

激光与光电子学进展

端面离焦泵浦薄片涡旋光激光器

连天虹*, 朱家华, 刘健宁, 焦明星

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 研究了一种对薄片激光晶体进行端面离焦泵浦的涡旋光激光器。泵浦光经过会聚透镜聚焦,当焦点处于薄片 Nd:YAG 中时,激光器输出基模。通过移动会聚透镜改变泵浦光焦点,当泵浦光焦点移出薄片 Nd:YAG 时,产生 1 阶涡旋光,微调输出镜倾斜角度可以改变涡旋光的手性。实验产生了 0.57 W 的 $LG_{0, \pm 1}$ 模连续涡旋光以及 0.48 W 的 $LG_{0, -1}$ 模脉冲涡旋光。脉冲涡旋光的重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 35.2 ns,单脉冲能量为 0.048 mJ,峰值功率为 1.37 kW。这种方案无需对泵浦光和谐振腔进行特殊设计,具有结构简单紧凑的优点。

关键词 激光器; 固体激光器; 离焦泵浦; 涡旋光; 调 Q

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221877

End-Pumped Out-of-Focus Thin Disk Vortex Laser

Lian Tianhong*, Zhu Jiahua, Liu Jianning, Jiao Mingxing

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, Shaanxi, China

Abstract A thin disk vortex laser end-pumped out-of-focus is presented. When the focus of the convergent pump beam is located in the thin Nd:YAG disk, the laser operates in the fundamental mode. While the focus is moved out of the thin disk, the laser generates a vortex beam with an order of 1, and the handedness can be changed by finely tuning the tilt angle of the output mirror. A continuous wave output power of 0.57 W and a Q-switched pulse output power of 0.48 W, with the repetition rate of 10 kHz, pulse width of 35.2 ns, single pulse energy of 0.048 mJ, and peak power of 1.37 kW is experimentally demonstrated. This scheme of vortex laser is free of specially designed pump beams and laser resonators, and thus is compact in structure.

Key words lasers; solid-state laser; end-pumped out-of-focus; vortex light; Q-switched

1 引言

涡旋光束是一种具有轨道角动量(OAM)、相位面呈现螺旋分布的结构光场^[1]。在光通信领域,得益于无穷维的 OAM 本征态以及不同 OAM 模式之间的正交性,OAM 为复用信息提供了高度的自由度,大大提高了光通信过程中的传输容量^[2-3]。在光学微操纵领域,涡旋光束独特的相位奇点可以用来捕获并操控粒子、实现光学扳手,这为基础物理、生命科学的研究提供了手段^[4-5]。由于涡旋光具有螺旋状等相位面,它在旋转物体表面反射时会产生旋转多普勒效应^[6]。利用旋转多普勒效应可以对微流体中的涡流进行无标记、非接触的精密测量,可以对海洋、大气中的湍流等进行远距

离探测,还可以用于研究基于旋转多普勒效应的目标探测、识别方法。另外,涡旋光束在水、大气等介质中通信、探测目标时,表现出抗干扰、高灵敏度等优点^[7-9]。

这些应用领域的发展对涡旋光束的产生技术提出了更高要求,高功率的脉冲涡旋光成为了涡旋光产生技术的研究热点之一。目前,已经研究了很多种涡旋光束的产生方法^[10-12]。目前用于产生涡旋光的方法主要分为主动法和被动法。被动方法使用柱面透镜构成的模式转换器^[13]、螺旋相位板^[14]、 q -板^[15]、定制超表面和空间光调制器等生成涡旋光束^[16-21]。这种方法的主要缺点是转换效率低、光束质量不理想以及受损伤阈值的限制脉冲功率水平难以提高等。另一种方法是在谐振腔内直接生成涡旋光束,即所谓的主动法。这种

收稿日期: 2022-06-20; 修回日期: 2022-07-04; 录用日期: 2022-07-11; 网络首发日期: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61805196, 51875455, 62075180)

