

文章编号:1005-4642(2022)04-0036-05

基于球差选模的激光器横模特性实验

盛 泉^{a,b}, 钟 凯^{a,b}, 李吉宁^{a,b}, 徐德刚^{a,b}, 史 伟^{a,b}, 姚建铨^{a,b}

(天津大学 a. 精密仪器与光电子工程学院; b. 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要:开发了面向光电子专业高年级本科生的基于球差选模的固体激光器横模特性实验系统,在激光谐振腔内使用短焦距透镜引入球差,使具有不同光斑尺寸的各阶横模的空间光路发生分离,从而便捷地实现对不同阶数横模的选择和切换. 该实验系统综合激光原理中的腔模理论和几何光学中的像差理论,学生可以直观地观察到透镜的球差对激光器工作状态的影响和稳定的高阶横模图像;通过定性和定量分析,直接体现球差、激光器的模式匹配、谐振腔的稳区、激光的横模等重要知识点及其对激光器工作状态的影响. 同时该实验提高了学生在激光器调试准直和工具软件使用方面的实践技能.

关键词:固体激光器;球差;激光横模

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.04.007

实践能力是工程人才培养的核心要素之一. 在新工科建设的背景下,工程教育需要对实践教学进行更深层次地推进. 光电子类专业以激光技术为基础,将光学、激光、电子学和计算机等学科互相渗透,是未来信息技术发展的核心支撑. 高性能的激光光源和光学系统在国防、前沿科学装置和先进工业制造等领域中不可或缺,其中涉及的激光原理和工程光学(几何光学)是光电子和光电信息相关专业高年级本科生的专业核心课程,激光器腔模理论和光学系统像差理论为其中关键知识点^[1-5]. 目前开展的关于激光器横模特性的实验教学,大多集中于激光光束质量测量等内容上. 少数教学和科研单位设计了产生和观察高阶横模的实验,但由于高阶横模选择方法多基于腔内插入头发丝或者将谐振腔失调等损耗手段,实验现象复现不易控制,也无法从理论上定量分析和验证不同横模的起振条件^[6-8],难以体现激光的横模选择、谐振腔稳区以及模式匹配等重要知识点;另一方面,激光/光电子专业的学生往往对像差和光学设计相关知识运用较少,这不利于知识的交叉贯通和实际应用^[3-5]. 为此,本文将前沿研究成果与教学实践相结合,设计开发了基于球差

选模的激光器横模特性实验系统,利用腔内透镜球差产生不同阶数的 LG 模式,让学生直接观察到透镜的球差对激光器工作状态的影响和稳定的高阶横模图像;通过定性和定量分析,直接体现球差、激光器的模式匹配、谐振腔的稳区、激光的横模等重要知识点及其对激光器工作状态的影响,提高学生对知识的综合运用能力.

1 实验系统设计

图 1 所示为基于球差选模的激光器横模特性实验系统的光路示意图,其基本结构为端面泵浦的固体激光器. 泵浦源采用光纤耦合输出的半导体激光器(LD),经光纤端面出射的泵浦光由耦合透镜组聚焦进入激光晶体(LC),激光谐振腔由平凹的激光全反镜 M_1 和平平的激光输出镜 M_2 构成. 腔内加入长焦距透镜 L_1 和短焦距透镜 L_2 ,前者距离激光全反镜 M_1 的距离 d_1 约等于其焦距,使透镜 L_1 和 L_2 之间的光束为大光斑尺寸的准直光;后者距离激光输出镜 M_2 的距离 d_2 约等于其焦距,起到增大系统球差的作用. M_2 置于由螺旋测微器驱动的位移台上,可精细微调 M_2 与 L_2 之间的间距 d_2 .

收稿日期: 2021-09-03; **修改日期:** 2021-11-09

基金项目: 天津大学研究生创新人才培养项目(No. YCX202031)

作者简介: 盛 泉(1985—),男,山东禹城人,天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授,博士,主要从事激光技术研究. E-mail: shengquan@tju.edu.cn

