CN 51-1346/O4 ISSN 1003-501X (印刷版) ISSN 2094-4019 (网络版)

光电工程
Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

复杂结构光场的多自由度协同调控技术研究进展

张智超，海澜，张书瑞，高春清，付时尧

引用本文:

张智超，海澜，张书瑞，等. 复杂结构光场的多自由度协同调控技术研究进展[J]. 光电工程，2024， **51**(8): 240079.

Zhang Z C, Hai L, Zhang S R, et al. Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(8): 240079.

https://doi.org/10.12086/oee.2024.240079

收稿日期: 2024-03-31; 修改日期: 2024-04-27; 录用日期: 2024-04-28

相关论文

Miniature tunable Airy beam optical meta-device

Jing Cheng Zhang, Mu Ku Chen, Yubin Fan, Qinmiao Chen, Shufan Chen, Jin Yao, Xiaoyuan Liu, Shumin Xiao, Din Ping Tsai

Opto-Electronic Advances 2024, **7**(2): 230171 doi: 10.29026/oea.2024.230171

A review of liquid crystal spatial light modulators: devices and applications

Yiqian Yang, Andrew Forbes, Liangcai Cao

Opto-Electronic Science 2023, **2**(8): 230026 doi: 10.29026/oes.2023.230026

基于4π聚焦系统的电磁矢量光学斯格明子的产生

孙家琳，王思聪，周志凯，郑泽灿，姜美玲，宋世超，邓子岚，秦飞，曹耀宇，李向平

光电工程 2023, **50**(6): 230059 doi: 10.12086/oee.2023.230059

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚，章思梦，李晨霞，洪治，井绪峰

光电工程 2023, **50**(8): 230117 doi: 10.12086/oee.2023.230117

更多相关论文见光电期刊集群网站

OEE 光电工程 Opto-Electronic Engineering

http://cn.oejournal.org/oee

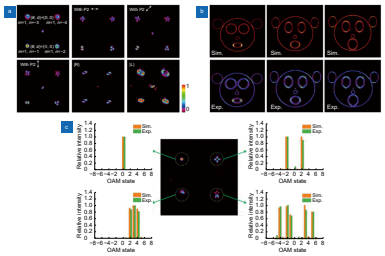
OE_Journal Website

Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程
矢量光场调控专题

Review
2024 年, 第 51 卷, 第 8 期

DOI: 10.12086/oee.2024.240079

复杂结构光场的多自由度协同调控技术研究进展



张智超[1,2,3]，海　澜[1,2,3]，张书瑞[1,2,3]，高春清[1,2,3]，付时尧[1,2,3*]

[1]北京理工大学光电学院，北京 100081；
[2]信息光子技术工业和信息化部重点实验室，北京 100081；
[3]光电成像技术与系统教育部重点实验室，北京 100081

摘要：对光场各自由度的单一或协同调控获得的结构光场由于具有新颖的物理性质，展现了重要的研究意义和应用价值。例如，轨道角动量作为一种全新的调控自由度直接影响光场相位与空间分布，常通过单独作用或共同作用构造高维空间，调控生成的涡旋光场及矢量光场已广泛应用于超大容量光通信、遥感探测、量子通信等领域。在此基础上，针对日益发展的前沿应用需求，引入新的光场调控自由度与传统自由度结合，进一步拓展高维和多维的结构光场研究成为了亟待解决的问题。本文首先从双自由度调控技术出发，以矢量涡旋光场为重点介绍了两种典型内禀自由度的耦合以及作用方式；在此基础上，结合本课题组的相关工作，系统综述了超越传统自由度并打破双自由度数目限制的复杂结构光场调控技术。

关键词：光场调控；矢量涡旋光场；多自由度耦合

中图分类号：TN929.1　　**文献标志码：**A

张智超，海澜，张书瑞，等. 复杂结构光场的多自由度协同调控技术研究进展 [J]. 光电工程，2024，**51**(8): 240079
Zhang Z C, Hai L, Zhang S R, et al. Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(8): 240079

Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom

Zhang Zhichao[1,2,3], Hai Lan[1,2,3], Zhang Shurui[1,2,3], Gao Chunqing[1,2,3], Fu Shiyao[1,2,3*]

[1]School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
[2]Key Laboratory of Information Photonics Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China;
[3]Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China

Abstract: Structured beams manipulated by single or multiple degrees of freedom (DoFs) present novel physical properties, showing important research significance and practical value. Among them, orbital angular momentum (OAM), as a novel DoF, directly decides the phase and spatial distribution of laser beams. The independent manipulation of OAM or the coupled manipulation with spin angular momentum enables the construction of high-

收稿日期：2024-03-31；修回日期：2024-04-27；录用日期：2024-04-28
基金项目：国家重点研发计划 (2022YFB3607700)；国家自然科学基金资助项目 (62350011,62375014, 11834001, 61905012)；北京市自然科学基金资助项目 (1232031)
*通信作者：付时尧，fushiyao@bit.edu.cn
版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

dimensional Hilbert space, which has already found broad applications in domains like ultra-large capacity optical communication, remote sensing detection and quantum communication. On this basis, considering the rapidly evolving application requirements, there is still a significant challenge to integrate the novel degrees of freedom with the traditional degrees of freedom, limiting the extension and expansion of high-dimensional and multi-dimensional structured beams. In this paper, from the perspective of two-degree-of-freedom manipulation methods, a series of structured beams coupled by two intrinsic DoFs is reviewed with emphasis on the vectorial vortex beams. Furthermore, we systematically review the manipulation of complex structured beams with multiple degrees of freedom that overcome the limitations of conventional two-degree-of-freedom. Also, the related work of our team is discussed here.

Keywords: laser field manipulation; vector vortex beams; multiple degrees-of-freedom

1 引　言

自激光问世以来，对激光光场的调控一直是当前领域的研究前沿与应用热点[1-2]。光场的基本自由度一般指空间、时间、频率 (波长)、复振幅以及自旋角动量 (spin angular momentum, SAM)，对其分别进行调控可生成具有不同物理性质的光场模式如阵列光场[3]、超快激光[4]、光频梳[5-6]、大能量激光[7] 以及矢量光场[8-9] 等，对应满足当下大部分的应用需求。30 年前，轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 作为一种全新的自由度被证明存在于具有螺旋波前的涡旋光场中[10]，其决定了光场的相位和空间分布，这一特殊性质使其迅速得到了国内外的关注[11-14]。由于 OAM 具有无穷个本征值，且不同的 OAM 模式相互正交，通过对 OAM 进行单独调控而获得的涡旋光场在大容量光通信[15-22]、旋转体探测[23-30]、光学微操控[31-35]、量子技术[36-38] 等领域也得到了广泛应用。

随着上述新型自由度的发现和调控技术的发展，结合多种自由度进行协同调控而获得的兼具多种物理特性的复杂结构光场走进了研究者的视野[1, 39-41]，以双自由度耦合结构光场尤为常见。其中，最受关注的即是 SAM-OAM 协同调控下的矢量涡旋光场[42](vector vortex beams, VVB)，这种光束具有横截面各向异性的偏振分布与甜甜圈形状的光场轮廓。作为涡旋光场和矢量光场的一种普遍形式，矢量涡旋光场同时具有偏振涡旋和相位涡旋性质，在激光加工[43-44]、高分辨率成像[45]、表面等离子体激发[46] 等领域有广阔的应用前景。

针对现代光学愈发多样的应用场景，所需的结构光场性质越发丰富，由此亟需打破可协同调控的自由度数目限制，进行新型自由度的构建以及三自由度及以上协同调控的超自由度复杂结构光场的生成。本文首先以矢量涡旋光场为出发点，介绍了新自由度的构建以及双自由度协同调控方式，进而对近年来国内外研究者对更多自由度协同作用下的新型光场及调控方式的研究进行了分类梳理，结合了本文作者团队在该领域的代表研究工作。

2 矢量涡旋光场的双自由度调控

本节以矢量涡旋光场作为双自由度调控技术的代表例子，介绍了其双自由度耦合原理，进一步针对应用需求将矢量涡旋光场的连续可调生成方法做了分类梳理。

2.1 SAM-OAM 协同调控理论

SAM 和 OAM 同属于表示描述光子旋转运动的内禀自由度，分别表现为光场的圆偏振态与螺旋波前。其中，SAM 只有两个本征值 (σ=±1)，代表左旋偏振态$|L\rangle$和右旋偏振态$|R\rangle$，对其调控所得的非均匀偏振分布矢量光场可表示为两个本征态的叠加：

$$|\psi\rangle = |u_{\mathrm{L}}\rangle|L\rangle + |u_{\mathrm{R}}\rangle|R\rangle\,, \tag{1}$$

