

通过优化损耗点镜产生高效率的涡旋光束

李平¹, 张澍霖¹, 汪莎^{1*}, 冯国英¹, 周寿桓^{1,2}

¹四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064;

²华北光电研究所, 北京 100015

摘要 通过使用带有损耗点的腔镜, 在 Yb:phosphate(Yb:QX) 振荡器里实现了一阶涡旋光束的输出。详细研究了涡旋光的光-光转换效率与损耗点直径和腔内激光模式直径及形状的关系。实验发现, 在 Z 字型固体激光器中, 当腔内激光模式直径为损耗点直径的 4~6 倍, 激光模式在切线面和弧矢面的光斑直径比例(即椭圆率)约为 80%, 泵浦功率为 1.59 W 时, 获得了光-光转换效率最高为 7.7% 的一阶涡旋光束。此研究可为利用损耗点在 Z 字型固体激光器中产生高转换效率的一阶涡旋光束提供理论实验依据。

关键词 激光光学; 固体激光器; 涡旋光束; 损耗点镜; 椭圆率

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0501005

High Efficiency Vortex Beam Generation by Optimization of Defect-Spot Mirror

Li Ping¹, Zhang Shulin¹, Wang Sha^{1*}, Feng Guoying¹, Zhou Shouhuan^{1,2}

¹College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China;

²North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract Herein, the first-order vortex beam was generated from Yb:phosphate (Yb:QX) oscillator possessing defect-spot mirror. Moreover, the relationships among the optical-to-optical conversion efficiency of the vortex beam, defect-spot diameter, and laser mode diameter and shape inside the cavity were minutely evaluated. Results indicate that in Z-shaped solid-state lasers, when the diameter of laser mode inside the cavity is approximately 4–6 times the defect-spot diameter, the ratio of the laser spot diameter in the tangent and sagittal planes (i. e., ellipticity) is approximately 80%, and the pump power is 1.59 W, the first-order vortex beam with the highest optical-to-optical conversion efficiency of 7.7% is obtained. This study can provide a theoretical and experimental basis for generating first-order vortex beam with high conversion efficiency in Z-shaped solid-state lasers using defect-spot.

Key words laser optics; solid state lasers; vortex beam; defect-spot mirror; ellipticity

OCIS codes 140.3580; 050.4865; 240.5770

1 引言

由文献[1]可知, 强度分布呈甜甜圈形的涡旋光束不仅具有螺旋形的波前, 还具有中心强度为零的相位奇点; 其相位表达式含 $\exp(i l \phi)$ 因式, 其中 l 为拓扑电荷数, ϕ 为方位角指数, 每个光子携带的轨道角动量为 $l \hbar$ (\hbar 为约化普朗克常数)。涡旋光的用途非常广泛, 包括光通信^[2]、光镊^[3]、粒子捕获^[4]、荧光显微镜^[5]、超分辨显微镜^[6]、材料加工^[7]、非线性频率转换^[8]、引力波探测^[9]和细胞研究^[10]等。

涡旋光可由腔外方法和腔内方法产生。腔外方法有柱透镜模式转换法^[11]、空间光调制器^[12]、计算全息法^[13]、超表面^[14]、中空波导法^[15]、少模光纤法^[16]、空间滤波^[17]和旋转镜面光学参数振荡器法^[18]等。然而, 这些腔外方法有的器件结构复杂, 有的设备制造不易会增加额外的成本, 有的又会不可避免地造成光束能量衰减或输出功率降低, 较难获得高质量的涡旋光束。

相比于腔外产生涡旋光的方法, 在腔内直接产生涡旋光束的方法, 由于其系统更加简洁紧凑,

收稿日期: 2019-12-24; 修回日期: 2020-01-09; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61975137)

