

涡旋光激光器研究进展

刘俊^{1,2}, 王健^{1,2*}¹华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;²湖北光谷实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 涡旋光是一种横向空间分布的特殊光场,包括相位涡旋光和偏振涡旋光,被广泛应用于天文学、光学操控、显微镜、成像、传感、量子科学和光通信等领域。目前,涡旋光场的产生技术主要采用腔外转换法,但该方法存在明显的局限性,如产生的涡旋光光场的相位不连续。因此,涡旋光激光器具有重要的研究意义。回顾了涡旋光激光器的研究进展,全面综述了不同类型的涡旋光激光器,包括基于分立元器件的涡旋光激光器、基于光纤的涡旋光激光器以及基于集成器件的涡旋光激光器,同时对其未来发展趋势进行了分析和展望。涡旋光激光器有望进一步推动涡旋光在众多领域的广泛应用。

关键词 激光器; 涡旋光; 光子空间维度; 轨道角动量

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1201001

1 引言

在光子的空间维度中,具有空间分布的相位、偏振和强度可以操控光场的空间结构,这种特殊的光场被称为结构光^[1-3]。结构光包括具有特定空间结构的各种特殊光场,例如轨道角动量光束、贝塞尔光束、矢量光束、艾里光束和时空光束等。与高斯光束相比,结构光具有更复杂的空间结构光场,可以应用于更广泛的领域。携带轨道角动量(OAM)的光束是一种结构光,具有 $\exp(i l \varphi)$ 的螺旋相位波前,其中 l 表示拓扑电荷, φ 表示方位角^[4]。拓扑电荷 l 原则上取无限值,表示螺旋相位波前的旋转速度,而其旋转方向可以通过 l 的正负表示。由于螺旋相位结构,OAM 光束中心有相位奇点的存在,光场强度为零且光场呈圆环形分布,OAM 光束又称为涡旋光场。由于 l 在原则上取无限值,且具有不同 l 值的涡旋光场之间是相互正交的,因此,涡旋光场这一特性被称为无限正交特性。由于这些独特性质,涡旋光引起了极大的关注,推动了多个学科的快速发

展^[5-16]。

随着大数据时代的到来,全球互联网流量的急剧增长以及电子商务、云计算、物联网、虚拟会议等大量新兴的数据密集型应用推动了研究者们不断开发新技术来实现通信容量的可持续增长。各种先进的调制格式和复用技术,包括 M 进制相移键控(M -PSK)、 M 进制正交幅度调制(M -QAM)、正交频分复用(OFDM)、波分复用(WDM)、光时分复用(OTDM)和偏振分复用(PDM)等,利用光子的频率(波长)、振幅、相位和时间物理维度^[17-20]。空分复用(SDM)技术也被认为是一种利用光子的空间结构来提高通信容量的技术。涡旋光场的无限正交特性使得其在 SDM 中得到了广泛的应用^[21-41]。

作为 20 世纪的四大重大发明之一,激光器是光通信系统的基础部分,具有至关重要的作用。1960 年,第一台激光器诞生^[42],其在单色性、相干性、方向性和高亮度等方面的优势使得其在各个领域中都得到应用。研究者研究出以气体作为增益介质的 CO_2 激光器和氦氖激光器^[43-44]、以液体作为增益介

收稿日期: 2022-02-25; **修回日期:** 2022-04-11; **录用日期:** 2022-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(11774116, 62001182)、湖北省重点研发计划(2020BAB001, 2020BAA007)、广东省重点领域研发计划(2018B030325002)、湖北光谷实验室创新科研项目(OVL2021BG004)

通信作者: *jwang@hust.edu.cn

质的染料激光器^[45]以及半导体激光器^[46]等不同类型的激光器。与此同时,光纤激光器也被提出,Snitzer^[47]首次在掺杂 Nd³⁺ 的光纤中实现了激光谐振输出。

目前,在基于涡旋光场的各种应用中,涡旋光场的产生技术主要采用腔外转换法,即通过在激光谐振腔外放置光学元件来实现高斯光束到涡旋光场的转换,这些光学元件包括衍射光学元件、变换光学方法、相位板、基于光纤的器件、光子集成器件、超表面等^[48-67]。除此之外,通过激光谐振腔直接输出涡旋光场的涡旋光激光器^[68-72]也是涡旋光产生的一种方法。涡旋光激光器能避免腔外转换法的部分缺点,如转换效率低、转换之后光斑质量差、功率限制、额外增加转换器件等。本文聚焦涡旋光激光器,在简要介绍了光子基本维度资源、涡旋光场的产生方法之后,重点介绍了基于分立元器件的涡旋光激光器、基于光纤的涡旋光激光器以及基于集成器件的涡旋光激光器。最后,分析了涡旋光激光器目前存在的问题,并对未来的发展趋势进行了展望。

2 光子的基本维度和涡旋光场的产生方法

光子的基本维度资源是光通信应用的基础,光

子相比电子的独特之处在于其具有多个维度,如图 1 所示,光子的基本维度资源包括波长/频率、复振幅、偏振、时间和横向空间维度^[17-21]。通过对光子的横向空间维度进行操控,可以得到相应的结构光,而涡旋光场就是其中一种,其空间相位可被调制。

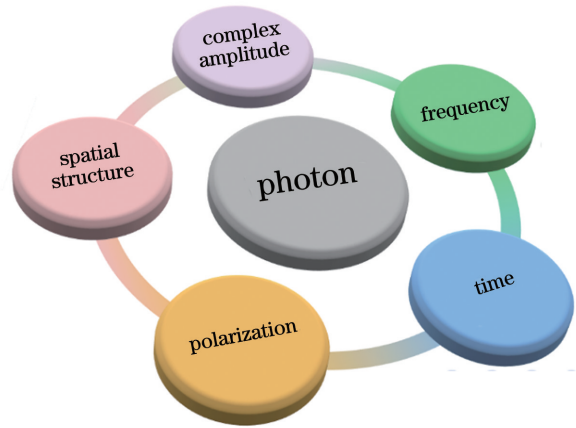


图 1 光子的基本物理维度资源

Fig. 1 Basic physical dimension resources of photons

涡旋光场相较于传统光波维度资源(如复振幅、波长、偏振、时间等),是光子基本维度资源中尚待充分利用的一种物理维度资源。以拉盖尔-高斯为例,通过麦克斯韦方程组,可以在圆柱坐标系推导得到拉盖尔-高斯光束的光场分布^[73]为

$$u(r, \varphi, z) = E_0 \left[\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right]^l L_m^l \left[\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] \frac{w_0}{w(z)} \exp[-i\phi_{ml}(z)] \exp \left[i \frac{k_0 r^2}{2q(z)} \right] \exp(i l \varphi), \quad (1)$$

式中: E_0 为初始电场强度;高度 z 、半径 r 、方位角 φ 为圆柱坐标系的坐标; $w(z) = w_0 [(z^2 + z_R^2)/z_R^2]^{1/2}$ 为束腰位置 z 处的光斑半径大小, w_0 为束腰半径大小, z_R 为瑞利距离; k_0 为光束在真空中的波矢大小; $q(z) = z - iz_R$ 为光束复参量; $\phi_{ml}(z) = (2m + l + 1)\arctan(z/z_R)$ 为Gouy相移项,其中 m 取值为 $(0, +\infty)$,表示沿径向的环数, l 取值为 $(-\infty, +\infty)$,表示拉盖尔-高斯光束的拓扑电荷数; $L_m^l(\cdot)$ 为广义拉盖尔多项式。可以看出,拉盖尔-高斯光束的光场分布取决于 m 和 l ,也可以看出涡旋光场特有的正交特性和无限取值。因此,利用涡旋光场的无限正交特性以及其与光子的其他物理维度的兼容性,可以在光通信中实现可持续扩容。简单高效地产生涡旋光场是拓展涡旋光应用范围的重要一环。涡旋光的产生方法按照是否存在增益介质可以分为无源和有源,如图 2 所示。其中,无源方法主

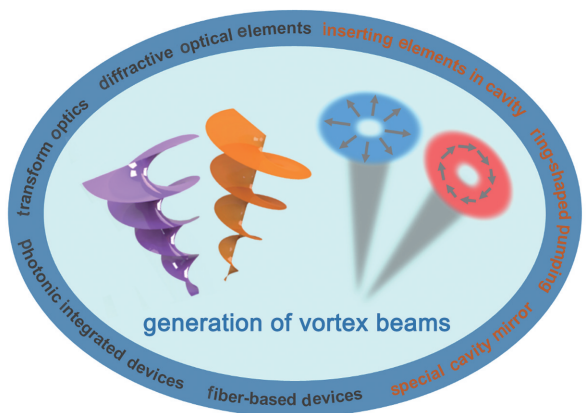


图 2 涡旋光场的产生方法

Fig. 2 Methods for vortex beam generation

要包括衍射光学元件、变换光学方法、相位板、基于光纤的器件、光子集成器件和超表面等^[48-67],有源方法主要是指激光器直接出射涡旋光场,即涡旋光激光器。涡旋光激光器按照产生机理可以分为腔内插

入元件法^[74]、特殊腔镜法^[75]、环形光泵浦法^[76]等。根据涡旋光激光器的应用场景, 本文将其分为基于分立元器件的自由空间涡旋光激光器、基于光纤的涡旋光激光器以及基于集成器件的涡旋光激光器。

3 基于分立元器件的涡旋光激光器

相较于光纤激光器和集成片上涡旋光激光器, 基于分立元器件的涡旋光激光器主要由自由空间中

分立的单元光器件组成, 输出激光也是直接在自由空间中产生的, 具有构造简单、输出光场稳定、输出模式数目多等优点。

偏振涡旋光(矢量光束)不仅具有螺旋相位的特征, 还具有空间变化的偏振分布, 在激光加工、光场操控等领域具有得天独厚的优势。2005 年, Kozawa 等^[77]基于腔内插入元件法, 在 Nd:YAG 激光器的谐振腔中插入布儒斯特棱镜, 实现了偏振涡旋光的直接激射输出, 如图 3(a)所示。锥形布儒斯特棱镜

