

文章编号 1004-924X(2026)16-2460-24

涡旋光束激光器研究进展及中红外波段实现

张羽扬, 郝晨君, 苏乐晨, 李昊翔, 王辰成, 苗 玉, 高秀敏*, 宋 波
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 涡旋光束可由自旋角动量(Spin Angular Momentum, SAM)和轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的叠加态表征, 具有螺旋相位波前和复杂的空间偏振分布, 在显微成像、材料处理、光通信、量子信息等领域应用前景广阔。近年来, 涡旋光束腔内集成化产生技术不断发展, 并在提高模式纯度、输出功率和系统稳定性等方面展现出一定优势。本文系统综述涡旋光束激光器的研究进展, 阐述标量与矢量涡旋光束的产生原理、实现方法与技术特点, 对腔内增益调制、损耗调制、腔外器件调控等方案进行性能对比。针对中红外涡旋光束激光器, 梳理非线性光学上转换与下转换技术路线, 归纳其主要实现路线和代表性研究进展, 并从波长拓展、OAM 模式调控和脉冲特性等方面比较不同方案的性能特点。最后对中红外涡旋激光器的发展趋势进行展望, 以期为相关领域研究提供参考。

关键词: 涡旋光束激光器; 标量涡旋; 矢量涡旋; 中红外激光; 轨道角动量

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263416.2460 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263416.2460

Research progress on vortex lasers and realization in the mid-infrared band

ZHANG Yuyang, HAO Chenjun, SU Lechen, LI Haoxiang, WANG Chencheng,
MIAO Yu, GAO Xiumin*, SONG Bo

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

* Corresponding author, E-mail: gxm@usst.edu.cn

Abstract: Vortex beams possess helical phase wavefronts and carry orbital angular momentum (OAM). According to polarization characteristics, they can be classified as scalar and vector vortex beams. Scalar vortex beams usually have nearly uniform polarization distributions. Vector vortex beams additionally exhibit spatially varying polarization structures. These distinctive field properties support applications in microscopy, material processing, optical communication, and quantum information. In recent years, intracavity generation techniques for vortex beams have continued to develop. They offer advantages in mode purity, output power, and system stability. This review summarizes recent progress in vortex-beam lasers. It introduces the generation principles of scalar and vector vortex beams. It also discusses their implementation methods and technical characteristics. Intracavity gain modulation, intracavity loss modulation, and extracavity device-based control are compared. Their advantages, limitations, and applicable condi-

收稿日期: 2026-05-12; 修订日期: 2026-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62305222)

tions are evaluated. Special attention is given to mid-infrared vortex-beam lasers. The review outlines non-linear optical up-conversion and down-conversion routes. It also summarizes their main implementation approaches and representative research progress. Different schemes are compared in terms of wavelength extension, OAM mode control, and pulse characteristics. Particular emphasis is placed on relationships among laser sources, modulation methods, and conversion processes. The comparison highlights how each route balances flexibility, efficiency, stability, and implementation complexity. The review further distinguishes source-generation problems from vortex-mode control problems. It also discusses the coupling between these two aspects. Key challenges include crystal compatibility, phase matching, thermal effects, and optical damage. Other challenges involve spatial mode matching, mode purity, and faithful OAM transfer. The review finally discusses future development trends. Possible directions include higher mode purity, broader wavelength coverage, shorter pulses, and greater system integration. These discussions support a clearer understanding of current opportunities and remaining limitations. This work aims to clarify the main technical routes in this field. It also provides a reference for future research on mid-infrared vortex-beam lasers.

Key words: vortex beam lasers; scalar vortex beams; vector vortex beams; mid-infrared band; orbital angular momentum

1 引 言

自 1960 年西奥多·梅曼成功研制出世界上第一台激光器以来,激光就以其高亮度、单色性、方向性、高相干性、抗干扰性^[1]等优点受到了各行业的广泛青睐。按照对激光波长的划分,常见的激光器有紫外、可见光、近红外、中红外、远红外等波段,不同波段的激光器在工业制造、军事、医疗等多个领域^[2]有着广泛的应用。然而,随着光通信、量子信息、微纳操控和精密加工等领域对光场自由度、空间模式复用以及能量分布调控能力提出更高要求,传统基模高斯光束虽然仍是多数激光应用中追求的理想模式,但在部分需要复杂相位、偏振或轨道角动量调控的特殊场景中,其单一空间模式难以充分满足多维光场调控需求。因此,光场调控技术的发展为拓展激光模式维度提供了新的途径。通过对光场振幅分布、相位分布以及偏振矢量场空间分布的调控,人们可以构建多种空间结构光场,如涡旋光束、贝塞尔光束、矢量光束等。其中,偏振矢量场空间分布的调控并非仅指改变整束光的整体偏振态,而是指使光束横截面上不同空间位置具有不同的偏振方向、椭圆率或旋向,从而形成空间非均匀偏振结构,这是矢量光束区别于普通均匀偏振光束的重要特征。空间结构光场具有空间结构化的强度、相

位和偏振,在特定的应用领域表现出独特的应用性能。

涡旋光束是携带轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 的特殊结构光束。长久以来,人们只关注到了光的自旋角动量 (Spin Angular Momentum, SAM), 与光场的圆偏振极化态密切相关^[3]。但在 1992 年 Allen^[4] 等人证实拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 模式的激光具有 OAM 之后,针对 OAM 的研究逐渐成为近几十年的前沿研究领域。OAM 提供了多维正交模式,可以实现模分复用,在自由空间光通信方面具有高安全性^[5]、高通信容量和高稳定性^[6] 的优点,并且, OAM 在量子通信^[7-8]、光镊^[9-10]、超分辨成像^[11] 等领域具有潜在应用。而随着光场调控技术的蓬勃发展,对 OAM 的复杂调控已经成为可能,目前单一对光束的 OAM 进行调控已经能够生成足够高纯度和高功率的标量涡旋光束;而对 SAM 和 OAM 同时进行调控可以获得具有多维复用能力的偏振态各向异性分布的矢量涡旋光束。

近年来,国内外在涡旋光束上取得了一系列进展。国内方面,研究人员侧重于矢量涡旋光束生成、模式筛选、高功率和实用化瓶颈突破,形成了完整的技术体系。国际方面,多家国外研究机构围绕涡旋光束的极端物理特性、新奇效应等方

面也取得一些代表性应用成果^[12-13]。

本文将主要对涡旋光束的生成方法进行介绍。获得涡旋光束的方法主要分为两类:激光器腔外调控产生与腔内直接生成。腔外生成是利用外置转换器件对激光器输出的基模高斯光束进行后调制,从而获得涡旋光束;腔内生成则通过特殊谐振腔结构或内置调控器件,直接在谐振腔内制备涡旋光束。二者的核心物理区别在于:腔内产生的涡旋光束是谐振腔的本征模式,满足腔的自洽振荡条件,可在腔内直接起振、放大并稳定输出;而腔外涡旋光束由器件转换得到,并非谐振腔本征模式,无法在腔内自维持振荡。因此,腔外方法虽具有结构灵活、系统成本较低、调控方式简便等优势,但所获涡旋光束在模式纯度、峰值功率与长期稳定性方面存在固有局限^[14-15]。近年来,腔内直接生成涡旋光束凭借优异的模式特性,成为该领域的重要研究方向。

较为成熟的涡旋光束激光器波段大多处于可见光和近红外波段,其余波段因技术原因发展进程相对滞后。但这些波段的涡旋光束激光器也展现出显著的应用潜力与研究价值,因此近几年来也有学者逐渐重视这方面的研究,中红外涡旋光束激光器便是这期间该波段中发展较为迅速的典型方向。中红外激光因波段位于大气窗口^[16],而且还覆盖了众多分子和原子的吸收峰^[17],在医疗手术^[18]、环境监测^[19]及军事对抗^[20]等领域具备重要的应用价值与应用空间,在传统高斯模式激光器方面已有较多研究积累。而经过调控 OAM 得到的中红外涡旋光束同时具备中红外波段在部分大气窗口中的传输特性^[21-22]和 OAM 模式的高维度复用,比传统中红外高斯模式光束提供有益补充。需要指出的是,中红外涡旋激光器的发展同时受到中红外光源技术与涡旋光场调控技术两方面因素的制约。一方面,中红外激光器及非线性频率转换过程对非线性晶体的透过范围、损伤阈值、相位匹配条件和热管理能力提出较高要求;另一方面,涡旋光束的产生与传输还涉及 OAM 模式纯度、高阶模式稳定性、空间模式匹配以及 OAM 在非线性和转换过程中的保真传递等问题。因此,中红外涡旋激光器并非单纯受限于中红外光源或涡旋光束产生中的某一类问题,而是受到波段拓展与结构光场调

控耦合作用的共同影响,目前仍处于快速发展阶段,系统性综述相对缺乏。

本文围绕“涡旋光束类型及产生机制”和“中红外波段实现”两条主线展开综述。首先,从光场结构和调控自由度出发,梳理标量涡旋光束与矢量涡旋光束的产生原理、实现方法和技术特点;随后,面向中红外波段,归纳基于非线性频率转换和直接中红外发射型光源的涡旋光束产生方案,总结其在波长调谐、高阶模式、短脉冲输出和 OAM 模式传递等方面的研究进展。通过将腔内增益调制、损耗调制、腔外器件调控以及光学参量振荡 (Optical Parametric Oscillation, OPO)、差频产生 (Difference-Frequency Generation, DFG)、和频产生 (Sum-Frequency Generation, SFG) 等非线性频率转换技术纳入统一比较,本文旨在补充现有综述对中红外涡旋光束激光器系统性总结的不足,为相关研究提供参考。本文的整体综述框架如图 1 所示。

2 标量涡旋光束产生原理及方法

2.1 标量涡旋光束产生原理

自 1992 年 Allen 等人发现光学轨道角动量与 LG 模式激光的联系之后,关于特殊光场的研究进入了新的阶段。标量涡旋光束是较早受到关注的涡旋光束光场模型,其本质是具有中空强度分布和螺旋形波前以及各向同性偏振态分布的特殊光束。以最经典的 LG 光束为例,从标量波动方程出发,在柱坐标系下对方程做傍近似,得到波动方程的本征解^[23-24],解的形式为:

$$\begin{aligned} u(r, \varphi, z) = & \frac{C_{lp}^{\text{LG}}}{w(z)} \left(\frac{\sqrt{2} r}{w(z)} \right)^{|l|} \\ & * \exp \left(-\frac{r^2}{w^2(z)} \right) L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right), \\ & * \exp \left(-ik \frac{r^2}{2R(z)} \right) \exp(-il\varphi), \\ & * \exp(-ikz) \exp(-i\psi(z)). \end{aligned} \quad (1)$$

具有式(1)形式解的光束被称为 LG 光束,其中 C_{lp}^{LG} 为常量,具体定义见式(2.2), $w(z)$ 为光束在距离 z 处的半径, $L_p^{|l|}$ 为拉盖尔多项式, $R(z)$ 为瑞利距离, l 为 LG 光束的角向指数,取值为任意

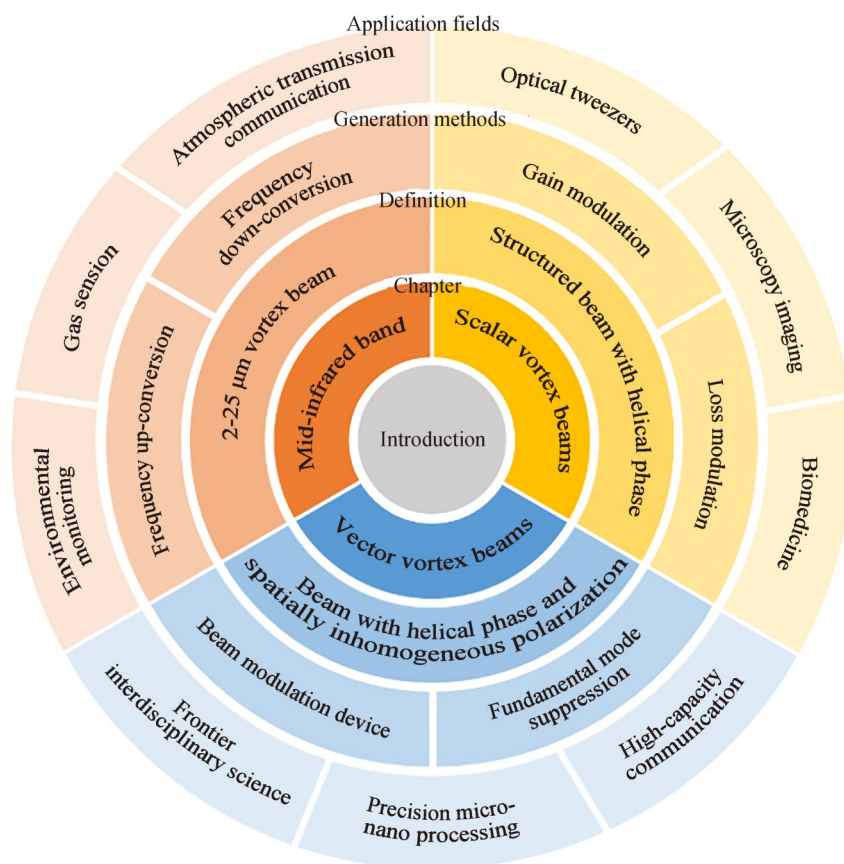


图 1 涡旋光束的分类、产生机制、实现方法及应用场景概述。该图概括了本文的整体综述框架,包括标量涡旋光束和矢量涡旋光束的基本分类,相位/OAM 调控与相位-偏振协同调控等产生机制,以及腔外器件调控、腔内增益调制、腔内损耗调制和模式选择等典型实现方法。同时,该图还突出了中红外涡旋光束激光器中涉及的非线性频率转换、晶体适配、空间模式匹配和 OAM 保真传递等关键问题,并展示了涡旋光束在光通信、量子信息、光学操控、精密加工和成像等领域的应用前景。

Fig. 1 Overview of the classification, generation mechanisms, implementation methods, and application scenarios of vortex beams. This figure summarizes the overall framework of this review, including the basic classification of scalar and vector vortex beams, the corresponding generation mechanisms such as phase/OAM modulation and coupled phase - polarization modulation, as well as typical implementation methods including external device-based modulation, intracavity gain modulation, intracavity loss modulation, and mode-selection mechanisms. It also highlights key issues in mid-infrared vortex beam lasers, such as nonlinear frequency conversion, crystal compatibility, spatial mode matching, and OAM transfer fidelity, and presents the application prospects of vortex beams in optical communication, quantum information, optical manipulation, precision processing, and imaging.

