

## 缺陷镜技术直接产生高功率高阶涡旋激光研究 (特邀)

周伦滨, 冯 凯, 王 冬, 徐 斌\*

(厦门大学电子科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 涡旋光在光通信、量子纠缠、新的非线性光学效应、微纳机械加工、超分辨成像和光镊等领域具有重要的应用价值。涡旋光应用的前提条件是高质量涡旋光束的产生, 将缺陷镜技术和固体激光谐振腔技术结合起来研究, 对直接产生高光束质量、高稳定性和大拓扑荷数 (高阶) 的涡旋激光具有明显的优势。当前, 该项技术多是用在简单的两镜线性腔中, 且以连续波涡旋激光为主。文中使用紫外皮秒脉冲激光器制备了点缺陷镜, 并采用 LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为激光实验平台, 构造了 V 型激光谐振腔, 首次实现了复杂谐振腔内直接产生高阶涡旋激光输出。当吸收功率为 11.46 W 时, 获得了最高输出功率为 2.69 W 的三阶涡旋激光, 斜效率达到 23.6%; 进一步调节谐振腔及点缺陷尺寸, 最高获得了 13 阶涡旋激光输出。该研究表明缺陷镜技术也可以用于复杂结构激光谐振腔, 直接产生高阶涡旋激光, 从而为其他运行模式 (如调 Q 和锁模) 的高阶涡旋激光研究提供了一定的依据。

**关键词:** 全固态激光器; 光学涡旋; 缺陷镜; V 型折叠腔

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210408

## Research on direct generation of high-power and high-order vortex lasers using defect-mirror technology (Invited)

Zhou Lunbin, Feng Kai, Wang Dong, Xu Bin\*

(School of Electronic Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Vortex light has important applications in optical communication, quantum entanglement, new nonlinear optical effect, micro- and nano-mechanical processing, super-resolution imaging and optical tweezers, etc. The precondition of vortex light applications is the generation of high-quality vortex light. The method of spot defect mirror combined with solid-state laser technology has outstanding advantage in direct generation of high-order vortex light with high quality and high stability. At present, this method has mostly used in various two-mirror linear cavities for laser generation in continuous-wave mode. A spot defect mirror using an ultraviolet picosecond laser was fabricated. Then, an diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a V-shaped laser cavity configuration was arranged. Based on this laser, a 2.69 W vortex laser with topological charge of 3 was achieved. Slope efficiency of this 3<sup>rd</sup> vortex laser was about 23.6%. Further changing the cavity length and defect spot size, high-order vortex laser output with topological charges up to 11 and 13 was also achieved. This research clearly indicates that the spot defect mirror technology can directly generate high-order vortex laser in a structurally complicated laser resonator, which has provided reference for Q-switched and/or mode-locked high-order vortex laser generation.

收稿日期: 2021-06-05; 修订日期: 2021-09-08

基金项目: 深圳大学二维材料光电科技国际合作联合实验室开放基金 (2DMOST2018026); 福建省先进微纳光子技术与器件重点实验室开放课题

作者简介: 周伦滨, 男, 硕士生, 主要从事基于固体激光的涡旋激光产生和应用方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 徐斌, 男, 副教授, 博士, 主要从事固体激光技术方面的研究。

**Key words:** all-solid-state laser; optical vortices; defect mirror; V-type folded cavity

## 0 引言

涡旋光是一种有环形光强分布和螺旋波前的奇异光束,每个涡旋光子携带有轨道角动量 (Orbit Angular Momentum, OAM), OAM 具有独特的性质,从而引起了人们越来越多的研究兴趣,涡旋光已在微观粒子的操控<sup>[1-3]</sup>、量子纠缠<sup>[4]</sup>、光学显微技术<sup>[5]</sup>、大容量光通信系统<sup>[6]</sup>和纳米量级微加工<sup>[7-8]</sup>等多个领域开始发挥作用。

涡旋光应用的前提条件是高质量涡旋光束的产生,传统涡旋光束的产生方式多是利用既有的激光器对其高斯光场进行改造来获得涡旋光。譬如,利用螺旋相位板<sup>[9]</sup>、像散透镜<sup>[10]</sup>、空间光调制器<sup>[11]</sup>和全息技术<sup>[12]</sup>等一些特殊的光学元件进行模式转换,从而得到 LG 光束。但在现有激光器外附加引入的这些光学元件无疑使得激光系统变得更复杂、成本增加;而且光束的准直难度也较大,难以获得高功率、高光束质量的涡旋光束。

