

Yb:GdYCOB 晶体涡旋激光器

卢洁玲^{1,2} 张莉珍¹ 林州斌¹ 林海枫^{1,2} 陈玮冬¹ 张戈¹

¹中国科学院福建物质结构研究所光电材料化学与物理重点实验室, 福建 福州 350002

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用光强分布为环形的半导体激光器端面抽运 Yb:GdYCOB 晶体, 实现了激光谐振腔直接发射涡旋激光。通过测量输出激光光束的空间强度分布、光束品质因子、光束纯度以及光束的波前相位信息, 证实激光器输出的光束为高纯度涡旋光束。当抽运功率为 3.2 W 时, 最大输出功率为 281 mW, 光-光转换效率为 8.7%, 斜率效率为 21.7%。

关键词 激光技术; 涡旋激光; 环形端面抽运; Yb³⁺ 掺杂晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0901003

Yb:GdYCOB Crystal Vortex Lasers

Lu Jieling^{1,2} Zhang Lizhen¹ Lin Zhoubin¹ Lin Haifeng^{1,2} Chen Weidong¹ Zhang Ge¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Materials Chemistry and Physics, Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the Yb:GdYCOB crystal end-pumped by a diode laser with an annular-shaped beam profile, the direct emission of vortex laser is realized in a laser resonant cavity. By measuring the spatial intensity distribution, beam quality factor, beam purity, and wave front phase information, it is confirmed that the laser output beam is really a highly pure vortex beam. With 3.2 W pump power, the maximum output power is 281 mW, the optical-to-optical efficiency is 8.7%, and the slope efficiency is 21.7%.

Key words laser technique; vortex laser; annular-shaped end-pumped; Yb³⁺-doped crystal

OCIS codes 140.3460; 140.3615; 140.3480; 140.3380

1 引言

涡旋光束是近年来得到广泛重视的一种带有螺旋状波前和相位奇异点的特殊光束^[1]。1992年, Allen等^[2]证明涡旋光束中的每一个光子携带的轨道角动量为 $\pm l\hbar$, 其中 l 为拓扑荷数, \hbar 是普朗克常数。涡旋光束特殊的性质使其在许多领域得到重要的应用, 如利用带有轨道角动量的涡旋光束实现微观粒子的操控^[3-4]、量子通讯^[5]以及受激发射损耗超分辨显微技术(STED)^[6-7], 利用涡旋激光的螺旋形波前进行纳米加工^[8]等。稳定的高光束质量的涡旋光束成为当前激光研究的热点之一^[1,9]。

传统产生涡旋光束的方式是在激光谐振腔外通过波前整形技术将普通的高斯光束转换为拉盖尔-高斯光束(LG_{pl})^[1]。拉盖尔-高斯光束是一种被广泛研究和应用的涡旋光束, 其中LG₀₁光是最低阶的拉盖尔-高斯光束, 拓扑荷数为 ± 1 ^[2]。外腔波前整形技术包括螺旋相位片^[10]、空间光调制器^[11]、全息光栅^[12]等, 但是该技术受限于腔外元件的损伤阈值与准直难度, 难以获得高功率、高光束质量的涡旋光束。因此, 近年来学术界逐渐将

收稿日期: 2016-04-27; **收到修改稿日期:** 2016-05-27

基金项目: 国家 863 计划(2013AA014202)、国家自然科学基金(11404332, 61575199, 6118054, 61308085, 61475158, 61275177)、中国国家留学基金(201504910418, 201504910629)、福建省科技计划项目(2014H0052, 2016H0045)

作者简介: 卢洁玲(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事全固态涡旋激光器方面的研究。E-mail: lu_jieling@163.com

导师简介: 张戈(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光、非线性光学材料及相关器件等方面的研究。