* E-mail: shawang.laser@outlook.com

产生涡旋光束的质量更好^[19],越来越受到人们的关注。腔内直接产生涡旋光束的方法有采用环形泵浦光^[20]、插入圆形吸收器^[21]、增益整形^[22]、热透镜效应^[23]、像散调控^[24]、螺旋相位板^[25-26]及保偏光纤模式转换^[27]。采用损耗点产生涡旋激光^[28-29]具有结构简单、低成本、低损耗、高功率及极佳鲁棒性的优势,目前已应用于掺钕 YAG 激光器^[19]、掺钛蓝宝石激光器^[29]和氦氖激光器^[30]。但是,目前仅有少量研究损耗点与腔内激光模式直径比例对涡旋光束光-光转换效率影响的报道^[29,31-32]。Lee 等^[31-32]使用直径为 40 μm 的损耗点,在拉曼激光器中其光-光转换效率为 5%,在倍频拉曼激光器中其光-光转换效率为 4%。Tan 等^[29]在 Z 型腔固体激光器实验中,采用直径为 80 μm 的损耗点时光-光转换效率为 4.2%,采用直径 140 μm 的损耗点时光-光转换效率为 2.1%。并且据本课题组所知,还未有关于激光光斑形状对一阶涡旋光束光-光转换效率的影响的报道。

本文利用腔镜上带有损耗点的 Yb:phosphate (Yb:QX) 振荡器来产生涡旋光束。当损耗点与腔内光轴同轴时,具有低反射率的损耗点可以很好地抑制类似于基模的低阶横模振荡。通过调节腔长改变损耗点镜上激光光斑的大小和形状,并研究其与涡旋光束光-光转换效率的关系,从而得到此时产生高转换效率的涡旋光束的最佳条件。实验发现,在腔内激光模式的光斑椭圆率约为 80%,并且光斑直径大约是损耗点直径的 4~6 倍时,获得了最高光-光效率为 7.7% 的一阶涡旋光输出,比现有的利用损耗点镜产生涡旋光束的最高转换效率提高了 54%。

2 实验装置

利用损耗点镜产生涡旋光束的实验装置如图 1 所示。激光腔整体上采用了 Z 型腔架构,有助于控制激光光斑大小。实验中,将晶体以布儒斯特角放置可以引入像散,从而可以影响激光光斑的形状。泵浦源是中心波长为 976 nm 的单模光纤耦合激光二极管,最大输出功率为 1.59 W。晶体是 2 mm \times 8 mm \times 2.5 mm、掺杂粒子数浓度为 10% 的 Yb:QX。为了将泵浦光聚焦到晶体中,采用焦距分别为 18.53 mm 和 60 mm 的透镜(L₁、L₂)组成一个望远镜系统。同时,通过调节光学元件夹具的俯仰角来控制光斑在晶体里的位置。平凹镜 M₁ 和 M₂ 的曲率半径均为 100 mm。M₄ 为透过率为 5% 的输出耦合镜。M₅ 为损耗点镜,可通过三维平移台来调节损耗点的位置。M₃、M₆ 为折叠镜,M₇ 和 M₈ 为反射镜,L₃ 为焦距 50 mm 的透镜。

为了检验涡旋光束,在输出耦合镜后搭建了马赫-曾德尔干涉仪系统。由损耗点镜产生的涡旋光束经过非偏振立方晶体(NPBS₁)后被分成两束光:其中一束光经过半波片($\lambda/2$)、M₇ 和 L₃,作为探测光;另一束光经过半波片、偏振立方晶体(PBS)和 M₈,作为平面信号光。两束光在 NPBS₂ 处汇合并发生干涉。由于探测波光路中插入了一个透镜 L₃,其焦点后面的光束会因发散而强度变弱。为了使后面干涉时两束光强度接近,以增强条纹对比度,所以在信号波光路中插入了一个半波片和 PBS 来衰减其光强。探测波光路中插入的半波片用来调节偏振态,使两束光路的偏振态相同。在实验中,用 CCD 来观察激光模式的光束轮廓和强度分布,M2MS(BC106N)测试仪用来检测激光光斑直径和光束质量。

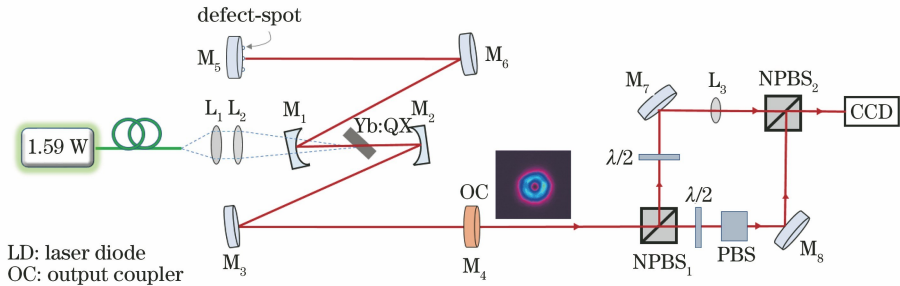


图 1 利用损耗点镜产生涡旋光束和马赫-曾德尔干涉装置图

Fig. 1 Experimental setup for vortex beam generated by defect-spot mirror and Mach-Zehnder interferometer