整数, p 为径向指数,取值为任意正整数, $\psi(z)$ 为古伊相移,详见式(3), l 和 p 为 LG 光束的关键变量,前者直接决定光束的螺旋相位结构和 OAM, l 的绝对值越大,螺旋相位的扭转程度越高^[25], OAM 越大;后者决定光束在径向上的光强分布规律, p 越大, LG 光束径向光强分布的亮环数量越多。图 2(a)为对标量涡旋光束的光在不同和数值下的光强分布仿真图,图 2(b)为相位分布仿

真图。

$$C_{lp}^{LG} = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}}, \quad (2)$$

$$\psi(z) = (p+|l|+1) \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right). \quad (3)$$

标量涡旋光束的产生方法较为简便,相较于需同步调控相位与偏振分布的矢量涡旋光束,其仅需对入射光束实施单一相位调制即可实现,无

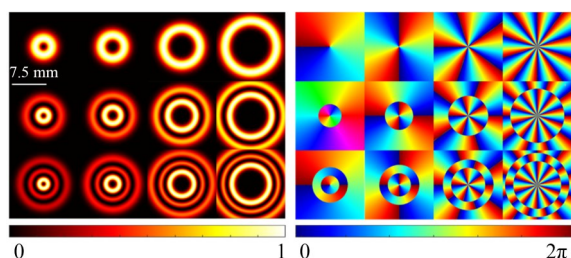


图2 左图为LG光束的光强分布仿真图,从左到右改变 l 的值,数值分别取1,2,5,10;从上到下改变 p 的值,分别取0,1,2;右图为LG光束的相位分布仿真图, l 和 p 的取值与左图对应

Fig. 2 Left is simulation diagrams of the intensity distribution of Laguerre-Gaussian (LG) beams. The value of l (azimuthal index) varies from left to right as 1, 2, 5, and 10; the value of p (radial index) varies from top to bottom as 0, 1, and 2; Right is simulation diagrams of the phase distribution of LG beams, where the values of l and p correspond to those on the left

需额外配置偏振调控组件与复杂干涉光路,对光路结构的精度要求相对宽松,仅依托简单单光路配置搭配常规相位调制器件便可完成制备,降低了光路搭建难度与系统成本,且相关制备技术经过长期研究与工程验证已趋于成熟。凭借独有的OAM特性,可用于OAM模式复用和光学操控等应用场景,既可以利用不同拓扑荷对应OAM态的正交性实现光通信多通道并行传输、扩容通信容量,也能在无需复杂调控系统的前提下完成微粒捕获与旋转操控,适配生物医学、微纳制造等领域的规模化应用需求。

2.2 标量涡旋光束的生成方法及研究现状

腔内直接产生标量涡旋光束的核心思路是模式选择:通过增益调制或损耗调制打破模式简并,使涡旋模式成为最低阈值、优先振荡的模式。早期常通过改变腔内增益的方式来获得标量涡旋光束,具有兼容性强、稳定性高、功率大^[26]、纯度高的优点。图3展示了几种代表性标量涡旋光束激光器的实验结构。2013年, Kim等人提出了一种用毛细管光纤对泵浦光束进行整形,将808 nm泵浦光束转换为近场环形分布,成功输出高纯度 LG_{01} 光束,并可向 LG_{02} 、 LG_{03} 模式扩展^[27]。2017年, Liu等人以Er:LuYAG为增益介质,并利用特制中心打孔反射镜将1 532 nm高斯泵浦

光转换为环形泵浦光,在简单双镜腔内直接产生 $\sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段纯 LG_{01} 模式右旋涡旋光束,实现了连续波与调Q脉冲两种工作模式^[28]。2024年, Zhao等人提出了一种结合了高增益单晶光纤和集成螺旋面输出耦合器的腔体内模式转换方案,单晶光纤使泵浦光经全反射约束形成类波导传输,与共振模式空间匹配,延长有效增益长度,集成螺旋面输出耦合器的螺旋相位结构打破模式简并,通过位置依赖型共振模式适配,实现特定拓扑荷的选择性振荡,该方法得到了最大功率66 W,并在高阶模式($l=8$)下也得到44 W的输出功率,纯度均 $>90\%$,在功率、纯度与高阶模式方面取得代表性进展^[29]。

损耗调制也是获得标量涡旋光束的常见方法之一,通过在腔内引入特定器件或结构,对非涡旋光束施加额外损耗,仅让涡旋模式低损耗振荡,进而实现稳定输出。2018年, Qiao等人采用调Q激光在输出耦合镜表面刻写圆形图案,使局部镀膜层发生改性或损伤,从而在腔内引入空间损耗调制,实现对特定LG涡旋模式的选择性振荡。该方法可直接从激光腔内生成最高288阶的高阶涡旋光束,并证实了所产生涡旋光束具有良好的传输稳定性^[30]。2025年, Liu等人利用半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)辅助克尔锁模与光斑缺陷镜横向模调控的协同机制,通过时空双模调控实现短脉冲涡旋光束的腔内直接生成,半导体可饱和吸收镜辅助克尔锁模使不同纵向模相位锁定,同时半导体可饱和吸收镜的可饱和吸收特性解决了纯克尔锁模启动难、腔对准要求苛刻的问题,且涡旋光束的环形强度分布可避免半导体可饱和吸收镜单点过热,提升稳定性;光斑缺陷镜通过引入空间损耗调制,使LG涡旋光束的泵浦阈值最低,优先振荡,仅当缺陷与腔轴对齐时,可获得清晰的LG模轮廓,该方法实现振荡器直接腔内输出75.7 fs涡旋光束^[31]。

为更清晰地比较不同腔内标量涡旋光束产生方案的性能特点,表1汇总了近年来代表性标量涡旋光束激光器在输出功率、模式阶数、脉冲特性和模式纯度等方面的主要结果。可以看出,标量涡旋光束激光器的发展主要集中在模式可控性、高功率输出、高阶拓扑荷拓展和超短脉冲

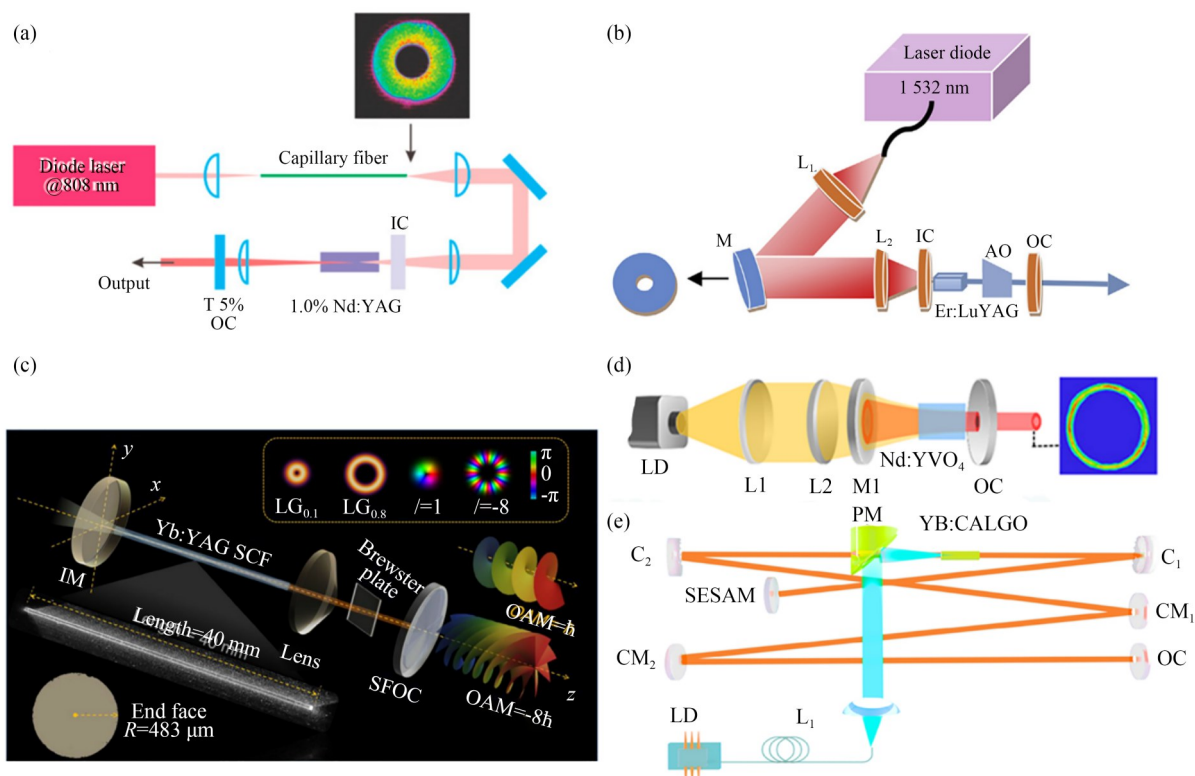


图 3 (a)采用毛细管光纤作为低损耗光束整形元件的光路^[27]; (b)用中心打孔反射镜形成高纯度涡旋光束的光路图^[28]; (c)结合了高增益单晶光纤和集成螺旋面输出耦合器的激光器光路结构及其光束轮廓与相位分布^[29]; (d)激光刻写腔镜实现空间损耗调制的光路结构图^[30]; (e)利用半导体可饱和吸收镜辅助克尔锁模与光斑缺陷镜横向模调控的 Yb:CALGO 涡旋激光振荡器整体结构^[31]

Fig. 3 (a) Optical path using a capillary fiber as a low-loss beam shaping element^[27]; (b) Optical path diagram for generating high-purity vortex beams with a center-punched mirror^[28]; (c) Laser optical path structure combining a high-gain single-crystal fiber and an integrated spiral output coupler, along with its beam profile and phase distribution^[29]; (d) Optical path structure diagram for achieving spatial loss modulation via laser-scribed cavity mirrors^[30]; (e) Overall structure of a Yb:CALGO vortex laser oscillator utilizing a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM)-assisted Kerr mode locking and transverse mode control with a spot-defect mirror^[31]

输出等方向,不同技术路线在输出性能和系统复杂度方面各有侧重。

除上述研究外,近年来标量涡旋光束激光器在模式可控性和功率扩展方面也取得了新的代表性进展。2019年,Wei等人提出了一种基于腔内自旋-轨道角动量转换的固体激光器方案,在 1 064 nm 波段实现了可控 LG_{01} 和 LG_{02} 模式输出,模式纯度分别约为 96.8% 和 92.7%,斜率效率分别为 11.06% 和 5.11%,体现了腔内几何相位调控在高纯度模式选择方面的优势^[32]。2021年,Geberbauer等人采用模式转换输出耦合器,在 Nd:YVO₄ 激光器中实现了 31.3 W 的 LG_{01} 涡旋输出,斜率效率达到 62.5%,模式纯度为

95.2%,并实现最高 600 kHz 的调 Q 工作,展示了该方案在高功率、高效率涡旋输出方面的潜力^[33]。2023年,Chen等人利用 Yb:YAG 薄片激光振荡器实现了最高 101 W 的 LG 涡旋光束输出,进一步将直接腔内产生标量涡旋光束的功率提升至百瓦量级^[34]。为更清晰地比较不同技术路线在工作波长、输出模式、功率水平、脉冲特性、模式纯度和效率等方面的差异,表 1 汇总了几项代表性标量涡旋光束激光器研究的关键性能参数。

总体来看,标量涡旋光束激光器的腔内产生技术已从早期的环形泵浦模式选择,逐步发展到增益分布设计、腔内自旋-轨道角动量转换、模式

表 1 标量涡旋光束激光器代表性研究的关键性能参数对比
Tab. 1 Comparison of key performance parameters in representative scalar vortex beam lasers

Year	Author	Strategy	Wave-length/nm	Mode/TC	Power/energy	Pulse re-gime	Purity / efficiency	Ref.
2013	Kim <i>et al.</i>	Annular pump	1 064	LG ₀₁ -LG ₀₃	410/380/298 mW	CW	$\eta_s=33\%/31\%/29\%$; $M^2=2.0/2.9/3.7$	[27]
2017	Liu <i>et al.</i>	Annular pump with center-punched mirror	1 647.7/ 1 619.5	LG ₀₁	2.6 W/450 mW; 0.66 mJ	CW/Q-switched	65 ns, 1 kHz; right-hand-ed LG ₀₁	[28]
2019	Wei <i>et al.</i>	Intracavity spin-orbit conversion	1 064	LG ₀₁ /LG ₀₂	120 mW for LG ₀₁ ; ~80–90 mW for LG ₀₂	CW	Purity $\approx 97\%/93\%$; $\eta_s\approx 11\%/5.1\%$	[32]
2021	Geberbauer <i>et al.</i>	Mode-transforming OC	1 064	LG ₀₁ /HG ₁₀	31.3 W; 303 μ J at 100 kHz	Q-switched	$\eta_s=62.5\%$; purity $=95.2\%$; up to 600 kHz	[33]
2023	Chen <i>et al.</i>	Thin-disk mode control	1 030	LG ₀₁ , TC $=\pm 1$	101 W	CW	$\eta_s=40.7\%$; $\eta_{o-o}=33.3\%$	[34]
2024	Zhao <i>et al.</i>	SCF+spiral-face OC	~1 030	$l=+1/-8$	63.3 W; >44 W at $l=-8$	CW	$\eta_s=67\%/47\%$; purity>90%	[29]
2018	Qiao <i>et al.</i>	Inscribed loss modulation	1 064	$l=1-288$	0.3–1.0 W; 600 mW at $l=225$	CW	Transmission-stable high-charge vortices	[30]
2025	Liu <i>et al.</i>	SESAM+defect mirror	1 030	LG ₀₁ , $ l =1$	3.2 W	75.7 fs, 59.56 MHz	18.2 nm bandwidth; RMS=0.72% at 2.53 W	[31]

Notes: LG, Laguerre-Gaussian; TC, topological charge; CW, continuous-wave operation; OC, output coupler; HG, Hermite-Gaussian; SCF, single-crystal fiber; SESAM, semiconductor saturable absorber mirror; RMS, root mean square; η_s , slope efficiency; η_{o-o} , optical-to-optical efficiency.