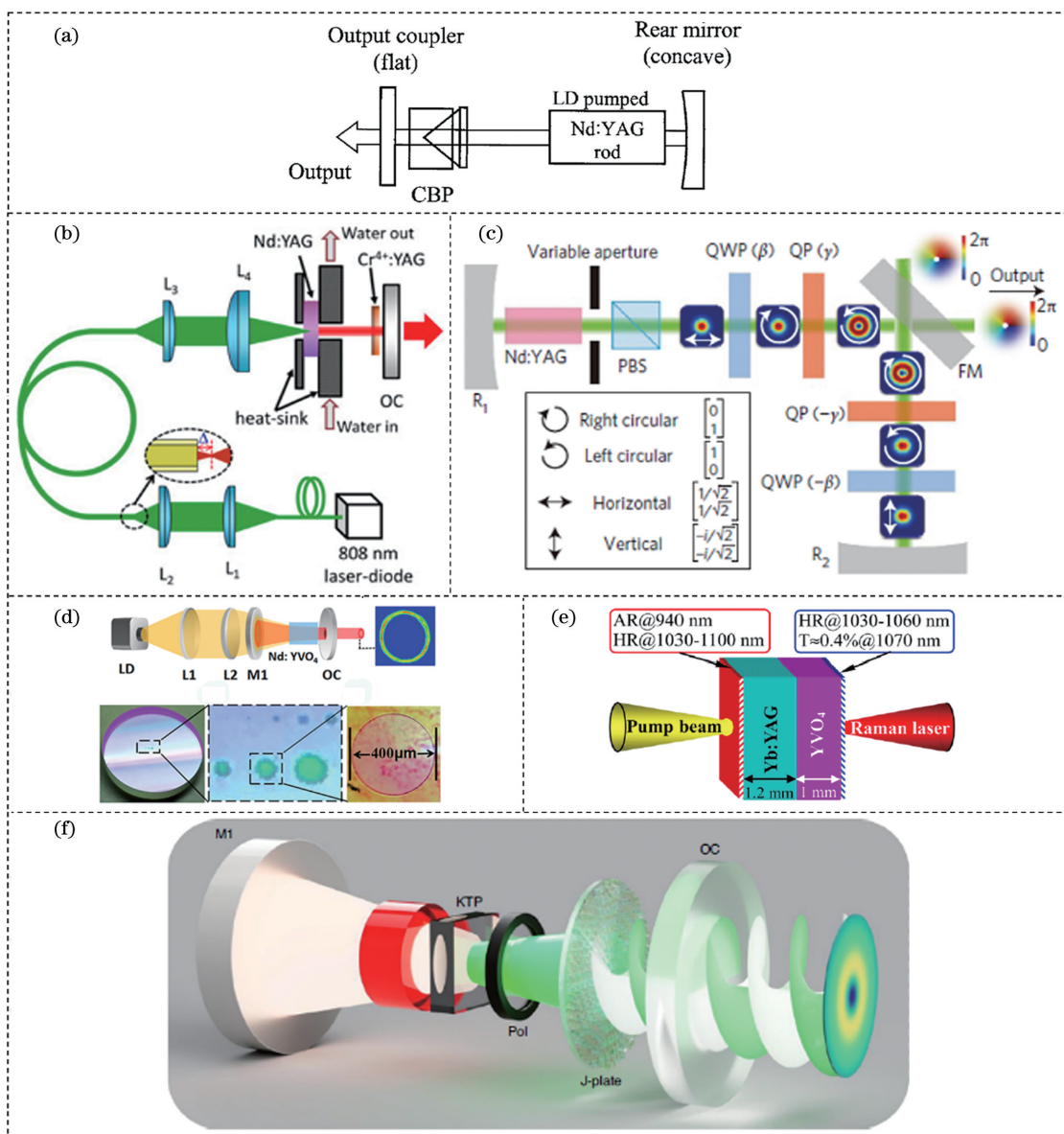


图 3 基于分立元器件的涡旋光激光器。(a)通过在谐振腔内放置圆锥形布儒斯特棱镜, 激光器输出偏振涡旋光^[77]; (b)基于离焦耦合环形泵浦光的涡旋光激光器^[78]; (c)利用自旋轨道耦合实现涡旋光输出^[79]; (d)利用点缺陷透镜实现涡旋光输出^[80]; (e)基于 Yb:YAG/YV₄ 拉曼激光器的涡旋激光阵列^[81]; (f)利用超表面器件实现涡旋光输出^[82]

Fig. 3 Vortex lasers based on discrete components. (a) Polarization vortex laser assisted by conical Brewster prism inserted in cavity^[77]; (b) vortex laser based on off-axis coupled ring-shaped pumping^[78]; (c) vortex laser based on spin-orbital coupling^[79]; (d) vortex laser based on point-defect lens^[80]; (e) vortex laser array based on Yb:YAG/YV₄ Raman laser^[81]; (f) vortex laser based on metasurface device^[82]

由凸面棱镜和凹面棱镜两个棱镜组成,避免了凸面棱镜侧表面的光束发散。通过合理地搭配布儒斯特角和锥形棱镜的顶角,可以调节径向偏振涡旋和角向偏振涡旋光经过棱镜之后的损耗大小,以此实现选模;通过在棱镜表面加镀电介质多层膜(SiO_2 和 TaO_5),可进一步加强偏振态的选择能力。2015 年, Fang 等^[78]通过光纤离焦耦合得到环形光场泵浦光,从而制备了偏振涡旋光激光器。如图 3(b)所示,激光器的增益介质为 Nd:YAG 晶体,一侧加镀有 1064 nm 高反膜的晶体起到腔镜的作用。离焦耦合得到环形泵浦光的方法会损失部分激光二极管的功率,降低了泵浦光的耦合效率。

图 3(c)报道了一种能够产生高阶庞加莱球所有态的新型激光器。利用激光腔内的 Q-plate 元件将偏振态映射到涡旋光场,证明了标准激光腔的涡旋光场的简并度可以被破坏,激光腔输出了高质量的涡旋光场,这种方法为在腔内实现几何相位控制的新型涡旋光激光器铺平了道路^[79]。图 3(d)所示为基于特殊腔镜法实现的最高阶数为 288 的涡旋光激光器^[80]。增益介质为尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体。通过在输出腔镜的中心制作不同大小的点缺陷并调节激光腔的腔长,可以实现不同的涡旋光场直接输出,由于点缺陷的存在,输出功率随着涡旋光场阶数的增加而降低。同时,利用点缺陷镜调节激光模式会增大激光谐振腔的损耗,导致激光腔中的反转粒子数的利用率较低,激光器阈值功率较高。图 3(e)展示了基于 Yb:YAG/YVO₄ 拉曼激光器实现涡旋光激光阵列的示意图^[81]。泵浦光为 940 nm 激光二极管输出的高斯光,2.2 mm 长的法布里-珀罗(F-P)谐振腔含有 Yb:YAG 晶体和 YVO₄ 晶体,分别在这两个晶

体两端的端面镀膜以构成谐振腔的腔镜。图 3(f)报道了一种在内腔插入超表面器件以控制激光器输出光场的涡旋光激光器^[82]。通过合理设计超表面器件,能够实现任意线偏振态到涡旋光场的映射,实验中实现了最高 100 阶涡旋光场的输出。相较于插入基于几何相位的 Q-plate 的激光器,该激光器能够同时输出差异极大且不对称的涡旋光场。通过优化设计谐振腔,该激光器能够产生超高纯度的涡旋光场,与腔外模式转换产生的涡旋光场相比,其纯度提高了几个数量级。该激光器是一个倍频腔,通过内腔中的非线性晶体(KTP),将 Nd:YAG(波长为 1064 nm)的红外基频光波转换为二次谐波(波长为 532 nm)。

贝塞尔光束也是一种涡旋光,其具有无衍射特性,被广泛应用于很多领域。轴棱镜是一种产生贝塞尔-高斯(BG)光束的方法^[83]。由亚波长结构的微单元组成的阵列光学元件的超表面具有结构紧凑、相位调节范围大等优点,可以实现光学波前的各种操控^[84-85]。研究者设计了一种波长为 1064 nm 的 BG 激光器,增益介质为 Nd:YVO₄,其中谐振腔的反射镜是超表面结构^[86]。

图 4 展示了 BG 激光器的结构示意图,两个反射镜形成 F-P 腔,其中镜子 1 是部分透射的平面镜,镜子 2 是超表面反射镜。超表面反射镜结构如图 4 插图所示,硅(Si)天线阵列周期性分布在二氧化硅(SiO_2)上, SiO_2 底部的 Ag 可以增大腔镜的反射率,超表面腔镜的相位如图 4 右下插图所示。基于模式选择元件(MSE)实现激光器中的选模,在谐振腔的适当位置放置金属纳米线,使得正负阶的 BG 简并模式具有不同损耗,实现激光腔的模式选择,输出特定的 BG 光场。

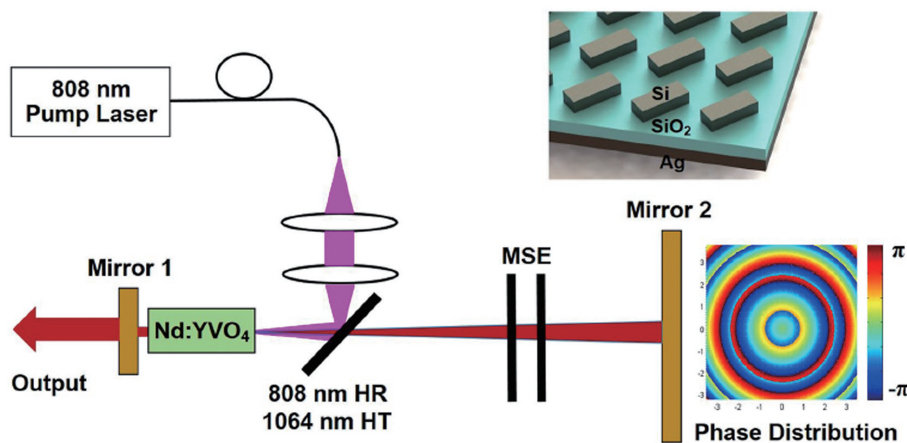


图 4 BG 激光器的结构示意图^[86]

Fig. 4 Structural diagram of BG laser^[86]

通过调节输出镜的半径以及 MSE 的参数,可以产生不同阶数的 BG 模式,如图 5 所示。仿真时,首先将不同 BG 模式的束腰半径 ω_0 都定为 0.14 mm,通过调节谐振腔反射镜 1 的半径,可以

实现不同 BG 模式的直接输出。图 5 给出了 BG₀ 到 BG₊₀₃ 模式的强度和相位分布,对应谐振腔反射镜 1 的半径分别为 $2.5 \times \omega_0$, $2.6 \times \omega_0$, $2.7 \times \omega_0$, $2.8 \times \omega_0$ 。

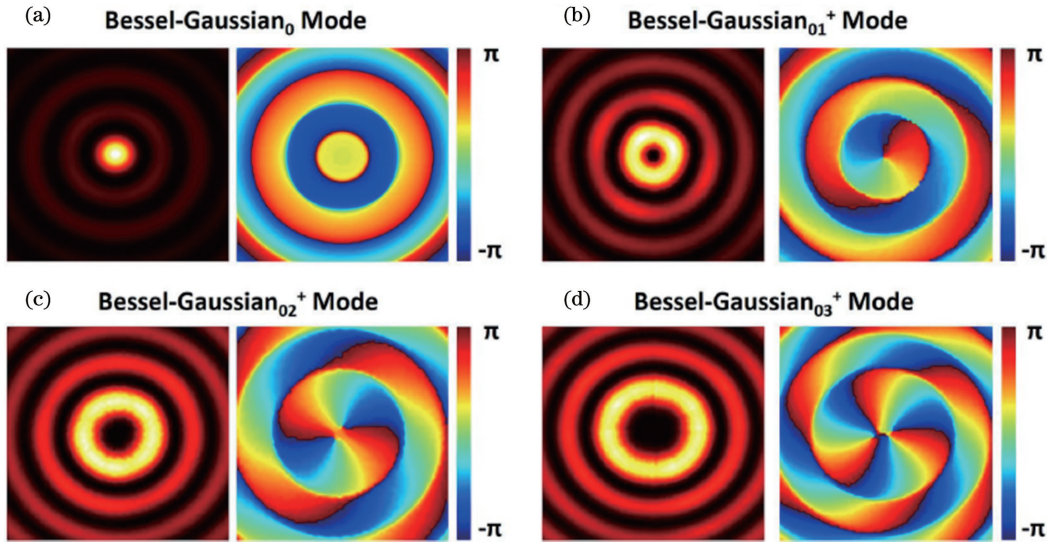


图 5 基于超表面的 BG 激光器输出的 BG 光束的幅度和相位分布^[86]