通信作者: *tianhongl@126.com

方法本质上是对谐振模式的选择。文献[22]使用短焦距透镜在谐振腔内引入球差实现各阶 LG 模的模式选择,通过优化器件参数产生最高 75 阶的高阶 LG 模^[22]。文献[23]将泵浦光离焦耦合转换成环形光束,通过多模光纤产生 1 阶 LG 模连续光和 1 阶左手性 LG 模脉冲光^[23]。文献[24]将光斑缺陷空间滤波器与 Ti:Sapphire 激光腔结合,在中心缺陷光斑直径为 140 μm 时产生 $\text{LG}_{0,\pm 1}$ 模。以上三种产生涡旋光的方式都需要泵浦整形,即将泵浦光调制成环形分布来选择性激发高阶 LG 模式,从而实现直接从激光器输出 LG 光束。另外,文献[25]在双偏振微片激光器内部同时产生两个垂直偏振的 $\text{LG}_{0,+1}$ 模和 $\text{LG}_{0,0}$ 模,在腔外通过偏振选择产生 $\text{LG}_{0,+1}$ 模^[25]。目前,为了产生涡旋光,往往要对泵浦光进行特殊的整形或对谐振腔的损耗分布进行特殊设计,这使得激光器的结构变得复杂,增加了成本,也降低了实际应用中的稳定性、可靠性。因此,相对于需要额外的光学器件的被动法、需要对泵浦光和諧振腔进行调制的主动法,本文提出对薄片激光晶体进行离焦泵浦实现涡旋光直接输出。在受光纤耦合二极管端面泵浦的薄片固体激光器中,通过调整泵浦光会聚点的位置,实现涡旋光的直接产生。在连续工作的情况下,输出 $\text{LG}_{0,+1}$ 或 $\text{LG}_{0,-1}$ 模式的涡旋光。在调 Q 工作状态下,输出 $\text{LG}_{0,-1}$ 模式的涡旋光。这种激光器具有结构简单、成本低的优点,属于紧凑型的脉冲涡旋光激光器。

2 实验装置与方法

端面离焦泵浦薄片涡旋光激光器实验装置如图 1 所示。中心波长为 808 nm 的光纤耦合输出激光二极管(LD)作为泵浦源,耦合光纤的纤芯直径为 105 μm ,数

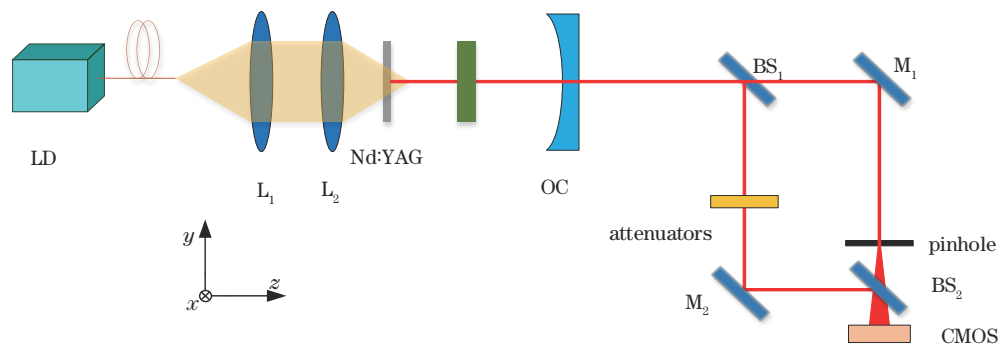


图1 端面泵浦的薄片涡旋光激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the end-pumped thin disk vortex laser

3 实验结果与讨论

3.1 连续工作状态下激光器的输出特性

谐振腔中不插入声光调 Q 开关,激光器处于连续工作状态。首先调整透镜 L_2 的纵向位置,使泵浦光会聚点处于 Nd:YAG 中。此时泵浦光会聚点与谐振腔基模形成模式匹配,激光器输出基模光斑,如

值孔径(NA)为 0.22。耦合光纤输出的泵浦光先由透镜 L_1 准直,再由透镜 L_2 聚焦到激光晶体 Nd:YAG 的端面上,透镜 L_1 、透镜 L_2 的焦距分别为 30 mm、20 mm。Nd:YAG 的掺杂浓度(原子数分数)为 1.0%,直径为 10 mm,厚度为 1 mm。晶体的泵浦端面镀有 808 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,另一端面镀有 1064 nm 增透膜。输出耦合镜(OC)的曲率半径 R 为 200 mm,透过率为 5%,OC 和激光晶体的泵浦端面构成平-凹光学谐振腔,谐振腔长度为 5 cm。声光 Q 开关(AOM)由中国电子科技集团公司第二十六研究所提供,其横截面尺寸为 5 mm \times 10 mm,有效衍射区域直径为 1 mm,驱动信号频率为 70 MHz,重复频率设置为 10 kHz。端面泵浦薄片 Nd:YAG 产生 LG 模式的基本原理是:当泵浦光的会聚点处于 Nd:YAG 中时,泵浦光与谐振腔基模达到模式匹配,激光器输出基模。当透镜 L_2 向 Nd:YAG 靠近时,由于 Nd:YAG 的厚度很小,泵浦光的会聚点将移出 Nd:YAG 薄片,而 Nd:YAG 中的泵浦光半径将增大,与高阶模式形成模式匹配。实验中透镜 L_2 的焦距,使得会聚点移动量为 Nd:YAG 厚度时,激光器输出 $\text{LG}_{0,\pm 1}$ 模。