式中：$|u_{\mathrm{L}}\rangle$和$|u_{\mathrm{R}}\rangle$表示左旋和右旋本征态对应的光场分布模式。与之对应的，具有螺旋相位 $\exp(\mathrm{i}l\varphi)$ (l 为拓扑荷数，φ 为角向坐标) 的涡旋光场携带的 OAM，有无穷多个本征值且本征值 l 可为任意整数，可构建无穷维度的希尔伯特空间。当 SAM 与 OAM 协同调控时，OAM 调控作用于式 (1) 中左旋和右旋本征态对应的光场分布，直积态叠加形式可表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|l\rangle|L\rangle + \beta|m\rangle|R\rangle\,, \tag{2}$$

式中：α 与 β 为复系数，l 和 m 为左旋和右旋分量对应 OAM 态携带的角量子数。这种偏振旋向相反且分别携带不同 OAM 的圆偏光束的叠加形式，可定义矢量涡旋光场。在更为复杂的矢量光场中，往往涉及到多个 OAM 叠加态与 SAM 叠加的情况，此情况下的

模式可以进一步表示为

$$|\psi\rangle = \sum_i \alpha_i |l_i\rangle |L\rangle + \sum_j \beta_j |m_j\rangle |R\rangle , \quad (3)$$

式中：i 和 j 为左旋和右旋分量对应的 OAM 序数。由此可见，诸如此类光场涉及到的 SAM 与 OAM 协同调控，不可理解为 SAM 与 OAM 态的直积形式，而是基于模式正交分解与叠加的结果。特别地，矢量涡旋光场的叠加态具有不可分离性，与量子纠缠中的 Bell 态具有相似的表达，进而开辟了使用经典光场模拟量子任务的应用可能[39, 47]。为了更直观地表征矢量涡旋光束，除了式 (2) 的表达形式，研究人员还提出了一系列斯托克斯矢量与庞加莱球模型，表征范围由对称阶次矢量扩展至非对称高阶矢量涡旋光场。通过对矢量涡旋光场的偏振斯托克斯矢量的进一步分析，当 OAM 态正交基底为零阶叠加非零阶时，其斯托克斯矢量分布恰好满足斯格明子结构，保证了在自由空间传输时具有良好的拓扑稳定性，可作为一种代表性的光学斯格明子[48]，开辟了潜在的研究方向和应用可能。

2.2 矢量涡旋光场调控生成技术进展

随着调控器件的发展，对单一 OAM 的调控技术已日趋成熟，液晶空间光调制器[49]、数字微透镜阵列[50-52]、Q 波片[53] 以及超材料[54-56] 先后被用于标量涡旋光场的生成调控。考虑矢量涡旋光场的调控原理，需要在上述基础上考虑偏振控制，引入模式叠加技术或直接采用偏振敏感的 OAM 调控器件。

2.2.1 腔外法

矢量涡旋光束的腔外调控原理主要基于对基模高斯光场的模式转换，也被称为被动式调控，相较于腔内产生方式具有更高的灵活性，受限程度更低。从调控机理出发，腔外调控可以分为两种主要方式：一是基于式 (2) 中正交基底的模式叠加方式控制产生；二是通过偏振敏感的超构表面及液晶分子材料器件直接调制生成。

对于第一种方法，双自由度的协同调控相当于分为两步展开，首先获得两束正交偏振光场，再对两个标量场进行 OAM 调控，获得携带不同 OAM 态的标量光场模式，矢量涡旋光场由最终模式叠加产生。普遍的干涉合成方法为利用两束分别携带不提供轨道角动量非同轴正交偏振光场以同轴合束的方法来合成矢量涡旋光束，如通过 Sagnac 干涉仪[57-59]、直角棱镜[60]、渥拉斯通棱镜[61] 以及 Rochi 光栅法[62-63] 等。然而上述的非同轴光束合束在实际操作中调控较为困难，对实验环境要求较高，所以可采用液晶空间光调制器进行同轴光路合成。液晶空间光调制器具有特定的偏振敏感性，只对水平偏振方向的光束具有相位调制作用而对其正交竖直偏振态不具备调制作用，可对入射的同轴正交偏振光场进行不同的 OAM 调控以获得矢量涡旋光场。2022 年，英国南安普顿大学的 Shen 等提出了一种新型光学斯格明子的产生方式[64]，正是基于上述原理，由图 1(a) 所示光路结构，将入射光场扩束入射至加载不同 OAM 的分屏液晶空间光调制器，出射携带 1 阶 OAM 的水平光场与基模高斯竖直偏振光场，通过附加的偏振元件，可产生 1 阶 Neel 型斯托克斯矢量斯格明子，本质上即是对双自由度调制而生成的非对称矢量涡旋光束。此外，若不满足于只对入射光

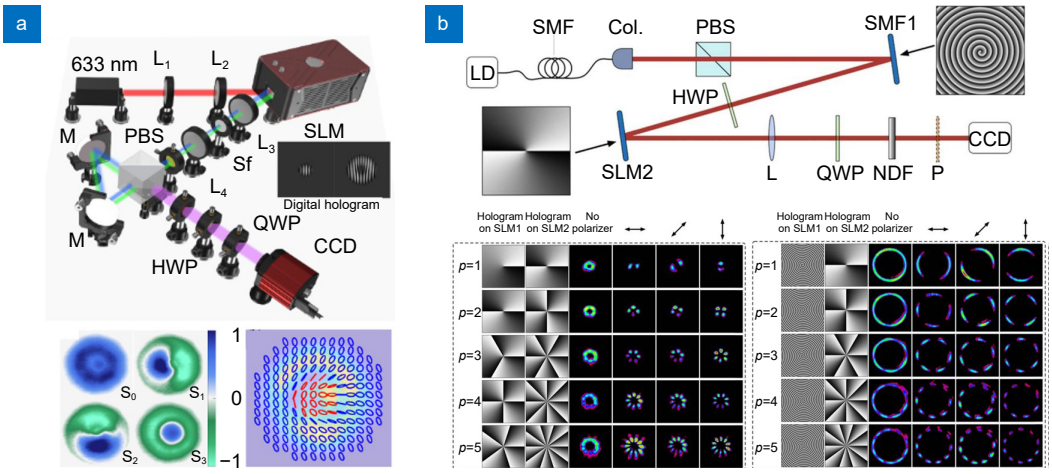


图 1 矢量涡旋光场的腔外调控方法。(a) 对正交偏振光场单独调控 OAM 的光学斯格明子产生[64]；(b) 通过液晶空间调制器级联对正交偏振光场分别调控 OAM 的完美涡旋光束产生[67]

Fig. 1 The extra-cavity manipulation of VVBs. (a) The generation of optical skyrmions by OAM manipulation on opposite SAM states[64]; (b) The generation of perfect VVBs using cascaded LC-SLMs[67]

场的单一偏振模式进行调控，可通过级联液晶空间调制器的方式，在两台空间光调制器间放置半波片(HWP)或四分之一波片(QWP)等偏振元件使SAM反向，即可使两个正交SAM基底分别在不同的空间光调制器上得到单独的OAM调控[65]。本课题组基于这种方法，于2016年提出了一种双调制器级联方案[66-67]，调控生成了如图1(b)所示的完美矢量涡旋光束。这种方式除了可以降低实验系统的复杂性，还具有任意阶次灵活调控与数字化生成的巨大优势。

对于第二种方法，最主流的SAM-OAM耦合器件即是基于光学自旋霍尔效应的Q波片[68]，其一般由液晶分子材料制成，相当于一种由具有空间拓扑结构的各向异性半波片组合，可将入射光场的SAM转换为相反旋向且引入额外的OAM。随着微纳加工技术的发展，二维亚波长尺度的超表面结构由于具有天线排布角度、几何参数等多个可调自由度，可改变参数以控制入射光场的相位、偏振以及光束方向等，可以实现与Q波片类似的功能。早在2014年，深圳大学的Yi等[69]利用超表面模拟Q波片作用，通过级联方式生成了任意态矢量涡旋光束。近年来，各研究团队更是发掘了用超表面调控高维光场的能力[70-74]，可设计实现矢量涡旋光束的复用与解复用，打下了在大容量通信、遥控传感以及量子领域的应用基础。

2.2.2 腔内法

相较于腔外调控方法，腔内直接调控可产生更高质量、更稳定的矢量涡旋光束。但仅针对固体激光器研究方向，矢量激光器较之于标量激光器的报道少之又少。同时考虑谐振腔的输出模式限制，且基于合束的模式叠加方式受限，矢量涡旋光场的腔内调控往往通过在腔内引入自旋-轨道耦合器件，在满足模式自再现条件的情况下实现。