实际上, LG 模式是激光谐振腔的本征模式之一,理论上可以由激光谐振腔直接产生并激射。因此,自 21 世纪初由激光谐振腔直接产生涡旋激光的技术进入人们视野以来,就以低损耗、高功率、高光束质量、高稳定性等优点迅速得到了各国科研人员的关注。目前,腔内直接产生涡旋光束的方法主要是通过控制腔内的增益与损耗关系来达到抑制基模高斯模式的目的,从而实现涡旋激光输出。例如,基于增益控制的方法有环形光泵浦<sup>[13]</sup>和离轴泵浦<sup>[14]</sup>,基于损耗调节的方法则包括了利用增益介质的热透镜效应<sup>[15]</sup>和在腔内插入损耗元件<sup>[16-17]</sup>等手段。然而,环形光泵浦源不是商业化标准光源,需要后期对光束进行光强分布的改造;热透镜效应仅对具有明显热效应的激光增益介质才有效,而且热透镜效应易造成输出光束不稳定和输出光功率饱和;另外,这些方法在获得高阶涡旋激光方面仍然存在局限性。

缺陷镜法是直接产生高阶涡旋光的有效方法,其工作原理与利用光阑限制高阶横模起振,从而获得高斯基模光束的方法恰好相反,由于高阶横模光束在空间上比低阶横模光束扩展得更大,因此利用点缺陷大

小合适的谐振腔镜就能够抑制基模高斯光束,甚至抑制低阶横模光束,从而输出所需的高阶横模光束。2018 年, Qiao 等<sup>[18]</sup>利用简单的两镜凹平腔结构,采用缺陷镜技术获得了最高 288 阶的涡旋激光输出,这充分证明了缺陷镜法在高阶涡旋研究方面的巨大潜力。虽然缺陷镜技术在产生高阶涡旋光方面的潜力已经得到认可,但从当前发表的研究成果来看,其主要应用于简单的两镜线性腔的研究<sup>[18-20]</sup>,而其他更复杂激光腔型仅有一篇一阶涡旋光输出的报道<sup>[21]</sup>。

V 型腔作为一种热效应不灵敏的谐振腔,具有良好的输出性能,在很多高效率、高功率激光输出应用中被广泛采用<sup>[22-23]</sup>。同时, V 型腔的结构也有利于实现频率变换、被动调 Q 以及波长调谐等操作。文中将 V 型腔与缺陷镜结合,采用 LD 泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光作为实验平台,实现了 V 型激光谐振腔内直接产生高功率、高阶涡旋激光输出;并利用改进的斐索干涉仪验证了出射激光的波前相位信息<sup>[24-25]</sup>。

## 1 实验装置

LD 端面泵浦的 V 型折叠腔涡旋激光器结构如图 1(a) 所示。泵浦源为中心波长约 808 nm 的光纤耦合半导体激光器,纤芯直径约 400 μm,数值孔径为 0.22。考虑到高阶横模的光斑尺寸较大,略微放大泵浦光尺寸有利于高阶模式的输出,因此将泵浦光经由焦距分别为 50 mm 和 60 mm 的透镜准直聚焦后进入谐振腔。谐振腔由平面输入镜 M1、折叠镜 M2 以及平面输出镜 M3 构成。M1 对 808 nm 泵浦光高透,在激光波长处反射率大于 99.9%。M2 的曲率半径为 100 mm,相应的波长透过率与 M1 一致。M3 为一个平面输出镜,对 1064 nm 激光的透过率约为 1.8%。需要指出的是,由于在该平面镜上制备了点缺陷,点缺陷对输出激光将产生较大的损耗,因此选用透过率较低的输出镜,以期减小损耗,保证激光输出。在点缺陷制备过程中,将 355 nm 皮秒激光聚焦到镜片表面膜层,逐步加大皮秒激光脉冲能量,从而将膜层完全破坏掉,形成不同尺寸的缺陷圆点,点缺陷如图 1(b)~(c) 所示。谐振腔两条臂长的初始值分别为

8.5 cm 和 6.8 cm, 折叠角约 20°。此时晶体内激光基模尺寸约为 150 μm。实验中使用的激光晶体为 a 切 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5at.%, 晶体尺寸为