干涉仪用于测量输出光束的相位分布。分光镜 BS_1 将输出光束分为两路光束,一个支路中用针孔产生球面波作为参考光束,另一个支路用衰减片对待测光束进行衰减,使待测光束和球面波的强度比较接近,最终经过 BS_2 后发生干涉。用高速光电探测器(DET025A, Thorlabs, 美国)测量记录采集到的激光脉冲序列和脉冲形状,所用示波器的带宽为 300 MHz,采样率为 2 GSa/s。用 Cinogy 公司生产的光斑分析仪(CinCam CMOS-1202, Cinogy 公司, 德国)拍摄激光器输出光斑和干涉图像。

图 2(a) 所示,阈值泵浦功率为 1.8 W。为了产生 LG 模光束,沿 z 方向调节透镜 L_2 的位置,形成离焦泵浦。当移动量为 1.01 mm 时,激光器输出 LG 模式,阈值泵浦功率为 2.4 W。增加泵浦功率并微调输出耦合镜倾斜角度,激光器能够输出环形光斑,输出光斑如图 2(b) 所示。沿不同方向倾斜输出耦合镜,通过干涉仪测量相位,干涉图如图 2(c)、图 2(d) 所示。可以看

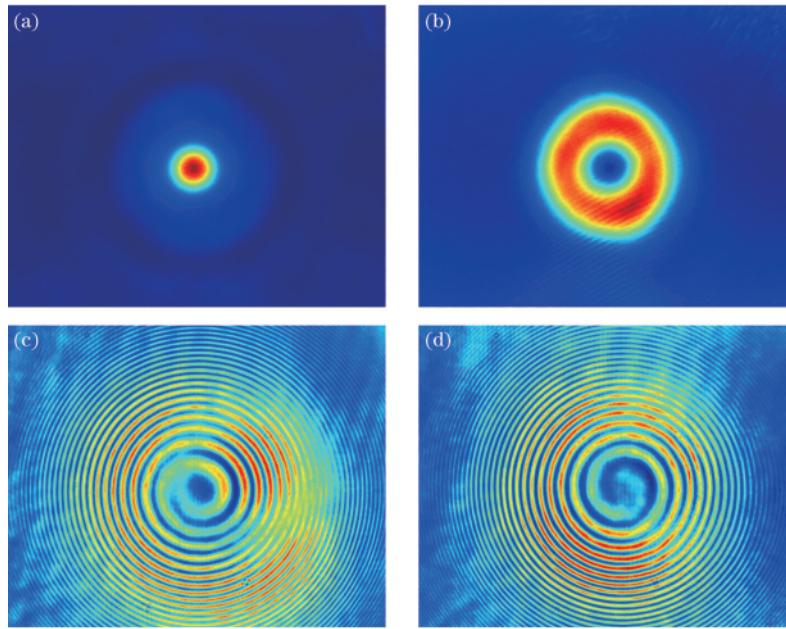


图 2 连续工作状态下激光器的输出光斑和干涉图。(a) $LG_{0,0}$; (b) 光强分布; (c) $LG_{0,-1}$ 干涉图; (d) $LG_{0,+1}$ 干涉图
Fig. 2 Spots and interference patterns of the output laser in continuous-wave operation. (a) $LG_{0,0}$; (b) intensity profile; (c) $LG_{0,-1}$ interference pattern; (d) $LG_{0,+1}$ interference pattern

到干涉图像呈现左手性、右手性的涡旋相位分布, 拓扑荷分为 -1 和 $+1$, 表明激光器能够输出 $LG_{0,+1}$ 或 $LG_{0,-1}$ 模式的涡旋光。

实验测得的左、右手性模式的功率十分接近。

图 3 是 $LG_{0,+1}$ 模的输出功率与泵浦功率的关系, 当泵浦功率由 2.5 W 提高到 6.1 W 时, 输出功率由 13 mW 提高到 570 mW 。当泵浦功率提高到 6.1 W 以上时, 输出的光束无法保持手性, 且模式结构变得复杂。

