

直接输出高阶横模激光器的实验研究

陈霞飞, 张凯伦, 陈子阳, 李小燕, 蒲继雄

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 从理论和实验上研究了从激光器直接输出高阶拉盖尔-高斯 (LG) 光束和高阶厄密-高斯 (HG) 光束。首先从理论上研究了高阶 LG 光束和高阶 HG 光束的光强分布特性, 并进行数值仿真。在实验研究中, 利用 445 nm 的蓝光半导体激光器端面泵浦 Pr:YLF 晶体, 在一定的条件下, 能从平凹腔直接输出 640 nm 波长高阶 LG 光束和高阶 HG 光束。实验结果表明: 从激光腔内输出的高阶 LG 光束和高阶 HG 光束与理论仿真基本一致。文中所报道的获得高阶模的实验装置简单, 对产生高阶光束及其应用具有较重要价值。

关键词: 高阶拉盖尔-高斯光束; 高阶厄密-高斯光束; 蓝光半导体激光器; 平凹腔;
Pr:YLF 晶体

中图分类号: O436 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0606002

Experimental investigation on direct generation of high order transverse mode laser

Chen Xiafei, Zhang Kailun, Chen Ziyang, Li Xiaoyan, Pu Jixiong

(Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Generation of higher-order Laguerre-Gaussian (LG) beams (vortex beams) and higher-order Hermite-Gaussian (HG) beams directly from the laser was theoretically and experimentally studied. The intensity distribution characteristics of higher-order LG beams and higher-order HG beams were theoretically studied, and the numerical simulation results were given. The Pr:YLF crystal was end-pumped by a 445 nm blue semiconductor laser, under certain conditions, the higher-order LG beam and the higher-order HG beam of wavelength 640 nm was directly delivered from the plano-concave laser cavity. The experimental results show that the higher-order LG beams and the higher-order HG beams from the laser cavity are in agreement with the theoretical simulation. It is shown that the device for generating the higher-order modes is simple. The results of this paper seems very important for generation of higher-order laser beams and their applications.

Key words: higher-order Laguerre-Gaussian (LG) beams; higher-order Hermite-Gaussian (HG) beams; blue semiconductor laser; plano-concave cavity; Pr:YLF crystal

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(11674111, 61575070, 11750110426); 福建省自然科学基金(2017J01003)

作者简介: 陈霞飞(1993-), 女, 硕士生, 主要从事光束传输与变换方面的研究。Email: 191331069@qq.com

导师简介: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事光束传输与变换方面的研究。Email: jixiong@hqu.edu.cn

0 引言

拉盖尔-高斯(LG)模式和厄密-高斯(HG)模式分别是笛卡尔坐标和柱坐标在旁轴近似下标量亥姆霍兹方程的两个解。LG 光束是具有螺旋相位因子 $\exp(il\varphi)$ (φ 为方位角)的常见涡旋光束^[1], 涡旋光束是具有螺旋型相位波前和中空环状的光强分布的一种特殊的光束^[2]。这种光束具有轨道角动量, 在新型光通信、引力波探测和微粒操纵等领域具有非常重要的应用^[3-7]。目前, 已有一些把激光光束变换成涡旋光束的方法, 通过空间光调制器(SLM)或螺旋相位板对入射激光加载螺旋相位, 即可获得涡旋光束^[8]。LG_{pl} 光束有径向系数 p 和角向系数 l 。当 $p=0, l \neq 0$ 时, 是两个相反涡旋波前 LG 模式组成花瓣状强度分布的角向高阶 LG_{0l} 光束, 其光束具有自愈性^[9-10]。当 $p \neq 0, l=0$ 时, 是环形状的径向高阶 LG_{p0} 光束^[11]。当 $p \neq 0, l \neq 0$ 时, 是常规高阶 LG_{pl} 光束。