E-mail: zhg@fjirsm.ac.cn

目光聚焦在如何由激光谐振腔直接发射涡旋激光。拉盖尔-高斯光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发射。与外腔波前整形方法相比,这种内腔直接产生涡旋激光的方法具有低损耗、高功率、高光束质量、高稳定性等优点。目前,内腔直接产生涡旋光束的方法包括采用光强分布为环形的抽运源^[13-14]、使用带点缺陷的谐振腔镜^[15-16]、利用增益介质的热透镜效应^[17]等。这些方法的本质在于通过控制谐振腔的增益与损耗,达到抑制基模高斯模式的目的,从而实现谐振腔直接发射拉盖尔-高斯光。

目前,在固体激光领域关于腔内直接产生涡旋光束的研究主要集中在掺 Nd³⁺ 激光晶体固体激光器,包括 Nd:YAG^[14,18]、Nd:YVO₄^[17]、Nd:GdVO₄^[16]等,也有使用 Er:YAG^[19]、Yb:YAG^[20]作为增益介质的激光器。与掺 Nd³⁺ 激光晶体相比,掺 Yb³⁺ 激光晶体具有许多优异的性能,如量子亏损低、热性能好、荧光寿命长,能量存储便利、光转换效率高等。掺 Yb³⁺ 激光晶体在可调谐^[21-23]以及超快激光^[24-26]领域具有很大的应用价值。

Yb:GdYCOB 激光晶体是一种掺 Yb³⁺ 的钙-稀土硼酸盐单斜晶体^[27],与其他 Yb³⁺ 掺杂硼酸盐激光晶体相比,它具有更长的荧光寿命^[28-29]以及更宽的荧光发射带宽^[27]。本文采用光强分布为环形的半导体激光器端面抽运 Yb:GdYCOB 晶体,实现了激光谐振腔直接发射涡旋激光。通过分析输出激光的空间强度分布、光束质量、光束纯度以及光束的波前信息,证实了激光器输出的是高纯度的一阶拉盖尔-高斯光束(LG₀₁)。

2 基本原理与实验装置

在端面抽运体系中,不同横模的阈值公式为^[30]

$$P_{\text{pth}} = \frac{\hbar \nu_p (L + T)}{2\sigma\tau_f\eta_q\eta_{\text{abs}}} \times \frac{1}{l \int_{r_0} r_0(r, z) s_0(r, z) dV}, \quad (1)$$

式中 σ 为激光增益介质的受激发射截面, τ_f 为激光增益介质的上能级寿命, ν_p 为抽运光频率, r 为光斑曲率半径, z 为光束传播距离, V 为有效重叠区间的体积, η_q 为抽运光的量子效率, η_{abs} 为吸收系数, L 为谐振腔腔损耗, T 为输出镜的透射率, l 为有效腔长, $r_0(r, z)$ 为抽运光的空间强度分布函数, $s_0(r, z)$ 为谐振腔的横模的空间强度分布函数。通过改变谐振腔的不同横模的强度分布,可以计算出不同横模在相同的抽运条件下的阈值。(1)式表明,在增益介质内部,当谐振腔横模与抽运光达到最好的重叠度时,该模拥有最低的激光振荡阈值,会优先起振。也就是说,通过使用特定空间强度分布的抽运光以及特定设计的谐振腔结构可以直接产生有效的 LG₀₁ 激光输出。

发射涡旋激光的实验装置如图 1(a)所示,实验采用由平面反射镜 M1 与曲率半径 $R = 100$ mm 的输出耦合镜 M2 构成的腔长为 30 mm 的平凹腔。M1 镜镀有对 976 nm 抽运光的增透膜以及对 1085 nm 发射光的高反膜,输出镜 M2 镀有 1085 nm 发射光的部分透射膜,透射率 $T = 2\%$ 。实验采用沿 x 轴方向切割的 Yb:GdYCOB 晶体,晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm, Yb³⁺ 掺杂的原子数分数为 9.28%。晶体端面未镀膜。实验过程中晶体由厚度为 0.1 mm 的钢箔包裹后放置在固定的铜块上,铜块连接半导体制冷器(TEC), TEC 连接水冷装置,水冷装置保持水温为 10 °C。经谐振腔 ABCD 理论计算,晶体内部的基模(TEM₀₀)高斯光束半径为 117 μm。

