

· 特邀综述 ·

复杂涡旋结构光场的产生方法

柳强^{1,2*}, 潘婧^{1,2}, 万震松^{1,2}, 申艺杰^{1,2}, 张恒康^{1,2}, 付星^{1,2}, 巩马理^{1,2}

¹清华大学精密仪器系, 北京 100084;

²光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084

摘要 涡旋光是一种携带轨道角动量、相位面呈螺旋状分布的新型结构光场, 在量子纠缠、量子通信、光学微操控等领域已经获得了广泛应用。随着研究的深入, 具有比传统涡旋光更复杂的拓扑结构、相位奇点、轨道角动量和偏振奇点的结构光场的产生, 吸引了众多研究人员的兴趣。从固体激光腔内直接激发产生空间结构光和腔外调控得到空间结构光出发, 分别介绍了离轴泵浦加像散转换、调制元件调制波形、泵浦整形三种腔内方法, 以及空间光调制器光场定制、模式叠加、超构表面微结构设计的三种腔外方法, 并分析比较了几种方法的优缺点, 展望了未来空间涡旋结构光场的发展趋势。

关键词 几何光学; 空间结构光; 离轴泵浦; 像散转换; 泵浦整形; 模式叠加; 超构表面

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500006

Generation Methods for Complex Vortex Structured Light Field

Liu Qiang^{1,2*}, Pan Jing^{1,2}, Wan Zhensong^{1,2}, Shen Yijie^{1,2},

Zhang Hengkang^{1,2}, Fu Xing^{1,2}, Gong Mali^{1,2}

¹Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084;

²Key Laboratory Photonic Control Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract Vortex beam is a new type of structured light field carrying orbital angular momentum, with a spirally distributed phase surface. It has great application potential in fields such as quantum entanglement, quantum telecommunication, and microparticle control. With further research, structured light carrying more complex topological structures, phase singularities, orbital angular momentums, and polarization singularities than traditional vortex beams has been produced and has drawn the attention of many researchers. Focusing on two distinct mechanisms, i. e., generating spatially structured light straight from a solid-laser cavity and controlling the light field out of solid-laser cavity, we introduce methods on off-axis pumping and astigmatism conversion from the cavity, modulating elements from the cavity, pump shaping from the cavity, customizing the optical field out of cavity by a spatial light modulator, mode superposition out of cavity, and controlling the metasurface microstructures out of cavity. Moreover, the strengths and weaknesses of these methods and the trend in the development of spatial structured light have been described in this article.

Key words geometric optics; spatial structured light; off-axis pumping; astigmatism conversion; pump shaping; mode superposition; metasurface

OCIS codes 080.4865; 070.6120; 050.6624

1 引言

近 30 年来, 涡旋光的相关研究进展飞速, 涡旋光已在多个领域展现出巨大的应用潜力, 成为当下热门的研究方向。涡旋光是一种携带轨道角动量且

相位面呈螺旋状分布的新型结构光场^[1-2]。轨道角动量可用于信息编码, 从而可被应用于量子通信领域^[3]。在量子纠缠领域^[4], 涡旋光的轨道角动量可被用于轨道角动量纠缠, 成为一个可携带纠缠态的参量。另外, 作为一个新型的光场, 涡旋光具有特殊

收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-02-01; 录用日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(61875100)

* E-mail: qiangliu@tsinghua.edu.cn

的相位面分布,已被应用于光镊中,捕获并操控粒子进行旋转^[5],为基础物理的研究提供了手段。除此之外,涡旋光在 3D 光束整形^[6]和微纳光机械驱动^[7]领域也获得重要应用。随着光场拓扑相位、相位奇点和轨道角动量(OAM)操控技术的发展,相比传统单奇点涡旋光具有更复杂的拓扑结构、相位奇点、OAM 和偏振奇点的光场得以产生,例如厄米-拉盖尔-高斯模式^[8-9]、涡旋恩斯-高斯模式^[10-11]、SU(2)几何模^[12-13]、分数阶 OAM^[14-15]以及自旋-轨道角动量耦合的矢量涡旋光束^[16-17]等。之后,结构光场的概念被提出,探索新型结构光场也逐步成为研究的重要部分。因为涡旋光具有独特的拓扑相位和相位奇点的性质,其反射、折射、干涉、衍射、偏振等基本光学性质都具有异于一般光束的独特特点^[18-22]。正是由于这些超乎寻常的特性,结构光不断推动着新的物理现象的探索发现和全新科学应用的发展,且至今依然存在着巨大的理论研究价值。

各应用领域的发展对结构光束的形态及其调控性能提出了更高要求,产生各类结构光束的更加可控的激发方式成为人们研究的热点之一。不同的激发方式有不同的优缺点,导致其应用的方式、场景不同,同时,不同的激发方式可以激发的模式也有一定的差异。为了扩充结构光的作用,发掘其应用潜力,规避结构光激发方式所存在的一些缺点,同时发掘新的光场模式,各种激发结构光的方式应运而生。空间结构光具有产生方法多样、产生模式丰富的特点,所以本文的讨论范围是基于空间光的结构光。除了空间结构光,还有基于波导产生的结构光,比如,通过设计特殊的微环结构和偏振控制产生带有特定偏振的确定模式的涡旋光^[23-24],以及采用挤压光纤等方法激发高阶模式产生的涡旋光^[25]等,本文将不予细述,且后文所说的腔内直接激发均是固体激光腔内直接激发。

本文介绍了产生空间结构光常用的六种方式。空间涡旋结构光的产生分为腔内直接激发涡旋结构光和腔外调控产生涡旋结构光两大类,其中,腔内直接激发涡旋结构光的三种方法分别是:1) 离轴泵浦抑制谐振腔的基模输出,待高阶模输出后,在腔外加像散转换元件,将模式转化为带有轨道角动量的结构光;2) 腔内加调制元件直接输出带轨道角动量的结构光;3) 通过整形泵浦光来激发不同模式的带轨道角动量的光场。腔外调控产生涡旋结构光的三种方法分别是:1) 使用空间光调制器直接对平面光进行调制,进而进行光场定制;2) 通过厄米-高斯(HG)本

征模式不同的组合叠加来产生丰富的光场结构;3) 通过对超构表面微结构的设计和入射光角度、偏振态的控制,实现自旋角动量和轨道角动量光的转换,从而产生带有轨道角动量的涡旋光,并对其加以控制。

2 腔内直接激发结构光场

若要在腔内直接激发产生涡旋结构光,则需要控制腔内的增益和损耗的关系,抑制基模的输出。腔内损耗的调控主要有两种方式:1) 通过对谐振腔本身进行调控,打破谐振腔的对称性,增加基模的损耗,从而实现高阶模式的输出;2) 在腔内插入特定的光学元件,调控不同模式间的损耗差异,从而得到特定模式的输出。腔内增益调控主要是通过调节泵浦的空间分布和不同模式间的增益差异来控制激光器的模式输出。

2.1 基于离轴泵浦和像散转换产生涡旋结构光场

基于离轴泵浦方法产生带轨道角动量的光场具有成本低、易实现、可集成度较高等特点。该方法通过对泵浦的离轴控制来改变泵浦和不同模式分布的重叠率,产生所需的高阶模式,而后经过腔外的模式像散转换器得到带轨道角动量的光场,如拉盖尔-高斯(LG)模式的光场、厄米-拉盖尔-高斯(HLG)模式的光场和 SU(2)几何模式的光场。近些年,在传统离轴泵浦的基础上,研究人员通过改变谐振腔内的一些元件或在谐振腔内加入一些元件的方法,在激光谐振腔中直接产生了带有轨道角动量的光场。

拉盖尔-高斯模式是一种腔内的本征模式,其横截面呈“甜甜圈”状,是携带轨道角动量的涡旋光场。产生拉盖尔-高斯光场的简单的、低成本的方法就是通过柱透镜像散引入 $\pi/2$ 的相位差,将腔内的另一种本征模式厄米-高斯(HG)模式转换为携带轨道角动量的拉盖尔-高斯模式。而产生厄米-高斯模式的一个常用方法就是在固体激光器中使用的离轴泵浦法。1996年,Laabs等^[26]为了在腔内产生可变化的模式,将通过光纤输出的泵浦光打在晶体的不同离轴位置(晶体上镀有高反膜的一面与凹面镜形成平凹腔,如图1(a)所示),当腔内某个特定模式与泵浦重叠率最高时,获得的增益最高、损耗最低,即可选择输出该模式;他们采用这个方法产生了 $HG_{0,0}$ 到 $HG_{0,87}$ 的模式。1997年,Chen 课题组^[27]通过理论推导得到了产生厄米-高斯模式最低阈值的相关计算方法。2018年,笔者所在团队将 Yb:CALGO 晶体作为增益介质,通过调节输出镜和晶体离轴的双离轴泵浦方法增加了厄米-高斯模式可达到的阶数^[28]。