Fig. 5 Output intensity and phase distributions of BG laser based on metasurfaces^[86]

在此基础上,我们演示了一种涡旋模式重构且波长可调谐的涡旋光激光器,其谐振腔包含自由空间部分和光纤部分^[87]。在自由空间部分,通过在激光谐振腔中插入空间光调制器(SLM)和带通滤波器(BPF),实现了模式选模和波长选模,最终实现了阶数为 $-10 \sim 10$ 的涡旋光场重构以及整个 C 波段的调谐。

三部分。通过在 SLM 上加载不同的相位图,可以实现可重构的涡旋光激光器,而可调谐 BPF 可以实现激光器波长调谐。图 6(b)展示了可重构可调谐涡旋光激光器的实验装置图。980 nm 泵浦光通过 WDM 进入谐振腔,偏振控制器(PC)用于保证出射光偏振态与起偏器(Pol.)的校准。光束经过准直器(Col.)之后,入射到加载有螺旋相位的 SLM1 上,实现高斯光到涡旋光的转换。第二个半波片(HWP2)和偏振分束器(PBS)的组合可以调节和控制涡旋光激光器的输出功率。加载有相反相位面的 SLM2 可以将涡旋光到高斯光的转换耦合回光纤。

图 6(a)展示了可重构可调谐 OAM 激光器的原理图。增益介质为掺铒光纤(EDF),泵浦波长为 980 nm,可以保证激光波长覆盖整个 C 波段。在环形谐振腔插入光隔离器(ISO)使得激光单向传输。模式选择模块(高斯光-涡旋光-高斯光转换模块)可以保证腔内只激发单个涡旋模式,模式转换模块分为高斯光到涡旋光、涡旋光到高斯光和涡旋光输出

图 7 展示了激光器输出的拓扑电荷数可重构的涡旋光。如图 7(a)所示,通过切换 SLM 上的相位板,可以实现 1550 nm 处阶数为 $-10 \sim 10$ 的涡旋光

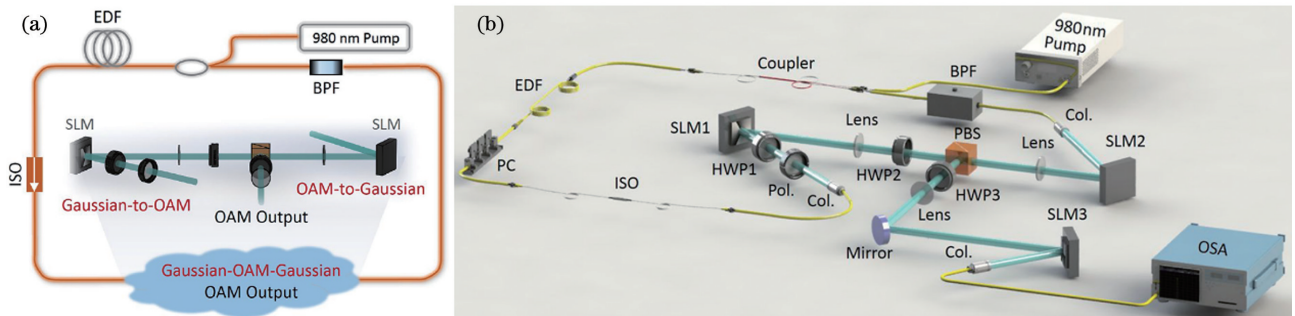


图 6 可重构可调谐 OAM 激光器^[87]。(a)概念和原理;(b)实验装置

Fig. 6 Reconfigurable and tunable OAM laser^[87]. (a) Concept and principle; (b) experimental setup

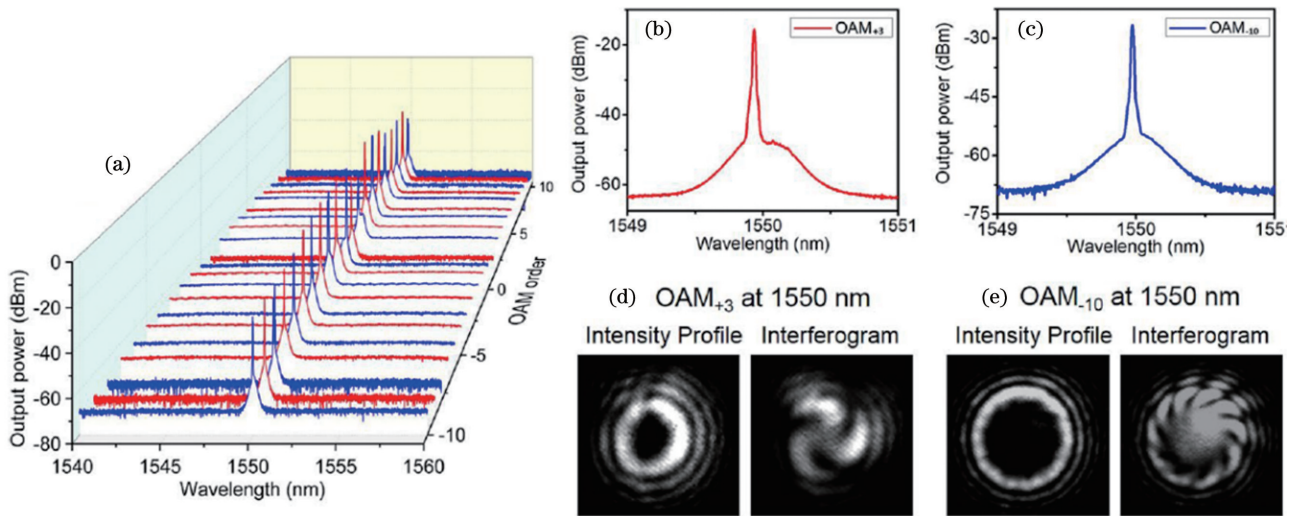


图 7 模式可重构涡旋光激光器的实验结果^[87]。(a)测量光谱;(b) OAM_{+3} 激光谱;(c) OAM_{-10} 激光谱;(d) OAM_{+3} 激光强度和干涉光斑;(e) OAM_{-10} 激光强度和干涉光斑

Fig. 7 Experimental results of mode reconfigurable vortex laser^[87]. (a) Measured spectra; (b) spectrum of OAM_{+3} laser; (c) spectrum of OAM_{-10} laser; (d) intensity profile and interferogram of OAM_{+3} laser; (e) intensity profile and interferogram of OAM_{-10} laser

场的直接激励。图 7(b)和图 7(c)分布给出了 OAM_{+3} 和 OAM_{-10} 的光谱图的细节,图 7(d)和图 7(e)给出了观测到的涡旋光束的强度分布和干涉图。图 8(a)所示为调节涡旋光激光器波长的结果,通过调节谐振腔中的可调谐 BPF,可以实现激

光波长从 1530 nm 到 1565 nm 的调谐,这里选取 OAM_{+1} 模式作为简单示意图。图 8(b)和图 8(c)分别展示了 1550 nm 和 1565 nm 处的光谱细节图。图 8(d)和图 8(e)分别给出了 1550 nm 和 1565 nm 处的 OAM_{+1} 模式的强度分布和干涉图。

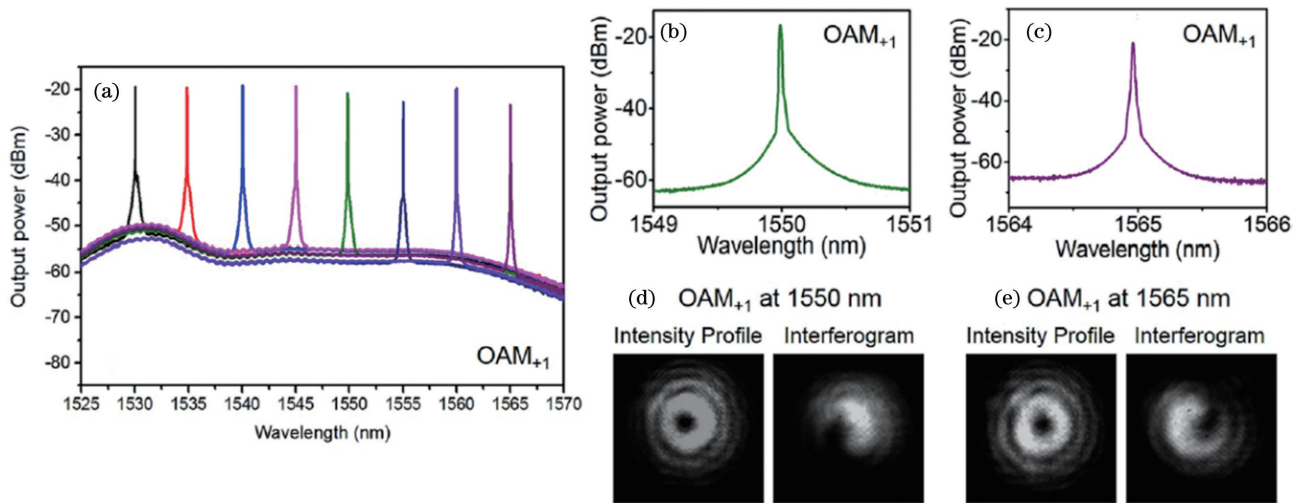


图 8 波长可调谐涡旋光激光器的实验结果^[87]。(a)波长调谐光谱;(b)1550 nm 处 OAM_{+1} 激光谱;(c)1565 nm 处 OAM_{+1} 激光谱;(d)1550 nm 处 OAM_{+1} 强度和干涉光斑;(e)1565 nm 处 OAM_{+1} 强度和干涉光斑

Fig. 8 Experimental results of wavelength tunable vortex laser^[87]. (a) Wavelength tunable spectra; (b) spectrum of OAM_{+1} laser at 1550 nm; (c) spectrum of OAM_{+1} laser at 1565 nm; (d) intensity profile and interferogram of OAM_{+1} laser at 1550 nm; (e) intensity profile and interferogram of OAM_{+1} laser at 1565 nm

在自由空间中,涡旋光场的环形区域随着涡旋光场拓扑电荷数的增大而增大。因此,在激光腔中,在相同的泵浦条件下,可以通过在谐振腔

的腔镜上刻蚀不同大小的点来选取谐振腔中振荡的激光模式。更进一步地,通过在谐振腔腔镜内刻蚀同心圆环,可以在谐振腔中同时选取不同

的振荡涡旋光场。这些涡旋光场相互之间并不重叠,不存在模式竞争,因此可以同时谐振输出,即多涡旋光激光器,结构如图 9(a)所示^[88]。输出耦合镜上的同心圆环结构如图 9(c)所示。当激光振荡时,必须保证同心圆环结构的对称轴与激光腔轴重合,不同阶数的涡旋光场分布在增益介质的不同区域且彼此不重合,从而选择出共轴且

彼此不重合的多个涡旋光场,实现多涡旋光的同时直接输出。在实验中,增益介质为尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 Nd:YVO_4 晶体,输出耦合镜上刻蚀的同心圆环尺寸依次为 $r_0 = 25\text{ }\mu\text{m}$, $r_{11} = 200\text{ }\mu\text{m}$, $r_{12} = 300\text{ }\mu\text{m}$, $r_{21} = 500\text{ }\mu\text{m}$, $r_{22} = 600\text{ }\mu\text{m}$, $r_{31} = 800\text{ }\mu\text{m}$, $r_{32} = 900\text{ }\mu\text{m}$, $r_{41} = 1100\text{ }\mu\text{m}$, $r_{42} = 1200\text{ }\mu\text{m}$ 。