近年来, 由于高阶 LG 光束比零阶 LG 光束具有更高的信号功率, 许多研究者都在致力于产生高阶 LG 光束^[12]。基于激光二极管(LD)端泵抽运激光器的方法, Flood 等人在 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 激光器中观察到径向高阶 LG_{p0} 模式^[13-15]。在谐振腔里放置相位元件, Oron 等人在 Nd:YAG 和 CO₂ 激光系统中获得了几个角向高阶 LG_{0l} 模式^[16]。在谐振腔里插入一个吸收环, Hasnaoui 和 Aït-Ameur 也能激励出径向高阶 LG_{p0} 模式^[17]。就高阶角向 LG_{0l} 模式而言, Chen 等人还提出了一种环形端泵的方法^[18]。Naidoo 等人在端面镜子带有细薄不透明圆盘的 Nd:YAG 激光器中产生了 LG_{0l} 模式^[9]。但他们的工作局限在于产生单一的高阶径向或高阶角向 LG 光束, 并且这些报道的研究工作中, 都需要在谐振腔里放入相应的元件才能产生相应的高阶 LG 光束。据笔者所知, 还没有见到有关从激光器直接输出高阶 LG 光束和高阶 HG 光束的研究报道。

在文中, 报道利用端泵抽运激光器的方法直接输出高阶 LG 光束和高阶 HG 光束。理论研究了高阶 LG 光束和高阶 HG 光束的光强分布特性, 并进行了实验验证。讨论了各种 LG(包括径向高阶、角向高阶和常规高阶模式)、HG 模式。所得到的研究结果对于直接输出高阶横模激光器提供了实验依据。

1 理论分析

首先研究 LG 模式复杂场分布。在旁轴近似下, 用柱坐标的标量的亥姆霍兹方程, 可得到 LG_{pl} 模式的数学表达式^[19]:

$$u_{pl}(r, \theta, z) = A_{pl} \frac{\omega_0}{\omega(z)} f_{pl} \left(\frac{\sqrt{2} r}{\omega(z)} \right) \cos[l(\theta - \theta_0)] \cdot \exp \left[-jkz - j \frac{kr^2}{2R(z)} + j(2p+1)\psi(z) \right] \quad (1)$$

其中,

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (2)$$

$$R(z) = (z^2 + z_0^2) / z \quad (3)$$

$$z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda} \quad (4)$$

$$\psi(z) = \arctan \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (5)$$

式中: $p \in \{0, 1, 2, 3, K\}$ 为径向指数; $l \in \{0, 1, 2, 3, K\}$ 为角向指数; A_{pl} 为振幅系数; θ_0 为角向变化的任意参考角; ω_0 为光束腰半径; k 为波数; λ 为波长; z_0 为瑞利距离; $R(z)$ 为波前曲率半径; $\psi(z)$ 为 Gouy 相位。 $f_{pl}(\rho)$ 函数定义为:

$$f_{pl}(\rho) = \rho^l L_p^l(\rho^2) \exp \left(-\frac{\rho^2}{2} \right) \quad (6)$$

式中: $L_p^l(\rho^2)$ 为广义拉盖尔多项式^[20]。

$$L_p^l(\rho^2) = \sum_{m=0}^p (-1)^m \binom{p+1}{p-m} \frac{\rho^{2m}}{m!} \quad (7)$$

HG 模式是傍轴近似下亥姆霍兹方程在笛卡尔坐标系下的解, 可得到 HG 模式表达式为^[21]:

$$u_{mn}(x, y) = C_{mn} H_m \left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}} x \right) H_n \left(\sqrt{\frac{2\pi}{L\lambda}} y \right) e^{-\frac{x^2+y^2}{(L\lambda/\pi)}} \quad (8)$$

式中: C_{mn} 为常系数。可以看出, TEM_{mn} 模在镜面上振幅分布的特点取决于厄密特多项式与高斯分布函数的乘积。厄密特多项式的零点决定场的节线, 厄密特多项式的正负交替的变化与高斯函数随着 x, y 的增大而单调下降的特性决定了场分布的外形轮廓。

根据 LG 和 HG 光束的理论, 仿真结果如图 1 所示, 图 1(a)~(c) 为高阶 LG_{pl} 模式; 图 1(d)~(f) 为高阶 HG_{mn} 模式。

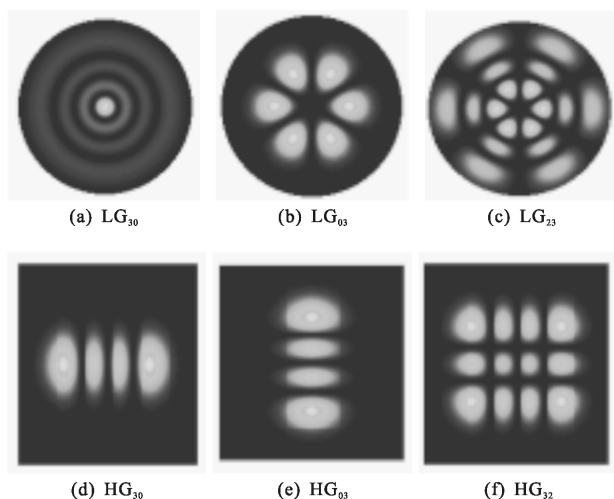


图 1 高阶 LG 模式和 高阶 HG 模式的数值仿真

Fig.1 Simulation of higher-order Laguerre-Gaussian beams and higher-order Hermite-Gaussian beams

