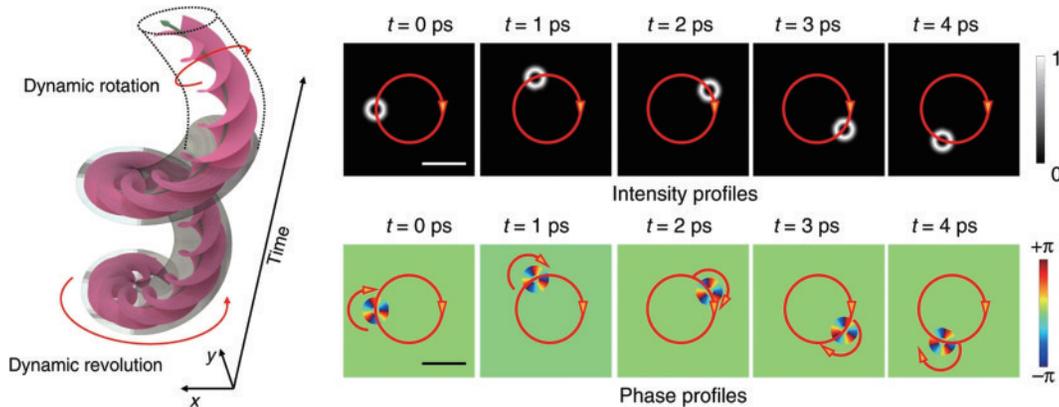


图 24 携带两种形式 OAM 的时空光束示意图

Fig. 24 Schematic of spatiotemporal beams carrying two forms of OAM

## 4 总结和展望

本文从结构光束的定义出发,介绍了不同类型的结构光束。从最初的干涉条纹到后来无衍射光束的振幅分布型结构光束,具有螺旋波前和相位结构的相位分布型结构光束,从柱对称矢量光场到任意矢量光束的偏振分布型结构光束,从单一型到多参量混合型结构光束,从空间结构光束拓展到复杂的时空光束,包括时变 OAM 光束、矢量时空光束、时空光学涡旋,以及动态时空光束。回顾了不同方案包括利用传统光学元件、SLM,以及超构表面等生成结构光束。传统的 SLM 生成结构光束的方法由于器件体积庞大、光路复杂,限制了集成光学的进一步发展。利用超构表面研究小尺寸、多自由度、可重构的光学器件生成复杂结构光束将是未来的一个趋势。被动超构表面缺乏在某些应用中所期望的 SLM 所提供的动态行为。例如,在传感或自由空间通信中,虽然有源超构表面可以缓解这个问题,但它们的空间分辨率和多波长响应仍然是目前及未来研究的主题。对于时空光场,除了具有结构相位的模式外,还可以进一步探索具有空间定制偏振态(例如矢量模式)的光束,以获得有趣的动态时空行为。为了实现更复杂的波包,有必要开发一种方法来控制光波包的幅度、相位,甚至偏振在时空上的三维方式。同时,开发精确测量光波包三维轮廓的技术也至

2020,Zhao 等<sup>[148]</sup>使用多个光学频率梳线产生包含两个独立 OAM 的时空结构光束。在给定的传播距离上观察时,光束可以携带两种类型的 OAM,如图 24 所示。这种光束是通过组合多条频率线产生的,每条线携带由单个频率线组成的复杂加权 LG 模式的  $\ell$  值和多个  $p$  值。通过选择适当的权重,动态频率和模式相关的相长和相消干涉产生具有空间偏移的 LG 模式,该空间偏移具有绕模式中心的旋转和绕中心轴的旋转。值得一提的是,这项研究的重要性在于有可能实现高达 99% 的模式纯度,并可以控制光束的螺旋相位和旋转速度,可用于生成具有更复杂动态特性的时空光束。

关重要。此外,对光与物质相互作用的全面理解也是未来的一大挑战。我们对物质的基本激发的理解仍处于早期阶段。结构光如光学涡旋光束和矢量光束,将为加强光场和物质之间的相互作用引入新的自由度。迄今为止,结构光束为强场物理在阿秒科学中的应用提供了新的机遇。