2016年，南非CSIR国家激光中心的Naidoo等[75]率先提出了一种基于Q波片作用的可控高阶庞加莱球光束的生成方法，图2(b)展示了配合偏振调控元件QWP建立的腔内自旋-轨道角动量之间的转换模型，且引入巧妙的腔型设计满足了庞加莱球光束连续调控过程中的所有自恰条件。类似地，天津大学的Fan等在2020年提出了一种双光束泵浦的双通道飞秒OPO装置[76]，同样采用QWP和QP置于其中一通道上，当满足非线性相位匹配条件与偏振要求时，可同时生成波长可调的矢量涡旋模式与基模高斯光束(图2(b))。同年，本研究团队也报道了基于此调控原理的固体激光器结构[77]，通过把QWP与QP元件组合置于Er:YAG激光腔内，将矢量涡旋光束拓展到了人眼安全的1.6 μm波段。在此基础上，针对矢量涡旋光束在旋转体探测方面的应用需求，本团队开展了进一步的探索性工作[78]，于2021年报道了一种可同时调控横纵模分布，直接产生1.6 μm单频矢量涡旋光场的固体激光器。腔型采用环形腔结构，通过内置一光束隔离器实现光场的单向运转，消除空间烧孔效应，同时不影响QP对腔内光场的横模调控，可直接输出单频柱矢量光束(图2(c))，腔内具体调控过程可由公式进行数学推导，初始水平偏振光场可表示为

$$|\boldsymbol{H}\rangle=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}. \tag{4}$$

主轴方向为γ的q阶QP的琼斯矩阵表达式为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{QP}}(\gamma)=\begin{bmatrix}\cos(2q\varphi+\gamma) & \sin(2q\varphi+\gamma)\\ \sin(2q\varphi+\gamma) & -\cos(2q\varphi+\gamma)\end{bmatrix}. \tag{5}$$

水平光场入射QP组合后，可以转换为OAM-SAM耦合模式：

$$\begin{aligned}|\psi\rangle&=\boldsymbol{M}_{\mathrm{QP}}(\gamma)|\boldsymbol{H}\rangle\\&=\frac{\sqrt{2}}{2}\exp(\mathrm{i}\gamma)|L\rangle|2q\rangle+\frac{\sqrt{2}}{2}\exp(-\mathrm{i}\gamma)|R\rangle|-2q\rangle.\end{aligned} \tag{6}$$

经由腔镜反射后，SAM和OAM本征值取反，反射光束反向通过QP后恢复为初始光场，满足模式自再现条件，输出镜可稳定输出柱矢量光束。

除了Q波片之外，将超表面置于激光器内，也可以发挥类似的几何相位调控作用。2020年，南非CSIR国家激光中心的Sroor等提出了一种可见光波段的矢量涡旋激光器，如图2(d)所示，设计并应用了一块新型超表面结构J波片[79]。与Q波片有所不同，J波片对光束的正交偏振可引入任意非对称的螺旋相位，生成杂合庞加莱球上的矢量涡旋光场，实验中已调控产生了携带超100阶OAM的高纯度矢量涡旋光场。

3 复杂光场的“超自由度”协同调控

在前述内容基础上，还存在其他双自由度调控下的新型结构光场，且这些复杂光场具有超越传统自由度限制的调控可能。涉及三个自由度及以上的协同调控可被定义为“超自由度”调控，本节对具有代表性的复杂光场及涉及的超自由度协同调控做出介绍。

3.1 SU(2)光场

在利用多个自由度构建高维结构光场时，可供扩展的自由度除了前述空间分布和偏振，还包括路径自由度。在量子领域内，路径自由度常作为非共轴自发参量下转换中的纠缠自由度之一，可直接调控或通过

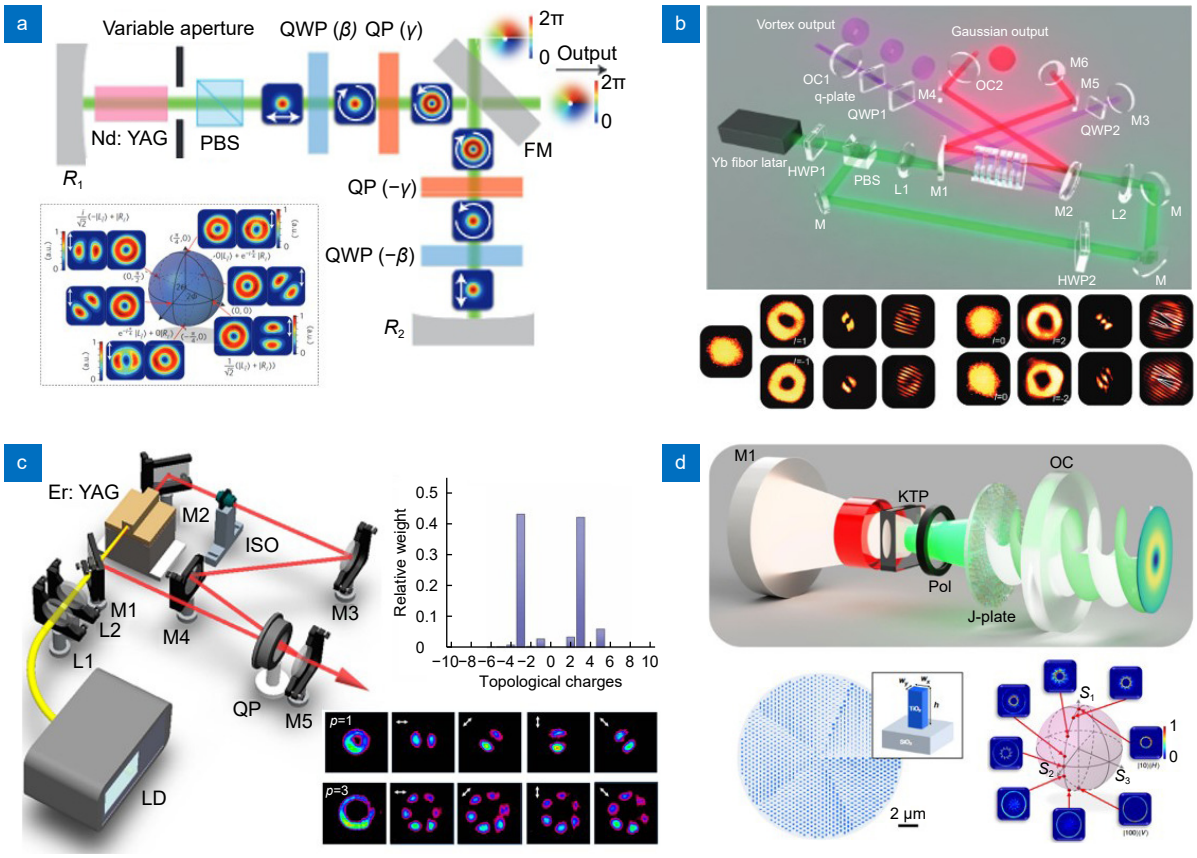


图 2 矢量涡旋光场的腔内调控方法。(a) 基于 Q 波片与 QWP 耦合作用的高阶庞加莱球光束腔内调控过程[75]; (b) 基于 Q 波片与 QWP 耦合作用对特定矢量涡旋光场的非线性腔内调控结构[76]; (c) 基于 Q 波片与环腔作用的单频柱矢量涡旋光束的调控结构[78]; (d) 基于 J 板对杂合庞加莱球上光束的腔内调控结构[79]

Fig. 2 The intra-cavity manipulation of VVBs. (a) The generation of high-order Poincare sphere beams from a laser using Q-plate [75]; (b) The non-linear generation of wave-tunable CVBs in OPO cavity[76]; (c) The scheme of single-frequency CVBs laser[78]; (d) The generation of hybrid Poincare sphere beams using meta-surface[79]

分束得到，调控难度较低。然而在经典光场中，路径自由度在近轴条件下受维度限制，难以系统地存在和表征，针对于此，研究人员提出了一种波迹几何模式的光场族，可用 SU(2) 对称性描述光波与射线轨迹的耦合[80-81]，同时提出了 SU(2) 庞加莱球用于该光场的模式演化和表征，如图 3(a) 中所示。这样的 SU(2) 光场包含了许多新的可调自由度，如表示射线数量的频率简并度，射线振荡方向和相对位置与描述射线旋转对称轨迹的中心 OAM。许多研究者实验研究了对这些自由度的调控手段，如射线数量自由度可由一精确设计的频率简并腔实现，这样的腔型很早之前就被提出[82-83]，通过控制其中横纵模的模式间隔比例，即频率简并度，可以直接影响输出的射线数量；射线振荡方向和相对位置可通过调整腔内模式匹配情况而实现[84]；至于中心 OAM，则可基于射线离轴度通过模式转换器件来灵活调控[85]。在此研究基础上，清华大学、英国南安普顿大学与南非金山大学的联合团队不断拓展挖掘出更多的可调自由度[81,86-91]，丰富了 SU(2) 相干态光束类型。2020 年，该团队结合偏振特性提出了一种全新的矢量涡旋光束[86]，在前述三自由度调控基础上，巧妙地采用在轴截面各向异性的 c-cut 晶体作为增益介质，这样，光腔内不同离轴度的射线轨迹可以不同的倾角通过增益晶体，因而对各个射线轨迹上的光形成了不同程度的偏振调制，从而直接在腔内引入了对 SAM 自由度的调制，获得了四种自由度联合调控的光场 (图 3(b))。2021 年，该课题组在同样的激光器结构中[88]，选取偏振、振荡方向、周期振荡位置三个自由度，其中周期振荡位置由增益点位置决定，三个自由度各自具有两个维度，从而将光束维度扩展到八维空间，结合腔外 OAM 与 SAM 调控方法，生成一组完备的类 GHZ 最大纠缠态，可模拟量子领域中的三粒子最大纠缠，图 3(c) 中展示了输出的光束结构。同时，通过调整腔型和增益点位置，还可以调控光场簇的多个往返振荡位置，此外还讨论

