

高光束质量高斯非稳腔固体激光器研究

岱 钦*, 张善春, 杨 帆, 宁日波, 李业秋, 乌日娜

(沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:为了获得高光束质量的脉冲固体激光输出,研究了高斯非稳腔固体激光器的模式分布。运用边界有限元法将谐振腔内光场衍射积分方程转化成矩阵方程组,模拟分析了平凸高斯非稳腔内光阑位置、孔径大小以及高斯镜参数对输出光束模式的影响。基于理论模拟结果对激光器结构参数进行了优化,分别测量了腔内不同光阑位置和孔径下的激光器输出光束振幅及模式分布情况。在光阑半径为1 mm、光阑距高斯镜为150 mm、泵浦电压为900 V的实验条件下,光束质量 $M_x^2 = 1.9$ 、 $M_y^2 = 2.3$,激光最大输出能量为280 mJ的高光束质量激光输出。实验结果表明,在腔内加入选模光阑以及优化高斯镜参数可以进一步改善腔内模式分布,获得高光束质量激光输出,这与理论模拟结果基本相符。

关键词:非稳腔;高斯镜;模式分布;边界有限元法

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20191203.0559

Research on the high beam quality of Gaussian unstable resonators in solid state lasers

DAI Qin*, ZHANG Shan-chun, YANG Fan, NING Ri-bo, LI Ye-qiu, WU Ri-na

(School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

* Corresponding author, E-mail: daiqin2003@126.com

Abstract: In order to obtain high beam quality pulsed solid laser output, the distribution mode of the Gaussian unstable resonator was studied. The boundary finite element method was used to transform the integral equation of the diffraction of the light field in the cavity into a matrix equation. According to a theoretical simulation, the effects of the aperture position, the size of aperture and the parameters of the Gaussian mirror on the amplitude of the output beam in a plane-convex Gaussian instability cavity were analyzed. Based on the results of the theoretical simulation, the optical parameters of the laser were optimized. The distribution of amplitude and mode of output beam under different positions and aperture sizes were measured in this experiment. When the radius of the aperture was 1 mm, the aperture was 150 mm from the Gaussian mirror, the pump voltage was 900 V, the values of M^2 in the x and y directions were respectively 1.9 and 2.3, and the maximum output en-

收稿日期:2018-06-14;修订日期:2018-07-31

基金项目:国家自然科学基金(No. 61705145);辽宁省高等学校创新人才支持计划(No. LR2016079);辽宁省自然科学基金(No. 201602649);沈阳市科技计划项目(No. 17-33-6-00)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61705145); Support Program for Innovative Talents in Liaoning Province(No. LR2016079); Natural Science Foundation of Liaoning Province of China(No. 201602649); Shenyang Science and Technology Plan Project(No. 17-33-6-00)

ergy of the laser was 280 mJ. The experimental results show that the addition of an aperture and the optimization of the parameters of the Gaussian mirror could improve the distribution of intracavity mode and produce high quality beam output, which agrees with the results of the theoretical simulation.

Key words: unstable cavity; Gaussian mirror; distribution mode; boundary finite element method

1 引言

光束质量是评价输出激光特性极为重要的参数,它是在质的方面评价激光特性的指标^[1-7]。固体激光器的光束质量与谐振腔特性以及激光介质的热性能有着密切关系。泵浦不均匀或泵浦功率过高所导致的激光介质产生热透镜和热致双折射效应是降低激光器光束质量的重要原因。由于谐振腔中腔镜镜宽、腔长的不合理性产生的大菲涅尔数使得腔内一般多为高阶模振荡,这也是降低固体激光器光束质量的另一个原因。含有高阶模激光光束、模式分辨率较低、光束质量差,很大程度上限制了固体激光器在军事、医疗、材料加工等领域上的实际应用。因此,研究固体激光器输出光束模式分布,改善激光光束质量以满足各领域对高光束质量激光的需求具有极其重要的意义。