转换输出耦合器、损耗调制以及薄片激光功率扩展等多种技术路线并行发展的阶段。由表 1 可以看出,不同方案在性能侧重点上存在明显差异:环形泵浦方法结构相对简单,可实现 LG₀₁~LG₀₃ 等低阶模式的选择性输出,但输出功率主要处于百毫瓦至瓦级;腔内自旋-轨道角动量转换方法在模式可控性和模式纯度方面具有优势,可实现约 90% 以上的 LG 模式纯度;模式转换输出耦合器和薄片激光器方案提升了输出功率,代表性结果已分别达到 30 W 级和 100 W 级;激光刻写腔镜等损耗调制方法则更适合拓展高阶拓扑荷,可实现最高 288 阶涡旋输出;而 SESAM 辅助克尔锁模结合缺陷镜的方法进一步推动了标量涡旋光束向飞秒脉冲输出方向发展。由此可见,标量涡旋光束激光器的发展并非单一追求某一项性能指标,而是在输出功率、模式纯度、拓扑荷阶数、脉冲宽度和系统稳定性之间进行综合优化。未来研究仍需进一步解决高阶模式下功率扩展

受限、模式纯度保持困难以及短脉冲运行中空模式稳定性不足等问题。

3 矢量涡旋光束产生原理及方法

3.1 矢量涡旋光束产生原理

随着现代光学研究对光场调控维度的需求从单一相位扩展至全矢量空间,矢量涡旋光束因其特有的各向异性偏振分布与螺旋相位结构,逐步成为新的结构光场研究热点。相比于偏振态各向同性的标量涡旋光束,矢量涡旋光束实现了空间极化态与 OAM 的深度耦合,这种多维度的空间特性赋予了光场更高的调控自由度。典型矢量涡旋光束可表示为两个携带不同 OAM 的正交偏振分量的相干叠加;对于常见柱矢量光束,该叠加通常表现为等值异号拓扑荷的左右旋圆偏振分量组合。其电场可采用琼斯矢量表示为式(4)形式:

$$|E\rangle = L_l + R_l = \phi_L |L\rangle + \phi_R |R\rangle, \quad (4)$$

其中: L_l 和 R_l 分别表示左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, ϕ_L 和 ϕ_R 为左右旋圆偏振分量的振幅和初

相位, $|L\rangle = \exp(il_l\varphi)$, $|R\rangle = \exp(il_R\varphi)$, l_l 和 l_R 是拓扑荷数。图4为矢量涡旋光束的光强、相位、偏振分布图。

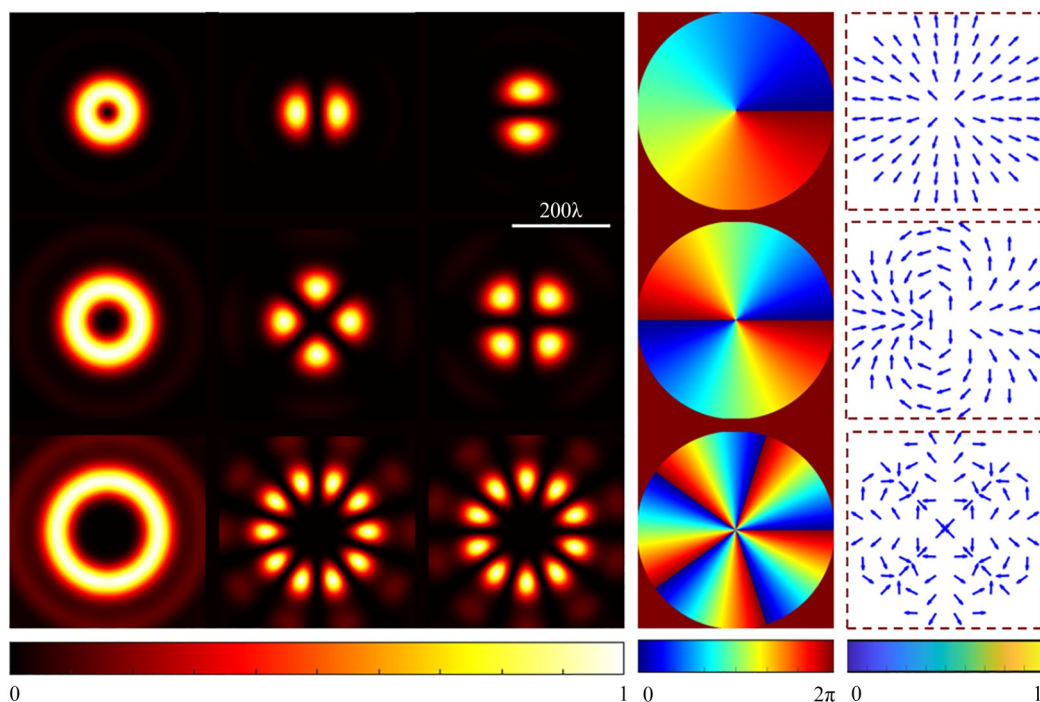


图4 不同阶数矢量涡旋光束的光强、相位及偏振方向分布。左侧区域为矢量涡旋光束的总光强分布及其在两个正交偏振分析方向上的分量强度分布;中间列为对应的相位分布;右侧列为对应的偏振方向分布。各行从上至下分别对应1阶、2阶和5阶矢量涡旋光束

Fig. 4 Intensity, phase, and polarization-orientation distributions of vector vortex beams with different orders. The left group shows the total intensity distributions of vector vortex beams and their component intensity distributions projected along two orthogonal polarization analysis directions. The middle column presents the corresponding phase distributions, and the right column shows the corresponding polarization-orientation distributions. From top to bottom, the rows correspond to first-, second-, and fifth-order vector vortex beams, respectively

矢量涡旋光束因叠加了各向异性偏振分布,可用于超分辨聚焦、偏振-相位多维编码及自旋-轨道协同操控等方向。依托其独特的相位与偏振协同调控优势,矢量涡旋光束在高容量光通信、精密微纳加工及超分辨成像等领域,展现出一定的应用价值与技术竞争力,为相关研究提供了新的技术手段。

3.2 矢量涡旋光束的生成方法及研究现状

在激光腔内生成矢量涡旋光束的方法主要有抑制腔内基模振荡和在腔内置入模式转化器件两种^[35]。抑制模式振荡的核心是筛选目标模式,抑制非目标模式。通过在激光谐振腔内抑制基模,以使拉盖尔高斯横模起振。早年常用环形

泵浦的方式来获得矢量涡旋光束,图5列举了一些典型腔内矢量涡旋光束产生与分选结构。2011年, Kim等人使用自制空心毛细管光纤将Er/Yb光纤激光器的输出耦合到毛细管光纤的内包层传输后形成环形泵浦光束,使其与LG₀₁模式强度分布空间匹配,可生成输出功率13.1 W的1645 nm 矢量涡旋光束,斜率效率达48 %^[36]。虽然后续利用环形泵浦生成的涡旋光束在功率和效率等方面有了较好的进步,但是模式阶次普遍不高^[37-38]。2010年, Ito等人设计了一种低反射率点缺陷镜,可针对性抑制低阶模式振荡,同时允许高阶空心模式稳定振荡,通过调控,可在同一激光腔内成功生成LG标量涡旋光束、LG矢量

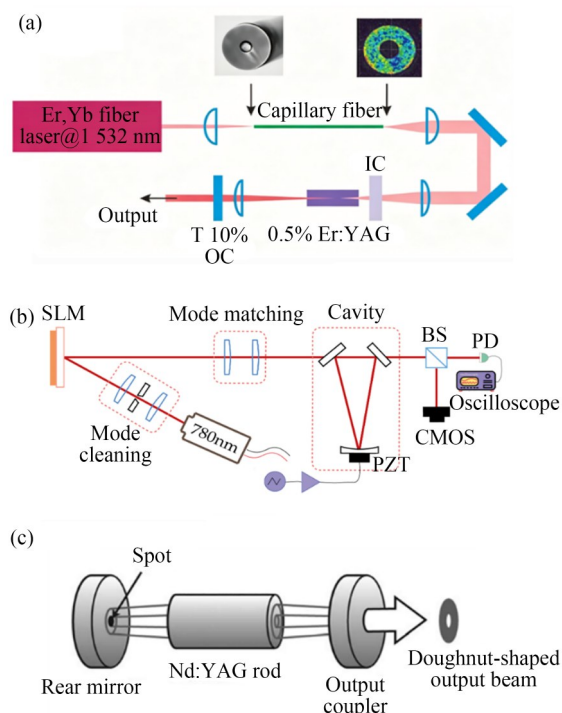


图5 (a) Er:YAG激光器谐振腔示意图。图示分别为毛细管光纤的横截面(左上)及泵浦光出射毛细管光纤后的近场光斑分布图(右上)^[36]; (b)带有点缺陷镜的谐振腔结构^[39]; (c)分选涡旋光束的三角光学腔系统结构图^[40]

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the Er:YAG laser resonator. The insets show the cross-section of the capillary fiber (top left) and the near-field spot distribution of the pump light after exiting the capillary fiber (top right)^[36]; (b) Structure of the resonator with a spot-defect mirror^[39]; (c) System structure diagram of the triangular optical cavity for vortex beam discrimination^[40]

涡旋光束、贝塞尔-高斯矢量光束^[39]。此外,合理利用光学腔特性还可实现对光束模式的分选。2025年,Fagundes等人利用三角光学腔来区分涡旋光束(含OAM)和伪涡旋光束(不含OAM),其核心优势在于利用宇称对称性破缺导致的共振峰分裂来直接关联到光束的波前结构,该研究为结构光的模式分选提供了新方案^[40]。

腔内模式抑制通过在谐振腔内引入模式选择性损耗,抑制基模与非目标模式,使矢量涡旋模优先振荡,具有结构紧凑、稳定性好、集成度高的优点。但该方法在模式阶数、可调谐范围与偏振控制灵活性上存在局限,难以实现大范围任意

矢量涡旋输出。

随着光场调控技术的发展,尤其是应用于光场调控的器件的成熟,如液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)^[41-42],数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)^[43],q波片^[44]等器件的出现,对结构光场的调控难度大大降低,近几年来,通过在激光器光路结构中添加调控器件来生成涡旋光束的方案逐渐成为常用技术路线。

LC-SLM基于液晶电控双折射,通过电场改变液晶分子取向,对入射光的相位/偏振进行调控。LC-SLM由于其可通过编程调控,且工艺成熟,成本适中,是目前常用的调控器件之一。2018年,Zhang等人提出并验证了一种基于反射型纯相位LC-SLM的矢量涡旋光束生成新方法(如图6),该方法是利用LC-SLM和四分之一波片的紧凑结构,结合琼斯矩阵的精准建模,实现了混合阶庞加莱球(Hybrid-order Poincaré Sphere, HyPS)上任意矢量涡旋光束的高效直接生成^[45]。

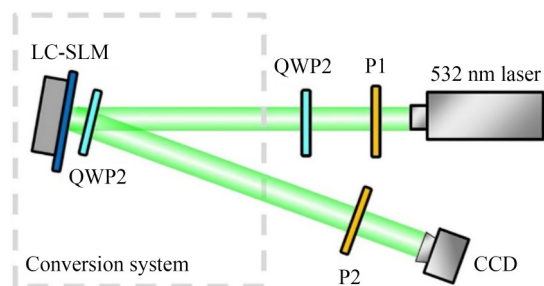


图6 利用反射式LC-SLM产生HyPS上任意矢量涡旋光束的实验装置图^[45]

Fig. 6 Experimental setup diagram for generating arbitrary vector vortex mode beams on the HyPS using a reflective LC-SLM^[45]

DMD是基于微机电系统(Microelectromechanical Systems, MEMS)工艺制造的半导体可控微反射镜阵列芯片,整个芯片由几十万到几百万个独立可转动铝制微镜面排成二维方阵,通过互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)驱动电极产生的静电场驱动微镜 $\pm 12^\circ$ 偏转,实现光信号通断的二进制振幅调制。其灰度由时分频占空比调控,