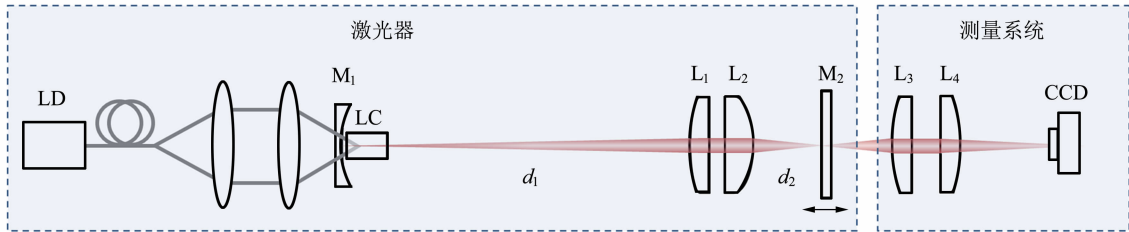
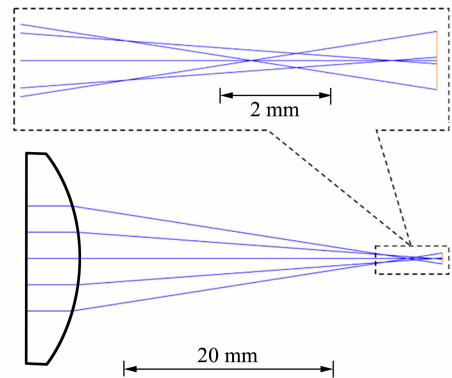


图1 实验系统光路示意图

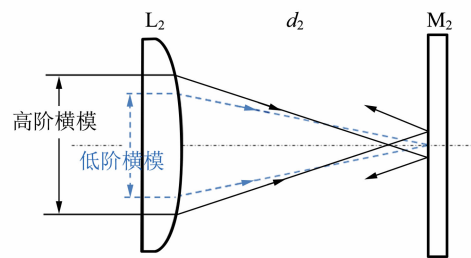
根据激光原理中的腔模理论,激光在腔镜处的波前曲率半径必须与腔镜的曲率半径一致才能实现自再现,因此腔内振荡光束的束腰必须严格控制在平面输出镜 M_2 处。由于不同阶数的激光横模具有不同的光斑尺寸,根据几何光学中的像差理论,在短焦距透镜 L_2 引入的球差作用下,各阶横模经 L_2 聚焦后的实际焦点位置不同。

图2(a)所示为利用光学设计软件 Zemax 计算得到的实验系统中透镜 L_2 (焦距为 33.9 mm) 的球差。小尺寸的基模高斯光束 TEM_{00} 模的实际焦点非常接近透镜的理论焦点;而阶数越高的模式光斑尺寸越大,在经过透镜 L_2 时因受到更强的会聚作用,其实际焦点与透镜的理论焦点或 TEM_{00} 模的实际焦点相比更接近 L_2 。因此,当 M_2 置于透镜 L_2 的理论焦点处时, TEM_{00} 模将得到有效的反馈,而高阶模因为几何偏折损耗逸出谐振腔, TEM_{00} 基模激光振荡如图2(b)所示;微调 M_2 的位置使 d_2 略小于透镜 L_2 的焦距,则某一高阶模的实际焦点落在 M_2 的反射面上,得到有效反馈起振(在本实验的柱对称光路结构中为拉盖尔-高斯 LG_{pm} 模式, p 和 m 分别为径向和角向指数),同时其他模式被抑制。 M_2 相对 L_2 理论焦点的偏离量越大(d_2 越小),激光横模的阶数越高,如图2(c)所示,这样可实现对激光器横模的选择和切换。选择掺杂原子分数为0.5%、长为5 mm的a切割 $Nd:YVO_4$ 晶体作为激光晶体,激光输出波长为 1 064 nm;波长为 878.6 nm 的LD作为泵浦源,泵浦光斑半径为 $100\ \mu m$,泵浦功率为1 W;透镜 L_1 和 L_2 的焦距分别为 150 mm 和 33.9 mm, M_1 镜的曲率半径为 50 mm, d_1 为 155 mm。经 M_2 镜输出的激光经腔外的透镜 L_3 和 L_4 准直、聚焦后进入 CCD 相机,分别将 CCD 相机置于 L_4 附近和焦点处,观察激光的近场和远场光斑。上述器件中 M_1 镜镀 878.6 nm 增透、