3 分析与讨论

首先调节振荡器以产生基模,当泵浦功率为 0.2 W 时,基模开始振荡。在最大泵浦功率为 1.59 W

时,得到了最高 340 mW 的输出功率,此时的光-光转换效率为 21.4%。损耗点镜上有直径分别为 150, 200, 250 μm 三个损耗点,将它们放大 200 倍,对应的显微镜图分别如图 2(a)~(c)所示。腔镜上的损

耗点是由东京大学小林洋平教授实验室用波长为 266 nm 的脉冲激光烧蚀掉介质多层薄膜镜上的薄膜

制成的,脉冲激光参数如下:脉冲重复频率为 10 kHz,脉冲能量为 17 μJ ,脉冲持续时间为 10 ns。

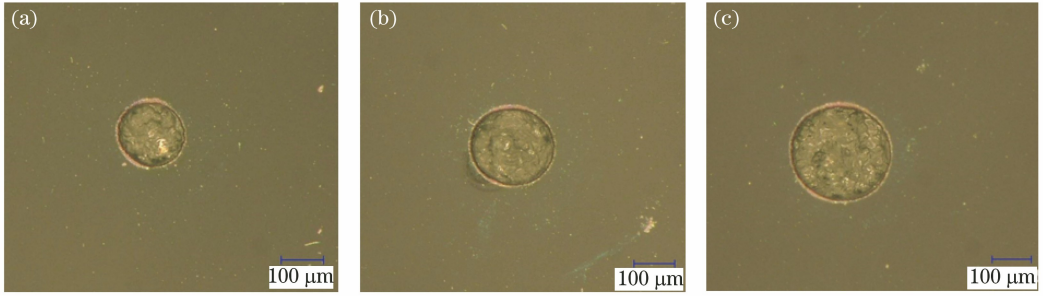


图 2 损耗点显微镜图。(a) 150 μm ; (b) 200 μm ; (c) 250 μm

Fig. 2 Micrograph images of defect-spots. (a) 150 μm ; (b) 200 μm ; (c) 250 μm

接着,移动损耗点镜,使某个损耗点的中心与光轴同轴,从而产生中心暗空、强度分布为甜甜圈形光束。三个损耗点产生的强度分布为甜甜圈形光束的光斑模式如图 3 所示。实验中,采用马赫-曾德尔干涉的方式来检测干涉条纹,进而确定涡旋光束的拓扑荷数和手性,根据干涉条纹此时的分叉个数等于拓扑荷数来确定其 l 值,根据分叉方向则可以判断其手性,向下为正,向上为负。实际测得的干涉条纹如图 3 所示,由图 3 可知在这三个损耗点处产生的涡旋光束的拓扑荷数都为 1。并且实验测得 150 μm 损耗点产生的涡旋光束在 x 和 y 方向上的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.8 和 2.25。在本文实验中没有出现高阶涡旋,可能是因为泵浦功率、腔的结构、损耗点尺寸等。若继续扩大损耗点直径,本课题组认为通过控制激光光斑直径,优化激光腔和增大泵浦功率,理论上可以产生更高阶次的涡旋光束。

实验中,通过改变腔长来改变腔内光斑的大小。腔长的改变是通过前后移动损耗点镜改变其与 M_6 间的距离来实现的,定义 M_5 到 M_6 间的距离为短臂腔长 L 。用 reZonator 软件模拟了随着 L 的改变,激光光斑的变化情况,结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着 L 的增加在切线面 (tangential) 和弧矢面 (sagittal) 两个截面上的光斑都是先增大后减小。