近几年随着镀膜技术的飞速发展,高斯渐变反射率镜已经广泛应用于固体激光器^[8-11]。由反射率以高斯函数径向变化的耦合输出镜所构成的高斯腔,理论上能够产生大体积、模式分布光滑均匀的基横模。而在实际的激光光路中,硬边光阑对激光输出特性的影响是不可避免的,菲涅尔衍射效应会使得光束传输受到光阑的制约^[12-13],硬边光阑位置及尺寸大小将影响谐振腔内的模式数目、模式本征值、模体积及衍射损耗。最佳的孔径光阑能够提高谐振腔的模式鉴别能力,国内学者对此展开大量研究。滕树云^[14]等人研究了腔外高斯光束与平行光束经同孔径硬边光阑下衍射的变化情况,得出了在较小孔径下二者分布近似。李汝焯等人研究了高阶贝塞尔-高斯光束通过圆孔硬边光阑的传输特性,得出衍射特性与贝塞尔函数阶数以及光束菲涅尔数等因素有关的结论。Y-Feng^[15]等人研究了由高斯镜产生的光束通过近轴光阑 ABCD 光学系统时光束模式分布。Xu Y^[16]等人研究了高斯光束通过腔外带有孔径光阑

的失调光学系统的传输特性,并分析了不同高斯镜参数下光场变化情况。

为了实现高光束质量的激光输出,本文研究平凸高斯非稳内腔硬边光阑对输出光束特性的影响,利用边界有限元法将腔内衍射积分方程转化为自再现本征矩阵方程,进一步分析了内腔光阑位置以及孔径尺寸对输出激光光束特性的影响,并进行了激光器实验测试和分析。

2 理论模拟及分析

图 1 为腔内带有小孔光阑的平凸高斯腔结构图。小孔光阑与 $M1$ 凸镜、 $M2$ 平面镜之间的距离分别为 d_1 、 d_2 ,谐振腔腔长为 d ; $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ 分别为凸面镜、小孔光阑及平面镜所在面;光束在传输过程中与腔内光学元件相交于 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 。

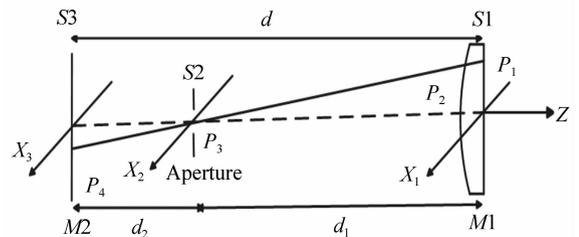


图 1 平凸高斯腔结构示意图

Fig. 1 Diagram of plane-convex Gaussian cavity

引入窗口函数:

$$A_p(r) = \begin{cases} 1 & r \leq A \\ 0 & r > A \end{cases}, \quad (1)$$

其中, A 为腔内硬边光阑孔径。

以凸镜面为参考面,由光学谐振腔衍射积分方程可以得到光束由凸镜传至光阑处场分布 U_{12} 及光阑传至平镜处的场分布 U_{23} 分别为:

$$U_{12}(n) = \frac{i}{2\lambda} \iint A_0 U_{21}(m) \exp[-2(x_1^2 + y_1^2) / \omega_0^2] \frac{\exp(-ik\rho_1)}{\rho_1} \left(1 + \frac{d_1}{\rho_1}\right) dx_1 dy_1, \quad (2)$$

$$U_{23}(m) = \frac{i}{2\lambda} \iint U_{12}(n)$$

$$\frac{\exp(-ik\rho_2)}{\rho_2} \left(1 + \frac{d_2}{\rho_2}\right) dx_2 dy_2, \quad (3)$$

其中, m 表示平镜及凸面高斯镜上的节点值, n 表示光阑上的节点值。 A_0 为高斯镜中心反射率, ω_0 为反射率降到峰值的 $1/e^2$ 时的径向距离, ρ_1 表示传输光束在凸镜与光阑间距离, ρ_2 表示光阑与平镜间的光束传输距离。式(2)表示光阑面上第 n 个面元上的光场值为凸镜面上 m 个面元场值叠加之和, 式(3)表示平面上第 m 个面元上的光场值为光阑面上 n 个面元场值叠加之和。当面元上节点值 m, n 无限大时, 式(2)、(3)中的 $U_{21}(m)$ 、 $U_{12}(n)$ 可近似看成常数, 引入替换变量 T_{12} 及 T_{23} , 因此可以将积分方程转换成矩阵方程, 即:

$$U_{12} = F_{12} U_{21}, \quad (4)$$

$$U_{23} = F_{23} U_{12}, \quad (5)$$

其中: F_{12} 、 F_{23} 为传输矩阵, 具体形式为:

$$\left\{ \begin{aligned} F_{12} &= \begin{bmatrix} f_{12}(1,1) & \cdots & f_{12}(1,M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{12}(1,M) & \cdots & f_{12}(M,M) \end{bmatrix}, \\ F_{23} &= \begin{bmatrix} f_{23}(1,1) & \cdots & f_{23}(1,M) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{23}(1,M) & \cdots & f_{23}(M,M) \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

当渡越次数足够多, 腔内光场分布满足:

$$\sigma U_{21}^{(s)} = F U_{21}^{(s)}, \quad (7)$$

其中, σ 是光场自再现时的本征值, 它描述的是自再现过程中振幅和相位的变化情况。

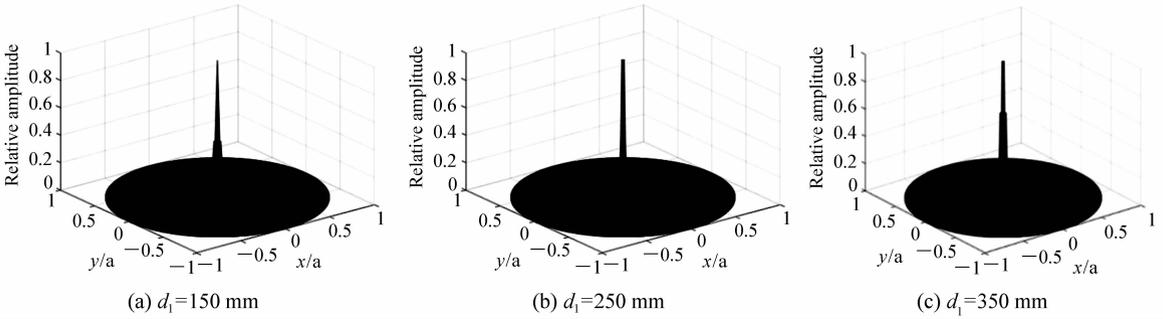


图2 不同位置光阑处输出光束振幅分布图

Fig. 2 Distributions of output beam amplitude at different positions

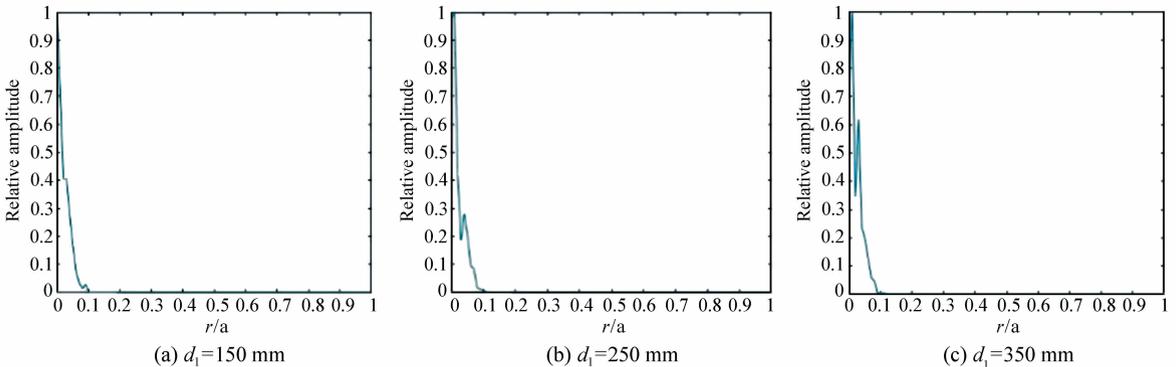


图3 不同位置光阑处输出光束模式分布

Fig. 3 Distributions of output beam pattern at different positions

图2、3 为光阑处于腔内不同位置处时输出光束振幅以及模式分布变化情况。其中, r 表示光

斑横向任意点与光斑中心距离宽度, r/a 表示光斑横向任意点离中心的相对宽度。可见当光阑距

高斯镜较近时输出光束中间峰值区域模式分布较为均匀,四周区域模式分布有轻微起伏,整体模式分布较为平滑、均匀,振幅分布在中心区域较大、边缘区域较小,其整体幅度分布呈现由中心至边缘区域逐渐减小的近基横模高斯分布趋势。随着光阑距凸镜距离变大其光束整体轮廓逐渐趋于不均匀,模式幅度起伏较大,高阶模数目较多。