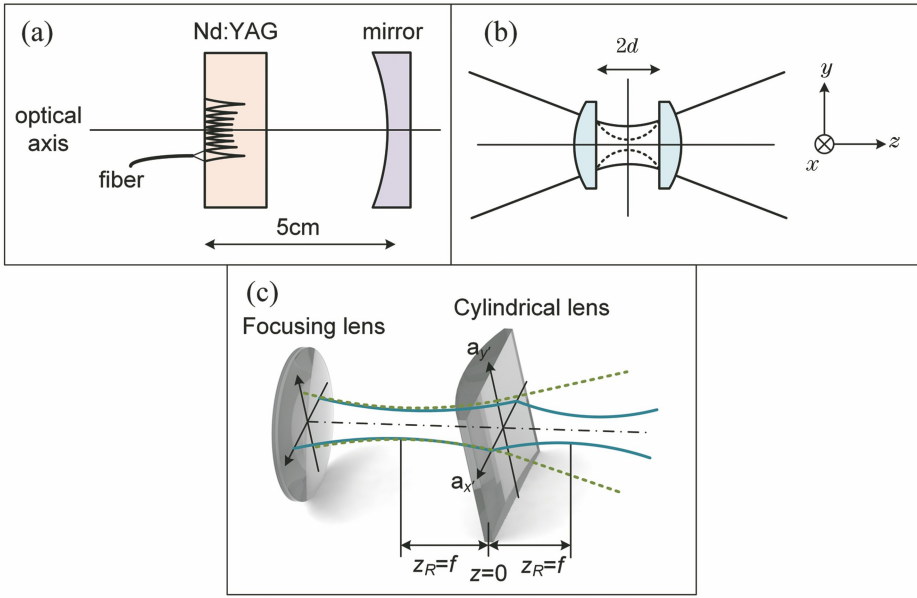


图 1 离轴泵浦和像散转换。(a)离轴泵浦产生高阶厄米-高斯模式^[26]；
(b)一对柱透镜作为模式像散转换器^[29]；(c)一个柱透镜进行像散转换^[30]

Fig. 1 Off-axis pumping and astigmatic conversion. (a) High-order HG modes motivated by off-axis pumping^[26] ; (b) a pair of cylindrical lenses as the astigmatic mode converter^[29] ; (c) one cylindrical lens as the astigmatic mode converter^[30]

为了得到携带轨道角动量的光束,需要在光场中的两个垂直方向引入 $\pi/2$ 的相位差,将厄米-高斯模式转变为拉盖尔-高斯模式。厄米-高斯模式和拉盖尔-高斯模式的转换技术正在被深入研究。1992年,Allen等^[2]提出了移除拉盖尔-高斯模式中的轨道角动量的方法,并设计了一套像散转换系统,用以将厄米-高斯模式转换为拉盖尔-高斯模式。1993年,Allen研究小组^[29]报导了 $\pi/2$ 像散转换系统,如图 1(b)所示,他们将一对柱透镜作为模式像散转换器,按照母线与厄米-高斯模成 45° 的方向放置柱透镜,当满足两个柱透镜间的距离是 $\sqrt{2}$ 倍柱透镜焦距以及光束的瑞利长度是 $(1+\sqrt{2}/2)$ 倍的焦距这两个条件时,就会为厄米-高斯模式的两个垂直方向引入 $\pi/2$ 的 Gouy 相位差,从而完成了厄米-高斯模式到拉盖尔-高斯模式的转换。2018年,Chen 课题组^[30]利用单柱透镜研究了模式像散转换的过程,如图 1(c)所示,当柱透镜母线方向与厄米-高斯模式成 45° ,光束的瑞利长度与柱透镜焦距相等,且柱透镜距光束束腰距离为焦距时,在无限远的光场中,厄米-高斯模式的两个垂直分量的 Gouy 相位差将为 $\pi/2$,厄米-高斯模式可以转换为拉盖尔-高斯模式,在有限远的传播过程中将出现由厄米-高斯模式向拉盖尔-高斯模式转化的厄米-拉盖尔-高斯过渡模式。除了用柱透镜进行像散转换外,腔镜的旋转也可以为模式引入像散,进而产生涡旋。

2008年,Habraken等^[31]提出了腔镜在不同旋转频率下模式变化的理论,并发现当腔镜旋转时厄米-高斯模式也会演化出涡旋模式,并于2009年更进一步研究了腔镜旋转时腔稳定性参数和模式的轨道角动量^[32]。

除了 $x-y$ 平面的离轴可以产生厄米-高斯模式外,其他两个面上的离轴对模式的变化也有一定影响。2018年,Huang等^[33]在 $x-z$ 平面旋转增益介质 Nd:YVO₄ 至某一角度,实现了 HG₀₁ 模式的输出,并在此基础上,通过在 $y-z$ 平面旋转增益介质实现了携带轨道角动量的 LG₀₁ 模式直接从腔内输出,并发现产生的拉盖尔-高斯模式带有一定的偏振特性。2019年,Tuan等^[34]在光泵浦半导体激光器中,通过将泵浦光在 $x-z$ 平面斜入射到半导体增益薄片的不同位置上,获得了特定厄米-拉盖尔-高斯横向模式。

除了拉盖尔-高斯模式携带轨道角动量以外,余摆线光场也同样携带轨道角动量。2006年,Chen 课题组^[35]在本征频率和横纵模频率间隔比的函数曲线中发现了类似锁模的“魔鬼阶梯”,在高 Q 值的对称腔中,当腔长满足横纵模耦合的频率简并,且横模阶数达到 100~500 时,得到了三维李萨如光场,如图 2(a)所示;2008年,Chen 课题组^[36]在横纵模锁定的状态下,于菲涅耳数更大的激光系统中得到了余摆线光场,如图 2(b)所示,在行波状态下,余摆线带有轨道角动量,但是对于腔内形成的驻波,余摆线不携带有轨道角动量。

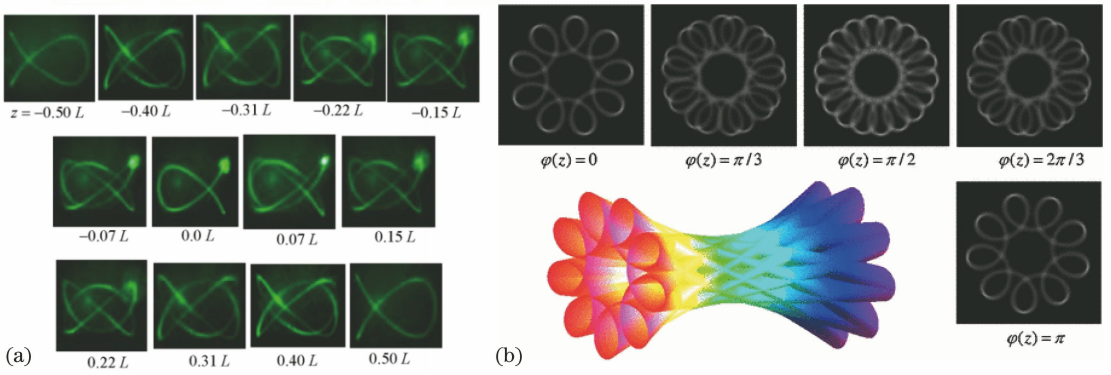


图 2 李萨如和余摆线光场。(a)李萨如光场及其传输^[35]；(b)余摆线光场及其传输^[36]
 Fig. 2 Lissajous and trochoidal patterns. (a) Lissajous light field and its transmission^[35] ;
 (b) trochoidal light field and its transmission^[36]

SU(2)几何模也是带有轨道角动量的光场,且是一种横纵模锁定的带有多个奇点的特殊光场,其横截面呈多边形点阵分布。该光场在腔长满足频率简并条件时经像散转换后产生。1999年,Erhard等^[37]设计了多径泵浦谐振腔,基于闭合的射线路径腔型提出了横模锁定效应。2001年,Dingjan等^[38]采用离轴泵浦法,在频率简并的情况下得到了几何模,并发现几何模具有几何光学的轨迹性,以及几何模是厄米-高斯模式相位频率锁定的结果。2011年,Chen课题组^[39]从理论上分析了几何模的模式叠加,并在实验中得到了多轴几何模,其经像散模式

转换器后产生了多轴拉盖尔-高斯模式。2013年,Chen课题组^[40]在齐次亥姆霍兹方程中引入泵浦分布将其变为非齐次亥姆霍兹方程,在理论上分析了分数简并的波迹二象性,并在实验上得到与理论吻合的几何模光场分布;另外,他们还发现了在满足频率简并时激光器输出功率激增的现象,这一理论上得到的结果与实验结果一致。2018年,笔者所在团队通过研究后发现,增益介质在 x - y 面的移动可以对几何模的初相位起到控制作用^[41],如图 3(a)所示。2016年,Chen课题组^[42]借助马赫-曾德尔干涉腔用近平面波与像散转换后的几何模式干涉,证实