3.2 调 Q 工作状态下激光器输出特性

在谐振腔中插入声光调 Q 晶体, 激光器处于脉冲运行工作状态。当透镜 L_2 移动距离为 1.04 mm 时, 激光器输出 LG 模式, 光斑如图 4(a) 所示, 阈值泵浦功率为 2.9 W 。微调 Q 开关和输出耦合镜倾斜角度得到的干涉图如图 4(b) 所示。可以看到干涉图像呈现左手性涡旋相位分布, 拓扑荷为 -1 , 表明激光器输出了 $LG_{0,-1}$ 模式的涡旋光。

图 5 是调 Q 工作状态下 $LG_{0,-1}$ 模的功率与泵浦

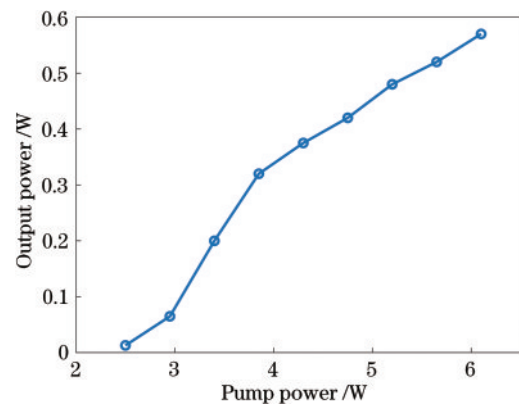


图 3 连续工作状态下, $LG_{0,+1}$ 模的输出功率与泵浦功率的关系
Fig. 3 Output power of mode $LG_{0,+1}$ versus pump power under continuous-wave operation

功率的关系, 当泵浦功率由 3.0 W 提高到 6.1 W 时, 输出功率也由 81 mW 提高到 480 mW 。相比没有加入声光调 Q 晶体时的阈值功率, 加入声光调 Q 晶

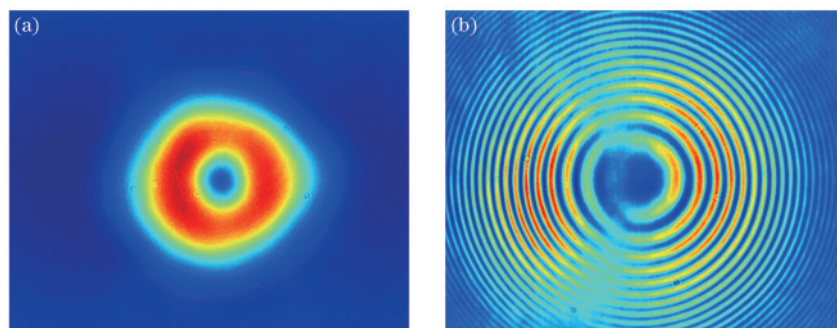


图 4 调 Q 工作状态下激光器的输出光斑和干涉图。(a) 光强分布; (b) $LG_{0,-1}$ 干涉图

Fig. 4 Spots and interference patterns of the output laser under Q-switched operation. (a) Intensity profile; (b) $LG_{0,-1}$ interference pattern

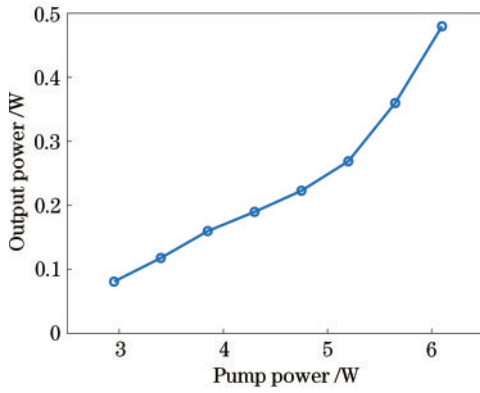


图 5 调 Q 工作状态下 $LG_{0,-1}$ 模的功率与泵浦功率的关系
Fig. 5 Output power of the mode $LG_{0,-1}$ versus pump power under Q-switched operation