响应达微秒级,具备高损伤阈值、宽波段适配及高稳定性。2010年, Ren 等人报道了一种利用 DMD 生成 LG 光束的方法^[46],在五年后,该课题组又将 DMD 与二进制编码技术结合,构建了一套厄米-高斯模式光的生成与调控系统^[47](需要指出的是, Ren 等人的工作主要面向标量空间模式或厄米-高斯模式调控,并非严格意义上的矢量涡旋光束产生方案,因此本文仅将其作为腔外可编程结构光调控方法的补充说明)。Li 等提出的一种基于 DMD 的高径向节点矢量涡旋光束产生方法,其实验装置如图 7 所示,通过优化具有可调椭圆率的二值复用全息图,将标量涡旋光束的模式纯度提高至 97.23%;随后结合 Wollaston 棱镜干涉结构,实现了矢量涡旋光束的任意调控。该方法在 632.8 nm He-Ne 激光条件下生成了径向节点数 $p=10$ 的高径向节点矢量涡旋光束,并实现了偏振阶数最高为 25 的矢量涡旋光束输出。进一步地,作者基于 Stokes 参量重构了矢量光束的偏振态分布,并给出了矢量质量因子(Vector Quality Factor, VQF)分析,其中 $l=4, m=-4, p=4$ 的矢量光束在 HOPS 上的 VQF 可达 96%, $l=1, m=-3, p=10$ 的矢量涡旋光束在 HyPS 上的 VQF 可达 98%^[48]。

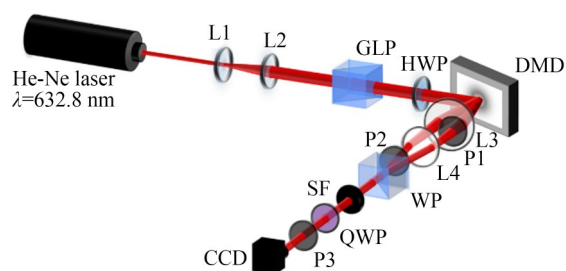


图 7 基于 DMD 的矢量涡旋光束产生与检测实验装置^[48]
Fig. 7 Experimental setup for generation and detection of vector vortex beams based on a DMD^[48]

Q 波片(q-plate)是一种光轴空间渐变的双折射器件,基于几何相位效应,其光轴方位角随极角按 $\theta=q\varphi+\theta_0$ 分布。入射圆偏振光经其作用后发生自旋-轨道角动量转换,可高效生成特定拓扑荷的涡旋光束或矢量光束,具备转换效率高、光路紧凑、无像素衍射等特点。作为一种新兴的光学元器件,目前已在涡旋光束领域应用广泛。2016 年, Naidoo 等人 在激光腔内加入

两块 q 波片,通过调节 q 波片与四分之一波片的角度,可实现高阶庞加莱球(Higher-Order Poincaré Sphere, HOPS)的任意光束可控生成(见图 8(a))^[49]。2025 年, Yao 等人提出一种基于几何相位自旋-轨道转换的方法,仅用单个 q 波片结合由两个四分之一波片和反射镜组成的相位延迟系统(见图 8(b)),实现了最高 16 阶的任意矢量涡旋光束的生成与探测,该系统结构简单、成本低且易集成,同时分析了传播过程中古伊相位偏移对矢量涡旋光束偏振分布的影响,为结构化光操控及量子通信等领域提供了有效解决方案^[50]。

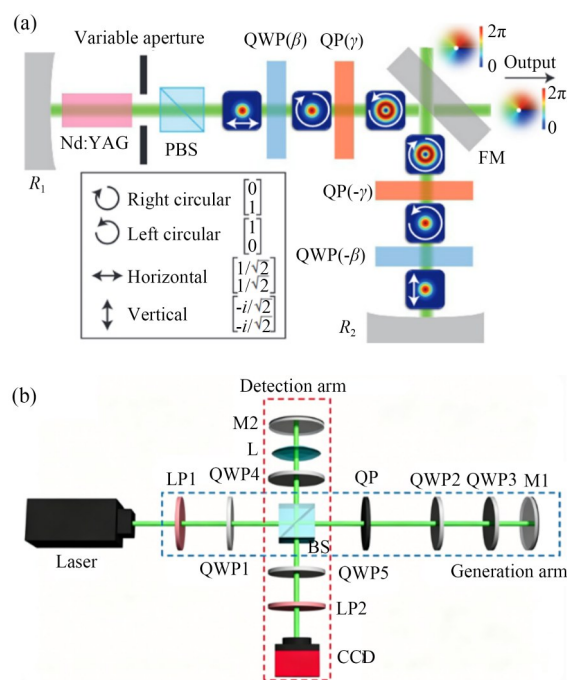


图 8 (a) 利用两个 q 波片调节光束的双臂腔系统结构图^[49]; (b) 单个 q 波片生成和探测任意矢量涡旋光束结构图^[50]

Fig. 8 (a) Structure diagram of the dual-arm cavity system for beam adjustment with two q-plates^[49]; (b) Structure diagram for generating and detecting arbitrary vector vortex mode beams with a single q-plate^[50]

超表面是由亚波长尺度人工纳米结构组成的二维超材料,基于界面电磁共振效应,通过调控纳米单元的几何参数,实现对入射光场相位、振幅、偏振的多自由度突变调控。其厚度远小于

波长,具备微型化、集成化优势。2025年,Gao等人提出一种基于二氧化钒(VO_2)相变的手性 Janus可重构太赫兹超表面,将手性响应、非对称传输特性与热控可重构机制相结合,依托潘查拉特南-贝里(Pancharatnam-Berry,PB)几何相位实现对电磁波波前的精准调控,成功在单一器件上完成多通道涡旋光束的动态生成。该超表面以手性超原子为基本单元,借助 VO_2 的绝缘-金属相

变实现透射与反射工作模式的切换,结合 Janus结构的非对称传输特性与手性结构的圆偏振选择效应,构建出温度、入射方向、偏振态三重独立调控维度,最终实现4路解耦的涡旋光束输出,为太赫兹 OAM复用通信、多通道光信息处理提供了高集成、可动态调控的新型解决方案,有效提升了涡旋光束系统的信道容量与功能灵活性^[51]。

表 2 矢量涡旋光束产生方法代表性研究的关键性能参数对比

Tab. 2 Comparison of key performance parameters in representative vector vortex beam generation methods

Year	Author	Method	System/ λ	Mode	Output/ η	Quality/tunability	Ref.
2011	Kim <i>et al.</i>	AP	Er:YAG/1 645 nm	RP-LG ₀₁	13.1 W; $\eta_s=48\%$; Pth=5.8 W	$M^2=1.9-2.4$	[36]
2019	Chen <i>et al.</i>	AP-ML	Yb:YAG/1 030, 1 050 nm	LG _{0,1} , $l \leq 14$	1.36 W; $\eta_{o-o}=17.5\%$	$M^2 \approx 1+1$; dual- λ	[37]
2010	Ito <i>et al.</i>	SDM	Nd:YAG/ $\sim 1\,064$ nm	V-LG, V-BG	—	LG ₀₁ -LG ₀₈ ; Pol. verified	[39]
2016	Naidoo <i>et al.</i>	IQP	Nd:YAG/ $\sim 1\,064$ nm	HOP, $ l =1, 10$	—	Arbitrary HOP; purity>98%	[49]
2018	Zhang <i>et al.</i>	SLM-QWP	LC-SLM/532 nm	HyOPS-VVB	$\eta_{\text{gen}} \approx 56.3\%$	Arbitrary HyOPS	[45]
2024	Li <i>et al.</i>	DMD-WP	DMD/632.8 nm	$p \leq 10$; $\text{PO} \leq 25$	$\eta_{\text{DMD}} \approx 5\%$; purity=97.23%	VQF=96%, 98%	[48]
2025	Yao <i>et al.</i>	SQP-PDS	QP/532 nm	HyPS-VVB; TC ≤ 16	$\eta_{\text{SO}} > 99.5\%$; Tsys>17.6%	Gouy effect analyzed	[50]
2025	Gao <i>et al.</i>	MS	VO_2 -MS/THz	4-channel VB	3.89–4.07 THz; 6.83 THz	Temp./Dir./ CP control	[51]

Notes: AP, annular pump; AP-ML, annular-pump microchip laser; SDM, spot-defect mirror; IQP, intracavity q-plate; SLM-QWP, liquid-crystal spatial light modulator combined with a quarter-wave plate; DMD-WP, digital micro-mirror device combined with a Wollaston prism; SQP-PDS, single q-plate with a phase-delay system; MS, metasurface; RP-LG₀₁, radially polarized LG₀₁ mode; V-LG, vector Laguerre - Gaussian beam; V-BG, vector Bessel - Gaussian beam; HOP, higher-order Poincaré sphere beam; HyOPS/HyPS, hybrid-order Poincaré sphere; VVB, vector vortex beam; PO, polarization order; TC, topological charge; CP, circular polarization; η_s , slope efficiency; η_{o-o} , optical-to-optical efficiency; η_{gen} , generation efficiency; η_{DMD} , DMD modulation efficiency; η_{SO} , spin - orbit conversion efficiency; Tsys, system transmission efficiency. “—” indicates that output power or efficiency was not emphasized as a key metric in the cited work.

综合上述标量与矢量涡旋光束的产生方式与研究进展,不同技术路线在转换效率、模式纯度、可控拓扑荷范围及系统复杂度等方面呈现出明显差异。腔内增益调制凭借高效率、高纯度与高稳定性,成为高功率标量涡旋光束的优选方案;腔内损耗调制能够实现超高阶涡旋模式输出,但在效率与输出功率方面存在一定限制。腔

外相位调制方式结构简洁、调谐灵活,适用于原理性演示,却因不属于谐振本征模式而难以保证长期稳定性。

对于矢量涡旋光束,因其需要实现相位与偏振的协同调控,制备难度更高。腔内模式抑制方法集成度较高,但模式阶数与可调谐范围有限;基于 q 波片、超表面等器件的腔外调控方式可实

现任意矢量涡旋光场的灵活构建,是当前多维结构光场调控的重要技术路线,但光路相对复杂,对系统对准与环境稳定性要求较高。整体而言,腔内直接生成涡旋光束在模式质量、输出性能与系统稳定性方面具有一定优势,已成为高性能涡旋激光器的重要发展趋势。

4 中红外涡旋光束激光器

当前涡旋光束激光器的综述研究多集中于可见光与近红外波段,针对中红外波段的系统性综述仍相对有限。为此,本文对中红外涡旋光束激光器展开系统梳理与总结,阐明其在大气传输、分子光谱、环境监测、生物医疗成像等场景中独特的应用潜力,并系统归纳中红外涡旋光源在波长调谐、高阶模式、短脉冲和高功率输出等方面的研究进展,弥补了现有综述中对中红外涡旋光束激光器这一细分方向关注不足的问题。尽管一般涡旋光束的产生与调控技术已日趋成熟,但将涡旋光束拓展至中红外波段时,既需解决中红外光源在晶体材料和相位匹配方面的限制,也需保证涡旋模式在频率转换过程中的模式纯度与 OAM 传递保真。而特殊波段涡旋激光可将结构光场的独特物理特性与特定频段的物质相互作用优势深度融合,有望拓宽应用场景与实用价值,这也让中红外涡旋光束激光器的研究兼具重要科学意义与工程应用前景。

4.1 中红外激光器简介

关于中红外波段的边界,在不同标准和应用领域的划分并不完全一致。按照 ISO 20473:2007 光学与光子学标准,中红外波段通常定义为 $3\sim 50\ \mu\text{m}$ ^[52];而在红外光谱学中,中红外区域常对应波数范围 $4\ 000\sim 400\ \text{cm}^{-1}$,即波长约为 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$,主要覆盖分子振动吸收和指纹谱区。此外,在中红外光子学^[53]和中红外激光^[54]研究中, $2\ \mu\text{m}$ 以上波段也常被纳入广义中红外讨论范围。考虑到本文所综述的中红外涡旋光束激光器涉及 $2\ \mu\text{m}$ 附近激光源、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 大气窗口以及 $6\sim 12\ \mu\text{m}$ 非线性频率转换输出,本文将 $2\sim 12\ \mu\text{m}$ 作为中红外涡旋光束激光器相关研究的主要讨论范围。其中, $2\sim 3\ \mu\text{m}$ 可视为近红外向中红外过渡的短波中红外区域, $3\sim 12\ \mu\text{m}$

则属于严格标准意义下的中红外范围。中红外激光应用广泛,并且目前发展较为成熟。根据中红外激光的产生机制和实现方式,可将其大体分为直接发射型中红外激光器和非线性频率转换型中红外光源两类。直接发射型中红外激光器依靠特定工作介质在中红外波段直接实现粒子数反转和受激辐射,主要包括化学激光器、气体激光器、稀土离子或过渡金属离子掺杂的固体/光纤激光器以及半导体量子级联激光器等。非线性频率转换型中红外光源则不依赖中红外增益介质直接发光,而是利用二阶非线性效应将近红外或其他波段激光转换至中红外波段,典型技术包括 SESAM, SFG, OPO 等。化学激光器是较早实现高功率红外激光输出的重要技术路线,典型体系包括氟化氢(HF)^[55]、溴化氢(HBr)^[56]等分子化学激光器。此类激光器具有输出功率高、能量扩展能力强等特点,连续输出功率可达千瓦级^[57]。然而,化学激光器通常需要复杂的反应介质供给、尾气处理和安全防护系统,装置体积较大且运行维护不便,因此在小型化、可调谐和结构光场集成等应用场景中受到一定限制;稀土离子掺杂固体/光纤激光器是中红外激光的重要技术路线之一,主要利用稀土离子的 4f 能级跃迁实现激光输出。常见掺杂离子包括 Tm^{3+} ^[58], Ho^{3+} ^[59], Er^{3+} ^[60], Dy^{3+} ^[61]等,其中 Tm^{3+} , Ho^{3+} 通常对应约 $2\ \mu\text{m}$ 波段, Er^{3+} 可实现约 $2.7\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段输出, Dy^{3+} 等离子也被用于更长波长中红外激光研究。此类激光器可采用晶体、陶瓷、玻璃或光纤等形式的增益介质,具有结构紧凑、稳定性较好和光束质量较高等优点。此外, Fe^{2+} 掺杂 II~IV 族硫族化物晶体,如 $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ 和 $\text{Fe}:\text{ZnS}$,也是近年来 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外固体激光器的重要研究方向。该类激光器具有较宽的增益带宽和较大的波长调谐潜力,可用于发展宽调谐中红外光源,并已在脉冲输出和连续波输出方面取得进展^[62-64];气体激光器以气体或蒸气作为工作介质,典型代表包括 CO_2 激光器、CO 激光器、He-Ne 激光器和金属蒸气激光器等。此类激光器发展较早,具有谱线丰富、运行稳定和技术成熟等特点,已在工业加工、医疗和科研等领域得到广泛应用。近年来,随着空芯光纤技术的发展,充气空芯光纤激光