实验使用中心波长为 976 nm 的半导体激光器进行端面抽运。图 1(b)为实验使用的由光束分析仪测得的环形抽运光的近场光束强度分布。为了获得横截面光强分布为环形的抽运光,对抽运光进行整形^[19],得到近场光强分布为环形且最大输出功率为 4 W 的抽运光。实验测得整形后抽运光的光束品质因子为 36。

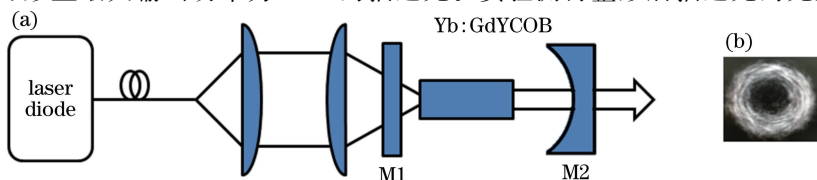


图 1 (a) Yb:GdYCOB 晶体激光器实验装置示意图;(b)抽运光近场光强分布

Fig. 1 (a) Schematic diagram of experimental setup of Yb:GdYCOB crystal laser; (b) near-field intensity distribution of pump laser

为了确保激光谐振腔优先激发 LG_{01} 模,需要使环形抽运光在有效增益长度内与谐振腔振荡的 LG_{01} 横模实现最大程度的空间重叠度,以此保证抽运光与谐振腔 LG_{01} 模获得最佳模式匹配。由于抽运光在其两倍瑞利长度内发散角近似为零,可以认为抽运光在其两倍瑞利长度内光束半径保持不变,因此,只有保证抽运光的两倍瑞利长度覆盖整个激光介质的有效增益长度才能实现最佳的模式匹配,即

$$2Z_{Rp} = \frac{2\pi n\omega_p^2}{M_p^2\lambda} \geq l_c, \quad (2)$$

式中 Z_{Rp} 为抽运光的瑞利长度, λ 为抽运光波长, n 为增益介质折射率, ω_p 为抽运光束束腰半径, M_p^2 为抽运光光束品质因子, l_c 为激光增益介质的有效长度。

对于 LG_{01} 模式,其强度分布为^[31]

$$P_{LG_{01}} = \frac{4r^2}{\pi\omega^4(z)l_c} \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega^2(z)}\right], \quad (3)$$

式中 r 为横截面上的径向坐标, $\omega(z)$ 为谐振腔基模(TEM_{00})的光束半径,拓扑荷数为 1。在谐振腔内, LG_{01} 模的光束半径为 TEM_{00} 模的 $\sqrt{2}$ 倍,在实验采用的谐振腔中,利用(3)式计算得到的激光增益介质内 LG_{01} 模的光束半径为 $165 \mu\text{m}$ 。为了保证 LG_{01} 模被优先激发,将抽运光通过耦合透镜组聚焦到晶体内部,聚焦光束半径为 $190 \mu\text{m}$ 。将相关参数代入(2)式,可以计算得到此时的抽运光两倍瑞利长度为 10.9 mm ,大于晶体长度 10 mm ,满足(2)式的要求。使用光束分析仪测量得到抽运光在晶体上的聚焦光束的半径为 $190 \mu\text{m}$,中间空心部分半径为 $60 \mu\text{m}$,如图 1 所示。通过理论计算可以得到,在这种条件下,激光谐振腔内 LG_{01} 模的阈值最低,可以被优先激发。

