

引用格式: ZHANG Feng-chen, HUI Chen-lin, SHU Qi-he, *et al.* Experimental Investigation on High-order Transverse-mode of the Pr:YLF Laser by a Blue Laser-diode Off-axis Pumping[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1014001

张锋宸, 惠沉林, 舒启鹤, 等. 蓝光离轴泵浦 Pr:YLF 激光器及其高阶横模特性实验研究[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1014001

蓝光离轴泵浦 Pr:YLF 激光器及其高阶横模特性 实验研究

张锋宸, 惠沉林, 舒启鹤, 黄彩虹, 龚冬梅, 庄凤江

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要: 采用蓝光二极管(LD)离轴泵浦 Pr:YLF 晶体和谐振腔调控, 开展了直接输出 720 nm 激光的空心光束和高阶横模特性的理论和实验研究. 基于高阶厄米-高斯光束(HG)光强特征理论, 数值模拟了厄米-高斯光束(HG)与拉盖尔-高斯光束(LG)之间的模态转换特性. 实验中, 采用 442 nm 蓝光 LD 作为激光泵浦源, 在紧凑的平凹谐振腔内使激光起振. 通过 LD 离轴泵浦 Pr:YLF 晶体和谐振腔调节手段, 直接获得空心和高阶 HG 模式的 720 nm 激光输出. 同时, 理论分析了 HG 模式相干叠加产生不同空间模态的光强分布, 实验结果证实高阶 HG 光束与理论计算基本一致. 本文方法在粒子操控、光学微加工和光通信等领域具有潜在应用价值.

关键词: Pr:YLF 激光器; 可见光波; 蓝光泵浦; 高阶横模; 固体激光

中图分类号: TN248.1; O434.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204910.1014001

Experimental Investigation on High-order Transverse-mode of the Pr:YLF Laser by a Blue Laser-diode Off-axis Pumping

ZHANG Feng-chen, HUI Chen-lin, SHU Qi-he, HUANG Cai-hong, GONG Dong-mei,
ZHUANG Feng-jiang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: The direct generation of the visible high-order transverse-mode laser was present by employing an off-axis pumping and cavity control in a diode end-pumped Pr:YLF laser. The detailed numerical analysis was proposed based on the intensity characteristic theory about the High-order Hermite-Gaussian (HG) beam and the coherent superposition of different HG amplitudes and phases. In our setup, a blue LD was served as an end-pumped source with a pump wavelength of 442 nm, and a compact plano-concave cavity was designed for lasing. For directly obtaining hollow and high-order HG mode 720 nm laser outputs, we manipulate the resonator of the Pr:YLF laser by employing an efficient off-axis diode-pumping. The experimental results confirmed that the high-order HG beams are generally consistent with the theoretical calculations. In this paper, we experimentally demonstrated an approach for generating the hollow and high-order (HG) mode 720 nm laser beams by manipulating laser modes inside the cavity. Further researches will focus on obtaining higher energy high-order transverse-mode laser outputs, and the method in this paper has potential in the fields of optical manipulation, optical micromachining, and optical communications.

Key words: Pr:YLF laser; Visible light; Blue laser-diode pumping; High-order Hermite-Gaussian(HG)

基金项目: 国家自然科学基金(No.61505058)

第一作者: 张锋宸(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为固体激光技术及其应用等. Email: zfchen0212@163.com

导师(通讯作者): 庄凤江(1986-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为全固态激光及超快激光技术等. Email: fjzhuang@gmail.com