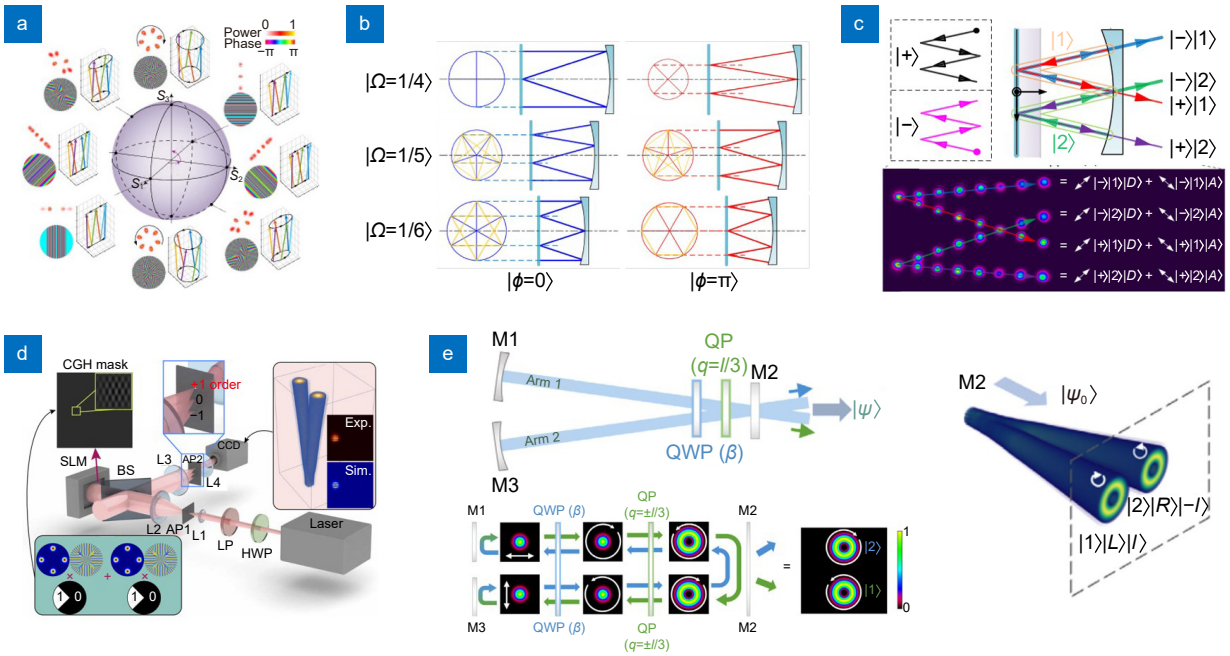


图 3 SU(2) 相干态光场的表征与调控方式。(a) SU(2) 庞加莱球[80]; (b) SU(2) 基本相干态中频率简并度与相对相位自由度对射线簇的影响[86]; (c) 基于偏振、射线振动方向、周期振荡位置三自由度八维光场的基本调控原理[88]; (d) 基于 SLM 对标量光场调控模拟 (c) 中不可分离态的装置[90]; (e) 基于 OAM、SAM 与路径三自由度最大不可分离态的调控[93]

Fig. 3 The representation and manipulation of SU (2) coherent states. (a) SU (2) Poincare sphere beams[80]; (b) The SU(2) coherent states decided by the frequency degeneracy and the coherent phase[83]; (c) The manipulation principle of 3-DoFs 8-dimensional nonseparable states[85]; (d) The digital modulation of SU(2) coherent states[87]; (e) The intra-cavity manipulation of 3-DoF nonseparable states[90]

了光束各射线上的子 OAM 调控可能。图 3(d) 中展示了他们的最新研究，提出用 SLM 代替频率简并腔调控生成标量 SU(2) 光束的装置[90]，通过调控 OAM 代替原激光器中的偏振自由度，复现类 GHz 态的完备生成，且通过 SLM 的相位调控，可将自由度拓展至四个。除此之外，由非球面透镜调控的像散度自由度也可以引入此类超自由度光场，可实现至多六个自由度的协同调控[91]，这种具有灵活可调性和维度扩展性的 SU(2) 光场已经可以应用于大容量通信[92] 以及量子任务模拟[88] 中。

受到 SU(2) 相干态光场的调控启发，本课题组也基于矢量涡旋激光器探索研究了自由度的扩展[93]，如图 3(e) 中通过折叠腔结构引入路径自由度，与 SAM-OAM 耦合元件共同作用，在激光光源内实现三自由度的协同调控以及不可分离态的直接生成，实验生成并验证了八种类 GHz 态，保真度达到 95%以上。

3.2 涡旋阵列光场

同样，结合路径或者波矢自由度，还可以获得具有不同空间排列结构的标量或矢量涡旋光束阵列，可以用于以多点光镊[94] 为例的同时需要多路光束的领域内。涡旋光束阵列是指一种光束按一定位置规律排布的光场形式，早期常采用单一 OAM 调控结合分束光学系统的方式获得，这一方式下系统结构冗杂且不稳定。目前，涡旋阵列光场调控的主流方式是基于衍射理论，采用定制的衍射光学元件，利用衍射级次排布光场，这样为各衍射级次光场的各向异性调控新自由度的拓展提供了可能。下面主要以本组在涡旋阵列光场的生成工作[67, 95-100] 为例，梳理在此复杂光场中多个自由度的协同调控方法。

2016 年，本课题组设计了一种新型的一维编码全息光栅，可以实现涡旋阵列在空间位置分布和 OAM 模式两个自由度上的调控[95]，基模高斯光束经该光栅作用后将会在远场衍射区域形成衍射级次和各衍射级次上 OAM 模式可调的线型涡旋光束阵列。随后结合简易光学系统，入射两个加载不同相位信息的级联液晶空间光调制器，对涡旋阵列的不同正交偏振模式先后进行调控、生成了不同的线性矢量涡旋光束阵列，实现了涡旋阵列在空间位置分布、OAM 模式和 SAM 模式三个自由度上的调控。随后，本课题组更换二维编码全息光栅，同时对各空间位置上左右旋正交偏振分量的 OAM 阶次和复振幅大小同时进行调控[99]，如图 4(a) 所示，叠加生成了混合庞加莱光束