由于损耗点镜的反射率为 99%,在实验中可将 M2MS 测试仪紧靠损耗点镜放置,通过测量其透过光斑来获得激光光斑直径。光斑实际测量点与损耗点镜后表面的距离 $s = 32 \text{ mm}$,损耗点镜厚度 $d = 8 \text{ mm}$ 。为了修正因发散而产生的光斑直径误差,测得了基模在 L 为 790 mm 和 1340 mm 时的 M^2 (光束质量因子) 值,都约为 1.1。由 M^2 定义可知

$$M^2 = \frac{\omega\theta}{\omega_0\theta_0}, \quad (1)$$

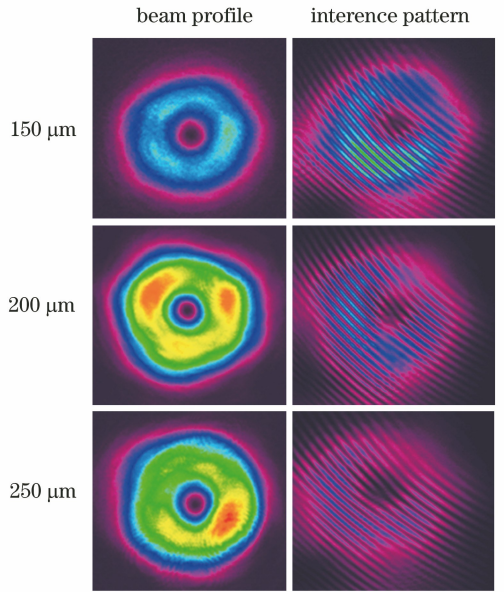


图 3 损耗点产生的光斑模式和干涉模式

Fig. 3 Spot patterns and interference patterns produced by defect-spots

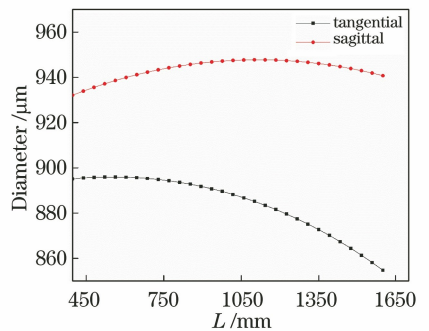


图 4 激光光斑直径仿真结果

Fig. 4 Simulation results of laser spot diameter

式中: ω 和 θ 为实际被测激光的束腰半径和远场发散角; ω_0 和 θ_0 为理想激光的束腰半径和远场发散角。 $\omega_0\theta_0$ 一般取 $2\lambda/\pi$, 将其代入(1)式中, 可得

$$\theta = 2M^2\lambda / (\pi\tau\omega). \quad (2)$$

定义 r_1 为损耗点镜前表面上光斑的半径, r_2

为实际测得的光斑半径, θ_1 和 θ_2 分别为光斑发散前后的半发散角。再由 ABCD 矩阵可得

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_2/n_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 + 2\theta_1(d + 1.5s)/3 \\ \theta_1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中: n_1 和 n_2 为空气和损耗点镜的折射率。

最后得到所求激光光斑直径 ω_{correct} 和测得的光斑直径 ω_{test} 的关系为

$$\omega_{\text{correct}} = \omega_{\text{test}} - 4\theta_1(d + 1.5s)/3. \quad (4)$$

以间隔 50 mm 改变 L , 变化范围为 790 ~ 1340 mm, 得到的激光光斑大小与腔长的关系如图 5(a) 所示, 光斑椭圆率随腔长的变化关系如图 5

(b) 所示。由图 5(a) 可知: 随着腔长 L 的增加, 光斑先增大后减少; 且在腔长为 1090 mm 时光斑最大, 其光斑最大时直径为 890 μm 。由图 5(b) 可知: 随着腔长 L 的增加, 光斑椭圆率整体呈下降趋势, 这说明随着腔长增加, 切线面与弧矢面的光斑直径比例逐渐减小。这一实验现象与图 4 中的仿真结果一致。

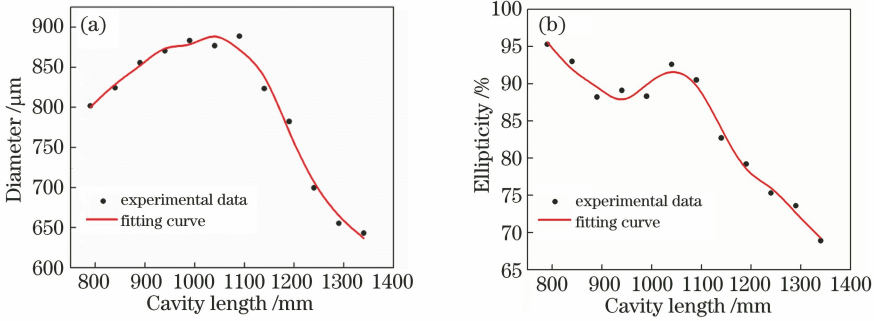


图 5 腔内激光模式(基模)光斑直径和椭圆率与腔长的关系。(a)直径;(b)椭圆率

Fig. 5 Relationship between spot diameter and ellipticity of laser mode(fundamental mode) and cavity length.