3 mm×3 mm×5 mm, 晶体端面未镀膜。为了减轻热透镜效应, 晶体用钢箔包裹并安装在水冷铜块内, 铜块与水冷机相连, 温度设置为 16 °C。

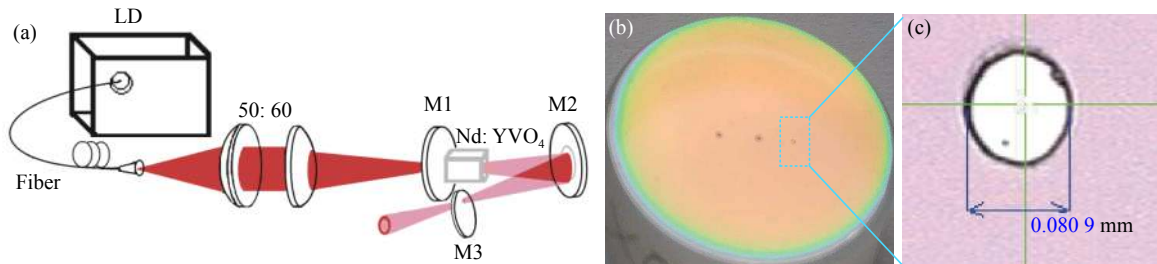


图 1 (a) LD 端面泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 V 型折叠腔涡旋激光器装置示意图; (b) 蚀刻了点缺陷的输出镜 M3; (c) 80 μm 的点缺陷  
Fig.1 (a) Schematic diagram of LD-end-pumped V-type Nd:YVO<sub>4</sub> vortex laser; (b) Output mirror M3 with several defect spots; (c) 80 μm defect spot

## 2 实验结果与分析

首先, 选择 M3 上膜系完好的部分 (即非缺陷点位置) 进行激光实验, 通过反复优化调节, 使得输出激光的功率最高, 激光输出功率与吸收功率曲线如图 2 所示, 当吸收功率达到 15.37 W 时, 获得最大的输出功率 4.25 W, 斜效率约为 28.0% (见图 2 中数据曲线 1), 且此时激光器没有出现饱和现象。该激光的输出效率相对较低, 其主要原因是由于考虑到该实验的核心目的是为了实现在涡旋光, 尤其是高阶涡旋光的输出, 因而使用较低透的输出镜。用 Ocean Optics 光

谱仪和 DataRay 光斑分析仪分别记录了激光光谱和激光光斑, 如图 3 所示, 激光的中心波长约为 1 064 nm, 激光光强为高斯模式分布, 光斑的圆对称性好, M<sup>2</sup> 因子测量估算约为 2.6。

为了获得涡旋光输出, 平移 M3 镜, 使谐振腔内激光打在 80 μm 尺寸的缺陷点上, 反复优化调节, 观察到空心光束输出, 该空心光束的输出功率随吸收功率的变化情况如图 2 中曲线 2 所示, 可见: 该空心光束与高斯模式激光的输出功率十分接近, 表明该 80 μm 点缺陷对激光谐振腔造成的损耗很小。为了验证该空心光束是涡旋光, 进而确定其拓扑荷数, 实验

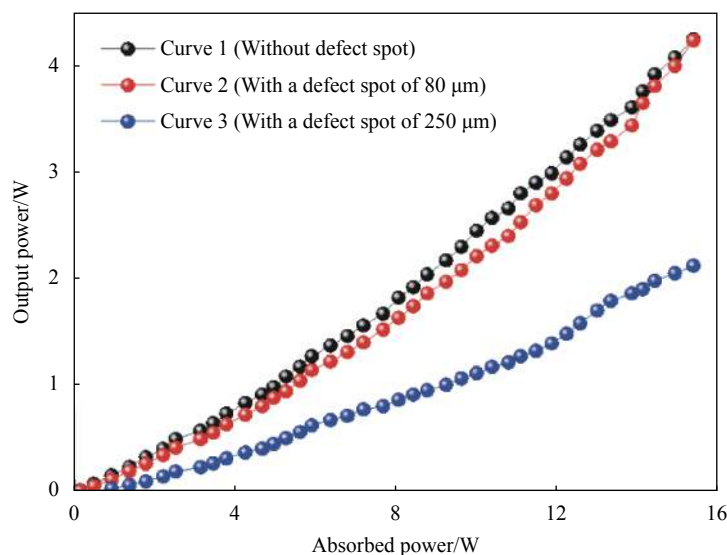


图 2 V 型折叠腔涡旋激光实验输出功率曲线  
Fig.2 Output power curves of V-type folded cavity vortex laser