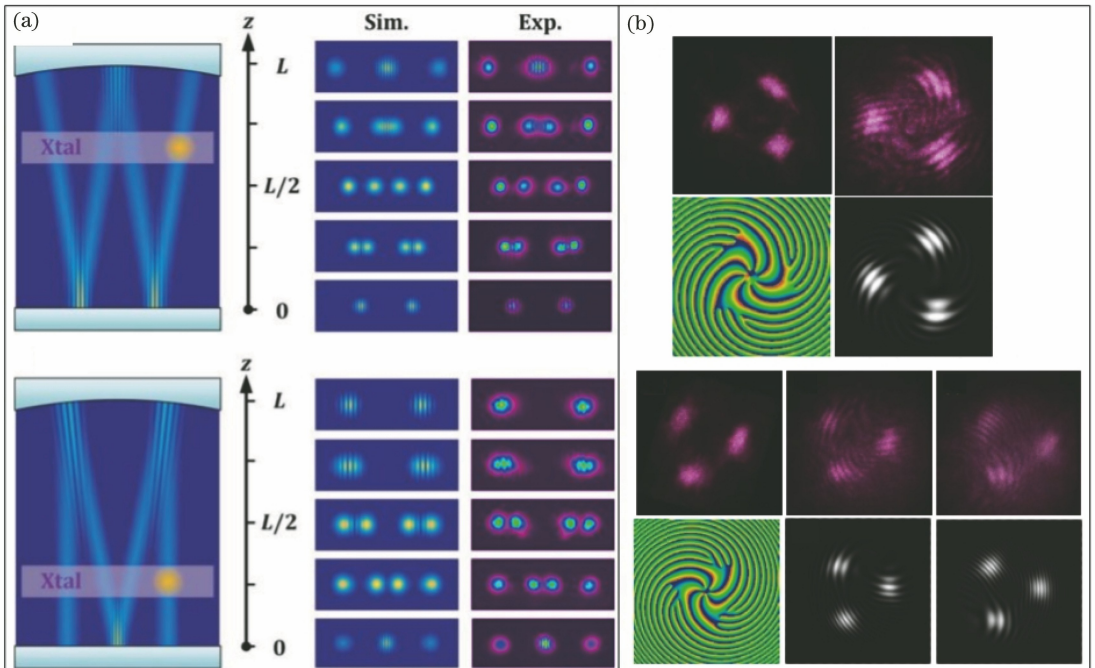


图 3 几何模光场分布。(a)几何模的相位控制^[41]；(b)几何模光场的奇点验证^[42]
 Fig. 3 Geometric modes light field. (a) Phase control of geometric modes^[41] ;
 (b) verification of singularities in geometric modes light field^[42]

了其携带轨道角动量,如图 3(b)所示。另外,在 2018 年,笔者所在团队^[43]还在 SU(2)几何模附近,即准频率简并谐振腔条件下,发现了多边形涡旋光模式,不同于 SU(2)几何模的点阵模式,多边形涡旋光束是近封闭多边形。

涡旋晶格是大口径泵浦下出现的光场分布,也具有轨道角动量,可被理解为多个模式的叠加模式。

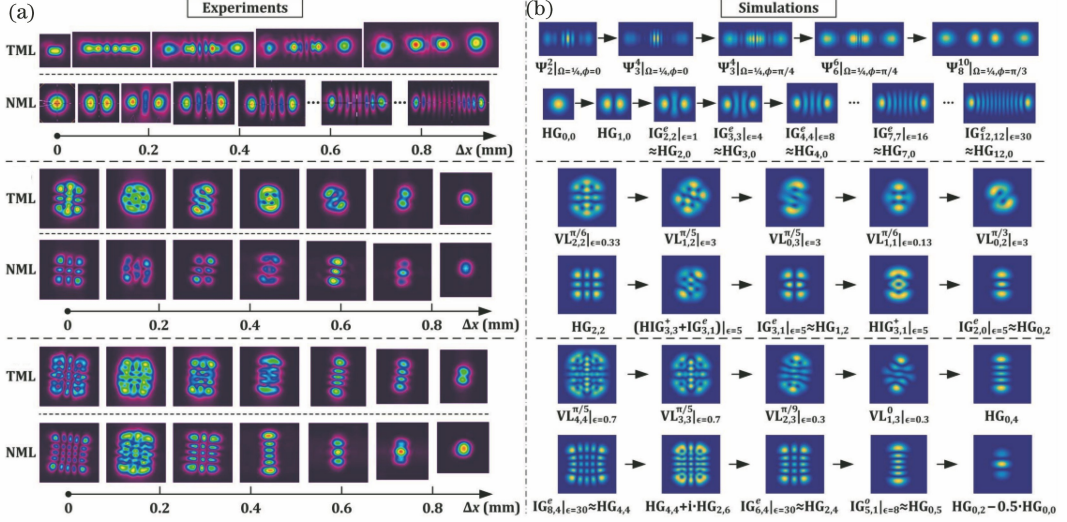


图 4 横锁模和未横锁模的涡旋晶格光场分布^[45]。(a)实验结果;(b)仿真结果

Fig. 4 Light field patterns of the transverse mode locking and the non-mode-locking vortex lattices^[45].

(a) The experimental result; (b) the simulation result

2.2 基于腔内调制器件产生涡旋结构光

通过在腔内插入调制器件的方式产生结构光的相关研究起步较早。初期,人们为了在腔内获得高纯度的一阶厄米-高斯光束,在谐振腔内插入金属细丝,基于金属细丝增大基模高斯光束在腔内的衍射损耗,同时利用一定角度下金属细丝可适应一阶厄米-高斯模(HG₀₁)特殊分瓣结构的特点,获得了高纯度 HG₀₁模^[46]。自此之后,人们为了直接从腔内得到各类结构光束,尝试将各种调制器件插入谐振腔内,例如螺旋相位板^[47-48]、光阑^[49]、声光调制器^[50]、液晶 *q* 平板和纯相位液晶空间光调制器等。其中:液晶 *q* 平板作为一种空间非均匀的双折射器件因可以对光子的自旋和轨道角动量进行调控而备受关注^[51];具有可编程特性的纯相位空间光调制器因在数字化横模激光器中具有重要应用价值而被广泛研究^[52]。

液晶 *q* 平板是一种空间变化的双折射器件,整个平板具有相同的相位延时,但平板的快(慢)轴方向不均匀。在 *x-y* 平面内的光轴方向上,折射率椭球可以沿着平面角向转动。将 *x* 轴处的光轴方向定义为 φ_0 ,则光轴方向可表示为

$$\alpha(r, \varphi) = l\varphi + \varphi_0, \quad (1)$$

式中: φ 表示方位角; l 为 q 平板的拓扑荷数; r 为径向坐标; α 为折射率椭球旋转角度。根据极坐标系的定义可知在坐标系中心,即 $r=0$ 处,坐标系的方位角 φ 没有定义,因此在坐标系中心处 q 平板的光轴也没有定义。如果 q 是整数或半整数,则板中光轴方向连续。与半波片或 1/4 波片相似, q 平板的琼斯矩阵可以表示为

$$\mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据以上定义,当左旋圆偏振光 $E_{in} = E_0 \times [1, i]$ 通过 q 平板时,光场的偏振态可以描述为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{out} &= \mathbf{J}_q \mathbf{E}_{in} = \\ E_0 \begin{bmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} &= \\ E_0 \exp(i2q\varphi) \exp(i2\varphi_0) \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)式可知,入射平面光场被转化成一个涡旋光场,其拓扑荷数为 $2q$,每个光子的平均轨道角动量为 $2q$ 。很容易证明,在右旋圆偏振输入波情况下,输出波的拓扑荷数和轨道角动量的符号反转^[53],如

图 5(b)所示。基于以上原理,众多学者对如何利用 q 平板获得可控的结构光束进行了探索。2016 年, Naidoo 等^[53]提出了一种腔内产生可控高阶庞加莱光束的方法。该方法通过在腔内插入 q 平板,结合调控腔内 q 平板和 $1/4$ 波片的角度实现了整个高阶庞加莱球上光束的产生,并实现了光子自旋和轨道

角动量之间的可控转换。Naidoo 等^[53]利用几何相位控制激光器腔内偏振和轨道角动量转换,在谐振腔内获得了可在矢量光束与涡旋光束之间相互转换的结构光束。这项工作为基于腔内几何相位控制的新型结构光激光器奠定了基础。实验装置与实验结果如图 5 所示。