结构光束已经被应用于光学成像、光捕获和操纵、光通信和数据传输等领域,是在微观和纳米尺度上研究光与物质相互作用的强大和不可或缺的工具。结构光束作为光学领域的一个重要研究方向,将继续在各个领域展现出更多的应用潜力,随着技术的发展,我们期待看到更多关于结构光束的令人兴奋的新应用。

## 参 考 文 献

- [1] Young T. I. The Bakerian Lecture. Experiments and calculations relative to physical optics[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1804, 94: 1-16.
- [2] Lu R W, Tanimoto M, Koyama M, et al. 50 Hz volumetric functional imaging with continuously adjustable depth of focus[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9 (4): 1964-1976.
- [3] 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.
- [4] Zhan Q W, Leger J R. Microellipsometer with radial

- symmetry[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4630-4637.
- [5] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [6] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [7] He H, Friese M E, Heckenberg N R, et al. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(5): 826-829.
- [8] Leach J, Jack B, Romero J, et al. Quantum correlations in optical angle - orbital angular momentum variables[J]. *Science*, 2010, 329(5992): 662-665.
- [9] Zhang Y W, Agnew M, Roger T, et al. Simultaneous entanglement swapping of multiple orbital angular momentum states of light[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 632.
- [10] Kozawa Y, Matsunaga D, Sato S. Superresolution imaging via superoscillation focusing of a radially polarized beam[J]. *Optica*, 2018, 5(2): 86-92.
- [11] Yoshida M, Kozawa Y, Sato S. Subtraction imaging by the combination of higher-order vector beams for enhanced spatial resolution[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(4): 883-886.
- [12] Durnin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [13] Durnin J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1987, 4(4): 651-654.
- [14] Broky J, Siviloglou G A, Dogariu A, et al. Self-healing properties of optical Airy beams[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [15] Siviloglou G A, Christodoulides D N. Accelerating finite energy Airy beams[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(8): 979-981.
- [16] Siviloglou G A, Broky J, Dogariu A, et al. Observation of accelerating Airy beams[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [17] Gutiérrez-Vega J C, Iturbe-Castillo M D, Chávez-Cerda S. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(20): 1493-1495.
- [18] Alpmann C, Bowman R, Woerdemann M, et al. Mathieu beams as versatile light moulds for 3D micro particle assemblies[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26084-26091.
- [19] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C, Chávez-Cerda S. Parabolic nondiffracting optical wave fields[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(1): 44-46.
- [20] López-Mariscal C, Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C, et al. Observation of parabolic nondiffracting optical fields [J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2364-2369.
- [21] Xie Z W, Wang X K, Ye J S, et al. Spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 3347.
- [22] Wang G C, Zhou T, Huang J Z, et al. Moiré meta-device for flexibly controlled Bessel beam generation[J]. *Photonics Research*, 2022, 11(1): 100-108.
- [23] Liu S, Noor A, Du L L, et al. Anomalous refraction and nondiffractive Bessel-beam generation of terahertz waves through transmission-type coding metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(10): 1968-1977.
- [24] Chen W T, Khorasaninejad M, Zhu A Y, et al. Generation of wavelength-independent subwavelength Bessel beams using metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(5): e16259.
- [25] Rosen J, Yariv A. Snake beam: a paraxial arbitrary focal line[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(20): 2042-2044.
- [26] Zamboni-Rached M. Stationary optical wave fields with arbitrary longitudinal shape by superposing equal frequency Bessel beams: frozen waves[J]. *Optics Express*, 2004, 12(17): 4001-4006.
- [27] Fan X H, Li P, Guo X Y, et al. Axially tailored light field by means of a dielectric metalens[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(2): 024035.
- [28] Berry M V, Balazs N L. Nonspreading wave packets[J]. *American Journal of Physics*, 1979, 47(3): 264-267.
- [29] Jarutis V, Matijošius A, Di Trapani P, et al. Spiraling zero-order Bessel beam[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(14): 2129-2131.
- [30] Matijošius A, Jarutis V, Piskarskas A. Generation and control of the spiraling zero-order Bessel beam[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8767-8771.
- [31] Chremmos I D, Chen Z G, Christodoulides D N, et al. Bessel-like optical beams with arbitrary trajectories[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23): 5003-5005.
- [32] Zhao J, Zhang P, Deng D, et al. Observation of self-accelerating Bessel-like optical beams along arbitrary trajectories[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 498-500.
- [33] Zhao J Y, Chremmos I D, Zhang Z, et al. Specially shaped Bessel-like self-accelerating beams along predesigned trajectories[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(13): 1157-1169.
- [34] Wen Y H, Chen Y J, Zhang Y F, et al. Winding light beams along elliptical helical trajectories[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(1): 013829.
- [35] He J W, Wang S, Xie Z W, et al. Abruptly autofocusing terahertz waves with meta-hologram[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(12): 2787-2790.
- [36] Wen J, Chen L, Yu B B, et al. All-dielectric synthetic-phase metasurfaces generating practical airy beams[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1030-1038.
- [37] Wen J, Chen L, Chen X, et al. Use of dielectric metasurfaces to generate deep-subwavelength nondiffractive Bessel-like beams with arbitrary trajectories and ultralarge deflection[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(5): 2000487.
- [38] Siegman A E. *Lasers*[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986.
- [39] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Ince - gaussian beams [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 144-146.
- [40] Gather M C, Yun S H. Single-cell biological lasers[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(7): 406-410.
- [41] Reichert M, Haist T, Wagemann E U, et al. Optical

- particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(9): 608-610.
- [42] Rodrigo J A, Caravaca-Aguirre A M, Alieva T, et al. Microparticle movements in optical funnels and pods[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5232-5243.
- [43] MacDonald M P, Paterson L, Volke-Sepulveda K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. *Science*, 2002, 296(5570): 1101-1103.
- [44] Ren Y X, Fang Z X, Gong L, et al. Digital generation and control of Hermite-Gaussian modes with an amplitude digital micromirror device[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(12): 125604.
- [45] Ren Y X, Fang Z X, Gong L, et al. Dynamic generation of Ince-Gaussian modes with a digital micromirror device [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(13): 133106.
- [46] 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.
- [47] Ji W, Lee C H, Chen P, et al. Meta-q-plate for complex beam shaping[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25528.
- [48] Ohtake Y, Ando T, Fukuchi N, et al. Universal generation of higher-order multiringed Laguerre-Gaussian beams by using a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1411-1413.
- [49] Ruffato G, Massari M, Romanato F. Generation of high-order Laguerre-Gaussian modes by means of spiral phase plates[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5094-5097.
- [50] Wang Y M, Fang X Y, Kuang Z Y, et al. On-chip generation of broadband high-order Laguerre - Gaussian modes in a metasurface[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2463-2466.
- [51] Mao H D, Ren Y X, Yu Y E, et al. Broadband metaconverters for multiple Laguerre-Gaussian modes[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(9): 1689-1698.
- [52] Chen L, Kanwal S, Lu Y Z, et al. Broadband generation of accelerating polygon beams with large curvature ratio and small focused spot using all-dielectric metasurfaces [J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(6): 1203-1210.
- [53] 兰燕平, 胡俊涛, 孙卓, 等. 光学焦散线的任意无衍射结构光场调控[J]. *光学学报*, 2023, 43(13): 1326001.  
Lan Y P, Hu J T, Sun Z, et al. Manipulation of non-diffracting beams with arbitrary structures based on optical caustics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(13): 1326001.
- [54] Couillet P, Gil L, Rocca F. Optical vortices[J]. *Optics Communications*, 1989, 73(5): 403-408.
- [55] 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]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [56] Bai Y H, Lü H R, Fu X, et al. Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(1): 012601.
- [57] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [58] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [59] Lee W M, Yuan X C, Cheong W C. Optical vortex beam shaping by use of highly efficient irregular spiral phase plates for optical micromanipulation[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(15): 1796-1798.
- [60] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.
- [61] Stoyanov L, Topuzoski S, Stefanov I, et al. Far field diffraction of an optical vortex beam by a fork-shaped grating[J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 301-308.
- [62] Ge S J, Chen P, Shen Z X, et al. Terahertz vortex beam generator based on a photopatterned large birefringence liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12349-12356.
- [63] 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.
- [64] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, et al. Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8030-8035.
- [65] Xie C Q, Zhu X L, Shi L N, et al. Spiral photon sieves apodized by digital prolate spheroidal window for the generation of hard-x-ray vortex[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1765-1767.
- [66] Yang Y J, Zhao Q, Liu L L, et al. Manipulation of orbital-angular-momentum spectrum using pinhole plates [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(6): 064007.
- [67] Zhao H, Quan B G, Wang X K, et al. Demonstration of orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing based on a metasurface in the terahertz band[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1726-1732.
- [68] Zhang Y C, Liu W W, Gao J, et al. Generating focused 3D perfect vortex beams by plasmonic metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(4): 1701228.
- [69] Dharmavarapu R, Izumi K I, Katayama I, et al. Dielectric cross-shaped-resonator-based metasurface for vortex beam generation at mid-IR and THz wavelengths [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(7): 1263-1270.
- [70] Mehmood M Q, Mei S T, Hussain S, et al. Visible-frequency metasurface for structuring and spatially multiplexing optical vortices[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(13): 2533-2539.
- [71] Barnett S M, Allen L. Orbital angular momentum and nonparaxial light beams[J]. *Optics Communications*, 1994, 110(5/6): 670-678.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] He J W, Wang X K, Hu D, et al. Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [75] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 534-536.
- [76] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Perfect optical vortex array with controllable diffraction order and topological charge[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(9): 1836-1842.