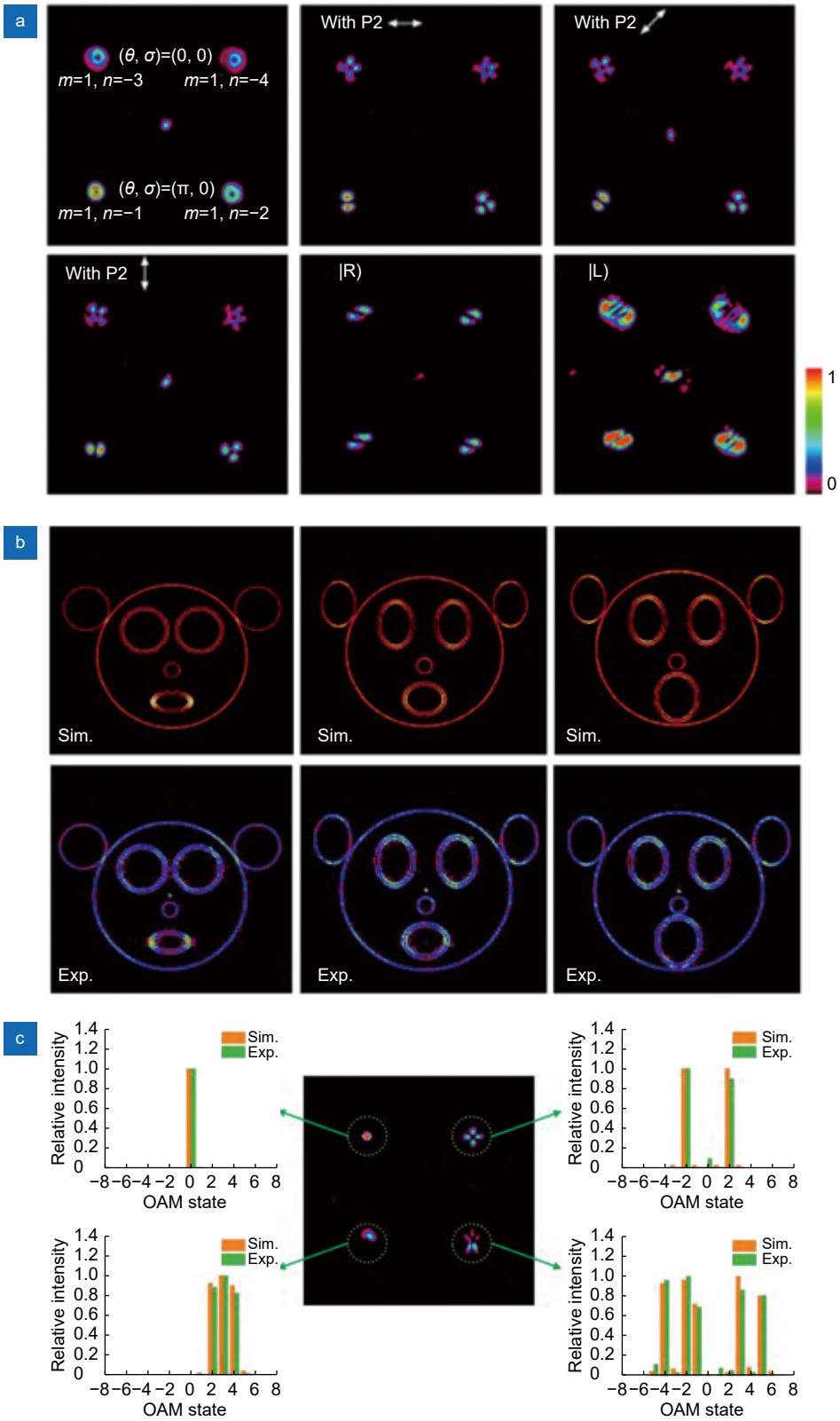


图 4 多自由度耦合的复杂涡旋阵列光场。(a) 二维光栅调控 SAM-OAM 产生的矢量涡旋阵列[99]; (b) 由纯相位光栅调控的五自由度矢量涡旋阵列[98]; (c) 三自由度调控下的高维涡旋阵列[100]

Fig. 4 The complex vortex array coupled by multi-DoFs. (a) The vector vortices array manipulated by 2D grating[99]; (b) The five DoFs manipulation on vector vortices array using phase-only grating[98]; (c) The higher dimensional vector vortices array manipulated by 3-DoFs[100]

阵列，实现了对涡旋阵列在空间位置分布、OAM 模式、SAM 模式和复振幅四个自由度上的调控。2020 年，一种可以实现完美涡旋光束阵列的多自由度调控的光栅被提出[98]，该光栅的透过率函数由贝塞尔函数、余弦函数、螺旋位相等相互叠加，经过纯相位化后得到，通过调节光栅相关参数可以实现对完美涡旋光束阵列的空间位置分布、OAM 模式、环数、束腰椭圆度、束腰半径五个自由度的任意调控(图 4(b))。在此基础上，本课题组进一步提出一种集成纯相位光栅[100]，采用棋盘相格模拟振幅调制，对入射光场进行复振幅调制，成功将基模高斯光束转化为多模复用的涡旋光束阵列，实现对涡旋阵列的空间位置分布、OAM 模式和复振幅三个自由度的调控。通过调整光栅的设计参数，可以灵活操控多模复用涡旋光束阵列的空间位置分布和不同空间位置处多模复用涡旋光束的 OAM 谱分布，如图 4(c) 所示，在高维数据分发系统中作为数据载体得到了实际的应用验证。

由于涡旋阵列光场在腔内的模式转换过程中很难实现模式自再现，所以上述工作都限于腔外调控。近期意大利理工学院的 Piccardo 等提出一种插入了特殊设计的超表面的固体激光器[101]，可以产生 10×10 的涡旋激光器阵列，结合了 SAM-OAM 耦合机理，实现了 OAM、SAM、空间结构分布以及频率等多自由度的腔内调控。

3.3 时空光场

前述各“超自由度”光场所涉及的协同调控多局限于空间域自由度，尽管自激光问世以来对时间自由度的单独调控一直是研究热点，可直至近日，将时间自由度与新型空间域自由度耦合协同调控产生多维光场的技术才引起了研究者的重视，可用以激发特定的物理过程[102-103]，以此制造螺旋微纳结构[104]、激发新的非线性效应[105]以及模拟凝聚态物质中拓扑结构[48]等。

2020 年，美国南加州大学的 Zhao 等人提出了一种可结合 OAM 自由度的时空光束的产生方法[106]，将不同 LG 模式添加于光频梳的不同频率上，将频率与空间分布相结合，产生了具有两种形式的轨道角动量动态时空结构光场，如图 5(a) 所示。同年，上海理工大学的 Chong 等人首次生成并测量了新型时空涡旋光场[107]，体现为具有横向轨道角动量分布的短脉冲波包，这种结合了新型自由度的双自由度调控光场在时空光场中具有分水岭意义 (图 5(b))，进而，又提出了可利用时空涡旋和空间涡旋之间的碰撞，对光子角动量三维方向进行精确控制[108]。2022 年，该团队在已有的时空光场生成装置中加入一片 QWP，增加了 SAM 可调自由度，生成了矢量时空涡旋光场[109]，如图 5(c) 中所示。同年，同组的 Wan 等人提出了“光学涡环”[110]，在前述工作的基础上加入扩束系统和保角变换系统，将沿涡线方向拉伸的时空涡管映射为

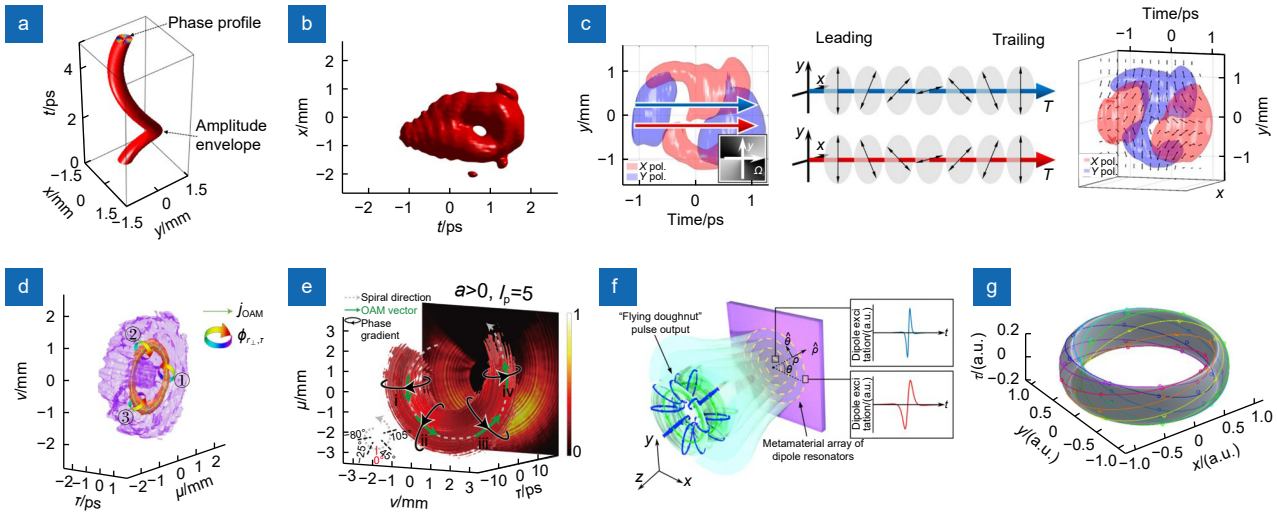


图 5 时空域多自由度协同调控光场。(a) 双 OAM 可调时空光场[106]；(b) 标量时空涡旋光场[107]；(c) 矢量时空涡旋光场[109]；(d) “光学涡环”[110]；(e) “光学海螺”[111]；(f) 超表面调控环形脉冲[112]；(g) 超越二维拓扑结构的光学霍普夫子[113]

Fig. 5 The novel structured beams manipulated by multi-DoFs in the space-time domain. (a) Spatiotemporal beams with two OAMs[106]; (b) The schematic diagram of scalar spatiotemporal vortices[107]; (c) The experimental scheme and the mode conversion of vector spatiotemporal vortices[109]; (d) Vortex rings of light[110]; (e) “Photonic conchs” [111]; (f) Flying electromagnetic doughnuts manipulated by metasurface[112]; (g) The photonic hopfions with 3D topological structure[113]

“光学涡环”，即具有中空环状光强分布的涡旋波包(图 5(d))。2024 年，南京大学 Chen 等人提出了具有不同拓扑荷的手性对称性破缺“光学涡环”[111]，也可以被称为“光子海螺”(图 5(e))，将手性作为全新维度引入多自由度时空光场的调控机理。