图 4 为光阑距高斯镜 150 mm、光阑孔径为

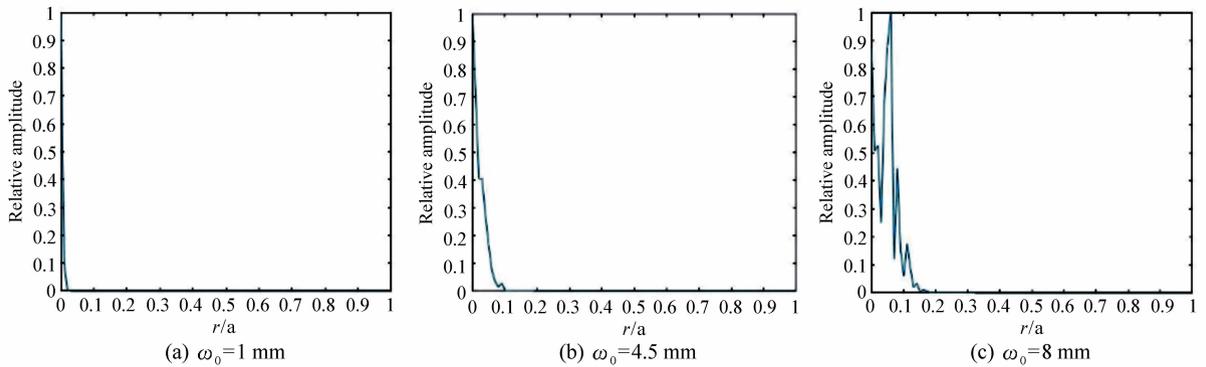


图 4 不同膜斑半径处输出光束振幅分布图

Fig. 4 Distributions of output beam amplitude at different membrane spot radius

图 5、6 为光阑距高斯镜 150 mm、高斯镜膜斑半径为 4.5 mm 时不同光阑尺寸下输出光束振幅分布情况。光阑尺寸为 1 mm 时振幅分布中间峰值位置处平滑,四周区域有轻微的起伏;光阑尺寸为 3 mm 时振幅分布曲线不是平滑的,中间位置以及四周区域起伏较大,高阶模数目较多。

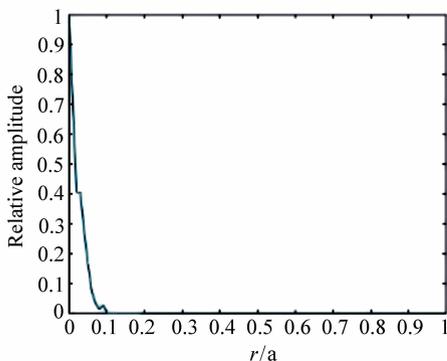


图 5 $A = 1$ mm 时振幅分布

Fig. 5 Distribution of amplitude when A is 1 mm

以上模拟分析了腔内光阑半径、位置以及高斯镜参数对输出光束模式分布的影响,激光器实际运行过程中晶体热效应、泵浦光密度不均匀分

1 mm、高斯凸镜膜斑半径不同时输出光场振幅分布图。由图 5 可见,当高斯镜膜斑半径为 1 mm 时,输出光束模式平滑、均匀,模式幅度分布起伏不大;当膜斑半径为 8 mm 时,模式幅度起伏较大,高阶模数目较多,整体模式分辨率较低。由此可鉴,随着膜斑半径的增加其输出光束模式呈不均匀趋势。