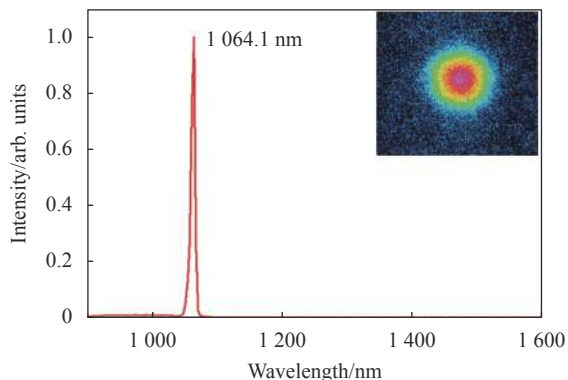


图 3 V 型折叠腔实验基模条件下观察到的激光光谱和光斑

Fig.3 Lasers spectrum and beam spot of V-type folded cavity observed under fundamental mode condition

中利用改进的斐索干涉仪和光斑分析仪对每个输出功率处的光斑进行干涉测量,从而获取其波前相位信息。实验发现,从阈值开始到输出功率为 2.69 W,可以清晰地观察到具有较好对比度的干涉条纹,图 4(b)~4(e) 分别给出了在输出功率为 0.63 W, 1.04 W, 2.08 W

和 2.69 W 时的干涉条纹,这些条纹表明了在该区间段的中空光束均为三阶涡旋光,图 4(a) 给出了典型的三阶涡旋光光斑。需要指出的是,随着三阶涡旋激光输出功率的增加,图 4(b)~4(e) 干涉条纹的清晰度逐渐变差,这主要是由于在高功率时,需要加入更多的功率衰减器以保证光斑分析仪测量的激光强度不饱和,这些衰减器的引入使得条纹的清晰度恶化。继续增加泵浦功率,直到激光输出功率为 3.08 W 时,通过监测发现输出涡旋光从三阶退化为一阶,其干涉条纹如图 4(f) 所示。这意味着:随着吸收功率的增加,在晶体热效应的影响下,腔内激光在输出镜上的模式尺寸发生变化,导致此时点缺陷已经无法抑制低阶横模的起振,因而输出的是一阶涡旋激光。同时,随着泵浦功率的进一步增大,从图 2 中可以看到曲线 2 的末端与曲线 1 趋近重合,表明缺陷点引入的损耗无法继续起到抑制基模振荡的作用,从而输出激光进一步退化为高斯光。