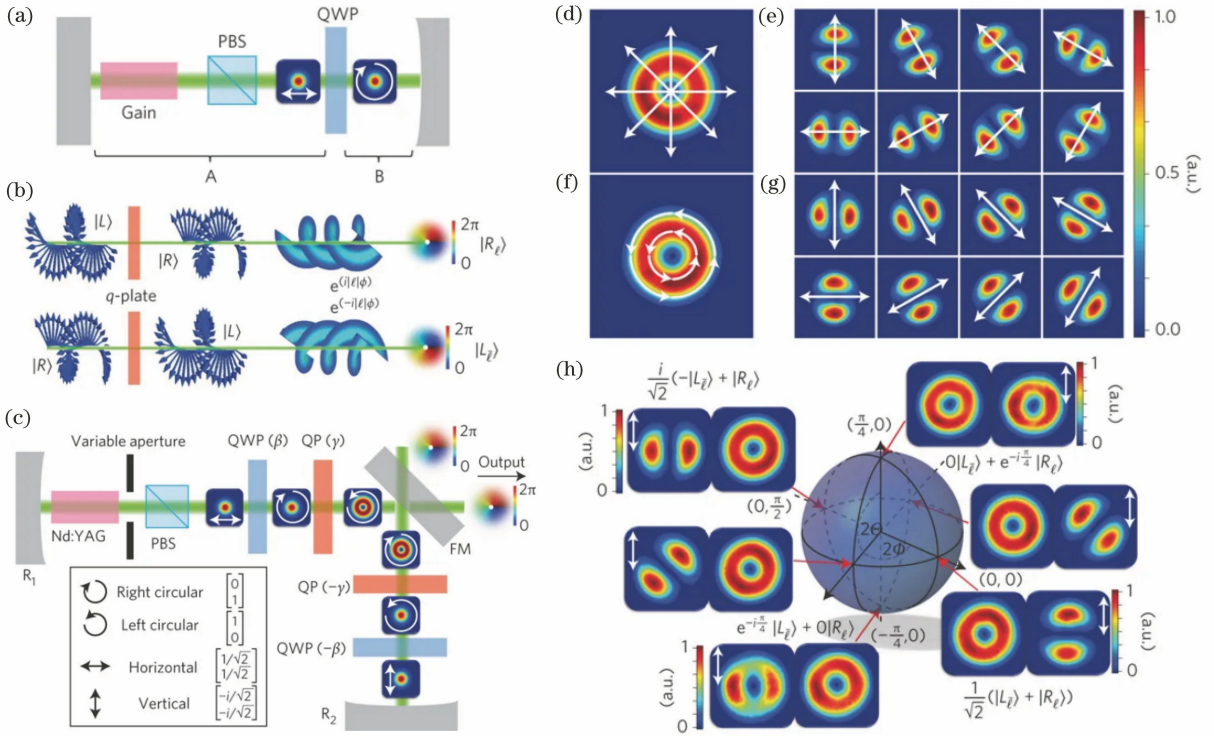


图 5 可控庞加莱光束^[53]。(a)(b)(c)实验装置示意图;(d)(e)(f)(g)(h)实验结果
 Fig. 5 Controllable Poincare beams^[53]. (a)(b)(c) Schematics of experimental set-up;
 (d)(e)(f)(g)(h) experimental results

液晶空间光调制器 (SLM) 技术已成为根据需求创建任意光场的工具。虽然液晶空间光调制器也是一种双折射器件,但其与 q 平板有重要区别。空间光调制器的快慢轴随空间均匀分布,但其相位延时可以通过调整电压来实时控制。该器件也被用在激光器中,作为一种可控器件,它可通过控制腔内损耗的方式选择腔内振荡的光场模式。在谐振腔内插入这样的实时可编程器件,在控制激光器输出模式时就不需要再对谐振腔进行任何机械控制,极大地提高了激光器的稳定性和紧凑性。空间光调制器的最重要特点是可以创建任意光场^[54]。2013 年, Ngcobo 等^[55]将空间光调制器插入激光器腔内充当一片全息反射镜,使得全息镜的相位和振幅可以简单地通过将计算机生成的灰度图像写入设备来控制,满足了激光模式的需求。他们的实验结果说明可以轻松地对激光模式进行数字控制。此外,他们

还演示了标准固态激光谐振腔模式的实时切换。该工作为激光模式的自定义提供了新的可能性,如图 6(a)所示。2019 年, Liu 等^[56]利用空间光调制器控制腔内损耗整形实现了 V 型折叠数字激光器,该激光器可输出数字化可控的高纯度厄米-高斯模,再结合腔外 $\pi/2$ 像散模式转换器,可以实现拓扑荷为 $-11 \sim 12$ 的涡旋光束。该工作通过改变施加在厄米-高斯上的相位模式(不需要对腔体进行任何机械对准),就可以对厄米-高斯模式的模阶(即涡旋光束的轨道角动量)进行数字化切换,如图 6(b)所示。

2.3 基于泵浦整形产生涡旋结构光

无论是离轴泵浦还是腔内插入衍射元件 (q 平板和空间光调制器),都是通过控制腔内损耗选择本征模式。上文提到的模式的输出本质上是本征模式间损耗和增益相互较量的结果。除了控制损耗外,对增益的控制为结构光的产生提供了一种新思路。

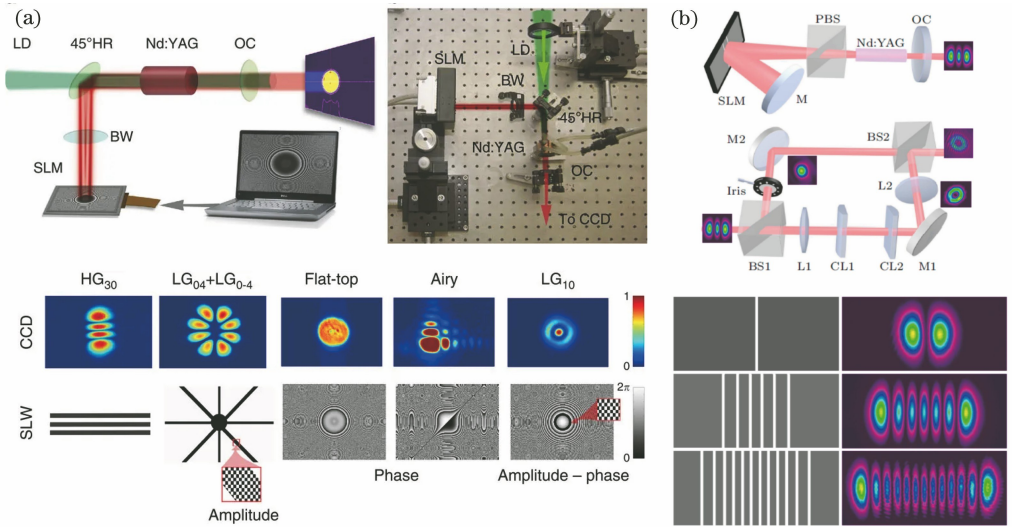


图 6 SLM 数字化激光器设计及其实验结果。(a)全息镜数字激光器^[55]；(b)损耗控制数字激光器^[56]
 Fig. 6 Design of SLM digital laser and its experimental results. (a) Holographic digital laser^[55] ;
 (b) loss-control digital laser^[56]

在结构光激光器的设计中可采用泵浦整形方案,用泵浦空间调制器件改变泵浦光束在晶体内的横向分布,从而控制晶体内增益的空间分布。通过这种方式改变腔内不同本征模式的增益分布,增大某一特定本征模式的增益,就可以实现谐振腔输出特定本征模式的控制^[57-59]。泵浦的整形主要通过环形泵浦光纤和数字微镜阵列(DMD)实现。2019年, Schepers 等和 Chen 等分别提出了环形光纤泵浦

(拉盖尔-高斯形)和 DMD 空间增益整形(厄米-高斯形)两种实验方案,前者通过控制环形泵浦光斑的直径实现了 0~14 阶矢量涡旋光束的输出^[60],如图 7 (a)所示,后者通过 DMD 对泵浦光束整形,实现了超过 1000 种高纯度厄米-高斯模的输出^[61],如图 7 (b)所示。泵浦整形技术结合 DMD 的快速重写特点在谐振腔激光横模实时快速定制以及复杂横模再生放大中具有极其重要的潜在价值。

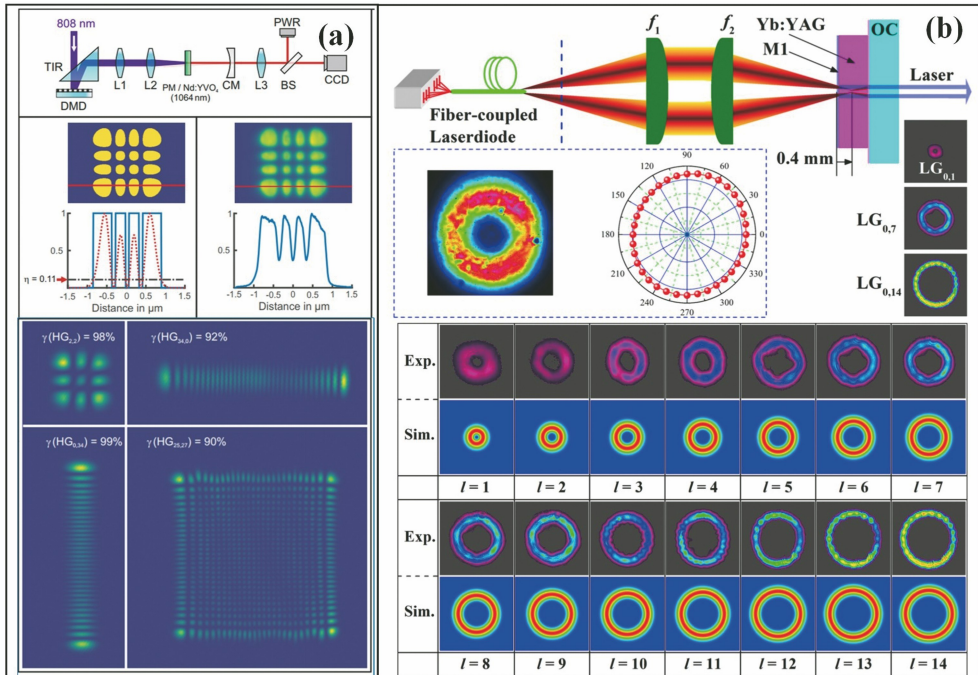


图 7 泵浦整形激光器设计及其实验结果。(a)厄米-高斯泵浦整形激光器^[60]；(b)矢量涡旋泵浦整形激光器^[61]
 Fig. 7 The set-up and experimental results of the pump-shaping laser. (a) HG modes pump-shaping laser^[60] ;
 (b) vector vortex pump-shaping laser^[61]