收稿日期: 2020-06-16; 录用日期: 2020-08-06

<http://www.photon.ac.cn>

beams; Solid-state laser

OCIS Codes: 140.3300; 140.3480; 140.7300; 140.5680

0 引言

高阶横模激光,因其特殊的光场特性分布,在激光冷却、光学捕获、流体物理等方面具有重要的物理意义和技术应用价值,是国内外光场调控研究的主要热点之一.近些年来,随着人们对可调谐涡旋光束的研究日趋成熟且不断深入,利用像散光学系统实现厄米-高斯(Hermite-Gaussian, HG)模式的干涉叠加是激光腔外合成涡旋光束的主要技术之一.常用采用螺旋相位板^[1]、计算全息图^[2]或模式转换法^[3]等相位元件来调节光的波前,经过相位调制后合成携带轨道角动量的拉盖尔-高斯(Laguerre-Gaussian, LG)模式.目前,基于像散方式产生的模式个数是有限的,而通过激光谐振腔内调节激发本征模式具有高效紧凑、简单丰富的结构优点.因此,直接产生空心涡旋光束和高阶横模光束,受到研究人员的广泛重视^[4].SENATSKY Y等在平谐振腔内插入短聚焦强球差平凸透镜实现从低阶到高阶径向指数 $p=0\sim 12$,角向指数 $l=0\sim 28$ 多种高阶LG模态的稳定输出^[5],SHEN Y等采用离轴泵浦结构实现了高阶厄米-高斯光束的稳定输出^[6].高阶横模,尤其是高阶厄米-高斯模式,经过干涉叠加或相干合成后可获得具有环形空间结构且每个光子均携带 $\pm l\hbar$ 的轨道角动量的涡旋光束,这种具有波前螺旋相位和携带轨道角动量的光束揭示了宏观物理光学和微观量子光学之间的微妙联系^[7].这些独特的物理特性,在纳米制造、非线性光学和光通信等领域展现出一系列新应用^[8-10].

在稀土激活离子中,三价镨离子(Pr^{3+})具有丰富的能级结构,能够用于产生多条位于可见光波段的跃迁光谱线.由于氟化物基质具有较低的声子能量,可以有效地降低非辐射弛豫的概率,使得以该基质掺杂获得的激光晶体拥有较低的泵浦阈值和较高的发光效率.其中,掺杂镨离子氟化钇镨激光晶体($\text{Pr}:\text{YLF}$)是目前研究最为广泛的三价 Pr^{3+} 掺杂的激光晶体. $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体拥有三个比较强的吸收峰分别位于444、469、479 nm等蓝光波段.随着蓝光二极管性能不断成熟完善及商品化,采用蓝光LD作为全固态激光器的泵浦源获得了广泛的应用.在442 nm的蓝光LD泵浦下, $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体存在五个较强的主发射峰,分别为绿色(523 nm)、橙色(604 nm)、红色(640 nm)、深红色(698 nm)和深红色(720 nm)^[11]等.近几年来,基于 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体的固体激光器研究成为当前激光领域研究的一个热点问题.其中,HIROKI T等采用 $\text{Cr}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体首次实现 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 输出640 nm可见光被动调Q实验^[12],IIJIMA K等通过半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)得到最大输出功率65 mW重复频率108 MHz波长640 nm的激光脉冲^[13],MA Y等使用 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体在泵浦功率3.16 W时实现640 nm和607 nm双波长涡旋光束的输出,其输出功率分别为808 mW和211 mW^[14];在连续激光器方面,厦门大学王凤娟等实现了522 nm和640 nm连续激光输出,其斜效率分别为37.1%和47.5%^[15].但是,目前关于 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 的深红色720 nm激光研究较少,其在生物医学领域具有广泛应用,包括血氧饱和度和血流速度检测等^[16].进一步,利用非线性晶体倍频可以获得其二次谐波波长为360 nm.由于其二次谐波为紫外激光,具有波长短、加工精度高、冷加工等特性,在微细制造中具有独特优势,能够有效提高激光制造的精度.由于720 nm发射峰对应的受激发射截面较小^[17-18],需要抑制其它可见波段发射谱线,才能有效地获得720 nm激光输出.本文主要基于三价镨离子 ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ 的能级跃迁,开展 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 晶体的深红色720 nm激光研究.通过光学谐振腔设计,有效地抑制其它可见波段发射谱线,获得了720 nm激光输出.同时,本研究采用离轴泵浦结构从谐振腔内直接产生720 nm一阶LG模式.对HG模式的相干叠加产生的不同空间模态进行了理论分析,并通过改变泵浦光位置和调整谐振腔倾角,得到丰富的横模光斑图.

1 实验装置及荧光谱

本激光实验装置主要由蓝光LD泵浦模块、聚焦透镜f1、输入镜M1、 $\text{Pr}:\text{YLF}$ 激光晶体和输出耦合镜M2组成,如图1所示.实验研究采用Nichia蓝光二极管作为激光泵浦源,输出波长为442 nm,通过风冷方式对泵浦光源进行冷却,最高泵浦输出功率约3.5 W.蓝光LD经过模块内部的准直透镜,整形为长宽比约为1:5的输出光斑,再通过30 mm焦距的平凸透镜聚焦入射到激光晶体前表面. $\text{Pr}:\text{YLF}$ 激光晶体端面抛光,镀有

400~720 nm 增透膜, Pr^{3+} 的掺杂浓度约为 0.5at.%, 尺寸为 $3 \times 3 \times 4 \text{ mm}^3$. 晶体表面用铝箔包裹置于冷却热沉内, 通过半导体制冷片 (Thermo Electric Cooler, TEC) 温度控制器将温度控制在 20.0°C .