器^[65]通过空芯光纤对气体介质和泵浦光进行空间约束,增强了光与气体之间的相互作用,并在系统紧凑性、光束传输和模式控制方面展现出一定优势,因此成为气体激光器及气体非线性光源领域的一个新兴研究方向;量子级联激光器^[66]是一种基于半导体耦合量子阱子带间电子跃迁的单极性激光光源,与传统的半导体激光器的电子-空穴复合的受激辐射机制不同,量子级联激光器仅由电子参与受激辐射过程,具有宽波长调谐范围、高输出功率、结构紧凑的优点。非线性光学频率变换是基于晶体中二阶光学非线性效应的频率变换技术,核心是非线性晶体,利用这一技术可以极大地扩展激光器的波长输出范围,非线性光学频率变换主要有倍频(Second-Harmonic Generation, SHG), SFG, DFG、光学参量放大(Optical Parametric Amplification, OPA)和 OPO,其中, OPO 和 OPA 因其发展成熟且性能优越,在追求高功率和宽调谐的实际应用中占据主导地位^[67]。基于非线性效应的激光器具有较好的稳定性,且无需复杂的光路和系统,所以目前用非线性晶体设计的中红外涡旋激光器报道较多,目前常用于中红外激光器的非线性晶体种类丰富,在不同场景下均有不错的表现。此外,量子级联激光器和稀土离子掺杂固体/光纤激光器也已被用于中红外涡旋光束产生研究^[68-70]。前者具有波长可设计、结构紧凑和电泵浦工作等特点,适合发展小型化中红外涡旋光源;后者则可依托稀土离子能级跃迁实现中红外激光输出,并具有较好的稳定性和光束质量,为中红外涡旋模式的直接产生提供了另一类技术路径。

4.2 中红外标量涡旋光束激光器发展现状

目前涡旋光束激光器中可见光到近红外波段发展较为成熟^[71-73]。而中红外波段的涡旋光束虽然也具有很好的应用前景,但与可见光和近红外波段相比,中红外涡旋光束激光器的发展起步较晚,但近年来已围绕非线性频率转换、波长调谐、高阶 OAM 模式输出和短脉冲产生等方面取得了一系列代表性成果。现有研究多分散于不同技术路线和具体器件方案中,尚缺乏对中红外涡旋光束激光器的系统性梳理与横向比较。从技术实现角度看,该方向不仅受到中

红外光源本身的制约,例如非线性晶体透过范围、损伤阈值、相位匹配条件和泵浦条件等,还需要在频率转换过程中保持 OAM 模式纯度、空间模式匹配和模式传递稳定性,这进一步增加了系统设计与调试难度。因此,对中红外涡旋光束激光器的发展现状和关键技术进行系统总结,具有重要的研究意义和应用价值。从研究意义上看,该方向有助于完善涡旋光束技术在特殊波段的覆盖范围,并推动结构光场调控与中红外光源技术的交叉融合;从应用价值上看,中红外波段覆盖多种原子和分子的特征吸收谱线,并包含重要的大气传输窗口,若与 OAM 模式复用和空间结构光场调控相结合,有望在光谱传感、环境监测、自由空间通信和复杂环境探测等领域展现出潜在优势。

从涡旋模式角度看,核心问题是 OAM 的高效保真传递以及高阶模式纯度保持;从中红外非线性转换角度看,相位匹配、晶体色散、吸收损耗和热效应会影响转换效率与光束质量;而古伊相位和谐振腔结构则体现为二者之间的耦合因素,会进一步影响模式稳定性。中红外标量涡旋光束的产生主要依赖 OPO, DFG 等非线性下转换过程,或直接中红外发射型光源结合模式调控实现。相比之下, SFG 等非线性上转换过程通常用于将已有中红外涡旋光转换至可见光或近红外波段,以实现高灵敏探测、成像或信息处理,因此更适合作为中红外涡旋光束检测手段,而非独立的中红外涡旋光源方案。其中,下转换以光学 OPO, DFG 为典型代表,可将短波长泵浦光转换为长波长中红外光,易于实现宽调谐、高阶涡旋输出,是当前方案较多的技术路线;上转换则通过 SFG 等频率转换机制,将中红外长波辐射转换至可见光或近红外波段,便于利用成熟的硅基探测器进行成像和探测,同样展现出重要应用潜力。依托上转换与下转换两条技术路线,研究者已在中红外涡旋光源的波长调谐、模式阶数、脉冲宽度等方面取得一系列进展。

2011 年, Miyamoto 等人利用图 9(a)所示装置,实现 $1\ \mu\text{m}$ 涡旋光束泵浦的中红外 OPO,实验利用两个螺旋相位板将高斯光转化为涡旋光束,再将其泵浦至由 KTP 晶体和两块平面反射镜组

成的平面平行腔内,腔内瑞利长度 x_R 趋于无穷大,导致光束的古伊相位偏移为零,进而抑制了 OAM 的各向异性转移,使得泵浦光的 OAM 和拓扑荷数可被闲频光与信号光均分,结果生成能量 0.5 mJ、脉宽 31 ns、拓扑荷数 0.5 的 $2\ \mu\text{m}$ 半整数中红外光涡旋脉冲,以及能量 0.24 mJ、拓扑荷数为 1 的中红外光涡旋脉冲,该实验拓展了中红外涡旋光束拓扑荷调控方式^[74]。

2014 年, Furuki 等人设计了如图 9(b)所示的装置,将两块 KTP 晶体级联,通过调整第二块 KTP 晶体抵消单一 KTP 晶体导致的闲频光横向位移,最终实现信号光与闲频光的共线输出,同时,调整 KTP 晶体的角度还可调整信号光 ($1\ 820\sim 1\ 954\ \text{nm}$) 和闲频光 ($2\ 335\sim 2\ 561\ \text{nm}$) 的波长,进而通过 ZGP 晶体的角度调整,使差频光覆盖 $6.3\sim 12\ \mu\text{m}$,该设计实现了 $6.3\sim 12\ \mu\text{m}$ 宽调谐中红外光学涡旋脉冲的产生,同时解决了

非共线相位匹配导致的涡旋纯度下降问题^[71]。

2020 年, Tong 等人为实现中红外飞秒涡旋光束,设计了如图 9(c)所示装置,该装置核心为 OPO 振荡腔模块,振荡腔由一块 MgO:PPLN 晶体和四块腔镜 (M1, M2, M3, M4) 构成,其中 M1, M2 为平凹镜, M3 为平面镜, M1, M2, M3 均可高效反射 $2.2\sim 2.6\ \mu\text{m}$, 反射 $1.02\sim 1.04\ \mu\text{m}$ 和 $1.8\sim 2.1\ \mu\text{m}$, 通过平移 M3 可精细调节腔长,从而调控后续涡旋光束的波长连续调谐;并且,通过控制泵浦光与闲频光之间的夹角,利用非共线泵浦的模式竞争效应,使 1~6 阶的厄米-高斯光束成为主导模式;实验最后用两个柱面透镜 (C2, C3) 作为模式转换器通过调控光束的相位分布,将厄米-高斯光束转化为涡旋光束,得到 1~3 阶脉冲宽度为 $400\ \text{fs}\sim 1.1\ \text{ps}$ 的涡旋光束, 4~6 阶脉冲宽度为 $600\ \text{fs}\sim 1.1\ \text{ps}$ 的涡旋光束^[72]。

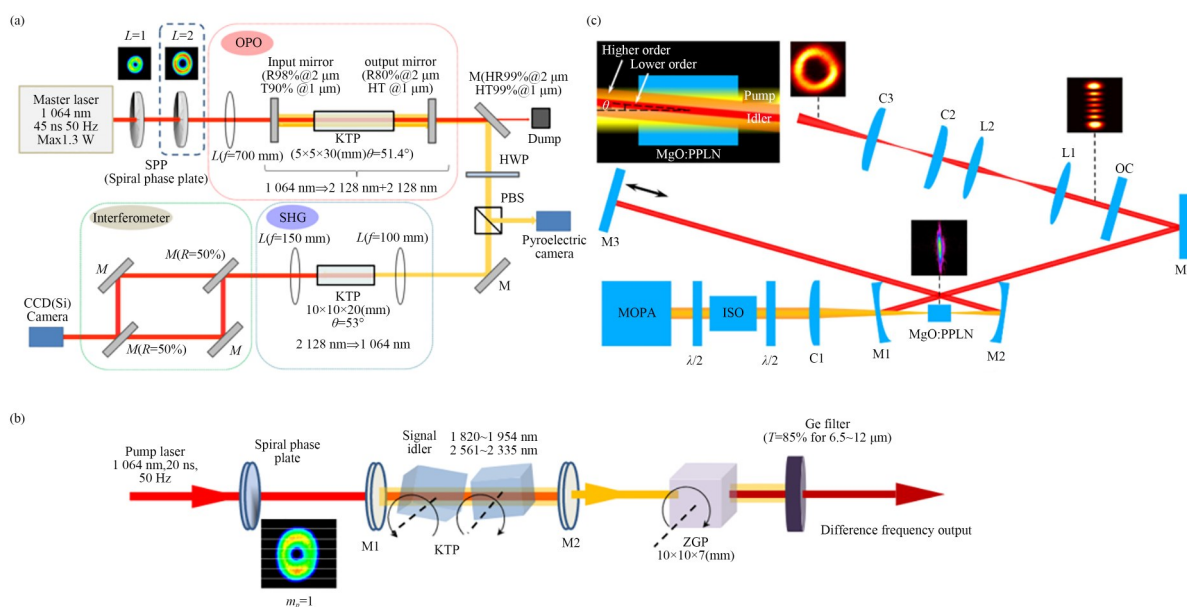


图 9 (a) $1\ \mu\text{m}$ 涡旋光束泵浦的中红外 KTP OPO 装置^[74]; (b) $2\ \mu\text{m}$ 光涡旋激光泵浦的 ZGP 差频发生器产生可调谐中红外 ($6.3\sim 12\ \mu\text{m}$) 光学涡旋的实验装置图^[71]; (c) 基于同步泵浦 OPO 生成中红外飞秒涡旋光束的实验装置图^[72]

Fig. 9 (a) Mid-infrared KTP optical parametric oscillation setup pumped by $1\ \mu\text{m}$ vortex light^[74]; (b) Experimental setup diagram for generating tunable mid-infrared ($6.3\sim 12\ \mu\text{m}$) optical vortices using a ZGP difference frequency generator pumped by a $2\ \mu\text{m}$ optical vortex laser^[71]; (c) Experimental setup diagram for generating mid-infrared femtosecond vortex beams based on a synchronously pumped optical parametric oscillator^[72]

在中红外涡旋光束的非线性光学转换研究方面,基于和频产生(SFG)机制将中红外涡旋光转换至可见光/近红外波段的技术路线同样

取得代表性进展,为中红外涡旋光束的高效探测与高灵敏成像提供了新途径。2021 年, Wang 等人基于非线性频率上转换实现中红外单光子

水平涡旋边缘增强成像,将 3 070 nm 中红外涡旋光场通过非线性滤波上转换至可见光波段,利用硅基电荷耦合器件 (Charge-Coupled Device, CCD) 实现高信噪比探测,并在傅里叶面施加涡旋泵浦相位结构,完成全光边缘增强,验证了 OAM 在上转换过程中的高保真传递与涡旋光束高效筛选^[75]。2026 年,曾和平团队将涡旋复振幅调控与啁啾准相位匹配技术结合,构建宽视场中红外上转换成像系统,实现大视场、高分辨涡旋光场检测,进一步拓展了上转换技术在中红外涡旋光信息处理与结构光成像中的应用场景^[76]。

当前大多数关于中红外涡旋光束激光器的研究主要集中在宽波长调谐、功率和纯度提升、短脉冲等方面,而对于中红外高阶涡旋光束的研究较少,高阶模式的中红外涡旋光束有望提升信息容量、模式复用能力和空间光场调控自由度。2018 年, Aadhi 等人采用两台相同的掺镁周期极化铌酸锂 (MgO:PPLN) 晶体作为非线性介质,构建紧凑的四镜腔结构 (如图 10(a)), 通过双晶体相干能量耦合实现涡旋阶数的高效转移,实现最高 6 阶的高阶中红外涡旋光束生成^[77]。