- [77] Liu Y C, Ke Y G, Zhou J X, et al. Generation of perfect vortex and vector beams based on Pancharatnam-Berry phase elements[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44096.
- [78] Leach J, Yao E, Padgett M J. Observation of the vortex structure of a non-integer vortex beam[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 71.
- [79] Berry M V. Optical vortices evolving from helicoidal integer and fractional phase steps[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(2): 259-268.
- [80] Yang Z S, Zhang X, Bai C L, et al. Nondiffracting light beams carrying fractional orbital angular momentum[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(3): 452-461.
- [81] Tao S H, Yuan X C, Lin J, et al. Fractional optical vortex beam induced rotation of particles[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 7726-7731.
- [82] Götte J B, O’Holleran K, Preece D, et al. Light beams with fractional orbital angular momentum and their vortex structure[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 993-1006.
- [83] O’Dwyer D P, Phelan C F, Rakovich Y P, et al. Generation of continuously tunable fractional optical orbital angular momentum using internal conical diffraction[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 16480-16485.
- [84] Xu Z D, Gui C C, Li S H, et al. Fractional orbital angular momentum (OAM) free-space optical communications with atmospheric turbulence assisted by MIMO equalization[C]//*Advanced Photonics for Communications*, July 13-17, 2014, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2014: JT3A.1.
- [85] Sharma M K, Joseph J, Senthikumar P. Fractional vortex dipole phase filter[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(1): 325-332.
- [86] Liu H Y, Wang Y, Wang J Q, et al. Electromagnetic vortex enhanced imaging using fractional OAM beams[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(6): 948-952.
- [87] Yang Y J, Zhu X L, Zeng J, et al. Anomalous Bessel vortex beam: modulating orbital angular momentum with propagation[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(3): 677-682.
- [88] Zhang K, Yuan Y Y, Ding X M, et al. Polarization-engineered noninterleaved metasurface for integer and fractional orbital angular momentum multiplexing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(1): 2000351.
- [89] Li X Z, Ma H X, Yin C L, et al. Controllable mode transformation in perfect optical vortices[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 651-662.
- [90] Yang Y J, Thirunavukkarasu G, Babiker M, et al. Orbital-angular-momentum mode selection by rotationally symmetric superposition of chiral states with application to electron vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(9): 094802.
- [91] Ming Y, Intaravanne Y, Ahmed H, et al. Creating composite vortex beams with a single geometric metasurface[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(18): 2109714.
- [92] Ahmed H, Intaravanne Y, Ming Y, et al. Multichannel superposition of grafted perfect vortex beams[J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(30): e2203044.
- [93] Pohl D. Operation of a ruby laser in the purely transverse electric mode TE<sub>01</sub>[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(7): 266-267.
- [94] Mushiake Y, Matsumura K, Nakajima N. Generation of radially polarized optical beam mode by laser oscillation [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1972, 60(9): 1107-1109.
- [95] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylindrical-vector beams[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 77-87.
- [96] Varin C, Piché M. Acceleration of ultra-relativistic electrons using high-intensity TM<sub>01</sub> laser beams[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(1): s83-s88.
- [97] Novotny L, Beversluis M R, Youngworth K S, et al. Longitudinal field modes probed by single molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(23): 5251-5254.
- [98] Ciattoni A, Crosignani B, Di Porto P, et al. Azimuthally polarized spatial dark solitons: exact solutions of Maxwell’s equations in a Kerr medium[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(7): 073902.
- [99] 胡孟霞, 王志强, 李向平, 等. 超表面偏振信息编码[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813010.
- Hu M X, Wang Z Q, Li X P, et al. Metasurface polarization information encoding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813010.
- [100] 夏天, 谢振威, 袁小聪. 基于超表面波带片的远场偏振全息加密[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813015.
- Xia T, Xie Z W, Yuan X C. Far-field polarized holographic encryption by metasurface zone plates[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813015.
- [101] Bouhelier A, Beversluis M, Hartschuh A, et al. Near-field second-harmonic generation induced by local field enhancement[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(1): 013903.
- [102] 唐宇涛, 张学才, 胡子贤, 等. 非线性光学超构表面: 基础与应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822002.
- Tang Y T, Zhang X C, Hu Z X, et al. Nonlinear photonic metasurfaces: fundamentals and applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822002.
- [103] Zhan Q W. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15):