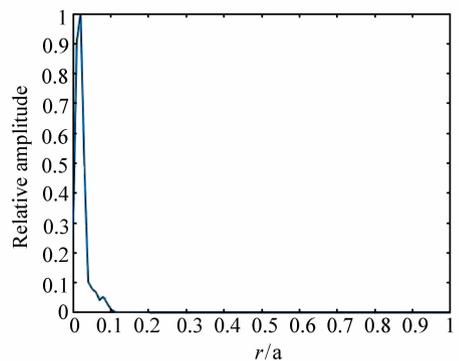


图 6 $A = 3$ mm 时振幅分布

Fig. 6 Distribution of amplitude when A is 3 mm

布等因素对光束质量的影响也不可忽略。对于有源腔模式自再现的理论分析同样基于光学谐振腔衍射和边界有限元方法,考虑到晶体热效应以及增益不均匀情况,其理论模拟结果与无源腔相比必然存在差异,但输出光束模式分布的整体趋势保持一致。

3 实验测试及结果分析

图 7 是实验激光器光路结构图。激光棒尺寸

为 $\phi 8 \times 120 \text{ mm}$ 。M1 为平面全反镜、M2 是曲率半径为 $2 m$ 的高斯凸镜。M1、M2 构成激光器平凸谐振腔,其腔长为 800 mm 。

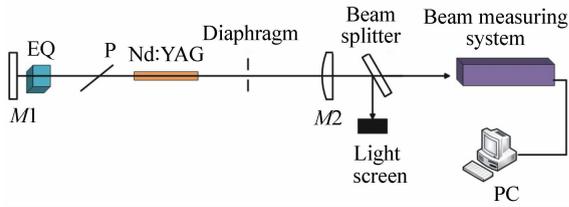


图7 激光器光路结构图

Fig.7 Structure and optical path of the laser

激光器泵浦源为脉冲氙灯。根据辐射度学基本原理可知,脉冲氙灯的辐射能量可表示为:

$$Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} \phi_2(t) dt, \quad (8)$$

式中, $\phi_2(t)$ 为辐射通量,其表示为:

$$\phi_2(t) = E_2(t) R^2 \Omega, \quad (9)$$

则脉冲氙灯的辐射能量表达式可以表示成:

$$Q_2 = \int_{t_1}^{t_2} E_2(t) R^2 \Omega dt, \quad (10)$$

其中, R 是光源到接收器之间的距离; Ω 是立体角; $E_2(t)$ 为单位面积上脉冲氙灯的辐射能量,表示为瞬时电压与常量之积。

则脉冲氙灯的辐射能量表达式进一步表示为:

$$Q_2 = mV, \quad (11)$$

其中, m 为函数积分常数; V 为脉冲氙灯内路注入的瞬时电压。脉冲氙灯的辐射能量与内路注入泵浦电压呈线性关系。

由于实验中激光棒的尺寸为 $\phi 8 \times 120 \text{ mm}$, 基于以上理论模拟结果,为了获得较好的光束质量,对高斯镜膜斑半径选择为 4.5 mm 。实验中激光器整体工作于单脉冲运行,脉冲重复频率为 1 Hz 。

图8、9分别为光阑半径为 1 mm 、高斯镜膜斑

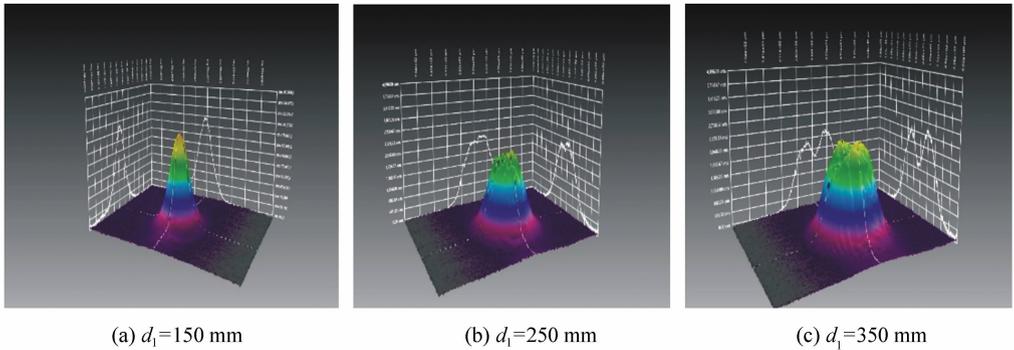


图8 不同位置光阑处输出光束三维振幅分布

Fig.8 Three-dimensional amplitude distributions of output beam at different positions