体时的阈值功率提高了 0.5 W, 这是由声光调 Q 晶

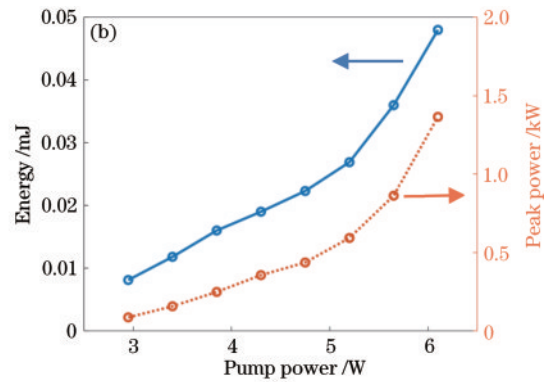
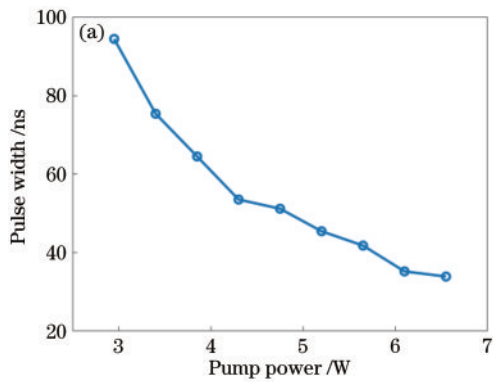


图 6 实验结果。(a) 脉冲宽度随泵浦功率的变化; (b) 脉冲能量和峰值功率随泵浦功率的变化
Fig. 6 Experimental results. (a) Pulse width versus pump power; (b) pulse energy and peak power versus pump power

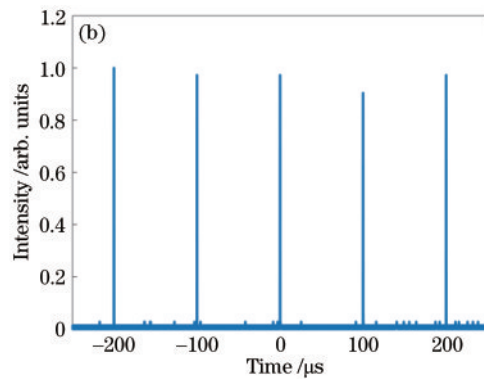
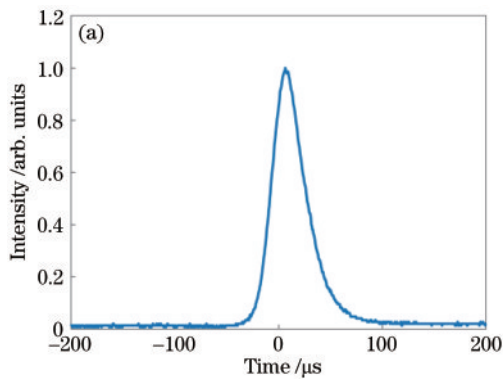


图 7 时域波形。(a) 单脉冲形状; (b) 脉冲序列
Fig. 7 Temporal pulse shape. (a) Single pulse; (b) pulse train

4 结 论

在端面泵浦固体激光器中, 通过改变泵浦光会聚点的纵向位置进行离焦泵浦, 可以直接产生 LG 模式涡旋光。在连续工作状态下, 产生了 $LG_{0,+1}$ 模和 $LG_{0,-1}$ 的涡旋光束, 输出功率最高达到 0.57 W。在调 Q 工作状态下, 产生了 $LG_{0,-1}$ 模脉冲涡旋光束, 平均

体的插入损耗引起的。加入声光调 Q 晶体, 激光器达到的最大输出功率为 480 mW, 比没有加入声光调 Q 晶体时的最大输出功率 (570 mW) 低了 90 mW。

图 6 为 $LG_{0,-1}$ 模的脉冲宽度、峰值功率、脉冲能量随泵浦功率的变化曲线。从图 6(a) 中可以看出, 随着泵浦功率的增加, 输出脉冲宽度从 3.0 W 的 94.5 ns 逐渐减小至 6.1 W 的 35.2 ns。从图 6(b) 中可以看出, 泵浦功率增加, 脉冲峰值功率和脉冲能量能够接近线性地增加。在最大泵浦功率 6.1 W 的情况下, 得到最大平均功率为 0.48 W, 对应的单脉冲能量为 0.048 mJ, 峰值功率为 1.37 kW。

图 7 为激光器处于最大泵浦功率 6.1 W 时的输出脉冲序列和脉冲形状。可以看出输出脉冲的重复频率为 10 kHz, 脉冲宽度为 35.2 ns。

输出功率最高达到 0.48 W。当声光调 Q 开关工作在 10 kHz, 最大泵浦功率为 6.1 W 时, 输出脉冲的单脉冲能量为 0.038 mJ, 脉冲宽度为 35.2 ns, 峰值功率达到 1.37 kW。在连续工作状态下, 通过微调输出镜角度可以调整模式的手性, 但在声光调 Q 下, 手性无法调整。这可能与涡旋光在调 Q 晶体中的传播性质有关, 后续将对这个问题进行研究。