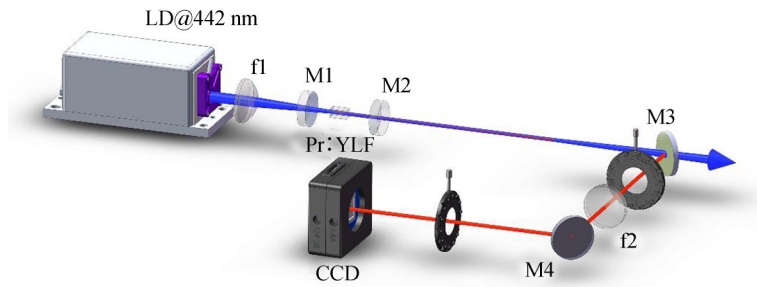


图1 蓝光泵浦Pr:YLF激光实验装置

Fig.1 Experimental setup of blue laser diode pumped Pr:YLF laser

三价镨离子(Pr^{3+})吸收泵浦光子能量后处于多重态能级 $^3\text{P}_j$ 上能级, 向较低的 $^3\text{F}_j$ 能级和 $^3\text{H}_j$ 能级跃迁并向外辐射能量, Pr^{3+} 激光能级跃迁图如图2所示, 具有五个典型的能级跃迁. 在蓝光LD泵浦Pr:YLF晶体时, 采用高精度光谱仪(Ocean optics, HR4000)测量Pr:YLF晶体的荧光曲线, 如图3所示. Pr:YLF晶体存在四个较强的主发射峰, 分别为 $604.6 \text{ nm} (^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_6)$ 、 $639.4 \text{ nm} (^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_2)$ 、 $697.1 \text{ nm} (^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_3)$ 和 $720.0 \text{ nm} (^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{F}_4)$. 由图3可见: 荧光最强位于 604.6 nm 和 639.4 nm 处, 谱线强度约为 720.0 nm 峰值的 2.7 倍; 720.0 nm 谱线强度约为 697.1 nm 谱线强度的 1.4 倍. 由于形成 604.6 nm 的激光跃迁 $^3\text{P}_0 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 中存在 $^3\text{H}_6 \rightarrow ^1\text{D}_2$ 的基态重吸收损耗^[19], 使得在泵浦功率较低时相较于深红色 720 nm 难以形成稳定的激光振荡. 但是, 697.1 nm 谱线距离 720.0 nm 谱线较近, 镜片膜系设计较为敏感. 要想获得单一波长的 720 nm 基频光, 需要抑制增益较强的 604.6 nm 、 639.4 nm 和临近的 697.1 nm 谱线. 通过光学膜系设计控制谐振腔腔镜在 604.6 nm 和 639.4 nm 处的透过率大于 90% , 可以简单高效地抑制两条谱线的振荡. 虽然靠近 720.0 nm 的 697.1 nm 谱线处实现高透难度很大, 但是 697.1 nm 荧光谱线强度较弱. 通过控制 697.1 nm 的透过率大于 720.0 nm 处, 可以保证 720.0 nm 具有更高的腔内增益, 利于优先振荡, 以获得纯净的 720.0 nm 激光输出.