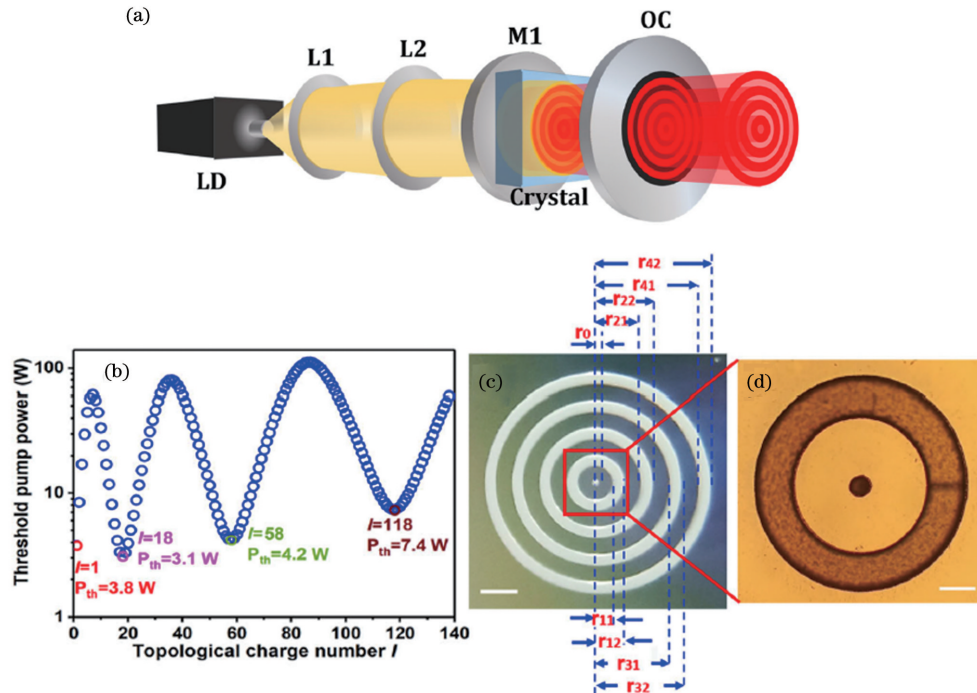


图 9 多涡旋光激光器设计^[88]。(a)装置图;(b)振荡的不同阶数涡旋光束的阈值功率;(c)输出耦合镜表面上刻蚀的同心圆环结构图样;(d)放大的中心区域的显微图样

Fig. 9 Design of multi-vortex laser^[88]. (a) Experimental setup; (b) threshold pump power versus topological charge number of vortex light; (c) image of concentric-ring pattern etched on output coupler; (d) microscopy image of magnified central area

研究者利用多涡旋光激光器演示了信息的编码和传输。该多涡旋光激光器产生的多个涡旋光束在空间上彼此不重合且共轴传输,具有极好的稳定性。利用这一特点,研究者设计了一种空间编码的新方式。在实验中,研究者以十六进制编码作为演示,四个空间上不重合的涡旋光束(拓扑电荷数分别为 1、18、58、118)分别对应十六进制编码中的四个比特位,每个比特位的“0”和“1”表示输出光场中涡旋光场的“无”和“有”,通过不同的组合可以实现所有的十六进制编码,对应的码元表如图 10(b)所示。例如,十六进制中的“D”代表“13”,对应的比特位是 1101,根据上述编码方法,即拓扑电荷数分别为 1、58、118 的涡旋光束组合可实现十六进制中“D”的编码。在实验中,研究者利用数字微镜设备(DMD)实现了上述十六进制的编码,装置如图 10(a)所示。

激光腔产生的多涡旋光场入射到 DMD 上,根据需要编码的码元信息,通过计算机操控 DMD 表面的微镜阵列角度,不同区域对应不同的反射角。以十六进制中码元“D”为例,设置拓扑电荷数为 18 的涡旋光束对应的 DMD 区域的反射角,使其与拓扑电荷数为 1, 58, 118 的涡旋光束对应的 DMD 区域的反射角不同,这样在接收端就接收不到拓扑电荷数为 18 的涡旋光束,因此产生的多涡旋光束对应十六进制 1101,即码元“D”。最后,研究者实验演示了图片信息的传输,如图 10(c)所示。灰度图中每个像素点的灰度值为 $0 \sim 255$,因此每个像素点的灰度由两组多涡旋光束编码来表示。

4 基于光纤的涡旋光激光器

在光通信系统中,光纤激光器相比半导体激光

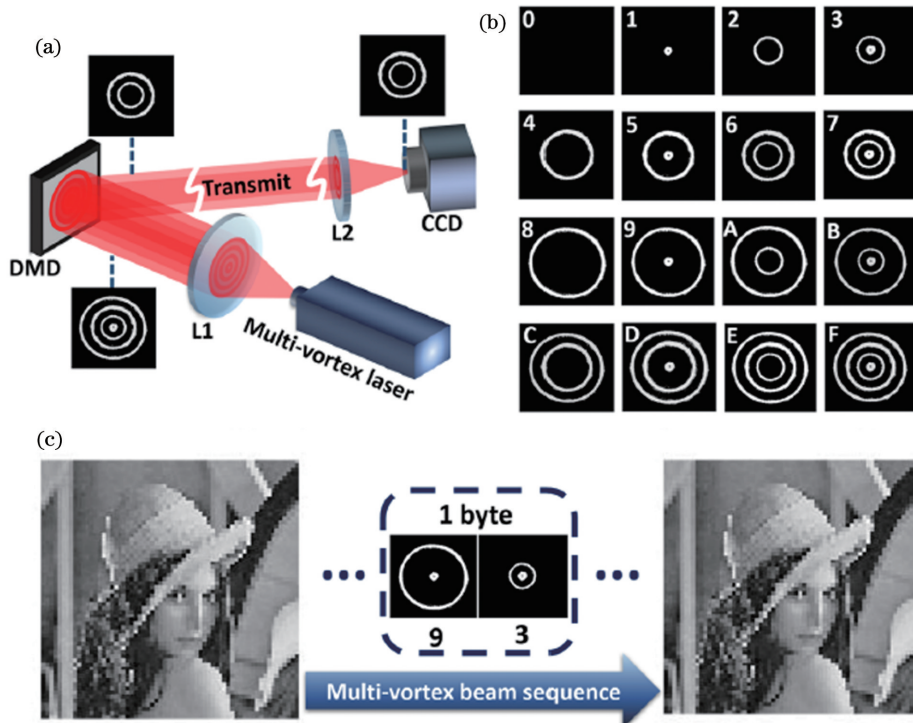


图 10 基于多涡旋光激光器的信息编码和数据传输^[88]。(a)装置图;(b)DMD 编码后的多涡旋光斑图样与对应的 16 进制编码信息;(c)图像传输

Fig. 10 Information encoding and data transmission based on multi-vortex laser^[88]. (a) Experimental setup; (b) multi-vortex light spot pattern and corresponding hexadecimal coding information encoded by DMD; (c) image transfer

器具有更好的稳定性,且光束质量更优,能更好地兼容光纤通信系统,有效降低系统的复杂度和成本。光纤激光器是以掺杂光纤作为增益介质的激光器,增益光纤的不断改进和发展使得光纤激光器有了更多的种类,利用不同的掺杂光纤可以实现不同波段的光纤激光器。光纤激光器按照谐振腔的类型可分为线形谐振腔和环形谐振腔光纤激光器。其中,线形谐振腔光纤激光器又可以称为分布式反馈激光器,通常由一对光纤布拉格光栅(FBG)构成谐振腔。涡旋光光纤激光器是在此基础上发展起来的。

图 11(a)所示为一种低阈值涡旋光激光器,输出波长为 1053 nm。通过在少模光纤上刻写 FBG 来实现谐振中的模式选择,进而实现输出模式的切换^[89]。在实验中,通过单模光纤和少模光纤的错位耦合,可实现少模光纤中高阶模式的激发。少模光纤中刻写的 FBG 作为腔镜存在多个反射峰,对应谐振腔中不同的振荡模式。在谐振腔中放置偏振控制器,调节腔内的偏振状态,进而调节不同模式的损耗,从而控制谐振腔中振荡的模式和激光器输出的模式。模式之间的转换也可以用长周期光栅(LPFG)来实现,图 11(b)所示为一种基于 LPFG 的低阈值偏振涡旋光激光器,LPFG 与少模光纤 FBG

组成谐振腔,具有很高的转换效率^[90]。图 11(c)所示的偏振涡旋光激光器的谐振腔由两个 FBG 组成,两个 FBG 分别刻写在两种不同类型的少模光纤中,两种光纤的折射率剖面的差异导致光纤中模式的有效折射率不一样,因此 FBG 对应的反射峰的位置存在差异。在实验中,通过施加应力或者调节温度可以调节 FBG 反射峰的位置,实现两个 FBG 的高阶模式自耦合峰的重合,此时谐振腔就可以直接输出偏振涡旋光。图 11(d)展示了一种基于环形谐振腔的高阶模式激光器^[92],利用制备的特殊 WDM 器件,可以将 980 nm 的泵浦光从基模转换成高阶模式并耦合进入谐振腔中,基于模式匹配原理,980 nm 的泵浦高阶模式可以激发谐振腔中对应的高阶模式,实现高阶模式输出,该光纤激光器整个激光腔都是由少模光纤组成。图 11(e)展示了一种基于模式耦合器的飞秒锁模激光器^[93]。利用拉锥技术制备的宽带模式耦合器件,将基模转换为高阶模式,环形谐振腔中振荡的基模被这个器件转换成高阶模式,实现高阶涡旋光束的输出。图 11(f)展示了一种基于环形光纤的光纤激光器^[94],通过在环形光纤上直接刻写 FBG,可以实现高阶模式的直接输出。