3 腔外调制产生涡旋结构光场

腔内激发结构光因受到谐振腔的限制,输出模式有限。相较于腔内激发,腔外调制光场的灵活性更高。通过在腔外插入器件获得涡旋结构光场是十分常用的手段,最早用到的器件包括螺旋相位板^[62-64]以及上文提到的 q 平板^[65-67],这两种器件在使用时光路结构简单。但二者均为定态调制器件,无法按需灵活地定制结构光场,且成本较高,目前这两种方法大多被用于在腔外产生特殊波长和高功率的飞秒涡旋结构光束^[68-71]。随着光场定制数字化和多元化的发展,目前腔外产生可分为两种方式:一是通过可编程器件和超构表面元件对光场进行调制,该方式可定制特定模式;二是模式叠加的方式,该方式可以从模式组合的角度控制、产生结构光场。

3.1 基于腔外液晶调制器件产生涡旋结构光

空间光调制器作为一种可编程的液晶器件,用在腔外可以更加灵活地起到数字化定制的作用。目前,空间光调制器已成为腔外标量结构光定制的最常用方法。用光调制器调制光场时主要有两种方法:1)在衍射零阶构造目标光场;2)在衍射高阶构造目标光场。前者通过减小相位步长来降低空间光调制器的空间衍射效率,而后者则通过增加一个空间

变化周期的高空间频率光栅,使更多的光从一阶衍射出去。这两种方法都依赖于适当的滤波,通常是在空间光调制器之后的傅里叶平面上选择所需的衍射级次。以上第一种相位模板产生的方法为双相位全息法(DPH)^[72-74],第二种相位模板产生的方法为计算全息法(CGH)^[74-76],运用上述方法创建的模式质量可以非常高。

Mendoza-Yero等^[77]使用DPH方法进行了结构光场的定制,实验装置和实验结果如图8(a)所示。2013年,Arrizón等^[78]介绍了CGH方法,通过构造傅里叶级数在一阶级次构造目标光场。图8(b)为CGH方法级次分离的效果示意图。CGH方法因更加灵活和实验装置简单而被广泛采用,2016年,Forbes等^[79]用空间光调制器产生了多种定制光束,如图9(a)所示。除单光束外,利用频谱分离的方法,即利用多空间频谱对不同的模式叠加不同方向的闪耀光栅的方法,使各个模式向不同的方向衍射,并将这些包含频谱的模板进行叠加得到复用模板。采用复用模板对入射光束进行调整,可以产生空间多光束定制的效果。2017年,Rosales-Guzmán等^[80]使用单个空间光调制器实现了多达200个空间模式的复用,如图9(b)所示。空间光调制器定制光场模式的复用技术,可以促进模式复用技术在自由空间和光纤通信甚至量子信道中的多路复用。

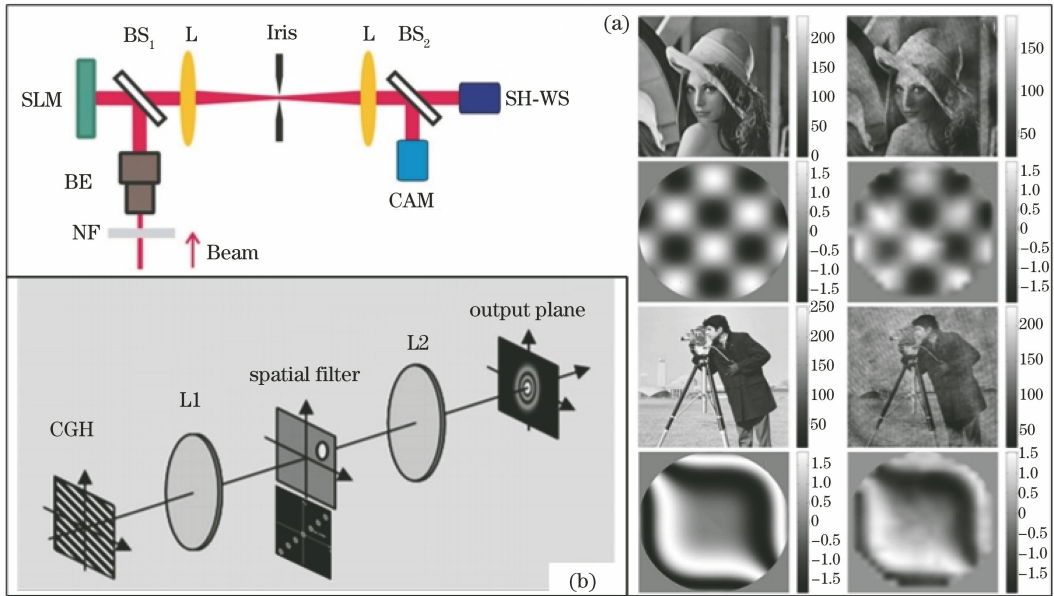


图8 空间光调制器的腔外调制方法。(a)双相位调制装置及实验结果^[77];

(b)基于计算全息法的二次傅里叶变换装置图^[78]

Fig. 8 The method on the SLM modulation out of cavity. (a) Set-up and experimental results of dual phase modulation^[77]; (b) double-Fourier transform optical setup for the generation of scalar complex fields employing a CGH^[78]

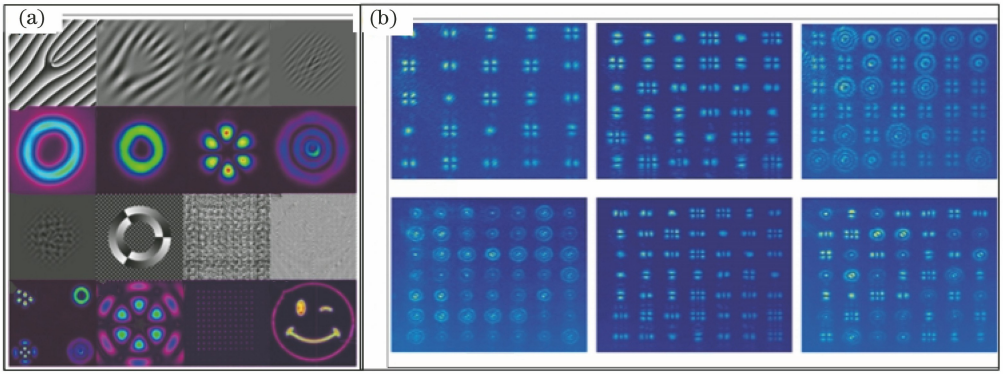


图 9 CGH 方法定制光场模式。(a)多种定制结构光场^[79]；(b)单空间光调制器调制 200 个空间模式复用输出^[80]

Fig. 9 Light field patterns customization on CGH. (a) A variety of custom structured light field^[79] ; (b) 200 modes multiplex from a single SLM^[80]

另外,可以用一种与波长无关的方式创建这些全息图,相位转换可以在一个较宽的波长范围内精确地实现,尽管会有一些效率损失,但也为宽谱甚至白光光束整形定制开辟了道路。除此之外还有一些特殊方法也可以产生非衍射贝塞尔-高斯光束^[81]、圆涡旋阵列光束^[82]等。

3.2 基于腔外模式叠加产生涡旋结构光

结构光除了具有谐振腔的本征模式之外,还包含由本征模式叠加得到的复杂结构光,包括多奇点涡旋

光束、复杂矢量光束等。如图 10(b)所示,除了可以通过空间光调制器复振幅调制实现基于模式叠加产生的标量多奇点涡旋光束^[83]外,腔外干涉叠加也可以产生标量多奇点涡旋光束,且可以更直观地说明光束奇点产生的原因。当一组具有不同相位差的正交分布厄米-高斯模(如, HG_{10} 和 HG_{01})叠加时,可以得到所合成的 HG 模到涡旋光束等多种过渡模式^[84]。当更高阶一维本征模式叠加时可以产生更加复杂的涡旋阵列^[85],实验装置和实验结果如图 10(a)所示。

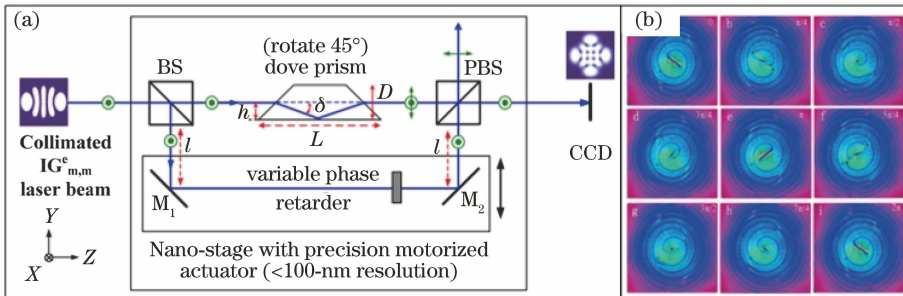


图 10 腔外模式叠加产生涡旋阵列。(a)马赫-曾德尔干涉得到涡旋阵列的实验装置示意图^[85]；

(b)利用模式叠加原理的空间光调制器多奇点涡旋光束控制的实验结果^[83]