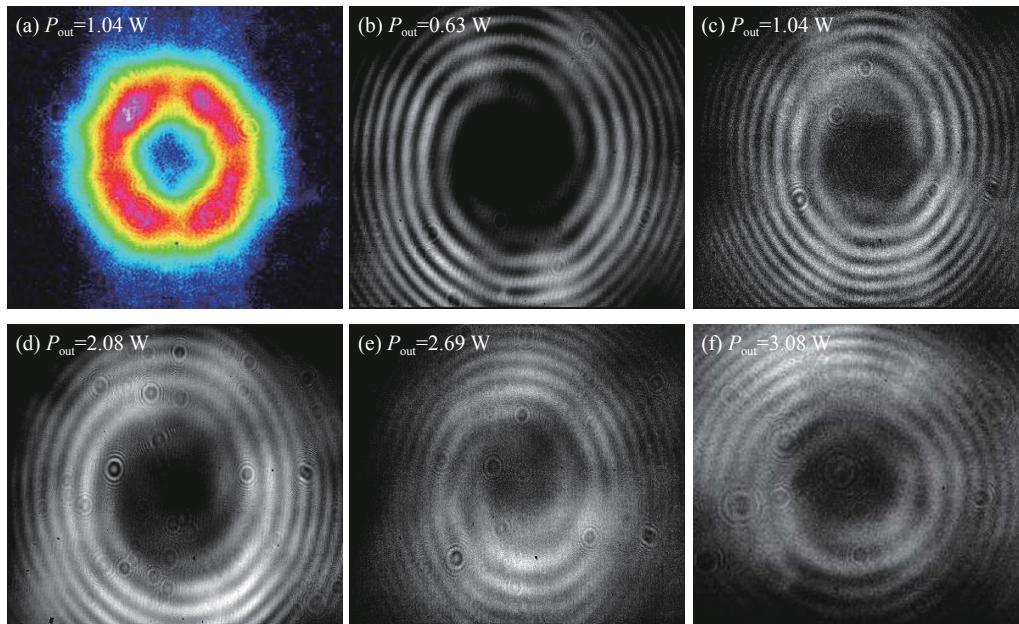


图 4 直径 80 μm 点缺陷产生的 (a) 1.04 W 涡旋激光光斑和 (b)~(f) 不同输出功率涡旋激光的干涉条纹

Fig.4 (a) 1.04 W vortex laser beam spot and (b)-(f) interference fringes measured at different output power of vortex lasers using a 80 μm defect spot

以上用 80 μm 点缺陷最高仅获得了三阶涡旋激光输出,说明 80 μm 点缺陷抑制低阶模式激光的能力有限,为了获得更高阶涡旋激光输出,继续平移缺

陷镜,采用 250 μm 的点缺陷来引入更高的谐振腔往返损耗,同时调整谐振腔两条臂长分别至约 10 cm 和 7 cm,获得了中空区域更大的光斑,典型光斑如



图 5(a) 所示; 该中空激光的输出功率曲线见图 2 曲线 3, 其最大输出功率达到 2.12 W。此外, 还监测了在不同输出功率时的干涉光场情况, 在晶体的吸收功率分别为 1.37 W(输出功率 59 mW)、1.78 W(输出功率 92 mW)、3.78 W(输出功率 310 mW)、5.61 W(输出功率 556 mW) 和 7.67 W(输出功率 800 mW) 时, 得到如图 5(c)~5(f) 所示的干涉图样。可见在低输出功率时, 如输出功率小于 310 mW, 可以得到比较清晰的顺时针螺旋条纹, 条纹数为 11, 表明获得的是 11 阶的涡旋激光; 当输出功率增加到 556 mW 时, 虽然仍然是 11 条干涉条纹, 但条纹的清晰度和对比度变差, 且条纹变为逆时针方向。螺旋条纹方向的变化意味着涡旋手性的不同, 笔者认为这应该是由晶体的热效应引起的: 相反手性涡旋光的坡印亭矢量在腔内是对称传播的<sup>[13]</sup>。适当的热透镜效应有利于 LG 模式的涡旋激光产生。通过改变晶体内部泵浦光焦点位置以及晶体角度能够产生不同的热梯度, 从而影响坡印亭矢量传播的对称性, 使相反手性的涡旋光之间产生足够的损耗差, 其中损耗更小的涡旋光就可以单独输出。而随着热效应的加剧, 晶体内部热梯度发生的变化也会影响输出涡旋光的手性。然而, 在三阶涡旋激光实验中, 随着泵浦功率从低到高, 并未观测到涡旋手性的变

化。因此, 这意味着高阶涡旋光的稳定性更易受到热效应的影响。进一步地, 当输出功率增加到 800 mW 时, 观测到干涉条纹仍为逆时针方向, 但条纹数减少到 10, 高功率时涡旋光拓扑荷数减少这一规律与三阶涡旋光实验的结论一致。

最后, 发现通过改变 V 型谐振腔的折叠角也能对涡旋光的拓扑荷数产生影响。小的折叠角引入的像散小, 有利于获得更高的光束质量, 有利于产生更小的(基模)激光光斑。根据参考文献 [18], 小基模光斑尺寸的谐振腔更有利于产生高阶涡旋激光。因此, 在上述 11 阶涡旋激光的基础上, 将折叠角尽最大限度的缩小到约 18°(受到镜片调整架尺寸的制约), 发现涡旋光的拓扑荷数增加到 13, 图 6(a) 所示为该 13 阶涡旋激光在吸收功率为 3.78 W 时的激光光斑, 对应的输出功率约为 240 mW, 略低于同等吸收功率下 11 阶涡旋激光的输出功率, 图 6(b) 所示为该 13 阶涡旋激光的干涉条纹, 条纹为顺时针方向。当输出功率进一步增加到约 380 mW 时, 可观测到干涉条纹数减少到 12, 为逆时针方向, 可见在不改变谐振腔参数的情况下, 更高阶涡旋光的拓扑荷数对热透镜效应导致的光斑尺寸变化更敏感; 涡旋光的手性变化也更频繁, 其本身的稳定程度降低。