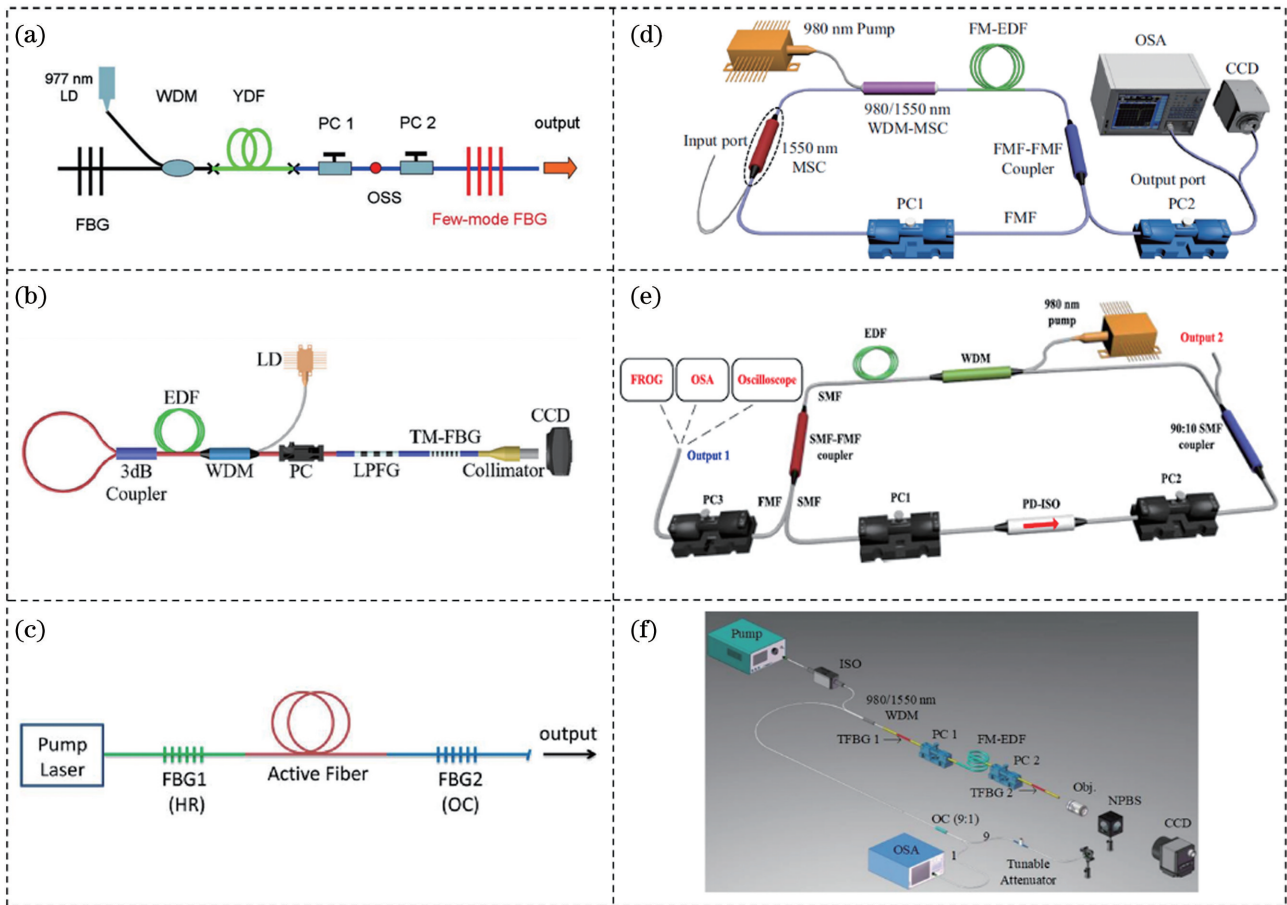


图 11 基于光纤的涡旋光激光器。(a)基于少模 FBG 的低阈值单波长偏振涡旋光激光器^[89]；(b)基于长周期光栅的低阈值偏振涡旋光激光器^[90]；(c)基于一对少模 FBG 选模的偏振涡旋光激光器^[91]；(d)基于环形腔的高阶涡旋光激光器^[92]；(e)基于模式耦合器的涡旋光飞秒激光器^[93]；(f)基于环形光纤的涡旋光激光器^[94]

Fig. 11 Vortex lasers based on fiber. (a) Low threshold single-wavelength polarization vortex laser based on few-mode FBG^[89]; (b) low threshold polarization vortex laser based on long period grating^[90]; (c) polarization vortex laser based on pair of few-mode FBGs to realize selective mode operation^[91]; (d) high order vortex laser based on ring cavity^[92]; (e) vortex femtosecond laser based on mode coupler^[93]; (f) vortex laser based on ring-shaped fiber^[94]

研究者提出了一种线形腔激光器,其谐振腔由光纤上飞秒激光刻写的 FBG 和法布里-珀罗干涉仪(FPI)组成,可以实现腔内高阶模式的直接谐振输出,是波长可以切换的涡旋光激光器^[95]。飞秒激光刻写 FBG 具有很高的灵活性和可操作性,在光纤中直写光纤光栅,材料不需要具有光敏性,激光直接聚焦到纤芯中,从而引入局域化折射率改变。对于绝大部分透明材料,都可以通过这种方式直写光栅或光波导结构,因此可以灵活选择加工材料体系。调控移动速度和激光光源的重复频率可改变光栅周期,因此可以灵活控制光栅周期。

波长可切换的涡旋光激光器的实验装置如图 12 所示,980 nm 的泵浦光通过 980 nm/1550 nm 的 WDM 耦合进入谐振腔中,激发高阶模式,实现高阶模式泵浦。此处 WDM 和少模光纤为错位焊

接,增益介质为 1.2 m 长的环形掺铒光纤,两端分别刻有 FBG 和 FPI 以构成线形谐振腔,同时,环形掺铒光纤两端分别放置有一个偏振控制器,可调节谐振腔中的偏振状态。线形谐振腔光纤输出端与自制的模式耦合器直接焊接,实现激光器模式输出。整个谐振腔由同一种光纤组成,在环形掺铒光纤上刻写 FBG 和 FPI,利用它们的偏振特性,通过调节两端的偏振控制器,调节谐振腔中不同模式的损耗,实现谐振腔中的模式选择和涡旋模式的直接输出。同时,利用少模 FPI 的梳状滤波特性,可以实现波长的切换,在每个 OAM 光束输出波长处,通过偏振控制都可以实现-1 阶到+1 阶的涡旋模式切换。

研究者首先测试了 FBG 和 FPI 的性能,图 13(a)和图 13(b)分别对应 FBG 和 FPI 的透射谱。可以看到,FBG 在谐振腔中作为高反射率镜,

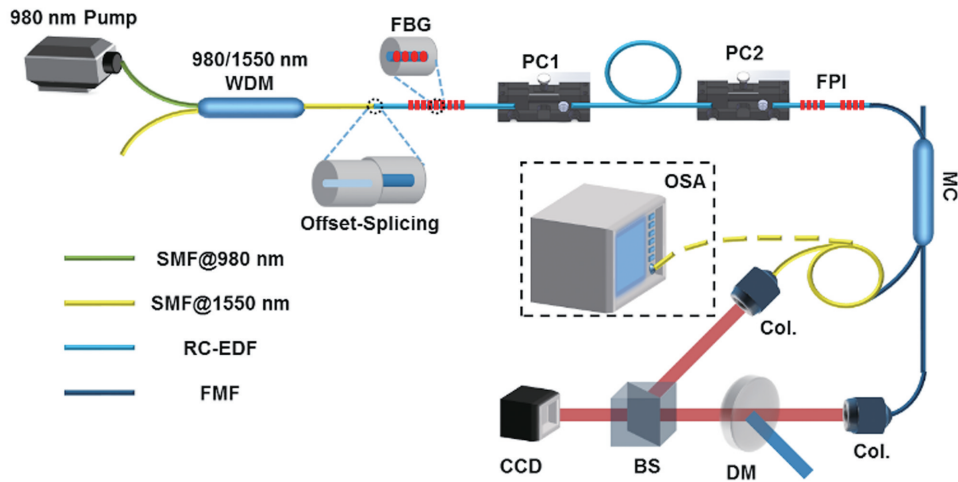


图 12 可调谐 OAM 激光器的实验装置图^[95]

Fig. 12 Experimental setup of tunable OAM laser^[95]

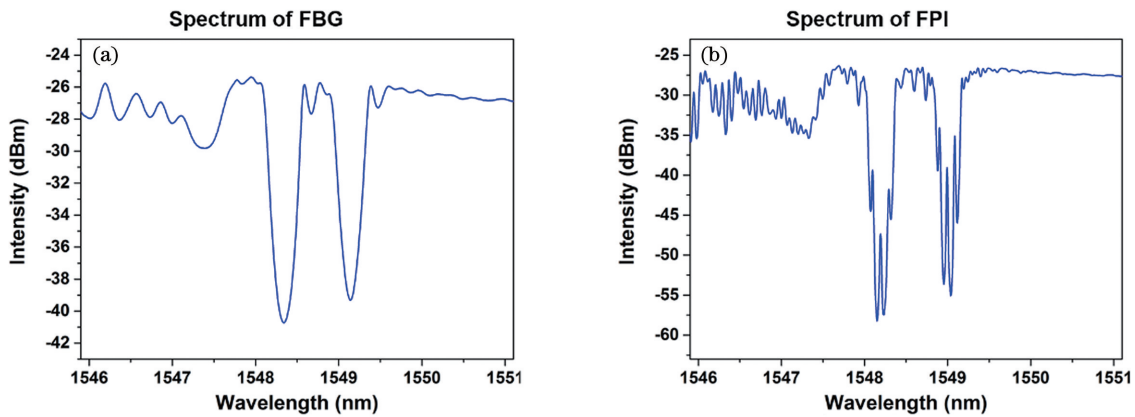


图 13 透射光谱^[95]。(a)FBG;(b)FPI

Fig. 13 Transmission spectra^[95]. (a) FBG; (b) FPI

其透射谱有三个波谷,从左到右分别为 LP_{11} 模式的自耦合峰、 LP_{01} 与 LP_{11} 之间的互耦合峰和 LP_{01} 模式的自耦合峰,波长分别为 1547.4, 1548.4, 1549.2 nm,谐振深度约为 15 dB。FPI 透射谱三个中心波长位置处的反射峰与 FBG 相同,由于 FPI 的干涉性质,在每个谐振峰中可以看到多个透射峰,其有着梳状滤波的特性,可以用来有效地选择激光腔内的模式。适当调节腔内的偏振状态,就可以得到 $l = \pm 1$ 的 OAM 激光输出。其中 FBG 的周期是 $1.071 \mu\text{m}$,光栅长度是 4 mm;FPI 是由一对具有相同周期和相同长度的 FBG 组成,其光栅周期和长度分别为 $1.071 \mu\text{m}$ 和 6 mm,FBG 之间的间隔是 8 mm。

由于采用了错位熔接泵浦的方法,因此泵浦光损耗较大,该涡旋光激光器的阈值功率较大,当泵浦光功率达到 400 mW 时,可以实现 OAM 激光的直接输出,错位熔接的损耗为 7 dB~8 dB。通过调节

腔内的偏振控制器,可以得到波长分别为 1547.48 nm 和 1547.61 nm 的 OAM 激光输出,如图 14(a)所示,激光的消光比大于 40 dB,反射峰的 3 dB 带宽约小于 0.02 nm(光谱仪的最小分辨率)。不同波长处的激光经少模光纤耦合器分束后发生干涉,通过控制腔内的偏振态,可以得到 $l = \pm 1$ 的 OAM 光斑和干涉图样,如图 14(b)所示。

5 基于集成器件的涡旋光激光器

近年来,光子集成技术发展迅猛,光学器件的小型化是一种发展趋势。相比集成器件的灵活性、可重构、可调谐特性,传统分立元件具有很大的局限性。基于集成器件的涡旋光激光器是极具研究价值的一个方向。