图 1(a)~(c) 从左到右依次是 $p \neq 0, l = 0$ 的径向高阶 LG_{30} 模式, $p = 0, l \neq 0$ 的角向高阶 LG_{03} 模式, $p \neq 0, l \neq 0$ 的常规高阶 LG_{23} 模式; 图 (d)~(f) 从左到右分别是在 x 轴上有 3 条节线, 在 y 轴上没有节线的高阶 HG_{30} 模式; 在 x 轴上没有节线, 在 y 轴上有 3 条节线的高阶 HG_{03} 模式; 在 x 轴上有 3 条节线, 在 y 轴上有 2 条节线的高阶 HG_{32} 模式。

2 数值模拟与实验结果

实验装置如图 2 所示, 使用蓝光 LD 作为泵浦源, 最大输出功率为 4 W, 其中心波长是 445 nm, 采用风冷方式对泵浦源模块进行降温。工作介质是 a

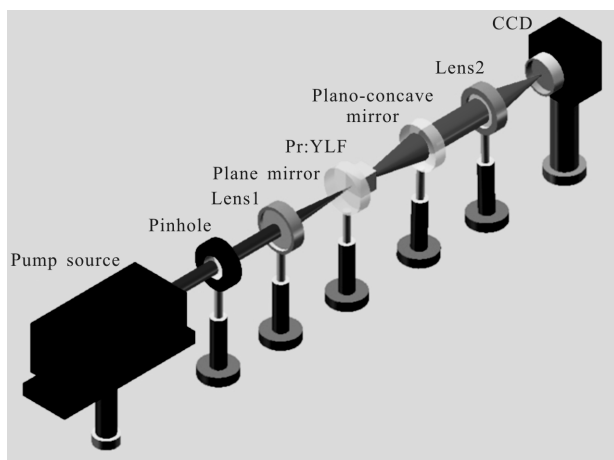


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental setup

切的 Pr:YLF 晶体, 掺杂浓度为 0.5%, 尺寸是 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$ 。谐振腔为平凹腔, 输入端面是平面镜, 对 445 nm 的透射率 T 为 90%, 对 640 nm 的反射率 R 为 99.7%, 输出端面是凹面镜, 其曲率半径为 100 mm, 对 640 nm 的透射率为 $(2 \pm 1)\%$, 此时腔长为 100 mm, 再用 Lens2 聚焦到 CCD, 来观察各种模式的光斑图。

泵浦源经过透镜聚焦到 Pr:YLF 晶体, 使粒子激发到上能级, 实现粒子数反转, 而 Pr:YLF 晶体在此泵浦源抽运下能从蓝光、绿光、橙光、红光 ($^3P_0 \rightarrow ^3F_2$, 640 nm) 到深红光不同波长实现各种颜色的输出。如图 3 所示, Pr:YLF 晶体作为工作介质, 几乎覆盖了可见光波段的大部分范围^[2]。在文中, 仅研究输出增益最大的红光 ($^3P_0 \rightarrow ^3F_2$, 640 nm) 输出。在该实验中, 调节平凹腔的输入镜、输出镜、腔长, 还有聚焦到晶体上的焦距, 调节驱动电流也会影响光斑的形状, 这些变量都可以影响输出光束的形状。在某种情况下, 获得光斑形状近似为高斯的基横模; 调节谐振腔以及驱动电流, 可以获得高阶模。高阶模包括: 高阶 LG 模、高阶 HG 模。