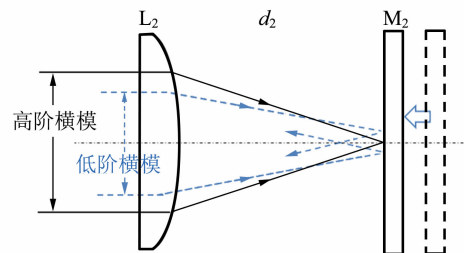
1 064 nm高反膜, M_2 镜镀 1 064 nm 透过率为 10%的部分透过膜,其他腔内器件均镀 1 064 nm 增透膜。关于球差对激光器工作状态的影响及对横模的选择作用的详细讨论,可参见文献[9-11]。



(a) 透镜的球差



(b) 利用球差选择低阶横模



(c) 利用球差选择高阶横模

图2 透镜的球差及利用球差选择低阶和高阶横模示意图

2 理论分析

高阶 LG 横模的光斑半径为

$$W_{pm} = w_0 \sqrt{2p + |m| + 1},$$

其中, w_0 为 TEM_{00} 基模高斯光束的光斑半径, 可通过计算谐振腔的传输矩阵 ($ABCD$ 矩阵) 得到; p 和 m 分别为高阶横模的径向指数和角向指数.

由于激光晶体置于透镜 L_1 的前焦点附近, L_1 与 L_2 之间的光束近似为准直的平行光. 指导学生使用光学设计软件 Zemax 计算得到不同尺寸的光束经过透镜 L_2 聚焦后的球差量, 也即光束边缘光线的实际焦点位置相对透镜理论焦点位置的偏离量, 如图 3 所示.

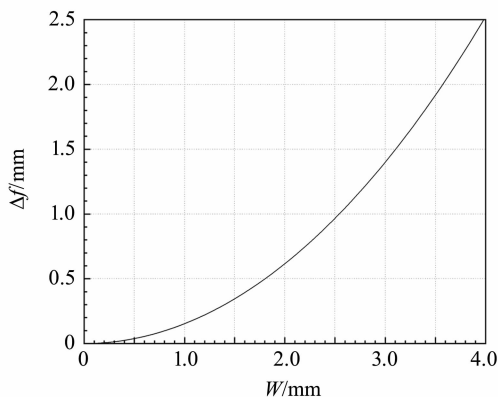


图 3 利用 Zemax 软件计算得到的球差量与光斑半径的关系曲线

可以看出, 光束尺寸越大, 球差越严重, 球差导致光束的实际焦点与透镜的理论焦点的偏离也越明显. 不同阶数的模式具有不同的光斑尺寸, 也就有不同的实际焦点. 例如, 根据上述谐振腔参量, 经 $ABCD$ 矩阵计算得到透镜 L_2 处的基模光斑半径 w_0 约为 $600 \mu\text{m}$, 这样 $\text{LG}_{0,33}$ 模式的光斑半径 $W_{0,33}$ 约为 3.5 mm ; 由图 3 可知, 半径为 3.5 mm 的光束经过 L_2 聚焦后, 球差导致的实际焦点偏移量约为 1.9 mm . 因此理论上只要将输出镜 M_2 从理论焦点处向 L_2 方向移动 1.9 mm , 就能使激光器的横模从 TEM_{00} 切换为 $\text{LG}_{0,33}$.

3 典型实验现象和讨论

图 4~5 为 1 W 泵浦功率下, 微调 M_2 位置, 当初始位置偏移量 δ 不同时, 分别在透镜 L_4 后接近 L_4 处和 L_4 焦点处记录的近场和远场光斑.

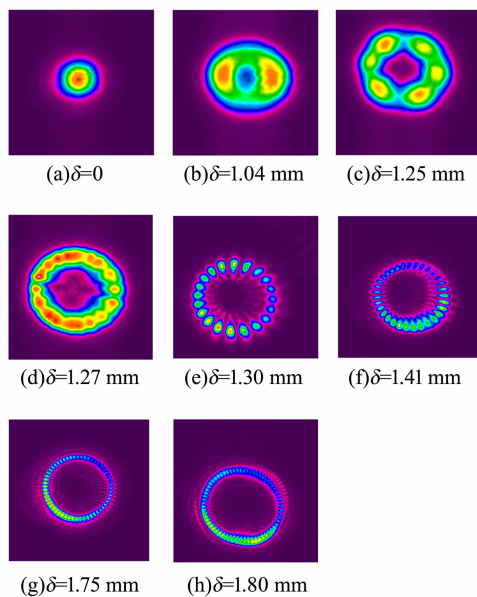


图 4 输出镜 M_2 置于不同位置时的激光横模(近场)