图 15(a)所示的结构可以利用低成本的半导体激光器直接发射涡旋光束^[96]。通过在垂直腔面发射涡旋光激光器(VCSEL)的孔径内制作微尺度螺

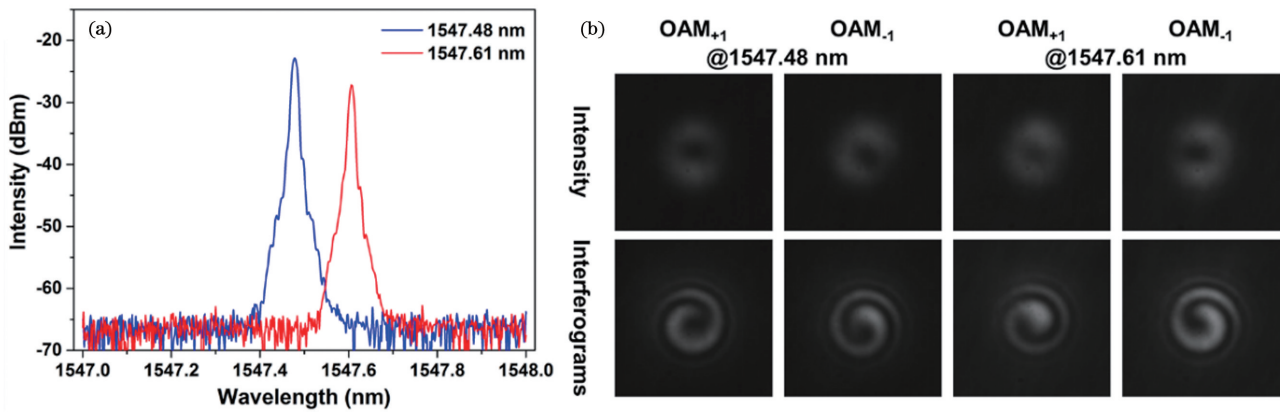


图 14 全光纤波长可调谐涡旋光激光器的实验结果^[95]。(a)光谱;(b)强度和干涉图样

Fig. 14 Experimental results of all-fiber wavelength-switchable vortex laser^[95]. (a) Measured spectra; (b) measured intensity profiles and interferograms

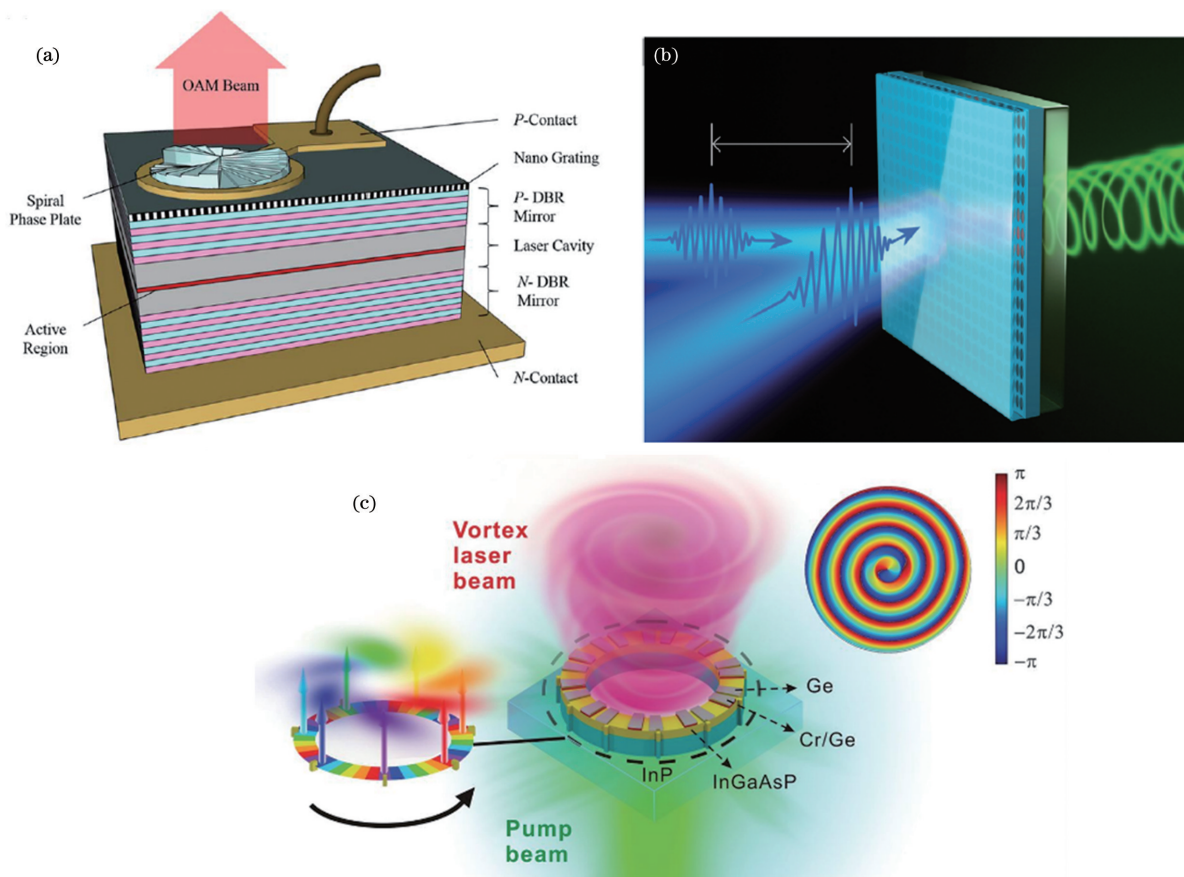


图 15 基于集成器件的涡旋光激光器。(a)垂直腔面发射涡旋光激光器(VCSEL)^[96];(b)钙钛矿基涡旋光激光器^[97];
(c)基于 InGaAsP/InP 平台的涡旋光微激光器原理图^[98]

Fig. 15 Vortex lasers based on integrated devices. (a) Vertical-cavity surface-emitting vortex laser (VCSEL)^[96];
(b) vortex laser based on lead bromide perovskite^[97]; (c) vortex micro-laser based on InGaAsP/InP platform^[98]

旋相位板, VCSEL 发射的线偏振高斯光束被转换成涡旋光场及其叠加态的光束, 激光器具有高效率和高光束质量。VCSEL 器件由于其低制造成本、高能效、圆对称光束轮廓和高调制带宽, 在很多领域都有广泛应用。图 15(b)展示了一种钙钛矿基涡旋光激

光器, 基于模式对称性和远场特性, 涡旋光激光可以切换到线偏振光激光, 反之亦然, 切换时间为 $1 \sim 1.5 \text{ ps}$, 能量消耗比全光开关低几个数量级^[97]。图 15 提供了一种解决低能耗和高速纳米光子学之间长期存在的矛盾的方法, 引入了可在太赫兹频率

下切换的涡旋光激光器。图 15 (c) 展示了在 InGaAsP/InP 平台上制造的涡旋光激光器的结构^[98]。顶部铯和铬/铯引入了不同的损耗和增益调制,在微环激光器中形成了具有单向功率循环的特殊点。因此,带有角光栅的微环只允许一个方向的光旋转,从而产生集成涡旋光激光发射。

目前,产生涡旋光的集成器件主要是无源器件,且大部分是基于硅基平台的微环光栅器件^[58,99-100]。基于此,研究者利用 InP 平台的微环光栅器件,通过

优化结构设计,首次制备了基于电泵浦的高速直调偏振涡旋光激光器^[101-102]。

图 16 给出了分别用于产生角向和径向偏振涡旋光的结构示意图。如图 16(a)所示,微腔顶部刻蚀有光栅结构。如图 16(b)所示,微腔的顶部和侧壁都刻蚀有光栅结构。图 16(c)展示了激光器的主要组成结构,包括衬底、P 欧姆接触层、下包层、有源区、上包层、顶部光栅、侧面光栅和 N 欧姆接触层。

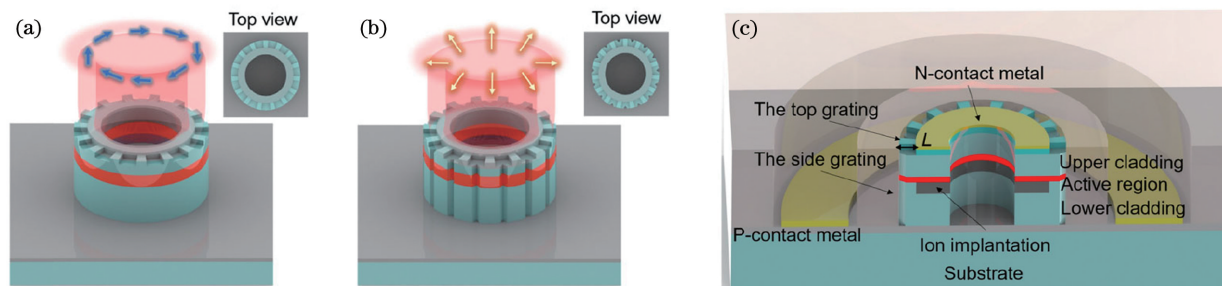


图 16 微腔激光器结构示意图^[101]。(a)产生角向偏振涡旋光的微腔激光器;(b)产生径向偏振涡旋光的微腔激光器;(c)矢量光激光器的横截面

Fig. 16 Structural diagrams of micro-cavity lasers^[101]. (a) Micro-cavity laser for azimuthally polarized vortex beam; (b) micro-cavity laser for radially polarized vortex beam; (c) cross section of vector laser

图 17(a1)展示了半径为 $25 \mu\text{m}$ 的微腔偏振涡旋光激光器的辐射强度分布。图 17(b1)~(e1)所示为微腔偏振涡旋光激光器输出光场经过偏振片之后的光场分布,其中箭头对应偏振片方向,可以看出,出射光为径向偏振涡旋光。进一步地,研究者将微腔偏振

涡旋光激光器输出的偏振涡旋光耦合进少模光纤中,实现了少模光纤中本征模式 TM_{01} 的激发,经过光纤传输后的光场如图 17(a2)所示。研究者用起偏器对光纤输出光场进行了检测,如图 17(b2)~(e2)所示,可以看出,光纤输出光为径向偏振涡旋光。

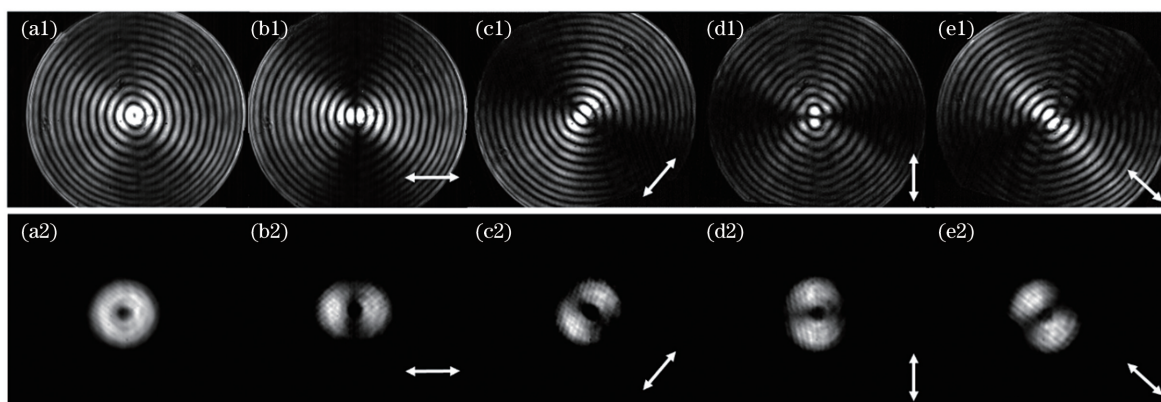


图 17 涡旋光激光器出射光场和经过光纤传输之后的光场^[102]。(a1)远场强度分布;(b1)~(e1)偏振分布;(a2)经 2 km 光纤传输后的光场强度分布;(b2)~(e2)光纤输出光场的偏振分布特性

Fig. 17 Output light field of vortex laser and light field after transmission through fiber^[102]. (a1) Far-field intensity distribution; (b1)-(e1) polarization distributions; (a2) intensity distribution after 2 km fiber transmission; (b2)-(e2) polarization distributions of fiber output field