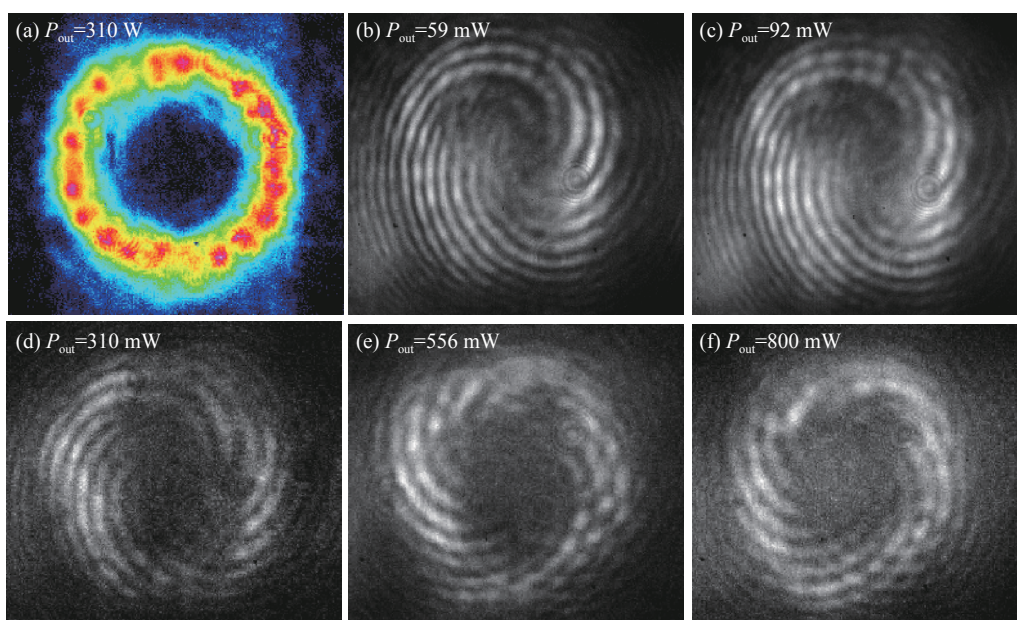


图 5 直径 250  $\mu\text{m}$  点缺陷产生的 (a) 310 mW 涡旋激光光斑和 (b)~(f) 不同输出功率涡旋激光的干涉条纹

Fig.5 (a) 310 mW vortex laser beam spot and (b)-(f) interference fringes measured at different output power of vortex lasers using a  $\Phi 250 \mu\text{m}$  defect spot

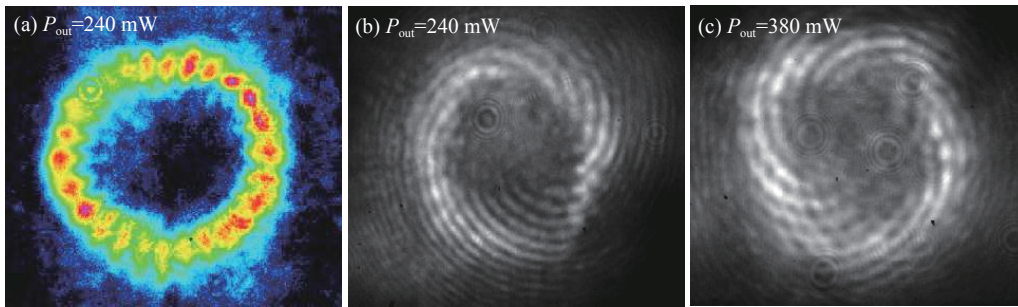


图 6 (a) 输出功率为 240 mW 时获得的 13 阶涡旋激光光斑; (b) 对应的 13 阶涡旋激光干涉条纹; (c) 激光输出功率为 380 mW 时的 12 阶涡旋激光干涉条纹

Fig.6 (a) Beam spot of an 240 mW 13<sup>th</sup>-order vortex laser; (b) Corresponding 13<sup>th</sup>-order vortex laser interference fringe; (c) Interference fringe of an 380 mW 12<sup>th</sup>-order vortex laser