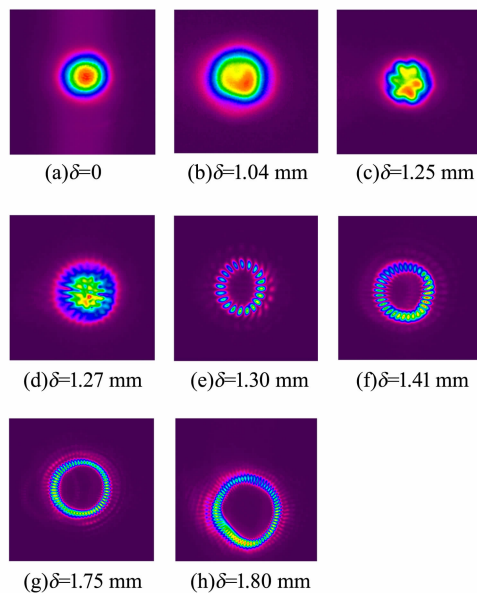


图 5 输出镜 M_2 置于不同位置时的激光横模(远场)

如理论分析预期, 当 d_2 接近透镜 L_2 的理论焦距时, 激光器以基模 TEM_{00} 运转, 移动位移台上 M_2 的位置使 d_2 逐渐缩短, 激光器的输出光斑由基模变为环形, 且中心暗核的尺寸逐渐增大; 继续缩短 d_2 , 环形光斑变为花瓣状. 对比近场和远场光斑可知, 当 d_2 相对使 TEM_{00} 模式运转的初始位置偏移量 $\delta < 1.30 \text{ mm}$ 时, 环状光斑的近场与远场分布不同, 即此时的激光为多个不同横模的非相干叠加; 当偏移量 $\delta \geq 1.30 \text{ mm}$ 时, 清晰的花瓣状光斑在近场和远场的光强分布一致, 说明

此时的激光为单一的高阶 LG 模式,花瓣状的强度分布是由携带正负轨道角动量的 $LG_{0,+m}$ 和 $LG_{0,-m}$ 模式的相干叠加形成,花瓣间的节线数量即为 LG 模式的角向指数 m ,实验中 1 W 泵浦功率下最高能够演示 $LG_{0,33}$ 横模. 当增加泵浦功率时,可观察到单一高阶 LG 模式角向指数 m 范围的下限和上限均比低泵浦功率时高,这是由于增益变高,从而需要更强的球差实现对模式的区分,以及使原本增益较低的更高阶模式得以起振. 实验中在 1~10 W 泵浦功率范围内都能观察到良好的选模效果,为避免晶体损伤未尝试更高的泵浦功率. 实验教学中,可综合考虑实验室硬件条件、激光安全性以及实验现象的显著性选择泵浦功率.

基于相关的实验现象,可以对如下知识点展开讲解和讨论:

1) 透镜球差的概念以及光束尺寸对球差产生的影响;

2) 谐振腔稳区的概念及其对激光器运转状态的影响,由于经短焦距透镜聚焦后谐振腔稳区很窄,能够使谐振腔满足稳定或者非稳条件,观察激光器的工作状态;

3) 单模和多模激光的传输特性,单模激光传输过程中横截面上的光强分布不变,而多模光束传输过程中其光强分布会发生变化,并在聚焦后形成“热斑”;

4) 激光横模的概念和直观图像,以及横模阶数对光斑尺寸的影响;

5) 模式匹配的概念,通过微调泵浦耦合透镜与激光晶体之间的距离,控制晶体中泵浦光斑大小,使不同阶数的横模与泵浦光有最佳的模式匹配,实现模式阶数的控制;

6) 模式选择的概念和方法,即通过控制增益或损耗,使不同模式的净增益有明显的差异;

7) 对于工程光学内容要求更高的光电信息等专业学生,该实验可以进一步演示使用不同焦距、基材(折射率)、面型(平凸、双凸或者消球差非球面)的透镜时,球差量的变化以及对光斑变化的影响.