(a) Diameter; (b) ellipticity

损耗点直径分别为 150 μm 和 200 μm 时, 涡旋光束光-光转换效率随腔长的变化关系如图 6 所示。由图 6(a) 可知, 对于直径为 150 μm 的损耗点, 当腔长为 1190 ~ 1240 mm 时, 涡旋光束转换效率较高,

此时对应的光斑大小为 700 ~ 782 μm 。由图 6(b) 可知, 对于直径为 200 μm 的损耗点, 当腔长为 1140 ~ 1190 mm 时, 涡旋光束转换效率较高, 此时对应的光斑大小为 782 ~ 824 μm 。

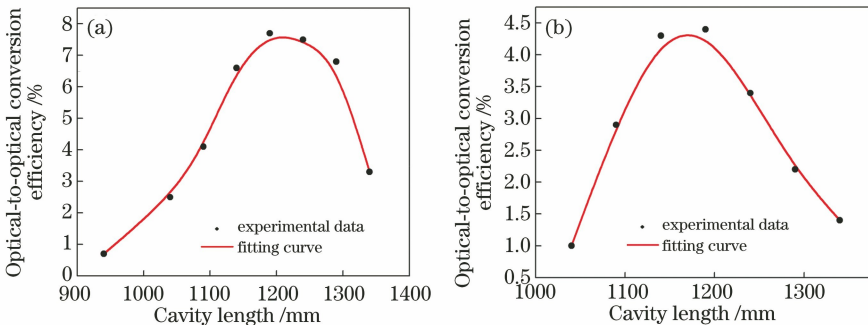


图 6 损耗点直径不同时, 涡旋光束的光-光转换效率与腔长的关系。(a) 150 μm ; (b) 200 μm

Fig. 6 Optical-to-optical conversion efficiency of vortex beam versus cavity length under different defect-spot diameters. (a) 150 μm ; (b) 200 μm

损耗点直径分别为 150 μm 和 200 μm 时, 涡旋光束的光-光转换效率与光斑椭圆率的关系如图 7 所示。由图 7 可知, 同样地, 当光斑椭圆率约为

80% 时, 光-光转换效率较高。本文认为这是因为晶体成布儒斯特角摆放所引入的像散导致泵浦光斑在晶体里为椭圆。

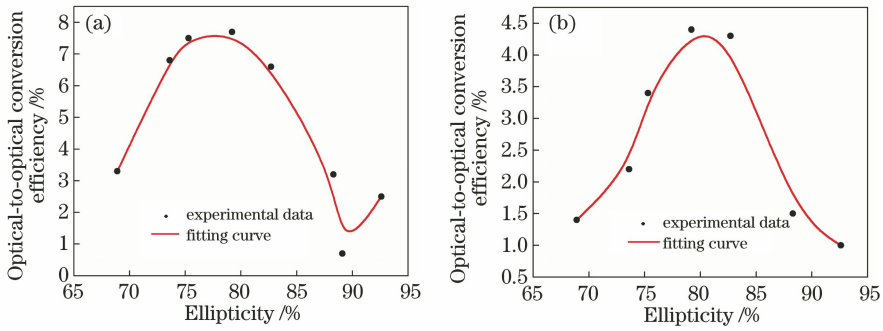


图 7 损耗点直径不同时, 涡旋光束的光-光转换效率与激光模式光斑椭圆率的关系。(a) 150 μm ; (b) 200 μm
 Fig. 7 Optical-to-optical conversion efficiency of vortex beam versus ellipticity of laser mode under different defect-spot diameters. (a) 150 μm ; (b) 200 μm

实验中还研究了直径为 150 μm 和 200 μm 损耗点的涡旋光转换效率与激光光斑直径的关系, 如图 8 所示。由图 8(a)可知, 对于直径为 150 μm 的损耗点, 当激光光斑直径为 700~782 μm , 对应的光斑椭圆率约为 80%时, 光-光转换效率较高, 最高为