采用超表面的特殊微纳结构设计可以辅助实现在空间和时间等自由度上更高维度的调控。2018 年，英国南安普顿大学团队等采用了一种由电偶极子谐振腔构成的超表面器件，该器件电偶极子方向、谐振频率和线宽在整个阵列中随空间变化分布，图 5(g) 中展示了对电磁场的时空及偏振模式的操控[112]；随后于 2021 年，该团队基于此原理定制了一种纳米超表面环形光脉冲发射器[114]，在实验中产生了光学环形光脉冲和太赫兹环形光脉冲。2021 年，斯坦福大学的研究团队设计了单个无源非局部超薄纳米光子平面，实现了具有可控群速度和传输距离的三维“光弹”的输出以及对其内部自由度[115](如自旋角动量和轨道角动量等) 的调控。

此外，具有任意轨道角动量指向以及可以同时携带多种光学奇点的新型时空光场、具有时空涡旋和环向空间涡旋的光学涡环[113]——霍普夫子等也在时空调控领域引起了广泛关注和进一步的深入研究，其结构如图 5(g) 所示。

4 结　论

本文对近年来的多光束协同调控技术进行了综述，从调控自由度的类型与数量出发对双自由度矢量涡旋光场以及“超自由度”复杂结构光场进行了介绍。同时，重点介绍了本课题组在该领域内的代表性成果，包括矢量涡旋光束的腔内调控、五自由度涡旋阵列的生成以及经典不可分离态构造等，讨论了各类复杂光场的实际以及潜在应用可能与调控方法的优劣。当然，由于光场自由度类型丰富，协同组合方式多样，文中并没有涵盖所有的复杂结构光场，而是选取了最具代表性和应用价值的常见结构光场，在对其调控机理的深入研究中也不难发现进一步拓展的可能。

尽管现有的复杂结构光场已得到了巨大的发展和应用，但是仍然还有调控局限性，可以从三个方面概括：

1) 可调自由度数目的限制。SU(2) 光场和涡旋阵列光场可以达到六个自由度甚至七个自由度的协同调控，但是超过七个自由度的结构光场鲜有实验报道，且其中部分调控自由度应用价值低，不具有内禀性质。而在时空维度内的协同调控光场中，可调自由度数目更加受限，除了横向轨道角动量外，构造出新型的时空耦合自由度还较为困难。

2) 可调维度的局限性，以矢量涡旋光场为例，SAM 仅具有两个本征值，维度扩展能力差。同时，OAM 虽然具有无穷维度且具有正交性，但是 OAM 的实际可生成阶次不高，模式复用能力仍存在限制。此外，复杂结构光场的路径、波矢等自由度也都有空分复用、模分复用的应用难度，构造诸如 OAM 的无限可调自由度并提升调控灵活性是亟待解决的问题。

3) 调控生成方法的限制。目前绝大多数的多自由度复杂结构光场都由腔外调控器件产生，这种方式生成的光场集成性和稳定性都较低，对应的解决方式是采用腔内调控的方式，但受到本征振荡模式以及器件损伤阈值的限制，影响了调控的灵活性，这对新型调控机理、新型调控器件材料都提出了巨大挑战。

除此之外，诸如光学斯格明子、霍普夫子等新型拓扑结构光场仍保留了未来的研究发展可能，可以推动实现高精度的光学加工、高速的光通信、精准的生物医学应用、量子信息处理以及光学陷阱和光力操控等领域的潜在应用，推动光场调控领域的发展和进步。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] Forbes A, de Oliveira M, Dennis M R. Structured light[J]. *Nat Photonics*, 2021, **15**(4): 253−262.

[2] Forbes A. Structured light from lasers[J]. *Laser Photonics Rev*, 2019, **13**(11): 1900140.

[3] Li W, Yu J W, Yan A M. Research progress of vortex beam array generation technology[J]. *Laser Optoelectron Prog*, 2020, **57**(9): 090002.

[4] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers[J]. *Nat Photonics*, 2013, **7**(11): 868−874.

[5] Fortier T, Baumann E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. *Commun Phys*, 2019, **2**(1): 153.

[6] Chang L, Liu S T, Bowers J E. Integrated optical frequency comb technologies[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(2): 95−108.

[7] Zuo J X, Lin X C. High-power laser systems[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(5): 2100741.

[8] Rosales-Guzmán C, Ndagano B, Forbes A. A review of complex vector light fields and their applications[J]. *J Opt*, 2018, **20**(12): 123001.

[9] Zheng S J, Lin X, Huang Z Y, et al. Light field regulation

based on polarization holography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(11): 220114.
郑淑君, 林枭, 黄志云, 等. 基于偏光全息的光场调控研究进展[J]. 光电工程, 2022, **49**(11): 220114.

[10] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes[J]. *Phys Rev A*, 1992, **45**(11): 8185−8189.

[11] Zhang Z C, Hai L, Fu S Y, et al. Advances on solid-state vortex laser[J]. *Photonics*, 2022, **9**(4): 215.

[12] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2011, **3**(2): 161−204.

[13] Zeng R Y, Zhao Q, Shen Y J, et al. Structural stability of open vortex beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2021, **119**(17): 171105.

[14] Bai Y H, Lv H R, Fu X, et al. Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum [Invited][J]. *Chin Opt Lett*, 2022, **20**(1): 012601.

[15] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nat Photonics*, 2012, **6**(7): 488−496.

[16] 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.

[17] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Adv Opt Photonics*, 2015, **7**(1): 66−106.

[18] Yu S Y. Potentials and challenges of using orbital angular momentum communications in optical interconnects[J]. *Opt Express*, 2015, **23**(3): 3075−3087.

[19] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. *Photonics Res*, 2016, **4**(5): B14−B28.

[20] Fu S Y, Zhai Y W, Zhou H, et al. Demonstration of high-dimensional free-space data coding/decoding through multi-ring optical vortices[J]. *Chin Opt Lett*, 2019, **17**(8): 080602.

[21] Fu S Y, Zhai Y W, Zhou H, et al. Experimental demonstration of free-space multi-state orbital angular momentum shift keying[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(23): 33111−33119.

[22] Fu S Y, Zhai Y W, Zhou H, et al. Demonstration of free-space one-to-many multicasting link from orbital angular momentum encoding[J]. *Opt Lett*, 2019, **44**(19): 4753−4756.

[23] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum[J]. *Science*, 2013, **341**(6145): 537−540.

[24] Lavery M P J, Barnett S M, Speirits F C, et al. Observation of the rotational Doppler shift of a white-light, orbital-angular-momentum-carrying beam backscattered from a rotating body[J]. *Optica*, 2014, **1**(1): 1−4.

[25] Fang L, Padgett M J, Wang J. Sharing a common origin between the rotational and linear doppler effects (Laser Photonics Rev. 11(6)/2017)[J]. *Laser Photonics Rev*, 2017, **11**(6): 1770064.

[26] Fu S Y, Wang T L, Zhang Z Y, et al. Non-diffractive Bessel-Gauss beams for the detection of rotating object free of obstructions[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(17): 20098−20108.

[27] Zhang W H, Gao J S, Zhang D K, et al. Free-space remote sensing of rotation at the photon-counting level[J]. *Phys Rev Appl*, 2018, **10**(4): 044014.

[28] Qiu S, Liu T, Ren Y, et al. Detection of spinning objects at oblique light incidence using the optical rotational Doppler effect[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(17): 24781−24792.

[29] Zhai Y W, Fu S Y, Yin C, et al. Detection of angular acceleration based on optical rotational Doppler effect[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(11): 15518−15527.

[30] Zhai Y W, Fu S Y, Zhang J Q, et al. Remote detection of a rotator based on rotational Doppler effect[J]. *Appl Phys Express*, 2020, **13**(2): 022012.

[31] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. *Nat Photonics*, 2011, **5**(6): 343−348.

[32] Chen M Z, Mazilu M, Arita Y, et al. Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam[J]. *Opt Lett*, 2013, **38**(22): 4919−4922.

[33] Gecevičius M, Drevinskas R, Beresna M, et al. Single beam optical vortex tweezers with tunable orbital angular momentum[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**(23): 231110.

[34] Liang Y S, Yao B L, Ma B H, et al. Holographic optical trapping and manipulation based on phase-only liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, **36**(3): 309001.

[35] Yang Y J, Ren Y X, Chen M Z, et al. Optical trapping with structured light: a review[J]. *Adv Photonics*, 2021, **3**(3): 034001.

[36] Fickler R, Lapkiewicz R, Huber M, et al. Interface between path and orbital angular momentum entanglement for high-dimensional photonic quantum information[J]. *Nat Commun*, 2014, **5**(1): 4502.

[37] Cao H, Gao S C, Zhang C, et al. Distribution of high-dimensional orbital angular momentum entanglement over a 1 km few-mode fiber[J]. *Optica*, 2020, **7**(3): 232−237.

[38] Li Z X, Zhu D, Lin P C, et al. High-dimensional entanglement generation based on a Pancharatnam-Berry phase metasurface[J]. *Photonics Res*, 2022, **10**(12): 2702−2707.