4 结束语

为满足新工科建设中对激光与光电子类专业领域创新性工程科技人才的培养需求,设计了基

于球差选模的激光器横模特性实验系统. 综合核心课程激光原理和工程光学的关键知识点,将像差、稳区以及高阶横模等不易演示的抽象知识点进行直观体现,改变以往激光实验教学目标和内容单一的情况. 与该实验系统相关的理论计算、实验操作和讨论内容,能够加强学生对激光器腔模理论、光学设计像差理论知识理解,并提高激光器调试准直和工具软件使用方面的实践技能. 该实验系统中的光学元件均为常规通用器件,成本低、装调难度适中. 目前该系统已应用在天津大学电子科学与技术(光电子技术)专业本科生激光实验教学中,有效提高了学生对相关知识点的理解程度和综合运用专业知识的能力.

参考文献:

- [1] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理 [M]. 7 版. 北京:国防工业出版社,2014:25-95.
- [2] 郁道银,谈恒英. 工程光学 [M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2016:93-112.
- [3] 尤勤,崔宇明,于音. 工程光学虚拟仿真实验教学改革[J]. 实验室科学,2020,23(4):131-134.
- [4] 钟凯,温午麒,徐德刚,等. 基于 Nd:YAG/LBO 倍频蓝光的全固态激光综合实验系统[J]. 实验技术与管理,2019,36(2):113-118.
- [5] 王萌,何铁锋,王宁,等. 激光原理与技术课程实验及实践教学改革[J]. 中国现代教育装备,2021,21(5):120-121.
- [6] 罗敏慧,余学才,黄宇红. 激光光束质量分析与参数测量实验[J]. 实验科学与技术,2007,5(3):24-26.
- [7] 谭中奇,吴素勇,于旭东,等. 氦氖激光器的横模选择实验[J]. 大学物理实验,2016,29(6):15-17.
- [8] 许勇,胡朝晖,张书练. 基于猫眼谐振腔激光器的激光基本特性综合实验系统[J]. 物理实验,2008,28(4):6-9.
- [9] Sheng Q, Wang M, Ma H C, et al. Continuous-wave long-distributed-cavity laser using cat-eye retroreflectors [J]. Optics Express, 2021, 29(21): 34269-34277.
- [10] Wang M, Ma Y Y, Sheng Q, et al. Laguerre-Gaussian beam generation via enhanced intracavity spherical aberration [J]. Optics Express, 2021, 29(17):27783-27790.
- [11] 盛泉,王爱华,王盟,等. 利用球差实现超高阶拉盖尔-高斯模式激光振荡[J]. 光电技术应用,2021,36(5):73-76.

Laser transverse mode characteristic demonstration based on mode-selecting via spherical aberration

SHENG Quan^{a,b}, ZHONG Kai^{a,b}, LI Ji-ning^{a,b},
XU De-gang^{a,b}, SHI Wei^{a,b}, YAO Jian-quan^{a,b}

(a. School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering;

b. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A solid-state laser transverse mode experimental system based on spherical aberration selection was developed for senior undergraduates majored in opto-electronics. By introducing strong spherical aberration with a short-focal lens in the laser cavity, the light paths of the different orders of transverse modes were spatially separated, the selection and switching of transverse modes of different orders could be realized. The experimental system integrated the cavity mode theory in the laser principle and the aberration theory in geometric optics, so that the influence of the spherical aberration of the lens on the working state of the laser and the stable high-order transverse mode image could be observed intuitively. Through qualitative and quantitative analysis, the important points such as spherical aberration, mode matching of lasers, stable region of resonators, transverse modes of lasers and their effects on the working state of lasers could be directly depicted. With this experimental teaching system, students' practical skills in laser adjustment, alignment and use of tool software had been improved.

Key words: solid-state laser; spherical aberration; laser transverse mode

[责任编辑:任德香]

(上接 24 页)

Newton ring experiment based on signal processing and deep learning

LU Ming-feng¹, WU Jin-min², YANG Wen-ming³, ZHANG Feng¹, TAO Ran¹

(1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China;

3. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The Newton ring experiment based on signal processing and deep learning was proposed, which was different from the experience based on the fringe counting method. From the point of view of signal mechanism, it revealed the essence of the chirp signal of the Newton rings, and introduced the fractional Fourier transform and the chirp Fourier transform. In terms of data analysis, the formation of a network of deep neurons made the intelligent analysis of Newton rings possible. Based on signal processing and deep learning, the high-precision measurement of physical parameters such as lens curvature radius could be implemented without the fringe counting, which provided a new perspective for university physics equal-thickness interference experiments.

Key words: Newton ring; deep learning; neural network; Fourier transform; signal processing

[责任编辑:郭 伟]