Fig. 10 Extracavity pattern superposition produces the vortex array. (a) An experimental device for obtaining a vortex array by a Mach-Zehnder interferometer^[85] ; (b) experimental results of multi-singularity vortex beam control by SLM based on the mode superposition method^[83]

目前,标量涡旋光束可以使用空间光调制器进行数字化定制,而矢量光束还没有较为灵活的纯数字化定制方案,因此模式叠加是其产生的最重要的实验方法^[86-87]。其主要思路是使用空间光调制器得到任意空间分布的标量结构光场,再结合腔外的偏振控制和模式叠加技术得到可以数字化控制的矢量光束。2016年, Lu 等^[88]利用空间光调制器产生了多拉盖尔-高斯模叠加光束,然后对该光束进行了腔外偏振控制和叠加,实验装置如图 11(a)所示。花瓣形高阶庞加莱矢量结构光束如图 11(b)所示,此

工作很好地利用了模式叠加的思路,在光场调制和腔外矢量光束获取中均使用了模式叠加的思想。2017年, Rosales-Guzmán 等^[89]利用空间光调制器空间多通道复用技术和模式叠加技术获得了多涡旋光束,实验装置和实验结果如图 12 所示,此工作在一个空间光调制器上同时产生了 16 个偏振分布和空间形状不同的矢量涡旋光束。以上两个实验的设计思路为未来腔外结构光束的产生开辟了一条新途径,结合空间光调制器的光场定制优势和腔外模式叠加技术可以探索更多更有实用意义的结构光束。

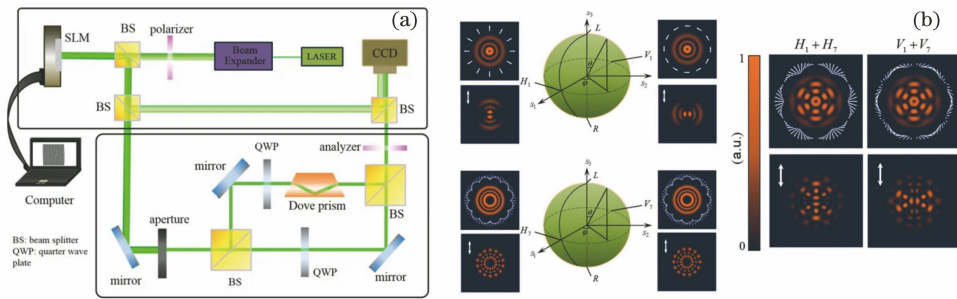


图 11 腔外模式叠加得到花瓣形高阶庞加莱矢量光束^[88]。(a)实验装置;(b)原理示意图

Fig. 11 High order petaling Poincare vector beams obtained by superposition of out-of-cavity modes^[88].

(a) Experimental set-up; (b) schematic

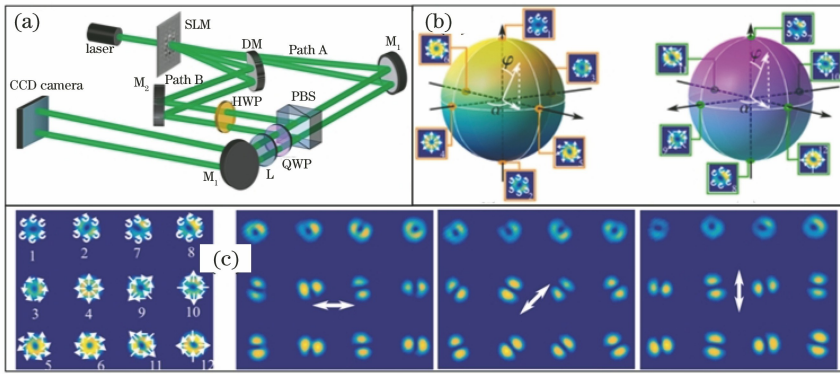


图 12 腔外模式叠加和多通道复用技术同时产生多矢量结构光束^[89]。

(a) 实验装置;(b)原理示意图;(c)实验结果

Fig. 12 Simultaneous generation of vector structured beams by out-of-cavity modes superposition and multi-channel multiplex technology^[89]. (a) Experimental set-up; (b) schematic; (c) experimental results

3.3 基于超构表面涡旋结构光的产生

传统上使用的空间光调制器和模式叠加产生涡旋光的方法,器件集成难度较大,而基于超构表面产生涡旋光可以较好地解决这个问题。超构表面是由一系列几何结构经过设计的光学散射体组成的阵列,可在微纳尺度上对光的相位、偏振以及传输方向进行灵活的控制^[90-92]。基于超构表面可以同时改变光场的轨道角动量和自旋角动量这两个参量,自旋-轨道角动量相互作用是产生轨道角动量的一个重要方法。2013年, Li等^[93]在金属表面设计了相同的z型单元阵列,利用几何相位元件构建的超构表面将自旋角动量转化成轨道角动量,并在实验上证实了两个自旋之间的横向角分裂,实现了自旋霍尔效应的直接观测。2014年, Karimi等^[94]在玻璃基底上设计了L型金属天线,由可变的亚波长金属等离子体天线实现了圆偏振光向 $\pm 2h$ 轨道角动量的转换,为产生轨道角动量的超薄器件的制作打下了基础。2015年, Ma等^[95]将六边形排列元件作为超构表面的单个单元,如图13(a)所示,将圆偏振光转换成了拓扑荷数为2的涡旋光,并实现了涡旋光到单个点

的聚焦。

2016年, Yang等^[96]在930 nm和766 nm波长上分别产生和聚焦了具有不同拓扑荷数的轨道角动量光束,这项作为超薄多波长涡旋光器件的设计打下了基础,在未来光通信领域具有巨大的潜力。2017年, Devlin等^[97]在玻璃基底上用二氧化钛作为单个单元材料设计了超构表面,产生了分数和整数拓扑荷数的涡旋光束,首次实现了不同任意轨道角动量的共线涡旋光束的同时产生,增加了涡旋光束的功能和应用。涡旋光束的复用与解复用也可以通过超构表面的设计来实现。2017年, Li等^[98]利用设计的纯相位光学天线超构表面,同时实现了多波长、不同拓扑荷数、多偏振的复用与解复用;当将该超构表面作为复用器件时,通过改变光束的入射角,就可以使不携带轨道角动量的光束转变为同轴传输的携带不同拓扑荷数的涡旋光束;当将该超构表面作为解复用器件时,同轴传输且携带不同轨道角动量的光束可以转变为不同方向传输的基模光。轨道角动量的叠加也可基于超构表面实现。2017年, Yue等^[99]提出了基于等离子体超构表面,通过控制

入射光的偏振态使轨道角动量在多信道上叠加的方法。基于传统的方法,带有左右旋圆偏振的自旋角动量只能转换为带有相反轨道角动量的涡旋光,2017年,Devlin 等^[100]设计的超构表面突破了这一限制,将左旋和右旋圆偏振光转换为携带有独立值轨道角动量的涡旋光,如图 13(b)所示,这一突破说

明自旋角动量和轨道角动量之间存在一种材料介导的联系,为之后复杂结构光场的产生和光通信领域的发展奠定了研究基础。2018年,Xie 等^[101]利用反向设计的概念设计了结构紧凑的高效垂直 OAM 光发生器,其模式纯度约为 97%,器件的半径仅为 $1.2 \mu\text{m}$,适用于片上可集成的涡旋光源^[102]。