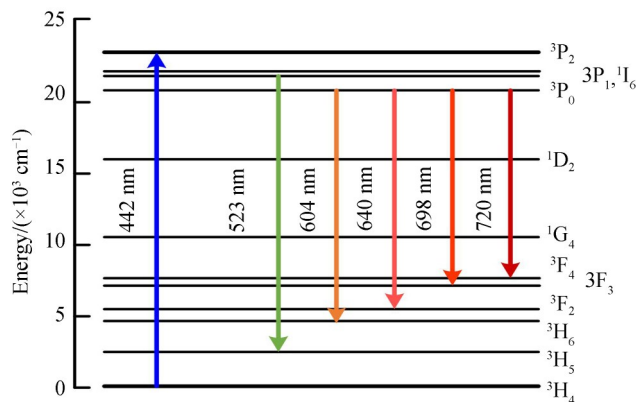


图2 Pr:YLF晶体能级跃迁图

Fig.2 Energy level scheme of Pr:YLF with transitions

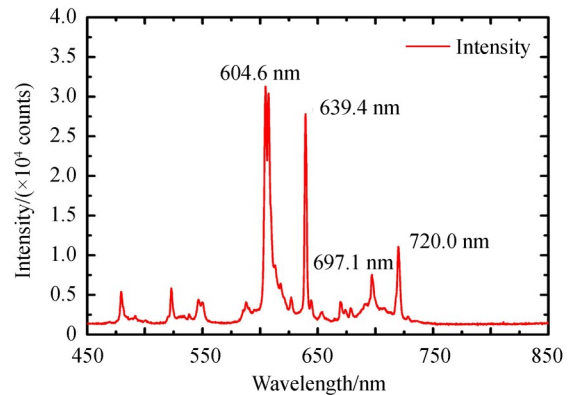


图3 谐振腔内Pr:YLF晶体荧光光谱

Fig.3 Fluorescence spectrum of Pr:YLF crystal in cavity

实验装置中, 激光输入镜M1为平面镜表面镀有 $700 \sim 850 \text{ nm}$ 全反膜 ($R > 99.9\%$) 和 $400 \sim 670 \text{ nm}$ 高透膜 ($T > 95\%$). 激光输出镜M2为曲率半径 $R = 150 \text{ mm}$ 的平凹镜, 其表面镀有 $710 \sim 800 \text{ nm}$ 高反膜 (T 约为 0.3%) 和 $430 \sim 450 \text{ nm}$ 高透膜 ($T > 97\%$), 以保证 720 nm 优先振荡. 整个平凹谐振腔长度约为 48 mm .

2 实验结果与分析

根据前述实验装置开展Pr:YLF激光实验研究, 由于Pr:YLF激光晶体长度较短, 泵浦吸收率约为 50% . 通过提高LD泵浦功率, 最终获得稳定的基频激光输出, 在泵浦功率 3 W 时, 获得了输出功率约为 5 mW

的 720 nm 基频光. 实验获得的基频光, 通过分光镜片 (M3 和 M4) 反射后, 有效地减少泵浦蓝光后, 通过平凸透镜 f2 将基频光聚焦于光束分析仪 (Spiricon CCD) 中, 记录光斑实验数据. 其中, 插入光阑有效地减少背景杂散光的影响. 图 4 为 Pr:YLF 基频光的精确谱线, 位于 720.75 nm, 经过激光光束分析仪测量和分析得到, 输出 720.75 nm 激光的 M2 因子: X 方向优于 1.4; Y 方向优于 1.2. 其中, 插图显示基频光的光斑分布, 呈现良好的基模高斯分布. 这是由于良好的泵浦光斑模式匹配, 且平凹腔结构具有很好的选模能力和提高增益介质利用率的能力, 易于获得良好模式特征.

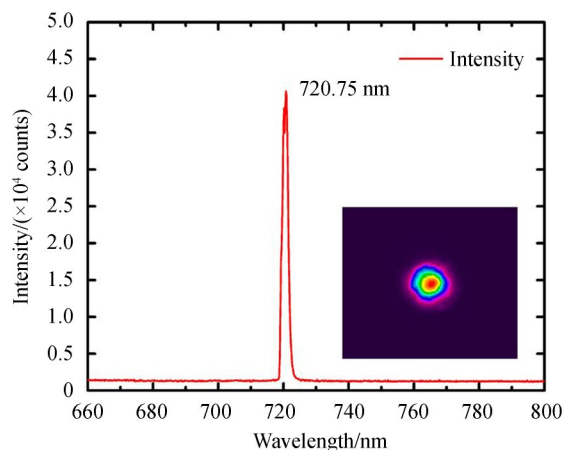


图 4 720 nm 激光光谱
Fig.4 Laser spectrum of 720 nm

为进一步获得 720 nm 高阶横模激光, 本实验研究通过调节聚焦透镜 f1 的倾角, 使泵浦光偏离主轴. 离轴泵浦示意图, 如图 5 所示, 将引入泵浦模式失配量. 调整输出镜 M2 的俯仰和偏摆量, 调整角度范围约为 $\pm 3^\circ$, 镜架整圈调整时的灵敏度为 $\pm 0.39^\circ$, M2 俯仰和偏摆角度正方向, 如图 6 虚线所示.