2024 年, Zhou 等人为实现中红外波段可调

高阶花瓣状模式生成设计了如图 10(b) 所示装置,该装置通过组合不同结构的螺旋相位板将高斯光转化为 1~3 阶可调 LG 光束,再由透镜聚焦进入 OPO 共振腔, OPO 共振腔由 KTA 晶体和两块腔镜构成,通过平移输出耦合镜 (Output Coupler, OC) 调节腔长可改变腔内闲频光的模式尺寸,实现 LG 光束阶数的调控。当泵浦光 l 为 1 时,可实现 0~5 阶调控; l 为 2 时,可实现 0~8 阶调控; l 为 3 时,可实现 0~10 阶调控^[73]。

本课题组在 2024 年也曾提出过一种中红外高阶涡旋光束生成方案, OPO 结构如图 11 所示,实验装置由泵浦光系统、光场调控系统、OPO 系统与光学过滤系统四部分组成,其中 OPO 系统经过参数比较后选用法布里-珀罗谐振腔结构,法布里-珀罗腔结构简单,并且可使光束在腔内充分振荡; BaGa₄Se₇ 晶体具有较高的透光范围和较高的损伤阈值,通过 Sellmeier 方程计算,将晶体切割角定为 $\theta=52^\circ$, $\varphi=0^\circ$, 通过控制转台旋转 BaGa₄Se₇ 晶体可以得到 2.5~7 μm 的中红外波段信号光输出; 光场调控系统选用针对 1.064 μm 泵浦光反射率为 98% 的反射式相位型 LC-SLM。实验利用 LC-SLM 将泵浦光由高斯模式调制为涡旋光束结合波长可调

表 3 中红外标量涡旋光束激光器代表性研究的关键性能指标对比

Tab. 3 Comparison of key performance indicators in representative mid-infrared scalar vortex beam lasers

Year	Author	Method	Wavelength / tuning	Mode order	Pulse regime	Key result	Ref.
2011	Miyamoto <i>et al.</i>	Vortex-pumped KTP-OPO	~2 μm	Fractional TC = 0.5; TC = 1	ns pulse	0.5 mJ fractional vortex pulse; 0.24 mJ TC = 1 vortex pulse	[74]
2014	Furuki <i>et al.</i>	ZGP-DFG	6.3~12 μm	Same TC as pump	ns pulse	>135 μJ at 6.3~7.0 μm ; long-wave MIR vortex output	[71]
2018	Aadhi <i>et al.</i>	CW T-SRO	2 276~3 576 nm	$l=1-6$	CW	6.8 W at $l=1$; $\eta=27.2\%$; 0.7 W at $l=6$	[77]
2020	Tong <i>et al.</i>	Synchronously pumped OPO + mode converter	2 323~2 382 nm	1st—6th order	fs / ps	Pulse duration tunable from ~400 fs to ~1.1 ps	[72]
2024	Zhou <i>et al.</i>	Idler-resonant KTA-OPO	MIR idler output	OAM tunable from 0 to ± 10	ns pulse	LG petal-like modes; 0.8/0.53/0.46 mJ for LG _{0, ± 5} /LG _{0, ± 8} /LG _{0, ± 10}	[73]

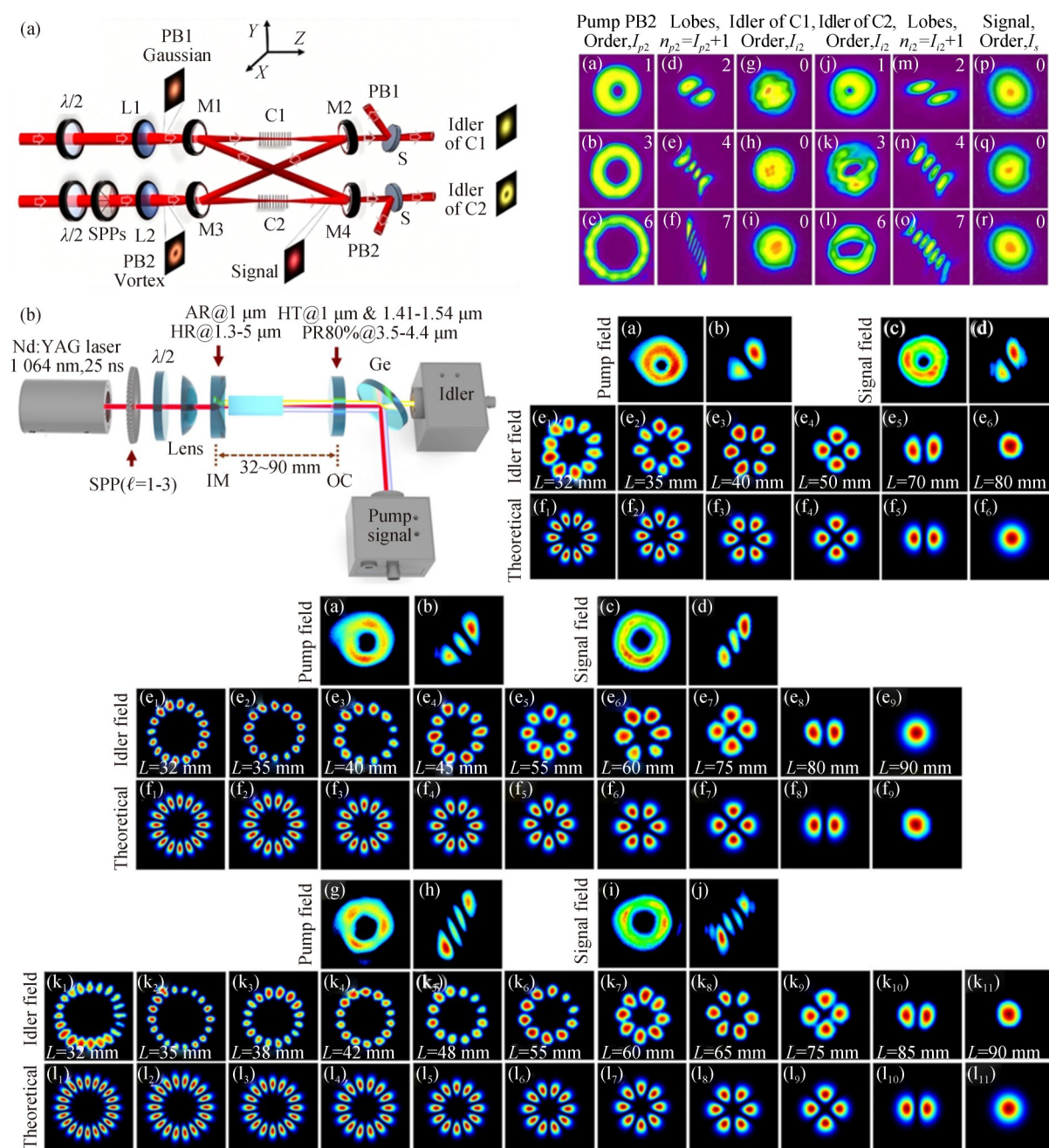


图 10 (a)双晶共振 OPO 结构图^[77]; (b)腔长可调 OPO 产生中红外高阶 LG 光束的系统及光强分布图^[73]

Fig. 10 (a)Structure diagram of the dual-crystal resonant optical parametric oscillator^[77]; (b) System and intensity distribution diagrams of a cavity-length-tunable optical parametric oscillator for generating mid-infrared high-order Laguerre-Gaussian (LG) beams^[73]

的信号光,目的是将泵浦光所含的 OAM 最大程度地传递至信号光以实现中红外波段涡旋光束输出。实验结果如图 11,其中,闲频光输出光斑呈无任何奇点的高斯模式分布,而信号光的输出光斑呈涡旋光束的环状光强分布,实验生成最高 5 阶波长可调谐涡旋光束,而当对

泵浦涡旋光束的拓扑荷数增加至 6 阶以上时,其中心奇点的面积过大致使无法再对 OPO 系统形成有效泵浦,导致模式失配破坏 OPO 的条件。对于实验目前的缺陷,可通过重新计算晶体切割角,或是调整谐振腔结构来进行优化。

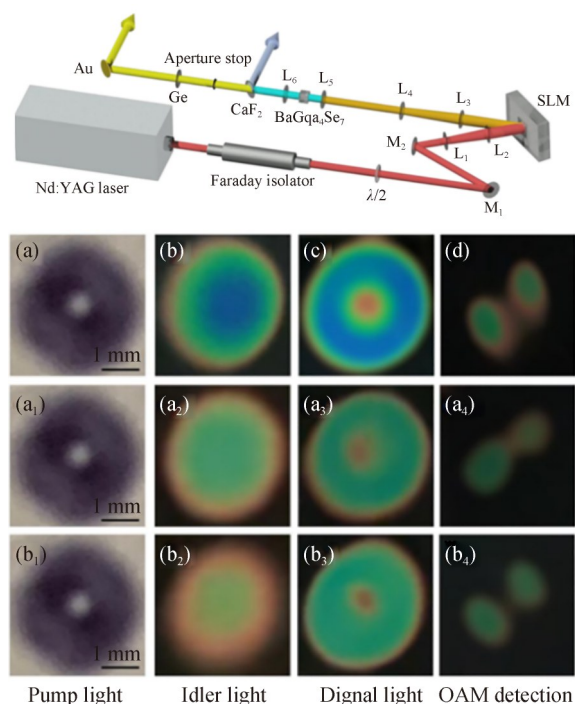


图 11 基于 BaGa_4Se_7 晶体的高阶中红外涡旋光束 OPO 结构及检测结构

Fig. 11 Structure and detection configuration of a high-order mid-infrared vortex optical parametric oscillator based on BaGa_4Se_7 crystal

4.3 中红外矢量涡旋光束激光器发展现状

前述中红外标量涡旋光束激光器主要围绕 OAM 模式产生、拓扑荷传递、波长调谐、高阶模式输出和短脉冲产生等方面展开,其核心是将涡旋光束的螺旋相位结构拓展至中红外波段。相比之下,中红外矢量涡旋光束激光器还需要在中红外波段实现空间非均匀偏振结构的产生与保持,因此不仅涉及 OAM 模式调控,还涉及腔内偏振模式选择、矢量模式转换、偏振态稳定性和中红外偏振器件适配等问题。由于中红外波段可用的 q 波片、S-waveplate、LC-SLM 和高损伤阈值偏振调控器件相对有限,该方向的研究报道明显少于中红外标量涡旋光束。目前已有的代表性工作主要集中在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 附近的稀土离子掺杂固体/光纤激光器中,通过各向异性晶体谐振腔、腔内 S-waveplate 或矢量模式转换结构,实现径向偏振和角向偏振等柱矢量光束输出。

2023 年, Liu 等报道了基于 c-cut $\text{Tm}:\text{CaY}$ -

AlO_4 晶体谐振腔的 $2\text{ }\mu\text{m}$ 柱矢量光束产生(如图 12)。该工作利用 c-cut $\text{Tm}:\text{CaYAlO}_4$ 晶体的双折射效应,并结合 SESAM 构建折叠六镜腔,通过调节曲面腔镜 M_4 与 SESAM 之间的距离,在约 1962 nm 波段实现了径向偏振和角向偏振柱矢量光束输出,并且两种矢量模式可在谐振腔内切换。进一步提高泵浦功率至 7 W 时,作者获得了稳定的径向偏振调 Q 锁模(Q-switched Mode Locking, QML)柱矢量光束,输出功率为 55 mW ,子脉冲重复频率为 120.42 MHz ,脉冲宽度约为 0.5 ns ,光束质量因子 M^2 约为 2.9 。该工作表明,利用各向异性晶体和腔内模式选择机制,可以在 $2\text{ }\mu\text{m}$ 固体激光谐振腔中直接产生具有空间非均匀偏振分布的柱矢量光束,为中红外矢量涡旋光束的源端产生提供了实验基础^[78]。

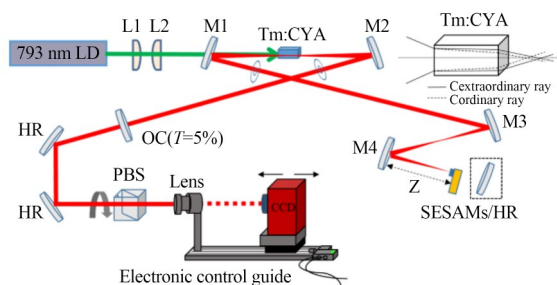
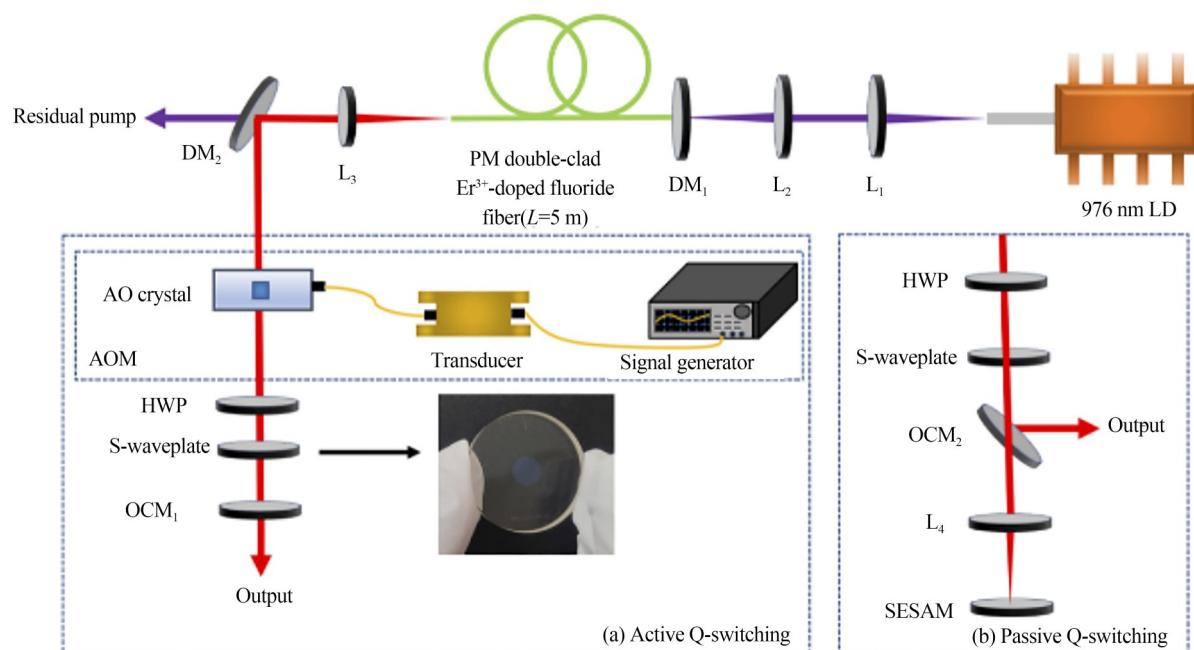