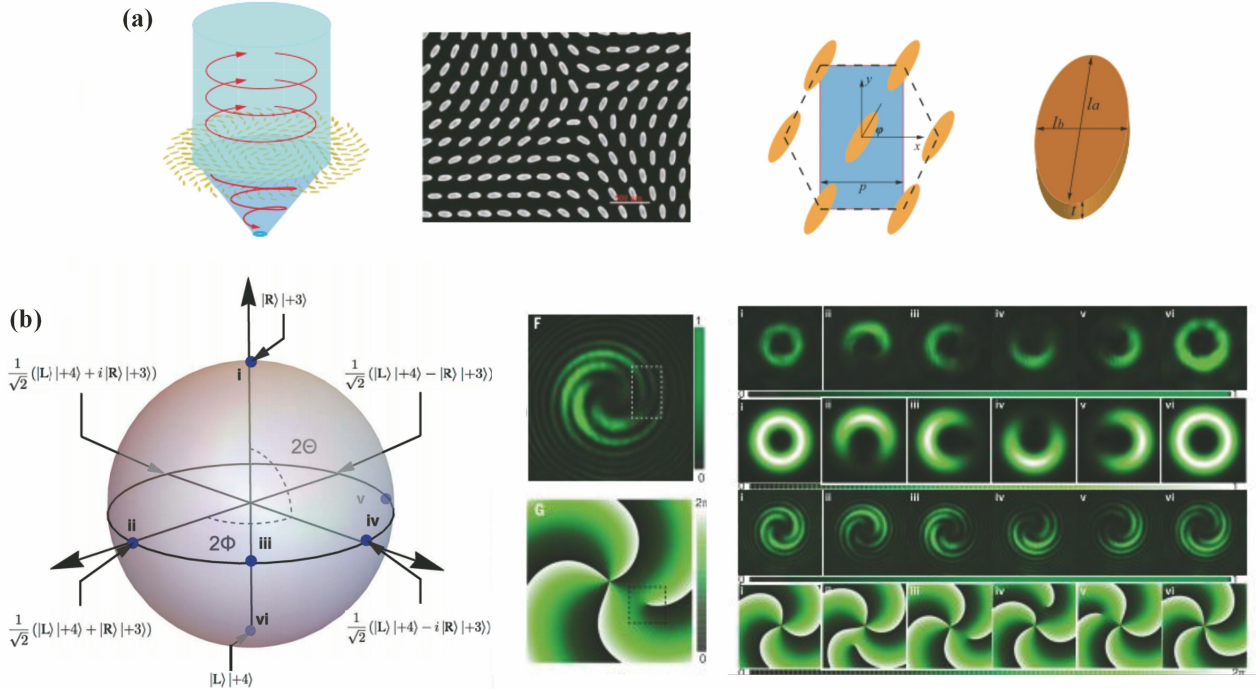


图 13 超构表面产生涡旋光。(a)六边形单元超构表面^[95];

(b)圆偏振光向两束任意轨道角动量光束的转换^[100]

Fig. 13 Vortex beams produced by the metasurfaces. (a) The hexagonal-unit metasurface^[95]; (b) conversion of circularly polarized light to two arbitrary OAM beams^[100]

4 结束语

本文介绍了空间结构光产生的方法,该方法包括腔内直接激发产生结构光和腔外调控光场得到结构光两大类。腔内产生结构光的三种方法分别是:1)离轴泵浦抑制谐振腔的基模,使厄米-高斯高阶模输出后,在腔外加入像散转换元件,将高阶模式转化为携带轨道角动量的光场;2)在腔内加入调制元件来调制波形,输出带轨道角动量的结构光;3)通过整形泵浦光来激发不同模式的带轨道角动量的光场。腔外产生结构光的三种方法分别是:1)使用空间光调制器进行光场定制;2)通过本征模式不同的组合叠加来产生不同且丰富的光场结构;3)通过对超构表面的微结构进行设计,并控制入射光的角度和偏振态,可以实现自旋角动量和轨道角动量光的转换,从而产生带有轨道角动量的结构光,并可以对其加以控制。

在上述六种方法中,腔内离轴泵浦加腔外像散

转换的方法操作简单,成本低,且具有可调控性,可用于集成,但由于腔内模式的竞争与选择,不能实现模式的随意定制,激发的模式有限;在腔内使用调制元件进行调制的方法虽然可以通过改变调制元件来调制光场,但成本高,且不能灵活调整;利用腔内泵浦整形的方法可以通过设计泵浦得到特定的输出结构光,但对泵浦光调整的要求较高,可集成度较低,灵活性较低;在腔外利用空间光调制器的方法可以定制不同的结构光,灵活性大,但不利于集成,成本较高;利用腔外模式叠加的方法可产生的模式丰富,灵活性较高,且在矢量光的产生方面具有明显优势,但对实验调整的要求较高,同时可集成度较低;基于腔外等离子体超构表面产生结构光是近几年刚兴起的一个研究方向,可集成度高,灵活性较高,对光子角动量物理研究的丰富,对光通信领域的发展和推动具有巨大潜力,但设计复杂。

另外,对涡旋结构光时域、频域、空域等方面参

数的拓展,仍具有非常广阔的研究空间。在空域参数方面,对于维度更高、结构更为丰富的模式的产生,以及具有更高实用性的产生装置的设计,仍需开展进一步的理论与实验研究。在时域与频域参数方面,利用调 Q 及锁模技术产生高峰值功率涡旋结构光输出,利用放大技术产生高平均功率涡旋结构光输出,进而利用非线性变换实现涡旋结构光轨道角动量以及光谱拓展都是未来重要的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Couillet P, Gil L, Rocca F. Optical vortices [J]. *Optics Communications*, 1989, 73(5): 403-408.
- [2] 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.
- [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] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons [J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [5] Lafong A, Hossack W J, Arlt J, et al. Time-multiplexed Laguerre-Gaussian holographic optical tweezers for biological applications [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 3065-3072.
- [6] Chen Z Z, Zeng T T, Qian B J, et al. Complete shaping of optical vector beams [J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 17701-17710.
- [7] Ladavac K, Grier D G. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays [J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1144-1149.
- [8] Abramochkin E, Alieva T. Closed-form expression for mutual intensity evolution of Hermite-Laguerre-Gaussian Schell-model beams [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(19): 4032-4035.
- [9] Wang Y, Chen Y J, Zhang Y F, et al. Generalised Hermite-Gaussian beams and mode transformations [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055001.
- [10] Bandres M A, Gutiérrez-Vega J C. Ince-Gaussian modes of the paraxial wave equation and stable resonators [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(5): 873-880.
- [11] Woerdemann M, Alpmann C, Denz C. Optical assembly of microparticles into highly ordered structures using Ince-Gaussian beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(11): 111101.
- [12] Tuan P H, Liang H C, Huang K F, et al. Realizing high-pulse-energy large-angular-momentum beams by astigmatic transformation of geometric modes in an Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG laser [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-9.
- [13] Chen Y F, Tung J C, Tuan P H, et al. Symmetry breaking induced geometric surfaces with topological curves in quantum and classical dynamics of the SU(2) coupled oscillators [J]. *Annalen Der Physik*, 2017, 529(10): 1600253.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Nasalski W. Vortex and anti-vortex compositions of exact elegant Laguerre-Gaussian vector beams [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(2): 155-159.
- [17] Milione G, Evans S, Nolan D A, et al. Higher order Pancharatnam-Berry phase and the angular momentum of light [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(19): 190401.
- [18] Yu N, 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.
- [19] Zhang L G, Shen B F, Zhang X M, et al. Deflection of a reflected intense vortex laser beam [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113904.
- [20] Mourka A, Baumgartl J, Shanor C, et al. Visualization of the birth of an optical vortex using diffraction from a triangular aperture [J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 5760-5771.
- [21] 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.
- [22] Pattanayak A K, Maji S, Brundavanam M M. Polarization singularities due to unfolding of fractional vortex beams in a birefringent crystal [C] // *Frontiers in Optics 2017*. Washington, D. C.: OSA, 2017: 91.
- [23] Cai X, Wang J, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [24] Miao P, Zhang Z F, Sun J B, et al. Orbital angular momentum microlaser [J]. *Science*, 2016, 353(6298): 464-467.
- [25] Zhang W D, Wei K Y, Huang L G, et al. Optical

- vortex generation with wavelength tunability based on an acoustically-induced fiber grating[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19278-19285.
- [26] Laabs H, Ozygus B. Excitation of Hermite Gaussian modes in end-pumped solid-state lasers via off-axis pumping[J]. *Optics & Laser Technology*, 1996, 28(3): 213-214.
- [27] Chen Y F, Huang T M, Kao C F, et al. Generation of Hermite-Gaussian modes in fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(6): 1025-1031.
- [28] Shen Y J, Meng Y, Fu X, et al. Wavelength-tunable Hermite-Gaussian modes and an orbital-angular-momentum-tunable vortex beam in a dual-off-axis pumped Yb : CALGO laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 291-294.
- [29] 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.
- [30] Chen Y F, Chang C C, Lee C Y, et al. Characterizing the propagation evolution of wave patterns and vortex structures in astigmatic transformations of Hermite-Gaussian beams [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(1): 015002.
- [31] Habraken S J M, Gerard N. Orbital angular momentum in twisted and rotating cavity modes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6905: 690504.
- [32] Habraken S J M, Nienhuis G. Rotational stabilization and destabilization of an optical cavity [J]. *Physical Review A*, 2009, 79: 011805.
- [33] Huang X X, Xu B, Cui S W, et al. Direct generation of vortex laser by rotating induced off-axis pumping[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1-6.
- [34] Tuan P H, Hsieh Y H, Tu C W, et al. Generating high-order transverse patterns in optically pumped semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(6): 1-7.
- [35] Chen Y F, Lu T H, Su K W, et al. Devil's staircase in three-dimensional coherent waves localized on lissajous parametric surfaces [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(21): 213902.
- [36] Lu T H, Lin Y C, Chen Y F, et al. Three-dimensional coherent optical waves localized on trochoidal parametric surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(23): 233901.
- [37] Erhard J, Laabs H, Bernd O, et al. Diode-pumped multipath laser oscillators[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3611: 2-10.
- [38] Dingjan J, van Exter M P, Woerdman J P. Geometric modes in a single-frequency Nd : YVO₄ laser[J]. *Optics Communications*, 2001, 188(5/6): 345-351.
- [39] Lu T H, Lin Y C, Chen Y F, et al. Generation of multi-axis Laguerre-Gaussian beams from geometric modes of a hemiconfocal cavity[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 991-999.
- [40] Chen Y F, Tung J C, Chiang P Y, et al. Exploring the effect of fractional degeneracy and the emergence of ray-wave duality in solid-state lasers with off-axis pumping [J]. *Physical Review A*, 2013, 88: 013827.
- [41] Shen Y J, Yang X L, Fu X, et al. Periodic-trajectory-controlled, coherent-state-phase-switched, and wavelength-tunable SU(2) geometric modes in a frequency-degenerate resonator[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(32): 9543-9549.
- [42] Chen Y F, Tuan P H, Cho C Y, et al. Exploring vortex structures of circularly geometric beams from off-axis pumped solid-state lasers with an external mode converter[C] // *Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC)*, Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2016: JTh2A.14.
- [43] Shen Y J, Wan Z S, Meng Y, et al. Generation of polygonal vortex beams in quasi-frequency-degenerate states of Yb: CALGO laser[C] // *Laser Congress 2018 (ASSL)*, Boston, Massachusetts. Washington, D.C.: OSA, 2018: AW2A.3.
- [44] Chen Y F, Lan Y P. Formation of optical vortex lattices in solid-state microchip lasers: spontaneous transverse mode locking [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(6): 063807.
- [45] Shen Y J, Wan Z S, Fu X, et al. Vortex lattices with transverse-mode-locking states switching in a large-aperture off-axis-pumped solid-state laser[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(12): 2940-2944.
- [46] Niziev V G, Chang R S, Nesterov A V. Generation of inhomogeneously polarized laser beams by use of a Sagnac interferometer[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(33): 8393-8399.
- [47] Lin Y Y, Yeh C C. Optical vortex beam conversion based on resonator with an intra-cavity spiral phase plate[C] // *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, July 31-August 4, 2017. New York: IEEE, 2017: s1641.
- [48] Oron R, Danziger Y, Davidson N, et al. Laser mode discrimination with intra-cavity spiral phase elements[J]. *Optics Communications*, 1999, 169(1/2/3/4/5/6): 115-121.
- [49] Kim D J, Kim J W. High-power TEM₀₀ and Laguerre-Gaussian mode generation in double resonator configuration [J]. *Applied Physics B*,