6 总结和展望

简要回顾了近年来涡旋光激光器的研究进展,

从中可以看出,激光器的出现是现代光学发展的一大重要成果,激光不仅揭示了光子的本质特性,帮助人们了解微观世界,还被广泛应用于工业制造、生物

医学、国防军事等领域,推动着现代科技的发展与进步。因此,涡旋光束的产生技术是涡旋光应用的基础,对拓宽涡旋光的应用范围至关重要。目前,涡旋光产生主要是通过腔外转换实现的,该方法简单方便,但是存在一些明显的局限性。例如,由于相位元件的相位非连续性,产生的涡旋光本质上不具备理想的螺旋形相位波前,这会影响产生的涡旋光束的纯度,影响涡旋光的应用。因此,涡旋光激光器具有重要的研究意义。

目前已经报道的关于涡旋光激光器的研究工作较少,针对涡旋光激光器的研究工作也在起步阶段,很多性能有待提升。图 18 给出了涡旋光激光器未来发展的趋势和展望。前文提到的涡旋光激光器主要集中在相位涡旋光激光器和偏振涡旋光激光器,更加全面的广义上的结构光激光器是值得研究的一个方向,包括厄米高斯光激光器、贝塞尔光束激光器、艾里光束激光器等,不同的结构光激光器有着不同的特点和不同的应用场景。目前报道的大部分涡旋光激光器都是连续光激光器,在可调谐性、多波长、高功率和单纵模等特性上有很大的发展空间。进一步地,涡旋光激光器可以拓展为脉冲涡旋光激光器,包括皮秒脉冲激光器和飞秒脉冲激光器等,更进一步地,通过结合不同的维度、时域和空间域,涡旋光激光器可以拓展为时空锁模脉冲激光器。上

述这些发展趋势在实现方法上并不局限于某一种特定的类型,基于分立元件、光纤和集成器件的涡旋光激光器都可以实现。当然,不同类型的激光器具有自身不同的特性,需要改进和提升的方向也各有不同。基于分立元件的涡旋光激光器的研究起步更早,研究成果也相对丰富,主要是通过腔内插入元件或利用特殊腔镜来实现的,更容易结合传统激光器的优点进行改进,但是目前在输出功率和模式数目上仍然有很大的提升空间。光纤激光器以其结构紧凑、光束质量好、转换效率高、散热性好等优势而被广泛应用,理论上基于光纤的涡旋光激光器同样有这些优势,然而目前在实际制备过程中,基于光纤的涡旋光激光器却很难实现这些优势,输出光场不稳定、阈值功率大等主要受限于掺稀土光纤,掺稀土光纤的增益性能及光纤中的模式稳定性和模式数目等都有待提升,光纤中的模式串扰和模式损耗也有待解决。小型化和集成化是未来光通信发展的趋势之一,因此基于集成器件的涡旋光激光器的研究显得至关重要。目前报道的集成涡旋光激光器结构比较单一,主要为微环光栅结构,这些激光器在阈值功率、输出功率、模式数目上都有待优化和改进。针对不同的场景,不同类型激光器的融合应用也是发展趋势之一。

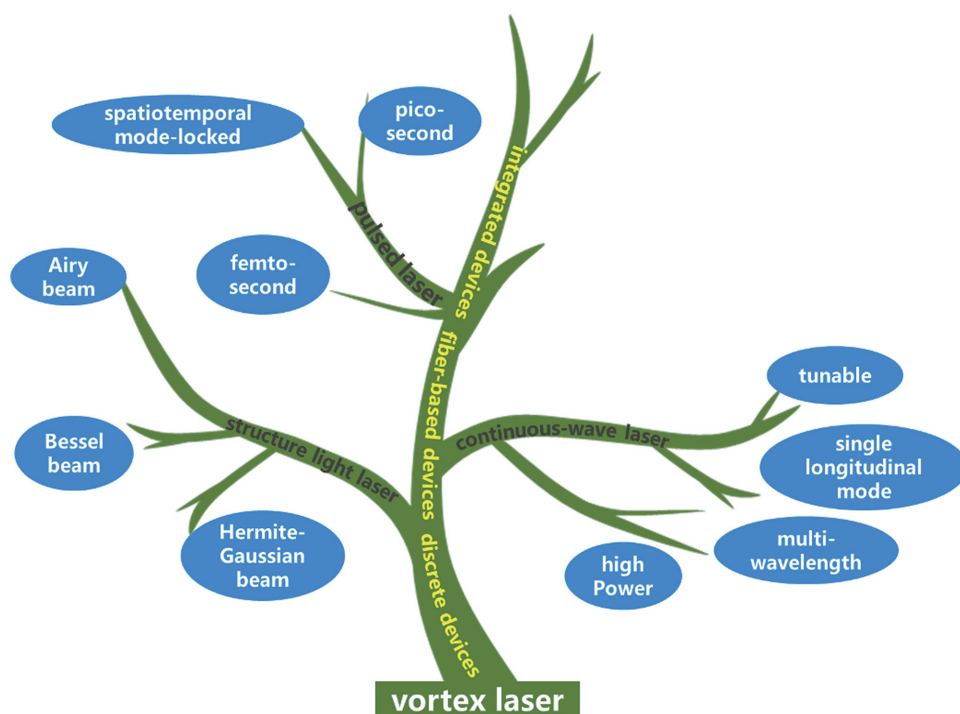


图 18 涡旋光激光器未来发展的趋势和展望

Fig. 18 Future development trend and prospect of vortex laser

参 考 文 献

- [1] Dennis M R, O'Holleran K, Padgett M J. Chapter 5: singular optics: optical vortices and polarization singularities[M]//Progress in optics. Amsterdam: Elsevier, 2009: 293-363.
- [2] Zhan Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications[J]. Advances in Optics and Photonics, 2009, 1(1): 1-57.
- [3] Ramachandran S, Kristensen P. Optical vortices in fiber[J]. Nanophotonics, 2013, 2(5/6): 455-474.
- [4] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [5] 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.
- [6] Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation[J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 335-342.
- [7] Fang L, Padgett M J, Wang J. Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(6): 1700183.
- [8] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles[J]. Science, 2001, 292(5518): 912-914.
- [9] Padgett M J, Bowman R. Tweezers with a twist [J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 343-348.
- [10] Bernet S, Jesacher A, Fürhapter S, et al. Quantitative imaging of complex samples by spiral phase contrast microscopy [J]. Optics Express, 2006, 14(9): 3792-3805.
- [11] Wang J, Liu J, Li S H, et al. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications[J]. Nanophotonics, 2021, 11(4): 645-680.
- [12] Vieira J, Trines R M G M, Alves E P, et al. Amplification and generation of ultra-intense twisted laser pulses via stimulated Raman scattering [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10371.
- [13] Elias N M. Photon orbital angular momentum in astronomy[J]. Astronomy & Astrophysics, 2008, 492(3): 883-922.
- [14] Liu J, Nape I, Wang Q, et al. Multidimensional entanglement transport through single-mode fiber [J]. Science Advances, 2020, 6(4): eaay0837.
- [15] 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.
- [16] Liu J, Li S M, Zhu L, et al. Direct fiber vector eigenmode multiplexing transmission seeded by integrated optical vortex emitters [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7(3): 17148.
- [17] Winzer P J. Modulation and multiplexing in optical communication systems [C]//2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum electronics and Laser Science Conference, June 2-4, 2009, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009.
- [18] Winzer P J, Foschini G J. MIMO capacities and outage probabilities in spatially multiplexed optical transport systems [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16680-16696.
- [19] Zhou X, Yu J J. Multi-level, multi-dimensional coding for high-speed and high-spectral-efficiency optical transmission [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(16): 3641-3653.
- [20] Winzer P J, Gnauck A H, Doerr C R, et al. Spectrally efficient long-haul optical networking using 112-gb/s polarization-multiplexed 16-QAM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 547-556.
- [21] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14-B28.
- [22] Wang J. Data information transfer using complex optical fields: a review and perspective (Invited Paper) [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(3): 30005.
- [23] Willner A E, Huang H, Yan Y, et al. Optical communications using orbital angular momentum beams [J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(1): 66-106.
- [24] Wang J. Twisted optical communications using orbital angular momentum [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 62(3): 034201.
- [25] Huang H, Xie G D, Yan Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link enabled by three-dimensional multiplexing of orbital angular momentum, polarization, and wavelength [J]. Optics Letters, 2014, 39(2): 197-200.
- [26] Lei T, Zhang M, Li Y R, et al. Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(3): e257.
- [27] Liu J, Wang J. Polarization-insensitive PAM-4

- carrying free-space orbital angular momentum (OAM) communications [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4258-4269.
- [28] 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.
- [29] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers [J]. *Optica*, 2015, 2 (3): 267-270.
- [30] Chen S, Wang J. Characterization of red/green/blue orbital angular momentum modes in conventional G.652 fiber [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(4): 7200308.
- [31] Huang H, Milione G, Lavery M P J, et al. Mode division multiplexing using an orbital angular momentum mode sorter and MIMO-DSP over a graded-index few-mode optical fibre [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14931.
- [32] Wang A D, Zhu L, Liu J, et al. Demonstration of hybrid orbital angular momentum multiplexing and time-division multiplexing passive optical network [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29457-29466.
- [33] Liu J, Li S M, Du J, et al. Performance evaluation of analog signal transmission in an integrated optical vortex emitter to 3.6-km few-mode fiber system [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1969-1972.
- [34] Chen S, Liu J, Zhao Y F, et al. Full-duplex bidirectional data transmission link using twisted lights multiplexing over 1.1-km orbital angular momentum fiber [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38181.
- [35] Zhu G X, Hu Z Y, Wu X, et al. Scalable mode division multiplexed transmission over a 10-km ring-core fiber using high-order orbital angular momentum modes [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (2): 594-604.
- [36] Zhu L, Zhu G X, Wang A D, et al. 18 km low-crosstalk OAM + WDM transmission with 224 individual channels enabled by a ring-core fiber with large high-order mode group separation [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1890-1893.
- [37] Liu J, Zhu L, Wang A D, et al. All-fiber pre- and post-data exchange in km-scale fiber-based twisted lights multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (16): 3896-3899.
- [38] Liu J, Wang J. Demonstration of reconfigurable joint orbital angular momentum mode and space switching [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37331.
- [39] Milione G, Lavery M P J, Huang H, et al. 4 × 20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de) multiplexer [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1980-1983.
- [40] Baghdady J, Miller K, Morgan K, et al. Multi-gigabit/s underwater optical communication link using orbital angular momentum multiplexing [J]. *Optics Express*, 2016, 24(9): 9794-9805.
- [41] Zhao Y F, Wang A D, Zhu L, et al. Performance evaluation of underwater optical communications using spatial modes subjected to bubbles and obstructions [J]. *Optics Letters*, 2017, 42 (22): 4699-4702.
- [42] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby [J]. *Nature*, 1960, 187(4736): 493-494.
- [43] Patel C K N. Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂ [J]. *Physical Review*, 1964, 136(5A): A1187-A1193.
- [44] Hargrove L E, Fork R L, Pollack M A. Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, 5(1): 4-5.
- [45] Aoyagi Y, Aoyagi T, Namba S. Tunable distributed feedback dye laser [J]. *The Review of Laser Engineering*, 1975, 3(2): 90-95.
- [46] Hall R N, Fenner G E, Kingsley J D, et al. Coherent light emission from GaAs junctions [J]. *Physical Review Letters*, 1962, 9(9): 366-368.
- [47] Snitzer E. Optical maser action of Nd⁺³ in a Barium crown glass [J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7 (12): 444-446.
- [48] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, et al. Helical wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate [J]. *Optics Communications*, 1994, 112 (5/6): 321-327.
- [49] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, et al. Spin-to-orbital conversion of the angular momentum of light and its classical and quantum applications [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(6): 064001.
- [50] Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.
- [51] Liu J, Wang J. Demonstration of polarization-insensitive spatial light modulation using a single polarization-sensitive spatial light modulator [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9959.
- [52] Maurer C, Jesacher A, Bernet S, et al. What spatial light modulators can do for optical microscopy [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 81-101.