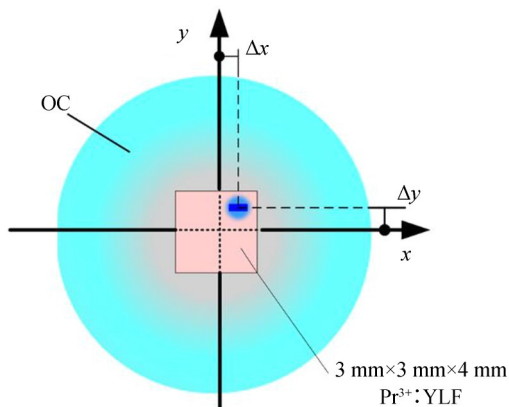


图 5 离轴端面泵浦示意图
Fig.5 Schematic diagram of off-axis end pump

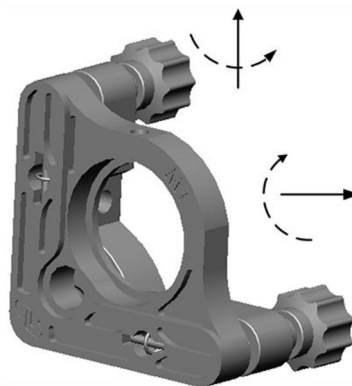


图 6 M2 调整俯仰和偏摆角度示意图
Fig.6 Schematic diagram of adjusting M2 pitch and yaw angle

平凹谐振腔内振荡的所有模式中, 低阶横模主要集中分布在腔轴附近. 当泵浦光偏离量 Δx (Δy) 较小时, 谐振腔内振荡光束与几何腔轴之间的偏离程度较小, 对应的低阶横模具有较高的模式匹配度, 而低阶横模具有良好的方向性, 损耗低, 所以在模式竞争中易于起振. 高阶横模在谐振腔内的传播方向与几何腔轴之间的夹角较大, 在传播过程中的几何偏折损耗较大, 所以泵浦光偏离晶体中心越远, 激发的高阶模式越多, 所需的泵浦阈值越高. 在旁轴近似的条件下, 求解亥姆霍兹方程得到的“光束”解包括: 基模高斯光束和高阶 HG_{nm} 和 LG_{nm} 等数学表达式^[20]. 当谐振腔内模式数量大于 2 时, 多种模式的相干叠加使得模态间的相位发生改变^[21], 结果表现为输出光束呈现空心 LG 模式, 如式 (1); 沿 45° 或 135° 分布的“两瓣”模式, 如式 (2) 所示.

$$LG_{nm}(x, y, z) = \sum_{k=0}^N i^k b(n, m, k) HG_{N-k,k}(x, y, z) \quad (1)$$

$$HG_{nm}\left(\frac{x+y}{\sqrt{2}}, \frac{x-y}{\sqrt{2}}, z\right) = \sum_{k=0}^N b(n, m, k) HG_{N-k,k}(x, y, z) \quad (2)$$

式中,

$$N = n + m \quad (3)$$

$$b(n, m, k) = \left[\frac{(N-k)! k!}{2^N n! m!} \right]^{1/2} \times \frac{1}{k!} \frac{d^k}{dt^k} \left[(1-t)^n (1+t)^m \right]_{t=0} \quad (4)$$

实验中,调节M2镜俯仰和偏摆角度使输出激光为基模高斯光束.当M2镜的俯仰角度为 0.078° 时,振荡光束位于腔轴附近,谐振腔输出稳定的 HG_{01} 模式,如图7(b)所示.在激光束稳定输出后,调节M2镜偏摆角度至 -0.065° 时,谐振腔输出沿 45° 分布的“两瓣”模式,如图7(a)所示.此外,为了获得图7(a)的对称模式,调节M2镜至 0.055° 时,实现了沿 135° 分布的“两瓣”模式,如图7(c)所示.实验结果表明,调整M2镜偏摆角度不同,但空间模式演化过程遵循对称性原则.