- 2015, 121(3): 401-405.
- [50] Kim D J, MacKenzie J I, Kim J W. Adaptable beam profiles from a dual-cavity Nd : YAG laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1740-1743.
- [51] Marrucci L. The q -plate and its future[J]. Journal of Nanophotonics, 2013, 7(1): 078598.
- [52] Konforti N, Marom E, Wu S T. Phase-only modulation with twisted nematic liquid-crystal spatial light modulators[J]. Optics Letters, 1988, 13(3): 251-253.
- [53] Naidoo D, Roux F S, Dudley A, et al. Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser[J]. Nature Photonics, 2016, 10(5): 327-332.
- [54] Litvin I A, Ngcobo S, Naidoo D, et al. Doughnut laser beam as an incoherent superposition of two petal beams[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 704-707.
- [55] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, et al. A digital laser for on-demand laser modes [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2289.
- [56] Liu S S, Chen X D, Pu J X, et al. A V-folded digital laser for on-demand vortex beams by astigmatic transformation of hermite-Gaussian modes[J]. Chinese Physics Letters, 2019, 36(12): 124203.
- [57] Sato T, Kozawa Y, Sato S. Transverse-mode selective laser operation by unicursal fast-scanning pumping[J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3245-3248.
- [58] Litvin I A, King G, Strauss H. Beam shaping laser with controllable gain[J]. Applied Physics B, 2017, 123(6): 174.
- [59] Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [60] Schepers F, Bexter T, Hellwig T, et al. Cavity-external spatial gain shaping for selective higher-order mode excitation [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: JTu2A. 61.
- [61] Chen D M, Miao Y J, Fu H, et al. High-order cylindrical vector beams with tunable topological charge up to 14 directly generated from a microchip laser with high beam quality and high efficiency[J]. APL Photonics, 2019, 4(10): 106106.
- [62] Sueda K, Miyaji G, Miyanaga N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3548-3553.
- [63] 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.
- [64] Kotlyar V V, Elfstrom H, Turunen J, et al. Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(5): 849-861.
- [65] 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.
- [66] Karimi E, Piccirillo B, Marrucci L, et al. Light propagation in a birefringent plate with topological charge[J]. Optics Letters, 2009, 34 (8): 1225-1227.
- [67] Piccirillo B, D'Ambrosio V, Slussarenko S, et al. Photon spin-to-orbital angular momentum conversion via an electrically tunable q -plate [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(24): 241104.
- [68] Miyamoto K, Suizu K, Akiba T, et al. Direct observation of the topological charge of a terahertz vortex beam generated by a Tsurupica spiral phase plate[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(26): 261104.
- [69] Peele A G, McMahon P J, Paterson D, et al. Observation of an X-ray vortex[J]. Optics Letters, 2002, 27(20): 1752-1754.
- [70] Moh K J, Yuan X C, Cheong W C, et al. High-power efficient multiple optical vortices in a single beam generated by a kinoform-type spiral phase plate[J]. Applied Optics, 2006, 45(6): 1153-1161.
- [71] Nivas J J J, He S T, Rubano A, et al. Direct femtosecond laser surface structuring with optical vortex beams generated by a q -plate[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 17929.
- [72] Hsueh C K, Sawchuk A A. Computer-generated double-phase holograms[J]. Applied Optics, 1978, 17(24): 3874-3883.
- [73] Arrizón V, Sánchez-De-la-llave D. Double-phase holograms implemented with phase-only spatial light modulators: performance evaluation and improvement[J]. Applied Optics, 2002, 41(17): 3436-3447.
- [74] 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.
- [75] Litvin I A, Dudley A, Roux F S, et al. Azimuthal decomposition with digital holograms [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10996-11004.
- [76] Bentley J B, Davis J A, Bandres M A, et al.

- Generation of helical Ince-Gaussian beams with a liquid-crystal display[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(5): 649-651.
- [77] Mendoza-Yero O, Mínguez-Vega G, Lancis J. Encoding complex fields by using a phase-only optical element[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1740-1743.
- [78] Arrizón V, Ruiz U, Carrada R, et al. Pixelated phase computer holograms for the accurate encoding of scalar complex fields[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(11): 3500-3507.
- [79] Forbes A, Dudley A, McLaren M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 200-227.
- [80] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Mahonisi N, et al. Multiplexing 200 spatial modes with a single hologram[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(11): 113501.
- [81] López-Mariscal C, Helmersson K. Shaped nondiffracting beams[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1215-1217.
- [82] Ma H X, Li X Z, Tai Y P, et al. Generation of circular optical vortex array [J]. *Annalen Der Physik*, 2017, 529(12): 1700285.
- [83] Wan Z S, Shen Y J, Gong M L, et al. Quadrant-separable multi-singularity vortices manipulation by coherent superposed mode with spatial-energy mismatch [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34940-34955.
- [84] O'NEIL A T, COURTIAL J. Mode transformations in terms of the constituent Hermite-Gaussian or Laguerre-Gaussian modes and the variable-phase mode converter [J]. *Optics communications*, 2000, 181(1/2/3): 35-45.
- [85] Chu S C, Yang C S, Otsuka K. Vortex array laser beam generation from a Dove prism-embedded unbalanced Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2008, 16(24): 19934-19949.
- [86] Vyas S, Kozawa Y, Sato S. Polarization singularities in superposition of vector beams [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8972-8986.
- [87] Liu S, Qi S X, Zhang Y, et al. Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 228-233.
- [88] Lu T H, Huang T D, Wang J G, et al. Generation of flower high-order Poincaré sphere laser beams from a spatial light modulator [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39657.
- [89] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25697-25706.
- [90] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(12): 889-898.
- [91] Liu Z T, Meng Y, Hu F T, et al. Largely tunable terahertz circular polarization splitters based on patterned graphene nanoantenna arrays [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-11.
- [92] Meng Y, Hu F T, Liu Z T, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16425-16439.
- [93] Li G X, Kang M, Chen S M, et al. Spin-enabled plasmonic metasurfaces for manipulating orbital angular momentum of light [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4148-4151.
- [94] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [95] Ma X L, Pu M B, Li X, et al. A planar chiral metasurface for optical vortex generation and focusing [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10365.
- [96] Yang K P, Pu M B, Li X, et al. Wavelength-selective orbital angular momentum generation based on a plasmonic metasurface[J]. *Nanoscale*, 2016, 8(24): 12267-12271.
- [97] Devlin R C, Ambrosio A, Wintz D, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in dielectric metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 377-393.
- [98] Li Y, Li X, Chen L W, et al. Orbital angular momentum multiplexing and demultiplexing by a single metasurface[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(2): 1600502.
- [99] Yue F Y, Wen D D, Zhang C M, et al. Multichannel polarization-controllable superpositions of orbital angular momentum states[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(15): 1603838.
- [100] 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.
- [101] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, et al. Inverse design in nanophotonics [J]. *Nature Photonics*, 2018, 12(11): 659-670.
- [102] Xie Z W, Lei T, Li F, et al. Ultra-broadband on-chip twisted light emitter for optical communications [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(4): 18001.