3 实验结果与分析

$\text{Yb}:\text{GdYCOB}$ 晶体激光输出功率图如图 2(a) 所示,当注入抽运功率为 2.07 W 时,激光器达到阈值。随着注入抽运光功率的增大,输出激光的功率逐渐增加,当注入抽运功率达到 3.2 W 时,获得最大的输出功率 281 mW ,此时激光器没有出现饱和现象。因此可以推断,如果使用更高功率的激光抽运源,激光器的输出功率能够得到进一步提升。实验中 $\text{Yb}:\text{GdYCOB}$ 激光器的光光转换效率为 8.7% ,斜率效率为 21.7% 。图 2(b) 为在最大输出功率 281 mW 的条件下测得的输出激光的光谱,出射激光中心波长为 1084.1 nm ,半峰全宽为 2.1 nm 。

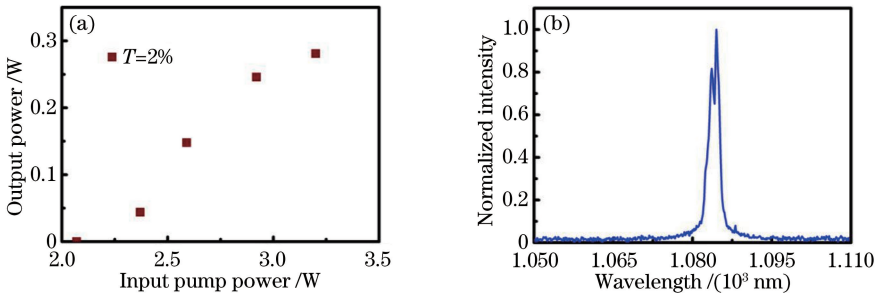


图 2 (a) $\text{Yb}:\text{GdYCOB}$ 晶体激光器输出功率图;(b)输出功率为 281 mW 的激光光谱

Fig. 2 (a) Output power of $\text{Yb}:\text{GdYCOB}$ crystal laser versus input pump power;

(b) spectra of laser with a 281 mW output power

图 3 是在最大输出功率为 281 mW 的情况下测得的激光的空间强度分布。图 3(a) 为远场空间强度分布;使用焦距为 200 mm 的平凸透镜将输出激光进行聚焦,在焦平面附近测得的近场空间强度分布如图 3(b) 所示。由图可以看出,激光出射光强在横截面上为环形分布,中间部分光强为零,且远场和近场具有相同的空间强度分布形式。这表明,出射激光进行傅里叶变换后仍是其本身,即出射激光为谐振腔的本征模式。理论上,理想的 LG_{01} 模的光束品质因子为 2,实验测得最大输出功率 281 mW 下的出射激光光束品质因子为 2.1,与理论值接近。事实上,实验测得的光束品质因子并不能精确地表示 LG_{01} 模的模式纯度。为了进一步确定出射激光是否为 LG_{01} 模,需要测量光束横截面的光强分布以及光束的波前相位信息。

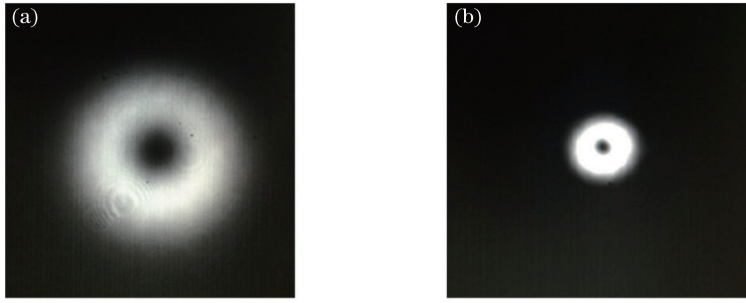


图 3 输出激光的空间强度分布。(a)远场;(b)近场

Fig. 3 Spatial intensity distribution of output laser. (a) Far-field; (b) near-field

图 4 所示为实验测量的远场激光光束横截面的空间强度分布。从图中可以看出测量值与理论值符合得较好,即出射激光与 LG_{01} 模基本吻合。图 4 所示实验测量得到的两个光强峰值存在差异,这是激光腔镜的微小失调以及晶体的各向异性导致的^[32]。由图 4 可以看到,光斑所在中心位置光强近似为 0,这表明谐振腔中的基模高斯光束成分被完全抑制,产生的 LG_{01} 光束不包含基模高斯光束成分。