### 3 结 论

文中利用缺陷镜以及 V 型腔实现了谐振腔内涡旋激光的直接激射, 当吸收功率为 11.46 W 时, 获得了最高输出功率为 2.69 W 的三阶涡旋激光, 斜率效率为 23.6%。在此基础上, 通过改变谐振腔和点缺陷尺寸, 获得了最高 13 阶的涡旋激光输出, 这是目前复杂结构谐振腔和缺陷镜技术相结合所能获得的最高阶涡旋激光, 表明缺陷镜技术能够获得高阶涡旋光的这种优势仍然可以在这种具有小像散激光谐振腔中得到发挥, 笔者相信: Z 型、X 型甚至更加复杂的多镜谐振腔也是如此。相对于简单的两镜线性激光器, 这些复杂结构谐振腔提供了更多的结构灵活性, 为实现更重要用途的激光光源提供了可能。接下来将通过进一步优化制备更高质量的缺陷镜来提升输出涡旋激光的光束质量, 同时制备更大尺寸的点缺陷, 从而获得更高阶涡旋激光输出。

#### 参考文献:

[1] Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(11): 827.  
 [2] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, et al. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4713-4716.  
 [3] Grier D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.  
 [4] Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta [J]. *Science*, 2012, 338(2): 630-643.

[5] Hell S W. Far-field optical nanoscopy [J]. *Science*, 2007, 316(5828): 1153-1158.  
 [6] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G. Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(4): 282-286.  
 [7] Allegre O J, Jin Y, Perrie W, et al. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21198-21207.  
 [8] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W, et al. Materials processing with a tightly focused femtosecond vortex laser pulse [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3417-3419.  
 [9] Xin J, Dai K, Lei Z, et al. Generation of optical vortices by using spiral phase plates made of polarization dependent devices [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1984.  
 [10] Li N, Xu B, Cui S, et al. High-order vortex generation from CW and passively Q-switched Pr: YLF visible lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, PP(99): 1-1.  
 [11] Matsumoto N, Ando T, Inoue T, et al. Generation of high-quality higher-order Laguerre-Gaussian beams using liquid-crystal-on-silicon spatial light modulators [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(7): 1642-1651.  
 [12] Heckenberg N R, Meduff R, Smith C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221.  
 [13] Kim D J, Kim J W. Direct generation of an optical vortex beam in a single-frequency Nd: YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(3): 399-402.  
 [14] 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]. *Opt Express*, 2018, 26(21): 26925-26932.

- [15] Chard S P, Shardlow P C, Damzen M J. High-power non-astigmatic TEM<sub>00</sub> and vortex mode generation in a compact bounce laser design [J]. *Applied Physics B*, 2009, 97(2): 275-280.
- [16] Harris M, Hill C A, Vaughan J M. Optical helices and spiral interference fringes-Science Direct [J]. *Optics Communications*, 1994, 106(4-6): 161-166.
- [17] Oron R, Danziger Y, Davidson N, et al. Laser mode discrimination with intra-cavity spiral phase elements [J]. *Optics Communications*, 1999, 169(1-6): 115-121.
- [18] Qiao Z, Xie G, Wu Y, et al. Generating high-charge optical vortices directly from laser up to 288th order [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800019.
- [19] Akihiko I, Yuichi K, Shunichi S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [20] Lee A J, Omatsu T. Direct Generation of Vortex Laser Beams and Their Non-Linear Wavelength Conversion [M]//Hector Perez-De-Tejada. *Vortex Dynamics and Optical Vortices Vortex Dynamics and Optical Vortices*. London: IntechOpen, 2017.
- [21] Wang S, Zhao Z, Ito I, et al. Direct generation of femtosecond vortex beam from a Yb: KYW oscillator featuring a defect-spot mirror [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(3): 523-530.
- [22] Liao X, Guo J, He J J. Tunable V-cavity laser with butt-joint passive tuning section for fast wavelength switching [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1-7.
- [23] Scheller M, Baker C W, Koch S W, et al. High power dual-wavelength VECSEL based on a multiple folded cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(10): 790-793.
- [24] Huang Xiaoxu, Xu Bin, Cui Shengwei, et al. Direct generation of vortex laser by rotating induced off-axis pumping [J]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(5): 1601606.
- [25] Cui S, Xu B, Luo S, et al. Determining topological charge based on an improved Fizeau interferometer [J]. *Opt Express*, 2019, 27(9): 12774-12779.