[39] Shen Y J, Rosales-Guzmán C. Nonseparable states of light: from quantum to classical[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(7): 2100533.

[40] Wan Z S, Wang H, Liu Q, et al. Ultra-degree-of-freedom structured light for ultracapacity information carriers[J]. *ACS Photonics*, 2023, **10**(7): 2149−2164.

[41] Liu Y L, Dong Z, Chen Y H, et al. Research advances of partially coherent beams with novel coherence structures: engineering and applications[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(11): 220178.
刘永雷, 董震, 陈亚红, 等. 新型相干结构光场调控及应用研究进展[J]. 光电工程, 2022, **49**(11): 220178.

[42] Zhang D K, Feng X, Cui K Y, et al. Identifying orbital angular momentum of vectorial vortices with pancharatnam phase and stokes parameters[J]. *Sci Rep*, 2015, **5**(1): 11982.

[43] Niziev V G, Nesterov A V. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1999, **32**(13): 1455−1461.

[44] Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. *Appl Phys A Mater Sci Process*, 2007, **86**(3): 329−334.

[45] Zhao W Q, Tang F, Qiu L R, et al. Research status and application on the focusing properties of cylindrical vector beams[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, **62**(5): 054201.

[46] Zhou Z H, Tan Q F, Jin G F. Surface plasmon interference formed by tightly focused higher polarization order axially symmetric polarized beams[J]. *Chin Opt Lett*, 2010, **8**(12): 1178−1181.

[47] Töppel F, Aiello A, Marquardt C, et al. Classical entanglement in polarization metrology[J]. *New J Phys*, 2014, **16**: 073019.

[48] Shen Y J, Zhang Q, Shi P, et al. Optical skyrmions and other topological quasiparticles of light[J]. *Nat Photonics*, 2024, **18**(1): 15−25.

[49] Lazarev G, Chen P J, Strauss J, et al. Beyond the display: phase-only liquid crystal on Silicon devices and their applications in photonics [Invited][J]. *Opt Express*, 2019, **27**(11): 16206−16249.

[50] Mirhosseini M, Magaña-Loaiza O S, Chen C C, et al. Rapid generation of light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(25): 30196−30203.

[51] Ren Y X, Li M, Huang K, et al. Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(10): 1838−1844.

[52] 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]. *Appl Opt*, 2015, **54**(27): 8030−8035.

[53] Ji W, Lee C H, Chen P, et al. Meta-q-plate for complex beam shaping[J]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 25528.

[54] Zhou H, Yang J Q, Gao C Q, et al. High-efficiency, broadband all-dielectric transmission metasurface for optical vortex generation[J]. *Opt Mater Express*, 2019, **9**(6): 2699−2707.

[55] 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.

[56] Shaltout A M, Shalaev V M, Brongersma M L. Spatiotemporal light control with active metasurfaces[J]. *Science*, 2019, **364**(6441): eaat3100.

[57] Jones P H, Rashid M, Makita M, et al. Sagnac interferometer method for synthesis of fractional polarization vortices[J]. *Opt Lett*, 2009, **34**(17): 2560−2562.

[58] Liu S, Li P, Peng T, et al. Generation of arbitrary spatially variant polarization beams with a trapezoid Sagnac interferometer[J]. *Opt Express*, 2012, **20**(19): 21715−21721.

[59] Li P, Zhang Y, Liu S, et al. Generation of perfect vectorial vortex beams[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(10): 2205−2208.

[60] Liu S, Qi S X, Zhang Y, et al. Highly efficient generation of arbitrary vector beams with tunable polarization, phase, and amplitude[J]. *Photonics Res*, 2018, **6**(4): 228−233.

[61] Maurer C, Jesacher A, Fürhapter S, et al. Tailoring of arbitrary optical vector beams[J]. *New J Phys*, 2007, **9**: 78.

[62] 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]. *Opt Lett*, 2007, **32**(24): 3549−3551.

[63] Xie Y Y, Cheng Z J, Liu X, et al. Simple method for generation of vector beams using a small-angle birefringent beam splitter[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(21): 5109−5112.

[64] Shen Y J, Martínez E C, Rosales-Guzmán C. Generation of optical skyrmions with tunable topological textures[J]. *ACS Photonics*, 2022, **9**(1): 296−303.

[65] Moreno I, Davis J A, Cottrell D M, et al. Encoding high-order cylindrically polarized light beams[J]. *Appl Opt*, 2014, **53**(24): 5493−5501.

[66] Fu S Y, Gao C Q, Shi Y, et al. Generating polarization vortices by using helical beams and a Twyman Green interferometer[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(8): 1775−1778.

[67] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Generating perfect polarization vortices through encoding liquid-crystal display devices[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(23): 6501−6505.

[68] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**(16): 163905.

[69] Yi X N, Ling X H, Zhang Z Y, et al. Generation of cylindrical vector vortex beams by two cascaded metasurfaces[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(14): 17207−17215.

[70] Fu S Y, Gao C Q, Wang T L, et al. Simultaneous generation of multiple perfect polarization vortices with selective spatial states in various diffraction orders[J]. *Opt Lett*, 2016, **41**(23): 5454−5457.

[71] Yue F Y, Wen D D, Zhang C M, et al. Multichannel polarization-controllable superpositions of orbital angular momentum states[J]. *Adv Mater*, 2017, **29**(15): 1603838.

[72] Zhang X, Huang L L, Zhao R Z, et al. Multiplexed generation of generalized vortex beams with on-demand intensity profiles based on metasurfaces[J]. *Laser Photonics Rev*, 2022, **16**(3): 2100451.

[73] Wu H S, Zeng Q J, Wang X R, et al. Polarization-dependent phase-modulation metasurface for vortex beam (de)multiplexing[J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(6): 1129−1135.

[74] Ke L, Zhang S M, Li C X, et al. Research progress on hybrid vector beam implementation by metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(8): 230117.
柯岚, 章思梦, 李晨霞, 等. 超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展[J]. 光电工程, 2023, **50**(8): 230117.

[75] Naidoo D, Roux F S, Dudley A, et al. Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser[J]. *Nat Photonics*, 2016, **10**(5): 327−332.

[76] Fan J T, Zhao J, Shi L P, et al. Two-channel, dual-beam-mode, wavelength-tunable femtosecond optical parametric oscillator[J]. *Adv Photonics*, 2020, **2**(4): 045001.

[77] Song R, Gao C Q, Zhou H, et al. Resonantly pumped Er: YAG vector laser with selective polarization states at 1.6 μm[J]. *Opt Lett*, 2020, **45**(16): 4626−4629.

[78] Song R, Liu X T, Fu S Y, et al. Simultaneous tailoring of longitudinal and transverse mode inside an Er: YAG laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2021, **19**(11): 111404.

[79] Sroor H, Huang Y W, Sephton B, et al. High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(8): 498−503.

[80] Shen Y J, Wang Z Y, Fu X, et al. SU(2) Poincare sphere: A

generalized representation for multidimensional structured light[J]. *Phys Rev A*, 2020, **102**(3): 031501.

[81] Shen Y J. Rays, waves, SU(2) symmetry and geometry: toolkits for structured light[J]. *J Opt*, 2021, **23**(12): 124004.

[82] Chen Y F, Jiang C H, Lan Y P, et al. Wave representation of geometrical laser beam trajectories in a hemiconfocal cavity[J]. *Phys Rev A*, 2004, **69**(5): 053807.

[83] Dingjan J, van Exter M P, Woerdman J P. Geometric modes in a single-frequency Nd: YVO_4 laser[J]. *Opt Commun*, 2001, **188**(5-6): 345−351.

[84] 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]. *Appl Opt*, 2018, **57**(32): 9543−9549.

[85] Tung J C, Liang H C, Lu T H, et al. Exploring vortex structures in orbital-angular-momentum beams generated from planar geometric modes with a mode converter[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(20): 22796−22805.

[86] Shen Y J, Yang X L, Naidoo D, et al. Structured ray-wave vector vortex beams in multiple degrees of freedom from a laser: erratum[J]. *Optica*, 2020, **7**(12): 1705.

[87] Wan Z S, Wang Z Y, Yang X L, et al. Digitally tailoring arbitrary structured light of generalized ray-wave duality[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(21): 31043−31056.

[88] Shen Y J, Nape I, Yang X L, et al. Creation and control of high-dimensional multi-partite classically entangled light[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 50.

[89] Wang Z Y, Shen Y J, Naidoo D, et al. Astigmatic hybrid SU(2) vector vortex beams: towards versatile structures in longitudinally variant polarized optics[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(1): 315−329.

[90] Wan Z S, Shen Y J, Liu Q, et al. Multipartite classically entangled scalar beams[J]. *Opt Lett*, 2022, **47**(8): 2052−2055.

[91] Pan J, Wang Z Y, Zhan Z Y, et al. Multiaxial super-geometric mode laser[J]. *Opt Lett*, 2023, **48**(7): 1630−1633.