- 3377-3382.
- [104] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3063-3065.
- [105] Li J L, Ueda K I, Musha M, et al. Converging-axicon-based radially polarized ytterbium fiber laser and evidence on the mode profile inside the gain fiber[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(11): 1360-1362.
- [106] Toussaint K C, Park S, Jureller J E, et al. Generation of optical vector beams with a diffractive optical element interferometer[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2846-2848.
- [107] Bomzon Z, Biener G, Kleiner V, et al. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(5): 285-287.
- [108] Moh K J, Yuan X C, Bu J, et al. Direct noninterference cylindrical vector beam generation applied in the femtosecond regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(25): 251114.
- [109] Zhao H, Wang X K, Quan B G, et al. High-efficiency phase and polarization modulation metasurfaces[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(2): 2100199.
- [110] Zhao H, Zhang C M, Guo J Y, et al. Metasurface hologram for multi-image hiding and seeking[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(5): 054011.
- [111] Wang X L, Ding J P, Ni W J, et al. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3549-3551.
- [112] Wang H T, Wang X L, Li Y N, et al. A new type of vector fields with hybrid states of polarization[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10786-10795.
- [113] Milione G, Sztul H I, Nolan D A, et al. Higher-order Poincaré sphere, stokes parameters, and the angular momentum of light[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(5): 053601.
- [114] Ren Z C, Kong L J, Li S M, et al. Generalized poincaré sphere[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26586-26595.
- [115] Moreno I, Davis J A, Sánchez-López M M, et al. Nondiffracting Bessel beams with polarization state that varies with propagation distance[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(23): 5451-5454.
- [116] Davis J A, Moreno I, Badham K, et al. Nondiffracting vector beams where the charge and the polarization state vary with propagation distance[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2270-2273.
- [117] Fu S Y, Zhang S K, Gao C Q. Bessel beams with spatial oscillating polarization[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30765.
- [118] Li P, Zhang Y, Liu S, et al. Quasi-Bessel beams with longitudinally varying polarization state generated by employing spectrum engineering[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4811-4814.
- [119] Li P, Zhang Y, Liu S, et al. Generation and self-healing of vector Bessel-Gauss beams with variant state of polarizations upon propagation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5821-5831.
- [120] Li P, Wu D J, Zhang Y, et al. Polarization oscillating beams constructed by copropagating optical frozen waves[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(7): 756-761.
- [121] Zang X F, Ding H Z, Intaravanne Y, et al. A multi-foci metalens with polarization-rotated focal points[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(12): 1900182.
- [122] Wang R X, Intaravanne Y, Li S T, et al. Metalens for generating a customized vectorial focal curve[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(5): 2081-2087.
- [123] Li J E, Li J T, Yue Z, et al. Structured vector field manipulation of terahertz wave along the propagation direction based on dielectric metasurfaces[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(12): 2200325.
- [124] Zhang F, Pu M B, Guo Y H, et al. Synthetic vector optical fields with spatial and temporal tunability[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65(5): 254211.
- [125] Li J T, Liu J Y, Yue Z, et al. Polarization variable terahertz metasurface along the propagation path[J/OL]. *Fundamental Research*: 1-22[2023-06-05]. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2023.03.017>.
- [126] Dorrah A H, Rubin N A, Zaidi A, et al. Metasurface optics for on-demand polarization transformations along the optical path[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(4): 287-296.
- [127] Guo J Y, Wang X K, He J W, et al. Generation of radial polarized Lorentz beam with single layer metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(1): 1700925.
- [128] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, et al. Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere[J]. *Photonics Research*, 2016, 5(1): 15-21.
- [129] Bao Y J, Ni J C, Qiu C W. A minimalist single-layer metasurface for arbitrary and full control of vector vortex beams[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(6): 1905659.
- [130] Liu M Z, Huo P C, Zhu W Q, et al. Broadband generation of perfect Poincaré beams via dielectric spin-multiplexed metasurface[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2230.
- [131] Diddams S A, Vahala K, Udem T. Optical frequency combs: coherently uniting the electromagnetic spectrum[J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [132] Shen Y J, Rosales-Guzmán C. Nonseparable states of light: from quantum to classical[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(7): 2100533.
- [133] Papisimakis N, Fedotov V A, Savinov V, et al. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space[J]. *Nature Materials*, 2016, 15(3): 263-271.
- [134] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [135] Kondakci H E, Abouraddy A F. Airy wave packets accelerating in space-time[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(16): 163901.
- [136] Shaltout A M, Lagoudakis K G, van de Groep J, et al. Spatiotemporal light control with frequency-gradient