7.7%, 此时其功率曲线如图 9(a)所示。由图 8(b)可知, 对于直径为 200 μm 的损耗点, 当激光光斑直径为 782~824 μm , 对应的光斑椭圆率也约为 80%时, 其光-光转换效率最高为 4.4%, 此时涡旋光的功率曲线如图 9(b)所示。这一现象与图 6 和图 7 一致。

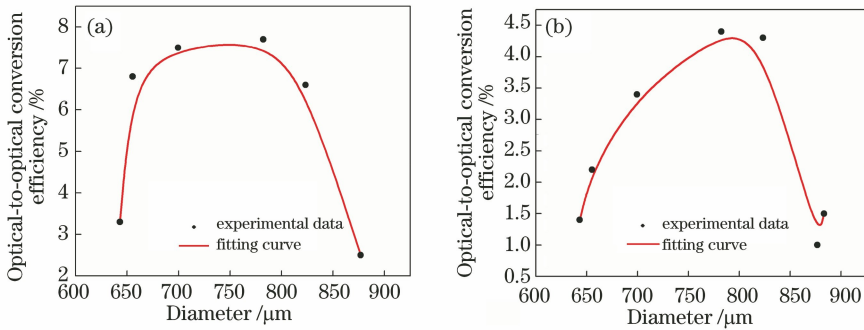


图 8 损耗点直径不同时, 涡旋光束的光-光转换效率与激光模式直径的关系。(a) 150 μm ; (b) 200 μm
 Fig. 8 Optical-to-optical conversion efficiency of vortex beam versus diameter of laser mode under different defect-spot diameters. (a) 150 μm ; (b) 200 μm

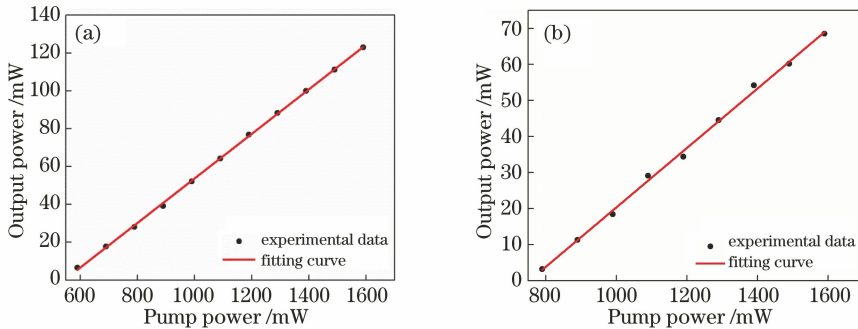


图 9 不同损耗点直径下, 最大涡旋光束光-光转换效率时的功率曲线。(a) 150 μm ; (b) 200 μm
 Fig. 9 Output power curves at maximum optical-to-optical conversion efficiency of vortex beam under different defect-spot diameters. (a) 150 μm ; (b) 200 μm

此外, 对于直径为 250 μm 的损耗点, 实验测得激光光斑直径约为 782 μm , 此时对应的光斑椭圆率为 79%, 能获得最大的光-光转换效率, 为 1.9%。实验中发现, 随着损耗点直径增大, 光-光转换效率下

降, 分析认为除了损耗点直径增大导致引入的损耗增大的原因外, 还可能是因为腔内光斑椭圆率约为 80%时光斑的直径还不能达到产生高转换效率涡旋光束所需的理论值。同时, 最高光-光转换效率都没

有在光斑直径最大处获得,这可能是受限于此时的光斑椭圆率。由以上的实验分析可知,当腔内光斑直径大约是损耗点的4~6倍且光斑椭圆率大约为80%时,可以得到较高光-光转换效率的涡旋光输出。

4 结 论

本文通过带有损耗点镜、增益介质为Yb:QX的Z字型固体激光器产生了一阶涡旋光束。通过改变腔长来改变腔内激光模式光斑的形状及大小,研究了涡旋光束光-光转换效率与损耗点直径和光斑椭圆率的关系。经过实验测试及理论分析,当腔内激光模式光斑椭圆率约为80%,并且光斑直径大约是损耗点的4~6倍时,可以提高基于损耗点产生涡旋光束的光-光转换效率。后期本课题组打算利用此装置研究高效率飞秒涡旋光的产生。