实验使用马赫-曾德尔干涉仪测量出射激光光束的波前相位信息。图 5 所示为通过光束分析仪测得的共轴干涉图。由图可以看到一个带有顺时针螺旋方向的清晰干涉条纹,这表明出射激光为拓扑荷数为 1 的 LG_{01} 模。使用格兰棱镜测量出射激光的偏振性,确定出射激光为线性偏振光。不改变激光谐振腔参数,重启激光器,其空间光强分布以及干涉条纹、螺旋方向不会发生任何改变,这表明激光器输出为稳定的带有螺旋波前的 LG_{01} 光。受到抽运功率的限制,整个实验在低输出功率下运转,如果能够进一步提高抽运光的功率,有望获得更大功率的涡旋激光输出。

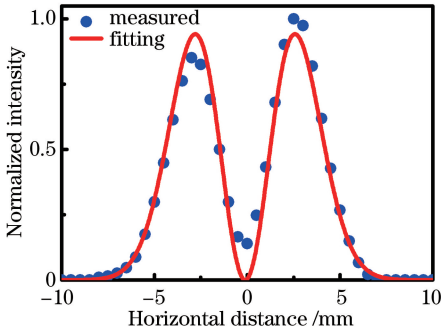


图 4 横截面光强分布图

Fig. 4 Cross-sectional intensity distribution

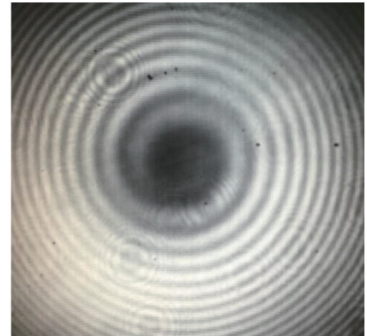


图 5 激光干涉图

Fig. 5 Interference pattern of laser

4 结 论

采用光强分布为环形的半导体激光器端面抽运 $Yb:GdYCOB$ 激光晶体,通过设计合理的谐振腔结构,使抽运光与腔内 LG_{01} 模式相匹配,成功实现 LG_{01} 模涡旋激光的输出。在传输过程中输出激光空间强度没有发生改变,其光束纯度以及光束品质因子与理想的 LG_{01} 光束吻合。波前相位信息表明激光器输出的是带有螺旋波前的 LG_{01} 光束,拓扑荷数为 1。当注入功率达到 3.2 W 时,获得最大的输出功率 281 mW,对应的斜率效率为 21.7%。如果进一步提高抽运光的功率,有望获得更大功率的涡旋激光输出。

参 考 文 献

- 1 Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2011, 3 (2): 161-204.
- 2 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]. *Phys Rev A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- 3 Gahagan K T, Swartzlander G A. Optical vortex trapping of particles[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(11): 827-829.