- [53] Forbes A, Dudley A, McLaren M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 200-227.
- [54] Yan Y, Zhang L, Wang J, et al. Fiber structure to convert a Gaussian beam to higher-order optical orbital angular momentum modes [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(16): 3294-3296.
- [55] Wong G K L, Kang M S, Lee H W, et al. Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber [J]. *Science*, 2012, 337(6093): 446-449.
- [56] Li S H, Mo Q, Hu X, et al. Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4376-4379.
- [57] Su T H, Scott R P, Djordjevic S S, et al. Demonstration of free space coherent optical communication using integrated silicon photonic orbital angular momentum devices [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9396-9402.
- [58] Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters[J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [59] Guan B B, Scott R P, Qin C, et al. Free-space coherent optical communication with orbital angular, momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 145-156.
- [60] Strain M J, Cai X L, Wang J W, et al. Fast electrical switching of orbital angular momentum modes using ultra-compact integrated vortex emitters [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4856.
- [61] Du J, Wang J. Chip-scale optical vortex lattice generator on a silicon platform[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 5054-5057.
- [62] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [63] Li G X, Kang M, Chen S M, et al. Spin-enabled plasmonic metasurfaces for manipulating orbital angular momentum of light [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4148-4151.
- [64] Yang Y M, Wang W Y, Moitra P, et al. Dielectric meta-reflectarray for broadband linear polarization conversion and optical vortex generation [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(3): 1394-1399.
- [65] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, et al. Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(5): e167.
- [66] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, et al. Arbitrary spin-to-orbital angular momentum conversion of light[J]. *Science*, 2017, 358(6365): 896-901.
- [67] Du J, Wang J. Dielectric metasurfaces enabling twisted light generation/detection/(de) multiplexing for data information transfer [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13183-13194.
- [68] Okida M, Omatsu T, Itoh M, et al. Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd : YVO₄ 1.3- μm bounce laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7616-7622.
- [69] Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, et al. An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- [70] Chard S P, Shardlow P C, Damzen M J. High-power non-astigmatic TEM₀₀ and vortex mode generation in a compact bounce laser design [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 275-280.
- [71] Huang X X, Xu B, Cui S W, et al. Direct generation of vortex laser by rotating induced off-axis pumping[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1601606.
- [72] Wang S, Zhang S L, Qiao H C, et al. Direct generation of vortex beams from a double-end polarized pumped Yb : KYW laser [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 26925-26932.
- [73] Beijersbergen M W, Allen L, van der Veen H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [74] Thirugnanasambandam M P, Senatsky Y, Ueda K. Generation of very-high order Laguerre-Gaussian modes in Yb : YAG ceramic laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(9): 637-643.
- [75] 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.
- [76] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Generation of Laguerre-Gaussian modes in fiber-coupled laser diode end-pumped lasers [J]. *Applied Physics B*, 2001, 72(2): 167-170.
- [77] Kozawa Y, Sato S. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 3063-3065.
- [78] Fang Z Q, Xia K G, Yao Y, et al. Radially polarized and passively Q-switched Nd : YAG laser

- under annular-shaped pumping[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 337-342.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] Dong J, Wang X L, Zhang M M, et al. Structured optical vortices with broadband comb-like optical spectra in $\text{Yb} : \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}/\text{YVO}_4$ Raman microchip laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(16): 161108.
- [82] Sroor H, Huang Y W, Sephton B, et al. High-purity orbital angular momentum states from a visible metasurface laser [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(8): 498-503.
- [83] Litvin I A, Ngcobo S, Naidoo D, et al. Doughnut laser beam as an incoherent superposition of two petal beams[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 704-707.
- [84] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966-3969.
- [85] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788-792.
- [86] Zhou N, Wang J. Metasurface-assisted orbital angular momentum carrying Bessel-Gaussian Laser: proposal and simulation [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 8038.
- [87] Zhou N, Liu J, Wang J. Reconfigurable and tunable twisted light laser[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 11394.
- [88] Qiao Z, Wan Z Y, Xie G Q, et al. Multi-vortex laser enabling spatial and temporal encoding [J]. *Photonix*, 2020, 1: 13.
- [89] Sun B, Wang A T, Xu L X, et al. Low-threshold single-wavelength all-fiber laser generating cylindrical vector beams using a few-mode fiber Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 464-466.
- [90] Chen R S, Wang J H, Zhang X Q, et al. High efficiency all-fiber cylindrical vector beam laser using a long-period fiber grating [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 755-758.
- [91] Liu T, Chen S P, Hou J. Selective transverse mode operation of an all-fiber laser with a mode-selective fiber Bragg grating pair [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5692-5695.
- [92] Wang F, Shi F, Wang T, et al. Method of generating femtosecond cylindrical vector beams using broadband mode converter[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(9): 747-750.
- [93] Wang T, Shi F, Huang Y P, et al. High-order mode direct oscillation of few-mode fiber laser for high-quality cylindrical vector beams [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11850-11858.
- [94] Yang K, Liu Y G, Wang Z, et al. All-fiber orbital angular momentum laser generated with titled fiber Bragg grating pair written in few-mode ring-core fiber[C]//*Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, March 3-7, 2019, San Diego, California, Washington, D.C.: OSA, 2019: W3C.4.*
- [95] Cui F, Liu J, Wang J, et al. All-fiber wavelength-switchable orbital angular momentum (OAM) laser assisted by fiber Bragg grating and Fabry-Perot interferometer directly inscribed in erbium-doped fiber with femtosecond laser [C]//*2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 9-14, 2021, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.*
- [96] Li H L, Phillips D B, Wang X Y, et al. Orbital angular momentum vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Optica*, 2015, 2(6): 547-552.
- [97] Huang C, Zhang C, Xiao S M, et al. Ultrafast control of vortex microlasers [J]. *Science*, 2020, 367(6481): 1018-1021.
- [98] Miao P, Zhang Z F, Sun J B, et al. Orbital angular momentum microlaser [J]. *Science*, 2016, 353(6298): 464-467.
- [99] Li S M, Nong Z C, Wu X, et al. Orbital angular momentum vector modes (de) multiplexer based on multimode micro-ring [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 29895-29905.
- [100] Shao Z K, Zhu J B, Zhang Y F, et al. On-chip switchable radially and azimuthally polarized vortex beam generation[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1263-1266.
- [101] Zheng S, Ma X, Chen Q A, et al. Concentric microcavities for cylindrical vector beam lasers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2211-2214.
- [102] Ma X, Zheng S, Chen Q A, et al. High-speed directly modulated cylindrical vector beam lasers [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(12): 3261-3270.

Research Progress of Vortex Laser

Liu Jun^{1,2}, Wang Jian^{1,2*}

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

² Optics Valley Laboratory, Hubei 430074, Hubei, China

Abstract

Significance A vortex beam is a special light field possessing a spatial structure, including phase vortex and polarization vortex, and possessing a phase singularity and a polarization singularity correspondingly. A phase vortex laser carrying orbital angular momentum (OAM) has a helical phase front of $\exp(il\varphi)$, where l is the topological charge value and φ refers to the azimuthal angle. The topological charge represents the twisting rate of the helical phase which is an unlimited value in principle. In addition, phase vortices with different topological charges are orthogonal to each other. A polarization vortex laser is a light beam with spatially variant polarization. Due to the phase singularity and polarization singularity, the intensity of a vortex laser beam at the center is canceled leading to a ring-shape intensity profile. Vortex beams have been widely used in astronomy, optical manipulation, microscopy, imaging, sensing, quantum science, and optical communications owing to their distinct advantages, such as inherent orthogonality and unbounded states in principle.

With the arrival of a big data era, the dramatic increase of global internet traffic has attracted increasing research efforts for sustainable expansion of capacity. Beyond various advanced modulation formats and multiplexing techniques using the physical dimensions of photons including frequency, amplitude, phase, and time, space-division multiplexing (SDM) is recognized as an alternative technique to increase transmission capacity by exploring the spatial structure of photons. Optical vortices can be regarded as a mode set to multiplex data information owing to the inherent orthogonality and unbounded states.

As one of the four major inventions in the 20th century, the laser is the basic part of an optical communication system and plays a very important role. Up to now, on one hand, a vortex beam is generated mainly through the conversion occurring outside the laser cavity, and the various applications based on vortex beam, such as diffractive optical elements, transform optics, spiral phase plate, fiber based devices, photonic integrated devices, metasurfaces, have obvious limitations in some aspects including imperfect spiral wave front phases. On the other hand, a vortex beam can be directly generated from a vortex laser, which can avoid some disadvantages of the conversions occurring outside the laser cavity, such as low conversion efficiency, poor beam quality after conversion, power limitation, and additional converter devices. Therefore, vortex lasers deserve more extensive and sufficient researches.

The ways to output a vortex beam directly from the laser cavity can be mainly divided into three types. 1) Inserting some elements, such as a spiral phase plate, lens, and diaphragm, into the cavity to generate a vortex beam from the laser cavity. 2) Using a special cavity mirror to select the oscillation mode in laser cavity. 3) Using a ring-shaped pumping to generate a vortex beam. By converting the pump beam into a ring-shaped one similar to the shape of the intensity profile of a vortex beam, the oscillation mode in the laser cavity can match the pump beam to the generated vortex beam.

Progress The vortex laser based on discrete components is mainly composed of discrete single optical elements in free space. This laser is simple to construct, stable, and has large number of output modes. In 2005, Kozawa et al. demonstrated a polarization vortex laser by inserting a Brewster prism into the laser cavity based on Nd:YAG [Fig. 3(a)]. A laser which can generate all states on the higher-order Poincaré sphere was demonstrated in 2016. By exploiting the geometric phase control inside the laser cavity to map polarization to OAM, the OAM degeneracy of a standard laser cavity may be broken to produce pure OAM beams, and the generalized vector vortex beams may be created with high purity at the source. A fiber laser is one with a doped fiber as gain medium which has better stability and better beam quality comparing with the semiconductor lasers. A fiber laser is more compatible to an optical fiber communication system, which can effectively reduce the system complexity and cost. A fiber laser based on a linear resonator and a ring resonator outputs different modes, which are demonstrated in Fig. 11. In recent years, the photonic integration technique has developed rapidly, and the miniaturization of optical devices is also a

development trend. In addition, integrated devices are flexible, tunable, and reconfigurable comparing with the traditional discrete components. Therefore, a vortex laser based on integrated devices is of great research value. Vertical-cavity surface-emitting vortex lasers based on lead bromide perovskite and InGaAsP/InP platform are demonstrated (Fig. 15).

Conclusions and Prospects Here, we provide an overview of the recent progress of vortex optical lasers. We comprehensively review different types of vortex lasers, including vortex lasers based on discrete components, vortex lasers based on fiber, and vortex lasers based on integrated devices. Meanwhile, the future development trend of vortex lasers is analyzed and the prospect is discussed. Vortex lasers are expected to further promote the wide application of vortex beam in many fields.

Key words lasers; vortex beam; space dimension of photon; orbital angular momentum