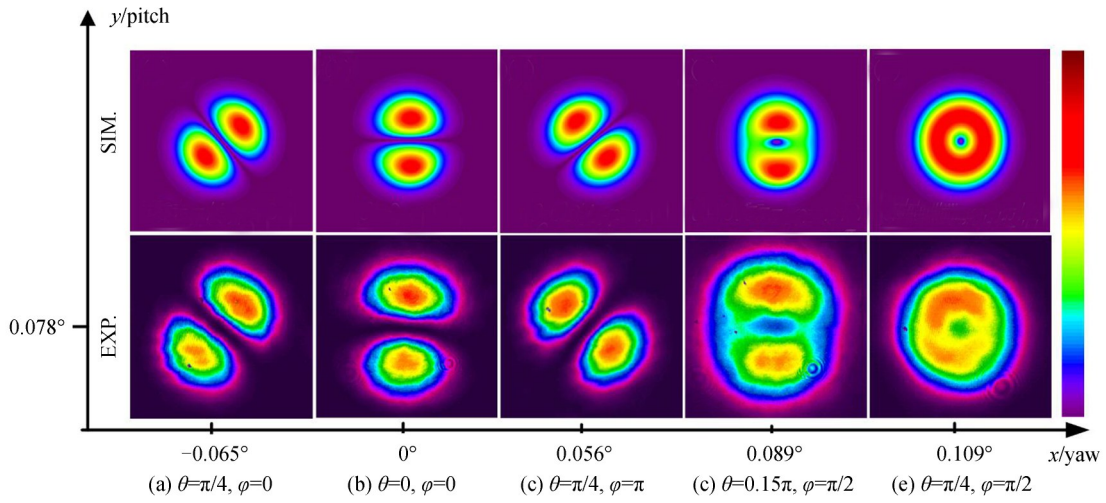


图7 高阶横模理论仿真模式及不同输出镜位置实验模式

Fig.7 Theoretical HG modes and experimental spatial modes for different OC positions

离轴泵浦破坏了谐振腔的对称性引起模式重叠效率不同是产生此类“两瓣”形状光斑的主要原因.调节M2镜的偏摆角度实质上分别改变了腔内 HG_{10} 和 HG_{01} 的强度,不同强度的HG模式相干叠加赋予了输出光束不同的相位信息,构成谐振腔内输出光斑图的多样性,合成的空间模式符合数学表达式为

$$HG_{out}(\theta, \varphi) = \cos\theta HG_{01} + \exp(i\varphi) \sin\theta HG_{10} \quad (5)$$

式中, θ 表示每个模式的权重,与泵浦功率和谐振腔对称性相关, φ 表示模态间相位.当 HG_{10} 和 HG_{01} 模式强度相等即 $\theta=\pi/4$ 时,此时输出沿对角线分布(45° 和 135°)的“两瓣”模式,对应的相位为 $\varphi=0$ 和 $\varphi=\pi$,仿真图如图7(a)~(c)所示.在图7(c)的基础上,继续沿正方向增大M2镜的偏摆角度,在 0.089° 时获得垂直分布的两瓣模式,如图7(d)所示,结合理论模拟图,分析 HG_{10} 模式强度较弱是产生此类现象的主要原因.此外,微调M2镜的偏摆角度至 0.109° 使 HG_{10} 和 HG_{01} 模式强度近似相等 $\theta=\pi/4$ 时,可在腔内合成一阶LG空心光束($\varphi=\pi/2$),如图7(e)所示.

此时LG空心光束可以用强度相等的 HG_{10} 和 HG_{01} 相干叠加产生相位来表示^[22],符合关系式(6).

$$LG_{0,\pm 1} = 1/\sqrt{2} (HG_{01} \pm iHG_{10}) \quad (6)$$

结合实验光斑图与模拟光斑图分析, HG_{10} 和 HG_{01} 模式强度主要影响合成光斑图的均匀性,而输出结果为空心光束或者“两瓣”模式主要受相干叠加后产生的相位控制.因此,离轴泵浦激发的一系列的高阶模态可以通过HG的相干叠加来进行数值模拟.同理,该装置产生的任何空间模态也可以通过计算机生成全息图

调制高斯光束来实现.

随着M2镜俯仰(偏摆)角度的增加,可获得的高阶HG模式也随之增多,如图8所示.增大M2镜偏摆角度可选模 $m \neq 0, n = 0$ 沿 x 方向的高阶HG模式;增大M2镜俯仰角度可选模 $m = 0, n \neq 0$ 沿 y 方向的高阶HG模式.由于聚焦到激光晶体的泵浦光斑为长宽比1:5的长方形光斑,在进行泵浦光离轴操作时,水平方向的离轴距离 Δx 小于垂直方向离轴距离 Δy ,导致沿 x 方向分布的低阶HG模式质量上远小于同阶沿 y 方向分布的HG模式.在输出沿 y 方向HG阶数大于6时,随着俯仰角度的增加,激光输出光斑对称性逐渐下降.其原因为高阶模式在传播时几何偏折损耗较大和谐振腔出现一定的失谐现象,可以通过优化泵浦光光束改善高阶模光强分布.在有限地离轴泵浦条件下,实验沿 x 方向最高可获得HG₉₀模式,沿 y 方向最高可获得HG₀₈模式.增大泵浦光离轴距离和提高泵浦功率可以有效地获得更多高阶模态,因此进一步的研究将致力于优化深红色720 nm激光器结构和输出性能,解析高阶横模相干合成的物理模型等.