- 4 Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers[J]. *Opt Commun*, 2002, 207(1): 169-175.
- 5 Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Opt Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- 6 Klar T A, Jakobs S, Dyba M, *et al.* Fluorescence microscopy with diffraction resolution barrier broken by stimulated emission[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, 97(15): 8206-8210.
- 7 Hell S W. Far-field optical nanoscopy[J]. *Science*, 2007, 316(5828): 1153-1158.
- 8 Toyoda K, Takahashi F, Takizawa S, *et al.* Transfer of light helicity to nanostructures[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110(14): 143603.
- 9 Zhan Q. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications[J]. *Adv Opt Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- 10 Kotlyar V V, Almazov A A, Khonina S N, *et al.* Generation of phase singularity through diffracting a plane or Gaussian beam by a spiral phase plate[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(5): 849-861.
- 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]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(7): 1642-1651.
- 12 Heckenberg N R, McDuff R, Smith C P, *et al.* Generation of optical-phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(3): 221-223.
- 13 Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Generation of Laguerre-Gaussian modes in fiber-coupled laser diode end-pumped lasers[J]. *Appl Phys B-Lasers O*, 2001, 72(2): 167-170.
- 14 Lin D, Daniel J M O, Clarkson W A. Controlling the handedness of directly excited Laguerre-Gaussian modes in a solid-state laser[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(13): 3903-3906.
- 15 Lee A J, Omatsu T, Pask H M. Direct generation of a first-Stokes vortex laser beam from a self-Raman laser[J]. *Opt Express*, 2013, 21(10): 12401-12409.
- 16 Lee A J, Zhang C Y, Omatsu T, *et al.* An intracavity, frequency-doubled self-Raman vortex laser[J]. *Opt Express*, 2014, 22(5): 5400-5409.
- 17 Okida M, Omatsu T, Itoh M, *et al.* Direct generation of high power Laguerre-Gaussian output from a diode-pumped Nd:YVO₄ 1.3- μ m bounce laser[J]. *Opt Express*, 2007, 15(12): 7616-7622.
- 18 Ito A, Kozawa Y, Sato S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror[J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- 19 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]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 14526-14531.
- 20 Sato T, Kozawa Y, Sato S. Transverse-mode selective laser operation by unicursal fast-scanning pumping[J]. *Opt Lett*, 2015, 40(14): 3245-3248.
- 21 Brauch U, Giesen A, Karszewski M, *et al.* Multiwatt diode-pumped Yb:Yag thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 713-715.
- 22 Lacovara P, Choi H K, Wang C A, *et al.* Room-temperature diode-pumped Yb:Yag Laser[J]. *Opt Lett*, 1991, 16(14): 1089-1091.
- 23 Zhang Lizhe, Dai Jianming, Zhang Weili, *et al.* All-solid-state tunable Yb:YAG laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(10): 873-876.
张丽哲, 戴建明, 张伟力, 等. 全固化可调谐 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2001, 28(10): 873-876.
- 24 Honninger C, Morier-Genoud F, Moser M, *et al.* Efficient and tunable diode-pumped femtosecond Yb:glass lasers[J]. *Opt Lett*, 1998, 23(2): 126-128.
- 25 Honninger C, Zhang G, Keller U, *et al.* Femtosecond Yb:Yag laser using semiconductor saturable absorbers[J]. *Opt Lett*, 1995, 20(23): 2402-2404.
- 26 Mejiti F, Kalashnikov V L, Poloyko I G, *et al.* Kerr lens mode-locked operation of Yb:KYW laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, B11(3): 166-168.
- 27 Zhang Y, Wei B, Wang G. Spectroscopic properties of Yb³⁺-doped Ca₄Gd_{0.5}Y_{0.5}O(BO₃)₃ single crystals[J]. *Phys Status Solidi A*, 2010, 207(6): 1468-1473.
- 28 Jiang H, Wang J, Zhang H, *et al.* Spectroscopic properties of Yb-doped GdCa₄O(BO₃)₃ crystal[J]. *Chem Phys Lett*, 2002, 357(1-2): 15-19.
- 29 Jiang H, Wang J, Zhang H, *et al.* Spectral and luminescent properties of Yb³⁺ ions in YCa₄O(BO₃)₃ crystal[J]. *Chem Phys Lett*, 2002, 361(5): 499-503.

- 30 Clarkson W A, Hanna D C. Effects of transverse-mode profile on slope efficiency and relaxation oscillations in a longitudinally-pumped Laser[J]. J Mod Optic, 1989, 36(4): 483-498.
- 31 Phillips R L, Andrews L C. Spot size and divergence for Laguerre Gaussian beams of any order[J]. Appl Opt, 1983, 22(5): 643-644.
- 32 Kano K, Kozawa Y, Sato S. Generation of a purely single transverse mode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror[J]. International Journal of Optics, 2011, 2012: 359141.