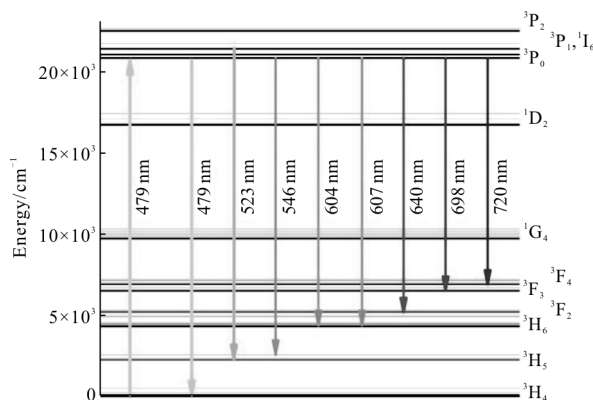


图 3 Pr³⁺:YLF 的能级跃迁

Fig.3 Energy level scheme of selected transitions of Pr³⁺:YLF

实验上得到的高阶 LG 模式和 高阶 HG 模式是通过调整谐振腔的倾斜角和加大驱动电流实现的, 具体表现为: 驱动电流越大, 高阶模越容易输出, 但是具体输出的是高阶 LG 模式还是高阶 HG 模式, 是通过调整谐振腔的倾斜角实现的。在其他参考文献^[9, 16-18]中, 为了获得高阶模输出, 需要在谐振腔内加入相应的元件, 抑制低阶模, 只获得高阶模输出。

拉盖尔-高斯光束的仿真与实验如图 4 所示, 实验图(f)与仿真图(a)大概一致;仿真的 LG 光束输出图如图(b)~(d)所示,其中图(b)~(d)分别是 LG_{0l} 、 LG_{02} 、 LG_{08} ,表示的是 $p=0, l \neq 0$ 角向 LG_{0l} 光束, l 依次为 1, 2, 8, 当 l 取不同数值时,实验图 4(g)~(i)中观测到,当 $l=2$ 时,圆环的内环很小,但是随着 l 逐渐增大至 8 时,圆环的内环逐渐增大,整个光束的半径也随着增大,这与理论模拟图相符。实验图 4(j)是 LG_{16} , 其含义是 $p=1, l=6$ 的常规高阶 LG_{pl} 光束,与模拟图 4(e)基本一致。实验中还观测到,当 l 分别为 1、2 时,输出的 LG 光束圆度较好,光束也比较均匀对称,而当输出光束阶数逐渐增加到 8 时,输出的光束会体现出一定的不均匀性与不对称性,这是因为在实验过程中谐振腔出现了失谐情况。

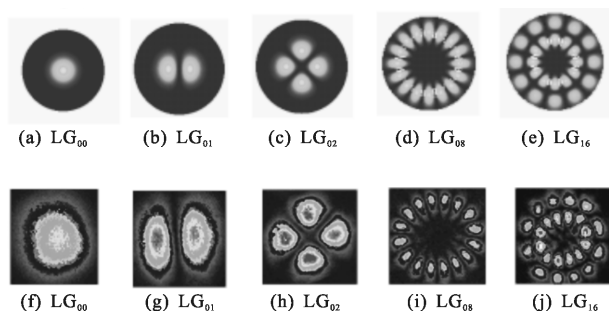


图 4 LG 光束的数值仿真与实验

Fig.4 Simulation and experimental output of LG beams

厄密-高斯光束的仿真与实验如图 5 所示。由图 5 可见,实验结果与数值仿真结果符合得很好。即实验结果(图 5(e)~(h))与仿真结果(图 5(a)~(d))基本一致。

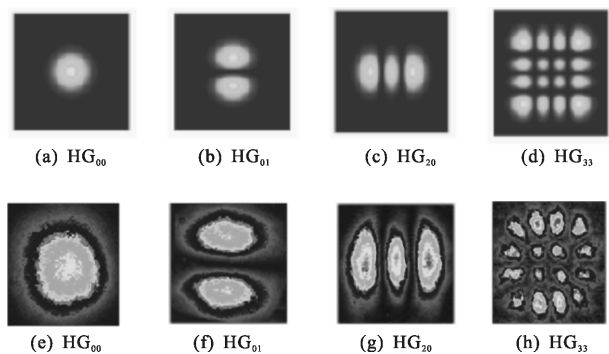


图 5 HG 光束的数值仿真与实验

Fig.5 Simulation and experiment of HG beams

3 结论

文中报道了用蓝光 LD 泵浦激活介质为 Pr:YLF 晶体的激光器。通过控制平凹腔激光谐振腔以及泵浦功率等,可以从激光器中直接输出高阶 LG 模式和高阶 HG 模式。实验发现,泵浦源的驱动电流大小会影响高阶 LG 模式和高阶 HG 模式。驱动电流越大,越容易输出高阶模式;谐振腔的倾斜角会影响高阶模式的输出,最优的倾斜角抑制基模,容易输出高阶模式。在实验研究中,不需要多加额外的器件就能从激光腔里直接输出高阶 LG 模式和高阶 HG 模式。这项研究对获得高阶模具有一定的意义。