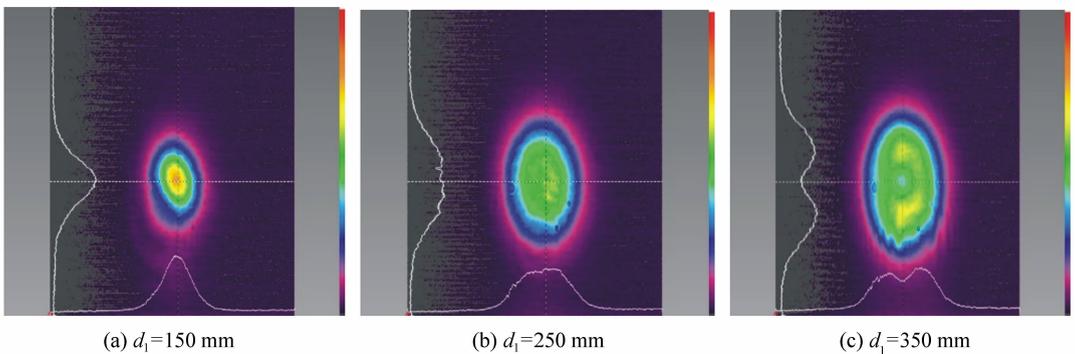


图9 不同位置光阑处输出光束二维振幅分布

Fig.9 Two-dimensional amplitude distributions of output beam at different positions

半径为 4.5 mm 时,光阑距高斯镜不同距离下输出光束的三维、二维轮廓以及模式分布图。当光阑距高斯镜较近时输出光束中间峰值区域模式分布较为均匀,四周区域模式分布有轻微起伏,整体模式分布较为平滑、均匀;振幅在中心区域较大、边缘区域较小,其整体幅度分布呈现由中心至边缘区域逐渐减小的近基横模高斯分布。随着光阑与凸镜间距离变大,其光束整体轮廓逐渐趋于不均匀分布,模式幅度起伏较大,高阶模数目较多。

当光阑距高斯凸镜 150 mm、高斯镜膜斑半径为 4.5 mm 时,采用光束质量分析仪分别测量了光阑尺寸为 1 mm、3 mm 时输出激光光束轮廓分布情况。其测量结果如图 10、11 所示。