[92] Wan Z S, Shen Y J, Wang Z Y, et al. Divergence-degenerate spatial multiplexing towards future ultrahigh capacity, low error-rate optical communications[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 144.

[93] Hai L, Zhang Z C, Liu S L, et al. Intra-cavity laser manipulation of high-dimensional non-separable states[J]. *Laser Photonics Rev*, 2024, **18**(4): 2300593.

[94] Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 810−816.

[95] Fu S Y, Wang T L, Gao C Q. Perfect optical vortex array with controllable diffraction order and topological charge[J]. *J Opt Soc America A*, 2016, **33**(9): 1836−1842.

[96] Fu S Y, Zhang S K, Wang T L, et al. Rectilinear lattices of polarization vortices with various spatial polarization distributions[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(16): 18486−18491.

[97] Fu S Y, Gao C Q, Wang T L, et al. Detection of topological charges for coaxial multiplexed perfect vortices[C]//*Opto-Electronics and Communications Conference* (*OECC*) *and Photonics Global Conference* (*PGC*), Singapore, 2017: 1–2. https://doi.org/10.1109/OECC.2017.8114895.

[98] Wang H, Fu S Y, Gao C Q. Tailoring a complex perfect optical vortex array with multiple selective degrees of freedom[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(7): 10811−10824.

[99] Fu S Y, Wang T L, Zhang Z Y, et al. Selective acquisition of multiple states on hybrid Poincare sphere[J]. *Appl Phys Lett*, 2017, **110**(19): 191102.

[100] Shang Z J, Fu S Y, Hai L, et al. Multiplexed vortex state array toward high-dimensional data multicasting[J]. *Opt Express*, 2022, **30**(19): 34053−34063.

[101] Piccardo M, de Oliveira M, Toma A, et al. Vortex laser arrays with topological charge control and self-healing of defects[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(5): 359−365.

[102] Yessenov M, Hall L A, Schepler K L, et al. Space-time wave packets[J]. *Adv Opt Photonics*, 2022, **14**(3): 455−570.

[103] Cao Q, Zhan Q W. Spatiotemporal sculpturing of light and recent development in spatiotemporal optical vortices wavepackets (Invited)[J]. *Acta Photonica Sin*, 2022, **51**(1): 0151102.

[104] Ni J C, Wang C W, Zhang C C, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material[J]. *Light Sci Appl*, 2017, **6**(7): e17011.

[105] Ruffato G. Non-destructive OAM measurement via light-matter interaction[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 55.

[106] 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]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1): 4099.

[107] Chong A, Wan C H, Chen J, et al. Generation of spatiotemporal optical vortices with controllable transverse orbital angular momentum[J]. *Nat Photonics*, 2020, **14**(6): 350−354.

[108] Wan C H, Chen J, Chong A, et al. Photonic orbital angular momentum with controllable orientation[J]. *Natl Sci Rev*, 2022, **9**(7): nwab149.

[109] Cao Q, Zheng P K, Zhan Q W. Vectorial sculpturing of spatiotemporal wavepackets[J]. *APL Photonics*, 2022, **7**(9): 096102.

[110] Wan C H, Cao Q, Chen J, et al. Toroidal vortices of light[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(7): 519−522.

[111] Chen W, Liu Y, Yu A Z, et al. Observation of chiral symmetry breaking in toroidal vortices of light[J]. *Phys Rev Lett*, 2024, **132**(15): 153801.

[112] Papasimakis N, Raybould T, Fedotov V A, et al. Pulse generation scheme for flying electromagnetic doughnuts[J]. *Phys Rev B*, 2018, **97**(20): 201409.

[113] Shen Y J, Yu B S, Wu H J, et al. Topological transformation and free-space transport of photonic hopfions[J]. *Adv Photonics*, 2023, **5**(1): 015001.

[114] Zdagkas A, McDonnell C, Deng J H, et al. Observation of toroidal pulses of light[J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(7): 523−528.

[115] Guo C, Xiao M, Orenstein M, et al. Structured 3D linear space-time light bullets by nonlocal nanophotonics[J]. *Light Sci Appl*, 2021, **10**(1): 160.

作者简介

张智超 (1998-)，女，北京理工大学光学工程专业博士研究生。研究方向为激光光场调控技术及应用研究，在 *Laser Photonics & Review*、*Optics Letter*、*Photonics* 等期刊发表 SCI 论文 6 篇，参与国家重点研发计划、国家自然科学基金等课题研究。

E-mail: ofzhangzz@163.com

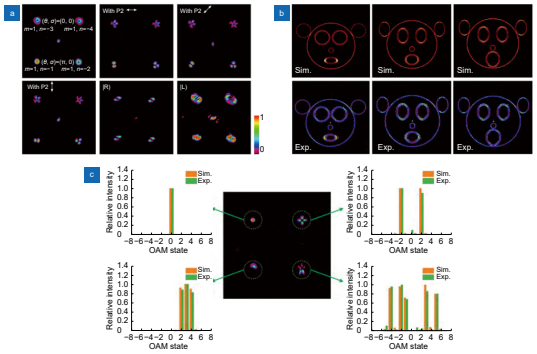
【通信作者】付时尧 (1992-)，男，北京理工大学教授、博导，国家级高层次青年人才。长期从事激光光场调控技术及应用研究，主持国家重点研发计划、国家自然科学基金 (原创探索等)、某基础科研计划等项目十余项，出版专著 2 部，发表论文 60 余篇，获授权发明专利 22 项，多次担任国内外学术会议专题共主席、程序委员会委员等，研究成果已应用于多个系统，并被《人民日报》等媒体报道。曾入选博新计划，获北京市自然科学二等奖 (序 1)、中国电子学会优秀博士论文奖、王大珩光学奖等。现为中国激光杂志社第三届青年编委会委员、《光学学报》等期刊青年编委、中国光学工程学会会刊《红外与激光工程》编委会第一届执行委员会委员等。

E-mail: fushiyao@bit.edu.cn

扫描二维码，获取PDF全文

Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom

Zhang Zhichao[1,2,3], Hai Lan[1,2,3], Zhang Shurui[1,2,3], Gao Chunqing[1,2,3], Fu Shiyao[1,2,3*]



The complex vortex array coupled by multi-DoFs

Overview: By tailoring single or multiple degrees of freedom, structured beams with novel physical properties have gained numerous interests. With the development of modern optics, the increasing advanced applications require more DoFs of laser field to be coupled and flexibly manipulated. Among the various DoFs, SAM, as an intrinsic DoF, has been applied to modulate vector beams. While OAM, as an emerging DoF, decides the vortex beams with helical phase. The coupling of above two enabling the construction of high-dimensional Hilbert space, forms the vector vortex beams with phase and polarization singularities, which has already found broad applications in domains like ultra-large capacity optical communication, remote sensing detection and quantum communication. Besides the vector vortex beams, most structured beams are manipulated by only one or two coupled DoFs, like ray-wave structured light and spatiotemporal light. The ability to simultaneously tailor more DoFs and generate a family of complex structured beams is crucial in the cutting-edge realm. The non-separable states, optical skyrmions and photonic hopfions can be seen as the typical instance. However, there is still a significant challenge to integrate the novel degrees of freedom with the traditional degrees of freedom, limiting the extension and expansion of high-dimensional and multi-dimensional structured beams. In this paper, from the perspective of extent of the multi-DoFs coupling, we systematically review the manipulation methods and a series of corresponding structured beams. Begin with the SAM-OAM coupled vectorial vortex beams, the principle and representation is briefly presented. Classified by the generation mechanism, the extra-cavity and intra-cavity manipulation methods are also summarized. The extra-cavity generation is mainly achieved by combining orthogonally polarized beams with different OAMs, while the intra-cavity manipulation is achieved by inserting SAM-OAM coupling devices like Q-Plate and metasurface. Further, the "super-degree-of-freedom" complex structured light field, denoting the three and more DoFs combined beams, are introduced here: A bunch of SU(2) beams have the unique properties as ray-wave duality, capable of unveiling more flexibly controlled DoFs; complex vortex arrays, manipulated with the path DoF, can be simply achieved by the diffractive optical elements; spatiotemporal vortex beams has extending the OAM to time domain. Such structured beams have already exploited more than five DoFs. Of course, due to the abundant degrees of freedom of the light field and the various ways of combination, this paper does not cover all the complex structured light fields, but selects the most representative and common structured light fields with great practical value, and it is not difficult to find the possibility of further expansion of the degree of freedom in the further study.

Zhang Z C, Hai L, Zhang S R, et al. Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, **51**(8): 240079; DOI: 10.12086/oee.2024.240079

Foundation item: Project supported by National Key Research and Development Program of China (2022YFB3607700), National Natural Science Foundation of China (62375014, 11834001, 61905012, 62101033), and Beijing Natural Science Foundation (1232031)

[1]School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; [2]Key Laboratory of Information Photonics Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China; [3]Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China

* E-mail: fushiyao@bit.edu.cn