参考文献:

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre -Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A Atomic Molecular & Optical Physics*, 1992, 45(11): 8185.
- [2] Gao Chunqing, Zhang Shikun, Fu Shiyao, et al. Adaptive optics wavefront correction techniques of vortex beams [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2017, 46(2): 0201001. (in Chinese)
高春清, 张世坤, 付时尧, 等. 涡旋光束的自适应光学波前校正技术[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0201001.
- [3] Xie G, Li L, Yan Y, et al. Performance metrics for a free-space communication link based on multiplexing of multiple orbital angular momentum beams with higher order radial indices[C]//Lasers and Electro-Optics, IEEE, 2015: 1-2.
- [4] Xie G, Ren Y, Yan Y, et al. Experimental demonstration of a 200 -Gbit/s free-space optical link by multiplexing Laguerre -Gaussian beams with different radial indices [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3447.
- [5] Luo R, Li L, Cui W, et al. Experimental study of diode pumped rubidium amplifier for single higher-order Laguerre-Gaussian modes[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12):13351.
- [6] Noack A, Bogan C, Willke B. Higher-order Laguerre-Gauss modes in (non -) planar four-mirror cavities for future gravitational wave detectors[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 751.
- [7] Shi L, Li J, Tao T, et al. Rotation of nanowires with radially higher-order Laguerre-Gaussian beams produced by computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(26): 6398-6402.
- [8] Bu Jing, Zhang Lichao, Dou Xiujie, et al. Generation and

- application of optical vortices with arbitrary topological charges [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2017, 46(6): 0634001. (in Chinese)
- 步敬, 张莉超, 豆秀婕, 等. 任意拓扑荷光学涡旋的产生及应用[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0634001.
- [9] Naidoo D, Ait-Ameur K, Brunel M, et al. Intracavity generation of superpositions of Laguerre–Gaussian beams[J]. *Appl Phys B*, 2012, 106: 683–690.
- [10] Vaity P, Singh R P. Self-healing property of optical ring lattice[J]. *Opt Lett*, 2011, 36: 2994–2996.
- [11] Woerdemann M, Alpmann C, Esseling M, et al. Advanced optical trapping by complex beam shaping [J]. *Laser Photon Rev*, 2013, 7: 839–854.
- [12] Senatsky Y, Bisson J, Li J, et al. Laguerre–Gaussian modes selection in diode-pumped solid-state lasers [J]. *Opt Rev*, 2012, 19: 201–221.
- [13] Flood C J, Giuliani G, van Driel H M. Preferential operation of an end-pumped Nd: YAG laser in high-order Laguerre–Gauss modes[J]. *Opt Lett*, 1990, 15: 215–217.
- [14] Frauchiger J, Albers P, Weber H P. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped CW Nd:YAG lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28: 1046–1056.
- [15] Huang Y J, Chiang P Y, Liang H C, et al. High-power Q-switched laser with high-order Laguerre–Gaussian modes: application for extra-cavity harmonic generations [J]. *Appl Phys B*, 2011, 105: 385–390.
- [16] Oron R, Danziger Y, Davidson N, et al. Discontinuous phase elements for transverse mode selection in laser resonators[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74: 1373–1375.
- [17] Hasnaoui A, Ait-Ameur K. Properties of a laser cavity containing an absorbing ring [J]. *Appl Opt*, 2010, 49: 4034–4043.
- [18] Chen Y F, Lan Y P, Wang S C. Generation of Laguerre–Gaussian modes in fiber-coupled laser diode endpumped lasers[J]. *Appl Phys B*, 2001, 72: 167–170.
- [19] Arora R K, Lu Z. Graphical study of Laguerre–Gaussian beam modes [J]. *IEE Proc Microwaves, Antennas Propag*, 1994, 141: 145–150.
- [20] Magnus W, Oberhettinger F, Soni R P. Formulas and Theorems for the Special Functions of Mathematical Physics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1966: 508.
- [21] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, et al. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 50–55. (in Chinese)
- 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 50–55.
- [22] Philip Werner Metz, Fabian Reichert, Francesca Moglia, et al. High-power red, orange, and green $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ lasers[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(11): 3193–3196.