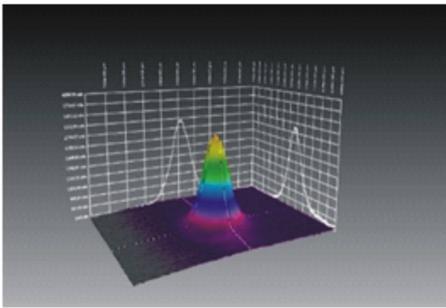


图 10 光阑尺寸为 1 mm 时输出光束轮廓图

Fig. 10 Output beam profile with aperture size of 1 mm

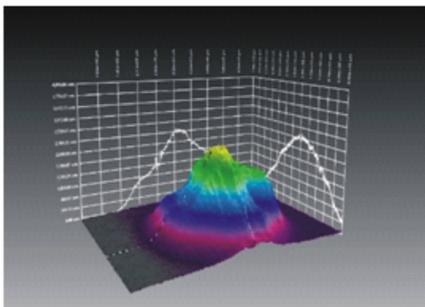


图 11 光阑尺寸为 3 mm 时输出光束轮廓图

Fig. 11 Output beam profile with aperture size of 3 mm

从实验测得的光斑轮廓图中能够得出光阑尺寸为 1 mm 时输出光束为近基横模输出。图 11 模式分布不平滑的主要原因是光阑半径增大导致透过光束模半径增加。

当腔内光阑孔径为 1 mm 时,分别测量了光

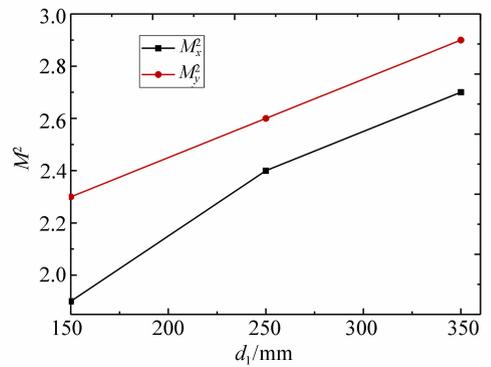


图 12 输出光束 M^2 值随光阑位置变化图

Fig. 12 Output beam M^2 varies with aperture position

阑距高斯凸镜不同距离时,其输出光束在 x 切面及 y 切面的 M^2 值。如图 12 所示。由图 12 可以看出,腔内光阑与高斯凸镜之间的距离影响输出光束的 M^2 值,光阑与高斯镜之间的距离越近其光束质量越好、 M^2 值越小。光阑在腔内靠近全反镜、距高斯镜 150 mm 时,输出光束在 x 、 y 方向的 M^2 值为 $M_x^2 = 1.9$ 、 $M_y^2 = 2.3$ 。

在光阑距高斯镜 150 mm、光阑半径为 1 mm 的条件下测量了激光器在不同泵浦电压下的输出能量,如图 13 所示。可见在泵浦电压为 900 V 时激光器动态条件下输出的最大能量为 280 mJ。

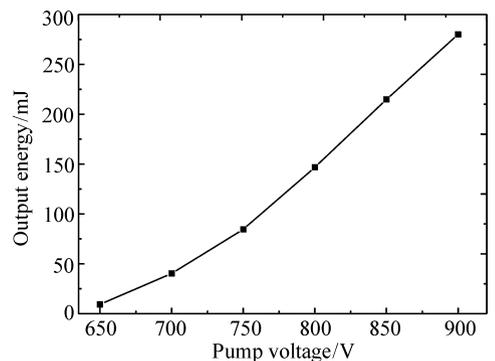


图 13 激光器输出能量曲线图

Fig. 13 Output energy curve of the laser

泵浦电压为 900 V 时利用 DET10A 型光电探测器和 300 MHz 泰克存储示波器测量了输出激光的脉宽,其值为 11.4 ns,记录的脉冲波形如图 14 所示。

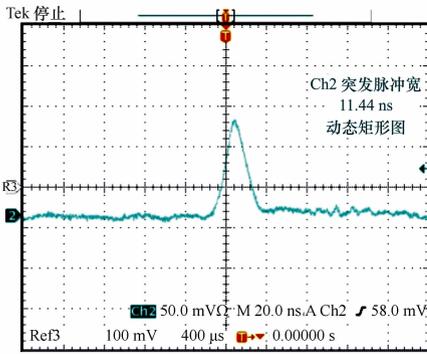


图 14 输出激光脉冲波形

Fig. 14 Output laser pulse shape

4 结 论

本文研究了高斯非稳腔固体激光器的光束特性,分析了腔内光阑和高斯镜参数对激光输出特性的影响。利用边界有限元法理论模拟了可变孔径光阑平凸高斯非稳腔输出光束的振幅分布。通过理论模拟分析,对激光器结构参数进行了优化,在光阑半径为 1 mm、光阑距高斯镜 150 mm、泵浦电压为 900 V 状态下,获得了光束质量 $M_x^2 = 1.9$ 、 $M_y^2 = 2.3$,激光最大输出能量为 280 mJ 的高光束质量激光输出。

参考文献:

- [1] 王君涛,童立新,徐浏,等. 5 kW Nd:YAG 端面抽运板条激光器及其光束质量提升[J]. 中国激光,2018,45(1):101003.
WANG J T, TONG L X, XU L, et al. . 5 kW end-pumped Nd:YAG slab lasers and beam quality improvement[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2018, 45(1):101003. (in Chinese)
- [2] 陈诚,郑加金,韦玮,等. 基于 CCD 测量激光光束质量 M^2 [J]. 发光学报,2017,38(5):642-647.
CHEN CH, ZHENG J J, WEI W, et al. . Measurement of laser beam quality M^2 based on CCD[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(5):642-647. (in Chinese)
- [3] 程雪,王建立,刘昌华. 高能光纤激光器光束合成技术[J]. 红外与激光工程,2018,47(1):0103011.
CHENG X, WANG J L, LIU CH H. Beam combining of high energy fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1):0103011. (in Chinese)
- [4] 樊仲维,邱基斯,唐熊忻,等. 用于空间碎片探测的百赫兹 3.31 J 高光束质量全固态 Nd:YAG 激光器[J]. 物理学报,2017,66(5):054205.
FAN ZH W, QIU J S, TANG X X, et al. . A 100 Hz 3.31 J all-solid-state high beam quality Nd:YAG laser for space debris detecting[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5):054205. (in Chinese)
- [5] 胡立发. 用平行向列液晶空间光调制器制作相息图的研究[J]. 液晶与显示,2005,20(2):93-98.
HU L F. Kinoform using parallel aligned nematic liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Displays*, 2005, 20(2):93-98. (in Chinese)
- [6] 周琦,陆俊发,印建平. 空间光调制器对入射光场调制特性的实验研究[J]. 液晶与显示,2013,28(3):349-353.
ZHOU Q, LU J F, YIN J P. Experimental study of modulation characteristics of spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3):349-353. (in Chinese)
- [7] 李小平,胡五生,于洪丽,等. 基于液晶空间光调制器的相位差波前探测技术定量研究[J]. 液晶与显示,2017,32(3):234-239.
LI X P, HU W SH, YU H L, et al. . Quantitative analysis on phase diversity technique based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3):234-239. (in Chinese)
- [8] 邓德刚,易葵,邵建达,等. 高斯镜谐振腔产生的激光光束的 M^2 因子及传输特性[J]. 中国激光,2006,33(S1):244-247.
DENG D G, YI K, SHAO J D, et al. . M^2 factor and propagation properties of beams generated by Gaussian mirror resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(S1):244-247. (in Chinese)
- [9] MOSSAKOWSKA-WYSZYNSKA A, WITONSKI P, SZCZEPANSKI P. Relaxation oscillations in a laser with a Gaussian mirror[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(9):1668-1676.

- [10] FUJIWARA H, BROWN K E B, DLOTT D D. High-energy flat-top beams for laser launching using a Gaussian mirror [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19):3723-3731.
- [11] 易葵, 马平, 邱红, 等. 大口径传输反射镜的研究进展[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12):2902-2907.
YI K, MA P, QIU H, *et al.*. Progress on large aperture transport mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(12):2902-2907. (in Chinese)
- [12] 赵彤, 韩新民, 刘万发, 等. 采用腔内设置限孔光阑抑制倒向波的理论分析[J]. *强激光粒子数*, 2012, 14(5):655-658.
ZHAO T, HAN X M, LIU W F, *et al.*. Theoretical analysis of reverse mode suppression using diaphragm for symmetric confocal unstable ring resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5):655-658. (in Chinese)
- [13] 王晓铭, 郭劲, 郭汝海, 等. 大功率 TEA CO₂ 非稳腔激光器的远场传输特性[J]. *中国光学*, 2012, 5(6):672-676.
WANG X M, GUO J, GUO R H, *et al.*. Far field transmission characteristics of high-power unstable resonator TEA CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):672-676. (in Chinese)
- [14] 腾树云, 刘立人, 万玲玉, 等. 孔径光阑限制下高斯光束的传输[J]. *光学学报*, 2005, 25(2):157-160.
TENG SH Y, LIU L R, WAN L Y, *et al.*. Propagation of Gaussian beam limited by an aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2):157-160. (in Chinese)
- [15] FENG Y J, ZHANG R ZH, ZHANG B. Propagation properties of the beam generated by Gaussian mirror resonator passing through a paraxial ABCD optical system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(4):662-668.
- [16] XU Y G. Property study of beam generated by Gaussian mirror through the misaligned optical system with aperture[J]. *Optik*, 2015, 126(20):2282-2286.

作者简介:



岱 钦(1977—),男,内蒙古通辽人,博士,教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail:daiqin2003@126.com



张善春(1994—),男,辽宁朝阳人,硕士研究生,主要从事大功率固体激光器研究。E-mail:1436111051@qq.com