- metasurfaces[J]. *Science*, 2019, 365(6451): 374-377.
- [137] Cao Q, Chen J, Lu K Y, et al. Sculpturing spatiotemporal wavepackets with chirped pulses[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(11): 2261-2264.
- [138] Cao Q, Chen J, Lu K Y, et al. Non-spreading Bessel spatiotemporal optical vortices[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(2): 133-140.
- [139] Wan C H, Shen Y J, Chong A, et al. Scalar optical hopfions[J]. *eLight*, 2022, 2(1): 1-7.
- [140] Shen Y, Zhan Q, Wright L G, et al. Roadmap on spatiotemporal light fields[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(9): 093001.
- [141] Rego L, Dorney K M, Brooks N J, et al. Generation of extreme-ultraviolet beams with time-varying orbital angular momentum[J]. *Science*, 2019, 364(6447): eaaw9486.
- [142] Mounaix M, Fontaine N K, Neilson D T, et al. Time reversed optical waves by arbitrary vector spatiotemporal field generation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5813.
- [143] Fontaine N K, Ryf R, Chen H, et al. Packaged 45-mode multiplexers for a 50- $\mu\text{m}$  graded index fiber[C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 23-27, 2018, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2018.
- [144] Fontaine N K, Ryf R, Chen H S, et al. Laguerre-Gaussian mode sorter[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1865.
- [145] Chong A, Wan C H, Chen J, et al. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(6): 350-354.
- [146] Wan C H, Chen J, Chong A, et al. Generation of ultrafast spatiotemporal wave packet embedded with time-varying orbital angular momentum[J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1334-1336.
- [147] Wan C H, Cao Q, Chen J, et al. Toroidal vortices of light[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(7): 519-522.
- [148] Zhao Z, Song H, Zhang R Z, et al. Dynamic spatiotemporal beams that combine two independent and controllable orbital-angular-momenta using multiple optical-frequency-comb lines[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 4099.