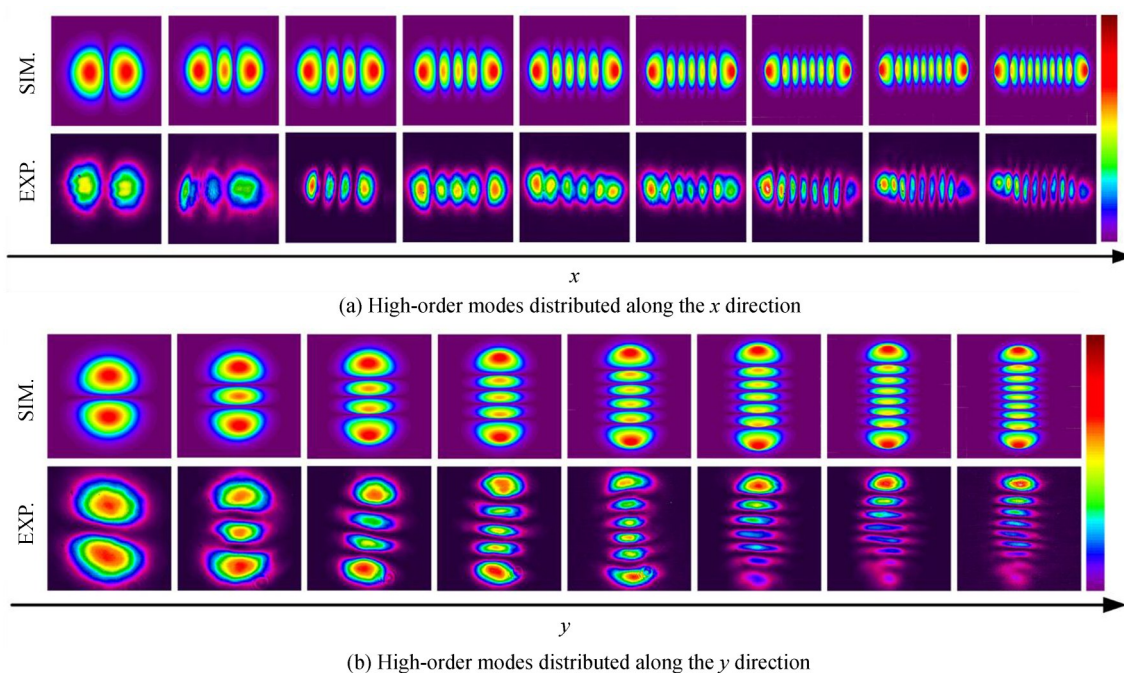


图8 高阶HG模式的数值仿真和实验模态图

Fig.8 Simulation and experimental spatial distributions for high-order modes.

3 结论

本文报道了采用蓝光LD泵浦Pr:YLF晶体,通过离轴泵浦和谐振腔调控,直接获得了720 nm激光的空心光束和高阶横模.对高阶HG模式的光场分布和相干叠加理论进行了详细地数值模拟和分析;并在实验中采用离轴泵浦实现了高阶HG模式和一阶HG相干叠加的各种光斑图,理论分析结果与实验结果基本一致.实验表明,泵浦光离轴的距离直接影响输出高阶HG模式的数量,泵浦光在激光晶体上偏离几何腔轴的距离越远,谐振腔所激发的高阶HG模式越多.限制模态阶数的主要原因是激光晶体的尺寸大小和泵浦功率.本实验研究,不需要借助额外的相位调节元件,通过谐振腔控制直接输出空心光束和高阶HG模式;其特殊的电场分布和卓越的光束特性,使光学系统的性能得到明显地提升,在粒子操控和光学微加工等领域具有潜在的应用.