致谢 感谢 Kobayashi Yohei 先生、Ito Isao 先生和 Zhao Zhigang 先生在实验中所给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 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*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Wang Z X, Zhang N, Yuan X C. High-volume optical vortex multiplexing and de-multiplexing for free-space optical communication [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 482-492.
- [3] Curtis J E, Grier D G. Modulated optical vortices [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(11): 872-874.
- [4] Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(11): 827-829.
- [5] Dedecker P, Muls B, Hofkens J, et al. Orientational effects in the excitation and de-excitation of single molecules interacting with donut-mode laser beams [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3372-3383.
- [6] Török P, Munro P R T. The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy [J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3605-3617.
- [7] Hnatovsky C, Shvedov V G, Krolikowski W, et al. Materials processing with a tightly focused femtosecond laser vortex pulse[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(20): 3417-3419.
- [8] Apurv C N, Aadhi A, Jabir M V, et al. Frequency-doubling characteristics of high-power, ultrafast vortex beams [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2614-2617.
- [9] Granata M, Buy C, Ward R, et al. Higher-order Laguerre-Gauss mode generation and interferometry for gravitational wave detectors[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(23): 231102.
- [10] Gao H F, Ren Y X, Liu W W, et al. Rotation dynamics of yeast cell in vortex optical tweezers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4): 0404002. 高红芳, 任煜轩, 刘伟伟, 等. 酵母细胞在涡旋光阱中的旋转动力学研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0404002.
- [11] Courtial J, Padgett M J. Performance of a cylindrical lens mode converter for producing Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Optics Communications*, 1999, 159(1/2/3): 13-18.
- [12] 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.
- [13] Terhalle B, Langner A, Päivänranta B, et al. Generation of extreme ultraviolet vortex beams using computer generated holograms [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4143-4145.
- [14] Liu J P, Min C J, Lei T, et al. Generation and detection of broadband multi-channel orbital angular momentum by micrometer-scale meta-reflectarray [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 212-218.
- [15] Balistreri M L M, Korterik J P, Kuipers L, et al. Local observations of phase singularities in optical fields in waveguide structures [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2): 294-297.
- [16] Ke X Z, Ge T. Experiment on generation of vortex light with few-mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106004. 柯熙政, 葛甜. 利用少模光纤产生涡旋光的实验[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106004.
- [17] Liu Z J, Zhao H F, Liu J L, et al. Generation of hollow Gaussian beams by spatial filtering[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2076-2078.
- [18] Smith A, Armstrong D. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator[J]. *Optics Express*, 2003, 11(8): 868-873.
- [19] 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.
- [20] Kim D J, Kim J W. Direct generation of an optical vortex beam in a single-frequency Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(3): 399-402.
- [21] Harris M, Hill C A, Vaughan J M. Optical helices

- and spiral interference fringes [J]. Optics Communications, 1994, 106(4/5/6): 161-166.
- [22] Bisson J F, Senatsky Y, Ueda K I. Generation of Laguerre-Gaussian modes in Nd:YAG laser using diffractive optical pumping [J]. Laser Physics Letters, 2005, 2(7): 327-333.
- [23] Okida M, Itoh M, Yatagai T, et al. A direct generation of a high power ($\gg 7$ W) Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO₄ 1.3 μ m bounce laser[C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007. Munich. New York: IEEE, 2007: 4385823.
- [24] Wang S, Zhang S, Yang H, et al. Direct emission of chirality controllable femtosecond LG01 vortex beam [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(20): 201110.
- [25] Xin J T, Dai K J, Zhong L, et al. Generation of optical vortices by using spiral phase plates made of polarization dependent devices [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1984-1987.
- [26] 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.
- [27] Wang T, Wang F, Shi F, et al. Generation of femtosecond optical vortex beams in all-fiber mode-locked fiber laser using mode selective coupler [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(11): 2161-2166.
- [28] Wang S, Zhao Z G, 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.
- [29] 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.
- [30] Vyas S, Kozawa Y, Sato S. Generation of a vector doughnut beam from an internal mirror He-Ne laser [J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2080-2082.
- [31] Lee A J, Omatsu T, Pask H M. Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser [J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12401-12409.
- [32] 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.