图 12 基于 c-cut $\text{Tm}:\text{CaYAlO}_4$ 晶体谐振腔的 $2\text{ }\mu\text{m}$ 柱矢量光束产生装置^[78]

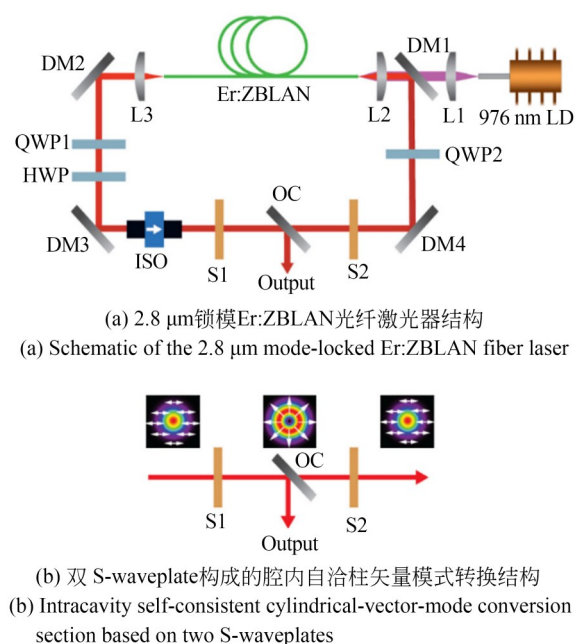
Fig. 12 Experimental setup for $2\text{ }\mu\text{m}$ cylindrical vector beam generation from a c-cut $\text{Tm}:\text{CaYAlO}_4$ crystal resonator^[78]

随后, Zhu 等将中红外柱矢量光束拓展至 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器中。该工作在偏振保持 $\text{Er}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器腔内引入定制 S-waveplate 作为模式转换器,实现了约 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 波段连续波和调 Q 脉冲柱矢量光束输出(如图 13)。通过调节腔内偏振状态和谐振腔条件,系统可在径向偏振光束和角向偏振光束之间切换。连续波工作时,径向偏振和角向偏振柱矢量光束的最大输出功率分别为 240.3 mW 和 245.6 mW ;在主动调 Q 工作下,最短脉冲宽度为 281 ns ,对应重复频率为 41 kHz 、平均输出功率为 104.7 mW ;在被动调 Q 工作下,最

图 13 基于 Er:ZBLAN 光纤激光器的中红外可切换柱矢量光束产生装置^[79]Fig. 13 Experimental setup of a mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser producing mode-switchable cylindrical vector beams^[79]

短脉冲宽度为 968 ns, 对应重复频率为 75.3 kHz、平均输出功率为 86.3 mW。该研究说明, Er:ZBLAN 等直接中红外发射型氟化物光纤激光器不仅可用于普通中红外激光输出, 也可通过腔内 S-waveplate 模式转换实现中红外柱矢量光束产生^[79]。

2024 年, Li 等进一步实现了 2.8 μm Er:ZBLAN 光纤激光器中飞秒柱矢量光束的直接产生。该系统采用非线性偏振旋转实现锁模, 并在腔内引入两个 S-waveplate 构成自洽的柱矢量模式转换结构, 使线偏振基模在腔内传播过程中转换为径向偏振或角向偏振柱矢量光束, 并在往返传播后恢复原偏振态以满足腔内自洽振荡条件 (如图 14)。实验结果表明, 该系统可在约 2 795 nm 中心波长处输出飞秒柱矢量脉冲, 典型脉冲宽度为 336 fs, 重复频率为 42.24 MHz, 峰值功率达到 7.3 kW; 其中径向偏振和角向偏振飞秒柱矢量光束的最大平均输出功率分别为 103.4 mW 和 105.1 mW。该工作将中红外柱矢量光束从连续波和纳秒调 Q 脉冲进一步拓展至飞秒超快脉冲区域, 为中红外矢量涡旋光束在微纳加工、强场光学和超快光场调控中的应用提供了新的实验基础^[80]。

图 14 基于 Er:ZBLAN 光纤激光器的中红外飞秒柱矢量光束产生装置^[80]Fig. 14 Experimental setup for generating mid-infrared femtosecond cylindrical vector beams from an Er:ZBLAN fiber laser^[80]

4.4 中红外涡旋光束激光器小结

综上所述, 中红外涡旋光束激光器可从光场

结构上进一步分为中红外标量涡旋光束激光器和中红外矢量涡旋光束激光器。前者主要关注 OAM 模式产生、拓扑荷传递、波长调谐、高阶模式输出和短脉冲产生等问题,核心在于将涡旋光束的螺旋相位结构稳定拓展至中红外波段。现有研究多采用 OPO,DFG 等非线性频率转换方案,利用近红外或可见光波段成熟的涡旋光束调控技术,将泵浦光携带的 OAM 传递至中红外信号光或闲频光,在宽波段调谐、高阶拓扑荷输出和飞秒脉冲产生方面已取得较多代表性成果。

相比之下,中红外矢量涡旋光束激光器不仅需要保持 OAM 螺旋相位结构,还需要在中红外波段产生和维持空间非均匀偏振分布,因此对腔内偏振模式选择、矢量模式转换器件和偏振态检测方法提出了更高要求。目前该方向报道相对较少,主要集中在 $2\ \mu\text{m}$ 和 $2.8\ \mu\text{m}$ 附近的稀土离子掺杂固体/光纤激光器中,通过各向异性晶体、S-waveplate 或矢量模式转换结构实现径向偏振和角向偏振柱矢量光束输出。总体来看,中红外标量涡旋光束激光器在波长调谐范围和高阶 OAM 输出方面发展较快,而中红外矢量涡旋光束激光器仍处于起步阶段,其进一步发展仍依赖于中红外偏振调控器件、矢量模式转换器件和高稳定性腔结构的完善。

5 总结和展望

涡旋光束激光器凭借轨道角动量的独特物理特性,已成为结构光场与激光技术领域的前沿热点,在光通信、光操控、超分辨成像及量子信息等方向展现出潜在的应用价值。经过数十年发展,可见光与近红外波段的标量、矢量涡旋激光产生技术日趋成熟,腔内增益调制、损耗调制、模式转换器件集成等方案不断发展,实现了高功率、高阶数、短脉冲涡旋光束的稳定输出,然而,具有独特应用优势的中红外波段的涡旋光束激光器仍处于发展初期。通过对不同中红外涡旋光源实现路线的比较可以看出,OPO 中红外激光器兼具较高转换效率、宽波长调谐能力和良好的模式传递特性,是当前实现中红外涡旋光束输出的重要方案之一;DFG 可覆盖 $6.3\sim 12\ \mu\text{m}$ 长波中红外,但存在效率低、结构复杂等短板;非线性

上转换更适用于中红外涡旋光高灵敏探测,难以作为独立光源使用。总之,中红外涡旋光束激光器在模式调控、材料适配、系统集成、工程化落地等方面都还存在若干瓶颈,制约其向高性能、实用化方向发展。

当前挑战集中于三方面:其一,中红外高阶涡旋光束生成受限,拓扑荷数过高易引发泵浦失配与模式畸变,矢量涡旋的相位-偏振协同调控精度不足,古伊相位偏移与偏振串扰难以抑制,难以获得高纯度、高阶数稳定输出;其二,增益介质与非线性晶体性能制约,稀土掺杂中红外增益介质对涡旋光束增益分布不均,常用非线性晶体的透光范围、损伤阈值与 OAM 传递效率难以兼顾,高性能晶体制备难度大、成本高;其三,系统集成化与稳定性矛盾突出,现有方案多依赖腔外调制器件,体积庞大、抗干扰性差,腔内集成则引入额外损耗,导致功率与效率下降,同时缺乏中红外涡旋光束实时检测与闭环校正手段,长期工作稳定性难以保障。此外,在涡旋光场调控方面,矢量涡旋多维调控和高阶 OAM 模式稳定输出仍需进一步突破;在中红外光源方面,飞秒脉冲产生、晶体热管理和宽波段相位匹配仍是关键限制;在二者耦合方面,非线性频率转换过程中的 OAM 高效保真传递机理仍有待完善,是限制该方向进一步发展的重要因素。

面向未来,涡旋光束激光器有望朝着中红外化、高阶矢量化、高功率短脉冲化、集成芯片化、低成本工业化方向快速发展,未来仍需围绕材料体系、模式调控和系统集成等方面持续推进。在材料体系上,可重点关注稀土掺杂中红外单晶光纤、硫系玻璃与新型硫族化合物非线性晶体,优化晶体切割角与谐振腔结构,提升 $2.5\sim 12\ \mu\text{m}$ 宽波段 OAM 传递效率与功率承载能力;在光路设计上,采用腔内集成螺旋耦合器、点缺陷镜、单 q 波片等紧凑化方案,结合环形泵浦与损耗调制协同机制,抑制模式竞争,实现高阶涡旋直接输出;在调控技术上,依托人工智能算法实现相位、偏振、脉冲的多维智能校正,探索亚 100 fs 中红外涡旋脉冲输出瓶颈;在集成形态上,基于铌酸锂薄膜与硅基光子学平台,研发片上中红外涡旋激光源,推动器件向微型化、低功耗、便携式演进。同时,完善中红外光参量过程 OAM 传递与古伊相

位补偿理论,建立统一物理模型,为技术突破提供理论支撑。此外,涡旋光束激光器未来还可与 Bessel 光束等无衍射结构光场相结合。本课题组近期实现了均匀与非均匀偏振分布 Bessel 光束的单光束产生,并研究了高阶矢量 Bessel 涡旋光束的传输和自愈特性,为新型结构光源的发展提供了参考^[81-82]。

综上,涡旋光束激光器正从基础研究逐步向应用探索拓展,中红外波段有望成为涡旋光束激光器进一步拓展的重要方向之一。未来需聚焦新型材料、腔内集成、多维智能调控等关键方向,突破模式纯度、功率、阶数与系统稳定性的协同瓶颈,完善理论体系与工程化方案,推动中红外涡旋激光器在环境、医疗、通信、国防等领域实现

规模化应用,为相关光电应用和交叉研究提供技术参考。

作者贡献申明:

张羽扬:完成文章框架搭建,核心章节撰写及文献搜寻分析;

郝晨君:论文构思和文献搜寻分析;

苏乐晨:论文构思和文献搜寻分析;

李昊翔:论文构思和文献搜寻分析;

王辰成:实验设计和数据提供;

苗玉:论文构思指导,学术规范审核;

高秀敏:课题负责人,指导课题研究及验证;

宋波:从学术伦理、论证严密性、结论普适性三个维度进行指导。

参考文献:

- [1] 梁俊,高博. 激光对抗技术的现状及发展趋势[J]. 科技资讯, 2011, 9(29): 4.
LIANG J, GAO B. Present situation and development trend of laser countermeasure technology [J]. *Science & Technology Information*, 2011, 9(29): 4. (in Chinese)
- [2] 樊仲维. 高功率、短波长: 固体激光发展的必由之路[J]. 科学通报, 2024, 69(28): 4173-4174.
FAN Z W. High power and short wavelength: The route for the development of solid-state lasers [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(28): 4173-4174. (in Chinese)
- [3] 苟新鑫,李松泽,石鹏,等. 光学自旋角动量的调控机理及研究进展[J]. 光学学报, 2024, 44(10): 1026002.
GOU X X, LI S Z, SHI P, *et al.* Regulation mechanisms and recent progress of optical spin angular momentum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(10): 1026002. (in Chinese)
- [4] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPRE-EUW 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.
- [5] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [6] 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.
- [7] MIRHOSSEINI M, MAGAÑA-LOAIZA O S, O'SULLIVAN M N, *et al.* High-dimensional quantum cryptography with twisted light [J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(3): 033033.
- [8] MAIR A, VAZIRI A, WEIHS G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons [J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [9] NG J, LIN Z F, CHAN C T. Theory of optical trapping by an optical vortex beam [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 103601.
- [10] SHEN Z, LIU N. Optical tweezers with optical vortex based on deep learning [J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(4): 2212-2218.
- [11] YAN L, KRISTENSEN P, RAMACHANDRAN S. Vortex fibers for STED microscopy [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(2): 022903.
- [12] FORBES K A. Vortex Light at the Nanoscale: Twists, Spins, and Surprises; a Review [EB/OL]. 2025: *arXiv*: 2508.09564. <https://arxiv.org/abs/2508.09564>
- [13] KAM A, TSESES S, FRIDMAN L, *et al.* Quantum skyrmions and high dimensional entanglement mediated by nanophotonics [J]. *eLight*, 2026, 6(1): 13.
- [14] 李沁. 基于 Nd: YVO4 晶体激光器的涡旋光腔内产生与性质研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,