参考文献

- [1] WU Wen-bing, SHENG Zong-qiang, WU Hong-wei. Design and application of flat spiral phase plate[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(5): 054102.
吴文兵, 圣宗强, 吴宏伟. 平板式螺旋相位板的设计与应用[J]. *物理学报*, 2019, **68**(5): 054102.
- [2] HUANG Su-juan, ZHANG Jie, SHAO Wei, *et al.* Experimental study on optical vortex array with high quality[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8): 0826002.

- 黄素娟,张杰,邵蔚,等. 高质量光学涡旋阵列的实验研究[J]. 光子学报, 2017, **46**(8): 0826002.
- [3] SHEN Y, MENG Y, FU X, *et al.* Dual-wavelength vortex beam with high stability in a diode-pumped Yb:CaGdAlO₄ laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, **15**(5): 55803.
- [4] HUANG X, XU B, CUI S, *et al.* Direct generation of vortex laser by rotating induced off-axis pumping[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, **24**(5): 2814789.
- [5] THIRUGNANASAMBANDAM M P, SENATSKY Y, UEDA K. Generation of very-high order Laguerre-Gaussian modes in Yb:YAG ceramic laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, **7**(9): 637-643.
- [6] SHEN Y, MENG Y, FU X, *et al.* Wavelength-tunable Hermite-Gaussian modes and an orbital-angular-momentum-tunable vortex beam in a dual-off-axis pumped Yb:CALGO laser[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(2): 291-294.
- [7] SHEN Y, WANG X, XIE Z, *et al.* Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities[J]. *Light-Science & Applications*, 2019, **8**(1): 1-29.
- [8] QIU C, YANG Y. Vortex generation reaches a new plateau[J]. *Science*, 2017, **357**(6352): 645.
- [9] KONG F, ZHANG C, BOUCHARD F, *et al.* Controlling the orbital angular momentum of high harmonic vortices[J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1): 14970.
- [10] ZHU L, WANG A, CHEN S, *et al.* Orbital angular momentum mode groups multiplexing transmission over 2.6-km conventional multi-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(21): 25637-25645.
- [11] ESTEROWITZ L, BARTOLI F J, ALLEN R E, *et al.* Energy levels and line intensities of Pr³⁺ in LiYF₄[J]. *Physical Review B*, 1979, **19**(12): 6442-6455.
- [12] HIROKI T, RYOSUKE K, KODAI I, *et al.* Saturation of 640-nm absorption in Cr³⁺:YAG for an InGaN laser diode pumped passively Q-switched Pr³⁺:YLF laser[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(15): 19382-19395.
- [13] IJIMA K, KARIVAMA R, TANAKA H, *et al.* Pr³⁺:YLF mode-locked laser at 640 nm directly pumped by InGaN-diode lasers[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(28): 7782-7787.
- [14] MA Y, VALLES A, TUNG J, *et al.* Direct generation of red and orange optical vortex beams from an off-axis diode-pumped Pr³⁺:YLF laser[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(13): 18190.
- [15] WANG Feng-juan, LIU Zhe, XU Bin, *et al.* Blue laser diode pumped Pr³⁺:YLF visible lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(12):1202002.
王凤娟,刘哲,徐斌,等. 蓝光激光二极管抽运Pr³⁺:YLF红绿可见光激光器[J]. 中国激光, 2013, **40**(12):1202002.
- [16] FENG Y, DENG H, CHEN X, *et al.* Blood oxygenation and flow measurements using a single 720 nm tunable V-cavity laser[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, **8**(8): 3516.
- [17] LUO S, YAN X, CUI Q, *et al.* Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9nm[J]. *Optics Communications*, 2016, **380**:357-360.
- [18] HE M, CHEN S, NA Q, *et al.* Watt-level Pr³⁺:YLF deep red laser pumped by a fiber-coupled blue LD module or a single-emitter blue LD[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **18**(1):011405.
- [19] GUN T, METZ P, HUBER G. Power scaling of laser diode pumped Pr³⁺:LiYF₄ cw lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(6): 1002-1004.
- [20] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, HELO V, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, **96**(1-3): 123-132.
- [21] GALVEZ E J, CRAWFORD P R, SZTUL H I, *et al.* Geometric phase associated with mode transformations of optical beams bearing orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(20): 203901.
- [22] ONEIL A T, COURTIAL J. Mode transformations in terms of the constituent Hermite-Gaussian or Laguerre-Gaussian modes and the variable-phase mode converter[J]. *Optics Communications*, 2000, **181**(1): 35-45.