参 考 文 献

- [1] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 90.
- [2] 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.
- [3] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [4] 陈理想, 张远颖. 光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 164210.
Chen L X, Zhang Y Y. Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 164210.
- [5] Yang Y J, Ren Y X, Chen M Z, et al. Optical trapping with structured light[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 034001.
- [6] 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.
- [7] Belmonte A, Rosales-Guzmán C, Torres J P. Measurement of flow vorticity with helical beams of light[J]. *Optica*, 2015, 2(11): 1002-1005.
- [8] 杨伟东, 邱晓东, 陈理想. 光轨道角动量分离、成像、传感及微操控应用研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500013.
Yang W D, Qiu X D, Chen L X. Research progress in detection, imaging, sensing, and micromanipulation application of orbital angular momentum of beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500013.
- [9] 杨苏辉, 廖英琦, 林学彤, 等. 涡旋光场在强散射环境中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(6): 20211040.
Yang S H, Liao Y Q, Lin X T, et al. Application of vortex light field in strong scattering environment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211040.
- [10] 柳强, 潘婧, 万震松, 等. 复杂涡旋结构光场的产生方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500006.
Liu Q, Pan J, Wan Z S, et al. Generation methods for complex vortex structured light field[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500006.
- [11] 吕铭鑫, 张翼鹏, 何健朗, 等. 涡旋光激光器研究进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(1): 0151105.
Lü M X, Zhang Y P, He J L, et al. Research progress of vortex beam laser(invited) [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(1): 0151105.
- [12] 徐云, 余俊杰, 韩侠辉, 等. 基于圆环达曼光栅整形的环形光抽运的 Nd:YAG 声光调 Q 涡旋光激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601002.
Xu Y, Yu J J, Han X H, et al. Acousto-optically Q-switched and vortex Nd:YAG laser by using circular Dammann grating for annular pumping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0601002.
- [13] 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.
- [14] Sueda K, Miyaji G, Miyanaga N, et al. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3548-3553.
- [15] Marrucci L, Manzo C, Paparo D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.
- [16] 郭姣艳, 李文宇, 孙然, 等. 基于双箭头超表面宽带太赫兹涡旋光束的产生[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2014003.
Guo J Y, Li W Y, Sun R, et al. Generation of broadband terahertz vortex beam based on double-arrow metasurface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2014003.
- [17] Devlin R C, Ambrosio A, Wintz D, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion in dielectric metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2017, 25(1): 377-393.
- [18] Ngcobo S, Litvin I, Burger L, et al. A digital laser for on-demand laser modes[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2289.
- [19] 刘奎, 李治, 郭辉, 等. 使用空间光调制器产生高阶厄米高斯光束[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0905004.
Liu K, Li Z, Guo H, et al. Generation of high-order Hermite-Gaussian beams using a spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0905004.
- [20] 马文琪, 路慧敏, 王建萍, 等. 基于空间光调制器和深度学习的涡旋光束产生[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1107001.
Ma W Q, Lu H M, Wang J P, et al. Vortex beam generation based on spatial light modulator and deep learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1107001.
- [21] 李瑞健, 任元, 刘通, 等. 基于纯相位空间光调制器和棋盘格法制备高阶贝塞尔涡旋光束[J]. *光学学报*, 2022, 42(10): 1005001.
Li R J, Ren Y, Liu T, et al. Generation of high-order Bessel beam vortex based on phase-only spatial light modulator and checkerboard phase lattice method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(10): 1005001.
- [22] 刘俊杰, 盛泉, 王盟, 等. 基于腔内球差选模产生高阶拉盖尔-高斯模式激光[J]. *物理学报*, 2022, 71(1): 014204.
Liu J J, Sheng Q, Wang M, et al. High-order Laguerre-Gaussian mode laser generated based on spherical aberration cavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(1): 014204.
- [23] Fang Z Q, Yao Y, Xia K G, et al. Simple Nd:YAG laser generates vector and vortex beam[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 031405.
- [24] Tan S W, Zhou C H, Shirakawa A, et al. Vortex Ti:Sapphire laser by using an intracavity spot-defect spatial filter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 76-80.
- [25] Zhang Z L, Gui K, Zhao C M, et al. Direct generation of vortex beam with a dual-polarization microchip laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(15): 1221-1224.