- 2024.
- LI Q. *Generation and Properties of Vortex Optical Cavity Based on Nd: YVO₄ Crystal Laser* [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2024. (in Chinese)
- [15] 陈书影. 离轴泵浦全固态激光器中高阶涡旋光束的产生研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2025.
- CHEN S Y. *Generation of High-order Vortex Beams in Off-axis Pumped All-solid-state Lasers* [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2025. (in Chinese)
- [16] 叶玮琳, 何迅, 孟永贤, 等. 一种高精度中红外大气甲烷传感系统的研制[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1128003.
- YE W L, HE X, MENG Y X, *et al.* Highly-accurate mid-infrared atmospheric methane sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1128003. (in Chinese)
- [17] 卞进田, 聂劲松, 孙晓泉. 中红外激光技术及其进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S3): 188-193.
- BIAN J T, NIE J S, SUN X Q. Mid-infrared laser technology and its progress[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 188-193. (in Chinese)
- [18] EBRAHIM-ZADEH M, SOROKINA I T. *Mid-Infrared Coherent Sources and Applications* [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [19] 刘永福. 工业生产中的污染物环境监测技术分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(15): 28-29, 32.
- LIU Y F. Analysis of environmental monitoring technologies for pollutants in industrial production[J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2025, 6(15): 28-29, 32. (in Chinese)
- [20] 胡飞, 郭宇, 胡尧博, 等. 激光制导武器的作战使用综述[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(8): 309-316.
- HU F, GUO Y, HU Y B, *et al.* Overview of operational use of laser-guided weapons[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2024, 45(8): 309-316. (in Chinese)
- [21] 吕新杰, 杨彬, 姚红权, 等. 用于远程气体探测的双波长中红外激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(1): 153-160.
- LÜ X J, YANG B, YAO H Q, *et al.* Dual-wavelength mid-infrared laser for long-range gas detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(1): 153-160. (in Chinese)
- [22] LI X X, YANG L Y, ZHOU Z Y, *et al.* 4.8- μm CO-filled hollow-core silica fiber light source[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 295.
- [23] KOGELNIK H, LI T. Laser beams and resonators[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(10): 1312-1329.
- [24] 魏敦钊. 拉盖尔高斯光束的产生及其轨道角动量探测[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- WEI D Z. *Generation of Laguerre Gaussian Beam and Its Orbital Angular Momentum Detection* [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. (in Chinese)
- [25] 马力, 王颖, 李敏, 等. 基于双螺旋阵列的光场任意角向调控[J]. 中国光学(中英文), 2025, 18(4): 921-930.
- MA L, WANG Y, LI M, *et al.* Arbitrary azimuthal optical field manipulation by dual-spiral arrays[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(4): 921-930. (in Chinese)
- [26] FAN L, WANG L M, SUN R, *et al.* High-power and efficient vortex Nd: YVO₄ laser using annular pumping[J]. *Laser Physics*, 2023, 33(11): 115002.
- [27] KIM J W, CLARKSON W A. Selective generation of Laguerre-Gaussian (LG_{0n}) mode output in a diode-laser pumped Nd: YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2013, 296: 109-112.
- [28] LIU Q Y, ZHAO Y G, ZHOU W, *et al.* Vortex operation in Er: LuYAG crystal laser at $\sim 1.6\ \mu\text{m}$ [J]. *Optical Materials*, 2017, 71: 31-34.
- [29] ZHAO Y G, CHEN B, ZHENG C S, *et al.* Controlled generation of high-purity scalar orbital angular momentum states from a high-power single-crystal fiber laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(6): 2301089.
- [30] QIAO Z, XIE G Q, WU Y H, *et al.* Generating high-charge optical vortices directly from laser up to 288th order[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800019.
- [31] LIU J D, GUO Z R, HU M Y, *et al.* Sub-100 fs vortex beams generated from a Yb: CALGO laser[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(21): e00819.
- [32] WEI D Z, CHENG Y, NI R, *et al.* Generating

- controllable laguerre-Gaussian laser modes through intracavity spin-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11: 014038.
- [33] GEBERBAUER J W T, KERRIDGE-JOHNS W R, DAMZEN M J. >30 W vortex LG(01) or HG(10) laser using a mode transforming output coupler[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 29082-29094.
- [34] CHEN H S, WANG Q, LIU X, *et al.* 100-W Yb: YAG thin-disk vortex laser oscillator [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(4): 1.
- [35] 付时尧, 高春清. 矢量涡旋光束的生成与模式识别方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(15): 1526001.
- FU S Y, GAO C Q. Generation and mode recognition method of vectorial vortex beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(15): 1526001. (in Chinese)
- [36] KIM J W, MACKENZIE J I, HAYES J R, *et al.* High power Er: YAG laser with radially-polarized Laguerre-Gaussian (LG01) mode output [J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14526-14531.
- [37] 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.
- [38] DING Y S, YANG J W, CHEN D M, *et al.* Rectangular beam pumped Raman microchip laser for generating multiwavelength high-order Hermite-Gaussian lasers and vortex lasers[J]. *Annalen der Physik*, 2022, 534(6): 2200095.
- [39] 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.
- [40] FAGUNDES L M, SOUTO RIBEIRO P H, DE ARAÚJO R M. Discrimination of Vortex and Pseudovortex Beams with a Triangular Optical Cavity [EB/OL]. 2024: *arXiv*: 2410.14491. <https://arxiv.org/abs/2410.14491>
- [41] CUNHA A, FIGUEIRA G, ANDRÉ P. Enabling the study of photons orbital angular momentum for optical communications: Orbital angular momentum carrying beam modulation and demodulation using twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48(9): 425.
- [42] LU Z K, LIU Z Q, TANG J L, *et al.* Generation of high-order Hermite-Gaussian modes and optical vortices by manipulating off-axis displacement of an intracavity lens[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(20): 6421-6424.
- [43] REN Y X, LU R D, GONG L. Tailoring light with a digital micromirror device[J]. *Annalen der Physik*, 2015, 527(7/8): 447-470.
- [44] MORENO I, DEL MAR SÁNCHEZ-LÓPEZ M, DAVIS J A, *et al.* Physical and encoded Q-plates for the generation of switchable vector beams [C]. *Laser Beam Shaping XVII. San Diego, California, USA*. SPIE, 2016: 99500L.
- [45] ZHANG H, YAO L, PANG Y Y, *et al.* Flexible and high-efficiency generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(9): 092601.
- [46] REN Y X, LI M, HUANG K, *et al.* Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(10): 1838-1844.
- [47] 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.
- [48] LI R J, ZHU X Y, TU Y N, *et al.* Generation of high radial node vector vortex beams based on digital micromirror device[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 171: 110457.
- [49] 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.
- [50] YAO J N, WU S M, LI X L, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beam using a single Q-plate [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(12): 2402290.
- [51] GAO P, CHEN C, DAI Y W, *et al.* Reconfigurable Janus metasurface with chiral meta-atoms for multi-channel vortex beams and metasurface holography multiplexing [J]. *Optics Express*, 2024: 309.
- [52] International Organization for Standardization. Optics and photonics-Spectral bands: ISO 20473:2007 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.

- [53] LIANG G Z, YU X C, HU X N, *et al.* Mid-infrared photonics and optoelectronics in 2D materials [J]. *Materials Today*, 2021, 51: 294-316.
- [54] BALTRUKONIS J, ULČINAS O, ORLOV S, *et al.* High-order vector Bessel-Gauss beams for laser micromachining of transparent materials [J]. *Physical Review Applied*, 2021, 16(3): 034001.
- [55] VICTOR V A. High energy HF (DF) lasers[J]. *Journal of Physics Research and Applications*, 2018, 1(1): 1-16.
- [56] 刘勳. 燃烧驱动 HBr 化学激光研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
LIU X. *Study on Combustion-driven HBr Chemical Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [57] 王增强, 多丽萍, 周冬建, 等. 连续波千瓦级燃烧驱动 HBr 化学激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1216004.
WANG Z Q, DUO L P, ZHOU D J, *et al.* : Continuous-wave kilowatt-class combustion-driven HBr chemical laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1216004. (in Chinese)
- [58] 刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 等. 530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 105-111.
LIU Y Z, XING Y B, LIAO L, *et al.* 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(18): 105-111. (in Chinese)
- [59] NIU C, JIANG Y, WEN Y, *et al.* High-efficiency Ho: YAP pulse laser pumped at 1989 nm [J]. *Crystals*, 2021, 11(6): 595.
- [60] 史伟, 张露, 付士杰, 等. 高功率高效率中红外波段掺铒氟化物光纤激光器研究进展[J]. 中国激光, 2024, 51(19): 1901004.
SHI W, ZHANG L, FU S J, *et al.* High-power and high-efficiency mid-infrared Er-doped fluoride fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(19): 1901004. (in Chinese)
- [61] 朱灿林, 康民强, 邓颖, 等. 直接激励中红外固体激光器研究进展[J]. 激光与红外, 2022, 52(7): 956-962.
ZHU C L, KANG M Q, DENG Y, *et al.* Research progress on directly pumping mid-infrared solid-state lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(7): 956-962. (in Chinese)
- [62] MIROV S, FEDOROV V, MOSKALEV I, *et al.* Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} -doped mid-IR laser materials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(1): 21-41.
- [63] FEDOROV V, MARTYSHKIN D, KARKI K, *et al.* Q-switched and gain-switched Fe: ZnSe lasers tunable over 360-515 μm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 13934.
- [64] SHEN Y L, WAN Y C, ZHU F, *et al.* High-power compact continuous-wave Fe: ZnSe laser at 4 μm with $>50\%$ overall conversion efficiency[J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(8): 081405.
- [65] 王泽锋, 周智越, 崔宇龙, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望(II): 基于粒子数反转[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 152-167.
WANG Z F, ZHOU Z Y, CUI Y L, *et al.* Research progress and prospect of fiber gas laser sources (II): based on population inversion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 152-167. (in Chinese)
- [66] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D L, *et al.* Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [67] 周炳琨. 激光原理[M]. 6版. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHOU B K. *Laser Principle* [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [68] LIU J L, LIN J Q, CHEN X Y, *et al.* A 1.9 μm Tm: YLF external cavity mode conversion vortex laser based on LD off-axis pump[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126596.
- [69] LIU J, GU J, HUANG L, *et al.* Mid-infrared vortex array generation with a tunable singularity in an Er: YAP laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(2): 021110.
- [70] WANG Y B, SHEN Y J, MENG Y, *et al.* Generation of 1535-nm pulsed vortex beam in a diode-pumped Er, Yb: glass microchip laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(10): 891-894.
- [71] FURUKI K, HORIKAWA M T, OGAWA A, *et al.* Tunable mid-infrared (6.3-12 μm) optical vortex pulse generation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26351-26357.
- [72] TONG H, XIE G Q, QIAO Z, *et al.* Generation of a mid-infrared femtosecond vortex beam from an optical parametric oscillator [J]. *Optics Letters*,

- 2020, 45(4): 989-992.
- [73] ZHOU Y X, YANG X N, YE J Q, *et al.* Generation of tunable high-order Laguerre - Gaussian petal-like modes from a mid-infrared optical vortex parametric oscillator[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2024, 3(3): 036013.
- [74] MIYAMOTO K, MIYAGI S, YAMADA M, *et al.* Optical vortex pumped mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12220.
- [75] WANG Y Q, FANG J N, ZHENG T T, *et al.* Mid-infrared single-photon edge enhanced imaging based on nonlinear vortex filtering [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(10): 2100189.
- [76] YU M Y, WEI Z H, *et al.* Wide-field mid-infrared edge-enhanced upconversion imaging[J]. *ACS Photonics*, 2026, 13(4): 991-999.
- [77] AADHI A, SHARMA V, SAMANTA G K. High-power, continuous-wave, tunable mid-IR, higher-order vortex beam optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2312-2315.
- [78] LIU Y Y, LI L Y, *et al.* 2 μm cylindrical vector beam generation from a c-cut Tm: CaYAlO₄ crystal resonator[J]. *Optics Express*, 2023, 31(6): 9387.
- [79] ZHU G J, LI X Y, YIN X Y, *et al.* Mid-infrared pulsed Er: ZBLAN fiber laser producing mode-switchable cylindrical vector beams[J]. *Optics Express*, 2023, 31(24): 40781.
- [80] LI X Y, ZHU G J, MA C Y, *et al.* Direct generation of femtosecond cylindrical vector beams from a 2.8 μm Er: ZBLAN fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(12): 121104.
- [81] 王徐坚, 郝晨君, 李昊翔, 等. 高阶矢量 Bessel 涡旋光的传输和自愈特性研究[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(8): 1169-1178.
- WANG X J, HAO C J, LI H X, *et al.* Research on transmission and self-healing characteristics of high-order vector Bessel vortex beams [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(8): 1169-1178. (in Chinese)
- [82] 殷亮, 姚凯玲, 孙逊, 等. 均匀和非均匀偏振分布 Bessel 光束的单光束实现[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(10): 1524-1533.
- YIN L, YAO K L, SUN X, *et al.* Single-beam implementation of uniform and non-uniformly polarized Bessel beams [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(10): 1524-1533. (in Chinese)

作者简介:



张羽扬(2000—),男,硕士研究生,江苏宜兴人,现就读于上海理工大学光电信息与计算机工程学院,主要从事光场调控,非线性激光器方向的研究。
E-mail:243350600@usst.edu.cn

通讯作者:



高秀敏(1978—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,博士生导师。2003年硕士毕业于西北工业大学,2006年博士毕业于中国科学院上海光学精密机械研究所,主要从事光场调控、痕量物质检测和智能传感技术方向的研究。E-mail:gxm@usst.edu.cn